



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 1 期  
Vol. 45 No. 1

## 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

综合述评

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)

学术论文

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)

## CONTENTS

### COMPREHENSIVE REVIEW

Research Progress of Soil Improvement by Plant Urease Induced Carbonate Precipitation

..... LI Mingdong, ZHANG Shiai, YANG Yuanjiang,

XU Haofeng, TAO Xueqing, HE Jia (1)

### ACADEMIC PAPERS

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 *Comamonas kerstersii* 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)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202308046



# 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

(东华理工大学 土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 酶诱导碳酸盐沉淀(EICP)改良土体是岩土工程领域的新兴热点技术,全面总结梳理 EICP 改良土体的研究现状,优选关键技术参数,并对 EICP 的未来发展提出了展望。建议制定植物脲酶促沉碳酸钙改良土体方法标准,对植物脲酶的保存方法、EICP 改良土体在特殊环境条件下的长期性能开展研究。研究结果表明,EICP 能够显著提高土体的性能,无侧限抗压强度最高可达 3 MPa,抗风蚀能力可达  $29.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,表面贯入强度可达 1.065 MPa,渗透系数降低率可达 98.2%,重金属离子质量分数降低率可达 99.96%。

**关键词:** 植物脲酶; 酶诱导碳酸盐沉淀(EICP); 土体改良; 固化; 重金属

中图分类号: TU 44

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)01-0001-09

## Research Progress of Soil Improvement by Plant Urease Induced Carbonate Precipitation

LI Mingdong, ZHANG Shiai, YANG Yuanjiang,  
XU Haofeng, TAO Xueqing, HE Jia

(School of Civil Engineering and Architecture, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** Soil improvement by enzyme induced carbonate precipitation (EICP) is an emerging hot technologie in the field of geotechnical engineering. The research status of soil improvement by EICP are summarized comprehensively, the key technical parameters are optimized, and the prospects of future development of EICP are pointed out. The standard method of soil improvement by plant urease promoting sinking of calcium carbonate is suggested. The preservation methods of plant urease and the longterm performance of soil improvement by EICP under special environmental conditions are conducted. The research results show that EICP can significantly improve the performance of soil, the maximal unconfined compressive strength reaches 3 MPa, the ability of wind erosion resistance reaches  $29.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the surface penetration strength reaches 1.065 MPa, the rate of permeability coefficient reduction reaches 98.2%, the rate of heavy metal ion mass content reduction reaches 99.96%.

**Keywords:** plant urease; enzyme induced carbonate precipitation (EICP); soil improvement; solidification; heavy metal

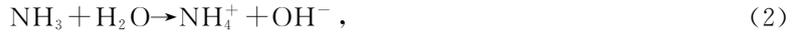
许多植物的种子或根部富含脲酶,脲酶能够将土体中的尿素催化水解为氨气和二氧化碳,它们与土体中的水反应,转化为碳酸根和铵根离子。当土体中存在难溶碳酸盐的阳离子(钙离子、铅离子等)时,

收稿日期: 2023-08-04

通信作者: 李明东(1981-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事岩土工程领域的研究。E-mail:lmd@ecut.edu.cn。

基金项目: 国家重点实验室开放基金资助项目(2022NRE29); 国家自然科学基金资助项目(51869001)

碳酸盐达到过饱和状态,形成沉淀,其自然反应为



利用该自然反应,人为地从植物中提取脲酶,将足量脲酶和尿素引入土体中,它们能在短时间内诱导生成大量碳酸盐沉淀,称为植物脲酶诱导碳酸盐(EICP),相应的处理过程称为EICP改良土体<sup>[1-6]</sup>过程。EICP在岩土工程领域具有广阔的应用前景<sup>[7-9]</sup>,主要有3个方面。1) 土体加固和防渗处理。将脲酶、尿素和可溶性钙盐同时引入土体,生成强胶结力的碳酸钙<sup>[10]</sup>,碳酸钙粘结松散的土颗粒,填充土内孔隙,起到提高土体强度、降低土体渗透性的作用,具体可用于路基加固、防风固沙、湿陷性土治理和膨胀土治理等<sup>[11-14]</sup>。2) 岩石、混凝土裂隙堵漏。将脲酶、尿素和可溶性钙盐配制成堵漏液,当堵漏液流经过渗漏裂隙时,碳酸钙在裂缝侧壁上逐渐沉积,直至裂隙闭合<sup>[15]</sup>。3) 重金属污染土修复。将脲酶和尿素引入重金属污染土,重金属离子与碳酸根结合成稳定的碳酸盐结合态。

植物脲酶诱导碳酸盐技术具有3个优势。1) EICP与微生物诱导碳酸盐(MICP)相比,整个反应过程不需要空气(氧气),因此,也适用于细粒土<sup>[16-17]</sup>。2) 堵漏液中的游离脲酶只有12 nm,能够修复极细小的裂隙。3) 全过程环保来源为植物,处理过程不需要水泥,处理后的剩余脲酶可以自然降解<sup>[18]</sup>。

为了总结EICP改良土体的现状,优选技术参数,研讨前进方向,本文从EICP的影响因素、改良土体的效果和改良土体的机理3个方面进行了全面梳理,希望能为这一新兴领域的发展提供借鉴。

## 1 EICP的影响因素

EICP的反应效率(实际碳酸钙沉淀量与理论最大值的比率)用碳酸钙产率进行表达,其影响因素包括脲酶的来源、质量浓度、钙离子质量浓度、pH值和温度等。碳酸钙产率随豆粉质量浓度的变化<sup>[19-27]</sup>,如图1所示。图1中: $\rho$ 为质量浓度; $w$ 为质量分数; $c$ 为浓度。由图1可知:碳酸钙产率随洋刀豆脲酶质量浓度的增加先增加后减小,当洋刀豆脲酶质量浓度为 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,碳酸钙产率最大,可达90%以上<sup>[19-23]</sup>;当黄豆脲酶质量浓度低于 $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,碳酸钙产率随黄豆脲酶质量浓度增加而快速增加,当黄豆脲酶质量浓度超过 $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,碳酸钙产率增长缓慢<sup>[24]</sup>,当黄豆脲酶质量浓度为 $15 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,碳酸钙产率为55%<sup>[25]</sup>,当黄豆脲酶质量浓度为 $40 \sim 50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,碳酸钙产率为80%~90%<sup>[26]</sup>,当黄豆脲酶质量浓度为 $50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,碳酸钙产率达到99.4%<sup>[27]</sup>。Javadi等<sup>[28]</sup>使用西瓜籽脲酶,碳酸钙产率可达64%。

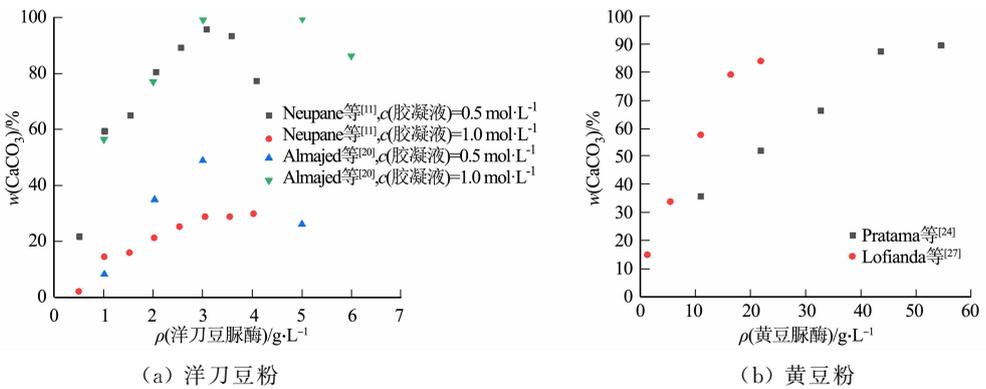


图1 碳酸钙产率随豆粉质量浓度的变化<sup>[19-27]</sup>

Fig. 1 Variation of calcium carbonate yield with mass concentration of soybean<sup>[19-27]</sup>

碳酸钙产率随钙离子质量浓度的变化<sup>[29-31]</sup>,如图2所示。

文献<sup>[29-36]</sup>发现使用低 $\text{Ca}^{2+}$ 质量浓度的钙源时,碳酸钙产率较高,随着 $\text{Ca}^{2+}$ 质量浓度的增加,碳酸钙产率逐渐下降。氯化钙、醋酸钙、硝酸钙、乳酸钙的加固效果依次降低<sup>[32]</sup>。随着反应环境pH值的升高,碳酸钙产率先增高后降低,当反应环境pH值在8~9时,碳酸钙产率达到峰值<sup>[9,33-36]</sup>,主要原因是

偏酸性反应环境会抑制脲酶活性, 强碱性反应环境不利于尿素水解<sup>[31]</sup>。Arab 等<sup>[23]</sup>在 10, 25, 40 °C 条件下, 使用 EICP 改良土体, 25, 40 °C 土体中的碳酸钙质量分数接近, 分别为 4.3% 和 4.4%, 而 10 °C 土体中的碳酸钙质量分数只有 3.4%。Krajewska 等<sup>[37]</sup>发现温度从 0 °C 上升至 50 °C 时, 碳酸钙沉淀速率从 0.038 g · h · L<sup>-1</sup> 提升至 0.340 g · h · L<sup>-1</sup>, 这是由于脲酶活性会随温度的升高而逐步增加<sup>[23, 34, 37]</sup>, 但不同种类的脲酶差异性较大, 对温度的耐受程度不一致, 存在不同的最适温度范围。黄豆脲酶在 0~75 °C 范围内活性随温度上升快速升高, 65 °C 以上酶活性的增长率变缓<sup>[34]</sup>; 西瓜籽脲酶在 50 °C 左右达到最佳酶活性<sup>[2]</sup>; 黑眼豌豆的最佳酶活性在 30~35 °C 之间<sup>[38]</sup>。

Ahenkorah 等<sup>[39]</sup>发现植物脲酶诱导碳酸钙的晶型主要为方解石, 少部分为球霏石、文石, 晶型主要取决于植物脲酶来源、钙源和外加剂。不同酶源的方解石形态扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)图像<sup>[28, 40-41]</sup>, 如图 3 所示。由图 3 可知: 西瓜籽脲酶诱导碳酸钙晶型为斜方 6 面体方解石<sup>[28]</sup>; 洋刀豆脲酶诱导碳酸钙晶型大多为方块状方解石<sup>[40]</sup>; 黄豆脲酶诱导碳酸钙晶型多为类球形方解石<sup>[41]</sup>, 这是由于不同植物脲酶的氨基酸序列不同, 其中, 酸性氨基酸的数量和分布结构是决定碳酸钙晶型的重要因素之一<sup>[36]</sup>。氯化钙、硝酸钙等无机钙盐生成的碳酸钙晶型为更稳定的方解石<sup>[42-44]</sup>, 使用有机钙盐生成的晶型多为球霏石, 少数为文石。Phua 等<sup>[45]</sup>用乳酸钙制成了放射性增长的球形方解石。外加剂的引入有利于生成更稳定的方解石, 并促进球霏石向方解石的转换<sup>[22, 46-53]</sup>。

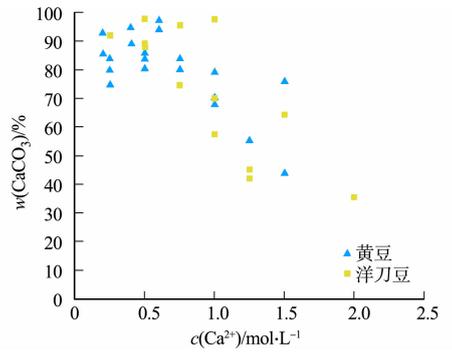
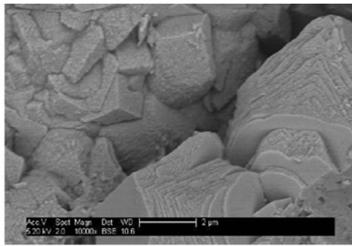
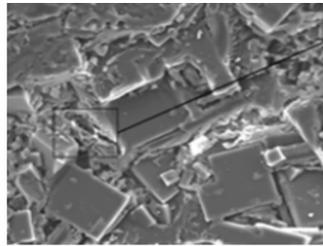


图 2 碳酸钙产率随钙离子质量浓度的变化<sup>[29-31]</sup>

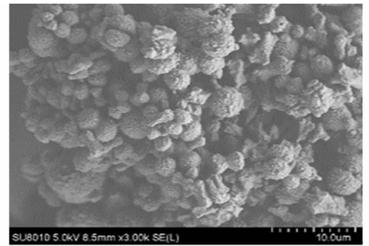
Fig. 2 Variation of calcium carbonate yield with mass concentration of calcium ions<sup>[29-31]</sup>



(a) 西瓜籽脲酶诱导碳酸钙



(b) 洋刀豆脲酶诱导碳酸钙



(c) 黄豆脲酶诱导碳酸钙

图 3 不同酶源的方解石形态 SEM 图像<sup>[28, 40-41]</sup>

Fig. 3 SEM images of calcite morphology from different enzyme sources<sup>[28, 40-41]</sup>

## 2 EICP 改良土体的效果

### 2.1 加固效果

Cui 等<sup>[46]</sup>用单相(低 pH 值)注入法处理砂土, 砂土的无侧限抗压强度达到 3.0 MPa(目前最好记录), 大多数为 0.2~2.0 MPa<sup>[2, 17, 20, 23, 29, 34, 47]</sup>。EICP 的处理能将抗风蚀能力从加固前的 8 m · s<sup>-1</sup> 提高到加固后的 25 m · s<sup>-1</sup><sup>[48]</sup>, 最高可达 29.1 m · s<sup>-1</sup>, 将海藻酸钠加入 EICP 溶液抗风蚀能力还能再提升一倍<sup>[22]</sup>, 多次处理的效果更佳, 循环 4 次后, 砂粒的平均表面贯入强度由 11 kPa 增加到了 1.065 MPa<sup>[49]</sup>, 这是因为风沙表面形成了坚硬致密的凝胶结皮层<sup>[22]</sup>。

EICP 加固土体的效果除了受到 EICP 反应影响外, 还受到土体的影响和外加剂的影响。吴林玉等<sup>[34]</sup>用 EICP 处理砂土后, 发现随着砂土粒径的增大, 砂土试样的无侧限抗压强度先增大后减小, 粒径为 0.25~0.50 mm 的砂土的无侧限抗压强度最高(1.21 MPa); 粒径为 0.50~1.00 mm 的砂土和粒径小于 0.25 mm 的砂土的无侧限抗压强度分别为 0.62, 0.40 MPa。

外加剂的影响也十分显著, 不同成核剂作用效果<sup>[19, 21-22, 50-54]</sup>, 如图 4 所示。图 4 中:  $p$  为无侧限抗压强度。由图 4 可知: 木素的无侧限抗压强度由 298 kPa 提高到 419 kPa<sup>[50]</sup>, 脱脂奶粉由 0.12~0.16 MPa

提高到 1.65 MPa~1.82 MPa<sup>[22]</sup>,山梨醇提高 2.2 倍<sup>[51]</sup>,黄原胶提高约 8 倍,Mg<sup>2+</sup> 提高 16.6%<sup>[52-53]</sup>,海藻酸钠最多提高 3 倍<sup>[54]</sup>。提高的主要原因是外加剂为碳酸钙提供了成核位点<sup>[20,50,53,55-60]</sup>。综上,当前研究主要基于无侧限抗压强度判定加固效果,遴选最佳技术参数。

在不同环境条件(降雨引发干湿循环、冻融循环、酸雨)下,需要进一步研究加固土体的耐久性及其动力特性。

### 2.2 防渗效果

EICP 具有较好的防渗效果,Yasuhara 等<sup>[29]</sup>用 EICP 处理一次后,土体渗透系数降低 60%~70%,4 次处理后土体渗透系数从初始的 0.040 0 cm·s<sup>-1</sup>降低至 0.001 5 cm·s<sup>-1</sup>,总体降低了 96%。Handley-Sidhu 等<sup>[57]</sup>用达西方程式进行了计算,多孔介质的渗透率从 9.990 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>降至 0.175 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>,渗透系数降低了 98.2%。Hoang 等<sup>[17]</sup>使用 EICP 对砂土进行 8,12 和 16 次处理,发现增加处理次数会降低土体渗透率,16 次处理后,渗透系数最大降低 90%。综上,EICP 技术在降低土体渗透性方面效果明显,主要原因是碳酸钙沉淀充填于土颗粒之间,占据土体孔隙,土体孔隙体积减小<sup>[58]</sup>。截止目前,尚未见利用 EICP 进行混凝土裂隙或岩石裂隙堵漏的相关研究,有必要开展专题研究。

### 2.3 修复重金属污染土的效果

重金属污染对环境和生物的危害极大,且易通过食物链富集危害人类的健康。Nam 等<sup>[40]</sup>应用 EICP 修复矿山废渣中的重金属,发现处理后的可溶性 As,Mn,Zn,Pb,Cr 和 Cu 的质量浓度分别降低了 31.7%,65.8%,50.6%,51.6%,45.1%和 49.7%。Moghal 等<sup>[59]</sup>探究了 EICP 对不同重金属组合污染土的修复效果,发现重金属吸附从大到小顺序为 Cd,Ni,Pb。在 EICP 反应液中添加脱脂奶粉,养护 40 d 后,可溶性铅离子下降率最高可达 99.96%<sup>[59]</sup>。边汉亮等<sup>[60]</sup>用黄豆粗提取脲酶对锌离子污染土进行修复,经过 3 次修复后,土体中可溶性锌离子减少 83.75%,碳酸盐结合态增加 68.51%。重金属污染土的修复是千年工程,但目前尚未见到 EICP 修复重金属污染土在不同环境(酸碱度、温度及湿度)条件下的长期稳定性相关研究,有必要开展专题研究。

## 3 EICP 改良土体的机理

### 3.1 加固机理

EICP 加固土体的机理,如图 5 所示。

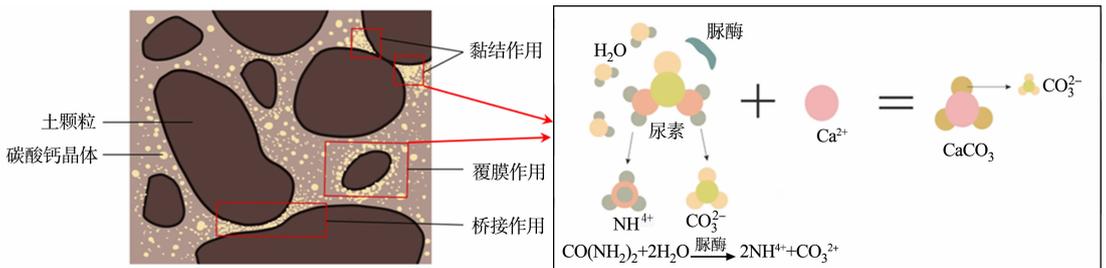


图 5 EICP 加固土体的机理

Fig. 5 Mechanism of soil by EICP reinforcement

过饱和的碳酸钙沉积在土体内,起到桥接、黏结和覆膜作用。桥接作用是碳酸钙晶体在两个相邻但不接触的土颗粒之间沉淀、生长,通过“搭桥”连接两个土颗粒;黏结作用是碳酸钙晶体在土颗粒接触点附近沉积聚集,黏结土颗粒,提高土体强度;覆膜作用是碳酸钙晶体覆盖在土颗粒表面。

因此,桥接作用和黏结作用在土体颗粒之间产生胶结作用,能显著增强土体团块的强度,是 EICP 加固土体的主要机制,而覆膜作用未能给土颗粒之间建立联系,没有明显的加固作用<sup>[61-73]</sup>。

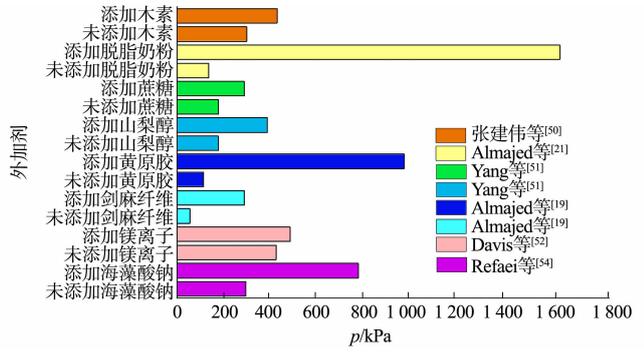


图 4 不同成核剂作用效果

Fig. 4 Effects of different nucleating agents

碳酸钙质量分数随无侧限抗压强度的变化<sup>[17,20,23,29,34,73]</sup>,如图 6 所示。由于各试验使用的 EICP 溶液配比、加固土体类型、处理周期等不同,数据出现一定的离散性,整体呈现出碳酸钙质量分数越高,无侧限抗压强度越大的趋势<sup>[17,20,23,29,34,65]</sup>。

### 3.2 修复重金属污染土的机理

EICP 主要是将污染土体中的可交换态重金属离子转化为固态碳酸盐,EICP 修复重金属机理示意图,如图 7 所示。由图 7 可知:一些离子半径接近  $\text{Ca}^{2+}$  的重金属离子( $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$  和  $\text{Zn}^{2+}$  等)直接替代  $\text{Ca}^{2+}$  离子,并与  $\text{CO}_3^{2-}$  结合生成碳酸盐沉淀<sup>[66]</sup>;在土壤中形成的  $\text{CaCO}_3$  对环绕其表面的金属离子具有很强的化学吸附能力,将重金属离子包裹,有效减少重金属污染物淋滤浸出<sup>[67-68]</sup>;部分重金属(As,Cr 等)在溶液中形成络合阴离子(亚砷酸根等),络合阴离子替代  $\text{CO}_3^{2-}$  与  $\text{Ca}^{2+}$  反应生成沉淀<sup>[69-71]</sup>。

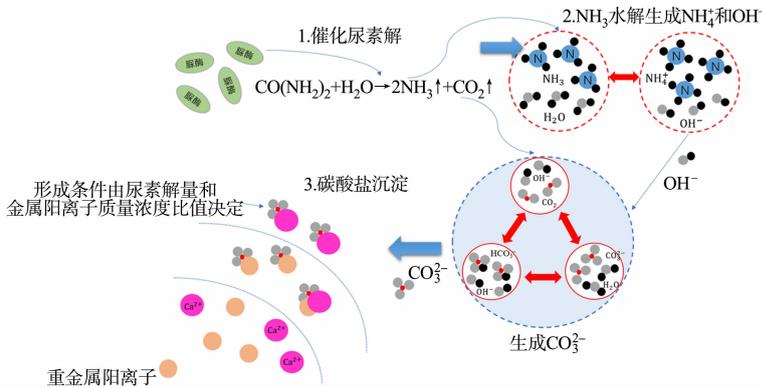


图 7 EICP 修复重金属机理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of heavy metal remediation mechanism by EICP

## 4 结论

总结梳理 EICP 改良土体现有研究,得到了以下 3 点主要结论。

1) 目前,已经开发出的植物脲酶包括洋刀豆、黄豆、黑豆、西瓜籽和南瓜子脲酶等,其中,洋刀豆脲酶效果最好,最佳质量浓度为  $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ;黄豆脲酶经济性最好,质量浓度越大,效果越好;氯化钙、醋酸钙、硝酸钙、乳酸钙的加固效果依次降低。

2) EICP 能够显著提高土体强度,土体强度随碳酸钙质量分数的增加而增加,最高可达 3 MPa;EICP 能够显著提高砂土的抗风蚀能力,由  $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  提高到  $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;EICP 能够显著降低土体的渗透系数,降低率可达 98.2%;EICP 能够显著降低重金属离子的质量分数,最高可达 99.96%。EICP 改良土体缺乏成核点位的问题可通过添加方解石种子、木质素、脱脂奶粉、蔗糖、山梨醇和海藻酸钠等成核剂进行解决。

3) EICP 加固土体的内在机理是碳酸盐晶体的桥接作用和黏结作用,防渗的内在机理是碳酸钙晶体的孔隙填充作用和孔道堵塞作用,修复重金属污染土内在机理是成盐沉淀和络合作用。

当前,EICP 改良土体研究存在以下 3 点不足。

1) 计算碳酸钙产率的反应时间、钙离子浓度、反应温度标准不统一,难以比较不同研究人员的结果,建议尽快建立统一的标准。

2) 植物脲酶溶液在常温下放置 72 h 后会大量失活,亟需对植物脲酶的保存方法开展对比研究,在实验室研究中可考虑  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  水溶液、 $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  软冻、 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$  冰冻、 $-80 \text{ }^\circ\text{C}$  冰冻状态等,并给出植物脲酶溶液

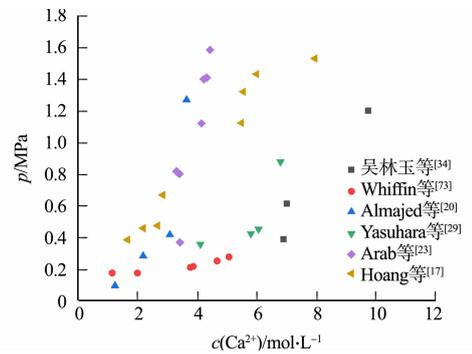


图 6 碳酸钙质量分数随无侧限抗压强度的变化<sup>[17,20,23,29,34,73]</sup>

Fig. 6 Variation of calcium carbonate mass fraction with unconfined compressive strength<sup>[17,20,23,29,34,73]</sup>

的合理保存方法。

3) 目前,EICP 改良土体的研究主要集中于处理后即时性能评价,对于改良后土体长期性能的研究仍占少数<sup>[72]</sup>,尚需进一步开展系统研究,包括干湿循环、冻融循环、酸雨影响和反复荷载下的性能演化规律和机制。

#### 参考文献:

- [1] 张海丽,徐品品,冷立健,等. 微生物诱导碳酸钙沉积研究与应用[J]. 生物学杂志,2020,37(1):86-91. DOI:10.3969/j.issn.2095-1736.2020.01.086.
- [2] DILRUKSHI R A N,NAKASHIMA K,KAWASAKI S. Soil improvement using plant-derived urease-induced calcium carbonate precipitation[J]. Soils and Foundations,2018,58(4):894-910. DOI:10.1016/j.sandf.2018.04.003.
- [3] ABDULLAH A,HAMED K T,EDWARD K,*et al.* Enzyme induced biocementated sand with high strength at low carbonate content[J]. Scientific Reports,2019,9(1):1135. DOI:10.1038/s41598-018-38361-1.
- [4] GAO Yufeng,HE Jia,TANG Xinyi,*et al.* Calcium carbonate precipitation catalyzed by soybean urease as an improvement method for fine-grained soil[J]. Soils and Foundations,2019,59(5):1631-1637. DOI:10.1016/j.sandf.2019.03.014.
- [5] 刘阳,高玉峰,何稼,等. 大豆脲酶诱导碳酸钙沉积技术的防风固沙试验研究[J]. 河南科学,2019,37(11):1784-1789. DOI:10.3969/j.issn.1004-3918.2019.11.012.
- [6] HE Jia,GAO Yufeng,GU Zhangxiang,*et al.* Characterization of crude bacterial urease for CaCO<sub>3</sub> precipitation and cementation of silty sand[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2020,32(5):04020071. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003100.
- [7] KAVAZANJIAN E,HAMDAN N. Enzyme induced carbonate precipitation (EICP) columns for ground improvement[C]//International Conference on Future Environment and Energy. Virginia:Geotechnical Special Publication,2015:2252-2261. DOI:10.1061/9780784479087.209.
- [8] MUJAH D,CHENG L,SHAHIN M A. Microstructural and geomechanical study on biocemented sand for optimization of MICP process[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2019,31(4):04019025. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002660.
- [9] CHENG Liang,SHAHIN M A. Microbially induced calcite precipitation (MICP) for soil stabilization[J]. Ecological Wisdom Inspired Restoration Engineering,2019(1):47-68. DOI:10.1007/978-981-13-0149-0\_3.
- [10] QIAN Chunxiang,REN Xinwei,RUI Yafeng,*et al.* Characteristics of bio-CaCO<sub>3</sub> from microbial bio-mineralization with different bacteria species [J]. Biochemical Engineering Journal,2021,176:108180. DOI:10.1016/j.bej.2021.108180.
- [11] NEUPANE D,YASUHARA H,KINOSHITA N,*et al.* Applicability of enzymatic calcium carbonate precipitation as a soil-strengthening technique[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2013,139(12):2201-2211. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000959.
- [12] KAVAZANJIAN J E,ALMAJED A,HAMDAN N. Bio-inspired soil improvement using EICP soil columns and soil nails[C]//Grouting 2017. Virginia:Geotechnical Special Publication,2017:13-22. DOI:10.1061/9780784480793.002.
- [13] SONG J Y,SIM Y,JANG J,*et al.* Near-surface soil stabilization by enzyme-induced carbonate precipitation for fugitive dust suppression[J]. Acta Geotechnica,2020,15(7):1967-1980. DOI:10.1007/s11440-019-00881-z.
- [14] PUTRA H,YASUHARA H,FAUZAN M. Review of enzyme-induced calcite precipitation as a ground-improvement technique[J]. Infrastructures,2020,5(8):66. DOI:10.3390/infrastructures5080066.
- [15] 李明东,李琳,田安国,等. 一种混凝土坝缝隙的堵漏方法: CN 104480902A [P]. 2015-04-01.
- [16] KHODADADI T H,KAVAZANJIAN E,BILSEL H. Mineralogy of calcium carbonate in MICP-treated soil using soaking and injection treatment methods[C]//Geotechnical Frontiers 2017. Florida:American Society of Civil Engineers,2017:195-201. DOI:10.1061/9780784480441.021.
- [17] HOANG T,ALLEMAN J,CETIN B,*et al.* Sand and silty-sand soil stabilization using bacterial enzyme-induced calcite precipitation (BEICP)[J]. Canadian Geotechnical Journal,2019,56(6):808-822. DOI:10.1139/CGJ-2018-0191.
- [18] 曹光辉,刘士雨,俞缙,等. 酶诱导碳酸钙沉淀(EICP)技术及其在岩土工程中的应用[J]. 高校地质学报,2021,27

- (6);754-768. DOI:10.16108/j.issn1006-7493.2020200.
- [19] ALMAJED A. Enzyme induced carbonate precipitation (EICP) for soil improvement[D]. Arizona: Arizona State University, 2017.
- [20] ALMAJED A, KHODADADI T H, KAVAZANJIAN J E. Baseline investigation on enzyme-induced calcium carbonate precipitation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2018, 144(11):04018081. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001973.
- [21] ALMAJED A, ABBAS H, ARAB M, *et al.* Enzyme-induced carbonate precipitation (EICP)-based methods for eco-friendly stabilization of different types of natural sands[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 274:122627. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122627.
- [22] ALMAJED A, LEMBOYE K, ARAB M G, *et al.* Mitigating wind erosion of sand using biopolymer-assisted EICP technique[J]. Soils and Foundations, 2020, 60(2):356-371. DOI:10.1016/j.sandf.2020.02.011.
- [23] ARAB M G, ROHY H, ZEIADA W, *et al.* One-phase EICP biotreatment of sand exposed to various environmental conditions[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(3):04020489. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003596.
- [24] PRATAMA E M, PUTRA H, SYARIF F. Application of calcite precipitation method to increase the shear strength of peat soil [C] // Conference Series: Earth and Environmental Science. San Francisco: IOP Publishing, 2018: 012058. DOI:10.1088/1755-1315/871/1/012058.
- [25] BAIQ H S, YASUHARA H, KINOSHITA N, *et al.* Examination of calcite precipitation using plant-derived urease enzyme for soil improvement[J]. Geomate Journal, 2020, 19(72):231-237. DOI:10.21660/2020.72.9481.
- [26] LEE S, KIM J. An experimental study on enzymatic-induced carbonate precipitation using yellow soybeans for soil stabilization[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(7):2026-2037. DOI:10.1007/s12205-020-1659-9.
- [27] LOFIANDA L, PUTRA H, ERIZAL S, *et al.* Potentially of soybean as bio-catalyst in calcite precipitation methods for improving the strength of sandy soil[J]. Architecture, 2021, 9(7):2317-2325. DOI:10.13189/cea.2021.090719.
- [28] JAVADI N, KHODADADI H, HAMDAN N, *et al.* EICP treatment of soil by using urease enzyme extracted from watermelon seeds[C] // International Conference on Future Environment and Energy. Virginia: Geotechnical Special Publication, 2018:115-124.
- [29] YASUHARA H, NEUPANE D, HAYASHI K, *et al.* Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(3):539-549. DOI: 10.1016/j.sandf.2012.05.011.
- [30] CARMONA J P S F, OLIVEIRA P J V, LEMOS L J L. Biostabilization of a sandy soil using enzymatic calcium carbonate precipitation[J]. Procedia Engineering, 2016, 143:1301-1308. DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.144.
- [31] CHANDRA A, RAVI K. Application of enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) to improve the shear strength of different type of soils[C] // Problematic Soils and Geoenvironmental Concerns. Singapore: Springer, 2021:617-632. DOI:10.1007/978-981-15-6237-2\_52.
- [32] 朱磊. 颗粒级配对酶诱导碳酸钙沉淀加固遗址土的影响研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2022. DOI:10.27204/d.cnki.glzhu.2022.000774.
- [33] OLIVEIRA P J V, FREITAS L D, CARMONA J P S F. Effect of soil type on the enzymatic calcium carbonate precipitation process used for soil improvement[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(4):04016263. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001804.
- [34] 吴林玉, 缪林昌, 孙潇昊, 等. 植物源脲酶诱导碳酸钙固化砂土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(4):714-720. DOI:10.11779/CJGE202004014.
- [35] 张宽, 唐朝生, 刘博, 等. 基于新型单相 MICP 技术改性黏性土力学特性的试验研究[J]. 工程地质学报, 2020, 28(2):306-316. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2019-528.
- [36] SONDI I, SALOPEK B. Influence of the primary structure of enzymes on the formation of CaCO<sub>3</sub> polymorphs: A comparison of plant (*Canavalia ensiformis*) and bacterial (*Bacillus pasteurii*) ureases[J]. Langmuir: The ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2005, 21(19):8876-8882. DOI:10.1021/la051129v.
- [37] KRAJEWSKA B, VAN ELDIK R, BRINDELL M. Temperature- and pressure-dependent stopped-flow kinetic studies of jack bean urease implications for the catalytic mechanism[J]. Journal of Biological Inorganic Chemistry, 2012,

- 17(7):1123-1134. DOI:10.1007/s00775-012-0926-8.
- [38] ZUSFAHAIR Z, DIAN R N, DANIA P, *et al.* Partial purification and characterization of urease from black-eyed pea (*Vigna unguiculata* ssp. *unguiculata* L.) [J]. Journal of Fundamental and Applied Sciences, 2018, 14(1):20-24. DOI:10.11113/MJFAS.V14N1.749.
- [39] AHENKORAH I, RAHMAN M M, KARIM M R, *et al.* A review of enzyme induced carbonate precipitation (EICP): The role of enzyme kinetics [J]. Sustainable Chemistry, 2021, 2(1):92-114. DOI:10.3390/suschem2010007.
- [40] NAM I H, ROH S B, PARK M J, *et al.* Immobilization of heavy metal contaminated mine wastes using *Canavalia ensiformis* extract [J]. Catena, 2016, 136:53-58. DOI:10.1016/j.catena.2015.07.019.
- [41] 郎鈔棚, 马明, 邱立冬, 等. 大豆脲酶促沉碳酸钙改良砂土地基承载特性模型试验研究: 基于静力触探试验 [J]. 高校地质学报, 2021, 27(6):784-788. DOI:10.16108/j.issn1006-7493.2020212.
- [42] GOROSPE C M, HAN S H, KIM S G, *et al.* Effects of different calcium salts on calcium carbonate crystal formation by *Sporosarcina pasteurii* KCTC 3558 [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering, 2013, 18(5):903-908. DOI:10.1007/s12257-013-0030-0.
- [43] ZHANG Yie, GUO Hongxian, CHENG Xiaohui. Influences of calcium sources on microbially induced carbonate precipitation in porous media [J]. Materials Research Innovations, 2014, 18(S2):79-84. DOI:10.1179/1432891714Z.000000000384.
- [44] LIU Dagang, CHENG Huihuang, CHANG P R, *et al.* Biomimetic soyprotein nanocomposites with calcium carbonate crystalline arrays for use as wood adhesive [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(15):6235-6241. DOI:10.1016/j.biortech.2010.02.107.
- [45] PHUA Y J, ROYNE A. Bio-cementation through controlled dissolution and recrystallization of calcium carbonate [J]. Construction and Building Materials, 2018, 167(10):657-668. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.059.
- [46] CUI Mingjuan, LAI Hanjiang, HOANG T, *et al.* One-phase-low-pH enzyme induced carbonate precipitation (EICP) method for soil improvement [J]. Acta Geotechnica, 2020, 16(8):1-9. DOI:10.1007/s11440-020-01043-2.
- [47] NAFISI A, SAFAVIZADEH S, MONTOYA B M. Influence of microbe and enzyme-induced treatments on cemented sand shear response [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(9):06019008. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002111.
- [48] KNORR B. Enzyme-induced carbonate precipitation for the mitigation of fugitive dust [D]. Arizona: Arizona State University, 2014.
- [49] GAO Yaqing, HUA Chen, KE Tong. Field test on soybean-urease induced calcite precipitation (SICP) for desert sand stabilization against the wind-induced erosion [J]. Sustainability, 2022, 14(22):15474. DOI:10.3390/su142215474.
- [50] 张建伟, 王小锯, 李贝贝, 等. EICP-木质素联合固化粉土的试验研究 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2):201-202. DOI:10.11835/j.issn.2096-6717.2020.155.
- [51] YANG Yuanjiang, LI Mingdong, TAO Xueqing, *et al.* The effect of nucleating agents on enzyme-induced carbonate precipitation and corresponding microscopic mechanisms [J]. Materials, 2022, 15(17):5814. DOI:10.3390/ma15175814.
- [52] DAVIS K J, DOVE P M, DE YOREO J J. The role of  $Mg^{2+}$  as an impurity in calcite growth [J]. Science, 2000, 290(5494):1134-1137. DOI:10.1126/science.290.5494.1134.
- [53] CHANDRA A, RAVI K. Effect of magnesium incorporation in enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) to improve shear strength of soil [J]. Advances in Computer Methods and Geomechanics, 2020(56):333-346. DOI:10.1007/978-981-15-0890-5\_28.
- [54] REFAEI M, ARAB M G, OMAR M. Sandy soil improvement through biopolymer assisted EICP [C] // Geo-Congress 2020: Foundations, Soil Improvement and Erosion. Virginia: American Society of Civil Engineers, 2020:612-619. DOI:10.1061/9780784482780.060.
- [55] CHEN Tao, SHI Peiheng, LI Yi, *et al.* Biomineralization of varied calcium carbonate crystals by the synergistic effect of silk fibroin/magnesium ions in a microbial system [J]. Cryst Eng Comm, 2018, 20(17):2366-2373. DOI:10.1039/C8CE00099A.
- [56] ZHU Liping, LANG Chaopeng, LI Bingyan, *et al.* Characteristics of soybean urease induced  $CaCO_3$  precipitation

- [J]. *Geomechanics and Engineering*, 2022, 31(3): 281. DOI: 10.12989/gae.2022.31.3.281.
- [57] HANDLEY-SIDHU S, SHAM E, CUTHBERT M O, *et al.* Kinetics of urease mediated calcite precipitation and permeability reduction of porous media evidenced by magnetic resonance imaging[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2013, 10(5): 881-890. DOI: 10.1007/s13762-013-0241-0.
- [58] CHO G C, DODDS J, SANTAMARINA J C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: Natural and crushed sands[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2006, 133(5): 591-602. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2006)132:5(591).
- [59] MOGHAL A A B, LATEEF M A, MOHAMMED S A S, *et al.* Efficacy of enzymatically induced calcium carbonate precipitation in the retention of heavy metal ions[J]. *Sustainability*, 2020, 12(17): 7019. DOI: 10.3390/su12177019.
- [60] 边汉亮, 张旭钢, 韩一, 等. 大豆脲酶对  $Zn^{2+}$  污染土的修复试验研究[J]. *工业建筑*, 2022, 52(11): 67-70. DOI: 10.13204/j.gjzG20110216.
- [61] MIAO Linchang, WU Linyu, SUN Xiaohao. Enzyme-catalysed mineralisation experiment study to solidify desert sands[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 10611. DOI: 10.1038/s41598-020-67566-6.
- [62] SUN Xiaohan, MIAO Linchang, WANG Hengxing, *et al.* Enzymatic calcification to solidify desert sands for sandstorm control[J]. *Climate Risk Management*, 2021, 33: 100323. DOI: 10.1016/j.crm.2021.100323.
- [63] LIN Hai, SULEIMAN M T, BROWN D G. Investigation of pore-scale  $CaCO_3$  distributions and their effects on stiffness and permeability of sands treated by microbially induced carbonate precipitation (MICP)[J]. *Soils and Foundations*, 2020, 60(4): 944-961. DOI: 10.1016/j.sandf.2020.07.003.
- [64] 张茜, 叶为民, 刘樟荣, 等. 基于生物诱导碳酸钙沉淀的土体固化研究进展[J]. *岩土力学*, 2022(2): 1-13. DOI: 10.16285/j.rsm.2021.1249.
- [65] ALIOTTA L, CINELLI P, COLTELLI M. B, *et al.* Rigid filler toughening in PLA-calcium carbonate composites: Effect of particle surface treatment and matrix plasticization[J]. *European Polymer Journal*, 2019, 113: 78-88. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2018.12.042.
- [66] DILRUKSHI R A N, KAWASAKI S. Effective use of plant-derived urease in the field of geoenvironmental[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2016, 6(1): 2. DOI: 10.4172/2165-784X.1000207.
- [67] CHEN Minjie, LI Yafei, JIANG Xiaoru, *et al.* Study on soil physical structure after the bioremediation of Pb pollution using microbial-induced carbonate precipitation methodology[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 411: 125103. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125103.
- [68] ZHU Xuejiao, KUMARI D, HUANG M S, *et al.* Biosynthesis of CdS nanoparticles through microbial induced calcite precipitation[J]. *Materials and Design*, 2016, 98: 209-214. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.03.008.
- [69] TRIPTI K. pH modulates arsenic toxicity in *Bacilluslicheniformis* DAS-2[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 130: 240-247. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2016.04.029.
- [70] CATELANI T, PERITO B, BELLUCCI F, *et al.* Arsenic uptake in bacterial calcite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 222: 642-654. DOI: 10.1016/j.gca.2017.11.013.
- [71] QIAN Xinyi, FANG Chaolin, HUANG Minsheng, *et al.* Characterization of fungal-mediated carbonate precipitation in the biomineralization of chromate and lead from an aqueous solution and soil[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 164: 198-208. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.195.
- [72] XU Kai, HUANG Ming, ZHEN Jiajie, *et al.* Field implementation of enzyme-induced carbonate precipitation technology for reinforcing a bedding layer beneath an underground cable duct[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(4): 1011-1022. DOI: 10.1016/j.jrmge.2022.06.012.
- [73] WHIFFIN V S, VAN PAASSEN L A, HARKES M P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2007, 24(5): 417-423. DOI: 10.1080/01490450701436505.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 刘源岗)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202307003



# 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

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对 GLS10 型直线振动筛弹簧紧固螺栓松动故障, 结合软件 LABVIEW 和 NIUSB-6363 数据采集卡, 构建一种基于加速度传感器的振动筛螺栓松动故障诊断系统。通过拧松固定螺栓个数的方法, 模拟振动筛弹簧悬臂梁固定端松动故障。结果表明: 当振动筛悬臂梁固定端松动时, 其最大振幅明显减小, 其幅度为原先幅值的 53%, 可以有效判断故障类型; 当故障类型相同、故障程度不同时, 分析得到的加速度信号图谱互不相同, 且振幅差异明显, 可根据振幅的阈值来判断螺栓松动的故障程度。

**关键词:** 振动筛; 加速度传感器; 故障诊断; 螺栓松动

中图分类号: TH 133.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)01-0010-06

## Fault Diagnosis System for Bolt Loosening in Vibrating Screen Based on Acceleration Sensor

ZHU Laifa, JIN Huaxue, FAN Wei, LIU Bin

(School of Electromechanical and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** A vibrating screen bolt loosening fault diagnosis system based on acceleration sensors is constructed by combining LABVIEW software and NIUSB-6363 data acquisition card for the GLS10 linear vibrating screen spring fastening bolt loosening fault. The loosening fault of the fixed end of the vibrating screen spring cantilever beam was simulated by changing the number of loosening bolts. The results show that when the fixed end of the suspension arm of the vibrating screen is loose, its maximum amplitude significantly decreases to 53% of the original amplitude, which can be used to effectively determine the fault type. When the fault type is the same but with various degrees, the acceleration signal spectra obtained varies, and the difference of amplitude is significant, the fault degree of bolt loosening can be determined based on the threshold of the amplitude.

**Keywords:** vibrating screen; acceleration sensor; fault diagnosis; bolt looseness

振动筛是石矿加工行业的关键设备之一, 原煤的分选、清洗及砂石骨料的分选都要用到振动筛, 因此, 需要对振动筛进行准确有效的状态监测及故障诊断, 以保证振动筛的长期正常运行<sup>[1-3]</sup>。振动筛应用广泛, 由于其工作条件复杂, 容易产生各种机械故障。目前, 故障主要依靠设备上振幅牌人眼观察或采用人工手持式振动传感器依靠传统经验进行判断, 效率低下, 尤其是螺栓缺失的问题, 难以被及时准确地发现, 造成停工停产的严重后果<sup>[4-7]</sup>。利用仿真软件 LABVIEW 结合虚拟仪器技术进行信号采集

收稿日期: 2023-07-05

通信作者: 朱来发(1977-), 男, 高级实验师, 主要从事智能制造、机电控制的研究。E-mail: hquetc\_zhu@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52275530); 福建省自然科学基金资助项目(2020J01068); 新工科项目(E-JX20201518); 高等教育学会专项课题(22FJSYZD003)

和数据分析在各领域中应用广泛<sup>[8-12]</sup>, 将其应用于振动筛的故障诊断也是一种便捷高效的方法。

范伟等<sup>[13]</sup>提出变分模态分解(VMD)和递归量化分析(RQA)的故障诊断方法。Agarwalla 等<sup>[14]</sup>将模糊推理系统与遗传算法(GAS)相结合, 利用混合人工技术(AI)识别悬臂梁结构损伤, 并进行数学模拟, 得出许多系统的有效解。Shanmugam 等<sup>[15]</sup>开发了一种新型振动筛, 其振动模式为圆形, 新的振动筛在改变操作参数方面具有灵活性, 提供给筛台的圆形振动模式包括筛台中颗粒上的惯性力, 从而减少筛堵塞。乔靖宇等<sup>[16]</sup>将双层直线振动筛作为煤炭筛分设备, 对其进行静力学分析, 并在结构设计中筛箱及加强梁之间的连接形式进行优化, 避免应力集中现象的出现, 从而延长振动筛的使用寿命, 保证煤炭筛分的稳定可靠。

因此, 针对振动筛悬臂梁结构常出现的弹簧紧固螺栓松动故障, 采用软件 LABVIEW 和 NIUSB-6363 数据采集卡, 设计出一种基于加速度传感器的振动筛螺栓松动故障诊断系统。

## 1 硬件系统设计

### 1.1 GLS10 型振动筛结构

实验用振动筛为可调式自同步振动筛<sup>[17-18]</sup>, 其实物及结构示意图, 如图 1 所示。GLS10 型振动筛主要由筛箱、振动电机、支撑系统构成。筛箱整体由优质钢材焊接而成, 为了避免焊缝处应力集中导致开裂, 侧板和激振器大梁采用螺旋连接。筛网共 3 层, 筛孔尺寸自上而下递减, 筛分粒度分别为大于 1.2, 1.2~0.6, 0.6~0.3 mm 和小于 0.3 mm。

### 1.2 加速度传感器

选择的 ICP-31931 型美格信三轴加速度传感器采用现代集成电路技术将传统的电荷放大器置于传感器中, 所有高阻抗电路都密封在传感器内, 并以低阻抗电压方式输出, 具有测量信号质量好、抗干扰能力强和远距离测量等优点<sup>[19-20]</sup>。基于振动筛的运行参数, 振动检测平台采用 4 个三轴加速度传感器, 其技术参数, 如表 1 所示。

表 1 三轴加速度传感器的主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of three-axis acceleration sensor

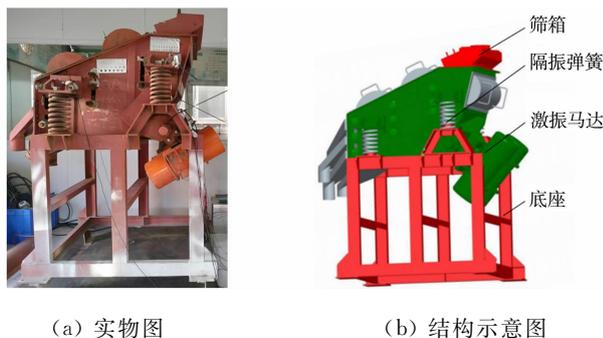
技术参数	参数值	技术参数	参数值
灵敏度 1(X,Y,Z)/mV · g <sup>-1</sup>	99.960, 99.862, 97.216	频率响应/Hz	0.5~3 000.0
灵敏度 2(X,Y,Z)/mV · g <sup>-1</sup>	94.276, 98.588, 103.194	工作温度/°C	-20~120
灵敏度 3(X,Y,Z)/mV · g <sup>-1</sup>	99.666, 94.472, 99.470	ICP 工作电压/V	18~30
灵敏度 4(X,Y,Z)/mV · g <sup>-1</sup>	97.902, 100.646, 95.550	ICP 工作电流/mA	2~10
最大允许加速度	50g		

传感器安装在 4 个弹簧的支撑头上座处, 即筛箱和弹簧的连接处, 采集 4 个测点 3 个方向共 12 通道的加速度信号。传感器的安装方式为磁力安装座安装, 其位置如图 2 所示。传感器的 X, Y, Z 轴分别采集振动筛水平方向、竖直方向、横向的加速度信号。

## 2 LABVIEW 软件系统

### 2.1 总体框架

采用软件 LABVIEW 设计信号采集与数据分析系统, 通过 LABVIEW 滤波预处理收集到的振动信号<sup>[21-23]</sup>, 并对信号进行分析与特征提取, 从而实时监测悬臂梁的振动信号。



(a) 实物图

(b) 结构示意图

图 1 GLS10 型振动筛及结构示意图

Fig. 1 GLS10 vibrating screen and structure diagram



图 2 GLS10 型振动筛传感器安装位置图

Fig. 2 Installation position diagram of GLS10 vibrating screen sensor

软件系统设计框图,如图 3 所示。在信号检测及预处理的基础上,软件系统设计包含了状态变量提取、状态诊断和诊断决策三部分内容。状态变量提取主要为数据采集模块,根据设计要求,分为单通道采集模式和多通道采集模式,可以对采集模式、采样率和采样数等参数进行设置,并建立故障阈值档案库。状态诊断模块主要对信号进行高低通带滤波,对预处理过的信号进行时频域分析。诊断决策模块主要根据实验分析结果,按照采集信号测量得到的振幅值,采用阈值法判断是否存在螺栓松动故障。

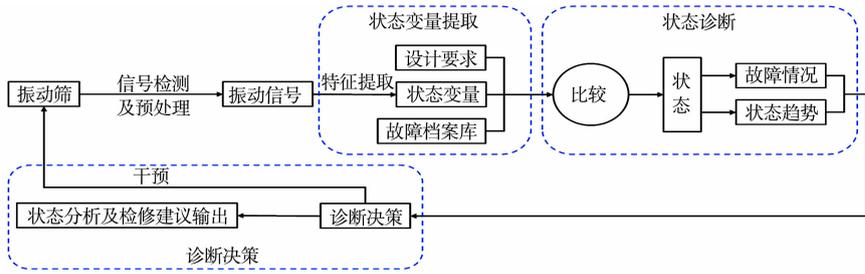


图 3 软件系统的总体设计框图

Fig. 3 Overall design diagram of software system

## 2.2 设计流程图

根据系统要求实现的功能确定总体框架,并遵循模块化程序的设计思想确定总体方案。采用从左到右的方法设计系统各部分的功能模块,将各模块组成一个系统整体。数据采集、信号预处理、信号分析及数据输出等模块组成振动筛信号采集与分析系统。系统运行流程图如图 4 所示。

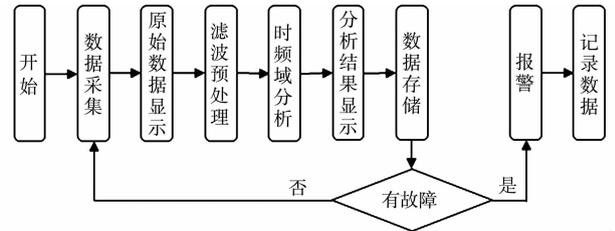


图 4 振动筛信号采集分析系统流程图

Fig. 4 Flow chart of vibrating screen signal acquisition and analysis system

## 2.3 信号采集模块设计

信号采集模块采用软件 LABVIEW 的插件 DAQ 助手创建采集加速度 IEPE 模式的任任务,首先,选择 cDAQ-9185 中的物理通道,cDAQ-9185 中有 3 个 NI 9234 振动采集模块共 12 通道,分别对这 12 个通道进行参数设置,采用连续采集的模式,并将采样率和采样数都设为 1 024;其次,启动采集任务,读取波形或信号数据;最后,结束采集任务并清理缓存。数据采集程序框图,如图 5 所示。

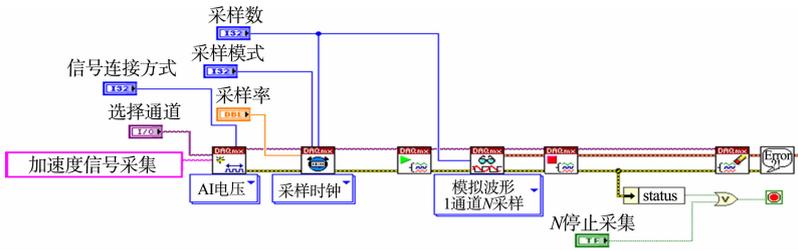


图 5 数据采集程序框图

Fig. 5 Data collection program block diagram

## 3 实验验证

### 3.1 振动筛故障诊断实验平台

振动筛悬臂梁故障诊断实验平台,如图 6 所示。采用 352C33 型压电式加速度传感器检测振动筛悬臂梁位置的振动信号,通过 LC0602 型信号放大器将采集到的振动信号进行放大滤波处理,采用 NIUSB-6363 数据采集卡将采集到的模拟信号转换为数字信号,并传到软件 LABVIEW 开发的数据采集系统中,以实现了对故障信号的采集与分析。



图 6 振动筛悬臂梁故障诊断实验平台  
Fig. 6 Experimental platform of vibrating screen cantilever fault diagnosis

### 3.2 正常工作状态下的数据

振动筛在正常工作时, 固定端螺栓全部处于拧紧状态。此时, 采集到的振动信号均为正常工作状态下的振动信号。通过数据分析得到振动筛正常工作状态下的加速度信号和幅值谱, 如图 7 所示。图 7 中:  $a$  为加速度;  $t$  为时间;  $A$  为振幅;  $f$  为频率。

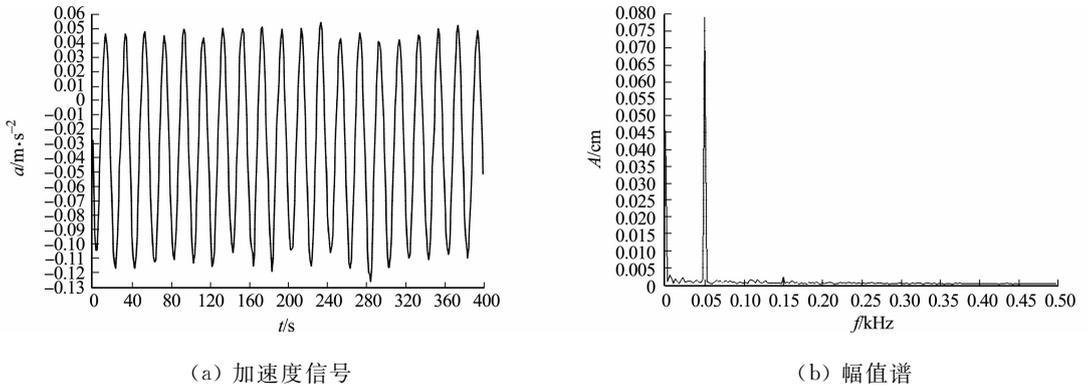


图 7 振动筛正常工作状态下的加速度信号与幅值谱

Fig. 7 Acceleration signal and amplitude spectrum of vibrating screen under normal working state

由图 7 可知: 振动筛的加速度信号基本稳定在  $-0.120 \sim 0.050 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$  之间波动, 且正向加速度最大不超过  $0.055 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ , 反向加速度最大不超过  $-0.126 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ; 振动筛的最大幅值出现在固有频率 51 Hz 时, 该振幅幅度太大, 因此应避免固有频率。

### 3.3 固定端松动故障分析

3.3.1 加速度信号与幅值谱对比 在正常工作状态下的振动筛悬臂梁的固定端上拧松一个固定螺栓, 模拟其松动故障, 得到振动筛在固定端松动与正常状态下的加速度信号和幅值谱对比, 如图 8, 9 所示。

由图 8 可知: 当振动筛悬臂梁固定端的一个螺栓松动时, 与正常工作状态相比, 测得的加速度信号

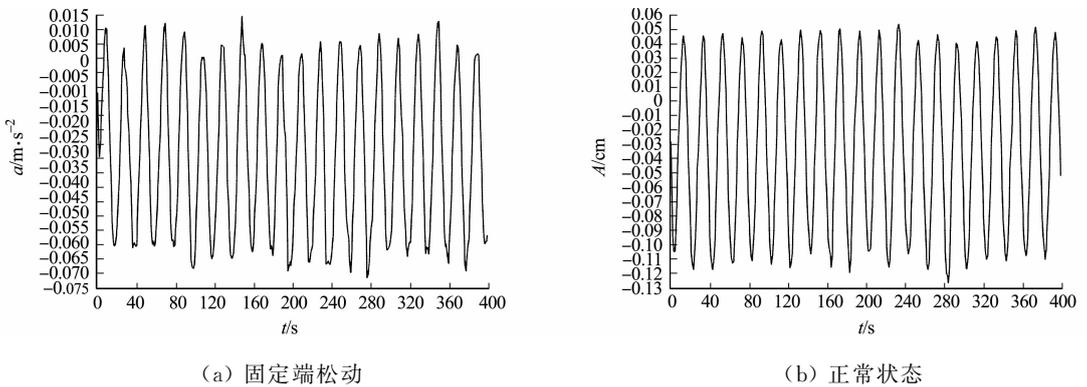


图 8 振动筛在固定端松动与正常状态下的加速度信号对比

Fig. 8 Comparison of acceleration signal between fixed end looseness and normal state of vibrating screen

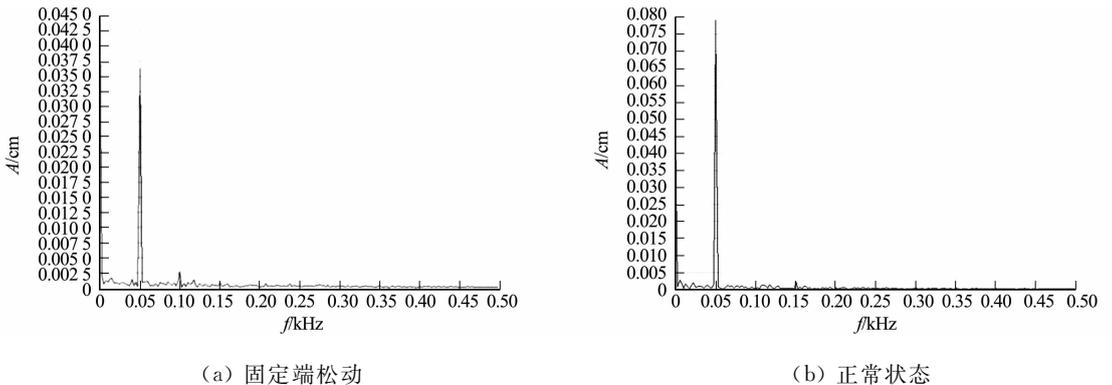


图 9 振动筛在固定端松动与正常状态下的幅值谱对比

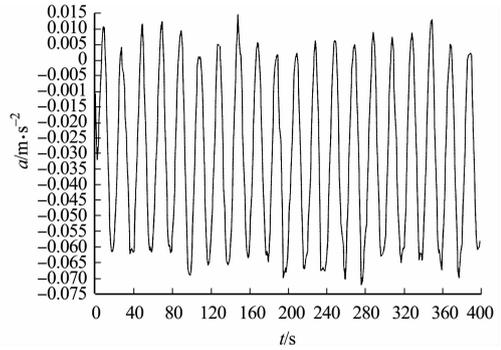
Fig. 9 Comparison of amplitude spectrum between fixed end looseness and normal state of vibrating screen

中正、反向加速度明显减小,在波动周期  $T/2$  和  $T$  附近( $T=200$  s),波形出现明显波动,可见加速度信号波形图不再规律。由此可判断此时该振动筛悬臂梁结构出现了固定螺栓松动的故障。

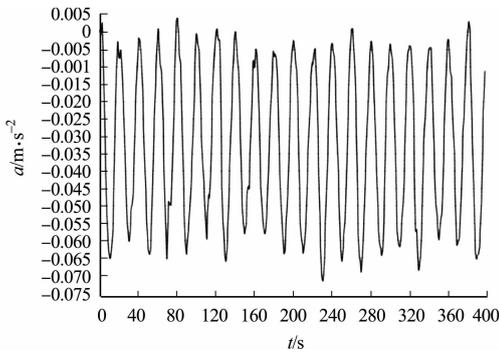
由图 9 可知:当振动筛悬臂梁固定端的一个螺栓松动时,最大幅值为 0.037 5 cm,与拧紧时的最大幅值 0.080 0 cm 相比减小了 53%。对比幅值谱可以判断振动筛悬臂梁出现了固定端松动的故障。

**3.3.2 固定端松动故障程度分析** 为了对振动筛悬臂梁固定端松动故障程度进行研究,分别模拟固定端缺失 1 个、2 个和 3 个固定螺栓时的情况,得到悬臂梁固定端松动不同故障程度的加速度对比图,如图 10 所示。

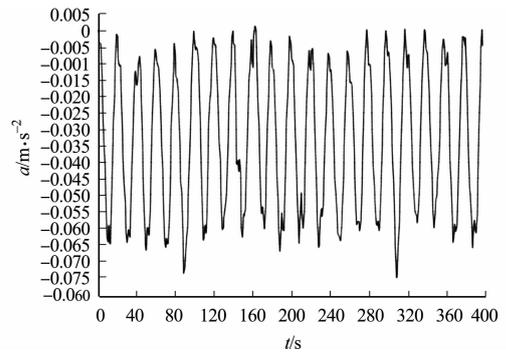
由图 10 可知:当固定端缺失 1 个固定螺栓时,波形在周期  $T/2$  和  $T$  附近出现波动;当缺失 2 个固定螺栓时,波形在周期  $T/2$  和  $T$  附近波动幅度变大;当缺失 3 个固定螺栓时,波形在周期  $T/2$  和  $T$  附近的波动幅度比缺失 2 个螺栓时更加明显( $T=200$  s)。因此,在固定端缺失固定螺栓的故障诊断中,可通过波峰的波动幅度判断缺失螺栓的故障程度。



(a) 缺失 1 个固定螺栓



(b) 缺失 2 个固定螺栓



(c) 缺失 3 个固定螺栓

图 10 固定端松动不同故障程度的加速度对比图

Fig. 10 Acceleration comparison diagrams of different fault degrees at fixed end looseness

对比图 10 的分析图谱可知:当振动筛悬臂梁故障类型相同但故障程度不同时,得到的加速度信号图也都互不相同,且振幅差异明显,因此可以根据振幅的阈值来有效判断螺栓松动的故障类型。相较于传统的将振幅牌贴在振动筛上根据振幅的黑点人工观测判断振动故障情况的方法,基于加速度传感器的振动筛故障诊断系统拥有更高的准确性和时效性。

## 4 结束语

针对 GLS10 型直线振动筛常见的弹簧紧固螺栓松动故障,结合软件 LABVIEW 和 NIUSB-6363 数据采集卡,设计一种基于加速度传感器的振动筛螺栓松动故障诊断系统。为实现对振动筛故障信号进行采集和分析的功能,采用加速度传感器、电荷放大器、数据采集卡及电脑组成的硬件系统和 1 个能实现数据采集、信号预处理、信号分析和结果输出 4 个功能模块的软件系统。通过拧松固定螺栓及改变松动螺栓个数的方法,分别模拟振动筛弹簧悬臂梁固定端松动故障。通过分析图谱可知,当悬臂梁故障类型不同时,其分析得到的加速度信号图谱也互不相同,且振幅差异明显。振动筛悬臂梁弹簧固定端松动时,其最大幅值减小的幅度为原先幅值的 53%,从而可以有效地判断其螺栓松动故障,为各种机械设备的故障振动检测提供一定的科学依据和参考。

## 参考文献:

- [1] 武瑞峰. 选煤厂振动筛运行状态及故障诊断系统的研究[J]. 机械管理开发, 2021, 36(9): 150-151. DOI: 10.16525/j.cnki.cn14-1134/th. 2021.09.064.
- [2] 陈华. 直线振动筛在线故障诊断方法研究及系统开发[D]. 厦门: 华侨大学, 2022.

- [3] 王喜升. 选煤厂振动筛运行状态监测及故障诊断研究[J]. 当代化工研究, 2022(21):104-107. DOI:10.3969/j.issn.1672-8114.2022.21.035.
- [4] 柴进, 张海斌, 高平小, 等. 基于特征融合的选煤厂振动筛故障诊断方法[J]. 煤炭工程, 2023, 55(6):158-163.
- [5] 陈华. 直线振动筛在线故障诊断方法研究及系统开发[D]. 厦门: 华侨大学, 2021.
- [6] 方涛. 双盘机械悬臂转子轴承碰摩故障检测方法[J]. 兰州工业学院学报, 2019, 26(3):34-38, 61. DOI:10.3969/j.issn.1009-2269.2019.03.007.
- [7] BARBOSA T S, FERREIRA D D, PEREIRA D A, *et al.* Fault detection and classification in cantilever beams through vibrationsignal analysis and Higher-Order statistics[J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2016, 27(5):535-541. DOI:10.1007/s40313-016-0255-1.
- [8] 张智艺. 基于 LABVIEW 的远程实时监控和故障诊断系统的开发[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(7):18-22. DOI:10.3969/j.issn.1001-425X.2019.07.005.
- [9] MITRA A C, JAGTAP A, KACHARE S. Development and validation of experimental setup for flexural formula of cantilever beam using NI-LABVIEW[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5(9):20326-20335. DOI:10.1016/j.matpr.2018.06.407.
- [10] 任艳波, 于海涛, 赵伟, 等. 基于 LABVIEW 的谐振式微悬臂梁传感器智能激励与检测系统[J]. 仪表技术与传感器, 2015(12):11-14. DOI:10.3969/j.issn.1002-1841.2015.12.004.
- [11] ADAV A, SINGH N K. Effects of accelerometer mass on natural frequency of a magnesium alloy cantilever beam [J]. Vibroengineering Procedia, 2019, 29:207-212. DOI:10.21595/vp.2019.21114.
- [12] 郭中华, 姚锡涛. 挖掘机动臂异响故障的排查方法[J]. 建设机械技术与管理, 2019, 32(6):57-58. DOI:10.13824/j.cnki.cmtm.2019.06.013.
- [13] 范伟, 何越雷, 王寅, 等. 基于 VMD-RQA 的直线振动筛激振力不平衡故障诊断[J]. 振动与冲击, 2021, 40(18):25-32. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2021.18.004.
- [14] AGARWALLA D K, KHAN A S, SAHOO S K. Application of genetic fuzzy system for damage identification in cantilever beam structure[J]. Procedia Engineering, 2016, 144:215-225. DOI:10.1016/j.proeng.2016.05.027.
- [15] SHANMUGAM B K, VARDHAN H, RAJ M G, *et al.* Evaluation of a new vibrating screen for dry screening fine coal with different moisture contents[J]. International Journal of Coal Preparation and Utilization, 2022, 42(3):752-761. DOI:10.1080/19392699.2019.1652170.
- [16] 乔靖宇, 李哲, 李仙国, 等. 双层直线振动筛的静力学分析优化[J]. 自动化应用, 2020(8):135-136. DOI:10.19769/j.zdhy.2020.08.052.
- [17] 苏旭. 振动筛健康状态监测方法研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2020.
- [18] 江方文. 振动筛故障特征提取及监测系统的开发[D]. 厦门: 华侨大学, 2017.
- [19] 李瑞君, 常振鑫, 雷英俊, 等. 基于 DVD 光学读取头的悬臂式低频加速度计[J]. 机械工程学报, 2019, 55(2):10-17. DOI:10.3901/JME.2019.02.010.
- [20] 唐小平, 张晨曦, 卢会湘, 等. LTCC 加速度计的悬臂微梁结构制造[J]. 电子工艺技术, 2019, 40(3):148-150, 186. DOI:10.14176/j.issn.1001-3474.2019.03.006.
- [21] 朱艳, 李曙生, 曹元军. 基于 LABVIEW 的船舶轴系在线故障检测[J]. 自动化与仪器仪表, 2016(1):33-35. DOI:10.14016/j.cnki.1001-9227.2016.01.033.
- [22] 杨青青, 马训鸣, 李海海, 等. 基于 LABVIEW 的冲击振动信号监测系统的设计[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(6):210-212. DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2017.06.058.
- [23] 卓兴成, 童一飞, 李东波. 基于 LABVIEW 的轴承振动信号分析系统设计与开发[J]. 机械设计与制造工程, 2019, 48(1):55-59. DOI:10.3969/j.issn.2095-509X.2019.01.014.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴跃勤)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202311037



# 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<sup>1</sup>, 易定容<sup>1</sup>, 黄彩虹<sup>2</sup>, 袁涛<sup>1</sup>, 梅小华<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 针对传统自动聚焦方法效率低,难以适应工业产品微观形貌检测高精度、高效率需求的问题,提出一种基于物方差动共焦轴向测量引导的显微镜自动对焦方法(DCAFM)。在获取测量系统中离焦量和轴向光强差之间的标定曲线后,控制运动机构使物镜与样本的轴向距离以等步距的方式采集图像。通过焦前与焦后位置光强差快速确定当前轴向离焦量,控制轴向运动机构,实现快速自动对焦。搭建显微镜自动对焦实验平台,对样品进行测试。实验结果表明:文中方法的图像对焦速度和灵敏度优于 DFT,EOG 等自动对焦方法,系统的轴向分辨率优于  $0.4 \mu\text{m}$ ,有效地提高了显微镜的对焦速度和精度。

**关键词:** 自动对焦方法; 轴向测量; 轴向差动共焦; 物方差动; 微观形貌检测

中图分类号: TP 391.7

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)01-0016-06

## Microscope Automatic Focusing Method Based on Height-Guidance of Object-Side Differential Confocal Axial Measurement

HAI Yongjie<sup>1</sup>, YI Dingrong<sup>1</sup>, HUANG Caihong<sup>2</sup>,  
YUAN Tao<sup>1</sup>, MEI Xiaohua<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low efficiency of traditional automatic focusing methods and difficulty in adapting to the high precision and high efficiency of microscopic morphology detection in industrial products, a microscope automatic focusing method based on the height-guidance of object-side differential confocal axial measurement is proposed. After obtaining the calibration curve between the defocus amount and the axial light intensity difference in the measurement system, the motion mechanism is controlled so that the axial distance between the objective lens and the sample is used to collect images at equal steps. The current axial defocus amount is determined quickly through the difference in light intensity between the front and back focus positions, and control the axial movement mechanism to achieve fast autofocus. A microscope autofocus experimental platform is built to test samples. Experimental results show that the image focusing speed and sensitivity of the proposed method are better than that of DFT, EOG and other automatic focusing methods, and the axial resolution of the system is better than  $0.4 \mu\text{m}$ , which effectively improves the focusing speed and accuracy.

