

卷首语

本期主题：数据增强设计新进展

特邀组稿人：龙 瀛

清华大学建筑学院 长聘副教授



10年前,规划设计领域的计算机辅助主要依靠规划设计软件如AutoCAD、空间数据库系统如GIS及城市模型等,数据分析支持规划设计的现状分析部分也主要囿于工程地质条件、用地适宜性等物质空间层面。

随着新数据环境的普及和计算能力的提高,各个学科和行业都在积极拥抱数据科学,规划设计也不例外。为此,2013年在剑桥大学访学期间,我与时在伦敦大学学院巴特莱特建筑学院攻读博士的沈尧老师通过微博的私信功能交流甚多,讨论了大数据支持城市空间认知和规划设计的多方面内容,并一起合作了利用路网数据提取城镇建设用地边界的研究,后来发表在美国地理学会会刊AAAG上。

结合当时开展的多项利用新数据的城市空间研究工作和大量讨论,我们认识到一个数据支持规划设计的新时代的到来。城市分析将从物质空间拓展到社会空间,从仅限于支持规划设计的现状认知到全流程,从低频的规划支持到高频的设计增强,我们将其命名为“数据增强设计(Data Augmented Design, DAD)”,即为新数据环境下,通过定量城市分析驱动的规划设计方法。它通过数据分析、建模、预测等手段,为规划设计的全过程提供调研、分析、方案设计、评价、追踪等支持工具,以数据实证提高设计的科学性并激发规划设计人员的创造力。这篇中文论文发表在2015年《上海城市规划》第2期(龙瀛,沈尧.《数据增强设计——新数据环境下的规划设计回应与改变》),2016年该论文获得金经昌中国城市规划优秀论文奖(佳作奖)。截至目前,该文在中国知网登记的引用次数为125次,国内也涌现了大量数据增强设计方面的研究及相关论文。


受《上海城市规划》编辑部邀请,2016年第3期我曾组织“数据增强设计”主题栏目。该栏目集结了8篇来自学界和业界的优秀论文,多数得到较高的引用和下载。这8篇论文侧重于利用新数据对城市物质和社会空间进行量化分析和问题诊断,进而支持规划设计,但还未达到支持规划设计全流程及多种数据增强设计模式的定位。

时至今日,我国的城市发展和规划设计都发生了非常大的变化,如国土空间规划、城市更新、城市体检等备受重视,数据环境也日益成熟,数据增强设计的理念已经深入规划设计实践的各个方面。为此,有必要对数据增强设计的新进展进行讨论。

首先,基于当前城市面临的问题、机遇与趋势,从理论层面探讨与展望面向未来的数据增强设计。《面向未来的数据增强设计:信息技术影响下的设计应对》一文从日常活动与空间形式两个层面梳理了信息技术影响



上海城市规划杂志
微信公众号



下城市发展的特征及机遇,从“以时间换空间”“以信息换能量”“以物流换人流”3个方面展望未来城市空间的变化趋势,并进一步讨论城市组织要素功能和价值的重塑及以数字创新为核心的面向未来的数据增强设计的应用潜力。《协频城市:时空数据增强设计中的频度协同》一文指出未来城市是“低频城市”向“高频城市”复合的“协频城市”,讨论了频度作为(时空)数据增强设计的基本要素在模型环境设定、时空数据的涌现规律和城市需求匹配等方面的重要意义,并提出以智能技术为一种协频和调频工具箱形成以地点为视角、时空规律发现为特点的时空数据增强的路径,指出“频度智能”对于规划智能化的积极意义。

其次,在基于智能算法的规划设计流程与方法方面进行探索,旨在促进规划设计方法的智能化与决策科学化。《人工演进的元城市系统:城市空间形态的一种智能生成》一文基于复杂系统和网络科学理论,提出3种形态生成方法,包括图网络下的物质空间形态生成、运筹优化的实体形态生成和参数化的城市系统生成,并构建借助数字孪生技术的包含多项基本功能的元城市系统,为基于自我优化迭代的城市空间形态生成提供参考方法。《面向公共服务设施布局优化的规划支持系统设计》一文从因素分析、问题建模和模型求解3个阶段提出基于布局优化模型和智能优化算法的公共服务设施布局思路,并构建了包含系统功能需求、系统技术架构和系统应用在内的面向公共服务设施布局优化的规划支持系统技术框架,为优化公共服务设施布局提供方法支持。

最后,通过定量数据分析增强对城市空间的现状认知与问题识别,支持规划设计响应与空间优化。《基于复杂适应系统理论的城市色彩系统建构和方法探索——以北京王府井街区为例》一文从主体、特征和机制3方面剖析城市色彩系统内涵,并以北京王府井街区为例,通过实证研究探索了色彩系统与城市设计体系4个阶段的适应关系,对延续城市文脉、塑造城市特色具有重要意义。《基于多源数据的建筑综合风险评估与更新优化策略——以福州市仓山区为例》一文以福州市仓山区为例,应用PS-InSAR技术与机器学习相结合的方法评估建筑自身风险,并结合多源数据构建建筑综合风险评估模型,为识别建筑风险及城市更新优化提供科学量化工具。《基于多源数据的小学空间服务绩效评价方法及优化策略——以武汉东西湖区为例》一文以武汉东西湖区为例,利用多源大数据,从个体的出行路径及过街体验出发,对小学空间服务绩效进行精细化评价,为完善以小学为代表的公共服务体系提供科学依据。

数据和计算领域发展迅速,本期主题“数据增强设计新进展”的7篇论文所呈现的是在这一特定时期的工作,未来数据增强设计领域的研究和实践定将不断深入、日新月异。

目次



数据增强设计新进展

- 1 面向未来的数据增强设计：信息技术影响下的设计应对 张恩嘉 龙 瀛
- 8 协频城市：时空数据增强设计中的频度协同 沈 尧
- 14 人工演进的元城市系统：城市空间形态的一种智能生成 杨 滔 罗维祯 林旭辉 邓成汝
- 23 面向公共服务设施布局优化的规划支持系统设计 叶 澄 张姗姗 李民健 李智轩
- 30 基于复杂适应系统理论的城市色彩系统建构和方法探索——以北京王府井街区为例 张梦宇 顾重泰 陈易辰 张晓东
- 38 基于多源数据的建筑综合风险评估与更新优化策略——以福州市仓山区为例 李苗裔 黄 俐 党安荣
- 46 基于多源数据的小学空间服务绩效评价方法及优化策略——以武汉东西湖区为例 牛 强 张永雄 吴宛娴 陈 伟 宁 玲 彭 阳

规划实践

- 55 新时期城市文化空间专项规划编制思考与探索——以上海浦东新区为例 邴燕萍
- 61 城市详细规划中地理学方法的应用途径——以站域空间研究为例 张晨阳 钱巧云 江宇凡 戴一正
- 68 雨洪韧性导向的生态城市空间塑造——以中法武汉生态示范城为例 杨正光 张旭超 董 芳

新城规划

- 75 海湾及沿海都市圈格局下的新城建设与发展模式——渤海湾与长三角核心区的对比分析 曾 鹏 魏琛朋 蔡良娃
- 81 基于儿童友好空间营造的城市规划建设探索——以上海松江新城为例 黄 婧

城市研究

- 87 城市创新空间及其规划实践的研究进展与展望 唐 爽 张京祥
- 94 上海旧区改造中的里弄风貌保护附加图则创新探讨 赵宝静 张 灏
- 101 技术理性与利益博弈：跨界地区协同规划思考 刘 珺
- 109 基于全国网络调研的防疫社区功能需求研究 谭宇星 黄健美 孟丹诚 徐磊青
- 115 香港婴幼儿服务设施体系的构成特征及其规划启示 肖锐琴 林楚燕
- 122 城市建成环境对老年人步行出行的影响分析——基于重庆市江北区12个住区的实证 王莹亮 肖 健 李 琪 倪 军 谭少华 彭慧蕴

城市更新

- 129 德国框架性更新规划对上海城市更新的启示 李 锴 张 溱 金 山
- 138 深圳市社区微更新实施机制与路径探索——“趣城·社区微更新（蛇口）计划”的经验与启示 毛玮丰 胡淙涛 唐 倩

乡村规划

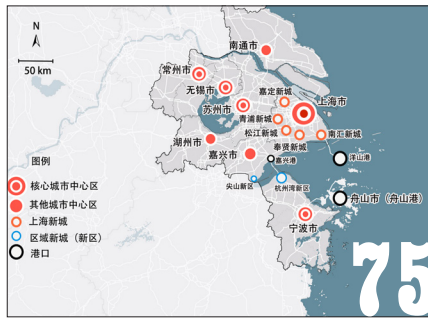
- 143 乡村振兴背景下上海未来乡村社区顶层规划战略思考 张 雁
- 149 村庄共同缔造与乡土化问题研究——以黄冈市红安县七家畈村为例 陈 铭 郭 雯

规划信息

- 156 规划书评·规划在线·海外传真

本刊启事

1. 作者投稿不得侵犯他人著作权。
2. 本刊所发文章仅代表作者观点。欢迎对本刊所登文章开展学术批评和讨论。
3. 本刊对来稿保留修改权，对所发文章享有中文专有出版权（含数字出版权），请勿一稿多投。如有异议，请事先声明。
4. 本刊文章不得擅自转载。若需转载，必须事先征得本刊编辑部和作者同意。
5. 限于人力和物力，来稿一律不退，敬请作者自留底稿。
6. 读者所订杂志如有装订、印刷质量问题，请与印刷厂联系。



Contents

NEW DEVELOPMENT OF DATA AUGMENTED DESIGN	<ul style="list-style-type: none"> 1 Data Augmented Design for the Future Urban Space: Design Responses Influenced by Information and Communication Technology ZHANG Enjia, LONG Ying 8 Synergised City: Frequency Synergy in Spatiotemporal Data-Augmented-Design SHEN Yao 14 Meta Urban System of Artificial Evolution: A Kind of Intelligent Generation of Urban Morphology YANG Tao, LUO Weizhen, LIN Xuhui, DENG Chengru 23 Design of Planning Support System for the Optimization of Public Service Facilities Allocation YE Cheng, ZHANG Shanqi, LI Minjian, LI Zhixuan 30 Construction and Method Exploration of Urban Color System Based on CAS Theory: A Case Study of Wangfujing Block in Beijing ZHANG Mengyu, GU Zhongtai, CHEN Yichen, ZHANG Xiaodong 38 Building Comprehensive Risk Assessment and Optimization Strategy Based on Multi-source Data: A Case Study of Cangshan District, Fuzhou LI Miaoyi, HUANG Li, DANG Anrong 46 Evaluation Method and Optimization Strategy of Primary School Spatial Service Performance Based on Multi-source Data: A Case Study of Dongxihu District, Wuhan NIU Qiang, ZHANG Yongxiong, WU Wanxian, CHEN Wei, NING Ling, PENG Yang
PLANNING PRACTICE	<ul style="list-style-type: none"> 55 Thinking and Exploration on Urban Cultural Space Sector Plan in the New Era: A Case Study of Pudong New Area, Shanghai BING Yanping 61 Application Ways of Geography Methods in Urban Detailed Planning: A Case Study of Research on Station Field ZHANG Chenyang, QIAN Qiaoyun, JIANG Yufan, DAI Yizheng 68 Eco-city Space Shaping Guided by Flood Resilience: A Case Study of the Sino-French Wuhan Ecological Demonstration City YANG Zhengguang, ZHANG Xuchao, DONG Fang
NEWTOWN PLANNING	<ul style="list-style-type: none"> 75 New Town Construction and Development Mode under the Pattern of Gulf and Coastal Metropolitan Area: Comparative Analysis of Bohai Bay and the Core Area of Yangtze River Delta ZENG Peng, WEI Chenpeng, CAI Liangwa 81 Research on Child-friendly Space Provision in Urban Planning and Development: A Case Study of Shanghai Songjiang New Town HUANG Jing
URBAN RESEARCH	<ul style="list-style-type: none"> 87 Review on Progress and Prospect of Urban Innovation Space and Its Planning Practice TANG Shuang, ZHANG Jingxiang 94 A Discussion on the Supplementary Planning Code for Lilong Protection in Shanghai Old District Renovation ZHAO Baojing, ZHANG Hao 101 Technological Rationality and Interest Game: Exploration on Cross-border Regional Collaborative Planning in the New Era LIU Jun 109 Study on the Functional Requirement of COVID-19 Prevention Community Based on National Online Questionnaire Survey TAN Yuxing, HUANG Jianmei, MENG Dancheng, XU Leiqing 115 The Structural Characteristics and Planning Enlightenments of Hong Kong Childcare Facility System XIAO Ruiqin, LIN Chuyan 122 Analysis of Urban Built Environment Influence on Walking in the Elderly: An Empirical Research Based on 12 Residential Areas in Jiangbei District, Chongqing WANG Yingliang, XIAO Jian, LI Qi, NI Jun, TAN Shaohua, PENG Huiyun
URBAN REGENERATION	<ul style="list-style-type: none"> 129 Learn from Rahmenplan in German Urban Regeneration LI Kai, ZHANG Qin, JIN Shan 138 Community Micro-renewal Implementation Mechanism and Path Exploration in Shenzhen: The Experience and Enlightenment of "Fun City: Community Micro-renewal (Shekou)" MAO Weifeng, HU Congtao, TANG Qian
RURAL PLANNING	<ul style="list-style-type: none"> 143 Thinking on Top-level Planning Strategy of Shanghai Future Rural Communities under the Background of Rural Vitalization ZHANG Yan 149 Research on Village Co-creation and Localization: A Case Study of Qijiafan Village of Hong'an County, Huanggang CHEN Ming, GUO Wen
URBAN PLANNING INFO	<ul style="list-style-type: none"> 156 Book Review • Latest News • Overseas Practice

NOTICE

1. The authors shall not infringe copyright.
2. The articles represent the views of the authors. Comments and academic criticism of any kind are highly appreciated.
3. The editorial department reserves the right of amending the articles and Chinese copyright (including digital copyright). Please do not duplicate submission. If you have any questions, please advance statement.
4. If reprinting is required, agreement from the editorial department and the author is kindly requested.
5. Due to limited human and material resources, contributions will not be sent back.
6. For binding and printing issues, please contact the printing house.

面向未来的数据增强设计:信息通信技术影响下的设计应对*

Data Augmented Design for the Future Urban Space: Design Responses Influenced by Information and Communication Technology

张恩嘉 龙瀛 ZHANG Enjia, LONG Ying

摘要 信息通信技术的发展给城市规划及设计带来新机遇与新挑战。从日常活动的视角梳理出人们日常生活虚实交织与空间使用时空转移的发展趋势,从空间形式的视角归纳出城市空间数实相生与日常需求智能响应的特征。在此基础上,从3个方面展望ICT影响下城市空间的变化:“以时间换空间”——通过混合、共享、分时复用的方式提高低频/潮汐空间的使用效率;“以信息换能量”——互联网信息流替代部分出行和功能空间的同时也促进新的活动和空间需求的产生;“以物流换人流”——线上线下服务促进商品/服务流动方向的转变,对物流仓储与运输空间的需求增长。进一步讨论了城市组织要素功能和价值的重塑及以数字创新为核心的面向未来的数据增强设计的应用潜力。

Abstract The development of information and communication technology (ICT) brings profound opportunities and challenges to urban planning and design. This study reviews the mix of real and virtual daily life and the spatiotemporal transfer of spatial usage from the perspective of human activities. It also summarizes the interplay of data and urban entity and intelligent response to the demand supported by ICT from the perspective of urban spatial form. This study proposes the changes in the urban space from three aspects. (1) "Exchanging time for space" — ICT could improve the efficiency of low-frequency/tidal space through mixed and shared space. (2) "Exchanging information for energy" — internet information replaces part of travel and functional space but also promotes the generation of new activities and space. (3) "Replacing pedestrian flows with logistics" — online to offline services promote the change of the flow direction of commodities/services, increasing demand for logistics warehousing and transportation space. This study also discusses the reshaping function and value of urban elements and the application potential of future-oriented data augmented design with digital innovation.

关键词 信息通信技术;数字创新;数据增强设计;城市规划;城市设计

Key words information and communication technology; digital innovation; Data Augmented Design; urban planning; urban design

文章编号 1673-8985 (2022) 03-0001-07 中图分类号 TU981 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20220301

作者简介

张恩嘉

清华大学建筑学院

博士研究生

龙瀛 (通信作者)

清华大学建筑学院

生态规划与绿色建筑教育部重点实验室

长聘副教授, 博士生导师

ylong@tsinghua.edu.cn

0 引言

随着移动互联网(4G/5G)、传感网与物联网、人工智能、大数据与云计算等信息通信技术(Information and Communication Technology, ICT)的发展,城市生活与城市空间都经历着深刻变革,给城市空间的规划与设计带来前所未有的机遇和挑战。一方面,新数据和新方法的

涌现给定量刻画城市空间和人群行为带来新机遇,有助于在精细尺度理解城市的历史与现状,挖掘城市空间和人群行为的互动规律,为城市规划与设计的科学性及合理性提供实证基础^{[1]83}。因此,以数据驱动研究为基础的规划与设计方法在实践中的应用不断迭代、更新和优化^[2-5],并进一步催生人工智能辅助设计^[6-7]。

*基金项目:国内企事业单位委托项目“WeCityX科技规划研究”(编号20212001232);国家自然科学基金面上项目“城市收缩背景下城市空置的智能测度、机理认知与规划设计响应研究”(编号52178044);清华大学-丰田联合研究基金专项“未来社会广义人居环境研究:场所营造及评估关键技术研发、决策优化与场景应用”(编号20213930029)资助。

另一方面,随着互联网、移动互联网在人们居住、工作、交通、游憩等日常生活方方面面的渗透度不断提升,人们生活方式的转变重塑着以往人与空间的互动关系^{[8]188}。城市的互动更加高频,而依赖低频城市空间设计的传统城市空间形式不能完全适应新时代人们对空间的需求^{[9]101},因此给城市规划与设计带来新挑战。

数据增强设计(Data Augmented Design, DAD)作为立足于新数据环境,以定量城市分析为基础的实证性空间干预设计方法论,自2015年由龙瀛和沈尧^{[1]82}提出以来不断得到应用及发展^[10-11]。龙瀛和张恩嘉^[12]将数据增强设计的应用概括为3个维度:即基于数据分析的场地问题识别与特征挖掘,基于量化研究的案例特征提取与空间模式总结,以及以趋势和需求研究为基础的面向未来的新居住、工作、交通及游憩形式的规划设计。其中DAD第一维度和第二维度致力于回答如何把握新机遇,提升规划与设计的效率和效益,DAD第三维度则致力于认识城市发展的新趋势,通过数字创新的方法应对城市规划与设计在新时代面临的挑战^{[13]10}。本文旨在通过梳理ICT影响下人与空间互动方式转变的研究进展,总结和展望ICT影响下未来空间的使用和设计逻辑,并在此基础上进一步提出数据增强设计在未来空间设计中的应用潜力,为顺应时代发展趋势、满足新时代人对空间的新需求提供参考。

1 ICT对人与空间互动的重塑

1.1 日常生活的虚实交织与空间使用的时空转移

随着信息技术对人们日常生活的渗透度的提升,互联网尤其是移动互联网的迅速发展深刻改变了人们衣食住行的方式。截至2020年12月,我国网民规模达9.89亿,互联网普及率达70.4%,手机网民占比99.7%^[14],我国已成为全球最大的数字社会。即时通信、线上办公、网络购物、网络社交、网络视频(含短视频)、网约车、在线教育、在线医疗等在线活动方式丰富了人们的日常生活,我国网民每天平均屏幕使用时间为6小时,平均使用手机

108次^[15]。由此可见,人们日常生活已逐渐与数字化形式深度绑定,形成现实生活与数字化生活互相交织的状态。

ICT产生的线上活动对线下活动产生的影响大致可以分为4个方面^{[16]270}。“替代”(substitution):ICT为各种各样的线下活动提供了可替换的线上活动,如线上办公、网络社交、在线服务等。“补充”(supplement):在一些场景下,新兴的基于ICT的活动补充了原来的活动,是一种新的活动形式,如AR、VR、XR等互动形式。“作为介质的促进”(facilitation):ICT也可能作为介质刺激并促进一些新地点的活动需求,如在线点评、网络推荐等。“时空间再分配”(reallocation):一些活动场景下,ICT只是对活动的时空间进行再分配,如外卖、共享办公等。

ICT影响下线上活动与线下活动相互交织,两者形成复杂的时空转换关系。基于人物理属性的线下活动是时空间连续的,而基于ICT连接属性的线上活动则是时空间不连续的^[17]。根据线上线下活动的时间同步性与活动关联性的差异,可将人们日常活动的虚实转换划分为4类:交替(异步—无关)、并存(同步—无关)、传递(异步—有关)与融合(同步—有关)(见表1)。因此,以时间维度为切片看待线上线下同步活动时,ICT影响下的活动呈现复合化^[18]与多任务^{[19]97}的特征,并表现出“前台”(foreground activity)和“后台”(background activity)的注意力差异^[20]。而以时间维度看待线上线下异步活动时,ICT影响下的线上活动对线下活动的替代、促进或分配作用促使活动的时空灵活性提升^{[16]279}。以空间维度为切片仅关注线上活动或以整体视角看待线上线下活动时,ICT影响下的活动便表现出时间及空间的碎片化^[21]或者破碎化^[22]的特征。

人们日常活动线上线下的虚实交织使得活动与空间的交互关系发生变化。一方面,线上活动的时空不连续性促进远程办公、远程服务等异地办公及服务空间的形成^[23]。另一方面,端到端、人到人的线上信息的交互与调度

也促使对同一空间不同时间安排的细化,促进共享空间如共享办公、共享居住等新的空间使用形式的产生^[24]。前者通过信息的空间连接属性实现不同空间之间的需求转移,后者则通过信息的时间连接属性实现同一空间在不同时间的需求整合。

