



ISSN 1000-5013

CN 35-1079/N

CODEN HDZIEF

华侨大学学报

(自然科学版)

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCE)

第 46 卷 第 1 期

Vol. 46 No. 1

2025

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 墩 (LIU Gong)

江开勇 (JIANG Kaiyong)

孙 涛 (SUN Tao)

肖美添 (XIAO Meitian)

吴季怀 (WU Jihuai)

宋秋玲 (SONG Qiuling)

张认成 (ZHANG Rencheng)

张云波 (ZHANG Yunbo)

陈国华 (CHEN Guohua)

苑宝玲 (YUAN Baoling)

周树峰 (ZHOU Shufeng)

郑力新 (ZHENG Lixin)

徐西鹏 (XU Xipeng)

郭子雄 (GUO Zixiong)

黄仲一 (HUANG Zhongyi)

黄华林 (HUANG Hualin)

葛悦禾 (GE Yuehe)

蒲继雄 (PU Jixiong)

蔡绍滨 (CAI Shaobin)

主 编 (Editor in Chief)

黄仲一 (HUANG Zhongyi)

目 次

综述

间充质干细胞外泌体在骨肉瘤治疗中的研究进展

..... 王福财, 刘卓晟 (1)

学术论文

分布式后驱电动客车电子差速控制策略

..... 常东鑫, 韩勇, 叶伟宏, 石金明, 申水文 (14)

粒子群算法优化的车辆悬架座椅模糊 PID 控制

..... 兰旋旋, 甘达, 林鸿森, 林祖胜 (23)

节理岩体中大跨隧道围岩变形破坏模式分析

..... 田皓天, 俞缙, 林聪波, 王海猛, 蔡浩慧, 周玮 (30)

基于 SketchUp 和 OSG 的区域建筑震害模拟三维动态可视化

..... 颜学渊, 郑欣颖, 刘旭宏, 赵瀚彬 (38)

夏热冬冷地区村镇典型街巷冬季热环境实测与分析

..... 林姝颖, 李玲真, 常明玉, 吴正旺 (46)

屋顶花园空间感知与恢复绩效的关联性

..... 卓志雄, 董靛 (52)

供需视角下的城市公园绿地空间评价及优化

..... 翁奕城, 王楠, 陈梓聪 (60)

中药治疗糖尿病肾病的伞状系统评价

..... 李滢, 周智涵, 杨齐锋, 吴循循, 刁勇, 杨会勇 (71)

丙戊酸促进小鼠神经干细胞分化成神经元及其影响机制

..... 宁文洁, 刘使君, 孙源培, 赖靖尧, 王立强, 侯志勇 (79)

融合距离引导式 A* 算法与动态窗口法的移动机器人路径规划

..... 黄昱航, 李国刚, 焦启, 曹冬平 (87)

机器学习模型交易中的数据购买量与模型定价

..... 林苗君, 羊梓敏, 陈斌 (95)

应用重心插值的 Burgers 方程数值解法

..... 滕宇航, 赖艺颖, 黄浪扬 (104)

广义(2+1)维 Hirota-Maccari 系统的动力学及混沌行为

..... 张冬梅, 梁建莉 (113)

CONTENTS

COMPREHENSIVE REVIEW

Research Progress of Mesenchymal Stem Cell-Derived Exosomes in Treatment of
Osteosarcoma

..... WANG Fucui, LIU Zhuosheng (1)

ACADEMIC PAPERS

Electronic Differential Control Strategy for Distributed Rear-Drive Electric Bus

..... CHANG Dongxin, HAN Yong, YE Weihong, SHI Jinming, SHEN Shuiwen (14)

Fuzzy PID Control of Vehicle Suspension Seat Optimized by Particle Swarm Algorithm

..... LAN Diandian, GAN Da, LIN Hongsen, LIN Zusheng (23)

Analysis of Deformation and Failure Mode of Surrounding Rock of Long-Span Tunnel in

Jointed Rock Mass

..... TIAN Haotian, YU Jin, LIN Congbo,

WANG Haimeng, CAI Haohui, ZHOU Wei (30)

Three-Dimensional Dynamic Visualization of Regional Building Seismic Damage Simulation

Base on SketchUp and OSG

..... YAN Xueyuan, ZHENG Xinying, LIU Xuhong, ZHAO Hanbin (38)

Actual Measurement and Analysis of Winter Thermal Environment in Typical Streets and

Alleys in Villages and Towns of Hot Summer and Cold Winter Regions

..... LIN Shuying, LI Lingzhen, CHANG Mingyu, WU Zhengwang (46)

| | |
|--|--|
| Correlation Between Spatial Perception and Restoration Performance in Rooftop Garden | ZHUO Zhixiong, DONG Liang (52) |
| Space Evaluation and Optimization of Urban Park Green From Perspective of Supply and Demand | WENG Yicheng, WANG Nan, CHEN Zicong (60) |
| Umbrella Systematic Review of Chinese Medicine for Diabetic Nephropathy | LI Ying, ZHOU Zhihan, YANG Qifeng, WU Xunxun, DIAO Yong, YANG Huiyong (71) |
| Valproic Acid Promotes Differentiation of Mouse Neural Stem Cells Into Neurons and Its Mechanism of Effect | NING Wenjie, LIU Shijun, SUN Yuanpei, LAI Jingyao, WANG Liqiang, HOU Zhiyong (79) |
| Path Planning for Mobile Robots by Integrating Distance-Guided A* Algorithm and Dynamic Window Approach | HUANG Yuhang, LI Guogang, JIAO Qi, CAO Dongping (87) |
| Data Purchase Volume and Model Pricing in Machine Learning Model Transactions | LIN Miaojun, YANG Zimin, CHEN Bin (95) |
| Numerical Solution Method of Burgers Equation Using Barycentric Interpolation | TENG Yuhang, LAI Yiyang, HUANG Langyang (104) |
| Dynamics and Chaotic Behavior of Generalized (2+1)-Dimensional Hirota-Maccari System | ZHANG Dongmei, LIANG Jianli (113) |

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202408063



间充质干细胞外泌体在骨肉瘤 治疗中的研究进展

王福财, 刘卓晟

(华侨大学 医学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 阐述间充质干细胞外泌体(MSC-Exos)在骨肉瘤(OS)治疗中的研究进展。通过查阅近年的相关文献,综述 OS 的研究现状、发病机制和潜在治疗靶点, MSC-Exos 的生物学特性和功能,以及 MSC-Exos 在 OS 的靶向治疗、肿瘤耐药性和作为药物递送载体等方面的研究进展。结果表明: MSC-Exos 作为一种新兴的生物治疗剂,在 OS 治疗领域具有广阔的应用前景。

关键词: 间充质干细胞; 外泌体; 骨肉瘤; 靶向治疗; 肿瘤耐药性

中图分类号: R 738.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2025)01-0001-13

Research Progress of Mesenchymal Stem Cell-Derived Exosomes in Treatment of Osteosarcoma

WANG Fucui, LIU Zhuosheng

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

Abstract: This review is to elucidate the research progress of mesenchymal stem cell-derived exosomes (MSC-Exos) in the treatment of osteosarcoma (OS). By reviewing recent relevant literature, the current status, pathogenesis and potential therapeutic targets of OS, the biological characteristics and functions of MSC-Exos, as well as the research progress of MSC-Exos in OS targeted therapy, tumor drug resistance and as a drug delivery carrier are summarized. The results show that MSC-Exos, as a novel biological therapeutic agent, has broad application prospects in OS treatment.

Keywords: mesenchymal stem cells; exosomes; osteosarcoma; targeted therapy; tumor resistance

骨肉瘤(OS)是来源于间叶组织的骨肿瘤,在原发恶性骨肿瘤中占比约为 50%。目前,学界广泛认为其起源于间充质干细胞(MSC),尽管骨肉瘤的治疗已经取得了巨大的进展,但仍然面临着作用靶点少、异质性高、肿瘤微环境复杂、预后较差等问题。近年来,间充质干细胞外泌体(MSC-Exos)作为肿瘤治疗的有力工具已经成为研究热点, MSC-Exos 通过调节肿瘤微环境、抑制肿瘤细胞的增殖和迁移,表现出显著的抗肿瘤作用。此外, MSC-Exos 还能作为药物递送的纳米载体,提高药物的靶向性和治疗效果。大量研究结果表明, MSC-Exos 具有体积小、完整性高等特性,将 MSC-Exos 应用于 OS 治疗具有较高的临床价值和广阔的应用前景,有望成为一种治疗 OS 的新型纳米治疗剂。

收稿日期: 2024-08-25

通信作者: 王福财(1978-),男,副教授,博士,主要从事间充质干细胞在肿瘤及炎症损伤中的应用的研究。E-mail: wfc@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(81860354, 81060273); 江西省青年科学基金资助项目(20132BAB215017)

1 骨肉瘤概述

1.1 骨肉瘤研究现状

OS是骨组织中最常见的原发性恶性骨肿瘤,在儿童和青少年人群中的发病率最高(中位年龄为18岁),其次是60岁以上的老年人,具有双峰年龄分布特征。研究显示,在全球范围内,OS的发生率约为每年每百万人2~4例^[1-2],其中,大约四分之一的患者存在肝和肺的转移性疾病,肺是最常见的转移部位^[3],肺组织的转移进展和患者复发是OS临床死亡的主要原因^[4]。OS的好发部位为股骨远端、胫骨近端和肱骨近端等长骨靠近骨干骺端的生长板,较少发生在颅骨、颌骨、骨盆等位置。OS的特征是存在转化的成骨细胞并产生类骨质基质。OS细胞的生长转移与肿瘤微环境(TME)有很强的联系,特别是骨微环境。骨微环境是由细胞外基质和各种细胞所组成,后者包括MSC、内皮细胞、巨噬细胞、淋巴细胞、干细胞、成纤维细胞、成骨细胞、破骨细胞和骨细胞等。骨微环境是一个非常特化、复杂的高度动态的环境,OS和骨微环境中多种细胞之间通过许多环境信号相互调节,这些环境信号通常由多种细胞因子、趋化因子、可溶性生长因子诱导生成^[5],由细胞外囊泡(EV)进行传递。目前,EV被认为是细胞间通信的一个有效载体^[6],由外泌体(Exos)、迁移体、微泡等多种亚型构成。然而,由于OS高水平细胞异质性的存在,以及OS相关分子和遗传机制的复杂性,使临床上开发有效治疗的手段变得极其困难。目前,OS患者使用的治疗包括手术切除原发性肿瘤和新辅助化疗。这种常规治疗方法对于局限性OS患者疗效较好,但对于具有化疗药物耐药性的晚期、转移性、复发性的OS患者则效果大大降低,可导致预后不良。据报道,转移性OS患者的平均生存时间一般不到5a^[7]。因此,阐明OS的发病机制及其潜在治疗靶点,可为未来开发新型OS的治疗方法提供新的思路。

1.2 骨肉瘤发病机制

1.2.1 骨肉瘤分子生物学特征 OS的分子生物学机制可以大致分为DNA突变、非编码RNA作用和表观遗传学改变等3个部分。DNA突变主要体现在TP53和RB1两个抑癌基因。Wagley等^[8]发现,在小鼠体外试验中使TP53沉默后,可以诱导小鼠MSC中的Osx,Runx2高水平表达,使骨质表型产生恶性转化。研究表明,RB1基因是推动OS亚群发展的重要驱动因子。其他的DNA突变,如MDM2^[9],WWOX,NF2^[10],BLM^[11]等均与OS的发生、发展具有相关性。非编码RNA占体内RNA数量的90%以上,其中,miR-101,miR-200等微小RNA与OS密切相关。miR-101能显著降低MG-63细胞系的存活率抑制OS增殖,而miR-200则可以通过下调OS细胞中的E结合锌指蛋白(ZEB1,ZEB2),抑制OS发生及转移。其他的非编码RNA(如lncRNA-FGD5-AS1,circRNA-103801,circRNA-MTO1等)均可对OS产生不同程度的影响。除此之外,Zhang等^[12]发现,以DNA甲基化和组蛋白修饰为主的表观遗传学异常改变也能够引起正常细胞向恶性肿瘤细胞转化。因此,研究OS的分子生物学特征,可为OS的早期诊断、早期治疗、疗效判断及预后等提供重要的参考指标。

1.2.2 骨肉瘤相关信号通路 近年来,越来越多的研究表明,肿瘤细胞内信号通路的失调与OS的发生、发展密切相关。Zhu等^[13]发现,SNHG10,FLVCR1-AS1等非编码RNA物质可通过调节Wnt/ β -连环蛋白信号通路的活性调控OS细胞的增殖和侵袭。Liu等^[14]发现,在PI3K/Akt信号通路中,lncRNA GAS5的上调可以降低PI3K/Akt信号通路的活性,达到抑制OS细胞增殖和减少侵袭的效果。而Wang等^[15]发现,在JAK/STAT信号通路中,OS细胞中IL-6呈高水平表达,抑制该通路则可抑制OS细胞生长和转移。除此之外,PD-1/PD-L1,MAPK,NF- κ B等信号通路也呈现出与OS的高度相关性,共同参与OS的生长发展机制^[16-17]。因此,多条信号通路参与OS的发生、发展,但OS具体发病机制尚不明确。

1.3 骨肉瘤潜在分子靶点

1.3.1 泛素特异性蛋白酶家族 泛素-蛋白酶体系统的功能影响着机体大部分的重要细胞活动,包括基因转录、DNA修复及细胞凋亡的全过程,并且深刻诱导肿瘤的发生、发展^[18]。泛素特异性蛋白酶1(USP1)是一种去泛素化酶亚型,研究表明,USP1在肿瘤组织中呈高度表达,其在OS的进展中也发挥重要作用。Chen等^[19]发现,盐诱导激酶2(SIK2)在多种肿瘤(包括OS)中的表达水平与肿瘤的进展密切相关,SIK2可作为OS潜在的治疗靶点。以慢病毒载体为传递介质的USP1-shRNA能够沉默SIK2

并导致 OS 细胞系凋亡,降低侵袭性,这表明 USP1 和 SIK2 之间存在密切关联。Yuan 等^[18]发现,USP1 可以通过 K11 和 K29 去泛素化介导转录共激活因子与 PDZ 结合基序进行稳定结合,对下游的 Hippo 信号通路产生影响,抑制 OS 细胞中 TEAD 转录因子和 PDZ 结合基序的相互作用,降低下游 Hippo 信号通路的各组分水平,包括 CYR61, c-Myc 和 RUNX2 等。此外,Zeng 等^[20]在包含 45 个 OS 样本的报告中发现,USP7 的高水平表达,可能通过激活 Wnt/ β -连环蛋白信号通路诱导 OS 细胞发生上皮-间质转化。因此,泛素特异性蛋白酶家族(不限于 USP1, USP2, USP7)均对 OS 的发生、发展产生直接或间接的影响。

1.3.2 ErbB 家族 ErbB 家族是一类能够调节关键细胞信号传导途径和基因表达水平的酪氨酸激酶受体^[21]。ErbB 家族由以下 4 个成员构成: ErbB1 (HER1), ErbB2 (HER2), ErbB3 (HER3), ErbB4 (HER4),其中,HER1 属于表皮生长因子受体(EGFR)。ErbB1 和 ErbB2 能够促进肿瘤的发展,且 ErbB2/ErbB3 的信号传导可以通过 PI3K/Akt 途径促进肿瘤细胞的生长和侵袭。ErbB3 可以通过激活 Wnt 3a 途径的信号传导,使由 Wnt 3a 途径诱导的靶向 MSC 向成骨细胞分化,形成新的骨组织应用于骨再生。Huang 等^[22]在包含 90 个 OS 患者样本的研究中发现,原发性 OS 组织中的 ErbB3, ErbB4 的扩增水平明显更高,并且 ErbB3 和 ErbB3-EGFR 共扩增水平与 OS 发生、发展有着密切相关性,提示 ErbB3 可能是 OS 治疗的一个重要靶点。Jullien 等^[23]发现,在同种异体移植的小鼠模型中,ErbB3 的沉默能够通过抑制肿瘤细胞增殖达到治疗肿瘤的效果,这更证实 ErbB3 应用于 OS 治疗中的潜在可能性。因此,ErbB 家族有望成为 OS 潜在的治疗靶标。

1.3.3 溶血磷脂酸酰基转移酶 β 溶血磷脂酸酰基转移酶 β (LPAAT β)是一类可以调节 OS 细胞增殖的酶类。它能够将机体内的溶血磷脂酸转化为磷脂酸,溶血磷脂酸的生物活性与细胞的生长增殖有着紧密的联系,且转化后的产物磷脂酸是一种具有信息传导功能的生物活性磷脂,它广泛参与机体多种信号转导途径,如 Raf-1, mTOR 等,能够发挥抑制肿瘤细胞的作用。在大量的 OS 患者样本研究中,均发现 LPAAT β 的过表达情况,这表明 LPAAT β 的水平高低与 OS 发生、发展有着潜在联系。Song 等^[24]发现,将 siRNA 沉默的 LPAAT β 插入到慢病毒载体后,在体外对具有顺铂耐药性的 OS 细胞进行给药,以此来观测沉默 LPAAT β 对 OS 细胞活力的影响,结果表明,沉默 LPAAT β 基因能够抑制顺铂耐药性 OS 细胞的生长,主要是通过降低 PI3K/Akt/mTOR 信号通路的激活。Gan 等^[25]发现,在睾丸癌细胞模型中,激活 PI3K/Akt/mTOR 信号通路能够抑制顺铂诱导的细胞凋亡,并改善对顺铂的耐药性。这一机制在其他肿瘤如 OS 中可能也具有相似的调控作用,但具体机制尚需进一步研究验证。

1.3.4 Notch 信号通路 Notch 信号通路主要参与细胞间的信息传导,当细胞间带有 Notch 信号的相关配体的细胞和相邻带有 Notch 信号受体的细胞结合后,即可激活 Notch 信号通路,产生信号传导,其本质是配体受体相互结合后产生交互作用,使得细胞中 Notch 蛋白的构象变化,发生 Notch 细胞内域的核转位。目前,在哺乳动物中已发现有 5 种配体(DLL1, DLL3, DLL4, Jagged1, Jagged2)和 4 种受体(Notch1, Notch2, Notch3, Notch4)。骨形态发生蛋白 9(BMP9)是一类能够调节肿瘤细胞增殖和组织修复再生的蛋白质,在建立 BMP9 强诱导性 MSC 分化的前提条件之下,Notch 信号可通过调节不同的配体和受体发挥不同作用,其中,Notch1 能够抑制破骨细胞的生成和骨吸收,而 Notch2 则可以显著增强作用。由此可见,Notch 信号传导在肿瘤细胞发生、发展、迁移过程中都发挥关键作用,与 OS 微环境紧密相关。在 OS 的模型中,可以发现 Notch 信号失调,Notch 信号活性调节对于 OS 的治疗具有潜在意义。Cao 等^[26]发现,Notch1 可以激活 BMP9/Smad 信号通路,并通过上调 ALK2 表达水平,促进 MSC 分化增殖用于骨再生,而且经过 Notch 信号诱导的 BMP9 还能够促进 MSC 成骨分化的全过程,使机体内碱性磷酸酶活性大大增强。然而,Notch 信号通路在 OS 发生、发展中的确切作用仍有待进一步研究。

1.3.5 其他潜在分子靶点 细胞外基质(ECM)与 OS 的发生、发展密切相关。Martino 等^[27]发现,ECM 不仅可以早期预防 OS 的发生,还能通过调控 TME 抑制肿瘤的生长和进展,具体表现在 TME 中胶原蛋白、纤维粘连蛋白、层粘连蛋白等物质的水平变化。Bergamaschi 等^[28]发现,将 ECM 分为主要的 4 大类:ECM1, ECM2, ECM3, ECM4,它们分别参与 4 种不同的途径(PI3K 途径、葡萄糖代谢途径、Wnt- β -连环蛋白途径、内质网途径)对肿瘤细胞进行调节,能够在肿瘤细胞中发挥不同的生物学功能。

小分子核糖核酸(miRNA)与蛋白质的相互作用对于 OS 的进展有重要作用。常见的结合蛋白主要是以 NOB1, HMGB1, MIF 为主。Zhang 等^[29]发现,通过下调 miR-363 能够使 NOB1 的表达水平提高,而 miR-363 又与 OS 细胞增殖、迁移及上皮-间质转化有着重要联系。此外,Sumaiya 等^[30]发现,巨噬细胞移动抑制因子(MIF)通过糖皮质激素反调节来介导生成炎症因子并参与肿瘤过程,MIF 能够与 miR-451 发生相互作用,诱导 miR-451 过表达并抑制 OS 细胞的增殖和迁移。Centomo 等^[31]发现,miR-22 能够靶向作用于树突状细胞(DC)的 p38 而抑制 DC 的抗肿瘤能力,进而诱导肿瘤进展。Lian 等^[32]发现,miR-34a 通过调控 C-Myc 和 Bim 信号通路,与 OS 细胞对顺铂(CDDP)的化疗敏感性、转移及患者预后密切相关。

DNA 依赖性蛋白激酶催化亚基(DNA-PKcs)是一类与凋亡蛋白酶高度相关的核 DNA 依赖性丝氨酸/苏氨酸蛋白激酶的催化亚基,在大量凋亡细胞中都可以观测到 DNA-PKcs 活性降低,因此,DNA-PKcs 是评价细胞凋亡的关键指标。Fang 等^[33]在小鼠实验模型中发现,DNA-PKcs 活性降低可以抑制小鼠体中人胶质母细胞瘤异种移植物的生长,使人胶质母细胞瘤异种移植植物中的肿瘤细胞大程度消退,在 OS 治疗中也可能发挥作用。

Gremlin(GREM)1 是骨形态形成蛋白拮抗剂,属于 BMP 家族成员,在机体内发挥着调节组织分化的关键作用。Gu 等^[34]发现,通过 lenti-GREM1 诱导的 GREM1 表现出过表达水平后,能够对 OS 细胞系中的 U2OS, MG63, Saos-2 等细胞的活力产生抑制作用,从而抑制 OS 发展。进一步在小鼠接种 U2OS 细胞模型中研究发现,上调 GREM1 水平能够抑制 OS 增殖,而 GREM1 沉默表达则会促进 OS 的发生、发展。

不同类型分子靶点与治疗骨肉瘤生物学功能的关系,如表 1 所示。

表 1 不同类型分子靶点与治疗骨肉瘤生物学功能的关系

Tab. 1 Relationship between different types of molecular targets and biological functions in treatment of osteosarcoma

| 分子靶点 | 靶点/信号通路 | 功能 | 引用文献 |
|---------------|----------------------|-------------|-----------|
| SNHG10 | Wnt/ β -连环蛋白途径 | 促进增殖和转移 | 文献[13] |
| lncRNA GAS5 | PI3K/Akt 途径 | 抑制侵袭和迁移 | 文献[14] |
| IL-6 | JAK/STAT 途径 | 调节生长和转移 | 文献[15] |
| USP1 | Hippo 途径 | 诱导细胞凋亡 | 文献[18-19] |
| USP7 | Wnt/ β -连环蛋白途径 | 诱导上皮-间质转化 | 文献[20] |
| ErbB3 | Wnt 3a 途径 | 抑制细胞增殖 | 文献[22-23] |
| LPAAT β | PI3K/Akt/mTOR 途径 | 增强耐药性 | 文献[24-25] |
| Notch1 | BMP9/Smad 途径 | 促进 MSC 成骨分化 | 文献[26] |
| ECM1 | PI3K 途径 | 上调胶原蛋白 | 文献[28] |
| ECM2 | Wnt/ β -连环蛋白途径 | 高度表达透明质酸 | 文献[28] |
| ECM3 | 葡萄糖代谢途径 | 维护细胞结缔组织 | 文献[28] |
| ECM4 | 内质网途径 | 上调炎症基因表达 | 文献[28] |
| miR-363 | NOB1 | 抑制生长、迁移 | 文献[29] |
| miR-451 | MIF | 介导生成炎症因子 | 文献[30] |
| miR-22 | p38 | 抑制 DC 抗肿瘤活性 | 文献[31] |
| miR-34a | C-Myc, Bim | 提高化疗敏感性 | 文献[32] |
| DNA-PKcs | GBM | 介导肿瘤消退 | 文献[33] |
| GREM1 | U2OS, MG63, Saos-2 | 抑制细胞系活性 | 文献[34] |

2 间充质干细胞及外泌体生物学特性

2.1 间充质干细胞外泌体

MSC 起源于发育早期的中胚层,属于多能干细胞。MSC 具有多向分化和自我复制的特点,能够分化为多种不同的组织细胞,包括骨细胞、软骨细胞、脂肪细胞等, MSC 在成人组织中功能的主要表现包括修复机制和再生活性。它存在于人体生长发育的许多组织中,可来源于骨髓、胎盘、羊水、脐带、脂肪组织和其他组织细胞。MSC 除了通过直接分化而达到治疗作用以外,还能够通过旁分泌的方式实现治

疗作用,旁分泌的物质主要是外泌体等细胞外囊泡。这类物质作用于靶细胞,最终实现靶向治疗^[35-36]。此外,Abdelmoneim 等^[37]发现,MSC 还表现出极强的免疫调节能力,MSC 可以通过分泌大量促炎因子诱导机体产生免疫应答,并且还能够有效地抑制炎症反应,招募大量的生长因子,从而激活机体损伤组织部位再生修复的机制。MSC 还具有多种生物学效应,在干扰肿瘤增殖侵袭、调节炎症反应、抗细胞凋亡、促进血管生成中都发挥着重要作用。MSC 临床广泛应用于干细胞移植、组织损伤修复、自身免疫性疾病治疗等领域,是目前再生医学领域中研究最广泛的干细胞。近年来,Qiao 等^[38]的研究结果显示,MSC 可促进肿瘤进展和抑制肿瘤增殖的现象,这提示 MSC 可能与肿瘤治疗存在高度相关性。Karnoub 等^[39]的研究结果显示,MSC 在 TME 中能够转化为肿瘤相关间充质干细胞,从而促进癌症进展。此后,基于 MSC 巨大的治疗潜力,将 MSC 用于临床肿瘤的治疗受到了越来越多学者的关注。

Exos 是由细胞分泌出的 EV 的一个亚群,大小均匀、直径为 40~100 nm,且具有相对稳定的脂质双分子层膜结构。根据颗粒直径大小,EV 可以分为外泌体(40~100 nm)、微泡(100~1 000 nm)和凋亡小体(500~5 000 nm)。外泌体最初是由 Johnstone^[40]在网织红细胞的研究中发现,并且在 1987 年将其命名为 exosome。Exos 早期被当作是与细胞废物代谢相关的物质,近些年来开始逐渐受到人们关注。Exos 通常以其内容物的不同进行分类,含有不同内容物的 Exos 在溶液中都具有各自的沉降系数,利用该特点进行差速离心是目前最常用的外泌体分离和提取的方法。除差速离心之外,通常还可使用超滤法、免疫亲和膜分离法、尺寸排除色谱法、分子筛层析法、微流控技术法等多种方法^[41]作为分离提取 Exos 的途径。Exos 是细胞间通讯的重要介质,可以将不同的内容物运至不同细胞,并参与信息传递和信号调控,其内容物复杂多样,包括蛋白质、核酸(mRNA, lncRNA, circRNA, miRNA, DNA)、脂质等生物分子。根据来自外泌体数据库 Vesiclepedia(<http://microvesicles.org/>)的数据,迄今为止被发现的 Exos 内容物包括 566 911 种蛋白质,27 692 种 mRNA,22 858 种 miRNA。随着研究的深入,除了网织红细胞以外,如间充质干细胞、肿瘤细胞、脂肪细胞、淋巴细胞等几乎所有类型的细胞都能够形成 Exos,且大多数都以出芽的方式进行分泌。Exos 可以由多种来源细胞释放,也可以由体液分离得到,如唾液、尿液、母乳、羊水、腹水等。Exos 在维持机体正常生理活动的同时,还参与多种病理生理过程。Exos 可以促进肿瘤细胞上皮-间质转化,形成转移前微环境,利于肿瘤的生长。Kogure 等^[42]发现,Exos 在肿瘤发生和发展、肿瘤转移的过程中都发挥着重要的调控作用。因此,Exos 已经成为医学领域治疗肿瘤的研究热点话题之一。

2.2 间充质干细胞外泌体的生物学特性

MSC 是一种具有巨大细胞治疗潜力的多能成体干细胞,在疾病治疗过程中,MSC 主要通过旁分泌途径产生 Exos 来介导细胞间通讯。Exos 作为体积最小的 EV,其稳定性最好,近年来被作为替代干细胞治疗的新研究热点。间充质干细胞外泌体(MSC-Exos)被描述为来源于 MSC 的且含有 Exos 的产物^[43],是目前使用最广泛的干细胞源性外泌体之一,其携带着母体细胞 MSC 的多种生物活性成分及生物学信息,可以替代细胞疗法实现无细胞疗法^[44]。Yaghoubi 等^[45]研究表明,MSC-Exos 在多种疾病的动物模型中展现出显著疗效,从而引起广泛的关注。

Hassanzadeh 等^[46]研究表明,MSC-Exos 在肿瘤治疗中具有显著作用,它能够作为治疗载体,与靶向药物结合后广泛参与细胞间通讯,将蛋白质、RNA 及其他生物活性分子递送到靶细胞中,发挥调节免疫、促血管生成的作用对特定疾病途径进行调控,这种 Exos 的介导反应可以抑制或促进肿瘤的发生、发展,显示出良好的治疗效果。与 MSC 相比,MSC-Exos 具有低免疫原性、低毒性、低致瘤性、长半衰期的独特优势,并且便于储存和管理,能够有效地降低肿瘤细胞不良分化的风险,并减少肿瘤治疗中不利的副作用。MSC-Exos 的功能可能与 MSC 的来源有关^[47-48]。不同来源 MSC-Exos 在生物学上都具有相同的特性,但同时也存在功能上的细微差异。例如,从脂肪细胞中提取的 MSC-Exos 比从骨髓中提取的 MSC-Exos 在促血管生成能力上更具有优势^[49]。

因此,探究 MSC-Exos 的来源、靶向性,以及其在肿瘤细胞中的作用和机制,将有助于扩大无细胞治疗方法的应用前景,提升临床肿瘤治疗水平^[36]。除此之外,目前 MSC-Exos 的研究大多数还停留在动物实验和人体体外实验中,在广泛投入临床使用之前,还需确定其给药剂量、给药途径、最佳的治疗时间窗,并且制定标准化生产、分离鉴定、效力检测等一系列相对统一的标准。传统的细胞治疗以干细胞

移植为主,这种方式可能存在机体免疫排斥现象及致瘤的可能,且由于体积较大,容易损伤周边组织,在使用上存在很大的局限性。与使用 MSC 的传统细胞治疗方法相比,MSC-Exos 在临床肿瘤治疗方面的应用范围更广、风险更小,既保留了 MSC 的生物学特性,又具备更好的安全性和便利性,因此,MSC-Exos 正成为一种有前途的纳米级无细胞治疗工具。

2.3 间充质干细胞外泌体的功能

MSC-Exos 除了表现 MSC 和 Exos 共同的生物学特性以外,与 MSC 相比具备更为稳定的膜结构,能够更大程度保证其内容物的完整性,并且 MSC-Exos 体积更小,更容易到达作用靶点,具有更低的免疫原性和更高的安全性。与 Exos 相比,MSC-Exos 富含蛋白质、核酸、脂类,以及具有生物活性的 RNA,包括 mRNA,miRNA,tRNA 等,能维持 MSC-Exos 对靶细胞进行基因转录与翻译的功能^[50]。这对于调节骨重建、神经炎症细胞及炎症因子等都有着直接或者间接的作用。机体中的骨稳态,主要靠成骨细胞和破骨细胞调节,若成骨细胞的相对活性高,可能会引发骨硬化,若成骨细胞的相对活性低,可能会引起骨质疏松,对机体均产生不利影响。因此,对成骨细胞和破骨细胞进行活性调节对于骨的再生修复具有重要意义。Yang 等^[51]发现,来源于 MSC-Exos 的 lncRNA MALATI 能够与成骨细胞中的 miRNA-34c 结合,提高转录因子 RUNX2 的活性水平,从而提高成骨细胞活性,增强体内成骨作用。Zuo 等^[52]发现,MSC-Exos 能够参与成骨细胞、破骨细胞之间的信息运输和传递,且能够防止破骨细胞因过度活化而对骨组织产生破坏,对维持骨稳态有着积极作用。除此之外,在动物试验中,MSC-Exos 还能够提高实验动物体内 VEGF/VEGFR 的表达水平,促进局部新生血管的形成^[53],同时还能够对骨折部位起到促进骨修复、加速骨愈合的作用^[54]。因此,MSC-Exos 疗法具有更广阔的应用前景。

MSC-Exos 还可以对神经炎症细胞及炎症因子产生作用,主要体现在对中性粒细胞、小胶质细胞、星形胶质细胞等神经炎症细胞及炎症因子的抑制作用。MSC-Exos 可以抑制中性粒细胞释放 IL-17 及补体激活,影响 IL-18,MMP-9,TNF- α 等^[55]物质的表达,从而对机体内中性粒细胞的浸润和吞噬能力进行调控。Zhao 等^[56]研究表明,它还可以作用于 NF- κ B 和 CysLT2R-ERK1/2 信号通路,减少小胶质细胞向 M1 型转化的可能,并促进其向 M2 型转化,最终抑制炎症的反应。对于星形胶质细胞,MSC-Exos 在经过 IL-1 的诱导后,可以抑制 Nrf-2 信号通路的活性^[57],减少脂多糖诱导的神经炎症反应。除作用于神经炎症细胞外,MSC-Exos 对巨噬细胞、树突状细胞、淋巴细胞也具有潜在调控作用,具体作用机制有待阐明。

3 间充质干细胞外泌体在骨肉瘤治疗中的应用

3.1 MSC-Exos 参与骨肉瘤靶向治疗

3.1.1 MSC-Exos 参与 OS 的肿瘤生长、转移与侵袭 MSC-Exos 可携带 MSC 的遗传信息,参与多种肿瘤的进程,并在 OS 细胞的生长、转移及侵袭过程中发挥重要作用。Yoshida 等^[58]发现,分离提取骨髓来源的 MSC-Exos 内容物 miR-25-3p,可以调控 OS 细胞增殖、迁移及侵袭能力,其主要表现在骨髓来源的 MSC-Exos 可以将 miR-25-3p 靶向转移至 OS 细胞,过表达后抑制其靶基因的表达,从而诱导 OS 细胞形成和转移。Shimbo 等^[59]发现,携带 miR-143 的 MSC-Exos 作用于 OS 的 143B 细胞后,机体内 OS 肺转移趋势明显受到抑制,表明 miR-143 可以很大程度上减少 OS 细胞的迁移。Qin 等^[60]探索内含 miR-208a 的 MSC-Exos 对 OS 细胞的影响,结果显示,OS 细胞能够通过 miR-208a 的介导与 MSC-Exos 进行细胞通讯,形成异位表达的 miR-208a 能显著提高 OS 细胞的存活和增殖能力。Zhang 等^[61]发现,miR-206 在 OS 细胞中呈低表达,过表达的 miR-206 能够显著抑制肿瘤细胞的增殖,并靶向作用于 TRA2B 促进细胞凋亡。Gong 等^[62]发现,OS 细胞通过 MSC-Exos 摄取 miR-675 后,能够显著下调细胞中 CALN1 的表达水平,从而促进细胞增殖与转移。Ruan 等^[63]发现,内容物 miR-22 可被 MG63 摄取,抑制 MG63 的增殖,从而抑制 OS 发展。Yun 等^[64]发现,miR-488-3p 通过靶向 NRSN2 来抑制肿瘤细胞的恶性行为并促进自噬,为 miR-488-3p 在 OS 发生中的作用提供新的见解。Xu 等^[65]发现,miR-150 能够通过靶向 IGF2BP1 促进 OS 细胞凋亡,抑制 OS 增殖与迁移。Zhao 等^[66]发现,长链非编码 RNA PVT1 也对 OS 也有影响,包裹 PVT1 的 MSC-Exo 与 OS 细胞接触后,能够抑制细胞的泛素化进程并促

进 ERG 的表达, 从而促进肿瘤生长和转移。Li 等^[67] 还发现, lncRNA MALAT1 能够通过 MALAT1/miR-143/NRSN2 轴调节下游 Wnt/ β -Catenin 信号通路, 从而促进 OS 细胞的增殖、迁移和侵袭。除此之外, 内含蛋白 uPA^[68]、LCP1^[69] 的 MSC-Exos 也对调控 OS 细胞增殖、迁移等发挥关键作用。uPA 能够通过激活 OS 细胞中的 uPA/uPAR 轴, 使肿瘤恶性转化为转移表型。而 LCP1 则能够通过 JAK2/STAT3 途径促进 OS 转移和增殖。因此, MSC-Exos 参与 OS 的肿瘤生长、转移与侵袭。

3.1.2 MSC-Exos 参与 OS 的肿瘤耐药性 随着 OS 耐药性机制的研究逐渐深入, MSC-Exos 不仅可以通过诱导 TME 细胞表型改变促进 OS 细胞的增殖、迁移, 还可以通过其内含物诱导 OS 细胞产生化疗耐药性。因此, 研究 MSC-Exos 内含物与 OS 信号通路和耐药性机制的关系都对探究其耐药性具有重要意义。临床上应用于 OS 治疗的药物主要有阿霉素(Dox)和 CDDP, Dox 和 CDDP 的耐药非常普遍^[70]。耐药性受 MSC-Exos 内含物调控的影响, 耐药性的发展严重限制了药物在 OS 临床治疗中的应用和有效性, 并且还可能导致预后不良和复发。

MSC-Exos 的内容物包含多种物质, 其中很大一部分可对 OS 细胞耐药性产生直接或间接的影响。Zhu 等^[71] 的研究显示, Exos 内含物 circPVT1 能在 OS 细胞系中表达相较于正常成骨细胞系 hFOB1.19 显著上调, 并且在多药耐药的 OS 细胞系中 circPVT1 的表达水平更高。进一步研究发现, circPVT1 能通过上调耐药性相关基因 ABCB1 的表达, 诱导 OS 细胞对顺铂和阿霉素的耐药性发生。敲除 circPVT1 的表达则可降低 ABCB1 的表达水平, 从而部分恢复 OS 细胞对这两种化疗药物的敏感性。临床数据表明, 高表达 circPVT1 的患者在生存率和预后方面均显著低于低表达患者, 这表明 circPVT1 在 OS 耐药性发展及患者预后中发挥重要作用。Pu 等^[72] 发现, 内容物 miR-34a-5p 可以通过抑制 AGTR1 基因的表达, 从而促进 OS 的多药耐药性。而内容物 miR-199a-3p 却能靶向调节 AK4 的表达, 下调 AK4 的水平, 从而降低 OS 的多药耐药性^[73]。此外, Wang 等^[74] 发现, miR-155 能够靶向作用于 PTEN 的表达, 通过激活 PI3K/Akt/mTOR 信号通路, 降低 OS 对 DOX 的敏感性。Li 等^[75] 还发现, miR-214 均可通过靶向作用位点 PHLDA2 抑制 PI3K/Akt 信号通路, 最终增强 OS 对于放射的敏感性。

目前, 尽管 OS 患者的临床化疗药物(包括顺铂、阿霉素、甲氨蝶呤及多比柔星等)能够较大幅度地改善病况, 提高预后总生存率, 然而, OS 化疗药物耐药性的高患病率却是一个不可忽略的因素。因此, 使用 MSC-Exos 运载的内容物对 OS 细胞进行靶向调控, 从而降低其耐药性, 是目前临床治疗 OS 的关键问题。

MSC-Exos 不同内容物与骨肉瘤靶向治疗功能的关系, 如表 2 所示。

表 2 MSC-Exos 不同内容物与骨肉瘤靶向治疗功能的关系

Tab. 2 Relationship between different contents of MSC-Exos and targeted therapeutic function of osteosarcoma

| 外泌体内容物 | 靶点/信号通路 | 功能 | 引用文献 |
|---------------|------------------------|--------------|--------|
| miR-25-3p | DKK3 | 诱导细胞形成和转移 | 文献[58] |
| miR-143 | 143B | 减少细胞迁移 | 文献[59] |
| miR-208a | MG62, Saos-2 | 促进细胞侵袭和迁移 | 文献[60] |
| miR-206 | 143B | 抑制细胞增殖、诱导凋亡 | 文献[61] |
| miR-675 | CALN1 | 促进细胞增殖与转移 | 文献[62] |
| miR-22 | MG63 | 抑制肿瘤增殖 | 文献[63] |
| miR-488-3p | NRSN2 | 抑制肿瘤增殖 | 文献[64] |
| miR-150 | IGF2BP1 | 抑制 OS 增殖和迁移 | 文献[65] |
| lncRNA PVT1 | Saos-2, MG63, MNNG/HOS | 促进肿瘤增殖和迁移 | 文献[66] |
| lncRNA MALAT1 | NRSN2 | 促进细胞增殖、迁移和侵袭 | 文献[67] |
| uPA | KHOS | 促进细胞转移和侵袭 | 文献[68] |
| LCP1 | 143B, HOS | 促进肿瘤增殖和转移 | 文献[69] |
| circPVT1 | ABCB1 | 增加多药耐药性 | 文献[71] |
| miR-34a-5p | AGTR1 | 促进耐药性 | 文献[72] |
| miR-199a-3p | AK4 | 降低耐药性 | 文献[73] |
| miR-155 | PTEN | 降低 DOX 敏感性 | 文献[74] |
| miR-214 | PHLDA2 | 增强放疗敏感性 | 文献[75] |

3.2 药物递送载体 MSC-Exos

由于传统细胞治疗中 MSC 载药能力的限制, MSC 分泌的纳米级细胞外囊泡,即外泌体,已成为研究重点。MSC-Exos 能够携带不同的信号分子内容物,且本身体积小、便于分离提取,可以很好地解决药物装载的问题,是一种可以实现靶向递送的自然药物载体,已经成为临床治疗肿瘤的理想载体。Abello 等^[76]发现,标记的 hUC-MSCs 外泌体在进入机体后,24 h 内在肿瘤部位不断蓄积,具有定位肿瘤和药物靶向递送的潜在用途。证实被标记过的 Exos 具有肿瘤靶向特性。在药物递送的过程中, MSC-Exos 能够通过膜蛋白与受体细胞相结合,克服 P-糖蛋白等多药耐药相关蛋白介导的耐药性^[77],将抗癌药物选择性递送到 OS 细胞处。Wei 等^[78]发现, MSC-Exos 含有高表达 SDF-1 蛋白,能够与 OS 细胞中的 CRCX4 蛋白发生相互作用,通过 SDF1-CRCX4 轴的激活,从而接近靶向细胞发挥治疗作用。由此表明, MSC-Exos 可作为递送药物的载体靶向到达肿瘤细胞发挥作用,其在 OS 治疗中的作用有待进一步研究。

阿霉素是目前广泛用于癌症治疗的药物之一,但其对心肌具有损害性,因此,增加药物靶向性和降低对心肌的损伤对临床治疗癌症具有重要意义^[79]。Wei 等^[80]发现,将骨髓来源的 MSC-Exos 作为纳米药物载体,与化疗药物 Dox 结合后靶向运送至 OS 细胞内,通过 SDF1-CXCR4 轴对 OS 细胞趋化性进行调控,实验结果表明,在肿瘤晚期的酸性条件下,承载 Dox 的 MSC-Exos 药物载体能够显著降低机体毒性和增强对肿瘤细胞的毒性,这提示 MSC-Exos 可以作为药物递送载体应用于 OS 治疗。此后, Wang 等^[81]也发现,利用骨髓 MSC 分泌的外泌体制备的 EM-Dox 在 OS 中表现出更强的肿瘤抑制活性和更少的副作用,这为开发 OS 新型纳米级药物载体提供了机会。

Kanchanapally 等^[82]将厚朴酚(Honokiol)装载到 MSC-Exos 后进行药效检测,结果发现,经过 MSCs-Exos-Honokiol 处理后的癌细胞中药物的蓄积浓度较 Honokiol 组明显更高,这提示 MSCs-Exos-Honokiol 能够对药物进行更有效的传递。在相同培养条件下, MSCs-Exos-Honokiol 对癌细胞的杀伤力是 Honokiol 的 4~5 倍,且在 MSCs-Exos-Honokiol 作用的肿瘤细胞中,检测显示特大型 B 淋巴细胞瘤、抗凋亡蛋白 B 细胞淋巴瘤 2 蛋白显著减少,而细胞凋亡蛋白 Bcl-2 相关 X 蛋白和 p21 表达显著增加。这提示 MSCs-Exos-Honokiol 可以通过促进细胞凋亡、改变细胞周期进程抑制 OS 细胞的生长。

人子宫内膜干细胞(hEnSCs)属于 MSC 的一个亚类,其分泌形成的 hEnSCs-Exos 也属于 MSC-Exos 的一种。Nooshabadi 等^[83]将阿托伐他汀(Ato)装载到 hEnSCs-Exos 上后,形成 hEnSCs-Exos-Ato 应用于评估肿瘤治疗,结果显示 hEnSCs-Exos-Ato 具有理想的药物释放能力,在 48 h 内能够释放大约 50% 的药物。此外, Abas 等^[84]还提出,人脐带 MSC 来源的 Exos 也能够装载 PTX 应用于癌症治疗,这都为 OS 治疗药物递送载体的选择提供了重要参考。

总而言之, MSC-Exos 作为药物递送载体具有低免疫原性、无细胞毒性、长期安全的特点,对于多种恶性肿瘤(包括 OS)都表现出了巨大优势, MSC-Exos 载药系统能够在提高肿瘤摄取的同时,极大地减少对机体的不良反应,包括药物本身毒副作用和对器官的生物毒性。MSC-Exos 载药系统具有更好的药物释放潜力,利用 MSC-Exos 载药系统传递药物治疗 OS 还具有很多的优势和发展空间,值得更深入的研究。

4 结论

近年来, MSC-Exos 作为一种新兴的生物治疗剂,在 OS 治疗领域具有广阔的应用前景,但由于 OS 的高度异质性和复杂的肿瘤微环境,患者的生存率提升仍然有限。因此, OS 的治疗和预后改善一直是医学研究中的难题。目前, MSC-Exos 可通过多种途径在 OS 发生、发展及其治疗中发挥效应,还可以作为有效的药物递送载体,将化疗药物如 Dox 等直接递送到肿瘤细胞中,从而提高治疗效率并减少对正常细胞的毒性影响,为 OS 的治疗提供了多角度的策略。尽管 MSC-Exos 在实验室研究和动物模型中表现出显著的抗肿瘤效果,但它在 OS 治疗中的应用仍面临着许多挑战。MSC-Exos 的生产、提纯、表征及体内外功效评估等技术问题需进一步解决。此外, MSC-Exos 的临床转化研究尚处于初步阶段,为了加快 MSC-Exos 的临床转化,亟需开展更多的临床试验以验证其安全性和有效性。

总而言之, MSC-Exos 作为一种具有高度生物相容性的新型生物治疗剂,在 OS 治疗中展现出了独

特的优势,其独特的生物学特性和多功能性为 OS 的治疗提供了新的思路。随着对 MSC-Exos 生物学特性和治疗机制的深入理解,以及生产和应用技术的不断完善,MSC-Exos 有望成为 OS 患者治疗的重要工具,为 OS 及其他恶性肿瘤的治疗带来新的希望。

参考文献:

- [1] KLEIN M J, SIEGAL G P. Osteosarcoma: Anatomic and histologic variants[J]. *American Journal of Clinical Pathology*, 2006, 125(4): 555-581. DOI:10.1309/UC6K-QHLD-9LV2-KENN.
- [2] SMELAND S, BIELACK S S, WHELAN J, *et al.* Survival and prognosis with osteosarcoma: Outcomes in more than 2000 patients in the EURAMOS-1 (European and American Osteosarcoma Study) cohort[J]. *European Journal of Cancer*, 2019, 109: 36-50. DOI:10.1016/j.ejca.2018.11.027.
- [3] MILLER B J, CRAM P, LYNCH C F, *et al.* Risk factors for metastatic disease at presentation with osteosarcoma: An analysis of the SEER database[J]. *The Journal of Bone and Joint Surgery. American Volume*, 2013, 95(13): e89. DOI:10.2106/JBJS.L.01189.
- [4] NIE Zhigang, PENG Hao. Osteosarcoma in patients below 25 years of age: An observational study of incidence, metastasis, treatment and outcomes[J]. *Oncology Letters*, 2018, 16(5): 6502-6514. DOI:10.3892/ol.2018.9453.
- [5] ALFRANCA A, MARTINEZ-CRUZADO L, TORNIN J, *et al.* Bone microenvironment signals in osteosarcoma development[J]. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2015, 72(16): 3097-3113. DOI:10.1007/s00018-015-1918-y.
- [6] MATHIEU M, MARTIN-JAULAR L, LAVIEU G, *et al.* Specificities of secretion and uptake of exosomes and other extracellular vesicles for cell-to-cell communication [J]. *Nature Cell Biology*, 2019, 21(1): 9-17. DOI: 10.1038/s41556-018-0250-9.
- [7] ZHANG Bin, ZHANG Yan, LI Rongzhen, *et al.* The efficacy and safety comparison of first-line chemotherapeutic agents (high-dose methotrexate, doxorubicin, cisplatin, and ifosfamide) for osteosarcoma: A network meta-analysis [J]. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 2020, 15(1): 51. DOI:10.1186/s13018-020-1576-0.
- [8] WAGLEY Y, CHESI A, ACEVEDO P K, *et al.* Canonical notch signaling is required for bone morphogenetic protein-mediated human osteoblast differentiation[J]. *Stem Cells*, 2020, 38(10): 1332-1347. DOI:10.1002/stem.3245.
- [9] FENG Weilou, WANG Zhi, FENG Dongxu, *et al.* The effects of common variants in MDM2 and GNRH2 genes on the risk and survival of osteosarcoma in Han populations from Northwest China[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 15939. DOI:10.1038/s41598-020-72995-4.
- [10] MA J, KLEMM J, GERARDO-RAMIREZ M, *et al.* Cluster of differentiation 44 promotes osteosarcoma progression in mice lacking the tumor suppressor Merlin[J]. *International Journal of Cancer*, 2020, 147(9): 2564-2577. DOI:10.1002/ijc.33144.
- [11] TOUS-ROMERO F, PALMA-MILLA C, ORTIZ-DE FRUTOS J. Skin lesions associated with a new mutation in the RECQL4 gene in a patient with osteosarcoma[J]. *Actas Dermo-Sifiligráficas*, 2022, 113(10): 983-984. DOI: 10.1016/j.ad.2021.07.013.
- [12] ZHANG Ying, LIU Zhaoyong, YANG Xia, *et al.* H3K27 acetylation activated-COL6A1 promotes osteosarcoma lung metastasis by repressing STAT1 and activating pulmonary cancer-associated fibroblasts[J]. *Theranostics*, 2021, 11(3): 1473-1492. DOI:10.7150/thno.51245.
- [13] ZHU Shutao, LIU Yang, WANG Xiao, *et al.* lncRNA SNHG10 promotes the proliferation and invasion of osteosarcoma *via* Wnt/ β -catenin signaling[J]. *Molecular Therapy-Nucleic Acids*, 2020, 22: 957-970. DOI:10.1016/j.omtn.2020.10.010.
- [14] LIU Jianmin, CHEN Ming, MA Longyang, *et al.* LncRNA GAS5 suppresses the proliferation and invasion of osteosarcoma cells *via* the miR-23a-3p/PTEN/PI3K/AKT pathway[J]. *Cell Transplant*, 2020, 29: 963689720953093. DOI:10.1177/0963689720953093.
- [15] WANG Shenglin, WANG Yunqing, HUANG Zhen, *et al.* Stattic sensitizes osteosarcoma cells to epidermal growth factor receptor inhibitors *via* blocking the interleukin 6-induced STAT3 pathway[J]. *Acta Biochim Biophys Sin (Shanghai)*, 2021, 53(12): 1670-1680. DOI:10.1093/abbs/gmab146.
- [16] LI Rui, SHI Yanlong, ZHAO Shiwei, *et al.* NF- κ B signaling and integrin- β 1 inhibition attenuates osteosarcoma metastasis *via* increased cell apoptosis[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 123: 1035-1043. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2018.11.003.

- [17] NING Lei, WAN Shuanglin, JIE Zhiwei, *et al.* Lycorine induces apoptosis and G1 phase arrest through ROS/p38 MAPK signaling pathway in human osteosarcoma cells *in vitro* and *in vivo* [J]. *Spine*, 2020, 45(3): E126-E139. DOI:10.1097/brs.0000000000003217.
- [18] YUAN Putao, FENG Zhenhua, HUANG Hai, *et al.* USP1 inhibition suppresses the progression of osteosarcoma *via* destabilizing TAZ[J]. *International Journal of Biological Sciences*, 2022, 18(8): 3122-3136. DOI:10.7150/ijbs.65428.
- [19] CHEN Fangyu, CHEN Liuwei, QIN Qin, *et al.* Salt-inducible kinase 2: An oncogenic signal transmitter and potential target for cancer therapy[J]. *Frontiers in Oncology*, 2019, 9:18. DOI:10.3389/fonc.2019.00018.
- [20] ZENG Qiuming, LI Zongyuan, ZHAO Xi, *et al.* Ubiquitin specific protease 7 promotes osteosarcoma cell metastasis by inducing epithelia mesenchymal transition[J]. *Oncology Reports*, 2018, 41(1): 543-551. DOI:10.3892/or.2018.6835.
- [21] BHANUMATHY K K, BALAGOPAL A, VIZEACOUMAR F S, *et al.* Protein tyrosine kinases: Their roles and their targeting in leukemia[J]. *Cancers*, 2021, 13(2): 184. DOI:10.3390/cancers13020184.
- [22] HUANG Zhen, WANG Shenglin, CHEN Hui, *et al.* Clinicopathological and prognostic values of ErbB receptor family amplification in primary osteosarcoma[J]. *Scandinavian Journal of Clinical and Laboratory Investigation*, 2019, 79(8): 601-612. DOI:10.1080/00365513.2019.1683764.
- [23] JULLIEN N, DIEUDONNE F X, HABEL N, *et al.* ErbB3 silencing reduces osteosarcoma cell proliferation and tumor growth *in vivo* [J]. *Gene*, 2013, 521(1): 55-61. DOI:10.1016/j.gene.2013.03.031.
- [24] SONG Lei, DUAN Ping, GAN Yibo, *et al.* Silencing LPAAT β inhibits tumor growth of cisplatin-resistant human osteosarcoma *in vivo* and *in vitro* [J]. *International Journal of Oncology*, 2017, 50(2): 535-544. DOI:10.3892/ijo.2016.3820.
- [25] GAN Yu, WANG Yong, TAN Zhengyu, *et al.* TDRG1 regulates chemosensitivity of seminoma TCam-2 cells to cisplatin *via* PI3K/Akt/mTOR signaling pathway and mitochondria-mediated apoptotic pathway[J]. *Cancer Biology & Therapy*, 2016, 17(7): 741-750. DOI:10.1080/15384047.2016.1178425.
- [26] CAO Junjie, WEI Yalin, LIAN Jing, *et al.* Notch signaling pathway promotes osteogenic differentiation of mesenchymal stem cells by enhancing BMP9/Smad signaling[J]. *International Journal of Molecular Medicine*, 2017, 40(2): 378-788. DOI:10.3892/ijmm.2017.3037.
- [27] MARTINO J S D, AKHTER T, BRAVO-CORDERO J J. Remodeling the ECM: Implications for metastasis and tumor dormancy[J]. *Cancers (Basel)*, 2021, 13(19): 4916. DOI:10.3390/cancers13194916.
- [28] BERGAMASCHI A, TAGLIABUE E, SORLIE T, *et al.* Extracellular matrix signature identifies breast cancer subgroups with different clinical outcome[J]. *The Journal of Pathology*, 2008, 214(3): 357-367. DOI:10.1002/path.2278.
- [29] ZHANG Yongtao, WANG Fang, WANG Lina, *et al.* MiR-363 suppresses cell migration, invasion, and epithelial-mesenchymal transition of osteosarcoma by binding to NOB1[J]. *World Journal of Surgical Oncology*, 2020, 18(1): 83. DOI:10.1186/s12957-020-01859-y.
- [30] SUMAIYA K, LANGFORD D, NATARAJASEENIVASAN K, *et al.* Macrophage migration inhibitory factor (MIF): A multifaceted cytokine regulated by genetic and physiological strategies[J]. *Pharmacology & Therapeutics*, 2022, 233: 108024. DOI:10.1016/j.pharmthera.2021.108024.
- [31] CENTOMO M L, VITIELLO M, POLISENO L, *et al.* An immunocompetent environment unravels the proto-oncogenic role of miR-22[J]. *Cancers (Basel)*, 2022, 14(24): 6255. DOI:10.3390/cancers14246255.
- [32] LIAN Hongyu, ZHOU Yang, SUN Zhang, *et al.* MicroRNA34a is associated with chemotherapy resistance, metastasis, recurrence, survival, and prognosis in patient with osteosarcoma[J]. *Medicine*, 2022, 101(38): e30722. DOI:10.1097/md.00000000000030722.
- [33] FANG Xiaoguang, HUANG Zhi, ZHAI Kui, *et al.* Inhibiting DNA-PK induces glioma stem cell differentiation and sensitizes glioblastoma to radiation in mice[J]. *Science Translational Medicine*, 2021, 13(600): eabc7275. DOI:10.1126/scitranslmed.abc7275.
- [34] GU Qingguo, LUO Yibin, CHEN Cheng, *et al.* GREM1 overexpression inhibits proliferation, migration and angiogenesis of osteosarcoma[J]. *Experimental Cell Research*, 2019, 384(1): 111619. DOI:10.1016/j.yexcr.2019.111619.

- [35] SUN Yao, LIU Guoliang, ZHANG Kai, *et al.* Stem cell-derived exosomes: Emerging therapeutic opportunities for wound healing[J]. *Stem Cell Research & Therapy*, 2023, 14(1):107. DOI:10.1186/s13287-023-03345-0.
- [36] ZHOU Chuchao, ZHANG Boyu, YANG Yanqing, *et al.* Mesenchymal stem cells-derived exosomes for drug delivery [J]. *Stem Cell Research & Therapy*, 2021, 12(1):561. DOI:10.1186/s13287-021-02629-7.
- [37] ABDELMONEIM M, EL-NAENAEY E Y, ABD-ALLAH S H, *et al.* Anti-inflammatory and immunomodulatory role of bone marrow-derived MSCs in mice with acute lung injury[J]. *Journal of Interferon & Cytokine Research*, 2021, 41(1):29-36. DOI:10.1089/jir.2020.0073.
- [38] QIAO Ling, XU Zhili, ZHAO Tiejun, *et al.* Dkk-1 secreted by mesenchymal stem cells inhibits growth of breast cancer cells *via* depression of Wnt signalling[J]. *Cancer Letters*, 2008, 269(1):67-77. DOI:10.1016/j.canlet.2008.04.032.
- [39] KARNOUB A E, DASH A B, VO A P, *et al.* Mesenchymal stem cells within tumour stroma promote breast cancer metastasis[J]. *Nature*, 2007, 449(7162):557-563. DOI:10.1038/nature06188.
- [40] JOHNSTONE R M, ADAM M, HAMMOND J R, *et al.* Vesicle formation during reticulocyte maturation. Association of plasma membrane activities with released vesicles (exosomes)[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1987, 262(19):9412-9420. DOI:10.1016/s0021-9258(18)48095-7.
- [41] ZHANG Yi, BI Jiayao, HUANG Jiayi, *et al.* Exosome: A review of its classification, isolation techniques, storage, diagnostic and targeted therapy applications[J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2020, 15(69):17-34. DOI:10.2147/IJN.S264498.
- [42] KOGURE A, YOSHIOKA Y, OCHIYA T. Extracellular vesicles in cancer metastasis: Potential as therapeutic targets and materials[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(12):4463. DOI:10.3390/ijms21124463.
- [43] GIMONA M, BRIZZI M F, CHOO A B H, *et al.* Critical considerations for the development of potency tests for therapeutic applications of mesenchymal stromal cell-derived small extracellular vesicles[J]. *Cytotherapy*, 2021, 23(5):373-380. DOI:10.1016/j.jcyt.2021.01.001.
- [44] BAGNO L, HATZISTERGOS K E, BALKAN W, *et al.* Mesenchymal stem cell-based therapy for cardiovascular disease: Progress and challenges[J]. *Molecular Therapy*, 2018, 26(7):1610-1623. DOI:10.1016/j.ymthe.2018.05.009.
- [45] YAGHOUBI Y, MOVASSAGHPUR A, ZAMANI M, *et al.* Human umbilical cord mesenchymal stem cells derived-exosomes in diseases treatment[J]. *Life Sciences*, 2019, 233:116733. DOI:10.1016/j.lfs.2019.116733.
- [46] HASSANZADEH A, RAHMAN H S, MARKOV A, *et al.* Mesenchymal stem/stromal cell-derived exosomes in regenerative medicine and cancer; overview of development, challenges, and opportunities[J]. *Stem Cell Research & Therapy*, 2021, 12(1):297. DOI:10.1186/s13287-021-02378-7.
- [47] BÖRGER V, BREMER M, FERRER-TUR R, *et al.* Mesenchymal stem/stromal cell-derived extracellular vesicles and their potential as novel immunomodulatory therapeutic agents[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2017, 18(7):1450. DOI:10.3390/ijms18071450.
- [48] WANG Jingjing, SUN Zhen, GOU Wenyu, *et al.* Alpha-1 antitrypsin enhances islet engraftment by suppression of instant blood-mediated inflammatory reaction[J]. *Diabetes*, 2017, 66(4):970-980. DOI:10.2337/db16-1036.
- [49] KANG I S, SUH J, LEE M N, *et al.* Characterization of human cardiac mesenchymal stromal cells and their extracellular vesicles comparing with human bone marrow derived mesenchymal stem cells[J]. *BMB Reports*, 2020, 53(2):118-123. DOI:10.5483/BMBRep.2020.53.2.235.
- [50] VAKHSHITEH F, ATYABI F, OSTAD S N. Mesenchymal stem cell exosomes: A two-edged sword in cancer therapy[J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2019, 14:2847-2859. DOI:10.2147/IJN.S200036.
- [51] YANG Xucheng, YANG Junxiao, LEI Pengfei, *et al.* LncRNA MALAT1 shuttled by bone marrow-derived mesenchymal stem cells-secreted exosomes alleviates osteoporosis through mediating microRNA-34c/SATB2 axis[J]. *Aging*, 2019, 11(20):8777-8791. DOI:10.18632/aging.102264.
- [52] ZUO Rui, LIU Minghan, WANG Yanqiu, *et al.* BM-MSC-derived exosomes alleviate radiation-induced bone loss by restoring the function of recipient BM-MSCs and activating Wnt/beta-catenin signaling[J]. *Stem Cell Research & Therapy*, 2019, 10(1):30. DOI:10.1186/s13287-018-1121-9.
- [53] ZHANG Lu, JIAO Guangjun, REN Shanwu, *et al.* Exosomes from bone marrow mesenchymal stem cells enhance

- fracture healing through the promotion of osteogenesis and angiogenesis in a rat model of nonunion[J]. *Stem Cell Research & Therapy*, 2020, 11(1):38. DOI:10.1186/s13287-020-1562-9.
- [54] ZHAO Yao, LI Yawu, LIN Tianyi, *et al.* Progenitor cell-derived exosomes endowed with VEGF plasmids enhance osteogenic induction and vascular remodeling in large segmental bone defects[J]. *Theranostics*, 2021, 11(1):397-409. DOI:10.7150/thno.50741.
- [55] ZHANG Bin, LAI R C, SIM W K, *et al.* Topical application of mesenchymal stem cell exosomes alleviates the imiquimod induced psoriasis-like inflammation[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2021, 22(2):720. DOI:10.3390/ijms22020720.
- [56] ZHAO Yangmin, GAN Yunxiao, XU Gewei, *et al.* MSCs-derived exosomes attenuate acute brain injury and inhibit microglial inflammation by reversing CysLT2R-ERK1/2 mediated microglia M1 polarization[J]. *Neurochemical Research*, 2020, 45(5):1180-1190. DOI:10.1007/s11064-020-02998-0.
- [57] LIU Kai, CAI Guoliang, ZHUANG Zhe, *et al.* Interleukin-1 β -treated mesenchymal stem cells inhibit inflammation in hippocampal astrocytes through exosome-activated nrf-2 signaling[J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2021, 16:1423-1434. DOI:10.2147/IJN.S289914.
- [58] YOSHIDA A, FUJIWARA T, UOTANI K, *et al.* Clinical and functional significance of intracellular and extracellular microRNA-25-3p in osteosarcoma[J]. *Acta Med Okayama*, 2018, 72(2):165-174. DOI:10.18926/AMO/55857.
- [59] SHIMBO K, MIYAKI S, ISHITOBI H, *et al.* Exosome-formed synthetic microRNA-143 is transferred to osteosarcoma cells and inhibits their migration[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2014, 445(2):381-387. DOI:10.1016/j.bbrc.2014.02.007.
- [60] QIN Fa, TANG Haoyu, ZHANG Yong, *et al.* Bone marrow-derived mesenchymal stem cell-derived exosomal microRNA-208a promotes osteosarcoma cell proliferation, migration, and invasion[J]. *Journal of Cellular Physiology*, 2020, 235(5):4734-4745. DOI:10.1002/jcp.29351.
- [61] ZHANG Hongliang, WANG Jun, REN Tingting, *et al.* Bone marrow mesenchymal stem cell-derived exosomal miR-206 inhibits osteosarcoma progression by targeting TRA2B[J]. *Cancer Letters*, 2020, 490:54-65. DOI:10.1016/j.canlet.2020.07.008.
- [62] GONG Liangzhi, BAO Qiyuan, HU Chuazhen, *et al.* Exosomal miR-675 from metastatic osteosarcoma promotes cell migration and invasion by targeting CALN1[J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2018, 500(2):170-176. DOI:10.1016/j.bbrc.2018.04.016.
- [63] RUAN Qing, WANG Cuijie, WU Yuntao, *et al.* Exosome microRNA-22 inhibiting proliferation, migration and invasion through regulating Twist1/CADM1 axis in osteosarcoma[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1):761. DOI:10.1038/s41598-023-50612-4.
- [64] YUN Chao, ZHANG Jincai, MORIGELE. MiR-488-3p represses malignant behaviors and facilitates autophagy of osteosarcoma cells by targeting neurensin-2[J]. *Current Pharmaceutical Biotechnology*, 2024, 25(10):1264-1275. DOI:10.2174/1389201024666230626102837.
- [65] XU Zhengfeng, ZHOU Xiaoxiao, WU Jiajun, *et al.* Mesenchymal stem cell-derived exosomes carrying microRNA-150 suppresses the proliferation and migration of osteosarcoma cells *via* targeting IGF2BP1[J]. *Translational Cancer Research*, 2020, 9(9):5323-5335. DOI:10.21037/tcr-20-83.
- [66] ZHAO Wei, QIN Pan, ZHANG Da, *et al.* Long non-coding RNA PVT1 encapsulated in bone marrow mesenchymal stem cell-derived exosomes promotes osteosarcoma growth and metastasis by stabilizing ERG and sponging miR-183-5p[J]. *Aging*, 2019, 11(21):9581-9596. DOI:10.18632/aging.102406.
- [67] LI Fujiang, CHEN Xin, SHANG Cong, *et al.* Bone marrow mesenchymal stem cells-derived extracellular vesicles promote proliferation, invasion and migration of osteosarcoma cells *via* the lncRNA MALAT1/miR-143/NRSN2/Wnt/beta-catenin axis[J]. *OncoTargets and Therapy*, 2021, 14:737-749. DOI:10.2147/OTT.S283459.
- [68] ENDO-MUNOZ L, CAI N, CUMMING A, *et al.* Progression of osteosarcoma from a non-metastatic to a metastatic phenotype is causally associated with activation of an autocrine and paracrine uPA axis[J]. *PLoS One*, 2015, 10(8):e0133592. DOI:10.1371/journal.pone.0133592.
- [69] GE Xuhui, LIU Wei, ZHAO Wene, *et al.* Exosomal transfer of LCP1 promotes osteosarcoma cell tumorigenesis and metastasis by activating the JAK2/STAT3 signaling pathway[J]. *Molecular Therapy-Nucleic Acids*, 2020, 21:900-915. DOI:10.1016/j.omtn.2020.07.025.

