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

華僑大学学报

（自然科学版）

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY
（NATURAL SCIENCE）

第 44 卷　第 6 期
Vol. 44　No. 6

2023

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　塬(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)

华 侨 大 学 学 报
（自 然 科 学 版）
2023 年 11 月　　总第 194 期（卷终）　　第 44 卷　第 6 期

目　　次

综合述评

石墨烯基气凝胶吸附材料在空气净化领域的研究进展
…… 许景威，陈国华（661）

铜死亡在肿瘤治疗方面的研究进展
…… 宋一博，郑才仕，周树锋（671）

学术论文

轮毂驱动轻型商用车差速转向稳定性分析
…… 韩锋钢，陈进，罗翔，宋帆，彭倩（676）

福建省农村装配式建筑制约因素的系统动力仿真与生态效益探讨
…… 何春玲，张子晨，罗志宇，胡润（684）

组织和个人视角下安全支持对建筑工人的安全行为影响
…… 汪丫，祁神军，陈晶晶，康梦月（694）

南音声景的感知评价与心理恢复性效应
…… 陈岩君，欧达毅，廉英奇，杜春雨，徐涵（702）

街道环境和人群活动与主观感知的内在关联性
…… 吴莞姝，李欣迪，黄梦欣（707）

酚基壳聚糖季铵盐的结构对抗菌和抗生物被膜活性的影响

…… 王林，辛梅华，李明春，石露露，赖旺坤（719）

虾青素微胶囊对 Hp 小鼠血清及胃黏膜细胞因子的影响

…… 文亚飞，王福财，许晓英，陈韵琪，吴振，王立强（727）

基于模板学习的智能侨情问句生成方法

…… 方昱龙，王泽锦，王华珍，何霆（735）

基于 POI 数据的社区生活圈体育服务设施空间分异

…… 田洁玫，梁发超（743）

采用空间依赖的 MTDPN 扶梯危险行为的姿态估计

…… 林志鸿，郑力新，曾远跃（751）

顾及街景信息的城市交通违法行为影响因素分析

…… 赵志远，郁勋剑，黄永刚，吴升（759）

一类具有弱 Allee 效应离散捕食系统的 1∶4 共振

…… 杨金玲，邓圣福（769）

向量值全纯映射 Schwarz 引理的刚性

…… 林雄，李锦成，王建飞（777）

第 44 卷总目次

…… （Ⅰ～Ⅹ）

期刊基本参数： CN 35-1079/N * 1980 * b * A4 * 120 * zh * P * ￥10.00 * 1 000 * 15 * 2023-11 * n

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY
(NATURAL SCIENCE)
Vol. 44 No. 6 Sum 194 (Volume End) Nov. 2023

CONTENTS

COMPREHENSIVE REVIEW

Research Progress of Graphene-Based Aerogel Adsorption Materials in Air Purification
…… XU Jingwei, CHEN Guohua (661)

Research Progress of Cuproptosis in Tumor Therapy
…… SONG Yibo, ZHENG Caishi, ZHOU Shufeng (671)

ACADEMIC PAPERS

Stability Analysis of Differential Steering for Wheel-Driven Light Commercial Vehicles
…… HAN Fenggang, CHEN Jin, LUO Xiang, SONG Fan, PENG Qian (676)

System Dynamics Simulation on Constraining Factors and Ecological Benefits Discussion of Rural Prefabricated Buildings in Fujian Province
…… HO Chunling, ZHANG Zichen, LUO Zhiyu, HU Run (684)

Effect of Safety Support on Construction Workers′ Safety Behavior From Organizational and Individual Perspectives
…… WANG Ya, QI Shenjun, CHEN Jingjing, KANG Mengyue (694)

Perception Evaluation and Psychological Restorative Effect of Nanyin Soundscape
…… CHEN Yanjun, OU Dayi, LIAN Yinqi, DU Chunyu, XU Han (702)

Internal Correlation Between Street Environment, Crowd Activities and Subjective Perception
…… WU Wanshu, LI Xindi, HUANG Mengxin (707)

Effect of Structure of Phenol-Based Chitosan Quaternary Ammonium Salt on Antibacterial and Antibiofilm Activities
…… WANG Lin, XIN Meihua, LI Mingchun, SHI Lulu, LAI Wangkun (719)
Effect of Astaxanthin Microcapsules on Serum and Gastric Mucosal Cytokines of Hp Mice
…… WEN Yafei, WANG Fucai, XU Xiaoying, CHEN Yunqi, WU Zhen, WANG Liqiang (727)
Intelligent Question Generation Method Based on Template Learning for Overseas Chinese Situation
…… FANG Yulong, WANG Zejin, WANG Huazhen, HE Ting (735)
Spatial Differentiation of Sports Service Facilities in Community Life Circle Based on POI Data
…… TIAN Jiemei, LIANG Fachao (743)
Pose Estimation of Escalator Dangerous Behavior Using Spatially-Aware Multi-Task Decoupled Pose Network
…… LIN Zhihong, ZHENG Lixin, ZENG Yuanyue (751)
Analysis of Influencing Factors of Urban Traffic Violations Considering Street View Information
…… ZHAO Zhiyuan, YU Xunjian, HUANG Yonggang, WU Sheng (759)
1∶4 Resonance of Discrete Predator-Prey System With Weak Allee Effect
…… YANG Jinling, DENG Shengfu (769)
Rigidity of Schwarz Lemma for Vector-Valued Holomorphic Mappings
…… LIN Xiong, LI Jincheng, WANG Jianfei (777)
Total Contents of Vol. 44
…… (Ⅰ～Ⅹ)

Serial Parameters: CN 35-1079/N * 1980 * b * A4 * 120 * zh * P * ¥10.00 * 1 000 * 15 * 2023-11 * n

DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.202310007

石墨烯基气凝胶吸附材料在空气净化领域的研究进展

许景威，陈国华

（华侨大学 材料科学与工程学院，福建 厦门 362021）

摘要： 综述石墨烯气凝胶的制备方法及石墨烯基气凝胶作为吸附材料在空气净化领域中的应用现状，总结目前石墨烯气凝胶材料存在的问题，并对石墨烯气凝胶在空气净化吸附方面的未来发展方向提出展望。结果表明：石墨烯气凝胶是一种具有大比表面积、高孔隙率、多吸附位点的良好空气净化材料，经改性后的石墨烯气凝胶对气体污染物具有可观的化学吸附能力，结合自身物理吸附性能，成为了近年来备受关注的空气净化材料之一。

关键词： 石墨烯气凝胶；改性；吸附机理；空气净化

中图分类号： TQ 427.26　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-5013(2023)06-0661-10

Research Progress of Graphene-Based Aerogel Adsorption Materials in Air Purification

XU Jingwei, CHEN Guohua

(College of Material Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: The preparation methods of graphene aerogel and application status of graphene-based aerogel as adsorption materials in the field of air purification are reviewed. The current existing problems of graphene aerogel materials are summarized and the future development direction of graphene aerogel in air purification adsorption is forecasted. The results show that the graphene aerogel is a good air purification material with large specific surface area, high porosity and multiple adsorption sites. The modified graphene aerogel has considerable chemical adsorption performance of gaseous pollutants. Combined with its own physical adsorption performance, it has become one of the most concerned air purification materials in recent years.

Keywords: graphene aerogel; modification; adsorption mechanism; air purification

空气是人类生存不可缺少的物质，其品质的好坏直接关系到人类健康、生活和工作的质量，因此对空气质量进行改善尤为重要。为了解决近年来由车辆尾气、工业污染、室内装修等产生的空气污染物带来的危害，除了使用替代燃、寻找清洁能源，以及大面积种植绿林等措施对空气污染物进行预防外，还可以通过空气净化技术对污染物进行清除。目前最常用的去除空气污染物的方法主要有吸附法[1]、过滤法[2]、光催化氧化法[3]等，其中，吸附法因技术成熟、操作简单、成本低等优点广泛应用于空气污染物的

收稿日期： 2023-10-07

通信作者： 陈国华(1964-)，男，教授，博士，博士生导师，主要从事高分子材料、石墨烯材料制备与应用研究。E-mail：hdcgh@hqu.edu.cn。

基金项目： 国家自然科学基金资助项目（51373055）；福建省石墨烯粉体及复合材料工程技术研究中心资助项目（2017H2001）；福建省厦门市重点实验室资助项目(2023-01)

净化处理,但同时存在选择吸附性、脱附、二次污染等问题。因此,研究人员通常采用物理和化学相结合的方式对污染物进行吸附。

石墨烯(graphene)是一种具有6边形蜂窝状晶体结构的新型二维碳质材料,最早是由2004年英国科学家Novoselov等[4]通过机械剥离法制备得到的。较大的理论比表面积(2 630 $m^2 \cdot g^{-1}$)石墨烯在空气净化领域中具有一定的应用前景,但由于石墨烯具有化学惰性,仅能和污染物之间产生Ⅱ-Ⅱ相互作用,因此,其吸附容量有限、易脱附。氧化石墨烯(GO)作为石墨烯的衍生物之一,不但继承了石墨烯比表面积大的特点,且还含有大量的羧基、羟基、羰基等机型官能团[5],因此,在GO表面易进行化学改性,但GO质量轻、密度低及飘散易,对肺部产生较大危害。目前,大部分研究将GO作为前驱体,通过各种方法将GO制备成气凝胶,从而借助气凝胶材料超低密度、高孔隙率及强吸附等优点对气体污染物进行有效吸附。本文对石墨烯基气凝胶吸附材料在空气净化领域的研究进展进行综述。

1 石墨烯气凝胶的制备工艺

石墨烯气凝胶是由石墨烯片层通过组装、搭接形成的具有三维网络交联结构的多孔材料,为了能使制备得到的石墨烯气凝胶具有更高的表面利用率和功能化的可能性,大多采用经过化学剥离且具有大量含氧官能团的氧化石墨烯作为前驱体,通过超临界干燥、冷冻干燥、常压干燥等后处理方式得到石墨烯气凝胶。目前,熟知的且在污染物治理方面应用广泛的石墨烯气凝胶制备工艺主要包括水热法、化学还原法、化学交联法和模板法等。石墨烯气凝胶自组装法的制备过程,如图1所示。

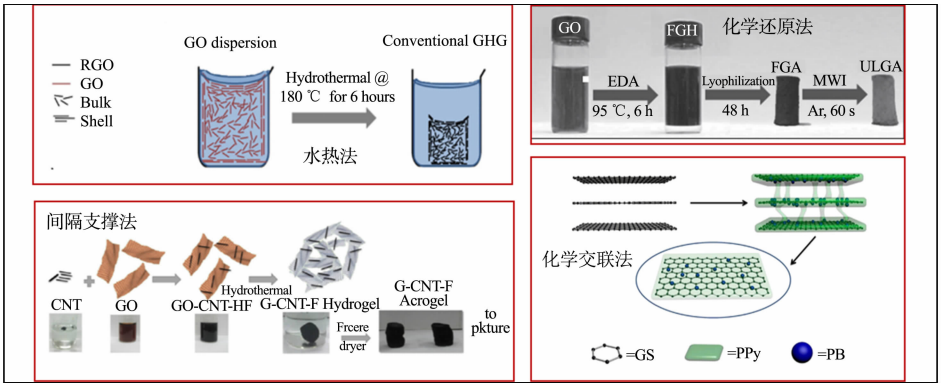


图1 石墨烯气凝胶自组装法的制备过程

Fig. 1 Preparation process of graphene aerogel by self-assembly method

1.1 水热法

水热法是在不使用任何有机化学品的情况下,对氧化石墨烯水溶液进行高温高压处理。在还原过程中,去除氧化石墨烯的含氧官能团,增加片层间的范德华力,各片层由四周向内部堆积,从而形成具有多孔的石墨烯气凝胶[6]。虽然水热法可以通过控制氧化石墨烯前驱体的质量浓度[7]、水热的温度[8]及冷冻温度[9]对气凝胶的孔结构进行调控,但由于反应过程是不可见的,难以保证其重复性,且所需要的设备条件苛刻,因此不适合大规模生产。

1.2 化学还原法

化学还原法是通过加入水合肼[10]、乙二胺[11]、抗坏血酸[12]等还原剂,促进氧化石墨烯的还原的方法,在较高温度下就能使氧化石墨烯被还原,从而堆叠自组装成石墨烯气凝胶。化学还原法所需的条件没有水热法苛刻,且反应工艺简单,但仅有部分的化学还原试剂满足绿色环保的理念,具有局限性。

水热法、化学还原法均是依靠石墨烯片层之间的范德华力实现自组装,但往往强度较低。随着还原程度的提高,片层堆叠严重,不利于石墨烯表面充分利用,因此,衍生出一种气凝胶的制备方法,即间隔支撑法。Jokar等[13]在GO水溶液中加入CNTs,利用CNTs与GO片层之间的Ⅱ-Ⅱ相互作用,使CNTs均匀分布在GO片层上,从而减少了自组装过程中石墨烯片层之间的堆叠,有效提高了气凝胶的比表面积、气凝胶的强度。Kumar等[14]通过在石墨烯片上原位生长CNTs制备得到CNTs复合石墨烯气凝胶,由此达到CNTs独立且均匀分布在石墨烯片层上的目的。

1.3　化学交联法

除了在气凝胶中加入力学性能较好的材料提高气凝胶的强度外，还能够借助交联剂（如丙烯酸脂[15]、聚吡咯[16]、聚乙烯醇[17]等）与氧化石墨烯上的官能团相互作用，使石墨片之间产生团聚，从而制备结构更加稳定的石墨烯气凝胶。

1.4　模板法

相较于水热法[18]、化学还原法[19]、化学交联法，模板法能够有效控制石墨烯气凝胶的内部孔隙结构，主要分为硬模板法和软模板法。石墨烯气凝模板法的制备工艺，如图 2 所示。硬模板法通常采用具有丰富的多孔结构材料作为基底，通过在模板上聚集、沉积石墨烯后，加热或腐蚀去除骨架，从而形成石墨烯气凝胶[20-21]。软模板法则是采用气泡[22]、冰晶[23]等作为模板剂，在石墨烯气凝胶中产生均一、有序及可控的孔隙结构。

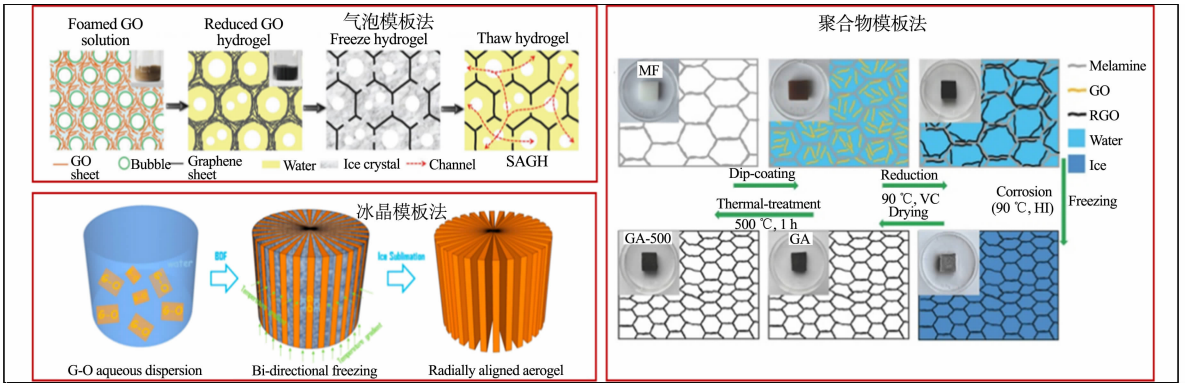


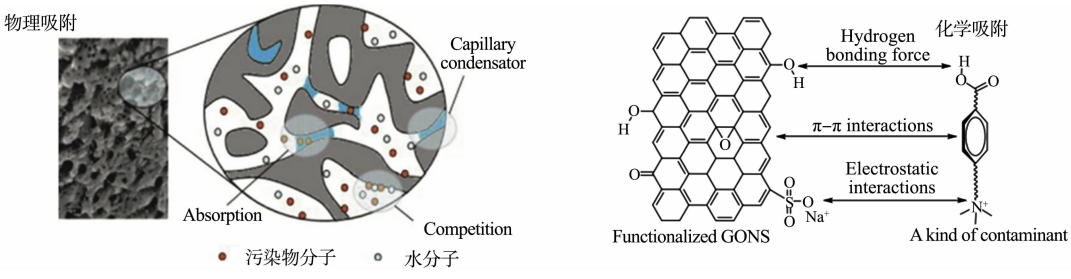
图 2　石墨烯气凝胶模板法的制备工艺

Fig. 2　Preparation technology of graphene aerogel template

虽然化学交联法和模板法在制备气凝胶上更具潜力，但或多或少引入了外来物种，进而影响材料的纯度和结构，导致繁琐的后处理步骤。因此，研究人员更青睐于使用水热法制备石墨烯气凝胶，同时，水热法也更易对氧化石墨烯表面特性进行掺杂、复合等，赋予了材料更多的可能性。

2　石墨烯气凝胶的吸附机理

石墨烯气凝胶对空气污染物的吸附机理主要分为物理吸附过程及化学吸附过程[26-27]，如图 3 所示。



（a）物理吸附过程　　（b）化学吸附过程

图 3　石墨烯气凝胶对空气污染物的吸附机理[26-27]

Fig. 3　Adsorption mechanism of graphene aerogel on air pollutants[26-27]

物理吸附主要依靠石墨烯气凝胶高孔隙结构，高孔隙结构为气体提供的足够的扩散、吸附空间及丰富的吸附位点[27]，当空气污染物进入多孔隙结构中，空气污染物与石墨烯片层产生相互作用，从而吸附在孔壁上，但这些相互作用力相对较弱。因此，其吸附速率、吸附量及防脱附能力相对较差。

化学吸附主要借助氧化石墨烯上多官能团、易于改性的特性，在石墨烯片上进行一定的化学修饰或掺杂杂原子（如 N，S，B），从而高效吸附空气污染物。以甲醛气体吸附为例，含有氨基的化合物和甲醛之间发生亲合作用，从而达到去除甲醛的目的[25]，而掺杂高电负性的原子能使石墨烯能隙变化较大，从而增加材料的吸附性能。

3 石墨烯基气凝胶在空气净化领域中的应用

单纯依靠石墨烯气凝胶大的比表面积和多孔结构难以实现对空气污染物快速、高效的吸附,并且有大量的模拟研究表明,单纯的石墨烯气凝胶对空气污染物的吸附远不如改性后的石墨烯气凝胶[28-31]。因此,研究人员借助分子动力学模拟等理论作为辅助,重点关注了石墨烯气凝胶的表面改性。除此之外,还将石墨烯气凝胶与其他性能优异的物质进行复合,以提高气凝胶对空气污染物的吸附能力。

3.1 氧化石墨烯气凝胶

氧化石墨烯是一种含大量氧官能团的功能化石墨烯,能与各种分子进行共价和非共价相互作用,从而实现对空气污染物的捕获和转化[32]。通过氧化石墨烯片层搭接而成的气凝胶有助于污染物气体的扩散和吸附。He等[33]利用单向冷冻干燥技术制备氧化石墨烯泡沫,并探究不同氧化石墨烯泡沫(不同质量分数前驱体)对丙酮气体的吸附行为。结果表明,当前驱体质量分数较低(0.2%~0.8%)时,氧化石墨烯片层间的堆积较少,从而氧化石墨烯泡沫暴露了更多的极性官能团及更高的孔隙连通性,使氧化石墨烯气凝胶对丙酮气体具有接近100%的吸附能力。

除了材料的孔径结构会对污染物吸附产生影响外,表面的官能团也会对污染物的吸附产生影响。Petit等[34]通过探究Hummers法和Brodie法得到氧化石墨烯表面化学性质对氨吸附的影响。尽管这两种方法所制备的氧化石墨烯在表观上对氨吸附并没有太大的区别(结构上均存在羟基、羧基等官能团),但Hummers法在制备过程中向石墨烯中引入大量的硫作为磺酸基,使氨分子保留方式不同。这说明对于不同污染物,在气凝胶上引入亲和力更强的官能团有助于吸附污染物[35]。Liu等[36]采用四乙烯五胺(TEPA)对氧化石墨烯表面进行胺基功能化修饰,并通过低频超声处理增加了胺基修饰程度及更多的表面吸附位点,从而有效吸附二氧化碳,N质量分数由初始的0.08%增加至4.84%,且TEPA修饰后的氧化石墨烯对CO_2的吸附量由初始的0.3 mmol·g^{-1}提升至1.2 mmol·g^{-1},这主要归功于通过亲核取代反应的胺基与CO_2发生的强烈相互作用。由于氧化石墨烯是两亲性物质,在大多数常用溶剂中都能均匀分散,即使采用冷冻干燥使其成为气凝胶,也会因强度弱而极易变成粉末。

为了能够兼顾气凝胶结构和官能团的影响,Hsan等[37]利用交联剂将壳聚糖与氧化石墨烯进行交联,并采用冷冻干燥技术制备有序多孔结构的壳聚糖接枝氧化石墨烯气凝胶,氧化石墨烯的加入使壳聚糖由无孔性转变为多孔性,壳聚糖的比表面积和孔隙体积明显增加,这与Alhwaige等[38]的研究结果一致。同时,氧化石墨烯的加入使整体气凝胶不仅具有壳聚糖本身大量的碱胺基团,还具有大量的含氧基团,使其对CO_2的最大吸附容量达到11.35 mg·g^{-1}。Du等[39]在研究对CO_2吸附时,除了利用壳聚糖本身大量的碱胺基团,还在氧化石墨烯/壳聚糖气凝胶中引入经APTES硅化处理后的Laponite RD,进一步增加气凝胶材料中氨基的数量,以此提高对CO_2的吸附容量(78.9 mg·g^{-1})。Huang等[40]将葡聚糖-δ-内酯(GDL)作为凝胶促进剂,利用$La(OH)_3$和聚乙烯亚胺(PEI)将氧化石墨烯薄片进行交联,并经过超临界CO_2干燥得到气凝胶。

交联剂中的La^{3+}和质子化氨基与氧化石墨烯边缘的羧基具有很强的静电相互作用,保证了氧化石墨烯气凝胶以片层边缘连接的结构,减少了氧化石墨烯片层之间的堆叠,赋予了气凝胶良好的弹性及高的比表面积($La(OH)_3$和PEI的比表面积分别为854,674 m^2·g^{-1}),从而对H_2S,SO_2,HI,CO及H_2等气体具有良好的吸附转化能力。

3.2 氨(胺)基改性石墨烯气凝胶

近几年,研究大部分集中在对CO_2和甲醛气体的吸附,而氨(胺)基改性由于其低成本、对这两种气体均具有良好的吸附选择性。Liang等[41]采用PEI原位还原制备胺功能化石墨烯气凝胶,胺功能化石墨烯气凝胶具有连续的孔隙结构和较大的比表面积,且通过PEI引入胺基,为石墨烯气凝胶提供化学吸附位点,该优异的特性使得其对甲醛的吸附速度非常快,仅需5 min即可达到吸附饱和,最大吸附容量为2.43 mg·g^{-1}。Liu等[42]利用PEI与石墨烯间强共价键作用,浸渍后,将PEI负载在三维羟基化石墨烯的基面上,冷冻干燥形成蜂窝状气凝胶结构。蜂窝状气凝胶结构使得气凝胶在富胺(超过10.03 mol·L^{-1})的情况下仍保持CO_2对活性吸附位点的扩散位阻,从而保证了对CO_2高的吸附量(4.13 mmol·g^{-1})和循环稳定性。Wu等[43]分别以TEPA,TETA,PEI作为氮源,通过水热法和冷冻干燥法

制备了三维多孔石墨烯气凝胶，虽然所制备气凝胶的比表面积较低，但这 3 种有机胺试剂均能为气凝胶提供高质量分数（均在 10％以上）的氮，因此能够良好地吸附 CO_2。另外，Wu 等[43]还提到水的存在能够提高 CO_2 的吸附量，事实上，虽然水中的氢键提供了丰富的活性位点，但同样水也会堵塞孔洞结构，从而减少孔壁上的吸附位点。Oh 等[44]将氧化石墨烯溶液与双氰胺进行凝胶化，以及氮中热处理，得到氮化碳功能化多孔石墨烯气凝胶。氮化碳功能化多孔石墨烯气凝胶为 CO_2 的捕获和储存提供了较大的体积空间，而氮化碳上的富电子氮增强了进入气体的特异性和可逆吸附性，使 CO_2 吸附量较大（0.43 $mmol \cdot g^{-1}$）。

材料上负载的特殊官能团使材料具有化学吸附特性，而为了追求更高的改性官能团质量分数，目前大多研究为碳纳米管和氨（胺）基化石墨烯气凝胶相结合制备高效的空气净化材料。吴利瑞等[45]以乙二胺（EDA）为氮源，在石墨烯气凝胶中引入碳纳米管，从而制备具有良好甲醛气体吸附能力的氨基化碳纳米管/石墨烯-海绵复合材料。实验结果表明，碳纳米管的引入能够在气凝胶中起到支撑作用，避免石墨烯片层组装过程的严重堆叠，提高气凝胶的比表面积及活性吸附位点数量，使甲醛气体的穿透时间由 2 176 $min \cdot g^{-1}$ 延长至 4 024 $min \cdot g^{-1}$，吸附容量由 9.26 $mg \cdot g^{-1}$ 提升至 13.50 $mg \cdot g^{-1}$。在此基础上，Ma 等[46]发现少量的 CNTs 确实能够减弱石墨烯片层的团聚程度，获得更多的吸附位点，但过多的 CNTs 会在石墨烯片内自行团聚，从而阻碍三维气凝胶结构的形成。Wu 等[47]提出碳纳米管作为间隔物的另一种作用，即在避免石墨烯片堆叠的同时能够增加石墨烯上与氮源反应的有效官能团数量，提高氨基修饰程度。碳纳米管改性石墨烯气凝胶的作用示意图[48]，如图 4 所示。

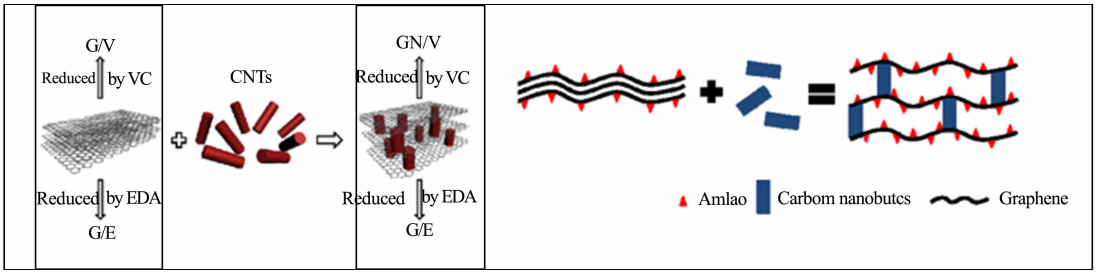


图 4　碳纳米管改性石墨烯气凝胶的作用示意图[48]

Fig. 4　Effect sketch diagram of carbon nanotubes modified graphene aerogel[48]

虽然 CNTs 的引入能为更高效空气净化材料的制备给予一定启发，但未经修饰的 CNTs 对甲醛气体的吸附能力较弱[45]，且高温下对氧化石墨烯进行氨基化修饰是一种边还原边修饰的过程，即使有 CNTs 的间隔作用，氨基化程度也较低。因此，Wang 等[48]先将 PEI 接枝到 CNTs 表面，随后将修饰后的 CNTs 引入石墨烯气凝胶中，主要化学吸附物质 PEI-CNTs 增加了石墨烯气凝胶比表面积和表面吸附位点的支撑物，对甲醛的吸附容量高达 568.41 $mg \cdot g^{-1}$。与碳纳米管修饰氨基化石墨烯气凝胶相比，氨基的修饰程度可以不受氧化石墨烯表面官能团数量的影响，且经过修饰的 CNTs 能与氧化石墨烯之间产生共价键、氢键和Ⅱ-Ⅱ相互作用，从而形成连接良好、机械性能强的三维网络框架。

除了依靠石墨烯片自组装成气凝胶外，还可依靠模板法制备石墨烯气凝胶，Wu 等[49]将海绵浸渍在含有石墨烯纳米点的氧化石墨烯溶液中，通过 EDA 和氨表面改性制备石墨烯纳米点修饰的三维氨基功能石墨烯-海绵复合材料。海绵及石墨烯纳米点的加入能大幅度减小氧化石墨烯的使用量，从而减小制备成本，除此之外，石墨烯纳米点和经氨基改性后的氧化石墨烯为甲醛提供了丰富的氨基吸附活性位点。Wang 等[50]以二氧化硅气凝胶为模板，采用溶胶-凝胶法合成含有石墨烯和二氧化硅气凝胶的 2D/3D 结构，并通过 TEPA 浸渍改性得到胺功能化的 2D/3D 吸附剂，对 CO_2 吸附量达到 4.9 $mmol \cdot g^{-1}$，且能够在 10 次 CO_2 吸附/解吸循环中保持稳定。

3.3　杂原子掺杂石墨烯气凝胶

杂原子（N，S，B）与碳原子之间存在尺寸和电负性差异，通过杂原子掺杂会导致石墨烯物理化学、电子和催化性能发生变化[51]，这使石墨烯气凝胶在该改性策略上广泛应用于能源及水体重金属吸附领域。虽然有大量的理论研究表明，经杂原子掺杂的石墨烯片能够对 HCHO，CO_2，H_2S 等气体进行吸附，但对石墨烯气凝胶进行杂原子掺杂并用于气体吸附的研究却少之又少。

Sui等[52]以氧化石墨烯为碳源,氨为氮源,通过水热反应合成了一种高孔隙率的氮掺杂石墨烯气凝胶,优异的比表面积(830 $m^2 \cdot g^{-1}$)及高质量分数(8.4%)氮赋予了气凝胶优异的CO_2和CH_4吸附性能,但对吸附机理并未进行深入的探讨。Wu等[53]用甲烷作为前驱体,在Ni泡沫模板上,通过常压化学气相沉积(CVD)生长三维石墨烯泡沫,并在不同温度下向石墨烯泡沫中加入C_3N_4,形成N掺杂的3D石墨烯泡沫。通过探究不同N缺陷结构对CO_2吸附的影响,结合密度泛函理论模型,揭示吡啶N是CO_2还原最活跃的位点,为未来的高质量分数吡啶N的碳质材料制备(进行CO_2吸附)给予了一定的启发。Pruna等[54]为了增加N掺杂石墨烯气凝胶的吡啶N的数量,分别以膨胀石墨和预氧化石墨为原料增加氧化石墨烯的氧的质量分数,以及改变氧官能团的类型,使掺杂后的石墨烯气凝胶中吡啶N和石墨N质量分数增加,从而增强对CO_2的捕获能力,由此也说明吡啶N是CO_2最主要、最活跃的吸附位点。在另一项研究中,Pruna[55]探讨了三维N掺杂石墨烯气凝胶制备条件对CO_2吸附性能的影响,并表明氮掺杂石墨烯气凝胶吸附CO_2很大程度上由N构型、胺稳定性和孔结构等共同影响。除了利用杂原子替代碳结构中的碳原子进行掺杂外,Androulidakis等[56]将结构中含有杂原子的6方hBN与还原氧化石墨烯复合形成杂化气凝胶,由于6方hBN与石墨烯具有相似的结构,因此,在石墨烯中掺杂B和N的结构能与甲醛发生强化学吸附,是一种良好的甲醛吸附材料。

3.4 石墨烯复合气凝胶

金属有机框架化合物(MOFs)是一种具有高比表面积、超高孔隙率和丰富有机功能官能团等优点的晶态纳米多孔材料,近年来在空气净化方面展示出了巨大的潜力。将MOFs材料加入到石墨烯气凝胶中,能提升材料对污染物的物理吸附和化学吸附能力。Szczesniak等[57]在三维介孔石墨烯存在下通过MOF结晶得到石墨烯-MOF高孔复合材料,通过调控石墨烯-MOF高孔复合材料中石墨烯和MOF的质量比,得到比表面积高达2 390 $m^2 \cdot g^{-1}$的苯蒸汽吸附材料.石墨烯-MOF高孔复合材料大孔体积和石墨烯片层作用力为苯吸附提供了扩散通道和良好的吸附能力,吸附量达到24.5 mmol·g^{-1},是初始MOF的两倍。Zhang等[58]将MOF-199与壳聚糖/氧化石墨烯气凝胶结合,通过调控气凝胶的孔径及MOF-199自身的介孔结构为甲醛吸附营造了良好的吸附环境。此外,壳聚糖酰胺化氧化石墨烯为甲醛吸附提供了优异的胺基吸附能力,通过物理吸附和化学吸附共同作用,提高了其对甲醛气体的吸附能力,最大吸附容量为197.89 mg·g^{-1},MOF-199@AFGO/CS制备示意图,如图5所示。图5中:w(CS)为壳聚糖质量分数。

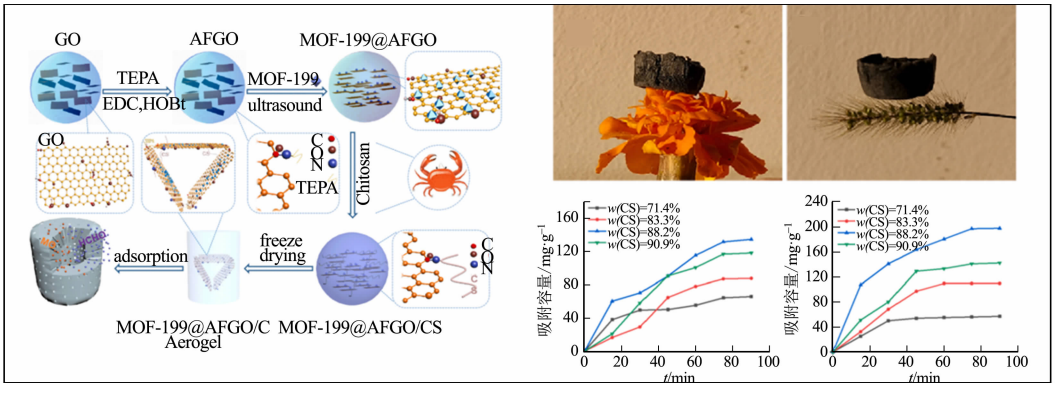


图5 MOF-199@AFGO/CS制备示意图

Fig. 5 Preparation sketch diagram of MOF-199@AFGO/CS

李厚志[59]通过层层组装的方法,在石墨烯水凝胶上原位生长不同质量分数的ZIF-8石墨烯杂化气凝胶,石墨烯杂化气凝胶的比表面积高达1 099.76 m^2,独特的多层次微孔/介孔结构材料可促进CO_2与气凝胶中的微孔产生强相互作用,介孔为CO_2的传输及吸附于ZIF中咪唑化合物单元发挥了积极的作用,在298 K,1个标准大气压条件下,石墨烯杂化气凝胶对CO_2的吸附量为0.99 mmol·g^{-1},高于同等条件下石墨烯气凝胶(0.38 mmol·g^{-1})和ZIF-8晶体(0.7 mmol·g^{-1})对CO_2的吸附。

石墨烯气凝胶除了与性能优异的潜力材料协同增强气体吸附能力外,还有一些其他策略增强石墨烯气凝胶自身的性能。Liu等[60]采用水热法和CO_2活化法制备三维葡萄糖/石墨烯气凝胶,三维葡萄

糖/石墨烯气凝具有高比表面积(763 $m^2 \cdot g^{-1}$)、狭窄的介孔尺寸分布和分层孔结构，这些特性成为去除 CO_2(298 K 时为 76.5 $mg \cdot g^{-1}$)，CH_4(298 K 时为 16.8 $mg \cdot g^{-1}$)和 H_2(77 K 时为 12.1 $mg \cdot g^{-1}$)良好的吸附剂。Malolepszy 等[61]在水热制备石墨烯气凝胶中加入丙烯酸聚合物，并在高温下通过热解聚合物为气凝胶提供新的多孔结构，增加气凝胶的比表面积和孔总体积，对正己烷吸附容量达到了 415 $mg \cdot g^{-1}$。

4　结论

石墨烯气凝胶具有比表面积大、多孔、易于改性等特性，在空气净化领域中表现出巨大的发展前景。几种常用于空气净化领域的石墨烯气凝胶制备方法、石墨烯气凝胶吸附机理及近年来石墨烯气凝胶应用于空气净化方面的相关研究能够为研究人员提供一定的参考意义。

目前，对石墨烯气凝胶的研究和应用仍存在着一些困难，主要表现为以下 4 点：

1）尽管有大量的理论研究辅助证明经化学修饰后的石墨烯对气体具有良好的吸附性，但对于石墨烯气凝胶仅作为吸附材料的研究却十分稀少；

2）经化学修饰的石墨烯只能将污染物存储在内部，而无法进行转化，导致吸附材料存在吸附上限，使用寿命较短，缺乏对解吸吸附材料，并将其重复利用的研究；

3）尽管化学吸附是一种能够快速高效去除污染物的策略，但污染物的吸附是由物理吸附和化学吸附共同作用的，大部分研究却更偏重于化学吸附，忽视了物理吸附的作用；

4）对于石墨烯气凝胶的吸附性能大多在偏离实际的高污染物浓度下试验，且没有统一的测试方法，无法通过吸附性能评判吸附材料的优劣，参考价值减弱。

基于此，今后可对石墨烯气凝胶从以下 3 个方面进行深入研究：

1）探究石墨烯气凝胶再生利用的普适性手段，实现对材料的高效循环利用，避免造成二次污染；

2）创新改性工艺，使用低成本、绿色环保的试剂对石墨烯进行改性，同时提高石墨烯气凝胶物理及化学吸附能力，推动石墨烯气凝胶在市场中的应用；

3）探究能在实际环境和多污染物混合条件下具有良好吸附净化能力的石墨烯气凝胶的制备方法。

参考文献：

[1] ZHANG Xueyang, GAO Bin, CREAMER A E, *et al*. Adsorption of VOCs onto engineered carbon materials: A review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 338(6): 102-123. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2017.05.013.

[2] KIM J T, LEE C W, JUNG H J, *et al*. Application of 2D materials for adsorptive removal of air pollutants[J]. ACS Nano, 2022, 16(11): 17687-17707. DOI: 10.1021/acsnano.2c07937.

[3] HUANG Yu, LU Yanfeng, NIU Ruiyuan, *et al*. Removal of indoor volatile organic compounds via photocatalytic oxidation: A short review and prospect[J]. Molecules, 2016, 21(1): 56-76. DOI: 10.3390/molecules21010056.

[4] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, *et al*. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. Science, 2004, 306(5696): 666-669. DOI: 10.1126/science.1102896.

[5] ALIYEV E, FILIZ V, KHAN M M, *et al*. Structural characterization of graphene oxide: Surface functional groups and fractionated oxidative debris[J]. Nanomaterials, 2019, 9(8): 1180-1195. DOI: 10.3390/nano9081180.

[6] 万文超. 用于吸油和空气净化领域的石墨烯气凝胶材料的研究[D]. 成都：西南石油大学，2016.

[7] LIU Xiaoting, PANG Kai, YANG Hui, *et al*. Intrinsically microstructured graphene aerogel exhibiting excellent mechanical performance and super-high adsorption capacity[J]. Carbon, 2020, 161(33): 146-152. DOI: 10.1016/j.carbon.2020.01.065.

[8] 龚焕焕，李德军，赵梦鲤. 水热温度对 3D 石墨烯结构及蛋白吸附性能的调控[J]. 天津师范大学学报(自然科学版)，2017, 37(6): 11-14, 20.

[9] XU Xiang, ZHANG Qiangqiang, YU Yikang, *et al*. Naturally dried graphene aerogels with superelasticity and tunable poisson's ratio[J]. Advanced Materials, 2016, 28(41): 9223-9230. DOI: 10.1002/adma.201603079.

[10] RATHI K, KIM D. Super-compressible and mechanically stable reduced graphene oxide aerogel for wearable functional devices[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2023, 24(1): 1-11. DOI: 10.1080/14686996.

2023.2214854.

[11] NGUYET D M, QUAN T H, THINH D B, *et al*. Preparing three-dimensional graphene aerogels by chemical reducing method: Investigation of synthesis condition and optimization of adsorption capacity of organic dye[J]. Surfaces and Interfaces, 2021, 23(8): 101023-101036. DOI: 10.1016/j.surfin.2021.101023.

[12] SAHINER N. Conductive polymer containing graphene aerogel composites as sensor for CO_2[J]. Polymer Composites, 2018, 40(s2): 1208-1218. DOI: 10.1002/pc.24947.

[13] JOKAR E, SHAHROKHIAN S, ASDIAN E, *et al*. An efficient two-step approach for improvement of graphene aerogel characteristics in preparation of supercapacitor electrodes[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 17(1): 465-473. DOI: 10.1016/j.est.2018.04.014.

[14] KUMAR R, ALAFERDOV A V, SINGH R K, *et al*. Self-assembled nanostructures of 3D hierarchical faceted-iron oxide containing vertical carbon nanotubes on reduced graphene oxide hybrids for enhanced electromagnetic interface shielding[J]. Composites Part B-Engineering, 2019, 168(14): 66-76. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.12.047.

[15] LIU Sihang, XU Liangbo, YUAN Zhefan, *et al*. 3D interlayer slidable multilayer nano-graphene oxide acrylate crosslinked tough hydrogel[J]. Langmuir, 2022, 38(27): 8200-8210. DOI: 10.1021/acs.langmuir.2c00355.

[16] TONG Xin, JIA Wenjie, LI Youmei, *et al*. One-step preparation of reduced graphene oxide/Prussian blue/polypyrrole aerogel and their enhanced photo-fenton performance[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2019, 102(33): 92-98. DOI: 10.1016/j.jtice.2019.05.008.

[17] BO Yuqin, YU Anran, LIU Huie, *et al*. Preparation of elastic graphene aerogel and its adsorption of oil[J]. Journal of Porous Materials, 2021, 28(1): 39-56. DOI: 10.1007/s10934-020-00964-3.

[18] GARCIA-BORDEJE E, BENITO A M, MASER W K. Graphene aerogels via hydrothermal gelation of graphene oxide colloids: Fine-tuning of its porous and chemical properties and catalytic applications[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2021, 292(27): 1-18. DOI: 10.1016/j.cis.2021.102420.

[19] HU Han, ZHAO Zongbin, WAN Wubo, *et al*. Ultralight and highly compressible graphene aerogels[J]. Advanced Materials, 2013, 25(15): 2219-2223. DOI: 10.1002/adma.201204530.

[20] 李国臣,肖民,董其超,等.石墨烯基气凝胶的研究进展及应用综述[J].广州化工,2022,50(17):27-30.

[21] LI Chenwei, JIANG Degang, LIANG Hui, *et al*. Superelastic and arbitrary-shaped graphene aerogels with sacrificial skeleton of melamine foam for varied applications[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(8): 1-9. DOI: 10.1002/adfm.201704674.

[22] YANG Hongsheng, LI Zengling, SUN Guoqiang, *et al*. Superplastic air-dryable graphene hydrogels for wet-press assembly of ultrastrong superelastic aerogels with infinite macroscale[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(26): 1-9. DOI: 10.1002/adfm.201901917.

[23] WANG Chunhui, CHEN Xiong, WANG Bin, *et al*. Freeze-casting produces a graphene oxide aerogel with a radial and centrosymmetric structure[J]. ACS Nano, 2018, 12(6): 5816-5825. DOI: 10.1021/acsnano.8b01747.

[24] YU Jingang, YU Linyan, YANG Hua, *et al*. Graphene nanosheets as novel adsorbents in adsorption, preconcentration and removal of gases, organic compounds and metal ions[J]. Science of the Total Environment, 2015, 502(23): 70-79. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.08.077.

[25] SURESH S, BANDOSZ T J. Removal of formaldehyde on carbon-based materials: A review of the recent approaches and findings[J]. Carbon, 2018, 137(1): 207-221. DOI: 10.1016/j.carbon.2018.05.023.

[26] PEI Jingjing, ZHANG Jiangshun. On the performance and mechanisms of formaldehyde removal by chemi-sorbents[J]. Chemical Engineering Journal, 2011, 167(1): 59-66. DOI: 10.1016/j.cej.2010.11.106.

[27] LI Hao, LI Tiehu, DENG Weibin, *et al*. Preparation and adsorption properties of graphene-modified, pitch-based carbon foam composites[J]. Polymers, 2022, 14(20): 4455-4467. DOI: 10.3390/polym14204455.

[28] ZHOU Qingxiao, YUAN Lei, YANG Xi, *et al*. DFT study of formaldehyde adsorption on vacancy defected graphene doped with B, N, and S[J]. Chemical Physics, 2014, 440(11): 80-86. DOI: 10.1016/j.chemphys.2014.06.016.

[29] JYOTI R, DEJI R, KAUR N, *et al*. A new insight into transition metal doped graphene nanoribbon for hydrogen sulfide gas adsorption: First principle investigation[J]. Surfaces and Interfaces, 2023, 40(3): 103154-103162. DOI: 10.1016/j.surfin.2023.103154.

[30] LU Yunhua, XU Yanjie, ZHANG Junan, *et al*. Adsorption of carbon dioxide gas by modified graphene: A theoretical study[J]. Chemistryselect, 2022, 7(7): 1-12. DOI: 10.1002/slct.202104067.

[31] TANG Shaobin, CAO Zexing. Adsorption of nitrogen oxides on graphene and graphene oxides: Insights from density functional calculations[J]. Journal of Chemical Physics, 2011, 134(4): 1-15. DOI: 10.1063/1.3541249.

[32] LI Fen, JIANG Xue, ZHAO Jijun, *et al*. Graphene oxide: a promising nanomaterial for energy and environmental applications[J]. Nano Energy, 2015, 16(8): 488-515. DOI: 10.1016/j.nanoen.2015.07.014.

[33] HE Yongqiang, ZHANG Nana, WU Fei, *et al*. Graphene oxide foams and their excellent adsorption ability for acetone gas[J]. Materials Research Bulletin, 2013, 48(9): 3553-3558. DOI: 10.1016/j.materresbull.2013.05.056.

[34] PETIT C, SEREDYCH M, BANDOSZ T J. Revisiting the chemistry of graphite oxides and its effect on ammonia adsorption[J]. Journal of Materials Chemistry, 2009, 19(48): 9176-9185. DOI: 10.1039/b916672f.

[35] FAN Chaojun, LI Sheng, LUO Mingkun, *et al*. Effects of N and S functionalities on binary gas co-adsorption on a coal macromolecule[J]. Energy & Fuels, 2019, 33(5): 3934-3946. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.8b04410.

[36] LIU Yamin, SAJJADI B, CHEN Weiyin, *et al*. Ultrasound-assisted amine functionalized graphene oxide for enhanced CO_2 adsorption[J]. Fuel, 2019, 247(33): 10-18. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.03.011.

[37] HSAN N, DUTTA P K, KUMAR S, *et al*. Chitosan grafted graphene oxide aerogel: Synthesis, characterization and carbon dioxide capture study[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 125(21): 300-306. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2018.12.071.

[38] ALHWAIGE A A, AGAG T, ISHIDA H, *et al*. Biobased chitosan hybrid aerogels with superior adsorption: Role of graphene oxide in CO_2 capture[J]. RSC Advances, 2013, 3(36): 16011-16020. DOI: 10.1039/c3ra42022a.

[39] DU Wenjie, MA Rui, LIU Zhiyan, *et al*. Study on the adsorption properties of graphene oxide/laponite RD/chitosan composites[J]. Materials, 2021, 14(12): 1-13. DOI: 10.3390/ma14123224.

[40] HUANG Huan, CHEN Pengwan, ZHANG Xuetong, *et al*. Edge-to-edge assembled graphene oxide aerogels with outstanding mechanical performance and superhigh chemical activity[J]. Small, 2013, 9(8): 1397-1404. DOI: 10.1002/smll.201202965.

[41] LIANG Junfei, CAI Zhi, LI Lidong, *et al*. Scalable and facile preparation of graphene aerogel for air purification [J]. RSC Advances, 2014, 4(10): 4843-4847. DOI: 10.1039/c3ra45147j.

[42] LIU Faqian, LI Wei, ZHAO Jie, *et al*. Covalent-grafting polyethyleneimine on hydroxylated three-dimensional graphene for superior CO_2 capture[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(23): 12252-12258. DOI: 10.1039/c5ta01536g.

[43] WU Jingjie, QIU Xianyu, CHEN Shuixia. Preparation and characterization of an amine-modified graphene aerogel for enhanced carbon dioxide adsorption[J]. Chemical Routes to Materials, 2022, 57(3): 1727-1737. DOI: 10.1007/s10853-021-06768-3.

[44] OH Y, LE V D, MAITI U N, *et al*. Selective and regenerative carbon dioxide capture by highly polarizing porous carbon nitride[J]. ACS Nano, 2015, 9(9): 9148-9157. DOI: 10.1021/acsnano.5b03400.

[45] 吴利瑞，张蓝心，于飞，等. 氨基化碳纳米管/石墨烯气凝胶对甲醛吸附研究[J]. 中国环境科学，2015，35(11)：3251-3256.

[46] MA Jie, SUN Yiran, YANG Jinhu, *et al*. High-performance amino-functional graphene/CNT aerogel adsorbent for formaldehyde removal from indoor air[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2017, 17(3): 913-922. DOI: 10.4209/aaqr.2016.07.0312.

[47] WU Lirui, QIN Ziyi, ZHANG Lanxin, *et al*. CNT-enhanced amino-functional graphene aerogel adsorbent for highly efficient removal of formaldehyde [J]. New Journal of Chemistry, 2017, 41(7): 2527-2533. DOI: 10.1039/c6nj03643k.

[48] WANG Wuyou, ZHAO Xiaowen, YE Lin. Self-assembled construction of robust and super elastic graphene aerogel for high-efficient formaldehyde removal and multifunctional application[J]. Small, 2023, 19(24): 1-13. DOI: 10.1002/smll.202300234.

[49] WU Lirui, ZHANG Lanxin, MENG Tao, *et al*. Facile synthesis of 3D amino-functional graphene-sponge composites decorated by graphene nanodots with enhanced removal of indoor formaldehyde[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2015, 15(3): 1028-1034. DOI: 10.4209/aaqr.2014.10.0237.

[50] WANG Wenjing, MOTUZAS J, ZHAO Xiusong, *et al*. 2D/3D assemblies of amine-functionalized graphene silica

(templated) aerogel for enhanced CO_2 sorption[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(33): 30391-30400. DOI: 10.1021/acsami.9b07192.

[51] VASSEGHIAN Y, LE V T, JOO S W, *et al*. Spotlighting graphene-based catalysts for the mitigation of environmentally hazardous pollutants to cleaner production: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 365(8): 1-14. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132702.

[52] SUI Zhuyin, MENG Yuena, XIAO Peiwen, *et al*. Nitrogen-doped graphene aerogels as efficient supercapacitor electrodes and gas adsorbents[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(3): 1431-1438. DOI: 10.1021/am5042065.

[53] WU Jingjie, LIU Mingjie, SHARMA P P, *et al*. Incorporation of Nitrogen defects for efficient reduction of CO_2 via two-electron pathway on three-dimensional graphene foam[J]. Nano Letters, 2016, 16(1): 466-470. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b04123.

[54] PRUNA A, CARCEL A C, BENEDITO A, *et al*. Effect of synthesis conditions on CO_2 capture of ethylenediamine-modified graphene aerogels[J]. Applied Surface Science, 2019, 487(3): 228-235. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.05.098.

[55] PRUNA A, CARCEL A C, BENEDITO A, *et al*. The effect of solvothermal conditions on the properties of three-dimensional N-doped graphene aerogels[J]. Nanomaterials, 2019, 9(3): 1-13. DOI: 10.3390/nano9030350.

[56] ANDROULIDAKIS C, KOTSIDI M, GORGOLIS G, *et al*. Multi-functional 2D hybrid aerogels for gas absorption applications[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 13548-13560. DOI: 10.1038/s41598-021-92957-8.

[57] SZCZESNIAK B, CHOMA J, JARONIEC M. Ultrahigh benzene adsorption capacity of graphene-MOF composite fabricated via MOF crystallization in 3D mesoporous graphene[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2019, 279(11): 387-394. DOI: 10.1016/j.micromeso.2019.01.022.

[58] ZHANG Wenkun, HUANG Ting, REN Yu, *et al*. Preparation of chitosan crosslinked with metal-organic framework (MOF-199) @ aminated graphene oxide aerogel for the adsorption of formaldehyde gas and methyl orange [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 193(36): 2243-2251. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.11.056.

[59] 李厚志. 石墨烯/ZIF-8复合气凝胶材料的制备及其性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.

[60] LIU Kangkai, JIN Biao, MENG Longyue. Glucose/graphene-based aerogels for gas adsorption and electric double layer capacitors[J]. Polymers, 2019, 11(1): 1-16. DOI: 10.3390/polym11010040.

[61] MALOLEPSZY A, MAZURKIEWICZ-PAWLICKA M, KOTKOWSKI T, *et al*. Synthesis of graphene foams and their sorption properties of n-hexane[J]. Journal of Porous Materials, 2021, 28(4): 1069-1079. DOI: 10.1007/s10934-021-01054-8.

(**责任编辑**: 陈志贤 **英文审校**: 刘源岗)

DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.202311006

铜死亡在肿瘤治疗方面的研究进展

宋一博，郑才仕，周树锋

（华侨大学 化工学院，福建 厦门 361021）

摘要： 过量的铜可以导致肿瘤细胞发生程序性细胞死亡(PCD)，即铜死亡。这一过程是通过破坏肿瘤细胞代谢和诱导蛋白质毒性应激发生的，这一发现强调了铜稳态和肿瘤代谢之间的复杂联系。综述细胞铜代谢和铜死亡的具体机制，阐述铜基纳米材料在肿瘤治疗中的应用。结果表明：铜死亡途径为肿瘤治疗开辟了新视角，具有广阔的应用前景。

关键词： 铜代谢；铜稳态；铜死亡；肿瘤治疗

中图分类号： R 730.2　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-5013(2023)06-0671-05

Research Progress of Cuproptosis in Tumor Therapy

SONG Yibo, ZHENG Caishi, ZHOU Shufeng

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

Abstract: Excess copper induces programmed cell death (PCD) in tumor cells, known as cuproptosis. This process occurs through disruption of tumor cell metabolism and induction of protein toxicity stress, highlighting the complex interplay between copper homeostasis and tumor metabolism. The specific mechanisms of copper metabolism and cuproptosis in cells are reviewed, and the applications of copper-based nanomaterials in tumor therapy are described. The results show that copper-induced cell death provides a new perspective for tumor therapy and has potential application prospects.

Keywords: copper metabolism; copper homeostasis; cuproptosis; tumor therapy

铜(Cu)是几乎所有生物体的基本元素。大量研究表明，Cu 是多种关键代谢酶的辅助因子，这些酶可驱动广泛的生理过程。当铜代谢失衡时，细胞可能会受到严重的损害，因此，全身铜水平变化必须维持在一个很小的范围内，以确保正常的生化过程。2022 年，铜诱导的细胞死亡方式被首次命名为铜死亡(cuproptosis)[1]。基于此，本文针对铜死亡的作用机制及铜基纳米材料在肿瘤铜死亡治疗中的研究进展进行综述。

1　铜的代谢

铜主要通过食物摄入进入人体，如肉类、鱼类、贝类、全谷类、坚果和巧克力都含有丰富的铜。大部分食物中铜主要以二价离子(Cu^{2+})形式存在，主要在小肠被吸收，进入小肠上皮细胞之前，Cu^{2+} 被金属还原酶(six-transmembrane epithelial antigen of the prostate, STEAP)吸附在细胞表面，并被还原为 Cu^{+}，通过小肠上皮细胞的铜转运蛋白 1(CTR1，也称为 SLC31A1)被主动吸收[2]。在通过肠道吸收后，铜被分泌到血液中，铜蓝蛋白(ceruloplasmin, CP)、白蛋白(albumin)、转铜蛋白(metallothionein)及

收稿日期： 2023-11-06

通信作者： 周树锋(1966-)，男，教授，博士，博士生导师，主要从事系统药理学、药物代谢与转运的研究。E-mail：szhou@hqu.edu.cn。

α_2-微球蛋白(α_2-macroglobulin)等血浆蛋白结合参与了铜的运输和代谢过程,并帮助将铜运送到身体的各个器官和组织中。

铜一旦被细胞吸收,可以通过不同的蛋白载体转运到蛋白靶点,或者被金属硫蛋白(MT)螯合以储存。关键的蛋白载体主要包括细胞色素C氧化酶17(COX17)、铜超氧化物歧化酶铜伴侣蛋白(CCS)和抗氧化剂1(ATOX1)。细胞内的铜代谢过程[3],如图1所示。

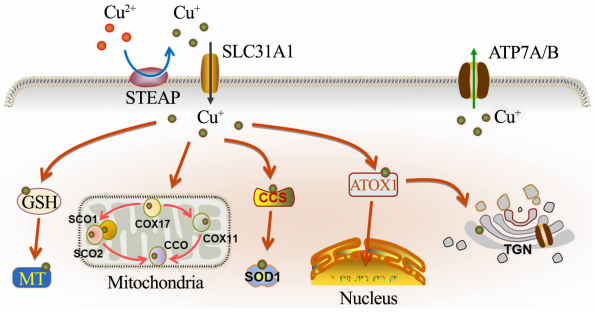


图1 细胞内的铜代谢过程

Fig. 1 Intracellular copper metabolism process

1) COX17可将Cu^+转运至次级载铜蛋白,包括合成细胞色素C氧化酶1(SCO1)、合成细胞色素C氧化酶2(SCO2)和细胞色素C氧化酶11(COX11),并将Cu^+传递给细胞色素C氧化酶(CCO),CCO是细胞呼吸链中的关键酶之一,参与将细胞内的化学能转化为细胞需要的能量[4]的过程。

2) CCS是另一种Cu伴侣蛋白,可以将Cu^+转移给超氧化物歧化酶1(SOD1)[5],并帮助SOD1正确折叠和激活,维持SOD1的活性和稳定性,在细胞内发挥重要的抗氧化作用,从而保护细胞免受自由基的损害。

3) ATOX1则可以将Cu^+转运到细胞核,Cu^+因而与转录因子结合并驱动基因表达[6]。ATOX1还可将Cu^+从高尔基体反面的网络结构(TGN)转运到铜转运ATP酶(ATP7A和ATP7B)。ATP7A在除了肝脏以外的大多数组织和器官中表达,而ATP7B主要在肝脏中表达[7]。在生理Cu^+水平下,铜转运ATP酶定位在TGN中,将Cu^+从细胞质转运到TGN腔内。当细胞内Cu^+增加时,铜转运ATP酶与细胞质膜融合,以外排Cu^+。当Cu^+恢复到生理水平时,这些铜转运蛋白被再次回收到TGN。

肝脏是调控铜稳态的中央控制器官,主要通过3条铜代谢途径:将Cu^+释放到血液中进一步循环、转运到胆汁中排泄或储存在肝细胞中[8]。在铜摄入量高的情况下,铜的吸收减少,铜的排泄增加;相反,在铜摄入量低的情况下,通过胆汁排泄的内源性铜减少,吸收的铜增加。铜稳态的失衡可能会导致铜过量或缺乏,进而引发一系列与铜代谢相关的疾病,例如威尔逊病(由于铜排泄障碍而导致铜在体内积累)、门克斯(Menkes)病(由于铜吸收障碍而导致铜缺乏)等[9]。因此,维持适当的铜代谢对于人体健康至关重要。

2 铜死亡的机制

先前研究表明,铜离子载体伊利司莫(Elesclomol,ES)可以诱导细胞死亡[10]。为验证这种死亡方式是否受已知的细胞死亡方式的影响,Tsvetkov等[1]通过对细胞分别进行抑制剂处理,包括细胞凋亡抑制剂(Z-VAD-FMK和BOC-D-FMK)[11-12]、铁死亡抑制剂(ferrostatin-1)[13]、坏死抑制剂(Necrostatin-1)[14]及氧化应激抑制剂(N-acetyl cysteine)[15],发现这些抑制剂对铜离子载体诱导的细胞死亡均没有影响,说明铜离子载体诱导的细胞死亡是一种不同于已知的细胞死亡方式的新型细胞死亡方式。

同时,研究还显示,对线粒体呼吸依赖性强的细胞对铜离子载体的敏感性比进行糖酵解的细胞高出近1 000倍;与经GPX4铁死亡抑制剂处理的细胞相比,采用线粒体功能抑制剂处理的细胞对铜离子载体的敏感性影响有很明显的区别。用铜离子载体ES处理细胞后,三羧酸(TCA)循环相关产物代谢失调,进一步阐明了铜载体诱导的细胞死亡与TCA循环的密切联系。这种铜诱导的细胞死亡方式在2022年被首次命名为铜死亡(cuproptosis)[16]。铜死亡的主要过程依赖于细胞内铜离子的积累,当过量的Cu^{2+}进入细胞时,它会被转运到线粒体并被还原为Cu^+。这种Cu^+干扰了TCA循环和电子传递链

(ETC)，导致脂酰化蛋白的寡聚化和 Fe-S 簇蛋白的丢失，最终导致细胞死亡(图 2)。

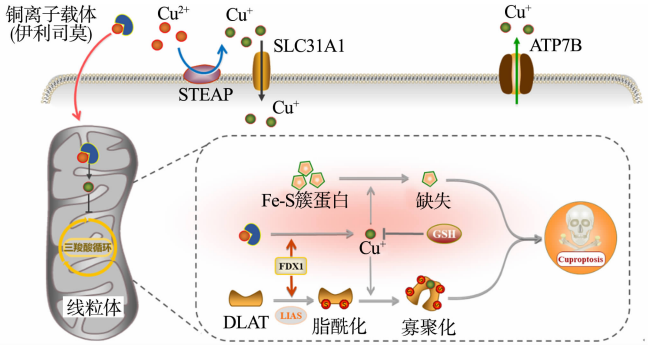


图 2　铜死亡机制示意图

Fig. 2　Schematic diagram of cuproptosis mechanism

为了进一步探究铜死亡的代谢途径，Tsvetkov 等[1]使用 CRISPR-Cas9 技术进行功能丧失筛选，并鉴定了 7 个与铜诱导的细胞死亡相关的基因。它们分别编码铁氧还蛋白 1(ferredoxin 1，FDX1)、脂酰转移酶 1(lipolytransferase 1，LIPT1)、硫辛酸合成酶(lipoyl synthase，LIAS)、二氢硫辛酰胺脱氢酶(dihydrolipoamide dehydrogenase，DLD)、二氢硫辛酰 S-乙酰转移酶(dihydrolipoamide S-acetyltransferase，DLAT)、丙酮酸脱氢酶 E1-α 亚基(pyruvate dehydrogenase E1 subunit α_1，PDHA1)和丙酮酸脱氢酶 E1-β 亚基(pyruvate dehydrogenase E1 subunit β，PDHB)。其中，LIPT1，LIAS，DLD 是硫辛酸途径的组分，丙酮酸脱氢酶(pyruvate dehydrogenase，PDH)复合物中的 DLAT、E1-α 亚基和 E1-β 亚基是脂酰化蛋白的靶点[17]。

研究证实，FDX1/LIAS 是蛋白质脂酰化的上游调节因子，在调节细胞铜死亡过程中扮演着关键角色。FDX1 是铜死亡过程中的一个关键酶，具有很强的还原能力，可以将 Cu^{2+} 还原为 Cu^{+}，并可以在线粒体内对 DLAT、甘氨酸裂解系统蛋白 H(glycine cleavage system protein H，GCSH)、二氢硫辛酰转琥珀酰基酶(dihydrolipoamide-S-succinyltransferase，DLST)和二氢硫辛酰支链转移酶 E2(dihydrolipoamide branched-chain transacylase E2，DBT)这 4 种特定酶进行脂酰化。脂酰化是一种稀有但高度保守的半胱氨酸残基的翻译后修饰，在维持细胞代谢途径和保持正常线粒体功能方面起着至关重要的作用[18]。一方面，进入细胞内的 Cu^{2+} 经 FDX1 还原后生成 Cu^{+}，Cu^{+} 可以结合已发生脂酰化的蛋白质，特别是在末端半胱氨酸残基的二硫键上，这导致蛋白质聚集，蛋白质聚集会干扰酶的结构、功能和活性，从而阻碍 TCA 循环的正常进行。例如，当 Cu^{+} 结合到丙酮酸脱氢酶复合物的一个亚基 DLAT 时，DLAT 发生寡聚，功能丧失，丙酮酸无法转化成乙酰辅酶 A，整个 TCA 循环被严重抑制。另一方面，Cu^{+} 也会影响线粒体中的 Fe-S 簇蛋白发挥作用，包括电子转移、催化反应、DNA 修复等[19]。

3　铜死亡在肿瘤治疗方面的应用

铜死亡为肿瘤治疗提供了新视角。铜死亡诱导剂可触发细胞铜死亡过程，目前以铜离子载体为主，如伊利司莫、NSC-319726 和二硫化物等[20]。这些化合物通过将铜离子引入细胞内并干扰 Fe-S 簇生物合成等途径诱导细胞铜死亡，具有潜在的抗癌效果[21]。目前，伊利司莫正在癌症病人中进行Ⅱ期临床试验[22]。

此外，铜基纳米材料由于其内在的物理化学和生物特性、在生物体中的重要作用，以及近年来在各种疾病特别是癌症治疗中的重要作用而受到广泛关注。同时，新兴的纳米技术极大地促进了具有多功能性质的铜基纳米材料的制备，从而建立了一个“铜时代”[23]。

Xu 等[24]设计了一种葡萄糖氧化酶(GOx)包埋的 Cu(I) 1，2，4-三唑([Cu(tz)])配位聚合物纳米平台(GOx@[Cu(tz)])，用于饥饿增强型铜死亡和光动力协同治疗。葡萄糖和谷胱甘肽的消耗使癌细胞对 GOx@[Cu(tz)]介导的铜代谢敏感，产生脂酰化的线粒体蛋白聚集，诱导铜死亡。体内实验结果表明，GOx@[Cu(tz)]对膀胱肿瘤生长的抑制率为 92.4%。这是第一个关于铜纳米材料能够诱导铜死亡用于膀胱癌协同治疗的报道。此外，Ni 等[25]设计了一种新型的肿瘤微环境(TME)响应型核-壳结构树

突状分子(CSTD),并有效地装载了铜离子和化疗药物双硫仑(DSF),用于肿瘤靶向磁共振(MR)成像和铜死亡促进的化学-化学动力学治疗。CSTD-Cu(II)@DSF可被MCF-7乳腺癌细胞特异性摄取,并在ROS过表达的弱酸性TME中释放药物。细胞内富集的Cu^{2+}离子可诱导脂酰化蛋白的寡聚化和蛋白毒性应激,诱导铜死亡,有效抑制MCF-7肿瘤的生长。

不仅如此,Xu等[26]还研发了一种新型铜/铁杂化空心无定形金属有机框架(HaMOF),用于负载阿霉素抗癌药(DOX@Fe/CuTH)。DOX@Fe/CuTH可以同时促进H_2O_2的产生和谷胱甘肽的消耗,放大细胞氧化应激,还可以引起线粒体功能障碍,下调铜转运蛋白ATP7A,导致代谢紊乱,并在细胞质中大量保留铜,过量的Cu^{2+}可引起DLAT蛋白聚集,导致细胞铜死亡。此外,Zhou等[27]还制备了光热触发纳米平台(Au@MSN-Cu/PEG/DSF),原位生成具有细胞毒性的双(二乙基二硫代氨基甲酸盐)铜(CuET),导致细胞凋亡,形成的Cu^{+}促进线粒体蛋白聚集,导致铜死亡;与光热疗法协同作用,有效抑制肿瘤生长,抑制率高达80.1%。这些结果为基于铜死亡的潜在癌症治疗提供了有希望的前景,为设计先进的铜基纳米治疗平台提供了启发。

4 结论与展望

综上可知,铜的吸收、转运、利用和排泄对维持生物体内的铜稳态具有显著影响,铜代谢紊乱可导致代谢异常,引起相关疾病。铜死亡是一种新型细胞调节性死亡方式,与TCA循环密切相关,近年来在肿瘤治疗中的应用日益凸显。深入了解铜死亡机制,开发新型铜基纳米材料,对于探索肿瘤治疗新方案,筛选肿瘤靶向的相关药物具有一定价值。

参考文献:

[1] TSVETKOV P,COY S,PETROVA B,*et al*. Copper induces cell death by targeting lipoylated tca cycle proteins[J]. Science,2022,375(6586):1254-1261. DOI:10.1126/science.abf0529.

[2] CHEN Xinyue,CAI Qi,LIANG Ruikai,*et al*. Copper homeostasis and copper-induced cell death in the pathogenesis of cardiovascular disease and therapeutic strategies[J]. Cell Death and Disease,2023,14(2):105. DOI:10.1038/s41419-023-05639-w.

[3] WANG Wuyin,MO Wentao,HANG Zishan,*et al*. Cuproptosis: Harnessing transition metal for cancer therapy[J]. ACS Nano,2023,17(20):19581-19599. DOI:10.1021/acsnano.3c07775.

[4] HORNG Y C,COBINE P A,MAXFIELD A B,*et al*. Membrane transport, structure, function, and biogenesis: Specific copper transfer from the COX17 metallochaperone to both SCO1 and COX11 in the assembly of yeast cytochrome *c* oxidase[J]. The Journal of Biological Chemistry,2004,279(34):35334-35340. DOI:10.1074/jbc.M404747200.

[5] CULOTTA V C,KLOMP L W J,STRAIN J. The copper chaperone for superoxide dismutase[J]. Journal of Biological Chemistry,1997,272(38):23469-23472. DOI:10.1074/jbc.272.38.23469.

[6] HATORI Y,INOUYE S,AKAGI R. Thiol-based copper handling by the copper chaperone atox1[J]. International Union of Biochemistry Molecular Biology Life,2017,69(4):246-254. DOI:10.1002/iub.1620.

[7] FRANCESCO T B,SERENA S. Mechanisms of charge transfer in human copper atpases ATP7A and ATP7B[J]. IUBMB Life,2017,69(4):218-225. DOI:10.1002/iub.1603.

[8] CHEN Liyun,MIN Junxia,WANG Fudi. Copper homeostasis and cuproptosis in health and disease[J]. Signal Transduction and Targeted Therapy,2022,7(1):378. DOI:10.1038/s41392-022-01229-y.

[9] HOON S,LEAH H Z. Genetic defects in copper metabolism[J]. The Journal of Nutrition,2003,133(5):1527S-1531S. DOI:10.1038/sj.ijo.0802279.

[10] TSVETKOV P,DETAPPE A,CAI Kai,*et al*. Mitochondrial metabolism promotes adaptation to proteotoxic stress[J]. Nature Chemical Biology,2019,15(7):757. DOI:10.1038/s41589-019-0315-5.

[11] XU Weijun,WANG Yaping,HOU Guanghui,*et al*. Tumor microenvironment responsive hollow nanoplatform for triple amplification of oxidative stress to enhance cuproptosis-based synergistic cancer therapy[J]. Advanced Healthcare Materials,2023,12(13):2202949. DOI:10.1002/adhm.202202949.

[12] SHEEN-CHEN S M,HUNG K S,ENG H L. Effect of BOC-D-FMK on hepatocyte apoptosis after bile duct liga-

tion in rat and survival rate after endotoxin challenge[J]. Journal of Gastroenterology and Hepatology, 2008, 23(8pt1): 1276-1279. DOI: 10.1111/j.1440-1746.2008.05368.x.

[13] XIE Wensheng, GUO Zhenhu, ZHAO Lingyun, *et al*. The copper age in cancer treatment: From copper metabolism to cuproptosis[J]. Progress in Materials Science, 2023, 138(1): 101145. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2023.101145.

[14] YOU Zerong, SAVITZ S, YANG Jinsheng. Necrostatin-1 reduces histopathology and improves functional outcome after controlled cortical impact in mice[J]. Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism, 2008, 28(9): 1564-1573. DOI: 10.1038/jcbfm.2008.44.

[15] CECONI C, CURELLO S, CARGNONI A, *et al*. The role of glutathione status in the protection against ischaemic and reperfusion damage: Effects of N-acetyl cysteine[J]. Journal of Molecular and Cellular Cardiology, 1987, 19(3): S11. DOI: 10.1016/S0022-2828(87)80040-8.

[16] 刘骏达，钟薇薇，鲁显福，等. 铜死亡与铜代谢相关疾病研究进展[J]. 江苏大学学报(医学版)，2022，32(4)：318-325. DOI：10.13312/j.issn.1671-7783.y220108.

[17] 朱洁洁，王华. 铜诱导调节性细胞死亡的作用机制与抗肿瘤治疗的研究[J]. 江苏大学学报(医学版)，2022，32(4)：326-349. DOI：10.13312/j.issn.1671-7783.y220122.

[18] 黄本林，付瑞，王宁，等. 铜死亡与肿瘤的关系研究进展[J]. 临床误诊误治，2022，35(11)：112-116. DOI：10.3969/j.issn.1002-3429.2022.11.024.

[19] LEE K C, YEO W S, ROE J H. Oxidant-responsive induction of the *suf* operon, encoding a Fe-S assembly system, through Fur and IscR in *Escherichia coli*[J]. Journal of Bacteriology, 2008, 190(24): 8244-8247. DOI: 10.1128/JB.01161-08.

