



ISSN 1000-5013  
CN 35-1079/N  
CODEN HDZIEF

# 华侨大学学报

(自然科学版)

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY  
(NATURAL SCIENCE)

第 45 卷      第 6 期  
Vol. 45      No. 6

## 2024

中国·泉州/厦门  
CHINA·QUANZHOU/XIAMEN



公众微信号    官网二维码

《 华 侨 大 学 学 报 ( 自 然 科 学 版 ) 》

第 七 届 编 辑 委 员 会

The Seventh Editorial Committee of  
Journal of Huaqiao University ( Natural Science )

主 任 (Director of Editorial Committee)

张云波 (ZHANG Yunbo)

副主任 (Vice Director of Editorial Committee)

陈国华 (CHEN Guohua)

黄仲一 (HUANG Zhongyi)

编 委 (Members of Editorial Committee) (按姓氏笔画为序)

刁 勇 (DIAO Yong)

王士斌 (WANG Shibin)

刘 堉 (LIU Gong)

江开勇 (JIANG Kaiyong)

孙 涛 (SUN Tao)

肖美添 (XIAO Meitian)

吴季怀 (WU Jihuai)

宋秋玲 (SONG Qiuling)

张认成 (ZHANG Rencheng)

张云波 (ZHANG Yunbo)

陈国华 (CHEN Guohua)

苑宝玲 (YUAN Baoling)

周树峰 (ZHOU Shufeng)

郑力新 (ZHENG Lixin)

徐西鹏 (XU Xipeng)

郭子雄 (GUO Zixiong)

黄仲一 (HUANG Zhongyi)

黄华林 (HUANG Hualin)

葛悦禾 (GE Yuehe)

蒲继雄 (PU Jixiong)

蔡绍滨 (CAI Shaobin)

主 编 (Editor in Chief)

黄仲一 (HUANG Zhongyi)

### 目次

图像分割引导的散堆工件结构光三维位姿估计

..... 邓君, 李娜, 王亚凯, 高振国 (696)

新型双管水压致裂法地应力测试装置及其应用

..... 常方强, 梁潇洋, 黄梓焰, 梁康康, 全露龙, 曹亚南, 常方伟 (706)

桥面水马布置对大跨度悬索桥涡激振动的影响

..... 周椿楦, 周光伟, 陈昌萍 (712)

采用WSR方法论的塔吊坍塌事故安全评价方法

..... 祁神军, 汪丫, 陈晶晶, 张子晨 (721)

厦门杏林湾水库底泥有机质和营养盐的分布特征与来源及污染评价

..... 李静, 唐雪平, 庄马展, 李飞, 周真明 (730)

厦门营平近代骑楼楼梯间热压通风对夏季室内热环境的影响

..... 黄鹭红, 梁露丹, 石悦含 (740)

肝细胞癌铁死亡特征基因的 ceRNA 调控网络构建及分析

..... 朱亚玲, 方杉杉, 黎祎杰, 徐先祥, 刁勇 (746)

虾青素复合纳米颗粒 Pickering 乳液的制备及评价

..... 郑秀梅, 杜鑫, 柳培忠, 虞文熙, 吴振, 王立强, 侯志勇 (756)

改进 YOLO 的 X 射线管道焊缝检测算法

..... 王合佳, 林宁, 林振超, 黄凯, 牛顿, 郑力新 (766)

新疆新型城镇化发展的时空差异及协调水平

..... 刘硕, 张永福, 刘永强 (776)

中国省域数字经济发展水平测度与时空差异及影响因素分析

..... 刘珂, 吕书龙, 刘文丽, 黄文彬 (789)

动态多尺度决策信息系统局部最优尺度的更新规律

..... 陈应生, 李进金 (800)

Douady-Earle 延拓中用到的拟共形映照参数表示

..... 林珍连 (808)

Halin 图的无包含边染色

..... 彭燕, 谈漪, 陈莉莉 (812)

第 45 卷总目次

..... (I ~ X)

CONTENTS

Structured Light-Based 3D Pose Estimation of Piled Workpieces Guided by Image Segmentation  
..... DENG Jun, LI Na, WANG Yakai, GAO Zhenguo (696)

New Type of Double Pipe Hydraulic Fracturing Method *In-Situ* Stress Testing Device and Its Application  
..... CHANG Fangqiang, LIANG Xiaoyang, HUANG Ziyang,  
LIANG Kangkang, QUAN Lulong, CAO Yanan, CHANG Fangwei (706)

Influence of Bridge Deck Barriers Arrangement on Vortex-Induced Vibration of Long-Span Suspension Bridge  
..... ZHOU Chunbin, ZHOU Guangwei, CHEN Changping (712)

Safety Evaluation Method for Tower Crane Collapse Accidents Using WSR Methodology  
..... QI Shenjun, WANG Ya, CHEN Jingjing, ZHANG Zichen (721)

Distribution Characteristics, Sources and Pollution Evaluation of Organic Matter and Nutrient Salts in Sediment of Xinglin Bay Reservoir in Xiamen City  
..... LI Jing, TANG Xueping, ZHUANG Mazhan, LI Fei, ZHOU Zhenming (730)

Effect of Thermal Pressure Ventilation Strengthened by Stairwell on Summer Indoor Thermal Environment in Traditional Qilou Building in Yingping District of Xiamen City  
..... HUANG Luhong, LIANG Ludan, SHI Yuehan (740)

Construction and Analysis of ceRNA Regulatory Network of Ferroptosis Feature Genes in  
Hepatocellular Carcinoma

..... ZHU Yaling, FANG Shanshan, LI Yijie, XU Xianxiang, DIAO Yong (746)

Preparation and Evaluation of Astaxanthin Composite Nanoparticles Pickering Emulsion

..... ZHENG Xiumei, DU Xin, LIU Peizhong,  
YU Wenxi, WU Zhen, WANG Liqiang, HOU Zhiyong (756)

X-Ray Pipe Weld Detection Algorithm of Improved YOLO

..... WANG Hejia, LIN Ning, LIN Zhenchao,  
HUANG Kai, NIU Dun, ZHENG Lixin (766)

Spatial and Temporal Difference and Coordination Level of New-Type Urbanization  
Development in Xinjiang

..... LIU Shuo, ZHANG Yongfu, LIU Yongqiang (776)

Analysis on Measurement, Spatiotemporal Differences and Influencing Factors of  
Digital Economy Development Level in Chinese Provinces

..... LIU Ke, LÜ Shulong, LIU Wenli, HUANG Wenbin (789)

Updating Law of Local Optimal Scale of Dynamic Multi-Scale Decision Information System

..... CHEN Yingsheng, LI Jinjin (800)

Parametric Representation of Douady-Earle Quasiconformal Extension

..... LIN Zhenlian (808)

Inclusion-Free Edge Coloring of Halin Graph

..... PENG Yan, TAN Yi, CHEN Lili (812)

Total Contents of Vol. 45

..... ( I ~ X )

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202401011



# 图像分割引导的散堆工件 结构光三维位姿估计

邓君<sup>1,2</sup>, 李娜<sup>2,3</sup>, 王亚凯<sup>1,2</sup>, 高振国<sup>1,2</sup>

- (1. 华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021;  
2. 华侨大学 计算机视觉与机器学习重点实验室, 福建 厦门 361021;  
3. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对散堆工件场景中点云生成耗时久、位姿估计困难、多类工件混合情形难处理等问题, 提出图像分割引导的散堆工件结构光三维位姿估计方法, 并基于 JAKA Zu3 6-DoF 机器人开发散堆工件抓取实验系统。采用 YOLACT 模型获取散堆工件图像中的工件信息, 通过自适应阈值筛选待抓取工件, 利用双目结构光生成目标工件所在区域的局部点云, 并基于投票匹配算法和迭代最近邻算法估计工件位姿。通过搭建的实验系统对文中方法进行测试。实验结果表明: 系统完成目标工件位姿估计时间约为 3.641 s, 其中, 点云计算需 0.536 s, 点云配准需 0.446 s; 与其他方法相比, 文中方法平均可缩小点云规模 44%, 点云生成时间平均缩减 24%, 配准成功率提升至 100%。

**关键词:** 双目结构光; 点云生成; 点云配准; 位姿估计; 图像分割

**中图分类号:** TP 391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2024)06-0696-10

## Structured Light-Based 3D Pose Estimation of Piled Workpieces Guided by Image Segmentation

DENG Jun<sup>1,2</sup>, LI Na<sup>2,3</sup>, WANG Yakai<sup>1,2</sup>, GAO Zhenguo<sup>1,2</sup>

- (1. College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
2. Key Laboratory of Computer Vision and Machine Learning, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;  
3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of point cloud generation time-consuming, pose estimation difficulty, and multi class workpiece mixing difficult handling in the scene of piled workpieces, a structured light-based 3D pose estimation of piled workpieces guided by image segmentation is proposed, and an experimental system of piled workpiece picking is developed based on the JAKA Zu3 6-DoF robot. The YOLACT model is used to extract workpiece information from the piled workpieces images. The workpiece to be grabbed is filtered through adaptive threshold, the local point clouds in the area where the target workpiece is generated using binocular structured light. The workpiece pose based on the voting matching algorithm and the iterative nearest neighbor algorithm is estimated. The proposed method is tested by the constructed experimental system. The experimental results show that the system takes approximately 3.641 s to complete the target workpiece pose esti-

收稿日期: 2024-01-11

通信作者: 高振国(1976-), 男, 教授, 博士, 主要从事智能制造、机器视觉及无线自组网络等的研究。E-mail: gaohit@sina.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62372190, 61972166); 福建省高校产学研合作资助项目(2021H6030)

mation. Among them, point cloud computing takes 0.536 s and point cloud registration takes 0.446 s. Compared with other methods, the proposed method can reduce the size of point clouds by an average of 44%, reduce the time of the point clouds generation by an average of 24%, and improve the registration success rate to 100%.

**Keywords:** binocular structured light; point cloud generation; point cloud registration; pose estimation; image segmentation

散堆工件分拣是工业生产中的常见任务,散堆工件分拣系统需要检测工件,对工件进行三维点云生成(三维重建)和位姿估计,再控制机械臂完成抓取。目标工件三维点云生成和位姿估计是整个系统至关重要的部分。三维点云生成方法可以分为主动式与被动式两种。被动式方法不与场景交互,通过相机采集场景图片,根据图像的纹理分布等信息恢复深度信息,进而生成点云<sup>[1-2]</sup>。双目视觉利用左、右相机对同一场景拍摄的图像进行特征点匹配,获得视差,进而获得三维点云。该方法难点在于左、右图像像素点的匹配,匹配精确度会直接影响生成点云的效果。主动式方法通过传感器主动向场景照射信号,通过解析返回的信号计算场景的三维信息<sup>[3-4]</sup>。主动式方法能够提供高质量的三维数据,但通常需要更多的传感器<sup>[5]</sup>。结构光三维点云生成技术通过主动投射编码图案,更好地实现更多像素点的匹配,从而形成高密度三维点云。

对于机器人工件分拣系统,不仅需要检测工件,还需要估计工件的位姿。传统的位姿估计方法依赖于深度图或与 RGB 图像结合使用<sup>[6-13]</sup>。这类方法难于处理散堆工件之间遮挡问题,因此大多数姿态估计方法是基于点云进行的。目前,基于点云的目标位姿估计方法主要分为基于卷积神经网络(CNN)的方法和基于特征的方法。CNN 在点云领域中已被广泛应用<sup>[14-20]</sup>,基于特征的方法十分依赖于特征点,若物体缺乏明显的特征点,使得特征提取不准确,则位姿估计会受影响<sup>[21-33]</sup>。

上述方法在处理复杂场景时需要重建整个场景,这不仅会消耗大量时间和资源,还会生成大量冗余点,导致后续计算效率低、所需存储空间大等问题。针对这些问题,本文对图像分割引导的散堆工件结构光三维位姿估计进行研究<sup>[34-35]</sup>。

## 1 系统设计

双目结构光系统中的左、右相机和投影仪分别通过 USB 接口和 HDMI 接口与计算机连接,计算机通过路由器与机器人连接。系统硬件模块,如图 1 所示。

系统架构主要由 5 个模块组成:点对特征库构建模块、YOLACT 训练模块、双目结构光局部点云生成模块、位姿估计模块、机械臂抓取模块。其中,前两个模块构成系统离线准备部分,后 3 个模块构成系统在线运行部分。系统架构,如图 2 所示。

散堆工件图像库存储了 1 000 幅利用 Labelme 标注的散堆工件图片,图片用于训练 YOLACT 网络模型。系统需要操作的各种类型工件由预先准备的系统工件类型模型决定。工件类型模型为相应类型标准工件的三维点云集合,存储于工件类型模型库中。为进行点云匹配位姿估计,计算每个工件类型的模型点云的点对特征集合,并用该集合作为相应类型工件模型的特征模型,存储于模型点对特征库中。

双目结构光局部点云生成模块包含工件筛选、结构光投影、点云计算 3 个环节。该模块通过双目系统中的左目相机拍摄散堆工件场景图像,利用 YOLACT 模型对图像进行实例分割,通过自适应阈值筛选出所有适合抓取的工件。在点云生成过程中,双目结构光系统通过投影仪将编码图案投影在散堆工件上,利用双目相机捕获带有编码图案的场景图像,生成所有适合抓取工件处的局部点云。在位姿估计模块,根据 YOLACT 输出的工件类别信息,在模型点对特征库中找到对应的模型,先后通过位姿粗配准与精配准获取工件位姿,从而指导机械臂抓取工件。工件位姿估计过程,如图 3 所示。图 3(d)中:蓝色点云为模型点云。

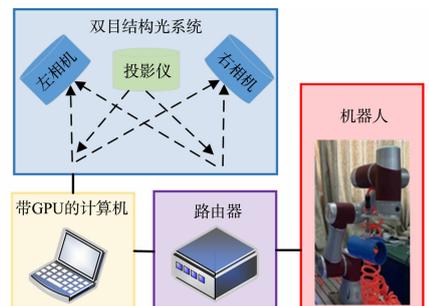


图 1 系统硬件模块

Fig. 1 System hardware modules

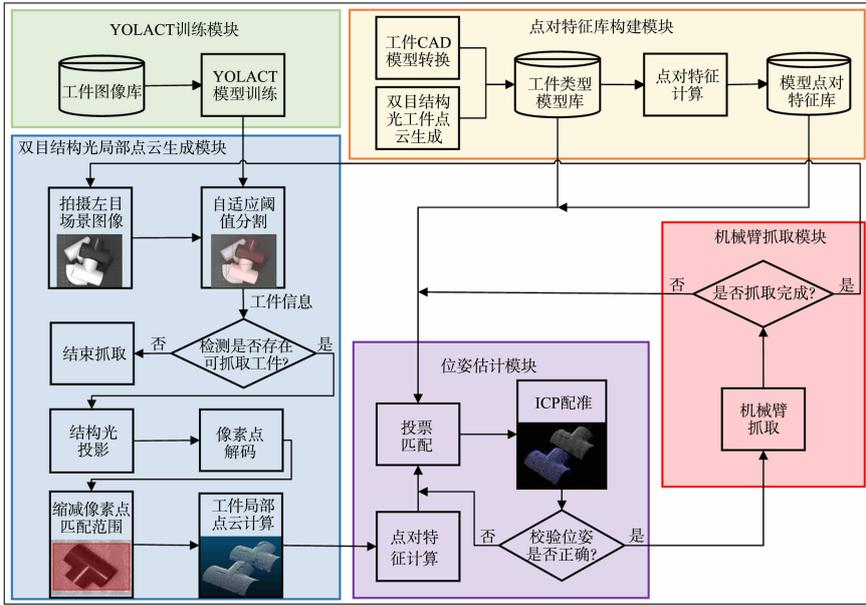
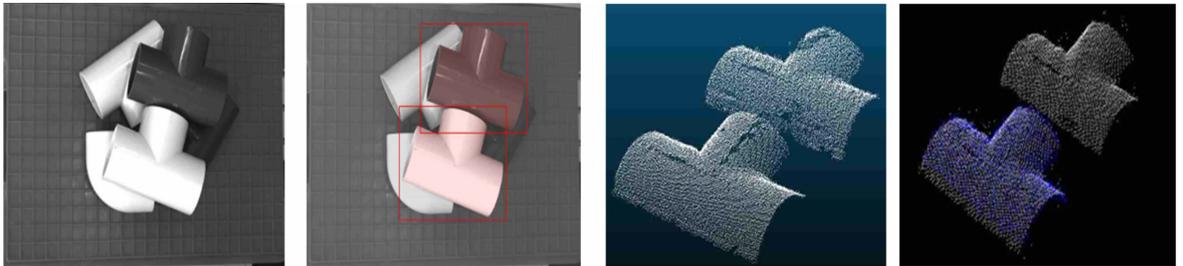


图 2 系统架构

Fig. 2 System structure



(a) 初始散堆工件场景图

(b) 工件筛选结果

(c) 生成工件局部点云

(d) 点云配准结果

图 3 工件位姿估计过程

Fig. 3 Process of workpieces pose estimation

## 2 双目结构光局部点云

双目结构光局部点云生成过程中,通过双目相机同步采集投影仪投射编码图案后的散堆工件场景图片。随后,通过解码计算每个像素点的绝对相位<sup>[36]</sup>,结合筛选出适合抓取工件的分割信息计算目标工件区域视差。为提高重建速度,减小点云规模,在计算目标工件区域内每行像素点对应的视差时,每隔  $n$  个像素点计算一次视差,生成视差图,进而转换为点云。双目结构光局部点云生成过程,如图 4 所示。

YOLACT 模型对散堆工件场景图像实例分割时,存在分割被遮挡工件的情况。为从实例分割结果中筛选出适合抓取工件的部分,引入了阈值策略。把标准工件水平放置,通过相机拍摄标准工件获取其二维图像,由 YOLACT 进行实例分割。YOLACT 把图像像素分为工件内部、工件边缘和工件外部 3 类。需要把工件边缘像素归类入工件内部和工件外部,为此计算工件内部像素点的平均灰度值  $F$ ,再计算对应工件边缘像素点的灰度值  $g$ 。若  $g < F/2$ ,则将边缘像素点归入工件外部像素点,反之,归入工件内部像素点。计算工件内部像素数量,并以此值的 70% 作为阈值来筛选适合抓取的工件。当同类型工

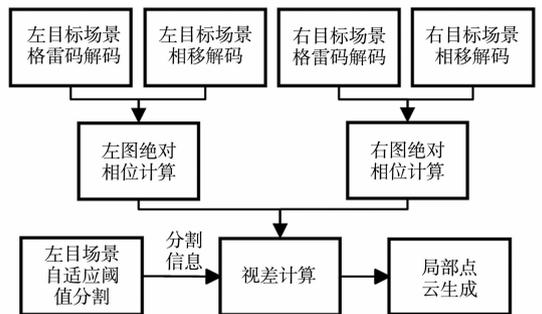


图 4 双目结构光局部点云生成过程

Fig. 4 Process of binocular structured light localpoint cloud generation

件内部像素数量超过该阈值时,认为该工件适合抓取,反之,则删除该工件的信息。散堆工件场景图像原始分割结果与筛选结果,如图 5 所示。

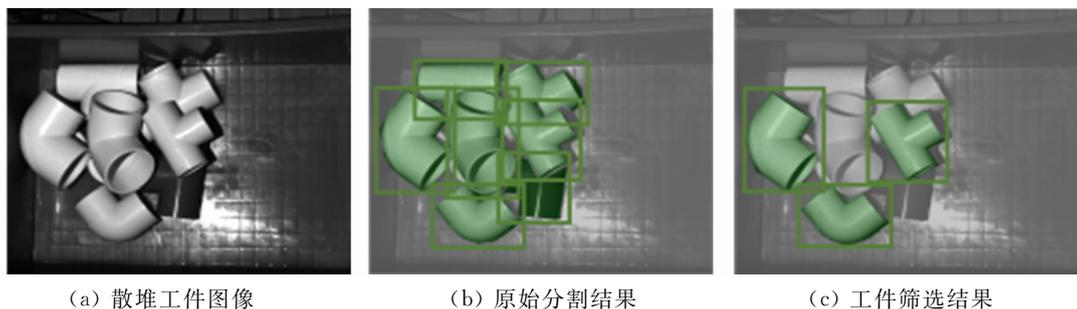


图 5 散堆工件场景图像原始分割结果与筛选结果

Fig. 5 Original segmentation results and filtered results of piled workpieces scene image

## 2.1 混合结构光编码方案

为减少结构光投影时间,采用格雷码与相移码相结合的结构光编码方式,共投射  $p$  幅格雷码图案,  $q$  幅相移码图案,以左相机为例,左相机采集的结构光投影场景图片,如图 6 所示。

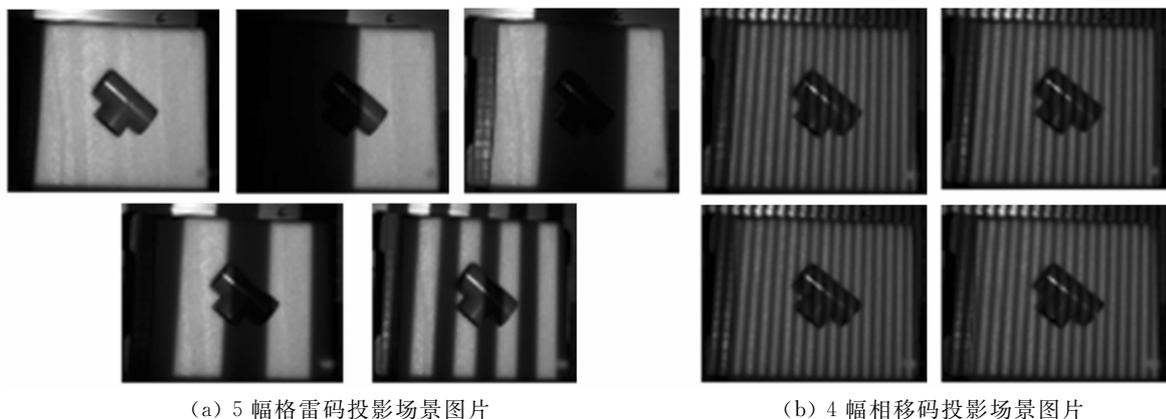


图 6 左相机采集的结构光投影场景图片

Fig. 6 Structured light projection scene images collected by left camera

经过格雷码编解码,  $p$  位格雷码将整个图像划分为  $2^p$  个区域,每个区域内像素点的格雷码值相同。相移图案是周期性图案,在一个周期内,相位值是连续且唯一的。把相移码周期长度和每个区域长度设为相同,通过格雷码与相移码混合编码得到的每个像素点的绝对相位  $\psi$  为

$$\psi = 2k\pi + \varphi. \quad (1)$$

式(1)中:  $k$  为像素位置的格雷码值;  $\varphi$  为像素位置的相位值。

通过混合编码,可进一步区分每个区域内的像素点。格雷码解码时,为避免环境中阴影区域解码的错误二值化,通过投影正、反格雷码图案,计算带正、反格雷码图案灰度差值的方式,进行图像二值化。设  $I(x, y)$  为投影格雷码时图像中位置  $(x, y)$  处的像素灰度值(光强),  $I_r(x, y)$  为投影反格雷码图案时图像中位置  $(x, y)$  处的光强,若  $I(x, y) \geq I_r(x, y)$ ,则认为该位置对应格雷码亮条纹,二值化为 1;若  $I(x, y) < I_r(x, y)$ ,则认为该位置对应格雷码暗条纹,二值化为 0。对拍摄的所有带格雷码图案的场景图片进行上述解码过程,就可得到每个位置的格雷码值。

相移码解码的目的是从捕获的带相移码的场景图像计算每个像素点的相位值。投射的相移图案为灰度条纹,光强表达式为

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(\varphi(x, y) + \varphi_i). \quad (2)$$

式(2)中:  $a(x, y)$  为背景光强;  $b(x, y)$  为调制强度;  $\varphi(x, y)$  表示相位值;  $\varphi_i$  表示相移值。

以 4 步相移法为例,在一个  $2\pi$  周期内,相位每次移动幅度为  $\pi/2$ 。第  $i$  副图像的光强为  $I_1(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(\varphi(x, y))$ ,  $I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos(\varphi(x, y) + \frac{\pi}{2})$ ,  $I_3(x, y) = a(x, y) +$

$b(x,y)\cos(\varphi(x,y)+\pi)$ ,  $I_4(x,y)=a(x,y)+b(x,y)\cos\left(\varphi(x,y)+\frac{3\pi}{2}\right)$ 。每个像素点的相位为

$$\varphi(x,y)=\arctan\left(\frac{I_4(x,y)-I_2(x,y)}{I_1(x,y)-I_3(x,y)}\right) \quad (3)$$

## 2.2 缩减像素点匹配搜索范围

左、右场景图案解码后,为左图像的像素点在右图像中寻找匹配点时,可以搜索所有像素点,但这样效率较低。为节省资源开销,基于 YOLACT 输出的工件分割信息,只对工件内部像素点进行匹配,并利用极线约束,将搜索范围缩小为右图像对应的极线,再通过延伸工件包围框边界,进一步将匹配范围缩小为对应极线中的一段。

为简化极线的计算,先对左、右图片进行极线校正。极线校正把两幅原始图像转化为两幅新图像。这两幅新图像中,对应极线均在与横轴平行的同一直线上,即两幅图像中互相匹配的像素点具有相同的纵坐标。

双目视觉中空间点在左、右图像的成像位置,如图 7 所示。图 7 中: $P$  在极线校正后的左、右图像上的坐标分别为  $(a,b)$ ,  $(m,n)$ ;两个红色方框代表极线校正后的左、右图像平面,以图像的左边界为  $x$  方向的零起始边;左图像中的像素位置  $(a,b)$  在  $x$  方向上相对于右图像中的像素位置  $(m,n)$  更靠右,即  $a > m$ ,且图像极线校正后使得  $b = n$ ,因此,把右目图像中搜索匹配点的范围缩减为第  $b$  行中  $[0,a]$  区间。右图工件包围框获取过程,如图 8 所示。

由图 8 可知:左图分割得到的掩膜和包围框可以覆盖右图对应工件的大部分区域;通过计算双目系统拍摄图像的最大视差  $v$ ,在右图上将包围框的左边界向左延伸  $(v+c)$  个像素点,其中,  $c$  是为保证匹配的准确性而额外延伸的像素数量;延伸后的包围框就可包含左图工件区域内像素点对应的匹配点,左图点  $(a,b)$  的匹配范围缩减为右图像对应极线中  $[0,a]$  区间。通过延伸包围框边界,进一步将匹配点搜索范围缩减为  $[h,a]$  区间,其中,  $h$  为原包围框左边界所在像素点位置向左延伸  $(v+c)$  个像素点后的左边界位置。

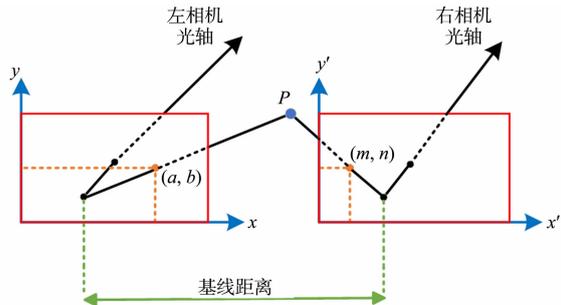
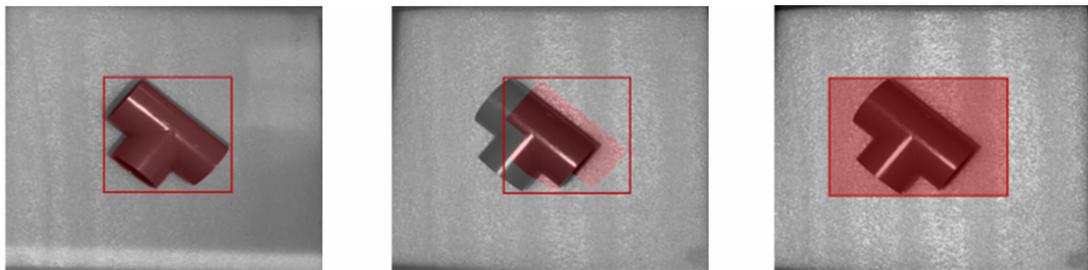


图 7 双目视觉中空间点在左、右图像的成像位置  
Fig. 7 Imaging positions of spatial point in left and right images in binocular vision



(a) 左图分割结果

(b) 分割结果用于右图

(c) 包围框延伸结果

图 8 右图工件包围框获取过程

Fig. 8 Process of obtaining bounding box of right image workpiece

## 3 位姿估计

### 3.1 模型数据库

获取工件模型点云有两种方式:一是通过工件的 CAD 模型转换为点云,将降采样后的点云作为工件模型点云;二是将双目结构光生成的工件稀疏点云通过 Cloud Compare 软件进行去噪和平滑等处理,将处理后的点云作为工件模型点云。

将工件模型点云转换为 **PPF** 特征,并用该特征作为相应类型工件模型的特征模型,以工件类型为索引构建模型点对特征库。每个模型都包含一个从 **PPF** 特征到具有相似特征的点对集合的映射,该映

射关系采用哈希表存储。

**PPF** 特征是一个 4 维向量,用于表示两个空间点  $p_1$  和  $p_2$  之间的相对位置和方向关系,即

$$\mathbf{PPF}(p_1, p_2) = [\|\mathbf{d}\|_2, n_1, n_2, u]。 \quad (4)$$

式(4)中: $\mathbf{d}$  为  $p_1$  到  $p_2$  的方向向量; $\|\mathbf{d}\|_2$  为  $p_1$  和  $p_2$  之间的欧氏距离; $n_1$  和  $n_2$  分别为  $p_1$  和  $p_2$  处的法向量与向量  $\mathbf{d}$  之间的夹角; $u$  为  $p_1$  和  $p_2$  处的两法向量之间的夹角。

### 3.2 基于投票匹配和迭代最近邻位姿的估计

位姿估计过程,如图 9 所示。首先,使用直通滤波定义点云的有效范围,去除离群点云。接着,通过移动最小二乘法滤波平滑点云,以减少噪声影响,提高匹配的稳定性。随后,计算工件点云的点对特征集合,并以工件类别信息为索引找到对应模型进行配准。最后,通过投票匹配和 ICP 算法估计工件位姿。

设  $\mathbf{M}$  为模型点云的点对特征,  $\mathbf{S}$  为环境点云的点对特征,模型点云的点对特征( $\mathbf{PPF}_\Theta(p_n, p_m)$ )和场景点云的点对特征( $\mathbf{PPF}_\Omega(q_j, q_k)$ )为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M} &= \{\mathbf{PPF}_\Theta(p_1, p_2), \dots, \mathbf{PPF}_\Theta(p_n, p_m)\}, \\ \mathbf{S} &= \{\mathbf{PPF}_\Omega(q_1, q_2), \dots, \mathbf{PPF}_\Omega(q_j, q_k)\}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

根据 YOLACT 得到的工件种类信息,可以在模型点对特征库中选择对应的模型,并为每个场景点建立投票箱。比较模型点对( $p_n, p_m$ )和场景点对( $q_j, q_k$ )的特征向量,若相似,则为该模型点投票。对场景点构建的所有点对特征集合完成投票后,将投票数( $f$ )的最大值作为匹配点的权值  $o_i$ ,即

$$o_i = \text{Max}(f_1, f_2, \dots, f_m)。 \quad (6)$$

为所有场景点获取匹配结果后,可以得到多个位姿,将相似的位姿结果分配到相同的簇中。计算簇中所有位姿投票数的总和作为该簇的总得分( $W_n$ ),即

$$W_n = \sum_{j=1}^{n_u} \sum_{i=1}^{n_j} o_i。 \quad (7)$$

式(7)中: $n_u$  为簇中的位姿个数; $n_j$  为场景点个数。

选择总得分最高的簇,并计算其聚类中心的对应位姿,作为粗配准位姿结果。首先,计算所有位姿的位置向量的平均值来求解位置均值,其次,计算该簇聚类中心对应的旋转矩阵( $\mathbf{A}$ ),即

$$\mathbf{A} = \frac{1}{n_u} \sum_{i=1}^{n_u} \omega_i (\mathbf{u}_i^T \times \mathbf{u}_i)。 \quad (8)$$

式(8)中: $\mathbf{u}_i$  为位姿的旋转矩阵; $\omega_i$  为位姿的权重。

通过投票匹配和位姿聚类,得到了模型点云到场景点云的初始变换矩阵。使用 ICP 算法<sup>[33]</sup>进一步精细调整,减少点云对应点匹配的距离误差。

## 4 实验验证

### 4.1 散堆工件抓取实验系统

通过测试系统抓取工件的平均耗时、平均点云生成时间、配准成功率和平均配准时间验证方法的整体性能。平均耗时为系统抓取目标工件过程中各环节单次所耗平均时间;平均点云生成时间与平均配准时间为获取单个工件位姿所需点云生成时间和配准时间;配准成功率为实验中位姿估计成功次数所占比例。

搭建的散堆工件抓取实验系统(图 10)包含标准工业 6-DoF 机器人 JAKA Zu3、末端执行器、双目结构光系统、带高性能图形处理单元(GPU)的计算机。系统采用吸嘴作为末端执行器,结合气泵、电磁阀和继电器完成抓取。吸嘴由于其工作原理,需要接触面平滑,且吸嘴工作时吸力较小,因此,将抓取点选在工件重心附近。

### 4.2 散堆工件抓取流程实验

工件搬移过程,如图 11 所示。

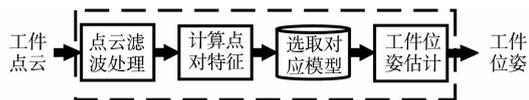


图 9 位姿估计过程

Fig. 9 Process of pose estimation

抓取全部工件仅需两次结构光点云生成(图 11(a)):

1) 系统利用 YOLACT 对图片进行实例分割,并筛选出 3 个适合抓取的表层工件;

2) 利用双目结构光系统生成 3 个目标工件区域的局部点云,并计算工件的位姿,指导机械臂搬移工件。完成对表层 3 个工件的抓取后,系统捕获当前场景图像进行实例分割,筛选出下层的 5 个适合抓取的工件。

随后,重复上述过程,完成对下层 5 个工件的搬移。搬移下层 5 个工件后,系统再次捕获场景图像进行实例

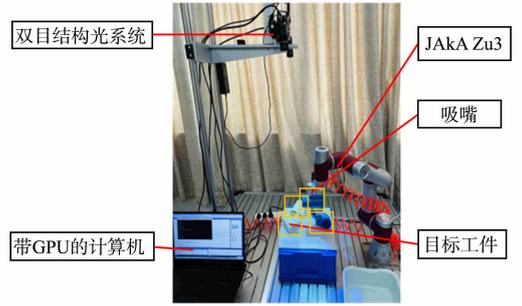
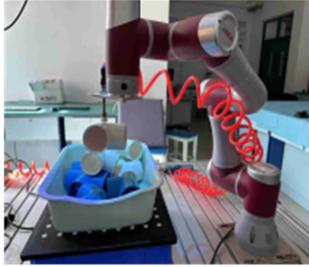


图 10 实验系统

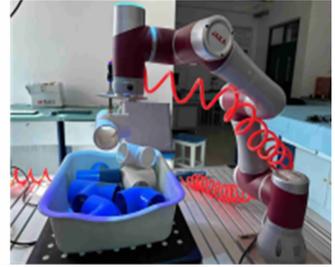
Fig. 10 Experiment system



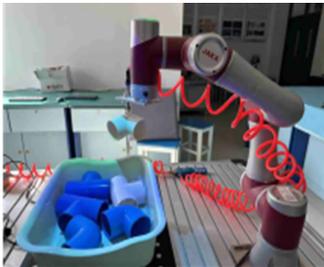
(a) 散堆工件场景图像



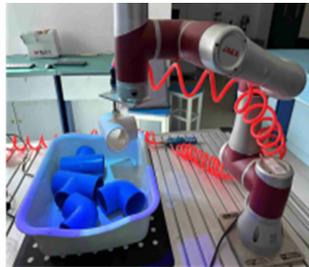
(b) 搬移上层 L 型工件



(c) 搬移上层 T 型工件



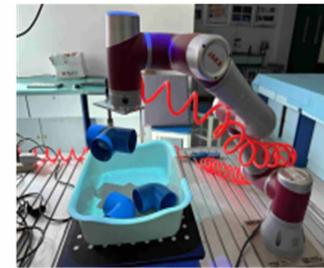
(d) 搬移上层 L 型工件



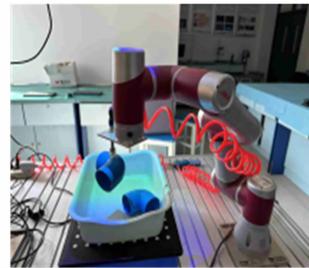
(e) 搬移下层 T 型工件 1



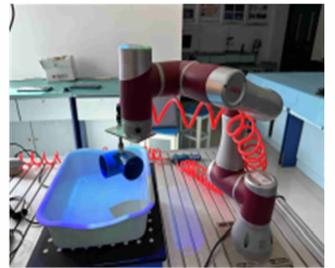
(f) 搬移下层 T 型工件 2



(g) 搬移下层 T 型工件 3



(h) 搬移下层 L 型工件 1



(i) 搬移下层 L 型工件 2

图 11 工件搬移过程

Fig. 11 Process of moving workpieces

分割,发现无适合抓取的工件,系统结束抓取任务。

点云生成环节的工件搬移过程总耗时( $t$ )为

$$t = t_s + t_j + t_r + t_e + t_c. \quad (9)$$

式(9)中: $t_s$ 为工件筛选环节耗时; $t_j$ 为结构光投影环节耗时; $t_r$ 为计算工件点云环节耗时; $t_e$ 为工件位姿估计环节耗时; $t_c$ 为机械臂搬移工件环节耗时。

没有点云生成环节的工件搬移过程中,单次搬移过程总耗时  $t$  为机械臂搬移过程耗时。系统搬移工件各环节所耗时间,如表 1 所示。表 1 中: $n$ 为抓取次数; $t_{rc} = t_s + t_j + t_r$ ;  $t_a$ 为平均时间。

机械臂搬移工件环节平均耗时为 6.024 s,远高于估计单个工件位姿平均耗时。为提升散堆工件抓取系统工作效率,令机械臂搬移工件环节与下一个工件点云的配准过程并行执行。

表 1 系统搬移工件各环节所耗时间

Tab. 1 Time consumed at each step of system in moving workpieces

$n$	$t_s/s$	$t_j/s$	$t_r/s$	$t_{rc}/s$	$t_e/s$	$t_c/s$	$t/s$
1	0.108	2.538	0.432	3.078	0.418	6.123	9.619
2	—	—	—	—	0.432	5.645	5.645
3	—	—	—	—	0.423	6.004	6.004
4	0.122	2.544	0.568	3.234	0.534	6.212	9.980
5	—	—	—	—	0.425	5.939	5.939
6	—	—	—	—	0.433	6.128	6.128
7	—	—	—	—	0.405	6.154	6.154
8	—	—	—	—	0.398	5.988	5.988
$t_s$	0.029	0.635	0.125	0.789	0.434	6.024	6.932

### 4.3 相关方法对比测试

基于 DFP<sup>[35]</sup> (DFPCP) 方法、基于 PointNet<sup>++</sup><sup>[15]</sup> (PCP) 方法及基于 DGCNN<sup>[16]</sup> (DCP) 方法均利用双目结构光生成点云, 使用投票匹配和迭代最近邻算法<sup>[33]</sup> 估计工件位姿。所有方法均在相同场景下实验了 50 次, 4 种方法点云生成和位姿估计结果对比, 如表 2 所示。表 2 中:  $n_r$  为重建的次数;  $\eta$  为配准成功率;  $t_{ps}$  为分割时间;  $S$  为点云规模。

表 2 4 种方法点云生成和位姿估计结果对比

Tab. 2 Comparison of point cloud generation and pose estimation results of four methods

参数	DFPCP 方法	PCP 方法	DCP 方法	文中方法
$n_r$	50	50	50	50
$t_s/s$	—	—	—	0.110
$t_j/s$	2.563	2.545	2.558	2.549
$t_r/s$	1.586	1.555	1.568	0.536
$t_{ps}/s$	—	0.169	0.094	—
$t_{rc}/s$	4.149	4.269	4.220	3.195
$S$	0.150	0.090	0.100	0.060
$\eta$	0.420	0.900	0.920	1.000
$t_e/s$	2.112	0.462	0.536	0.446
$t/s$	6.261	4.731	4.756	3.641

由表 2 可知: DFPCP 方法的配准成功率远低于其他方法, 这是由于 DFPCP 方法生成的整个散堆工件场景点云包含大量无关点, 并且 DFPCP 不能选择对应模型进行配准, 而是需要依次和 L 型、T 型工件的点对特征集合进行配准, T 型工件的点对特征与 L 型工件的点对特征相似, L 型工件模型点云易配准到场景点云中 T 型工件区域, 导致配准成功率低; 另外 3 种方法均是针对目标工件点云进行配准, 大幅度提升了配准成功率; PCP 方法和 DCP 方法需要计算完整场景点云, 然后, 对场景点云进行分割, 以获取目标工件点云, 这导致点云生成时间较长, 且在散堆工件之间存在遮挡情况, 两种方法都存在分割被遮挡工件的点云的情况, 进而导致配准失败; 文中方法结合 YOLACT 输出的目标工件的分割信息, 只生成待抓取工件的点云, 与其他方法相比, 文中方法平均可缩小点云规模约 44%, 点云生成时间平均缩短 24%, 配准成功率平均提升 25%。

## 5 结束语

提出了一种图像分割引导的散堆工件结构光三维位姿估计方法, 并基于所搭建的散堆工件抓取实验系统进行了散堆工件抓取实验。实验结果表明, 该方法能快速生成所有适合抓取工件的局部点云, 显著减少了点云规模和点云生成时间, 双目结构光点云生成平均时间仅为 3.195 s。通过以种类为索引找到对应的模型进行基于投票匹配和 ICP 算法的位姿配准, 提高了配准成功率, 配准平均成功率达 100%。相较其他方法, 文中方法在减小点云规模、提高点云生成速度和提高配准成功率方面表现出色, 从而有效提高了抓取效率。文中方法在更复杂环境下的工件掩膜分割质量方面仍有进一步提高的空

间。对于不适合抓取的工件,系统通过机械臂对工件进行调整,确定抓取点,进而完成抓取,将是未来研究的主题。

### 参考文献:

- [1] SCHONBERGER J L, FRAHM J M. Structure-from-motion revisited[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Piscataway: IEEE Press, 2016: 4104-4113. DOI: 10.1109/CVPR.2016.445.
- [2] 黄及远, 李敏, 谢兵兵, 等. 双目视觉关键技术研究综述[J]. 制造业自动化, 2023, 45(5): 166-171. DOI: 10.1009-0134(2023)05-0166-06.
- [3] FOIX S, ALENYA G, TORRAS C. Lock-in time-of-flight (ToF) cameras: A survey[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(9): 1917-1926. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2101060.
- [4] 夏晨旭, 郝群, 张一鸣, 等. 基于结构光投影三维重建的人脸特征检测[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(22): 186-192. DOI: 10.3788/LOP230620.
- [5] AHARCHI M, AITKBIR M. A review on 3D reconstruction techniques from 2D images[C]// International Conference on Smart Cities Applications, Berlin: Springer, 2020: 510-522. DOI: 10.1007/978-3-030-37629-1\_37.
- [6] MAYER N, ILG E, HAUSSER P, *et al.* A large dataset to train convolutional networks for disparity, optical flow, and scene flow estimation[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Piscataway: IEEE Press, 2016: 4040-4048. DOI: 10.1109/CVPR.2016.438.
- [7] SUNDERMEYER M, MARTON Z C, DURNER M, *et al.* Implicit 3D orientation learning for 6D object detection from RGB images[C]// European Conference on Computer Vision, Cham: Springer, 2018: 699-715. DOI: 10.1007/978-3-030-01231-1\_43.
- [8] 牟向伟, 孙国奇, 陈林涛, 等. 基于 Kinect 相机的多视角 RGB-D 信息融合的甜椒姿态估计研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(10): 159-167. DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2023.10.023.
- [9] BRACHMANN E, KRULL A, MICHEL F, *et al.* Learning 6D object pose estimation using 3D object coordinates [C]// European Conference on Computer Vision, Cham: Springer, 2014: 536-551. DOI: 10.1007/978-3-319-10605-2\_35.
- [10] KRULL A, BRACHMANN E, MICHEL F, *et al.* Learning analysis-by-synthesis for 6D pose estimation in RGB-D images[C]// IEEE International Conference on Computer Vision, Piscataway: IEEE Press, 2015: 954-962. DOI: 10.1109/ICCV.2015.115.
- [11] CRIVELLARO A, RAD M, VERDIE Y, *et al.* A novel representation of parts for accurate 3D object detection and tracking in monocular images[C]// IEEE International Conference on Computer Vision, Piscataway: IEEE Press, 2015: 4391-4399. DOI: 10.1109/ICCV.2015.499.
- [12] HODAN T, HALUZA P, OBRŽÁLEK Š, *et al.* T-LESS: An RGB-D dataset for 6D pose estimation of texture-less objects[C]// IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, Piscataway: IEEE Press, 2017: 880-888. DOI: 10.48550/arXiv.1701.05498.
- [13] JAFARI O H, MITZEL D, LEIBE B. Real-time RGB-D based people detection and tracking for mobile robots and head-worn cameras[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, Piscataway: IEEE Press, 2014: 5636-5643. DOI: 10.1109/ICRA.2014.6907688.
- [14] QI C R, SU Hao, MO Kaichun, *et al.* PointNet: Deep learning on point sets for 3D classification and segmentation [C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Piscataway: IEEE Press, 2017: 652-660. DOI: 10.1109/CVPR.2017.16.
- [15] QI C R, YI Li, SU Hao, *et al.* Pointnet<sup>++</sup>: Deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space[C]// Annual Conference on Neural Information Processing Systems, New York: MIT Press, 2017: 5099-5108. DOI: 10.48550/arXiv.1706.02413.
- [16] WANG Yue, SUN Yongbin, LIU Ziwei, *et al.* Dynamic graph CNN for learning on point clouds[J]. ACM Transactions on Graphics, 2019, 38(5): 1-12. DOI: 10.48550/arXiv.1801.07829.
- [17] WANG Chen, XU Danfei, ZHU Yuke, *et al.* DenseFusion: 6D object pose estimation by iterative dense fusion[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Piscataway: IEEE Press, 2019: 3343-3352. DOI: 10.48550/arXiv.1901.04780.
- [18] GAO Ge, LAURI M, WANG Yulong, *et al.* 6D object pose regression via supervised learning on point clouds[C]//

- IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2020; 3643-3649. DOI: 10.1109/ICRA40945.2020.9197461.
- [19] ZHUANG Chuangang, LI Shaofei, DING Han. Instance segmentation based 6D pose estimation of industrial objects using point clouds for robotic bin-picking[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2023, 82: 102541. DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102541.
- [20] ZHUANG Chuangang, WANG Haoyu, DING Han. Attention vote: A coarse-to-fine voting network of anchor-free 6D pose estimation on point cloud for robotic bin-picking application[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2024, 86: 102671. DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102671.
- [21] PAVLAKOS G, ZHOU Xiaowei, CHAN A, *et al.* 6-DoF object pose from semantic keypoints[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway: IEEE Press, 2017: 2011-2018. DOI: 10.1109/ICRA.2017.7989233.
- [22] ROTHGANGER F, LAZEBNIK S, SCHMID C, *et al.* 3D object modeling and recognition using local affine-invariant image descriptors and multi-view spatial constraints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2006, 66(3): 231-259. DOI: 10.1007/s11263-005-3674-1.
- [23] TULSIANI S, MALIK J. Viewpoints and keypoints[C]// *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1510-1519. DOI: 10.1109/CVPR.2015.7298758.
- [24] RUBLEE E, RABAUD V, KONOLIGE K, *et al.* ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF[C]// *IEEE International Conference on Computer Vision*. Piscataway: IEEE Press, 2011: 2564-2571. DOI: 10.1109/ICCV.2011.6126544.
- [25] BAY H, TUYTELAARS T, VAN GOOL L. Surf: Speeded up robust features[C]// *European Conference on Computer Vision*. Berlin: Springer, 2006: 404-417. DOI: 10.1007/11744023\_32.
- [26] RUSU R B, BLODOW N, BEETZ M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Piscataway: IEEE Press, 2009: 3212-3217. DOI: 10.1109/ROBOT.2009.5152473.
- [27] TOMBARI F, SALT S, DI STEFANO L. Unique signatures of histograms for local surface description[C]// *European Conference on Computer Vision*. Berlin: Springer, 2010: 356-369. DOI: 10.1007/978-3-642-15558-1\_26.
- [28] VIDAL J, LIN C Y, MARTÍ R. 6D pose estimation using an improved method based on point pair features[C]// *International Conference on Control, Automation, and Robotics*. Piscataway: IEEE Press, 2018: 405-409. DOI: 10.1109/ICCAR.2018.8384709.
- [29] SHARP G C, LEE S W, WEHE D K. ICP registration using invariant features[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(1): 90-102. DOI: 10.1109/34.982886.
- [30] YANG Jiaolong, LI Hongdong, CAMPBELL D, *et al.* Go-ICP: A globally optimal solution to 3D ICP point-set registration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2015, 38(11): 2241-2254. DOI: 10.1109/TPAMI.2015.2513405.
- [31] 汪霖, 郭佳琛, 张璞, 等. 基于改进 ICP 算法的三维点云刚体配准方法[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(2): 183-190. DOI: 10.16152/j.cnki.xdxbzr.2021-02-002.
- [32] 荆路, 武斌, 方锡禄. 基于 SIFT 特征点结合 ICP 的点云配准方法[J]. *激光与红外*, 2021, 51(7): 944-950. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2021.07.019.
- [33] ZHANG Jing, YIN Baoqun, XIAO Xianpeng, *et al.* 3D detection and 6D pose estimation of texture-less objects for robot grasping[C]// *International Conference on Control and Robotics Engineering*. Piscataway: IEEE Press, 2021: 33-38. DOI: 10.1109/ICCRE51898.2021.9435702.
- [34] BOLYA D, ZHOU Chong, XIAO Fanyi, *et al.* YOLACT: Real-time instance segmentation[C]// *IEEE International Conference on Computer Vision*. Piscataway: IEEE Press, 2019: 9157-9166. DOI: 10.1109/ICCV.2019.00925.
- [35] LI Beiwen, AN Yatong, CAPPELLERI D, *et al.* High-accuracy, high-speed 3D structured light imaging techniques and potential applications to intelligent robotics[J]. *International Journal of Intelligent Robotics and Applications*, 2017, 1(1): 86-103. DOI: 10.1007/s41315-016-0001-7.
- [36] 熊宗刚. 结构光双目三维成像关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202403036



# 新型双管水压致裂法地应力测试装置及其应用

常方强<sup>1</sup>, 梁潇洋<sup>1</sup>, 黄梓焰<sup>1</sup>, 梁康康<sup>2</sup>, 全露龙<sup>2</sup>, 曹亚南<sup>2</sup>, 常方伟<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 深部岩土工程勘察(山东)有限公司, 山东 潍坊 261071)

**摘要:** 提出一种新型双管水压致裂法地应力测试装置, 管路采用C型接头的高压双层钢丝胶管。在浙江省和福建省的16条隧道中进行测试应用, 取得了较好的效果。结果表明: 新型双管水压致裂法地应力测试装置密封效果良好, 能够分别控制封隔段和压裂段进行加压、泄压; 在我国东南沿海地区, 深部岩体中的天然应力场具有明显的方向性, 最大水平主应力与最小水平主应力比值为0.55~0.85, 侧压系数为0.72~4.83, 平均值为2.16。

**关键词:** 地应力; 水压致裂法; 双管; 岩石力学

中图分类号: TU 45

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)06-0706-06

## New Type of Double Pipe Hydraulic Fracturing Method *In-Situ* Stress Testing Device and Its Application

CHANG Fangqiang<sup>1</sup>, LIANG Xiaoyang<sup>1</sup>, HUANG Ziyang<sup>1</sup>,  
LIANG Kangkang<sup>2</sup>, QUAN Lulong<sup>2</sup>,  
CAO Yanan<sup>2</sup>, CHANG Fangwei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Deep Geotechnical Engineering Survey (Shandong) Limited Company, Weifang 261071, China)

**Abstract:** A new type of double pipe hydraulic fracturing *in-situ* stress testing device is proposed, using high-pressure double-layer steel wire rubber hoses with C-type joints in the pipeline. The new device are tested and applied in 16 tunnels in Zhejiang Province and Fujian Province, obtaining good results. The results show that the new double pipe hydraulic fracturing *in-situ* stress testing device has good sealing effect, and can control the pressure and relief of the sealing section and fracturing section separately. In the southeastern coastal areas of China, the natural stress field in deep rock masses has obvious directionality, with 0.55-0.85 ratio of maximum horizontal principal stress to minimum horizontal principal stress, the lateral pressure coefficient is 0.72-4.83, the average value is 2.16.

**Keywords:** *in-situ* stress; hydraulic fracturing method; double pipe; rock mechanics

地应力是地层岩体在长期地质过程中受到地球重力和构造应力共同作用而逐渐形成的, 是地质构造形成与演化, 以及区域地质稳定的重要影响因素<sup>[1]</sup>。近年来, 随着国家战略的实施, 一批大型深部地下工程陆续兴建, 相较于浅部岩体, 深部岩体的非线性、不均质性和各向异性更加突出, 深部岩体具有独

收稿日期: 2024-03-24

通信作者: 常方强(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事海洋工程、岩土工程的研究。E-mail: changfq@hqu.edu.cn.

特的“三高一扰动”特性,即高应力、高地温、高岩溶水压和强烈的开采扰动<sup>[2-3]</sup>。

为了准确地测量深部岩体的地应力,国内外已提出了 10 余种方法,如水压致裂法、扁千斤顶(压力枕)法、刚性包体应力计法、声发射法等。这些方法中,水压致裂法由于能够测量出岩体的原始应力状态,应用最为广泛。国内已有较多学者采用水压致裂法测得一些岩体的天然应力<sup>[4-9]</sup>,测试设备大都采用地质钻机自带的钻杆作为供压管道,将封隔器连接在钻杆端部,进行下放和供压。由于钻杆采用螺纹连接,故难以保障连接处不会出现渗漏泄压,而压力传感器一般布设在地面上,造成实际施加的压力比测得的数值更小。此外,水压致裂法的操作和测试难度较大,多数学者的研究结果都是基于少数几个钻孔数据展开研究的,对地区统计的经验性不强。基于此,本文提出一种新型双管水压致裂法地应力测试装置,并在浙江省、福建省的 16 条隧道的深部钻孔内进行测试,研究该区域地应力的分布规律。

## 1 水压致裂法测试

水压致裂法测试建立在弹性力学之上,基于以下 3 个假定:1) 岩体连续、均匀、各向同性;2) 测点岩体为非渗透性,岩体为多孔介质,注入的流体按照达西定律在岩体空隙中流动;3) 钻孔需与其中一个主应力保持平行。

采用水压致裂法测试地应力是在两端的封隔段膨胀后,将压裂段进行密封,然后,在压裂段内进行供压(一般选择水压),采用压裂的峰值、裂隙闭合时的关闭压力和裂隙重新张开时的压力(重张压力)进行计算,确定水平向的最大主应力和最小主应力<sup>[4]</sup>。水压致裂法典型压力变化曲线,如图 1 所示。图 1 中: $p_{c,1}$  为初始开裂压力(峰值压力); $p_s$  为关闭压力; $p_{c,2}$  为重张压力;1~9 为不同的测试阶段。

假设深部岩体中存在的天然应力场,竖向应力  $\sigma_v = \rho g H$ ,  $\rho$  为上覆岩层容重,  $g$  为重力加速度,  $H$  为试验段埋。取岩体垂直钻孔平面进行分析,可得水压致裂应力测量力学模型,如图 2 所示。图 2 中: $\sigma_{max}$  为最大水平主应力; $\sigma_{min}$  为最小水平主应力; $p_c$  为岩体孔壁位置受到的压力; $r$  为钻孔半径; $X-X'$  为水平轴; $Y-Y'$  为竖向轴; $\theta$  为中心角度。

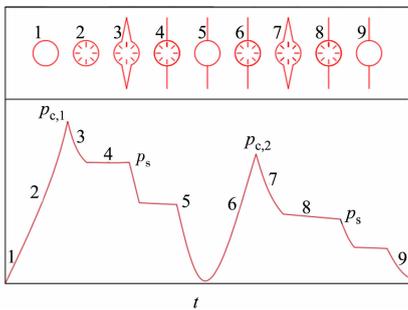
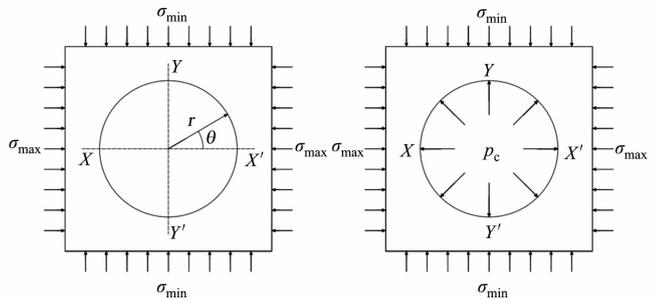


图 1 水压致裂法典型压力变化曲线

Fig. 1 Typical pressure variation curve of hydraulic fracturing method



(a) 力学模型 (b) 应力集中

图 2 水压致裂应力测量力学模型

Fig. 2 Mechanical model of hydraulic fracture stress measurement

当孔壁出现垂直裂缝时,孔壁上应力可用柯西应力集中解进行分析。当  $\theta = 0^\circ$  时,环向应力  $\sigma_\theta$  取到最小值;当  $\sigma_\theta \leq -\sigma_t$  ( $\sigma_t$  为岩体抗拉强度) 时,孔壁开裂,裂隙形成,此时,最小主应力等于关闭应力,可得

$$\sigma_{max} = \sigma_t + 3\sigma_{min} - p_c, \tag{1}$$

$$\sigma_{min} = p_s. \tag{2}$$

通过水压致裂试验,确定  $p_{c,1}$ ,  $p_{c,2}$ ,  $p_s$ , 可计算出  $\sigma_{max}$ ,  $\sigma_{min}$ 。需要指出的是,  $p_{c,1}$ ,  $p_{c,2}$ ,  $p_s$  均为孔内测点位置处的数值,而在测试过程中,该位置处的数值应为地面处的实测值与孔内静水压力  $p_w$  之和,其关系为

$$p_{c,1} = p_{c,1,g} + p_w, \tag{3}$$

$$p_{c,2} = p_{c,2,g} + p_w, \tag{4}$$

$$p_s = p_{s,1,g} + p_w. \tag{5}$$

式(3)~(5)中: $p_{c,1,g}$ ,  $p_{c,2,g}$ ,  $p_{s,1,g}$  分别为开裂压力、重张压力和关闭压力的计算值。

## 2 新型双管水压致裂法地应力测试装置

目前,国内使用的水压致裂法仪器多为单回路方式,即单管方式。单回路测试系统将钻杆作为导管,封隔段与压裂段加压致裂时都通过该管道进行实验<sup>[10-12]</sup>。首先,将封隔器运送至测试区域,再利用高压泵通过导管对封隔段进行注液,达到设计压力后,通过封隔器顶部的推拉开关将压力由封隔段转换到压裂段内。这种装置较为简单,现场操作简便,便于连续作业<sup>[13]</sup>,但容易产生以下两个问题。

1) 地下所有加压管路都通过钻杆实现,钻杆连接的密封性较差,在设计时并未考虑水压密闭性问题。因此,在打压过程中,管路会出现渗漏,导致压力下降,测试结果可能失真。

2) 封隔段和压裂段只能采用一套系统分时控制,无法同时进行控制,因此,在压裂期间无法控制封隔压力。

新型双管水压致裂法装置主要由高压泵站、数据采集系统、串联封隔器、高压胶管和开关等组成,如图 3 所示。

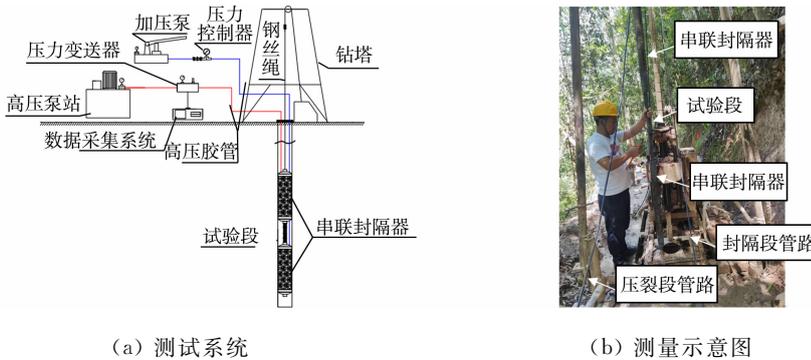


图 3 新型双管水压致裂测试装置

Fig. 3 New type of double pipe hydraulic fracturing testing devices

放弃使用钻杆,采用高压胶管替代,对封隔器等装置进行作业,达到封隔器输送与试验段加压的目的。相较于传统单回路装置,高压胶管具有更高的密封性,测试前可向管道内通入液体进行密封性检查,确保测试期间获得数据的准确性,同时,也更便于携带作业。装置使用高压胶管内部固定双层钢丝网,以增强强度,试验前,对高压胶管施加压力至 50 MPa,未见破坏迹象。高压胶管每段长度为 20~50 m,采用 C 型接头连接,接头处带有橡胶密封圈。此外,采用双回路系统,两条独立的高压胶管分别向封隔段和压裂段加压,相较于传统单回路装置,新型装置可更加高效、精确地控制封隔段与压裂段压力。试验过程中,一旦发现封隔器压力不够,可随时补压,以保障数据测试的可靠性。

## 3 工程应用实例

为了进一步验证新型双管水压致裂法地应力测试装置的适用性,在浙江省和福建省的 16 条隧道勘察中进行测试。测试地点,如图 4 所示。

测试区域均为山岭隧道,地层岩性主要为第 4 系地层、侏罗系上统地层;浙江省测试区段的岩性多为强风化至中风化晶屑玻屑熔结凝灰岩,灰黄至灰色,玻屑塑变结构,主要以火山灰、浆屑为主,含少量长石、石英矿;福建省测试区段的岩性多为强风化至中风化花岗岩,灰白色至黄褐色,斑状结构,主要含有石英、长石和黑云母,岩性坚硬。

地应力测试深度约为 100~500 m。珠龙隧道 ZLZK3 钻孔地应力测试曲线(测试深度  $h=253.0$  m),如图 5 所示。图 5 中: $p$  为测试压力。由图 5 可知:地应力测试曲线的上升段和下降段均较为明显,岩石压裂后重张段压力均小于初始压裂段,曲线较为均匀,测试较为理想。

关闭压力的确定对水压致裂法地应力计算非常重要。由式(2)可知,关闭压力等于最小水平主应力,即水压致裂法可直接测出最小水平主应力值。目前,比较常用的  $p_s$  取值方法有拐点法、单切线法、双切线法、Mauskat 法及流量-压力法等<sup>[14]</sup>。文中  $p_s$  的取值方法主要采用拐点法,对于拐点不明显的情况,则采用单切线法或双切线法。



图 4 测试地点

Fig. 4 Test location

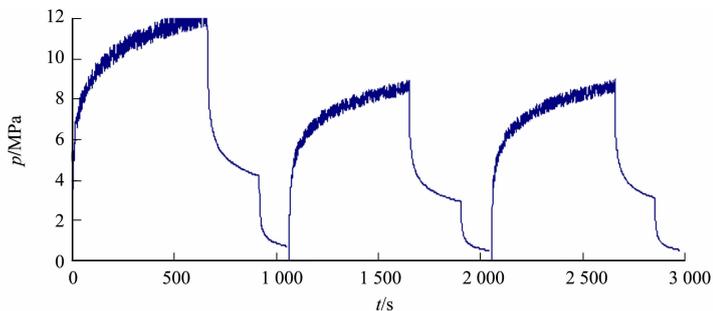


图 5 珠龙隧道 ZLZK3 钻孔地应力测试曲线

Fig. 5 In-situ stress test curves of ZLZK3 borehole in Zhulong Tunnel

对地应力进行测试,测试位置处的钻孔直径为 76 mm,由钻孔取出的岩芯可知,岩体完整性良好,岩体呈长柱状、坚硬,均能满足水压致裂条件。水压致裂测试完成后,采用带定位方向的水下摄像头记录破裂的方向和裂缝长度。各钻孔地应力测试结果,如表 1 所示。

表 1 各钻孔地应力测试结果

Tab. 1 In-situ stress test results of each borehole

编号	隧道名称	h/m	压裂参数/MPa					主应力值/MPa			破裂方向
			$p_{c,1,g}$	$p_{c,2,g}$	$p_{s,1,g}$	$p_w$	$\sigma_t$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_v$	
1	珠龙隧道	253.0	11.86	8.46	5.51	2.53	3.40	13.13	8.04	6.70	NW22°
		248.0	11.74	8.42	5.02	2.48	3.32	11.60	7.5	6.57	
		243.0	11.61	8.07	4.88	2.43	3.54	11.43	7.31	6.44	
2	如公尖隧道	184.0	11.31	9.34	5.51	1.84	1.97	10.87	7.35	4.88	NW19°
		179.0	10.77	8.04	5.15	1.79	2.73	10.99	6.94	4.74	
		174.0	10.75	7.97	5.11	1.74	2.78	10.84	6.85	4.61	
3	南山岗隧道	193.0	13.71	10.42	6.08	1.93	3.29	11.68	8.01	5.11	NW49°
		188.0	13.44	10.17	6.05	1.88	3.27	11.74	7.93	4.98	
		183.0	13.06	8.74	5.76	1.83	4.32	12.20	7.59	4.85	
4	麻田隧道	129.0	10.02	8.53	4.71	1.29	1.49	8.18	6.00	3.42	NW23°
		124.0	9.72	8.17	4.18	1.24	1.55	6.85	5.42	3.29	
		119.0	9.26	7.91	4.04	1.19	1.35	6.59	5.23	3.15	
5	龙溪隧道	128.0	8.34	6.45	4.12	1.28	1.89	8.47	5.40	3.39	NW36°
		123.0	9.52	7.37	4.12	1.23	2.15	7.45	5.35	3.26	
		118.0	8.47	6.75	3.87	1.18	1.72	7.22	5.05	3.13	
6	黄寮隧道	119.0	8.81	8.10	6.51	1.19	0.71	13.81	7.70	3.15	NW45°
		114.0	9.31	8.84	6.04	1.14	0.47	11.56	7.18	3.02	
		109.0	7.25	6.12	5.01	1.09	1.13	11.09	6.10	2.89	
7	和尚山隧道	235.0	11.62	9.12	5.01	2.35	2.50	10.61	7.36	6.23	NW24°
		230.0	10.41	6.94	4.47	2.30	3.47	11.07	6.77	6.10	
		225.0	9.77	7.41	4.08	2.25	2.36	9.33	6.33	5.96	
8	杨家山隧道	172.0	10.65	8.41	4.88	1.72	2.24	9.67	6.60	4.56	NW25°
		167.0	10.17	8.36	4.74	1.67	1.81	9.20	6.41	4.43	
		162.0	9.86	7.84	4.51	1.62	2.02	8.93	6.13	4.29	
9	四方岩隧道	169.0	11.32	8.97	4.45	1.69	2.35	7.76	6.14	4.48	NW34°
		164.0	11.12	8.54	4.11	1.64	2.58	7.07	5.75	4.35	
		159.0	11.03	8.11	3.87	1.59	2.92	6.68	5.46	4.21	
10	锣鼓山隧道	137.0	9.41	7.84	4.27	1.37	1.57	7.71	5.64	3.63	NW22°
		132.0	8.81	7.71	4.24	1.32	1.10	7.65	5.56	3.50	
		127.0	8.48	7.04	4.13	1.27	1.44	7.89	5.40	3.37	
11	罗坞隧道	282.0	11.23	10.07	4.77	2.82	1.16	9.88	7.59	7.47	NW23°
		277.0	10.47	9.14	4.43	2.77	1.33	9.69	7.20	7.34	
		272.0	9.91	8.77	4.21	2.72	1.14	9.30	6.93	7.21	

续表  
Continue table

编号	隧道名称	h/m	压裂参数/MPa					主应力值/MPa			破裂方向
			$p_{c,1,g}$	$p_{c,2,g}$	$p_{s,1,g}$	$p_w$	$\sigma_t$	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	$\sigma_v$	
12	金光隧道	183.0	10.12	8.72	4.05	1.64	1.41	6.70	5.69	4.85	NW37°
		173.0	9.73	7.40	3.67	1.54	2.33	6.70	5.21	4.58	
		163.0	8.89	7.34	3.47	1.43	1.56	5.96	4.91	4.32	
13	高仔田1#隧道	169.0	10.74	9.15	6.05	1.37	1.59	11.74	7.42	4.48	NW45°
		160.0	9.86	7.88	5.01	1.28	1.98	9.71	6.29	4.24	
		150.0	8.99	7.45	4.96	1.18	1.54	9.79	6.14	3.98	
14	铁观音隧道	380.5	17.50	14.70	6.60	3.81	2.80	12.71	10.41	10.08	NW25°
		375.5	17.30	14.50	6.10	3.76	2.80	11.31	9.86	9.95	
		370.5	16.10	13.00	6.10	3.71	3.10	12.71	9.81	9.82	
15	仙灵旗隧道	503.0	11.32	9.72	3.07	5.03	1.60	9.55	8.10	13.33	NW25°
		495.0	11.12	8.86	3.01	4.95	2.26	10.07	7.96	13.12	
		487.0	10.47	8.77	2.89	4.87	1.70	9.64	7.76	12.91	
16	狮头山隧道	108.0	8.40	7.40	6.10	0.977	1.00	12.85	7.08	2.86	NW18°
		98.0	8.10	7.10	5.80	0.877	1.00	12.05	6.68	2.60	
		88.0	8.10	6.80	5.50	0.777	1.30	11.25	6.28	2.33	

## 4 测试结果与讨论

### 4.1 水平应力具有较强的方向性

由实测结果可知:深部岩体中的天然应力场具有明显的方向性,破裂方向位于 NW18°~NW45°;最大水平主应力与最小水平主应力比值为 0.55~0.85,这与华北地区的数据<sup>[10]</sup>基本接近。因此,东南沿海岩体中水平应力有强烈的方向性和各向异性,在成因历史过程中,受到明显的现代构造应力场的控制。

### 4.2 水平应力与深度的关系

水平主应力随深度的变化情况,如图 6 所示。由图 6 可知:该测试区域处于中、低地应力区域,应力状态较稳定。通常情况下,岩体中的水平应力随深度的增大而增大,文献[15-16]采用应力解除法和水压致裂法等进行统计,可得水平应力与深度的线性关系式,但也指出数据离散性较大。文中测试结果中,最小水平主应力与深度基本呈正相关关系,但最大水平主应力与深度的相关性较差。

### 4.3 水平应力普遍大于竖向应力

除仙灵旗隧道外,其他隧道的水平应力普遍大于竖向应力,最大水平应力与竖向应力的比值(侧压系数)一般为 0.72~4.83,多数大于 1.00,平均值为 2.16,表明该区域的最大水平主应力与竖向应力存在一定差异,水平应力作用较为明显,也说明该区域受到较大的水平构造应力控制。三向主应力的关系为  $\sigma_{max} > \sigma_{min} > \sigma_v$ ,该种形式应力对逆断层活动有利。

各地区侧压系数的对比,如图 7 所示。由图 7 可知:浙江省和福建省的统计结果与世界多数地区的数值基本接近。由此可知,在我国东南沿海地区,在深度 100 m 以下,水平构造应力作为主导,对逆断层活动有利。此外,需注意隧道设计时,过大的侧压系数也可能导致边墙部分承受较大的围岩压力<sup>[17]</sup>。

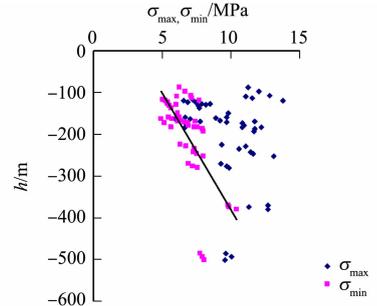


图 6 水平主应力随深度的变化情况

Fig. 6 Variation of horizontal principal stress with depth

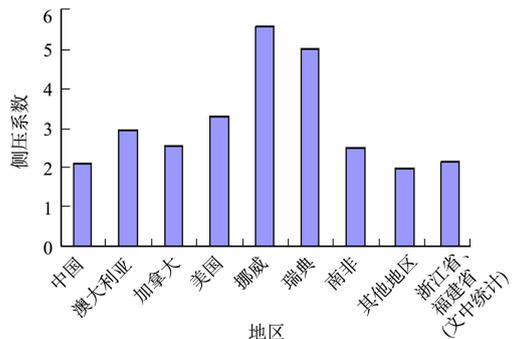


图 7 各地区侧压系数的对比

Fig. 7 Comparison of lateral pressure coefficients in different regions

#### 4.4 测试注意事项

地应力的测试设备常较为笨重,需要的管路较多,如在仙灵旗隧道测试时,最大测试深度为503.0 m,需要超过1 000 m的管路。管路在放入孔内和提升时,需注意管路与钢丝绳必须保持同步,否则,管路容易弯曲、折叠,被卡在孔壁上,因此,可以将管路与钢丝绳每隔20~30 m长度上用锁扣锁住,防止管路沿钢丝绳滑落。封隔器直径必须与孔径相适应,一般情况下,封隔器的直径有许多种类,直径过大,下放有时困难,直径过小,则可能影响封隔效果。文中装置封隔器直径为68 mm,能够封隔75,90 mm的孔径。正常情况下,封隔器在5~10 min即可基本泄压完毕,但有时管路不慎出现弯曲折叠等问题,会影响封隔器泄压,地面上的压力表无法显示出封隔器内的压力,因此,封隔器的泄压尽量维持时间长一些,如果可行泄压时间做到30 min以上,若泄压不完全就提升封隔器,有可能被卡在孔壁上,无法提升,导致封隔器和管路等卡死在孔内。加上碎块状岩体可能出现塌块,地应力的测试存在被卡孔内的风险,建议若钻孔同时做其他测试,如波速、孔内摄像等,地应力测试最好放在最后进行。

## 5 结论

- 1) 新型双管水压致裂法地应力测试装置采用C型接头的双层钢丝高压胶管代替钻杆,密封效果良好,通过地面控制系统能够分别控制封隔段和压裂段进行加压、泄压,避免封隔段压力衰减的问题。
- 2) 我国东南沿海地区,深埋岩体中的天然应力场具有明显的方向性,破裂方向位于 $NW18^\circ \sim NW45^\circ$ ,最大水平主应力与最小水平主应力比值为0.55~0.85。水平主应力随深度的增大而增大,最小主应力与埋深的正相关关系明显,但最大主应力与埋深的相关性较差。
- 3) 侧压系数一般为0.72~4.83,大部分大于1.00,平均值为2.16,隧道设计时应注意侧压问题。

#### 参考文献:

- [1] 贺永胜,王启睿,刘恩来,等.深部岩体地应力分布及测试技术研究进展[J].防护工程,2021,43(4):71-78.
- [2] 王金安,李飞.复杂地应力场反演优化算法及研究新进展[J].中国矿业大学学报,2015,44(2):189-205.
- [3] 李飞,周家兴,王金安.基于稀少样本数据的地应力场反演重构方法[J].煤炭学报,2019,44(5):1421-1431.
- [4] 吕情绪.保德煤矿地应力测试及分布特征分析[J].煤矿机械,2021,42(8):99-102.
- [5] 蔡美峰.深部水压致裂地应力测量关键技术研究及其在万福煤矿超千米深部测量中的应用[D].北京:北京科技大学,2006.
- [6] 马鹏,赵国平,张永永,等.锦屏超高压岩体水压致裂法地应力测试系统研制与应用[J].长江科学院院报,2012,29(8):58-61,66.
- [7] 李金锁,彭华,马秀敏,等.水压致裂地应力测试方法在云南大理一丽江铁路隧道工程中的应用[J].地质通报,2006(5):644-648.
- [8] 曾昭友.水压致裂法测试矿井软岩巷道地应力研究[J].煤炭科学技术,2012,40(12):31-34. DOI:10.13199/j.cst.2012.12.37.zengzhy.019.
- [9] 赵国平,陈文华,马鹏,等.水压致裂法地应力测试在水电工程中的应用[J].长江科学院院报,2013,30(11):77-82.
- [10] 郭文雕,王显军,杨树新.论述原地应力测量水压致裂法发展状况[J].决策探索(中),2018(11):34-36.
- [11] 林旭东.水压致裂地应力测试法在煤矿底板突水预测中的应用[J].中国煤炭,2019,45(6):49-52. DOI:10.19880/j.cnki.ccm.2019.06.010.
- [12] 邹爱清,韩晓玉,尹健民,等.一种新型绳索取芯钻杆内置式双管水压致裂地应力测试方法及其应用[J].岩石力学与工程学报,2018,37(5):1126-1133.
- [13] 王海忠.单回路水压致裂原地应力测量系统的研制与应用[J].地壳构造与地壳应力文集,2004(增刊1):39-44.
- [14] 邢博瑞.单孔三维水压致裂原位地应力测量应用研究[D].北京:中国地质大学(北京),2014.
- [15] 景锋,胜谦,张勇慧,等.中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(10):2056-2062.
- [16] 康红普,伊丙鼎,高富强,等.中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J].煤炭学报,2019,44(1):30-40.
- [17] 徐能雄,张彬,武雄,等.岩体力学[M].北京:地质出版社,2020.