- [70] TANG Zhaopeng, LU Yubao, CHEN Yutong, *et al.* Research progress of microRNA in chemotherapy resistance of osteosarcoma[J]. *Technology in Cancer Research & Treatment*, 2021, 20: 15330338211034262. DOI: 10.1177/15330338211034262.
- [71] ZHU Kunpeng, MA Xiaolong, ZHANG Chunlin. Overexpressed circPVT1, a potential new circular RNA biomarker, contributes to doxorubicin and cisplatin resistance of osteosarcoma cells by regulating ABCB1[J]. *International Journal of Biological Sciences*, 2018, 14(3): 321-330. DOI: 10.7150/ijbs.24360.
- [72] PU Youguang, ZHAO Fangfang, LI Yinpeng, *et al.* The miR-34a-5p promotes the multi-chemoresistance of osteosarcoma *via* repression of the AGTR1 gene[J]. *BMC Cancer*, 2017, 17(1): 45. DOI: 10.1186/s12885-016-3002-x.
- [73] WANG Lei, CHEN Yan, JIANG Ya, *et al.* MiR-199a-3p affects the multi-chemoresistance of osteosarcoma through targeting AK4[J]. *BMC Cancer*, 2018, 18(1): 631. DOI: 10.1186/s12885-018-4460-0.
- [74] WANG Lin, TANG Bing, HAN Heng, *et al.* miR-155 affects osteosarcoma MG-63 cell autophagy induced by adriamycin through regulating PTEN-PI3K/AKT/mTOR signaling pathway[J]. *Cancer Biotherapy & Radiopharmaceuticals*, 2018, 33(1): 32-38. DOI: 10.1089/cbr.2017.2306.
- [75] LI Yi, SONG Xinmao, LIU Zegang, *et al.* Upregulation of miR-214 induced radioresistance of osteosarcoma by targeting PHLDA2 *via* PI3K/Akt signaling[J]. *Frontiers in Oncology*, 2019, 9: 298. DOI: 10.3389/fonc.2019.00298.
- [76] ABELLO J, NGUYEN T D T, MARASINI R, *et al.* Biodistribution of gadolinium- and near infrared-labeled human umbilical cord mesenchymal stromal cell-derived exosomes in tumor bearing mice[J]. *Theranostics*, 2019, 9(8): 2325-2345. DOI: 10.7150/thno.30030.
- [77] CHEN Lan, WANG Li, ZHU Lingling, *et al.* Exosomes as drug carriers in anti-cancer therapy[J]. *Frontiers in Cell and Developmental Biology*, 2022, 10: 728616. DOI: 10.3389/fcell.2022.728616.
- [78] WEI Hongxiang, CHEN Fei, CHEN Jinyuan, *et al.* Mesenchymal stem cell derived exosomes as nanodrug carrier of doxorubicin for targeted osteosarcoma therapy *via* SDF1-CXCR4 Axis[J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2022, 17: 3483-3495. DOI: 10.2147/IJN.S372851.
- [79] BENJAMIN R S. Adjuvant and neoadjuvant chemotherapy for osteosarcoma: A historical perspective[J]. *Advances in Experimental Medicine and Biology*, 2020, 1257: 1-10. DOI: 10.1007/978-3-030-43032-0_1.
- [80] WEI Hongxiang, CHEN Fei, CHEN Jinyuan, *et al.* A nanodrug consisting of doxorubicin and exosome derived from mesenchymal stem cells for osteosarcoma treatment *in vitro* [J]. *International Journal of Nanomedicine*, 2019, 14: 8603-8610. DOI: 10.2147/IJN.S218988.
- [81] WANG Jinkui, LI Mujie, JIN Liming, *et al.* Exosome mimetics derived from bone marrow mesenchymal stem cells deliver doxorubicin to osteosarcoma *in vitro* and *in vivo* [J]. *Drug Delivery*, 2022, 29(1): 3291-3303. DOI: 10.1080/10717544.2022.2141921.
- [82] KANCHANAPALLY R, KHAN M A, DESHMUKH S K, *et al.* Exosomal formulation escalates cellular uptake of honokiol leading to the enhancement of its antitumor efficacy[J]. *ACS Omega*, 2020, 5(36): 23299-23307. DOI: 10.1021/acsomega.0c03136.
- [83] NOOSHABADI V T, KHANMOHAMMADI M, SHAFEI S, *et al.* Impact of atorvastatin loaded exosome as an anti-glioblastoma carrier to induce apoptosis of U87 cancer cells in 3D culture model[J]. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 2020, 23: 100792. DOI: 10.1016/j.bbrep.2020.100792.
- [84] ABAS B I, DEMIRBOLAT G M, CEVIK O. Wharton jelly-derived mesenchymal stem cell exosomes induce apoptosis and suppress EMT signaling in cervical cancer cells as an effective drug carrier system of paclitaxel[J]. *PLoS One*, 2022, 17(9): e0274607. DOI: 10.1371/journal.pone.0274607.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 刘源岗)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202407004



分布式后驱电动客车电子差速控制策略

常东鑫¹, 韩勇^{1,2}, 叶伟宏³, 石金明¹, 申水文^{1,2}

- (1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024;
2. 厦门理工学院 福建省客车先进设计与制造重点实验室, 福建 厦门 361024;
3. 厦门金龙汽车新能源科技有限公司, 福建 厦门 361021)

摘要: 为提高转向工况下分布式后驱电动客车操纵稳定性,提出一种双层式电子差速控制策略。上层控制策略根据车辆参考模型和实际状态参数,以质心侧偏角和横摆角速度为控制目标,通过模糊PI控制器计算得到附加横摆力矩。下层控制策略先以驱动轮的垂直载荷比例作为驱动力分配依据,再将上层控制中计算得到的附加横摆力矩分配给轮边电机。考虑到实际电机能够提供的最大转矩是有限值,对电机进行选型以确定电子差速控制策略输出的转矩范围。在Simulink和Trucksim中搭建联合仿真环境验证电子差速控制策略的可靠性。结果表明:在双移线工况下,该电子差速控制策略相比于等转矩分配策略,在方向盘回转时车辆的质心侧偏角最高减小了69.8%,横摆角速度最高减小了8.2%;在方向盘角阶跃工况下,该电子差速控制策略相比于等转矩分配策略,质心侧偏角能够减小83.7%,横摆角速度能够减小9.4%。

关键词: 电子差速控制; 分布式后驱电动客车; 操纵稳定性; 电机选型; 双层式

中图分类号: U 461.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2025)01-0014-09

Electronic Differential Control Strategy for Distributed Rear-Drive Electric Bus

CHANG Dongxin¹, HAN Yong^{1,2}, YE Weihong³,
SHI Jinming¹, SHEN Shuiwen^{1,2}

- (1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
2. Fujian Key Laboratory of Bus Advanced Design and Manufacture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
3. Xiamen King Long Motor New Energy Technology Limited Company, Xiamen 361021, China)

Abstract: To improve the handling stability of a distributed rear-drive electric bus under steering conditions, a dual layer electronic differential control strategy was proposed. The upper layer control strategy was based on the vehicle reference model and actual state parameters, targeting the center of mass lateral deflection angle and yaw rate as the control objectives, and the additional yaw moment was calculated using a fuzzy PI controller. The lower control strategy first took the vertical load ratio of the driving wheel as the basis for driving force distribution, and then allocated the additional yaw moment, determined in the upper control layer, to the wheel side motor. Considering that the maximum torque provided by the actual motor was limited, motor selection was carried out to determine the torque range for the output of the electronic differential control strategy. A joint simulation environment was built in Simulink and Trucksim to verify the reliability of this strategy. The results indicated that under double lane change conditions, compared to the equal torque distribution strategy, the maximum lateral deflection angle of the vehicle's center of mass was reduced by 69.8% and the maximum yaw rate was reduced by 8.2% under steering conditions; under steering angle step conditions, the lateral deflection angle was reduced by 83.7% and the yaw rate was reduced by 9.4% compared to the equal torque distribution strategy.

收稿日期: 2024-07-10

通信作者: 韩勇(1984-),男,教授,博士,主要从事汽车智能安全、系统安全的研究。E-mail: yonghan@xmut.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB3406500);福建省技术创新重点攻关及产业化项目(2023G048, 2023G013)

tegy, the electronic differential control strategy reduced the maximum center of mass lateral deflection angle by 69.8% and the maximum yaw rate by 8.2% during steering wheel rotation. Under the steering wheel angle step conditions, this control strategy could reduce the center of mass lateral deflection angle by 83.7% and the yaw rate by 9.4% compared to the equal torque distribution strategy.

Keywords: electronic differential control; distributed rear drive electric bus; handling stability; motor selection; dual layer type

分布式驱动电动汽车因动力传输结构简洁、传动效率高及在车身控制方面的巨大优势,逐渐成为新一代电动汽车领域的研究热点和重要发展方向^[1]。分布式后驱电动客车取消了传统客车的传动轴、差速器等机械部件,左、右后轮各有 1 个独立的轮边驱动电机。因此,为保证分布式后驱电动客车操纵稳定性,同时又充分发挥驱动电机独立可控的优势,需要设计电子差速控制策略以应对不同的驾驶工况。

臧怀泉等^[2]提出一种基于相对滑移率的电子差速控制方法,设计了基于最优控制和滑模控制的线性二次型最优滑模控制器,该方法可有效地降低车辆转弯时驱动轮的相对滑移率,提高了车辆的行驶安全性。王亚楠等^[3]改进了仅以滑移率作为转矩分配依据的控制方法,采用更加主动的预分配与补偿分配相结合的控制方法,该控制系统使各轮滑移率和驱动转矩的波动范围更小。Ghezzi 等^[4]采用模型参考自适应控制技术优化转矩分配,并考虑了 3 种不同的代价函数来制定优化问题,这种方法能使车辆在常见的转向工况下具备较精确的控制效果,但这种方法实现过程较为复杂,需要对控制系统有精确的参数调整。裴晓飞等^[5]设计了一种分层式的差速转向控制器,该控制方法在中低车速时能有效减小转弯半径,但是控制策略未考虑质心侧偏角的影响。Guo 等^[6]采用逻辑阈值法对车轮速度和滑移率进行控制,该控制策略能使车辆在转向时稳定行驶,但是缺乏与其他控制方法的对比。赵树恩^[7]等结合主动前轮转向与直接横摆力矩协调控制,根据车辆稳定状态自适应地调整控制权重,既保证了车辆行驶稳定性,又提高系统的实时性。彭晓燕等^[8]针对驱动电机正常和故障工况下分布式电动汽车的操纵稳定性问题,提出一种结合前轮转向和驱动力重构的驱动力分配控制方法,该控制方法可以在驱动电机出现故障时也能保证车辆稳定性,但是只与平均分配方法作对比,缺少与其他控制方法的详细比较。

综上所述,大部分学者在制定电子差速策略之前,未进行车辆动力性能验证,这会导致电子差速控制策略输出的电机转矩不在实际范围内。因此,本文提出一种双层式电子差速控制策略,并将实际电机数据导入车辆模型验证其动力性能。

1 研究方法

1.1 线性二自由度车辆模型

线性二自由度车辆模型只考虑汽车沿 y 轴的侧向运动与绕 z 轴的横摆运动,并假设纵向车速恒定、侧偏刚度为常数^[9]。该模型能够很好地反映出汽车行驶时的理想状态,非常适合作为车辆操纵稳定性研究的参考模型。线性二自由度车辆模型,如图 1 所示。

图 1 中: β 为质心侧偏角; ω_r 为横摆角速度; α_1, α_2 分别为前、后轮侧偏角; a, b 分别为车辆质心到前、后轴的距离; δ 为前轮转角; u, v 分别为车辆的纵向、侧向车速; L 为轴距; F_{Y1}, F_{Y2} 分别为地面对前、后轮的侧向反作用力。

二自由度车辆运动微分方程为

$$\left. \begin{aligned} (k_1 + k_2)\beta + \frac{1}{u}(ak_1 - bk_2)\omega_r - k_1\delta &= m(\dot{v} + u\omega_r), \\ (ak_1 - bk_2)\beta + \frac{1}{u}(a^2k_1 + b^2k_2)\omega_r - ak_1\delta &= I_z \dot{\omega}_r. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: m 为整车质量; k_1, k_2 分别为前、后轴侧偏刚度; I_z 为车辆绕 z 轴的转动惯量。

汽车在等速行驶时,前轮角阶跃输入下进入的稳态响应是等速圆周行驶。常用输出与输入的比值(如稳态横摆角速度与前轮转角之比)来评价稳态响应^[10]。当汽车进入稳态时,横摆角速度 ω_r 为定值,

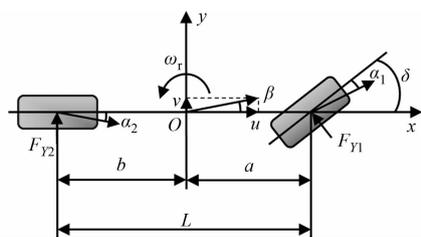


图 1 线性二自由度车辆模型

Fig. 1 Linear two degree of freedom vehicle model

此时, $\dot{v}=0, \dot{\omega}_r=0$, 代入式(1), 可求得稳态响应下的横摆角速度和质心侧偏角, 即

$$\left. \begin{aligned} \omega_r &= \frac{u}{L(1+Ku^2)}\delta, \\ \beta &= \left[\frac{b}{L(1+Ku^2)} + \frac{mau^2}{k_2L^2(1+Ku^2)} \right] \delta_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中: K 为稳定性因数, $K = \frac{m}{L^2} \left(\frac{a}{k_2} - \frac{b}{k_1} \right)$ 。

车辆行驶时, 车轮产生的侧向加速度不能超过路面附着系数 μ 所能提供的最大值, 否则, 会出现侧滑现象。考虑到行车安全性, 横摆角速度最大值 ω_{\max} 应满足

$$\omega_{\max} = \mu g / u. \quad (3)$$

如果车辆的质心侧偏角过大, 也会导致车辆出现侧滑失稳的情况, 因此, 从车辆稳定性角度考虑, 将理想的质心侧偏角设定为 $0^{[11]}$ 。故期望横摆角速度 ω_d 和期望质心侧偏角 β_d 分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \omega_d &= \min \left\{ \left| \frac{u}{L(1+Ku^2)}\delta \right|, \left| \frac{\mu g}{u} \right| \right\}, \\ \beta_d &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

表1 整车结构参数

Tab. 1 Structure parameters of vehicle

| 参数 | 数值 |
|---|------------------------|
| $l \times w \times h / \text{mm} \times \text{mm} \times \text{mm}$ | 10 480 × 2 550 × 3 300 |
| m_0 / kg | 11 500 |
| m / kg | 18 000 |
| a / mm | 3 570 |
| b / mm | 2 130 |
| L / mm | 5 700 |
| r / mm | 468 |
| $k_1 / \text{N} \cdot \text{rad}^{-1}$ | -123 577 |
| $k_2 / \text{N} \cdot \text{rad}^{-1}$ | -233 909 |
| i_0 | 17.814 |

1.2 整车模型

以 Trucksim 软件车辆模型库中的 Tour Bus 为初始车型, 按照国内某品牌纯电动城市客车的车型参数, 对初始车型参数进行相应的设置修改。整车结构参数, 如表 1 所示。表 1 中: m_0 为整车空载质量; l, w, h 分别为整车的长、宽、高; r 为车轮滚动半径; i_0 为轮边减速器传动比。

1.3 电机参数匹配

电机参数需根据整车动力性能需求进行匹配, 涉及的主要参数有电机的功率、转矩及转速。基于整车模型参数, 并参照 GB/T 18385-2005《电动汽车动力性能试验方法》, 结合中国主要城市市区道路特点, 对分布式后驱电动客车提出动力性指标: 1) 最高车速为 $69 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$; 2) 车速从 $0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 加速到 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 所需时间不大于 12 s ; 3) 车速为 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时的爬坡度不低于 15% 。

整车的需求功率根据其动力性指标来确定, 应满足最高车速、加速性能、最大爬坡度的要求, 即整车需求功率应为最高车速需求功率 P_1 、爬坡性能需求功率 P_2 、加速最大需求功率 P_3 三者中的最大值^[12]。

最高车速需求功率 P_1 表达式为

$$P_1 = \frac{v_{\max}}{3\ 600\eta_T} \left(mgf + \frac{C_D A v_{\max}^2}{21.15} \right). \quad (5)$$

式(5)中: v_{\max} 为最高车速; f 为滚动阻力系数; C_D 为风阻系数; A 为迎风面积; η_T 为传动系统效率。

根据动力性指标 1), 最高车速为 $69 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 因此, 最高车速对应的需求功率 $P_1 = 60 \text{ kW}$ 。

爬坡性能需求功率 P_2 表达式为

$$P_2 = \frac{v_i}{3\ 600\eta_T} \left(mgf \cos \alpha_{\max} + mg \sin \alpha_{\max} + \frac{C_D A v_i^2}{21.15} \right). \quad (6)$$

式(6)中: v_i 为车辆完成爬坡时的速度; α_{\max} 为最大爬坡角。

将各参数代入式(6)可得, 当爬坡度为 15% 、爬坡速度为 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时的需求功率 $P_2 = 164 \text{ kW}$ 。

加速性能需求功率在加速过程的末时刻输出功率最大, 加速过程最大需求功率 P_3 为

$$P_3 = \frac{v_m}{3\ 600\eta_T} \left\{ mgf + \frac{\varphi m v_m}{0.36} \left[1 - \left(\frac{t_m - d_t}{t_m} \right)^x \right] + \frac{C_D A v_m^2}{21.15} \right\}. \quad (7)$$

式(7)中: φ 为旋转质量换算系数; x 为拟合系数; t_m 为加速过程时间; d_t 为设计过程的迭代步长; v_m 为加速过程末速度。

根据动力性指标 2), 将各参数代入式(7)可得 $P_3 = 206 \text{ kW}$ 。

综合考虑动力性指标, 选择最大功率 $P_{\max} = \max(P_1, P_2, P_3) = 206 \text{ kW}$, 又考虑到电动车在城市公

共交通使用的负载情况, 及其他设备的能耗, 还需将峰值功率提高, 最后确定 2 个电机的峰值功率总和为 220 kW。按照 2 个电机平均分配的原则, 得到单个电机的峰值功率为 110 kW。电机的峰值功率与额定功率的比值称为过载系数, 一般取 2~3, 文中电机的过载系数取 2, 即电机的额定功率 $P_e = 55 \text{ kW}$ 。

电机的峰值转速 n_{\max} 一般由最高车速决定^[13], 其计算公式为

$$n_{\max} \geq \frac{i_g i_0 v_{\max}}{0.377r} \quad (8)$$

式(8)中: i_g 为变速箱的传动比, 电动车无变速箱, 因此变速箱的传动比为 1。

由 $v_{\max} = 69 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 得 $n_{\max} \geq 6\ 967 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 取 $n_{\max} = 7\ 500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。电机的峰值转速与额定转速的比值称为基速比, 一般为 2~4^[14], 文中电机的基速比取 3, 即电机额定转速 $n_e = 2\ 500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

电机的峰值扭矩由最大爬坡度确定, 即

$$M_{\max} \geq \frac{r}{\eta_T i_0 i_g} \left(mgf \cos \alpha_{\max} + mg \sin \alpha_{\max} + \frac{C_D A v_i^2}{21.15} \right) \quad (9)$$

式(9)中: M_{\max} 为电机峰值扭矩。

车辆的最大爬坡度为 15%, 将参数代入式(9)得到 $M_{\max} \geq 775 \text{ N} \cdot \text{m}$, 考虑动力性余量需求, 电机峰值扭矩可取 $M_{\max} = 860 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。按照两个电机平均分配的原则, 得到单个电机的峰值扭矩为 430 N·m。

电机的额定转矩 M_e 由额定功率与额定转速决定, 即

$$M_e = \frac{9\ 550 P_e}{n_e} \quad (10)$$

将参数代入式(10)可得 $M_e = 210 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。电机性能参数匹配结果, 如表 2 所示。

表 2 电机性能参数

| Tab. 2 Motor performance parameters | |
|---|-------|
| 性能指标 | 数值 |
| P_{\max}/kW | 110 |
| $n_{\max}/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ | 7 500 |
| $M_{\max}/\text{N} \cdot \text{m}$ | 430 |
| P_e/kW | 55 |
| $n_e/\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ | 2 500 |
| $M_e/\text{N} \cdot \text{m}$ | 210 |

1.4 电机参数匹配结果验证

根据电机参数匹配结果, 选用某品牌的驱动电机进行台架标定实验, 得到电机外特性曲线, 如图 2 所示。图 2 中: M 为转矩; n 为转速; P 为功率。电机标定数据显示转矩最高为 438.88 N·m, 转速最高为 7 500 r·min⁻¹, 功率最高为 110.23 kW, 符合上文电机参数匹配结果。

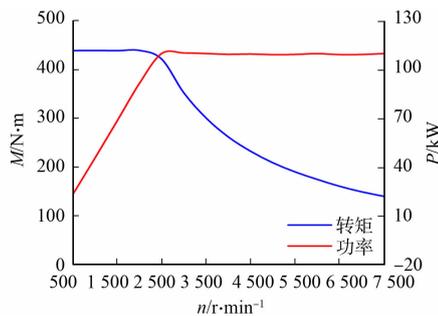


图 2 电机外特性曲线

Fig. 2 External characteristic curves of motor

使用 AVL_Cruise 软件建立分布式后驱电动客车模型, 并导入电机标定数据进行车辆动力性能仿真。车速-时间 ($v-t$) 曲线, 如图 3 所示。由图 3 可知: 最高车速可以达到 74 km·h⁻¹, 从 0 km·h⁻¹ 到 50 km·h⁻¹ 的加速时间为 10.9 s。

爬坡度-车速 ($\alpha-v$) 曲线, 如图 4 所示。由图 4 可知: 车速在 20 km·h⁻¹ 时的爬坡度为 21%。仿真结果表明, 电机参数匹配结果满足分布式后驱电动客车动力性指标要求。

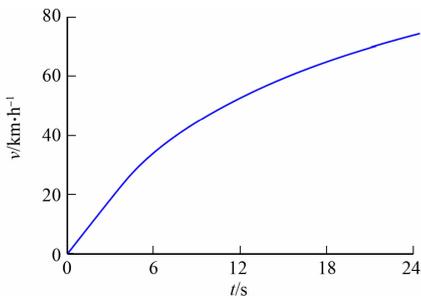


图 3 车速-时间曲线

Fig. 3 Vehicle speed-time curve

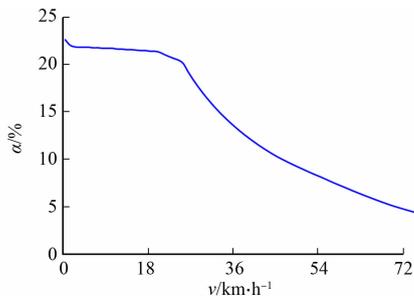


图 4 爬坡度-车速曲线

Fig. 4 Gradient-vehicle speed curve

1.5 电机数学模型

电机的需求转矩与实际转矩之间的关系可以简化为一个二阶响应系统^[15], 其传递函数 $G(s)$ 为

$$G(s) = \frac{T_r}{T_i} = \frac{1}{2\epsilon^2 s^2 + 2\epsilon s + 1} \quad (11)$$

式(11)中: T_r 为实际转矩; T_i 为需求转矩; ϵ 为电机特性常数, 根据永磁同步电机响应特性, 取值为 $0.001^{[16]}$ 。

2 控制策略设计

2.1 电子差速控制策略

为提高分布式后驱电动客车在转向工况下的操纵稳定性, 设计一种双层式电子差速控制策略, 如图 5 所示。图 5 中: T_L, T_R 为分配至左、右轮边电机的转矩; T_f 为总驱动力矩; T_m 为附加横摆力矩。

上层控制为附加横摆力矩制定层, 首先依据当前车速与目标车速的偏差基于 PID 控制计算出纵向驱动力; 然后将当前车速、前轮转角、整车结构参数传入二自由度参考模型, 计算得到期望质心侧偏角和期望横摆角速度。模糊 PI 控制器根据质心侧偏角和横摆角速度期望值与实际值的误差及误差变化率输出维持车辆稳定行驶所需的附加横摆力矩。下层控制为驱动力分配层, 综合电机运行状况和车辆实时运动状态, 将上层控制计算出的纵向驱动力和附加横摆力矩分配至左、右轮边电机, 实现轮边电子差速控制。

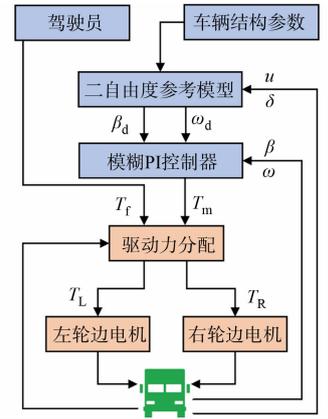


图 5 双层式电子差速控制策略
Fig. 5 Dual layer electronic differential control strategy

2.2 控制器设计

在 PI 控制中, 比例系数与积分系数是固定不变的, 无法满足实时变化的动态需求。将 PI 控制和模糊控制相结合便可以动态调整 PI 控制器中的比例系数和积分系数^[17]。

模糊 PI 控制通过输入理想值与实际值的误差及误差变化率来控制输出 ΔK_p 和 ΔK_i , 得到最终的 PI 控制系数为

$$\left. \begin{aligned} K_p &= K_{p,0} + \Delta K_p, \\ K_i &= K_{i,0} + \Delta K_i. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式(12)中: $K_{p,0}, K_{i,0}$ 为原本采用 PI 控制的数值; $\Delta K_p, \Delta K_i$ 为模糊控制器输出的增量; K_p, K_i 为最终 PI 控制器的比例系数与积分系数。

模糊 PI 控制器的原理, 如图 6 所示。设计模糊 PI 控制器的输入值为质心侧偏角和横摆角速度二者期望值与实际值的误差 e 和误差变化率 e_c 。输出值为比例系数和积分系数的增量 ΔK_p 和 ΔK_i 。 E 和 E_c 是模糊化模块将输入的清晰量转成了模糊量; U_p 和 U_i 是经过近似推理运算后得出的模糊量。隶属度函数, 如图 7 所示。图 7 中: NB 代表负大值; NM 代表负中值; NS 代表负小值; ZO 代表零; PS 代表正小值; PM 代表正中值; PB 代表正大值。边缘使用高斯隶属函数, 中间使

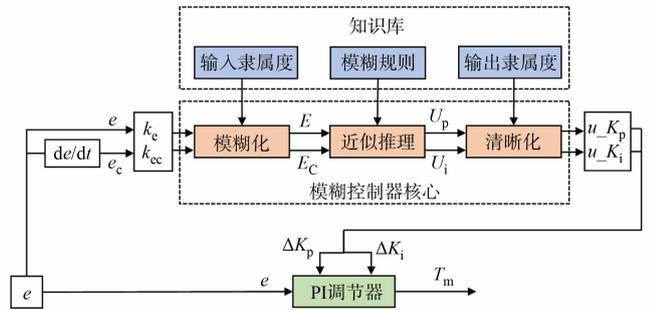
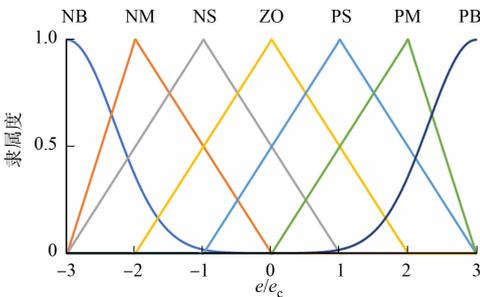
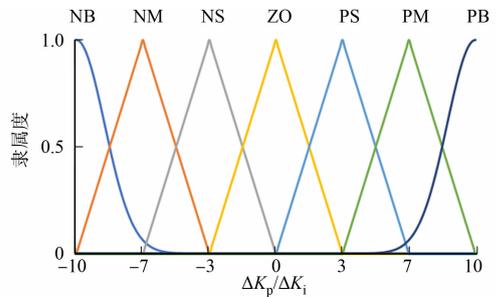


图 6 模糊 PI 控制器原理
Fig. 6 Principle of fuzzy PI controller



(a) 输入



(b) 输出

图 7 输入与输出的隶属度函数

Fig. 7 Membership function of input and output

用三角隶属函数。由于控制系统的边缘通常具有较复杂的隶属度分布, 所以使用高斯型函数可以更好地拟合这种复杂的隶属度分布, 从而提高模糊控制器的建模精度^[18]。

在 PI 控制器中, 比例系数 K_p 的取值决定了控制系统的响应速度, 积分控制的作用是为了消除系统的稳态误差。 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 的具体调整规则如下: 1) 当 e 较大时, 应选择较大的 ΔK_p 和较小的 ΔK_i , 这样可以避免超调, 加快系统的响应速度; 2) 当 e 为中等大小时, 为减小系统的超调量, 保证一定的响应速度, ΔK_p 应适当减小, ΔK_i 的取值大小要适中; 3) 当 e 较小时, 为了减小稳态误差, 使系统具有较好的稳态性能, ΔK_p 和 ΔK_i 的值应取大些^[19]。

基于以上描述并结合工程技术人员的分析和实际操作经验, 考虑误差变化率 e_c 的影响, 设计的 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 模糊控制规则, 如表 3 所示。

表 3 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 模糊控制规则

Tab. 3 Fuzzy control rules of $\Delta K_p, \Delta K_i$

| e | e_c | | | | | | |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
| NB | PB/NB | PB/NB | PM/NM | PM/NM | PS/NS | ZO/ZO | ZO/ZO |
| NM | PB/NB | PB/NB | PM/NM | PS/NS | PS/NS | ZO/ZO | NS/ZO |
| NS | PM/NB | PM/NM | PM/NS | PS/NS | ZO/ZO | NS/PS | NS/PS |
| ZO | PM/NM | PM/NM | PS/NS | ZO/ZO | NS/PS | NM/PM | NM/PM |
| PS | PS/NM | PS/NS | ZO/ZO | NS/PS | NS/PS | NM/PM | NM/PB |
| PM | PS/ZO | ZO/ZO | NS/PS | NM/PS | NM/PM | NM/PB | NB/PB |
| PB | ZO/ZO | ZO/ZO | NM/PS | NM/PM | NM/PM | NB/PB | NB/PB |

2.3 驱动力分配设计

驱动力分配流程, 如图 8 所示。车辆在直行时, 将整车所需的纵向驱动力平均分配到各个驱动电机。车辆在转向时, 车身会朝转向外侧倾斜, 外侧驱动轮的垂直载荷也会随之增大, 此时需要给外侧驱动轮更大的驱动力以维持车辆稳定行驶。在驱动力分配时, 首先以驱动轮的垂直载荷比例作为驱动力分配的依据, 然后将附加横摆力矩分配到左、右轮边电机。同时, 还需满足电机转矩约束条件, 控制策略输出的转矩不能超过电机的峰值扭矩。

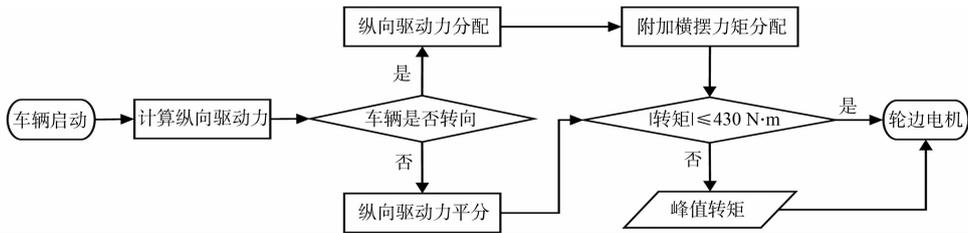


图 8 驱动力分配流程

Fig. 8 Driving force distribution process

车辆转向时的具体分配策略为

$$\left. \begin{aligned} T_L &= \frac{F_{z,l}}{F_{z,l} + F_{z,r}} \cdot T_f + \frac{T_m}{2}, \\ T_R &= \frac{F_{z,r}}{F_{z,l} + F_{z,r}} \cdot T_f - \frac{T_m}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(13)中: $F_{z,l}, F_{z,r}$ 分别为左、右驱动轮的垂直载荷。

3 仿真结果与分析

3.1 双移线工况仿真结果

参考 ISO 3888-1-1999 中的双移线试验标准, 试验车速设置为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 选取路面附着系数为 0.85 的干燥沥青路面, 仿真时长设为 20 s, 双移线工况下的仿真结果, 如图 9 所示。图 9 中: θ 为方向盘转向角度。

车辆在起步时,车身会产生轻微抖动,导致左、右侧车轮的垂直载荷发生细微的变化。所以在车辆起步时即使车辆没有转向,转矩也会出现轻微的差速效果(图9(b))。左、右电机转矩重叠是因为车辆正在直线行驶,车辆转向时,电子差速控制策略开始生效,左、右电机转矩大小出现明显区别。左转时增大右侧电机转矩,减小左侧电机转矩;右转时增大左侧电机转矩,减小右侧电机转矩。

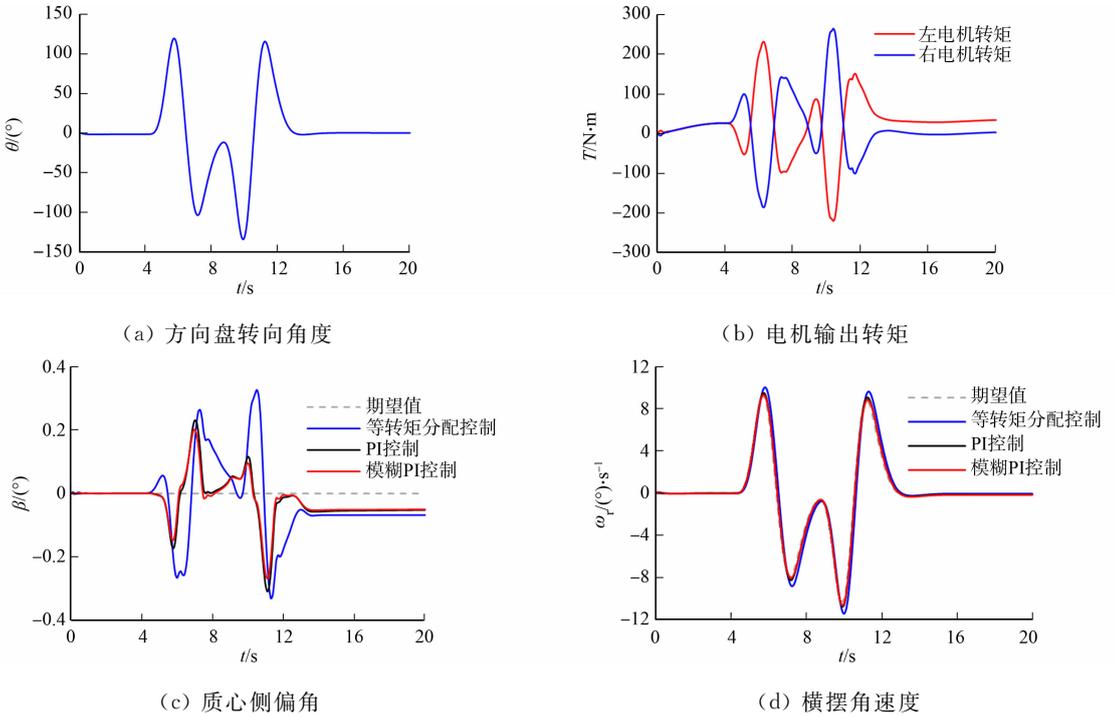


图9 双移线工况下的仿真结果

Fig.9 Simulation results under double lane change condition

方向盘在回转时,车辆的质心侧偏角和横摆角速度会出现较大幅度的波动(图9(c),(d)),于是重点分析方向盘回转时的客车稳定性。在5.7 s时方向盘出现第1次回转,在此次回转过程中,等转矩分配控制、PI控制、模糊PI控制的质心侧偏角峰值分别为 -0.266° 、 -0.174° 、 -0.150° 。横摆角速度峰值分别为 $10.060, 9.494, 9.359 (^{\circ}) \cdot s^{-1}$ 。此时,模糊PI控制相比于等转矩分配控制在质心侧偏角峰值上减小了43.6%,在横摆角速度峰值上减小了7.0%。相比于PI控制在质心侧偏角上减小了13.8%,在横摆角速度上减小了1.4%。

方向盘第2次回转出现在7.1 s,在此次回转过程中,模糊PI控制相比于等转矩分配控制在质心侧偏角峰值上减小了22.5%,在横摆角速度峰值上减小了8.2%。相比于PI控制在质心侧偏角峰值上减小了11.7%,在横摆角速度峰值上减小了2.4%。

方向盘第3次回转出现在9.9 s,在此次回转过程中,模糊PI控制相比于等转矩分配控制在质心侧偏角峰值上减小了69.8%,在横摆角速度峰值上减小了6.9%。相比于PI控制在质心侧偏角峰值上减小了15.5%,在横摆角速度峰值上减小了1.0%。

方向盘第4次回转出现在11.2 s,在此次回转过程中,模糊PI控制相比于等转矩分配控制在质心侧偏角峰值上减小了17.8%,在横摆角速度峰值上减小了8.1%。相比于PI控制在质心侧偏角峰值上减小了12.3%,在横摆角速度峰值上减小了1.9%。

3.2 方向盘角阶跃工况仿真结果

参考GB/T 6323-2014《汽车操纵稳定性试验方法》,方向盘角阶跃工况的试验车速设置为 $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,车辆直线行驶2 s后,在0.2 s内方向盘转动 150° 。选取路面附着系数为0.85的干燥沥青路面,仿真时长设为20 s。方向盘角阶跃工况下的仿真结果,如图10所示。

由图10(b)可知:当车辆进入稳态响应阶段后,处于转向外侧的右轮边电机输出的转矩反而比内侧电机输出的转矩小。这是因为对于客车而言,在方向盘角阶跃工况下,车辆转向幅度较大,车速较高,如果持续给外侧车轮更大的驱动力会导致转向过度,出现侧翻的情况。为避免发生侧翻情况,上层控制器

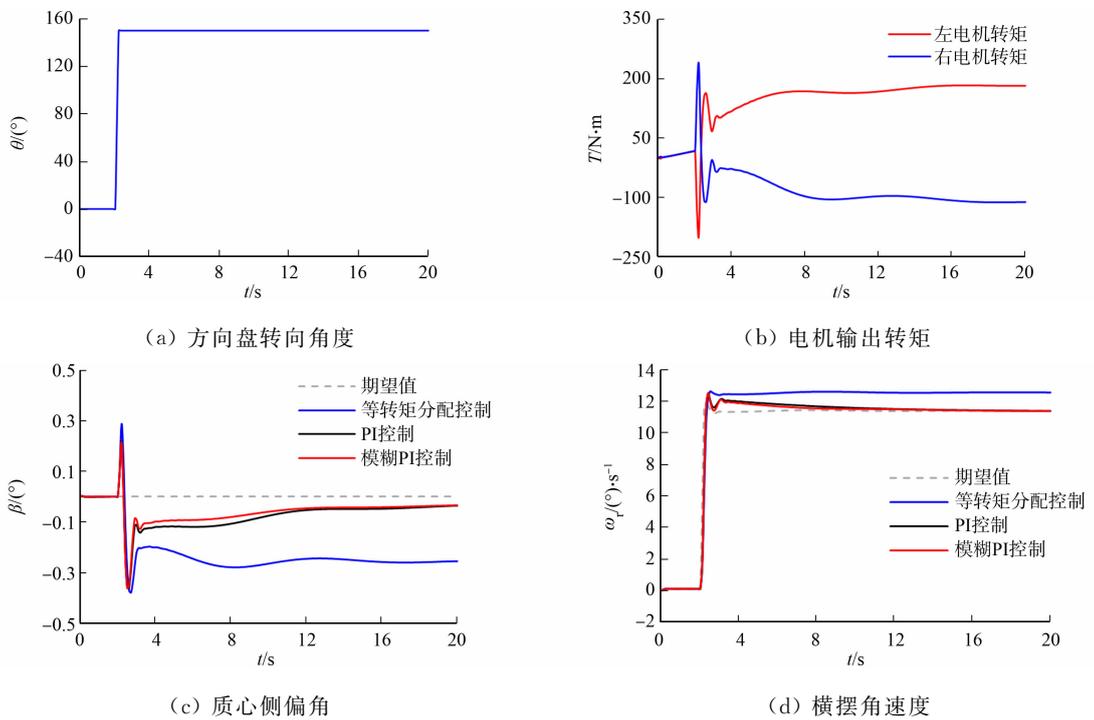


图 10 方向盘角阶跃工况下的仿真结果

Fig. 10 Simulation results under steering wheel angle step condition

会在车辆进入稳态响应后,输出一个反向的附加横摆力矩,从而抑制车辆转向过度,维持车辆稳定行驶。

由图 10(c),(d)可知:质心侧偏角和横摆角速度在第 2~4 s 波动幅度较大,此时 PI 控制和模糊 PI 控制的效果差别不明显,之后逐渐趋于平稳,可以看到模糊 PI 控制能够更快地接近期望值,二者相比于等转矩分配控制在车辆操纵稳定性上均有较大的提升。在 2~4 s 区间,模糊 PI 控制相比于等转矩分配控制,在质心侧偏角峰值上减小了 5.0%,在横摆角速度峰值上减小了 1.1%。在 16 s 后质心侧偏角与横摆角速度数值基本保持稳定,此刻模糊 PI 控制相比于等转矩分配控制,在质心侧偏角上减小了 83.7%,在横摆角速度上减小了 9.4%。

4 结论

通过分析影响车辆稳定性的因素,确定控制目标为质心侧偏角和横摆角速度。对分布式后驱电动客车进行电机选型,并利用电机标定数据验证车辆动力性能,最终确定了电子差速控制策略输出的电机转矩范围。最后基于双移线和方向盘角阶跃两种转向工况对模糊 PI、PI、等转矩分配 3 种不同的控制策略进行对比分析,得到以下 3 点结论。

1) 施加电子差速控制的车辆操纵稳定性明显优于等转矩分配控制的车辆,而且基于模糊 PI 控制的电子差速控制系统对车辆操纵稳定性提升更大。

2) 在双移线工况下,方向盘在回转过程中,模糊 PI 控制下的质心侧偏角和横摆角速度相比于等转矩分配策略,最高分别减小了 69.8%和 8.2%;相比于 PI 控制,最高分别减小了 15.5%和 2.4%。

3) 在方向盘角阶跃工况下,车辆进入稳态响应阶段后,模糊 PI 控制下的质心侧偏角和横摆角速度相比于等转矩分配策略,分别减小了 83.7%和 9.4%;相比于 PI 控制,能够较快地接近期望值。

提出的电子差速控制策略充分利用了分布式后驱电动客车的优势,提高了车辆的操纵稳定性和行驶安全性,可以为转向工况下客车操纵稳定性研究提供参考依据。

参考文献:

- [1] 章恒亮, 花为. 分布式驱动系统用轮毂电机及其技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2871-2886. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.222954.
- [2] 臧怀泉, 戴彦, 张素燕, 等. 一种基于相对滑移率的电动汽车电子差速控制方法研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53

- (16):112-119. DOI:10.3901/JME.2017.16.112.
- [3] 王亚楠,严世榕,吕兵兵,等.分布式驱动电动汽车电子差速系统仿真研究[J].机电工程,2018,35(10):1128-1132. DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.10.021.
- [4] GHEZZI M K, DÒRIA-CEREZO A, OLM J M. Yaw moment MRAC with optimal torque vectoring for a four in-wheel motor EV[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology. Lyon: IEEE Press, 2018:1820-1825. DOI:10.1109/ICIT.2018.8352460.
- [5] 裴晓飞,刘志厅,陈祯福,等.分布式驱动电动汽车的差速转向控制及其适用性[J].汽车安全与节能学报,2019,10(4):423-432. DOI:10.3969/j.issn.1674-8484.2019.04.003.
- [6] GUO Xiangrong, CHEN Yi, LI Hong. Research on steering stability control of electric vehicle driven by dual in-wheel motor[C]//10th Institute of Electrical and Electronics Engineers International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems. Xi'an: IEEE Press, 2020:394-399. DOI:10.1109/CYBER50695.2020.9279154.
- [7] 赵树恩,胡洪银,景东印. AFS/DYC协调控制的分布式驱动电动汽车稳定性控制[J].华侨大学学报(自然科学版), 2021,42(5):571-579. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.202010015.
- [8] 彭晓燕,邢星飞,崔庆佳,等.分布式电动汽车驱动力分配控制方法研究[J].汽车工程,2022,44(7):1059-1068. DOI:10.19562/j.chinasae.qcgc.2022.07.012.
- [9] 刘文营,刘伟,崔晓川.二自由度车辆动力学模型的扩展研究[J].中国测试,2016,42(增刊2):76-79.
- [10] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2018.
- [11] MA Li, CHENG Chang, GUO Jianfei, *et al.* Direct yaw-moment control of electric vehicles based on adaptive sliding mode[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2023,20(7):13334-13355. DOI:10.3934/mbe.2023594.
- [12] 杨年炯,宋英杰,肖旺.某型纯电动汽车动力系统匹配及优化研究[J].中国工程机械学报,2023,21(6):557-561. DOI:10.15999/j.cnki.311926.2023.06.012.
- [13] 郭金刚,董昊轩.四轮轮毂电机驱动电动汽车动力系统优化匹配[J].公路交通科技,2019,36(7):150-158. DOI:10.3969/j.issn.1002-0268.2019.07.019.
- [14] 李胜琴,闫祥伟,金丽彤.分布式驱动电动汽车横摆稳定性控制策略研究[J].重庆理工大学学报(自然科学), 2021,35(5):65-73. DOI:10.3969/j.issn.1674-8425(z).2021.05.009.
- [15] TAHAMI F, KAZEMI R, FARHANGHI S. A novel driver assist stability system for all-wheel-drive electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2003,52(3):683-692. DOI:10.1109/TVT.2003.811087.
- [16] 李以农,胡一明,邹桃.轮毂电机驱动电动汽车横摆稳定性控制[J].重庆大学学报,2017,40(12):24-34. DOI:10.11835/j.issn.1000-582X.2017.12.004.
- [17] BORASE R P, MAGHADE D K, SONDKAR S Y, *et al.* A review of PID control, tuning methods and applications [J]. International Journal of Dynamics and Control, 2021,9:818-827. DOI:10.1007/s40435-020-00665-4.
- [18] CSISZÁR O, CSISZÁR G, KOSHELEVA O, *et al.* Why fuzzy control is often more robust (and smoother): A theoretical explanation[C]//IEEE Symposium Series on Computational Intelligence. Mexico City: IEEE Press, 2023: 501-505. DOI:10.1109/SSCI52147.2023.10372014.
- [19] HU Tangqing, ZHANG Xuxiu. Simulation of PMSM vector control system based on fuzzy PI controller[C]//2019 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems. Shenyang: IEEE Press, 2019:111-114. DOI:10.1109/ICPICS47731.2019.8942439.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴跃勤)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202405020



粒子群算法优化的车辆悬架座椅 模糊PID控制

兰靛靛^{1,2}, 甘达¹, 林鸿森³, 林祖胜^{1,2}

- 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024;
- 厦门理工学院 福建省客车先进设计制造重点实验室, 福建 厦门 361024;
- 厦门国创中心 先进电驱动技术创新中心, 福建 厦门 361006)

摘要: 针对车辆悬架座椅的振动问题,基于 ADAMS/View 和 MATLAB/Simulink 平台建立三自由度 1/4 车辆主动悬架座椅系统模型和路面模型,提出一种运用粒子群算法优化模糊 PID 的控制方法。该方法融合标准粒子群算法与模糊 PID 算法,通过粒子群算法对模糊 PID 控制中的量化因子、比例因子和模糊规则参数进行优化,解决模糊 PID 控制参数的选取存在经验性和主观性的问题。仿真结果表明:在不同的车速下,相较于模糊 PID 控制,粒子群优化模糊 PID 控制的座椅加速度下降 16.5% 以上,相较于被动悬架座椅,粒子群优化模糊 PID 控制的座椅加速度下降 48.0% 以上,减振效果改善明显。

关键词: 悬架座椅; 粒子群算法; 模糊 PID 控制; 硬件在环仿真试验

中图分类号: U 461.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2025)01-0023-07

Fuzzy PID Control of Vehicle Suspension Seat Optimized by Particle Swarm Algorithm

LAN Diandian^{1,2}, GAN Da¹, LIN Hongsen³, LIN Zusheng^{1,2}

- School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
- Fujian Key Laboratory of Bus Advanced Design and Manufacture,
Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
- Advanced Electric Drive Technology Innovation Branch, Xiamen National Innovation Center, Xiamen 361006, China)

Abstract: Aiming at addressing the vibration problem of vehicle suspension seat, a three-degree-of-freedom 1/4 vehicle active suspension seat system model and a road profile model were established based on ADAMS/View and MATLAB/Simulink platforms, and a control method using particle swarm algorithm to optimize fuzzy PID was proposed. This method integrates the standard particle swarm algorithm with the fuzzy PID algorithm, optimizing the quantization factor, scale factor and fuzzy rule parameters in the fuzzy PID control through the particle swarm algorithm, to solve the problem of empirical and subjective selection of the fuzzy PID control parameters. The simulation results indicate that, under different vehicle speeds, the seat acceleration using particle swarm optimized fuzzy PID control is reduced by more than 16.5% compared to fuzzy PID control, and by over 48.0% compared to passive suspension seats, thereby significantly enhancing the damping effect.

收稿日期: 2024-05-29

通信作者: 兰靛靛(1970-),女,高级工程师,主要从事振动噪声控制的研究。E-mail:Landd10@163.com。

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2021J011199)

Keywords: suspension seat; particle swarm algorithm; fuzzy PID control; hardware-in-the-loop test

车辆行驶时,路面的振动与冲击经轮胎、悬架衰减后传递到车身,座椅作为直接与人体接触的部件,对其进行减振优化设计既不影响整车行驶性能,成本又相对较低,容易得到广泛应用,这是提高车辆乘坐舒适性的有效手段,也是高端座椅发展的趋势^[1-2]。特别是驾驶时间较长的商用车已大多数采用了带悬架的司机座椅来衰减传递到人体的振动。

目前,车辆座椅悬架普遍使用的是由弹性元件和阻尼元件组成的被动悬架,这类悬架结构设计参数一般是固定的,虽然在一定程度上能够减少传递到人体的振动,但难以应对车辆行驶工况的不确定性及其自身参数的时变性,减振适应能力有限^[3]。随着控制技术和车辆主动悬架技术的进步,国内外学者对汽车座椅悬架设计了主动作动器,并提出不同的控制策略,期望获得实时的最优控制力来减小振动,提高车辆乘坐舒适性^[4-5]。在众多主动悬架控制方法中,模糊PID控制综合了模糊控制和PID控制的优点,不依赖于被控对象的精确模型,结构简单、鲁棒性强,能较好地适应复杂的非线性系统,在汽车悬架的主动控制领域有较多应用^[6-8]。然而,模糊PID控制参数的选取依据经验或试凑,存在较大的主观性,缺乏准确的理论指导,实际控制效果受限。因此,学者们尝试采用其他算法对模糊PID控制进行优化,以提高控制效果^[9-10]。

粒子群优化(PSO)是一种基于群体智能的寻优算法,搜索能力强、参数易调整、可编程性高,可用于改进模糊PID控制的效果。赵家豪等^[11]在研究增程式辅助动力单元节气门开度的动态控制中,以发动机的转速、转矩和负载扰动等参数为控制目标,采用混沌退火混合粒子群算法优化模糊PID的量化因子、比例因子等参数,取得了较好的控制效果。Boukhalifa等^[12]在研究双星感应电动机的直接转矩控制中,分别比较了粒子群优化模糊PID控制、粒子群优化PID控制和遗传算法优化PID控制等3种算法,发现粒子群优化模糊PID算法控制效果最好,可减小大扭矩波动,加快上升时间,避免干扰。李扬等^[13]采用粒子群算法离线优化模糊PID参数的论域,对高枝修剪机机械臂实现了末端修枝锯快速准确地定位控制,提高了修剪机的作业效率。基于此,本文针对车辆悬架座椅系统的振动控制问题,提出一种基于粒子群算法优化的车辆悬架座椅模糊PID控制方法。

1 主动悬架座椅系统模型

车辆平顺性可用“输入-系统-输出”的动力学方法进行研究。路面不平度和车速形成了汽车振动系统的“输入”,此“输入”经过轮胎、悬架、车身、座椅悬架等弹性元件、阻尼元件与质量构成振动系统的传递,得到系统的“输出”是经座椅传至人体的振动加速度^[14]。

1.1 路面随机激励模型

采用滤波白噪声法建立路面随机激励模型,车辆单轮所受路面激励的时域模型^[5]为

$$\dot{q}(t) = -2\pi u f_0 q(t) + 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)u} \cdot W(t). \quad (1)$$

式(1)中: u 为车辆行驶速度; f_0 为时间截止频率; n_0 为参考空间频率,数值为 0.1 m^{-1} ; $G_q(n_0)$ 为参考空间频率下的路面功率谱密度值; $W(t)$ 为单位高斯白噪声的时域信号。

1.2 主动悬架座椅系统模型

采用能够反映车体垂直方向绝大多数动态特性的三自由度1/4车辆主动悬架座椅系统模型,如图1所示。图1中: m_1, m_2, m_3 分别为车辆簧下质量、簧上质量和人椅质量; K_t, K, K_s 分别为轮胎刚度、车辆悬架刚度和座椅悬架刚度; C, c 分别为车辆悬架阻尼和座椅悬架阻尼; q 为路面激励; z_1, z_2, z_3 分别为簧下质量、簧上质量和人椅质量垂直方向的振动位移; F_d 为座椅悬架主动控制力。

根据牛顿第二定律,系统动力学方程为

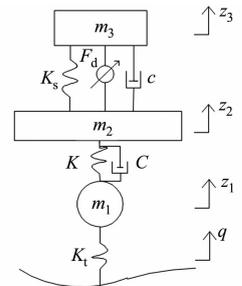


图1 1/4车辆主动悬架座椅系统模型
Fig. 1 Model of 1/4 vehicle active suspension seat system

$$\left. \begin{aligned} m_3 \ddot{z}_3 + c(\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + K_s(z_3 - z_2) &= F_d, \\ m_2 \ddot{z}_2 + C(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + K(z_2 - z_1), \\ -c(\dot{z}_3 - \dot{z}_2) - K_s(z_3 - z_2) + F_d &= 0, \\ m_1 \ddot{z}_1 + K_t(z_1 - q) - C(\dot{z}_2 - \dot{z}_1), \\ -K(z_2 - z_1) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

系统的状态变量 $\mathbf{X} = [\dot{z}_3, \dot{z}_2, \dot{z}_1, z_3, z_2, z_1, q]^T$, 控制变量 $\mathbf{U} = [F_d]$, 输出变量 $\mathbf{Y} = [\ddot{z}_3, z_3 - z_2, z_1 - q]^T$, 则状态空间方程为

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{G}\mathbf{W}, \quad \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} + \mathbf{D}\mathbf{U}. \quad (3)$$

式(3)中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -\frac{c}{m_3} & \frac{c}{m_3} & 0 & -\frac{K_s}{m_3} & \frac{K_s}{m_3} & 0 & 0 \\ \frac{c}{m_2} & -\frac{C+c}{m_2} & \frac{C}{m_2} & \frac{K_s}{m_2} & -\frac{K_s+K}{m_2} & \frac{K}{m_2} & 0 \\ 0 & \frac{C}{m_1} & -\frac{C}{m_1} & 0 & \frac{K}{m_1} & -\frac{K+K_t}{m_1} & \frac{K_t}{m_1} \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2\pi u f_0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_3} \\ -\frac{1}{m_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\frac{K_s}{m_3} & \frac{K_s}{m_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_3} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 2\pi n_0 \sqrt{G_q(n_0)} u \end{bmatrix}; \quad \mathbf{W} = [W(t)].$$

1/4 车辆主动悬架座椅系统模型参数, 如表 1 所示。

表 1 1/4 车辆主动悬架座椅系统模型参数

Tab. 1 Parameters of model of 1/4 vehicle active suspension seat system

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|-----------------|-----|------------------------------------|---------|---|-------|
| m_1/kg | 60 | $K_s/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ | 2 000 | $c/(\text{N} \cdot \text{s}) \cdot \text{m}^{-1}$ | 360 |
| m_2/kg | 350 | $K/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ | 24 000 | $C/(\text{N} \cdot \text{s}) \cdot \text{m}^{-1}$ | 1 900 |
| m_3/kg | 70 | $K_t/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ | 250 000 | | |

2 主动悬架座椅控制方法

2.1 主动悬架座椅模糊 PID 控制

采用模糊 PID 控制方法对座椅进行控制, 控制力($F_d(t)$)由 PID 控制器输出, 计算公式为

$$F_d(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (4)$$

式(4)中: K_p, K_i, K_d 分别为比例系数、积分系数和微分系数; $e(t)$ 为误差。

PID 参数由模糊控制器求得, 计算公式为

$$K_p = K_{p,0} + K_{\Delta p} \Delta K_p, \quad K_i = K_{i,0} + K_{\Delta i} \Delta K_i, \quad K_d = K_{d,0} + K_{\Delta d} \Delta K_d. \quad (5)$$

式(5)中: $K_{p,0}, K_{i,0}, K_{d,0}$ 分别为 PID 参数初始设定值; $K_{\Delta p}, K_{\Delta i}, K_{\Delta d}$ 均为比例因子; $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 均为模糊修正值。

首先,采用双输入三输出的模糊控制器,以座椅垂直加速度值与理想值的偏差和偏差变化率作为输入,通过量化因子 K_e, K_{ec} 模糊化得出模糊变量;然后,按照模糊规则进行模糊推理,再由解模糊得出模糊控制量;最后,由比例因子 $K_{\Delta p}, K_{\Delta i}, K_{\Delta d}$ 反模糊化得到 PID 的模糊修正值。为了建立模糊规则,将输入变量和输出变量的语言值划分为 7 个子集,定义为负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(Z)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。由于 2 个量化因子和 3 个比例因子分别有 7 个隶属函数,因此,共有 35 个隶属函数;每个输出的模糊修正值的控制规则有 49 条,共有 147 条模糊规则 $R=[r_1, r_2, \dots, r_{147}]$ 。选用 Mamdani 法进行模糊推理,采取面积中心法进行模糊语言到精确数学值的解析。

由式(5)可知,模糊 PID 的最终参数 K_p, K_i, K_d 是由 PID 参数初始设定值、比例因子和模糊修正值共同决定的,它们是量化因子、比例因子和模糊控制规则的非线性函数。由于汽车座椅系统是一个非线性的时变系统,要求控制器能根据车辆的不同行驶工况实时调节座椅悬架振动系统的参数,从而使传递到人体的振动最小。然而,仅凭经验制定的模糊 PID 参数具有一定的主观性,影响控制效果。因此,采用粒子群算法对模糊 PID 控制器进行优化。

2.2 粒子群优化模糊 PID 控制

粒子群算法是一种群体协作寻优算法,早期的粒子群优化算法是模仿鸟类觅食行为而提出的^[15]。1998年,Shi等^[16]提出了标准粒子群算法,该算法引入惯性权重,以提高粒子的搜索能力,收敛速度快,代码简洁高效,近年来,在供配电、光伏与微电网、电机设计优化等领域得到广泛的应用^[17]。

2.2.1 标准粒子群算法优化模糊 PID 基于标准粒子群优化的模糊 PID 控制器,如图 2 所示。采用标准粒子群算法,对模糊 PID 的量化因子、比例因子和模糊控制规则共同组成的 152 维空间同时进行寻优搜索。使用编码法实现对模糊规则的寻优,定义数字 1~7 对应模糊规则的 NB~PB^[11]。

2.2.2 标准粒子群算法 一群粒子在搜索空间中运动时,有速度和位置两个属性,通过迭代寻找目标函数的最优解,并通过适应度来评价解的品质。 N 个粒子在 152 维搜索空间中运动时,第 i 个粒子在第 k 次迭代时的位置为 $\mathbf{X}_{i,k}=[x_{i,k}^1, x_{i,k}^2, \dots, x_{i,k}^{152}]^T$,将模糊 PID 待优化参数组合作为粒子位置向量内的元素,即 $\mathbf{X}_{i,k}=[K_e^i, K_{ec}^i, K_{\Delta p}^i, K_{\Delta i}^i, K_{\Delta d}^i, r_1^i, r_2^i, \dots, r_{147}^i]^T$,粒子的速度为 $\mathbf{v}_{i,k}=[v_{i,k}^1, v_{i,k}^2, \dots, v_{i,k}^{152}]^T$,粒子在取得自身最优适应度时对应的位置记为 $p_{best,i}$,将所有粒子的 $p_{best,i}$ 进行比较,找出最优位置,即全局最优位置,记为 $g_{best,i}$ 。每一次迭代粒子会跟踪 p_{best}, g_{best} 两个极值进行更新,第 $k+1$ 次迭代时第 i 个粒子的速度($v_{i,k+1}$)和位移($x_{i,k+1}$)的计算公式分别为

$$v_{i,k+1} = \omega \cdot v_{i,k} + c_1 \cdot \text{rand}_1 \cdot (p_{best,i} - x_{i,k}) + c_2 \cdot \text{rand}_2 \cdot (g_{best,i} - x_{i,k}), \quad x_{i,k+1} = x_{i,k} + v_{i,k+1}. \quad (6)$$

式(6)中: x_i 为粒子位置; c_1, c_2 为学习因子,取值为 1.5;选取粒子总数为 100 个,最大迭代次数为 100; $\text{rand}_1, \text{rand}_2$ 为 $[0, 1]$ 上均匀分布的随机数; ω 为惯性权重,它能够产生线性的随迭代时间递减的惯性权重值,计算公式为

$$\omega = \omega_{up} - (\omega_{up} - \omega_{low}) \frac{k}{k_{max}}. \quad (7)$$

式(7)中: $\omega_{up}, \omega_{low}$ 分别为惯性权重的上、下界,通常, $\omega_{up} = 0.9, \omega_{low} = 0.4; k_{max}$ 为最大允许迭代次数。

2.2.3 适应度函数 根据文献[18]中人体对振动的反应和汽车平顺性的主要性能指标,选取座椅加速度(a , 坐垫上方垂直方向上的均方根值)作为目标函数,计算公式为

$$a = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

由于时间绝对误差积分(ITAE)函数能综合体现控制算法的响应速度和稳定性,故选取座椅加速度的 ITAE 函数作为适应度函数,计算公式为

$$f = \int_0^t |e_a(t)| dt / \int_0^t |e_{a,PID}(t)| dt. \quad (9)$$

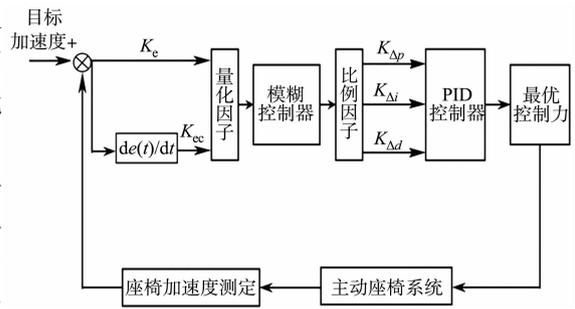


图 2 基于标准粒子群优化的模糊 PID 控制器
Fig. 2 Fuzzy PID controller based on standard PSO

式(9)中:分子为待优化的座椅加速度的 ITAE 函数;分母为在 PID 控制时的座椅加速度的 ITAE 函数; $e_a(t)$ 为待优化的座椅加速度实际输出值与目标值的偏差; $e_{a,PID}(t)$ 为 PID 控制时的座椅加速度实际输出值与目标值的偏差。

粒子群算法优化模糊 PID 参数流程图,如图 3 所示。当迭代次数达到最大时,停止搜索并输出当前最优解。

利用 MATLAB/Simulink 软件编写算法程序,以 C 级路面等级,车速为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的模糊 PID 控制参数寻优为例,可以得到粒子群算法在优化迭代到第 15 代时,适应度收敛于 1.03,此时,输出的控制参数优化结果为 $K_e=0.68$, $K_{ec}=0.51$, $K_{\Delta p}=1.53$, $K_{\Delta i}=0.42$, $K_{\Delta d}=1.89$, $[r_1, r_2, \dots, r_{147}]=[7, 6, \dots, 3]$ 。

3 仿真分析

联合基于 ADAMS/View 环境下的多体动力学模型和在 MATLAB/Simulink 环境下编写的控制器模型,以座椅加速度为座椅性能评价指标,设置仿真时间为 10 s,选择常见的 C 级路面,将不同车速作为研究变量,分别对被动悬架座椅、模糊 PID 控制(fuzzy-PID)和粒子群优化模糊 PID 控制(PSO-fuzzy-PID)进行仿真,可得不同车速下的座椅加速度,如表 2 所示。表 2 中: v 为车速; $a_1 \sim a_3$ 分别为被动悬架座椅、模糊 PID 控制、粒子群优化模糊 PID 控制的座椅加速度。

表 2 不同车速下的座椅加速度

Tab. 2 Seat acceleration at different vehicle speeds

| 参数 | $v=20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ | $v=60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ | $v=100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ |
|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--|
| $a_1/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ | 0.255 3 | 0.533 1 | 0.626 9 |
| $a_2/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ | 0.174 9 | 0.352 7 | 0.404 5 |
| $a_3/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ | 0.132 7 | 0.257 9 | 0.279 5 |

由表 2 及相关计算可知:当车速分别为 20,60,100 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,相较于模糊 PID 控制,粒子群优化模糊 PID 控制的座椅加速度分别下降 16.53%,17.78%,19.94%,相较于被动悬架座椅,粒子群优化模糊 PID 控制的座椅加速度分别下降 48.02%,51.62%,55.42%;在不同工况下,粒子群优化模糊 PID 控制优于模糊 PID 控制,减振效果更加明显。

不同车速下座椅加速度的时间历程,如图 4 所示。

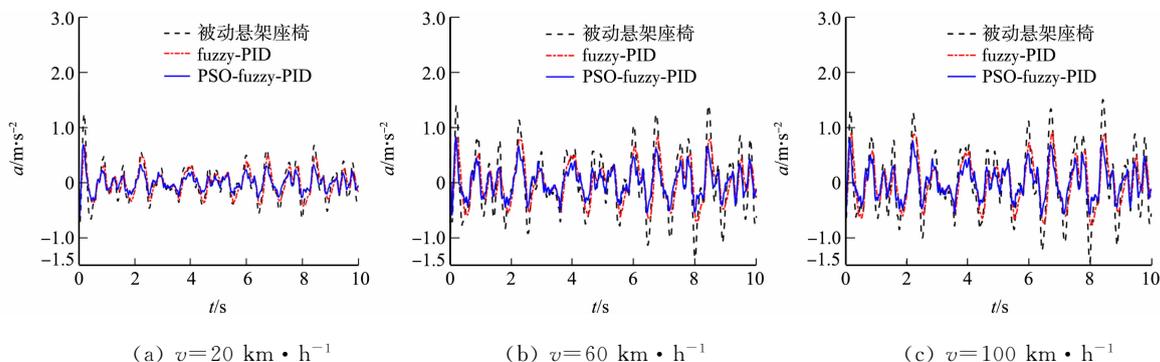


图 4 不同车速下座椅加速度的时间历程

Fig. 4 Time history of seat acceleration at different vehicle speeds

4 在环仿真试验验证

4.1 硬件在环试验

为了进一步验证设计控制器的效果,采用 dSPACE 硬件搭建硬件在环仿真试验平台进行试验。试

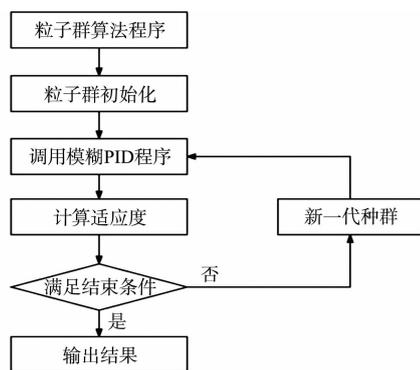


图 3 粒子群算法优化模糊 PID 参数流程图
Fig. 3 Flow chart of particle swarm algorithm for optimizing fuzzy PID parameters

验仪器包括 dSPACE 系统、控制器、功率放大器、作动器、力传感器等。

硬件在环仿真试验,如图 5 所示。首先,将 Simulink 模型编译到 dSPACE 软件实时平台, dSPACE 硬件与控制器相连,在编译软件上编写控制程序,并下载到控制器中,将控制器连接功率放大器的 AC 交流电接口,功率放大器再与作动器相连,在作动器头部安装力传感器,力传感器输出的信号连接到 dSPACE 硬件中,在上位机上显示实时力的大小,从而形成闭环控制。

4.2 试验结果分析

在 dSPACE 软件实时平台的 Controldesk 中观察和监测试验结果,并对数据结果进行分析和处理,试验工况设定时间为 5 s,车速设定为 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,路面等级为 C 级。座椅悬架主动控制力实际值与理论值的对比,如图 6 所示。

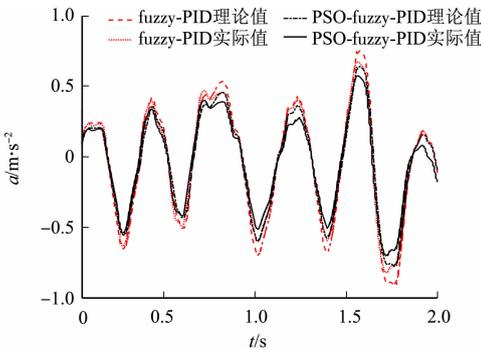
由图 6 可知:座椅主动悬架控制力理论峰值为 122.8 N,实际峰值为 132.9 N,两者最大偏差为 8.22%,误差在可接受范围。

不同控制方法下座椅加速度的实际值与理论值,如表 3 所示,相应的对比曲线,如图 7 所示。表 3 中: $a_{2,\text{th}}$, $a_{2,\text{re}}$ 分别为模糊 PID 控制的座椅加速度的理论值和实际值; $a_{3,\text{th}}$, $a_{3,\text{re}}$ 分别为粒子群优化模糊 PID 控制的座椅加速度的理论值和实际值; η 为相较于被动悬架座椅的变化幅度。由表 3 及图 7 可知:粒子群优化模糊 PID 控制的座椅加速度的实际值和理论值均低于模糊 PID 控制 16.5% 以上,低于被动悬架座椅 50% 以上,减振性能明显;实际值和理论值之间的偏差均在 6.4% 左右,误差在可接受范围,验证了该方法在硬件在环测试环境下的可行性。

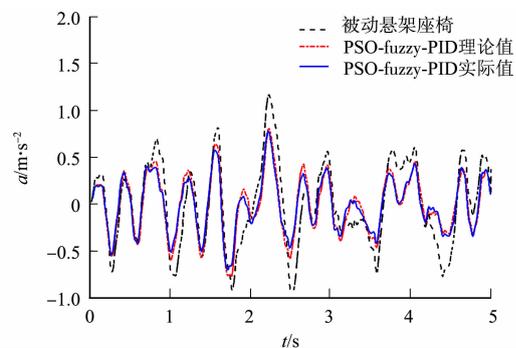
表 3 不同控制方法下座椅加速度的实际值与理论值

Tab. 3 Real values and theoretical values of seat acceleration under different control methods

| 参数 | 数值 | $\eta/\%$ | 参数 | 数值 | $\eta/\%$ |
|--|---------|-----------|--|---------|-----------|
| $a_1/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ | 0.533 1 | — | $a_{3,\text{th}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ | 0.257 9 | -51.62 |
| $a_{2,\text{th}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ | 0.352 7 | -33.84 | $a_{3,\text{re}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ | 0.241 5 | -54.70 |
| $a_{2,\text{re}}/\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ | 0.329 8 | -38.13 | | | |



(a) PSO-fuzzy-PID 和 fuzzy-PID



(b) PSO-fuzzy-PID 和被动悬架座椅

图 7 不同控制方法下座椅加速度实际值与理论值的对比

Fig. 7 Comparison of real values and theoretical values of seat acceleration under different control methods

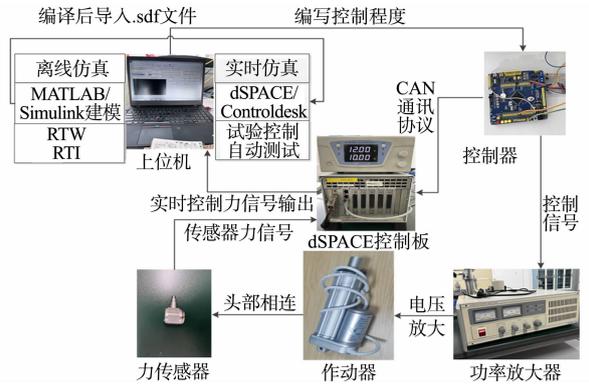


图 5 硬件在环仿真试验

Fig. 5 Hardware-in-the-loop simulation test

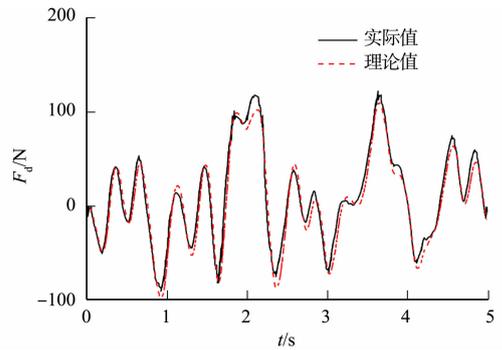


图 6 座椅悬架主动控制力实际值与理论值的对比

Fig. 6 Comparison between real values and theoretical values of active control force of seat suspension

5 结束语

提出一种粒子群算法优化模糊 PID 控制的方法, 该方法不但具有模糊 PID 控制的优点, 能较好地适应非线性时变的车辆悬架系统, 而且利用粒子群算法搜索能力强、收敛速度快的特点优化模糊 PID 控制的量化因子、比例因子和模糊规则等参数, 克服了模糊 PID 控制参数的选取存在主观性和经验性的问题。仿真结果表明, 在 C 级路面激励, 不同行驶车速下, 相较于模糊 PID 控制和被动悬架座椅, 采用文中控制器的座椅减振效果更佳。

参考文献:

- [1] 刘杉, 孙琦, 侯力文, 等. 基于加速粒子群的车辆座椅悬架最优控制研究[J]. 噪声与振动控制, 2018, 38(3): 49-54, 59.
- [2] TSENG H E, HROVAT D. State of the art survey: Active and semi-active suspension control[J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 53(7): 1034-1062. DOI: 10.1080/00423114.2015.1037313.
- [3] LI Weixing, DU Haiping, NING Donghong, *et al.* Event-triggered H_∞ control for active seat suspension systems based on relaxed conditions for stability[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 149: 1-15. DOI: 10.1016/j.ymssp.2020.107210.
- [4] GAN Zhengkang, ANDREW J H, DARLING J. Adaptive control of an active seat for occupant vibration reduction [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 349: 39-55. DOI: 10.1016/j.jsv.2015.03.050.
- [5] 于曰伟, 赵雷雷, 周长城, 等. 车辆座椅次优控制主动悬架设计及分析[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(3): 87-93. DOI: 10.13190/j.jbupt.2020-219.
- [6] SHI Hongyan, PAN Shouli, LIU Liping, *et al.* Research on active suspension control strategy based on fuzzy PID control[J]. Hydromechatronic Engineering, 2015, 43(24): 67-74.
- [7] 袁传义, 张焱, 唐金花. 强横风作用下车辆半主动悬架模糊 PID 控制研究[J]. 噪声与振动控制, 2022, 42(3): 168-171, 236.
- [8] 胡启国, 杨晨光. 考虑路面时变的整车主动悬架的改进模糊 PID 集成控制策略[J]. 现代制造工程, 2020, 2: 20-25.
- [9] 冯金芝, 喻凡, 郑松林, 等. 基于遗传算法的主动油气悬架分成控制[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(4): 525-531.
- [10] 马克, 米林, 谭伟, 等. 基于 FPGA 的汽车主动悬架模糊自适应 PID 控制器设计[J]. 机床与液压, 2018, 46(2): 95-99, 148. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3881.2018.14.027.
- [11] 赵家豪, 魏民祥, 丁玉章, 等. 增程式 APU 混沌退火混合粒子群优化模糊 PID 动态控制[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6): 1213-1221. DOI: 10.13224/j.cnki.jasp.2021.06.010.
- [12] BOUKHALFA G, BELKACEM S, GHIKHI A, *et al.* Genetic algorithm and particle swarm optimization tuned fuzzy PID controller on direct torque control of dual star induction motor[J]. Journal of Central South University, 2019, 26(7): 1886-1896. DOI: 10.1007/s11771-019-4142-3.
- [13] 李扬, 侯加林, 苑进, 等. 基于改进 PSO 的模糊 PID 高枝修剪机械臂末端抑振算法与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 49-58. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.10.007.
- [14] 余志生. 汽车理论[M]. 6 版. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [15] EBERHART R C, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Piscataway: IEEE Service Center, 1995: 39-43.
- [16] SHI Yuhui, EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer[C]//Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation. Piscataway: IEEE Service Center, 1999: 69-73.
- [17] 周嗣理, 李国丽, 王群京, 等. 基于改进粒子群优化算法的永磁球形电机驱动策略研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 166-176, 189. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.210841.
- [18] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Mechanical vibration and shock human exposure to whole-body vibration-part 1: General requirements: ISO 2631-1-1997[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1997.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴跃勤)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202405024



节理岩体中大跨隧道围岩 变形破坏模式分析

田皓天¹, 俞缙¹, 林聪波¹, 王海猛², 蔡浩慧², 周玮²

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430000)

摘要: 运用 3DEC 离散元软件, 建立含不同节理分布的大跨隧道模型。考虑节理的走向、倾角、间距和力学参数等因素, 对大跨隧道开挖后无支护的围岩变形破坏情况进行模拟计算, 并对大量计算结果进行分析。研究表明: 大跨隧道围岩开挖后的风险部位主要由节理走向与倾角决定, 该部位失稳及落块由节理间距和力学参数决定; 当考虑双向组合节理时, 围岩情况比单向节理更为复杂, 隧道围岩的变形破坏形式不仅在横截面上呈现一定规律, 并且在隧道轴向上也会有所差异; X 向节理主要影响隧道横截面围岩变形破坏的位置, Y, Z 向节理则会影响隧道轴线方向的围岩变形分布规律, 并且节理倾角愈大, 围岩松动范围愈深。

关键词: 隧道工程; 节理岩体; 离散元模拟; 围岩变形破坏; 大跨隧道

中图分类号: U 451.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)01-0030-08

Analysis of Deformation and Failure Mode of Surrounding Rock of Long-Span Tunnel in Jointed Rock Mass

TIAN Haotian¹, YU Jin¹, LIN Congbo¹,
WANG Haimeng², CAI Haohui², ZHOU Wei²

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

2. China Communications Second Navigation Engineering Bureau Limited Company, Wuhan 430000, China)

Abstract: Using 3DEC discrete element software, a model of long-span tunnel with different joint distributions is established. Considering the strikes, dip angles, spacing and mechanical parameters of joints, the deformation and failure of surrounding rocks without support of the long-span tunnel after excavation is simulated and analyzed. The research results show that the risk position of the long-span tunnel surrounding rock after excavation is mainly determined by the strikes and dip angles of the joints. The instability and falling of blocks in this position are determined by the joint spacing and mechanical parameters. When considering the bidirectional combination joints, the surrounding rocks are more complex than the unidirectional joints. The deformation and failure forms of the tunnel surrounding rocks not only present a certain laws in the cross section, but also present difference in the tunnel axis. The X-direction joints mainly affect the deformation and failure location of the tunnel cross-section surrounding rocks, while the Y, Z-direction joints affect the deformation distribution laws of the tunnel axis direction, and the larger the joint dip angle, the deeper the surrounding rocks loosening ranges.