[20] LI Duguang, SHI Zhaoqi, LIU Xiaolong, *et al*. Identification and development of a novel risk model based on cuproptosis-associated RNA methylation regulators for predicting prognosis and characterizing immune status in hepatocellular carcinoma[J]. Hepatology International, 2023, 17(1): 112-130. DOI: 10.1007/s12072-022-10460-2.

[21] WANG Changhong, XUE Ji, YANG Guang, *et al*. Role of NSC319726 in ovarian cancer based on the bioinformatics analyses[J]. Oncotargets and Therapy, 2015, 8(3): 3757-3765. DOI: 10.2147/OTT.S86343.

[22] NGWANE A H, PETERSEN R D, BAKER B, *et al*. The evaluation of the anti-cancer drug elesclomol that forms a redox-active copper chelate as a potential anti-tubercular drug: The evaluation of the anti-cancer drug elesclomol [J]. International Union of Biochemistry and Molecular Biology Life, 2019, 71(5): 532-538. DOI: 10.1002/iub.2002.

[23] DU Yaqian, ZHANG Rui, YANG Jiani, *et al*. A "closed-loop" therapeutic strategy based on mutually reinforced ferroptosis and immunotherapy[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(13): 2111784. DOI: 10.1002/adfm.202111784.

[24] XU Yuzhi, LIU Siyang, ZENG Leli, *et al*. An enzyme-engineered nonporous copper(I) coordination polymer nanoplatform for cuproptosis-based synergistic cancer therapy[J]. Advanced Materials, 2022, 34(43): 2204733. DOI: 10.1002/adma.202204733.

[25] NI Cheng, OUYANG Zhijun, LI Gaoming, *et al*. A tumor microenvironment-responsive core-shell tecto dendrimer nanoplatform for magnetic resonance imaging-guided and cuproptosis-promoted chemo-chemodynamic therapy[J]. Acta Biomaterialia, 2023, 164(1): 474-486. DOI: 10.1016/j.actbio.2023.04.003.

[26] XU Weijun, QIAN Junmin, HOU Guanghui, *et al*. A hollow amorphous bimetal organic framework for synergistic cuproptosis/ferroptosis/apoptosis anticancer therapy via disrupting intracellular redox homeostasis and copper/iron metabolisms[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(40): 2205013. DOI: 10.1002/adfm.202205013.

[27] ZHOU Jie, YU Qiao, SONG Juan, *et al*. Photothermally triggered copper payload release for cuproptosis-promoted cancer synergistic therapy[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2023, 62(12): e202213922. DOI: 10.1002/anie.202213922.

（责任编辑： 黄晓楠　　**英文审校：** 刘源岗）

DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.202307004

轮毂驱动轻型商用车差速转向稳定性分析

韩锋钢，陈进，罗翔，宋帆，彭倩

（厦门理工学院 机械与汽车工程学院，福建 厦门 361024）

摘要： 针对分布式驱动差速转向因车轮滑转或滑移导致的失稳问题，以某后轮轮毂驱动轻型商用车底盘为研究对象，设计差速转向控制策略。构建二自由度转向运动学模型，根据理想横摆角速度和实际横摆角速度的差值进行自适应实时跟踪控制，对轮毂驱动电机附加横摆力矩进行合理分配，实现转向助力协调优化控制，开展实车测试并参照 QC/T 480－1999 对车辆转向稳定性进行评估。结果表明：稳态回转试验、转向回正试验、转向轻便性试验的综合评分分别为 84.10，89.46，85.82，均满足国标要求且性能良好。

关键词： 轮毂电机；电子差速；扭矩分配；横摆力矩

中图分类号： U 469.72 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000-5013(2023)06-0676-08

Stability Analysis of Differential Steering for Wheel-Driven Light Commercial Vehicles

HAN Fenggang, CHEN Jin, LUO Xiang, SONG Fan, PENG Qian

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: Aiming at the instability problem caused by wheel slippage in distributed drive using differential steering, a differential steering control strategy is designed based on the chassis of a light commercial vehicle driven by rear wheels. A two degree of freedom steering kinematic model was constructed, and adaptive real-time tracking control was performed based on the difference between the ideal and the actual yaw rate. The additional yaw moment of the wheel hub drive motor was reasonably allocated to achieve coordinated and optimized control of steering assistance. On-site testing and evaluation of the vehicle's steering stability was conducted with reference to QC/T 480-1999. The results show that the comprehensive scores of steady-state rotation test, steering return test, and steering portability test are 84.10, 89.46 and 85.82, respectively, which meet the requirements of national standards and have good performance.

Keywords: hub motor; electronic differential; torque distribution; yaw moment

轮毂电机独立驱动的电动汽车去除了传动轴、变速器和机械差速离合器等部件，提升了空间利用率和传动效率，其在布置结构、底盘集成控制及执行灵活性等方面有着明显的技术优势[1-3]。差速协调控制技术是轮毂驱动车辆能够行驶稳定的关键[4-6]，采用轮毂电机驱动，各个轮毂电机相互独立，具有可控性强、响应速度快的优点，有更先进的执行控制能力[7-8]。然而，差速控制需要对每个轮毂电机进行精确

收稿日期： 2023-07-14

通信作者： 彭倩(1982-)，男，教授，博士，主要从事新能源汽车电驱动的研究。E-mail：pengqian603@163.com。

基金项目： 福建省科技厅高校产学合作项目(2020H6021)；福建省厦门市重大专项(3502Z202221030)

协调及实时控制，其控制方法复杂，亟待进一步深入研究[9]。

学者们对电动汽车差速转向稳定性机理进行了研究。Farazandeh 等[10]通过比例积分(PI)控制器计算附加前轮转角，并在每个车轮上独立输出附加转角，降低了轮胎侧向力的饱和程度，从而提升车辆转向稳定性。黄茂云[11]提出一种基于柔性动作-评价(SAC)算法协调控制方法，改善了车辆在极限工况中的操纵稳定性和安全性。赵万忠等[12]通过构建汽车三自由度模型及差速转向系统模型，设计鲁棒比例积分微分(PID)路感控制器进行转向路感仿真研究，结果表明，系统具有理想的转向灵敏度和转向稳定性。莫建平等[13]采用阿克曼转向模型，设计一种自适应控制方法，在低速行驶时提高了电动汽车的转向性能。李政伟[14]设计基于模糊控制的电子差速控制模型，对差速控制系统进行设计和分析，系统性地验证了控制策略的正确性。林祥辉[15]针对车体因滑移而失衡问题，提出一种基于自抗扰控制的电子差速控制(EDC)策略，在平滑路面、对接路面及对开路面进行实验，论证了该策略的可行性。翟丽等[16]采用神经网络 PID 控制的电子差速转速扭矩综合控制策略，仿真验证了该策略的可行性和合理性。王其东等[17]基于三步法设计线控差动转向非线性控制器并进行仿真与在环试验，结果表明，车辆能根据驾驶员意愿实现较精准的转向控制。

以上研究主要面向乘用车，较少有涉及商用车及对整车试验的研究。因此，本文对某后轮轮毂驱动轻型商用车开展仿真及整车操稳性测试。

1　差速转向控制策略

图 1 为电子差速控制策略总体方案。将驾驶员指令通过 CAN 通讯网络与差速控制器和电机控制器进行信息交换，控制层通过 CAN 通讯信号传递的输入信号进行分析控制，判断整车是直线或转向行驶。通过实际横摆角速度判定车辆是直线或转向行驶，若实际横摆角速度为 0，则判定为直线行驶；若不为 0，则判定为转向行驶。

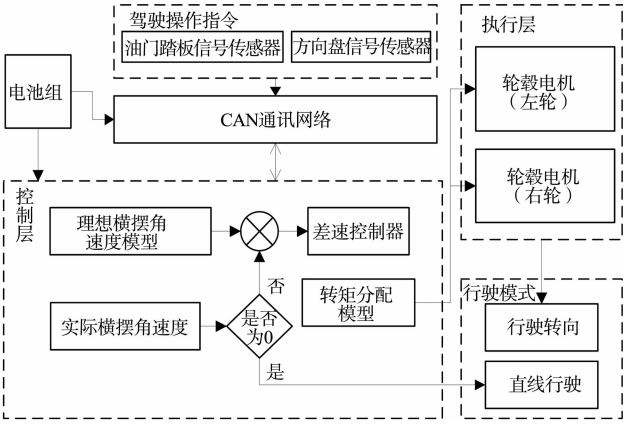


图 1　电子差速控制策略总体方案

Fig. 1　General scheme of electronic differential control strategy

1.1　直线行驶差速控制策略

根据横摆角速度反馈来调节轮毂电机的扭矩输出，调整车身方向确保车辆直线行驶。当横摆角速度(γ)不为零、车辆将出现跑偏趋势时，将横摆角速度作为 PID 控制器的输入变量。计算附加横摆力矩，并依据需求对左、右两侧驱动轮的扭矩进行分配。两轮扭矩的增加或减小通过横摆角的正负来判断，当横摆角速度 $\gamma>0$ 时，将外侧驱动轮扭矩(T_2)减去附加扭矩(ΔT)的一半，同时将附加扭矩(ΔT)的一半增加至内侧驱动轮扭矩(T_1)；当 $\gamma<0$ 时，将内侧驱动轮扭矩(T_1)减去附加扭矩(ΔT)的一半，同时将附加扭矩(ΔT)的一半增加至外侧驱动轮扭矩(T_2)。

1.2　转向行驶差速控制策略

整车采用前轮转向、后轮驱动方式。基于阿克曼转向模型，为了确保车辆的转向稳定性，在车辆转向行驶时，假定不考虑车辆出现横摆角漂移、侧偏的现象和天气、道路摩擦等因素的影响[18-19]。整车转向动力学模型，如图 2 所示。图 2 中：C 为整车轮距；L 为车辆轴距；l_f，l_r 分别为整车质心到前、后轴的轴距；F_{X1}，F_{X2}，F_{X3}，F_{X4} 分别为左前轮、左后轮、右前轮、右后轮沿 X 轴方向的作用力；F_{Y1}，F_{Y2}，F_{Y3}，F_{Y4} 分别为左前轮、左后轮、右前轮、右后轮沿 Y 轴方向的作用力；u 为整车纵向速度；v 为整车横向速度。当接收到驾驶员的转向指令时，车辆将指令通过主差速器传递给后差速器和前轮实现差速转向。

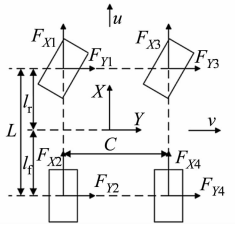


图 2　整车转向动力学模型

Fig. 2　Vehicle steering dynamics model

转向行驶差速控制策略，如图 3 所示。当整车转向行驶时，通过车速和方向盘转角来计算理论横摆角速度。将横摆角速度实际值(γ)与理论值(γ_d)之差($\Delta\gamma$)作为 PID 控制器的输入变量来计算附加横摆力矩，

并结合方向盘转角信号对2个驱动车轮的附加扭矩进行分配。当 $\Delta\gamma\geqslant 0$ 时,将右侧驱动轮扭矩(T_1)减去附加扭矩(ΔT),同时将附加扭矩(ΔT)增加至左侧驱动轮扭矩(T_2);而当$\Delta\gamma<0$时,将左侧驱动轮扭矩(T_2)减去附加扭矩(ΔT),同时将附加扭矩(ΔT)增加至右侧驱动轮扭矩(T_1)。

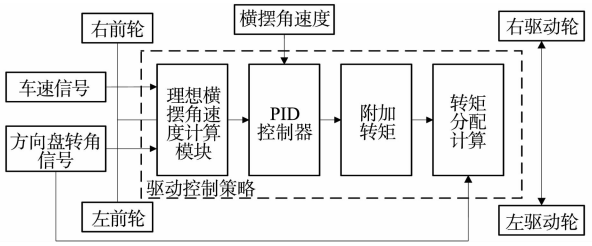


图3 转向行驶差速控制策略

Fig. 3 Steering driving differential control strategy

1.3 差速转向模型

1.3.1 车辆二自由度模型 利用汽车线性二自由度模型,开展车辆操作稳定性的特性研究。假定轮胎侧向力与侧偏角为正比例关系,不考虑车身侧偏角的影响,并将同一轴上的车轮简化为一个车轮[20],车辆二自由度模型的动力学微分方程表示为

$$\left.\begin{aligned}\dot{\beta}&=-\frac{K_a+K_b}{mu}\cdot\beta+\left(\frac{K_a l_r-K_b l_f}{mu^2}-1\right)\cdot\gamma+\frac{K_b}{mu}\cdot\delta_a,\\ \dot{\gamma}&=\frac{-K_b l_f+K_a l_r}{\boldsymbol{I}_X}\cdot\beta-\frac{K_b l_f^2+K_a l_r^2}{\boldsymbol{I}_X u}\cdot\gamma+\frac{K_b l_f}{\boldsymbol{I}_X}\cdot\delta_a。\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式(1)中:m 为车辆质量;β 为质心侧偏角;δ_a 为前轮转角;$\boldsymbol{I}_X$ 为绕 X 轴的横摆转动惯量;K_a 和 K_b 分别为前轮和后轮的侧倾刚度。

当车辆行驶稳定后,确定前轮角度,车辆行驶至等速圆周状态。此时,$\dot{\beta}$ 和 $\dot{\gamma}$ 的值为0,同时设理想质心侧偏角(β)为0,代入式(1)中,可得

$$\left.\begin{aligned}\gamma_d&=\frac{u\delta_a}{L+K_u u^2},\\ K_u&=\frac{m(K_a l_r-K_b l_f)}{L^2 K_b K_a}。\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

式(2)中:K_u 为车辆稳态域度。

理想横摆角速度模型,如图4所示。

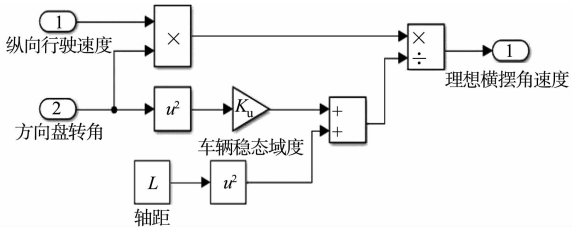


图4 理想横摆角速度模型

Fig. 4 Ideal yaw rate model

1.3.2 扭矩分配策略 横摆角速度理论值和实际值之差($\Delta\gamma$)及方向盘转角通过控制器产生一个附加横摆力矩来调整车辆行驶轨迹,将附加横摆力矩分配至2个后轮,使 $\Delta\gamma$ 为0。假设PID控制器产生了一个附加扭矩(ΔT),此时,需要将纵向驱动力(ΔF)增加或减少至内侧轮和外侧轮,故有

$$\left.\begin{aligned}&\Delta T=\Delta F\cdot\frac{C}{2}+\Delta F\cdot\frac{C}{2}=\Delta F\cdot C,\\ &\Delta F\cdot r_t=\Delta T_f,\\ &\Delta T_f=\Delta T\cdot r_t/C。\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

式(3)中:ΔT_f 为轮胎扭矩变化值;r_t 为轮胎滚动半径。

根据式(3)计算出车轮的附加扭矩后,通过方向盘的转角来确定需要增加或减少的驱动扭矩。将初始扭矩和附加扭矩输入动力学模型,完成动力学模型的驱动力控制。扭矩分配模型,如图5所示。图5中:输入附加扭矩和方向盘转角信号,输出2个驱动轮的扭矩值。

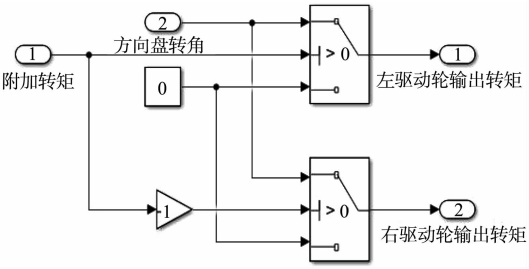


图5 扭矩分配模型

Fig. 5 Torque distribution model

2 稳定性试验与评价指标

2.1 稳态回转试验

稳态回转试验是指车辆以最低稳定速度行驶并做圆周运动,当在半圈内车辆能够始终保持对准圆周时,固定方向盘并停车,记录数据并开始试验,车辆缓慢起步,均匀地加速至最大侧向加速度(不超过6.5 $m\cdot s^{-2}$)。从左、右两个方向分别测试,每个方向试验3次。测试数据包括侧向加速度、转弯半径比、前后轴侧偏角差值。转弯半径比和前后轴侧偏角差值的计算公式分别为

$$\frac{R_t}{R_0}=57.3\cdot\frac{v_i}{r_j},\tag{4}$$

$$\delta_1-\delta_2=57.3\cdot L\cdot\left(\frac{1}{R_0}-\frac{1}{R_t}\right)。\tag{5}$$

式(4)，(5)中：R_t，R_0 分别为 t 点转弯半径和初始半径；v_i 为 i 点纵向瞬时车速；r_j 为 j 点瞬时横摆角速度值；δ_1 为前轴侧偏角；δ_2 为后轴侧偏角。

稳态回转试验的评价指标有中性转向点(N_{a_n})、不足转向度(N_U)、车身侧倾度(N_φ)，其计算公式分别为

$$N_{a_n}=60+\frac{40}{a_{n,100}-a_{n,60}}\cdot(a_n-a_{n,60}),\tag{6}$$

$$N_U=60+\frac{U(U_{60}-U)(\lambda-U)}{U_{100}(U_{60}-U_{100})(\lambda-U_{100})},\qquad\lambda=\frac{2\cdot U_{60}/U_{100}}{U_{60}/U_{100}-2}\cdot U_{100},\tag{7}$$

$$N_\varphi=60+\frac{40}{K_{\varphi,60}-K_{\varphi,100}}\cdot(K_{\varphi,60}-K_\varphi)。\tag{8}$$

式(6)～(8)中：a_n，$a_{n,100}$，$a_{n,60}$ 分别为中性转向点的试验值、上限值、下限值；U，U_{100}，U_{60} 分别为不足转向度的试验值、上限值、下限值；K_φ，$K_{\varphi,100}$，$K_{\varphi,60}$ 分别为车身侧倾度的试验值、上限值、下限值；λ 为系数。

2.2　转向回正试验

调节方向盘转角使车辆做圆周运动，将车速提升至侧向加速度为 4 m·s^{-2}，固定方向盘并稳定车速 3 s，随后迅速松开方向盘且保持车速不变，记录车辆运动过程。从左、右两个方向分别测试，每个方向试验 3 次。残留横摆角速度平均值($\Delta\bar{r}$)和第 i 次试验的横摆角速度总方差($E_{r,i}$)的计算公式分别为

$$\Delta\bar{r}=\frac{1}{3}\sum_{k=1}^{3}\Delta r_k,\tag{9}$$

$$E_{r,i}=\left[\sum_{k=0}^{n}\left(\frac{r_{k,i}}{r_{0,i}}\right)^2-0.5\right]\times\Delta T_c。\tag{10}$$

式(9)，(10)中：Δr_k 为第 k 次试验的残留横摆角速度；$r_{k,i}$，$r_{0,i}$ 分别为横摆角速度第 i 次的瞬时值和初始值；n 为采样点数；ΔT_c 为采样周期。

评价指标包括残留横摆角速度评价分值($N_{\Delta r}$)和横摆角速度总方差评价分值(N_E)，其计算公式分别为

$$N_{\Delta r}=60+\frac{40}{\Delta r_{60}-\Delta r_{100}}\cdot(\Delta r_{60}-\Delta r),\tag{11}$$

$$N_E=60+\frac{40}{E_{r_{60}}-E_{r_{100}}}\cdot(E_{r_{60}}-E_r)。\tag{12}$$

式(11)，(12)中：Δr，Δr_{100}，Δr_{60} 分别为残留横摆角速度的试验值、上限值、下限值；E_r，$E_{r_{100}}$，$E_{r_{60}}$ 分别为横摆角速度总方差的试验值、上限值、下限值。

2.3　转向轻便性试验

车辆以 10 km·h^{-1} 的稳定车速按照指定双扭线行驶 1 周，记录方向盘转角和扭矩，试验共进行 3 次。测量数据有方向盘最大作用力矩、最大作用力、平均摩擦力矩均值、平均摩擦力均值、作用功(W_i)、平均摩擦力矩($\overline{M}_{sw,i}$)、平均摩擦力($\overline{F}_{sw,i}$)。W_i，$\overline{M}_{sw,i}$，$\overline{F}_{sw,i}$ 的计算公式分别为

$$W_i=\frac{1}{57.3}\sum_{j=1}^{n_i-1}M_{sw,i,j}\cdot(\delta_{sw,i,j+1}-\delta_{sw,i,j}),\tag{13}$$

$$\overline{M}_{sw,i}=\frac{57.3W_i}{2(|-\delta_{sw,max}|+|+\delta_{sw,max}|)},\tag{14}$$

$$\overline{F}_{sw,i}=2\,\overline{M}_{sw,i}/D。\tag{15}$$

式(13)～(15)中：W_i 为绕双扭线第 i 周行驶时的方向盘作用功；$M_{sw,i,j}$ 为第 i 周的第 j 个采样点处的方向盘作用力矩；n_i 为第 i 周的采样点数；$\delta_{sw,i,j}$，$\delta_{sw,i,j+1}$ 分别为第 i 周的第 j 个、第 $j+1$ 个采样点处的方向盘转角；D 为汽车方向盘直径。

评价指标为方向盘的最大转力评价分值(N_{F_m})和平均摩擦力评价分值(N_{F_s})，其计算式分别为

$$N_{F_m}=60+\frac{40}{F_{m,60}-F_{m,100}}\cdot(F_{m,60}-F_m), \tag{16}$$

$$N_{F_s}=60+\frac{40}{F_{s,60}-F_{s,100}}\cdot(F_{s,60}-F_s)。 \tag{17}$$

式(16),(17)中:F_m,$F_{m,100}$,$F_{m,60}$分别为方向盘最大转力的试验值、上限值、下限值;F_s,$F_{s,100}$,$F_{s,60}$分别为方向盘平均摩擦力的试验值、上限值、下限值。

3 实车试验

3.1 实车试验平台

搭建某轻型商用车轮毂驱动平台化底盘试验平台,如图6所示。底盘骨架采用全铝合金结构,以三元锂电池为动力能源。底盘主要参数,如表1所示。表1中:l,w,h分别为底盘的长、宽、高;k为轴数;c,d分别为前、后轮距;AL_1,AL_2分别为前、后轴荷;m_L为最大装载质量;h_{min}为最小离地间隙;v_{max}为最高车速;α_{max}为最大爬坡度。

图6 轮毂驱动平台化底盘试验平台

Fig. 6 Wheel-driven platform based chassis test rigs

表1 底盘主要参数

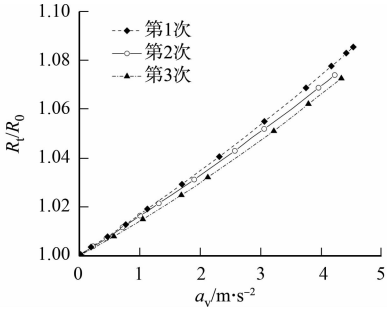
Tab. 1 Main parameters of chassis

参数	数值	参数	数值	参数	数值
$l\times w\times h$/mm×mm×mm	5 500×2 080×2 500	c/mm	1 710	m/kg	2 050
L/mm	3 400	d/mm	1 740	m_L/kg	1 000
k/个	2	AL_1/kg	1 400	h_{min}/mm	160
v_{max}/km·h^{-1}	100	AL_2/kg	1 650	α_{max}/%	≥10

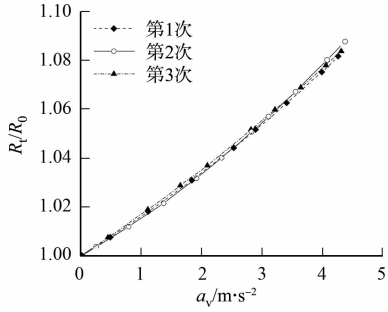
3.2 试验结果分析

综合考量试验场条件、平台和设备等多方面因素,参考GB/T 6323—2014《汽车操纵稳定性试验方法》[21],分别采用转向轻便性试验、转向回正试验及稳态回转试验对车辆操纵稳定性的转向轻便性、回正性能及不足转向特性进行实车验证。依据QC/T 480—1999《汽车操纵稳定性指标限值与评价方法》[22]对试验结果进行评分,评价指标满分为100分,及格为60分,分值的高低决定了车辆稳定性的优劣,分数越高,其稳定性能越优。

3.2.1 稳态回转试验 整车稳态回转试验结果,如图7~9所示。图7~9中:a_v为侧向加速度;φ为车身侧倾角。考虑车辆向左及向右的转向工况,分别对左转和右转开展3次试验验证。



(a) 左转



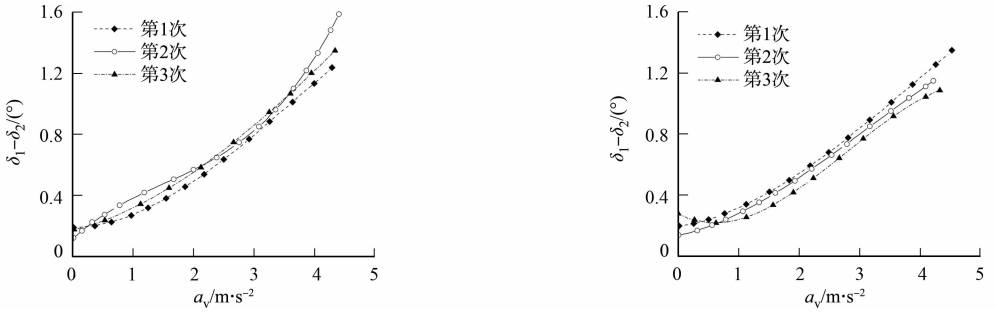
(b) 右转

图7 转弯半径比特性曲线

Fig. 7 Characteristic curves of turning radius ratio

对整车稳态回转特性进行打分,计算过程参照式(6)~(8),试验数据和评价结果,如表2所示。由表2可知:中性转向点、不足转向度、车身侧倾度的评价分值分别为63.72,88.57,100.00,计算得出稳态回转试验的综合评分为84.10,满足国标要求且性能良好。中性转向点评价分值满足基本要求,不足转向度评价分值良好,车身侧倾度评价分值优秀,综上来看,整车稳态回转性能较理想。

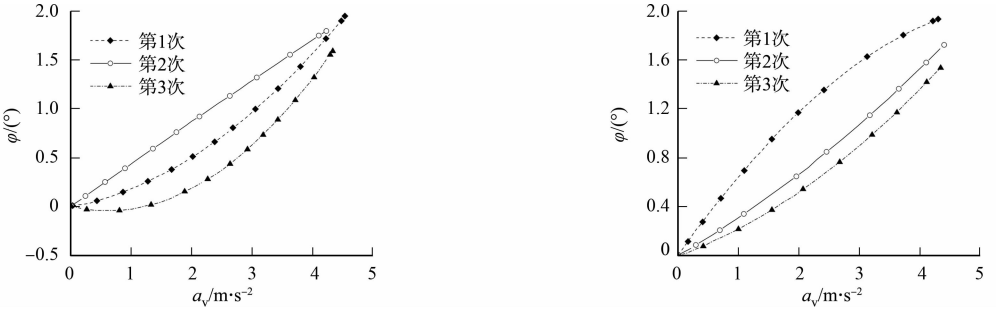
3.2.2 转向回正试验 转向回正试验测试结果,如图10所示。图10中:t_t为试验时间。考虑车辆向左及向右的转向工况,分别对左转和右转开展3次试验验证。



(a) 左转　　(b) 右转

图 8　前后轴侧偏角之差特性曲线

Fig. 8　Characteristic curves of difference between front and rear axle slip angles angles



(a) 左转　　(b) 右转

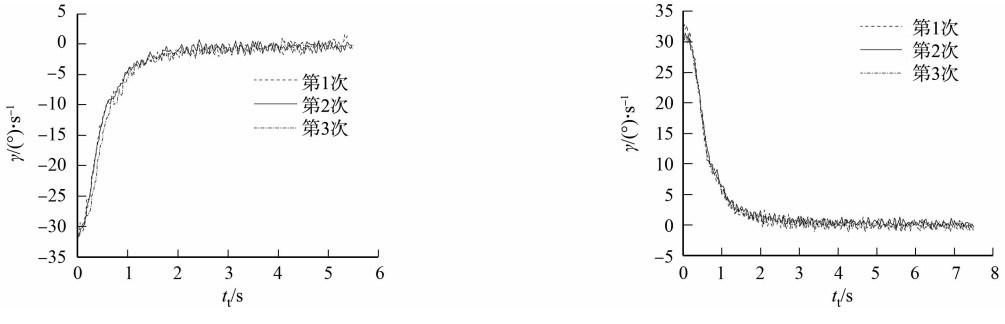
图 9　车身侧倾角特性曲线

Fig. 9　Characteristic curves of body roll angle

表 2　稳态回转试验数据和评价结果

Tab. 2　Steady-state rotation test data and evaluation results

评价指标	左转				右转				评价分值
	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值	第 1 次	第 2 次	第 3 次	平均值	
a_n/m·s^{-2}	4.59	4.26	4.36	4.40	4.31	4.44	4.37	4.37	63.72
U/(°)·s^2·m^{-1}	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.22	0.27	0.25	88.57
K_φ/(°)·s^2·m^{-1}	0.25	0.43	0.09	0.26	0.59	0.34	0.26	0.40	100.00



(a) 左转　　(b) 右转

图 10　转向回正试验测试结果

Fig. 10　Results of steering return test

对整车转向回正特性进行打分，评价指标包括残留横摆角速度和横摆角速度总方差，计算过程参照式(11)，(12)，试验数据和评价结果，如表 3 所示。由表 3 可知：残留横摆角速度、横摆角速度总方差评价分值分别为 90.27，88.65，转向回正试验的综合评分为 89.46，满足国标要求且性能良好。综上可知，整车转向回正性能良好。

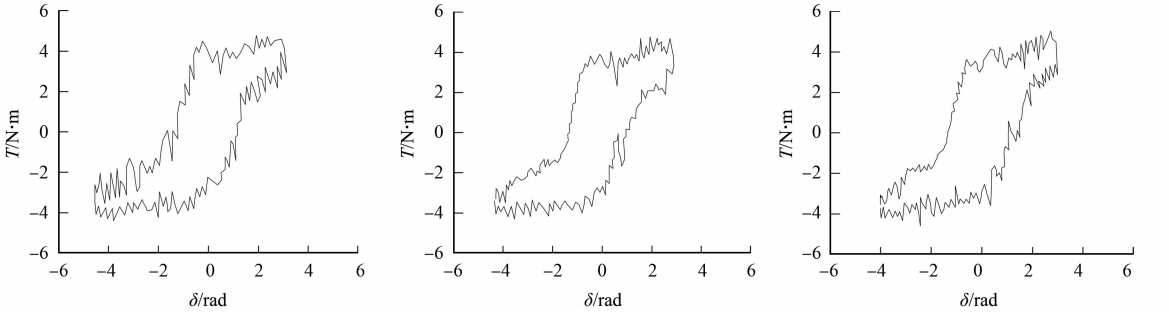
3.2.3　*转向轻便性试验*　转向轻便性试验测试结果，如图 11 所示。图 11 中：T 为方向盘扭矩；δ 为方向盘转角。考虑试验的严谨性，分别进行 3 次试验验证。

对整车转向轻便特性进行打分，评价指标包括方向盘的最大转力(F_m)和平均摩擦力($\overline{F}_{sw,i}$)，计算

表3 转向回正试验数据和评价结果

Tab. 3 Steering return test data and evaluation results

评价指标	左转				右转				评价分值
	第1次	第2次	第3次	平均值	第1次	第2次	第3次	平均值	
$\Delta r/(°)\cdot s^{-1}$	1.18	0.79	0.22	0.73	1.17	1.12	0.25	0.68	90.27
E_r/s	0.40	0.36	0.33	0.36	0.46	0.45	0.44	0.45	88.65



(a) 第1周 (b) 第2周 (c)第3周

图11 转向轻便性试验测试结果

Fig. 11 Results of steering portability test

过程参照式(16),(17),试验数据及其评价结果,如表4,5所示。表4中:M_{max}为方向盘最大作用力矩;$\theta_{max,r}$,$\theta_{max,l}$分别为方向盘右转、左转最大转角;$\overline{v}$为平均车速。

表4 转向轻便性试验数据

Tab. 4 Steering portability test data

测试参数	数值			
	第1周	第2周	第3周	平均值
$M_{max}/N\cdot m$	4.80	4.95	4.73	4.83
F_m/N	76.19	76.32	76.10	76.20
$\theta_{max,r}/(°)$	174.74	173.26	166.49	171.50
$\theta_{max,l}/(°)$	261.28	228.45	245.00	244.91
W_i/J	21.50	19.88	19.40	20.26
$\overline{M}_{sw,i}/N\cdot m$	1.41	1.42	1.35	1.39
$\overline{F}_{sw,i}/N$	61.77	61.82	61.70	61.76
$\overline{v}/km\cdot h^{-1}$	11.33	11.16	11.52	11.33

由表5可知:方向盘最大转力、方向盘平均摩擦力的评价分值分别为92.80,78.83,转向轻便性试验的综合评分为85.82,满足国标要求且性能良好。综上,整车转向轻便性能较理想。

表5 转向轻便性试验数据评价结果

Tab. 5 Evaluation results of steeringportability test data

评价指标	测试数据	评价分值	综合评分
F_m/N	76.20	92.80	85.82
$\overline{F}_{sw,i}/N$	61.76	78.83	85.82

4 结束语

针对四轮轮毂驱动差速转向因车轮滑转或滑移导致的失稳问题,以某后轮轮毂驱动轻型商用车底盘为研究对象,搭建车辆二自由度动力学模型,并采用PID转向控制策略对车辆横摆角速度进行实时跟踪控制。通过稳态回转试验、转向回正试验和转向轻便性试验,分别对整车操纵稳定性的不足转向特性、回正性能和转向轻便性进行了验证。实验结果表明:3个试验的综合评分较理想,该转向控制策略对轮毂电机驱动的差速协调控制效果良好,能够有效提升驱动轮之间的差速协调控制,提高操纵稳定性和行驶安全性。

参考文献:

[1] 徐寅,陈东.电动汽车差速系统研究综述[J].中国机械工程,2011,22(4):498-503.

[2] 杜雄梓,周亢,雷帅帅.四轮轮毂电机驱动农用无人车差速转向建模与分析[J].中国农机化学报,2023,44(2):106-111.DOI:10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2023.02.015.

[3] 张光德，王硕，马强. 电动轮汽车横向稳定性协同控制[J]. 机械设计与制造，2023，386(4)：163-166，171. DOI：10.3969/j. issn. 1001-3997. 2023. 04. 033.

[4] 姚芳，林祥辉，吴正斌，等. 电动汽车电子差速控制技术研究综述[J]. 自动化学报，2021，47(8)：1785-1798. DOI：10.16383/j. aas. c190293.

[5] HOU Rufei，LI Zhai，SUN Tianmin，*et al*. Steering stability control of a four in-wheel motor drive electric vehicle on a road with varying adhesion coefficient[J]. IEEE Access，2019，7：32617-32627. DOI：10. 1109/ACCESS. 2019. 2901058.

[6] CHEN Yong，CHEN Sizhong，ZHAO Yuzhuang，*et al*. Optimized handling stability control strategy for a four in-wheel motor independent-drive electric vehicle[J]. IEEE Access，2019，7：17017-17032. DOI：10. 1109/ACCESS. 2019. 2893894.

[7] 李英蕊. 轮毂电机驱动电动车技术发展研究[J]. 科教导刊：电子版(下旬)，2022(8)：285-286.

[8] 张征，马晓军，刘春光，等. 基于分层模型的轮毂电机驱动车辆直接横摆力矩控制[J]. 农业机械学报，2019，50(12)：387-394. DOI：10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2019. 12. 045.

[9] 刘持林. 轮毂液驱重型车辆前桥差速协调控制研究[D]. 长春：吉林大学，2020.

[10] FARAZANDEH A，AHMED A K W，RAKHEJA S. An independently controllable active steering system for maximizing the handling performance limits of road vehicles[J]. Journal of Automobile Engineering，2015，229(10)：1291-1309. DOI：10. 1177/0954407014560419.

[11] 黄茂云. 分布式驱动电动汽车操纵稳定性智能协调控制研究[D]. 赣州：江西理工大学，2022.

[12] 赵万忠，王春燕，张宗强，等. 轮毂电机独立驱动电动汽车差速转向路感控制研究[J]. 中国机械工程，2014，25(1)：87-91. DOI：10. 3969/j. issn. 1004-132X. 2014. 01. 017.

[13] 莫建平，蓝民华. 轻型低速电动汽车差速转向控制策略研究[J]. 技术与市场，2020，27(11)：34-35. DOI：10. 3969/j. issn. 1006-8554. 2020. 11. 011.

[14] 李政伟. 轮毂电机驱动电动汽车的电子差速控制策略研究[D]. 武汉：武汉工程大学，2020.

[15] 林祥辉. 电动汽车独立驱动轮毂电机的电子差速控制策略研究[D]. 天津：河北工业大学，2020.

[16] 翟丽，董守全，罗开宇. 四轮毂电机独立驱动车辆转向电子差速控制[J]. 北京理工大学学报，2010，30(8)：901-905. DOI：10. 15918/j. tbit1001-0645. 2010. 08. 011.

[17] 王其东，曹也，陈无畏，等. 轮毂电机驱动车辆线控差动转向的研究[J]. 汽车工程，2019，41(12)：1384-1393，1409. DOI：10. 19562/j. chinasae. qcgc. 2019. 012. 006.

[18] 张希明. 纯电动汽车控制系统[D]. 杭州：浙江大学，2008.

[19] 靳彪，张欣，杨庆保. 纯电动汽车低速转向差速控制模型[J]. 北京交通大学学报，2013，37(4)：158-161. DOI：10.3969/j. issn. 1673-0291. 2013. 04. 031.

[20] 卢山峰，徐兴，陈龙，等. 轮毂电机驱动汽车电子差速与差动助力转向的协调控制[J]. 机械工程学报，2017，53(16)：78-85. DOI：10. 3901/JME. 2017. 16. 078.

[21] 全国汽车标准化技术委员会. 汽车操纵稳定性试验方法：GB/T 6323－2014[S]. 北京：中国标准出版社，2014.

[22] 国家机械工业局. 汽车操纵稳定性指标限值与评价方法：QC/T 480－1999[S]. 北京：中国标准出版社，1999.

(责任编辑： 黄晓楠　　**英文审校：** 吴跃勤**)**

DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.202307046

福建省农村装配式建筑制约因素的系统动力仿真与生态效益探讨

何春玲，张子晨，罗志宇，胡润

（华侨大学 土木工程学院，福建 厦门 361021）

摘要： 探究农村装配式建筑发展的必要性和优势，及其对生态效益的相辅作用。基于大量文献的制约因素提取与归纳，使用系统动力学方法对福建省农村装配式建筑推广制约因素进行系统动力建模与作用路径仿真，通过专家问卷的模糊层次分析，对农村装配式建筑生态影响因素进行重要性排序，以乡村振兴战略的生态效益为发展，综合提出助力于福建省农村装配式建筑推广的策略。结果表明：提升装配式建筑功能与质量水平、提高政府政策支持度、降低增量成本对推动农村装配式建筑起显著的正向作用；污染物排放、环境改善带来的额外抵消效益具有生态效益权重影响性。

关键词： 农村装配式建筑；系统动力学；制约因素；生态效益；模糊层次分析；福建省

中图分类号： TU 741；N 941.3 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000-5013(2023)06-0684-10

System Dynamics Simulation on Constraining Factors and Ecological Benefits Discussion of Rural Prefabricated Buildings in Fujian Province

HO Chunling, ZHANG Zichen, LUO Zhiyu, HU Run

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

Abstract: The necessity and advantages of the development of rural prefabricated buildings and their complementary effects on ecological benefits are investigated. Through the extraction and induction of the constraining factors in a large number of literatures, the system dynamics method is used to establish the system dynamic model and to simulate the effect path of the constraining factors of prefabricated buildings popularization in rural areas of Fujian Province, and by the fuzzy hierarchy analysis of experts′ questionnaire, the importance of ecological influence factors of rural prefabricated buildings is ranked, and the strategies of promoting rural prefabricated buildings in Fujian Province are put forward comprehensively with the ecological benefits of rural revitalization strategy. The results show that improving the function and quality level of prefabricated buildings, increasing government policy support, and reducing incremental costs have a significant positive effect on promoting rural prefabricated buildings. The additional offset benefits of pollutant discharge and environmental improvement influence the weight of ecological benefits.

Keywords: rural prefabricated buildings; system dynamics; constraining factors; ecological benefits; fuzzy hierarchy analysis; Fujian Province

装配式建筑的环保性与节能减排的突出性可促进经济可持续发展。近年来，装配式建筑推广政策密集出台，2016 年，《国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见》[1]指出发展装配式建筑是建

收稿日期： 2023-07-31

通信作者： 何春玲(1972-)，女，副教授，博士，主要从事装配式建筑与智能建造的研究。E-mail：clho@hqu.edu.cn。

造方式的重大变革，建筑业开始关注绿色建筑及建筑工业化生产。同时，随着国家发展战略的推进，2018 年，《乡村振兴战略规划(2018－2022 年)》[2]指出我国农村建设要以美丽宜居村庄为导向，农村建筑的环保性及宜居性成为评判乡村建设的重要一环，因此，农村装配式建筑在这个大背景下产生与发展。2019 年，《关于开展农村住房建设试点工作的通知》[3]强调在农村运用现代化的建造方式中考虑多方要素，例如，经济、气候和传统习俗等，发展好乡村现代建筑。同年，《关于印发住房和城乡建设部建筑市场监管司 2019 年工作要点的通知》[4]提到在农村危房改造和易地扶贫搬迁中要明确一定的装配式建造比例。因此，地方政府加大了对农村装配式住房的投入和推广力度。2021 年，《福建省住房和城乡建设厅等 9 部门关于加快推动新型建筑工业化发展的实施意见》[5]鼓励要在新农村建设中推广应用装配式建筑。

目前，我国的农村装配式企业较多，但大多停留在设计研发阶段[6]，实际落地项目较少，建筑信息模型(BIM)等装配式建筑的重要技术手段[7]尚未得到较好的运用。由于农村的规划和设计多是借鉴城市建筑的模式，所以农村装配式建筑未得到大范围的推广，发展较为缓慢。

国内外学者对装配式建筑的发展制约因素与推广机制进行了相关研究[8-17]。由农村装配式建筑发展的现实情况可知，装配式建筑的影响因素之间并非相互独立，需考虑各因素间的因果关系。基于此，本文运用系统动力学方法，将影响因素进行赋值仿真，确定关键影响因素，并据此制定农村装配式建筑的推广策略。

1　装配式建筑发展的制约因素分析与仿真

1.1　制约因素分析

为了解装配式建筑发展的制约因素，在混凝土结构条件下，以装配式建筑、建筑工业化和装配式建筑制约因素等为主题，在中国知网进行文献搜索，对下载量大且阐述全面的文献进行归纳总结、提取和分类，提出具备共识的 34 个制约因素。

全国装配式建筑的制约因素，如表 1 所示。表 1 中：N 为相关文献篇数。

表 1　全国装配式建筑的制约因素

Tab. 1　Constraining factors of prefabricated buildings across country

序号	制约因素	N/篇	序号	制约因素	N/篇
1	建设成本偏高	17	18	装配式建筑发展模式融资不畅	4
2	缺乏专业人才	15	19	开发商认可程度不高	4
3	政府支持力度不够	15	20	政策法规不完善	3
4	相关规范、标准不完善	15	21	物流运输体系不完善	2
5	消费者认可程度不高	12	22	模数体系不完善	2
6	现场管理模式不成熟	12	23	缺乏完善税收及相关优惠政策	2
7	产业链支撑不足	11	24	投资回收期长	2
8	科研投入不足	10	25	消费者购买价格高	1
9	缺乏创新	9	26	市场培育和发展缓慢	1
10	监管机制不完善	8	27	节能意识淡薄	1
11	关键技术不成熟	7	28	装配式建筑试点项目示范效应不足	1
12	政府宣传力度不足	6	29	区域经济水平不高	1
13	各参与主体间协同作业程度低	5	30	对现浇模式过度依赖	1
14	市场认可度不高	4	31	政策未考虑设计、生产和施工三者一体化经营模式的管理机制	1
15	企业转型意愿不强	4	32	标准化、工业化、机械化、信息化、智能化应用不足	1
16	信息化技术应用不成熟	4	33	安全可靠性存在质疑	1
17	集成化程度低	4	34	项目组织管理模式落后	1

为进一步了解福建省农村装配式建筑的制约因素，通过上述文章，进一步以乡村振兴、装配式建筑、装配式建筑制约因素等为关键词进行归纳，对表述相近的制约因素进行整合，可得福建省农村装配式建

筑的制约因素,如表2所示。

表2 福建省农村装配式建筑的制约因素

Tab. 2 Constraining factors of rural prefabricated buildings in Fujian Province

序号	制约因素	N/篇	序号	制约因素	N/篇
1	建造成本偏高	9	6	政府宣传力度不够	3
2	农民认可程度不高	5	7	产业链不健全	3
3	运输成本偏高	4	8	缺少相关政策	2
4	政府支持力度不够	3	9	专业人才匮乏	2
5	缺乏地域特色	3	10	经济发展水平不高	1

1.2 仿真模型的建立

在整理装配式建筑制约因素的基础上,考虑制约因素间的相互影响及间接因素对装配式建筑发展可能产生的影响,通过系统动力学建立影响因素仿真模型。系统运行的时间边界为2012—2032年,并假设4个条件:1)假设研究数据为平均值;2)假设国民经济水平稳定增长,人民生活水平逐渐提高,人口水平持续增长,但仍面临人口老龄化压力及劳动力缺口压力;3)假设福建省装配式建筑持续健康发展,房地产市场稳步发展,装配式建筑市场价格稳定;4)假设福建省装配式建筑发展遵循可持续发展原则。通过因果关系分析,可得福建省农村装配式建筑推广影响因素的因果关系图,如图1所示。

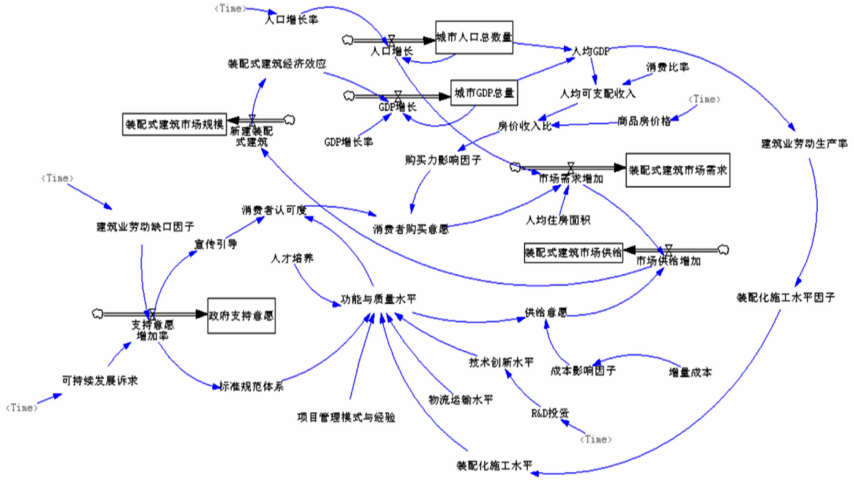


图1 福建省农村装配式建筑推广影响因素的因果关系图

Fig. 1 Causal relationship diagram of influence factors of rural prefabricated buildings popularization in Fujian Province

对反馈回路进行设计与分析,可得因素的作用机理与影响路径,从政府支持意愿、功能与质量水平和消费者购买意愿等关键因素发展3条反馈回路(+表示正向影响;-表示负向影响)。

1)反馈回路1:政府支持意愿→(+)宣传引导→(+)消费者认可度→(+)消费者购买意愿→(+)装配式建筑市场需求→(+)装配式建筑经济效益→(+)劳动生产率→(-)建筑业劳动力缺口→(+)政府支持意愿。

2)反馈回路2:功能与质量水平→(+)消费者认可度→(+)消费者购买意愿→(+)装配式建筑市场需求→(+)装配式建筑经济效益→(+)城市GDP总量→(+)研究与试验发展(R&D)投资→(+)技术创新水平→(+)功能与质量水平。

3)反馈回路3:消费者购买意愿→(+)装配式建筑市场需求→(+)装配式建筑经济效益→(+)城市GDP总量→(+)人均GDP→(+)人均可支配收入→(-)房价收入比→(+)消费者购买力→(+)消费者购买意愿。

由此可得以下3个结论。

1)反馈回路1为负反馈回路,对系统演变起平衡作用,即政府对装配式建筑的支持意愿不断增加,加大宣传引导可使消费者认可度逐渐提高而增加购买意愿,消费者购买意愿增强可使装配式建筑市场需求扩大,装配式建筑经济效益越来越好,劳动生产率逐渐提高,建筑业劳动力缺口不再紧缺。

2）反馈回路 2 为正反馈回路，对系统演变起加强作用，功能与质量水平提高，消费者接受程度提高使市场规模变大，装配式建筑经济效益稳步提升，城市 GDP 总量逐渐增加，加大对装配式建筑行业的研发资金的投入使技术创新水平提高。

3）反馈回路 3 为负反馈回路，消费者愿意购买装配式建筑使市场需求变大，装配式建筑经济效益稳步提升，国民经济水平稳步提高，人均可支配收入不断增加使房价收入比下降，消费者有更多的可支配收入而提升了购买力。

在因果关系图的基础上，建立福建省农村装配式建筑推广影响因素的存量流量图，如图 2 所示。

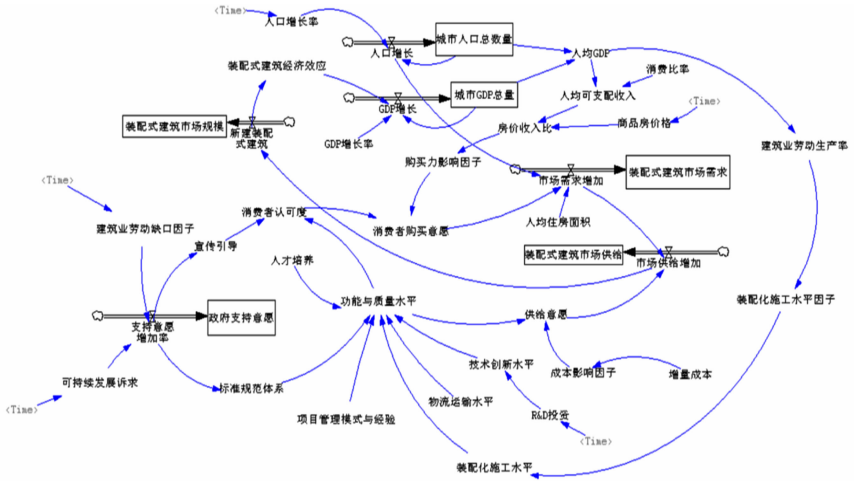


图 2　福建省农村装配式建筑推广影响因素的存量流量图

Fig. 2　Stock flow diagram of influence factors of rural prefabricated buildings popularization in Fujian Province

为保证模型输入变量所需数据的完整性及数据来源的合理性，收集了大量官方数据，主要包括宏观基础数据（由福建省统计年鉴查询获得）和福建省装配式建筑经济效益（类比相关研究与政府技术报告数据）[18]。对于难以量化的影响因素，如功能质量与水平、支持意愿、房价收入比、消费者购买意愿、增量成本、供给意愿等，则通过问卷调查与专家打分的方式进行赋值，打分专家均来自福建省。

1.3　农村装配式建筑影响因素的模型仿真

1.3.1　模型检验　为获得模拟的稳定性与结果的可靠性，在仿真前先进行模型检验。

1）稳定性测试。改变时间间隔，对建立的模型进行稳定性测试。将时间步长由 1.0 变为 0.5，以房价收入比为观测对象，在不同的时间间隔下，检验模型是否稳定运行。稳定性测试结果，如图 3 所示。由图 3 可知：在两种不同时间间隔的条件下，系统的运行趋势相同，证明稳定性良好。

2）极端情况测试。采用极限法对模型进行观测检验，将消费比率由 0.2 变为 1.0，以市场供给量为观测对象，对模型进行极端情况测试。极端情况测试结果，如图 4 所示。由图 4 可知：即使消费比例达到极限值（1.0），市场供给量并没有向不合理的方向发展，在不同消费比率条件下的发展趋势相近，说明模型具有可靠性。

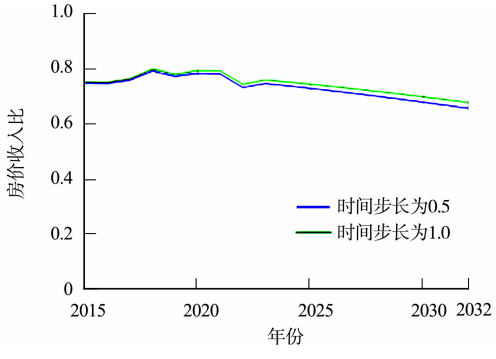


图 3　稳定性测试结果

Fig. 3　Test results of stability

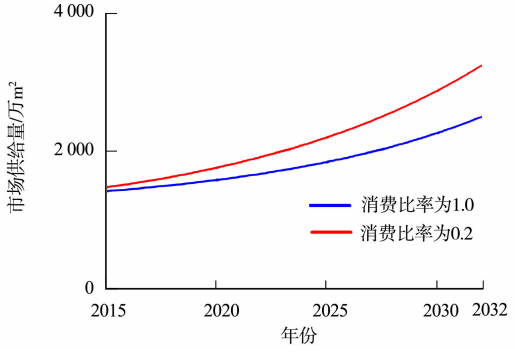


图 4　极端情况测试结果

Fig. 4　Test results of extreme case

1.3.2 系统模型的仿真分析 根据历史数据,对房价收入比、支持意愿增加率进行趋势模拟及预测。

1)房价收入比。房价收入比反映房地产市场水平和居民经济水平,房价收入比=(商品房价格+装配式建筑增量成本)/人均可支配收入。房价收入比、人均可支配收入和商品房价格的模拟曲线,如图5~7所示。由图5~7可知:人均可支配收入稳步提升,商品房价格在波动中逐渐提升;2015-2017年,人均可支配收入提升幅度不及商品房价格提升幅度,房价收入比上升;2018-2023年,房价收入比在波动中下降;2023年后,在政策的有效调控下,房价收入比呈稳定下降趋势,房地产市场稳定发展。

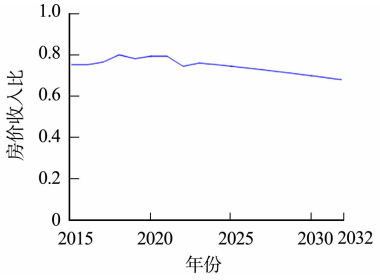


图5 房价收入比模拟曲线

Fig. 5 Simulation curve of house price to income ratio

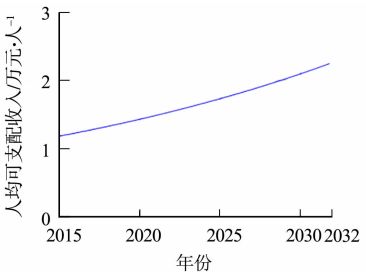


图6 人均可支配收入模拟曲线

Fig. 6 Simulation curve of per capita disposable income

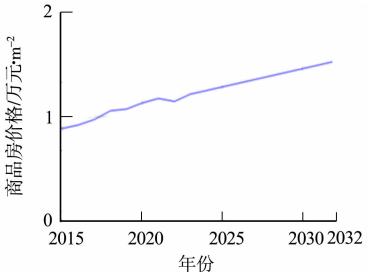


图7 商品房价格模拟曲线

Fig. 7 Simulation curve of commercial house price

2)支持意愿增加率。支持意愿增加率= 可持续发展诉求×0.5+建筑业劳动缺口因子×0.5。随着可持续发展诉求的呼声越来越高,福建省政府发展装配式建筑的意愿日益强烈。支持意愿增加率、可持续发展诉求和建筑业劳动缺口因子模拟曲线,如图8~10所示。由图8~10可知:支持意愿增加率不断提高,可持续发展是当今社会发展的主旋律。

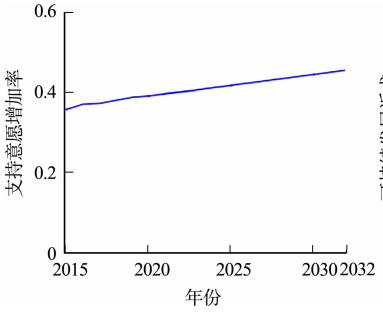


图8 支持意愿增加率模拟曲线

Fig. 8 Simulation curve of increase rate of support willingness

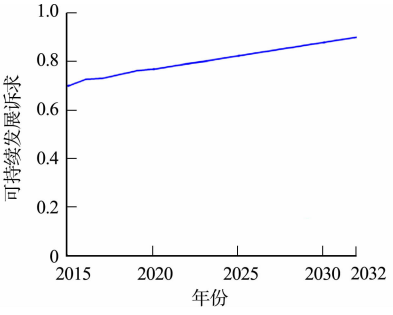


图9 可持续发展诉求模拟曲线

Fig. 9 Simulation curve of sustainable development demand

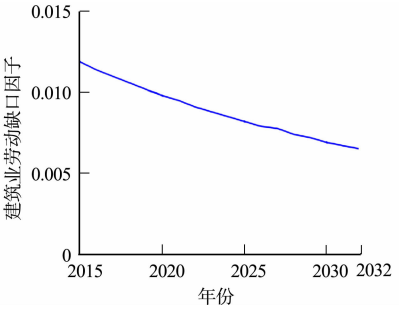


图10 建筑业劳动缺口因子模拟曲线

Fig. 10 Simulation curve of labor gap factor in construction industry

1.3.3 政策变化的模拟 在政策变化的影响面上,对功能与质量水平、成本影响因子和支持意愿增加率进行模拟。

1)功能与质量水平的模拟(调控1)。将功能与质量水平变量系数由1.0变为1.4,观察供给意愿、消费者购买意愿、市场供给增加量和市场需求增加量的发展趋势,结果如图11~14所示。由图11~14可知:当装配式建筑的功能与质量水平提升后,消费者对于装配式建筑的购买意愿与开发商的供给意愿明显增强;当消费者与开发商对装配式建筑共同出现正向意愿时,装配式建筑市场供给与装配式建筑市场需求稳步上升,且两者的增加量较为显著。

2)成本影响因子的模拟(调控2)。将成本影响因子变量系数由1.0变为0.5,观察供给意愿、装配式建筑市场规模的发展趋势,结果如图15,16所示。由图15,16可知:由于成本影响因子变量系数变小,相较于现有装配式建筑市场的成本价格表现,装配式建筑市场规模与供给意愿的发展趋势相对较低;若增大成本影响因子的调控力度,供给意愿及装配式建筑市场规模也将显著提升。

3)支持意愿增加率的模拟(调控3)。将支持意愿增加率变量系数由1.0变为1.4,观察供给意愿、消费者购买意愿、装配式建筑经济效益的变化趋势,结果如图17~19所示。由图17~19可知:当政府支持意愿逐渐增强,消费者与开发商对可持续发展理念的响应增强,对装配式建筑的购买与供给意愿增强,装配式建筑经济效益提升显著。

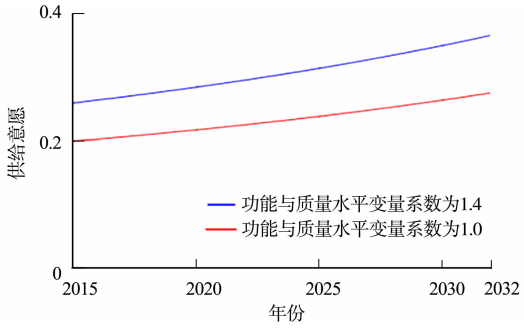


图 11　供给意愿模拟(调控 1)

Fig. 11　Simulation of supply willingness (regulation 1)

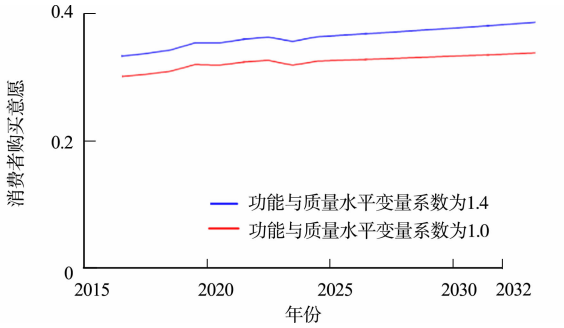


图 12　消费者购买意愿模拟(调控 1)

Fig. 12　Simulation of consumer purchase willingness (regulation 1)

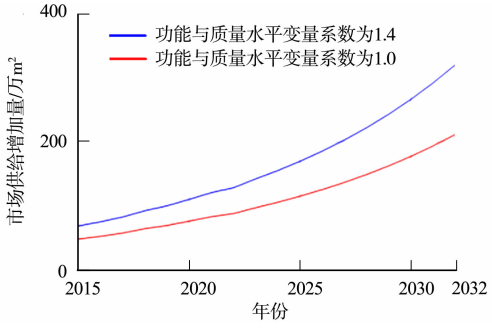


图 13　市场供给增加量模拟(调控 1)

Fig. 13　Simulation of market supply increase (regulation 1)

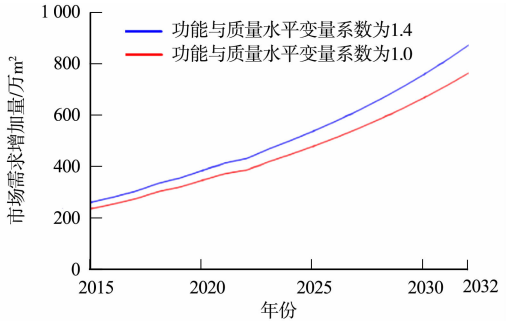


图 14　市场需求增加量模拟(调控 1)

Fig. 14　Simulation of market demand increase (regulation 1)

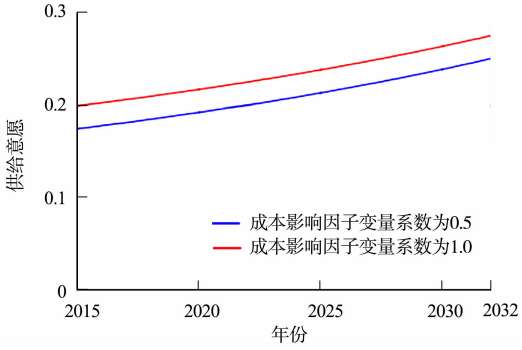


图 15　供给意愿模拟(调控 2)

Fig. 15　Simulation of supply willingness (regulation 2)

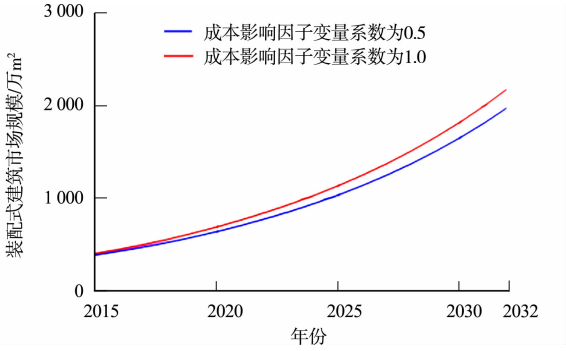


图 16　装配式建筑市场规模模拟(调控 2)

Fig. 16　Simulation of market size of prefabricated buildings (regulation 2)

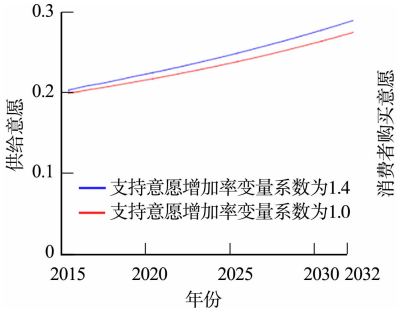


图 17　供给意愿模拟(调控 3)

Fig. 17　Simulation of supply willingness (regulation 3)

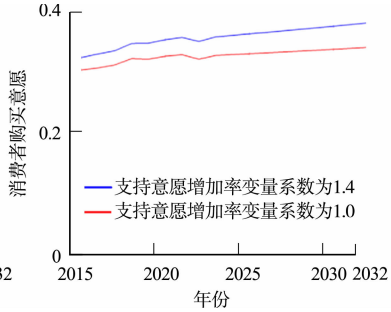


图 18　消费者购买意愿模拟(调控 3)

Fig. 18　Simulation of consumer purchase willingness (regulation 3)

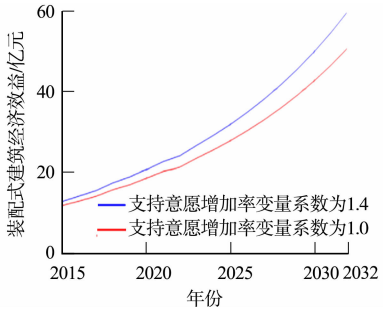


图 19　装配式建筑经济效益模拟(调控 3)

Fig. 19　Simulation of economic benefits of prefabricated buildings (regulation 3)

1.4 系统模拟结果探讨

由系统模拟结果可知,村民对装配式建筑接受程度仍然较低,造价仍然较高。在乡村振兴发展战略的背景下,可采用以下3个策略来推动福建省农村装配式建筑的发展。

1)功能与质量水平的提升策略。装配式建筑人才存在缺口,且装配式建筑在专业技能上对施工人员的要求更加严格。此外,城市生活水平与农村生活水平存在差距,愿意服务基层、扎根基层的装配式建筑人才较少,要想培养农村装配式建筑人才,需要提供福利政策。职业院校应积极响应国家号召,在装配式建筑教学中加大教学实践比例,与福建省农村装配式建筑企业合作,根据企业相关岗位的招聘标准调整教学内容。在标准规范体系方面,应推动标准化设计,这是从根本上提高装配式建筑功能与质量水平的重要方式。

2)政府支持度的提高策略。政府支持度是影响农村装配式建筑推广的重要因素之一,政府的大力支持有助于提高装配式建筑经济效益。在农村推广装配式建筑,应让居民了解装配式建筑相较于传统建造模式的优势,政府应当加大宣传引导,利用多种媒介宣传装配式建筑。此外,开展试点工程并组织农村居民参观,近距离参观装配式建筑是最直观的宣传方式,可以让农村居民感受装配式建筑施工现场整洁的环境,从而渐渐地接受装配式建筑。

3)增量成本的降低策略。降低预制构件成本十分重要,农村装配式建筑发展需要完善的产业链,以产业链带动生产,降低建造成本,因地制宜,制作具有地域特色的建筑样板供农村居民挑选。同时,可增加装配式建筑预制构件的工厂数量,降低预制构件成本。

2 农村装配式建筑的生态效益探讨

2.1 生态效益影响因素的选取

从248篇文献资料中筛选出30篇涉及建筑生态效益评价的文献,采用文献分析法,进行要素识别,提取出相关的生态效益影响因素。对于生态效益影响因素的研究,大多数学者主要关注节能、节地、节水、节材和环境保护等因素,也有部分学者提到建筑对居住者的作用。对生态效益影响因素进行划分,结果如表3所示。表3中:N_1,N_2分别为主要因素和次要因素的相关文献篇数。

表3 生态效益影响因素

Tab.3 Influencing factors of ecological benefit

主要因素	N_1/篇	次要因素	N_2/篇
污染物排放	26	废气排放(CO_2等温室气体和有毒气体)	20
		粉尘排放	14
		固体废弃物排放	14
资源消耗	22	资源消耗量(水、材料、土地)	20
		能源消耗量	17
		费用节约(维护成本、拆除成本、后期能耗成本)	4
居住者需求	9	采光	9
		通风	9
		居住者健康	4
保护室外环境	18	噪音	17
		优化布局	3
		大气达标率	2
绿色建造	7	垃圾回收利用率	6
		可再生能源使用量的比例	2
		绿色建材利用率	1
环境反作用力	3	环境改善带来的额外抵消效益	2
		环境影响建筑物寿命	1

2.2 生态效益影响因素的架构

为了解各因素间的重要性,建立农村生态效益影响因素架构。福建省农村装配式建筑的生态效益影响因素架构,如图20所示。

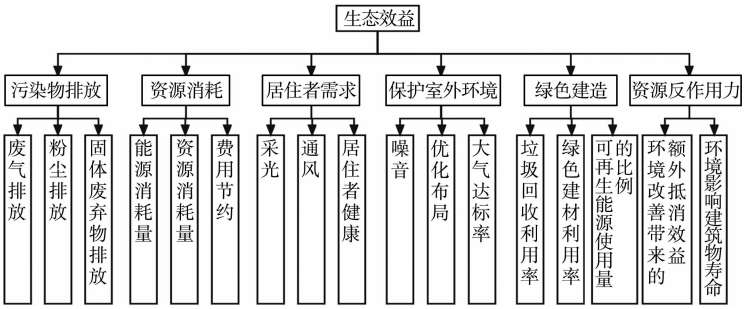


图 20　生态效益影响因素架构

Fig. 20　Structure of influence factors of ecological benefit

2.3　生态效益影响因素的权重分析

采用模糊层次分析法，对农村装配式建筑生态效益影响因素进行分析，对两两因素相互比较的重要性程度进行分值定义（因素 i 与因素 j 的分值设定为 0.1～0.9）。考虑数据的综合性和全面性，邀请来自高校、设计单位、施工单位、建设单位和政府部门等 15 位专家（工作经验 7 a 以上）进行打分。以专家 1 为例，可得模糊层次分析 n 维打分方形矩阵（矩阵 $\boldsymbol{A}$（$n=6$）），结果如表 4 所示。

表 4　专家 1 主要因素打分矩阵

Tab. 4　Scoring matrix of main factors from expert 1

i	打分值					
	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$	$j=6$
1	0.5	0.8	0.8	0.9	0.9	0.5
2	0.2	0.5	0.7	0.5	0.4	0.5
3	0.2	0.3	0.5	0.4	0.3	0.5
4	0.1	0.5	0.6	0.5	0.4	0.5
5	0.1	0.6	0.7	0.6	0.5	0.5
6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

矩阵元素 $a_{i,j}$ 为 $0\leqslant a_{i,j}\leqslant 1$，$a_{i,j}+a_{j,i}=1$，其中，$i,j=1,2,\cdots,n$。对矩阵元素按行进行求和，有

$$a_i=\sum_{k=1}^{n}a_{i,k},\qquad i,k=1,2,\cdots,n\ 。\tag{1}$$

由式(1)可得

$$\boldsymbol{A}_i^{\mathrm{T}}=(a_i)_{6\times 1}=[4.4\quad 2.8\quad 2.2\quad 2.6\quad 3.0\quad 3.0]。$$

计算各因素的权重值 $\boldsymbol{I}_{\mathrm{W}}$，有 $w_i=\dfrac{1}{n}-\dfrac{1}{2\alpha}+\dfrac{\alpha_i}{n\alpha}$，$\boldsymbol{I}_{\mathrm{W}}=[w_1\quad w_2\quad w_3\quad\cdots\quad w_n]^{\mathrm{T}}$。

由 $w_{i,j}=\alpha(w_i-w_j)+0.5$，$\alpha=\dfrac{n-1}{2}$，可得矩阵

$$\boldsymbol{W}=\begin{bmatrix}w_{1,1} & w_{1,2} & \cdots & w_{1,n}\\ w_{2,1} & w_{2,2} & \cdots & w_{2,n}\\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots\\ w_{n,1} & w_{n,2} & \cdots & w_{n,n}\end{bmatrix}。\tag{2}$$

由构建的权重矩阵（表 5）可得

$$\boldsymbol{I}_{\mathrm{W}}^{\mathrm{T}}=(w_i)_{6\times 1}=[0.260\,0\quad 0.153\,3\quad 0.113\,3\quad 0.140\,0\quad 0.166\,7\quad 0.166\,7]。$$

计算检验回收数据的一致性 I_{C}，即

$$I_{\mathrm{C}}(\boldsymbol{A},\boldsymbol{W})=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}|w_{i,j}-a_{i,j}|}{n^2}=0.064\,8。$$

表 5　构建的权重矩阵

Tab. 5　Weight matrix

i	权重					
	$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	$j=5$	$j=6$
1	0.500 0	0.766 7	0.866 7	0.800 0	0.733 3	0.733 3
2	0.233 3	0.500 0	0.600 0	0.533 3	0.466 7	0.466 7
3	0.133 3	0.400 0	0.500 0	0.433 3	0.366 7	0.366 7
4	0.200 0	0.466 7	0.566 7	0.500 0	0.433 3	0.433 3
5	0.266 7	0.533 3	0.633 3	0.566 7	0.500 0	0.500 0
6	0.266 7	0.533 3	0.633 3	0.566 7	0.500 0	0.500 0

由此可知，结果符合一致性原则要求（$I_{\mathrm{C}}<0.100\,0$）。使用迈实软件进行计算，得到修正后的主要因素权重（专家 1），如表 6 所示。

首先，按照上述步骤对主要因素下的各次要因素进行计算，可以得到专家组的农村装配式建筑生态效益评估指标的各层级权重；然后，按照权重对农村装配式建筑中间层（主要因素）进行重要

性排序(表7),按照权重对农村装配式建筑底层(次要因素)进行重要性排序(表8)。

表6 修正后的主要因素权重(专家1)

Tab.6 Corrected weights of main factors (expert 1)

主要因素	权重
污染物排放	0.260 0
资源消耗	0.153 3
居住者需求	0.113 3
保护室外环境	0.140 0
绿色建造	0.166 7
环境反作用力	0.166 7

表7 农村装配式建筑主要因素重要性排序

Tab.7 Importance ranking of main factors of rural prefabricated buildings

排序	主要因素	权重
1	污染物排放	0.232 9
2	资源消耗	0.170 2
3	环境反作用力	0.158 7
4	居住者需求	0.152 9
5	绿色建造	0.143 1
6	保护室外环境	0.142 2

表8 农村装配式建筑次要因素重要性排序

Tab.8 Importance ranking of secondary factors of rural prefabricated buildings

主要因素	次要因素	同级权重	单排序	全局权重	总排序
污染物排放	废气排放	0.382 2	1	0.089 0	2
	粉尘排放	0.326 7	2	0.076 1	3
	固体废弃物排放	0.291 1	3	0.067 8	4
资源消耗	能源消耗量	0.377 8	1	0.064 3	6
	资源消耗量	0.328 9	2	0.056 0	10
	费用节约	0.293 3	3	0.049 9	11
居住者需求	采光	0.400 0	1	0.061 2	7
	通风	0.324 4	2	0.049 6	12
	居住者健康	0.275 6	3	0.042 1	15
保护室外环境	噪音	0.406 7	1	0.057 8	8
	大气达标率	0.315 6	2	0.044 9	14
	优化布局	0.277 8	3	0.039 5	16
绿色建造	垃圾回收利用率	0.464 4	1	0.066 5	5
	绿色建材利用率	0.342 2	2	0.049 0	13
	可再生能源使用量的比例	0.193 3	3	0.027 7	17
环境反作用力	环境改善带来的额外抵消效益	0.646 7	1	0.102 6	1
	环境影响建筑物寿命	0.353 3	2	0.056 1	9

3 结论

对福建省农村装配式建筑制约因素进行系统动力仿真与生态效益探讨,可得以下2个结论。

1) 目前,福建省农村装配式建筑尚未形成规模,需要加大科研投入,研究出一套符合农村实际的、健全的标准规范体系,在方案设计、地方标准和技术指南等方面制定统一规范,达到功能与质量水平提升的效果。在政府支持意愿方面,装配式建筑具有诸多优点,但也存在建筑形式单一的问题,依据《乡村振兴战略规划(2018—2022年)》,建筑应当突出当地文化特色,可将文化元素、历史特点等加入装配式建筑,有助于提高政策支持度;在农村危房的改造中,对于选择装配式建筑的农村居民给予一定的补贴,提高农村居民选择装配式建筑的积极性。农村装配式建筑的推广困难与成本增大往往是因基础设施条件未能提升的缘故,由于农村交通不发达,地区偏远,运输大型装配式建筑构件十分不便,应当完善农村的基础设施,为装配式建筑预制构件运输提供便利,此外,强化农村装配式建筑发展的产业链,活络预制构件市场,依据环境生态效益的要求,整体带动供需面来降低建造成本。

2) 在农村装配式建筑生态效益影响因素中,主要因素的污染物排放权重最高,其余排序依次为资源消耗、环境反作用力、居住者需求、绿色建造和保护室外环境;由对应的次要因素可发现,权重最高者分别为废气排放、能源消耗量、采光、噪音、垃圾回收利用率与环境改善带来的额外抵消效益。环境改善带来的额外抵消效益的权重值具有影响性,故在有关政策的制定和实施中,可进一步考虑减少污染物排放所带来的效益。相较于传统农村建筑,装配式建筑的经济效益尚未达到农村住户的期望值,因此,可

加大对农村装配式建筑的相关政策补贴。

现阶段我国的城乡发展仍然存在一定差距，农村装配式建设模式给农村建筑的改建再建提供了一个新思路，尽管政策已经有所倾斜，农村装配式建筑的发展仍然任重而道远。政府在推广乡村振兴战略、农村装配式建筑时，应该加大对农村装配式建筑的经济与环境效益的政策推广，并进一步提出可行的建筑政策补贴，以助力装配式建筑在农村快速长久的发展。

参考文献：

[1] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院办公厅关于大力发展装配式建筑的指导意见[EB/OL]. (2016-09-27)[2023-07-31]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-09/30/content_5114118.htm.