1.2 城市空间的数实相生与日常需求的智能响应

近年来,随着物联网(Internet of Things, IoT)技术的不断发展,由工业领域提出并发展的“信息物理系统”(Cyber-physical System, CPS)及“数字孪生”(Digital Twin)等概念逐渐延伸到城市领域^[25]。一些研究者从体系架构层面提出自适应的智慧城市规划系统,突出基于数据驱动模型的城市资源配置。赵丽虹等^[26]从万物互联提升供需匹配视角强调信息物理系统在城市规划方法变革中的应用。甄峰等^[27]基于城市资源合理高效配置的目的,提出“人—技术—空间”一体的智慧城市规划框架,强调智慧的城市规划技术与智慧城市的规划之间的传导与实现关系。武廷海等^[28]从历史演变的视角,强调数字化信息化的城市系统通过供需信息精准匹配实现保障人们幸福生活目的的重要意义。另一些研究者则从具体空间设计策略视角,展望新技术满足人们新需求的实现路径。张恩嘉等^{[13]7}从数字创新技术与空间干预和场所营造融合视角提出颠覆性技术作用下的设计转变路径。韩亚楠等^[29]探索了新技术对城市更新的数字感知、增强设计、科学决策、公众参与等方面的应用潜力。整体而言,基于“全面感知—智能计算—精准匹配—协同响应”系统的城市空间能够实现数据与实体空间的相互影响和反馈(见图1),形成“规划—实施—评估”的数字化智能管理闭环,促进规划的实时评估、预警、动态智能反馈及远程管控^[30]。

城市空间的数实相生改变了人与空间的互动和需求匹配方式。在过去,城市空间往往在规划设计建造之后,由人去适应空间的设计形式,并通过人的出行和移动获取物质和信息

资源,然后在长期互动下设计并改造空间。而现在,随着空间的全面感知与智能反馈系统的构建,空间能够主动识别、动态调整进而满足人的需求。人对物质和信息的需求也可以不再仅依赖实体的空间形式,而通过物质流和信息流的形式进行动态匹配^[31]。

2 ICT影响下的未来空间组织逻辑

正如威廉·米切尔^{[8]13}在20年前预测的那样,“信息化对社会影响的深刻程度不亚于电气化,旧的社会结构——受地点和时间制约的组织方式——已经出现裂痕”。ICT编织的信息流网络连接时间和空间,将时空要素进行解构并重构。城市空间作为信息交换、商品生产及活动

载体的功能也进一步被拆解和调整^[32]。因而,城市空间原有的时空运行逻辑在ICT影响下发生了变化,ICT将改变现存的城市组织要素的功能和价值,并且重建它们之间的关系。

2.1 以时间换空间

城市不同功能被使用的频率不同。然而过去受限于数据获取和管理方法的时空精度,城市规划设计师及管理者难以对同一空间不同时间的需求进行感知,也不能精细化地管理和分配空间资源。因此,规划设计师长期通过冗余较多的低频的城市空间设计满足人们高频的活动需求。然而,随着经济社会发展水平的提升,大城市承载的人及其需求迅

速增长,原来冗余设计的空间在新的发展阶段暴露出资源紧张的问题,进而造成交通拥堵、住房紧张等一系列城市问题。与此相反,一些人口减少的城市则呈现出原本冗余设计的空间在新的发展阶段更加冗余甚至剩余的情况,造成鬼城、空城,或者新区活力不足等低效存量空间的问题。随着ICT对地理约束的降低,人们更容易了解不熟悉地方的空间信息,也更容易到达可视性较低的隐藏空间^[33],城市空间设计的冗余性可以在一定程度得以降低。以往针对不同的活动及功能的空间设计中,空间功能与空间形式需相互匹配。在未来,借助ICT对活动的引导及对空间的动态管理,规划设计师可以用时间换空间,实现空间的动态调整和混合使用,空间形式不再必须追随功能^{[9]69}(见图2)。

一方面,针对分散在各处的相同使用功能的空间,可以将低频空间如书房、休闲、娱乐、会议等功能进行整合,通过化零为整、空间共享及分时复用的方式,提高空间的使用效率(见图2a)。近年来,我国共享办公室、共享会议室、共享茶室、共享自习室、共享厨房、共享会客厅等基于互联网平台的共享空间产业规模发展迅速。客厅、书房、茶室、厨房等人们日常使用频率相对较低的私人空间被拆解,并进行公共化重组,消费者通过按时付费的方式获取空间的部分时段的使用权。使用但不拥有的共享思想^[34]在城市空间的使用上仍具有潜力。

另一方面,针对同一公共空间,我们可以通过基于数字边界的空间形态的动态调整引导同一空间不同时间的不同类型活动的空间布局,实现同一空间不同功能的分时组合(见图2b)。Sidewalk Toronto的动态路缘设计(dynamic curb)通过网格形模块化的数字铺装设计及自适应的交通信号灯的使用可以动态自由地调整空间的使用边界和功能。在交通高峰期为交通功能,可用作乘客上下车的停靠站,在交通非高峰期则可作为行人活动的空间。弹性灵活的空间设计能够充分发挥空间的使用潜力,提升空间的利用效率。

表1 日常活动虚实转换的4种场景
Tab.1 Four scenarios of virtual-to-real conversion of daily activities

时间同步性与活动关联性	无关	有关	活动的时空特征
异步	交替 例:线上上课、线下跑步	传递 例:线上外卖、线下吃饭	时空灵活性
同步	并存 例:线上看视频、线下吃饭	融合 例:线上直播、线下吃饭	复合化、多任务、前台与后台
活动的时空特征	时间及空间的碎片化/破碎化		—

资料来源:笔者自制。



图1 基于IoT架构的城市空间系统
Fig.1 Urban space system based on IoT architecture

资料来源:笔者自绘。

2.2 以信息换能量

随着互联网及移动互联网覆盖度的提升,以往城市空间的信息功能被互联网信息流逐渐替代。互联网信息在引导出行及活动、调整空间的使用及布局方面起到关键作用,以空间为核心的活动组织形式逐渐转换为以人为核心的活动组织。远程办公、线上服务、网络休闲等线上活动形式节约了人们出行和城市空间使用的成本,以往为了人们更容易获取信息而产生的出行成本及对空间资源的需求被大幅度降低。与此同时,新的线上活动也会促进新的出行需求和空间形式的产生。因此,城市空间会更加强调其作为活动容器的作用,并提供与众不同的、难以复制和被互联网替代的、具有本地独特吸引力的空间体验(见图3)。

一方面,教育、政务、咨询、会议等围绕信息服务所设计的功能空间在新的发展阶段的需求被降低,为了获取这些信息而产生的出行需求也被进一步缩减。部分空间对人的出行及活动的吸引力降低,逐渐失去人的各类活动构成的活力,从而产生负面的连锁效应,给城市规划、设计和管理带来挑战。但对于空间资源较为紧张的城市而言,这也可能带来新的机遇,例如剩余的仍需要出行满足的信息交流需求如线下会议、教育、咨询等,则可通过以时间换空间的共享空间形式满足;一些动态的交通载体也可作为信息活动的载体,实现出行即服务(Mobility-as-a-Service, MaaS)的移动空间形式;随着这些以信息服务为目的的空间体量被缩减,腾挪后的空间使用潜力则可以被进一步释放,从而满足体验性活动的空间需求。

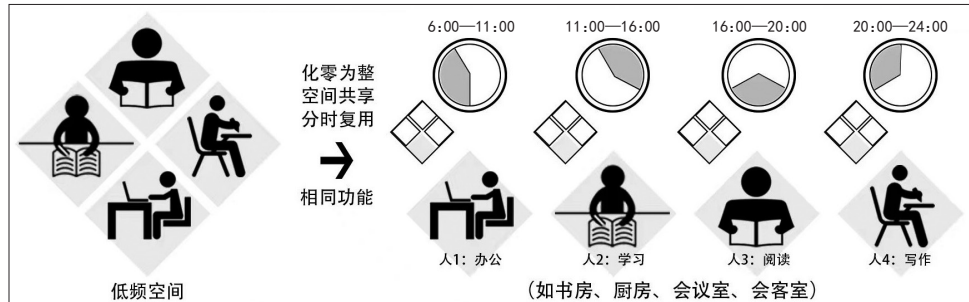
另一方面,无论是威廉·米切尔^{[8]187}还是爱德华·格莱泽^[35]都强调尽管ICT可以减少原本“必要”的出行,但人们仍然需要在特定的地点和时间,以直接的、面对面的方式相互交流和活动。互联网信息在其中可以扮演“橱窗”“口碑”“地图”“导游”等多样角色,从而促进和引导人的出行和活动。在此过程中,“金角银边草肚皮”的地理区位与“酒香不怕巷子深”的互联网区位博弈,给城市边缘、深处或

者其他可视性较低的空间提供前所未有的发展机遇。

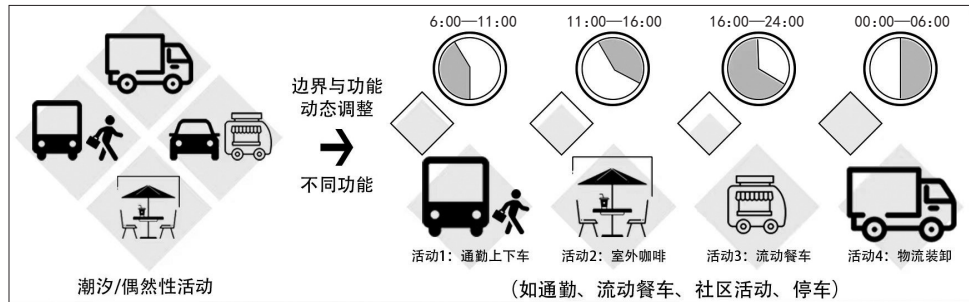
2.3 以物流换人流

建筑空间除了承担信息功能外,也承担商品及服务供给的功能。在过去,前店面和后房间分别起到信息提供和商品满足的功能。然而,以往信息的传递更多是单向的且途径单一的,消费者需要通过自身的流动主动去获取信

息并满足商品需求。随着店面的信息功能被互联网替代,前店面的重要性被降低,甚至可以与后房间进行拆离。后房间则不必位于租金较高的商业区,可以选择贴近消费者的区域或者贴近生产端的区域^{[8]184}。与此同时,双向流动的信息路径使得消费者可以提供自身的空间信息和需求,基于线上线下服务(Online to Offline, O2O)的服务者和产品提供商主动流向消费者^[36](见图4)。原来为了减少消费者



a 私人空间的公共化共享



b 公共空间的弹性灵活利用

图2 以时间换空间——相同或不同功能空间的整合与共享示意图

Fig.2 Exchanging time for space: a diagram of the integrated and shared space

资料来源:笔者自绘。

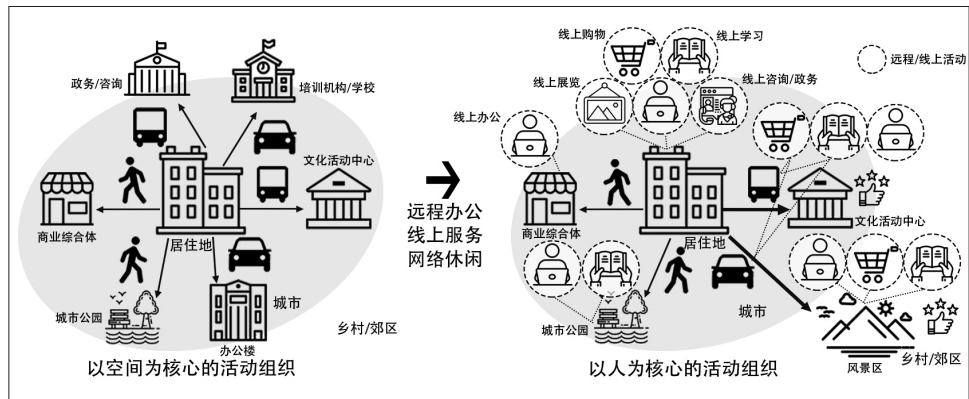


图3 以信息换能量——远程/线上服务改变人的出行需求及活动空间偏好示意图

Fig.3 Exchanging information for energy: a diagram of remote/online services changing the travel demand and spatial preference

资料来源:笔者自绘。

信息获取及出行成本而产生的各级商业中心的
空间区位的重要性被削减。因此,随着物质
流动方向的转变,商品/服务供给地的选址便
更加灵活。对商品和服务的及时性需求的差异
则会反映在服务空间离消费者距离的远近上。
以满足及时需求为主的商品与服务如社区团
购、外卖等的提供商更靠近消费者,而对及时
性要求较低的商品与服务如网购等的提供商
则可以离开所服务主体所在的城市,在周边城
市甚至全国、全球进行布置。以体验、在场经
济为主的消费者流动形式的活动空间载体仍然
对空间的可达性有一定的需求。因此,承载体
验性活动的空间载体与提供商品和服务的空
间载体在选址和设计上会有所差异。

伴随着流动方向变化的是城市交通组织
系统的调整。以往交通空间的设计主要为了
承载人流,因此注重对步行、公共交通、私家
车等不同出行形式的道路网络设计及设施配
套。而伴随着城市商品和服务流动方向的调
整和转变,城市空间针对物流仓储与运输的
空间形式设计开始涌现,如物流园区、物流配
送中心、快递驿站、智能快递柜等。在未来,随
着机器人配送等无人物流的发展,针对物流
配套的交通设施也将进行调整。例如雄安新
区、Sidewalk Toronto等通过地下管道的设计
满足物流运输的需求。京东通过智能化设
备和算法改造道路,实现无人配送(无人车/
机器人)所需的铁路协同。以往针对车流交
通设计的停车空间也开始转向地下/地上智能
仓储空间等的设计。

3 数字创新:面向未来的数据增强设计

在ICT的影响下,以时间换空间、以信息换
能量、以物流换人流3种新的空间组织和使用
逻辑使得办公、服务、游憩空间面临吸引力不
足、活力下降的问题,但同时也获得更大的选
址自由度,并更看重线下活动空间的体验性,
可以充分释放城市空间潜力;交通空间则会面
临更大的物流仓储和运输压力,需要适应城市
物流系统的改造和升级,实现交通空间的人机
友好。随着远程、到家等形式的活动及服务的

比例增加,居住空间及其周边作为人的日常活
动空间在ICT影响下更加重要,而其中使用频
率较低的功能可延伸到社区或者城市中被整
合和分时复用。

然而,无论是空间的选址和需求智能响
应,还是活动的预约和引导,都离不开ICT作为
基础设施在其中扮演需求感知、主体连接和信
息传递的作用。因此,面向未来的数据增强设
计需要通过“全面感知—智能计算—精准匹
配—协同响应”的数字创新工具来实现基于
数据分析的空间设计增强,从而适应人们日常
生活与城市空间的发展趋势。具体来说,数字
创新主要由大数据、云计算、人工智能、移动
互联网等“软件”技术和传感器(声光热、压力、
温湿度、位移等传感器)、执行器(管控设施、
信息设施及互动设施)等“硬件”技术,通过
与空间干预和场所营造的结合,将城市空间打

造为智慧城市的空间投影和载体,实现智慧/
未来城市的落地实践^{[13]8}。

在以时间换空间的场景中,数字创新在空
间干预层面的应用主要体现在通过传感器感
知空间的使用情况,自动匹配不同时段人群
的使用需求,并通过数字设施对时空边界进行
控制和自适应调整。数字创新在场所营造层
面的应用主要体现在通过手机应用、小程序
或其他智能设备收集、匹配、整合人在不同
时段的空间需求,并通过导航、通知等形式
引导人的活动。在以信息换能量的场景中,
在线休闲、远程服务及办公系统使得提供服
务的对象及空间不受消费者出行范围及可达
性的地理约束,可以自由选址。与此同时,剩
余的空间需要重新考虑它们的使用功能和提
供服务的在场价值。数字创新技术可以提升
城市空间作为活动载体的功能:通过空间干
预植入互动的声、光、电

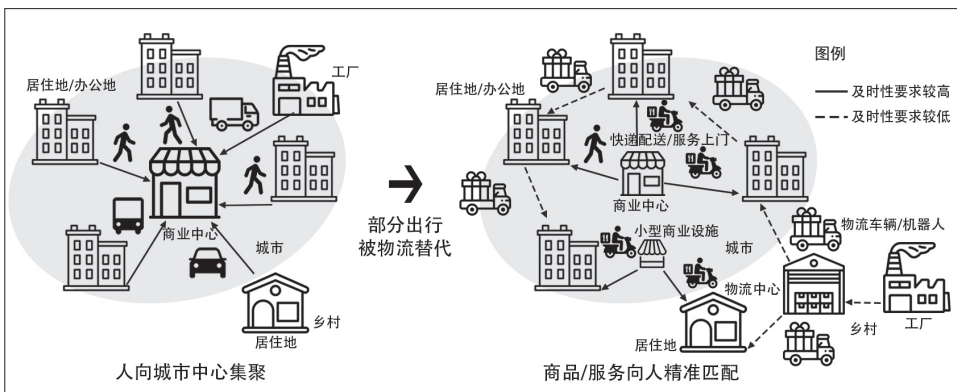


图4 以物流换人流——商品/服务与消费者的双向流动示意图
Fig.4 Replacing pedestrian flows with logistics: a diagram of two-way flows of materials/services and consumers
资料来源:笔者自绘。

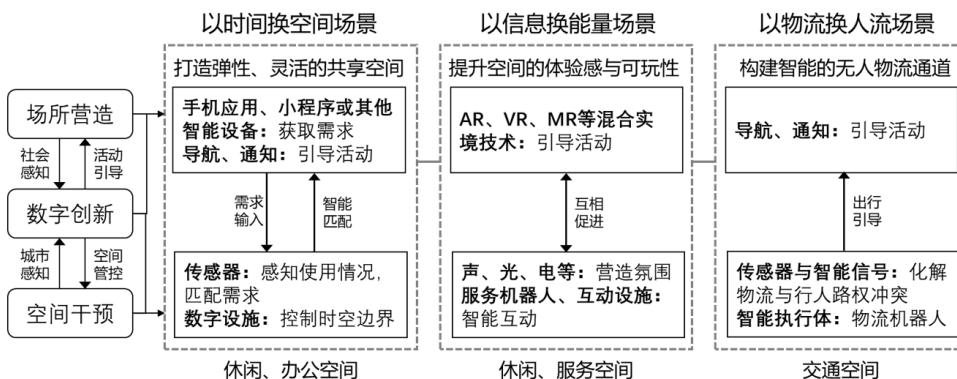


图5 数字创新在未来城市场景中的应用
Fig.5 Application of digital innovation in future urban space
资料来源:笔者自绘。

等氛围营造设施,布置服务机器人、互动娱乐设施等智能执行体,以及通过场所营造的AR、VR、MR等混合实境技术来提升空间的沉浸式体验和可玩性。在以物流换人流的场景中,由于服务场景的主体及移动方向的转变,部分服务空间的选址更加自由,而与物流相关的交通空间也将被智能化改造,实现车路协同。数字创新技术可通过空间干预布置多种类型的传感器实现路面及管道对物流载体的全面感知,以及多功能智能交通杆及智能信号实现对行人的感知和通行引导,并通过导航、通知等手机应用引导人流与物流的分离,保障行人安全与物流机器人的通畅运输(见图5)。

总体而言,数字创新通过社会感知和城市感知实现对供给与需求的全面感知,然后通过空间干预和场所营造方法提升空间的灵活性、增加体验感与可玩性,并实现对智能无人物流系统的构建。

4 总结与讨论

ICT的发展给城市规划与设计带来新机遇和新挑战。本文从日常活动的视角梳理出随着ICT对日常生活渗透度的提升,人们日常生活呈现虚实交织、空间使用呈现时空转移的特征。本文也从空间形式的视角归纳出随着IoT、5G等ICT基础设施的发展,城市空间可以在数字孪生系统的基础上实现与数据的实时交互,并智能响应城市的日常需求。在此基础上,本文从“以时间换空间”“以信息换能量”和“以物流换人流”3个方面展望了ICT影响下城市空间的时空逻辑变化,以及现存的城市组织要素的功能和价值的重塑。具体来说,“以时间换空间”强调ICT对空间的时间序列的精确管理,促进空间的错峰使用和智能弹性;“以信息换能量”则注重ICT对出行和空间需求的调节作用,强调以空间为核心的活动组织形式向以人为核心的活动组织的转变。一方面城市实体空间信息功能被替代,使得部分出行需求降低,另一方面,ICT也会引导新的活动类型,因此需要人在场活动的城市休闲和服务空间则应需要更加具有体验性和可玩性,并充分利用

互联网区位优势,实现空间布局的灵活性。“以物流换人流”关注ICT对以商品与服务为核心的逆向交通流的促进作用,从而使部分满足及时需求的商品及服务空间更贴近消费者,而对及时性需求不高的商品及服务空间则可以远离消费者。并且由于物流需求的增长,城市交通空间也将由围绕人的出行配套拓展到兼顾人流、物流的空间形态调整。最后,本文从面向未来的数据增强设计角度讨论了数字创新以空间干预和场所营造两种形式提升办公与休闲空间的灵活弹性、增强休闲与服务空间的体验感与可玩性,以及拓展交通空间的智能无人物流能力等方面的潜力。

本文提出的针对未来空间的展望有些已经有显著的发展趋势和空间表征,例如以O2O服务为代表的外卖、社区团购及网络购物使得无堂食空间的中央厨房、社区团购“网格仓+门店”、淘宝村等新的空间形式涌现。有的现象刚刚开始萌芽和发展,例如共享客厅、共享自习室、共享办公空间等。还有的形式尚在技术探索及实验阶段,例如全面感知的车路协同融合设计、地上地下无人物流运输体系等。然而,本文只从城市空间可能发生的转变进行讨论,但实际上城市空间中仍然有许多不会变化的要素,原来的日常生活方式和空间组织形式仍然会存在并延续,ICT只是提供了一些新的可能性,城市空间会因为这些新的可能性变得更加拼贴和丰富。

参考文献 References

[1] 龙瀛,沈尧. 数据增强设计——新数据环境下的规划设计回应与改变[J]. 上海城市规划, 2015(2): 81-87.
LONG Ying, SHEN Yao. Data augmented design: urban planning and design in the new data environment[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2015(2): 81-87.

[2] 高喆,陈伟,宁玲. 数据增强设计在武汉市中心体系规划中的应用[J]. 规划师, 2016, 32(12): 87-90.
GAO Zhe, CHEN Wei, NING Ling. The application of data augmented design in Wuhan center system planning[J]. Planners, 2016, 32(12): 87-90.