收稿日期: 2024-05-02

通信作者: 俞缙(1978-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事岩土力学与地下工程的研究。E-mail: bugyu0717@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(52374090)

Keywords: tunnel engineering; jointed rock mass; discrete element simulation; deformation and failure of surrounding rock; long-span tunnel

特大跨度隧道与普通断面公路隧道相比,围岩的自稳时间更长,同时失稳风险也更高^[1]。因此,在特大跨度隧道的开挖过程中,围岩变形的控制成为施工中的重点和难点^[2]。大跨隧道围岩的变形破坏模式是进行合理支护的前提^[3],因此,在隧道设计前需要对围岩的变形破坏进行分析和预判,以确保隧道开挖过程中的稳定性、安全性与经济性。目前,国内外有较多学者通过力学模型试验、数值模拟等方法,分析了围岩变形破坏的影响因素,对于明晰围岩的变形破坏机制有极大的推动作用^[4]。为有效开展隧道围岩的支护设计,学者们针对不同的地质与工程特点,提出了隧道开挖的合理洞型、支护技术、变形控制方法等,保障了隧道的施工安全^[5],但采用传统的均质体方法分析大跨隧道的变形破坏模式不够精确,需要考虑节理岩体的不均匀性。

牛少卿等^[6]对大跨度巷道顶板的层状特征进行了分析,探讨了结构失稳机理,并得出岩层沿节理面滑动是主要失稳原因之一。高峰等^[7]采用 UDEC 离散元软件模拟了隧道塌方情况,发现岩体节理对于塌方形式起着主导作用。Bahaaddini 等^[8]使用 PFC3D 数值模拟软件研究了不同节理对岩体变形破坏的影响,发现破坏模式主要由节理方向和岩桥步距角决定。Chen 等^[9]使用离散元方法模拟了受围压作用下的节理岩体,发现样本的破坏模式和对围压的敏感性都受到节理组倾角的控制。Chen 等^[10]发现了岩体压缩时,在不同节理倾角下和不同连续因子下的变形特征。赵景彭^[11]以大梁山隧道为工程依托,研究发现在不同节理倾角下,隧道围岩稳定性的差异和锚杆的受力情况区别。刘刚等^[12]发现节理分布对大跨隧道的围岩变形破坏模式具有显著的影响,并且也得出了相应的规律。然而,在探究特大跨隧道围岩受力变形特征时,由于岩体介质的不均匀性及节理分布的随机性,目前尚缺乏系统性的研究。不同的节理分布会导致围岩不同的破坏特征,因此,需要采取不同的支护措施确保隧道的稳定性和安全性。基于此,本文对节理岩体中大跨隧道围岩变形破坏模式进行分析。

1 离散元模拟试验

1.1 模型建立

采用 3DEC 离散元软件模拟计算不同节理情况下大跨隧道围岩的变形破坏特征,将岩石看作各向同性的连续等效介质,且每个节理的力学性质相同,隧道模型是基于某大断面隧道的加宽段进行设计^[13]。扁平形的大跨度公路隧道的跨度为 30 m,高度为 17 m,扁平率约为 0.57,隧道的埋深为 80 m,总开挖长度为 50 m,每个开挖步长为 5 m。在数值计算中,按照隧道直径的 3 倍设置模型的上、下、左、右边界^[14]。隧道模型建立示意图,如图 1 所示。图 1 中: φ_x 表示 X 向节理的倾角,即与 XOY 平面的夹角; φ_y 表示 Y 向节理的倾角,即与 YOZ 平面的夹角; φ_z 表示 Z 向节理的倾角,即与 YOZ 平面的夹角。

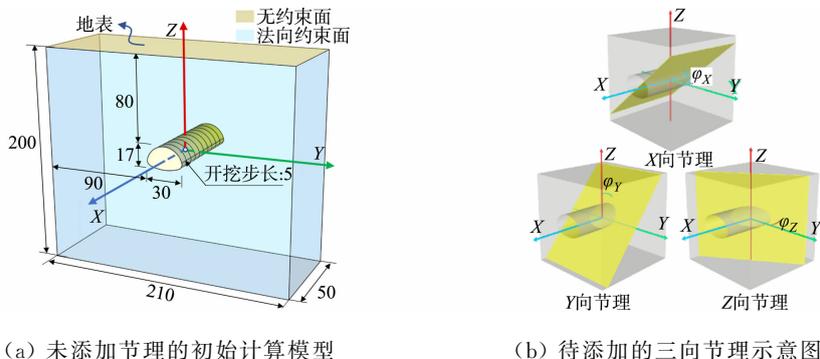


图 1 隧道模型建立示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagrams of tunnel model establishment (unit: m)

未考虑节理的影响,隧道模型包含约 200 万个网格单元,设置最大网格尺寸不超过 3 m。边界条件设置如下:模型的四周和底部添加约束,顶部为自由面,整体仅考虑重力作用,同时法向速度被设定为 0。在数值计算模型中,采用笛卡尔坐标系,其中,X,Y,Z 轴分别代表隧道轴线方向、隧道横轴方向和竖

直轴线方向。为了方便描述,将围绕这3个轴旋转的节理分别称为 X, Y, Z 向节理。

1.2 参数的确定

岩石块体选取花岗岩作为研究对象,并使用摩尔-库伦塑性模型描述岩石块体的变形特性。采用节理面接触库仑滑移模型作为节理的本构,将节理视为岩体参数劣化的主要原因,通过现场取样随后进行室内三轴试验测定无节理岩体参数,岩石力学参数如下:密度(ρ)为 $2\,643.3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$;变形模量(E)为 51 GPa ;泊松比(μ)为 0.23 ;粘聚力(c_R)为 23.38 MPa ;内摩擦角(φ_R)为 59° 。Shreedharan等^[15]经过多次试验验证的数据,并通过反分析法再次修正,得到各项力学参数:切向刚度(k_s)为 $6.42\text{ GPa}\cdot\text{m}^{-1}$;法向刚度(k_n)为 $2.7\text{ GPa}\cdot\text{m}^{-1}$;抗拉强度(σ)为 5 kPa ;粘聚力(c_j)为 0.4 MPa ;内摩擦角(φ_j)为 20° 。模型及其参数的准确性已通过现场变形监测数据进行验证^[16]。

1.3 模拟方案

隧道模型采用双侧壁导坑9步开挖法。在计算过程中,主要考虑了节理倾角、间距和力学参数等因素。在以节理倾角为主要因素进行分析时,节理的间距统一取 2 m ;仅单向节理时,在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 之间,隔 10° 模拟计算一次;对于双向节理组合,分别计算不同倾角的 X, Y, Z 各向节理组合。当间距为主要因素分析时,为了减小隧道开挖跨度对计算结果的影响,并且提高研究的适用性,引入间跨比 $\alpha, \alpha=d/B$,其中, d 为节理间距, B 为隧道跨度。由于天然节理间距一般为 $0.1\sim 3.0\text{ m}$ ^[17],在隧道跨度为 30 m 的情况下,设置间跨比取值 $0.01\sim 0.10$ 之间,以 0.01 为间隔渐增进行计算模拟。当力学参数为主要因素分析时,法向刚度、切向刚度、黏聚力三者取原有数值的 $0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ 倍,以此对应不同围岩级别的岩体参数。

2 大跨隧道破坏模式

2.1 单向节理变形破坏模式

在 X, Y, Z 三向节理条件下,选取一部分代表性位移云图进行讨论。经过计算分析,当间跨比 $\alpha=0.07$ 时,隧道围岩易发生失稳^[16],因此,选取的位移云图间跨比 α 均为 0.07 。各向节理围岩横截面位移云图,如图2所示。图2中: φ 为节理倾角; $s(\cdot)$ 为位移函数。由图2可知如下3点结论。

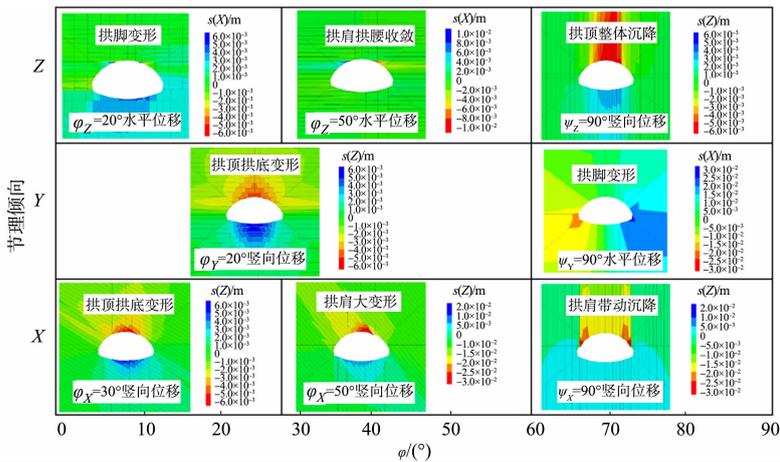


图2 各向节理围岩横截面位移云图

Fig. 2 Cross-sectional displacement nephograms of jointed surrounding rocks for various directions

1) 当仅存在 X 向节理时,围岩的水平变形远远小于竖直变形,破坏以竖直位移为主。当 φ_X 在 30° 以下时,围岩的主要破坏地点发生在隧道上、下两处;当 φ_X 为 $30^\circ\sim 70^\circ$ 时,变形上移至拱肩和拱顶部位,在隧道上半部分的拱顶和拱肩处发生大变形;当 $\varphi_X > 70^\circ$ 时,拱肩可能会发生掉块的危险,并且由于拱肩发生向下的位移,隧道自身稳定性较差,因此,此处产生剪切破坏,从而整个隧道发生失稳。

2) 当仅存在 Y 向节理时,这些节理在隧道的横截面上主要呈现出相切于隧道轮廓线的水平岩层形状。当 φ_Y 为 $0^\circ\sim 70^\circ$ 时,围岩主要以拱底和拱顶变形为主,且拱底的隆起量稍大,但是当倾角逐渐变大时,变形量逐渐减少;当 φ_Y 为 $70^\circ\sim 90^\circ$ 时,拱顶和拱底的变形量降低,但两侧的拱脚处会由于应力集中

发生向内侧的位移。因此,岩体相对完整且具备较好的强度,整个隧道的稳定性较好。

3) 当仅存在 Z 向节理时,在 φ_z 为 20° 以内时,围岩整体具有较高的稳定性,但在拱脚处可能会发生变形破坏;当 φ_z 为 $20^\circ \sim 70^\circ$ 时,隧道围岩下方变形量较小,主要分布在上半部分拱肩拱腰处;当 $\varphi_z > 70^\circ$ 时,可以看作隧道上方存在许多平行层岩,极易引起大规模的滑动变形,使隧道顶部整体发生大变形。

2.2 X,Y 双向节理变形破坏模式

当考虑双向组合节理时,围岩情况比单向节理更为复杂,隧道围岩的变形破坏形式不仅在横截面上呈现一定规律,并且在隧道轴向上也会有所差异。因此,双向节理需要考虑三维中的变形破坏情况。为了便于显示和分析,同样在间跨比为 0.07 时,选取主要变形破坏部位来展示变形破坏云图的横截面,并提取同一模型的隧道中线剖面处的隧道剖面图。

X, Y 向节理部分倾角组合下围岩横截面位移云图,如图 3 所示。

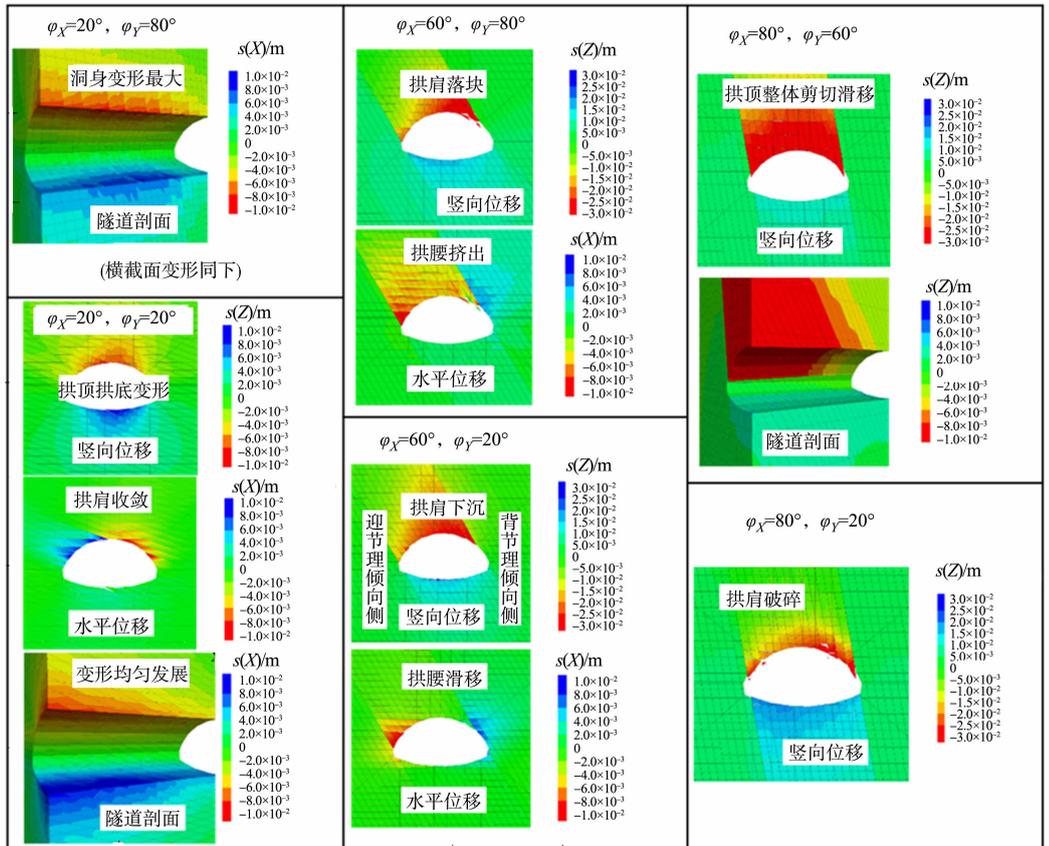


图 3 X, Y 向节理部分倾角组合下围岩横截面位移云图

Fig. 3 Cross-sectional displacement nephograms of surrounding rocks under partial dip angle combination of X, Y -direction joints

由图 3 可知:当双向节理中的 φ_X 为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时,隧道拱底和拱顶发生变形,并且在拱肩处发生收敛,此时,竖向变形部位会稍微有所偏移,但 Y 向节理倾角的改变对横截面的破坏模式几乎没有影响;当 φ_X 为 $30^\circ \sim 70^\circ$ 时,隧道围岩表现为拱肩的破碎和拱腰的滑移收敛,背节理倾向一侧的拱肩发生破坏,而迎节理倾向一侧的拱腰则出现较严重的滑移破坏,增加 φ_Y 会导致围岩更加破碎,变形范围更深,并增加隧道围岩失稳的风险;当 $\varphi_X > 70^\circ, \varphi_Y < 40^\circ$ 时,截面处的围岩非常破碎,在开挖后最先发生的是拱肩处块体的破碎和掉落,接踵而至的是沿 X 向节理面的破坏,这导致隧道的稳定性较差,当 $\varphi_Y > 40^\circ$ 后,隧道围岩的岩块比较大,上半部分围岩相对完整,容易整体沿节理面滑移变形,可能导致拱肩处的块体掉落;在隧道纵向上,当 $\varphi_X < 30^\circ, \varphi_Y < 60^\circ$ 时,围岩在最先开挖的拱顶和拱底处发生最大的变形,隧道入口处的围岩若发生松动,则会引起后续围岩的破坏,当 $\varphi_Y > 60^\circ$ 后,在隧道中部截面上出现大变形。

2.3 X,Z 双向节理变形破坏模式

当 X, Z 双向节理组合时,它们对于围岩的破坏模式都起着主导作用。 X, Z 向节理部分倾角组合下围岩横截面位移云图,如图 4 所示。图 4 中:横截面和剖面的位置与节 2.2 相同;间跨比为 0.07。

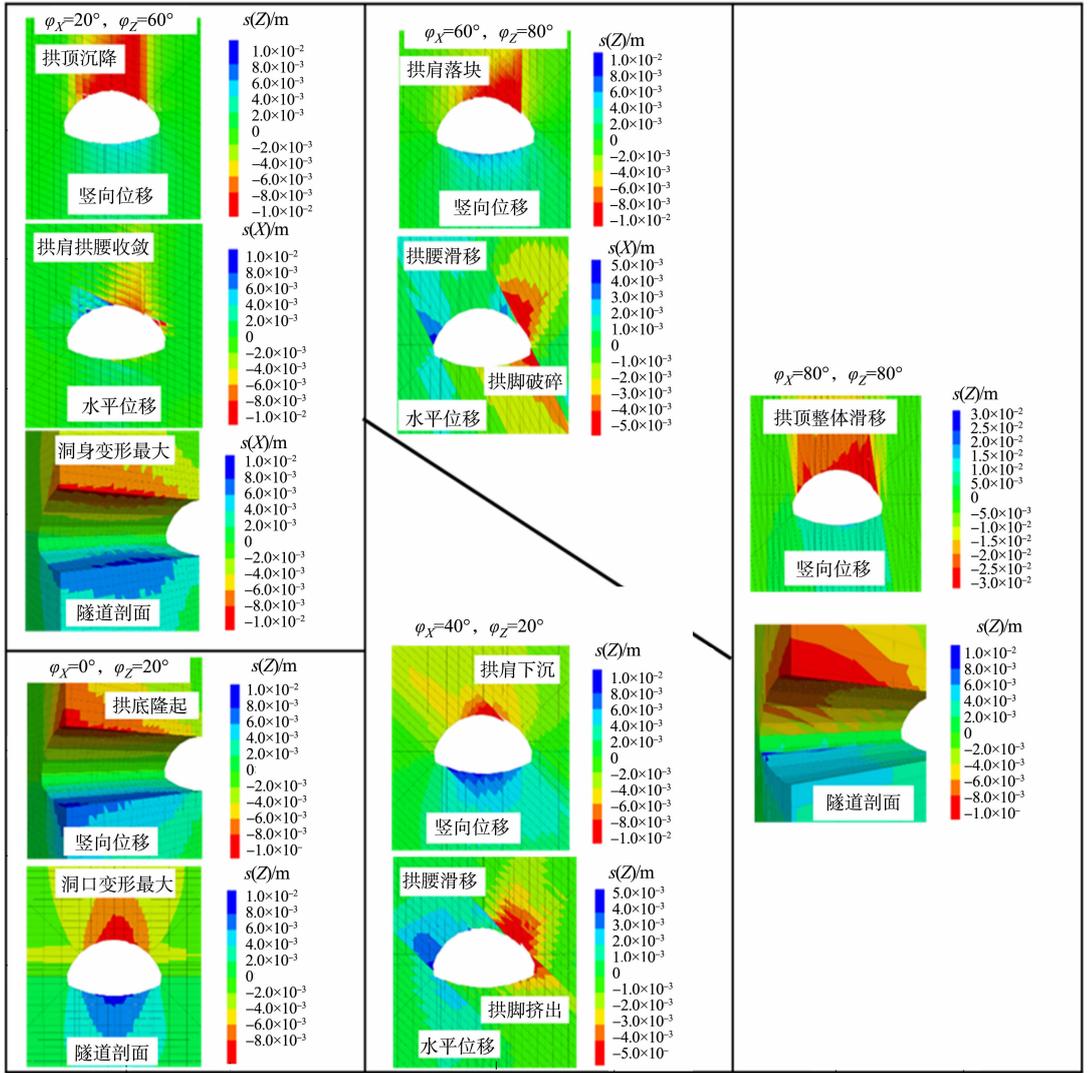


图4 X,Z向节理部分倾角组合下围岩横截面位移云图

Fig. 4 Cross-sectional displacement nephograms of surrounding rocks under partial dip angle combination of X, Z-direction joints

由图4可知:当 $\varphi_X < 40^\circ$ 时,在Z向节理的影响下,出现的两种破坏模式较为相似,当 $\varphi_Z < 40^\circ$ 时,隧道围岩变形大多为拱底隆起及拱顶的沉降,拱肩处附近区域为一些小的收敛变形,增加X向节理倾角只会导致隧道变形不对称,基本上没有掉落块体的情况发生,而当 $\varphi_Z > 40^\circ$ 后,变形破坏模式会发生一些变化,拱顶的沉降远大于拱底的变形量,拱肩处还会出现一些落块,对称收敛的拱肩还会变成不对称的一侧收敛;当 φ_X 为 $40^\circ \sim 70^\circ$ 时,围岩的变形发生了转变,从隧道上下部位转移到中间拱腰处,会出现拱腰滑移现象,还可能会出现岩块掉落的情况,当 $\varphi_Z < 40^\circ$ 时,拱肩及对称面拱脚两处的位移相差不大,并且影响范围也相似,同时拱腰和拱脚处还会发生收敛和挤出变形;随着 φ_X 与 φ_Z 的增加,拱底和拱脚两处变形渐渐变小,同时拱肩的变形更大,更容易出现落块现象;当 $\varphi_X > 70^\circ$ 后,围岩变形愈来愈大,拱肩大变形上移转变为拱顶沉降,拱肩沉降一侧大于另一侧,导致围岩更加不稳定,并出现沿拱肩变形破坏缺口的滑移,随着 φ_Z 的增加,塌落范围变大,两侧拱肩也有较大的沉降变形;对于隧道纵深向的围岩变形破坏,当 $\varphi_X < 40^\circ, \varphi_Z < 40^\circ$ 时,隧道开挖进口处变形较大,且变形持续时间较长,当 $\varphi_Z > 40^\circ$,拱顶的围岩均匀变形同时范围缩小,而在隧道中部拱底隆起现象更为明显,在 $\varphi_X > 80^\circ$ 后,隧道上方的变形范围逐渐由拱顶扩大至拱肩,在拱腰处的围岩也出现斜向位移,围岩纵向变形已经不随 φ_X 的改变而变化,随着 φ_Z 的增大,围岩的变形主要集中在拱顶并且范围增大。

2.4 Y,Z双向节理变形破坏模式

在Y,Z向上的节理相较于X向节理,对隧道的变形破坏影响较小。在考虑节理参数折减的情况

下,它的变形破坏有所增加。为了进一步了解其特征,采用节理参数折减为 0.5 倍后计算位移, Y, Z 向节理部分倾角组合下围岩横截面位移云图,如图 5 所示。图 5 中:横截面和剖面的位置与节 2.2 相同。

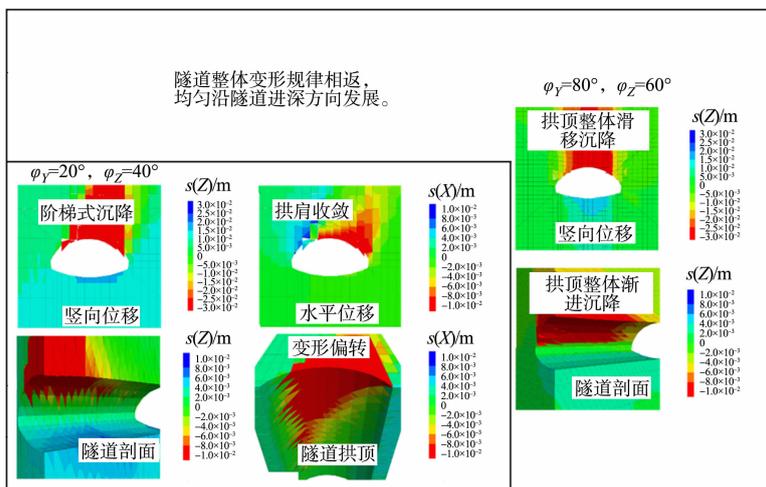


图 5 Y, Z 向节理部分倾角组合下围岩横截面位移云图

Fig. 5 Cross-sectional displacement nephograms of surrounding rocks under partial dip angle combination of Y, Z -direction joints

由图 5 可知:当 $\varphi_Z < 60^\circ, \varphi_Y < 50^\circ$ 时,围岩的变形形式相似,隧道的拱底几乎没有隆起,而拱肩处会出现部分块体的破碎,可能会发生掉落。根据隧道的俯视图,在隧道纵深方向,右侧拱肩变形减小,但左侧拱肩变形逐渐增大,当 φ_Y 愈接近 50° 时,这种情况则没有那么明显;当 φ_Z 为 $60^\circ \sim 90^\circ$ 时,无论 φ_Y 怎么变化,隧道的变形破坏模式均以整体性的拱顶和拱肩变形为主,上方拱顶处整体由于剪切破坏而发生滑移沉降,从而可能会引发大规模的坍塌,拱肩也可能会因为围岩破碎出现落块;特别是当 $\varphi_Y = 50^\circ, \varphi_Z = 90^\circ$ 时,整体崩塌的程度最大,且 $\varphi_Z > 70^\circ$ 时,所有岩块都会发生塌落,说明控制围岩稳定性要格外注意 Z 向节理的倾角。

2.5 大跨隧道围岩变形破坏模式判别表

节理岩体中大跨隧道围岩变形破坏模式判别图,如图 6 所示。

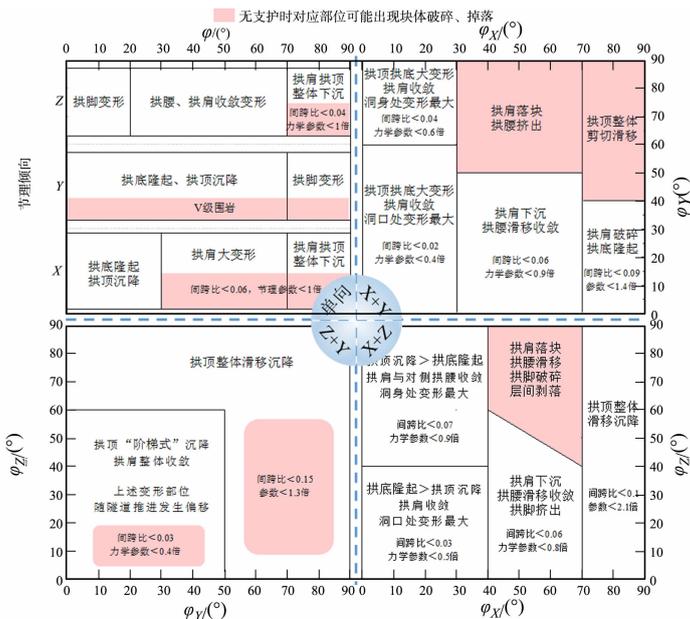


图 6 节理岩体中大跨隧道围岩变形破坏模式判别图

Fig. 6 Discriminant diagrams of deformation and failure modes of surrounding rocks of long-span tunnel in jointed rock mass

文献[16]总结和归纳各种节理分布的数值模拟计算结果,并结合节理对大跨隧道围岩稳定性的影

响规律。文中通过分析工程现场的节理信息,可以初步预测出大跨隧道中的危险区域、失稳风险及可能发生的变形破坏类型。根据这些结果,在实际工程中就可以针对性的制定施工方案,规避风险。

目前的工程岩体分级标准主要是根据岩体基本质量指标(BQ)划分,并对自身稳定性进行初步评估。然后,根据这些粗略的围岩等级,提供不同施工方案。然而,这种将围岩视为均质岩体的方法,不仅在判断隧道稳定性上有欠缺,并且提供的施工方案也不太清晰。此外,还有一种通过霍克布朗公式估算围岩参数,并使用有限元数值模拟进行计算的方法。然而,这种方法对于隧道围岩变形破坏的位置和变形破坏的形式也无能为力,而且过程比较繁琐^[18]。相比之下,判别法可以直接根据现场勘察的节理信息预测隧道施工过程中可能出现的危险和围岩破坏的位置,保证了人员的安全和施工顺利进行,并且得出了节理分布对隧道围岩破坏模式的影响,填补了这一部分研究的空缺。

根据不同的变形破坏模式的特点,结合不同施工工法的优缺点及施工的难易程度,考虑围岩变形控制的效果及施工的安全性及经济性,不同节理情况下大跨隧道施工工法建议图,如图7所示。

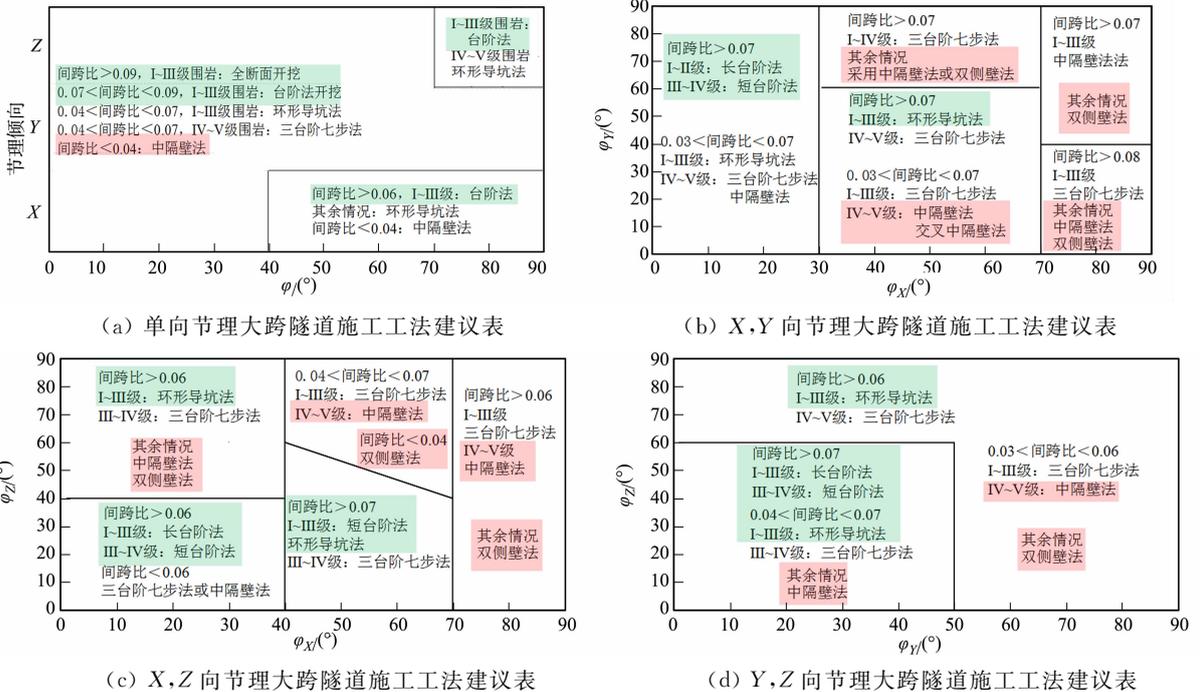


图7 不同节理情况下大跨隧道施工工法建议图

Fig. 7 Construction method suggestion diagrams of long-span tunnel under different joint conditions

3 结论

1) 围岩的变形发生部位和空间位置主要与节理走向及倾角有关,间距和力学参数仅影响围岩是否发生破坏及落块。隧道跨度愈大,围岩变形破坏受节理影响的差异愈明显。

2) 对于 X 向节理,隧道围岩主要以竖向变形为主,当节理倾角超过 70°后,隧道极易失稳;对于 Y 向节理,随着倾角的增大,围岩的变形量逐渐减小,岩石具有一定强度,因此,稳定性较好;对于 Z 向节理,围岩破坏形式大致可以分为 3 种:在 φ_z 为 20°以内时,拱脚处可能会发生变形破坏;当 φ_z 为 20°~70°时,变形区域主要分布在隧道上方;当 $\varphi_z > 70^\circ$ 时,拱顶处易发生滑动变形。

3) 在双向节理组合下,X 向节理的倾角变化是影响隧道截面上围岩变形破坏部位的主要因素,Y,Z 向节理主要影响隧道纵深方向变形破坏空间位置的变化。节理倾角愈大,围岩松动范围愈深。

4) 根据节理情况,得到围岩变形破坏模式的判别方法,提出了相应的施工工法建议表,该方法考虑了岩体不均匀性的特点,具有高效性与实用性,对大跨隧道的支护与施工设计具有指导意义。

参考文献:

[1] 张顶立. 隧道及地下工程的基本问题及其研究进展[J]. 力学学报, 2017, 49(1): 3-21. DOI: 10. 6052/0459-1879-16-

348.

- [2] 洪开荣, 冯欢欢. 中国公路隧道近 10 年的发展趋势与思考[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 62-76. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2020.12.005.
- [3] 熊自明, 卢浩, 王明洋, 等. 我国大型岩土工程施工安全风险研究进展[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3703-3716. DOI: 10.16285/j.rsm.2017.2138.
- [4] 左建平, 魏旭, 王军, 等. 深部巷道围岩梯度破坏机理及模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 478-485. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.000853.
- [5] 杨忠民, 高永涛, 吴顺川, 等. 隧道大变形机制及处治关键技术模型试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4482-4492. DOI: 10.16285/j.rsm.2018.0542.
- [6] 牛少卿, 杨双锁, 李义, 等. 大跨度巷道顶板层面剪切失稳机理及支护方法[J]. 煤炭学报, 2014, 39(增刊 2): 325-331. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2013.1404.
- [7] 高峰, 唐星, 李星, 等. 基于 UDEC 离散元法的隧道塌方特征分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(1): 24-28, 34. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0696.2018.01.04.
- [8] BAHAAADDINI M, SHARROCK G, HEBBLEWHITE B K. Numerical investigation of the effect of joint geometrical parameters on the mechanical properties of a non-persistent jointed rock mass under uniaxial compression[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 49: 206-225. DOI: 10.1016/j.compgeo.2012.10.012.
- [9] CHEN Miao, ZANG Chuanwei, DING Ziwei, *et al.* Effects of confining pressure on deformation failure behavior of jointed rock [J]. Journal of Central South University, 2022, 29(4): 1305-1319. DOI: 10.1007/s11771-022-4991-z.
- [10] CHEN Xin, LIAO Zhihong, PENG Xi. Deformability characteristics of jointed rock masses under uniaxial compression [J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(2): 213-221. DOI: 10.1016/j.ijmst.2011.08.012.
- [11] 赵景彭. 节理倾角对层状岩体大断面隧道稳定性研究[J]. 铁道建筑, 2011(9): 58-61. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1995.2011.09.018.
- [12] 刘刚, 赵坚, 宋宏伟, 等. 断续节理方位对巷道稳定性的影响[J]. 煤炭学报, 2008, 167(8): 860-865. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2008.08.005.
- [13] 黄建国, 俞缙, 李小刚, 等. 超大断面隧道不同加宽段围岩变形及围岩压力监测分析[J]. 隧道建设: 中英文, 2021, 41(增刊 2): 115-122. DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.S2.014.
- [14] 苏晓堃. 隧道开挖数值模拟的围岩边界取值范围研究[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(3): 64-68. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2012.03.014.
- [15] SHREEDHARAN S, KULATILAKES P. Discontinuum-equivalent continuum analysis of the stability of tunnels in a deep coal mine using the distinct element method[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(5): 1903-1922. DOI: 10.1007/s00603-015-0885-9.
- [16] 林聪波, 俞缙, 常方强, 等. 三维贯通节理对大跨隧道围岩稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(3): 1141-1152. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2023.03.030.
- [17] 廖国华. 节理间距及岩石质量指标的估算[J]. 岩石力学与工程学报, 1990(1): 68-75.
- [18] 赵坚, 李海波. 莫尔-库仑和霍克-布朗强度准则用于评估脆性岩石动态强度的适用性[J]. 岩石力学与工程学报, 2003(2): 171-176. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.02.001.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202409014



基于 SketchUp 和 OSG 的区域建筑 震害模拟三维动态可视化

颜学渊¹, 郑欣颖¹, 刘旭宏², 赵瀚彬¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350108;

2. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 针对现有震害模拟可视化方法建模环节存在的不足,设计一种基于 SketchUp 草图大师的区域建筑三维建模方法。该方法解决了传统建模方法中过于依赖原始数据和模型维护困难的问题,实现区域建筑建模的灵活性和模型的可维护性。利用 OSG 三维渲染引擎和 Qt 框架搭建震害模拟三维动态可视化平台,完成区域建筑震害模拟的三维动态可视化。以福建省福州市台江区某区域为例,对该区域进行三维建筑建模和震害模拟结果的动态可视化展示。结果表明:所提建模方法和平台具有可行性。

关键词: 区域建筑三维建模; 三维动态可视化; 震害模拟; 草图大师; OSG 三维渲染引擎

中图分类号: X 43; TP 391.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)01-0038-08

Three-Dimensional Dynamic Visualization of Regional Building Seismic Damage Simulation Base on SketchUp and OSG

YAN Xueyuan¹, ZHENG Xinying¹, LIU Xuhong², ZHAO Hanbin¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A regional building three-dimensional(3D) modeling method based on SketchUp sketch master is designed to solve the shortcomings in the modeling segment of existing seismic damage simulation visualization methods. The method overcomes the problems of traditional modeling methods overdependent on original data and model maintenance difficulties, the flexibility of regional building modeling and the maintainability of the models are achieved. A 3D dynamic visualization platform for seismic damage simulation is constructed using OSG 3D rendering engines and Qt framework, the 3D dynamic visualization of regional building damage simulation is accomplished. Taking Taijiang District, Fuzhou City, Fujian Province as an example, 3D building modeling and dynamic visualization displays of seismic damage outcomes are carried out. The results show that the modeling method and platform are feasible.

Keywords: regional building three-dimensional modeling; three-dimensional dynamic visualization; seismic damage simulation; sketch master; OSG three-dimensional rendering engine

收稿日期: 2024-09-21

通信作者: 颜学渊(1982-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事结构减隔震方面的研究。E-mail:yxy820910@sina.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278490);福建省科技计划项目(2022Y3001, 2023J01343, 2023-K-104, 2023-K-105, 2023-K-109);福建省中青年教育科研资助项目(JAT231056);福建理工大学科技资助项目(GY-Z220228)

目前,中国城市化程度已经达到非常高的水平,大量人口和建筑集中在城镇区域。一旦城镇区域发生地震,势必会造成严重人员伤亡和财产损失^[1]。经验和理论表明,合理的震前规划是城镇区域抗震减灾最为有效的手段之一^[2],而震害模拟可视化技术对建筑震害模拟结果进行可视化展示,可有效评估震害预损失,辅助制定震前规划。因此,利用计算机可视化技术开展震害模拟可视化工作具有十分重要的现实意义。

静态可视化方法^[3-6]采用颜色、破坏纹理贴图、符号化等方式对建筑震害程度进行可视化展示,是当前震害模拟可视化中比较成熟的技术。然而,该方法仅对建筑的震害结果进行静态展示,不能体现震中建筑的实时变化情况及震害细节,不具备直观性,致使建筑震害信息不能在震害损失评估及震前规划中被充分利用。因此,需要一种更真实、直观的建筑震害模拟可视化方案。动态可视化方法通过表征在建筑体震害中动态的晃动现象,弥补静态可视化不够直观的缺点,为制定震前规划提供更为直观的依据。

在动态可视化研究中,区域建筑三维建模环节是主要部分,模型的准确度和可维护性将直接影响震害模拟工作的意义与应用价值。目前,基于建筑 2D 数据的竖向拉伸建模法^[1,5-12]是震害模拟可视化研究中应用较多的方法。该方法将现有的建筑 2D 数据作为建模数据源,直接通过建筑轮廓的竖向拉伸完成建模,并利用已有的建筑 2D 数据(数据来源广泛,兼顾经济、快速、批量)建模,十分契合区域建筑震害模拟可视化快速、经济、大批量的建模需求。但这种方法建立的模型真实感不强,且过于依赖建筑 2D 数据的准确性。因此,该方法建立的模型的真实感和准确性往往不尽如人意。目前,研究人员的研究重点大都集中于增强模型的真实感^[1,9-10,13],而对于解决该方法对建筑 2D 数据依赖性的研究较少。在众多建筑建模方法中,基于三维软件的建模法因其建模灵活、简单、兼容性强的优点^[14-17],被广泛应用于建筑建模领域。因此,本文基于 SketchUp 和 OSG 的区域建筑震害模拟三维动态可视化。

1 基于 SketchUp 的区域建筑三维建模

建筑 2D 数据拉伸建模能满足三维模型快速和经济的要求,但存在过于依赖原始建筑 2D 数据、数据更新时间间隔较长、测量误差较大等问题。若数据本身存在错误,将导致建筑模型错误,进而直接影响震害模拟工作的意义与应用价值。为解决此问题,研究在建筑 2D 数据拉伸建模的基础上,结合三维软件建模灵活的优点,引入 SketchUp 三维建模软件,修正拉伸模型中数据不准确的部分,提升模型的准确度和可维护性。以福建省福州市台江区某区域为例,对该区域展开三维建筑建模,验证该方法的可行性。基于 SketchUp 的区域建筑三维建模技术路线图,如图 1 所示。

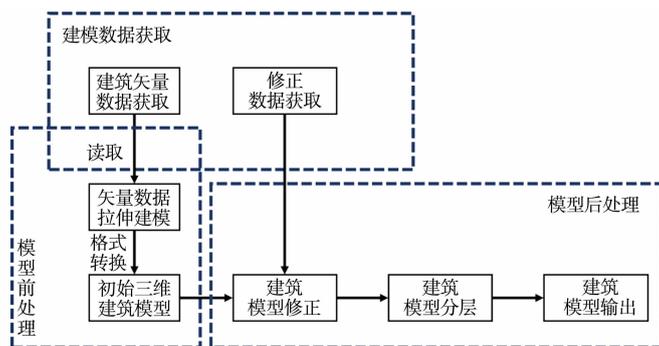


图 1 基于 SketchUp 的区域建筑三维建模技术路线图

Fig. 1 Technical roadmap of regional building 3D modeling based on SketchUp

1.1 建模数据获取

区域建筑三维建模所需要的数据,一部分来源于现有建筑轮廓矢量数据(简称矢量数据),另一部分来源于实地调研测量数据。因此,使用矢量数据作为建模数据的基础来源,用于初步生成建筑三维模型;使用实地调研测量获得的修正数据作为建模数据补充来源,用于错误建筑的修正工作。

矢量数据是一种描述建筑物外部轮廓形状和矢量图形的 2D 数据,通常包括建筑的外形、尺寸、高度、地理坐标和空间关系信息。采用地图软件获取所需矢量数据,获取的同时需将数据转换成 shp (shapfile)格式用于后续处理。矢量数据获取及处理流程图,如图 2 所示。

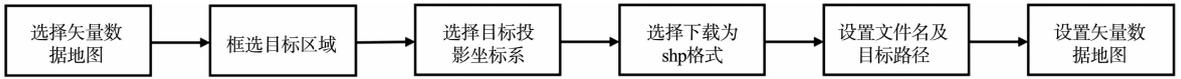
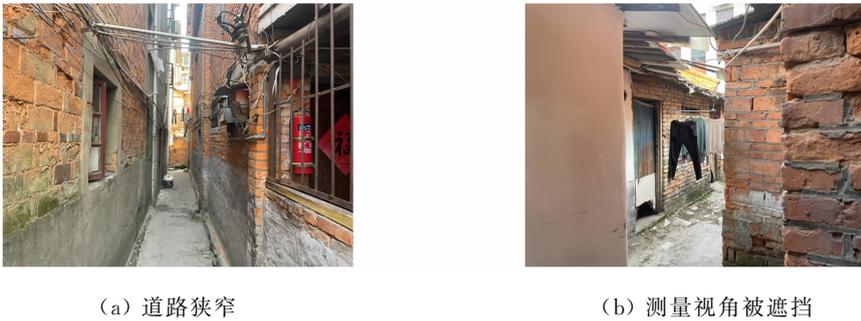


图 2 矢量数据获取及处理流程图

Fig. 2 Flowchart of acquisition and processing of vector data

修正数据采用实地调研测量的方式获取。在实际调研中经常出现道路过于狭窄、测量视线被遮挡等复杂情况(图 3)。因此,需要一种灵活、适应复杂测量情况的测量方案。基于此,选用手持激光测距仪(测距仪)和数显电子角尺(电子角尺)作为距离及角度测量设备,用于获取问题建筑的轮廓、尺寸和相对位置关系信息。调研主要工作如下:1) 测量获取问题建筑的轮廓尺寸、高度、相对关系等数据信息,为后续问题建筑的修正工作提供准确的数据来源;2) 收集并汇总区域内所有建筑的建筑年代、结构类型等基本信息,为后续建筑信息展示提供数据来源。

建筑高度修正前、后效果对比图,如图 4 所示。实地调研数据及信息获取流程图,如图 5 所示。

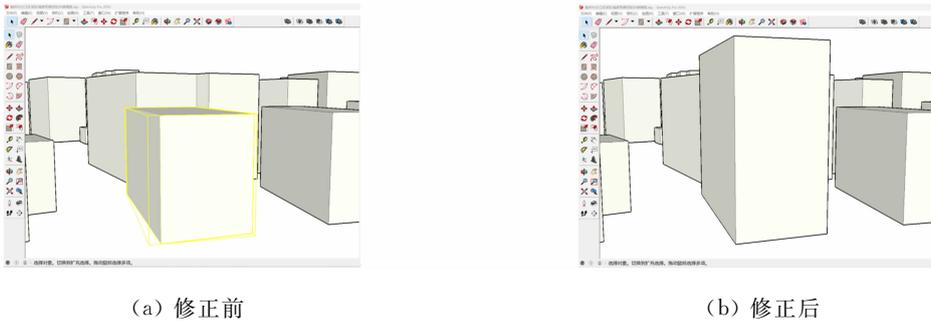


(a) 道路狭窄

(b) 测量视角被遮挡

图 3 实地调研的复杂情况

Fig. 3 Complex situations of field research



(a) 修正前

(b) 修正后

图 4 建筑高度修正前、后效果对比图

Fig. 4 Comparison of effect before and after correction of building depth

1.2 模型处理

模型处理工作分为模型前处理工作和模型后处理工作。前处理工作是利用操作引擎(FME)完成 shp 格式文件的读取、竖向拉伸建模和从 shp 格式到 skp 格式的数据转换工作,建立区域的初始三维建筑模型。后处理工作利用 SketchUp 三维建模软件完成,主要包括问题建筑的修正、建筑模型的分层、输出 3 个环节。

在初始建筑三维模型的基础上,利用 SketchUp 和实地调研数据对目标区域问题建筑进行修正,解决基于 2D 建模法过于依赖原始数据的问题,提升建筑模型的准确性,共包括 3 部分。首先,在初始三维建筑模型中,存在由于拆除而不存在的建筑模型,利用 SketchUp 的删除指令,结合实际调研情况,删除多余的问题建筑;其次,对于实际高度与模型数据不同的建筑模型,利用 SketchUp 的移动指令,结合实际调研的建筑高度数据,修正问题建筑的模型高度;最后,对

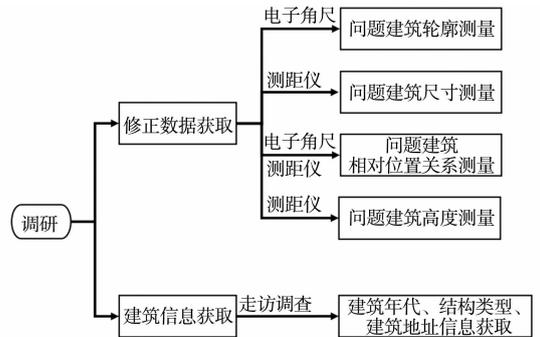


图 5 实地调研数据及信息获取流程图

Fig. 5 Flowchart of acquisition of data and information from field research

于缺失及建筑轮廓错误的建筑模型, 综合利用 SketchUp 的直线、旋转、推拉等各项指令, 结合实际调研的问题建筑轮廓、尺寸、高度、相对关系等信息, 重建缺失及轮廓错误建筑。具体流程有 3 步: 1) 根据问题建筑与现有建筑的相对位置关系对问题建筑进行定位; 2) 根据问题建筑的轮廓和尺寸数据重建问题建筑的 2D 平面轮廓; 3) 根据问题建筑的高度信息拉伸建筑模型完成问题建筑的三维模型重建。示例区域修正前后效果对比如图 6 所示。

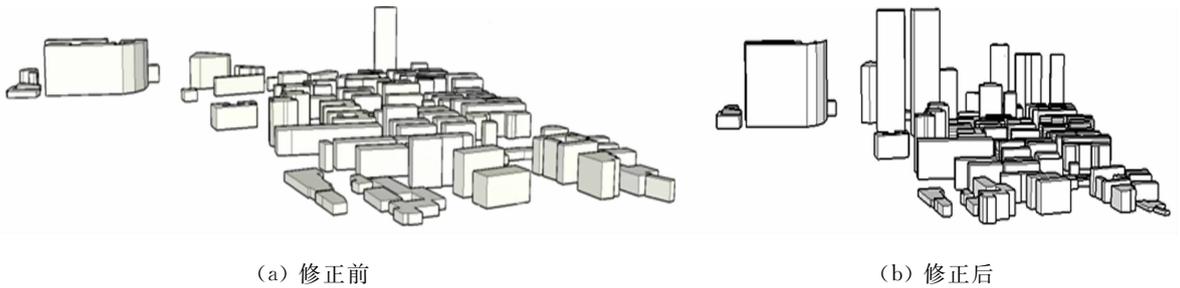


图 6 示例区域修正前、后效果对比图

Fig. 6 Comparison of effects before and after correction of example region

在修正后建筑三维模型的基础上, 利用 SketchUp 对建筑模型进行分层。SketchUp 交错平面指令实现建筑模型的批量分层工作, 用于配合建筑各层震害时程数据展示建筑各层层间位移, 提升震害模拟三维动态可视化的真实感。

分层后区域建筑局部三维模型效果图, 如图 7 所示。分层后区域建筑三维模型效果图, 如图 8 所示。在分层后建筑三维模型的基础上, 利用 SketchUp 将模型分组、命名并输出为 obj 格式文件, 以便后续导入区域建筑震害模拟三维动态可视化平台进行三维动态渲染。

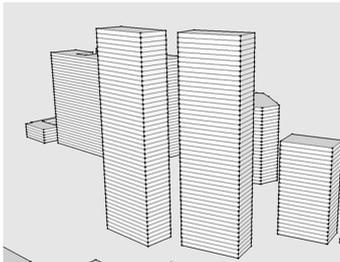


图 7 分层后区域建筑局部三维模型效果图

Fig. 7 Renderings of layered regional building 3D model after stratification

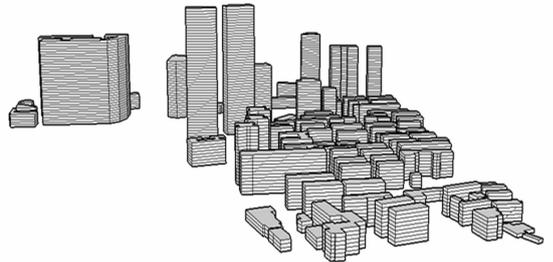


图 8 分层后区域建筑三维模型效果图

Fig. 8 Renderings of regional building 3D model after stratification

2 区域建筑震害模拟三维动态可视化平台

2.1 需求分析及平台框架设计

震害模拟动态可视化可通过更加直观的方式帮助用户获取震害详细信息, 从而助力震前规划。因此, 对震害模拟可视化平台提出了界面简洁、操作简单、实现用户灵活、直观地获取全面的震害模拟信息的需求。基于此, 开发区域建筑震害模拟三维动态可视化平台的架构, 该架构由基于 OSG 的可视化程序框架和基于 Qt 的图形用户界面框架搭建而成^[18]。

2.2 基于 OSG 的震害模拟可视化程序框架

基于 OSG 的震害模拟可视化程序框架总架构, 如图 9 所示。该框架基于 OSG 开源图形引擎搭建, 由匹配模块、三维动态渲染模块、用户操作交互模块组成。

匹配模块负责识别区域建筑三维模型, 与导入的震害模拟时程数据、建筑信息相匹配。震害模拟时程数据主要为层间位移角, 区域建筑信息包括建筑面积、层数、用途、建设年代等。该模块主要基于 OSG 中自带的访问者机制(NodeVisitor)开发, 该机制主要用于对 OSG 场景树中各个节点的访问和执行预定操作。该模块能够遍历区域建筑三维模型中的场景树, 识别每个建筑模型节点, 并执行预定的数据匹配操作, 从而实现建筑模型识别, 以及建筑信、息震害时程数据的匹配。

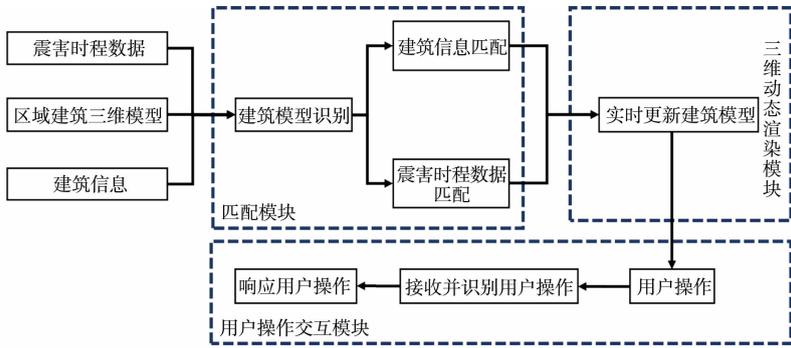


图9 基于 OSG 的震害模拟可视化程序框架总架构

Fig. 9 Overall structure of seismic disaster simulation visualization program framework based on OSG

三维动态渲染模块根据震害模拟时程数据实时更新建筑模型,绘制建筑震害模拟动画。将区域建筑破坏状态划分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、毁坏 5 个等级。对于多层常规结构^[19],完好状态下应保持弹性状态,并规定弹性位移角限值取 $1/550$;有轻微塑性变形时,变形应小于 2 倍弹性位移限值;中等破坏状态下的层间位移限值应取弹性限值和弹塑性限值的平均值;严重破坏状态下的层间位移限值应取 90% 的不倒塌弹塑性变形限值。因此,将基本完好状态下位移角限值取为 $1/550$,轻微破坏的位移角限值取 0.0040 ,中等破坏下位移角限值取 $1/120$,严重破坏状态下的位移角限值取 0.016 。对于毁坏状态下的位移角限值则取值为 0.0333 ^[20]。

位移判定准则,如表 1 所示。表 1 中: θ 为层间位移角建议值。

表 1 位移判定准则

Tab. 1 Displacement determination criteria

| 破坏等级 | θ | 建筑展示颜色 |
|------|-------------------------------|--------|
| 基本完好 | $0.0018 \leq \theta < 0.0040$ | 蓝色 |
| 轻微破坏 | $0.0040 \leq \theta < 0.0083$ | 绿色 |
| 中等破坏 | $0.0083 \leq \theta < 0.0160$ | 黄色 |
| 严重破坏 | $0.0160 \leq \theta < 0.0330$ | 紫色 |
| 毁坏 | $\theta \geq 0.0330$ | 红色 |

三维动态渲染模块主要基于 OSG 中自带的更新回调机制(UpdateCallback)开发,该机制主要用于完成需要在每帧绘制时执行的工作。该模块能够在每帧绘制时访问震害时程位移数据,并根据位移数据动态更新建筑模型,通过颜色展示建筑震害,从而实现根据震害模拟时程数据实时更新建筑模型,绘制建筑震害模拟动画。

用户操作交互模块负责接收并响应用户对三维场景操作,实现用户对场景的漫游及建筑信息的浏览功能。该模块主要基于 OSG 中自带的事件更新回调机制(EventCallback)开发,该机制主要完成用户临时定义需要执行的工作。该模块能够接收用户对三维场景的拖拽、缩放等视角操作和单击建筑模型的鼠标操作,并根据操作切换场景照相机视角或弹出建筑信息展示窗口,从而实现三维场景漫游和建筑信息浏览功能。

2.3 基于 Qt 的图形用户界面框架

基于 Qt 的图形用户界面框架总架构,如图 10 所示。该框架基于 Qt 图形用户界面开发框架搭建,由三维场景交互模块、程序数据交互模块和程序窗口界面模块组成。

三维场景交互模块负责将 OSG 三维场景嵌入 Qt 开发的用户界面中。该模块主要基于 Qt 中自带的信号与槽机制和 OSG 中自带的 osgQOpenGLWidget 类开发。其中,信号与槽机制涉及到信号与槽两个概念,前者是指对象发出的事件或状态变化情况的通知;后者是指对象中被用来响应该通知的函数,可以执行特定的操作。二者通过 QObject::connect() 函数进行连接,当信号相关联的事件发生时,对象会发出相应的信号,与之连接的槽函数将自动被调用,执行用户自定义的操作。osgQOpenGLWidget 类中添加了 Qt 与 OSG 交互所需的功能与接口。在该模块中,使用 osgQOpenGLWidget 类对象完成三维场景的初始化操作,即准备接收绘制指令并渲染 OSG 三维场景。这时,osgQOpenGLWidget 类

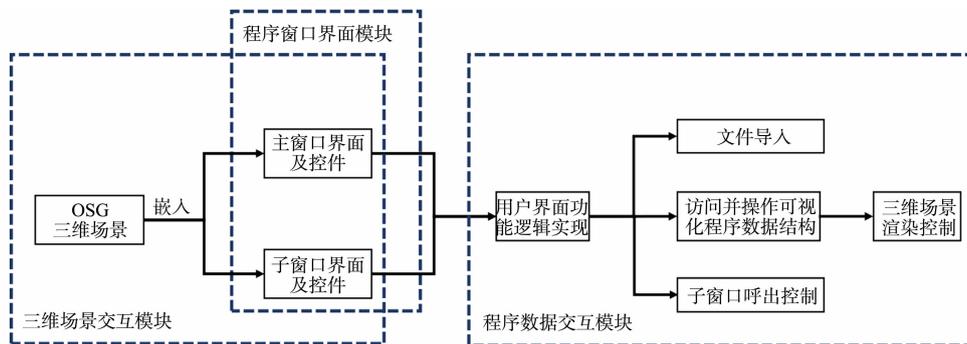


图 10 基于 Qt 的图形用户界面框架总架构

Fig. 10 Overall structure of graphical user interface framework based on Qt

对象会发出初始化完成的信号,并连接到自行设计的槽函数中执行其中三维场景嵌入用户界面的操作,从而实现三维场景与用户界面的交互。

程序数据交互模块负责用户界面功能的逻辑实现和封装用户界面对震害模拟可视化程序框架中数据结构的访问和操作,实现文件导入,以及对三维场景渲染控制和子窗口呼出的控制。该模块主要基于 C++ 的全局变量和信号与槽机制开发。全局变量是指在函数外部定义,可以被本程序所有对象或函数引用的变量。在该模块中,将基于 OSG 的震害模拟可视化程序中需要与用户界面交互的关键变量统一设置为全局变量,并设计用户界面逻辑,实现操作关键全局变量。在用户对界面进行操作时,利用信号与槽机制触发信号,连接槽函数执行其中对全局变量或其余变量的操作。

程序窗口界面模块负责绘制程序所需的主窗口和子窗口的用户界面及其控件。该模块主要基于 Qt 中自带的 QWidget 类及其子类开发。在该模块中,设计主窗口和子窗口的用户界面及其控件,并绘制其布局。

3 示例及平台介绍

选取福建省福州市台江区某区域为示例,使用区域建筑震害模拟三维动态可视化平台对该区域进行震害模拟结果的三维动态可视化展示,验证该可视化平台的可行性。

3.1 示例区域概述

福州市台江区共有 100 余栋多高层城市建筑,涵盖了包括钢筋混凝土结构、砖混结构、底部框架上部砖混结构在内的多种结构类型,覆盖范围广泛,具有很强的普适性和参考价值。

3.2 平台环境概述

区域建筑震害模拟三维动态可视化平台的开发和运行借助 Visual Studio 集成开发环境 (IDE)、OSG 等软件和 CPU、显卡等硬件的配合。平台开发环境,如表 2 所示。

表 2 三维动态可视化平台开发环境

Tab. 2 Development environment for 3D dynamic visualization platform

| 软件名称 | 版本 | 硬件名称 | 设备参数 |
|---------------|--------|------|----------------|
| Visual Studio | VS2019 | CPU | i7-12700H |
| OSG | 3.6.5 | 操作系统 | Windows11 x64 |
| Qt | 5.15.2 | 显卡 | RTX3060 Laptop |
| — | — | 内存 | 16 GB |

3.3 平台功能介绍

区域建筑震害模拟三维动态可视化平台功能包括文件导入模块、渲染控制模块和建筑信息展示模块。其中,文件导入模块负责导入和解析平台展示所需的区域建筑三维模型文件、震害模拟时程数据和区域建筑信息文件;渲染控制模块负责控制渲染的开始与暂停、渲染的帧率及不同的震害动画展示模式;建筑信息展示模块负责展示具体建筑的建造年代、建筑类型、震害程度等信息。各模块的控制界面,如图 11~14 所示。

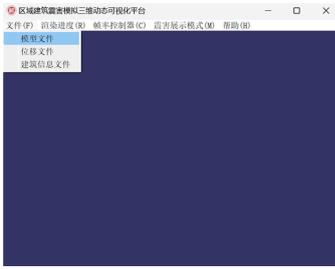


图 11 文件导入界面

Fig. 11 Interface of file import

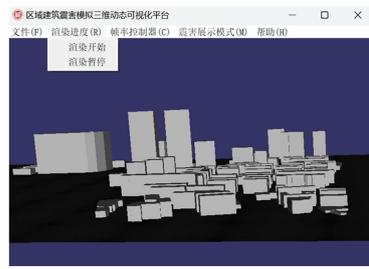
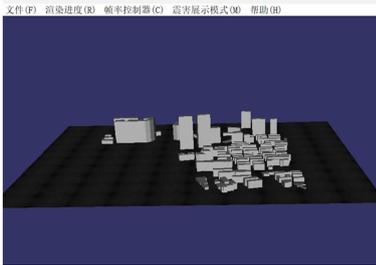
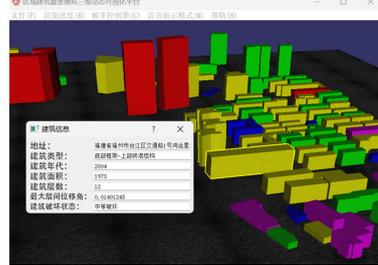


图 12 渲染进度控制界面

Fig. 12 Interface of rendering progress control



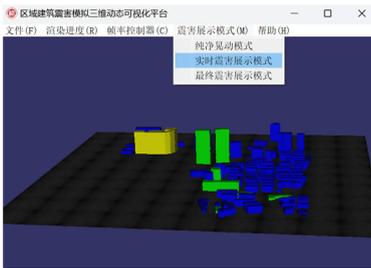
(a) 区域模型展示模式



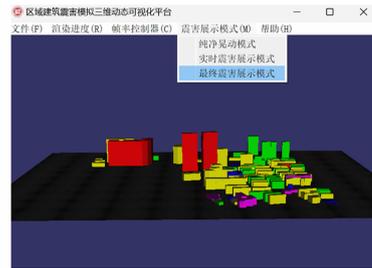
(b) 建筑信息展示模式

图 13 区域模型图

Fig. 13 Regional model



(a) 实时震害展示模式



(b) 最终震害展示模式

图 14 震害模拟画面图

Fig. 14 Seismic damage simulation

4 结论

基于 SketchUp 三维软件、OSG 开源图形引擎和 Qt 图形用户界面开发框架,实现区域建筑的三维建模和其震害模拟结果的三维动态可视化展示,并对福州市台江区某区域建筑的震害模拟结果进行三维动态可视化展示。

1) 提出基于 SketchUp 的区域建筑三维建模方法。该方法解决了传统震害模拟可视化建模方法中过于依赖原始数据和模型更新维护困难的问题,实现高效、经济、灵活、精确、轻量的区域建筑三维建模,适用于区域建筑震害模拟结果的三维动态可视化展示。

2) 开发区域建筑震害模拟三维动态可视化平台。该平台界面简洁,操作简单,能够全面展示区域建筑震害的过程,辅助用户更加灵活、直观地获取区域建筑震害信息。

3) 研究结果能够用于震前规划制定、震后救灾开展和地震安全教育等方面工作,为提高城镇区域建筑韧性和抗震减灾工作提供技术支持。

参考文献:

- [1] 许镇,陆新征,韩博,等. 城市区域建筑震害高真实度模拟[J]. 土木工程学报, 2014, 47(7): 46-52. DOI:10.15951/j.tmgxb.2014.07.032.
- [2] 张鹏程. 村镇区域砌体结构信息智能获取与震害预测[D]. 大连:大连理工大学, 2021. DOI:10.26991/d.cnki.gdllu.