[2] 中华人民共和国中央人民政府. 乡村振兴战略规划(2018－2022 年)[EB/OL]. (2018-09-26)[2023-07-31]. http://www.gov.cn/zhengce/2018-09/26/content_5325534.htm.

[3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住房和城乡建设部办公厅关于开展农村住房建设试点工作的通知[EB/OL]. (2019-02-02)[2023-07-31]. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zhengce/zhengcefilelib/201902/20190203_239427.htm.

[4] 中华人民共和国中央人民政府. 关于印发住房和城乡建设部建筑市场监管司 2019 年工作要点的通知[EB/OL]. (2019-03-11)[2023-07-31]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2019-09/29/content_5434604.htm.

[5] 福建省住房和城乡建设厅. 福建省住房和城乡建设厅等 9 部门关于加快推动新型建筑工业化发展的实施意见[EB/OL]. (2021-10-09)[2023-07-31]. https://zjt.fujian.gov.cn/xxgk/zfxxgkzl/xxgkml/dfxfgzfgzhgfxwj/jzsc/202110/t20211019_5745832.ht.

[6] 王舒扬，岳晓鹏，李娟. 支撑体住宅理论在装配式农宅设计中的应用[J]. 华侨大学学报(自然科学版)，2020，41(2)：186-190. DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.201906039.

[7] 董娜，弓成，熊峰. 装配式建筑施工建筑信息模型应用成熟度评价[J]. 华侨大学学报(自然科学版)，2020，41(1)：50-59. DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.201907029.

[8] 李想，黄喜兵. 基于 SWOT-AHP 模型的装配式建筑发展影响因素研究[J]. 四川建筑，2022，42(3)：62-65，68.

[9] 何鹏旺. 乡村振兴背景下农村地区装配式建筑推进战略研究[D]. 济南：山东建筑大学，2020.

[10] 唐根丽，张梦婷，张恒. 基于 SEM 实证分析的装配式建筑发展制约因素研究[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版)，2021，23(6)：596-604. DOI：10.11717/j.issn.1673-1387.2021.06.09.

[11] 边晶梅，王震龙，刘霞. 基于主成分分析的装配式建筑发展制约因素研究[J]. 建筑经济，2021，42(2)：76-80. DOI：10.14181/j.cnki.1002-851x.202102076.

[12] SUN Houchao，FANG Yuwei，YIN Minggan，*et al*. Research on the restrictive factors of vigorous promotion of prefabricated buildings in Yancheng under the background of “double carbon”[J]. Sustainability，2023，15(2)：1737. DOI：10.3390/SU15021737.

[13] 陈缙，周早弘. 基于 WSR-SWOT 模型的装配式建筑发展现状及对策研究[J]. 项目管理技术，2021，19(1)：56-59.

[14] 李强年，陈瑞军，马岷成. 基于 DEMATEL-ISM 的装配式建筑发展制约因素研究[J]. 工程管理学报，2020，34(2)：38-43. DOI：10.13991/j.cnki.jem.2020.02.008.

[15] TAN Tan，CHEN Ke，XUE Fan，*et al*. Barriers to building information modeling (BIM) implementation in China′s prefabricated construction：An interpretive structural modeling (ISM) approach[J]. Journal of Cleaner Production，2019，219：949-959. DOI：10.1016/j.jclepro.2019.02.141.

[16] 张淇，程志辉. 基于 ISM 的大连市装配式建筑发展制约因素研究[J]. 工程管理学报，2020，34(3)：34-38. DOI：10.13991/j.cnki.jem.2020.03.007.

[17] YUAN Mengqi，LI Zhongfu，LI Xiaodong，*et al*. How to promote the sustainable development of prefabricated residential buildings in China：A tripartite evolutionary game analysis[J]. Journal of Cleaner Production，2022，349：131423. DOI：10.1016/j.jclepro.2022.131423.

[18] 祁神军，张云波，张涛军，等. 住宅产业化规模经济效应及宏观激励政策仿真研究[J]. 建筑经济，2013(7)：89-92. DOI：10.14181/j.cnki.1002-851x.2013.07.004.

（责任编辑：钱筠　　英文审校：方德平）

DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.202306003

组织和个人视角下安全支持对建筑工人的安全行为影响

汪丫，祁神军，陈晶晶，康梦月

（华侨大学 土木工程学院，福建 厦门 361021）

摘要： 为了探讨安全支持、安全自我效能感和安全态度与建筑工人安全行为之间的作用关系，高效提高管理建筑工人的安全行为水平，从个人和组织两个维度将安全支持划分为安全领导力、家人安全关心、工友安全沟通 3 个要素，构建安全支持与安全行为之间的假设关系模型。结合 216 名建筑工人问卷调研数据，采用 SPSS 和 AMOS 软件进行模型拟合。结果表明：安全支持对建筑工人的安全行为产生显著的正向影响，其中，工友安全沟通是影响建筑工人安全行为的关键因素；安全态度是影响建筑工人安全行为的关键中介变量；在安全管理中，管理层应更注重工友群体间非正式沟通，以提高建筑工人的安全行为水平。

关键词： 安全支持；安全沟通；安全态度；安全自我效能感；安全行为

中图分类号： X 947　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-5013(2023)06-0694-08

Effect of Safety Support on Construction Workers′ Safety Behavior From Organizational and Individual Perspectives

WANG Ya, QI Shenjun, CHEN Jingjing, KANG Mengyue

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

Abstract: In order to explore the relationship among safety support, safety self-efficacy, safety attitude and construction workers′ safety behavior, and to improve efficiently the level of managing construction workers′ safety behavior, from individual and organisational dimensions, the safety support is divided into three elements of safety leadership, family safety care, and workmate safety communication, a hypothetical relationship model between safety support and safety behavior is constructed. Combining the data from the questionnaire survey of 216 construction workers, SPSS and AMOS softwares are adopted to fit the model. The results show that safety support has a significant positive impact on construction workers′ safety behavior, the workmate safety communication is a key factor influencing construction workers′ safety behavior; safety attitude is a key mediating variable influencing construction workers′ safety behavior; in safety management, the management should pay more attention to informal communication among workmate groups to improve the level of construction workers′ safety behavior.

Keywords: safety support; safety communication; safety attitude; safety self-efficacy; safety behavior

根据全国工程质量安全监管信息平台统计，2022 年全国共发生房屋及市政工程生产安全事故 550

收稿日期： 2023-06-03

通信作者： 祁神军(1982-)，男，副教授，博士，主要从事建筑安全的研究。E-mail：qisj972@163.com。

基金项目： 福建省创新战略研究项目(2020R0055)

起，死亡 624 人。虽然近年建筑施工安全事故起数和死亡人数呈下降趋势，但相较于安全事故起数和死亡人数都较低的 2015 年，2022 年安全事故起数和死亡人数分别上升了 19.6%和 11.2%。建筑工人的不安全行为是导致安全事故的主要原因[1]，而安全支持有助于减轻压力，减少建筑工人的不安全行为。

目前，已有许多学者对建筑工人安全行为的影响因素展开研究。在安全支持方面，文献[2-6]探究了主观社会支持、组织安全支持、精神支持和物质支持、可视化和智能化设备支持等对建筑工人不安全行为的影响，结果表明，物质和社会方面的支持对建筑工人的安全行为产生正向影响，但以上研究暂未将家人关心作为安全支持的组成因素。在安全自我效能感方面，文献[7-9]认为安全自我效能感是环境因素或个体因素影响个体行为的关键中间变量，能从动机角度解释个体行为发生的内因。在安全态度方面，Vierendeels 等[10]认为安全态度是一种心理活动，能直接影响人的行为决策；Li 等[11]认为良好的安全态度有助于提高建筑工人对安全政策重要性的认识，促进其遵守安全规章制度的承诺。在安全行为方面，学者主要从个体因素和组织因素两个方面展开建筑工人安全行为相关研究，王丹等[12]发现群体层的安全氛围对建筑工人的安全行为产生正向影响；Meng 等[13]认为安全氛围、领导与成员之间的交流、亲社会性、主动性、同伴之间的交流对建筑工人的安全行为有显著影响；周彪等[14]发现责任心能促进建筑工人的遵守性安全行为，有效地防止安全事故的发生[15]。

以上研究仅从一个角度去考虑建筑工人安全行为的影响因素，然而，在安全管理实践中，安全行为并非单一因素作用的结果。基于此，本文将从个人和组织两个层面研究安全支持对建筑工人安全行为的影响。

1　理论基础与研究假设

1.1　安全支持、安全自我效能感与安全行为间的关系

张洪潮等[7]指出上司支持感对个体的自我效能感产生正向调节作用。基于此，提出假设：

H1　安全领导力对建筑工人安全自我效能感存在显著的正向影响。

丁道韧等[16]指出组织支持可通过强化自我效能感来促进个体的正向行为。基于此，提出假设：

H2　工友安全交流对建筑工人安全自我效能感存在显著的正向影响；自我效能感会影响个体的思维模式，进而影响其行为[17]。

Rahimi 等[18]认为安全自我效能感在管理层安全承诺、安全意识与不安全绩效关系中具有中介作用，加强建筑工人的安全自我效能感，可减少不安全的表现和随之而来的职业事故；安全自我效能感高的建筑工人不惧怕工作中的困难和风险，能将自己的能力转化为工作实践，通过有效的方式控制自己的行为，并处理潜在的负面后果，因而他们的安全行为水平较高。基于此，提出假设：

H3　安全自我效能感对建筑工人安全遵守行为存在显著的正向影响．

以及假设：

H4　安全自我效能感对建筑工人安全参与行为存在显著的正向影响。

1.2　安全支持、安全态度与安全行为间的关系

Li 等[11]提出安全领导力对铁路员工的安全态度产生正向作用，可促进铁路员工的安全行为。基于此，提出假设：

H5　安全领导力对建筑工人安全态度存在显著的正向影响。

冯亚娟等[19]提出工作-家庭冲突对建筑工人的不安全行为存在直接的正向影响；李亚楠等[20]认为家人的安全劝导可以使地铁施工人员规范其安全态度和安全行为。基于此，提出假设：

H6　家人安全关心对建筑工人安全态度存在显著的正向影响。

祁神军等[21]认为组织氛围对建筑工人的安全态度有显著影响。基于此，提出假设：

H7　工友安全交流对建筑工人安全态度存在显著的正向影响。

Kao 等[22]认为积极的安全态度有利于促进建筑工人的安全遵守行为和安全参与行为。基于此，提出假设：

H8　安全态度对建筑工人安全遵守行为存在显著的正向影响．

以及假设：

H9 安全态度对建筑工人安全参与行为存在显著的正向影响。

1.3 理论模型的构建

采用结构方程模型,构建安全支持对建筑工人安全行为的影响机理模型,如图1所示。

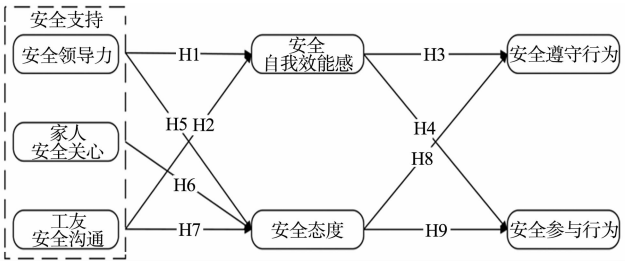


图1 安全支持对建筑工人安全行为的影响机理模型

Fig. 1 Influence mechanism model of safety support on safety behavior of construction workers

2 研究设计

2.1 测量指标

2.1.1 *安全支持* 组织层面的安全支持是上级领导和工友肯定建筑工人的工作贡献,重视和关心他们的安全而采取的一系列行为[23];个人层面的安全支持是家人对建筑工人日常工作的安全提醒和身心健康的关心[4]。因此,从组织和个人两个维度将安全支持划分为安全领导力、家人安全关心、工友安全沟通3个要素。安全支持作为一种有益资源,当建筑工人感知到它时会产生感恩的心理,更倾向于采取有效的安全措施[12]。建筑工人安全领导力、家人安全关心、工友安全沟通的测量指标,如表1所示。

表1 建筑工人安全领导力、家人安全关心和工友安全沟通的测量指标

Tab. 1 Measurement indexes of safety leadership, family safety care and workmate safety communication of construction workers

一级指标	二级指标	文献来源
安全领导力(LES)	领导定期召开安全会议(LES1) 领导提供必要安全工具和个人防护设备(LES2) 领导定期开展安全教育培训(LES3)	文献[24]
家人安全关心(FAC)	家人关心我的工作安全问题和健康状况(FAC1) 家人经常提醒我要安全作业(FAC2) 遇到困难时,家人会体量我并帮我一起解决问题(FAC3)	文献[25-26]
工友安全沟通(WOS)	当我冒险作业时,工友会及时提醒我(WOS1) 工友愿意与我交流分享安全作业经验(WOS2) 工友会经常鼓励我安全作业(WOS3)	文献[27]

2.1.2 *安全自我效能感* 安全自我效能感是建筑工人能否安全完成施工作业的自信心[28]。自我效能感被理解为一种心理资源,通过认知、意识、情感和动机等影响个体的行为[29]。建筑工人安全自我效能感的测量指标,如表2所示。

表2 建筑工人安全自我效能感的测量指标

Tab. 2 Measurement indexes of safety self-efficacy of construction workers

一级指标	二级指标	文献来源
安全自我效能感(SEF)	安全培训教育使我知道如何处理安全问题(SEF1) 我有信心安全完成施工作业(SEF2) 我感知我可以处理好安全问题(SEF3)	文献[30-31]

2.1.3 *安全态度* 安全态度是建筑工人面对安全事故时的主观态度和责任心,良好的主观态度和强烈的责任心有利于建筑工人意识到安全行为的重要性[32]。建筑工人安全态度的测量指标,如表3所示。

表3 建筑工人安全态度的测量指标

Tab. 3 Measurement indexes of safety attitude of construction workers

一级指标	二级指标	文献来源
安全态度(SA)	我认同遵守安全规则可以防止安全事故发生(SA1) 我会积极与工友交流安全作业经验(SA2) 施工作业时,我认为佩戴齐各种安全设备有助于降低安全事故风险(SA3)	文献[22]

2.1.4 *安全行为* 安全行为是建筑工人在施工作业时,为了确保自身和工作环境安全而采取的行动[33]。文献[34-35]从行为自发性的角度将安全行为划分为安全遵守行为和安全参与行为。建筑工人安全遵守行为和安全参与行为的测量指标,如表4所示。

表 4　建筑工人安全遵守行为和安全参与行为的测量指标

Tab. 4　Measurement indexes of safety obedient behavior and safety participation behavior of construction

一级指标	二级指标	文献来源
安全遵守行为(SOB)	我严格遵守安全作业的各项管理规章制度(SOB1)	文献[35-36]
	施工作业时，我会佩戴齐各种安全设备(SOB2)	
	施工作业时，我会严格按照操作手册执行作业(SOB3)	
安全参与行为(SAB)	我会积极主动与工友分享安全作业的经验(SAB1)	文献[35-36]
	工友危险作业时，我会及时提醒(SAB2)	
	施工作业时，我会确保自己安全参与作业(SAB3)	

2.2　问卷设计及调研

基于安全支持对建筑工人安全行为的影响机理模型，采用李特克的 7 级量表编制问卷。问卷内容由建筑工人性别、婚姻状况、年龄、教育程度、工龄、工种等背景资料，以及安全支持对安全行为的影响因素和测量指标两部分组成。

通过线上和线下调研的方式，共发放问卷 300 份，有效收回 216 份，回收有效率为 72%。在有效问卷中，建筑工人主要来自 16 个省市，大多集中在四川省(占比 24.5%)、福建省(占比 24.1%)、贵州省(占比 17.1%)、江西省(占比 8.8%)，四川省和贵州省均属于劳动输出大省，此外，还包含了湖南、河南和安徽等典型的劳动输出省份。

在性别方面，男性工人占比 86.1%，女性工人占比 13.9%；在婚姻状况方面，已婚占比 78.2%，未婚占比 16.2%，离异占比 5.6%；在年龄方面，20～30 岁占比 12.5%，31～40 岁占比 43.1%，41～50 岁占比 33.3%，51～60 岁占比 10.6%，60 岁以上占比 0.5%；在教育程度方面，以初中及以下学历为主，占比 59.1%；在工龄方面，工龄 5 a 及以上的建筑工人占比 66.2%，说明调研对象的安全经验比较丰富；在工种方面，涉及木工、泥工、钢筋工、水电工、特种工、焊工、架子工等 7 个工种。问卷中建筑工人基本信息数据符合建筑工人的基本特征，说明调研对象具有代表性。

3　研究结果与分析

3.1　问卷信效度分析

采用 SPSS 25.0 软件对问卷的变量数据分别进行可靠性分析和因子分析，以检验问卷的信效度，得到安全领导力、家人安全关心、安全自我效能感、安全态度和安全遵守行为的标准化 Cronbach′s α 值分别为 0.796，0.752，0.799，0.786，0.804，各观测变量的 Cronbach′s α 值均大于 0.700；工友安全交流、安全参与行为的标准化 Cronbach′s α 值为 0.664，0.660，均大于 0.650；问卷的信度满足要求。此外，安全领导力、家人安全关心、安全自我效能感、安全态度、安全遵守行为、工友安全交流和安全参与行为的 KMO 值分别为 0.683，0.681，0.704，0.685，0.707，0.648，0.632，各观测变量的 KMO 值均大于 0.600，问卷的效度满足要求[37]。

3.2　模型拟合

借助 AMOS 26.0 软件对关于安全支持与安全行为的影响机理的假设模型进行拟合，通过对模型进行一系列的优化与调整，可得安全支持对建筑工人安全行为影响机理拟合模型，如图 2 所示。图 2 中：$e1$～$e25$ 为残差。修正后的模型拟合指数，如表 5 所示。表 5 中：x^2/df，RMSEA，IFI，TLI，CFI 分别为卡方比、近似均方根误差、增值适配度指标、Tucker-Lewis 指标、比较拟合指数。由表 5 可知：各项指数结果均满足要求，模型拟合度较好。

表 5　模型拟合指数

Tab. 5　Model fitting indexes

项目	x^2/df	RMSEA	IFI	TLI	CFI
拟合指数标准	1.000～3.000	<0.080	>0.900	>0.900	>0.900
拟合指数结果	1.439	0.045	0.961	0.953	0.961

经验证性因素分析，可得修正后模型的运行结果，如表 6 所示。表 6 中：*** 表示 $P<0.001$。由表 6 可知：各变量之间的影响关系显著，能有效地验证模型假设。

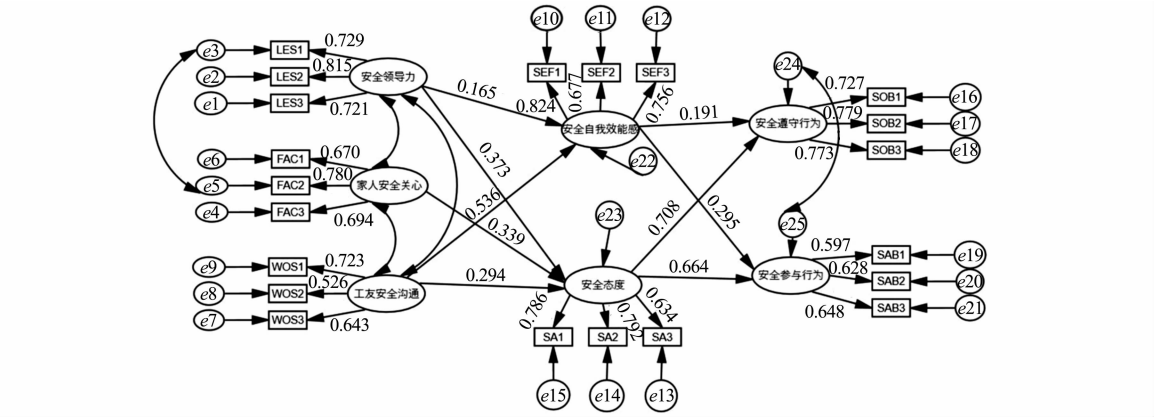


图2 安全支持对建筑工人安全行为影响机理拟合模型

Fig. 2 Fitting model of influence mechanism of safety support on safety behavior of construction workers

表6 修正后模型的运行结果

Tab. 6 Results of modified model

传递路径	标准化路径系数	P	假设	是否支持假设
安全自我效能感←安全领导力	0.165	0.273	H1	不支持
安全自我效能感←工友安全沟通	0.536	0.001	H2	支持
安全遵守行为←安全自我效感	0.191	0.020	H3	支持
安全参与行为←安全自我效能感	0.295	0.002	H4	支持
安全态度←安全领导力	0.373	0.002	H5	支持
安全态度←家人安全关心	0.339	0.001	H6	支持
安全态度←工友安全沟通	0.294	0.020	H7	支持
安全参与行为←安全态度	0.664	***	H8	支持
安全遵守行为←安全态度	0.708	***	H9	支持

3.3 结果分析

安全态度、安全自我效能感、安全参与行为和安全遵守行为4个潜变量间的总效应,如表7所示。表7中:E为总效应。

表7 各潜变量间的总效应

Tab. 7 Total effect between each latent variables

潜变量	E(工友安全沟通)	E(家人安全关心)	E(安全领导力)	E(安全态度)	E(安全自我效能感)
安全态度	0.276	0.307	0.334	0	0
安全自我效能感	0.667	0	0.197	0	0
安全参与行为	0.294	0.181	0.236	0.589	0.197
安全遵守行为	0.302	0.225	0.274	0.732	0.149

由表7可得以下5个结论。

1) 安全支持对建筑工人安全行为的影响效果显著。工友安全沟通、家人安全关心、安全领导力对建筑工人的安全参与行为的总效应分别为0.294,0.181,0.236;工友安全沟通、家人安全关心、安全领导力对建筑工人的安全遵守行为的总效应分别0.302,0.225,0.274。

2) 工友安全沟通是影响建筑工人安全行为的关键因素。从安全支持的3个要素来看,工友安全沟通对建筑工人的安全参与行为和安全遵守行为影响均最为显著,影响总效应分别为0.294,0.302;其次是安全领导力,它对建筑工人的安全参与行为和安全遵守行为影响总效应分别为0.236,0.274;最后是家人安全关心,它对建筑工人的安全参与行为和安全遵守行为影响总效应分别为0.181,0.225。

3) 工友安全沟通是影响建筑工人安全自我效能感的首要因素。模型拟合结果表明,工友安全沟通与安全自我效能感的标准化路径系数达到0.536,影响程度较大;工友安全沟通对建筑工人的安全自我效能感的总效应在所有潜变量中达到最大,为0.667。

4) 安全领导力是影响建筑工人安全态度的关键因素。安全领导力与建筑工人安全态度的标准化

路径系数为 0.373；安全领导力对建筑工人安全态度的影响最为显著，影响总效应为 0.334。

5）安全态度是影响建筑工人安全行为的关键中介变量。从中介变量的角度，相较于安全自我效能感，安全态度对建筑工人的安全行为的中介效应更加显著。其中，安全态度对建筑工人的安全遵守行为影响更为显著。安全态度与安全参与行为和安全遵守行为的标准化路径系数为 0.664，0.708；安全态度对建筑工人安全遵守行为和安全参与行为的影响总效应分别为 0.732，0.589。

4　建筑工人安全行为管理的措施与建议

4.1　提升安全领导力

提升安全领导力，可有效提高建筑工人安全行为水平。安全领导力的观测变量 LES1，LES2 和 LES3 的标准化路径系数分别为 0.729，0.815 和 0.721，说明领导对建筑工人安全管理重视的责任心及开展必要的培训教育能极大提升安全领导力。因此，在选聘安全领导时，应当重点关注他们的安全责任心，还应要求他们积极融入建筑工人群体中，多与建筑工人开展安全交流沟通，了解和关心建筑工人群体工作和生活中遇到的困难，让他们感受到来自领导的关心，从而使他们在心理上逐渐形成安全生产的积极态度，更加重视安全生产，提高安全生产行为水平。

4.2　鼓励工友间的非正式沟通

鼓励工友间非正式沟通，培养良好的安全施工氛围。工友安全沟通的观测变量 WOS1，WOS2 和 WOS3 的标准化路径系数分别为 0.723，0.526 和 0.643，说明施工作业时，工友间的安全提醒与鼓励能有效加强工友间的安全沟通，但工友间缺乏安全生产经验交流与分享。因此，领导应该着重提高工友群体间安全交流的质量，在进行建筑安全培训时，以指导的方式为建筑工人解决与安全有关的问题，鼓励建筑工人表达意见、相互探讨发现问题并最终合力解决，形成良好的安全工作氛围，促进工人群体间形成互助互惠的关系。领导还应该从工友间的非正式群体周围去强调安全生产的重要性，培养非正式组织良好的安全氛围，从而提高建筑工人整体的安全参与行为水平和安全遵守行为水平。

4.3　端正建筑工人的安全态度

丰富建筑工人安全教育培训形式，端正建筑工人的安全态度。建筑工人安全态度的观测变量 SA1，SA2 和 SA3 的标准化路径系数分别为 0.786，0.792 和 0.634，说明定期开展安全规则培训和安全交流分享会是端正建筑工人安全态度的关键举措。因此，项目部应组织建筑工人开展多样化的安全交流分享会议和安全教育培训，提高安全培训的响应性、灵活性和互动性，以便工友间建立更强的情感联系，并提高建筑工人价值体系中安全的重要性。建筑工人在正确认识安全生产后，才会端正安全态度，高效地提升安全行为水平。

4.4　提高建筑工人的安全自我效能感

鼓励工友间的经验交流分享，提高建筑工人的安全自我效能感。安全自我效能感的观测变量 SEF1，SEF2 和 SEF3 的标准化路径系数分别为 0.824，0.677 和 0.756，说明安全培训教育和增强建筑工人安全生产自信心对提高建筑工人的安全自我效能感具有非常重要的作用。因此，在日常安全管理中应当鼓励工友群体多分享自己的安全操作经验和安全知识，尽可能地采纳他们的相关建议和解决方案，激励他们发展自己的能力，提高他们完成与安全相关工作任务的信心和动机，始终保持较高的安全自我效能感，更加愿意主动遵守安全规章制度，服从安全管理，并积极参与安全生产，从而提高自身的安全行为水平。

5　结论

从组织和个人视角，将安全态度和安全自我效能感作为重要的中介变量，采用结构方程模型探索安全支持对建筑工人安全行为的影响机理。依据模型分析结果，提出提升建筑工人安全行为的措施与建议，为建筑业管理者安全管理提供新的参考思路。研究得到以下 3 个结论。

1）工友安全沟通是最为显著的安全支持因素，对建筑工人的安全行为影响最为显著，对建筑工人安全参与行为和安全遵守行为的总效应分别为 0.294，0.302。在安全生产管理中应注重工友群体之间

的非正式交流沟通,进而影响周围的工友,从而提升整体安全生产氛围和安全生产行为水平。

2) 安全态度是重要的中介变量,在安全支持的中介作用下,对安全参与行为和安全遵守行为产生显著正向影响,总效应分别为0.589,0.732。在安全培训中,应着重培养建筑工人的安全价值体系,使他们正确地认识安全生产,从思想上端正安全生产态度,有效地规范建筑工人的安全行为。

3) 安全领导力是影响建筑工人安全态度的关键因素,总效应为0.334。与建筑工人的平等交流沟通及领导的安全责任心能从心理层面转变建筑工人的安全态度,使建筑工人更加重视安全生产。

研究还存在以下不足:尽管问卷具有一定的代表性,但问卷调研对象存在样本不均匀的问题;建立安全支持对建筑工人安全行为的影响机理模型时,仅从个人层面和组织层面的安全支持考虑影响安全行为的前因变量,未考虑施工作业环境层面的安全支持,如考虑减少施工现场噪音对建筑工人安全行为的影响。

参考文献:

[1] MA Ling, GUO Hongling, FANG Yihai. Analysis of construction workers' safety behavior based on myers-briggs type indicator personality test in a bridge construction project[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2021, 147(1): 1-11. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001958.

[2] 陈梅,祁神军,牛达钰,等. 主观社会支持对建筑工人心理及不安全行为的影响[J]. 中国安全科学学报,2021,31(1):30-37. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2021.01.005.

[3] 史玉芳,董芮. 组织支持感对建筑业农民工不安全行为的影响[J]. 中国安全生产科学技术,2020,16(10):158-164.

[4] 康梦月,祁神军,陈梅. 精神支持与物质支持对建筑工人不安全行为影响对比[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(3):143-148.

[5] LOOSEMORE M, MALOUF N. Safety training and positive safety attitude formation in the Australian construction industry[J]. Safety Science, 2019, 113: 233-243. DOI: 10.1016/j.ssci.2018.11.029.

[6] WU Shaoze, HOU Lei, ZHANG Guomin. Integrated application of BIM and extended reality technology: A review, classification and outlook[C]// Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. Hangzhou: Springer, 2021: 1227-1236.

[7] 张洪潮,王杰,卢迪. 自我效能感对安全行为的影响及上司支持感的调节作用[J]. 煤矿安全,2018,49(7):253-256. DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2018.07.065.

[8] 孙伟,杨洁,徐超,等. 民航飞行员自我效能感与安全绩效关系研究[J]. 安全与环境学报,2018,18(4):1359-1363. DOI:10.13637/j.issn.1009-6094.2018.04.021.

[9] YE Gui, XIANG Qianting, YANG Lijuan, *et al*. Safety stressors and construction workers' safety performance: The mediating role of ego depletion and self-efficacy[J]. Frontiers in Psychology, 2022, 12: 1-16. DOI: 10.3389/fpsyg.2021.818955.

[10] VIERENDEELS G, RENIERS G, VAN NUNEN K, *et al*. An integrative conceptual framework for safety culture: The egg aggregated model (TEAM) of safety culture[J]. Safety Science, 2018, 103: 323-339. DOI: 10.1016/j.ssci.2017.12.021.

[11] LI M, ZHAI H, ZHANG J, *et al*. Research on the relationship between safety leadership, safety attitude and safety citizenship behavior of railway employees[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(6): 1-17. DOI: 10.3390/ijerph17061864.

[12] 王丹,何洋. 群体视角下安全氛围对安全行为的跨层次影响[J]. 中国安全科学学报,2022,32(12):25-31. DOI:10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2022.12.2365.

[13] MENG Xiangcheng, CHAN A H S, LUI L K H, *et al*. Effects of individual and organizational factors on safety consciousness and safety citizenship behavior of construction workers: A comparative study between Hong Kong and Mainland China[J]. Safety Science, 2021, 135: 1-12. DOI: 10.1016/j.ssci.2020.105116.

[14] 周彪,吴春林,汪涛,等. 建设项目员工责任心对安全行为的影响[J]. 土木工程学报,2018,51(8):89-95. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2018.08.010.

[15] 叶贵,王妍,任梦雪,等. 体力疲劳对建筑工人不安全行为的影响效应研究[J]. 中国安全生产科学技术,2023,19(1):122-127.

[16] 丁道韧,陈万明. 自我效能感对个体即兴作用机制研究:基于个体结果期望的中介作用及组织支持的调节作用

[J]. 预测，2017，36(1)：21-27.

[17] 任广林. 在校大学生一般自我效能感调查[J]. 循证护理，2019，5(6)：573-574. DOI：10.12102/j.issn.2095-8668.2019.06.02.

[18] RAHIMI P T，MOHAMMADZADA E A. The effect of employees' management commitment to safety and consciousness on unsafe performance：The mediating role of safety self-efficacy[J]. Journal of Health and Safety at Work，2015，4(4)：69-80.

[19] 冯亚娟，邢仲超. 工作-家庭冲突与建筑工人不安全行为：一个被调节的链式中介模型[J]. 安全与环境学报，2021，21(5)：2129-2138. DOI：10.13637/j.issn.1009-6094.2020.0123.

[20] 李亚楠，殷胜利，路禹轩. 地铁施工作业人员不安全行为影响因素与监控方法[J]. 建筑安全，2022，37(1)：49-54.

[21] 祁神军，成家磊，张云波. 计及组织氛围的建筑工人不安全行为机理模型的构建[J]. 华侨大学学报(自然科学版)，2018，39(2)：198-204. DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.201703066.

[22] KAO Kuoyang，SPITZMUELLER C，CIGULAROV K，*et al*. Linking safety knowledge to safety behaviours：A moderated mediation of supervisor and worker safety attitudes[J]. European Journal of Work and Organizational Psychology，2019，28(2)：206-220. DOI：10.1080/1359432X.2019.1567492.

[23] 畅鹏花，张戌凡. 组织安全支持与个体安全行为的关系：一项元分析[J]. 工业安全与环保，2022，48(3)：41-44.

[24] OAH S，NA R，MOON K. The influence of safety climate，safety leadership，workload，and accident experiences on risk perception：A study of Korean manufacturing workers[J]. Safety and Health at Work，2018，9(4)：427-433. DOI：10.1016/j.shaw.2018.01.008.

[25] 康梦月，祁神军，张云波，等. 精神支持对建筑工人消极情绪的干预机制[J]. 中国安全科学学报，2023，33(1)：56-63. DOI：10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2023.01.2379.

[26] 王文杰，杨振宏，李盼，等. 基于作业安全感的建筑工人不安全行为研究[J]. 建设科技，2020(8)：82-86. DOI：10.16116/j.cnki.jskj.2020.08.016.

[27] 张建设，张文宇，苑东亮，等. 基于个体特征的施工人员安全认知差异分析[J]. 土木工程与管理学报，2021，38(2)：84-90. DOI：10.13579/j.cnki.2095-0985.2021.02.012.

[28] MO Junwen，CUI Libing，WANG Ruirui，*et al*. Proactive personality and construction worker safety behavior：Safety self-efficacy and team member exchange as mediators and safety-specific transformational leadership as moderators[J]. Behavioral Sciences，2023，13(4)：1-18. DOI：10.3390/bs13040337.

[29] 左敏. 少数民族大学生领悟社会支持对学习投入的影响：以四川省为例[J]. 社会科学家，2022，308(12)：154-160.

[30] KIM T，SYDNES A K，BATALDEN B. Development and validation of a safety leadership self-efficacy scale (SLSES) in maritime context[J]. Safety Science，2021，134：1-11. DOI：10.1016/j.ssci.2020.105031.

[31] 阮国祥. 建筑企业差错管理氛围对员工安全行为影响研究[J]. 中国安全科学学报，2017，27(1)：140-145. DOI：10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2017.01.025.

[32] 祁神军，成家磊，黄芹芹，等. 安全态度、安全能力、不安全动机对建筑工人不安全行为的发生机理[J]. 华侨大学学报(自然科学版)，2018，39(5)：669-674. DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.201803013.

[33] YANG Xiaoyi，ZHANG Boling，WANG Lulu，*et al*. Exploring the relationships between safety compliance，safety participation and safety outcomes：Considering the moderating role of job burnout[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health，2021，18(8)：1-13. DOI：10.3390/ijerph18084223.

[34] JUNG M，LIM S，CHI S. Impact of work environment and occupational stress on safety behavior of individual construction workers[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health，2020，17(22)：1-21. DOI：10.3390/ijerph17228304.

[35] CHOI B，LEE S. The psychological mechanism of construction workers' safety participation：The social identity theory perspective[J]. Journal of Safety Research，2022，82：194-206. DOI：10.1016/j.jsr.2022.05.011.

[36] HE Changquan，MCCABE B，JIA Guangshe，*et al*. Effects of safety climate and safety behavior on safety outcomes between supervisors and construction workers[J]. Journal of Construction Engineering and Management，2020，146(1)：1-13. DOI：10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001735.

[37] 龙蔚，郭豪杰，路遥. 基于云南省 900 份农户残膜回收意愿问卷的 SEM 实证研究[J]. 中国农业大学学报，2022，27(8)：246-257. DOI：10.11841/j.issn.1007-4333.2022.08.22.

(**责任编辑**：钱筠　　**英文审校**：方德平)

DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.202309009

南音声景的感知评价与心理恢复性效应

陈岩君[1]，欧达毅[1,2]，廉英奇[1]，杜春雨[1]，徐涵[1]

（1. 华侨大学 建筑学院，福建 厦门 361021；
2. 华侨大学 福建省城乡建筑遗产保护技术重点实验室，福建 厦门 361021）

摘要： 为了传承与保护入选世界级非物质文化遗产的南音，探究南音声景的感知评价和心理恢复性效应，以南音器乐曲《梅花操》为研究对象，在实验室环境下，使用语义差异评价问卷和声景感知恢复量表（PRSS）探究南音声景的感知评价和心理恢复性效应，并借助一段南音介绍视频考虑自上而下加工对声景感知的影响。结果表明：声景感知评价中舒适性的评分均值为 2.00，说明南音舒适性较好；PRSS 的评分均值为 4.73，说明南音具有一定的恢复作用；观看介绍视频会让被试对南音需要传承与保护更加认同；南音是一种具有恢复性的声景，自上而下加工对声景感知有一定影响。

关键词： 声景；声景感知；南音；恢复性；自上而下加工

中图分类号： TU 112 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000-5013(2023)06-0702-05

Perception Evaluation and Psychological Restorative Effect of Nanyin Soundscape

CHEN Yanjun[1], OU Dayi[1,2], LIAN Yinqi[1], DU Chunyu[1], XU Han[1]

(1. School of Architecture, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Urban and Rural Architectural Heritage Protection Technology Key Laboratory of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to inherit and protect the Nanyin as a world-class intangible cultural heritage, and to investigate the perception evaluation and psychological restorative effect of Nanyin soundscape, taking the Nanyin instrumental music *Mei Hua Cao* as the research object, the semantic differential evaluation questionnaire and the perceived restorativeness soundscape scale (PRSS) are used to explore the perception evaluation and psychological restorative effect of Nanyin soundscape in the laboratory environment. The effect of the top-down processing on the soundscape perception is considered with the help of the introductory video of Nanyin. The results show that the mean score value of comfort in the soundscape perception evaluation is 2.00, indicating better comfort of Nanyin. The mean score value of the PRSS is 4.73, indicating certain restorative effect of Nanyin. Watching the introduction video will make the subjects more agreeable to the need for inheritance and protection of Nanyin. Nanyin is a soundscape with restoration, and top-down processing has a certain effect on soundscape perception.

Keywords: soundscape; soundscape perception; Nanyin; restorative; top-down processing

收稿日期： 2023-09-09

通信作者： 欧达毅（1982-），男，教授，博士，博士生导师，主要从事建筑声环境、声景观的研究。E-mail：oudayi_hqu@126.com。

基金项目： 国家自然科学基金资助项目（51578252）；福建省社会科学规划项目（FJ2021B075，FJ2017C018）

南音发源于福建省泉州市，是我国古代音乐文化保存最丰富、最完整的一大乐种[1]，它既可以演唱，也可以纯乐器演奏，于 2009 年入选世界级非物质文化遗产。然而，在多元文化的冲击、生产生活方式的转变及传承人老年化等背景下[2]，南音的传承和发展面临紧迫的境地[3]，现有的研究主要从南音的教学、传播等方面进行讨论[4-6]，较少从声景角度探讨南音的价值。

声景的定义为个体、群体或社区所感知的在给定场景下的声环境[7]。声景恢复性效应一般指声景对环境中个体的恢复所发挥的促进(或阻碍)作用[8]。其中，心理恢复性效应是声景恢复性效应的一个重要体现。近年来，关于声景的研究受到了越来越多的重视，尤其是恢复性方面。例如，通过改变鸟鸣声的种类或数量，探究其对恢复性的影响[9-10]；通过对噪声的掩蔽效果，研究流水声的恢复性[11-12]；采用视听的方式将声音材料与视觉材料一一组合，比较不同组合恢复性效果的差异及相互影响[13-14]。研究人员认为，个体体验声景是自下而上、知觉驱动过程的结果，也是基于现有偏好、态度和认知的自上而下过程的结果[15]。然而，目前考虑个体对声景自上而下加工的研究尚少。基于此，本文将南音作为一种恢复性声音，研究南音声景的感知评价和心理恢复性效应，并考虑了声景自上而下加工过程。

1　实验设计

1.1　实验素材

选取南音四大名曲之一的《梅花操》作为实验的南音材料，全曲由酿雪争春、临风妍笑、点水流香、联珠破萼和万花竞放 5 节组成，时长约 19 min。为避免听音过长造成疲劳，使用 Audition 软件截取《梅花操》的第 2，3 节作为实验音频，时长约 8 min。

使用一段南音介绍视频，研究自上而下加工对声景体验的影响。介绍视频选自央视官方节目《文化大百科——曲苑荟萃》中关于南音的专题视频，内容包括南音的发展演变历史、演奏乐器、表演形式、曲风评价，及其在中国音乐史的地位，并强调南音于 2009 年入选世界非物质文化遗产，时长约 8 min。

1.2　问卷设计

问卷主要由 3 个部分组成。

1) 第 1 部分为南音的感知评价，声景感知问卷基于语义差异法(SD)进行设计，语义差异法是声景主观问卷调查中的一种常见方法[16]，使用意思相反的形容词对可以量化被试的主观感受。问卷包括 8 组意思相反的形容词对(感知评价因子)，即无价值的-有价值的、无文化内涵的-有文化内涵的、只能被束之高阁的-可以应用于现实场景的、应该被淘汰的-需要传承与保护的、不舒适-舒适、不愉快-愉快、乏味-有趣、焦虑-平静，前 4 对从价值、文化内涵、可应用性、传承与保护 4 个方面进行评价，后 4 对从声音引起的内心感受进行评价。

2) 第 2 部分为南音的心理恢复性效应评价。声景恢复性问卷使用声景感知恢复量表(PRSS)[17]，该量表在 4 个维度(魅力、引离、兼容、程度)下分别设置相关的问题，被试回答对每个问题的同意程度。原量表有 19 个问题，根据实验特点及需要选取其中 8 个高可靠性的问题作为心理恢复性的评价指标。魅力维度包含 4 个问题(总的来说，我觉得这种声环境很吸引人；我想待在有这样声音的环境中；这些声音引起了我对一些事情的好奇心；我陶醉在这样的声环境中)。引离维度包含 2 个问题(这种声环境可以让我免受外界干扰；当我听到这些声音时，我感觉从工作、日常事务和责任中解脱了出来)。兼容维度包含 1 个问题(这些声音环境符合我的偏好)。程度维度包含 1 个问题(这些声音似乎可以与很多场景(如公园、街道等)非常自然地融合在一起)。该问卷为 7 级量表，1～7 分别表示根本不、非常少、一点点、有点、相当多、非常多、完全，评分越高表明心理恢复性越好。

3) 第 3 部分为南音的适配场景评价。适配场景问卷包含 3 个问题(您认为刚听到的声音是否适合在公园/街道/广场场景中)，目的在于探索南音应用于城市公共空间的可能性，并为后续推广提供参考。

1.3　实验流程

实验在华侨大学李朝耀大楼一间研究室进行，墙面为石灰抹面，一侧开窗，地板为水磨石，顶面为轻质塑料板材吊顶，室内布置适量吸声板，背景噪声为 34～35 dB。研究室内放有 1 张办公桌、2 把办公椅、1 台挂式空调(实验时关闭)。一次实验仅有一个被试，被试面前放置一台 S2340M 型戴尔显示器，听音设备使用 HD6700 型森海塞尔耳机，允许被试将音量调整到一个舒适值。

实验面向华侨大学厦门校区学生进行招募,为了避免被试对南音提前熟悉而影响其主观评价,被试的招募条件为之前从未了解过南音的非闽籍大学生,一共招募40名被试(女性23名,男性17名,平均年龄为(23.4±2.5)岁),随机分为介绍组(男性9名,女性11名)和无介绍组(男性8名,女性12名)。

被试到达实验场地后先休息平复2 min,此时,主试讲解实验流程。无介绍组被试填写个人基本信息后,带上眼罩聆听约8 min南音,再填写声景感知问卷、声景恢复性问卷和适配场景问卷;介绍组被试观看8 min南音介绍视频后填写个人基本信息,再戴上眼罩聆听相同的南音材料,最后填写声景感知问卷、声景恢复性问卷和适配场景问卷。每次实验的总时间为20~30 min。

2 实验结果与分析

2.1 声景感知评价

对样本整体进行均值分析。南音语义差异法调查结果,如图1所示。图1中:S_{ave}为评分均值;-1,1表示一般符合;-2,2表示较符合;-3,3表示非常符合;0表示均不符合。由图1可知:感知评价因子的评分均值皆大于1;感知评价因子的评分均值大于等于2的形容词对为不舒适-舒适(2.00)、应该被淘汰的-需要传承与保护的(2.43)、无文化内涵的-有文化内涵的(2.83)、无价值的-有价值的(2.55),这说明南音给人的感受较为舒适,且被试总体较为认同南音的文化内涵、文化价值及需要传承与保护。

进一步分析无介绍组和介绍组、性别之间的评价差异。使用K-S检验判断数据的正态性,发现不符合正态分布($P<0.050$),故使用Mann-Whitney U检验进行分析,结果如表1所示。表1中:$S_{ave,n}$,$S_{ave,i}$分别为无介绍组和有介绍组的评分均值;$S_{ave,m}$,$S_{ave,f}$分别为男性和女性的评分均值。由表1可知:除不愉快-愉快、乏味-有趣、无价值的-有价值的3个形容词对之外,其余介绍组的形容词对评分均值都高于无介绍组,但这种差异不具有统计学意义;应该被淘汰的-需要传承与保护在介绍组和无介绍组之间的差异达到了边缘性显著水平($P=0.056$),这表明看过南音介绍视频的被试明显更加认同南音需要传承与保护;性别在所有因子评价中的差异均不具有统计学意义。

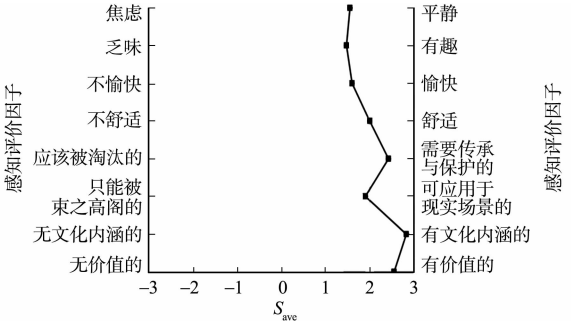


图1 南音语义差异法调查结果

Fig. 1 Survey results of Nanyin semantic difference method

表1 南音介绍视频和性别对语义差异法评价的影响

Tab. 1 Effect of Nanyin introduction video and gender on evaluation of semantic differential method

感知评价因子	南音介绍视频			性别		
	$S_{ave,n}$	$S_{ave,i}$	P	$S_{ave,m}$	$S_{ave,f}$	P
无价值的-有价值的	2.55	2.55	0.774	2.47	2.61	0.310
无文化内涵的-有文化内涵的	2.75	2.90	0.218	2.76	2.87	0.394
只能被束之高阁的-可以应用于现实场景的	1.80	2.00	0.209	1.94	1.87	0.489
应该被淘汰的-需要传承与保护的	2.30	2.55	0.056	2.69	2.30	0.732
不舒适-舒适	1.80	2.20	0.221	2.06	1.96	0.735
不愉快-愉快	1.65	1.55	0.844	1.71	1.52	0.798
乏味-有趣	1.65	1.30	0.329	1.35	1.57	0.472
焦虑-平静	1.25	1.85	0.122	1.82	1.35	0.486

2.2 心理恢复性效应评价

对样本整体进行均值分析,问卷总体评分均值为4.73,超过了中值4.00,这说明南音声景具有一定的心理恢复作用。魅力维度包括4个问题,主要内容为被试能否被环境吸引,是否愿意待在这样的环境中,该维度能够衡量被试非自愿注意力的程度,这是一种无意识、不费力的注意力形式,当个体处于无意识状态时,有助于定向注意力的恢复[18];实验中南音的魅力维度评分均值为4.72,说明南音声景具有一定恢复定向注意力的潜力。引离维度包括2个问题,主要内容为环境能否让被试从现实工作中脱离,该维度能够衡量被试在环境中观念的转变,这种转变可以是注视方向的改变或看待旧环境的新方式等,从

而将人从当下的压力中解脱出来[18]；实验中南音的引离维度评分均值为 5.05，在 4 个维度中评分最高，说明南音声景的恢复性主要从使人引离体现。兼容维度包括 1 个问题，内容为环境是否符合偏好，该维度强调个人和环境的适应性，个体能够在环境中感到舒适而不会刻意关注自己的行为[18]；实验中南音的兼容维度评分均值为 4.25，表明个体在南音声景中具有一定适应性。程度维度包括 1 个问题，内容为声音和场景是否可以自然融合，该维度强调环境的连贯性和丰富性；实验中南音的程度维度评分均值为 4.60，说明南音和其他场景（如公园、街道等）结合时具有一定的连贯性，这为南音应用于现实场景提供了一定参考。

进一步使用 Mann-Whitney U 检验分析无介绍组和介绍组、性别之间的心理恢复差异，结果显示各组间的差异均不具有统计学意义（$P>0.050$），说明介绍视频和性别差异对南音的恢复性影响不明显。

2.3　适配场景评价

实验调查了南音和公园、街道、广场的适配程度，结果显示，85.0%的人认为南音适合在公园场景中，72.5%的人认为南音适合在街道场景中，仅有 12.5%的人认为南音适合在广场场景中。这可能是因为南音徐缓舒展的音乐节奏和城市公园的安静环境较为相配，而街道、广场的环境相对嘈杂，且城市公园中播放音乐的情况并不少见，故南音和城市公园场景的适配程度最高。

3　讨论

3.1　南音的心理恢复性效应

由 PRSS 得出的南音平均心理恢复值为 4.73，证明南音具有一定的恢复作用。进一步与其他声源的恢复性进行比较，Zhao 等[19]对哈尔滨太阳岛公园的声景感知进行研究，使用 PRSS 衡量夏季和冬季不同种类鸟鸣声的感知恢复性，其中，夏季啄木鸟的恢复性最高（3.25）；李亨[20]在实验室环境下对鸟鸣声场景、流水声场景的心理恢复效果进行测量，原文使用的 PRSS 为 11 级量表，将其转化为 7 级量表后得出鸟鸣场景下的 PRSS 评分均值为 4.64，流水声为 4.38。这表明南音的恢复性效果和自然声相差不大。已有许多研究证明了鸟鸣声和流水声的恢复性，比如能够减轻压力[21]、恢复注意力[22]等，表明南音可能存在类似的恢复性，还需要将来进一步的实验证明。

3.2　南音介绍视频的影响

自上而下加工指个体通过先验知识或期望对刺激进行加工，在实验中主要通过改变被试的先验知识来影响自上而下加工。为了避免被试提前具备这种先验知识，在实验前期，控制了被试必须为非闽籍人士，并且在实验过程中也设置了问题进行二次筛选，最终得到的被试对南音基本没有了解，即对南音的先验知识较少。进一步，以 8 min 的南音介绍视频作为前期材料，让被试了解南音，增加被试的先验知识。尽管短期的介绍视频能够让被试增加的先验知识有限，但实验结果表明，这种先验知识在一定程度上影响了声景体验，相较于无介绍组，介绍组对南音的传承与保护表示出了明显的认同，但对心理恢复则没有明显影响，这可能有以下 3 个原因：1）恢复时间不够长，短期恢复的效果有限；2）大学生群体对南音的偏好可能较低，有研究显示大学生对中国传统音乐的偏好程度普遍较低[23]，因此影响了南音的恢复效果；3）介绍视频的内容具有一定针对性，介绍视频的主要内容为历史文化方面，而恢复性评价问卷的内容和历史文化无关，因此对恢复性的影响不明显。

4　结束语

南音声景具有一定的心理恢复作用，给人的感受较为舒适，南音较适合与公园和街道场景结合，当随机为被试提供南音介绍视频时，会对被试的声景感知有一定影响，介绍组被试比无介绍组被试更认同南音需要传承与保护。研究表明，南音是一种具有恢复性的民俗音乐，声景体验过程中的自上而下加工需要得到更多关注。

参考文献：

[1]　彭兆荣，葛荣玲. 南音与文化空间[J]. 民族艺术，2007(4)：64-69. DOI：10.16564/j.cnki.1003-2568.2007.04.005.

[2] 陈敏红.乐人、曲谱及文化空间的"原真"保护:泉州南音民间乐社传承困境研究[J].渭南师范学院学报,2015,30(5):87-89,96. DOI:10.15924/j.cnki.1009-5128.2015.05.016.

[3] 吴婉嫔.论泉州南音传承与教学的现状[D].南昌:南昌大学,2022. DOI:10.27232/d.cnki.gnchu.2022.004411.

[4] 王媛媛.泉州南音洞箫的民间传承研究[D].泉州:泉州师范学院,2022. DOI:10.27882/d.cnki.gqzsf.2022.000063.

[5] 白志艺,章咏杰.基于互联网技术的南音传承新模式探究[J].泉州师范学院学报,2021,39(5):73-77. DOI:10.16125/j.cnki.1009-8224.2021.05.014.

[6] 陈恩慧.泉州师范学院南音本科专业教学改革探究[J].中国音乐,2021(3):114-119. DOI:10.13812/j.cnki.cn11-1379/j.2021.03.013.

[7] INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12913-1: Acoustics-soundscape-part 1: Definitionand conceptual framework[S]. Geneva: International Organisation for Standardization,2014.

[8] 张圆.城市公共开放空间声景的恢复性效应研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.

[9] UEBEL K,MARSELLE M,DEAN A J,*et al*. Urban green space soundscapes and their perceived restorativeness [J]. People and Nature,2021,3(3):756-769. DOI:10.1002/pan3.10215.

[10] DOUGLAS J W A,EVANS K L. An experimental test of the impact of avian diversity on attentional benefits and enjoyment of people experiencing urban green-space[J]. People and Nature,2022,4(1):243-259. DOI:10.1002/pan3.10279.

[11] YANG W Y,MOON H J. Effects of indoor water sounds on intrusive noise perception and speech recognition in rooms[J]. Building Services Engineering Research and Technology,2018,39(6):637-651. DOI:10.1177/0143624418769187.

[12] TRUDEAU C,STEELE D,GUASTAVINO C. A tale of three misters: The effect of water features on soundscape assessments in a montreal public space[J]. Frontiers in Psychology,2020,11:570797. DOI:10.3389/fpsyg.2020.570797.

[13] DENG Li,LUO Hao,MA Jun,*et al*. Effects of integration between visual stimuli and auditory stimuli on restorative potential and aesthetic preference in urban green spaces[J]. Urban Forestry & Urban Greening,2020,53:126702. DOI:10.1016/j.ufug.2020.126702.

[14] LIU Fangfang,LIU Peiye,KANG Jian,*et al*. Relationships between landscape characteristics and the restorative quality of soundscapes in urban blue spaces[J]. Applied Acoustics,2022,189:108600. DOI:10.1016/j.apacoust.2021.108600.

[15] RATCLIFFE E. Sound and soundscape in restorative natural environments: A narrative literature review[J]. Frontiers in Psychology,2021,12:570563. DOI:10.3389/fpsyg.2021.570563.

[16] 廉英奇,欧达毅,潘森森,等.不同景观空间类型的声景评价研究[J].建筑科学,2020,36(8):57-63. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2020.08.09.

[17] PAYNE R S. The production of a perceived restorativeness soundscape scale[J]. Applied Acoustics,2013,74(2):255-263. DOI:10.1016/j.apacoust.2011.11.005.

[18] KAPLAN S. The restorative benefits of nature: Toward an integrative framework[J]. Journal of Environmental Psychology,1995,15(3):169-182. DOI:10.1016/0272-4944(95)90001-2.

[19] ZHAO Wei,LI Hongyu,ZHU Xun,*et al*. Effect of birdsong soundscape on perceived restorativeness in an urban park[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2020,17(16):5659. DOI:10.3390/ijerph17165659.

[20] 李亨.山地城市公园声景特征及健康效益研究[D].重庆:重庆大学,2020. DOI:10.27670/d.cnki.gcqdu.2020.000430.

[21] MICHELS N,HAMERS P. Nature sounds for stress recovery and healthy eating: A lab experiment differentiating water and bird sound[J]. Environment and Behavior,2023,55(3):175-205. DOI:10.1177/00139165231174622.

[22] 艾祥睿,欧达毅.声压级大小对鸟叫声和流水声恢复性效应的影响[J].华侨大学学报(自然科学版),2022,43(5):612-618. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202104054.

[23] 梁凤华,苏前忠.大学生音乐欣赏偏好与大五人格特征相关的研究[J].上饶师范学院学报,2016,36(5):100-106. DOI:10.3969/j.issn.1004-2237.2016.05.019.

(**责任编辑**:钱筠 **英文审校**:方德平)

DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.202305021

街道环境和人群活动与主观感知的内在关联性

吴莞姝，李欣迪，黄梦欣

（华侨大学 建筑学院，福建 厦门 361021）

摘要： 以福建省厦门市 8 条代表性街道为研究对象，探究街道环境、人群活动与主观感知之间关联性的普适性规律。基于实地调研数据、问卷调查数据、兴趣点(POI)数据、基于位置的服务(LBS)数据等多源数据，采用语义差别法、相关性分析等方法对街道环境、人群活动与主观感知 3 类指标的相关性进行研究。结果表明：人群活动与街道宏观环境特征的相关性显著，而与街道微观环境特征的关联性较弱；街道环境与主观感知的相关性显著，各类人群的感知差异明显；人群活动强度与安静程度、遮荫度等感知评价因子显著相关，工作日、非工作日与人群活动显著相关的感知评价因子存在差异；街道类型也对人群活动及主观感知有显著影响。

关键词： 街道环境；人群活动；主观感知；关联性；厦门市

中图分类号： TU 984.13　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-5013(2023)06-0707-12

Internal Correlation Between Street Environment, Crowd Activities and Subjective Perception

WU Wanshu, LI Xindi, HUANG Mengxin

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

Abstract: Eight representative streets in Xiamen City, Fujian Province are taken as the research objects to explore the universal law of the correlation between street environment, crowd activities and subjective perception. Based on multi-source data such as field research data, questionnaire survey data, point of interest (POI) data, location based services (LBS) data, the correlation between street environment, crowd activities and subjective perception is studied by methods of semantic differenial method and correlation analysis. The results show that crowd activities are significantly correlated with the macro-environmental characteristics of street, but weakly correlated with the micro-environmental characteristics of street; the correlation between street environment and subjective perception is significant, and the perception of various group of crowd is obviously different; the crowd activity intensity is significantly related to the perception evaluation factors of quietness degree and shade degree, and there are differences in the perception evaluation factors significantly relating to crowd activities on working days and non-working days; street types also have a significant impact on crowd activities and subjective perception.