收稿日期: 2023-11-27

通信作者: 梅小华(1980-),女,讲师,主要从事智能控制与应用系统的研究。E-mail:forest999@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(52375539);福建省自然科学基金面上基金资助项目(2021J01293);福建省自然科学基金重点资助项目(2020J02005)

of the microscope.

**Keywords:** autofocus method; axial measurement; axial differential confocal; object-side differential; micro-morphology detection

显微镜自动对焦技术在工业产品检测如 PCB 板检测<sup>[1]</sup>、生物样品高通量检测及数字病理诊断<sup>[2]</sup>中广泛应用。随着工业生产与科学研究的发展,传统自动对焦方法难以同时满足应用场景对精度和效率的要求,因此,提高自动对焦的精度与效率已经成为工业生产与生物科学研究领域亟待解决的问题。

目前,基于图像的自动对焦方法主要有离焦深度法<sup>[3]</sup>与聚焦深度法<sup>[4]</sup>。离焦深度法通过分析一系列离焦模糊图像的重要特征估计光学系统的点扩散函数,从而对光学系统参数进行建模,反推出离焦量。离焦深度法的缺点是估计出的点扩散函数无法应用于其他光学系统,具有一定的局限性。聚焦深度法通过采集不同轴向位置的序列图像,使用某种聚焦评价函数或图像清晰度评价函数,该函数反映图像离焦程度量化值与离焦量之间的关系。聚焦深度法的核心之一是根据应用场景选择或设计合适的聚焦评价函数,该方法具有不需要额外添加光学器件、方法泛化能力强等优点,已有学者针对聚焦评价函数展开研究,以提高自动对焦的效率与精度。熊锐等<sup>[5]</sup>对 Brenner 函数和 Roberts 函数进行改进,提出一种适合于多边缘方向的大尺度微纳器件的快速自动聚焦的聚焦评价函数,但该方法需要存储大量图像进行分析。为了减少自动对焦过程中需要分析的图像数量以提高对焦效率,李强等<sup>[6]</sup>设计一种基于深度学习的数字病理扫描系统单次曝光自动对焦方法,该算法输入离焦模糊图像,通过算法处理后直接获得对应的准焦图像,从原理上替代了传统方法对逐个子图像进行机械扫描调焦。周鹏等<sup>[7]</sup>提出一种基于三轴视觉测量系统的自动对焦技术,该方法共采集 7 张图像通过高斯拟合确定最终正焦位置,将光学离焦模型分解为 2 个曲线方程,提高了对焦效率。

基于聚焦深度法的自动对焦方法一定程度上依赖于聚焦评价函数的选择是否适用于测量场景<sup>[8]</sup>,容易产生对焦精度不足、对焦速度过慢等问题,需要根据不同的应用场景对不同的聚焦评价函数进行改进;而基于深度学习开发的自动对焦方法依赖训练集,并且应用场景较有针对性,该方法缺少普适性且需要处理大量数据<sup>[5,9]</sup>。由于共聚焦显微技术使用点探测,能够更加稳定地获得光强轴向响应曲线,样品参数不易对该曲线造成影响,因此可基于共焦成像的轴向层析特性,研究适用于共焦显微成像系统的自动对焦方法。基于此,针对传统自动对焦方法中聚焦评价函数普适性低、灵敏度低和对焦速度慢的问题,本文提出一种基于物方差动共焦轴向测量引导的显微镜自动对焦方法(DCAFM)。

## 1 原理及方法

### 1.1 自动对焦原理

差动共焦显微镜的原理示意图,如图 1 所示,其中,探测器端、点光源前的针孔是互相共轭的,非物镜焦平面上的绝大部分光线都会被针孔挡住,因此共焦显微镜探测器段具有较大的信噪比,所得成像的对比度和清晰度较高<sup>[10]</sup>。

DCAFM 主要基于差动共焦显微原理(图 1),光源中发出的白光通过准直透镜、全反射镜,经过数字微镜器件(DMD)将白光调制为周期点阵光,光线照射到样本表面上后反射至探测端成像。PI 电机带动物镜相对于当前轴向位置分别向上和向下移动轴向偏移量  $u_f$ ,并在移动完成后获取图像,从而获得两张图像以实现基于物方差动共焦轴向测量引导的自动对焦。

根据差动共焦轴向距离测量的原理获取灰度差与轴向离焦量的关系,基于该轴向光强差动曲线获取轴向离焦量,从而达到自动对焦的目的。根据刘志群<sup>[11]</sup>的相关研究,在差动共焦显微测量系统中,探测端光强与样品表面离焦量之间的关系,即轴向光强响应曲线的表达式为

$$I(u) = \left( \sin \frac{u}{2} / \frac{u}{2} \right)^2. \quad (1)$$

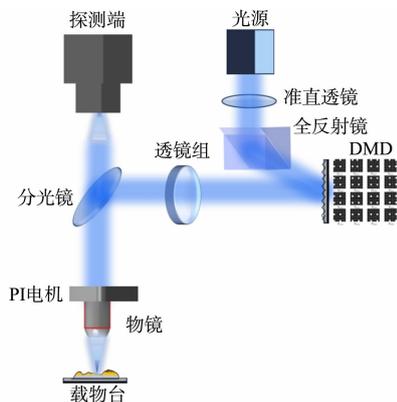


图 1 差动共焦显微镜的原理示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of principle of differential confocal microscope

式(1)中: $u$ 为样品表面轴向离焦量; $I(u)$ 为探测端接收到的光照强度;坐标原点为焦面位置。

为了进行系统标定,获取当前测量系统探测端光强差与离焦量的近似线性关系,设 $u_{\text{Pre}}$ 和 $u_{\text{Post}}$ 分别为焦前曲线和焦后曲线的轴向偏移量,并且此处 $u_{\text{F}} = u_{\text{Pre}} = u_{\text{Post}}$ 。

采用焦前轴向光强响应曲线 $I(u - u_{\text{Pre}})$ 与焦后轴向光强曲线 $I(u + u_{\text{Post}})$ 作差,表达式为

$$I_{\text{Differ}} = I_{\text{Pre}} - I_{\text{Post}} \quad (2)$$

式(2)中: $I_{\text{Differ}}$ 为差动光强信号; $I_{\text{Pre}}$ 为焦前光强信号, $I_{\text{Pre}} = I(u - u_{\text{Pre}})$ ;  $I_{\text{Post}}$ 为焦后光强信号, $I_{\text{Post}} = I(u + u_{\text{Post}})$ 。获得物方轴向测量差动曲线,如图2所示。

相比于传统共聚焦显微镜,差动共聚焦显微镜能够通过分析相对于焦面前、后对称的两个探测器位置的光强信息,快速获取物镜当前与焦面的距离。由于差动共聚焦原理下的轴向差动光强响应曲线的线性区具有较大的斜率,因此,能够有效提高对焦过程中的灵敏度。

根据Tan等<sup>[12]</sup>确定的Sinc2模型对共聚焦轴向响应曲线进行拟合,通过设定一定的轴向偏移量 $u_{\text{F}}$ ,获得焦前与焦后的轴向特性曲线,并使用焦前曲线与焦后曲线作差(图2),获得物方差动共聚焦轴向测量曲线仿真图,如图3所示。图3中:蓝色区域为线性区,具有轴向定位能力。根据光强的差值 $I_{\text{Differ}}(u)$ 能够对应当前样本表面的离焦量 $\Delta u = I_{\text{Differ}}^{-1}(\Delta u)$ ,实现轴向测量引导的自动对焦方法。

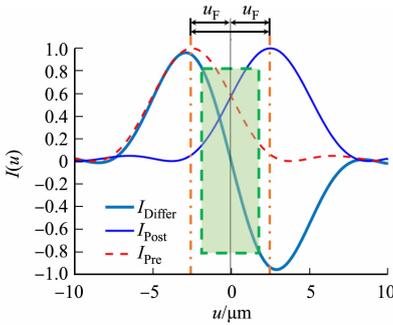


图2 差动共聚焦理论仿真

Fig. 2 Differential confocal theory simulation

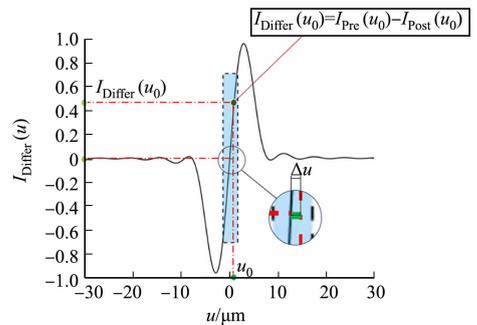
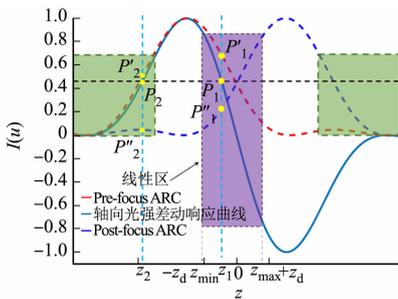


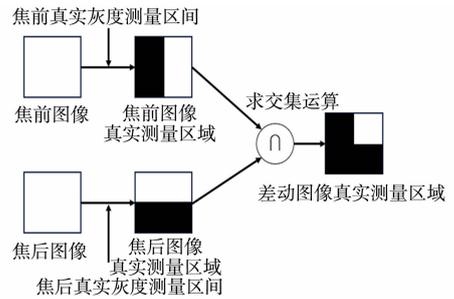
图3 物方差动共聚焦轴向测量曲线仿真图

Fig. 3 Simulation curve diagram of object-side differential confocal axial measurement

由于差动后的曲线的非线性区域不具有轴向定位能力,可能具有不唯一解导致无法对应正确轴向离焦量,因此,提出一种基于信息论的超量程判断方法(IT-ORDM)<sup>[10]</sup>对被测表面高度所属的曲线区域进行判断,以解决存在非唯一解的情况。基于信息论的超量程判断方法,如图4所示。图4中: $z$ 为轴向距离; $+z_d$ , $-z_d$ 分别为焦前、焦后轴向光强响应曲线峰值对应的轴向距离。



(a) 共聚焦轴向响应曲线



(b) IT-ORDM 示意图

图4 基于信息论的超量程判断方法

Fig. 4 Over range determination method based on information theory

假设对某点 $P_1$ (对应轴向距离 $z_1$ )的轴向离焦量进行判断,该点位于紫色区域内的线性区(对应轴向距离范围为 $[z_{\text{min}}, z_{\text{max}}]$ ),因此,在量程内可以得出正确的离焦量。但在图4(a)的绿色区域内,也存在一点 $P_2$ (对应轴向距离 $z_2$ ),该点相应地在焦前轴向光强响应曲线(Pre-focus ARC)和焦后轴向光强响应曲线(Post-focus ARC)上有2个点 $P'_2$ 和 $P''_2$ ,是超出测量量程的,与 $P_2$ 具有同一轴向距离 $z_2$ 。因此,在焦前和焦后图像中都可能存在超出量程的点和在量程内的点。IT-ORDM通过系统刻度曲线分别获得焦前与焦后图像中的真实测量区域,进而对焦前和焦后图像进行求交集运算,即可获得差动图像

的有效测量区域(图 4(b))。

### 1.2 共焦光学系统标定

差动共焦显微测量系统的实验平台,如图 5(a)所示。图像探测器采用滨松 sCMOS 相机、PlanFluor物镜(10 倍,数值孔径值为 0.3)和 Motic BA600Mot 显微镜架。通过测量系统刻度方法对所用测量系统进行刻度,刻度流程如图 5(b)所示。



图 5 差动共焦显微测量系统

Fig. 5 Differential confocal microscopy measurement system

分别将物镜移动至焦前 10  $\mu\text{m}$  与焦后 10  $\mu\text{m}$  处,以 0.2  $\mu\text{m}$  的步距获取 200 张层扫图像,对线性区曲线进行线性拟合,测量系统中的轴向响应曲线及差动曲线,如图 6(a),(b)所示。重复 5 组刻度试验,结果如图 6(c)所示,误差棒的中心为 5 组数据均值,棒长为标准差的两倍。

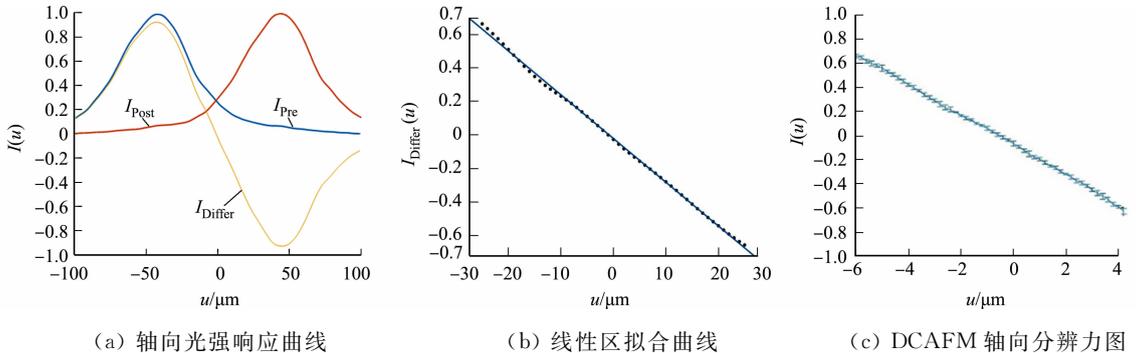


图 6 刻度试验结果及分析

Fig. 6 Results and analysis of calibration experiment

为验证文中方法的轴向分辨率,采用步距 0.2  $\mu\text{m}$ ,层扫 200 张图片进行多组重复性试验,作出文中方法的轴向分辨力图,最大标准差为 0.556,轴向分辨率高于 0.4  $\mu\text{m}$ 。经过对线性区域的线性拟合(图 6(b)),得到拟合式为

$$I_{Differ}(u) = -0.02608u - 0.02142. \quad (3)$$

### 1.3 自动对焦流程

DCAFM 流程图,如图 7 所示。DCAFM 具有以下 3 个步骤。

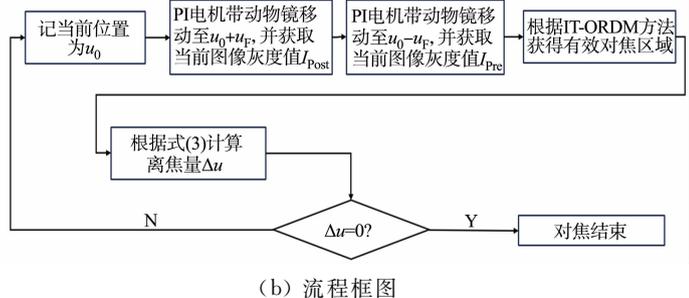
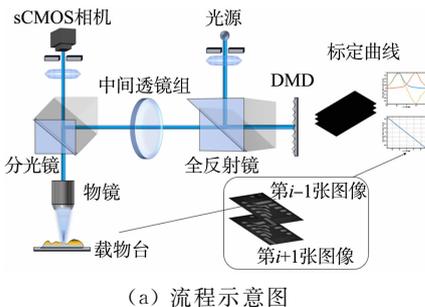


图 7 DCAFM 流程图

Fig. 7 Flow chart of DCAFM

1) 在获取的第  $i$  张样本图像的前、后轴向距离  $u_f$  位置获取 2 张样本图像灰度(即光强值)并作差,得到  $I_{Differ}$ 。

- 2) 判断被测样品的轴向高度是否超过对焦范围,获取图像中的有效离焦距离。
- 3) 根据步骤 2)中所获取的有效离焦距离进行对焦。

## 2 实验结果与分析

传统自动对焦方法的核心是对焦评价函数,其性能好坏直接影响最终的对焦效果。目前的图像清晰度评价函数主要有基于图像梯度的评价函数、频域评价函数、信息熵评价函数和统计学评价函数。因此,为验证 DCAFM 的自动对焦性能,采用 4 种具有代表性的清晰度评价函数进行自动对焦过程模拟,将实验结果与文中方法进行对比。分别选取文献[12]中的能量梯度函数(EOG)、二维离散傅里叶变换(DFT)法、信息熵清晰度评价函数及 Variance 函数进行自动对焦性能对比实验。

分别采用 DCAFM、EOG、DFT、信息熵清晰度评价函数、Variance 函数等方法,以  $0.2 \mu\text{m}$  为步距对金手指样品进行层扫,从而获取不同离焦程度样本图像,并对所得样本图像进行清晰度评价。DCAFM 测试用样本焦面图像,如图 8 所示。使用常用清晰度评价函数进行对比,如图 9 所示。由图 9 可知:相比于其他方法,DFT 方法寻找焦面的误差较大,不符合单峰性,存在一定的轴向距离偏移。

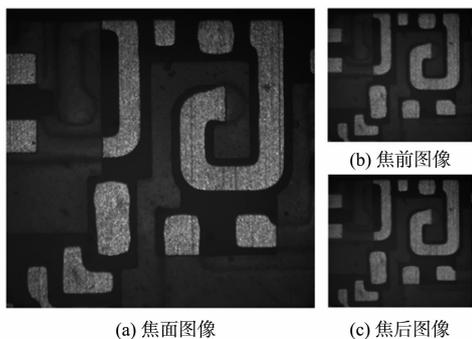


图 8 DCAFM 测试用样本图像

Fig. 8 Sample images for DCAFM testing

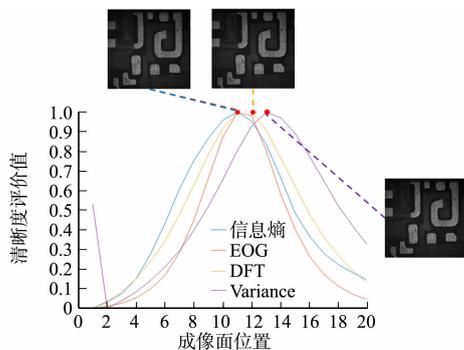


图 9 常用清晰度评价函数对比图

Fig. 9 Comparison chart of commonly used clarity evaluation functions

采用自动对焦评价函数的灵敏度、陡峭度、对焦效率等参数对不同方法的对焦性能进行比较。在轴向相等步距的情况下,灵敏度  $S_{\text{en}}$  的计算式<sup>[15]</sup>为

$$S_{\text{en}} = \frac{\text{Score}_{\text{max}}(j) - \text{Score}(j \pm 1)}{\text{Score}(j \pm 1)} \quad (4)$$

式(4)中:Score 为某图像的清晰度得分; $j$  为层扫图像序列的索引; $\text{Score}_{\text{max}}(j)$  为某清晰度评价函数下的最高清晰度得分。

对焦效率使用 Matlab 中的代码运行时间为标准。由于 DCAFM 对焦所用曲线为一条直线,因此,使用灰度差值为 0 的点作为  $\text{Score}_{\text{max}}$  所在的点。

不同自动对焦方法的性能对比,如表 1 所示。表 1 中: $t$  为对焦时间。由表 1 可知:相比传统自动对焦方法,DCAFM 在灵敏度及对不同离焦距离图像的分辨能力上有显著提升;在自动对焦效率方面,相比于文献[4]中提出的需要获取 7 张图片的自动对焦方法,DCAFM 仅需提取 2 张图片的信息即可完成对焦;相比于传统的基于图像处理的自动对焦方法,DCAFM 对焦所用的时间缩短了 80% 以上。

表 1 不同自动对焦方法的性能对比

Tab. 1 Performance comparison of different autofocus methods

方法	$S_{\text{en}}$	$t/\text{s}$
DFT	$1.45 \times 10^{-3}$	46.50
EOG	$8.95 \times 10^{-3}$	26.55
Variance 函数	$2.92 \times 10^{-3}$	22.54
信息熵函数	$9.06 \times 10^{-4}$	56.60
DCAFM	$2.61 \times 10^{-2}$	3.92

## 3 结束语

通过对共聚焦显微镜的原理进行讨论,提出基于物方差动共焦轴向测量引导的显微镜自动对焦方法。该自动对焦方法基于物方差动共焦轴向距离测量原理,在检测过程中只需采集 2 幅图像即可完成对焦;同时,用于对焦的曲线灵敏度较大,轴向分辨率高于  $0.4 \mu\text{m}$ ,因此,能够实现较高的对焦效率、精

度和较好的普适性。经过实验验证, 相比传统基于图像算子的自动对焦方法, DCAFm 可以提高工业产品自动光学检测过程中获取图像的质量, 提高基于自动光学检查(AOI)方法的工业产品缺陷自动检测效率和精度。

### 参考文献:

- [1] DAVE N, TAMBADE V, PANDHARE B, *et al.* PCB defect detection using image processing and embedded system [J]. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2016, 3(5): 1897-1901.
- [2] LIAO Jun, JIANG Shaowei, ZHANG Zibang, *et al.* Terapixel hyperspectral whole-slide imaging via slit-array detection and projection[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2018, 23(6): 066503. DOI:10.1117/1.JBO.23.6.066503.
- [3] SUBBARAO M, SURYA G. Depth from defocus: A spatial domain approach[J]. *International Journal of Computer Vision*, 1994, 13(3): 271-294. DOI:10.1007/BF02028349.
- [4] XIONG Yalin, SHAFER S A. Depth from focusing and defocusing[C]// *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. New York: IEEE Press, 1993: 68-73. DOI:10.1109/CVPR.1993.340977.
- [5] 熊锐, 顾乃庭, 徐洪艳. 一种适应多方向灰度梯度变化的自动对焦评价函数[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(4): 373-380. DOI:10.3788/LOP202259.0418001.
- [6] 李强, 刘贤明, 韩凯歌, 等. 基于深度学习的数字病理扫描系统单次曝光自动对焦方法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2021, 51(10): 1675-1689. DOI:10.1360/SSI-2020-0349.
- [7] 周鹏, 胡成海, 毕超, 等. 三轴视觉测量系统自动对焦技术[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(12): 443-450. DOI:10.3788/IRLA20210141.
- [8] QU Yufu, ZHU Shenyu, ZHANG Ping. A self-adaptive and nonmechanical motion autofocusing system for optical microscopes[J]. *Microscopy Research and Technique*, 2016, 79(11): 1112-1122. DOI:10.1002/jemt.22765.
- [9] BIAN Zichao, GUO Chengfei, JIANG Shaowei, *et al.* Autofocusing technologies for whole slide imaging and automated microscopy[J]. *Journal of Biophotonics*, 2020, 13(12): e202000227. DOI:10.1002/jbio.202000227.
- [10] 高兴宇, 伍世荣, 萧泽新. 一种现代先进成像技术: 共焦显微术[C]// 2004 全国光学与光电子学学术研讨会、2005 全国光学与光电子学学术研讨会、广西光学学会成立 20 周年年会论文集. 桂林: 广西光学学会, 2005: 250-252.
- [11] 刘志群. 差动并行共聚焦高精度快速三维表面形貌测量方法研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2020.
- [12] TAN Jiubin, LIU Chenguang, LIU Jian, *et al.* Sinc2 fitting for height extraction in confocal scanning[J]. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, 2015, 27(2): 025006. DOI:10.1088/0957-0233/27/2/025006.
- [13] YUAN Tao, YI Dingrong, YE Yiqing, *et al.* Differential confocal over range determination method based on information theory[J]. *Applied Optics*, 2023, 62(8): 2073-2077. DOI:10.1364/AO.484018.
- [14] 熊锐. 基于数字图像处理的显微自动对焦技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2021.
- [15] 王焯茹. 基于数字图像处理的自动对焦方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202308014



# 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

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 直接抽签定标法、票决定标法及票决低价定标法等定标办法均没有综合考虑定标候选人报价和综合得分, 择优竞价性相对较差. 基于物有所值(VFM)理论创新性地提出了票决指数法. 对我国评定分离办法试点情况进行梳理, 基于 VFM 理论构建票决指数法的初步模型和最合适区域模型, 对比分析票决指数法与其他票决办法. 结果表明: 票决指数法是一种科学有效的评定分离定标办法, 可为招标人更科学择优竞价定标提供一定的理论指导.

**关键词:** 工程招标; 物有所值(VFM); 评定分离; 定标办法; 票决指数法; 择优竞价

**中图分类号:** TU 723.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2024)01-0022-07

## Assessment Separation Method for Engineering Bidding Evaluation From Perspective of Value for Money

QI Shenjun, CHEN Jingjing, WANG Ya, ZHAN Zhaoxi

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

**Abstract:** The bidding methods such as direct signing bidding method, vote decision bidding method and vote decision low price method do not comprehensively consider the bidding candidates' quotation and comprehensive score, the competitive bidding performance is relatively poor. Based on the value for money (VFM) theory, an innovative vote index method is proposed. The pilot situation of China's evaluation separation method is sorted out, based on VFM theory, the preliminary model of voting index method and the most suitable region model are constructed, and then vote index method is compared with other vote methods. The results show that the vote index method is a scientific and effective evaluation separation method, it provides certain theoretical guidance for bidders to make more scientific and optimal bidding decisions.

**Keywords:** engineering bidding; value for money (VFM); assessment separation; bidding method; vote index method; competitive bidding

目前, 广东、浙江、江苏、福建、安徽、河北、江西、山东、湖北、四川、黑龙江、宁夏、湖南、河南等 14 个省(超过 60 个城市)推行评定分离招标. 票决指数法将物有所值(VFM)理论运用到定标办法中, 结合综合得分和投标报价, 使用价值系数定量推选价值系数(综合得分/投标报价)最高的投标人为中标人, 再根据招标需求辅以最合适区域法加以筛选, 寻求一种可供选择的定标办法服务于建设工程项目评定分离定标活动, 解决了票决过程中出现的人为因素干扰、难以择优竞价的难题, 满足择优竞价的需求.

**收稿日期:** 2023-08-10

**通信作者:** 祁神军(1982-), 副教授, 博士, 主要从事建筑招投标的研究. E-mail: qisj972@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资助项目(2020R0055)

票决指数法综合考虑招标人极为关注的投标报价和投标人的多重属性, 力求以最低价格得到最大的利润和价值, 从而客观选出最高性价比的中标者<sup>[1-3]</sup>。

## 1 评定分离办法

招标人作为招投标的市场主体, 肩负着对工程进度、资金控制、施工质量、工程收益、项目变更等多方面的全部责任, 却没有选择中标人的自主决策权。身负评标权和间接定标权的评标委员会多为临时机构, 既非法人, 也非自然人, 既无法承担民事责任, 也无法承担刑事责任, 权利和义务不对等。在多数情况下, 评标委员会并不能准确认识招标人的实际需求, 推选出的中标人在实力、信誉和履约情况等方面与招标人的期待存在极大的落差。由于权责错位、不够完善的诚信评价体系建设, 评标委员会极易成为众投标人围标、串标的“狩猎对象”。

评定分离办法将常规招投标的专家评标过程分为评标委员会评标和定标委员会定标两个相互独立的阶段, 让错位的定标权重返招标人, 实现招标人的权责统一。评定分离招投标演变过程, 如图 1 所示。

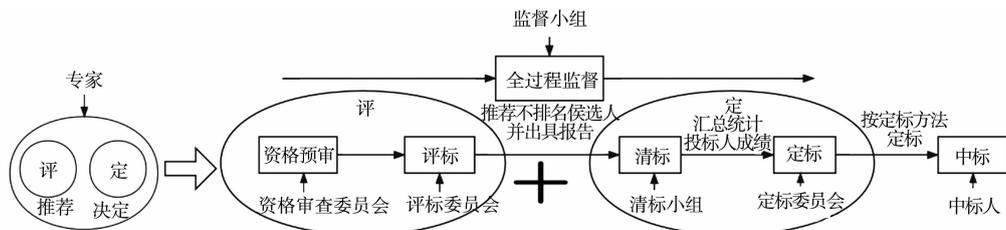


图 1 评定分离招投标演变过程

Fig. 1 Process of assessment separation bidding evolution

评定分离办法的评标委员会只负责对投标文件的技术、报价、资质等做出定性评审意见, 向招标人推荐不少于 3 名不排序的合格定标候选人, 并出具书面评标报告, 说明中标候选人的优势、风险等评审情况。由招标人组成的定标委员会综合投标人实力、信誉、履约能力等情况, 根据项目实际情况, 采取合法合理的定标办法, 择优选择中标人。

## 2 票决指数法模型的构建

### 2.1 物有所值理论

有效的公共部门采购应以物有所值(VFM)为基础<sup>[4]</sup>, 采购过程涉及各个阶段, 供应商的选择阶段显著影响采购结果的完成<sup>[5]</sup>。为了服务共同利益, 公共采购的目标, 应购买 VFM 的商品和服务<sup>[6]</sup>。实际上, 这意味着将合同授予提供最佳性价比的投标人, 而不是基于最低价格的投标人。

评估投标人的一些参数是无形的, 招标人很难在进行客观衡量。VFM 不仅限于成本, 还包括质量或非财务方面, 就是以尽可能优惠的价格实现预期的招标目标, 招标目标不一定是最低的价格, 而是对投标人财务和非财务方面的公平评估。要确定商品或服务是否物有所值, 应该考虑其整体生命周期成本, 而不是最低价格<sup>[6]</sup>。Mc Kevitt 等<sup>[7]</sup>认为, VFM 始终致力于质量与成本之间的权衡, 然后将这些标准以具体的方式传达给投标人。Olatunji 等<sup>[8]</sup>将 VFM 定义在项目中, 以达到客户满意度目标, 即招标人基于择优竞价原则选到价格和质量均满意的投标人。

一些常见的公共采购目标如下: 1) 获得最高性价比, 以最具竞争力的价格获得尽可能好的质量<sup>[9]</sup>; 2) 鼓励供应商之间的竞争, 确保政府尽可能以优惠的价格获得最好的商品或服务<sup>[4]</sup>。Bergman 等<sup>[10]</sup>将质量和价格相结合, 使用质量对价格或价格对质量的评分。在欧盟, 更多的供应商将价格和质量合并为总分, 或使用加权函数将价格和质量(或价格分数和质量分数)组合成单个值, 再对不同的出价进行比较和排序。

### 2.2 票决指数法

票决指数法指的是定标候选人的综合得分(满足资质条件的企业实力、荣誉信誉、技术方案等方面的综合表现得分)与投标报价的比例关系。为使综合得分和投标报价归一化, 价值系数(V)为

$$V = F/C. \quad (1)$$

式(1)中: $F$ 为综合得分系数,即投标人综合得分占有进入票决定标阶段的投标人综合得分总分的比例; $C$ 为投标报价系数,即投标报价占有进入票决定标阶段的投标总报价的比例。

### 2.3 票决指数法模型

2.3.1 初步模型构建 设有  $m$  个定标候选人,每个候选人的投标报价设为  $A_i (i=1,2,\dots,m)$ ,综合得分设为  $B_i (i=1,2,\dots,m)$ 。每个候选人的投标报价系数归一化( $C_i$ )为

$$C_i = A_i / \sum_{i=1}^m A_i. \quad (2)$$

每个候选人的综合得分系数归一化( $F_i$ )为

$$F_i = B_i / \sum_{i=1}^m B_i. \quad (3)$$

每个候选人的价值系数  $V$  归一化( $V_i$ )为

$$V_i = F_i / C_i. \quad (4)$$

当  $V \geq 1$  时,表明投标人资质优异且能以较低的投标报价完成项目;当  $V < 1$  时,表明投标人投标报价过高,或综合资质不能达标。因此,招标人可选择  $V \geq 1$  且价值系数最大的投标人作为中标人。

2.3.2 最合适区域模型 最合适区域模型可避免选择价值指数最大但投标报价过低的定标候选人,同时避免定标的离散型和盲目性。以成本系数为横坐标,功能系数为纵坐标,与横轴成  $45^\circ$  的一条直线为价值标准线( $V=1$ ),价值标准线与两条双曲线包络而成的阴影区域为最合适区域。功能系数( $y$ )表达式为

$$y = \sqrt{x^2 \pm 2s}. \quad (5)$$

式(5)中: $s$ 为给定的常数。

最合适区域图,如图2所示。在定标过程中,应根据中标候选人的数确定  $s$  大小, $s$  随着中标人数的增加而减少。若给定的  $s$  较大,则两条曲线距离价值标准线的差异就越大,所形成的最合适区域越大,可供选择的合格中标候选人越多。反之,给定的  $s$  较小,则形成的最合适区域越小,可供选择的中标候选人越少。最合适区域内的投标人既不宜太多,也不宜太少。当 80% 左右的投标人分布在阴影区域内,则可认为当前区域为最合适区域。

即使价值系数相同,各自的综合得分与投标报价的绝对值也不一定相同,价值系数极大影响投标人的筛选。最合适区域能在价值系数基础上进一步做出区分,优先选择落于最合适区域内的投标人。当  $V \geq 1$  时,点落于最合适区域的左上方,即投标人的综合得分高于投标报价;当  $V < 1$  时,点将落在最合适区域的右下方,即投标人的投标报价高于综合得分。选择落在最合适区域中价值系数最大的投标人。

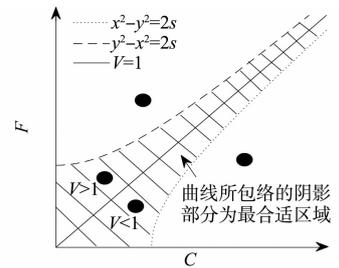


图2 最合适区域图  
Fig. 2 Most suitable region

### 2.4 票决指数法定标的基本程序

采用票决指数法进行定标,可以直接选择价值系数,也可在价值系数的基础上采用最合适区域进行选择,具体有如下4个步骤:

- 1) 根据各入围定标候选人的投标报价,通过式(2)计算投标报价系数;
- 2) 根据各入围定标候选人的综合得分,运用式(3)计算综合得分系数;
- 3) 结合式(4)计算入围定标候选人的价值系数;

4) 若无特殊要求,可直接使用价值系数法,从  $V \geq 1$  中选择价值系数最大者为中标人,如需进一步筛选,可依据式(5)构建最合适区域, $s$  的选择可采用试选法,通过反复调整  $s$ ,使超过 80% 的中标人落在绘制区域。选择最合适区域中价值系数最大者为中标人。

### 2.5 定标办法的比较

投标报价始终是作为招标人衡量投标人的关键因素,但文献[11-13]认为,招标人还应该考虑价格以外的多重标准,否则容易导致对质量的妥协。票决指数法定标不仅基于投标报价,还考虑了投标人的

综合价值,实现了择优和竞价高度结合<sup>[14]</sup>。现有的定标办法在择优和竞价方面各有侧重,票决指数法与其他定标办法对比,如表 1 所示。

表 1 票决指数法与其他定标办法对比

Tab. 1 Comparison between vote index method and other calibration methods

定标办法	主要特征	优点	缺点	适用情形	票决指数法与之对比的优点
直接抽签定标法	随机抽签选取中标人	程序简单、成本低、廉政风险低	择优性或竞价性不强	候选人投标报价、实力相当	择优竞价
价格竞争定标法	选取投标报价最低者为中标人	程序简单、成本低、合理竞价	择优性不强	技术难度较低,候选人实力相当、投标报价悬殊	高度择优
票决定标法	直接票决或逐轮票决,依票决排名确定中标人	择优、竞价程度低	竞价程度低、廉政压力大	技术难度较高,履约征信差异较大	竞价充分,无廉政压力
票决抽签定标法	先投票选出不少于 3 名候选人,再随机抽签确定 1 名中标人	降低廉政风险,优中选随机选人	相对择优竞价,效率易受影响	招标人内控机制完善	高度择优、合理竞价
抽签票决定标法	随机抽取不低于 3 名候选人,再票决确定中标人	票决难度和压力降低	中标人可能实力一般,投标报价不合理	候选人实力和投标报价相差不大	中标人实力和投标报价匹配
票决低价定标法	投票确定不少于 3 名候选人,选择投标报价最低者	择优竞价有机结合	投标报价最低者,综合实力不一定靠前	候选人实力相当,投标报价悬殊	中标人实力和报价匹配
集体议事法	集体商议,定标委员各自发表意见,最终由组长确定中标人	择优竞价有机结合	效率低,或无法达成共识,廉政压力大	技术含量较高,定标委员会成员偏好不同	程序透明,效率高,无廉政压力
竞争性磋商法	投票表决不少于 3 名投标人,就投标报价、技术等磋商,票决出最终中标人	票决得分相近时,可进一步择优和竞价	程序繁琐、耗时较长、成本较高	定标时间充裕,候选人得分相近	程序简单,节约成本
票决指数法	投票表决不少于 3 名投标人,以价值系数最高者为中标人	优中选优、合理竞价、廉政压力小	投标人数量多、前期票决效率低	综合得分和投标报价成正比	—
综合评分法	量化技术、商务等指标汇总比较,分数最高者为中标人	投标人综合水平高	指标权重易设置不合理,综合水平不一	工期紧张、技术复杂的大型项目	选择价低质优的投标人
经评审最低投标价中标法	以投标报价为参考基数,量化投标报价外其他因素,取最低价为中标人	施工总成本低	工程质量较难满足标准	工期、技术无特殊要求的一般项目	成本得到控制且质量过关

公共采购应当透明和公正,招投标也不例外,所有潜在投标人都遵循明确的规则和程序<sup>[15]</sup>。票决指数法借助价值系数定量化指标,为招标人挑选出优质价低的中标人,从而以尽可能优惠的价格获得高质量的服务,尽量减少风险并确保遵守法律和条例要求<sup>[16]</sup>,平衡招标人对择优和竞价两方面的需求。

### 3 实例研究结果与分析

#### 3.1 案例背景

大型施工项目为福建省某市保障性安居工程,总用地面积为 47 753 m<sup>2</sup>(含地下连通通道 187 m<sup>2</sup>),建安投资额约为 10.108 亿元,总建筑面积为 277 942 m<sup>2</sup>。总工期为 1 031 d,定额工期为 1 288 d,开标时间为 2022 年 9 月 15 日,开工日期为 2022 年 9 月 27 日。评标办法采用定性评审法,定标办法采用票

决定标法中的直接票决定标法,中标人为6号。

### 3.2 基于票决指数法的定标

为进一步验证科学性,构建最合适区域, $s$ 取值0.35,为更好增加区分度,投标报价系数和综合得分系数均扩大25倍,超过80%的定标候选人皆落于最合适区域。6号为最合适区域中价值系数最大者,结果仍与实际中标人相符,如图3所示。

定标候选人价值系数的计算,如表2所示。表2中:编号为定标候选人编号。

### 3.3 结果对比分析

投标人的确定与 $s$ 相关, $s$ 随机,中标人不同。不同 $s$ 的定标候选人价值系数计算,如表3所示。

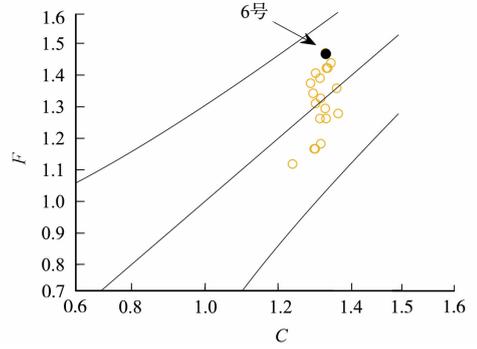


图3 最合适区域法中标人确定

Fig. 3 Determination of winning bidder for most suitable regional method

表2 定标候选人价值系数的计算

Tab. 2 Calculation of value coefficient of calibration candidate

编号	投标报价/元	C	综合得分	F	V	排序
6	842 828 914.59	0.053 1	92.00	0.058 8	1.107 3	1
3	825 910 033.17	0.052 1	88.00	0.056 3	1.080 6	2
18	852 254 406.00	0.053 7	90.00	0.057 5	1.070 8	3
15	844 486 164.00	0.053 2	89.00	0.056 9	1.069 5	4
11	817 040 134.75	0.051 5	86.00	0.055 0	1.068 0	5
1	846 598 964.53	0.053 4	89.00	0.056 9	1.065 5	6
5	833 310 808.00	0.052 5	87.00	0.055 6	1.059 0	7
12	821 433 049.00	0.051 8	84.00	0.053 7	1.036 7	8
8	834 548 786.60	0.052 6	83.00	0.053 1	1.009 5	9
19	825 768 774.97	0.052 1	82.00	0.052 4	1.005 8	10
2	862 190 470.45	0.054 4	85.00	0.054 3	0.998 2	11
14	842 404 051.00	0.053 1	81.00	0.051 8	0.975 5	12
10	833 309 167.48	0.052 5	79.00	0.050 5	0.961 9	13
13	843 865 644.40	0.053 2	79.00	0.050 5	0.949 2	14
17	864 790 413.87	0.054 5	80.00	0.051 2	0.939 4	15
16	785 866 162.00	0.049 6	70.00	0.044 8	0.903 2	16
7	823 388 907.09	0.051 9	73.00	0.046 7	0.899 8	17
4	834 738 089.09	0.052 6	74.00	0.047 3	0.899 2	18
9	825 014 735.89	0.052 0	73.00	0.046 7	0.898 1	19

由表3可知:当 $s < 0.25$ 时, $s$ 越小,最合适区域越小,入围的投标人越少,当 $s$ 分别为0.20,0.15,0.13,0.10,以及 $s < 0.05$ 时,中标人依次为3,18,11,12,8号;当 $s > 0.25$ 时,超80%的中标人稳定在合适区域,且6号总是保持为最合适区域内价值系数最高者,因而选择6号为最合适的中标者。尽管该项目采取直接票决法与票决指数法的结果相同,但票决指数法能规避直接票决法面临的竞价不够及廉政风险等问题,综合了票决低价法和票决定标法(集体议事法)的优点,既实现择优又实现竞价。

表3 不同 $s$ 的定标候选人价值系数计算

Tab. 3 Calculation of candidate value coefficients of different  $s$

$s$	入围投标人编号	V
$>0.25$	1~19	6
0.20	1~5,7~19	3
0.15	2,3,5,8,10,11,12,13,14,15,17,18,19	18
0.13	2,5,8,10,11,12,13,14,17,19	11
0.10	2,8,10,12,13,14,19	12
$<0.05$	19,8,2	8

票决指数法通过价值系数这个定量指标选择价低质优的最优承包商, 在实施评定分离办法过程中, 工期合理缩短、成本得到有效降低。经调研, 采用评定分离办法招标的某市项目的工期平均缩短约 10 d 左右, 成本降低 4%~5%, 投诉较少, 工程开展较为顺利。运用票决指数法后, 招标效率提高, 中标单位技术水平高、组织协调能力强、信誉服务好。

## 4 研究结果及展望

### 4.1 研究结果

在分析现有定标办法不足的基础上, 基于 VFM 视角创新性地提出了票决指数法, 并构建了初步模型和最适合区域模型, 提出基本步骤和基本原则, 对比分析了其他定标办法的优劣, 最后通过实例分析验证了该定标办法的科学性和有效性。

研究表明: 票决指数法综合考虑投标报价和综合得分, 从定量的角度更科学地实现入围投标人的择优竞价; 票决指数法克服了直接抽签定标法、票决定标法、集体议事法、竞争性磋商法等存在的廉政风险和不当利益输送风险, 同时又克服了票决抽签法和抽签票决定标法的运气成分;  $s$  应使超 80% 的入围投标人落入最合适区域中。

### 4.2 择优竞价措施

票决指数法旨在平衡择优和竞价的需求, 但要合理挑选出优质价低的投标人, 还应促进择优竞价原则在招标人和投标人双向的渗透。从招标人评分的角度考虑, 评标专家要发挥专业优势, 做出全局性评审意见和建议, 提出推荐理由, 以及提醒合同签订过程中需注意事项, 起到咨询和决策参谋的作用。清标应当具有较强的针对性, 力求通过准确有效清标指标实现精准择优。定标需明确定标方向, 考核投标人具体因素、应当明确否决性因素, 以及各因素之间重要性, 促使定标结果更加科学和公正。

从投标人中标的角度考虑, 投标人应在信用、企业产值、服务、拟派项目团队与能力水平、自身管理水平、专业技术水平等多方面下功夫, 并且合理投标报价、有序投标报价。评定分离应当按照三公一诚信原则进一步规范并公开定标依据、程序、方案, 行政主管部门应当进一步加强评定分离全过程的行政监管、标后评估, 不断完善配套制度和机制, 强化招标人的主体责任, 简化放权, 依法行政。在评定分离办法招标的实施过程中, 对发现的问题及时总结分析, 举一反三, 优化完善, 以形成政策和办法应用的良性循环。

### 4.3 研究不足及展望

票决指数法应用物有所值理论, 弥补现有定标办法择优与竞价的不足, 有利于投标人选择施工成本低、工期短、质量高的项目参建方, 实现了择优竞价的目的<sup>[17-18]</sup>。然而, 票决指数法操作相对复杂, 招标人不易掌握, 在一定程度上阻碍其应用和推广。因此, 优化计算过程、简化办法、规范化和流程化实际操作将成为下阶段的研究重点。

### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 中华人民共和国招标投标法(修订草案公开征求意见稿)[EB/OL]. (2019-12-03)[2023-08-09]. <https://www.ndrc.gov.cn/yjzxDownload/fj1xdca.pdf>.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部关于进一步加强房屋建筑和市政基础设施工程招标投标监管的指导意见[EB/OL]. (2019-12-25)[2023-08-09]. [https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengce-filelib/201912/20191224\\_243228.html](https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengce-filelib/201912/20191224_243228.html).
- [3] 李朝政. 评定分离办法在建设工程招投标中的应用探索[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2023(2): 74-76. DOI:10.12359/202302025.
- [4] MANU P, ASIEDU R O, MAHAMADU A, *et al.* Contribution of procurement capacity of public agencies to attainment of procurement objectives in infrastructure procurement[J]. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2021, 28(10): 3322-3345. DOI:10.1108/ECAM-05-2020-0375.
- [5] CHIKWERE D, CHIKAZHE L, TUKUTA M. The influence of public procurement practices on service delivery: Insights from Zimbabwe's rural district councils[J]. *Journal of Tianjin University Science and Technology*, 2022, 55(9): 30-45. DOI:10.1080/23311886.

- [6] ADI S, DUTIL P. Searching for strategy: Value for money (VFM) audit choice in the new public management era [J]. *Canadian Public Administration-Administration Publique Du Canada*, 2018, 61(1): 91-108. DOI: 10.1111/capa.12254.
- [7] MC KEVITT D, DAVIS P. Value for money: A broken pinata? [J]. *Public Money and Management*, 2016, 36(4): 257-264. DOI: 10.1080/09540962.2016.1162591.
- [8] OLATUNJI S O, OLAWUMI T O, AWODELE O A. Achieving value for money (VFM) in construction projects [J]. *Journal of Civil and Environmental Research*, 2017, 9(2): 54-64. DOI: 10.6084/m9.figshare.19758703.
- [9] CHANGALIMA I A, MUSHI G O, MWAISEJE S S. Procurement planning as a strategic tool for public procurement effectiveness: Experience from selected public procuring entities in Dodoma City, Tanzania [J]. *Journal of Public Procurement*, 2021, 21(1): 37-52. DOI: 10.1108/JOPP-05-2020-0047.
- [10] BERGMAN M A, LUNDBERG S. Tender evaluation and supplier selection methods in public procurement [J]. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 2013, 19(2): 73-83. DOI: 10.1016/j.pursup.2013.02.003.
- [11] LIU Junying, CUI Zhipeng, YANG Xiaojun, *et al.* Experimental investigation of the impact of risk preference on construction bid markups [J]. *Journal of Management in Engineering*, 2018, 34(3): 4018003. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000596.
- [12] NAJI K K, GUNDUZ M, FALAMARZI M H. Assessment of construction project contractor selection success factors considering their interconnections [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022, 26(9): 3677-3690. DOI: 10.1007/s12205-022-1377-6.
- [13] ERDOGAN S A, ŠAPARAUSKAS J, TURSKIS Z. A multi-criteria decision-making model to choose the best option for sustainable construction management [J]. *Sustainability*, 2019, 11(8): 2239. DOI: 10.3390/su11082239.
- [14] SEMAAN N, SALEM M. A deterministic contractor selection decision support system for competitive bidding [J]. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2017, 24(1): 61-77. DOI: 10.1108/ECAM-06-2015-0094.
- [15] HASSAN S H A, ISMAIL S, AHMAD H. Public procurement in Malaysia: Objectives and procurement principles [J]. *Journal of Economic and Administrative Sciences*, 2021, 37(4): 694-710. DOI: 10.1108/JEAS-03-2020-0033.
- [16] AIMABLE N, OSUNSAN O K, FLORENCE I, *et al.* Procurement planning on value for money among selected districts in southern province, Rwanda [J]. *Journal of Research in Business and Management*, 2019, 7(1): 34-40.
- [17] CHIKWERE D, CHIKAZHE L, TUKUTA M. Value for money in public procurement: Experience from Zimbabwe' rural district councils [J]. *Cogent Social Sciences*, 2023, 9(2): 1-16. DOI: 10.1080/23311886.2023.2244746.
- [18] BOSIO E, DJANKOV S, GLAESER E, *et al.* Public procurement in law and practice [J]. *American Economic Review*, 2022, 112(4): 1091-1117. DOI: 10.1257/aer.20200738.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202311005



# 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

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 为了厘清防雨天井对农宅夏季室内舒适度的影响,选取具有较高可比性的典型案例,开展室内外温湿度、风速、照度等指标的实测分析。结果表明:防雨天井能稳定且有效地组织室内的自然通风,但风速较小;防雨天井能有效改善农宅的室内天然采光,但午间偶有轻微眩光;防雨天井特别适宜于东西向布局的农宅,可有效缓解夏季东西晒的不利影响;设置该天井的农宅室内热环境较未设者更舒适;在夏热冬冷地区的农宅建设中,恰当地设置防雨天井可有效改善居住环境。

**关键词:** 夏热冬冷地区; 防雨天井; 农宅; 室内舒适度

中图分类号: TU 119.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)01-0029-06

## 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

(College of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to clarify the impact of rainproof patio on the summer indoor comfort of farmhouses, typical cases with high comparability are selected to conduct measurement and analysis of indoor and outdoor temperature and humidity, wind speed, illumination and other indexes. The results show that rainproof patio can stably and effectively organize indoor natural ventilation, but the wind speed is small. Rainproof patio can effectively improve the indoor natural lighting of farmhouses, but there is occasional slight glare during the noon. Rainproof patio is particularly suitable for farmhouses with east-west layout, which can effectively alleviate the adverse effects of east-west sun exposure in summer. The indoor thermal environment of farmhouses with this patio is more comfortable than those without it. In the construction of farmhouses in hot summer and cold winter regions, the appropriate rainproof patio can effectively improve the living environment.

**Keywords:** hot summer and cold winter regions; rainproof patio; farmhouse; indoor comfort

农宅建设是乡村振兴的重要内容之一。作为传统民居的典型要素,天井具有改善天然采光、组织自然通风等功能,并一直广受夏热冬冷地区居民的喜爱。同时,天井也具有改善民居内部热环境<sup>[1-5]</sup>,加强民居室内的自然通风<sup>[6-8]</sup>,改善民居通风、降温等生态功能<sup>[9-13]</sup>。

收稿日期: 2023-11-06

通信作者: 吴正旺(1972-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事建筑设计及其理论的研究。E-mail: wuzhengwang@126.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378018)

当前乡村振兴中,农宅普遍基地面积较小,层数较多。近年来,在闽北夏热冬冷地区的农宅建设中,出现了一种带防雨功能的新型天井,其长、宽约 2~3 m,高约 3~5 层,顶部设玻璃等采光防雨构造,并留有空隙通风,相关案例逐年增加。然而,增加顶部必然会影晌天井的通风、采光及散热等功能。当楼层较多、用地局促时,这种建筑要素的适宜性仍有待研究。为厘清防雨天井对农宅夏季室内舒适度的影响,本文选取 3 个典型案例,在夏季对农宅开展温湿度、风环境、光环境等实测分析。

## 1 研究对象

以福建省南平市顺昌县仁寿镇的 3 幢农宅为研究对象。农宅鸟瞰图,如图 1 所示。图 1 中:农宅 A(东西朝向)和农宅 B(南北朝向)均设防雨天井,农宅 A、B 的天井平面尺寸分别约为 2.2 m×4.2 m,1.0 m×6.0 m;农宅 C 未设防雨天井。防雨天井剖面示意图,如图 2 所示。

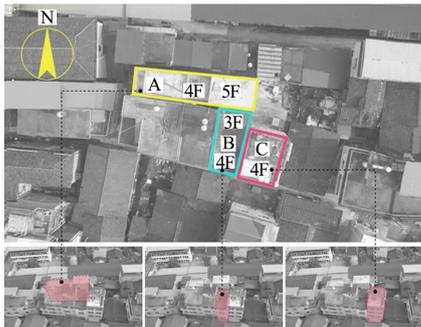
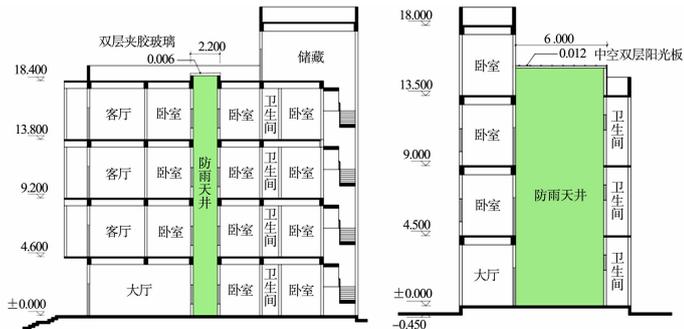


图 1 农宅鸟瞰图

Fig. 1 Bird view of farmhouse



(a) 农宅 A

(b) 农宅 B

图 2 防雨天井剖面示意图(单位:m)

Fig. 2 Section schematic diagrams of rainproof patio (unit: m)

农宅平面图,如图 3 所示。



(a) 农宅 A



(b) 农宅 B



(c) 农宅 C

图 3 农宅平面图

Fig. 3 Plane diagrams of farmhouse

农宅的基本信息,如表 1 所示。

表 1 农宅的基本信息

Tab. 1 Basic information of farmhouse

基本信息	农宅 A	农宅 B	农宅 C
建筑朝向	坐西朝东	坐北朝南	坐北朝南
建筑层数	局部 5 层	局部 4 层	4 层
建筑结构	框架结构	砖混结构	框架结构
围护结构	200 mm 实心黏土砖墙	200 mm 实心黏土砖墙	200 mm 实心黏土砖墙
屋顶形式及材料	钢筋混凝土平屋顶	钢筋混凝土平屋顶	钢筋混凝土平屋顶
通风方式	风扇、自然通风	风扇、自然通风	风扇、自然通风

当地夏季最高平均气温为 34.4 ℃。实测期间,室外平均气温为 31.6 ℃,最高气温为 38.7 ℃,最低气温为 25.0 ℃,全天最大波动幅度为 12.4 ℃。相对湿度为 39.6%~89.0%,平均相对湿度为 67.4%。

## 2 研究概况

### 2.1 实测时间

2023年6月28日—7月5日, 共计8日, 选取晴天、多云、阴天等当地夏季的典型天气进行测量, 时段为每日0:00—24:00, 包括气温、相对湿度、风速和照度等4项指标。

### 2.2 测量仪器

TESTO 405i 型热敏风速测速仪(量程  $0\sim 30\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 测量精度  $\pm 5\%$ )、AZ88162 型温湿度仪(温度量程  $-30\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 测量精度  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 湿度量程  $0\%\sim 99\%$ , 测量精度  $\pm 3\%$ )、GM1030 型照度仪(量程  $0\sim 200\ 000\text{ lx}$ , 测量精度  $\pm 4\%$ )各9台, 均具有自动记录功能。热敏风速测速仪间隔5 min 进行自动记录; 温湿度仪和照度仪间隔30 min 进行自动记录。

### 2.3 测点布置

在各农宅1层室内、室外及防雨天井顶部等处放置温湿度仪、热敏风速测速仪和照度仪, 在农宅A的2层和天井顶部放置热敏风速测速仪。测点距地面均为1.5 m, 设有防雨天井的农宅测点均布置于1层地面天井的正下方, 未设天井的农宅测点布置于1层室内的对角线上<sup>[14]</sup>。按照居民既有的开窗、开门及闭户等日常习惯进行实测。

## 3 实测分析

### 3.1 设置防雨天井对农宅室内舒适度的影响

3.1.1 热环境分析 农宅B、C的气温( $\theta$ )和相对湿度( $F$ )实测数据对比, 如图4、5所示。由图4、5可知: 农宅B的日间平均气温为 $29.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 日间平均相对湿度为 $73.7\%$ , 夜间平均气温为 $28.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 夜间平均相对湿度为 $79.5\%$ , 每日最低气温出现在6:20—7:20, 最高气温出现在正午时段; 农宅C主要依赖入户门及东侧门窗进行采光通风, 日间平均气温为 $29.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 日间平均相对湿度为 $74.0\%$ , 夜间平均气温为 $29.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 夜间平均相对湿度为 $80.8\%$ , 农宅C日间多数时间只开启局部门窗, 昼夜平均气温较接近。

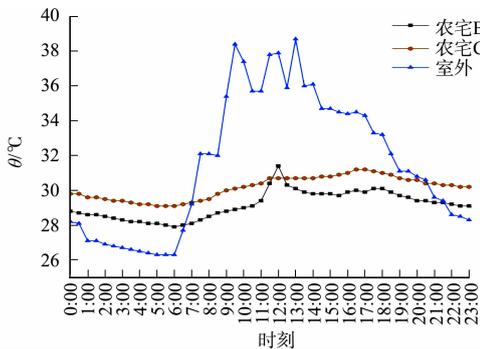


图4 农宅B、C的气温实测数据对比  
Fig. 4 Comparison of temperature data of farmhouse B and C

总体上看, 在全天约95%的时段, 农宅B的室内气温均低于无防雨天井的农宅C, 仅在正午短时段内略高于农宅C; 农宅B、C的室内气温波动较小, 但农宅B的热环境更为舒适。

3.1.2 风环境分析 农宅B、C的风速( $v$ )实测数据对比, 如图6所示。由图6可知: 农宅B、C的室内风速变化趋势与室外较接近, 农宅C的风速波动幅度较大, 农宅B的风速虽小但更稳定; 农宅C上午的风速明显大于下午, 农宅B则相反, 故两幢农宅的风速峰值出现的时间也不相同; 在保持南侧入户门开启的状态下, 农宅C的风速大部分时段大于农宅B。农宅C的居民习惯在

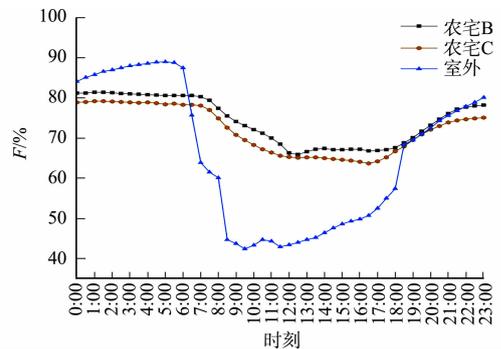


图5 农宅B、C的相对湿度实测数据对比  
Fig. 5 Comparison of relative humidity data of farmhouse B and C

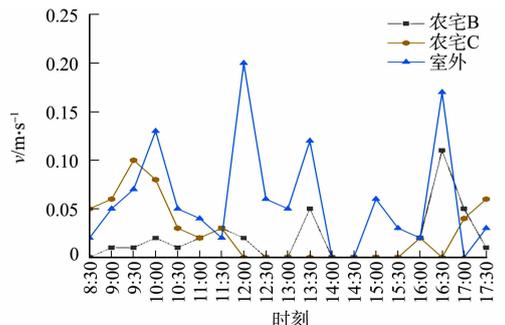


图6 农宅B、C的风速实测数据对比  
Fig. 6 Comparison of wind speed data of farmhouse B and C

午休时段将入户门关闭,导致某些时段内无风,由此可推断保持无防雨天井的农宅入户门窗的开启是组织通风流线的重要因素。

3.1.3 光环境分析 农宅 B,C 的室内照度( $E$ )实测数据对比,如图 7 所示。由图 7 可知:农宅 B 的室内采光优于农宅 C,农宅 B 的室内最大照度值为 1 745 lx,农宅 C 的室内最大照度仅有 48.4 lx。在朝向与周边环境相同的情况下,若不完全开启入户大门,农宅 C 的室内在绝大多数时段内须借助人工照明来满足日常生活的需求。农宅 B 的室内采光得益于防雨天井的设置,即使在午后入户门关闭的情况下,室内依旧能够满足采光的需求。由此可知,防雨天井可以很好地改善室内的光环境,减少人工照明。

### 3.2 防雨天井对不同朝向农宅室内舒适度的影响

#### 3.2.1 热环境分析 农宅 A,B 的气温和相对湿度实测

数据对比,如图 8,9 所示。由图 8,9 可知:农宅 A 的最高气温为 31.4 °C,平均气温为 28.9 °C,气温波幅为 3.4 °C,最高气温出现在 12:00—13:00,最低气温出现在 6:30—7:00;两座农宅的室内平均气温均低于室外平均气温 2.7 °C,农宅 A 的室内最高气温低于室外最高气温 7.3 °C,农宅 B 的室内最高气温低于室外最高气温 6.1 °C,农宅 A 的隔热效果略优于农宅 B;在 22:00—8:00 时段内,农宅 B 的室内平均气温高于农宅 A 约 0.4 °C,在 8:00—22:00 时段内,农宅 A 的平均气温高于农宅 B 约 0.3 °C;在 7:00—15:00 时段内,农宅 A,B 室内气温均上升快,波动大,相对湿度则显著下降。

由此可知,两座农宅的相对湿度与气温的变化规律都存在时段上的差异,夜间及上午时段,农宅 B 的相对湿度(65.2%~84.8%)低于农宅 A(65.2%~86.1%),而午后农宅 B 的相对湿度则高于农宅 A。

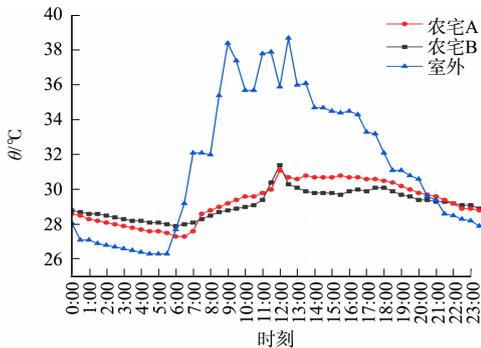


图 8 农宅 A,B 的气温实测数据对比

Fig. 8 Comparison of temperature data of farmhouse A and B

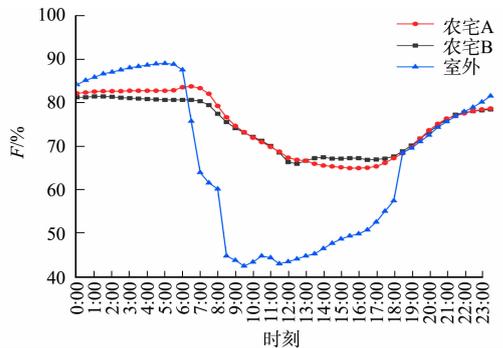


图 9 农宅 A,B 的相对湿度实测数据对比

Fig. 9 Comparison of relative humidity data of farmhouse A and B

3.2.2 风环境分析 农宅 A,B 的室内风速实测数据对比,如图 10 所示。由图 10 可知:农宅 A 与农宅 B 的室内风速都不大,全天大部分时段有风,但也有部分时段的风速为 0;农宅 A 的室内风速峰值出现在 11:00—11:30,最低风速出现在 14:30—15:30;农宅 B 的室内最高风速出现在 17:00—17:30,农宅 A,B 最低风速出现的时段相同,主要原因是室外此时也处于风速的最低值。无论是东西朝向的农宅 A 还是南北朝向的农宅 B,设置天井都能较有效地组织室内通风。

热压通风能够用于辅助风压通风,改善农宅室内的通风情况<sup>[15]</sup>。为了验证天井的热压通风潜力,在农宅 A 的天井底部、天井 5.5 m 处(农宅 2 层)及天井顶部布置了热敏风速测速仪,对天井不同高度的风速进行比较。

防雨天井不同高度的风速实测数据对比,如图 11 所示。由图 11 可知:在实测的大部分时段内,天井顶部风速 > 天井 5.5 m 处风速 > 天井底部风速;由于热压通风的大小与进出风口高差成正比关系<sup>[16]</sup>,在 14:00—16:30 时段内,天井底部由于入户门关闭风速为 0,而天井 5.5 m 处和天井顶部仍保持有风状态。

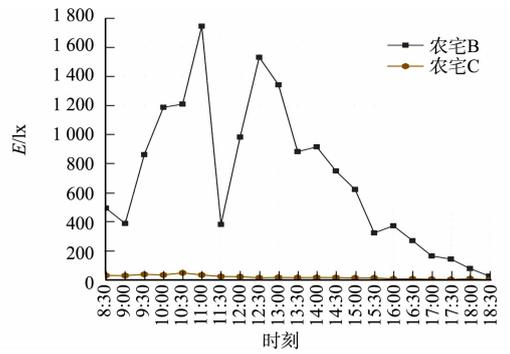


图 7 农宅 B,C 的室内照度实测数据对比

Fig. 7 Comparison of indoor illumination data of farmhouse B and C

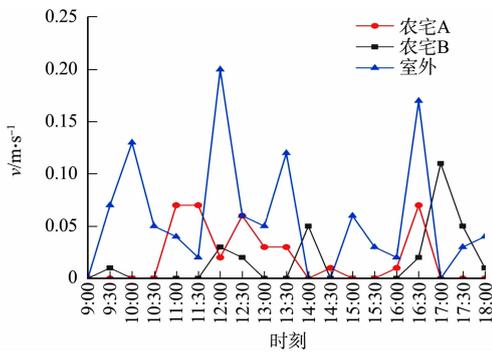


图 10 农宅 A,B 的室内风速实测数据对比

Fig. 10 Comparison of wind speed data of farmhouse A and B

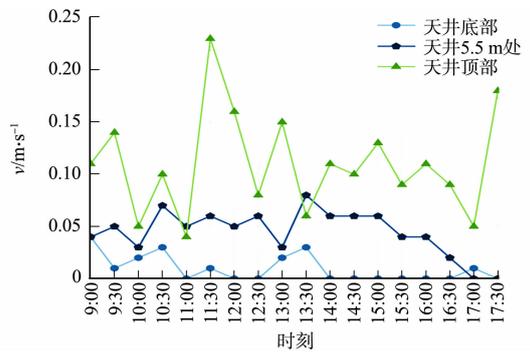


图 11 防雨天井不同高度的风速实测数据对比

Fig. 11 Comparison of wind speed data at different heights of rainproof patio

3.2.3 光环境分析 农宅 A,B 的室内照度实测数据对比,如图 12 所示。由图 7,12 可知:农宅 A,B 室内采光比农宅 C 有较大的改善,室内照度能较好地满足居民的日常生活需求,在日间无需人工照明辅助;在 11:30—12:00 时段内,农宅 A,B 的照度比 11:00—11:30 时段有明显下降,这是由于云层的遮挡导致太阳直射光减弱(当日多云),室内照度下降;农宅 B 的照度整体上变化幅度较小,农宅 A 的总体室内采光优于农宅 B,但局部时段照度过高,需采取一定的遮阳措施以减少眩光。

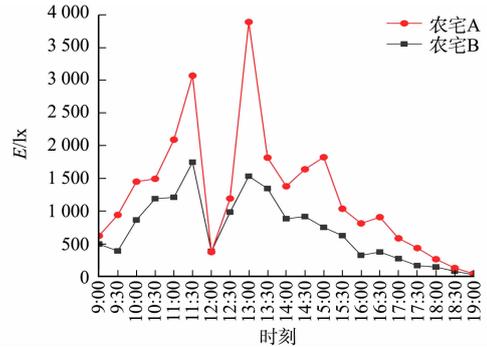


图 12 农宅 A,B 的室内照度实测数据对比

Fig. 12 Comparison of indoor illumination data of farmhouse A and B

## 4 讨论及结论

1) 防雨天井可稳定地组织自然通风,但风速较小。

与传统天井不同,防雨天井平面尺寸小,高度大,因此,有利于形成热压通风,但风压通风则不稳定,且加设了采光顶部后,通风量减少。在实测中,室外风速一直很小,但除居民关闭入户门的时段外,设有防雨天井的农宅在大部分时段内均有微风,特别是农宅 A,其进风口高差约 12 m,即便在入户门关闭的情况下,仍能产生明显的热压通风。

2) 恰当地设置防雨天井的形态及界面能进一步改善天然采光。农宅 A 为东西朝向,用地极其狭长,但内部设置的天井南北长、东西短,且天井内壁 3 面均为白墙,有利于阳光漫射,很好地改善了天然采光。农宅 B 也设置了防雨天井,其平面尺度、高度与农宅 A 近似,且两个天井的长边均为南北朝向,但农宅 B 的天井内壁白墙面积较少,且顶部采用阳光板,其透光率低于农宅 A 的玻璃,因此室内照度低于农宅 A。需要注意的是,由于夏季午间太阳高度角大,阳光几乎垂直入射,导致防雨天井的底部四壁的照度远远高于室内平均值,可能会产生眩光。

3) 防雨天井可缓解由于建筑朝向不良导致的天然采光及自然通风缺陷。密集的建筑群能有效减少太阳辐射得热,也会导致通风采光不良,而防雨天井可加以改善。坐北朝南的农宅 B 的夜间气温高于农宅 A,这是由于农宅 B 的东、西、北侧均被建筑紧贴,夜间散热能力减弱,而农宅 A 与周边建筑之间设有狭长的巷道,其作用与冷巷相似,可在夜间较好地辅助建筑散热。午后,由于农宅 A 西晒,故气温高于农宅 B。由实测结果可知,防雨天井较好地改善了农宅内部的通风,两座农宅虽然朝向不同,但室内热环境差异不大,较为舒适。综上,天井的置入有效地改善了农宅的室内舒适度,但对东西朝向农宅的效果更加明显一些。

4) 设置防雨天井的农宅热环境较为舒适,但在午间时段(12:00—13:00)气温略高于同类农宅。农宅 B 在全天大部分时间的气温都低于农宅 C。在 12:00—12:30 时段内,由于太阳直射导致农宅 B 的室内气温急速上升,但持续时间很短。防雨天井在改善采光的同时仍可通过组织自然通风将室内热量排出,提高了舒适度。

## 参考文献:

- [1] 曾志辉,陆琦.天井对岭南现代低层住宅的热环境意义[J].建筑学报,2010(3):27-29. DOI:10.3969/j.issn.0529-1399.2010.03.007.
- [2] 黄志甲,张恒,龚城,等.徽州传统民居夏季热环境分析[J].建筑科学,2017,33(10):26-31. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2017.10.05.
- [3] 高云飞,莫健斌,刘琳,等.广府传统三间两廊天井空间风热参数特性现场研究[J].广东工业大学学报,2022,39(3):105-115,124. DOI:10.12052/gdutxb.210119.
- [4] MICALLEF D, BUHAGIAR V, BORG S P. Cross-ventilation of a room in a courtyard building[J]. Energy and Buildings,2016,133:658-669. DOI:10.1016/j.enbuild.2016.09.053.
- [5] 宣晨晨,祝健.基于 Airpak 3.0 的建筑内天井热环境模拟[J].建筑节能,2018,46(11):11-14. DOI:10.3969/j.issn.1673-7237.2018.11.003.
- [6] 陈晓扬,薛家薇,郑彬.泉州手巾寮民居夏季热环境实测分析[J].建筑学报,2010(增刊1):84-87.
- [7] 吴志刚,肖毅强.闽东传统民居夏季热环境实测分析:以长乐“九头马”古民居群为例[J].建筑节能,2017,45(7):16-20,103. DOI:10.3969/j.issn.1673-7237.2017.07.003
- [8] 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.
- [9] KINDAH M, GIOVANNI S. Thermal performances of traditional houses in dry hot arid climate and the effect of natural ventilation on thermal comfort: A case study in Damascus[J]. Energy Procedia,2015,78:2893-2898. DOI:10.1016/j.egypro.2015.11.661.
- [10] KUBOTA T, ZAKARIA M A, ABE S, *et al.* Thermal functions of internal courtyards in traditional Chinese shop-houses in the hot-humid climate of Malaysia[J]. Building and Environment,2017,112:115-131. DOI:10.1016/j.buildenv.2016.11.005.
- [11] SOFLAEI F, SHOKOUHIAN M, SOFLAEI A. Traditional courtyard houses as a model for sustainable design: A case study on BWHS mesoclimate of Iran[J]. Frontiers of Architectural Research,2017,6(3):329-345. DOI:10.1016/j.foar.2017.04.004.
- [12] 杨阳,方廷勇,王礼飞,等.徽州民居中天井对夏季室内热环境的影响[J].建筑节能,2015,43(7):59-62. DOI:10.3969/j.issn.1673-7237.2015.07.016.
- [13] 尹君君.浙江传统民居天井通风研究[D].杭州:浙江理工大学,2018.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑热环境测试方法标准:JGJ/T 347-2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [15] 陈晓扬,仲德崑.被动节能自然通风策略[J].建筑学报,2011(9):34-37. DOI:10.3969/j.issn.0529-1399.2011.09.009.
- [16] 张芳芳,张群,王江丽.洛阳乡村民居建筑通风优化策略及效能[J].工业建筑,2020,50(7):34-40.