- 2021.000477.
- [3] 陈相兆,孙柏涛,李芸芸,等.基于 CityEngine 的城市建筑群三维震害模拟研究[J].地震工程与工程振动,2018,38(4):93-99. DOI:10.13197/j. eeev. 2018. 04. 93. chenxz. 014.
- [4] ÖZSOYÖ A E, SANRI K I, ÜNEN H C. Visualization of seismic vulnerability of buildings with the use of a mobile data transmission and an automated GIS-based tool[J]. Structures, 2020, 24: 50-58. DOI:10.1016/j. istruc. 2020. 01. 004.
- [5] ZHAI Yongmei, CHEN Shenglong. A seismic hazard prediction system for urban buildings based on time-history analysis[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 1-18. DOI:10.1155/2020/7367434.
- [6] ZHAI Yongmei, CHEN Shenglong, OUYANG Qianwen. GIS-based seismic hazard prediction system for urban earthquake disaster prevention planning[J]. Sustainability, 2019, 11(9): 2620. DOI:10.3390/su11092620.
- [7] HORI M, ICHIMURA T, KOKETSU K, *et al.* Current state of integrated earthquake simulation for earthquake hazard and disaster[J]. Journal of Seismology, 2008, 12(2): 307-321. DOI:10.1007/s10950-007-9083-x.
- [8] 韩博,陆新征,许镇,等.基于高性能 GPU 计算的城市建筑群震害模拟[J].自然灾害学报,2012,21(5):6-22. DOI:10.13577/j. jnd. 2012. 0503.
- [9] 孙柏涛.城市震害三维模拟系统的实现方法[J].地震工程与工程振动,2010,30(5):1-8. DOI:10.13197/j. eeev. 2010. 05. 001.
- [10] 王东明,陈敬一,高杰.基于地震巨灾情景构建的应急救援演练虚拟仿真系统架构与设计[J].自然灾害学报,2021,30(4):18-34. DOI:10.13577/j. jnd. 2021. 0403.
- [11] 张灿.基于地震动参数的城市建筑震害情景构建[D].兰州:中国地震局兰州地震研究所,2022. DOI:10.27491/d.cnki. gzdl. 2022. 000016.
- [12] 王可鑫.基于基督城震害和精细化仿真的城市抗震韧性研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2020. DOI:10.27490/d.cnki. ggjgy. 2020. 000052.
- [13] 陆新征,田源,许镇,等.一种新型城市地震灾害模拟方法:城市抗震弹塑性分析方法[J].科学通报,2020,65(11):1055-1062. DOI:10.1360/TB-2019-0679.
- [14] BARTONEK D, BUDAY M. Problems of creation and usage of 3D model of structures and theirs possible solution [J]. Symmetry, 2020, 12(1): 181. DOI:10.3390/sym12010181.
- [15] 许捍卫,房晓亮,任家勇,等.基于 SketchUp 的城市三维建模技术[J].测绘科学,2011,36(1):213-214.
- [16] 谷彦斐,徐泮林,丁鹏文,等.基于 SketchUp 与 ArcGIS 的数字校园设计与实现[J].测绘与空间地理信息,2019,42(9):148-150.
- [17] 单杰,李志鑫,张文元.大规模三维城市建模进展[J].测绘学报,2019,48(12):1523-1541.
- [18] 李昌明,李东年,赵正旭,等.基于 OSG 与 Qt 的 FAST 三维场景仿真[J].计算机应用与软件,2022,39(2):1-5,62.
- [19] 中国建筑科学研究院.建筑抗震设计规范:GB 50011-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [20] 清华大学、西南交通大学、北京交通大学土木工程结构专家组.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008,29(4):1-9. DOI:10.14006/j. jzjgxb. 2008. 04. 001.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202404044



夏热冬冷地区村镇典型街巷 冬季热环境实测与分析

林姝颖, 李玲真, 常明玉, 吴正旺

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 选取福建省南平市仁寿镇的 8 条典型案例开展实测, 分析不同街巷的高宽比、街巷朝向、街巷平面形态等特征, 对比空气温度、相对湿度、风速及黑球温度的同时性变化情况。结果表明: 朝向影响街巷冬季热环境的主要途径是太阳辐射, 其效果与街巷的剖面形态密切相关; 位于多层低密度住区的街巷气温高于多层高密度住区, 但其风速也较高; 在多层建筑群中, 平面呈“丁”字形态的街巷风速较小、气温较高; 狭窄且两侧建筑高度相近的街巷风速虽大于两侧建筑不同高度街巷, 但在全天大部时段, 其热环境仍位于舒适区间。

关键词: 夏热冬冷地区; 街巷; 冬季热环境; 实测

中图分类号: TU 119.22

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)01-0046-06

Actual Measurement and Analysis of Winter Thermal Environment in Typical Streets and Alleys in Villages and Towns of Hot Summer and Cold Winter Regions

LIN Shuying, LI Lingzhen, CHANG Mingyu, WU Zhengwang

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

Abstract: Eight typical cases from Renshou Town, Nanping City, Fujian Province are selected for actual measurement, the streets and alleys characteristics of different height to width ratios, orientation and plane shape *etc* are analyzed. The simultaneous changes of air temperature, relative humidity, wind speed and black sphere temperature are compared. The results show that, orientation affects the thermal environment of streets and alleys in winter mainly by way of solar radiation, and its effect is closely related to the cross-sectional shape of the streets and alleys. The streets and alleys located in multistory low-density residential areas have higher temperatures than multistory high-density residential areas, and have higher wind speeds. In a multistory building complex, streets and alleys with a flat “T” shape have lower wind speeds and higher temperatures. The wind speeds of the streets and alleys with narrow and similar building heights on both sides are higher than those with different building heights on both sides, their thermal environment remains in a comfortable range for most of the day.

Keywords: hot summer and cold winter region; street and alley; winter thermal environment; actual measurement

街巷是传统村镇主要的公共空间, 是邻里交往的重要场所。传统街巷在形态^[1-3]、更新策略^[4-7]及热

收稿日期: 2024-04-21

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

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378018)

环境^[8-12]等方面表现出较强的适应性。在当前乡村振兴建设中,由于总体布局、单体设计、道路形态等均不同于传统村镇,出现了低层网格式、多层网格式及多层干道式等典型的低密度街巷,其形态及朝向不同于传统。基于此,本文对夏热冬冷地区村镇典型街巷冬季热环境进行实测与分析。

1 研究概况

1.1 区域气候特征

南平市位于福建省北部,属夏热冬冷地区,冬季湿冷,夏季炎热,年平均气温为 18~20 ℃,冬季平均气温为 6.5~14.7 ℃,平均相对湿度约为 77%,平均日照时间为 10.4 h,盛行风向为东北风,平均风速约 1.27 m·s⁻¹。

1.2 研究对象

选取福建省南平市顺昌县仁寿镇为研究区域,该镇南北长、东西窄。街巷鸟瞰图,如图 1 所示。仁寿镇新区近 5 a 建成,街巷宽敞,建筑形式相近且密度低,布局整齐划一;仁寿镇旧区为高密度低层布局,街巷狭窄曲折,有少量多层新建民宅散布。选取仁寿镇的新、旧区共 8 条街巷开展实测,以温度、相对湿度、风速等作为指标,比较不同高宽比、平面形态、朝向等条件下的街巷热环境。

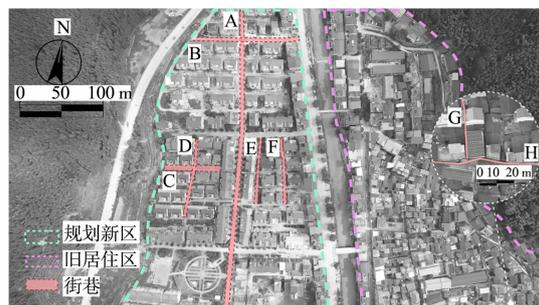


图 1 街巷鸟瞰图

Fig. 1 Bird view of streets and alleys

街巷测点空间数据信息,如表 1 所示。

表 1 街巷测点空间数据信息

Tab. 1 Spatial data information of streets and alleys measurement points

| 参数 | 街巷 A | 街巷 B | 街巷 C | 街巷 D | 街巷 E | 街巷 F | 街巷 G | 街巷 H |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------------|-----------|-------------------|-------------------|
| 特点 | 多层 网格式 | 多层 网格式 | 低层 网格式 | 低层 网格式 | 多层 南北向 干道式 | 多层 网格式 | 低层 高密度 不规则式 | 低层 高密度 不规则式 |
| 朝向 | 东西 | 南北 | 东西 | 南北 | 南北 | 南北 | 南北 | 东西 |
| 宽度/m | 6.5 | 7.7 | 11.9 | 4.7 | 3.4 | 4.4 | 2.0 | 2.2 |
| 高宽比 | 2.2 | 1.8 | 0.9 | 2.3 | 4.2 | 4.1 | 5.4 | 4.9 |
| 剖面示意图 (m) | | | | | | | | |

1.3 实测时间与测量仪器

实测时间为 2023 年 12 月 31 日—2024 年 1 月 6 日,实测时段为每日 8:30—17:00,包含风速、气温、相对湿度等指标。测量仪器类型包括 WFWZY-1 型万向风速仪、AZ88162 型温湿度计、RS-HQ 型黑球温度计,每种类型仪器 8 台,均具有自动记录功能。WheatA 小麦芽-农业气象大数据显示:实测期间平均气温为 10.8 ℃,平均相对湿度为 6.2%,平均风速为 1.16 m·s⁻¹,盛行北风。

系统实验仪器及参数,如表 2 所示。

表 2 实验仪器及参数

Tab. 2 Experimental instruments and parameters

| 参数 | 仪器 | 测量精度 | 量程 | 实验方法 |
|------|----------------|-------------------------|------------------------------|----------------|
| 风速 | WFWZY-1 型万向风速仪 | ±0.05 m·s ⁻¹ | 0.05~30.00 m·s ⁻¹ | 自动记录,间隔 10 min |
| 气温 | AZ88162 型温湿度计 | ±0.5 ℃ | -30~70 ℃ | 自动记录,间隔 10 min |
| 相对湿度 | AZ88162 型温湿度计 | ±3% | 0%~99% | 自动记录,间隔 10 min |
| 黑球温度 | RS-HQ 型黑球温度计 | ±0.1 ℃ | -40~120 ℃ | 自动记录,间隔 10 min |

以朝向、高宽比、平面形态为指标,据《建筑热环境测试方法标准》相关规定,在 8 条街巷内同时布置 8 个测点,温湿度计、黑球温度计布置于 1.1 m 高处,万向风速仪布置于 1.7 m 高处^[13]。

2 实测结果与分析

2.1 街巷高宽比对风、热环境的影响

东西朝向的街巷高宽比与气温成反比,南北朝向的街巷则无明显规律。街巷 C 的平均气温为 $16.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温可达 $25.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均相对湿度为 40.1% 。街巷 A 的平均气温为 $14.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,街巷 H 的平均气温为 $13.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,除了 $8:30-9:30$ 及 $16:30-16:50$ 这两个时间段,其余时间段街巷 C 的气温都高于街巷 A, H。由此可知:高宽比小的街巷平均气温高;低密度街巷气温总是高于高密度街巷。

街巷 H, C, A 风速实测数据对比,如图 2 所示。图 2 中: v 为风速。由图 2 可知:东西朝向的街巷 A, H, C 全天波幅较大,下午的风速大于上午的风速;街巷的平均风速从大到小分别为街巷 C, A, H。

街巷 C 高宽比最小,建筑立面规整且空间宽敞,因此,对风的遮挡相对较小;街巷 H 的街巷尺度最小,空间较为封闭,大约有 25% 的时间处于静风状态。国内外研究提出,当风速小于 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,人感觉舒适^[14]。日本学者村上周三和森川泰成根据不同的温度提出舒适风速的范围,当气温小于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,风速应小于 $1.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;气温在 $10\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,风速小于 $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[15],因此,街巷 C 的风速虽大于街巷 A, H,但仍处于舒适区间。赵敬源等^[16]研究表明,高宽比大的街巷热环境差,街巷高宽比在 $0.8\sim 0.9$ 时的热环境最佳,街巷 C 的热环境较优。

街巷 H, C, A 气温、相对湿度实测数据对比,如图 3 所示。图 3 中: θ 为气温; θ_b 为黑球温度; F 为相对湿度。

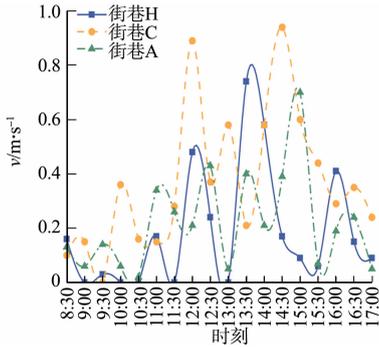


图 2 街巷 H, C, A 风速实测数据对比

Fig. 2 Comparison of measured data of wind speed in streets and alleys H, C, A

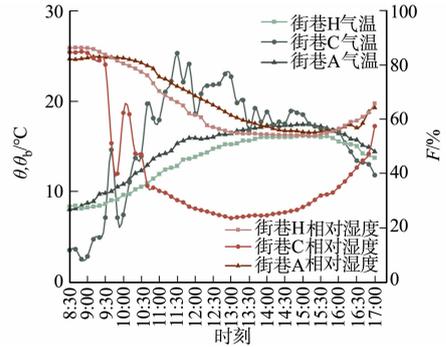


图 3 街巷 H, C, A 气温、相对湿度实测数据对比

Fig. 3 Comparison of measured data of temperature and relative humidity in streets and alleys H, C, A

2.2 街巷平面形态对风、热环境的影响

街巷 E, F 气温、相对湿度实测数据对比,如图 4 所示。街巷 E, F 风速实测数据对比,如图 5 所示。

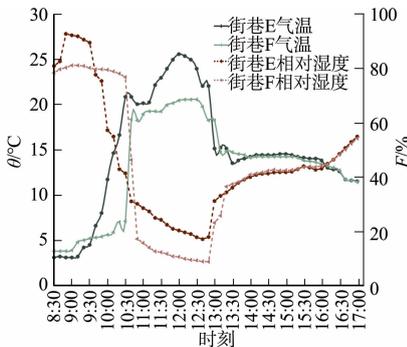


图 4 街巷 E, F 气温、相对湿度实测数据对比

Fig. 4 Comparison of measured data of temperature and relative humidity in streets and alleys E, F

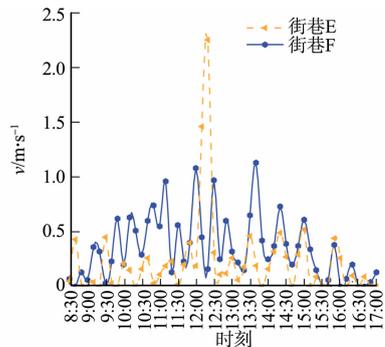


图 5 街巷 E, F 风速实测数据对比

Fig. 5 Comparison of measured data of wind speed in streets and alleys E, F

由图 4 可知:在相同街道朝向和街巷高宽比接近的条件下,“丁”字形的街巷 E 的平均气温为 $15.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均相对湿度为 42.7% ;“井”字形的街巷 F 的平均气温为 $13.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,平均相对湿度为 43.9% ;街巷 F 的气温在 $9:30-13:00$ 低于街巷 E,在 $13:00$ 之后,两条街巷的温差减小,变化趋势较一致。

由图 5 可知:街巷 E,F 的整体风速变化趋势较接近,街巷 E 的平均风速为 $0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大风速为 $2.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;街巷 F 的平均风速为 $0.34 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大风速为 $1.13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;街巷 E 在 12:00—12:40 的风速显著大于街巷 F,其余大多数时间段内,街巷 F 的风速较大。风对太阳辐射热作用具有一定的削减效果,在冬季的气候条件下风速增大会加剧冷感^[17]。街巷 E,F 均位于低密度居住区,两条街巷周边建筑形式相近。街巷 F 的周边建筑为南北朝向,街巷 E 周边建筑为东西朝向,且周边的建筑界面较街巷 F 连续、规整。在实测期间,据气象数据显示,当地风速较小,建筑界面较为规整的街巷 E 仍然具有一定的防风作用,风速更稳定。

2.3 街巷朝向对风、热环境的影响

街巷 A,B 气温、黑球温度实测数据对比,如图 6 所示。由图 6 可知:在低密度居住区,东西朝向的街巷 A 在 9:00—11:30 的气温高于南北朝向的街巷 B,其余时间段街巷 B 的气温较高,温差最大可达 $8.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$;从黑球温度的变化情况来看,街巷 A 的黑球温度变化趋势较为平缓,街巷 B 在 11:40 左右,黑球温度急剧上升,两条街巷黑球温度最大可相差 $9.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

街巷 H,G 气温、黑球温度实测数据对比,如图 7 所示。由图 7 可知:在低密度居住区中,南北朝向的街巷 G 的气温与黑球温度在实测时间段内均低于东西朝向的街巷 H,两条街巷的气温与黑球温度变化趋势相近,街巷 H,G 的黑球温度相差 $0.2 \sim 3.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

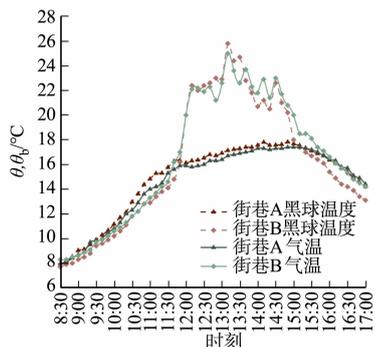


图 6 街巷 A,B 气温、黑球温度实测数据对比
Fig. 6 Comparison of measured data of temperature and black sphere temperature in streets and alleys A, B

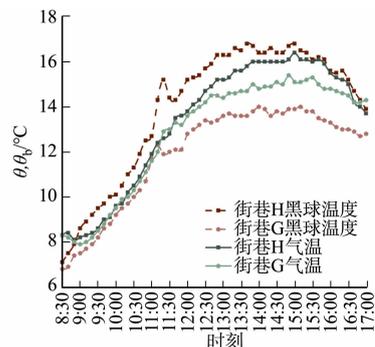


图 7 街巷 H,G 气温、黑球温度实测数据对比
Fig. 7 Comparison of measured data of temperature and black sphere temperature in streets and alleys H, G

街巷 C,D 气温、黑球温度实测数据对比,如图 8 所示。由图 8 可知:街巷 C,D 的气温与黑球温度变化规律与街巷 A,B 存在差异,在 10:30 之前两条街巷的气温波动大,但总体变化趋势接近,10:30 后街巷 C 的气温高于街巷 D;两条街巷的黑球温度变化趋势与气温变化趋势相近。由于冬季太阳高度角较小,东西朝向的街巷会由于建筑的遮挡从而损失更多的热量^[8]。在实测中,街巷 A,B 呈现出这一趋势,由于街巷 C,D 的建筑间距较大,建筑高度较小,因此,东西朝向的街道仍然能够获取较多的热量。

街巷 C,D 风速实测数据对比,如图 9 所示。由图 9 可知:街巷 C 的平均风速为 $0.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,街巷 D 的平均风速为 $0.37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,在 13:00 之前,街巷 C 平均风速小于街巷 D,在 13:00 之后,街巷 C 的平均风速大。

街巷 G,H 风速实测数据对比,如图 10 所示。由图 10 可知:街巷 G 的平均风速为 $0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,街巷 H 的平均风速为 $0.14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;从全天的风速变化情况看,街巷 G 风速变化波动较小,街巷 H 在下午风速有所增大,其风速在 14:30—15:30 达到峰值。

街巷 G,H 不同天气状况风速实测数据对比,如图 11 所示。由图 11 可知:在晴天温度升高时,街巷 G,H 的风速较阴天时均有所升高。街巷 G 在午后温度升高时,其风速会高于街巷 H;街巷 G 尺度较

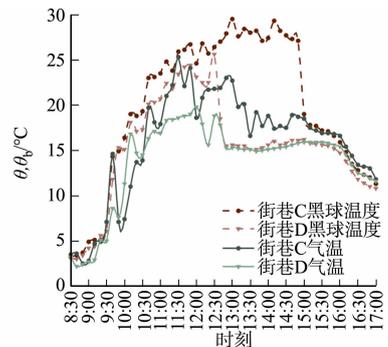


图 8 街巷 C,D 气温、黑球温度实测数据对比
Fig. 8 Comparison of measured data of temperature and black sphere temperature in streets and alleys C, D

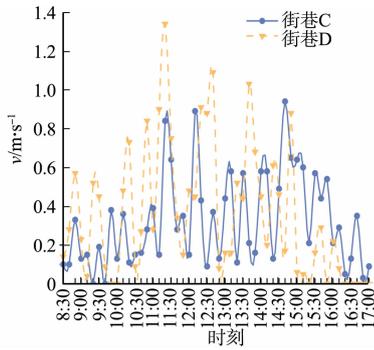


图9 街巷 C, D 风速实测数据对比

Fig. 9 Comparison of measured data of wind speed in streets and alleys C, D

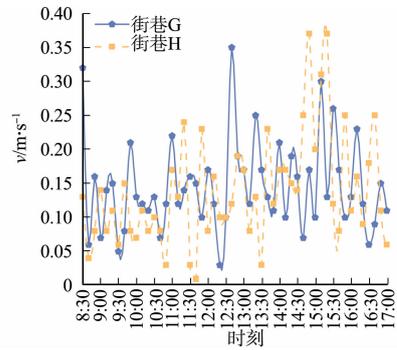


图10 街巷 G, H 风速实测数据对比

Fig. 10 Comparison of measured data of wind speed in streets and alleys G, H

小, 两侧建筑较高, 相较于街巷 H 两侧北高、南低的建筑形式更易产生狭管效应, 同时也易与街巷上方产生温差, 增大风速。

街巷 A, B 风速实测数据对比, 如图 12 所示。由图 12 可知: 街巷 A 在实测大多数时间段内风速低于街巷 B; 从总体上看, 实测期间内, 8:30—11:00 两条街巷风速相差较小, 差值最大为 $0.43 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 11:00—14:30 两者风速差距增大, 最大可相差 $0.83 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

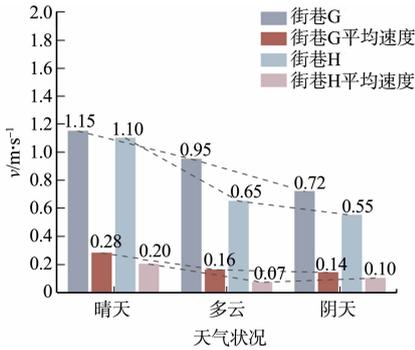


图11 街巷 G, H 不同天气状况风速实测数据对比

Fig. 11 Comparison of measured data of wind speed under different weather conditions in streets and alleys G, H

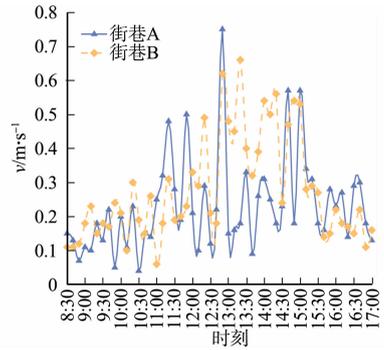


图12 街巷 A, B 风速实测数据对比

Fig. 12 Comparison of measured data of wind speed in streets and alleys A, B

3 结论

1) 朝向影响街巷冬季热环境的主要途径是太阳辐射, 其效果与街巷的剖面形态密切相关。实测结果表明, 在获得太阳直接辐射的时段, 街巷的气温常常较高。一般认为, 由于冬季太阳高度角较小, 东西朝向街巷建筑遮挡更严重, 获得的太阳辐射更少。在新区开展的实测发现, 当两侧建筑高度较高时, 南北朝向的街巷气温较高; 但是, 当两侧建筑高度较低时, 则是东西朝向的街巷气温较高。同时, 在旧区开展的实测也发现, 两侧建筑高度较低的东西朝向街巷气温高于两侧建筑较高的南北朝向街巷。因此, 从冬季热环境角度看, 在乡村振兴中, 对于东西向街巷, 其两侧建筑高度要低一些为宜; 对于南北向街巷, 其沿街建筑可以高一些。

2) 位于多层低密度住区的街巷气温高于多层高密度住区, 但风速也较高。低密度住区的街巷获得的太阳辐射多、气温高, 但平均风速大于高密度住区的街巷。冬季风速增大时会加剧冷感, 因此, 就冬季舒适度而言, 适当增加街区内部的建筑密度, 有利于提高热舒适度; 对于密度难以增加的街巷, 则应避免形成风叠加、风加剧的区域。

3) 在多层建筑群中, 平面呈“丁”字形态的街巷风速较小、气温较高。当前的乡村振兴, 建筑以联排、独栋为主, 形成了大量“井”、“丁”字形街巷。相较于“井”字形街巷, “丁”字形街巷的建筑界面较连续, 其风速较小且变化幅度窄, 有利于冬季防风。因此, 在街巷布局中, 可适当以错位、联排等布局方式, 将网格式的“井”字形街巷, 修改为“丁”字形。但在夏季, 这种连续、多层的街巷, 可能会加剧静稳天气的

形成及持续,是否仍舒适,还有待进一步研究。

4) 狭窄且两侧建筑高度相近的街巷风速虽大于两侧建筑高度不一者,但在全天大部时段,其热环境仍位于舒适区间。对于狭窄的街巷,一方面,由于两侧建筑较高,易诱发狭管效应,另一方面,由于其底部获得的太阳辐射较少,与上方温度差较大,还会形成一定程度的热压通风,这也可能是导致其风速较大的原因之一。但是,这些因素的影响并不强烈,在实测中,上述街巷的风速均位于舒适区间。因此,在乡村振兴中,应增加一些狭窄的街巷,既可作为新旧区域的联系,也有利于防风。

参考文献:

- [1] 李早,叶茂盛,孙慧,等.徽州传统村落街巷空间与居游通行的关联规律[J].建筑学报,2021(增刊1):24-32.
- [2] BOURBIA F,BOUCHERIBA F. Impact of street design on urban microclimate for semiarid climate[J]. Renewable Energy,2010,35(2):343-347. DOI:10.1016/j.renene.2009.07.017.
- [3] 张小娟,卢凤阳.黄河流域甘肃段传统村落空间形态特征研究:以靖远县平堡村为例[J].华中建筑,2023,41(8):85-89. DOI:10.13942/j.cnki.hzjz.2023.08.014.
- [4] 秦海东,胡李平.基于城市触媒效应的传统商业街区微更新策略[J].规划师,2019,35(增刊1):81-86. DOI:10.3969/j.issn.1006-0022.2019.z1.016.
- [5] 叶露,王亮,王畅.历史文化街区的“微更新”:南京老门东三条营地块设计研究[J].建筑学报,2017(4):82-86. DOI:10.3969/j.issn.0529-1399.2017.04.012.
- [6] 王海勇,袁新国,魏凯,等.非历史文化名城内传统街区的保护更新探索[J].规划师,2017,33(4):143-147. DOI:10.3969/j.issn.1006-0022.2017.04.024.
- [7] 王新阁,林倍多.基于空间句法的古城街巷微更新策略研究:以苏州阊门历史文化街区为例[J].城市建筑空间,2023,30(12):53-55.
- [8] 金雨蒙,康健,金虹.哈尔滨旧城住区街道冬季热环境实测研究[J].建筑科学,2016,32(10):34-38,79. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2016.10.06.
- [9] 劳钊明,李颖敏,邓雪娇,等.基于 ENVI-met 的中山市街区室外热环境数值模拟[J].中国环境科学,2017,37(9):3523-3531.
- [10] 殷实,WERNER L,肖毅强.湿热地区传统骑楼街区夏季热环境研究[J].南方建筑,2019(4):53-59. DOI:10.3969/j.issn.1000-0232.2019.04.053.
- [11] 金虹,崔鹏.哈尔滨中央大街商业街区形态要素与温度关联性研究[J].建筑科学,2019,35(8):11-17. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2019.08.02.
- [12] SHASHUA-BAR L,TSIROI I X,HOFFMAN M. Passive cooling design options to ameliorate thermal comfort in urban streets of a mediterranean climate (athens) under hot summer conditions[J]. Building and Environment,2012,57(11):110-119. DOI:10.1016/j.buildenv.2012.04.019.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑热环境测试方法标准:JGJ/T 347-2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [14] 唐毅,孟庆林.广州高层住宅小区风环境模拟分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2001(4):352-356,360. DOI:10.3969/j.issn.1006-7930.2001.04.012.
- [15] MURAKAMI S,MORIKAWAY. Criteria for assessing wind-induced discomfort considering temperature effort [J]. Journal of Architecture Planning and Environmental Engineering,1985,35:9-17. DOI:10.3130/aij.358.0_9.
- [16] 赵敬源,刘加平.城市街谷热环境数值模拟及规划设计对策[J].建筑学报,2007(3):37-39. DOI:10.3969/j.issn.0529-1399.2007.03.013.
- [17] 刘魁星,游伟洁,甘婷婷.寒冷地区室外辐射特性对人体热舒适影响研究[J].建筑科学,2024,40(2):142-149,159. DOI:10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2024.02.17.

(责任编辑:陈志贤 英文审校:方德平)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202405018



屋顶花园空间感知与恢复绩效的关联性

卓志雄, 董靓

(华侨大学 建筑学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为了确定绿色屋顶空间对健康的恢复作用,选取3种特定场景探索绿色屋顶空间的恢复性潜力。以华侨大学人-境交互实验屋顶花园不同类型空间为研究对象,通过开展实地研究,测量受试者在不同空间恢复前后心理感知和生理反馈指标的变化,探究屋顶花园空间感知与恢复绩效的关联性。结果表明:屋顶花园具有一定的恢复性潜力,不同开敞程度空间的恢复绩效具有显著性差异,其中以半开敞空间的恢复绩效最佳,其次是覆盖空间和开敞空间;环境感知评价对心理和生理恢复绩效有显著影响,尤其是心理感知层面。

关键词: 屋顶花园; 空间感知; 心理感知; 生理反馈指标; 恢复性潜力

中图分类号: TU 986

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)01-0052-08

Correlation Between Spatial Perception and Restoration Performance in Rooftop Garden

ZHUO Zhixiong, DONG Liang

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

Abstract: In order to determine the restorative effects of green rooftop space on health, three specific scenarios were selected to explore the restorative potential of green rooftop space. Taking different types of spaces in the rooftop garden of the human-environment interaction experiment of Huaqiao University as the research object, the correlation between spatial perception and restoration performance of rooftop garden was investigated by conducting a field study to measure the changes in psychological perception and physiological feedback indexes before and after the restoration in different spaces. The results show that rooftop garden has a certain restorative potential, and the restoration performance of spaces with different degrees of openness has significant differences, the best restoration performance occur in semi-open space, secondly in covered space and open space. The environmental perceptual evaluations significantly affect the psychological and physiological restoration performance, especially at the level of psychological perceptions.

Keywords: rooftop garden; spatial perception; psychological perception; physiological feedback index; restoration potential

伴随城市的快速发展,城市化环境能给予人们诸多的便利性,但也让越来越多的城市人群在日常生活中面临更多的困境,例如,城市中各种疾病日趋蔓延、心理问题日益突出和健康风险不断增加^[1-3]。大量研究表明,自然环境有助于弥补健康损失,与自然环境接触能够减轻身心压力^[4-5]。自然环境可以减少生活中压力源带给人们的刺激,为人们提供适应性的庇护所,从而帮助人们获得恢复性体验^[6]。

收稿日期: 2024-05-24

通信作者: 董靓(1963-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事智慧城市设计、可持续景观设计的研究。E-mail: le-ong@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51678253); 华侨大学科研基金资助项目(15BS302)

由 Ulrich 等^[7]和 Kaplan^[8]提出的压力恢复理论(SRT)与注意力恢复理论(ART)均阐释了暴露于自然环境可以有效提升游憩者的情绪状态,证实了自然环境有助于缓解精神压力的作用。Hartig 等^[9]发现自然化空间具有减少负面情绪的心理效益,同时可改善注意力并重新获得精神活力。比起城市环境,自然环境往往拥有更好的健康疗愈效益,处在自然环境中人的血压、情绪及注意力有显著的改善^[10]。屋顶花园作为独特类型的袖珍绿地也具有缓解压力和提升身心健康的潜力^[11]。由城市化引起用地紧张问题导致城市绿地的建设遭受了限制,而建筑屋顶可为城市景观的多样化存在提供额外的空置空间。同时,在屋顶建设花园能为城市创造生态和社会效益^[12],例如,缓解城市热岛效应、调节雨洪管理、提高建筑的隔热性能、提升城市整体美观形象等^[13-16]。

目前,一些学者聚焦于屋顶花园植被的压力恢复效益,与无植被的屋顶花园相比,有植被的屋顶花园对人群的积极影响更为显著^[17]。Lee 等^[18]发现具有结构化植被的自然空间能帮助人群改善情绪状态和减轻压力,而较为封闭的植被空间则不一定能促进身心健康。比起混凝土屋顶,利用短暂时间观看开花的屋顶花园草地可以持续提高大学生的注意力^[11]。除了植被的健康效益,屋顶花园绿色空间的感知体验具有更直观的感受,有助于恢复性水平的提高。Mesimäki 等^[19]为游客提供多感官的屋顶花园接触,揭示了屋顶花园的恢复性潜力是存在的且恢复性水平较高。

然而,目前关于屋顶花园恢复性效益的研究多是以单一类型空间为研究场景,缺少对多样化屋顶花园绿色空间的研究,并且国内针对屋顶花园恢复绩效的研究也鲜有报道。此外,相关研究往往是基于虚拟现实技术进行视觉刺激从而评估恢复绩效^[20-21],该方法虽然具备便捷的操作性,但与真实的自然环境相比存在感知差异性。现场研究允许体验真实的环境,保证自然体验的生态效度,为使用特定的设计提升屋顶花园恢复效益提供实证支持。国外学者已开展诸多关于绿色空间开敞程度对注意力恢复影响的相关探索,而目前国内则较少聚焦于该方向的研究。因此,本文选择华侨大学人境交互实验室为试验场地,通过实地测量方法,探讨屋顶花园不同空间类型与压力恢复的关联性。

1 研究方法

1.1 实验场地及测试对象

实验场地位于华侨大学建筑学科实验大楼人境交互实验室(图1)。实验室基础是一个矩形的屋顶花园,面积约为240 m²,拥有水体、景观廊架、阳光房、乔灌木、地被植物等景观元素。实验室平时作为庭院日常对外开放,为附近的师生提供绿色休憩空间。

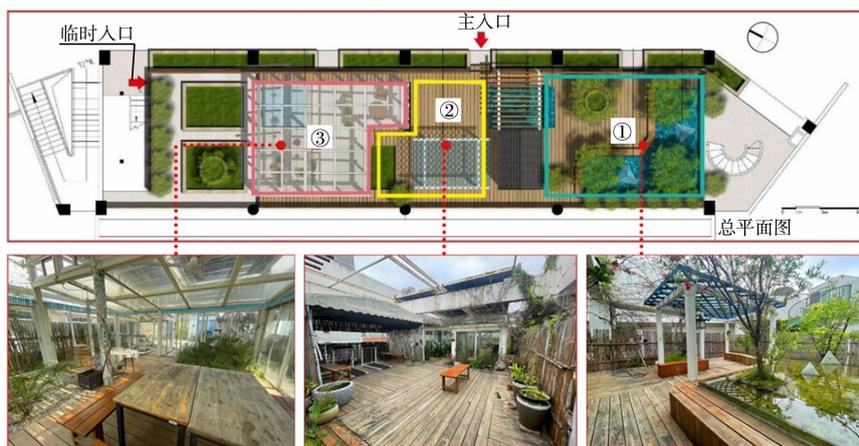


图1 实验场地示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental site

作为附近大学生日常生活中接触最多的第二自然,积极的自然访问有助于减轻压力并提高注意力。该屋顶花园主要有3个游憩空间,分别是图1中的区域空间①,②,③。区域①中植物群落半结构化,人工水池约占整个空间的一半,拥有折线形景观廊架和休闲座椅,空间视线较为清晰。区域②是用木头铺成较为开阔的广场,左侧有一些低矮灌木,视觉范围较为开阔。区域③为开敞式的阳光房,是师生进行园艺活动的半户外空间,其中有大面积的低矮灌木和地被植物,视线主要向左右两侧渗透。

在景观空间营造过程中,设计师常利用亲自然元素构造不同空间类型,包括开敞空间、半开敞空间、覆盖空间、垂直空间等^[22]。其中,开敞空间一般用低矮灌木或地被植物控制空间开敞度,几乎暴露于阳光下,引起空间视线较为开阔、私密性较弱;半开敞空间中部分空间受到较高植物的封闭,导致视线受到一定的限制,开敞程度较小;覆盖空间一般利用浓密树冠的植物或构筑物作为空间顶平面,空间四周较为开敞;而垂直空间则应用高又细的植物构造成具有垂直感且上空开敞的空间。根据风景园林设计要素对空间类型的划分,图 1 中的①,②,③游憩空间可以分别对应为半开敞空间、开敞空间和覆盖空间。

因此,选取该屋顶花园的 3 种空间类型作为实验样地,以此比较屋顶花园不同空间类型的恢复性效益。由于实验场地的受惠对象主要为在校大学生群体,所以共招募 35 名大学生作为测试对象,男女比例将近 1:1。所有参与者身体健康状况良好,无身心疾病,且在实验前 24 h 未饮用茶、酒等刺激性物品。为了确保实验的顺利进行,参与者在实验前被告知实验流程并签署了知情同意书。

1.2 恢复绩效测量

借鉴前人研究经验,采用心理感知量表和生物反馈测量法,探究屋顶花园对身心健康的恢复绩效。

1) 心理感知量表。选用感知恢复性量表(PRS)评价不同屋顶花园空间类型对受试者心理恢复的影响。PRS 是由 Hartig 等^[23]建立的环境评价体系,可以衡量环境的恢复性潜力。参照文献^[23]提出 PRS 修改版,其中涵盖了逃离性、魅力性、延展性和兼容性 4 个维度特征,并采用李克特 7 级量表进行评价。考虑到测试对象的感知差异可能影响到压力恢复,引入了测试对象的环境感知评价,包括环境的美景度、满意度及舒适度,评价量表均为 5 级量表,以此探究主观感知评价与恢复绩效的关联性。

2) 生物反馈测量。实验测量的生理指标包括心率(HR)和心率变异性(HRV),HR 和 HRV 是生理压力的有效测量指标,并且经常用于压力恢复的研究^[24]。HR 是客观的生理唤醒指标,受到交感神经和副交感神经的调节,当产生紧张、压力等心理状态时,交感神经活动增强会导致心率加快。HRV 是指连续心跳间隔时间的变化,是个体调节应激反应能力的生理标志,可作为评价个体自主神经活动的客观指标^[25]。研究主要采用 HRV 中的 RR 间期均值(t_M)、RR 间期标准差(t_{SD})、连续 RR 间期均值平方差的平方根(t_{RMSSD})指标。

t_M , t_{SD} , t_{RMSSD} 用于评估副交感神经活动,数值越大,表明恢复效果越好。选用 Polar V2 型心率和 Polar H10 型心率带测定 HR 和 HRV 指标,通过观察生理指标的变化,可以客观解释不同屋顶花园绿色空间的压力恢复绩效。

1.3 实验方法

实验选择在 2023 年 5—6 月中晴朗无风的白天进行,实验时间为 8:00—9:30 或 16:30—18:00,实验期间气候较为适宜且物理环境基本一致,在该屋顶花园进行实验也可避免噪音的干扰。实验流程,如图 2 所示。1) 受试者到达现场后被随机分配到一个空间以消除顺序效应,随后佩戴心率和心率带。2) 其次,进行一项 3 min 的数字口算,以诱导受试者的心理压力水平。在完成压力测试任务后,测量生理和心理指标(前测值)。3) 研究表明,接触自然环境 3~5 min 可以获得可靠的研究结论^[26],故将恢复活动时间控制在 5 min。在恢复过程中,受试者以静坐或站立的方式感知空间,为了提高实验结果的信度和效度,受试者被要求在实验期间只对独立绿色空间进行视觉感知,5 min 后再次测量其生理和心理指标(后测值),随之填写环境感知评价。4) 受试者休息 10 min 以平复个人情绪,并进行下一个空间的实地测量。

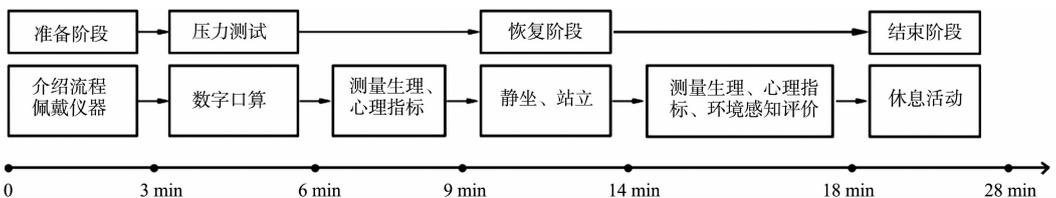


图 2 实验流程

Fig. 2 Experimental process

1.4 数据分析

首先,使用 Cronbach's α 对 PRS 的内部信度进行分析。结果显示,Cronbach's α 为 0.91 ($P <$

0.05), 表明 PRS 的信度较好。其次, 采用 Kubios HRV Standard 软件对生理数据进行伪影和异位搏的校正, 为了排除典型伪影、异位心跳和漏拍, 使用 3 次样条插值方法替换漏拍的心率间隔, 并利用平滑先验方法去除时间序列的非平稳性, 对数据进行去趋势化处理。然后, 选用 IBM SPSS 26.0 软件记录每组实验前、后受试者心理感知和生理反馈指标的变化值, 作为测量恢复绩效的指标。采用单因素方差分析检验受试者恢复生理和心理指标的变化量, 并以此分析各空间类型恢复绩效的差异性, 如有差异, 则使用最小显著性差异 (LSD) 法进行事后检验。

2 研究结果与分析

2.1 基线数据的检测

在通过方差齐性检验的基础上, 对恢复阶段前的生理和心理指标进行方差分析, 结果如表 1 所示。表 1 中: DF 表示自由度; MS 代表均方误差; F 用于评估组间的差异; P 为显著性。由表 1 可知: 所有指标的差异均无统计学意义 ($P > 0.05$), 说明应激源暴露后受试者的生理和心理状态基本一致。因此, 可以将后期生理和心理状态的差异归因于屋顶花园不同空间类型的影响。

表 1 恢复初始生理和心理指标方差分析结果

Tab. 1 Results of variance of physiological and psychological indexes of initial recovery

| 测量指标 | 半开敞空间 | 开敞空间 | 覆盖空间 | DF | MS | F | P |
|------------------------|--------|--------|--------|----|----------|------|-------|
| 远离性 | 3.23 | 2.91 | 2.74 | 3 | 1.44 | 1.74 | 0.162 |
| 魅力性 | 2.71 | 2.71 | 2.49 | 3 | 0.42 | 0.34 | 0.802 |
| 延展性 | 2.57 | 2.63 | 2.43 | 3 | 0.28 | 0.25 | 0.859 |
| 兼容性 | 2.54 | 2.51 | 2.54 | 3 | 0.24 | 0.24 | 0.867 |
| HR/次·min ⁻¹ | 78.74 | 77.97 | 78.34 | 3 | 4.45 | 0.03 | 0.993 |
| t_M /ms | 772.30 | 783.09 | 781.09 | 3 | 1 256.28 | 0.09 | 0.968 |
| t_{SD} /ms | 44.08 | 44.01 | 43.14 | 3 | 17.21 | 0.06 | 0.980 |
| t_{RMSSD} /ms | 35.52 | 36.00 | 33.44 | 3 | 43.04 | 0.13 | 0.940 |

2.2 感知恢复性量表与空间恢复绩效

各空间类型 PRS 分值大小依次为半开敞空间 (6.77 ± 4.45) > 覆盖空间 (6.40 ± 3.56) > 开敞空间 (3.34 ± 2.96)。单因素方差分析结果显示, 3 种屋顶花园空间类型间的 PRS 分值变化有显著效应 ($F = 9.011, P < 0.001$), 表明不同屋顶花园空间类型恢复绩效的差异有统计学意义。

不同空间类型感知恢复性及特征的 LSD 事后比较分析结果, 如表 2 所示。表 2 中: M 为均值差; * 表示在 0.05 水平 (双侧) 上显著相关; ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关。由表 2 可知: 半开敞空间 ($M = 3.43, P = 0.000$) 和覆盖空间 ($M = 3.06, P = 0.001$) 对感知恢复性的恢复绩效显著优于开敞空间, 半开敞空间与覆盖空间的差异则无统计学意义。由此可知, 半开敞空间恢复绩效优于其他两种空间类型, 覆盖空间恢复绩效优于开敞空间。

表 2 不同空间类型感知恢复性及特征的 LSD 事后比较分析结果

Tab. 2 Results of LSD post hoc comparative analysis of perception restoration and characteristics of different spatial types

| 空间类型 i | 空间类型 j | PRS | | 远离性 | | 魅力性 | | 延展性 | | 兼容性 | |
|----------|----------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|
| | | M | P |
| 半开敞空间 | 开敞空间 | 3.43** | 0.000 | 0.51* | 0.039 | 1.06*** | 0.000 | 1.09** | 0.000 | 0.77** | 0.008 |
| | 覆盖空间 | 0.37 | 0.676 | -0.14 | 0.562 | 0.09 | 0.759 | 0.29 | 0.239 | 0.14 | 0.619 |
| 开敞空间 | 半开敞空间 | -3.43** | 0.000 | -0.51* | 0.039 | -1.06** | 0.000 | -1.09** | 0.000 | -0.77** | 0.008 |
| | 覆盖空间 | -3.06** | 0.001 | -0.66** | 0.009 | -0.97** | 0.001 | -0.80** | 0.001 | -0.63* | 0.030 |
| 覆盖空间 | 半开敞空间 | -3.71 | 0.676 | 0.14 | 0.562 | -0.09 | 0.759 | -0.29 | 0.239 | -0.14 | 0.619 |
| | 开敞空间 | 3.06** | 0.001 | 0.66** | 0.009 | 0.97** | 0.001 | 0.80** | 0.001 | 0.63* | 0.030 |

为了进一步探析不同空间类型的恢复性特征, 统计不同空间类型的 PRS 维度的分值变化。结果显示, 不同空间类型的远离性变化值 ($F = 3.963, P = 0.022 < 0.05$) 和兼容性变化值 ($F = 4.117, P = 0.019 < 0.05$) 的差异具有统计学意义, 而不同空间类型的魅力性变化值 ($F = 8.911, P = 0.000 < 0.001$)

和延展性变化值($F=4.117, P=0.000<0.001$)的差异极具统计学意义。因此可知,3种屋顶花园空间类型的 PRS 维度分值均呈现显著性效应。由表 2 可知:3种空间类型中的 PRS 维度分值变化展现出相似的趋势,半开敞空间和覆盖空间的恢复绩效均优于开敞空间。具体表现为半开敞空间($M=0.51, P=0.039$)和覆盖空间($M=0.66, P=0.009$)的远离性变化值优于开敞空间;半开敞空间($M=1.06, P=0.000$)和覆盖空间($M=0.97, P=0.001$)的魅力性变化值优于开敞空间;半开敞空间($M=1.09, P=0.000$)和覆盖空间($M=0.80, P=0.001$)的延展性变化值优于开敞空间;半开敞空间($M=0.77, P=0.008$)和覆盖空间($M=0.63, P=0.030$)的兼容性变化值优于开敞空间。

总体而言,感知恢复性量表及其维度变化共同印证了屋顶花园空间类型的恢复绩效在不同维度上表现出显著差异化,其中半开敞空间的恢复绩效最佳,其次分别为覆盖空间和开敞空间。

2.3 生理反馈指标与空间恢复绩效

生理反馈指标与空间恢复绩效的关联性采用 HR 和 HRV 两类指标予以表征。在通过方差齐性检验的基础上,对生理反馈指标进行单因素方差分析。

2.3.1 HR 变化 在感知体验不同空间类型后,3种空间类型的 HR 下降值分别为半开敞空间(2.37 ± 3.81)、开敞空间(0.60 ± 0.31)、覆盖空间(1.60 ± 3.85),受试者的 HR 均有所降低,表明屋顶花园空间类型具有潜在的恢复潜力,尤其是半开敞空间和覆盖空间。单因素方差分析结果显示,3种屋顶花园空间类型的 HR 变化量具有显著效应($F=2.135, P<0.05$),反映出3种屋顶花园空间类型的恢复绩效具有显著差异性。不同空间类型生理指标的 LSD 事后比较分析结果,如表 3 所示。由表 3 可知:仅有半开敞空间对 HR 的恢复绩效显著优于开敞空间($M=1.771, P=0.042$)。

表 3 不同空间类型生理指标的 LSD 事后比较分析结果

Tab. 3 Results of post hoc comparative LSD analysis of physiological indexes of different spatial types

| 空间类型 <i>i</i> | 空间类型 <i>j</i> | HR/次·min ⁻¹ | | t_M /ms | | t_{SD} /ms | | t_{RMSSD} /ms | |
|---------------|---------------|------------------------|----------|-----------|----------|--------------|----------|-----------------|----------|
| | | <i>M</i> | <i>P</i> | <i>M</i> | <i>P</i> | <i>M</i> | <i>P</i> | <i>M</i> | <i>P</i> |
| 半开敞空间 | 开敞空间 | 1.771* | 0.042 | 19.343* | 0.015 | 3.446 | 0.182 | 2.717 | 0.329 |
| | 覆盖空间 | 0.771 | 0.372 | 6.200 | 0.601 | 0.629 | 0.981 | -0.070 | 0.980 |
| 开敞空间 | 半开敞空间 | -1.771* | 0.042 | -19.343* | 0.015 | -3.446 | 0.182 | -2.717 | 0.329 |
| | 覆盖空间 | -1.000 | 0.247 | -13.143* | 0.026 | -3.383 | 0.190 | -2.787 | 0.316 |
| 覆盖空间 | 半开敞空间 | -0.771 | 0.372 | -6.200 | 0.601 | -0.629 | 0.981 | 0.070 | 0.980 |
| | 开敞空间 | 1.000 | 0.247 | 13.143* | 0.026 | 3.383 | 0.190 | 2.787 | 0.316 |

2.3.2 HRV 变化 HRV 指标的变化量,如表 4 所示。由表 4 可知: t_M 和 t_{RMSSD} 在恢复阶段后的增幅明显大于 t_{SD} 的变化量; t_{SD} 指标在开敞空间中呈现下降的迹象,说明开敞空间对诱发屋顶花园的恢复绩效有一定的局限性。单因素方差分析结果显示,屋顶花园空间类型均对 t_M ($F=1.394, P<0.05$) 和 t_{RMSSD} ($F=1.659, P<0.05$) 变化有显著效应;而空间类型对 t_{SD} ($F=1.18, P>0.05$) 变化则无显著效应,表明屋顶花园空间类型对该指标变化量的差异无统计学意义。由表 3 可知:开敞空间对 t_M 指标的恢复绩效均显著低于半开敞空间($M=-19.343, P=0.015$)和覆盖空间($M=-13.143, P=0.026$),说明 t_M 指标的上升值均低于其他两种空间类型,导致其空间恢复绩效较低。

表 4 HRV 指标的变化量

Tab. 4 Changes of HRV indexes

| 空间类型 | t_M /ms | t_{SD} /ms | t_{RMSSD} /ms |
|-------|-------------|--------------|-----------------|
| 半开敞空间 | 23.89±40.55 | 3.00±13.13 | 5.78±13.55 |
| 开敞空间 | 4.54±62.57 | -0.44±9.75 | 2.76±10.40 |
| 覆盖空间 | 17.69±42.31 | 2.94±8.85 | 5.55±10.52 |

2.4 环境感知评价与恢复绩效的关系

为了探析受试者的环境感知评价与恢复绩效的关联性,采用相关性分析检验两者之间的关系。环境感知评价与恢复绩效的相关性,如图 3 所示。从 Spearman 相关系数和显著性来看,环境感知评价与大部分恢复绩效指标呈正相关。与生理恢复绩效相比,环境感知评价与心理感知恢复的关联性更为紧密,且相关性系数保持在 0.3~0.6。此外,环境感知评价与心理感知恢复的显著效应表现得更为强烈。

在心理感知恢复性表征上,环境感知评价中的美景度、满意度和舒适度对感知恢复性量表及其维度有极为显著的积极影响。由图 3 可知,环境感知评价与感知恢复性维度的关联性大小依次是延展性、兼容性、魅力性、远离性,并且环境舒适度对感知恢复性的影响最大,其次是满意度和美景度。可见,环境感知评价对屋顶花园恢复绩效存在积极的影响,良好的环境空间体验会促使产生恢复性作用。在相关性分析结果中,发现环境感知评价与生理反馈指标也呈正相关关系,其中,美景度对 HR 有显著的积极影响,满意度与 t_{RMSSD} 指标之间的关系也出现了类似的结果,且舒适度对 HR 和 t_{SD} 有显著的正向影响。综上,虽然屋顶花园环境感知评价对心理和生理的影响存在差异化,但在一定程度上强调了受试者环境感知体验的重要性,表明优越的环境感知对诱发较佳的空间恢复绩效有着重要的影响。

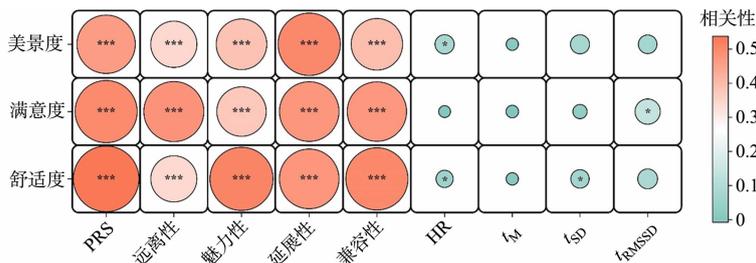


图 3 环境感知评价与恢复绩效的相关性

Fig. 3 Correlation between environmental perception evaluation and restoration performance

3 结论

以华侨大学人境交互实验室的 3 种屋顶花园空间类型为实验场地,通过实地测量方法,选用单因素方差分析探析不同空间类型心理和生理恢复绩效的差异性,并进一步分析受试者环境感知评价与恢复绩效的相关性,得出了如下 4 点结论。

1) 尽管心理感知和生理反馈指标测量结果存在差异性,两者的显著性变化均可证实屋顶花园具有恢复绩效。这与先前的研究结果相似,即接触屋顶花园对心理和生理具有促进身心健康的积极作用^[19,27]。可进一步解释为拥有亲生物设计的屋顶花园属于人工自然环境,易受到人们的青睐,因为人类天生就具备与自然环境联系的倾向^[28]。

2) 感知恢复性量表结果揭示了不同屋顶花园空间类型的恢复绩效具有显著的差异性,恢复绩效最优是半开敞空间,其次是覆盖空间和开敞空间,表明受试者短暂沉浸在屋顶花园有助于获得恢复性体验。不同空间类型的感知恢复性维度(远离性、魅力性、延展性、兼容性)的差异具有统计学意义,并且开敞空间和覆盖空间在各个维度所表现的恢复绩效优于开敞空间。

3) 受试者在 3 种屋顶花园空间类型的 HR 均有下降且变化量具有显著效应,而只有半开敞空间的生理恢复绩效高于开敞空间。HRV 中的 t_M 和 t_{RMSSD} 指标在恢复过程中增幅大于 t_{SD} , t_{SD} 指标在开敞空间中呈下降趋势,可见开敞空间对受试者身心放松效果较差。 t_M 和 t_{RMSSD} 的变化量也具有显著效应,然而仅有 t_M 可以反映出木质开敞空间的恢复绩效较低。

4) 环境感知评价(美景度、满意度、舒适度)对屋顶花园空间类型的心理和生理恢复有显著的正向影响。环境感知评价中舒适度对心理感知恢复绩效影响最大,其次是满意度和美景度。环境感知评价对生理恢复绩效也有重要影响,相较于生理反馈指标,环境感知评价对心理感知的影响较为显著。因此,在营造屋顶花园时,应充分考虑屋顶花园的空间感知体验,以期最大限度发挥屋顶花园绿色空间的恢复性效益。

屋顶花园空间类型具有心理和生理健康的恢复性潜力,不同空间类型的恢复绩效具有显著的差异化。整体而言,半开敞空间的恢复绩效最佳,其次为覆盖空间,最后是开敞空间。由此可知,开敞程度较低的空间拥有良好的恢复绩效,当空间开敞程度降低到一定程度时会导致恢复绩效下降。Kaplan 等^[29]提出的注意力恢复理论强调开敞程度较低的空间具有强烈的远离性特征,进而更容易恢复积极情绪。当视野逐渐开阔,易导致注意力分散。心理学中的“瞭望-庇护”(prospect-refuge)理论指出,人们在观赏外界环境时需要保证自身处于安全感的庇护所,清晰视野和隐藏空间的环境具有帮助人们提升幸

福感的能力^[30]。开敞空间恢复效益较差,究其原因可能是该空间主要以木质铺装为主,植被少且单一,在视觉感知上容易产生单调、呆板的顿挫感。而覆盖空间虽然半封闭但具有一定的可渗透性,并且含有大面积的低矮灌木和地被植物,自然化程度较高,为受试者提供绿色缓冲空间以对抗压力事件的负面影响。而半开敞空间恢复性潜力最大的原因除了空间的开敞程度,还有相对结构化的植被,使其营造的空间感较为舒适,这与环境感知评价对恢复绩效影响的结果相似,即舒适度在环境的恢复绩效中扮演着重要的角色。先前研究表明,具有结构化的植被设计与更好的恢复绩效有关^[18,31-32]。此外,心理感知指标的变化量对测量屋顶花园空间类型的恢复绩效更为显著,这可能是受试者常于此活动,对此类空间产生场所依恋和环境偏好。而生理反馈指标则客观阐释了屋顶花园对人身心理健康的恢复作用,但在一定程度上也受到遗传特征、生存环境等因素的影响,这种生理变化的潜在机制有待进一步证实。将心理和生理指标测量方法相结合,有助于更好地理解屋顶花园的健康益处。

然而,研究只定性分析屋顶花园空间类型对心理和生理反馈的影响。后续研究应进一步量化空间成分特征,以更具体的量化分析探讨屋顶花园环境质量对恢复绩效的影响。

参考文献:

- [1] 刘群阅,吴瑜,肖以恒,等. 城市公园恢复性评价心理模型研究: 基于环境偏好及场所依恋理论视角[J]. 中国园林, 2019,35(6):39-44. DOI:10.19775/j.cla.2019.06.0039.
- [2] 赵一帆,潘芝颖,胡乃文,等. 城市化与精神健康的关系: 经典假设、挑战与研究趋势[J]. 中国临床心理学杂志, 2022,30(4):876-882. DOI:10.16128/j.cnki.1005-3611.2022.04.024.
- [3] LAMHAMEDI H, LIZIN S, WITTERS N, *et al.* The recreational value of a peri-urban forest in Morocco[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021,65:127339. DOI:10.1016/j.ufug.2021.127339.
- [4] JANEZKO E, BIELINIS E, WÓJCIK R, *et al.* When urban environment is restorative: The effect of walking in suburbs and forests on psychological and physiological relaxation of young polish adults[J]. *Forests*, 2020,11(5):591. DOI:10.3390/f11050591.
- [5] TYRVÄINEN L, OJALA A, KORPELA K, *et al.* The influence of urban green environments on stress relief measures: A field experiment[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2014,38:1-9. DOI:10.1016/j.jenvp.2013.12.005.
- [6] YU C S, HSIEH H. Beyond restorative benefits: Evaluating the effect of forest therapy on creativity[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020,51:126670. DOI:10.1016/j.ufug.2020.126670.
- [7] ULRICH R S, SIMONS R F, LOSITO B D, *et al.* Stress recovery during exposure to natural and urban environments[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 1991,11(3):201-230. DOI:10.1016/S0272-4944(05)80184-7.
- [8] 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.
- [9] HARTIG T, MITCHELL R, DE VRIES S, *et al.* Nature and health[J]. *Annual Review of Public Health*, 2014,35(1):207-228. DOI:10.1146/annurev-publhealth-032013-182443.
- [10] HARTIG T, EVANS G W, JAMNER L D, *et al.* Tracking restoration in natural and urban field settings[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2003,23(2):109-123. DOI:10.1016/S0272-4944(02)00109-3.
- [11] LEE K E, WILLIAMS K J H, SARGENT L D, *et al.* 40-second green roof views sustain attention: The role of micro-breaks in attention restoration[J]. *Journal of Environmental Psychology*, 2015,42:182-189. DOI:10.1016/j.jenvp.2015.04.003.
- [12] SHAFIQUE M, KIM R, RAFIQ M. Green roof benefits, opportunities and challenges: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018,90:757-773. DOI:10.1016/j.rser.2018.04.006.
- [13] 朱伶俐,丁凤,杨琳,等. 夏冬季城市公园与城市热岛/冷岛空间关系研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2020,36(1):87-95. DOI:10.12046/j.issn.1000-5277.2020.01.013.
- [14] KUOPPAMÄKI K, HAGNER M, LEHVÄVIRTA S, *et al.* Biochar amendment in the green roof substrate affects runoff quality and quantity[J]. *Ecological Engineering*, 2016,88:1-9. DOI:10.1016/j.ecoleng.2015.12.010.
- [15] NAWAZ R, MCDONALD A, POSTOYKO S. Hydrological performance of a full-scale extensive green roof located in a temperate climate[J]. *Ecological Engineering*, 2015,82:66-80. DOI:10.1016/j.ecoleng.2014.11.061.
- [16] MESIMÄKI M, HAURU K, KOTZE D J, *et al.* Neo-spaces for urban livability?: Urbanites' versatile mental ima-

- ges of green roofs in the Helsinki metropolitan area, Finland[J]. *Land Use Policy*, 2017, 61: 587-600. DOI:10.1016/j.landusepol.2016.11.021.
- [17] LEE K E, WILLIAMS K J H, SARGENT L D, *et al.* Living roof preference is influenced by plant characteristics and diversity[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 122: 152-159. DOI:10.1016/j.landurbplan.2013.09.011.
- [18] LEE J, KANG M, LEE S, *et al.* Effects of vegetation structure on psychological restoration in an urban rooftop space[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023, 20(1): 260. DOI:10.3390/ijer-ph20010260.
- [19] MESIMÄKI M, HAURU K, LEHVÄVIRTA S. Do small green roofs have the possibility to offer recreational and experiential benefits in a dense urban area?: A case study in Helsinki, Finland[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 40: 114-124. DOI:10.1016/j.ufug.2018.10.005.
- [20] BIRENBOIM A, DIJST M, ETTEMA D, *et al.* The utilization of immersive virtual environments for the investigation of environmental preferences[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 189: 129-138. DOI:10.1016/j.landurbplan.2019.04.011.
- [21] BROWNING M H E M, MIMNAUGH K J, VAN RIPER C J, *et al.* Can simulated nature support mental health?: Comparing short, single-doses of 360-degree nature videos in virtual reality with the outdoors[J]. *Frontiers in Psychology*, 2019, 10(10): 2667. DOI:10.3389/fpsyg.2019.02667.
- [22] 布思 N K. 风景园林设计要素[M]. 曹礼昆, 等译. 北京: 中国林业出版社, 1989.
- [23] HARTIG T, KORPELA K, EVANS G W, *et al.* A measure of restorative quality in environments[J]. *Housing, Theory & Society*, 1997, 14(4): 175-194. DOI:10.1080/02815739708730435.
- [24] ANNERSTEDT M, JÖNSSON P, WALLERGÅRD M, *et al.* Inducing physiological stress recovery with sounds of nature in a virtual reality forest: Results from a pilot study[J]. *Physiology & Behavior*, 2013, 118: 240-250. DOI:10.1016/j.physbeh.2013.05.023.
- [25] JIANG Bin, CHANG C Y, SULLIVAN W C. A dose of nature: Tree cover, stress reduction, and gender differences[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 132: 26-36. DOI:10.1016/j.landurbplan.2014.08.005.
- [26] YIN Jie, ZHU Shihao, MACNAUGHTON P, *et al.* Physiological and cognitive performance of exposure to biophilic indoor environment[J]. *Building and Environment*, 2018, 132: 255-262. DOI:10.1016/j.buildenv.2018.01.006.
- [27] YOON E, LIM Y. A Study on the connection between nature and architectural space in Le Corbusier's Venice hospital project[J]. *Architectural Research*, 2020, 22(4): 113-122. DOI:10.5659/AIKAR.2020.22.4.113.
- [28] KELLERT S R, WILSON E O. The biophilia hypothesis[M]. Washington D C: Island Press, 1993.
- [29] KAPLAN R, KAPLAN S. The experience of nature: A psychological perspective[M]. New York: Cambridge University Press, 1989.
- [30] GATERSLEBEN B, ANDREWS M. When walking in nature is not restorative: The role of prospect and refuge [J]. *Health & Place*, 2013, 20: 91-101. DOI:10.1016/j.healthplace.2013.01.001.
- [31] 王茜, 张延龙, 赵仁林, 等. 四种校园绿地景观对大学生生理和心理指标的影响研究[J]. *中国园林*, 2020, 36(9): 92-97. DOI:10.19775/j.cla.2020.09.0092.
- [32] HUANG Qiuyun, YANG Minyan, JANE H, *et al.* Trees, grass, or concrete?: The effects of different types of environments on stress reduction[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 193: 103654. DOI:10.1016/j.landurbplan.2019.103654.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202408006



供需视角下的城市公园绿地 空间评价及优化

翁奕城^{1,2}, 王楠¹, 陈梓聪¹

(1. 华南理工大学 建筑学院, 广东 广州 510641;

2. 华南理工大学 广州市景观建筑重点实验室, 广东 广州 510641)

摘要: 以广东省广州市越秀区为例,利用层次分析法和专家咨询法建立供需测度指标体系,并采用两步移动搜索法、服务区分析法、OD成本矩阵法等展开公园绿地供给评价。采用区位熵方法对总人口密度及不同群体人口密度展开居民需求评价,借助协同度模型得出公园绿地空间供需协同度及供需关系评价。结果表明:越秀区公园绿地空间整体供给水平高,但不同街道供给差异大;整体需求水平高且呈横向带状分布;供需布局不平衡,空间分异明显;供需协同度较好,但仍有部分供需失调及供给不足区域亟需优化。

关键词: 公园绿地; 供需测度; 空间优化; 多源数据; 公平性

中图分类号: TU 986

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)01-0060-11

Space Evaluation and Optimization of Urban Park Green From Perspective of Supply and Demand

WENG Yicheng^{1,2}, WANG Nan¹, CHEN Zicong¹

(1. School of Architecture, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Guangzhou Key Laboratory of Landscape Architecture,
South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Taking Yuexiu District, Guangzhou, Guangdong as an example, the index system of supply and demand measurement is established by analytic hierarchy process method and expert consultation method, two-step mobile search method, service area analysis method and OD cost matrix method are used to evaluate the park green supply. Using the location entropy method, the resident demand is evaluated for total population density and population densities of different groups; using the coordination model, the evaluation of supply-demand coordination degree and supply-demand relationship of park green space is obtained. The results show that the overall supply level of park green space in Yuexiu District is high, but the supply of different streets varies significantly. The overall demand level is high and distributed in a horizontal strip shape. The spatial difference of unbalanced distribution of supply and demand is obvious. The coordination degree of supply and demand is benign, but some areas with supply-demand imbalance and insufficient supply would be optimized necessarily.

Keywords: park green; supply and demand evaluation; space optimization; multi-source data; fairness

收稿日期: 2024-08-05

通信作者: 翁奕城(1974-),男,副教授,博士,主要从事景观生态规划设计、城市更新设计的研究。E-mail:wengych@scut.edu.cn.