[3] 盛强,方可. 基于多源数据空间句法分析的数字化城市设计——以武汉三阳路城市更新项目为例[J]. 国际城市规划, 2018, 33(1): 52-59.
SHENG Qiang, FANG Ke. Digital urban design using space syntax analysis based on multi-source data: an urban renewal project in Wuhan Sanyanglu Area[J]. Urban Planning International, 2018, 33(1): 52-59.

[4] 杨俊宴. 全数字化城市设计的理论范式探索[J]. 国际城市规划, 2018, 33(1): 7-21.
YANG Junyan. Exploration on theoretical paradigm of all-digital urban design[J]. Urban Planning International, 2018, 33(1): 7-21.

[5] 周垠,龙瀛. 数据增强设计下的北京行政副中心评估[J]. 上海城市规划, 2016(3): 1-8.
ZHOU Yin, LONG Ying. Assessment of Beijing sub-center based on data augmented design[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2016(3): 1-8.

[6] 吴志强. 人工智能辅助城市规划[J]. 时代建筑, 2018(1): 6-11.
WU Zhiqiang. Artificial intelligence assisted urban planning[J]. Time + Architecture, 2018(1): 6-11.

[7] 周怀宇,刘海龙. 人工智能辅助设计: 基于深度学习的风景园林平面识别与渲染[J]. 中国园林, 2021, 37(1): 56-61.
ZHOU Huaiyu, LIU Hailong. Artificial intelligence aided design: landscape plan recognition and rendering based on deep learning[J]. Chinese Landscape Architecture, 2021, 37(1): 56-61.

[8] MITCHELL W J. E-topia: "urban life, Jim—but not as we know it"[M]. Cambridge: MIT Press, 2000.

[9] BATTY M. Inventing future cities[M]. Cambridge: MIT Press, 2018.

[10] 曹哲静,龙瀛. 数据自适应城市设计的方法与实践——以上海衡复历史街区慢行系统设计为例[J]. 城市规划学刊, 2017(4): 47-55.
CAO Zhejing, LONG Ying. Methodology and practice of data augmented design: case study of slow traffic system design in Shanghai Hengfu Historical District[J]. Urban Planning Forum, 2017(4): 47-55.

[11] 甘欣悦,龙瀛. 新数据环境下的量化案例借鉴方法及其规划设计应用[J]. 国际城市规划, 2018, 33(6): 80-87.
GAN Xinyue, LONG Ying. Methodology and application of quantitative case study in urban planning & design in the new data environment[J]. Urban Planning International, 2018, 33(6): 80-87.

[12] 龙瀛,张思嘉. 数据增强设计框架下的智慧规划研究展望[J]. 城市规划, 2019, 43(8): 34-40, 52.
LONG Ying, ZHANG Enjia. Smart urban planning under the framework of data augmented design[J]. City Planning Review, 2019, 43(8): 34-40, 52.

[13] 张思嘉,龙瀛. 空间干预、场所营造与数字创新:

- 颠覆性技术作用下的设计转变[J]. 规划师, 2020 (21): 5-13.
- ZHANG Enjia, LONG Ying. Spatial intervention, place making and digital innovation: design transformation driven by disruptive technologies[J]. *Planners*, 2020(21): 5-13.
- [14] 中国互联网络信息中心. 第47次中国互联网络发展状况统计报告[R/OL]. (2021-02-03) [2022-03-19]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/03/content_5584518.htm.
- China Internet Network Information Center. The 47th China statistical report on internet development[R/OL]. (2021-02-03) [2022-03-19]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/03/content_5584518.htm.
- [15] 爱尔眼科, 一点资讯. 国民手机用眼行为大数据报告[R/OL]. (2018-06-05) [2022-03-19]. http://zqb.cyol.com/html/2018-06/08/nw.D110000zqnb_20180608_3-03.htm.
- Aier Eye Hospital Group Co., Ltd., Yidianzixun. Big data report on national mobile phone eye behavior[R/OL]. (2018-06-05) [2022-03-19]. http://zqb.cyol.com/html/2018-06/08/nw.D110000zqnb_20180608_3-03.htm.
- [16] MOKHTARIAN P L, SALOMON I, HANDY S L. The impacts of ICT on leisure activities and travel: a conceptual exploration[J]. *Transportation*, 2006, 33(3): 263-289.
- [17] STARIKOVA A V, DEMIDOVA E E. Analysis of youth activities in the digital age: time-geographical approach[J]. *Geography, Environment, Sustainability*, 2021, 14(1): 234-240.
- [18] 姜玉培, 甄峰. 信息技术对城市居民生活空间的影响及规划策略研究[J]. *国际城市规划*, 2018, 33 (6) : 88-93.
- JIANG Yupe, ZHEN Feng. Study on the impact of ICT on urban residents' life-space and spatial planning strategy[J]. *Urban Planning International*, 2018, 33(6): 88-93.
- [19] 李春江, 张艳. 日常生活数字化转向的时间地理学应对[J]. *地理科学进展*, 2022, 41 (1) : 96-106.
- LI Chunjiang, ZHANG Yan. The time geography response to the digital transition of everyday life[J]. *Progress in Geography*, 2022, 41(1): 96-106.
- [20] THULIN E, VILHELMSON B. Bringing the background to the fore: time-geography and the study of mobile ICTs in everyday life[M]//Ellegård K. *Time geography in the global context*. London: Routledge, 2018.
- [21] 王晶, 甄峰. 信息技术对城市碎片化的影响及规划策略研究[J]. *国际城市规划*, 2015, 30 (3) : 66-71.
- WANG Jing, ZHEN Feng. Study on the impacts of information and communication technologies on urban fragmentation and planning strategy[J]. *Urban Planning International*, 2015, 30(3): 66-71.
- [22] 尹罡, 甄峰, 席广亮. 信息技术影响下城市休闲空间生产机理及特征演变研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2014, 30 (6) : 121-124.
- YIN Gang, ZHEN Feng, XI Guangliang. A study on production mechanism and evolution characteristics of urban leisure space affected by information and communication technologies[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2014, 30(6): 121-124.
- [23] COENEN M, KOK R A W. Workplace flexibility and new product development performance: the role of telework and flexible work schedules[J]. *European Management Journal*, 2014, 32(4): 564-576.
- [24] COLL-MARTINEZ E, MENDEZ-ORTEGA C. Agglomeration and coagglomeration of co-working spaces and creative industries in the city[J]. *European Planning Studies*, 2020, doi: 10.1080/09654313.2020.1847256.
- [25] BATTY M. Digital twins[J]. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2018, 45(5): 817-820.
- [26] 赵丽虹, 王鹏. 对ICT背景下城市规划技术方法变革方向的思考[J]. *当代建筑*, 2020 (12) : 51-55.
- ZHAO Lihong, WANG Peng. Research on the development of urban planning under the background of ICT[J]. *Contemporary Architecture*, 2020(12): 51-55.
- [27] 甄峰, 孔宇. “人—技术—空间” 一体的智慧城市规划框架[J]. *城市规划学刊*, 2021 (6) : 45-52.
- ZHEN Feng, KONG Yu. An integrated "human-technology-space" framework of smart city planning[J]. *Urban Planning Forum*, 2021(6): 45-52.
- [28] 武廷海, 官鹏, 李嫣. 未来城市体系: 概念、机理与创造[J]. *科学通报*, 2022, 67 (1) : 18-26.
- WU Tinghai, GONG Peng, LI Yan. Future cities as a system of systems: its concept, mechanism and creation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(1): 18-26.
- [29] 韩亚楠, 茅明睿, 贺俊堯, 等. 新技术驱动下城市微更新的设计赋权——基于北京双井街道参与式微更新实践[J]. *新建筑*, 2021 (4) : 11-17.
- HAN Ya'nan, MAO Mingrui, HE Junyao, et al. Design empowerment for urban micro-renewal driven by new technology: Shuangjing micro-renewal practice based on human and evidence-based participatory design methodology[J]. *New Architecture*, 2021(4): 11-17.
- [30] 杨滔, 秦凌, 黄奇畴, 等. 城市智慧空间的设计与建构[J]. *未来城市设计与运营*, 2022 (1) : 17-22.
- YANG Tao, QIN Ling, HUANG Qiqing, et al. Design and construction of urban smart space[J]. *Future City Studies*, 2022(1): 17-22.
- [31] BATTY M. *The inventive century*[M]. Cambridge: MIT Press, 2018.
- [32] 周榕. 硅基文明挑战下的城市因应[J]. *时代建筑*, 2016 (4) : 42-46.
- ZHOU Rong. Urban responses against challenges posed by cyber civilisation[J]. *Time + Architecture*, 2016(4): 42-46.
- [33] ZHANG F, ZU J, HU M, et al. Uncovering inconspicuous places using social media check-ins and street view images[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2020, 81: 101478.
- [34] KELLY K. *The inevitable: understanding the 12 technological forces that will shape our future*[M]. New York: Penguin, 2016.
- [35] GLAESER E. *Triumph of the city: how our greatest invention makes us richer, smarter, greener, healthier, and happier*[M]. London, England: Penguin Books, 2011.
- [36] 牛强, 易帅, 顾重泰, 等. 面向线上线下社区生活圈的服务设施配套新理念新方法——以武汉市为例[J]. *城市规划学刊*, 2019 (6) : 81-86.
- NIU Qiang, YI Shuai, GU Zhongtai, et al. New concept and approaches to the reconfiguration of service facilities of online and offline community life circle: a case study of Wuhan[J]. *Urban Planning Forum*, 2019(6): 81-86.

协频城市:时空数据增强设计中的频度协同*

Synergised City: Frequency Synergy in Spatiotemporal Data-Augmented-Design

沈尧 SHEN Yao

摘要 真实的城市瞬息变化,持续演进。得益于海量的跨模态高频时空感知数据的涌现,城市分析方法与干预手段持续“高频化”,与较为“低频”的传统规划理论形成互补,为城市的短期、长期干预分别提供了路径。“低频城市”与“高频城市”有机结合的复合态是未来城市的特点,进而提出一种新的规划设计视角——“协频城市”,其强调高低频协同的城市研究和干预方法,以城市时间频度为切入点,运用频度与空间规划的单元、尺度、粒度、距离等要素的紧密联系,提倡尊重时空数据的自然频度和尺度涌现机制,以及与城市议题干预需求对应的必要性,以智能技术作为一种协频和调频工具箱形成以地点为视角、时空规律发现为特点的时空数据增强的路径。提出以整合城市频度作为一种发现城市智能和探索新规划理论的重要手段,指出在城市研究和实践中运用“频度智能”对于规划智能化的积极意义。

Abstract Real cities continue shifting and evolving almost instantly. With the massive cross-modal, high-frequency, and spatiotemporal data, the approaches in urban analytics and spatial intervention are now known to be high-frequency, complementing the conventional, low-frequency methods, and providing new possibilities for short-term and long-term decision-making for urban wellbeing. The so-called "high-frequency city" and "low-frequency city" imply two paradigms that are not well-associated and mutually referenced, and the scrutiny on the urban frequency and on the cities under different frequencies is very still absent. This research introduces a new paradigm named "hybrid-frequency city" as a new methodology to incorporate the high-frequency city and low-frequency city comprehensively. It is argued that neither a fully high-frequency city nor a pure low-frequency city is the ultra-form of the future city. Urban frequency is defined as a fundamental element in the hybrid-frequency city, which is closely associated with domains, resolution, scales, etc. In our framework, the method to calibrate proper resolutions and scales for the purposed spatial domain is proposed and a frequency modulator is required for synergising the interventions across domains, scales, and resolutions for various urban issues. It is demonstrated that urban frequency is an essential type of urban intelligence that benefits relevant urban studies and practice with domain-scale-resolution precision.

关键词 大数据;频度;数据增强设计;城市科学;规划协同

Key words big data; frequency; Data Augmented Design; urban science; planning synergy

文章编号 1673-8985 (2022) 03-0008-06 中图分类号 TU981 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. sup. 20220302

作者简介

沈尧
自然资源部国土空间智能规划技术重点实验室
同济大学建筑与城市规划学院
副教授, 博士生导师
英国伦敦大学学院高级空间分析中心
荣誉研究员, eshenyao@tongji.edu.cn

0 引言

随着城市感知基础设施的建设和相关技术的发展,各种跨模态、时空精细化的数据不断涌现,城市正变得越来越智能化^[1]。对于时空数据增强的规划设计而言,时间频度智能已成为城市智能的一个重要维度^[2-3]。基于高频瞬变数据的“高频”城市不仅是理解城市动态现实的新视角,也正在成为未来规划设计的重要对象^[4]。它与更注重长期目标的传统规划

理论及规划设计形成对比和互补,成为快速响应的城市干预路径^[5]。关于高频城市的认识仍处于初期阶段,其与对应的低频城市的关系及规划设计应用的一般路径仍缺乏研究。

未来城市是“低频城市”向“高频城市”复合的“协频城市”,需结合高频响应和低频支持,凝练城市时空规律,提高时空数据增强的规划设计的时空精确性和有效性。本文从数据环境中的频度入手,讨论高频、低频城市规

*基金项目:国家重点研发计划课题“城市韧性测度及动态演化机理”(编号2020YFB2103901-1);国家自然科学基金“面向高频城市的空间网络绩效评价方法研究”(编号51908413)资助。

划设计的范式转变,提出频度协同对于数据增强设计^[6]的必要性;探索频度与空间单元、粒度、尺度、距离定义等要素的内在联系,强调针对不同城市议题采用涌现的效用空间与特征频度的重要意义,总结基于频度协同的时空数据增强设计的一般框架。本文认为频度协同是一种发现城市智能和探索新规划理论的重要手段,其在城市研究和实践中“频度智能”的运用对于规划智能化具有积极意义。

1 新数据环境下的协频城市

1.1 传统规划设计的“低频城市”

低频城市指的是受限于感知基础设施条件、获取难度、计算条件和城市科学基础,将真实高频城市活动归纳为较长周期性的总体空间特征,应用于规划设计应对的远景蓝图的实现。传统的城市规划与设计便是一种面向“低频城市”的干预方法,通常关注的是物质空间营造,一般服务于较为长期的建设和发展目标。城市物质空间在短时间内自身变化较少,本身亦属于低频城市要素。相关的城市规划理论和方法也偏重对现象的归纳,重视对普世的、定性的城市规律的总结,方便案例间知识迁移及规划共识的快速形成。更重要的是,城市数据环境的设定决定了人们感知城市和设计介入的基本方法。

虽然传统的规划设计亦讲求实际踏勘、社会调研等截面数据,但一般而言还是主要依赖于空间统计数据等低频数据。低频数据主要指的是截面化的、更新频率低且较难获取的,通常依赖于普查、测绘、对地观测等手段所形成的城市间歇感知数据(如人口普查、交通出行调查、经济普查数据等)。对低频数据的依赖是传统城市数据环境的重要特征之一。在传统城市数据环境下,各类空间数据更新较慢、信息维度较少,模态相对单一,数据交互一般按照层结构组织,相互之间的互动逻辑是相对简化的“空间重叠”逻辑(见图1)。这在一定程度上也影响了对应的规划设计方法(见表1)。传统数据环境下的规划设计一般将规划设计蓝图抽象为可分解、可叠合的多层城市系统(如

交通、绿地、水系、开放空间等)。这样的树形结构通常易于理解,方便经验迁移,符合人们潜意识中对于可理解系统的归纳习惯,但也容易忽略不同系统之间存在的复杂联系,使得规划设计对于动态的社会生活干预失效^[7]。因此,如果假设数据环境和规划设计环境的暗合存在,那么传统规划设计的方法实际上非常接近于一种简化的空间信息模型,通过监控、编辑和可视化不同层次的空间要素系统,以达到相对远期规划目标。当规划设计中的频度变化细微时,空间尺度、粒度等便成为不同类型规划设计的特征,甚至成为特定规划的成果要求。

1.2 新数据环境下的“高频城市”

高频城市得益于移动互联网、物联网等城市感知基础设施网络的快速完善,城市数据获取难度和成本降低,计算条件和技术跨越式发展,城市活动被真实地记录、即时传送和处理,以支持规划设计的快速分析、决策和响应。高频城市数据是动态的、跨时空截面的、时新时异的、通常依赖于志愿者型的社会感知手段所形成的城市持续感知数据,其是新数据环境的重要特点^[8]。新数据环境下的规划设计被认为能够应对“高频城市”的空间干预问题。这样的规划设计依赖数据科学与人工智能等技术,通常关注的是对于空间的动态绩效的保障和提升,短期目标的快速响应。在此背景下,空间中存在的高频联系作为空间的动态功能性体现,成为高频城市的重要要素。不断涌现的新城市理论和方法,虽暂未形成新的知识体系,但已展现出新特点,如注重时空精细化的城市现象的识别,强调通过定量手段挖掘城市规律,以城市模型或工作流程辅助知识迁移,能够依据政策、主体、对象等差异形成不同成果,注重方法科学性和技术理性辅助下的规划共识的涌现。

在新的数据环境中,不同时空数据大量存在时空维度上的结构性映射和相互关联,存在跨模态融合难度和语义解析的可能偏差,因此规划要素不限于线性的建成环境要素,也包含它们之间的复杂时空耦合关系。城市规划与设

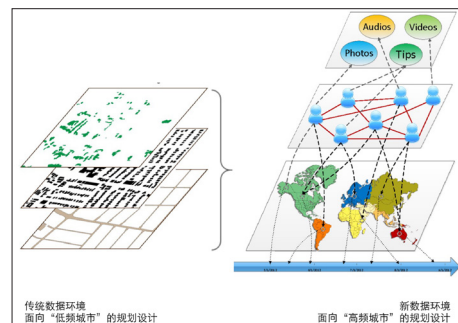


图1 频度转换视角下新旧数据环境差异图示
Fig.1 Comparison between the old and new data environment with respect to frequency

资料来源:笔者自绘。

计干预则被细化到不同的时间窗口,应对可能出现的短期问题。因此,高频城市是智慧城市的重要特征,其内涵是对城市要素之间的时空关系的精准把握,被干预的方式从蓝图式规划迈向智能规划,注重规划与设计对不同频度下城市问题的响应能力。高频城市展现出前所未有的复杂性,需要依赖新的城市科学和智能规划模型进行应对^[9]。这些城市模型依赖于感知与计算技术,以时空要素的处理、运算和模拟为规划设计的路径来响应较为明确的城市绩效提升目标,其中除了空间尺度外,还应注意时间频度及其他模型中所涉及的参数设定对结果的潜在影响。频度将是区别新数据环境下各种规划设计类型的重要维度。

1.3 频度协同的未来城市

高频城市和低频城市的互补性高于替代性,我们仍需要面对不同频度下的规划设计的干预问题。因此,协频城市是频度协同的未来城市认知和干预框架,它基于高频城市和低频城市的复合态,依赖于即时和周期的主被动感知技术构建覆盖多时间频度,真实的城市活动被记录在不同的时空窗口间妥善映射,同时支持长期建设发展和短期治理目标,将长期目标作为动态响应的累积目标,将动态响应作为长期目标的时空细化的一种规划协同路径。

我们如何规划城市,实际上与我们如何构建支持规划决策的城市信息模型密切相关^[10-11]。协频城市的特点将从对于低频城市和高频城市所支持的信息模型入手,理解和重塑空间、

技术与人的复杂关系^[12]。当下的城市信息模型在频度上产生了两种“极端”：一是以地点为视角的地点信息模型；二是以个体为视角的个体信息模型，分别代表低频和高频信息模型的差异（见图2）。地点信息模型通常以地点为视角，以空间统计为观测方法，容易对应规划编制的需求空间范围，如事权边界包括行政边界、产权边界等，或设计要素如街道、地块、建筑等。它的优势是数据基础较为简单，较易获取，容易复制和解释，不通过复杂建模也可以构建整体趋势的联系，能够直观地联系数据与规划设计。而个体信息模型则相反，它以个体为视角，解释了各类主体（人、企业、动植物、自动化运行的车量等）时空行为的复杂性和真实性，但通常与规划编制的空间范围不一致，数据较难获取，必须依赖模型解释，空间关系呈现出局部异质性，较难解释，需要通过地点模型联系数据与规划设计。

频度是区分信息模型的重要维度。由于频度差异，地点信息模型与个体信息模型在行为真实度、数据易获度、计算难度、可解释度和潜在偏误方面呈现出截然不同但相互补充的关系。若能选择好合适的频度，便可能集合两种信息模型的优势，避免劣势。因此，笔者认为在某些时间频度范围内，存在一种支持协频城市的（时空）数据增强设计信息模型（Data-Augmented-Design Information Model, DADIM）。它基于地点为表示单元，响应需求，保证较高的可解释性，但以地点内、地点间的时

空行为作为分析对象来兼顾行为动态的真实性，以平衡可解释度和行为真实性；它强调探索自下而上的治理频度区间，以降低数据的获取和计算难度，但尽可能保证模型的精巧性和轻量化；它能够通过跨频度数据进行相互校核，减少时空偏误，增强模型稳健性；并能够融合空间视角下整体行为空间特点与个人视角下的局部特征，以推进对新的规划设计洞见发现。因此，找寻合适的频度区间是构建这一（时空）数据增强设计信息模型的基础，在此基础上高频城市和低频城市的规划设计响应能够获得同步，形成二者相互支持、持续增强的未来城市图景。

2 频度作为（时空）数据增强设计的基本要素

在协频城市背景下，时空数据增强设计信息模型为时空数据增强设计的相关决策提供了数据底板。然而，为了形成时空数据增强设计决策模型，仍需从频度角度出发，回应若干基本问题：（1）频度如何影响数据增强设计的模型环境设定？（2）频度是如何在不同数据间涌现的？（3）频度是如何在规划过程中被使用的？以上3点分别对应时空数据增强设计中的模型环境设定、频度选择和频度需求匹配问题。

2.1 频度与单元、粒度、尺度、距离的复合性

城市频度不是一个孤立的维度，它和城市诸多其他属性相辅相成，影响我们认识、计算和设计城市的方式和方法（见图3）^[13]。通常

而言，城市频度会呈现出与单元粒度和空间尺度的同向性，即一般而言，随着频度降低，通常我们更关注整体的、较为静态的趋势，用于观测的尺度也通常变得较大，粒度也变得较粗。比如当我们测度区域的功能结构时，区域内群体性的行为特征显然比个体行为更能表达结构属性，而避免过度的噪音。