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202311038



# 桥面水马布置对大跨度悬索桥 涡激振动的影响

周椿彬<sup>1</sup>, 周光伟<sup>2</sup>, 陈昌萍<sup>1,2,3</sup>

(1. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361000;

2. 厦门理工学院 福建省风灾害与风工程重点实验室, 福建 厦门 361024;

3. 厦门海洋职业技术学院, 福建 厦门 361100)

**摘要:** 为研究桥面水马布置对桥梁涡激振动的影响,以某大跨度悬索桥为工程背景,基于计算流体力学(CFD)方法,研究不同风速、桥面水马布置方案下的桥梁断面受力情况及其周围流场的变化规律。结果表明:在桥面上布置水马能够改变桥梁断面周围流场的压力和速度分布,在桥梁上部和背风侧产生漩涡,可观察到明显的漩涡脱落现象,与无布置水马的桥梁相比,其发生涡激振动的可能性大大提升;水马与桥面边缘的距离越大,漩涡脱落现象越不明显,桥梁发生涡激振动的可能性越低。

**关键词:** 桥梁; 水马布置; 漩涡脱落; 涡激振动; 数值模拟

中图分类号: U 446.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)06-0712-09

## Influence of Bridge Deck Barriers Arrangement on Vortex-Induced Vibration of Long-Span Suspension Bridge

ZHOU Chunbin<sup>1</sup>, ZHOU Guangwei<sup>2</sup>, CHEN Changping<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361000, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Wind Disaster and Wind Engineering,

Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

3. Xiamen Ocean Vocational College, Xiamen 361100, China)

**Abstract:** In order to study the influence of bridge deck barriers arrangement on bridge vortex-induced vibration, taking a long-span suspension bridge as the engineering background, based on the computational fluid dynamics (CFD) method, the stress situation of bridge section and the variation of surrounding flow field are studied under different wind speeds and bridge deck barriers arrangement. The results show that the arrangement of the barriers on the bridge deck can change the pressure and speed distribution of surrounding flow field of bridge section, and the vortex is generated in the upper part and the leeward side of the bridge, obvious vortex shedding phenomenon can be observed, and compared with the bridge without the barriers, the possibility of vortex-induced vibration increases greatly. The greater the distance between the barriers and the edge of the bridge deck, the less obvious the vortex shedding phenomenon, and the lower the possibility of vortex-induced vibration of the bridge.

**Keywords:** bridge; barriers arrangement; vortex shedding; vortex-induced vibration; numerical simulation

收稿日期: 2023-11-28

通信作者: 陈昌萍(1971-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事桥梁风工程的研究。E-mail:cpchen@hnu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178510);福建省科技计划项目(引导性项目)(2021Y0042)

水马作为桥梁临时维护的围挡措施,广泛应用于桥梁的检测、维修等市政工程中。因市政工程的特点,水马往往沿桥梁跨径采取紧密排列的形式进行布置,但这样的水马布置改变了桥梁的气动外形,增加了桥梁产生涡激振动的可能性。2020年5月5日,广东省的虎门大桥进行市政施工时,因水马的布置改变了桥梁的气动外形,进而产生了较大振幅的涡激振动。涡激振动是一种在低风速条件下,柔性桥梁因经过其结构表面的流体漩涡发生规律的周期性脱落而导致桥梁发生限幅振动的一种风致振动现象<sup>[1]</sup>。虽然涡激振动不会在短时间内对桥梁结构造成毁灭性的破坏,但幅度较大的涡激振动会严重影响桥梁上行车、行人的舒适性,加速受力构件的疲劳破坏,导致桥梁出现结构损伤甚至断裂<sup>[2]</sup>。桥梁涡激振动的产生不仅与桥梁本身的质量、刚度、阻尼有关<sup>[3-4]</sup>,也与桥梁截面的气动外形密切相关<sup>[5]</sup>。

葛耀君等<sup>[6]</sup>总结大跨度桥梁主梁涡激振动的研究进展,描述涡激振动控制措施的发展趋势,列举主流的桥梁气动控制措施,对未来的研究方向做出了一定判断。华旭刚等<sup>[7]</sup>讨论大跨度悬索桥多个竖向振动模式分布的特性,发现仅以一阶模态进行涡振性能评估不够全面。黄俐等<sup>[8]</sup>针对大宽高比桥梁断面的涡振锁定区间进行数值模拟研究,总结典型卡门涡街和“鱼尾摆动”两种尾流形态,发现“鱼尾摆动”是介于卡门涡街现象和平稳流场之间的流场形态。王维民等<sup>[9]</sup>对桥梁竖弯涡激振动情况下的行车安全舒适性进行研究。上述研究主要针对涡激振动特性和采用永久性气动外形控制措施的影响,而针对桥面水马这样的临时施工措施对桥梁气动外形的改变而导致的涡激振动的研究较为缺乏。

鉴于此,本文采用计算流体力学(CFD)方法<sup>[10]</sup>,研究低风速情况下,不同的水马布置情况对桥梁断面周围流场的影响,探究桥梁涡激振动的发生机制,提出桥梁施工期间桥面水马的合理布置方法。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

某桥全长 1 108 m(230 m+648 m+230 m),为三跨悬索桥结构体系。全桥由钢箱梁、索塔及吊杆组成,属于大跨度柔性悬索桥。

桥面设置 2% 的双向坡,桥面两侧为双向 6 车道,与虎门大桥主梁断面气动外形相近,主梁标准断面的宽为 36.6 m,高度为 2.67 m。桥面上设有路缘石,路缘石宽度为 240 mm,高度为 140 mm,桥梁两侧及中央区域设有栏杆。主梁标准截面的布置,如图 1 所示。

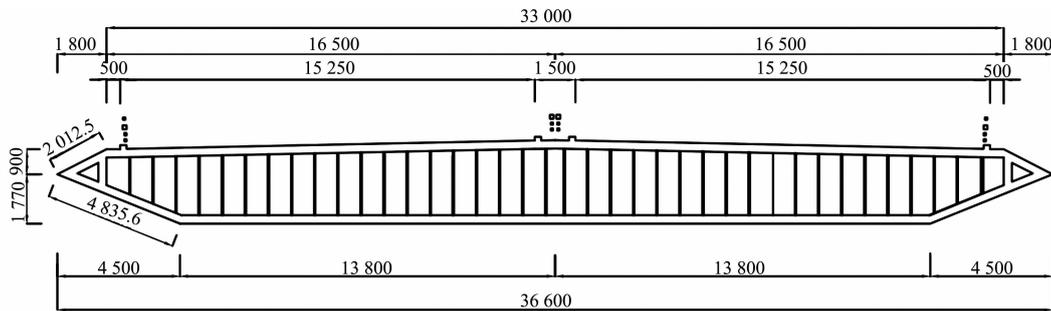


图 1 主梁标准断面的布置(单位: mm)

Fig. 1 Arrangement of standard section of main girder (unit: mm)

### 1.2 桥梁动力特性分析

桥梁的涡激振动与全桥的动力特性密切相关<sup>[11]</sup>。采用 ANSYSAPDL 软件建立桥梁有限元模型<sup>[12]</sup>,主梁、索塔采用 BEAM4 单元进行模拟。

有限元模型中,钢箱梁弹性模量为 0.21 TPa,泊松比为 0.3,索塔弹性模量为 34.5 GPa,承台弹性模量为 30.0 GPa,桥梁主缆弹性模量为 0.198 TPa。

全桥有限元模型,如图 2 所示。图 2 中: X, Y, Z 为空间坐标系。

经计算,可得该桥梁低阶竖弯及扭转模态的动力

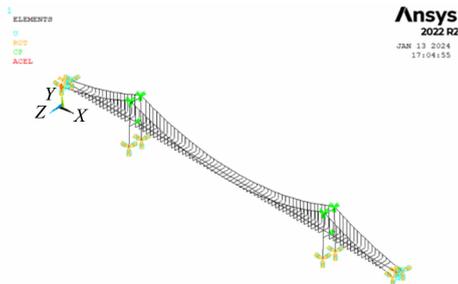


图 2 全桥有限元模型

Fig. 2 Finite elements model of full bridge

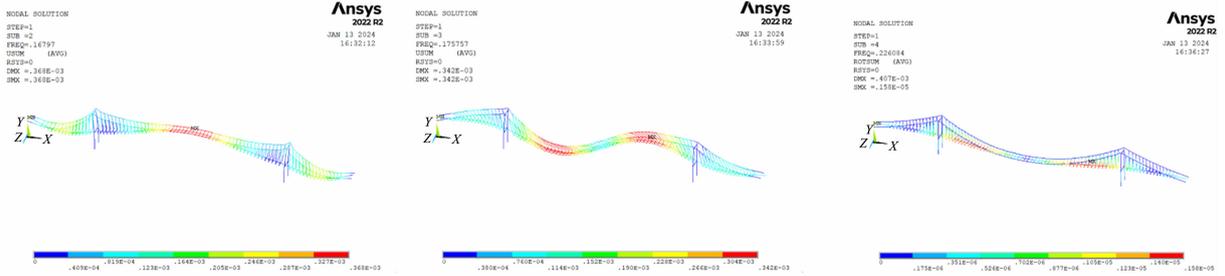
特性,如表1所示。表1中: $f$ 为频率。

表1 桥梁低阶竖弯及扭转模态的动力特性

Tab.1 Dynamic characteristics of low order vertical bending and torsional modes of bridge

编号	$f/\text{Hz}$	振型描述
1	0.167 97	主梁一阶对称竖弯
2	0.175 76	主梁二阶反对称竖弯
3	0.226 08	主梁一阶正对称扭转

桥梁模态振型图,如图3所示。



(a) 主梁一阶对称竖弯

(b) 主梁二阶反对称竖弯

(c) 主梁一阶正对称扭转

图3 桥梁模态振型图

Fig.3 Modal vibration mode of bridge

## 2 数值模拟方法

### 2.1 流体计算关系

静三分力系数是用于描述成桥主梁断面风荷载特性的无量纲参数,主要包括阻力系数( $C_D$ )、升力系数( $C_L$ )、扭矩系数( $C_M$ ),分别与因前后表面压强差而产生的阻力( $F_D$ )、上下表面压强差产生的升力( $F_L$ )、升阻力合力点与扭心不一致产生的扭矩( $M_T$ )有对应关系<sup>[13]</sup>。即

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho U^2 D}, \quad (1)$$

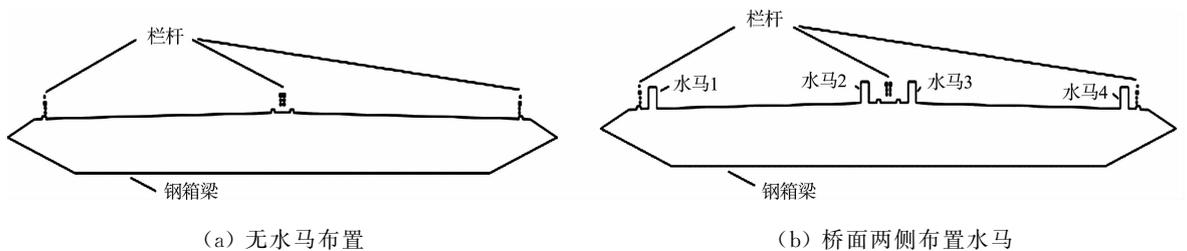
$$C_L = \frac{2F_L}{\rho U^2 B}, \quad (2)$$

$$C_M = \frac{2M_T}{\rho U^2 B^2}. \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $\rho$ 为流体密度,即空气密度 $1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $B$ 为桥梁断面的投影宽度;  $D$ 为桥梁断面的投影高度;  $U$ 为来风速。

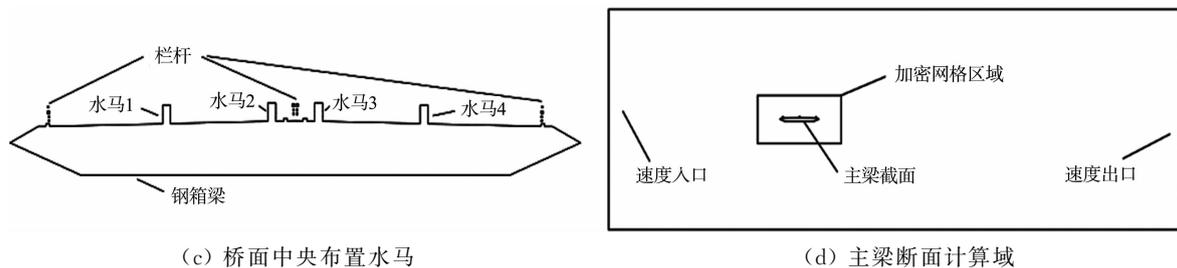
### 2.2 计算模型及工况设置

采用 Model Designer 软件建立悬索桥主梁断面简化缩尺模型<sup>[14]</sup>,模型分为钢箱梁截面、栏杆、桥面水马3个部分。整体流场计算域尺寸(宽×长)设置为 $18.3 \text{ m} \times 54.9 \text{ m}$ ,为使桥梁周围流场的模拟结果更为准确,加密网格流场区域尺寸(宽×长)设置为 $4 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ ,水马布置共计4排,由桥梁迎风侧至背风侧分别编号为水马1~4,水马断面宽度为 $0.5 \text{ m}$ ,高度为 $1.0 \text{ m}$ ,气动外形简化为矩形。各方案主梁断面模型及计算域,如图4所示。



(a) 无水马布置

(b) 桥面两侧布置水马



(c) 桥面中央布置水马

(d) 主梁断面计算域

图 4 不同水马布置方案的主梁断面模型及计算域

Fig. 4 Main girder section models and calculation domains for different barriers arrangements

桥面两侧布置水马的方案中,每个水马与栏杆的距离为 0.5 m;桥面中央布置水马的方案中,水马 1,4 分别放置于桥面 1/4 和 3/4 处,水马 2,3 与栏杆的距离均为 0.5 m。

### 2.3 计算方法

计算模型建立后,采用 Fluent Meshing 软件进行网格划分,采用面网格剖分方法,网格形式为非结构化三角形网格,外部流场单元尺寸设置为 2 000 mm,加密网格区域流场单元尺寸设置为 500 mm,为满足湍流模型对壁面  $Y^+$  值的要求,对栏杆等细小构件部分及主梁做边界层网格膨胀处理<sup>[15]</sup>。网格总节点数为 72 719,总单元数为 98 574。主梁断面周围流场网格划分,如图 5 所示。

为更好地得到主梁断面周围流场的参数,湍流模型选用 SST  $k-\omega$ ,流场入口速度根据工况设置选取,湍流强度为 0.5%。流场出口定义为压力出口,上下边界定义为对称边界。设置计算步数为 10 000 步,计算步长为 0.01 s(总计算区间时长为 100 s)。采用 SIMPLE 方法处理压力与速度的耦合关系。在计算过程中,选取主梁断面的阻力、升力、力矩、压强和速度作为计算步长监控的参数,输出结果并进行分析。涡激振动带有自激性质,但振动的结构反过来会对漩涡脱落形成某种反馈作用,使涡振振幅受到限制。取流场发展和变化趋势较为稳定的时间作为研究区间,即来流后的 50~100 s。

涡激振动往往发生在低风速情况下,因漩涡脱落的频率接近桥梁低阶振型频率而发生较大振幅的振动。为探究漩涡脱落频率与风速之间的关系,找到桥梁断面有可能发生涡激振动的风速区间,设置风速区间为 1~10  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,每次计算间隔为 1  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。通过统计桥梁断面的升力卓越频率,可得漩涡脱落频率-风速关系图,如图 6 所示。图 6 中:  $f_s$  为漩涡脱落频率;  $v$  为风速。由图 6 可知:发生涡激振动可能性较大的风速区间为 4~7  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,故选取该风速参数作为速度入口条件。

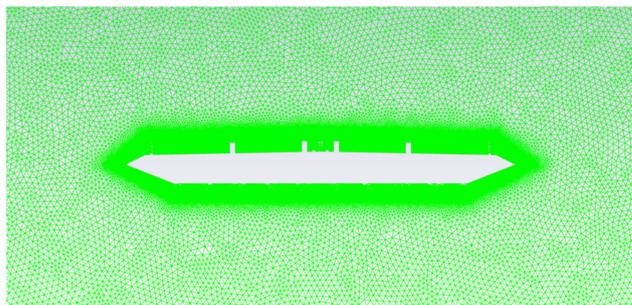


图 5 主梁断面周围流场网格划分

Fig. 5 Grid meshing of flow field around main girder section

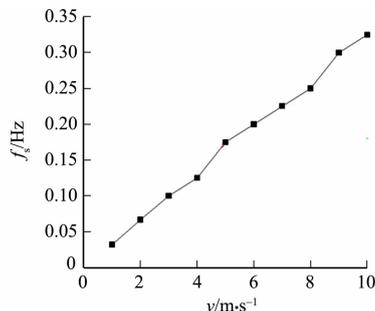


图 6 漩涡脱落频率-风速关系图

Fig. 6 Relationship diagram of vortex shedding frequency-wind speed

为研究水马布置对主梁断面周围流场的影响,探究桥梁发生涡激振动的机制,共设置 6 种工况。工况设置,如表 2 所示。

表 2 水马布置工况设置

Tab. 2 Setting of working conditions for barriers arrangement

工况	$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	水马布置	工况	$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	水马布置
1	4	无水马布置	4	7	无水马布置
2	4	桥面两侧布置水马	5	7	桥面两侧布置水马
3	4	桥面中央布置水马	6	7	桥面中央布置水马

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 静三分力系数

为研究不同风速情况下,不同水马布置方案对主梁断面静三分力系数的影响,采取CFD方法,选用 $0^\circ$ 风攻角对主梁断面周围流场进行数值模拟分析,可得各工况下的阻力、升力和扭矩时程图。设置较长的时间区间,使流场趋于稳定后,得到桥梁断面的阻力、升力和扭矩,分别根据式(1)~(3)计算对应的阻力系数、升力系数和扭矩系数。静三分力系数,如表3所示。

表3 不同风速下水马布置方案的静三分力系数

Tab. 3 Static three-component force coefficient of different wind speeds for barriers arrangement schemes

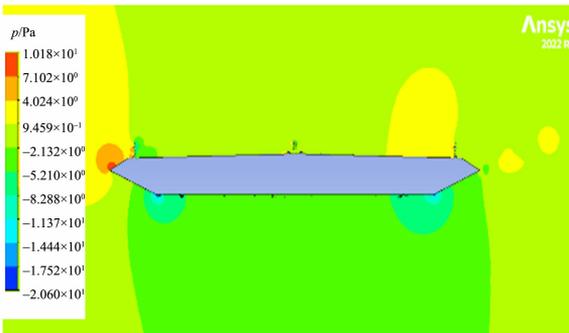
$v/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	水马布置	$C_D$	$C_L$	$C_M$
4	无水马布置	0.450 7	-0.279 6	0.013 6
4	桥面两侧布置水马	0.613 7	-0.238 3	0.002 3
4	桥面中央布置水马	0.509 8	-0.207 8	0.021 4
7	无水马布置	0.462 4	-0.288 3	0.013 5
7	桥面两侧布置水马	0.615 0	-0.240 6	0.003 5
7	桥面中央布置水马	0.498 1	-0.186 3	0.020 4

由表3可知:当桥梁断面的气动外形发生改变,如在桥面的两侧或中央布置水马时,在风速相同的情况下,静三分力系数发生较大的改变;阻力系数从大到小排序为桥面两侧布置水马、桥面中央布置水马、无水马布置,且阻力方向均为正向;升力系数绝对值从大到小排序为无水马布置、桥面两侧布置水马、桥面中央布置水马,且升力方向均为负向;扭矩系数从大到小排序为桥面中央布置水马、无水马布置、桥面两侧水马布置。因此,可推断桥梁断面的静三分力系数与水马的布置有较强的关联性。

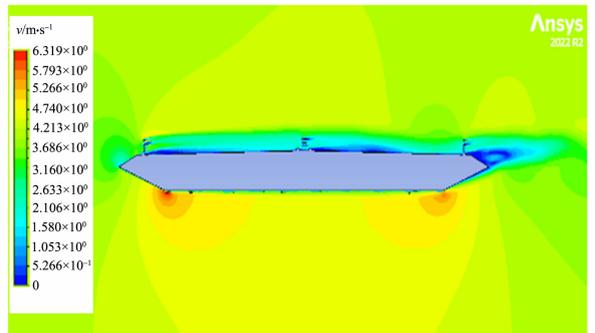
#### 3.2 不同工况下流场压力及速度分析

漩涡脱落导致的桥梁涡激振动是一个连续的过程,因此在数值模拟中采用瞬时计算迭代的方法计算每一步长的流场情况,设置合理的时间步数,最终叠加每一瞬时的流场情况,可得漩涡脱落持续时间内流场的持续变化过程。为了使计算结果更加精确,将时间步长设置为0.01 s。

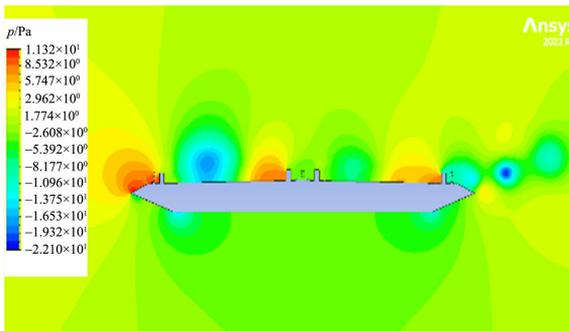
不同工况下流场模拟结果图,如图7所示。



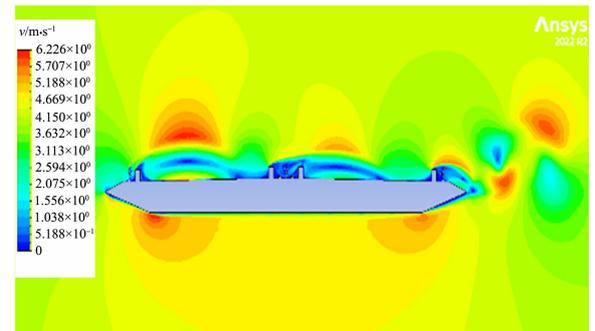
(a) 压力云图(工况 1)



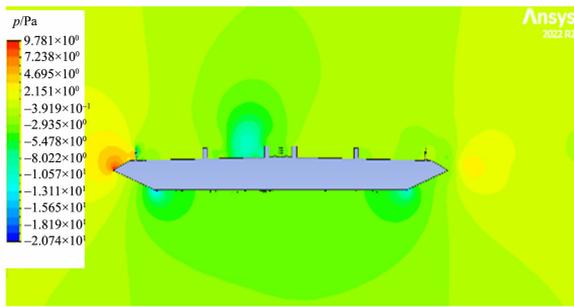
(b) 速度云图(工况 1)



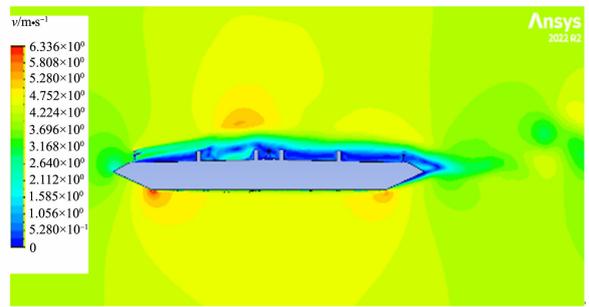
(c) 压力云图(工况 2)



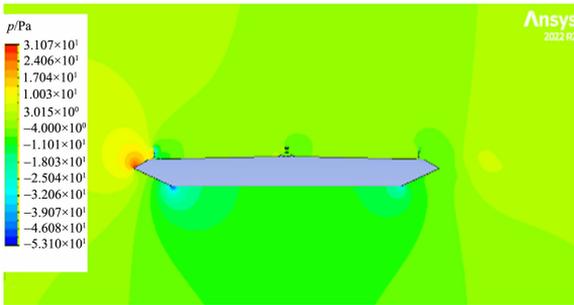
(d) 速度云图(工况 2)



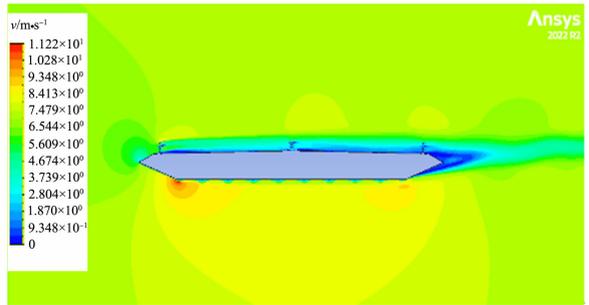
(e) 压力云图(工况 3)



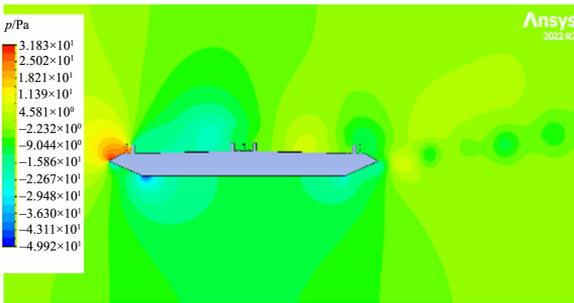
(f) 速度云图(工况 3)



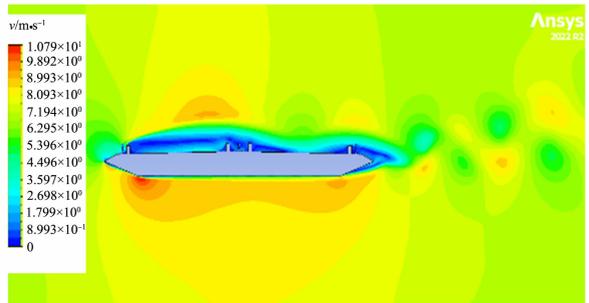
(g) 压力云图(工况 4)



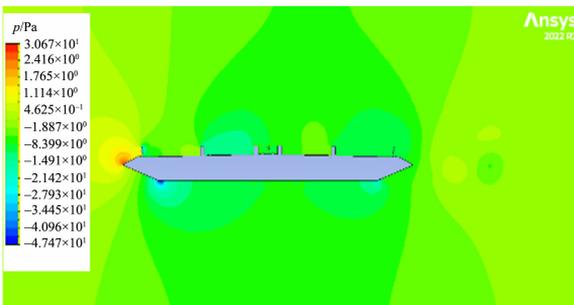
(h) 速度云图(工况 4)



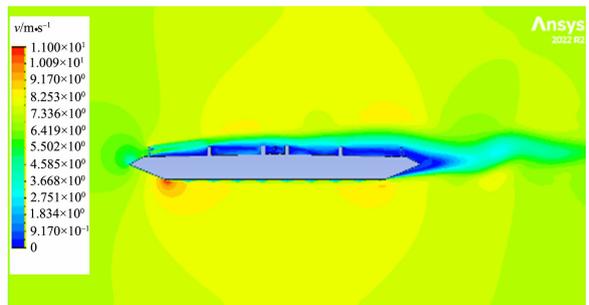
(i) 压力云图(工况 5)



(j) 速度云图(工况 5)



(k) 压力云图(工况 6)



(l) 速度云图(工况 6)

图 7 不同工况下流场模拟结果图

Fig. 7 Simulation result of flow field under different working conditions

由图 7 可知以下 6 个结论。

1) 当风荷载以一定速度流经主梁断面时,会在主梁钢箱梁迎风侧形成以风嘴为核心,逐渐向外扩散的正高压区,也会在钢箱梁截面底部的两个端点处形成范围较小的圆形负压区。

2) 流场速度沿钢箱梁边界梯度分布,越靠近钢箱梁表面速度越低,并在背风侧形成相同速度的漩涡,风速越大,主梁截面背风侧的涡量越大(图 7(b),(h))。

3) 工况 2,5(桥面两侧布置水马)发生明显的漩涡脱落现象,主梁背风侧可见明显的漩涡交替脱落,钢箱梁上端也因水马的阻隔作用出现较为明显的正负压交替分布;工况 3,6(桥面中央布置水马)也可于主梁背风侧观察到漩涡脱落现象,但相较于桥面两侧布置水马的工况并不明显。

4) 气流经过主梁截面风嘴时几乎沿着风嘴壁面运动,气流与壁面并未发生大角度碰撞,并在风嘴的分流下形成上、下两股气流,下端的气流因壁面边界层的粘性,始终沿着主梁截面下部行进至背风侧;上端气流受到了栏杆的阻挡,但由于栏杆镂空率较大,气流从栏杆截面间隔中穿过,沿着主梁上端截面流动,与下端气流汇聚于背风侧,形成上、下两个漩涡,二者共同作用下产生了一个较大的负压区(图7(a),(b),(g),(h))。

5) 在桥面两侧布置水马,气流经过迎风侧风嘴被分为上、下两股气流后,下端气流仍沿主梁断面下部行进至背风侧,上端的气流受到迎风侧水马1的阻隔,使上部气流沿着钢箱梁上壁面先分离,再附着,进而在1号水马后侧形成较大尺寸的漩涡(图7(c),(d),(i),(j))。上述现象同样发生在气流遭遇水马2~4的阻挡时,并分别形成了尺寸大小不一的漩涡。在上、下端气流在背风侧尾流区汇合后,因分离后的高速气流与低速漩涡之间的气压差交替变化,在主梁断面背风侧产生了较为明显的漩涡脱落现象。从相同的时间步长中脱落后的漩涡之间的距离大致相等可判断漩涡脱落有一个较为固定的卓越频率。

6) 在桥面中央布置水马,下端气流沿着主梁断面下部行进至背风侧。上端气流首先经过栏杆断面分流,受到水马1阻隔后,气流分离附着,在水马1前后各形成一个漩涡,且上端气流在经过水马2~4时也发生相同现象,前、后各产生1个大小相近的漩涡,并沿着钢箱梁上部截面连接形成扁平狭长的负压区。上端气流和下端气流各自产生一个大小不等的漩涡,并在分离气流的作用下发生较不显著的漩涡脱落现象(图7(e),(f),(k),(l))。

桥面两侧布置水马的情况能够发生较为显著的漩涡脱落现象,但工况2中,流场升力、扭矩卓越频率分别为0.110,0.139 Hz,与主梁一阶对称竖弯、主梁一阶正对称扭转模态频率相差较大,不会导致桥梁发生涡激振动。因此,取工况5为详细研究对象,若工况5的漩涡脱落频率与桥梁主要振型频率相近,则会发生共振现象,桥梁的涡激振动振幅也将大大增加,严重影响行车、行人的舒适性,甚至发生构件的疲劳破坏。

### 3.3 桥面水马布置对桥梁断面涡激振动的影响

为了进一步研究该桥梁断面在布置了桥面水马后是否会产生涡激振动,通过对比漩涡脱落频率与桥梁模态频率的方法来判断是否有共振现象的产生。

为研究桥面水马布置对于桥梁断面涡激振动的影响,选取具有代表性的工况5,6作为研究对象。漩涡脱落频率往往与升力、扭矩的变化频率相等,故选取升力、扭矩时程图,通过快速傅里叶变换(FFT)得到频谱图与漩涡脱落的卓越频率,进而判断桥梁断面是否会发生涡激振动。

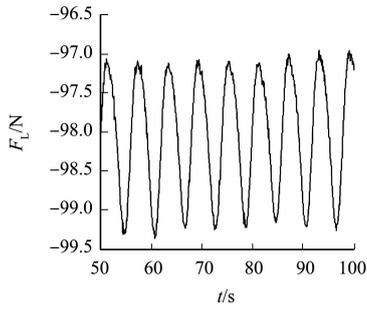
为了探究不同的水马布置对升力、扭矩的影响,分别选取工况5,6的升力、扭矩时程图为研究对象。当气流并未完全流经桥梁断面时,桥梁断面的升力、扭矩时程图并不规则且偏差较大。模拟结果显示,气流入口进入流场后50 s,桥梁升力、扭矩时程曲线的变化基本趋于稳定。因此,选取来流后50~100 s作为时程图横坐标。工况5,6的升力、扭矩时程图及频谱图,如图8,9所示。

对比图8,9可知:在桥梁断面上的不同位置布置水马,在流场的作用下,在主梁断面上产生的升力和扭矩的大小、频率、特征均有明显不同。

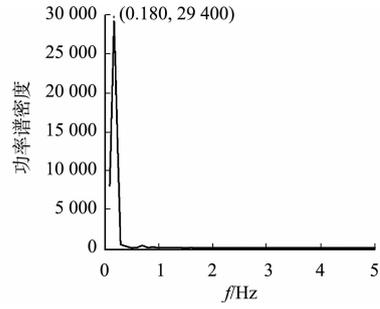
由图8可知:在风速为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,桥面两侧布置水马的情况下,主梁断面的升力、扭矩时程图呈明显的周期性变化,推测是漩涡脱落的频率固定导致的;主梁断面升力在 $-99.37 \sim -96.94 \text{ N}$ 波动,平均值为 $-98.01 \text{ N}$ ,方向竖直向下;升力的卓越频率为0.180 Hz,根据桥梁的动力特性分析,该卓越频率与主梁二阶反对称竖弯振型频率0.175 76 Hz接近,工况5在该模态下有可能产生桥梁的竖向涡激振动;工况5下主梁断面扭矩在 $102.21 \sim 169.51 \text{ N} \cdot \text{m}$ 周期性波动,平均值为 $135.45 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,方向为顺时针;扭矩的卓越频率为0.231 Hz,与桥梁的一阶正对称扭转模态振型频率0.226 09 Hz较接近,工况5在该模态下有可能产生桥梁的扭转涡激振动。

由图9可知:在风速为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,桥面中央布置水马的情况下,升力、扭矩时程图不再呈现类似工况5中明显的固定频率周期性变化,而是在发展一定时间后趋于平稳,但在早期仍有一定的波动;主梁断面升力在 $-92.71 \sim -72.18 \text{ N}$ 不规则波动,平均值为 $-78.54 \text{ N}$ ,方向竖直向下;升力的卓越频率为0.06 Hz,该卓越频率与桥梁各模态振型相差较大,推测工况6产生桥梁竖向涡激振动的可能性较小;主梁断面扭矩在 $264.32 \sim 410.28 \text{ N} \cdot \text{m}$ 不规则波动,平均值为 $307.62 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,方向为顺时针;扭矩存在多

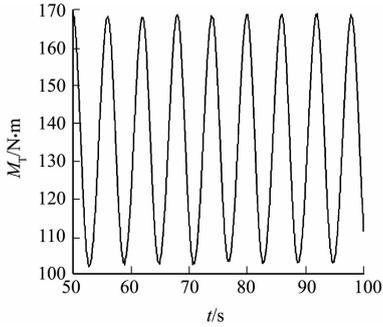
个卓越频率,分别为 0.02,0.12 Hz,扭矩时程曲线的卓越频率与桥梁扭转模态的频率差距较大,推测产生桥梁扭转涡激振动的可能性较小。



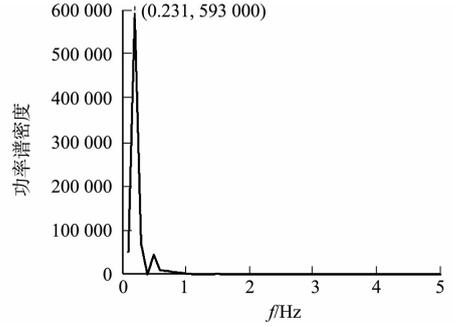
(a) 升力时程图



(b) 升力频谱图



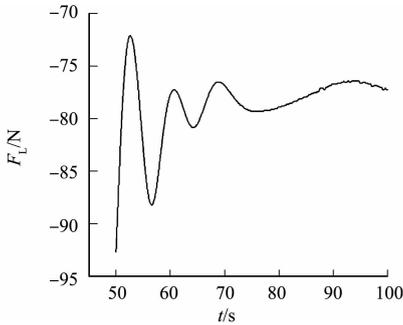
(c) 扭矩时程图



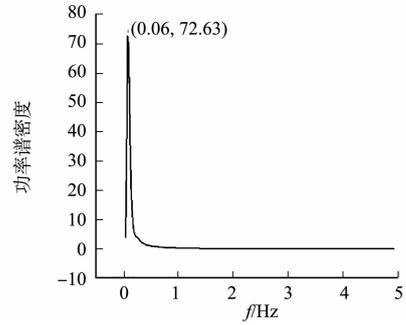
(d) 扭矩频谱图

图 8 工况 5 的升力和扭矩时程图及频谱图

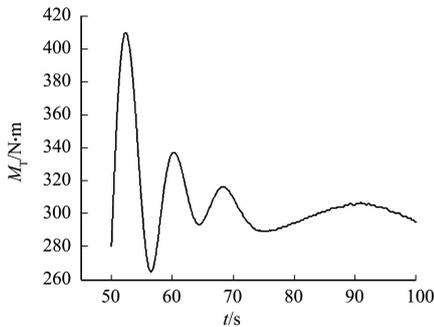
Fig. 8 Time-history diagram and spectrogram of lift and torque under working condition 5



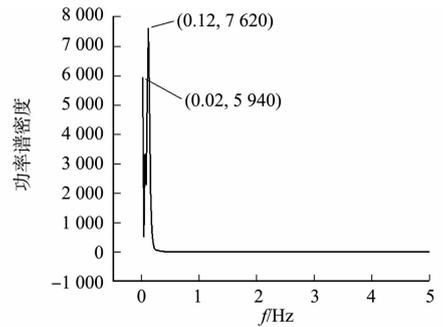
(a) 升力时程图



(b) 升力频谱图



(c) 扭矩时程图



(d) 扭矩频谱图

图 9 工况 6 的升力和扭矩时程图及频谱图

Fig. 9 Time-history diagram and spectrogram of lift and torque under working condition 6

由此可知:桥面中央布置水马相较于桥面两侧布置水马的升力、扭矩卓越频率与桥梁模态频率相差较大,在该布置方案下桥梁产生涡激振动的可能性较低。

## 4 结论

1) 截面尺寸较小的水马依然能够显著改变主梁断面的气动外形,导致桥梁在一定的风速区间内发生涡激振动。在桥面两侧布置水马的情况下,流体绕过水马这一“钝体”,在桥梁上部及背风侧出现明显的漩涡脱落现象。

2) 桥面两侧布置水马的工况下,  $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的风速处于桥梁发生涡激振动的风速区间内,推测桥梁在该工况下有较大可能发生大幅涡激振动。

3) 相较于桥面两侧布置水马,桥面中央布置水马的升力和扭矩卓越频率与桥梁一阶对称竖弯和一阶正对称扭转模态频率相差较大,且该工况下周围流场随着时间跨度的增大逐渐稳定,推测发生桥梁涡激振动的可能性较小。

4) 在桥梁两侧布置水马会提高桥梁在特定风速下发生涡激振动的可能性。在桥梁进行市政施工时,建议避免采用水马沿桥梁两侧摆放的布置方式。流体经过镂空率较大的栏杆时,并未在尾部产生漩涡脱落现象,建议使用开孔率较大的水马替代无孔水马,以降低桥梁涡激振动的风险。

### 参考文献:

- [1] FAZL E L, SCANLAN R H. Vortex-induced vibrations of flexible bridges[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1990, 116(6): 1392-1411. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9399(1990)116:6(1392).
- [2] 张志田, 陈政清. 桥梁节段与实桥涡激共振幅值的换算关系[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(7): 77-82. DOI: 10.15951/j.tmgexb.2011.07.009.
- [3] 祝志文, 石亚光, 颜爽. 带防撞栏杆扁平箱梁高阶模态涡激振动的 CFD 研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(10): 228-234, 277. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.10.029.
- [4] 陈平, 陈强草, 华旭刚, 等. 结构-尾流振子耦合模型参数识别及桥梁涡激振动预测[J]. *世界桥梁*, 2021, 49(2): 84-89. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2021.02.014.
- [5] 樊书文, 李永乐. 风嘴形式对桥梁断面三分力系数影响的数值模拟[J]. *四川建筑*, 2018, 38(3): 163-165.
- [6] 葛耀君, 赵林, 许坤. 大跨桥梁主梁涡激振动研究进展与思考[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(10): 1-18. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.10.001.
- [7] 华旭刚, 陈智文, 陈政清. 大跨度悬索桥的多阶模态竖向涡振与控制[J]. *中国公路学报*, 2019, 32(10): 115-124. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.10.011.
- [8] 黄俐, 周帅, 梁鹏. 桥梁断面两个涡振锁定区间的数值模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(11): 47-53, 73. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.11.008.
- [9] 王维民, 陈楚龙, 刘叶, 等. 竖弯涡振作用下桥上列车行车安全舒适性研究[J]. *桥梁建设*, 2023, 53(增刊 1): 38-45. DOI: 10.20051/j.issn.1003-4722.2023.S1.006.
- [10] SARWAR M W, ISHIHARA T. Numerical study on suppression of vortex-induced vibrations of box girder bridge section by aerodynamic countermeasures[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2010, 98(12): 701-711. DOI: 10.1007/s12205-018-0548-y.
- [11] 鲜荣, 廖海黎, 李明水. 大跨度桥梁主梁沿跨向涡激振动响应计算[J]. *西南交通大学学报*, 2008, 43(6): 740-746. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2008.06.011.
- [12] 陈精一, 蔡国忠. 电脑辅助工程分析 ANSYS 使用指南[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
- [13] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [14] NAKAMURA Y, OHYA Y, TSURUTA H. Experiments on vortex shedding from flat plates with square leading and trailing edges[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, 222: 437-447. DOI: 10.1017/S0022112091001167.
- [15] WISSINK J G. DNS of separating low Reynolds number flow in a turbine cascade with incoming wakes[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2003, 24(4): 626-635. DOI: 10.1016/S0142-727X(03)00056-0.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202310012



# 采用 WSR 方法论的塔吊坍塌 事故安全评价方法

祁神军, 汪丫, 陈晶晶, 张子晨

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为提高塔吊安全管理效率,采用物理-事理-人理(WSR)方法论构建塔吊坍塌事故安全评价体系。从物理层面基于塔吊的结构组成视角分析塔吊坍塌的主要风险致因;从事理层面梳理塔吊坍塌事故发生的内在机理,并建立塔吊坍塌事故树模型;从人理层面提出塔吊坍塌关键风险因素的应对措施;通过实例论证安全评价模型的可行性。研究表明:保护装置失效是塔吊坍塌事故树模型中最关键的风险因素,其关键重要度为 51.14%,加强塔吊设备安全隐患巡查、规范塔吊作业人员行为和优化塔吊运行安全监管能有效降低人不良思想和行为造成的物理风险。

**关键词:** 物理-事理-人理(WSR)方法论;塔吊坍塌;事故树;安全评价;基本事件

**中图分类号:** X 947 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2024)06-0721-09

## Safety Evaluation Method for Tower Crane Collapse Accidents Using WSR Methodology

QI Shenjun, WANG Ya, CHEN Jingjing, ZHANG Zichen

(School of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of tower crane safety management, a safety evaluation system for tower crane collapse accidents is constructed based on the Wuli-Shili-Renli (WSR) methodology. From Wuli level, the main risk causes of tower crane collapse are analysed based on the structural composition of the tower crane. From Shili level, the internal mechanism of tower crane collapse is sorted out, and the fault accident tree model of tower crane collapse is established. From Renli level, the countermeasures of key risk factors of tower crane collapse are proposed; and the feasibility of the safety evaluation model is demonstrated by examples. The research results show that the failure of protective devices is the most critical risk factor in the tower crane collapse accident tree model, with a critical importance degree of 51.14%, strengthening the inspection of hidden safety hazards of tower crane equipment, regulating the behaviour of tower crane operators and optimising the safety supervision of tower crane operation can effectively reduce Wuli risks caused by bad person thoughts and behaviours.

**Keywords:** Wuli-Shili-Renli (WSR) methodology; tower crane collapse; fault accident tree; safety evaluation; basic event

近年来,塔吊安全事故频繁发生,据 2012—2022 年的不完全统计,我国共发生 335 起塔吊事故<sup>[1]</sup>

收稿日期: 2023-10-16

通信作者: 祁神军(1982-),男,副教授,博士,主要从事建筑安全的研究。E-mail:qjsj972@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(71303082);福建省创新战略研究项目(2020R0055)

(其中 2019—2022 年的统计数据来源于网站 <https://www.safahoo.com/>),造成了 340 多人的伤亡和巨大的经济损失。其中,塔吊坍塌事故发生最为频繁、破坏性最大<sup>[2]</sup>。为了保障塔吊安全运行、预防安全事故发生、识别关键风险致因,对塔吊进行安全评价至关重要。

在塔吊风险因素方面,学者们从塔吊作业人员职业安全与健康<sup>[3]</sup>、机械故障<sup>[4]</sup>和塔吊工作原理<sup>[5]</sup>等视角分析塔吊在装、使用、维护全过程中的主要风险因素,但上述研究没有从塔吊的物理结构组成及安全事故风险发生机理的角度分析塔吊坍塌事故。塔吊物理结构不安全状态是导致塔吊坍塌的风险因素<sup>[6]</sup>,塔吊结构失效往往是因局部结构失效而最终引发塔吊体系整体的坍塌事故。事故树分析法可以通过梳理各事故原因间的逻辑关系,识别引发事故的关键风险因素<sup>[7]</sup>。在塔吊安全评价方面,Li 等<sup>[8]</sup>结合熵和累积前景理论,精确、合理地评价塔吊的安全状况;吴占稳等<sup>[9]</sup>通过采用改进熵权法和综合模糊法,建立塔吊安全评价模型,从而减少人的主观因素对安全评价的影响;Zhou 等<sup>[10]</sup>基于风险管理理论,应用 AcciMap 技术定性分析,建立通用的塔吊安全系统模型。然而,上述安全评价方法的系统性不够,对相关影响因素的考虑还不够全面。塔吊坍塌事故是由两个或多个基本事件同时作用的系统问题,需要对处于“临界状态”的系统采取措施,从而阻止潜在风险,避免塔吊安全事故的发生。物理-事理-人理(WSR)方法论是用于解决复杂系统问题的方法和工具<sup>[11]</sup>,主要应用于供应链管理<sup>[12]</sup>、安全生产管理<sup>[13]</sup>和企业管理<sup>[14]</sup>等领域。

因此,本文采用 WSR 方法论和安全评价,从塔吊的物理结构组成角度,建立塔吊坍塌事故安全评价的 WSR 理论框架,进一步从物理、事理和人理 3 个方面构建系统化的塔吊事故安全评价体系。

## 1 基于 WSR 方法论的塔吊坍塌安全评价机理

WSR 方法论是一种能够处理现实中复杂社会经济系统问题的方法论,具有普适性,是综合定性和定量分析方法的东方系统思想<sup>[11]</sup>。应用 WSR 方法论解决复杂系统问题的哲学思路是整体认识-分层研究-综合解决。塔吊坍塌事故是跨系统层面的多种因素共同作用的结果,而不是单独因素导致的。因此,采用 WSR 方法论构建塔吊坍塌事故安全评价模型,如图 1 所示。

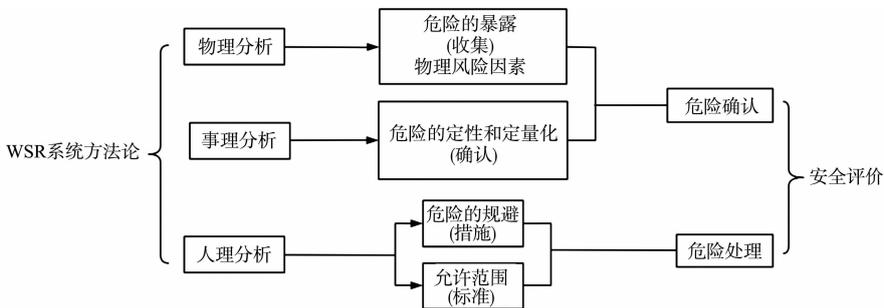


图 1 塔吊坍塌事故安全评价模型

Fig. 1 Safety evaluation model for tower crane collapse accidents

物理(W)是指客观规律世界的法则和规则,在塔吊安全评价体系中是指组织所拥有的塔吊设备及塔吊结构的组成规则<sup>[15]</sup>,可通过文献和事故案例分析塔吊的结构组成和塔吊坍塌的物理风险因素。事理(S)是指事物的机理,在塔吊安全评价体系中是指塔吊坍塌事故的内在逻辑,通过梳理塔吊坍塌事故的发生机理并建立塔吊坍塌的事故树模型,定性分析塔吊安全体系失效的潜在模式,定量识别塔吊坍塌的关键风险致因,实现对塔吊坍塌事故的综合安全评价。人理(R)是指组织协调社会关系,在塔吊安全评价体系中是指分析作业人员个体思想、行为安全,协调人之间的复杂关系,可依据安全评价结果,从人理维度对关键风险致因采取针对性应对措施。

通过物理、事理和人理三维度层层深入开展动态分析,识别塔吊坍塌事故系统中贡献度较大的关键风险因素,从而对关键风险因素采取针对性的预防措施,并在实际安全管理中给出关键性建议,以减少塔吊坍塌安全事故的发生。

## 2 塔吊坍塌事故的物理分析

通过收集塔吊事故发生的客观数据,发现塔吊坍塌是塔吊安全事故中最常见的类型。因此,基于塔吊上部结构-塔身-塔基的物理结构组成角度,分析塔吊坍塌事故的物理风险致因。

## 2.1 塔吊坍塌事故统计

通过收集和分析学者及网站整理 2012—2022 年我国发生塔吊安全事故类型的数据,得到统计图如图 2 所示。由图 2(a)可知:在塔吊安全事故中,塔吊坍塌事故发生最频繁,尤其是 2020 年和 2021 年发生的塔吊坍塌事故剧增。由图 2(b)可知:塔吊坍塌事故发生最频繁,概率为 60%;其次是构件脱落、吊物伤人和高处坠落事故,三者发生概率占总事故类型的 34%;发生频率相对较少的塔吊安全事故类型是塔吊碰撞和其他塔吊安全事故,仅占 6%。由此可知,塔吊坍塌事故约占总塔吊安全事故的 2/3,因此,重点关注和研究塔吊坍塌安全事故尤为重要。

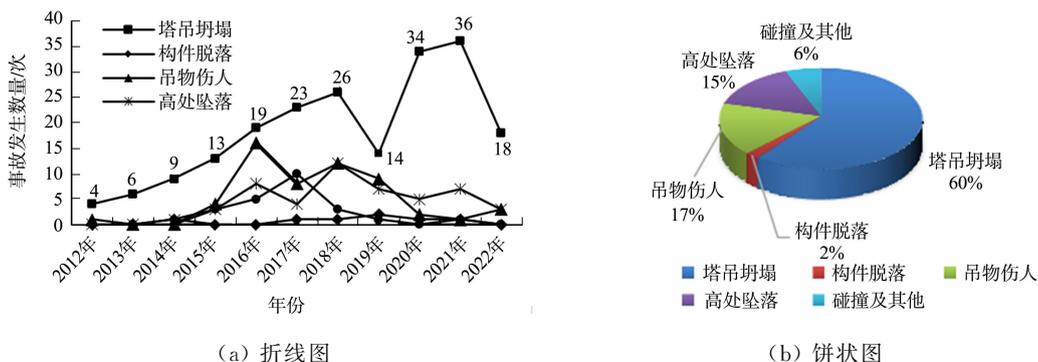


图 2 2012—2022 年塔吊安全事故统计图

Fig. 2 Statistical charts of tower crane safety accidents during 2012-2022

## 2.2 塔吊坍塌事故物理风险因素

基于所收集到的塔吊安全事故类型统计,从塔吊组成结构角度分析可总结为以下 3 种常见的塔吊坍塌事故致因。

1) 塔吊上部结构破坏。塔吊的上部结构主要包括塔帽、起重臂、平衡臂、和回转总成 4 个部分,结构破坏的主要原因为起重臂、平衡臂架折断,塔吊塔帽和回转标准节变形,顶升套架和塔顶标准节与下支座未连接。当力矩限制器失效、起重限制器失效、制动器设计缺陷、起升限位器开关损坏或违章超载使用时,会导致塔吊的起重臂和平衡臂失稳而发生折断,塔吊力矩失衡。

2) 塔吊塔身结构破坏。塔吊塔身主要是由标准节拼装而成,结构破坏的主要原因为标准节结构部件连接失效和塔身失稳。塔身标准节连接部位失效,塔身松脱散架,从而无法作为整体构件参与受力,导致塔身折断,引发塔吊倒塌。当塔身垂直度超标时,未及时校正塔身垂直度,容易导致塔身失稳而发生塔吊坍塌;另外,在大风天气条件下,风力会对塔臂施加力的效果,产生不利于塔身的力矩,此时若标准节在安装时未严格测量控制使得塔身垂直度超标,就会导致塔体的平衡力矩在逆风段处于危险状态。

3) 塔吊基础破坏。塔吊基础的稳固是影响整体稳定性的重要因素,塔吊基础破坏的主要原因为塔吊基础高强度地脚螺栓连接失效,塔吊基础混凝土强度不达标,塔吊基础沉降不均匀。塔基附近土壤出现扰动,塔吊螺栓出现锈蚀发生断裂,以及违规调整地脚螺栓位置,都会导致塔吊坍塌。雨季雨水长期冲刷塔吊基础,会导致塔吊基础不均匀沉降,最终发生塔吊坍塌事故。塔吊基础混凝土强度不达标,也会导致塔吊基础的承载力不足,造成塔吊坍塌事故。

## 3 塔吊坍塌事故的事理分析

以物理分析为基础,选择事故树分析法,在事理层面上对塔吊坍塌事故进行系统性安全综合评价,通过评价结果识别出系统中潜在的失效模式和关键风险致因,为塔吊安全管理提供理论依据。

### 3.1 塔吊坍塌事故树的构建

通过事故树分析法对塔吊坍塌事故进行安全分析和评价<sup>[16]</sup>。一般塔吊在安装后必须验收合格才能投入使用,因此,建立塔吊坍塌事故树模型的前提条件是施工单位不得使用质量不合格或受损未检修合格的塔吊。以塔吊坍塌事故为顶上事件,从塔吊的物理结构部位视角对塔吊坍塌事故进行分析,发现

塔吊坍塌事故主要致因分别为塔吊上部结构破坏、塔身结构破坏和塔吊基础破坏。结合事件之间的逻辑关系推理出可能导致顶上事件发生的基本事件,绘制相应的塔吊坍塌事故树,如图 3 所示。图 3 中基本事件的含义,如表 1 所示。

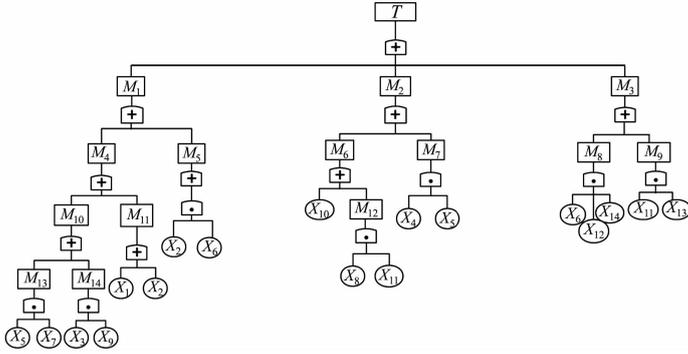


图 3 塔吊坍塌事故树模型

Fig. 3 Fault accident tree model of tower crane collapse

表 1 基本事件的含义

Tab. 1 Meaning of basic events

基本事件	含义	基本事件	含义	基本事件	含义
$T$	塔吊坍塌	$M_{10}$	平衡臂失稳	$X_6$	材料选用不合理
$M_1$	塔吊上部结构破坏	$M_{11}$	起重臂失稳	$X_7$	销轴安装不当
$M_2$	塔身结构破坏	$M_{12}$	塔吊垂直度偏差	$X_8$	采取的塔吊校直措施无效
$M_3$	塔吊基础破坏	$M_{13}$	塔臂连接失效	$X_9$	吊件滑脱冲击
$M_4$	上部结构局部失稳	$M_{14}$	荷载突变	$X_{10}$	强风
$M_5$	上部结构强度失效	$X_1$	保护装置失效	$X_{11}$	地基不平整
$M_6$	塔身失稳	$X_2$	违章超载	$X_{12}$	混凝土基础强度不足
$M_7$	标准节断裂	$X_3$	突然卸载	$X_{13}$	基础沉降不均匀
$M_8$	塔吊基础强度失效	$X_4$	螺栓型号选用不当	$X_{14}$	地脚螺栓松动
$M_9$	塔吊基础刚度失效	$X_5$	连接不牢固		

### 3.2 塔吊坍塌事故定性分析

利用布尔代数化简塔吊坍塌事故树模型,即

$$\begin{aligned}
 T &= M_1 + M_2 + M_3 = M_4 + M_5 + M_6 + M_7 + M_8 + M_9 = \\
 &(M_{13} + M_{14}) + M_{11} + X_2 X_6 + X_{10} + M_{12} + X_4 X_5 + X_6 X_{12} X_{14} + X_{11} X_{13} = \\
 &X_1 + X_2 + X_{10} + X_2 X_6 + X_4 X_5 + X_5 X_7 + X_3 X_9 + X_8 X_{11} + X_{11} X_{13} + X_6 X_{12} X_{14}。
 \end{aligned}$$

根据布尔代数化简后的事故树可知,塔吊坍塌事故发生的最小割集为

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \{X_1\}, & K_2 &= \{X_2\}, & K_3 &= \{X_{10}\}, & K_4 &= \{X_2, X_6\}, \\
 K_5 &= \{X_4, X_5\}, & K_6 &= \{X_5, X_7\}, & K_7 &= \{X_3, X_9\}, \\
 K_8 &= \{X_8, X_{11}\}, & K_9 &= \{X_{11}, X_{13}\}, & K_{10} &= \{X_6, X_{12}, X_{14}\}。
 \end{aligned}$$

建立的塔吊坍塌事故树有 10 个最小割集,即存在 10 种潜在的塔吊坍塌失效机制。例如,最小割集  $\{X_2, X_6\}$  表示当违章超载、材料选用不合理这两个基本事件同时发生时,可能会使塔吊上部结构失效,造成塔吊上部结构破坏,最终导致塔吊坍塌事故。

### 3.3 塔吊坍塌事故的定量分析

3.3.1 专家意见权重 调查邀请了 15 位来自施工总承包单位和塔吊租赁单位的专家对塔吊坍塌事故的致因进行评价,采用权重赋值法,尽量确保塔吊坍塌基本事件发生概率的准确性。专家均对塔吊较熟悉,学历均在本科及以上;工龄在 7 a 及以上的专家有 10 人,且 30 岁及以上的专家有 12 人。

在确定专家权重时分别选取塔吊熟悉度、工龄、年龄、学历 4 项因素,并将各因素细分为 3~4 个等级,采用强制比较法计算各专家权重<sup>[13]</sup>,计算公式为

$$A_{i,j}^l = \sum_{j=1}^4 W_{i,j} B_{i,l} \quad (1)$$

$$r_l = \sum_{i=1}^4 A_{i,j}^l W_i, \tag{2}$$

$$R_l = r_l / \sum_{l=1}^{15} r_l. \tag{3}$$

式(1)~(3)中: $A_{i,j}^l$ 为专家  $l$  在第  $i$  项指标第  $j$  级上的得分; $W_{i,j}$ 为项目划分后的级别权重; $W_i$ 为项目权重; $B_{i,l}$ 为指示函数, $B_{i,l}=1$ 表示第  $l$  位专家在第  $i$  项中属于第  $j$  级, $B_{i,l}=0$ 则表示第  $l$  位专家在第  $i$  项中不属于第  $j$  级; $r_l$ 为专家得分; $R_l$ 为分值归一化后得到的专家权重。

各指标权值赋予结果,如表 2 所示。利用强制比较法所得的专家权重,如表 3 所示。

表 2 指标赋权表

Tab. 2 Indicator weighting table

指标		指标级别		专家构成/人	指标		指标级别		专家构成/人		
项目	项目权重	级别	权重		项目	项目权重	级别	权重			
塔吊熟悉度	4	非常熟悉	3	2	年龄	2	50 岁以上	4	3		
		较熟悉	2				40~50 岁	3			
		一般	1				30~40 岁	2		7	
10 a 以上	4	9	30 岁以下	1			2				
工龄	3	7~10 a	3	1	学历	1	博士及以上	3	1		
		5~7 a	2				3	硕士		2	3
		5 a 以下	1				2	本科		1	11

表 3 专家权重

Tab. 3 Weight of experts

专家编号	权重	专家编号	权重	专家编号	权重	专家编号	权重
1	0.076 7	5	0.065 3	9	0.076 7	13	0.048 3
2	0.093 8	6	0.076 7	10	0.045 5	14	0.051 1
3	0.093 8	7	0.079 5	11	0.039 8	15	0.056 8
4	0.082 4	8	0.042 0	12	0.071 0		

3.3.2 基本事件发生概率 塔吊坍塌事故的基本事件发生概率的估算步骤如下。

1) 量化问卷。参照文献[17]将基本事件发生的可能性及严重程度对应关系用概率值划分为 6 个等级,分别得到 15 位专家对各基本事件发生概率的评价结果。

2) 赋权专家评价。对 15 位专家的评价意见进行权重赋值,将步骤 1)中获得的基本事件发生概率乘以专家权重后,得到赋权后的各基本事件的发生概率。经过专家权重赋值筛选后的数据更有参考价值。各基本事件的发生概率,如表 4 所示。

表 4 基本事件的发生概率

Tab. 4 Probability of occurrence of basic events

基本事件	概率	基本事件	概率
$X_1$	0.49	$X_8$	0.36
$X_2$	0.52	$X_9$	0.38
$X_3$	0.36	$X_{10}$	0.40
$X_4$	0.44	$X_{11}$	0.30
$X_5$	0.63	$X_{12}$	0.36
$X_6$	0.47	$X_{13}$	0.46
$X_7$	0.53	$X_{14}$	0.53

3.3.3 顶上事件概率 在研究大量实际工程资料的基础上,依据 15 位具有丰富工程经验专家的评分计算基本事件的发生概率,从而计算顶上事件的发生概率,即

$$P(T) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i). \tag{4}$$

式(4)中: $P(T)$ 为顶上事件  $T$  的概率值; $q_i$ 为第  $i$  个基本事件的发生概率。

将所得基本事件的发生概率代入式(4),可得该塔吊坍塌事故发生的概率  $P(T)=0.967 6$ ,即当所有基本事件同时发生时,塔吊坍塌事故树模型中顶上事件的发生概率为 0.967 6。这说明在各基本事件排列组合发生时,顶上事件发生是一个极大必然事件,因此,需高度重视安全管理以降低基本事件的发生概率,从而减少塔吊坍塌事故的发生。

3.3.4 概率重要度和关键重要度 在求得顶上事件的发生概率后,依据基本事件的概率重要度  $I_g(i)$  和关键重要度  $I_c(i)$ ,分析得到危险性最大的基本事件,其计算式为

$$I_g(i) = \frac{\partial P(T)}{\partial q_i}, \quad (5)$$

$$I_c(i) = \frac{\partial P(T)}{\partial q_i} \frac{q_i}{P(T)}. \quad (6)$$

根据式(5),(6)计算出基本事件的概率重要度和关键重要度,结果如表5所示。由表5可知:概率重要度排序结果为  $I_g(1) = I_g(10) > I_g(5) > I_g(2) > I_g(4) = I_g(7) > I_g(11) > I_g(3) > I_g(9) > I_g(6) > I_g(8) = I_g(13) > I_g(12) = I_g(14)$ ;关键重要度排序结果为  $I_c(5) > I_c(1) > I_c(10) > I_c(2) > I_c(7) > I_c(4) > I_c(6) > I_c(11) = I_c(13) > I_c(9) = I_c(3) > I_c(8) > I_c(12) > I_c(14)$ 。

表5 概率重要度和关键重要度计算结果

Tab. 5 Calculation results of probability importance and critical importance

基本事件	$I_g(i)/\%$	$I_c(i)/\%$	基本事件	$I_g(i)/\%$	$I_c(i)/\%$
$X_1$	100.00	51.14	$X_8$	30.00	11.16
$X_2$	67.00	36.01	$X_9$	36.00	14.14
$X_3$	38.00	14.14	$X_{10}$	100.00	41.34
$X_4$	63.00	28.65	$X_{11}$	46.00	14.26
$X_5$	97.00	62.67	$X_{12}$	25.00	9.30
$X_6$	33.00	16.03	$X_{13}$	30.00	14.26
$X_7$	63.00	34.62	$X_{14}$	17.00	9.31

根据概率重要度的性质<sup>[18]</sup>,由上述排序结果可知:采取措施降低突然卸载、吊件滑脱冲击和强风等基本事件的发生,能有效降低塔吊坍塌事故的发生概率。然而,基本事件的概率重要度并未考虑基本事件自身的发生概率是否容易改变,因此,采用关键重要度从基本事件发生概率和敏感度两个方面共同反映基本事件的重要程度。

由概率重要度和关键重要度的排序结果可知,基本事件的概率重要度和关键重要度的排序基本一致,但基本事件中的突然卸载( $X_3$ )、销轴安装不当( $X_7$ )、地基不平整( $X_{11}$ )的重要性下降了。这说明虽然突然卸载( $X_3$ )、销轴安装不当( $X_7$ )、地基不平整( $X_{11}$ )这3个基本事件可以有效降低塔吊坍塌事故的发生概率,但要从实际上采取措施降低这3个基本事件自身的发生概率比较困难。而基本事件连接不牢固( $X_5$ )、材料选用不合理( $X_6$ )、基础沉降不均匀( $X_{13}$ )的重要性上升了,说明在塔吊坍塌的事故树体系中连接不牢固( $X_5$ )、材料选用不合理( $X_6$ )、基础沉降不均匀( $X_{13}$ )是敏感度较高且比较容易采取措施实现降低塔吊坍塌事故发生的风险因素。由上述分析可知,相比于概率重要度,关键重要度更能反映事故树的本质,更有实际意义。因此,主要采用关键重要度来分析基本事件的重要程度。除此之外,考虑概率重要度和关键重要度均比较大的基本事件也十分必要。

因此,根据关键重要度排序结果及概率重要度和关键重要度排名前6基本事件的交叉事件可知:保护装置失效( $X_1$ )、违章超载( $X_2$ )、螺栓型号选用不当( $X_4$ )、连接不牢固( $X_5$ )、销轴安装不当( $X_7$ )、强风( $X_{10}$ )是塔吊坍塌事故树中的关键基本事件。其中,基本事件中的保护装置失效( $X_1$ )既极易引发塔吊坍塌事故发生,又容易通过采取措施减小其发生概率,其关键重要度为51.14%,因此,应重点预防保护装置失效( $X_1$ )的发生。

## 4 塔吊坍塌事故的人理分析

物的不安全状态最终可归结为人的不足,人理分析主要通过组织或人协调人与社会、人与人之间的关系,避免因人或社会因素干扰引发安全事故<sup>[19]</sup>。由上述塔吊坍塌事故树模型安全评价结果分析可知:保护装置失效( $X_1$ )、违章超载( $X_2$ )、螺栓型号选用不当( $X_4$ )、连接不牢固( $X_5$ )、销轴安装不当( $X_7$ )、强风( $X_{10}$ )这6个风险因素是塔吊坍塌事故的主要致因,研究结果与赵挺生等<sup>[20]</sup>、Raviv等<sup>[21]</sup>、李凯等<sup>[22]</sup>的部分研究结论一致,但在研究视角和方法上存在一定的差异。

从塔吊结构组成视角识别影响其物理安全状态的风险因素,进而从物理的不安全状态中分析出人的管理或行为上的不足。赵挺生等<sup>[20]</sup>从环境与设备、人员、管理、塔吊参与单位、监管机构等5个层面定性研究,得出塔吊管理人员安全隐患巡查不到位、塔吊维修保养责任人未按要求保养设备,以及塔吊

的安装和拆卸相关人员的资质不合格导致了保护装置失效( $X_1$ )、螺栓型号选用不当( $X_4$ )、连接不牢固( $X_5$ )、销轴安装不当( $X_7$ );Raviv等<sup>[21]</sup>从人为因素和环境因素的视角研究,得出塔吊操作人员进行塔吊生产作业时存在违章超载( $X_2$ )操作,容易引发塔吊坍塌事故;李凯等<sup>[22]</sup>基于案例推理,得出在大风环境下相关管理人员安全监管疏忽,未能及时制止塔吊作业人员在强风( $X_{10}$ )条件下进行塔吊吊装作业等因素会造成塔吊坍塌事故。由上述分析可知,塔吊的安全运行与塔吊管理人员、塔吊维修保养责任人、塔吊安装拆卸人员和塔吊操作人员的行为均存在一定关联。因此,从塔吊相关人员的视角提出3个塔吊坍塌预防措施:1)加强塔吊设备安全隐患巡查( $X_1, X_4, X_5, X_7$ );2)规范塔吊作业人员的行为( $X_2$ );3)优化塔吊运行安全管控( $X_{10}$ )。

#### 4.1 加强塔吊设备安全隐患巡查

塔吊由于其本身的危险性质,对其进行日常的运行检查和安全检查风险大,若要将各个连接件部位细致地检查一遍,需要检查人员冒很大的安全风险,且人工的检测效率很低。这样很容易忽略难以被检查到的连接件部位,从而埋下极大的安全隐患。

建筑施工企业可以考虑运用感应系统对塔吊的保护装置进行实时监测,以便作业人员在作业前了解塔吊保护装置系统是否处于正常状态,实现高效管理塔吊的保护装置。对于连接件部位,需要认真地检查各种连接螺栓,实时更新各关键连接节点的安全状态,并及时向上级汇报塔吊运行过程中存在的隐患,从而采取有效措施解决问题。除此之外,维修保养责任人还可以采用无人机巡查系统对连接螺栓的各连接件部位进行巡查,可视化管理巡查结果,预警潜在问题,这样不仅大大提高了巡查效率,还保障了巡查安全。

#### 4.2 规范塔吊作业人员的行为

由于大部分塔吊事故与人的不安全行为相关<sup>[23]</sup>,因此,从改变人的思想和行为方面,针对性地采取塔吊坍塌事故预防措施,能避免人的过失所导致的塔吊坍塌事故,进而有效减少塔吊坍塌事故的发生。

在安全意识和个人素质方面,加强操作员的思想教育,积极开展岗位安全知识教育、岗位操作规程教育和安全技术规程教育等,在思想上引导塔吊操作人员重视塔吊的安全生产,从而做到安全地进行塔吊相关的生产活动。在工作行为方面,严格管控,加强对塔吊相关工作人员的考核与检查工作,时刻关注工作人员工作时的情绪反应,及时纠正不安全行为操作和违规的不良习惯。严格执行各项规范制度,要求特种工持证上岗。

#### 4.3 优化塔吊运行安全管控

建筑施工的特点是人员多、工作环境复杂,塔吊一旦发生坍塌事故,极易造成人群体伤亡。塔吊安全管理与塔吊的安全生产作业密切相关,因此,进一步加强安全管理措施,可以有效地降低塔吊坍塌事故发生的风险。

塔吊的安全评价结果表明,应加强对强风天气下塔吊运行状态的安全监管。强风天气条件下,施工条件更加严苛,安全管理人员应考虑运用信息采集系统实时监控风速,通过APP终端显示器,设定有助于塔吊安全作业的相关参数,实时查看塔吊运行状态。当塔吊作业环境的风速值超出设定的参数值时,感应系统会自动报警并发出指令使塔吊停止运行,从源头上避免塔吊安全事故的发生。

## 5 实例分析

### 5.1 工程概述

2019年1月23日,某建设工程项目10号楼塔式起重机在进行拆卸作业时发生一起坍塌事故,事故造成5人死亡,造成经济损失580余万元<sup>[24]</sup>。专家团队判定事故的结果是塔吊在拆除作业时顶升过程中未使用顶升防脱装置、横梁销栓未可靠落入踏步圆槽、未配平塔臂就移动小车变幅等直接原因造成了塔吊坍塌。

### 5.2 塔吊坍塌事故安全评价结果

基于专家团队的事后原因判定结果,物理分析得出该案例中塔吊坍塌事的物理风险致因包括未使用顶升防脱装置( $X_1$ )、横梁销栓未可靠落入踏步圆槽( $X_5, X_7$ )。结合图1的塔吊坍塌事故树模型,事

理分析得到案例中塔吊坍塌事故的发生机制,如图4所示。

利用塔吊坍塌事故树模型分析本案例可知:最小割集 $\{X_1\}$ 和 $\{X_5, X_7\}$ 是塔吊坍塌事故致因的两种基本组合方式。若仅最小割集 $\{X_1\}$ 发生,求得 $P(T)=0.49$ ;当仅最小割集 $\{X_5, X_7\}$ 发生,求得 $P(T)=0.55$ ;当最小割集 $\{X_1\}$ 和 $\{X_5, X_7\}$ 同时发生,可求得 $P(T)=0.77$ 。计算本案例中基本事件的概率重要度和关键重要度,结果如表6所示,得到概率重要度和关键重要度的排序结果分别为 $I_g(1)=I_g(5)>I_g(7), I_c(5)>I_c(7)>I_c(1)$ 。

由上述分析可知,该塔吊坍塌事故案例的发生机理与建立的塔吊事故树模型发生机理基本吻合,证明了所建立的塔吊事故树模型的可靠性和科学性。

根据事理分析评价结果可知,保护装置失效( $X_1$ )、连接不牢固( $X_5$ )、销轴安装不当( $X_7$ )是导致本案例塔吊发生坍塌事故的主要物理风险致因,且当这3个基本事件同时发生时,塔吊坍塌事故的发生概率达到0.77,其中,连接不牢固( $X_5$ )是最关键的风险致因,关键重要度达到64.60%。

根据人理分析可知,案例中的塔吊坍塌事故是由安全管理不当、安全检查不到位和人的操作失误共同造成的。调查报告中指出,施工和监理单位安全生产监管不到位、无特种作业证人员进行塔吊拆卸作业,以及卫队塔吊拆卸人员进行安全教育和技术交底等原因引发了塔吊坍塌事故,与文中得到的安全评价结果基本一致。为避免此类塔吊坍塌事故再次发生,管理人员应加强安全管理,重点检查塔吊连接部位的连接情况,避免施工现场的安全管理失控行为;提高施工人员的安全生产意识,杜绝无证上岗行为。

## 6 结论

基于WSR方法论提出塔吊坍塌事故安全评价体系,建立塔吊坍塌事故风险评价模型,从塔吊结构组成视角综合定性和定量方法,系统、全面地识别塔吊坍塌事故的关键风险因素,并提出针对性的应对措施。由上述分析得出以下4个主要结论。

1) 塔吊坍塌安全风险评价模型中存在10种导致塔吊坍塌事故发生的潜在失效机制。

2) 塔吊的保护装置失效( $X_1$ )、违章超载( $X_2$ )、螺栓型号选用不当( $X_4$ )、连接不牢固( $X_5$ )、销轴安装不当( $X_7$ )、强风( $X_{10}$ )是导致塔吊坍塌的关键风险因素,其中,保护装置失效( $X_1$ )是塔吊坍塌事故体系中贡献度最大的风险致因。

3) 通过塔吊坍塌风险评价模型对某建设项目塔吊坍塌事故进行安全评估,研究结果显示,塔吊的保护装置失效( $X_1$ )、连接不牢固( $X_5$ )、销轴安装不当( $X_7$ )是导致该案例塔吊坍塌事故发生的關鍵风险因素,其中,连接不牢固( $X_5$ )是最关键的风险因素,关键重要度达到64.60%。

4) 加强塔吊设备安全隐患巡查、规范塔吊作业人员的行为和优化塔吊运行安全管控等风险应对措施是有效的。

文中研究仅确定了塔吊坍塌事故的关键影响因素,对于次要因素的分析有待在后续研究中进一步开展,并结合工程实际案例更加系统全面地提出更有针对性的塔吊坍塌预防措施。

## 参考文献:

- [1] 况宇琦. 基于数据挖掘的塔吊事故案例分析研究[D]. 武汉:华中科技大学,2021.
- [2] 唐凯,陈陆,张洲境,等. 我国建筑施工行业生产安全事故统计分析及对策[J]. 建筑安全,2020,35(9):40-43. DOI: 10.3969/j.issn.1004-552X.2020.09.014.
- [3] BALAN E D A, HASMORI M F B. A study of tower crane accidents and its mitigation measures from tower crane operator perspectives[J]. Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment,2022,1(3):1484-1891.