(责任编辑:钱筠 英文审校:方德平)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202311012



# Genomic Insights of A Multi-Drug Resistant *Comamonas kerstersii* Isolate

WANG Hui<sup>1</sup>, MING Desong<sup>2</sup>, WANG Mingxi<sup>1</sup>

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

2. Quanzhou First Hospital Affiliated to Fujian Medical University, Quanzhou 362000, China)

**Abstract:** A multi-drug resistant *C. kerstersii* 121606 was isolated from a patient with a urinary tract infection, and the antimicrobial susceptibility testing (AST) and whole genome sequencing were performed, then comparative genomic analyses were conducted with seven representative *Comamonas* species strains and *Acidovorax* species by average nucleotide identity (ANI) analysis using OrthoANI and single nucleotide polymorphism (SNP) analysis by snpTree web server. Finally, genomic sequence annotation was conducted with RAST server, as well as functional annotation of orthologous clusters by OrthoVenn, prediction of antibiotic resistance genes (ARGs) by CARD, CRISPRs by CRISPR recognition tool, and prophages by PHAST. These data revealed that *C. kerstersii* 121606 was a multi-drug resistant bacterium with similar genetic components to other seven *Comamonas* species and *Acidovorax* species. The presence of ARGs in its genome helped to explain its multi-drug resistance mechanisms. These findings provide valuable insights for the study of novel antibiotics to manage multi-drug resistant *C. kerstersii* infections.

**Keywords:** *Comamonas kerstersii*; multi-drug resistance; comparative genomic analysis; antibiotic resistance gene; CRISPR; prophage

**CLC Number:** Q 939.48; R 378 **Document Code:** A **Article Number:** 1000-5013(2024)01-0035-12

## 一株多药耐药 *Comamonas kerstersii* 细菌的基因组分析

王慧<sup>1</sup>, 明德松<sup>2</sup>, 王明席<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 医学院, 福建 厦门 361021;

2. 福建医科大学附属泉州第一医院, 福建 泉州 362000)

**摘要:** 从1名尿路感染患者中分离出了1株多药耐药的 *Comamonas kerstersii* (*C. kerstersii*) 菌株 121606, 对其进行了抗微生物药敏试验 (AST) 和全基因组测序; 然后将其与7个具有代表性的 *Comamonas* 菌株和 *Acidovorax* 菌种进行基因组比较分析, 包括使用 OrthoANI 分析平均核苷酸同一性 (ANI), 以及通过 snpTree 网络服务器进行单核苷酸多态性 (SNP) 分析。最后, 使用 RAST 服务器进行基因组序列, 使用 OrthoVenn 软件对同源簇进行功能注释, 通过 CARD 数据库对抗生素耐药基因 (ARGs) 进行预测, 并利用 CRISPR 识别工具预测 CRISPR, 以及利用 PHAST 软件预测前噬菌体。结果表明: *C. kerstersii* 121606 是一种多药耐药细菌, 其遗传成分与其他7个 *Comamonas* 和 *Acidovorax* 菌种相似; 其基因组中存在的 ARGs 有助于解释其多药耐药机制。这些发现为研究新型抗生素来控制多药耐药 *C. kerstersii* 感染提供了有价值的见解。

**关键词:** *Comamonas kerstersii*; 多药耐药性; 比较基因组分析; 抗生素耐药性基因; CRISPR; 前噬菌体

收稿日期: 2023-11-01

通信作者: 王明席 (1969-), 男, 副教授, 博士, 主要从事临床细菌生物信息学的研究。E-mail: mxwang@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省厦门南方海洋研究中心科研资金资助项目 (14GYY008NF08); 方树福堂基金会和方润华基金会资助项目 (14X30127)

*Comamonas kerstersii* (*C. kerstersii*) is a gram-negative, aerobic, motile rod bacterium<sup>[1]</sup> that mainly caused the gastrointestinal tract infections<sup>[2-4]</sup>. It is rarely resistant to antibiotics<sup>[2, 5]</sup>. However, we isolated a multi-drug resistant strain, 121606, from the urine of an 82-year-old male patient with a urinary tract infection secondary to prostatic hyperplasia. This strain was resistant to 18 out of 21 antibiotics, including  $\beta$ -lactams, aminoglycosides, quinolones, sulfonamide and colistin, indicating that it was a multi-drug resistant strain. The property of multi-drug resistance of *C. kerstersii* 121606 has not been reported. As the infections of *C. kerstersii* are rapidly increasing, it is imperative to understand the genomic features and the antibiotic resistance mechanisms of *C. kerstersii* strain 121606 for better management of the increasing *C. kerstersii* infections. To achieve these purposes, in this paper, we performed genomic sequencing for strain 121606, conducted comparative genomic analyses, and correlated the antibiotic resistance genes (ARGs) in the genome with its multi-drug phenotype.

## 1 Materials and Methods

### 1.1 Bacterium Identification and Antimicrobial Susceptibility Testing

Bacterium identification and antimicrobial susceptibility testing (AST) of *C. kerstersii* 121606 were performed by BD Phoenix<sup>TM</sup> automated identification and antibiotic susceptibility testing system with the NMIC/ID-4 panel (Becton, Dickinson and Company, Franklin Lakes, NJ, USA), according to CLSI categories.

### 1.2 DNA Extraction and 16S rRNA Gene Sequencing

DNA extraction and 16S rRNA gene sequencing of *C. kerstersii* 121606 were performed as described previously<sup>[6]</sup>. It was deposited into GenBank under genus *Acidovorax* (1 460 bp, GenBank No. KY014106).

### 1.3 Genome Sequencing, Assembly, Annotation and Analysis of General Components in *C. kerstersii* 121606 Genome

Sequencing of the genomic DNA of *C. kerstersii* 121606 was completed with Illumina HiSeq<sup>TM</sup> 2000 (Illumina, San Diego, CA, USA) with 500 bp library preparations. The clean data were obtained (476 Mb). Genome assembly was carried out by SOAP *de novo* (version 2.04), and the genomic size was 3.34 Mb (196 contigs, GenBank assembly accession No. GCA\_002002445.1, ASM200244v1).

The genomic sequences were annotated with RAST server<sup>[6]</sup>. The identification of rRNA genes, genomic GC content, insertion sequence (IS) elements was completed with RNAmmer 1.2 server<sup>[7]</sup>.

### 1.4 Comparative Genomic Analyses of *C. kerstersii* Strains

To understand the origin, genomic compositions of *C. kerstersii* 121606, five representative *Comamonas* species and two *Acidovorax* species were comparatively analysed (GenBank accession numbers: *C. kerstersii* 8943, CP020121.1; *C. kerstersii* J29, NZ\_LFYYP00000000.1; *C. kerstersii* UBA11446, DOQQ00000000.1; *C. testosterone* TK102, CP006704.1; *C. aquatica* CJG, CP016603.1; *Acidovorax* sp. RAC01, NZ\_CP016447.1; *Acidovorax* sp. 1608163, NZ\_CP033069.1). Both *C. kerstersii* 8943 and *C. kerstersii* J29 were isolated from the same source—dialysis effluent of patients with peritonitis caused by continuous ambulatory peritoneal dialysis (CAPD) by the same team from Zhejiang Province, China<sup>[8]</sup>.

Average nucleotide identity (ANI) analysis was operated by OrthoANI<sup>[9]</sup>. The single nucleotide polymorphism (SNP) differences between each *C. kerstersii* genomes were calculated using the snpTree web server for the assembled genomes with minimum coverage and minimum distance be-

tween SNPs<sup>[10]</sup>. Functional annotation of orthologous clusters among the *C. kerstersii* strains was conducted by OrthoVenn<sup>[11]</sup>. The prediction of CRISPRs (clustered regularly interspaced short palindromic repeats), prophages in our *C. kerstersii* 121606 were carried out with CRISPR recognition tool (CRT, version CRT1.1)<sup>[12]</sup>, PFAST<sup>[13]</sup> respectively.

### 1.5 Analysis of Antibiotic Resistance Mechanisms of *C. kerstersii* 121606 at Genomic Level

The ARGs in *C. kerstersii* 121606 was predicted through CARD database, then filtered with more stringent cut-off parameters (identity>50%, query coverage>50%, subject coverage>50%, match length>100 amino acids, identical amino acids>100).

## 2 Experimental Results and Analysis

### 2.1 Identification and Antibiotic Susceptibilities Profiles of *C. kerstersii* 121606

With BD Phoenix<sup>TM</sup> automated identification and AST system, *C. kerstersii* 121606 was initially misidentified as *Sphingobacterium multivorum* (92% confidence). Moreover, because its 16S rRNA gene sequence displayed high identity with *Acidovorax* sp. 98-63833 (GenBank No. AY258065.1), it was again misidentified as *Acidovorax* sp. and deposited as *Acidovorax* sp. in GenBank after BlastN analysis.

The AST (table 1) displayed that *C. kerstersii* 121606 was resistant to 18 out of 21 tested antibiotics, including aminoglycosides (amikacin, gentamicin), nearly all  $\beta$ -lactams {penicillins (ampicillin,

Tab. 1 Antibiotic resistance profiles of *C. kerstersii* 121606

表 1 *C. kerstersii* 121606 的耐药性谱

Antibiotics classification	Name of antibiotics	121606
Aminoglycosides	Amikacin	R (>32)
	Gentamicin	R (>8)
Carbapenems	Imipenem	R (>8)
	Meropenem	IS (4)
Cephalosporins	Cefazolin	R (>16)
	Ceftazidime	R (>16)
	Cefotaxime	R (>32)
	Cefepime	R (>16)
Monobactams	Aztreonam	R (>16)
	Ampicillin	R (>16)
Penicillins	Piperacillin	R (>64)
	Amoxicillin-clavulanate	R (>16/8)
	Ampicillin-sulbactam	R (>16/8)
	Piperacillin-tazobactam	IS (64/4)
Chloramphenicols	Chloramphenicol	R (>16)
Polypeptides	Colistin	R (>2)
	Ciprofloxacin	R (>2)
Quinolones	Levofloxacin	R (>8)
	Moxifloxacin	R (>4)
	Sulfonamides	Trimethoprim-sulfamethoxazole
Tetracyclines	Tetracycline	S (4)

**Notes:** S represents sensitive; IS represents intermediately sensitive; R represents resistant.

**注:** S 表示敏感; IS 代表中度敏感; R 代表抗性。

piperacillin, amoxicillin-clavulanic acid, ampicillin-sulbactam, piperacillin-tazobactam), cephalosporins (cefazolin, ceftazidime, cefotaxime, cefepime), carbapenems (imipenem), monobactams (aztreonam)}, chloramphenicols (chloramphenicol), polypeptides (colistin), quinolones (ciprofloxacin, levofloxacin, moxifloxacin), sulfonamides (trimethoprim/sulfamethoxazole), intermediately suscepti-

ble to meropenem, piperacillin-tazobactam, and sensitive to tetracycline. These data showed that *C. kerstersii* 121606 possessed a multi-drug resistant phenotype.

## 2.2 General Genomic Components of *C. kerstersii* 121606

The assembled genome was composed by 196 contigs and 53 scaffolds, the repeat accounted for 31.2%. The genome size was 3 419 381 bp, and GC content was 59.68%. It had 3 291 coding sequences (CDS), 3 128 insertion sequences (ISs), 17 tRNAs, 3 rRNAs.

## 2.3 Subsystem Features of *C. kerstersii* 121606 and Orthologues in Four Representative *Comamonas* Species and Two *Acidovorax* Species

The subsystem features of *C. kerstersii* 121606 generated by RAST server revealed that it contained 27 subsystem categories (A-A' in figure 1). For example, it contained 80 genes related to virulence, disease and defense, 6 related to phage, prophage (table 2). Further subsystem category analysis revealed that *C. kerstersii* 121606 had two phages, which was consistent to the number predicted by PHAST, as described below.

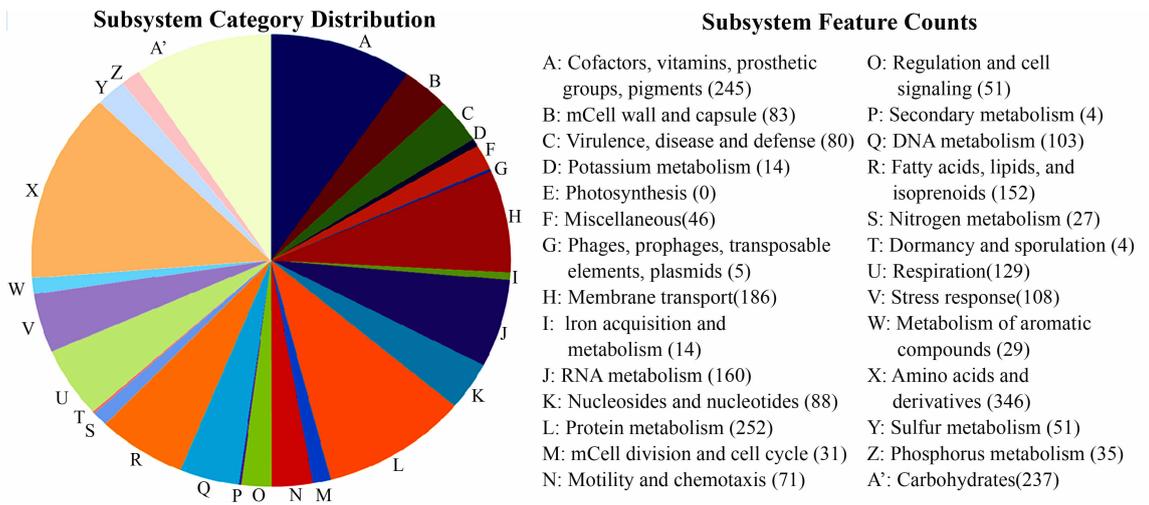


Fig. 1 Subsystem categories distribution of genome of *C. kerstersii* 121606 analyzed by RAST server

图1 应用RAST服务器分析*C. kerstersii*121606基因组的子系统分类分布

**Notes:** In the 27 subsystem categories of A-A', the values in parentheses represent the gene count of that subsystem category.

**注:** 在A~A'的27个子系统类别中,括号内的数值表示该子系统类别的基因计数。

Tab. 2 Subsystem features of *C. kerstersii* strain 121606

表2 *C. kerstersii* 菌株121606的子系统特征

Subsystem features	Function classification	Function description	Subsystem feature counts
Virulence, disease and defense	Resistance to antibiotics and toxic compounds	Multiple antibiotic resistance MAR locus	1
		Copper homeostasis	16
		Bile hydrolysis	3
		Cobalt-zinc-cadmium resistance	9
		Resistance to fluoroquinolones	4
		Arsenic resistance	4
		Copper homeostasis: copper tolerance	4
		$\beta$ -lactamase	2
		Multidrug resistance efflux pumps	18

Continue table

续表

Subsystem features	Function classification	Function description	Subsystem feature counts
Virulence, disease and defense	Bacteriocins, ribosomally synthesized antibacterial peptides	Tolerance to colicin E2	1
		Colicin V and bacteriocin production cluster	9
	Invasion and intracellular resistance	Involved in DNA transcription	2
		Involved in protein synthesis	7
Phages, prophages, transposable elements and plasmids	Phages, prophages	Phage replication	2
		Phage packaging machinery	2
		Phage tail fiber proteins	1
		Phage capsid proteins	1
		Phage lysis modules	0

## 2.4 ANI Analysis and Phylogenetic Tree of *C. kerstersii* 121606 With Five Representative *Comamonas* Species and Two *Acidovorax* Species

To reconfirm this *C. kerstersii* isolate 121606, we calculated the ANI values with other five representative *Comamonas* species and two closely related *Acidovorax* species. *C. kerstersii* 121606 showed high identities with *C. kerstersii* 8943, J29, UBA11446 (99.39%, 99.40%, 99.08%, respectively), and its identities with *C. testosterone* TK102, *C. aquatica* CJG, *Acidovorax* sp. 1608163, and *Acidovorax* sp. RAC01, were low (76.71%, 81.34%, 74.95%, 75.07%, respectively). According to the microbial taxonomy for species delineation ((95±0.5)% cut-off for ANI)<sup>[14]</sup>, these data suggested that *C. kerstersii* 121606 really belonged to the species *C. kerstersii*, the identification as *S. multivorum* by the BD Phoenix<sup>TM</sup> automated identification method or as *Acidovorax* sp. by 16S rRNA gene sequence was not correct.

The phylogenetic tree based on SNPs showed that *C. kerstersii* 121606, 8943, J29 and UBA11446 grouped together and other bacteria constituted a monophyletic cluster (figure 2). In figure 2, the tree was built using snpTree server with default parameters; the maximum likelihood tree was based on SNPs alignment; tree was shown in the rectangular cladoGram format in which branches were drawn with reference to branch lengths. The tree topology evaluation was based on percentage of concordance. Their distance to *C. testosterone* TK102, *C. aquatica* CJG, *Acidovorax* sp. 1608163 and *Acidovorax* sp. RAC01 was the same as the ANI-based phylogenetic tree (not shown).

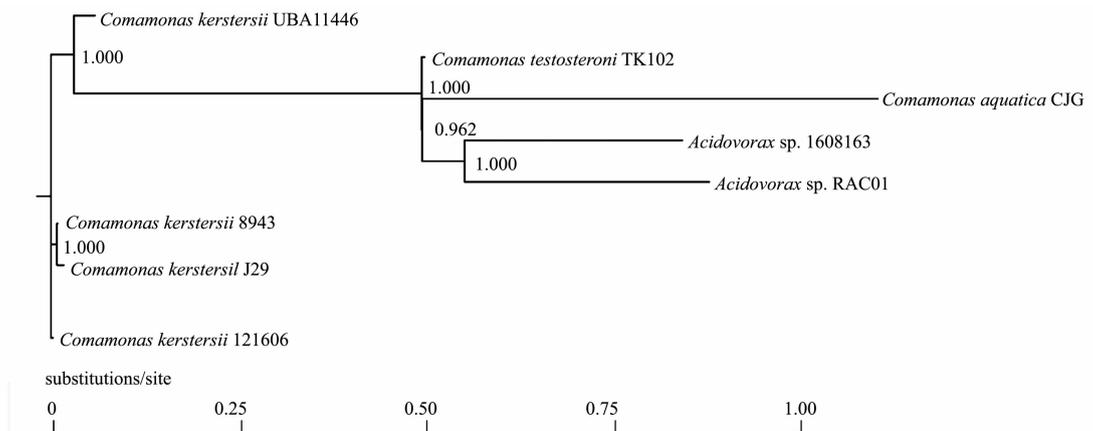


Fig. 2 SNP phylogenetic tree of *C. kerstersii* strains and *Acidovorax* species

图 2 *C. kerstersii* 菌株及 *Acidovorax* 菌种的 SNP 系统发育树

The orthologues of *C. kerstersii* 121606 were compared with other three *C. kerstersii* genomes (strain 8943, J29 and UBA11446). It showed that strain 121606 had 2 955 proteins, 2 943 clusters,

11 singletons. 2 095 clusters were shared by these four *C. kerstersii* strains. Further, the gene family clusters of these five *Comamonas* species and two *Acidovorax* species were presented in figure 3. In agreement with above statements, *C. kerstersii* strain 121606, 8943, J29 and UBA11446 exhibited a closely related similarity in single- or multiple-copy orthologs.

## 2.5 Prediction of CRISPR in *C. kerstersii* 121606

CRISPRs are vital constituents of RNA-based viral defense systems possessed by bacteria and archaea<sup>[15]</sup>. CRISPR loci are composed by leader sequence, repeats, spacers and cas gene cassette<sup>[15]</sup>. *C. kerstersii* 121606 was predicted to contain 10 nearly identical 29-nucleotide CRISPR repeats (GGTTGCCCGCACACGCGGGGATAGGCC) (Range: 2657125-2657702 in genome), which separated by 32 nucleotides spacers in average length. The constituent characteristics of these CRISPRs were same as those originally found in *Escherichia coli* genome in 1987<sup>[16]</sup>.

## 2.6 Prediction of Prophages in *C. kerstersii* 121606

The *C. kerstersii* 121606 genome harbored an incomplete (a) and an intact prophage region (b) (figure 4). The intact prophage region b was predicted to extend from 1 799 206 bp to 1 836 855 bp (37 650 bp in length) and it carried 35 CDSs. Significantly, one integrase used as the marker of mobile

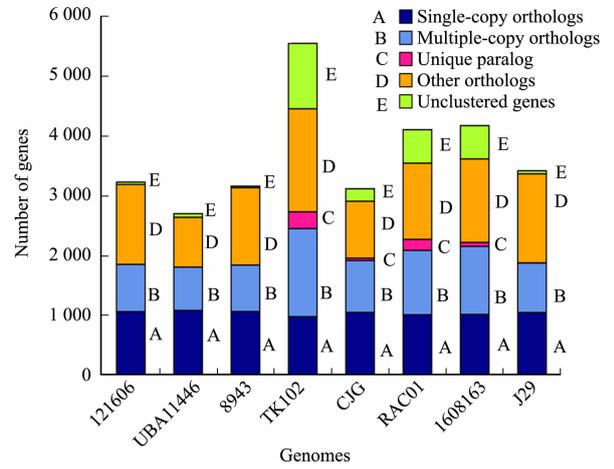


Fig. 3 Orthologous distribution of *C. kerstersii* strains and *Acidovorax* species

图3 *C. kerstersii* 菌株及 *Acidovorax* 菌种的同源分布

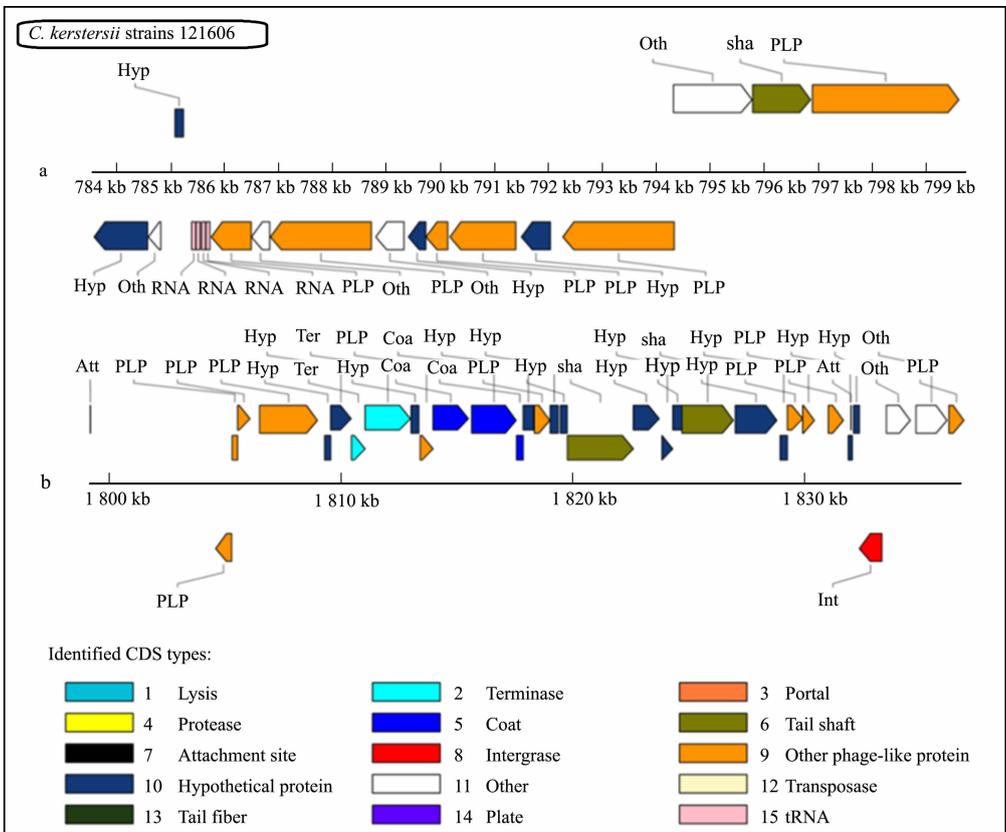


Fig. 4 Predicted prophage regions and elements in genomes of *C. kerstersii* 121606

图4 *C. kerstersii* 121606 基因组中预测的前噬菌体区域和组成元件

DNA elements<sup>[17]</sup> was identified in b, and the *att* sites used to determine the extent of the prophage<sup>[18]</sup>

were also found in b, meaning that the intact prophage region b is disseminatable? This assumption requires laboratory verification.

## 2.7 Resistome of *C. kerstersii* 121606

*C. kerstersii* 121606 (table 3) harbored a number of ARGs contributing to the resistance to  $\beta$ -lactams (*bla*<sub>KPC-2</sub>, *bla*<sub>SPM-1</sub>), fluoroquinolone (*AANT*(4')-*Ib*, *apmA*, *mfd*, *opmH*, *oqxB*), polymyxin (*basR*), elfamycin (*basS*, *lpxC*), fosfomycin (*pvrR*), aminocoumarin, elfamycin, fluoroquinolone, isoniazid, lipopeptide antibiotics, and rifamycin[*tet*(35)], or encoding efflux pump complex subunits or regulators (*acrB*, *acrD*, *acrF*; *mexA*, *mexB*, *mexQ*, *oprM*, *mexR*; *smeB*, *smeD*, *smeE*; *adeJ*; *mdtF*). The presence of these collective ARGs was consistent with the AST profiles of *C. kerstersii* 121606.

Tab. 3 Predicted antibiotic resistance genes in *C. kerstersii* 121606 genome

表 3 *C. kerstersii* 121606 基因组中抗生素抗性基因的预测

Antibiotic resistance genes	Functions	Antibiotic resistance genes	Functions	
<i>bla</i> <sub>KPC-2</sub>	<i>Klebsiella pneumoniae</i> carbapenemase-2	<i>ANT</i> (4')- <i>Ib</i>		
<i>bla</i> <sub>SPM-1</sub>	Sao Paulometallo- $\beta$ -lactamases-1	<i>apmA</i>	Determinant of fluoroquinolone resistance	
<b><i>acrB</i></b>		<i>mfd</i>		
<b><i>acrD</i></b>		<i>opmH</i>		
<b><i>acrF</i></b>		<i>oqxB</i>		
<b><i>mexA</i></b>		<i>basR</i>	Determinant of polymyxin resistance	
<b><i>mexB</i></b>		<i>basS</i>	Determinant of elfamycin resistance	
<b><i>mexQ</i></b>	Efflux pump complex or subunit conferring antibiotic resistance	<i>lpxC</i>	Determinant of elfamycin resistance, protein(s) conferring antibiotic resistance via molecular bypass	
<b><i>oprM</i></b>				
<b><i>mexR</i></b>			<i>pvrR</i>	Determinant of fosfomycin resistance
<b><i>smeB</i></b>				
<b><i>smeD</i></b>				
<b><i>smeE</i></b>			Determinant of resistance to aminocoumarin, elfamycin,	
<i>adeJ</i>		<i>tet</i> (35)	fluoroquinolone, isoniazid, lipopeptide antibiotics, rifamycin	
<i>mdtF</i>				

**Notes:** +/− indicates presence or absence of the resistance gene in the genome predicted by CARD; bold indicates discussed.

**注:** +/− 分别表示 CARD 预测的基因组中抗性基因的存在或不存在;粗体表示已讨论。

## 3 Discussion

### 3.1 Underestimated *C. kerstersii* Infections in Clinical Diagnosis

As mentioned above, during our laboratory diagnosis, *C. kerstersii* 121606 was initially misidentified as *S. multivorum*. Later, it was misidentified as *Acidovorax* sp. even by the gold standard diagnosis method, 16S rRNA gene sequencing. In fact, we had the same misidentification experience with other two *C. kerstersii*, 202149 and 12322-1 (unpublished). Their identities as *C. kerstersii* were not determined until their genomic sequences were obtained for ANI analysis. There are increasing reports of *C. kerstersii* misidentification due to unreliable phenotypic identification tests prior to the application of MALDI-TOF<sup>[4,19-20]</sup>. As a result, actual *C. kerstersii* infections might be seriously underestimated.

### 3.2 Origin of *C. kerstersii* 121606 Revealed by Comparative Genomic Analyses

The phylogenetic trees based on both ANI values and SNPs confirmed that *C. kerstersii* 121606 is a strain of the species *kerstersii* and is closely related to *C. kerstersii* 8943 and *C. kerstersii* J29. Additionally, the orthologous analysis revealed that strains *C. kerstersii* 121606, 8943, and J29 contained

highly similar single- or multiple-copy orthologs. It is known that *C. kerstersii* 8943 and *C. kerstersii* J29 were isolated from the same source in Zhejiang Province, China<sup>[8]</sup>, which is not far from Quanzhou City, the isolation site of *C. kerstersii* 121606. Therefore, *C. kerstersii* 121606 might have the same ancestor as *C. kerstersii* 8943 and J29.

### 3.3 Multi-Drug Phenotype of *C. kerstersii* 121606 Explained by Presence of Number of Antibiotic Resistance Genes in Genome

According to table 1, *C. kerstersii* 121606 exhibited the multi-drug phenotype of *C. kerstersii*, which had not been previously reported. For instance, it was noted that nine of the antibiotics to which *C. kerstersii* 121606 was resistant (amikacin, gentamicin, imipenem, cefepime, cefotaxime, ciprofloxacin, ampicillin-sulbactam, piperacillin-tazobactam, trimethoprim-sulfamethoxazole) were sensitive in 14 clinical *C. kerstersii* strains<sup>[21]</sup>. Additionally, 11 of the antibiotics to which *C. kerstersii* 121606 was resistant (ampicillin, ampicillin-sulbactam, cefotaxime, ceftazidime, cefepime, imipenem, gentamicin, amikacin, ciprofloxacin, colistin, trimethoprim-sulfamethoxazole) were susceptible in four clinical *C. kerstersii* isolates<sup>[5]</sup>. The AST profiles of strain 121606 (table 1) could be explained by the corresponding ARGs in its genome (table 3).

$\beta$ -lactams are the primary antibiotics used to treat bacterial infections. The rapid increase in bacterial resistance to  $\beta$ -lactams posed a serious health threat. The mechanisms of  $\beta$ -lactam resistance include inactivation by  $\beta$ -lactamases, efflux pumps, reduced permeability, and altered transpeptidases<sup>[22]</sup>. *C. kerstersii* 121606 possessed at least the former two mechanisms.

Firstly, the presence of the  $\beta$ -lactamase encoding genes *bla*<sub>SPM-1</sub> and *bla*<sub>KPC-2</sub> in *C. kerstersii* 121606 explained its resistance to the tested  $\beta$ -lactams, including penicillins (ampicillin, piperacillin, amoxicillin-clavulanic acid, piperacillin-tazobactam), cephalosporins (ceftazidime, cefotaxime, cefepime), monobactams (aztreonam), and carbapenems (imipenem) (table 1).

SPM-1 (Sao Paulo metallo- $\beta$ -lactamases) is a Class B metallo- $\beta$ -lactamase, first identified in *Pseudomonas aeruginosa* strain 48-1997A isolated in Sao Paulo, Brazil<sup>[23]</sup>. It shows hydrolytic activity against penicillins (benzylpenicillin, ampicillin, carbenicillin, azlocillin, piperacillin), with the highest activity for benzylpenicillin, ampicillin, and piperacillin, and preferential hydrolyzing activity against cephalosporins (cephalothin, cefuroxime, cefotaxime, cefoxitin, cefepime), carbapenems (imipenem, meropenem), the serine  $\beta$ -lactamase inhibitor tazobactam, but not against the monobactam aztreonam or the serine  $\beta$ -lactamase inhibitor clavulanic acid. The latter two are competitive inhibitors of SPM-1<sup>[23]</sup>. The presence of *bla*<sub>SPM-1</sub> was consistent with the resistance of *C. kerstersii* 121606 to ampicillin, piperacillin, cefotaxime, cefepime, and imipenem.

KPC-2 is a homolog of various *Klebsiella pneumoniae* carbapenemases (KPCs), the most typical example of a class A carbapenemase, which also confers resistance to most  $\beta$ -lactams. KPC-1 was first found in a *K. pneumoniae* isolate in 1996 in the United State, and showed hydrolytic activity against penicillin (benzylpenicillin, ampicillin, cloxacillin, piperacillin), cephalosporins (cefotaxime), carbapenem (imipenem and meropenem), and monobactams (aztreonam)<sup>[24]</sup>. The KPC-1 transforming expressing bacteria showed resistance to penicillins (ampicillin, amoxicillin-clavulanic acid, piperacillin-tazobactam), cephalosporins (ceftazidime, cefoxitin, cefpodoxime, cefotaxime, ceftriaxone), carbapenems (imipenem, meropenem), and monobactams (aztreonam)<sup>[24]</sup>. Initially identified KPC-2 also has hydrolytic activity against penicillins and cephalosporins but not cephamycins and ceftazidime. Recently emerged KPC-2 variants evolved by single and double amino acid substitution among clinical isolates showed increased hydrolytic activity against ceftazidime and consequently increased resistance to ceftazidime, while maintaining the resistance capacity to penicillins and carbapenems<sup>[25]</sup>. The presence of *bla*<sub>KPC-2</sub> was closely related to the resistance of *C. kerstersii* 121606 to ampicillin, amoxicillin-

clavulanic acid, piperacillin-tazobactam, ceftazidime, cefotaxime, imipenem, and aztreonam.

Secondly, for the efflux pumps, the *C. kerstersii* 121606 genome possessed several type of multi-drug efflux systems, which would further enhance resistance to  $\beta$ -lactams and other antibiotics listed in table 1.

The genes *acrD*, *acrB*, and *acrF* encode three types of RND (Resistance Nodulation and cell Division) efflux pumps that confer resistance to monobactams (aztreonam), cephalosporins (cefazolin), and aminoglycosides (amikacin, gentamicin) and quinolones (ciprofloxacin, levofloxacin, moxifloxacin). For example, the AcrD (encoded by *acrD*) containing AcrAD-TolC efflux pump confers resistance to aztreonam, cefazolin in *Salmonella typhimurium*<sup>[26]</sup>, and aminoglycosides (amikacin, gentamicin, neomycin, kanamycin, and tobramycin) in *E. coli*<sup>[27]</sup>. AcrAB-TolC, a major and clinically important efflux pump in Gram-negative bacteria, and another type of RND efflux pumps, AcrEF-TolC, contribute to resistance to fluoroquinolones, which are often used as therapeutic alternatives in infections<sup>[28]</sup>.

For the component and structure of RND efflux pumps in Gram-negative bacteria, for example, the AcrAB-TolC multidrug efflux pump complex is formed by assembling the homotrimeric inner membrane protein (IMP) AcrB, which recognizes, binds and translocates substrates, and transduces the energy (proton motive force, PMF) for the drug/proton antiport process, the hexameric membrane fusion protein (MFP) AcrA, which forms a membrane fused tubular structure inside the periplasmic space, and the homotrimeric outer membrane factor (OMF) TolC<sup>[29]</sup>, constituting a main means of intrinsic resistance against cytotoxic substances<sup>[30]</sup>.

The TolC encoding gene *tolC*, and the AcrEF efflux pump encoding genes *acrE* and *acrF* were predicted in *C. kerstersii* 121606, but not *acrA*. *acrE* was predicted to encode a 399 amino acid-AcrE protein in *C. kerstersii* 121606 through CARD database, but it was filtered out and not listed in table 3 because its identity with the reference gene was below 50%. However, AcrE and AcrD/AcrF are homologues of AcrA and AcrB, and AcrE can substitute AcrA to form a functional complex with AcrD by associating with the same residues identified in AcrB binding<sup>[31]</sup>. So, we supposed that *C. kerstersii* 121606 possessed functional AcrEF, AcrED, or AcrEB-TolC multidrug efflux pumps, resulting in resistance to monobactams (aztreonam), cephalosporins (cefazolin), aminoglycosides (amikacin, gentamicin) and quinolones (ciprofloxacin, levofloxacin, moxifloxacin) (table 1).

In addition, *C. kerstersii* 121606 may have MexAB-OprM, which is found in *P. aeruginosa*, as it harbored their encoding genes *mexA*, *mexB*, *oprM* and one of the repressor gene, *mexR*. Overexpression of MexAB-OprM induced by *mexR* mutations can export various antibiotics, including penicillins (penicillin G, cloxacillin, nafcillin, amoxicillin, piperacillin, carbenicillin, sulbenicillin), cepheims (cefamandole, cefuroxime, cefoperazone, cefotaxime, ceftizoxime, ceftriaxone, ceftazidime, cefpirome, cefepime, ceftazopran, cefoselis, ceftioxin), oxacephems (moxalactam, flomoxef), monobactams (aztreonam), quinolones (nalidixic acid, piroimidic acid, pipemidic acid, cinoxacin, norfloxacin, ofloxacin, enoxacin, ciprofloxacin, tosufloxacin, sparfloxacin), macrolides (erythromycin, oleandomycin, spiramycin), lincosamides (lincomycin), chloramphenicol (chloramphenicol), and novobiocin (novobiocin)<sup>[32]</sup>. If MexAB-OprM really conferred the resistance of *C. kerstersii* 121606 to penicillins (amoxicillin, piperacillin), cephalosporins (cefotaxime, ceftazidime, cefepime), monobactams (aztreonam), quinolones (ciprofloxacin), chloramphenicol (chloramphenicol)] (table 1), sequencing of the full-length *mexR* gene in *C. kerstersii* 121606 should be performed to verify whether it is a loss-of-function mutant<sup>[33]</sup>, leading to overexpression of MexAB-OprM and contributing to the resistance. In fact, *C. kerstersii* 121606 may express a series of Mex efflux pumps as it contained the genes *mexA-N*, *mexP-R*, *mexV-Y*, *mexA-N*, *mexP-R*, *mexV-Y*, *oprA*, *oprJ*, *oprM*, *oprN*,

*oprZ*<sup>[34]</sup>, most of which were not listed in table 3 due to the stringent filtering parameters mentioned above.

*C. kerstersii* 121606 might also possess another two homologues of the mexAB-*oprM* efflux pumps, SmeABC and SmeDE (a SmeB homologue) F (a SmeC homologue) multidrug efflux pump, as their encoding genes *smeA* (encoding the inner-membrane fusion lipoprotein), *smeB* (encoding the RND transporter), *smeC* (encoding the outer-membrane efflux lipoprotein), *smeD*, *smeE*, *smeF* (encoding the outer membrane protein), and the regulation genes *smeR* (encoding the two-component system sensory kinase which positively regulates expression of the *smeA*, *smeB*, *smeC* genes), *smeS* (encoding the two-component system response regulator) were predicted through CARD database, and *smeS* and *smeR* were located upstream of the *smeABC* genes and the *smeDEF* genes as reported<sup>[35]</sup>. We should mention that, *smeA*, *smeC*, *smeF*, *smeR*, and *smeS* were not put into table 3 because their identities with the reference genes in CARD database were below 50%. The SmeABC efflux pump confers the resistance to aminoglycosides (amikacin, gentamicin, kanamycin, streptomycin, tobramycin), penicillins (penicillin, carbenicillin, ampicillin), (cefsulodin, cefotaxime, cefoperazone, cefepime, cefpirome), quinolones (nalidixic acid, ciprofloxacin, norfloxacin, trovafloxacin)<sup>[35]</sup>. The efflux pump SmeDEF has broad substrate specificity and contributes to the resistance to a variety of antimicrobials, including quinolones, macrolides, chloramphenicol, and novobiocin<sup>[34]</sup>, trimethoprim-sulfamethoxazole in clinical isolates of *Stenotrophomonas maltophilia*<sup>[36]</sup>. Aside from conferring the resistance to  $\beta$ -lactams (listed in table 3), the probable expression of AcrEF, AcrED, AcrEB-TolC, MexAB-OprM, *smeABC*, SmeDEF multidrug efflux pump also contributed to the resistance to aminoglycosides (amikacin, gentamicin), quinolones (ciprofloxacin, levofloxacin, moxifloxacin), chloramphenicol (chloramphenicol), sulfonamides (trimethoprim-sulfamethoxazole).

Overall, these ARGs contained in *C. kerstersii* 121606 genome explained its multi-drug resistance.

## 4 Conclusion

Comparative genomic analyses revealed that our clinical *C. kerstersii* isolate 121606 belonged to the species *C. kerstersii* and shared similar genetic components with five other *Comamonas* species and the closely related *Acidovorax* species. The ARGs in the genome were consistent with its multi-drug resistance phenotype. All the data needs to be verified by laboratory experiments and could help to find new drug to combat infections caused by multi-drug resistant *C. kerstersii*.

**Ethics Statement:** This article does not contain any studies with humans or animals performed by any of the authors. This work was approved by the Ethics Committee of Quanzhou First Hospital.

## References:

- [1] WAUTERS G, DE BAERE T, WILLEMS A, *et al.* Description of *Comamonas aquatica* comb. nov. and *Comamonas kerstersii* sp. nov. for two subgroups of *Comamonas terrigena* and emended description of *Comamonas terrigena* [J]. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2003, 53(3): 859-862. DOI: 10.1099/ijms.0.02450-0.
- [2] LIU Xuejiao, QIAO Xiwen, HUANG Tianmin, *et al.* *Comamonas kerstersii* bacteremia [J]. *Med Mal Infect*, 2020, 50(3): 288-290. DOI: 10.1016/j.medmal.2019.12.005.
- [3] BENNANI H, HANCHI AL, SORAA N. A young child with acute perforated appendicitis due to *Comamonas kerstersii*: A rare case report [J]. *Pan Afr Med J*, 2022, 41: 186-193. DOI: 10.11604/pamj.2022.41.186.29615.
- [4] BISWAS J S, FITCHETT J, O'HARA G. *Comamonas kerstersii* and the perforated appendix [J]. *J Clin Microbiol*, 2014, 52(8): 3134. DOI: 10.1128/JCM.00909-14.
- [5] ALMUZARA MN, VERA OCAMPO C, BAKAI R, *et al.* Intra-abdominal infections due to *Comamonas kerstersii*

- [J]. *J Clin Microbiol*, 2013, 51(6):1998-2000. DOI:10.1128/JCM.00659-13.
- [6] WANG M, LIN N, ZHANG Y, *et al*. The antibiotic resistance and pathogenicity of a multidrug-resistant *Elizabethkingia anophelis* isolate[J]. *Microbiologyopen*, 2019, 8(11):e804. DOI:10.1002/mbo3.804.
- [7] HU S, WU Y, ZHOU Y, *et al*. Comparative genomic analysis of *Myroides odoratimimus* isolates[J]. *Microbiologyopen*, 2019, 8(2):e00634. DOI:10.1002/mbo3.634.
- [8] JIANG Xiwei, LIU Wenhong, ZHENG Beiwen. Complete genome sequencing of *Comamonas kerstersii* 8943, a causative agent for peritonitis[J]. *Sci Data*, 2018, 5(1):180222. DOI:10.1038/sdata.2018.222.
- [9] LEE I, KIM Y O, PARK S C, *et al*. OrthoANI: An improved algorithm and software for calculating average nucleotide identity[J]. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2016, 66(2):1100-1103. DOI:10.1099/ijsem.0.000760.
- [10] LEEKITCHAROENPHON P, KAAS RS, THOMSEN MC, *et al*. snpTree: A web-server to identify and construct SNP trees from whole genome sequence data[J]. *BMC Genomics*, 2012, 13(Suppl 7):S6(1-8). DOI:10.1186/1471-2164-13-S7-S6.
- [11] WANG Y, COLEMAN-DERR D, CHEN G. OrthoVenn: A web server for genome wide comparison and annotation of orthologous clusters across multiple species[J]. *Nucleic Acids Res*, 2015, 43(W1):W78-W84. DOI:10.1093/nar/gkv487.
- [12] BLAND C RT, SABREE F, LOWE M, *et al*. CRISPR recognition tool (CRT): A tool for automatic detection of clustered regularly interspaced palindromic repeats[J]. *BMC Bioinformatics*, 2007, 8:209-216. DOI:10.1186/1471-2105-8-209.
- [13] ZHOU You, LYNCH K H, DENNIS J J, *et al*. PHAST: A fast phage search tool[J]. *Nucleic Acids Res*, 2011, 39:W347-W352. DOI:10.1093/nar/gkr485.
- [14] GORIS J, KLAPPENBACH J A, COENYE T, *et al*. DNA-DNA hybridization values and their relationship to whole-genome sequence similarities[J]. *Int J Syst Evol Microbiol*, 2007, 57(1):81-91. DOI:10.1099/ijms.0.64483-0.
- [15] WIEDENHEFT B, DOUDNA J A. RNA-guided genetic silencing systems in bacteria and archaea[J]. *Nature*, 2012, 482(7385):331-338. DOI:10.1038/nature10886.
- [16] ISHINO Y, MAKINO K, AMEMURA M, *et al*. Nucleotide sequence of the iap gene, responsible for alkaline phosphatase isozyme conversion in *Escherichia coli*, and identification of the gene product[J]. *J Bacteriol*, 1987, 169(12):5429-5433. DOI:10.1128/jb.169.12.5429-5433.1987.
- [17] BENNETZEN JL. Transposable element contributions to plant gene and genome evolution[J]. *Plant Mol Biol*, 2000, 42(1):251-269.
- [18] VENTURA M, KLEEREBEZEM M, DE VOS WM, *et al*. The prophage sequences of *Lactobacillus plantarum* strain WCFS1[J]. *Virology*, 2003, 316(2):245-255. DOI:10.1016/j.virol.2003.08.019.
- [19] OPOTA O, ZANETTI G, JATON K, *et al*. Bacteremia caused by *Comamonas kerstersii* in a patient with diverticulosis[J]. *J Clin Microbiol*, 2014, 52(3):1009-1012. DOI:10.1128/JCM.02942-13.
- [20] RONG K, ALMUTAWA F. *Comamonas kerstersii* Bacteremia of Unknown Origin[J]. *Case Rep Infect Dis*, 2022, 2022:1129832. DOI:10.1155/2022/1129832.
- [21] ALMUZARA M, ESTRAVIZ ML, ELLIS A, *et al*. First report of *Comamonas kerstersii* causing urinary tract infection[J]. *New Microbes New Infect*, 2018, 24:4-7. DOI:10.1016/j.nmni.2018.03.003.
- [22] SAWA T, KOOGUCHI K, MORIYAMA K. Molecular diversity of extended-spectrum  $\beta$ -lactamases and carbapenemases, and antimicrobial resistance[J]. *J Intensive Care*, 2020, 8:13. DOI:10.1186/s40560-020-0429-6.
- [23] MURPHY T A, SIMM A M, TOLEMAN M A, *et al*. Biochemical characterization of the acquired metallo-beta-lactamase SPM-1 from *Pseudomonas aeruginosa* [J]. *Antimicrob Agents Chemother*, 2003, 47(2):582-587. DOI:10.1128/AAC.47.2.582-587.2003.
- [24] YIGIT H, QUEENAN A M, ANDERSON G J, *et al*. Novel carbapenem-hydrolyzing  $\beta$ -lactamase, KPC-1, from a carbapenem-resistant strain of *Klebsiella pneumoniae* [J]. *Antimicrob Agents Chemother*, 2001, 45(4):1151-1161. DOI:10.1128/AAC.45.4.1151-1161.2001.
- [25] MEHTA SC, RICE K, PALZKILL T. Natural variants of the KPC-2 carbapenemase have evolved increased catalytic efficiency for ceftazidime hydrolysis at the cost of enzyme stability[J]. *PLoS Pathog*, 2015, 11(6):e1004949. DOI:10.1371/journal.ppat.1004949.
- [26] CUESTA BERNAL J, EL-DELIK J, *et al*. Characterization and molecular determinants for  $\beta$ -lactam specificity of

- the multidrug efflux pump AcrD from *Salmonella typhimurium*[J]. *Antibiotics* (Basel), 2021, 10(12):1494. DOI: 10.3390/antibiotics10121494.
- [27] ROSENBERG EY, MA D, NIKAIDO H. AcrD (acriflavine resistance D) of *Escherichia coli* is an aminoglycoside efflux pump[J]. *J Bacteriol*, 2000, 182(6):1754-1756. DOI:10.1128/JB.182.6.1754-1756.2000.
- [28] CHETRI S, DOLLEY A, BHOWMIK D, *et al.* Transcriptional response of AcrEF-TolC against fluoroquinolone and carbapenem in *Escherichia coli* of clinical origin[J]. *Indian J Med Microbiol*, 2018, 36(4):537-540. DOI:10.4103/ijmm.IJMM\_18\_308.
- [29] KOBYLKA J, KUTH MS, MÜLLER RT, *et al.* AcrB: A mean, keen, drug efflux machine[J]. *Ann N Y Acad Sci*, 2020, 1459(1):38-68. DOI:10.1111/nyas.14239.
- [30] PUGH HL, CONNOR C, SIASAT P, *et al.* *E. coli* ST11 (O157:H7) does not encode a functional AcrF efflux pump[J]. *Microbiology* (Reading), 2023, 169(4):001324. DOI:10.1099/mic.0.001324.
- [31] ALAV I, BAVRO V N, BLAIR JMA. Interchangeability of periplasmic adaptor proteins AcrA and AcrE in forming functional efflux pumps with AcrD in *Salmonella enterica* serovar Typhimurium[J]. *J Antimicrob Chemother*, 2021, 76(10):2558-2564. DOI:10.1093/jac/dkab237.
- [32] TSUJIMOTO H, NISHINO T. Substrate specificities of MexAB-OprM, MexCD-OprJ, and MexXY-oprM efflux pumps in *Pseudomonas aeruginosa*[J]. *Antimicrob Agents Chemother*, 2000, 44(12):3322-7. DOI:10.1128/AAC.44.12.3322-3327.2000.
- [33] SRIKUMAR R, PAUL CJ, POOLE K. Influence of mutations in the *mexR* repressor gene on expression of the MexA-MexB-oprM multidrug efflux system of *Pseudomonas aeruginosa*[J]. *J Bacteriol*, 2000, 182(5):1410-1414. DOI:10.1128/JB.182.5.1410-1414.2000.
- [34] ZHANG Li, LI Xianzhi, POOLE K. SmeDEF multidrug efflux pump contributes to intrinsic multidrug resistance in *Stenotrophomonas maltophilia*[J]. *Antimicrob Agents Chemother*, 2001, 45(12):3497-3503. DOI:10.1128/AAC.45.12.3497-3503.2001.
- [35] LI Xianzhi, ZHANG Li, POOLE K. SmeC, an outer membrane multidrug efflux protein of *Stenotrophomonas maltophilia*[J]. *Antimicrob Agents Chemother*, 2002, 46(2):333-343. DOI:10.1128/AAC.46.2.333-343.2002.
- [36] SÁNCHEZ MB, MARTÍNEZ JL. The efflux pump SmeDEF contributes to trimethoprim-sulfamethoxazole resistance in *Stenotrophomonas maltophilia*[J]. *Antimicrob Agents Chemother*, 2015, 59(7):4347-4348. DOI:10.1128/AAC.00714-15.

(责任编辑:黄仲一 英文审校:刘源岗)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202310017



# 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<sup>1</sup>, 郭玉川<sup>1,2</sup>, 姚磊<sup>1</sup>, 王会静<sup>1</sup>, 白运保<sup>1</sup>, 张子惠<sup>1</sup>

(1. 新疆大学 地理与遥感科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2. 新疆大学 新疆绿洲生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 探究干旱区典型绿洲城市景观生态安全时空演变, 设置经济、生态、景观生态安全、可持续(MOP)4 种情景, 预测土地利用/覆被变化(LUCC)趋势, 评价 2030 年景观生态安全, 以期缓解城市建设开发与生态环境保护的矛盾。基于 1990—2020 年的土地利用数据, 采用遥感、地理信息系统(GIS)网格等方法构建景观生态安全评价模型, 以揭示库车市近 30 a 景观生态安全空间分布特征与变化趋势, 并通过耦合 MOP-PLUS 模型预测库车市 2030 年景观生态安全时空演变规律。结果表明: 1990—2020 年, 研究区耕地、林地、建设用地面积总体呈增加趋势, 草地、水域面积总体呈现减少趋势, 地类转换主要集中于耕地、草地与未利用地; 景观生态安全值(ESI)空间集聚状态明显, 但集聚程度有所下降, 景观生态安全等级以中等、较高、高生态安全为主, 占研究区总面积 60.15%~64.87%; 相较于 2020 年, 2030 年 4 种情景下的 ESI 变化幅度较大, 主要集中于南部人口聚集地。

**关键词:** 土地利用格局变化; 景观生态安全评价; PLUS 多情景模拟; 库车市

**中图分类号:** X 826; Q 146

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-5013(2024)01-0047-14

## LUCC Trend and Landscape Ecological Security Evaluation in Kucha City through Coupled MOP-PLUS Model

LU Tiantian<sup>1</sup>, GUO Yuchuan<sup>1,2</sup>, YAO Lei<sup>1</sup>,  
WANG Huijing<sup>1</sup>, BAI Yunbao<sup>1</sup>, ZHANG Zihui<sup>1</sup>

(1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** Aiming to explore the spatial and temporal evolution of urban landscape ecological security in typical oasis city in arid areas, four scenarios including economy, ecology, landscape ecological security and sustainability (MOP) were used to predict land use/cover change (LUCC) trend, and to evaluate landscape ecological security in 2030, which could help ease the tension between urban construction and development and ecological environment protection. Based on the land use data from 1990 to 2020, methods such as remote sensing and geographic information system grid were used to construct the landscape ecological security evaluation model in order to demonstrate the landscape ecological security spatial distribution characteristics and change trends in Kucha City over the past 30 years, and to predict spatial and temporal evolution patterns of landscape ecological security in Kucha City in 2030 through coupled MOP-PLUS model. The results showed

**收稿日期:** 2023-10-18

**通信作者:** 郭玉川(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事水文及水资源方面的教学和科研工作。E-mail: xjguoyuchuan@xju.edu.cn。

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41961003)

that from 1990 to 2020, the areas of cultivated land, woodland and construction land in the research areas showed an overall increasing trend, while the areas of grassland and water showed an overall decreasing trend, and land type conversion mainly focused on cultivated land, grassland and unused land. The spatial clustering status of landscape ecological security value (ESI) was obvious, but the degree of clustering decreased, and the landscape ecological security level was dominated by medium, higher and high ESI, which accounted for 60.15%-64.87% of the total area of the study area. Compared to 2020, the changes in ESI under the four scenarios in 2030 were relatively large, mainly concentrated in the southern population gathering areas.