除频度、粒度和尺度的同向性以外，适配它们变化的空间单元定义也在发生变化。当频度很高时，个人的感知系统所对应的空间单元是主要的关系单元，如感知的凸空间，或是视线与视域；随着频度降低，城市可观察的物理空间逐渐成为分析单元，如引力点、公共空间、建筑和地块；而频度更低时，空间分析单元开始倾向于空间网格，或者多边形管理边界，而忽略一些建成环境的空间细节。因此，频度视角的另一个关键内涵是研究对象定义的变化。我们甚至可以将之类比到各种规划设计类型，比如城市设计实际上比土地利用规划要更加高频，因为更加关注人们的行为与细节空间设计的关联；控制性详细规划则相对城市设计更加低频，其通常以地块为操作单元，更加关注公共空间、建筑在其中的管控和落实；城市总体规划、区域规划等更加强调整低频的、稳定的发展空间格局塑造。

城市频度变化还与距离的定义有关，这将更加直接影响我们如何计算不同的城市单元所组成的系统联系。一般而言，距离存在多种定义方式，但本质上一种克服空间紧邻的消耗，可以被大致分为能量消耗和认知消耗，分

表1 新旧数据条件下的低频城市与高频城市规划设计的特征比较
Tab.1 Comparison between high-frequency and low-frequency cities in terms of data conditions and planning paradigms

比较内容	传统数据环境下 面向“低频城市”的规划设计	新数据环境下 面向“高频”城市的规划设计
数据特征	低频、低维、简单模态的等级系统	高频、高维、跨模态的复杂系统
数据结构	缺少结构异质性与映射关系	富含结构异质性与映射
模型内涵	基于数量的观测与统计	基于质量的感知与计算
模型原型	空间信息模型	智能规划模型
数据处理	监控、编辑与可视化	处理、运算与模拟
系统观	通常基于城市系统的“空间叠合”	通常基于城市系统的“时空耦合”
规划知识迁移	通常基于经验迁移	通常基于定量模型迁移
设计规划目标	通常基于远期规划目标	通常基于短期治理目标
响应规划成果	成果通常依赖于建成环境要素	成果还包含政策、主体、对象等要素
尺度效应	空间尺度、粒度等	除了尺度效应还包含其他参数

资料来源：笔者自制。

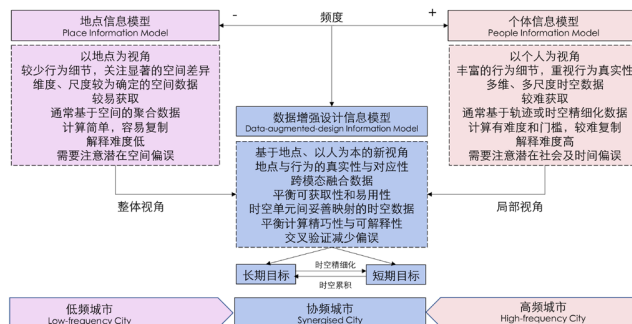


图2 协频城市作为高频城市和低频城市的复合态
Fig.2 Data-augmented-design information model as a well-balance of high and low frequency cities

资料来源：笔者自绘。

别对应的几何测度为米制距离和认知距离。高频城市中连接分析单元（如视域、视线、领域等）的是认知拓扑距离，因为空间尺度较小，能量消耗在可承受范围以内；低频城市中分析单元的相互关系通常是米制地理距离，因为空间尺度大，能量消耗成为最重要的互动成本，与此同时，米制距离还可以与时长、花费等要素等价。而其他频度下的城市则很可能呈现出两种距离效应的叠加，需要考虑联系的两种成本。

需要指出的是，有时候频度、单元、粒度、尺度及距离的复合关系可能在一定范围内出现复杂的组合关系，进而表现为不同的空间语义特征。如人们的出行、电量消耗、房屋交易等信息，都可能在感知（空间）、视线、引力点、公共空间、建筑甚至是地块等尺度被观测或记录。但很显然，总体而言，这些数据在不同环境参数条件下所呈现出的语义则可能发生很大变化。以出行行为为例，在高频度、细粒度、小尺度，以感知、视线为分析单元，注重几何空间视角的模型环境下，出行行为可能表现出寻路行为特征；而在中频度、中粒度、中尺度，以建筑或地块为单元，注重认知距离和米制距离作用的模型环境下，出行行为则可能被细化成为起讫点的空间布局特征。

城市频度在传统规划中是一个相对固定的维度，然而在智慧城市的背景下，城市频度分异加剧，面向不同类型的数据增强设计任务的适用频度确定变成一项重要挑战。频度、单元、粒度、尺度、距离的复合设定是时空数据增强设计

决策模型的观测、分析和设计的环境参量。

2.2 时空数据的时间特征频度与空间效用布局

城市高频时空数据理论上可以被投影到多个时空尺度，进而呈现出不同的特征和效用。对于给定的时空数据集，它会在某一个时间频度区间，与某一个空间布局（由单元、粒度、尺度共同决定），呈现出较为稳定和均衡的特点，服务于现象的复现^[14]。本文将具有稳定特点（稳定的时间变异性）的时间形态称作“特征形态”，将与时间特征形态对应的、具备空间稳定特点（稳定的空间变异性）的空间布局称作“效用布局”（见图4）。低于特征形态的频度，时间变异性增加则“噪音”形态越发明显；高于该频度，时间变异性减少则“背景”形态越发明显。与之类似，效用布局依赖于一个较为稳定的空间变异性区间，避免“噪音”布局和“背景”布局。借用极端时空变异性，将会影响数据增强设计中依赖的定量逻辑的可迁移性、可复现性和稳健性，进而为规划设计绩效的持续提升带来困难。时空变异性可以从不同的指标上进行定量测度，如时空熵^[15]、变化度^[16]、时空扫描统计^[17]等。因此，在时空数据增强设计中需注意使用时空数据中涌现的典型形态，而非变异性较高的形态，保证数据特征的代表性，进而构建可复现的时空规律，避免人为构造相关或者因果关系，从而降低规划策略失准风险，保证

数据增强设计的科学性。因此，尊重时空数据自身在时间频度和空间尺度上的涌现规律，是保证数据增强设计成果的有效性的前提之一。

2.3 城市议题的需求频度与尺度

数据增强设计的一个重要目标是服务于社会经济绩效的精准提升^[18]。这一精准性的落实不仅体现在时空数据分析与计算中的时间特征形态和空间效用布局，也体现在时空设定与拟涉及城市社会经济问题的自身时间频度和空间尺度的组合上。只有将曾是议题所依赖的时空要求与时空数据的稳定特征对应起来，才能建立起准确的时空归因（spatiotemporal attribution），从而利用这种时空因果关系去进一步规划与设计。本文初步解析12种城市议题在Web of Science搜索引擎中最高引15篇文章中的使用数据频度调查，展示重要文献中这些城市问题在时间频度（分、时、天、年）和空间尺度（微观、中观、宏观）双轴象限中的大致分布（见图5）。其中不难发现，城市议题在频度维度上呈现出一定的频度分布的一般规律，即大量的规划决策是高频的，而少量的规划决策是低频的。这也从侧面印证了前文讨论的时间频度与空间尺度的复合性，即我们通常较少在低频目标中涉及非常细微的个体差异，而在高频目标中则可兼容各个空间尺度。从频度视角看，人们的时空行为（寻路、步行流、交通流、犯罪等）发生以分钟和小时为频度；城

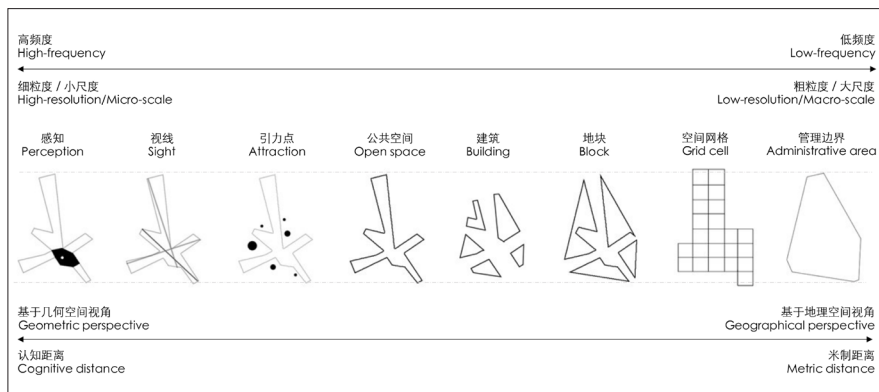


图3 频度视角下空间单元、尺度、粒度与距离定义的转换

Fig.3 Definition of spatial unit, scale, resolution, and distance in the condition of frequency

资料来源：笔者自绘。

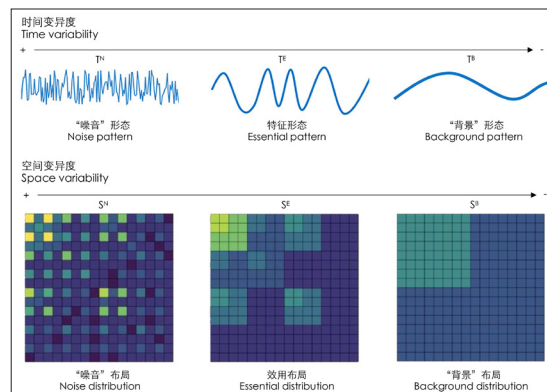


图4 城市时间特征形态与空间效用布局的涌现

Fig.4 Emergence of essential patterns in space-time variability

资料来源：笔者自绘。

市业态变化、流行病传播形态、城市韧性过程，则以天为频度；居民迁居和空间网络的变迁频率则为年，城市系统、土地利用变化、气候变化则通常在10年以上。需要说明的是，这里的频度依赖是基于研究和规划干预需求的，而非事实上某一现象的绝对事实频度，即通常城市研究和规划干预的城市议题有其可观测、可研究、可干预的某种频度和尺度需求。这些需求来自观测现象的显著程度或者事权干预的便利性，形成了对应规划设计决策需求的空间尺度依赖，如步行形态通常需要街区尺度干预，而城市交通流则不得不聚焦整个城市系统。因此，作为数据增强设计的目标，解决各类城市问题需要注意它们自身所需的频度和尺度，并将其与时空数据涌现的特征频度和效用布局进行适配，提高数据增强设计的响应能力。

3 频度协同的(时空)数据增强设计

3.1 (时空)数据增强设计的框架

依托前文所述的基础，本文提出时空数据增强设计的决策框架，其中可以分为两部分：一是空间数据的升频，其主要任务是将传统低频数据与时空高频数据进行融合，根据频度、单元、尺度和粒度的涌现关系，确定特定空间效用布局和时间特征形态所表征的影响因子，使传统数据获得时空精细化，空间数据得以多维高频化；二是空间数据的降频，其主要任务

是将涌现出的影响因子与所涉及的城市议题表现观测数据进行时空关联，根据涌现的规律在时空维度上的异质性，确定特定规律所依赖的时空范围，进行空间精确落位，使得时空数据充分降维，形成以空间为单元的、具有形态解释意义的、具备时空响应能力的规划设计策略(见图6)。两个步骤的具体环节详述如下。

(1) 空间数据升频:异步数据同步化

依据规划设计目标(其中包含所需的干预要素、空间单元、响应频度、尺度和粒度等)，首先开展城市初诊，判断针对特定城市议题集的低频、高频数据，根据时空变异度研究各项数据的时空频度、空间尺度和研究粒度的依赖关系。通过空间汇总、跨尺度映射、时空降维等方法，将低频、高频数据进行同步化，识别合适的空间单元和频度，平衡可解释性和行为真实性，控制时空可变单元问题和数据不确定性问题，从多频异步的原始数据中，提取涌现的、高频同步的影响因子指标。这些指标将在具有典型特征意义的频度和尺度下，尊重数据的时空涌现机理，结合可解释性和行为真实性，尽可能多地保留原始数据的多维信息，使传统低频数据充分获得时空高频数据的增强，进而高频化和多维化。

(2) 空间数据降频:同步数据空间化

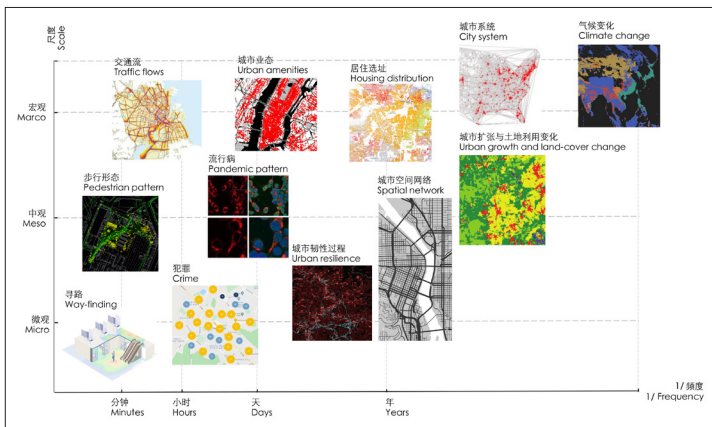
将涌现的时空影响因子指标，通过城市模型与目标观测数据指标相关联，运用空间分

析、数据挖掘、机器学习等手段^[19]，获得二者的稳定关系，并将得到的显著规律进行时空模式挖掘，识别规律的主要类型和时空边界，将时空规律在有效的频度、尺度和粒度下进行落位，得到具有明确形态意义和时空响应能力的干预分区边界，并与规划设计目标所需要的频度、尺度设定相结合，得到因地制宜和因时制宜的规划设计策略。这些策略必须要有明确的空间示意，以及定量图示表明特定低频空间干预能够获得的高频效应，使规划设计充分获得时空智能的增强，以较为低频的干预支持高频空间规律的形成，进而促进高频效应的落实。

上述两个步骤结合形成截面化的一种时空数据增强设计的路径。可以将这一框架持续应用于某一规划设计，形成以规划设计成果比对为导向的规划设计预警机制，加强规划设计本身应对时空机理变化的纠偏和自适应优化能力。

3.2 协频城市:面向未来的频度智能

在上述时空数据增强的框架下，城市数据与模型的频度转换实际提供了一种智能模式。这种频度智能具备以下5个特征:(1) 顺应涌现的干预:时空数据增强的规划设计应注意对于涌现的、典型时空现象的挖掘和利用，才能在规划设计干预时驱动相关涌现的动力学机制，增强规划设计的科学性;(2) 时空规律落位:时空数据具备较高的复杂性，时空数据增



注:各类城市议题的示意图所覆盖的范围即是在相关文献中出现的主要范围。
图5 不用类型城市问题规划设计需求的时间频度与空间尺度分布
Fig.5 Urban issues scattering against frequency and scale

资料来源:笔者自绘。

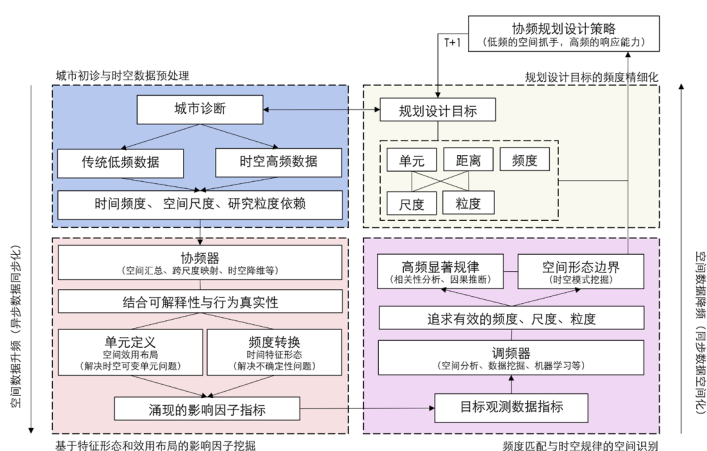


图6 频度协同的时空数据增强设计模型

Fig.6 Frequency synergy in data-augmented-design processes

资料来源:笔者自绘。

强的设计方法应在成果阶段充分降低复杂性,以规律的空间落位为最终成果,方便指导以低频要素为干预对象的规划设计工作;(3) 同频的协同设计:时空数据增强的设计注重同一频度下不同目标的相互关系,保证同频视角下的规划设计具有相互增强作用;(4) 异频的协同关联:时空数据增强的设计可以支持面向同一城市议题,不同频度视角下的策略的相互支撑,形成复频增强的规划设计成果;(5) 跨频的知识体系:时空数据增强的设计应注重传统规划理论的时空精细化,为多频视角下的复杂城乡规划知识体系提供有益补充,并与相关方向前沿结合^[20],形成跨学科的知识体系。

4 结语

智慧城市正在使城市不断高频化,而如何使用好频度智能是规划设计未来城市的一项新挑战^[21-22]。本文从频度这一新视角重新审视数据增强设计的可能扩展路径,提出频度是新数据环境的重要特征,是高频城市的重要特点,是区别于传统数据的重要维度,也是未来规划设计类型的重要区别维度。频度与单元定义、空间尺度、粒度、距离指标等密切相关,它们一起构成时空数据增强设计的特征,也要根据设计目标选择合适的分析单元和特征频度。时空数据自身具有涌现的特点,存在时间特征频度和空间效用布局,而城市议题自身也具有天然的时间频度和空间尺度依赖,将二者妥善匹配是时空数据增强设计模型的重要任务。基于此,本文进而以时空数据增强设计模型试图平衡空间可解释性和时空行为真实性,以空间规律挖掘和时空边界识别为手段,获得规划设计策略的空间配置指引和具体时空策略生成,以频度协同作为提升规划设计高频响应能力的主要手段,建立跨频度的城乡规划知识迁移将高频度的可复现的新发现与低频理论归纳建立参照体系,形成具有时空针对性的、新的规划理论知识体系。频度智能将是智慧城市智能的一个重要部分,帮助我们提升城市规划设计的多频度的综合绩效,持续构建动态的、具有时空针对性的规划知识,凝练新的规划理论和目标价值。

参考文献 References

- [1] 吴志强,甘惟. 转型时期的城市智能规划技术实践[J]. 城市建筑, 2018 (3): 26-29.
WU Zhiqiang, GAN Wei. Urban intelligent planning technology practice in transitional period[J]. Urbanism and Architecture, 2018(3): 26-29.
- [2] BATTY M. Inventing future cities[M]. Cambridge: MIT Press, 2018.
- [3] 柴彦威,端木一博. 时间地理学视角下城市规划的时间问题[J]. 城市建筑, 2016 (16): 21-24.
CHAI Yanwei, DUANMU Yibo. Time problem in urban planning from the perspective of time-geography[J]. Urbanism and Architecture, 2016(16): 21-24.
- [4] 沈尧. 动态的空间句法——面向高频城市的组构分析框架[J]. 国际城市规划, 2019 (1): 54-63.
SHEN Yao. Dynamic space syntax: towards the configurational analysis of the high frequency cities[J]. Urban Planning International, 2019(1): 54-63.
- [5] BATTY M. High and low frequency cities, big data and urban theory[M]//WILLIS K, AURIGI A. The Routledge companion to smart cities. London: Routledge, 2020: 51-60.
- [6] 龙瀛,沈尧. 数据增强设计——新数据环境下的规划设计回应与改变[J]. 上海城市规划, 2015 (2): 81-87.
LONG Ying, SHEN Yao. Data Augmented Design: urban planning and design in the new data environment[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2015(2): 81-87.
- [7] ALEXANDER C. A city is not a tree[M]. Portland: Sustain Press, 1968.
- [8] LIU Y, LIU X, GAO S, et al. Social sensing: a new approach to understanding our socioeconomic environments[J]. Annals of the Association of American Geographers, 2015, 105(3): 512-530.
- [9] MICHAEL B. The new science of cities[M]. Cambridge: MIT press, 2013:13-20.
- [10] 杨滔,张晔理,秦潇雨. 城市信息模型(CIM)作为“城市数字领土”[J]. 北京规划建设, 2020 (6): 75-78.
YANG Tao, ZHANG Yecheng, QIN Xiaoyu. City Information Modelling (CIM) as the digital territory of the city[J]. Beijing Planning Review, 2020(6): 75-78.
- [11] 牛强,夏源,牛雪蕊,等. 智慧城市的大脑——智慧模型的概念、类型和作用[J]. 上海城市规划, 2018 (1): 40-43, 62.
NIU Qiang, XIA Yuan, NIU Xuerui, et al. Smart model: the brain of smart city and its concept, categories and function[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2018(1): 40-43, 62.
- [12] 甄峰,孔宇. “人—技术—空间”一体的智慧城市规划框架[J]. 城市规划学刊, 2021 (6): 45-52.
ZHEN Feng, KONG Yu. An integrated "human-technology-space" framework of smart city planning[J]. Urban Planning Forum, 2021(6): 45-52.
- [13] 龙瀛,沈尧. 大尺度城市设计的时间、空间与人(TSP)模型——突破尺度与粒度的折中[J]. 城市建筑, 2016 (16): 33-37.
LONG Ying, SHEN Yao. A Time-Space-People (TSP) model for the human focused, fine-resolution and large-scale urban design[J]. Urbanism and Architecture, 2016(16): 33-37.
- [14] SHUGART H H. A theory of forest dynamics: the ecological implications of forest succession models[M]. Caldwell: The Blackburn Press, 1984.
- [15] SONG C, QU Z, BLUMM N, et al. Limits of predictability in human mobility[J]. Science, 2010, 327(5968): 1018-1021.
- [16] ZHONG C, BATTY M, MANLEY E, et al. Variability in regularity: mining temporal mobility patterns in London, Singapore and Beijing using smart-card data[J]. PloS ONE, 2016, 11(2): e0149222.
- [17] CHENG T, ADEPEJU M. Modifiable Temporal Unit Problem (MTUP) and its effect on space-time cluster detection[J]. PloS ONE, 2014, 9(6): e100465.
- [18] 沈尧,卓健,吴志强. 精准城市设计面向社会效应精准提升的城市形态[J]. 时代建筑, 2021 (1): 26-33.
SHEN Yao, ZHUO Jian, WU Zhiqiang. Precise urban design toward socially sustainable urban form[J]. Time+ Architecture, 2021(1): 26-33.
- [19] 麦克·巴迪,沈尧. 城市规划与设计中的人工智能[J]. 时代建筑, 2018 (1): 24-31.
BATTY M, SHEN Yao. Artificial intelligence in city planning and design[J]. Time+ Architecture, 2018(1): 24-31.
- [20] 塔娜,柴彦威. 行为地理学的学科定位与前沿方向[J]. 地理科学进展, 2022, 41 (1): 1-15.
TA Na, CHAI Yanwei. Disciplinary position and research frontiers of behavioral geography[J]. Progress in Geography, 2022, 41(1): 1-15.
- [21] 龙瀛,张恩嘉. 科技革命促进城市研究与实践的三个路径:城市实验室、新城市与未来城市[J]. 世界建筑, 2021 (3): 62-65.
LONG Ying, ZHANG Enjia. Three ways to promote urban research and practice with emerging technologies: from the perspectives of city laboratory, new city, and future city[J]. World Architecture, 2021(3): 62-65.
- [22] SENOUSI A M, ZHANG J, SHI W, et al. A proposed framework for identification of indicators to model high-frequency cities[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2021, 10(5): 317.