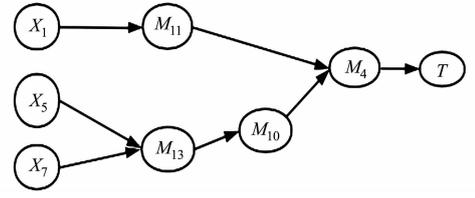


图4 塔吊坍塌事故的发生机制

Fig. 4 Mechanism of tower crane collapse accidents

表6 案例中基本事件的概率重要度和关键重要度

Tab. 6 Probabilistic importance and critical importance of basic events in cases

基本事件	$I_g(i)/\%$	$I_c(i)/\%$
$X_1$	100.00	51.14
$X_5$	100.00	64.60
$X_7$	63.00	34.35

- [4] RADLOV K, IVANOV G. Analysis of accidents with tower cranes on construction sites and recommendations for their prevention[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 951(1): 12-25. DOI: 10.1088/1757-899X/951/1/012025.
- [5] 王金辉,郝伟,陶泽,等.基于模糊贝叶斯网络的塔吊作业安全风险评估[J].安全与环境工程,2021,28(4):15-20. DOI:10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20200828.
- [6] 孔留全,李海涛,纪健强,等.塔式起重机事故案例分析及预防措施[J].建筑安全,2020,35(12):32-34. DOI:10.3969/j.issn.1004-552X.2020.12.010.
- [7] 赵挺生,周炜,徐凯,等.建筑工程塔吊安全影响因素分析[J].工业安全与环保,2019,45(2):17-22. DOI:10.3969/j.issn.1001-425X.2019.02.005.
- [8] LI Aihua, ZHAO Zhangyan. Crane safety assessment method based on entropy and cumulative prospect theory[J]. Entropy, 2017, 19(1): 44-45. DOI: 10.3390/e19010044.
- [9] 吴占稳,张文.改进熵权法及其在起重机安全评价中的应用[J].机械设计与研究,2022,38(1):207-210. DOI:10.13952/j.cnki.jofmdr.2022.0071.
- [10] ZHOU Wei, ZHAO Tingsheng, LIU Wen, *et al.* Tower crane safety on construction sites: A complex sociotechnical system perspective[J]. Safety Science, 2018, 109: 95-108. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.05.001.
- [11] 寇晓东,顾基发.物理-事理-人理系统方法论25周年回顾:溯源、释义、比较与前瞻[J].管理评论,2021,33(5):3-14. DOI:10.14120/j.cnki.cn11-5057/f.20201231.004.
- [12] 刘家国,孔玉丹,周欢,等.供应链风险管理的物理-事理-人理方法研究[J].系统工程学报,2018,33(3):298-307. DOI:10.13383/j.cnki.jse.2018.03.002.
- [13] 刘春登.水利工程安全评价及安全管理系统分析[J].治淮,2022(11):63-64. DOI:10.3969/j.issn.1001-9243.2022.11.032.
- [14] 柳长森,郭建华,金浩,等.基于WSR方法论的企业安全风险管控模式研究:“11·22”中石化管道泄漏爆炸事故案例分析[J].管理评论,2017,29(1):265-272. DOI:10.14120/j.cnki.cn11-5057/f.2017.01.026.
- [15] 陈涛,赵金先,蒋克洁.基于WSR与C-OWA的地铁盾构施工安全管理模糊评价研究[J].工程管理学报,2019,33(5):68-73. DOI:10.13991/j.cnki.jem.2019.05.013.
- [16] 刘家亮,郭翠静,汪奂伶.基于火灾事故树模型的储能锂离子电池安全性检测方法与验证[J].储能科学与技术,2023,12(5):1-10. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0039.
- [17] 胡平.多标段建筑群施工塔吊的选型和平面布置要点[J].建筑安全,2022,37(6):46-49. DOI:10.3969/j.issn.1004-552X.2022.06.013.
- [18] 何立华,魏琪,李奕睿.基于故障树和贝叶斯网络的建筑施工火灾风险评价[J].工程管理学报,2017,31(5):107-111. DOI:10.13991/j.cnki.jem.2017.05.020.
- [19] 周欢,刘家国.港口危化品物流风险管理的WSR模型研究[J].管理评论,2021,33(5):142-151. DOI:10.14120/j.cnki.cn11-5057/f.20201231.008.
- [20] 赵挺生,周炜,徐凯,等.复杂社会技术系统下的塔吊安全思考[J].中国安全科学学报,2018,28(6):153-159. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2018.06.026.
- [21] RAVIV G, FISHBAIN B, SHAPIRA A. Analyzing risk factors in crane-related near-miss and accident reports[J]. Safety Science, 2017, 91: 192-205. DOI: 10.1016/j.ssci.2016.08.022.
- [22] 李凯,谈秉峰.大风环境下主塔安全防范措施[J].筑路机械与施工机械化,2018,35(5):94-97. DOI:10.3969/j.issn.1000-033X.2018.05.016.
- [23] 况宇琦,赵挺生,蒋灵,等.塔式起重机事故案例关联规则挖掘与分析[J].中国安全科学学报,2021,31(7):137-142. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.07.019.
- [24] 岳阳市市应急管理局.华容县华容明珠三期工程项目“1·23”较大塔式起重机坍塌事故调查报告[EB/OL]. (2019-07-23)[2023-09-25]. [https://www.yueyang.gov.cn/ztxx/62333/62439/62442/content\\_1583121.html](https://www.yueyang.gov.cn/ztxx/62333/62439/62442/content_1583121.html).

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202403028



# 厦门杏林湾水库底泥有机质和营养盐的分布特征与来源及污染评价

李静<sup>1</sup>, 唐雪平<sup>2</sup>, 庄马展<sup>2</sup>, 李飞<sup>1</sup>, 周真明<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 厦门市环境科学研究院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 以厦门杏林湾水库为研究对象,测定表层底泥中有机质(OM)、总氮(TN)、游离态氮(FN)、可交换态氮(EN)、酸解态氮(HN)、残渣态氮(RN)、总磷(TP)、有机磷(OP)、无机磷(IP)、铁铝结合态磷(NaOH-P)和钙结合态磷(HCl-P)的质量比,分析表层底泥中有机质及营养盐的分布特征和污染状况。结果表明:杏林湾水库底泥中 OM, TN 和 TP 的平均质量比分别为 49 360.28, 1 588.63, 1 095.63 mg · kg<sup>-1</sup>; OM, TN, EN 和 HN 的空间分布呈现从后溪汇入处至入海口处先增加后减小、从九天湖排洪渠和董任排洪渠交汇处至入海口处逐渐减小的特征; TP, IP, NaOH-P 和 HCl-P 的空间分布呈现随水流方向逐渐减小的特征;底泥具有较高氮磷释放风险,易发生富营养化问题,其中,氮主要来源于有机质富集,磷主要来源于上游支流及周边地区含磷农业废水和居民生活污水,OM 主要来源于高等植物;氮、磷单项污染指数和综合污染指数整体上均处于重度污染,营养盐污染主要来源于氮,有机指数整体处于尚清洁水平,且底泥整体受到有机氮污染。

**关键词:** 底泥; 有机质; 营养盐; 杏林湾水库; 空间分布; 污染评价; 来源分析

**中图分类号:** X 52 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2024)06-0730-10

## Distribution Characteristics, Sources and Pollution Evaluation of Organic Matter and Nutrient Salts in Sediment of Xinglin Bay Reservoir in Xiamen City

LI Jing<sup>1</sup>, TANG Xueping<sup>2</sup>, ZHUANG Mazhan<sup>2</sup>,  
LI Fei<sup>1</sup>, ZHOU Zhenming<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Xiamen Institute of Environmental Science, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Taking Xinglin Bay Reservoir in Xiamen City as the research object, the mass ratios of organic matter (OM), total nitrogen (TN), free nitrogen (FN), exchangeable nitrogen (EN), acid solution nitrogen (HN), residual nitrogen (RN), total phosphorus (TP), organic phosphorus (OP), inorganic phosphorus (IP), iron/aluminum combined phosphorus (NaOH-P) and calcium combined phosphorus (HCl-P) in the surface sediment were measured, and the distribution characteristics and pollution status of organic matter and nutrient salts in the surface sediment were analyzed. The results showed that the average mass ratios of OM, TN and TP in the sediment of Xinglin Bay Reservoir were 49 360.28, 1 588.63 and 1 095.63 mg · kg<sup>-1</sup>, respec-

**收稿日期:** 2024-03-16

**通信作者:** 周真明(1981-),男,教授,博士,主要从事底泥/沉积物治理及资源化理论与技术的研究。E-mail: zhenming@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51878300);福建省厦门市自然科学基金资助项目(3502Z202373041)

tively; the spatial distribution of OM, TN, EN and HN showed an increase and then a decrease from the confluence of Hou River to the estuary, and a gradual decrease from the confluence of Jiutian Lake and Dongren Drainage Canals to the estuary; the spatial distribution of TP, IP, NaOH-P and HCl-P showed a gradual decrease with the direction of water flow; the sediment had a high risk of nitrogen and phosphorus release, and was prone to eutrophication, of which, nitrogen mainly came from organic matter enrichment, phosphorus mainly came from phosphorus-containing agricultural wastewater and residential sewage from upstream tributaries and the surrounding areas, and OM mainly came from higher plants; nitrogen, phosphorus single pollution index and comprehensive pollution index were in heavy pollution as a whole, nutrient salts pollution mainly came from nitrogen, organic index as a whole was still in clean level, and the sediment as a whole was polluted by organic nitrogen.

**Keywords:** sediment; organic matter; nutrient salts; Xinglin Bay Reservoir; spatial distribution; pollution evaluation; source analysis

水体富营养化是当今水库面临的重要环境问题之一<sup>[1-2]</sup>。由底泥引起的内源污染成为水体富营养化的主要原因<sup>[3]</sup>。水库底泥作为营养物质的“源”和“汇”,是水体氮、磷和有机质等营养物质在物理、化学和生物作用下沉积形成的产物,在一定条件下会释放营养物进入水体形成二次污染<sup>[4-5]</sup>。研究底泥中有机质和营养盐的特征及污染,可间接反映水体污染状况,对提升水库生态环境质量具有重要意义。

杏林湾水库位于福建省厦门市集美区,流域总面积为 142 km<sup>2</sup>,集水面积为 67.3 km<sup>2</sup>,库容面积约为 2.2 km<sup>2</sup>,平均水深为 2.2 m,最大水深为 5.5 m<sup>[6]</sup>。目前,该水库兼具市政供水、景观用水、农业用水和防洪功能。2000 年至今,杏林湾水库外源污染已基本得到控制,但由内源污染引起的富营养化现象仍时有发生,目前水质持续为劣 V 类。依据 GB 3838—2002 地表水水域环境功能及保护目标和厦门市地表水体实际状况,厦门市生态环境保护局将杏林湾水库划分为 V 类地表水环境功能区。因此,为实现厦门杏林湾水库水质提升和生态修复,需研究其底泥中有机质和营养盐特征及污染状况。

目前,国内外对河流<sup>[7-9]</sup>、湖泊<sup>[10-12]</sup>、海域<sup>[13-14]</sup>和水库<sup>[15-16]</sup>等底泥中总氮、总磷的形态、空间分布特征、释放机理及相关分析有较多研究。然而,关于厦门杏林湾水库底泥中有机质和营养盐分布特征及污染状况的研究尚未见报道。因此,本文测定了杏林湾水库表层底泥 8 个采样点中的有机质(OM)、总氮(TN)、游离态氮(FN)、可交换态氮(EN)、酸解态氮(HN)、残渣态氮(RN)、总磷(TP)、有机磷(OP)、无机磷(IP)、铁铝结合态磷(NaOH-P)和钙结合态磷(HCl-P)的质量比并分析了其分布特征,评价表层底泥污染等级和污染风险,并分析底泥中有机质和营养盐来源,以期对杏林湾水库富营养化控制提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集与测定

综合考虑杏林湾水库水文特征、河道情况、周边布局及支流汇水等情况,确定了 8 个可反映水库总体情况的代表性断面布设采样点,具体的采样点位示意图,如图 1 所示。杏林湾水库中存在 2 条流路,1 条从后溪汇入处至入海口,称为流路 1,包括采样点 XLWN01, XLWN02, XLWN03, XLWN04, XLWN05 和 XLWN06; 1 条从九天湖排洪渠和董任排洪渠交汇处至入海口,称为流路 2,包括采样点 XLWN06, XLWN07 和 XLWN08。采用柱状底泥采样器采集杏林湾水库表层底泥(0~20 cm),各采样点采集样品 10 kg,现场人工挑拣去除碎石、螺蛳、枯叶等杂质,利用注射器吸去上覆水后装入 PE 自封袋中排尽空气并密封带回实验室。

底泥中 OM 质量比采用重铬酸钾容量法测定; TN 质量比采用凯氏定氮法测定; 各形态磷和各形态氮质量比采用分级提取(SMT)法<sup>[17-18]</sup>测定; pH 采用玻璃电极法测定; 含水量(WC)采用质量法测定。



图 1 杏林湾水库底泥采样点位示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of sampling points in sediment of Xinglin Bay Reservoir

## 1.2 底泥污染评估方法

目前,国内外关于淡水水库中底泥的污染状况的评价尚未有统一的标准和方法<sup>[10]</sup>。采用综合污染指数法和有机污染指数法对杏林湾水库中底泥的污染状况进行评价。

1.2.1 综合污染指数法 单项污染指数  $S_i$  和综合污染指数 FF 的计算公式分别为

$$S_i = \frac{C_i}{C_{i,s}}, \quad (1)$$

$$FF = \sqrt{\frac{F^2 + F_{\max}^2}{2}}. \quad (2)$$

式(1),(2)中: $i$ 为评价因子; $C_i$ 为评价因子质量比的实测值; $C_{i,s}$ 为评价因子的评价标准值,其中,TN,TP的评价标准值分别为  $550, 600 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[13,15,19]</sup>;  $F$ 为  $n$ 项污染指数的平均值(TP污染指数  $S_{TP}$ 和TN污染指数  $S_{TN}$ 的平均值);  $F_{\max}$ 为  $n$ 项污染指数的最大值( $S_{TP}$ 和  $S_{TN}$ 的最大值)。

底泥综合污染程度等级划分标准,如表1所示。

表1 底泥综合污染程度等级划分标准

Tab. 1 Classification standard for comprehensive pollution level of sediment

$S_{TN}$	$S_{TP}$	FF	污染程度	等级
$S_{TN} \leq 1.0$	$S_{TP} \leq 0.5$	$FF \leq 1.0$	清洁	1
$1.0 < S_{TN} \leq 1.5$	$0.5 < S_{TP} \leq 1.0$	$1.0 < FF \leq 1.5$	轻度污染	2
$1.5 < S_{TN} \leq 2.0$	$1.0 < S_{TP} \leq 1.5$	$1.5 < FF \leq 2.0$	中度污染	3
$S_{TN} > 2.0$	$S_{TP} > 1.5$	$FF > 2.0$	重度污染	4

1.2.2 有机污染指数法 综合污染指数法忽略了OM指标,为使评价结果更加精确地反映底泥污染状况,采用有机污染指数法对底泥的污染状况进行评价<sup>[11,13]</sup>。具体计算公式为

$$I_o = w_{OC} \times w_{ON}, \quad (3)$$

$$w_{ON} = w_{TN} \times 0.95, \quad (4)$$

$$w_{OC} = \frac{w_{OM}}{1.724}. \quad (5)$$

式(3)~(5)中: $I_o$ 为有机指数; $w_{OC}$ 为有机碳质量分数; $w_{ON}$ 为有机氮质量分数; $w_{TN}$ 为总氮质量分数; $w_{OM}$ 为有机质质量分数。质量比换算成质量分数的公式为  $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} = 0.0001\%$ 。

有机指数和有机氮评价标准,如表2所示。

表2 有机指数和有机氮评价标准

Tab. 2 Evaluation standard of organic nitrogen and organic index

等级	$w_{ON}/\%$	$I_o$	污染等级
I	$w_{ON} < 0.033$	$I_o < 0.050$	清洁
II	$0.033 \leq w_{ON} < 0.066$	$0.050 \leq I_o < 0.200$	较清洁
III	$0.066 \leq w_{ON} < 0.133$	$0.200 \leq I_o < 0.500$	尚清洁
IV	$w_{ON} \geq 0.133$	$I_o \geq 0.500$	有机(氮)污染

## 2 结果与讨论

### 2.1 底泥中有机质和营养盐含量及分布特征

2.1.1 OM的质量比及分布 底泥中OM质量比既是评价内源污染的重要指标<sup>[20]</sup>,也是反映底泥有机营养程度的重要指标<sup>[9]</sup>。杏林湾水库底泥中OM质量比( $w(\text{OM})$ )空间分布,如图2所示。由图2可知:底泥中OM质量比为  $28\ 273.60 \sim 63\ 357.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,平均值为  $49\ 360.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

水体沉积物中OM的来源主要为水体自养生物合成和陆源输入<sup>[21]</sup>。各采样点OM质量比排序为  $\text{XLWN08} > \text{XLWN05} > \text{XLWN01} > \text{XLWN03} > \text{XLWN02} > \text{XLWN04} > \text{XLWN06} > \text{XLWN07}$ 。XLWN08处OM质量比最高,原因可能是XLWN08位于九天湖排洪渠出口与董任排洪渠出口附近,

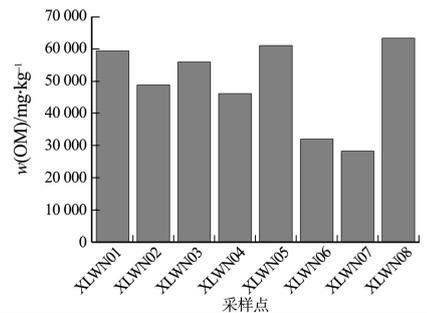


图2 OM质量比空间分布  
Fig. 2 Spatial distribution of OM mass ratio

上游人口密集,且分布着大量的农业用地<sup>[22]</sup>,沿途的生活污水和农作物残体经过雨水冲刷和地表径流汇入排洪渠,最后进入九天湖中,含有有机质的泥沙在此处长期累积沉降,导致 XLWN08 处的 OM 质量比较高。XLWN01 位于后溪支流汇入口附近,后溪沿途分布着大量的农业用地和林地<sup>[22]</sup>,一些植物残体随着外源输入进入杏林湾水库,故此处的 OM 质量比较高。XLWN02 周边分布着大量农业用地,且上游是农村居住点<sup>[22]</sup>,XLWN03 位于华大排洪渠和下蔡排洪渠附近,上游同样分布着大片农业用地<sup>[22]</sup>,受人类有机生活污水排放和漂流到此处的农作物残体腐烂的影响,故这两个采样点的 OM 质量比均较高。XLWN04 位于省队皮划船赛道途中和园博苑附近,园博苑的生态岛是厦门最主要的大型候鸟栖息地,受到船运和鸟类活动的影响,此处 OM 质量比也处于较高水平。

OM 质量比空间分布总体呈现在流路 1 上先增加后减小,在流路 2 上逐渐减小的特征。分析原因为流路 1 沿岸分布着后溪、华大排洪渠和下蔡排洪渠,沿途汇入外源有机质后又经过水库水体的稀释,而流路 2 汇入的外源有机质被沿途稀释,故呈现此分布特征。

2.1.2 TN 质量比及分布 杏林湾水库底泥中 TN 质量比( $w(\text{TN})$ )空间分布,如图 3 所示。由图 3 可知:杏林湾水库底泥中 TN 质量比为 769.00~2 440.50  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,平均值为 1 588.63  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

根据美国环保署(EPA)确定的底泥 TN 污染评价标准<sup>[20,23]</sup>,杏林湾水库底泥中 TN 质量比主要处于清洁和轻度污染水平,其中,清洁水平占比 25.0%,中度污染水平占比 62.5%,重度污染水平占比 12.5%。各采样点 TN 质量比排序为 XLWN08 > XLWN05 > XLWN03 > XLWN01 > XLWN02 > XLWN04 > XLWN06 > XLWN07。XLWN08 处 TN 污染严重的原因一方面可能和 OM 相同,受上游汇入的生活污水和农作物残体的影响,另一方面可能和上游农业用地中氮肥的使用有关。XLWN01 上游分布着大量农业用地和林地<sup>[22]</sup>,含氮的农业废水和植物残体沿途汇入后溪最后进入杏林湾水库,故此处 TN 质量比处于轻度污染水平。XLWN02 周边和 XLWN03 上游分布着大量农业用地<sup>[22]</sup>,此外,XLWN02 上游是农村居住点<sup>[22]</sup>,XLWN03 位于华大排洪渠和下蔡排洪渠附近,受周边居民生活污水、含氮农业废水和漂流到此的农作物残体腐烂的影响,这两处 TN 质量比均处于轻度污染。XLWN04 位于园博苑附近,受到鸟类活动的影响,此处 TN 质量比也处于轻度污染水平。由图 2,3 可知:TN 的空间分布特征和 OM 相似。

2.1.3 TP 质量比及分布 杏林湾水库底泥中 TP 质量比( $w(\text{TP})$ )空间分布,如图 4 所示。由图 4 可知:杏林湾水库底泥中 TP 质量比为 366.50~3 048.00  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,平均值为 1 095.63  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

根据 EPA 确定的底泥 TP 污染评价标准<sup>[20,23]</sup>,杏林湾水库底泥中 TP 质量比主要处于中度污染和重度污染水平,其中,轻度污染水平占比为 12.5%,中度污染水平占比为 25.0%,重度污染水平占比为 62.5%。各采样点 TP 质量比排序为 XLWN08 > XLWN01 > XLWN02 > XLWN07 > XLWN03 > XLWN05 > XLWN06 > XLWN04。其中, XLWN08 和 XLWN01 处底泥中 TP 污染较为严重,原因为 XLWN01 位于后溪支流汇入口附近,后溪沿途分布着大量的农业用地和林地<sup>[22]</sup>,受上游农业种植中磷肥使用的影响,此处 TP 处于重度污染水平。XLWN08 位于九天湖排洪渠出口与董任排洪渠出口附近,上游人口密集,且分布着大量的农业用地<sup>[22]</sup>,受上游生活污水排放和含磷农业废水排放的影响,故此处 TP 污染较为严重。由图 4 可知:水库底泥 TP 质量比总体呈现随着水流方向逐渐减小的趋势。

XLWN07 和 XLWN08 两相近采样点的 OM, TN 和 TP 质量比均差异较大, XLWN07 位于九天湖流域,2022 年厦门市开展了九天湖防汛应急清淤工程<sup>[24]</sup>,采样时发现 XLWN07 处样品含沙量较大,故

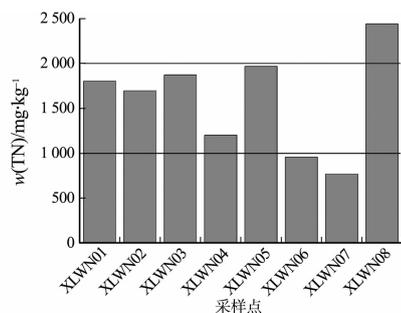


图 3 TN 质量比空间分布  
Fig. 3 Spatial distribution of TN mass ratio

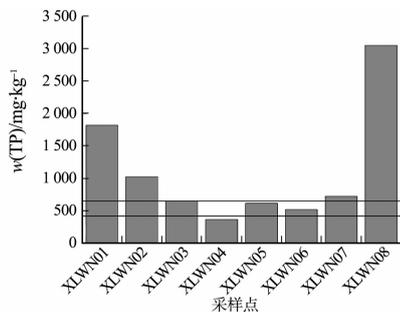


图 4 TP 质量比空间分布  
Fig. 4 Spatial distribution of TP mass ratio

推测 XLWN07 处进行过清淤;XLWN05 所在处流域变宽,流速减小,导致沉积作用加剧<sup>[13]</sup>,故此处 OM, TN 和 TP 质量比相比其上游底泥中 OM, TN 和 TP 质量比均较高;XLWN06 处 OM, TN 和 TP 质量比均相对较低,原因可能是大部分含有污染物的底泥在 XLWN05 处堆积,剩余污染物在流动过程中又经过水体稀释所引起。

2.1.4 各形态氮质量比及分布 杏林湾水库底泥各形态氮的质量比( $w(N)$ )空间分布和质量分数( $w_N$ ),如图 5 所示。

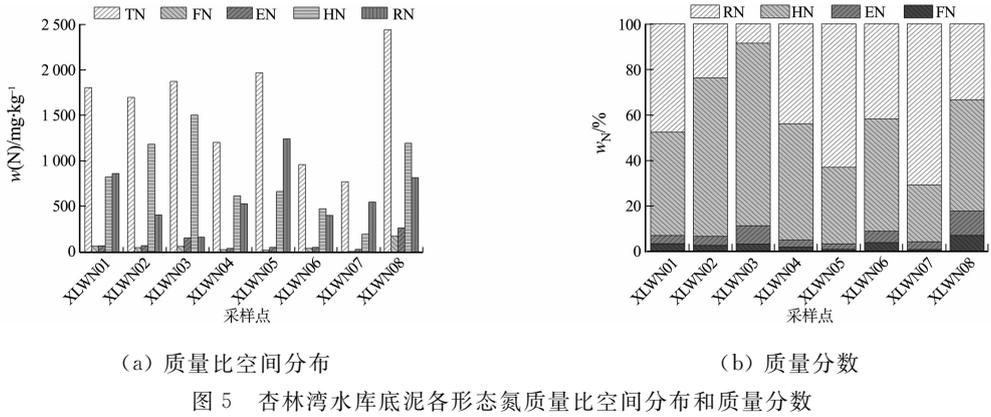


图 5 杏林湾水库底泥各形态氮质量比空间分布和质量分数

Fig. 5 Spatial distribution and mass ratios of nitrogen of various forms in sediment of Xinglin Bay Reservoir

由图 5 可知:底泥中 FN 质量比介于  $6.00\sim 171.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均值为  $52.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均值占 TN 质量比的  $3.28\%$ ;FN 的空间分布特征总体呈现随着水流方向减小的趋势。FN 是动态释放的氮形态,是底泥-上覆水界面氮营养盐交换的主要形态。底泥和上覆水之间的营养盐交换主要是通过底泥中间隙水和上覆水之间营养盐通过浓度差进行扩散作用完成的<sup>[25]</sup>。XLWN01 和 XLWN08 处 FN 质量比均较高,鉴于这两处采样点所处地理位置,推测原因为九天湖排洪渠、董任排洪渠和后溪汇入水体中包含了大量生活污水和农业废水。

EN 质量比介于  $26.50\sim 261.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均值为  $88.06\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均值占 TN 质量比的  $5.54\%$ 。OM 经过矿化作用形成的氨氮在 FN 和 EN 之间进行再分配,因此,EN 是底泥中较为“活跃”的一种氮形态<sup>[26]</sup>。EN 可通过离子交换、吸附解析和生物扰动作用不断与间隙水之间保持动态平衡<sup>[27-28]</sup>。此外,EN 还是湖泊中初级生产者,是可直接利用的营养来源<sup>[29]</sup>。底泥中 EN 质量比空间分布特征和 OM, TN 质量比空间分布特征相似。

HN 质量比介于  $192.00\sim 1501.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均值为  $829.56\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均值占 TN 质量比的  $52.22\%$ 。HN 是指土壤在  $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ HCl}$  和  $(120\pm 2)^\circ\text{C}$  下水解  $20\text{ h}$  后能被酸分解的氮<sup>[18]</sup>。可矿化态氮和酸解态氮成正比<sup>[25]</sup>。HN 在 TN 中占有较大比例,说明杏林湾水库底泥整体氮释放风险较大,很可能会加剧杏林湾水库的富营养化程度。HN 和 EN, OM, TN 呈现相似分布特征。

RN 质量比介于  $159.50\sim 1241.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均值为  $618.75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均值占 TN 质量比的  $38.95\%$ 。RN 主要来自缩合程度较高的腐殖质结构成分,主要以有机杂环态存在,或者与杂环或芳香环键结合在一起形成有机结合氮,难以被分解或转化<sup>[18,29]</sup>。RN 总体呈现随着水流方向减小的趋势,在 XLWN05 处由于流域变宽,流速减小,沉积作用加剧,污染物在此处堆积,故该点位的 RN 质量比相比周边都高。由图 5 可知:RN 质量比随着水流方向呈现波浪形变化趋势,且变化幅度较大。

2.1.5 底泥中各形态磷及分布 杏林湾水库底泥各形态磷质量比( $w(P)$ )空间分布和质量分数( $w_P$ ),如图 6 所示。由图 6 可知:XLWN08 和 XLWN01 处的各形态磷质量比均较高,分析原因也是受到上游含磷农业废水和生活污水排放的影响。

底泥中 OP 质量比介于  $95.00\sim 552.50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均值为  $284.06\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均值占 TP 质量比的  $25.93\%$ 。位于杏林湾的园博苑的生态岛是大型候鸟在厦门最主要的栖息地,而鸟粪作为天然有机肥一般富含有机态磷<sup>[17]</sup>,所以杏林湾水库中部流域存在较高质量比的 OP。OP 质量比随水流方向变化趋势和 RN 相似。有机磷具有潜在释放风险,可通过被降解与分解转变为其他可生物利用形式<sup>[30]</sup>,经扩散、再悬浮和生物扰动等形式进入上覆水中,进而影响水体富营养化水平<sup>[31-33]</sup>,因此,OP 质

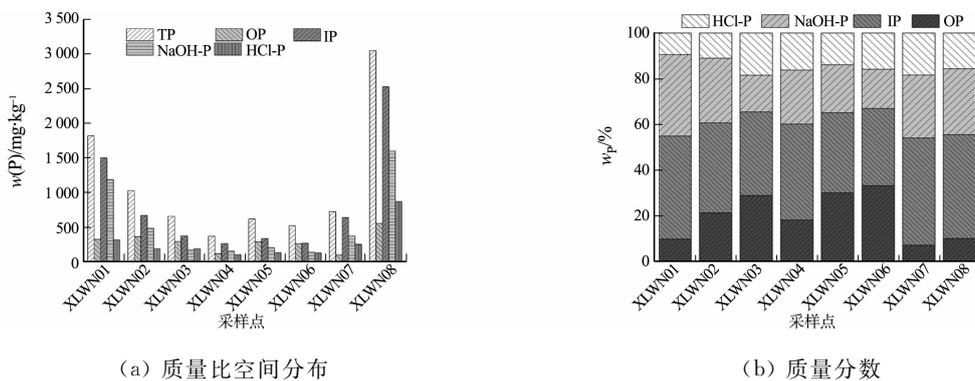


图 6 杏林湾水库底泥各形态磷质量比空间分布和质量分数

Fig. 6 Spatial distribution and mass ratios of phosphorus of various forms in sediment of Xinglin Bay Reservoir 量比分布应引起重视。

底泥中 IP 质量比介于  $261.50 \sim 2\ 524.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 平均值为  $811.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值占 TP 质量比的 74.07%。说明杏林湾水库底泥中的 TP 主要以 IP 的形式存在, 故两者的质量比空间分布特征相似, 均呈现随着水流方向逐渐减小的趋势, 且变化幅度较大。

底泥中 NaOH-P 质量比介于  $133.50 \sim 1\ 598.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 平均值为  $534.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值占 IP 质量比的 65.27%, 占 TP 质量比的 48.81%。NaOH-P 质量比空间分布特征与 IP 质量比空间分布特征相似, 这是因为杏林湾水库底泥中 IP 主要以 NaOH-P 形式存在。杏林湾水库所在区域土壤是我国南方的铁铝土红壤, 该土壤富含铁铝氧化物<sup>[34]</sup>, 且南方以花岗岩和砂岩等母岩为主<sup>[35]</sup>, 从而决定了底泥中的 NaOH-P 占绝对优势。NaOH-P 是与铁铝氧化物或氢氧化物结合的磷形态<sup>[36-37]</sup>, 具有很高的释放活性, 当 pH 值和氧化还原电位发生变化时可转化为可溶形态磷释放到水体中<sup>[36-38]</sup>, 与人为活动相关, 可在一定程度上反映水库受污染状况<sup>[38-39]</sup>, 具有一定的指导意义。NaOH-P 与水体富营养化息息相关, 较高的质量比和空间分布反映出杏林湾水库磷的潜在释放风险较大, 易发生磷污染。

底泥中 HCl-P 质量比介于  $100.50 \sim 869.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  之间, 平均值为  $269.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值占 IP 质量比的 32.90%, 占 TP 质量比的 24.60%。XLWN01 和 XLWN08 处 HCl-P 质量比较高的原因: 一方面, 受到上游含磷农业废水和生活污水排放的影响; 另一方面, 杏林湾水库底泥 pH 值为  $8.68 \sim 9.59$ , 在偏碱性的环境中, Ca 离子可与溶解性磷结合生成 HCl-P<sup>[36]</sup>, 由于 XLWN01 和 XLWN08 上游都分布着大片农业用地, 此外, XLWN08 上游人口密集, XLWN01 上游还分布着大量林地<sup>[22]</sup>, 由养殖业产生的动物排泄物、农业活动中产生的农作物残体和树木落叶中均含有 Ca 离子, 这也可能造成 XLWN08 处 HCl-P 质量比最高。HCl-P 质量比空间分布总体上呈现随水流方向减小的特征。HCl-P 是一种较为稳定的磷形态, 较难被生物利用<sup>[40]</sup>, 只有在弱酸性条件下才可部分释放到水体中, 一般水利条件下不会对水环境造成威胁。但是从长远考虑, HCl-P 的生态影响力也不容忽视。

综上所述, 杏林湾水库底泥中磷主要来自于人类生活污水和含磷农业废水, 同时还受到园博苑鸟类活动的影响。

NaOH-P 可被生物直接利用, 60% 的 OP 可通过矿化作用被分解利用<sup>[41]</sup>, 因此, 将 NaOH-P 与 60% 的 OP 之和定义为 BAP<sup>[42-43]</sup>。杏林湾水库底泥中 BAP 质量比( $w(\text{BAP})$ )及 BAP 占 TP 百分比( $\delta$ ), 如图 7 所示。BAP 可向上覆水释放, 使水体含磷量增加<sup>[44-45]</sup>, 可通过 BAP 与 TP 的比值初步评估底泥磷的释放风险<sup>[46]</sup>。所有采样点 BAP 与 TP 的比值均超过 30%, 可见整个杏林湾水库底泥呈现较高磷释放风险。此外, BAP 质量比空间分布和 NaOH-P 质量比空间分布相似, 这可能与 BAP 中 NaOH-P 占比较高有关。

## 2.2 底泥有机质和营养盐来源分析

杏林湾水库底泥中各指标之间的相关性( $r$ )分析, 如图 8 所示。图 8 中: \* 表示  $P < 0.05$ 。由图 8

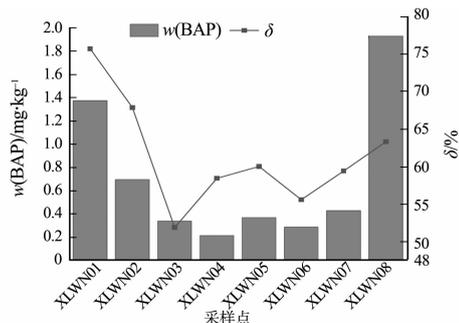


图 7 BAP 质量比及其在 TP 中的占比  
Fig. 7 BAP mass ratios and its proportion in TP

可知:杏林湾水库底泥中各形态磷之间均具有显著的相关性( $P < 0.05$ ),而 OM 和 TP 之间相关性不显著( $r = 0.55$ ,  $P = 0.16$ ),说明底泥中有机质富集不是磷的主要来源,结合各形态磷的空间分布特征,推测杏林湾水库底泥中各形态磷主要来自上游支流和周边地区含磷农业废水和居民生活污水;OM 和 TN 之间的相关系数高达 0.95( $P < 0.001$ ),推测底泥中氮主要来自有机质富集<sup>[38,47]</sup>。底泥中 C/N 值可在一定程度上反映有机质来源<sup>[47]</sup>,计算得到杏林湾水库底泥中 C/N 平均值为 18.02,表明底泥中的有机质主要来自于高等植物,杏林湾水库上游分布着大片农业用地和林地<sup>[22]</sup>,故推测杏林湾水库底泥中有机质主要来源于农作物残体和树木落叶。底泥中 N/P 值可在一定程度上反映出底泥的富营养化状态,计算得到杏林湾水库底泥中 N/P 平均值为 1.45,远远低于水生生物体内 N/P 水平(7~10),过低的 N/P 对高等水生植物的生长不利<sup>[48]</sup>,这也与采样现场观察到的高等水生植物数目较少、分布稀疏的情况相符。

### 2.3 底泥有机质和营养盐污染状况评价

2.3.1 综合污染指数法 杏林湾水库底泥综合污染评价结果,如表 3 所示。杏林湾水库底泥综合污染评价热力图,如图 9 所示。

表 3 杏林湾水库底泥综合污染评价结果

Tab. 3 Evaluation results of comprehensive contamination in sediment of Xinglin Bay Reservoir

采样点	TN 评价指数		TP 评价指数		综合污染指数	
	$S_{TN}$	等级	$S_{TP}$	等级	FF	等级
XLWN01	3.28	4	3.03	4	3.22	4
XLWN02	3.09	4	1.71	4	2.76	4
XLWN03	3.40	4	1.09	3	2.88	4
XLWN04	2.18	4	0.61	2	1.83	3
XLWN05	3.58	4	1.03	3	3.01	4
XLWN06	1.74	3	0.86	2	1.54	3
XLWN07	1.40	2	1.20	3	1.35	2
XLWN08	4.44	4	5.08	4	4.92	4
平均值	2.89	4	1.83	4	2.69	4

由表 3 可知:底泥  $S_{TN}$  介于 1.40~4.44 之间,平均值为 2.89,整体处于重度污染,所有采样点中,TN 轻度污染占比 12.5%,中度污染占比 12.5%,重度污染占比 75.0%;底泥  $S_{TP}$  介于 0.61~5.08 之间,平均值为 1.83,整体处于重度污染,所有采样点中,TP 轻度污染占比 25.0%,中度污染占比 37.5%,重度污染占比 37.5%;底泥 FF 介于 1.35~4.92 之间,平均值为 2.69,整体处于重度污染,所有采样点中,FF 轻度污染占比 12.5%,中度污染占比 25.0%,重度污染占比 62.5%。

由图 9 可知:FF 的等级受  $S_{TN}$  影响较大,表明杏林湾水库底泥营养盐污染主要来源于氮污染。

2.3.2 有机污染指数法 杏林湾水库底泥有机污染评价结果,如表 4 所示。由表 4 可知:底泥中  $\omega_{ON}$  介于 0.073%~0.232% 之间,平均值为 0.151%,整体上处于有机氮污染,所有采样点中,尚清洁占比 37.5%,有机氮污染占比 62.5%。根据  $S_{TN}$  和有机氮(ON)污染分布状况可以看出,杏林湾底泥受外源氮污染严重。底泥

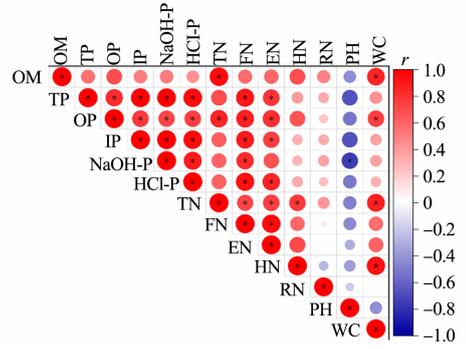


图 8 各指标之间的相关性分析  
Fig. 8 Correlation analysis between various indicators

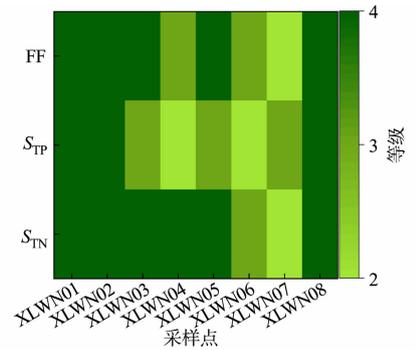


图 9 杏林湾水库底泥综合污染评价热力图  
Fig. 9 Thermogram of comprehensive contamination evaluation in sediment of Xinglin Bay Reservoir

$I_0$  介于 0.120~0.852 之间,平均值为 0.466,整体上处于尚清洁水平,所有采样点中,较清洁占比 25.0%,尚清洁占比 25.0%,有机污染占比 50.0%。

表4 杏林湾水库底泥有机污染评价结果

Tab.4 Evaluation results of organic contamination in sediment of Xinglin Bay Reservoir

采样点	$w_{ON}/\%$	污染等级(有机氮)	$I_0$	污染等级(有机指数)
XLWN01	0.171	有机氮污染	0.591	有机污染
XLWN02	0.161	有机氮污染	0.456	尚清洁
XLWN03	0.178	有机氮污染	0.577	有机污染
XLWN04	0.114	尚清洁	0.305	尚清洁
XLWN05	0.187	有机氮污染	0.662	有机污染
XLWN06	0.091	尚清洁	0.169	较清洁
XLWN07	0.073	尚清洁	0.120	较清洁
XLWN08	0.232	有机氮污染	0.852	有机污染

### 3 结论

1) 研究区域内底泥中 OM, TN 和 TP 质量比平均值分别为 49 360.28, 1 588.63, 1 095.63  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。OM, TN, EN, HN 的空间分布特征相似,呈现在流路 1 上先增加后减小,在流路 2 上逐渐减小的特征。TN 中各形态氮占比排序为 HN(52.22%)>RN(38.95%)>EN(5.54%)>FN(3.28%)。TP, IP, NaOH-P 和 HCl-P 的空间分布特征相似,随水流方向逐渐减小。TP 中各形态磷占比为 IP(74.07%)>OP(25.93%);NaOH-P(48.81%)>HCl-P(24.60%)。

2) TN 中 HN 占比 52.22%, TP 中 NaOH-P 占比 48.81%,所有采样点 BAP 与 TP 比值均超过 30%,由此可知,杏林湾水库底泥氮磷释放风险较高,杏林湾水库易发生富营养化问题。

3) 有机质和营养盐来源分析表明底泥中氮主要来自于有机质富集,磷主要来源于上游支流和周边地区含磷农业废水和居民生活污水。底泥中 C/N 平均值为 18.02,表明底泥中的有机质主要来自于高等植物;N/P 平均值为 1.45,表明杏林湾水库底泥不利于高等水生植物生长。

4) 综合污染指数法评价结果表明,底泥氮磷整体均处于重度污染状态,综合污染指数整体处于重度污染状态,底泥中营养盐污染主要来源于氮。有机氮和有机指数评价结果表明,底泥整体处于有机氮污染和尚清洁状态。

### 参考文献:

- [1] ZHANG Wenqiang, JIN Xin, MENG Xin, *et al.* Phosphorus transformations at the sediment-water interface in shallow freshwater ecosystems caused by decomposition of plant debris[J]. *Chemosphere*, 2018, 201: 328-334. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2018.03.006.
- [2] 秦伯强. 浅水湖泊湖沼学与太湖富营养化控制研究[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(5): 1229-1243. DOI: 10.18307/2020.0501.
- [3] WEN Shuailong, WANG Hongwei, WU Tao, *et al.* Vertical profiles of phosphorus fractions in the sediment in a chain of reservoirs in North China: Implications for pollution source, bioavailability, and eutrophication[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 704: 135318. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135318.
- [4] 冀峰, 王国祥, 韩睿明, 等. 太湖流域农村黑臭河流表层沉积物营养盐的污染特征[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 81-87. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.015.
- [5] ZHAO Bing, HU Yuansi, YU Haoran, *et al.* A method for researching the eutrophication and N/P loads of plateau lakes: Lugu Lake as a case[J]. *The Science of the Total Environment*, 2023, 876: 162747. DOI: 10.1016/J.SCITOT-ENV.2023.162747.
- [6] 吴龙洋, 阎希柱, 杨军. 杏林湾水库上游水域水华期和非水华期水质变化[J]. *环境科学导刊*, 2021, 40(2): 7-10. DOI: 10.13623/j.cnki.hkdk.2021.02.003.
- [7] YE Hongmeng, HUANG Changchun, YUAN Xuyin, *et al.* Morphological characteristics and ecological risk assessment of nitrogen and phosphorus in the sediments of Futunxi watershed in Fujian Province[J]. *Environmental Moni-*

- toring and Assessment, 2021, 193(6): 335. DOI: 10. 1007/S10661-021-09106-X.
- [8] 张沐,任增谊,张曼,等. 外秦淮河底泥污染及疏浚效果[J]. 环境科学, 2023, 44(7): 3945-3956. DOI: 10. 13227/j. hjkx. 202208081.
- [9] 原璐彬,邢书语,刘鑫,等. 镇江市古运河和金山湖河湖上覆水体和沉积物氮及有机质分布特征及污染评价[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3186-3197. DOI: 10. 13227/j. hjkx. 202010192.
- [10] 刘海,赵国红. 霍邱县城湖泊沉积物营养盐分布及污染评价[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2583-2591. DOI: 10. 13227/j. hjkx. 202206068.
- [11] 李芬芳,黄代中,莲花,等. 洞庭湖及其入湖口表层沉积物氮、磷、有机质的分布及污染评价[J]. 生态环境学报, 2018, 27(12): 2307-2313. DOI: 10. 16258/j. cnki. 1674-5906. 2018. 12. 017.
- [12] LIN Xiaowen, WU Chao, WU Xiaodong, *et al.* Evaluation of the distribution of N, P and organic matter in sediment and the pollution status of lakes in southeastern Hubei Province, China[J]. Journal of Freshwater Ecology, 2023, 38(1): 2244526. DOI: 10. 1080/02705060. 2023. 2244526.
- [13] 王书锦,刘云根,张超,等. 洱海流域入湖河口湿地沉积物氮、磷、有机质分布及污染风险评价[J]. 湖泊科学, 2017, 29(1): 69-77. DOI: 10. 18307/2017. 0108.
- [14] 杜彩丽,黎佳茜,李国文,等. 乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5598-5607. DOI: 10. 13227/j. hjkx. 202202060.
- [15] 万杨,周小峰,叶小凡,等. 浙江省温岭湖漫水水库沉积物中营养盐分布及风险评价[J]. 环境化学, 2023, 42(12): 4392-4403. DOI: 10. 7524/j. issn. 0254-6108. 2023020906.
- [16] 王洪伟,王少明,张敏,等. 春季潘家口水库沉积物-水界面氮磷赋存特征及迁移通量[J]. 中国环境科学, 2021, 41(9): 4284-4293. DOI: 10. 19674/j. cnki. issn1000-6923. 20210222. 002.
- [17] 刘永九,黄素珍,张璐,等. 洪湖国际重要湿地沉积物磷空间分布特征及释放风险[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3198-3205. DOI: 10. 13227/j. hjkx. 202009090.
- [18] 赵丽,王书航,姜霞,等. 蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化[J]. 环境科学, 2016, 37(12): 4626-4632. DOI: 10. 13227/j. hjkx. 201605099.
- [19] 李慧,雷沛,李珣,等. 天津市北大港湿地沉积物氮磷分布特征及污染评价[J]. 环境科学学报, 2021, 41(10): 4086-4096. DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2021. 0153.
- [20] 方家琪,祁闯,张新厚,等. 太湖竺山湾沉积物碳氮磷分布特征与污染评价[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5367-5374. DOI: 10. 13227/j. hjkx. 201905127.
- [21] 尹鹏飞,熊静,贾雨欣,等. 杞麓湖表层沉积物营养盐和粒度空间分布及评价[J]. 环境科学与技术, 2023, 46(10): 32-41. DOI: 10. 19672/j. cnki. 1003-6504. 0577. 23. 338.
- [22] 沈宸宇,闫钰,于瑞莲,等. APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源[J]. 环境科学, 2022, 43(5): 2476-2488. DOI: 10. 13227/j. hjkx. 202108337.
- [23] 邱祖凯,胡小贞,姚程,等. 山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价[J]. 环境科学, 2016, 37(4): 1389-1396. DOI: 10. 13227/j. hjkx. 2016. 04. 025.
- [24] 谢伟. 城市河湖清淤工程的生态价值: 以厦门市九天湖为例[J]. 低碳世界, 2022, 12(7): 21-23. DOI: 10. 16844/j. cnki. cn10-1007/tk. 2022. 07. 049.
- [25] 范庆元,王泓,杜春艳,等. 洞庭湖典型垸内沟渠沉积物不同形态氮的赋存特征[J]. 水资源研究, 2018, 7(3): 271-278. DOI: 10. 12677/JWRR. 2018. 73030.
- [26] LANGE G J D. Distribution of exchangeable, fixed, organic and total nitrogen in interbedded turbiditic/pelagic sediments of the Madeira Abyssal Plain, eastern North Atlantic[J]. Marine Geology, 1992, 109(1/2): 95-114. DOI: 10. 1016/0025-3227(92)90223-5.
- [27] YU Juhua, FAN Chengxin, ZHONG Jichen, *et al.* Evaluation of in situ simulated dredging to reduce internal nitrogen flux across the sediment-water interface in Lake Taihu, China[J]. Environmental Pollution, 2016, 214: 866-877. DOI: 10. 1016/j. envpol. 2016. 03. 062.
- [28] SHANG Jingge, ZHANG Lu, SHI Chengjun, *et al.* Influence of Chironomid Larvae on oxygen and nitrogen fluxes across the sediment-water interface (Lake Taihu, China)[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(5): 978-985. DOI: 10. 1016/S1001-0742(12)60116-8.
- [29] LI Jialu, ZUO Qiting. Forms of nitrogen and phosphorus in suspended solids: A case study of Lihu Lake, China[J]. Sustainability, 2020, 12(12): 5026. DOI: 10. 3390/su12125026.

- [30] WANG Ting, WANG Kun, JIANG Xia. Influence of rewetting process on distribution and release of phosphorus in sediments of East Lake Dongting[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(4): 937-947. DOI: 10.18307/2018.0407.
- [31] 马晓阳, 牛凤霞, 肖尚斌, 等. 高磷沉积物有机磷形态分布及释放动力学特征: 以宜昌西北口水库为例[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(1): 293-301. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210709.009.
- [32] 韩年, 袁旭音, 周慧华, 等. 洪泽湖入湖河流沉积物有机磷分布特征及外源输入对其形态转化的影响[J]. *湖泊科学*, 2020, 32(3): 665-675.
- [33] 张嘉雯, 魏健, 刘利, 等. 衡水湖沉积物营养盐形态分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 2020, 41(12): 5389-5399. DOI: 10.13227/j.hjxx.202004237.
- [34] 梁止水, 邓琳, 高海鹰, 等. 南淝河底泥中氮磷空间分布规律及污染评价[J]. *环境工程*, 2013, 31(增刊1): 124-127. DOI: 10.13205/j.hjgc.2013.s1.159.
- [35] 叶宏萌, 杨浩, 袁旭音, 等. 基于流域沉积物氮磷形态的生态风险评价: 以沙溪流域为例[J]. *环境化学*, 2020, 39(12): 3471-3479. DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2019111802.
- [36] 郑培儒, 李春华, 叶春, 等. 镜泊湖沉积物各形态磷分布特征及释放贡献[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(2): 883-890. DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2021.0099.
- [37] LONG Ziwei, JI Zehua, PEI Yuansheng. Characteristics and distribution of phosphorus in surface sediments of a shallow lake[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023, 124(2): 50-60. DOI: 10.1016/J.JES.2021.10.012.
- [38] QIU Zijian, LIU Qian, ZHANG Ruiqi, *et al.* Distribution characteristics and pollution assessment of phosphorus forms, TOC, and TN in the sediments of Daye Lake, Central China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 23(2): 1023-1036. DOI: 10.1007/S11368-022-03398-3.
- [39] 向速林, 楚明航, 刘丽贞, 等. 鄱阳湖流域赣江(南昌段)沉积物磷赋存形态特征及释放风险分析[J/OL]. *湖泊科学*, 2024, 36(4): 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1331.p.20240311.2228.002.html>.
- [40] 雷雨梦, 刘云根, 梁启斌, 等. 云南不同类型农村沟渠底泥磷形态分布特征及风险评价[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(3): 161-166. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6504.2017.02.026.
- [41] RYDIN E. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment[J]. *Water Research*, 2000, 34(7): 2037-2042. DOI: 10.1016/S0043-1354(99)00375-9.
- [42] SHOJA H, RAHIMI G, FALLAH M, *et al.* Investigation of phosphorus fractions and isotherm equation on the lake sediments in Ekbatan Dam (Iran)[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(6): 1-15. DOI: 10.1007/s12665-017-6548-2.
- [43] SHEN Dali, HUANGSaihua, ZHANG Yiping, *et al.* The source apportionment of N and P pollution in the surface waters of lowland urban area based on EEM-PARAFAC and PCA-APCS-MLR[J]. *Environmental Research*, 2021, 197(13): 111022. DOI: 10.1016/J.ENVRES.2021.111022.
- [44] DAN F S, LIU Sumei, YANG Bin. Geochemical fractionation, potential bioavailability and ecological risk of phosphorus in surface sediments of the Cross River estuary system and adjacent shelf, South East Nigeria (West Africa)[J]. *Journal of Marine Systems*, 2020, 201(C): 103244. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2019.103244.
- [45] WANG Xiaoli. Phosphorus fractionation and bio-availability in surface sediments from the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 12: 379-386. DOI: 10.1016/j.proenv.2012.01.293.
- [46] 高春梅, 朱珠, 王功芹, 等. 海州湾海洋牧场海域表层沉积物磷的形态与环境意义[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(11): 3437-3444. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6923.2015.11.031.
- [47] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价[J]. *环境科学*, 2010, 31(4): 961-968. DOI: 10.13227/j.hjxx.2010.04.003.
- [48] 刘伟, 褚一凡, 谭启洋, 等. 鄱阳湖西侧周边农村水塘夏季表层沉积物氮、磷、有机质分布特征及评价[J]. *湖泊科学*, 2023, 35(1): 192-202. DOI: 10.18307/2023.0113.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 刘源岗)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202403016



# 厦门营平近代骑楼楼梯间热压通风 对夏季室内热环境的影响

黄鹭红<sup>1</sup>, 梁露丹<sup>1</sup>, 石悦含<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021;

2. 湖北省建筑科学研究设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430061)

**摘要:** 为研究厦门市营平片区近代骑楼公共楼梯竖向空间触发的热压通风对夏季室内热环境的改善效果, 选取一个具备热压通风和单侧通风条件的典型案例, 对室内外风速、空气温度和湿度进行现场实测。实测数据分析结果表明:热压通风期间,2层的室内外平均风速比是单侧通风的2.3倍,其室内通风和降温效果均显著优于单侧通风,能有效改善2层的室内热环境和风环境,13:00-15:00期间,热压通风效果达到峰值,可使人体热感降低1.07℃;而热压通风3层的室内风速与单侧通风的相当,不足以产生明显的室内气温差异;热压和单侧通风期间,3层室内气温明显随室外气温波动,建议增设屋面隔热保温层,增加楼梯间伸出屋面的高度及其顶部开口率,以降低3层室内太阳辐射得热,提高室内风速,增强热压通风对室内热环境的影响。

**关键词:** 近代骑楼; 楼梯间; 热压通风; 室内热环境; 厦门市营平片区

中图分类号: TU 111.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)06-0740-06

## Effect of Thermal Pressure Ventilation Strengthened by Stairwell on Summer Indoor Thermal Environment in Traditional Qilou Building in Yingping District of Xiamen City

HUANG Luhong<sup>1</sup>, LIANG Ludan<sup>1</sup>, SHI Yuehan<sup>2</sup>

(1. College of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Hubei Provincial Academy of Building Research and Design Limited Company, Wuhan 430061, China)

**Abstract:** To study the improvement effect of thermal pressure ventilation strengthened by stairwell on summer indoor thermal environment in the traditional Qilou buildings in Yingping District of Xiamen City, one typical case with thermal pressure ventilation and unilateral wind pressure ventilation was selected, and the indoor and outdoor wind speed, temperature and humidity were measured. The analysis of measure data illustrates that, with thermal pressure ventilation, the second floor's indoor ventilation and cooling effect are significantly better than those with unilateral wind pressure ventilation, the average of the indoor and outdoor wind speed ratio is 2.3 times higher than that with unilateral wind pressure ventilation, and during 13:00-15:00, the indoor wind speed reaches peak value, the human body thermal sensation could reduce 1.07℃. However, the indoor wind speed of the third floor of hot pressure ventilation is equivalent to that of single-sided ventilation, which is not enough to produce significant differences in indoor temperature. During hot pressing and unilateral ventilation, the indoor temperature on the third floor fluctuates significantly with the outdoor air temperature.

收稿日期: 2024-03-09

通信作者: 黄鹭红(1979-),女,副教授,博士,主要从事建筑设计及其理论研究。E-mail:287069663@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51408515);福建省自然科学基金面上资助项目(2021J01301)

It is recommended to add a roof insulation layer and to increase the height of the staircase protruding from the roof and its top opening ratio, in order to reduce the indoor solar radiation heat gain of the third floor, to increase indoor wind speed, and to enhance the impact of thermal pressure ventilation on the indoor thermal environment.

**Keywords:** traditional Qilou; stairwell; thermal pressure ventilation; indoor thermal environment; Yingping District of Xiamen City

骑楼是在我国南方湿热地区广泛存在的临街商住楼,大进深小面宽。目前,针对骑楼室内自然通风的研究主要集中在漳州、泉州和广州等地区,研究内容侧重于天井和廊道对骑楼热压和对流通风的影响<sup>[1-3]</sup>。厦门近代骑楼不同于漳泉、广东、广西等其他南方地区的骑楼,它层数多、大多无天井,随着城市化进程和老城区的高密度发展,产权几经分割,形成大量的单面采光通风户型,夏季室内湿热且自然通风条件较差,严重影响居住品质<sup>[4]</sup>,学界在天井“烟囱效应”促进通风方面的研究成果对于鲜有天井的厦门近代骑楼的适用性不强。因此,本文通过对比现场实测数据,研究厦门近代骑楼梯间热压通风对夏季室内热环境的影响,并提出改善措施和建议。

## 1 公共竖向楼梯热压通风潜能

营平历史街道及骑楼现状分布,如图 1 所示。厦门营平片区以鹭江道、厦禾路、思明北路和大同路为边界,包含了厦门“五纵两横”近代骑楼的“三纵”(厦禾路、开元路、大同路)和“两横”(开禾路、思明北路),保留着“下商上住”的最初格局,沿街界面完整统一,是厦门近代骑楼街区的典型代表。营平片区沿街 337 户近代骑楼的公共竖向楼梯空间可分为 3 个大类、6 个子类(表 1),其中,楼梯位于住宅中心且四周临内墙(a1)的空间类型占比高达 77.15%,在营平片区内最普遍。

相较于其他类型, a1 类型的楼梯位置分布于建筑平面的几何中心,楼梯间产生的热压抽拔力能更均匀地影响到户内空间,有利于实现户内风环境的全域优化,可见,厦门营平近代骑楼公共楼梯间具备良好的热压通风潜能。选取 a1 类型空间的骑楼为样本,对比测试公共楼梯间的热压通风潜能被激活前、后的骑楼室内热环境状况。

## 2 室内热环境测试概况

### 2.1 测试对象及测试工况

厦门地区夏季盛行偏南风,选定建筑朝向与盛行风向垂直的担水巷 3 号骑楼,研究在风压通风最不利条件下热压通风对室内热环境的改善效果。

担水巷 3 号是一栋典型的沿街骑楼,共 3 层,

底层和上部住宅出入口分离,上部住宅的楼梯间顶部对外界有可开闭的开口。其住宅平面图及测点布置图,如图 2 所示。楼梯间位于住宅中心且四周临内墙,属最常见的空间类型(a1);上部住宅每层为两户一室一厅的单侧通风户型,为避免盛行风对热压通风的影响,以西北朝向的户型为测试对象。

实验设计了 2 种实测工况。工况 1 测试时间为 2021 年 8 月 21 日 9:00—18:00,利用楼梯间的“烟囱效应”引起室内外空气流动;测试对象的窗户和分户门均开启、楼梯间顶部开口开启。工况 2 测试时间为 2021 年 8 月 22 日 9:00—18:00,通过风压引起室内外空气流动,测试对象处于常态下的单侧通风状态:窗户开启,分户门关闭,楼梯间出屋面的开口关闭。

测试两日天气晴朗,以偏南风为主,全天室外平均气温分别为 30.7、30.8℃,室外平均湿度分别为



图 1 营平历史街道及骑楼现状分布  
Fig. 1 Current distribution of historical streets and traditional Qilou in Yingping

表 1 营平近代骑楼公共竖向楼梯空间分类统计表  
Tab. 1 Classification and statistics of public vertical stairwell space in traditional Qilou in Yingping

公共竖向空间类型		数量/户	比例/%
大类	子类		
楼梯位于中心(A)	楼梯四周临内墙(a1)	260	77.15
	楼梯一侧临外墙(a2)	15	4.45
	楼梯单侧临墙(b1)	36	10.68
楼梯位于端部(B)	楼梯两侧临墙(b2)	14	4.15
	楼梯局部外凸(b3)	1	0.30
	楼梯局部外凸(b3)	5	1.48
楼梯贯通两端(C)		6	1.78
总计		337	100.00

78.7%, 78.1%。测试期间(9:00—18:00),室外平均气温分别为 34.6, 34.0 °C;室外平均风速分别为 0.51, 0.59  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,单侧通风工况的室外气温略低于热压通风,室外风速略高于热压通风,其气象条件更有利于室内散热,降低人体热感觉。

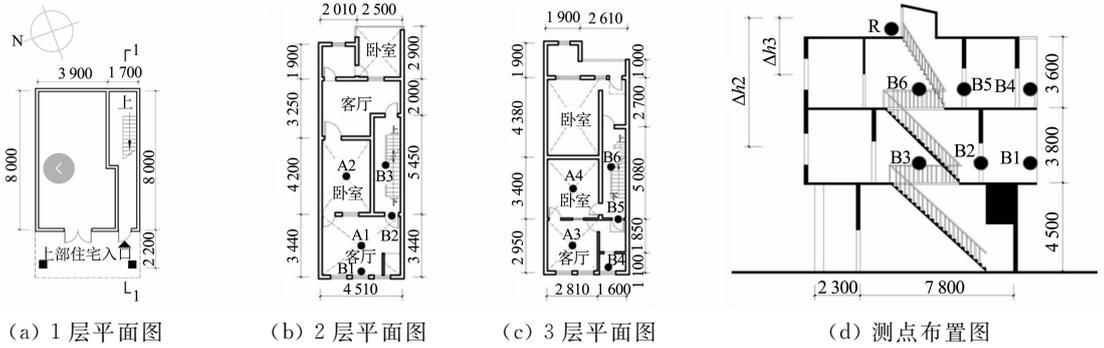


图2 担水巷3号住宅平面图及测点布置图(单位:mm)

Fig. 2 Plan and measurement point layout of residential building No. 3 in Danshui Lane (unit: mm)

## 2.2 测试仪器及测点布置

测量的热环境参数包括室内外风速(测点 R, B1~B6)、室内外空气温度和湿度(测点 R, A1~A4)。实测采用人工记录和自动记录相结合的方式。各测点风速每小时人工同步测量1次,空气温度和湿度数据每5 min自动同步采集1次。

风速和空气温湿度测试分别采用 Testo425 型热线风速计和 AZ8829 型温湿度记录仪,精度分别为  $\pm 0.03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\pm 0.6 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $\pm 3\%$ 。测点设置在距楼地面 1.5 m 的高度上(图2)。为了避免太阳辐射对温湿度测量的影响,室外温湿度感应器加装防辐射罩。

## 3 室内热环境实测分析

2种工况下风速和空气温度随时间的变化情况,如图3,4所示。图3,4中: $v_h, \theta_h$ 为热压通风风速和温度; $v_u, \theta_u$ 为单侧通风风速和温度。由图3,4可知以下4点结论。

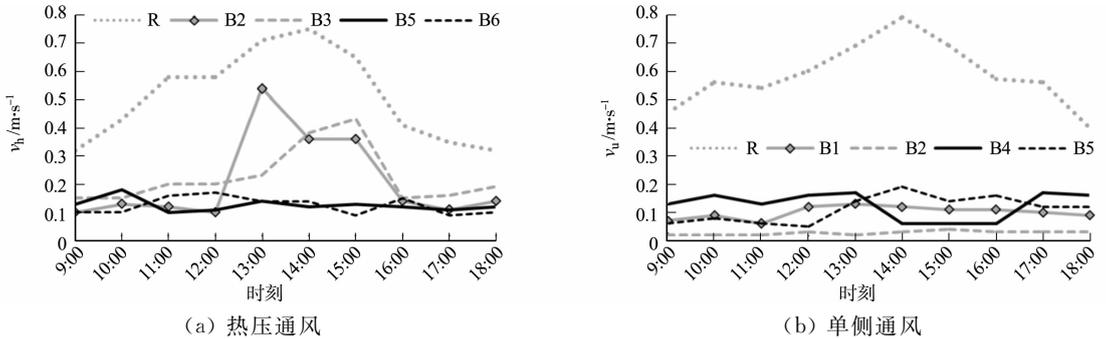


图3 2种工况下风速随时间变化曲线

Fig. 3 Curves between time and wind speed under two working conditions

1) 测试期间,受屋顶热辐射影响,2层的气温始终低于3层。

2) 单侧通风时,3层受周边建筑的遮挡小于2层,3层的室内风速大于2层。

3) 热压通风时,2层的通风效果优于3层。据统计,测试期间2层(测点 B2, B3)的平均风速比3层(测点 B5, B6)的高  $0.09 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这是由于白天楼梯间顶部开口附近的空气受热上升,周围较低温度的空气不断流入楼梯间进行补充,促成室内空气流通。楼梯间顶部开口和各进风口间的高度差( $\Delta h$ )和温度差( $\Delta t$ )决定了空气流通的效果,两者的值越大,通风效果越好。图2中: $\Delta h_2$ 大于 $\Delta h_3$ ,而且受屋顶热辐射作用,3层室内气温高于2层,导致楼梯间顶部开口与2层进风口的气温差大于其与3层进风口的气温差,因此,热压通风时,2层的室内风速高于3层。

4) 热压通风时,2层风速随时间变化明显,13:00—15:00期间,室内风速显著增加。但热压通风时3层风速均处于低值稳定状态,与单侧通风的2,3层室内风速变化规律一致。

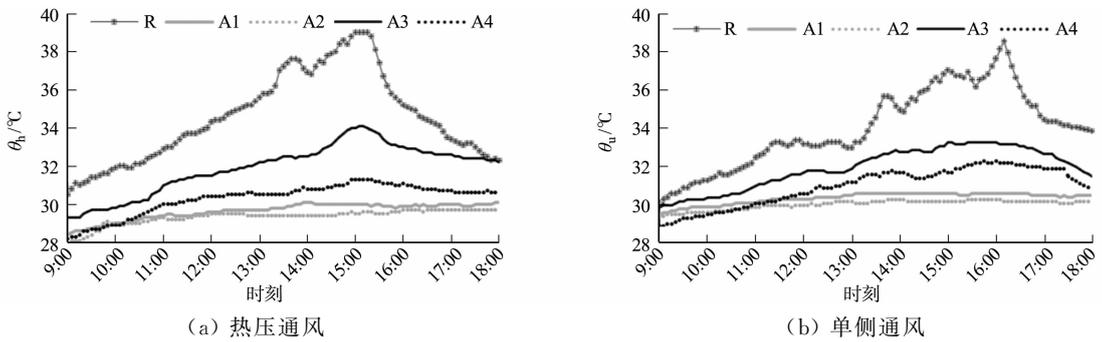


图 4 2 种工况下空气温度随时间变化曲线

Fig. 4 Curves between time and air temperature under two working conditions

### 3.1 室内外风速对比

由于不同工况的风速不是同时测量,对同一时刻室内外风速比(简称风速比)进行对比。风速比越大,表明其风速衰减度越小,室内通风状态越好,越适宜湿热地区的气候条件。

两种工况室内 6 个测点的风速平均值,如表 2 所示。表 2 中:  $v_a$  为室内风速平均值。以热压通风的风速均值各层最低测点(B2, B6)、风压通风的风速均值各层最高测点(B1, B4)为样本,计算风速比( $\delta$ )。

各样本测点的风速比及其箱型图,如图 5 所示。由图 5 可知:测试期间的风速比平均值排序为 B2(热压 2 层) > B6(热压 3 层) > B4(单侧 3 层) > B1(单侧 2 层);测试期间,2 层的热压通风风速比平均值是单侧通风的 2.3 倍,其风速比除了在 12:00 时略低于单层通风外,其余时刻均明显高于单层通风,尤其在 13:00—15:00 期间,其风速比平均值是单侧通风的 3.6 倍;测试期间,3 层的热压通风风速比平均值是单侧通风的 1.1 倍,其风速比在 14:00—16:00 期间显著高于单层通风,其余时刻略小于或略大于单层通风。

可见,热压通风时,各层风速最低区域的风速比平均值均大于单侧通风时风速最高区域,其风速的平均衰减度小于单侧通风;2 层室内通风状况显著优于单侧通风,3 层室内通风状况与单侧通风相当。

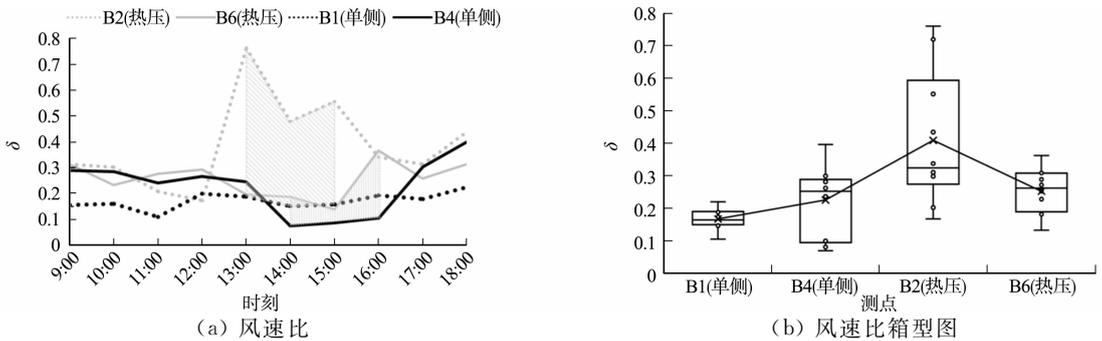


图 5 各样本测点的风速比及其箱型图

Fig. 5 Wind speed ratio and box plot of each sample measurement point

### 3.2 室内温度对比

客厅位于室内外空气流通的主要路径上,因此,将其作为各层的典型房间,不同工况的室内气温,如图 6 所示。图 6 中:  $\theta$  为空气温度。由图 6 可知以下 3 点结论。

1) 9:00—15:40 期间,热压通风的室外气温高于单侧通风,平均温差达 1.3 °C;15:40—18:00 期间,热压通风的室外气温低于单侧通风,平均温差达 1.5 °C。

2) 9:00—15:40 期间,热压通风在室外气温高于单侧通风的情况下,其 2 层客厅的室内气温始终低于单侧通风,平均温差为 0.63 °C;15:40—18:00 期间,该温度仍持续低于单侧通风,平均温差为 0.49 °C。可见,热压通风对 2 层的降温效果显著优于单侧通风,该优势受室外气温影响很小。

3) 9:00—15:40 期间,热压通风的 3 层客厅的室内平均气温比单侧通风的高  $0.18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 15:40—18:00 期间,受室外气温影响,该平均温度比单侧通风的低  $0.14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见,由于屋顶隔热措施不完备,3 层的室内气温明显随室外气温而波动,自然通风方式转换产生的室内风速变化对其影响权重远不及室外气温。

### 3.3 室内综合补偿温度对比

夏季偏热环境下,加强空气流动能够降低人体热感觉,改善人体热舒适性;而相对湿度的上升会降低人体的蒸发和呼吸的散热效率,增加人体热感觉,加剧热不适感<sup>[5-13]</sup>。热压通风测试期间,在通风最佳时段(13:00—15:00)内,室内气温和风速同时处于高峰,室内风速的升高一定程度上消除了气温上升对人体热感觉的影响,提升了人体的热适应性。

将风速和湿度对人体热感的影响表示为对人体造成同等热感的空气温度,即综合补偿温度,其中包括风速补偿温度  $\theta_v$ <sup>[14]</sup>和湿度补偿温度  $\theta_\varphi$ <sup>[5]</sup>,即

$$\theta_v = \begin{cases} 0.55v/0.15 - 4(\varphi - 70\%), & \varphi \geq 70\%, \\ 0.55v/0.15, & \varphi < 70\%, \end{cases} \quad (1)$$

$$\theta_\varphi = (0.25/10\%) \times (60\% - \varphi), \quad \varphi \geq 60\%, \quad (2)$$

$$\theta_c = \theta_v + \theta_\varphi. \quad (3)$$

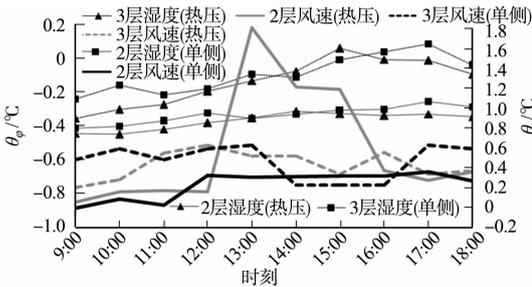
式(1)~(3)中: $v$ 为室内风速; $\varphi$ 为相对湿度; $\theta_c$ 为综合补偿温度。

夏季综合补偿温度越高,表明室内的风速和相对湿度在降低人体热感方面的效果越明显,室内热环境越佳。利用式(1)~(3)分别计算两种工况各层客厅在不同时刻的综合补偿温度。计算时,热压通风的室内风速取各层最不利值(测点 B2, B6 的测量值),单侧通风的室内风速取各层最优值(测点 B1, B4 的测量值)。计算结果,如图 7 所示。由图 7 可知以下 3 点结论。

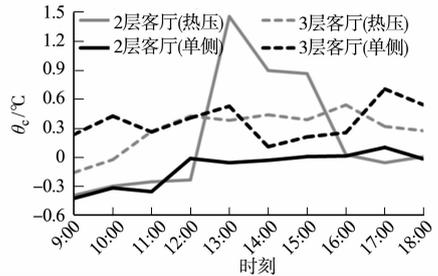
1) 测试期间各层湿度补偿温度的平均值均为负值,且同层 2 种工况的数值非常接近。可见,室内湿度加大了人体热感觉负担,且同层湿度对热感觉的负作用受自然通风状态的影响很小。

2) 测试期间,单侧通风当日的室外气象条件更有利于室内散热和降低人体热感觉,但其 2 层的综合补偿温度均小于或接近 0。可见单侧通风对 2 层的人体热感觉无积极效应。

3) 在室外平均气温最高的 13:00—15:00 期间,2 层和 3 层热压通风的综合补偿温度的平均值分别为  $1.07, 0.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,且大部分时间热压通风各层的综合补偿温度均比同层单侧通风的高,2 层和 3 层的平均值分别比单侧通风的高  $1.10, 0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见,在夏季室内外气温的高峰时段(13:00—15:00),热压通风对人体热感觉的改善效果比单侧通风的好,尤对 2 层的效果更佳。



(a) 湿度补偿温度、风速补偿温度



(b) 综合补偿温度

图 7 各层客厅的湿度、风速和综合补偿温度

Fig. 7 Humidity, wind speed and comprehensive compensation temperature of each living room on each floor

## 4 结论

厦门营平片区 77.15% 的近代骑楼楼梯位于住宅中心且四周临内墙,公共楼梯间具备良好的热压通风潜能。相较单侧通风,利用楼梯竖向空间进行热压通风能有效改善 2 层的室内热环境和风环境。

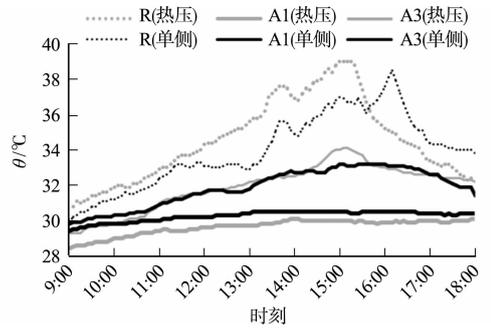


图 6 各层典型房间的室内气温

Fig. 6 Indoor temperature of typical rooms on each floor

测试期间,热压通风的2层风速最低区域的风速比平均值是单侧通风风速最高区域的2.3倍;2层室内通风和降温效果均显著优于单侧通风期间,该优势受室外气温影响很小。而且在室外气温最高的13:00—15:00期间,热压通风能使2层的人体热感降低 $1.07\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,而单侧通风却使人体热感增加了 $0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对人体热感无积极效应。

由于屋顶隔热措施不完备,3层室内气温明显随室外气温而波动;热压通风的3层风速与单侧通风的相当,13:00—15:00期间,热压通风使3层的人体热感降低 $0.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,仅比单侧通风的多 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,自然通风方式不同,产生的室内风环境差异对室内气温的影响权重远不及室外气温。

因此,增设屋面隔热保温层,减少室内的太阳辐射得热,是改善顶层室内热环境的最有效措施。其次,适当增加楼梯间伸出屋面的高度<sup>[15]</sup>与楼梯间的顶部开口率<sup>[16]</sup>,增加热压通风的风口高度差,以加强顶层热压,提升3层室内风速,是扩大热压通风对单侧通风领先优势的重要措施。

## 参考文献:

- [1] 薛佳薇,冉茂宇,吴扬. 泉州不同朝向骑楼柱廊夏季热环境测试与比较分析[J]. 建筑科学,2011,27(8):17-23. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2011.08.009.
- [2] 陈敬,王丽娟,刘加平,等. 海口传统骑楼夏季室内热环境测试研究[J]. 建筑科学,2011,27(4):42-47. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2011.04.008.
- [3] 蓝洪宁. 基于建筑环境舒适性的广州骑楼参数化改造设计研究[D]. 广州:华南理工大学,2019. DOI:10.27151/d.cnki.ghnlu.2019.003398.
- [4] 石悦含,黄鹭红. 厦门骑楼住宅自然通风优化研究:以营平片区为例[D]. 厦门:华侨大学,2022. DOI:10.27155/d.cnki.ghqiu.2022.000798.
- [5] ZHAI Yongchao, MIAO Fengyu, YANG Liu, *et al.* Using personally controlled air movement to improve comfort after simulated summer commute[J]. Building and Environment, 2019, 165:106329. DOI:10.1016/j.buildenv.2019.106329.
- [6] 崔惟霖,欧阳沁,余娟,等. 相同热感觉条件下不同环境温度与风速组合对人体舒适性及工作效率的影响[J]. 暖通空调,2013,43(7):68-72.
- [7] 谈美兰. 夏季相对湿度和风速对人体热感觉的影响研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [8] 徐小林. 重庆夏季室内热环境对人体生理指标及热舒适的影响研究[D]. 重庆:重庆大学,2005.
- [9] 田元媛,许为全. 湿热环境下人体热反应的实验研究[J]. 暖通空调,2003,33(4):27-30.
- [10] DE DEAR R J, AKIMOTO T, ARENS E A, *et al.* Progress in thermal comfort research over the last twenty years [J]. Indoor Air, 2013, 23(6):442-461. DOI:10.1111/ina.12046.
- [11] JIN Ling, ZHANG Yufeng, ZHANG Zhongjun. Human responses to high humidity in elevated temperatures for people in hot-humid climates[J]. Building and Environment, 2017, 114:257-266. DOI:10.1016/j.buildenv.2016.12.028.
- [12] ZUO Chunying, LUO Lin, LIU Weiwei. Effects of increased humidity on physiological responses, thermal comfort, perceived air quality, and sick building syndrome symptoms at elevated indoor temperatures for subjects in a hot-humid climate[J]. Indoor Air, 2020, 31(2):524-540. DOI:10.1111/ina.12739.
- [13] SU Xing, ZHANG Xu, GAO Jun. Evaluation method of natural ventilation system based on thermal comfort in China[J]. Energy and Buildings, 2009, 41(1):67-70. DOI:10.1016/j.enbuild.2008.07.010.
- [14] 王宇,易小楠. 成都地区气候条件对人体热舒适影响的研究[J]. 制冷与空调,2011,25(1):19-22. DOI:10.3969/j.issn.1671-6612.2011.01.005.
- [15] 周孝清,徐敏,庞玥,等. 竹筒屋天井的热压通风的潜力分析[J]. 华中建筑,2021,39(11):49-53. DOI:10.13942/j.cnki.hzjz.2021.11.011.
- [16] 贾佳,倪阳,贺维桢. 拔风井对改善办公建筑过渡空间自然通风效果的模拟与验证:以华南理工大学广州国际校区大数据实验中心为例[J]. 建筑学报,2021(增刊2):86-93.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202401010



# 肝细胞癌铁死亡特征基因的 ceRNA 调控网络构建及分析

朱亚玲, 方杉杉, 黎祎杰, 徐先祥, 刁勇

(华侨大学 医学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 通过构建肝细胞癌(HCC)铁死亡特征基因的 ceRNA 调控网络,探讨特征基因在 HCC 中的预后价值。筛选差异表达铁死亡相关基因(DE-FRGs),构建 DE-FRGs 的预后风险模型。采用生存分析、独立预后分析、ROC 曲线及 C 指数分析评价模型的准确性。比较高、低风险组间免疫细胞浸润、肿瘤微环境及免疫治疗反应的差异。构建并分析铁死亡特征基因的 ceRNA 调控网络。结果表明:高风险组 HCC 患者总生存期和无进展生存期显著低于低风险组;风险评分和肿瘤分期为 HCC 患者的独立预后因素;与其他临床特征相比,预后风险模型具有更好的预测能力;高、低风险组 HCC 患者在免疫细胞浸润、肿瘤微环境及免疫治疗反应等方面的差异具有统计学意义;ceRNA 调控网络中,*SLC7A11* 的高表达与 HCC 患者预后不良密切相关。

**关键词:** 肝细胞癌; 铁死亡; ceRNA; 预后; 免疫细胞浸润

中图分类号: R 735.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)06-0746-10

## Construction and Analysis of ceRNA Regulatory Network of Ferroptosis Feature Genes in Hepatocellular Carcinoma

ZHU Yaling, FANG Shanshan, LI Yijie,  
XU Xianxiang, DIAO Yong

(School of Medicine, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** By constructing a ceRNA regulatory network of ferroptosis feature genes in hepatocellular carcinoma (HCC), the prognostic value of feature genes in HCC was explored. The differential expression of ferroptosis-related genes (DE-FRGs) was screened and a prognostic risk model of DE-FRGs was constructed. The accuracy of the model was evaluated using survival analysis, independent prognostic analysis, ROC curve and C index analysis. The differences of immune cell infiltration, tumor microenvironment and immunotherapy response were compared between high-risk and low-risk groups. The ceRNA regulatory network of ferroptosis feature genes was constructed and analyzed. The results showed that the overall survival and progression free survival of HCC patients in the high-risk group were significantly lower than those of the low-risk group. Risk score and tumor stage were independent prognostic factors for HCC patients. Compared with other clinical features, prognostic risk model had better predictive power. There were significant differences in immune cell infiltration, tumor microenvironment and immunotherapy response between high-risk and low-risk groups. High expression of *SLC7A11* in the ceRNA network was closely associated with poor prognosis in HCC patients.