基金项目: 广东省基础与应用基础研究自然科学基金资助项目(2023A1515011482)

随着城市化快速发展,城市居民对游憩需求愈加迫切。公园绿地作为居民游憩活动的首选空间,对提升幸福感,促进身心健康等方面具有重要意义。传统公园绿地规划方法在大方向上能较为合理地分配公园资源,但缺乏技术手段细化人群的需求程度,导致公园服务压力过大,或者公园资源未充分利用甚至闲置^[1]。公园绿地供给与居民游憩需求的错配导致游憩服务效率低下。因此,综合考虑公园绿地供给与居民需求的整体评价与优化研究具有重要意义。

关于公园绿地供需测度研究主要包括可达性、公平性和多源数据方法等。基于可达性视角,采用网络分析法、两步移动搜索法对公园绿地的空间供需展开研究^[2-4]。随着研究的深入,一些学者基于公平性视角,讨论不同人群的差异性需求,使公园绿地的空间供需评价研究更加客观、科学^[5-7]。公园绿地公平性的诉求也从“空间公平”上升到“社会公平”层面,公园绿地规划逐渐从供给端为主体的传统视角,转变为居民群体社会属性、分布特征及其获取公园绿地服务的能力等需求端的考量^[8]。整合地理空间数据和社交媒体文本数据(如全球定位系统(GPS)轨迹数据^[9]、Wi-Fi 接入点数据^[10]、大众点评^[11]等)进行评估已成为趋势。木皓可等^[12]使用兴趣点(POI)数据及社交媒体数据表征公园绿地服务供需,对公园绿地服务水平进行评价。王宝强等^[13]使用手机信令数据等多源数据,对武汉市环城空间的游憩资源与游憩强度进行特征匹配。

目前的研究中,基于公园绿地供给或人群偏好的单一角度讨论较多,而基于供需视角的研究较少。现有的评价多基于单一公园类别展开,缺少对各类公园绿地的系统性供需评估。供给端主要基于绿地比例等静态指标^[14],需求端主要基于服务矩阵、公众参与式制图、SolVES 模型结合的问卷调查、专家访谈等方法^[15],这些方法获得的数据质量虽然较高,但常受限于行政边界且调研成本昂贵。而地理信息系统和网络大数据方法使绿地空间供需评估更加高效、便捷。越秀区是广东省广州市的老中心城区,在人口高密度和高强度开发的双重影响下,公园绿地服务压力大、空间供需矛盾十分突出,是很好的研究案例。基于此,本文以广东省广州市越秀区为例,采用层次分析法和专家咨询法,建立供需测度指标体系,利用多源数据对公园绿地空间供需关系进行评价,并提出优化对策。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区域概况

越秀区位于广东省广州市中心城区西南部,总面积约为 33.8 km²,公园绿地面积约为 6.10 km²,占绿地总量的比例约为 79%。研究区域概况,如图 1 所示。

越秀区下辖 18 个街道、222 个社区,整体人口密度较高,约有 83% 的街道人口密度在 2 万人·km⁻² 以上,特别是大东街道的人口密度高达 7.1 万人·km⁻²。

越秀区街道及居住小区分布,如图 2 所示。

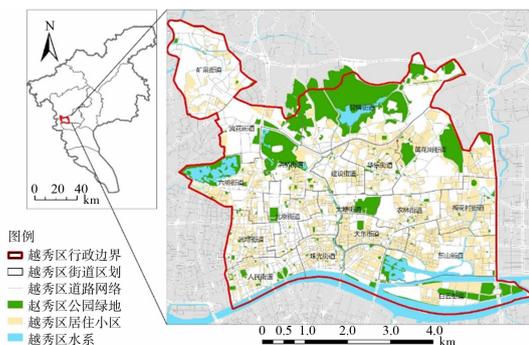


图 1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of study area

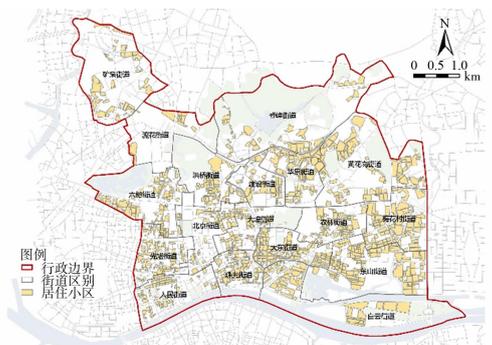


图 2 越秀区街道及居住小区分布

Fig. 2 Distribution of streets and residential districts in Yuexiu District

1.2 数据来源

利用多样渠道获取数据,并进行对比筛选、处理,再运用 ArcGIS Pro 软件,采用 WGS1984_49N 投影坐标系构建研究数据集,结果如表 1 所示。

表1 研究数据集
Tab.1 Research dataset

| 数据类型 | 数据内容 | 数据来源 |
|-----------|------------------------|----------------------------------|
| 行政区划数据 | 越秀区及街道行政边界矢量数据 | 广州市规划和自然资源局、标准地图服务官网 |
| 路网数据 | 各级道路中心线矢量数据 | 各地图平台、越秀区控制性详细规划 |
| 公园绿地数据 | 公园绿地点数据、公园绿地面积数据 | 高德地图开放平台、越秀区控制性详细规划、百度地图街景 |
| 居住小区及人口数据 | 居住小区点数据、建筑面积数据、居住小区面数据 | 高德地图开放平台、越秀区控制性详细规划 |
| | 居住小区信息数据(如房屋户数、楼栋总数等) | 互联网住宅交易平台(房天下、安居客等) |
| | 各街道面积及人口数据 | 2022年越秀区统计年鉴、2022年12月越秀区城乡低保救助公示 |

1.3 公园绿地分级

从供需视角出发,结合 GB/T 51346—2019《城市绿地规划标准》及广州市公园绿地服务能力研究成果^[16],根据绿地规模与实际服务能力,将越秀区的公园绿地划分为不同等级。公园绿地分级指标^[16-18],如表2所示。

表2 公园绿地分级指标
Tab.2 Classification indexes of park green

| 指标 | 绿地等级 | | |
|----------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|------------|
| | 一级 | 二级 | 三级 |
| 绿地规模/km ² | >0.10 | 0.01~0.10 | 0.004~0.01 |
| 服务距离/m | 800 | 500 | 300 |
| 步行时长/min | 15 | 10 | 5 |
| 备注 | 综合公园及0.10 km ² 以上的专类公园 | 社区公园及0.01~0.10 km ² 的专类公园 | 游园 |

根据绿地划分标准,越秀区内一级公园绿地14处,占公园数量的5.6%,占绿地面积总量的80.4%,主要包括麓湖公园、越秀公园、流花湖公园等;二级公园绿地26处,包括发展公园、传祺公园和宏城公园等;三级公园绿地208处,数量众多,但绿地规模偏小,主要呈点状布局,均可为居民游憩活动提供一定的服务供给。越秀区公园绿地分布及服务覆盖,如图3所示。

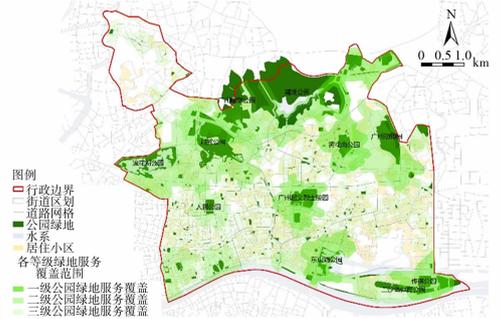


图3 越秀区公园绿地分布及服务覆盖
Fig.3 Distribution and service coverage of park green in Yuexiu District

2 研究方法

2.1 供需模型

公园绿地空间供需模型,如图4所示。依据公平性视角,借鉴已有的研究成果^[4-7],采用层次分析法和专家打分法构建公园绿地空间供需评价系统。在空间需求层面,根据生理性弱势群体及社会性弱势群体的划分标准,结合广州市绿地使用人群社会属性报告和实地调研观测结论,除总人口密度外,还包括65岁以上老年人口密度、0~14岁儿童人口密度及低收入群体人口密度进行公园绿地空间需求评价,更能体现城市绿地游憩服务的公平性要求。

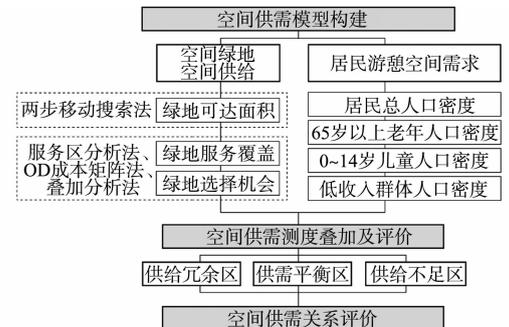


图4 公园绿地空间供需模型
Fig.4 Supply and demand model of park green space

并开展权重打分, 可得公园绿地空间供需评价指标权重, 结果如表 3 所示。经计算, 各矩阵一致性比率 (CR) 值均小于 0.1, 通过一致性检验, 表明指标打分结果有效。最后, 通过空间供需测度的叠加获得最终的供需关系评价, 包括供给冗余、供给平衡和供给不足 3 种情况。

表 3 公园绿地空间供需评价指标权重

Tab. 3 Weights of evaluation indexes of park green space supply and demand

| 系统层 | 要素层 | 指标层 | 权重 |
|--------|--------|-----------------------|-------|
| 空间供给 A | 绿地可达面积 | 各级绿地服务范围内的居民可达绿地面积 A1 | 0.292 |
| | | 一级公园绿地服务覆盖情况 A2 | 0.222 |
| | | 二级公园绿地服务覆盖情况 A3 | 0.194 |
| | | 三级公园绿地服务覆盖情况 A4 | 0.111 |
| | 绿地选择机会 | 居民极限步行距离内可选择的绿地数量 A5 | 0.181 |
| 空间需求 B | 需求指数 | 总人口密度 B1 | 0.508 |
| | | 65 岁以上人口密度 B2 | 0.242 |
| | | 0~14 岁人口密度 B3 | 0.092 |
| | | 低收入群体人口密度 B4 | 0.158 |

2.2 供需测度方法

首先, 通过 ArcGIS Pro 软件, 采用多种供需测度方法 (表 4) 对供需数据进行分析及可视化表达。为了消除量纲影响, 达到供需可比结果, 对各项指标原始数值进行归一化处理, 并划分等级, 得到公园绿地空间供需评价结果。

表 4 供需测度方法

Tab. 4 Measurement methods of supply and demand

| 分类 | 测度指标 | 测度方法 | 说明 |
|------|--------|---------------------------------|---|
| 供给测度 | 绿地可达面积 | 两步移动搜索法 (2SFCA) ^[19] | 使用一、二级公园绿地出入口及三级绿地质心点作为供给点, 使用小区的质心点作为需求点, 根据不同等级绿地服务半径 (一级 800 m、二级 500 m、三级 300 m) 为搜索阈值进行两次搜索。其中, 距离采用路网距离, 权重采用高斯权重 |
| | 绿地服务覆盖 | 服务区分析法 | 计算绿地服务覆盖情况, 并依据评价指标体系中的权重分配对各级公园绿地分别赋值, 再使用叠加分析工具将评价结果按权重求合并匹配到小区 |
| | 绿地选择机会 | OD 成本矩阵法 ^[20] | 设置小区点数据为起始点, 公园绿地点数据为目的点, 极限步行距离 800 m 为搜索阈值, 进行成本矩阵计算, 得到各小区点可获取的公园绿地数量数据, 使用空间连接工具将评价结果连接到小区 |
| 需求测度 | 人口密度 | 人口密度精细化尺度转换 | 在总人口密度上, 依据建筑面积将总人口数据进行精细化的空间表达 ^[21] , 同时将结果数据与互联网住宅交易平台中居住小区人口数量进行校正, 实现由街道精度到小区精度的空间转化 |
| | 区位熵 | 区位熵公式 | 利用各街道内人均公园绿地供给与研究区域内人均公园绿地供给的比值, 分析总人口、老年、儿童及低收入群体的公园绿地空间分配情况 |

其次, 计算绿地空间供需协同度, 获得空间供需关系匹配结果。协同度 (耦合协调度) 是用来描述某一系统或参量之间彼此协调、同步发展的程度, 目前, 在公园绿地供需关系研究中已有一定应用基础^[22-23]。绿地空间供需协同度 (D) 的计算公式为

$$D = \sqrt{CT}, \quad C \in [0, 1], \quad T \in [0, 1],$$

$$C = 2 \left\{ \frac{f_1(x) \cdot f_2(x)}{[f_1(x) + f_2(x)]^2} \right\}^{\frac{1}{2}},$$

$$T = \alpha f_1(x) + \beta f_2(x)。$$

上式中: C 为供需耦合度; T 为供需调和指数; $f_1(x)$, $f_2(x)$ 分别为公园供给评价和居民需求评价; α , β 为待定权数, 且 $\alpha + \beta = 1$, 由于空间供给与空间需求同等重要, α , β 均取 0.5。

根据供需耦合协同结果得到对应的空间供需关系匹配结果 (表 5), 包括优质协调发展、一般协调发

展、劣质协调发展及失调发展类别下的供给冗余、供需平衡和供给不足。

表5 供需协同情况及供需关系类型

Tab. 5 Supply-demand coordination situation and supply-demand relationship types

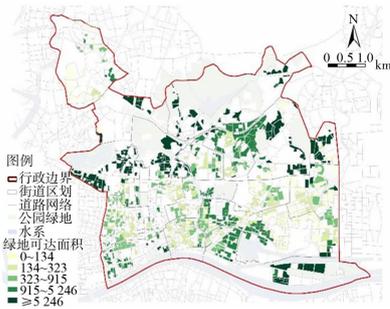
| D | 协同等级 | 供需关系类型 | | |
|----------------------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | $f_1(x) > f_2(x)$ | $f_1(x) = f_2(x)$ | $f_1(x) < f_2(x)$ |
| $D \geq 0.80$ | 优质协调发展 | 供给冗余 | 供需平衡 | 供给不足 |
| $0.60 \leq D < 0.80$ | 一般协调发展 | 供给冗余 | 供需平衡 | 供给不足 |
| $0.40 \leq D < 0.60$ | 劣质协调发展 | 供给冗余 | 供需平衡 | 供给不足 |
| $0 \leq D < 0.40$ | 失调发展 | 供给冗余(需求损益) | 供需平衡(供需共损) | 供给不足(供给损益) |

3 公园绿地供需评价

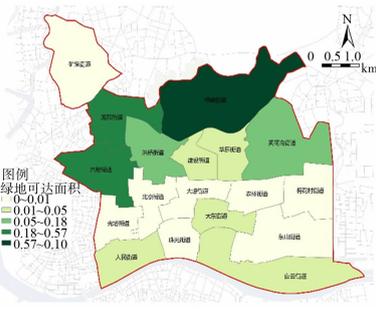
3.1 公园绿地供给评价

3.1.1 公园绿地供给分项评价 1) 绿地可达面积评价。使用两步移动搜索法计算居住小区的绿地可达面积(该数据为系数值),可得越秀区公园绿地可达面积评价,结果如图5所示。由图5可知:越秀区不同街道的公园绿地可达面积差异较大,北部片区的登峰街道、流花街道等街道公园绿地的可达面积明显优于其他街道。

2) 绿地服务覆盖评价。首先,将各等级绿地按照不同的服务范围进行网络分析,针对单一小区可能会出现被同等级内不同绿地多次覆盖的情况,为提高评价精度,对每一次覆盖进行累计记数并计算权重得分,可得越秀区公园绿地服务覆盖叠加情况,如图6所示。由图6可知:公园绿地服务范围几乎覆盖全区,绿地服务覆盖率整体较高。



(a) 居住小区尺度



(b) 街道尺度

图5 越秀区公园绿地可达面积评价

Fig. 5 Evaluation of accessible area of park green in Yuexiu District

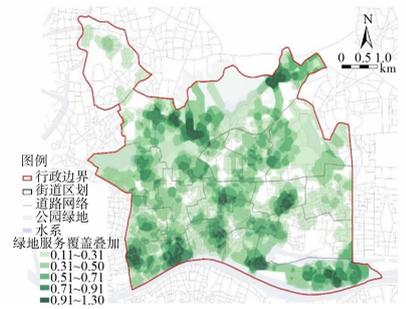
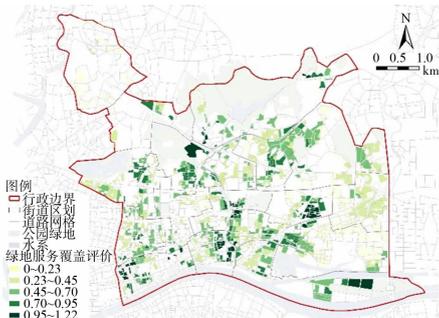


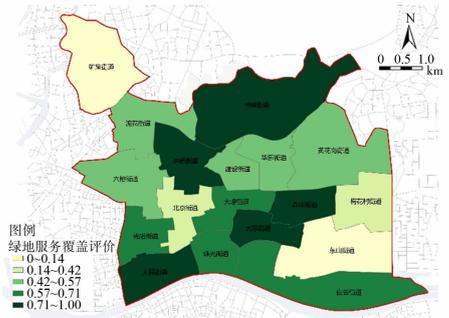
图6 越秀区公园绿地服务覆盖叠加

Fig. 6 Overlay of park green service coverage in Yuexiu District

其次,使用空间连接工具将绿地覆盖情况连接到各小区,可得越秀区公园绿地服务覆盖评价,如图7所示。



(a) 小区尺度



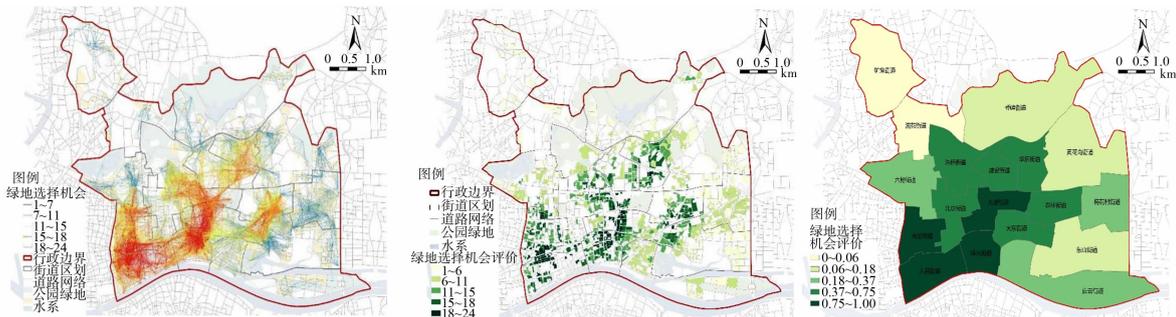
(b) 街道尺度

图7 越秀区公园绿地服务覆盖评价

Fig. 7 Evaluation of park green service coverage in Yuexiu District

3) 绿地选择机会评价。首先, 建立小区及公园绿地间的选择机会 OD 矩阵, 如图 8 所示。图 8 中: OD 线以直线呈现, 代表各小区与公园绿地间实际路网距离。由图 8 可知: 越秀区的公园绿地选择机会存在明显的空间分异。

其次, 将数据叠加到小区的面图层, 可得越秀区公园绿地选择机会评价, 如图 9 所示。



(a) 小区尺度

(b) 街道尺度

图 8 越秀区公园绿地选择机会 OD 矩阵
Fig. 8 OD matrix of park green selection opportunity in Yuexiu District

图 9 越秀区公园绿地选择机会评价
Fig. 9 Evaluation of park green selection opportunities in Yuexiu District

3.1.2 公园绿地供给整体评价 将公园绿地空间供给分项评价结果归一化处理并按权重叠加, 可得越秀区公园绿地空间供给评价, 如图 10 所示。由图 10 可知: 越秀区公园绿地空间供给整体水平较高, 空间布局呈现东北高、西南高而局部低的现象; 空间供给水平高的片区主要为登峰街道及洪桥街道; 空间供给水平低的片区主要为东山街道、梅花村街道及矿泉街道。

3.2 公园绿地需求评价

3.2.1 总人口需求 将越秀区各街道人口在小区尺度重分配, 可得小区总人口密度与人均公园绿地供给区位熵, 如图 11 所示。由图 11 可得以下 3 个结论。

1) 西南部片区的小区人口密度整体偏高, 其中, 六榕街道、北京街道由于文旅资源丰富、教育单位和医疗机构等公共服务设施众多, 小区往往规模较大, 造成街道人口密度偏高; 珠光街道、大东街道内存在大量 2000 年之前建成的老旧小区, 绿化率低、容积率高。

2) 少数分布在南北边缘的街道绿地水域面积占比大, 整体人口密度较低, 但仍存在个别小区人口密集的现象。

3) 人均公园绿地服务水平低于整体水平的街道有 6 个, 街道居民享有较少的绿地空间供给, 公园绿地游憩空间分布呈明显不均衡性。

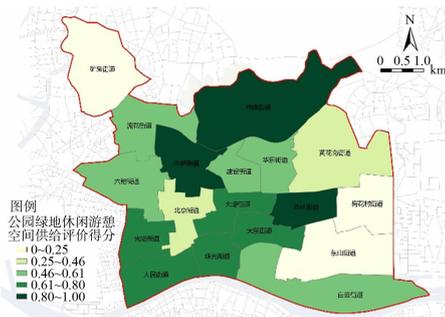
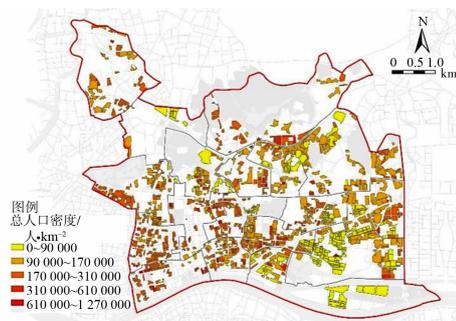
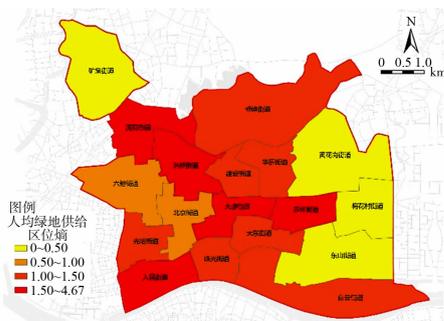


图 10 越秀区公园绿地空间供给评价
Fig. 10 Evaluation of park green space supply in Yuexiu District



(a) 总人口密度



(b) 人均绿地供给区位熵

图 11 越秀区总人口密度与人均绿地供给区位熵

Fig. 11 Total population density and location entropy of per capita green supply in Yuexiu District

3.2.2 不同群体需求 越秀区不同群体的人口密度与人均绿地供给区位熵,如图 12 所示。由图 12 可得以下 2 个结论。

- 1) 老年人口密度、儿童人口密度呈中间高、南北低的趋势,低收入人口密度在区域西南部聚集。
- 2) 老年人口密度、低收入群体的人均绿地供给区位熵的极值高出总人口极值数倍,说明公园绿地供给在老年和低收入群体间的分布更不均衡,整体上人均绿地供给区位熵高的绿地服务水平略向老年及儿童倾斜,但未向低收入群体倾斜。

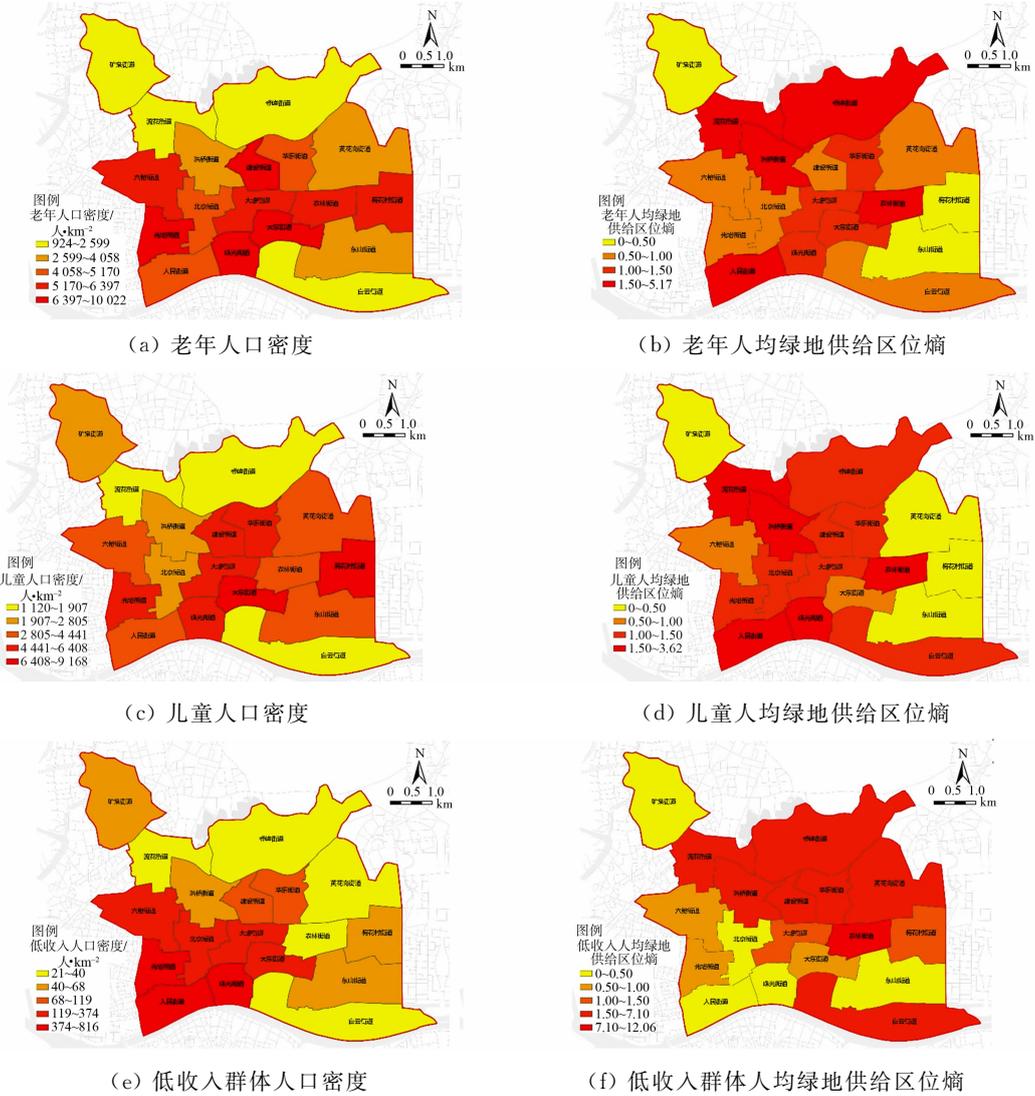


图 12 越秀区不同群体人口密度与人均绿地供给区位熵

Fig. 12 Population density and location entropy of per capita green supply of different groups in Yuexiu District

将越秀区公园绿地空间需求分项评价结果归一化处理并按权重叠加,可得越秀区公园绿地空间需求评价,如图 13 所示。由图 13 可知:越秀区居民公园绿地空间需求整体呈现中部高、东西高、向南北逐渐降低的趋势,形成空间聚集的特征;大东街道、珠光街道及光塔街道的公园绿地空间需求最大;梅花村街道、建设街道公园绿地空间需求较大;流花街道、白云街道及登峰街道则需求较低。

3.3 公园绿地供需关系评价

首先,根据越秀区公园绿地空间供需评价结果,采用自然断点分级法对评价结果进行分级,可得越秀区公园绿地空

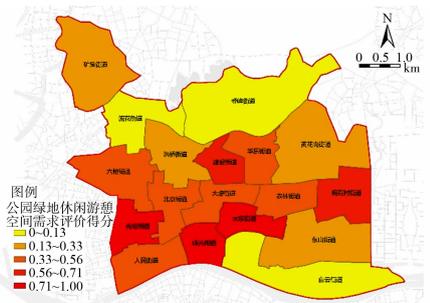


Fig. 13 Evaluation of park green space demand in Yuexiu District

间供需评价差值,如图 14 所示。

由图 13,14 可知:在整体供需上,区内公园绿地供给东北高、局部低,需求中心高、北部低,存在明显空间分异现象;区内供给水平最高的是北部的登峰街道、洪桥街道和中部的农林街道;区内需求水平空间分布呈横向带状分布,中间偏南地带需求高;中部老城区光塔街道、珠江街道、大东街道及梅花村街道的供需评价差值较大,面临严重供不应求问题。

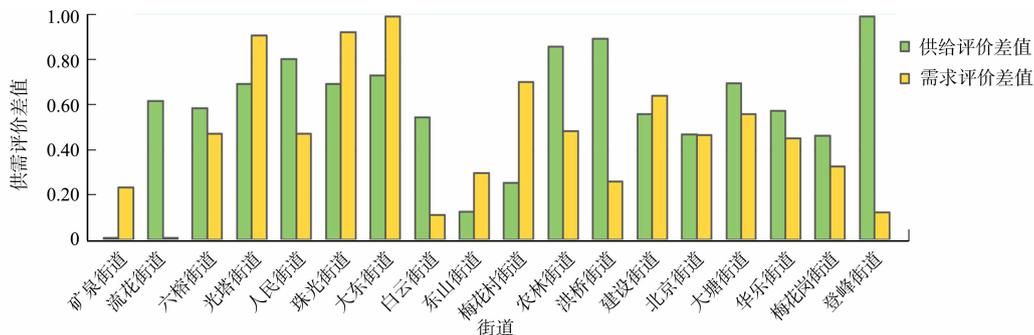


图 14 越秀区公园绿地空间供需评价差值

Fig. 14 Evaluation difference values of park green space supply and demand in Yuexiu District

然后,进行空间供需协同度计算(表 6),并对供需协同情况进行空间可视化表达。由此可得以下 4 个结论。

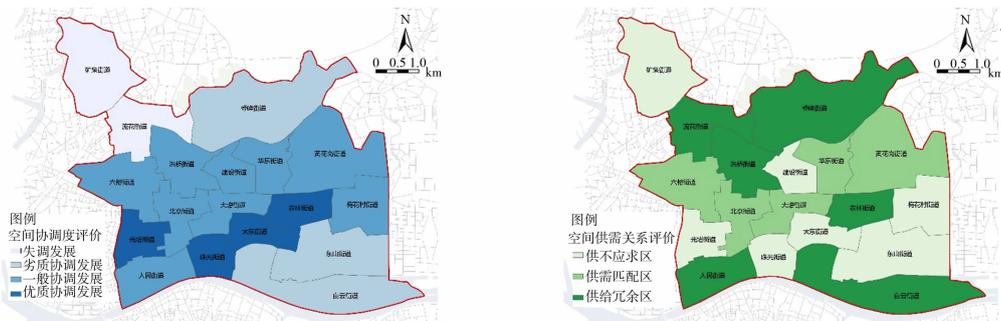
- 1) 协调度最高的片区为大东街道,最低的为矿泉街道。
- 2) 从空间分布来看,得分高的片区位于老城区,需求与供给之间形成了正向的竞争协作关系。
- 3) 得分低的片区集中于西北部,矿泉街道及流花街道,绿地数量规模与人口密度供需差异大。
- 4) 片区协同度呈现以老城区为中心向四周降低的现象,在“十三五”期间老城区旧改的效果显著。

表 6 越秀区公园绿地空间供需协同度计算结果

Tab. 6 Calculation results of park green space supply-demand cooperation degree in Yuexiu District

| 街道 | C | T | D | 街道 | C | T | D |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 矿泉街道 | 0.130 | 0.118 | 0.124 | 流花街道 | 0.080 | 0.308 | 0.158 |
| 六榕街道 | 0.994 | 0.526 | 0.723 | 光塔街道 | 0.991 | 0.799 | 0.890 |
| 人民街道 | 0.966 | 0.636 | 0.783 | 珠江街道 | 0.990 | 0.805 | 0.893 |
| 大东街道 | 0.988 | 0.864 | 0.924 | 白云街道 | 0.750 | 0.326 | 0.494 |
| 东山街道 | 0.916 | 0.211 | 0.440 | 梅花村街道 | 0.883 | 0.477 | 0.649 |
| 农林街道 | 0.960 | 0.668 | 0.801 | 洪桥街道 | 0.837 | 0.575 | 0.694 |
| 建设街道 | 0.998 | 0.597 | 0.772 | 北京街道 | 1.000 | 0.451 | 0.672 |
| 大塘街道 | 0.994 | 0.625 | 0.788 | 华乐街道 | 0.993 | 0.512 | 0.713 |
| 黄花岗街道 | 0.985 | 0.394 | 0.623 | 登峰街道 | 0.624 | 0.561 | 0.592 |

越秀区公园绿地供需协同度及供需关系评价,如图 15 所示。



(a) 供需协同度

(b) 供需关系

图 15 越秀区公园绿地供需协同度及供需关系评价

Fig. 15 Supply-demand coordination degree and evaluation of supply-demand relationship of park green space in Yuexiu District

采用等间距分级法对评价结果进行划分,可得各街道供需协同情况及供需关系类型,如表7所示。由表7可知:越秀区协调发展的街道占比大,其空间供给和空间需求多处于相互正向促进的状态,但协调发展区中仍有半数以上街道存在供需不匹配的现象,还有很大优化空间;失调发展类区由于规划缺位及对有一级公园绿地的街道关注不足,导致供需失调,流花街道及矿泉街道应在后期的规划中得到重点关注。

表7 越秀区公园绿地供需协同情况及供需关系类型

Tab.7 Supply-demand coordination situation and supply-demand relationship types of park green in Yuexiu District

| 协同等级 | 供需关系类型 | | |
|--------|-----------|-------------------------------|----------------|
| | 供给冗余 | 供给平衡 | 供给不足 |
| 优质协调发展 | 农林街道 | — | 光塔街道、珠光街道、大东街道 |
| 一般协调发展 | 人民街道、洪桥街道 | 六榕街道、北京街道、大塘街道、 华乐街道、黄花岗街道 | 建设街道、梅花村街道 |
| 劣质协调发展 | 登峰街道、白云街道 | — | 东山街道 |
| 失调发展 | 流花街道 | — | 矿泉街道 |

综上所述,越秀区公园绿地空间供需关系呈现以下4个特征。

- 1) 整体供给水平高,但具体供给水平差异大,部分街道绿地可达面积、绿地服务覆盖情况、绿地选择机会等指标低,面临严重供不应求问题。
- 2) 整体需求水平高,集中于中部且呈横向带状分布,中部片区空间供给压力较大。
- 3) 空间供需不平衡,存在供给东北高、局部低,需求中心高、北部低的错配现象。
- 4) 供需关系整体较协调,“十三五”期间老旧小区改造成果显著,部分失调地区值得重点关注。

4 公园绿地空间优化对策

4.1 供给不足区

1) 分期消除供给极不足区内服务盲区。供给极不足区包括矿泉街道、东山街道及梅花村街道,其原因在于区内绿地数量少、面积小。针对矿泉街道城中村人口密度高且短期内增绿困难等现状,应结合白云山片区还绿于民的总体要求,以及广州火车站现代商务会展区规划等,分期消除供给服务盲区。东山街道及梅花村街道则可依托新河浦、二沙岛等碧道规划建设,推动公园绿地增量建设。此外,鼓励企业和学校向居民开放广场及附属绿地,或采取社区绿化率奖励,激励各方群体开展社区绿化活动,增加公园绿地空间。

2) 重点提升供给较不足区内供给效率。供给较不足区包括光塔街道、珠光街道、大东街道及建设街道。该片区最显著问题为高需求与紧张用地之间的矛盾。把握此轮广州市城市更新的契机,加强优质口袋公园建设。通过完善城市道路系统,精细化改造片区步行网络,提升进入公园绿地的便捷程度,提高公园绿地空间供给效率。

4.2 供需平衡区

1) 强化高供高需区域公园绿地特色。高供高需区域包括六榕街道、北京街道、大塘街道及华乐街道。该片区内公园绿地空间供给与居民人口密度的匹配度较高,供需协调发展指数较高,优质的公园绿地空间可以促进居民的游憩活动开展。同时应重视公园绿地内部功能供需的匹配情况,提供良好的游憩环境要素和精准化供给服务,以提升公园绿地的吸引力,打造特色城市名片。

2) 关注低供低需区域游憩需求。低供低需区域包括黄花岗街道。该片区内居民游憩需求相对较低,且公园绿地总体数量规模与空间可达性都低于平均水平。首先,要充分了解居民游憩需求,避免均质化配置造成的绿地资源浪费。其次,关注现有公园绿地空间布局是否平衡,优化公园绿地整体结构,使片区内公园绿地的生态效益最大化。

4.3 供给冗余区

高供低需区域包括农林街道、人民街道、洪桥街道、登峰街道、白云街道及流花街道。该片区应在后续城市发展中关注区域定位的合理性,引导社会资源和人口发展的流向,促进公园绿地空间供需平衡状

态的达成,避免绿地空间供给的浪费及社会不公平问题的加剧。同时提升冗余区提升交通可达性,扩大绿地服务范围,打造优质绿地服务产品,引导周边群体共享该片区绿地资源。

5 结果与展望

从供需关系出发,通过两步移动搜索法、服务区分析法及 OD 成本矩阵法综合评价公园绿地的空间供给;通过不同属性居民的人口密度和区位熵评价公园绿地的空间需求,揭示广州市越秀区公园绿地空间供需关系特征。结果表明,广州市越秀区公园绿地整体供给水平较高,集中于中部且呈横向带状分布。然而,存在供给东北高、局部低,需求中心高、北部低的错配现象,供需存在较大的差异,空间不平衡、群体不平等而导致公平性较差。最后,从供给不足区、供需平衡区和供给冗余区 3 个方面提出相应的空间优化策略。本研究具有以下两个创新之处。

1) 提高绿地空间评价的数据精度。在供给数据上,除了关注综合公园、社区公园外,还将与居民游憩关系密切的游园也纳入供给数据,并将整体公园绿地进行二次等级划分,使供给评价数值更加准确。在需求数据上,已有研究往往只考虑总人口分布,但本研究兼顾总人口、老年人、儿童及低收入群体等不同属性居民群体的需求,体现公平性原则,使需求评价数值更客观合理。在供需评价上,以往研究多在街道尺度进行讨论,本研究将供需数据细化到居住小区,将居住小区尺度供需、街道尺度供需及街道尺度区位熵结合起来评价供需水平,有效识别出街道尺度供需情况及街道之间、街道内部的具体差异,使供需评价更加精准。

2) 优化空间供需评价方法。已有研究中,两步移动法计算可达性的方法已较为成熟,但其在计算前往绿地过程中的空间阻力时,缺乏对绿地吸引力等因素的考虑,导致供给评价结果偏差大。本研究对绿地进行等级划分,进而设定适宜的服务阈值参数,通过两步移动法得到空间承载容量供给,同时结合服务区分析法和 OD 成本矩阵得到空间服务容量供给,综合这 3 种评价方法共同评价居民可选择的绿地面积、数量及类型,使供给评价更为客观、准确。

由于无法获取小区尺度的老年、儿童、低收入者等弱势群体的人口数据,仅在街道尺度结合区位熵评价其内部差异,未能在小区尺度进行详细分析,这对需求侧分析深度有所影响。此外,供需评价体系各指标权重的确定及协同度模型调节系数的确定,也存在一定主观性,导致最后的计算结果存在少许偏差。公园绿地的空间供需情况会随着社会经济发展不断动态变化,未来随着空间供需理论模型的进一步完善,可以不断拓展理论研究的深度,使量化结果更加客观、准确。

参考文献:

- [1] 戚荣昊,杨航,王思玲,等. 基于百度 POI 数据的城市公园绿地评估与规划研究[J]. 中国园林,2018,34(3):32-37. DOI:10.3969/j.issn.1000-6664.2018.03.006.
- [2] 高兴,秦华. 基于可达性的山地城市公园绿地服务范围分析及布局优化:以万盛经济技术开发区为例[J]. 西南师范大学学报(自然科学版),2017,42(5):54-59. DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2017.05.009.
- [3] 王甫园,王开泳,刘汉初. 珠三角城市群生态空间游憩服务供需匹配性评价与成因分析:基于改进的两步移动搜索法[J]. 生态学报,2020,40(11):3622-3633. DOI:10.5846/stxb201901060046.
- [4] 刘艳艳,王泽宏,李钰君. 供需视角下的城市公园耦合协调发展度研究:以广州中心城区为例[J]. 上海城市管理,2018,27(2):71-76. DOI:10.3969/j.issn.1674-7739.2018.02.013.
- [5] 匡纬,李莎,周慧荻. 城市公园绿地布局公平性精准化评价方法研究:以北京市海淀区为例[J]. 华中农业大学学报,2022,41(1):160-169.
- [6] 丛楷昕,金云峰,邹可人. 人民城市建设下上海市中心城区社区公共绿地供需匹配与优化研究:以虹口区为例[C]//中国风景园林学会 2022 年会论文集. 北京:中国建筑工业出版社,2022:10,120-129.
- [7] 金云峰,卢喆,吴钰宾. 休闲游憩导向下社区公共开放空间营造策略研究[J]. 广东园林,2019,41(2):59-63. DOI:10.3969/j.issn.1671-2641.2019.02.012.
- [8] 周聪惠. 公园绿地规划的“公平性”内涵及衡量标准演进研究[J]. 中国园林,2020,36(12):52-56. DOI:10.19775/j.cla.2020.12.0052.
- [9] 叶宇,庄宇,张灵珠,等. 城市设计中活力营造的形态学探究:基于城市空间形态特征量化分析与居民活动检验

- [J]. 国际城市规划, 2016(1):26-33.
- [10] KIM Y L. Seoul's Wi-Fi hotspots: Wi-Fi access points as an indicator of urban vitality[J]. *Computers Environment & Urban Systems*, 2018(6):13-24. DOI:10.1016/j.compenvurbsys.2018.06.004.
- [11] 盛强, 杨滔, 刘星. 酒香不怕巷子深? 基于大众点评数据对王府井街区餐饮业分布的空间句法分析[J]. *新建筑*, 2018(5):124-129. DOI:10.12069/j.na.201805027.
- [12] 木皓可, 高宇, 王子尧, 等. 供需平衡视角下城市公园绿地服务水平与公平性评价研究: 基于大数据的实证分析[J]. *城市发展研究*, 2019, 26(11):10-15. DOI:10.3969/j.issn.1006-3862.2019.11.012.
- [13] 王宝强, 陈娴, 施澄. 基于多源数据的武汉市环城游憩空间特征解析[J]. *中国园林*, 2021, 37(6):49-54. DOI:10.19775/j.cla.2021.06.0049.
- [14] GRAÇA M, ALVES P, GONÇALVES J, *et al.* Assessing how green space types affect ecosystem services delivery in Porto, Portugal[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 170:195-208. DOI:10.1016/j.landurbplan.2017.10.007.
- [15] KALINAUSKAS M, BOGDZEVIC K, GOMES E, *et al.* Mapping and assessment of recreational cultural ecosystem services supply and demand in Vilnius (Lithuania)[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 855:158590. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.07.160.
- [16] 梁颢严, 肖荣波, 廖远涛. 基于服务能力的公园绿地空间分布合理性评价[J]. *中国园林*, 2010, 26(9):15-19. DOI:10.3969/j.issn.1000-6664.2010.09.006.
- [17] 黄娅萍, 梁攀呈, 李宜斌. 广州市主城区口袋公园使用概况与优化策略[J]. *广东园林*, 2021, 43(4):7-11. DOI:10.12233/j.gdyl.2021.04.002.
- [18] 广州市林业和园林局. 广州市绿地系统规划(2020—2035)[DB/OL]. (2020-10-28)[2024-07-05]. http://lyylj.gz.gov.cn/zmhd/wszyj/content/post_6870961.html, 2020-10-28.
- [19] RADKE J, MU L. Spatial decompositions, modeling and mapping service regions to predict access to social programs[J]. *Geographic Information Sciences*, 2000, 6(2):105-112. DOI:10.1080/10824000009480538.
- [20] 张霞, 钱佳欢. 基于 OD 和行为分析的高校边界开放策略研究: 以武汉大学为例[J]. *新建筑*, 2005(6):37-41. DOI:10.12069/j.na.202006037.
- [21] 朱瑾, 李建松, 蒋子龙, 等. 基于“实有人口、实有房屋”数据的精细化人口空间化处理方法及应用研究[J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2018, 50(3):133-140.
- [22] 金云峰, 李涛, 王俊祺, 等. 基于协同度量模型的城乡绿地系统布局调适方法[J]. *中国园林*, 2019, 35(5):59-62. DOI:10.19775/j.cla.2019.05.0059.
- [23] 时珍, 邢露华, 郑琳琳, 等. 城市公园绿地游憩供需协同度评价及优化策略[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(2):197-204.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202403027



中药治疗糖尿病肾病的伞状系统评价

李滢, 周智涵, 杨齐锋, 吴循循, 刁勇, 杨会勇

(华侨大学 生物医学学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 通过计算机检索中国知网、万方数据库、中文科技期刊数据库、PubMed 和 Embase 数据库, 将 30 篇文献纳入 2013—2023 年中药治疗 III~IV 期糖尿病肾病的系统进行评价。通过图表结合的形式展示证据分布特征, 并以质量评价工具 AMSTAR-2 对文献质量进行评价。研究结果表明: 发文量总体呈上升趋势, 干预措施中黄芪与茯苓占中药成分的绝大部分; Meta 分析整体质量都较低, 部分关键条目表现不佳; 中药治疗 III~IV 期糖尿病肾病的 Meta 分析已经形成一定规模的证据群, 但这些文献的方法学质量存在较大问题, 之后的研究需要按照相应评价标准提高要求, 并选用更具有代表意义的结局指标。

关键词: 糖尿病肾病; 中药; Meta 分析; 方法学; 质量评价

中图分类号: R 259

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)01-0071-08

Umbrella Systematic Review of Chinese Medicine for Diabetic Nephropathy

LI Ying, ZHOU Zhihan, YANG Qifeng,
WU Xunxun, DIAO Yong, YANG Huiyong

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

Abstract: China National Knowledge Infrastructure (CNKI), Wanfang Data, China Science and Technology Journal Database (VIP), PubMed and Embase are searched by computer, and 30 articles are included in the systematic review of the treatment of stage III-IV diabetic kidney disease with traditional Chinese medicine from 2013 to 2023. The distribution characteristics of evidence through a combination of charts and graphs are displayed, and the literature quality is evaluated using quality evaluation tool AMSTAR-2. The research results show that the number of publications is on the rise overall, of which *Astragalus membranaceus* and *Poria cocos* account for the vast majority of traditional Chinese medicine components in intervention measures. The overall quality of Meta analysis is relatively lower with some key items performing poorly. The Meta analyses of Chinese medicine for the treatment of stage III-IV diabetic nephropathy has formed a certain sizeable evidence group, but there are some problems in the methodology quality of the literature. The requirements of subsequent researches need to be improved according to corresponding review standards, and more representative outcome indicators need to be chosen.

Keywords: diabetic kidney disease; traditional Chinese medicine; Meta analysis; methodology; quality assessment

收稿日期: 2024-03-16

通信作者: 杨会勇(1978-), 男, 副教授, 博士, 主要从事循证中医药临床评价的研究。E-mail: shyhy@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(82304762); 福建省自然科学基金资助项目(2022J05062); 福建省厦门市自然科学基金资助项目(3502Z20227041); 华侨大学科研基金资助项目(21BS126)

糖尿病肾病(DKD)是糖尿病引发的一种严重的慢性并发症,是糖尿病患者中最常见的肾脏疾病之一。DKD通常呈隐匿性发展,早期症状不明显,导致知晓率低,而早期治疗更是微乎其微^[1]。DKD受多种病理因素影响,但发病机制尚未完全明确,目前缺乏特异性疗法。近年来,中药及其活性成分对改善DKD临床症状有显著效果^[2-3]。根据糖尿病肾病 Mogensen 分期,处于Ⅲ~Ⅳ期患者接受有效的干预措施,可以预防患者病情加重,甚至可达到治愈的效果,对改善预后具有重要意义^[4-6]。基于此,本文对中药治疗糖尿病肾病的伞状系统进行评价。

1 研究方法

1.1 检索策略

计算机检索中国知网(CNKI)、万方数据库(WanFang Data)、维普(VIP)、PubMed和EMbase数据库,搜集中药治疗糖尿病肾病的中、英文文献,检索时限为2013—2023年。采用主题词与自由词相结合的方式检索文献,中文数据库检索词包括中药、中医药、中成药、中药材、糖尿病肾病、糖尿病肾病早期、糖尿病肾病患者等,英文数据库检索词包括Chinese traditional medicine,Chinese Herb*,Chinese medicine,Chinese patent medicine,diabetic nephropathie,diabetic kidney disease,diabetic glomerulosclerosis等。

1.2 纳入标准

采用中医药(中药汤剂、中成药、中药注射液、灌肠中药、中西医结合药等)治疗糖尿病肾病患者,糖尿病肾病患者均符合Mogensen^[7]Ⅲ~Ⅳ期,年龄、性别、种族、地域不限,对研究结果也无限制。

1.3 排除标准

- 1) 叙述性文献综述、网状Meta分析、伞状综述、研究方案、会议摘要、专家评论、撤回文章等。
- 2) 动物实验或体外实验研究等非临床研究。
- 3) 无明确诊断标准的文献。
- 4) 重复发表的文献。

1.4 文献筛选与资料提取

由两名研究人员根据预先确定的纳入与排除标准对文献进行独立筛选、提取和交叉核对,与第3名研究者讨论或协商解决任何分歧。使用Note Express文献管理软件删除重复的文章,并通过阅读文章的标题与摘要进行筛选,将不相关文献剔除,再通过阅读全文进行复筛,确定最终纳入的文献数量。两名研究者通过标准化表格提取以下内容:第一作者、国家、发表年份、样本量、纳入文章数量、干预措施、结局指标、患者类型、偏倚评估工具。

1.5 方法学质量评价

质量评价工具AMSTAR-2常用于系统方法学质量的评价,对于医疗决策具有重要的作用。该工具由16个条目所组成,其中7个(条目2,4,7,9,11,13和15)为关键条目。根据文章对条目标准的满足程度评价为“是”“部分是”和“否”。根据各个条目是否符合评价得出文章质量等级为“高”“中”“低”和“极低”。两名研究者通过AMSTAR-2进行独立评价,并交叉核对结果,与第3名研究者讨论或协商解决分歧^[8-9]。

1.6 统计分析

通过文字与图表相结合的形式进行数据分析,通过柱状图与折线图相结合展示发文趋势,通过证据图进行可视化干预措施与结局指标^[10],方法学质量通过雷达图展示AMSTAR-2评价结果。

2 研究结果与分析

2.1 文献筛选流程及结果

初步检索数据库获得相关文献791篇,PubMed数据库获得66篇,EMbase数据库获得85篇,CNKI获得209篇,WanFang Data获得375篇,VIP获得56篇。最终通过阅读全文,将动物实验、系统综述、网络药理学、患者不符合Ⅲ~Ⅳ期糖尿病肾病标准等文章排除,共纳入30篇文献,包括24篇中文

文献和 6 篇英文文献。文献筛选流程, 如图 1 所示。图 1 中: n 为文献数量。

2.2 纳入文献基本特征

30 篇文献按照患者的 Mogensen 分期分为 3 种类别: DKD III 期的研究共 15 篇, 患者 22 239 例; DKD IV 期的研究共 2 篇, 患者 1 463 例; DKD III ~ IV 期的研究共 13 篇, 患者 19 233 例。

纳入文献的基本特征, 如表 1 所示。表 1 中: ACEI 为血管紧张素转换酶抑制剂; ARB 为血管紧张素受体阻滞剂; ①~⑩为结局指标, ①为疗效指标, ②为血脂(甘油三酯、总胆固醇、高密度脂蛋白胆固醇), ③为尿蛋白(尿微量白蛋白、24 h 尿蛋白定量、尿白蛋白排泄率), ④为肾功能(血肌酐、血尿素氮、内生肌酐清除率), ⑤为氧化应激指标(超氧化物歧化酶、丙二醛), ⑥为血糖(血糖、空腹血糖、餐后 2 h 血糖、糖化血红蛋白), ⑦为血压(收缩压、舒张压), ⑧为白蛋白(血浆白蛋白、血清白蛋白), ⑨为不良反应, ⑩为其他(中医证候积分、胱抑素 C、纤维蛋白原)。

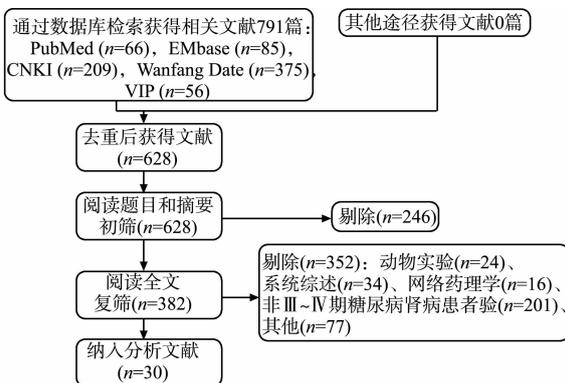


图 1 文献筛选流程

Fig. 1 Literature screening process

表 1 纳入文献的基本特征

Tab. 1 Basic characteristics of included literature

| 作者 年份 | 国家 | 纳入 文章数 | 样本量 | | 干预措施 | 患者 类别 | 偏倚评估工具 | 结局 指标 | 敏感性 分析 | 亚组 分析 |
|---------------------------------|----|-----------|-------|-------|---------------------|----------------|-------------------------------------|-------------|-----------|----------|
| | | | 治疗组 | 对照组 | | | | | | |
| 陈欢 2020 ^[11] | 中国 | 21 | 772 | 762 | 益气养阴 通络法 | III 期 | Cochrane 偏倚 风险评估工具 | ①②③④ ⑥⑨⑩ | 是 | 是 |
| 袁丽莎等 2022 ^[12] | 中国 | 10 | 393 | 392 | 益气温阳 活血法 | III ~ IV 期 | Cochrane 偏倚 风险评估工具 与 Jadad 量表 | ②③④⑥⑨ | 是 | — |
| 董必成 2021 ^[13] | 中国 | 11 | 442 | 438 | 尿毒清颗粒 + ACEI/ARB | III 期 | Cochrane 偏倚 风险评估工具 | ①②③④⑨⑩ | 是 | 是 |
| 张美珍等 2022 ^[14] | 中国 | 13 | 438 | 438 | 参芪地黄汤 | III 期 | Cochrane 偏倚 风险评估工具 | ①③④⑥⑨⑩ | 是 | 否 |
| 刘芬等 2023 ^[15] | 中国 | 13 | 483 | 479 | 参芪地黄汤 | III ~ IV 期 | Cochrane 偏倚 风险评估工具 | ④⑥⑨⑩ | 是 | 是 |
| 金玉洁 2023 ^[16] | 中国 | 16 | 697 | 658 | 解毒通络 益肾法 | III ~ IV 期 | Cochrane 偏倚 风险评估工具 | ①③④⑥⑨ | 否 | 是 |
| 马虹 2023 ^[17] | 中国 | 55 | 2 727 | 2 691 | 尿毒清颗粒 + ACEI/ARB | III 期 | Cochrane 偏倚 风险评估工具 | ①⑤⑩ | 否 | 否 |
| Luo 等 2015 ^[18] | 中国 | 60 | 2 163 | 2 125 | 冬虫夏草 + ACEI/ARB | III 期或 IV 期 | Jadad 量表 | ②③④⑥⑦⑩ | 是 | 否 |
| Zheng 等 2018 ^[19] | 中国 | 28 | 1 087 | 987 | 中药 + ACEI/ARB | III 期 | Cochrane 偏倚 风险评估工具 | ③④⑨ | 是 | 否 |
| 阮智超等 2023 ^[20] | 中国 | 17 | 613 | 612 | 活血化痰类 中成药 | III 期 | Cochrane 偏倚 风险评估工具与 Jadad 量表 | ③④⑨ | 是 | 是 |
| Xue 等 2018 ^[21] | 中国 | 14 | 464 | 454 | 六味地黄 丸类方 | III ~ IV 期 | Cochrane 偏倚 风险评估工具 | ①③⑥⑨ | 是 | 是 |
| 唐雯等 2017 ^[22] | 中国 | 9 | 328 | 266 | 活血益气类中 药 + 雷公藤多苷 | IV 期 | Cochrane 偏倚 风险评估工具 | ①③④⑧⑨ | 否 | 否 |
| 常天瀛 2013 ^[23] | 中国 | 6 | 207 | 198 | 肾炎康复片 + ARB | III ~ IV 期 | Cochrane 偏倚 风险评估工具 | ②③④⑥ | 否 | 否 |

续表
Continue table

| 作者年份 | 国家 | 纳入文章数 | 样本量 | | 干预措施 | 患者类别 | 偏倚评估工具 | 结局指标 | 敏感性分析 | 亚组分析 |
|------------------------------------|----|-------|-------|-------|----------------------|------|-----------------------------|--------------|-------|------|
| | | | 治疗组 | 对照组 | | | | | | |
| 赵洁等 2019 ^[24] | 中国 | 15 | 708 | 694 | 补阳还五汤 | Ⅲ期 | Cochrane 偏倚风险评估工具 | ②③④⑨ | 是 | 否 |
| Liu 等 2013 ^[25] | 中国 | 21 | 842 | 794 | 中药 | Ⅲ期 | Jadad 量表 | ①③④⑥ | 是 | 是 |
| Yang 等 2014 ^[26] | 中国 | 27 | 1 143 | 1 096 | 黄葵胶囊 | Ⅲ~Ⅳ期 | Cochrane 偏倚风险评估工具 | ③④⑧ | 否 | 否 |
| 张云 2018 ^[27] | 中国 | 12 | 561 | 563 | 百令胶囊+ARB | Ⅲ~Ⅳ期 | Jadad 量表 | ①②③④⑥ ⑦⑨⑩ | 是 | 是 |
| 陈硕等 2019 ^[28] | 中国 | 12 | 570 | 525 | 补脾益肾、化痰消癥汤药 | Ⅲ期 | Cochrane 偏倚风险评估工具 | ①③⑨⑩ | 否 | 是 |
| 陈硕等 2019 (2) ^[29] | 中国 | 15 | 797 | 723 | 补脾益肾、通络泄浊方药+ACEI/ARB | Ⅲ~Ⅳ期 | Cochrane 偏倚风险评估工具 | ①③④⑨⑩ | 否 | 是 |
| 姚志等 2019 ^[30] | 中国 | 12 | 450 | 434 | 黄葵胶囊+ACEI/ARB | Ⅲ期 | Cochrane 偏倚风险评估工具 | ③⑨ | 否 | 否 |
| 杨涛等 2017 ^[31] | 中国 | 14 | 648 | 608 | 活血消癥中药 | Ⅲ~Ⅳ期 | Cochrane 偏倚风险评估工具 | ①②③④⑥ | 否 | 否 |
| 杨涛 2018 ^[32] | 中国 | 6 | 267 | 267 | 海昆肾喜胶囊 | Ⅲ~Ⅳ期 | Cochrane 偏倚风险评估工具 | ③④⑩ | 是 | 否 |
| 范婷 2020 ^[33] | 中国 | 12 | 692 | 692 | 益气补肾为治法中药方剂 | Ⅲ期 | Cochrane 偏倚风险评估工具 | ①②③④⑥⑨ | 是 | 否 |
| 吕沈辉 2020 ^[34] | 中国 | 15 | 768 | 700 | 益气养阴、补肾活血中药 | Ⅲ期 | Cochrane 偏倚风险评估工具 | ①②③⑥⑨ | 是 | 是 |
| 戴骁意等 2018 ^[35] | 中国 | 18 | 727 | 702 | 益气养阴活血方 | Ⅲ期 | Cochrane 偏倚风险评估工具 | ①③④⑨ | 否 | 否 |
| 陈美玲等 2020 ^[36] | 中国 | 8 | 478 | 391 | 中药灌肠 | Ⅳ期 | Cochrane 偏倚风险评估工具 | ①③④ | 否 | 否 |
| 周威等 2020 ^[37] | 中国 | 11 | 529 | 518 | 中药 | Ⅲ期 | Cochrane 偏倚风险评估工具 | ①③⑥ | 否 | 是 |
| 吴晓芸等 2020 ^[38] | 中国 | 16 | 588 | 584 | 中药穴位贴敷 | Ⅲ~Ⅳ期 | Cochrane 偏倚风险评估工具 | ①③④⑩ | 否 | 否 |
| 潘欣渝 2023 ^[39] | 中国 | 27 | 1 384 | 1 380 | 中药 | Ⅲ~Ⅳ期 | Cochrane 偏倚风险评估工具与 Jadad 量表 | ①③④ ⑥⑨⑩ | 是 | 是 |

2.3 发文时间趋势

中药治疗Ⅲ~Ⅳ期糖尿病肾病的文献发表数目自 2013 年有轻微下降后,自 2016 年起逐步上升,于 2020 年到达峰值后急剧下降,自 2021 年又逐步上升,文献发表数目不断波动,但总体呈上升趋势。

发文数量趋势,如图 2 所示。图 2 中: η 为占比。

2.4 中药成分

发文量前 10 的中药成分分别为:黄芪、茯苓、丹参、当归、山药、地黄、甘草、川芎、大黄、白术。其中,黄芪占比最大,共计 19 篇文献(占 63.33%),其次是茯苓(占 56.67%)。

各类中药成分发文量占比,如表 2 所示。

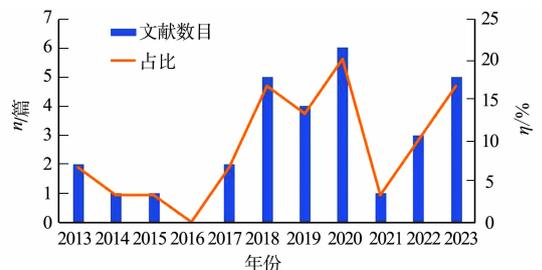


图 2 发文数量趋势

Fig. 2 Publication numbers trend

表 2 各类中药成分发文量占比

Tab. 2 Proportion of publications of various traditional Chinese medicines ingredients

| 中药成分 | n/篇 | $\eta/\%$ | 中药成分 | n/篇 | $\eta/\%$ |
|------|-----|-----------|------|-----|-----------|
| 黄芪 | 19 | 63.33 | 茯苓 | 17 | 56.67 |
| 丹参 | 16 | 53.33 | 当归 | 14 | 46.67 |
| 山药 | 14 | 46.67 | 地黄 | 14 | 46.67 |
| 甘草 | 14 | 46.67 | 川芎 | 13 | 43.33 |
| 大黄 | 13 | 43.33 | 白术 | 13 | 43.33 |

2.6 方法学质量

结局指标证据分布,如图 3 所示。图 3 中:气泡的大小取决于发文数量的多少。基于 AMSTAR-2 的方法质量,如图 4 所示。纳入系统评价的 AMSTAR 2 评估,如图 5 所示。

根据 AMSTAR-2 评估,30 篇文献 Meta 分析的整体方法学质量均极低。在大多数非关键条目中,纳入的 Meta 分析表现不佳。

1) 对于条目 1(研究问题与纳入标准是否遵循 PICO(研究人群、干预措施、对照组与结局指标)原则),绝大部分文献表现良好,遵循 PICO 原则,其中,29 篇文献评价为“是”,仅 1 篇文献评价为“否”。

2) 对于条目 5,6,分别有 80%与 90%的文献实现双人重复式文献选择与数据选取,具有可重复性。

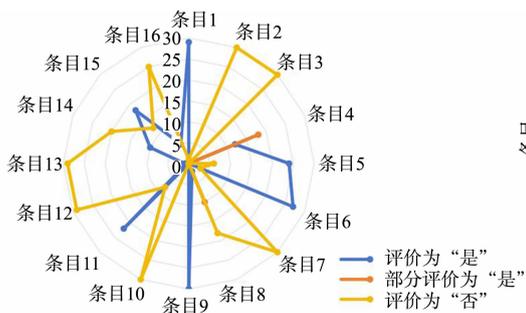


图 4 基于 AMSTAR-2 的方法质量
Fig. 4 Method quality of methodology based on AMSTAR-2

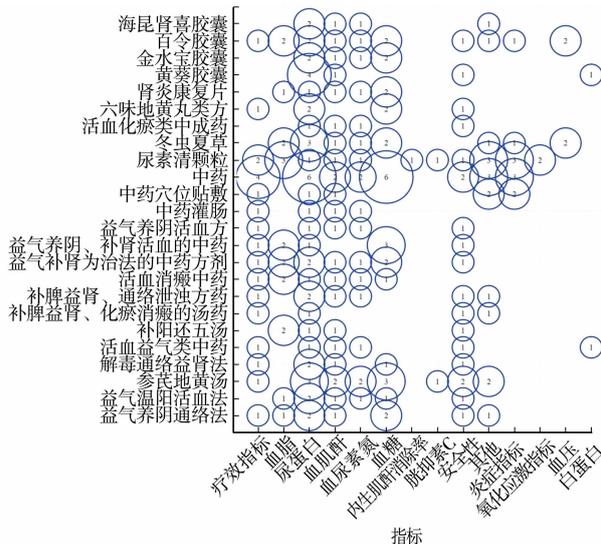


图 3 结局指标证据分布

Fig. 3 Evidence distribution of outcome index

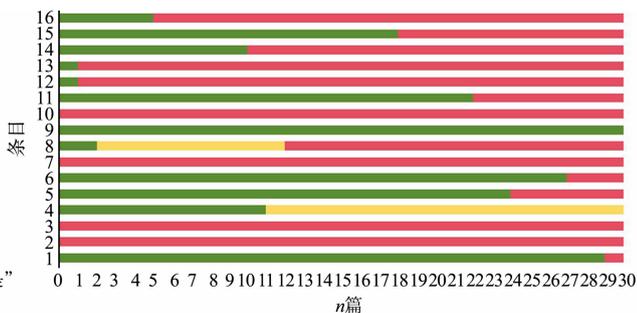


图 5 纳入系统评价的 AMSTAR 2 评估
Fig. 5 AMSTAR 2 assessment of included systematic review

3) 对于条目 3,10,由于所有纳入的 Meta 分析均未说明纳入研究类型的理由,且并未报告纳入的各个研究的资助来源情况,所以条目 3,10 的评价为“否”。

4) 对于条目 9,30 篇文献均采用了合适的工具,表现最好。其中,24 篇文献采用 Cochrane 风险偏倚评估工具,3 篇文献采用了 Jadad 量表,3 篇文献采用 Cochrane 风险偏倚评估工具与 Jadad 量表。

5) 对于条目 11,22 篇文献采用适当的方法及研究结果,因此,条目 11 评价为“是”。

6) 对于条目 15,18 篇文献对发表偏倚进行了合理分析,条目 15 评价为“是”。

7) 对于条目 4,11 篇文献采用检索数据库的方式追溯参考文献、检索灰色文献,或者采用手工检索期刊等方式全面检索文献,条目 4 评价为“是”,其余 19 篇文献制定了较为广泛的检索策略,故均评价为“部分是”。

8) 对于条目 2,由于 30 篇文献均在系统评价实施前未确定研究方法,以及未提供成文的计划书,故 30 篇文献都不满足条目 2 的评价标准。

9) 对于条目 7, 无任何一篇文献提供排除文献清单以证明排除的合理性, 从而导致条目 7 的评价也都为“否”。

10) 对于条目 13, 在讨论或解释结果时, 仅 1 篇(3.33%) 文献考虑了纳入研究的偏倚风险。

3 讨论

证据图是一种系统的制图方法, 通过系统查找、分析与总结以展示选主题领域的研究活动范围, 为进一步的研究提供基础, 并有助于确定研究重点^[40]。通过检索 5 个数据库有关中药治疗Ⅲ~Ⅳ期糖尿病肾病的 Meta 分析, 以证据图的形式对纳入文献的干预措施、结局指标进行分析。

结果显示, 中药治疗Ⅲ~Ⅳ期糖尿病肾病的 Meta 分析已初步形成一定规模的证据群, 疗效指标、血脂、尿蛋白、血肌酐、血尿素、血糖及安全性结局指标绝大部分文章都有纳入研究, 但内生肌酐清除率、胱抑素 C、炎症指标、氧化应激指标、血压、白蛋白等指标仅少数文章有提到, 之后的研究纳入结局指标应更全面。

这项横断面研究评估了自 2013—2023 年发表的 30 篇有关中药治疗Ⅲ~Ⅳ期糖尿病肾病的 Meta 分析的方法学质量。通过 AMSTAR-2 对纳入的 Meta 分析进行方法学质量评价, 发现其结果均为“极低”, 这对研究结果的论证强度有着一定的影响。这些研究的报告质量不高主要是有以下 7 个原因:

1) 所有的文献缺乏前期设计方案或注册信息, 这与系统评价的严谨性和透明度有极大的关联;

2) 纳入文章均未分析纳入研究的类型, 并且 AMSTAR-2 量表还要求研究者应当报告选择研究类型的理由;

3) 研究显示没有一篇文章提供排除研究的清单或证明排除的合理性, 降低了文献筛选流程的透明度和客观性, 不利于判断纳入研究是否全面;

4) 有商业资助的研究项目更有可能对赞助产品提出有利的结果或夸大其效果, 但并无文章描述其分析中纳入研究的资金来源情况;

5) 绝大部分的系统评价都没有评估纳入研究的偏倚风险对 Meta 分析结果的潜在影响, 也没有在解释或讨论结果时考虑纳入研究的偏倚风险;

6) 在研究过程中接受资助的系统评价需要更加严格审核和评估, 但只有较少的文章报告了潜在的利益冲突;

7) 实施系统的检索策略可以降低发表偏倚, 但许多文章未纳入灰色文献、未发表和正在进行的试验, 这可能在一定程度上影响结论的准确性。

系统总结了 2013—2023 年中药治疗Ⅲ~Ⅳ期糖尿病肾病的系统评价, 通过图表结合的形式以展示纳入文献基本特征、发文趋势、中药成分及结局指标的分布情况, 并借助 AMSTAR-2 对文献的方法学质量进行评价。严格遵循双盲原则, 保证研究过程的客观性。原始研究大部分来源于随机对照试验(RCT), 原始证据的质量较高。采用证据图展示了直观的证据群, 系统地绘制了各个中药干预措施和 10 类指标之间的证据矩阵, 对中药治疗Ⅲ~Ⅳ期糖尿病肾病的现有研究认识更全面, 为之后进行高质量的研究提供指导及数据参考。

同时也存在一定的局限性。首先, 纳入研究的样本量小, 缺乏临床意义, 无法提供充足证据以制定临床决策。其次, 纳入研究的有关肾功能的结局指标不具备代表意义, 相关指标如血清肌酐、 β_2 -微球蛋白、血尿酸、血尿素氮等并未进行充分的评估。另外, 检索常用中、英文数据库, 评价的研究都为中文和英语, 其中大多数为中文文献, 可能会存在语言偏倚。最后, 证据图的展示方式还存在改进之处, 可在之后的研究中结合网络数据库以实现智能化。

虽然有关中药治疗Ⅲ~Ⅳ期糖尿病肾病的 Meta 分析发文量有所增长, 但这些系统评价的方法学质量并没有很大的提升, 对于那些无任何一篇文章满足评价标准及报告率较低的条目必须高度重视, 研究者在未来的研究过程中应发布研究方案、提供排除文献清单及考虑纳入研究的偏倚风险对结果的影响等, 提高研究的方法学质量以提供更多中药治疗Ⅲ~Ⅳ期糖尿病肾病的循证依据。同时, 在未来的研究中应该更多聚焦肾功能, 采用有针对性的结局指标, 以帮助制定临床决策。

参考文献:

- [1] 李凯阳,李保华. 中医药治疗糖尿病肾病的研究进展[J]. 新疆中医药,2024,42(1):119-122.
- [2] 赵明,何燕铭,张曾,等. 中医药调节外泌体干预糖尿病肾脏疾病研究进展[J]. 中国中医药信息杂志,2024,31(4):183-186. DOI:10.19879/j.cnki.1005-5304.202303098.
- [3] 靳贺超,顾悦,张圆圆,等. 细胞焦亡与坏死性凋亡在糖尿病肾病中的作用及中医药干预研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志,2022,28(3):58-67. DOI:10.13422/j.cnki.syfjx.20220336.
- [4] 吕改,鲁冰,吕小草,等. 基于网络平台的个性化管理对Ⅲ~Ⅳ期糖尿病肾病患者用药效果的影响[J]. 中国药物滥用防治杂志,2024,30(1):72-74,79. DOI:10.15900/j.cnki.zylf1995.2024.01.018.
- [5] 黄赛娇,林意,卢艳,等. 基于内质网应激探讨越婢加术汤对糖尿病肾病患者的治疗机制[J]. 广州中医药大学学报,2024,41(2):299-305. DOI:10.13359/j.cnki.gzxbtcm.2024.02.006.
- [6] 吕嘉欣,刘阳,王楚翘,等. 中药有效成分通过调控 miRNA 的表达治疗糖尿病肾病机制的研究进展[J]. 实用中医内科杂志,2024,38(4):64-67. DOI:10.13729/j.issn.1671-7813.Z20230322.
- [7] MOGENSEN C E, SCHMITZ A, CHRISTENSEN C K. Comparative renal pathophysiology relevant to IDDM and NIDDM patients [J]. Diabetes-Metabolism Research and Reviews, 1988, 4 (5): 453-483. DOI: 10.1002/dmr.5610040504.
- [8] SHEA B J, REEVES B C, WELLS G, *et al.* AMSTAR 2: A critical appraisal tool for systematic reviews that include randomised or non-randomised studies of healthcare interventions, or both[J]. British Medical Journal, 2017, 358: j4008. DOI:10.1136/bmj.j4008.
- [9] 张方圆,沈傲梅,曾宪涛,等. 系统评价方法学质量评价工具 AMSTAR 2 解读[J]. 中国循证心血管医学杂志,2018,10(1):14-18.
- [10] 李伦,杨克虎,田金徽,等. 一种新的证据总结方法: 证据图简介[J]. 中国循证儿科杂志,2011,6(3):230-232.
- [11] 陈欢. 益气养阴通络法治疗早期糖尿病肾病的 Meta 分析[D]. 沈阳:中医药大学,2020.
- [12] 袁丽莎,张宁,杨荣禄,等. 益气温阳活血法治疗糖尿病肾脏病Ⅲ~Ⅳ期的 Meta 分析[J]. 海南医学院学报,2022,28(2):140-147. DOI:10.13210/j.cnki.jhmu.20201228.001.
- [13] 董必成. 尿毒清颗粒联合 ACEI 或 ARB 治疗Ⅲ期糖尿病肾病的 Meta 分析[D]. 南昌:江西中医药大学,2021.
- [14] 张美珍,郝晓晖,李艳杰,等. 参芪地黄汤治疗早期糖尿病肾病 13 项随机对照试验的 Meta 分析[J]. 世界中西医结合杂志,2022,17(4):637-644,651. DOI:10.13935/j.cnki.sjzx.220401.
- [15] 刘芬,王郁金,苏衍进,等. 参芪地黄汤治疗气阴两虚型Ⅲ~Ⅳ期糖尿病肾病 Meta 分析及 GRADE 评价[J]. 河北中医,2023,45(2):330-338.
- [16] 金玉洁. 解毒通络益肾法治疗消渴肾病的 Meta 分析及消渴肾安汤作用机制探讨[D]. 长春:长春中医药大学,2023.
- [17] 马虹. 中成药治疗糖尿病肾病的 Meta 分析及网络药理学研究[D]. 石河子:石河子大学,2023.
- [18] LUO Ying, YANG Shikun, ZHOU Xun, *et al.* Use of *Ophiocordyceps sinensis* (syn. *Cordyceps sinensis*) combined with angiotensin-converting enzyme inhibitors (ACEI)/angiotensin receptor blockers (ARB) versus ACEI/ARB alone in the treatment of diabetic kidney disease: A Meta-analysis[J]. Renal Failure, 2015, 37(4):614-634. DOI:10.3109/0886022X.2015.1009820.
- [19] ZHENG Qian, LIU Weijing, WEI Wei, *et al.* The efficacy and safety of Chinese herbal medicine combined with ACEI/ARB fortreatment of incipient diabetic nephropathy: A meta-analysis[J]. TMR Integrative Medicine, 2018, 2 (1):7-29.
- [20] 阮智超,倪博然,李家木,等. 3 种活血化瘀类中成药治疗糖尿病肾病Ⅲ期的系统综述[J]. 世界中医药,2023,18(2):206-210,220.
- [21] XUE Gao, SHANG Jianwei, LIU Hongfang, *et al.* A meta-analysis of the clinical efficacy of TCM decoctions made from formulas in the liuwei dihuang wan categorized formulas in treating diabetic nephropathy proteinuria[J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2018, 2018:2427301. DOI:10.1155/2018/2427301.
- [22] 唐雯,尚恒,何雪娟,等. 活血益气类中药联合雷公藤多苷治疗糖尿病肾病的 Meta 分析[J]. 中国医疗设备,2017,32(增刊 1):161-162.
- [23] 常天瀛. 肾炎康复片联合 ARB 类降压药治疗糖尿病肾病的系统评价[D]. 长春:长春中医药大学,2013.
- [24] 赵洁,莫超,孟立锋,等. 补阳还五汤治疗早期糖尿病肾病的疗效及安全性的 Meta 分析[J]. 中国中药杂志,2019,44(8):1660-1667. DOI:10.19540/j.cnki.cjcmm.20190109.001.