人工演进的元城市系统：城市空间形态的一种智能生成

Meta Urban System of Artificial Evolution: A Kind of Intelligent Generation of Urban Morphology

杨滔 罗维祯 林旭辉 邓成汝 YANG Tao, LUO Weizhen, LIN Xuhui, DENG Chengru

摘要 为探究城市空间形态的生成如何更能反映城市作为复杂巨系统的本质,从理论上初步探讨复杂系统的可持续建构、多专业优化协同、多尺度网络建构等理念,探索城市空间形态生成的内在逻辑,提出自我优化迭代的城市空间形态生成的算法演进模式。借鉴复杂系统和网络科学的理论成果,提出基于图网络的空间形态生成、运筹优化下的实体形态生成和参数化的系统生成的方法体系,建构包含空间与行为形态网络分析、用地功能与公共服务设施网络分析、三维形态生成、专业协同评估、人机互动调整等基本功能的系统。最后介绍该系统在深圳前海妈湾片区规划设计工作中的应用,以及深圳大学和清华大学的工作营活动中的实践尝试,对未来城市发展的价值动力的探索给予一定的启示。

Abstract To investigate how the way of generating urban spatial morphology reflects the essence of the cities as mega systems, this paper, from the perspective of theories, seeks to discuss the ideas on sustainable construction of complex systems, collaborative optimization of different disciplines, and multi-scaled network formation, explores the basic logics of generating urban spatial forms, and makes the initial proposition of establishing the pattern of the evolutionary algorithm for producing urban spatial forms via the process of self-optimizing iteration. The paper draws on the theoretical achievements of complex systems and network science, and proposes the methodology which consists of the graph-based generation of spatial forms, generation of building forms via operations research, and parametric-aided generation of systems. In this way, a platform emerges with basic functions such as analysis of relationships between space and human behaviours, network analysis of land use and public facilities, 3D shape generation, multi-disciplinary assessment, and design adjustment via human-computer interaction. Finally, this paper introduces the practice in the planning and design of Mawan in Shenzhen, as well as the workshops at Shenzhen University and Tsinghua University, which gives some insights to the exploration of the driving force of future urban development.

关键词 新陈代谢;可持续发展;空间句法;形状语法;数字孪生;未来城市

Key words metabolism; sustainable development; space syntax; shape grammar; digital twins; future city

文章编号 1673-8985 (2022) 03-0014-09 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20220303

作者简介

杨滔

清华大学建筑学院

副教授,博士, taoyang128@qq.com

罗维祯

中规院(北京)规划设计有限公司

中级规划师,硕士

林旭辉

中规院(北京)规划设计有限公司

初级规划师

邓成汝

中规院(北京)规划设计有限公司

初级规划师,硕士

0 引言

随着我国城镇化由外延式扩张向内涵式提升方向转型发展,城市更新过程中对于土地容量与价值的判断变得越来越迫切,而这又与建成环境的几何形态构成密切相关。这在本质上回归到剑桥大学马丁研究中心于20世纪60年代提出的研究问题,即怎样的建设形态才能最好地利用土地价值。他们讨论诸如大街坊、小街坊及院落等不同的建筑物布局形态(见图1),同时也辨析了街道空间

结构对于土地价值的影响^[1]。这对于后续各种流派的城市空间形态研究都有深刻影响。从我国实践角度而言,控制性详细规划重点关注用地结构、空间结构、交通市政构成、公共服务设施布局等,城市设计则从日照、行为模式、微环境、美学、业态运营等角度对三维几何形态进行更为深入的剖析,而这两方面又彼此关联互动,并都对土地容量与价值有直接影响。这可回归到地块上构筑物的三维形态与更大范围的空间形态结构的抽象互动

中,也可探讨城市形态与城市功能的多元联动,还可辨析城市中跨专业、跨行业、跨部门的协同设计。

本文试图从理论上回归到城市这个复杂巨系统的本源,探究跨专业的子系统基于人的行为对城市空间形态的互动性作用力,同时强调在数字模拟环境中,人对各种变量或参数的选择而仿真各个子系统的彼此演进,在人机互动的过程中优化城市巨系统的涌现机制。在这种意义上,本文引入信息科学中人工演进(artificial evolution)的概念,即计算模型或仿真可根据人对变量与参数的选择,形成自动演进的算法,从而模拟人干预下的系统演进过程^[2];研究人机互动下人工城市系统的演进模式,试图建立起科学的洞察力,明晰城市原初系统的核心要素及其关联,即元城市系统。

基于此,本文期望以数字化的方式去模拟城市空间形态的生成,而其过程又依赖于人参与建构和运行城市各个系统的内在规律。从方法角度,本文力图从城市空间形态入手,逐步建构城市其他系统与之的联动关系,搭建初步的元城市系统。

1 理论基础

元城市系统的建立基于对城市科学经典理论的深入研究,从复杂系统、新陈代谢、可持续发展到网络理论、空间句法、形状语法等,试图建构不同尺度的城市空间形态生成与社会经济环境动态交互的理论模型,强化“空间—实体—规则”之间的多维度联动,试图让城市科学与城市艺术有机融合。

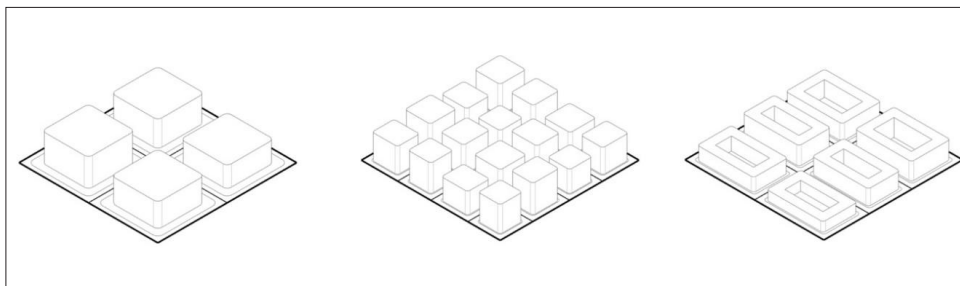


图1 大街坊、小街坊和院落的布局形式

Fig.1 The layout of the main street, the small street, and the courtyard

1.1 生成式设计

借助计算机算法,人们对城市空间形态的生成进行了一定的探索,如生成式设计。一般而言,这是指使用者在定义设计目标和条件约束后,运用算法快速生成设计方案,为设计师等相关利益方提供决策辅助^[3]。其中开发人员对业务场景进行探索,把设计生成的逻辑结构化和规则化,并提供可视化平台^[4]。

目前生成式设计主要有两大类。

第一类是将城市设计方案抽象为大量相关变量的未知函数。该技术路径借助城市设计方案和对应相关变量的大规模训练数据,通过长时间的模型训练,得到稳定的输入与输出关系,并结合城市设计场地的具体信息生成方案,辅助决策^{[4]10}。案例包括小库科技的xkool和谷歌公司的Delve。小库科技于2017年5月开发SaaS产品小库xkool系统^[5],根据设计师导入的场地信息对设计场地进行多维分析、智能测算,并自动生成排布方案。谷歌公司旗下的AI生成式设计工具Delve^[6]可通过机器学习算法生成大量设计方案,并快速评估。但该方法前期依赖极大规模的训练样本,且模型训练时间也较为漫长。由于方案生成规则仅依靠机器对训练样本的学习,其自动生成的建筑和城市设计方案仍难免存在不符合形态生成逻辑的问题。

第二类是基于实际业务逻辑,通过人工直接把城市设计方案梳理为相关变量明确的函数关系,通过运筹学算法寻找最优解,快速生成符合输入条件的结果。这类也有广泛应用的案例。KPFui开发的XIM天际线工具^[7]基

于用户描绘的天际线生成建筑大致轮廓,并辅助用户平衡容积率与城市天际线的矛盾; Doraiswamy等^[8]通过建立建筑设计方案与视觉参数之间的函数关系,产生大量建筑设计体块方案。但是大部分研究仍仅基于较为单一维度的参数自动生成方案。

本文不是从技术方法角度来切入城市空间形态生成,而是回归到与之相关的城市作为系统的科学理论,先探究其可能的内在建构式的系统机制。

1.2 复杂系统的可持续建构

首先,本文探究城市作为复杂系统论的理论。这是研究系统各组件之间关系如何引起系统的集体行为,以及系统与其周边环境的相互作用。在1960年代, Mumford^[9]将城市比喻为机器,这曾是系统论在城市领域的重要应用。在随后的研究中,将城市类比为有机生命体的论述^[10]得到业内广泛认同。这种转变是系统论向复杂系统论的递进,同时更符合城市复杂多变的特点。复杂系统强调系统之间的动态联系和协同,比如交通系统和能源系统的关系等。通过对各开放系统内部和系统之间反馈循环关系的建模,城市中不同客体、组团、系统之间可形成紧密关联^[11]。

在复杂系统论的基础上,城市新陈代谢理论(urban metabolism)将城市看作类似人体的有机生命体。此生命体通过从系统外部摄入资源进行本体活动,最后产生废品作为输出端从系统排出(见图2)。此理论强调,原料、能源、水、食物等在城市生态系统中的流动方式定义了城市健康指数和可持续性。

作为有机生命体,城市各个系统之间需建立可协同优化的机制。哈佛大学可持续规划导则(ZOFNASS)项目提出一种可持续规划导则框架,包括5大发展目标地主、7大城市系统和4大空间层级。其中,7大城市系统为:景观、交通、水资源、能源、固态垃圾、信息和食物供给系统^[13],通过将各系统与城市用地方案接驳,构建城市规划多维协同模型。

资料来源:笔者自绘。

1.3 网络理论下的形态生成机制

城市复杂系统的优化协同机制从网络理论角度更具有操作性和解释性。网络理论是图论 (graph theory) 的一部分,可用于解释城市内部非空间的交流,包括万维网、社会网络、知识论网络等^[14]。城市是人类社会经济环境等活动的集合体,以流动和场所为主体的各类活动,都可被抽象为要素之间的联系和节点,共同构成复杂的网络系统。无论是传播于社交网络中的信息 (见图3),还是传播于城市微环境中的疫情病毒,都可基于网络理论进行模拟和解释。

从图网络的角度,空间句法认为城市空间形态不是社会经济活动的静态背景,而是社会经济活动的一部分,即城市空间形态的设计、建构、体验、更新、拆除等就是社会经济活动的自然组成部分^[16]。在此理论下,空间句法提出“空间—非空间”一体化模型,即自然地理空间、市政基础设施空间、房屋立面空间、社会经济空间、文化习俗空间、乃至游戏故事与自然气候等非空间因素,通过多层次的网络系统彼此联系起来^[17],从而用于揭示物质空间网络形态与功能运行网络之间的关系,解释城市中空间环境行为、非空间影响机制、形式与功能互动模式等。基于大量的实证案例研究,空间句法认为人们对社会、经济、环境的平衡发

展追求将会以独特的空间结构建设与运行过程体现出来,即“空间结构的可持续性”^[18]。

在更微观的层面上,基于建筑实体的形式逻辑规则,形状语法 (shape grammar) 提出自动生成建筑物和城市实体的路径 (见图4)。该方法通过规则构建、形状选择和模块组合等步骤,快速生成符合需求的几何形态^[19]。形状语法通常遵循自下而上的顺序,以最小形状单元为起点,按照预设规则进行组合和变化,最终构成一个完整的几何图形^[20],其中所设定的规则集和生成步骤是一种建筑内在逻辑的表达^[21]。近年来,形状语法在城市规划设计领域的应用逐渐增多^[22]。

2 方法框架

基于上述理论研究,本文提出3种形态生成方法,包括图网络下的物质空间形态生成、运筹优化的实体形态生成和参数化的城市系统生成。在生成过程中,设计师进行方案创作的要素将被充分考虑,作为系统生成的必要因素。

2.1 图网络下的空间形态生成

进行方案创作时,物质空间几何形态的构思是出发点之一;同时,此构思与用地、交通、市政、社会经济、环境等方面的互动也是必不

可少的,但这一部分的关联性构思仍然存在很大的感性认知成分。该系统借鉴了空间句法的理论基础,即几何形态本身也能体现行为模式;同时也强调空间形态的生成可来自人们的方案构思本身。

对于空间要素,系统采用空间句法的定义,体现为4种常用表达模式,即像素点、轴线或线段、凸空间和等视域 (isovist)。像素点是空间分割的方格块,对应于个体、物体或事件所占据的空间,一般根据分析对象的大小来确定。轴线为最长的且最少遍历覆盖空间的直线集合,对应于视线或行走趋势;而线段则是两交叉口之间的线段,对应于行走轨迹或趋势。凸空间作为从每个局部点出发延伸出去所占据的最大空间,且任意两点之间的直线连线与其边长不交叉,对应于人们的对视、聚集、交谈。等视域是从每个局部点向四周看出去,由空间边界和视线所围合的最大空间,对应于个人看周边环境的行为。这些空间要素都可抽象为一个点,而它们之间的交叉或重叠等则抽象为连接,共同构成了图网络,用于分析每个空间要素在网络之中的重要程度,如距离其他空间要素的远近等^[24]。

根据实证研究,城市空间形态在扩张过程中遵循双参数的韦伯函数。其中,一个参数用

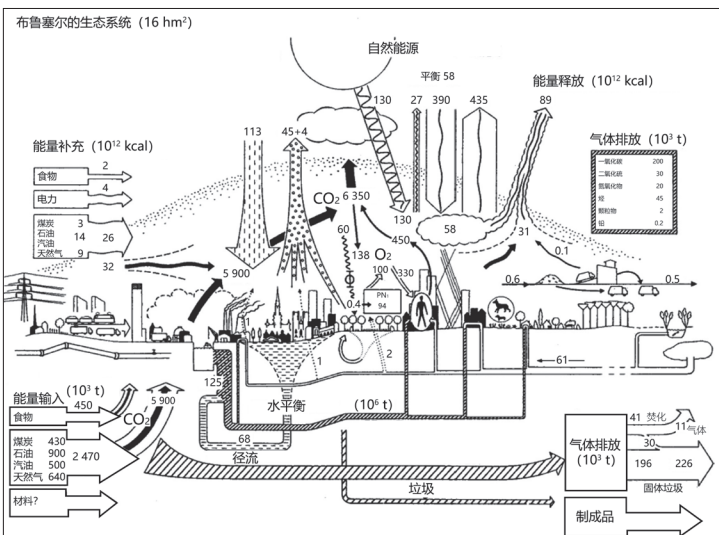


图2 城市新陈代谢理论模型
Fig.2 Urban metabolism theoretical model

资料来源:参考文献[12]。



图3 表达社交网络上千个用户的结构图
Fig.3 Graph representing thousands of users on social network

资料来源:参考文献[15]。

于描述每条街道到达其他街道的拓扑距离;另一个参数描述每条街道在分析半径增加情况下连接到其他街道的数量。它们彼此制约,前者体现空间形态线性延伸的增长动力,后者体现团状聚集的增长动力^[25]。

同时,空间句法的研究也表明街道网络构成方式影响着交通出行,进而影响用地的分布情况;而用地本身的吸引力又影响着空间形态结构的调整。这是一个反复迭代的过程,其结果使得特定的交通流和用地在特定的半径下分布在对应的街道中^[26]。例如,中小规模商业用地将会对应于在大尺度与小尺度可达性都较高的街道等^[27]。以此,街道网络、出行交通、用地性质等将会彼此关联起来,共同构成空间形态,作为下一步实体形态生成的基础。

2.2 运筹优化的实体形态生成

针对实体形态生成,本文参考了两种方法:一是依托建筑逻辑的规则建模,二是生成对抗神经网络(GAN)的方法。两种方法最终目的都是应用算法自动生成建筑空间形态,且遵守建筑规范,满足规划要求。但这两种方法由于底层逻辑的差别而明显不同。规则式生成遵循建筑设计的内在明确逻辑,是建筑师和算法工程师可自主控制的,但缺点是该方法通常需要使用迭代方法进行多次生成和判断。GAN建筑生成方法的优势在于生成结果非常生动,且速度较快,不需做多次迭代。但该方法需要进行长时间的模型训练和参数调整,且生成结果的形态和质量极大程度取决于样本质量。

本文试图研发另一种自生成算法,该算法满足如下要求:(1)遵循建筑设计和城市规划的内在逻辑;(2)生成结果的重点指标需尽可能接近规划方案所设定的地块目标参数;(3)生成速度快,排除迭代算法在生成过程的应用;(4)以数生形,建立参数与形态的强因果关系,降低空间形态的不确定性。

为满足上述要求,首先需要城市规划 and 建筑设计的核心逻辑进行总结归纳,构建相关数据库(包括面宽、进深、标准层面积、层

高、功能活跃度等)和各类功能的建筑、用地性质的空间组织结构规则库。其次,提出“算量”概念,其目标是保证所生成的建筑体块满足规划要求。实现此功能的思路是将问题抽象为限定条件下的优化问题,使用运筹学的相关算法快速解决。该方法与以遗传算法为代表的迭代生成方法在逻辑层面最大的不同是:遗传算法是在每一代中寻找接近目标的基因组,并不断进行变异和选择,直到找见小于所设定容差的组合,属于启发式发展^[28],有较大几率落于局部最优,且寻优的难度会随着自变量数量的增加而显著增加;而基于运筹学的方法则是通过构建问题模型,在限定条件下求目标函数极值的过程,因此该方法速度极快且准确率高。最后是“生形”,该方法极大地继承了形状语法规论,应用计算机图形学中的相关算法,自下而上分层次生成地块中的建筑体块。

总体而言,该算法包括3个模块,分别是基于规划建筑专业的业务规则库、基于运筹学的优化定量和基于形状语法的形态生成。

2.3 参数化的系统生成

参数化概念可以很好地解决参数可控这个问题。提起参数化生成设计,人们更多地会联想到其美学上的识别性,即有序复杂的优雅和无缝流动感^{[29]10},而这只是其原则性内核的一种外在表现形式。参数化的实质是将一个物体中每个部分的约束条件,以及各部分之间的关系用可变的数值表示^{[29]11},任何一个部分的改变都会引发其他部分的关联性改变。因而,任何用数学关系连接的自变量(自然因素、社会因素和技术因素)和因变量(建筑的几何形态)^[30]均属于参数化生成设计。

参数化设计属于技术层面的概念,面对城市规划设计应用,则还需其他经典理论支撑,如模式语言(pattern language)^[31]和精明准则(smart code)^[32]。本文探索了如何利用数学关系描述城市设计三维形态,最终构建出可用参数控制的生成式设计算法模型。

本文通过大量的案例学习和业务分析,

总结城市空间典型形态类型,抽取建筑主要参数,形成业务规则库,最终构建出高效准确、参数可控、目标限定的城市设计自动生成算法模型和工作流程。

3 功能体系

基于理论基础和主要方法,遵循规划师、设计师和建筑师进行方案创作的原则,本文初步构建了一套功能体系,寻求城市物质空间形态的人工演进如何与各专业系统的运转规律相互协同与匹配,辅助城市空间形态及其相关社会经济环境属性关系的生成,推动精细化的城市设计与控规协同。

如图5所示,该体系分为4个模块,分别为控规方案制定、三维形体生成、多维量化评估和人机交互调整,其中包括空间行为形态网络分析、用地功能与公共服务设施网络分析、三维形态生成、专业协同评估、人机互动调整等功能。各模块彼此联动,形成控制性详细规划

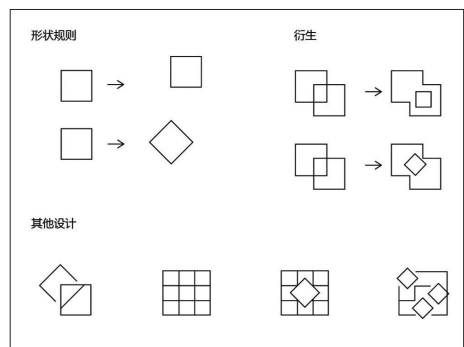


图4 形状语法基于旋转规则生成形状的示意图
Fig.4 A shape grammar demonstrates rotation by 45 AE
资料来源:参考文献[23]。

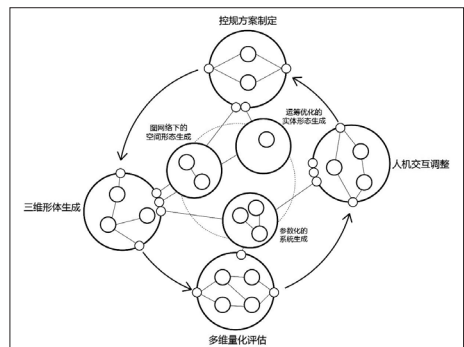


图5 功能体系
Fig.5 The functional system
资料来源:笔者自绘。

与城市设计的协同机制。

每一个闭环开始于控规方案制定,来自用户提供或系统推荐。控规方案提供了二维用地数据和参数,经过形体生成模块实现信息升维;多维量化评估模块使用上一模块提供的三维几何载体,进行多专业量化分析模拟;分析结果可辅助设计师对方案进行研判,并选择优化方向和策略,以人机交互的模式,对控规方案进行修改;修改后的方案再次进入模块一,开始新一轮循环。