收稿日期: 2024-01-10

通信作者: 刁勇(1967-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事基因治疗药物的研究。E-mail: diaoyong@hqu.edu.cn。

基金项目: 福建省泉州市高层次人才项目(2022C006R)

**Keywords:** hepatocellular carcinoma; ferroptosis; ceRNA; prognosis; immune cell infiltration

肝细胞癌(HCC)是肝脏恶性肿瘤的主要形式,占原发性肝癌病例的75%~85%<sup>[1-2]</sup>。虽然手术切除、肝移植、介入治疗、靶向治疗和免疫治疗等技术不断提升,但多数HCC患者被确诊时已为晚期,且复发率和转移率高,导致患者预后较差<sup>[3]</sup>。临床上常用TNM分期系统<sup>[4]</sup>和巴塞罗那临床分期系统<sup>[5]</sup>指导HCC患者治疗和预后预测,但其对患者预后预测的效果非常有限,因此,迫切需要寻找可靠的生物标志物用于HCC早期诊断、治疗和预后预测。

铁死亡是一种铁依赖性的调节性细胞死亡方式,由细胞内铁离子超载、活性氧积累、脂质过氧化和各种细胞死亡效应器的激活所驱动,最终导致质膜破裂和细胞死亡<sup>[6-7]</sup>。大量研究表明,铁死亡与HCC<sup>[8]</sup>、乳腺癌<sup>[9]</sup>、卵巢癌<sup>[10]</sup>等多种癌症的发展相关。有报道称,*CISDI*和*TP53*基因多态性能抑制HCC细胞铁死亡,这证明铁死亡相关基因在HCC进展中发挥作用<sup>[11-12]</sup>。此外,还有研究发现*NRF2*、*ABHD12*和*MT1G*等铁死亡相关基因对索拉非尼诱导的HCC细胞铁死亡具有保护作用<sup>[13-15]</sup>。近年来,诱导肿瘤细胞铁死亡已成为一种很有前景的肿瘤治疗策略。

竞争性内源RNA(ceRNA)是一种复杂的转录后调控机制,涉及lncRNA、miRNA和mRNA等多种分子<sup>[16]</sup>。lncRNA和mRNA具有相同的miRNA应答元件(MRE),lncRNA可通过竞争性结合MRE间接调节mRNA表达水平和细胞功能<sup>[17]</sup>。有研究发现,lncRNA NEAT1可通过与miR-362-3p的竞争性结合促进*MIOX*的表达,从而增强erastin诱导的HCC细胞铁死亡<sup>[18]</sup>。CeRNA网络在HCC细胞铁死亡过程中发挥重要的调控作用<sup>[19]</sup>,但其作用机制仍有待进一步完善。本文利用TCGA数据库筛选HCC患者差异表达铁死亡相关基因,并基于HCC患者的预后风险模型构建铁死亡特征基因的ceRNA调控网络,以期为深入研究HCC铁死亡调控机制、探索诱导铁死亡相关治疗靶点提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 数据来源

图1为研究流程。从TCGA数据库(<https://portal.gdc.cancer.gov/>)下载374例HCC组织样本和50例正常组织样本的RNA-Seq转录组测序数据及临床资料。利用Perl软件整理并提取各样本的RNA表达矩阵和生存时间、生存状态、年龄、性别、分级、分期等临床特征信息,剔除信息不全的样本。利用GENECODE网站(<https://www.genecodegenes.org/>)下载人类基因注释GTF文件,对RNA表达矩阵进行注释,从而区分mRNA和lncRNA。以ferroptosis为关键词,分别在NCBI数据库(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/>)和GeneCards数据库(<https://www.genecards.org/>)检索,得到364个铁死亡相关基因(FRGs)。

采用R软件的edgeR包对HCC组织和正常组织进行差异分析,以 $|\log_2 FC| > 1.5$ ,  $FDR < 0.05$  (FC为差异倍数, FDR为错误发现率)为条件,筛选差异表达基因(DEGs)和差异表达lncRNAs(DELncRNAs)。将DEGs与FRGs取交集,得到差异表达铁死亡相关基因(DE-FRGs)。利用R软件clusterProfiler包对DE-FRGs进行基因本体(GO)和京都基因与基因组百科全书(KEGG)通路富集分析,并通过ggplot2包对富集结果进行可视化。当 $P < 0.05$ 时,差异具有统计学意义。

### 1.2 差异表达铁死亡相关基因的获取及富集分析

采用R软件survival包进行单因素Cox回归分析(过滤标准为 $P < 0.05$ ),筛选与HCC患者预后相关的DE-FRGs。为避免模型过度拟合,使用glmnet包进行最小绝对收缩并选择算子(LASSO)回归

### 1.3 预后风险模型的构建及评价

采用R软件survival包进行单因素Cox回归分析(过滤标准为 $P < 0.05$ ),筛选与HCC患者预后相关的DE-FRGs。为避免模型过度拟合,使用glmnet包进行最小绝对收缩并选择算子(LASSO)回归

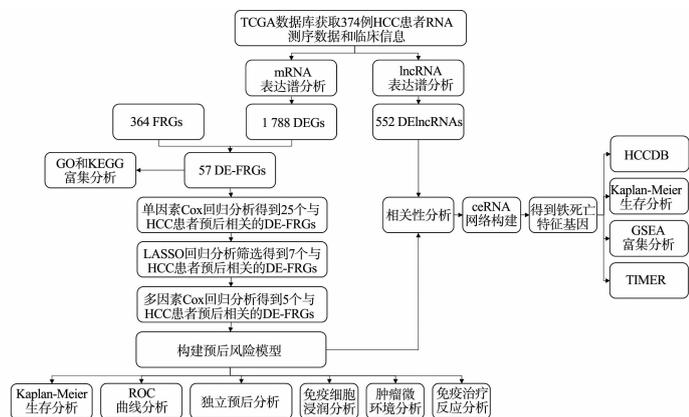


图1 研究流程

Fig. 1 Research process

分析,选取平均交叉验证误差最小的 $\lambda$ 值( $\lambda$ 值决定了回归系数被压缩的程度, $\lambda$ 值越大,模型系数越小)。通过多因素Cox回归分析,构建预后风险模型并计算风险评分,根据风险评分的中位值,将HCC患者分为高风险组和低风险组。采用Kaplan-Meier生存分析评估高、低风险组间的总生存期和无进展生存期的差异。通过对风险评分和患者年龄、性别、分级、分期等临床特征进行单因素和多因素Cox回归分析,验证该模型是否能作为HCC患者的独立预后因素。使用timeROC包绘制受试者操作特征(ROC)曲线,计算曲线下面积(AUC),AUC值越大,表示模型的准确性越好。运用rms包计算模型的C指数,以评价模型的预测能力。

#### 1.4 肿瘤免疫浸润分析及免疫治疗的评价

使用GSVA、GSEABase包进行ssGSEA富集分析,评估高、低风险组HCC患者间肿瘤免疫细胞浸润及免疫功能的差异。通过estimate包计算每个肿瘤组织的基质评分、免疫评分、ESTIMATE评分和肿瘤纯度,并分析肿瘤微环境在高、低风险组间是否存在差异。采用TIDE算法计算每位患者的TIDE评分,以预测高、低风险组HCC患者对免疫治疗的反应。

#### 1.5 铁死亡特征基因 ceRNA 调控网络的构建

将铁死亡特征基因与DElncRNAs进行Spearman相关性分析,以相关性系数 $|r| > 0.3, P < 0.001$ 为筛选标准,得到铁死亡相关差异表达lncRNAs(FR-DElncRNAs)。通过miRcode数据库(<http://www.mircode.org/>)下载高度保守的microRNA家族文件,使用Perl软件比对获得FR-DElncRNAs与miRNA相互作用关系。利用TargetScan数据库([https://www.targetscan.org/vert\\_80/](https://www.targetscan.org/vert_80/))、miRTarBase数据库([https://mirtarbase.cuhk.edu.cn/~miRTarBase/miRTarBase\\_2022/php/index.php](https://mirtarbase.cuhk.edu.cn/~miRTarBase/miRTarBase_2022/php/index.php))和miRDB数据库(<https://mirdb.org/>)预测miRNA调控的mRNA,并与铁死亡特征基因取交集,得到miRNA与mRNA的关系对。采用Cytoscape软件构建铁死亡特征基因的ceRNA调控网络。

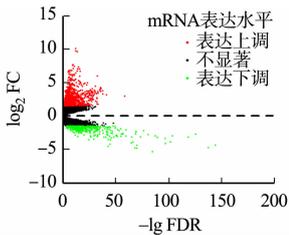
#### 1.6 ceRNA 调控网络中特征基因的分析

首先,利用HCCDB数据库(<http://lifeome.net/database/hccdb/home.html>)中15个公开的HCC表达数据集验证特征基因在HCC中的表达情况。采用Kaplan-Meier Plotter数据库(<http://kmplot.com/analysis/index.php?p=background>)进行生存分析,以评估特征基因的表达与HCC患者生存率之间的相关性。随后,通过GSEA富集分析,预测特征基因在HCC发生发展中的作用机制。最后,运用TIMER数据库(<https://cistrome.shinyapps.io/timer/>)可视化特征基因在泛癌中的表达情况,并分析其表达与HCC免疫细胞浸润的相关性。

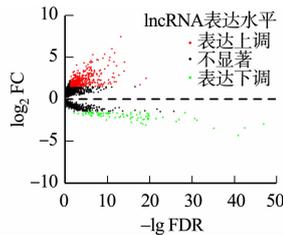
## 2 实验结果与分析

### 2.1 差异表达铁死亡相关基因的获取

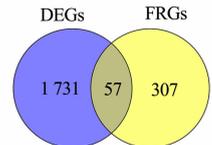
差异表达分析结果,如图2所示。分析TCGA数据库中HCC组织和正常组织的转录组数据,共得到1788个DEGs,其中,上调基因1400个,下调基因388个(图2(a));得到DElncRNAs 552个,其中,表达上调463个,表达下调89个(图2(b));DEGs与FRGs取交集,得到57个DE-FRGs(图2(c))。



(a) mRNA 差异分析火山图



(b) lncRNA 差异分析火山图



(c) DE-FRGs 韦恩图

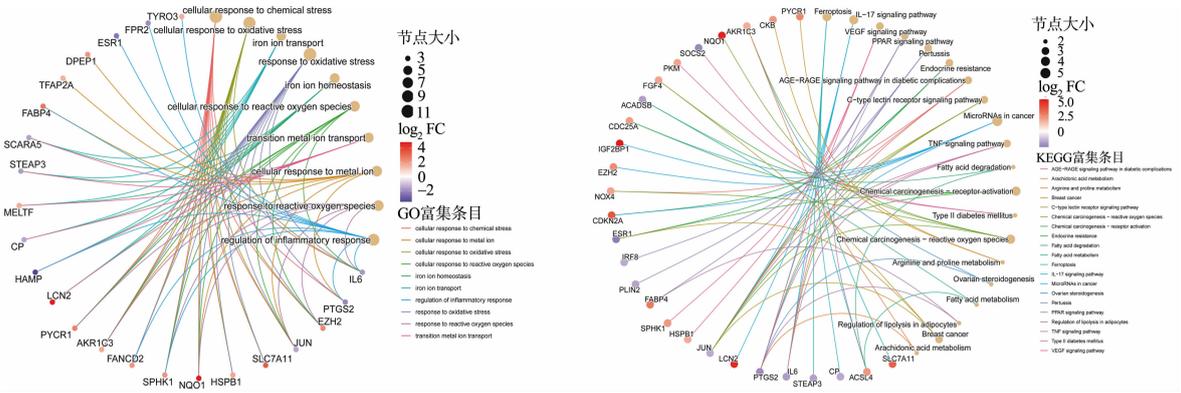
图2 差异表达分析结果

Fig. 2 Analysis results of differential expression

### 2.2 DE-FRGs 的富集分析

利用R软件对57个DE-FRGs进行富集分析,如图3所示。由图3(a)可知:DE-FRGs主要参与细胞对氧化应激的反应、铁离子运输、铁离子稳态、细胞对活性氧的反应、炎症反应的调节等生物过程。由

图 3(b)可知;DE-FRGs 参与调控铁死亡、IL17 信号通路、VEGF 信号通路、PPAR 信号通路、TNF 信号通路等,这些通路在肝癌的发生发展过程中发挥重要作用。



(a) GO 富集分析

(b) KEGG 富集分析

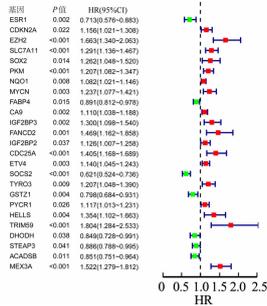
图 3 功能富集分析

Fig. 3 Functional enrichment analysis

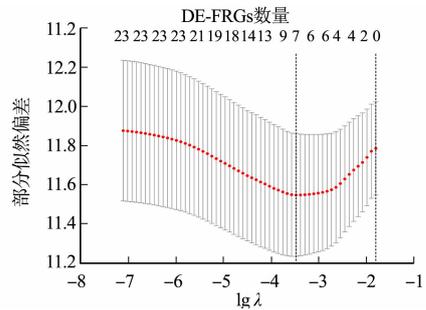
### 2.3 预后风险模型的构建

构建预后风险模型,结果如图 4 所示。图 4 中:HR 为风险比;95%CI 为 95%置信区间。通过单因素 Cox 回归分析筛选出 25 个与 HCC 患者预后相关的 DE-FRGs(图 4(a));经 LASSO 回归进一步分析得到 7 个与 HCC 患者预后相关的 DE-FRGs(图 4(b),(c));通过多因素 Cox 回归分析,得到 5 个用于构建预后风险模型的 DE-FRGs,其中,SOCS2 为 HCC 患者预后的保护因素,EZH2,SLC7A11,NQO1,MYCN 为 HCC 患者预后的风险因素(图 4(d))。

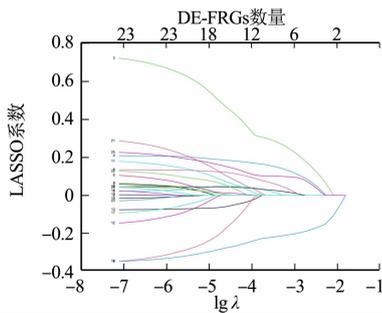
基于这 5 个 DE-FRGs 构建预后风险模型的风险评分方程,即风险评分=0.422×EZH2+0.211×SLC7A11+0.052×NQO1+0.158×MYCN-0.273×SOCS2。以风险评分的中位值(0.971)为界,将 HCC 患者分为高风险组和低风险组。



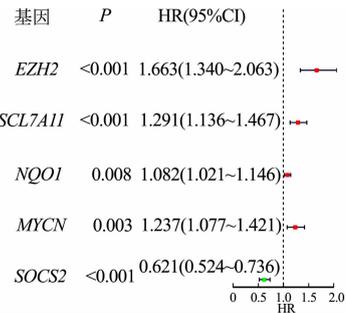
(a) 单因素 Cox 回归森林图



(b) LASSO 回归交叉验证误差 λ 的选择



(c) 25 个 DE-FRGs 的 LASSO 系数分布图



(d) 多因素 Cox 回归森林图

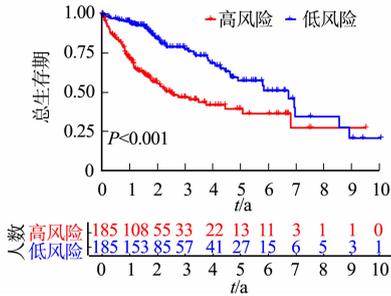
图 4 预后风险模型的构建结果

Fig. 4 Constructing results of prognostic risk model

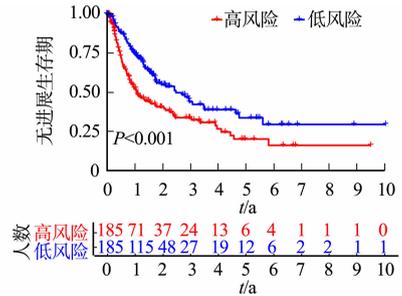
### 2.4 预后风险模型的评价

预后风险模型的评价结果,如图 5 所示。图 5 中:t 为时间。Kaplan-Meier 生存分析结果显示,高

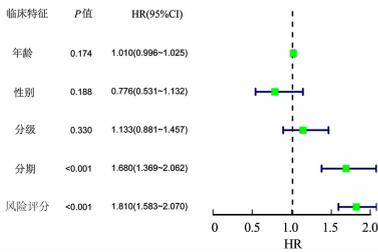
风险组 HCC 患者的总生存期和无进展生存期显著低于低风险组 ( $P < 0.001$ ) (图 5(a), (b))。单因素和多因素 Cox 回归分析结果显示, 风险评分和分期可作为 HCC 患者的独立预后因素 ( $P < 0.001$ ) (图 5(c), (d))。ROC 曲线分析结果显示, 风险模型预测 HCC 患者 1 a, 3 a 和 5 a 生存期的 AUC 值分别为 0.802, 0.742 和 0.693 (图 5(e))。参与风险模型构建的 5 个 DE-FRGs 的 AUC 值均大于 0.740, 提示这 5 个 DE-FRGs 为 HCC 铁死亡特征基因 (图 5(g))。与其他临床特征的 AUC 值相比, 风险评分的 AUC 值最大 (图 5(f)), 且 C 指数分析发现风险评分的敏感性和 1-特异性明显优于其他临床特征 (图 5(h)), 表明预后风险模型比其他临床特征更能准确地预测 HCC 患者的预后情况。



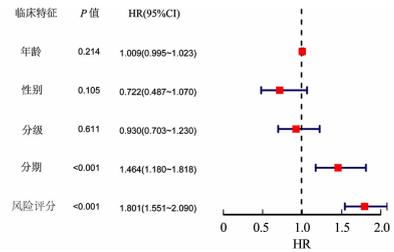
(a) 总生存期 Kaplan-Meier 生存曲线



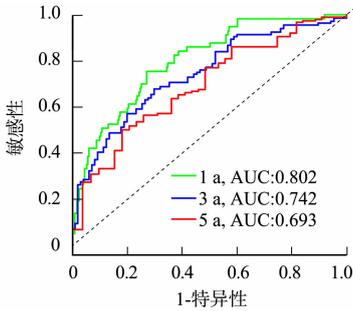
(b) 无进展生存期 Kaplan-Meier 生存曲线



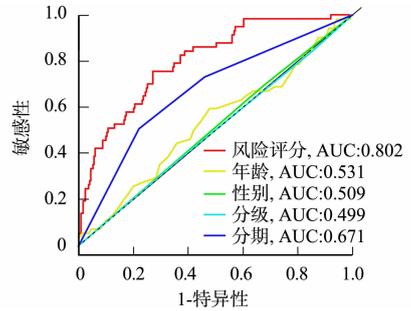
(c) 单因素 Cox 回归独立预后分析



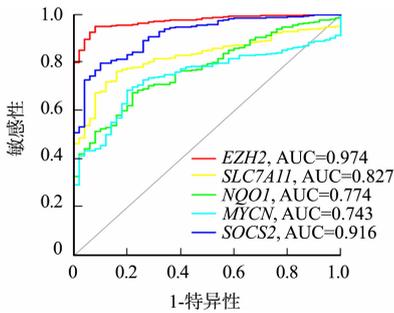
(d) 多因素 Cox 回归独立预后分析



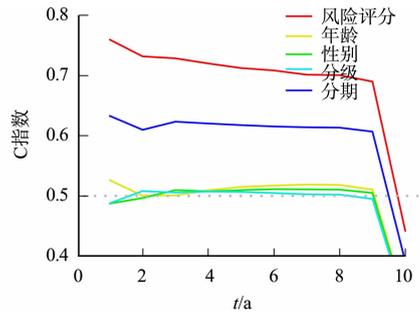
(e) 1, 3, 5 a 生存率的 ROC 曲线



(f) 临床特征的 ROC 曲线



(g) 特征基因的 ROC 曲线



(h) 临床特征的 C 指数曲线

图 5 预后风险模型的评价

Fig. 5 Evaluation of prognostic risk model

### 2.5 肿瘤免疫细胞浸润及免疫治疗反应分析

高、低风险组患者肿瘤免疫细胞浸润及免疫治疗反应分析, 如图 6 所示。图 6 中: “\*”表示  $P < 0.05$ ; “\*\*”表示  $P < 0.01$ ; “\*\*\*”表示  $P < 0.001$ 。通过 ssGSEA 免疫细胞浸润分析发现, 与低风险

组患者相比,高风险组患者 B 细胞、肥大细胞、中性粒细胞等细胞的比例较低,而活化的树突状细胞的比例较高( $P < 0.05$ )(图 6(a))。免疫功能方面,高风险组患者细胞溶解活性、I 型干扰素应答、II 型干扰素应答显著降低( $P < 0.05$ )(图 6(b)),说明高风险组患者存在免疫抑制的状态。肿瘤微环境差异分析显示,高风险组具有较低的基质评分和 ESTIMATE 评分( $P < 0.05$ )(图 6(c)),且肿瘤纯度较高( $P < 0.05$ )(图 6(d))。此外,TIDE 算法结果显示,高风险组 TIDE 评分显著低于低风险组( $P < 0.05$ )(图 6(e)),说明高风险组患者对免疫治疗的反应更好。以上结果提示,高风险组 HCC 患者肿瘤免疫抑制程度较高,对免疫治疗更敏感,有望从免疫治疗中获益。

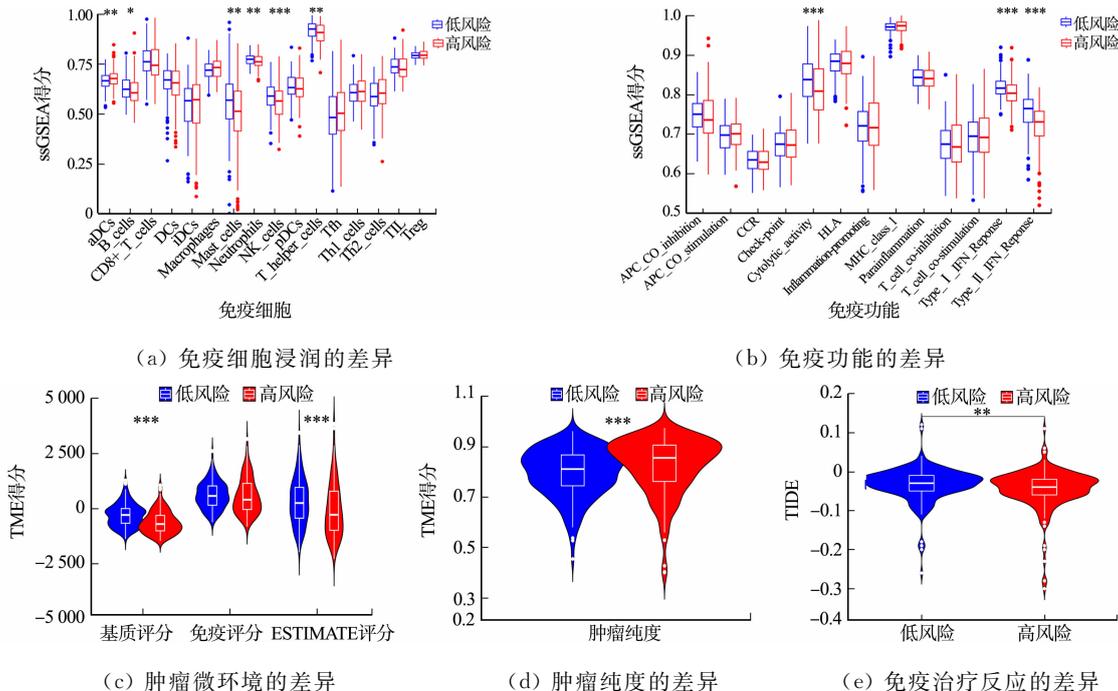


图 6 高、低风险组患者肿瘤免疫细胞浸润及免疫治疗反应分析

Fig. 6 Analysis of tumor immune cell infiltration and immunotherapy response in high-risk and low-risk groups

## 2.6 铁死亡特征基因 ceRNA 调控网络的构建

经 Spearman 相关性分析得到 50 个 FR-DElncRNA,其中 46 个表达上调,4 个表达下调(图 7(a))。借助 miRcode 数据库比对得到 183 个 miRNA,再经 TargetScan,miRTarBase,miRDB 数据库共同预测得到 1 786 个 mRNA,将 mRNA 与构建风险模型的 5 个铁死亡特征基因取交集得到 1 个交集基因 *SLC7A11*。根据分析得到的 lncRNA-miRNA 关系对和 miRNA-mRNA 关系对构建 ceRNA 调控网络(图 7(b)),网络中 *SLC7A11* 为特征基因,潜在竞争性结合的 miRNA 为 hsa-miR-363-3p,hsa-miR-142-3p,hsa-miR-27a-3p,竞争性的 FR-DElncRNA 有 RUSC1-AS1,CRNDE,HOTTIP。

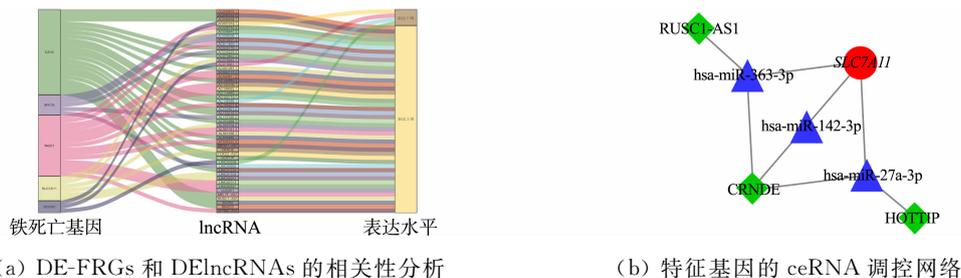


图 7 风险模型中特征基因 ceRNA 调控网络的构建

Fig. 7 Construction of ceRNA regulatory network of feature genes in risk model

## 2.7 ceRNA 调控网络中特征基因的分析

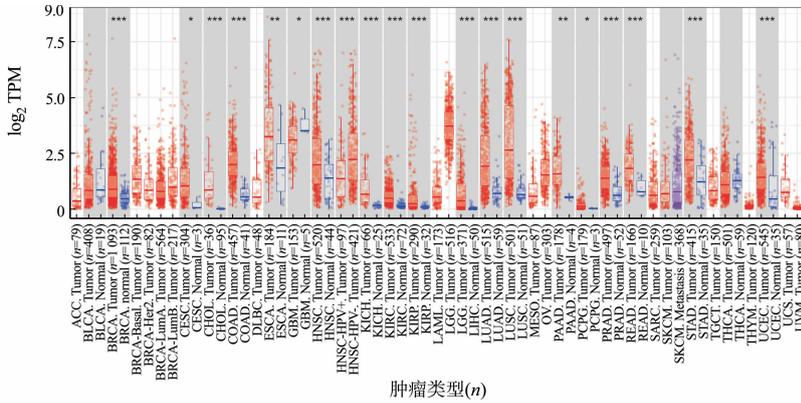
*SLC7A11* 在 HCCDB 数据库中的差异表达分析,如表 1 所示。CeRNA 调控网络的特征基因 *SLC7A11* 在 HCCDB 数据库的 11 个肝癌与癌旁组织数据集中表达量均显著升高( $P < 0.05$ )。CeRNA 调控网络中特征基因的分析,如图 8 所示。表 1,图 8 中: $n$  为样本数量。

表 1 SLC7A11 在 HCCDB 数据集 中的差异表达分析

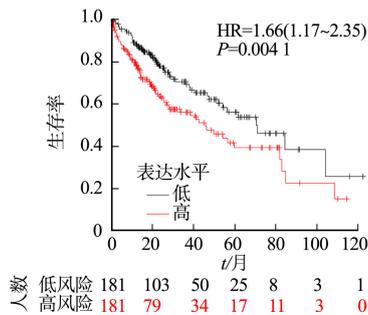
Tab.1 Differential expression analysis of SLC7A11 in HCCDB dataset

数据集	P	样本类型	n	表达均值	标准偏差	四分位差
HCCDB1	$7.60 \times 10^{-18}$	HCC	100	6.685	1.834	2.984
		癌旁组织	97	4.735	0.511	0.573
HCCDB3	$3.18 \times 10^{-17}$	HCC	268	0.367	0.555	0.340
		癌旁组织	243	0.060	0.045	0.023
HCCDB4	$2.17 \times 10^{-11}$	HCC	240	5.828	0.250	0.212
		癌旁组织	193	5.700	0.125	0.163
HCCDB6	$9.29 \times 10^{-13}$	HCC	225	3.710	0.690	0.510
		癌旁组织	220	3.354	0.163	0.193
HCCDB7	$1.73 \times 10^{-8}$	HCC	80	10.250	0.813	1.200
		癌旁组织	82	9.624	0.443	0.549
HCCDB12	$1.82 \times 10^{-7}$	HCC	81	2.890	1.655	2.445
		癌旁组织	80	1.779	0.679	0.597
HCCDB13	$1.56 \times 10^{-18}$	HCC	228	4.971	1.197	1.109
		癌旁组织	168	4.194	0.257	0.220
HCCDB15	$5.40 \times 10^{-21}$	HCC	351	5.992	2.459	3.770
		癌旁组织	49	2.730	1.575	1.920
HCCDB16	$2.01 \times 10^{-11}$	HCC	60	6.178	1.813	3.135
		癌旁组织	60	4.242	0.298	0.343
HCCDB17	$1.47 \times 10^{-8}$	HCC	115	6.633	0.259	0.265
		癌旁组织	52	6.463	0.110	0.113
HCCDB18	$3.76 \times 10^{-27}$	HCC	212	0.749	0.749	1.135
		癌旁组织	177	0.101	0.137	0.080

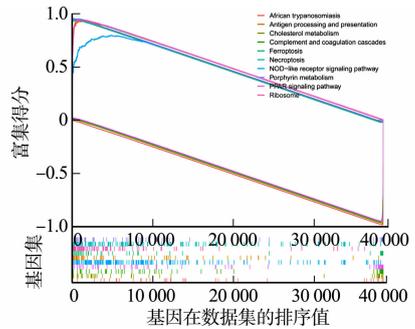
SLC7A11 在 BRCA,CHOL,COAD,UCEC 等 20 多种肿瘤组织中的表达量均显著升高( $P < 0.05$ ) (图 8(a)),说明高表达 SLC7A11 与多种肿瘤的发生发展密切相关。通过 Kaplan-Meier 生存分析发现,SLC7A11 高表达能显著降低患者生存率( $P < 0.05$ ),是预后相关的风险因素,该结果与前面的分析



(a) SLC7A11 在泛癌中的表达水平



(b) SLC7A11 的 Kaplan-Meier 生存曲线



(c) SLC7A11 的 GSEA 富集分析

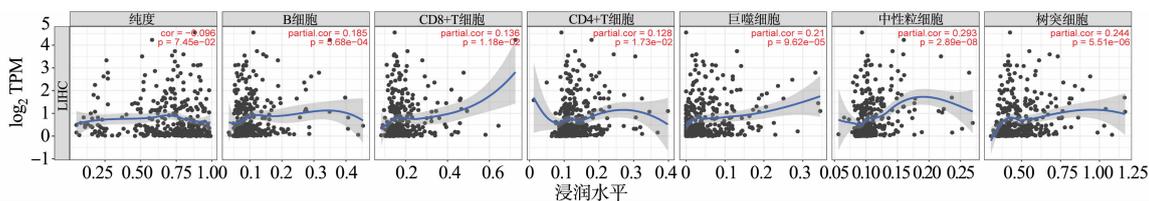
(d) *SLC7A11* 表达水平与免疫细胞浸润的相关性

图 8 ceRNA 调控网络中特征基因的分析

Fig. 8 Analysis of feature genes in ceRNA regulatory network

结果一致(图 8(b))。GSEA 富集分析结果发现,活化的 *SLC7A11* 在抗原加工与提呈、坏死性凋亡、铁死亡等通路中显著富集( $P < 0.05$ ) (图 8(c))。免疫细胞浸润结果显示,*SLC7A11* 在 HCC 中的表达水平与 B 细胞、CD8+T 细胞、CD4+T 细胞、巨噬细胞、中性粒细胞和树突细胞的浸润水平显著正相关( $P < 0.05$ ),提示 *SLC7A11* 在调节 HCC 免疫细胞浸润过程中起重要作用(图 8(d))。

### 3 讨论

细胞内铁代谢失衡和活性氧积累导致的脂质过氧化是参与铁死亡过程的主要因素,并受到多个基因的调控<sup>[20]</sup>。随着铁死亡研究的不断深入,越来越多的铁死亡相关基因作为铁死亡相关途径的介质参与 HCC 的进展<sup>[21]</sup>。因此,探索 HCC 中铁死亡相关基因的调控机制,对于寻找更有效的 HCC 治疗靶点、改善 HCC 患者预后具有重要意义。

利用 TCGA 数据库分析得到 57 个 DE-FRGs,经 LASSO-Cox 回归分析筛选出 5 个 DE-FRGs 用于构建预后风险模型,包括 *SOCS2*, *EZH2*, *SLC7A11*, *NQO1* 和 *MYCN*。*SOCS2* 表达异常参与了 HCC 的发生、发展、转移和预后<sup>[22]</sup>。有研究证实,高表达的 *SOCS2* 是预测 HCC 放射敏感性的生物标志物之一,其可通过促进 *SLC7A11* 的泛素化降解,进一步诱导铁死亡,提示靶向 *SOCS2* 可提高 HCC 放疗的效率,改善患者的预后<sup>[23]</sup>。*EZH2* 的过表达促进了 HCC 的发生、进展和转移<sup>[24]</sup>。研究发现,*EZH2* 通过表观遗传沉默 *P21*、染色质解旋酶 DNA 结合蛋白 5、*Cdkn2a* 等多种肿瘤抑制基因,促进肝癌细胞的增殖和转移<sup>[25]</sup>。*SLC7A11* 作为 Xc 系统的关键氨基酸转运蛋白,参与胱氨酸的胞外摄取,促进主要抗氧化剂谷胱甘肽的合成,保护细胞免受氧化应激的损伤<sup>[26]</sup>。大量实验证明,*SLC7A11* 的高表达与多种肿瘤的生长、侵袭、转移及不良预后密切相关<sup>[27]</sup>。有研究发现,*circ0097009* 直接结合并阻断 miR-1261,从而诱导 *SLC7A11* 表达上调和铁死亡抑制,最终导致 HCC 细胞增殖和侵袭<sup>[28]</sup>。*NQO1* 高表达与肿瘤转移、血管生成和预后不良相关。HCC 细胞中高表达的 *NQO1* 通过激活 PI3K/AKT 和 MAPK/ERK 信号通路促进 HCC 细胞增殖并介导肿瘤生长<sup>[29]</sup>。*MYCN* 是 HCC 复发的生物标志物,也是肝癌治疗的重要靶点<sup>[30]</sup>。*MYCN* 基因的敲除可抑制 HCC 细胞的增殖和侵袭<sup>[31]</sup>。利用生存分析和 ROC 曲线分析对预后风险模型进行评价,结果显示,构建的风险模型可较准确地评估 HCC 患者的预后情况,具有良好的预测能力,可作为 HCC 患者预后风险评估的有力工具。此外,高、低风险组 HCC 患者在肿瘤免疫细胞浸润、免疫功能、肿瘤微环境及免疫治疗反应方面的差异均具有统计学意义,说明风险模型能较准确地反映 HCC 患者的免疫状态,在 HCC 患者免疫治疗方法的选择中具有一定的参考价值。

构建了 1 个由 3 个 FR-DELncRNAs,3 个 miRNA 和 1 个 DE-FRGs 组成的 ceRNA 调控网络,网络中差异表达上调的 *RUSC1-AS1*, *CRNDE* 和 *HOTTIP* 通过竞争性结合 *hsa-miR-363-3p*, *hsa-miR-142-3p* 和 *hsa-miR-27a-3p* 调节 *SLC7A11* 的表达。有报道称,过表达的 *RUSC1-AS1* 可通过调节 miR-340-5p/*CREB1* 诱导 HCC 细胞的增殖、侵袭和迁移,从而促进 HCC 的进展<sup>[32]</sup>。*CRNDE* 通过吸附 miR-539-5p 促进 *POU2F1* 的表达,从而促进 HCC 细胞增殖和转移<sup>[33]</sup>。*HOTTIP* 作为一种预后标志物,可促进肝癌和胰腺癌等肿瘤发生和发展<sup>[34]</sup>。然而,上述 lncRNAs 竞争性结合 miRNA 调节 *SLC7A11* 表达进而影响 HCC 细胞铁死亡的研究鲜有报道。因此,文中构建的 ceRNA 调控网络有望为 HCC 细胞铁死亡机制的研究提供新思路。此外,研究还利用外部数据库进一步验证了 *SLC7A11* 在泛癌、生存及免疫细胞浸润方面的作用,说明 *SLC7A11* 可作为 HCC 治疗和预后评估的可靠靶点。

综上所述,研究成功构建了基于铁死亡特征基因的预后风险模型和 ceRNA 调控网络,为深入研究

铁死亡相关基因在肝细胞癌中的作用机制提供参考。由于研究是基于 TCGA 数据库进行的回顾性分析,仍存在一定的局限性,需进一步在临床病例中进行验证。

#### 参考文献:

- [1] SUNG H, FERLAY J, SIEGEL R L, *et al.* Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries[J]. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 2021, 71(3): 209-249. DOI: 10. 3322/caac. 21660.
- [2] GANESAN P, KULIK L M. Hepatocellular carcinoma[J]. *Clinics in Liver Disease*, 2023, 27(1): 85-102. DOI: 10. 1016/j. cld. 2022. 08. 004.
- [3] VOGEL A, MEYER T, SAPISOCHIN G, *et al.* Hepatocellular carcinoma[J]. *Lancet*, 2022, 400(10360): 1345-1362. DOI: 10. 1016/S0140-6736(22)01200-4.
- [4] AMIN M B, GREENE F L, EDGE S B, *et al.* The eighth edition AJCC cancer staging manual: Continuing to build a bridge from a population-based to a more "personalized" approach to cancer staging[J]. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 2017, 67(2): 93-99. DOI: 10. 3322/caac. 21388.
- [5] REIG M, FORNER A, RIMOLA J, *et al.* BCLC strategy for prognosis prediction and treatment recommendation: The 2022 update[J]. *Journal of Hepatology*, 2022, 76(3): 681-693. DOI: 10. 1016/j. jhep. 2021. 11. 018.
- [6] AJOOLABADY A, TANG D, KROEMER G, *et al.* Ferroptosis in hepatocellular carcinoma: Mechanisms and targeted therapy[J]. *British Journal of Cancer*, 2023, 128(2): 190-205. DOI: 10. 1038/s41416-022-01998-x.
- [7] HUANG Ziyue, XIA Haoming, CUI Yunfu, *et al.* Ferroptosis: From basic research to clinical therapeutics in hepatocellular carcinoma[J]. *Journal of Clinical and Translational Hepatology*, 2023, 11(1): 207-218. DOI: 10. 14218/JCTH. 2022. 00255.
- [8] TANG Daolin, KROEMER G, KANG Rui. Ferroptosis in hepatocellular carcinoma: From bench to bedside[J]. *Hepatology*, 2023, 11(1): 207-218. DOI: 10. 1097/HEP. 0000000000000390.
- [9] YANG Fan, XIAO Yi, DING Jiahua, *et al.* Ferroptosis heterogeneity in triple-negative breast cancer reveals an innovative immunotherapy combination strategy[J]. *Cell Metabolism*, 2023, 35(1): 84-100. DOI: 10. 1016/j. cmet. 2022. 09. 021.
- [10] CHENG Zhe, CHEN Yongheng, HUANG Huichao. Identification and validation of a novel prognostic signature based on ferroptosis-related genes in ovarian cancer[J]. *Vaccines*, 2023, 11(2): 205-225. DOI: 10. 3390/vaccines11020205.
- [11] YUAN Hua, LI Xuemei, ZHANG Xiuying, *et al.* CISD1 inhibits ferroptosis by protection against mitochondrial lipid peroxidation[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2016, 478(2): 838-844. DOI: 10. 1016/j. bbrc. 2016. 08. 034.
- [12] JENNIS M, KUNG C P, BASU S, *et al.* An African-specific polymorphism in the TP53 gene impairs p53 tumor suppressor function in a mouse model[J]. *Genes & Development*, 2016, 30(8): 918-930. DOI: 10. 1101/gad. 275891. 115.
- [13] CHANG K, CHEN Y, ZHANG X, *et al.* DPP9 Stabilizes NRF2 to suppress ferroptosis and induce sorafenib resistance in clear cell renal cell carcinoma[J]. *Cancer Research*, 2023, 83(23): 3940-3955. DOI: 10. 1158/0008-5472.
- [14] CAI Mengxing, LUO Jingwen, YANG Chunxiu, *et al.* ABHD12 contributes to tumorigenesis and sorafenib resistance by preventing ferroptosis in hepatocellular carcinoma[J]. *iScience*, 2023, 26(12): 108340-108358. DOI: 10. 1016/j. isci. 2023. 108340.
- [15] SUN Xiaofang, NIU Xiaohua, CHEN Ruochan, *et al.* Metallothionein-1G facilitates sorafenib resistance through inhibition of ferroptosis[J]. *Hepatology*, 2016, 64(2): 488-500. DOI: 10. 1002/hep. 28574.
- [16] THOMSON D W, DINGER M E. Endogenous microRNA sponges: Evidence and controversy[J]. *Nature Reviews Genetics*, 2016, 17(5): 272-283. DOI: 10. 1038/nrg. 2016. 20.
- [17] SHI Yi, LIU Jibin, DENG Jing, *et al.* The role of ceRNA-mediated diagnosis and therapy in hepatocellular carcinoma[J]. *Hereditas*, 2021, 158(1): 44-58. DOI: 10. 1186/s41065-021-00208-7.
- [18] ZHANG Ying, LUO Meiyang, CUI Xiaohong, *et al.* Long noncoding RNA NEAT1 promotes ferroptosis by modulating the miR-362-3p/MIOX axis as a ceRNA[J]. *Cell Death and Differentiation*, 2022, 29(9): 1850-1863. DOI: 10. 1038/s41418-022-00970-9.

- [19] YANG Zelong, HE Kun, CHEN Weigang, *et al.* A ferroptosis-related ceRNA network in hepatocellular carcinoma for potential clinical applications[J]. *American Journal of Translational Research*, 2023, 15(6): 3912-3927.
- [20] CHEN Xin, LI Jingbo, KANG Rui, *et al.* Ferroptosis: Machinery and regulation[J]. *Autophagy*, 2021, 17(9): 2054-2081. DOI: 10.1080/15548627.2020.1810918.
- [21] TANG Daolin, CHEN Xin, KANG Rui, *et al.* Ferroptosis: Molecular mechanisms and health implications[J]. *Cell Research*, 2021, 31(2): 107-125. DOI: 10.1038/s41422-020-00441-1.
- [22] LIU Jiankun, LIU Zhiyong, LI Wei, *et al.* SOCS2 is a potential prognostic marker that suppresses the viability of hepatocellular carcinoma cells[J]. *Oncology Letters*, 2021, 21(5): 399-409. DOI: 10.3892/ol.2021.12660.
- [23] CHEN Qianping, ZHENG Wang, GUAN Jian, *et al.* SOCS2-enhanced ubiquitination of SLC7A11 promotes ferroptosis and radiosensitization in hepatocellular carcinoma[J]. *Cell Death & Differentiation*, 2022, 30(1): 137-151. DOI: 10.1038/s41418-022-01051-7.
- [24] AU S L K, WONG C C L, LEE J M F, *et al.* Enhancer of zeste homolog 2 epigenetically silences multiple tumor suppressor microRNAs to promote liver cancer metastasis[J]. *Hepatology*, 2012, 56(2): 622-631. DOI: 10.1002/hep.25679.
- [25] WANG Bohan, LIU Yachong, LIAO Zhibin, *et al.* EZH2 in hepatocellular carcinoma: Progression, immunity, and potential targeting therapies[J]. *Experimental Hematology & Oncology*, 2023, 12(1): 52-65. DOI: 10.1186/s40164-023-00405-2.
- [26] SHIN C S, MISHRA P, WATROUS J D, *et al.* The glutamate/cystine xCT antiporter antagonizes glutamine metabolism and reduces nutrient flexibility[J]. *Nature Communications*, 2017, 21(8): 15074-15085. DOI: 10.1038/ncomms15074.
- [27] HE Feng, ZHANG Peng, LIU Junlai, *et al.* ATF4 suppresses hepatocarcinogenesis by inducing SLC7A11 (xCT) to block stress-related ferroptosis[J]. *Journal of Hepatology*, 2023, 79(2): 362-377. DOI: 10.1016/j.jhep.2023.03.016.
- [28] LÜ Ning, ZENG Yan, KONG Yanan, *et al.* Ferroptosis is involved in the progression of hepatocellular carcinoma through the circ0097009/miR-1261/SLC7A11 axis[J]. *Annals of Translational Medicine*, 2021, 9(8): 675-686. DOI: 10.21037/atm-21-997.
- [29] DIMRI M, HUMPHRIES A, LAKNAUR A, *et al.* NAD(P)H quinone dehydrogenase 1 ablation inhibits activation of the phosphoinositide 3-kinase/Akt serine/threonine kinase and mitogen-activated protein kinase/extracellular signal-regulated kinase pathways and blocks metabolic adaptation in hepatocellular carcinoma[J]. *Hepatology*, 2020, 71(2): 549-568. DOI: 10.1002/hep.30818.
- [30] QIN Xianyang, SU Ting, YU Wenkui, *et al.* Lipid desaturation-associated endoplasmic reticulum stress regulates MYCN gene expression in hepatocellular carcinoma cells[J]. *Cell Death & Disease*, 2020, 11(1): 66-79. DOI: 10.1038/s41419-020-2257-y.
- [31] YASUKAWA K, LIEW L C, HAGIWARA K, *et al.* MicroRNA-493-5p-mediated repression of the MYCN oncogene inhibits hepatic cancer cell growth and invasion[J]. *Cancer Science*, 2020, 111(3): 869-880. DOI: 10.1111/cas.14292.
- [32] LIU Chunjiang, TANG Liming, XU Miaojun, *et al.* LncRNA RUSC1-AS1 contributes to the progression of hepatocellular carcinoma cells by modulating miR-340-5p/CREB1 axis[J]. *American Journal of Translational Research*, 2021, 13(3): 1022-1036.
- [33] LI Zhixi, WU Gang, LI Jie, *et al.* lncRNA CRNDE promotes the proliferation and metastasis by acting as sponge miR-539-5p to regulate POU2F1 expression in HCC[J]. *BMC Cancer*, 2020, 20(1): 282-293. DOI: 10.1186/s12885-020-06771-y.
- [34] WEI Huamei, XU Zuoming, CHEN Liucui, *et al.* Long non-coding RNA PAARH promotes hepatocellular carcinoma progression and angiogenesis via upregulating HOTTIP and activating HIF-1 $\alpha$ /VEGF signaling[J]. *Cell Death and Disease*, 2022, 13(2): 102-115. DOI: 10.1038/s41419-022-04505-5.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 刘源岗)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202405019



# 虾青素复合纳米颗粒 Pickering 乳液 的制备及评价

郑秀梅<sup>1</sup>, 杜鑫<sup>1</sup>, 柳培忠<sup>1</sup>, 虞文熙<sup>1</sup>, 吴振<sup>2</sup>, 王立强<sup>1</sup>, 侯志勇<sup>1,3</sup>

(1. 华侨大学 生物医学学院, 福建泉州 362021;

2. 厦门大学 药学院, 福建 厦门 361102;

3. 解放军 962 医院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 利用固体颗粒(复合纳米颗粒)稳定油水界面的特性,制备玉米醇溶蛋白-虾青素纳米颗粒(Zein-AST NPs)和玉米醇溶蛋白-虾青素-阿拉伯胶复合纳米颗粒(Zein-AST-GA NPs),并比较它们的稳定性差异。以 Zein-AST-GA NPs 为稳定剂,使用含 AST 的玉米油制备 Pickering 乳液,研究乳液中 AST 的稳定性、体外释放率和大鼠体内药代动力学。实验结果显示:油相中含有 AST 的 Pickering 乳液(PE1)比油相中不含 AST 的 Pickering 乳液(PE2)具有更好的热稳定性和贮藏稳定性,且 PE1 具有较强的自由基清除能力,释放速率优于参比制剂和 PE2,AST 的释放符合非克扩散规律;口服 PE1 后 8 h 达到最大 AST 血浆质量浓度( $2.654 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ),且相对生物利用度分别是市售虾青素微囊粉(AST-MCs)和 PE2 的 1.703,1.481 倍。

**关键词:** 虾青素; Pickering 乳液; 稳定性; 生物利用度

中图分类号: R 944.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)06-0756-10

## Preparation and Evaluation of Astaxanthin Composite Nanoparticles Pickering Emulsion

ZHENG Xiumei<sup>1</sup>, DU Xin<sup>1</sup>, LIU Peizhong<sup>1</sup>, YU Wenxi<sup>1</sup>,  
WU Zhen<sup>2</sup>, WANG Liqiang<sup>1</sup>, HOU Zhiyong<sup>1,3</sup>

(1. School of Biomedical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. School of Pharmaceutical Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China;

3. 962 Hospital of Liberation Army, Harbin 150080, China)

**Abstract:** The property of solid particles (composite nanoparticles) to stabilize the oil-water interface was utilized to prepare corn zein-solubilized protein-astaxanthin nanoparticles (Zein-AST NPs) and corn zein-solubilized protein-astaxanthin-arabic gum composite nanoparticles (Zein-AST-GA NPs), and their stability differences were compared. Using Zein-AST-GA NPs as stabilizer, Pickering emulsion was prepared using corn oil containing AST. The stability, in vitro release rate, and *in vivo* pharmacokinetics in rats of AST in the emulsion were studied. The experimental results show that the Pickering emulsion containing AST (PE1) in the oil phase has better thermal and storage stability than the Pickering emulsion without AST in the oil phase (PE2), and PE1 has stronger free radical scavenging ability with a release rate superior to that of the reference

收稿日期: 2024-05-01

通信作者: 侯志勇(1972-),男,副主任药师,主要从事创新药物的研究。E-mail:mpp5358@163.com。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFE0101700);福建省高校产学研合作重大项目(2019Y4007);华侨大学研究生科研创新基金资助项目(18013071019)

formulation and PE2, and the release of AST is in accordance with Fick's diffusion law. The maximum AST plasma mass concentration ( $2.654 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ) is reached 8 hours after oral administration of PE1, and the relative bioavailability are 1.703 and 1.481 times higher than that of commercially available astaxanthin microcapsule powder (AST-MCs) and PE2, respectively.

**Keywords:** astaxanthin; Pickering emulsion; stability; bioavailability

虾青素 (astaxanthin, AST) 是一种脂溶性营养素<sup>[1]</sup>, 雨生红球藻是天然 AST 的最佳获取来源之一<sup>[2]</sup>。由于 AST 化学结构中的多烯链可有效清除细胞膜磷脂双分子层之间的自由基, 化学结构中的  $\beta$ -紫罗兰酮环上的羟基和酮基能吸引自由基未配对电子或向自由基提供电子, 因此, AST 具有较强的抗氧化活性、抗炎活性、抗癌活性、抗肥胖和抗糖尿病活性等<sup>[3-6]</sup>。由于 AST 难溶于水, 且化学结构中双键使其在光、氧和热等条件下易发生氧化降解, 导致 AST 存在稳定性差和口服生物利用度低等缺点。

乳液是保护生物活性物质免受降解的给药途径之一, 可增强生物活性物质的物理、化学稳定性, 可提高生物利用度, 并实现靶向递送和控制释放<sup>[7]</sup>。Pickering 乳液以固体颗粒为稳定剂, 固体颗粒吸附在油水界面处, 形成密集的界面层, 防止聚集现象和奥斯瓦尔德熟化, 具有更高的稳定性<sup>[8]</sup>。Pickering 乳液界面处颗粒形成的网络结构可改变脂质消化, 实现药物的缓释释放, 提高药物的生物利用度。多糖 (如壳聚糖和纤维素等) 与蛋白质相互作用形成的复合纳米颗粒稳定的 Pickering 乳液具有更强的乳化性能和更厚的界面层<sup>[9]</sup>。基于此, 本文对虾青素复合纳米颗粒 Pickering 乳液的进行制备及评价。

## 1 实验部分

### 1.1 实验仪器

紫外-可见分光光度计 (日本岛津公司); BSA124S 型电子天平 (奥豪斯仪器 (常州) 有限公司); 高效液相色谱仪 (辽宁省大连市依利特公司); 78HW-1 型恒温磁力搅拌器 (江苏省金坛市环宇科技仪器厂); 台式冷冻高速离心机 (湖南省长沙市湘仪实验仪器); RC-806D 型溶出实验仪 (天津市天大天发科技有限公司); 旋转蒸发仪 (河南省巩义市予华仪器有限责任公司); pH 测定仪 (广东省广州市授科仪器科技有限公司); 纳米粒度及 ZETA 电位分析仪 (美国布鲁克海文仪器公司); 真空冷冻干燥机 (北京松源华兴生物技术有限公司); JEM-1200EX 型透射电子显微镜 (日本电子株式会社); Nicolet iS10 型傅里叶红外光谱仪 (美国 Nicolet 仪器公司); D8 Advance X 型射线衍射仪 (德国 Bruker Optics 仪器公司); STA449F5 型同步热分析仪 (德国 Netzsch 仪器公司); 高速剪切机 (美国布鲁克海文仪器公司); BT-9300ST 型激光粒度分布仪 (辽宁省丹东市百特仪器有限公司); MCR302 型流变仪 (上海市安东帕 (上海) 商贸有限公司); 光学显微镜 (广东省广州市明美光电技术有限公司); 倒置荧光显微镜 (日本尼康)。

### 1.2 实验试剂

雨生红球藻油、市售虾青素微囊粉 (安徽省黄山市德宝生物科技有限公司); 玉米油、虾青素标准品、玉米醇溶蛋白、阿拉伯胶、磷酸盐缓冲盐溶液 (上海市阿拉丁生化科技股份有限公司); 乙醇、二氯甲烷、甲醇 (广东省汕头市西陇科学股份有限公司); 丙酮、盐酸、氢氧化钠、氯化钠、氯化钙、氯化钾、无水乙醚 (上海市国药集团化学试剂有限公司); 尼罗红、尼罗蓝 A (上海市易恩化学技术有限公司); 吐温-80、胰蛋白酶、胃蛋白酶、水合氯醛 (上海市源叶生物科技有限公司); 尿素、 $\alpha$ -淀粉酶、脂肪酶、猪胆盐 (上海市易恩化学技术有限公司)。

## 2 实验方法

### 2.1 玉米醇溶蛋白-虾青素-阿拉伯胶复合纳米颗粒的制备

将玉米醇溶蛋白 (Zein) 溶于质量分数为 80% 乙醇溶液中, 室温条件下磁力搅拌使其完全分散, 将 pH 值调至 3.5, 得到质量浓度为  $2.5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  的 Zein 溶液。将 Zein 溶液与 AST 溶液 (pH 值为 3.5,  $0.25 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  的 AST 乙醇溶液) 等体积均匀混合, 混合液快速注入蒸馏水 (5 倍混合液体积, pH 值为 3.5) 中, 充分搅拌 (在室温下, 转速为  $800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ), 在  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  下, 旋转蒸发, 除去有机溶剂。用相同 pH 值的蒸馏水补充至原有体积, 离心 ( $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 5 min) 除去不溶性物质, 得到玉米醇溶蛋白-虾青素

纳米颗粒(Zein-AST NPs)分散液。

称取一定质量的阿拉伯胶(Gum Arabic,GA)溶于蒸馏水中,使用磁力搅拌器使溶液完全溶胀,将pH值调至3.5,形成GA溶液。将GA溶液加入到Zein-AST NPs分散液中,GA和Zein的质量比为1.0:1.5,磁力搅拌2h(在室温下,转速为 $800\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ),离心( $5\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,5min)去除不溶性物质,得到Zein-AST-GA NPs分散液,最终得到的玉米醇溶蛋白-虾青素-阿拉伯胶复合纳米颗粒(Zein-AST-GA NPs)分散液中Zein的质量浓度为 $2.5\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。Zein-AST-GA NPs分散液在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下,冷冻12h后,用真空冷冻干燥机冷冻干燥24h,得到Zein-AST-GA NPs。

## 2.2 Pickering乳液的制备

以体积分数为30%的玉米油为油相,向玉米油中加入质量浓度为 $0.03\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的AST,在 $12\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的转速下,将含有AST的玉米油缓慢滴入质量浓度为 $6.25\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的Zein-AST-GA NPs分散液中,滴加结束后,继续剪切3min,得到Pickering乳液。

## 2.3 傅里叶变换红外光谱

将2mg Zein-AST NPs粉末和2mg Zein-AST-GA NPs粉末分别与KBr混合,将混合物研磨成细粉并压制成透明薄片,采用傅里叶变换红外吸收光谱仪进行测量分析。光谱采集的波数范围为 $4\,000\sim 400\text{ cm}^{-1}$ ,分辨率为 $4\text{ cm}^{-1}$ ,扫描32次。

## 2.4 X射线衍射

以 $2^{\circ}\cdot\text{min}^{-1}$ 的扫描速率记录 $5^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的衍射图。管电压为40kV,管电流为40mA。

## 2.5 扫描电子显微镜

使用扫描电子显微镜(SEM)观察Zein-AST NPs和Zein-AST-GA NPs的微观形貌,使用毛细管将新鲜制备的样品点在锡箔纸上,在室温条件下自然晾干并喷金镀膜,使用场发射扫描电镜在15kV的加速电压下记录SEM图像。

## 2.6 乳液的类型

将Pickering乳液分别滴加到纯玉米油或纯蒸馏水中,如果乳液液滴能够在水相中迅速分散并在油相中保持团聚,则认为它是水包油(O/W)型乳液,反之,则认为它为油包水(W/O)型乳液。

## 2.7 乳液微观结构特征

将一滴稀释5倍后的乳液滴加到光学显微镜的载玻片上,用盖玻片覆盖后,放置在载物台上观察其形态。为进一步验证Zein-AST-GA NPs吸附在油水界面上,使用倒置荧光显微镜对Pickering乳液进行观察。将每个样品稀释5倍,用尼罗红染色油相和尼罗蓝A对蛋白质进行染色。

## 2.8 流变学特征

采用MCR 302型流变仪研究不同油相体积分数(10%,20%,30%,40%,50%,60%)的Pickering乳液流变行为,钢制平行板直径为40mm,间隙为1mm。每次测量取适量Pickering乳液平铺于平板上,在室温下进行测量。在剪切速率为 $0.1\sim 100.0\text{ s}^{-1}$ 范围内测量表观粘度,绘制剪切速率-粘度曲线。在 $0.1\sim 100.0\text{ Hz}$ 范围内进行频率扫描,应变为1%,测量储能模量和损耗模量与频率的关系。

## 2.9 乳析指数

采用乳析指数( $I_c$ )评价乳液的稳定性,测量并记录不同稳定性条件下每个乳液的总高度( $H_t$ )和乳化相高度( $H_s$ )。 $I_c$ 的计算公式为

$$I_c = H_s / H_t \times 100\%$$

## 2.10 乳液的稳定性

将Pickering乳液避光贮藏,在 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,分别测定0,10,30,60,90,120,360d乳液的乳析指数,采用光学显微镜观察乳液的微观形态,并计算乳液中AST保留率。

## 2.11 乳液中虾青素的稳定性

以Zein-AST-GA NPs为稳定剂,以含AST的玉米油为油相(油相AST的质量浓度为 $0.03\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ),按节2.2的方法制备Pickering乳液,乳液中AST的质量浓度为 $0.054\,3\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ,记为PE1,如图1(a)所示。

以Zein-AST-GA NPs为稳定剂,以纯玉米油为油相,按节2.2的方法制备Pickering乳液,乳液中

AST 的质量浓度为  $0.054\ 3\ \text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ , 记为 PE2, 如图 1(b) 所示。

Zein-AST-GA NPs, 如图 1(c) 所示。AST, 如图 1(d) 所示。

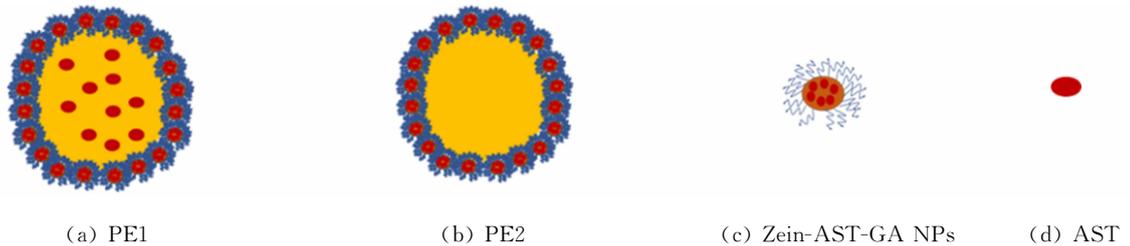


图 1 Pickering 乳液示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Pickering emulsion

## 2.12 体外释放实验

分别以 200 mL, 质量分数为 0.5% 的 Tween 80 溶液的 SGF(模拟胃液), SIF(模拟肠液) 为溶出介质, 将等 AST 浓度的 AST 丙酮溶液、市售虾青素微囊粉(AST-MCs)溶液、PE2 和 PE1 分别装入处理好的透析袋(相对分子质量为 14 000)中, 将透析袋分别置于溶出介质中, 在温度为  $(37.0 \pm 0.5)\ ^\circ\text{C}$ , 搅拌速度为  $100\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$  的条件下, 分别于 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 48.0 h 从释放的溶出介质中取 2 mL 样品溶液, 并加入相同体积的空白溶出介质。将取出的 2 mL 样品溶液与 2 mL 的丙酮溶液混合均匀, 用  $0.45\ \mu\text{m}$  的滤膜除去杂质, 使用紫外-可见分光光度计在波长 479.5 nm 处测量 AST 吸光度, 计算各时间点的药物累积释放率, 药物累积释放率( $\eta_a$ )为

$$\eta_a = \frac{\rho_t V + \sum_{i=1}^{t-1} \rho_i V_s}{m_0} \times 100\%。$$

上式中:  $\rho_t$  为取样时间点  $t$  时 AST 的质量浓度;  $\rho_i$  为取样时间点的前一个时间点  $i$  的 AST 质量浓度;  $V$  为溶出介质的总体积;  $V_s$  为取样的体积;  $m_0$  为 AST 总质量。

## 2.13 大鼠体内药代动力学实验

取 24 只健康雄性 SD(白色封闭群)大鼠, 将等质量浓度的 AST 玉米油、市售 AST-MCs、PE2 和 PE1 随机分为 4 组( $n=6$ )。AST 玉米油组、市售 AST-MCs 组和 PE2 组为对照组, PE1 组为实验组。每组大鼠给药前禁食 12 h, 不禁水, 分别以剂量为  $100\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  进行灌胃。灌胃结束后分别于 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 48.0 h 对大鼠眼眶取约 0.5 mL 血, 置于用肝素钠处理过的 EP 管中。将血浆样品进行处理后, 使用高效液相分析方法进样分析, 记录峰面积, 计算 AST 质量浓度。以取样时间为横坐标, AST 质量浓度为纵坐标, 绘制血药质量浓度-时间曲线图。用 Data Analysis System (DSA) 软件以非房室模型进行分析计算药动学参数及相对生物利用度( $F$ )。  $F$  的计算式为

$$F = \frac{\text{AUC}_{(0 \sim \infty), \text{T}}}{\text{AUC}_{(0 \sim \infty), \text{ASTO}}} \times 100\%。$$

上式中:  $\text{AUC}_{(0 \sim \infty), \text{T}}$  为试制剂的药物质量浓度时间曲线下面积(时间为  $0 \sim \infty$ );  $\text{AUC}_{(0 \sim \infty), \text{ASTO}}$  为 AST 玉米油的药物质量浓度时间曲线下面积(时间为  $0 \sim \infty$ )。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 傅里叶变换红外光谱

傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱通常用于研究复合物中潜在的相互作用, 因此, 测定了 Zein, GA, AST, Zein NPs, Zein-AST NPs, Zein-AST-GA NPs 的 FTIR 光谱(图 2)。图 2 中:  $\nu$  为波数。由图 2 可知如下 2 点结论。

1) 在 FTIR 中, 波数为  $3\ 100 \sim 3\ 500\ \text{cm}^{-1}$  的吸收峰是由于羟基的 O—H 拉伸振动<sup>[10]</sup> 引起的, 在 Zein, GA 和 AST 的 FTIR 光谱中, 氢键的特征峰波数分别为  $3\ 424.02, 3\ 424.95$  和  $3\ 495.50\ \text{cm}^{-1}$ ; Zein NPs 氢键的特征峰波数为  $3\ 416.49\ \text{cm}^{-1}$ ; 在 Zein-AST NPs 和 Zein-AST-GA NPs 的光谱中, 氢键的特征峰波数移动至  $3\ 427.33\ \text{cm}^{-1}$  和  $3\ 416.27\ \text{cm}^{-1}$  处, 表明在 Zein, AST 和 GA 之间形成了氢键。

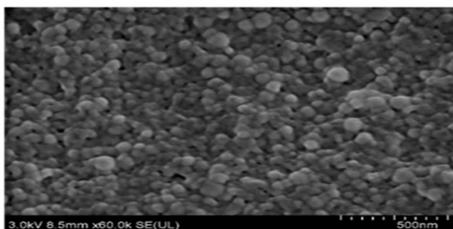
2) 蛋白质在波数为  $1\ 650\sim 1\ 700\ \text{cm}^{-1}$  处的吸收峰代表酰胺 I 带, 在波数为  $1\ 500\sim 1\ 550\ \text{cm}^{-1}$  处的吸收峰代表酰胺 II 带<sup>[11]</sup>, 酰胺 I, II 带分别为 C=O 的拉伸和 C-N 的拉伸。在 FTIR 光谱中, Zein 在波数为  $1\ 656.17\ \text{cm}^{-1}$  处显示了一个酰胺 I 带, 在波数为  $1\ 537.15\ \text{cm}^{-1}$  处显示了一个酰胺 II 带; Zein NPs 的酰胺 I 带未发生移动, 酰胺 II 带的特征峰移至波数为  $1\ 535.50\ \text{cm}^{-1}$ ; AST 的 FTIR 光谱在波数为  $1\ 650.82\ \text{cm}^{-1}$  处显示了 C=O 的拉伸振动, 在波数为  $1\ 551.63\ \text{cm}^{-1}$  处显示六元原子环 C-C 的拉伸震动, 在波数为  $976.42\ \text{cm}^{-1}$  处显示 C,C 共轭中 C-H 的拉伸振动, 在波数为  $976.42\ \text{cm}^{-1}$  处的吸收峰消失了; Zein-AST NPs 的酰胺 I, II 带分别移至波数为  $1\ 653.96, 1\ 536.14\ \text{cm}^{-1}$  处, 表明 Zein 和 AST 之间存在静电相互作用, 同时, Zein 和 AST 都具有疏水性, 说明 Zein 和 AST 之间可能存在疏水相互作用, 疏水相互作用也可能是形成 Zein-AST NPs 的另一种作用力; Zein-AST-GA NPs 形成后, 在波数为  $1\ 656.19, 1\ 540.32\ \text{cm}^{-1}$  处显示出酰胺 I, II 带, 表明 Zein, AST 和 GA 之间发生了静电相互作用, 与 Zein-AST NPs 相比, Zein-AST-GA NPs 在波数为  $1\ 072.62\ \text{cm}^{-1}$  处显示了一个特征峰, 这是 GA 的特征峰, 表明 GA 已经吸附到 Zein 表面, 表明 Zein, AST 和 GA 之间可能存在氢键相互作用和疏水相互作用等。