Keywords: street environment; crowd activity; subjective perception; correlation; Xiamen City

作为城市中最重要、使用最频繁的公共活动场所和行为空间之一[1]，街道是城市居民最常见的生活环境及日常景观[2-3]，与城市公共生活质量紧密相连[4]。人群活动作为街道公共生活的重要组成部分，

收稿日期： 2023-05-29

通信作者： 吴莞姝(1988-)，女，副教授，博士，主要从事公共空间研究、城市设计、城市空间信息分析的研究。E-mail：wuwanshu131@163.com。

基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51908229)；福建省自然科学基金资助项目(2019J01063)

不仅是表征街道活力的重要指标[5],也是增强城市吸引力与竞争力的必要条件。Jacobs[6]指出街道乃至城市的环境特征能吸引人群在街道上活动,促进城市活力。许多研究均侧重于探究街道环境对人群活动的影响。如郝新华等[7]指出功能密度、到城市商业中心的距离等街道环境指标能够影响街道活力;徐磊青等[8]以上海市南京西路为例,分析商业性街道的空间与界面特征对步行者停留活动的影响。

随着城市设计理念的转变,人的主体性愈发得到重视,居民对公共空间的感知体验成为评价空间品质的重要指标。作为心理学与神经科学领域词汇,感知在引入建筑及规划领域后,用以表示居民对城市空间的心理感受[9]。大量文献指出街道环境要素,如街道能见度、使用便利性[10]、照明情况[11]、绿化环境[12-13]等与人群安全感、舒适性等主观感知相关联,且感知也会因居民的年龄、性别[14]及活动方式[15]的差异产生异质性。研究者通过多种方法收集量化居民感知,其中,语义差别法作为一种通过言语尺度测定居民感受的量化方式[16],被广泛地运用于空间感知评价的研究中,探究城市空间与主观感知的关联性。例如,王德等[17]运用语义差别法设计问卷,研究街道客体指标与空间感知特征之间的关系,得出街道三维形态与氛围特色显著影响居民的主观感知的结论;赵渺希等[18]结合认知地图与语义差别法,分析不同社会群体对街道空间意向的感知差异。此外,研究者指出感知重叠可产生群体性的空间主观意象,进而丰富场所的语义信息[19],环境与感知之间存在相互作用的关系。

人群活动作为主观感知的决定性因素,有助于塑造个人感知中的街道形象[20],活动强度、类型及频率都能够影响居民的主观感知[21]。同样,感知对活动也存在反作用,如积极感知对活动的意愿与强度有正向影响,消极感知则会增大环境中的活动难度[22]。一些研究还将感知视为环境与活动之间的中介变量[23-24]进行系统性分析。虽然对于街道环境的研究众多,但大多集中于街道环境对某一要素如人群活动的单方面作用,而忽略了街道环境对多方面要素的影响及要素之间的内部关联,从而缺少了综合性分析。基于此,本文将街道空间与人作为研究主体,探究街道环境、人群活动与主观感知3类指标之间关联性的普适性规律。

1 研究范围及数据来源

1.1 研究范围

厦门市位于福建省东南部,是福建省乃至全国代表性沿海经济发达城市之一、中国最早的经济特区之一,也是海峡西岸中心城市。厦门岛作为厦门市的中心城区,具有历史文化悠久、功能业态多元、人口及产业集聚等特征,这使厦门岛内街道的空间形态与功能类型多样化。

基于《厦门市街道设计导则》[25]和文献[26-28]对城市街道类型的划分,通过兴趣点(POI)数据与实地调研确定8种街道类型:购物休闲类街道、商务办公类街道、行政服务类街道、生活居住类街道、科教文化类街道、历史文化街道及街区、城市景观类街道与多功能混合类街道。

在此基础上,使用ArcGIS软件将基于位置的服务(LBS)数据、街道路网数据与建筑轮廓数据等导入厦门市域地图,通过核密度分析、百度热力图等方式筛选出厦门岛内8条不同类型且人口密度高、人群活动强度大的城市街道,包括龙头路、文化艺术中心及其周边、筼筜路、思明南路、大学路、中山路、观音山海滨旅游商业街与厦禾-嘉禾路。

各街道区位、功能分布及性质定位,如图1所示。

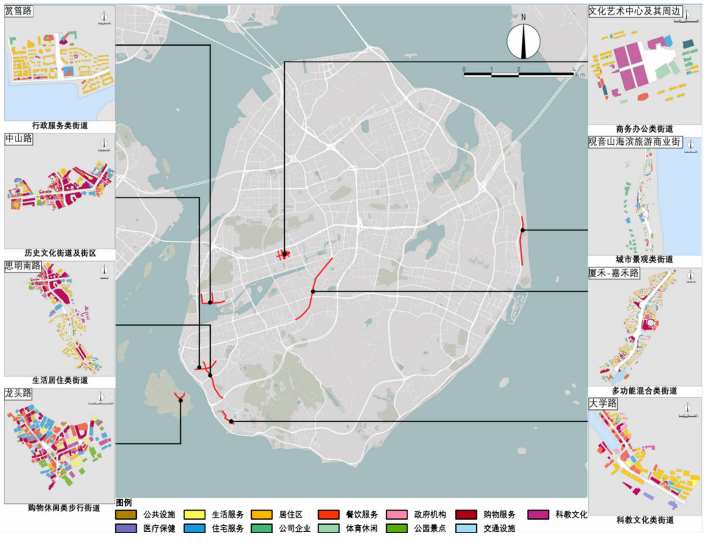


图1 各街道区位、功能分布及性质定位

Fig. 1 Location, functional distribution and character orientation of each street

1.2　数据来源与收集

传统数据收集方法获得的数据精度大、准确度高，但具有范围小、成本高等局限性。大数据及开放数据的广泛应用提高了数据收集效率，降低了成本，还能在获取文本数据的基础上进行方位与图像数据的整理[29]，将多维度数据纳入研究范围中。因此，采用以下 3 种综合性的数据收集方法。

1）实地调研数据。根据研究需要并考虑大数据的局限性，通过实地调研获取各街道微观尺度的环境指标数据，如街道公共座椅长度、步行道面积等。

2）问卷调查数据。文中的主观感知评价问卷分为个体特征采集与主观感知评价两部分。个体特征采集受访者的基本社会特征，包括性别、年龄、从事职业与定居地属性，以及受访者前往街道的活动目的（即旅游游玩、日常通勤、购物休闲与无目的到访[20]等活动类型）。主观感知评价采用语义差别法，基于空间特性选取意义相反的形容词对并让受访者评分，以量化人群对街道环境的主观感知评价。选取与街道环境相关联的开敞度、复杂度、趣味性、安静程度、热闹度、规模大小[17]、活泼度、洁净度、精致度[30]、便利度、具有特色程度、文化感[31]、明亮度、绿化程度、遮荫度与安全感[32]等 16 个感知评价因子，分别对应 16 组意义相反的形容词对，即便利-不便利、明亮-昏暗、精致-粗糙、干净-肮脏、绿化多-绿化少、荫凉-暴晒、规模小-规模大、开敞-封闭、单调-复杂、安静-嘈杂、热闹-冷清、有趣-无趣、活泼-严肃、有特色-无特色、文化感强-文化感弱、安全-危险。基于李克特量表赋予形容词对 7 层评价等级，分数从低至高表示感知评价由消极到积极，分值分别为－3，－2，－1，0，1，2，3。

问卷调查于 2021 年 10 月进行，共收集 614 份问卷（男性 270 份，女性 344 份），包括 117 份纸质版问卷及 497 份微信小程序问卷。其中，有效问卷 588 份，有效率为 95.77％。

3）时空大数据。时空大数据包括 LBS 数据、POI 数据、建筑轮廓数据与街道路网数据。LBS 数据为极光 Aurora Mobile 用户匿名地理位置大数据，选取 2020 年 10 月 17 日－2020 年 10 月 30 日厦门市域内所有 LBS 记录，识别并测算用户数量及其位置记录，基于 LBS 数据周期性位置更新机制（用户打开 APP 后，其位置数据以每小时 1 次的频率向后台报送），将所有用户位置信息前推 1 h，以最接近整点的记录作为用户在该时间点的位置，人群活动强度则基于此数据进行进一步计算。POI 数据来源于高德地图应用程序接口（API），于 2020 年 12 月采用 Python 爬虫技术进行采集，经筛选处理后得出 13 种 POI 类型，功能密度等指标均在该数据基础上进行计算。建筑轮廓数据与街道路网数据来源于百度地图，结合地理信息系统（GIS）软件进行分析。

综上，基于街道环境、人群活动与主观感知 3 类指标，综合使用多维度研究数据，可得研究指标与数据类型对应方式，如图 2 所示。

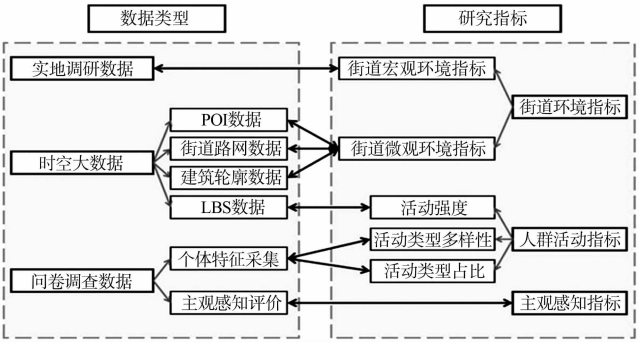


图 2　研究指标与数据类型对应方式

Fig. 2　Corresponding method between research indicators and data types

1.3　指标选取、量化及描述性统计

1）街道环境指标。根据空间尺度，将街道环境指标分为街道宏观环境指标（交通可达性、周边地块用地性质、开发强度、功能密度、功能混合度、功能多样性、绿化覆盖比例）与街道微观环境指标（高宽比、贴线率、步行道面积比、座椅长度比例、灰空间面积比例、沿街商业界面比例）。街道环境指标的量化方法及结果，如表 1 所示。

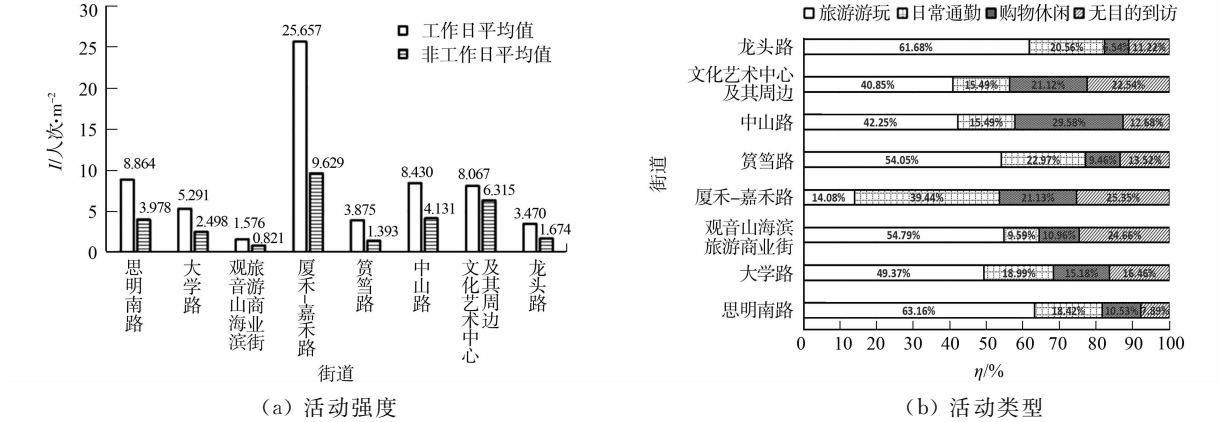
2）人群活动指标。人群活动指标包括活动强度、活动类型多样性和活动类型占比。基于预处理后的用户数量及整点位置记录，汇总工作日与非工作日各街道上 8:00—22:00 的 LBS 用户记录数量，将街道上的人口密度视为此街道的人群活动强度（I），$I=n/S$。其中：n 为街道到访的人次数；S 为街道面积[33]。活动类型数据来自问卷。

3）主观感知指标。根据问卷调查结果，得到 16 项感知评价因子的量化数据。由于研究数据的数值差异较大，层级不一致，收集街道环境数据后进行标准化处理，并将各街道的人群活动强度及活动类型数据进行对比分析，结果如图 3 所示。图 3 中：η 为活动类型占比。根据问卷结果汇总各街道感知评价因子的平均值（f_{ave}），并绘制其平均分折线图（图 4），以便开展后续分析。

表1 街道环境指标的量化方法及结果

Tab.1 Quantitative methods and results of street environment indicators

街道环境指标	计算量化方法	街道							
		思明南路	大学路	观音山海滨旅游商业街	厦禾-嘉禾路	筼筜路	中山路	文化艺术中心及其周边	龙头路
交通可达性/m	按照间隔200 m对街道进行取点,计算地铁站到该点的网络距离平均值[34-35]	411.00	1 007.92	579.66	363.08	357.97	549.24	371.40	1 366.87
周边地块用地性质	街道研究范围内与商业有关地块性质的占比情况[36]	0.37	0.11	0.72	0.41	0.20	0.71	0.03	0.20
开发强度	街道研究范围内的平均容积率[37]	3.50	2.19	0.31	6.41	3.05	6.50	3.34	1.66
功能密度/个·m^{-2}	街道研究范围内POI的密度,POI密度=POI数量/街道面积[8]	0.009 6	0.007 0	0.001 2	0.015 8	0.003 8	0.011 7	0.003 0	0.005 3
功能混合度	功能混合度$=-P_1+P_2+P_3+\cdots+P_n$,n为POI的类别数,P为某类POI数量所在街段POI总数的比值[35]	0.58	0.59	0.26	0.56	0.55	0.35	0.32	0.44
功能多样性	街道中POI类别的多样性,利用信息熵公式进行计算[38]	0.63	0.68	0.82	0.79	0.81	0.61	0.81	0.68
绿化覆盖比例/%	街道的绿化面积与街道总面积的比值(buffer=10 m)[35]	5.02	4.54	16.68	25.81	23.30	1.79	19.74	1.52
高宽比	街道宽度与沿街建筑外墙高度的比值[39]	0.52	0.81	0.12	0.33	0.68	0.91	0.38	0.71
贴线率/%	建筑立面线长度与建筑控制线长度的比值[36]	70.26	78.35	40.83	84.14	57.48	87.70	92.78	76.40
步行道面积比/%	街道内步行道面积与街道总面积的比值[40]	39.56	44.58	67.82	63.93	51.93	85.85	91.99	100.00
座椅长度比例/%	座椅总长度与街道中心线长度的比值[8]	2.71	1.19	—	2.45	3.08	5.98	10.44	9.52
灰空间面积比例/%	灰空间总面积与人行道总面积的比值[41]	17.55	32.09	—	0.06	—	37.87	3.40	14.39
沿街商业界面比例/%	街道中商业建筑界面的长度与总街道的长度的比值[42]	50.11	59.85	23.80	62.73	34.53	56.95	43.11	36.60



(a) 活动强度 (b) 活动类型

图3 各街道人群活动强度及活动类型统计

Fig.3 Statistics of crowd activity intensity and activity type of each street

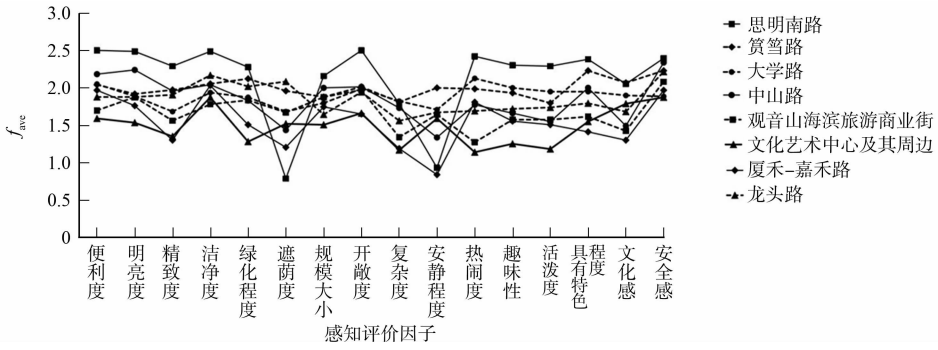


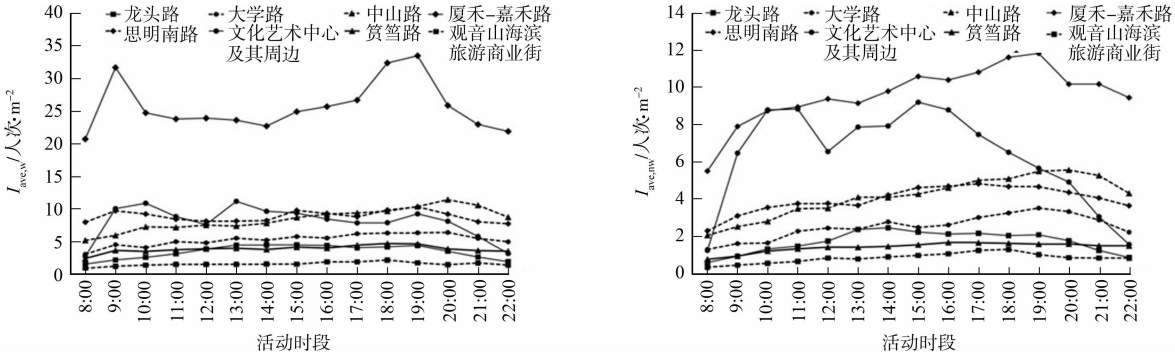
图 4　各街道感知评价因子平均值折线图

Fig. 4　Line chart of perception evaluation factor average value of each street

2　研究结果与分析

2.1　街道环境与人群活动

2.1.1　*人群活动现状及其成因*　1）活动强度对比分析。工作日与非工作日 8:00－22:00 平均活动强度对比，如图 5 所示。图 5 中：$I_{ave,w}$，$I_{ave,nw}$分别表示工作日与非工作日的平均活动强度。



（a）工作日　　（b）非工作日

图 5　工作日与非工作日平均活动强度对比（8:00－22:00）

Fig. 5　Comparison of average activity intensities between working days and non-working days (8:00 to 22:00)

对比图 3(a)和图 5 可知：工作日的平均活动强度明显高于非工作日，厦禾-嘉禾路的平均活动强度均明显大于其他 7 条街道，这与该街道作为厦门市多功能核心商业街及就业中心，人流量巨大且临近城市重要交通枢纽有关。

由图 5 可知：商务办公类街道及行政服务类街道在工作日 8:00—9:00 与 17:00—19:00 的活动强度显著上升，有明显的早晚通勤高峰，如厦禾-嘉禾路；其他类型街道的工作日平均活动强度变化幅度平缓，呈白天活动强度逐步上升，夜间逐渐下降的趋势；大多数街道的非工作日平均活动强度变化趋势与工作日相似，早晚平均活动强度波动不明显，仅文化艺术中心及其周边的平均活动强度变化呈现出上午、下午人群活动强度达到峰值，而中午陷入低谷的双峰形态，这是由于街道及其周边建筑具有一定公共服务功能，如科教、体育等，从而使该街道非工作日期间活动量显著增加，而中午受到气温及午休等因素影响，活动量明显降低，最终产生双峰形态的平均活动强度变化折线。

2）活动类型多样性分析。基于活动类型占比数据（图 3(b)），通过信息熵计算出各街道人群活动信息熵值，如表 2 所示。表 2 中：e 为信息熵值。通过熵值大小可判断各街道的人群活动类型是否均衡、街道的活动类型多样性能否成立。

表 2　各街道人群活动信息熵值

Tab. 2　Information entropy of crowd activities of each street

指标	思明南路	大学路	观音山海滨旅游商业街	厦禾-嘉禾路	筼筜路	中山路	文化艺术中心及其周边	龙头路
e	0.749 7	0.899 6	0.823 8	0.951 7	0.839 6	0.919 7	0.951 4	0.755 3

由表2可知:8条街道的活动多样性较高且差距小,活动类型较为均衡、活动多样性可以成立;厦禾-嘉禾路的活动类型多样性最大($e=0.951\ 7$),街道上各项活动占比均衡,符合其多功能混合类街道与城市核心街道的性质;思明南路与龙头路($e<0.800\ 0$)分别作为生活居住类街道与购物休闲类街道,与其他街道相比,其功能性质与面向人群更具偏向性,故活动类型均衡度较差,活动多样性也随之较低。

2.1.2 *街道环境与人群活动相关性分析* 在数据满足正态分布(k-s 检验显著性检验值大于0.05)的基础上,通过R-Studio软件分析街道环境与人群活动的相关性,结果如图6所示。图6中:* 表示相关系数 r 的显著性水平 $P<0.05$;* * 表示相关系数 r 的显著性水平 $P<0.01$。

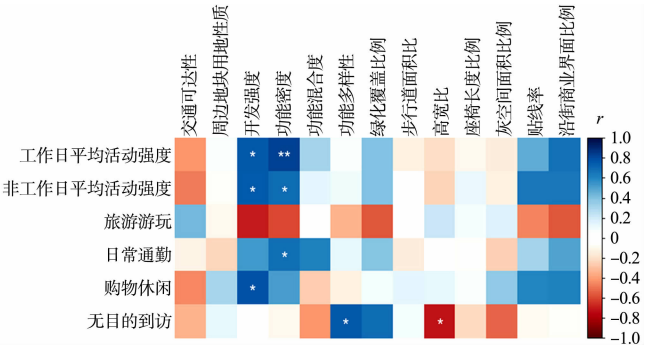


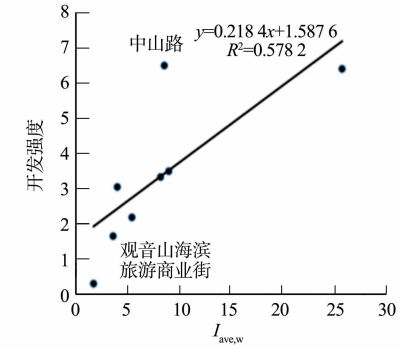
图6 街道环境与人群活动的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between street environment and crowd activities

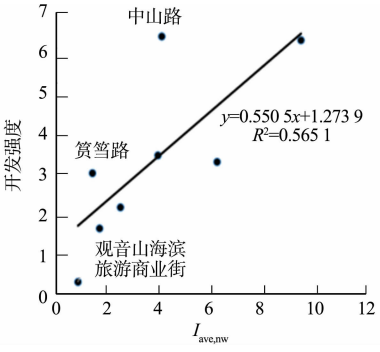
由图6可知:活动强度仅与街道开发强度和功能密度相关;开发强度与购物休闲行为显著相关;日常通勤行为受到功能密度的影响显著;无目的到访行为则与功能多样性显著相关,与高宽比呈显著负相关。

值得注意的是,街道环境指标与旅游游玩之间无显著相关,原因可能是相较于对街道有明确认知的本地居民,外来游客对旅行地点的选择更受到旅游地的意向认知、市场形象等其他因素的影响[43],与街道环境具体要素或特征的关联性较弱。此外,交通可达性、绿化覆盖比例等街道环境指标对活动强度及类型没有显著性影响,与人群活动的关联性弱。综上,活动强度及类型与街道宏观环境指标相关性更为密切,受其影响程度更大,而与街道微观环境指标的关联性较弱,受其影响较小。

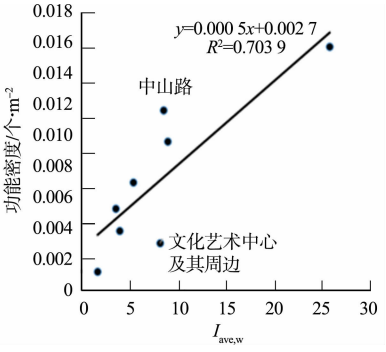
2.1.3 *不同类型街道的街道环境与人群活动关联性分析* 根据相关性分析,基于显著相关的指标对,可得各街道的散点分布图及拟合线,如图7所示。图7中:δ_1,δ_2,δ_3 分别为购物休闲占比、日常通勤占比和无目的到访占比。



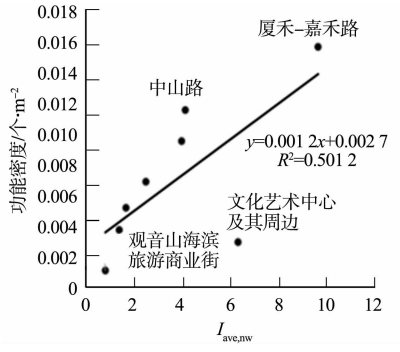
(a) 开发强度与工作日平均活动强度



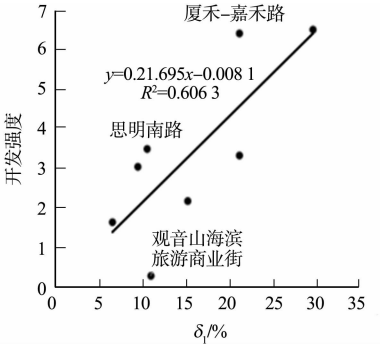
(b) 开发强度与非工作日平均活动强度



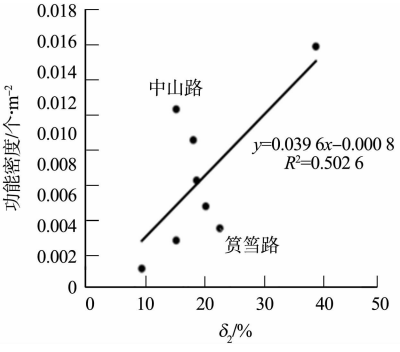
(c) 功能密度与工作日平均活动强度



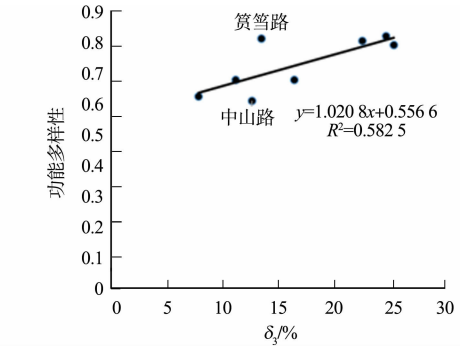
(d) 功能密度与非工作日平均活动强度



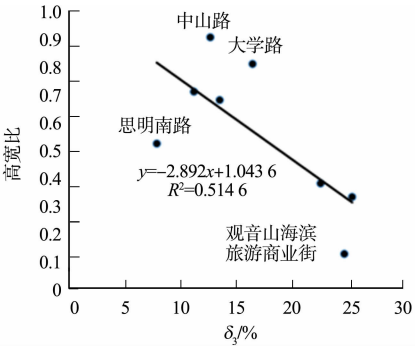
(e) 开发强度与购物休闲占比



(f) 功能密度与日常通勤占比



（g）功能多样性与无目的到访占比



（h）高宽比与无目的到访占比

图 7　各街道的散点分布图及拟合线

Fig. 7　Scattergram and fitting line of each street

由图 7 可得以下 4 点结论。

1）相较于其他街道，历史文化街道及街区的开发年代久远且受众面较窄，导致在开发强度相似的情况下，该类型街道的活动强度明显低于其他街道，且由于街道性质，街道上与通勤办公功能相关的建筑占比较少，日常通勤占比较低，人群活动主要为旅游游玩与购物休闲。

2）相较于其他类型街道，城市景观类街道，尤其是自然景观类街道的开发强度与功能密度较小，对活动强度的影响较弱，高宽比与无目的到访的相关性较弱，主要面向旅游游玩与无目的到访人群。

3）行政服务类街道由于街道性质与日常通勤活动直接相关，即使该街道的功能密度较低，日常通勤占比也较大。

4）相较于其他类型街道因街道性质导致散点偏移，多功能混合类街道的散点则更加贴合大部分拟合线分布，由于街道开发强度、功能密度及功能多样性均较为突出，该类型街道的活动强度明显高于其他街道，其中，日常通勤占比最大，而功能混合度高、街道主体性质不突出的街道性质则导致旅游游玩占比较小。

2.2　街道环境与主观感知

2.2.1　*问卷评价结果及分析*　由问卷评价结果可知：受访者对 8 条街道的各项评分均在 0 分以上，为正向感知；部分街道的各项评分较为稳定平均，如大学路、龙头路等；一些街道的感知评分与其他街道存在明显差异，如思明南路的遮荫度评分明显低于其他街道，而明亮度、洁净度等方面高于其他街道；厦禾-嘉禾路在精致度、安静程度等方面得分较低，其中，安静程度为 8 条街道中的最低得分。

2.2.2　*街道环境与主观感知相关性分析*　街道环境与主观感知的相关性分析，如图 8 所示。根据指标之间的相关性显著程度，总结街道环境对主观感知的影响，并得出以下 2 点结论。

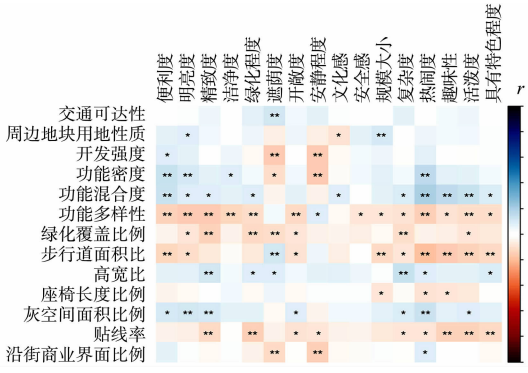


图 8　街道环境与主观感知的相关性分析

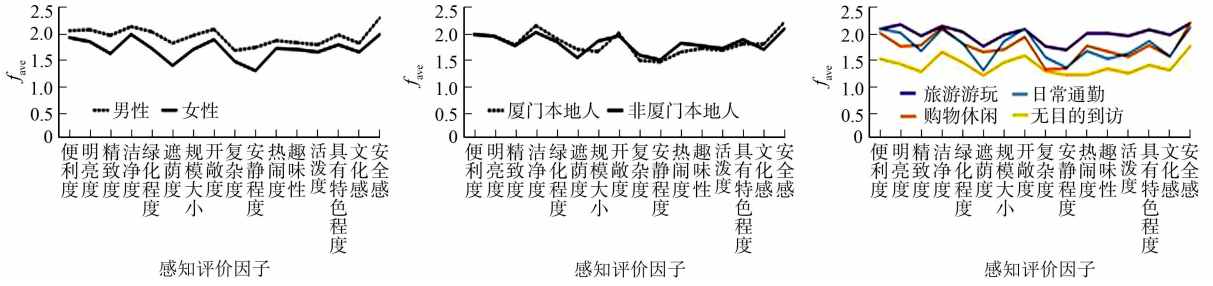
Fig. 8　Correlation between street environment and subjective perception

1）16 项感知评价因子与街道宏观环境指标之间存在 44 对相关，与街道微观环境指标存在 38 对相关。其中，功能多样性与 14 项感知评价因子相关，功能混合度和步行道面积比例与 10 项感知评价因子相关；部分街道环境指标与感知评价因子的相关性较弱，如交通可达性仅与 1 项感知评价因子显著相关。因此，主观感知受到多方面环境要素的影响，其中，功能多样性对主观感知影响最大，而交通可达性对主观感知的影响最弱，关联性最小。

2）部分街道环境指标与感知评价因子之间均为负相关，如步行道面积比、贴线率等，即该指标数值的增长会使感知评分下降，居民对街道的负面感知增强。

此外,对人群类型异质性是否会导致人群对街道环境的感知产生差异进行探究。基于受访者的个体特征数据,主要从性别、定居地属性与活动类型3方面对主观感知进行分析,可得不同类型人群的主观感知差异,如图9所示。

不同类型人群的感知指标与街道环境指标相关对统计,如表3所示。表3中:N为显著相关指标对的数量。



(a) 性别 (b) 定居地属性 (c) 活动类型

图9 不同类型人群的主观感知差异

Fig. 9 Differences in subjective perceptions among different types of crowd

表3 不同类型人群的感知指标与街道环境指标相关对统计

Tab. 3 Statistics of correlation pairs between perception indicators of different types of crowd and street environment indicators

指标	N/对							
	男性	女性	厦门本地人群	非厦门本地人群	旅游游玩人群	日常通勤人群	购物休闲人群	无目的到访人群
街道宏观环境指标	20	26	28	32	33	19	12	4
街道微观环境指标	10	38	29	15	19	6	17	6
街道环境指标	30	64	57	47	52	25	29	10

由图9及表3可得以下3点结论。

1) 在性别方面,男性对街道环境的感知评价普遍高于女性,而女性感知与街道环境相关的指标对数量更多,即女性感知受街道环境影响更大,且更易受到街道微观环境指标的影响。

2) 在定居地属性方面,厦门本地人与非厦门本地人对街道环境的感知评价相似,但本地人群的感知受到街道环境的影响更大。此外,街道宏观环境指标对非本地人群的感知影响大,而街道微观环境指标对其影响较小。

3) 在活动类型方面,个体的活动类型对街道感知影响显著,其中,旅游游玩人群的感知评价普遍高于其他类型活动,显著相关的指标对数量最多,主观感知受到街道环境的影响最为显著,而无目的到访人群的感知评价分数最低、主观感知与街道环境关联性最弱,受到的影响最小。

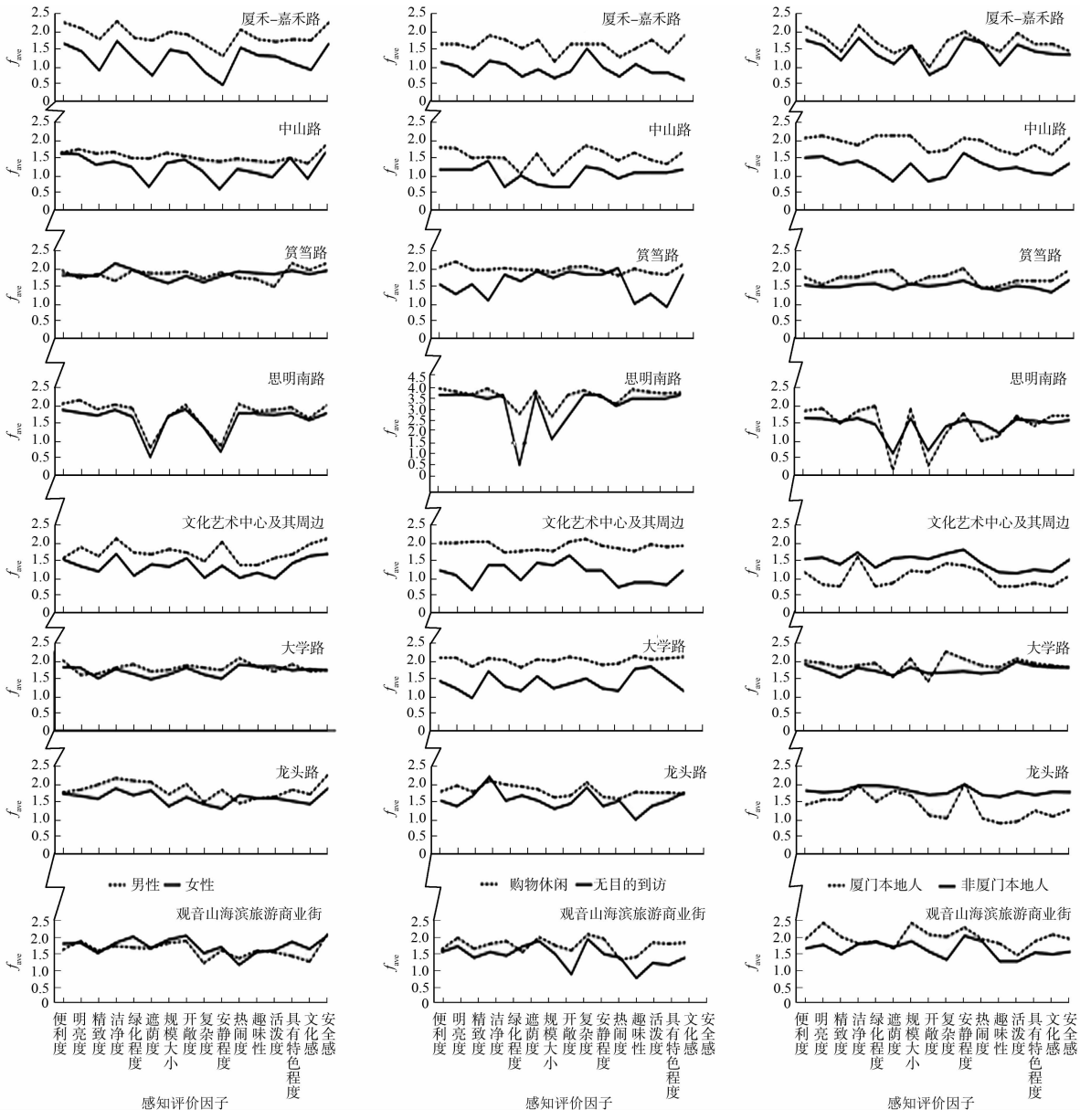
2.2.3 *不同类型人群的感知与不同类型街道环境的关联性分析* 基于性别、定居地属性及旅游游玩与无目的到访两项活动类型,可得各街道不同类型人群主观感知评价折线图,如图10所示。

由图10可得以下3点结论。

1) 在性别方面,男性对街道环境的感知评价分数普遍高于女性,其中,多功能混合类街道的评价差异最为显著。从感知评价因子出发,便利度与趣味性受性别的影响较弱,但在遮荫度与安静程度上,女性的感知评价明显低于男性。

2) 在定居地属性方面,不同定居地属性的个体感知在不同类型街道上存在差异:生活居住类街道两类人群的感知评价相似,但本地人群的感知评价波动更加剧烈,受到日常生活的街道环境的影响更大;在购物休闲类街道与商务办公类街道上,非本地人群的感知评价明显优于本地人群;本地人群对历史文化街道及街区的感知评价显著高于非本地人群,可考虑到社会因素与文化在地性等对本地人群主观感知的影响。此外,不同定居地人群的复杂度评分差异明显而洁净度相似。

3) 在活动类型方面,无目的到访人群的感知评价明显低于旅游游玩人群,且评分波动更加明显。在部分街道上的感知评价存在显著差异,如商务办公类街道等。



（a）性别　　（b）活动类型　　（c）定居地属性

图 10　各街道不同类型人群主观感知评价折线图

Fig. 10　Line chart of subjective perception evaluation of different types of crowd of each street

2.3　人群活动与主观感知

人群活动与主观感知的相关性分析，如图 11 所示。在活动强度方面，由图 11 可知：工作日平均活动强度与便利度、热闹度显著相关，与遮荫度、安静程度负显著相关，这一结果与上文分析一致（图 6），而开发强度、功能密度这两项指标又与便利度显著相关，与遮荫度及安静程度负显著相关（图 8）；非工作日平均活动强度同样与遮荫度、安静程度负显著相关，但与便利度及热闹度关联性较弱，说明非工作日期间居民倾向于在距离更为偏远、安静的区域活动，并且非工作日平均活动强度还与绿化程度、复杂度等负显著相关，这需结合具体街道环境进行分析。

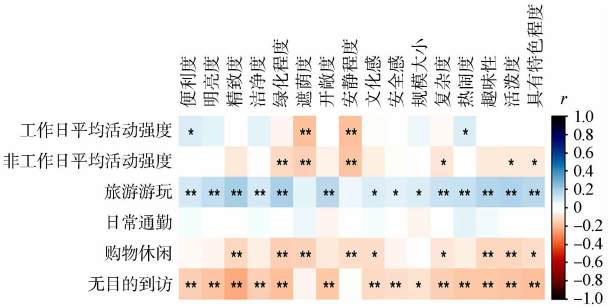


图 11　人群活动与主观感知的相关性分析

Fig. 11　Correlation between crowd activities and subjective perception

与复杂度、活泼度及具有特色程度感知评价因子显著相关的街道环境指标基本一致,如与功能混合度等显著相关,与功能多样性等显著负相关。基于相关的街道环境指标,以厦禾-嘉禾路、文化艺术中心及其周边为例,两条街道的显著相关指标值普遍低于8条街道平均值,而负显著相关指标值高于街道平均值(表4),且两条街道的绿化程度、复杂度等感知评价普遍低于街道的感知评价因子的平均值(图12),这两条街道的非工作日人群活动强度较大,与描述性统计结果一致(图3(a))。

表4 街道环境指标横向对比

Tab. 4 Horizontal comparison of street environment indicators

相关性	街道环境指标	厦禾-嘉禾路	文化艺术中心及其周边	街道平均值
正相关	功能混合度	0.56	0.32	0.46
	高宽比	0.33	0.38	0.56
	灰空间面积比/%	0.06	3.40	13.17
负相关	功能多样性	0.79	0.81	0.73
	贴线率/%	84.14	92.78	73.49
	步行道面积比/%	62.73	43.11	45.96

在活动类型方面,旅游游玩与14项感知评价因子相关,10对为正相关,即人群对于街道环境的正向感知有利于街道上旅游活动的增长;而购物休闲和无目的到访与感知评价因子之间均为负相关;日常通勤与主观感知不存在显著相关,与感知的关联性较弱,即主观感知对通勤意愿及行为影响较小,但已有研究指出主观感知对通勤方式的选择有显著影响[44]。

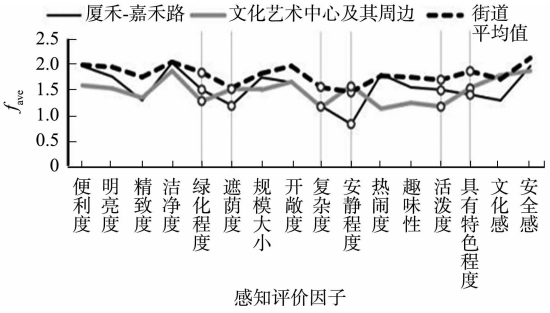


图12 主观感知评分对比

Fig. 12 Comparison of subjective perception scores

2.4 街道环境和人群活动与主观感知的关联性分析

基于以上街道环境、人群活动与主观感知的相关性分析(图6,8,11)可知:街道环境、人群活动与主观感知之间均存在显著相关,其中,街道环境与主观感知的关联性最为显著,而街道环境与人群活动之间的关联性最弱;人群活动主要受到主观感知的影响,而主观感知又与其所处的环境及环境中的活动息息相关,三者相互影响、相互制约。

3 结论与建议

以厦门市8条代表性街道为研究对象,探究街道环境、人群活动与主观感知之间的关联性规律,可得以下4个结论。

1) 人群活动与街道宏观环境指标显著相关,而与街道微观环境关联性较弱。购物休闲、日常通勤与无目的到访受到街道环境的影响显著,而旅游游玩受到的影响较弱。

2) 街道环境与主观感知显著相关。其中,男性的感知评价明显优于女性,但女性感知与街道环境的关联性更强;相较于非本地人群,本地人群的主观感知与街道环境的相关性更显著;旅游游玩人群对街道环境的感知评价最高,与街道环境的相关性最密切,而无目的到访人群感知评价最低,相关性最弱。

3) 人群活动强度与安静程度、遮荫度等感知显著相关,且不同时段与活动强度显著相关的感知评价因子存在差异;积极的个体感知有利于人群活动尤其是旅游游玩的增长,而主观感知对日常通勤活动的影响最小,关联性最弱。

4) 街道类型差异不仅对人群活动及主观感知带来显著影响,还能影响不同类型人群的感知评价。

根据以上结论,提出3点基于人群活动与体验感优化的街道改造建议:1) 相较于提升街道可达性与商业业态,通过增加不同功能建筑及设施以提高功能密度及多样性的方式,更能够提升街道上的人群活动强度;2) 改善街道绿化、合理均衡人车通行面积、提供人群停留活动空间能够提升个体的街道体验感;3) 从群体感知层面加强对街道的积极认知,通过地方政府组织的宣传与群众的认同维护,共同树立良好的街道乃至城市形象,促进旅游游玩等活动的增长。

此外,研究还存在局限性:部分指标的分类较为宽泛,未做细分研究,如活动类型、活动强度等;部分

数据的局限性无法通过多源数据得到解决，如问卷受访者不能与 LBS 数据用户匹配；缺少对街道环境、人群活动与主观感知内部作用机制的分析。后续研究可从这些角度进行探讨。

参考文献：

[1] HE Nan，LI Guanghao. Urban neighbourhood environment assessment based on street view image processing：A review of research trends[J]. Environmental Challenges，2021，4：100090. DOI：10. 1016/j. envc. 2021. 100090.

[2] FLOCKl R，BREITUNG W. Migrant street vendors in urban China and the social production of public space[J]. Population，Space and Place，2016，22(2)：158-169. DOI：10. 1002/psp. 1892.

[3] SUN Ziwen，BELL S，SCOTT I，*et al*. Everyday use of urban street spaces：The spatio-temporal relations between pedestrians and street vendors：A case study in Yuncheng，China[J]. Landscape Research，2020，45(3)：292-309.

[4] GEHL J. Cities for people[M]. Washington D C：Island Press，2013.

[5] MAAS P R. Towards a theory of urban vitality[D]. Vancouver：University of British Columbia，1984.

[6] JACOBS J. The death and life of great American cities[M]. New York：Vintage，1992.

[7] 郝新华，龙瀛，石淼，等. 北京街道活力：测度、影响因素与规划设计启示[J]. 上海城市规划，2016(3)：37-45. DOI：10. 3969/j. issn. 1673-8985. 2016. 03. 009.

[8] 徐磊青，康琦. 商业街的空间与界面特征对步行者停留活动的影响：以上海市南京西路为例[J]. 城市规划学刊，2014(3)：104-111. DOI：10. 3969/j. issn. 1000-3363. 2014. 03. 013.

[9] ORDONEZ V，BERG T L. Learning high-level judgments of urban perception[C]// European Conference on Computer Vision. Zurich：Springer，2014：494-510. DOI：10. 1007/978-3-319-10599-4_32.

[10] ACEVES-GONZÁLEZ C，EKAMBARAM K，REY-GALINDO J，*et al*. The role of perceived pedestrian safety on designing safer built environments[J]. Traffic Injury Prevention，2020，21(s1)：S84-S89.

[11] RAMÍREZ T，HURTUBIA R，LOBEL H，*et al*. Measuring heterogeneous perception of urban space with massive data and machine learning：An application to safety[J]. Landscape and Urban Planning，2021，208：104002. DOI：10. 1016/j. landurbplan. 2020. 104002.

[12] PARK Y，GARCIA M. Pedestrian safety perception and urban street settings[J]. International Journal of Sustainable Transportation，2020，14(11)：860-871.

[13] CHEN Chongxian，LI Haiwei，LUO Weijing，*et al*. Predicting the effect of street environment on residents′ mood states in large urban areas using machine learning and street view images[J]. Science of the Total Environment，2022，816：151605.

[14] HERRMANN-LUNECKE M G，MORA R，VEJARES P. Perception of the built environment and walking in pericentral neighbourhoods in Santiago，Chile[J]. Travel Behaviour and Society，2021，23(3)：192-206.

[15] WANG Yongcheng，WONG Y D，GOH K. Perceived importance of inclusive street dimensions：A public questionnaire survey from a vision (ing) perspective[J]. Transportation，2021，48(5)：699-721. DOI：10. 1007/s11116-019-10071-1.

[16] 章俊华. 规划设计学中的调查分析法 16：SD 法[J]. 中国园林，2004(10)：57-61. DOI：10. 3969/j. issn. 1000-6664. 2004. 10. 013.

[17] 王德，张昀. 基于语义差别法的上海街道空间感知研究[J]. 同济大学学报(自然科学版)，2011，39(7)：1000-1006. DOI：10. 3969/j. issn. 0253-374x. 2011. 07. 011.

[18] 赵渺希，钟烨，王世福，等. 不同利益群体街道空间意象的感知差异：以广州恩宁路为例[J]. 人文地理，2014，29(1)：72-79. DOI：10. 13959/j. issn. 1003-2398. 2014. 01. 004.

[19] ZHANG Fan，ZHOU Bolei，LIU Liu，*et al*. Measuring human perceptions of a large-scale urban region using machine learning[J]. Landscape and Urban Planning，2018，180：148-160. DOI：10. 1016/j. landurbplan. 2018. 08. 020.

[20] MEHTA V. Walkable streets：Pedestrian behavior，perceptions and attitudes[J]. Journal of Urbanism，2008，1(3)：217-245. DOI：10. 1080/17549170802529480.

[21] HERBOLSHEIMER F，MAHMOOD A，UNGAR N，*et al*. Perceptions of the neighborhood built environment for walking behavior in older adults living in close proximity[J]. Journal of Applied Gerontology，2021，40(12)：1697-1705. DOI：10. 1177/0733464820979258.

[22] ADAMS E J，SHERAR L B. Community perceptions of the implementation and impact of an intervention to improve the neighbourhood physical environment to promote walking for transport：A qualitative study[J]. BMC

Public Health,2018,18(1):1-14. DOI:10.1186/s12889-018-5619-y.

[23] ORSTAD S L,Mc DONOUGH M H,JAMES P,*et al*. Neighborhood walkability and physical activity among older women: Tests of mediation by environmental perceptions and moderation by depressive symptoms[J]. Preventive Medicine,2018,116:60-67. DOI:10.1016/j.ypmed.2018.08.008.

[24] BLITZ A. How does the individual perception of local conditions affect cycling? An analysis of the impact of built and non-built environment factors on cycling behaviour and attitudes in an urban setting[J]. Travel Behaviour and Society,2021,25:27-40.

[25] 上海市城市规划设计研究院,厦门市交通研究中心,厦门市城市规划设计研究院. 厦门市街道设计导则[R]. 厦门:厦门市规划委员会,2018.

[26] 叶慧. 城市街道景观的分类与设计探讨[J]. 安徽农业科学,2013,41(8):3498-3500. DOI:10.13989/j.cnki.0517-6611.2013.08.071.

[27] 张家瑜,袁阳,周梦涵,等. 基于POI的街道类型精细化识别和分布特征研究:以福州主城区为例[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2022,54(3):406-413. DOI:10.15986/j.1006-7930.2022.03.011.

[28] 邢忠,陈子龙,顾媛媛,等. 基于大数据的城市街道活力影响因素定量分析[J]. 西部人居环境学刊,2021,36(3):98-105. DOI:10.13791/j.cnki.hsfwest.20210312.

[29] 李薇. 大数据与统计学分析方法比较[J]. 现代商贸工业,2015,36(11):52-53. DOI:10.19311/j.cnki.1672-3198.2015.11.023.

[30] 苟爱萍,王江波. 基于SD法的街道空间活力评价研究[J]. 规划师,2011,27(10):102-106. DOI:10.3969/j.issn.1006-0022.2011.10.019.

[31] 张军,刘大平,张雨婷. 基于需求差异的历史街区改造评价方法研究:以横道河子镇历史街区为例[J]. 建筑学报,2016(2):66-69.

[32] 匡晓燕. 重塑人性化街道:基于SD法成都市街道空间活力评价[J]. 四川建筑,2018,38(5):23-26. DOI:10.3969/j.issn.1007-8983.2018.05.008.

[33] 钮心毅,吴莞姝,李萌. 基于LBS定位数据的建成环境对街道活力的影响及其时空特征研究[J]. 国际城市规划,2019,34(1):28-37.

[34] MONTGOMERY J. Making a city: Urbanity, vitality and urban design[J]. Journal of Urban Design,1998,3(1):93-116. DOI:10.1080/13574809808724418.

[35] 杨婕,陶印华,刘志林,等. 邻里效应视角下社区交往对生活满意度的影响:基于北京市26个社区居民的多层次路径分析[J]. 人文地理,2021,36(2):27-34,54. DOI:10.13959/j.issn.1003-2398.2021.02.005.

[36] 龙瀛,周垠. 街道活力的量化评价及影响因素分析:以成都为例[J]. 新建筑,2016(1):52-57. DOI:10.3969/j.issn.1000-3959.2016.01.009.

[37] 贺慧,陈艺,林小武. 基于开放数据的商业街道公共空间品质影响因素识别及评价研究:以武汉市楚河汉街和中山大道为例[J]. 城市建筑,2018(6):26-34. DOI:10.19892/j.cnki.csjz.2018.06.005.

[38] 杨俊宴,吴浩,郑屹. 基于多源大数据的城市街道可步行性空间特征及优化策略研究:以南京市中心城区为例[J]. 国际城市规划,2019,34(5):33-42.

[39] 芦原义信. 街道的美学[M]. 尹培桐,译. 天津:百花文艺出版社,2006.

[40] 邓一凌,陈前虎,过秀成. 街道环境对行人步行体验的影响[J]. 城市问题,2018(6):43-50. DOI:10.13239/j.bjsshkxy.cswt.180606.

[41] 徐磊青,孟若希,陈筝. 迷人的街道:建筑界面与绿视率的影响[J]. 风景园林,2017,147(10):27-33. DOI:10.14085/j.fjyl.2017.10.0027.07.

[42] ZHANG Lemin,ZHANG Ruoxi,YIN Biao. The impact of the built-up environment of streets on pedestrian activities in the historical area[J]. Alexandria Engineering Journal,2021,60(1):285-300. DOI:10.1016/j.aej.2020.08.008.

[43] 沈涵. 游客的旅游地选择与购买决策模型分析[J]. 旅游学刊,2005(3):43-47. DOI:10.3969/j.issn.1002-5006.2005.03.017.

[44] 曹晨,甄峰,姜玉培. 邻里环境感知与个体健康对通勤模式选择的影响研究:以南京市为例[J]. 地理研究,2021,40(10):2823-2837.

(**责任编辑**:钱筠 **英文审校**:方德平)

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202305007

酚基壳聚糖季铵盐的结构对抗菌和抗生物被膜活性的影响

王林，辛梅华，李明春，石露露，赖旺坤

(华侨大学 材料科学与工程学院，福建 厦门 361021)

摘要： 制备邻羟基苯甲酰化壳聚糖(OPC)、间羟基苯甲酰化壳聚糖(MPC)、对羟基苯甲酰化壳聚糖(PPC)、3,5-二羟基苯甲酰化壳聚糖(DPC)、3,4,5-三羟基苯甲酰化壳聚糖(TPC)、*O*-(2-羟丙基三甲基氯化铵)壳聚糖(QACS)和 *O*-(2-羟丙基三甲基氯化铵)-*N*-对羟基苯甲酰化壳聚糖(QAPPC)7 种壳聚糖衍生物，采用核磁共振氢谱和元素分析表征产物的结构，并测试产物的抗菌活性和抗生物被膜活性。结果表明：产物的抗菌活性和抗生物被膜活性排序为 PPC＞OPC＞MPC；质量浓度为 0.5 mg·mL^{-1}的 PPC 对大肠杆菌(*E. coli*)、金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)的抑菌率分别为 78.2%，100.0%，质量浓度为 2.5 mg·mL^{-1}的 PPC 对 *E. coli*，*S. aureus*形成的生物被膜的清除率分别为 75.3%，87.7%；将对羟基苯甲酸接枝到 QACS 的氨基上，制备的 QAPPC 的抗菌活性和抗生物被膜活性均优于 QACS 和 PPC，酚基和季铵盐具有协同抗菌效果；质量浓度为 0.5 mg·mL^{-1}的 QAPPC 对 *E. coli*，*S. aureus* 的抑菌率分别为 83.3%，100.0%，质量浓度为 2.5 mg·mL^{-1}的 QAPPC 对 *E. coli*，*S. aureus* 生物被膜的清除率分别为 77.4%，92.4%。

关键词： 酚基壳聚糖；壳聚糖季铵盐；抗菌；生物被膜

中图分类号： O 636.1；R 378　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-5013(2023)06-0719-08

Effect of Structure of Phenol-Based Chitosan Quaternary Ammonium Salt on Antibacterial and Antibiofilm Activities

WANG Lin, XIN Meihua, LI Mingchun,
SHI Lulu, LAI Wangkun

(College of Material Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Seven chitosan derivatives were prepared including *o*-hydroxybenzoylate chitosan (OPC), *m*-hydroxybenzoylated chitosan (MPC), *p*-hydroxybenzoylated chitosan (PPC), 3,5-dihydroxybenzoylated chitosan (DPC), 3,4,5-trihydroxybenzoylated chitosan (TPC), *O*-(2-hydroxypropyltrimethylammonium chloride) chitosan (QACS) and *O*-(2-hydroxypropyltrimethylammonium chloride)-*N*-*p*-hydroxybenzoylated chitosan (QAPPC). Nuclear magnetic resonance spectra and elemental analysis were used to characterize the structure of the product, and the antibacterial activity and antibiofilm activity of the product were tested. The results showed that the order of antibacterial activity and antibiofilm activity of the product was PPC＞OPC＞MPC. The antibacterial rates of PPC at mass concentration of 0.5 mg·mL^{-1} against *Escherichia coli* (*E. coli*) and *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) were 78.2% and 100.0%, respectively. The biofilm removal rates of PPC at mass concentration of 2.5 mg·mL^{-1} against *E. coli* and *S. aureus* were 75.3% and

收稿日期： 2023-05-29

通信作者： 李明春(1962-)，男，教授，博士，博士生导师，主要从事功能高分子材料的研究。E-mail:mcli@hqu.edu.cn。

基金项目： 福建省科技计划项目(2019H6014，2020Y4012)

87.7%, respectively. 4-hydroxybenzoic acid was grafted onto the amino group of QACS, the antibacterial activity and antibiofilm activity of the prepared QAPPC were both superior to those of QACS and PPC, and the phenolic group and quaternary ammonium salts had synergistic antibacterial effects. The antibacterial rates of QAPPC at mass concentration of 0.5 mg·mL^{-1} against *E. coli* and *S. aureus* were 83.3% and 100.0%, respectively, and the biofilm removal rates of QAPPC at mass concentration of 2.5 mg·mL^{-1} against *E. coli* and *S. aureus* were 77.4% and 92.4%, respectively.

Keywords: phenol-based chitosan; chitosan quaternary ammonium salt; antibacterial; biofilm

细菌生物被膜是多种表面附着的细菌细胞包裹在自分泌的细胞外聚合物中的多细胞三维组合,顽固的生物被膜广泛存在。与独立的、自由游动的浮游细菌相比,被包裹在生物被膜中的细菌对抗生素表现出更强的抵抗力,因此,一旦细菌生物被膜感染形成,就很难根除或治愈[1-2]。

酚类化合物在自然界中广泛存在,且酚类化合物具有一定的抗菌活性,如香芹酚、没食子酸、丁香酚和水杨酸等,将天然酚酸接枝到壳聚糖上可以改善壳聚糖的抗菌活性[3]。常见的酚基壳聚糖的制备方法有自由基接枝法、酶介导反应、EDC/NHS缩合反应、席夫碱反应等[4-8]。Kim等[9]研究了咖啡酸、阿魏酸和芥子酸接枝的壳聚糖对铜绿假单胞菌和单核细胞增多性李斯特菌的抗菌和抗生物被膜活性,制备的壳聚糖衍生物在0.5MIC(最低抑菌质量浓度)可以显著降低生物被膜的黏附,具有抗菌和抗生物被膜的潜力。Yang等[10]采用碳二亚胺法制备壳聚糖接枝绿原酸(CS-g-CA),产物对金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)的MIC为0.625 mg·mL^{-1},MIC能显著抑制生物被膜的形成,2MIC可以清除77.53%的成熟生物被膜。Khan等[11]采用离子凝胶化技术将间苯三酚(PG)封装到壳聚糖纳米颗粒(CSNP)中,制备的PG-CSNP对白色念珠菌、金黄色葡萄球菌、肺炎克雷伯菌、变形链球菌具有抑制作用,且PG-CSNP抑制生物被膜形成和清除生物被膜能力优于间苯三酚。

酚类改性壳聚糖可以得到具有良好抗菌活性的酚类壳聚糖衍生物,但各种酚基结构对抗菌活性、抗生物被膜活性的影响缺乏系统的比较。基于此,本文以壳聚糖为原料,制备邻羟基苯甲酰化壳聚糖(OPC)、间羟基苯甲酰化壳聚糖(MPC)、对羟基苯甲酰化壳聚糖(PPC)、3,5-二羟基苯甲酰化壳聚糖(DPC)、3,4,5-三羟基苯甲酰化壳聚糖(TPC)5种酚基壳聚糖,研究酚基壳聚糖中酚基位置、酚基数量对壳聚糖抗菌活性及抗生物被膜活性的影响,在此基础上制备酚基壳聚糖季铵盐,并对抗菌活性和抗生物被膜活性进行比较。

1 实验部分

1.1 主要试剂和仪器

壳聚糖(CS,脱乙酰度为89%,分子质量为50 ku),山东省青岛市海汇生物工程有限公司;2,3-环氧丙基三甲基氯化铵,山东省东营市国丰精细化工有限公司;水杨酸、苯甲醛、对羟基苯甲酸,上海市国药集团化学试剂有限公司;间羟基苯甲酸、3,5-二羟基苯甲酸,上海市安耐吉化学技术有限公司;没食子酸,上海市阿拉丁生化科技股份有限公司。其他试剂均为市售分析纯。

Avance Ⅲ 500 MHz型核磁共振波谱仪,德国Bruker公司;Vario EL cube型元素分析仪,德国Elementar公司;FD-1B-50型冷冻干燥机,北京博医康实验仪器有限公司。

1.2 壳聚糖衍生物的制备

1.2.1 *酚基壳聚糖的制备*[12] 将1.6 g壳聚糖机械搅拌溶解于50 mL体积分数为2%的醋酸溶液中,称取和壳聚糖氨基等物质的量的酚酸溶解于50 mL甲醇中,加入1-乙基-3-(3-二甲基氨丙基)碳二亚胺(EDC)和*N*-羟基琥珀酰亚胺(NHS),搅拌至完全溶解。将酚酸溶液缓慢滴加到壳聚糖溶液中,30 ℃反应24 h,反应结束后经透析、冷冻干燥,可得酚基壳聚糖。

1.2.2 *酚基季铵化壳聚糖的制备*[13] 经苯甲醛和壳聚糖的氨基反应得到*N*-苯亚甲基壳聚糖(CSBA),在CSBA的羟基上引入季铵盐制备*O*-(2-羟丙基三甲基氯化铵)-*N*-苯亚甲基壳聚糖(QACSBA),经脱保护,可得*O*-(2-羟丙基三甲基氯化铵)壳聚糖(QACS)。

将1.6 g QACS搅拌溶解于50 mL去离子水中,称取0.7 g对羟基苯甲酸溶解于50 mL甲醇中,加入1.0 g的EDC和0.6 g的NHS,搅拌至完全溶解。将对羟基苯甲酸溶液缓慢滴加到QACS溶液中,

30 ℃搅拌反应 24 h，反应结束后经透析、冷冻干燥，可得 *O*-(2-羟丙基三甲基氯化铵)-*N*-对羟基苯甲酰化壳聚糖(QAPPC)。酚基壳聚糖季铵盐的制备路线，如图 1 所示。

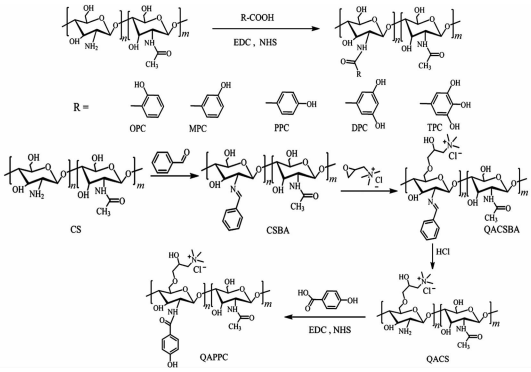


图 1　酚基壳聚糖季铵盐的制备路线

Fig. 1　Preparation route of phenol-based chitosan quaternary ammonium salt

1.3　产物的表征

1.3.1　*核磁共振氢谱*(^{1}H NMR)*分析*　将制备的壳聚糖衍生物溶解于 D_2O 中，使用 Avance Ⅲ 500 MHz 型核磁共振波谱仪测定产物的^{1}H NMR，测试温度为 22 ℃，采样次数为 64 次。

1.3.2　*取代度测定*　壳聚糖及其衍生物经真空干燥至恒质量，使用 Vario EL cube 型元素分析仪测定其 C，N，H 的质量分数，依据碳氮比计算壳聚糖的脱乙酰度和产物的取代度[12]。

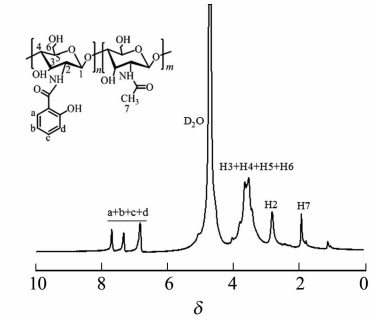
1.4　产物的抗菌活性测试

通过最低抑菌质量浓度、最低杀菌质量浓度(MBC)、抑菌率表征产物的抗菌活性；通过最低生物被膜形成抑制质量浓度(MBIC)、最低生物被膜杀灭质量浓度(MBBC)、生物被膜抑制率和生物被膜清除率表征产物抗生物被膜活性，具体测试参照文献[12]。

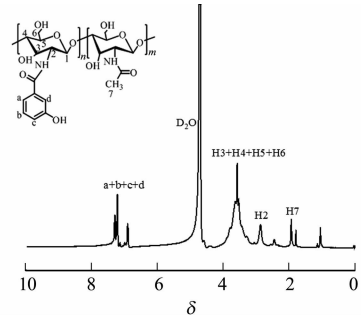
2　实验结果与讨论

2.1　产物的^{1}H NMR

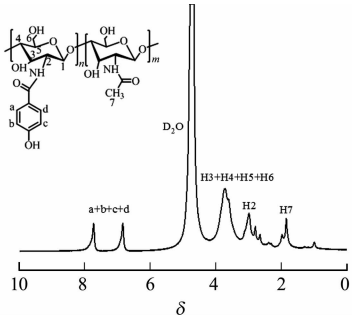
壳聚糖衍生物的^{1}H NMR 谱图，如图 2 所示。图 2 中：δ 为化学位移；4.7 对应的是 D_2O 的溶剂峰。



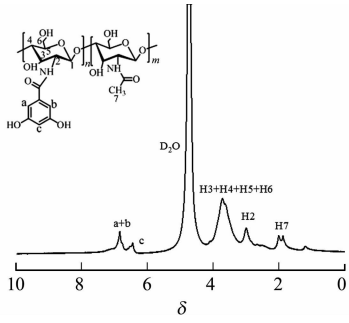
(a) OPC



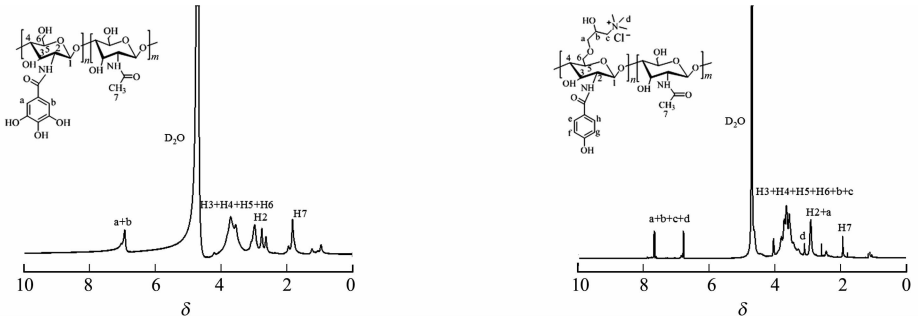
(b) MPC



(c) PPC



(d) DPC



(e) TPC (f) QAPPC

图2 壳聚糖衍生物的^{1}H NMR谱图

Fig. 2 ^{1}H NMR spectra of chitosan derivatives

由图2可知:不同结构酚基壳聚糖的^{1}H NMR谱图主要区别在于6～8处的苯环氢质子的特征峰;OPC和MPC由于酚基取代基位于苯环的邻位或间位上,空间不对称,在核磁氢谱上苯环的特征峰的位置存在偏差;PPC和DPC产物的^{1}H NMR谱图在6～8处出现的氢质子特征峰有两个,这是因为两种产物上接枝的苯酚基团属于对称结构,PPC的^{1}H NMR谱图在结构上出现的两个氢质子特征峰的峰面积一致,DPC的^{1}H NMR谱图虽然也有两个苯环上的氢质子特征峰,但这两个特征峰的峰面积比例为1∶2;TPC的^{1}H NMR谱图中3个酚基占用苯环上的3个氢,剩余的2个氢在空间属于对称结构,在核磁共振氢谱上有相同的化学位移,故只有1个特征峰[14];QAPPC的^{1}H NMR谱图在3.1处出现季铵盐上甲基的质子峰,此外,在6～8处出现2个氢质子的特征峰,对应苯环上的氢质子,表明QAPPC分子结构中含有苯环。核磁共振氢谱表明酚基壳聚糖季铵盐已成功制备。

2.2 产物的取代度

壳聚糖衍生物的元素分析和取代度,如表1所示。表1中:w为质量分数;DD为脱乙酰度;DS为取代度。由表1可知:壳聚糖的脱乙酰度为86.0%;OPC,MPC,PPC,DPC和TPC的取代度相近;CSBA中用于保护壳聚糖氨基的苯亚甲基的取代度为64.9%,进一步在CSBA的羟基进行季铵化得到的QACSBA中季铵盐的取代度为20.1%,经脱保护后发现,用于保护氨基的苯亚甲基并未完全脱除,未脱除的苯亚甲基的残余量仅为1.6%,以此为原料制备的QAPPC对羟基苯甲酰的取代度为16.9%,与PPC中对羟基苯甲酰的取代度基本一致(15.4%),相近的取代度有利于后续性能的比较。

表1 壳聚糖衍生物的元素分析和取代度

Tab. 1 Elemental analysis and substitution degree of chitosan derivatives

样品	w(C)/%	w(N)/%	w(H)/%	DD/%	DS/%
CS	41.69	7.75	7.06	86.0	—
OPC	42.06	6.14	6.58	—	24.4
MPC	42.35	6.34	6.51	—	21.6
PPC	41.36	6.56	6.57	—	15.4
DPC	42.27	6.29	6.14	—	22.3
TPC	42.07	6.31	6.17	—	21.5
CSBA	53.55	6.05	5.69	—	64.9
QACSBA	52.68	6.39	7.46	—	20.1
QACS	34.83	6.87	6.64	—	1.6
QAPPC	37.26	6.30	6.39	—	16.9

2.3 酚基季铵化壳聚糖的抗菌活性

2.3.1 最低抑菌质量浓度和最低杀菌质量浓度 大肠杆菌(*E. coli*)和金黄色葡萄球菌(*S. aureus*)生物被膜形成前后耐药性变化,如表2所示。

由表2可知:酚基壳聚糖对*E. coli*的MIC均为625 μg·mL^{-1},MBC均为1 250 μg·mL^{-1};PPC,TPC对*E. coli*的MBIC为1 250 μg·mL^{-1},而OPC,MPC和DPC的MBIC为2 500 μg·mL^{-1};清除*E. coli*生物被膜需要的PPC,TPC的最低质量浓度为5 000 μg·mL^{-1},清除*E. coli*生物

被膜需要的 OPC，MPC 和 DPC 的最低质量浓度均大于 5 000 μg·mL^{-1}；QACS，PPC 对 *E. coli* 的 MIC，MBIC 相同，分别为 625，1 250 μg·mL^{-1}，而 QAPPC 对 *E. coli* 的 MIC 和 MBIC 均低于 QACS，PPC，分别为 313，625 μg·mL^{-1}；QACS 对 *E. coli* 的 MBC 为 2 500 μg·mL^{-1}，而 PPC，QAPPC 对 *E. coli*的 MBC 均为 1 250 μg·mL^{-1}，QACS，PPC 对 *E. coli* 的 MBBC 均为 5 000 μg·mL^{-1}，而 QAPPC 的 MBBC 为 2 500 μg·mL^{-1}；将季铵盐和对羟基苯甲酰基同时引入壳聚糖分子结构中，得到的 QAPPC 对 *E. coli* 的抑菌效果优于 PPC，QACS。

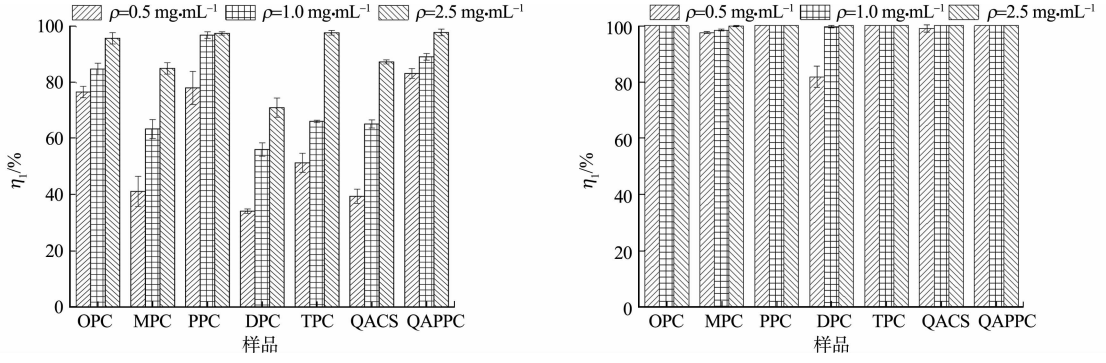
由表 2 可知：除 PPC 外，其余 4 种酚基壳聚糖对 *S. aureus* 的 MIC 和 MBC 一致，分别为 78，313 μg·mL^{-1}，而 PPC 对 *S. aureus* 的 MIC 为 39 μg·mL^{-1}；当形成生物被膜后，最低杀菌质量浓度出现差异，当 PPC 质量浓度为 1 250 μg·mL^{-1} 时，可以完全清除 *S. aureus* 形成的生物被膜，而清除 *S. aureus*形成的生物被膜的 OPC，MPC，DPC 和 TPC 需要的最低质量浓度为 2 500 μg·mL^{-1}。

表 2　大肠杆菌和金黄色葡萄球菌生物被膜形成前后耐药性变化

Tab. 2　Changes of drug resistance before and after biofilm formation in *E. coli* and *S. aureus*

样品	大肠杆菌/μg·mL^{-1}				金黄色葡萄球菌/μg·mL^{-1}			
	MIC	MBIC	MBC	MBBC	MIC	MBIC	MBC	MBBC
OPC	625	2 500	1 250	10 000	78	625	313	2 500
MPC	625	2 500	1 250	10 000	78	625	313	2 500
PPC	625	1 250	1 250	5 000	39	625	313	1 250
DPC	625	2 500	1 250	10 000	78	625	313	2 500
TPC	625	1 250	1 250	5 000	78	625	313	2 500
QACS	625	1 250	2 500	5 000	39	625	313	2 500
QAPPC	313	625	1 250	2 500	39	625	156	1 250

2.3.2　*产物的抑菌率*　不同质量浓度(ρ)的酚基壳聚糖季铵盐的抑菌率(η_1)，如图 3 所示。



(a) *E. coli*　　(b) *S. aureus*

图 3　酚基壳聚糖季铵盐的抑菌率

Fig. 3　Antibacterial rates of phenol-based chitosan quaternary ammonium salt

由图 3 可得以下 3 点结论。

1）酚基的位置和数量均能影响壳聚糖的抗菌活性。在相同质量浓度时，单酚基壳聚糖衍生物的抗菌活性排序为 PPC＞OPC＞MPC；酚基壳聚糖的抗菌活性不仅与酚基的位置有关，还与酚基的数量有关，这是因为酚基壳聚糖是通过酰胺键将苯酚接枝到壳聚糖的氨基上，将壳聚糖的单元糖苷链看成是一个整体，酰胺基团是吸电子基团，吸电子的取代基可以增强苯酚的酸性，酰胺基团位于酚基的邻位和对位时，苯氧基负离子的负电荷可以分散到酰胺基团上，使苯酚的酸性强于间位异构体[15]，当酚基位于取代基的对位时，空间位阻较小，暴露在外面的酚基与细菌接触几率增加，抗菌活性优于邻位酚基，这与抗菌活性变化趋势一致。

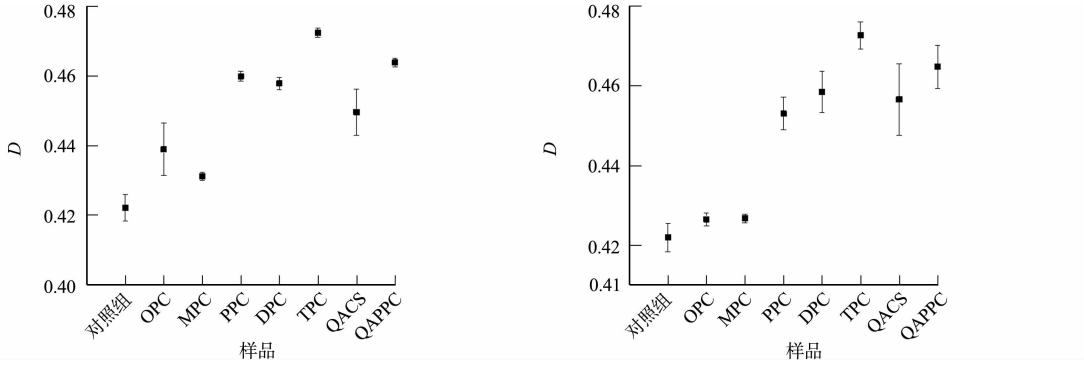
2）酚基的数量发生改变时，抗菌活性排序为 TPC＞MPC＞DPC，并不随酚基数量变化呈现规律性变化，酚基的数量对壳聚糖抗菌活性的影响还与酚基的位置有关。DPC 的抗菌活性弱于 MPC，虽然增加了酚基的数量，但这两个酚基均可视为间位酚基，进一步弱化了苯酚的酸性，表现出较差的抗菌活性。TPC 的抗菌活性较 DPC 得到增强，尽管 TPC 有两个酚基位于间位上，但对位酚基的存在增强了苯酚

的酸性,表现出的抗菌活性优于DPC。由酚基季铵化壳聚糖对 *S. aureus* 的抑菌率可知,除MPC,DPC外,其余3种酚基壳聚糖对 *S. aureus* 的抑菌率均为100.0%。在制备的5种酚基壳聚糖中,PPC的抗菌活性最强,质量浓度为0.5 mg·mL^{-1}的PPC,TPC对 *E. coli* 的抑菌率分别为78.2%,51.4%。

3)对比相同质量浓度下的PPC,QACS和QAPPC的抑菌率,QAPPC的抗菌活性优于QACS和PPC,QAPPC是将对羟基苯甲酸通过缩合反应接枝到QACS的分子结构中,故季铵盐基团和酚基对提升壳聚糖的抗菌活性具有协同作用,质量浓度为0.5 mg·mL^{-1}的QAPPC对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的抑菌率分别为83.3%,100.0%。

2.3.3 *菌悬液中的蛋白质含量* 通过考马斯亮蓝法测定菌悬液中的蛋白质含量,因受标准曲线误差、细菌培养批次等的影响,故实验中以波长595 nm下的OD值(D)表示蛋白质含量。将壳聚糖衍生物与细菌共培养30 min后,可得酚基壳聚糖季铵盐作用后菌悬液中蛋白质含量,如图4所示。由图4可知:在酚基数量相同时,MPC处理后的菌悬液中蛋白质含量最低,这与抑菌率测试结果一致;当酚基的数量发生改变时,TPC处理后的菌悬液中蛋白质含量最高;对于 *E. coli*,经PPC处理后的菌悬液中蛋白质含量高于DPC,而 *S. aureus* 却出现相反的结果,这与细菌结构及抗菌机理有关。

结合抑菌率的数据可知,在相同质量浓度下,抑菌率排序为PPC>TPC>DPC,然而,菌悬液中蛋白质含量的变化并不完全相符,这可能是酚基壳聚糖与细菌相互作用时,不仅与破坏细胞膜结构改变细胞膜通透性有关,还可能与抑制胞内酶的活性有关[16]。QAPPC与细菌接触后的菌悬液中蛋白质含量高于PPC,QACS,菌悬液中蛋白质含量的变化趋势与抑菌率的变化趋势一致。



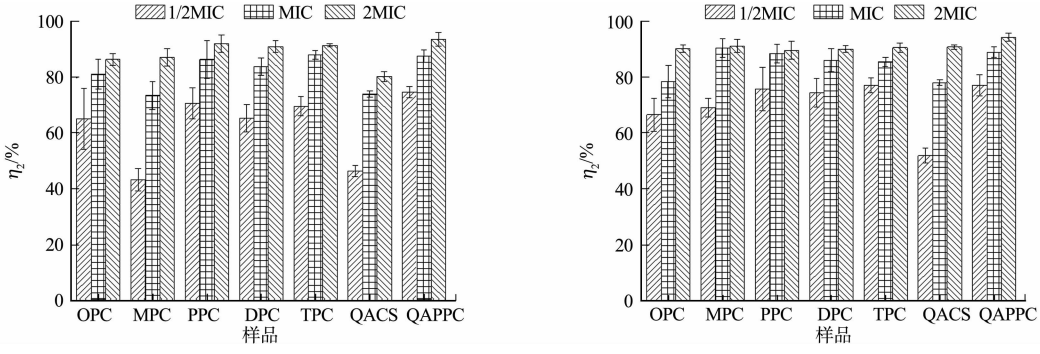
(a) *E. coli* (b) *S. aureus*

图4 酚基壳聚糖季铵盐作用后菌悬液中蛋白质含量

Fig. 4 Content of protein effected by phenol-based chitosan quaternary ammonium salt

2.3.4 *产物对生物被膜形成的抑制率* 酚基壳聚糖季铵盐对生物被膜形成的抑制率(η_2),如图5所示。由图5可得以下3点结论。

1)酚基壳聚糖季铵盐对两种细菌的生物被膜形成的抑制率出现相同的趋势,当酚基数量相同时,对生物被膜形成的抑制效果排序为PPC>OPC>MPC,与抑菌率和蛋白质含量变化趋势一致;1/2MIC的PPC对 *E. coli* 和 *S. aureus* 生物被膜形成的抑制率分别为70.7%,76.3%。



(a) *E. coli* (b) *S. aureus*

图5 酚基壳聚糖季铵盐对生物被膜形成的抑制率

Fig. 5 Inhibition rates of phenol-based chitosan quaternary ammonium salt on biofilm formation

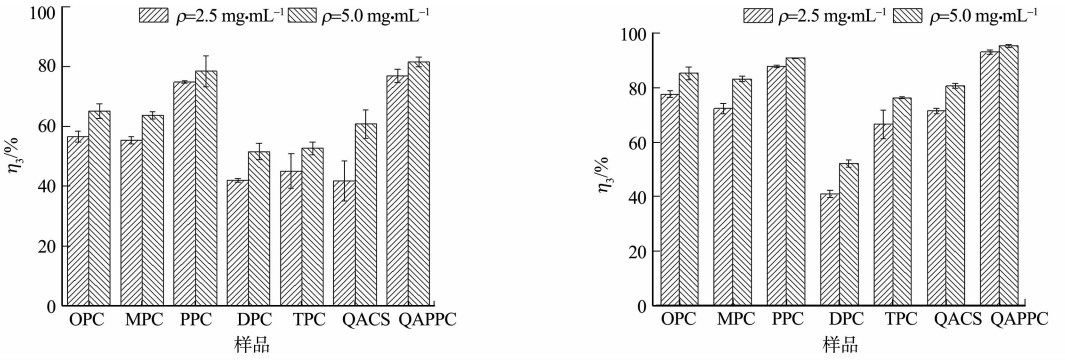
2）增加酚基的数量可以改善壳聚糖衍生物对生物被膜的抑制效果。对生物被膜形成的抑制率排序为 TPC＞DPC＞MPC，1/2MIC 的 TPC 对 *E. coli* 和 *S. aureus* 生物被膜形成的抑制率分别为 69.7%，77.7%。生物被膜的形成不仅与外界环境有关还与细菌多种基因的表达有关[10]。

3）在相同质量浓度下，对生物被膜形成的抑制率排序为 QAPPC＞PPC＞QACS，表明将对羟基苯甲酰引入 QACS 中可以提高 QACS 对生物被膜形成的抑制率。1/2MIC 的 QAPPC 对 *E. coli* 和 *S. aureus*生物被膜形成的抑制率分别为 74.7%，77.6%。

2.3.5　*产物对生物被膜的清除率*　酚基壳聚糖季铵盐对生物被膜的清除率（η_3），如图 6 所示。由图 6 可知以下 2 点结论。

1）产物对 *S. aureus* 形成的生物被膜的清除率优于对 *E. coli* 的生物被膜的清除率，这与抑菌率的结果一致；酚基的位置改变对生物被膜的清除效果与抑菌率的变化趋势一致，对生物被膜的清除效果的排序为 PPC＞OPC＞MPC，质量浓度为 2.5 mg·mL^{-1}的 PPC 对 *E. coli* 和 *S. aureus* 形成的生物被膜的清除率分别为 75.3%，87.7%。值得注意的是，增加酚基的数量并不能够提高壳聚糖对生物被膜的清除效果。

2）在相同质量浓度下，对生物被膜的清除效果排序为 QAPPC＞PPC＞QACS，这表明将对羟基苯甲酸接枝到 QACS 的分子结构中可以进一步提高 QACS 对生物被膜的清除率，季铵盐基团和酚基具有协同作用；质量浓度为 2.5 mg·mL^{-1}的 QAPPC 对 *E. coli*，*S. aureus* 形成的生物被膜的清除率分别为 77.4%，92.4%。



(a) *E. coli*　　(b) *S. aureus*

图 6　酚基壳聚糖季铵盐对生物被膜的清除率

Fig. 6　Biofilm removal rates of phenol-based chitosan quaternary ammonium salt

3　结论

1）制备酚基壳聚糖季铵盐，通过核磁共振氢谱表征产物的结构。通过元素分析计算得出 QACS 季铵盐取代度为 20.1%，酚基的取代度为 15.4%～24.4%。OPC，MPC，PPC，DPC 和 TPC 的取代度分别为 24.4%，21.6%，15.4%，22.3%和 21.5%。以取代度为 20.1%的 QACS 季铵盐为原料制备的 QAPPC 中，对羟基苯甲酰基的取代度为 16.9%。

2）抗菌测试和抗生物被膜测试结果表明，影响酚基壳聚糖抗菌活性的主要因素是酚基的位置，其次是酚基的数量，PPC 的抗菌活性和抗生物被膜活性最佳。抗菌活性和清除生物被膜的能力排序为 PPC＞OPC＞MPC。酚基的数量对壳聚糖抗菌活性的影响与酚基的位置有关，增加酚基的数量并不一定能够提高酚基壳聚糖的抗菌活性。质量浓度为 0.5 mg·mL^{-1}的 PPC 对 *E. coli* 和 *S. aureus* 的抑菌率分别为 78.2%，100.0%，1/2MIC 的 PPC 对 *E. coli*，*S. aureus* 生物被膜形成的抑制率分别为 70.7%，76.3%，质量浓度为 2.5 mg·mL^{-1}的 PPC 对 *E. coli* 和 *S. aureus* 所形成的生物被膜的清除率分别为 75.3%，87.7%。

3）QAPPC 的抗菌活性和抗生物被膜活性均优于单一改性的壳聚糖衍生物（QACS 和 PPC），季铵盐和酚基具有协同抗菌活性. 质量浓度为 0.5 mg·mL^{-1}的 QAPPC 对 *E. coli* 的抑菌率为 83.3%，高于相同质量浓度下 QACS 对 *E. coli* 的抑菌率（39.5%）和 PPC 对 *E. coli* 的抑菌率（78.2%）。1/2MIC

的QAPPC对*E. coli*和*S. aureus*生物被膜形成的抑制率分别为74.7%,77.6%。质量浓度为2.5 mg·mL^{-1}的QAPPC对*E. coli*和*S. aureus*形成的生物被膜的清除率分别为77.4%,92.4%。

参考文献:

[1] FLEMMING H C,WINGENDER J,SZEWZYK U,*et al*. Biofilms: An emergent form of bacterial life[J]. Nature Reviews Microbiology,2016,14(9):563-575. DOI:10.1038/nrmicro.2016.94.