- [25] LIU Xiaoyu, LIU Ling, CHEN Pinyi, *et al.* Clinical trials of traditional Chinese medicine in the treatment of diabetic nephropathy: A systematic review based on a subgroup analysis[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2018, 151(2): 810-819. DOI:10.1016/j.jep.2013.11.028.
- [26] YANG Gangyi, ZHANG Min, ZHANG Min, *et al.* Effect of *Huangshukuihua (Flos Abelmoschi Manihot)* on diabetic nephropathy: A Meta-analysis[J]. *Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2015, 35(1): 15-20. DOI: 10.1016/s0254-6272(15)30003-0.
- [27] 张云. 百令胶囊联合 ARB 治疗糖尿病肾病的 Meta 分析[D]. 武汉: 湖北中医药大学, 2018.
- [28] 陈硕, 秦万里, 赵文景. 补脾益肾、化痰消癥法治疗Ⅲ期糖尿病肾病有效性和安全性系统评价与 Meta 分析[J]. *环球中医药*, 2019, 12(6): 959-966.
- [29] 陈硕, 赵文景, 王悦芬, 等. 补脾益肾、通络泄浊法联合 ACEI/ARB 类药治疗Ⅲ~Ⅳ期糖尿病肾病有效性和安全性系统评价与 Meta 分析[J]. *河北中医*, 2019, 41(1): 123-132.
- [30] 姚志, 郑启艳, 张冬梅, 等. 黄葵胶囊联合 ACEI/ARB 治疗 2 型糖尿病肾病Ⅲ期蛋白尿系统评价[J]. *中国中医药信息杂志*, 2019, 26(9): 99-103.
- [31] 杨涛, 李潇然, 王世东, 等. 活血消癥中药治疗糖尿病肾病的随机对照临床试验系统综述及 Meta 分析[J]. *世界中医药*, 2017, 12(1): 5-9, 15.
- [32] 杨涛. 基于倾向评分匹配法的海昆肾喜胶囊治疗糖尿病肾病病例回顾性研究[D]. 北京: 北京中医药大学, 2018.
- [33] 范婷. 糖肾汤治疗早期糖尿病肾病临床观察及老年糖尿病肾病与衰弱的关联[D]. 北京: 北京中医药大学, 2020.
- [34] 吕沈辉. 益气养阴补肾活血法治疗糖尿病肾病Ⅲ期的 Meta 分析[D]. 武汉: 湖北中医药大学, 2020.
- [35] 戴晓意, 濮佳琦, 孙沛霖, 等. 益气养阴活血方治疗早期糖尿病肾病的 Meta 分析[J]. *浙江中西医结合杂志*, 2018, 28(8): 699-702.
- [36] 陈美玲, 孙鲁英, 孙卫卫, 等. 中药灌肠治疗Ⅳ期糖尿病肾病系统评价[J]. *中医学报*, 2020, 35(12): 2706-2712. DOI:10.16368/j.issn.1674-8999.2020.12.596.
- [37] 周威, 林添昌, 张怡. 中药联合治疗 2 型糖尿病结合肾病 Meta 分析[J]. *右江民族医学院学报*, 2020, 42(6): 778-785.
- [38] 吴晓芸, 董必成, 刘丽婷, 等. 中药穴位贴敷佐治糖尿病肾病Ⅲ-Ⅳ期的 Meta 分析[J]. *中医药通报*, 2020, 19(6): 59-63. DOI:10.14046/j.cnki.zyytb2002.2020.06.018.
- [39] 潘欣渝. 中医药改善糖尿病肾病微炎症状态文献计量学分析及系统评价[D]. 苏州: 中国中医科学院, 2023.
- [40] SARAN A, WHITE H. Evidence and gap maps: A comparison of different approaches[J]. *Campbell Systematic Reviews*, 2018, 14(1): 1-38. DOI:10.4073/cmdp.2018.2.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 刘源岗)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202405017



丙戊酸促进小鼠神经干细胞分化 成神经元及其影响机制

宁文洁¹, 刘使君¹, 孙源培¹, 赖靖尧², 王立强¹, 侯志勇^{1,3}

(1. 华侨大学 生物医学学院, 福建 泉州 362021;

2. 神岐生命科技(福建)有限公司, 福建 泉州 362005;

3. 解放军 962 医院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 为了探究丙戊酸(VPA)促进小鼠神经干细胞(NSCs)分化成神经元的可能机制,从小鼠脑中分离神经干细胞并进行传代培养,再将其在不同类型分化培养基中重新接种,诱导细胞分化为神经元,用免疫荧光染色检测神经元特异性标志物的表达情况,并采用 qRT-PCR 分析研究 VPA 处理前、后 Wnt/ β -catenin 信号通路中关键分子表达水平。结果表明:分离后传代培养的 NSCs 悬液内 Nestin 和 Pax6 阳性细胞比例居高,分化后细胞呈现出显著神经元形态,且神经元标志物 β -微管蛋白(TUJ1)、双皮质素(DCX)和微管相关蛋白 2 (MAP2)在分化后表达水平显著提高;与正常组相比,VPA 处理组中 Wnt-3 α , β -catenin 和 cyclin D1 的 mRNA 相对表达量上升,p21 的 mRNA 相对表达量降低;Wnt/ β -catenin 信号通路的抑制剂 FH535 能显著减弱 VPA 中 NSCs 分化成神经元的过程。

关键词: 神经干细胞; 神经元; 细胞周期蛋白; 丙戊酸; Wnt/ β -catenin 通路

中图分类号: R 329.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)01-0079-08

Valproic Acid Promotes Differentiation of Mouse Neural Stem Cells Into Neurons and Its Mechanism of Effect

NING Wenjie¹, LIU Shijun¹, SUN Yuanpei¹,
LAI Jingyao², WANG Liqiang¹, HOU Zhiyong^{1,3}

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

2. Shenqi Life Science and Technology (Fujian) Limited Company, Quanzhou 362005, China;

3. PLA 962 Hospital, Harbin 150080, China)

Abstract: To investigate the possible mechanisms by which valproic acid (VPA) promotes the differentiation of mouse neural stem cells (NSCs) into neurons, neural stem cell were isolated from mouse brain and passaged in culture, then re-inoculated in different types of differentiation medium to induce cell differentiation into neurons, and the expression of neuron-specific markers was detected by immunofluorescence staining, and the expression levels of key molecules in the Wnt/ β -catenin signalling pathway were investigated before and after VPA treatment by qRT-PCR. The results showed that the proportion of Nestin and Pax6 positive cells within suspensions of NSCs cultured in passages after isolation was high, the differentiated cells showed significant

收稿日期: 2024-05-21

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

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

neuronal morphology, and the expression levels of neuronal markers β -Tubulin (TUJ1), Doublecortin (DCX) and recombinant microtubule associated protein 2 (MAP2) were significantly increased after differentiation. Compared with the normal group, the mRNA relative expression levels of *Wnt-3 α* , *β -catenin* and *cyclin D1* was increased, and the mRNA relative expression levels of *p21* protein was decreased in the VPA-treated group. FH535, an inhibitor of the Wnt/ β -catenin signalling pathway, significantly attenuated the differentiation of NSCs into neurons in VPA.

Keywords: neural stem cells; neurons; cell cycle protein; valproic acid; Wnt/ β -catenin pathway

神经干细胞(NSCs)是在胚胎、新生儿和成人大脑中产生神经元和神经胶质细胞的主要祖细胞^[1],是多潜能的前体细胞,能作为神经球在培养基中生长和自我更新很长一段时间,同时保持稳定以产生成熟的功能性脑细胞^[2],在神经系统疾病的治疗中发挥着独特的作用。随着对神经发育的了解和干细胞技术的进步,可以通过不同来源获得 NSCs,并有目的地将其分化为特定的神经谱系细胞,从而替代某些神经系统疾病中丢失的特定细胞,为治疗神经退行性疾病提供了新的方法^[3]。NSCs 的分化受到多种因素的调节,包括生长和转录因子、表观遗传调节剂、微核糖核酸(microRNA)和细胞外基质成分的作用等^[4]。除这些内在特征和外在信号的调节外,化学物质也可以调节 NSCs 的分化进程。

丙戊酸(VPA)是一种用于治疗神经疾病的药物,研究表明 VPA 对神经具有保护作用。这种作用的潜在机制是上调抗凋亡蛋白(Bcl-2)的表达,从而产生神经营养效应^[5]。VPA 是一种细胞外信号调节激酶(ERK)通路激活剂,它可以通过激活 ERK 调节转录因子 AP-1 功能,也可以作为神经营养因子促进神经元分化和神经元存活。VPA 还能增加 ERK 通路调控的基因的表达,包括生长锥相关蛋白和 Bcl-2,促进神经突生长和细胞存活,增强去甲肾上腺素的摄取和释放^[6]。Hsieh 等^[7]的研究表明,在 VPA 上调的神经元特异性基因中存在一种神经源性的基本螺旋-环-螺旋转录因子(NeuroD),它能够诱导神经元,如诱导成年海马神经祖细胞的神经元分化,也能抑制神经胶质分化,如星形胶质细胞和少突胶质细胞。VPA 在神经元分化中发挥着重要作用,但是 VPA 对 NSCs 的影响尚不清楚。因此,本文从小鼠中分离 NSCs,经过不同培养基重新接种使其分化成神经元,探究 VPA 诱导 NSCs 分化的可能影响机制。

1 实验材料

1.1 动物和试剂

昆明种小鼠购自福州吴氏试验动物研究中心,试验动物使用许可证号:SCXK(闽)2016-0002。

NeurobasalTM Plus 培养基、B-27TM Plus 添加物、 γ -分泌酶抑制剂(DAPT)(美国 Gibco 公司);优等胎牛血清(FBS)(美国 Hy-clone 公司);培养细胞/细菌总 RNA 提取试剂盒(北京天根生化科技有限公司);PrimeScriptTM RT Reagent Kit with gDNA Eraser(Perfect Real Time) 试剂盒(日本 TAKARA 公司);iTaq Unieversal SYBR Green 超混合液(美国 Bio-Rad 公司); β -巯基还原剂、体积分数 4% 的组织细胞固定液(北京索莱宝生物科技有限公司);双皮质素(DCX)抗体、 β -微管蛋白(TUJ1)抗体(英国 Abcam 公司);抗荧光淬灭剂(上海碧云天生物技术有限公司);山羊抗小鼠二抗-Cy3(美国 Jackson 公司);丙戊酸(VPA)、牛血清白蛋白(BSA)、Triton X-100 聚乙二醇辛基苯基醚(美国 Sigma 公司);Nestin 单克隆抗体、Pax6 单克隆抗体、Mouse IgG1 Isotype Control(同型对照)、DyLight 488 偶联山羊抗小鼠 IgG 二抗(美国 Invitrogen 公司);引物(上海生工生物工程股份有限公司);NeuroCult NSC 增殖补充剂、NeuroCult NSC 基础培养基(加拿大 StemCell Technologies 公司);FGF2(bFGF)、表皮生长因子(EGF)(美国 Peprotech 公司);FH535 拮抗剂(美国 EMD Millipore 公司)。

1.2 实验设备

台式低温高速离心机(美国 Beckman 公司);流式细胞仪(美国 Beckman 公司);倒置荧光显微镜(德国莱卡公司);荧光定量 PCR 仪、PCR 仪(美国 BIO-RAD 公司);高速离心机(德国 Eppendorf 公司);涡旋震荡器(德国 IKA 公司);超微量分光光度计(美国 Thermo 公司)。

2 实验方法

2.1 溶液配制

完全培养液:将 50 mL NeuroCult NSC 增殖补充剂添加到 450 mL NeuroCult NSC 基础培养基中,加入 20 μL 500 $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 EGF 和 1 000 μL 100 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的 FGF2,于 4 $^{\circ}\text{C}$ 下储存。

对照组为诱导分化第 0 天的细胞,其他各组别神经干细胞需在相应的培养基中诱导分化 10 d。正常(NOR)组细胞培养基由 NeurobasalTM Plus 培养基、体积分数 2% 的 B-27TM Plus 添加物和体积分数 0.1% 的 DAPT 组成;实验(EXP)组细胞培养基由 NeurobasalTM Plus 培养基、体积分数 2% 的 B-27TM Plus 添加物、体积分数 0.1% 的 DAPT 和 0.75 mmol $\cdot \text{L}^{-1}$ VPA^[8] 组成;VPA+FH535(ANT)组细胞培养基由 NeurobasalTM Plus 培养基、体积分数 2% 的 B-27TM Plus 添加物、体积分数 0.1% 的 DAPT、0.75 mmol $\cdot \text{L}^{-1}$ VPA 和 FH535 拮抗剂构成。

2.2 神经干细胞的分离培养

取出生第 15 天的鼠脑组织,先用生理盐水冲洗至洗涤液澄清,再用体积分数 75% 的酒精洗涤,最后用生理盐水冲洗 3 次;将端脑快速解剖分离并转移至 50 mL 离心管中,用枪头吹至浑浊。加入完全培养液,2 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min,重复 2 次。向离心管中加入 1 mL 完全培养液,吹打至没有可见细胞团块;将细胞按照每 15 mL 1.0×10^7 个的密度接种于 T75 瓶中,置于细胞培养箱中培养。

2.3 神经干细胞传代

神经干细胞培养 7 d 后可以观察到神经球,将其收集至离心管中,离心弃上清,加入 Accutase 酶,重悬细胞球后,将离心管放置于恒温震荡箱中孵育 20 min。吹打细胞液至无肉眼可见的团块,向离心管中加入生理盐水使消化终止,3 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min,去上清,再加入完全培养液重悬,使沉淀分散为单细胞悬液。将细胞以每 15 mL 1.0×10^6 个的密度接种于 T75 瓶中,放置于培养箱中培养。

2.4 定向分化

用 Laminin 包被 24 孔板,置于培养箱内过夜,在接种细胞前,用磷酸缓冲液(PBS)洗涤 24 孔板。将第 2 代神经干细胞的神经球消化为单细胞,再用神经元分化培养基重悬细胞,按每孔 500 μL 4×10^4 个细胞接种于 24 孔板,放置于 37 $^{\circ}\text{C}$,体积分数 5% 的 CO_2 培养箱中培养。每隔 3 d 换液 1 次,换液采取半量换液原则,观察细胞状态诱导 10 d。

2.5 流式细胞术

将细胞固定、透化,然后用 Nestin,Pax6 单克隆抗体、小鼠 IgG1 同种型对照分别与体积分数 5% 的 BSA 以体积比 1:100 稀释。将一抗在冰上孵育 1 h 后,用 DyLight 488 偶联的山羊抗小鼠 IgG 二抗在冰上以 1:500 的稀释度对细胞进行染色 1 h。每个样品采集了 1×10^5 个细胞。

2.6 qRT-PCR

在培养 0 和 10 d 时,分别检测各组 *TUJ1*, *DCX* 和微管相关蛋白 2 (*MAP2*) 的 mRNA 相对表达量,检测各组 Wnt/ β -catenin 信号通路中关键分子 *Wnt-3 α* , *β -catenin*, *cyclin D1*, *p21* 的 mRNA 相对表达量。对 RNA 样品进行提取,使用微量分光光度计测量 RNA 浓度。对 RNA 进行纯化及反转录,结果采用 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 法进行相对定量。PCR 引物序列,如表 1 所示。表 1 中:*GAPDH* 为管家基因。

表 1 PCR 引物序列

Tab.1 Primer sequences of PCR

| 基因名称 | 引物序列 (5'-3') | 基因名称 | 引物序列 (5'-3') |
|---------------------------------|--|-----------------------------------|--|
| <i>TUJ1</i> | F:CGCCATGTTTCAGACGCAAG R:CTCGGACACCAGGTCGTTC | <i>β-catenin</i> | F:GACCACAAGCAGAGTGCTGA R:ACTCGGCTCTGTCAGGTGAG |
| <i>DCX</i> | F:GAGTGGGGCTTTCGAGTGAT R:TGGTGAACACAGCAACTT | <i>cyclin D1</i> | F:TGGAGCCCCTGAAGAAGAG R:AAGTGCCTTGTGCGGTAGC |
| <i>MAP2</i> | F:AAGTGGTGACTTGGCTCAGG R:GGGAGGATGGAGGAAGGTCT | <i>p21</i> | F:CTGCTCCCTTCTCAGAC R:TGAGGTAGGACCAGGAAACC |
| <i>Wnt-3α</i> | F:GCCGTCACATGCACCTCAA R:GCTCTGTGGCACCTTGAAG | <i>GAPDH</i> | F:AGGTTGTCTCCTGCGACTTCA R:TGGTCCAGGGTTTCTTACTCC |

2.7 免疫荧光染色

诱导 10 d 后,去除孔板中培养液,再用体积分数 4% 的多聚甲醛(PFA)固定 10 min,吸出,洗涤。加入体积分数 0.3% 的 Triton X-100,室温固定 10 min,吸出,洗涤。每孔加体积分数 3% 的 BSA 室温封闭 1 h;加入体积分数 3% BSA 稀释后的 TUJ1 抗体(体积比为 1:300)和 DCX 抗体(体积比为 1:300),对照组加入等量体积分数 3% 的 BSA,4 ℃ 孵育过夜。吸去一抗,洗涤;再加入体积分数 3% BSA 稀释后的山羊抗小鼠二抗-Cy3(体积比为 1:500),避光孵育 1 h,吸出,洗涤;加入 5 滴抗荧光淬灭剂(含 DAPI),室温避光放置 5 min,荧光显微镜观察拍照。

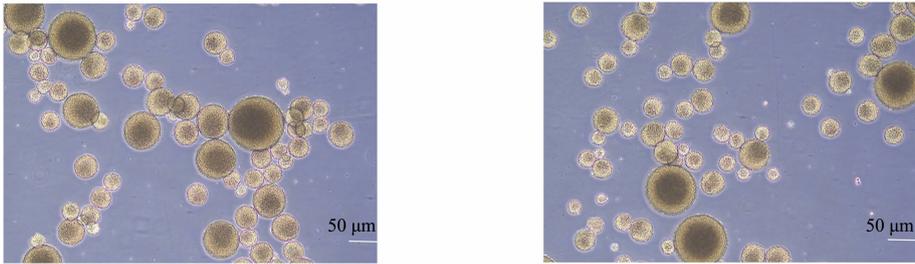
2.8 统计学分析

采用 Graphpad Prism 6 软件作图^[9],所有数据均用均值±标准差($\bar{x} \pm s$)表示。采用 SPSS 18.0 软件对原始数据进行正态性检验,并对服从正态分布的连续变量进行单因素方差分析;然后进行方差齐假设事后检验,对方差不齐的数据使用 Welch 校正的两独立样本 t 检验评价组间参数的显著性。检验水准 α 设为 0.05。与对照(CON)组相比,上标“*”“**”“***”分别表示 $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$;与正常(NOR)组相比,上标“#”“##”“###”分别表示 $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$;与实验(EXP)组相比,上标“\$”“\$\$”“\$\$\$”分别表示 $P < 0.05$, $P < 0.01$, $P < 0.001$ 。

3 实验结果与分析

3.1 神经干细胞分离培养及标志物检测

采用神经球技术从人神经组织中分离出神经干细胞,经体外培养并传代可以观察到细胞聚集生长,并形成球状(图 1)。



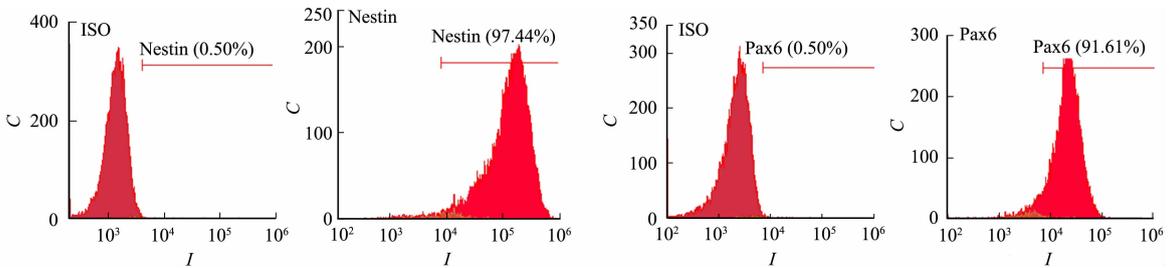
(a) 细胞第 1 次传代培养 7 d 后

(b) 细胞第 2 次传代培养 7 d 后

图 1 体外培养的 NSCs 形态

Fig. 1 Morphology of NSCs cultured *in vitro*

许多标志物与 NSCs 相关,这些标志物包括 SOX2^[10], Nestin^[11] 和 Pax6^[12] 等。使用单细胞分析鉴定 NSCs 标志物,通过采用流式细胞术对神经干细胞胞内标志物 Nestin 和 Pax6 进行检测。Nestin, Pax6 在神经干细胞内的表达峰图,如图 2 所示。图 2 中: C 为细胞计数; I 为荧光强度。由此可知,传代培养后,细胞悬液内具有高比例的 Nestin 和 Pax6 阳性细胞。



(a) Nestin

(b) Pax6

图 2 Nestin, Pax6 在神经干细胞内的表达峰图

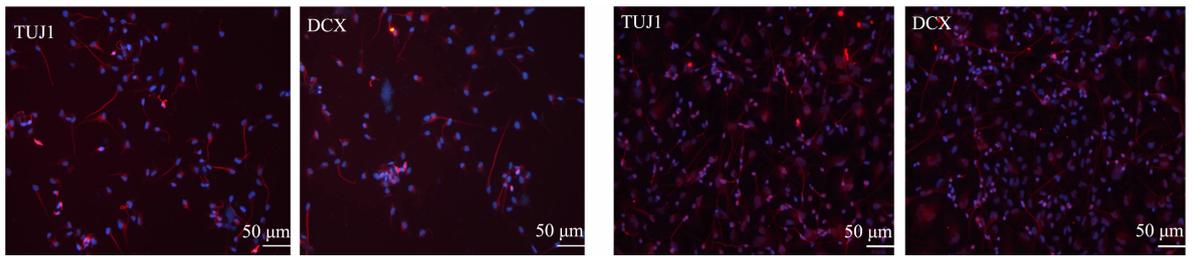
Fig. 2 Expression peak diagrams of Nestin, Pax6 in neural stem cells

3.2 诱导后神经元形态

通过种板使细胞呈贴壁生长,采用分化培养基对神经干细胞进行诱导,可观察到许多细胞表现出神

神经元形态^[13], 具有小的圆形细胞体, 延伸出长突起。

为了探究分化培养基能否将神经干细胞诱导为神经元, 对诱导后的细胞进行免疫荧光染色处理, 检测神经元特异性标志物 TUJ1, DCX。TUJ1, DCX 在体外分化细胞中的表达, 如图 3 所示。图 3 中: 红色为 TUJ1, DCX 免疫荧光染色; 蓝色为 DAPI 染色。NOR 组和 EXP 组诱导培养后的细胞 TUJ1 和 DCX 抗体染色的阳性率对比, 如图 4 所示。图 4 中: η 为免疫荧光阳性率。



(a) NOR 组

(b) EXP 组

图 3 免疫荧光检测神经干细胞的分化情况

Fig. 3 Immunofluorescence detection of differentiation of neural stem cells

由图 3, 4 可知: NOR 组和 EXP 组的 NSCs 都成功分化成神经元; 与 NOR 组相比, EXP 组培养的细胞, NSCs 分化的细胞表达神经元特异性标志物 TUJ1, DCX 更显著。结果表明, 分化培养基和丙戊酸都促进 NSCs 向神经元的分化, EXP 组中 NSCs 分化的神经元数量远高于正常组, 分化效果更佳, 模拟了体内神经干细胞向神经元进化的过程。

3.3 诱导前、后神经元标志物基因表达量变化

为了进一步检测 TUJ1, DCX, MAP2 在神经干细胞分化过程中的表达情况, 提取诱导 0 d 和 10 d 后细胞中的 RNA, 通过 qRT-PCR 检测, 得到神经元标志物基因 mRNA 相对表达量, 如图 5 所示。

由图 5 可知: 与 CON 组相比, NOR 组和 EXP 组中 TUJ1, DCX, MAP2 的 mRNA 在分化过程中表达水平都显著提高, 标志物基因表达水平的差异具有统计学意义 ($P < 0.001$); 与 NOR 组相比, EXP 组中 TUJ1, DCX 和 MAP2 的 mRNA 表达水平的差异具有统计学意义 ($P < 0.001$)。

3.4 Wnt/ β -catenin 信号通路中关键分子在分化中的表达

VPA 能够促进 NSCs 向神经元的分化, 为进一步探究 VPA 在 NSCs 分化过程中可能的影响机制, 选取 Wnt/ β -catenin 信号通路中关键分子 *Wnt-3 α* 和 β -catenin 为评价指标, 通过 RT-qPCR 检测 *Wnt-3 α* 和 β -catenin 的 mRNA 相对表达量, 结果如图 6(a), (b) 所示。由图 6(a) 可知: 与 CON 组相比, NOR 组和 EXP 组中 *Wnt-3 α* 的 mRNA 相对表达量均高于对照组; 与 NOR 组相比, EXP 组的 VPA 可以增加细胞中 *Wnt-3 α* 的 mRNA 相对表达量; 然而, 在加入 FH535 后, 与 EXP 组相比, ANT 组中 *Wnt-3 α* 的 mRNA 相对表达量下降。由图 6(b) 可知: 与 CON 组相比, NOR 组和 EXP 组中 β -catenin 的 mRNA 相对表达量明显提高; 与 NOR 组相比, EXP 组中 β -catenin 的 mRNA 表达提高更显著; 加入 FH535 拮抗剂后, ANT 组中 β -catenin 的 mRNA 表达下降, 但是表达水平仍然高于 CON 组。

此外, 实验还探究了丙戊酸对分化细胞中细胞周期蛋白 cyclin D1 表达的影响, 结果如图 6(c) 所示。由图 6(c) 可知: 与 CON 组相比, NSCs 分化后的细胞中 *cyclin D1* 的 mRNA 相对表达量显著提升 ($P < 0.001$), EXP 组中 *cyclin D1* 的 mRNA 相对表达量显著高于 NOR 组 ($P < 0.001$); 加入 FH535 拮抗剂

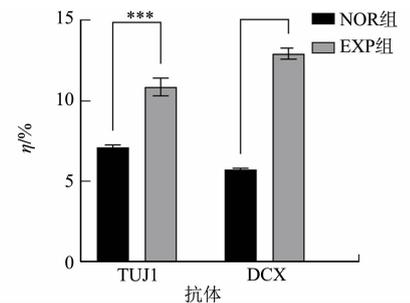
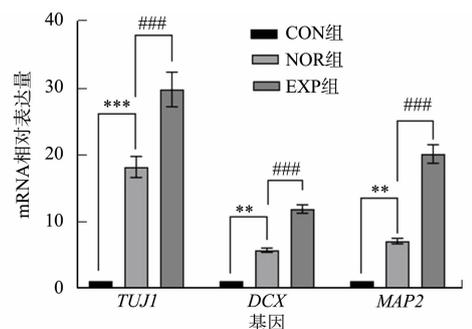


图 4 诱导培养后的细胞 TUJ1 和 DCX 抗体染色的阳性率

Fig. 4 Positive rates of TUJ1 and DCX antibody staining in cells after induction culture

图 5 神经元标志物基因 mRNA 相对表达量
Fig. 5 Relative mRNA expression of neuronal marker genes

后,ANT 组中 *cyclin D1* 的 mRNA 相对表达量下降($P < 0.001$),表达水平低于 EXP 组,但高于 CON 组。由图 6(d)可知:与 CON 组相比,NOR 组和 EXP 组中 *p21* 的 mRNA 相对表达量均显著下降,且与 NOR 组相比,EXP 组中 *p21* 的 mRNA 相对表达量更低,加入 FH535 拮抗剂后,ANT 组 *p21* 的 mRNA 相对表达量提高,但仍低于 CON 组。

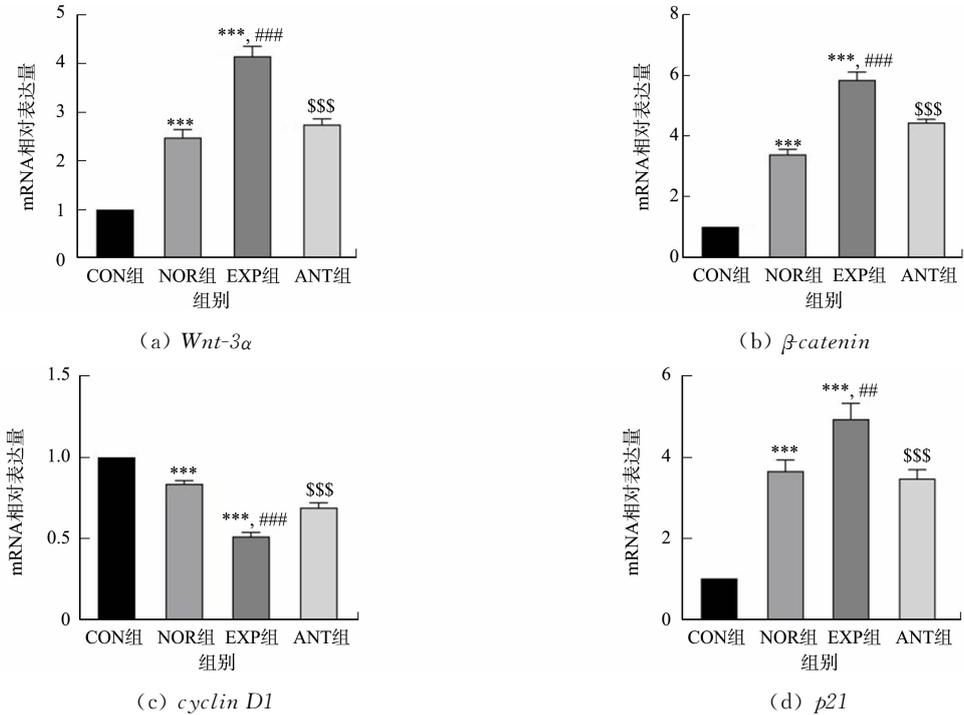


图 6 分化前、后 Wnt/ β -catenin 信号通路关键分子的 mRNA 相对表达量

Fig. 6 Relative mRNA expression of key molecules of Wnt/ β -catenin signaling pathway before and after differentiation

4 结论

神经干细胞存在于胚胎发育期间和成人中枢神经系统 (CNS) 的某些区域^[14],它们能够自我更新,同时保留对神经元、星形胶质细胞和少突胶质细胞 3 个主要中枢神经系统谱系的分化潜力^[15]。动物成人 NSCs 促进损伤或患病中枢神经系统的修复是一种很有前途的方法。从小鼠脑部分离神经干细胞,使用补充有生长因子的培养基分离和扩增 NSCs,流式细胞术结果显示,分离后传代培养的神经干细胞细胞表面标记物 Nestin, Pax6 表达显著,可得到高纯度的神经干细胞,再将神经干细胞通过分化培养基处理,诱导其向着神经元方向分化,模拟体内 NSCs 的分化进程。研究表明,无论是正常组还是实验组,NSCs 分化后细胞中 *TUJ1*, *DCX*, *MAP2* 的 mRNA 相对表达量均显著升高,且分化后细胞经免疫荧光染色呈现出显著神经元形态。

Wnt/ β -catenin 通路调节多种发育过程,如细胞增殖、细胞分化和细胞迁移等^[16]。在经典信号通路中,在 Wnt 配体存在的情况下,细胞表面的 Wnt 配体和受体结合后会诱散发散,导致复合物 (AXIN, GSK3 β , CK1, APC) 向受体聚集^[16]。随后, GSK3 β 的磷酸化和抑制确保了细胞膜 β -catenin 浓度的升高。细胞质中未磷酸化的 β -catenin 迁移到细胞核并聚集,与 T 细胞特异性因子 (TCF) 或淋巴细胞增强子结合因子 (LEF) 及共激活因子 (如 Pygopus 和 Bcl-9) 相互作用,触发 Wnt 靶基因 (如 *c-Myc*, *CDKN1A* 和 *cyclin D1*) 表达,导致 TCF/LEF 靶基因上调。具有高度多向性及多功能的超转录因子 (TF) *c-Myc* 通过靶向多达 15% 的基因来控制多种细胞功能,对细胞增殖、分化、凋亡和新陈代谢具有广泛影响^[17]。不同的细胞因子和激素可促进 *c-Myc* 蛋白水平的稳定,进而激活依赖于 *c-Myc* 的靶基因的核转录活化,例如,参与细胞周期调控的基因包括细胞周期蛋白 D1, D2, B1, 细胞周期蛋白依赖性激酶 4 (CDK4) 和 CDK 抑制剂 p21, p27^[17]。除此之外,显性活性形式的 β -catenin 的表达促进径向胶质细胞

(RG)自我更新和抑制中间祖细胞(IP)产生^[18]。IP 在中期神经发生期间产生大量的神经元,并且在晚期神经发生期间可能作为唯一的神经元生成祖细胞库^[19],所以 Wnt/ β -catenin 通路在调节 IP 行为中也起着必要的作用。Woodhead 等^[20]指出, β -catenin 的局灶性消融促进 RG 细胞周期退出和神经元分化。Kuwahara 等^[21]研究表明,Wnt/ β -catenin 通路通过 N-myc 和神经源性转录因子 Ngn1/2 促进神经元分化。总之,Wnt/ β -catenin 通路在神经细胞分化中发挥重要作用,通过对比发现,正常组与添加 VPA 组都会导致神经元分化,分化结束伴随着神经元细胞数量的增加及 Wnt-3 α 和 β -catenin 的表达量上升,但是与 CON 组相比,添加 VPA 组中分化产生的神经元数更多,Wnt-3 α 和 β -catenin 表达量也更高,然而,再加入拮抗剂后,这种作用明显减弱,Wnt-3 α 和 β -catenin 的表达量明显降低,因此认为 VPA 介导的神经元分化是由于激活 Wnt/ β -catenin 信号通路导致的。

细胞周期调节剂细胞周期蛋白依赖性激酶(CDK)主要存在于多个 4 级复合物中,每个复合物都含有 CDK、细胞周期蛋白(cyclin)、增殖细胞核抗原和 p21 蛋白。通过 p21 的分子克隆和第 4 级细胞周期激酶复合物的体外重建研究表明,p21 的过表达可以抑制 cyclin 或 CDK 家族成员的活性,进而抑制细胞的增殖,p21 是细胞周期蛋白激酶的通用抑制剂^[22]。在实验中,除了 Wnt-3 α 和 β -catenin 外,还伴随着 cyclin D1 和 p21 mRNA 相对表达量的变化,与对照组相比,分化后的细胞中 cyclin D1 的 mRNA 相对表达量上升;与正常组相比,添加 VPA 组 NSCs 分化后的细胞中 cyclin D1 的 mRNA 表达更为显著,但是 p21 的 mRNA 相对表达量下降;然而在加入拮抗剂后,呈现出相反的趋势。VPA 介导的神经元的分化可以通过激活 Wnt/ β -catenin 信号通路转录调控靶基因 *c-Myc* 和 *cyclin D1*,一方面,*c-Myc* 可以通过下调 p21 蛋白解除其过表达对细胞周期蛋白激酶的抑制作用,促进细胞分裂增殖;另一方面,Wnt/ β -catenin 信号通路也可以直接增强靶基因 *cyclin D1* 的 mRNA 相对表达量,最终促进 NSCs 细胞增殖和分化为神经元。

综上所述,VPA 介导 NSCs 分化为神经元的可能机制如下:VPA 先通过激活 Wnt/ β -catenin 信号通路,促进 Wnt/ β -catenin 信号通路中关键分子 β -catenin, Wnt-3 α 的 mRNA 表达水平,再通过调控 Wnt 靶基因 *c-Myc* 等,抑制 p21 蛋白的表达,促进细胞周期蛋白 cyclin D1 的表达,进而诱导 NSCs 的增殖分化。研究发现,经过 VPA 处理的培养基更容易诱导 NSCs 分化成神经元,实验探究了其可能的影响机制,为进一步探究 VPA 诱导后的神经元功能提供了可能,促进了神经元在再生医学到药物筛选等应用中的进一步研究。

参考文献:

- [1] LADRAN I, TRAN N, TOPOL A, *et al.* Neural stem and progenitor cells in health and disease[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews-Systems Biology and Medicine, 2013, 5(6): 701-715. DOI: 10.1002/wsbm.1239.
- [2] FERRARI D, BINDA E, De FILIPPIS L, *et al.* Isolation of neural stem cells from neural tissues using the neurosphere technique[J]. Current Protocols in Stem Cell Biology, 2010(15): 2D. 6. 1-2D. 6. 18. DOI: 10.1002/9780470151808.sc02d06s15.
- [3] NIE Luwei, YAO Dabao, CHEN Shiling, *et al.* Directional induction of neural stem cells, a new therapy for neurodegenerative diseases and ischemic stroke[J]. Cell Death Discovery, 2023, 9(1): 215. DOI: 10.1038/s41420-023-01532-9.
- [4] MARQUES B L, MACIEL G F, BRITO M J, *et al.* Regulatory mechanisms of stem cell differentiation: Biotechnological applications for neurogenesis[J]. Seminars in Cell & Developmental Biology, 2023, 144: 11-19. DOI: 10.1016/j.semcdb.2022.09.014.
- [5] CORSON T W, WOO K K, LI P P, *et al.* Cell-type specific regulation of calreticulin and Bcl-2 expression by mood stabilizer drugs[J]. European Neuropsychopharmacology, 2004, 14(2): 143-150. DOI: 10.1016/S0924-977X(03)00102-0.
- [6] YUAN Peixiong, HUANG Lidong, JIANG Yiming, *et al.* The mood stabilizer valproic acid activates mitogen-activated protein kinases and promotes neurite growth[J]. Journal of Biological Chemistry, 2001, 276(34): 31674-31683. DOI: 10.1074/jbc.M104309200.
- [7] HSIEH J, NAKASHIMA K, KUWABARA T, *et al.* Histone deacetylase inhibition-mediated neuronal differentiation

- of multipotent adult neural progenitor cells[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(47): 16659-16664. DOI: 10.1073/pnas.0407643101.
- [8] 王莉, 伍亚民, 刘媛, 等. 丙戊酸影响神经干细胞体外分化的量效和时效关系[J]. 现代生物医学进展, 2011, 11(12): 2263-2265. DOI: 10.13241/j.cnki.pmb.2011.12.021.
- [9] ZHUANG Kai, HUANG Changquan, LENG Lige, *et al.* Neuron-specific menin deletion leads to synaptic dysfunction and cognitive impairment by modulating p35 expression[J]. Cell Reports, 2018, 24(3): 701-712. DOI: 10.1016/j.celrep.2018.06.055.
- [10] ZHANG Juan, JIAO Jianwei. Molecular biomarkers for embryonic and adult neural stem cell and neurogenesis[J]. Biomed Research International, 2015, 2015: 727542. DOI: 10.1155/2015/727542.
- [11] PARK D, XIANG A P, MAO F F, *et al.* Nestin is required for the proper self-renewal of neural stem cells[J]. Stem Cells, 2010, 28(12): 2162-2171. DOI: 10.1002/stem.541.
- [12] NINKOVIC J, PINTO L, PETRICCA S, *et al.* The transcription factor Pax6 regulates survival of dopaminergic olfactory bulb neurons *via* crystallin α A[J]. Neuron, 2010, 68(4): 682-694. DOI: 10.1016/j.neuron.2010.09.030.
- [13] YAN Yasheng, ARZUA T, LOGAN S, *et al.* Isolation and culture of human-induced pluripotent stem cell-derived cerebral organoid cells[J]. Methods in Molecular Biology, 2022, 2454: 483-494. DOI: 10.1007/978-1-0716-1437-2_1.
- [14] GORDON J, AMINI S. General overview of neuronal cell culture[J]. Methods in Molecular Biology, 2021, 2311: 1-8. DOI: 10.1007/978-1-0716-1437-2_1.
- [15] LIU D D, HE J Q, SINHA R, *et al.* Purification and characterization of human neural stem and progenitor cells[J]. Cell, 2023, 186(6): 1179-1194. DOI: 10.1016/j.cell.2023.02.017.
- [16] STEINHART Z, ANGERS S. Wnt signaling in development and tissue homeostasis[J]. Development, 2018, 145(11): dev146589. DOI: 10.1242/dev.146589.
- [17] DANG C V. MYC on the path to cancer[J]. Cell, 2012, 149(1): 22-35. DOI: 10.1016/j.cell.2012.03.003.
- [18] WROBEL C N, MUTCH C A, SWAMINATHAN S, *et al.* Persistent expression of stabilized β -catenin delays maturation of radial glial cells into intermediate progenitors[J]. Developmental Biology, 2007, 309(2): 285-297. DOI: 10.1016/j.ydbio.2007.07.013.
- [19] NOCTOR S C, MARTÍNEZ-CERDEÑO V, KRIEGSTEIN A R. Contribution of intermediate progenitor cells to cortical histogenesis[J]. Arch Neurol, 2007, 64(5): 639-642. DOI: 10.1001/archneur.64.5.639.
- [20] WOODHEAD G J, MUTCH C A, OLSON E C, *et al.* Cell-autonomous β -catenin signaling regulates cortical precursor proliferation[J]. Journal of Neuroscience, 2006, 26(48): 12620-12630. DOI: 10.1523/JNEUROSCI.3180-06.2006.
- [21] KUWAHARA A, HIRABAYASHI Y, KNOEPFLER P S, *et al.* Wnt signaling and its downstream target N-myc regulate basal progenitors in the developing neocortex[J]. Development, 2010, 137(7): 1035-1044. DOI: 10.1242/dev.046417.
- [22] MOUSSA R S, PARK K C, KOVACEVIC Z, *et al.* Ironing out the role of the cyclin-dependent kinase inhibitor, p21 in cancer: Novel iron chelating agents to target p21 expression and activity[J]. Free Radical Biology and Medicine, 2019, 133: 276-294. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2018.03.027.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 刘源岗)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202404033



融合距离引导式 A* 算法与动态窗口法的 移动机器人路径规划

黄昱航^{1,2}, 李国刚^{1,2}, 焦启^{1,2}, 曹冬平^{1,2}

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 厦门市专用集成电路系统重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 为解决移动机器人路径规划中效率低下等问题, 提出一种距离引导式 A* 算法与动态窗口法的融合算法。在改进 A* 算法中, 引入双向搜索策略, 采用综合距离启发函数, 利用全局路径筛选策略对路径进行优化。在得到全局最优路径的基础上, 与动态窗口法结合, 实现移动机器人的动态避障。结果表明: 距离引导式 A* 算法和文中融合算法在路径长度、遍历节点数目和运行时间方面实现了显著提升, 能更好地满足移动机器人对路径规划的要求。

关键词: 移动机器人; 路径规划; A* 算法; 动态窗口法; 动态避障

中图分类号: TP 242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2025)01-0087-08

Path Planning for Mobile Robots by Integrating Distance-Guided A* Algorithm and Dynamic Window Approach

HUANG Yuhang^{1,2}, LI Guogang^{1,2}, JIAO Qi^{1,2}, CAO Dongping^{1,2}

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Xiamen City Key Laboratory of Application Specific Integrated Circuit System,
Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: To solve the problem of low efficiency in mobile robot path planning, a fusion algorithm combining a distance-guided A* algorithm with the dynamic window approach is proposed. In the improved A* algorithm, a bidirectional search strategy is introduced, and a comprehensive distance heuristic function is adopted, utilizing a global path filtering strategy to optimize the path. On the basis of obtaining the global optimal path, it is combined with the dynamic window approach to achieve dynamic obstacle avoidance for the mobile robot. The results show that the distance-guided A* algorithm and the proposed fusion algorithm achieve significant improvements in terms of path length, the number of traversed nodes, and running time, which better satisfies the requirements of mobile robot for path planning.

Keywords: mobile robot; path planning; A* algorithm; dynamic window approach; dynamic obstacle avoidance

随着智能科技和自动化技术的不断进步, 移动机器人的路径规划问题逐渐成为备受关注的研究热点。机器人路径规划中, Dijkstra 算法^[1] 虽然被广泛使用, 但在实际应用中可能会导致非最优路径的问题, 同时也会出现计算复杂度较高等问题。D* 算法^[2] 主要用于动态环境下的路径规划, 但在静态环境

收稿日期: 2024-04-11

通信作者: 李国刚(1973-), 男, 副教授, 博士, 主要从事电子信息方面的研究。E-mail: lgg@hqu.edu.cn.

中,其效率略逊于其他算法,且计算复杂度较高。快速扩展随机树(RRT)算法^[3]是一种基于采样的算法,其主要目标是快速探索,并找到一个近似的解决方案,但不能保证找到最短或最优路径。相较而言,A*算法^[4]通过选择合适的启发函数,能够在室内环境下高效地搜索并找到最佳路径,使其成为移动机器人全局路径规划的首选算法之一。动态窗口法(DWA)是一种常见的局部路径规划算法,根据机器人的运动学模型,对各个轨迹进行评分,从而选择最优路径,实现动态避障。

赵晓等^[5]巧妙地加入跳点搜索机制,实现长距离的跳跃,避免A*算法寻路过程中对冗余节点的计算,显著降低了计算的复杂度,使寻路更加快速和高效。Wang等^[6]提出一种指数加权方法,该方法充分考虑了路况的影响因素,并通过改进启发函数的改进,成功找到全局最优的路径。田海波等^[7]提出一种考虑转弯成本的估价评估搜索效率,得到相对较短的路径长度,但这种方法会导致节点扩展较多,消耗大量内存。李炯逸等^[8]提出一种针对A*算法在室内环境路径规划中存在问题的改进方法。辛煜等^[9]通过将A*算法的可搜索邻域扩展为无限个,缩短了路径长度,减少了拐点数量。王中玉等^[10]通过检测当前节点和其祖父节点之间的连线是否存在障碍物,消除路径中的不必要的节点,从而优化路径的长度和转折角度。姬鹏等^[11]通过优化搜索点、评价函数和拐点,提高检索速度和路径平滑度。程传奇等^[12]通过优化启发函数,选择关键点,减少路径规划的长度,并与动态窗口法结合,提高路径平滑性和避障能力。唐嘉宁等^[13]提出一种基于双向机制的改进A*算法,显著提高了路径规划的效率。基于此,本文提出一种距离引导式A*算法与动态窗口法相结合的融合算法^[14-16]。

1 A*算法概述

1.1 A*算法

A*算法结合贪心策略和Dijkstra算法的特点,使用一个评价函数,通过构建和更新开放列表及关闭列表,不断选择代价最低的节点作为当前节点,直到找到目标节点或满足停止条件为止。A*算法的代价函数是其核心要素,它能够有效地指导搜索过程朝着目标节点进行。A*算法的代价函数 $f(n)$ 可表示为

$$f(n) = g(n) + h(n). \quad (1)$$

式(1)中: n 为当前节点; $g(n)$ 为起点到当前节点 n 的实际代价; $h(n)$ 为启发函数,表示当前节点 n 到目标节点的估计代价。

1.2 改进A*算法

为了克服A*算法在搜索过程中出现的遍历节点过多、路径较长、效率较低等问题,采用双向搜索策略、综合距离启发函数及全局路径筛选策略来提升效率。

1.2.1 双向搜索策略 同时从起始节点和目标节点进行搜索,加速路径规划过程。双向搜索策略具体有以下7个步骤。

步骤1 在双向搜索策略中,需要初始化两个开放列表openlist1,openlist2,以及两个关闭列表closelist1,closelist2,分别用于存储待搜索的节点和已经搜索过的节点。

步骤2 将起始节点加入openlist1中,目标节点加入openlist2中。同时从起始节点和目标节点开始搜索,每次从两个开放列表中选择代价最小的节点进行正向搜索和反向搜索。在正向搜索中,需要更新正向搜索节点的代价函数,并判断最优节点是否在反向搜索的路径上。若存在,则找到路径;若不存在,则将节点加入closelist1。

步骤3 对当前最优节点进行处理。找出当前节点的连接点 m ,若节点 m 在closelist1中,则搜索下一个节点 m ;若节点 m 不在closelist1中,则判断节点 m 是否在正向搜索的openlist1中,若节点 m 不在openlist1中,则计算该点的实际代价 $g(m)$ 、估计代价 $h(m)$ 和代价函数 $f(m)$ 。

步骤4 节点 m 的父节点设为 n ,并将节点 m 按代价函数 $f(m)$ 从小到大的顺序添加到正向搜索的openlist1中。

步骤5 判断实际代价 $g(n)$ 加上父节点 n 到节点 m 的距离是否大于 $g(m)$ 。若大于 $g(m)$,则进一步搜索父节点 n 的下一连接点;若小于 $g(m)$,则重新计算 $g(m)$, $h(m)$, $f(m)$ 。直至与父节点 n 的所有连接点都已搜索完毕。

步骤 6 进行反向搜索, 步骤与正向搜索一致。

步骤 7 判断步骤 4, 5 的返回值, 若返回 openlist1 与 openlist2 列表均为空, 仍未到达目标节点, 则表示寻路失败; 若当起始节点和目标节点搜索队列中的某个节点在地图上相遇, 则找到一条从起始节点到目标节点的路径。此时, 可以根据相遇节点及其前驱节点, 回溯构造出完整的路径。

1.2.2 综合距离启发函数 首先, 综合距离启发函数在计算中进行对角线方向距离的调整, 通过引入一个额外的因子平衡直线和对角线移动的代价, 确保搜索路径更加均匀和平滑, 能够更好地引导搜索方向。然后, 引入动态权重来控制搜索速度。最后, 加入当前节点和目标节点的距离与起始节点和目标节点距离的比值, 进一步优化搜索的准确性。通过对启发函数的改进, 算法可以在不同情况下灵活地调整搜索速度和寻优性能, 从而找到最优解。

综合距离启发函数公式为

$$h(n) = 1.2 \times \omega(n) \times d(n) - u(n), \tag{2}$$

$$d(n) = [x(n) + y(n) + (\sqrt{2} - 2) \times \min_{x,y}], \tag{3}$$

$$x(n) = |x_g - x_n|, \tag{4}$$

$$y(n) = |y_g - y_n|, \tag{5}$$

$$\min_{x,y} = \min(|x_g - x_n|, |y_g - y_n|), \tag{6}$$

$$u(n) = \frac{\sqrt{(x_g - x_n)^2 + (y_g - y_n)^2}}{\sqrt{(x_g - x_s)^2 + (y_g - y_s)^2}}. \tag{7}$$

式(2)~(7)中: (x_s, y_s) 为起始节点坐标, (x_g, y_g) 为目标节点坐标; (x_n, y_n) 为当前节点坐标; 当 $d(n) > 5$ 时, $\omega(n) = 2.8$, 当 $d(n) \leq 5$ 时, $\omega(n) = 0.9$ 。

1.2.3 全局路径筛选策略 为了删除全局路径中产生的冗余拐点, 引入全局路径筛选策略, 可有效地去除冗余拐点, 从而提升路径规划的结果。优化后的路径, 如图 1 所示。图 1 中: A~K 为算法遍历的最优节点。

原始路径为 A-B-C-D-E-F-G-H-I-J-K, 优化后的路径为 A-E-F-I-K。全局路径筛选策略具体有以下 4 个步骤。

步骤 1 获取双向 A* 算法规划路径中的每个拐点坐标 $\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$, 将起始节点 $p_s(x_s, y_s)$ 加入拐点坐标集的首位, 把目标节点 $p_g(x_g, y_g)$ 加入拐点坐标集的末位, 得到所有关键节点, 并将其放入集合 $A\{p_s, p_1, p_2, p_3, \dots, p_n, p_g\}$ 。

步骤 2 建立一个空的集合 $B\{\text{Set}B\}$, 用于存放经过优化后的坐标点。

步骤 3 首先, 判断集合 A 中的首位坐标 p_s 与集合 A 中的末位坐标 p_g 形成的线段是否与障碍物相交; 若不相交, 则判断集合 A 中的首位坐标 p_s 与集合 A 中的倒数第 2 位坐标 p_n 形成的线段是否与障碍物相交; 若不相交, 则判断集合 A 中的首位坐标 p_s 与集合 A 中的倒数第 3 位坐标 p_{n-1} 形成的线段是否与障碍物相交。直到找到集合 A 中的首位坐标 p_s 与集合 A 中的某个坐标 p_x 形成的线段与障碍物不相交, 再将 p_s 加入集合 B 中, 并将集合 A 更新为 $\{p_x, \dots, p_n, p_g\}$ 。

步骤 4 将更新后的集合 A 重复步骤 3, 再次进行判断, 并持续更新集合 A, B。当集合 A 中的坐标数量为两个时, 将最后两个坐标加入集合 B。最后, 集合 B 为优化后的坐标点, 即优化后的路径。

路径优化策略中的线段相交检测采用向量叉积的性质进行判断, p_1, p_2 是拐点集中的两个坐标, p_3, p_4 是障碍物坐标集中的两个坐标。

判断线段是否相交的过程具体有以下 2 个步骤。

步骤 1 cp_1 是向量 $p_1 p_2$ 和向量 $p_1 p_3$ 的叉积; cp_2 是向量 $p_1 p_2$ 和向量 $p_1 p_4$ 的叉积; cp_3 是向量 $p_3 p_4$ 和向量 $p_3 p_1$ 的叉积; cp_4 是向量 $p_3 p_4$ 和向量 $p_3 p_2$ 的叉积。

步骤 2 若 $cp_1 \times cp_2 \leq 0$, 且 $cp_3 \times cp_4 \leq 0$, 说明拐点间形成的线段与障碍物点间形成的线段相交。

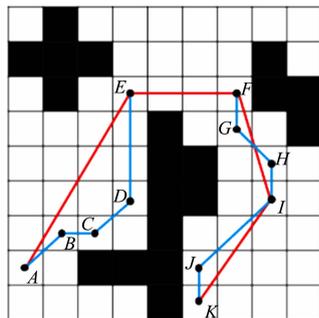


图 1 优化后的路径

Fig. 1 Optimized path

否则,说明拐点间形成的线段与障碍物点间形成的线段不相交。

2 动态窗口法

2.1 机器人运动学模型

机器人的运动学模型为

$$x(t+1) = x(t) + v_t \Delta t \cos \theta_t, \quad (8)$$

$$y(t+1) = y(t) + v_t \Delta t \sin \theta_t, \quad (9)$$

$$\theta(t+1) = \theta(t) + \omega_t \Delta t. \quad (10)$$

式(8)~(10)中: $x(t+1), y(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻的坐标; $\theta(t+1)$ 为 $t+1$ 时刻的偏航角; Δt 为时间间隔。

2.2 速度采样

速度采样依赖于机器人当前所处的状态,并需要考虑机器人自身约束及环境约束等参数。机器人的速度限制 v_m 为

$$v_m = \{(v, \omega) \mid v \in [v_{\min}, v_{\max}], \omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]\}. \quad (11)$$

式(11)中: v 为机器人的线速度; ω 为机器人的角速度; v_{\min}, v_{\max} 分别为机器人的最小线速度和最大线速度; $\omega_{\min}, \omega_{\max}$ 分别为机器人的最小角速度和最大角速度。

机器人电机加减速限制 v_d 为

$$v_d = \{(v, \omega) \mid v \in [v_n - a_{\max} \Delta t, v_n + a_{\max} \Delta t], \omega \in [\omega_n - \alpha_{\max} \Delta t, \omega_n + \alpha_{\max} \Delta t]\}. \quad (12)$$

式(12)中: a_{\max}, α_{\max} 分别为机器人的最大线加速度和最大角加速度; v_n, ω_n 分别为机器人当前的线速度和角速度。

机器人安全距离限制 v_s 为

$$v_s = \{(v, \omega) \mid v \in [v_{\min}, \sqrt{2 \text{dist}(v, \omega) a_{\max}}], \omega \in [\omega_{\min}, \sqrt{2 \text{dist}(v, \omega) \alpha_{\max}}]\}. \quad (13)$$

式(13)中: $\text{dist}(v, \omega)$ 为当前状态和障碍物之间的距离。

动态窗口速度限制 v_w 为

$$v_w = v_m \cap v_d \cap v_s. \quad (14)$$

2.3 评价函数

评价函数起到决策机器人运动路径的作用。改进后的评价函数 $G(v, \omega)$ 为

$$G(v, \omega) = \delta \text{head}(v, \omega) + \beta \text{dist}(v, \omega) + \gamma \text{vel}(v, \omega) + \eta \text{dist}_s(v, \omega). \quad (15)$$

式(15)中: $\text{head}(v, \omega)$ 为方位角的评价函数,是当前采样速度下产生的轨迹终点位置方向与目标点连线的夹角; $\text{dist}(v, \omega)$ 为障碍物距离的评价函数,是当前速度下对应轨迹与障碍物之间的距离; $\text{vel}(v, \omega)$ 为速度的评价函数,是当前轨迹的速度大小; $\text{dist}_s(v, \omega)$ 为当前轨迹与目标节点距离的评价函数; $\delta, \beta, \gamma, \eta$ 均为加权系数。

3 距离引导式 A* 算法与动态窗口法的融合

为了保证机器人路径规划的安全和效率,提出一种融合路径规划算法(文中融合算法),其流程图如图2所示。即将距离引导式 A* 算法与动态窗口法结合,使用距离引导式 A* 算法在已知的环境中规划出一条初始路径,在机器人沿着这条路径移动的过程中,动态窗口法会根据实时的传感器数据动态地调整机器人的速度和方向,以避免突然出现的未知障碍物。这种结合使机器人能够在保证路径规划效率的同时,具备一定的安全性,能够在复杂

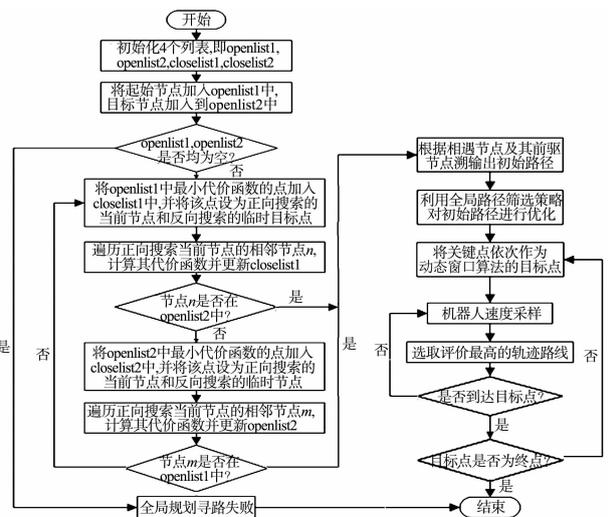


图2 文中融合算法流程图

Fig. 2 Flowchart of proposed fusion algorithm

环境中出现的未知障碍物。这种结合使机器人能够在保证路径规划效率的同时,具备一定的安全性,能够在复杂

多变的环境中灵活调整路径, 从而提高机器人的效率。

4 仿真结果与分析

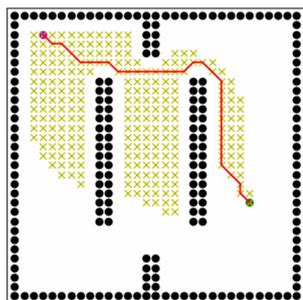
为了验证文中融合算法的有效性, 使用 i7-13700H, 16 GB 运行内存的笔记本电脑作为实验硬件设备, 并采用 Python 3.10 作为实验的软件运行环境。A* 算法采用 8 邻域搜索方法, 使用欧几里得距离作为启发函数来计算估计代价 $h(n)$ 。

为更好地体现距离引导式 A* 算法和动态窗口法的效果及地图适应性, 分别设计 4 种实验的地图环境, 并与 A* 算法和文献[12]A* 算法进行对比。融合算法评价函数的加权系数 $\delta=0.15, \beta=1.0, \gamma=1.0, \eta=2.0$ 。融合算法的仿真机器人运动学参数, 如表 1 所示。表 1 中: d_v 为速度分辨率; d_ω 为转速分辨率。不同的地图环境下全局路径规划仿真结果, 如图 3~6 所示。全局路径规划实验结果对比, 如表 2 所示。表 2 中: t 为运行时间; l 为路径长度; N 为遍历节点数。

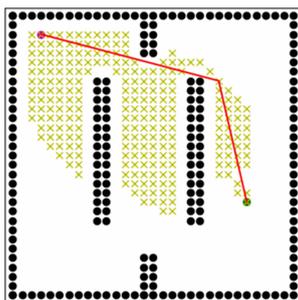
表 1 融合算法的仿真机器人运动学参数

Tab. 1 Simulation robots kinematic parameters of fusion algorithm

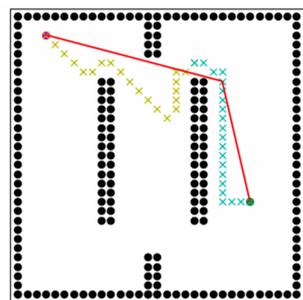
| 参数 | 取值 | 参数 | 取值 | 参数 | 取值 |
|---------------------------------|------|---------------------------------|------|-----------------------------|------|
| $v_{max}/m \cdot s^{-1}$ | 5.00 | $\alpha_{max}/rad \cdot s^{-2}$ | 0.70 | $d_v/m \cdot s^{-1}$ | 0.01 |
| $\omega_{max}/rad \cdot s^{-1}$ | 0.70 | $a_{max}/m \cdot s^{-2}$ | 0.20 | $d_\omega/rad \cdot s^{-1}$ | 0.02 |



(a) A* 算法



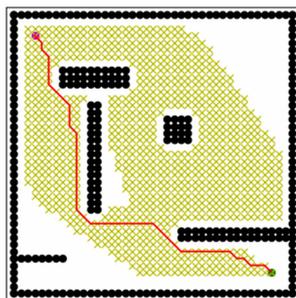
(b) 文献[12]A* 算法



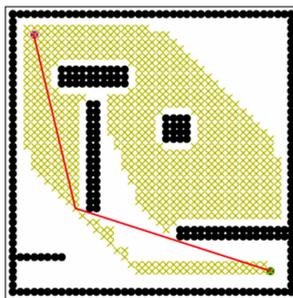
(c) 距离引导式 A* 算法

图 3 30×30 地图环境下全局路径规划仿真结果

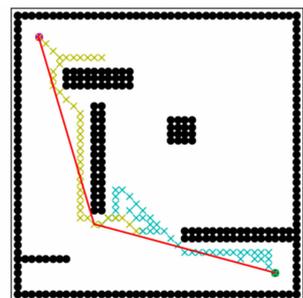
Fig. 3 Simulation results of global path planning in 30×30 map environment