### 3.2 X 射线衍射分析

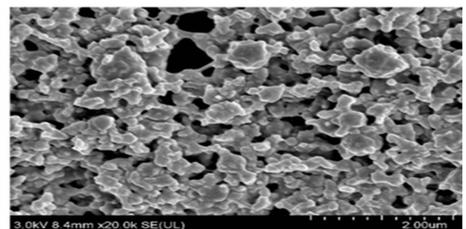
使用 X 射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)法分析 Zein, GA, AST, Zein NPs, Zein-AST NPs, Zein-AST-GA NPs 的光谱, X 射线衍射谱图, 如图 3 所示。由图 3 可知: Zein 在  $9^\circ$  和  $19^\circ$  显示出两个宽衍射峰, 表明蛋白质的无定形性质; GA 在  $19^\circ$  显示出一个宽衍射峰, 表明天然多糖的无定形性质; AST 在  $11.2^\circ, 13.9^\circ, 14.4^\circ, 16.5^\circ, 18.6^\circ, 20.8^\circ$  和  $25.7^\circ$  具有尖锐的吸收峰, 表明 AST 的存在形式为高结晶结构; 在 Zein-AST NPs 和 Zein-AST-GA NPs 的 XRD 光谱中并没有发现 AST 的特征衍射峰, 表明 AST 可能通过与 Zein 之间的疏水相互作用, 以无定形的形态分布在纳米颗粒中; Zein-AST-GA NPs 的峰值低于 Zein-AST NPs 的峰值, 表明 Zein 与 GA 之间存在分子间的相互作用; 与未包埋 AST 的 Zein NPs 相比, Zein-AST NPs 的衍射峰强度更高, 说明 Zein 和 AST 之间存在分子间的相互作用。

### 3.3 扫描电子显微镜分析

采用扫描电子显微镜(SEM)对 Zein-AST NPs 和 Zein-AST-GA NPs 的微观结构进行表征, 扫描电镜图, 如图 4 所示。



(a) Zein-AST NPs



(b) Zein-AST-GA NPs

图 4 样品的扫描电镜图

Fig. 4 Diagrams of scanning electron microscope of samples

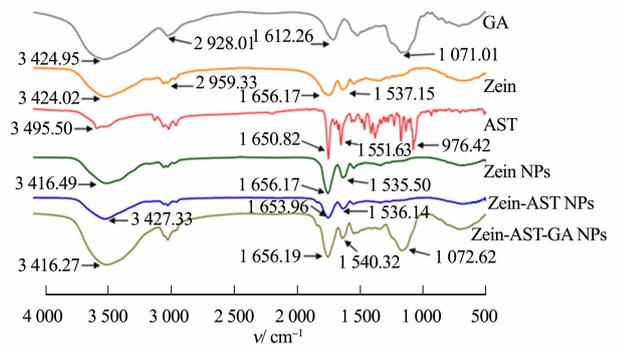


图 2 样品的傅里叶变换红外光谱图

Fig. 2 Fourier transform infrared spectrogram of samples

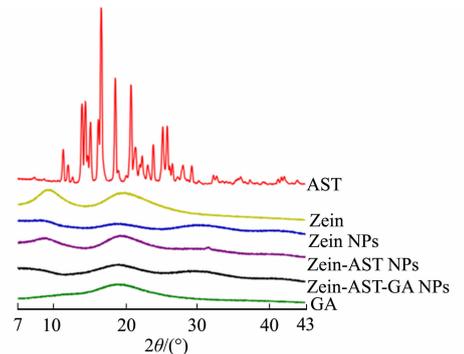


图 3 样品的 X 射线衍射谱图

Fig. 3 X-ray diffraction pattern of samples

由图 4 可知: Zein-AST NPs 呈球形, 表面光滑, 粒径约为 100 nm, 与纳米粒度仪测定的结果相对应; 添加 GA 后, Zein-AST-GA NPs 的粒径变大, 并观察到复合纳米颗粒之间相互连接, 表明 GA 和 Zein 之间的交联可能不止发生在分子内部, 还可能发生在分子间, 导致颗粒之间形成团块。

### 3.4 Pickering 乳液类型和微观结构

Pickering 乳液的类型对比, 如图 5 所示。由图 5 可知: 乳液液滴在水相中均匀分散, 在油相中保持团聚。借助倒置荧光显微镜观察 Zein-AST-GA NPs 稳定的 Pickering 乳液的界面结构。

倒置荧光显微镜图, 如图 6 所示。由图 6 可知: 油相被尼罗红染色呈现绿色; 由蛋白质组成的 Zein-AST-GA NPs 被尼罗蓝 A 染色呈现红色; 组合尼罗红染色的绿色荧光位于球形液滴中间, 液滴周围有明显的红色圆圈, 表明 Zein-AST-GA NPs 吸附在了油水界面上, 进一步确认复合纳米颗粒和油相中含 AST 的 Pickering 乳液为水包油 (O/W) 型乳液。

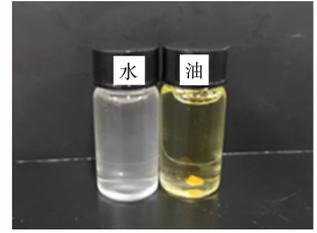


图 5 Pickering 乳液的类型对比  
Fig. 5 Comparison of Pickering emulsion types

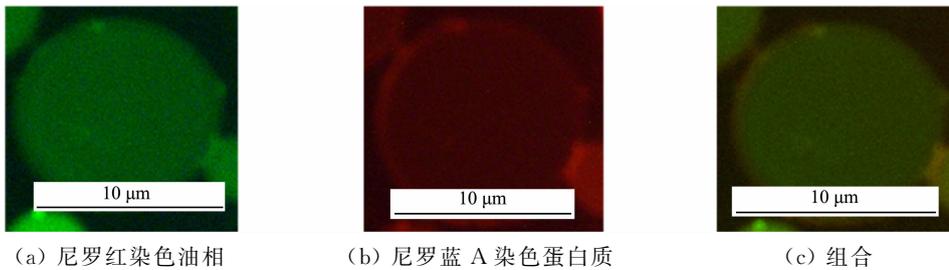


图 6 Pickering 乳液界面结构的倒置荧光显微镜图

Fig. 6 Inverted fluorescence microscope diagram of Pickering lotion interface structure

### 3.5 Pickering 乳液的流变性能分析

通过 Pickering 乳液的流变形可以更好地了解其内部结构, 不同油相体积分数的 Pickering 乳液流变性, 如图 7 所示。图 7 中:  $\mu$  为表观粘度;  $v$  为剪切速率;  $\varphi$  为体积分数;  $f$  为频率;  $G'$  为储能模量;  $G''$  为损耗模量。

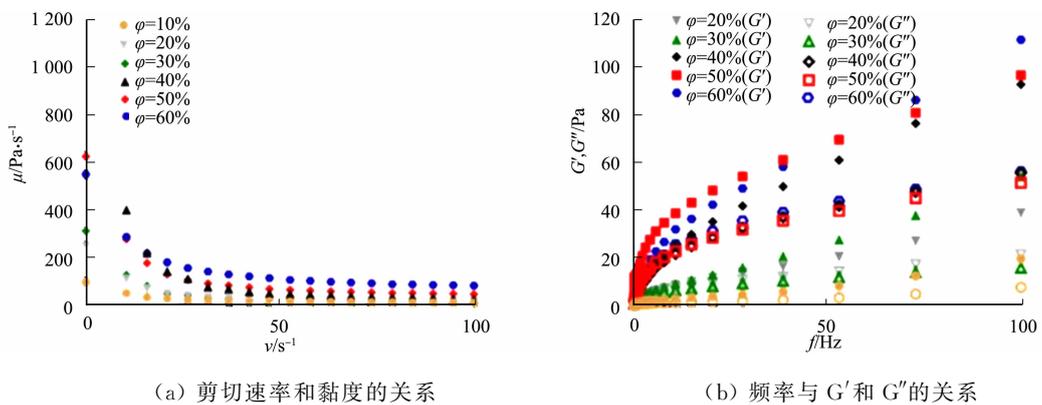


图 7 不同油相体积分数的 Pickering 乳液流变特性

Fig. 7 Rheological properties of Pickering emulsions with different volume fractions of oil phase

由图 7(a) 可知: 剪切速率从  $0.1 \text{ s}^{-1}$  增加到  $100.0 \text{ s}^{-1}$ , Pickering 乳液的表观粘度逐渐降低, 表明 Pickering 乳液的剪切稀化行为, 这是由于乳液内部的结构随剪切速率的增加而破裂, 导致粘度降低; 乳液的表观粘度随油相体积分数的增加而增加, 这可能是由于 Zein-AST-GA NPs 吸收更多的油滴形成了稳定的三维网络结构<sup>[12]</sup>。

由图 7(b) 可知: 频率为  $0.1 \sim 100.0 \text{ Hz}$  的 Pickering 的  $G'$  和  $G''$  随油相体积分数的增加而增加, Pickering 乳液的  $G'$  明显高于  $G''$ , 表明 Pickering 乳液形成了弹性凝胶结构, 乳液液滴的相对密度增大, 并在较高的油相体积分数下有更高的  $G'$ , 较高的  $G'$  和  $G''$  说明 Pickering 乳液中 Zein-AST-GA NPs 形成的界面层更稳定, 因此, 当复合纳米颗粒质量浓度固定时, 油相体积分数对 Pickering 乳液的流变性能

有明显的影响,增多的油相可以通过在油水界面形成稳定的三维网络结构,并在一定程度上抵抗高频振荡,增强乳液的稳定性<sup>[13]</sup>。

### 3.6 乳液的稳定性

贮藏时间对 Pickering 乳液的影响,如图 8 所示。图 8 中: $t$  为贮藏时间。由图 8 可知:随着贮藏时间的推移, Pickering 乳液的  $I_C$  略微增加,且乳液液滴的微观形态仍然保持着均匀的球形形态,表明 Zein-AST-GA NPs 稳定的 Pickering 乳液对乳液液滴的聚集有较好的稳定性;贮藏 360 d 后, Pickering 乳液的液滴未出现聚集现象,表明 Zein-AST-GA NPs 在油滴表面形成的致密界面层,提高了乳液的贮藏稳定性。

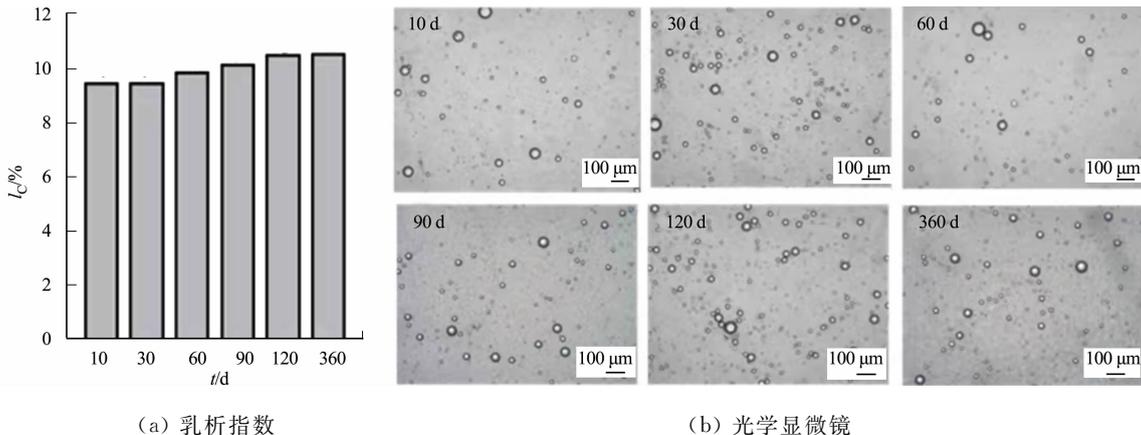


图 8 贮藏时间对 Pickering 乳液的影响

Fig. 8 Effects of storage time on Pickering emulsion

贮藏时间对虾青素保留率( $K$ )的影响,如图 9 所示。在 4 °C 下,虾青素贮藏 360 d 后, PE1 的 AST 保留率为(92.500 ± 0.100)%,高于 PE2 的(88.700 ± 0.110)%,表明将 AST 同时封装在 Pickering 乳液的复合纳米颗粒和油滴中可有效提高 AST 的保留率,可能是因为吸附在油水界面处复合纳米颗粒中的 AST 可保护油滴内部的 AST,防止过多的 AST 氧化分解。

### 3.7 体外释放

体外释放模拟药物在体内的释放过程,考察 Pickering 乳液在摄入后释放封装物质的能力。当口服药物后,在胃肠道的释放有助于药物的吸收,根据 2020 版《中华人民共和国药典》通则,难溶性药物可加少许表面活性剂,因此,在两种溶出介质中均添加 0.5% 的吐温-80 以满足“漏槽条件”。体外释放曲线,如图 10 所示。图 10 中: $Q$  为释放率。

在 SGF 中释放 48 h 后,AST 丙酮溶液、市售 AST-MCs、PE2 和 PE1 的释放率分别达到(14.960 ± 0.052)%, (42.960 ± 0.051)%, (56.800 ± 0.095)% 和(47.060 ± 0.044)%。在 SGF 中,PE2 的释放率更高的可能是因为低 pH 值环境下,Zein 和 GA 之间的静电相互作用减少,Zein-AST-GA NPs 稳定性下降,导致复合纳米颗粒中的 AST 释放增加,PE1 中复合纳米颗粒中 AST 质量分数较少,复合纳米颗粒分布在油水界面处形成屏障,导致油滴内部的 AST 溶出缓慢,释放率较低。

在 SIF 中释放 48 h 后,AST 丙酮溶液、市售 AST-MCs、PE2 和 PE1 的释放率分别达到(32.990 ± 0.015)%, (56.210 ± 0.185)%, (61.780 ± 0.015)% 和(77.070 ± 0.257)%,并在前 12 h 快速释放,可能是因为 AST 丙酮溶液长时间放置在溶出杯中,导致部分 AST 氧化降解,释放率较低。与市售 AST-MCs 相比, Pickering 乳液具有更好的体外释放率,且 PE1 释放率高于 PE2。原因可能是在较高的 pH 值下,Zein-AST-GA NPs 之间发生聚集,导致 Zein-AST-GA NPs 与释放介质的接触面积减小,不利于

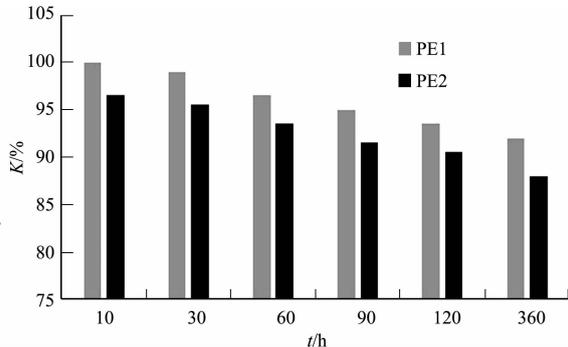


图 9 贮藏时间对虾青素保留率的影响

Fig. 9 Effects of storage time on retention rate of astaxanthin in shrimp

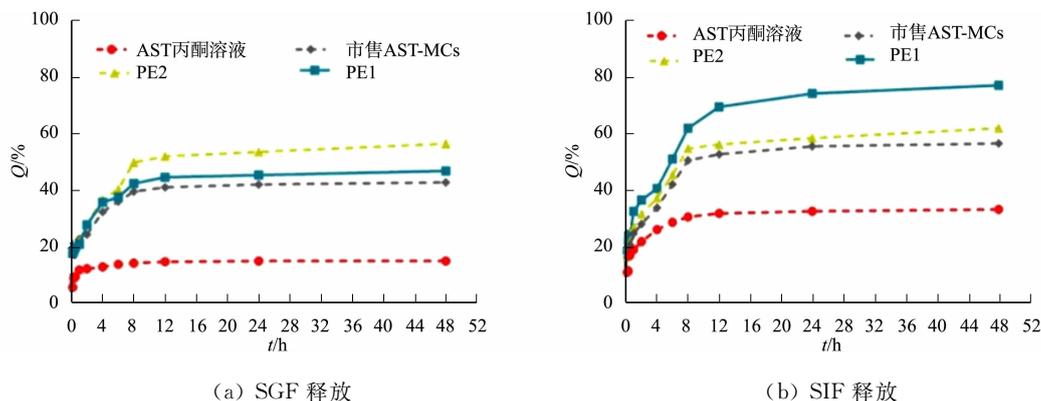


图 10 体外释放曲线

Fig. 10 *In vitro* release curves

包封在复合纳米颗粒中 AST 的释放,而复合纳米颗粒的聚集增加了油滴与释放介质的接触面积,增加了油滴中 AST 的释放。因此,PE1 在 SIF 中的释放率最高,并高于 PE2 在 SGF 中的释放率。

通过 DDSolver 软件拟合药物释放动力学模型,阐述药物释放的机制及动力学。模拟肠液中、胃液中各模型拟合结果,如表 1,2 所示。

表 1 模拟肠液中各溶液拟合结果

Tab. 1 Fitting results of solutions in simulated intestinal fluid

溶液	模拟肠液							
	零级动力学		一级动力学		Higuchi		Korsmeyer-Peppas	
	方程	R <sup>2</sup>	方程	R <sup>2</sup>	方程	R <sup>2</sup>	方程	R <sup>2</sup>
AST 丙酮溶液	$Q=0.389t+19.869$	0.396 5	$\ln(100-Q)=0.006t+36.951$	0.429 3	$Q=3.494t^{0.5}+15.153$	0.690 9	$Q=18.700t^{0.178}$	0.890 5
市售 AST-MCs	$Q=0.809t+28.373$	0.523 1	$\ln(100-Q)=0.020t+15.155$	0.637 0	$Q=6.927t^{0.5}+19.395$	0.818 1	$Q=26.505t^{0.225}$	0.914 3
PE2	$Q=0.881t+30.491$	0.528 7	$\ln(100-Q)=0.024t+12.87$	0.661 0	$Q=7.535t^{0.5}+20.739$	0.802 8	$Q=28.504t^{0.226}$	0.923 9
PE1	$Q=1.188t+34.548$	0.591 7	$\ln(100-Q)=0.06t+4.627$	0.852 2	$Q=9.935t^{0.5}+21.945$	0.848 5	$Q=32.182t^{0.251}$	0.938 1

由表 1 可知:PE1 在 SIF 中的释放曲线与 Korsmeyer-Peppas 拟合效果最好,且药物释放动力学指数范围为 0.126~0.251,表明 PE1 释放 AST 遵循菲克扩散规律。进一步说明复合纳米颗粒和油相中同时含有 AST 的 Pickering 乳液(PE1)在模拟肠液中可以持续释放药物。

表 2 模拟胃液中各溶液拟合结果

Tab. 2 Fitting results of solution in simulated gastric juice

溶液	模拟胃液							
	零级动力学		一级动力学		Higuchi		Korsmeyer-Peppas	
	方程	R <sup>2</sup>	方程	R <sup>2</sup>	方程	R <sup>2</sup>	方程	R <sup>2</sup>
AST 丙酮溶液	$Q=0.123t+10.932$	0.284 0	$\ln(100-Q)=0.001t+79.255$	0.290 9	$Q=1.147t^{0.5}+9.346$	0.555 2	$Q=10.455t^{0.12}$	0.820 5
市售 AST-MCs	$Q=0.511t+26.639$	0.454 3	$\ln(100-Q)=0.009t+31.164$	0.509 0	$Q=4.503t^{0.5}+19.665$	0.745 3	$Q=24.229t^{0.176}$	0.909 0
PE2	$Q=0.793t+28.625$	0.535 2	$\ln(100-Q)=0.019t+16.106$	0.642 6	$Q=6.76t^{0.5}+19.906$	0.805 1	$Q=26.808t^{0.219}$	0.916 2
PE1	$Q=0.585t+26.926$	0.465 2	$\ln(100-Q)=0.011t+26.385$	0.531 2	$Q=5.125t^{0.5}+20.156$	0.752 7	$Q=25.365t^{0.188}$	0.907 0

### 3.8 大鼠药代动力学研究

大鼠单次口服给药后血药质量浓度-时间曲线,如图 11 所示。图 11 中: $\rho$  为质量浓度。由图 11 可知:AST 玉米油和 PE1 血浆中 AST 质量浓度的达峰时间分别为 4,8 h,使用 Data Analysis System 软

件以非房室模型计算药代动力学参数。

非房室模型药代动力学参数,如表 3 所示。表 3 中:<sup>a</sup> 表示与 AST 玉米油相比,显著水平  $P < 0.05$ ; <sup>b</sup> 表示与市售 AST-MCs 相比,显著水平  $P < 0.05$ ; <sup>c</sup> 表示与 PE2 相比,显著水平  $P < 0.05$ 。

由表 3 可知:PE1 血浆中的 AST 达峰质量浓度( $\rho_{\max}$ )最高,其平均质量浓度为 $(2.654 \pm 0.004) \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,分别是 AST 玉米油、市售 AST-MCs 和 PE2 的 5.74, 2.43, 1.49 倍;PE1 的  $\text{AUC}_{(0-t)}$  分别是 AST 玉米油、市售 AST-MCs 和 PE2 的 5.50, 1.70, 1.56 倍;PE1 平均滞留时间( $T_{\text{MR}}$ )和半衰期( $t_{1/2}$ )是 AST 玉米油的 1.17, 1.80 倍,表明 PE1 可在体内滞留更长的时间;血浆中生物活性物质的相对生物利用度可以根据( $\text{AUC}_{(0-\infty)}$ )反映,PE1 的相对生物利用度分别是市售 AST-MCs 和 PE2 的 1.703, 1.481 倍。

表 3 非房室模型药代动力学参数

Tab. 3 Pharmacokinetic parameters of non compartmental model

药代动力学参数	AST 玉米油	市售 AST-MCs	PE2	PE1
$t_{1/2}/\text{h}$	$16.871 \pm 0.008$	$28.038 \pm 0.039^a$	$36.402 \pm 1.565^{ab}$	$30.417 \pm 0.188^{ab}$
$T_{\max}/\text{h}$	$4 \pm 0$	$8 \pm 0$	$8 \pm 0$	$8 \pm 0$
$\rho_{\max}/\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$	$0.462 \pm 0.001$	$1.092 \pm 0.006^a$	$1.779 \pm 0.001^{ab}$	$2.654 \pm 0.004^{abc}$
$\text{AUC}_{(0-t)}/\mu\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{mL}^{-1}$	$8.265 \pm 0.014$	$26.733 \pm 0.165^a$	$29.140 \pm 0.143^{ab}$	$45.486 \pm 0.054^{abc}$
$\text{AUC}_{(0-\infty)}/\mu\text{g} \cdot \text{h} \cdot \text{mL}^{-1}$	$9.514 \pm 0.040$	$42.239 \pm 0.327^a$	$48.601 \pm 0.849^{ab}$	$71.944 \pm 0.083^{abc}$
$T_{\text{MR}}/\text{h}$	$39.946 \pm 0.023$	$46.047 \pm 0.055^a$	$52.262 \pm 1.873^{ab}$	$46.642 \pm 0.108^a$
$F/\%$	—	443.967	510.676	756.191

PE1 具有最高的血药质量浓度和相对生物利用度的原因可能有以下 3 点。

1) Zein-AST-GA NPs 稳定的乳液具有较小的尺寸和更大的表面积,加速了 AST 的溶出。

2) Pickering 乳液中的油相使 Pickering 乳液具有 I 型脂质制剂的部分特征<sup>[14]</sup>,口服 Pickering 乳液后,分散在乳液油相中的 AST 被充分消化,形成胶体物质,该物质与内源性增溶物质相互作用后,产生混合胶束,增强了 AST 的口服吸收<sup>[15]</sup>。

3) 口服给药后,乳剂可以增加向肠道相关淋巴组织运输 AST,促进 AST 的肠道淋巴组织的吸收<sup>[16]</sup>。以上结果表明复合纳米颗粒和油相中同时含有 AST 的 Pickering 乳液(PE1)可以提高 AST 在大鼠血浆中的质量浓度和相对生物利用度。

## 4 结论

由于 AST 在水中的溶解度较低,其化学结构容易在光、氧、热等条件下氧化分解,导致稳定性和生物利用度低,限制了其应用。目前有研究报道部分新型载体和技术可以改善 AST 的稳定性和生物利用度, Kim 等<sup>[17]</sup>制备了包封 AST 的壳聚糖-三聚磷酸纳米颗粒,研究表明,包封在纳米颗粒中的 AST 可以延长其在胃肠道中的释放时间,增强其抗氧化活性。Bassijeh 等<sup>[18]</sup>将包封 AST 的微胶囊与游离的 AST 进行比较,在 60 °C 下放置 12 d 后,微胶囊中游离 AST 的质量分数比 AST 的质量分数降低了 30%。然而,仍存在一定的局限性,例如,贮藏稳定性差和相对生物利用度依旧较低。

文中 Pickering 乳液可以提高 AST 的稳定性。与游离 AST 油溶液和商业 AST-MC 相比,复合纳米颗粒和油相中含有 AST 的 Pickering 乳液在大鼠中显示出最佳的体外生物可利用性和相对生物利用度。综上所述,在复合纳米颗粒和油相中含有 AST 的 Pickering 乳液具有成为负载 AST 的有效递送体系的潜力,为 AST 的开发和应用提供参考。

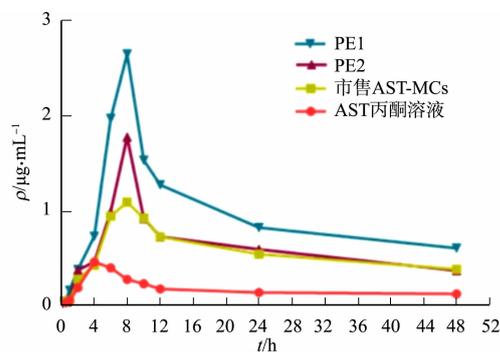


图 11 大鼠单次口服给药后血药质量浓度-时间曲线  
Fig. 11 Blood mass concentration vs. time curves after single oral administration in rats

## 参考文献:

- [1] KHOO K S, LEE S Y, OOI C W, *et al.* Recent advances in biorefinery of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 288: 121606. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.121606.
- [2] HONGM E, CHANG W S, PATEL A K, *et al.* Microalgal-based carbon sequestration by converting LNG-Fired waste CO<sub>2</sub> into red gold astaxanthin: The potential applicability [J]. *Energies*, 2019, 12(9): 1718. DOI: 10.3390/en12091718.
- [3] AMBATI R R, PHANG S M, RAVI S, *et al.* Astaxanthin: Sources, extraction, stability, biological activities and its commercial applications: A review [J]. *Marine Drugs*, 2014, 12(1): 128-152. DOI: 10.3390/md12010128.
- [4] SPERANZA L, PESCE M, PATRUNO A, *et al.* Astaxanthin treatment reduced oxidative induced pro-inflammatory cytokines secretion in U937: SHP-1 as a novel biological target [J]. *Marine Drugs*, 2012, 10(4): 890-899. DOI: 10.3390/md10040890.
- [5] CHEN Yannan, SU Wentao, TIE Shanshan, *et al.* Advances of astaxanthin-based delivery systems for precision nutrition [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 127: 63-73. DOI: 10.1016/j.tifs.2022.07.007.
- [6] CHEN Yenting, KAO Chienjen, HUANG Hsinyi, *et al.* Astaxanthin reduces MMP expressions, suppresses cancer cell migrations, and triggers apoptotic caspases of *in vitro* and *in vivo* models in melanoma [J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 31: 20-31. DOI: 10.1016/j.jff.2017.01.005.
- [7] ARAIZA-CALAHORRA A, AKHTAR M, SARKAR A. Recent advances in emulsion-based delivery approaches for curcumin: From encapsulation to bioaccessibility [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 71: 155-169. DOI: 10.1016/j.tifs.2017.11.009.
- [8] HARMAN C L G, PATEL M A, GULDIN S, *et al.* Recent developments in Pickering emulsions for biomedical applications [J]. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2019, 39: 173-189. DOI: 10.1016/j.cocis.2019.01.017.
- [9] WEI Zihao, ZHU Pei, HUANG Qingrong. Investigation of ovotransferrin conformation and its complexation with sugar beet pectin [J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 448-458. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.08.036.
- [10] LIANG Hongshan, ZHOU Bin, HE Lei, *et al.* Fabrication of zein/quaternized chitosan nanoparticles for the encapsulation and protection of curcumin [J]. *RSC Advances*, 2015, 5(18): 13891-13900. DOI: 10.1039/c4ra14270e.
- [11] ALCANTARA A C S, ARANDA P, DARDER M, *et al.* Bionanocomposites based on alginate-zein/layered double hydroxide materials as drug delivery systems [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2010, 20(42): 9495-9504. DOI: 10.1039/c0jm01211d.
- [12] ZAMANI S, MALCHIONE N, SELIG M J, *et al.* Formation of shelf stable Pickering high internal phase emulsions (HIPE) through the inclusion of whey protein microgels [J]. *Food & Function*, 2018, 9(2): 982-990. DOI: 10.1039/c7fo01800b.
- [13] CHEN Kai, CHEN Miancai, FENG Yuhong, *et al.* Application and rheology of anisotropic particle stabilized emulsions: Effects of particle hydrophobicity and fractal structure [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, 524: 8-16. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2017.02.088.
- [14] POUTON C W. Formulation of poorly water-soluble drugs for oral administration: Physicochemical and physiological issues and the lipid formulation classification system [J]. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2006, 29(3/4): 278-287. DOI: 10.1016/j.ejps.2006.04.016.
- [15] 刘颖, 易涛, 宦娣, 等. 利用体外脂解模型评价 I 型脂质制剂 [J]. *药学学报*, 2010, 45(10): 1307-1311. DOI: 10.16438/j.0513-4870.2010.10.019.
- [16] 徐浩, 高艺璇, 王向涛. 槲皮素纳米混悬剂的制备、表征及抗乳腺癌研究 [J]. *中草药*, 2019, 50(1): 42-51.
- [17] KIM E S, BAEK Y, YOO H J, *et al.* Chitosan-tripolyphosphate nanoparticles prepared by ionic gelation improve the antioxidant activities of astaxanthin in the *in vitro* and *in vivo* model [J]. *Antioxidants*, 2022, 11(3): 479. DOI: 10.3390/antiox11030479.
- [18] BASSIJEH A, ANSARI S, HOSSEINI S M H. Astaxanthin encapsulation in multilayer emulsions stabilized by complex coacervates of whey protein isolate and Persian gum and its use as a natural colorant in a model beverage [J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109689. DOI: 10.1016/j.foodres.2020.109689.

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202403040



# 改进 YOLO 的 X 射线 管道焊缝检测算法

王合佳<sup>1</sup>, 林宁<sup>2</sup>, 林振超<sup>2</sup>, 黄凯<sup>2</sup>, 牛顿<sup>2</sup>, 郑力新<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 工学院, 福建 泉州 362021;

2. 华侨大学 福建省特种设备检验研究院泉州分院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 提出一种基于 YOLOv8n 算法改进的 YOLOv8n-MG 算法,用于解决目标小、遮挡重叠、算法参数量大等问题。首先,引入 GSConv 和 VoV-GSCSP 模块降低算法复杂度,提高算法对缺陷粗糙边缘的检测能力;其次,使用轻量级的上采样算子 Carafe 替换原有的传统上采样,保留更多的细节特征;最后,引入混合局部通道注意力(MLCA)机制,以较低的计算成本和参数量保留更多的空间特征信息,并利用 Adam 优化器提高算法对复杂参数空间的学习能力。结果表明:优化后的算法与 YOLOv8n 算法相比,参数量减少了 11.3%,检测帧率提高了 7.7%,平均精度提高了 2.8%。

**关键词:** 焊接缺陷; 缺陷检测; MLCA 模块; YOLOv8 算法; 检测帧率

中图分类号: TP 391.41; TU 229

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)06-0766-10

## X-Ray Pipe Weld Detection Algorithm of Improved YOLO

WANG Hejia<sup>1</sup>, LIN Ning<sup>2</sup>, LIN Zhenchao<sup>2</sup>,  
HUANG Kai<sup>2</sup>, NIU Dun<sup>2</sup>, ZHENG Lixin<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. Quanzhou Branch of Special Equipment Inspection Research Institute, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** An improved YOLOv8n-MG algorithm based on the YOLOv8n algorithm is proposed to solve issues such as the small targets, overlapping occlusion, and large number of algorithm parameters, *etc.* Firstly, the GSConv and VoV-GSCSP modules are introduced to reduce the complexity of the the algorithm and enhance its ability to detect rough edges of defects. Secondly, a lightweight up-sampling operator, Carafe, is used to replace the traditional up-sampling, preserving more detailed features. Finally, a mixed local channel attention (MLCA) mechanism is introduced to retain more spatial feature information with lower computational cost and parameters, and the Adam optimizer is used to improve the algorithm's learning ability in complex parameter spaces. The results show that compared with the YOLOv8n algorithm, the optimized algorithm reduces the number of parameters by 11.3%, improves the detection frame rate by 7.7%, and improves the average accuracy by 2.8%.

**Keywords:** weld defect; defect detection; mixed local channel attention module; YOLOv8 algorithm; detection frame rate

随着我国工业化水平的不断提高,焊接技术已广泛应用于承压容器、冶金工业、石油化工等多个

收稿日期: 2024-03-04

通信作者: 郑力新(1967-),男,教授,博士,主要从事图像分析、机器视觉、深度学习方法的研究。E-mail: zlx@hqu.edu.cn。

基金项目: 福建省科技计划项目(2020Y0039); 福建省泉州市科技计划项目(2020C042R)

领域。工业设备的焊接质量直接影响焊接结构的使用性能和寿命<sup>[1]</sup>。由于生产工艺和焊接环境等因素的影响,工业设备的焊缝位置在制造和使用过程中容易产生各类焊接缺陷<sup>[2]</sup>。这些缺陷根据不同焊缝位置可分为内部缺陷(裂纹、未熔合、未焊透、条形和圆形缺陷等)和表面缺陷。内部缺陷利用 X 射线技术将其映射到图像中,并通过专家或计算机视觉进行检测。

随着深度学习技术的进步,深度学习在焊缝缺陷检测方面显示出巨大的潜力。目前的目标检测算法大致可分为两种:两阶段检测算法和一阶段检测算法。两阶段检测算法包括 R-CNN 算法<sup>[3]</sup>,Faster R-CNN 算法<sup>[4]</sup>和 HyperNet 算法<sup>[5]</sup>等。一阶段检测算法包括 YOLO 算法<sup>[6-8]</sup>,SSD 算法<sup>[9]</sup>等。许多研究人员采用这两种算法对实际场景进行研究,并取得了一定进展。Liu 等<sup>[10]</sup>提出 AF-RCNN 算法,将 ResNet 和 FPN 作为网络的骨干,同时利用了轻量级模型信道注意和空间注意机制。Chen 等<sup>[11]</sup>在 Faster R-CNN 算法的基础上进行改进,利用深度残差网络 Res2Net 增强了焊接缺陷特征提取能力。然而,上述模型通过增加模型的参数量和复杂程度以提高检测精度,导致参数量过大、推理速度较慢。

为了解决检测速度的问题,Liu 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于改进 LF-YOLO 算法的高效的特征提取(EFE)模块,速度为  $61.5 \text{ F} \cdot \text{s}^{-1}$ ,平均精度为 92.9%。Zhang 等<sup>[13]</sup>在 YOLOv8-nano 算法引入了对小目标敏感的全维动态卷积和基于归一化(NAM)注意力机制,提高了模型检测性能。程松等<sup>[14]</sup>在 YOLOv5 算法中引入 GhostBottleneck 模块和注意力机制,极大减少了算法参数量,使其适用于嵌入式设备。Yang 等<sup>[15]</sup>在 YOLOv3-tiny 算法的主干上增加了空间金字塔池化(SPP)模块,减少了检测头的数量,极大减少了算法参数量,但该算法的小目标检测性能不足。上述算法因过分强调速度提升而导致整体性能下降。

在实际工业环境中,焊接过程中的焊丝飞溅会造成焊渣等杂质的产生,不同缺陷相互重叠会对缺陷的定位和识别分类造成干扰,因此,上述研究的准确性和检测速度有一定局限性。基于此,本文提出一种基于 YOLOv8n 算法改进的深度学习检测算法。

## 1 YOLOv8n-MG 算法

### 1.1 YOLOv8 算法

YOLO 算法是目前较为先进的单阶段目标检测框架,旨在通过仅分析一次图像提供检测结果。从 YOLOv1 算法开始,经过多次改进和更新,一直到 YOLOv8 算法。YOLOv8 算法整合了 YOLOv5 算法部分结构,将第 1 个卷积层的内核从  $6 \times 6$  过渡到  $3 \times 3$ ,并用 C2F 模块取代了 C3 模块,更新了部分瓶颈的结构变化及顶层激活函数的变化。YOLOv8 算法主要包括主干、颈部和头部。YOLOv8 算法,如图 1 所示。

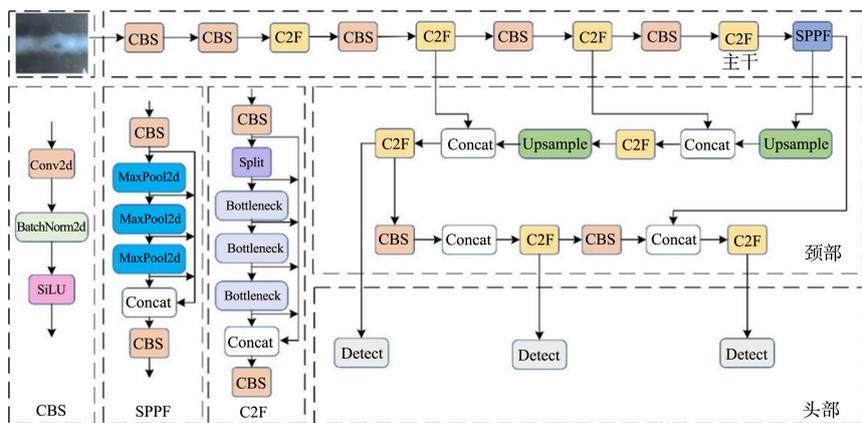


图 1 YOLOv8 算法

Fig. 1 YOLOv8 algorithm

主干提取图像特征。YOLOv8 算法使用一个新的骨干网络,它由多个 C2F 模块加上空间金字塔池化(SPPF)模块组成,SPPF 模块使用更多的跳过连接来丰富模型的特征表达能力,能够处理不同尺度的物体,使网络能够在多个尺度上提取特征,增强了模型的尺度适应能力。



面积的焊缝缺陷。因此,引入 VoV-GSCSP 模块,尽可能多地保留每个通道的隐藏连接。

GSCConv 模块,如图 3 所示。

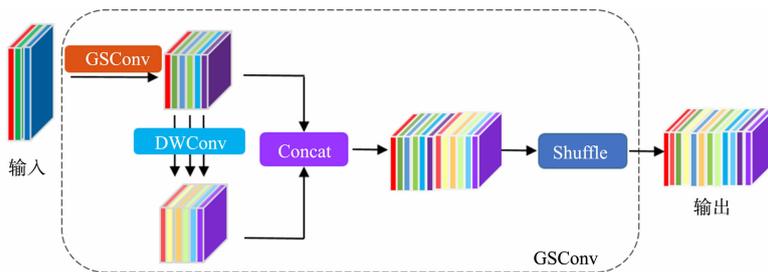


图 3 GSCConv 模块

Fig. 3 GSCConv module

GSCConv 模块融合了 GhostNet 和 ShuffleNetv2 的轻量级思想。GhostNet 主要解决了标准卷积的输出通常有很多相似的特征图,会给计算带来冗余的问题。GhostNet 的 Ghost 卷积不是标准卷积,而是先使用标准卷积来获得第一部分;其次通过深度卷积对这部分进行卷积,以获得几个相似的特征图作为第二部分的结果。最后,将这两个部分连接在一起,作为输出特征图。ShuffleNetv2 主要解决了深度可分离卷积中的信道信息分离问题,即输入特征图中的信道信息在计算过程中相互独立,导致信息交互不足,而通过 shuffle 操作提高特征间的信息流动,将标准卷积和深度可分离卷积产生的特征信息融合在一起,增加小目标缺陷特征提取的多样性和丰富度,降低计算复杂度,提高模型的泛化能力。

GSCConv 通过将输入通道划分为多个组,并对每个组进行独立的卷积运算,有利于模型对于缺陷边缘信息的提取和最大化保留,有助于区别母材背景和缺陷信息,同时减少了计算量。GSCConv 旨在保持较低时间复杂度的同时,尽可能多地保留通道之间的隐藏连接,并提高预测速度。

VoV-GSCSP 模块,如图 4 所示。VoV-GSCSP 模块利用不同的结构设计方案,通过跨阶段网络连接选择全局上下文信息,进一步提高模型对缺陷重叠边缘信息特征的提取能力,解决缺陷重叠混淆的问题,提高特征利用效率和网络性能,降低计算和网络结构的复杂性。通过结合 GSCConv 模块和 VoV-GSCSP 模块,实现了 YOLOv8n 算法颈部结构的重构,更有利于小目标焊缝缺陷特征的提取和分类,在减少模型计算量的同时,也提高了焊缝缺陷识别的准确性。

### 1.2.2 轻量级上采样算子 Carafe 特征上采样

是许多网络架构中的关键操作,上采样生成的特征图的质量对模型的准确性至关重要。YOLOv8-nano 算法使用 Upsample 操作,仅利用输入特征图中的空间信息,而忽略了语义信息,这会导致信息丢失或模糊,影响检测精度。因此,引入轻量级上采样算子 Carafe。算子 Carafe 可以保留更多的缺陷图像细节,同时减少采样过程导致的焊接缺陷的信息丢失,并且不会额外增加学习参数,这有利于模型的压缩和轻量化。Carafe 分为两个主要模块,即上采样核预测模块和特征重组模块。假设上采样的倍率为  $\alpha$ ,输入特征图的高、宽、长分别为  $H, W, C$ 。采样算子 Carafe 的采样操作有如下 2 个步骤。

1) 通过上采样核预测上采样核。对于输入特征图,使用  $1 \times 1$  的卷积,将通道数进行压缩。假设上采样核的尺寸为  $k_{up} \times k_{up}$ ,利用  $k_{enc} \times k_{enc}$  的卷积层来预测上采样核,得到形状为  $\alpha H \times \alpha W \times k_{up}^2$  的上采样核,并对上采样核利用 softmax 激活函数进行归一化。

2) 通过特征重组模块,完成上采样。将输出特征图中的每个位置映射回输入特征图,得到  $k_{up} \times k_{up}$  为中心的预测值,并用该点的上采样核作点积得到输出值。内容感知重组模块可使局部区域中相关的特征信息得到更多的关注,重组后的特征图,比原有的特征图具有更多的语义信息。

引入轻量级上采样算子 Carafe,适应不同内容和尺度的特征,有助于实现对不同尺度缺陷目标的特

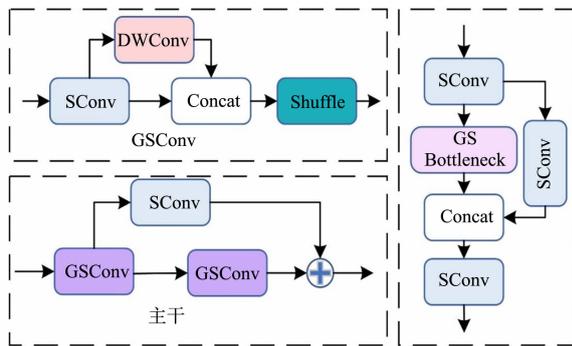


图 4 VoV-GSCSP 模块

Fig. 4 VoV-GSCSP module

征提取,不同于 Upsample 需要引入额外的参数量,算子 Carafe 只引入少量的参数,保持轻量化的特性。

1.2.3 MLCA 机制 注意力机制在计算机视觉中被广泛应用,能够帮助神经网络强调重要元素并抑制不相关的元素。然而,大多数信道注意力机制只关注信道特征信息,而忽略了空间特征信息,不利于提高在大面积母材背景下提取小面积缺陷的能力,从而导致目标检测性能模型较差。此外,现有的空间注意力模块往往复杂且成本高昂。

MLCA 机制结合了局部和全局特征、通道和空间特征信息,从而提高网络的表达效果,同时,相较于其他的注意力机制,MLCA 机制的参数更少,成本较低。MLCA 机制工作原理有如下 6 点。

1) 输入特征图,并进行局部平均池化和全局平均池化处理。局部池化关注局部区域的特征,而全局池化捕捉整个特征图的统计信息。

2) 通过一维卷积(Conv1d),对局部池化和全局池化后的特征进行特征转换,以压缩特征通道并保持空间维度不变。

3) 重新排列一维卷积后的特征,便于后续操作。

4) 通过“乘法”操作,将一维卷积后的特征与原始输入特征相结合,实现特征选择,强化对有用特征的关注。

5) 通过“加法”操作,将全局池化后的特征与局部池化特征相结合,融合全局上、下文信息。

6) 通过反池化(UNAP)操作,将特征图恢复到原始的空间维度。

MLCA 机制,如图 5 所示。MLCA 机制的优点在于以较低的计算成本保留更多的空间特征信息,从而使得卷积层能够接收到更多有用的通道信息,提高小目标缺陷特征图的表达能力和模型的检测性能,有助于区分在大面积母材背景下小面积缺陷的能力,同时参数量更少,能够在不影响精度的情况下,同时提高推理速度,实现模型的轻量化,便于模型部署。

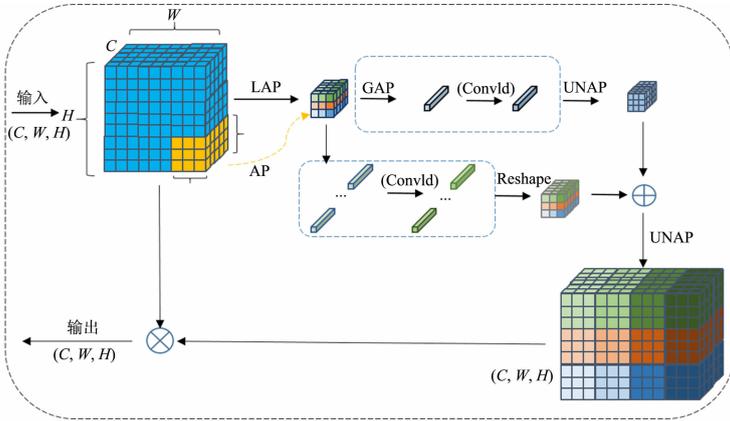


图 5 MLCA 机制

Fig. 5 MLCA mechanism

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验环境

为训练模型,使用 Adam 作为优化器,将训练批量大小设置为 32,初始学习率为 0.001,为了优化模型在训练过程中的性能,采用学习率衰减方法。学习率衰减方法使用初始学习率调整模型的参数,从而更新速度。此外,还利用学习率系数控制训练过程中学习率的衰减。迭代次数设置为 1 000。实验在 NVIDIA GeForce GTX TITAN Xp GPU 上进行,使用 python3.8 和 Pytorch 深度学习框架。

### 2.2 实验数据集

由于焊接工业领域的数据集很难收集,而且人工标注成本很高,目前公开的数据集也很稀少,如 Mery<sup>[20]</sup>在 2015 年提出了 GDXray 数据集,但仅包含 10 个焊缝缺陷数据样本,而且没有对缺陷进行标注。实验数据集来自福建省特种设备检验研究院(泉州分院)。对 X 射线管道焊缝缺陷胶片原件进行图像采集,使用专业的 VIDAR 工业胶片扫描仪对胶片进行扫描。在胶片扫描过程中,因为胶片本身拍

摄仪器和管道的原因,扫描出的图像不明显。对扫描的图像进行灰度调节,使得焊缝图像明显可见,对采集到的图像进行筛选,删除缺陷颜色暗淡和不易于母材区分的图像,仅留下缺陷特征较为明显的图像(共 431 张),从而能够方便专业人士进行标签标注。

增强图像数据方法有随机调整图像亮度、增加高斯噪点、水平翻转。图像数据增强后,数据集扩展为 1 884 张图片,命名为 HWDXray 数据集。在专业人士的指导下,对图片标注焊缝缺陷(裂纹、未熔合、未焊透、条形和圆形缺陷)。数据集按 7 : 2 : 1 的比例划分成 1 318 张图片的训练集、377 张图片的测试集和 189 张图片的验证集,图像像素大小为 1 280 px × 680 px,训练时将图片尺寸统一缩放,像素尺寸为 640 px × 640 px。HWDXray 数据集缺陷样例,如图 6 所示。

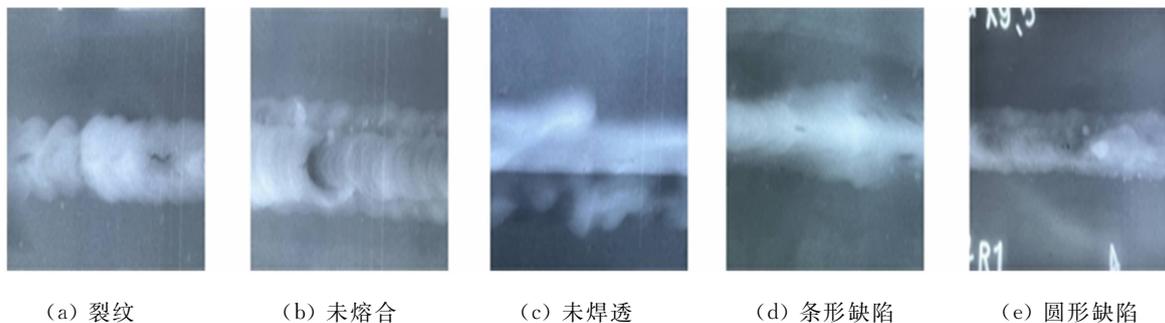


图 6 HWDXray 数据集缺陷样例

Fig. 6 Samples of HWDXray dataset defects

将 GDXray 数据集的 10 张焊缝缺陷数据作为验证模型的泛化性能,由于原数据集并没有提供缺陷标注,所以在专业人士的指导下同 HWDXray 数据集进行相同的标注。GDXray 数据集缺陷样例,如图 7 所示。

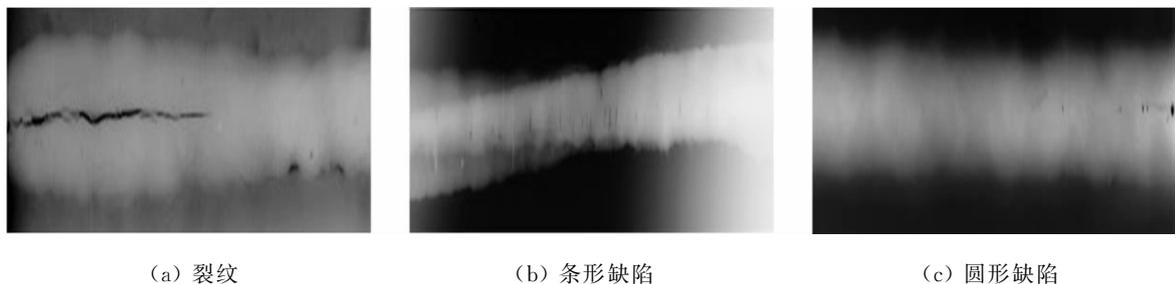


图 7 GDXray 数据集缺陷样例

Fig. 7 Samples of GDXray dataset defects

### 2.3 模型评估指标

精度(P)公式为

$$P = \frac{TP}{TP + FP} \tag{1}$$

式(1)中:TP 为正确识别为正样本的数量;FP 为错误识别为正样本但实际上是负样本的数量。

召回率( $\xi$ )为

$$\xi = \frac{TP}{TP + FN} \tag{2}$$

式(2)中:FN 为预测为负样本但实际上是正样本的数量。

不同召回率对应的精度平均值( $P_{a,R}$ )为

$$P_{a,R} = \sum_{k=1}^n p(k) \Delta R(k) \tag{3}$$

式(3)中: $n$  为召回率的总数; $p(k)$  为第  $k$  个召回率相对应的精度值; $\Delta R(k)$  为第  $k$  次召回率和第  $(k-1)$  次召回率的差值。

平均精度( $P_a$ )为

$$P_a = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M P_i. \quad (4)$$

式(4)中: $M$ 为类别个数。

检测帧率( $\eta$ )为

$$\eta = \frac{1}{t_{\text{tot}}} = \frac{1}{t_{\text{pre}} + t_{\text{det}} + t_{\text{pos}}}. \quad (5)$$

式(5)中: $t_{\text{tot}}$ 为总处理时间; $t_{\text{pre}}$ 为预处理时间; $t_{\text{det}}$ 为检测时间; $t_{\text{pos}}$ 为后处理时间。

## 2.4 颈部优化对模型性能的影响

分别在 YOLOv8n 算法和 YOLOv5 算法的颈部引入 GSConv 模块、VoV-GSCSP 模块及轻量级算子 Carafe, 将其命名为 YOLOv8n-GVC 算法和 YOLOv5-GVC 算法。在保持其他参数不变的情况下, 使用相同的数据集、实验环境和评估指标进行检测和测试, 优化颈部对比实验, 如表 1 所示。表 1 中: $n$ 为处理器处理次数; $m$ 为参数量。

表 1 优化颈部对比实验

Tab. 1 Comparison experiment of optimized neck

算法	$P_a/\%$	$n/\text{次}$	$\eta/\text{F} \cdot \text{s}^{-1}$	$m/10^6$ 个
YOLOv5	89.3	7.5	65.8	5.4
YOLOv5-GVC	90.6	7.6	77.4	5.1
YOLOv8n	92.3	7.4	79.5	6.2
YOLOv8n-GVC	93.2	7.3	81.8	5.3

由表 1 可知: YOLOv8n-GVC 算法和 YOLOv5-GVC 算法的性能表现令人满意, 其  $P_a$  比原算法分别提高了 0.9% 和 1.3%, YOLOv8-GVC 算法最高, 为 92.3%; YOLOv8n-GVC 算法和 YOLOv5-GVC 算法参数量比原算法也有一定程度的下降, 分别下降了  $0.9 \times 10^6$  和  $0.3 \times 10^6$  个, YOLOv5-GVC 模型的参数量最少, 为  $5.1 \times 10^6$  个; YOLOv5-GVC 算法比 YOLOv8n-GVC 算法参数量更少, 算法更轻量化, 但 YOLOv8n-GVC 算法在具备较高识别精度的同时, 参数量也得到保证(参数量仅多了  $0.2 \times 10^6$  个, 但  $P_a$  却提高了 2.6%)。

GSConv 模块和 VoV-GSCSP 模块跨级部分网络的设计不但减少了模型计算量, 而且提高了对缺陷边缘特征信息的提取, 有助于解决大面积母材背景下小面积焊缝缺陷的问题。而轻量级算子 Carafe 对上采样核进行预测和重组, 提高上采样效果, 并进一步实现模型的轻量化。表明通过引入 GSConv 模块、VoV-GSCSP 模块及轻量级算子 Carafe, 不仅减少算法的计算量, 还提高了焊缝缺陷识别的准确率, 从而实现了模型精度和速度之间的平衡。

## 2.5 不同注意力机制对模型性能的影响

将 YOLOv8n-GVC 算法作为基准算法, 在基准算法的基础上添加了 MLCA<sup>[19]</sup>, CPCA (Channel prior convolutional attention<sup>[21]</sup>), LSKA (Large separable kernel attention)<sup>[22]</sup>, CBAM (Convolutional block attention module)<sup>[23]</sup>, SegNext<sup>[24]</sup> 等机制, 在保持其他参数不变的情况下, 使用相同的损失函数、数据集、实验环境和评估指标。不同注意力机制对比实验, 如表 2 所示。

表 2 不同注意力机制对比实验

Tab. 2 Comparison experiment of different attention mechanisms

算法	$P_a/\%$	$n/\text{次}$	$\eta/\text{F} \cdot \text{s}^{-1}$	$m/10^6$ 个
YOLOv8n-GVC	93.2	7.3	81.8	5.3
YOLOv8n-GVC-MLCA	95.1	7.5	85.6	5.5
YOLOv8n-GVC-CPCA	91.7	8.2	52.3	6.0
YOLOv8n-GVC-LSKA	92.5	7.6	69.8	5.9
YOLOv8n-GVC-CBAM	93.9	7.3	67.8	5.8
YOLOv8n-GVC-SegNext	91.9	7.8	65.6	5.9

由表 2 可知: YOLOv8n-GVC-MLCA 算法的  $P_a$  最高, 为 95.1%, 比基准算法提高 1.9%, 表明 MLCA 机制能够更好地结合更多的通道和空间特征信息, 保留了更多的语义信息, 提高了对缺陷小目标的检测精度, 参数量只增加了  $0.2 \times 10^6$  个, 减少对计算资源的需求; 增加了注意力机制之后, 算法的参数

量都比基准算法高, 并且大多数  $\eta$  比原基准算法要低, 这表明注意力机制的引入影响了模型的效率和速度, 增加了算法的参数数量, 不利于算法的实际应用性。

MLCA 机制通过局部池化和全局池化的操作, 结合更多的通道和空间特征的信息, 在不占用更多内存的情况下, 最大限度地保留语义信息, 提高模型检测精度。而通过在 C2F 模块的基础上添加 MLCA 机制, 能够更好地利用空间和通道维度的信息, 提高特征的语义性和多样性。

## 2.6 改进算法性能

在自制的 X 射线管道焊缝图像数据集上进行改进算法性能的实验测试, 将模型训练设置为 1 000 个 epoch, 当平均精度没有明显提高时, 程序会自动停止训练。改进算法的检测结果, 如图 8 所示。由图 8 可知: 改进算法能够在大面积的焊接母材的背景下检测缺陷, 对于整个图形而言, 缺陷所占的面积很小, 而且在大面积的母材背景下很难被发现, 还有多个缺陷重叠的情况, 但改进算法对于缺陷的检测结果较好; 在针对实际工业环境焊接过程中产生的焊渣影响、不同尺度的缺陷、缺陷重叠等问题上都取得较为不错的结果, 有助于分类缺陷、解决缺陷识别困难等问题。

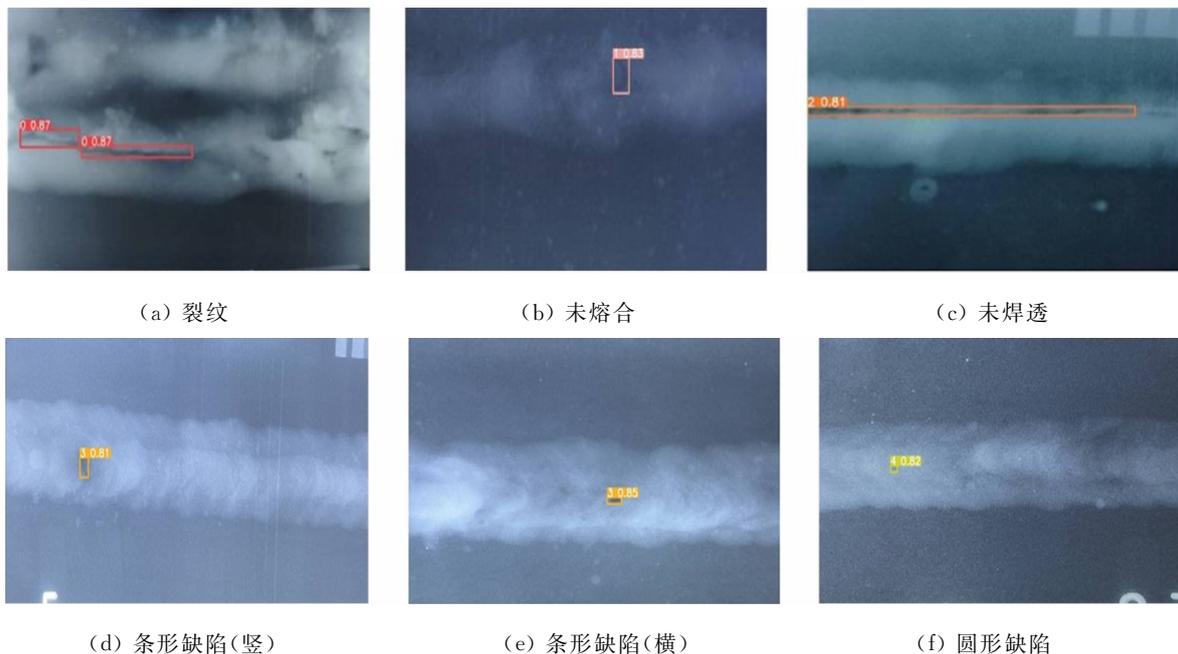


图 8 改进算法的检测结果

Fig. 8 Detection results of improved algorithm

## 2.7 目标检测算法性能对比

为了验证改进算法的优越性, 将 YOLOv8n-MG 算法与目前主流的目标检测算法进行比较, 在保持其他参数不变的情况下, 使用相同的评估指标进行比较, 比较它们在 X 射线管道焊缝数据集上的性能表现。不同目标检测算法性能对比, 如表 3 所示。

由表 3 可知: YOLOv8n-MG 算法  $P_a$  均优于其他算法, 为 95.1%, 比基准算法提高 2.8%,  $\eta$  比基准算法略高  $6.1 \text{ F} \cdot \text{s}^{-1}$ , 提高了 7.7%, 参数量比大部分算法更少, 比基准算法少  $0.7 \times 10^6$  个, 减少了 11.3%。这表明 YOLOv8n-MG 算法在使用更少参数量的基础上, 不仅能够保证精度高, 还能保持较好的检测速度, 实现模型精度和速度之间的平衡。

为了进一步验证改进算法的泛化能力和有效性, 将 YOLOv8n-MG 算法在 GDXray 数据集上进行验证, 比较 YOLOv8n-MG 在不同数据集的性能表现。

YOLOv8n-MG 算法在 GDXray 数据集上的平均精度为 63.4%, 这表明模型的泛化性能较好。考虑到

表 3 不同目标检测算法性能对比

Tab. 3 Performance comparison of different object detection algorithms

算法	$P_a/\%$	$\eta/\text{F} \cdot \text{s}^{-1}$	$m/10^6$ 个
YOLOv8n	92.3	79.5	6.2
YOLOv7	87.1	64.2	7.3
YOLOv6	83.2	57.6	6.8
YOLOv5	89.3	65.8	5.4
Faster R-CNN	85.5	59.3	7.2
YOLOv8n-MG	95.1	85.6	5.5

不同胶片影像采集标准及缺陷定义的差异,各数据集间存在着较大的缺陷类型差距,而 YOLOv8n-MG 算法能在相似的焊缝缺陷数据集上识别出正确缺陷,展现出不错的泛化性能。

结果表明,提出改进的 YOLO 算法取得了令人满意的结果,对缺陷小目标检测、缺陷重叠、模型参数量较大等问题具有优异性,以较少的参数量实现了更高的精准度和推理速度,也证明模型具有一定的泛化性能,这有利于实验场景中的适用性和有效性。改进的 YOLO 算法不仅保留了 YOLO 系列的速度优势,而且提高了对焊缝缺陷小目标的检测精度。

### 3 结论

为了解决 X 射线管道焊接检测中存在的数据集缺乏、缺陷小目标、遮挡重叠、推理速度慢等问题,自制了 X 射线管道焊接缺陷数据集,并提出 YOLOv8n-MG 算法。YOLOv8n-MG 算法在 YOLOv8n 算法的基础上,对算法多个方面进行了优化和改进,包括对优化颈部为 GSCONV,并引入 VoV-GSCSP 模块和 Carafe 轻量级上采样算子,对骨干的 C2F 模块添加 MLCA 机制。利用自制的 X 射线管道焊接缺陷 HWDXray 数据集,使用平均精度和检测帧率等指标评估了算法性能,并与其他目标检测算法和 GDXray 数据集进行比较。结果表明,YOLOv8n-MG 算法在保持较高检测速度的同时,显著提高了检测精度,取得了良好的效果。

未来将进一步发展检测模型,并扩大数据集,收集更多情况下的 X 射线管道焊缝样本,使每种缺陷的样本更加丰富和均衡,从而能够更详细地分析和标注缺陷特征;继续专注于提高算法检测准确性,降低网络参数,并将算法和系统部署到普通的计算机设备中。从而能够帮助相关的检验人员辅助 X 射线管道焊缝缺陷的检测工作。

### 参考文献:

- [1] 高杨.长输管道自动焊接设备及技术发展探究[J].石化技术,2022,29(12):219-221.
- [2] BARSOU M,Z, JONSSON B. Influence of weld quality on the fatigue strength in seam welds[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(3): 971-979. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2010.12.001.
- [3] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, *et al.* Region-based convolutional networks for accurate object detection and segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 38(1): 142-158. DOI: 10.1109/TPAMI.2015.2437384.
- [4] GAVRILESCU R, ZET C, FOAL U C, *et al.* Faster R-CNN: An approach to real-time object detection[C]// 2018 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering. Lasi: IEEE Press, 2018: 0165-0168. DOI: 10.1109/ICEPE.2018.8559776.
- [5] KONG Tao, YAO Anbang, CHEN Yurong, *et al.* Hypernet: Towards accurate region proposal generation and joint object detection[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas: IEEE Press, 2016: 845-853. DOI: 10.1109/CVPR.2016.98.
- [6] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, *et al.* You only look once: Unified, real-time object detection[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Las Vegas: IEEE Press, 2016: 779-788. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
- [7] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: Better, faster, stronger[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu: IEEE Press, 2017: 7263-7271. DOI: 10.1109/CVPR.2017.690.
- [8] REDMON J, FARHADI A. YOLOV3: An incremental improvement[EB/OL]. (2018-04-08)[2024-01-03]. <https://arxiv.org/abs/1804.02767>.
- [9] LIU Wei, ANGUELOV D, ERHAN D, *et al.* SSD: Single shot multibox detector[C]// Computer Vision-ECCV 2016: 14th European Conference. Cham: Springer International Publishing, 2016: 21-37. DOI: 10.1007/978-3-319-46448-0\_2.
- [10] LIU Weipeng, SHAN Shengqi, CHEN Haiyong, *et al.* X-ray weld defect detection based on AF-RCNN[J]. Welding in the World, 2022, 66(6): 1165-1177. DOI: 10.1007/s40194-022-01281-w.
- [11] CHEN Yongbin, WANG Jingran, WANG Guitang. Intelligent welding defect detection model on improved R-CNN

- [J]. IETE Journal of Research, 2023, 69(12): 9235-9244. DOI: 10. 1080/03772063. 2022. 2040387.
- [12] LIU Moyun, CHEN Youping, XIE Jingming, *et al.* LF-YOLO: A lighter and faster YOLO for weld defect detection of X-ray image[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(7): 7430-7439. DOI: 10. 1109/JSEN. 2023. 3247006.
- [13] ZHANG Yi, NI Qingjian. A novel weld-seam defect detection algorithm based on the S-YOLO model[J]. Axioms, 2023, 12(7): 697. DOI: 10. 3390/axioms12070697.
- [14] 程松, 杨洪刚, 徐学谦, 等. 基于 YOLOv5 的改进轻量型 X 射线铝合金焊缝缺陷检测算法[J]. 中国激光, 2022, 49(21): 2104005. DOI: 10. 3788/CJL202249. 2104005.
- [15] YANG Jun, FU Bo, ZENG Jinquan, *et al.* YOLO-Xweld: Efficiently detecting pipeline welding defects in X-ray images for constrained environments[C]// International Joint Conference on Neural Networks. Padua; IEEE Press, 2022: 1-7. DOI: 10. 1109/IJCNN55064. 2022. 9892765.
- [16] HU Jie, WANG Zhangbin, CHANG Minjie, *et al.* Psg-YOLOV5: A paradigm for traffic sign detection and recognition algorithm based on deep learning[J]. Symmetry, 2022, 14(11): 2262. DOI: 10. 3390/sym14112262.
- [17] LI Hulin, LI Jun, WEI Hanbing, *et al.* Slim-neck by GSConv: A lightweight-design for real-time detector architectures [J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2024, 21(3): 62. DOI: 10. 1007/s11554-024-01436-6.
- [18] WANG Jiaqi, CHEN Kai, XU Rui, *et al.* Carafe: Content-aware reassembly of features[C]// Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Seoul; IEEE Press, 2019: 3007-3016. DOI: 10. 1109/ICCV. 2019. 00310.
- [19] WAN Dahang, LU Rongsheng, SHEN Siyuan, *et al.* Mixed local channel attention for object detection[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 123: 106442. DOI: 10. 1016/j. engappai. 2023. 106442.
- [20] MERY D, RIFFO V, ZSCHERPEL U, *et al.* GDXray: The database of X-ray images for nondestructive testing[J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2015, 34(4): 42. DOI: 10. 1007/s10921-015-0315-7.
- [21] HUANG Hejun, CHEN Zuguo, ZOU Ying, *et al.* Channel prior convolutional attention for medical image segmentation[EB/OL]. (2023-06-08)[2024-01-03]. <https://arxiv.org/abs/2306.05196>.
- [22] LAU K W, PO L M, REHMAN Y A U. Large separable kernel attention: Rethinking the large kernel attention design in cnn[J]. Expert Systems with Applications, 2024, 236: 121352. DOI: 10. 1016/j. eswa. 2023. 121352.
- [23] WOO S H, PARK J, LEE J Y, *et al.* Cbam: Convolutional block attention module[C]// Proceedings of the European Conference on Computer Vision. Cham; Springer International Publishing, 2018: 3-19. DOI: 10. 1007/978-3-030-01234-2\_1.
- [24] GUO Menghao, LU Chengze, HOU Qibin, *et al.* Segnext: Rethinking convolutional attention design for semantic segmentation[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2022, 35: 1140-1156. DOI: 10. 48550/arXiv. 2209. 08575.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 陈婧)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202402002



# 新疆新型城镇化发展的 时空差异及协调水平

刘硕, 张永福, 刘永强

(新疆大学 地理与遥感科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 从经济发展、公共服务、生态文明、智慧创新、社会文化、城乡统筹6个方面构建新疆新型城镇化发展水平评价指标体系,运用熵值法、泰尔指数等方法对2007—2021年新疆14个地州及4大区域的发展水平进行综合测度与时空差异分析,并运用协调水平模型和回归模型研究各地州新型城镇化协调水平与影响因素,探究新疆新型城镇化发展水平与协调水平的时空演变规律及空间分布格局。结果表明:新疆新型城镇化发展水平相对较低,协调水平与发展水平均呈现以乌鲁木齐市为中心的“中间高、周边低”的分布格局;协调水平的主导驱动力为市场环境动力,其次是经济发展水平和对外开放程度。

**关键词:** 新型城镇; 时空差异; 协调水平模型; 驱动力; 新疆

**中图分类号:** TU 984.1(445); F 299.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2024)06-0776-13

## Spatial and Temporal Difference and Coordination Level of New-Type Urbanization Development in Xinjiang

LIU Shuo, ZHANG Yongfu, LIU Yongqiang

(College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** An evaluation index system of the new-type urbanization development level in Xinjiang is constructed from six aspects: the economic development, the public service, the ecological civilization, the smart innovation, the social culture, and the urban-rural coordination. Using the entropy method, the Theil index method and other methods, the spatial and temporal difference of the development level of 14 prefectures and four regions in Xinjiang from 2007 to 2021 are measured and analyzed comprehensively. The coordination level model and the regression model are used to study the coordination levels and influencing factors of new urbanization development in different prefectures, and the time evolution law and spatial distribution pattern of the development level and coordination level of new-type urbanization in Xinjiang are explored. The results show that the development level of new-type urbanization in Xinjiang is relatively lower, the coordination level and development level show the distribution pattern of “high in the middle, low in the surrounding area” with Urumqi as the center. The dominant driving force of the coordination level is the market environment dynamics, followed by the economic development level and the opening up degree.