[2] LIU Peiying,LI Danxia,KANG Miaomiao,*et al*. Emerging applications of aggregation-induced emission luminogens in bacterial biofilm imaging and antibiofilm theranostics[J]. Small Structures,2023,4(5):220329. DOI:10.1002/sstr.202200329.

[3] LIU Jun,PU Huimin,LIU Shuang,*et al*. Synthesis, characterization, bioactivity and potential application of phenolic acid grafted chitosan: A review[J]. Carbohydrate Polymers,2017,174:999-1017. DOI:10.1016/j.carbpol.2017.07.014.

[4] CURCIO M,PUOCI F,IEMMA F,*et al*. Covalent insertion of antioxidant molecules on chitosan by a free radical grafting procedure[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(13): 5933-5938. DOI: 10.1021/jf900778u.

[5] BOZIC M,GORGIEVA S,KOKOL V. Laccase-mediated functionalization of chitosan by caffeic and gallic acids for modulating antioxidant and antimicrobial properties[J]. Carbohydrate Polymers,2012,87:2388-2398. DOI:10.1016/j.carbpol.2011.11.006.

[6] SCHREIBER S B,BOZELL J J,HAYES D G,*et al*. Introduction of primary antioxidant activity to chitosan for application as a multifunctional food packaging material[J]. Food Hydrocolloids,2013,33(2):207-214. DOI:10.1016/j.foodhyd.2013.03.006.

[7] KIM K,KIM K,RYU J H,*et al*. Chitosan-catechol: A polymer with long-lasting mucoadhesive properties[J]. Biomaterials,2015,52:161-170. DOI:10.1016/j.biomaterials.2015.02.010.

[8] BARBOSA H F G,ATTJIOU M,LEITAO A,*et al*. Characterization, solubility and biological activity of amphihilic biopolymeric schiff bases synthesized using chitosans[J]. Carbohydrate Polymers,2019,220:1-11. DOI:10.1016/j.carbpol.2019.05.037.

[9] KIM G,DASAGRANDHI C,KANG E H,*et al*. *In vitro* antibacterial and early stage biofilm inhibitory potential of an edible chitosan and its phenolic conjugates against Pseudomonas aeruginosa and Listeria monocytogenes[J]. 3 Biotech,2018,8(10):439-439. DOI:10.1007/s13205-018-1451-4.

[10] YANG Xin,LAN Weiqing,XIE Jing. Antimicrobial and anti-biofilm activities of chlorogenic acid grafted chitosan against *Staphylococcus aureus*[J]. Microbial Pathogenesis, 2022, 173: 105748. DOI: 10.1016/j.micpath.2022.105748.

[11] KHAN F,OH D,CHANDIKA P,*et al*. Inhibitory activities of phloroglucinol-chitosan nanoparticles on mono- and dual-species biofilms of *Candida albicans* and bacteria[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2022, 211: 112307. DOI:10.1016/j.colsurfb.2021.112307.

[12] WANG Lin,XIN Meihua,LI Mingchun,*et al*. Effect of the structure of chitosan quaternary phosphonium salt and chitosan quaternary ammonium salt on the antibacterial and antibiofilm activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2023,242:124877. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.124877.

[13] 明如镜,辛梅华,李明春,等. *O*-季铵化-*N*,*N*-双十二烷基壳聚糖/胆固醇的混合单分子膜性质研究[J]. 材料研究学报,2010,24(3):254-258.

[14] WU Chunhua,TIAN Jinhu,LI Shan,*et al*. Structural properties of films and rheology of film-forming solutions of chitosan gallate for food packaging[J]. Carbohydrate Polymers,2016,146:10-19. DOI:10.1016/j.carbpol.2016.03.027.

[15] 胡宏纹. 有机化学[M]. 北京:高等教育出版社,2014.

[16] YAN Chunchao,XIAO Feng,QIU Tong,*et al*. Preparation of gallic acid-chitosan copolymer and its antibacterial activity against *Staphylococcus aureus* and *Escherichia coli*[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed,2021,36(6):934-941. DOI:10.1007/s11595-021-2490-y.

(**责任编辑**:钱筠 **英文审校**:刘源岗)

DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.202306019

虾青素微胶囊对 Hp 小鼠血清及胃黏膜细胞因子的影响

文亚飞[1]，王福财[1]，许晓英[1]，陈韵琪[1]，吴振[2]，王立强[1]

（1. 华侨大学 生物医学学院，福建 泉州 362021；
2. 厦门大学 药学院，福建 厦门 361102）

摘要： 采用幽门螺杆菌(Hp)灌胃法建立 Hp 感染小鼠模型，收集小鼠血清及胃组织。通过染色法观察小鼠胃黏膜内 Hp 定植量及病理学改变，通过酶标记测定法检测小鼠血清及胃黏膜 HMGB1，IL-6，TNF-α，IL-4 和 IL-10 的质量浓度。结果表明：与对照组相比，虾青素微胶囊(ASX-MCs)可降低小鼠胃黏膜内 Hp 定植量，减轻胃黏膜炎症损伤，降低血清和胃黏膜促炎因子 HMGB1，IL-6，TNF-α 的质量浓度，并提高抑炎因子 IL-4 和 IL-10 的质量浓度；ASX-MCs 可减轻 Hp 感染引起的小鼠胃黏膜炎症损伤，抑制血清和胃黏膜促炎因子的表达，促进抑炎因子的表达。

关键词： 虾青素；幽门螺杆菌；胃炎；细胞因子

中图分类号： R 96 **文献标志码：** A **文章编号：** 1000-5013(2023)06-0727-08

Effect of Astaxanthin Microcapsules on Serum and Gastric Mucosal Cytokines of Hp Mice

WEN Yafei[1], WANG Fucai[1], XU Xiaoying[1], CHEN Yunqi[1], WU Zhen[2], WANG Liqiang[1]

(1. School of Biomedical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;
2. School of Pharmaceutical Sciences, Xiamen University, Xiamen 361102, China)

Abstract: A mouse model of *Helicobacter pylori* (Hp) infection using the Hp gavage method is established, and the mouse serum and gastric tissue are collected. The amount of Hp colonization and pathological changes of mouse gastric mucosa are observed through staining method, and the mass concentrations of HMGB1, IL-6, TNF-α, IL-4 and IL-10 from serum and gastric mucosa of mice are detected through enzyme labeling assay method. The results show that, compared with the control group, astaxanthin microcapsules (ASX-MCs) can reduce the amount of Hp colonization in gastric mucosa of mouse, alleviate the gastric mucosal inflammatory damage, reduce the serum and gastric mucosal pro-inflammatory factors such as HMGB1, IL-6 and TNF-α, and increase the mass concentration of anti-inflammatory factors IL-4 and IL-10. Morever, ASX-MCs can alleviate mouse gastric mucosal inflammatory damage caused by Hp infection, inhibit the expression of pro-inflammatory factors of serum and gastric mucosa, and promote the expression of anti-inflammatory factors.

Keywords: astaxanthin; *Helicobacter pylori*; gastritis; cytokines

幽门螺杆菌(Hp)作为胃癌元凶，是导致胃炎、甚至胃癌的常见病原体之一[1]。已有研究发现，Hp

收稿日期： 2023-06-01

通信作者： 王立强(1970-)，男，教授，博士，主要从事药剂学和创新药物研发的研究。E-mail：wlq1599@163.com。

基金项目： 国家重点研发计划项目(2016YFE0101700)；福建省高校产学合作重大项目(2019Y4007)

感染与胃溃疡、十二指肠溃疡、慢性胃炎,以及炎症性肠病等一系列消化系统疾病的发生密切相关[2]。

炎症和免疫之间存在动态平衡,随着 Hp 持久性刺激,炎症和免疫力逐渐趋向更严重的平衡,该平衡通过促炎和抑炎细胞因子实现[3]。因此,通过增加或减少一种特定的细胞因子来打破这种平衡来缓解炎症,可能有助于根除 Hp。虾青素(ASX)具有强大的抗氧化和抗炎作用,对胃肠道具有保护作用[4]。Kim 等[5]认为,ASX 的抗氧化和抗炎作用可以抑制 Hp 的生长,并减少胃部炎症。喂食富含 ASX 和 β-胡萝卜素的食物可能是预防 Hp 感染引起的胃炎的新策略[6]。本文通过建立 Hp 感染 C57BL/10JGpt 胃炎小鼠模型,探讨虾青素微胶囊对 Hp 小鼠血清及胃黏膜细胞因子的影响。

1 实验材料

1.1 药品与试剂

虾青素微胶囊(实验室自制);Hp(ATCC43504)菌株(江西省南昌市消化研究所);Karmali 空肠弯曲菌琼脂基础(英国 OXOID 公司);多粘菌素 B、两性霉素 B、万古霉素(江苏省南京市都莱生物技术有限公司);快速革兰氏染色液试剂盒(北京市索莱宝科技有限公司);布氏肉汤(山东省青岛市海博生物技术有限公司);无水乙醇、二甲苯(广东省汕头市西陇科学股份有限公司);吉姆萨染色液、苏木素伊红染色试剂盒(上海市碧云天生物技术有限公司);细菌基因组 DNA 提取试剂盒(离心柱型,北京市天根生化科技有限公司);引物合成(上海市生工生物技术服务公司);小鼠高迁移率族蛋白 B1(HMGB1),IL-6,TNF-α,IL-4,IL-10 ELISA 检测试剂盒(福建省泉州市优诺生物工程技术开发有限公司)。

1.2 实验仪器

立式压力蒸汽灭菌器(上海市申安医疗器械厂);三气培养箱(上海市颐习仪器设备公司);生物安全柜(新加坡艺思高公司);电脑自动脱水机(辽宁省沈阳市誉德电子仪器有限公司);生物组织包埋机(湖北省孝感亚光医用电子技术有限公司);生物显微镜、常规手动轮转式切片机(徕卡显微系统);实时荧光定量 PCR(Real-time PCR,陕西省西安市天隆科技公司);酶标仪(江苏省常州市锐品密仪器有限公司)。

1.3 实验动物

SPF 级 C57BL/10JGpt 小鼠,5～6 周龄,体质量为 20～25 g,雄性,购于江苏省南京市集萃药康生物科技股份有限公司,许可证号:容 17 苏 A25988(21)。所有动物实验程序都已得到华侨大学医学院实验动物管理伦理委员会批准(审批序号:伦研批第 A2021035 号)。

2 实验方法

2.1 活菌悬浮液的制备

取出冻存的 Hp ATCC43504 标准菌株,待其室温融化后,在离心机(转速为 5 000 r·min^{-1})中离心 5 min,弃上清液。用无菌接种环刮一接种环菌,在平板上用划线法进行接种,于恒温三气培养箱中培养 48～72 h(温度为 37 ℃,体积分数为 5%的 O_2,体积分数为 10%的 CO_2,体积分数为 85%的 N_2)。

当琼脂培养基表面划线处长出灰白色、半透明状菌体且无杂菌污染,便可进行传代。用无菌接种环轻轻刮下琼脂培养基上灰白色单个菌落,菌种通过革兰氏染色、快速尿素酶试验、氧化酶试验进行鉴定。Hp 琼脂培养并鉴定后,先用无菌接种环沿着划线长菌处轻轻刮下灰白色活菌,再用移液枪量取灭菌后的布氏肉汤轻轻吹打琼脂培养基菌体处,经 0.45 μm 无菌滤网过滤,回收液即为活菌悬浮液。

2.2 ASX-MCs 的制备

采用喷雾干燥法制备虾青素微胶囊(ASX-MCs),以辛烯基琥珀酸淀粉酯-羟丙基 β 环糊精-麦芽糊精 (OSA-(HP-β-CD)-MA)为壁材,PGFE-大豆卵磷脂为乳化剂,通过单因素考察法,最优制备工艺如下:乳化剂质量分数为 2.6%;超声功率为 490 W;超声时间为 20 min;制备的 ASX 乳化液的粒径为(215.59±6.58) nm。喷雾干燥工艺如下:芯壁比例为 1.0∶2.5;固形物质量分数为 25%;进口温度为 130 ℃;制备的 ASX-MCs 包封率为(83.31±0.59)%。经过体外评价和大鼠体内的单次口服药代动力学评价,ASX-MCs 具有稳定性高、水溶性良好、口服生物利用度高等优点,在波长为 477 nm 处,测得 ASX-MCs 中 ASX 质量分数为 2.0%。

2.3　动物的造模

48 只 C57BL 小鼠适应性饲养一周后，随机分为 6 组，分别为空白组、对照组、空白微胶囊组、虾青素微胶囊组，虾青素组，三联组，每组 8 只。根据文献[7]及预实验结果，建立 Hp 感染 C57BL 小鼠模型。给药方式：对空白组灌胃空白布氏肉汤；对对照组灌胃 Hp(每毫升细菌群落总数为 1.0×10^9，每千克小鼠灌胃 15 mL，下同)；对空白微胶囊组灌胃 Hp 和 MCs(质量浓度为 200 $\mu g\cdot mL^{-1}$，每千克小鼠灌胃 15 mL)；对虾青素微胶囊组灌胃 Hp 和 ASX-MCs(质量浓度为 200 $\mu g\cdot mL^{-1}$，每千克小鼠灌胃 15 mL)；对虾青素组灌胃 Hp 和 ASX(4 $\mu g\cdot mL^{-1}$，每千克小鼠灌胃 15 mL)；对三联组灌胃 Hp 及三联(每千克小鼠灌胃 14.20 mg 甲硝锉＋每千克小鼠灌胃 7.15 mg 克拉霉素＋每千克小鼠灌胃 400 nmol 奥美拉唑)。末次灌胃继续饲养 8 周后，摘眼球取血处死小鼠，无菌条件下收集小鼠血清及胃组织进行后续实验。

2.4　Hp 感染模型的评价依据

根据文献[8]，在建模结束后处死小鼠，对 Hp 感染模型进行评价。无菌条件下取胃黏膜，采用 Giemsa 对胃黏膜进行染色，采用 Real-time PCR 检测 Hp Urease A 的基因表达，采用 H&E 染色检查胃黏膜组织病理学变化，若 3 者皆呈阳性，证实 Hp 感染模型构建成功。

2.5　标本的采集与处理

小鼠摘眼球取血后，4 ℃过夜，在离心机(转速为 2 000 $r\cdot min^{-1}$)中离心 20 min，小心吸取上清液。将上清液分装于灭菌离心管(100 $\mu L\cdot 管^{-1}$)中，−80 ℃冰箱保存。采用酶标记测定(ELISA)方法检测血清内炎症因子质量分数。沿胃大弯至胃小弯一分为二剪开小鼠胃组织，其中一份经组织固定液固定后，脱水、石蜡包埋、切片、Giemsa 染色，以及 H&E 染色；另一份提取细菌 DNA 进行 Real-time PCR 检测，提取细菌蛋白进行 ELISA 检测。

2.6　改良 Giemsa 染色法

将组织切片置于二甲苯Ⅰ，Ⅱ各 10 min，再分别置于质量分数为 100%，95%，85%，75%的酒精中各 5 min，水洗；Giemsa 染色 20 min 后水洗，置于质量分数分别为 95%，100%的酒精中各 3 s，再置于二甲苯Ⅰ，Ⅱ各 10 min 中，用中性树胶封片；在高倍镜(100 倍)下观察，如果出现典型短杆状、蓝紫色螺旋杆菌即为 Hp 阳性，否则为 Hp 阴性。

2.7　Real-time PCR 检测法

用细菌基因组 DNA 提取试剂盒(离心柱型)提取胃黏膜组织中 Hp 基因组 DNA。GAPDH 引物序列上游为 5′-AACGGCACAGTCAAGGCTGAGAACG-3′，下游为 5′-CAACATACTCGGCACCGGCATCG-3′，产物长度为 118 bp；HpUrease A 引物序列上游为 5′-TGTTGGCGACAGACCGGTTCAAATC-3′，下游为 5′-GCTGTCCCGCTCGCAATGTCTAAGC-3′，产物长度为 120 bp。以提取的细菌基因组 DNA 为模板，以小鼠 GAPDH 为内参，采用 Real-time PCR($2^{-\Delta\Delta CT}$法)检测 C57BL 小鼠胃黏膜内 Hp Urease A 基因的相对表达量。

2.8　H&E 染色检测法

将组织切片置于二甲苯Ⅰ、Ⅱ各 10 min，再分别置于质量分数为 100%，95%，85%，75%酒精各 5 min，水洗 5 min；苏木素染液染色 10 min，在质量分数为 1%的盐酸酒精中分化 3 s，自来水返蓝；伊红染液染色 3～5 min，分别置于质量分数为 75%，85%，95%Ⅰ，95%Ⅱ，100%Ⅰ，100%Ⅱ酒精梯度脱水各 5 min；将组织切片分别置于二甲苯Ⅰ，Ⅱ各 10 min，中性树胶封片；H&E 的染色结果根据小鼠胃黏膜层内炎性细胞的密度和浸润深度进行分级。

2.9　ELISA 法

按照 ELISA 试剂盒说明书配制检测液、洗涤液、标准品及样品，HMGB1，IL-6，TNF-α，IL-4 和 IL-10 的标准品梯度质量浓度为 120.0，60.0，30.0，15.0，7.5，0 $pg\cdot mL^{-1}$，TNF-α 标准品梯度质量浓度为 640.0，320.0，160.0，80.0，40.0，0 $pg\cdot mL^{-1}$。

将梯度质量浓度标准品、标准稀释液、待测样品依次加入标准孔、空白孔、样品孔，每孔 100 μL，重复 3 次，封板模封板。37 ℃下孵育 1 h 后，进行洗板。每个孔中均加入 100 μL 检测液 A，覆膜封板置于 37 ℃孵育 1 h，洗板。每个孔中均加入 100 μL 检测液 B，覆膜封板置于 37 ℃孵育 30 min，洗板。每孔

加 90 μL 底物溶液,覆膜封板避光 37 ℃显色,观察颜色变化,出现明显的蓝色并呈现梯度排布时,终止显色,紫外分光光度计检测的波长为 450 nm。

2.10 统计学分析

通过方差单向分析(ANOVA)分析差异,数据的显著性差异分析表现如下:* 代表 $P<0.050$;** 代表 $P<0.010$;*** 代表 $P<0.001$。GraphPad Prism 9.4.1 用于制作统计图。

3 实验结果与分析

3.1 Hp 鉴定结果

Hp 鉴定结果,如图 1 所示。由图 1 可知:革兰氏染色结果为革兰氏阴性杆状菌,快速尿素酶试纸检测及氧化酶试剂检测结果均为 Hp 阳性。

(a) 革兰氏染色 (b) 速尿素酶试纸检测 (c) 氧化酶试剂检测

图 1 Hp 鉴定结果

Fig. 1 Identification results of Hp

实验成功建立 Hp 感染 C57BL 小鼠模型,Hp 感染成功率为 100%。

3.2 小鼠体质量变化

小鼠体质量变化,如图 2 所示。由图 2 可知:Hp 感染和 ASX-MCs 干预对小鼠体质量变化无影响($P>0.05$)。

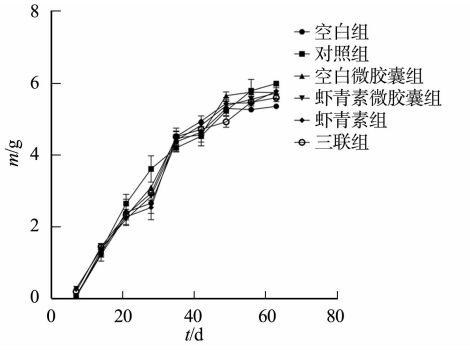
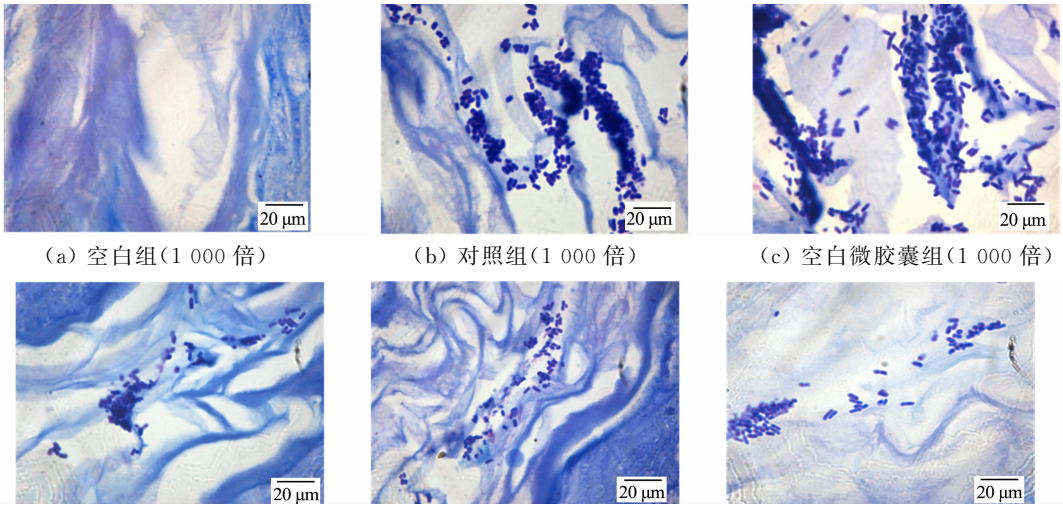


图 2 小鼠体质量变化

Fig. 2 Change of body quality of mice

3.3 小鼠胃黏膜内 Hp 定植量

3.3.1 Giemsa 染色 Giemsa 染色结果,如图 3 所示。由图 3 可知:在空白组染色结果中未见 Hp 的存在;在对照组、空白微胶囊组、虾青素微胶囊组、虾青素组和三联组染色结果中可见典型短杆状、蓝紫色螺旋杆菌,初步判断为 Hp,Hp 多聚集于胃黏膜层、胃小凹上皮和腺上皮;对照组和空白微胶囊组胃



(a) 空白组(1 000 倍) (b) 对照组(1 000 倍) (c) 空白微胶囊组(1 000 倍)

(d) 虾青素微胶囊组(1 000 倍) (e) 虾青素组(1 000 倍) (f) 三联组(1 000 倍)

图 3 Giemsa 染色结果

Fig. 3 Giemsa staining results

组织切片中 Hp 定植量较多，虾青素微胶囊组、虾青素组和三联组 Hp 定植量较少。

3.3.2　Hp Urease A 相对表达量　Hp Urease A 相对表达量，如图 4 所示。图 4 中：ns 表示 $P>0.050$，差异无统计学意义。由图 4 可知：对照组和空白微胶囊组小鼠胃黏膜 Hp Urease A 相对表达量差异无统计学意义（$P>0.050$），该结果与 Giemsa 染色结果相一致；与对照组相比，虾青素微胶囊组、虾青素组和三联组小鼠胃黏膜 Hp Urease A 的相对表达量均明显下降（$P<0.001$）；虾青素微胶囊组、虾青素组和三联组小鼠胃黏膜 Hp Urease A 的相对表达量差异无统计学意义（$P>0.050$）。

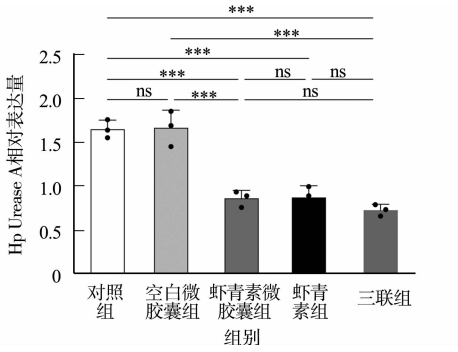
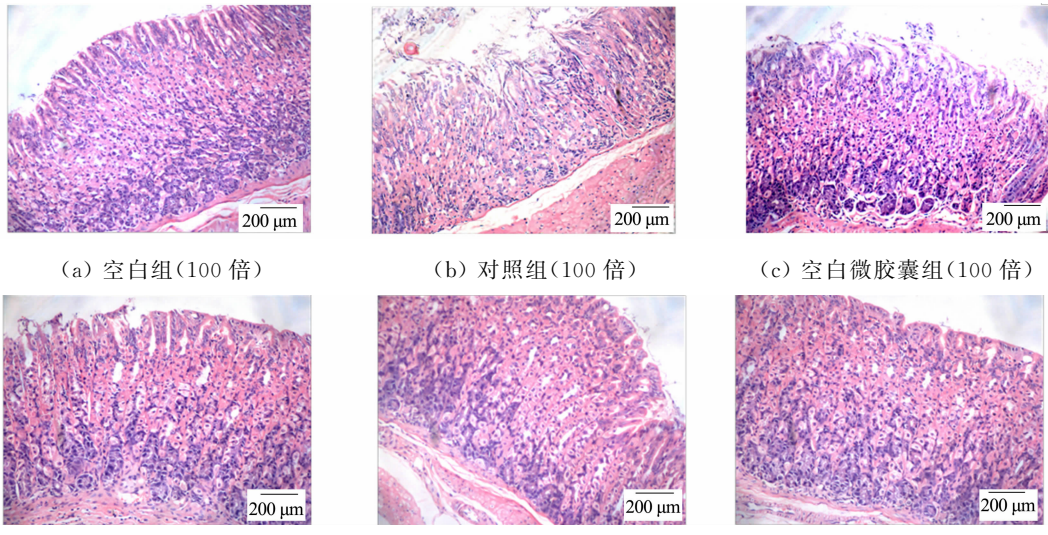


图 4　Hp Urease A 相对表达量

Fig. 4　Relative expression amount of Hp Urease A

由图 3，4 可知：Hp 感染会导致小鼠胃黏膜内 Hp 大量定植；空白微胶囊对小鼠胃黏膜内 Hp 定植量无影响；虾青素微胶囊、虾青素和三联药物均可降低小鼠胃黏膜内 Hp 定植量。

3.3.3　H&E 染色结果及病理学评分　H&E 染色结果，如图 5 所示。由图 5 可知：空白组小鼠胃黏膜组织结构完整，腺细胞整齐紧密排列；对照组和空白微胶囊组小鼠胃黏膜组出现炎性细胞浸润及腺体破坏；虾青素微胶囊组、虾青素组和三联组小鼠胃黏膜组织偶尔出现炎性细胞浸润，腺细胞排列较为整齐。



（a）空白组（100 倍）　（b）对照组（100 倍）　（c）空白微胶囊组（100 倍）

（d）虾青素微胶囊组（100 倍）　（e）虾青素组（100 倍）　（f）三联组（100 倍）

图 5　H&E 染色结果

Fig. 5　H&E staining results

H&E 病理学评分，如图 6 所示。由图 6 可知：与空白组相比，对照组、空白微胶囊组、虾青素微胶囊组和三联组小鼠胃黏膜均出现炎症；对照组和空白微胶囊组小鼠胃黏膜炎症程度差异无统计学意义（$P>0.050$）；与对照组相比，虾青素微胶囊组（$P<0.001$）、虾青素组（$P<0.050$）和三联组小鼠（$P<0.001$）胃黏膜炎症明显减轻。Hp 感染后，大量定植会引起小鼠胃黏膜发生炎症反应，诱导胃黏膜炎症损伤，空白微胶囊对小鼠胃黏膜炎症反应无影响，虾青素微胶囊、虾青素和三联药物均可减轻 Hp 感染引起的小鼠胃黏膜炎症反应，减轻胃黏膜炎症损伤。

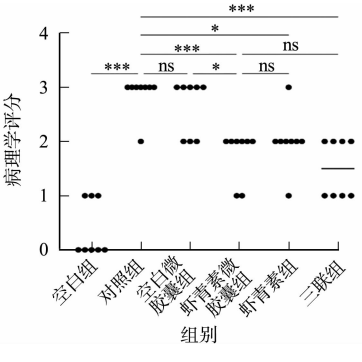


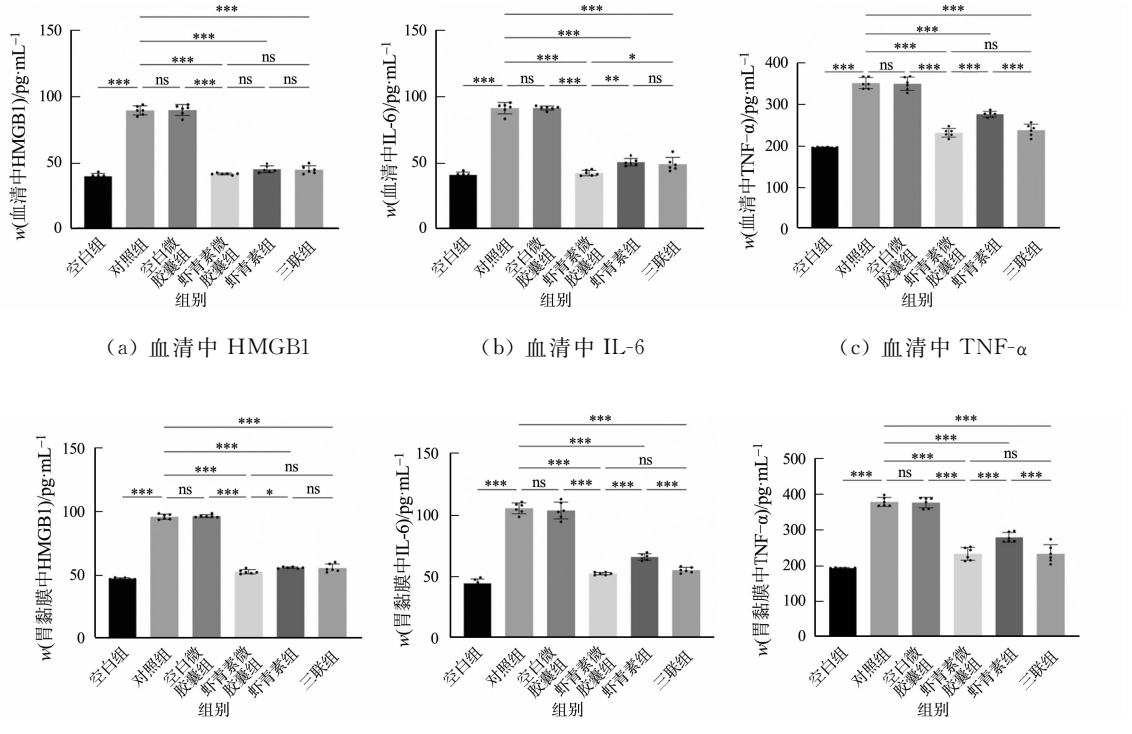
图 6　H&E 病理学评分

Fig. 6　H&E pathology score

3.4　小鼠血清及胃黏膜促炎因子的表达

小鼠血清及胃黏膜促炎因子的表达，如图 7 所示。由图 7 可知：Hp 感染组小鼠血清中 HMGB1，IL-6，TNF-α 的质量分数较空白组明显上升（$P<0.001$）；对比对照组，空白微胶囊干预后，小鼠血清中 HMGB1，IL-6，TNF-α 的质量分数无明显变化（$P>0.05$），而经过

虾青素微胶囊、虾青素和三联干预后,小鼠血清中 HMGB1,IL-6,TNF-α 的质量分数明显下降($P<0.001$);Hp 感染组小鼠胃黏膜中 HMGB1,IL-6,TNF-α 的质量分数较空白组明显上升($P<0.001$),对比对照组,经过空白微胶囊干预后,小鼠胃黏膜组织中 HMGB1,IL-6,TNF-α 的质量分数无明显变化($P>0.050$),而经过虾青素微胶囊、虾青素和三联药物干预后,小鼠胃黏膜中 HMGB1,IL-6,TNF-α 的质量分数明显下降($P<0.001$)。因此,Hp 感染组小鼠血清及胃黏膜中促炎因子 HMGB1,IL-6,TNF-α 的表达增加,空白微胶囊干预对此无影响,而虾青素微胶囊、虾青素和三联药物均可抑制 Hp 感染组小鼠血清及胃黏膜组织内促炎因子 HMGB1,IL-6,TNF-α 的表达。



(a) 血清中 HMGB1 (b) 血清中 IL-6 (c) 血清中 TNF-α

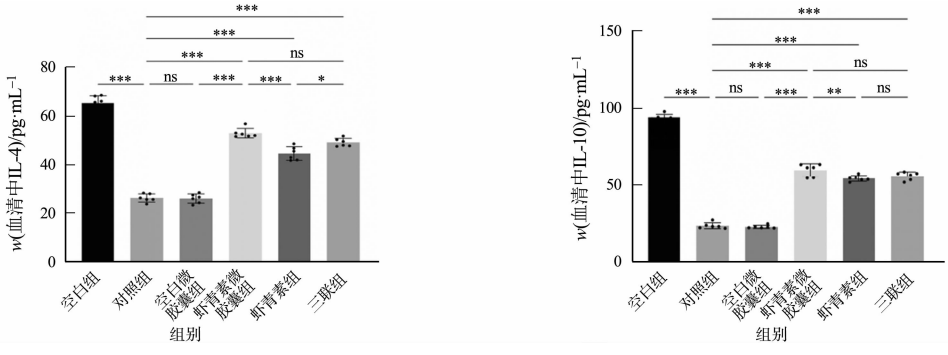
(d) 胃黏膜中 HMGB1 (e) 胃黏膜中 IL-6 (f) 胃黏膜中 TNF-α

图 7 小鼠血清及胃黏膜促炎因子的表达

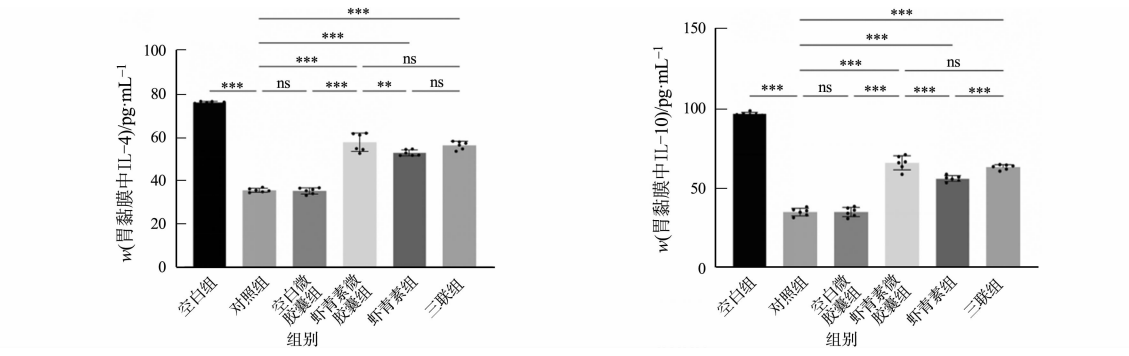
Fig. 7 Expression of pro-inflammatory factors in serum and gastric mucosa of mice

3.5 小鼠血清及胃黏膜抑炎因子的表达

小鼠血清及胃黏膜抑炎因子的表达,如图 8 所示。由图 8 可知:Hp 感染组小鼠血清中 IL-4,IL-10 的质量分数较空白组明显下降($P<0.001$);对比对照组,空白微胶囊干预后,小鼠血清中 IL-4,IL-10 的质量分数无明显变化($P>0.050$),而虾青素微胶囊、虾青素和三联干预后,小鼠血清中 IL-4,IL-10 的质量分数明显上升($P<0.001$);Hp 感染组小鼠胃黏膜中 IL-4,IL-10 的质量分数较空白组明显下降($P<0.001$);对比对照组,空白微胶囊干预后,小鼠胃黏膜中 IL-4,IL-10 的质量分数无明显变化($P>0.050$),而经过虾青素微胶囊、虾青素和三联干预后,小鼠胃黏膜组织中 IL-4, IL-10 的质量分数明显上



(a) 血清中 IL-4 (b) 血清中 IL-10



（c）胃黏膜中 IL-4　　（d）胃黏膜中 IL-10

图 8　小鼠血清及胃黏膜抑炎因子的表达

Fig. 8　Expression of serum and gastric mucosal anti-inflammatory factors in mice

升（$P<0.001$）；Hp 感染组小鼠血清及胃黏膜中抑炎因子 IL-4，IL-10 的表达降低，空白微胶囊干预对此无影响，而虾青素微胶囊、虾青素和三联均可促进 Hp 感染组小鼠血清及胃黏膜组织内抑炎因子 IL-4，IL-10 的表达。

虾青素微胶囊组小鼠血清及胃黏膜内促炎因子质量分数均低于虾青素组，抑炎因子质量分数均高于虾青素组，虾青素制备成微胶囊后稳定性提高、具有水溶性良好、口服生物利用度高等优点，因此，在体内更能有效地调节炎症相关细胞因子。

4　结论

Hp 的致癌机制一方面基于慢性炎症的发作，另一方面基于细菌特异性毒性因素，这两个过程往往协同发展，Hp 特定的细菌毒力因子 CagA 和 VacA 对宿主细胞 DNA 造成损伤，并激活维持细胞存活的特定途径，最终导致受感染细胞修复 DNA 损伤的能力下降[9]。

ASX 独特的长共轭双键骨架、极性羟基和羰基结构具有强大的抗氧化和抗炎作用，可减轻细胞 DNA 损伤[10]。ASX-MCs 减少 Hp 在小鼠胃黏膜内定植量，并减轻 Hp 感染引起的小鼠胃黏膜炎症反应。Wang 等[11]发现富含 ASX 的藻类粉对体外 Hp 的生长和在小鼠胃内对 Hp 的定植均有抑制作用，使用富含 ASX 的藻类喂食 BALB/c Hp 小鼠，小鼠胃黏膜脂质过氧化和炎症细胞浸润减少。空白微胶囊对 Hp 感染组小鼠胃黏膜定植量，胃黏膜炎症损伤程度，以及血清和胃黏膜内细胞因子的表达均无影响，因此，ASX-MCs 中发挥抑菌作用和抗炎作用的成分是 ASX。同时，对比虾青素组，虾青素微胶囊在调节幽门螺杆菌引起的胃黏膜炎症反应中相关细胞因子，发挥抗炎作用更突出，采用微胶囊剂型提高了虾青素的稳定性、水溶性及生物利用度，具有明显的优势。

HMGB1 与多种细菌性疾病有关，包括炎症性肺损伤、败血症和角膜炎[12]。研究表明，HMGB1 在炎症反应中起到“警报”的作用，参与免疫炎症应答，形成具有化学因素的免疫刺激复合物，介导内毒素诱导的致死性组织损伤和全身炎症，促进白细胞迁移，激活淋巴细胞，进而增强炎症反应[13]。HMGB1 在免疫炎症通路中可激活核因子 NF-κB，从而刺激多种促炎细胞因子的释放[14]。文中实验结果发现，当 Hp 感染时，小鼠血清和胃黏膜组织中促炎因子 HMGB1，IL-6，TNF-α 的质量分数增加，抑炎因子 IL-4，IL-10 的质量分数减少；ASX-MCs 干预后，小鼠血清和胃黏膜组织中促炎因子 HMGB1，IL-6，TNF-α 的质量分数减少，抑炎因子 IL-4，IL-10 的质量分数增加，这可能与 ASX-MCs 抑制炎症通路的表达有关。

治疗幽门螺杆菌的最常见疗法是基于克拉霉素的一线三联疗法或用新型抗生素替代克拉霉素的四联疗法，但由于抗生素耐药菌株的流行率增加，抗生素疗法在幽门螺杆菌的治疗中有超过 20％的患者无效[15]。虾青素在细菌感染性消化道疾病防控治疗中具有巨大的潜力，然而，机体内复杂的炎症通路彼此交汇，相互协调，针对 Hp 感染性胃炎的靶向治疗仍有待深入研究。

参考文献:

[1] SENCHUKOVA M A. *Helicobacter pylori* and gastric cancer progression[J]. Current Microbiology,2022,79(12):383. DOI:10.1007/s00284-022-03089-9.

[2] XU Wenting,XU Liming,XU Chengfu. Relationship between *Helicobacter pylori* infection and gastrointestinal microecology[J]. Front Cell Infect Microbiol,2022,12:938608. DOI:10.3389/fcimb.2022.938608.

[3] SALVATORI S,MARAFINI I,LAUDISI F,*et al*. *Helicobacter pylori* and gastric cancer: Pathogenetic mechanisms[J]. International Journal of Molecular Sciences,2023,24(3):2895. DOI:10.3390/ijms24032895.

[4] KUMAR S,KUMAR R,KUMARI A,*et al*. Astaxanthin: A super antioxidant from microalgae and its therapeutic potential[J]. Journal of Basic Microbiology,2022,62(9):1064-1082. DOI:10.1002/jobm.202100391.

[5] KIM S H,LIM J W,KIM H. Astaxanthin inhibits mitochondrial dysfunction and interleukin-8 expression in *Helicobacter pylori*-infected gastric epithelial cells[J]. Nutrients,2018,10(9):1320. DOI:10.3390/nu10091320.

[6] KANG H,KIM H. Astaxanthin and β-carotene in *Helicobacter pylori*-induced gastric inflammation: A mini-review on action mechanisms[J]. Journal of Cancer Prevention,2017,22(2):57-61. DOI:10.15430/jcp.2017.22.2.57.

[7] HAN H,LIM J W,KIM H. Astaxanthin inhibits *Helicobacter pylori*-induced inflammatory and oncogenic responses in gastric mucosal tissues of mice[J]. Journal of Cancer Prevention,2020,25(4):244-251. DOI:10.15430/jcp.2020.25.4.244.

[8] NISHIZAWA T,SUZUKI H,NAKAGAWA I,*et al*. Early *Helicobacter pylori* eradication restores sonic hedgehog expression in the gastric mucosa of Mongolian gerbils[J]. Digestion,2009,79(2):99-108. DOI:10.1159/000209219.

[9] DE MELO F F,MARQUES H S,PINHERIRO S L R,*et al*. Influence of *Helicobacter pylori* oncoprotein CagA in gastric cancer: A critical-reflective analysis[J]. World Journal of Clinical Oncology,2022,13(11):866-879. DOI:10.5306/wjco.v13.i11.866.

[10] NAIR A,AHIRWAR A,SINGH S,*et al*. Astaxanthin as a king of ketocarotenoids: Structure, synthesis, accumulation, bioavailability and antioxidant properties[J]. Marine Drugs,2023,21(3):176. DOI:10.3390/md21030176.

[11] WANG X,WILLEN R,WADSTROM T. Astaxanthin-rich algal meal and vitamin C inhibit *Helicobacter pylori* infection in BALB/cA mice[J]. Antimicrob Agents Chemother,2000,44(9):2452-2457. DOI:10.1128/aac.44.9.2452-2457.2000.

[12] MAIUOLO J,BULOTTA R M,OPPEDISANO F,*et al*. Potential properties of natural nutraceuticals and antioxidants in age-related eye disorders[J]. Life (Basel),2022,13(1):77. DOI:10.3390/life13010077.

[13] ANDERSSON U,YANG H. HMGB1 is a critical molecule in the pathogenesis of gram-negative sepsis[J]. Journal of Intensive Medicine,2022,2(3):156-166. DOI:10.1016/j.jointm.2022.02.001.

[14] LIN H J,HSU F Y,CHEN Weiwei,*et al*. *Helicobacter pylori* activates HMGB1 expression and recruits RAGE into lipid rafts to promote inflammation in gastric epithelial cells[J]. Frontiers in Immunology,2016,7:341. DOI:10.3389/fimmu.2016.00341.

[15] ROSZCZENKO-JASIŃSKA P,WOJTY M I,JAGUSZTYN-KRYNICKA E K. Helicobacter pylori treatment in the post-antibiotics era-searching for new drug targets[J]. Appl Microbiol Biotechnol,2020,104(23):9891-9905. DOI:10.1007/s00253-020-10945-w.

(责任编辑: 陈志贤 **英文审校:** 刘源岗)

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202304010

基于模板学习的智能侨情问句生成方法

方昱龙，王泽锦，王华珍，何霆

(华侨大学 计算机科学与技术学院,福建 厦门 361021)

摘要： 为解决侨情问句甚少导致训练的侨情语料较少的问题,提出一种基于模板学习的智能侨情问句生成方法。首先,对侨情篇章文本进行包含主题、关系、对象的三元组抽取;其次,构建训练数据集,输入数据由主题和关系构成,输出数据为问句模板;随后,采用以 BERT+LSTM+Attention 为核心算法的 seq2seq 框架,实现问句模板生成;最后,对模板问句进行主题文本替换,从而得到最终的实例化问句。采用 BLEU,ROUGE-*N*,公开问答系统评测及人工评价方式对文中方法进行评价。结果表明:BLEU,ROUGE-*N*,公开问答系统评测及人工评价方式对文中方法的评测结果分别为 0.77,0.67,81%,88%,较基线模型有较大的提升。

关键词： 侨情;问句生成;模板学习;seq2seq;注意力机制

中图分类号： TP 394.4　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-5013(2023)06-0735-08

Intelligent Question Generation Method Based on Template Learning for Overseas Chinese Situation

FANG Yulong, WANG Zejin, WANG Huazhen, HE Ting

(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To address the issue of limited training for overseas Chinese language materials due to the scarcity of overseas Chinese question sentences, a template learning based intelligent overseas Chinese situation generation method is proposed. Firstly, the text of overseas Chinese situation is extracted by triplet including theme, relationship and object. Secondly, the training data set is constructed, its input data are composed of themes and relationships, and its output data is question template. Then, BERT+LSTM+Attention as the core algorithm of seq2seq framework is applied to generate question template. Finally, the template question is replaced by the theme text to get the final instantiated question. BLEU, ROUGE-*N*, public question answering system evaluation and human evaluation method were used to evaluate the proposed method. The results show that the evaluation results of the BLEU, ROUGE-*N*, public question answering system evaluation and human evaluation method are 0.77, 0.67, 81% and 88%, respectively, with significant improvements compared to the baseline model.

Keywords: overseas Chinese situation; question generation; template learning; seq2seq; attention mechanism

侨情是指一个国家或地区的华侨华人、归侨侨眷的情况。当前人们在认知侨情时,常使用百度、谷歌等大众通用问答引擎来进行侨情问答,这是一种促进信息精确获取、提升知识输入的高效率模式。通

收稿日期： 2023-04-18

通信作者： 王华珍(1975-),女,副教授,博士,主要从事人工智能、机器学习、增强现实、虚拟现实等的研究。E-mail:wanghuazhen@hqu.edu.cn。

基金项目： 国家重点研发计划项目(2018YFB1402500);教育部中外语言交流合作中心国际中文教育研究课题(21YH30B);福建省社会科学基金资助项目(FJ2021B110);中央高校基本科研业务费自主项目(TZYB-202005);华侨大学"华侨华人研究"专项经费资助一般项目(HQHRYB2019-01)

过使用侨情问答,人们无需阅读长篇章文本就可以获取到侨情信息,这样一方面满足了现代人快节奏的生活方式,另一方面也促进了人们想了解侨情的动力。然而,通用问答引擎采用的技术是通用型问答模型,而非针对某个特定领域,其垂直性能不足,不能很好地反映该特定领域的认知信息。因此,研发特定侨情问答引擎具有现实意义。而当前侨情问句甚少,用来训练的侨情语料较少,导致如今还未出现高性能的侨情问答模型。因此,利用海量的侨情篇章文本生成问答对以构建问答模型训练集,从而研究问句生成(question generation,QG)的模型,是实现高性能侨情问答的关键前提。

问句生成是人工智能领域中一项重要的研究分支,其研究内容可概括为由各种输入形式的文本中的知识、语义、语法信息等自动生成问句[1]。近年来,问句生成已成为自然语言处理领域中炙手可热的研究点之一。传统研究主要基于规则操作句法树或知识库生成问题,如基于语法的问句生成方法[2-3]、基于语义的问句生成方法[4-6]、基于模板的问句生成方法[7-10]。随着人工智能技术的发展,深度学习模型为问句生成提供了一个由数据驱动、端到端可训练的框架[11]。与传统的基于规则的问句生成方法相比,基于深度学习生成的问句在流畅性和多样性方面都有了很大的提升。在运用深度学习方法进行问题生成时,大多数研究者采用带注意力机制的 seq2seq 方法来实现[12-14]。此外,Liu 等[15]将传统模板法与 seq2seq 结合生成问句;Tuan 等[16]融入上下文关联信息对问句生成进行改进。由此可见,问句生成的主流技术是基于大规模问答对语料的深度学习模型。但在侨情知识问答领域,由于侨情知识具有多国别的地理分散性及主题多样性,因此,无法针对各个侨情主题分别获取海量问答语料对,进而无法满足大数据深度学习模型训练的需求,说明侨情问答具有小规模学习的特性。

综上可知,注意力机制、模板法、seq2seq 模型等技术虽然在问句生成领域具有重要的价值,但上述研究仍存在许多不足,如模板法生成的问句往往句式单一,难以达到提问角度的多元化和复杂化;注意力机制和 seq2seq 模型在没有大量语料支持的前提下,训练出的模型不能满足精度需求等。因此,本文将模板法与 seq2seq 模型相结合,引入基于 Transformer 的双向编码器表达(BERT)预训练模型,并嵌入注意力机制,提出一种基于模板学习的智能侨情问句生成方法。

1 研究设计

1.1 研究框架

针对侨情问句较少导致无法构建大规模问答对语料、进而无法训练高性能侨情问答模型的问题,提出一种将模板法与 seq2seq 模型相结合,引入 BERT[17]预训练模型,并嵌入注意力机制的智能侨情问句生成方法(QGTL-OCS),其研究框架,如图 1 所示。

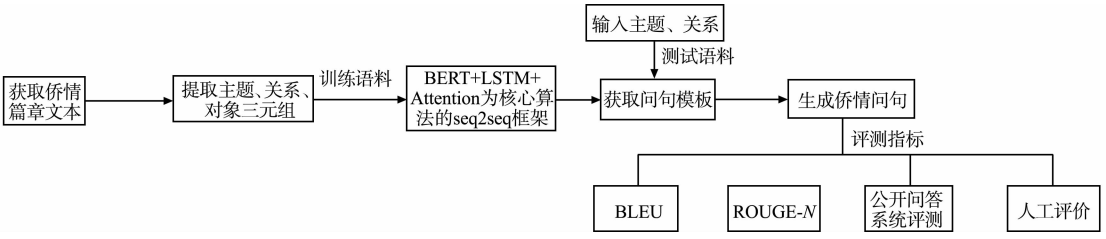


图 1 智能侨情问句生成方法研究框架

Fig. 1 Research framework of intelligent question generation methods for overseas Chinese situation

首先,对侨情篇章文本进行包含主题、关系、对象的三元组抽取;其次,构建训练数据集,输入数据由主题和关系构成,输出数据为问句模板;随后,采用以 BERT+长短时记忆网络(LSTM)+Attention 为核心算法的 seq2seq 框架实现问句模板生成;最后,对模板问句进行主题文本替换,从而得到最终的实例化问句。采用双语评估辅助工具 BLEU、ROUGE-N、公开问答系统评测和人工评价方式对实例化问句进行评测,从而衡量实例化问句的质量。

1.2 侨情问答对三元组抽取

1.2.1 *提取主题、关系和对象三元组* 为了能围绕"侨情"生成一系列紧扣主题的问答对,首先需要获取侨情相关的初始问答对 $B_{QA}=\{Q,A\}$,其中,Q 为问句集合,A 为答句集合,进而从传统的侨情问答篇章文本(问句和答句都是非结构化文本段)中提取核心信息,包括主题、关系和对象三元组,以构成问答

对三元组 $F=(P,R,O)$，其任一问答对三元组定义为 $f=(p,r,o)$。主题和关系来源于问句，对象来源于答案。问句中的主谓关系一般对应主题和关系元组，对象是答句中回应问句的核心实体信息。获得的问答对三元组代表了问答对语料的核心关键信息，去除了问答对语料中冗长的自然语言表达，实现问答对语料的信息聚合。

1.2.2　*构建问句模板*　在问答对中，关系元组代表问句的模式信息，其数量是有限的。问答对中主题、对象元组代表问句的具体信息，具有多元性、广域性的特点，其数量是无限的。因此，每种关系对应一种特定类型的问句，可相应地构建出特定类型的问句模板。结合具体的主题和对象元组，可以将问句模板实例化为问句。问句模板的生成流程包括最优问句筛选和主题抽象化。

由传统的问答对中问句所组成的语料库 Q 中特定关系 $r_i\in R=\{r_1,r_2,\cdots,r_n\}$（$n$ 为关系的总数）所对应的问句语料库 Q'（$Q'\subset Q$）数量庞大且句式多样，因此，应从 Q' 中筛选出一个最优问句 q_i。首先，筛选包含疑问词并且主语、谓语、宾语齐全的问句集 Q''；再从 Q'' 中选择谓语词是关系词 r_i，且长度最短、字数最少的问句作为最优问句 q_i。最优问句 q_i 中的主题和关系组成了问句两元组 $g_i=(p_i^{\text{best}},r_i)$。

最优问句 q_i 中包含具体的主题，即主题是问题模板实例化的数据。为了生成问句模板，进一步将 q_i 中的实例化主题数据抽象成主题概念，即用〈SUB〉标签代替实例化主题，获得问句模板 s_i。抽取最优问句并形成模板问句的过程示意图，如图 2 所示。

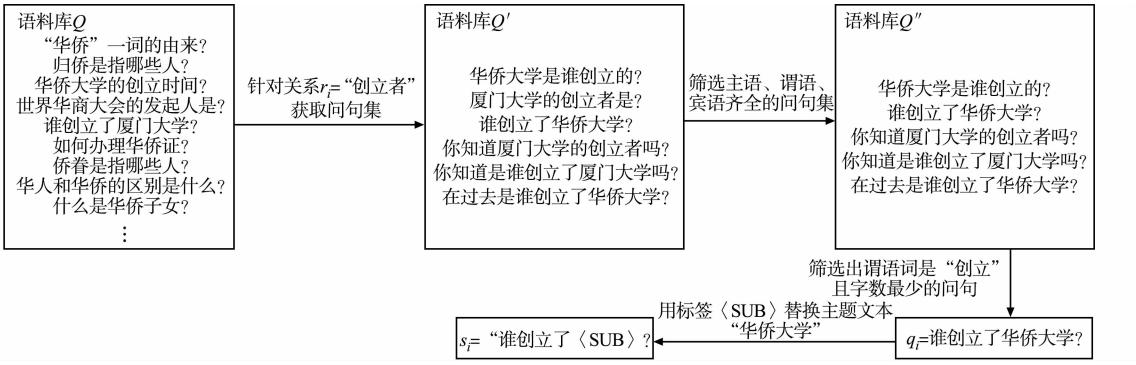


图 2　抽取最优问句并形成模板问句的过程示意图

Fig. 2　Schematic diagram of process for extracting optimal question and forming template question

首先，从语料库 Q 中针对关系“创立者”获取问句集 Q'，包含“华侨大学是谁创立的?”“厦门大学的创立者是?”“谁创立了华侨大学”“你知道厦门大学的创立者吗?”等多条问句；其次，采用疑问词词典法和依存句法分析技术筛选主语、谓语、宾语成分齐全的句子组成问句集 Q''，如问句“厦门大学的创立者是?”缺少宾语成分，无法入选 Q''；再次，从问句集 Q'' 中筛选出谓语词是“创立”且字数最少的问句，即“谁创立了华侨大学?”作为最优问句 q_i；最后，用〈SUB〉标签代替实例化主题“华侨大学”，获得问句模板“谁创立了〈SUB〉?”。每个关系 $r_i\in\{r_1,r_2,\cdots,r_n\}$ 都可以生成一个对应的问句模板，最终可以获得 n 个对应的问句模板。

1.3　问句模板生成算法设计

1.3.1　*算法思想*　从语料到模板的过程是将传统问答对语料转换为三元组，在同关系的问句中挑选最优问句，抽象化后得到问句模板。从问答对三元组到问句模板的映射过程采用深度学习模型实现。因此，训练集 $D_{\text{train}}=\{D_{\text{in}},D_{\text{out}}\}$，其中，$D_{\text{in}}=\{g_i\mid i=1,\cdots,n\}$，$D_{\text{out}}=\{s_i\mid i=1,\cdots,n\}$。采用 seq2seq 模型实现深度学习，是一个序列经过映射得到另一个序列的过程，可看作是一种 Encoder-Decoder[18] 结构。从问答对三元组到问句模板生成算法的模型框架，如图 3 所示。当输入一个主题与关系元组后，seq2seq 模型会生成一个带有 SUB 标记的问句模板。

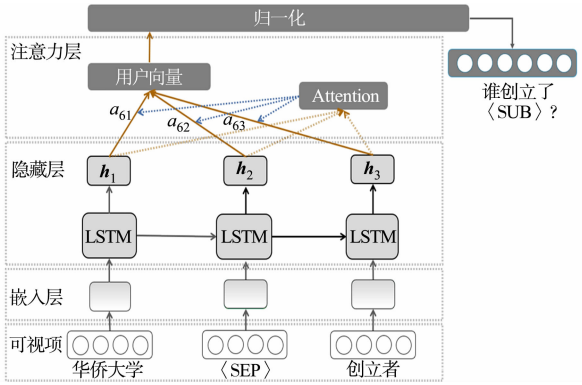


图 3　算法模型框架

Fig. 3　Framework of algorithm model

1.3.2 *算法原理* 已知输入数据 $D_{\text{in}}=\{g_i=(p_i^{\text{best}},r_i)\mid i=1,\cdots,n\}$,设计 seq2seq 模型 Φ 实现问句模板的生成,即

$$s_i=\Phi(g_i)。$$

式中:$s_i\in D_{\text{out}}=\{s_i\mid i=1,\cdots,n\}$。

采用 BERT+LSTM+Attention 实现算法模型 Φ,算法原理如下。

1) 文本的向量表示。获取 D_{in},D_{out} 和标识符〈SUB〉,〈SEP〉所组成的集合的字典大小为 $|V|$。对问句二元组 g_i 进行 BERT 编码获得嵌入矩阵 $\boldsymbol{X}_i\in\mathbf{R}^{|V|\times J}$($J$ 为嵌入词的长度)。此时,$J=3$,$\boldsymbol{X}_{i,1}$ 为 p_i^{best} 的 BERT 编码向量,$\boldsymbol{X}_{i,2}$ 为插入标识〈SEP〉的 BERT 编码向量,$\boldsymbol{X}_{i,3}$ 为 r_i 的 BERT 编码向量。在 $\boldsymbol{X}_{i,1}$ 和 $\boldsymbol{X}_{i,3}$ 之间插入标识〈SEP〉,便于在 Encoder 结构中分离主题和关系。对问句模板 s_i 进行 BERT 编码,获得嵌入矩阵 $\boldsymbol{Y}_i\in\mathbf{R}^{|V|\times K}$($K$ 为问句模板的长度),用于 Decoder 模块中。

2) 算法优化过程。根据 LSTM 算法对输入数据 $\boldsymbol{x}_t\in\boldsymbol{X}_i$ 进行运算,即

$$\boldsymbol{f}_t=\sigma(\boldsymbol{W}_{\text{f}}\cdot[\boldsymbol{h}_{t-1},\boldsymbol{x}_t]+\boldsymbol{b}_{\text{f}}),\tag{1}$$

$$\boldsymbol{i}_t=\sigma(\boldsymbol{W}_{\text{t}}\cdot[\boldsymbol{h}_{t-1},\boldsymbol{x}_t]+\boldsymbol{b}_{\text{i}}),\tag{2}$$

$$\hat{\boldsymbol{C}}_t=\tanh(\boldsymbol{W}_{\text{C}}\cdot[\boldsymbol{h}_{t-1},\boldsymbol{x}_t]+\boldsymbol{b}_{\text{C}}),\tag{3}$$

$$\boldsymbol{C}_t=\boldsymbol{f}_t\odot\boldsymbol{C}_{t-1}+\boldsymbol{i}_t\odot\hat{\boldsymbol{C}}_t,\tag{4}$$

$$\boldsymbol{o}_t=\sigma(\boldsymbol{W}_{\text{o}}\cdot[\boldsymbol{h}_{t-1},\boldsymbol{x}_t]+\boldsymbol{b}_{\text{o}}),\tag{5}$$

$$\boldsymbol{h}_t=\boldsymbol{o}_t\odot\tanh(\boldsymbol{C}_t)。\tag{6}$$

式(1)~(6)中:$\boldsymbol{h}_t$ 是在时刻 t 的隐藏状态;$\boldsymbol{f}_t$,$\boldsymbol{i}_t$,$\boldsymbol{o}_t$ 分别为 LSTM 单元的遗忘门、输入门、输出门;$\hat{\boldsymbol{C}}_t$,$\boldsymbol{C}_t$ 分别为 LSTM 单元在时刻 t 的历史状态和当前状态;$\boldsymbol{W}_{\text{f}}$,$\boldsymbol{W}_{\text{t}}$,$\boldsymbol{W}_{\text{C}}$,$\boldsymbol{W}_{\text{o}}$,$\boldsymbol{b}_{\text{f}}$,$\boldsymbol{b}_{\text{i}}$,$\boldsymbol{b}_{\text{C}}$,$\boldsymbol{b}_{\text{o}}$ 均为超参数。

为了进一步提升 seq2seq 的模型性能,使用一个带有 Attention 机制的 LSTM 算法实现 Decoder。Decoder 在时刻 t 输出的词汇概率向量 $\boldsymbol{P}(\boldsymbol{y}_t\mid\boldsymbol{H},\boldsymbol{o}_t)$ 是由 t 时刻 LSTM 的输出向量 $\boldsymbol{o}_t$(式(5))和 Encoder 的 t 时刻前的所有隐藏状态 $\boldsymbol{H}=\{\boldsymbol{h}_t\}_{t=1}^{t-1}$,可以表示为

$$\boldsymbol{P}(\boldsymbol{y}_t\mid\boldsymbol{H},\boldsymbol{o}_t)=\text{softmax}(\boldsymbol{W}_{\text{s}}\odot\tanh(\boldsymbol{W}_{\text{t}}[\boldsymbol{o}_t,\boldsymbol{a}_t]))。\tag{7}$$

式(7)中:$\boldsymbol{a}_t$ 是由 Encoder 每一时刻隐藏状态加权表示的 Attention 向量,反映了 Encoder 任意时刻隐藏层值对 Decoder 输出的影响程度;$\boldsymbol{W}_{\text{s}}$,$\boldsymbol{W}_{\text{t}}$ 为待学习的参数。

采用 align 函数计算 $\boldsymbol{o}_t$ 和 $\boldsymbol{H}$ 的相关系数 α_t,其公式分别为

$$\alpha_t=\text{align}(\boldsymbol{o}_t,\boldsymbol{H}),\tag{8}$$

$$\alpha_{t_i}=\frac{\exp(z(\boldsymbol{o}_t,\boldsymbol{h}_i))}{\sum_{j=1}^{J}\exp(z(\boldsymbol{o}_t,\boldsymbol{h}_j))}。\tag{9}$$

式(9)中:$z(\boldsymbol{o}_t,\boldsymbol{h}_i)$ 是用来计算 $\boldsymbol{o}_t$ 和任意时刻隐藏层状态 $\boldsymbol{h}_i$ 的数量积,其公式为

$$z(\boldsymbol{o}_t,\boldsymbol{h}_i)=\tanh(\boldsymbol{W}_{\text{p}}\boldsymbol{h}_i)\odot\tanh(\boldsymbol{W}_{\text{q}}\boldsymbol{o}_t)。\tag{10}$$

式(10)中:$\boldsymbol{W}_{\text{p}}$,$\boldsymbol{W}_{\text{q}}$ 为待学习的参数。

1.3.3 *算法伪代码* 基于模板学习的智能侨情问句生成方法的伪代码如下。

输入训练集 $D_{\text{train}}=\{D_{\text{in}},D_{\text{out}}\}$,其中,$D_{\text{in}}=\{g_i\mid i=1,\cdots,n\}$,$D_{\text{out}}=\{s_i\mid i=1,\cdots,n\}$,以及一条待测试的问句二元组 $g_{\text{test}}=(t_{\text{test}},r_{\text{test}})$。

输出一个问句 $q_{g_{\text{test}}}$。

1) 文本向量化表达:获取 D_{in},D_{out} 和标识符〈SUB〉,〈SEP〉所组成的集合的字典大小为 $|V|$。对问句二元组 g_i 进行 BERT 编码获得嵌入矩阵 $\boldsymbol{X}_i\in\mathbf{R}^{|V|\times J}$($J$ 为嵌入词的长度)。对问句模板 s_i 进行 BERT 编码获得嵌入矩阵 $\boldsymbol{Y}_i\in\mathbf{R}^{|V|\times K}$($K$ 为问句模板的长度);

2) 初始化 seq2seq 模型;

3) while 不满足终止条件

选择一个 batch 训练语料;

运行 seq2seq 模型优化算法;

4）保存侨情问句生成模型 Φ；

5）将待测试的问句二元组 g_{test} 输入到模型 Φ 中，生成问句模板 s_{test}；

6）将 s_{test} 中主题标记〈SUB〉用 t_{test} 进行替换，获得实例化的侨情问句 $q_{g_{\text{test}}}$。

2　实证分析

2.1　侨情篇章文本收集与处理

网络爬虫是一种按照开发者所制定的规则，自动嗅探、发现网络上存在的资源并进行获取的程序。利用网络爬虫技术，通过设定搜索条件，就能高效地获取所需内容。以“华侨”“华人”“侨胞”或“涉侨”等词汇为搜索关键字，爬取百度知道平台网页内容，获取侨情相关的问答篇章文本。最终得到初始侨情问答篇章文本规模为 17 656 条。

由于爬虫获得的问答篇章文本篇幅冗长、噪声过多，因此，对侨情问答篇章文本使用人工编辑方式进行预处理。如问答篇章文本中的问句：“一般认为，1729 年荷印巴达维亚华侨成立的明诚书院是华侨教育的开端。”经人工处理为：“华侨教育从什么时候开始?”经过预处理后，获得高质量精简问答对 17 656个。进一步通过手工筛选与编辑处理方式进行主题、关系、对象三元组的抽取，得到预处理后的 17 656个问答对三元组，结果如表 1 所示。

表 1　预处理后的问答对及其三元组

Tab. 1　Preprocessed question and answer pairs and triples

问句	答案	问答对三元组
华裔和华侨的区别是什么?	定居在国外的华人是否具有中国国籍	华裔和华侨 ‖ 区别 ‖ 定居在国外的华人是否具有中国国籍
华侨大学创办时间是什么时候?	1960 年 11 月 1 日	华侨大学 ‖ 创办时间 ‖ 1960 年 11 月 1 日
华侨大学是什么类别的大学?	公立大学	华侨大学 ‖ 类别 ‖ 公立大学
华侨大学的校训是什么?	会通中外、并育德才	华侨大学 ‖ 校训 ‖ 会通中外、并育德才

2.2　算法实验设置

对 17 656 个问答对及其对应的三元组采用依存句法分析等自然语言处理技术获得 5 438 个问句模板，从而获得 5 438 条学习语料。进一步使用 seq2seq 模型来实现模板学习。模型超参数设置参考了 Liu 等[15]的工作，具体如下：隐藏层状态维数为 500，batch 大小为 32，epoch 大小为 50，l_{r} 为 0.000 5。针对 5 438 条学习语料进行训练集和测试集的划分，分别为 3 807 条与 1 631 条。

2.3　算法实验结果与分析

采用双语评估辅助工具 BLEU、ROUGE-N 指标、公开问答系统评测及人工评价方式对 QGTL-OCS 模型模型进行性能评价。

BLEU[19]的核心在于比较生成问句文本和参考问句文本之间 n-gram 的重合程度，重合程度越高，则认为生成问句文本的质量越高，其计算式为

$$\text{BLEU} = \text{BP} \times \exp\left(\sum_{n=1}^{N} W_n \times \lg P_n\right), \tag{11}$$

$$\text{BP} = \begin{cases} 1, & l_{\text{c}} > l_{\text{r}}, \\ \exp\left(1 - \dfrac{l_{\text{r}}}{l_{\text{c}}}\right), & l_{\text{c}} \leqslant l_{\text{r}}。 \end{cases} \tag{12}$$

式(11)，(12)中：l_{c} 为生成问句文本长度；l_{r} 为参考问句的文本长度；P_n 为 n-gram 的精度；N 为 n-gram 取值；W_n 为 n-gram 的权重，$W_n = N/4$，文中 N 取 4；BP 为惩罚因子。

此外，通过 ROUGE-N[20]指标基于召回率对生成问句进行评估，其计算式为

$$\text{ROUGE-}N = \frac{\sum_{\text{word}\{\text{References}\}} \sum_{\text{gram}_N \text{word}} \text{Count}_{\text{matc}}(\text{gram}_N)}{\sum_{\text{word}\{\text{References}\}} \text{Count}(\text{gram}_N)}。 \tag{13}$$

式(13)中：$\text{Count}_{\text{matc}}(\text{gram}_N)$ 表示生成问句文本 word 和参考问句文本 References 重合的的 n-gram 个数；$\text{Count}(\text{gram}_N)$ 表示参考问句文本的 n-gram 个数。

公开问答系统评测是一种面向实践应用的评测策略,采用百度人工智能(AI)开放平台推出的通用闲聊机器人(https://ai.baidu.com/unit/v2/static/socialbot)进行效果评估。通过将测试集中的主题和关系数据送入模型生成问句,把所得问句作为通用闲聊机器人的输入,得到对应的答案。再将答案与测试集中三元组 $F=(T,R,O)$ 的对象 O 进行对比,若对象 O 被包含于所得答案中,则判定模型产生的问句为正确。最终评测得分为测试正确的结果与测试总问句数的比值。由于通用闲聊机器人可以覆盖最大会话空间,因此,公开问答系统评测方法具有全面性。但该方法依赖于公开问答系统的性能,评测稳定性较差。

人工评价是指侨情专业人员对算法最终输出的问句进行语法正确性、语义完整性和问句所属类型等进行评测的方式。该评价方法虽然会耗费极高的人力,但评判结果准确,且真实可信。

根据上述4种评测方法,得到模型评价结果,如表2所示。由表2可知:文中所提算法的BLEU指标评测结果为0.77,表明该算法产生的问句模板比较贴合相同关系中的最优问句抽象所得的模板;该算法的ROUGE-N指标评测结果为0.67,表明该算法生成的问句文本与参考的问句文本存在一定的差距,但处于可接受范围内;公开问答系统评测得到的准确率为81%,体现了该算法生成的问句的准确性;人工评价的准确率达到了88%,体现问答系统反馈的有效性。

表2 模型评测结果

Tab.2 Model evaluation results

评测方法	评测结果
BLEU	0.77
ROUGE-N	0.67
公开问答系统评测	81%
人工评价	88%

综上可知,基于模板学习的智能侨情问句生成方法继承了模板法的特性,并且在输入指向准确、针对性强的关系的前提下,可以生成易于理解、符合语言习惯、切合主题的问句。

2.4 对比实验与消融实验

通过对比实验与消融实验进一步评测QGTL-OCS模型的有效性。主要模型如下。

1)循环神经网络(RNN)[21]和BERT-RNN模型。RNN主要用于处理序列数据,具有记忆能力和对时间依赖关系的建模能力。BERT-RNN是以BERT为文本嵌入模型的RNN架构。

2)LSTM[22]和BERT-LSTM模型。LSTM是长短期记忆网络,用于解决传统RNN在长序列训练中的梯度消失和梯度爆炸问题;LSTM引入了门控机制,通过控制信息的流动和遗忘,有效地捕捉序列中的长期依赖关系。BERT-LSTM是以BERT为文本嵌入模型的LSTM模型。

3)双向长短期记忆网络(BiLSTM)[23]和BERT-BiLSTM模型。BiLSTM是一种递归神经网络的变体,用于处理序列数据。与传统的LSTM不同,BiLSTM在处理序列同时考虑了过去和未来的上下文信息,以更全面地捕捉序列的特征。BERT-BiLSTM是以BERT为文本嵌入模型的BiLSTM模型。

4)QGTL-OCS$_{DE}$消融模型。删除BERT-QGTL-OCS模型中的三元组抽取模块,直接将文本语料作为输入,并用LSTM+Attention来实现问句生成。

5)QGTL-OCS$_{DA}$消融模型。删除QGTL-OCS模型中的Attention模块,仅用三元组抽取+LSTM来实现问句生成。

6)QGTL-OCS$_{DB}$消融模型。删除QGTL-OCS模型中的BERT模块,仅用三元组抽取+LSTM+Attention来实现问句生成。

7)QGTL-OCS模型。采用三元组抽取+BERT+LSTM+Attention来实现问句生成。

不同模型的对比结果,如表3所示。由表3可知:相比单一的可用于处理序列数据的RNN,LSTM,BiLSTM模型,QGTL-OCS模型采用三元组抽取并结合BERT与Attention机制生成问句模板,进一步生成问句的这种技术路线更加有效,得到的问句质量有较大的提升。究其原因可能是三元组抽取获得了文本语料精确的主题和关系信息,BERT更准确地获得了文本的向量表达,而Attention能对不

表3 不同模型的对比结果

Tab.3 Comparison results of different models

模型	BLEU	ROUGE-N
RNN	0.40	0.24
BERT-RNN	0.44	0.27
LSTM	0.57	0.39
BERT-LSTM	0.59	0.43
BiLSTM	0.60	0.44
BERT-BiLSTM	0.62	0.47
QGTL-OCS$_{DE}$	0.59	0.45
QGTL-OCS$_{DA}$	0.60	0.44
QGTL-OCS$_{DB}$	0.58	0.40
QGTL-OCS	0.77	0.67

同的信息赋予不同的权重，使模型在生成问句模板时更加精确。对比消融模型可知：三元组抽取模块、BERT 模块与 Attention 模块都不同程度地增强了生成问句的质量。

2.5　样例分析

根据所提算法原理，输入待测试的主题和关系，则输出一个侨情问句。模型测试实例结果，如表 4 所示。由表 4 可知：文中算法可针对侨情实体信息生成语法正确、语义完整、类型丰富的侨情问句。

表 4　模型测试实例结果

Tab. 4　Example results of model testing

输入主题	输入关系	输出问句
陈嘉庚	籍贯	陈嘉庚是哪里人？
侨眷	定义	侨眷定义是什么？
李光耀	出生	李光耀出生是什么时候？
华侨联合会	创立者	谁创立了华侨联合会？
美国留学生数量最多	原因	美国留学生数量最多原因是什么？
新加坡	人口	新加坡人口有多少？

3　结论

由于侨情知识具有多国别的地理分散性及主题多样性，无法针对各个侨情主题分别获取海量问答语料对，导致当前侨情问句甚少，用来训练的侨情语料较少，还没有出现高性能的侨情问答模型。因此，提出一种基于模板学习的智能侨情问句生成方法（QGTL-OCS），弥补了传统模板法生成问句的不足。将模板法与 seq2seq 模型相结合，并嵌入注意力机制的小规模学习的技术，实现智能高效的侨情问句生成。该方法能从小规模实例训练集中学习出通用问句模板，进而实例化数量多、类型丰富的侨情问句，从而构建具有推广和应用价值的侨情问答系统。

该研究大大促进了人们对侨情的认知和把握，也有利于政府对侨情信息的管理和侨务工作的实施。研究还进一步提升了问答对三元组抽取的自动化程度，可构建更合理的生成问句评估指标。另外，QGTL-OCS 模型的输出结果为问句，这些问句可服务于侨情问答系统。后续工作将结合侨情的领域特点，开发定制化的问答系统。

参考文献：

[1] RUS V，WYSE B，PIWEK P，*et al*. The first question generation shared task evaluation challenge[C]// Proceedings of the 6th International Natural Language Generation Conference. Trim Castle：School of Computer Science and Statistics，2010：7-9. DOI：10.5555/2187681.2187740.