**Keywords:** land use pattern change; landscape ecological security evaluation; PLUS multi-scenario simulation; Kucha City

新疆已经进入高质量发展的关键衔接期,区域发展质量提升迫在眉睫,保障土地资源合理配置已成为区域可持续发展亟待解决的难题<sup>[1]</sup>。土地利用/覆被变化(LUCC)是人类活动对自然环境影响最直接的表现形式,它与地表物质循环、生物多样性和自然资源可持续发展有着紧密联系<sup>[2]</sup>,围绕土地利用变化的研究理论与方法已被广泛应用于区域与可持续发展<sup>[3]</sup>、资源环境承载力<sup>[4]</sup>及土地碳核算<sup>[5]</sup>等领域,并形成了相对完整的理论与方法体系。景观生态安全评价是生态安全在属性和数值上具体的量化,也是对区域景观在受到外力干扰后整体生态安全程度状况的一种描述<sup>[6]</sup>,将其与空间统计学方法相结合能够更直观、全面地反映城市景观生态安全的时空演变。随着城市化进程的快速推进,城市建设用地需求扩大、人地关系紧张、资源环境矛盾突出、生态系统脆弱性增强<sup>[7-8]</sup>等问题给城市生态安全带来了极大的挑战。因此,揭示快速发展的城市景观生态安全时空演变特征,模拟预测不同情景下景观生态安全的动态变化趋势,提出城市土地利用结构优化方式,对促进城市经济社会高质量发展尤为重要。

景观生态安全评价是国内外相关研究领域的热点。Chen等<sup>[9]</sup>修订综合位置加权指数(LWLI),研究景观指数变化与城市热岛效应的相互关系。Renetzedner等<sup>[10]</sup>分析奥地利景观格局变化特征及对生态可持续性的影响。文献[11-12]分别从自然、社会、距离等方面选取驱动因子探究其对生态安全的影响过程。Boix-fayos等<sup>[13]</sup>基于景观生态安全格局对地中海山区土地利用生态管理进行规划。国内对景观生态安全评价的研究主要集中于流域<sup>[14]</sup>、生态保护区<sup>[15]</sup>、湿地<sup>[16]</sup>和城市<sup>[17]</sup>,并运用景观格局指数、驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)等多种方法构建生态安全评价模型<sup>[18]</sup>,研究景观生态安全的时空分布、多尺度变化、影响因素<sup>[19-20]</sup>等。随着计算机及地理信息技术的广泛运用,土地变化动态建模研究迅速发展,极大推进了基于土地利用预测生态环境评价的研究进程<sup>[21-23]</sup>。

库车市作为新疆最典型的荒漠绿洲区之一,也是新疆较早开发的土地利用灌溉区,前人的研究多集中于干旱区土地利用变化中盐碱地、耕地的变化<sup>[24]</sup>,对生态安全的评价<sup>[25]</sup>多集中于以往年份,对未来生态安全的预测仍为空白。基于此,本文选取1990,2000,2010,2020年的库车市土地利用数据,分析土地利用类型变化特征<sup>[26]</sup>,探究景观生态安全时空演变规律。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

库车市隶属于新疆维吾尔自治区阿克苏地区,属于大陆性暖温带干旱气候,年平均气温为10.5~11.4℃,年平均降水为51.6mm。库车市是天山南麓最具代表性的平原绿洲,绿洲内经济发展以农业为主,是新疆主要棉产区和阿克苏地区最大的灌溉区<sup>[27]</sup>。研究区北部为山区,南部为平原,地势北高南低,自西北向东南倾斜,东邻轮台县,西与新和县隔河相望,南接塔克拉玛干沙漠,北部与和静县毗连。截至2021年年末,全市总面积1.45万km<sup>2</sup>,人口48.86万人,区域生产总值335.98亿元。

### 1.2 数据来源与处理

采用的土地利用数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>),1990—2020年土地利用遥感数据集(CNLUCC)分辨率为30m,按照土地资源及其利用属性,结合研究需要将其重新整合为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地等6类。数字高程模型(DEM)数据来自地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>),分辨率为30m,坡度和起伏度数据基于DEM,借助

ArcGIS 10.6 坡度和焦点统计工具获得。库车市行政边界矢量、土地利用变化分析的驱动因子数据来自中国科学院资源环境科学与数据中心 (<http://www.resdc.cn/>)。道路数据来自 Open Street map (<http://www.OpenStreetmap.org>)。社会经济数据来自阿克苏统计局, 以及《新疆统计年鉴》《阿克苏统计年鉴》《库车市统计公报》。以上数据均统一为 WGS 1984 UTM Zone 44N。

### 1.3 研究方法

1.3.1 土地利用动态度 土地利用动态度是指在一定时间范围内某一类土地的数量变化情况, 用来表示该土地利用类型在一定时间内的变化程度<sup>[28]</sup>。土地利用动态度  $K$  (单一动态度) 的计算公式为

$$K = \frac{A_{i,b} - A_{i,a}}{A_{i,a}} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式(1)中:  $A_{i,a}$  为研究初期第  $i$  种地类的面积;  $A_{i,b}$  为研究末期第  $i$  种地类的面积;  $T$  为研究时段<sup>[29]</sup>。

1.3.2 土地利用类型转移矩阵 土地利用类型转移矩阵主要用于描述区域内不同土地利用类型之间的转化过程, 揭示不同土地利用类型之间的转化速率<sup>[30]</sup>, 实现对研究区土地利用类型的结构特征和变化方向的全面阐述。土地利用类型转移矩阵  $S_{i,j}$  为

$$S_{i,j} = \begin{bmatrix} s_{1,1} & s_{1,2} & \cdots & s_{1,m} \\ s_{2,1} & s_{2,2} & \cdots & s_{2,m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{m,1} & s_{m,2} & \cdots & s_{m,m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中:  $m$  为土地利用/土地覆盖的数目;  $j$  为转换后的第  $j$  种地类。

1.3.3 二元 logistic 回归分析与 ROC 曲线检验 土地利用变化受多因子影响, 基于数据的可获得性及全面性原则, 分别从自然、社会、可达性角度选取起伏度、坡度、年平均降水、年平均气温、土壤类型、土壤侵蚀、人均国内生产总值(GDP)、人口密度、距铁路距离、距二级道路距离、距三级道路距离、距行政村距离等 12 个驱动因子 ( $o_1 \sim o_{12}$ )。将 2010 年的土地利用数据与 12 个驱动因子进行二元 logistic 回归分析, 并对其结果进行 ROC 曲线检验, 以判定驱动因子对地类变化的影响程度, 有

$$P_i = \frac{\exp(\beta_0 + \beta_1 o_1 + \beta_2 o_2 + \cdots + \beta_n o_n)}{1 + \exp(\beta_0 + \beta_1 o_1 + \beta_2 o_2 + \cdots + \beta_n o_n)} \quad (3)$$

$$\log \text{it}(P_i) = \beta_0 + \beta_1 o_1 + \beta_2 o_2 + \cdots + \beta_n o_n \quad (4)$$

式(3), (4)中:  $P_i$  为单位栅格内转换为第  $i$  种地类的概率;  $o_1 \sim o_n$  为选取的土地利用驱动因子;  $\beta_0 \sim \beta_n$  为各土地利用的回归系数<sup>[31]</sup>。

1.3.4 景观生态安全评价 1) 景观生态安全评价单元划分与模型构建。采用 ArcGIS 软件的渔网工具, 将研究区分别划分为  $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ ,  $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ ,  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$  的网格, 经过对比,  $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$  的网格对研究区边缘拟合效果最好, 故采用  $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$  的网格 (共 1 004 个), 剔除边缘地带的 93 个无效评价单元, 共 911 个评价单元 (图 1)。

选取景观干扰度指数和景观脆弱度指数构建景观生态安全评价模型。景观干扰度指数  $LDI_i$  为

$$LDI_i = xC_i + yH_i + zF_i \quad (5)$$

式(5)中:  $C_i$ ,  $H_i$ ,  $F_i$  分别为景观破碎度、多样性及周长维数;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  分别为对应指数的权重, 参考文献<sup>[30-31]</sup>, 结合研究区的实际状况分别赋值为 0.5, 0.3, 0.2。

景观脆弱度指数与生态系统的抵御性息息相关, 一般而言, 抵御性与生态系统的稳定性呈正相关关系<sup>[32-33]</sup>。以专家打分的形式, 对研究区内的 6 种地类的景观脆弱度指数分别赋值为 1~6, 将其归一化后可得耕地、林地、水域、草地、建设用地、未利用地的景观脆弱度指数分别为 0.44, 0.21, 0.56, 0.33, 0.10, 0.79<sup>[34-35]</sup>。将景观干扰度指数与景观脆弱度指数代入景观生态安全值 (ESI) 公式, 可得

$$ESI_k = \sum_{i=1}^m \frac{A_{k,i}}{A_k} \times (1 - 10 \times LDI_i \times LVI_i) \quad (6)$$



图 1 研究区评价单元

Fig. 1 Research area evaluation units

式(6)中:  $ESI_k$  为第  $k$  个评价单元的景观生态安全值;  $LVI_i$  为景观脆弱度指数;  $A_{k,i}$  为第  $k$  个评价单元第  $i$  种地类的面积;  $A_k$  为第  $k$  个评价单元的总面积。

2) 景观生态安全空间自相关分析。全局与局部空间自相关的共同点在于解释事物在某方面的相关性,不同点在于全局空间自相关侧重有无相关性,局部空间自相关侧重相关性集聚的空间位置<sup>[36]</sup>。采用 GeoDa 软件对景观生态安全值进行相关性分析,主要包括全局空间自相关及局部空间自相关,以揭示库车市 ESI 在空间上的相关性。

1.3.5 基于斑块生成土地利用模拟(PLUS)模型的库车市未来土地利用模拟 PLUS 模型基于土地扩展分析策略的规则,挖掘框架 LEAS 和多类型随机森林的元胞自动机模拟,与其他模型相比,可获得更高的模拟精度并刻画未来不同情景的景观格局<sup>[37]</sup>。根据研究需要,设置经济、生态、景观生态安全、可持续(MOP)等 4 个情景。

1) 模型精度验证。为验证 PLUS 模型对未来土地利用模拟的准确性,结合 2010 年土地利用数据,将 12 个土地利用驱动因子导入 PLUS 模型的 LEAS 模块,可以得到 6 种地类的发展概率,并将模拟与实际的 2020 年土地利用数据进行对比,可得 Kappa 系数为 0.833 0,总体精度为 0.884 3,FOM 系数为 0.069 3。由此可知,PLUS 模型可以满足干旱区未来土地利用多情景模拟需要。

2) 多情景模拟。由近 30 a 库车市土地利用类型转移矩阵可知,耕地主要由草地、建设用地、未利用地转换而来;建设用地主要由草地、耕地、未利用地转换而来;结合 1990—2020 年库车市统计公报,以及《新疆统计年鉴》《库车市土地利用总体规划》《新疆阿克苏地区湿地保护修复工程》,参考文献[38-40]的未来土地利用模拟参数,设置以下 4 种情景。

I) 经济情景。设置草地、建设用地、未地利用地转向耕地发展概率增加 15%,草地、耕地、未利用地转向建设用地发展概率增加 15%。

II) 生态情景。设置耕地、建设用地、未利用地转向林地、草地、水域的发展概率增加 20%,同时设置林地、草地、水域转向其他地类概率下降 10%,设置林地、水域为限制发展区域,对坡度大于 15°的耕地进行退耕还林保护,并调整林地、草地、水域的发展潜力。

III) 景观生态安全情景。以 2020 年景观生态安全等级评价为基础,将高生态安全( $ESI \geq 0.6029$ )设为限制转换区域,2030 年土地利用需求栅格数由马尔可夫链转移矩阵概率计算获得。

IV) MOP 情景。MOP 情景以 PLUS 模型经济、生态、景观生态安全情景下各地类面积值为上下线,强调经济、生态、社会效益的最大化。由于社会效益的最大化很难量化,故选取经济效益( $E_{d(X)}$ )与生态效益( $E_{p(X)}$ )的最大化。MOP 优化目标为

$$E_{d(X)} = \sum_i^n d_i \times X_i, \tag{7}$$

$$E_{p(X)} = \sum_i^n p_i \times X_i. \tag{8}$$

$$\text{Max}(E_{d(X)}, E_{p(X)}). \tag{9}$$

式(7),(8)中: $X_i$  表示第  $i$  种地类变量; $d_i, p_i$  为单位面积下此地类的经济和生态系数。

MOP 模型目标函数约束条件,如表 1 所示。表 1 中: $X_1 \sim X_6$  分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地的土地类型变量。

表 1 MOP 模型目标函数约束条件

Tab.1 Constraint conditions of MOP model objective function

( $\text{km}^2$ )

约束条件	说明
$X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 + X_6 = 14\ 512$	2030 年各地类总面积保持不变
$X_1 \geq 222\ 3$	耕地面积不低于 2020 年水平,以保障粮食安全
$X_2 \geq 1\ 573$	林地面积不低于 2020 年水平,以建设生态屏障
$X_3 \geq 4\ 043$	草地面积不低于 2020 年水平,以促进畜牧业发展
$X_4 \geq 115.2$	水域面积不低于 2020 年面积的 80%
$X_5 \geq 149$	建设用地面积不低于 2020 年水平,以促进经济发展
$X_6 \geq 4\ 465$	未利用地面积不低于 2020 年面积的 70%,以防止过度开发

参考库车市统计公报和《阿克苏统计年鉴》, 可得各地类均经济效益(万元·km<sup>-2</sup>), 根据谢高地等<sup>[41]</sup>不同景观类型生态价值服务当量作为各地类的生态价值指标系数, 并询问专家求解结合 PLUS 模型进行微调, 可得经济价值指标与生态价值指标公式为

$$E_{d(X)} = 14.82X_1 + 0.21X_2 + 2.59X_3 + 0.37X_4 + 1\,478.48X_5 + 0.06X_6, \quad (10)$$

$$E_{p(X)} = 6.91X_1 + 21.85X_2 + 7.24X_3 + 45.97X_4 + 0.08X_5 + 0.42X_6, \quad (11)$$

$$\text{Max}(E_{d(X)}, E_{p(X)} = aE_{d(X)} + bE_{p(X)}). \quad (12)$$

针对库车市未来 10 a 的发展, 结合以上参数设置、线性条件制约, 在 LINGO 12.0 软件中使用代码求解, 可得  $a=0.474, b=0.526$ 。

## 2 研究结果与分析

### 2.1 土地利用类型特征及变化

库车市 1990—2020 年土地利用覆被, 如图 2 所示。由图 2 可知: 1990—2020 年, 建设用地不断向东扩张, 由最初的零散分布到现在的集中分布为主; 耕地面积不断向东、向南扩张, 进而导致林地、草地分布破碎化程度增加; 东南部未利用地由 2000 年开始至 2020 年逐步增加; 区域内草地、未利用地始终为主要用地类型。

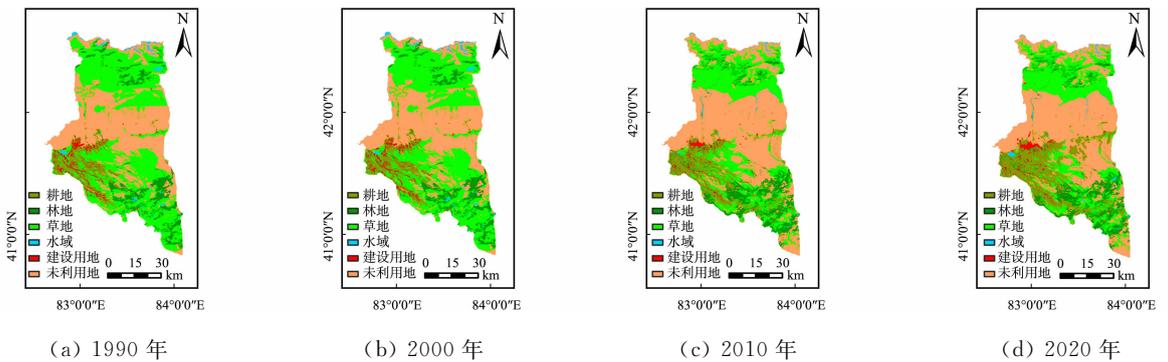


图 2 库车市 1990—2020 年土地利用覆被

Fig. 2 Land use cover in Kucha City from 1990 to 2020

库车市 1990—2020 年土地利用动态度与面积变化( $\Delta A$ ), 如表 2 所示。由表 2 可知: 1990—2000 年, 水域动态度最高(0.47%), 面积增加 8.36 km<sup>2</sup>, 未利用地动态度最低(-0.04%), 面积减少 20.89 km<sup>2</sup>, 该时期各地类面积变化不显著, 土地利用结构较稳定; 2000—2010 年, 耕地动态度最高(4.46%), 面积增加 497.50 km<sup>2</sup>, 未利用地动态度最低(2.63%), 面积减少 1 384.41 km<sup>2</sup>, 相较于 1990—2000 年, 该时期各地类动态度显著增强; 2010—2020 年, 建设用地动态度最高(3.87%), 面积增加 41.64 km<sup>2</sup>, 其次为耕地动态度(3.79%), 面积增加 611.01 km<sup>2</sup>, 林地动态度最小(-0.19%), 面积减少 29.91 km<sup>2</sup>, 相较于 2000—2010 年, 该时期除建设用地外, 各地类动态度略有减小。

表 2 库车市 1990—2020 年土地利用动态度与面积变化

Tab. 2 Land use dynamics and area changes in Kucha City from 1990 to 2020

地类	K/%			$\Delta A/\text{km}^2$		
	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2020 年	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2020 年
耕地	-0.17	4.46	3.79	-19.12	497.50	611.01
林地	0.09	2.93	-0.19	11.39	363.37	-29.91
草地	0.05	-3.25	-0.84	31.11	-2 126.23	-372.71
水域	0.47	-3.81	2.53	8.36	-70.67	29.09
建设用地	-0.70	3.07	3.87	-11.62	-47.60	41.64
未利用地	-0.04	2.63	-0.42	-20.89	1 384.41	-279.04

### 2.2 土地利用转移矩阵

库车市 1990—2020 年土地利用转移矩阵桑基图, 如图 3 所示。由图 3(a) 及相关计算可知: 1990—2000 年, 林地、草地转入量大于转出量, 林地由其他地类转入 24.04 km<sup>2</sup>, 转入量最大为草地, 贡献占比

为 49.21%；草地由其他地类转入 118.73 km<sup>2</sup>，转入量最大为耕地，贡献占比为 58.40%；耕地、建设用地、未利用地转出量大于转入量，耕地与未利用地均最大转向草地，转出占比均达 75%以上；部分建设用地转向耕地，转移量较小(19.87 km<sup>2</sup>)；该阶段各地类间转移趋势较为简单，且转移量较小。

由图 3(b),(c)及相关计算可知:2000—2020 年,各地类转移间转移趋势趋于复杂;耕地转入量始终大于转出量,主要来源于草地、建设用地,2000—2010 年,草地贡献占比为 61.90%,2010—2020 年,草地贡献占比为 56.60%;2000—2010 年,建设用地转入量最大为 87.19 km<sup>2</sup>,且建设用地与耕地相互转化趋势显著;2010 年以后,耕地转入建设用地数量大幅减少,即耕地扩张与人类活动发展趋势相近,均处于较为平稳阶段;林地、草地、未利用地与水域均存在相互转化的情况,相较于 2000—2010 年,转移量大幅减小。

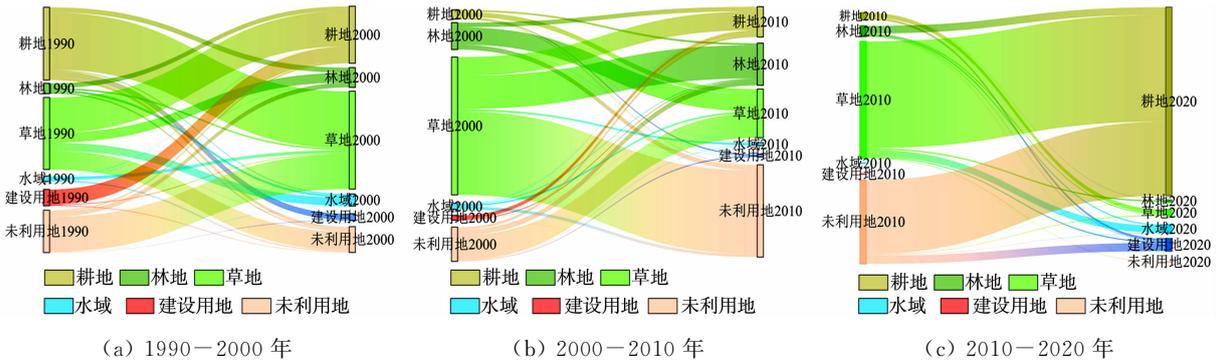


图 3 库车市 1990—2020 年土地利用转移矩阵桑基图

Fig. 3 Sankey diagram of land use transfer matrix in Kucha City from 1990 to 2020

## 2.3 土地利用驱动因子分析

2.3.1 土地利用变化二元 logistic 回归分析 首先,采用 ArcGIS 软件将土地利用数据二值化,再对 12 个土地利用驱动因子进行模糊隶属度处理,并与二值化的 2010 年土地利用数据统一转为浮点型数据;然后,将栅格数据转为 ASC II 文本,通过 CIUE-S 模型进行转换处理;最后,将所得数据导入 SPSS 软件进行二元 logistic 回归分析。二元 logistic 回归系数,如表 3 所示。表 3 中; $\beta_1 \sim \beta_6$  分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的二元 logistic 回归系数;—表示通过显著性检验而无值。由表 3 可知:驱动因子均通过显著性检验,回归系数为正时,表示自变量与因变量成正相关,反之,则为负相关。

表 3 二元 logistic 回归系数

Tab. 3 Binary logistic regression coefficients

驱动因子	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$	$\beta_6$
$\alpha_1$	-47.413	4.088	-1.713	-6.720	-17.654	0.106
$\alpha_2$	-2.122	1.150	-0.170	-1.912	0.918	0.135
$\alpha_3$	19.925	2.903	3.212	16.928	6.244	8.792
$\alpha_4$	9.858	-5.222	-8.761	6.595	1.455	7.638
$\alpha_5$	1.187	-0.267	0.692	1.025	-0.750	-1.792
$\alpha_6$	-3.844	-3.067	-0.485	-2.529	0.033	3.398
$\alpha_7$	2.093	-0.593	0.877	2.972	2.842	-6.354
$\alpha_8$	0.395	1.297	0.873	-5.943	4.413	-5.283
$\alpha_9$	-0.209	6.686	2.519	-0.183	-3.289	-6.024
$\alpha_{10}$	-3.722	-4.787	-4.196	7.800	-22.636	3.804
$\alpha_{11}$	-3.388	-3.248	-2.888	0.342	-5.200	4.356
$\alpha_{12}$	-14.002	4.111	5.691	-6.899	-3.305	-1.683

2.3.2 二元 logistic 回归分析结果与 ROC 曲线检验 采用 ROC 曲线检验二元 logistic 回归分析。当 ROC 值大于 0.500 时,拟合效果良好;当 ROC 值小于 0.500 时,拟合效果较差。耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地的 ROC 值分别为 0.937,0.853,0.766,0.764,0.960,0.852。在 2010 年土地利用数据与各驱动因子的拟合结果中,ROC 曲线下各等级面积的拟合度均大于 0.75,故驱动因子对库车市土地利用变化研究的解释力较强,可用于库车市未来土地利用模拟。

## 2.4 景观生态安全时空演变特征

2.4.1 景观生态安全时空特征 将景观指数代入景观生态安全评价模型, 采用自然间断点法结合阈值微调确定生态安全等级。因 2030 年景观生态安全评价需要, 以较近的 2020 年景观生态安全值为基础, 设定低安全( $ESI < 0.2602$ )、较低安全( $0.2602 \leq ESI < 0.4175$ )、中安全( $0.4175 \leq ESI < 0.5481$ )、较高安全( $0.5481 \leq ESI < 0.6207$ )、高安全( $ESI \geq 0.6207$ )等 5 个生态安全等级。

库车市 1990—2020 年生态安全区面积及动态度, 如表 4 所示。表 4 中:  $A_e$  为生态安全区面积;  $K_e$  为生态安全区面积动态度。由表 4 及相关计算可知: 1990—2020 年, 低生态安全区面积占比波动降低, 2020 年低生态安全区面积最小( $3\,093.29\text{ km}^2$ ), 较 1990 年下降  $9.33\%$ , 面积减小  $318.43\text{ km}^2$ ; 较低生态安全区面积先降低后增加, 并于 2000 年后持续增加, 其中, 2000—2010 年增幅最大( $46.59\%$ ); 中生态安全区面积持续增加, 2020 年面积达到最大( $4\,260.22\text{ km}^2$ ), 平均各时段增幅为  $42.17\%$ ; 较高生态安全区面积先增加后减少, 于 2010 年达到顶峰( $2\,574.65\text{ km}^2$ ), 但在 2010—2020 年降至  $1\,788.64\text{ km}^2$  (降幅为  $30.53\%$ ), 与 1990 年的面积基本持平; 高生态安全区面积持续下降, 2000—2010 年下降最大, 面积减少  $3\,126.73\text{ km}^2$  (降度为  $54.44\%$ )。

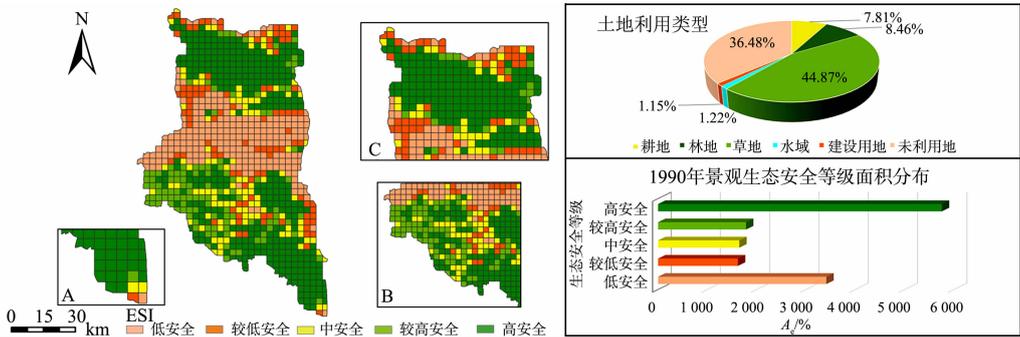
表 4 库车市 1990—2020 年景观生态安全区面积及动态度

Tab. 4 Landscape ecological security area and dynamics in Kucha City from 1990 to 2020

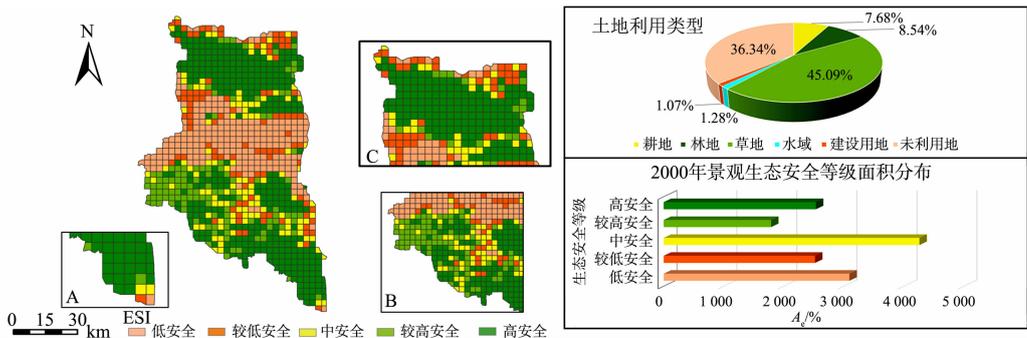
生态安全区等级	$A_e/\text{km}^2$				$K_e/\%$		
	1990 年	2000 年	2010 年	2020 年	1990—2000 年	2000—2010 年	2010—2020 年
低安全	3 411.72	3 389.21	3 284.43	3 093.29	-0.66	-3.09	-5.82
较低安全	1 618.79	1 582.68	2 320.13	2 521.01	-2.23	46.59	8.66
中安全	1 646.34	1 684.69	3 402.68	4 260.22	2.33	101.98	25.20
较高安全	1 783.37	1 798.57	2 574.65	1 788.64	0.85	43.15	-30.53
高安全	5 754.29	5 743.36	2 616.63	2 535.36	-0.19	-54.44	-3.11

库车市 1990—2020 年景观生态安全等级图谱, 如图 4 所示。

由图 4 可知: 库车市 ESI 呈现低生态安全区集聚性广泛分布, 较高生态安全区与高生态安全区由广泛团状到小区域集中分布, 中生态安全区插花随机式分布到区域团状分布, 较低生态安全区零星式集中分布的趋势; 较高生态安全区与高生态安全区分布于库车市北部山麓地带、南部人口聚集地, 此区域主要地类为林地、草地、耕地和建设用, 地类集聚或交错分布, 北部山区受人类活动小, 景观损失度低, 故



(a) 1990 年



(b) 2020 年

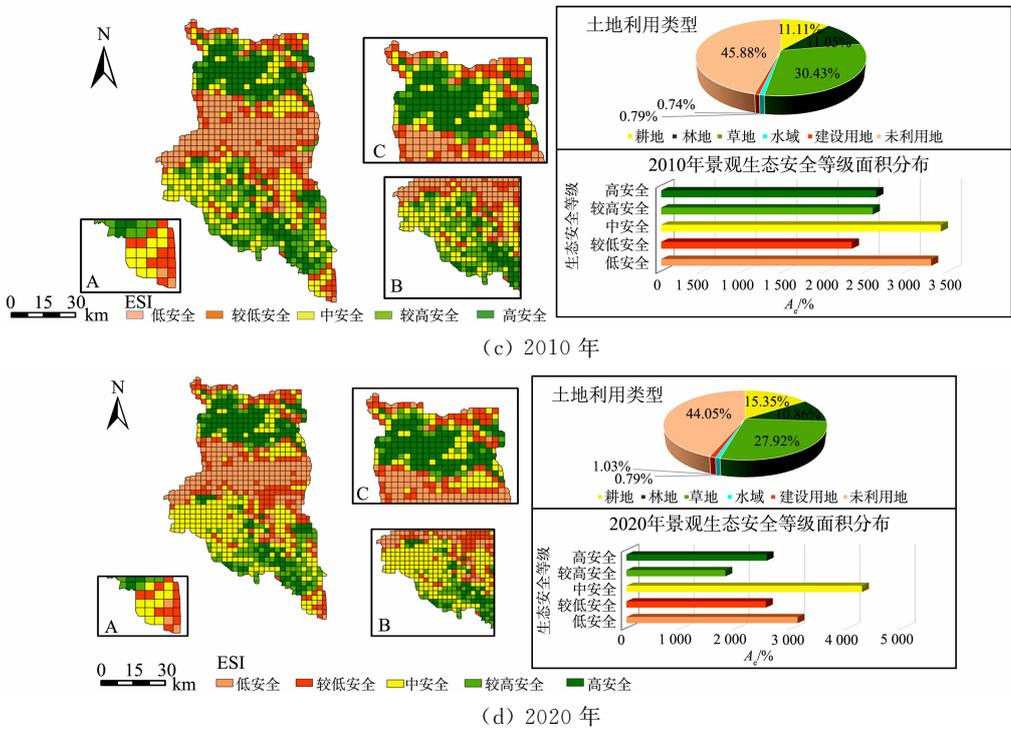


图4 库车市1990—2020年景观生态安全等级图谱

Fig. 4 Landscape ecological security level maps in Kucha City from 1990 to 2020

面积波动较小,南部人口聚集地后期由于人为干扰其面积大幅度减少,因此,人类活动是导致较高与高生态安全区面积下降的重要缘由;低与较低生态安全区分布在库车市中部,主要地类为未利用地中的戈壁和沙地,地类单一、脆弱度高;中生态安全区主要由较高生态安全区与高生态安全区退化而来。

2.4.2 景观生态安全全局空间自相关 将1990,2000,2010,2020年的库车市景观生态安全值导入GeoDa软件,可得Moran's  $I$ 值( $I_M$ )均为正值,显著性检验已通过( $P=0.05$ )。库车市1990—2020年景观生态安全值全局空间自相关,如图5所示。图5中:lagged ESI为景观生态空间滞后值。

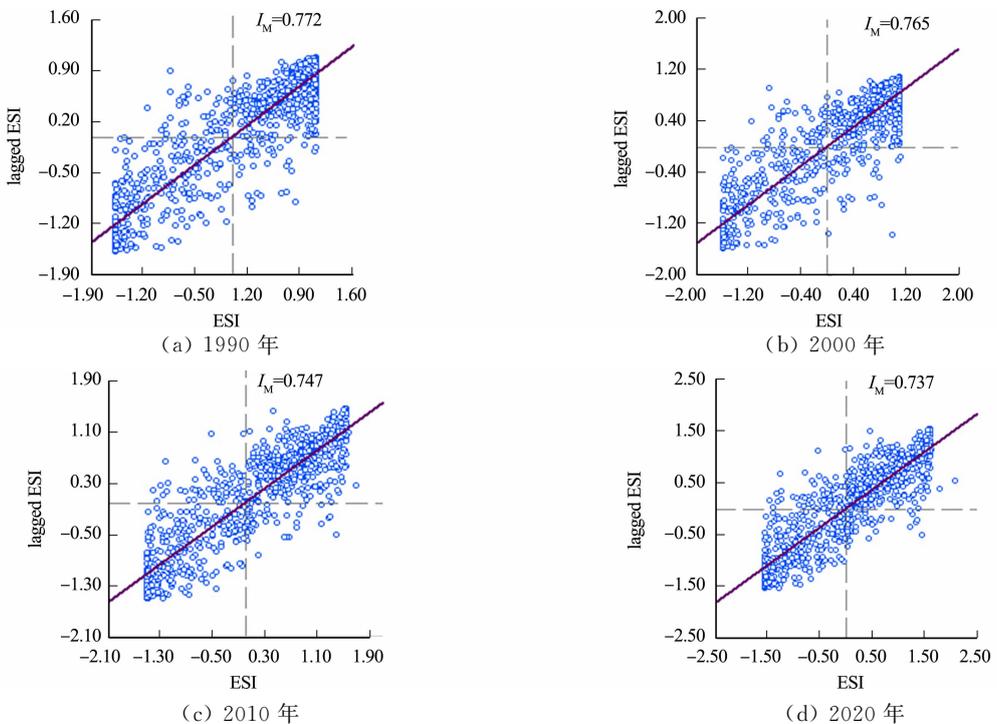


图5 库车市1990—2020年景观生态安全值全局空间自相关

Fig. 5 Global spatial autocorrelation of landscape ecological security values in Kucha City from 1990 to 2020

由图 5 可知:散点主要集中分布于第 1 象限与第 3 象限,且大多集中于回归线附近, $M_i$  由 0.772 下降至 0.737,数值较大,即景观生态安全值在空间分布上仍呈现较强的正相关关系;高值附近景观生态安全值也较高,低值附近数值也较低,区域内空间全局集聚效应显著。因而,需加强高、低生态安全区交界处管控,谨防高生态安全区向低生态安全区转变,同时注意防范生态安全区内部退化。

2.4.3 景观生态安全局部空间自相关 采用 ArcGIS 软件对库车市景观生态安全指数进行局部空间自相关分析。库车市 1990—2020 年景观生态安全值局部空间自相关,如图 6 所示。

由图 6 可知:1990—2000 年,库车市景观生态安全局部空间自相关格局总体变化不显著,南部地区高-高值区域扩大,成为了相关性显著的区域;其他区域空间自相关性变化均不明显;2000—2010 年,库车市景观生态安全局部空间变化显著,南部的高-高区域与北部以东的高-高值区域开始萎缩并零碎化;中部的低-低值区域边缘萎缩加剧;北部的低-低值区域略有萎缩;东南拐角区域由不显著区域变为低-低区域;2010—2020 年,南部高-高值区域继续萎缩,变化为不显著区域,中部的低-低值区域边缘略有萎缩,其余区域变化不显著。这与景观生态安全空间格局变化特征基本一致,且受地类转移态度与地类转向限制,地类转移态度越高,局部空间自相关变动越剧烈,地类转向越复杂多样,景观破碎度越高,联通性越差,局部空间自相关空间格局状态越差。

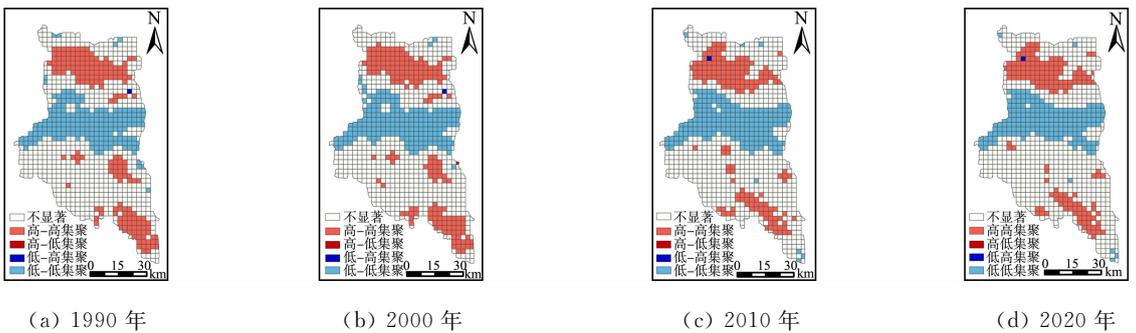


图 6 库车市 1990—2020 年景观生态安全值局部空间自相关

Fig. 6 Local spatial autocorrelation of landscape ecological security values in Kucha City from 1990 to 2020

## 2.5 基于 MOP-PLUS 模型的 2030 年库车市未来土地利用模拟

2.5.1 库车市 2030 年土地利用特征变化 经济情景、生态情景、景观生态安全情景、MOP 情景 4 种情景下库车市 2030 年地类特征,如表 5 所示。表 5 中: $A$  为地类面积; $\eta$  为地类面积占比。

表 5 4 种情景下库车市 2030 年地类特征

Tab. 5 Land type characteristics in Kucha City under four scenarios in 2030

地类	$A/\text{km}^2$				$\eta/\%$			
	经济情景	生态情景	景观生态安全情景	MOP 情景	经济情景	生态情景	景观生态安全情景	MOP 情景
耕地	2 916.02	2 714.95	2 833.14	2 851.37	20.10	18.71	19.52	19.64
林地	1 523.99	1 555.20	1 551.43	1 542.54	10.50	10.72	10.69	10.69
草地	3 629.41	3 797.44	3 706.25	3 732.03	25.01	26.17	25.54	25.72
水域	145.58	178.52	173.87	173.99	1.00	1.23	1.20	1.20
建设用地	225.22	155.41	176.01	185.55	1.55	1.07	1.21	1.28
未利用地	6 072.68	6 111.39	6 072.20	6 027.42	41.84	42.11	41.84	41.53

由表 5 可知:相较于 2020 年,2030 年耕地、建设用地、水域面积持续上升,草地、林地、未利用地面积持续下降;经济情景下的耕地与建设用地于 4 种情景中面积最大,分别为 2 916.03,225.22  $\text{km}^2$ ,分别占研究区面积的 20.09%,1.55%,较 2020 年面积分别增加 692.54,76.09  $\text{km}^2$ ,水域于 4 种情景中面积最小(145.58  $\text{km}^2$ ),占比 1.00%;生态情景下的林地、草地、水域面积于 4 种情景中最大,水域面积较 2020 年增加 34.49  $\text{km}^2$ ,草地与林地面积占比最高,分别为 26.17%,10.72%,耕地与建设用地面积较经济情景下分别减少 201.07,69.81  $\text{km}^2$ ,扩张速度明显下降;区别于经济情景与生态情景对某一地类的保护,景观生态安全情景下的耕地与建设用地较生态情景增加 118.19,20.60  $\text{km}^2$ ,林地、草地、水域面积较生态情景的总差幅不超过 2.40%,且均高于经济情景中的面积占比,该情景下各地类发展状况

较为良好;MOP情景下的耕地与建设用地面积仅次于经济情景,分别为 2 851.37,185.55 km<sup>2</sup>,较经济情景的总差幅不超过 2.21%,林地、草地、水域面积较生态情景的总差幅不超过 1.72%,水域较 2020 年增加 29.96 km<sup>2</sup>(增幅为 20.80%)。由此可知,MOP 情景下各地类发展状况最佳,兼顾经济与生态效益最大化。

2.5.2 库车市 2030 年不同情景景观生态安全评价 库车市 2030 年分情景景观生态安全等级图谱,如图 7 所示。

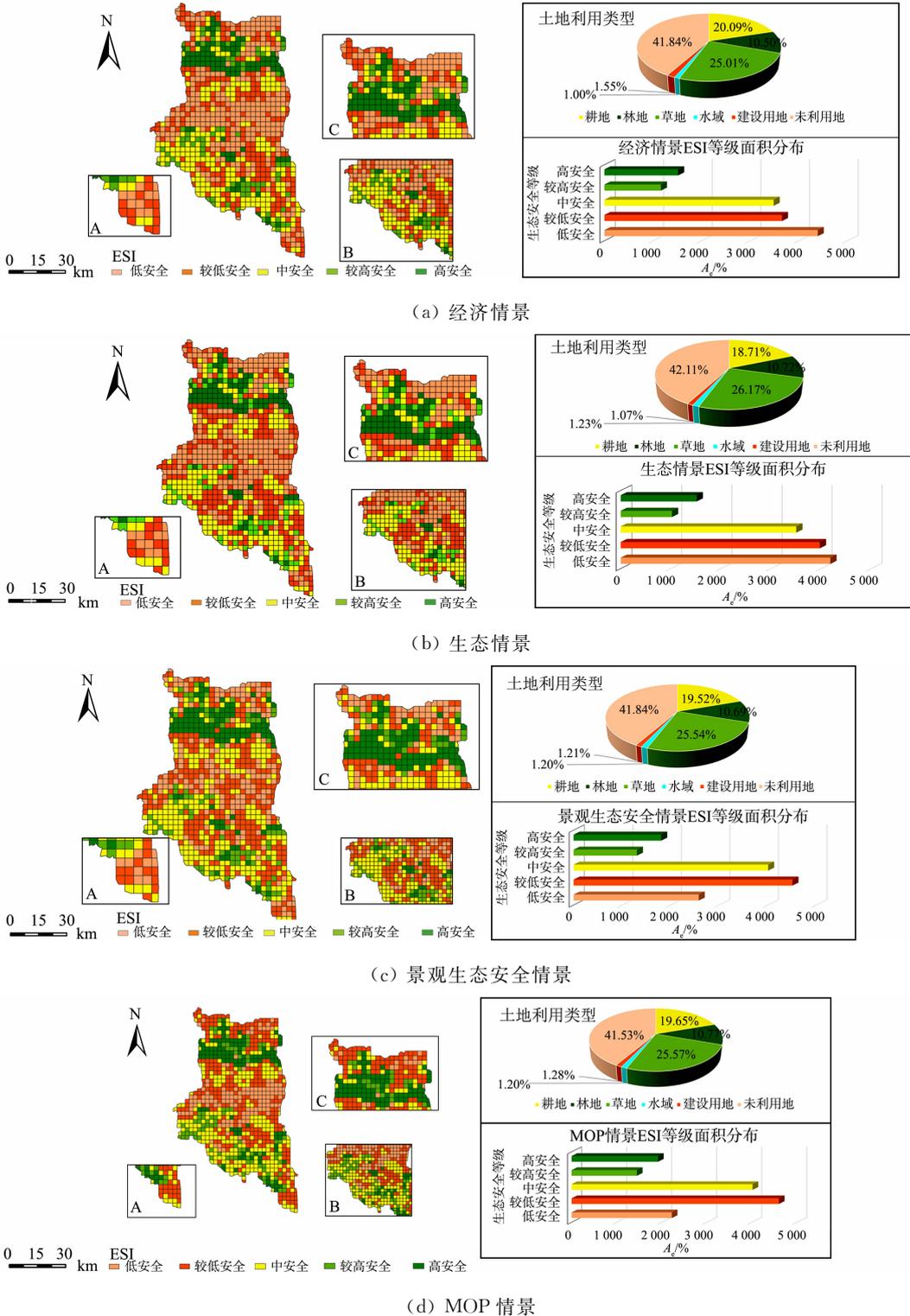


图 7 库车市 2030 年分情景景观生态安全等级图谱

Fig. 7 Landscape ecological security level maps in Kucha City by scenarios in 2030

由图 7 可知:4 种情景下的景观生态安全等级分布较 2020 年变动较大;低与较低生态安全区面积增加明显,占研究区面积 48%左右;较高与高生态安全区面积明显减少,占比约为 27%;中生态安全区面积稳固增加,占比约为 25%。这说明各地类的转化打破了景观原有的联通性、完整性,使景观破碎度、损失度增加,故增加了景观格局的不稳定性。

经济情景下,较低与低生态安全区面积所占面积最大,分为 4 387.74,4 183.68 km<sup>2</sup>,较 2020 年增速分别为 40.76%,43.74%,与之对应的耕地与建设用地占比和也为 4 种情景最大(21.13%),这说明经济建设的快速发展与景观生态安全格局的恶化密切相关,在未来发展规划中必然要遏制牺牲生态环境以发展经济的行为。生态保护情景下,由于对林地、草地、水域的大力保护,该情景下低生态安全区面积下降 204.06 km<sup>2</sup>;较低与低生态安全区均比经济情景分别增加 321.87,21.81 km<sup>2</sup>;相较于经济情景,较高与高生态安全区变化不大,这说明林、草、水域的面积扩张是改善北部山区、中部荒漠区此类生态环境脆弱区的重要因素。景观生态安全情景下,打破了遥感影像中对地类数量和位置的限制,以 2020 年生态安全高值为限制区域,该情景下低生态安全区面积较 2020 减少 515.43 km<sup>2</sup>(降幅为 16.66%);中等、较高与高生态安全区面积在 4 种情景中仅次于 MOP 情景,这说明相对于经济情景与生态情景,景观生态安全情景更有利于地类间的平衡与生态系统稳定性。MOP 情景下,低生态安全区面积较景观生态安全情景减少 355.38 km<sup>2</sup>,较 2020 年减少 870.81 km<sup>2</sup>(降幅为 28.15%);较低与中生态安全区面积均在景观生态安全情景的基础上分别增加 90.52,6.41 km<sup>2</sup>;较高与高生态安全区面积比其他 3 种情景更大。此外,MOP 情景下各地类分布也最为协调,故 MOP 情景兼顾经济与生态效益,有利于形成有序的国土空间管控局面,更符合库车市未来景观生态安全的发展。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 讨论

选用土地利用动态度、转移矩阵,从速度与土地利用转移方向可得近 30 a 土地利用动态变化与景观生态安全值变动趋势基本一致,即 1990—2000 年变动幅度较小,2000—2020 年先升后降。随着荒漠、戈壁、草地、林地逐步被开发为耕地及建设用地,地类破碎度增加,中、高生态安全区不断向低方向转化,这揭示了干旱区林地、草地、水域与景观生态安全之间的紧密联系及保护作用,与文献[39,42]的研究观点一致。库车气候干旱、蒸发量大、土壤肥力较低,由于气温回升及农业灌溉使得土壤盐渍化现象加剧,故库车市整体与干旱区特征一致,均处于生态脆弱区<sup>[43]</sup>。近年来,随着水利设施的修建,国家“退耕还林”政策及居民生态保护意识的提升使得库车市水域面积有所增加、草地退化一定程度缓解,2020 年库车市景观生态安全值空间自相关上仍呈现出明显的高高与低低集聚现象,且全局莫兰指数仍处于较高水平的 0.737,故库车市总体生态安全仍处于良好水平,此结果与文献[44]互为印证。2000 年以后,ESI 由绿洲内部为中心向四周不断降低,朝南、东、东南方向不断延伸,生态安全等级分布变差,这突出了绿洲作为干旱区生态环境纽带的重要地位,文献[45]以 MSPA-MCR 模型构建艾比湖流域生态安全网络格局,从生态格局的角度突出强调绿洲对与维持干旱区生态格局稳定的重要性,这与景观生态安全评价这一角度互为补充。对 PLUS 模型模拟的 4 大情景进行对比分析,MOP 情景基于其他情景进行线性约束并设置经济与生态效益最大化,该情景下,中、高与低生态安全区面积较其他情景分别最大上升 2.82%,最大下降 15.25%,故 MOP 情景适用于干旱区未来土地利用发展规划,有助于缓解城市开发与其脆弱的生态基底之间的矛盾,这与文献[46]的研究结论一致。

2030 年 ESI 高值区域呈现出北部山麓地带大面积团状分布、南区人口聚集地小面积团状分散分布的特征。北部山区海拔较高,人类活动少,林地、草地、水域分布景观多样性较好、破碎度低,故此区域除北部边缘地区外,在 4 种情景下较高与高生态安全区占比均达到 70%以上;随着城镇化的推进,城区与县域拓展有序,同时退耕还林还草,加之南部多为农业用地,土壤条件较好、海拔起伏较小,故南部人口聚集区较高与高生态安全区出现小区域团状分布与中生态安全区大面积穿插分布的生态安全格局。综合上述研究,对库车市生态安全治理和生态环境保护提出以下建议:1) 库车市低与较低生态安全区主要集中于中部,中部荒漠、戈壁区景观类型单一,人类活动少,一旦受损将难以恢复,因此应以保护为主,减少开发活动;中部与南部人口聚集地接壤地区如玉奇吾斯、伊西哈拉乡等地可建立缓冲区,加大种植

白刺、元参等耐旱、耐盐碱作物,提升生物多样性。2) 针对中生态安全区,南部人口聚集区耕地开发重用轻养、导致土壤肥力水平低,引起耕地弃耕<sup>[47]</sup>,小区域生态安全由高向中甚至向低方向转化,因而经济发展应适当调整产业结构,延伸小白杏、棉花、核桃等作物产业链,发挥龙头农业合作社带头作用并严格把控生态与耕地红线。库车市煤炭、油田、盐资源丰富<sup>[48]</sup>,工业发展应提升技术水平、降低能源损耗以减小生态破坏,构建“山水林田湖草沙”一体化生态安全修复新格局。3) 干旱区较高与高生态安全区分布具有明显的城市属性<sup>[49]</sup>,城区内部与外围景观生态安全状况差距明显,因而城市开发要管控好开发力度,开发须有节制并遵循可持续发展的原则,打造有生态背景、开敞空间体系和人文景观构成的多功能景观体系。

在生态安全保护情景的基础上进行改进,以景观生态安全高值区域( $ESI \geq 0.6207$ )为限制区,打破了原有土地利用数据分类及其分布区域的约束,结果显示该情景较原有生态情景低生态安全区降低11.31%,中生态安全区升高3.55%。另外,研究仅从景观结构角度选取干扰与脆弱度进行景观生态安全评价,评价尺度较为单一,因而其ESI具有一定保守性。今后可从气候、地形、植被、社会因素等方面综合考虑,进行多尺度评价。

### 3.2 结论

1) 库车市作为干旱区典型绿洲城市,土地利用分布与整个干旱区状况一致,即未利用地与草地为占优势的景观类型。近30 a来耕地与建设用地面积受人类垦荒活动影响呈明显上升趋势,这使区域内耕地、林地与未利用地的斑块类型愈加复杂,景观破碎度一定程度增加。

2) 土地利用类型的变动幅度与景观生态安全值波动幅度十分相似,地类转移引发了库车市生态安全等级之间的相互转化。1990—2000年库车市景观生态安全空间集聚效应显著,虽然集聚程度小幅度下降,但仍处于较高水平,故库车市总体景观生态安状况较为良好。

3) MOP情景基于其他3种情景设置线性约束,并兼顾生态与经济效益最大化,实现了低生态安全区占比最小为15.65%,高与较高生态安全区较其他情景占比最高为23.70%。与2020年相比,耕地涨幅26.52%,建设用地涨幅28.69%,林地、草地与水域面积占比均居4种情景中最高,更有利于缓解干旱区生态环境保护与经济发展矛盾。

### 参考文献:

- [1] 和海秀,周洪华,白如霄. 基于土地利用变化的新疆塔城地区碳排放特征分析[J]. 水土保持通报,2022,42(3):373-380. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.046.
- [2] 涂雯,吴静雯,马理辉,等. 水土保持措施驱动村域土地利用景观格局变化:以米脂县高西沟村为例[J]. 水土保持学报,2023,37(3):147-154. DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.03.020.
- [3] LIANG Xuedong, SI Dongyang, ZHANG Xinli. Regional sustainable development analysis based on information entropy: Sichuan Province as an example[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017,14(10):1219. DOI:10.3390/ijerph14101219.
- [4] ZHANG Ze, HU Baiqing, QIU Haihong. Comprehensive evaluation of resource and environmental carrying capacity based on SDGs perspective and three-dimensional balance model[J]. Ecological Indicators,2022,138:108788. DOI:10.1016/j.ecolind.2022.108788.
- [5] CUNHA-E-SÁ M A, ROSA R, DUARTE C C. Natural carbon capture and storage (NCCS): Forests, land use and carbon accounting[J]. Resource and Energy Economics, 2013, 35(2):148-170. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.122271.
- [6] 袁媛,罗志军,赵杰,等. 基于景观结构和空间统计学的南昌市景观生态安全评价[J]. 水土保持研究,2020,27(3):247-255. DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2020.03.036.
- [7] ZHANG Qiang, WANG Gang, YUAN Ruanyue, et al. Dynamic responses of ecological vulnerability to land cover shifts over the Yellow River Basin, China[J]. Ecological Indicators, 2022, 144:109554. DOI:10.1016/j.ecolind.2022.109554.
- [8] 王晓琴,王宏卫,谈波,等. 新疆阿克苏地区景观格局与生境质量时空演变及影响机制[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2022,43(6):777-789. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202203041.
- [9] CHEN Ailian, ZHAO Xinfeng, YAO Lei, et al. Application of a new integrated landscape index to predict potential

- urban heat islands[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 69: 828-835. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.05.045.
- [10] RENEZEDER C, SCHINDLER S, PETERSEIL J, *et al.* Can we measure ecological sustainability? Landscape pattern as an indicator for naturalness and land use intensity at regional, national and European level[J]. *Ecological Indicators*, 2010, 10(1): 39-48. DOI: 10.1016/j.ecolind.2009.03.017.
- [11] MONDAL B, DOLUI G, PRAMANIK M, *et al.* Urban expansion and wetland shrinkage estimation using a GIS-based model in the East Kolkata Wetland, India[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 83: 62-73. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.07.037.
- [12] SICA Y V, QUINTANA R D, RADELOFF V C, *et al.* Wetland loss due to land use change in the Lower Paraná River Delta, Argentina[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 568: 967-978. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.04.200.
- [13] BOIX-FAYOS C, BOERBOOM L G J, JANSSEN R, *et al.* Mountain ecosystem services affected by land use changes and hydrological control works in Mediterranean catchments[J]. *Ecosystem Services*, 2020, 44(11): 101136. DOI: 10.1016/j.ecoser.2020.101136.
- [14] 杨鸿飞, 吴建召, 胡祉显, 等. 基于景观格局分析地震灾区小流域生态安全: 以龙溪河为例[EB/OL]. (2023-01-16) [2023-11-23].
- [15] 程植, 林孝松. 三峡库区大宁河流域景观格局变化及生态安全格局构建研究[J]. *重庆师范大学学报(自然科学版)*, 2021, 38(3): 40-49. DOI: 10.11721/cqnuj20212312.
- [16] LUO Jieliang, FU Hui. Construct the future wetland ecological security pattern with multi-scenario simulation[J]. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110473. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110473.
- [17] 王永庶, 唐岱, 延相东, 等. 基于网格尺度的保山市中心城区生态安全评价研究[J]. *西南林业大学学报(自然科学)*, 2021, 41(5): 80-87. DOI: 10.11929/j.swfu.202007057.
- [18] 钱田田, 王宏卫, 余芳瑞, 等. 基于 DPSIR 模型的新疆城市生态韧性评估及影响因素分析[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(5): 607-614. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202303009.
- [19] 谢余初, 巩杰, 张玲玲. 基于 PSR 模型的白龙江流域景观生态安全时空变化[J]. *地理科学*, 2015, 35(6): 790-797. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2015.06.016.
- [20] 王欣珂, 林弘, 谢香群, 等. 闽江流域土地利用时空变化特征及驱动因子分析[J]. *生态科学*, 2023, 42(4): 171-181. DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2023.04.020.
- [21] ANIAH P, BAWAKYILLENUO S, CODJOE S N A, *et al.* Land use and land cover change detection and prediction based on CA-Markov chain in the savannah ecological zone of Ghana[J]. *Environmental Challenges*, 2023, 10: 100664. DOI: 10.1016/j.envc.2022.100664.
- [22] ZHANG Jun, LIU Zhaoshun, LI Shujie. Research on land use simulation of incorporating historical information into the FLUS model: Setting Songyuan City as an example[J]. *Sustainability*, 2022, 14(7): 1-14. DOI: 10.3390/su14073828.
- [23] CHASIA S, OLANG L O, SITOKI L. Modelling of land-use/cover change trajectories in a transboundary catchment of the Sio-Malaba-Malakisi Region in East Africa using the CLUE-s model[J]. *Ecological Modelling*, 2023, 476: 110256. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2022.110256.
- [24] 王新红. 库车龟兹小巷之变: 从无人问津到人气满满[N]. *新疆日报(汉)*, 2023-11-12(004).
- [25] 麦尔耶姆·亚森, 买买提·沙吾提, 吐尔逊·艾山, 等. 新疆渭干河-库车河三角洲绿洲耕地时空变化特征分析[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(18): 3506-3518. DOI: 10.3864/j.issn.0578-1752.2017.18.007.
- [26] GAO Linna, MA Yonggang, XU Zhonglin, *et al.* Multi-scenario simulation and ecological risk analysis of land use based on the PLUS model: A case study of Nanjing[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 85: 10405. DOI: 10.1016/j.scs.2022.104055.
- [27] 何珍珠, 王宏卫, 杨胜天, 等. 塔里木盆地中北部绿洲生态安全评价[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(4): 963-970. DOI: 10.13866/j.azr.2018.04.26.
- [28] 吴金华, 刘思雨, 白帅. 基于景观生态安全的神木市生态廊道识别与优化[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(4): 1120-1127. DOI: 10.13866/j.azr.2021.04.24.
- [29] 魏心雨, 王雁杰, 孙梦媛, 等. 基于土地利用结构变化的河南省碳排放时空格局及驱动力分析[EB/OL]. (2023-01-11) [2023-11-23].
- [30] 乔斌, 颜玉倩, 张婷华, 等. 基于土地利用变化的西宁市景观生态风险识别及优化策略[J]. *生态学杂志*, 2023, 42

- (8);2020-2031. DOI:10.13292/j.1000-4890.202307.013.
- [31] PATRICHE C V,PIRNAU R,GROZAVU A,*et al.* A comparative analysis of binary logistic regression and analytical hierarchy process for landslide susceptibility assessment in the Dobrov River Basin, Romania[J]. *Pedosphere*,2016,26(3):335-350. DOI:10.1016/S1002-0160(15)60047-9.
- [32] 修炆景,侯蒙京,田骄阳,等. 基于土地利用/覆盖的甘肃省景观生态风险时空变化特征[J]. *草业学报*,2023,32(1):1-15. DOI:10.11686/cyxb2021298.
- [33] 卢远,苏文静,华瑾,等. 左江上游流域景观生态风险评价[J]. *热带地理*,2010,30(5):496-502. DOI:10.13284/j.cnki.rddl.001392.
- [34] 刘顺鑫,黄云.“三生空间”视角下万州区景观生态安全评价及其耦合特征分析[J]. *水土保持研究*,2020,27(6):308-316. DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20200718.001.
- [35] 袁媛,罗志军,赵杰,等. 基于景观结构和空间统计学的南昌市景观生态安全评价[J]. *水土保持研究*,2020,27(3):247-255. DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2020.03.036.
- [36] 王重玲,程淑杰,王林伶,等. 基于 GIS 的宁夏中部干旱带生态安全空间格局的评价[J]. *西部林业科学*,2020,49(2):147-153. DOI:10.16473/j.cnki.xblykx1972.2020.02.021.
- [37] 谢名睿,危小建,赵莉,等. 南昌市生态用地景观结构与网络连通性多情景模拟[J]. *水土保持通报*,2023,43(2):202-211,309. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.024.
- [38] ZHAO Yongyu,KASIMU A,HONG Wuliang,*et al.* Construction and restoration of landscape ecological network in Urumqi City based on landscape ecological risk assessment[J]. *Sustainability*,2022,14:8154. DOI:10.3390/su14138154.
- [39] RAN Hong,MA Yonggang,XU Zhonglin. Evaluation and prediction of land use ecological security in the Kashgar Region based on grid GIS[J]. *Sustainability*,2022,15(1):40. DOI:10.3390/ijgi11060328.
- [40] WANG Ziyang,SHI Peiji,ZHANG Xuebin,*et al.* Research on landscape pattern construction and ecological restoration of Jiuquan City based on ecological security evaluation[J]. *Sustainability*,2021,13:5732. DOI:10.3390/su13105732.
- [41] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等. 中国生态系统服务的价值[J]. *资源科学*,2015,37(9):1740-1746. DOI:1007-7588(2015)09-1740-07.
- [42] CHEN Xiaodong,YANG Zhaoping,HAN Fang,*et al.* Landscape ecological risk and ecological security pattern construction in world natural heritage sites: A case study of Bayinbuluke, Xinjiang, China[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*,2022,11(6):328. DOI:10.3390/su15010040.
- [43] 康璇,王雪梅,柴仲平. 近 25 a 来渭-库绿洲土地利用/覆被变化及其影响因素[J]. *水土保持通报*,2016,36(5):333-339. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.003.
- [44] 艾克旦·依萨克,满苏尔·沙比提,阿曼妮萨·库尔班,等. 阿克苏河流域绿洲生态安全评价及影响因子分析[J]. *环境科学与技术*,2020,43(7):217-223. DOI:10.19672/j.cnki.1003-6504.2020.07.029.
- [45] WEI Qianian,YAO Lei,TANG Hua,*et al.* Temporal and spatial variation analysis of habitat quality on the PLUS-InVEST model for Ebinur Lake Basin, China[J]. *Ecological Indicators*,2022,145:109632. DOI:10.1016/j.ecolind.2022.109632.
- [46] SHI Mingjie,WU Hongqi,ZHU Lei,*et al.* Temporal and spatial evolution and prediction of carbon stocks in Yili Valley based on MCE-CA-Markov and InVEST models[J]. 2021,38:1010-1019. DOI:10.13254/j.jare.2020.0586.
- [47] 王娟,张飞,于海洋,等. 基于 LUCC 的渭干河-库车河三角洲绿洲水文及生态特征[J]. *水土保持研究*,2016,23(2):236-242,359. DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2016.02.044.
- [48] 刘小雪,蒋志辉. 乡村振兴战略背景下库车农民专业合作社发展研究[J]. *安徽农业科学*,2023,51(14):254-258. DOI:10.3969/j.issn.0571-6611.2023.14.062.
- [49] 朱亚楠. 乌鲁木齐市土地利用景观格局变化与生态安全耦合协调研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2022.

(责任编辑:钱筠 英文审校:刘源岗)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202310024



# 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<sup>1,2</sup>, 王宏卫<sup>1,2</sup>, 罗魁<sup>1,2</sup>, 郑旭东<sup>1,2</sup>, 闫晓梅<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学 地理科学与遥感学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;  
2. 新疆大学 新疆绿洲生态自治区重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046)

**摘要:** 基于伊犁河谷 1990—2020 年土地利用数据, 利用景观生态风险评价模型探析“生产-生活-生态”(“三生”)空间及景观生态风险格局时空演变特征, 借助 PLUS 模型模拟伊犁河谷 2030 年生产空间优先、生活空间优先和生态空间优先 3 种情景下“三生”空间格局及景观生态风险分布特征。结果表明: 1990—2020 年, 伊犁河谷“三生”空间以草地生态空间为主, 草地生态空间和林地生态空间面积呈减少趋势, 其余空间呈增加趋势; 1990, 2000, 2010, 2020 年景观生态风险均值分别为 0.035 5, 0.033 1, 0.034 8, 0.034 6, 伊犁河谷景观生态风险呈先下降后上升趋势, 风险等级在空间分布上呈现梯度变化; 2020—2030 年 3 种情景的景观生态风险均呈上升趋势, 景观生态风险均值从大到小为生活空间优先情景、生态空间优先情景、生产空间优先情景。

**关键词:** “三生”空间; 景观生态风险; PLUS 模型; 模拟预测; 伊犁河谷

**中图分类号:** P 901; X 826 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2024)01-0061-10

## Spatiotemporal Evolution and Multi Scenario Simulation of Ecological Risks in “Three Lives” Spatial Landscape of Ili River Valley

WU Changrui<sup>1,2</sup>, WANG Hongwei<sup>1,2</sup>, LUO Kui<sup>1,2</sup>,  
ZHENG Xudong<sup>1,2</sup>, YAN Xiaomei<sup>1,2</sup>

(1. School of Geographic Science and Remote Sensing, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2. Key Laboratory of Xinjiang Oasis Ecological Autonomous Region, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

**Abstract:** Based on the land-use data of the Ili River Valley from 1990 to 2020, the landscape ecological risk assessment model was used to explore the spatiotemporal evolution characteristics of the “production-living-ecological”(“three lives”) spaces and landscape ecological risk patterns. The PLUS model was used to simulate the spatial patterns and the landscape ecological risk distribution characteristics of “three lives” under the three scenarios including the production space priority, the living space priority and the ecological space priority of the Ili River Valley in 2030. The results showed that, from 1990 to 2020, “three lives” spaces of Ili River Valley was dominated by the grassland ecological space, and the area of grassland ecological space and woodland ecological space showed a decreasing trend, while the remaining space showed an increasing trend. In 1990,

收稿日期: 2023-10-02

通信作者: 王宏卫(1967-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事干旱区生态环境与城乡发展的研究。E-mail: wang-hw\_777@163.com。

基金项目: 新疆第三次综合科学考察资助项目(2021xjkk0902)

2000, 2010 and 2020, the average landscape ecological risks were 0.035 5, 0.033 1, 0.034 8 and 0.034 6, respectively. The landscape ecological risks of the Ili River Valley showed a trend of first decreasing and then increasing, and the risk levels showed a gradient change in spatial distribution. From 2020 to 2030, the landscape ecological risks showed an upward trend under the three scenarios, and the average value of landscape ecological risks which ranged from high to low were the living space, the ecological space, and the production space of priority scenarios.

**Keywords:** “three lives” space; landscape ecological risk; PLUS model; simulation prediction; Ili River Valley

美国环境保护署在 20 世纪 90 年代提出生态风险评估框架,为深入理解生态系统的稳定性和可持续性提供理论支持<sup>[1]</sup>。生态风险评估是基于现有生态风险源评估系统的潜在损害<sup>[2-3]</sup>,生态风险评估框架不仅有助于更好地管理环境,还有助于更全面地了解潜在的生态风险<sup>[4-5]</sup>。

景观生态风险评价作为生态风险评估的重要分支,强调在自然和人为的影响下的景观结构和类型<sup>[6-9]</sup>,而当前的研究主要集中于人类活动频繁的大城市和生态脆弱区域,例如,流域、行政区、城市、矿区和自然保护区等<sup>[10-16]</sup>,对于生态类型复杂的绿洲地区,特别是在“三生”空间视角下的景观生态风险变化的研究相对薄弱<sup>[17-22]</sup>。

绿洲地区作为生态系统中的亮点,其生态环境变化对整个区域的可持续发展具有重要影响<sup>[9]</sup>。然而,现有的研究大多基于短时间跨度的土地利用数据,对于长时间跨度的景观生态风险变化缺乏深入研究。因此,探讨绿洲地区长时间序列景观生态风险的演变特征及未来趋势显得尤为重要,这将有助于全面地理解和预测区域的生态环境状况。伊犁河谷不仅是新疆乃至中亚地区的生态调节枢纽,同时也是承载新疆重要社会经济发展的地理单元<sup>[23-24]</sup>。本文对伊犁河谷“三生”空间景观生态风险时空演变与多情景模拟进行研究。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

伊犁河谷位于新疆天山西部的伊犁河上游,东经  $80^{\circ}09' \sim 84^{\circ}56'$ ,北纬  $42^{\circ}14' \sim 44^{\circ}50'$ 。伊犁河谷东面、南面和北面都被群山环绕,地势西低东高,西宽东窄,伊犁河由东向西穿越伊犁中央。

伊犁河谷属于温带大陆性气候,气候温和湿润,年均气温为  $10.4^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量约为  $417.6\text{ mm}$ ,山区降雨量可达  $600\text{ mm}$ ,是新疆最湿润的地区。伊犁河谷农牧业发展优势明显,农牧产品丰富。随着经济发展和城镇化进程加快,人类活动对“三生”空间格局影响越来越大,生态环境长期受到人类活动干扰,进而影响着区域生态风险,以伊犁河谷为研究区域,研究区域示意图,如图 1 所示。

### 1.2 数据来源

采用 1990, 2000, 2010, 2020 年土地利用栅格数据 ( $30\text{ m} \times 30\text{ m}$ ),年均降水、年均气温、植被覆盖度(FVC)、人均国内生产总值(GDP)、人口密度数据均为精度  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  的栅格数据, $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  的均重采样。以上数据均来自中国科学院资源环境数据中心(<http://www.resdc.cn>)。

数字高程模型(DEM)数据来自地理空间数据云平台(<http://www.Gscloud.cn>),坡度和坡向由 DEM 数据衍生得到,研究区域矢量边界由中国县级行政区划边界图进行提取,距离数据由欧氏距离法计算。基于“三生”空间与土地利用主导功能的视角,结合研究区域的实际情况,归并基础数据中各用地类型<sup>[25]</sup>。

“三生”空间分类体系,如表 1 所示。

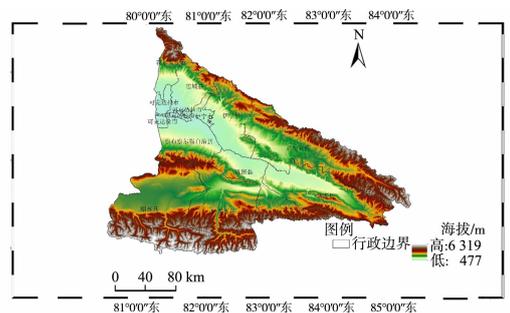


图 1 研究区域示意图

Fig. 1 Sketch diagram of study area

表 1 “三生”空间分类体系

Tab. 1 Classification system of “three lives” spaces

“三生”空间分类		土地利用分类系统的二级分类
一级分类	二级分类	
生产空间	农业生产空间	旱地、水田
	工矿生产空间	其他建设用地
生活空间	城镇生活空间	城镇用地
	农村生活空间	农村居民点
生态空间	草地生态空间	低覆盖度草地、中覆盖度草地、高覆盖度草地
	林地生态空间	林地、疏林地、灌木林地、其他林地
	水域生态空间	河渠、湖泊、水库坑塘、永久性冰川雪地、滩涂、滩地
	其他生态空间	沙地、戈壁、盐碱地、沼泽地、裸土地、裸岩、其他

## 2 研究方法

### 2.1 PLUS 模型

PLUS 模型利用土地扩展分析策略(LEAS)计算研究区域各土地利用类型的增长概率,结合不同土地利用类型的像元数、转换矩阵、各土地利用类型的邻域权重和多类型随机种子(CARS)对研究区域未来土地利用进行模拟,从而确定土地扩张和景观动态变化的驱动因素<sup>[26-27]</sup>。以 2010,2020 年土地利用数据为基础,综合文献[22,28-37],从研究区域实际情况、数据可获取性和驱动因子可量化性 3 方面进行考虑,在验证 PLUS 模型精度时,不断调整因子,最终得到模拟精度较高的影响因子组合。土地利用模拟驱动因子,如图 2 所示。

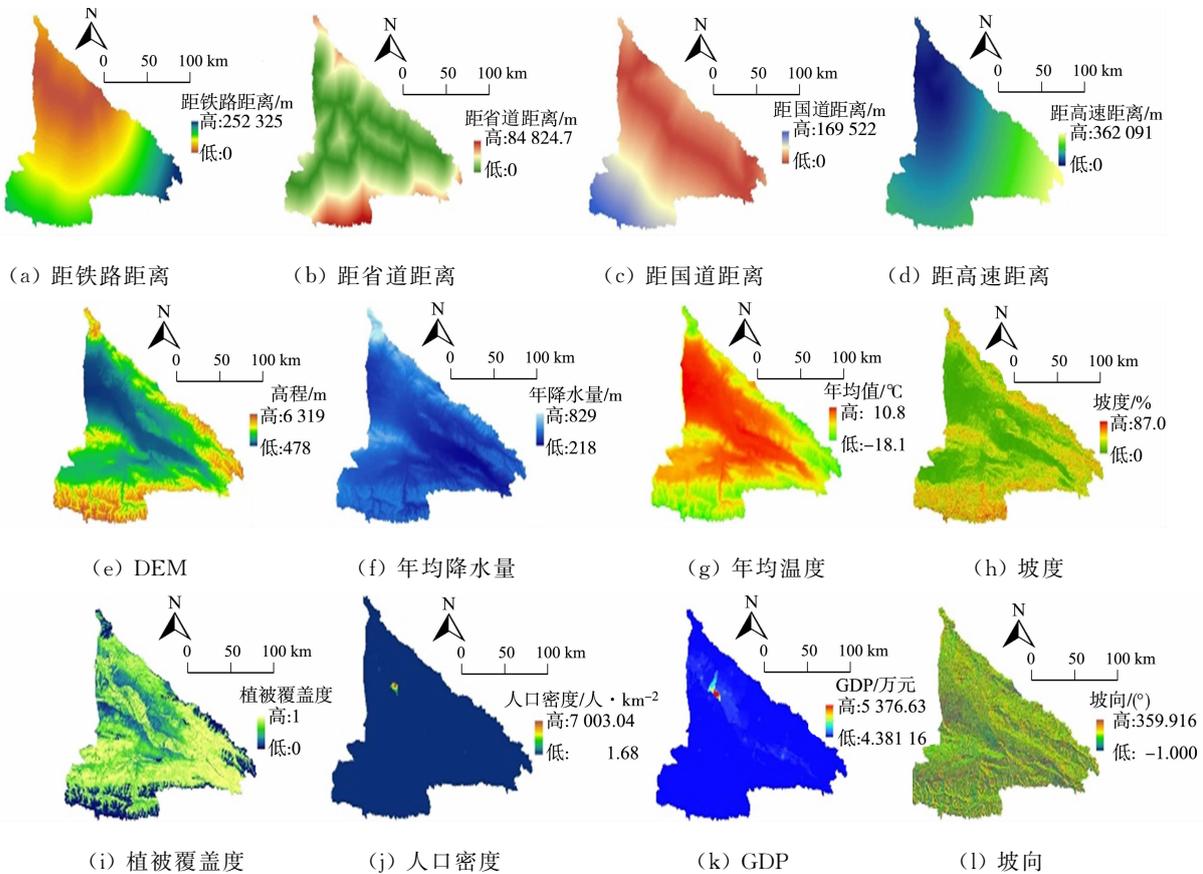


图 2 土地利用模拟驱动因子

Fig. 2 Driving factors of land-use simulation

利用 2010 年土地利用现状图,模拟得到 2020 年土地利用空间分布状态,PLUS 模型整体精度为 0.92,Kappa 系数为 0.85(>0.80)。因此,模拟结果精度较高,可对 2030 年的土地利用格局进行模拟。

综合考虑不同的发展需求,在 PLUS 模型中设置生产空间优先发展、生活空间优先发展和生态空间优先发展 3 种情景,从而模拟伊犁河谷 2030 年的土地利用格局<sup>[38-39]</sup>。转换原则设计如下:1) 生产空间优先发展情景下,农业生产空间和工矿生产空间是重要空间类型,因此,保护并扩大生产空间是这一情景的主要目标,伊犁河谷处于经济发展的重要阶段,预计生态空间向生产空间转化的可能性将提高 10%;2) 生活空间优先发展情景下,通过限制生活空间向其他空间类型转化来实现生活空间优先发展,禁止高等级空间类型向低等级空间类型转换(空间类型等级由高向低为城镇生活空间、乡村生活空间、工矿生产空间、农业生产空间、林地生态空间、草地生态空间、水域生态空间、其他生态空间);3) 生态空间优先发展情景下,将生态环境保护作为第一目标,限制城市化,将生态保护红线设为限制区,限制生态空间向其他空间类型的转出,不允许高生态效益用地向低生态效益用地转换,增加其他空间类型向生态空间的转换概率。

空间类型转换成本矩阵,如表 2 所示。表 2 中:1 表示可能转换;0 表示不可能转换;a, b, c, d, e, f, g, h 分别表示农业生产空间、工矿生产空间、城镇生活空间、农村生活空间、草地生态空间、林地生态空间、水域生态空间和其他生态空间。