**Keywords:** new-type urbanization; spatial and temporal difference; coordination level model; driving force; Xinjiang

**收稿日期:** 2024-02-06

**通信作者:** 张永福(1964-),男,副教授,主要从事国土资源评价与土地资源管理的研究。E-mail: 978404336@qq.com。

**基金项目:** 第三次新疆综合科学考察项目(2022xjkk1103)

传统城镇化中城镇人口的大规模集聚造成了农村劳动力快速减少,加之城市过于注重自身发展,忽略了与周边地区的协同和对农村地区的带动,从而加剧了城乡二元结构的固化。与传统城镇化一味追求城市人口的增加和城市规模的扩张不同,新型城镇化更加注重城乡统筹和可持续发展。新型城镇化的内涵可以概况为在城镇化建设中,坚持以人为本,统筹经济、社会、生态、文化与创新,推动区域协调发展,促进城镇空间高效集约,合理分配要素资源,科学推进高质量发展与城乡一体化建设,实现社会和谐稳定与可持续发展,满足居民的物质文化与精神文明需求。《新疆城镇化体系规划(2014—2030)》中指出新疆推进新型城镇化建设有利于经济、社会、工业、人地关系、生态环境等各方面的发展。

在指标体系的构建上,文献[1-3]从人口、经济、社会、土地等方面进行构建;文献[4-6]陆续将生态文明与城乡一体化纳入评价指标体系;文献[7-9]又逐步增加了科技水平的指标;蓝庆新等<sup>[10]</sup>从城镇自身发展质量、城镇化推进效率、城镇化协调程度3个维度构建中国新型城镇化质量评价体系;赵磊等<sup>[11]</sup>选取人口城镇化、经济城镇化、空间城镇化、社会包容性、环境治理力、城乡统筹度和生态集约化7个要素,测度分析中国省际新型城镇化发展水平。

近年来,有关新型城镇化协调水平的研究主要有两种:一种是新型城镇化与生态环境、乡村振兴、旅游发展等系统间的耦合协调水平<sup>[12-14]</sup>;另一种是新型城镇化内部各子系统间的耦合协调水平<sup>[15-16]</sup>。Vernon等<sup>[17]</sup>认为技术进步、人口迁移和经济增长是促进城镇化发展关键因素;而文献[18-19]将产业结构与城镇化间的关系作为研究的重点;文献[20-22]将新型城镇化发展水平的驱动因子归纳为行政力、市场力、外向力和内源力;赵田<sup>[23]</sup>将地区的自然条件也纳入了研究范围;张震<sup>[16]</sup>将协调水平驱动因子归纳为经济发展水平、产业结构、政府行为、科技创新能力、对外开放程度和交通条件。

综上所述,关于新型城镇化水平测度及影响因素的研究较为丰富,但是对协调水平影响因素的研究较少,有关新疆的研究中所构建的指标体系维度普遍较少。基于此,本文对新疆新型城镇化发展的时空差异及协调水平进行研究。

## 1 研究区概况

新疆维吾尔自治区位于中国西北,土地面积166万 $\text{km}^2$ ,约占国土面积的1/6,是我国丝绸之路经济带的核心区域。新疆正处于从传统城镇化向新型城镇化过渡的阶段,新疆新型城镇化具有重要意义。研究区示意图,如图1所示。

按照《新疆城镇化体系规划(2014—2030)》中提出的划分标准,将研究区域14个地州划分为北疆北部、天山北坡、天山南坡、南疆三地州4个区域。北疆北部包括塔城地区、阿勒泰地区;天山北坡包括乌鲁木齐市、克拉玛依市、吐鲁番地区、哈密地区、昌吉回族自治区(简称昌吉州)、博尔塔拉蒙古自治州(简称博州)、伊犁哈萨克自治州(简称伊犁州);天山南坡包括巴音郭楞蒙古自治州(简称巴州)、阿克苏地区;南疆三地州包括克孜勒苏柯尔克孜自治州(简称克州)、喀什地区、和田地区。



图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of study area

## 2 数据来源与研究方法

### 2.1 数据来源

数据来源如下:《新疆统计年鉴(2008—2021年)》、新疆各地州《国民经济和社会发展统计公报(2007—2021年)》、《中国城市建设统计年鉴(2007—2021年)》、《中国城市统计年鉴(2007—2021年)》及新疆各地州统计局网站的相关资料。部分数据是整理计算后的结果,缺失的数据采用相邻年份插值法进行补齐。

### 2.2 研究方法

2.2.1 熵值法 为消除选取指标、确定权重中的主观因素,采用客观赋权法中的熵值法对指标、权重进

行计算。由于各指标数据的单位、数量级不同,对原始数据进行标准化处理<sup>[24-25]</sup>。

1) 构建原始数据矩阵,假设有  $m$  个地区,  $n$  项指标,矩阵  $(\mathbf{X})$  为

$$\mathbf{X} = (x_{i,j})_{m \times n} \quad (1)$$

2) 处理极差标准化,正向指标为

$$X_{i,j} = (x_{i,j} - x_{i,\min}) / (x_{i,\max} - x_{i,\min}) \quad (2)$$

负向指标为

$$X_{i,j} = (x_{i,\max} - x_{i,j}) / (x_{i,\max} - x_{i,\min}) \quad (3)$$

3) 第  $i$  个地区第  $j$  项指标的比例为

$$P_{i,j} = X_{i,j} / \sum_{j=1}^n X_{i,j} \quad (4)$$

4) 第  $j$  项指标的熵值( $e_j$ )为

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m P_{i,j} \ln P_{i,j} \quad (5)$$

5) 差异性系数( $g_j$ )为

$$g_j = 1 - e_j \quad (6)$$

6) 第  $j$  项指标的权重( $W_j$ )为

$$W_j = g_j / \sum_{j=1}^n g_{i,j} \quad (7)$$

7) 第  $i$  个地区第  $j$  项指标评价得分( $S_{i,j}$ )为

$$S_{i,j} = W_j x_{i,j} \quad (8)$$

8) 第  $i$  个地区新型城镇化发展水平综合评价得分( $S_i$ )为

$$S_i = \sum_{j=1}^n S_{i,j} \quad (9)$$

式(2),(3),(5)中: $X_{i,j}$ 为标准化处理后的值; $x_{i,j}$ 为指标数据的原始值; $x_{i,\max}$ 和  $x_{i,\min}$ 分别为某一指标各地区所有年份原始数据中的最大值与最小值; $k > 0, k = 1/\ln m; e_j \geq 0$ 。

2.2.2 泰尔指数 泰尔指数常用来表示一个地区的内部差异,并且由于泰尔指数具有良好的分解性质,通常将样本分为多个区域或组别,对新型城镇化发展水平进行泰尔指数的计算与分解<sup>[12,26]</sup>。

1) 新疆的总体差异泰尔指数( $T$ )为

$$T = 1 / (k \sum_{q=1}^k [S_q / \bar{S} \times \ln(S_q / \bar{S})]) \quad (10)$$

式(10)中: $q$ 为各地州; $k$ 为地州数量; $S_q$ 为地州  $q$  的新型城镇化发展水平; $\bar{S}$ 为新疆新型城镇化发展水平的平均值。

2) 各区域的总体差异泰尔指数( $T_p$ )为

$$T_p = 1 / (k_p \sum_{q=1}^{k_p} [S_{p,q} / \bar{S}_p \times \ln(S_{p,q} / \bar{S}_p)]) \quad (11)$$

式(11)中: $k_p$ 为区域  $p$  的地州市数量; $S_{p,q}$ 为区域  $p$  内的地州  $q$  的新型城镇化发展水平; $\bar{S}_p$ 为区域  $p$  的新型城镇化发展水平的平均值。

3) 新疆的总体差异泰尔指数为

$$T = T_w + T_b = \sum_{p=1}^4 (k_p / k \times \bar{S}_p / \bar{S} \times T_p) + \sum_{p=1}^4 [k_p / k \times \bar{S}_p / \bar{S} \times \ln(\bar{S}_p / \bar{S})] \quad (12)$$

式(12)中: $T_w$ 为区域内差异的泰尔指数; $T_b$ 为区域间差异泰尔指数。

2.2.3 Kernel 密度估计法 Kernel 密度估计法是用连续的密度曲线描述变量的分布,是研究非均衡分布的一种重要非参数方法,广泛应用在空间分布的非均衡问题。变量  $x$  的核密度  $f(x)$ <sup>[11,27]</sup> 为

$$f(x) = 1 / (nh \sum_{i=1}^n k[(x - x_i) / h]) \quad (13)$$

式(13)中: $n$ 为观测值个数; $x_i$ 为独立同分布观测值;函数  $k(\cdot)$ 为核函数; $h$ 为带宽,带宽越小,核密度

函数曲线越不光滑, 估计精度越高。

2.2.4 协调水平模型 协调水平模型用于分析事物的协调发展水平, 借助协调水平模型计算新型城镇化内部子系统间的协调水平<sup>[28-29]</sup>。

1) 评价地区各子系统间的耦合度(C)为

$$C(U_1, U_2, \dots, U_n) = n \times (U_1 U_2 \dots U_n / (U_1 + U_2 + \dots + U_n)^n)^{1/n} \quad (14)$$

式(14)中:  $U_n$  为子系统的综合评价值,  $n$  为子系统的个数,  $n=6$ 。

2) 新型城镇化发展水平综合评价为

$$F = \beta_1 U_1 + \beta_2 U_2 + \beta_3 U_3 + \dots + \beta_n U_n \quad (15)$$

式(15)中:  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_n$  为前述熵值法测算得到的子系统的权重。

3) 各子系统间的协调水平(D)为

$$D = \sqrt{C \times F} \quad (16)$$

2.2.5 多元线性回归分析 多元线性回归分析用来分析两种及以上变量间的定量关系。为较好解释新型城镇化协调水平的驱动机制, 建立多元线性回归模型<sup>[1,6]</sup>, 各子系统间的协调水平为

$$D = \beta_1 L_1 + \beta_2 L_2 + \beta_3 L_3 + \dots + \beta_n L_n + \epsilon \quad (17)$$

式(17)中:  $L_1, L_2, \dots, L_n$  为各驱动因子;  $\epsilon$  为常数项。

### 3 结果分析

#### 3.1 新疆新型城镇化发展水平指标体系的构建

经济发展是新型城镇化发展的重要基础<sup>[9,16]</sup>, 经济发展水平的提升意味着国民经济规模的扩大、产业结构的优化及经济和社会素质的提高。公共服务是新型城镇化发展的基本保障, 是提升城市建设质量与吸引人才的重要基础。生态文明是新型城镇化发展的关键抓手, 贯穿于经济、社会、环境、民生等各个方面, 是人与自然和谐共生、可持续发展的社会形态。智慧创新是新型城镇化发展的内生动力, 能够有效改善生产生活方式, 提升城乡居民生活质量。社会文化是新型城镇化发展的内在资源, 能够促进物质文明与精神文明的共同发展。城乡统筹是新型城镇化发展的内在要求, 要充分考虑资源分配、居民利益、制度环境等各方问题, 营造协调、良性、融合的城乡建设环境。

借鉴较成熟的指标体系成果<sup>[11,18]</sup>, 参考国家《“十四五”新型城镇化实施方案》中的宜居、韧性、创新、智慧、绿色及人文的理念, 遵循科学性、系统性、全面性、可比性与可操作性的原则, 对 2007—2021 年新疆 14 个地州共 10 080 个原始数据进行标准化处理, 并用熵值法计算每个指标历年的权重, 最终以各指标历年权重的平均值作为该指标的权重。选取经济发展、公共服务、生态文明、智慧创新、社会文化及城乡统筹 6 个准则层, 并根据经济水平、经济效益、开放水平等 20 个要素层。最终选取了 48 个指标构建了新疆新型城镇化发展水平评价指标体系, 如表 1 所示。

由表 1 可知: 经济发展与公共服务是影响新型城镇化发展水平最重要的因素; 城乡统筹的权重比智

表 1 新疆新型城镇化发展水平评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of new-type urbanization development level in Xinjiang

准则层 (权重)	要素层	指标层	单位	属性	权重
经济发展 (0.223)	经济水平	城镇固定资产投资额	万元	正向	0.023
		GDP 增长率	%	正向	0.012
		第二、三产业总产值	万元	正向	0.030
		第三产业产值占 GDP 比重	%	正向	0.015
	经济效益	人均可支配收入	元·人 <sup>-1</sup>	正向	0.018
		人均地区生产总值	元·人 <sup>-1</sup>	正向	0.023
		人均社会消费品零售总额	元·人 <sup>-1</sup>	正向	0.021
	开放水平	进出口总额	亿元	正向	0.049
		区外招商引资金额	亿元	正向	0.032

续表

准则层(权重)	要素层	指标层	单位	属性	权重
公共服务 (0.227)	基础设施	城市用水普及率	%	正向	0.007
		城市燃气普及率	%	正向	0.007
		人均城市道路面积	$\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$	正向	0.016
		建成区排水管道密度	$\text{km} \cdot \text{km}^{-2}$	正向	0.024
	医疗卫生	每万人医疗机构床位数	$\text{个} \cdot \text{万人}^{-1}$	正向	0.020
		每万人医生数	$\text{人} \cdot \text{万人}^{-1}$	正向	0.018
	社会保障	城镇登记失业率	%	负向	0.016
		基本医疗保险参保率	%	正向	0.018
	教育水平	人均粮食产量	$\text{kg} \cdot \text{人}^{-1}$	正向	0.026
		初高中升学率	%	正向	0.012
生态文明 (0.116)	生态治理	每10万人高等院校在校学生数	$\text{人} \cdot (10 \text{万人})^{-1}$	正向	0.065
		生活垃圾无害化处理率	%	正向	0.009
	环境质量	城市污水处理率	%	正向	0.008
		建成区绿化覆盖率	%	正向	0.007
	绿色生活	空气质量优良天数占全年比例	%	正向	0.010
		可吸入颗粒物	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	负向	0.009
	绿色经济	人均公园绿地面积	$\text{m}^2 \cdot \text{人}^{-1}$	正向	0.014
		人均水资源量	$\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$	正向	0.026
	智慧创新 (0.148)	人均城市生活垃圾清运量	$\text{t} \cdot \text{人}^{-1}$	正向	0.015
		单位GDP用水量	$\text{t} \cdot \text{万元}^{-1}$	负向	0.011
社会文化 (0.132)	创新环境	单位GDP能耗	$\text{t} \cdot \text{万元}^{-1}$	负向	0.009
		规模以上工业企业单位数	个	正向	0.021
	智慧科技	规模以上企业研究与试验人员数量	人	正向	0.057
		移动电话普及率	$\text{个} \cdot \text{百人}^{-1}$	正向	0.019
	文化资源	互联网普及率	%	正向	0.018
		公共图书馆数量	个	正向	0.011
城乡统筹 (0.152)	文化产出	博物馆数量	个	正向	0.016
		A级及以上风景名胜区数量	个	正向	0.016
	文化普及	国内外旅游人次	万人	正向	0.028
		国内外旅游收入	万元	正向	0.045
经济统筹	人口统筹	每10万人普通中学在校学生数	人	正向	0.016
		城镇化率	%	正向	0.020
	社会统筹	非农业与农业人口比例	—	正向	0.078
		非农业产值占GDP比例	%	正向	0.014
		城乡人均可支配收入比例	—	负向	0.009
社会统筹	农村人均纯收入	元	正向	0.013	
	城乡人均社会消费品零售总额比例	—	负向	0.007	
		城乡每万人医疗机构床位数比例	—	负向	0.011

慧创新的权重更大,社会文化与生态文明的权重相对较小。

### 3.2 新疆新型城镇化发展水平测度与时空差异分析

根据表1的指标体系与权重,计算2007—2021年新疆与14个地州新型城镇化发展水平综合得分,新疆新型城镇化发展水平时序变化,如图2所示。图2中: $S$ 为新型城镇化发展水平。

由图2(a)可知:新疆新型城镇化发展水平的平均值呈现稳定增长态势, $\bar{S}$ 由2007年的0.212提升到2021年的0.361,上升幅度达70.28%;2007—2016年为平稳上升阶段,上升幅度基本稳定,2017—2021年为波动上升阶段,增速时快时慢,但始终保持上升趋势。

根据新疆新型城镇化发展水平综合评价得分结果, $\bar{S} > 0.5, 0.4 < \bar{S} \leq 0.5, 0.3 < \bar{S} \leq 0.4, 0.2 < \bar{S} \leq 0.3, \bar{S} < 0.2$ 的等级分别为较高水平,中等偏上水平,中等水平,中等偏下水平,较低水平<sup>[4,30]</sup>。

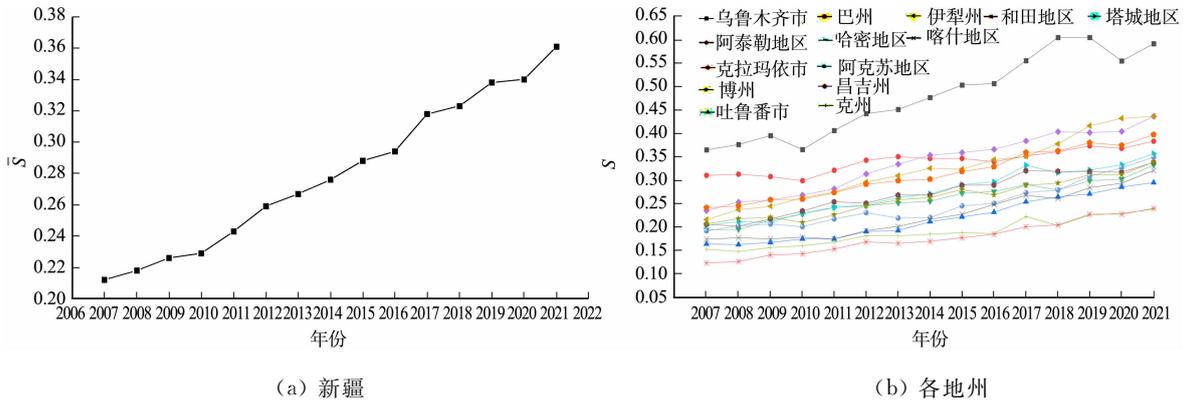


图 2 新疆新型城镇化发展水平时序变化

Fig. 2 Time changes of new-type urbanization development level in Xinjiang

由图 2(b)可知:2007—2021 年间乌鲁木齐市的新型城镇化发展水平始终位于新疆首位,自 2015 年一直保持较高水平;天山北坡其他地州中,昌吉州与伊犁州发展速度较快,2021 年达到中等偏上水平,克拉玛依市近些年来始终是中等水平,发展遇到瓶颈,吐鲁番市发展速度较慢,在天山北坡中一直垫底;北疆北部的塔城地区和阿勒泰地区的发展水平极为接近,且与新疆整体水平基本保持一致;天山南坡中,巴州发展水平相对更高,但近些年阿克苏地区增速较快,2021 年时已达到中等水平,并且逐渐缩小了与巴州的差距;南疆三地州整体发展水平显著落后于其他地区,喀什地区近些年来增速较快,2021 年已达中等水平,克州与和田地区新型城镇化发展水平较低,且始终处于全疆末尾两位,与其他地区的差距越来越大。

部分年份新疆型城镇化发展水平空间分布,如图 3 所示。

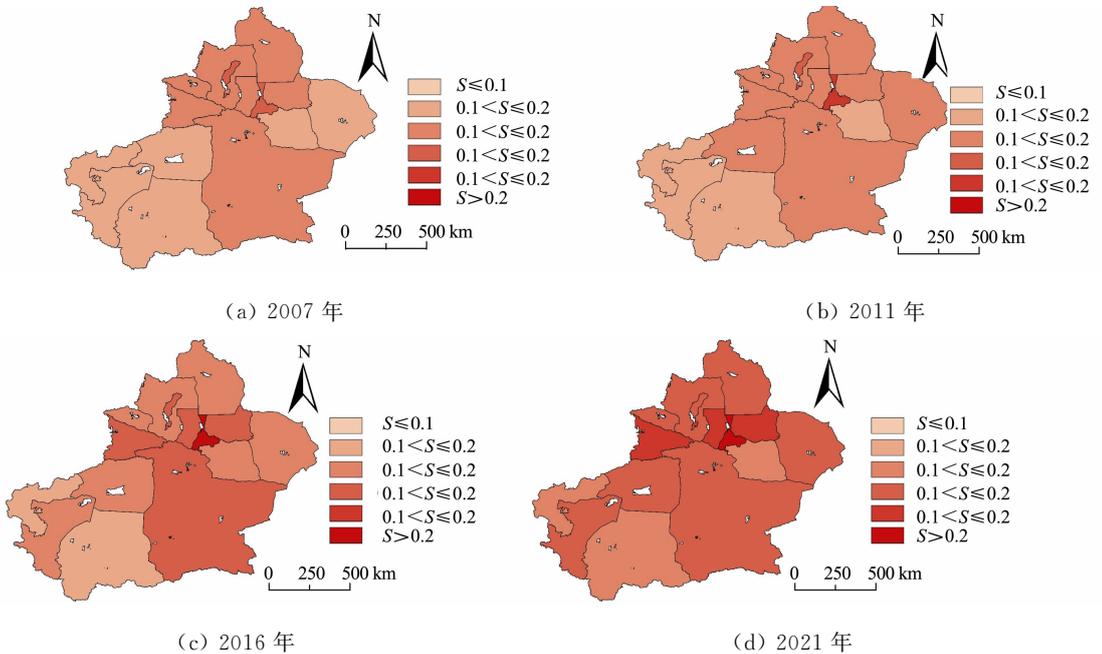


图 3 部分年份新疆新型城镇化发展水平空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of new-type urbanization development level in Xinjiang in some years

新疆新型城镇化发展水平呈现以乌鲁木齐市为中心,“中间高、周边低”的空间分布格局;从地区上来看,全疆新型城镇化发展水平从“一强多弱”逐渐转变为“一超多强三弱”的分布格局,“一超”为乌鲁木齐市,“三弱”为吐鲁番市、克州与和田地区;得益于天山北坡经济带的建设及优越的区位优势,新疆新型城镇化发展水平较高的地州集中分布在天山北坡,其中,乌鲁木齐市发展水平在新疆最高,昌吉州、克拉玛依市、伊犁州这些地区保持着中等偏上的发展水平;北疆北部的阿勒泰地区和塔城地区及天山南坡的巴州和阿克苏地区基本代表着新疆整体水平,这些地区发展较为稳定,是新疆新型城镇化建设的中流砥柱;南疆三地州中,喀什地区的优势持续显著,对外贸易及旅游业的大力发展,使得喀什地区的发展速度

加快,发展水平基本与全疆持平;克州与和田地区由于区位优势及恶劣的环境,导致多年来经济落后,产业结构固化,整体发展缓慢。

部分年份各地州子系统发展水平,如图4所示。

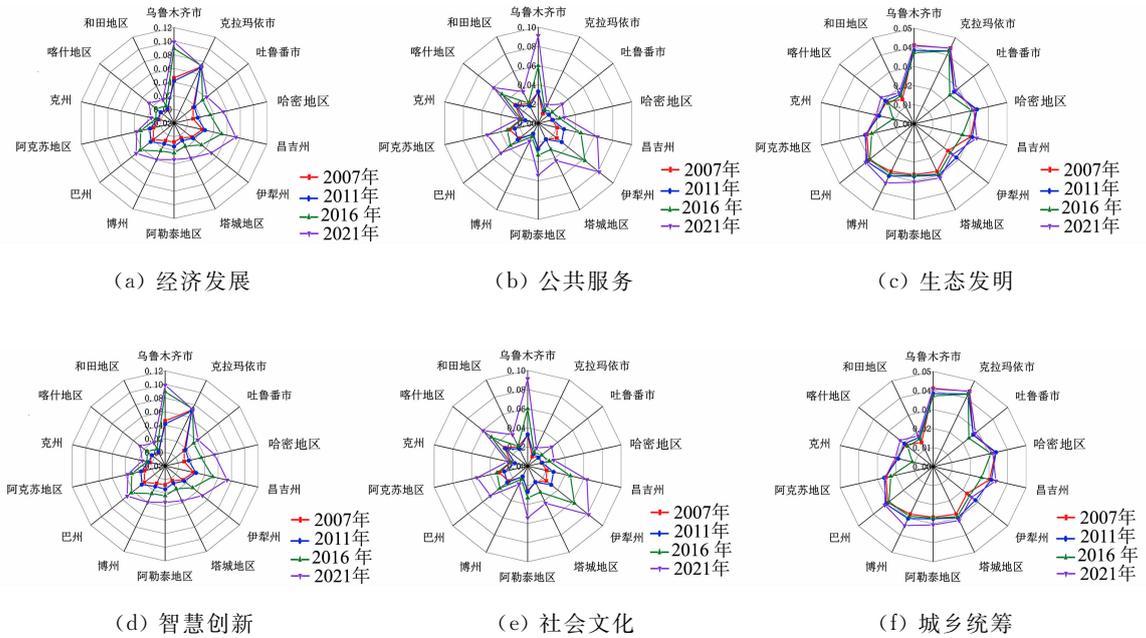


图4 部分年份各地州子系统发展水平

Fig. 4 Sub-system development level of each region in some years

由图4可知:作为新疆首府的乌鲁木齐市的经济水平显著高于其他地区经济水平,并且近年来发展速度相对较快,对周边地区的经济具有良好的集聚和带动效应;克州与和田地区由于区位较差,资源匮乏,经济发展水平较低且速度缓慢;乌鲁木齐市作为新疆政治文化中心,教育、医疗、基础设施等公共服务相对比较完善,其他地区公共服务水平整体相差不大,并且均呈现稳定上升趋势;阿勒泰地区生态环境良好,生态文明水平居全疆之首,近些年来趋于稳定,增幅较小;乌鲁木齐市、克拉玛依市和昌吉州的智慧科技水平明显高于其他地区,是天山北坡经济带重要的科技推手,其余地区水平相对较低;乌鲁木齐市和伊犁州的社会文化水平显著高于新疆其他地区,并且仍保持较高的发展速度,其次是昌吉州、喀什地区和阿勒泰地区这些旅游业较为发达的地区;各地州城乡统筹水平历年水平变化幅度很小,乌鲁木齐市和克拉玛依市的始终位于新疆前两位,与乡村的联动性及资源的倾斜相对其他地区更好,克州与和田地区垫底,发展速度明显低于新疆平均水平,这与其经济水平较低,产业结构不合理有着莫大的关系。

### 3.3 4 大区域新型城镇化发展水平差异与演进

以新疆新型城镇化发展水平综合得分为基础,测算新疆新型城镇化发展水平的泰尔指数及贡献率,如表2所示。

表2 新疆新型城镇化发展水平的泰尔指数及贡献率

Tab. 2 Theil indexes and contribution rates of new-type urbanization development level in Xinjiang

年份	T	T <sub>b</sub> (贡献率/%)	T <sub>w</sub> (贡献率)	T <sub>p</sub> (贡献率/%)			
				北疆北部	天山北坡	天山南坡	南疆三地州
2007	0.038	0.015 (40.08)	0.023 (59.92)	0 (0)	0.035 (53.36)	0.007 (2.55)	0.010 (4.01)
2008	0.039	0.017 (43.59)	0.022 (56.41)	0 (0.08)	0.035 (51.11)	0.004 (1.65)	0.010 (3.57)
2009	0.038	0.016 (43.77)	0.021 (56.23)	0 (0.04)	0.034 (52.14)	0.006 (2.45)	0.004 (1.58)
2010	0.031	0.015 (48.08)	0.016 (51.92)	0 (0.01)	0.025 (46.04)	0.008 (3.82)	0.004 (2.04)

续表

年份	$T$	$T_b$ (贡献率/%)	$T_w$ (贡献率/%)	$T_p$ (贡献率/%)			
				北疆北部	天山北坡	天山南坡	南疆三地州
2011	0.035	0.017 (47.42)	0.019 (52.55)	0 (0.11)	0.031 (49.11)	0.007 (2.71)	0.002 (0.61)
2012	0.036	0.016 (45.26)	0.020 (54.74)	0 (0.01)	0.032 (51.26)	0.007 (2.81)	0.002 (0.64)
2013	0.038	0.017 (46.12)	0.020 (53.88)	0 (0.01)	0.032 (48.16)	0.012 (4.42)	0.003 (1.28)
2014	0.038	0.018 (46.43)	0.021 (53.57)	0 (0)	0.031 (47.10)	0.013 (4.42)	0.005 (2.04)
2015	0.036	0.017 (46.41)	0.020 (53.59)	0 (0)	0.031 (47.96)	0.009 (3.29)	0.006 (2.35)
2016	0.035	0.015 (43.06)	0.020 (56.94)	0 (0.02)	0.030 (48.86)	0.009 (3.69)	0.010 (4.37)
2017	0.032	0.012 (37.79)	0.020 (62.17)	0 (0.07)	0.032 (54.51)	0.009 (4.06)	0.007 (3.54)
2018	0.041	0.017 (40.04)	0.025 (59.96)	0 (0)	0.039 (54.47)	0.009 (2.91)	0.007 (2.57)
2019	0.035	0.013 (38.49)	0.021 (61.54)	0 (0)	0.035 (56.47)	0.005 (2.29)	0.006 (2.77)
2020	0.028	0.012 (42.99)	0.016 (57.04)	0 (0.15)	0.025 (51.41)	0.002 (1.22)	0.007 (4.25)
2021	0.027	0.011 (42.04)	0.016 (57.96)	0 (0.18)	0.025 (50.65)	0.002 (1.14)	0.010 (5.99)

由表 2 可知:新疆新型城镇化发展水平的  $T$  呈现波动下降的趋势,说明新疆新型城镇化发展水平的总体差异在缩小,区域发展更为协调,整体趋势更为统一;从贡献率上看, $T_w$  基本维持在 60%,是  $T$  的主要来源;从趋势上看, $T_w$  与  $T_b$  整体上呈现波动下降的趋势,与  $T$  基本一致。因此, $T_b$  的差异较大,近几年降低显著; $T_w$  相对较小,并逐渐趋于稳定。

由表 2 还可知:天山北坡组内  $T_p$  同样呈现波动下降的趋势,并且对  $T$  的贡献率始终约为 50%,远超另外 3 个区域的贡献率,说明天山北坡是 4 大区域内部差异最大的,但差异逐渐缩小;北疆北部组内  $T_p$  极小,对  $T$  的贡献微乎其微,说明北疆北部两地区发展水平极为接近,且整体变化不大;天山南坡组内  $T_p$  的趋势为先上升后下降,且目前已低于 2007 年的水平,说明天山南坡两地区间的差距在逐渐缩小,对  $T$  的贡献度也在不断降低;南疆三地州组内  $T_p$  先下降后上升,对  $T$  的贡献度仅次于天山北坡,由于喀什地区相较于克州与和田地区发展较快,预计组内差异还会继续扩大。

运用 Kernel 密度估计方法,对总体及 4 大区域新型城镇化发展水平的时空分布态势进行分析。新疆新型城镇化发展水平演进,如图 5 所示。

由图 5 可知:从分布位置上来看,核密度曲线的中心逐渐向右移,但移动幅度较小,证明新型城镇化发展水平处于稳定上升状态,但提升速度较为缓慢;从分布态势看,核密度曲线的主峰宽度和高度基本不变,证明新疆新型城镇化发展水平的绝对差异较为稳定;从分布延展性看,研究期内核密度曲线呈现右拖尾现象,且与主峰距离逐渐拉大,证明新型城镇化发展水平较高的城市发展速度较快,且与其他地区的差距在不断扩大。

4 大区域新型城镇化发展水平演进,如图 6 所示。

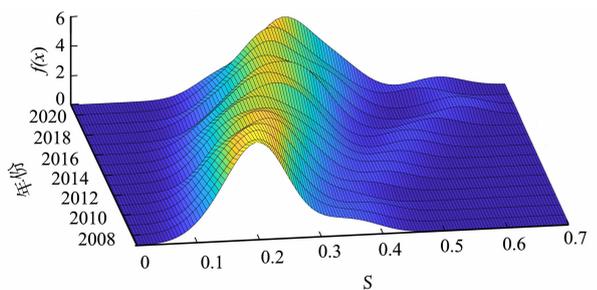


图 5 新疆新型城镇化发展水平演进

Fig. 5 Evolution of new-type urbanization development level in Xinjiang

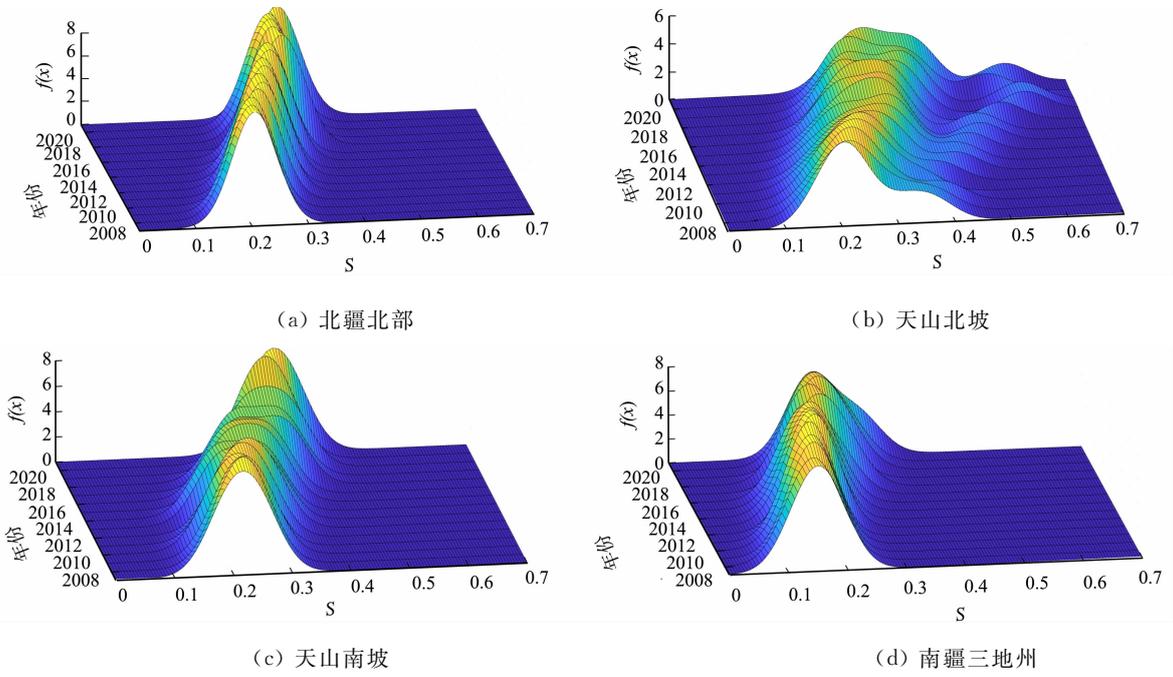


图 6 4 大区域新型城镇化发展水平演进

Fig. 6 Evolution of new-type urbanization development level in four regions

各地州新型城镇化协调水平时序变化,如图 7 所示。由图 7 可得到如下 4 点结论。

1) 天山北坡核密度曲线中心逐渐右移,主峰的宽度逐渐变宽,高度在逐渐下降,证明新型城镇化发展水平的绝对差异在逐渐扩大,并且核密度曲线出现右拖尾现象,与主峰距离逐渐拉大,与新疆总体核密度曲线的趋势相同。

2) 天山南坡的主峰经历了宽度先变宽后变窄,高度先下降后上升的过程,证明天山南坡新型城镇化发展水平的绝对差异呈现先缩小后扩大的趋势。

3) 北疆北部和天山南坡都只有一个主峰,核密度曲线中心均向右移,并且幅度基本相同,但北疆北部的主峰宽度更窄,高度更高,证明北疆北部新型城镇化发展水平的绝对差异低于天山南坡。

4) 南疆三地州核密度曲线中心向右移动的速度缓慢,曲线整体上呈现宽度变窄,高度降低的趋势,证明南疆三地州新型城镇化发展水平提升较慢,绝对差异在逐渐扩大。

### 3.4 新疆新型城镇化协调水平测度与分析

通过构建协调水平模型,运用 SPSSAU 软件对新疆新型城镇化协调水平进行测度,将新型城镇化协调水平划分为 10 个等级<sup>[31-32]</sup>,新型城镇化协调水平等级划分标准,如表 3 所示。

表 3 新型城镇化协调水平等级划分标准

Tab. 3 Classification criteria of coordination level of new-type urbanization

等级	D	协调程度	等级	D	协调程度
1	(0~0.1)	极度失调	6	[0.5~0.6)	勉强协调
2	[0.1~0.2)	严重失调	7	[0.6~0.7)	初级协调
3	[0.2~0.3)	中度失调	8	[0.7~0.8)	中级协调
4	[0.3~0.4)	轻度失调	9	[0.8~0.9)	良好协调
5	[0.4~0.5)	濒临失调	10	[0.9~1.0)	优质协调

乌鲁木齐市的协调水平始终较高,2007 年已经达到中级协调,2014 年以来一直保持优质协调的水

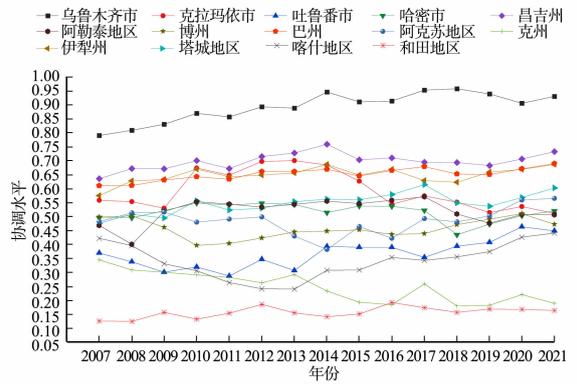


图 7 各地州新型城镇化协调水平时序变化

Fig. 7 Temporal changes in coupled coordination degree of new-type urbanization in various prefectures

平,说明乌鲁木齐市各子系统的发展均位于新疆前列(其他协调水平较高的地区还有昌吉州、巴州和伊犁州),基本能维持在初级协调及以上,说明各子系统的发展没有明显短板,吐鲁番市协调水平呈现先下降后上升的趋势,但仍是天山北坡协调水平最低的地州;北疆北部的塔城地区在 2017 年后发展较快,逐渐与阿勒泰地区拉开差距,但两地均维持在勉强协调水平区间内;天山南坡中,巴州稳定处于初级协调水平,阿克苏地区近年来上升幅度显著,但与巴州仍存在一定差距;南疆三地州中,随着喀什的不断开放以及旅游业的发展,其协调水平逐年提高,却仍处于濒临失调的状态,克州与和田地区各子系统的发展均较差,多数位于全疆垫底,协调水平常年处在中度失调及以下的状态。

部分年份新型城镇化协调水平空间分布,如图 8 所示。

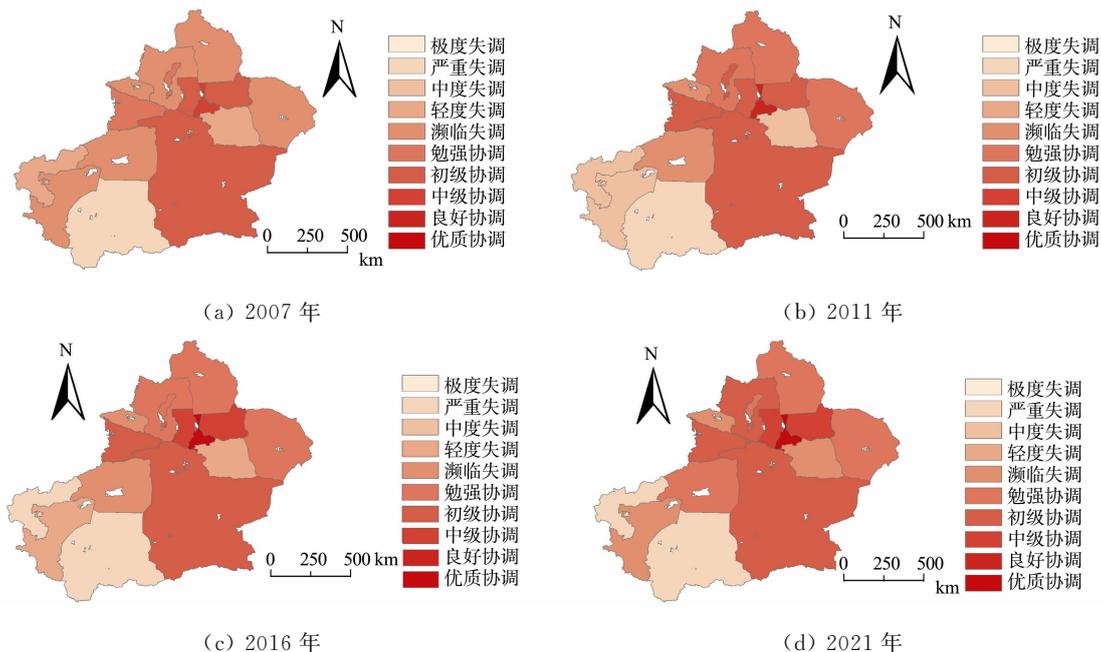


图 8 部分年份新型城镇化协调水平空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of coordination level of new-type urbanization in some years

由图 8 可知:从空间分布格局上来看,新疆新型城镇化协调水平以乌鲁木齐市为中心,整体上呈现“中间高,周边低”的空间分布格局,并且北疆的协调水平整体上高于南疆协调水平,这与新型城镇化发展水平的空间分布格局基本一致;2021 年新疆勉强协调及以上的地区有 9 个,相比 2007 年增加了 4 个;南疆三地州的协调水平始终较低,且增长速度缓慢,克州与和田地区的协调水平常年严重失调,没有明显的改善。

### 3.5 新疆新型城镇化协调水平驱动力分析

新型城镇化的协调发展是一个复杂的过程,为进一步研究新型城镇化协调水平的驱动机制,引入多元线性回归分析模型。选取了 7 个因素研究其对新型城镇化协调水平的影响<sup>[18]</sup>,分别为经济发展水平(ECO)、政府调控能力(GOV)、市场环境动力(MAR)、产业结构升级(UIS)、对外开放程度(OPEN)、科技创新水平(TEC)及城乡收入差距(URI)<sup>[16,33,34]</sup>。经济发展水平用人均国内生产总值表示,政府调控能力用地区财政支出表示,市场环境动力用社会消费品零售总额表示,产业结构升级用产业结构升级指数表示<sup>[35-36]</sup>,对外开放程度用外贸进出口总额表示,科技创新水平用专利申请量表示,城乡收入差距用城乡人均可支配收入之比表示。以上述 7 个因素作为解释变量,以新型城镇化协调水平作为被解释变量,构建多元线性回归模型。

新型城镇化协调水平动力因子的回归分析,如表 4 所示。表 4 中: $B$  为回归系数;\* 表示  $P < 0.05$ ,说明模型的整体效果显著;\*\* 表示  $P < 0.01$ ;  $T$  为被解释变量影响程度的统计量。

由表 4 计算可知:决定系数  $R^2$  为 0.810,调整后  $R^2$  为 0.804; $F(7, 202) = 123.106$ ,说明模型拟合效果较好;联合显著性检验低于 0.01,说明模型整体回归效果良好;检验统计量 D-W 为 0.727;共线性诊断 VIF 最高为 7.575,在 10.000 以下,说明解释变量之间的多重共线性较弱。

表4 新型城镇化协调水平动力因子的回归分析

Tab. 4 Regression analysis of dynamic factors of new-type urbanization coordination level

参数	非标准化系数		标准化系数	T	P	VIF
	B	标准误差				
常量	-35.807	21.977	—	-1.629	0.105	—
ln ECO	3.843	1.273	0.172	3.018	0.003*	3.448
ln GOV	-8.387	0.910	-0.429	-9.216	0**	2.303
ln MAR	10.102	1.409	0.564	7.170	0**	6.578
UIS	3.068	4.173	0.028	0.735	0.463	1.547
ln OPEN	2.236	0.392	0.224	5.708	0**	1.642
ln TEC	1.651	1.204	0.116	1.371	0.172	7.575
URI	-5.458	1.219	-0.242	-4.478	0**	3.117

由显著性和影响系数可以看出,经济发展水平、市场环境动力和对外开放程度为显著的正向影响关系,政府调控能力和城乡收入差距为负向影响关系,产业结构升级和科技创新水平并无显著影响。市场环境动力的影响系数最大,说明市场环境动力对新型城镇化协调水平的正向影响作用最大,其次是经济发展水平和对外开放程度。

## 4 结论与建议

### 4.1 结论

1) 新疆新型城镇化的发展目前仍处于起步阶段,各区域与地州间的发展并不均衡。新疆新型城镇化发展整体态势良好,先后经历稳定上升和波动上升两个阶段,新型城镇化发展水平持续提高,并且仍保持上升的趋势。天山北坡地区发展水平差异较大,对新疆总体差异贡献率最大,南疆三地州发展水平相对较低,且增速缓慢,与其他地区有较大差距。乌鲁木齐市作为自治区首府,始终保持较高的新型城镇化发展水平,并且与其他地区的差距在不断扩大。

2) 新疆各地州新型城镇化协调水平很不平衡,差异较大,总体上处于缓慢提高的态势。从空间分布格局上看,协调水平以乌鲁木齐市为中心,总体上呈现“中间高、周边低”的分布格局。从整体质量上看,2021年全疆达到协调的地区有9个,相比2007年增加了哈密市、塔城地区、阿勒泰地区和阿克苏地区,克州与和田地区常年严重失调。

3) 新疆新型城镇化协调水平的主导驱动力为市场环境动力,其次是经济发展水平和对外开放程度,负向的驱动力为城乡收入差距和政府调控能力,在目前的发展阶段,产业结构升级和科技创新水平对协调水平并没有显著的影响力。

### 4.2 建议

1) 天山北坡经济发展水平普遍较高,各地州及各子系统没有较为明显的短板,是新疆新型城镇化发展的排头兵,在高质量发展的背景下,要不断推进乌鲁木齐都市圈、乌昌一体化建设,通过乌鲁木齐中心城市的集聚效应,驱动天山北坡经济带的协同发展,促进新能源、跨境贸易、快递物流等新兴产业的发展,依托经济水平的提升,推动城乡公共服务、智慧科技水平及基础设施建设网络建设,带动乡村劳动人口就业。吐鲁番市经济发展水平较低,在后续应依托光热资源,不断发展光伏、康养、试车及特色瓜果等产业,加快提升经济发展水平,同时打造特色旅游,促进文化产业的发展,提升社会文化水平。

2) 北疆北部经济发展水平和生态文明水平呈现两极化分布,建议维持住卓越的生态环境,依托现有资源,不断拓展绿色经济,增强可持续发展能力,打造一批具有地方特色的文旅品牌及特色小镇,逐步提升经济发展水平,继而带动新型城镇化其他系统的发展;同时要着力改善牧民生产生活条件,促进城乡协同发展,提高城乡统筹水平。

3) 天山南坡作为发展潜力巨大的地区,各子系统发展水平均处于全疆中等水平,相较之下,应当着力提升经济发展水平与智慧创新水平。面对产业发展不平衡、工业化基础薄弱等问题,应依托石油、矿产、棉花等传统优势产业,不断推进配套产业链的建设,形成规模化、标准化的产业集群;积极参与中巴经济走廊建设,打造特色农副产品精深加工基地、矿产资源深加工基地等,加快地方工业化进程,促进产

业结构升级;还应大力建设网络基础设施,优化人才引进政策,吸引高新技术企业入住,着力提升地区智慧创新水平。

4) 南疆三地州各子系统发展均与全疆其他地区有着一定的差距,短时间内无法有较快提升,因此,新型城镇化发展应缓步慢走,在巩固脱贫攻坚成果的基础上,不断改善生态环境与天地关系,加大环保投入;积极推进职业教育,提升社会文化水平与城乡统筹水平;培育一些特色产业,如石油、天然气等矿产资源开发,棉花、干果等种植业及玉石等特色工艺品加工产业,同时加快基础设施建设,不断提升公共服务与智慧科技水平。喀什地区新型城镇化发展与协调水平显著高于克州与和田地区,后续应持续推进南疆三地州协同发展,加快喀什地区建设,推进大喀什城市圈发展成为面向中亚的区域性商贸物流中心、文化旅游集散中心和特色产品加工出口基地,并不断带动周边地区的发展,以克州与和田地区的经济发展水平的提升为基础,促进新型城镇化其他子系统的发展及协调水平的提升。

## 参考文献:

- [1] 陈明星,陆大道,张华.中国城市化水平的综合测度及其动力因子分析[J].地理学报,2009,64(4):12.
- [2] 赵永平.新型城镇化发展水平测度及其时空差异分析[J].西安电子科技大学学报(社会科学版),2016,26(5):60-68. DOI:10.16348/j.cnki.cn61-1336/c.2016.05.009.
- [3] 卢凤娇,盖建,范已飞.高质量发展背景下山东省新型城镇化水平测度及协调发展研究[J].统计与管理,2021,36(10):62-67. DOI:10.16722/j.issn.1674-537x.2021.10.010.
- [4] 杨丽,孙之淳.基于熵值法的西部新型城镇化发展水平测评[J].经济问题,2015(3):115-119. DOI:10.16011/j.cnki.jjw.2015.03.023.
- [5] 袁晓玲,贺斌,卢晓璐,等.中国新型城镇化质量评估及空间异质性分析[J].城市发展研究,2017,24(6):8.
- [6] 徐亚茹,曾文,李英.新型城镇化水平区域差异与驱动因素分析[J].地理信息世界,2018,25(1):88-94. DOI:10.3969/j.issn.1672-1586.2018.01.019.
- [7] 欧进锋,许抄军,陈东.广东省新型城镇化高质量发展水平演变及其影响因素[J].经济地理,2023,43(3):78-87. DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2023.03.009.
- [8] 赵玉,谢放阳,丁宝根.中国城镇化高质量发展的综合测度与演化特征[J].区域经济评论,2020(5):85-93. DOI:10.14017/j.cnki.2095-5766.2020.0092.
- [9] 王保力,苏向辉,马瑛,等.新疆以人为核心新型城镇化发展水平测度[J].合作经济与科技,2023(19):21-23. DOI:10.13665/j.cnki.hzjyjkj.2023.19.034.
- [10] 蓝庆新,刘昭洁,彭一然.中国新型城镇化质量评价指标体系构建及评价方法:基于2003—2014年31个省市的空间差异研究[J].南方经济,2017(1):111-126. DOI:10.19592/j.cnki.scje.2017.01.009.
- [11] 赵磊,方成.中国省际新型城镇化发展水平地区差异及驱动机制[J].数量经济技术经济研究,2019,36(5):44-64. DOI:10.13653/j.cnki.jqte.2019.05.003.
- [12] 翁钢民,唐亦博,潘越,等.京津冀旅游:生态-城镇化耦合协调的时空演进与空间差异[J].经济地理,2021,41(12):196-204. DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2021.12.021.
- [13] 王惠,史秉亮,张新宇,等.乡村振兴、新型城镇化及生态环境耦合协调发展评价和障碍因子分析[J].山西农经,2023(20):36-40. DOI:10.16675/j.cnki.cn14-1065/f.2023.20.009.
- [14] 谢天成,张研,王溯瑄,等.乡村振兴与新型城镇化协同发展:基于省级尺度时空演化分析[J].经济问题,2022(9):91-98. DOI:10.16011/j.cnki.jjw.2022.09.009.
- [15] 宋香荣,樊艳华,单蕾娜.新疆新型城镇化协调发展水平测度及影响因素实证研究[J].生态经济,2021,37(7):78-87.
- [16] 张震.安徽省新型城镇化协调发展水平的时空差异及影响因素[D].合肥:安徽建筑大学,2023. DOI:10.27784/d.cnki.gahjz.2023.000108.
- [17] VERNON H,WANG H G.Aspects of the rural-urban transformation of countries[J].Journal of Economic Geography,2005(1):5. DOI:10.1093/jnlecg/lbh052.
- [18] MOOMAW R L,SHATTER A M.Urbanization and economic development: A bias toward large cities? [J].Journal of Urban Economics,1996,40(1):13-37. DOI:10.1006/juec.1996.0021.
- [19] HENDERSON J V,KUNCORO A,TURNER M.Industrial development in cities[J].Journal of Political Economy,1995,103(5):1067-1090. DOI:10.1086/262013.

- [20] 徐超. 山东省新型城镇化发展评价及其动力研究[D]. 曲阜:曲阜师范大学,2018.
- [21] 熊湘辉,徐璋勇. 中国新型城镇化水平及动力因素测度研究[J]. 数量经济技术经济研究,2018,35(2):44-63. DOI:10.13653/j.cnki.jqte.20180203.002.
- [22] 王滨. 新型城镇化的区域差异及其动力机制研究[J]. 统计与决策,2020,36(10):77-82. DOI:10.13546/j.cnki.tjyj.2020.10.016.
- [23] 赵田. 黄河流域城镇化水平时空演变及影响因素研究[D]. 济南:山东建筑大学,2021. DOI:10.27273/d.cnki.gsa-jc.2021.000525.
- [24] 赵卓文,吴勤书,张时智. 江苏省城镇化质量与规模协调性空间格局[J]. 地理空间信息,2021,19(2):116-120. DOI:10.3969/j.issn.1672-4623.2021.02.031.
- [25] 邹亚锋,张倩,饶钰飞,等. 中国西部省会城市新型城镇化发展水平演化研究[J]. 干旱区地理,2023,46(4):636-648.
- [26] 杨钧. 新型城镇化发展的时空差异及协调度分析[J]. 财经科学,2015(12):48-57.
- [27] 黄杰,钟朋舒. 河南省新型城镇化发展的空间差异及分布动态演进[J]. 信阳师范学院学报(哲学社会科学版),2022,42(6):21-27.
- [28] 李晓燕. 中原经济区新型城镇化协调度评价及地区差异分析[J]. 区域经济评论,2013(6):154-160. DOI:10.14017/j.cnki.2095-5766.2013.06.008.
- [29] 杨剩富,胡守庚,叶菁,等. 中部地区新型城镇化发展协调度时空变化及形成机制[J]. 经济地理,2014,34(11):23-29. DOI:10.15957/j.cnki.jjdl.2014.11.004.
- [30] 李帆,王振伟. 湖北省新型城镇化发展水平测度及区域差异分析[J]. 统计与决策,2016(19):3. DOI:10.13546/j.cnki.tjyj.2016.19.028.
- [31] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系:以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理,1999(2):76-82.
- [32] 高楠,马耀峰,李天顺,等. 基于耦合模型旅游产业与城市化协调发展研究:以西安市为例[J]. 旅游学刊,2013(1):7. DOI:10.3969/j.issn.1002-5006.2013.01.007.
- [33] 卢晶. 中国新型城镇化发展地区差异分解及驱动因素分析[J]. 统计与决策,2022,38(9):79-83. DOI:10.13546/j.cnki.tjyj.2022.09.015.
- [34] 谭斌,王菲,虞克明. 新疆区域经济差异及其影响因素分析[J]. 西部论坛,2012,22(5):9. DOI:10.3969/j.issn.1674-8131.2012.05.11.
- [35] 徐德云. 产业结构升级形态决定、测度的一个理论解释及验证[J]. 财政研究,2008(1):46-49. DOI:10.19477/j.cnki.11-1077/f.2008.01.015.
- [36] 胡飞. 产业结构升级、对外贸易与环境污染的关系研究:以我国东部和中部地区为例[J]. 经济问题探索,2011(7):6. DOI:10.3969/j.issn.1006-2912.2011.07.022.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 刘源岗)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202407038



# 中国省域数字经济发展水平测度与时空差异及影响因素分析

刘珂, 吕书龙, 刘文丽, 黄文彬

(福州大学 数学与统计学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 基于 2015—2021 年中国的 30 个省(自治区、直辖市)面板数据,从数字基础设施、数字创新环境、数字治理、数字产业化、产业数字化 5 个维度构建综合评价指标体系;用熵值法客观测算各省数字经济发展水平,采用核密度估计和泰尔指数进行时空差异分析,以最优分层构建地理探测器对数字经济发展水平进行影响因素分析。结果表明:各省数字经济发展水平及分维度指标均明显增长;数字经济发展龙头地区在中国的东部,且低水平省份占比有下降趋势;与 2015 年相比,2021 年 30 个省(自治区、直辖市)数字经济发展水平的总体差异、区域内差异、区域间差异均显著降低;考察期内数字经济发展水平分层异质性的影响因素按平均解释能力由强到弱依次为政府投入、经济水平、城镇化水平、人力资源及产业结构。

**关键词:** 数字经济; 时空差异; 影响因素; 地理探测器

中图分类号: F 49; O 213

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)06-0789-11

## Analysis on Measurement, Spatiotemporal Differences and Influencing Factors of Digital Economy Development Level in Chinese Provinces

LIU Ke, LÜ Shulong, LIU Wenli, HUANG Wenbin

(College of Mathematics and Statistics, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Based on panel data from 30 provinces (autonomous regions, municipalities directly under the Central Government) in China from 2015 to 2021, a comprehensive evaluation index system is constructed from the five dimensions of digital infrastructure, digital innovation environment, digital governance, digital industrialization, and industrial digitalization. The entropy method is employed to objectively measure the development level of the digital economy in each province. Kernel density estimation and Theil index are employed to analyze the spatial and temporal differences. The influencing factors of the development level of digital economy are analyzed by constructing the geographic detector with the optimal stratification. The results show that the development level of the digital economy and sub-dimension indicators in each province have increased significantly. The leading regions of digital economy development are in the eastern part of China, and the proportion of provinces with low-levels is declining. Compared with 2015, the overall difference, intra regional difference, and inter regional difference in the level of digital economy development in 30 provinces (autonomous regions, municipalities directly under the Central Government) in 2021 have significantly decreased.

收稿日期: 2024-07-27

通信作者: 吕书龙(1977-), 副教授, 主要从事统计计算和应用统计的研究。E-mail: wujispace@fzu.edu.cn。

基金项目: 国家统计局重点项目(2022LZ12); 福建省本科高校教育教学改革项目(FBJY20230035); 福州大学研究生院教学改革项目(0480-00489499, 0480-00488503); 中国康复医学会科技发展项目(KFKT-2022-022)

During the investigation period, the influencing factors of hierarchical heterogeneity in the digital economy development level, in order of average explanatory power from strong to weak, are government investment, economic level, urbanization level, human resources, and industrial structure.

**Keywords:** digital economy; spatiotemporal difference; influencing factor; geographical detector

数字经济<sup>[1]</sup>是指以使用数字化的知识和信息作为关键生产要素、以现代信息网络作为重要载体、以信息通信技术的有效使用作为效率提升和经济结构优化的重要推动力的一系列经济活动。数字经济自1996年Don Tapscott首次提出以来,备受各国政府、权威机构及研究学者的关注<sup>[2-3]</sup>。然而,全球数字经济发展非常不均衡,中国的在数字经济发展过程中也存在不平衡问题。

目前,对数字经济发展水平的测度方法主要有增加值法、卫星账户法和综合评价指标体系法等。通过文献梳理,发现增加值法的测算结果具有较大的差异性<sup>[4-5]</sup>;尽管卫星账户法可利于国际间的比较,但相关理论研究还不够充分<sup>[6-7]</sup>;相比于增加值法和卫星账户法,综合评价指标体系法更加灵活,不仅可以进行个体间纵向比较,也可以对综合评价指数分维度进行横向分析<sup>[8-10]</sup>。对数字经济发展水平的时空差异分析主要采用核密度估计、基尼系数分解、聚类分析、空间相关分析、社会网络分析等。梳理发现时空差异分析方法丰富,但研究期限有待进一步跟进<sup>[10-12]</sup>。对数字经济发展水平的影响因素的判定主要采用空间计量模型、二次指派程序(QAP)、地理加权回归(GWR)、地理探测器模型等。已有文献指出,空间计量模型不可避免会受到变量间多重共线性的影响,因此,模型选择也会受到影响<sup>[10,13]</sup>。QAP分析可以克服多重共线性,但其主要用于研究关系方阵之间的相关性<sup>[14]</sup>;GWR也会受到自变量间共线性的影响<sup>[15]</sup>;而地理探测器模型不需要构建线性回归方程,没有过多的前提假设,而且不会受因素间共线性的影响<sup>[16]</sup>,但模型效果依赖于数值型因子分层方法的选择。

为弥补上述不足,本文对2015—2021年中国的30个省(自治区、直辖市)(不含西藏和港澳台)数字经济发展水平展开探索,采用熵值法、核密度估计、泰尔指数对研究区域的数字经济发展水平进行综合测算和时空差异分析,以最优分层构建地理探测器,找出数字经济发展水平的显著影响因素。

## 1 指标体系构建与研究方法

### 1.1 数字经济发展水平指标体系的构建

对相关文献进行总结,发现构建的评价指标体系多包含数字基础设施、数字产业化及产业数字化维度<sup>[17-20]</sup>,但仍不够全面。焦帅涛等<sup>[9]</sup>认为数字经济是一种伴随着数字技术不断创新的一种新经济形态,数字经济的发展需要数字化创新的加大和助力。而徐振剑等<sup>[10]</sup>认为数字化治理与公共服务等是数字经济的重要组成部分,贯穿数字化生产力与生产关系发展的始终。受上述文献的启发,根据科学性、系统性、全面性、代表性原则,从数字基础设施、数字创新环境、数字治理、数字产业化、产业数字化5个维度出发,同时考虑到指标数据的可得性,构建指标体系,如表1所示。

表1 数字经济发展水平指标体系

Tab. 1 Indicator system for development level of digital economy

一级指标	二级指标	单位	属性
数字基础设施	长途光缆线路长度 $y_1$	万公里	正向
	移动电话基站数 $y_2$	万个	正向
	互联网宽带接入端口数 $y_3$	万个	正向
	移动电话普及率 $y_4$	部·人 <sup>-1</sup>	正向
	互联网宽带接入普及率 $y_5$	户·人 <sup>-1</sup>	正向
	互联网域名数 $y_6$	万个	正向
	互联网网页数 $y_7$	万个	正向
	IPv4 地址数 $y_8$	万个	正向
数字创新环境	规模以上工业企业 R&D 人员全时当量 $y_9$	人年	正向
	规模以上工业企业 R&D 经费 $y_{10}$	亿元	正向
	国内专利申请授权量 $y_{11}$	项	正向
	技术市场成交额 $y_{12}$	亿元	正向

续表  
Continue table

一级指标	二级指标	单位	属性
数字治理	政府一体化政务服务能力指数 $y_{13}$	—	正向
	政府科学技术财政支出 $y_{14}$	亿元	正向
数字产业化	软件业务收入 $y_{15}$	亿元	正向
	电信业务总量 $y_{16}$	亿元	正向
	互联网百强企业数量 $y_{17}$	家	正向
产业数字化	实物商品网上零售额占社会消费品零售总额比例 $y_{18}$	—	正向
	有电子商务交易活动的企业数比例 $y_{19}$	—	正向
	每百人使用计算机数 $y_{20}$	台	正向
	每百家企业拥有网站数 $y_{21}$	个	正向

数字基础设施是数字经济正常运转的前提条件。其中,以长途光缆线路长度、移动电话基站数、互联网宽带接入端口数反映基础硬件设施;以移动电话普及率、互联网宽带接入普及率反映硬件设施应用水平;以互联网域名数、互联网网页数、IPv4 地址数反映基础软件设施。

数字创新环境为数字经济持续发展提供新活力。其中,以规模以上工业企业 R&D 人员全时当量、规模以上工业企业 R&D 经费反映创新投入;以国内专利申请授权量、技术市场成交额反映创新成果。

数字治理是推动数字经济、数字生活安全健康可持续的重要环节。其中,以政府一体化政务服务能力指数反映政府数字服务能力;以政府科学技术财政支出反映数字治理支出力度。

数字产业化对应于数字经济核心产业,是数字经济发展的基础。以软件业务收入、电信业务总量、互联网百强企业数量反映数字产业化。

产业数字化是数字技术与实体经济的融合,给传统产业带来效率提升和产出增加。其中,以实物商品网上零售额占社会消费品零售总额的比例、有电子商务交易活动的企业数比例反映产业数字化交易;以每百人使用计算机数、每百家企业拥有网站数反映产业数字化经营。

## 1.2 数据说明

基于数据的可获得性及部分数据缺失较多,选取 2015—2021 年中国的 30 个省(自治区、直辖市)(不含西藏和港澳台,下略)为研究对象。表 1 中的  $y_5, y_{18}$  指标通过计算得到,属性均为正向。原始数据来源于国家统计局、《中国统计年鉴》、国家行政学院电子政务研究中心、中国互联网协会。

## 1.3 研究方法

1.3.1 熵值法 熵值法<sup>[11]</sup>是一种客观赋权法,根据指标的信息熵确定权重,权重越大,说明指标的影响越大。熵值法可以对多个指标进行综合、分维度测算,且其客观赋权的特点能充分体现数字经济发展的实际水平。因此,采用熵值法对数字经济发展水平进行客观综合评价,具体计算步骤参照文献[16]。

1.3.2 核密度估计 核密度估计是通过连续的密度曲线描述随机变量分布形态的一种非参数估计方法。核密度曲线可以清晰直观地展示变量分布的位置、形态及延展性。核密度估计对模型的依赖性较弱,具有稳健性,是研究不均衡分布的常用方法<sup>[21]</sup>。因此,参考文献[21-23],采用高斯核函数进行核密度估计,以期对数字经济发展水平分布的动态演变进行探索。

1.3.3 泰尔指数 泰尔指数<sup>[24]</sup>可以衡量地区间目标变量的差异性,其值为 0,意味着变量在空间上为绝对均衡,其值越大,则变量在空间上不平衡的程度越大。泰尔指数不仅可以衡量整体上的差异,也可以分解测算区域内差异、区域间差异对总差异的贡献。因此,为进一步量化数字经济发展水平的空间分布差异及对差异的动态发展展开探索,采用泰尔指数及其分解方法。泰尔指数及其分解公式分别为

$$T = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^{n_k} \frac{y_{k,j}}{\mu} \ln \left( \frac{y_{k,j}}{\mu} \right) = \sum_{k=1}^K \frac{n_k \mu_k}{n \mu} \left( \frac{1}{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} \frac{y_{k,j}}{\mu_k} \ln \left( \frac{y_{k,j}}{\mu_k} \right) \right) + \frac{1}{n} \sum_{k=1}^K n_k \frac{\mu_k}{\mu} \ln \left( \frac{\mu_k}{\mu} \right) = T_{WR} + T_{BR},$$

$$T_{WR} = \sum_{k=1}^K \frac{n_k \mu_k}{n \mu} \left( \frac{1}{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} \frac{y_{k,j}}{\mu_k} \ln \left( \frac{y_{k,j}}{\mu_k} \right) \right),$$

$$T_{BR} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^K n_k \frac{\mu_k}{\mu} \ln \left( \frac{\mu_k}{\mu} \right),$$

$$T_k = \frac{1}{n_k} \sum_{j=1}^{n_k} \frac{y_{k,j}}{\mu_k} \ln\left(\frac{y_{k,j}}{\mu_k}\right)$$

上式中:  $K$  为区域数;  $n$  为省(自治区、直辖市)数;  $n_k$  为  $k$  区域所含省(自治区、直辖市)数;  $y_{k,j}$  为  $k$  区域内  $j$  省(自治区、直辖市)数字经济发展水平;  $\mu, \mu_k$  分别为整体和  $k$  区域数字经济发展水平均值;  $T_{WR}$  为区域内泰尔指数;  $T_{BR}$  为区域间泰尔指数;  $T_k$  为  $k$  区域泰尔指数;  $T$  为总泰尔指数。

区域内差异贡献率  $R_{WR}$ 、区域间差异贡献率  $R_{BR}$  及  $k$  区域差异贡献率  $R_k$  的计算公式分别为

$$R_{WR} = \frac{T_{WR}}{T}, \quad R_{BR} = \frac{T_{BR}}{T}, \quad R_k = \frac{n_k \mu_k}{n \mu T} T_k$$

1.3.4 地理探测器 地理探测器是一种统计量,用于测量和识别数据中的空间分层异质性<sup>[25]</sup>。相比于其他模型,地理探测器不需要构建线性回归方程,没有过多的前提假设,而且不会受因素间共线性的影响,其中,因子探测可以探测单个因子对因变量分层异质性的解释能力,交互探测则可以探测双因子的交互作用。因此,应用因子探测和交互探测进行数字经济发展水平的影响因素分析。

因子探测器是地理探测器的核心部分,刻画了因变量在整个空间与分层之间的离散方差,表达式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{l=1}^L n_l \sigma_l^2}{n \sigma^2} = 1 - \frac{S_{SW}}{S_{ST}}$$

上式中:  $L$  是一个因子的分层数;  $\sigma^2$  和  $\sigma_l^2$  为所有省份和  $l$  分层数字经济发展水平的方差;  $S_{SW}$  为分层内方差之和;  $S_{ST}$  为研究区域总方差。  $q$  的取值在  $[0, 1]$ , 值越大,说明数字经济发展水平分层异质性越明显,此因子对数字经济发展水平分层异质性的解释力越强,反之越弱。

交互探测器<sup>[26]</sup>是通过比较两个单因子  $q$  值和它们交互作用的  $q$  值来探测相互作用。交互探测器探测 5 种交互作用,包括非线性减弱、单因子减弱、双因子增强、独立和非线性增强<sup>[27]</sup>。

使用的熵值法、核密度估计、泰尔指数均通过 Stata17 软件实现,地理探测器分析通过 R4.3.3 软件实现,检验显著性水平均为 0.05。

## 2 数字经济发展水平及时空差异分析

### 2.1 数字经济发展水平初步分析

通过熵值法得到 2015—2021 年中国的 30 个省(自治区、直辖市)的数字经济发展水平,如图 1 所示。2015—2021 年中国的 30 个省(自治区、直辖市)的数字经济发展水平均值依次为 0.101 3, 0.112 4, 0.122 5, 0.140 2, 0.160 3, 0.175 8, 0.177 3。从时间变化看,30 个省(自治区、直辖市)数字经济发展水平均值逐年增长,各省也呈稳步增长趋势。其中,2015—2021 年数字经济发展水平始终高于均值的地区包括北京市、上海市、江苏省、浙江省、福建省、山东省、广东省,集中在中国的东部。

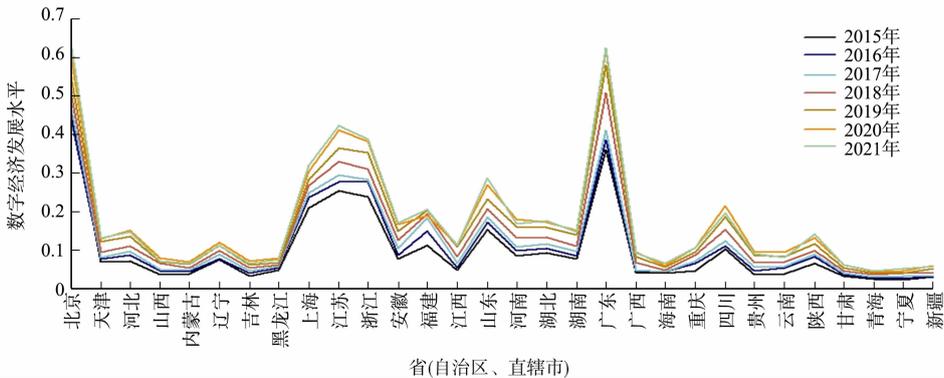


图 1 中国的 30 个省(自治区、直辖市)的数字经济发展水平

Fig. 1 Digital economy development level in 30 provinces (autonomous regions, municipalities directly under the Central Government) of China

中国的 30 个省(自治区、直辖市)的数字经济发展分维度水平,如图 2 所示。由图 2 可知:2015—

2021 年各地区数字基础设施、数字创新环境、数字治理、数字产业化及产业数字化维度水平均有提升,但各维度水平分布不平衡,水平较高的地区仍集中在中国的东部。

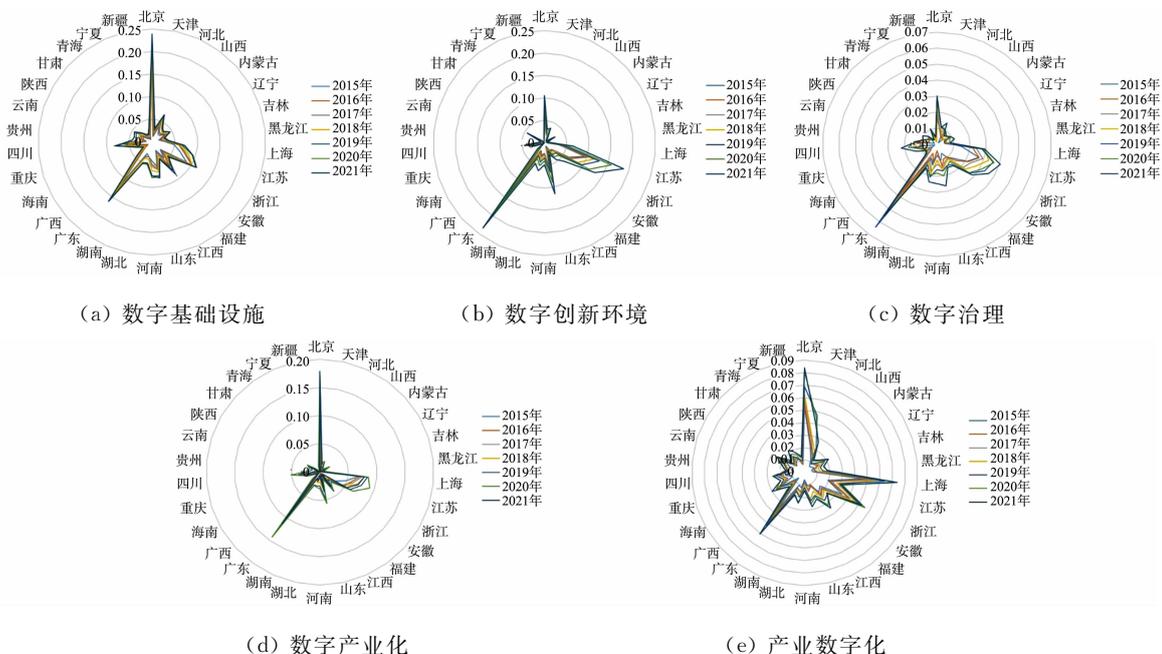


图 2 中国的 30 个省(自治区、直辖市)的数字经济发展分维度水平

Fig. 2 Sub-dimensional level of digital economy development in 30 provinces

(autonomous regions, municipalities directly under the Central Government) of China

进一步考察 30 个省(自治区、直辖市)的数字经济发展水平年段均值,并从高到低排序后平均分成第 1 梯队、第 2 梯队、第 3 梯队,如表 2 所示。由表 2 可知:30 个省(自治区、直辖市)的数字经济发展水平年段均值的平均水平约为 0.141 4,北京市、广东省、江苏省、浙江省、上海市、山东省、福建省及四川省年段均值均超过平均水平。

表 2 2015—2021 年中国的 30 个省(自治区、直辖市)的数字经济发展水平年段均值

Tab. 2 Mean value of digital economy development level in 30 provinces (autonomous regions, municipalities directly under the Central Government) of China from 2015 to 2021

分组	省(自治区、直辖市)	年段均值	分组	省(自治区、直辖市)	年段均值	分组	省(自治区、直辖市)	年段均值
第 1 梯队	北京市	0.527 6	第 2 梯队	安徽省	0.125 9	第 3 梯队	广西壮族自治区	0.067 9
第 1 梯队	广东省	0.498 2	第 2 梯队	湖南省	0.115 1	第 3 梯队	黑龙江省	0.063 3
第 1 梯队	江苏省	0.336 4	第 2 梯队	河北省	0.114 5	第 3 梯队	山西省	0.059 9
第 1 梯队	浙江省	0.318 9	第 2 梯队	陕西省	0.103 9	第 3 梯队	内蒙古自治区	0.054 7
第 1 梯队	上海市	0.266 6	第 2 梯队	天津市	0.101 0	第 3 梯队	吉林省	0.053 1
第 1 梯队	山东省	0.215 6	第 2 梯队	辽宁省	0.098 0	第 3 梯队	海南省	0.051 0
第 1 梯队	福建省	0.176 8	第 2 梯队	江西省	0.083 7	第 3 梯队	甘肃省	0.047 6
第 1 梯队	四川省	0.155 3	第 2 梯队	重庆市	0.083 0	第 3 梯队	新疆维吾尔自治区	0.043 5
第 1 梯队	湖北省	0.136 1	第 2 梯队	云南省	0.068 6	第 3 梯队	宁夏回族自治区	0.037 4
第 1 梯队	河南省	0.133 3	第 2 梯队	贵州省	0.068 6	第 3 梯队	青海省	0.036 2

中国的 30 个省(自治区、直辖市)数字经济发展水平分维度分区域年段均值平均水平,如表 3 所示。表 3 中:东部包括北京市、天津市、河北省、辽宁省、上海市、江苏省、浙江省、福建省、山东省、广东省、海南省;中部包括山西省、吉林省、黑龙江省、安徽省、江西省、河南省、湖北省、湖南省;西部包括内蒙古自治区、广西壮族自治区、重庆市、四川省、贵州省、云南省、陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区。

由表 3 可知:各个维度东部年段均值平均水平均高于中部、西部及 30 个省(自治区、直辖市)的平均水平,而中部、西部均低于 30 个省(自治区、直辖市)的平均水平。

表3 中国的30个省(自治区、直辖市)数字经济发展水平分维度分区域年段均值平均水平

Tab. 3 Average level of digital economy development level in 30 provinces (autonomous regions, municipalities directly under the Central Government) of China in different dimensions and regions

分维度	年段均值平均水平			
	东部	中部	西部	30个省(自治区、直辖市)
数字基础设施	0.080 2	0.037 8	0.029 4	0.050 3
数字创新环境	0.060 2	0.021 8	0.009 8	0.031 5
数字治理	0.020 3	0.012 1	0.007 5	0.013 4
数字产业化	0.050 2	0.010 2	0.008 4	0.024 2
产业数字化	0.035 0	0.014 4	0.014 6	0.022 0

## 2.2 数字经济发展水平时空差异分析

2.2.1 核密度分析 2015—2021年数字经济发展水平核密度曲线,如图3所示。由图3可知:30个省(自治区、直辖市)核密度曲线呈右移趋势,说明整体数字经济发展水平逐年提高;主峰下降说明低水平地区占比减少;而曲线均有多个波峰,从左边起第1个波峰表明中国的数字经济发展水平较低地区占比仍然最高,多个波峰也反映出中国的数字经济发展水平存在多处极化现象;同时,由曲线尾部的延展性可知,近年来龙头地区与低水平地区的差距进一步拉大。分区域来看,东部区域数字经济发展水平差距最大;中部区域仍存在2处极化现象,但有明显缓解;西部区域整体水平最低,其右拖尾特征表明区域内差距也进一步扩大。

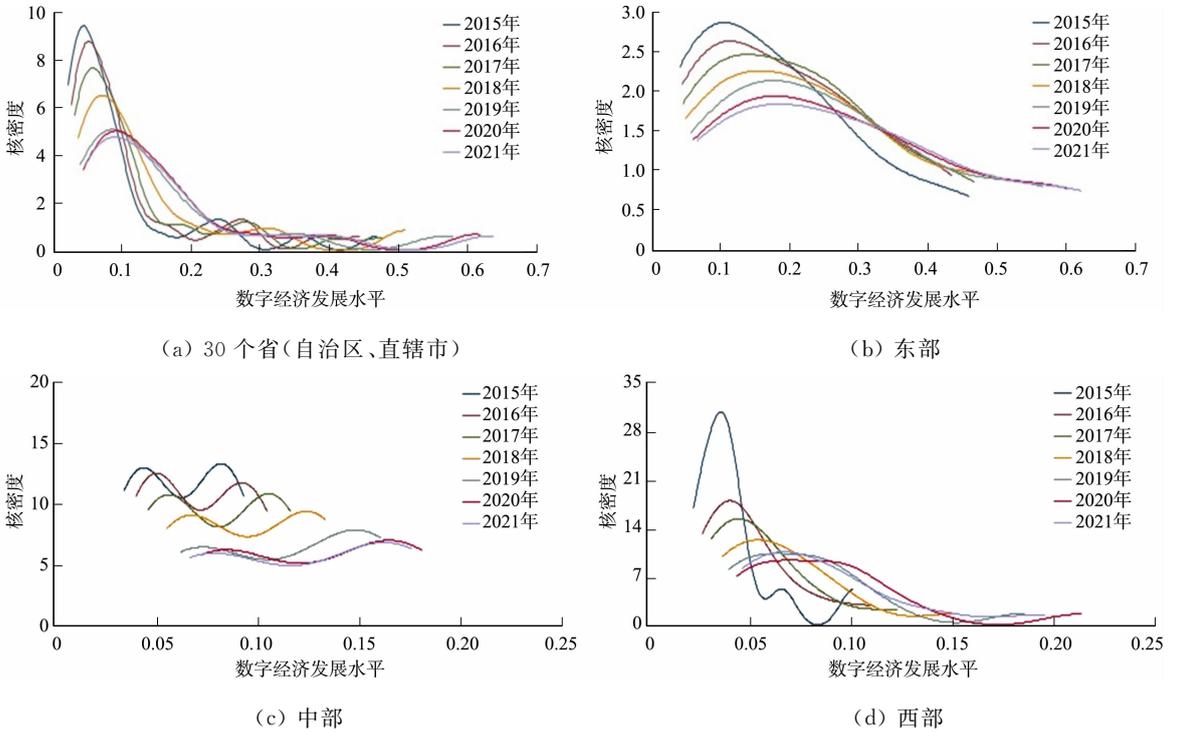


图3 2015—2021年数字经济发展水平核密度曲线

Fig. 3 Kernel density curves of digital economy development level from 2015 to 2021