[2] HEILMAN M，SMITH N A. Extracting simplified statements for factual question generation[C]// Proceedings of QG 2010：The Third Workshop on Question Generation. Pittsburgh：Springer-Verlag，2010：11-20.

[3] ALI H，CHALI Y，HASAN S A. Automatic question generation from sentences[C]// In Actes de la 17e Conférence sur le Traitement Automatique des Langues Naturelles. Montréal：Université de Montréal，2010：213-218.

[4] MANNEM P，PRASAD R，JOSHI A. Question generation from paragraphs at UPenn：QGSTEC system description [C]// Proceedings of QG 2010：The Third Workshop on Question Generation. Pittsburgh：Springer-Verlag，2010：84-91.

[5] SHANTHI BALA P，AGHILA G. Q-genesis：Question generation system based on semantic relationships[C]// Proceedings of ICBDCC18. Coimbatore：Springer，2019：509-517. DOI：10.1007/978-981-13-1882-5_44.

[6] KWATE DASSI L. Semantic-based self-critical training for question generation[EB/OL]. (2021-08-26)[2023-04-10]. https：//doi.org/10.48550/arXiv.2108.12026.

[7] DIVATE M，SALGAONKAR A. Automatic question generation approaches and evaluation techniques[J]. Current Science，2017，113(9)：1683-1691. DOI：10.18520/cs/v113/i09/1683-1691.

[8] CURTO S，MENDES A C，COHEUR L. Question generation based on lexico-syntactic patterns learned from the web[J]. Dialogue and Discourse，2012，3(2)：147-175. DOI：10.5087/dad.2012.207.

[9] LINDBERG D，POPOWICH F，NESBIT J，*et al*. Generating natural language questions to support learning on-line

[C]// Proceedings of the 14th European Workshop on Natural Language Generation. Sofia: Association for Computational Linguistics, 2013: 105-114.

[10] CHALI Y, GOLESTANIRAD S. Ranking automatically generated questions using common human queries[C]// International Natural Language Generation Conference. Edinburgh: Association for Computational Linguistics, 2016: 217-221. DOI: 10.18653/v1/W16-6635.

[11] WANG Liuyin, XU Zihan, LIN Zibo, *et al*. Answer-driven deep question generation based on reinforcement learning [C]// Proceedings of the 28th International Conference on Computational Linguistics. Barcelona: Association for Computational Linguistics, 2020: 5159-5170. DOI: 10.18653/v1/2020.coling-main.452.

[12] DU Xinya, SHAO Junru, CARDIE C. Learning to ask: Neural question generation for reading comprehension[EB/OL]. (2017-04-29)[2023-03-19]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.00106.

[13] ZHOU Qingyu, YANG Nan, WEI Furu, *et al*. Neural question generation from text: A preliminary study[C]// National CCF Conference on Natural Language Processing and Chinese Computing. Cham: Springer, 2017: 662-671. DOI: 10.1007/978-3-319-73618-1_56.

[14] YUAN Xingdi, WANG Tong, GULCEHRE C, *et al*. Machine comprehension by text-to-text neural question generation[C]// Proceedings of the 2nd Workshop on Representation Learning for NLP. Vancouver: Association for Computational Linguistics, 2017: 15-25. DOI: 10.18653/v1/W17-2603.

[15] LIU Tianyu, WEI Bingzhen, CHANG Baobao, *et al*. Large-scale simple question generation by template-based seq2seq learning[C]// National CCF Conference on Natural Language Processing and Chinese Computing. Cham: Springer, 2017: 75-87. DOI: 10.1007/978-3-319-73618-1_7.

[16] TUAN L A, SHAH D, BARZILAY R. Capturing greater context for question generation[C]// Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. New York: AAAI Press, 2020: 9065-9072. DOI: 10.1609/aaai.v34i05.6440.

[17] DEVLIN J, CHANG Mingwei, LEE K, *et al*. BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding[EB/OL]. (2018-10-11)[2023-03-19]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805.

[18] CHO K, MERRIENBOER B V, GULCEHRE C, *et al*. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation[C]// Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing. Doha: ACL, 2014: 1724-1734. DOI: 10.3115/v1/D14-1179.

[19] PAPINENI K, ROUKOS S, WARD T, *et al*. BLEU: A method for automatic evaluation of machine translation [C]// Proceedings of the 40th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics. Philadelphia: ACL, 2002: 311-318. DOI: 10.3115/1073083.1073135.

[20] LIN C Y. Rouge: A package for automatic evaluation of summaries[C]// Proceedings of the Workshop on Text Summarization Branches Out (WAS 2004). Barcelona: ACL, 2004: 74-81.

[21] WERBOS P J. Generalization of backpropagation with application to a recurrent gas market mode[J]. Neural Networks, 1988, 1(4): 339-356. DOI: 10.1016/0893-6080(88)90007-X.

[22] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.

[23] SCHUSTER M, PALIWAL K K. Bidirectional recurrent neural networks[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1997, 45(11): 2673-2681. DOI: 10.1109/78.650093.

(**责任编辑**: 黄晓楠 **英文审校**: 吴逢铁)

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202305015

基于 POI 数据的社区生活圈体育服务设施空间分异

田洁玫[1,2],梁发超[1,2]

(1. 华侨大学 政治与公共管理学院,福建 泉州 362021;
2. 华侨大学 政治发展与公共治理研究中心,福建 泉州 362021)

摘要: 基于兴趣点(POI)数据与 ArcGIS 软件方法,划定福建省 5 336 个社区生活圈公里格网,构建社区生活圈体育服务设施分类指标体系,测算分析区域与市域的社区生活圈体育服务设施空间分异。结果表明:闽东北匹配协同程度总体高于闽西南,福州市和厦门市分别贡献主要力量;两大协同发展区内部呈现多组团、高值集聚、低值分散的状态;闽东北高值聚类多于低值聚类;社区生活圈体育服务设施均等化水平为闽东北>闽西南,并可按照厦门-莆田-福州、漳州-泉州-南平、龙岩-宁德-三明划分出高、中、低三个等级。

关键词: 兴趣点(POI)数据;社区生活圈;体育服务设施;空间分异;福建省

中图分类号: TU 984;F 293.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2023)06-0743-08

Spatial Differentiation of Sports Service Facilities in Community Life Circle Based on POI Data

TIAN Jiemei[1,2], LIANG Fachao[1,2]

(1. School of Political Science and Public Administration, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;
2. Research Center of Political Developmentand Public Governance, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Based on point of interest (POI) data and ArcGIS software method, 5 336 community life circle kilometer grids in Fujian Province are established, and a classification index system for sports service facilities in community life circle is constructed. The spatial differentiation of sports service facilities in community life circle between regions and cities is analyzed. The results show that the overall degree of matching collaboration in Northeast Fujian is higher than that in Southwest Fujian, the main contribution is from Fuzhou City and Xiamen City. The state of multi cluster, high value concentration, and low value dispersion appears in two major collaborative development zones. High value clustering in Northeast Fujian is more than low value clustering. The equalization level of sports service facilities in the community life circle is Northeast Fujian>Southwest Fujian, and can be divided into three levels of high, medium, and low according to Xiamen-Putian-Fuzhou, Zhangzhou-Quanzhou-Nanping and Longyan-Ningde-Sanming.

Keywords: point of interest (POI) data; community life circle; sports service facilities; spatial differentiation; Fujian Province

基本公共体育服务均等化是我国基本公共服务均等化的重要组成部分,同时也是促进全民健康的

收稿日期: 2023-05-24

通信作者: 田洁玫(1988-),女,讲师,博士,主要从事城市与区域管理的研究。E-mail:tjm6688@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42077434);国家社会科学基金资助项目(22BGL190);福建省社会科学基金资助项目(FJ2021C077);福建省厦门市社会科学调研课题(厦社科研[2023]D2)

重要保障[1]。体育服务设施是基本公共体育服务均等化的保障。针对体育服务设施配置的不均衡问题,需要充分把握空间分异特征,提出优化配置策略。

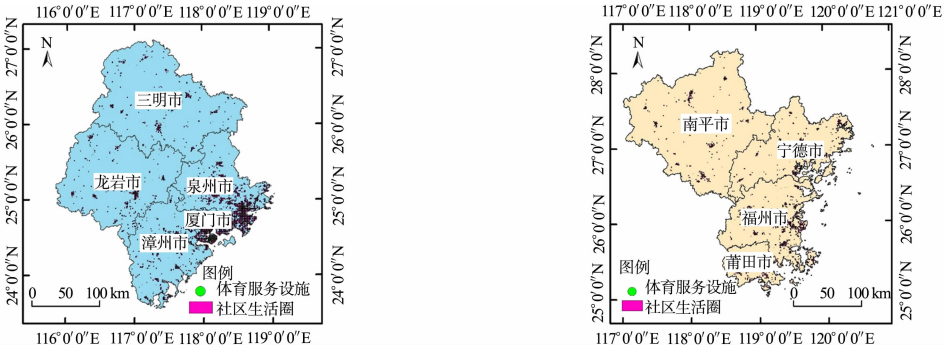
Diez Roux 等[2]研究纽约市民居住场所不同距离范围的体育设施配置情况;Limstrand 等[3]认为挪威体育服务设施距离尺度研究的效果意义重大;Neutens 等[4]基于地理信息系统方法,分析服务设施空间布局;Higgs 等[5]使用地理信息系统(GIS)技术,构建国家体育设施数据库,并测度设施供给可达性;Lynch 等[6]研究体育场馆的区域可及性和可用性。梳理体育服务设施空间尺度及与居住场所可达关系,可知未来研究需要不断贴近社区居民生活层面进行小尺度探寻。宋耀伟等[7]运用探索性空间数据分析方法,对我国各省域体育场地空间格局与空间分异特征进行分析;游茂林等[8]运用 ArcGIS 软件方法对我国城市体育空间布局、体育产业分异进行研究;董德龙等[9]利用莫兰指数对我国东中西部区域体育健身场所的空间集聚进行研究;王茜等[10]运用 ArcGIS 软件方法对上海市社区健身苑点均等化供给的空间布局优化进行研究。除了利用传统调研数据或统计数据,曾洪发等[11]还以设施兴趣点(point of interest,POI)为数据源,运用匹配度分析模型等方法研究体育公园空间格局。梳理前人在体育服务设施空间研究方面的方法与技术可知,ArcGIS 软件、各类模型指数与 POI 数据的综合应用有助于推进研究的深化。

以居住场所为基础划定社区生活圈,源自日本最早开始研究与实践的"生活圈"理论,是居民出行成本较低、日常活动频率较高、服务便利度较优的非实体空间[12]。基于社区尺度的体育服务设施供给显然更有利于满足社区居民的体育需求[13]。近年来,国内专家围绕社区生活圈的空间测度、构建与服务配置进行研究[14],并基于社区生活圈视角研究了公共服务设施的空间配置[15]。已有学者针对天津市的社区生活圈医疗服务设施[16]、武汉市的社区生活圈养老服务设施[17]等布局配置问题展开研究,但针对社区生活圈体育服务设施的相关研究则较少见。因此,本文以福建省为例,运用多类型 POI 地理空间数据与 ArcGIS 软件方法,划定社区生活圈公里格网,梳理社区生活圈体育服务设施指标体系,探究福建省区域与市域的社区生活圈体育服务设施空间分异情况。

1 数据指标

1.1 研究数据来源

福建省简称闽,位于中国东南沿海,下辖 9 市。为解决发展不平衡、不充分问题,深化山海协作,推进发达市域和欠发达市域联动发展,福建省提出构建闽东北(福州市、莆田市、宁德市、南平市)和闽西南(厦门市、泉州市、漳州市、三明市、龙岩市)两大协同发展区域。基于福建省的区域与市域两个层面展开分析,研究概况图,如图 1 所示。借助百度地图开放平台提供的地点检索服务,通过计算机编程语言按照经纬度范围获取福建省全部百度地图 POI 数据超过 70 万个。对 POI 数据进行去重、筛选、匹配和检索,最终得到各类基本公共服务设施 POI 数据共计 46 572 个,提取居住场所 POI 数据 77 904 个。



(a) 闽西南协同发展区 (b) 闽东北协同发展区

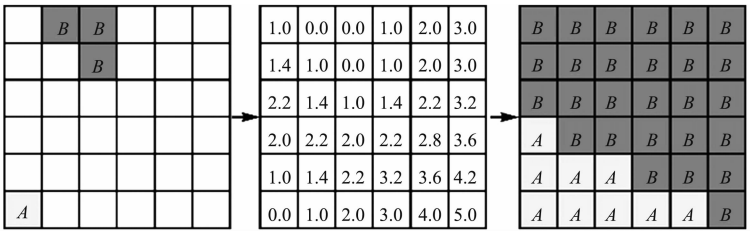
图 1 研究概况图

Fig. 1 Research overview diagram

1.2 社区生活圈划定

《社区生活圈规划技术指南》指出,社区生活圈是在适宜的日常步行范围内满足城乡居民全生命周

期工作与生活等各类需求的基本单元。参考《城市居住区规划设计标准》，15 min 生活圈居住区步行距离标准为 800～1 000 m，考虑到社区生活圈中老幼等特殊群体的适用性，研究采取上限 1 000 m 作为划定社区生活圈的标准距离。基于欧氏区域分配原理图（图 2），以居住场所 POI 数据为源对象，按照标准距离的格网单元分配划定得到社区生活圈公里格网，能够保证仅对有居住场所的空间进行社区生活圈研究，同时保证后续研究结果可以在同等尺度层面互相比较分析。将 77 904 个居住场所 POI 数据按照 1 000 m 的最大距离分配到1 000 m×1 000 m 网格尺度的格网单元，最终得到福建省全部 5 336 个社区生活圈格网。



（a）目标网格　　（b）欧式几何距离　　（c）欧式域分配

图 2　欧氏区域分配原理图

Fig. 2　Schematic diagram of Euclidean region allocation

1.3　设施指标体系构建

社区生活圈体育服务设施指标体系构建既要满足基本公共服务需求，又要符合社区生活圈建设要求。依据《“十四五”公共服务规划》将保障目标与短板弱项对接，明确需求类目；《社区生活圈规划技术指南》在此基础上，从服务要素配置层面提出应对的基本公共服务设施配置要求。综合对比梳理后，通过要素名称（大、中、小型多功能运动场地、室外综合健身场地、体育馆（场）或全民健身中心、小型体育公园、健身步道、体育中心、健身广场等）筛选体育服务设施 POI 数据，同时运用 ArcGIS 软件将 5 336 个社区生活圈公里格网与筛选得到的体育服务设施进行空间连接，最终得到社区生活圈体育服务设施 POI 数据共计 6 136 个。

2　研究方法

2.1　匹配协同指数方法

不一致指数是反映两组指标数据不一致程度的统计指标，在人口、经济、产业的空间集聚水平或空间匹配程度研究中运用广泛[18]。依据较为成熟的不一致指数公式可以推导得出体育服务设施与社区生活圈的空间匹配协同指数（C_i），该指数可以反映福建省体育服务设施与社区生活圈的空间匹配程度与均衡状况。C_i 的计算公式为

$$C_i=\frac{S_i/S_q}{U_i/U_q}。\tag{1}$$

式（1）中：S_i 为区域 i 体育服务设施分布总量；S_q 为研究区 q 体育服务设施的分布总量；U_i 为区域 i 的社区生活圈分布总量；U_q 为研究区 q 的社区生活圈分布总量。$C_i<1$，表明区域 i 属于社区生活圈体育服务设施匹配协同滞后型；$C_i>1$，表明区域 i 属于社区生活圈体育服务设施匹配协同超前型；$C_i=1$，表明区域 i 属于一致型[19]。

2.2　探索性空间数据分析方法

探索性空间数据分析方法包括全局与局部两种。全局空间自相关分析主要使用 2 种指数方法。1）莫兰指数（Moran′s I，I_M），取值范围[−1，1]；$I_M>0$ 聚类趋势，空间正相关性；$I_M<0$ 离散趋势，空间负相关性；$I_M=0$，呈现空间随机性。2）Getis-Ord General G 指数法，包括观测值 General G 指数（G_O）和期望值 General G 指数（G_E），取值范围[0，1]；当 $Z>0$ 且 $G_O>G_E$，数据在高值区域聚类；当 $Z<0$ 且 $G_O<G_E$，数据在低值区域聚类。局部空间自相关分析主要使用局部莫兰指数（Anselin Local Moran′s I），结果呈现 4 种形式：1）高值聚类（H-H 型）；2）低值被高值围绕的异常值（L-H 型）；3）低值聚类（L-L 型）；4）高值被低值围绕的异常值（H-L 型）。

2.3　变异系数测算方法

变异系数测算方法目前在基本公共服务设施均等化研究领域被广泛使用，变异系数值越大，说明服务设施均等化差异越大；变异系数值越小，说明服务设施均等化程度越高[20]。对福建省社区生活圈体育服务设施变异系数（CV）进行测算，基于对 CV 值的分析可以进一步判断社区生活圈体育服务设施的

均等化空间差异情况。CV计算公式为

$$CV=\sqrt{\sum_{m=1}^{n}\frac{[(y_j-u)^2/n]}{u}}。\tag{2}$$

式(2)中:y_j为某区域第j个社区生活圈体育服务设施的分布总量,$j=1,2,3,\cdots,n$;u为某区域所有社区生活圈体育服务设施的平均值。

3 研究结果与分析

3.1 社区生活圈体育服务设施匹配协同指数分析

3.1.1 福建省区域层面的匹配协同指数分析 根据式(1)测算得到福建省两大协同发展区的社区生活圈体育服务设施匹配协同指数,如表1所示。闽东北体育服务设施与其社区生活圈的匹配协同指数大于1,说明闽东北整体的体育服务设施配置比例超出社区生活圈,表明体育服务设施配置对于社区生活圈具有更好的承托与服务能力;反之,闽西南的匹配协同指数小于1,说明闽西南整体的社区生活圈相对滞后于体育服务设施配置,此时可能存在社区生活圈缺少体育服务设施均等配置的情况。由此可知,福建省闽东北的体育服务设施空间匹配协同程度略高于闽西南。

表1 福建省两大协同发展区的社区生活圈体育服务设施匹配协同指数

Tab.1 Matching collaboration indexes of sports service facilities in community life circle in two major collaborative development zones in Fujian Province

区域名称	体育服务设施总量	社区生活圈总量	匹配协同指数
闽东北	2 405	1 944	1.08
闽西南	3 731	3 392	0.96

3.1.2 福建省市域层面的匹配协同指数分析 福建省各市的社区生活圈体育服务设施匹配协同指数,如表2所示。闽东北可以划分为两种空间匹配协同类型:1)福州市属于体育服务设施匹配协同超前型,其体育服务设施总量占整个闽东北区域的63.04%,其社区生活圈占闽东北区域的48.15%,社区生活圈中体育设施具有更多的发展空间;2)莆田市、宁德市和南平市的匹配协同指数均小于1,属于滞后型,其中,南平市的社区生活圈占比最高,体育服务设施占比最低,其匹配协同指数仅为0.58,呈现明显的匹配不足态势。

表2 福建省各市的社区生活圈体育服务设施匹配协同指数

Tab.2 Matching collaboration indexes of sports service facilities in community life circle of various cities in Fujian Province

市域名称	体育服务设施总量	社区生活圈总量	匹配协同指数	市域名称	体育服务设施总量	社区生活圈总量	匹配协同指数
福州市	1 516	936	1.31	漳州市	516	628	0.75
莆田市	370	330	0.91	泉州市	1 291	1 401	0.84
宁德市	265	321	0.67	三明市	232	382	0.55
南平市	254	357	0.58	龙岩市	267	363	0.67
厦门市	1 425	618	2.10				

闽西南可以划分为两种空间匹配协同类型:1)厦门市属于体育服务设施匹配协同超前型,其匹配协同指数1.6倍高于闽东北指数最高值福州市的1.31,3.8倍高于闽西南指数最低值三明市的0.55,社区生活圈中体育设施供给优势巨大;2)泉州市、漳州市、龙岩市和三明市属于体育服务设施匹配协同滞后型,与厦门市的突出表现相比,此四城市均呈现弱势,且福建9市的指数最低值也在其中,存在更多社区生活圈与体育服务设施的不匹配情况,具有明显的区域配置比例失调情况。

3.2 社区生活圈体育服务设施全局空间自相关分析

3.2.1 福建省区域层面的全局空间自相关分析 运用ArcGIS软件得到福建省两大协同发展区的社区生活圈体育服务设施全局自相关指标,如表3所示。两种指数方法的P值均小于0.01,同时Z值均大于2.58,统计学意义上的置信度达到99%,因此,拒绝零假设,通过显著性检验。

由表3可知:1)所有区域的$I_M>0$,表明存在显著的空间正相关特征,社区生活圈体育服务设施配

置整体均呈现聚集态势，这种聚集有利于提升体育设施对社区居民的服务水平与效率；2）所有区域的 $G_O > G_E$，说明福建省社区生活圈体育服务设施的总体呈现高值区域聚类，且设施配置总体高水平汇集；3）根据 I_M 排序，有闽东北＞闽西南，两大协同发展区各自的社区生活圈体育服务设施配置集聚程度高于福建省整体情况，且闽东北的设施整体聚集效果最明显，区分两大协同发展区的做法更有利于社区生活圈体育服务设施供给效果呈现；4）对比 G_O 与 G_E 数值差异，两大协同发展区各自的高值区域聚类情况均突出明显，社区生活圈体育服务设施配置在协同区内部也各自形成热点。

3.2.2　*福建省市域层面的全局空间自相关分析*　福建省各市的社区生活圈体育服务设施全局自相关指标，如表 4 所示。两种指数方法的置信度均达到 99%，通过统计学意义上的显著性检验。考察社区生活圈体育服务设施的空间布局可知，福建省基本呈现由两大协同发展区的中心城市向周边辐射并逐步弱化的分布态势，且每个市均存在一个或多个较为核心的高值聚类空间，并从核心高值聚类空间向周边伴随着体育服务设施配置水平减弱而逐步扩散分布，形成多组团、高集聚状态。

表 3　福建省两大协同发展区的社区生活圈体育服务设施全局自相关指标

Tab. 3　Global autocorrelation indicators of sports service facilities in community life circle in two major collaborative development zones in Fujian Province

区域名称	I_M	G_E	G_O
闽东北	0.35	0.001 0	0.006 8
闽西南	0.33	0.000 6	0.004 1

表 4　福建省各市的社区生活圈体育服务设施全局自相关指标

Tab. 4　Global autocorrelation indicators of sports service facilities in community life circle of various cities in Fujian Province

市域名称	I_M	G_E	G_O	市域名称	I_M	G_E	G_O
福州市	0.27	0.002 4	0.013 1	漳州市	0.34	0.002 6	0.020 6
莆田市	0.18	0.006 0	0.033 3	泉州市	0.21	0.001 6	0.009 5
宁德市	0.20	0.004 7	0.035 5	三明市	0.08	0.004 2	0.017 8
南平市	0.15	0.004 5	0.035 1	龙岩市	0.22	0.004 4	0.035 2
厦门市	0.46	0.004 7	0.015 7				

对比分析 I_M 可知：1）$I_M > 0$，说明福建省 9 市的社区生活圈体育服务设施配置均呈现聚集态势；2）各市的社区生活圈体育服务设施的 I_M 相差较大，数值在 0.08～0.46 之间；3）对各市的 I_M 进行排序，有三明市＜南平市＜莆田市＜宁德市＜泉州市＜龙岩市＜福州市＜漳州市＜厦门市；4）闽西南 4 市中，厦门市和漳州市的 I_M 均高于闽西南的整体水平，而闽东北 5 市中，福州市的 I_M 较高，可以明确这 3 个城市的社区生活圈体育服务设施空间聚类显著性相较于其他市更为明显。

对比分析 G_O，G_E 可知：1）各市的 $G_O > G_E$，表明福建省 9 市的社区生活圈体育服务设施总体呈现高值聚类；2）闽东北的社区生活圈体育服务设施热点区域主要位于福州市，并零星分布于莆田市；闽西南则以厦门市为主要热点区域，其他零星分布于泉州市与漳州市。

3.3　社区生活圈体育服务设施局部空间自相关分析

3.3.1　*福建省区域层面的局部空间自相关分析*　运用 ArcGIS 软件的局部空间自相关方法可以得到 H-H 型和 L-L 型两种聚类结果共计 1 666 个，H-L 型和 L-H 型两种异常结果共计 982 个。从总体上看，聚类类型多于异常类型，但福建省和闽西南的高值聚类均少于低值聚类，仅闽东北的社区生活圈体育服务设施高值聚类多于低值聚类，这与全局空间自相关的空间分布状态判断相一致（图 3）。

综合对比可知：1）福建省两大协同发展区的 H-L 型高值被低值围绕异常均较少，这种自身体育服务设施配置水平高，但周边水平较低的高值极值化社区生活圈总体较为少见；2）L-H型低值被高值围绕异常在各个区域则普遍较多，这种自身体育服务设施配置水平低，但周边配置水平普遍较高的社区生活圈可以在未来有针对性地进行补充完善；3）闽东北主要表现为 H-H 型＞L-L 型，说明闽东北的相邻社区生活圈之间体育服务设施配置水平均较高的情况多于均较低的情况；4）闽西南总体表现为 H-H 型＜L-L 型，虽然相邻社区生活圈之间呈现出低值聚集多于高值聚集的情况，但是闽西南 H-H 型多于闽东北 H-H 型，说明闽西南的社区生活圈体育服务设施配置具有高值聚类的局部优势。

3.3.2　*福建省市域层面的局部空间自相关分析*　福建省各市的社区生活圈体育服务设施聚类异常图，

如图4所示。由图4(a)可知:1) 闽西南的H-H型高值聚类中,泉州市占比最多,达到50.63%,厦门市次之为27.59%,漳州市为11.73%,闽南金三角组团的社区生活圈体育服务设施配置水平优越;2) H-L型高值被低值围绕异常类型在闽西南5市中均较少,其中,厦门市仅有4个,泉州市则占整个福建省的37.50%,具备向周边正向辐射带动的积极作用;3) L-H型低值被高值围绕异常中,泉州市占比达到52.11%,厦门市为25.74%,这种配置水平"凹陷"情况应积极填补完善;4) L-L型低值聚类中,漳州市占比35.61%,泉州市次之为35.31%,作为闽西南的三大核心城市之二,其社区生活圈体育服务设施配置短板需要引起重视。

由图4(b)可知:1) H-H型高值聚类中,福州市占比最多,达到72.73%,说明闽东北核心引领城市的社区生活圈体育服务设施服务能力强劲;2) H-L型高值被低值围绕异常类型在闽东北4市中均较少,说明体育服务设施极端高值不均衡情况较少;3) L-H型低值被高值围绕异常各市中,福州市占比高达70.22%,这种极端低值异常可能存在于周边体育服务设施普遍富集的情况;4) L-L型低值聚类中,福州市占比41.54%,南平市为32.82%,低值聚集说明存在社区生活圈体育服务设施配置短板,应对照所在区域尽快查缺补漏。

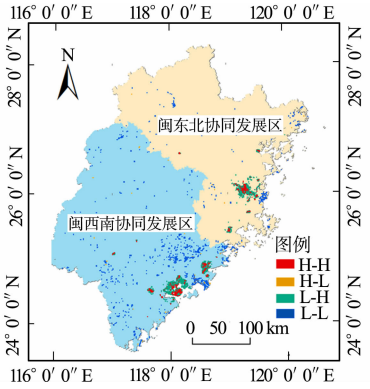
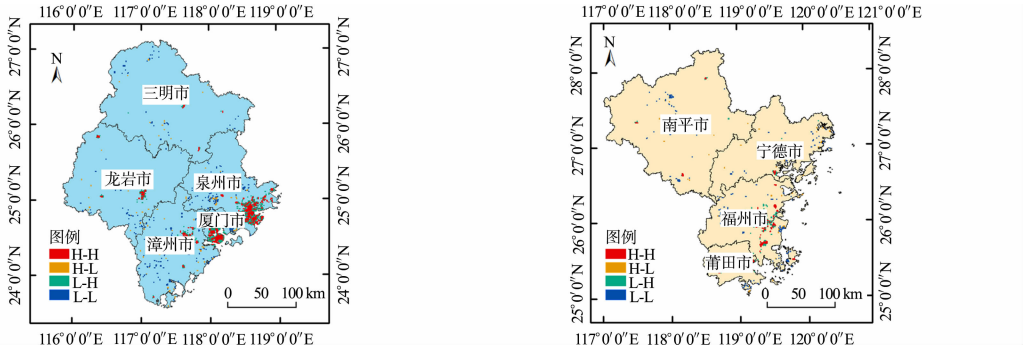


图3 福建省的社区生活圈体育服务设施聚类异常图

Fig. 3 Cluster anomaly map of sports service facilities in community life circle in Fujian Province



(a) 闽西南协同发展区 (b) 闽东北协同发展区

图4 福建省各市的社区生活圈体育服务设施聚类异常图

Fig. 4 Cluster anomaly maps of sports service facilities in community life circle of various cities in Fujian Province

3.4 社区生活圈体育服务设施变异系数测算分析

根据式(2)测算得到福建省社区生活圈体育服务设施配置变异系数指标,如表5所示。社区生活圈体育服务设施变异系数指标越大,说明社区生活体育服务设施均等化程度越低。按变异系数由小到大,均等化水平由高到低排序可知:闽东北>闽西南,说明闽东北内部的社区生活圈体育服务设施配置均等化水平最高,闽西南则低于福建省整体均等化水平。

表5 福建省社区生活圈体育服务设施配置变异系数指标

Tab. 5 CV indicators of sports service facilities in community life circle in Fujian Province

区域、市域名称	标准差	平均值	CV	区域、市域名称	标准差	平均值	CV
闽东北	2.66	1.24	2.15	厦门市	3.88	2.31	1.68
闽西南	2.46	1.10	2.24	漳州市	1.83	0.82	2.22
福州市	3.18	1.62	1.97	泉州市	2.06	0.92	2.24
莆田市	2.19	1.12	1.95	三明市	1.55	0.61	2.55
宁德市	2.08	0.83	2.52	龙岩市	1.81	0.74	2.46
南平市	1.66	0.71	2.34				

综合对比福建省各市的社区生活圈体育服务设施变异系数可知:闽东北的变异系数较大值在宁德市和南平市,较小值在莆田市和福州市;闽西南的变异系数较大值在三明市和龙岩市,较小值在厦门市、

漳州市和泉州市；福建省社区生活圈体育服务设施的均等化水平高低大致可按东部沿海和西部山区一分为二。

在 ArcGIS 软件中采用 Natural Breaks(Jenks)自然断裂法，依据变异系数值将 9 个市的社区生活圈体育服务设施配置均等化水平划为高、中、低 3 个等级，如图 5 所示。图 5 中：社区生活圈体育服务设施均等化配置的高等级市包括厦门市、莆田市和福州市，三者皆为福建省中东部沿海城市，平均变异系数为 1.87；社区生活圈体育服务设施均等化配置的中等级市包括漳州市、泉州市、南平市，分布于福建省西北部与东南部，平均变异系数为 2.27；社区生活圈体育服设施均等化配置的低等级市包括龙岩市、宁德市和三明市，主要位于福建省西南角和东北角两端，平均变异系数为 2.51。

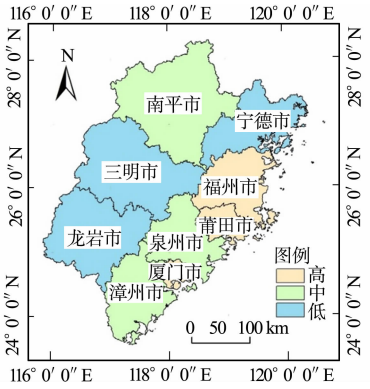


图 5　福建省各市的社区生活圈体育服务设施变异系数指标图

Fig. 5　CV indicators map of sports service facilities in community life circle of various cities in Fujian Province

4　结论

基于多类型 POI 数据研究福建省社区生活圈体育服务设施的空间分异，其本质在于从数据技术层面考察均等化配置的公平可及问题。社区生活圈是非实体的空间单元，其 15 min 步行范围有利于满足可及要求。但每个生活圈内的体育服务设施配置情况是否公平，则可以尝试通过数据技术手段比较验证[21]。因此，依据居住场所的 POI 地理空间大数据，划定小尺度的社区生活圈公里格网，保证可及性和可比性；在此基础上，构建社区生活圈体育服务设施指标体系，以统一规范保证公平性。通过 ArcGIS 软件模型分析，从区域和市域两个层面进行公平可及的空间分异比较，得到以下 2 点主要结论。

1）福建省区域层面社区生活圈体育服务设施匹配协同程度表现为闽东北＞闽西南，匹配协同指数最高值与最低值均在闽西南；两大协同发展区内部的集聚程度均高于福建省整体的集聚程度，且闽东北聚集效果更明显。总体上看，聚类类型多于异常类型，且闽东北的高值聚类多于低值聚类。社区生活圈体育服务设施的均等化水平表现为闽东北＞闽西南。闽东北内部空间差异较小，表现为社区生活圈体育服务设施配置优势不突出但劣势也不明显，需要抓住补短板来提振弱项；闽西南则相对空间差异较大，表现为设施配置的绝对优势集中但劣势较为突出，需要抓住促均等来拉平差距。

2）福建省市域层面社区生活圈体育服务设施呈现显著性、正相关性、聚类性的空间特性，形成多组团、高值集聚、低值分散态势。社区生活圈体育服务设施均等化配置按照厦门-莆田-福州、漳州-泉州-南平、龙岩-宁德-三明分成高、中、低 3 个等级。应积极把握福州和莆田的相对优势，以福莆高等级组团态势形成合力，强化滨海城市的空间溢出效应，向北部宁德和西部南平传导社区生活圈体育服务设施均等化配置经验；同时将厦门与泉州作为滨海增长极点，增强厦漳泉体育圈建设，以便更好地辐射作用于处于西部山区的龙岩与三明，形成联动效应，促进共建共享。

运用 POI 数据开展体育服务设施空间研究，具备数据体量大、时效强的优势特征[22]，但仍存在数据缺失的可能性，未来可考虑扩充数据来源，降低数据缺失风险；随着政策持续发布，相关概念内涵与外延将会丰富拓展[23]，社区生活圈体育服务设施指标体系未来也可进一步完善；基于 ArcGIS 分配模型的社区生活圈划定采取格网形式，在满足 15 min 步行范围要求的基础上便于横向比较分析[24]，但可能缺少社区生活圈构建指标的其他约束，未来可基于技术方法进一步考虑改进。

参考文献：

[1]　朱焱，于文谦. 我国公共体育资源配置水平差异与空间演进特征分析[J]. 武汉体育学院学报，2019，53(5)：28-35. DOI：10.15930/j.cnki.wtxb.2019.05.005.

[2]　DIEZ ROUX A V，EVENSON K R，MCGINN A P，*et al*. Availability of recreational resources and physical activity in adults[J]. American Journal of Public Health，2007，97(3)：493-499. DOI：10.2105/ajph.2006.087734.

[3]　LIMSTRAND T，REHRER N J. Young people′s use of sports facilities：A norwegian study on physical activity[J].

Scandinavian Journal of Public Health,2008,36(5):452-459. DOI:10.1177/1403494807088455.

[4] NEUTENS T,SCHWANEN T,WITLOX F,*et al*. Evaluating the temporal organization of public service provision using space-time accessibility analysis[J]. Urban Geography,2010,31(8):1039-1064. DOI:10.2747/0272-3638.31.8.1039.

[5] HIGGS G,LANGFORD M,NORMAN P. Accessibility to sport facilities in wales: A GIS-based analysis of aocio-economic variations in provision[J]. Geoforum,2015,62:105-120. DOI:10.1016/j.geoforum.2015.04.010.

[6] LYNCH H,MOORE A,EDWARDS C,*et al*. Advancing play participation for all: The challenge of addressing play diversity and inclusion in community parks and playgrounds[J]. The British Journal of Occupational Therapy,2020,83(2):107-117. DOI:10.1177/0308022619881936.

[7] 宋耀伟,张嫣,雷蕾,等.我国各省域城乡体育场地均等化水平的空间格局分析[J].成都体育学院学报,2019,45(1):65-72. DOI:10.15942/j.jcsu.2019.01.010.

[8] 游茂林,杨剑.基于GIS的我国城市中心城区青少年体育空间布局的问题与对策:以武汉市江岸区为例[J].西安体育学院学报,2020,37(1):44-50. DOI:10.16063/j.cnki.issn1001-747x.2020.01.007.

[9] 董德龙,于永平,梁红梅.全民健身与绿色生态协调发展的时空特征与空间集聚[J].成都体育学院学报,2019,45(4):47-53. DOI:10.15942/j.jcsu.2019.04.008.

[10] 王茜,何川秀玥,翁敏.社区健身苑点均等化供给测度及空间布局优化[J].天津体育学院学报,2018,33(2):170-176. DOI:10.13297/j.cnki.issn1005-0000.2018.02.011.

[11] 曾洪发,左逸帆.我国体育公园空间分布格局及其影响因素[J].武汉体育学院学报,2022,56(4):49-57. DOI:10.15930/j.cnki.wtxb.2022.04.008.

[12] 肖作鹏,柴彦威,张艳.国内外生活圈规划研究与规划实践进展述评[J].规划师,2014,30(10):89-95.

[13] 叶静怡,吴正旺.国际户外体育空间研究进展及趋势[J].华侨大学学报(自然科学版),2022,43(6):743-752. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202207022.

[14] 周岱霖,黄慧明.供需关联视角下的社区生活圈服务设施配置研究:以广州为例[J].城市发展研究,2019,26(12):1-5,18.

[15] 张夏坤,裴新蕊,李俊蓉,等.生活圈视角下天津市中心城区公共服务设施配置的空间差异[J].干旱区资源与环境,2021,35(3):43-51. DOI:10.13448/j.cnki.jalre.2021.067.

[16] 倪丽丽,郄茗,周志宇.基于老年可达性的社区卫生服务设施适老化布局研究:以天津市中心城区为例[J].城市问题,2022(8):42-51. DOI:10.13239/j.bjsshkxy.cswt.220805.

[17] 魏伟,潘雪晴,谢波.基于"城市人"理论的社区养老设施规划配置研究:以武汉市主城区为例[J].现代城市研究,2022(1):30-37. DOI:10.3969/j.issn.1009-6000.2022.01.005.

[18] 闫东升,杨槿,高金龙.长江三角洲人口与经济的非均衡格局及其影响因素研究[J].地理科学,2018,38(3):376-384. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2018.03.007.

[19] 许淑娜.河南省人口-经济空间分布不均衡性分析[J].地域研究与开发,2014,33(5):155-159. DOI:10.3969/j.issn.1003-2363.2014.05.029.

[20] 田洁玫.基于POI数据的社区生活圈基本公共服务设施均等化测度分析[J].测绘地理信息,2023,48(1):152-156. DOI:10.14188/j.2095-6045.2022666.

[21] 蔡兴飞,王浩,李莉,等.社区生活圈评估应用实践、挑战及展望[J].规划师,2023,39(5):47-52.

[22] 游茂林,任涛.我国体育公园空间分布特征、影响因素及发展策略研究:基于POI大数据的分析[J].体育学研究,2023,37(4):42-54. DOI:10.15877/j.cnki.nsic.20230607.001.

[23] 塔娜,柴彦威.理解社区生活时间:基于时空间行为的视角[J].人文地理,2023,38(3):29-36. DOI:10.13959/j.issn.1003-2398.2023.03.004.

[24] 陈晓东,余劲松弟.地址模型下的城市网格划分方法[J].华侨大学学报(自然科学版),2022,43(3):392-402. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202101015.

(**责任编辑**:黄晓楠 **英文审校**:方德平)

DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.202305020

采用空间依赖的 MTDPN 扶梯危险行为的姿态估计

林志鸿[1]，郑力新[1]，曾远跃[2]

（1. 华侨大学 工学院，福建 泉州 362021；
2. 福建省特种设备检验研究院 泉州分院，福建 泉州 362021）

摘要： 为实现自动扶梯场景下姿态估计的快速响应和准确估计，提出一种基于空间依赖的多任务解耦姿态网络（MTDPN）。首先，对姿态估计网络进行定位和分类任务分支的解耦，使每个任务分支能够自适应地调整特征关注方向；其次，提出一种空间依赖卷积，通道联合层和空间联合层作为中间层，以逐点卷积和逐深度卷积取代传统卷积，从而降低 MTDPN 的参数量和浮点计算量，使每张图片的检测时间仅为 73.3 ms。在扶梯危险行为关键点数据集和 COCO 关键点数据集上对 MTDPN 进行评估。结果表明：与原始网络 YOLO-POSE 相比，MTDPN 在扶梯危险行为关键点数据集和 COCO 关键点数据集上的准确性指标均有所提高。

关键词： 自动扶梯；人体姿态估计；危险行为检测；任务解耦；空间依赖

中图分类号： TP 391.41；TU 229　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1000-5013(2023)06-0751-08

Pose Estimation of Escalator Dangerous Behavior Using Spatially-Aware Multi-Task Decoupled Pose Network

LIN Zhihong[1], ZHENG Lixin[1], ZENG Yuanyue[2]

(1. College of Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;
2. Quanzhou Branch, Fujian Special Equipment Inspection and Research Institute, Quanzhou 362021, China)

Abstract: In order to realize fast response and accurate estimation of pose estimation in escalator scenarios, a multi-task decoupled pose network (MTDPN) based on spatially-aware is proposed. Firstly, the localization and classification task branches are decoupled for the pose estimation network so that each task branch can adaptively adjust the feature focus direction. Secondly, a spatially-aware convolution is proposed, with the channel joint layer and the spatial joint layer as the intermediate layer, replacing traditional convolution with point wise convolution and depth wise convolution, thus reducing the number of parameters and the computation of floating point of the MTDPN, so that the detection time of each image is only 73.3 ms. The MTDPN is evaluated on the escalator dangerous behavior key point dataset and the COCO key point dataset. The results show that the MTDPN has improved accuracy metrics on both the escalator dangerous behavior key point dataset and COCO key point dataset compared to the original network YOLOPOSE.

Keywords: escalator; human pose estimation; dangerous behavior detection; task decoupling; spatially-aware

自动扶梯[1]已经成为商场、医院、车站等公共场所常见的载客设备。但自动扶梯在实际应用中，由于乘坐人员使用不当和应急救援（自救）不及时，容易造成乘坐人员的坠落、碰撞、挤压等事故[2-4]，对人

收稿日期： 2023-05-29

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

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

体伤害大、危险性高[5]。因此,准确及时的危险行为检测是保障自动扶梯使用的重要前提。

危险行为检测以人体骨架序列[6-7]为研究对象,先提取图像中乘客的姿态信息,再将所提取的骨架序列蕴含的人类行为进行分类,直观地让模型理解目标的行为,进而分析乘客行为的安全性。因此,稳定准确的人体姿态估计(HPE)对自动扶梯的危险行为检测具有重要意义。

早期的HPE仅针对单人目标,主要是基于传统的计算机视觉算法。汤一平等[8]针对少数画面帧中人体对象漏检问题导致的姿态估计丢失,提出基于混合高斯背景差分的方向梯度直方图(HOG)特征匹配算法,该算法能够对粘连的人体对象进行有效分割,从而降低人体对象误检率。但是HOG特征匹配算法对姿态和尺度形变较为敏感,对人物尺度变化较大的自动扶梯监控图像的检测精度不佳。

随着卷积神经网络(CNN)的发展,HPE逐渐扩展到多人姿态估计领域。多人姿态估计根据骨骼关键点生成方式的不同分为自底向上方法和自上而下方法。自底向上方法提取画面中所有可能的骨骼关键点,生成高斯分布概率图[9-12],设计复杂的匹配策略组合人体姿态。自上而下方法[13-18]不同于自底向上方法一次性生成所有关键点,是由人类检测器和姿态估计器构成的两阶段方法。两种检测器将HPE划分为两个阶段:1)人类检测器在监控画面中检测可能存在的乘客类别和定位区域;2)姿态估计器中,对检测到的乘客所在区域使用单人姿态估计生成人体骨骼关键点。相比自底向上方法,自上而下方法具有较强的多人场景建模能力,能够有效避免不同人类骨骼之间的错误连接。不同于CNN模型,一些研究人员把Transformer[19]结构用于关键点位置的预测。TokenPose[20]从大量数据中学习关键点之间的统计约束关系,编码为关键点token。集联Transformer的姿态识别(PRTR)[21]利用自注意力层在Transformer中进行标记化表示,以捕获关键点的关节空间和外观建模。虽然基于Transformer的架构能够在空间和时间域中编码身体关节之间的远程依赖关系,但它们通常需要大规模的训练数据集来实现与卷积网络相比较的性能,这让Transformer的训练和推理变得昂贵。

自动扶梯场景中的实时姿态估计对模型的精度和速度具有一定的要求。YOLOPOSE[22]具有恒定的检测时间和精度优势,能满足扶梯场景中人体姿态估计对准确性和实时性的要求。结合应用环境和模型部署条件,以YOLOPOSE为基线模型,对自上而下方法进行研究。然而,自上而下方法受到2个限制:1)人类估计器依赖人类检测器的检测结果,未识别、错误识别和定位错误的人类乘客都会导致人类姿态估计的失效;2)2种检测器网络的参数量和计算量过于庞大,增加了训练量和推理成本,也增加了危险行为的检测耗时。这2个限制会影响自上而下方法的准确性和计算效率。基于此,本文提出一种基于空间依赖的多任务解耦姿态网络(multi-task decoupled pose network,MTDPN)。

1 基于空间依赖的多任务解耦姿态网络

耦合的人类检测器[23-24]导致不同任务的特征关注方向之间的混淆[25-26],因此,提出多任务解耦姿态网络(MTDPN),允许每个任务独立地学习和调整自己的偏置参数。

1.1 多任务解耦姿态网络

为了让具有不同特征关注方向的分类和定位任务实现各自最佳性能,提出一种多任务解耦姿态网络(MTDPN),将自上而下方法的检测网络解耦成多条不共享支路,以满足不同的视觉任务的特征关注需求。将包含分类、定位和姿态估计3种视觉任务信息的特征金字塔称为多任务耦合特征,在解耦头架构中,多任务耦合特征被拆解为3条不共享的任务分支,表示为

$$\boldsymbol{T}\in\boldsymbol{R}^{H\times W\times C\times(\mathrm{cls},\mathrm{box},\mathrm{conf},N_{\mathrm{kpt}})}, \tag{1}$$

$$\boldsymbol{P}_i=[\boldsymbol{C}_x,\boldsymbol{C}_y,\mathrm{anc_w},\mathrm{anc_h},\mathrm{conf},\mathrm{cls},\boldsymbol{K}_x^1,\boldsymbol{K}_y^1,\boldsymbol{K}_{\mathrm{conf}}^1,\cdots,\boldsymbol{K}_x^n,\boldsymbol{K}_y^n,\boldsymbol{K}_{\mathrm{conf}}^n],\quad i\in[1,\cdots,n]。 \tag{2}$$

式(1),(2)中:$\boldsymbol{T}$为多任务耦合特征;$\boldsymbol{R}$为张量;H,W,C分别为特征图的高、宽和通道数;cls为分类任务;box为定位任务;N_{kpt}为姿态估计任务;$\boldsymbol{P}_i$为特征金字塔中第i层特征,其对应的特征图尺度$F_i\in(H_i,W_i)$;$(\boldsymbol{C}_x,\boldsymbol{C}_y)$为定位任务回归框的中心点坐标;$(\mathrm{anc_w},\mathrm{anc_h})$为当前尺度特征层预设的锚框尺寸;(conf,cls)为当前检测对象的置信度及类别分数;$(\boldsymbol{K}_x^1,\boldsymbol{K}_y^1,\boldsymbol{K}_{\mathrm{conf}}^1,\cdots,\boldsymbol{K}_x^n,\boldsymbol{K}_y^n,\boldsymbol{K}_{\mathrm{conf}}^n)$为一组完整的17个人体骨骼关节坐标信息。

全卷积耦合网络和多任务解耦姿态网络架构,如图1所示。图1中:(a)是原始的全卷积耦合网络,

通过全卷积层输出所有任务的预测结果；(b)是多任务解耦姿态网络；$P_3 \sim P_6$ 分别表示第 3～6 层的特征层；$N_{类别}$ 为网络预测的类别数量，通常为 1；$N_{关键点}$ 为网络估计的人体关键点的数量，通常为 17。

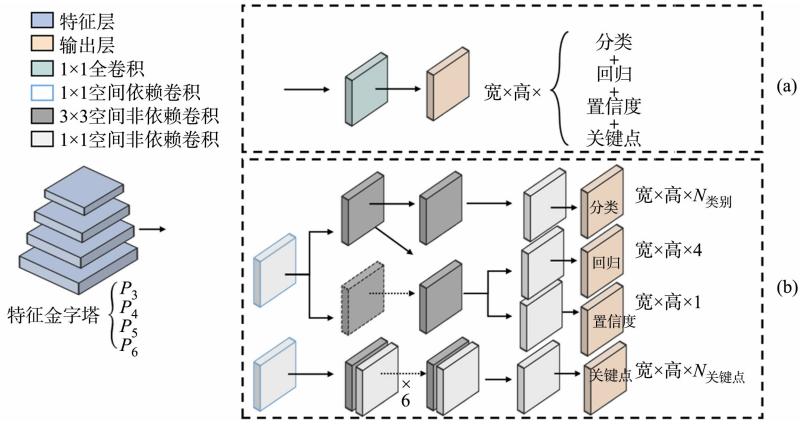


图 1　全卷积耦合网络与多任务解耦姿态网络的架构图

Fig. 1　Architecture of full convolutional coupling network and multi-task decoupled pose network

首先，多任务耦合特征以 1 个卷积核大小为 1×1 的空间非依赖卷积层作为根茎层；然后，连接 2 层卷积核大小为 3×3 的空间非依赖卷积和 1 层卷积核大小为 1×1 的空间非依赖卷积，以构建分类支路；最后，输出全部类别的预测结果。相似地，定位支路遵从分类支路的构建原则，定位支路复用分类支路中第 1 层空间非依赖卷积的特征信息，以减少参数冗余，再构建 1 层卷积核大小为 3×3 的空间非依赖卷积适配定位任务的特征关注方向。由于置信度分支与定位支路的交并比(IoU)判别原则有非常深的联系，因此，置信度分支与定位共享特征信息。

采用 2 层平行卷积核大小为 1×1 的空间非依赖卷积分别输出回归结果和置信度结果。姿态估计分支首先由一层卷积核大小为 1×1 的空间依赖卷积激活支路关注的特征信息；然后，使用重复堆叠 6 次卷积核大小为 3×3 的空间非依赖卷积和卷积核大小为 1×1 的空间非依赖卷积构成卷积块；最后，输出 57 个人体关键点结果。为了防止不同任务特征关注方向的相互影响，人类检测器分支应该不与姿态回归器分支共享任何参数。

1.2　空间依赖卷积

自上而下方法的两种检测器模型和多任务解耦姿态网络的多分支结构引入了庞大的计算成本和复杂的特征表达，增加了自动扶梯场景中自上而下方法应用的优化难度和推理成本。为了降低自上而下方法的庞大计算量与学习难度，提出一种空间依赖卷积(spatially-aware convolution，SA Conv)，结构如图 2 所示。

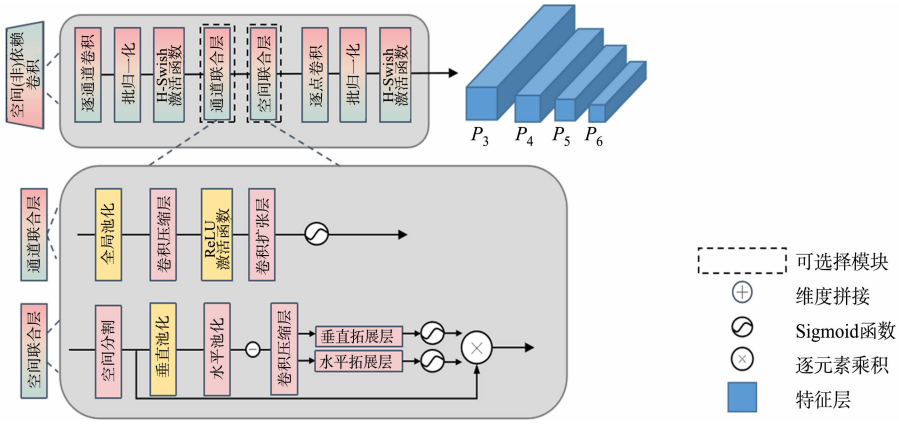


图 2　空间依赖卷积的结构

Fig. 2　Structure of spatially-aware convolution

空间依赖卷积通过逐深度卷积和逐点卷积减少计算消耗。通道联合层对通道特征进行重新缩放，缩小通道，将网络的决策能力集中在最具有区分性和重要性的特征上。放大通道可以增强有用特征的

表示,减少冗余和噪声特征的影响,提高网络的表达能力和泛化性能。空间联合层考虑特征图中垂直和水平特征之间的关系,学习两个不同方向上的权重,并通过分裂和聚合重新对特征加权,提高重要特征的表示能力,以此来弥补轻量化带来的精度损失。两层设计的注意力层进一步降低优化难度。

通道联合层的作用是将每个通道的多任务耦合特征信息编码为单个描述符,以实现通道级别的特征融合。通道联合层中通过全局平均池化(GAP)将每个通道的多任务耦合特征 $\boldsymbol{T}$ 信息编码为单个描述符。它的输出是一个维度为 $\boldsymbol{Z}\in\boldsymbol{R}^{1\times1\times C}$ 的张量。压缩层按照缩放率 r 缩小卷积核挤压多任务耦合特征 $\boldsymbol{T}$ 获得 $\boldsymbol{W}_1$,扩张层重新以缩放率 $\frac{1}{r}$ 放大卷积核获得 $\boldsymbol{W}_2$,σ 激活两层缩放层的前馈网络执行通道联合,激活后的特征以元素乘积方式与初始多任务耦合特征联合得到 $\boldsymbol{F}_1$,其表达为

$$\boldsymbol{F}_1=\boldsymbol{T}\otimes\sigma(\boldsymbol{W}_2(R_{\mathrm{L}}(\boldsymbol{W}_1(\boldsymbol{Z}))。\tag{3}$$

式(3)中:$\boldsymbol{W}_1\in\boldsymbol{R}^{(C,C/r)}$ 为压缩层卷积变换函数;$\boldsymbol{W}_2\in\boldsymbol{R}^{(C/r,C)}$ 为扩张层卷积变换函数;R_{L} 为激活函数 ReLU;σ 为 Sigmoid 激活函数;$\otimes$ 为逐元素乘积符号。

空间联合层作用是通过沿水平和垂直方向的自适应池化进行操作,保持特征图上每组关键点之间的空间关系,并利用这些关系构建方向感知特征图。

$$\boldsymbol{F}_2=\boldsymbol{W}_3\left(\left[\sum_{0\leqslant i\leqslant W}\frac{1}{W}\sum_{0\leqslant i\leqslant H}\boldsymbol{F}_1(H,i),\sum_{0\leqslant i\leqslant H}\frac{1}{H}\sum_{0\leqslant j\leqslant W}\boldsymbol{F}_1(W,j)\right]\right),\tag{4}$$

$$\boldsymbol{F}_3=\partial(\boldsymbol{F}_2)。\tag{5}$$

式(4),(5)中:$[\cdot,\cdot]$ 为特征图沿空间方向上的连接操作;$\boldsymbol{F}_2\in\boldsymbol{R}^{W\times H\times C\times N_{\mathrm{kpt}}}$ 是在垂直与水平两个方向上编码姿态关键点的中间特征图;∂ 为非线性激活函数;$\boldsymbol{W}_3\in\boldsymbol{R}^{(C,C/r)}$。

然后,$\boldsymbol{F}_3$ 沿垂直和水平方向拆分为 $\boldsymbol{F}_3^{\mathrm{h}}\in\boldsymbol{R}^{C/r\times H\times N_{\mathrm{kpt}}(y)}$ 和 $\boldsymbol{F}_3^{\mathrm{w}}\in\boldsymbol{R}^{C/r\times W\times N_{\mathrm{kpt}}(x)}$ 两个独立的张量。2个卷积核大小为 1×1 的空间非依赖卷积变换 W_{h} 和 W_{w},用于将 $\boldsymbol{F}_3^{\mathrm{h}}$ 和 $\boldsymbol{F}_3^{\mathrm{w}}$ 分别变换为与输入 $\boldsymbol{T}$ 具有相同通道数的张量,产生为

$$\boldsymbol{g}^{\mathrm{h}}=\sigma(W_{\mathrm{h}}(\boldsymbol{F}_3^{\mathrm{h}})),\tag{6}$$

$$\boldsymbol{g}^{\mathrm{w}}=\sigma(W_{\mathrm{w}}(\boldsymbol{F}_3^{\mathrm{w}})),\tag{7}$$

$$\boldsymbol{T}^{*}=\boldsymbol{F}_1\otimes\boldsymbol{g}^{\mathrm{h}}\otimes\boldsymbol{g}^{\mathrm{w}}。\tag{8}$$

式(6)~(8)中:$\boldsymbol{g}^{\mathrm{w}}$ 和 $\boldsymbol{g}^{\mathrm{h}}$ 分别为垂直因子和水平因子;$\boldsymbol{T}^{*}$ 为空间依赖卷积输出结果。

最后,通道联合层特征 $\boldsymbol{F}_1$ 与垂直因子 $\boldsymbol{g}^{\mathrm{w}}$ 和水平因子 $\boldsymbol{g}^{\mathrm{h}}$ 共同以元素乘积方法作用,获得空间依赖卷积的结果 $\boldsymbol{T}^{*}$。

2 实验结果与分析

2.1 实验环境

训练时预热阶段的迭代设置为3个轮次,预热期间动量设置为0.8,偏置大小初始化为0.1;初始学习率设置为0.01,优化器使用随机梯度下降法,初始动量为0.937,交并比的阈值设置为0.2,锚框阈值为4.0。数据增强方面,考虑到小目标的识别,通过马赛克法拼接并进行随机随选、翻转、平移等几何操作,提高模型的泛化能力,混合增强使用概率为0.1,图像复制使用概率为0.1。实验在2台 NVIDIA GeForce GTX TITAN Xp GPU 上进行,使用 Python3.8 和 Pytorch 深度学习框架。

2.2 实验数据集

实验数据集来自两个商场的监控视频,通过监控视频及手持相机采集了不同角度下行人在扶梯场景的危险行为,共6 553张图片。通过 Labelme 软件标注每个人类乘客的目标检测标签框,扶梯危险行为关键点数据集部分场景,如图3所示。为每个人类乘客标注17个人体关键点信息,包括鼻子、左眼、右眼、左耳、右耳、左肩、右肩、左肘、右肘、左手腕、右手腕、左臀、右臀、左膝、右膝、左脚踝、右脚踝。每个关键点的坐标信息包括(x,y,v),其中,(x,y)表示该关键点归一化后所在的图像坐标;v 表示该关键点在图像中的可见度,$v\in\{1,2,3\}$,其中,1为完全可见,2为遮挡可见,3为完全不可见。为方便模型训练,扶梯危险行为关键点的可见度皆为1。

数据集划分训练集、验证集和测试集,其中,5 306张乘客状态图片为训练集,657张乘客状态图片

为测试集，590 张乘客状态图片为验证集。图像像素大小为 1 080 px×1 080 px，训练时将图片尺寸统一缩放为 640 px×640 px。

(a) 携带宠物　(b) 携带包裹　(c) 翻越扶手　(d) 跌倒　(e) 逆行

图 3　扶梯危险行为关键点数据集部分场景

Fig. 3　Partial scenarios from escalator dangerous behavior key point dataset

2.3　评价指标

准确率 η_{P} 是指在识别出来的图片中正确识别样本的数量与样本总数量的比例，即

$$\eta_{\mathrm{P}}=\frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP}+\mathrm{FP}}。\tag{9}$$

式(9)中：TP 和 FP 分别为正确和错误识别样本数量。

召回率 η_{R} 是测试集中正确识别的样本被分类器正确识别为正的比例，即

$$\eta_{\mathrm{R}}=\frac{\mathrm{TP}}{\mathrm{TP}+\mathrm{FN}}。\tag{10}$$

式(10)中：FN 为未正确识别的样本数量。

计算每张图片中真实关键点与预测的关键点之间的相似度 S_{OK}，通过所有图片的 S_{OK} 计算平均准确率 η_{AP}，即

$$\eta_{\mathrm{AP}}=\sum\nolimits_{p}\sigma(S_{\mathrm{OK}}>T)\Big/\sum\nolimits_{p}1。\tag{11}$$

式(11)中：p 为当前组的预测值；σ 为标准差；T 为阈值，表示识别的困难程度。

所有关键点类别的 η_{AP} 的平均值(η_{mAP})表示模型在所有关键点类别上的平均性能，其表达式为

$$\eta_{\mathrm{mAP}}=\sum\nolimits_{i=1}^{k}\eta_{\mathrm{AP},i}/k。\tag{12}$$

$\eta_{\mathrm{mAP0.5}}$ 表示 IoU 阈值设置为 0.5 的 η_{mAP}，$\eta_{\mathrm{mAP0.95}}$ 表示 IoU 阈值从 0.50 到 0.95 的 η_{mAP}。η_{mAP} 得分越高，表明模型在测试集上的拟合程度越高。因此，选取 η_{P}，η_{R}，η_{AP}，$\eta_{\mathrm{mAP0.5}}$ 和 $\eta_{\mathrm{mAP0.95}}$ 对姿态估计模型的有效性进行评估。

2.4　空间依赖卷积消融实验

对不同轻量化方法搭建的多任务解耦姿态网络的计算成本进行对比，如表 1 所示。表 1 中：参数量(N_{P})和浮点计算量(N_{F})为网络大小指标，这 2 个指标越小，表明网络占用资源越小；η_{P}，η_{R} 和 $\eta_{\mathrm{mAP0.5}}$ 为精度指标，这 3 个指标越高，说明网络的准确性能越好；每种网络完成 590 张图片推理的时间(t)和每张图片检测时间(t_{p})为速度指标，这 2 个指标越小，说明网络推理图片的速度越快。将图像统一缩放至像素为 640 px×640 px，在相同 GPU 设备上推理相同的 590 张扶梯危险行为关键点测试集。通过上述指标评估空间依赖卷积的轻量化效果、优化性能，以及在自动扶梯中对危险行为检测的及时性。

表 1　不同轻量化方法搭建的多任务解耦姿态网络的计算成本

Tab. 1　Calculation cost of multi-task decoupled pose networks built by different lightweight methods

网络	$N_{\mathrm{P}}/\times10^{6}$	$N_{\mathrm{F}}/\times10^{9}$	$\eta_{\mathrm{P}}/\%$	$\eta_{\mathrm{R}}/\%$	$\eta_{\mathrm{mAP0.5}}/\%$	t/s	t_{p}/ms
全卷积	26.2	61.5	98.7	98.7	99.5	63.5	103.4
空间依赖卷积	16.4	24.9	98.6	98.7	99.4	43.2	73.3
ShuffleNet V2[27]	12.3	18.6	98.2	97.8	97.9	52.0	89.5
EfficientNetV2[28]	29.2	31.2	94.3	94.3	97.9	54.3	92.0

由表 1 可知：全卷积使用最复杂的卷积计算提取图像特征，其精度指标 $\eta_{\mathrm{mAP0.5}}$ 为 99.5%，体现了最好的准确性能，对应产生最大的参数量 26.2×10^{6} 和浮点计算量 61.5×10^{9}，庞大的计算量增加了推理

成本。使用全卷积的计算成本最高,原因可能是在大尺度特征图,如在 $F_0 \in (80,80)$ 分辨率下进行特征提取时,会产生指数式增长的计算成本。空间依赖卷积使用逐点卷积和逐深度卷积替代全卷积,在大分辨率的每个像素点上进行分组卷积,参数量减少了48%,浮点计算量减少了59%,完成590张图片的推理时间最少,仅为43.2 s,每张照片检测时间仅为73.3 ms。同时,空间依赖卷积增强了不同任务的表达能力和学习效果,相比全卷积,其 $\eta_{\text{mAP0.5}}$ 仅降低0.1%。

将目前最新的轻量化网络 ShuffleNet V2[27] 与 EfficientNetV2[28] 进行对比。ShuffleNet V2 将参数量和浮点计算量分别压缩至 12.3×10^6,18.6×10^9,获得了最小的参数量;但由于设计通道重排,每张图片的检测时间相比空间依赖卷积增加了16.2 ms,其 $\eta_{\text{mAP0.5}}$ 较空间依赖卷积降低了1.5%。相比空间依赖卷积,EfficientNetV2 的参数量和浮点计算量分别增加了 12.8×10^6,6.3×10^9,每张图片的检测时间增加了18.7 ms,并且由于缺少对不同任务的强化表达,其 $\eta_{\text{mAP0.5}}$ 相对空间依赖卷积降低了1.5%。

综合表2结果可知,空间依赖卷积在精度指标和速度指标的平衡中取得最优。

2.5 多任务解耦姿态网络消融实验

在扶梯危险行为关键点数据集上评估多任务解耦姿态网络的性能并进行比较,结果如表2所示。由表2可知:在扶梯危险行为关键点数据集中,相比 YOLOPOSE[22] 网络,MTDPN 的 $\eta_{\text{mAP0.5}}$ 和 $\eta_{\text{mAP0.95}}$ 分别提升了0.3%和4.4%,η_{P} 和 η_{R} 分别提高了1.6%和1.8%,这得益于任务解耦架构对姿态估计方法作用;YOLOv7-POSE[29] 具有更高的准确率,这是因为自上而下方法是个复杂的多任务网络,受到目标检测精度的影响,而 YOLOv7-POSE 为不同目标动态分配最佳候选对象,提高了其在目标检测上的准确性,并采用了更加复杂的卷积提取模块,其参数量较 MTDPN 增加了 9.9×10^6,因此,YOLOv7-POSE 网络姿态估计的准确率略高。

表2 多任务解耦姿态网络在扶梯危险行为关键点数据集上的性能比较

Tab.2 Performance comparison of multi-task decoupled pose network on escalator dangerous behavior key point dataset

网络	$N_{\text{P}}/\times10^6$	$N_{\text{F}}/\times10^9$	$\eta_{\text{P}}/\%$	$\eta_{\text{R}}/\%$	$\eta_{\text{mAP0.5}}/\%$	$\eta_{\text{mAP0.95}}/\%$
YOLOPOSE	15.1	20.5	97.2	96.9	99.1	77.2
YOLOv7-POSE	26.3	20.7	99.6	99.5	99.6	87.3
MTDPN	16.4	24.9	98.6	98.7	99.4	81.6

为了进一步评估多任务解耦姿态网络的有效性,将 MTDPN 与自上而下和自底向上的姿态估计网络在 COCO 关键点数据集上中进行性能比较,结果如表3所示。表3中:输入尺寸为输入网络的分辨率指标,输入尺寸越大,网络的准确率越高;N_{P} 和每秒 10^9 次的乘法-加法运算次数(N_{GMACS})为网络大小指标,这两个指标越小,网络占用资源越小;η_{AP},IoU 阈值为0.5的 η_{AP}($\eta_{\text{AP0.5}}$),IoU 阈值为0.75的 η_{AP}($\eta_{\text{AP0.75}}$),检测物体面积大于像素 96 px×96 px 的 η_{AP}($\eta_{\text{AP}^{\text{L}}}$),IoU 阈值范围在[0.5,1.0]的最大召回率的平均值(η_{AR})为精度指标。

表3 多任务解耦姿态网络在COCO关键点数据集上的性能比较

Tab.3 Performance comparison of multi-task decoupled pose network on COCO key point dataset

网络	输入尺寸/px×px	$N_{\text{P}}/\times10^6$	N_{GMACS}	$\eta_{\text{AP}}/\%$	$\eta_{\text{AP0.5}}/\%$	$\eta_{\text{AP0.75}}/\%$	$\eta_{\text{AP}^{\text{L}}}/\%$	$\eta_{\text{AR}}/\%$
Hourglass[30]	512×512	277.8	413.8	56.6	81.8	61.8	67.0	—
PifPaf[31]	—	—	—	66.7	—	—	72.9	—
OpenPose[9]	—	—	—	61.8	84.9	67.5	68.2	66.5
EfficientHRNet-H_0[11]	512×512	23.3	268.8	67.1	—	—	—	—
HigherHRNet[10]	640×640	63.8	308.6	68.4	88.2	75.1	74.2	—
DEKR[32]	512×512	29.6	90.8	67.3	87.9	74.1	76.1	72.4
YOLOPOSE[22]	960×960	15.1	22.8	51.7	80.5	56.1	49.2	56.0
YOLOv7-POSE[29]	640×640	26.3	20.7	58.7	84.5	63.7	72.1	65.3
MTDPN	640×640	16.4	24.9	57.9	83.3	63.6	51.9	66.7

自底向上的方法 Hourglass、HigherHRNet、PifPaf 为每个关键点独立估计高斯分布热图,再通过关节配对方法一次性组合所有的关键点,具有实时性快的优点;自上而下的方法 EfficientHRNet-H_0 通过保持高分辨组合不同特征尺度中的关键点,实现精确的人体姿态估计;DEKR 通过解开每个关键点

独立回归，在检测物体面积大于像素 96 px×96 px 的指标中取得了最佳。

由表 2，3 可知：MTDPN 通过调整不同视觉任务的特征关注方向，有效提升了姿态估计方法的准确率；空间依赖卷积能够增强不同任务的表达能力和学习效果，对乘客特征的关注具有正向作用。

3　结束语

为实现自动扶梯场景下姿态估计方法的快速响应和准确估计，提出一种基于空间依赖的多任务解耦姿态网络，将检测网络解耦为分类、定位两个不共享的任务分支，以满足不同视觉任务的特征关注方向差异的需求，从而实现分类和定位任务各自的最优性能，提高人类检测器的精确度。通过设计空间依赖卷积和空间非依赖卷积网络搭建 MTDPN 的多分支结构，相比全卷积网络，其参数量减少了 48%，浮点计算量减少了 59%，每张图片检测时间仅为 73.3 ms。相比原始网络 YOLOPOSE，MTDPN 在扶梯危险行为关键点数据集的精度指标 $\eta_{\mathrm{mAP0.5}}$ 和 $\eta_{\mathrm{mAP0.95}}$ 分别提高了 0.3% 和 4.4%，在 COCO 关键点数据集的 η_{AP} 提高了 6.2%。推理速度和精度的提升保证了基于自动扶梯危险行为检测的准确估计和速度优势。然而，多分支检测架构会增加模型训练的时间消耗，因此，下一阶段的研究目标是在训练阶段并行融合检测和估计分支，以缩短多分支姿态估计网络的时间训练成本。

参考文献：

[1] 舒文华，欧阳惠卿. 自动扶梯乘客行为智能感知和自主安全管理技术标准探讨[J]. 质量与标准化，2021，354(10)：39-43. DOI：10.3969/j.issn.2095-0918.2021.10.015.