表 2 空间类型转换成本矩阵

Tab. 2 Space types conversion cost matrix

空间类型	生产空间优先情景								生活空间优先情景								生态空间优先情景							
	a	b	c	d	e	f	g	h	a	b	c	d	e	f	g	h	a	b	c	d	e	f	g	h
a	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
b	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
c	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
d	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
e	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
f	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
g	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0
h	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1

参考文献[37],根据空间类型扩张面积的占比进行计算,得到不同场景下的邻域因子权重(表 3)。表 3 中: $s$  表示空间类型扩张面积; $\eta$  表示扩张面积比例(邻域因子权重)。邻域因子权重数值范围为 0~1,数值越大,表明该空间类型转化为其他空间类型难度越大,扩张能力越强;反之,则转为其他空间类型越容易。

表 3 邻域因子权重

Tab. 3 Neighborhood factor weights

参数	农业生产空间	工矿生产空间	城镇生活空间	农村生活空间	草地生态空间	林地生态空间	水域生态空间	其他生态空间	合计
$s/\text{km}^2$	641 572	77 940	42 978	38 057	310 235	134 801	57 623	74 808	1 378 014
$\eta/\%$	46.5	5.7	3.1	2.8	22.5	9.8	4.2	5.4	100.0

## 2.2 景观生态风险模型

为了明确“三生”空间景观生态风险状况,基于网格采样法(格网宜采用平均斑块面积的 2~5 倍<sup>[17]</sup>),选用 3 km×3 km 的网格作为评价单元(风险小区 6 220 个),利用 Fragstats 计算各时期各单元的景观生态风险指数。将景观生态风险指数作为景观风险小区中心点的风险指数,构建景观生态风险模型<sup>[32]</sup>。评价单元  $k$  的景观生态风险指数( $I_{ER,k}$ )越小,表示该评价单元的生态风险程度越低,反之,景观生态风险程度越高。 $I_{ER,k}$  表达式为

$$I_{ER,k} = \sum_{i=1}^N \frac{S_{k,i}}{S_k} \times I_{R,i} \quad (1)$$

式(1)中: $S_{k,i}$  为评价单元  $k$  中  $i$  类景观的面积; $S_k$  为评价单元  $k$  的总面积; $I_{R,i}$  为  $i$  类景观的损失度指数, $I_{R,i} = I_{E,i} \times I_{V,i}$ ,  $I_{E,i}$  为  $i$  类景观干扰度指数,  $I_{V,i}$  为  $i$  类景观类型的脆弱度指数。

景观干扰度指数  $I_{E,i}$  表达式为

$$I_{E,i} = \alpha I_{C,i} + \beta I_{N,i} + \gamma I_{F,i} \quad (2)$$

式(2)中:  $I_{C,i}$ ,  $I_{N,i}$ ,  $I_{F,i}$  分别为  $i$  类景观破碎度指数、分离度指数和分维数指数;  $\sigma, \beta, \gamma$  分别为各景观指数的权重,  $\alpha + \beta + \gamma = 1, \alpha = 0.5, \beta = 0.3, \gamma = 0.2^{[29]}$ 。

景观格局指数的计算方法, 如表 4 所示。

表 4 景观格局指数的计算方法

Tab. 4 Calculation methods of landscape pattern index

序号	指数	公式	生态学含义
1	$I_{C,i}$	$I_{C,i} = \frac{n_i}{s_i}$	$n_i$ 为景观类型 $i$ 的斑块个数; $s_i$ 为景观类型 $i$ 的面积; $I_{C,i}$ 越小, 表明所对应的景观生态系统稳定性越高 <sup>[30]</sup> , 反之, 则稳定性越低
2	$I_{N,i}$	$I_{N,i} = I_{l,i} \times \frac{s}{s_i}$ $I_{l,i} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n_i}{s}}$	$I_{l,i}$ 为景观类型 $i$ 的距离指数; $s$ 为景观总面积; $I_{N,i}$ 表示在景观类型中不同斑块间的分离程度, 其值越小, 表明所对应的景观空间分布越简单, 越完整 <sup>[31]</sup> , 反之, 分布越复杂, 破碎化程度越高
3	$I_{F,i}$	$I_{F,i} = \frac{2 \ln(\frac{p_i}{4})}{\ln s_i}$	$p_i$ 为景观类型 $i$ 的周长; $I_{F,i}$ 取值范围为 1~2, 其值越小, 景观斑块形状越简单, 反之, 越复杂, 当 $I_{F,i} < 1.5$ 时, 景观斑块形状趋于简单, 当 $I_{F,i} = 1.5$ 时, 景观斑块稳定性较差(处于布朗随机运动状态), 当 $I_{F,i} > 1.5$ 时, 景观斑块形状复杂 <sup>[33]</sup>
4	$I_{V,i}$	专家咨询 并归一化	其他生态空间权重赋值为 8, 水域生态空间为 7, 农业生产空间为 6, 草地生态空间为 5, 林地生态空间为 4, 工矿生产空间为 3, 农村生活空间为 2, 城镇生活空间为 1, 归一化处理得到伊犁河谷各景观类型的脆弱度指数, 其值表示某景观类型受到外界干扰后的敏感程度 <sup>[34]</sup>

### 3 研究结果与分析

#### 3.1 土地利用变化分析

1990—2020 年, 伊犁河谷主要用地为草地生态空间(GES), 占地面积可达 60% 以上。伊犁河谷农业生产空间(APS)、工矿生产空间(IPS)、城镇生活空间(ULS)、农村生活空间(RLS)、水域生态空间(WES)和其他生态空间(OES)面积呈增加趋势, 分别增加 1 687.49, 84.99, 73.36, 1.06, 49.85, 75.96 km<sup>2</sup>; 草地生态空间和林地生态空间(FES)面积则呈减少趋势, 分别减少了 1 733.38, 245.68 km<sup>2</sup>。空间类型转移图, 如图 3 所示。

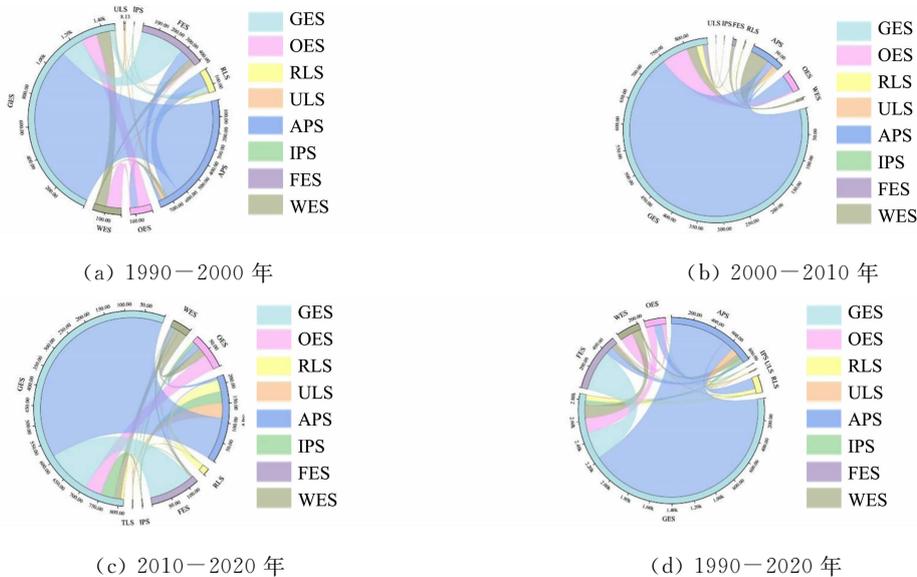


图 3 空间类型转移图

Fig. 3 Space types of transfer diagram

由图 3 可知: 1990—2020 年, 内伊犁河谷以草地生态空间与农业生产空间、林地生态空间、其他生态空间相互转换为主。草地生态空间转为农业生产空间的面积最多(448.56 km<sup>2</sup>), 占草地生态空间转出总面积的 78.36%, 农业生产空间转为草地生态空间的面积为 537.64 km<sup>2</sup>, 占农业生产空间转出总面

积的 66.12%。这表明伊犁河谷“三生”空间的变化以草地生态空间的转出、转入为主导。

### 3.2 景观生态风险时空演变分析

1990—2020年景观生态风险,如图4所示。基于自然断点法将生态风险统一分为5个等级的生态风险区,即低风险区域( $I_{ER} \leq 0.0156$ )、较低风险区域( $0.0156 < I_{ER} \leq 0.0259$ )、中风险区域( $0.0259 < I_{ER} \leq 0.0362$ )、较高风险区域( $0.0362 < I_{ER} \leq 0.0464$ )和高风险区域( $I_{ER} > 0.0464$ )。

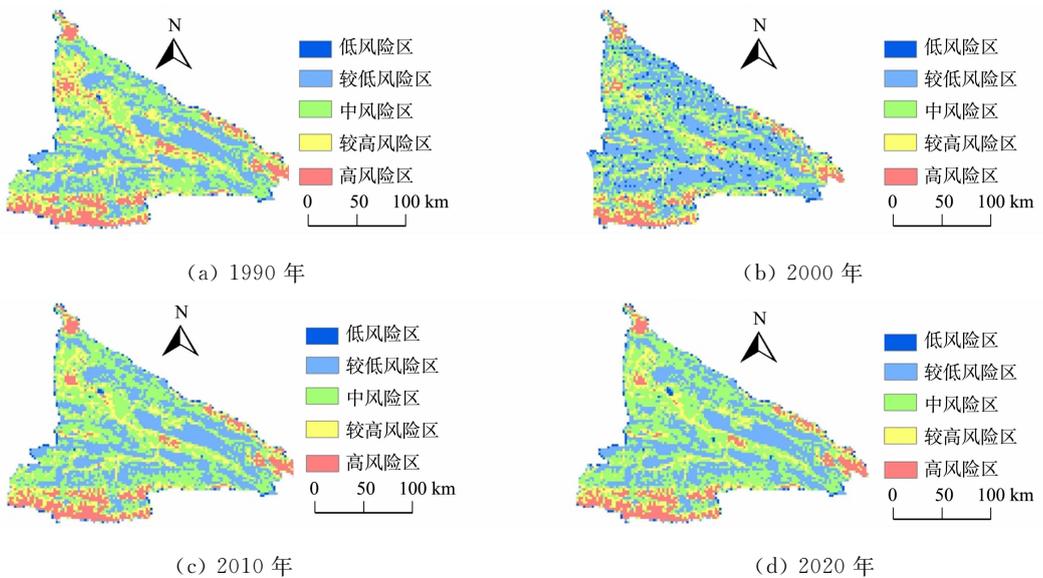


图4 1990—2020年景观生态风险

Fig. 4 Landscape ecological risk from 1990 to 2020

从时间尺度上看,1990年, $I_{ER}$ 为0.0055~0.0604,其平均值为0.0355;2000年, $I_{ER}$ 为0.0055~0.0578,其平均值为0.0331;2010年, $I_{ER}$ 为0.0055~0.0568,其平均值为0.0348;2020年, $I_{ER}$ 为0.0053~0.0567,其平均值为0.0346。

从空间分布上看,1990年,高风险区域主要分布于伊犁河谷最北部、东部、南部的山地区域(图4(a)),此区域以其他生态空间为主,包括积雪等,景观类型较复杂,景观损失度和景观脆弱度均较大,故景观生态风险较高;较高风险区域的分布以高风险区域为中心,向四周扩散分布,主要沿伊犁河、特克斯河及巩乃斯河分布,河岸区域以农业生产空间为主,生产空间和生活空间零散分布其中,人类活动干扰较强,景观斑块趋于破碎和零散;中、较低风险区主要分布于谷地,该区域以林地生态空间和草地生态空间为主,连片分布,降水充足,气候适宜,人类活动干扰相对较小,因此,景观生态风险较低;低风险区域的面积占比极小,仅为1.53%,集中分布于伊宁市东南部,是由于该区域中城镇生活空间集中分布,景观类型单一,斑块数少,破碎度极低,因此,景观生态风险低。2000年,中、较高、高风险区域面积显著减少(图4(b)),分别减少3771,2889,2358 km<sup>2</sup>,分布范围明显收缩,而较低、低风险区面积显著增加,分别增加2187,6831 km<sup>2</sup>,低风险区的大量分布于各个县市,虽仍是星点状分布,但数量和面积均增加,这得益于退耕还林、还草政策的实施。2010年,中、较高、高风险区域的面积增加(图4(c)),分别增加5301,594,1269 km<sup>2</sup>,较低、低风险区域的面积分别减少2124,5040 km<sup>2</sup>,较高、高风险区域的分布更为集中,低风险区域仅分布在伊宁市、昭苏县、新源县及研究区边缘。2020年风险区的分布与2010年相似(图4(d)),变化较小,低风险区域在巩留县也有分布,位于伊宁市的低风险区面积增加。此外,伊犁河谷的景观生态风险分布呈现出以高风险区为中心,较高风险区、中风险区、较低风险区、低风险区依次出现的特征。总的来说,1990—2020年,低风险区主要集中于新疆伊宁市且呈扩张趋势。

景观生态风险面积统计,如表5所示。由表5可知:1990—2000年,低风险区与较低风险区的面积占比由31.98%上升到48.08%,中风险区面积占比由35.88%降到29.15%,较高风险区面积和高风险区面积占比由32.14%降低到22.77%,这个阶段以较低风险区面积上升,中风险区面积下降为主,景观生态风险显著降低;2000—2020年,景观生态风险明显上升,其中,2010—2020年有略微下降,但不明显,2000—2020年的低和较低风险区面积占比共降低12.52%,中风险区面积增速较快(增加10.67%),

较高风险区面积先增加后减少(减少 0.26%),高风险区面积占比减少 2.11%,伊犁河谷景观生态风险分布主要以中风险为主,景观生态风险高值虽有降低,高值区面积有缩减,但整体景观生态风险仍呈升高趋势。

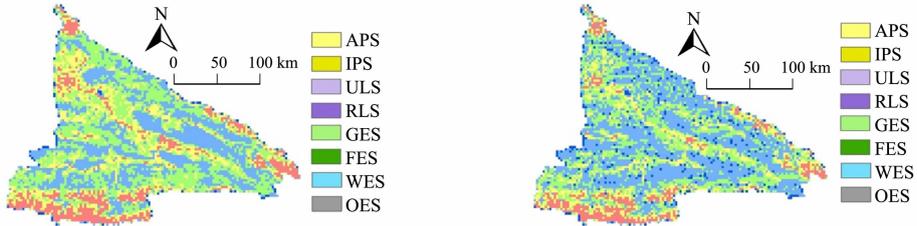
表 5 景观生态风险面积统计

Tab. 5 Landscape ecological risk area statistics

风险区等级	1990 年		2000 年		2010 年		2020 年	
	s/km <sup>2</sup>	η/%						
低风险区	855	1.53	3 042	5.43	918	1.64	999	1.78
较低风险区	17 046	30.45	23 877	42.65	18 837	33.65	18 909	33.78
中风险区	20 088	35.88	16 317	29.16	21 618	38.62	22 293	39.83
较高风险区	11 124	19.87	8 235	14.71	8 829	15.77	8 091	14.45
高风险区	6 867	12.27	4 509	8.05	5 778	10.32	5 688	10.16
合计	55 980	100.00	55 980	100.00	55 980	100.00	55 980	100.00

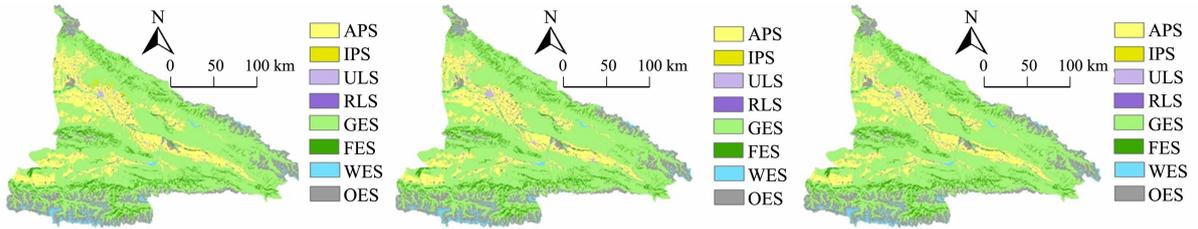
### 3.3 伊犁河谷土地利用生态风险预测

3.3.1 3 种情景的“三生”空间分布预测 3 种情景的“三生”空间分布图,如图 5 所示。由图 5(a),(b)可知:PLUS 模型模拟精度较高。由图 5(c)可知:2030 年,农业生产空间和工矿生产空间的扩张加剧,面积分别增加了 391.19,72.60 km<sup>2</sup>,伊犁河谷有 362.18 km<sup>2</sup> 的草地生态空间转向农业生产空间和工矿生产空间。由图 5(d)可知:伊犁河谷已经存在城市化趋势,伊犁河谷的生态空间和生活空间均扩张,增加面积分别为 526.21,61.21 km<sup>2</sup>,伊犁河谷其他生态空间和生产空间均有所缩减,分别减少了 26.98,589.29 km<sup>2</sup>,各县市的生产空间面积均减少。由图 5(e)可知:伊犁河谷的城市用地扩张受到明显抑制,生活空间、生产空间面积都呈减少趋势,共缩减 578.15 km<sup>2</sup>,草地生态空间和林地生态空间面积分别增加 561.58,58.82 km<sup>2</sup>,而水域生态空间和其他生态空间面积分别减少 8.36,26.78 km<sup>2</sup>。



(a) 2020 年“三生”空间

(b) 2020 年“三生”空间(PLUS 模型模拟)



(c) 2030 年生产空间优先情景

(d) 2030 年生活空间优先情景

(e) 2030 年生态空间优先情景

图 5 3 种情景的“三生”空间分布图

Fig. 5 Spatial distribution diagrams of “three lives” of three scenarios

3.3.2 基于土地利用的景观生态风险预测 从空间分布来看,2030 年,生产空间优先情景、生活空间优先情景、生态空间优先情景的生态风险分布特征与 2020 年相差较小,研究区特殊的三山夹两谷的地形特征对风险区分布有较大影响。

3 种情景的景观生态风险等级面积,如表 6 所示。由表 6 可知:3 种情景的中风险区均占比最大,分别为 37.14%,41.07%,40.73%,面积为 20 790,22 995,22 797 km<sup>2</sup>;3 种情景的低风险区占比最小,分别为 1.50%,1.58%,1.46%,面积为 837,882,819 km<sup>2</sup>;生产空间优先情景下低和较低风险区面积最小(15 732 km<sup>2</sup>),高和较高生态风险面积最大(19 458 km<sup>2</sup>),生态空间优先情景下的低和较低风险区面积最大(16 488 km<sup>2</sup>),高和较高风险区面积最小(16 695 km<sup>2</sup>)。

表6 3种情景的景观生态风险等级面积

Tab. 6 Areas of landscape ecological risk level under three scenarios

景观生态风险区	生产空间优先情景		生活空间优先情景		生态空间优先情景	
	$s/\text{km}^2$	$\eta/\%$	$s/\text{km}^2$	$\eta/\%$	$s/\text{km}^2$	$\eta/\%$
低风险区	837	1.50	882	1.58	819	1.46
较低风险区	14 895	26.61	15 246	27.23	15 669	27.99
中风险区	20 790	37.14	22 995	41.07	22 797	40.73
较高风险区	12 087	21.58	10 152	18.14	9 981	17.83
高风险区	7 371	13.17	6 705	11.98	6 714	11.99
合计	55 980	100.00	55 980	100.00	55 980	100.00

2030年3种情景的景观生态风险,如图6所示。

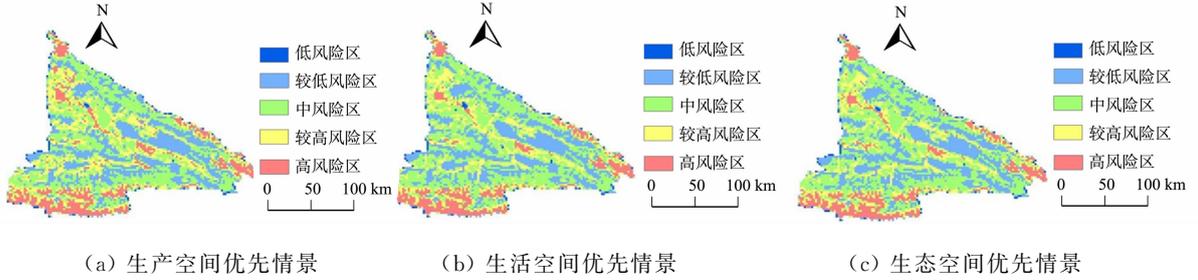


图6 2030年3种情景的景观生态风险

Fig. 6 Landscape ecological risks of three scenarios in 2030

生产空间优先情景的景观生态风险范围为 $0.005\ 6\sim 0.063\ 1$ ,均值为 $0.036\ 093\ 235$ (3种情景中最高),区域整体景观生态风险等级明显升高,中风险等级向较高风险转移面积最多( $5\ 490\ \text{km}^2$ ),风险等级上升、不变、下降区域分别为风险恶化区(风险恶化区域较大,占研究区面积的 $20.74\%$ ,呈星点状分布,河岸地区的分布相对集中)、稳定区(面积为 $44\ 253\ \text{km}^2$ ,占比为 $79.05\%$ )、改善区(位于新疆察布查尔锡自治县的西北角,面积仅有 $117\ \text{km}^2$ ,占比 $0.21\%$ )。

生活空间优先情景的景观生态风险范围为 $0.005\ 6\sim 0.058\ 4$ ,均值为 $0.035\ 628\ 9\ 3$ ,整体生态风险虽仍呈上升趋势,但以较低风险转向中风险为主,面积为 $3\ 870\ \text{km}^2$ ,风险恶化区、改善区、稳定区面积分别为 $8\ 136, 198, 47\ 646\ \text{km}^2$ 。

生态空间优先情景的景观生态风险也呈升高态势,景观生态风险值为 $0.005\ 6\sim 0.062\ 7$ ,均值为 $0.035\ 627\ 599$ ,风险转移特征与生活空间优先情景相似,风险恶化区、改善区、稳定区面积分别为 $7\ 677, 198, 48\ 105\ \text{km}^2$ 。

因此,虽然3种情景中生活空间优先情景的景观生态风险均值最低,但从风险区面积占比来看,生态空间优先情景下伊犁河谷的整体生态风险最低。

### 3 结论

1) 1990—2020年,伊犁河谷“三生”空间以草地生态空间为主,占地面积达 $60\%$ 以上。伊犁河谷农业生产空间、工矿生产空间、城镇生活空间、农村生活空间、水域生态空间和其他生态空间面积增加,草地生态空间和林地生态空间面积则减少。

2) 1990—2020年,景观生态风险降低,这一时期景观生态风险均值呈现减小趋势;2000—2020年,景观生态风险明显上升,均值虽有波动但不明显。

3) 2020—2030年,生产空间优先情景下,区域整体生态风险等级明显升高,中风险等级向较高风险转移面积最多。生活空间优先情景下,整体生态风险虽仍呈升高趋势,但风险转移特征以较低风险转向中风险为主。生态空间优先情景下,景观生态风险也呈升高态势,风险转移特征与生活空间优先情景相似,伊犁河谷整体生态风险最低。这是由于20世纪90年代中期以来,国家西部大开发从政策的角度鼓励了新疆土地的开发<sup>[40-45]</sup>。

## 参考文献:

- [1] TIAN Peng, LI Jialin, GONG Hongbo, *et al.* Research on land use changes and ecological risk assessment in Yongjiang River Basin in Zhejiang Province, China [J]. Sustainability, 2019, 11 (10): 2817. DOI: 10.3390/su11102817.
- [2] PENG Jian, ZONG Minli, HU Yina, *et al.* Assessing landscape ecological risk in a mining city: A case study in Liaoyuan City, China [J]. Sustainability, 2015, 7(7): 8312-8334. DOI: 10.3390/su7078312.
- [3] CUI Lu, ZHAO Yonghua, LIU Jianchao, *et al.* Landscape ecological risk assessment in Qinling Mountain [J]. Geological Journal, 2018, 53: 342-351. DOI: 10.1002/gj.3115.
- [4] CHEN Gong, LI Qi, PENG Fei, *et al.* Henan ecological security evaluation using improved 3D ecological footprint model based on emergy and net primary productivity [J]. Sustainability, 2019, 11 (5): 1353. DOI: 10.3390/su11051353.
- [5] YAN Yichen, JU Hongrun, ZHANG Shengrui, *et al.* The construction of ecological security patterns in coastal areas based on landscape ecological risk assessment: A case study of Jiaodong Peninsula, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(22): 12249. DOI: 10.3390/ijerph182212249.
- [6] LIU Di, CHEN Hai, ZHAN Hang, *et al.* Spatiotemporal evolution of landscape ecological risk based on geomorphological regionalization during 1980-2017: A case study of Shaanxi Province, China [J]. Sustainability, 2020, 12(3): 941. DOI: 10.3390/su12030941.
- [7] YANG Yang, SPYROU B, WHITE J M, *et al.* Palladium-mediated CO<sub>2</sub> extrusion followed by insertion of allene: Translating mechanistic studies to develop a one-pot method for the synthesis of alkenes [J]. Organometallics, 2020, 39(3): 453-467.
- [8] 王洁, 摆万奇, 田国行. 土地利用生态风险评价研究进展 [J]. 自然资源学报, 2020, 35(3): 576-585. DOI: 10.31497/zrzyxb.20200306.
- [9] 高星, 刘泽伟, 李晨曦, 等. 基于“三生空间”的雄安新区土地利用功能转型与生态环境效应研究 [J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7113-7122. DOI: 10.5846/stxb202002240325.
- [10] 陈慧敏, 周冬梅, 张军, 等. 基于景观格局的渭河流域甘肃段生态风险评价 [J]. 农业工程, 2022, 12(11): 72-79.
- [11] 刘可暄, 王冬梅, 魏源送, 等. 密云水库流域多尺度景观生态风险时空演变趋势 [J]. 生态学报, 2023, 43(1): 105-117.
- [12] 修扬景, 侯蒙京, 田骄阳, 等. 基于土地利用/覆盖的甘肃省景观生态风险时空变化特征 [J]. 草业学报, 2023, 32(1): 1-15. DOI: 10.11686/cyxb2021298.
- [13] 翟培秀, 李飞雪, 邱小倩, 等. 长三角地区景观生态风险时空演变评估 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(4): 245-255.
- [14] 王玲, 汪森. 成渝城市群景观生态风险演变分析 [J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(3): 626-637.
- [15] 杨庚. 景观格局演变背景下晋北大型露天矿区生态系统弹性与风险评价 [D]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- [16] 乔斌, 曹晓云, 孙玮婕, 等. 基于生态系统服务价值和景观生态风险的生态分区识别与优化策略: 以祁连山国家公园青海片区为例 [J]. 生态学报, 2023, 43(3): 986-1004.
- [17] 陈心怡, 谢跟踪, 张金萍. 海口市海岸带近 30 年土地利用变化的景观生态风险评价 [J]. 生态学报, 2021, 41(3): 975-986. DOI: 10.5846/stxb201909211974.
- [18] CHEN Jian, DONG Bin, LI Haoran, *et al.* Study on landscape ecological risk assessment of hooded crane breeding and overwintering habitat [J]. Environmental Research, 2020, 187(4): 109649. DOI: 10.1016/j.envres.2020.109649.
- [19] 何钊全, 尚雪, 张铜会, 等. 近 20 年陕北黄土丘陵区景观生态风险时空变化及其冷热点格局 [J]. 生态学杂志, 2023, 42(10): 2514-2525. DOI: 10.13292/j.1000-4890.202310.007.
- [20] 王敏, 胡守庚, 张绪冰, 等. 干旱区绿洲城镇景观生态风险时空变化分析: 以张掖绿洲乡镇为例 [J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5812-5824. DOI: 10.5846/stxb202105111234.
- [21] 袁雪松, 周俊, 胡蓓蓓, 等. 基于 FLUS 模型粤港澳大湾区“三生空间”多情景模拟预测 [J]. 地理科学, 2023, 43(3): 564-574. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2023.03.018.
- [22] 赵霖雨, 崔柳, 王佳, 等. 基于土地利用模拟预测模型分析的城市绿色空间发展多情景模拟及建设时序研究: 以湛江市中心城区为例 [J]. 生态学报, 2023, 43(15): 6307-6320.
- [23] 康紫薇, 张正勇, 位宏, 等. 基于土地利用变化的玛纳斯河流域景观生态风险评价 [J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6472-6485. DOI: 10.5846/stxb201908191731.

- [24] 樊影,王宏卫,杨胜天,等. 基于生境质量和生态安全格局的阿勒泰地区生态保护关键区域识别[J]. 生态学报, 2021,41(19):7614-7626. DOI:10.5846/stxb202011202987.
- [25] 杨清可,段学军,王磊等. 基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应:以长江三角洲核心区为例[J]. 地理科学,2018,38(1):97-106. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2018.01.011.
- [26] LIU Shishi,SU Hang,CAO Guofeng,*et al.* Learning from data: A post classification method for annual land cover analysis in urban areas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing,2019,154(8):202-215. DOI:10.1016/j.isprsjprs.2019.06.006.
- [27] YAO Yao,LIU Xiaoping,LI Xia,*et al.* Simulating urban land-use changes at a large scale by integrating dynamic land parcel subdivision and vector-based cellular automata[J]. International Journal of Geographical Information Science,2017,31(12):2452-2479. DOI:10.1080/13658816.2017.1360494.
- [28] 王子尧,黄楚梨,李惊,等. 耦合 InVEST-HFI-PLUS 模型的生态分区规划与动态评估:以博尔塔拉蒙古自治州为例[J]. 生态学报,2022,42(14):5789-5798. DOI:10.5846/stxb202108202319.
- [29] 靳甜甜,张云霞,朱月华,等. 黄土高原林区生态系统服务价值与景观生态风险时空变化及其关联性:以子午岭区为例[J]. 应用生态学报,2021,32(5):1623-1632. DOI:10.13287/j.1001-9332.202105.030.
- [30] 高宾,李小明,李志刚,等. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J]. 生态学报,2011,31(12):3441-3450.
- [31] PENG Jian,WANG Yanglin,ZHANG Yuan,*et al.* Evaluating the effectiveness of landscape metrics in quantifying spatial patterns[J]. Ecological Indicators,2010,10(2):217-223.
- [32] 吕乐婷,张杰,孙才志,等. 基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估[J]. 生态学报,2018,38(16):5952-5960.
- [33] 邱彭华,徐颂军,谢跟踪,等. 基于景观格局和生态敏感性的海南西部地区生态脆弱性分析[J]. 生态学报,2007(4):1257-1264. DOI:10.3321/j.issn:1000-0933.2007.04.001.
- [34] 孙才志,闫晓露,钟敬秋. 下辽河平原景观格局脆弱性及空间关联格局[J]. 生态学报,2014,34(2):247-257. DOI:10.5846/stxb201303200465.
- [35] 孔冬艳,陈会广,吴孔森. 中国“三生空间”演变特征、生态环境效应及其影响因素[J]. 自然资源学报,2021,36(5):1116-1135. DOI:10.31497/zrzyxb.20210503.
- [36] 姜昕彤,翟石艳,王铮,等. 基于未来土地利用模拟模型的郑州市“三生空间”模拟及生态环境效应分析[J]. 生态学报,2023,43(15):6225-6242.
- [37] 柳梦琪. 基于 PLUS 模型的老挝土地利用格局时空演变及模拟预测研究[D]. 武汉:华中科技大学,2022.
- [38] 陈鸿基,杨庆媛,彭立娟,等. 三峡库区县域“三生空间”时空演变特征与情景模拟[J]. 农业工程学报,2022,38(13):285-294.
- [39] 苏迎庆,刘庚,赵景波,等. 基于 FLUS 模型的汾河流域生态空间多情景模拟预测[J]. 干旱区研究,2021,38(4):1152-1161.
- [40] 李万年,曹月娥,张婷婷. 基于 GIS 的伊犁河谷 2000—2010 年土地利用的动态变化[J]. 湖北农业科学,2017,56(20):3853-3858. DOI:10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2017.20.016.
- [41] 贺可,吴世新,杨怡,等. 近 40 a 新疆土地利用及其绿洲动态变化[J]. 干旱区地理,2018,41(6):1333-1340.
- [42] 谈旭,王承武. 伊犁河谷生态系统服务价值时空演变及其驱动因素[J]. 应用生态学报,2023,34(10):2747-2756. DOI:10.13287/j.1001-9332.202310.021.
- [43] 郑艺文,刘晓煌,熊茂秋,等. 1990—2018 年新疆“三生”用地时空变化特征及其碳排放效应[J]. 草业科学,2022,39(12):2565-2577.
- [44] LIANG Xun,GUAN Qingfeng,CLARKE K C,*et al.* Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. Computers Environment and Urban Systems,2021,85:101569. DOI:10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569.
- [45] 牛统莉,熊立华,陈杰,等. 基于 PLUS 模型的长江流域土地利用变化模拟与多情景预测[J]. 生态学报,2022,42(10):3947-3958.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 刘源岗)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202304007



# 中国旅游业碳排放时空特征 及影响因素分解

邹利林<sup>1</sup>, 刘佳玲<sup>1</sup>, 王建英<sup>2</sup>

(1. 华侨大学 政治与公共管理学院, 福建 泉州 362021;

2. 华侨大学 旅游学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 综合运用碳排放系数估算法与旅游剥离系数法, 估算 2011—2021 年中国省级旅游交通、旅游住宿、旅游餐饮零售邮电业与旅游活动的碳排放量, 并运用对数平均迪式指数 (LMDI) 分解模型解析旅游碳排放影响因素。结果表明: 旅游业碳排放总体呈下降趋势, 空间分布上呈现东南多、西北少的特征; 旅游交通碳排放与旅游活动碳排放是旅游碳排放主要来源, 旅游消费水平与游客规模是旅游碳排放产生的主要因素; 旅游能源结构与旅游能源强度对旅游碳排放起抑制作用。

**关键词:** 碳排放; 旅游业; 时空分布; 因素分解; LMDI 模型; 碳排放系数估算法; 旅游剥离系数法

中图分类号: X 2; F 592

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)01-0071-07

## Spatial-Temporal Characteristics and Decomposition of Influencing Factors of Carbon Emissions of China's Tourism Industry

ZOU Lilin<sup>1</sup>, LIU Jialing<sup>1</sup>, WANG Jianying<sup>2</sup>

(1. School of Political Science and Public Administration, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. College of Tourism, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** The carbon emission coefficient estimation method and tourist stripping coefficient method are comprehensively used to estimate the carbon emissions of tourism transportation, tourism accommodation, tourism catering, retail, postal and telecommunications industries and tourism activities in China's provincial level during 2011 to 2021, and logarithmic mean dirichlet index (LMDI) decomposition model is used to analyze the influencing factors of tourism carbon emission. The results show that the carbon emissions of the tourism industry are decreasing overall, and it shows a characterist that there are more in the southeast and less in the north-west from the spatial distribution. Tourism transportation carbon emissions and tourism activities carbon emissions are the main sources of tourism carbon emissions. The level of tourism consumption and the scale of tourists are the main factors of tourism carbon emissions generated. The structure and intensity of tourism energy have an inhibitory effect on tourism carbon emissions.

**Keywords:** carbon emissions; tourism industry; temporal and spatial distribution; factor decomposition; logarithmic mean dirichlet index (LMDI) model; carbon emission coefficient estimation method; tourism stripping coefficient method

收稿日期: 2023-04-12

通信作者: 邹利林(1984-), 副教授, 博士, 主要从事城乡土地利用转型与国土空间治理的研究。E-mail: zll0303@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家社会科学基金一般资助项目(22BGL182)

旅游产业作为低消耗、低污染和高效益的朝阳产业在促进地方经济发展中起着愈发重要的作用。然而,据预测,国际旅游业的碳排放可能占据全球温室气体排放的8%<sup>[1]</sup>,这对全球气候变暖具有不可忽视的影响。绝大多数旅游碳排放间接体现在与旅游相关的交通、餐饮、住宿、商业和邮政通讯等行业<sup>[2]</sup>。近年来,中国旅游业高速发展,国内、国际旅游人数不断增长且行业发展势头良好,由此产生的碳排放对中国履行全球温室气体减排承诺形成较大压力<sup>[3]</sup>。目前,有关旅游碳排放计算方法主要有“自上而下”法<sup>[4]</sup>(建立标准化、系统化的碳排放测算监测体系)、“自下而上”法(计算旅游业涉及行业的碳排放)两大类。基于“自下而上”法,世界旅游组织预测全球旅游业碳排放约以2.5%的年均增长速度向大气中排放二氧化碳<sup>[5]</sup>。

旅游碳排放具有多空间尺度性,宏观尺度上,多数学者从旅游交通、旅游住宿及旅游活动方面估算全国旅游碳排放量<sup>[6-7]</sup>,或是从能源消耗角度估算中国旅游业碳排放量<sup>[8]</sup>;中观尺度上,将旅游业分为交通、住宿、游览、餐饮、购物、娱乐及其他7个方面,通过行业能源消耗量估算省级旅游碳排放<sup>[9]</sup>,或是从与旅游相关的交通、邮电、餐饮、游览、住宿、购物及其他方面估算旅游碳排放,并进行脱钩效应分析<sup>[10]</sup>,韩元军等<sup>[11]</sup>借鉴旅游消费剥离系数概念构建中国旅游业碳排放计算方法;微观尺度上,主要以代表性景区旅游碳排放特征为评价对象<sup>[12]</sup>,包战雄等<sup>[13]</sup>通过估算福州森林公园、武夷山、太姥山旅游交通碳排放,探讨国内不同旅游景点旅游交通碳排放的基本规律。当前,常用的分析方法有可拓展的随机性的环境影响评估模型(STIRPAT)<sup>[14]</sup>、环境压力控制模型(IPAT)<sup>[15]</sup>、探索性时空分析(ESTDA)<sup>[16]</sup>、探索性空间数据分析(ESDA)<sup>[17]</sup>和对数平均迪式指数(LMDI)分解<sup>[18]</sup>等。

全国尺度的旅游碳排放测算大多使用“三行业”法,即将旅游业碳排放分为旅游交通、旅游住宿及旅游活动3个测量单元,这不仅忽略了餐饮、购物、邮电通讯等行业中的碳排放,而且忽略综合测量旅游活动产生的碳排放,以及交通、运输等产生的碳排放,从而导致测算的旅游碳排放与实际碳排放存在一定偏差。此外,虽然现有研究分析了旅游碳排放与经济发展、市场环境等要素之间的因果联系,但较少系统解析旅游碳排放的影响因素。基于此,本文对中国旅游业碳排放时空特征及影响因素分解进行研究。

## 1 研究方法 with 数据来源

### 1.1 旅游碳排放量的测算方法

1.1.1 旅游交通碳排放 出行是旅游中不可缺少的环节,依据世界旅游组织与相关学者的研究,旅游交通碳排放( $m_T$ )为

$$m_T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m k_{i,j} l_i \alpha_i \quad (1)$$

式(1)中: $i$ 为第 $i$ 种客运交通方式(铁路、公路、民航和水路4种); $k_{i,j}$ 为 $j$ 地区中第 $i$ 类客运交通方式的旅客周转量; $l_i, \alpha_i$ 分别表示第 $i$ 类客运交通方式的碳排放因子和游客比例。

根据《2021年中国旅客运输行业市场现状及发展趋势分析》对游客出行方式的统计,公路旅客运输量占76.33%,铁路旅客运输量占18.75%,民航旅客运输量占3.40%,水路旅客运输量占1.52%。

1.1.2 旅游住宿碳排放 旅游住宿与酒店客房出租情况相关,考虑到数据获取及数据齐全程度,旅游住宿床位数采用已公布的星级饭店床位数。住宿业碳排放( $m_H$ )计算式为

$$m_H = \sum_{j=1}^m d \beta N_j T_j \quad (2)$$

式(2)中: $N_j, T_j$ 分别为 $j$ 地区的床位数和客房出租率; $\beta$ 为每张床每晚碳排放因子, $\beta=2.458$ ;  $d$ 为常数, $d=365$ 。

1.1.3 旅游餐饮零售邮电业碳排放 由于从现有统计资料中难以获取旅游餐饮零售邮电业等相关数据,借鉴投入产出法,通过行业化石能源消耗估算旅游餐饮零售邮电业的碳排放。引入旅游消费剥离系数,旅游餐饮零售邮电业碳排放( $m_Q$ )计算式为

$$m_Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m E_{i,j} \varphi U_i, \quad E_{i,j} = E_{i,t} \times R_t, \quad R_t = O/G. \quad (3)$$

式(3)中: $i$ 表示第 $i$ 种能源(原煤、煤油、汽油、柴油及燃料油5种); $E_{i,j}$ 为 $j$ 地区中第 $i$ 类旅游能源消耗

量; $\varphi$ 为单位标准煤碳排放, $\varphi=0.67$ (发改委能源研究所推荐数值); $U_i$ 为第*i*类能源折标准煤系数; $E_{i,t}$ 为*t*行业第*i*种能源消耗量; $R_t$ 为*t*行业旅游剥离系数; $O$ 表示行业旅游消费经济总量; $G$ 为行业总产出经济总量。

1.1.4 旅游活动碳排放 旅游活动碳排放产生于旅游游览及娱乐活动中。石培华等<sup>[6]</sup>将旅游活动按照旅游目的及内容分为观光旅游、休闲度假、商务出差、探访亲友及其他。基于此,旅游活动碳排放( $m_A$ )计算式为

$$m_A = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \gamma_i \rho_{i,j} \quad (4)$$

式(4)中: $i$ 为第*i*类旅游活动; $\gamma_i$ 为*i*类活动碳排放系数; $\rho_{i,j}$ 为*j*地区游客参加第*i*类旅游活动的人数。

多数学者采取旅游活动碳排放系数的统一指标如下:观光旅游为 $0.417 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$ ,休闲度假为 $1.670 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$ ,商务出差为 $0.786 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$ ,探访亲友为 $0.591 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$ ,其他为 $0.172 \text{ kg} \cdot \text{人}^{-1}$ <sup>[19]</sup>。旅游活动游客比例采取《中国国内旅游发展年度报告》中公布数据,观光旅游占比 $26.13\%$ ,休闲度假占比 $19.27\%$ ,商务出差占比 $14.90\%$ ,探访亲友占比 $33.25\%$ ,其他占比 $6.45\%$ 。

## 1.2 LMDI 模型

Kaya<sup>[20]</sup>于1989年提出Kaya恒等式,将旅游碳排放及其影响因素的关系用连乘表示,以此分解影响旅游业碳排放因素。LMDI法以目标变量的解为基础,是一种完全的、不产生残差的指数分解法。通过比较影响因素的大小,确定各因素对目标变量的影响程度。旅游业碳排放总量( $m_{\text{tot}}$ )计算式为

$$m_{\text{tot}} = m_T + m_H + m_A + m_Q = \frac{m_{\text{tot}}}{F} \times \frac{F}{E} \times \frac{E}{Y} \times \frac{Y}{P} \times P = \text{CE} \times \text{EM} \times \text{EI} \times \text{CI} \times \text{PS} \quad (5)$$

式(5)中: $F$ 为旅游业能源消耗量; $E$ 为旅游业总能源消耗; $Y$ 为旅游总收入; $P$ 为游客总人次; $\text{CE}$ , $\text{EM}$ , $\text{EI}$ , $\text{CI}$ , $\text{PS}$ 分别为模型分解的碳排放系数、旅游能源结构、旅游能源强度、旅游消费水平和游客规模<sup>[21]</sup>。

根据LMDI模型,各分解因素贡献值( $\Delta X$ )计算式为

$$\Delta X = \left( \frac{m_n - m_0}{\ln m_n - \ln m_0} \times \frac{\ln X_n}{X_0} \right) \quad (6)$$

式(6)中: $m_0$ 为基期旅游业碳排放总量; $m_n$ 为*n*期旅游业碳排放总量。

旅游碳排放量效应分解为

$$\Delta m_{\text{tot}} = m_n - m_0 = \Delta X$$

式中: $\Delta m_{\text{tot}} = \Delta \text{CE} + \Delta \text{EM} + \Delta \text{EI} + \Delta \text{CI} + \Delta \text{PS}$ , $\Delta \text{CE}$ , $\Delta \text{EM}$ , $\Delta \text{EI}$ , $\Delta \text{CI}$ , $\Delta \text{PS}$ 分别表示模型分解的碳排放系数效应、旅游能源结构效应、旅游能源强度效应、旅游消费水平效应与游客规模效应。

碳排放系数效应反映碳排放与化石能源消耗之间的变化关系,体现化石燃料之间的替代关系;旅游能源结构效应反映化石能源消耗与旅游能源总消耗的关系,体现旅游业中化石能源消耗比重,说明能源消耗结构合理性;旅游能源强度效应反映能源消耗与旅游收入的关系,体现投入产出之间的关系;旅游消费水平效应反映旅游收入与旅游人次的关系,体现游客人均消费水平;游客规模效应体现旅游人次,反映游客规模与数量。

## 1.3 数据来源

旅游业碳排放涉及旅游交通、旅游住宿、旅游餐饮零售邮电业与旅游活动能源消耗量,其中,客运周转量、零售额、邮政电信营业额、旅游收入及人数等数据来源于各省的统计年鉴及《中国文化和旅游年鉴》;能源消耗量来源于《中国能源统计年鉴》;旅游住宿床位数及出租率来源于《全国星级饭店统计报告》《中国统计年鉴》及《中国第三产业统计年鉴》。

# 2 碳排放结果与分析

## 2.1 中国旅游业碳排放时间分异特点

旅游碳排放总量与旅游业的发展状况息息相关,2011—2021年,旅游碳排放总量总体呈现波动式下降的趋势。旅游碳排放总量由2011年的18 126.02万t下降至2021年的4 755.49万t,降幅达到73.76%。2009年11月,节能减排指标纳入“十二五”国民经济发展规划中,我国逐步转向碳排放总量

和强度双控制度,在《加快旅游业发展的意见》中明确提出大力推进旅游节能减排。在全国节能减排宏观背景下,旅游业总体呈现向好态势下,节能减排、绿色低碳效果显著,绿色发展理念成为主要思潮。

2011—2021年旅游碳排放总量,如图1所示。由图1可知:2012年较2011年,旅游碳排放总量同比增长10.84%,但2013—2019年旅游业碳排放总量基本持平;2020年,旅游碳排放总量急剧下降,主要是受到新冠肺炎疫情管控影响,出行受限,人员流动减少,旅游总人数锐减,旅游业受到了较大的冲击,旅游收入折损46.74%,而且在“双碳”背景下,旅游业积极响应节能减排,助力碳达峰、碳中和目标的达成。

2011—2021年中国旅游业相关指标同比增长率,如图2所示。图2中: $\eta$ 为同比增长率。由图2可知:旅游交通碳排放总体呈现波动下降趋势,同比增长率自2015年起均为负值,保持逐年4%的下降比率;2019年较2011年的同比增长率下降44.40%。虽然交通网络不断健全完善,出行人数不断增加,旅游交通碳排放仍旧呈现下降趋势,这与交通工具的改进、交通业能源使用类型(新能源及清洁能源的运用使燃烧产生的二氧化碳排放量减少)的转变密切相关;除了2020,2021年,其他年份旅游活动碳排放同比增长率均为正值,也就是总体呈现逐年上升趋势,大致保持10%的同比增长率,2019年较2011年的同比增长率上升165.66%,这与现代旅游业不断发展、国内外旅游出行人数增长有关;旅游住宿碳排放与旅游餐饮零售邮电业碳排放变动率较大,这两个行业主要为线下服务业,是旅游业发展状况的晴雨表。总体上,自2018年以来,旅游住宿碳排放与旅游餐饮零售邮电业碳排放保持下降趋势,主要是因为近年来随着短旅途、就近游等旅游新趋势的出现,“宅酒店”式度假游受到更多欢迎,民宿成为越来越多游客的新选择,目前尚未统计普通旅馆及民宿的相关数据;另一方面,当前部分旅游场地购物消费由线下转为线上,而目前亦未统计线上购物销售额,从而导致旅游住宿碳排放与旅游餐饮零售邮电业的碳排放因统计范围没有更新而呈现下降趋势。

## 2.2 中国旅游业碳排放的时空分异特征

为分析省级单元旅游碳排放的时空差异,将旅游碳排放按照自然断裂划分为5级。旅游交通碳排放总体呈现东南多、西北少的分布布局,碳排放逐渐向东南地区聚集,高值聚集区由北向南移动。珠三角城市群是旅游交通碳排放高值地区,黄淮地区随着时间的推移,旅游交通碳排放由均匀分布逐渐向聚集方向发展,其中,安徽省成为黄淮平原的碳排放中心地区。华东、华南及华中地区是旅游交通碳排放较多的地区。西南地区是旅游交通碳排放热点地区且分布较为均匀。主要原因如下:首先,在空间分布上,旅游交通碳排放空间分布与人口分布耦合程度较高,说明人口集聚是旅游碳排放的重要因素;其次,旅游交通碳排放分布状况与交通网络密集程度、旅游资源丰富程度呈一定正向关系,交通枢纽点客运周转量高,所以交通线路密集省份相应的旅游交通碳排放更高,同时,旅游资源丰厚的省份能吸引更多游客观览,交通碳排放也越高;最后,短途旅行成为游玩新浪潮,疫情影响下出行受限,对旅游交通碳排放也有一定影响,长途旅行人数减少,就近游玩次数的增加使西北地区交通碳排放相对东南地区减少。

从区域尺度来看,沿海地区旅游住宿碳排放较高,华中地区旅游住宿碳排放分布较为均匀,重心由南向北转移。沿海地区旅游住宿碳排放高与住宿床位数多、出租率较高有关,客房出租率可达50%以上,领先于多数地区。值得注意的是,长江中游城市群旅游住宿碳排放增量明显,珠三角城市群是旅游

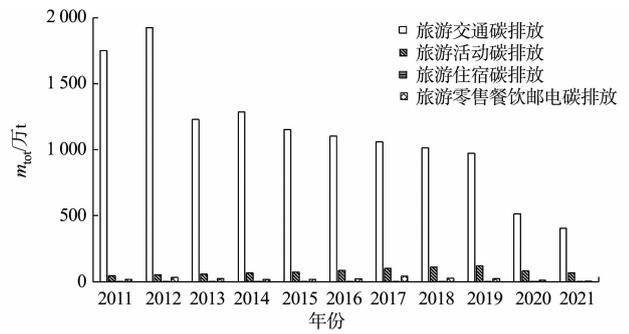


图1 2011—2021年旅游碳排放总量

Fig. 1 Total tourism carbon emissions from 2011 to 2021

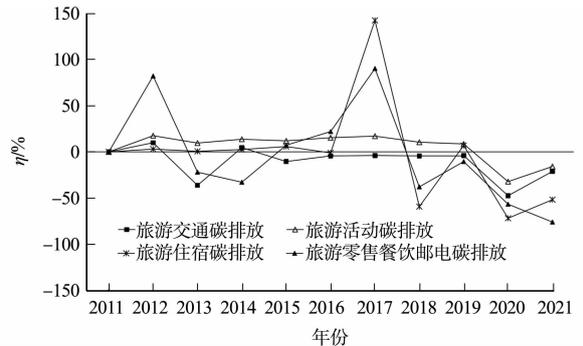


图2 2011—2021年中国旅游业相关指标同比增长率

Fig. 2 Year-on-year growth rate of related indicators in China's tourism industry from 2011 to 2021

住宿碳排放高值地区,“丝绸之路经济带”的提出掀起了沿线地区丝路游的热潮,旅游住宿碳排放增幅明显。除此以外,新疆也有较高的旅游住宿碳排放量。这是因为新疆拥有丰富的旅游景点,5A 级景区数量位居全国第 3,另外,自驾游的兴起使旅游人数急剧增加,留宿人数相对较多。

从旅游活动碳排放来看,东南沿海地区的旅游活动碳排放较高,旅游活动碳排放高值聚类中心由黄海沿岸向成渝城市群及长江中游城市群转移,珠三角城市群旅游活动碳排放下降较为明显。总体而言,旅游活动碳排放能体现游客出行目的地及旅游热门城市,时间的演变能反映旅游热门城市的变化。东南沿海地区不论是在旅游资源开发或是旅游服务方面都比西北地区更为完善与丰富,是大多数人首选的旅游目的地,另一方面,东南沿海地区人口相对聚集且人均收入水平较高,短途旅行成为当前热门的出行方式,使东南地区旅游活动碳排放分布聚集程度减弱,分布相对均匀。西北、西南地区旅游活动碳排放相对提高,这是因为随着西北、西南等地区旅游资源不断地开发,独具特色的自然风光及异域风情成为了越来越多游客新选择的出行游玩的目的地。

旅游餐饮零售邮电业碳排放主要分布在成渝城市群、长江中游城市群、长三角城市群,以及京津冀城市群,总体上分布较为均匀,大致呈现东部多、西部少的分布布局。旅游餐饮零售邮电业碳排放高值聚类区位于西南地区,西北地区旅游餐饮零售邮电业碳排放量较少。原因如下:首先,旅游餐饮零售邮电业与人口分布与密度成正向关系,人口集中分布地区旅游活动更为频繁,从而生产更多的碳排放;其次,在空间演变趋势上,随着独具地域特色的旅游资源开发及旅游配套产业设施的不断完善,东南地区保持高额的旅游餐饮零售邮电业碳排放,西南、西北地区相应也有增加。

### 2.3 旅游碳排放影响因素分解

根据式(5),(6),可以得到 2011—2021 年中国旅游业 LMDI 分解结果,如表 1 所示。

表 1 2011—2021 年中国旅游业 LMDI 分解结果

Tab. 1 LMDI decomposition results in China's tourism industry during 2011 to 2021

年份	$\Delta CE$	$\Delta EM$	$\Delta EI$	$\Delta CI$	$\Delta PS$	$\Delta m_{tot}$
2011	0	0	0	0	0	0
2012	1.24	-0.04	-0.34	0.15	0.42	1.43
2013	-0.53	-0.35	-0.17	0.09	0.26	-0.70
2014	-0.86	-0.04	-0.17	-0.01	0.26	-0.82
2015	0.04	-0.02	-0.23	0.14	0.19	0.12
2016	0.35	-0.04	-0.30	0.09	0.29	0.39
2017	1.92	-0.11	-0.45	0.13	0.48	1.97
2018	-1.45	-0.23	-0.45	0.25	0.32	-1.56
2019	-0.28	-0.03	-0.33	0.17	0.20	-0.27
2020	-1.10	-0.12	0.90	-0.38	-0.60	-1.30
2021	0.33	-1.08	-0.07	0.08	0.03	-0.71

由表 1 可知以下 3 点结论。

1) 2011—2021 年碳排放效应、旅游能源结构效应及旅游能源强度效应总和为负值,旅游消费水平效应与游客规模效应总和为正值。因此,旅游消费水平及游客规模是产生碳排放的主要因素,旅游能源结构及旅游能源强度(化石燃料消耗强度)是抑制旅游业碳排放减少的主要因素。

2) 按照各因素对碳排放累计贡献值排序,其中,碳排放系数效应贡献率为-8.54%、旅游能源结构效应贡献率为-50.80%、旅游能源强度效应贡献率为-40.66%、旅游消费水平效应贡献率为27.46%、游客规模效应贡献率为72.36%。因此,旅游能源结构效应与游客规模效应贡献率较高,说明旅游过程中碳排放的产生主要来自于旅游能源结构及游客人次。

3) 剔除 2020 年特殊影响年份,2011—2021 年旅游业碳排放效应之和为负,意味着外部环境稳定状态下旅游业碳排放总体呈下降趋势,并且 5 个因素中正效应贡献率小于负效应,意味着未来旅游碳排放会不断减少。

由表 1 中旅游碳排放效应之和,总体上我国旅游碳排放分为 3 个阶段。

1) 2011—2014 年,旅游碳排放效应呈下降趋势,该阶段对碳排放贡献较大的是碳排放系数效应,旅游消费水平效应与游客规模效应虽然对碳排放呈正向影响,但是贡献较小。

2) 2015—2017年,旅游碳排放效应呈上升趋势,该阶段对碳排放贡献较大的是游客规模效应,出行人数的增加使旅游碳排放增加。

3) 2018—2021年,旅游碳排放效应呈下降趋势,该阶段碳排放系数效应与旅游能源强度效应贡献值较大,旅游消费水平效应对碳排放影响较小。

因此,除2020年受到新冠肺炎疫情影响以外,各因素对旅游碳排放贡献均有较大的波动,其中,旅游消费水平、能源消耗强度及游客规模对碳排放有较大的影响,而2020年旅游碳排放下降的主要原因则是旅游消费水平与游客规模,当旅游消费与旅游人数对碳排放起负向作用时,旅游能源强度成为旅游碳排放产生的主要因素。往年数据中,旅游能源结构与旅游能源强度是抑制旅游碳排放生产的主要因素,这说明随着社会经济的不断发展与环保意识的增强,调整旅游能源结构、降低旅游能源强度在一定程度上减少了相关行业旅游碳排放的产生。

## 2.4 典型省份旅游业碳排放影响因素解析

2011—2021年典型省份旅游LMDI分解结果,如表2所示。

表2 2011—2021年典型省份旅游业LMDI分解结果

Tab.2 LMDI decomposition results in typical provinces tourism industry during 2011 to 2021

直辖市(或省)	$\Delta CE$	$\Delta EM$	$\Delta EI$	$\Delta CI$	$\Delta PS$
北京市	0.01	-0.28	-0.19	0.11	0.14
上海市	-0.53	-0.02	-0.20	0.58	-0.46
江苏省	0.46	1.69	0.02	0.36	0.17
浙江省	-0.26	-0.57	-0.38	0.25	0.43
湖北省	0.09	-0.86	-0.79	0.40	0.51
湖南省	-0.39	0.71	-1.71	0.23	0.83
广东省	-0.82	-0.53	-0.18	0.44	0.19
四川省	1.59	-1.45	-0.87	1.00	0.20
云南省	-0.59	-0.21	-1.16	0.43	1.15
陕西省	0.33	-0.87	-1.44	0.25	1.34

由表2可知:除北京、江苏省、湖北省、四川省、陕西省的碳排放系数效应为正值以外,其余省份均为负值;在旅游能源结构效应中,除江苏省、湖南省旅游能源结构效应为正值(旅游碳排放产生的原因)外,其余省份均为负值(对旅游碳排放抑制作用),由此间接反映出江苏省、湖南省两地需要在旅游能源结构的优化上投入更多精力;江苏省的旅游能源强度效应为正值,其余省份均为负值,也就是江苏省旅游能源强度是旅游业碳排放产生的原因之一;由旅游能源结构效应与旅游能源强度效应可知,对于大多数省份而言,旅游消耗能源结构的调整及旅游能源强度的减弱是旅游碳排放减少的主要原因,其中,旅游能源强度的减弱是二者中的主要因素;所有省份旅游消费水平效应均为正值,并且是旅游碳排放的主要正效应,说明游客消费水平的提升不仅带动了旅游地餐饮零售业的发展,消费过程也生产了较多的碳足迹。除上海市外,其余各省游客规模效应均为正值,且是旅游碳排放增长的主要正效应,因此,对于大多数省份,游客规模是产生旅游碳排放的主要因素。

## 3 结论

1) 2011—2021年,旅游碳排放总量总体呈现下降趋势,未来旅游碳排放依旧会不断增加。2020年,受到新冠肺炎疫情的影响,旅游碳排放大幅下降。总体上看,旅游交通与旅游住宿的碳排放呈现下降趋势,旅游活动与旅游餐饮零售邮电业碳排放呈现上升趋势,其中,旅游交通是碳排放主要来源,其次是旅游活动。

2) 全国旅游碳排放总量总体分布不均匀,其中,东南沿海地区、西南地区、华中地区的旅游碳排放总量较多。总体趋势上看,东南地区一直是旅游碳排放总量的重心,西北地区旅游碳排放总量随着旅游的不断发 展逐渐增加,表明旅游的发展与人口分布、经济发展水平及旅游资源开发利用程度密切相关。近郊游、短途游逐渐成为首选旅游方案,使旅游碳排放总量高值聚集区在东南地区,随着交通网络的完善及旅游资源的开发,西北、西南地区将会迎来旅游业发展新阶段。

3) 在影响旅游碳排放因素分解中,旅游能源结构与旅游能源强度对旅游业碳排放起抑制作用,旅

游消费水平与游客规模是旅游碳排放的主要来源。减少旅游碳排放需要不断优化能源结构(扩大对新能源的使用)、提高住宿服务品质与质量(提高客房出租率)。

#### 参考文献:

- [1] LENZEN M, SUN Y Y, FATURAY F, *et al.* The carbon footprint of global tourism[J]. *Nature Climate Change*, 2018(8):522-528.
- [2] SCOTT D, AMELUNG B, BECKEN S. Climate change and tourism-responding to global challenges[M]. Madrid: World Tourism Organization, 2008.
- [3] 王凯, 杨亚萍, 张淑文, 等. 中国旅游产业集聚与碳排放空间关联性[J]. *资源科学*, 2019, 41(2):362-371.
- [4] GOSSLING S. Global environmental consequences of tourism[J]. *Global Environmental Change*, 2002, 12(4):283-302.
- [5] CHIESA T, GAUTAM A. Towards a low carbon travel & tourism sector[C]// World Economic Forum. Geneva: [s. n.], 2009:3-4.
- [6] 石培华, 吴普. 中国旅游业能源消耗与 CO<sub>2</sub> 排放量的初步估算[J]. *地理学报*, 2011, 66(2):235-243.
- [7] 程慧, 徐琼, 郭尧琦. 中国旅游业碳排放脱钩的空间异质性及其驱动因素[J]. *华东经济管理*, 2020, 34(3):86-93. DOI:10.19629/j.cnki.34-1014/f.191007006.
- [8] 王凯, 李娟, 席建超. 中国旅游经济增长与碳排放的耦合关系研究[J]. *旅游学刊*, 2014, 29(6):24-33.
- [9] 陶玉国, 黄震方, 吴丽敏, 等. 江苏省区域旅游业碳排放测度及其因素分解[J]. *地理学报*, 2014, 69(10):1438-1448.
- [10] 赵先超, 朱翔. 湖南省旅游业碳排放的初步估算及脱钩效应分析[J]. *世界地理研究*, 2013, 22(1):166-175, 129.
- [11] 韩元军, 吴普. 京津冀地区旅游业的碳排放测算与比较研究[J]. *人文地理*, 2016, 31(4):127-134. DOI:10.13959/j.issn.1003-2398.2016.04.017.
- [12] 丁雨莲, 刘德旺, 张凤琴, 等. 皖南查济古村落旅游净碳排放估算与减碳增汇研究[J]. *资源开发与市场*, 2018, 34(7):935-940.
- [13] 包战雄, 袁书琪, 陈光水. 不同游客吸引半径景区内旅游交通碳排放特征比较[J]. *地理科学*, 2012, 32(10):1168-1175. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2012.10.002.
- [14] 汤姿, 李晓红. 基于 STIRPAT 模型的黑龙江省旅游业二氧化碳排放影响因素分析[J]. *生态经济*, 2019, 35(8):141-145.
- [15] 刘军, 岳梦婷. 区域旅游业碳排放及其影响因素:基于旅游流动性视角[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(7):37-48.
- [16] 岳立, 雷燕燕, 王杰. 中国省域旅游业碳排放效率时空特征及影响因素分析[J]. *统计与决策*, 2020, 36(16):69-73. DOI:10.13546/j.cnki.tjyjc.2020.16.015.
- [17] 翁钢民, 李聪慧, 潘越, 等. 中国旅游业碳排放脱钩效应及影响因素研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(2):114-120.
- [18] 王凯, 肖燕, 李志苗, 等. 中国旅游业 CO<sub>2</sub> 排放因素分解:基于 LMDI 分解技术[J]. *旅游科学*, 2016, 30(3):13-27. DOI:10.16323/j.cnki.lykx.2016.03.002.
- [19] TANG Zi, SHANG Jie, SHI Changbo, *et al.* Decoupling indicators of CO<sub>2</sub> emissions from the tourism industry in China: 1990-2012[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 46(6):390-397.
- [20] KAYA Y. Impact of carbon dioxide emission on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios[C]// Presentation to the Energy and Industry Subgroup. Paris: IPCC, 1990:350-416.
- [21] 孙燕燕. 上海市旅游碳排放估算及其效应分解[J]. *地域研究与开发*, 2020, 39(1):122-126.
- [22] 赵先超, 滕洁. 基于 LMDI 的湖南省旅游业碳排放影响因素分解[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(9):192-199. DOI:10.19672/j.cnki.1003-6504.2018.09.030.
- [23] 钟章奇, 吴静, 许爱文, 等. 中国各省区旅游业碳排放量初步估算及区域差异[J]. *世界地理研究*, 2016, 25(1):83-94.
- [24] 肖潇, 张捷, 卢俊宇, 等. 旅游交通碳排放的空间结构与情景分析[J]. *生态学报*, 2012, 32(23):7540-7548.
- [25] 韩元军, 吴普, 林坦. 基于碳排放的代表性省份旅游产业效率测算与比较分析[J]. *地理研究*, 2015, 34(10):1957-1970.

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202306012



# 胎儿大脑三维表面重建算法

蔡凯雄<sup>1</sup>, 王强<sup>2</sup>, 陈添峰<sup>2</sup>, 郑力新<sup>1</sup>

(1. 华侨大学 工学院, 福建 泉州 362021;  
2. 泉州市妇幼保健院 儿童医院, 福建 泉州 362000)

**摘要:** 通过核磁共振设备获得多个离散间距的磁共振切片图像,采用 CARESU\_NET 卷积神经网络对图像进行分割,获取胎儿大脑区域图像。采用 CARESU\_NET 卷积神经网络对间断切片进行边缘重构,恢复完整的边缘信息。对边缘重构后的图像组提取边缘像素,生成三维点云,运用泊松重建方法重建点云表面,得到胎儿大脑三维表面模型。结果表明:基于核磁共振图像的三维表面模型直观生动,提高诊断效率和准确性。

**关键词:** 胎儿大脑; 三维重建; 边缘重构; 点云处理; 核磁共振

**中图分类号:** TP 399 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2024)01-0078-08

## Fetal Brain Three-Dimensional Surface Reconstruction Algorithm

CAI Kaixiong<sup>1</sup>, WANG Qiang<sup>2</sup>, CHEN Tianfeng<sup>2</sup>, ZHENG Lixin<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, University of Huaqiao, Quanzhou 362021, China;  
2. Children's Hospital, Quanzhou Maternal and Child Health Hospital, Quanzhou 362000, China)

**Abstract:** Multiple discrete space magnetic resonance slice images are obtained using a nuclear magnetic resonance device, a CARESU\_NET convolutional neural network is used to segment image to extract the fetal brain region images. A CARESU\_NET convolutional neural network is used to reconstruct edge on discontinuous slices, complete edge information is restored. A three-dimensional point clouds are generated by extracting edge pixels from the edge-reconstructed images, and the point cloud surface is reconstructed using the Poisson reconstruction method to obtain a three-dimensional surface model of the fetal brain. The results show that the three-dimensional surface model based on nuclear magnetic resonance images is intuitive and vivid, the diagnostic efficiency and accuracy are improved.