2.2.2 泰尔指数分析 为定量研究数字经济发展水平空间分布差异,将研究区域分为东部、中部和西部3个区域。2015—2021年数字经济发展水平泰尔指数及其贡献率,如表4所示。

由表4可知:2015—2021年总体泰尔指数显著下降,表明中国的30个省(自治区、直辖市)数字经济发展水平的总差异缩小;2021年区域内和区域间泰尔指数与2015年相比均有下降,表明区域内、区域间差异均得到缩小;进一步地,东部、中部区域泰尔指数前期均有下降,但近年来均有上升,说明近年来东、中部区域内差异均有增加;而西部区域泰尔指数自2016年起呈上升趋势,到2021年开始下降,说明西部区域内差异自2016年起持续扩大,到2021年有所减小。

从在总泰尔指数中的贡献率看,2015—2021年区域内差异贡献率显著上升,区域间差异贡献率显

著下降,且近年来区域内差异贡献率大于区域间差异贡献率,说明近年来区域内差异对总差异的影响更大;进一步看,东部区域内差异贡献率始终大于中部和西部,说明较中部、西部而言,东部区域内差异对总差异影响更大。

表4 2015—2021年数字经济发展水平泰尔指数及其贡献率

Tab. 4 Theil index and its contribution rate of digital economy development level from 2015 to 2021

指标	年份						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
总体泰尔指数	0.385 8	0.339 4	0.324 5	0.307 5	0.287 9	0.281 2	0.298 0
区域内泰尔指数	0.183 2	0.157 9	0.152 3	0.153 0	0.149 3	0.150 9	0.153 2
区域间泰尔指数	0.202 6	0.181 5	0.172 1	0.154 5	0.138 7	0.130 3	0.144 8
东部区域泰尔指数	0.231 3	0.199 8	0.192 4	0.196 6	0.187 9	0.192 1	0.193 6
中部区域泰尔指数	0.062 4	0.057 2	0.057 5	0.053 8	0.064 4	0.060 2	0.069 1
西部区域泰尔指数	0.103 4	0.094 9	0.097 2	0.099 4	0.107 3	0.110 3	0.100 6
区域内差异贡献率	0.474 8	0.465 3	0.469 5	0.497 7	0.518 4	0.536 6	0.514 1
区域间差异贡献率	0.525 2	0.534 7	0.530 5	0.502 3	0.481 6	0.463 4	0.485 9
东部区域差异贡献率	0.405 7	0.389 2	0.386 8	0.407 3	0.405 8	0.419 6	0.408 2
中部区域差异贡献率	0.026 7	0.028 3	0.031 1	0.031 8	0.042 5	0.041 2	0.042 9
西部区域差异贡献率	0.042 4	0.047 8	0.051 7	0.058 5	0.070 0	0.075 8	0.062 9

### 3 数字经济发展水平的影响因素分析

#### 3.1 变量选择

通过时空差异分析,发现中国的数字经济发展水平在空间上分布不平衡,因此,构建地理探测器进行影响因素分析。已有研究结果显示,政府支持<sup>[10]</sup>、产业结构优化<sup>[16]</sup>、人才投入<sup>[28]</sup>等是数字经济发展水平的影响因素,但仍需进一步验证及丰富指标的选择。因此,考察的影响因素有政府投入、产业结构、城镇化水平、人力资源及经济水平共5个方面,因变量为数字经济发展水平。

政府投入方面,政府对科学技术的支出有助于数字创新<sup>[17]</sup>,因此,采用地方财政科学技术支出占一般公共预算支出的比例  $x_1$  来衡量。产业结构方面,数字产业化和产业数字化是数字要素与传统产业融合演变的结果,而以电子商务为代表的第三产业在数字经济中具有重要的地位<sup>[8]</sup>,因此,采用第三产业增加值占地区生产总值的比例  $x_2$  来衡量。城镇化水平方面,城镇化建设推动数字基础设施需求增加从而影响数字经济的发展,因此,采用城镇化率  $x_3$  来衡量。人力资源方面,数字经济的发展需要信息等专业技术人才的支撑<sup>[16]</sup>,因此,采用信息传输、软件和信息技术服务业城镇单位就业人数占城镇单位总就业人数的比例  $x_4$  来衡量。经济水平方面,高经济水平地区集聚着大量物质财富,为数字经济提供更加优越的物质基础,从而促进数字经济的发展,因此,采用人均地区生产总值  $x_5$  来衡量。

#### 3.2 基于最优分层的地理探测器分析

根据地理探测器的原理,因子变量必须为定性变量,但数值型数据转为定性数据的方法有多种,而数值型数据可划分的层数也不唯一。考虑到目前相关研究直接选择自然间断点法<sup>[16]</sup>,忽视了分层方法和层数对模型结果的影响,因此,采用  $k$  均值聚类、等间隔法、分位数法、自然间断点法共4种分层方法和4~8层数,基于因子探测  $q$  值最大化找出最优分层及最优分层下的显著影响因子。2015—2021年最优分层组合,如表5所示。由表5可知:自然间断点法不是所有因子共有的最佳分层方法,说明寻找最优分层组合是必要的。

最优分层组合下的因子探测  $q$  值及检验  $p$  值,如表6所示。由  $q$  值均值可知,对因变量分层异质性的平均解释能力由强到弱的影响因素依次为政府投入、经济水平、城镇化水平、人力资源及产业结构。由  $q$  值的检验显著性  $p$  值可知,2015—2021年始终显著的影响因素为政府投入、城镇化水平及经济水平,而发展到2021年时,5个影响因素均具有统计学意义,说明在数字经济发展前期,政府投入、经济水平和城镇化水平是主要影响因素,而随着数字化时代的高速发展,对人力资源的需求及产业结构的要求愈发凸显,最终也成为显著影响因素。

表 5 地理探测器的最优分层

Tab. 5 Optimal layering of geographical detector

年份	选择	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
2015	分层方法	分位数	$k$ 均值聚类	分位数	分位数	$k$ 均值聚类
	层数	6	7	8	8	7
2016	分层方法	等间隔	$k$ 均值聚类	分位数	分位数	$k$ 均值聚类
	层数	5	5	8	7	8
2017	分层方法	自然间断点	分位数	分位数	分位数	$k$ 均值聚类
	层数	8	7	8	8	6
2018	分层方法	自然间断点	分位数	分位数	分位数	$k$ 均值聚类
	层数	6	7	8	8	4
2019	分层方法	$k$ 均值聚类	$k$ 均值聚类	分位数	分位数	$k$ 均值聚类
	层数	7	8	5	8	4
2020	分层方法	自然间断点	$k$ 均值聚类	分位数	分位数	$k$ 均值聚类
	层数	7	8	5	8	4
2021	分层方法	等间隔	$k$ 均值聚类	等间隔	分位数	等间隔
	层数	5	6	7	7	6

表 6 最优分层组合下因子探测  $q$  值及检验  $p$  值

Tab. 6 Factor detection  $q$  values and testing  $p$  values under optimal hierarchical combination

年份	$q$					$p$				
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
2015	0.817 1	0.446 5	0.584 8	0.364 0	0.676 9	0.000 0	0.274 8	0.028 0	0.293 2	0.010 0
2016	0.751 6	0.392 6	0.597 6	0.475 6	0.703 1	0.000 4	0.253 7	0.022 7	0.061 5	0.008 3
2017	0.807 9	0.362 9	0.597 7	0.543 8	0.699 6	0.000 2	0.186 9	0.022 6	0.049 1	0.003 3
2018	0.870 6	0.317 9	0.593 3	0.554 3	0.661 7	0.000 0	0.265 7	0.024 3	0.049 6	0.003 1
2019	0.864 7	0.502 7	0.622 7	0.635 5	0.635 7	0.000 0	0.225 4	0.001 0	0.014 1	0.005 5
2020	0.888 2	0.518 8	0.629 9	0.509 5	0.610 9	0.000 0	0.180 9	0.000 8	0.080 7	0.009 7
2021	0.721 7	0.691 7	0.593 2	0.591 9	0.635 5	0.000 7	0.013 3	0.049 3	0.010 1	0.021 6
均值	0.817 4	0.461 9	0.602 7	0.525 0	0.660 5	—	—	—	—	—

进一步对所有因子进行交互探测,2015,2018 及 2021 年最优分层下 5 因子交互作用类型,如图 4 所示。由图 4 可知:部分因子之间交互探测的  $q$  值大于各相应单因子的  $q$  值(即图中的双因子增强),说明部分因子的交互作用对数字经济发展水平分层异质性具有更强的解释力,如 2021 年政府投入与人力资源的交互作用解释力达 0.919 0。

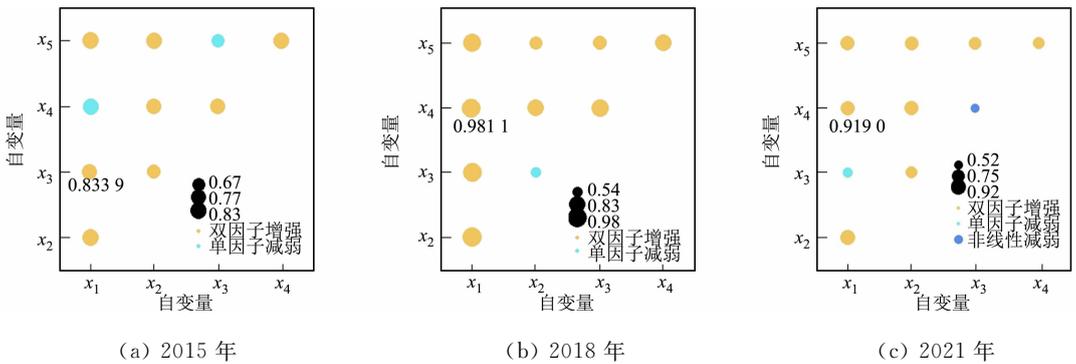


图 4 2015,2018 及 2021 年最优分层下 5 因子交互作用类型

Fig. 4 Type of interaction of five factors under optimal stratification in 2015, 2018 and 2021

## 4 分析与讨论

研究表明,2015—2021 年中国的省域数字经济发展水平稳步前进,但区域内及区域间发展不平衡,并由此寻找到其显著影响因素。

自数字经济被提出以来,国家先后颁布了《网络强国战略实施纲要》《数字经济发展战略纲要》等一系列政策,将数字经济上升为国家战略,可见各省积极发展数字经济并取得了稳定增长的良好态势。但在发展初期中、西部省域物质资源、人才技术等重要条件相对匮乏,导致中、西部数字经济发展水平相对落后,而东部的北京市、上海市、江苏省、浙江省、福建省、山东省、广东省有着更高的经济发展水平、更强的科技研发实力等良好基础,使得数字经济发展处于领先地位。2015—2021年,各省数字经济发展水平及分维度水平的差距依然存在,表现出明显的“马太效应”<sup>[16]</sup>。值得一提的是,除了以上东部7省,四川省在这7年里的平均发展水平超过了30个省(自治区、直辖市)的均值,这可能是因为西部大开发战略、“西三角经济圈”等政策促进了四川省数字经济的发展<sup>[18]</sup>。而中、西部数字基础设施、数字创新环境、数字治理、数字产业化及产业数字化维度的年段均值平均水平均低于东部平均水平,表明中国的区域数字基础设施、数字创新等发展的不平衡和不充分问题仍然需要解决。

无论是30个省(自治区、直辖市)整体还是东、中、西部区域核密度曲线,都显示出低水平地区占比逐步减少,尤其是西部区域减少幅度较大,这与“一带一路”等一系列国家战略和政策及各省重视发展数字经济的程度密切相关,如2017年陕西省建设数字经济试点示范区,2019年四川省、重庆市启动了“国家数字经济创新发展试验区”建设工作等。而西部核密度曲线右拖尾特征愈加明显,这是因为存在着少数数字经济发展水平相对较高的省份,如四川省等,其波峰宽度的变大也揭示了西部数字经济发展水平的差距变大。西部区域因较为落后的经济水平、有限的资源限制了其发展,低发展水平省份如何借助水平较高的邻近省份发展,较高发展水平的省份(如四川省)如何持续有效带动周边省份的发展,这些问题仍需重视。而中部数字经济发展水平两处极化现象得到显著缓解,这可能是由于中部各省在发展初期自身条件不同,但随着各省重视及周边较高数字经济发展水平省份的带动作用<sup>[19]</sup>等因素,加速了它们的发展,但差距明显变大。同样,东部数字经济发展水平的差距也有扩大。

30个省(自治区、直辖市)的数字经济发展水平的总体差异、区域内差异及区域间差异均显著缩小,究其原因可能是为数较少的高发展水平省进一步提升发展的速度较为缓慢,而大多数为非高发展水平的省不断完善数字要素从而发展较快,由此缩小了差异。需要指出的是,2017—2021年东、中、西部区域内差异均表现出波动上升的趋势,这可能是由于位于东部的辽宁省是中国的重要重工业基地,为适应数字时代的高速发展必须做出产业数字化转型,但由于数字人才缺乏和转型难度大,使得数字经济发展较慢,从而与东部高发展水平省的差距拉大,且超过了中、西部区域内的差距;位于中部的吉林省和黑龙江省同样是重工业基地,面临着相同的问题,而如安徽省处于长三角经济圈,近年来与东部高发展水平省密切合作,数字经济发展势头强劲<sup>[14]</sup>,使得中部区域内差异也在扩大;位于西部的新疆、青海等受限于地理位置和经济水平等因素,数字经济发展缓慢,而四川省、重庆市及陕西省等与其东部较高发展水平省的合作更加便捷,由此加快了它们的发展,使西部区域内差异增大。然而,区域间差异贡献率与区域内差异贡献率均不低,可见中国的数字经济发展水平空间上存在非均衡性,不仅区域间需要协同发展数字经济以进一步缩小差距,而且区域内也需解决发展不平衡问题,尤其是传统产业数字化转型的问题有待突破。

2015—2021年,始终显著影响数字经济发展水平的因素依次为政府投入、经济水平及城镇化水平,且平均解释力均超过0.6,可见这3个因素对中国的数字经济发展水平的分层起着重要作用。事实上,中国的东部的北京市、上海市、江苏省、浙江省等经济水平全国领先,政府科技创新投入占比和城镇化率更高,强大的经济实力促使其具备更完善的数字基础设施,更高的政府投入加快数字创新,高城镇化率进一步增加数字基础设施建设,由此,数字经济起步更高、发展更快。相反,西部的新疆、青海等在政府投入、经济水平及城镇化水平上更为落后,造成数字基础设施和数字技术等较为欠缺,进而数字经济起步低、发展慢,也因此出现了中国的数字经济发展水平的分层。到2021年时,人力资源及产业结构也发展为显著影响因素,原因可能是随着数字要素对社会生活重要性提升,各行各业对数字人才的需求增大,同时数字经济主要与以电子商务为代表的现代服务业融合发展<sup>[14]</sup>,对第三产业的发展水平要求更高。例如,中国东部的上海市、广东省等现代服务业发达,人才聚集,而中国中、西部的部分省则相对落后,从而导致数字经济发展水平的分层。政府投入与人力资源等一些组合因素可以对分层产生更强的解释力,由此启示,数字经济发展落后的省可以同时推动多个影响因素,达到更快发展数字经济的目的。

## 5 结论

近年来,数字经济深刻影响人们的生活,改变传统生产经营方式,但中国的数字经济发展水平分布不平衡。以2015—2021年中国的30个省(自治区、直辖市)为研究区域,选取数字基础设施、数字创新环境、数字治理、数字产业化、产业数字化5个维度建立数字经济发展水平指标体系;利用熵值法客观测算30个省(自治区、直辖市)数字经济发展水平后,对整体和分区域进行时空差异分析;以最优分层构建地理探测器进行影响因素分析。研究得到以下4点结论。

1) 2015—2021年中国的30个省(自治区、直辖市)数字经济发展水平及分维度水平均有增长趋势,但高于均值的地区主要集中东部。同时发现北京市、广东省、江苏省、浙江省、上海市、山东省、福建省及四川省年段均值均超过30个省(自治区、直辖市)年段均值平均水平。

2) 2015—2021年中国的30个省(自治区、直辖市)及东、中、西部区域数字经济发展水平核密度曲线结果显示,30个省(自治区、直辖市)整体数字经济发展水平逐年提高;龙头省分布在东部;西部区域整体水平最低,但低水平省占比呈下降趋势。

3) 2015—2021年泰尔指数及其分解结果表明,30个省(自治区、直辖市)数字经济发展水平的总体差异显著缩小,区域内、区域间差异均得到缩小,但近年来东、中、西部区域内差异均有增加,且东部区域内差异较中、西部而言对总差异的影响更大。

4) 2015—2021年对数字经济发展水平分层异质性的平均解释能力由强到弱的影响因素依次为政府投入、经济水平、城镇化水平、人力资源及产业结构,同时部分因素的交互作用对分层异质性具有更强的解释力。

综上,提出以下3点建议。

1) 从数字经济发展水平看,数字经济发展较为落后的省需要加强和完善物联网、数据中心等数字基础设施建设;进一步提高经济水平及城镇化率也有助于数字经济的发展。数字经济发展较为缓慢的省应结合自身产业结构特点,加快推进数字产业化和产业数字化发展,培育和发展数字产业集群,如电子信息制造、软件和信息技术服务、人工智能、大数据、云计算等产业,推动制造业、农业采用数字化技术、智能设备等提高生产效率,实现产业数字化转型;加大数字人才的培养和吸引解决数字技术难题;政府应加大科学技术的资金投入助力数字创新。

2) 从数字经济发展水平空间分布差异看,数字经济协同发展对缩小差距至关重要。对于区域间差异,应鼓励东部数字产业向中西部投资兴业,促进东部与中、西部数字技术协作和数字人才输出。对于区域内差异,各省之间也要加强数字经济合作,互补产业可以建立合作机制;各区域内数字经济发展水平较高的省(如西部的四川省)应带动周边省共同发展,共享、共建数字基础设施,加强与周边省的通信网络互通以提高区域内数据传输效率,还可以将优势产业向周边省延伸以带动周边产业的发展。

3) 从数字经济发展水平的影响因素看,各省应高度重视政府投入、经济水平、城镇化水平、人力资源及产业结构因素对自身数字经济发展的限制,因地制宜采取组合政策,充分发挥组合影响因素对数字经济发展带来的更大促进作用。

## 参考文献:

- [1] 中华人民共和国互联网信息化办公室. 二十国集团数字经济发展与合作倡议[EB/OL]. (2016-09-29)[2024-04-08]. [http://www.cac.gov.cn/2016-09/29/c\\_1119648520.htm](http://www.cac.gov.cn/2016-09/29/c_1119648520.htm).
- [2] BOWMAN J P. The digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence[J]. *Choice Reviews Online*, 1996, 33(9): 69-71.
- [3] 中国信息通信研究院. 中国数字经济发展研究报告(2023年)[R/OL]. (2023-04-27)[2024-04-08]. <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202304/P020240326636461423455.pdf>.
- [4] 鲁春丛. 《2018年中国数字经济发展和就业白皮书》解读[EB/OL]. (2018-04-12)[2024-04-08]. [http://www.caict.ac.cn/sytj/201804/t20180412\\_172812.htm](http://www.caict.ac.cn/sytj/201804/t20180412_172812.htm).
- [5] 许宪春, 张美慧. 中国数字经济规模测算研究: 基于国际比较的视角[J]. *中国工业经济*, 2020(5): 23-41. DOI:10.19581/j.cnki.ciejournal.2020.05.013.

- [6] 罗良清,平卫英,张雨露.基于融合视角的中国数字经济卫星账户编制研究[J].统计研究,2021,38(1):27-37. DOI:10.19343/j.cnki.11-1302/c.2021.01.003.
- [7] 张格渝,武晓婷.基于投入产出表的中国数字经济卫星账户构建[J].统计与决策,2023,39(5):5-9. DOI:10.13546/j.cnki.tjyjc.2023.05.001.
- [8] 王彬燕,田俊峰,程利莎,等.中国数字经济空间分异及影响因素[J].地理科学,2018,38(6):859-868. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2018.06.004.
- [9] 焦帅涛,孙秋碧.我国数字经济发展测度及其影响因素研究[J].调研世界,2021(7):13-23. DOI:10.13778/j.cnki.11-3705/c.2021.07.002.
- [10] 徐振剑,吕拉昌,辛晓华.中国城市数字经济发展空间分异及其影响因素[J].经济纵横,2023(8):71-79. DOI:10.16528/j.cnki.22-1054/f.202308071.
- [11] 杨承佳,李忠祥.中国数字经济发展水平、区域差异及分布动态演进[J].统计与决策,2023,39(9):5-10. DOI:10.13546/j.cnki.tjyjc.2023.09.001.
- [12] 刘英恒太,杨丽娜.中国数字经济产出的空间关联网结构及影响因素研究[J].技术经济,2021,40(9):137-145.
- [13] 程筱敏,邹艳芬.我国数字经济发展水平测度及空间溢出效应[J].商业经济研究,2022(23):189-192.
- [14] 胡艳,栗明钰,唐睿.长三角数字经济网络结构特征及影响因素[J].华东经济管理,2022,36(12):26-34. DOI:10.19629/j.cnki.34-1014/f.220707003.
- [15] 钟业喜,毛炜圣.长江经济带数字经济空间格局及影响因素[J].重庆大学学报(社会科学版),2020,26(1):19-30. DOI:10.11835/j.issn.1008-5831.jg.2019.05.002.
- [16] 蔡绍洪,谷城,张再杰.中国省域数字经济的时空特征及影响因素研究[J].华东经济管理,2022,36(7):1-9. DOI:10.19629/j.cnki.34-1014/f.211219002.
- [17] 苏冰杰,卢方元,朱峰,等.中国数字经济发展水平:时空特征、动态演化及影响因素[J].运筹与管理,2022,31(9):161-168. DOI:10.12005/orms.2022.0300.
- [18] 吕雁琴,范天正.中国数字经济发展的时空分异及影响因素研究[J].重庆大学学报(社会科学版),2023,29(3):47-60. DOI:10.11835/j.issn.1008-5831.jg.2023.04.002.
- [19] 王凯利,李欣儒,贺超城,等.城市群数字经济发展水平测度及空间分异研究[J].统计与决策,2023,39(23):127-131. DOI:10.13546/j.cnki.tjyjc.2023.23.023.
- [20] 何地,赵焯焯,齐琦.中国数字经济发展水平测度、时空格局与区域差异研究[J].工业技术经济,2023,42(3):54-62. DOI:10.3969/j.issn.1004-910X.2023.03.006.
- [21] 杨明海,张红霞,孙亚男.七大城市群创新能力的区域差距及其分布动态演进[J].数量经济技术经济研究,2017,34(3):21-39. DOI:10.13653/j.cnki.jqte.2017.03.002.
- [22] 伍国勇,庞国光,汤钧惠,等.中国乡村数字经济发展水平的测度、区域差异及时空演变[J].湖南农业大学学报(社会科学版),2022,23(4):15-27. DOI:10.13331/j.cnki.jhau(ss).2022.04.002.
- [23] 李洁,王琴梅.数字经济发展水平测度及时空演变[J].统计与决策,2022,38(24):73-78. DOI:10.13546/j.cnki.tjyjc.2022.24.014.
- [24] 成祖松,解亚森.安徽数字经济发展的区域差异及收敛性分析[J].技术与市场,2023,30(3):135-139,143. DOI:10.3969/j.issn.1006-8554.2023.03.034.
- [25] WANG Jinfeng, ZHANG Tonglin, FU Bojie. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. Ecological Indicators, 2016, 67:250-256. DOI:10.1016/j.ecolind.2016.02.052.
- [26] SONG Yongze, WANG Jinfeng, GE Yong, *et al.* An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data[J]. GIScience Remote Sensing, 2020, 57(5):593-610. DOI:10.1080/15481603.2020.1760434.
- [27] WANG Jinfeng, LI Xihu, CHRISTAKOS G, *et al.* Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(1):107-127. DOI:10.1080/13658810802443457.
- [28] 付争江,郑之琦,屈小娥.数字经济高质量发展指标体系构建及实证分析:来自陕西省的经验证据[J].统计与决策,2023,39(13):28-32. DOI:10.13546/j.cnki.tjyjc.2023.13.005.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:陈婧)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202306028



# 动态多尺度决策信息系统局部最优尺度的更新规律

陈应生<sup>1</sup>, 李进金<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021;

2. 闽南师范大学 数学与统计学院, 福建 漳州 363000)

**摘要:** 在对象动态增加的情况下, 对多尺度决策信息系统(MDIS)保持局部决策类不确定性的最优尺度更新规律进行研究。首先, 介绍决策信息系统和多尺度决策信息系统决策类不确定性的基本知识, 以及MDIS保持局部决策类不确定性的最优尺度定义。然后, 在增加一个对象的条件下, 分析MDIS局部决策类不确定性的更新规律。最后, 采用增量学习方法, 给出增加一个对象条件下MDIS局部最优尺度不变和变大的充分必要条件。结果表明: 文中方法可以快速地确定更新系统局部最优尺度。

**关键词:** 粒计算; 多尺度决策信息系统; 局部最优尺度选择; 不确定性; 动态更新

中图分类号: TP 18

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)06-0800-08

## Updating Law of Local Optimal Scale of Dynamic Multi-Scale Decision Information System

CHEN Yingsheng<sup>1</sup>, LI Jinjin<sup>1,2</sup>

(1. School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. School of Mathematics Sciences and Statistics, Minnan Normal University, Zhangzhou 363000, China)

**Abstract:** Research on the updating law of optimal scale of multi-scale decision information system (MDIS) to keep local decision class uncertainty under the condition of dynamic increase of objects. Firstly, the basic knowledge of decision class uncertainty of decision information system and multi-scale decision information system are introduced, and the definition of optimal scale of MDIS to keep local decision class uncertainty is given. Then, the updating law of local decision class uncertainty of MDIS is analyzed under the condition of adding one object. Finally, using the incremental learning method, the sufficient and necessary conditions are given for the local optimal scale of MDIS to remain invariant or increase under the condition of adding an object. The results show that the proposed method can quickly determine the local optimal scale of the update system.

**Keywords:** granular computing; multi-scale decision information system; local optimal scale selection; uncertainty; dynamic update

粒计算是模仿人类思维方式的一种处理信息的计算范式<sup>[1]</sup>。随着人工智能和信息科学的发展, 粒

收稿日期: 2023-06-28

通信作者: 李进金(1960-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事一般拓扑学与不确定性分析的研究。E-mail: jinjinlimnu@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12271191, 11871259); 福建省自然科学基金资助项目(2022J01306)

计算已广泛应用于人工智能、知识发现、决策分类、医疗诊断等领域,成为进行海量数据挖掘、不确定性分析等复杂问题的强有力工具<sup>[2-5]</sup>。多粒度是粒计算的一种显著特征,多尺度分析是处理复杂信息的一种重要方法。Wu等<sup>[6]</sup>首先提出多尺度决策信息系统(MDIS)模型,随后许多学者对这一模型进行大量的研究,主要包含粗糙近似与协调性的传递规律<sup>[7]</sup>、决策规则<sup>[8]</sup>、粗糙度和信息熵<sup>[9]</sup>、最优尺度问题<sup>[7-14]</sup>等。最优尺度是MDIS的核心问题,它研究以最小的条件信息达到最优的决策效果。Wu等<sup>[6]</sup>讨论MDIS的8种协调性的最优尺度,并对其进行综合分析和比较。She等<sup>[8]</sup>利用决策树,引入裁剪方法,以决策规则为标准,研究最优尺度与属性约简同步的具体算法。Li等<sup>[9]</sup>将系统推广到广义多尺度决策信息系统,采用分步优化的方法设计了一种最优尺度搜索算法。Huang等<sup>[10]</sup>将该模型推广到多尺度决策的情况下,并讨论最优尺度选择问题。陈应生等<sup>[11]</sup>构建多尺度集值信息系统,引入尺度重要度,给出系统的最优尺度选择算法。关于局部最优尺度的研究,顾沈明等<sup>[12]</sup>,马周明等<sup>[13]</sup>研究多尺度决策信息系统的局部最优尺度选择问题;吴伟志等<sup>[14]</sup>研究不协调广义多尺度决策系统的局部最优尺度组合选择问题。

动态变化是大数据的一个重要特征,增量学习是处理动态数据的一种重要方法,它主要研究更新的信息而不是重新计算,从而显著地提高效率。增量学习方法在粒计算中得到了应用,Yang等<sup>[15]</sup>提出一种动态概念更新方法;Zhang等<sup>[16]</sup>提出一个概率粗糙集的动态框架,并使用增量算法更新不确定区域;He等<sup>[17]</sup>通过矩阵的更新策略设计一种增量算法,并研究模糊概率粗糙集三支区域的更新规则。

在MDIS领域,Deng等<sup>[18]</sup>在MDIS上定义了一个模糊隶属度,并采用三支决策理论和增量学习方法探索最优尺度;Luo等<sup>[19]</sup>研究不完全MDIS中具有动态尺度变化的三支决策更新问题。然而,这些研究知识采用增量学习方法进行尺度间的信息更新,并未考虑到由于对象或属性的增删引起的动态变化因素。目前,只有少量学者研究对象动态增加的情况下MDIS最优尺度的更新问题,Hao等<sup>[20]</sup>运用三支决策理论研究MDIS在对象增加时系统最优尺度的更新算法;Chen等<sup>[21]</sup>研究在对象动态增加条件下系统最优尺度减小的充要条件;Li等<sup>[22]</sup>进一步研究在增加一个对象时,系统最优尺度相等和增加的充要条件。由于在具体的应用中有时只需要考虑局部决策的问题,故Chen等<sup>[23]</sup>研究保持系统局部决策类不确定性的最优尺度更新问题。基于此,本文对局部决策类的最优尺度问题展开研究,给出最优尺度不变和变大的充分必要条件,提出增加对象条件下最优尺度更新判断的快捷方法。

## 1 基础知识

### 1.1 决策信息系统决策类的不确定性

**定义1<sup>[6]</sup>**  $S=(U,A\cup\{d\})$ 称为一个决策信息系统,其中, $U=\{x_1,x_2,\dots,x_n\}$ 是一个非空有限集合,称为论域, $A=\{a_1,a_2,\dots,a_m\}$ 是一个非空有限属性集,对于任意的 $a\in A,a:U\rightarrow V_a$ 是一个单值映射,其中, $V_a=\{a(x)|x\in U\}$ 是属性 $a$ 的值域。 $d\notin A$ 称为一个决策属性, $d:U\rightarrow V_d$ 是一个单值映射,其中, $V_d=\{d(x)|x\in U\}$ 是属性 $d$ 的值域。

对于任意的属性子集 $B\subseteq A$ ,定义等价关系

$$R_B=\{(x,y)\in U\times U|a(x)=a(y),\forall a\in B\}.$$

$[x]_B=\{y\in U|a(x)=a(y),\forall a\in B\}$ 为对象 $x$ 关于属性子集 $B$ 的等价类。对于 $B\subseteq A,X\subseteq U,X$ 关于属性子集 $B$ 的上下近似分别定义为

$$\overline{R}_B(X)=\{x\in U|[x]_B\cap X\neq\emptyset\}, \quad \underline{R}_B(X)=\{x\in U|[x]_B\subseteq X\}.$$

由属性 $d$ 诱导的等价关系为

$$R_d=\{(x,y)\in U\times U|d(x)=d(y)\}.$$

$[x]_d=\{y\in U|(x,y)\in R_d\}$ 为 $x$ 关于 $d$ 的等价类, $U/R_d=\{R_d(x)|x\in U\}$ 称为 $R_d$ 的商集。

对于任意的决策类 $D\in U/R_d,U$ 被分成3个互不相交的区域,即

$$\text{Pos}_B(D)=\overline{R}_B(D)=\{[x]_B|[x]_B\subseteq D,x\in U\},$$

$$\text{Neg}_B(D)=U-\overline{R}_B(D)=\{[x]_B|[x]_B\cap D=\emptyset,x\in U\},$$

$$\text{Bnd}_B(D)=\overline{R}_B(D)-\underline{R}_B(D)=\{[x]_B|[x]_B\nsubseteq X,[x]_B\cap D\neq\emptyset,x\in U\}.$$

式中:  $\text{Pos}_B(D)$ 是可以完全确定属于  $D$  的信息粒,称为接受域;  $\text{Neg}_B(D)$ 是完全不属于  $D$  的信息粒,称为拒绝域;  $\text{Bnd}_B(D)$ 是不能确定属于  $D$  或不属于  $D$  的信息粒,称为边界域;  $\text{Pos}_B(D)$ 与  $\text{Neg}_B(D)$ 是完全可以决策的区域,而  $\text{Bnd}_B(D)$ 是不确定性区域。

**定义 2**<sup>[20]</sup> 设  $S=(U, A \cup \{d\})$  是一个决策信息系统,  $D \in U/R_d$ , 令

$$\text{UNC}(A, D) = \{[x]_B \mid [x]_B \not\subseteq D, [x]_B \cap D \neq \emptyset, x \in U\},$$

则称  $\text{UNC}(A, D)$  为  $D$  关于  $B$  的不确定性。

容易得到引理 1。

**引理 1**<sup>[22]</sup> 设  $S=(U, A \cup \{d\})$  称为一个决策信息系统,  $D \in U/R_d, x \in U$ , 则有

$$x \in \text{UNC}(A, D) \Leftrightarrow [x]_A \subseteq \text{UNC}(A, D),$$

$$x \notin \text{UNC}(A, D) \Leftrightarrow [x]_A \cap \text{UNC}(A, D) = \emptyset.$$

## 1.2 多尺度决策信息系统保持不确定性的最优尺度选择

**定义 3**<sup>[6]</sup> 设  $S=(U, A)$  为多尺度信息系统, 其中,  $U = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  是一个非空有限集合,  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  是一个非空条件属性集, 每个属性  $a_j$  都有  $s$  个尺度, 并且对任意的  $1 \leq r \leq s-1, 1 \leq j \leq m$ , 存在一个满射  $g_j^{r,r+1}: V_j^r \rightarrow V_j^{r+1}$ , 使  $a_j^{r+1} = g_j^{r,r+1} \cdot a_j^r$ , 即对任意的  $x \in U$ , 有  $a_j^{r+1}(x) = g_j^{r,r+1}(a_j^r(x))$ ,  $V_j^r = \{a_j^r(x) \mid x \in U\}$  是  $a_j$  关于第  $r$  尺度的属性  $a_j^r$  的值域,  $g_j^{r,r+1}$  称为条件属性  $a_j$  从第  $r$  尺度到第  $r+1$  的粒度转换函数。

根据定义 3,  $S$  关于第  $k$  尺度的信息系统为  $(U, A^k) = (U, \{a_1^k, a_2^k, \dots, a_m^k\})$ , 并且对任意的  $x \in U$ , 有  $[x]_{A^1} \subseteq [x]_{A^2} \subseteq \dots \subseteq [x]_{A^s}$ , 即信息粒是随着尺度的减少而逐渐变细。

不失一般性, 为方便表达, 与定义 3 相反, 文献[20-23]规定信息粒是随着尺度的增加而逐渐变细, 以下的讨论也遵循这个规定, 故有

$$[x]_{A^s} \subseteq [x]_{A^{s-1}} \subseteq \dots \subseteq [x]_{A^1}.$$

**定义 4**<sup>[7]</sup> 设  $S=(U, A \cup \{d\})$  为多尺度决策信息系统,  $S=(U, A)$  是一个多尺度信息系统,  $d \notin A$  是一个决策属性, 由决策属性  $d$  诱导的等价关系为

$$R_d = \{(x, y) \in U \times U \mid d(x) = d(y)\}.$$

根据信息粒是随着尺度的增加而逐渐变细, 对任意的  $D \in U/R_d$ , 有

$$\underline{R}_{A^1}(D) \subseteq \underline{R}_{A^2}(D) \subseteq \dots \subseteq \underline{R}_{A^s}(D), \quad \overline{R}_{A^1}(D) \supseteq \overline{R}_{A^2}(D) \supseteq \dots \supseteq \overline{R}_{A^s}(D).$$

根据上下近似定义,  $U$  被分成 3 个互不相交的区域, 即

$$\text{ACP}(A^k, D) = \underline{R}_{A^k}(D) = \{[x]_{A^k} \mid [x]_{A^k} \subseteq D, x \in U\},$$

$$\text{REJ}(A^k, D) = U - \overline{R}_{A^k}(D) = \{[x]_{A^k} \mid [x]_{A^k} \cap D = \emptyset, x \in U\},$$

$$\text{UNC}(A^k, D) = \overline{R}_{A^k}(D) - \underline{R}_{A^k}(D) = \{[x]_{A^k} \mid [x]_{A^k} \not\subseteq D, [x]_{A^k} \cap D \neq \emptyset, x \in U\},$$

且有  $\text{UNC}(A^s, D) \subseteq \text{UNC}(A^{s-1}, D) \subseteq \dots \subseteq \text{UNC}(A^1, D)$ 。

根据序贯三支决策理论, 有

$$\text{ACP}(A^{k+1}, D) = \text{ACP}(A^k, D) \cup K,$$

$$\text{REJ}(A^{k+1}, D) = \text{REJ}(A^k, D) \cup J,$$

$$\text{UNC}(A^{k+1}, D) = \text{UNC}(A^k, D) - L.$$

式中:  $K = \{x \in \text{UNC}(A^k, D) \mid [x]_{A^k} \subseteq D\}$ ;  $J = \{x \in \text{UNC}(A^k, D) \mid [x]_{A^k} \cap D = \emptyset\}$ ;  $L = \{x \in \text{UNC}(A^k, D) \mid [x]_{A^k} \not\subseteq D \wedge [x]_{A^k} \cap D \neq \emptyset\}$ 。

多尺度决策信息系统不同尺度间的信息粒化程度不一样, 较细尺度的粒化精度较高, 但认识知识需花费的精力较多, 较粗尺度的粒化精度较低, 而认识知识需花费的精力较少。人类的认知过程是一个由浅入深逐步推进的过程, 面对具体的认识目标, 人们希望以最小的精力获取决策目标, 即以最粗的尺度获取决策目的, 由于不确定性是衡量决策能力的重要指标, 而决策目标有时针对具体的某个决策类, 因此, 提出定义 5。

**定义 5** 设  $S=(U, A \cup \{d\})$  为 MDIS,  $D \in U/R_d$ , 如果存在一个  $1 \leq k \leq s$ , 使得  $\text{UNC}(A^s, D) = \text{UNC}(A^k, D)$ , 但任意的  $l < k$ , 有  $\text{UNC}(A^s, D) \subset \text{UNC}(A^l, D)$  成立, 则称  $k$  是  $D$  的局部最优尺度。

根据定义 5, 对于  $D \in U/R_d$ , 由  $\text{UNC}(A^s, D) \subseteq \text{UNC}(A^{s-1}, D) \subseteq \dots \subseteq \text{UNC}(A^1, D)$ , 决策类  $D$  针对最高尺度的不确定性最小, 即最高尺度的决策能力最好。因此,  $k$  是保持局部决策类不确定性的最粗尺度, 即保持局部决策能力不变的最优尺度。

## 2 增加对象条件下多尺度决策信息系统最优尺度的更新规律

对于一个多尺度决策信息系统  $S = (U, A \cup \{d\})$ , 当信息系统添加一个对象  $y$  时, 系统决策类的不确定性和最优尺度可能发生改变, 故讨论增加一个对象  $y$  是不确定性和最优尺度的更新规律。为方便表达, 把增加一个对象前后对应的时刻分别记为  $t, t+1$ ;  $S^{(t)} = (U_t, A \cup \{d\})$ ,  $S^{(t+1)} = (U_{t+1}, A \cup \{d\})$  分别为时刻  $t, t+1$  对应的多尺度决策信息系统;  $U_t = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,  $U_{t+1} = \{x_1, x_2, \dots, x_n, y\}$  分别为时刻  $t, t+1$  系统对应的论域;  $[x]_{A^k}^t, [x]_{A^k}^{t+1}$  分别为对象  $x$  第  $k$  尺度下在时刻  $t, t+1$  的等价类。下文都是针对更新前后的系统  $S^{(t)}, S^{(t+1)}$  开展的。因此, 引理或定理的表述中不再强调更新前后的系统, 也不再强调添加的对象  $y$ 。

假设添加的对象  $y$  不自成一类, 即存在  $x \in U_t$ , 使  $[y]_{A^s} = [x]_{A^s} \cup \{y\}$ 。

对于  $D_i \in U_t/R_d$ , 添加对象  $y$  后,  $D_{t+1} \in U_{t+1}/R_d$  是  $D_i$  的更新, 则有

$$D_{t+1} = \begin{cases} D_i \cup \{y\}, & d(y) = d(x), \quad \forall x \in D_i, \\ D_i, & \text{其他。} \end{cases}$$

**引理 2**<sup>[20]</sup> 对于任意的  $D_i \in U_t/R_d, D_{t+1} \in U_{t+1}/R_d$  是  $D_i$  的更新,  $1 \leq k \leq s$ , 则有

$$\text{UNC}(A^k, D_{t+1}) = \begin{cases} \text{UNC}(A^k, D_i) \cup [y]_{A^k}^{t+1}, & y \in \text{UNC}(A^k, D_{t+1}), \\ \text{UNC}(A^k, D_i), & \text{其他。} \end{cases}$$

根据引理 2, 显然, 有  $\text{UNC}(A^k, D_i) \subseteq \text{UNC}(A^k, D_{t+1})$ 。

更进一步, 容易得到引理 3。

**引理 3** 对  $D_i \in U_t/R_d, D_{t+1} \in U_{t+1}/R_d$  是  $D_i$  的更新,  $[y]_{A^k}^{t+1} = [x]_{A^k}^{t+1} \cup \{y\}, 1 \leq k \leq s$ , 有以下 2 个结论成立。

1) 如果  $D_{t+1} = D_i \cup \{y\}$ , 则有

$$\text{UNC}(A^k, D_{t+1}) = \begin{cases} \text{UNC}(A^k, D_i), & [x]_{A^k}^t \subseteq D, \\ \text{UNC}(A^k, D_i) \cup [x]_{A^k}^t \cup \{y\}, & [x]_{A^k}^t \cap D = \emptyset, \\ \text{UNC}(A^k, D_i) \cup \{y\}, & \text{其他。} \end{cases}$$

2) 如果  $D_{t+1} = D_i$ , 则有

$$\text{UNC}(A^k, D_{t+1}) = \begin{cases} \text{UNC}(A^k, D_i) \cup [x]_{A^k}^t \cup \{y\}, & [x]_{A^k}^t \subseteq D, \\ \text{UNC}(A^k, D_i), & [x]_{A^k}^t \cap D = \emptyset, \\ \text{UNC}(A^k, D_i) \cup \{y\}, & \text{其他。} \end{cases}$$

文献[23]中给出最优尺度变小的充分必要条件。

**定理 1**<sup>[23]</sup> 设  $D_i \in U_t/R_d, D_{t+1} \in U_{t+1}/R_d$  是  $D_i$  的更新,  $r, R$  分别是  $D_i, D_{t+1}$  的最优尺度,  $[y]_{A^s} = [x]_{A^s}^t \cup \{y\}$ , 则  $R < r$  当且仅当以下 3 个条件成立:

- 1)  $y \in \text{UNC}(A^s, D_{t+1})$ ;
- 2)  $x \notin \text{UNC}(A^s, D')$ ;
- 3)  $\text{UNC}(A^{r-1}, D_i) - \text{UNC}(A^s, D_i) = [x]_{A^s}^t$ 。

**定理 2** 设  $D_i \in U_t/R_d, D_{t+1} \in U_{t+1}/R_d$  是  $D_i$  的更新,  $r, R$  分别是  $D_i, D_{t+1}$  的最优尺度, 若  $[y]_{A^s} = [x]_{A^s}^t \cup \{y\}, y \notin \text{UNC}(A^s, D_{t+1})$ , 则  $r = R$ 。

证明: 由于  $y \notin \text{UNC}(A^s, D_{t+1})$ , 根据引理 1, 有  $[y]_{A^s} \cap \text{UNC}(A^s, D_{t+1}) = \emptyset$ , 故  $[x]_{A^s}^t \cap \text{UNC}(A^s, D') = \emptyset$  成立, 又因  $r$  是决策类  $D_i$  的最优尺度, 有  $\text{UNC}(A^s, D_i) = \text{UNC}(A^r, D_i)$ , 故  $[x]_{A^r}^t \cap \text{UNC}(A^r, D') = \emptyset$ , 分两种情况证明  $y \notin \text{UNC}(A^r, D_{t+1})$ 。

1) 当  $D_{t+1} = D_i \cup [y]$  时, 由  $y \notin \text{UNC}(A^s, D_{t+1})$  及  $[y]_{A^s} = [x]_{A^s}^t \cup \{y\}$ , 有  $[x]_{A^s}^t \subseteq D_i$ , 故  $[x]_{A^r}^t \subseteq D_i$ , 否则与  $\text{UNC}(A^s, D_i) = \text{UNC}(A^r, D_i)$  矛盾, 故  $[y]_{A^r} = [x]_{A^r}^t \cup \{y\} \subseteq D_{t+1}$ , 即  $y \notin \text{UNC}(A^r, D_{t+1})$ 。

2) 当  $D_{t+1} = D_t \cup [y]$  时, 由  $y \notin \text{UNC}(A^s, D_{t+1})$  及  $[y]_{A^s}^t = [x]_{A^s}^t \cup \{y\}$ , 有  $[x]_{A^s}^t \cap D_t = \emptyset$ ,  $[x]_{A^r}^t \cap D_t = \emptyset$ , 否则与  $\text{UNC}(A^s, D_t) = \text{UNC}(A^r, D_t)$  矛盾, 所以  $[y]_{A^r}^t \cap D_{t+1} = \emptyset$ , 即  $y \notin \text{UNC}(A^r, D_{t+1})$ 。

根据引理 2,  $\text{UNC}(A^s, D_{t+1}) = \text{UNC}(A^s, D_t)$ ,  $\text{UNC}(A^r, D_{t+1}) = \text{UNC}(A^r, D_t)$ , 故有  $\text{UNC}(A^s, D_{t+1}) = \text{UNC}(A^r, D_{t+1})$ 。

另一方面, 因为  $r$  是决策类  $D_t$  的最优尺度, 所以  $\text{UNC}(A^s, D_t) \subset \text{UNC}(A^{r-1}, D_t)$ , 从而  $\text{UNC}(A^s, D_{t+1}) = \text{UNC}(A^s, D_t) \subset \text{UNC}(A^{r-1}, D_t) \subseteq \text{UNC}(A^{r-1}, D_{t+1})$ , 所以  $r = R$ 。

**定理 3** 设  $D_t \in U_t/R_d, D_{t+1} \in U_{t+1}/R_d$  是  $D_t$  的更新,  $r, R$  分别是  $D_t, D_{t+1}$  的最优尺度,  $[y]_{A^s}^t = [x]_{A^s}^t \cup \{y\}$ , 若  $x \in \text{UNC}(A^s, D_t)$ , 则  $r = R$ 。

证明: 如果  $x \in \text{UNC}(A^s, D')$ , 那么  $y \in \text{UNC}(A^s, D_{t+1})$ , 因为  $\text{UNC}(A^s, D') = \text{UNC}(A^r, D')$ , 所以有  $x \in \text{UNC}(A^r, D')$ ,  $y \in \text{UNC}(A^r, D_{t+1})$ , 根据引理 2, 可得  $\text{UNC}(A^s, D_{t+1}) = \text{UNC}(A^s, D') \cup \{y\}$ , 且  $\text{UNC}(A^r, D_{t+1}) = \text{UNC}(A^r, D') \cup \{y\}$ 。

因此, 有  $\text{UNC}(A^s, D_{t+1}) = \text{UNC}(A^r, D_{t+1})$ , 因  $\text{UNC}(A^s, D') \subset \text{UNC}(A^{r+1}, D')$ , 有  $x \in \text{UNC}(A^{r+1}, D')$ ,  $y \in \text{UNC}(A^{r+1}, D_{t+1})$ , 从而有  $\text{UNC}(A^1, D_{t+1}) = \text{UNC}(A^1, D') \cup \{y\} \subset \text{UNC}(A^{r+1}, D') \cup \{y\} = \text{UNC}(A^{r+1}, D_{t+1})$ , 所以  $R = r$ 。

根据定理 2 与定理 3, 添加对象  $y$  后, 如果  $y \notin \text{UNC}(A^s, D_{t+1})$  或者  $x \in \text{UNC}(A^s, D')$ , 则  $D_{t+1}$  的最优尺度也是  $r$ , 因此, 只讨论  $y \in \text{UNC}(A^s, D_{t+1})$  且  $x \notin \text{UNC}(A^s, D')$  的情况。因为  $r$  是  $D_t$  的最优尺度, 故  $\text{UNC}(A^s, D') = \text{UNC}(A^r, D')$ , 从而  $x \notin \text{UNC}(A^r, D')$ ,  $y \in \text{UNC}(A^r, D_{t+1})$ , 根据引理 1 与引理 3, 容易得到引理 4。

**引理 4** 设  $r$  是  $D_t$  的最优尺度,  $y \in \text{UNC}(A^s, D_{t+1})$  且  $x \notin \text{UNC}(A^s, D')$ , 则有

$$\begin{aligned} [x]_{A^s}^t \cap \text{UNC}(A^s, D') &= \emptyset, \\ [x]_{A^r}^t \cap \text{UNC}(A^r, D') &= \emptyset, \\ \text{UNC}(A^s, D_{t+1}) &= \text{UNC}(A^s, D_t) \cup [x]_{A^s}^t \cup \{y\}, \\ \text{UNC}(A^r, D_{t+1}) &= \text{UNC}(A^r, D_t) \cup [x]_{A^r}^t \cup \{y\}. \end{aligned}$$

证明:  $y \in \text{UNC}(A^s, D_{t+1})$ ,  $x \notin \text{UNC}(A^s, D_t)$ , 根据引理 1 可得  $[y]_{A^s}^t \subseteq \text{UNC}(A^s, D_{t+1})$  且  $[x]_{A^s}^t \cap \text{UNC}(A^s, D_t) = \emptyset$ 。根据引理 3, 可得  $\text{UNC}(A^s, D_{t+1}) = \text{UNC}(A^s, D_t) \cup [x]_{A^s}^t \cup \{y\}$ 。

由于设  $r$  是  $D_t$  的最优尺度, 所以  $\text{UNC}(A^s, D') = \text{UNC}(A^r, D')$ , 从而有

$$\begin{aligned} [x]_{A^s}^t \cap \text{UNC}(A^s, D') &= \emptyset, \\ \text{UNC}(A^r, D_{t+1}) &= \text{UNC}(A^r, D_t) \cup [x]_{A^r}^t \cup \{y\}. \end{aligned}$$

给出最优尺度不变与变大的充分必要条件(定理 4, 5)。

**定理 4** 设  $D_t \in U_t/R_d, D_{t+1} \in U_{t+1}/R_d$  是  $D_t$  的更新,  $r, R$  分别是  $D_t, D_{t+1}$  的最优尺度,  $[y]_{A^s}^t = [x]_{A^s}^t \cup \{y\}$ ,  $y \in \text{UNC}(A^s, D_{t+1})$ , 且  $x \notin \text{UNC}(A^s, D')$ , 则  $R = r$  当且仅当以下两个条件成立:

- 1)  $[x]_{A^s}^t = [x]_{A^r}^t$ ;
- 2)  $\text{UNC}(A^{r-1}, D_{t+1}) - \text{UNC}(A^s, D_t) \supset [x]_{A^s}^t$ 。

证明: 根据引理 4, 有

$$\text{UNC}(A^s, D_{t+1}) = \text{UNC}(A^r, D_{t+1}) \Leftrightarrow [x]_{A^s}^t = [x]_{A^r}^t.$$

又因为  $\text{UNC}(A^s, D') \subset \text{UNC}(A^{r-1}, D')$ , 所以有

$$\begin{aligned} \text{UNC}(A^s, D_{t+1}) \subset \text{UNC}(A^{r-1}, D_{t+1}) &\Leftrightarrow \text{UNC}(A^s, D_t) \cup [x]_{A^s}^t \cup \{y\} \subset \\ \text{UNC}(A^{r-1}, D_{t+1}) &\Leftrightarrow \text{UNC}(A^{r-1}, D_{t+1}) - \text{UNC}(A^s, D_t) \supset [x]_{A^s}^t. \end{aligned}$$

因此, 有

$$\begin{aligned} R = r &\Leftrightarrow \text{UNC}(A^s, D_{t+1}) = \text{UNC}(A^r, D_{t+1}), \\ \text{UNC}(A^s, D_{t+1}) \subset \text{UNC}(A^{r-1}, D_{t+1}) &\Leftrightarrow [x]_{A^s}^t = [x]_{A^r}^t, \\ \text{UNC}(A^{r-1}, D_{t+1}) - \text{UNC}(A^s, D_t) &\supset [x]_{A^s}^t. \end{aligned}$$

**定理 5** 设  $D_t \in U_t/R_d, D_{t+1} \in U_{t+1}/R_d$  是  $D_t$  的更新,  $r, R$  分别是  $D_t, D_{t+1}$  的最优尺度,  $[y]_{A^s}^t = [x]_{A^s}^t \cup \{y\}$ ,  $y \in \text{UNC}(A^s, D_{t+1})$ ,  $x \notin \text{UNC}(A^s, D')$ , 则  $R > r$  当且仅当

$$[x]_{A^s}^t \subset [x]_{A^r}^t。$$

证明: 根据引理 4, 有

$$R > r \Leftrightarrow \text{UNC}(A^s, D_{t+1}) \subset \text{UNC}(A^r, D_{t+1}) \Leftrightarrow \text{UNC}(A^s, D_t) \cup [x]_{A^s}^t \cup \{y\} \subset \text{UNC}(A^r, D_t) \cup [x]_{A^r}^t \cup \{y\} \Leftrightarrow [x]_{A^s}^t \subset [x]_{A^r}^t。$$

**例 1** 动态多尺度决策信息系统(例 1), 如表 1 所示。更新动态 MDSI 决策类的局部最优尺度。

表 1 动态多尺度决策信息系统(例 1)

Tab. 1 Dynamic multi-scale decision information system (example 1)

$U$	$a_1^1$	$a_1^2$	$a_1^3$	$a_2^1$	$a_2^2$	$a_2^3$	$d$
$x_1$	Y	S	5	N	L	2	1
$x_2$	Y	S	4	Y	S	4	1
$x_3$	Y	S	4	Y	S	5	1
$x_4$	Y	M	3	Y	M	3	1
$x_5$	Y	M	3	Y	M	3	0
$x_6$	N	L	1	Y	M	3	0
$x_7$	N	L	2	Y	S	4	0
$x_8$	N	L	2	Y	S	5	0
$y$	N	L	2	Y	S	5	0
$z$	Y	S	5	N	L	2	1

设  $U_t = \{x_1, x_2, \dots, x_8\}$ , 当对象  $y, z$  被添加到系统后, 对最优尺度的更新进行研究。经计算可得

$$\begin{aligned} U_t/R_d &= \{D_t, E_t\} = \{\{x_1, x_2, x_3, x_4\}, \{x_5, x_6, x_7, x_8\}\}, \\ U_t/R_{A^3} &= \{\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5\}, \{x_6\}, \{x_7\}, \{x_8\}\}, \\ U_t/R_{A^2} &= \{\{x_1\}, \{x_2, x_3\}, \{x_4, x_5\}, \{x_6\}, \{x_7, x_8\}\}, \\ U_t/R_{A^1} &= \{\{x_1\}, \{x_2, x_3, x_4, x_5\}, \{x_6, x_7, x_8\}\}, \\ \text{UNC}(A^3, D_t) &= \text{UNC}(A^3, E_t) = \{x_4, x_5\}, \\ \text{UNC}(A^2, D_t) &= \text{UNC}(A^2, E_t) = \{x_4, x_5\}, \\ \text{UNC}(A^1, D_t) &= \text{UNC}(A^1, E_t) = \{x_2, x_3, x_4, x_5\}. \end{aligned}$$

因此,  $D_t, E_t$  的局部最优尺度都是 2。

当添入对象  $y$  时, 有  $E_{t+1} = E_t \cup \{y\}$ , 经计算可得,  $[y]_{A^3}^{t+1} = [x_8]_{A^3}^t \cup \{y\}$ ,  $\text{UNC}(A^3, D_{t+1}) = \{x_4, x_5, x_8, y\}$ ,  $\text{UNC}(A^3, E_{t+1}) = \{x_4, x_5, x_8, y\}$ , 故  $[y]_{A^3}^{t+1} = [x_8]_{A^3}^t \cup \{y\}$ ,  $y \in \text{UNC}(A^3, D_{t+1})$ ,  $x_8 \notin \text{UNC}(A^3, D_t)$ ,  $[x_8]_{A^3}^t \subset [x_8]_{A^2}^t$ , 根据定理 5,  $D_{t+1}$  的最优尺度大于  $D_t$  的最优尺度, 由  $[y]_{A^3}^{t+1} = [x_8]_{A^3}^t \cup \{y\}$ ,  $y \in \text{UNC}(A^3, E_{t+1})$ ,  $x_8 \notin \text{UNC}(A^3, E_t)$ ,  $[x_8]_{A^3}^t \subset [x_8]_{A^2}^t$ ,  $E_{t+1}$  的最优尺度大于  $E_t$  的最优尺度。经计算  $D_{t+1}, E_{t+1}$  的最优尺度都为 3。

当添入对象  $z$  时, 有  $D_{t+1} = D_t \cup \{z\}$ , 经过计算可得到  $[z]_{A^3}^{t+1} = [x_1]_{A^3}^t \cup \{z\}$ ,  $\text{UNC}(A^3, D_{t+1}) = \text{UNC}(A^3, E_{t+1}) = \{x_4, x_5\}$ ,  $z \notin \text{UNC}(A^3, D_{t+1})$ ,  $z \notin \text{UNC}(A^3, E_{t+1})$ , 由定理 2,  $D_{t+1}$  与  $E_{t+1}$  的最优尺度都不变, 都为 2。由于  $[x_2]_{A^3}^t = x_2$ ,  $[x_3]_{A^3}^t = x_3$ , 所以  $\text{UNC}(A^1, D_{t+1}) - \text{UNC}(A^3, D_{t+1}) \supset \text{UNC}(A^1, D_t) - \text{UNC}(A^3, D_t) = \{x_2, x_3\} \neq [x_2]_{A^3}^t$ ,  $\text{UNC}(A^1, E_{t+1}) - \text{UNC}(A^3, E_t) \supset \text{UNC}(A^1, E_t) - \text{UNC}(A^3, E_t) = \{x_2, x_3\} \neq [x_3]_{A^3}^t$ 。

根据定理 1, 无论加入何对象, 最优尺度都不会变小。

**例 2** 动态多尺度决策信息系统(例 2), 如表 2 所示。更新动态 MDSI 决策类的局部最优尺度。

经计算可得

$$\begin{aligned} U_t/R_d &= \{D_t, E_t\} = \{\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}, \{x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}\}, \\ U_t/R_{A^4} &= \{\{x_1, x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_7\}, \{x_5, x_6\}, \{x_8, x_9, x_{10}\}\}, \\ U_t/R_{A^3} &= \{\{x_1, x_2\}, \{x_3\}, \{x_4, x_5, x_6, x_7\}, \{x_8, x_9, x_{10}\}\}, \\ U_t/R_{A^2} &= \{\{x_1, x_2\}, \{x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}, \{x_8, x_9, x_{10}\}\}, \\ U_t/R_{A^1} &= \{\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}, \{x_8, x_9, x_{10}\}\}, \\ \text{UNC}(A^4, D_t) &= \text{UNC}(A^4, E_t) = \{x_4, x_5, x_6, x_7\}, \\ \text{UNC}(A^3, D_t) &= \text{UNC}(A^3, E_t) = \{x_4, x_5, x_6, x_7\}, \end{aligned}$$

$$\text{UNC}(A^2, D_i) = \text{UNC}(A^2, E_i) = \{x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\},$$

$$\text{UNC}(A^1, D_i) = \text{UNC}(A^1, E_i) = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}.$$

表 2 动态多尺度决策信息系统(例 2)

Tab. 2 Dynamic multi-scale decision information system (example 2)

$U$	$a_1^1$	$a_1^2$	$a_1^3$	$a_1^4$	$a_2^1$	$a_2^2$	$a_2^3$	$a_2^4$	$d$
$x_1$	Y	H	A	1	Y	H	A	1	1
$x_2$	Y	H	A	1	Y	H	A	1	1
$x_3$	Y	M	B	3	Y	M	B	2	1
$x_4$	Y	M	B	2	Y	M	C	4	1
$x_5$	Y	M	B	2	Y	M	C	5	1
$x_6$	Y	M	B	2	Y	M	C	5	0
$x_7$	Y	M	B	2	Y	M	C	4	0
$x_8$	Y	M	C	4	N	L	D	6	0
$x_9$	Y	M	C	4	N	L	D	6	0
$x_{10}$	Y	M	C	4	N	L	D	6	0
$y$	Y	M	B	2	Y	M	C	4	1

因此,  $D_i, E_i$  的最优尺度都是 3, 添入对象  $y$  时, 由表 2 可得,  $D_{i+1} = D_i \cup \{y\}, E_{i+1} = E_i$ , 且  $[y]_{t+1A^4} = [x_4]_{A^4} \cup \{y\}$ , 由  $x_4 \in \text{UNC}(A^4, D_i), x_4 \in \text{UNC}(A^4, E_i)$ , 根据定理 3,  $D_{i+1}$  与  $E_{i+1}$  的最优尺度都不变, 仍为 2。

### 3 结束语

寻找最优尺度是多尺度决策信息系统的核心问题, 决策类的不确定性是系统决策能力的一个重要的衡量标准。在最细尺度下, 系统的决策能力最优。以局部决策类在最细尺度下的不确定性作为度量指标, 采用增量学习方法, 在对象动态增加的环境下, 研究多尺度的决策信息系统保持局部决策类不确定性的最优尺度的更新规律, 给出在添加一个对象条件下, 最优尺度不变和变大的充分必要条件。文中给出了添加对象后系统最优尺度更新的一种判别方法, 进一步完善了这一课题的研究, 具有一定的理论价值和实践价值。

今后, 将进一步研究对象动态增加环境下多尺度覆盖决策信息系统和集值决策信息系统的最优尺度更新规律, 并探索将所得的结果推广到模糊集的情形。

#### 参考文献:

- [1] 王国胤, 张清华, 胡军. 粒计算研究综述[J]. 智能系统学报, 2007, 2(6): 8-26. DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.2007.06.002.
- [2] LI Jinhai, HUANG Chenchen, QI Jianjun, *et al.* Three way cognitive concept learning via multi-granularity[J]. Information Sciences, 2017, 378: 244-263. DOI:10.1016/j.ins.2016.04.051.
- [3] HUANG Zhenhuang, LI Jinjin, QUAN Yuhua. Noise-tolerant fuzzy  $\beta$  covering based multigranulation rough sets and feature subset selection[J]. IEEE Transactions Fuzzy Systems, 2022, 30(7): 2721-2735. DOI:10.1109/TFUZZ.2021.3093202.
- [4] YAO Yiyu. Three-way decisions with probabilistic rough sets[J]. Information Sciences, 2010, 180: 341-353. DOI:10.1016/j.ins.2009.09.021.
- [5] 王志焕, 游小英, 李伟康, 等. 模糊广义决策信息系统的证据特征与信任约简[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2020, 41(5): 683-689. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202003026.
- [6] WU Weizhi, LEUNG Yi. Theory and applications of granular labelled partitions in multi-scale decision tables[J]. Information Sciences, 2011, 181: 3878-3897. DOI:10.1016/j.ins.2011.04.047.
- [7] WU Weizhi, LEUNG Yi. A comparison study of optimal scale combination selection in generalized multi-scale decision tables[J]. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2020, 11: 961-972. DOI:10.1007/s13042-019-00954-1.
- [8] SHE Yanhong, QIAN Zhuohao, HE Xiaoli, *et al.* On generalization reducts in multi-scale decision tables[J]. Information Sciences, 2021, 555: 104-124. DOI:10.1016/j.ins.2020.12.045.

- [9] LI Feng, HU Baoqing. Stepwise optimal scale selection for multi-scale decision tables via attribute significance[J]. Knowledge-Based Systems, 2017, 129: 4-16. DOI:10. 1016/j. knosys. 2017. 04. 005.
- [10] HUANG Zhenhuang, LI Jinjin, DAI Weizhong, *et al.* Generalized multi-scale decision tables with multi-scale decision attributes[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2019, 115: 194-208. DOI:10. 1016 /j. ijar. 2019. 09. 010.
- [11] 陈应生, 李进金, 林荣德, 等. 多尺度集值决策信息系统[J]. 控制与决策, 2002, 37(2): 455-462. DOI:10. 13195/j. kzyjc. 2020. 0882.
- [12] 顾沈明, 陆瑾璐, 吴伟志. 广义多尺度决策系统的局部最优粒度选择[J]. 山东大学学报(理学版), 2018, 53(8): 1-8. DOI:10. 6040/j. issn. 1671-9352. 4. 2018. 184.
- [13] 马周明, 黄闽, 林国平, 等. 基于超图的多尺度决策信息系统最优尺度选择[J]. 闽南师范大学学报(自然科学版), 2023, 36(4): 1-15. DOI:10. 16007/j. cnki. issn2095-7122. 2023. 04. 001.
- [14] 吴伟志, 孙钰, 王霞, 等. 不协调广义多尺度决策系统的局部最优尺度组合选择[J]. 模式识别与人工智能, 2021, 34(8): 689-700. DOI:10. 16451/j. cnki. issn1003-6059. 202108002.
- [15] YANG Xin, LI Tianrui, LIU Dun. A unified framework of dynamic three-way probabilistic rough sets[J]. Information Sciences, 2017, 420: 126-147. DOI:10. 1016/j. ins. 2017. 08. 053.
- [16] ZHANG Qinghua, LV Gongxun, CHEN Yuhong, *et al.* A dynamic three-way decision model based on the updating of attribute values[J]. Knowledge-Based Systems, 2018, 142: 71-84. DOI:10. 1016/j. knosys. 2017. 11. 026.
- [17] HE Shifan, WANG Yangming, PAN Xiaohong, *et al.* A novel behavioral three-way decision model with application to the treatment of mild symptoms of COVID-19[J]. Applied Soft Computing, 2022, 124: 109055. DOI:10. 1016/j. asoc. 2022. 109055.
- [18] DENG Jiang, ZHAN Jianming, WU Weizhi. A three-way decision methodology to multi-attribute decision-making in multi-scale decision information systems[J]. Information Sciences, 2021, 568: 175-198. DOI:10. 1016/j. ins. 2021. 03. 058.
- [19] LUO Chuan, LI Tianrui, HUANG Yanhong, *et al.* Updating three-way decisions in incomplete multi-scale information systems[J]. Information Sciences, 2019, 476: 274-289. DOI:10. 1016/j. ins. 2018. 10. 012.
- [20] HAO Chen, LI Jinhai, FAN Min, *et al.* Optimal scale selection in dynamic multi-scale decision tables based on sequential three-way decisions[J]. Information Sciences, 2017, 415/416: 213-232. DOI:10. 1016/j. ins. 2017. 06. 032.
- [21] CHEN Yingsheng, LI Jinhai, LI Jinjin, *et al.* A further study on optimal scale selection in dynamic multi-scale decision information systems based on sequential three-way decisions[J]. International Journal of Machine Learning & Cybernetics, 2022, 13: 1505-1515. DOI:10. 1007/s13042-021-01474-7.
- [22] LI Jinhai, FENG Ye. Update of optimal scale in dynamic multi-scale decision information systems[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2023, 152: 310-324. DOI:10. 1016/j. ijar. 2022. 10. 020.
- [23] CHEN Yingsheng, LI Jinhai, LI Jinjin, *et al.* Sequential 3WD-based local optimal scale selection in dynamic multi-scale decision information systems[J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2023, 152: 221-235. DOI: 10. 1016/j. ijar. 2022. 10. 017.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 黄心中)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202309017



# Douady-Earle 延拓中用到的 拟共形映照参数表示

林珍连

(华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 假设  $f^{\mu(z)}(z)$  是单位圆  $D$  到自身保持  $-1, i, 1$  不动, 具有复特征  $\mu(z)$  的 Douady-Earle 延拓。借助于上半平面到自身保持  $0, 1, \infty$  三点不动的拟共形映射的参数表示, 利用单位圆到上半平面的共形映射, 给出 Douady-Earle 延拓  $f^{\mu(z)}(z)$  的参数表示。

**关键词:** 拟共形映照; 参数表示; 复特征; Douady-Earle 延拓

**中图分类号:** O 174.55 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2024)06-0808-04

## Parametric Representation of Douady-Earle Quasiconformal Extension

LIN Zhenlian

(School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** Suppose  $f^{\mu(z)}(z)$  is a Douady-Earle extension of the unit disk  $D$  onto itself with the complex dilatation  $\mu(z)$ , which kept  $-1, i, 1$  fixed. With the help of the parametric representation of the quasiconformal mapping of the upper half plane onto itself which kept  $0, 1, \infty$  fixed, by using the conformal mapping from the unit disk to the upper half plane, the parametric representation of the Douady-Earle extension  $f^{\mu(z)}(z)$  is given.