3.1 空间与行为形态网络分析

世界上多种多样的建成环境形态源于人类活动的多样性。人们从城市形态中所获得的信息会影响到人们与其周围环境交互的方式,继而影响到身处其中的人们行为特征^{[33][233]}。为了让环境变得有意义且使人们使用起来感到舒适,城市形态与功能之间关系的研究便变得十分重要^{[33][233]}。

在空间形态方面,系统初步对路网的空间结构进行描述,这是由于路网结构是城市发展的骨架。路网的形式、密度及周边用地性质与开发强度等将会影响人们的行为规律和资源的流动,进而作为重要因素决定城市是否能可持续发展。常用的指标来源于空间句法理论,包括标准化全局整合度、标准化全局选择度等^[34]。

在个体行为形态方面,当个体行为共同构成大规模规律时,人群的集体行为又会影响到城市社会经济等层面的具体问题。由于大众数据源的出现很好地补充了官方数据源,适合于对人的行为活动进行补充描述,并用于研究城市形态和人的行为活动之间的关系^[35]。系统依托规划设计经验、总结城市空间与行为之间的规律,综合考虑“自上而下”与“自下而上”的发展路径,建构起空间与行为形态的动态网络分析模块^[36]。

3.2 用地功能与公共服务设施网络分析

在规划设计中,地块性质、开发强度、公共服务设施是重点考虑要素,特别是近年来不断强调生活圈的概念,期望通过5分钟、

10分钟、15分钟等不同覆盖范围的生活圈,合理分配用地和公共资源。然而,生活圈的规模和划定又与各地块的用地性质、人口、开发强度等密切相关,需要采用均衡或最优解的算法来应对。系统除了采用诸如《居住区规划设计标准》^[37]《城市道路公共交通站、场、厂工程设计规范》^[38]《城市公共设施规划规范》^[39]等规范,还考虑受投资收益、城市密度分区、城市视线通廊等因素的影响。

在模型上,选择空间句法算法和基于运筹学优化算法的结合。空间句法理论提出“前景网络”与“背景网络”理论^[40],与“生活圈”概念具有一定的相似性。“前景网络”为“城市各类中心彼此联系而构成的空间网络,常常与主干道有一定的重合性”;“背景网络”为“城市中非中心性的、以居区为主的“空间网络”。其中,不同的尺度中,前景或背景网络具有不一样的空间影响范围。根据此理论,可确定不同用地与各类各等级公共服务设施的选址。

同时,系统还结合重力模型,考虑离散和连续优化在内的运筹学算法^[41]。其算法的目标是,在一系列的限制下,依据设施使用者的需求布置设施的位置,以使代价函数最小化^[42]。

3.3 三维形态生成

在实践中,规划师需要面对不同类型用地,推敲相关指标的设定,并优化地块所对应的具象三维城市形态及其对应的人口、经济、环境性能等。该过程必然包含从抽象用地指标到具象三维形态的生成工作^[43]。然而,如果设计范围较大,基于控规指标对所有地块进行手动建模所投入的人员与时间成本则较高^{[44][8]}。

面向规划实践的城市三维模型自动生成方法采用如下算法。一方面,针对用地功能组合形式及建筑形式的风格选择问题,通过大规模数据的学习,抽取实践设计中较为常见的组合形式及建筑形态,并建立相对独立的原型,以便复用。另一方面,基于实践经验,提取设计师常用的设计指标,例如用地性质、地块容积率、地块建筑密度等参数^[45];同时,结

合相关规范作为输入约束,通过运筹学求最优解的方法,将上述输入参数、规范限定与自动生成问题转化为带约束的线性规划数学模型^[46],求最优解,找出地块内符合该指标的建筑物形态。

3.4 专业协同评估

多专业协同评估是一种点与中心的信息交流模式,各参与方之间的信息交流具有唯一性与连续性^[47]。该信息沟通模式将来自不同专业的数据整合在一个平台上,实现了专业内、专业间的数据交流和信息最大化共享,从而保证了城市设计的高效率、高质量和可持续性^[48]。

在系统中,规划方案、能源方案、交通方案、固废处理方案,以及碳排放计算模型等需在规划设计的前期就进行详细的整合。此处的“整合”并不是将不同方案统一坐标然后叠加在一起,而是各系统联动、数据互通的深度整合。例如,建设时是否采用绿色建筑的标准会直接影响城市的总体能源消耗;规划方案的用地性质和强度会直接影响交通方案^[49];交通强度与人口分布、用地性质的分配有强相关^[50]。因此,只有综合考虑各专项方案并加以整合,才能得到方案在环境、经济、社会层面的影响,辅助做出正确的决策。

3.5 人机互动调整

人机交互模块是面向用户的系统研发中的重要内容。通过交互式平台,可以将规划师或设计师的设计意图以普适、直观的方法进行表达。同时,也能帮助专业/非专业人员在短时间内了解规划设计意图,加深对方案的认识并提出对应需求^{[44][16]}。此模块可以从4个方面开展:输入规则模块、自主生成模块、辅助决策模块和方案评估模块(见图6)。

用户可以交互式地调节系统中现有的城市相关规则,并将其作为基础资料和设计参考用于三维形态生成。在自主生成模块中,通过参数化增强设计使得方案与数据无缝联动^[51],提高城市设计工作的效率和准确度,生成基于

上位指标的城市设计草模。设计师可再根据自己的想法进行设计。此外,系统依托于方案精细化评估功能,可辅助进行快速的方案修改、方案比选、方案优化等工作。因此,通过人机互动调整的系统构建,能够将效益分析与规划设计优化一体化,大大提高设计的效率^[52]。

4 实践案例

上述的理论与方法需要经过实际案例的检验,以推动该系统在实践中不断完善。该系统的科学性和可行性有幸在深圳前海妈湾片区的规划编制工作和两个教学工作营活动中得到初步验证。

4.1 妈湾片区

深港国际服务城位于深圳前海妈湾片区。其总用地面积为3.574 km²,总建设量为600万m²,规划就业人口和居住人口均为10万人。该规划在编制的过程中强调“强交通、重生活”的理念,提出TOD (Transit-Oriented Development) 的发展方式。为实现该目标,该片区的规划采用了前文提出的方法论,按照“指标确定—模型生成—多维评估”的流程编制规划方案。

在“指标确定”阶段,系统基于已有路网与地块数据,计算不同出行半径(包括全局、1 200 m、500 m和300 m)下道路与地块的

可达性(见图7)。“可达性”同时考虑基于路网结构的可达性,以及妈湾片区规划的TOD中心对可达性的影响(见图8,表1)。

然后,系统基于不同生活圈大小,包括15分钟(对应1 200 m步行半径)、10分钟(对应500 m步行半径)和5分钟(对应300 m步行半径),对妈湾片区地块进行聚类,自动划分组团,形成不同等级生活圈(见图9)。接着,系统基于生活圈划分结果、已有的用地平衡表(见表2)、各类用地重要性排序(见表2),以及前文计算得到的地块复合可达性,把用地性质分配到各地块上(见图10)。最后,在计算结果中各地块的土地性质和复合可达性的基础上,依据容积率和可达性的关系,以及已有的各类功能的开发建设量(见表3),系统把各类功能的总建设量分配到各个地块上,完成容积率的分配(见图11)。

各个地块的土地性质和容积率等控规指标确定后,系统即可自动生成符合控规指标要求的城市设计方案的三维模型。利用前述的控规指标和生成的三维模型,系统即可对城市设计方案进行多维度的分析(见图12)。基于三维模型及各建筑的建筑功能,可对该方案可承载的人口数、耗能量、耗水量和固废产生量进行估算(见表4)。进一步,基于耗能量与固废产生量,系统计算出能源碳排放量与处理相应的固废垃圾所产生的碳排放量,以辅助评估妈湾片区实现可持续发展目标的程度。

4.2 工作营

该系统作为开放性工具,用于辅助城市设计教学。在深圳大学王浩锋教授与朱文健老师组织的“律动城市·数字生行”工作营,以及清华大学黄蔚欣副教授与北京交通大学盛强副教授组织的中国建筑学会计算性设计学术委员会年会工作营“城市形态分析与生成”中,基于深圳北站案例,该系统得到了验证。

在工作营期间,学生们尝试基于该系统进行城市设计:结合路网结构和用地平衡表等数据,生成各地块的控规指标,自动生成城市设计草模;结合相关参数对城市设计方案从建设成本、视线、碳排放等多个维度进行量化评估;根

表1 地块复合可达性权重表

Tab.1 Weights of different factors for the composite accessibility of sites

考虑因素	权重
与TOD距离	0.3
与海岸线距离	0.3
空间句法	0.4

资料来源:笔者自制。

表2 用地平衡表

Tab.2 Composition of urban development land

用地性质	用地面积百分比/%
商业服务业设施用地	41.6
公共管理与公共服务设施用地	7.8
居住用地	35.6
物流仓储用地	10.2
绿地与广场用地	4.8
工业用地	0.0

注:表内用地性质顺序代表用地优先次序。

资料来源:笔者自制。



双方不断交互,直到设计方案符合刚性指标,弹性指标,同时满足决策者需求

图6 人机交互式设计流程

Fig.6 Human-machine interactive design workflow

资料来源:笔者自绘。

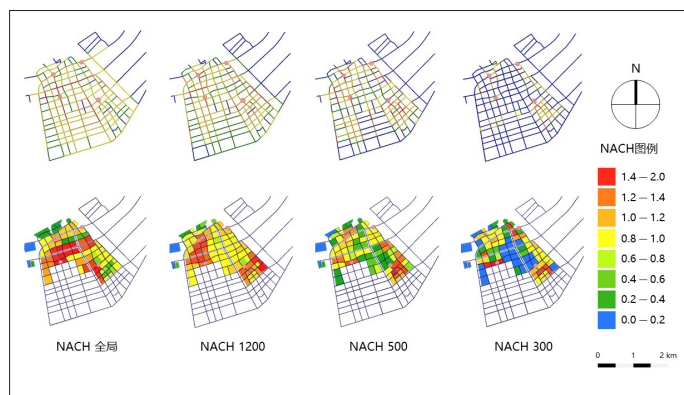


图7 基于空间句法的路网及地块可达性分析

Fig.7 Accessibility analysis of roads network and planning sites based on space syntax model

资料来源:笔者自绘。

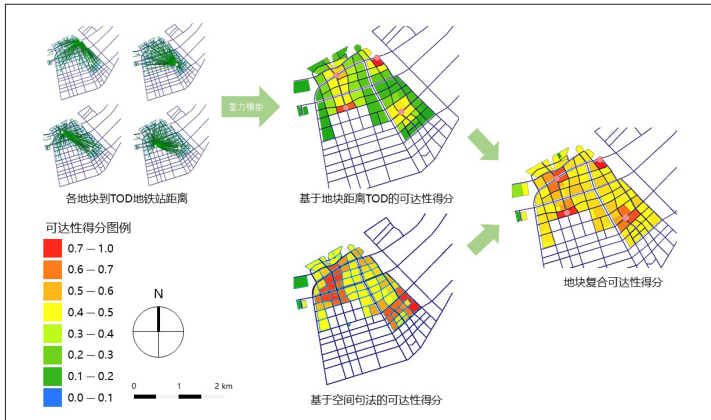


图8 地块复合可达性计算
Fig.8 Planning sites comprehensive accessibility analysis

资料来源:笔者自绘。

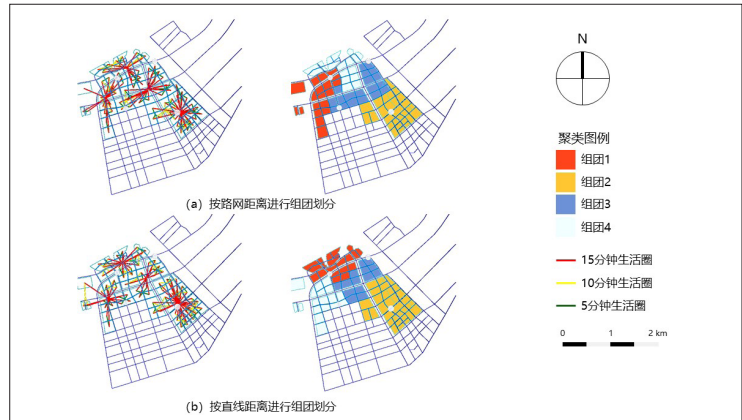


图9 基于层次聚类的组团划分
Fig.9 Forming living neighborhood based on hierarchical clustering

资料来源:笔者自绘。

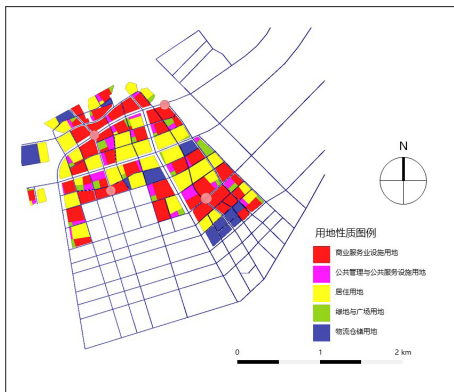


图10 用地性质分配
Fig.10 Land use allocation

资料来源:笔者自绘。

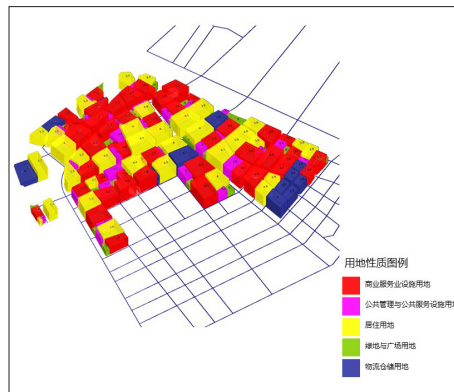


图11 容积率分配
Fig. 11 FAR allocation

资料来源:笔者自绘。

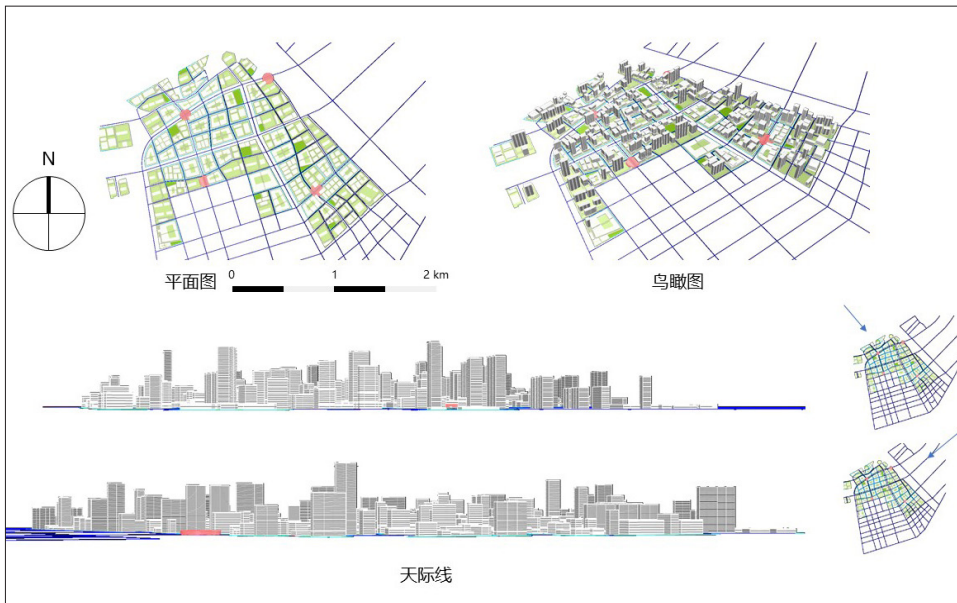


图12 建筑体块自动生成结果
Fig.12 The automatically generated building volume model

资料来源:笔者自绘。

据评估结果的反馈对原方案进行相应的修改。

学生们展现出大量精彩纷呈的方案(见图13)。有些方案强调公共服务设施配套的经济性,以“功能混合”“15分钟生活圈”等概念考虑整体空间布局;有些从TOD的概念入手,综合考虑地铁站点、开发强度、视线通廊、绿道、商业等联动,打造活力地段;有些以绿色生态为重点,在对阴影、立面太阳能利用潜力、热岛效应、风环境等分析的基础上,力图塑造一个绿岛。

总体而言,该系统的操作界面较为清晰,便于学生快速上手,有助于学生理解城市设计的要素、规则和造型之间的关系,充分发挥其专业能力进行各种探索,促进科学思维与艺术畅想的结合,最终提升教学质量。

5 结语

面向未来更为复杂的城市系统规划设计,本文提出的系统只是初步的尝试。该系统试图定量揭示城市的形态美与社会经济环境等多方面要素的协同规律,并寻找城市发展的价值动力。然而,这种协同规律的挖掘涉及不同尺度的涌现与坍塌、个体行为与集体现象互动、动态自适应等多方面的机制,涉及人的主观目的与选择等心理因素,还涉及城市空间形态自我生成的内在成因等。因此,借助数字孪生^①技术的元城市系统人工演进过程,在城市空间形态的涌现过程中如何平衡科学理性与艺术

注释: ①数字孪生是一组虚拟信息,从微观原子角度到宏观几何角度,全面描述真实或潜在的物质世界,通过仿真模拟、实时响应等,与物质实体进行交互,反映物质世界的全生命周期过程。

表3 各类用地的开发建设量

Tab.3 Floor area of construction within sites of different land use

功能类型	建筑面积百分比 /%	建筑面积 / 万 m ²
商业服务业设施用地	45.4	267.45
公共管理与公共服务设施用地	7.3	43.00
居住用地	38.7	227.98
物流仓储用地	8.6	50.66
绿地与广场用地	0.0	0.00
工业用地	0.0	0.00
总计	100.0	589.09

资料来源:笔者自制。

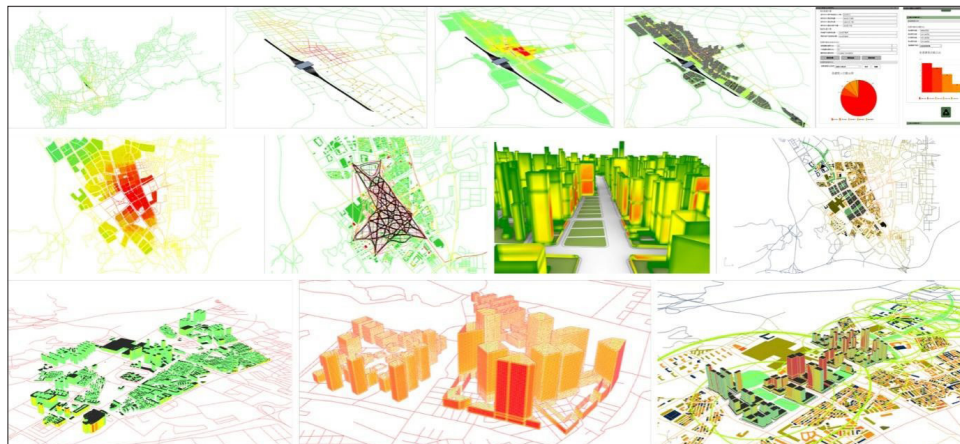


图13 工作营部分成果

Fig. 13 Collection of workshop achievement

资料来源:深圳大学工作营学生成果。

表4 生成方案多维评估

Tab.4 Multidimensional assessment for generated plan

相关指标	指标值
总用地面积	3.574 km ²
总建设量	592 万 m ²
居住人口	8.27 万人
工作人口	9.86 万人
耗电量	2.14 亿 kW · h/y
耗水量	214.84 t/y
固废垃圾产生量	1.24 万 t/y
碳排放 (用能)	16.11 万 t/y
碳排放 (垃圾处理)	1.21 万 t/y

资料来源:笔者自制。

感性,以及这些规律如何在规划设计中实践应用,仍将是未来探索的方向。■

参考文献 References

[1] MARTIN L, MARCH L. Urban space and structures[M]. London: Cambridge University Press, 1972.

[2] DUBITZKY W, WOLKENHAUER O, CHO K H, et al. Encyclopedia of systems biology[M]. New York: Springer, 2013.

[3] 李颢. 建筑生成设计——基于复杂系统的建筑设计计算机生成方法研究[M]. 南京: 东南大学出版社, 2012.

LI Biao. Generative architectural design, a research on the methodology of computer-aided generative architecture design based on complex systems[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2012.

[4] 高翔, 李煜, 徐跃家, 等. 应对高密度城市采光问题的生成式城市设计方法研究——以KPFui伦敦理想街区为例[J/OL]. 国际城市规划: 1-13 (2022-04-13) [2022-05-13]. DOI:10.19830/j.upi.2021.224.

GAO Xu, LI Yu, XU Yuejia, et al. Research on design strategies of daylight in high-density cities based on generative urban design: taking KPFui London ideal block as an example[J/OL]. Urban Planning International: 1-13(2022-04-13)[2022-05-13]. DOI:10.19830/j.upi.2021.224.

[5] 何宛余, 杨小菡. 人工智能设计, 从研究到实践[J]. 时代建筑, 2018 (1): 38-43.

HE Wanyu, YANG Xiaodi. Artificial intelligence design, from research to practice[J]. Time+Architecture, 2018(1): 38-43.

[6] SIDEWALK LABS Q, Optimizing unit yield while balancing quality of life for Wembley Park[EB/OL].

(2021-07-26)[2022-05-13]. <https://www.sidewalklabs.com/products/delve/quintain-case-study>.

[7] KPFui. XIM skyline design tool[DB/OL]. (2016-02-02)[2021-11-27]. <https://ui.kpf.com/blog/2016/2/2/skylinedesign-tool>.

[8] DORAISWAMY H, FERREIRA N, LAGE M, et al. Topology-based catalogue exploration framework for identifying view-enhanced tower designs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(6): 1-13.

[9] MUMFORD L. Utopia, the city and the machine[J]. Daedalus, 1965, 94(2): 271-292.

[10] SCHNORE L. The city as a social organism[J]. Urban Affairs Quarterly, 1966, 1(3): 58-69.

[11] LADYMAN J, LAMBERT J, WIESNER K. What is a complex system?[J]. European Journal for Philosophy of Science, 2013(3): 33-67.

[12] SHI W, GOODCHILD M, BATTY M, et al. Urban informatics[M]. Singapore: Springer, 2021.