**Keywords:** fetal brain; three-dimensional reconstruction; edge reconstruction; point cloud processing; nuclear magnetic resonance

医学三维重建在医学诊断、病理研究中有着重大意义<sup>[1]</sup>,相比二维模型,三维模型可以很快地观察到病变区域,从而加快医学诊断速度。完整的医学三维重建包括点云采集、点云配准、点云表面重建、表面纹理融合等过程。点云表面重建<sup>[2-4]</sup>工作是影响重建模型效果的关键技术<sup>[5-7]</sup>。

大脑三维重建需要对表面进行重建,从表面信息中得到顶点和面信息,并在计算机中仿真出大脑形态<sup>[8-10]</sup>。马阿敏等<sup>[11]</sup>通过阈值分割得到二值脑组织图像,再通过数学形态学处理得到脑部轮廓,但该重建方法只能应用在较为简单的大脑图像中,而切片要求足够密集,才能防止脑部信息缺失。Hu 等<sup>[12]</sup>使用树形图卷积生成对抗网络,通过单张磁共振图像生成大脑点云,较好地还原大脑的点云,但单张网络切片的信息素过低,生成的大脑结构难以让人信服。

**收稿日期:** 2023-06-12

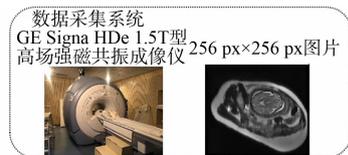
**通信作者:** 郑力新(1967-),男,教授,博士,主要从事图像分析、机器视觉、深度学习、大数据分析、机器人与视觉一体化技术、网络控制、机电一体化系统等的研究。E-mail: zlx@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 福建省科技计划项目(2020Y0039);福建省华侨大学院校联合创新项目(2022YX008)

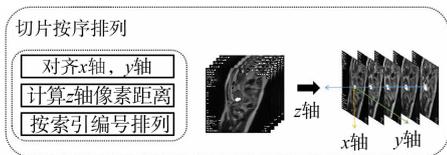
基于深度学习的点云表面重建算法在公有数据集中表现较好,文献[13-15]利用网络提取特征,计算每个点在空间中的占有概率,然而深度学习的网络泛用性较低,无法针对特殊的点云重建得到正确的重建结果。基于几何的点云表面重建算法分成显式重建算法和隐式重建算法。显式重建算法有滚球算法重建<sup>[16]</sup>、德劳内三角化算法<sup>[17]</sup>,然而显式重建算法要求点云分布均匀,当点云分布不均匀时,就会形成大量孔洞。隐式重建算法(如一般泊松算法<sup>[18-19]</sup>)使用隐式函数拟合局部表面的点,从而构成一个等值面,隐式重建算法在孔洞填充、表面平滑上有较好的表现。基于此,本文提出胎儿大脑三维表面重建算法。

## 1 算法流程图

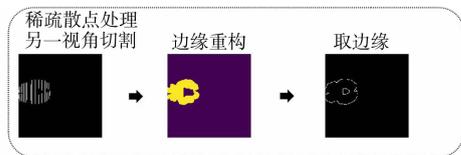
在专业医师的协助下,获取 500 人 10 715 张胎儿脑颅磁共振图像。同时,每张图像包含对应的分割标签图像和边缘重构标签图像。算法流程图,如图 1 所示。由图 1 可知:A 过程获取原始磁共振图像;B 过程的切片按顺序排列,初步得到带扫描间距的三维点云信息;C 过程的稀疏散点处理使用深度学习方法,解决了扫描间距带来的信息缺失;D 过程的图像组点云化实现了图像到点云的转换,为下一步网格化做数据准备;E 过程使用泊松曲面重建算法,实现从点云到网格的生成,生动展现了当前胎儿的大脑发育状况,有效辅助医生医学诊断。算法提供了一系列处理方法,实现了从磁共振图像到三维模型的生成。



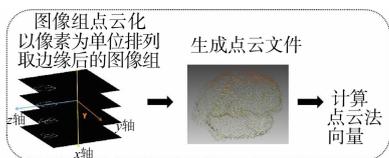
(a) A 过程



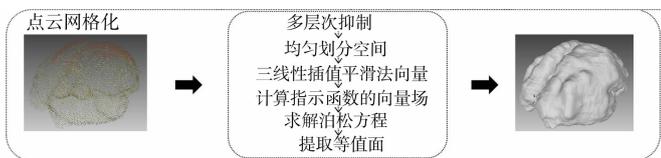
(b) B 过程



(c) C 过程



(d) D 过程



(e) E 过程

图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow diagrams of algorithm

## 2 点云的获取

### 2.1 连续切片的生成

对胎儿脑颅图像进行排列( $z$ 轴),分割得到胎儿大脑图像。离散的切片排列,如图 2 所示。图 2 中:白色部分为原始的脑颅内腔图像中分割出来的大脑组织。由图 2 可知:由于胎儿大脑组织采样间距为 2~5 mm,因此,大脑姿态、大小存在较大差异。将切片按照  $z$  轴的顺序排列,  $x$  轴和  $y$  轴的值是二维图像中的  $x$  轴和  $y$  轴的值,  $z$  轴的值是每张图像的索引编号乘每张图像之间的像素距离(索引编号从 0 开始,第 1 张扫描图像的索引是 0,第 2 张的索引是 1)。

像素距离与长度转换,如图 3 所示。像素距离表达式为

$$l_p = \frac{1}{y_2 - y_1} \quad (1)$$

式(1)中: $y_2$  是图 3 红色方框中下方横线的  $y$  坐标; $y_1$  是图 3 红色方框中上方横线的  $y$  坐标。

为了提高计算的精度,简化计算过程,假设仪器设置的扫描距离为 5 mm,  $z$  轴像素距离表达式为

$$l_z = 0.5 \times (y_2 - y_1) \quad (2)$$

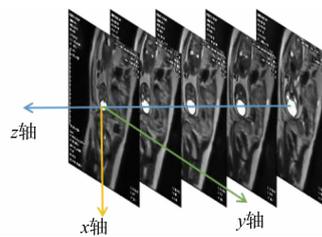


图 2 离散的切片排列

Fig. 2 Arrangement of discrete slices

通过对公式合并和简化,减少中间过程的计算,降低误差的传播,从而提高计算的准确性。在实际应用中,合理选择适当的计算方法可确保像素距离的精确度。通过综合考虑分辨率、采样间距和图像数据特征,可得到更可靠、更稳定的像素距离。精确的像素距离计算对医学图像的测量和分析具有重要的意义。

切片点云化,如图4所示。由图4可知:由于每层切片的间距过大,三维可视化后会损失大量信息,难以具有参考价值。为了解决信息缺失带来的问题,对点云模型,以像素为单位水平切片。稀疏水平面,如图5所示。

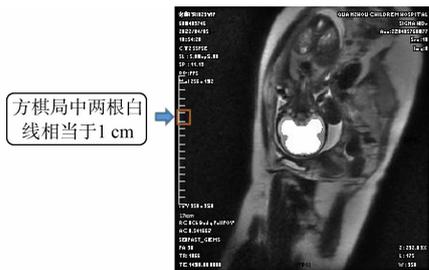


图3 像素距离与长度转换

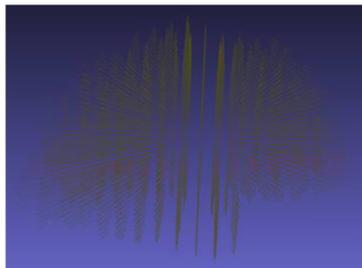


图4 切片点云化

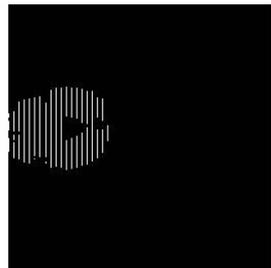


图5 稀疏水平面

Fig. 3 Conversion of pixel distance and length

Fig. 4 Slice point clouda

Fig. 5 Sparse horizontal plane

## 2.2 稀疏散点处理

图像分割过程<sup>[20]</sup>和边缘重构过程均使用了 CARESU\_NET 卷积神经网络,CARESU\_NET 卷积神经网络基于 U-Net 网络<sup>[21]</sup>进行改进。CARESU\_NET 卷积神经网络还原的大脑信息,如图6所示。由图6可知:在下采样模块中加入了残差注意力模块,提升网络的特征提取能力和表达能力;在上采样跳跃连接处加入了通道注意力模块,消除噪声和分配同层通道的权重;端到端模型能从稀疏散点中得到大脑切片图像,对边缘进行连接和对内部进行填充,左边输入稀疏散点图像,右边输出还原后的大脑图像。

深度学习框架为 tensorflow,梯度下降为随机梯度下降(SGD)优化器,学习率为 0.001,超参数为 0.9,一个 batch 的图像数为 32。分割算法使用 dice 损失函数作为算法评价系数,在 300 个 epoch 训练结束后,与标签图像对比,得出的图像可以达到 97%以上的还原度。

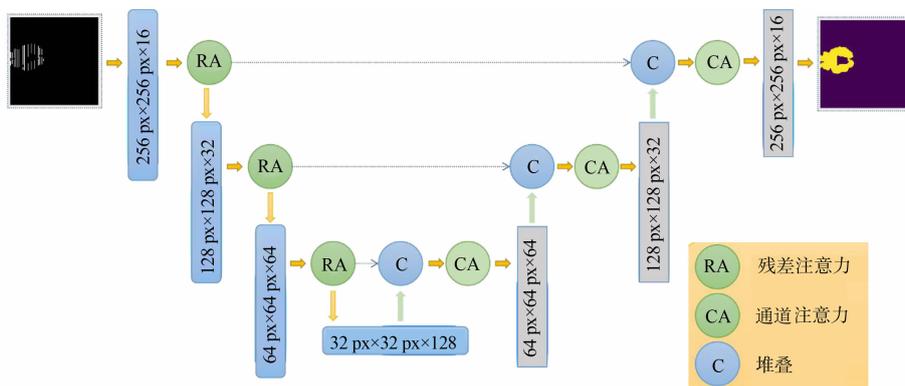


图6 CARESU\_NET 卷积神经网络还原的大脑信息

Fig. 6 Restoration of brain information using CARESU\_NET convolutional neural network

## 2.3 图像边缘获取

利用胎儿大脑的边缘数据能模拟出一个较好的大脑轮廓,而且能节省计算资源(用较少的数据完成可视化的工作)。选择传统的图像边缘化处理技术 Canny 算法<sup>[22]</sup>,完成边缘化操作。二维图像的像素点在  $x$  方向和  $y$  方向上的梯度分别为

$$f_x = \frac{F(x+1,y) - F(x-1,y)}{2}, \quad (3)$$

$$f_y = \frac{F(x,y+1) - F(x,y-1)}{2}. \quad (4)$$

像素点方向的梯度大小( $f_\theta$ )和方向( $\theta$ )分别为

$$f_\theta = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, \quad \theta = \arctan\left(\frac{f_y}{f_x}\right). \quad (5)$$

Canny 算法是以窗口的形式在图像上滑动, 从而进行卷积运算, 因此, 在两侧的边缘中心位置一定会出现梯度值较小的伪边缘。比较边缘像素点(沿着梯度的方向)与两侧像素点梯度大小, 若边缘像素点的梯度值最大, 说明它位于边缘的中心位置, 则保留; 否则, 抑制边缘像素点。在进行边缘检测时, 一些非边缘的噪声也会被检测出来, 需要对边缘加以限定。

在 Canny 算法中, 设置了高、低两个梯度值阈值  $T_H, T_L$ 。梯度值比  $T_H$  大的点为强边缘点, 梯度值比  $T_H$  小, 但比  $T_L$  大的点为弱边缘点, 梯度值比  $T_L$  小的点则抑制。在进行梯度值阈值处理时, 只有强边缘点、与强边缘相连的弱边缘点会被保留。

## 2.4 图像组点云化

在  $x$  轴方向, 大脑图层以一个像素为单位进行平铺, 得到每个点云的  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴坐标。点云的法向量计算是基于每个点的邻域点进行计算, 因此, 在计算每个点的法向量时, 取周边 4 个邻域点信息进行计算。通过邻域点和当前点生成面, 法向量正交当前面, 指向外部、内部方向。当法向量跟质心和当前点生成的向量夹角小于  $90^\circ$  时, 则判断为向外法向量。

## 3 网格化过程

### 3.1 泊松表面重建

泊松表面重建算法<sup>[23]</sup>有以下 3 个具体步骤: 1) 采用指示函数拟合表面; 2) 通过求解泊松方程提取等值面(在表面内部的空间值大于零, 在表面外部的空间值小于零); 3) 对等值面使用 Marching Cube 重建算法, 得到具有几何实体信息的表面模型<sup>[24]</sup>。

在空间  $S$ (上部分的长方体结构)中, 实体  $M$  包含点云集合和法向量集合, 其边界定义为  $\partial M$ 。通过散度定理可知, 通过曲面的通量约等于曲面内部的向量, 但由于曲面在正交方向上不连续, 需引入一个平滑函数  $\bar{F}()$  来平滑边界指示函数  $f(M)$ 。平滑后的法向量场为

$$\nabla(f(M)\bar{F})(q) = \int_{\partial M} \bar{F}(q-p)\bar{N}_{\partial M}(p)dp. \quad (6)$$

式(6)中:  $\bar{F}(q-p)$  表示从点  $p$  到点  $q$  的平滑过程。

空间三线性插值, 如图 7 所示。根据每个邻域点在  $q$  周边的 8 个体素,  $q$  的法向量投影坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_q &= (x-x_0)/(x_1-x_0), \\ y_q &= (y-y_0)/(y_1-y_0), \\ z_q &= (z-z_0)/(z_1-z_0). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)中:  $x_0, y_0, z_0$  分别为在体素下方的  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴的坐标;  $x_1, y_1, z_1$  分别为在体素上方的  $x$  轴、 $y$  轴和  $z$  轴的坐标。

通过空间三线性插值求点  $q$  的向量, 具体步骤为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{V}_{00} &= \mathbf{V}[x_0, y_0, z_0](1-x_q) + \mathbf{V}[x_1, y_0, z_0]x_q, \\ \mathbf{V}_{01} &= \mathbf{V}[x_0, y_0, z_1](1-x_q) + \mathbf{V}[x_1, y_0, z_1]x_q, \\ \mathbf{V}_{10} &= \mathbf{V}[x_0, y_1, z_0](1-x_q) + \mathbf{V}[x_1, y_1, z_0]x_q, \\ \mathbf{V}_{11} &= \mathbf{V}[x_0, y_1, z_1](1-x_q) + \mathbf{V}[x_1, y_1, z_1]x_q, \\ \mathbf{V}_0 &= \mathbf{V}_{00}(1-y_q) + \mathbf{V}_{10}y_q, \\ \mathbf{V}_1 &= \mathbf{V}_{01}(1-y_q) + \mathbf{V}_{11}y_q, \\ \mathbf{V} &= \mathbf{V}_0(1-z_q) + \mathbf{V}_1z_q. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)中:  $\mathbf{V}_{00}, \mathbf{V}_{10}, \mathbf{V}_{01}, \mathbf{V}_{11}$  分别为点  $p_{00}, p_{10}, p_{01}, p_{11}$  的向量。

指示函数  $f(M)$  代表的表面向量场近似为在一个小范围内  $\{m, m \subset \partial M\}$ ,  $\text{Ng}(m)$  是点  $q$  的邻接体素, 指示函数  $f(M)$  中点  $q$  的向量可以近似表示为

$$\bar{\mathbf{V}}(q) = \sum_{p \in \text{Ng}(m)} \alpha_{0,m} p \mathbf{N}_m. \quad (9)$$

根据式(6), 有  $\nabla \bar{\mathbf{X}} = \mathbf{V}$ ,  $\mathbf{X}$  为稀疏矩阵, 对两边同时求散度, 泊松方程为

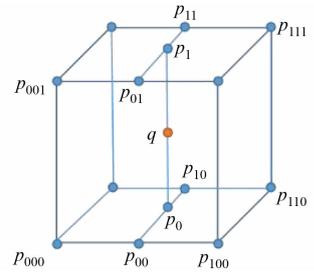


图 7 空间三线性插值

Fig. 7 Spatial trilinear interpolation

$$\bar{\Delta X} = \nabla V.$$

散度公式为

$$\operatorname{div} F = \nabla F = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}. \quad (10)$$

最小二乘法可求解近似解,使用移动立方体算法对  $x$  提取等值面,得到顶点和三角形信息,从而完成重建工作。

### 3.2 改进泊松表面重建

一般泊松表面重建的大脑会呈现出多层次效果,一般泊松表面重建的图像分割过程中的噪声也会一起重建。

1) 多层次抑制。因为点云是层次结构图像生成的,在空间结构中会呈现出多层次效果,显然是不符合人体大脑结构的。为了使生成的点云数据更加平滑,需要对体素之间进行插值,提高生成的面信息。计算点云平均距离,点云的距离取点  $p$  与距离点  $p$  最近点的距离,  $d_p = \min(\operatorname{dis}(p, q)), q = 1, 2, \dots, k, p \neq q$ 。

在点的总数为  $k$  的点云中,点云之间平均距离计算公式为  $\bar{d} = \frac{1}{k} \sum_{n=1}^k d_p$ 。

对每个点  $p$  使用最邻近结点算法(KNN)计算,得到周围  $K$  个邻域点云。计算邻域点云与点  $p$  的欧式距离,取结果大于  $T_H$  的点,  $T_H = \lambda \bar{d} (\lambda = 1, 2, \dots, n)$ 。计算两点间的中间点  $q(x, y, z) = \frac{p(x, y, z) + r(x, y, z)}{2}$ ,得到  $q$  点的空间坐标后,还需进行法向量的计算。 $q$  的法向量( $N_q$ )为

$$N_q = \sum_{i=1}^N \frac{1}{e^{\operatorname{dis}(q, i)}} N_i. \quad (11)$$

式(11)中: $N_i$  为周边法向量。

2) 噪声抑制。为了节省计算开销,采用八叉树划分法<sup>[25]</sup>将空间分成 8 等份(在根节点下有 8 个子节点)。如果每个子节点中的点云满足继续分割的数量要求,该节点作为父节点继续分割成 8 个子节点,在八叉树划分中点越密集的区域树深度越深,越稀疏的区域八叉树深度越浅。八叉树划分将点云存在的空间进行划分,噪声也有了自己的重建空间,对大脑组织进行重建,也对噪声区域进行重建。采用均匀划分算法对空间进行划分,为了减少计算量,计算空间所需长方体结构,长方体结构应能将物体点云囊括在内,以单位体积为  $1^3$  的体素把空间划分成若干大小相等的格子。实验结果表明,均匀划分算法更考虑整体的结构,远离大脑点云的噪声由于无法形成封闭的曲面结构,无法重建。

## 4 实验结果与分析

每组胎儿大脑磁共振由多张磁共振扫描图像组成,扫描间距的存在导致每张大脑的姿态差距较大。分割对比图,如图 8 所示。由图 8 可知:CARESU\_NET 分割后的图像能在细节处更为敏感,分割后能保留下更多的大脑图像信息。

U\_Net 卷积神经网络的平均交并比、精确率、召回率和相似率分别为 92.45%, 92.65%, 93.26%, 92.64%, CARESU\_NET 卷积神经网络的平均交并比、精确率、召回率和相似率分别为 95.38%, 95.72%, 95.89%, 95.68%, 比 U\_Net 卷积神经网络分别提升了 2.93%, 3.07%, 2.63%, 3.04%。

在重构实验中,任务较为简单,只需对边缘进行连接和对边缘内部进行填充。U\_Net 卷积神经网络的平均交并比、精确率、召回率和相似率分别为 63.97%, 96.49%, 97.11%, 96.62%, CARESU\_NET 卷积神经网络的平均交并比、精确率、召回率和相似率分别为 68.57%, 97.32%, 97.38%, 97.43%, 因此,两个卷积神经网络之间的差异较小。

重建效果对比,如图 9 所示。由图 9 可知:滚球算法在点云不规则排列的情况下,重建后会产生大量孔洞;一般泊松算法容易产生层次结构,对点云过于拟合;使用优化后的重建方法能避免过拟合重建,抑制结构层次化,解决孔洞问题,表面更加平滑。因此,优化后的泊松重建算法较一般泊松算法能更好地仿真胎儿大脑,重建的模型能更生动地展示给医生,并进行医学诊断。

重建后,滚球算法、一般泊松算法,优化后的泊松重建算法的顶点分别为 18 186, 47 120, 23 032 个;面

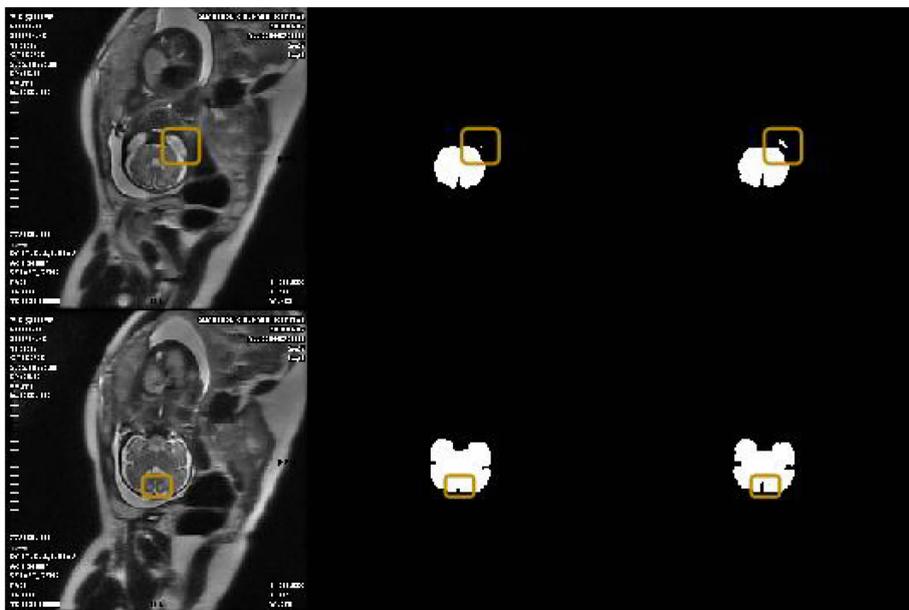
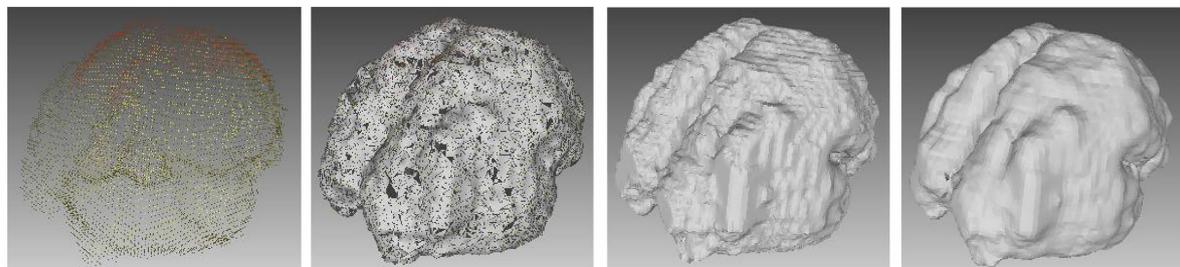


图 8 分割对比图

Fig. 8 Diagram of segmentation comparison



(a) 点云

(b) 滚球算法

(c) 一般泊松算法

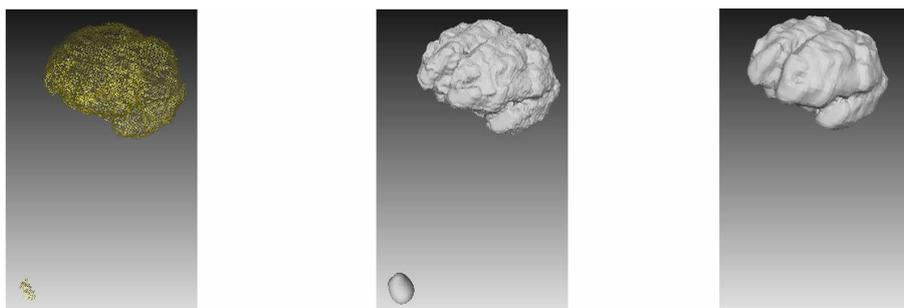
(d) 优化后的泊松重建算法

图 9 重建效果对比

Fig. 9 Comparison of reconstruction effects

分别为 27 030,94 252,46 044 个。由于滚球算法点云分布密度的不确定,因此,生成的顶点和面较少,表面会有大量孔洞;一般泊松算法相比于优化后的泊松重建算法形成了 2 倍多的顶点和面,从侧面反映了各个位置的点云重建过于拟合;优化后的泊松重建算法使用了更少的顶点和面结构能很好地还原大脑形态,点云分布更加均匀,重建模型的表面更为平滑,较少的数据可以减少模型文件的大小和加快加载模型时的渲染速度。

使用深度学习的方法,从孕妇腹部磁共振图像中获取胎儿大脑组织基础数据,由于图像分割算法无法达到百分百的精度,因此,会存在噪声。噪声抑制展示,如图 10 所示。



(a) 带噪声的点云

(b) 一般泊松算法

(c) 优化后的泊松重建算法

图 10 噪声抑制展示

Fig. 10 Noise suppression demonstration

在点云采样过程中,对噪声进行采样,一般泊松算法在图像左下角同样也会对噪声空间进行重建,也是一般泊松算法过拟合的结果。U\_Net 卷积神经网络和 CARESU\_Net 卷积神经网络的顶点分别为 22 030,23 032 个,面分别为 44 044,46 044 个。因此,CARESU\_NET 神经网络更为准确分割图像,保留更多的胎儿脑部图像信息,生成的大脑模型有更多有效的顶点和面信息。

重建对比图,如图 11 所示。由图 11 可知:由于 U\_Net 卷积神经网络提供的图像对细节和噪声处理较差,采样的点云不能很好地拟合大脑表面形态,在一定程度上影响医学诊断;CARESU\_NET 卷积神经网络给予重建算法更精准的点云数据,因此,重建结果更加拟合大脑,表面也更为光滑。

CARESU\_NET 卷积神经网络提高了深度学习方法在图像分割和边缘重构的性能,为点云采样提供了更准确的数据服务。同时,也对重建算法进行了一定的改进,抑制了层次化结构和噪声的影响,为胎儿大脑三维可视化效果的提升做出了帮助。

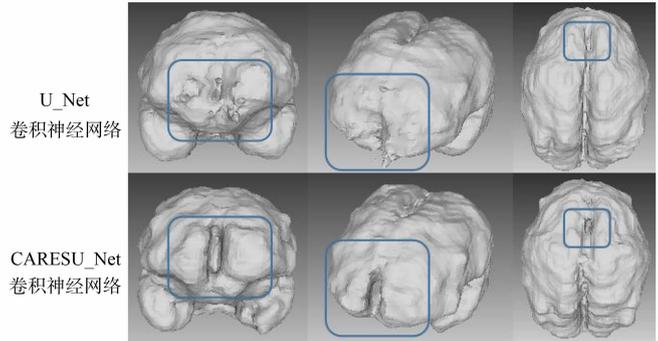


图 11 重建对比图

Fig. 11 Comparison diagrams of reconstruction

## 5 结束语

在输入一组胎儿脑颅磁共振图像后,采用 CARESU\_NET 卷积神经网络对图像进行分割,得到较为精确的胎儿大脑组织图像组。对胎儿大脑组织图像组进行堆叠后,从另一视角进行切片,构建切片间距较为密集、内容较为稀疏的图像组,从而重构边缘、填充信息、恢复图像。运用传统方法获取大脑边缘,采样得到三维点云,采用改进的泊松表面重建算法可提高可视化效果。未来还将探索胎儿扫描过程中移动大脑造成的左右脑半球不对称的解决办法,从而提高三维可视化和脑容量计算算法的临床能力。

## 参考文献:

- [1] 刘刚战,刘楷正. 医学图像三维重建技术的研究与应用[J]. 通讯世界,2016,9:279. DOI:10.3969/j.issn.1006-4222.2016.09.188.
- [2] 杨振发,万刚,曹雪峰,等. 基于几何结构特征的点云表面重建方法[J]. 系统仿真学报,2017,29(11):2684-2692. DOI:10.16182/j.issn1004731x.joss.201711013.
- [3] PODDAR S,JACOB M. Recovery of point clouds on surfaces: Application to image reconstruction[C]//IEEE 15th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2018). Washington D C:IEEE Press,2018:1272-1275. DOI:10.1109/ISBI.2018.8363803.
- [4] BERNARD F,SALAMANCA L,THUNBERG J,*et al.* Shape-aware surface reconstruction from sparse 3D point-clouds [J]. Medical Image Analysis,2017,38:77-89. DOI:10.1016/j.media.2017.02.005.
- [5] SHANG Yang,SUN Xiaoliang,ZHANG Yueqiang,*et al.* Research on 3D target pose tracking and modeling[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science,2019,2(2):60-69. DOI:10.11947/J. AGCS. 2018. 20170626.
- [6] XU Yusheng,HUANG Rong,TONG Xiaohua,*et al.* Exploiting robust estimators in phase correlation of 3D point clouds for 6 dof pose estimation[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science,2021,4(3):72-90. DOI:10.11947/j. JGGS. 2021. 0307.
- [7] LI Bin,ZHAO Xiaofa,CHEN Yong,*et al.* Three dimensional laser point cloud slicing method for calculating irregular volume[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science,2019,2(4):33-45. DOI:10.11947/j. JGGS. 2019. 0404.
- [8] 凡雪霖,王震寰,李丹辉,等. 大脑扣带回皮层的三维重建及可视化[J]. 蚌埠医学院学报,2019,44(8):1001-1003. DOI:10.13898/j.cnki.issn.1000-2200.2019.08.006.
- [9] 李秀辉,王震寰,沈龙山,等. 成人大脑颞平面的三维重建及三维可视化[J]. 蚌埠医学院学报,2018,43(4):421-424. DOI:10.13898/j.cnki.issn.1000-2200.2018.04.001.
- [10] HENG Fang,XI Yang,TAICHI K,*et al.* Brainsurface reconstruction from mri images based on segmentation networks ap-

- plying signed distance maps[C]// IEEE International Symposium on Biomedical Imaging. Nice; IEEE Press, 2021; 1164-1168. DOI:10.1109/isbi48211.2021.9434070.
- [11] 马阿敏, 杨荣骞, 宁海, 等. 脑部 MRI 图像头皮三维提取及重建[J]. 计算机应用, 2013, 33(5): 1439-1442. DOI: 10.3724/SP.J.1087.2013.01439.
- [12] HU Bowen, LEI Baiying, SHEN Yanyan, *et al.* A point cloud generative model via tree-structured graph convolutions for 3D brain shape reconstruction[C]// Chinese Conference on Pattern Recognition and Computer Vision. Cham; Springer International Publishing, 2021; 263-274. DOI: 10.1007/978-3-030-88007-1\_22.
- [13] HUANG Zitian, YU Yikuan, XU Jiawen, *et al.* PF-Net: Point fractal network for 3D point cloud completion[C]// IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Seattle; IEEE Press, 2020; 7662-7670. DOI: 10.48550/arXiv.2003.00410.
- [14] MESCHEDER L, OECHSLE M, NIEMEYER M, *et al.* Occupancy networks: Learning 3D reconstruction in function space[C]// Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, Long Beach; IEEE Press, 2019; 4460-4470.
- [15] TANG Jiapeng, LEI Jiabao, XU Dan, *et al.* Signagnostic optimization of convolutional occupancy networks[C]// Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, Montreal; IEEE Press, 2021; 6504-6513.
- [16] 胡丝兰, 周明全, 税午阳, 等. 一种改进 Ball Pivoting 的散乱点云数据重建算法[J]. 系统仿真学报, 2015, 10: 2446-2452. DOI: 10.16182/j.cnki.joss.2015.10.033.
- [17] LUO Yimin, MI Zhenxing, TAO Wenbing. DeepDT: Learning geometry from delaunay triangulation for surface reconstruction[J]. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2021, 35(3): 2277-2285.
- [18] KAZHDAN M, HOPPE H. Screened poisson surface reconstruction[J]. Acm Transactions on Graphics, 2013, 32(3): 1-13. DOI: 10.1145/2487228.2487237.
- [19] 欧阳宁, 杨碧伟, 林乐平. 法向估计的屏蔽泊松算法三维点云重建[J]. 电视技术, 2017, 41(11): 237-242. DOI: 10.16280/j.videoe.2017.h11.045.
- [20] 郑力新, 蔡凯雄. 一种基于 U-Net 模型的脑颅内腔分割方法及装置: CN115601344A[P]. 2023-01-13.
- [21] ARIKAWA T. Spatial W measurement based on U-Net convolutional neural network in large wave flume[J]. Water, 2023, 15(4): 647-662. DOI: 10.3390/w15040647.
- [22] 李静, 陈桂芬, 丁小奇. 基于改进 Canny 算法的图像边缘检测方法研究[J]. 计算机仿真, 2021, 38(4): 371-375. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9348.2021.04.075.
- [23] 李皓冉, 梅天灿, 高智. 全局 ICP 与改进泊松相结合的三维人脸重建[J]. 测绘学报, 2023, 52(3): 454-463. DOI: 10.11947/j.AGCS.2023.20220128.
- [24] 刘侠, 刘欢, 王淼淼, 等. 改进 Marching Cubes 算法的椎骨 CT 图像三维重建与可视化[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2019, 24(6): 84-92. DOI: 10.15938/j.jhust.2019.06.013.
- [25] 鲁猛胜, 姚剑, 董赛云. 法向约束的点云数据泊松表面重建算法[J]. 测绘地理信息, 2022, 47(4): 51-55. DOI: 10.14188/j.2095-6045.2020124.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202308013



# 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<sup>1</sup>, 贾灏<sup>1</sup>, 张钟炼<sup>1</sup>, 罗继亮<sup>1,2</sup>

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 福建省电机控制与系统优化调度工程技术研究中心, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 首先,根据变压器的实物,采用 MATLAB/Simulink 软件搭建变压器的仿真模型;然后,选择通用串行总线(USB)采集卡作为采集设备,采用 Labview 软件设计出相应的采集程序;最后,在多种联合仿真技术中,选择仿真接口工具箱(SIT)作为最合适的联合仿真方法,并在联合仿真程序中加入报警程序。结果表明:该数字孪生平台具有准确性和可靠性,可运用于变压器匝间短路的检测。

**关键词:** 数字孪生; 数据采集; 联合仿真; 电力变压器; 匝间短路

**中图分类号:** TM 407 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2024)01-0086-12

## Visualization Analysis of Magnetic Field and Electrical Parameters of Power Transformer Considering Digital Twin

YE Zhijun<sup>1</sup>, JIA Hao<sup>1</sup>, ZHANG Zhonglian<sup>1</sup>, LUO Jiliang<sup>1,2</sup>

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Engineering Research Center of Motor Control and System Optimal Schedule, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** Firstly, according to the physical object of the transformer, using MATLAB/Simulink software to build a simulation model of transformer. Then, a universal serial bus (USB) acquisition card is selected as the acquisition device, and the corresponding collection program using Labview software is designed. Finally, the simulation interface toolkit (SIT) is selected as the most suitable co-simulation method in various joint simulation technologies, and the alarm program is added to the co-simulation program. The results show that the digital twin platform has accuracy and reliability, and can be applied to the detection of turn-to-turn short circuit of transformer.

**Keywords:** digital twin; data acquisition; co-simulation; power transformer; turn-to-turn short circuit

电力系统是所有工业系统里规模最巨大、结构最复杂的人造复合系统,是人类工程科学史上的辉煌成就之一<sup>[1]</sup>。变压器作为电力系统不可或缺的电力设备,其正常运行对电力系统的稳定性起着不可或缺的作用,当变压器发生故障时,与其相关的电力线路用电负载都将受到巨大的影响,可能引发安全事故,导致巨大的经济损失。因此,实时监测变压器的运行状况,并提前预测变压器事故对提高电力系统的稳定性起到重要的作用<sup>[2]</sup>。

国内外学者已对变压器运行状态检测展开了广泛而深入的研究<sup>[3-12]</sup>。这些变压器故障检测方法都

**收稿日期:** 2023-08-29

**通信作者:** 叶志军(1976-),男,副教授,博士,主要从事电磁场数值分析、大型发电机内部故障仿真及变压器饱和特性的研究。E-mail:459888566@qq.com。

**基金项目:** 福建省自然科学基金资助项目(2020J01063)

可以作为判断变压器工作状况的依据,但这些方法都是从单一角度进行故障检测,而变压器发生故障往往是多种故障结合在一起的结果。因此,为了将这些方法集成到一个平台系统,必须搭建一个能够反映实际变压器运行状况的孪生体。从变压器实际运行情况来看,约 60%~70%的变压器内部故障是由于绕组机械磨损或者匝间电压高于绝缘耐受水平造成绝缘损坏所致。目前,工程中针对变压器匝间短路的故障检测普遍采用差动保护方法,但当变压器发生轻微匝间短路时,短路匝的故障电流较小,差动保护采集到的绕组端电流变化特征不明显,对此类轻微、渐变的匝间短路故障往往不能及时灵敏地识别,保护拒动的情况时有发生。如果任由其发展,可能会引发更严重的层间短路及相间短路等故障,造成变压器的严重损坏<sup>[13]</sup>。因此,如何对变压器内部匝间短路,特别是轻微匝间短路故障进行有效、精确的判断及预测,进而对变压器进行精准的故障检修,这对变压器运行的可靠性及经济性意义重大。

数字孪生作为实现物理空间与虚拟空间交互融合的最佳途径,本质上是实物的物理仿真模型,具备接收来自现实实体的数据并实时不断更新的能力,从而与物理对象在全生命周期中保持一致<sup>[14-15]</sup>。因此,构建变压器的数字孪生,在虚拟环境中建立模型对于操作者监控变压器的运行状况大有裨益<sup>[16-17]</sup>。目前,学者对于数字孪生在电力系统中的应用展开了深入的研究。文献<sup>[16]</sup>提出数字孪生在核电厂主控室设计的应用。文献<sup>[18-19]</sup>提出数字孪生技术在电网中的实际应用和展望。文献<sup>[20]</sup>提出一种秒级响应电网在线分析软件平台。上述研究着重介绍了应用部分,但对于如何搭建一个数字孪生平台并没有较为详细的介绍。基于此,本文对采用数字孪生的电力变压器磁场与电气参数进行可视化分析。

## 1 数字孪生平台

### 1.1 数字孪生平台的定义

数字孪生平台是集合传感器技术、5G 传输技术、物联网技术、虚拟现实技术和机器学习等高新技术搭建的一个具有可视化、人机协同功能的自主优化计算平台<sup>[17]</sup>。操作者能够通过虚拟现实技术在办公室身临其境,并对实物进行远程操作。

电力系统数字孪生平台构建完成后,操作者若要对电力进行调度,只需通过数字孪生平台上显示的变电站数据便可进行决策,从而提高数字孪生智能辅助决策的能力<sup>[18]</sup>。

### 1.2 数字孪生平台的特点

数字孪生平台具有以下 3 个特点。1) 高准确性。虚拟环境从现实实物构成、运行形态、行为规则等多层次、多角度、多属性地对现实实物进行孪生模拟。2) 可扩展性。虚拟环境模型可随着虚拟环境的自我推演或现实实物的运行形态进行分解、集成、粘贴、修正和去除等操作。3) 交互性。虚拟环境模型与现实实物都有接口和规范定义,在不同虚拟环境模型之间、不同现实实物终端之间、虚拟环境模型与现实终端之间能够实现通信交互。

### 1.3 数字孪生的实现

数字孪生平台原理图,如图 1 所示。将 Labview 软件和 MATLAB/Simulink 软件进行联合编程,充分发挥各自的优点<sup>[20]</sup>,建立一个图形交互界面优良、计算能力强大的可视化电力变压器数字孪生平台,并将物理实体的电磁参数和电气参数变化过程通过软件仿真实时呈现。数字孪生的实现主要有以下 4 个步骤。

1) 构造能精确反映实物的仿真模型。仿真模型的精确度要足够高,以便通过采集设备传输数据给该模型时能够准确无误地表现出实物的实际情况。文中主要关注电气参数和磁场参数,故仿真模型主要据此建立。

2) 设计变压器参数采集程序。若没有精密度高的采集程序,仿真模型的准确性也会大打折扣,所以采集程序必须能够快速、准确地反映数据<sup>[18]</sup>。

3) 将采集程序和仿真模型进行数据通信。拥有精确的仿真模型和快速准确的采集程序固然重要,但

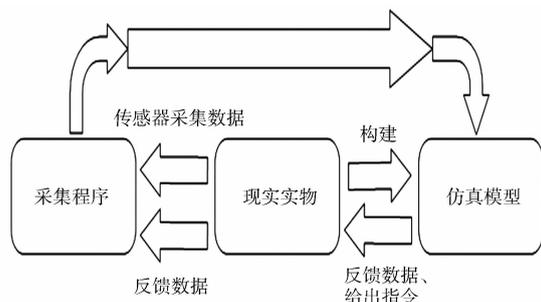


图 1 数字孪生平台原理图

Fig. 1 Schematic diagram of digital twin platform

令其实现数据互通,并保证互通的准确性和快速性也是重中之重。如果仿真模型和采集程序的性能都相当优异,但两者之间的通信却出现问题,那么实用性也将大为降低。因此,寻找最合适的通信方法是建立数字孪生平台的最后一步,也是重要的一步。

4) 将数字孪生平台应用于解决实际问题中。选择的案例为变压器匝间短路的检测,将变压器匝间短路相关的检测手段与数字孪生平台的实时检测量进行对比,以验证数字孪生平台检测变压器匝间短路的可靠性。

## 2 电力变压器数字孪生平台的建立

### 2.1 电力变压器模型

2.1.1 电力变压器的相关参数 选用单相变压器,高、低压绕组各6包,变压器铁芯由0.35 mm的硅钢片冲叠而成。

变压器参数,如表1所示。表1中: $P_r$ 为额定功率; $f_r$ 为额定频率; $U_{1,r}$ 为一次侧额定电压; $U_{2,r}$ 为二次侧额定电压; $I_{1,r}$ 为一次侧额定电流; $I_{2,r}$ 为二次侧额定电流; $\epsilon_s$ 为短路电压率; $\epsilon_n$ 为空载电流率; $N_1$ 为一次侧匝数; $N_2$ 为二次侧匝数。变压器外观,如图2所示。

表1 变压器参数

Tab. 1 Parameters of transformer

参数	有效值
$P_r/\text{kW}$	14
$f_r/\text{Hz}$	50
$U_{1,r}/\text{V}$	104
$U_{2,r}/\text{V}$	240
$I_{1,r}/\text{A}$	134.6
$I_{2,r}/\text{A}$	58.3
$\epsilon_s/\%$	6
$\epsilon_n/\%$	4
$N_1$	42
$N_2$	97



(a) 正面



(b) 反面

图2 变压器外观

Fig. 2 Appearance of transformer

2.1.2 变压器磁场的计算 电磁学基本公式为

$$\Phi = -\frac{1}{N} \int u dt, \quad (1)$$

$$\Phi = \int B ds, \quad (2)$$

$$B = \mu H. \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $\Phi$ 为磁通; $N$ 为变压器绕组匝数; $u$ 为瞬时电压; $t$ 为时间; $B$ 为磁感应强度; $s$ 为与磁场方向垂直的平面的面积; $H$ 为磁场强度; $\mu$ 为磁导率。由式(1)可得变压器一、二次侧的磁通 $\Phi_1, \Phi_2$ ,因损耗的存在, $\Phi_1 \neq \Phi_2$ ;由式(2)可得磁感应强度 $B = f(t, r)$ ,其中, $r$ 为某点离铁芯中心的距离;由式(3)可得磁场强度 $H$ 。

在实际中,变压器可能会工作在饱和状态,此时,电压和电流都会产生相应的畸变,由原来的正弦波变成尖顶波。为了能够真实反映变压器的运行状况,变压器需采用饱和变压器模型,通过Flux软件对该变压器进行建模,硅钢片型号为35H250。

硅钢片磁化曲线,如图3所示。

2.1.3 电力变压器模型的建立 采用MATLAB/Simulink软件对变压器模型进行仿真。

变压器模型,如图4所示。变压器模型包含了电气参数

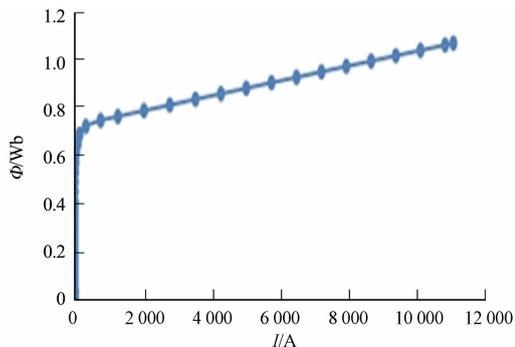


图3 硅钢片磁化曲线

Fig. 3 Magnetization curve of silicon steel sheet

及磁场参数的计算; 磁场计算模型根据式(1)进行模型搭建; 积分部分通过 Simulink 软件的积分模块实现; 仿真接口工具箱(SIT)探针将所接模块的数据通过 SIT 工具包传送给采集程序; 均方根值(RMS)模块用于求解波形有效值。

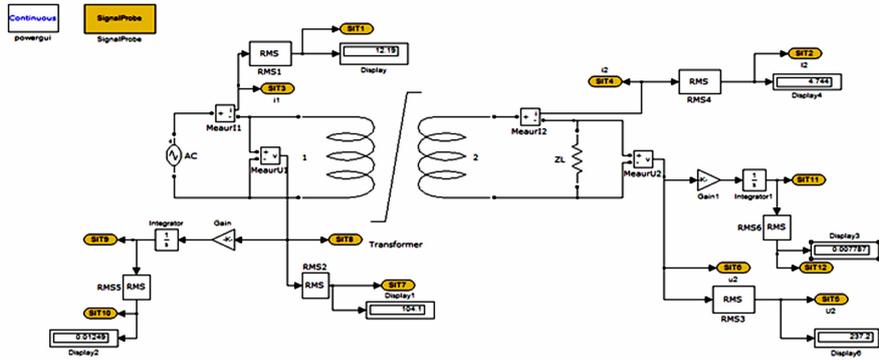


图 4 变压器模型

Fig. 4 Transformer model

变压器模型带载时, 令电压峰值为  $104\sqrt{2}$ , 负载带  $4\ \Omega$  电阻, 仿真时间设置为 1 s。带载情况波形图, 如图 5 所示。

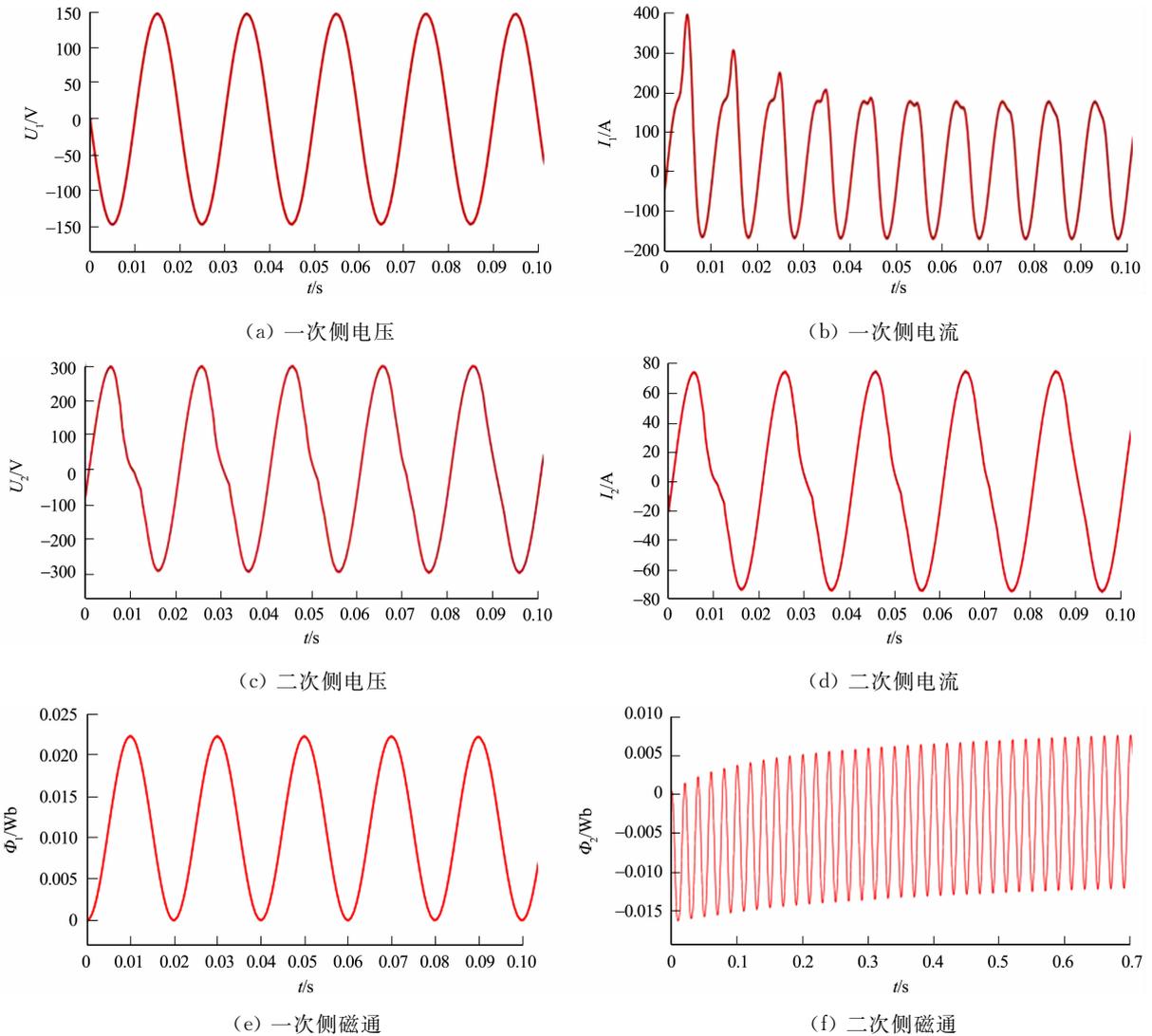


图 5 带载情况波形图

Fig. 5 Waveform diagrams of load condition

由图5可知:当电源刚接通时,会产生巨大的冲击电流,二次侧电压也会在刚开始的几个周期发生震荡;当负载带4Ω电阻,变压器未饱和,磁通为正弦波形时,所对应的电流也为正弦波形;图5(e),(f)因横坐标尺度不同导致波形不同。

## 2.2 采集程序

2.2.1 采集卡的工作原理 USB采集卡通过输入端口接收外部信号,再通过数模转换器将连续模拟信号分割为离散的数字量,采集卡内部处理器对数字信号进行采样、滤波等处理,处理后的信号通过USB接口传输到计算机,计算机可以使用相应软件对数据进行分析处理。采集卡的工作原理,如图6所示。

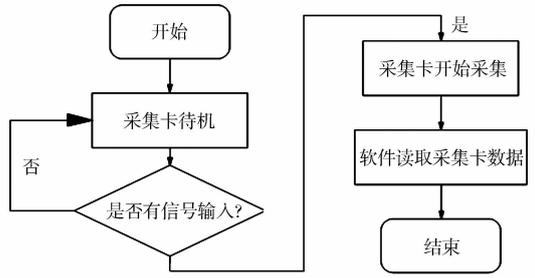


图6 采集卡的工作原理

Fig. 6 Working principle of acquisition card

2.2.2 采集程序的设计 Labview软件具有丰富的输入控件和显示控件,通过相关控件可以建立满足项目要求的系统界面。因此,采用Labview软件建立数字孪生平台的显示面板。采集程序的设计包括前面板设计和后面板设计。

采用Labview软件设置前面板时,程序需要输出变压器一、二次侧的电压、电流和磁通、与功率相关的参数,以及二次侧的负载大小。前面板界面,如图7所示。后面板为前面板的元件之间的逻辑关系。后面板界面,如图8所示。后面板界面中最主要的部分为顺序结构的第2帧,在第2帧中,通过调用动态库usb\_card\_V50.dll将采集卡读取的8个模拟接口数据输出,再根据前面板参数之间的计算关系设计计算程序。

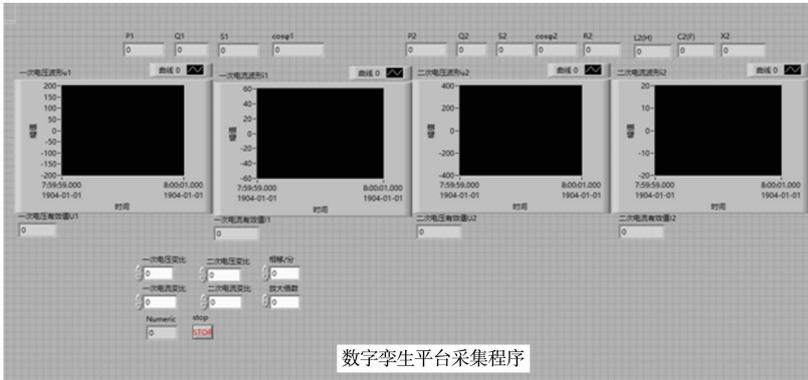


图7 前面板界面

Fig. 7 Front panel interface

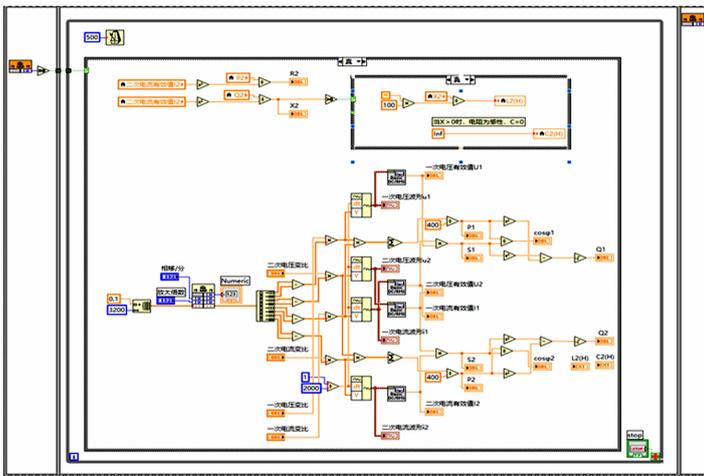


图8 后面板界面

Fig. 8 Rear panel interface

## 2.3 数据通信

2.3.1 数据通信的实现方法及选用 根据目前的联合编程方法,数据通信主要有以下3种方法:1)基于MATLAB Script的联合仿真方法;2)基于模拟接口工具箱(MIT)的联合仿真方法;3)基于SIT的联合仿

真方法。

MATLAB Script 具有通信简单、容易实现的优点,但是当调用 Simulink 软件运行时,响应速度较慢,所以该方法适合程序简单且不需要使用到 Simulink 的 MATLAB 程序。MIT 调用动态链接库(DLL),运行速度较快,而且能够脱离 MATLAB 单独运行,但缺点是在配置动态库接口的时候比较麻烦,且当 Simulink 构建的模型需要调试时,MIT 节点需要全部重新配置,过程较为繁琐。此外,由于 Simulink 中的饱和变压器模型存在代数环(输出影响输入),但在生成 C 语言代码时不允许存在代数环,因此,不符合要求。SIT 在 Labview 中具有 SIT 配置管理,在生成程序的时候更加简易,且程序会随着模型的变化而动态改变,调试较为方便,但是 SIT 只适用于较低版本的仿真软件,不能运用于高版本的仿真软件。

综上所述,考虑到程序需要符合易调试性和使用到 Simulink,故通过 SIT 实现数据通信是 3 种方法中的最佳解决方案。采用 Labview 的 SIT 配置功能生成的联合仿真程序,如图 9 所示。

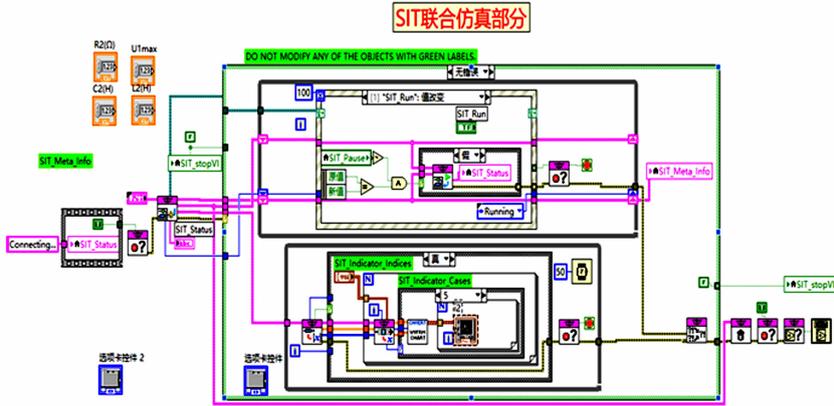


图 9 联合仿真程序

Fig. 9 Co-simulation program

### 2.3.2 联合仿真模型 确定了通过 SIT 实现数据通信的方法后,建立联合仿真模型。

1) 采集程序和 Simulink 仿真程序联合仿真。完成 Labview 采集程序 SIT 配置后,对前面板的显示控件位置进行相应调整,以达到更好的视觉效果。联合仿真程序前面板,如图 10 所示。



(a) 仿真部分

(b) 采集部分

图 10 联合仿真程序前面板

Fig. 10 Front panel of co-simulation program

仿真部分读取采集模块一次侧电压的有效值,改变仿真模型中交流电源的峰值,以达到动态仿真的目的;采集部分最上面一栏用于输入电压、电流的互感器变比。输入电压默认相角为 0,若要改变初相角,只需改变输入控件的数值。图 10 中的两个报警信号灯分别可以实现当电气量超过额定值时报警和当仿真值与实际值相差过大时报警的功能。

2) 报警系统设计。整体报警程序,如图 11 所示。整体报警程序包含 2 个部分。

第一,超过额定值的报警程序(报警程序 1)。当一、二次侧电压和电流超过额定值时,对变压器的运行具有危害性。因此,当变压器的一、二次侧电压和电流超过额定值时,会进行报警,报警程序 1 的流程图,如图 12 所示。

第二,仿真值与实际值相差过大的报警程序(报警程序 2)。仿真值与实际值相差过大往往是因为变压

器内部发生了故障,因此,需要设置一个报警程序,当仿真值与实际值相差过大时进行报警,并自动更新负载。报警程序2的流程图,如图13所示。图13中: $R$ 为电阻; $L$ 为电感; $C$ 为电容。

当实际值与仿真值相差超过设定值时,将会发出一个信号,使仿真报警灯亮起,并弹出警告对话框,同时给一个信号触发更新仿真模型的顺序结构。首先,暂停 Simulink 模型,再终止 Simulink 模型,之后进入条件结构,当电抗  $X$  大于 0,则为感性负载,当  $X$  小于 0,则为容性负载。计算出相应的电感、电容后,通过局部变量将其输送给 Simulink 的负载,从而使负载更新至最新状态。

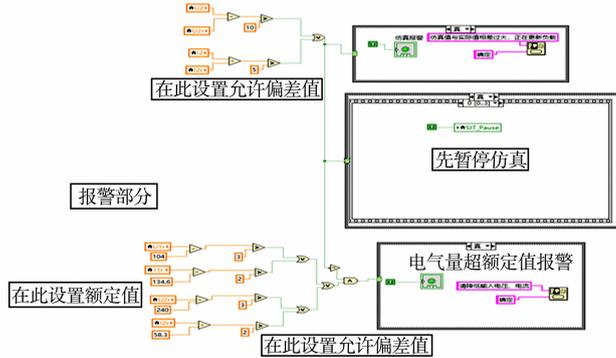


图 11 整体报警程序

Fig. 11 Overall alarm program

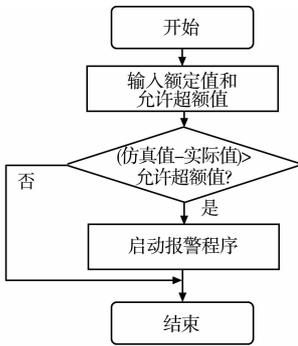
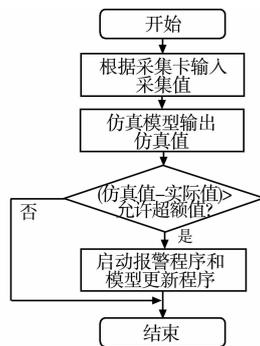
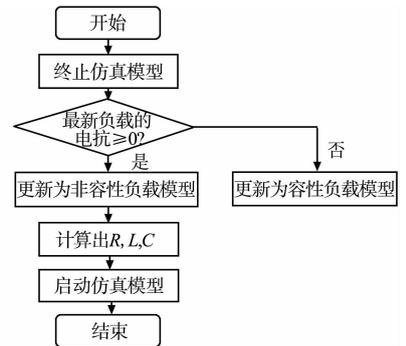


图 12 报警程序 1 的流程图

Fig. 12 Flowchart of alarm program 1



(a) 报警部分



(b) 负载更新部分

图 13 报警程序 2 的流程图

Fig. 13 Flowchart of alarm program 2

## 3 实验结果与分析

### 3.1 实验室环境测量

现场实验设施,如图14所示。

#### 3.1.1 测量步骤 测量步骤有以下4点。

1) 连接相应电气设备,将采集卡通过 USB 数据线和计算机进行连接,若采集卡有一个红灯常亮,表示已经连接。

2) 开启联合仿真程序的启动按钮,将程序的电压和电流互感器变比设置为 1,此时,若另一个红灯闪烁,表明采集卡正在采集数据。由于采集卡存在悬空值,有轻微的干扰,即使没有打开电源,采集程序仍存在较小的电气量。

3) 分别测量互感器的变比,测量多组数据取平均值,将所测最新的电压、电流互感器变比输入程序,再进行测试验证。

4) 对变压器进行电气参数、报警系统、磁场参数的验证。

3.1.2 注意事项 不能同时运行两个测量程序,否则会导致采集卡动态库产生错误,造成采集程序逻辑错误而无法使用。



图 14 现场实验设施

Fig. 14 On-site experimental facilities

### 3.2 程序验证

3.2.1 电气参数验证 1) 空载情况。变压器的空载验证需将变压器高压侧空载,一次侧通交流正弦电压,一次侧电压从 0 依次升高至一次侧额定电压,记录电气参数的实际值、采集值和仿真值。空载情况的电气测量数据,如表 2 所示。表 2 中: $U, I$  分别为电压和电流,下标  $r, c, s$  分别表示实际值、采集值和仿真值,下标 1, 2 分别表示一次侧、二次侧,下文符号含义与此相同。空载情况的电气误差,如表 3 所示。表 3 中: $\delta_{I_1}, \delta_{U_1}, \delta_{I_2}$  分别为空载情况下  $I_1, U_1, I_2$  实际值与仿真值的误差。

表 2 空载情况的电气测量数据

Tab. 2 Electrical measurement data of no-load condition

$U_{1,r}/V$	$I_{1,r}/A$	$U_{2,r}/V$	$U_{1,c}/V$	$I_{1,c}/A$	$U_{2,c}/V$	$I_{2,c}/A$	$U_{1,s}/V$	$I_{1,s}/A$	$U_{2,s}/V$
19.46	0.58	44.91	19.39	0.59	44.71	0.021 1	19.39	0.56	44.88
41.09	1.12	94.61	41.13	1.13	95.03	0.020 8	41.13	1.11	94.55
60.59	1.73	139.51	60.68	1.74	139.75	0.021 1	60.68	1.74	139.50
82.40	2.89	190.22	82.61	2.89	190.55	0.020 7	82.61	2.83	189.90
100.11	4.75	231.21	100.03	4.70	231.56	0.022 6	100.03	4.74	229.80
103.81	5.31	239.71	104.19	5.30	239.36	0.022 4	104.19	5.33	239.40

由表 2, 3 可知:实际值与仿真值的误差在 3.50% 之内,满足了工程要求,因此仿真值能够真实地反映实际值。

表 3 空载情况的电气误差

Tab. 3 Electrical errors of no-load condition (%)

$\delta_{I_1}$	$\delta_{U_1}$	$\delta_{I_2}$
-3.19	-0.07	-
-1.34	-0.05	-
0.64	0	-
-2.18	-0.16	-
-0.15	-0.61	-
0.32	-0.13	-

2) 带载情况。带载情况的电气参数实际值、采集值和仿真值,分别如表 4~6 所示。表 4~6 中: $P_2, Q_2, S_2$  分别为二次侧有功功率、二次侧无功功率和二次侧视在功率。由于受到多种因素影响,实际值、采集值会产生误差。带载情况的电气误差 1(实际值与采集值的误差),如表 7 所示。表 7 中: $\gamma_{U_2}$  为带载情况下  $U_2$  实际值与采集值的误差,其他符号含义与此类似。由表 7 可知:实际值与采集值误差在 2.00% 之内,满足工程要求,故采集值能够真实地反映实际值。

表 4 带载情况的电气参数实际值

Tab. 4 Actual values of electrical parameters of load condition

$R_{2,r}/\Omega$	$U_{2,r}/V$	$I_{2,r}/A$	$U_{1,r}/V$	$I_{1,r}/A$	$P_{2,r}/W$	$Q_{2,r}/var$	$S_{2,r}/V \cdot A$
525.54	242.80	0.46	104.30	5.92	111.40	11.58	112.00
253.47	240.80	0.95	104.35	6.35	225.10	26.89	226.70
164.86	240.70	1.46	104.50	7.04	344.30	14.38	344.60
95.10	238.70	2.51	103.70	8.68	594.80	15.43	595.00
60.43	239.30	3.96	104.00	11.50	942.70	30.71	943.20
49.16	239.90	4.88	104.30	13.48	1 162.20	83.55	1 165.20

表 5 带载情况的电气参数采集值

Tab. 5 Acquisition values of electrical parameters of load condition

$R_{2,c}/\Omega$	$U_{2,c}/V$	$I_{2,c}/A$	$U_{1,c}/V$	$I_{1,c}/A$	$P_{2,c}/W$	$Q_{2,c}/var$	$S_{2,c}/V \cdot A$
524.28	240.38	0.46	104.14	5.82	109.97	22.51	112.25
253.30	240.94	0.94	104.27	6.31	223.36	36.17	226.27
166.98	239.81	1.43	104.43	6.97	342.21	48.14	345.58
95.67	238.85	2.48	103.67	8.54	589.85	73.15	594.37
60.49	239.50	3.94	104.06	11.46	938.50	91.80	942.98
49.53	240.11	4.84	104.34	13.35	1 159.00	143.42	1 167.80

表6 带载情况的电气参数仿真值

Tab. 6 Simulation values of electrical parameters of load condition

$U_{2,s}/V$	$I_{2,s}/A$	$U_{1,s}/V$	$I_{1,s}/A$
238.70	0.45	104.14	5.66
239.23	0.92	104.43	6.28
238.40	1.43	104.37	6.79
237.18	2.50	103.74	8.41
237.88	3.93	104.08	11.18
238.11	4.80	104.23	13.26

表7 带载情况的电气误差 1

Tab. 7 Electrical errors 1 of load condition

(%)

$\gamma_{U_2}$	$\gamma_{I_2}$	$\gamma_{U_1}$	$\gamma_{I_1}$	$\gamma_{P_2}$	$\gamma_{S_2}$	$\gamma_{R_2}$
-1.00	0.27	-0.16	-1.63	-1.28	0.22	-0.24
0.06	-1.15	-0.07	-0.63	-0.77	-0.19	-0.07
-0.37	-1.98	-0.07	-1.07	-0.61	0.28	1.28
0.06	-1.16	-0.03	-1.57	-0.83	-0.11	0.60
0.08	-0.55	0.06	-0.36	-0.45	-0.02	0.10
0.09	-0.83	0.03	-0.96	-0.26	0.24	0.75

带载情况的电气误差 2(实际值与仿真值的误差),如表 8 所示。表 8 中: $\eta_{U_2}$  为带载情况下  $U_2$  实际值与仿真值的误差,其他符号含义与此类似。由表 8 可知:带载情况下  $U_2, I_2$  实际值与仿真值的误差相对较小,  $I_1$  实际值与仿真值的误差虽然最高(4.42%),但还在工程允许的误差范围之内,故仿真模型能够真实地反映实物变压器的电气参数。

表8 带载情况的电气误差 2

Tab. 8 Electrical errors 2

of load condition

(%)

$\eta_{U_2}$	$\eta_{I_2}$	$\eta_{I_1}$
1.69	1.69	4.42
0.65	3.47	1.08
0.96	2.26	3.61
0.64	0.52	3.09
0.59	0.66	2.76
0.75	1.60	1.60

3.2.2 报警系统验证 报警系统要实现的功能主要有以下 2 点。

1) 额定参数过高报警。当额定参数过高时,提醒工作人员降低工作电压,并通过采集卡的输出端口给出一个关闭脉冲信号从而保护电路,此时,由于一次侧电压超过额定值 104 V,产生报警信号。报警程序 1 的实验室环境测试,如图 15 所示。

2) 当仿真值与实际值相差过大报警。这类报警往往是变压器内部发生了故障,当报警信号产生时,先暂时停止仿真程序,再重新加载负载,直到仿真值与实际值相差在误差范围之内时,仿真程序才继续进行。报警程序 2 的实验室环境测试,如图 16 所示。

3.2.3 磁场参数验证 由于受到测试设备的限制,若进行磁通验证需要利用电磁感应定律间接验证磁场。电磁感应公式为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

式(4)中: $e$  为感应电动势。

若将一匝线圈( $N=1$ )套在电力变压器的铁芯上,此时,该线圈两端的电压绝对值等于磁通的微分。因此,只需将仿真模型计算得到的磁通  $\Phi$  经微分模块计算后,把得到的数值同一匝线圈两侧的电压进行对比,若两者相等,则间接证明了该仿真模型磁场计算的准确性。

空载情况和带载情况的磁场测量数据,分别如表 9,10 所示;而空载情况和带载情况的磁场误差,则分



图 15 报警程序 1 的实验室环境测试

Fig. 15 Laboratory environment testing of alarm program 1

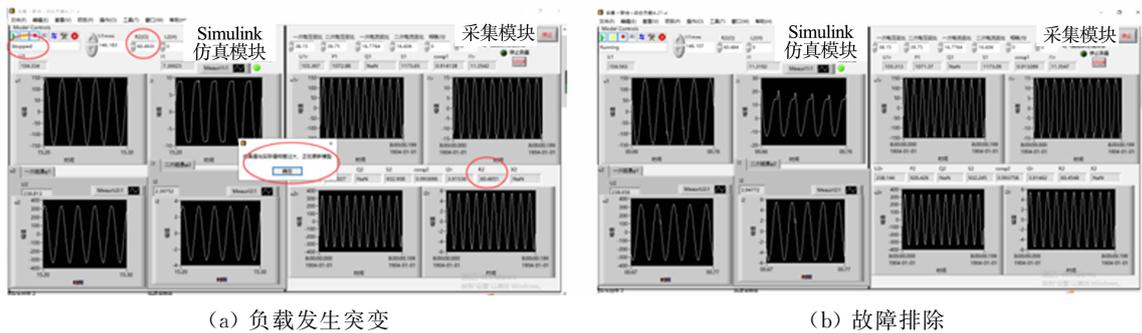


图 16 报警程序 2 的实验室环境测试

Fig. 16 Laboratory environment testing of alarm program 2

别如表 11,12 所示。表 11,12 中:  $\xi_{e_1}, \xi_{e_2}$  分别表示空载情况下  $e_1, e_2$  实际值与仿真值的误差;  $\zeta_{e_1}, \zeta_{e_2}$  分别表示带载情况下  $e_1, e_2$  实际值与仿真值的误差。