**Keywords:** quasiconformal mapping; parametric representation; complex dilation; Douady-Earle extension

### 1 预备知识

设  $w = f(z)$  是平面区域  $E$  到区域  $G$  的  $C^1$  类保向同胚映照, 且在  $E$  内处处满足条件

$$|f_{\bar{z}}(z)| < |f_z(z)|,$$
$$D_f(z) = \frac{|f_z(z)| + |f_{\bar{z}}(z)|}{|f_z(z)| - |f_{\bar{z}}(z)|} \leq K, \quad K \geq 1.$$

称  $f(z)$  是  $E$  内一个  $C^1$  类拟共形映照,  $\mu(z) = \frac{f_{\bar{z}}(z)}{f_z(z)}$  为  $w = f(z)$  的复特征。用  $f^{\mu(z)}(z)$  表示复特征为  $\mu(z)$  拟共形映照。自 20 世纪 50 年代开始, 拟共形映照便成为现代复分析的一个重要分支, 它涵盖了许多基本理论和问题的讨论, 其中包括拟共形映照的边界对应理论和规范拟共形映照对参数的依赖。更多拟共形映照相关内容可参见文献[1-6]。

在拟共形映照的边界对应问题的研究上, Beurling 等<sup>[5]</sup> 首先构造性地将实轴  $R$  到自身的拟对称同

**收稿日期:** 2023-09-28

**通信作者:** 林珍连(1970-), 女, 副教授, 主要从事单复变函数的研究。E-mail: zhenlian@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(11471128, 11971182); 福建省自然科学基金资助项目(2023J01127)

胚扩充为上半平面到自身拟共形同胚。用  $D$  表示单位圆盘,  $\partial D$  表示单位圆周,  $Q(\partial D)$  表示  $\partial D$  到自身的拟对称同胚全体所成的集合。1986 年, Douady 等<sup>[7]</sup> 确定了一个把  $\partial D$  到自身的同胚  $h(z)$  延拓成  $D$  到自身的同胚  $E(h)$  的方法。把  $E(h)(z), z \in D$  定义为使得  $\int_{\partial D} \frac{h(\zeta) - w}{1 - \overline{w}h(\zeta)} \frac{d\zeta}{|\zeta - z|^2} = 0$  的唯一值  $w \in D$ , 且当  $h(z)$  为拟对称时,  $E(h)$  是拟共形的。Douady-Earle 延拓还具有以下性质:  $E(h)$  是共形自然的, 且  $E(h)$  是实解析的; 若用  $T$  表示  $Q(\partial D)$  中满足保持  $-1, i, 1$  三点不动  $h(z)$  的集合, 当  $h(z) \in T$  时,  $E(h)$  的复特征也是实解析的。关于 Douady-Earle 延拓更多相关内容可参见文献[8-9]。

拟共形映照参数表示理论问题是拟共形映照理论的另一个基本问题, 夏道行<sup>[10]</sup> 首先借鉴单叶函数的 Loewner<sup>[11]</sup> 方法发展了拟共形映照的参数表示理论, 之后不少学者对这一问题进行了深入研究<sup>[1-4, 10-17]</sup>, 该理论很好地解决了拟共形映照的模数的估计和面积偏差估计的极值问题<sup>[15-17]</sup>。文献[13]和文献[14]分别考虑了  $\Sigma_k^0$  类拟共形映照和上半平面到自身保持  $0, 1, \infty$  不动的拟共形映照的参数表示式。对于上半平面的参数表示式有定理 A。

**定理 A** 设  $\mu(z, t)$  是定义在  $\text{Im } z > 0, 0 \leq t \leq 1$  的复值可测函数, 满足条件

$$\mu(z, t+s) = \mu(z, t) + s\nu(z, t) + o(s), \quad s \rightarrow 0.$$

其中:  $\mu(z, t), \nu(z, t) \in L^\infty, \|\mu(z, t)\|_\infty < 1$ 。

则上半平面到自身保持  $0, 1, \infty$  不动的拟共形映照  $w = f^{\mu(z, t)}(z, t)$  在上半平面的一切致密子集上一致地成立, 即

$$f^\mu(z, t+s) = f^\mu(z, t) + sF(f^\mu(z, t), t) + o(s), \quad s \rightarrow 0, \tag{1}$$

或者

$$\frac{\partial w}{\partial t} = F(w, t), \quad w = f^{\mu(z, t)}(z, t), \tag{2}$$

其中有

$$F(w, t) = -\frac{w(w-1)}{\pi} \iint_{\text{Im } \omega > 0} \left[ \frac{\varphi(\omega, t)}{\omega(\omega-1)(\omega-w)} + \frac{\overline{\varphi(\omega, t)}}{\overline{\omega}(\overline{\omega}-1)(\overline{\omega}-w)} \right] d\sigma d\tau, \tag{3}$$

$$\varphi(\omega, t) = \frac{v((f^\mu)^{-1}(\omega, t), t)}{1 - |\mu((f^\mu)^{-1}(\omega, t), t)|^2} \exp(-2i \arg((f^\mu)^{-1}(\omega, t))), \quad \text{Im } \omega > 0. \tag{4}$$

在定理 A 的基础上给出 Douady-Earle 延拓中保持  $-1, i, 1$  不动拟共形映照的参数表示式。

## 2 主要定理和证明

**定理 1** 设  $\mu(z, t)$  是定义在  $|z| < 1, 0 \leq t \leq 1$  的复值可测函数, 满足条件

$$\mu(z, t+s) = \mu(z, t) + s\nu(z, t) + o(s), \quad s \rightarrow 0.$$

其中,  $\mu(z, t), \nu(z, t) \in L^\infty, \|\mu(z, t)\|_\infty < 1$ 。

则  $|z| < 1$  到自身以  $\mu(z, t)$  为复特征且保持  $-1, i, 1$  不动的拟共形映照  $w = f^{\mu(z, t)}(z, t)$  适合

$$f^\mu(z, t+s) = f^\mu(z, t) + sF(f^\mu(z, t), t) + o(s), \quad s \rightarrow 0, \tag{5}$$

或者

$$\frac{\partial w}{\partial t} = F(w, t), \quad w = f^{\mu(z, t)}(z, t), \tag{6}$$

其中有

$$F(w, t) = -\frac{(w-i)(w^2-1)}{\pi} \iint_{|\omega| < 1} \left[ \frac{\varphi(\omega, t)}{(\omega^2-1)(\omega-i)(\omega-w)} + \frac{\overline{\varphi(\omega, t)}}{(1-\omega^2)(1-\overline{\omega}i)(1-\overline{\omega}w)} \right] d\sigma d\tau, \tag{7}$$

$$w = f^\mu(\zeta, t) = \sigma + i\tau.$$

$$\varphi(\omega, t) = \frac{v((f^\mu)^{-1}(\omega, t), t)}{1 - |\mu((f^\mu)^{-1}(\omega, t), t)|^2} e^{-2i \arg((f^\mu)^{-1}(\omega, t))}, \quad |\omega| < 1. \tag{8}$$

证明: 只需要把上半平面内的参数表示式转到单位圆内即可。根据文献[13]中定理 3.2 的证明过程可知, 从公式(4)转到公式(8)是很自然的。当前只需证明公式(3)转变成公式(7)即可。显然, 变换

$\omega = \frac{1-i\zeta+1}{2\zeta-i}$ , 把单位圆  $|\zeta| < 1$  映成  $\text{Im } \omega > 0$ ,  $-1$  映成  $0$ ,  $i$  映成  $\infty$ ,  $1$  映成  $1$ 。根据记号的写法, 公式(7)

中的  $\omega, \bar{\omega}, \sigma, \tau$  应记为  $\zeta, z, \xi, \eta$ 。再记

$$I_1 = -\frac{\omega(\omega-1)}{\pi} \iint_{\text{Im } \omega > 0} \frac{\varphi(\omega, t)}{\omega(\omega-1)(\omega-\bar{\omega})} d\sigma d\tau, \tag{9}$$

$$I_2 = -\frac{\omega(\omega-1)}{\pi} \iint_{\text{Im } \omega > 0} \frac{\overline{\varphi(\omega, t)}}{\bar{\omega}(\bar{\omega}-1)(\bar{\omega}-\omega)} d\sigma d\tau. \tag{10}$$

利用变换  $\omega = \frac{1-i\zeta+1}{2\zeta-i}$ , 在公式(9), (10)中的

$$\omega(\omega-1) = \frac{1-i\zeta+1}{2\zeta-i} \left( \frac{1-i\zeta+1}{2\zeta-i} - 1 \right) = -\frac{z^2-1}{2(z-i)^2},$$

$$\begin{aligned} \omega(\omega-1)(\omega-\bar{\omega}) &= \frac{1-i\zeta+1}{2\zeta-i} \left( \frac{1-i\zeta+1}{2\zeta-i} - 1 \right) \left( \frac{1-i\zeta+1}{2\zeta-i} - \frac{1-i\bar{\zeta}+1}{2\bar{\zeta}-i} \right) = \\ &= \frac{(\zeta^2-1)(\zeta-z)}{2(z-i)(\zeta-i)^3}, \end{aligned}$$

作  $h = \omega \circ f \circ \omega^{-1}$ , 那么,  $h$  是上半平面到自身的拟共形映照, 且它的复特征为

$$\mu_h = \left( \frac{(\omega^{-1})'}{|(\omega^{-1})'|} \right)^2 \mu_f \circ \omega^{-1} = \frac{|\zeta-i|^4}{(\zeta-i)^4} \mu_f \circ \omega^{-1}.$$

这样公式(9)积分号内复特征经过变换后的增加因子为  $\frac{|\zeta-i|^4}{(\zeta-i)^4}$ , 公式(10)中积分号内复特征经过

变换后的增加因子为  $\frac{|\zeta-i|^4}{(\zeta-i)^4}$ 。此外, 由  $d\omega d\bar{\omega} = \frac{1}{|\zeta-i|^4} d\zeta d\bar{\zeta}$  可知,  $I_1, I_2$  中面积元素经过变换后增加的

因子为  $\frac{1}{|\zeta-i|^4}$ 。

将以上讨论代入公式(9), (10), 可得

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{z^2-1}{2\pi(z-i)^2} \iint_{|\zeta| < 1} \frac{2(z-i)(\zeta-i)^3}{(\zeta^2-1)(\zeta-z)} \frac{|\zeta-i|^4}{(\zeta-i)^4} \varphi(\zeta, t) \frac{1}{|\zeta-i|^4} d\xi d\eta = \\ &= \frac{-1}{\pi(z-i)^2} \iint_{|\zeta| < 1} \frac{(z^2-1)(z-i)}{(\zeta^2-1)(\zeta-z)(\zeta-i)} \varphi(\zeta, t) d\xi d\eta. \end{aligned}$$

又可得

$$\begin{aligned} \bar{\omega}(\bar{\omega}-1)(\bar{\omega}-\omega) &= \frac{1-i\bar{\zeta}+1}{2\bar{\zeta}-i} \left( \frac{1-i\bar{\zeta}+1}{2\bar{\zeta}-i} - 1 \right) \left( \frac{1-i\bar{\zeta}+1}{2\bar{\zeta}-i} - \frac{1-i\zeta+1}{2\zeta-i} \right) = \\ &= \frac{-(\bar{\zeta}^2-1)}{2(\bar{\zeta}+i)^2} \frac{i(\bar{\zeta}z-1)}{(z-i)(\bar{\zeta}+i)}, \end{aligned}$$

故可得

$$\begin{aligned} I_2 &= \frac{z^2-1}{2\pi(z-i)^2} \iint_{|\zeta| < 1} \frac{2i(z-i)(\bar{\zeta}+i)^3}{(1-\bar{\zeta}^2)(1-\bar{\zeta}z)} \frac{|\zeta-i|^4}{(\zeta-i)^4} \overline{\varphi(\zeta, t)} \frac{1}{|\zeta-i|^4} d\xi d\eta = \\ &= \frac{-1}{\pi(z-i)^2} \iint_{|\zeta| < 1} \frac{(z^2-1)(z-i)}{(1-\bar{\zeta}^2)(1-\bar{\zeta}z)(1-i\bar{\zeta})} \overline{\varphi(\zeta, t)} d\xi d\eta. \end{aligned}$$

此外, 根据公式(1), 令

$$G(\omega, t, s) = f^\mu((f^\mu)^{-1}(\omega, t), t+s),$$

根据公式(5), 令

$$g(z, t, s) = f^\mu((f^\mu)^{-1}(z, t), t+s),$$

并且公式(2)的  $F(\omega, t)$  与公式(6)的  $F(z, t)$  适合关系式

$$\begin{aligned} F(\omega, t) &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{G(\omega, t, s) - \omega}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1-i}{2s} \left( \frac{g(z, t, s) + 1}{g(z, t, s) - i} - \frac{z+1}{z-i} \right) = \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{g(z, t, s) - z}{s} \frac{1}{(g(z, t, s) - i)(z-i)} = -\frac{F(z, t)}{(z-i)^2}. \end{aligned}$$

即证明了公式(3)变成公式(7),定理1得证。

### 参考文献:

- [1] AHLFORS L V. Lectures on quasiconformal mapping[M]. Princeton: American Mathematical Society, 1966.
- [2] LEHTO V, VIRTANEN K. Quasiconformal mapping in the plane [M]. 2nd. New York: Springer, 1973.
- [3] 李忠. 拟共形映射及其黎曼曲面论中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [4] ASTALA K, IWANIEC T, MARTIN G. Elliptic partial differential equations and quasiconformal mappings in the plane[M]. Princeton: Princeton University Press, 2009.
- [5] BEURLING A, AHLFORS L. The boundary corresponding for quasiconformal mapping[J]. Acta Mathematica, 1956, 96: 125-142.
- [6] ASTALA K, NESI V. Composites and quasiconformal mappings: New optimal bounds in two dimensions[J]. Calculus of Variations and Partial Differential Equations, 2003, 18: 335-355. DOI: 10. 1007/s00526-003-0145-9.
- [7] DOUADY A, EARLE C J. Conformally natural extension of homeomorphisms of the circle[J]. Acta Mathematica, 1986, 15: 23-48.
- [8] JIANG Manman, LIU Lixin, YAO Hongyu. The Douady-Earle extension are not always harmonic[J]. Proceedings of the American Mathematical Society, 2018, 146(7): 2853-2865. DOI: 10. 1090/proc/13047.
- [9] EARLE C J. Conformally natural extension of vector fields from  $S^{n-1}$  to  $B^n$ [J]. Proceedings of the American Mathematical Society, 1988, 102(1): 145-149. DOI: 10. 1090/s0002-9939-1988-0915733-2.
- [10] 夏道行. 拟共形映照的参数表示[J]. 复旦学报(自然科学版), 1959(2): 323-329.
- [11] 伯茂仁克. 单叶函数[M]. 杨维奇, 译. 北京: 科学出版社, 1987.
- [12] HE Chengqi. A parametric representation of quasiconformal extensions[J]. Chinese Science Bulletin, 1980, 25(9): 721-724.
- [13] LIN Zhenlian, SHI Qingtian. Parametric representations of quasiconformal mappings[J]. Acta Mathematica Scientia, 2020, 40B(6): 1874-1882. DOI: 10. 1007/s10473-020-0616-5.
- [14] 林珍连. 拟共形映照的参数表示[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 691-693. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201810077.
- [15] GEHRING F W, REICH E. Area distortion of under quasiconformal mappings[J]. Annales Fennici Mathematici, 1966, 388: 1-14. DOI: 10. 5186/aasfm. 1966. 388.
- [16] ASTALA K. Area distortion of quasiconformal mappings[J]. Acta Mathematica, 1994, 173(1): 37-60. DOI: 10. 1007/BF02392568.
- [17] EREMENKO A, HAMILTON D H. On the area distortion by quasiconformal mappings[J]. Proceedings of the American Mathematical Society, 1995, 123(9): 2793-2797. DOI: 10. 1090/S0002-9939-1995-1283548-8.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 黄心中)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202311003



# Halin 图的无包含边染色

彭燕, 谈漪, 陈莉莉

(华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 探究给定最大度的 Halin 图的无包含边色数的上界, 通过分析极小反例图的结构, 在给定部分子图的染色下, 对剩余图进行特殊染色。结果表明: 最大度为  $\Delta$  的 Halin 图的无包含边色数不超过  $\Delta+2$ 。

**关键词:** Halin 图; 无包含边染色; 无包含边色数; 极小反例图

**中图分类号:** O 157.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2024)06-0812-04

## Inclusion-Free Edge Coloring of Halin Graph

PENG Yan, TAN Yi, CHEN Lili

(School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** The upper bound of the inclusion-free chromatic index of Halin graph with the given maximum degree is explored. By analyzing the structure of the minimal counterexample graph, the special coloring to the remaining graph is done under the coloring of the given partial subgraphs. The results show that the inclusion-free chromatic index of Halin graph with the maximum degree  $\Delta$  is not more than  $\Delta+2$ .

**Keywords:** Halin graph; inclusion-free edge coloring; inclusion-free chromatic index; minimal counterexample graph

### 1 预备知识

设  $G$  是简单无向图,  $V(G)$ ,  $E(G)$ ,  $\Delta(G)$  和  $\delta(G)$  分别表示图  $G$  的顶点集、边集、最大度和最小度, 映射  $\varphi: E(G) \rightarrow C = \{1, 2, 3, \dots, k\}$  为图  $G$  的一个正常边染色, 即对任意相邻边  $e_1$  和  $e_2$ , 有  $\varphi(e_1) \neq \varphi(e_2)$ 。对任意顶点  $v \in V(G)$ ,  $v$  关联的边的颜色集记为  $S_\varphi(v)$ , 即  $S_\varphi(v) = \{\varphi(e) \mid \text{边 } e \text{ 与顶点 } v \text{ 关联}\}$ 。

若图  $G$  存在一个正常的边染色  $\varphi$ , 且满足对任意边  $uv \in E(G)$ , 有  $S_\varphi(u) \not\subseteq S_\varphi(v)$  及  $S_\varphi(v) \not\subseteq S_\varphi(u)$ , 则称  $\varphi$  为图  $G$  的无包含边染色。使图  $G$  具有无包含边染色所需的最小颜色数称为图  $G$  的无包含边色数, 记为  $\chi'_c(G)$ 。

无包含边染色的概念是由 Przybyło 等<sup>[1]</sup> 于 2020 年提出的。实际上, Zhang<sup>[2]</sup> 在 2008 年就提出 Smarandachely 邻点边染色。Gu 等<sup>[3]</sup> 将边染色定义为严格邻点可区别边染色, 这类边染色是对邻点可区别边染色的推广。对于无孤立边的图  $G$ , 它的邻点可区别边染色是图  $G$  的一个正常边染色  $\varphi$ , 且满足对任意边  $uv \in E(G)$ , 有  $S_\varphi(u) \neq S_\varphi(v)$ 。使图  $G$  具有邻点可区别边染色所需的最小颜色数称为图  $G$  的邻点可区别边色数, 记为  $\chi'_a(G)$ 。

Zhang<sup>[2]</sup> 确定了路、圈、树、完全图及完全二部图的邻点可区别边色数, 提出猜想 1。

**猜想 1<sup>[2]</sup>** 设  $G$  是不为  $C_5$  的简单连通图, 且  $|V(G)| \geq 3$ , 则  $\chi'_a(G) \leq \Delta(G) + 2$ 。

**定理 1<sup>[4]</sup>** 设  $G$  是没有孤立边的图, 且  $\Delta(G) = 3$ , 则  $\chi'_a(G) \leq 5$ 。

收稿日期: 2023-11-03

通信作者: 陈莉莉(1986-), 女, 副教授, 博士, 主要从事图染色的研究。E-mail: lily60612@126.com。

基金项目: 中央高校基本科研业务经费专项资金资助项目(ZQN-903)

Balister 等<sup>[4]</sup>证明对于最大度为 3 的图、所有的二部图, 猜想 1 是成立的(定理 1)。Hatami<sup>[5]</sup>使用概率方法证明任意一个最大度  $\Delta \geq 10^{20}$  的图  $G$ , 有  $\chi'_a(G) \leq \Delta + 300$ 。AKbari 等<sup>[6]</sup>证明任意没有孤立边的图  $G$ ,  $\chi'_a(G) \leq 3\Delta$ , Zhang 等<sup>[7]</sup>将这个上界改进到  $2.5\Delta + 5$ 。Joret 等<sup>[8]</sup>证明当图  $G$  的最大度  $\Delta$  充分大时,  $\chi'_a(G) \leq \Delta + 19$ 。对于特殊图方面, 文献[9-12]得到更多的结果。

若图  $G$  的最小度  $\delta(G) \geq 2$ , 则  $\chi'_c(G) \geq \chi'_a(G)$ , 等号成立当且仅当  $G$  是正则图。Przybyło 等<sup>[1]</sup>证明若图  $G$  是完全二部图, 那么  $\chi'_c(G) = \left\lceil \left(1 + \frac{1}{\delta-1}\right)\Delta \right\rceil$ 。对最大度  $\Delta \geq 2$  的完全二部图  $K_{2,\Delta}$ , 将其中一条边剖分一次, 得到的新图记为  $\widehat{K}_{2,\Delta}$ (图 1)。由图 1 可知:  $\chi'_c(K_{2,\Delta}) = 2\Delta + 1$ 。

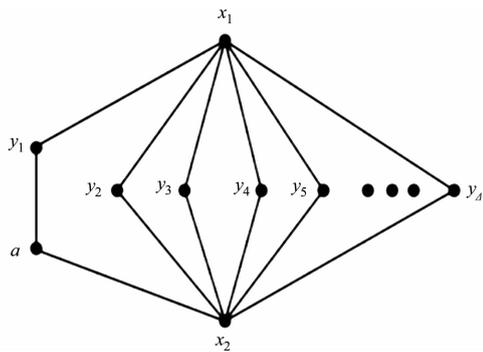


图 1 图  $\widehat{K}_{2,\Delta}$

Fig. 1  $\widehat{K}_{2,\Delta}$  diagram

Przybyło 等<sup>[1]</sup>提出一般图的无包含边色数的猜想, 即猜想 2。

**猜想 2<sup>[1]</sup>** 设图  $G$  是  $\delta(G) \geq 2$  且最大度为  $\Delta$  的连通图。如果  $G$  不同构于  $\widehat{K}_{2,\Delta}$ , 那么  $\chi'_c(G) \leq \left\lceil \left(1 + \frac{1}{\delta-1}\right)\Delta \right\rceil$ 。

Chen 等<sup>[13]</sup>和 Gu 等<sup>[3]</sup>分别独立地证明了猜想 2 对于次立方图是成立的, Chen 等<sup>[14]</sup>考虑二部图的无包含边染色, 得到猜想 2 对于  $(2, \Delta)$ -二部图是成立的。更多结果参考文献[14-16]。

Halin 图是一类平面图, 由树  $T$  和圈  $C$  构成, 树  $T$  没有 2 度顶点,  $C$  是连接树  $T$  上所有叶子点构成的圈, 且圈  $C$  是该平面图外部面的边界。对于 Halin 图  $G = T \cup C$ , 如果任意的顶点  $v \in V(G)$  不是树  $T$  的叶子点, 那么称顶点  $v$  为内点, 否则, 称顶点  $v$  为叶子点。定理 2 为 Halin 图的无包含边染色的结果。

**定理 2** 设图  $G$  是最大度为  $\Delta$  的 Halin 图, 则  $\chi'_c(G) \leq \Delta + 2$ 。

由于  $\Delta + 2 \leq \Delta + \left\lceil \frac{\Delta}{\delta-1} \right\rceil$ , 所以, 若定理 2 成立, 则猜想 2 对于 Halin 图是成立的。

## 2 定理 2 的证明

首先, 考虑次立方 Halin 图。由 Halin 图的定义, 次立方 Halin 图是 3-正则图。由于对任意的正则图  $G$ , 有  $\chi'_a(G) = \chi'_c(G)$ 。又由定理 1, 对任意无孤立边的次立方图  $G$ , 有  $\chi'_a(G) \leq 5$ , 从而得到引理 1。

**引理 1** 设图  $G = T \cup C$  是次立方 Halin 图, 则  $\chi'_c(G) \leq 5$ 。

对于次立方 Halin 图  $G$ , 其最大度  $\Delta$  为 3, 从而  $\chi'_c(G) \leq 5 = \Delta + 2$ , 定理 2 成立。因此, 始终假设 Halin 图  $G$  的最大度  $\Delta$  至少为 4。

**引理 2** 对任意的  $k \geq 4$ , 设 Halin 图  $G = T \cup C$  的最大度为  $k$ , 且只含一个内点, 则  $\chi'_c(G) \leq k + 2$ 。

证明: 假设顶点  $v$  是 Halin 图  $G$  的唯一内点,  $v_1, v_2, \dots, v_k$  是  $v$  的所有邻点, 不失一般性, 设圈  $C = v_1 v_2 \dots v_k$ 。对  $i = 1, 2, \dots, k$ , 令  $\varphi(vv_i) = i$ 。如果  $k$  是偶数, 则当  $i = 1, 3, \dots, k-1$  时, 令  $\varphi(v_i v_{i+1}) = k+1$ , 当  $i = 2, 4, \dots, k-2$  时, 令  $\varphi(v_i v_{i+1}) = k+2$ , 最后, 令  $\varphi(v_k v_1) = k+2$ ; 如果  $k$  是奇数, 则当  $i = 1, 3, \dots, k-2$  时, 令  $\varphi(v_i v_{i+1}) = k+1$ , 当  $i = 2, 4, \dots, k-1$  时, 令  $\varphi(v_i v_{i+1}) = k+2$ , 最后, 令  $\varphi(v_k v_1) = 2$ 。易验证,  $\varphi$  是图  $G$  的一个无包含边染色, 因此  $\chi'_c(G) \leq k + 2$ 。

均假设图  $G$  至少含有 2 个内点, 有引理 3。

**引理 3** 设 Halin 图  $G = T \cup C$  至少含 2 个内点, 则  $G$  中存在一个内点  $w$ ,  $w$  只有一个邻点是内点, 其余邻点都是树  $T$  的叶子点。

证明: 假设  $G$  中不存在这样的内点, 即任意内点的邻点中至少有 2 个是内点。设  $G$  的所有内点导出的子图为  $T'$ , 由假设可得  $\delta(T') \geq 2$ , 因此  $T'$  不是树。但是,  $T'$  是  $T$  的子图, 即  $T'$  是树, 矛盾。因此, 假设不成立。引理 3 得证。

称满足引理 3 的内点  $w$  为完美点。

**引理 4** 设 Halin 图  $G = T \cup C$  至少含 2 个内点, 且最大度  $\Delta \geq 4$ , 则  $\chi'_c(G) \leq \Delta + 2$ 。

证明:假设  $G = T \cup C$  是满足引理条件的极小反例。设  $w$  是图  $G$  的一个完美点,  $u$  是  $w$  的邻点中的唯一内点,  $v_1, v_2, \dots, v_k$  是  $w$  在圈  $C$  上的邻点, 对  $i = 1, \dots, k - 1, v_i v_{i+1} \in E(G)$ 。设  $v_1$  在圈上的另一个邻点为  $x, v_k$  在圈上的另一个邻点为  $y$ 。记  $x$  的邻点为  $v_1, x_1, x_2$ ;  $y$  的邻点为  $v_k, y_1, y_2$ 。不失一般性, 假设  $x_2, y_2$  在圈  $C$  上。完美点  $w$  及邻点, 如图 2 所示。假设  $F = \{1, 2, \dots, \Delta + 2\}$  为含有  $\Delta + 2$  种颜色的色集。

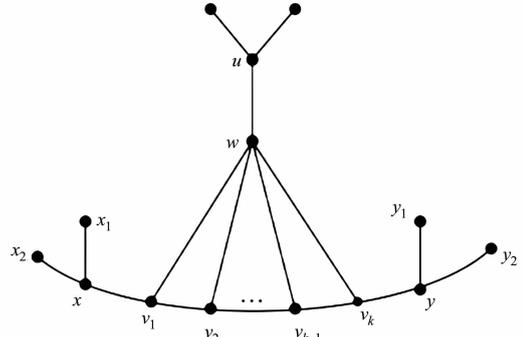


图 2 完美点  $w$  及邻点

Fig. 2 Perfect point  $w$  and adjacent points

**情形 1** 当  $d(w) = 3$  时, 令  $G' = G - \{v_1, v_2\} + \{xw, yw\}$ , 显然,  $G'$  仍是 Halin 图且  $|V(G')| < |V(G)|$ 。由  $G$  的极小性, 有  $\chi'_c(G') \leq \Delta(G') + 2 \leq \Delta + 2$ 。设  $\varphi'$  是定义在色集  $F$  上的  $G'$  的一个无包含边染色, 不失一般性, 假设  $\varphi'(xw) = a, \varphi'(yw) = b, \varphi'(wu) = c$ 。

首先, 对任意的边  $e \in E(G) \cap E(G')$ , 令  $\varphi(e) = \varphi'(e)$ 。对于边  $xv_1, yv_2$ , 令  $\varphi(xv_1) = a, \varphi(yv_2) = b$ 。因为  $S_\varphi(w) \not\subseteq S_{\varphi'}(u)$ , 所以  $\{a, b\}$  中至少存在一个颜色不在  $S_{\varphi'}(u)$  中, 不妨设  $a \notin S_{\varphi'}(u)$ 。将边  $wv_2$  染颜色  $a$ , 从而  $a \notin S_\varphi(u)$  但  $a \in S_\varphi(w)$ 。又因为  $d(w) \leq d(u)$ , 所以  $S_\varphi(u) \not\subseteq S_\varphi(w)$  且  $S_\varphi(w) \not\subseteq S_\varphi(u)$ 。

其次, 因为  $\Delta \geq 4$ , 所以  $\Delta + 2 \geq 6$ , 从而  $|F \setminus \{a, b, c, \varphi(xx_1), \varphi(xx_2)\}| \geq 1$ 。因此, 可以在  $F \setminus \{a, b, c, \varphi(xx_1), \varphi(xx_2)\}$  中选取一个颜色  $d$ , 将边  $wv_1$  染颜色  $d$ 。因为  $d \notin S_\varphi(x)$ , 但  $d \in S_\varphi(v_1)$ , 所以  $S_\varphi(v_1) \not\subseteq S_\varphi(x)$  且  $S_\varphi(x) \not\subseteq S_\varphi(v_1)$ 。

最后, 如果  $a \notin S_\varphi(y)$ , 则可以在  $F \setminus \{a, b, c, d\}$  中选一个颜色  $d_1$  对边  $v_1 v_2$  进行染色。若  $a \in S_\varphi(y)$ , 不妨设  $\varphi(yy_1) = a$ , 则可以在  $F \setminus \{a, b, c, d, \varphi(yy_2)\}$  选一个颜色  $d'_1$  对边  $v_1 v_2$  进行染色。易验证, 该染色  $\varphi$  是  $G$  的一个无包含边染色, 且使用颜色总数为  $\Delta + 2$ , 因此  $\chi'_c(G) \leq \Delta + 2$ , 与假设矛盾。

**情形 2** 当  $d(w) \geq 4$  时, 令  $G' = G - \{v_1, v_2, \dots, v_k\} + \{xw, yw\}$ , 显然,  $G'$  仍是 Halin 图且  $|V(G')| < |V(G)|$ 。由  $G$  的极小性, 可得  $\chi'_c(G') \leq \Delta(G') + 2 \leq \Delta + 2$ 。设  $\varphi'$  是定义在色集  $F$  上的  $G'$  的一个无包含边染色, 不失一般性, 假设  $\varphi'(xw) = a, \varphi'(yw) = b, \varphi'(wu) = c$ 。

首先, 对任意的边  $e \in E(G) \cap E(G')$ , 令  $\varphi(e) = \varphi'(e)$ 。对于边  $xv_1, wv_k, yv_k, wv_1$ , 令  $\varphi(xv_1) = \varphi(wv_k) = a, \varphi(yv_k) = \varphi(wv_1) = b$ 。因为  $S_\varphi(w) \not\subseteq S_{\varphi'}(u)$ , 所以  $\{a, b\}$  中至少存在一个颜色不在  $S_{\varphi'}(u)$  中, 不妨设  $a \notin S_{\varphi'}(u)$ 。同理, 因为  $S_{\varphi'}(u) \not\subseteq S_{\varphi'}(w)$ , 所以  $S_{\varphi'}(u)$  中至少存在一个颜色不在  $\{a, b, c\}$  中, 记这些颜色中的一个为  $\gamma$ 。由于  $|\{wv_2, \dots, wv_{k-1}\}| = k - 2$ , 且  $d(w) = k + 1 \leq \Delta$ , 因此  $k - 2 \leq \Delta - 1 - 2 = \Delta - 3$ 。又因为  $|F \setminus \{a, b, c, \gamma\}| \geq \Delta + 2 - 4 = \Delta - 2$ , 所以可以用  $F \setminus \{a, b, c, \gamma\}$  中的不同颜色分别对边  $wv_2, \dots, wv_{k-1}$  进行染色。不失一般性, 对  $i = 2, 3, \dots, k - 1$ , 令  $\varphi(wv_i) = d_i$ 。在当前染色下,  $S_\varphi(u) \not\subseteq S_\varphi(w)$  且  $S_\varphi(w) \not\subseteq S_\varphi(u)$ 。

其次, 假设  $\varphi(xx_1) = c_1, \varphi(xx_2) = c_2, \varphi(yy_1) = c_3, \varphi(yy_2) = c_4$ 。易知,  $|F \setminus S_\varphi(w)| \geq 2$ , 不妨假设  $\{\alpha, \beta\} \in F \setminus S_\varphi(w)$ 。

如果  $\{c_1, c_2\} = \{\alpha, \beta\}$ , 则  $S_\varphi(x) = \{a, \alpha, \beta\}$ 。由于  $b \in S_\varphi(w)$ , 因此  $b \notin \{\alpha, \beta\}$ , 从而可以使用  $\{\alpha, \beta\}$  中的任意一个颜色给边  $v_1 v_2$  染色, 使得  $S_\varphi(x) \not\subseteq S_\varphi(v_1)$  且  $S_\varphi(v_1) \not\subseteq S_\varphi(x)$ 。如果  $\{c_1, c_2\} \neq \{\alpha, \beta\}$ , 不失一般性, 不妨设  $\alpha \notin \{c_1, c_2\}$ , 那么可以使用  $\alpha$  给边  $v_1 v_2$  染色, 使得  $S_\varphi(x) \not\subseteq S_\varphi(v_1)$  且  $S_\varphi(v_1) \not\subseteq S_\varphi(x)$ 。同理, 可以使用  $\{\alpha, \beta\}$  中至少一个颜色给边  $v_{k-1} v_k$  染色, 使得  $S_\varphi(y) \not\subseteq S_\varphi(v_k)$  且  $S_\varphi(v_k) \not\subseteq S_\varphi(y)$ 。

如果  $\alpha, \beta$  均可以给边  $v_1 v_2$  染色, 使得  $S_\varphi(x) \not\subseteq S_\varphi(v_1)$  且  $S_\varphi(v_1) \not\subseteq S_\varphi(x)$ , 则先给边  $v_{k-1} v_k$  染色, 然后交替使用  $\alpha, \beta$  依次对边  $v_{k-2} v_{k-1}, v_{k-3} v_{k-2}, \dots, v_1 v_2$  进行染色, 使其满足  $\varphi(v_{k-2} v_{k-1}) \neq \varphi(v_{k-1} v_k)$ 。如果  $\alpha, \beta$  中只有一个颜色可以给边  $v_1 v_2$  染色, 使得  $S_\varphi(x) \not\subseteq S_\varphi(v_1)$  且  $S_\varphi(v_1) \not\subseteq S_\varphi(x)$ , 则  $|\{\alpha, \beta\} \cap \{c_1, c_2\}| = 1$ 。不失一般性, 假设  $\alpha = c_1$ , 则  $\beta \neq c_2$ 。如果  $b \neq c_2$ , 则  $\alpha, \beta$  均可以给边  $v_1 v_2$  染色, 与假设矛盾, 故  $b = c_2$ 。交换  $wv_1$  和  $wv_2$  的颜色, 即  $\varphi(wv_1) = d_2, \varphi(wv_1) = b$ 。交换后,  $\alpha, \beta$  均可以给边  $v_1 v_2$  染色。因此, 先给边  $v_{k-1} v_k$  染色, 然后交替使用  $\alpha, \beta$  依次对边  $v_{k-2} v_{k-1}, v_{k-3} v_{k-2}, \dots, v_1 v_2$  进行染色, 使其满足  $\varphi(v_{k-2} v_{k-1}) \neq \varphi(v_{k-1} v_k)$ 。

综上, 构造图  $G$  的一个边染色  $\varphi$ , 得到  $S_\varphi(u) \not\subseteq S_\varphi(w)$  且  $S_\varphi(w) \not\subseteq S_\varphi(u)$ ,  $S_\varphi(x) \not\subseteq S_\varphi(v_1)$  且  $S_\varphi(v_1) \not\subseteq S_\varphi(x)$  及  $S_\varphi(y) \not\subseteq S_\varphi(v_k)$  且  $S_\varphi(v_k) \not\subseteq S_\varphi(y)$ 。因为  $b \neq d_2, a \neq d_{k-1}, d_i \neq d_{i+1}, i=2, 3, \dots, k-2$ , 所以对  $i=1, 2, \dots, k-1$ , 有  $S_\varphi(v_i) \not\subseteq S_\varphi(v_{i+1})$  且  $S_\varphi(v_{i+1}) \not\subseteq S_\varphi(v_i)$ 。最后, 由于  $\alpha, \beta$  至少有一个属于  $S_\varphi(v_i)$ , 而  $\alpha, \beta$  均不属于且  $S_\varphi(w)$ , 因此对  $i=1, 2, \dots, k$ , 有  $S_\varphi(v_i) \not\subseteq S_\varphi(w)$  且  $S_\varphi(w) \not\subseteq S_\varphi(v_i)$ 。因此,  $\varphi$  是  $G$  的一个无包含边染色, 且使用颜色总数为  $\Delta+2$ , 即  $\chi'_c(G) \leq \Delta+2$ , 与假设矛盾。引理 4 得证。

综合引理 1、引理 2 和引理 4, 定理 2 得证。

### 3 结束语

通过研究极小反例 Halin 图  $G$  的子图的染色结构, 得到图  $G$  的  $\Delta+2$  种颜色的无包含边染色, 与  $G$  是极小反例矛盾, 从而证明  $G$  的无包含边色数不超过  $\Delta+2$ 。

#### 参考文献:

- [1] PRZYBYLO J, KWASNY J. On the inclusion chromatic index of a graph[J]. Journal of Graph Theory, 2021, 97(1): 5-20. DOI:10.1002/jgt.22636.
- [2] ZHANG Zhongfu. The Smarandachely adjacent vertex edge coloring of graphs[R]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2008: 1-13.
- [3] GU Jing, WANG Weifan, WANG Yiqiao, et al. Strict neighbor-distinguishing index of subcubic graphs[J]. Graphs and Combinatorics, 2021, 37: 355-368. DOI:10.1007/s00373-020-02246-w.
- [4] BALISTER P N, GYORI E, LEHEL J, et al. Adjacent vertex distinguishing edge-colorings[J]. SIAM Journal on Discrete Mathematics, 2007, 21(1): 237-250. DOI:10.1137/S0895480102414107.
- [5] HATAMI H.  $\Delta+300$  is a bound on the adjacent vertex distinguishing edge chromatic number[J]. Journal of Combinatorial Theory Series B, 2005, 95: 246-256. DOI:10.1016/j.jctb.2005.04.002.
- [6] AKBARI S, BDKHORI H, NOSTRATI N. R-strong edge colorings of graphs[J]. Discrete Mathematics, 2006, 306: 3005-3010. DOI:10.1016/j.disc.2004.12.027.
- [7] ZHANG Lianzhu, WANG Weifan, LIH Kowei. An improved upper bound on the adjacent vertex distinguishing chromatic index of a graph[J]. Discrete Applied Mathematics, 2014, 162: 348-354. DOI:10.1016/j.dam.2013.08.038.
- [8] JORET G, LOCHET W. Progress on the adjacent vertex distinguishing edge coloring conjecture[J]. SIAM Journal on Discrete Mathematics, 2020, 34(4): 2221-2238. DOI:10.1137/18M1200427.
- [9] BU Yuehua, LIH KW, WANG Weifan. Adjacent vertex-distinguishing edge-colorings of planar graphs with girth at least six[J]. Discussiones Mathematicae Graph Theory, 2011, 31(3): 429-439. DOI:10.7151/dmgt.1556.
- [10] YAN Chengchao, HUANG Danjun, CHEN Dong, et al. Adjacent vertex distinguishing edge colorings of planar graphs with girth at least five[J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2014, 28(4): 893-909. DOI:10.1007/s10878-012-9569-5.
- [11] WANG Weifan, WANG Yiqiao. Adjacent vertex-distinguishing edge coloring of  $K_4$ -minor-free graphs[J]. Applied Mathematics Letters, 2011, 24(12): 2034-2037. DOI:10.1016/j.aml.2011.05.038.
- [12] WANG Yi, CHENG Jian, LUO Rong, et al. Adjacent vertex-distinguishing edge coloring of 2-degenerate graphs [J]. Journal of Combinatorial Optimization, 2016, 31: 874-880. DOI 10.1007/s10878-014-9796-z.
- [13] CHEN Lili, LI Yanyi. A new proof for a result on the inclusion chromatic index of subcubic graphs[J]. Axioms, 2022, 11: 33. DOI:10.3390/axioms11010033.
- [14] CHEN Lili, LI Yanyi, ZHOU Xiangqian. The inclusion-free edge-colorings of  $(3, \Delta)$ -bipartite graphs[J]. Discrete Applied Mathematics, 2022, 321: 159-164. DOI:10.1016/j.dam.2022.06.039.
- [15] GU Jing, WANG Yiqiao, WANG Weifan, et al. Strict neighbor-distinguishing index of  $K_4$ -minor-free graphs[J]. Discrete Applied Mathematics, 2023, 329: 87-95. DOI:10.1016/j.dam.2023.01.017.
- [16] JING Puning, WANG Weifan, WANG Yiqiao, et al. Strict neighbor-distinguishing edge coloring of planar graphs [J]. Scientia Sinica Mathematica, 2023, 53(3): 523-542. DOI:10.1360/SSM-2021-0178.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 黄心中)

# 第 45 卷总目次

## 第 1 期

植物脲酶诱导碳酸盐沉淀改良土体研究进展 ..... 李明东, 张诗艾, 杨远江, 徐浩峰, 陶雪晴, 何稼 (1)

加速度传感器的振动筛螺栓松动故障诊断系统 ..... 朱来发, 金花雪, 范伟, 刘斌 (10)

基于物方差动共焦轴向测量引导的显微镜自动对焦方法 ..... 海涌杰, 易定容, 黄彩虹, 袁涛, 梅小华 (16)

物有所值视角下工程招投标评定分离定标办法 ..... 祁神军, 陈晶晶, 汪丫, 詹朝曦 (22)

夏热冬冷地区带防雨天井的农宅夏季室内环境实测分析 ..... 林姝颖, 赖婉玲, 吴正旺 (29)

一株多药耐药 *Comamonas kerstersii* 细菌的基因组分析(英文) ..... 王慧, 明德松, 王明席 (35)

耦合 MOP-PLUS 模型的库车市 LUCC 趋势与景观生态安全评价  
..... 路甜甜, 郭玉川, 姚磊, 王会静, 白运保, 张子惠 (47)

伊犁河谷“三生”空间景观生态风险时空演变与多情景模拟 ..... 吴常蕊, 王宏卫, 罗魁, 郑旭东, 闫晓梅 (61)

中国旅游业碳排放时空特征及影响因素分解 ..... 邹利林, 刘佳玲, 王建英 (71)

胎儿大脑三维表面重建算法 ..... 蔡凯雄, 王强, 陈添峰, 郑力新 (78)

考虑数字孪生的电力变压器磁场与电气参数可视化分析 ..... 叶志军, 贾灏, 张钟炼, 罗继亮 (86)

求解耦合非线性 Schrödinger-Boussinesq 方程的三角标量辅助变量方法 ..... 郭姣姣, 庄清渠 (98)

Klein-Gordon-Schrödinger 方程的几种差分格式及比较 ..... 林周瑾, 汪佳玲, 霍昱安 (108)

## 第 2 期

功能可恢复 RCS 混合框架结构研究进展 ..... 刘阳, 钟沛杰, 门进杰, 陈云, 刘小娟, 黄玉佳 (121)

CO<sub>2</sub> 封存诱发近断层活化机制研究进展 ..... 禹海涛, 张改, 闫晓 (136)

结构拓扑优化数值方法研究进展 ..... 石顺义, 郭新泽, 周克民 (150)

框架填充墙平面外抗震性能数值模拟 ..... 孟杰, 郭子雄, 谢鑫尧 (158)

节段料石拼接构造对 SCFST 柱抗震性能影响有限元分析 ..... 杜耀峰, 刘杰, 苏龙辉, 陈业伟, 刘阳, 黄玉佳 (166)

预应力张弦梁钢支撑系统力学性能分析 ..... 郑金伙, 严丰佐, 方四宝, 张朝慧, 杨钦聪, 李欣, 李海锋 (175)

不均匀锈蚀钢筋截面分布特征与拉伸数值模拟 ..... 何宝睿, 刘小娟, 苏龙辉, 洪秀君, 陈业伟 (186)

地铁车站叠合墙内衬早龄期温度与应变演化规律 ..... 陈春超, 陈士海, 陈建福, 张瀚武, 曾凡福 (193)

- 轴向力对剪切钢板阻尼器抗震性能影响的数值模拟 ..... 方庆田, 王照然, 宁西占 (201)
- 双金属复合管海水海砂混凝土短柱的轴压性能与承载力分析 ..... 叶勇, 汤钜荣, 陈业伟, 苏龙辉, 洪秀君 (210)
- 水位升降和潮汐水位作用下围堰的安全稳定性 ..... 韩贇, 朱浩杰, 刘小刚, 黄山景 (219)
- 列车轴质量和土工格室加固道砟对路基沉降的影响 ..... 姚学昌, 林福宽 (226)
- 非高斯波浪作用下深水高墩的非线性随机振动 ..... 张睿哲, 陈林聪 (233)
- 长期堆载预压处理软土地基效果评价 ..... 汪智慧, 辛全明, 孔志军, 蔡奇鹏, 余小康, 曹洋, 涂兵雄 (241)
- 碱激发富镁镍渣淤泥固化土 USC 及机理分析 ..... 许利惟, 陈韩, 蒋远, 吴毅轩, 刘雨菲, 毛文官 (248)
- 玻璃粉水泥基涂层材料的制备及防腐性能 ..... 王百公 (255)
- 厦门集美杏林湾水库底泥重金属污染状况评价 ..... 唐雪平, 李静, 庄马展, 李飞, 周真明 (262)
- 质量法测定植物营养液中电导率可行性 ..... 张华宇, 周帆, 廖晓斌, 刘新月, 朱家铭, 张嘉禾 (271)
- 应用 LMDI 模型的江西省交通运输业碳排放驱动力分析 ..... 刘安, 习明星, 邵志超, 李雪洁 (276)
- “双碳”目标下建筑节能减排研究进展可视化分析 ..... 彭一达, 秦旋, 刘志城 (283)
- 绿色金融支持我国东部地区 BIPV 建筑发展评价及耦合分析 ..... 叶青, 李悦, 魏心融 (290)
- 跨学科工程管理专业国际化人才培养模式 ..... 侯祥朝 (297)

### 第 3 期

- 电泳共沉积法制备金刚石/ $Al_2O_3$ /玻璃复合涂层的工艺 ..... 薛志萍, 陆静, 毛现艳, 黄身桂, 郭桦 (303)
- 生物力学约束下的多孔结构鞋中底设计 ..... 朱粉英, 程华钦, 刘斌 (314)
- 速度矢量场二阶滑模无人艇引导律 ..... 温锦元, 黄宴委 (324)
- 花岗岩残积土抗剪强度与微观结构特征 ..... 李扬波, 李如玥, 石熊, 陈怿旸, 吴波, 林炼伟 (332)
- 壳聚糖纳米乳剂对火龙果保鲜效果分析  
..... 郎丹, 夏秀红, 张彩云, 陈思妤, 杨润雨, 马宁, 牛荣丽, 唐健红, 杜志棍 (339)
- 香蕉 HOS15 基因的鉴定及枯萎病菌胁迫下的表达分析  
..... 王子澍, 王明元, 陈科霖, 贾幸宸, 卫瑾怡, 荣航, 唐易 (351)
- 全龄友好视角下厦门居住小区户外体育空间布局的舒适性模拟 ..... 叶静怡, 吴正旺 (357)
- 游径感知视角下传统村落文旅空间景观质量分析 ..... 林逸珊, 杨鸿辉, 陈铮衍, 丁铮 (370)
- 天山北坡经济带城乡聚落格局变化与影响因素分析 ..... 郑旭东, 王宏卫, 罗魁, 吴常蕊, 闫晓梅 (383)
- Comamonas kerstersii* 细菌致病性的基因组分析(英文) ..... 王慧, 明德松, 王明席 (394)
- 具有季节交替的  $n$  维 Gilpin-Ayala 竞争模型的动力学 ..... 陈梅香, 谢溪庄 (417)

## 第 4 期

- 废水中离子液体高级氧化降解研究进展 ..... 陈晓缘, 金春英, 林金清 (423)
- 采用 Cell-SELEX 技术的核酸适配体在肿瘤靶向治疗的研究进展  
..... 成志云, 陈佳怡, 白如玉, 杨会勇, MOHSAN Ullah, 刁勇 (439)
- 多维感知视角下的多元景观研究进展 ..... 邱坚珍, 林嘉明, 李雅婷, 魏童 (445)
- 大客车尾翼的数值模拟与风洞试验 ..... 杨永柏, 王靖宇, 庄国华 (454)
- 概率预测强化学习下非结构环境机械臂变阻抗力跟踪控制 ..... 董梓呈, 胡伟石, 邵辉, 郭霖 (461)
- 机器人石材雕刻粗加工能耗建模与优化分析 ..... 黄吉祥, 尹方辰, 黄身桂, 张舜德, 顾立志 (471)
- 温湿耦合循环对 SBS 改性沥青胶浆的性能影响 ..... 谭波, 樊雨竹, 李青, 谢恩连, 刘敬霜 (478)
- 采用层次分析法的香港地区历史建筑遗产保护价值评价 ..... 李子莹, 杨晓翔 (487)
- 粤港澳大湾区大气碳污协同减排水平评估 ..... 和思楠, 石龙宇 (494)
- 艾比湖流域 LUCC 驱动的碳储量时空动态特征与多情景预测  
..... 布威阿依谢姆·吐合提, 阿布都热合曼·哈力克, 姚凯旋, 魏倩倩, 姚磊, 唐华, 罗健梅, 段越帆 (501)
- 多特征融合的焊缝图像多标签分类算法 ..... 牛顿, 林宁, 林振超, 黄凯, 王合佳, 郑力新 (514)
- 非局部 Gray-Scott 模型的二阶线性化差分格式 ..... 陈心妍, 张馨心, 蔡耀雄 (524)
- 非线性 Schrödinger 方程的龙格库塔配点格式 ..... 姚梦丽, 滕宇航, 赖艺颖, 翁智峰 (534)

## 第 5 期

- 外场强化作用下分子筛合成的研究进展 ..... 许浪, 王银亮, 齐婷婷, 初广文, 邹海魁, 孙宝昌 (543)
- 超临界 CO<sub>2</sub> 流体技术制备脱细胞外基质材料及其生物医学应用 ..... 吴冰, 段又愈, 陈爱政 (551)
- 微生物-电极修饰及影响电合成转化 CO<sub>2</sub> 过程的研究进展 ..... 解一诺, 李逸鑫, 王远鹏 (559)
- 纳米结构石墨相氮化碳用于 CO<sub>2</sub> 催化转化的研究进展 ..... 王文栋, 王轶楠, 饶海彬, 郭芳松, 詹国武 (575)
- 维生素 B<sub>6</sub> 的合成代谢及其生产应用 ..... 李丹妮, 郑忠亮 (588)
- 马来松香聚乙二醇酯表面活性剂的制备及性能分析 ..... 王翰文, 杨斌, 苏江波, 饶小平 (596)
- 一例钙金属-有机骨架的合成及其结构与性质分析  
..... 王伟娟, 黄丽丽, 林知秋, 卢冬飞, 史荣会, 刘耀, 洪俊明 (603)
- 多拷贝 *pucBA* 基因在沼泽红假单胞菌光合生长中的作用 ..... 林若欣, 赵晓岚, 赵春贵, 杨素萍 (610)
- 沼泽红假单胞菌 CGA009 砷调控蛋白(ArsR)的调控作用 ..... 金春英, 崔亮, 陈勇男, 杨素萍, 赵春贵 (618)
- 产灵菌红素沙雷氏菌 R18 的鉴定及基因组特性 ..... 陈明霞, 邢元军, 李和阳, 施俊豪 (626)

金线莲多糖通过抑制 NF- $\kappa$ B 信号通路对糖尿病小鼠肾损伤的改善作用

..... 盛世美, 张建刚, 陈焯, 戴招龙, 李乐, 刘青 (635)

乙二醇对低共熔溶剂改性木质素制酚醛树脂胶黏剂的影响 ..... 甘林火, 湛云, 严思恩, 何昌雍 (642)

纤维素对活性炭孔结构的影响 ..... 宋磊, 夏嘉誉, 丁闻军 (649)

红树林来源细菌抑菌活性及其增肥潜力评估 ..... 杨道茂, 周钰焯, 李嘉欣, 易家乐, 杨勤伟, 黄康隆 (654)

三峡库区源头溪流湾滩河浮游植物群落特征 ..... 陈焯焯, 孙荣, 杨瑛, 胡家榕, 代晓涵 (661)

鹿茸菇液体菌种培养过程中生理指标的变化规律 ..... 彭汇涵, 于海玲, 王明元, 杨苗, 万雨欣 (667)

不同干燥方式对鹿茸菇品质的影响 ..... 于海玲, 汪依霓, 万雨欣, 杨苗, 彭汇涵, 王明元, 刘建福 (673)

膜分离精度对再造烟叶提取液的截留影响 ..... 赖傲楠, 武士杰, 李淑纯, 周树锋 (681)

华侨大学厦门校区鸟类多样性的时空分布格局 ..... 罗湘, 孙荣, 陈焯焯 (688)

## 第 6 期

图像分割引导的散堆工件结构光三维位姿估计 ..... 邓君, 李娜, 王亚凯, 高振国 (696)

新型双管水压致裂法地应力测试装置及其应用

..... 常方强, 梁潇洋, 黄梓焯, 梁康康, 全露龙, 曹亚南, 常方伟 (706)

桥面水马布置对大跨度悬索桥涡激振动的影响 ..... 周椿祺, 周光伟, 陈昌萍 (712)

采用 WSR 方法论的塔吊坍塌事故安全评价方法 ..... 祁神军, 汪丫, 陈晶晶, 张子晨 (721)

厦门杏林湾水库底泥有机质和营养盐的分布特征与来源及污染评价

..... 李静, 唐雪平, 庄马展, 李飞, 周真明 (730)

厦门营平近代骑楼楼梯间热压通风对夏季室内热环境的影响 ..... 黄鹭红, 梁露丹, 石悦含 (740)

肝细胞癌铁死亡特征基因的 ceRNA 调控网络构建及分析 ..... 朱亚玲, 方杉杉, 黎祎杰, 徐先祥, 刁勇 (746)

虾青素复合纳米颗粒 Pickering 乳液的制备及评价

..... 郑秀梅, 杜鑫, 柳培忠, 虞文熙, 吴振, 王立强, 侯志勇 (756)

改进 YOLO 的 X 射线管道焊缝检测算法 ..... 王合佳, 林宁, 林振超, 黄凯, 牛顿, 郑力新 (766)

新疆新型城镇化发展的时空差异及协调水平 ..... 刘硕, 张永福, 刘永强 (776)

中国省域数字经济发展水平测度与时空差异及影响因素分析 ..... 刘珂, 吕书龙, 刘文丽, 黄文彬 (789)

动态多尺度决策信息系统局部最优尺度的更新规律 ..... 陈应生, 李进金 (800)

Douady-Earle 延拓中用到的拟共形映照参数表示 ..... 林珍连 (808)

Halin 图的无包含边染色 ..... 彭燕, 谈漪, 陈莉莉 (812)

第 45 卷总目次 ..... (I ~ X)

# Total Contents of Vol. 45

## No. 1

Research Progress of Soil Improvement by Plant Urease Induced Carbonate Precipitation .....	LI Mingdong, ZHANG Shiai, YANG Yuanjiang, XU Haofeng, TAO Xueqing, HE Jia (1)
Fault Diagnosis System for Bolt Loosening in Vibrating Screen Based on Acceleration Sensor .....	HU Laifa, JIN Huaxue, FAN Wei, LIU Bin (10)
Microscope Automatic Focusing Method Based on Height-Guidance of Object-Side Differential Confocal Axial Measurement .....	HAI Yongjie, YI Dingrong, HUANG Caihong, YUAN Tao, MEI Xiaohua (16)
Assessment Separation Method for Engineering Bidding Evaluation From Perspective of Value for Money .....	QI Shenjun, CHEN Jingjing, WANG Ya, ZHAN Zhaoxi (22)
Measurement and Analysis of Summer Indoor Environment of Farmhouse With Rainproof Patio in Hot Summer and Cold Winter Regions .....	LIN Shuying, LAI Wanling, WU Zhengwang (29)
Genomic Insights of A Multi-Drug Resistant <i>Comamonas kerstersii</i> Isolate .....	WANG Hui, MING Desong, WANG Mingxi (35)
LUCC Trend and Landscape Ecological Security Evaluation in Kucha City through Coupled MOP-PLUS Model .....	LU Tiantian, GUO Yuchuan, YAO Lei, WANG Huijing, BAI Yunbao, ZHANG Zihui (47)
Spatiotemporal Evolution and Multi Scenario Simulation of Ecological Risks in "Three Lives" Spatial Landscape of Ili River Valley .....	WU Changrui, WANG Hongwei, LUO Kui, ZHENG Xudong, YAN Xiaomei (61)
Spatial-Temporal Characteristics and Decomposition of Influencing Factors of Carbon Emissions of China's Tourism Industry .....	ZOU Lilin, LIU Jialing, WANG Jianying (71)
Fetal Brain Three-Dimensional Surface Reconstruction Algorithm .....	CAI Kaixiong, WANG Qiang, CHEN Tianfeng, ZHENG Lixin (78)
Visualization Analysis of Magnetic Field and Electrical Parameters of Power Transformer Considering Digital Twin .....	YE Zhijun, JIA Hao, ZHANG Zhonglian, LUO Jiliang (86)
Trigonometric Scalar Auxiliary Variable Method for Coupled Nonlinear Schrödinger-Boussinesq Equation .....	GUO Jiaojiao, ZHUANG Qingqu (98)
Several Difference Schemes and Comparisons for Klein-Gordon-Schrödinger Equation .....	LIN Zhoujin, WANG Jialing, HUO Yu'an (108)

## No. 2

- State-of-the-Art of Resilient RCS Hybrid Frame Structure  
 ..... LIU Yang, ZHONG Peijie, MEN Jinjie, CHEN Yun, LIU Xiaojuan, HUANG Yujia (121)
- Research Progress on Mechanism of Near-Fault Reactivation Induced by CO<sub>2</sub> Geological Storage  
 ..... YU Haitao, ZHANG Gai, YAN Xiao (136)
- Research Progress in Numerical Methods of Structural Topology Optimization  
 ..... SHI Shunyi, GUO Xinze, ZHOU Kemin (150)
- Numerical Simulation of Out-of-Plane Seismic Performance of Frame Infilled Wall  
 ..... MENG Jie, GUO Zixiong, XIE Xinyao (158)
- Finite Element Analysis of Influence of Segment-Stone Splicing Structure on Seismic Performance of SCFST Columns ..... DU Yaofeng, LIU Jie, SU Longhui, CHEN Yewei, LIU Yang, HUANG Yujia (166)
- Analysis of Mechanical Properties of Steel Support System for Prestressed String Beams  
 ..... ZHENG Jinhua, YAN Fengzuo, FANG Sibao,  
 ZHANG Chaohui, YANG Qincong, LI Xin, LI Haifeng (175)
- Cross-Section Distribution Feature and Tensile Numerical Simulation of Non-Uniform Corroded Steel Bars  
 ..... HE Baorui, LIU Xiaojuan, SU Longhui, HONG Xiujun, CHEN Yewei (186)
- Early-Age Temperature and Strain Evolution of Composite Wall Lining in Subway Station  
 ..... CHEN Chunchao, CHEN Shihai, CHEN Jianfu, ZHANG Hanwu, ZENG Fanfu (193)
- Numerical Simulation on Seismic Performance of Shear Steel Panel Damper Under Axial Force  
 ..... FANG Qingtian, WANG Zhaoran, NING Xizhan (201)
- Analysis on Axial Compression Performance and Bearing Capacity of Seawater Sea Sand Concrete-Filled Bimetallic Tube Short Columns ..... YE Yong, TANG Jurong, CHEN Yewei, SU Longhui, HONG Xiujun (210)
- Safety and Stability of Cofferdam Under Effects of Rising and Falling of Water Level and Tide Level  
 ..... HAN Yun, ZHU Haojie, LIU Xiaogang, HUANG Shanqing (219)
- Influence of Train Axle Mass and Geocell Reinforcement Ballast on Roadbed Settlement  
 ..... YAO Xuechang, LIN Fukuan (226)
- Nonlinear Random Vibration of Deep-Water-High-Pier Under Non-Gaussian Wave Action  
 ..... ZHANG Rongzhe, CHEN Lincong (233)
- Evaluation of Long-Term Preloading Effects on Soft Soil Foundation  
 ..... WANG Zhihui, XIN Quanming, KONG Zhijun,  
 CAI Qipeng, SHE Xiaokang, CAO Yang, TU Bingxiong (241)
- USC and Mechanism Analysis of Alkali-Activated Magnesium-Rich Nickel Silt-Cured Soil  
 ..... XU Liwei, CHEN Han, JIANG Yuan, WU Yixuan, LIU Yufei, MAO Wengong (248)
- Preparation and Anti-Corrosion Performance of Glass Powder Cement-Based Coating Material  
 ..... WANG Baigong (255)
- Evaluation of Heavy Metal Pollution Status of Sediment in Xinglin Bay Reservoir Jimei Xiamen  
 ..... TANG Xueping, LI Jing, ZHUANG Mazhan, LI Fei, ZHOU Zhenming (262)

- Feasibility of Mass Method to Measure Electrical Conductivity Rate of Plant Nutrient Solution  
 ..... ZHANG Huayu, ZHOU Fan, LIAO Xiaobin, LIU Xinyue, ZHU Jiaming, ZHANG Jiahe (271)
- Driving Force Analysis of Transportation Industry Carbon Emissions in Jiangxi Province Using LMDI Model  
 ..... LIU An, XI Mingxing, SHAO Zhichao, LI Xuejie (276)
- Visualizaion Analysis of Research and Development of Building Energy Conservation and Emission  
 Reduction Under “Dual Carbon” Goal ..... PENG Yida, QIN Xuan, LIU Zhicheng (283)
- Evaluation and Coupling Analysis of Green Finance to Support Development of BIPV Buildings in Eastern China  
 ..... YE Qing, LI Yue, WEI Xinrong (290)
- Training Mode of International Talents of Engineering Management Major Based on Interdisciplinary  
 ..... HOU Xiangchao (297)

### No. 3

- Preparation of Diamond/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ /Glass Composite Coating by Electrophoretic Co-Deposition Method  
 ..... XUE Zhiping, LU Jing, MAO Xianyan, HUANG Shengui, GUO Hua (303)
- Design of Porous Structure Midsole Under Biomechanical Constraints  
 ..... ZHU Fenyong, CHENG Huaqin, LIU Bin (314)
- Second-Order Sliding Mode Guidance Law in Velocity Vector Field for Unmanned Surface Vessel  
 ..... WEN Jinyuan, HUANG Yanwei (324)
- Shear Strength and Microstructure Characteristics of Granite Residual Soil  
 ..... LI Yangbo, LI Ruyue, SHI Xiong, CHEN Yiyang, WU Bo, LIN Lianwei (332)
- Analysis of Preservation Effect of Chitosan Nanoemulsion on Pitaya  
 ..... LANG Dan, XIA Xiuhong, ZHANG Caiyun, CHEN Siyu,  
 YANG Runyu, MA Ning, NIU Rongli, TANG Jianhong, DU Zhigun (339)
- Identification of Banana *HOS15* Gene and Expression Analysis Under Stress of Fusarium Wilt  
 ..... WANG Zishu, WANG Mingyuan, CHEN Kelin,  
 JIA Xingchen, WEI Jinyi, RONG Hang, TANG Yi (351)
- Comfort Simulation on Layout of Outdoor Sports Space in Xiamen City Residential Quarters From  
 Age-Friendly Perspective ..... YE Jingyi, WU Zhengwang (357)
- Analysis on Landscape Quality of Cultural Tourism Space in Traditional Villages Under Trail Perception  
 Perspective ..... LIN Yishan, YANG Honghui, CHEN Zhengyan, DING Zheng (370)
- Analysis on Changes and Influencing Factors of Urban and Rural Settlements in North Slope Economic  
 Belt of Tianshan Mountains  
 ..... ZHENG Xudong, WANG Hongwei, LUO Kui, WU Changrui, YAN Xiaomei (383)
- Genomic Insights of Pathogenicity of *Comamonas kerstersii* ..... WANG Hui, MING Desong, WANG Mingxi (394)
- Dynamics of A  $n$ -Dimensional Gilpin-Ayala Competition Model With Seasonal Succession  
 ..... CHEN Meixiang, XIE Xizhuang (417)

## No. 4

- Research Progress on Degradation of Ionic Liquids in Wastewater Through Advanced Oxidative Processes  
 ..... CHEN Xiaoyuan, JIN Chunying, LIN Jinqing (423)
- Research Progress of Aptamers Using Cell-SELEX Technology in Cancer Targeted Treatment  
 ..... CHENG Zhiyun, CHEN Jiayi, BAI Ruyu, YANG Huiyong, MOHSAN Ullah, DIAO Yong (439)
- Research Progress on Multi-Landscapes From Multi-Dimensional Perception Perspective  
 ..... QIU Jianzhen, LIN Jiaming, LI Yating, WEI Tong (445)
- Numerical Simulation and Wind Tunnel Testing of Coach Rear Spoiler  
 ..... YANG Yongbai, WANG Jingyu, ZHUANG Guohua (454)
- Probability Prediction Reinforcement Learning for Variable Impedance Force Tracking Control of Robotic  
 Arms in Unstructured Environments ..... DONG Zicheng, HU Weishi, SHAO Hui, GUO Lin (461)
- Modeling and Optimization Analysis of Energy Consumption in Rough Machining of Robotic Stone Carving  
 ..... HUANG Jixiang, YIN Fangchen, HUANG Shengui, ZHANG Shunde, GU Lizhi (471)
- Effect of Temperature and Humidity Coupling Cycles on Performance of SBS Modified Asphalt Mastic  
 ..... TAN Bo, FAN Yuzhu, LI Qing, XIE Enlian, LIU Jingshuang (478)
- Evaluation of Conservation Value of Historical Building Heritage in Hong Kong Region Using  
 Analytic Hierarchy Process ..... LI Ziyang, YANG Xiaoxiang (487)
- Evaluation of Carbon and Pollution Synergy Reduction Levels in Atmosphere in Guangdong-Hong Kong-Macao  
 Greater Bay Area ..... HE Sinan, SHI Longyu (494)
- Spatio-Temporal Dynamics Characteristic and Multi-Scenario Prediction of Carbon Storage Driven by  
 LUCC in Ebinur Lake Basin  
 ..... BUWEIAYXIEMU · Tuheti, ABUDUREHEMAN · Halike, YAO Kaixuan,  
 WEI Qianqian, YAO Lei, TANG Hua, LUO Jianmei, DUAN Yuefan (501)
- Weld Image Multi-Label Classification Algorithm Based on Multi-Feature Fusion  
 ..... NIU Dun, LIN Ning, LIN Zhenchao, HUANG Kai, WANG Hejia, ZHENG Lixin (514)
- Second-Order Linearized Difference Scheme for Nonlocal Gray-Scott Model  
 ..... CHEN Xinyan, ZHANG Xinxin, CAI Yaoxiong (524)
- Runge-Kutta Collocation Scheme for Nonlinear Schrödinger Equation  
 ..... YAO Mengli, TENG Yuhang, LAI Yiyang, WENG Zhifeng (534)

## No. 5

- Research Progress of Molecular Sieves Synthesis Under External Field Intensification  
 ..... XU Lang, WANG Yinliang, QI Tingting, CHU Guangwen, ZOU Haikui, SUN Baochang (543)
- Supercritical CO<sub>2</sub> Fluid Technology-Assisted Fabrication of Decellularized Extracellular Matrix Materials  
 and Biomedical Applications ..... WU Bing, DUAN Youyu, CHEN Aizheng (551)

- Advances in Microbial-Electrode Modification and Influence on Process of Electrosynthesis to Convert CO<sub>2</sub>  
 ..... XIE Yinuo, LI Yixin, WANG Yuanpeng (559)
- Progress of Nanostructured Graphitic Carbon Nitride for CO<sub>2</sub> Catalytic Conversion  
 ..... WANG Wendong, WANG Yinan, RAO Haibin, GUO Fangsong, ZHAN Guowu (575)
- Synthesis Metabolism and Production Application of Vitamin B<sub>6</sub> ..... LI Danni, ZHENG Zhongliang (588)
- Preparation and Performance Analysis of Malay Rosin Polyethylene Glycol Ester Surfactants  
 ..... WANG Hanwen, YANG Bin, SU Jiangbo, RAO Xiaoping (596)
- Preparation and Evaluation of Astaxanthin Composite Nanoparticles Pickering Emulsion  
 ..... WANG Weijuan, HUANG Lili, LIN Zhiqiu, LU Dongfei, SHI Ronghui, LIU Yao, HONG Junming (603)
- Role of Multiple Copy *pucBA* Genes in Phototrophic Growth of *Rhodospseudomonas palustris*  
 ..... LIN Ruoxin, ZHAO Xiaolan, ZHAO Chungui, YANG Suping (610)
- Regulatory Role of Arsenic Regulatory Protein (ArsR) in *Rhodospseudomonas palustris* CGA009  
 ..... JIN Chunying, CUI Liang, CHEN Yongnan, YANG Suping, ZHAO Chungui (618)
- Identification and Genomic Characterization of Prodigiosin-Producing *Serratia* sp. R18  
 ..... CHEN Mingxia, XING Yuanjun, LI Heyang, SHI Junhao (626)
- Improvement Effects of *Anoectochilus roxburghii* Polysaccharose on Renal Injury in Diabetic Mice by  
 Inhibiting NF- $\kappa$ B Signaling Pathway  
 ..... SHENG Shimei, ZHANG Jiangang, CHEN Ye, DAI Zhaolong, LI Le, LIU Qing (635)
- Effect of Ethylene Glycol on Preparation of Phenolic Resin Adhesive Using Modified Lignin *via* Deep  
 Eutectic Solvent ..... GAN Linhuo, ZHAN Yun, YAN Sien, HE Changyong (642)
- Influence of Cellulose on Pore Structure of Activated Carbon ..... SONG Lei, XIA Jiayu, DING Wenjun (649)
- Evaluation of Antibacterial Activity and Fertilization Potential of Bacteria Derived From Mangrove Forests  
 ..... YANG Daomao, ZHOU Yuye, LI Jiabin, YI Jiale, YANG Qinwei, HUANG Kanglong (654)
- Phytoplankton Community Characteristics of Headstream Wantan River in Three Gorges Reservoir Area  
 ..... CHEN Yanyao, SUN Rong, YANG Ying, HU Jiarong, DAI Xiaohan (661)
- Change Laws of Physiological Indexes of *Lyophyllum decastes* Liquid Strains Cultivation Process  
 ..... PENG Huihan, YU Hailing, WANG Mingyuan, YANG Miao, WAN Yuxin (667)
- Effect of Different Drying Methods on Quality of *Lyophyllum decastes*  
 ..... YU Hailing, WANG Yini, WAN Yuxin,  
 YANG Miao, PENG Huihan, WANG Mingyuan, LIU Jianfu (673)
- Interception Effects of Membranes With Different Pore Sizes for Reconstituted Tobacco Extract  
 ..... LAI Aonan, WU Shijie, LI Shuchun, ZHOU Shufeng (681)
- Spatial and Temporal Distribution Pattern of Bird Diversity in Xiamen Campus of Huaqiao University  
 ..... LUO Xiang, SUN Rong, CHEN Yanyao (688)

## No. 6

- Structured Light-Based 3D Pose Estimation of Piled Workpieces Guided by Image Segmentation  
 ..... DENG Jun, LI Na, WANG Yakai, GAO Zhenguo (696)
- New Type of Double Pipe Hydraulic Fracturing Method *In-Situ* Stress Testing Device and Its Application  
 ..... CHANG Fangqiang, LIANG Xiaoyang, HUANG Ziyang,  
 LIANG Kangkang, QUAN Lulong, CAO Yanan, CHANG Fangwei (706)
- Influence of Bridge Deck Barriers Arrangement on Vortex-Induced Vibration of Long-Span Suspension Bridge  
 ..... ZHOU Chunbin, ZHOU Guangwei, CHEN Changping (712)
- Safety Evaluation Method for Tower Crane Collapse Accidents Using WSR Methodology  
 ..... QI Shenjun, WANG Ya, CHEN Jingjing, ZHANG Zichen (721)
- Distribution Characteristics, Sources and Pollution Evaluation of Organic Matter and Nutrient Salts in Sediment  
 of Xinglin Bay Reservoir in Xiamen City  
 ..... LI Jing, TANG Xueping, ZHUANG Mazhan, LI Fei, ZHOU Zhenming (730)
- Effect of Thermal Pressure Ventilation Strengthened by Stairwell on Summer Indoor Thermal Environment  
 in Traditional Qilou Building in Yingping District of Xiamen City  
 ..... HUANG Luhong, LIANG Ludan, SHI Yuehan (740)
- Construction and Analysis of ceRNA Regulatory Network of Ferroptosis Feature Genes in Hepatocellular  
 Carcinoma ..... ZHU Yaling, FANG Shanshan, LI Yijie, XU Xianxiang, DIAO Yong (746)
- Preparation and Evaluation of Astaxanthin Composite Nanoparticles Pickering Emulsion  
 ..... ZHENG Xiumei, DU Xin, LIU Peizhong, YU Wenxi, WU Zhen, WANG Liqiang, HOU Zhiyong (756)
- X-Ray Pipe Weld Detection Algorithm of Improved YOLO  
 ..... WANG Hejia, LIN Ning, LIN Zhenchao, HUANG Kai, NIU Dun, ZHENG Lixin (766)
- Spatial and Temporal Difference and Coordination Level of New-Type Urbanization Development in Xinjiang  
 ..... LIU Shuo, ZHANG Yongfu, LIU Yongqiang (776)
- Analysis on Measurement, Spatiotemporal Differences and Influencing Factors of Digital Economy  
 Development Level in Chinese Provinces ..... LIU Ke, LÜ Shulong, LIU Wenli, HUANG Wenbin (789)
- Updating Law of Local Optimal Scale of Dynamic Multi-Scale Decision Information System  
 ..... CHEN Yingsheng, LI Jinjin (800)
- Parametric Representation of Douady-Earle Quasiconformal Extension ..... LIN Zhenlian (808)
- Inclusion-Free Edge Coloring of Halin Graph ..... PENG Yan, TAN Yi, CHEN Lili (812)
- Total Contents of Vol. 45 ..... ( I ~ X)

# 《华侨大学学报(自然科学版)》简介

## BRIEF INTRODUCTION TO JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY ( NATURAL SCIENCE )

《华侨大学学报(自然科学版)》(以下简称《学报》)创刊于1980年,是福建省教育厅主管,华侨大学主办,面向国内外公开发行的自然科学综合性学术理论刊物。

《学报》的办刊宗旨是:坚持四项基本原则,贯彻“百花齐放,百家争鸣”和理论与实践相结合的方针,广泛联系海外华侨和港、澳、台、特区的科技信息,及时反映国内尤其华侨大学等高等学府在理论研究、应用研究和开发研究等方面的科技成果,为发展华侨高等教育和繁荣社会主义科技事业服务。

《学报》以创新性、前瞻性、学术性为办刊特色,主要刊登机械工程及自动化、测控技术与仪器、电气工程、电子工程、计算机技术、应用化学、材料与环境工程、化工与生化工程、土木工程、建筑学、应用数学等基础研究和应用研究方面的学术论文,科技成果的学术总结,新技术、新设计、新产品、新工艺、新材料、新理论的论述,以及国内外科技动态的综合评论等内容。

《学报》既是中文综合性科学技术类核心期刊,又是国内外重要数据库和权威性文摘期刊固定收录的刊源。在历次全国及福建省的科技期刊评比中,《学报》都荣获过大奖。曾获得1995年“全国高等学校自然科学学报系统优秀学报一等奖”,1997年“第二届全国优秀科技期刊奖”,1999年,2008年“全国优秀自然科学学报及教育部优秀科技期刊”,并于2001年入选“中国期刊方阵‘双效期刊’”。

《学报》现为双月刊,A4开本。国内统一连续出版物号:CN 35-1079/N;国际标准连续出版物号:ISSN 1000-5013;国内邮发代号:34-41;国外发行代号:NTZ1050。

Journal of Huaqiao University (Natural Science) (abbreviated to the Journal), started publication in 1980, is a comprehensive and academic journal about natural science, open distribution at home and abroad, sponsored by Huaqiao University; The Education Department of Fujian Province is responsible for its work.

The Journal has its purpose: adhering to the four cardinal policies, carrying out the principles of the “Flowers Blossom; Schools of Thought Contend” and theory combined with practice, collecting information of science and technology from overseas and those in Hong Kong, Macao, Taiwan and special economic zones and all sides, and in time reflecting the scientific and technological achievements about domestic theoretical research, applied research and development research in our university and others, and serving for development of the overseas Chinese higher education and the socialist prosperity on science and technology.

The Journal, with characteristics of creative, perspective and academic study, publishes the articles of fundamental and applied research on mechanical engineering and automation, observing and controlling technology and instruments, electric and electronic engineering, computer, applied chemistry, materials and environmental engineering, chemical and biochemical engineering, civil engineering, architecture, applied mathematics, etc. and the academic reports on achievements of science and technology, theses on new technology, new design, new products, new crafts, new materials, new theories, and the comprehensive reviews on scientific and technological developments at home and abroad.

The Journal is not only a core Chinese periodical on comprehensive science and technology, but also an important data base at home and abroad and periodical source that the authoritative abstracts have been recorded regularly. The Journal won the prizes among the national and provincial evaluation of scientific and technological periodicals such as “the first prize of good natural science of the national higher education periodicals” in 1995, “the good prize of the second national periodicals of science and technology” in 1997, “the good scientific and technological periodicals of the national natural science journals and the State Education Department” in 1999 and 2008, and selected into “‘double-effect periodical’ of the China periodicals matrix” in 2001. The Journal welcomes the contributors from our university and others.

The Journal is bimonthly publication, with format of A4. China standard serial number: CN 35-1079/N; International standard serial number: ISSN 1000-5013; Domestic mail number: 34-41; International issue number: NTZ1050.

- 《中文核心期刊要目总览》
- RCCSE 中国核心学术期刊
- 中国期刊方阵“双效期刊”
- 中国科技论文在线优秀期刊
- ISTIC 中国科技核心期刊
- 全国优秀科技期刊
- 华东地区优秀期刊

## 本刊被以下国内外检索期刊和数据库列为固定刊源

- 美国《化学文摘》(CAS)
- 波兰《哥白尼索引》(IC)
- “STN 国际”数据库
- 中国科学引文数据库
- 中国科技论文统计期刊源
- 中国学术期刊(光盘版)
- 中文科技期刊数据库
- 中国力学文摘
- 中国生物学文摘
- 中国数学文摘
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI)
- 荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)
- 德国《数学文摘》(Zbl MATH)
- 中国学术期刊综合评价数据库
- 中国期刊网
- 万方数据库
- 中国机械工程文摘
- 中国化学化工文摘
- 中国无线电电子学文摘
- 中国物理文摘

华侨大学学报(自然科学版)

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

Huaqiao Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)

(NATURAL SCIENCE)

(双月刊, 1980年创刊)

(Bimonthly, Started in 1980)

第45卷第6期(总第200期) 2024年11月20日

Vol. 45 No. 6 (Sum 200) Nov. 20, 2024

主管单位: 福建省教育厅

Competent Authority: The Education

主办单位: 华侨大学

Department of Fujian Province

(中国福建泉州 362021)

Sponsor: Huaqiao University

(中国福建厦门 361021)

(Quanzhou 362021, Fujian, China)

编辑出版: 华侨大学学报自然科学版编辑部

(Xiamen 361021, Fujian, China)

电话: 0595-22692545

Editor in Chief: HUANG Zhongyi

电子信箱: journal@hqu.edu.cn

Edited and Published by Editorial

网址: https://hdxh.hqu.edu.cn

Department of Journal of

Huaqiao University (Natural Science)

主编: 黄仲一

Tel: 0595-22692545

印刷: 泉州晚报印刷厂

E-mail: journal@hqu.edu.cn

国内发行: 福建省泉州市邮政局

https://hdxh.hqu.edu.cn

订购处: 全国各地邮政局(所)

Distributed by China Publication Foreign

国外发行: 中国出版对外贸易总公司

Trading Corporation

(北京 782 信箱, 邮政编码 100011)

(P. O. Box 782, Beijing, 100011, China)

中国标准连续出版物号: ISSN 1000-5013  
CN 35-1079/N

ISSN 1000-5013

国内邮发代号: 34-41

国内定价: 10.00 元/册  
60.00 元/套

国外发行代号: NTZ 1050