(a) A* 算法



(b) 文献[12]A* 算法



(c) 距离引导式 A* 算法

图 4 40×40 地图环境下全局路径规划仿真结果

Fig. 4 Simulation results of global path planning in 40×40 map environment

表 2 全局路径规划实验结果对比

Tab. 2 Comparison of global path planning experimental results

| 地图大小 | 起点与终点坐标 | A* 算法 | | | 文献[12]A* 算法 | | | 距离引导式 A* 算法 | | |
|-------|----------------|-------|-------|--------------|-------------|-------|--------------|-------------|-------|--------------|
| | | t/s | l/m | $N/\text{个}$ | t/s | l/m | $N/\text{个}$ | t/s | l/m | $N/\text{个}$ |
| 30×30 | (3,28),(25,10) | 1.21 | 36.14 | 248 | 0.97 | 32.99 | 239 | 0.21 | 32.99 | 40 |
| 40×40 | (3,37),(37,3) | 3.98 | 59.21 | 867 | 3.29 | 55.12 | 700 | 0.26 | 55.09 | 82 |
| 50×50 | (3,47),(47,3) | 2.43 | 66.33 | 475 | 1.33 | 63.08 | 257 | 0.27 | 63.08 | 82 |
| 60×60 | (2,52),(57,4) | 9.88 | 80.15 | 1 206 | 5.15 | 77.73 | 815 | 0.23 | 75.85 | 92 |

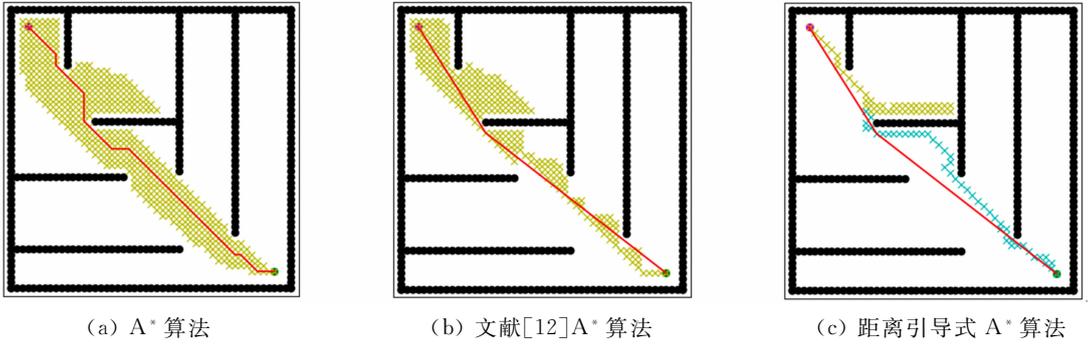


图 5 50×50 地图环境下全局路径规划仿真结果

Fig. 5 Simulation results of global path planning in 50×50 map environment

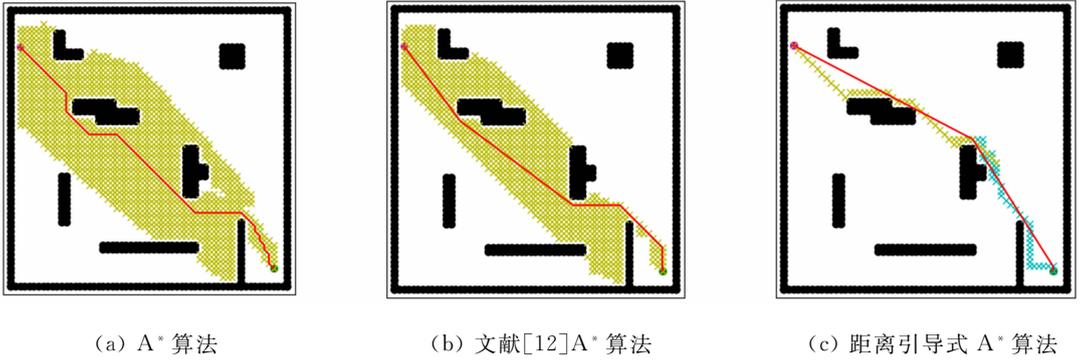


图 6 60×60 地图环境下全局路径规划仿真结果

Fig. 6 Simulation results of global path planning in 60×60 map environment

不同的地图环境下融合算法仿真结果,如图 7~10 所示。图 7~10 中:黄色区域表示正向遍历节点;青色区域表示反向遍历节点;红色线段表示规划的路径;黑色区域表示障碍物;紫色区域表示临时障碍物。

融合算法实验结果对比,如表 3 所示。由表 2,3 可知:距离引导式 A* 算法和文中融合算法在路径长度、遍历节点数目和运行时间方面均有提升,能更好地完成路径规划任务。

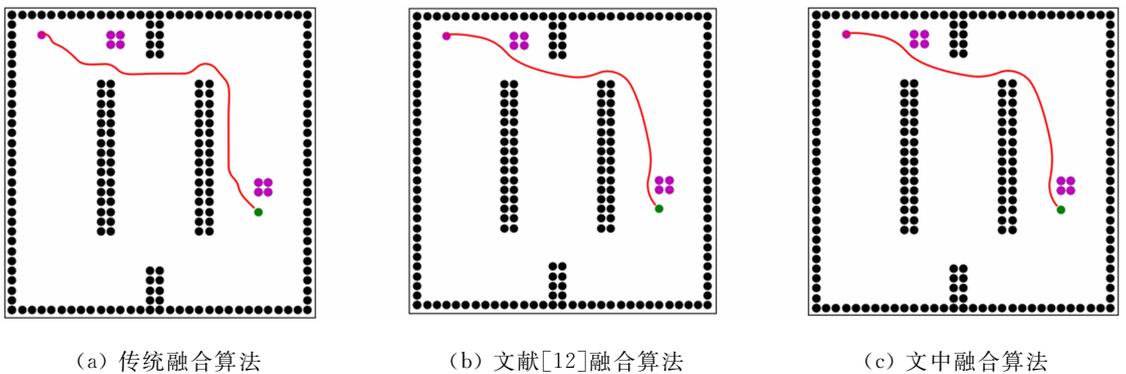


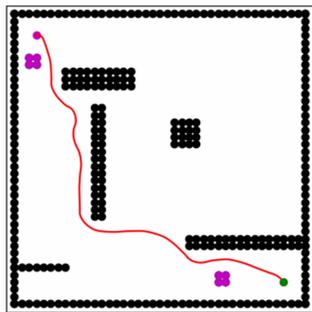
图 7 30×30 地图环境下融合算法仿真结果

Fig. 7 Simulation results of fusion algorithm in 30×30 map environment

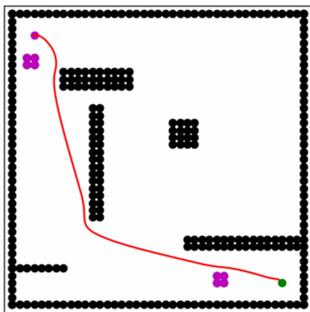
表 3 融合算法实验结果对比

Tab. 3 Comparison of fusion algorithm experimental results

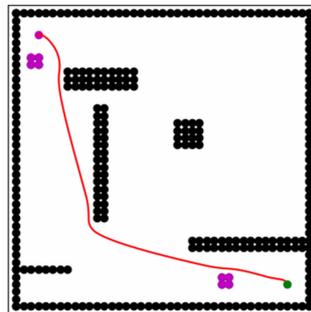
| 地图大小 | 起点与终点坐标 | 传统融合算法 | | 文献[12]融合算法 | | 文中融合算法 | |
|-------|----------------|--------|-------|------------|-------|--------|-------|
| | | t/s | l/m | t/s | l/m | t/s | l/m |
| 30×30 | (3,28),(25,10) | 130.73 | 34.95 | 40.37 | 33.74 | 34.70 | 33.68 |
| 40×40 | (3,37),(37,3) | 169.44 | 57.70 | 61.68 | 55.99 | 56.78 | 55.87 |
| 50×50 | (3,47),(47,3) | 190.65 | 65.16 | 75.23 | 64.25 | 65.45 | 64.22 |
| 60×60 | (2,52),(57,4) | 263.09 | 78.61 | 145.20 | 78.89 | 86.36 | 76.24 |



(a) 传统融合算法



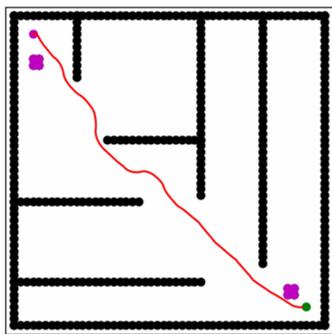
(b) 文献[12]融合算法



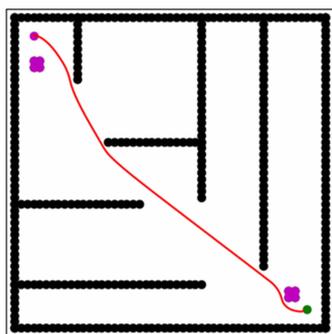
(c) 文中融合算法

图 8 40×40 地图环境下融合算法仿真结果

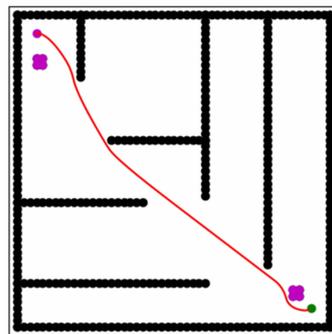
Fig. 8 Simulation results of fusion algorithm in 40×40 map environment



(a) 传统融合算法



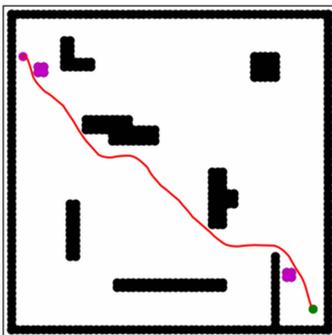
(b) 文献[12]融合算法



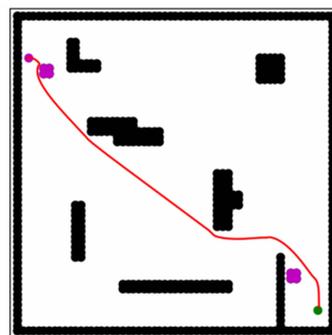
(c) 文中融合算法

图 9 50×50 地图环境下融合算法仿真结果

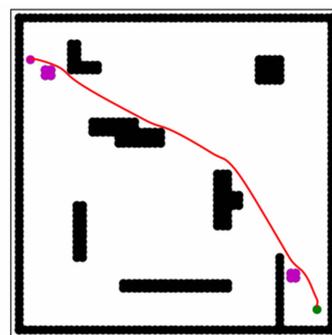
Fig. 9 Simulation results of fusion algorithm in 50×50 map environment



(a) 传统融合算法



(b) 文献[12]融合算法



(c) 文中融合算法

图 10 60×60 地图环境下融合算法仿真结果

Fig. 10 Simulation results of fusion algorithm in 60×60 map environment

5 结束语

路径规划技术在国家的无人系统领域具有重要应用价值,提升路径规划算法的性能对推动智能领域的发展具有关键意义。在全局路径规划中,采用双向搜索策略并提出一种综合距离启发函数,显著减少运行时间,利用全局路径筛选策略对初始路径进行优化,减少了拐点数和路径长度。在全局路径最优的基础上,采用动态窗口法进行局部路径规划,实现动态避障,并避免陷入局部最优解的情况。由实验结果可知,文中融合算法在路径长度、运行时间方面均有明显提升,能够更好地满足移动机器人对于路径规划的要求。

参考文献:

[1] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. Numerische Mathematik, 1959, 1(1): 269-

- 271, DOI:10.1007/BF01386390.
- [2] STENTZ A. Optimal and efficient path planning for partially known environments[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, IEEE Press, 2002:3310-3317. DOI:10.1109/ROBOT.1994.351061.
- [3] LAVALLE S M. Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning[J]. Research Report, 1998(7): 3632-3648.
- [4] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost path[J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(2): 100-107. DOI:10.1109/tssc.1968.300136.
- [5] 赵晓, 王铮, 黄程侃, 等. 基于改进 A* 算法的机器人路径规划[J]. 机器人, 2018, 40(6): 903-910. DOI: 10.13973/j.cnki.robot.170591.
- [6] WANG Xingdong, ZHANG Haowei, LIU Shuo. *et al.* Path planning of scenic spots based on improved A* algorithm [J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 1-7. DOI:10.1038/s41598-022-05386-6.
- [7] 田海波, 李陆军, 畅科剑, 等. 用于无人车路径规划的改进 A* 算法[J]. 现代制造工程, 2021(11): 63-68, 92. DOI: 10.16731/j.cnki.1671-3133.2021.11.009.
- [8] 李炯逸, 李强, 张新闻, 等. 移动机器人用改进的双向 A* 二次路径规划算法[J/OL]. 系统仿真学报: 1-11(2023-12-19)[2024-03-15]. <https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotat-XTFZ20231215007.htm>.
- [9] 辛煜, 梁华为, 杜明博, 等. 一种可搜索无限个邻域的改进 A* 算法[J]. 机器人, 2014, 36(5): 627-633. DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2014.0627.
- [10] 王中玉, 曾国辉, 黄勃, 等. 改进 A* 算法的机器人全局最优路径规划[J]. 计算机应用, 2019, 39(9): 2517-2522. DOI:10.11772/j.issn.1001-9081.2019020284.
- [11] 姬鹏, 张新元, 高帅轩, 等. 融合改进 A* 算法与动态窗口法的路径规划研究[J/OL]. 系统仿真学报: 1-11(2023-07-09)[2024-03-15]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.23-0619>.
- [12] 程传奇, 郝向阳, 李建胜, 等. 融合改进 A* 算法和动态窗口法的全局动态路径规划[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(11): 137-143. DOI: 10.7652/xjtub201711019.
- [13] 唐嘉宁, 彭志祥, 李孟霜, 等. 基于改进 A* 算法的无人机路径规划研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(8): 99-104. DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2211107.
- [14] 张旭, 程传奇, 郝向阳, 等. 一种兼顾全局与局部特性的机器人动态路径规划算法[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(3): 315-320. DOI: 10.3969/j.issn.1673-6338.2018.03.018.
- [15] 刘钰铭, 黄海松, 范青松, 等. 基于改进 A* -DWA 算法的机器人路径规划[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(1): 158-171. DOI: 10.13196/j.cims.2022.0634.
- [16] 邹文, 韩丙辰, 李鹏飞, 等. 融合改进 A* 算法和优化动态窗口法的路径规划[J]. 计算机集成制造系统, 2024, 30(1): 184-195. DOI: 10.13196/j.cims.2021.0498.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 陈婧)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202404034



机器学习模型交易中的数据 购买量与模型定价

林苗君¹, 羊梓敏², 陈斌²

(1. 华侨大学 财务处, 福建 泉州 362021;
2. 华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 基于数据边界的 Shapley 值总和构建成本分配问题, 采用截断蒙特卡洛的快速算法计算 Shapley 值, 证明了数据边界最优解存在性。针对不同版本模型定价场景, 定义模型经纪人收入最大化模型的定价问题, 并将收入最大化模型的定价问题转换为等价整数线性规划问题。运用公共数据集数值验证文中方法的正确性, 同时与已有的 4 种方法进行实验对比。实验结果表明: 文中方法可以提高模型经纪人收入和模型买方的购买比例。

关键词: 数据定价; 模型定价; Shapley 值; 整数规划

中图分类号: TP 274; F 49 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2025)01-0095-09

Data Purchase Volume and Model Pricing in Machine Learning Model Transactions

LIN Miaojun¹, YANG Zimin², CHEN Bin²

(1. Financial Department, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;
2. School of Mathematical Science, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Cost allocation problem based on Shapley value summation on data boundaries is constructed. Using the fast algorithm of the Truncated Monte Carlo, the existence of the optimal solution of the data boundary is proved. Aiming at pricing scenarios of different versions of the models, the pricing problem of the income maximizing model of the model broker is defined, and the pricing problem of the income maximizing model is transformed into an equivalent integer linear programming problem. By public datasets, our proposed method is validated its correctness, and the experiment is compared with four existing methods, simultaneously. The experimental results show that the proposed method can increase the income of the model broker and the purchase ratio of the model buyer.

Keywords: data pricing; model pricing; Shapley value; integer programming

在大数据时代, 数据的流通和共享已是大势所趋, 数据定价与交易方法亦受到了广泛关注^[1]。随着数据市场的发展, 交易的范畴超越了单纯的原始数据买卖, 涵盖了机器学习模型的交易。这一拓展使得数据分析能力有限的小微企业和个人用户能够便捷地获取模型服务成果, 而不是直接购入并处理原始数

收稿日期: 2024-04-11

通信作者: 陈斌(1984-), 男, 副教授, 博士, 主要从事运筹学与控制论的研究。E-mail: chenbinmath@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12071165); 福建省自然科学基金资助项目(2023J01124); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(ZQN-1102)

据。因此,模型定价成为数据定价研究的重要组成部分^[2]。

在数据市场的研究中,将数据视为商品并对其进行交易与定价的策略展现出丰富多样的面貌。基于数据定价的数据集(如 Dawex, Twitter, Bloomberg, Iota 和 SafeGraph 等)允许买家直接访问数据,允许买家根据数据的特征(信息熵水平^[3-4]、数据质量^[5-6]、新鲜度和实时性^[7-8]及数据集的大小^[9])进行估值。此外,竞争性数据交易模型^[10]巧妙融合了数据供应商的售卖意向与模型需求方的支付意愿的纳什均衡,从而确保各参与者的利润最优化。尽管如此,这些研究仍具有一定局限性,主要体现在数据价值评估效率的低维度依赖。基于此,本文对机器学习模型交易中的数据购买量与模型定价进行研究。

1 市场交易框架

三方交易系统中,数据提供者将数据记录提交给专业的模型经纪人。模型经纪人扮演着中介与增值的角色,运用先进的机器学习算法对数据进行深度训练,从而打造高性能的预测或分析模型。随后,精心训练出来的模型以服务的形式被精准对接至有特定需求的模型买方,实现数据价值转化与商业化。三方模型市场交易框架,如图 1 所示。

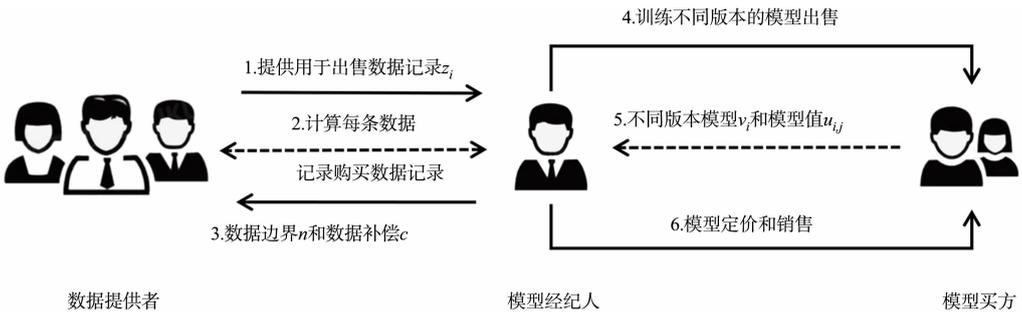


图 1 三方模型市场交易框架

Fig. 1 Three-parties model market transaction framework

1) 数据提供者。在数据供应链的初始环节,数据提供者提供经过预处理(如数据脱敏)的高质量数据集 D ,确保所有数据均源自合法途径,不含侵犯隐私内容,并且满足市场流通的法定标准。这一环节的合法性与合规性对于维护整个数据市场的健康秩序至关重要。

2) 模型经纪人。模型经纪人扮演着核心中介角色,通过收购数据集 D ,利用先进的技术手段对其进行深度挖掘,训练出多样化精度层次的机器学习模型。模型经纪人的成功取决于精准平衡成本控制与市场需求,通过高效数据利用和差异化模型服务最大化经济回报。

3) 模型买方。模型买方作为数据交易生态系统的终端用户,根据业务需求和预算限制,选择购买或订阅满足精度需求的模型服务。模型买方的选择偏好和反馈信息是推动模型迭代升级和市场动态调整的关键驱动力。

模型经纪人在市场初期面临的核心挑战可归结为成本效益的最大化,具体体现两方面的策略制定:一是高效筛选并购买最具性价比的数据集;二是精准定位市场,推出多样化精度层次的模型,并设定合理价格体系,以覆盖更广泛的用户需求。

2 最优数据边界的求解

当前数据市场的定价机制往往比较粗放,用户在交易中不得不承担购买完整数据集的成本,实际上,买家仅需利用其中一部分数据实现特定目标。这种定价机制忽略数据使用效用与购买成本之间的精细平衡,未能充分体现数据价值的差异化和用户的实际需求。在数据交易的决策过程中,过度累积数据并不是最优解,在数据规模与实际效用之间寻求最佳平衡点才是最优解^[11]。只有当边际收益高于边际成本时,才有必要购买数据;而相应的购买数据量称为数据边界 n 。在这个场景中,模型经纪人的首要任务是深入分析数据集的特性,识别最具预测价值或能显著提升模型性能的数据子集。

数据提供者搜集并整理数据记录,通过一系列预处理步骤(如数据清洗、脱敏处理等)确保数据质量

与合规性。完成这些准备后,数据被整合成具有特定主题或应用场景的数据集 D ,通过计算 Shapley 值,模型经纪人选择一个最优的数据边界 n 。在确定了所需数据后,模型经纪人利用选购的数据集训练多种机器学习模型,这些模型覆盖不同的复杂度和精度,旨在满足模型买方多样化的业务需求和预算限制。进入市场交易环节,模型经纪人将这些预训练好的模型推向市场,向模型买方展示。模型买方根据自身应用场景的具体要求(如预测精度、模型响应速度、成本预算等),选择最合适的模型进行购买。交易完成后,模型买方向模型经纪人支付模型费用 p_m ,作为模型使用权的交换。

2.1 Fast-TMC Shapley 算法

在机器学习中,衡量每个数据点对模型性能的贡献是一个关键问题。Shapley 值法是合作博弈论中的一种经典方法^[12]。在机器学习背景下,Shapley 值是考虑数据点在所有可能的数据子集中的边际贡献的平均值。在实际应用中,通常使用近似方法估计 Shapley 值,如蒙特卡罗截断采样 Shapley (TMC-Shapley)算法^[13]。TMC-Shapley 算法引入截断技巧和蒙特卡洛采样策略,缓解了传统 Shapley 值估计的计算复杂性问题。然而,TMC-Shapley 算法存在如下 3 个问题。

1) 计算成本高。尽管 TMC-Shapley 算法比 Shapley 值法有所优化,但计算量依然庞大,尤其是在处理大规模数据集时,所需的计算资源和时间可能依旧超出许多实际应用场景的承受范围。

2) 参数敏感度高。TMC-Shapley 算法的性能严重依赖截断阈值的选择和蒙特卡洛采样的次数,这两个参数的设置需要仔细调优。不当的参数设置可能导致评估结果偏差,影响数据价值判断的准确性。

3) 高维数据处理难。随着数据维度的增加,数据点之间的相互作用关系变得更加复杂,这直接加剧了 TMC-Shapley 算法的计算复杂度和内存需求,使其在高维数据集上的应用变得尤为困难。

Fast-TMC Shapley 算法,如图 2 所示。

Fast-TMC Shapley 算法着重解决了 Shapley 值法在大规模数据集应用中遇到的效率瓶颈。Fast-TMC Shapley 算法有 4 点核心改进。

1) 优化采样策略。Fast-TMC Shapley 算法通过更加智能化的采样方法,减少了对数据子集的盲目探索,确保每次采样都能有效增加信息量,避免无效或重复的工作,从而在保持评估精度的同时,大幅降低所需的样本数量。

2) 减少模型重训。通过高效的缓存和复用之前计算结果,即便是面对数据集的微小变化,也能够迅速定位并仅对必要部分进行重新评估,大大减少了计算资源的浪费。

3) 高效存储与计算。利用高级的数据结构和算法优化,Fast-TMC Shapley 算法能够有效管理计算过程中的中间结果,确保在处理大规模数据时的内存使用效率和计算速度。

4) 保证 Shapley 值估计的准确性。通过精心设计的近似策略和误差控制机制,即便在减少计算量的情况下,也能保持评估结果的可靠性和准确性。

2.2 数据边界建模

数据的 Shapley 值从大到小排序,从第一条数据开始购买,当购买第 n 条时,累计获得的总收益大于总成本,再根据模型买方的支付意愿(ω_{TP})构造收益的优化函数,从而找到数据边界 n 。

$S(sv_n)$ 表示前 n 个数据的 Shapley 总值,用来衡量第 n 个数据记录后模型可达到的准确度水平, $S(sv_n)$ 为

$$S(sv_n) = \sum_{i=1}^n sv_i \quad (1)$$

式(1)中: sv_i 为购买数据记录。

假设 $\omega_{TP} = \eta \cdot S(sv_n)$, $\eta \geq 0$, 效用函数满足 $\frac{dS(sv_n)}{dn} > 0$ (递增函数), $\frac{d^2 S(sv_n)}{d^2 n} \leq 0$ (边际效用递减)。

算法 1 快速蒙特卡洛采样方式计算 Shapley 值

输入: 训练数据集 $D = (x_i, y_i)_{i=1}^N$, 机器学习模型 A , 抽样次数 N , 评分指标 V

输出: 训练数据 \mathcal{Z}_i 的 Shapley 值 sv

1: 初始化 $sv_i = 0$ for $i = 1, \dots, N$

2: 处理数据集和标签 \mathcal{L} , 将 i 对应的数据点和标签移到数组的末尾

3: 对于 $n = 1$ 到 N 做:

3.1: 初始化类别数 $C = 1$

3.2: 当 $C < 2$ 时, 重复以下步骤:

3.2.1: 随机选择一个子集长度 S

3.2.2: 生成一个随机排列 P

3.2.3: 根据随机排列选取子集 X_R 和 Y_R

3.2.4: 计算子集中的唯一类别数 C

3.3: 使用子集训练模型并预测, 计算评价指标 V_C

3.4: 将 i 对应的数据点和标签添加到子集中, 形成新的集合 X_A 和 Y_A

3.5: 使用新的集合训练模型并预测, 计算评价指标 V_T

3.6: 计算并累加 Shapley 值的贡献, $sv_i += V_T - V_C$

4: 计算 sv 除以 N 得到最终的 Shapley 值

5: 返回 sv

图 2 Fast-TMC Shapley 算法

Fig. 2 Fast-TMC Shapley algorithm

由文献^[4-5]中的式(2),拟合 $S(sv_n)$ 和前 n 个数据记录之间的关联,显然方程满足效用函数的假设,即

$$S(sv_n) = \sum_{i=1}^n sv_i = \beta_1 - \beta_2 \cdot \exp(-\beta_3 \cdot n). \quad (2)$$

在估计不同数据集参数时,计算原始数据集的 sv_i ,并得到实验点 $(n_1, S(sv_1)), \dots, (n_N, S(sv_N))$ 。使用非线性最小二乘算法,通过最小化平方误差之和优化 $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)$,即

$$\min_{\beta_1, \beta_2, \beta_3} \sum_{i=1}^N (S(sv_i) - (\beta_1 - \beta_2 \cdot \exp(-\beta_3 \cdot n_i)))^2. \quad (3)$$

2.3 最优数据边界求解

假设 w 为模型买方的实际支付意愿, w' 为模型买方名义支付意愿。实际支付意愿取决于 sv_n , 并且有 $w = w' \cdot sv_n$ 。其中, w' 是一个正的随机变量,反映了模型买方的异质性。假设概率密度函数为 $f(w')$, 针对不同现实情况,提出了 w' 的两种分布。

1) 均匀分布。假设 W' 为模型买方的最大名义支付意愿, W 为模型买方的最大的实际支付意愿, 则 $W = W' \cdot sv_n$ 。对于一组模型买方, 其概率密度 $f(w')$ 遵循 $[0, W']$ 的均匀分布。累积分布函数 $F(p_m)$ 表示 $W' \leq p_m$ 的概率。因此, 购买概率 p_r 为

$$p_r = 1 - F(p_m) = W - p_m. \quad (4)$$

模型经纪人的利润 $\Pi(p_m, n)$ 可以表示为

$$\begin{aligned} \Pi(p_m, n) &= p_m \cdot m \cdot p_r - c \cdot n = p_m \cdot m \cdot (W - p_m) - c \cdot n = \\ &= p_m \cdot m \cdot (W' \cdot sv_n - p_m) - c \cdot n. \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)中: $sv_n = \sum_{i=1}^n sv_i = \beta_1 - \beta_2 \cdot \exp(-\beta_3 \cdot n)$, $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \geq 0$; $p_m \cdot m \cdot p_r - c \cdot n = p_m \cdot m \cdot (W - p_m)$ 为愿意支付不低于 p_m 价格的模型买方带来的收入; $c \cdot n$ 为支付给数据提供者的费用。

为获得最优的模型费用 p_m^* 和数据边界 n , 有

$$\left. \begin{aligned} \max_{p_m, n} \Pi(p_m, n) &= p_m \cdot m \cdot (W' \cdot S(sv_n) - p_m) - c \cdot n, \\ \text{s. t. } p_m &\geq 0, \quad n \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

方程(6)的约束条件确保了 p_m 和 n 的非负解, 有

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \Pi(p_m, n)}{\partial p_m} &= m \cdot (W' \cdot S(sv_n) - 2p_m), \\ \frac{\partial \Pi(p_m, n)}{\partial n} &= p_m \cdot m \cdot W' \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \exp(-\beta_3 \cdot n) - c. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

当 n 或 p_m 固定时, $\Pi(p_m, n)$ 的二阶导数为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \Pi(p_m, n)}{\partial^2 p_m} &= -2m < 0, \\ \frac{\partial^2 \Pi(p_m, n)}{\partial^2 n} &= -\beta_2 \cdot \beta_3^2 \cdot (p_m \cdot m \cdot W') \cdot \exp(-\beta_3 \cdot n) < 0. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

因此, 均匀分布的解是全局最优的。由 $\frac{\partial \Pi(p_m, n)}{\partial p_m} = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi(p_m, n)}{\partial n} = 0$, 可以得到 n^* 和 p_m^* 的解。

2) 由于许多自然现象遵循对数正态分布(LND)^[14], 因此, 使用对数正态分布模拟买方支付意愿比较符合实际。定义 w' 遵循 LND 分布, 其概率密度函数为 $f(w')$ 。累积分布函数 $F(p_m)$ 表示 $W' \leq p_m$ 的概率。因此, 购买概率为

$$p_r = 1 - F(p_m) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\ln p_m - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right) S(sv_n). \quad (9)$$

式(9)中: $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为度量理论中使用的误差函数。

模型经纪人的利润 $\Pi(p_m, n)$ 为

$$\Pi(p_m, n) = p_m \cdot m \cdot p_r - c \cdot n = p_m \cdot m \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\ln p_m - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right) \cdot S(sv_n) - c \cdot n =$$

$$\frac{p_m \cdot m}{2} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\ln p_m - \mu}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right) \cdot S(sv_n) - c \cdot n_o \quad (10)$$

式(10)中: $S(sv_n) = \sum_{i=n}^s sv_i = \beta_1 - \beta_2 \cdot \exp(-\beta_3 \cdot n)$, $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \geq 0$; $p_m \cdot m \cdot p_r$ 为从支付意愿不低于 p_m 的模型买方处所得到的收入。

通过调整 μ 和 σ , 可以灵活使用 LND 分布, 以适应不同情况, 假设 $\mu=0$ 和 $\sigma=1$, 优化问题为

$$\left. \begin{aligned} \max_{p_m, n} \Pi(p_m, n) &= p_m \cdot m \cdot \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\ln p_m}{\sqrt{2}} \right) \right) \cdot S(sv_n) - c \cdot n, \\ \text{s. t. } p_m &\geq 0, \quad n \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)中: 约束条件为 p_m 和 n 的解非负。

通过对 $\Pi(p_m, n)$ 关于 p_m 和 n 进行微分, 可以得到关于 $\frac{\partial \Pi(p_m, n)}{\partial p_m} = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi(p_m, n)}{\partial n} = 0$ 的具体形式。

$$\frac{\partial \Pi(p_m, n)}{\partial p_m} = \frac{m \cdot S(sv_n)}{2} \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\ln p_m}{\sqrt{2}} \right) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \exp \left(-\frac{\ln^2 p_m}{2} \right) \right), \quad (12)$$

$$\frac{\partial \Pi(p_m, n)}{\partial n} = \left(\frac{p_m \cdot m}{2} \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\ln p_m}{\sqrt{2}} \right) \right) \right) \cdot (\beta_2 \cdot \beta_3 \cdot \exp(-\beta_3 \cdot n)) - c. \quad (13)$$

$\Pi(p_m, n)$ 关于 p_m 或 n 的二阶导数是固定的且均为非正, 即

$$\frac{\partial^2 \Pi(p_m, n)}{\partial p_m^2} = -\frac{m \cdot S(sv_n)}{\sqrt{2\pi} \cdot p_m} \cdot (1 + \ln p_m) \cdot \exp \left(-\frac{\ln^2 p_m}{2} \right) < 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial^2 \Pi(p_m, n)}{\partial n^2} = -(\beta_2 \beta_3^2) \left(\frac{p_m \cdot m}{2} \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\ln p_m}{\sqrt{2}} \right) \right) \right) \cdot \exp(-\beta_3 \cdot n) < 0. \quad (15)$$

因此, LND 分布的解是全局最优的。通过解 $\frac{\partial \Pi(p_m, n)}{\partial n} = 0$ 和 $\frac{\partial \Pi(p_m, n)}{\partial p_m} = 0$, 得到 n^* 和 p_m^* 的解。

3 模型最优定价求解

3.1 模型定价模型的建模

为了实现促进双方更高效、互利的交易, 需要考虑到的 3 个关键定价因素。

1) 基于调研, 经纪人获得模型买方对各版本模型的具体购买意向, 包括他们对不同性能指标组合的偏好排序和每个版本的最高支付意愿。

2) 根据收集到的信息, 经纪人需制定精细的版本控制策略, 决定推出哪些精度或功能级别的模型。

3) 在构建模型的定价模型(RM)时, 经纪人还需考虑无套利原则, 即确保市场中不存在利用价格差异进行无风险获利的机会。这意味着同一模型或相近性能模型之间的定价必须合理衔接, 避免买方通过购买低价版本转售为高价版本, 从而赚取差价, 维护市场的稳定性和公平性。

模型经纪人使用数据集 D , 训练不同版本的模型 (v_1, v_2, \dots, v_N) 进行销售, 这些模型按准确度等级从低到高排序。假设模型买方对模型 v_i 感兴趣, 且其模型价值为 $u_{i,j}$, 模型买方仅在 $p(v_i) \leq u_{i,j}$ 时购买模型, 模型经纪人则获得收入 $p(v_i)$ 。RM 可以写为

$$\left. \begin{aligned} \max_{(p(v_1), p(v_2), \dots, p(v_N))} &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M p(v_i) \cdot I(p(v_i) \leq u_{i,j}), \\ \text{s. t. } p(v_i) &> p(v_j) \geq 0, \quad v_i \geq v_j, \\ p(v_i) + p(v_j) &\geq p(v_i + v_j), \quad \forall v_i, v_j \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式(16)中: $p(v_i)$ 为整数变量; $I(p(v_i) \leq u_{i,j})$ 是指示变量; 当 $p(v_i) \leq u_{i,j}$ 时, RM 为 1, 否则为 0; 约束条件确保了无套利属性。

3.2 模型最优定价求解

在求解式(16)时, 因存在指示函数 $I(p(v_i) \leq u_{i,j})$ 而难以求解, 需要将最大收益问题转换为等效的整数线性规划问题。首先, 使用 $0 \sim 1$ 整数变量 $x_{i,j,1}, x_{i,j,2}$ 和新增约束条件把非线性目标函数转化为了

一个二次整数线性规划问题。即

$$\left. \begin{aligned} \max_{\langle p(v_i), x_{i,j,1}, x_{i,j,2} \rangle} &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M p(v_i) \cdot x_{i,j,1}, \\ \text{s. t.} \quad &p(v_i) > p(v_j) \geq 0, \quad v_i \geq v_j, \\ &p(v_i) + p(v_j) \geq p(v_i + v_j), \quad \forall v_i, v_j \geq 0, \\ &x_{i,j,2} \cdot u_{i,j} \leq p(v_i) \leq x_{i,j,1} \cdot u_{i,j} + x_{i,j,2} \cdot L, \\ &x_{i,j,1} + x_{i,j,2} = 1, \\ &0 \leq x_{i,j,1}, x_{i,j,2} \leq 1. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式(17)中: L 为无穷大; $p(v_i), x_{i,j,1}, x_{i,j,2}$ 都是整数变量;第1,2个约束条件确保了市场的无套利特性,其余约束条件保证指示函数的转换; $u_{i,j}$ 为模型价值。

当 $x_{i,j,1}=1, x_{i,j,2}=0$ 时,目标函数变为 $p(v_i)$,第3个约束条件变为 $0 \leq p(v_i) \leq u_{i,j}$,这意味着模型 v_i 的价格低于其模型价值,模型买方会购买此模型,模型经纪人获得收入 $p(v_i)$ 。

当 $x_{i,j,1}=0, x_{i,j,2}=1$ 时,目标函数变为0,第3个约束条件变为 $u_{i,j} \leq p(v_i)$,这意味着模型 v_i 的价格高于其模型价值,模型买方不会购买。

由于目标函数是0~1整数变量的特性,将二次线性规划转换为一次线性规划问题,即

$$\left. \begin{aligned} \max_{\langle p(v_i), x_{i,j,1}, x_{i,j,2}, y_{i,j} \rangle} &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M y_{i,j}, \\ \text{s. t.} \quad &p(v_i) > p(v_j) \geq 0, \quad v_i \geq v_j, \\ &p(v_i) + p(v_j) \geq p(v_i + v_j), \quad \forall v_i, v_j \geq 0, \\ &x_{i,j,2} \cdot u_{i,j} \leq p(v_i) \leq x_{i,j,1} \cdot u_{i,j} + x_{i,j,2} \cdot L, \\ &x_{i,j,1} + x_{i,j,2} = 1, \\ &0 \leq x_{i,j,1}, x_{i,j,2} \leq 1, \\ &y_{i,j} \leq x_{i,j,1} \cdot L, \\ &y_{i,j} \leq p(v_i), \\ &y_{i,j} \geq p(v_i) - L \cdot (1 - x_{i,j,1}), \\ &y_{i,j} \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式(18)中: $p(v_i), x_{i,j,1}, x_{i,j,2}, y_{i,j}$ 都是整数变量;前两个约束条件保障了市场无套利特性,第3~5个约束条件保证指示函数的转换,而其他约束条件项则负责ILP的转换。

当 $x_{i,j,1}=1$ 时,约束条件 $y_{i,j} \leq x_{i,j,1} \cdot L$ 变为 $y_{i,j} \leq L$,约束条件 $y_{i,j} \geq p(v_i) - L \cdot (1 - x_{i,j,1})$ 变为 $y_{i,j} \geq p(v_i)$ 。同时,约束条件确保 $y_{i,j} \leq p(v_i)$ 。因此,3个约束条件的结合确保了 $y_{i,j} = p(v_i)$ 。目标函数变为 $p(v_i)$,模型买方会购买此模型。

当 $x_{i,j,1}=0$ 时,约束条件 $y_{i,j} \leq x_{i,j,1} \cdot L$ 变为 $y_{i,j} \leq 0$,约束条件 $y_{i,j} \geq p(v_i) - L \cdot (1 - x_{i,j,1})$ 变为 $y_{i,j} \geq -L$ 。同时,约束条件确保 $y_{i,j} \geq 0$ 。因此,3个约束条件的结合确保了 $y_{i,j} = 0$ 。目标函数变为0,模型买方不会购买此模型。

以上过程将收入最大化问题转换为ILP问题(简称为RM-ILP),可以获得提高模型经纪人收入的定价结果。

4 实验结果与分析

4.1 数据边界实验

数据边界实验采用糖尿病数据集和台湾省台北市房地产数据集两个公共数据集^[15]。糖尿病数据集中共有768条数据,每条数据有8个特征和1个对应的标签。糖尿病数据是标签数据,首先,使用Fast-TMC Shapley算法计算 sv_i ,即第 i 条数据的Shapley值,然后归一化 sv_i ;接着,从大到小排序 sv_i 并累加,获得 $S(sv_i)$ 。用最小均方误差的非线性最小二乘法进行拟合,拟合系数 $\beta_1 = 1.072, \beta_2 = 1.025$ 和 $\beta_3 = 0.034$ 。糖尿病数据集Shapley值,如图3所示。

房地产估值的市场历史数据集来自台湾省新北市新店区,一共有 414 条数据,每条数据有 6 个特征和 1 个对应的单位面积房价。评价函数是 R^2 , R^2 是衡量模型解释的变异量的比例, R^2 在 $0 \sim 1$ 之间, R^2 越接近 1, 表示模型的拟合效果越好。最小均方误差下,非线性最小二乘法拟合系数 $\beta_1 = 1.041$, $\beta_2 = 0.925$ 和 $\beta_3 = 0.073$ 。台北市房地产数据集 Shaple 值,如图 4 所示。

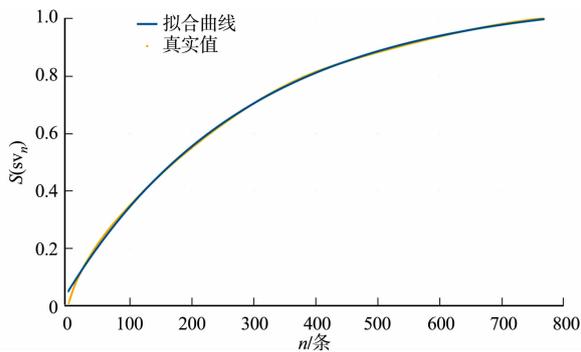


图 3 糖尿病数据集 Shapley 总值

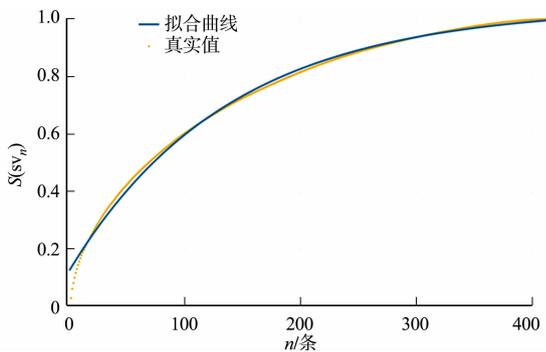


图 4 台北市房地产数据集 Shapley 总值

Fig. 3 Gross Shapley value of diabetes data

Fig. 4 Gross Shapley value of Taipei City real estate data

4.2 模型定价实验

针对不同的情境和目标,选择下列 4 种不同方法进行对比分析^[16]。

1) Lin 方法。该方法较为简单直观,通过确定模型价值的最低点和最高点,构建线性函数,估算价格。该方法适用于价值与价格呈线性关系、且市场对价格敏感度相对稳定的场景。

2) Average 方法。该方法通过市场调研收集的数据,计算所有调查样本中模型价值的平均数作为定价基准。该方法试图平衡高估与低估的风险,适用于追求稳定和市场接受度优先的场景。

3) DPP 方法。该方法是一种更灵活和动态的方法,依据市场反馈、库存情况、竞争对手价格等多种因素,通过动态规划算法为不同模型版本设定价格,旨在实现利润最大化^[17]。

4) DPP+方法。作为 DPP 方法的升级版,DPP+方法在动态规划的基础上,进一步扩展了解决方案空间,考虑了更多的变量和组合,以期找到更精准的最优定价策略^[18]。

凹性预期价格和正态分布需求下的 $p(v_i)$,如图 5 所示。图 5 中: u 为正态分布需求。凸性预期价格和正态分布需求下的 $p(v_i)$,如图 6 所示。

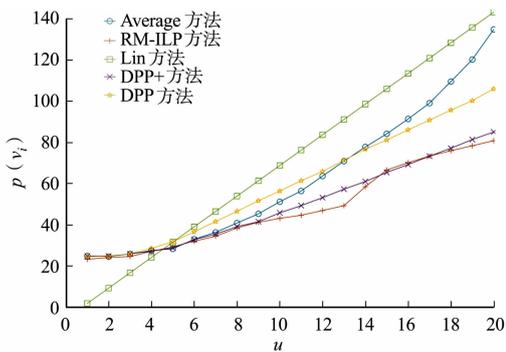


图 5 凹性预期价格和正态分布需求下的 $p(v_i)$

Fig. 5 $p(v_i)$ of concave expected price and normally distributed demand

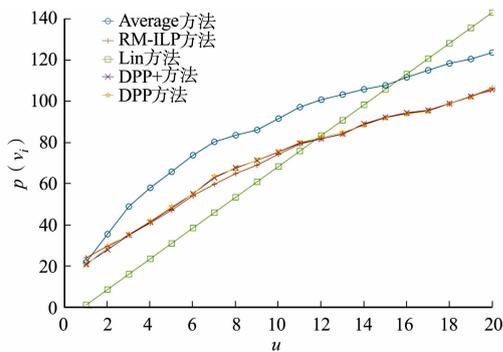


图 6 凸性预期价格和正态分布需求下的 $p(v_i)$

Fig. 6 $p(v_i)$ of convex expected price and normally distributed demand

凹性预期价格和正态分布需求的收入总值,如图 7 所示。图 7 中: p_i 为收入总值。凸性预期价格和正态分布需求的收入总值,如图 8 所示。由图 7,8 可知:相比于其他 4 种方法,RM-ILP 方法在收入增益方面的表现最为显著,最高可达 6.67 倍;RM-ILP 方法在凹性预期价格上相比于 DPP 方法和 DPP+方法有更优的表现,模型经纪人收入分别增长了 23% 和 3%;在凸性预期价格上相比于 DPP 方法和 DPP+方法,模型经纪人收入分别增长了 1%,3%。

综上所述,RM-ILP 方法在数据市场中的模型定价和策略优化提供更优化的解决方案。其优势主要体现在以下 5 个方面。

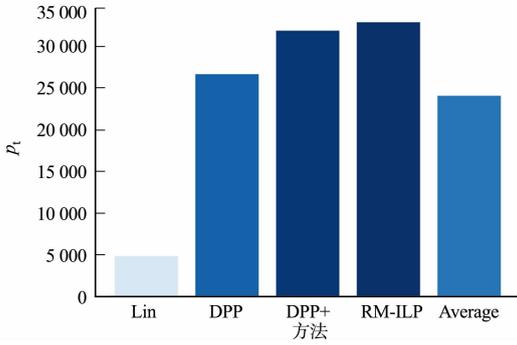


图7 凹性预期价格和正态分布需求的收入总值

Fig. 7 Concave expected price and total revenue of normally distributed demand

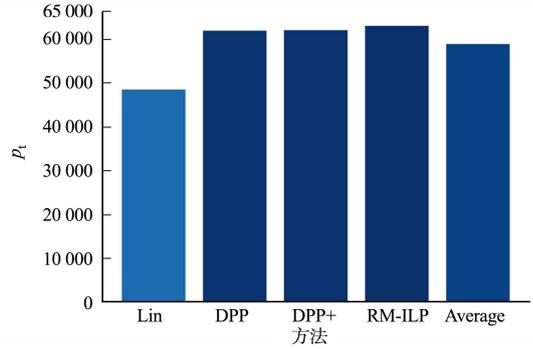


图8 凸性预期价格和正态分布需求的收入总值

Fig. 8 Convexity expected price and total revenue of normally distributed demand

1) 精细化价格设定。RM-ILP 方法能够基于复杂的市场需求模型,精确调整不同模型版本的价格,确保每个版本都能在满足市场需求的同时,使利润最大化。这种精细化定价策略优于简单的线性或平均值定价法,因为它能够更准确地反映市场细分和买方偏好。

2) 优化收入增益通过优化函数。RM-ILP 方法能够综合考虑各种定价和销售策略对总收入的影响,包括版本控制策略和市场需求的动态变化,从而实现收入的最大化。这种方法确保了模型经纪人在成本控制和市场需求之间找到最佳平衡点。

3) 确保可负担性比率。在追求利润最大化的同时, RM-ILP 方法还能够通过优化过程考虑模型买方的支付能力和意愿,确保定价策略不会因为过高而排斥大量潜在买家,维持一个健康的市场可接受度和客户基础。

4) 适应动态市场环境。面对快速变化的市场环境和买方偏好, RM-ILP 方法的动态调整能力至关重要。它能够及时反应市场信息,调整模型版本的供应、价格,甚至开发新的模型版本,以适应市场需求的变化,展现出了极强的灵活性和适应性。

5) 确保遵守市场规则。在构建优化模型时, RM-ILP 方法充分考虑了数据市场的特性和规则(如版本控制和无套利原则),确保了定价策略的合法性和市场公平性,防止了市场操纵和不正当竞争行为。

5 结论

1) 精细化数据价值评估。通过先进的 Fast-TMC Shapley 算法,实现了对数据点贡献的精细化评估,为数据的定价与交易提供了科学依据。

2) 高效资源分配。数据边界的确定帮助模型经纪人实现资源的高效配置,避免了不必要的数据购置成本,提高了数据利用效率。

3) 动态定价策略。基于 RM-ILP 的模型定价优化,不仅考虑了买方的偏好和支付能力,还确保了市场规则的遵守,提高了模型产品的市场竞争力和接受度。对不同真实数据集的数据边界进行了数值研究,验证了最优数据边界的存在性。与其他 4 种方法相比, RM-ILP 方法在模型经纪人收入最大化问题的求解中展现了明显优势。

通过应用 RM-ILP 方法,模型经纪人不仅能够更深入地理解模型买方的购买偏好和支付意愿,还能制定出更贴合市场需求、更符合买方行为习惯的定价策略,促进了数据市场的健康发展,通过提高数据和模型交易的透明度、效率和公平性,吸引更多参与者,推动数字经济的繁荣。

参考文献:

- [1] SONG Jie, HE Guannan, WANG Jianxiao, *et al.* Shaping future low-carbon energy and transportation systems digital technologies and applications[J]. *Energy*, 2022, 1(3): 285-305. DOI:10.23919/IEN.2022.0040.
- [2] PEI Jian. A survey on data pricing: From economics to data science[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2022, 34(10): 4586-4608. DOI:10.1109/TKDE.2020.3045927.

- [3] LI Xijun, YAO Jianguo, LIU Xue, *et al.* A first look at information entropy-based data pricing[C]// Proceedings of the 37th International Conference on Distributed Computing Systems. Atlanta: IEEE Press, 2017; 2053-2060. DOI: 10.1109/ICDCS.2017.45.
- [4] SHEN Yuncheng, GUO Bing, SHEN Yan, *et al.* A pricing model for big personal data[J]. Tsinghua Science and Technology, 2016, 21(5): 482-490. DOI: 10.1109/TST.2016.7590317.
- [5] YU Haifei, ZHANG Mengxiao. Data pricing strategy based on data quality[J]. Computers & Industrial Engineering, 2017, 112: 1-10. DOI: 10.1016/j.cie.2017.08.008.
- [6] YANG Jian, ZHAO Chongchong, XING Chunxiao, *et al.* Big data market optimization pricing model based on data quality[J]. Complexity, 2019(2): 1-10. DOI: 10.1155/2019/5964068.
- [7] ZHANG Meng, ARAFA A, HUANG Jianwei, *et al.* Pricing fresh data[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(5): 1211-1225. DOI: 10.1109/JSAC.2021.3065088.
- [8] ZHANG Meng, ARAFA A, HUANG Jianwei, *et al.* How to price fresh data[C]// Proceedings of the 2019 International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks. Avignon: IEEE Press, 2019: 1-8. DOI: 10.23919/WiOPT47501.2019.9144091.
- [9] NIYATO D, ALSHEIKH M A, WANG Ping, *et al.* Market model and optimal pricing scheme of big data and internet of things (IoT)[C]// Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Communications. Malaysia: IEEE Press, 2016: 1-6. DOI: 10.1109/ICC.2016.7510922.
- [10] OH H, PARK S, LEE G, *et al.* Competitive data trading model with privacy valuation for multiple stakeholders in IoT data markets[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(4): 3623-3639. DOI: 10.1109/JIOT.2020.2973662.
- [11] TIAN Yingjie, DING Yurong, FU Saiji, *et al.* Data boundary and data pricing based on the shapley value[J]. IEEE Access, 2022, 10: 14288-14300. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3147799.
- [12] GHORBANI A, ZOU J. Data shapley: Equitable valuation of data for machine learning[C]// Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning. California: PMLR Press, 2019: 2242-2251. DOI: 10.48550/arXiv.1904.02868.
- [13] CHEN Lingjiao, KOUTRIS P, KUMAR A. Towards model-based pricing for machine learning in a data marketplace [C]// Proceedings of the 2019 International Conference on Management of Data. Amsterdam: ACM Press, 2019: 1535-1552. DOI: 10.1145/3299869.3300078.
- [14] ALBERINI A. Efficiency vs bias of willingness-to-pay estimates: Bivariate and interval-data models[J]. Journal of Environmental Economics and Management, 1995, 29(2): 169-180. DOI: 10.1006/jeem.1995.1039.
- [15] YEH I, HSU T. Building real estate valuation models with comparative approach through case-based reasoning[J]. Applied Soft Computing, 2018, 65: 260-271. DOI: 10.1016/j.asoc.2018.01.029.
- [16] DONG Xin, SAHA B, SRIVASTAVA D. Less is more: Selecting sources wisely for integration[J]. VLDB Endowment, 2012, 6(2): 37-48. DOI: 10.14778/2535568.2448938.
- [17] LIU Jinfei, LOU Jian, LIU Junxu, *et al.* Dealer: An end-to-end model marketplace with differential privacy[J]. VLDB Endowment, 2021, 14(6): 957-969. DOI: 10.14778/3447689.3447700.
- [18] JIA Ruoxi, DAO D, WANG Boxin, *et al.* Efficient task-specific data valuation for nearest neighbor algorithms[J]. VLDB Endowment, 2019, 12(11): 1610-1623. DOI: 10.14778/3342263.3342637.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 黄心中)



应用重心插值的 Burgers 方程数值解法

滕宇航, 赖艺颖, 黄浪扬

(华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 利用重心插值构造求解 Burgers 方程的无网格数值方法。在时间方向用 Crank-Nicolson 差分法对方程进行离散, 在空间方向用重心插值切比雪夫配点法逼近函数本身及其空间导数。对全离散数值格式进行相容性分析。数值算例表明: 与经典的有限差分方法比较, 重心插值配点法用较少的节点就能达到较高的精度。

关键词: Burgers 方程; 重心插值配点法; Crank-Nicolson 差分法; 相容性分析

中图分类号: O 241.82

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)01-0104-09

Numerical Solution Method of Burgers Equation Using Barycentric Interpolation

TENG Yuhang, LAI Yiyang, HUANG Langyang

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

Abstract: The meshless numerical method of Burgers equation is solved using barycentric interpolation construction. The equation is discretized using the Crank-Nicolson difference method in the time direction. The function is approximated to itself and so is its spatial derivative using barycentric interpolation Chebyshev collocation method in spatial direction. The compatibility analysis of the fully discrete numerical value scheme is performed. Numerical experiments show that, compared with the classical finite difference method, the barycentric interpolation collocation method can achieve higher accuracy with fewer nodes.

Keywords: Burgers equation; barycentric interpolation collocation method; Crank-Nicolson difference method; compatibility analysis

Burgers 方程是一类描述对流与扩散相互作用的非线性偏微分方程^[1], 是 Navier-Stokes 方程中忽略压力项后的简化形式。考虑如下 Burgers 方程, 即

$$\left. \begin{aligned} u_t + u \cdot \nabla u &= v \Delta u, & (X, t) \in \Omega \times [0, T], \\ u(X, t) &= g(t), & t \in [0, T], \\ u(X, 0) &= f(X), & X \in \partial\Omega. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: $\Omega \subset \mathbf{R}^d$ ($d=1, 2$) 为有界凸区域, 边界分段光滑。

Burgers 方程在流体力学、气体动力学、交通流等众多领域都有着重要的作用和地位。许多学者对该问题做了大量研究, 并提出了数值解法。陈莲^[2]建立两种求解 Burgers 方程的 Crank-Nicolson 差分法格式, 并对其进行误差分析。Wang 等^[3]建立一种求解粘性 Burgers 方程的能量守恒型四阶隐式紧差

收稿日期: 2023-11-03

通信作者: 黄浪扬(1976-), 男, 副教授, 主要从事偏微分方程保结构算法的研究。E-mail: hly6@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11701197); 福建省自然科学基金面上资助项目(2022J01308); 中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(ZQN702)

分格式。Zhang 等^[4]利用线性化紧致差分格式求解具有 Burgers 型非线性项的二维 Sobolev 方程。Xu 等^[5]建立两种求解非线性 Burgers 方程的修正的非协调有限元全离散格式,并对其进行超收敛分析。Wang 等^[6]建立一种求解 Burgers 方程的多区域 Galerkin 方法,并分析其收敛性及稳定性。Zhao 等^[7]利用时空连续 Galerkin 方法对二维 Burgers 方程进行数值求解,并给出先验误差估计。Wang 等^[8]利用弱伽辽金有限元方法求解一类时间分数阶的广义 Burgers 方程。

以上求解 Burgers 方程的数值方法都是基于网格剖分建立离散格式, Chebyshev 节点的重心 Lagrange 插值公式可以有效克服 Runge 现象。很多学者将其推广到求解各类微分方程与积分方程,如 Volterra 积分方程^[9]、Allen-Cahn 方程^[10-13]、Black-Scholes 方程^[14]、分数阶微分方程^[15-16]等。Ömer^[17]应用重心插值配点法数值求解了二维和三维 Klein-Gordon-Schrödinger (KGS) 方程。基于此,本文对应用重心插值的 Burgers 方程数值解法进行研究。

1 重心 Lagrange 插值

1.1 重心 Lagrange 插值函数

设插值节点为 x_j , 对应的实数为 $y_j (j=0, 1, \dots, n)$, 使用多项式插值, 则在次数不超过 n 的多项式空间中, 存在唯一的重心 Lagrange 插值函数 $p(x)$, 满足 $p(x_j) = y_j, j=0, 1, \dots, n$ 。重心 Lagrange 插值函数为

$$p(x) = \sum_{j=0}^n \frac{\omega_j}{(x-x_j)} y_j / \sum_{i=0}^n \frac{\omega_i}{(x-x_i)} = \sum_{j=0}^n D_j(x) y_j. \quad (2)$$

式(2)中: $D_j(x)$ 为重心 Lagrange 插值基函数; ω_j 为重心 Lagrange 插值函数的重心权, ω_j 为

$$\omega_j = \left(\prod_{i=0, i \neq j}^n (x_j - x_i) \right)^{-1}. \quad (3)$$

由于重心 Lagrange 插值函数的重心权只与插值节点分布有关, 在利用重心插值逼近未知函数时, 采用第二类 Chebyshev 节点, 即

$$x_j = \cos\left(\frac{j}{n}\pi\right), \quad j=0, 1, \dots, n. \quad (4)$$

可以得到重心 Lagrange 插值函数的重心权为

$$\left. \begin{aligned} \omega_j &= (-1)^j \delta_j, \\ \delta_j &= \begin{cases} 1/2, & j=0 \text{ 或 } n, \\ 1, & \text{其他。} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

对式(2)进行求导, 得到函数 $p(x)$ 在插值节点 x_i 处的导数, $p^{(s)}(x_i)$ 为

$$p^{(s)}(x_i) = \frac{d^s p(x_i)}{dx^s} = \sum_{j=0}^n D_j^{(s)}(x_i) y_j = \sum_{j=0}^n D_{i,j}^{(s)} y_j. \quad (6)$$

将其写成矩阵形式即为

$$\mathbf{p}^{(s)} = \mathbf{D}^{(s)} \mathbf{p}. \quad (7)$$

式(7)中: $\mathbf{D}^{(s)}$ 为关于节点 $x_i (i=0, 1, \dots, n)$ 的 s 阶微分矩阵, $\mathbf{D}^{(s)} = (D_{i,j}^{(s)})_{n \times n}, s=1, 2$ 。

通过对重心 Lagrange 插值基函数求导, 分别得到一、二阶微分矩阵的元素^[11]为

$$\left. \begin{aligned} D_{i,j}^{(1)} &= \frac{\omega_j / \omega_i}{x_i - x_j}, \quad i \neq j, \\ D_{i,i}^{(1)} &= - \sum_{j=0, j \neq i}^n D_{i,j}^{(1)}, \\ D_{i,j}^{(2)} &= 2(D_{i,i}^{(1)} D_{i,j}^{(1)} - \frac{D_{i,j}^{(1)}}{x_i - x_j}), \quad i \neq j, \\ D_{i,i}^{(2)} &= - \sum_{j=0, j \neq i}^n D_{i,j}^{(2)}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

1.2 逼近性质

设 $p(x, y)$ 是 $u(x, y)$ 的重心 Lagrange 插值函数, 满足 $p(x_m, y_n) = u(x_m, y_n)$, 则定义误差函数为

$$e(x, y) = u(x, y) - p(x, y). \quad (9)$$

引理 1^[18] 如果 $u(x, y) \in C^{\bar{m}+1}([a, b] \times [c, d])$, 其中, $\bar{m} = \max\{m, n\}$, 则

$$|e(x, y)| \leq \|u^{\bar{m}+1}\|_{\infty} (C_1 \left(\frac{el_x}{2m}\right)^m + C_2 \left(\frac{el_y}{2n}\right)^n). \quad (10)$$

式(10)中: e 为自然对数; l_x 代表区间 $[a, b]$ 的一半; l_y 代表区间 $[c, d]$ 的一半。

同理可以得到

$$\left. \begin{aligned} |e_x(x, y)| &\leq C_1^* \|\partial_x^{(m+1)} u\|_{\infty} \left(\frac{el_x}{2(m-1)}\right)^{m-1} + C_2 \|\partial_y^{(n+1)} u\|_{\infty} \left(\frac{el_y}{2n}\right)^n, \\ |e_{x,x}(x, y)| &\leq C_1^{**} \|\partial_x^{(m+1)} u\|_{\infty} \left(\frac{el_x}{2(m-2)}\right)^{m-2} + C_2 \|\partial_y^{(n+1)} u\|_{\infty} \left(\frac{el_y}{2n}\right)^n, \\ |e_y(x, y)| &\leq C_1 \|\partial_x^{(m+1)} u\|_{\infty} \left(\frac{el_x}{2m}\right)^m + C_2^* \|\partial_y^{(n+1)} u\|_{\infty} \left(\frac{el_y}{2(n-1)}\right)^{n-1}, \\ |e_{y,y}(x, y)| &\leq C_1 \|\partial_x^{(m+1)} u\|_{\infty} \left(\frac{el_x}{2m}\right)^m + C_2^{**} \|\partial_y^{(n+1)} u\|_{\infty} \left(\frac{el_y}{2(n-2)}\right)^{n-2}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)中: $C_1, C_1^*, C_1^{**}, C_2, C_2^*, C_2^{**}$ 为常数。

2 二维 Burgers 方程的离散格式

考虑二维 Burgers 方程, 对时间区域进行 K 等分, 记步长为 $\tau = \frac{T}{K}$, T 为时间计算的终点。空间区域采用第二类 Chebyshev 节点分别离散为 $m+1$ 个计算节点 $a = x_0 < x_1 < \dots < x_m = b$ 和 $n+1$ 个计算节点 $c = y_0 < y_1 < \dots < y_n = d$, 得到计算节点 (x_i, y_j, t_k) , $0 \leq i \leq m, 0 \leq j \leq n, 0 \leq k \leq K$ 。

2.1 半离散格式及相容性分析

记函数 $u(x, y, t)$ 在节点 x_0, x_1, \dots, x_m 上的值为 $u(x_i, y, t) = u_i(y, t)$, 则函数 $u(x, y, t)$ 在节点 x_0, x_1, \dots, x_m 上的重心插值函数为

$$u(x, y, t) = \sum_{s=0}^m L_s(x) u_s(y, t). \quad (12)$$

式(12)中: $L_s(x)$ 表示 x 方向的重心插值基函数。

将式(12)代入方程(1)中, 并令方程在点 x_0, x_1, \dots, x_m 上精确成立, 得到常微分方程组, 即

$$\begin{aligned} \sum_{s=0}^m L_s(x_i) \frac{\partial u_s(y, t)}{\partial t} + \sum_{s=0}^m L_s(x_i) u_s(y, t) \left(\sum_{s=0}^m L'_s(x_i) u_s(y, t) + \sum_{s=0}^m L_s(x_i) \frac{\partial^2 u_s(y, t)}{\partial y^2} \right) = \\ v \left(\sum_{s=0}^m L''_s(x_i) u_s(y, t) + \sum_{s=0}^m L_s(x_i) \frac{\partial^2 u_s(y, t)}{\partial y^2} \right). \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)中: $L'_s(x_i) = C_{s,i}^{(1)}$ 为关于节点 x_0, x_1, \dots, x_m 的一阶微分矩阵 $\mathbf{C}^{(1)}$ 中的元素, 类似地, $L''_s(x_i) = C_{s,i}^{(2)}$ 为二阶微分矩阵 $\mathbf{C}^{(2)}$ 中的元素。

记 $u_{i,j}(t) = u_i(y_j, t)$, 函数 $u_i(y, t)$ 在节点 y_0, y_1, \dots, y_n 的重心插值函数为

$$u_i(y, t) = \sum_{r=0}^n T_r(y) u_{i,r}(t). \quad (14)$$

式(14)中: $T_r(y)$ 表示 y 方向的重心插值基函数。

将式(14)代入式(13), 微分矩阵形式为

$$\frac{d\mathbf{U}(t)}{dt} + \text{diag}(\mathbf{U}(t)) (\mathbf{C}^{(1)} \otimes \mathbf{I}_{n+1} + \mathbf{I}_{m+1} \otimes \mathbf{D}^{(1)}) \mathbf{U}(t) = v (\mathbf{C}^{(2)} \otimes \mathbf{I}_{n+1} + \mathbf{I}_{m+1} \otimes \mathbf{D}^{(2)}) \mathbf{U}(t). \quad (15)$$

式(15)中:

$$\mathbf{U}(t) = [\mathbf{U}_0(t) \cdots \mathbf{U}_m(t)]^T;$$

$$\mathbf{U}_i(t) = [u_{i,0}(t) \cdots u_{i,n}(t)]^T (i=0, \dots, m);$$

$\mathbf{D}^{(k)}$ 为关于节点 y_0, y_1, \dots, y_n 的 k 阶微分矩阵。

为了方便进行相容性分析, 算子定义为

$$\Gamma u(x, y, t) := u_t + u(u_x + u_y) - v(u_{x,x} + u_{y,y}). \quad (16)$$

令 $u(x_m, y_n, t)$ 为 $u(x, y, t)$ 的数值解, 则可以得到

$$\Gamma u(x_m, y_n, t) = 0. \quad (17)$$

定理 1 若 $u(x, y, t) \in C^{\overline{m+1}}([a, b] \times [c, d]) \times C^{(0)}(0, T]$, 其中 $\overline{m} = \max\{m, n\}$, 假设 $u(x_m, y_n, t)$ 有界, 则误差估计为

$$\begin{aligned} |u(x, y, t) - u(x_m, y_n, t)| &\leq C_1^{**} \|\partial_x^{(m+1)} u\|_\infty \left(\frac{el_x}{2(m-2)}\right)^{m-2} + \\ &C_2^{**} \|\partial_y^{(n+1)} u\|_\infty \left(\frac{el_y}{2(n-2)}\right)^{n-2}. \end{aligned} \quad (18)$$

证明:

$$\begin{aligned} \Gamma u(x, y, t) - \Gamma u(x_m, y_n, t) &= u_t(x, y, t) - u_t(x_m, y_n, t) + \\ &u(x, y, t)u_x(x, y, t) - u(x_m, y_n, t)u_x(x_m, y_n, t) + \\ &u(x, y, t)u_y(x, y, t) - u(x_m, y_n, t)u_y(x_m, y_n, t) + \\ &v(u_{xx}(x_m, y_n, t) - (x, y, t)) + v(u_{yy}(x_m, y_n, t) - u_{yy}(x, y, t)) = \\ &R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5. \end{aligned} \quad (19)$$

式(19)中:

$$\begin{aligned} R_1 &= u_t(x, y, t) - u_t(x_m, y_n, t) = u_t(x, y, t) - u_t(x_m, y, t) + \\ &u_t(x_m, y, t) - u_t(x_m, y_n, t) = e_t(x_m, y, t) + e_t(x_m, y_n, t). \end{aligned} \quad (20)$$

由引理 1, 有

$$\begin{aligned} |R_1| &= |e_t(x_m, y, t) + e_t(x_m, y_n, t)| \leq \\ &C_1 \|\partial_x^{(m+1)} u\|_\infty \left(\frac{el_x}{2m}\right)^m + C_2 \|\partial_y^{(n+1)} u\|_\infty \left(\frac{el_y}{2n}\right)^n. \end{aligned} \quad (21)$$

R_2 的估计为

$$\begin{aligned} |R_2| &= |u(x, y, t)u_x(x, y, t) - u(x_m, y_n, t)u_x(x_m, y_n, t)| \leq \\ &|u_x(x, y, t)| |u(x, y, t) - u(x_m, y_n, t)| + \\ &|u(x_m, y_n, t)| |u_x(x, y, t) - u_x(x_m, y_n, t)| \leq \\ &C_1^* \|\partial_x^{(m+1)} u\|_\infty \left(\frac{el_x}{2(m-1)}\right)^{m-1} + C_2 \|\partial_y^{(n+1)} u\|_\infty \left(\frac{el_y}{2n}\right)^n. \end{aligned} \quad (22)$$

同理有

$$\begin{aligned} |R_3| &= |u(x, y, t)u_y(x, y, t) - u(x_m, y_n, t)u_y(x_m, y_n, t)| \leq \\ &C_1 \|\partial_x^{(m+1)} u\|_\infty \left(\frac{el_x}{2m}\right)^m + C_2^* \|\partial_y^{(n+1)} u\|_\infty \left(\frac{el_y}{2(n-1)}\right)^{n-1}. \end{aligned} \quad (23)$$