[2] 蒋儒浩. 自动扶梯综合性能检测仪研制[D]. 合肥：合肥工业大学，2019.

[3] 付春平. 自动扶梯几起安全事故的共性分析与探讨[J]. 科技与创新，2023，217(1)：82-84，89. DOI：10.15913/j.cnki.kjycx.2023.01.023.

[4] 张栓柱. 基于事故树的商场电梯事故分析[J]. 消防界(电子版)，2022，8(21)：21-23. DOI：10.16859/j.cnki.cn12-9204/tu.2022.21.040.

[5] 解云蕾. 自动扶梯安全探讨[J]. 中国科技信息，2022(3)：64-66. DOI：10.3969/j.issn.1001-8972.2022.03.021.

[6] CHEN Yucheng，TIAN Yingli，HE Mingyi. Monocular human pose estimation：A survey of deep learning-based methods[J]. Computer Vision and Image Understanding，2020，192：102897. DOI：10.1016/j.cviu.2019.102897.

[7] ZHENG Ce，WU Wenhan，CHEN Chen，*et al*. Deep learning-based human pose estimation：A survey[EB/OL]. (2023-07-03)[2023-09-19]. https：//doi.org/10.48550/arXiv.2012.13392.

[8] 汤一平，杨冠宝，胡飞虎，等. 基于计算机视觉的自动扶梯节能系统[J]. 计算机测量与控制，2011，19(7)：1659-1661，1677. DOI：10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2011.07.052.

[9] CAO Zhe，HIDALGO G，SIMON T，*et al*. OpenPose：Realtime multi-person 2D pose estimation using part affinity fields[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence，2021，43(1)：172-186. DOI：10.1109/TPAMI.2019.2929257.

[10] CHENG B，XIAO Bin，WANG Jingdong，*et al*. HigherHRNet：Scale-aware representation learning for bottom-up human pose estimation[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle：IEEE Press，2020：5386-5395. DOI：10.48550/arXiv.1908.10357.

[11] NEFF C，SHETH A，FURGURSON S，*et al*. Efficienthrnet：Efficient scaling for lightweight high-resolution multi-person pose estimation[EB/OL]. (2020-12-30)[2023-09-19]. https：//doi.org/10.48550/arXiv.2007.08090.

[12] 田联房，吴啟超，杜启亮，等. 基于人体骨架序列的手扶电梯乘客异常行为识别[J]. 华南理工大学学报(自然科学版)，2019，47(4)：10-19. DOI：10.12141/j.issn.1000-565X.180186.

[13] FANG Haoshu，XIE Shuqin，LU Cewu，*et al*. RMPE：Regional multi-person pose estimation[C]// Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Venice：IEEE Press，2017：2334-2343. DOI：10.48550/arXiv.1612.00137.

[14] SUN Ke，XIAO Bin，LIU Dong，*et al*. Deep high-resolution representation learning for human pose estimation[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Long Beach：IEEE Press，2019：5693-5703. DOI：10.1109/CVPR.2019.00584.

[15] CHEN Yilun，WANG Zhicheng，PENG Yuxiang，*et al*. Cascaded pyramid network for multi-person pose estimation

[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Salt Lake City: IEEE Press, 2018: 7103-7112. DOI: 10.48550/arXiv.1711.07319.

[16] ASGARY S, MOTAZEDIAN H R, PARIROKH M, *et al*. KAPAO: A MEMS-based natural guide star adaptive optics system[J]. Iranian Endodontic Journal, 2013, 8(1): 1-5. DOI: 10.1117/12.2005959.

[17] PAPANDREOU G, ZHU T, KANAZAWA N, *et al*. Towards accurate multi-person pose estimation in the wild [C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu: IEEE Press, 2017: 3711-3719. DOI: 10.1109/CVPR.2017.395.

[18] 杨学存,李杰华,陈丽媛,等. 基于人体骨架的扶梯乘客异常行为识别方法[J/OL]. 安全与环境学报, 2022: 1-9 [2023-06-25]. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2022.2404.

[19] VASWANI A, SHAZEER N, PARMAR N, *et al*. Attention is all you need[J]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2017, 30: 6000-6010. DOI: 10.48550/arXiv.1706.03762.

[20] LI Yanjie, ZHANG Shoukui, WANG Zhicheng, *et al*. TokenPose: Learning keypoint tokens for human pose estimation[C]// Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Montreal: IEEE Press, 2021: 11313-11322. DOI: 10.48550/arXiv.2104.03516.

[21] LI Ke, WANG Shijie, ZHANG Xiang, *et al*. Pose recognition with cascade transformers[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Nashville: IEEE Press, 2021: 1944-1953. DOI: 10.1109/CVPR46437.2021.00198.

[22] MAJI D, NAGORI S, MATHEW M, *et al*. YOLO-Pose: Enhancing YOLO for multi person pose estimation using object keypoint similarity loss[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. New Orleans: IEEE Press, 2022: 2637-2646. DOI: 10.48550/arXiv.2204.06806.

[23] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: An incremental improvement[C]// Computer Vision and Pattern Recognition. Berlin: Springer, 2018, 1804: 1-6. DOI: 10.48550/arXiv.1804.02767.

[24] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection[EB/OL]. (2020-04-23)[2023-09-08]. https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.10934.

[25] WU Yue, CHEN Yinpeng, YUAN Lu, *et al*. Rethinking classification and localization for object detection[EB/OL]. (2020-04-02)[2023-09-07]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.06493.

[26] SONG Guanglu, LIU Yu, WANG Xiaogang. Revisiting the sibling head in object detector[C]// Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Seattle: IEEE Press, 2020: 11563-11572. DOI: 10.1109/CVPR42600.2020.01158.

[27] MA Ningning, ZHANG Xiangyu, ZHENG Haitao. ShuffleNet V2: Practical guidelines for efficient CNN architecture design[C]// European Conference on Computer Vision. [S.l.]: Springer, 2018: 122-138. DOI: 10.1007/978-3-030-01264-9_8.

[28] TAN Mingxing, LE Q V. EfficientNetV2: Smaller models and faster training[C]// International Conference on Machine Learning. [S.l.]: PMLR, 2021: 10096-10106. DOI: 10.48550/arXiv.2104.00298.

[29] WANG C Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H Y M. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors[C]// IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Vancouver: IEEE Press, 2023: 7464-7475. DOI: 10.1109/CVPR52729.2023.00721.

[30] NEWELL A, YANG Kaiyu, DENG Jia. Stacked hourglass networks for human pose estimation[EB/OL]. (2016-07-26)[2023-09-07]. https://doi.org/10.48550/arXiv.1603.06937.

[31] KREISS S, BERTONI L, ALAHI A. PifPaf: Composite fields for human pose estimation[C]// IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Long Beach: IEEE Press, 2019: 11969-11978. DOI: 10.1109/CVPR.2019.01225.

[32] CAO Xianshuai, SHI Yuliang, YU Han, *et al*. DEKR: Description enhanced knowledge graph for machine learning method recommendation[C]// Proceedings of the 44th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information. [S.l.]: ACM, 2021: 203-212. DOI: 10.1145/3404835.3462900.

(**责任编辑**: 黄晓楠 **英文审校**: 吴逢铁)

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202307002

顾及街景信息的城市交通违法行为影响因素分析

赵志远[1,2,3],郁勋剑[1,2],黄永刚[1,2],吴升[1,2,3]

(1. 福州大学 数字中国研究院(福建),福建 福州 350108;
2. 福州大学 空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室,福建 福州 350002;
3. 福建省数字经济联盟,福建 福州 350003)

摘要: 以 2017 年福州市交通违法数据为例,综合利用街景、路网和兴趣点等数据,构建三类地理环境特征指标体系,利用多元线性回归、岭回归模型和地理探测器,定量分析地理环境特征指标与城市交通违法行为之间的关系。结果表明:绿地广场用地、商服设施用地、交通服务设施密度、人车空间配比、道路拥挤指数与机动车交通违法行为关系密切,解释程度超过 50%;居住用地、交叉口密度、公共管理与公共服务用地与非机动车交通违法行为关系密切,解释程度超过 30%;公共管理与公共服务用地对两种典型交通违法行为的影响均较大,而土地利用熵、交叉口密度对行人和非机动车违反交通信号灯通行违法行为的影响更强;地理环境特征指标对不同交通违法行为解释程度的差异随着违法区域和违法类型等属性的变化而变化;街景数据所反映的局部空间环境因素提高了对机动车违法行为的解释程度,但对非机动车违法行为不明显。

关键词: 城市交通违法行为;地理环境特征指标体系;街景数据;影响因素

中图分类号: TP 311.13;D 922.14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2023)06-0759-10

Analysis of Influencing Factors of Urban Traffic Violations Considering Street View Information

ZHAO Zhiyuan[1,2,3], YU Xunjian[1,2],
HUANG Yonggang[1,2], WU Sheng[1,2,3]

(1. Academy of Digital China (Fujian), Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Key Laboratory of Spatial Data Mining and Information Sharing of Ministry of Education, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China;
3. The Digital Economy Alliance of Fujian Province, Fuzhou 350003, China)

Abstract: Taking the traffic violation data of Fuzhou City in 2017 as an example, three types of geographical environment characteristic indicator systems are constructed by comprehensively utilizing data such as data of street view, data of road network, and data of interest points. Multiple linear regression, ridge regression models, and geographic detectors are used to quantitatively analyze the relationship between geographical environment characteristic indicators and urban traffic violations. The results show that there is a close relationship between the land of green squares, the land of commercial service facilities, traffic service facility density, pedestrian and vehicle space ratio, road congestion index, and motor vehicle traffic violations, with an explana-

收稿日期: 2023-07-04

通信作者: 赵志远(1989-),男,副研究员,主要从事时空大数据分析与挖掘的研究。E-mail:zyzhao@fzu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42201500);福建省中青年教师教育科研项目(JAT210012);空间数据挖掘与信息共享教育部重点实验室开放基金资助项目(2022LSDMIS03)

tion degree exceeding 50%. Residential land, intersection density, public management and public service land are closely related to non-motor vehicle traffic violations, with an explanation degree exceeding 30%. Public management and public service land have a significant impact on both typical traffic violations which violating traffic lights for passage, while land use entropy and intersection density has a stronger impact on illegal behavior of pedestrians and non motorized vehicles violating traffic lights. The differences in the degree of interpretation of different traffic violations by geographical environmental characteristic indicators vary with the changes in attributes such as illegal areas and types of violations. The local spatial environmental factors reflected in data of street view have increased the degree of explanation for motor vehicle violations, but are not significant for non-motor vehicle violations.

Keywords: urban traffic violations; geographical environment characteristic indicator system; street view data; influencing factors

交通违法行为发生的原因是复杂化和多元化的,基本上可归结为人、车辆、道路及环境4个因素[1]。Rissanen等[2]发现闯红灯、醉酒驾驶、超速等交通违法行为是导致交通事故的重要因素;Chen等[3]认为在工业用地为主的区域会降低交通事故的风险;丁微等[4]指出公共服务用地中的社区服务型用地具有高人口密度、交通流量大、交通安全水平低的特点。上述研究基于非空间统计模型揭示出交通违法行为与地理环境因素有关,但在方法模型与局部空间环境因素上考虑较少。

考虑空间特性的分析模型能够更好地处理交通违法行为中空间因素的影响,交通违法行为具有空间位置属性,其空间自相关性、空间异质性会对基于非空间统计模型的结果产生负面影响。周悦等[5]利用全局莫兰指数和空间回归模型发现道路因素具有明显的空间自相关性;Pirdavani等[6]发现地理加权方法能够更好地解释事故和各类因子之间的关系。地理探测器由于能够有效处理样本量少、自变量存在共线性等问题[7-8],也被用于解释地理现象的影响因素。郝秀清等[9]使用地理探测器分析不同空间因子对交通事故的单独影响与交互影响,促使研究者关注事故空间分布差异的内在原因。

街景数据中蕴含的局部空间环境信息为解释交通违法行为提供了新视角。目前,有关街景数据主要从心理认知的角度分析城市视觉空间与心理感知有关行为的关系。Dai等[10]使用全卷积神经网络(FCN-8s)模型分割武汉的街景图像,探究城市视觉空间和居民心理感知之间的相关性;Chen等[11]发现在无信号交叉口公路中,绿色中央分隔带可以有效缓解驾驶人压力;李良等[12]认为景观对道路驾驶行为研究应集中于色彩和空间特征的最优值;鲁岳等[13]基于街景图像和深度学习方法,构建城市景观与交通安全的量化框架,以探究城市景观与交通安全之间的联系。但是,顾及街景的定量化局部空间环境特征对交通违法行为解释程度的研究仍较缺乏。

近年来,福州市城市治理数字化水平有所提高,在城市交通违法执行方面累积了丰富的数据资源。与此同时,居民出行"人车"矛盾[14]突出,迫切需要对交通违法行为进行分析治理。因此,本文对顾及街景信息的城市交通违法行为影响因素进行分析。

1 研究方法

1.1 研究框架

研究框架,如图1所示。首先,获取2017年福州市交通违法、兴趣点(POI)、街景等数据;然后,对数据进行预处理与清洗;构建街区空间环境指标体系,利用FCN-8s模型对街景图像进行语义分割;构建影响因素分析模型,计算和筛选典型交通违法行为结果;最后,分析机动车与非机动车交通违法行为

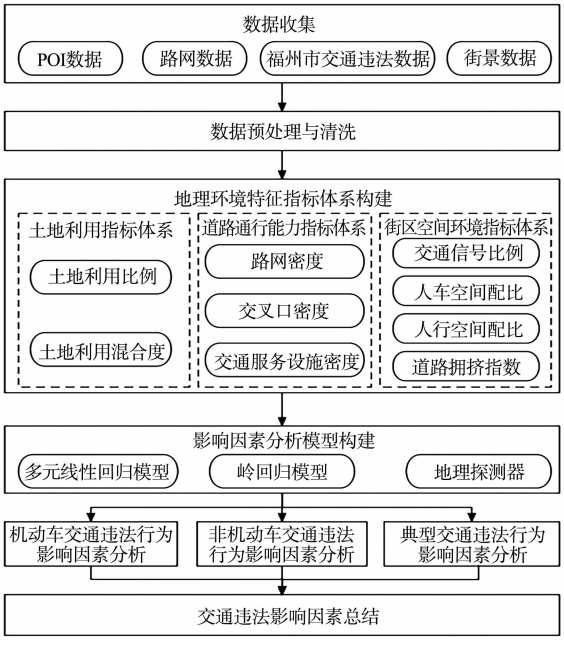


图1 研究框架

Fig. 1 Research framework

及典型交通违法行为的影响因素，对比典型交通违法行为对机动车与非机动车交通违法行为的适用性，进而对交通违法的影响因素进行总结。

1.2　地理环境特征指标体系构建

三类地理环境特征指标体系的细分指标和测算方法，如表 1 所示。

表 1　三类地理环境特征指标体系的细分指标和测算方法

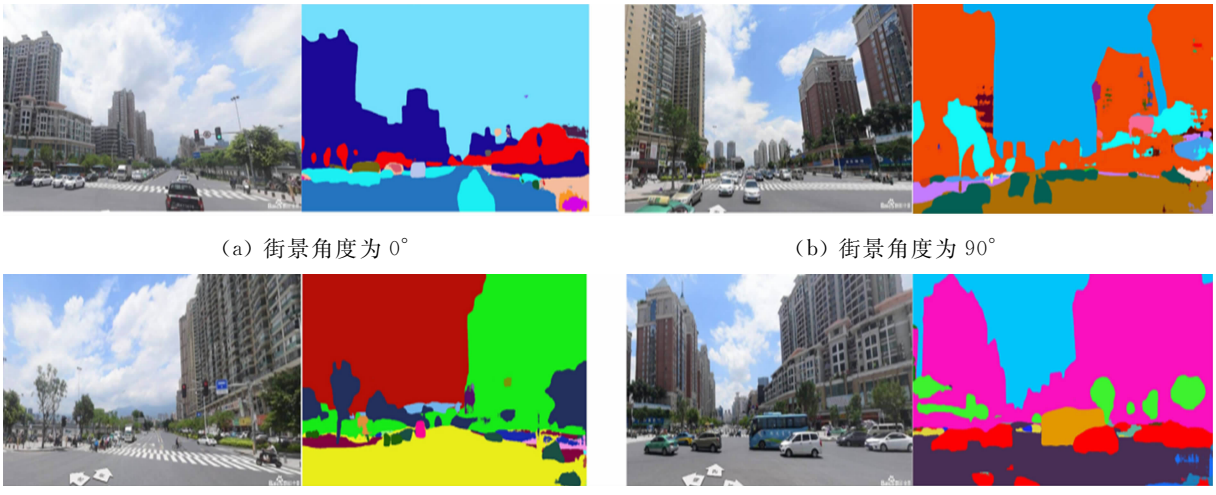
Tab. 1　Subdivision indicators and calculation methods for three types of geographical environment characteristic indicator systems

数据来源	指标体系	指标	测算方法	指标说明
POI 数据	土地利用	土地利用比例	$\text{land_}p_i^j=\frac{A_i^j}{A_j}$	$j\in(j_1,j_2,j_3,j_4,j_5,j_6)$，$j_1\sim j_6$ 为 6 种类型的 POI；$\text{land_}p_i^j$ 为网格 i 内 j 类型的 POI 所占的比例；A_j 为第 j 类 POI 总体数量(个)；A_i^j 为网格 i 内 j 类型 POI 的数量(个)
		土地利用混合度	$B_i=-\sum \text{land_}p_i^j \ln \text{land_}p_i^j$	B_i 为网格 i 土地利用混合度
路网数据	道路通行能力	路网密度	$D_1(i)=\frac{L_i}{S_i}$	L_i 为格网内路网的总长度(m)；S_i 为格网的面积(m^2)
		交叉口密度	$D_2(i)=C_\text{Count}_i/S_i$	C_Count_i 为格网内交叉口的总数量(个)
		交通服务设施密度	$D_3(i)=\frac{F_\text{Count}_i}{S_i}$	F_Count_i 为格网交通服务设施总数量(个)
街景数据	街区空间环境	交通信号比例	$Y_a=\frac{T}{W}$	反映街道中交通标志对行人和机动车的导向作用，其中，T 为交通信号灯和交通指示牌所占的像素值；W 为街景图片的总像素值
		人车空间配比	$Y_b=\frac{M_{\min}}{M_{\max}}$	反映街道中人相对于车(车相对于人)的空间比例，其中，$M_{\min}$ 为人和车像素中的较小者；$M_{\max}$ 为人和车像素中的较大者
		人行空间配比	$Y_c=\frac{P}{Q}$	反映人行道的聚集程度，其中，P 为行人的像素值；Q 为街景图片中人行道的像素值
		道路拥挤指数	$Y_d=\frac{F}{R}$	F 为机动车和非机动车的像素值之和；R 为街景图片中道路的像素值

1.3　基于全卷积神经网络的语义分割方法

基于 FCN-8s 模型的语义分割方法采用卷积层代替全连接层，反卷积层对最后一个卷积层的特征图进行上采样，恢复到与输入图像相同的大小，从而预测每个像素产生概率，并进行逐像素分类[16]。

使用 ADE-20K 数据集训练 FCN-8s 模型[17-18]，扫描窗口设置像素为 500 px×500 px，learning rate 和 early-stopping minimum learning rate 分别设置为 0.1 和 0.001，每个输入的 batch size 设置为 32。FCN-8s 模型获得的百度街景照片的场景分割结果(六一中路排尾路口)，如图 2 所示。



(a) 街景角度为 0°　　(b) 街景角度为 90°

(c) 街景角度为 180°　　(d) 街景角度为 270°

图 2　FCN-8s 模型获得百度街景照片的场景分割结果

Fig. 2　Scene segmentation results of Baidu Street View photos obtained by FCN-8s model

经过训练的FCN-8s模型准确率达到81.44%,在测试数据集上的准确率达到66.83%。该模型可将街景图像最多划分为151个子场景,对每张百度地图获取的街景照片中的特征进行语义分割,通过计算每个分割掩码中的像素数来计算图像中的视觉元素,从而得到每个语义对象的面积占比。

1.4 影响因素分析模型

将地理分析单元内交通违法事故的发生数量作为因变量,把地理分析单元内街景的语义分割结果代入表1中进行计算,得到地理环境特征指标作为自变量。

1.4.1 多元线性回归模型 多元线性回归模型是分析多个自变量对一个因变量的影响,被广泛应用到交通和地理分析中[19],因其未有效考虑空间特性影响,这里主要作对照模型。多元线性回归模型为

$$Y_i=\beta_0+\beta_1 X_1+\beta_2 X_2+\cdots+\beta_k X_k+\varepsilon,\quad k=1,2,\cdots,n。\tag{1}$$

式(1)中:X_k 为解释变量;Y_i 为因变量;k 为解释变量的数目或种类;β_0 为常数项;$\beta_1\sim\beta_k$ 为解释变量的回归系数;ε 为观测量 i 的随机误差。

1.4.2 岭回归(RRM)模型 岭回归模型适用于解决共线性数据的回归方法[20],是对普通最小二乘法的改进。岭估计的系数的表达式为

$$\overline{\beta}(K)=(\boldsymbol{X}'\boldsymbol{X}+K\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{X}y'。\tag{2}$$

式(2)中:K 为岭参数,当 $K=0$ 时为最小二乘估计,当 $K\to\infty$时,岭估计的系数趋近于0。岭参数 K 的选择并不是唯一固定的,一般使用岭迹法,即当 β 系数趋于稳定时的 K 值选择[21]。

1.4.3 地理探测器 地理探测器是揭示各要素空间分异驱动力的一组统计学方法[22-23]。使用因子和交互作用探测器分析单个地理环境特征指标及双指标交互作用对交通违法行为空间分布的影响。

因子探测器用于探测因变量的空间分异性,明确不同驱动因子对因变量空间分异的解释程度,用 q 值度量,q 的表达式为

$$q=1-\frac{1}{N\sigma^2}\sum_{i=1}^{L}N_i\sigma_i^2。\tag{3}$$

式(3)中:$q\in[0,1]$,q 越大表示空间分层异质性越强,即地理环境特征指标对交通违法空间分布的影响力越大[24-26],反之,则表示空间分布的随机性越强,当 $q=0$ 时指示研究对象不存在空间异质性;N 为研究区的全部样本数;σ_i^2 为指标的方差;N_i 为分区;$i=1,2,\cdots,L$,L 为分区数。

交互探测器可以得出两种指标交互作用时影响力的独立性及影响力的大小变化[11]。

2 研究数据及预处理

福州市地处台湾海峡西岸,公共交通出行占比较低,电动车、步行、自行车等出行方式占比较高,城区居民出行人车矛盾突出[15,27],以福州市三环内为研究区域,分析机动车与非机动车的交通违法行为。

2.1 交通违法数据

交通违法数据来源于2017年福州市交通执法部门执法历史数据库,违法类型参照《道路交通安全违法行为、代码及处罚记分标准》,数据包括机动车、非机动车的106万条匿名化违法记录信息,记录了违法行为的地址、时间、内容等信息。由于违法内容、类型繁多,数据存在长尾分布特征,选择了10种最为频繁的违法行为(表2)进行分析,经统计,这10种违法行为记录占总违法记录的91.81%[15],具有较好的代表性。

表2 交通违法类型分类

Tab.2 Classification type of traffic violations

违法类别	交通违法行为
非机动车交通违法行为	非机动车逆向行驶
	非机动车未在非机动车道内行驶
	非机动车行驶中存在安全隐患
	行人和非机动车违反交通信号灯通行
机动车交通违法行为	机动车逆向行驶
	机动车违反规定停放
	机动车违反禁令标志、禁止标线
	机动车行驶中存在安全隐患
	驾驶机动车违反道路交通信号灯通行
	遇行人正在通过人行横道时未停车让行

考虑到违法类型中,由于部分违法内容之间具有相似性,如机动车违反禁令标志指示的、机动车通过有灯控路口时不按所需行进方向驶入导向车道及机动车违反规定使用专用车道等均属于机动车违反禁令标志、禁止标线类违法行为,结合《道路交通安全违法行为、代码及处罚记分标准》的分类标

准及违法对象和行为特点，将违法行为合并成 2 类共 10 种，如表 2 所示。基于高德地图地理编码接口(lbs.amap.com)获取违法行为地址对应的经、纬度，且定位误差在 500 m 范围内的记录占 76%。

2.2　POI 数据

利用高德地图的 API 函数获取 2017 年福州市 POI 数据，并根据城市用地分类与规划建设用地标准表，将 POI 数据分为商业办公用地、交通设施用地、公共管理与公共服务用地、居住用地、绿地广场用地、商服设施用地 6 大类型。经清洗合并后，得到 6 种类型 POI 合计 386 904 条。福州市三环内 6 种类型的 POI 核密度分布图，如图 3 所示。其中，分类方法采用自然间断法。

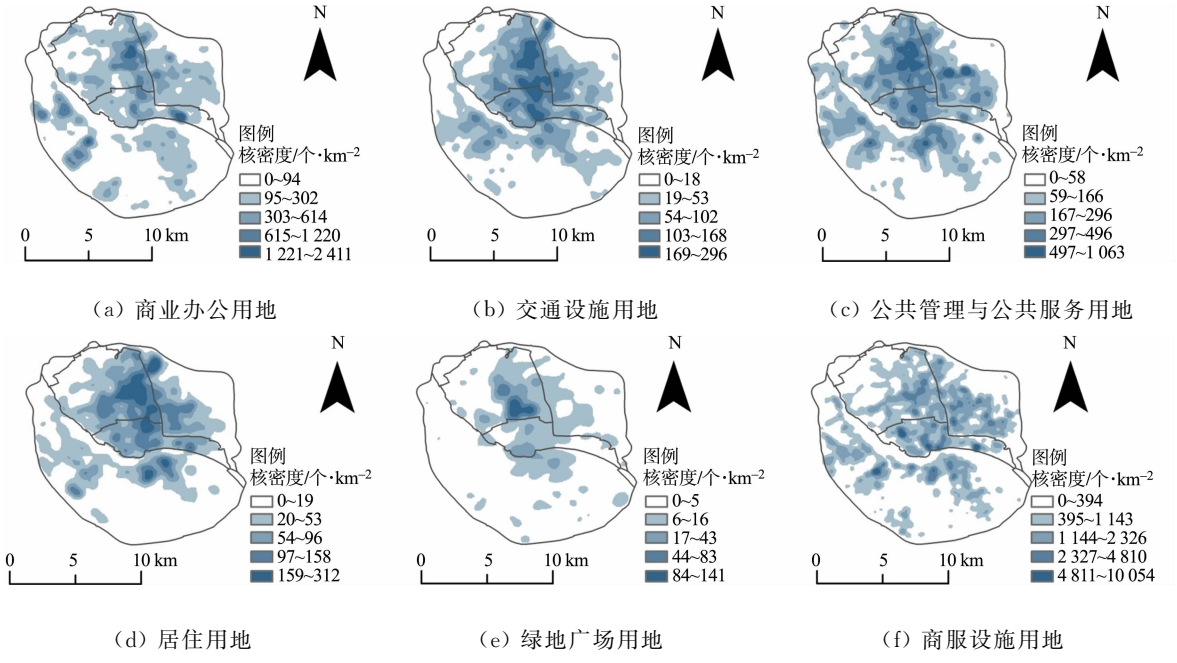


图 3　6 种类型的 POI 核密度分布图

Fig. 3　Six types of POI kernel density distribution maps

2.3　街景数据

由于百度地图开放平台(https://map.baidu.com/)获取街景图像具有时间限制，且考虑到研究范围在福州城区，近几年交通基础设施格局和城市风貌总体较为稳定，因此，使用 2020 年街景图像数据替代 2017 年街景数据。设置图片像素为 1 024 px×512 px，坐标类型为 GPS 坐标，垂直视角 20°，水平视角的范围取 0°，90°，180°，270°四个方向。对福州三环划分 1 000 m 网格，使用随机函数随机得到 50 个网格，每个网格随机生成 10 个采样点，利用这 10 个采样点的数据刻画该网格的局部空间环境特征。通过街景采集点的坐标，获得该坐标 4 个方向的街景图(图 4)。

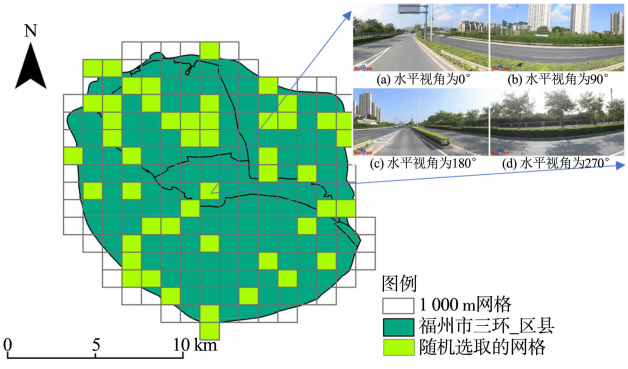


图 4　研究区域中心 1 000 m 网格与街景示例图

Fig. 4　Sample maps of 1 000 m grid and street view in research area center

3　研究结果与分析

街景数据语义分割结果共包含墙、建筑、路、汽车等 151 种类型，每个网格内所有类型的分割值之和均为 1，将分割结果代入表 1 中计算每个网格的地理环境特征指标即自变量。对自变量与因变量进行 Z-Score[26] 标准化处理后，分别对 10 种交通违法行为进行回归分析。岭回归设置 K 值步长为 0.01，选取岭参数趋于稳定时的 K 值。同时考虑到空间自相关程度会影响有关方法的有效性，利用全局莫兰指数进行分析。研究结果表明，在该空间尺度下机动车交通违法行为与非机动车交通违法行为呈现出整体较低的正向空间自相关特征，且非机动车违法行为的自相关程度明显高于机动车[15]。

3.1 机动车交通违法行为影响因素分析

机动车交通违法行为回归结果,如表3所示。表3中:“*”“**”“***”分别表示$P<0.050$,$P<0.010$,$P<0.001$。由表3可知:三类指标中均有显著性因子,其中,绿地广场用地、商服设施用地、交通服务设施密度、人车空间配比与道路拥挤指数均较为显著,且与机动车交通违法行为呈正相关,每增加一个单位,机动车交通违法行为发生的数量分别增加15.2%,27.3%,13.3%,16.2%,14.0%。与多元线性回归模型相比,显著性影响因素一致,但影响程度较小。

表3 机动车交通违法行为回归结果

Tab.3 Regression results of motor vehicle traffic violations

指标类型	指标	机动车		指标类型	指标	机动车	
		多元线性回归	岭回归			多元线性回归	岭回归
土地利用指标	商业办公用地	0.129	0.039	道路通行能力指标	路网密度	−0.160	−0.039
	交通设施用地	0.465	0.019		交叉口密度	−0.072	0.026
	公共管理与公共服务用地	−0.276	0.032		交通服务设施密度	0.394**	0.133*
	居住用地	−0.553	−0.034	街区空间环境指标	交通信号比例	−0.068	−0.006
	绿地广场用地	0.503**	0.152**		人车空间配比	0.267**	0.162**
	商服设施用地	1.004***	0.273***		人行空间配比	−0.097	0.003
	土地利用熵	−0.540	0.096		道路拥挤指数	0.266**	0.140**

由于机动车交通违法行为的空间自相关程度较低,利用非空间回归模型相较空间回归模型更具合理性,但空间回归模型仍对交通违法行为的治理具有参考价值。为了更全面地探究机动车交通违法行为的影响因素,使用地理探测器的因子探测器和交互探测器分析各指标对机动车交通违法行为的影响程度及双因子交互作用对机动车交通违法行为的影响。机动车交通违法探测因子q值,如图5所示。从图5可知:交通设施用地对机动车交通违法行为的解释程度最大,但利用非空间回归模型检测该指标却未检测为显著影响因子;交互探测排名前5位的影响指标均为双因子增强型,且交叉口密度与交通设施用地均出现了2次。

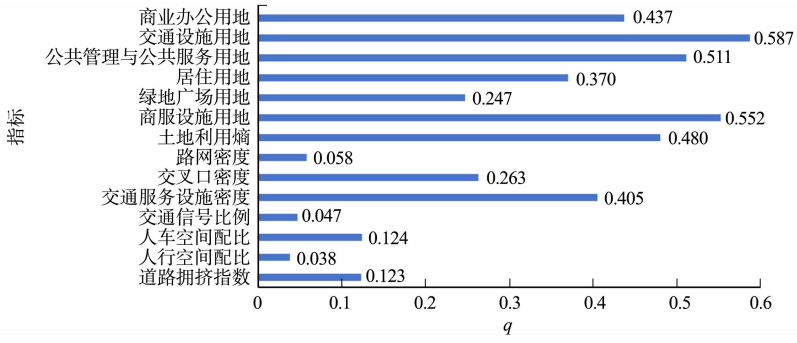


图5 机动车交通违法探测因子q值

Fig.5 q value of motor vehicle traffic violation detection factor

综合分析可知,商服设施用地、绿地广场用地、交通设施用地、交通服务设施密度、交叉口密度、人车空间配比和道路拥挤指数是影响机动车交通违法行为的重要因素,能够解释超过50%的机动车交通违法行为。其中,商业功能类型的区域一般位于城市中心或繁华地段,附近有大量的车流和人流量,主要承担居民的休闲、旅游、饮食等娱乐活动,增大了交通违法行为发生的可能性;交通设施用地一般认为以机动车活动为主,增加了机动车交通违法行为发生的可能性;交通服务设施、交叉口密度越大,虽然交通设施齐全、数量多、密度大,但考虑到其密度较大的场所车道繁杂,例如高速公路、高架桥、匝道等,以及车流量大、司机的视觉疲劳等原因引发交通违法事故的可能性仍不容忽视;人车空间配比与道路拥挤指数越大,表现为道路上机动车的占比越高,且人、车混行越严重,则发生机动车违法行为的可能性就越高,与实际情况相符。

3.2 非机动车交通违法行为影响因素分析

非机动车交通违法行为回归结果,如表4所示。表4中:“*”“**”分别表示$P<0.050$,$P<$

0.010。由表 4 可知：居住用地、交叉口密度指标较为显著，且均与非机动车交通违法行为呈正相关，每增加一个单位，非机动车交通违法行为发生的数量分别增加 17.9%，20.8%。

表 4　非机动车交通违法行为回归结果

Tab. 4　Regression results of non-motor vehicle traffic violations

指标类型	指标	非机动车		指标类型	指标	非机动车	
		多元线性回归	岭回归			多元线性回归	岭回归
土地利用指标	商业办公用地	0.269	0.028	道路通行能力指标	路网密度	−0.113	−0.032
	交通设施用地	−0.908*	−0.003		交叉口密度	0.425*	0.208**
	公共管理与公共服务用地	0.856*	0.112		交通服务设施密度	0.173	0.121
	居住用地	1.247**	0.179**	街区空间环境指标	交通信号比例	−0.160	−0.098
	绿地广场用地	−0.116	0.042		人车空间配比	0.021	0.007
	商服设施用地	0.294	0.029		人行空间配比	0.125	0.124
	土地利用熵	−0.922	0.049		道路拥挤指数	−0.044	−0.030

使用地理探测器分析各指标对非机动车交通违法行为的影响程度及双因子交互作用对机动车交通违法行为的影响。非机动车交通违法探测因子 q 值，如图 6 所示。从图 6 可知：公共管理与公共服务用地对非机动车交通违法行为的解释程度最大；交互探测排名前 5 位的影响指标均为双因子增强型，且公共管理与公共服务用地与交通服务设施密度均出现了 3 次。公共管理与公共服务用地在多元线性回归模型中也为显著影响因子，虽然非机动车交通违法行为的空间自相关程度较低，但显著高于机动车，这意味着非机动车利用空间回归模型即地理探测器的结果合理性高于机动车，与结果相符。

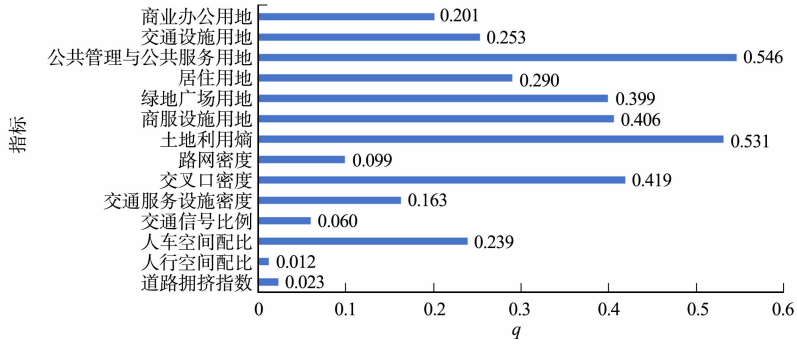


图 6　非机动车交通违法探测因子 q 值

Fig. 6　q value of non-motor vehicle traffic violation detection factor

综合分析可知，居住用地、公共管理与公共服务用地、交叉口密度与交通服务设施密度是影响非机动车交通违法发生的重要因素，能够解释超过 30%的非机动车交通违法行为。其中，居住用地、公共管理与公共服务用地的区域生活活动性强，居住、社会福利、医疗卫生等设施区域人口密集，增加了人群流量，并且相对其他区域有更低的限速，且在上下班的早晚高峰期时期具有高的行车需求，人车矛盾突出，增大非机动车违法行为产生的风险；而交叉口密度、交通服务设施密度越大，车辆与行人越密集，由于非机动车的延误特性与运行特性[27]等容易引发非机动车交通违法行为。

3.3　典型交通违法行为影响因素分析

典型交通违法行为回归结果，如表 5 所示。表 5 中：R^2 为相关性系数；“*”“**”“***”分别表示 $P<0.050$，$P<0.010$，$P<0.001$。“行人和非机动车违反交通信号灯通行”和“遇行人正在通过人行横道时未停车让行”是 10 种交通违法行为回归结果中影响因素解释性最好的非机动车和机动车典型的交通违法行为，对各影响因素进行剖析。从表 5 可知：在“行人和非机动车违反交通信号灯通行”这一非机动车典型违法行为中，公共管理与公共服务用地、居住用地、绿地广场用地、土地利用熵、交叉口密度、人车空间配比呈显著正相关，而商业办公用地、道路拥挤指数呈显著负相关；在“遇行人正在通过人行横道时未停车让行”这一机动车典型交通违法行为中，交通设施用地、公共管理与公共服务用地、绿地广场用地及人车空间配比呈显著正相关。

用地理探测器得到地理环境特征指标对典型交通违法行为影响力的排序，如图 7 所示。从图 7 可

知:在“行人和非机动车违反交通信号灯通行”这一典型违法行为中,前5位影响指标依次是公共管理与公共服务用地(0.772)>交叉口密度(0.540)>绿地广场用地(0.517)>土地利用熵(0.513)>商服设施用地(0.415);交互探测器结果中,道路拥挤指数与公共管理与公共服务用地出现次数最多;而在“遇行人正在通过人行横道时未停车让行”这一典型违法行为中,前5位影响指标依次是公共管理与公共服务用地(0.581)>土地利用熵(0.562)>绿地广场用地(0.457)>交叉口密度(0.439)>商服设施用地(0.406);交互探测器结果中,公共管理与公共服务用地、交叉口密度与绿地广场用地出现的次数最多。

表5 典型交通违法行为回归结果

Tab.5 Regression results of typical traffic violations

指标类型	指标	行人和非机动车违反交通信号灯通行		遇行人正在通过人行横道时未停车让行	
		多元线性回归	岭回归	多元线性回归	岭回归
土地利用指标	商业办公用地	−0.645***	−0.178**	0.352	0.054
	交通设施用地	−1.064***	−0.060	0.564	0.131**
	公共管理与公共服务用地	1.152***	0.136**	0.592	0.143**
	居住用地	1.155***	0.126**	0.081	0.039
	绿地广场用地	0.260	0.353***	0.843***	0.310***
	商服设施用地	0.410*	0.063	0.319	−0.020
	土地利用熵	−0.774	0.096**	−1.655**	−0.001
道路通行能力指标	路网密度	−0.045	−0.020	0.015	−0.046
	交叉口密度	0.246	0.172**	−0.078	0.080
	交通服务设施密度	−0.083	−0.010	−0.108	−0.125
街区空间环境指标	交通信号比例	−0.087	−0.049	0.084	0.059
	人车空间配比	0.239**	0.137*	0.428***	0.227***
	人行空间配比	−0.088	0.004	−0.227*	−0.088
	道路拥挤指数	−0.228**	−0.186**	−0.243**	−0.120
	R^2	0.814	0.710	0.727	0.585

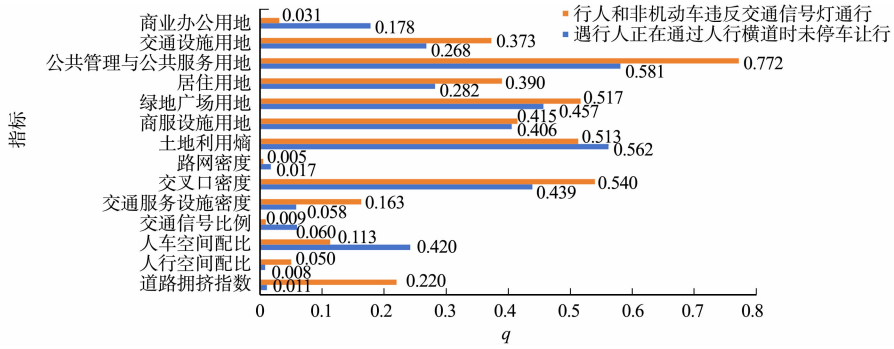


图7 两种典型交通违法行为探测因子q值

Fig.7 q value of two typical traffic violations detection factors

地理环境特征指标对两种典型交通违法行为的影响既有差异性又有一致性。差异性表现在土地利用熵、交叉口密度对“行人和非机动车违反交通信号灯通行”违法行为的影响明显高于“遇行人正在通过人行横道时未停车让行”违法行为,而公共管理与公共服务用地对两类交通违法行为的影响均较大。

街景指标中,人车空间配比和道路拥挤指数对交通违法的影响高于其他指标,表现为道路上机动车占比更高,且人车混行更严重,发生交通违法行为的可能性就更高,其中,人车空间配比和道路拥挤指数是通过街景数据获得的,然而现有研究未有效考虑街景数据的影响。针对该情况,可以考虑在人车混行严重的区域增加非机动车与机动车道隔离栅栏、指示牌及增加警力监管等措施来减少交通违法行为发生的可能性。因此,街景因素在一定程度上为交通违法行为影响因素的探究提供了新的视角,为治理措施的提出提供了参考依据。

3.4　交通违法行为治理建议

针对机动车违法行为的治理，需要重视车流量较大、人车混行的场所，对于路况复杂、交通信号比例较低、交通服务设施密度、交叉口密度较大的场所，可以增加机动车与非机动车隔离栏、人车分流指示牌、警力调度等措施。针对非机动车违法行为的治理，需要重视生活性强、人口密集，例如社区、市场、活动广场等场所，需要引起注意的是，在交叉口密度较大的路段，不应忽视非机动车交通违法事故的发生。

由于各地理环境特征指标对机动车与非机动车交通违法行为的解释程度并不适用于每一类具体的交通违法行为，且不同类型的交通违法行为违法特征的不同会导致地理环境特征指标对不同交通违法行为的解释程度的差异。因此，需要交通管理等相关部门在制定合理的交通违法治理措施时具体问题具体对待，根据每一类交通违法行为的违法属性，包括违法高峰时段[28]、违法热点区域[29]、违法主要群体[30]等，有针对性地进行研究并出台相应的治理措施。

4　结论

针对城市交通违法行为的治理需求，基于 2017 年福州市交通违法数据、街景数据等，提出城市交通违法行为影响因素分析框架，利用回归分析模型和地理探测器，从机动车与非机动车两个角度出发，探究地理环境属性与城市交通违法行为之间的关系，得到以下 3 点结论。

1）绿地广场用地、商服设施用地、交通服务设施密度、人车空间配比、道路拥挤指数与机动车违法行为具有较密切的关系，能够解释超过 50％的机动车交通违法行为。居住用地、交叉口密度、公共管理与公共服务用地与非机动车违法行为具有密切的关系，能够解释超过 30％的非机动车交通违法行为。

2）地理环境特征指标对两种典型交通违法行为的影响既有一致性又有差异性。公共管理与公共服务对两类典型交通违法行为的影响均较大，而土地利用熵、交叉口密度对“行人和非机动车违反交通信号灯通行”这一非机动车交通违法行为的影响明显高于“遇行人正在通过人行横道时未停车让行”违法行为。

3）地理环境特征指标对不同交通违法行为的解释程度依赖违法行为类型。因此，交通管理等相关部门应该具体问题具体对待，有针对性地进行研究并出台合理的交通违法治理措施。

研究仍有以下待改进之处：1）仅用福州市一个城市的数据进行分析，有关结果在其他城市的适用性有待验证；2）采用数据的时效性存在一定的不足，体现在采用了 2017 年的交通违法数据，而街景数据为 2020 年的；3）选择研究的交通违法行为均与空间具有一定的依赖关系，未考虑与空间位置无关的交通违法行为，例如遮挡号牌、无证驾驶等。

今后的工作将考虑使用更多城市的交通违法数据进行研究，探究不同城市之间的差异；努力收集和使用时效性更好、时间更接近的数据进行研究；同时考虑纳入更全面的交通违法行为种类，研究不同种类交通违法行为的影响因素。

参考文献：

[1]　郑依玲，谢波，南贤淑，等. 城市土地利用对交通事故的影响因素与作用机制研究：以武汉市为例[J]. 现代城市研究，2020(2)：42-49. DOI：10. 3969/j. issn. 1009-6000. 2020. 02. 006.

[2]　RISSANEN R，IFVER J，HASSELBERG M，*et al*. Quality of life following road traffic injury：The impact of age and gender[J]. Quality of Life Research，2020，29(6)：1587-1596. DOI：10. 1007/s11136-020-02427-3.

[3]　CHEN Peng，SHEN Qing. Built environment effects on cyclist injury severity in automobile-involved bicycle crashes [J]. Accident Analysis and Prevention，2016，86(11)：239-246. DOI：10. 1016/j. aap. 2015. 11. 002.

[4]　丁微，徐铖铖，刘攀. 用地组合形态划分与交通安全影响因素分析[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2017，47(5)：1074-1078. DOI：10. 3969/j. issn. 1001-0505. 2017. 05. 037.

[5]　周悦，付川云，江欣国，等. 考虑空间效应的出租车超速行为道路因素分析[J]. 中国安全科学学报，2021，31(3)：162-170. DOI：10. 16265/j. cnki. issn1003-3033. 2021. 03. 023.

[6]　PIRDAVANI A，BELLEMANS T，BRIJS T，*et al*. Application of geographically weighted regression technique in spatial analysis of fatal and injury crashes[J]. Journal of Transportation Engineering，2014，140(8)：04014032. DOI：10. 1061/(ASCE)TE. 1943-5436. 0000680.

[7] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134. DOI:10.11821/dlxb201701010.
[8] 徐勇,郭振东,郑志威,等.运用地理探测器研究京津冀城市群 $PM_{2.5}$ 浓度变化及影响因素[J].环境科学研究,2023,36(4):649-659. DOI:10.13198/j.issn.1001-6929.2023.01.01.
[9] 郝秀清,史宇鹏,张雪娜.县城交通事故的分布及其影响因素地理探测[J].交通工程,2019,19(6):53-60. DOI:10.13986/j.cnki.jote.2019.06.011.
[10] DAI Liangyang,ZHENG Chenglong,DONG Zekai,*et al*. Analyzing the correlation between visual space and residents' psychology in Wuhan, China using street-view images and deep-learning technique[J]. City and Environment Interactions,2021,11:100069. DOI:10.1016/J.CACINT.2021.100069.
[11] CHEN Hongyun,FABREGAS A,LIN P S. Landscaping of highway medians and roadway safety at unsignalized intersections[J]. Accident Analysis and Prevention,2016,90:63-72. DOI:10.1016/j.aap.2016.02.006.
[12] 李良,何江华,张恬,等.高速公路景观对驾驶人操作表现和心理健康的影响[J].南方建筑,2018,38(3):30-33. DOI:10.3969/j.issn.1000-0232.2018.03.030.
[13] 鲁岳,符锌砂.基于街景图像的城市景观与交通安全分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(10):22-30. DOI:10.12141/j.issn.1000-565X.200733.
[14] 贺捷.TOD理念下步行化城市公共空间塑造:以厦门市马銮湾南岸片区城市设计为例[J].城市规划学刊,2018(增刊1):89-93. DOI:10.16361/j.upf.201807015.
[15] 赵志远,黄永刚,吴升.基于时空热点分析的城市交通违法行为特征识别方法[J].地球信息科学学报,2022,24(7):1312-1325. DOI:10.12082/dqxxkx.2022.210599.
[16] 李昊东.基于全卷积网络改进的图像语义分割应用研究[D].南京:南京邮电大学,2019.
[17] 方旭,王光辉,杨化超.结合均值漂移分割与全卷积神经网络的高分辨遥感影像分类[J].激光与光电子学进展,2018,55(2):446-454. DOI:10.3788/LOP55.022802.
[18] YAO Yao,LIANG Zhaotang,YUAN Zehao,*et al*. A human-machine adversarial scoring framework for urban perception assessment using street-view images[J]. International Journal of Geographical Information Science,2019,33(12):2363-2384. DOI:10.1080/13658816.2019.1643024.
[19] 张帆,张永勇,陈俊旭.多种机器学习模型对不同洪水类型特征指标模拟效果评估[J].地理科学进展,2022,41(7):1239-1250. DOI:10.18306/dlkxjz.2022.07.008.
[20] 张金茜,巩杰,柳冬青.地理探测器方法下甘肃白龙江流域景观破碎化与驱动因子分析[J].地理科学,2018,38(8):1370-1378. DOI:10.13249/j.cnki.sgs.2018.08.020.
[21] 甄佳宁,蒋侠朋,赵德梅.利用Sentinel-2影像超分辨率重建的红树林冠层氮含量反演[J].遥感学报,2022,26(6):1206-1219. DOI:10.11834/jrs.20221461.
[22] WANG Jinfeng,LI Xinhu,CHRISTAKOS G,*et al*. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science,2010,24:107-127. DOI:10.1080/13658810802443457.
[23] 肖晔,赵林,乔路明,等.京津冀文化艺术产业空间格局演变及其影响因素[J].地理研究,2021,40(6):1768-1784. DOI:1011821/dlyj020200663.
[24] WANG Jinfeng,HU Yi. Environmental health risk detection with GeogDetector[J]. Environmental Modelling and Software,2012,33:114-115. DOI:10.1016/j.envsoft.2012.01.015.
[25] 杨丰硕,杨晓梅,王志华,等.江西省典型县域经济差异影响因子地理探测研究[J].地球信息科学学报,2018,20(1):79-88. DOI:10.12082/dqxxkx.2018.170375.
[26] 苍宏宇,谭宗颖.国内外信息检索研究热点分析:基于Z-Score标准化的词频[J].图书馆建设,2009(1):93-98.
[27] 卢艺.信号交叉口右转机动车与非机动车交通冲突分析[D].北京:中国人民公安大学,2021.
[28] 杨军,郭子渝.城市道路交通违法行为影响因素分析[J].西部交通科技,2020(9):142-145. DOI:10.13282/j.cnki.wccst.2020.09.039.
[29] 杨杰,邬群勇.福州市交通违法行为时空特征分析[J].测绘地理信息,2020,45(4):11-15. DOI:10.14188/j.2095-6045.2018300.
[30] 罗义学,杜岩,黎美清.机动车驾驶人交通违法行为相关因素分析[J].广西医科大学学报,2010,27(6):956-959. DOI:10.3969/j.issn.1005-930X.2010.06.062.

(**责任编辑**:黄晓楠 **英文审校**:吴逢铁)

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202303014

一类具有弱 Allee 效应离散捕食系统的 1∶4 共振

杨金玲,邓圣福

(华侨大学 数学科学学院,福建 泉州 362021)

摘要: 研究一类具有弱 Allee 效应的离散捕食系统。当参数满足一定条件时,该系统有一个正不动点,其线性算子的特征值为±i,这对应于 1∶4 共振。利用 Picard 迭代及时间 1 映射,将差分系统转化为常微分方程系统,讨论常微分方程系统退化平衡点附近的性质,得到该差分系统不动点附近的性质,并用数学软件模拟其局部相图。结果表明:随着参数值和扰动的变化,系统会产生稳定的焦点、"方形"异宿环、"叶形"异宿环及 Neimark-Sacker 分支等。

关键词: 离散捕食系统;Allee 效应;1∶4 共振;Picard 迭代

中图分类号: O 175.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2023)06-0769-08

1∶4 Resonance of Discrete Predator-Prey System With Weak Allee Effect

YANG Jinling, DENG Shengfu

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

Abstract: Study on a class of discrete predator-prey system with weak Allee effect. If parameters meet certain conditions, the studied system has a positive fixed point and its linear operator has eigenvalues ±i, which corresponds to 1∶4 resonance. Using Picard iteration and the time-one mapping, this discrete system is transformed into an ordinary differential equation system, and the properties near the degenerate equilibrium of the ordinary differential equation system are discussed, the properties near the fixed point of this discrete system are obtained, and their local phase portraits are simulated by mathematical software. The results show that with the change of parameter values and disturbances, the system can produce stable focal points, "square" heteroclinic cycles, "clover" heteroclinic cycles and Neimark-Sacker bifurcations and so on.

Keywords: discrete predator-prey system; Allee effect; 1∶4 resonance; Picard iteration

在许多生物数学模型中,捕食者-猎物模型一直是学者们研究的热点之一,它在人口动力学行为中扮演着十分重要的角色。对于离散模型的研究,很多学者做出了重要的贡献。例如,Huang 等[1]分析具有 Holling Ⅳ函数的非单调功能反应的捕食者-猎物模型的分岔。Zhong 等[2]研究具有强 Allee 效应[3]的捕食者-猎物模型,并对不动点附近的拓扑结构进行讨论。Chen 等[4]研究具有 Allee 效应的捕食系统的动力学问题。Wang 等[5]讨论 Allee 效应对猎物和捕食者种群的稳定作用。Zhang 等[6-7]研究具有强 Allee 效应的捕食系统不动点的 1∶2 共振,还研究具有弱 Allee 效应的捕食系统不动点的 1∶2 和 1∶3 共振。更多有关 Allee 效应的研究参见文献[8-14]。

收稿日期: 2023-03-29

通信作者: 邓圣福(1974-),男,教授,博士,主要从事微分方程和动力系统的研究。E-mail:sfdeng@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(12171171);福建省自然科学基金面上基金资助项目(2022J01303)

考虑具有弱 Allee 效应的离散捕食系统[15],有

$$\left.\begin{aligned} x_{n+1}&=x_n+rx_n(1-x_n)\frac{x_n}{c+x_n}-ax_ny_n,\\ y_{n+1}&=y_n+ay_n(x_n-y_n)。\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

式(1)中:x_n,y_n 分别为第 n 代猎物和捕食者的种群密度;r 为猎物的生长速度;a 为捕食者的攻击率;$\frac{x_n}{c+x_n}$为弱 Allee 效应函数[3],c 为 Allee 效应的常数。

由系统(1)可知,该系统有 3 个不动点 $E_0=(0,0)$,$E_1=(1,0)$,$E^*=\left(\frac{r-ac}{a+r},\frac{r-ac}{a+r}\right)$。假设 Allee 效应的常数 c 满足

$$0<c<\frac{r}{a}, \tag{2}$$

则不动点 E^* 是一个正的不动点。Zhang 等[7]等研究系统(1)在不动点 E^* 处的 1∶2 和 1∶3 共振,发现该系统会发生 Neimark-Sacker 分岔、倍周期分岔等,并采用混合控制策略控制 1∶2 和 1∶3 共振。然而,系统(1)在不动点 E^* 处的 1∶4 共振还未被分析。因此,本文对一类具有弱 Allee 效应离散捕食系统的 1∶4 共振进行研究。

1 预备知识

考虑不动点为 $x=0$ 的映射,有

$$x\to F(x)=\boldsymbol{A}x+f^2(x)+f^3(x)+\cdots+f^{r-1}(x)+O(|x|^r),\qquad x\in\mathscr{R}^n。 \tag{3}$$

式(3)中:$\boldsymbol{A}$ 为 Jacobian 矩阵;$f^s(x)$是 C^r 光滑的 s 次多项式向量值函数,$f^s(x)=O(|x|^s)$,即

$$f^s(x)=\sum_{j_1+j_2+\cdots+j_n=s}b^{(s)}_{j_1j_2\cdots j_n}x_1^{j_1}x_2^{j_2}\cdots x_n^{j_n}。$$

考虑近似恒同变换

$$x=H(y)=y+h^s(y),\qquad h^s(y)\in H^s_n。 \tag{4}$$

式(4)中:H^s_n 为 n 元 n 维 s 次齐次向量多项式组成的空间,$s=2,\cdots,r-1$。令

$$G(y)=H^{-1}\circ F\circ H(y),$$

则可以将式(3)化为

$$G(y)=\boldsymbol{A}y+f^2(y)+\cdots+f^{s-1}(y)+[f^s(y)-(h^s(\boldsymbol{A}y)-\boldsymbol{A}h^s(y))]+O(|y|^{s+1})。$$

式中:$|y|\ll1$。

每次变换后,再将 y 换回 x,最后可以将式(3)化为

$$G(x)=\boldsymbol{A}x+g^2(x)+\cdots+g^{r-1}(x)+O(|x|^r),\qquad g^s(x)\in\mathscr{G}^s。 \tag{5}$$

式(5)中:$\mathscr{G}^s$ 为 $\mathscr{R}^s:=\mathscr{R}(L^s_A)$在 H^s_n 中的补空间,算子 L^s_A 的定义为

$$L^s_A:H^s_n\to H^s_n,\qquad L^s_A(h^s(x))=h^s(\boldsymbol{A}x)-\boldsymbol{A}h^s(x),\qquad s=2,\cdots,r-1。$$

定义 1[16] 映射(5)的 j 次截取式($2\leqslant j\leqslant r-1$),即映射(3)的 j 次正规形为

$$\boldsymbol{A}x+g^2(x)+\cdots+g^j(x)。$$

式中:$g^i(x)\in\mathscr{G}^i$,$i=2,\cdots,j$。

系统(1)可以写成一个平面映射,即

$$G_0:(x,y)\to\begin{pmatrix}x+rx(1-x)\dfrac{x}{c+x}-axy\\ y+ay(x-y)\end{pmatrix}, \tag{6}$$

其 Jacobian 矩阵为

$$\boldsymbol{J}(x,y)=\begin{pmatrix}1-ay-\dfrac{rx(3cx+2x^2-2c-x)}{(c+x)^2} & -ax\\ ay & ax-2ay+1\end{pmatrix}。$$

$\boldsymbol{J}(x,y)$的特征方程为

$$p(\lambda)=\lambda^2+Q(x^*,y^*)\lambda+S(x^*,y^*)。$$

式中：$Q(x^*,y^*)=\dfrac{(r-ac)^2}{r(c+1)}-2$；$S(x^*,y^*)=1+\dfrac{(r-ac)^2}{r(c+1)}\left(\dfrac{a(r-ac)}{a+r}-1\right)$。

对 1∶4 共振进行研究，对应于不动点 E^* 附近有特征值 $\pm$i，即 $p(\lambda)=\lambda^2+1$，将其与 $p(\lambda)$ 的表达式进行比较，可得 $Q(x^*,y^*)=0$，$S(x^*,y^*)=1$。由此可得

$$c=\frac{2-a}{a(2a-3)},\qquad r=\frac{a}{2a-3}。\tag{7}$$

式中：$\dfrac{3}{2}<a<2$。

对系统(6)进行线性变换，$\tilde{u}=x-x^*$，$\tilde{v}=y-y^*$，将不动点(x^*,y^*)平移到原点，则系统(6)变为

$$\begin{pmatrix}\tilde{u}\\ \tilde{v}\end{pmatrix}\mapsto\boldsymbol{A}\begin{pmatrix}\tilde{u}\\ \tilde{v}\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\dfrac{a^3c^2+3ac^2r(a+r)-r^3(2c+1)}{r^2(c+1)^2}\tilde{u}^2-a\tilde{u}\tilde{v}-\dfrac{c^2(a+r)^4}{r^3(c+1)^3}\tilde{u}^3+O(|(\tilde{u},\tilde{v})|^4)\\ a\tilde{u}\tilde{v}-a\tilde{v}^2+O(|(\tilde{u},\tilde{v})|^3)\end{pmatrix}。\tag{8}$$

其中有

$$\boldsymbol{A}=\begin{pmatrix}1-\dfrac{(a^2c+2acr-r^2)(ac-r)}{r(c+1)(a+r)} & \dfrac{a(ac-r)}{a+r}\\ \dfrac{a(r-ac)}{a+r} & 1+\dfrac{a(ac-r)}{a+r}\end{pmatrix}。$$

为研究系统(8)的 1∶4 共振，取 $a=a_0+\alpha_1$，$r=r_0+\alpha_2$，其中，$\dfrac{3}{2}<a_0<2$，α_1，α_2 为充分小的参数。由式(7)，考虑参数情形

$$a=a_0+\alpha_1,\qquad c=\frac{2-a_0}{a_0(2a_0-3)},\qquad r=\frac{a_0}{2a_0-3}+\alpha_2。\tag{9}$$

将系统(9)代入系统(8)，有

$$\begin{pmatrix}\tilde{u}\\ \tilde{v}\end{pmatrix}\mapsto\begin{pmatrix}d_1\tilde{u}+d_2\tilde{v}+d_4\tilde{u}^2-(a_0+\alpha_1)\tilde{u}\tilde{v}+d_5\tilde{u}^3\\ -d_2\tilde{u}+d_3\tilde{v}+(a_0+\alpha_1)\tilde{u}\tilde{v}-(a_0+\alpha_1)\tilde{v}^2\end{pmatrix}+O(|(u,v)|^4)。\tag{10}$$

式(10)中：$d_1=\left(\dfrac{2}{a_0-1}-\dfrac{7}{2a_0}\right)\alpha_1+\left(1+\dfrac{2}{a_0-1}-\dfrac{15}{2a_0}\right)\alpha_2+O(|(\alpha_1,\alpha_2)|^2)$；$d_2=-1-\dfrac{1}{2a_0}\alpha_1+\dfrac{3-2a_0}{2a_0}\alpha_2+O(|(\alpha_1,\alpha_2)|^2)$；$d_3=-\dfrac{1}{2a_0}\alpha_1+\dfrac{3-2a_0}{2a_0}\alpha_2+O(|(\alpha_1,\alpha_2)|^2)$；$d_4=\dfrac{a_0(a_0-3)}{a_0-1}+\dfrac{3(a_0-2)^2}{(a_0-1)^2}\alpha_1-\dfrac{(2a_0-3)(9+2a_0(a_0-4))}{(a_0-1)^2}\alpha_2+O(|(\alpha_1,\alpha_2)|^2)$；$d_5=-\dfrac{2a_0^2(a_0-2)^2}{(a_0-1)^2}+\dfrac{4a_0(3-2a_0)(a_0-2)^2}{(a_0-1)^3}\alpha_1+\dfrac{2a_0(a_0-2)^2(2a_0-3)(3a_0-5)}{(a_0-1)^3}\alpha_2+O(|(\alpha_1,\alpha_2)|^2)$。

令 $\boldsymbol{T}=\begin{pmatrix}\sqrt{1-\dfrac{(d_1-d_3)^2}{4d_2^2}} & \dfrac{d_3-d_1}{2d_2}\\ 0 & 1\end{pmatrix}$，对系统(10)作可逆线性变换 $\begin{pmatrix}\tilde{u}\\ \tilde{v}\end{pmatrix}=\boldsymbol{T}\begin{pmatrix}u\\ v\end{pmatrix}$，可将其线性部分的矩阵 Jordan 化，此时，系统(10)变为

$$\begin{pmatrix}u\\ v\end{pmatrix}\mapsto\begin{pmatrix}A_1u+A_2v+\sum\limits_{2\leqslant k+l\leqslant 3}f_{k,l}u^kv^l+O(|(u,v)|^4)\\ -A_2u+A_1v+\sum\limits_{k+l=2}h_{k,l}u^kv^l+O(|(u,v)|^3)\end{pmatrix}。\tag{11}$$

式(11)中：$A_2=-\dfrac{\alpha_1-3\alpha_2+2a_0(1+\alpha_2)}{2a_0}\sqrt{1-\dfrac{(a_0-3)^2(\alpha_1+(3-2a_0)\alpha_2)^2}{(a_0-1)^2(\alpha_1-3\alpha_2+2a_0(1+\alpha_2))^2}}$；$f_{1,1}=-a_0+O(|(\alpha_1,\alpha_2)|)$；$f_{2,0}=\dfrac{a_0(a_0-3)}{a_0-1}+O(|(\alpha_1,\alpha_2)|)$；$h_{2,0}=0$；$h_{0,2}=-a_0+O(|(\alpha_1,\alpha_2)|)$；$f_{0,2}=-\dfrac{(a_0-3)^2}{2a_0(a_0-1)^3}\alpha_1^2+\dfrac{(a_0-3)^2(2a_0-3)}{a_0(a_0-1)^3}\alpha_1\alpha_2-\dfrac{(9-9a_0+2a_0^2)^2}{2a_0(a_0-1)^3}\alpha_2^2+O(|(\alpha_1,\alpha_2)|^3)$；$f_{3,0}=-\dfrac{2a_0^2(a_0-2)^2}{(a_0-1)^2}+O(|(\alpha_1,\alpha_2)|)$；

$h_{1,1}=a_0+O(|(\alpha_1,\alpha_2)|)$；$A_1=\dfrac{(2-a_0)\alpha_1+(3-2a_0)\alpha_2}{a_0(a_0-1)}$；$f_{2,1}=\dfrac{3a_0(a_0-3)(a_0-2)^2}{(a_0-1)^3}\alpha_1-\dfrac{3a_0(a_0-3)(2a_0-3)(a_0-2)^2}{(a_0-1)^3}\alpha_2+O(|(\alpha_1,\alpha_2)|^2)$；$f_{1,2}=-\dfrac{3(6-5a_0+a_0^2)^2}{2(a_0-1)^4}\alpha_1^2+\dfrac{3(2a_0-3)(6-5a_0+a_0^2)^2}{(a_0-1)^4}\alpha_1\alpha_2-\dfrac{3(3-2a_0)^2(a_0-3)^2(a_0-2)^2}{2(a_0-1)^4}\alpha_2^2+O(|(\alpha_1,\alpha_2)|^3)$；$f_{0,3}=\dfrac{(a_0-2)^2(a_0-3)^3}{4a_0(a_0-1)^5}\alpha_1^3-\dfrac{3(2a_0-3)(a_0-2)^2(a_0-3)^3}{4a_0(a_0-1)^5}\alpha_1^2\alpha_2+\dfrac{3(a_0-3)^3(6-7a_0+2a_0^2)^2}{4a_0(a_0-1)^5}\alpha_1\alpha_2^2-\dfrac{(a_0-2)^2(9-9a_0+2a_0^2)^3}{4a_0(a_0-1)^5}\alpha_2^3+O(|(\alpha_1,\alpha_2)|^4)$。

令 $z=u+\mathrm{i}v$，它的共轭为 $\bar{z}=u-\mathrm{i}v$，将系统(11)化为复数形式，即

$$z\mapsto\mu(\alpha)z+\sum_{2\leqslant k+l\leqslant 3}g_{k,l}z^k\bar{z}^l+O(|z|^4)。\tag{12}$$

式(12)中：$\mu(\alpha)=A_1-\mathrm{i}A_2$；$g_{2,0}=\dfrac{1}{4}(f_{2,0}-\mathrm{i}f_{1,1}+h_{1,1}-f_{0,2}-\mathrm{i}h_{0,2})$；$g_{1,1}=\dfrac{1}{2}(f_{2,0}+f_{0,2}+\mathrm{i}h_{0,2})$；$g_{0,2}=\dfrac{1}{4}(f_{2,0}+\mathrm{i}f_{1,1}-h_{1,1}-f_{0,2}-\mathrm{i}h_{0,2})$；$g_{3,0}=\dfrac{1}{8}(f_{3,0}-\mathrm{i}f_{2,1}-f_{1,2}+\mathrm{i}f_{0,3})$；$g_{2,1}=\dfrac{1}{8}(3f_{3,0}-\mathrm{i}f_{2,1}+f_{1,2}-3\mathrm{i}f_{0,3})$；$g_{1,2}=\dfrac{1}{8}(3f_{3,0}+\mathrm{i}f_{2,1}+f_{1,2}+3\mathrm{i}f_{0,3})$；$g_{0,3}=\dfrac{1}{8}(f_{3,0}+\mathrm{i}f_{2,1}-f_{1,2}-\mathrm{i}f_{0,3})$。

2 主要结论及证明

定理 1 对充分小的 $\alpha=(\alpha_1,\alpha_2)$，映射(12)可经光滑可逆变换化为

$$\omega\mapsto\Gamma_\alpha(\omega)=\mu(\alpha)\omega+H_{2,1}(\alpha)\omega^2\bar{\omega}+H_{0,3}(\alpha)\bar{\omega}^3+O(|\omega|^4)。\tag{13}$$

式(13)中：$H_{2,1}$，$H_{0,3}$ 为 α 的光滑函数，且 $\mu(\alpha)=\left(\dfrac{1}{a_0-1}-\dfrac{2}{a_0}\right)\alpha_1+\left(\dfrac{1}{a_0-1}-\dfrac{3}{a_0}\right)\alpha_2+\mathrm{i}\dfrac{(\alpha_1-3\alpha_2+2a_0(1+\alpha_2))}{2a_0}\sqrt{1-\dfrac{(a_0-3)^2(\alpha_1+(3-2a_0)\alpha_2)^2}{(a_0-1)^2(\alpha_1-3\alpha_2+2a_0(1+\alpha_2))^2}}$，则有

$$\left.\begin{aligned}H_{2,1}(0)&=\frac{a_0^2(-6+5\mathrm{i})-a_0^3(1-2\mathrm{i})(a_0-4-\mathrm{i})}{4(a_0-1)^2},\\H_{0,3}(0)&=-\frac{a_0^2(8-\mathrm{i})+a_0^3(a_0-6+\mathrm{i})}{4(a_0-1)^2}。\end{aligned}\right\}\tag{14}$$