[13] POLLALIS S. Planning sustainable cities: an infrastructure-based approach[M]. London: Routledge, 2016.

[14] BARABASI A. Network science[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2016.

[15] GRANDJEAN M. La connaissance est un reseau. Perspective sur l'organisation archivistique et encyclopédique[J]. Cachan: Les Cahiers du numérique, 2014(10): 37-54.

[16] HILLIER B, HANSON J. The social logic of space[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1984.

[17] HILLIER B. Space is the machine[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.

[18] HILLIER B. Spatial sustainability in cities: organic patterns and sustainable forms[C]/KOCH D, MARCUS L, STEEN J. Proceedings of the 7th International Space Syntax Symposium. Stockholm: TRITA-ARK-Forskningspublikation, 2009(1): 1-20.

[19] STINY G, GIPS J. Shape grammars and the generative specification of painting and sculpture[C]/IFIP Congress, 1971(2): 125-135.

[20] STINY G. Introduction to shape and shape grammars[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 1980, 7(3): 343-351.

[21] MITCHELL W. The logic of architecture: design, computation, and cognition[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1990.

[22] HALATSCH J, KUNZE A, SCHMITT G. Using shape grammars for master planning[C]/GERO J S, GOEL A K. Design computing and cognition. Dordrecht: Springer, 2008(8): 655-673.

[23] CHAU H. Preserving brand identity in engineering design using a grammatical approach[D]. Leeds: University of Leeds, 2002.

[24] HILLIER B, TURNER A, YANG T, et al. Metric and topo-geometric properties of urban street networks: some convergences, divergences and new results[J]. The Journal of Space Syntax, 2010(1): 258-279.

- [25] YANG T, HILLIER B. The impact of spatial parameters on spatial structuring[C]//GREENE M, REYES J, CASTRO A. Proceedings: Eighth International Space Syntax Symposium. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, 2012: 1-23.
- [26] HILLIER B, PENN A, HANSON J, et al. Natural movement: or, configuration and attraction in urban pedestrian movement[J]. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 1993, 20(1): 29-66.
- [27] 杨滔. 基于大数据的北京空间构成与功能区位研究[J]. *城市规划*, 2018, 42 (9) :28-38.
YANG Tao. A study of spatial structure and functional location based on big data[J]. *City Planning Review*, 2018, 42(9): 28-38.
- [28] NIELSEN J. Finding usability problems through heuristic evaluation[C]//Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, 1992: 373-380.
- [29] NEIL L, YUAN F. Scripting the future[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2012.
- [30] 李媛. 大跨建筑表皮参数化设计方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
LI Yuan. Research on parametric design method of long-span architectures surface[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [31] ALEXANDER C, ISHIKAWA S, SILVERSTEIN M, et al. A pattern language: towns, buildings, construction[M]. New York: Oxford University Press, 1977.
- [32] SANDY S, DUANY A, WRIGHT W. SmartCode: Version 9.2[M]. Scotts Valley: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012.
- [33] STEINITZ C. Meaning and the congruence of urban form and activity[J]. *Journal of the American Institute of Planners*, 1968(4): 233-248.
- [34] HILLER B, YANG T, TURNER A. Normalising least angle choice in Depthmap - and how it opens up new perspectives on the global and local analysis of city space[J]. *Journal of Space Syntax*, 2012, 3(2): 155-193.
- [35] CROOKS A, PFOSE D, JENKINS A, et al. Crowdsourcing urban form and function[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015(29): 720-741.
- [36] 龙瀛, 沈尧. 数据增强设计——新数据环境下的规划设计回应与改变[J]. *上海城市规划*, 2015 (2) : 81-87.
LONG Ying, SHEN Yao. Data augmented design - planning and design response and change in the new data environment[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2015(2): 81-87.
- [37] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 城市居住区规划设计标准:GB 50180-2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for urban residential area planning and design: GB 50180-2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [38] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市道路公共交通站、场、厂工程设计规范: CJJ/T 15-2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of urban roads, public transportation stops, terminus and depot engineering: CJJ/T 15-2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [39] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 城市公共设施规划规范: GB 50442-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for urban public facilities planning: GB 50442-2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [40] 杨滔. 基于空间句法的多尺度城市空间网络形态研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
YANG Tao. A syntactic study on the forms of multi-scaled urban spatial network[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [41] REVELLE C S, EISELT H A. Location analysis: a synthesis and survey[J]. *European Journal of Operational Research*, 2005, 165(1): 1-19.
- [42] HALE T S, MOBERG C R. Location science research: a review[J]. *Annals of Operations Research*, 2003, 123(1): 21-35.
- [43] 杨俊宴, 刘志远, 王桥, 等. 城市设计数字化平台关键技术研究与应用[J]. *建设科技*, 2021 (13) :4.
YANG Junyan, LIU Zhiyuan, WANG Qiao, et al. Research and application of key technologies of urban design digital platform[J]. *Construction Science and Technology*, 2021(13): 4.
- [44] 杨俊宴. 全数字化城市设计的理论范式探索[J]. *国际城市规划*, 2018, 33 (1) : 15.
YANG Junyan. Exploration on theoretical paradigm of all-digital urban design[J]. *Urban Planning International*, 2018, 33(1): 15.
- [45] 杨滔, 罗维祯, 林旭辉, 等. 城市空间设计的数字化创新方法探讨[J]. *城市设计*, 2021 (4) :18-23.
YANG Tao, LUO Weizhen, LIN Xuhui, et al. A discussion on new digitized methods for designing urban space[J]. *Urban Design*, 2021(4): 18-23.
- [46] HOOKER N. Operations research methods in constraint programming[M]//ROSSI F, VAN BEEK P, WALSH T. Foundations of artificial intelligence. London: Elsevier, 2006(2): 527-570 (2008-02-25)[2022-05-13]. [https://doi.org/10.1016/S1574-6526\(06\)80019-2](https://doi.org/10.1016/S1574-6526(06)80019-2).
- [47] 王磊, 余深海. 基于Revit的BIM协同设计模式探讨[C]//全国现代结构工程学术研讨会. 2014.
WANG Lei, YU Shenhai. Discussion on BIM collaborative design pattern based on Revit[C]// National Symposium on Modern Structural Engineering. 2014.
- [48] 王巧雯, 张加万, 牛志斌. 基于建筑信息模型的建筑多专业协同设计流程分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2018, 46 (8) :1155-1160.
WANG Qiaowen, ZHANG Jiawan, NIU Zhibin. Architecture multi-disciplinary collaborative design process based on building information model[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2018, 46(8): 1155-1160.
- [49] WILSON A G. Land-use/transport interaction models: past and future[J]. *Journal of Transport Economics and Policy*, 1998, 32(1): 3-26.
- [50] 钱寒峰, 杨涛, 杨明. 城市交通规划与土地利用规划的互动[J]. *城市问题*, 2010 (11) :5.
QIAN Hanfeng, YANG Tao, YANG Ming. Urban transportation planning and land-use planning[J]. *Urban Problems*, 2010(11): 5.
- [51] 徐卫国. 参数化设计与算法生形[J]. *城市环境设计*, 2012 (1) :4.
XU Weiguo. Parametric design and algorithm generating[J]. *Urban Environment Design*, 2012(1): 4.
- [52] 杨俊宴, 朱晓. 人工智能城市设计在街区尺度的逐级交互式设计模式探索[J]. *国际城市规划*, 2021, 36 (2) :9.
YANG Junyan, ZHU Xiao. Exploration of the step-by-step interactive design mode of artificial intelligence urban design at the block scale[J]. *Urban Planning International*, 2021, 36(2): 9.

面向公共服务设施布局优化的规划支持系统设计*

Design of Planning Support System for the Optimization of Public Service Facilities Allocation

叶澄 张姗姗 李民健 李智轩 YE Cheng, ZHANG Shanqi, LI Minjian, LI Zhixuan

摘要 公共服务设施布局直接影响着城市空间利用效率和城市居民的生活质量,是城市规划的重要内容。现有规划编制实践主要依据千人指标和服务半径进行公共服务设施配置,缺少量化的手段和工具支撑设施的精准化布局决策。基于数据增强设计的理念,梳理公共服务设施布局需要考虑的关键因素,提出基于布局优化模型和智能优化算法的公共服务设施布局思路,构建面向公共服务设施布局优化的规划支持系统技术框架,以期推动设施布局规划技术创新,促进公共服务设施布局决策科学化。

Abstract As an important element of urban planning, allocating public service facilities in a city has a direct impact on the utilization efficiency of urban space and the life quality of residents. In the current practice of urban planning, the allocation of public service facilities is mainly based on the thousand indicator index and the service radius of the facilities, and quantitative research methods are lacking to support sufficiently accurate allocation analysis. Based on the idea of Data Augmented Design, this paper sorts out the key factors for the allocation of public service facilities and proposes the idea of quantitative allocation of public service facilities based on layout optimization models and intelligent optimization algorithms. A technical framework of planning support system for the optimization of public service facilities allocation is constructed in order to promote the update of facilities allocation technology and the scientific allocation of public service facilities.

关键词 公共服务设施;数据增强设计;布局优化模型;规划支持系统;技术架构

Key words public service facilities; Data Augmented Design; layout optimization model; planning support system; technical framework

文章编号 1673-8985 (2022) 03-0023-07 中图分类号 TU981 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. sup. 20220304

作者简介

叶澄

南京大学建筑与城市规划学院
江苏省智慧城市设计仿真与可视化技术工程实验室
硕士研究生

张姗姗 (通信作者)

南京大学建筑与城市规划学院
自然资源部国土空间规划监测评估预警重点实验室
江苏省智慧城市设计仿真与可视化技术工程实验室
副研究员, zhangshanqi@nju.edu.cn

李民健

南京大学建筑与城市规划学院
江苏省智慧城市设计仿真与可视化技术工程实验室
硕士研究生

李智轩

南京大学建筑与城市规划学院
江苏省智慧城市设计仿真与可视化技术工程实验室
硕士研究生

0 引言

公共服务设施承载了城市居民的教育、医疗、体育和文化等多种服务功能,是重要的城市空间资源和社会资源^[1]。公共服务设施布局旨在对一定时期和一定区域内的公共服务资源进行合理的空间配置,以公平、高效地满足居民对于公共服务的需求。传统设施布局方法主要基于静态人口分布进行自上而下的指标分配和空间

选址,以服务半径和千人指标等规范标准为依据落实设施数量等刚性要求,具有标准化、平均化的特征^[2]。新型城镇化背景下,传统方法由于缺少对居民实际需求的考量,难以指导设施精准落位,不能满足公共服务设施配置人本化、精准化的实践需求^[3-4]。如何通过多源数据分析和布局优化模型支撑科学的公共服务设施布局决策,成为相关研究关注的热点^[5]。

*基金项目:国家自然科学基金青年项目“基于居民时空行为网络建模的社区公共服务设施布局研究”(编号52008201);江苏省“双创博士”(编号JSSCBS20210046);自然资源部国土空间规划监测评估预警重点实验室开放课题“基于活动—设施协同的公共服务设施规划评估研究”(编号LMEE-KF2021007)资助。

数据增强设计 (Data Augmented Design, DAD) 强调以定量城市分析为驱动,通过数据分析、建模、预测等手段,为规划设计全过程提供支持工具,提高规划设计的科学性^[6]。以DAD理念为引导,通过整合多源时空数据改进布局优化模型,建立围绕布局优化分析全过程的规划支持系统,有望为实现公共服务设施的精准化布局提供新思路。因此,本文基于数据增强设计理念,梳理公共服务设施布局的关键因素,提出布局优化模型的精准化改进方向,构建基于优化模型的公共服务设施布局总体思路。在此基础上,结合规划实践需求,提出面向公共服务设施布局的可交互规划支持系统设计,辅助规划师进行设施空间布局规划决策。

1 布局优化思路

公共服务设施布局优化过程可分为因素分析、问题建模、模型求解和方案比选4个主要环节 (见图1)。在因素分析阶段,针对特定的布局优化情景,结合上位规划、规范标准、居民诉求等信息,总结、归纳、挖掘公共服务设施布局优化需要考虑的因素。在问题建模阶段,将影响设施布局的各方面因素转换为布局优化模型的决策变量、优化目标、约束条件、需求权重等模型参数。在模型求解阶段,选择合适的智能优化算法进行布局优化模型求解,通过反复迭代调整寻优参数和优化模型的各项参数,计算出稳定收敛、符合条件的空间布局方案。在方案比选阶段,借助定量指标比较方案差别,根据决策经验进行综合研判,最终输出公共服务设施布局优化策略。

1.1 公共服务设施布局关键因素分析

公共服务设施的精准配置首先需要梳理设施布局考虑的关键因素,把握不同类型、不同导向设施布局问题的特点和关注重点。在区位理论、时间地理学等相关理论,以及社区生活圈等实践要求的基础上,本文将公共服务设施布局决策中需要考虑的关键因素总结为设施规划理念、设施服务供给、居民服务需求和布局空间条件4个方面 (见表1)。

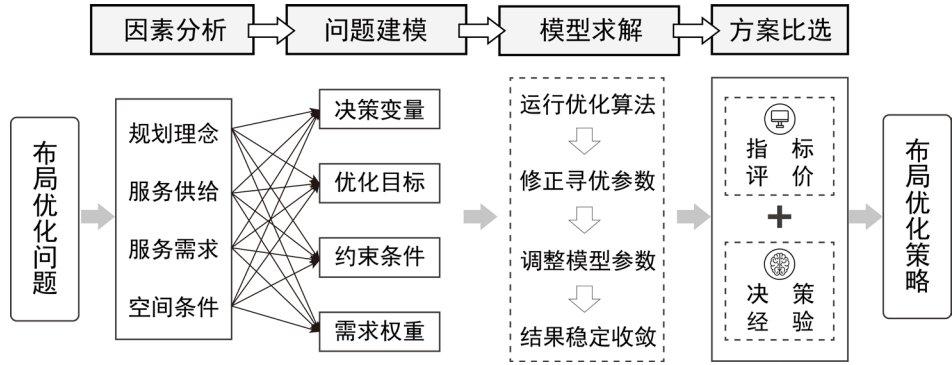


图1 公共服务设施布局优化问题求解总体思路
Fig.1 General idea of solving public service facilities allocation optimization problems

资料来源:笔者自绘。

表1 公共服务设施布局需考虑的关键因素
Tab.1 Key factors for the allocation of public service facilities

设施布局关注内容	关键因素	量化表达的可能形式
设施规划理念	效率性	居民获取服务的总移动成本、设施的服务覆盖范围 / 覆盖人数
	公平性	所有居民到最近设施的最远距离、居民到设施的可达性方差
	社会经济效益	财政支出、碳排放量
设施服务供给	数量	设施布局标准建议值、服务需求推算数量, 现状设施数量
	属性	设施类型、设施等级、设施规模、设施容量、服务半径、开放时间
居民服务需求	基本属性	分布、数量、性别、年龄段、收入、职业
	活动特征	活动点、活动路径、活动时长、移动半径、设施访问频率、设施选择偏好
布局空间条件	自然环境	地形、空气污染水平
	建成环境	交通网络、现有设施布局

资料来源:笔者自制。

(1) 设施规划理念方面,以人为本的公共服务设施布局强调设施布局的效率性、公平性和社会经济效益。其中,设施布局效率性一般通过居民到公共服务设施的总移动成本进行量化表征,成本越低,设施布局的效率性越好^[7]。设施布局公平性一般用居民就近获取服务的最大移动成本或成本差异来表征,最大成本或成本差异越小,设施布局的公平性越好^[8]。同时,公平性还体现在设施服务资源向弱势群体倾斜等举措上^[9]。近年来,设施布局的社会经济效益等也逐渐引起研究者的关注,合理的设施布局有助于提升设施利用率、减轻财政压力、引导居民的绿色健康行为^[10]。在实际规划场景中,公共服务设施布局通常需要综合考虑公平、效率、经济成本、生态环境等多维优化目标。

(2) 设施服务供给方面,需要重点考虑对设施数量和属性的布局优化。设施数量上,传统千人指标基于常住人口分布确定设施的配

置数量。然而,现有研究及规划实践表明根据实际服务需求推算合理的设施数量更符合公共资源精准配置的要求^[11]。设施属性上,不同类型、等级、规模的设施具有不同的服务能力和布局要求,但传统规划对此缺乏定量配置手段^[12]。例如,服务能力方面,社区卫生服务站、三甲医院等不同等级的设施具有不同的医疗水平和服务范围。医疗设施布局不仅强调各等级设施的总覆盖范围最大化以保障设施配置效率,也关注大型综合医院的布局均衡性以保证服务质量的空间公平性^[13]。布局要求方面,在布局垃圾站等邻避设施时,既要考虑设施与居民点的距离上限以降低运输成本,还要考虑距离下限以减少设施对居民的不良影响^[14]。而对于学校、公园等非邻避设施,则将提高设施的空间可达性作为设施布局的主要目标。

(3) 设施供给与居民需求的精准匹配是设施布局的重要目标,因此准确识别居民的共

性需求和不同群体的差异化需求是设施布局优化的核心^[15]。传统的设施布局分析方法利用居民点分布及其人口规模粗略估算需求点的设施服务需求,较少考虑不同群体对公共服务需求的差异。引入性别、年龄、收入等经济社会属性将居民划分为不同群体,分析不同群体之间的设施偏好和服务需求差异,可以提出公共服务设施差异化供给策略^[16]。手机信令、公交刷卡等多源时空数据的广泛应用,为动态感知居民活动与设施使用情况提供可能。利用空间聚类、复杂网络分析等方法挖掘居民的时空行为特征,可以更精准地刻画居民与设施的真实交互关系,提炼居民使用设施的时空规律,从而指导公共服务设施的精准化配置^[17]。

(4) 设施布局的空间条件也是设施优化布局中需要考虑的重要因素。例如,自然环境条件方面,山区复杂的地形会对居民出行方式和出行能力造成影响^[18]。建成环境条件方面,城市的道路与交通建设决定了城市空间网络的连接形态,进而决定了公共服务设施的空间可达性。此外,现有设施的布局也会影响新增设施的布局策略^[19]。

1.2 公共服务设施布局优化问题建模

区位分配模型是公共服务设施布局优化研究中应用最广,也是解决多目标优化、多条件约束的复杂设施布局问题最有效的方法之一^[20]。区位分配模型的一般思路是首先筛选设施布局的候选区位集合;其次根据设施布局要求,归纳布局优化目标和约束条件;最后利用智能优化算法从候选区位集合中求解出可在最大程度上满足要求的设施布局方案。经典布局优化模型如P-中位 (P-Media) 模型、P-中心 (P-Center) 模型、集合覆盖 (LSCP) 模型和最大覆盖 (MCLP) 模型,对设施供需匹配关系、空间环境制约等现实条件考虑较为简单,难以落实设施资源精准配置的目标。因此,精准化的公共服务设施配置需要在构建布局优化模型时进一步考虑设施间属性差异、居民需求偏好等因素。基于前文对公共服务设施布局关键因素的解读,本节从设施规划目标多元

表2 公共服务设施布局优化模型改进方向
Tab.2 The improvement direction of optimization models for allocating public service facilities

关键因素 优化方向	改进思路	应用场景
设施规划目标多元化	(1) 先验法, 根据决策偏好将多目标优化问题转为复合单目标优化问题; (2) 后验法, 求解近似最优解后再根据决策偏好选择满意方案	(1) 目标优先级明确的布局规划; (2) 目标优先顺序或权重分配不明确的布局规划
设施服务供给差异化	考虑服务内容、设施服务半径、服务容量等设施属性差异等对布局的影响	医疗、避难场所等多层级公共服务设施布局规划
居民服务需求精准化	(1) 行为活动规律分析; (2) 动态需求预测	精准化、前瞻性的设施布局规划
布局空间条件精细化	(1) 空间建模精细化, 准确测度设施空间可达性与居民出行成本; (2) 针对特定的设施布局决策情景综合考虑空间环境因素的制约	(1) 微观尺度的社区公共服务设施布局规划; (2) 考虑高层建筑物威胁的避难场所布局等

资料来源:笔者自制。

化、设施服务供给差异化、居民服务需求精准化和布局空间条件精细化4个方面提出公共服务设施布局优化模型的改进思路,并指出相关应用场景(见表2)。

(1) 在优化目标方面,经典布局优化模型主要关注单一目标导向下的设施布局,难以平衡规划实践中的多元规划理念和政策导向。精准化的布局优化模型需要建立多元目标体系,综合考虑设施布局的多维效益。当规划的目标导向存在矛盾、冲突时,多目标优化模型可以通过对多个目标函数的折中处理寻求到合适的布局方案。具体而言,建立多目标体系的方法大致分为先验法和后验法两类^[21]。先验法通过分层序列、线性加权等方法将多目标优化问题转为复合的单目标优化问题,适用于有决策经验和专家知识来支持多目标权重分配的决策场景。后验法中各优化目标是相对独立的关系,通过特定的多目标算法来寻找模型的近似最优解,再根据决策偏好从中选择满意方案,适用于缺少足够信息支持优化目标排序或权重分配的决策场景。

(2) 在服务供给方面,经典布局优化模型不考虑设施的容量或服务水平差异,难以适应实际公共服务设施布局时综合考量设施区位和规模等级的要求。面向不同类型、不同等级设施的布局优化模型需要对设施的服务能力进行差异化表达,以提高设施资源配置结果的精准度。特别是医疗、避难场所等多层级设施,

不同等级设施的服务内容有重叠,但服务水平、服务容量等存在显著差异,布局优化既要实现数量均衡,也要保证质量均衡^[22]。

(3) 在服务需求方面,经典布局优化模型中居民对公共服务的需求被简化为对最近设施的访问需求,对居民的行为特征和设施使用偏好的考虑不足。重力原则模拟居民对设施的访问,是布局优化模型的重要改进形式。而借助多源时空大数据分析居民的行为活动规律,获取不同个体和群体的设施使用特征,精准估计居民时空服务需求并将其转换为模型参数,是布局优化模型精准化改进的核心内容。此外,居民的活动空间及对公共服务设施的需求通常是一个动态变化的过程,未来研究还需要关注对居民设施服务需求预测和动态模拟^[23]。