表 9 空载情况的磁场测量数据

Tab. 9 Magnetic field measurement data of no-load condition

$U_1/V$	$I_1/A$	$U_2/V$	$e_r/V$	$e_{1,s}/V$	$e_{2,s}/V$	$\Phi_{1,s}/Wb$	$\Phi_{2,s}/Wb$
12.566	0.432	28.990	0.272	0.272	0.273	0.096	0.005
32.121	0.905	74.211	0.762	0.768	0.766	0.100	0.002
56.665	1.606	130.246	1.343	1.313	1.308	0.101	0.004
79.630	2.699	183.850	1.883	1.873	1.871	0.101	0.006
92.642	3.808	213.993	2.191	2.194	2.196	0.100	0.007
104.477	5.414	240.289	2.468	2.474	2.468	0.009	0.008

表 10 带载情况的磁场测量数据

Tab. 10 Magnetic field measurement data of load condition

$P_2/W$	$R_2/\Omega$	$U_1/V$	$I_1/A$	$U_2/V$	$I_2/A$	$e_r/V$	$e_{1,s}/V$	$e_{2,s}/V$	$\Phi_{1,s}/Wb$	$\Phi_{2,s}/Wb$
106.955	522.956	104.891	5.745	242.008	0.452	2.480	2.466	2.432	0.011	0.008
547.691	102.184	103.609	8.142	238.989	2.313	2.453	2.493	2.457	0.011	0.008
889.688	63.977	104.627	11.019	240.621	3.748	2.477	2.474	2.479	0.012	0.008
1 693.370	33.001	102.924	18.383	236.799	7.164	2.427	2.454	2.413	0.022	0.008
2 261.560	24.931	103.859	23.783	238.619	9.525	2.448	2.476	2.420	0.033	0.008

表 11 空载情况的磁场误差

Tab. 11 Magnetic field errors of no-load condition

$e_r/V$	$\xi_{e_1}/\%$	$\xi_{e_2}/\%$
0.272	0.36	0.41
0.762	0.88	0.59
1.343	-2.25	-2.60
1.883	-0.48	-0.62
2.191	0.11	0.22
2.468	0.20	-0.06

表 12 带载情况的磁场误差

Tab. 12 Magnetic field errors of load condition

$e_r/V$	$\zeta_{e_1}/\%$	$\zeta_{e_2}/\%$
2.480	-0.58	-1.95
2.453	1.63	0.20
2.477	-0.12	0.08
2.427	1.11	-0.59
2.448	1.16	-1.13

由表 11,12 可知:无论一、二次侧为空载情况还是带载情况,感应电动势最大误差均在 3.00% 之内,满足工程要求,表明仿真值能够真实地反映实际值。

对磁场参数进行可视化验证,在空载情况下观察磁通的波形,结果如图 17 所示。由图 17 可知:当电流比较小时,变压器未饱和,磁通波形和电流一样,均为正弦波。

3.2.4 误差分析 仿真值与实际值产生误差的原因主要有以下 3 点。

1) 采集程序误差。由于采集程序本身存在一定的

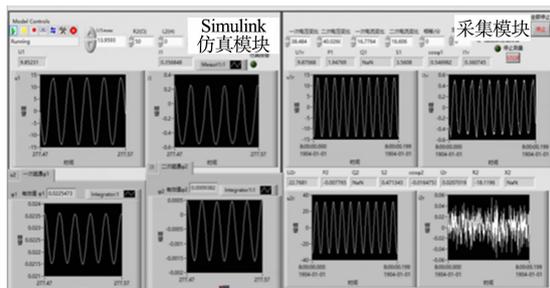


图 17 磁场参数可视化

Fig. 17 Visualization of magnetic field parameters

误差,因此,采集程序的误差会造成仿真程序的输入误差。

2) MATLAB 解法器误差。由于 Simulink 软件在进行计算时选用的解法器不同,则适用的条件不同,因此,产生的误差也不相同。

3) 磁化曲线存在误差。磁化曲线是通过 Flux 软件在理想的情况下生成的,依赖于变压器模型的建立的准确性,而磁化曲线会影响变压器的励磁电抗,因此,磁化曲线的误差会导致励磁电抗的误差。

## 4 数字孪生平台在变压器匝间短路的实际应用

### 4.1 变压器匝间短路判断依据

当变压器不同部位发生匝间短路时,各部位的电感参数、电流和磁场都会发生巨大的变化<sup>[13]</sup>。根据文献<sup>[13]</sup>,当变压器发生不同匝数的一次侧短路时,绕组电感参数会发生非线性改变,一次侧电流会剧烈增加,且短路绕组处磁力线走向发生横向偏转。

### 4.2 数字孪生平台的运用

根据节 4.1 的变压器匝间短路判断依据,配合搭建的数字孪生平台,可实现对电力变压器匝间短路的故障响应,下一步的研究方向是提高响应速度。在搭建的数字孪生平台中,可以在工程误差范围内计算出电气参数和电磁参数。通过实验室环境检测验证该平台的有效性,这对解决电力变压器的匝间短路具有实际意义。

除了提高响应速度外,通过数字孪生平台的磁场和电流的变化辨别短路及短路位置也是下一步的研究方向之一,可行性分析如下。

1) 通过磁场变化辨别匝间短路及短路位置。当变压器正常运行时,高、低压绕组产生的漏磁场强度较为均匀。当一次侧绕组发生匝间短路时,短路绕组内环流及一次侧绕组产生的安匝数(线圈匝数与线圈通过的电流的乘积)均较大,此时,一次侧的漏磁场强度比正常运行时更大,由于一次侧和短路绕组内环流产生不平衡安匝数,进而产生横向漏磁,短路位置附近漏磁场不平衡,且短路匝数越多,故障点周围漏磁场分布越不均匀。

2) 通过电流变化辨别匝间短路及短路位置。由于二次侧为功率需求侧,所以一次侧发生不同位置的匝间短路后,二次侧电流的变化趋势虽与一次侧相同,但电流的变化幅度非常小,基本在额定值附近发生较小的波动,并且理论计算值一直略小于仿真值,不同短路位置下二次侧电流的理论计算值与仿真值误差恰好与一次侧变化规律相反。由此可见,短路位置越靠近绕组首末两端,匝间短路电流越小。如果灵敏度校验时能够检测出位于两端的故障,那么就一定能检测出其他部位的故障。

通过数字孪生平台检测到故障电流、磁场,即可判断发生变压器匝间短路的位置。传统的变压器故障检测设备往往是通过传感器采集响应的物理量并设置报警装置进行事故的预防,而数字孪生平台将采集到的数据输入建立的模型,进行模拟仿真,能够推演出变压器模型后续设备的运行状况,在一定程度上可起到预知变压器事故的作用。

## 5 结论

电力变压器数字孪生平台在虚拟空间中创造出相应的孪生体,数字孪生体能够准确地反映实物的电气参数和电磁参数,当电力变压器发生事故的时候,数字孪生体会模拟事故情况并报警,从而使工作人员在第一时间了解设备的故障情况,获取解决方案。

数字孪生平台若要与实物更加相似,需从仿真模型、采集程序、数据通信和可视化效果这 4 个方面进行不断地优化。在仿真模型中加入其他的检测方法,如气体、温度和放电等其他手段;使用精准度更高的采集设备可以有效地减小误差;数据通信程序和联合仿真程序优化后应尽量转化成 C 语言,使程序运行速度大大提高,同时,加入与人工智能相关的功能;通过 Labview 软件建立可视化效果更佳的变压器虚拟 2D 或 3D 模型,通过颜色差异展示相关参数的分布情况。

数字孪生平台可用于检测变压器的匝间短路,相较于传统的检测手段,该平台具有预测事故的潜力。今后,运用该数字孪生平台的全生命周期特点,再结合人工智能和虚拟现实(VR)技术,工作人员即可在办

公室进行沉浸式操作和检修,最终实现智能电网。

## 参考文献:

- [1] 贺兴,艾芊,朱天怡,等.数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J].电网技术,2020,44(6):2009-2019. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2019.1983.
- [2] FERREIRA E F, BARROS I D. Faults monitoring system in the electric power grid of medium voltage[J]. ScienceDirect, 2018,130:696-703. DOI:10.1016/j.procs.2018.04.123.
- [3] 刘健,陈鲁鹏,张志华.基于本地量测信息的配电变压器静态参数估计[J].电力自动化设备,2021,41(2):71-76. DOI:10.16081/j.epae.202101002.
- [4] 梁永亮,李可军,赵建国,等.变压器在线监测装置配置优先级评估模型[J].电网技术,2016,40(8):2562-2569. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2016.08.045.
- [5] 陆晓,徐鹏,冯树海,等.考虑多时段量测数据随机误差的变压器正序参数辨识与评估方法[J].电网技术,2019,43(3):856-863. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2018.1994.
- [6] 刘洁苇,吕运强,李琳,等.高频变压器磁场和温度场的瞬态特性分析[J].高电压技术,2019,45(4):1191-1200. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20181206015.
- [7] 刘航,王有元,陈伟根,等.基于无监督概念漂移识别和动态图嵌入的变压器故障检测方法[J].中国电机工程学报,2020,40(13):4358-4371. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.191964.
- [8] 严英杰,盛戈啤,刘亚东,等.基于滑动窗口和聚类算法的变压器状态异常检测[J].高电压技术,2016,42(12):4020-4025. DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20161128041.
- [9] 李妍,周洪伟,沈小伟,等.电力变压器绕组电气参数对绕组变形的全局灵敏度分析[J].电力系统保护与控制,2018,46(7):31-37.
- [10] DE FARIA H J, SPIR C J G, MEJIA O J L. A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015,46:201-209. DOI:10.1016/j.rser.2015.02.052.
- [11] AZIRANI M, ARIANNIK M, WERLE P. Optimal frequency selection for detection of partial discharges in power transformers using the UHF measurement technique[J]. Measurement, 2021,172(9):108895.
- [12] BIGDELI M, VAKILIAN M, RAHIMPOUR E. A new method for detection and evaluation of winding mechanical faults in transformer through transfer function measurements[J]. Advances in Electrical and Computer Engineering, 2011,11(2):23-30. DOI:10.4316/AECE.2011.02004.
- [13] 叶志军,苟炬龙,蔡金星,等.变压器一次侧匝间短路参数与特征分析[J].电力系统自动化,2019,43(21):213-220.
- [14] 王鹏,杨妹,祝建成,等.面向数字孪生的动态数据驱动建模与仿真方法[J].系统工程与电子技术,2020,42(12):2779-2786. DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2020.12.14.
- [15] JIN Tao, SUN Zhongda, LI Long, *et al.* Triboelectric nanogenerator sensors for soft robotics aiming at digital twin applications[J]. Nature Communication, 2020,11:5381. DOI:10.1038/s41467-020-19059-3.
- [16] 刘明明,高楠,刘全东,等.虚拟现实技术在核电厂主控制室设计中的应用及探索[J].上海交通大学学报,2019,53(增刊1):29-32,44. DOI:10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.S1.006.
- [17] 丁华,杨亮亮,杨兆建,等.数字孪生与深度学习融合驱动的采煤机健康状态预测[J].中国机械工程,2020,31(7):815-823.
- [18] 白浩,周长城,袁智勇,等.基于数字孪生的数字电网展望和思考[J].南方电网技术,2020,14(8):18-24,40. DOI:10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2020.08.003.
- [19] ZHOU M, YAN Jianfeng, FENG Donghao. Digital twin framework and its application to power grid online analysis[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019,5(3):391-398. DOI:10.17775/CSEEJPES.2018.01460.
- [20] 周二专,冯东豪,严剑峰,等.秒级响应电网在线分析软件平台[J].电网技术,2020,44(9):3474-3480. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2020.0083.

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴逢铁)

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202306027



# 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

(华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 采用三角标量辅助变量(TSAV)方法,构造求解耦合非线性 Schrödinger-Boussinesq 方程初边值问题的高效数值格式。基于方程非线性势能的三角函数形式,提出求解方程的 TSAV 格式;对方程在时间和空间上分别采用二阶 Crank-Nicolson 格式和傅里叶谱方法进行离散,并证明时间半离散格式的修正能量守恒律。最后,通过数值算例对文中格式进行验证。结果表明:文中格式具有有效性,修正能量具有守恒性。

**关键词:** 耦合非线性 Schrödinger-Boussinesq 方程; 三角标量辅助变量方法; 修正能量; 守恒律

**中图分类号:** O 241.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2024)01-0098-10

## Trigonometric Scalar Auxiliary Variable Method for Coupled Nonlinear Schrödinger-Boussinesq Equation

GUO Jiaojiao, ZHUANG Qingqu

(School of Mathematical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** Based on the trigonometric scalar auxiliary variable (TSAV) method, an efficient numerical scheme is constructed to solve the initial boundary value problem of the coupled nonlinear Schrödinger-Boussinesq equation. Firstly, based on the trigonometric function form of the nonlinear potential energy equation, the TSAV scheme of the considered equation is proposed. Then, the equation is discretized in temporal and spatial by using the second-order Crank-Nicolson scheme and Fourier spectral method respectively, and the modified energy conservation law of time semi-discrete scheme is proved. Finally, the proposed scheme is verified by numerical examples. The results show that the proposed scheme is effective and the modified energy is conserved.

**Keywords:** coupled nonlinear Schrödinger-Boussinesq equation; trigonometric scalar auxiliary variable method; modified energy; conservation law

Schrödinger 方程和 Boussinesq 方程是应用数学和物理学中的重要方程,前人对这两类方程展开了广泛的研究<sup>[1-2]</sup>。耦合非线性 Schrödinger-Boussinesq(CNSB)方程是一类用于描述激光和等离子体领域各种物理过程的重要的波动方程<sup>[3]</sup>。文献[4-5]对方程解析解的存在性、全局光滑解及适定性进行了研究。由于直接求解 CNSB 方程的困难较大,所以数值求解 CNSB 方程得到了广泛的关注。例如, Yang 等<sup>[6]</sup>设计了求解 CNSB 方程的 BDF2-Galerkin 有限元格式。Tian 等<sup>[7]</sup>设计了基于 Galerkin 有限元框架的时间两网格格式。Oruc<sup>[8]</sup>提出一种用于求解 CNSB 方程的径向基函数结合有限差分的无网

**收稿日期:** 2023-06-29

**通信作者:** 庄清渠(1980-),男,副教授,博士,主要从事微分方程数值解法的研究。E-mail:qqzhuang@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(11771083);福建省自然科学基金资助项目(2021J01306)

格逼近方法。Cai 等<sup>[9]</sup>针对 CNSB 方程构造了一种保持质量和能量守恒的快速求解器。文献[10-11]对一维和二维 CNSB 方程构造一类保能量和质量守恒的有限差分方法。关于求解 CNSB 方程的一系列线性和非线性的紧致有限差分格式及其稳定性、收敛性等理论分析可参考文献[12-13]。二次 B 样条有限元方法<sup>[14]</sup>、基于时间分裂的傅里叶谱方法<sup>[15]</sup>及标量辅助变量(SAV)方法<sup>[16]</sup>等均可用于高效求解 CNSB 方程。

SAV 方法首先由 Shen 等<sup>[17]</sup>提出,之后出现了基于 SAV 方法的各类扩展形式,如拉格朗日乘数法、指数标量辅助变量方法等,这些方法因计算的高效性和简便性受到了广泛的应用<sup>[18]</sup>。Yang 等<sup>[19]</sup>提出一种基于非线性势能泛函的三角函数形式,即三角标量辅助变量(TSAV)方法,并验证该方法可以成功应用于一大类梯度流模型。该方法继承了传统 SAV 方法所有优点的同时,还弥补了其不足,它对于任意非线性势能泛函,均可通过添加一个大于 1 的常数  $c_0$ ,使新引入的标量辅助变量具有常正性。将标量辅助变量作用于方程的非线性部分,可以使方程完全解耦,简便计算。文献[20-21]基于正弦函数型标量辅助变量,分别构建了四阶非线性波动方程和广义分数阶 Schrödinger 方程的高阶 TSAV 保能格式。目前,针对 CNSB 方程的高阶 TSAV 保能格式的研究仍较少。基于此,本文基于余弦函数型标量辅助变量,提出一种求解耦合非线性 Schrödinger-Boussinesq 方程的高效能量稳定方法。

## 1 问题与 TSAV 格式

考虑带周期边界条件的 CNSB 方程的数值求解格式,即

$$\left. \begin{aligned} i\epsilon u_t + \gamma \Delta u - \xi uv &= 0, & \mathbf{x} \in \Omega, & t \in (0, T], \\ v_t - \Delta v + \alpha \Delta^2 v - \Delta(\theta f(v) + \omega |u|^2) &= 0, & \mathbf{x} \in \Omega, & t \in (0, T]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中:  $i^2 = -1$ ;  $\Omega = [a, b]^d$ ,  $d = 1, 2$ ;  $\epsilon$  表示电子数与离子数质量比的参数,  $\epsilon > 0$ ;  $\gamma, \xi, \alpha, \theta, \omega$  均为正实数;  $f(v)$  为一个满足  $f(0) = 0$  的充分光滑函数;  $u(\mathbf{x}, t)$  为朗缪尔振荡电场的复值函数;  $v(\mathbf{x}, t)$  为描述低频密度摄动的实值函数。

式(1)的初始条件为  $u(\mathbf{x}, 0) = u_0(\mathbf{x})$ ,  $v(\mathbf{x}, 0) = v_0(\mathbf{x})$ ,  $v_t(\mathbf{x}, 0) = v_1(\mathbf{x})$ ,  $\mathbf{x} \in \Omega$ 。

式(1)满足电荷(Q)守恒律和能量(E)守恒律<sup>[15]</sup>,有

$$\begin{aligned} Q(t) &= \int_{\Omega} |u(\mathbf{x}, t)|^2 dx = \int_{\Omega} |u(\mathbf{x}, 0)|^2 dx = Q(0), \\ E(t) &= \int_{\Omega} \left( \frac{1}{2} |\nabla \phi|^2 + \frac{1}{2} v^2 + \frac{\alpha}{2} |\nabla v|^2 + \frac{\omega \gamma}{\xi} |\nabla u|^2 + \theta F(v) + \omega |u|^2 v \right) dx = E(0). \end{aligned}$$

式中:新变量  $\phi$  满足  $v_t = \Delta \phi$ ;  $F(v) = \int_0^v f(s) ds$ 。

将式(1)中的第 1 个方程与  $u$  作内积,取虚部,可证明电荷守恒律。将式(1)中的第 1 个方程与  $-u_t$  作内积,取实部,再将式(1)中的第 2 个方程与  $-v_t$  作内积,结合上述内积结果和  $v_t = \Delta \phi$ ,可证明能量守恒律。

采用 TSAV 方法对式(1)进行求解,首先,引入  $v_t = \Delta \phi$ ,将式(1)降阶为关于时间一阶导的等价形式,有

$$\left. \begin{aligned} i\epsilon u_t &= -\gamma \Delta u + \xi uv, & \mathbf{x} \in \Omega, & t \in (0, T], \\ \phi_t &= v - \alpha \Delta v + \theta f(v) + \omega |u|^2, & \mathbf{x} \in \Omega, & t \in (0, T], \\ v_t &= \Delta \phi, & \mathbf{x} \in \Omega, & t \in (0, T]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

此时,式(2)的初始条件和边界条件可分别表示为

$$\begin{aligned} u(\mathbf{x}, 0) &= u_0(\mathbf{x}), & v(\mathbf{x}, 0) &= v_0(\mathbf{x}), & \phi(\mathbf{x}, 0) &= \phi_0(\mathbf{x}), & \mathbf{x} \in \Omega, \\ u(a, t) &= u(b, t), & v(a, t) &= v(b, t), & \phi(a, t) &= \phi(b, t), & t \in (0, T]. \end{aligned}$$

其次,对于任意网格函数  $u_1, u_2 \in L^2(\Omega)$ ,定义内积  $(\cdot, \cdot)$  和范数  $\|\cdot\|$  的表达式为

$$(u_1, u_2) = \int_{\Omega} u_1 u_2 dx, \quad \|u_1\| = \sqrt{(u_1, u_1)}.$$

然后,基于方程的非线性势能引入三角标量辅助变量,有

$$R = \cos(E_1(t)) + c_0 = \cos\left(\int_{\Omega} \theta F(v) + \omega |u|^2 v dx\right) + c_0.$$

式中:  $c_0$  是一个恒大于 1 的常数, 则有

$$\begin{aligned} \frac{dR}{dt} &= -\sin(E_1(t)) \left( \int_{\Omega} (\theta f(v) + \omega |u|^2) \cdot v_t + 2\omega \operatorname{Re}(uv \cdot \bar{u}_t) dx \right), \\ -\frac{dR}{\sin(E_1(t)) dt} &= \int_{\Omega} (\theta f(v) + \omega |u|^2) \cdot v_t + 2\omega \operatorname{Re}(uv \cdot \bar{u}_t) dx. \end{aligned}$$

再根据  $\cos^2 x + \sin^2 x = 1$ ,  $\frac{d}{dx} \arccos x = -\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ , 继续化简可得

$$\frac{d}{dt} \arccos(R - c_0) = \int_{\Omega} (\theta f(v) + \omega |u|^2) \cdot v_t + 2\omega \operatorname{Re}(uv \cdot \bar{u}_t) dx.$$

基于此, 可构建式(2)的 TSAV 格式, 有

$$\left. \begin{aligned} i\epsilon u_t &= -\gamma \Delta u + \xi R \cdot H_1, & \mathbf{x} \in \Omega, & t \in (0, T], \\ \phi_t &= v - \alpha \Delta v + R \cdot H_2, & \mathbf{x} \in \Omega, & t \in (0, T], \\ v_t &= \Delta \phi, & \mathbf{x} \in \Omega, & t \in (0, T], \\ \frac{d}{dt} \arccos(R - c_0) &= R \int_{\Omega} 2\omega \operatorname{Re}(H_1 \cdot \bar{u}_t) + H_2 \cdot v_t dx, & \mathbf{x} \in \Omega, & t \in (0, T]. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中有

$$\begin{aligned} H_1(u, v) &= \frac{uw}{\cos(E_1(t)) + c_0} = \frac{uw}{\cos\left(\int_{\Omega} (\theta F(v) + \omega |u|^2) v dx\right) + c_0}, \\ H_2(u, v) &= \frac{\theta f(v) + \omega |u|^2}{\cos(E_1(t)) + c_0} = \frac{\theta f(v) + \omega |u|^2}{\cos\left(\int_{\Omega} (\theta F(v) + \omega |u|^2) v dx\right) + c_0}. \end{aligned}$$

**定理 1** 式(3)满足修正能量守恒律, 有

$$\frac{d\tilde{E}}{dt} = 0. \quad (4)$$

式(4)中:  $\tilde{E} = \frac{1}{2} \|\nabla \phi\|^2 + \frac{1}{2} \|v\|^2 + \frac{\alpha}{2} \|\nabla v\|^2 + \frac{\omega \gamma}{\xi} \|\nabla u\|^2 + \arccos(R - c_0)$ .

证明: 将式(3)中第 1 个方程与  $\frac{2\omega}{\xi} u_t$  作内积, 并取实部, 可得

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\omega \gamma}{\xi} \|\nabla u\|^2 \right) + R \int_{\Omega} 2\omega \operatorname{Re}(H_1 \cdot \bar{u}_t) dx = 0.$$

将式(3)中第 2, 3 个方程分别与  $v_t, -\phi_t$  作内积并相加, 可得

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} \|\nabla \phi\|^2 + \frac{1}{2} \|v\|^2 + \frac{\alpha}{2} \|\nabla v\|^2 \right) + R \int_{\Omega} (H_2 \cdot v_t) dx = 0.$$

将上述两个内积结果相加, 并结合式(3)中最后一个方程, 可得

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} \|\nabla \phi\|^2 + \frac{1}{2} \|v\|^2 + \frac{\alpha}{2} \|\nabla v\|^2 + \frac{\omega \gamma}{\xi} \|\nabla u\|^2 + \arccos(R - c_0) \right) = 0,$$

即可证得式(4)。证明完毕。

## 2 时间半离散格式

为了给出 CNSB 方程的高效能量稳定数值求解格式, 在时间方向上采用二阶 Crank-Nicolson 格式逼近, 在空间方向上采用傅里叶谱方法逼近。在周期边界条件下考虑一维空间区域  $\Omega = [a, b]$  和时间区域  $(0, T]$ 。给定正整数  $M, N$ , 空间步长和时间步长可分别表示为  $h = \frac{b-a}{M}, \tau = \frac{T}{N}$ 。空间节点  $x_j = a + jh, j = 0, 1, 2, \dots, M-1$ , 时间节点  $t_n = n\tau, n = 0, 1, 2, \dots, N$ 。若记节点  $(x_j, t_n)$  上任意网格函数  $g$  的解析解为  $g(x_j, t_n)$ , 则它的数值解相应地记为  $g_j^n$ 。

对于  $n = 1, 2, \dots, N-1$ , 为了求解  $u^{n+1}, v^{n+1}, \phi^{n+1}, R^{n+1}$ , 通过二阶 Crank-Nicolson 格式构建 CNSB 方程

的时间半离散格式, 有

$$\left. \begin{aligned} \frac{i\varepsilon}{\tau}(u^{n+1} - u^n) &= -\frac{\gamma}{2}\Delta(u^{n+1} + u^n) + \xi\tilde{R}^{n+\frac{1}{2}} \cdot \tilde{H}_1^{n+\frac{1}{2}}, \\ \frac{1}{\tau}(\phi^{n+1} - \phi^n) &= \frac{1}{2}(v^{n+1} + v^n) - \frac{\alpha}{2}\Delta(v^{n+1} + v^n) + \tilde{R}^{n+\frac{1}{2}} \cdot \tilde{H}_2^{n+\frac{1}{2}}, \\ \frac{1}{\tau}(v^{n+1} - v^n) &= \frac{1}{2}\Delta(\phi^{n+1} + \phi^n), \\ \arccos(R^{n+1} - c_0) - \arccos(R^n - c_0) &= \tilde{R}^{n+\frac{1}{2}} \int_{\Omega} 2\omega \operatorname{Re}(\tilde{H}_1^{n+\frac{1}{2}} \cdot \overline{u^{n+1} - u^n}) + \\ &\quad \tilde{H}_2^{n+\frac{1}{2}} \cdot (v^{n+1} - v^n) \, dx. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式(5)中:  $\tilde{R}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{3}{2}R^n - \frac{1}{2}R^{n-1}$ ;  $\tilde{H}_1^{n+\frac{1}{2}} = H_1(\tilde{u}^{n+\frac{1}{2}}, \tilde{v}^{n+\frac{1}{2}})$ ;  $\tilde{H}_2^{n+\frac{1}{2}} = H_2(\tilde{u}^{n+\frac{1}{2}}, \tilde{v}^{n+\frac{1}{2}})$ ;  $\tilde{u}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{3}{2}u^n - \frac{1}{2}u^{n-1}$ ,  $\tilde{v}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{3}{2}v^n - \frac{1}{2}v^{n-1}$ .

此外, 式(5)的实现需要第 1 层的值  $u^1, v^1, \phi^1, R^1$  和初始条件。初始条件是已知的, 则当  $n=0$  时, 第 1 层的值可通过隐式 Crank-Nicolson 格式求解, 有

$$\left. \begin{aligned} \frac{i\varepsilon}{\tau}(u^1 - u^0) &= -\frac{\gamma}{2}\Delta(u^1 + u^0) + \xi R^{\frac{1}{2}} \cdot H_1^{\frac{1}{2}}, \\ \frac{1}{\tau}(\phi^1 - \phi^0) &= \frac{1}{2}(v^1 + v^0) - \frac{\alpha}{2}\Delta(v^1 + v^0) + R^{\frac{1}{2}} \cdot H_2^{\frac{1}{2}}, \\ \frac{1}{\tau}(v^1 - v^0) &= \frac{1}{2}\Delta(\phi^1 + \phi^0), \\ \arccos(R^1 - c_0) - \arccos(R^0 - c_0) &= R^{\frac{1}{2}} \int_{\Omega} 2\omega \operatorname{Re}(H_1^{\frac{1}{2}} \cdot \overline{u^1 - u^0}) + H_2^{\frac{1}{2}} \cdot (v^1 - v^0) \, dx. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)中:  $R^{\frac{1}{2}} = \frac{R^1 + R^0}{2}$ ;  $H_1^{\frac{1}{2}} = H_1\left(\frac{u^1 + u^0}{2}, \frac{v^1 + v^0}{2}\right)$ ;  $H_2^{\frac{1}{2}} = H_2\left(\frac{u^1 + u^0}{2}, \frac{v^1 + v^0}{2}\right)$ 。

**定理 2** 时间半离散格式(5), (6)满足修正能量守恒律, 有

$$\tilde{E}^{n+1} = \tilde{E}^n, \quad n=0, 1, 2, \dots, N-1.$$

式中:  $\tilde{E}^n$  为修正能量, 定义

$$\tilde{E}^n = \frac{1}{2} \|\nabla \phi^n\|^2 + \frac{1}{2} \|v^n\|^2 + \frac{\alpha}{2} \|\nabla v^n\|^2 + \frac{\omega\gamma}{\xi} \|\nabla u^n\|^2 + \arccos(R^n - c_0).$$

证明: 对于任意  $n \geq 1$ , 将式(5)中的第 1 个方程两端乘以  $\frac{2\omega}{\xi} \overline{(u^{n+1} - u^n)}$ , 并在  $\Omega$  上积分, 然后取实部, 由此可得

$$\frac{\omega\gamma}{\xi} \|\nabla u^{n+1}\|^2 - \frac{\omega\gamma}{\xi} \|\nabla u^n\|^2 + \tilde{R}^{n+\frac{1}{2}} \int_{\Omega} 2\omega \operatorname{Re}(\tilde{H}_1^{n+\frac{1}{2}} \cdot \overline{u^{n+1} - u^n}) \, dx = 0.$$

在式(5)第 2, 3 个方程的两端分别乘以  $(v^{n+1} - v^n)$ ,  $-(\phi^{n+1} - \phi^n)$ , 然后, 在  $\Omega$  上积分, 再将结果相加, 整理可得

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(\|v^{n+1}\|^2 - \|v^n\|^2) + \frac{\alpha}{2}(\|\nabla v^{n+1}\|^2 - \|\nabla v^n\|^2) + \frac{1}{2}(\|\nabla \phi^{n+1}\|^2 - \|\nabla \phi^n\|^2) + \\ \tilde{R}^{n+\frac{1}{2}} \int_{\Omega} \tilde{H}_2^{n+\frac{1}{2}} \cdot (v^{n+1} - v^n) \, dx = 0. \end{aligned}$$

将以上两个等式相加, 并利用式(5)中最后一个方程, 可得

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \|v^{n+1}\|^2 + \frac{\alpha}{2} \|\nabla v^{n+1}\|^2 + \frac{1}{2} \|\nabla \phi^{n+1}\|^2 + \frac{\omega\gamma}{\xi} \|\nabla u^{n+1}\|^2 + \arccos(R^{n+1} - c_0) = \\ \frac{1}{2} \|v^n\|^2 + \frac{\alpha}{2} \|\nabla v^n\|^2 + \frac{1}{2} \|\nabla \phi^n\|^2 + \frac{\omega\gamma}{\xi} \|\nabla u^n\|^2 + \arccos(R^n - c_0). \end{aligned}$$

由此可证得  $\tilde{E}^{n+1} = \tilde{E}^n, n=1, 2, \dots, N-1$ 。利用式(6)类似可证明  $\tilde{E}^1 = \tilde{E}^0$ 。证明完毕。

下面考虑式(5),(6)的求解。首先,考虑将式(5)的前3个方程分别改写为

$$\frac{i\varepsilon}{\tau}u^{n+1} + \frac{\gamma}{2}\Delta u^{n+1} = b_1, \quad (7)$$

$$\frac{1}{\tau}\phi^{n+1} - \frac{1}{2}v^{n+1} + \frac{\alpha}{2}\Delta v^{n+1} = b_2, \quad (8)$$

$$\frac{1}{\tau}v^{n+1} - \frac{1}{2}\Delta\phi^{n+1} = b_3. \quad (9)$$

式(7)~(9)中:  $b_1 = \frac{i\varepsilon}{\tau}u^n - \frac{\gamma}{2}\Delta u^n + \xi\tilde{R}^{n+\frac{1}{2}} \cdot \tilde{H}_1^{n+\frac{1}{2}}$ ;  $b_2 = \frac{1}{\tau}\phi^n + \frac{1}{2}v^n - \frac{\alpha}{2}\Delta v^n + \tilde{R}^{n+\frac{1}{2}} \cdot \tilde{H}_2^{n+\frac{1}{2}}$ ;  $b_3 = \frac{1}{\tau}v^n + \frac{1}{2}\Delta\phi^n$ .

不难看出式(7)~(9)是完全解耦的。由于拉普拉斯算子  $\Delta$  的特征值为非正实数,由式(7)可知,求解  $u^{n+1}$  的系数矩阵  $(\frac{i\varepsilon}{\tau} + \frac{\gamma}{2}\Delta)$  的特征值不为 0,所以  $u^{n+1}$  是可解的。

再将拉普拉斯算子  $\Delta$  和  $\frac{2}{\tau}$  分别作用于式(8),(9),联立两式可得

$$\frac{2}{\tau^2}v^{n+1} - \frac{1}{2}\Delta v^{n+1} + \frac{\alpha}{2}\Delta^2 v^{n+1} = \Delta b_2 + \frac{2}{\tau}b_3. \quad (10)$$

由式(10)可知:求解  $v^{n+1}$  的系数矩阵  $(\frac{2}{\tau^2} - \frac{1}{2}\Delta + \frac{\alpha}{2}\Delta^2)$  的特征值恒为正实数,所以  $v^{n+1}$  是可解的。同理,  $\phi^{n+1}$  也是可解的,有

$$\phi^{n+1} = \tau(b_2 + \frac{1}{2}v^{n+1} - \frac{\alpha}{2}\Delta v^{n+1}). \quad (11)$$

最后,将求得的  $u^{n+1}, v^{n+1}$  代入式(5)中最后一个方程,可得

$$R^{n+1} = \cos(\Gamma) + c_0. \quad (12)$$

式(12)中:  $\Gamma = \arccos(R^n - c_0) + \tilde{R}^{n+\frac{1}{2}} \int_{\Omega} 2\omega \operatorname{Re}(\tilde{H}_1^{n+\frac{1}{2}} \cdot \overline{u^{n+1} - u^n}) + \tilde{H}_2^{n+\frac{1}{2}} \cdot (v^{n+1} - v^n) dx$ .

值得注意的是,余弦函数的定义域为全体实数,且通过计算可知  $\Gamma$  的值恒为实数,所以  $R^{n+1}$  是始终可解的。此外,初始值  $u^1, v^1, \phi^1, R^1$  可通过式(6)采用预估校正法进行类似的求解。简言之,TSAV 格式(5),(6)可以通过以下4个步骤快速求解:

- 1) 通过式(6)解得第1层的值  $u^1, v^1, \phi^1, R^1$ ;
- 2) 计算  $b_1, b_2, b_3$ ;
- 3) 依次从式(7),(10),(11)求解  $u^{n+1}, v^{n+1}, \phi^{n+1}$ ;
- 4) 由式(12)解得  $R^{n+1}$ 。

### 3 数值算例

为了方便求解,对所有数值实验均采用快速傅里叶变换(FFT)和傅里叶逆变换(IFFT)进行空间离散,以验证文中格式在时间方向上具有二阶精度,在空间方向上具有谱精度,有效保持修正能量  $\tilde{E}$  的守恒性,并模拟 CNSB 方程二维孤立波的演化行为。在此之前,先定义  $e_j^n(g) = g_j^n - g(x_j, t_n)$ ,则对应的  $L^\infty$  误差和  $L^2$  误差可分别表示为

$$\operatorname{Err}_\infty(g) = \max_{1 \leq j \leq M} |e_j^n(g)|, \quad \operatorname{Err}_2(g) = h \sqrt{\sum_{j=1}^M (e_j^n(g))^2}.$$

式中:任意网格函数  $g$  可分别表示  $u, v, \phi$ 。

$L^\infty$  误差和  $L^2$  误差对应的收敛阶 Rate 的计算公式分别为

$$\operatorname{Rate}_\infty = \log_2 \left( \operatorname{Err}_\infty(\tau) / \operatorname{Err}_\infty\left(\frac{\tau}{2}\right) \right), \quad \operatorname{Rate}_2 = \log_2 \left( \operatorname{Err}_2(\tau) / \operatorname{Err}_2\left(\frac{\tau}{2}\right) \right).$$

同时,分别记电荷误差  $e_Q^n$ 、能量误差  $e_E^n$  和修正能量误差  $e_{\tilde{E}}^n$  分别为

$$e_Q^n = |Q^n - Q^0|, \quad e_E^n = |E^n - E^0|, \quad e_{\tilde{E}}^n = |\tilde{E}^n - \tilde{E}^0|.$$

**算例 1** 在算例 1 中, 选取  $\epsilon=1, \gamma=\xi=\theta=1, \alpha=\frac{2}{3}, \omega=-\frac{1}{2}, f(v)=\sigma v^2$ , 此时 CNSB 方程(1)具有孤立波解<sup>[7]</sup>, 即

$$\left. \begin{aligned} u(x, t) &= \pm \frac{\delta \kappa}{\xi} \sqrt{\frac{\gamma \sigma - \alpha \xi}{\gamma \omega}} \operatorname{sech}(\mu \zeta) \tanh(\mu \zeta) \exp\left(i\left(\frac{W}{2\gamma}x + \delta t\right)\right), \\ v(x, t) &= -\frac{\delta \kappa}{\xi} \operatorname{sech}^2(\mu \zeta), \\ \phi(x, t) &= \frac{12\kappa W}{\mu \xi} \left(\frac{b-x}{b-a} - \frac{1}{1+\exp(2\mu \zeta)}\right). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(13)中:  $\sigma=\frac{1}{9}; W=\sqrt{\frac{22}{15}}; \delta=\frac{1}{3}; \kappa=\delta+\frac{W^2}{4\gamma}; \mu=\sqrt{\frac{\kappa}{\gamma}}; \zeta=x-Wt$ .

当  $t=0$  时, 式(13)可作为 CNSB 方程的初始条件, 取常数  $c_0=2.0$ .

检验文中格式的时间精度和空间精度。选择计算区域  $\Omega=[-20, 20], T=1$ 。固定空间剖分  $M=512$ 。不同时间步长下  $u, v, \phi$  的时间  $L^\infty$  误差及收敛阶, 时间  $L^2$  误差及收敛阶, 分别如表 1, 2 所示。表 1, 2 中:  $\text{Rate}_{\infty, u}, \text{Rate}_{\infty, v}, \text{Rate}_{\infty, \phi}$  分别为  $\text{Err}_\infty(u), \text{Err}_\infty(v), \text{Err}_\infty(\phi)$  的收敛阶;  $\text{Rate}_{2, u}, \text{Rate}_{2, v}, \text{Rate}_{2, \phi}$  分别为  $\text{Err}_2(u), \text{Err}_2(v), \text{Err}_2(\phi)$  的收敛阶。由表 1, 2 可知: 文中格式在时间方向上具有二阶精度。

表 1 时间  $L^\infty$  误差及收敛阶

Tab. 1  $L^\infty$  errors and convergence orders of time

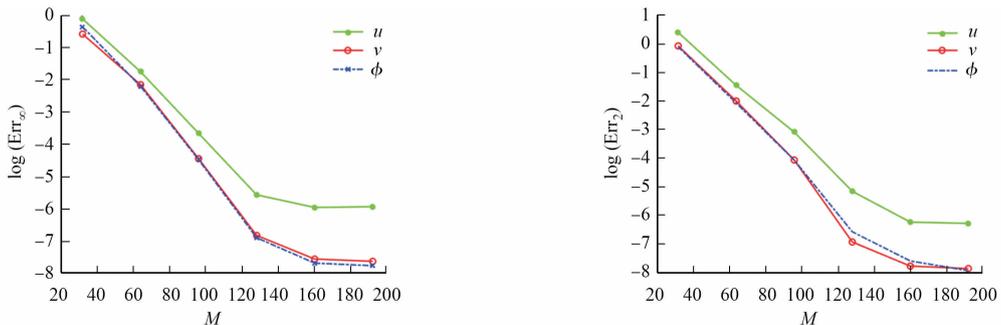
$\tau$	$\text{Err}_\infty(u)$	$\text{Rate}_{\infty, u}$	$\text{Err}_\infty(v)$	$\text{Rate}_{\infty, v}$	$\text{Err}_\infty(\phi)$	$\text{Rate}_{\infty, \phi}$
0.100 00	0.084 8	—	0.022 9	—	0.018 3	—
0.050 00	0.020 1	2.076 9	0.005 9	1.956 6	0.004 2	2.123 4
0.025 00	0.004 9	2.036 3	0.001 5	1.975 8	$9.931 6 \times 10^{-4}$	2.080 3
0.012 50	0.001 2	2.029 7	$3.602 4 \times 10^{-4}$	2.057 9	$2.416 5 \times 10^{-4}$	2.039 1
0.006 25	$3.061 2 \times 10^{-4}$	1.970 9	$8.955 8 \times 10^{-5}$	2.008 1	$5.960 2 \times 10^{-5}$	2.019 5

表 2 时间  $L^2$  误差及收敛阶

Tab. 2  $L^2$  errors and convergence orders of time

$\tau$	$\text{Err}_2(u)$	$\text{Rate}_{2, u}$	$\text{Err}_2(v)$	$\text{Rate}_{2, v}$	$\text{Err}_2(\phi)$	$\text{Rate}_{2, \phi}$
0.100 00	0.038 7	—	0.008 6	—	0.009 1	—
0.050 00	0.009 2	2.072 6	0.002 1	2.033 9	0.001 9	2.259 9
0.025 00	0.002 3	2.000 0	$5.204 5 \times 10^{-4}$	2.012 6	$4.491 9 \times 10^{-4}$	2.080 6
0.012 50	$5.613 6 \times 10^{-4}$	2.034 6	$1.282 0 \times 10^{-4}$	2.021 4	$1.094 8 \times 10^{-4}$	2.036 7
0.006 25	$1.403 5 \times 10^{-4}$	1.999 9	$3.181 9 \times 10^{-5}$	2.010 4	$2.710 3 \times 10^{-5}$	2.014 1

固定时间步长  $\tau=0.000 1, u, v, \phi$  在不同空间剖分下的空间  $L^\infty$  误差和  $L^2$  误差, 分别如图 1 所示。由图 1 可知: 文中格式在空间方向上呈现指数收敛, 具有谱精度。



(a)  $L^\infty$  误差

(b)  $L^2$  误差

图 1 空间  $L^\infty$  误差和  $L^2$  误差 ( $\tau=0.000 1$ )

Fig. 1 Spatial  $L^\infty$  errors and  $L^2$  errors ( $\tau=0.000 1$ )

选取计算区域  $\Omega=[-20,140]$ ,  $T=100$ , 固定空间剖分  $M=512$ , 时间步长  $\tau=0.01$ 。  $|u|, v, \phi$  的精确解与数值解, 如图 2 所示。

由图 2 可知: 不同时刻下的数值解与精确解都能很好地吻合, 故文中提出的 TSAV 格式是稳定的。

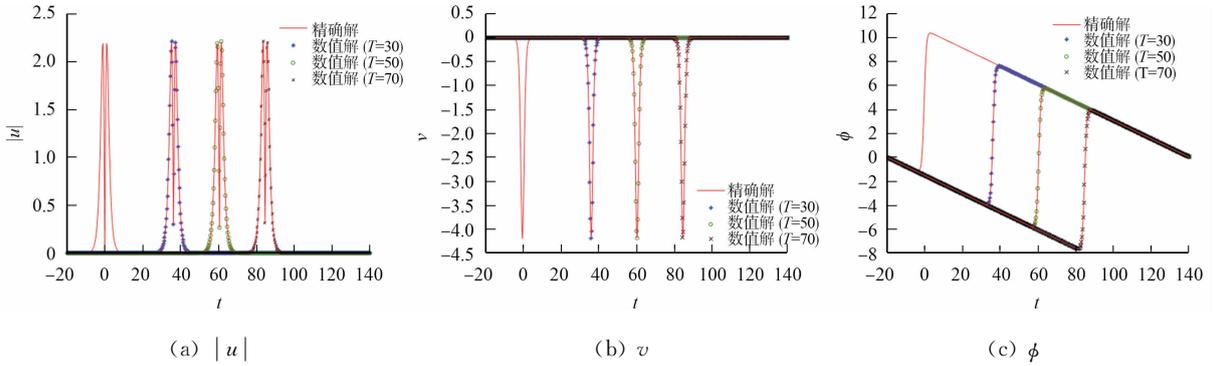
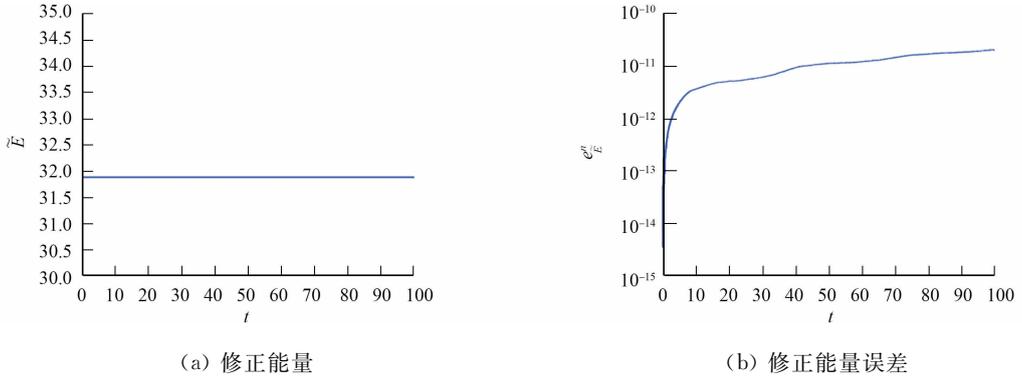


图 2  $|u|, v, \phi$  的精确解与数值解

Fig. 2 Exact solutions and numerical solutions of  $|u|, v$  and  $\phi$

验证 CNSB 方程的守恒律, 基于上述计算区域和网格设计, 修正能量  $\tilde{E}$  和修正能量误差  $(e_E^n)$  随着时间的变化情况, 如图 3 所示。

由图 3 可知: TSAV 格式能很好地保持修正能量守恒, 这与节 2 的能量守恒定理一致。



(a) 修正能量

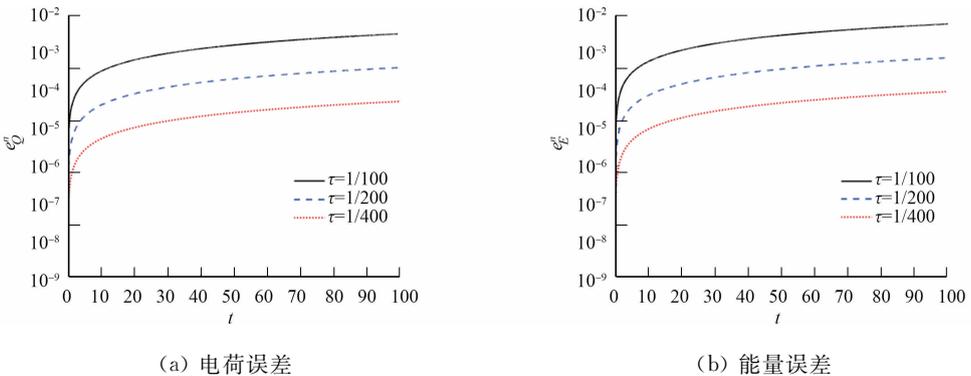
(b) 修正能量误差

图 3 修正能量和修正能量误差随着时间的变化情况

Fig. 3 Change situations of modified energies and modified energy errors with time

在不同时间步长  $\tau=1/100, 1/200, 1/400$  下, 电荷误差  $(e_Q^n)$  和能量误差  $(e_E^n)$  随着时间的变化情况, 如图 4 所示。

由图 4 可知: 电荷误差和能量误差均随着时间步长的减小而减小。



(a) 电荷误差

(b) 能量误差

图 4 电荷误差和能量误差随着时间的变化情况

Fig. 4 Change situations of electric errors and energy errors with time

**算例 2** 考虑 CNSB 方程二维孤立波的演化行为, 选择初始条件, 有<sup>[7,15]</sup>

$$\left. \begin{aligned} u_0(x) &= \frac{2}{\exp(x^2 + 2y^2) + \exp(-(x^2 + 2y^2))} \exp\left(\frac{5i}{\cosh(\sqrt{4x^2 + y^2})}\right), \\ v_0(x) &= \exp(-(x^2 + y^2)), \\ \phi_0(x) &= -\frac{1}{2} \exp(-(x^2 + y^2)). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

计算区域取  $\Omega = [-20, 20]^2$ , 固定空间剖分和时间步长分别为  $M = 512, \tau = 0.01$ , 取常数  $c_0 = 2.0$ 。

**情况 1**  $\varepsilon = 1, \gamma = \alpha = \theta = 1, \xi = \omega = \frac{1}{10}, f(v) = \sin v$ 。

**情况 2**  $\varepsilon = 1, \gamma = \theta = 1, \alpha = 0, \xi = \omega = \frac{1}{10}, f(v) = 0$ 。

CNSB 方程在情况 1 下的数值解  $|u|, v, \phi$  不同时间的曲面图, 如图 5 所示。

由图 5 可知:  $|u|$  的数值解随着时间的推移, 由一个波峰变成多个波峰;  $v, \phi$  的数值解逐渐呈现下陷趋势, 且逐渐产生少量余波。

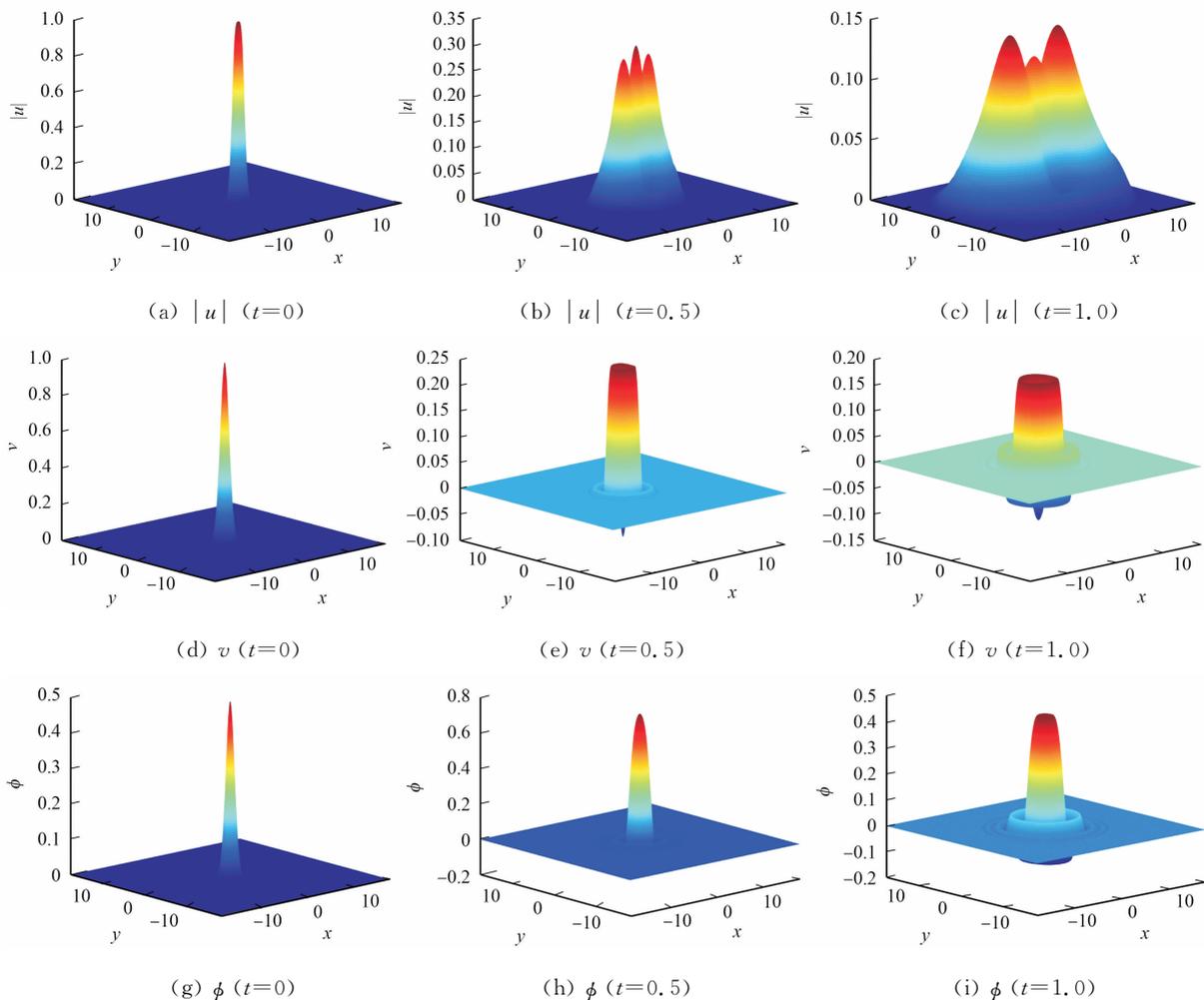


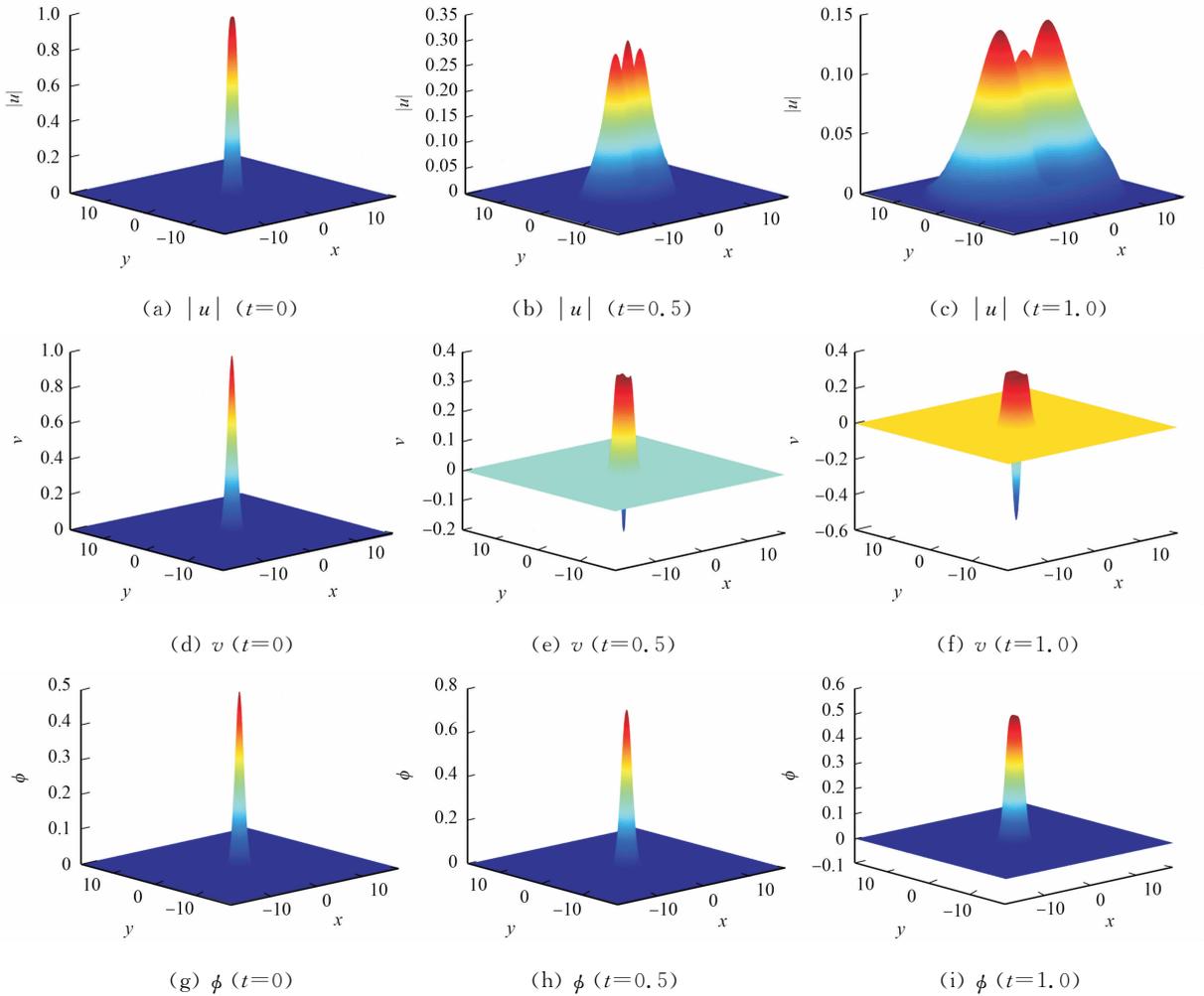
图 5  $|u|, v, \phi$  不同时间的曲面图(情况 1)

Fig. 5 Surface plots of  $|u|, v, \phi$  at different time (case 1)

CNSB 方程在情况 2 下可以简化为 Zakharov 系统, 它是 CNSB 方程的一种特殊形式。二维 Zakharov 系统的数值解  $|u|, v, \phi$  不同时间的曲面图, 如图 6 所示。

由图 6 可知:  $|u|$  的数值解随着时间的推移与情况 1 类似;  $v$  的数值解也随着时间推移出现下陷趋势, 但形态与情况 1 不同;  $\phi$  随着时间的推移并未出现下陷趋势, 也无余波产生。这与文献[7]中算例 4.3 的研究结果一致。

综上所述, 文中 TSAV 格式可推广至方程高维问题的求解。

图 6  $|u|, v, \phi$  不同时间的曲面图(情况 2)Fig. 6 Surface plots of  $|u|, v, \phi$  at different time (case 2)

## 4 结束语

利用 TSAV 方法构造耦合非线性 Schrödinger-Boussinesq 方程的能量稳定数值求解格式,理论证明了时间半离散格式的修正能量守恒性。通过数值实验验证了格式的稳定性和有效性,并模拟了方程二维的动力学过程。

## 参考文献:

- [1] CHAE D. Global regularity for the 2D Boussinesq equations with partial viscosity terms[J]. *Advances in Mathematics*, 2006, 203(2): 497-513. DOI:10.1016/j.aim.2005.05.001.
- [2] 孙传志,汪佳玲.非线性薛定谔方程的几种差分格式[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(4): 551-560. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202011019.
- [3] MAKHANKOV V G. On stationary solutions of the Schrödinger equation with a self-consistent potential satisfying Boussinesq's equation[J]. *Physics Letters A*, 1974, 50(1): 42-44. DOI:10.1016/0375-9601(74)90344-2.
- [4] GUO Boling, DU Xianyun. Existence of the periodic solution for the weakly damped Schrödinger-Boussinesq equation[J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2001, 262(2): 453-472. DOI:10.1006/jmaa.2000.7455.
- [5] FARAH L G, PASTOR A. On the periodic Schrödinger-Boussinesq system[J]. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 2010, 368(1): 330-349. DOI:10.1016/j.jmaa.2010.03.007.
- [6] YANG Yining, SUN Ziyu, LIU Yang, *et al.* Structure-preserving BDF2 FE method for the coupled Schrödinger-Boussinesq equations[J]. *Numerical Algorithms*, 2023, 93(3): 1243-1267. DOI:10.1007/s11075-022-01466-w.

- [7] TIAN Jiale, SUN Ziyu, LIU Yang, *et al.* TT-M finite element algorithm for the coupled Schrödinger-Boussinesq equations [J]. *Axioms*, 2022, 11(7): 314. DOI: 10.3390/axioms11070314.
- [8] ORUC O. A local radial basis function-finite difference (RBF-FD) method for solving 1D and 2D coupled Schrödinger-Boussinesq (SBq) equations [J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2021, 129: 55-66. DOI: 10.1016/j.engabound.2021.04.019.
- [9] CAI Jiexiang, YANG Bin, ZHANG Chun. Efficient mass-and energy-preserving schemes for the coupled nonlinear Schrödinger-Boussinesq system [J]. *Applied Mathematics Letters*, 2019, 91: 76-82. DOI: 10.1016/j.aml.2018.11.024.
- [10] DENG Dingwen, WU Qiang. Analysis of the linearly energy-and mass-preserving finite difference methods for the coupled Schrödinger-Boussinesq equations [J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2021, 170: 14-38. DOI: 10.1016/j.apnum.2021.07.013.
- [11] DENG Dingwen, WU Qiang. Linearized and decoupled structure-preserving finite difference methods and their analyses for the coupled Schrödinger-Boussinesq equations [J]. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 2021, 37(5): 2924-2951. DOI: 10.1002/num.22805.
- [12] LIAO Feng, ZHANG Luming, WANG Tingchun. Two energy-conserving and compact finite difference schemes for two-dimensional Schrödinger-Boussinesq equations [J]. *Numerical Algorithms*, 2020, 85: 1335-1363. DOI: 10.1007/s11075-019-00867-8.
- [13] LIAO Feng, ZHANG Luming. Numerical analysis of a conservative linear compact difference scheme for the coupled Schrödinger-Boussinesq equations [J]. *International Journal of Computer Mathematics*, 2018, 95(5): 961-978. DOI: 10.1080/00207160.2017.1302082.
- [14] BAI Dongmei, ZHANG Luming. The quadratic B-spline finite-element method for the coupled Schrödinger-Boussinesq equations [J]. *International Journal of Computer Mathematics*, 2011, 88(8): 1714-1729. DOI: 10.1080/00207160.2010.522234.
- [15] LIAO Feng, ZHANG Luming, WANG Shanshan. Time-splitting combined with exponential wave integrator Fourier pseudospectral method for Schrödinger-Boussinesq system [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2018, 55: 93-104. DOI: 10.1016/j.cnsns.2017.06.033.
- [16] HE Yuyu, CHEN Hongtao. Efficient and conservative compact difference scheme for the coupled Schrödinger-Boussinesq equations [J]. *Applied Numerical Mathematics*, 2022, 182: 285-307. DOI: 10.1016/j.apnum.2022.08.013.
- [17] SHEN Jie, XU Jie, YANG Jiang. The scalar auxiliary variable (SAV) approach for gradient flows [J]. *Journal of Computational Physics*, 2018, 353: 407-416. DOI: 10.1016/j.jcp.2017.10.021.
- [18] 郭姣姣, 庄清渠. 求解耦合非线性 Klein-Gordon-Schrödinger 方程的能量稳定方法 [J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2023, 44(4): 533-540. DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202206030.
- [19] YANG Junxiang, KIM J. The stabilized-trigonometric scalar auxiliary variable approach for gradient flows and its efficient schemes [J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2021, 129(1): 18. DOI: 10.1007/s10665-021-10155-x.
- [20] TIAN Zhihui, RAN Maohua, LIU Yang. Higher-order energy-preserving difference scheme for the fourth-order nonlinear strain wave equation [J]. *Computers Mathematics with Applications*, 2023, 135: 124-133. DOI: 10.1016/j.camwa.2023.01.026.
- [21] ZHANG Xi, RAN Maohua, LIU Yang, *et al.* A high-order structure-preserving difference scheme for generalized fractional Schrödinger equation with wave operator [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2023, 210: 532-546. DOI: 10.1016/j.matcom.2023.03.027.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 黄心中)

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202306029



# Klein-Gordon-Schrödinger 方程的 几种差分格式及比较

林周瑾, 汪佳玲, 霍昱安

(南京信息工程大学 数学与统计学院, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 探究在特定的初值和边界条件下一维 Klein-Gordon-Schrödinger 方程的几种差分格式并进行比较。利用经典的向前差分算子、中心差分算子、Crank-Nicolson 方法和紧差分算子分别为 Klein-Gordon-Schrödinger 方程构造向前 Euler 式、Crank-Nicolson 格式及紧差分格式。结果表明: Crank-Nicolson 格式及紧差分格式能够精确地保持离散电荷和能量守恒。数值实验验证了理论结果的正确性。

**关键词:** Klein-Gordon-Schrödinger 方程; 向前 Euler 格式; Crank-Nicolson 格式; 紧差分格式; 电荷守恒; 能量守恒

中图分类号: O 241.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)01-0108-13

## Several Difference Schemes and Comparisons for Klein-Gordon-Schrödinger Equation

LIN Zhoujin, WANG Jialing, HUO Yu'an

(School of Mathematics and Statistics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Several difference schemes of one-dimensional Klein-Gordon-Schrödinger equation under specific initial value and boundary conditions are investigated and contrasted. The classical forward difference operator, central difference operator, Crank-Nicolson method and compact difference operator are used to construct forward Euler scheme, Crank-Nicolson scheme and compact difference scheme respectively. Results show that Crank-Nicolson scheme and the compact difference scheme can accurately conserve the discrete charge and energy conservation. The correctness of the theoretical result has been verified by numerical experiments.