证明：取光滑的多项式变换

$$z=\omega+\sum_{2\leqslant k+l\leqslant 3}R_{k,l}u_1^k\bar{u}_1^l。$$

根据正规形理论[16]及计算，若取

$$R_{2,0}=\frac{g_{2,0}}{\mu(\mu-1)},\quad R_{1,1}=\frac{g_{1,1}}{\mu(\bar{\mu}-1)},\quad R_{0,2}=-\frac{g_{0,2}}{\mu-\bar{\mu}^2},\quad R_{2,1}=0,\quad R_{0,3}=0,$$

$$R_{3,0}=\frac{2g_{2,0}^2+\mu(\mu-1)g_{3,0}}{\mu^2(\mu-1)^2(1+\mu)}+\frac{g_{1,1}\bar{g}_{0,2}}{\mu(\mu-1)(1+\mu)(\mu^2-\bar{\mu})},$$

$$\begin{aligned}R_{1,2}=&\frac{\bar{\mu}^3g_{1,1}^2+\mu^3(\mu(\bar{\mu}-1)g_{1,2}+g_{1,1}\bar{g}_{2,0})-\mu\bar{\mu}(1+\mu^2)g_{1,1}^2}{\mu^2\bar{\mu}(\mu-1)(\bar{\mu}-1)^2(\bar{\mu}+1)(\mu-\bar{\mu}^2)}+\\&\frac{\mu\bar{\mu}(\bar{\mu}-1)(\bar{\mu}^2g_{1,2}+2g_{0,2}g_{2,0}-2\bar{\mu}g_{0,2}\bar{g}_{1,1})+\mu\bar{\mu}^2g_{1,1}\bar{g}_{2,0}}{\mu^2\bar{\mu}(\mu-1)(\bar{\mu}-1)^2(\bar{\mu}+1)(\mu-\bar{\mu}^2)}-\\&\frac{\mu^2(2g_{0,2}\bar{g}_{1,1}-\bar{\mu}^3g_{1,2}+\bar{\mu}^4g_{1,2}-\bar{\mu}(g_{1,1}^2+g_{1,2}+2(g_{2,0}+\bar{g}_{1,1})g_{0,2}))}{\mu^2\bar{\mu}(\mu-1)(\bar{\mu}-1)^2(\bar{\mu}+1)(\mu-\bar{\mu}^2)}-\\&\frac{\mu^2g_{1,1}\bar{g}_{2,0}+\mu^2\bar{\mu}^2(g_{1,2}+2g_{0,2}g_{2,0}+g_{1,1}\bar{g}_{2,0})}{\mu^2\bar{\mu}(\mu-1)(\bar{\mu}-1)^2(\bar{\mu}+1)(\mu-\bar{\mu}^2)}。\end{aligned}$$

式中：$\mu=\mu(\alpha)$，可以将映射(12)化为正规形(13)的形式。

$H_{2,1}(0)$，$H_{0,3}(0)$是 $H_{2,1}(\alpha)$，$H_{0,3}(\alpha)$当参数 α 取 0 时的结果，证毕。

为了将差分方程转化为微分方程，用流去近似 $\Gamma_\alpha(\omega)$。$\Gamma_\alpha(\omega)$的线性部分为

$$\omega \mapsto \mu(\alpha)\omega。$$

可以将 $\mu(\alpha)$写成指数的形式

$$\mu(\alpha) = \mathrm{e}^{\lambda(\alpha)} = \mathrm{e}^{\varepsilon_1(\alpha)+\mathrm{i}\varepsilon_2(\alpha)}。$$

其中：$\varepsilon_1(0)=0$，$\varepsilon_2(0)=\dfrac{\pi}{2}$，$\mu(0)=\mathrm{i}$。$\Gamma_\alpha(\omega)$的线性部分是对 $\lambda(\alpha)=\varepsilon_1(\alpha)+\mathrm{i}\varepsilon_2(\alpha)$沿着线性方程 $\dot{\omega}=\lambda(\alpha)\omega$ 轨道的单位-时间的位移。

定理 2　对充分小的 α，映射(13)的第 4 次迭代可表示为

$$\Gamma_\alpha^4(\omega)=\varphi_\alpha^1\omega+O(|\omega|^4)。$$

式中：φ_α^t 为平面系统

$$\dot{\omega}=\sigma(\alpha)\omega+\widetilde{H}_{2,1}(\alpha)\omega^2\overline{\omega}+\widetilde{H}_{0,3}(\alpha)\overline{\omega}^3 \tag{15}$$

的流，σ，$\widetilde{H}_{2,1}$，$\widetilde{H}_{0,3}$为 α 的光滑复值函数且$\sigma(0)=0$，有

$$\widetilde{H}_{2,1}(0)=-4\mathrm{i}H_{2,1}(0),\qquad \widetilde{H}_{0,3}(0)=-4\mathrm{i}H_{0,3}(0)。 \tag{16}$$

证明：$\alpha\to 0$ 时，$\mu(0)=\mathrm{i}$，故 $\mu^4(0)=1$，因此，在 $\alpha=0$ 附近，可将 $\mu^4(\alpha)$表示为 $\mu^4(\alpha)=\mathrm{e}^{\sigma(\alpha)}$，$\sigma(\alpha)$为满足 $\sigma(0)=0$ 的光滑复值函数，而 $\dot{\omega}=\sigma(\alpha)\omega$ 的解为 $\omega(\tau)=\mathrm{e}^{\sigma(\alpha)\tau}\omega_0$，其中，$\omega_0$ 为初值。由此得到系统(15)的线性部分。

考虑非线性部分，对映射(13)进行 4 次迭代，每一次迭代的形式分别为

$$\Gamma_\alpha^1(\omega)=\mu\omega+H_{2,1}\omega^2\overline{\omega}+H_{0,3}\overline{\omega}^3+O(|\omega|^4),$$

$$\Gamma_\alpha^2(\omega)=\mu^2\omega+\mu(1+\mu\overline{\mu})H_{2,1}\omega^2\overline{\omega}+(\mu+\overline{\mu}^3)H_{0,3}\overline{\omega}^3+O(|\omega|^4),$$

$$\Gamma_\alpha^3(\omega)=\mu^3\omega+\mu^2(1+\mu\overline{\mu}(1+\mu\overline{\mu}))H_{2,1}\omega^2\overline{\omega}+(\mu^2+\mu\overline{\mu}^3+\overline{\mu}^6)H_{0,3}\overline{\omega}^3+O(|\omega|^4),$$

$$\Gamma_\alpha^4(\omega)=\mu^4\omega+\mu^3(1+\mu\overline{\mu})(1+\mu^2\overline{\mu}^2)H_{2,1}\omega^2\overline{\omega}+(\mu+\overline{\mu}^3)(\mu^2+\overline{\mu}^6)H_{0,3}\overline{\omega}^3+O(|\omega|^4)。$$

对于充分小的$|\alpha|$，由 $\mu^4(0)=1$ 可知，映射 $\Gamma_\alpha(\omega)$接近于恒同映射 $\mathrm{id}(\omega)=\omega$，故可用流的单位-时间位移进行近似。对系统(15)进行 3 次 Picard 迭代，即

$$\omega^{(1)}(\tau)=\omega^{(2)}(\tau)=\mathrm{e}^{\sigma(\alpha)\tau}\omega_0,$$

$$\omega^{(3)}(\tau)=\mathrm{e}^{\sigma(\alpha)\tau}\omega_0+\frac{\widetilde{H}_{2,1}(\alpha)\mathrm{e}^{\sigma(\alpha)\tau}}{\sigma(\alpha)+\overline{\sigma}(\alpha)}(\mathrm{e}^{(\sigma(\alpha)+\overline{\sigma}(\alpha))\tau}-1)\omega_0^2\overline{\omega}_0+$$

$$\frac{\widetilde{H}_{0,3}(\alpha)\mathrm{e}^{\sigma(\alpha)\tau}}{3\overline{\sigma}(\alpha)-\sigma(\alpha)}(\mathrm{e}^{(3\overline{\sigma}(\alpha)-\sigma(\alpha))\tau}-1)\overline{\omega}_0^3+O(|\omega_0|^4).$$

比较 $\omega^{(3)}(1)$与 $\Gamma_\alpha^4(\omega_0)$中各项系数，可得式(16)，证毕。

考虑 $\sigma(\alpha)$的实部和虚部为新开折参数。假设

$$\sigma(\alpha)=\beta(\alpha)=\beta_1(\alpha)+\mathrm{i}\beta_2(\alpha),$$

把 β_1，β_2 作为参数，其中，

$$\beta_1(\alpha)=4\varepsilon_1(\alpha)=4\ln\sqrt{p_1^2+p_2^2},\qquad \beta_2(\alpha)=4\varepsilon_2(\alpha)(\mathrm{mod}\ 2\pi)=4\arctan\frac{p_2}{p_1}。$$

式中：p_1，p_2 分别为 $\mu(\alpha)$的实部和虚部，显然，

$$\det\left(\frac{\partial\beta}{\partial\alpha}\right)\Big|_{\alpha=0}=\frac{16}{1-a_0}+\frac{72}{a_0^2}\neq 0。$$

因此，将 β 作为参数，则式(15)化为

$$\dot{\omega}=(\beta_1+\mathrm{i}\beta_2)\omega+h_{2,1}(\beta)\omega^2\overline{\omega}+h_{0,3}(\beta)\overline{\omega}^3。 \tag{17}$$

式(17)中：$h_{2,1}(\beta)=\widetilde{H}_{2,1}(\alpha(\beta))$；$h_{0,3}(\beta)=\widetilde{H}_{0,3}(\alpha(\beta))$，$h_{0,3}(0)=\widetilde{H}_{0,3}(0)\neq 0$，$\widetilde{H}_{0,3}(0)$的定义见式(16)。

对系统(17)进行尺度变换，令 $\omega=\gamma(\beta)\eta$，$\gamma(\beta)\in\mathscr{C}$，其中，

$$\gamma(\beta)=\frac{1}{\sqrt{|h_{0,3}(\beta)|}}\exp\left(\mathrm{i}\frac{\arg h_{0,3}(\beta)}{4}\right)。$$

系统(17)可化为

$$\dot{\eta}=(\beta_1+\mathrm{i}\beta_2)\eta+A(\beta)\eta^2\bar{\eta}+\bar{\eta}^3, \tag{18}$$

式(18)中:$A(\beta)=\dfrac{h_{2,1}(\beta)}{|h_{0,3}(\beta)|}$。

最后,对系统(18)作极坐标变换,令 $\eta=\rho\mathrm{e}^{\mathrm{i}\varphi}$,有

$$\left.\begin{aligned}\dot{\rho}&=\beta_1\rho+\mathrm{a}(\beta)\rho^3+\rho^3 cos\ 4\varphi,\\ \dot{\varphi}&=\beta_2+\mathrm{b}(\beta)\rho^2-\rho^2 sin\ 4\varphi。\end{aligned}\right\} \tag{19}$$

式(19)中:$a(\beta)=\mathrm{Re}\ A(\beta)$;$b(\beta)=\mathrm{Im}\ A(\beta)$。

由文献[17]中的引理9.15,类似地,可得定理3。

定理3 系统(18)有以下7种复杂的分岔曲线。

1) 系统(18)始终有平凡平衡点 $E_0(0,0)$,且在 E_0 处发生Hopf分支。此外,当 $\lambda=-\mathrm{i}$ 时,有一个稳定的极限环;当 $\lambda=\mathrm{i}$ 时,极限环消失。

2) 系统(18)的非平凡平衡点 S_k,$E_k(k=1,2,3,4)$ 存在切(折)分支,在相应的参数值处,8个非平凡平衡点出现或消失。

3) 非平凡平衡点 S_k,E_k 发生Hopf分支,从非平凡反鞍点 E_k 分支出4个"小"极限环。

4) 存在"小"同宿回路分支。"小"环由Hopf分支产生,由于非平凡鞍点 S_k 的同宿轨道而消失。

5) 存在"方形"异宿环。

6) 存在"叶形"异宿环。根据鞍点量 $\sigma_0=tr\ \Lambda(S_k)$ 的符号,可以确定产生的是稳定或不稳定的"大"极限环。

7) "大"极限环的切(折)分支。在两个"大"环处,外面的极限环稳定,且两个极限环碰撞并消失。

系统(18)的分支图1~4[17],如图1~4所示。

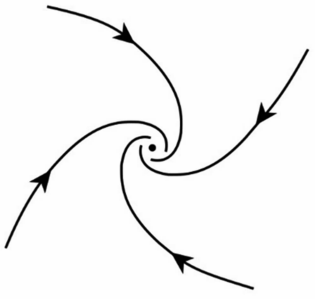


图1 系统(18)的分支图1

Fig. 1 Bifurcation diagram 1 of system (18)

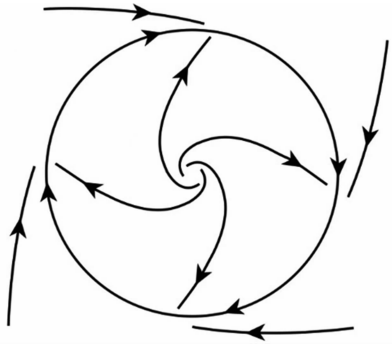


图2 系统(18)的分支图2

Fig. 2 Bifurcation diagram 2 of system (18)

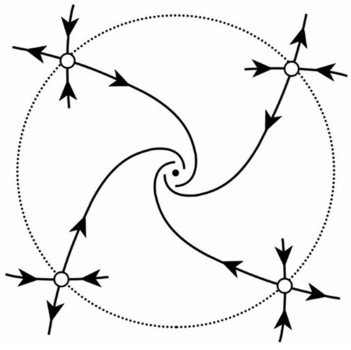


图3 系统(18)的分支图3

Fig. 3 Bifurcation diagram 3 of system (18)

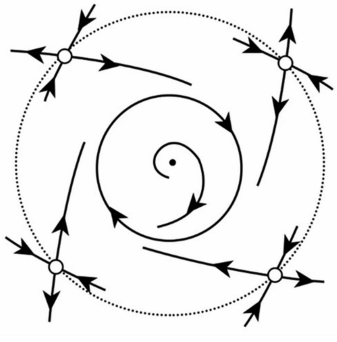


图4 系统(18)的分支图4

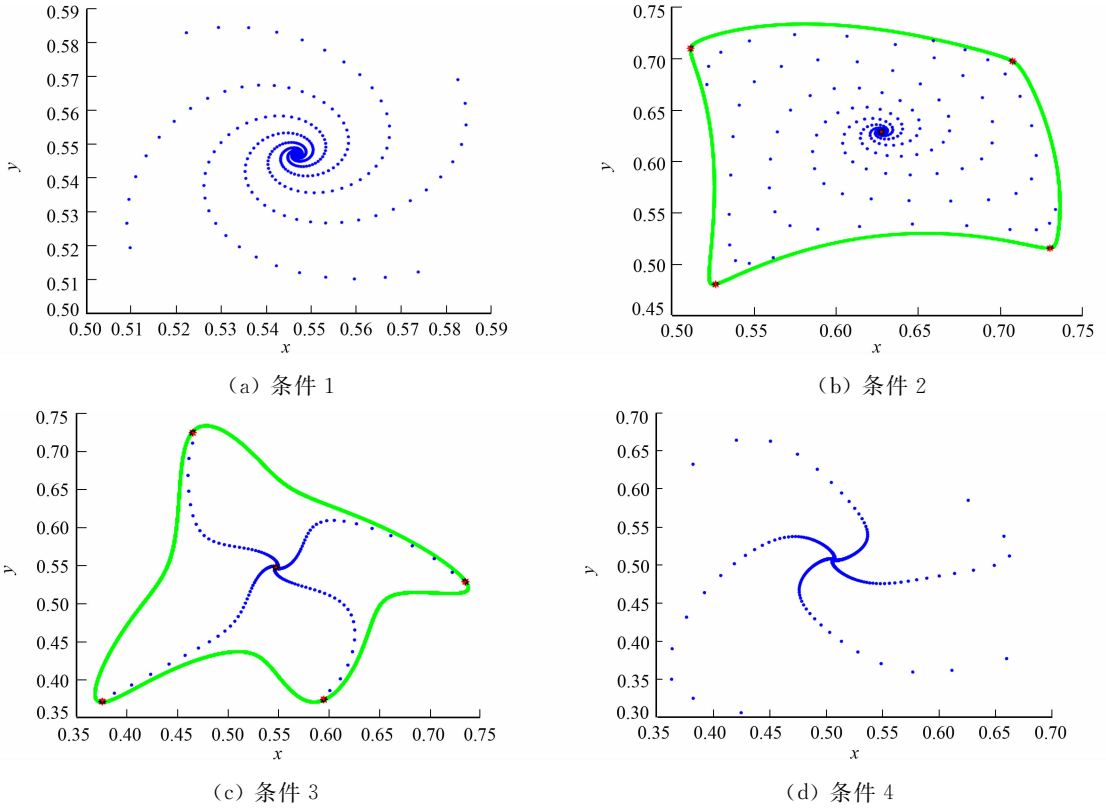
Fig. 4 Bifurcation diagram 4 of system (18)

根据定理3,可以得到系统(1)的相关结论。显然,系统(18)的平凡平衡点对应系统(1)的平凡不动点,系统(18)的4个非平凡对称平衡点对应系统(1)的单个周期4环。系统(18)非平凡平衡点的切分支和Hopf分支对应系统(1)非平凡不动点的切分支和Neimark-Sacker分支,系统(18)的同宿轨道和异宿

轨道对应系统(1)的异宿结构，系统(18)的极限环对应系统(1)的不变曲线。

3　数值模拟

对系统(1)的参数进行赋值，模拟系统(1)的相关性质。系统(1)在 E^* 附近的相图，如图 5 所示。当 $a_0=1.8, r_0=3, \alpha_1=0.003, \alpha_2=-0.087\ 31, c=0.185\ 185$ 时(条件 1)，系统(1)的不动点 E^* 为稳定的焦点(图 5(a))。当 $a_0=1.63, c=0.873\ 053, r_0=6.269\ 230, \alpha_1=0.012, \alpha_2=0.345$ 时(条件 2)，系统(1)在不动点 E^* 处发生 Neimark-Sacker 分岔，产生“方形”异宿环(图 5(b))。当 $a_0=1.812, c=0.166\ 27, r_0=2.903\ 85, \alpha_1=0.063, \alpha_2=0.055$ 时(条件 3)，系统(1)在不动点 E^* 处产生了“叶形”异宿环(图 5(c))。当 $a_0=1.99, \alpha_2=-0.01, c=0.005\ 12, r_0=2.020\ 6, \alpha_1=-0.04$ 时(条件 4)，系统(1)的不动点 E^* 为稳定的焦点(图 5(d))。



(a) 条件 1　　(b) 条件 2

(c) 条件 3　　(d) 条件 4

图 5　系统(1)在 E^* 附近的相图

Fig. 5　Phase portraits of system (1) near E^*

4　结束语

研究具有弱 Allee 效应的捕食者-猎物系统，当参数满足一定条件时，系统(1)的不动点 E^* 发生 1∶4 共振。为更方便地研究系统(1)的性质，首先，将系统(1)写成一个平面映射，对映射的线性部分进行 Jordan 化，再将系统化为复数的形式。然后，根据正规形理论将其化为正规形，利用 Picard 迭代及时间 1 映射，将离散系统化为常微分方程系统。最后，作尺度变换和极坐标变换，将常微分方程系统转化为极坐标的形式。通过分析常微分方程退化平衡点附近的性质，得到离散系统不动点附近的性质。对离散系统进行相应的数值模拟，结果表明，随着参数值和扰动的变化系统会产生稳定的焦点、“方形”异宿环、“叶形”异宿环及 Neimark-Sacker 分支等。

参考文献：

[1]　HUANG Jicai, LIU Sanhong, RUAN Shigui, *et al*. Bifurcations in a discrete predator-prey model with nonmonotonic functional respose[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2018, 464(1): 201-230. DOI: 10.1016/j.

jmaa. 2018. 03. 074.

[2] ZHONG Jiyu, YU Zhiheng. Qualitative properties and bifurcations of Mistro-Rodrigues-Petrovskii model[J]. Nonlinear Dynamics, 2018, 91(4): 2063-2075. DOI: 10. 1007/s11071-017-3932-0.

[3] DENNIS B. Allee effects: Population growth, critical density, and the change of extinction[J]. Nature Resource Modeling, 1989, 3(4): 481-538. DOI: 10. 1111/j. 1939-7445. 1989. tb00119. x.

[4] CHEN Xianwei, FU Xiangling, JING Zhujun. Dynamics in a discrete-time predator-prey system with Allee effect[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, English Series, 2013, 29(1): 143-164. DOI: 10. 1007/s10255-013-0207-5.

[5] WANG Wanxiong, ZHANG Yanbo, LIU Changzhong. Analysis of a discrete-time predator-prey system with Allee effect[J]. Ecological Complexity, 2011, 8(1): 81-85. DOI: 10. 1016/j. ecocom. 2010. 04. 005.

[6] ZHANG Limin, ZHANG Chaofeng, HE Zhirong. Codimension-one and codimension-two bifurcations of a discrete predator-prey system with strong Allee effect[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2019, 162: 155-178. DOI: 10. 1016/j. matcom. 2019. 01. 006.

[7] ZHANG Limin, XU Yike, LIAO Guangyuan. Codimension-two bifurcations and bifurcation controls in a discrete biological system with weak Allee effect[J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2022, 32(3): 1-27. DOI: 10. 1142/S0218127422500365.

[8] PECORN N. Analysis of 1∶4 resonance in a monopoly model with memory[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2018, 110: 95-104. DOI: 10. 1016/j. chaos. 2018. 03. 005.

[9] LI Bo, HE Zhimin. 1∶2 and 1∶4 resonances in a two-dimensional discrete Hindmarsh-Rose model[J]. Nonlinear Dynamics, 2015, 79(1): 705-720. DOI: 10. 1007/s11071-014-1696-3.

[10] LUO Guangwei, ZHANG Yanlong, XIE Jianhua, *et al*. Periodic-impact motions and bifurcations of vibro-impact systems near 1∶4 strong resonance point[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2008, 13(5): 1002-1014. DOI: 10. 1016/j. cnsns. 2006. 08. 004.

[11] CHEN Qiaoling, TENG Zhidong, WANG Lei, *et al*. The existence of codimension-two bifurcation in a discrete SIS epidemic model with standard incidence[J]. Nonlinear Dynamics, 2013, 71(1): 55-73. DOI: 10. 1007/s11071-012-0641-6.

[12] CHAKRABORTY P, SARKAR S, GHOSH U. Stability and bifurcation analysis of a discrete prey-predator model with sigmoid functional response and Allee effect[J]. Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo Series 2, 2021, 70(1): 253-273. DOI: 10. 1007/s12215-020-00495-5.

[13] KANGALGIL F, TOPSAKAL N, ÖZTÜRK N. Analyzing bifurcation, stability, and chaos control for a discrete-time prey-predator model with Allee effect[J]. Turkish Journal of Mathematics, 2022, 46(6): 2047-2068. DOI: 10. 55730/1300-0098. 3253.

[14] CHENG Lifang, CAO Hongjun. Bifurcation analysis of a discrete-time ratio-dependent predator-prey model with Allee effect[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2016, 38(1): 288-302. DOI: 10. 1016/j. cnsns. 2016. 02. 038.

[15] CELIK C, DUMAN O. Allee effect in a discrete-time predator-prey system[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2009, 40: 1956-1962. DOI: 10. 1016/j. chaos. 2007. 09. 077.

[16] 张芷芬, 李承治, 郑志明, 等. 向量场的分岔理论基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.

[17] KUZNETSOV Y A. Elements of applied bifurcation theory[M]. 2 ed. New York: Springer, 1998.

(**责任编辑**: 钱筠 **英文审校**: 黄心中)

DOI：10.11830/ISSN.1000-5013.202308007

向量值全纯映射 Schwarz 引理的刚性

林雄，李锦成，王建飞

（华侨大学 数学科学学院，福建 泉州 362021）

摘要： 借助 Schwarz 引理，给出单位圆盘上全纯自映射的 Schwarz 引理刚性结果。作为应用，得到了单位圆盘到 $\mathbf{C}^n$ 中单位球上的向量值全纯映射的刚性，丰富了 Schwarz 引理的研究。

关键词： 多复变；全纯映射；Schwarz 引理；刚性

中图分类号： O 174.5 **文献标志码**： A **文章编号**： 1000-5013(2023)06-0777-04

Rigidity of Schwarz Lemma for Vector-Valued Holomorphic Mappings

LIN Xiong, LI Jincheng, WANG Jianfei

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

Abstract: By using Schwarz lemma, rigidity result of Schwarz lemma for the holomorphic self-map of the unit disk is given. As an application, the rigidity of the vector valued holomorphic mapping from the unit disk to the unit ball of $\mathbf{C}^n$ is proved, which enriches the study of Schwarz lemma.

Keywords: several complex variables; holomorphic mapping; Schwarz lemma; rigidity

1 预备知识

记 D 为复平面 $\mathbf{C}$ 上的单位圆盘，即 $D=\{z\in\mathbf{C}:|z|<1\}$，n 维复欧氏空间 $\mathbf{C}^n$ 中的单位球记为

$$B_n=\{\boldsymbol{z}=(z_1,z_2,\cdots,z_n)\in\mathbf{C}^n:\|\boldsymbol{z}\|<1\}。$$

式中：$\|\boldsymbol{z}\|=\sqrt{\langle\boldsymbol{z},\boldsymbol{z}\rangle}=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}z_j\overline{z}_j}$，$\boldsymbol{z}\in\mathbf{C}^n$。

注意到 $n=1$ 时，$B_1=D$。记 $S^n=\partial B_n$ 为 $\mathbf{C}^n$ 中的单位球面。单位多圆柱记为

$$D^n=\underbrace{D\times D\times\cdots\times D}_{n个}。$$

当 $n\geqslant 2$ 时，B_n 与 D^n 不是双全纯等价的[1-2]。

Schwarz 引理是复分析的重要定理（Schwarz 引理给出全纯映射的一个重要基本性质），也是复分析和复几何研究的一个重要工具。文献[3-15]对 Schwarz 引理进行了推广及应用。引理 1 为经典的 Schwarz 引理。

引理 1[3] 设 $f:D\to D$ 是全纯映射，$f(0)=0$，则在单位圆盘 D 内恒有 $|f(z)|\leqslant|z|$，$|f'(0)|\leqslant 1$。$|f'(0)|=1$ 或 $|f(z_0)|=|z_0|$ 在某个点 $z_0\in D\backslash\{0\}$ 处成立，当且仅当 $f(z)=\mathrm{e}^{\mathrm{i}\theta}z$（$|z|<1$）。其中，$\theta$ 为实常数。

收稿日期： 2023-08-07

通信作者： 李锦成（1974-），男，讲师，主要从事复分析的研究。E-mail：hquljc@hqu.edu.cn。

基金项目： 国家自然科学基金资助项目（12071161）

特别地,若 $f'(0)=1$,则在 D 内,$f(z)\equiv z$。

一般地,如果把引理1中的 $f(0)=0$ 这个条件去掉,则有 Schwarz-Pick 引理(引理2)。

引理 2[13] 设 $f:D\to D$ 是全纯映射,则有

$$|f'(z)|\leqslant\frac{1-|f(z)|^2}{1-|z|^2},\qquad |z|<1。$$

特别地,$|f'(0)|\leqslant 1-|f(0)|^2$。

如果 $f'(0)=1$,那么有 $1\leqslant 1-|f(0)|^2\Rightarrow f(0)=0$。

由经典的 Schwarz 引理可知,在 D 内,$f(z)\equiv z$。设 $f:D\to D$ 是全纯映射,且存在一点 $a\in D$,使得 $f'(a)=\dfrac{1}{1-|a|^2}$,那么有

$$f(z)=\frac{z-a}{1-\bar{a}z},\qquad |z|<1。$$

基于此,本文给出了更一般的向量值全纯映射的刚性结果。

2 单位圆盘 D 上的 Schwarz 引理的刚性

定理 1 设 $f:D\to D$ 是全纯映射,若存在一点 $a\in D$,使得 $f'(a)=\dfrac{1}{1-|a|^2}$,那么,对于任意一点 $z\in D$,有

$$f(z)=\frac{z-a}{1-\bar{a}z}。$$

证明:证明分两种情况。

情况 1 若 $a=0$,则 $f'(0)=1$。由 Schwarz-Pick 引理,$1=|f'(0)|\leqslant 1-|f(0)|^2$,从而 $f(0)=0$。再由经典的 Schwarz 引理,有 $f(z)=z$ $(|z|<1)$。结论得证。

情况 2 若 $a\in D\backslash\{0\}$,令 $g(z)=-f(\varphi_a(z))$,其中,$\varphi_a(z)=\dfrac{a-z}{1-\bar{a}z}\in \mathrm{Aut}(D)$,则由 g 的定义易知,g 是 D 上的全纯自映射,且有

$$g'(0)=-f'(a)\varphi'_a(0)=-\frac{1}{1-|a|^2}(-1+|a|^2)=1。$$

由情况1的结论,对于任意一点 $\omega\in D$,有 $g(\omega)\equiv\omega$,即 $f(\varphi_a(\omega))=-\omega$。记 $z=\varphi_a(\omega)$,则有

$$f(z)=\frac{z-a}{1-\bar{a}z},\qquad |z|<1。$$

3 向量值 Schwarz 引理的刚性

引理 3[14] 如果 $\boldsymbol{f}:D\to B_n$ 是全纯映射,$\boldsymbol{f}(0)=\boldsymbol{0}=(0,0,\cdots,0)$,则对于任意一点 $z\in D$,有

$$\|\boldsymbol{f}(z)\|\leqslant|z|。$$

证明:任意取定一点 $z\in D$,则对于满足 $\boldsymbol{f}(z)=\boldsymbol{0}$ 的点 z,有 $0=\|\boldsymbol{f}(z)\|\leqslant|z|$,结论成立。对于 $\boldsymbol{f}(z)\neq\boldsymbol{0}$ 的点 z,则取定 $\boldsymbol{\xi}=\dfrac{\boldsymbol{f}(z)}{\|\boldsymbol{f}(z)\|}\in S^n$,$\lambda(\omega)=\langle\boldsymbol{f}(\omega),\boldsymbol{\xi}\rangle(\omega\in D)$,那么 λ 是 D 上的全纯自映射,且有 $\lambda(0)=0$。

由经典的 Schwarz 引理,对任意一点 $\omega\in D$,有 $|\lambda(\omega)|\leqslant|\omega|$,即 $|\langle\boldsymbol{f}(\omega),\boldsymbol{\xi}\rangle|\leqslant|\omega|$。取 $\omega=z$,则 $\|\boldsymbol{f}(z)\|\leqslant|z|$。

引理 4[4] 若 $\boldsymbol{f}:D\to B_n$ 是全纯映射,则有

$$\|\boldsymbol{f}'(0)\|\leqslant\sqrt{1-\|\boldsymbol{f}(0)\|^2}。$$

定理 2 设 $\boldsymbol{f}:D\to B_n$ 是全纯映射,若 $\boldsymbol{f}'(0)=\boldsymbol{e}_1=(1,0,\cdots,0)$,则对任意一点 $z\in D$,有

$$\boldsymbol{f}(z)=(z,0,\cdots,0)。$$

证明:记 $\boldsymbol{f}(z)=(f_1(z),f_2(z),\cdots,f_n(z))$,$z\in D$。由于 $\boldsymbol{f}'(0)=\boldsymbol{e}_1$,从而有

$$\begin{cases} f'_1(0)=1, \\ f'_j(0)=0, \quad j=2,3,\cdots,n。 \end{cases}$$

又显然，f_1 是 D 上的全纯自映射。那么由定理 1，有 $f_1(z)=z\ (z\in D)$。

由引理 4 知，$1=\|\boldsymbol{f}'(0)\|\leqslant\sqrt{1-\|\boldsymbol{f}(0)\|^2}$，从而 $\boldsymbol{f}(0)=\boldsymbol{0}$。

由引理 3，对于任意一点 $z\in D$，有 $\|\boldsymbol{f}(z)\|\leqslant|z|$，即

$$\sum_{j=1}^{n}|f_j(z)|^2\leqslant|z|^2。$$

又因为 $f_1(z)=z$，所以有

$$|z|^2+\sum_{j=2}^{n}|f_j(z)|^2\leqslant|z|^2。$$

那么，$f_j(z)=0, j=2,3,\cdots,n, \boldsymbol{f}(z)=(z,0,\cdots,0), z\in D$。

推论 1　设 $\boldsymbol{f}:D\to B_n$ 全纯，若存在 $\boldsymbol{\alpha}\in S^n$，使得 $\boldsymbol{f}'(0)=\boldsymbol{\alpha}$，则存在 n 阶酉方阵 $\boldsymbol{U}$，使 $\boldsymbol{f}(z)=(z,0,\cdots,0)\boldsymbol{U}, z\in D$。

证明：取 n 阶酉矩阵 $\boldsymbol{U}_1$，使 $\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{U}_1=\boldsymbol{e}_1$。令 $\boldsymbol{g}(z)=\boldsymbol{f}(z)\boldsymbol{U}_1(z\in D)$，则有 $\boldsymbol{g}'(0)=\boldsymbol{f}'(0)\boldsymbol{U}_1=\boldsymbol{e}_1$。应用定理 2，得 $\boldsymbol{f}(z)\boldsymbol{U}_1=\boldsymbol{g}(z)=(z,0,\cdots,0)$，即 $\boldsymbol{f}(z)=(z,0,\cdots,0)\overline{\boldsymbol{U}_1}', z\in D$。取 $\boldsymbol{U}=\overline{\boldsymbol{U}_1}', \overline{\boldsymbol{U}_1}'$ 为 $\boldsymbol{U}_1$ 的共轭转置。结论成立。

定理 2 对于取值在单位多圆柱 $D^n(n\geqslant 2)$ 上的全纯映射族是不成立的。反例如下。

假设 $\boldsymbol{f}(z)=(z,z^2,\cdots,z^n), z\in D$。显然，$\boldsymbol{f}:D\to D^n$ 是全纯映射，且 $\boldsymbol{f}'(0)=\boldsymbol{e}_1$。但是，$\boldsymbol{f}(z)\equiv(z,0,\cdots,0), z\in D$。

定理 2 类似于定理 1 的特殊情况。要想推出类似定理 1 的一般刚性结果，需要讨论 D 到 B_n 的全纯映射族 $H(D,B_n)$ 的类似 Schwarz-Pick 引理结论（引理 5，引理 4 的直接推广）。

引理 5　若 $\boldsymbol{f}:D\to B_n$ 是全纯映射，则对于任意一点 $a\in D$，有

$$\|\boldsymbol{f}'(a)\|\leqslant\frac{\sqrt{1-\|\boldsymbol{f}(a)\|^2}}{1-|a|^2}。$$

证明：任意取定一点 $a\in D$，令 $\boldsymbol{g}(z)=\boldsymbol{f}(\varphi_a(z))\ (z\in D)$，则 $\boldsymbol{g}:D\to B_n$ 是全纯映射，且

$$\begin{cases} \|\boldsymbol{g}(0)\|=\|\boldsymbol{f}(a)\|, \\ \|\boldsymbol{g}'(0)\|=\|\boldsymbol{f}'(a)\|\cdot|\varphi'_a(0)|=\|\boldsymbol{f}'(a)\|\cdot(1-|a|^2)。 \end{cases}$$

由引理 4，有

$$\|\boldsymbol{f}'(a)\|\cdot(1-|a|^2)\leqslant\sqrt{1-\|\boldsymbol{f}(a)\|^2},$$

再移项可得结论成立。

由引理 5，推出更一般的刚性结果（定理 3）。

定理 3　设 $\boldsymbol{f}:D\to B_n$ 是全纯映射，若存在一点 $a\in D$，使得 $\boldsymbol{f}'(a)=\frac{1}{1-|a|^2}\boldsymbol{e}_1$，则有

$$\boldsymbol{f}(z)=\left(\frac{z-a}{1-\bar{a}z},0,\cdots,0\right), \quad z\in D。$$

证明：根据 a 的选取，分成如下两种情况予以证明。

情况 1　当 $a=0$ 时，由定理 3，结论显然成立。

情况 2　当 $a\in D\backslash\{0\}$ 时，令 $\boldsymbol{g}(\omega)=-\boldsymbol{f}(\varphi_a(\omega)), \omega\in D$，则 $\boldsymbol{g}\in H(D,B_n)$ 且有

$$\boldsymbol{g}'(0)=\boldsymbol{e}_1。$$

对 $\boldsymbol{g}$ 应用定理 3，即有

$$\boldsymbol{g}(\omega)=\omega\boldsymbol{e}_1, \quad \omega\in D。$$

再令 $z=\varphi_a(\omega)$，则有

$$\boldsymbol{f}(z)=\frac{z-a}{1-\bar{a}z}\boldsymbol{e}_1, \quad z\in D。$$

类似推论 1 的证明，即可得到推论 2。

推论 2 设 $\boldsymbol{f}:D\to B_n$ 是全纯映射,若存在 $a\in D$ 和 $\boldsymbol{\alpha}\in S^n$,使得 $\boldsymbol{f}'(a)=\dfrac{1}{1-|a|^2}\boldsymbol{\alpha}$,则存在一个 n 阶酉矩阵 $\boldsymbol{U}$,使得

$$\boldsymbol{f}(z)=\frac{z-a}{1-\bar{a}z}\boldsymbol{e}_1\boldsymbol{U},\qquad z\in D。$$

参考文献:

[1] 史济怀. 多复变函数论基础[M]. 北京:高等教育出版社,2014.

[2] SCHEIDEMANN V. Introduction to complex analysis in several variables[M]. Switzerland:BirkhäUser,2023.

[3] BEARDON F,MINDA D. The hyperbolic metric and geometric function theory[C]// Proceedings of the International Quasiconformal Mappings and Their Applications. New Delhi:Narosa Publishing House,2007:9-56.

[4] PAVLOVIC M. A Schwarz lemma for the modulus of a vector-valued analytic function[J]. Proceedings of the American Mathematical Society,2011,139(3):969-973. DOI:10.1090/S0002-9939-2010-10578-6.

[5] LIU Yang,DAI Shaoyu. A note on Schwarz lemma for the modulus of holomorphic mappings on D[J]. Acta Mathematica Scientia,2015,35(1):89-94. DOI:10.1016/S0252-9602(14)60141-7.

[6] 徐庆华,刘太顺. 关于全纯映照模的 Schwarz 引理一点注记[J]. 数学年刊 A 辑(中文版),2016,37(2):147-154. DOI:10.16205/j.cnki.cama.2016.0014.

[7] 张宇芳,徐庆华. 单位圆盘上全纯映照模的精细 Schwarz 引理[J]. 数学物理学报,2017,37(1):18-25. DOI:10.3969/j.issn.1003-3998.2017.01.003.

[8] DAI Shaoyu,PAN Yifei. A Schwarz-Pick lemma for the modulus of holomorphic mappings between the unit balls in complex spaces[J]. Complex Variables and Elliptic Equations,2014,60(6):864-874. DOI:10.1080/17476933.2014.981170.

[9] DAVID K. Schwarz lemma for holomorphic mappings in the unit ball[J]. Glasgow Mathematical Journal,2018,60(1):219-224. DOI:10.1017/S0017089517000052.

[10] KNESE G. A Schwarz lemma on the polydisk[J]. Proceedings of the American Mathematical Society,2007,135(9):2759-2768. DOI:10.1090/S0002-9939-07-08766-7.

[11] DAI Shaoyu,PAN Yifei. A Schwarz-Pick lemma for the modulus of holomorphic mappings from the polydisk into the unit ball[J]. Acta Mathematica Scientia,2014,34(6):1775-1780. DOI:10.1016/S0252-9602(14)60122-3.

[12] WANG Jianfei,LIU Yang. The generalized Schwarz-Pick estimates of arbitrary order on the unit polydisk[J]. Complex Analysis and Operator Theory,2013,7(3):519-528. DOI:10.1007/s11785-011-0189-3.

[13] 史济怀,刘太顺. 复变函数[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1998.

[14] RUDIN W. Function theory in the unit ball of $\mathbf{C}^n$[M]. New York:Springer-Verlag,1980.

[15] RUDIN W. Real and complex analysis[M]. Singapore:McGraw-Hill Book Company,1987.

(**责任编辑**:陈志贤 **英文审校**:黄心中)

第 44 卷总目次

第 1 期

采用数值仿真实验的“透光”镜制造原理 …… 李卓，姜峰，王福增，路冬，吴贤，黄国钦，黄辉 (1)

固定时间扩张状态观测器下的四旋翼飞行器滑模控制策略 …… 张昭琪，李平 (12)

扰动电压观测器与线性补偿策略相结合的死区补偿方法 …… 胡启国，马鉴望，张祥，白熊 (21)

多次爆破作用下巷道围岩累积损伤演化与破裂特征 …… 黄江，陈士海，曾凡福，苏松 (29)

钢筋混凝土历史建筑中方钢-混凝土的极限粘结应力分析 …… 糜镇东，淳庆，金辉 (38)

冷弯厚壁型钢螺栓连接抗剪性能试验 …… 魏阳坤，王玲玲，霍静思 (46)

泉州古城街巷空间形态演变分析 …… 蔡舒翔 (52)

城市路网空间结构对住宅价格的影响分析 …… 吴莞姝，胡龙超，赵凯，陈泽平 (60)

相变蓄热水箱的性能优化模拟分析 …… 陈跃，吴璠，张赫男，王大为，程远达 (71)

胍基化壳聚糖季铵盐的制备及其抗菌性能 …… 王林，辛梅华，李明春，雷嘉华 (79)

胜红蓟内生真菌转化柠檬烯产物的抑菌活性 …… 裴真巧，王奇志，杨道茂，于海玲 (87)

桃蚜关键抗性基因挖掘及抗蚜 Cry 蛋白预测 …… 瞿贵军，林毅 (94)

应用禁忌粒子群算法的车间调度及其并行化实现 …… 郑天华，王佳斌，蔡宇翔，彭凯 (104)

动态卷积的 3D 点云目标检测算法 …… 蔡黎明，杜吉祥，刘怀进，张洪博，黄敬东 (111)

技能映射通过析取模型诱导的多分知识结构 …… 孙晓燕，李进金 (119)

数值求解纳米尺度热传导分数阶抛物两步模型 …… 沈淑君 (133)

第 2 期

采用模糊扩张状态观测器的四旋翼无人机滑模轨迹跟踪控制 …… 林哲，李平 (141)

采用多目标粒子群-遗传算法的井筒钻孔机械臂臂长设计 …… 胡启国，苏文 (150)

台阶爆破模型试验下破碎岩石抛掷速度规律分析 …… 陈春超，陈士海，张智宇，曾凡福，苏松 (157)

均布荷载作用下简支组合梁受力机理分析 …… 郑双杰，焦礼哲，董紫法，庄致滨，褚英杰，李海锋 (166)

基于 BPT-MLR 模型的建筑能耗分析和预测 …… 杨昊，冉茂宇 (178)

应用机械臂混凝土3D打印技术的空心曲面建筑物的设计和建造 …… 贺宇豪，吴正旺 (187)

宗教文化对泉州古城街道活力的影响分析 …… 陈晓婧，高悦尔，李思仪，袁文杨 (196)

采用空间量化技术的泉州传统街巷风貌改造策略 …… 林思达 (206)

采用文献计量的建筑业物联网研究热点与趋势分析 …… 秦旋，陈康 (211)

NTA强化Fe(Ⅱ)/PMS体系降解橙黄G的效能与机制

…… 马红芳，杨浩宇，陈思颖，陈秀峰，许冬梅，董冬吟，邹景，张建林 (222)

水环境治理PPP项目的多主体行为演化博弈 …… 宋文洁，詹朝曦 (233)

图像抠图与copy-paste结合的数据增强方法 …… 杨天成，杨建红，陈伟鑫 (243)

用于裂隙光源的侧面发光塑料光纤散射点设计 …… 龚冬梅，庄秀秀，洪雪梅，庄凤江 (250)

采用区块链的物联网数据共享方案 …… 傅文龙，李国刚，解童 (257)

多重调和映射的同向两点Schwarz引理及应用 …… 李俊，陈铭新，王建飞 (264)

时间分数阶Black-Scholes方程的重心Lagrange插值配点法 …… 吴哲，黄蓉，田朝薇 (269)

广义Camassa-Holm方程的不对称孤立波和不对称扭波的存在性 …… 温振庶，黄紫红 (277)

第3期

外泌体在肿瘤诊疗中的研究进展 …… 佟雷，林懿 (281)

采用RSPM-PS算法的机械手末端避障路径规划 …… 欧阳云，高振国，范丽玲，王继斌，蒋坤良 (290)

复杂交通环境下二轮机动车乘员头盔检测算法 …… 钟铭恩，谭佳威，袁彬淦，吴志华，冯妍，朱程林 (301)

装配式张弦梁钢支撑结构力学性能分析 …… 林雨浓，孙德畅，张朝慧，郑金伙，饶武斌，李欣，李海锋 (309)

钢管混凝土组合柱耐火性能对比分析 …… 王卫华，鲁亚彪，左帅，张智勇，高献 (319)

采用VMD和归一化峭度的钢管混凝土柱内部脱空缺陷识别方法

…… 刘景良，彭佳敏，方露，姜洋，蔡宏爽，张義岭 (328)

明代石拱桥永昌桥的动力特性及其抗震性能分析 …… 马宇坤，淳庆 (336)

改良生土技术下的浙江省乡村建筑物化阶段减碳策略 …… 贺宇豪，张明珍，任卫中，李志昊，吴正旺 (346)

常见声元素对5类景观空间景观感知评价的影响 …… 廉英奇，欧达毅 (356)

预制构件生产-运输-装配一体化的建造调度优化 …… 秦旋，朱倩影，韩家玄 (366)

5株植物内生真菌生物转化柠檬烯和月桂烯产物分析 …… 杨道茂，王奇志，裴真巧 (374)

采用地理探测器和GWR模型的喀什地区农村居民点时空演变及影响因素分析 …… 钱琮晖，张永福，徐华君 (381)

采用精确抠图的单幅自然图像背景虚化合成方法 …… 李晓颖，李思琪，洪雪梅，张海（391）

MRAU-net 网络下的 X 光胸片肺野分割算法 …… 胡俊，李平（398）

对流扩散方程最优控制问题的重心插值配点格式 …… 黄蓉，姚梦丽，翁智峰（407）

双全纯映射的从属原理及其应用 …… 邵俊霞，胡春英，王建飞（417）

第 4 期

重组腺相关病毒基因药物临床前评价方法的回顾与展望 …… 李佳苇，黎玲，黄艺峰，刁勇（421）

双功能型纤溶酶的研究进展 …… 严慧，周晶晶，林宏峻，唐明青（427）

储能电站磷酸铁锂电池模组灭火参数的仿真优化 …… 叶祥虎，杜建华，谭必蓉，瞿常（435）

衬塑钢管海水海砂混凝土短柱轴压性能有限元分析 …… 叶勇，薛昱萱，孙大为，姜航，赖顺颖（442）

考虑墙体位移与土压力耦合的侧向位移计算方法 …… 刘孟帅，陈士海，叶刚楠（451）

加强层对框架-核心筒结构的经济性和碳排放量影响分析 …… 吴琼，胡红松，陈跃辉（460）

水-力耦合作用下砂岩松弛特性试验与本构模型 …… 李昂，俞缙，刘士雨，涂兵雄，常方强（469）

1875－1966 年福建华侨工业历史空间分布特征分析 …… 张家浩，刘子瑜，陈志宏（477）

长三角城市群路网密度与碳排放时空特征及耦合分析 …… 陈燕，周镇宇，蒋有君，索心睿，宋新山，王宇晖（485）

假臭草来源植物内生真菌生物转化(＋)-柠檬烯产物分析 …… 杨道茂（495）

吐鲁番传统村落景观空间特征分析 …… 冯义义，王欢，徐华君，王婷婷（502）

地质灾害敏感性下的伊犁河谷生态安全格局构建 …… 余芳瑞，王宏卫，钱田田，谢玲，魏一鸣（510）

鼓励合作秘密分享方案的概念与构建 …… 程小刚，郭韧，卢正添，周长利，陈永红（518）

离散非线性薛定谔方程的 1∶1 共振 …… 张文娴，邓圣福（526）

求解耦合非线性 Klein-Gordon-Schrödinger 方程的能量稳定方法 …… 郭姣姣，庄清渠（533）

第 5 期

线粒体 DNA 拷贝数作为生物标志物的研究前景 …… 徐冬旸，刁勇（541）

生物碱类化合物降压作用及其机制研究进展 …… 成志云，解李祥，白如玉，刁勇（550）

《西游记》人物蛋雕工艺品的精雕五轴加工技术 …… 江弥峰，朱来发，刘斌，金花雪（558）

高温下铝合金薄板面内轴压屈曲特性分析 …… 卢松凯，董毓利，房圆圆，齐建全（563）

裂隙岩石应力松弛特性及声发射试验 …… 张默涵，俞缙，常旭，刘士雨，涂兵雄（574）

深基坑开挖对基坑内外桥台基础的变形影响分析 …… 濮黎明，肖朝昀，朱浩杰，黄山景（582）

游人对城市绿色空间的热感知效应分析 …… 卓志雄，董靓(591)

钙钛矿薄膜样品的紫外光电子能谱制样方法 …… 王秋祥，王仕博，耿嘉莲，赵鹏(600)

基于DPSIR模型的新疆城市生态韧性评估及影响因素分析

…… 钱田田，王宏卫，余芳瑞，魏一鸣，尹玉聪，薛孟琦(607)

柏苓颗粒的降尿酸效果及其初步作用机制 …… 丁飞艳，郑茗冉，吴振，王立强，侯志勇(615)

大学生干眼影响因素的二元Logistic回归分析 …… 朱梅红，邹循东，林泰南(622)

应用多尺度混合卷积网络的脑电信号特征提取与识别 …… 王蒙昊，方慧娟，龚亨翔，罗继亮(628)

具有相依性元件的串联系统的冗余元件分配问题 …… 李晓琴，游银萍(636)

非线性Schrödinger方程的算子分裂配点格式 …… 姚梦丽，田朝薇，翁智峰(645)

非局部Swift-Hohenberg方程的积分因子龙格库塔格式 …… 汪亚楠，蔡耀雄(654)

第6期

石墨烯基气凝胶吸附材料在空气净化领域的研究进展 …… 许景威，陈国华(661)

铜死亡在肿瘤治疗方面的研究进展 …… 宋一博，郑才仕，周树锋(671)

轮毂驱动轻型商用车差速转向稳定性分析 …… 韩锋钢，陈进，罗翔，宋帆，彭倩(676)

福建省农村装配式建筑制约因素的系统动力仿真与生态效益探讨 …… 何春玲，张子晨，罗志宇，胡润(684)

组织和个人视角下安全支持对建筑工人的安全行为影响 …… 汪丫，祁神军，陈晶晶，康梦月(694)

南音声景的感知评价与心理恢复性效应 …… 陈岩君，欧达毅，廉英奇，杜春雨，徐涵(702)

街道环境和人群活动与主观感知的内在关联性 …… 吴莞姝，李欣迪，黄梦欣(707)

酚基壳聚糖季铵盐的结构对抗菌和抗生物被膜活性的影响 …… 王林，辛梅华，李明春，石露露，赖旺坤(719)

虾青素微胶囊对Hp小鼠血清及胃黏膜细胞因子的影响 … 文亚飞，王福财，许晓英，陈韵琪，吴振，王立强(727)

基于模板学习的智能侨情问句生成方法 …… 方昱龙，王泽锦，王华珍，何霆(735)

基于POI数据的社区生活圈体育服务设施空间分异 …… 田洁玫，梁发超(743)

采用空间依赖的MTDPN扶梯危险行为的姿态估计…… 林志鸿，郑力新，曾远跃(751)

顾及街景信息的城市交通违法行为影响因素分析 …… 赵志远，郁勋剑，黄永刚，吴升(759)

一类具有弱Allee效应离散捕食系统的1∶4共振 …… 杨金玲，邓圣福(769)

向量值全纯映射Schwarz引理的刚性 …… 林雄，李锦成，王建飞(777)

第44卷总目次 …… (Ⅰ～Ⅹ)

Total Contents of Vol. 44

No. 1

Manufacturing Principle of "Light-Transparent" Mirror Using Numerical Simulation Experiment
…… LI Zhuo, JIANG Feng, WANG Fuzeng, LU Dong, WU Xian, HUANG Guoqin, HUANG Hui (1)
Sliding-Mode Control Strategy of Quadrotor With Fixed-Time Extended State Observer
…… ZHANG Zhaoqi, LI Ping (12)
Dead-Time Compensation Method Based on Disturbance Voltage Observer and Linear Compensation Strategy
…… HU Qiguo, MA Jianwang, ZHANG Xiang, BAI Xiong (21)
Cumulative Damage Evolution and Fracture Characteristics of Tunnel Surrounding Rock Under Multiple Blasting Action …… HUANG Jiang, CHEN Shihai, ZENG Fanfu, SU Song (29)
Analysis on Ultimate Bond Stress of Square Rebar-Concrete in Reinforced Concrete Historical Building
…… MI Zhendong, CHUN Qing, JIN Hui (38)
Experiment on Shear Behavior of Bolted Connection of Cold-Formed Thick-Walled Steel
…… WEI Yangkun, WANG Lingling, HUO Jingsi (46)
Analysis on Morphological Evolution of Street Spaces in Quanzhou Ancient City …… CAI Shuxiang (52)
Influence of Urban Road Network Spatial Structure on Housing Price
…… WU Wanshu, HU Longchao, ZHAO Kai, CHEN Zeping (60)
Performance Optimization Simulation Analysis of Phase-Change Heat Storage Tank
…… CHEN Yue, WU Fan, ZHANG Henan, WANG Dawei, CHENG Yuanda (71)
Preparation and Antibacterial Properties of Guanidine Chitosan Quaternary Ammonium Salt
…… WANG Lin, XIN Meihua, LI Mingchun, LEI Jiahua (79)
Antibacterial Activity of Limonene Product Transformed by *Ageratum conyzoides* Endophytic Fungi
…… PEI Zhenqiao, WANG Qizhi, YANG Daomao, YU Hailing (87)
Discovery of Key Resistance Genes of *Myzus persicae* and Prediction of Anti-Aphid Cry Proteins
…… QU Guijun, LIN Yi (94)
Workshop Scheduling Using Forbidden Particle Swarm Algorithm and Its Parallel Implementation
…… ZHENG Tianhua, WANG Jiabin, CAI Yuxiang, PENG Kai (104)
3D Point Cloud Target Detection Algorithm Based on Dynamic Convolution
…… CAI Liming, DU Jixiang, LIU Huaijin, ZHANG Hongbo, HUANG Jingdong (111)

Polytomous Knowledge Structure Delineated by Skill Map Through Disjunctive Model
…… SUN Xiaoyan, LI Jinjin (119)
Numerical Solution for Nanoscale Heat Conduction Fractional Parabolic Two-Step Model
…… SHEN Shujun (133)

No. 2

Sliding Mode Trajectory Tracking Control for Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle Using Fuzzy Extended State Observer …… LIN Zhe, LI Ping (141)
Arm Length Design of Wellbore Drilling Robotic Arm Using MOPSO-GA Optimization Algorithm
…… HU Qiguo, SU Wen (150)
Analysis of Throwing Velocity Law of Broken Rocks in Bench Blasting Model Experiment
…… CHEN Chunchao, CHEN Shihai, ZHANG Zhiyu, ZENG Fanfu, SU Song (157)
Stress Mechanism Analysis of Simply Supported Composite Beam Under Uniform Load
…… ZHENG Shuangjie, JIAO Lizhe, DONG Zifa, ZHUANG Zhibin, CHU Yingjie, LI Haifeng (166)
Analysis and Prediction of Building Energy Consumption Based on BPT-MLR Model
…… YANG Hao, RAN Maoyu (178)
Design and Construction of Hollow Curved Surface Building Using Concrete 3D Printing Technology of Manipulator …… HE Yuhao, WU Zhengwang (187)
Influence of Religious Culture on Street Vitality of Quanzhou Ancient City
…… CHEN Xiaojing, GAO Yueer, LI Siyi, YUAN Wenyang (196)
Transformation Strategy of Traditional Streets and Alleys in Quanzhou City Using Spatial Quantification Technology …… LIN Sida (206)
Research Hotspots and Trend Analysis of Internet of Things in Construction Industry Using Bibliometrics
…… QIN Xuan, CHEN Kang (211)
Efficiency and Mechanism of NTA Enhanced Fe(Ⅱ)/PMS System for Degradation of Orange G
…… MA Hongfang, YANG Haoyu, CHEN Siying, CHEN Xiufeng, XU Dongmei, DONG Dongyin, ZOU Jing, ZHANG Jianlin (222)
Multi-Agent Behavior Evolutionary Game of Water Environment Treatment PPP Projects
…… SONG Wenjie, ZHAN Zhaoxi (233)
Data Enhancement Method Combining Image Matting and Copy-Paste
…… YANG Tiancheng, YANG Jianhong, CHEN Weixin (243)
Design of Scattering Point of Side-Glowing Plastic Optical Fiber for Slit Light Source
…… GONG Dongmei, ZHUANG Xiuxiu, HONG Xuemei, ZHUANG Fengjiang (250)
Data Sharing Scheme for Internet of Things Using Blockchain …… FU Wenlong, LI Guogang, XIE Tong (257)

Same Direction Two-Point Schwarz Lemma for Pluriharmonic Mappings and Application
…… LI Jun, CHEN Mingxin, WANG Jianfei (264)
Barycentric Lagrange Interpolation Collocation Method for Time-Fractional Black-Scholes Equation
…… WU Zhe, HUANG Rong, TIAN Zhaowei (269)
Existence of Asymmetric Solitary Waves and Asymmetric Kink Waves of Generalized Camassa-Holm Equation
…… WEN Zhenshu, HUANG Zihong (277)

No. 3

Research Progress of Exosomes in Tumor Diagnosis and Treatment …… TONG Lei, LIN Yi (281)
Obstacle-Avoidance Path Planning of Manipulator End Using RSPM-PS Algorithm
…… OUYANG Yun, GAO Zhenguo, FAN Liling, WANG Jibin, JIANG Kunliang (290)
Helmet Detection Algorithm of Two-Wheeled Motor Vehicle Occupant in Complex Traffic Environment
…… ZHONG Ming′en, TAN Jiawei, YUAN Bin′gan, WU Zhihua, FENG Yan, ZHU Chenglin (301)
Mechanical Property Analysis of Fabricated Beam String Steel Support Structure
…… LIN Yunong, SUN Dechang, ZHANG Chaohui, ZHENG Jinhuo, RAO Wubin, LI Xin, LI Haifeng (309)
Comparative Analysis of Fire Resistance of Concrete-Filled Steel Tubular Composite Columns
…… WANG Weihua, LU Yabiao, ZUO Shuai, ZHANG Zhiyong, GAO Xian (319)
Cavity Defect Detection Method for Concrete-Filled Steel Tubular Column Using VMD and Normalized Kurtosis
…… LIU Jingliang, PENG Jiamin, FANG Lu, JIANG Yang, CAI Hongshuang, ZHANG Xiling (328)
Analysis of Dynamic Characteristics and Seismic Performance of Yongchang Stone Arch Bridge in Ming Dynasty
…… MA Yukun, CHUN Qing (336)
Carbon Reduction Strategy of Rural Building Stage in Zhejiang Province Under Improved Raw Soil Technology
…… HE Yuhao, ZHANG Mingzhen, REN Weizhong, LI Zhihao, WU Zhengwang (346)
Influencial of Common Sound Elements on Landscape Perception Evaluation of Five Types of Landscape Space
…… LIAN Yingqi, OU Dayi (356)
Construction Scheduling Optimization of Production-Transportation-Assembly Integration of Prefabricated Components …… QIN Xuan, ZHU Qianying, HAN Jiaxuan (366)
Analysis of Biotransformation Products of Limonene and Myrcene by Five Plant Endophytic Fungi
…… YANG Daomao, WANG Qizhi, PEI Zhenqiao (374)
Analysis of Spatial and Temporal Evolution of Rural Settlements in Kashgar Region and Influencing Factors Using Geodetector and GWR Model …… QIAN Conghui, ZHANG Yongfu, XU Huajun (381)
Synthesis Method for Background Blurring of Single Natural Image Using Accurate Matting
…… LI Xiaoying, LI Siqi, HONG Xuemei, ZHANG Hai (391)
Lung Field Segmentation Algorithm of X-Ray Chest Film Based on MRAU-Net Network

…… HU Jun, LI Ping (398)

Barycentric Interpolation Collocation Format for Optimal Control Problem of Convection-Diffusion Equation

…… HUANG Rong, YAO Mengli, WENG Zhifeng (407)

Subordination Principle and Its Application of Biholomorphic Mappings

…… SHAO Junxia, HU Chunying, WANG Jianfei (417)

No. 4

Assessment and Prospects of Preclinical Evaluation Methods of Recombinant Adeno-Associated Virus Gene Medicine …… LI Jiashen, LI Ling, HUANG Yifeng, DIAO Yong (421)

Research Progress of Dual-Functional Fibrinolytic Enzyme

…… YAN Hui, ZHOU Jingjing, LIN Hongjun, TANG Mingqing (427)

Simulation and Optimization of Fire Extinguishing Parameters for Lithium Phosphate Battery Modules in Energy Storage Power Plants …… YE Xianghu, DU Jianhua, TAN Birong, QU Chang (435)

Finite Element Analysis of Axial Compression Behavior of Seawater Sea Sand Concrete-Filled Plastic-Lined Steel Tube Stub Columns …… YE Yong, XUE Yuxuan, SUN Dawei, JIANG Hang, LAI Shunying (442)

Lateral Displacement Calculation Method Considering Coupling of Wall Displacement and Earth Pressure

…… LIU Mengshuai, CHEN Shihai, YE Gangnan (451)

Influence of Stiffened Storey on Economy and Carbon Emission of Frame-Core Tube Structures

…… WU Qiong, HU Hongsong, CHEN Yuehui (460)

Experiment and Constitutive Model of Relaxation Behavior of Sandstone Under Water-Force Coupling Action

…… LI Ang, YU Jin, LIU Shiyu, TU Bingxiong, CHANG Fangqiang (469)

Analysis of Historical Spatial Distribution Characteristics of Fujian Overseas Chinese Industries From 1875 to 1966 …… ZHANG Jiahao, LIU Ziyu, CHEN Zhihong (477)

Spatial-Temporal Characteristics and Coupling Analysis of Road Network Density and Carbon Emissions in Yangtze River Delta Urban Agglomeration ……

…… CHEN Yan, ZHOU Zhenyu, JIANG Youjun, SUO Xinrui, SONG Xinshan, WANG Yuhui (485)

Analysis of Biotransformation Products of (+)-Limonene by Plant Endophytic Fungi From *Praxelis clematidea*

…… YANG Daomao (495)

Analysis of Landscape Spatial Characteristics of Traditional Villages in Turpan

…… FENG Yiyi, WANG huan, XU Huajun, WANG Tingting (502)

Construction of Ecological Security Pattern in Yili River Valley Under Geological Hazard Sensitivity

…… YU Fanrui, WANG Hongwei, QIAN Tiantian, XIE Ling, WEI Yiming (510)

Concept and Construction of Collaboration-Encouraging Secret Sharing Scheme

…… CHENG Xiaogang, GUO Ren, LU Zhengtian, ZHOU Changli, CHEN Yonghong (518)

1∶1 Resonance of Discrete Nonlinear Schrödinger Equation …… ZHANG Wenxian, DENG Shengfu (526)

Energy Stable Method for Coupled Nonlinear Klein-Gordon-Schrödinger Equation

…… GUO Jiaojiao, ZHUANG Qingqu (533)

No. 5

Research Prospects of Mitochondrial DNA Copy Numbers as Biomarkers …… XU Dongyang, DIAO Yong (541)

Research Progress on Antihypertensive Effect and Mechanism of Alkaloid Compounds

…… CHENG Zhiyun, XIE Lixiang, BAI Ruyu, DIAO Yong (550)

Five Axis precision Sculpture Processing Technology of Egg Carving Crafts for Characters in *Journey to the West* …… JIANG Mifeng, ZHU Laifa, LIU Bin, JIN Huaxue (558)

Analysis of In-Plane Axial Compression Buckling Characteristics of Aluminum Alloy Sheet at High Temperatures …… LU Songkai, DONG Yuli, FANG Yuanyuan, QI Jianquan (563)

Stress Relaxation Characteristics and Acoustic Emission Experiment of Fractured Rock

…… ZHANG Mohan, YU Jin, CHANG Xu, LIU Shiyu, TU Bingxiong (574)

Influence of Deep Foundation Pit Excavation on Deformation of Abutment Foundation Inside and Outside Foundation Pit …… PU Liming, XIAO Zhaoyun, ZHU Haojie, HUANG Shanjing (582)

Analysis of Thermal Perception Effect of Tourists on Urban Green Space

…… ZHUO Zhixiong, DONG Liang (591)

Preparation Method of Perovskite Thin Film Samples by Ultraviolet Photoelectron Spectroscopy

…… WANG Qiuxiang, WANG Shibo, GENG Jialian, ZHAO Peng (600)

Urban Ecological Resilience Assessment and Influencing Factors Analysis in Xinjiang Based on DPSIR Model

…… QIAN Tiantian, WANG Hongwei, YU Fangrui, WEI Yiming, YIN Yucong, XUE Mengqi (607)

Effect of Bailing Granules on Reducing Uric Acid and Its Preliminary Action Mechanism

…… DING Feiyan, ZHENG Mingran, WU Zhen, WANG Liqiang, HOU Zhiyong (615)

Binary Logistic Regression Analysis on Influencing Factors of Dry Eye of College Students

…… ZHU Meihong, ZOU Xundong, LIN Tainan (622)

Electro-Encephalogram Feature Extraction and Recognition Using Multi-Scale Hybrid Neural Network

…… WANG Menghao, FANG Huijuan, GONG Hengxiang, LUO Jiliang (628)

Redundancies Allocation Problem in Series System With Interdependent Components

…… LI Xiaoqin, YOU Yinping (636)

Operator Splitting Collocation Scheme for Nonlinear Schrödinger Equation

…… YAO Mengli, TIAN Zhaowei, WENG Zhifeng (645)

Integrating Factor Runge-Kutta Format of Nonlocal Swift-Hohenberg Equation

…… WANG Yanan, CAI Yaoxiong (654)

No. 6

Research Progress of Graphene-Based Aerogel Adsorption Materials in Air Purification
…… XU Jingwei, CHEN Guohua (661)
Research Progress of Cuproptosis in Tumor Therapy …… SONG Yibo, ZHENG Caishi, ZHOU Shufeng (671)
Stability Analysis of Differential Steering for Wheel-Driven Light Commercial Vehicles
…… HAN Fenggang, CHEN Jin, LUO Xiang, SONG Fan, PENG Qian (676)
System Dynamics Simulation on Constraining Factors and Ecological Benefits Discussion of Rural Prefabricated Buildings in Fujian Province …… HO Chunling, ZHANG Zichen, LUO Zhiyu, HU Run (684)
Effect of Safety Support on Construction Workers' Safety Behavior From Organizational and Individual Perspectives …… WANG Ya, QI Shenjun, CHEN Jingjing, KANG Mengyue (694)
Perception Evaluation and Psychological Restorative Effect of Nanyin Soundscape
…… CHEN Yanjun, OU Dayi, LIAN Yinqi, DU Chunyu, XU Han (702)
Internal Correlation Between Street Environment, Crowd Activities and Subjective Perception
…… WU Wanshu, LI Xindi, HUANG Mengxin (707)
Effect of Structure of Phenol-Based Chitosan Quaternary Ammonium Salt on Antibacterial and Antibiofilm Activities …… WANG Lin, XIN Meihua, LI Mingchun, SHI Lulu, LAI Wangkun (719)
Effect of Astaxanthin Microcapsules on Serum and Gastric Mucosal Cytokines of Hp Mice
…… WEN Yafei, WANG Fucai, XU Xiaoying, CHEN Yunqi, WU Zhen, WANG Liqiang (727)
Intelligent Question Generation Method Based on Template Learning for Overseas Chinese Situation
…… FANG Yulong, WANG Zejin, WANG Huazhen, HE Ting (735)
Spatial Differentiation of Sports Service Facilities in Community Life Circle Based on POI Data
…… TIAN Jiemei, LIANG Fachao (743)
Pose Estimation of Escalator Dangerous Behavior Using Spatially-Aware Multi-Task Decoupled Pose Network
…… LIN Zhihong, ZHENG Lixin, ZENG Yuanyue (751)
Analysis of Influencing Factors of Urban Traffic Violations Considering Street View Information
…… ZHAO Zhiyuan, YU Xunjian, HUANG Yonggang, WU Sheng (759)
1∶4 Resonance of Discrete Predator-Prey System With Weak Allee Effect
…… YANG Jinling, DENG Shengfu (769)
Rigidity of Schwarz Lemma for Vector-Valued Holomorphic Mappings
…… LIN Xiong, LI Jincheng, WANG Jianfei (777)
Total Contents of Vol. 44 …… (Ⅰ~Ⅹ)

《华侨大学学报(自然科学版)》简介

BRIEF INTRODUCTION TO JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE)

《华侨大学学报(自然科学版)》(以下简称《学报》)创刊于1980年,是福建省教育厅主管,华侨大学主办,面向国内外公开发行的自然科学综合性学术理论刊物.

《学报》的办刊宗旨是:坚持四项基本原则,贯彻"百花齐放,百家争鸣"和理论与实践相结合的方针,广泛联系海外华侨和港、澳、台、特区的科技信息,及时反映国内尤其华侨大学等高等学府在理论研究、应用研究和开发研究等方面的科技成果,为发展华侨高等教育和繁荣社会主义科技事业服务.

《学报》以创新性、前瞻性、学术性为办刊特色,主要刊登机械工程及自动化、测控技术与仪器、电气工程、电子工程、计算机技术、应用化学、材料与环境工程、化工与生化工程、土木工程、建筑学、应用数学等基础研究和应用研究方面的学术论文,科技成果的学术总结,新技术、新设计、新产品、新工艺、新材料、新理论的论述,以及国内外科技动态的综合评论等内容.

《学报》既是中文综合性科学技术类核心期刊,又是国内外重要数据库和权威性文摘期刊固定收录的刊源. 在历次全国及福建省的科技期刊评比中,《学报》都荣获过大奖. 曾获得1995年"全国高等学校自然科学学报系统优秀学报一等奖",1997年"第二届全国优秀科技期刊奖",1999年,2008年"全国优秀自然科学学报及教育部优秀科技期刊",并于2001年入选"中国期刊方阵'双效期刊'".

《学报》现为双月刊,A4开本. 国内统一连续出版物号: CN 35-1079/N;国际标准连续出版物号: ISSN 1000-5013;国内邮发代号: 34-41;国外发行代号: NTZ1050.

Journal of Huaqiao University (Natural Science) (abbreviated to the Journal), started publication in 1980, is a comprehensive and academic journal about natural science, open distribution at home and abroad, sponsored by Huaqiao University; The Education Department of Fujian Province is responsible for its work.

The Journal has its purpose: adhering to the four cardinal policies, carrying out the principles of the "Flowers Blossom; Schools of Thought Contend" and theory combined with practice, collecting information of science and technology from overseas and those in Hong Kong, Macao, Taiwan and special economic zones and all sides, and in time reflecting the scientific and technological achievements about domestic theoretical research, applied research and development research in our university and others, and serving for development of the overseas Chinese higher education and the socialist prosperity on science and technology.

The Journal, with characteristics of creative, perspective and academic study, publishes the articles of fundamental and applied research on mechanical engineering and automation, observing and controlling technology and instruments, electric and electronic engineering, computer, applied chemistry, materials and environmental engineering, chemical and biochemical engineering, civil engineering, architecture, applied mathematics, etc. and the academic reports on achievements of science and technology, theses on new technology, new design, new products, new crafts, new materials, new theories, and the comprehensive reviews on scientific and technological developments at home and abroad.

The Journal is not only a core Chinese periodical on comprehensive science and technology, but also an important data base at home and abroad and periodical source that the authoritative abstracts have been recorded regularly. The Journal won the prices among the national and provincial evaluation of scientific and technological periodicals such as "the first prize of good natural science of the national higher education periodicals" in 1995, "the good prize of the second national periodicals of science and technology" in 1997, "the good scientific and technological periodicals of the national natural science journals and the State Education Department" in 1999 and 2008, and selected into "'double-effect periodical' of the China periodicals matrix" in 2001. The Journal welcomes the contributors from our university and others.

The Journal is bimonthly publication, with format of A4. China standard serial number: CN 35-1079/N; International standard serial number: ISSN 1000-5013; Domestic mail number: 34-41; International issue number: NTZ1050.

《华侨大学学报(自然科学版)》编辑部

- 《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 44 卷 第 6 期 (总第 194 期) 2023 年 11 月 20 日

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCE)

(Bimonthly, Started in 1980)

Vol. 44 No. 6 (Sum 194) Nov. 20, 2023

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: www.hdxb.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
Http://www.hdxb.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