类似地, 对于 R_4, R_5 的估计分别为

$$\begin{aligned} |R_4| &= |ve_{x,x}(x_m, y, t) + ve_{x,x}(x_m, y_n, t)| \leq \\ &C_1^{**} \|\partial_x^{(m+1)} u\|_\infty \left(\frac{el_x}{2(m-2)}\right)^{m-2} + C_2 \|\partial_y^{(n+1)} u\|_\infty - \left(\frac{el_y}{2n}\right)^n. \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} |R_5| &= |ve_{y,y}(x_m, y, t) + ve_{y,y}(x_m, y_n, t)| \leq \\ &C_1 \|\partial_x^{(m+1)} u\|_\infty \left(\frac{el_x}{2m}\right)^m + C_2^{**} \|\partial_y^{(n+1)} u\|_\infty \left(\frac{el_y}{2(n-2)}\right)^{n-2}. \end{aligned} \quad (25)$$

将式(21)~(25)代入式(19), 则定理得证。

2.2 全离散格式及相容性分析

定理 2 设 $u(x, y, t) \in C^{\overline{m+1}}([a, b] \times [c, d]) \times C^{(2)}(0, T]$, 假设 $u(x_m, y_n, t)$ 有界, 使用重心插值配点法求解的数值解为 $u^h(x_i, y_j, t_k)$, 则如下式子成立, 即

$$|u(x, y, t) - u^h(x_i, y_j, t_k)| \leq C \left\{ \tau^2 + \|u^{\overline{m+1}}\|_\infty \left[\left(\frac{el_x}{2(m-2)}\right)^{m-2} + \left(\frac{el_y}{2(n-2)}\right)^{n-2} \right] \right\}. \quad (26)$$

证明: 对方程时间方向采用 Crank-Nicolson 差分法离散得到的数值解为 $u^{k+1} = u(x, y, t_{k+1})$, 则

$$\delta u_t^{(k+1)/2} + u^{(k+1)/2} (u_x^{(k+1)/2} + u_y^{(k+1)/2}) - v(u_{x,x}^{(k+1)/2} + u_{y,y}^{(k+1)/2}) = R^k. \tag{27}$$

式(27)中: $\delta u_t^{(k+1)/2} = \frac{1}{\tau}(u(x, y, t_{k+1}) - u(x, y, t_k))$, $R^k = \delta u_t^{(k+1)/2} - u_t^{(k+1)/2}$ 是时间方向的截断误差。

由 Taylor 展开, 可得

$$|R^k| \leq C\tau^2. \tag{28}$$

空间方向利用重心 Lagrange 插值配点法离散, 有

$$\delta u_i^h(x_i, y_j, t_k) + u(x_i, y_j, t_{(k+1)/2})(u_x(x_i, y_j, t_{(k+1)/2}) + u_y(x_i, y_j, t_{(k+1)/2})) - v(u_{x,x}(x_i, y_j, t_{(k+1)/2}) + u_{y,y}(x_i, y_j, t_{(k+1)/2})) = R^k + \epsilon^{i,j}. \tag{29}$$

式(29)中: $\epsilon^{i,j}$ 为空间截断误差。

由式(27), (29), 可以得到

$$\delta u_i^{(k+1)/2} - \delta u_i^h(x_i, y_j, t_k) + u^{(k+1)/2}(u_x^{(k+1)/2} + u_y^{(k+1)/2}) - u(x_i, y_j, t_{(k+1)/2})(u_x(x_i, y_j, t_{(k+1)/2}) + u_y(x_i, y_j, t_{(k+1)/2})) - v(u_{x,x}^{(k+1)/2} + u_{y,y}^{(k+1)/2}) + v(u_{x,x}(x_i, y_j, t_{(k+1)/2}) + u_{y,y}(x_i, y_j, t_{(k+1)/2})) = -\epsilon^{i,j}. \tag{30}$$

类似定理 2 的推导, 有

$$|\epsilon^{i,j}| \leq C \|u^{(\bar{m}+1)}\|_\infty \left[\left(\frac{el_x}{2(m-2)} \right)^{m-2} + \left(\frac{el_y}{2(n-2)} \right)^{n-2} \right]. \tag{31}$$

结合式(28), (31), 则定理得证。

记 $u^k(x, y) = u(x, y, t_k)$, $k=0, 1, \dots, K$, 采用 Crank-Nicolson 差分法对时间离散, 对方程中的非线性项线性化处理, 得到时间半离散格式, 即

$$\frac{u^{k+1} - u^k}{\tau} + \frac{u^k(u_x^{k+1} + u_y^{k+1}) + u^{k+1}(u_x^k + u_y^k)}{2} = \frac{v(u_{x,x}^{k+1} + u_{y,y}^{k+1} + u_{x,x}^k + u_{y,y}^k)}{2}. \tag{32}$$

将微分矩阵代入时间半离散格式, 有 Burgers 方程全离散格式, 即

$$\left(\mathbf{I} + \frac{\tau}{2}(\text{diag}(\mathbf{U}^k)\mathbf{A}^* + \text{diag}(\mathbf{A}^*\mathbf{U}^k)) - \frac{v\tau}{2}\mathbf{B}^* \right) \mathbf{U}^{k+1} = \left(\mathbf{I} + \frac{v\tau}{2}\mathbf{B}^* \right) \mathbf{U}^k. \tag{33}$$

式(33)中: $\mathbf{A}^* = \mathbf{C}^{(1)} \otimes \mathbf{I}_{n+1} + \mathbf{I}_{m+1} \otimes \mathbf{D}^{(1)}$; $\mathbf{B}^* = \mathbf{C}^{(2)} \otimes \mathbf{I}_{n+1} + \mathbf{I}_{m+1} \otimes \mathbf{D}^{(2)}$ 。

3 数值算例

为验证重心插值配点法求解 Burgers 方程的有效性和合理性, 通过算例对重心插值配点法稳定性进行验证, 与 Crank-Nicolson 差分法对比说明重心插值配点法的高精度。记 U_e, U^h 分别为精确解及数值解, 定义在无穷范数意义下的绝对误差和相对误差分别为

$$E_\infty = \|U_e - U^h\|_\infty, \quad E_r = \frac{\|U_e - U^h\|_\infty}{\|U_e\|_\infty}.$$

上式中: $\|\cdot\|_\infty$ 表示无穷范数。

算例 1 考虑 $d=1$ 时的一维 Burgers 方程(1), 取 $T=1, a=0, b=1$, 初始条件为

$$u(x, 0) = \frac{2v\pi \sin \pi x}{2 + \cos \pi x}.$$

边界条件为 $u(0, t) = u(1, t) = 0$, 方程的精确解为

$$u(x, t) = \frac{2v\pi e^{-\pi^2 vt} \sin \pi x}{2 + e^{-\pi^2 vt} \cos \pi x}.$$

当 $v=0.01$, 固定空间节点 $n=16$ 时, 改变时间步长, 可得到重心插值配点法的时间收敛阶, 如表 1 所示。由表 1 可知: 随着 K 的增加, 利用重心插值配点法求出的方程数值解与精确解的绝对误差的数量级从 10^{-3} 减到 10^{-5} , 因此, 时间收敛阶为二阶精度。

当固定时间步长 $\tau=0.001$ 时, 改变空间节点数量, 可得到重心插值配点法与有限差分法的误差, 如

表 1 重心插值配点法时间收敛阶

Tab. 1 Time convergence orders of barycentric interpolation collocation method

| K | E_∞ | Rate |
|-----|-----------------------|------|
| 4 | 3.44×10^{-3} | — |
| 8 | 7.09×10^{-4} | 2.28 |
| 16 | 1.68×10^{-4} | 2.08 |
| 32 | 4.15×10^{-5} | 2.01 |
| 64 | 1.04×10^{-5} | 2.00 |

表 2 所示。由表 2 可知: 重心插值配点法在空间选取 10 个节点时, 最大绝对误差即可达到 10^{-6} 量级, 而有限差分法空间选取 128 个节点时, 最大绝对误差才能达到 10^{-6} 量级, 这表明重心插值配点法在空间上用较少的点可达到更高的精度。

表 2 重心插值配点法与有限差分法的误差

Tab. 2 Errors of barycentric interpolation collocation method and finite difference method

| 重心插值配点法 | | | 有限差分法 | | |
|---------|-----------------------|-----------------------|-------|-----------------------|-----------------------|
| n | E_{∞} | E_r | n | E_{∞} | E_r |
| 4 | 1.69×10^{-4} | 5.38×10^{-3} | 8 | 3.43×10^{-4} | 1.08×10^{-2} |
| 6 | 9.51×10^{-5} | 2.77×10^{-3} | 16 | 9.05×10^{-5} | 2.85×10^{-3} |
| 8 | 1.33×10^{-5} | 3.69×10^{-4} | 32 | 2.30×10^{-5} | 7.21×10^{-4} |
| 10 | 1.32×10^{-6} | 3.65×10^{-5} | 64 | 5.76×10^{-6} | 1.81×10^{-4} |
| 12 | 2.06×10^{-7} | 5.74×10^{-6} | 128 | 1.44×10^{-6} | 4.52×10^{-5} |

重心插值配点法数值解与精确解 ($\tau=0.05, n=20$), 如图 1 所示。由图 1 可知: 两种解吻合。

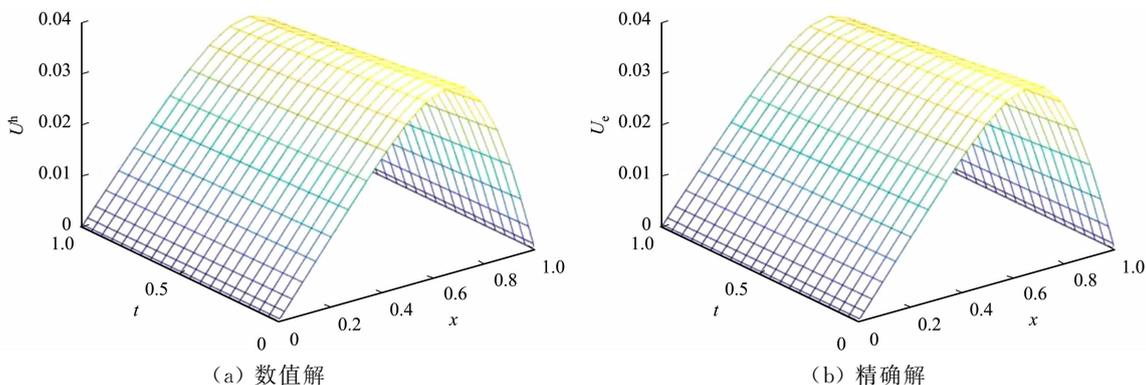


图 1 重心插值配点法数值解与精确解 ($\tau=0.05, n=20$)

Fig. 1 Numerical solution and exact solution of barycentric interpolation collocation method ($\tau=0.05, n=20$)

绝对误差 ($\tau=0.05, n=20$), 如图 2 所示。空间收敛阶 ($\tau=0.001, v=0.01$), 如图 3 所示。由图 3 可知: 重心插值配点法具有指数收敛速度。不同参数下重心插值配点法的数值解, 如图 4 所示。

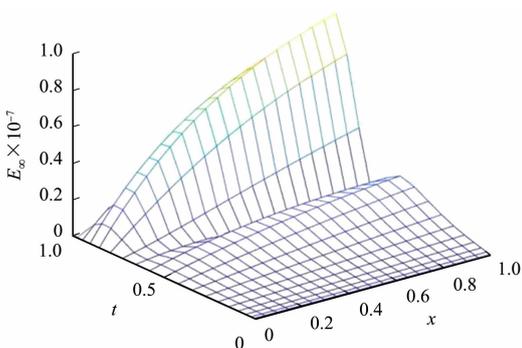


图 2 绝对误差 ($\tau=0.05, n=20$)

Fig. 2 Absolutely error ($\tau=0.05, n=20$)

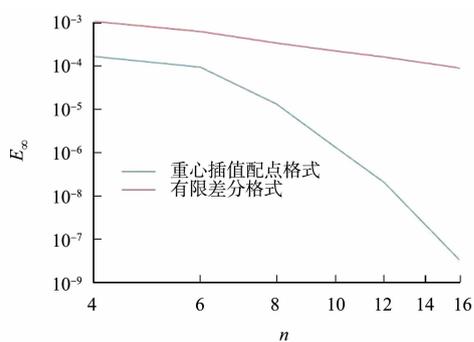


图 3 空间收敛阶 ($\tau=0.001, v=0.01$)

Fig. 3 Spatial convergence order ($\tau=0.001, v=0.01$)

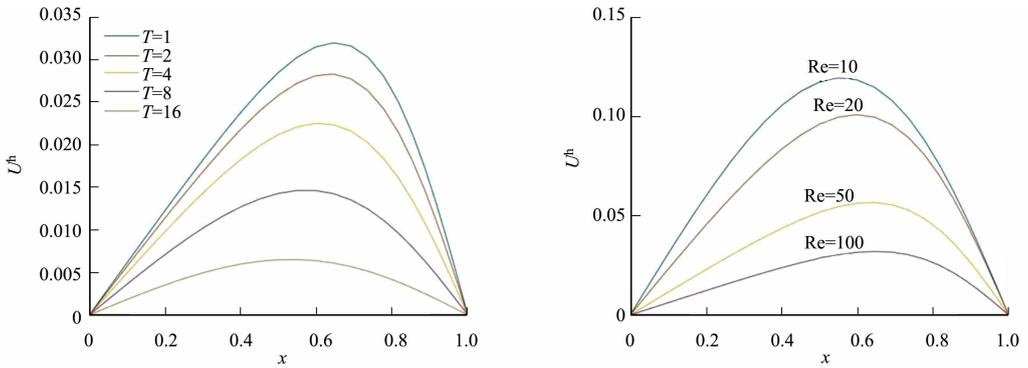
图 4(a) 为最终时间 $T=1, 2, 4, 8, 16$ 的数值解图像, 图 4(b) 为不同的雷诺数 $Re=10, 20, 50, 100$ 的数值解图像。由图 4 可知: 随着 T, Re 的增大, 数值解保持稳定, 说明了数值法的稳定性。

重心插值配点法的数值解与精确解的等势图 ($v=0.1$), 如图 5 所示。

算例 2 考虑如下二维 Burgers 方程, 即

$$\begin{cases} u_t + u \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) = v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \\ (x, y) \in [0, 1] \times [0, 1], \\ t \in [0, 1]. \end{cases}$$

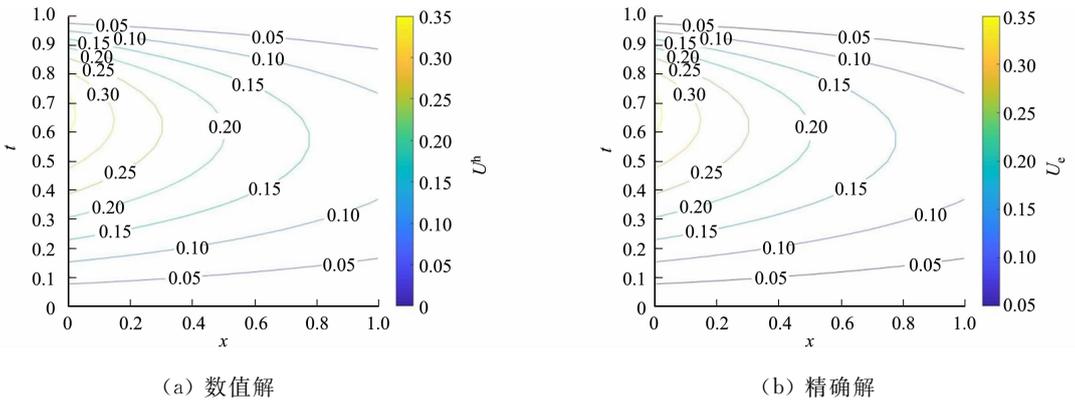
初值条件和边值条件由精确解确定, 方程的精确解为



(a) 不同时间的数值解 ($\tau=0.01, n=20$) (b) 不同雷诺数的数值解 ($\tau=0.05, n=32$)

图 4 不同参数下重心插值配点法的数值解

Fig. 4 Numerical solution of barycentric interpolation collocation method of different parameters



(a) 数值解 (b) 精确解

图 5 重心插值配点法的数值解与精确解的等势图 ($v=0.1$)

Fig. 5 Isopotential diagram of numerical solution and exact solution of barycentric interpolation collocation method ($v=0.1$)

$$u(x, y, t) = \frac{2v\pi \sin[\pi(x+y)] e^{-2v\pi^2 t}}{2 + \cos[\pi(x+y)] e^{-2v\pi^2 t}}$$

表 3 重心插值配点法时间收敛阶

Tab. 3 Time convergence order of barycentric interpolation collocation scheme

| K | E_∞ | Rate |
|-----|-----------------------|-------|
| 8 | 3.22×10^{-3} | — |
| 16 | 6.71×10^{-4} | 2.264 |
| 32 | 1.62×10^{-4} | 2.049 |
| 48 | 7.19×10^{-5} | 2.004 |
| 64 | 4.03×10^{-5} | 2.011 |

重心插值配点法时间收敛阶,如表 3 所示。

当 $v=0.1$, 空间节点数 $m=n$, 固定空间节点数 $n=16$ 时, 改变时间节点数, 重心插值配点法与有限差分法的误差 ($\tau=0.001$), 如表 4 所示。

由表 4 可知: 当 n 取 8 时, 重心插值配点法的误差具有 10^{-4} 量级, 而有限差分法的误差只有 10^{-3} 量级; 重心插值配点法 $n=12$ 时误差有 10^{-5} 量级, 而有限差分法在 $n=64$ 时误差只有 10^{-5} 量级。

表 4 重心插值配点法与有限差分法的误差 ($\tau=0.001$)

Tab. 4 Errors of barycentric interpolation collocation method and finite difference scheme ($\tau=0.001$)

| 重心插值配点法 | | | 有限差分法 | | |
|---------|-----------------------|-----------------------|-------|-----------------------|-----------------------|
| n | E_∞ | E_τ | n | E_∞ | E_τ |
| 4 | 4.45×10^{-3} | 1.23×10^{-2} | 4 | 1.96×10^{-2} | 5.71×10^{-2} |
| 6 | 1.10×10^{-3} | 3.20×10^{-3} | 8 | 4.94×10^{-3} | 1.38×10^{-2} |
| 8 | 2.66×10^{-4} | 7.34×10^{-4} | 16 | 1.27×10^{-3} | 3.52×10^{-3} |
| 10 | 5.05×10^{-5} | 1.39×10^{-4} | 32 | 3.17×10^{-4} | 8.75×10^{-4} |
| 12 | 1.00×10^{-5} | 2.77×10^{-5} | 64 | 7.93×10^{-5} | 2.19×10^{-4} |

重心插值配点法的数值解与精确解 ($\tau=0.001, n=32$), 如图 6 所示。由图 6 可知: 数值解与精确解是相符的。

绝对误差($\tau=0.001, n=32$), 如图 7 所示。由图 7 可知: 数值解与精确解是相符的。

空间收敛阶($\tau=0.001$), 如图 8 所示。由图 8 可知: 重心插值配点法在求解二维问题时, 空间具有指数收敛。

算例 2 结果表明: 重心插值配点法在二维问题中, 具有高精度性与有效性, 且可通过更少的节点得到相对高的精度, 与理论分析相符。

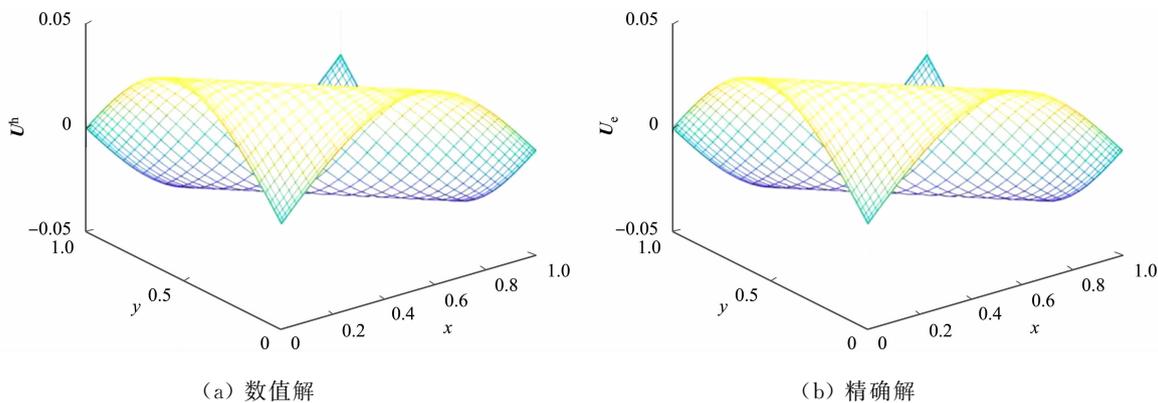


图 6 重心插值配点法的数值解与精确解($\tau=0.001, n=32$)

Fig. 6 Numerical solution and exact solution of barycentric interpolation collocation method ($\tau=0.001, n=32$)

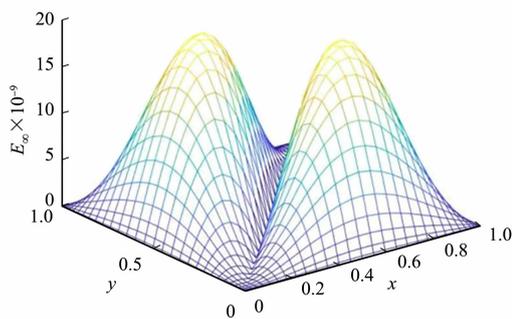


图 7 绝对误差($\tau=0.001, n=32$)

Fig. 7 Absolutely error ($\tau=0.001, n=32$)

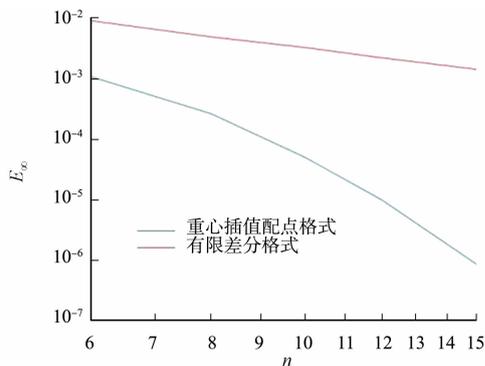


图 8 空间收敛阶($\tau=0.001$)

Fig. 8 Spatial convergence order ($\tau=0.001$)

5 结束语

将 Crank-Nicolson 差分法与重心插值切比雪夫配点法相结合, 提出了一种求解 Burgers 的有效数值法, 对方程的非线性项进行线性化处理, 避免迭代带来大计算量, 并给出了全离散法的相容性分析。通过数值算例验证数值法的有效性及其高精度, 通过与 Crank-Nicolson 差分法进行比较, 重心插值法可以用较少的节点得到较高的精度。

参考文献:

- [1] BURGERS J M. A mathematical model illustrating the theory of turbulence[J]. Advances in Applied Mechanics, 1948, 1: 171-199. DOI:10.1016/S0065-2156(08)70100-5.
- [2] 陈莲. 一维 Burgers 方程的几种有限差分法[D]. 南充: 西华师范大学, 2020.
- [3] WANG Xuping, ZHANG Qifeng, SUN Zhizhong. The pointwise error estimates of two energy-preserving fourth-order compact schemes for viscous Burgers equation[J]. Advances in Computational Mathematics, 2021, 47(2): 23. DOI:10.1007/S10444-021-09848-9.
- [4] ZHANG Qifeng, QIN Yifan, SUN Zhizhong. Linearly compact scheme for 2D Sobolev equation with Burgers' type nonlinearity[J]. Numerical Algorithms, 2022, 91(3): 1081-1114. DOI:10.1007/S11075-022-01293-Z.
- [5] XU Chao, PEU Lifang. Unconditional superconvergence analysis of two modified finite element fully discrete schemes for nonlinear Burgers' equation[J]. Applied Numerical Mathematics, 2023, 185: 1-17. DOI:10.1016/j.ap-

num. 2022. 11. 008.

- [6] WANG Chuan, WANG Tianjun. A multi-domain Galerkin method with numerical integration for the Burgers equation[J]. *International Journal of Computer Mathematics*, 2023, 100(5): 927-947. DOI: 10. 1080/00207160. 2023. 2171265.
- [7] ZHAO Zhihui, LI Hong. Numerical study of two-dimensional Burgers equation by using a continuous Galerkin method[J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2023, 149(1): 38-48. DOI: 10. 1016/J. CAMWA. 2023. 08. 030.
- [8] WANG Haifeng, XU Da, ZHOU Jun, *et al.* Weak Galerkin finite element method for a class of time fractional generalized Burgers equation[J]. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 2021, 37(1): 732-749. DOI: 10. 1002/num. 22549.
- [9] 于孟文, 张新东. 重心插值配点法求解 Volterra 积分方程[J]. *新疆师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(1): 75-80. DOI: 10. 14100/j. cnki. 1008-9659. 2023. 01. 010.
- [10] DENG Yangfang, WENG Zhifeng. Barycentric interpolation collocation method based on Crank-Nicolson scheme for the Allen-Cahn equation[J]. *AIMS Mathematics*, 2021, 6(4): 3857-3873. DOI: 10. 3934/MATH. 2021229.
- [11] 黄蓉, 邓杨芳, 翁智峰. SAV/重心插值配点法求解 Allen-Cahn 方程[J]. *应用数学和力学*, 2023, 44(5): 573-582. DOI: 10. 21656/1000-0887. 430149.
- [12] 邓杨芳, 姚泽丰, 汪精英, 等. 二维 Allen-Cahn 方程的有限差分法/配点法求解[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(5): 690-694. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 202001001.
- [13] 翁智峰, 姚泽丰, 赖淑琴. 重心插值配点法求解 Allen-Cahn 方程[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(1): 133-140. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 201806043.
- [14] 赖舒琴, 华之维, 翁智峰. 重心插值配点法求解 Black-Scholes 方程[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2020, 33(5): 1-8. DOI: 10. 19728/j. issn1672-6634. 2020. 05. 001.
- [15] 黄蓉, 翁智峰. 时间分数阶 Allen-Cahn 方程的重心插值配点法[J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(4): 553-560. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 202104060.
- [16] LI Jin, SU Xiaoning, ZHAO Kaiyan. Barycentric interpolation collocation algorithm to solve fractional differential equations[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2023, 205: 340-367. DOI: 10. 1016/J. MATCOM. 2022. 10. 005.
- [17] ÖMER O. Application of a collocation method based on linear barycentric interpolation for solving 2D and 3D Klein-Gordon-Schrödinger (KGS) equations numerically[J]. *Enginee-Ring Computations*, 2021, 38(5): 2394-2414. DOI: 10. 1108/EC-06-2020-0312.
- [18] YI Shichao, YAO Linquan. A steady barycentric Lagrange interpolation method for the 2D higher order time fractional telegraph equation with nonlocal boundary condition with error analysis[J]. *Numerical Methods for Partial Differential Equations*, 2019, 35(5): 1694-1716. DOI: 10. 1002/num. 22371.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 黄心中)

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202403012



广义(2+1)维 Hirota-Maccari 系统的 动力学及混沌行为

张冬梅, 梁建莉

(华侨大学 数学科学学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 采用微分方程定性理论和动力系统分支方法研究广义(2+1)维 Hirota-Maccari 系统的动力学及混沌行为, 获得对相应行波系统的分支相图, 得到系统的周期波解和孤立波解的精确表达式。通过数值模拟研究不同参数条件下的行波解波形及其性质的变化, 对该系统增加一个周期扰动项之后, 利用 Matlab 软件得到扰动系统在一些特殊参数条件下的 2D 相图、3D 相图和庞加莱截面。结果表明: 该系统在特定参数条件下的运动是准周期的。

关键词: 广义(2+1)维 Hirota-Maccari 系统; 行波解; 孤立波解; 混沌行为

中图分类号: O 175.29

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2025)01-0113-08

Dynamics and Chaotic Behavior of Generalized (2+1)-Dimensional Hirota-Maccari System

ZHANG Dongmei, LIANG Jianli

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

Abstract: The dynamics and chaotic behavior of generalized (2+1)-dimensional Hirota-Maccari system are studied by the qualitative theory of differential equations and the bifurcation method of dynamical systems, the bifurcations of phase portraits of the corresponding traveling wave system are obtained, and the exact expressions of the periodic wave solutions and solitary wave solutions of the system are obtained. Numerical simulation is carried out to study the wave forms and properties of traveling wave solutions under different parameter conditions. After adding periodic perturbation term to the system, 2D phase portrait, 3D phase portrait and Poincare section of the perturbed system are obtained by Matlab software under the special parameter conditions. The results show that the motion of the system is quasi-periodic under specific parameter conditions.

Keywords: generalized (2+1)-dimensional Hirota-Maccari system; traveling wave solution; solitary wave solution; chaotic behavior

1 预备知识

光孤子可以作为长距离光纤通信和光数据传输的信息载体。单模光纤中两个最重要的物理因素是群速度色散和自相位调制。光孤子消除了由于群速度色散引起的脉冲展宽, 自相位调制促进了脉冲压缩。群速度色散和自相位调制之间的精确平衡是实现光纤中光孤子的基础。光孤子可以用非线性偏微

收稿日期: 2024-03-02

通信作者: 梁建莉(1979-), 女, 副教授, 博士, 主要从事微分方程与动力系统的研究。E-mail: aalison18@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(11901215); 福建省自然科学基金资助项目(2022J01303)

分方程(NLPDE)进行描述,这激发了学者们对NLPDE的研究兴趣。

广义(2+1)维 Hirota-Maccari 系统^[1]为

$$\left. \begin{aligned} iu_t + u_{xy} + iu_{xxx} + uv - i|u|^2 u_x &= 0, \\ 3v_x + (|u|^2)_y &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: x, y 为空间变量; t 为时间变量; $u(x, y, t)$ 为复函数; $v(x, y, t)$ 为实函数。

系统(1)是一种特殊的非线性薛定谔方程,用于模拟局部空间中孤立波的运动,即在光纤通信、等离子体物理、非线性光学、流体力学等领域中具有有限频率密度扰动的大振幅低混合波的相互作用^[2],也解释了飞秒孤子脉冲在单模光纤中传播的动力学行为。许多学者用不同的方法得到系统(1)的解析解和孤子解,例如,(1/ G'')-expansion法^[3]、new Kudryashov法和 tanh-coth法^[4]、Jacobi elliptic function expansion法^[5]、KP约化法^[6]、改进 tan($\varphi(\xi)/2$)-expansion法^[7]、Sinh-Gordon法^[8]及其他处理NLPDE的方法^[9-16]。本文采用微分方程定性理论和动力系统分支方法,分析系统(1)的行波解和动力学行及其扰动系统的混沌行为。

2 定性分析与分支相图

对系统(1)进行行波变换,令

$$u(x, y, t) = e^{i\theta} U(\xi), \quad v(x, y, t) = V(\xi). \quad (2)$$

式(2)中: $\xi = \mu(x + y - ct)$, $\theta = rt + ax + by$, μ, c, a, b, r 为常数,通常 c, r 为波速, a, b 为波频。

把式(2)代入系统(1)的第2个方程并积分一次,可得

$$V(\xi) = -U^2(\xi)/3. \quad (3)$$

再把式(2),(3)代入系统(1)的第1个方程,将实部和虚部进行分离,并对虚部积分一次,可得

$$\left. \begin{aligned} U'' &= \frac{a^3 - r - ab}{(3a-1)\mu^2} U + \frac{1}{3\mu^2} U^3, \\ U'' &= \frac{c-a-b+3a^2}{\mu^2} U + \frac{1}{3\mu^2} U^3. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\text{令} \quad \alpha = \frac{a^3 - r - ab}{(3a-1)\mu^2} = \frac{c-a-b+3a^2}{\mu^2}, \quad \beta = \frac{1}{3\mu^2} > 0, \quad (5)$$

则系统(1)转化为

$$U'' = \alpha U + \beta U^3. \quad (6)$$

令 $Y = U'$,可得平面动力系统为

$$\frac{dU}{d\xi} = Y, \quad \frac{dY}{d\xi} = \alpha U + \beta U^3, \quad (7)$$

其首次积分为

$$H(U, Y) = Y^2 - \alpha U^2 - \frac{1}{2} \beta U^4 = h. \quad (8)$$

式(8)中: h 为积分常数。

显然,系统(7)有平衡点(0,0)。由式(5)可知, $\beta > 0$,当 $\alpha < 0$ 时,系统(7)有平衡点 $(\pm\sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}}, 0)$ 。

令 $\mathbf{M}(U, Y)$ 是系统(7)在平衡点 (U, Y) 处的线性化系统的雅可比(Jacobi)矩阵,则有

$$\mathbf{M}(U, Y) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \alpha + 3\beta U^2 & 0 \end{bmatrix}.$$

记 Jacobi 矩阵的行列式 $\mathbf{J}(U, Y) = |\mathbf{M}(U, Y)|$,由此可得

$$\mathbf{J}(0, 0) = -\alpha, \quad \mathbf{J}(\pm\sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}}, 0) = 2\alpha.$$

根据平面动力系统平衡点类型的判定方法,可得定理1。

定理1 1) 当 $\alpha < 0$ 时,系统(7)有3个平衡点 $O(0, 0)$, $A(\sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}}, 0)$ 和 $B(-\sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}}, 0)$,且 O 为中

心, A 和 B 为鞍点。2) 当 $\alpha=0$ 时, 系统(7)只有一个平衡点 $O(0,0)$, 且为拓扑鞍点。3) 当 $\alpha>0$ 时, 系统(7)只有一个平衡点 $O(0,0)$, 且为鞍点。

证明: 1) 当 $\alpha<0$ 时, 此时, 系统(7)有 3 个平衡点。对于 $O(0,0)$, Jacobi 矩阵 $\mathbf{M}(0,0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \alpha & 0 \end{bmatrix}$, 此时, 它有一对纯虚特征根 $\lambda_{1,2} = \pm i\sqrt{-\alpha}$, 则 O 为中心。同理, $\mathbf{M}(\pm\sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}}, 0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2\alpha & 0 \end{bmatrix}$, 此时, 它有一对相反的实特征根 $\lambda_{1,2} = \pm\sqrt{-2\alpha}$, 则 A 和 B 为鞍点。

2) 当 $\alpha=0$ 时, 系统(7)只有一个平衡点 $O(0,0)$, Jacobi 矩阵 $\mathbf{M}(0,0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, 此时, 它有两个零特征值, 且系统(7)变为

$$\frac{dU}{d\xi} = Y, \quad \frac{dY}{d\xi} = \beta U^3.$$

由文献[17]中节 2.11 的定理 2 可知, 当 $\beta>0$ 时, O 为拓扑鞍点。

3) 当 $\alpha>0$ 时, 系统(7)只有一个平衡点 $O(0,0)$, Jacobi 矩阵 $\mathbf{M}(0,0) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \alpha & 0 \end{bmatrix}$, 此时, 它有一对相反的实特征根 $\lambda_{1,2} = \pm\sqrt{\alpha}$, 则 O 为鞍点。

根据式(8)确定的能量函数, 记 3 个平衡点处的能量分别为

$$h_0 = H(0,0) = 0, \quad h_1 = H(\sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}}, 0) = \frac{\alpha^2}{2\beta}, \quad h_2 = H(-\sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}}, 0) = \frac{\alpha^2}{2\beta}.$$

结合上述定性分析, 通过对能量函数赋予不同的数值, 可以得到系统(7)在对应参数条件下的相图, 如图 1 所示。

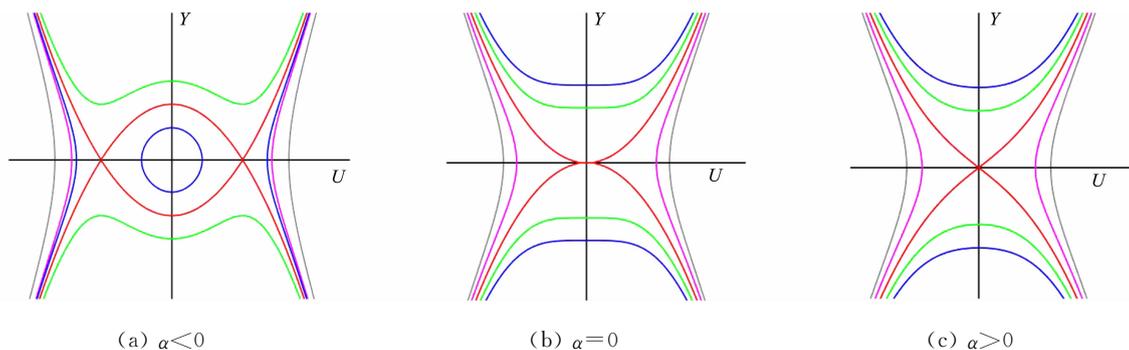


图 1 系统(7)的相图分支

Fig. 1 Bifurcations of phase portraits of system (7)

3 系统(1)的行波解及其精确表达式

对于一个给定的实数 h , 由式(8)给出的方程 $H(U, Y) = h$ 定义系统(7)中代表不同轨道的能量曲线。根据式(8)可得 $Y^2 = \frac{\beta}{2} \left(U^4 + \frac{2\alpha}{\beta} U^2 + \frac{2h}{\beta} \right)$ 。以 $U(0) = U_0$ 为初始条件, 由式(7)的第 1 个方程可得

$$\xi = \int_{U_0}^U \left[dU / \sqrt{\frac{\beta}{2} \left(U^4 + \frac{2\alpha}{\beta} U^2 + \frac{2h}{\beta} \right)} \right]. \tag{9}$$

由式(9)可计算各种行波解的精确表达式。主要研究以下两种情形(情形 1, 2)。

情形 1 图 1(a)中, 当 $h \in (h_0, h_1)$ 时, 由 $H(U, Y) = h$ 定义的能量曲线是一族包围平衡点 $O(0,0)$ 的周期轨和两个开轨道。此时, 式(9)为

$$\sqrt{\frac{\beta}{2}} \xi = \int_{-U_2}^U \frac{dU}{\sqrt{(U_1 - U)(U_2 - U)(U + U_1)(U + U_2)}}.$$

上式中: $U_1, U_2, -U_1, -U_2$ 为能量曲线与 U 轴的交点, 且 $-U_1 < -U_2 < U < U_2 < U_1$ 。

通过计算,可得系统(7)的周期波解为

$$U(\xi) = \frac{-U_2 + U_1 \eta^2 \operatorname{sn}^2(\omega \xi, k)}{1 - \eta^2 \operatorname{sn}^2(\omega \xi, k)} \tag{10}$$

式(10)中: $k^2 = \frac{4U_1 U_2}{(U_1 + U_2)^2}$; $\eta^2 = \frac{2U_2}{U_1 + U_2}$; $\omega = \frac{(U_1 + U_2)}{4} \cdot \sqrt{2\beta}$; $\operatorname{sn}(\cdot, k)$ 为 Jacobi 椭圆函数。

由式(3)可得

$$V(\xi) = -\frac{(-U_2 + U_1 \eta^2 \operatorname{sn}^2(\omega \xi, k))^2}{3(1 - \eta^2 \operatorname{sn}^2(\omega \xi, k))^2} \tag{11}$$

此时, $V(\xi)$ 为一个周期波解。式(10), (11)对应的波形图,如图 2(a), 2(b)所示。

由式(10), (11)可得系统(1)的解为

$$\left. \begin{aligned} u(x, y, t) &= \exp(i(rt + ax + by)) \cdot \frac{-U_2 + U_1 \eta^2 \operatorname{sn}^2(\omega \mu(x + y - ct), k)}{1 - \eta^2 \operatorname{sn}^2(\omega \mu(x + y - ct), k)}, \\ v(x, y, t) &= -\frac{(-U_2 + U_1 \eta^2 \operatorname{sn}^2(\omega \mu(x + y - ct), k))^2}{3(1 - \eta^2 \operatorname{sn}^2(\omega \mu(x + y - ct), k))^2} \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

由式(12)可得 u 的模 ($|u|$) 和强度分布 ($|u|^2 = U^2$) 分别为

$$|u| = |U| = \left| \frac{-U_2 + U_1 \eta^2 \operatorname{sn}^2(\omega \xi, k)}{1 - \eta^2 \operatorname{sn}^2(\omega \xi, k)} \right|, \tag{13}$$

$$|u|^2 = U^2 = \left(\frac{-U_2 + U_1 \eta^2 \operatorname{sn}^2(\omega \xi, k)}{1 - \eta^2 \operatorname{sn}^2(\omega \xi, k)} \right)^2. \tag{14}$$

此时, $|u|$ 和 $|u|^2$ 均为周期函数,且 $|u|$ 为一个周期尖波, $|u|^2$ 为一个周期波,其波形图,如图 2(c), 2(d)所示。

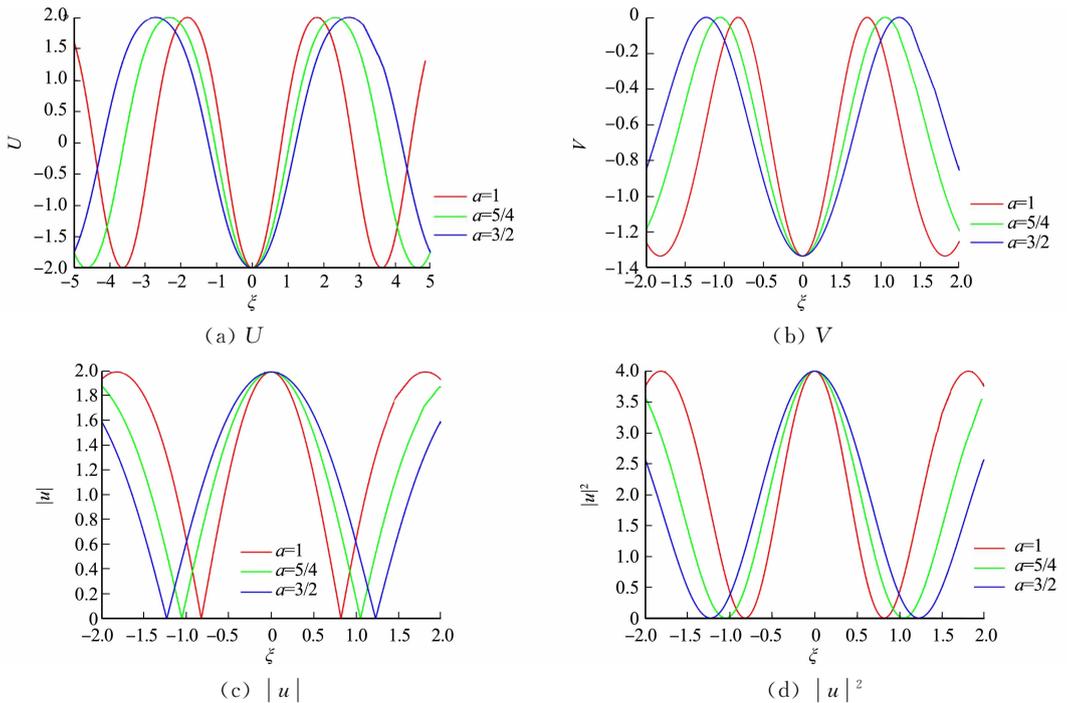


图 2 式(10), (11), (13), (14)对应的波形图

Fig. 2 Waveform diagrams corresponding to formula (10), (11), (13), (14)

通过数值模拟可知,当波频(a)越大时,它们的周期越大,但振幅没有改变。换言之, V , $|u|$, $|u|^2$ 的周期与 a 成正比例关系,但振幅与 a 无关。

情形 2 图 1(a)中,当 $h = h_1$ 时,由 $H(U, Y) = h$ 定义的能量曲线是两条异宿轨,此时,式(9)可写为 $\sqrt{\frac{\beta}{2}} \xi = \pm \int_0^U \frac{dU}{(U_1 - U)(U - U_2)}$, 其中, $U_1 = \sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}}$, $U_2 = -\sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}}$ 。经计算,可得系统(7)的扭波解 (U_+) 和反扭波解 (U_-) 分别为

$$U_+ = \sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}} \cdot \tanh\left(\sqrt{-\frac{\alpha}{2}} \xi\right), \quad U_- = -\sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}} \cdot \tanh\left(\sqrt{-\frac{\alpha}{2}} \xi\right), \quad (15)$$

其波形图如图 3(a), 3(b) 所示。

由式(3)可得

$$V(\xi) = \frac{\alpha}{3\beta} \cdot \tanh^2\left(\sqrt{-\frac{\alpha}{2}} \xi\right). \quad (16)$$

因为 $\alpha < 0, \beta > 0$, 所以此时的 $V(\xi)$ 为一个亮孤立波解, 其波形图如图 3(c) 所示。

由式(15), (16)可得系统(1)的解为

$$\left. \begin{aligned} u(x, y, t) &= \pm \exp(i(rt + ax + by)) \cdot \sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}} \cdot \tanh\left(\sqrt{-\frac{\alpha}{2}} \mu(x + y - ct)\right), \\ v(x, y, t) &= \alpha \tanh^2\left(\sqrt{-\frac{\alpha}{2}} \mu(x + y - ct)\right) / 3\beta. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

由式(17)可得 $|u|$ 和 $|u|^2 = U^2$ 分别为

$$|u| = |U| = \sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}} \cdot \left| \tanh\left(\sqrt{-\frac{\alpha}{2}} \xi\right) \right|, \quad (18)$$

$$|u|^2 = U^2 = -\frac{\alpha}{\beta} \cdot \tanh^2\left(\sqrt{-\frac{\alpha}{2}} \xi\right). \quad (19)$$

此时, $|u|$ 为一个反孤立尖波, $|u|^2$ 为暗孤立波, 其波形图如图 3(d), 3(e) 所示。

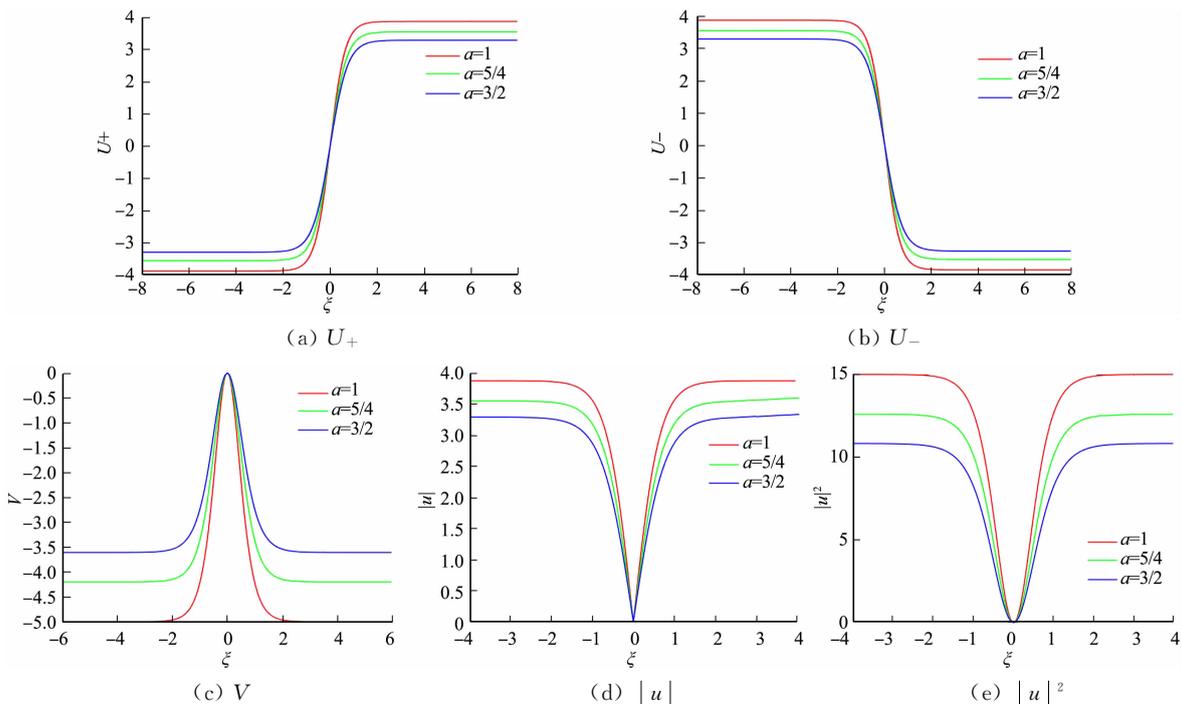


图 3 式(15), (16), (18), (19)对应的波形图

Fig. 3 Waveform diagrams corresponding to formula (15), (16), (18), (19)

背景上的孤立(尖)波是一种行波, 其振幅在 $|x|$ 中呈指数衰减到非零值, 若其振幅在 $|x|$ 中呈指数衰减到正值, 称该孤立(尖)波为正背景下的, 若其振幅在 $|x|$ 中呈指数衰减到负值, 称该孤立(尖)波为负背景下的。通过数值模拟可得, 波函数(V)是在负背景下的亮孤立波, 当波频(a)越大时, 振幅(高度)越小; $|u|$ 是在正背景下的反孤立尖波, 当波频 a 越大时, 它的振幅(高度)也是越小; $|u|^2$ 是在正背景下的暗孤立波, 当波频(a)越大时, 它的振幅(高度)也是越小。此外, 当 a 越大时, $|u|$ 的图像在 $x=0$ 处左右的倾斜程度越小。

探究波频(a)与波速(c)之间的关系。由式(5)可得

$$c = \frac{-8a^3 + 6a^2 + (2b - 1)a - b - r}{3a - 1},$$

$$c'(a) = \frac{-48a^3 + 42a^2 - 12a + b + 3r + 1}{(3a-1)^2} = \frac{-6a(8a^2 - 7a + 2) + b + 3r + 1}{(3a-1)^2}.$$

当 b, r 充分小时, 对任意 $a > 0$, 都有 $c' < 0$; 当 b, r 充分小时, 波频越大, 波速反而越小。

定理 2 1) 当 $\alpha < 0$ 时, 由 $H(U, Y) = h \in (h_0, h_1)$ 定义的能量曲线是一族包围平衡点 $O(0, 0)$ 的周期轨和两个开轨道, 此时, 系统(7)存在由式(10)给出的精确周期波解族。

2) 当 $\alpha < 0$ 时, 由 $H(U, Y) = h = h_1$ 定义的能量曲线是两条连接 $A(\sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}}, 0)$ 和 $B(-\sqrt{-\frac{\alpha}{\beta}}, 0)$ 的异宿轨, 此时, 系统(7)存在由式(15)给出的精确扭波解和反扭波解。

4 系统(1)的扰动系统的混沌行为

在系统(1)的右边加上扰动项, 可得

$$\left. \begin{aligned} iu_t + u_{xy} + iu_{xxx} + uv - i|u|^2 u_x &= f_1, \\ 3v_x + (|u|^2)_y &= f_2. \end{aligned} \right\} \tag{20}$$

式(20)中: f_1, f_2 为扰动项。

把式(2)代入系统(20)并积分一次, 将实部和虚部进行分离, 可得

$$\left. \begin{aligned} U'' &= \frac{a^3 - r - ab}{(3a-1)\mu^2} U + \frac{1}{3\mu^2} U^3 + f_1, \\ U'' &= \frac{c-a-b+3a^2}{\mu^2} U + \frac{1}{3\mu^2} U^3 + f_2. \end{aligned} \right\} \tag{21}$$

现考虑周期扰动, 令 $f_i = \gamma \cos(k\xi), i = 1, 2$ 。若参数满足以下条件

$$\alpha = \frac{a^3 - r - ab}{(3a-1)\mu^2} = \frac{c-a-b+3a^2}{\mu^2}, \quad \beta = \frac{1}{3\mu^2} > 0,$$

则系统(20)转化为带扰动项的平面扰动系统, 即

$$\frac{dU}{d\xi} = Y, \quad \frac{dY}{d\xi} = \alpha U + \beta U^3 + \gamma \cos(k\xi). \tag{22}$$

式(22)中: γ, k 分别为系统(22)的振幅和频率。

庞加莱映射是一种经典的分析动力系统的的方法, 通过庞加莱截面上截点的情况可以判断系统是否发生混沌。由文献[18]中节 2.10 可得引理 1。

引理 1 1) 若庞加莱截面上有且仅有一个不动点或少数离散点, 则系统的运动是周期的。

2) 若庞加莱截面上是一封闭曲线, 则系统的运动是准周期的。

3) 若庞加莱截面上是一些成片的密集点, 则系统的运动是混沌。

现研究振幅 γ 和频率 k 对系统(22)运动的影响。令 $\alpha = -2, \beta = 1/3$, 并保持不变, 并令 $\gamma = 0.5, 0.8, 1.4; k = 0.6, 0.8, \pi, 2\pi$, 分别可得系统(22)的 2D 相图、3D 相图和庞加莱截面, 如图 4~7 所示。

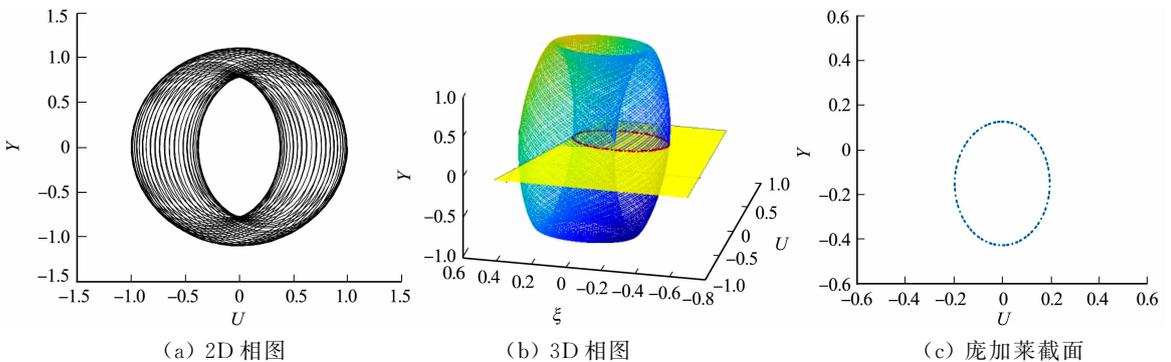


图 4 系统(22)的 2D 相图、3D 相图和庞加莱截面 ($\gamma = 0.5, k = 0.6$)

Fig. 4 2D phase portrait, 3D phase portrait and Poincaré section of system (22) ($\gamma = 0.5, k = 0.6$)

由图 4~7 可知: 在这些特定参数条件下, 系统(22)的庞加莱截面是一封闭曲线。因此, 系统(22)在这些特定参数条件下的运动是准周期的。

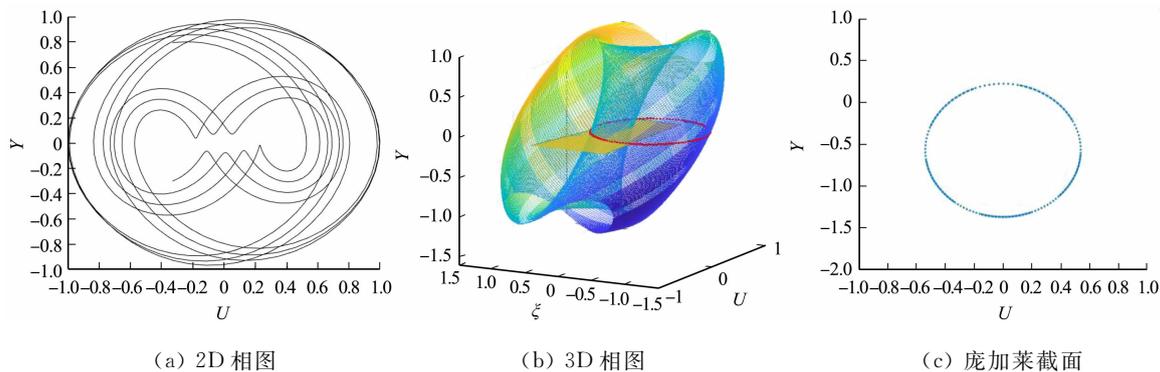


图 5 系统(22)的 2D 相图、3D 相图和庞加莱截面($\gamma=0.8, k=0.8$)

Fig. 5 2D phase portrait, 3D phase portrait and Poincaré section of system (22) ($\gamma=0.8, k=0.8$)

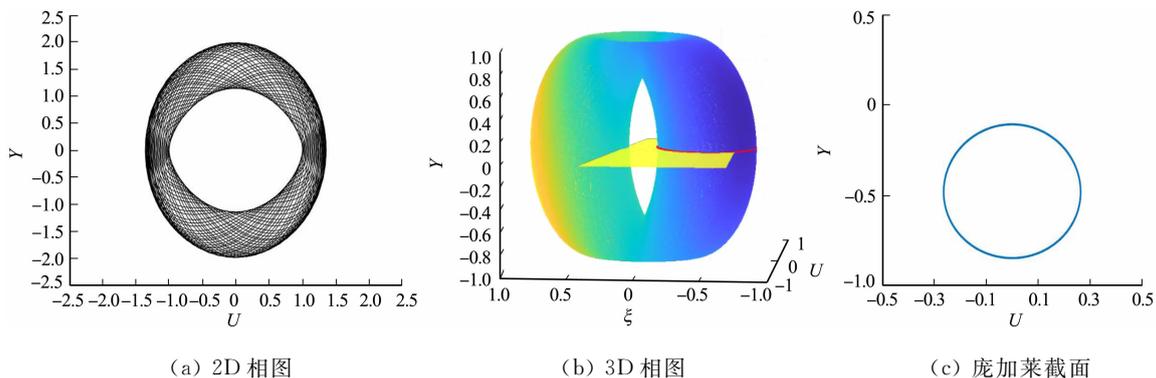


图 6 系统(22)的 2D 相图、3D 相图和庞加莱截面($\gamma=1, k=\pi$)

Fig. 6 2D phase portrait, 3D phase portrait and Poincaré section of system (22) ($\gamma=1, k=\pi$)

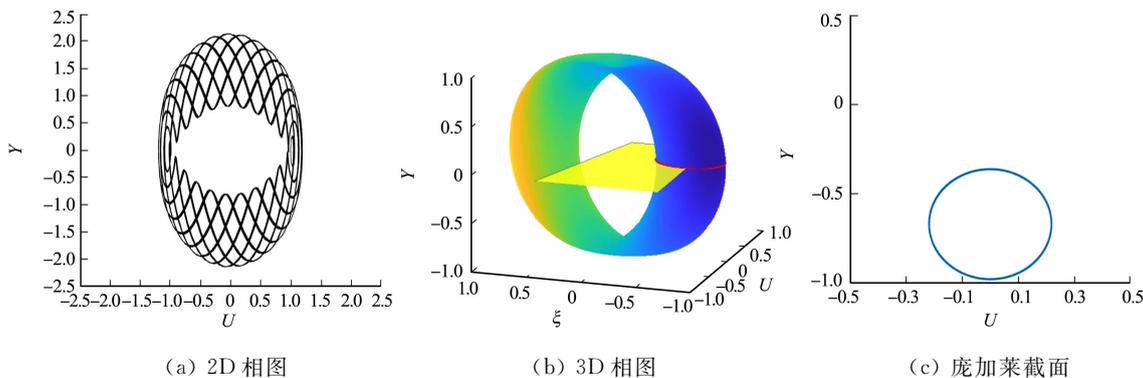


图 7 系统(22)的 2D 相图、3D 相图和庞加莱截面($\gamma=4, k=2\pi$)

Fig. 7 2D phase portrait, 3D phase portrait and Poincaré section of system (22) ($\gamma=4, k=2\pi$)

5 结束语

采用平面动力系统的方法研究广义(2+1)维 Hirota-Maccari 方程的分支与行波解, 并分析它对应的周期扰动系统, 得出该扰动系统在特定参数条件下的 2D 相图、3D 相图和庞加莱截面, 可得该扰动系统在特定参数条件下的运动是准周期的。此外, 对得到的行波解进行数值模拟, 研究不同参数条件下的行波解波形及其性质的变化, 并解释相关的物理性质。

参考文献:

[1] YU Xin, GAO Yitian, SUN Zhiyuan, *et al.* N -soliton solutions for the (2+1)-dimensional Hirota-Maccari equation in fluids, plasmas and optical fibers[J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2011, 378(2): 519-527. DOI:10.1016/j.jmaa.2010.12.019.

[2] MACCARI A. A generalized Hirota equation in 2+1 dimensions[J]. Journal of Mathematical Physics, 1998, 39(12):

6547-6551, DOI:10.1063/1.532664.

- [3] YOKUS A, BASKONUS H M. Dynamics of traveling wave solutions arising in fiber optic communication of some nonlinear models[J]. *Soft Computing*, 2022, 26(24):13605-13614. DOI:10.1007/S00500-022-07320-4.
- [4] OZDEMIR N, SECER A, OZISIK M, *et al.* Two analytical schemes for the optical soliton solution of the (2+1) Hirota-Maccari system observed in single-mode fibers[J]. *Universe*, 2022, 8(11):12. DOI:10.3390/universe8110584.
- [5] TARLA S, ALI K K, YILMAZER R, *et al.* Investigation of the dynamical behavior of the Hirota-Maccari system in single-mode fibers[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54(10):061005. DOI:10.1007/S11082-022-04021-Y.
- [6] XIA Pei, ZHANG Yi, ZHANG Heyan, *et al.* Some novel dynamical behaviors of localized solitary waves for the Hirota-Maccari system[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 108(1):533-541. DOI:10.1007/s11071-022-07208-w.
- [7] RAZA N, JHANGEER A, REZAZADEH H, *et al.* Explicit solutions of the (2+1)-dimensional Hirota-Maccari system arising in nonlinear optics[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2019, 33(30):1950360(1-21). DOI:10.1142/S0217979219503600.
- [8] YEL G, CATTANI C, BASKONUS H M, *et al.* On the complex simulations with dark-bright to the Hirota-Maccari system[J]. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*, 2021, 16(6):613. DOI:10.1115/1.4050677.
- [9] DEMIRAY S T, PANDIR Y, BULUT H. All exact travelling wave solutions of Hirota equation and Hirota-Maccari system[J]. *Optik*, 2016, 127(4):1848-1859. DOI:10.1016/j.ijleo.2015.10.235.
- [10] AMNA I, NAVEED A, UMAR K, *et al.* Optical solutions of Schrödinger equation using extended Sinh-Gordon equation expansion method[J]. *Frontiers in Physics*, 2020, 8:73. DOI:10.3389/fphy.2020.00073.
- [11] ALOTAIBI H. Traveling wave solutions to the nonlinear evolution equation using expansion method and addendum to Kudryashov's method[J]. *Symmetry-Basel*, 2021, 13(11):2126. DOI:10.3390/sym13112126.
- [12] CHEN Yong, YAN Zhenya. The Weierstrass elliptic function expansion method and its applications in nonlinear wave equations[J]. *Chaos Solitons & Fractals*, 2006, 29(4):948-964. DOI:10.1016/j.chaos.2005.08.071.
- [13] VINITA, RAY S S. Optimal system of Lie subalgebra for symmetry reductions, group invariant solutions and exact solutions to the coupled Hirota-Maccari system driving pulse propagation in optical fiber[J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2022, 36(17):2250093. DOI:10.1142/S021797922250093X.
- [14] SULAIMAN A T, YEL G, BULUT H. M-fractional solitons and periodic wave solutions to the Hirota-Maccari system[J]. *Modern Physics Letters B*, 2019, 33(5):1950052. DOI:10.1142/S0217984919500520.
- [15] NESLIHAN O, HANDENUR E, AYDIN S, *et al.* Optical solitons and other solutions to the Hirota-Maccari system with conformable, M-truncated and beta derivatives[J]. *Modern Physics Letters B*, 2022, 36(11):2150625. DOI:10.1142/S0217984921506259.
- [16] GHANBARI B. Abundant soliton solutions for the Hirota-Maccari equation via the generalized exponential rational function method[J]. *Modern Physics Letters B*, 2019, 33(9):19501069. DOI:10.1142/S0217984919501069.
- [17] PERKO L. *Differential equations and dynamical systems*[M]. 3rd ed. New York:Springer, 2001.
- [18] 刘秉正. *非线性动力学与混沌基础*[M]. 长春:东北师范大学出版社, 1994.

(责任编辑:钱筠 英文审校:黄心中)

《华侨大学学报(自然科学版)》简介

BRIEF INTRODUCTION TO JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE)

《华侨大学学报(自然科学版)》(以下简称《学报》)创刊于1980年,是福建省教育厅主管,华侨大学主办,面向国内外公开发行的自然科学综合性学术理论刊物。

《学报》的办刊宗旨是:坚持四项基本原则,贯彻“百花齐放,百家争鸣”和理论与实践相结合的方针,广泛联系海外华侨和港、澳、台、特区的科技信息,及时反映国内尤其华侨大学等高等学府在理论研究、应用研究和开发研究等方面的科技成果,为发展华侨高等教育和繁荣社会主义科技事业服务。

《学报》以创新性、前瞻性、学术性为办刊特色,主要刊登机械工程及自动化、测控技术与仪器、电气工程、电子工程、计算机技术、应用化学、材料与环境工程、化工与生化工程、土木工程、建筑学、应用数学等基础研究和应用研究方面的学术论文,科技成果的学术总结,新技术、新设计、新产品、新工艺、新材料、新理论的论述,以及国内外科技动态的综合评论等内容。

《学报》既是中文综合性科学技术类核心期刊,又是国内外重要数据库和权威性文摘期刊固定收录的刊源。在历次全国及福建省的科技期刊评比中,《学报》都荣获过大奖。曾获得1995年“全国高等学校自然科学学报系统优秀学报一等奖”,1997年“第二届全国优秀科技期刊奖”,1999年,2008年“全国优秀自然科学学报及教育部优秀科技期刊”,并于2001年入选“中国期刊方阵‘双效期刊’”。

《学报》现为双月刊,A4开本。国内统一连续出版物号:CN 35-1079/N;国际标准连续出版物号:ISSN 1000-5013;国内邮发代号:34-41;国外发行代号:NTZ1050。

Journal of Huaqiao University (Natural Science) (abbreviated to the Journal), started publication in 1980, is a comprehensive and academic journal about natural science, open distribution at home and abroad, sponsored by Huaqiao University; The Education Department of Fujian Province is responsible for its work.

The Journal has its purpose: adhering to the four cardinal policies, carrying out the principles of the “Flowers Blossom; Schools of Thought Contend” and theory combined with practice, collecting information of science and technology from overseas and those in Hong Kong, Macao, Taiwan and special economic zones and all sides, and in time reflecting the scientific and technological achievements about domestic theoretical research, applied research and development research in our university and others, and serving for development of the overseas Chinese higher education and the socialist prosperity on science and technology.

The Journal, with characteristics of creative, perspective and academic study, publishes the articles of fundamental and applied research on mechanical engineering and automation, observing and controlling technology and instruments, electric and electronic engineering, computer, applied chemistry, materials and environmental engineering, chemical and biochemical engineering, civil engineering, architecture, applied mathematics, etc. and the academic reports on achievements of science and technology, theses on new technology, new design, new products, new crafts, new materials, new theories, and the comprehensive reviews on scientific and technological developments at home and abroad.

The Journal is not only a core Chinese periodical on comprehensive science and technology, but also an important data base at home and abroad and periodical source that the authoritative abstracts have been recorded regularly. The Journal won the prizes among the national and provincial evaluation of scientific and technological periodicals such as “the first prize of good natural science of the national higher education periodicals” in 1995, “the good prize of the second national periodicals of science and technology” in 1997, “the good scientific and technological periodicals of the national natural science journals and the State Education Department” in 1999 and 2008, and selected into “‘double-effect periodical’ of the China periodicals matrix” in 2001. The Journal welcomes the contributors from our university and others.

The Journal is bimonthly publication, with format of A4. China standard serial number: CN 35-1079/N; International standard serial number: ISSN 1000-5013; Domestic mail number: 34-41; International issue number: NTZ1050.

- 《中文核心期刊要目总览》
- RCCSE 中国核心学术期刊
- 中国期刊方阵“双效期刊”
- 中国科技论文在线优秀期刊
- ISTIC 中国科技核心期刊
- 全国优秀科技期刊
- 华东地区优秀期刊

本刊被以下国内外检索期刊和数据库列为固定刊源

- 美国《化学文摘》(CAS)
- 波兰《哥白尼索引》(IC)
- “STN 国际”数据库
- 中国科学引文数据库
- 中国科技论文统计期刊源
- 中国学术期刊(光盘版)
- 中文科技期刊数据库
- 中国力学文摘
- 中国生物学文摘
- 中国数学文摘
- 俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI)
- 荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus)
- 德国《数学文摘》(Zbl MATH)
- 中国学术期刊综合评价数据库
- 中国期刊网
- 万方数据库
- 中国机械工程文摘
- 中国化学化工文摘
- 中国无线电电子学文摘
- 中国物理文摘

华侨大学学报(自然科学版)

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

Huaqiao Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)

(NATURAL SCIENCE)

(双月刊, 1980 年创刊)

(Bimonthly, Started in 1980)

第 46 卷 第 1 期 (总第 201 期) 2025 年 1 月 20 日

Vol. 46 No. 1 (Sum 201) Jan. 20, 2025

主管单位: 福建省教育厅

Competent Authority: The Education

主办单位: 华侨大学

Department of Fujian Province

(中国福建泉州 362021)

Sponsor: Huaqiao University

(中国福建厦门 361021)

(Quanzhou 362021, Fujian, China)

编辑出版: 华侨大学学报自然科学版编辑部

(Xiamen 361021, Fujian, China)

电话: 0595-22692545

Editor in Chief: HUANG Zhongyi

电子信箱: journal@hqu.edu.cn

Edited and Published by Editorial

网址: https://hdxh.hqu.edu.cn

Department of Journal of

Huaqiao University (Natural Science)

主编: 黄仲一

Tel: 0595-22692545

印刷: 泉州晚报印刷厂

E-mail: journal@hqu.edu.cn

国内发行: 福建省泉州市邮政局

https://hdxh.hqu.edu.cn

订购处: 全国各地邮政局(所)

Distributed by China Publication Foreign

国外发行: 中国出版对外贸易总公司

Trading Corporation

(北京 782 信箱, 邮政编码 100011)

(P. O. Box 782, Beijing, 100011, China)

中国标准连续出版物号: ISSN 1000-5013
CN 35-1079/N

ISSN 1000-5013

国内邮发代号: 34-41

国内定价: 10.00 元/册
60.00 元/套

国外发行代号: NTZ 1050