**Keywords:** Klein-Gordon-Schrödinger equation; forward Euler scheme; Crank-Nicolson scheme; compact difference scheme; charge conservation; energy conservation

Klein-Gordon-Schrödinger(KGS)方程是薛定谔方程的狭义相对论形式,该系统于 1970 年被 Yukawa 首次提出。1975 年,由 Fukuda 和 Tsutsumi 提出了带有 Yukawa 作用的 KGS 系统模型<sup>[1]</sup>,被用来描述量子场理论中守恒复标量核子场与实标量介子场之间相互作用,是相对论量子力学和量子场论中的最基本方程。随着学术科研的发展与科学技术的创新,KGS 方程的研究越来越受到国内外学者的重视。在过去的二十年中,许多学者们针对 KGS 方程的解析解和数值解进行了一系列的研究。

在数学方面,Fukuda 等<sup>[1]</sup>讨论了三维空间中耦合的 KGS 方程的初边值问题,建立了初边值问题整体解的存在唯一性定理。Baillon 等<sup>[2]</sup>讨论了耦合的 KGS 方程的柯西问题,并且证明了 KGS 方程柯西问题的唯一整体解的存在性。Darwish 等<sup>[3]</sup>设计了一种代数方法来统一构造 KGS 耦合方程的一系列

收稿日期: 2023-06-30

通信作者: 汪佳玲(1990-),女,副教授,博士,主要从事微分方程数值解的研究。E-mail:wangjialing@nuist.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(11801277)

显式精确解。Wang 等<sup>[4]</sup>用雅可比椭圆函数展开法的推广得到 KGS 方程的周期波解。文献[5-10]也在数学上对 KGS 方程展开研究。

然而,该方程的解析解很难得到,大多数情形只能靠数值方法进行求解。因此,对于如何得到能够长时间地保持系统解的行为的 KGS 方程的数值解就显得尤为重要。在数值方面,学者们利用许多不同的数值方法对 KGS 方程进行了数值计算<sup>[11-17]</sup>。Wang<sup>[11]</sup>提出一个紧差分格式来计算具有齐次 Dirichlet 边界条件的 KGS 方程。通过连接合适的辛 Runge-Kutta-type 方法和辛 Runge-Kutta-Nyström-type 方法,Hong 等<sup>[12]</sup>提出了 KGS 方程的显式多辛格式,并证明用该方法构造的方法是多辛的,可在适当的边界条件下精确地保持离散电荷守恒定律。Wang 等<sup>[13]</sup>提出用傅里叶谱方法求解具有周期边界条件的空间分数阶 KGS 方程,并且表明该格式可以保持离散电荷和能量守恒。

基于此,本文在一定的初值和边值条件下,利用不同的差分格式求解一维 KGS 方程并进行比较。

## 1 数值格式的构造

在区域  $\Omega=[a,b]\times[0,T]$  上考虑一维 KGS 方程,即

$$i\varphi_t + \frac{1}{2}\varphi_{xx} + \varphi u = 0, \quad x \in [a,b], \quad 0 < t \leq T, \quad (1)$$

$$u_t - u_{xx} + u - |\varphi|^2 = 0, \quad x \in [a,b], \quad 0 < t \leq T. \quad (2)$$

选取初值条件

$$\varphi(x,0) = \varphi_0(x), \quad u(x,0) = u_0(x), \quad u_t(x,0) = u_1(x), \quad x \in [a,b] \quad (3)$$

和 Dirichlet 零边界条件

$$\varphi(a,t) = \varphi(b,t) = 0, \quad u(a,t) = u(b,t) = 0, \quad t \in (0,T). \quad (4)$$

式(3)中: $\varphi_0(x)$ 是给定的具有足够光滑性的复值函数; $u_0(x)$ 和  $u_1(x)$ 是两个给定的具有足够光滑性的实值函数,这 3 个函数充当求解过程中的初始解。

式(1)~(4)具有电荷守恒律和能量守恒律,即

$$Q(t) = \int_a^b |\varphi|^2 dx = Q(0), \quad (5)$$

$$E(t) = \frac{1}{2} \int_a^b (u^2 + u_t^2 + u_x^2 + |\varphi_x|^2 - 2u|\varphi|^2) dx = E(0). \quad (6)$$

对区域  $\Omega=[a,b]\times[0,T]$  进行网格剖分,设  $J$  和  $N$  是正整数,取空间步长为  $h = \frac{b-a}{J}$ ,时间步长为  $\tau = T/N$ ,则定义网格点集合为

$$\Omega_h = \{x_j = a + jh, j = 1, \dots, J-1\}, \quad \Omega_\tau = \{t_n = n\tau, n = 1, \dots, N-1\},$$

$$\bar{\Omega}_h = \{x_j = a + jh, j = 0, 1, \dots, J\}, \quad \bar{\Omega}_\tau = \{t_n = n\tau, n = 0, 1, \dots, N\}.$$

设  $\{v_j^n | 0 \leq n \leq N, 0 \leq j \leq J\}$  为  $\bar{\Omega}_h \times \bar{\Omega}_\tau$  上的网格函数,引入差分算子

$$\delta_x^+ v_j^n = \frac{v_{j+1}^n - v_j^n}{h}, \quad j \neq J,$$

$$\delta_x^2 v_j^n = \frac{v_{j+1}^n - 2v_j^n + v_{j-1}^n}{h^2}, \quad j \neq 0, J,$$

$$\delta_t^+ v_j^n = \frac{v_j^{n+1} - v_j^n}{\tau}, \quad n \neq N,$$

$$\delta_t^2 v_j^n = \frac{v_j^{n+1} - 2v_j^n + v_j^{n-1}}{\tau^2}, \quad n \neq 0, N,$$

$$\delta_t v_j^n = \frac{v_j^{n+1} - v_j^{n-1}}{2\tau}, \quad n \neq 0, N,$$

$$A_h v_j^n = \left(1 + \frac{h^2}{12} \delta_x^2\right) v_j^n = \frac{1}{12} (v_{j+1}^n + 10v_j^n + v_{j-1}^n), \quad j \neq 0, J.$$

定义空间

$$V_h = \{\tilde{\mathbf{v}} | \tilde{\mathbf{v}} = (v_1, v_2, \dots, v_{J-1})\},$$

$$V_h^0 = \{ \mathbf{v} | \mathbf{v} = \{ v_j | 0 \leq j \leq J \} \in V_h, v_0 = v_J = 0 \}$$

和三对角矩阵

$$\mathbf{A} = \frac{1}{h^2} \begin{pmatrix} -2 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & -2 \end{pmatrix}_{(J-1) \times (J-1)},$$

$$\mathbf{B} = \frac{1}{12} \begin{pmatrix} 10 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 10 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 10 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 10 & 1 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 & 10 \end{pmatrix}_{(J-1) \times (J-1)}.$$

其中:矩阵  $\mathbf{A}$  根据二阶中心差分算子可得,矩阵  $\mathbf{B}$  为对角占优矩阵,因此是可逆矩阵。

设  $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in V_h$ , 定义离散内积和离散范数,即

$$\begin{cases} \langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle_J = h \sum_{j=1}^{J-1} u_j \bar{v}_j, & \|\mathbf{v}\|_J = \langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle_J^{\frac{1}{2}}, & \|\mathbf{v}\|_{\infty} = \max_{0 \leq j \leq J} |v_j|, \\ \|\delta_x \mathbf{v}\|_J = \left( h \sum_{j=0}^J |\delta_x v_j|^2 \right)^{\frac{1}{2}}, & \|\delta_x \mathbf{v}\|_J = \langle -\mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle_J^{\frac{1}{2}}. \end{cases}$$

上式中:  $\bar{v}$  为  $v$  的共轭复数。

经过简单计算,可得  $\|\delta_x \mathbf{v}\|_J = \langle -\mathbf{A} \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle_J^{\frac{1}{2}}$ 。

## 2 几种差分格式

### 2.1 向前 Euler 格式

令  $\Phi_j^n = \varphi(x_j, t_n), U_j^n = u(x_j, t_n)$ 。在节点  $(x_j, t_n)$  处考虑 KGS 方程(1)~(2),有

$$i \frac{\partial \varphi}{\partial t}(x_j, t_n) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}(x_j, t_n) + u(x_j, t_n) \varphi(x_j, t_n) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x_j, t_n) - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_j, t_n) + u(x_j, t_n) - |\varphi(x_j, t_n)|^2 = 0. \quad (8)$$

式(7), (8)中:  $0 \leq n \leq N-1; 1 \leq j \leq J-1$ 。

由向前差分算子及二阶中心差分算子,有

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}(x_j, t_n) &= \frac{1}{h^2} [\varphi(x_{j-1}, t_n) - 2\varphi(x_j, t_n) + \varphi(x_{j+1}, t_n)] - \frac{h^2}{12} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4}(\zeta_{j,n}, t_n) = \\ &\delta_x^2 \Phi_j^n - \frac{h^2}{12} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4}(\zeta_{j,n}, t_n), \quad x_{j-1} < \zeta_{j,n} < x_{j+1}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi}{\partial t}(x_j, t_n) &= \frac{1}{\tau} [\varphi(x_j, t_{n+1}) - \varphi(x_j, t_n)] - \frac{\tau}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}(x_j, \eta_{j,n}) = \\ &\delta_t^+ \Phi_j^n - \frac{\tau}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}(x_j, \eta_{j,n}), \quad t_n < \eta_{j,n} < t_{n+1}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x_j, t_n) &= \frac{1}{\tau^2} [u(x_j, t_{n+1}) - 2u(x_j, t_n) + u(x_j, t_{n-1})] - \frac{\tau^2}{12} \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \Theta_{j,n}) = \\ &\delta_t^2 U_j^n - \frac{\tau^2}{12} \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \Theta_{j,n}), \quad t_{n-1} < \Theta_{j,n} < t_{n+1}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_j, t_n) = \frac{1}{h^2} [u(x_{j-1}, t_n) - 2u(x_j, t_n) + u(x_{j+1}, t_n)] - \frac{h^2}{12} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4}(\theta_{j,n}, t_n) =$$

$$\delta_x^2 U_j^n - \frac{h^2}{12} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4}(\theta_{j,n}, t_n), \quad x_{j-1} < \theta_{j,n} < x_{j+1}. \quad (12)$$

将式(9)~(12)代入式(7),(8),得到

$$i\delta_t^+ \Phi_j^n + \frac{1}{2} \delta_x^2 \Phi_j^n + U_j^n \Phi_j^n = \frac{i\tau}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}(x_j, \eta_{j,n}) + \frac{h^2}{24} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4}(\zeta_{j,n}, t_n), \quad 1 \leq j \leq J-1, \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad (13)$$

$$\delta_x^2 U_j^n - \delta_x^2 U_j^n + U_j^n - |\Phi_j^n|^2 = \frac{\tau^2}{12} \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \Theta_{j,n}) - \frac{h^2}{12} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4}(\theta_{j,n}, t_n), \quad 1 \leq j \leq J-1, \quad 1 \leq n \leq N-1. \quad (14)$$

结合式(3),(4),可得

$$\begin{cases} \Phi_j^0 = \varphi_0(x_j), & U_j^0 = u_0(x_j), & U_j^1 = u_0(x_j) + \tau u_1(x_j), & 0 \leq j \leq J, \\ \Phi_0^n = \Phi_J^n = 0, & U_0^n = U_J^n = 0, & & 1 \leq n \leq N. \end{cases}$$

忽略式(13),(14)的小量项,则有

$$R_{j,n}^{(1)} = \frac{i\tau}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}(x_j, \eta_{j,n}) + \frac{h^2}{24} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4}(\zeta_{j,n}, t_n), \quad R_{j,n}^{(2)} = \frac{\tau^2}{12} \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \Theta_{j,n}) - \frac{h^2}{12} \frac{\partial^4 u}{\partial x^4}(\theta_{j,n}, t_n),$$

并用  $\varphi_j^n, u_j^n$  分别代替  $\Phi_j^n, U_j^n$ , 得到差分格式为

$$i\delta_t^+ \varphi_j^n + \frac{1}{2} \delta_x^2 \varphi_j^n + u_j^n \varphi_j^n = 0, \quad 1 \leq j \leq J-1, \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad (15)$$

$$\delta_x^2 u_j^n - \delta_x^2 u_j^n + u_j^n - |\varphi_j^n|^2 = 0, \quad 1 \leq j \leq J-1, \quad 1 \leq n \leq N-1, \quad (16)$$

$$\varphi_j^0 = \varphi_0(x_j), \quad u_j^0 = u_0(x_j), \quad u_j^1 = u_0(x_j) + \tau u_1(x_j), \quad 0 \leq j \leq J, \quad (17)$$

$$\varphi_0^n = \varphi_J^n = 0, \quad u_0^n = u_J^n = 0, \quad 1 \leq n \leq N. \quad (18)$$

式(15)~(18)即为 KGS 方程的向前 Euler 格式。称  $R_{j,n}^{(1)}$  和  $R_{j,n}^{(2)}$  为差分格式(15)和差分格式(16)的局部截断误差。记

$$\begin{aligned} c_1 &= \max \left\{ \frac{1}{2} \max_{0 \leq t \leq T} \max_{a \leq x \leq b} \left| \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}(x, t) \right|, \frac{1}{24} \max_{0 \leq t \leq T} \max_{a \leq x \leq b} \left| \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4}(x, t) \right| \right\}, \\ c_2 &= \max \left\{ \frac{1}{12} \max_{0 \leq t \leq T} \max_{a \leq x \leq b} \left| \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x, t) \right|, \frac{-1}{12} \max_{0 \leq t \leq T} \max_{a \leq x \leq b} \left| \frac{\partial^4 u}{\partial x^4}(x, t) \right| \right\}, \end{aligned}$$

则可知截断误差  $R_{j,n}^{(1)}, R_{j,n}^{(2)}$  满足

$$|R_{j,n}^{(1)}| \leq c_1(\tau + h^2), \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad 1 \leq j \leq J-1,$$

$$|R_{j,n}^{(2)}| \leq c_2(\tau^2 + h^2), \quad 1 \leq n \leq N-1, \quad 1 \leq j \leq J-1.$$

其中:  $c_1, c_2$  是与  $h$  和  $\tau$  无关的常数。

**注 1** 向前 Euler 格式(15)~(18)是一个非线性显性格式,并且该格式下  $\varphi$  的数值解在时间方向和空间方向上分别具有 1 阶和 2 阶精度,  $u$  的数值解在时间方向和空间方向上都具有 2 阶精度。

## 2.2 Crank-Nicolson 格式

令  $t_{n+1/2} = \frac{1}{2}(t_n + t_{n+1})$ , 在点  $(x_j, t_{n+1/2})$  处考虑方程(1)可得

$$i \frac{\partial \varphi}{\partial t}(x_j, t_{n+1/2}) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}(x_j, t_{n+1/2}) + u(x_j, t_{n+1/2}) \varphi(x_j, t_{n+1/2}) = 0.$$

其中:  $0 \leq n \leq N-1; 1 \leq j \leq J-1$ 。

应用公式

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}(x_j, t_{n+1/2}) = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}(x_j, t_n) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}(x_j, t_{n+1}) \right) - \frac{\tau^2}{8} \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial t^2}(x_j, \xi_{j,n}), \quad t_n < \xi_{j,n} < t_{n+1} \quad (19)$$

可得到

$$\begin{aligned} i \frac{\partial \varphi}{\partial t}(x_j, t_{n+1/2}) + \frac{1}{4} \left( \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}(x_j, t_n) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}(x_j, t_{n+1}) \right) - \frac{\tau^2}{16} \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x_j, \hat{\xi}_{j,n}) + \\ u(x_j, t_{n+1/2}) \varphi(x_j, t_{n+1/2}) = 0, \quad 1 \leq j \leq J-1, \quad 0 \leq n \leq N-1. \end{aligned}$$

再利用式(9)及

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t}(x_j, t_{n+1/2}) = \delta_t^+ \Phi_j^n + o(\tau^2), \quad (20)$$

$$u(x_j, t_{n+1/2}) = \frac{1}{2}(u(x_j, t_n) + u(x_j, t_{n+1})) + \bar{c}_1 \tau^2 = U_j^{n+1/2} + \bar{c}_1 \tau^2, \quad (21)$$

$$\varphi(x_j, t_{n+1/2}) = \frac{1}{2}(\varphi(x_j, t_n) + \varphi(x_j, t_{n+1})) + \bar{c}_2 \tau^2 = \Phi_j^{n+1/2} + \bar{c}_2 \tau^2, \quad (22)$$

可以得到

$$\begin{aligned} i\delta_t^+ \Phi_j^n + \frac{1}{2} \delta_x^2 \Phi_j^{n+1/2} + U_j^{n+1/2} \Phi_j^{n+1/2} &= \frac{1}{48} \left( \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4}(\zeta_{j,n}, t_n) + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4}(\zeta_{j,n+1}, t_{n+1}) \right) h^2 + \\ &\left( \frac{i}{24} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial t^3}(x_j, \tilde{\eta}_{j,n}) + \frac{1}{16} \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x_j, \xi_{j,n}) - \bar{c}_1 \bar{c}_2 \right) \tau^2. \end{aligned} \quad (23)$$

在  $(x_j, t_{n+1/2})$  处考虑方程(2), 即

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x_j, t_{n+1/2}) - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_j, t_{n+1/2}) + u(x_j, t_{n+1/2}) - |\varphi(x_j, t_{n+1/2})|^2 = 0. \quad (24)$$

式(24)中:  $1 \leq n \leq N-1; 1 \leq j \leq J-1$ .

结合式(11), (12), (21)及

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_j, t_{n+1/2}) = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_j, t_n) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_j, t_{n+1}) \right] - \frac{\tau^2}{8} \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x_j, \tilde{\theta}_{j,n}), \quad t_n < \tilde{\theta}_{j,n} < t_{n+1}, \quad (25)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x_j, t_{n+1/2}) = \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x_j, t_n) + \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x_j, t_{n+1}) \right] - \frac{\tau^2}{8} \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \tilde{\theta}_{j,n}), \quad t_n < \tilde{\theta}_{j,n} < t_{n+1}, \quad (26)$$

$$|\varphi(x_j, t_{n+1/2})|^2 = \frac{1}{2} (|\varphi(x_j, t_n)|^2 + |\varphi(x_j, t_{n+1})|^2) + \bar{c}_3 \tau^2, \quad (27)$$

可将式(24)改写为

$$\begin{aligned} \delta_t^2 U_j^{n+1/2} - \delta_x^2 U_j^{n+1/2} + U_j^{n+1/2} - \frac{1}{2} (|\Phi_j^n|^2 + |\Phi_j^{n+1}|^2) &= \\ \left( \frac{1}{8} \left( \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \tilde{\theta}_{j,n}) - \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x_j, \tilde{\theta}_{j,n}) \right) + \frac{1}{24} \left( \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \theta_{j,n}) + \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \theta_{j,n+1}) \right) + \bar{c}_3 - \bar{c}_1 \right) \tau^2 - \\ \frac{1}{24} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(\theta_{j,n}, t_n) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(\theta_{j,n+1}, t_n) \right) h^2, \quad 1 \leq n \leq N-1, \quad 1 \leq j \leq J-1. \end{aligned} \quad (28)$$

略去式(23)和式(28)的小量项, 则有

$$R_{j,n}^{(3)} = \frac{1}{48} \left( \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4}(\zeta_{j,n}, t_n) + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4}(\zeta_{j,n+1}, t_{n+1}) \right) h^2 + \left( \frac{i}{24} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial t^3}(x_j, \tilde{\eta}_{j,n}) + \frac{1}{16} \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x_j, \xi_{j,n}) - \bar{c}_1 \bar{c}_2 \right) \tau^2,$$

$$\begin{aligned} R_{j,n}^{(4)} &= -\frac{1}{24} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(\theta_{j,n}, t_n) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(\theta_{j,n+1}, t_n) \right) h^2 + \\ &\left( \frac{1}{8} \left( \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \tilde{\theta}_{j,n}) - \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x_j, \tilde{\theta}_{j,n}) \right) + \frac{1}{24} \left( \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \theta_{j,n}) + \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \theta_{j,n+1}) \right) + \bar{c}_3 - \bar{c}_1 \right) \tau^2. \end{aligned}$$

结合初值条件(3)和边值条件(4), 并用  $\varphi_j^n, u_j^n$  分别代替  $\Phi_j^n, U_j^n$ , 得到 Crank-Nicolson 差分格式为

$$i\delta_t^+ \varphi_j^n + \frac{1}{2} \delta_x^2 \varphi_j^{n+1/2} + u_j^{n+1/2} \varphi_j^{n+1/2} = 0, \quad 1 \leq j \leq J-1, \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad (29)$$

$$\delta_t^2 u_j^{n+1/2} - \delta_x^2 u_j^{n+1/2} + u_j^{n+1/2} - \frac{1}{2} (|\varphi_j^n|^2 + |\varphi_j^{n+1}|^2) = 0, \quad 1 \leq j \leq J-1, \quad 1 \leq n \leq N-1, \quad (30)$$

$$\varphi_j^0 = \varphi_0(x_j), \quad u_j^0 = u_0(x_j), \quad u_j^1 = u_0(x_j) + \tau u_1(x_j), \quad 0 \leq j \leq J, \quad (31)$$

$$\varphi_n^0 = \varphi_j^n = 0, \quad u_n^0 = u_j^n = 0, \quad 1 \leq n \leq N. \quad (32)$$

式(29)~(32)即为 KGS 方程的 Crank-Nicolson 格式。称  $R_{j,n}^{(3)}$  和  $R_{j,n}^{(4)}$  为差分格式(23)和差分格式(28)的局部截断误差。记

$$\begin{aligned} c_3 &= \max \left\{ \frac{1}{24} \max_{0 \leq t \leq T} \left| \frac{\partial^3 \varphi}{\partial t^3}(x, t) \right|, \frac{1}{16} \max_{0 \leq a \leq r \leq b} \left| \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x, t) \right|, \frac{1}{48} \max_{0 \leq t \leq T} \left| \frac{\partial^4 \varphi}{\partial t^4}(x, t) \right|, |\bar{c}_1|, |\bar{c}_3| \right\}, \\ c_4 &= \max_{0 \leq t \leq T} \left\{ \frac{-1}{24} \max_{0 \leq a \leq r \leq b} \left| \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x, t) \right|, \frac{1}{8} \left| \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x, t) \right|, \frac{-1}{8} \left| \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x, t) \right|, \bar{c}_3, -\bar{c}_1 \right\}, \end{aligned}$$

则可知截断误差  $R_{j,n}^{(3)}, R_{j,n}^{(4)}$  满足

$$\begin{aligned} |R_{j,n}^{(3)}| &\leq c_3(\tau^2 + h^2), & 0 \leq n \leq N-1, & 1 \leq j \leq J-1, \\ |R_{j,n}^{(4)}| &\leq c_4(\tau^2 + h^2), & 1 \leq n \leq N-1, & 1 \leq j \leq J-1. \end{aligned}$$

其中:  $c_3, c_4$  是与  $h$  和  $\tau$  无关的常数。

**注 2** 与向前 Euler 格式不同, Crank-Nicolson 格式(29)~(32)是一个非线性隐性格式, 并且该格式下  $\varphi$  和  $u$  的数值解在时间方向和空间方向上都具有 2 阶精度。

### 2.3 紧差分格式

在点  $(x_j, t_{n+1/2})$  处考虑方程(1), 有

$$i \frac{\partial \varphi}{\partial t}(x_j, t_{n+1/2}) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}(x_j, t_{n+1/2}) + u(x_j, t_{n+1/2}) \varphi(x_j, t_{n+1/2}) = 0.$$

其中:  $0 \leq n \leq N-1; 1 \leq j \leq J-1$ 。

结合式(19)~(22), 有

$$i \delta_t^+ \Phi_j^n + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}(x_j, t_{n+1/2}) + U_j^{n+1/2} \Phi_j^{n+1/2} = \left( \frac{i}{24} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial x^3}(x_j, \tilde{\eta}_{j,n}) + \frac{1}{16} \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x_j, \xi_{j,n}) - \bar{c}_1 \bar{c}_2 \right) \tau^2. \quad (33)$$

式(33)中:  $0 \leq n \leq N-1; 1 \leq j \leq J-1$ 。

式(33)两边同时左乘紧差分算子  $A_h$ , 可以得到

$$\begin{aligned} i A_h \delta_t^+ \Phi_j^n + \frac{1}{2} A_h \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}(x_j, t_{n+1/2}) + A_h (U_j^{n+1/2} \Phi_j^{n+1/2}) = \\ A_h \left( \frac{i}{24} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial x^3}(x_j, \tilde{\eta}_{j,n}) + \frac{1}{16} \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x_j, \xi_{j,n}) - \bar{c}_1 \bar{c}_2 \right) \tau^2. \end{aligned} \quad (34)$$

由于有

$$A_h \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}(x_j, t_n) = \delta_x^2 \Phi_j^n + \frac{h^4}{240} \frac{\partial^6 \varphi}{\partial x^6}(\zeta_{j,n}, t_n), \quad \zeta_{j,n} \in (x_{j-1}, x_{j+1}),$$

所以有

$$\frac{1}{2} A_h \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}(x_j, t_{n+1/2}) = \frac{1}{2} \delta_x^2 \Phi_j^{n+1/2} + \frac{h^4}{240} \frac{\partial^6 \varphi}{\partial x^6}(\tilde{\zeta}_{j,n}, \tilde{t}_{j,n}). \quad (35)$$

式(35)中:  $x_{j-1} < \tilde{\zeta}_{j,n} < x_{j+1}; t_{n-1} < \tilde{t}_{j,n} < t_{n+1}$ 。

将式(35)代入式(34), 有

$$\begin{aligned} i A_h \delta_t^+ \Phi_j^n + \frac{1}{2} \delta_x^2 \Phi_j^{n+1/2} + A_h (U_j^{n+1/2} \Phi_j^{n+1/2}) = \\ - \frac{1}{480} \left( \frac{\partial^6 \varphi}{\partial x^6}(\tilde{\zeta}_{j,n}, \tilde{t}_{j,n}) \right) h^4 + A_h \left( \frac{i}{24} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial x^3}(x_j, \tilde{\eta}_{j,n}) + \frac{1}{16} \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x_j, \xi_{j,n}) - \bar{c}_1 \bar{c}_2 \right) \tau^2. \end{aligned} \quad (36)$$

在点  $(x_j, t_{n+1/2})$  处考虑方程(2), 有

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x_j, t_{n+1/2}) - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_j, t_{n+1/2}) + u(x_j, t_{n+1/2}) - |\varphi(x_j, t_{n+1/2})|^2 = 0. \quad (37)$$

式(37)中:  $1 \leq n \leq N-1; 1 \leq j \leq J-1$ 。

将式(25)~(27)代入式(37), 可以得到

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x_j, t_{n+1}) + \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x_j, t_n) \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_j, t_{n+1}) + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_j, t_n) \right) + U_j^{n+1/2} - \\ \frac{1}{2} (|\Phi_j^n|^2 + |\Phi_j^{n+1}|^2) = \left( \frac{1}{8} \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x_j, \tilde{\theta}_{j,n}) + \frac{1}{8} \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \tilde{\Theta}_{j,n}) + \bar{c}_3 - \bar{c}_1 \right) \tau^2. \end{aligned} \quad (38)$$

将式(38)两边同时左乘紧差分算子  $A_h$ , 并利用式(11)及

$$A_h \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}(x_j, t_n) = \delta_x^2 U_j^n + \frac{h^4}{240} \frac{\partial^6 u}{\partial x^6}(\gamma_{j,n}, t_n), \quad \gamma_{j,n} \in (x_{j-1}, x_{j+1}),$$

可得

$$A_h \delta_t^2 U_j^{n+1/2} - \delta_x^2 U_j^{n+1/2} + A_h U_j^{n+1/2} - \frac{1}{2} A_h (|\Phi_j^n|^2 + |\Phi_j^{n+1}|^2) =$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{480} \left( \frac{\partial^6 u}{\partial x^6}(\gamma_{j,n}, t_n) + \frac{\partial^6 u}{\partial x^6}(\gamma_{j,n+1}, t_{n+1}) \right) h^4 + \\ & A_h \left( \frac{1}{8} \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x_j, \tilde{\theta}_{j,n}) + \frac{1}{8} \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \tilde{\Theta}_{j,n}) + \bar{c}_3 - \bar{c}_1 + \right. \\ & \left. \frac{1}{24} \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \Theta_{j,n}) + \frac{1}{24} \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \Theta_{j,n}) \right) \tau^2. \end{aligned} \quad (39)$$

略去式(36)和式(39)中的小量项,则有

$$R_{j,n}^{(5)} = A_h \left( \frac{i}{24} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial x^3}(x_j, \tilde{\eta}_{j,n}) + \frac{1}{16} \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x_j, \tilde{\xi}_{j,n}) - \bar{c}_1 \bar{c}_2 \right) \tau^2 - \frac{1}{480} \left( \frac{\partial^6 \varphi}{\partial x^6}(\tilde{\zeta}_{j,n}, \tilde{t}_{j,n}) \right) h^4,$$

$$\begin{aligned} R_{j,n}^{(6)} &= \frac{1}{480} \left( \frac{\partial^6 u}{\partial x^6}(\gamma_{j,n}, t_n) + \frac{\partial^6 u}{\partial x^6}(\gamma_{j,n+1}, t_{n+1}) \right) h^4 + \\ & A_h \left( \frac{1}{8} \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x_j, \tilde{\theta}_{j,n}) + \frac{1}{8} \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \tilde{\Theta}_{j,n}) + \bar{c}_3 - \bar{c}_1 + \frac{1}{24} \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \Theta_{j,n}) + \frac{1}{24} \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x_j, \Theta_{j,n}) \right) \tau^2, \end{aligned}$$

结合初值条件(3)和边值条件(4),并且用  $\varphi_j^n, u_j^n$  分别代替  $\Phi_j^n, U_j^n$ ,得到 KGS 方程的紧差分格式为

$$iA_h \delta_i^+ \varphi_j^n + \frac{1}{2} \delta_x^2 \varphi_j^{n+1/2} + A_h (u_j^{n+1/2} \varphi_j^{n+1/2}) = 0, \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad 1 \leq j \leq J-1, \quad (40)$$

$$\begin{aligned} A_h \delta_i^2 u_j^{n+1/2} - \delta_x^2 u_j^{n+1/2} + A_h u_j^{n+1/2} - \frac{1}{2} A_h (|\varphi_j^n|^2 + |\varphi_j^{n+1}|^2) &= 0, \\ 1 \leq n \leq N-1, \quad 1 \leq j \leq J-1, \end{aligned} \quad (41)$$

$$\varphi_j^0 = \varphi_0(x_j), \quad u_j^0 = u_0(x_j), \quad u_j^1 = u_0(x_j) + \tau u_1(x_j), \quad 0 \leq j \leq J, \quad (42)$$

$$\varphi_n^0 = \varphi_j^n = 0, \quad u_n^0 = u_j^n = 0, \quad 1 \leq n \leq N. \quad (43)$$

式(40)~(43)即为 KGS 方程的紧差分格式。称  $R_{j,n}^{(5)}$  和  $R_{j,n}^{(6)}$  为差分格式(36)和差分格式(39)的局部截断误差。记

$$\begin{aligned} c_5 &= \max \left\{ \frac{1}{8} \max_{\substack{a \leq x \leq b \\ 0 \leq t \leq T}} \left| \frac{\partial^4 u}{\partial t^4}(x, t) \right|, \frac{1}{8} \max_{\substack{a \leq x \leq b \\ 0 \leq t \leq T}} \left| A_h \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x, t) \right|, \frac{1}{480} \max_{\substack{a \leq x \leq b \\ 0 \leq t \leq T}} \left| \frac{\partial^6 u}{\partial x^6}(x, t) \right|, -\bar{c}_1, \bar{c}_3 \right\}, \\ c_6 &= \max_{\substack{a \leq x \leq b \\ 0 \leq t \leq T}} \left\{ \frac{1}{480} \max_{\substack{a \leq x \leq b \\ 0 \leq t \leq T}} \left| \frac{\partial^6 u}{\partial x^6}(x, t) \right|, \frac{1}{8} \max_{\substack{a \leq x \leq b \\ 0 \leq t \leq T}} \left| A_h \frac{\partial^4 u}{\partial x^2 \partial t^2}(x, t) \right|, \frac{1}{8} \max_{\substack{a \leq x \leq b \\ 0 \leq t \leq T}} \left| A_h \frac{\partial^4 u}{\partial x^4}(x, t) \right|, -\bar{c}_1, \bar{c}_3 \right\}, \end{aligned}$$

则可知截断误差  $R_{j,n}^{(5)}, R_{j,n}^{(6)}$  分别满足

$$|R_{j,n}^{(5)}| \leq c_5 (\tau^2 + h^4), \quad 0 \leq n \leq N-1, \quad 1 \leq j \leq J-1,$$

$$|R_{j,n}^{(6)}| \leq c_6 (\tau^2 + h^4), \quad 1 \leq n \leq N-1, \quad 1 \leq j \leq J-1.$$

其中:  $c_5, c_6$  是与  $h$  和  $\tau$  无关的常数。

**注 3** 紧差分格式(40)~(43)也是一个非线性隐性格式,并且该格式下的  $\varphi$  和  $u$  的数值解在时间方向和空间方向上分别具有 2 阶和 4 阶精度。

### 3 守恒性

**引理 1**<sup>[18]</sup> 对于任意的  $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in V_h^0$ , 有  $\langle \delta_x^2 \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle = -\langle \delta_x^+ \mathbf{u}, \delta_x^+ \mathbf{v} \rangle$ 。

**引理 2**<sup>[18]</sup> 对于任意的  $\mathbf{u} \in V_h, n=0, 1, \dots, N-1$ , 则有

$$\operatorname{Re} \langle -\mathbf{B}^{-1} \mathbf{A}(\mathbf{u}^{n+1} + \mathbf{u}^n), (\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n) \rangle = \|\delta_x \mathbf{u}^{n+1}\|^2 - \|\delta_x \mathbf{u}^n\|^2,$$

$$\operatorname{Im} \langle \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A}(\mathbf{u}^{n+1} + \mathbf{u}^n), (\mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n) \rangle = 0.$$

其中:  $\operatorname{Re}$  和  $\operatorname{Im}$  分别表示取函数的实部和虚部。

**定理 1** Crank-Nicolson 格式(29)~(32)能够精确地保持离散的电荷和能量守恒,即

$$Q^n = \|\boldsymbol{\varphi}^n\|^2 \equiv Q^0, \quad n=1, 2, \dots, N, \quad (44)$$

$$E^n = \|\mathbf{u}^n\|^2 + \|\delta_i^+ \mathbf{u}^n\|^2 + \|\delta_x^+ \mathbf{u}^n\|^2 + \|\delta_x^+ \boldsymbol{\varphi}^n\|^2 - 2\langle \mathbf{u}^n, |\boldsymbol{\varphi}^n|^2 \rangle = E^0, \quad n=1, 2, \dots, N-1. \quad (45)$$

证明:式(29), (30)可以表示为

$$i\delta_i^+ \boldsymbol{\varphi}^n + \frac{1}{2} \delta_x^2 \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2} + \mathbf{u}^{n+1/2} \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2} = 0, \quad (46)$$

$$\delta_i^2 u^{n+1/2} - \delta_x^2 u^{n+1/2} + u^{n+1/2} - \frac{1}{2} (|\varphi^n|^2 + |\varphi^{n+1}|^2) = 0. \quad (47)$$

将式(46)与  $\varphi^{n+1/2}$  作内积, 并取虚部, 有

$$\operatorname{Im} \left( \langle i\delta_i^+ \varphi^n, \varphi^{n+1/2} \rangle + \frac{1}{2} \langle \delta_x^2 \varphi^{n+1/2}, \varphi^{n+1/2} \rangle + \langle u^{n+1/2} \varphi^{n+1/2}, \varphi^{n+1/2} \rangle \right) = 0.$$

由引理 1 可知

$$\langle \delta_x^2 \varphi^{n+1/2}, \varphi^{n+1/2} \rangle = -\langle \delta_x^+ \varphi^{n+1/2}, \delta_x^+ \varphi^{n+1/2} \rangle = -\|\delta_x^+ \varphi^{n+1/2}\|^2 \in \mathbf{R}.$$

又

$$\langle u^{n+1/2} \varphi^{n+1/2}, \varphi^{n+1/2} \rangle = \sum_{j=0}^{N-1} u_j^{n+1/2} |\varphi_j^{n+1/2}|^2 \in \mathbf{R},$$

因此, 有

$$\operatorname{Im} \langle i\delta_i^+ \varphi^n, \varphi^{n+1/2} \rangle = \frac{1}{2\tau} (\|\varphi^{n+1}\|^2 - \|\varphi^n\|^2) = 0.$$

故有

$$\|\varphi^{n+1}\|^2 = \|\varphi^n\|^2. \quad (48)$$

因此, 式(44)成立。

将式(46)与  $\varphi^{n+1} - \varphi^n$  做内积, 并取实部, 有

$$\operatorname{Re} \left( \langle i\delta_i^+ \varphi^n, \varphi^{n+1} - \varphi^n \rangle + \frac{1}{2} \langle \delta_x^2 \varphi^{n+1/2}, \varphi^{n+1} - \varphi^n \rangle + \langle u^{n+1/2} \varphi^{n+1/2}, \varphi^{n+1} - \varphi^n \rangle \right) = 0.$$

对上式进行逐项分析, 即

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} \langle i\delta_i^+ \varphi^n, \varphi^{n+1} - \varphi^n \rangle &= 0, \\ \operatorname{Re} \left( \frac{1}{2} \langle \delta_x^2 \varphi^{n+1/2}, \varphi^{n+1} - \varphi^n \rangle \right) &= \operatorname{Re} \left( \frac{1}{4} \langle \delta_x^2 \varphi^{n+1}, \varphi^{n+1} - \varphi^n \rangle + \frac{1}{4} \langle \delta_x^2 \varphi^n, \varphi^{n+1} - \varphi^n \rangle \right) = \\ &= \operatorname{Re} \left( -\frac{1}{4} \langle \delta_x^+ \varphi^{n+1}, \delta_x^+ \varphi^{n+1} \rangle + \frac{1}{4} \langle \delta_x^+ \varphi^n, \delta_x^+ \varphi^n \rangle \right) = \\ &= -\frac{1}{4} \|\delta_x^+ \varphi^{n+1}\|^2 + \frac{1}{4} \|\delta_x^+ \varphi^n\|^2, \\ \operatorname{Re} \langle u^{n+1/2} \varphi^{n+1/2}, \varphi^{n+1} - \varphi^n \rangle &= \frac{1}{4} \langle u^{n+1} + u^n, |\varphi^{n+1}|^2 \rangle - \frac{1}{4} \langle u^{n+1} + u^n, |\varphi^n|^2 \rangle. \end{aligned}$$

整理可以得到

$$-\|\delta_x^+ \varphi^{n+1}\|^2 + \|\delta_x^+ \varphi^n\|^2 + \langle u^{n+1} + u^n, |\varphi^{n+1}|^2 \rangle - \langle u^{n+1} + u^n, |\varphi^n|^2 \rangle = 0. \quad (49)$$

将式(47)与  $u^{n+1} - u^n$  做内积, 有

$$\langle \delta_i^2 u^{n+1/2}, u^{n+1} - u^n \rangle - \langle \delta_x^2 u^{n+1/2}, u^{n+1} - u^n \rangle + \langle u^{n+1/2}, u^{n+1} - u^n \rangle - \frac{1}{2} \langle |\varphi^n|^2 + |\varphi^{n+1}|^2, u^{n+1} - u^n \rangle = 0.$$

对上式进行逐项分析, 可得到

$$\begin{aligned} \langle \delta_i^2 u^{n+1/2}, u^{n+1} - u^n \rangle &= \frac{1}{2} \|\delta_i^+ u^{n+1}\|^2 - \frac{1}{2} \|\delta_i^+ u^n\|^2, \\ -\langle \delta_x^2 u^{n+1/2}, u^{n+1} - u^n \rangle &= \frac{1}{2} \|\delta_x^+ u^{n+1}\|^2 - \frac{1}{2} \|\delta_x^+ u^n\|^2, \\ \frac{1}{2} \langle u^{n+1} + u^n, u^{n+1} - u^n \rangle &= \frac{1}{2} \|u^{n+1}\|^2 - \frac{1}{2} \|u^n\|^2. \end{aligned}$$

整理得到

$$\begin{aligned} \|\delta_i^+ u^{n+1}\|^2 - \|\delta_i^+ u^n\|^2 + \|\delta_x^+ u^{n+1}\|^2 - \|\delta_x^+ u^n\|^2 + \|u^{n+1}\|^2 - \\ \|u^n\|^2 - \langle |\varphi^n|^2 + |\varphi^{n+1}|^2, u^{n+1} - u^n \rangle = 0. \end{aligned} \quad (50)$$

用式(50)减去式(49)得到

$$\begin{aligned} \|u^{n+1}\|^2 + \|\delta_i^+ u^{n+1}\|^2 + \|\delta_x^+ u^{n+1}\|^2 + \|\delta_x^+ \varphi^{n+1}\|^2 - 2\langle u^{n+1}, |\varphi^{n+1}|^2 \rangle = \\ \|u^n\|^2 + \|\delta_i^+ u^n\|^2 + \|\delta_x^+ u^n\|^2 + \|\delta_x^+ \varphi^n\|^2 - 2\langle u^n, |\varphi^n|^2 \rangle, \end{aligned}$$

因此, 式(45)成立。

**定理 2** 紧差分格式(40)~(43)能够精确保持离散电荷和能量守恒,即

$$Q^n = \|\boldsymbol{\varphi}^n\|^2 \equiv Q^n, \quad n=0,1,\dots,N, \quad (51)$$

$$E^n = \|\mathbf{u}^n\|^2 + \|\delta_i^+ \mathbf{u}^n\|^2 + \|\delta_x \mathbf{u}^n\|^2 + \|\delta_x \boldsymbol{\varphi}^n\|^2 - 2\langle \mathbf{u}^n, |\boldsymbol{\varphi}^n|^2 \rangle \equiv E^n, \quad n=0,1,\dots,N-1. \quad (52)$$

证明:利用前面定义的矩阵  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$ ,式(40),(41)可以表示为

$$i\delta_i^+ \boldsymbol{\varphi}^n + \frac{1}{2} \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2} + \mathbf{u}^{n+1/2} \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2} = 0, \quad (53)$$

$$\delta_i^2 \mathbf{u}^{n+1/2} - \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{u}^{n+1/2} + \mathbf{u}^{n+1/2} - \frac{1}{2} (|\boldsymbol{\varphi}^n|^2 + |\boldsymbol{\varphi}^{n+1}|^2) = 0. \quad (54)$$

将式(53)与  $\boldsymbol{\varphi}^{n+1/2}$  作内积,并取虚部,则有

$$\text{Im}\langle i\delta_i^+ \boldsymbol{\varphi}^n, \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2} \rangle + \frac{1}{2} \text{Im}\langle \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2}, \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2} \rangle + \text{Im}\langle \mathbf{u}^{n+1/2} \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2}, \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2} \rangle = 0. \quad (55)$$

对上式进行逐项分析,有

$$\text{Im}\langle i\delta_i^+ \boldsymbol{\varphi}^n, \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2} \rangle = \frac{1}{2\tau} (\|\boldsymbol{\varphi}^{n+1}\|^2 - \|\boldsymbol{\varphi}^n\|^2),$$

$$\frac{1}{2} \text{Im}\langle \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2}, \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2} \rangle = 0.$$

又  $\langle \mathbf{u}^{n+1/2} \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2}, \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2} \rangle \in \mathbf{R}$ , 所以有

$$\frac{1}{2\tau} (\|\boldsymbol{\varphi}^{n+1}\|^2 - \|\boldsymbol{\varphi}^n\|^2) = 0.$$

由此可知,式(51)成立。

将式(53)与  $\delta_i^+ \boldsymbol{\varphi}^n$  作内积,并取实部,有

$$\text{Re}\langle i\delta_i^+ \boldsymbol{\varphi}^n, \delta_i^+ \boldsymbol{\varphi}^n \rangle + \frac{1}{2} \text{Re}\langle \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2}, \delta_i^+ \boldsymbol{\varphi}^n \rangle + \text{Re}\langle \mathbf{u}^{n+1/2} \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2}, \delta_i^+ \boldsymbol{\varphi}^n \rangle = 0. \quad (56)$$

逐项分析,有

$$\text{Re}\langle i\delta_i^+ \boldsymbol{\varphi}^n, \delta_i^+ \boldsymbol{\varphi}^n \rangle = 0,$$

$$\frac{1}{2\tau} \text{Re}\langle \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2}, \boldsymbol{\varphi}^{n+1} - \boldsymbol{\varphi}^n \rangle = -\frac{1}{4\tau} (\|\delta_x \boldsymbol{\varphi}^{n+1}\|^2 - \|\delta_x \boldsymbol{\varphi}^n\|^2),$$

$$\begin{aligned} \text{Re}\langle \mathbf{u}^{n+1/2} \boldsymbol{\varphi}^{n+1/2}, \delta_i^+ \boldsymbol{\varphi}^n \rangle &= \frac{1}{4\tau} \langle (\mathbf{u}^{n+1} + \mathbf{u}^n) \boldsymbol{\varphi}^{n+1}, \boldsymbol{\varphi}^{n+1} \rangle - \frac{1}{4\tau} \langle (\mathbf{u}^{n+1} + \mathbf{u}^n) \boldsymbol{\varphi}^n, \boldsymbol{\varphi}^n \rangle = \\ &= \frac{1}{4\tau} \langle \mathbf{u}^{n+1} + \mathbf{u}^n, |\boldsymbol{\varphi}^{n+1}|^2 \rangle - \frac{1}{4\tau} \langle \mathbf{u}^{n+1} + \mathbf{u}^n, |\boldsymbol{\varphi}^n|^2 \rangle. \end{aligned}$$

则式(56)可表示为

$$\|\delta_x \boldsymbol{\varphi}^{n+1}\|^2 - \|\delta_x \boldsymbol{\varphi}^n\|^2 - \langle \mathbf{u}^{n+1} + \mathbf{u}^n, |\boldsymbol{\varphi}^{n+1}|^2 \rangle + \langle \mathbf{u}^{n+1} + \mathbf{u}^n, |\boldsymbol{\varphi}^n|^2 \rangle = 0. \quad (57)$$

将式(54)与  $\delta_i^+ \mathbf{u}^n$  作内积,并取实部,有

$$\langle \delta_i^2 \mathbf{u}^{n+1/2}, \delta_i^+ \mathbf{u}^n \rangle - \langle \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{u}^{n+1/2}, \delta_i^+ \mathbf{u}^n \rangle + \langle \mathbf{u}^{n+1/2}, \delta_i^+ \mathbf{u}^n \rangle - \frac{1}{2} \langle |\boldsymbol{\varphi}^n|^2 + |\boldsymbol{\varphi}^{n+1}|^2, \delta_i^+ \mathbf{u}^n \rangle = 0. \quad (58)$$

分析式(58)的每一项,可得

$$\begin{aligned} \langle \delta_i^2 \mathbf{u}^{n+1/2}, \delta_i^+ \mathbf{u}^n \rangle &= \frac{1}{2\tau} \|\delta_i^+ \mathbf{u}^{n+1}\|^2 - \frac{1}{2\tau} \|\delta_i^+ \mathbf{u}^n\|^2, \\ -\langle \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{u}^{n+1/2}, \delta_i^+ \mathbf{u}^n \rangle &= \frac{1}{2\tau} (\|\delta_x \mathbf{u}^{n+1}\|^2 - \|\delta_x \mathbf{u}^n\|^2), \\ \langle \mathbf{u}^{n+1/2}, \delta_i^+ \mathbf{u}^n \rangle &= \frac{1}{2\tau} \|\mathbf{u}^{n+1}\|^2 - \frac{1}{2\tau} \|\mathbf{u}^n\|^2. \end{aligned}$$

则式(58)可以写成

$$\begin{aligned} \|\delta_i^+ \mathbf{u}^{n+1}\|^2 - \|\delta_i^+ \mathbf{u}^n\|^2 + \|\delta_x \mathbf{u}^{n+1}\|^2 - \|\delta_x \mathbf{u}^n\|^2 + \|\mathbf{u}^{n+1}\|^2 - \|\mathbf{u}^n\|^2 - \\ \langle |\boldsymbol{\varphi}^n|^2 + |\boldsymbol{\varphi}^{n+1}|^2, \mathbf{u}^{n+1} - \mathbf{u}^n \rangle = 0. \end{aligned} \quad (59)$$

结合式(57)与式(59),有

$$\|\mathbf{u}^{n+1}\|^2 + \|\delta_i^+ \mathbf{u}^{n+1}\|^2 + \|\delta_x \mathbf{u}^{n+1}\|^2 + \|\delta_x \boldsymbol{\varphi}^{n+1}\|^2 - 2\langle \mathbf{u}^{n+1}, |\boldsymbol{\varphi}^{n+1}|^2 \rangle =$$

$$\|u^n\|^2 + \|\delta_t^+ u^n\|^2 + \|\delta_x u^n\|^2 + \|\delta_x \varphi^n\|^2 - 2\langle u^n, |\varphi^n|^2 \rangle.$$

由此可知,式(52)成立。

### 4 数值实验

通过数值实验验证前面的理论结果。根据文献[19]可以得到 KGS 方程的解析解,即

$$\varphi(x, t, v, x_0) = \frac{3\sqrt{2}}{4\sqrt{1-v^2}} \operatorname{sech}^2\left(\frac{1}{2\sqrt{1-v^2}}(x-vt-x_0)\right) \exp\left(i\left(vx + \frac{1-v^2+v^4}{2(1-v^2)}t\right)\right), \tag{60}$$

$$u(x, t, v, x_0) = \frac{3}{4(1-v^2)} \operatorname{sech}^2\left(\frac{1}{2\sqrt{1-v^2}}(x-vt-x_0)\right). \tag{61}$$

式(60),(61)中: $v$ 为孤立波的传播速度; $x_0$ 为初始相位。

对于固定的  $t$ ,当  $\|x\| \rightarrow \infty$  时, $\varphi(x, t)$ 和  $u(x, t)$ 迅速衰减到 0。因此,在数值上可以在有限区域  $(a, b)$  中求解 KGS 方程。其中,  $-a, b \gg 1$ ,边界条件为零边界。

#### 4.1 数值解

考虑初值条件

$$\varphi_0(x) = \varphi(x, 0, v, 0), \quad u_0(x) = u(x, 0, v, 0), \quad u_1(x) = u_t(x, 0, v, 0).$$

计算主要在区间  $[-20, 20]$  中进行,选取空间步长  $h$  为 0.2,时间步长  $\tau$  为 0.001 s,传播速度  $v$  为 0.1。向前 Euler 格式、Crank-Nicolson 格式和紧差分格式在数值运算时间  $(T)$  分别为 1, 16 s 时得到的数值解,如图 1~3 所示。

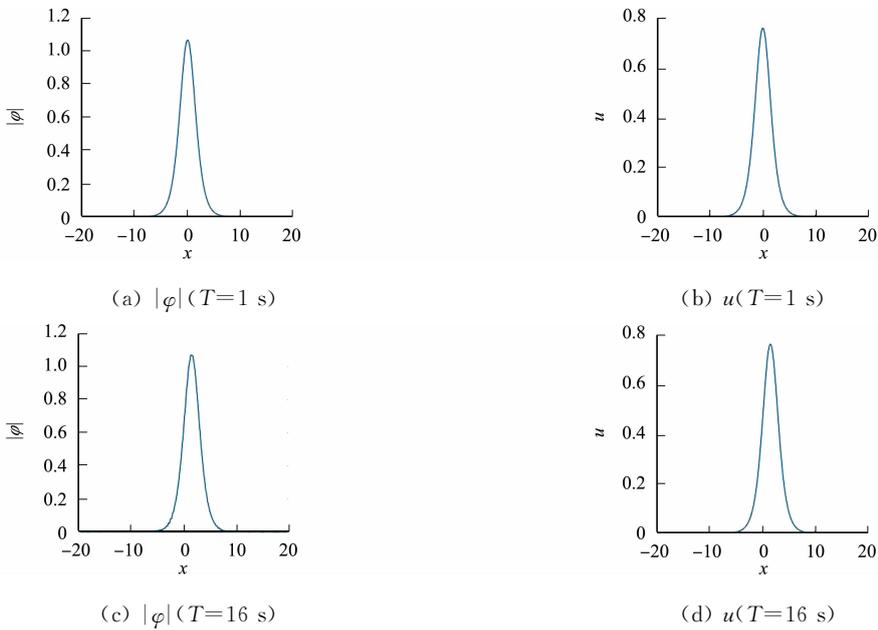


图 1 向前 Euler 格式在不同数值运算时间得到的数值解

Fig. 1 Numerical solutions of forward Euler scheme at different numerical operation times



由图 1~3 可知:当  $T=16$  时,向前 Euler 格式的数值解出现了一些轻微的振荡,Crank-Nicolson 格式和紧差分格式的数值解较为光滑。这表明相较于其他两种稳定的隐式格式,作为显式格式的向前 Euler 格

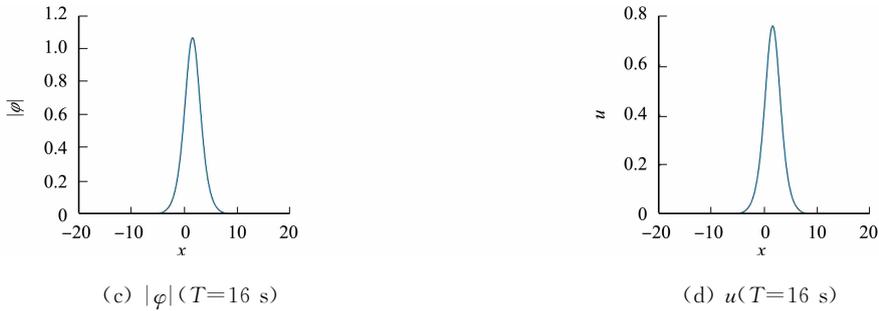


图 2 Crank-Nicolson 格式在不同数值运算时间得到的数值解

Fig. 2 Numerical solutions of Crank-Nicolson scheme at different numerical operation times

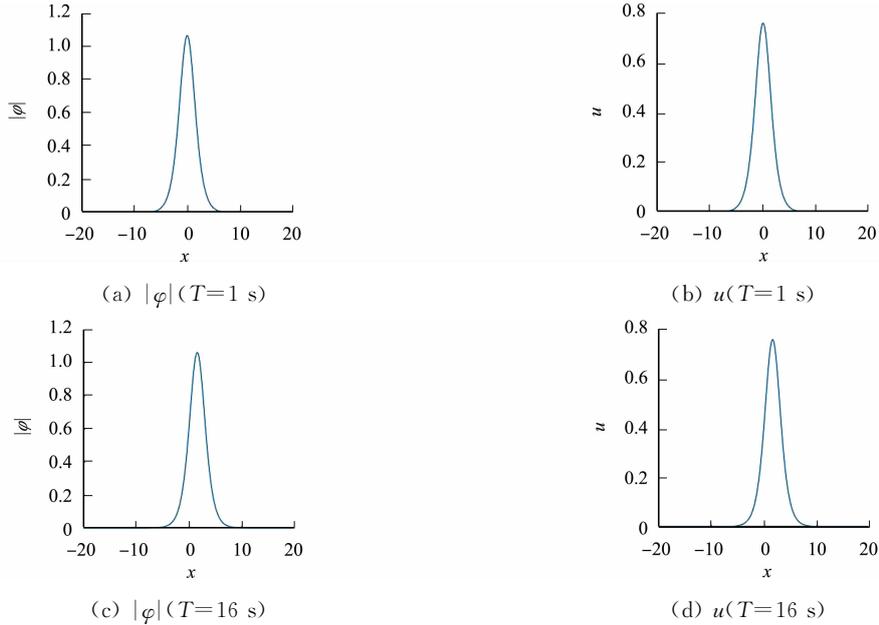


图 3 紧差分格式在不同数值运算时间得到的数值解

Fig. 3 Numerical solutions of compact difference scheme at different numerical operation times

式相对不稳定。

当  $T$  分别为 1, 16 s 时, 分别运用向前 Euler 格式、Crank-Nicolson 格式和紧差分格式求解 KGS 方程时的 CPU 运行时间( $t_{\text{CPU}}$ ), 结果如表 1 所示。由表 1 可知: 显式的向前 Euler 格式的计算速度明显优于隐式的 Crank-Nicolson 格式和紧差分格式, 这是因为向前 Euler 格式在计算过程中没有迭代。

表 1 不同数值运算时间时 3 种格式的 CPU 运行时间

Tab. 1 CPU runtimes of three schemes under different numerical operation times

$T/s$	$t_{\text{CPU}}/s$		
	向前 Euler 格式	Crank-Nicolson 格式	紧差分格式
1	0.443 491	24.160 042	36.455 731
16	4.235 344	428.940 976	650.413 849

## 4.2 电荷守恒与能量守恒

分别定义离散电荷误差 error  $Q$  和能量误差 error  $E$  为

$$\text{error } Q = \frac{Q^n - Q^0}{Q^0}, \quad (62)$$

$$\text{error } E = \frac{E^n - E^0}{E^0}. \quad (63)$$

式(62)中:  $Q^n$  和  $E^n$  分别表示第  $n$  步的电荷值和能量值。

计算在区间  $[-20, 20]$  中进行, 选取空间步长  $h$  为 0.2, 时间步长  $\tau$  为 0.001 s, 传播速度  $v$  为 0.1。分别绘制  $T=10$  s 时 Crank-Nicolson 格式和紧差分格式的电荷、能量值及其离散误差, 如图 4, 5 所示。

由图 4 可知: 电荷误差和能量误差分别在  $10^{-13}$  和  $10^{-12}$  左右, 表明 Crank-Nicolson 格式的电荷和能量

是守恒的。由图 5 可知:紧差分格式的守恒量误差分别在  $10^{-11}$  和  $10^{-12}$  左右,表明紧差分格式能够很好地保持离散电荷和能量守恒。

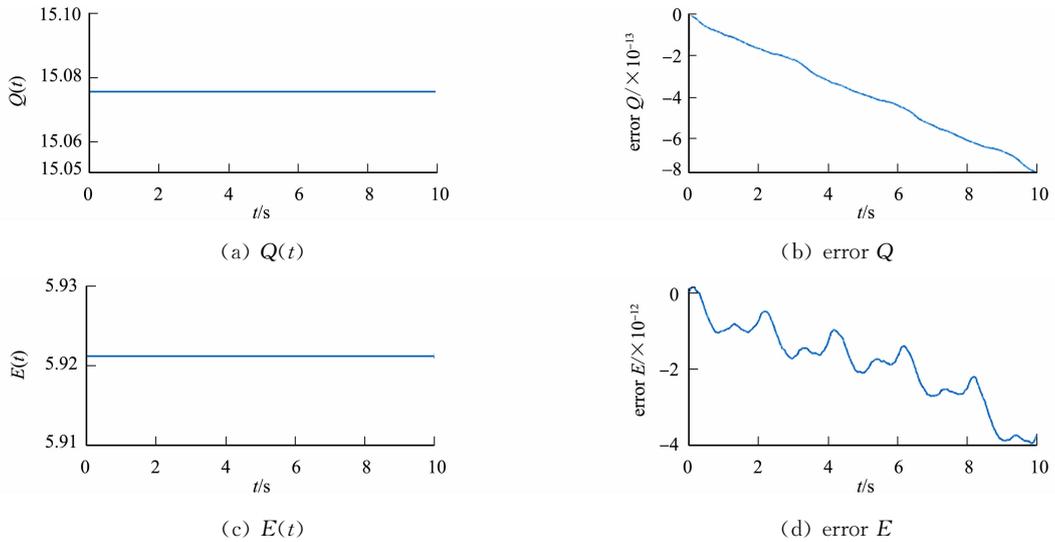


图 4 Crank-Nicolson 格式对守恒量的保持情况

Fig. 4 Conservation of conserved quantities in Crank-Nicolson scheme

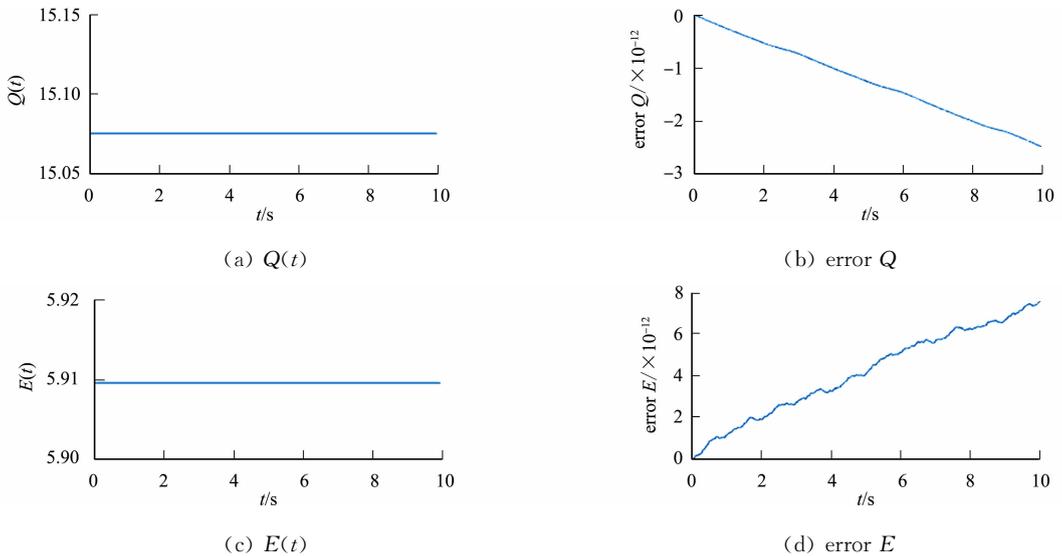


图 5 紧差分格式对守恒量的保持情况

Fig. 5 Conservation of conserved quantities in compact difference scheme

## 5 结束语

利用经典的差分算子为一维 KGS 方程分别构造向前 Euler 格式、Crank-Nicolson 格式和紧差分格式。利用相关理论知识讨论了 3 种格式的精度,详细证明了 Crank-Nicolson 格式和紧差分格式能够精确保持离散电荷守恒及能量守恒。数值实验结果表明,与 Crank-Nicolson 格式和紧差分格式相比,向前 Euler 格式长时间计算的稳定性稍差,但是其计算效率更高。另外,在数值上,Crank-Nicolson 格式和紧差分格式能够精确地保持离散的电荷和能量守恒,验证了理论结果的正确性。通过对 3 种格式的比较,可以看出它们在求解 KGS 方程时的优缺点,为不同工程应用提供合适的选择。

## 参考文献:

- [1] FUKUDA I, TSUTSUMI M, On coupled Klein-Gordon-Schrödinger equations II[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 1978, 66(2): 358-378. DOI: 10. 1016/0022-247X(78)90239-1.

- [2] BAILLON J B, CHADAM J M. The cauchy problem for the coupled Schrödinger-Klein-Gordon equations[J]. North-Holland Mathematics Studies, 1978, 30: 37-44. DOI: 10. 1016/S0304-0208(08)70857-0.
- [3] DARWISH A, FAN Engui. A series of new explicit exact solutions for the coupled Klein-Gordon-Schrödinger equations[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2004, 20(3): 609-617. DOI: 10. 1016/S0960-0779(03)00419-3.
- [4] WANG Mingliang, ZHOU Yubin. The periodic wave solutions for the Klein-Gordon-Schrödinger equations[J]. Physics Letters A, 2003, 318(1/2): 84-92. DOI: 10. 1016/j. physleta. 2003. 07. 026.
- [5] WANG Baoxiang. Classical global solutions for nonlinear Klein-Gordon-Schrödinger equations[J]. Mathematical Methods in the Applied Sciences, 1997, 20(7): 599-616. DOI: 10. 1002/(SICI)1099-1476(19970510)20:7<599::AID-MMA866>3.0.CO;2-7.
- [6] CAVALCANTI M, CAVALCANTI V. Global existence and uniform decay for the coupled Klein-Gordon-Schrödinger equations[J]. Nonlinear Differential Equations and Applications, 2000, 7(3): 285-307. DOI: 10. 1007/PL0000 1426.
- [7] HAYASHI N, WAHL W. On the global strong solutions of coupled Klein-Gordon-Schrödinger equations[J]. Journal of the Mathematical Society of Japan, 1987, 39(3): 489-497. DOI: 10. 2969/jmsj/03930489.
- [8] OHTA M. Stability of stationary states for the coupled Klein-Gordon-Schrödinger equations[J]. Nonlinear Analysis: Theory, Methods and Applications, 1996, 27(4): 455-461. DOI: 10. 1016/0362-546X(95)00017-P.
- [9] FUKUDA I, TSUTSUMI M. On the Yukawa-coupled Klein-Gordon-Schrödinger equations in three space dimensions[J]. Proceedings of the Japan Academy Series A Mathematical Sciences, 1975, 51(6): 402-405. DOI: 10. 3792/pja/1195518563.
- [10] XIA Jingna, HAN Shuxia, WANG Mingliang. The exact solitary wave solutions for the Klein-Gordon-Schrödinger equations[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2002, 23(1): 58-64. DOI: 10. 1007/BF02437730.
- [11] WANG Tingchun. Optimal point-wise error estimate of a compact difference scheme for the Klein-Gordon-Schrödinger equation[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2014, 412(1): 155-167. DOI: 10. 1016/j. jmaa. 2013. 10. 038.
- [12] HONG Jialin, JIANG Shanshan, LI Chun. Explicit multi-symplectic methods for Klein-Gordon-Schrödinger equations[J]. Journal of Computational Physics, 2009, 228(9): 3517-3532. DOI: 10. 1016/j. jcp. 2009. 02. 006.
- [13] WANG Junjie, XIAO Aiguo. Conservative Fourier spectral method and numerical investigation of space fractional Klein-Gordon-Schrödinger equations[J]. Applied Mathematics and Computation, 2019, 350: 348-365. DOI: 10. 1016/j. amc. 2018. 12. 046.
- [14] WANG Tingchun, ZHAO Xiaofei, JIANG Jiaping. Unconditional and optimal  $H^2$ -error estimates of two linear and conservative finite difference schemes for the Klein-Gordon-Schrödinger equation in high dimensions[J]. Advances in Computational Mathematics, 2018, 44: 477-503. DOI: 10. 1007/s10444-017-9557-5.
- [15] ZHANG Luming. Convergence of a conservative difference scheme for a class of Klein-Gordon-Schrödinger equations in one space dimension[J]. Applied Mathematics and Computation, 2005, 163(1): 343-355. DOI: 10. 1016/j. amc. 2004. 02. 010.
- [16] KONG Linghua, WANG Lan, JIANG Shanshan, *et al.* Multi-symplectic Fourier pseudo-spectral integrators for Klein-Gordon-Schrödinger equations[J]. Science China Mathematics, 2013, 56: 915-932. DOI: 10. 1007/s11425-013-4575-3.
- [17] XIANG Xinmin. Spectral method for solving the system of equations of Schrödinger-Klein-Gordon field[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 1988, 21(2): 161-171. DOI: 10. 1016/0377-0427(88)90265-8.
- [18] WANG Tingchun, ZHAO Xiaofei. Unconditional  $L^\infty$ -convergence of two compact conservative finite difference schemes for the nonlinear Schrödinger equation in multi-dimensions[J]. Calcolo, 2018, 55(3): 34-59. DOI: 10. 1007/s10092-018-0277-0.
- [19] WANG Jialing, LIANG Dong, WANG Yushun. Analysis of a conservative high-order compact finite difference scheme for the Klein-Gordon-Schrödinger equation[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2019, 358: 84-96. DOI: 10. 1016/j. cam. 2019. 02. 018.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 黄心中)

# 《华侨大学学报(自然科学版)》征稿简则

《华侨大学学报(自然科学版)》是华侨大学主办的,面向国内外公开发行的自然科学综合性学术刊物。本刊坚持四项基本原则,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,及时反映国内尤其是华侨大学等高等学府在基础研究、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。本刊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、数学和管理工程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。

## 1 投稿约定

- 1.1 作者应保证文稿为首发稿及文稿的合法性;署名作者对文稿均应有实质性贡献,署名正确,顺序无争议;文稿中所有事实均应是真实的和准确的,引用他人成果时,应作必要的标注;不违反与其他出版机构的版权协议及与其他合作机构的保密协议;无抄袭、剽窃等侵权行为,数据伪造及一稿两投等不良行为。如由上述情况而造成的经济损失和社会负面影响,由作者本人负全部责任。
- 1.2 自投稿日期起2个月之内,作者不得另投他刊。2个月之后,作者若没有收到反馈意见,可与编辑部联系。无论何种原因,要求撤回所投稿件,或者变更作者署名及顺序,需由第一作者以书面形式通知编辑部并经编辑部同意。
- 1.3 作者同意将该文稿的发表权,汇编权,纸型版、网络版及其他电子版的发行权、传播权和复制权交本刊独家使用,并同意由编辑部统一纳入相关的信息服务系统。
- 1.4 来稿一经刊用,编辑部将按篇一次性付给稿酬并赠送该刊物。本刊被国内外多家著名文摘期刊和数据库列为收录刊源,对此特别声明不另收费用,也不再付给稿酬。
- 1.5 其他未尽事宜,按照《中华人民共和国著作权法》和有关的法律法规处理。

## 2 来稿要求和注意事项

- 2.1 来稿务必具有科学性、先进性,论点鲜明、重点突出、逻辑严密、层次分明、文字精练、数据可靠。
- 2.2 论文题名字数一般不超过18字,必要时可加副题。文中各级层次标题要简短明确,一般不超过15字,且同一层次的标题应尽可能“排比”。
- 2.3 署名作者应对选题、研究、撰稿等作出主要贡献并能文责自负,一般以不超过3名为宜。作者单位应标明单位、所在城市、省份及邮政编码。
- 2.4 摘要应包括研究的目的、使用的方法、获得的结果和引出的结论等,应写成独立性短文且不含图表和引用参考文献序号等。其篇幅一般以150~250字左右为宜,关键词以4~8个为宜。
- 2.5 量和单位符号等要符合国家标准和国际标准。
- 2.6 能用文字说明的问题,尽量不用图表;画成曲线图的数据,不宜再列表。图表应有中英文标题。
- 2.7 参考文献仅选最主要的,且已公开发表的,按规范的内容、顺序、标点书写列入,并按其在文中出现的先后次序进行编号和标注。参考文献不少于15篇,未公开发表的资料不引用。
- 2.8 英文摘要尽可能与中文摘要对应,包括题目、作者姓名、作者单位、摘要、关键词。用过去时态叙述作者工作,用现在时态叙述作者结论,并符合英文写作规范。
- 2.9 文稿首页地脚处依次注明收稿日期;通信作者为可联系作者的姓名、出生年、性别、职称、学历、研究方向、电子邮件地址;基金项目为课题资助背景及编号,可几项依次排列。
- 2.10 请登录本刊唯一官方网站(<https://hdxh.hqu.edu.cn>)进行在线投稿,本刊不接受其他方式投稿。

- 《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)

Huaqiao Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)

(双月刊, 1980年创刊)

第45卷第1期 (总第195期) 2024年1月20日

### JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCE)

(Bimonthly, Started in 1980)

Vol. 45 No. 1 (Sum 195) Jan. 20, 2024

主管单位: 福建省教育厅

主办单位: 华侨大学

(中国福建泉州 362021)

(中国福建厦门 361021)

编辑出版: 华侨大学学报自然科学版编辑部

电话: 0595-22692545

电子信箱: journal@hqu.edu.cn

网址: https://hdxh.hqu.edu.cn

主编: 黄仲一

印刷: 泉州晚报印刷厂

国内发行: 福建省泉州市邮政局

订购处: 全国各地邮政局(所)

国外发行: 中国出版对外贸易总公司

(北京 782 信箱, 邮政编码 100011)

**Competent Authority:** The Education Department of Fujian Province

**Sponsor:** Huaqiao University  
(Quanzhou 362021, Fujian, China)  
(Xiamen 361021, Fujian, China)

**Editor in Chief:** HUANG Zhongyi

**Edited and Published by** Editorial Department of Journal of Huaqiao University (Natural Science)

Tel: 0595-22692545

E-mail: journal@hqu.edu.cn

https://hdxh.hqu.edu.cn

**Distributed by** China Publication Foreign Trading Corporation

(P. O. Box 782, Beijing, 100011, China)

中国标准连续出版物号: ISSN 1000-5013  
CN 35-1079/N

国内邮发代号: 34-41

国外发行代号: NTZ 1050

国内定价: 10.00 元/册  
60.00 元/套

ISSN 1000-5013



9 771000 501248