(4) 在布局空间条件方面,精准化的布局优化模型需要进一步提高空间建模能力,综合考虑空间环境因素的影响。传统的设施布局优化模型借助GIS技术测算网络距离或到达时长,近似表征居民访问设施的出行成本。基于时空大数据和互联网开放数据,精准化的布局优化模型能够提取居民动态移动轨迹、模拟动态交通运行情况,更准确、真实地测度公共服务的空间可达性。针对特定的布局优化决策情景,模型构建还需要考虑空气质量、周边建筑物高度等空间环境因素的制约^[24-25]。

1.3 公共服务设施布局优化模型求解

ArcGIS、SuperMap等GIS专业软件为公共服务设施布局优化模型的求解提供了可视化的工具支持。以ArcGIS为例,其叠置分析、要素转点工具可用于公共服务设施的候选区位筛选与候选点生成,网络分析拓展模块下的OD成本矩阵工具可用于交通权重网络的构建,位置分配分析工具可支持P-中位模型、P-中心模型等经典区位分配模型的求解,服务区分析工具可支持设施的服务覆盖范围分析。但目前的空间分析软件中内置的区位分配模型决策建模能力有限,只能解决一些典型布局优化问题,难以满足实际规划中差异化的布局要求。已有的研究更多是将GIS用于候选区位分析、数据可视化等步骤中^[26]。

考虑了多目标导向和复杂时空约束条件的设施布局优化模型往往是非线性规划问题,构建稳健性强、寻优效率高、规划领域知识驱动的优化算法成为获取科学布局优化方案的必要手段^[27]。大量研究表明启发式算法,即智能优化算法在解决复杂设施布局优化问题上具有显著优势,尤其是蚁群算法、粒子群算法等群智能算法因其出色的多目标寻优能力,在设施选址规划决策中应用广泛。如蚁群算法,其基本原理是通过模仿蚁群觅食行为,建立路径搜索与信息素更新机制实现群体间的信息传递,指导蚁群寻找全局最优解。单目标蚁群算法中信息素带来的正反馈会将蚂蚁汇聚至最优路径,而多目标蚁群优化算法在执行过程中会保存当前得到的近似最优解,并利用这些经验引导后续的搜索方向,最终得到一组近似最优解^[28]。在算法实践上,LINGO等通用优化求解器以及NumPy、SciPy等科学计算库为复杂布局优化模型求解提供了工具支持。

求解公共服务设施布局模型的过程是一个反复迭代、在抽象性与可解性之间不断取舍的过程。考虑的设施布局因素过于全面精细可能导致模型难以求解,甚至无法收敛的情况发生。根据优化算法的实际表现结果,有时需要通过降维、轻量化等手段简化模型结构或减小问题规模,使布局优化模型能够在合理的时间

内得到可接受的稳定收敛结果。降维方面,布局优化模型考虑的诸多因素之间本身存在着复杂的叠加替代作用,简化模型参数能够在一定程度上避免模型过早停滞或无法收敛的情况。例如建设成本参数一定程度上可由设施数量和规模等级的约束来代替。将多目标问题进行拆解,通过多步优化实现模型求解也可以有效降低优化模型的复杂度^[29]。此外,对需求点、设施点的聚类合并能够减小OD矩阵的规模,使模型能在合理的时间范围内得到满足要求的近似最优解,便于模型在实际规划场景中推广和使用。例如,在生活圈设施布局中,将居民个体需求汇聚至社区网格单元,能够有效减少需求点数量,提升模型求解效率。

综上所述,精准化的设施布局优化需要关注多元目标导向、设施供需匹配关系和复杂约束条件对设施布局的影响。而在技术实践上,需要采用数据挖掘方法实现参数提取,采用智能优化算法实现模型求解,具有较高的技术门槛。因此,有必要构建面向公共服务设施布局的规划支持系统作为技术支撑,以促进模型方法在规划实践中的推广应用。

2 规划支持系统设计

规划支持系统为解决复杂公共服务设施布局优化问题搭建了分析问题、建立模型、模拟决策过程和方案的环境。以公共服务设施布局优化思路为理论和方法依据,本文进一步设计面向公共服务设施布局的规划支持系统,为设施布局优化提供自定义建模、智能化求解、量化评价的工具支持。

2.1 系统功能需求

(1) 时空底座信息的动态接入

一般规划支持系统需要的城市运行数据以静态面板数据为主,而面向公共服务设施布局的规划支持系统还需要接入时空行为数据、开放爬虫数据等动态数据,以更好地反映居民需求和现有设施布局情况。除了用户自行上传相关数据,规划支持系统也应支持与其他信息平台、运营商平台的对接,提供数据调用、数据

抓取脚本,以实现数据资源的自动更新。

(2) 设施布局优化的全流程支持

针对公共服务设施布局优化中问题建模、模型求解、方案比选各个环节设置独立的功能模块。每个模块封装了针对该环节的模型和算法,为专业分析提供技术支持。为使通用的布局优化模型适用于复杂多样的实际问题,系统应支持自定义参数功能以实现针对具体情景进行设施布局优化。例如,问题建模模块应支持模型优化目标数量和权重、约束条件内容和阈值、备选区位来源等参数的自定义设置。

(3) 设施布局规划的多方参与

公共服务设施布局规划需要让规划管理者、城市居民、开发商等多元主体参与到规划过程中来,从不同参与者提供的信息中获取知识,增进政策制定的有效性与科学性^[30]。通过对不同用户开放不同的权限,规划支持系统能够为促进规划决策多方参与、规划接受政府与社会公共监督、社会公众理解城乡规划工作提供新的途径。

2.2 系统技术架构

面向公共服务设施布局优化的规划支持系统总体技术架构包含数据层、数据管理层、模型层和应用层(见图2)。

(1) 数据层

系统应用的数据包括支撑公共服务设施布局优化支持分析的原始数据和由平台计算运行产生的分析数据。根据数据的实时性和标准化程度,原始数据可分为基础城市运行数据、时空轨迹数据和其他支持数据3类。基础城市运行数据用于表征城市建设与经济社会发展现状,包括土地利用、道路网络、POI分布等基础地理信息数据和人口规模、人口结构等社会经济统计数据。时空轨迹数据如手机信令数据、公交刷卡数据、悬浮车移动轨迹等,用于表征城市居民日常活动时空特征,进而识别居民群体差异化的服务需求。其他支持数据包括一系列难以标准化接入,但对公共设施布局规划有价值的信息,如依托爬虫技术采集的打卡评论数据、针对性的调研数据等。基础城市运行

数据由规划部门负责定期更新,而时空轨迹数据等应用性动态数据更新时间则较为灵活,可以根据规划业务需求进行动态更新。

(2) 数据管理层

管理层通过对系统数据集的处理和更新维护,形成公共服务设施布局优化所需的专题数据库。数据处理的主要步骤包括数据抽取、数据清洗、数据转换和数据格式化^[31],数据资源维护则包括数据质检和数据更新两步。通过数据处理,多源异构的时空数据将被转换为模型层支持的标准格式数据以支持公共服务设施布局优化分析。质检通过的数据将汇总加载至专题数据库,其中地理空间数据库和时空行为数据库存储原始数据的初步处理结果,以备后续分析中调用;供需分析数据库存储为确定模型参数进行的数理统计、空间聚类、OD矩阵构建等前置分析结果;设施布局数据库存储设施布局方案的空间信息以及相关的方案元数据、指标评价结果、评估报告等内容。

(3) 模型层

模型层为公共服务设施布局优化涉及的各个环节提供模型和算法支持,充分利用智能优化算法、数据挖掘算法等前沿技术来解决复杂情景下的布局优化问题。在问题建模环节,系统提供的服务需求分析模型能够为基于时空大数据的可达性测度和居民行为谱系挖掘提供支持。在模型求解环节,系统为设施布局优化分析提供成熟的优化算法和开放的参数

接口,便于规划师根据具体需要调整参数,建立符合规划需求的布局优化模型,并借助系统平台实现模型求解。在方案比选环节,根据规划政策导向和现实需求,系统提供服务覆盖度、公平性、财政投入等各项布局效益评价指标的计算模型,并输出设施布局评价报告,为规划师和管理者进行设施布局决策提供量化参考。

(4) 应用层

应用层是规划支持系统的前端,支持用户的在线交互行为并展示后台分析结果。基于平台整合的多源信息和GIS空间分析与可视化技术,系统向用户提供信息查询与可视化功能,例如分析单元内的人口规模、人口结构点选查询,或是居民获取服务的路径规划模拟与可视化。系统的核心功能则是为用户完成设施布局优化与评估工作提供技术支持,用户可以在系统中完成需求分析、设施布局优化和方案评估的整体规划流程。此外,系统还提供了面向公众的方案公示和群众意见反馈模块,以便及时根据居民需求对规划进行调整,切实践行以人为本的规划理念。

2.3 系统应用

根据系统架构和分析流程,笔者设计开发了面向公共服务设施布局优化的规划支持系统,主要功能界面如图3所示。以社区文体中心布局为例,利用该系统可以实现居民需求分

析、布局优化求解和布局方案对比的功能,提升布局规划的效率性和科学性(见图4)。首先根据文体中心的布局要求,筛选城市主干道进行等间隔采样作为设施备选点,保证设施的交通便捷性。利用手机信令月度出行记录,在人口数量分布的基础上根据人群的社区驻留时间修正需求点的权重值,生成备选点与居民需求点之间的OD矩阵。基于OD矩阵进行设施布局优化,设置设施数量、服务容量限制等信息,使布局方案满足实际规划需求,保证设施布局的效率性和公平性。在布局优化模型计算的基础上,生成方案对比报告,量化对比不同方案的优劣程度,帮助规划师选择合适的方案。在设施道路投影点优化的基础上,综合考虑周边设施等因素,将实际设施选址位置选在距道路一定距离的缓冲环内。

3 总结与讨论

公共服务设施布局优化是人民城市建设的重要组成部分,对促进社会公平正义、提升人民生活质量和幸福感具有重要意义。本文面向设施布局科学化、人本化、精准化的发展需求,基于数据增强设计理念,提出公共服务设施布局优化的规划支持系统技术框架设计。笔者所提出的思路和框架为新数据环境下的定量规划分析提供一条“从理论到模型”“从方法到工具”的可行路径参考,对城市公共设施

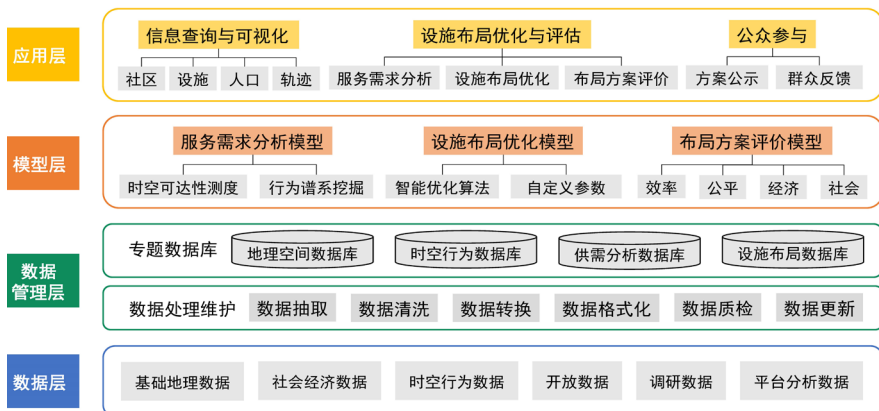


图2 公共服务设施布局规划支持系统技术架构

Fig.2 The technical framework of planning support system for allocating public service facilities

资料来源:笔者自绘。

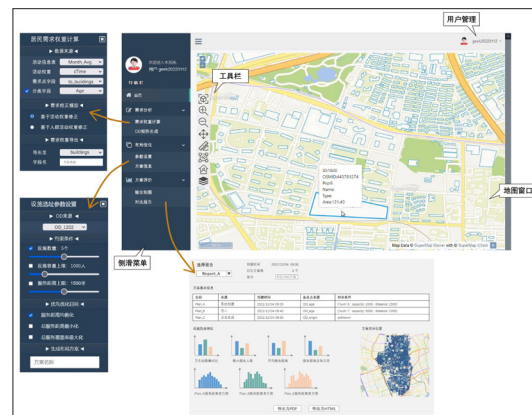


图3 规划支持系统主要功能界面

Fig.3 Main function interface of planning support system

资料来源:笔者自绘。

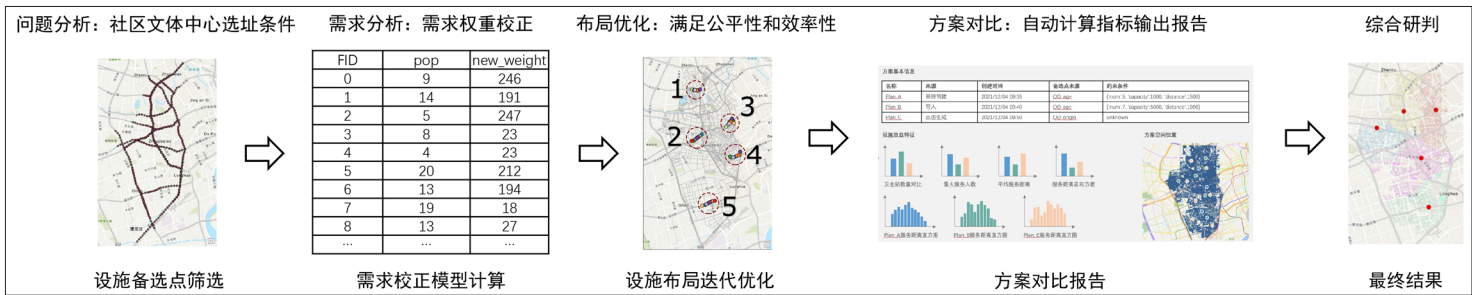


图4 设施布局优化流程示意图

Fig.4 Flow diagram of facilities allocation optimization

资料来源:笔者自绘。

专项规划、社区生活圈设施精准化布局等实践工作具有一定指导意义。

未来需要进一步研究的方向主要有3方面。一是居民行为特征的挖掘。利用多源时空大数据挖掘居民行为特征,提取居民与设施的交互规律,提高居民需求建模真实性,是布局优化模型设计改进需要深入探索的问题。二是规划支持系统的研发建设。利用规划支持系统平台开展面向不同地区、不同等级、不同类型设施的布局规划实践,以验证本文提出的布局优化模型和规划支持系统设计思路的有效性。三是完善规划分析成果对规划建设的决策支持机制。本文没有详细讨论数据驱动的分析成果该如何支持人本驱动的设施规划建设活动,有待未来进一步论证^[32]。

参考文献 References

[1] 刘雪娇. 用途混合视角下的社区公共服务设施精细化规划策略探讨[J]. 城市发展研究, 2021, 28(11): 31-37.
LIU Xuejiao. Discussion on refined planning strategy of community public service facilities from the perspective of mixed use[J]. Urban Development Studies, 2021, 28(11): 31-37.

[2] 庄少勤, 赵星烁, 李晨源. 国土空间规划的维度和温度[J]. 城市规划, 2020, 44(1): 9-13, 23.

ZHUANG Shaoqin, ZHAO Xingshuo, LI Chenyuan. Dimension and temperature of the spatial planning[J]. City Planning Review, 2020, 44(1): 9-13, 23.

[3] 周岱霖, 黄慧明. 供需关联视角下的社区生活圈服务设施配置研究——以广州为例[J]. 城市发展研究, 2019, 26(12): 1-5, 18.
ZHOU Dailin, HUANG Huiming. Community life cycle public facility configuration study based on demand-supply correlation: a case study of Guangzhou[J]. Urban Development Studies, 2019, 26(12): 1-5, 18.

[4] 蔡爱玲, 陶卓霖, 王钧, 等. 城市新区教育设施可达性评价与空间优化——以深圳市坪山区为例[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(1): 96-102.
CAI Ailing, TAO Zhuolin, WANG Jun, et al. Accessibility assessment and spatial optimization of educational facilities in newly urbanized areas: a case of Pingshan District, Shenzhen City[J]. Areal Research and Development, 2021, 40(1): 96-102.

[5] 黄晓春, 何莲娜, 程辉, 等. 城乡规划公共设施优化布置及选址模型建设与应用[J]. 建设科技, 2020(10): 47-50.
HUANG Xiaochun, HE Lianna, CHENG Hui, et al. Construction and application of configuration optimization and site selection model for public facilities in urban and rural planning[J]. Construction Science and Technology, 2020(10): 47-50.

[6] 龙瀛, 沈亮. 数据增强设计——新数据环境下的规划设计回应与改变[J]. 上海城市规划, 2015(2): 81-87.
LONG Ying, SHEN Yao. Data Augmented Design: urban planning and design in the new data environment[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2015(2): 81-87.

[7] 刘静, 朱青. 城市公共服务设施布局的均衡性探究——以北京市城六区医疗设施为例[J]. 城市发展研究, 2016, 23(5): 6-11.
LIU Jing, ZHU Qing. Research of equalizing layout of public service facilities: take health facilities of central six districts of Beijing for example[J]. Urban Development Studies, 2016, 23(5): 6-11.

[8] WANG F, TANG Q. Planning toward equal accessibility to services: a quadratic programming

approach[J]. Environment and Planning B: Planning and Design, 2013, 40(2): 195-212.

[9] 许婧雪, 张文忠, 湛丽, 等. 基于弱势群体需求的北京服务设施可达性集成研究[J]. 人文地理, 2019, 34(2): 64-71.
XU Jingxue, ZHANG Wenzhong, CHEN Li, et al. Research on the integration of Beijing service facilities accessibility based on the needs of disadvantaged groups[J]. Human Geography, 2019, 34(2): 64-71.

[10] TU W, LI Q, FANG Z, et al. Optimizing the locations of electric taxi charging stations: a spatial-temporal demand coverage approach[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2016, 65: 172-189.

[11] 程敏, 崔晓. 基于多目标改进免疫算法和GIS的养老机构空间配置优化研究——以上海市虹口区为例[J]. 地理科学, 2018, 38(12): 2049-2057.
CHENG Min, CUI Xiao. Spatial optimization configuration of the residential care homes based on the multi-objective improved immune algorithm and GIS: a case study of Hongkou District in Shanghai[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(12): 2049-2057.

[12] 陈煜婷, 张惠珍. 双层级医疗设施选址问题及禁忌搜索算法[J]. 运筹与管理, 2021, 30(9): 56-63.
CHEN Yuting, ZHANG Huizhen. Two-level medical facility location problem and tabu search algorithm[J]. Operations Research and Management Science, 2021, 30(9): 56-63.

[13] 宋正娜. 竞争型公共设施区位决策——概念、选址原则及模型构建[J]. 地理科学, 2016, 36(10): 1485-1494.
SONG Zhengna. Competitive public facilities location decision: concept, location selection principle and model construction[J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(10): 1485-1494.

[14] 程顺祺, 祁新华, 金星星, 等. 国内外公共服务设施空间布局研究进展[J]. 热带地理, 2016, 36(1): 122-131.
CHENG Shunqi, QI Xinhua, JIN Xingxing, et al. Progress in domestic and foreign study on spatial

- layout of public service facilities[J]. *Tropical Geography*, 2016, 36(1): 122-131.
- [15] 张姗姗,甄峰,秦萧,等.面向城市社区规划的参与式感知与计算——概念模型与技术框架[J]. *地理研究*, 2020, 39(7): 1580-1591.
ZHANG Shanqi, ZHEN Feng, QIN Xiao, et al. The conceptual model and technical framework of participatory sensing and computing for urban community planning[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(7): 1580-1591.
- [16] 刘倩.居民需求视角下社区生活圈配套设施优化策略研究——以西安市雁塔区为例[D].西安:西北大学, 2019.
LIU Qian. Research on optimization strategies of supporting facilities in community life circle from the perspective of residents' demand: a case study of Yanta District in Xi'an City[D]. Xi'an: Northwest University, 2019.
- [17] 邹思聪,张姗姗,甄峰.基于居民时空行为的社区日常活动空间测度及活力影响因素研究——以南京市沙洲、南苑街道为例[J]. *地理科学进展*, 2021, 40(4): 580-596.
ZOU Sicong, ZHANG Shanqi, ZHEN Feng. Measurement of community daily activity space and influencing factors of vitality based on residents' spatiotemporal behavior: taking Shazhou and Nanyuan streets in Nanjing as examples[J]. *Progress in Geography*, 2021, 40(4): 580-596.
- [18] 戴军,苑惠丽,马颖忆.西部乡村基础教育设施“场势效应”评价与空间优化——以海东市蒲台乡为例[J]. *农业现代化研究*, 2019, 40(4): 692-701.
DAI Jun, YUAN Huili, MA Yingyi. Spatial optimization of field intensity effect of rural basic education infrastructure in rural Western China: a case study of Putai Township, Haidong, Qinghai[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2019, 40(4): 692-701.
- [19] ZHANG W, CAO K, LIU S, et al. A multi-objective optimization approach for health-care facility location-allocation problems in highly developed cities such as Hong Kong[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2016, 59: 220-230.
- [20] 宋正娜,颜庭干,刘婷,等.新重力P中值模型及其在城市综合医院区位决策中的实证检验——以无锡市为例[J]. *地理科学进展*, 2016, 35(4): 420-430.
SONG Zhengna, YAN Tinggan, LIU Ting, et al. A new gravity P-median model and empirical test in urban comprehensive hospital location decision making: take Wuxi as an example[J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(4): 420-430.
- [21] 陈刚,付江月.兼顾公平与效率的多目标应急物资分配问题研究[J]. *管理学报*, 2018, 15(3): 459-466.
CHEN Gang, FU Jiangyue. Multi-objective emergency resources allocation with fairness and efficiency consideration[J]. *Chinese Journal of Management*, 2018, 15(3): 459-466.
- [22] HAJIPOUR V, FATTAHI P, TAVANA M, et al. Multi-objective multi-layer congested facility location-allocation problem optimization with Pareto-based meta-heuristics[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2016, 40(7-8): 4948-4969.
- [23] 陶卓霖,程杨,戴特奇,等.公共服务设施布局优化模型研究进展与展望[J]. *城市规划*, 2019, 43(8): 60-68, 88.
TAO Zhuolin, CHENG Yang, DAI Teqi, et al. Research progress and prospect of public service facilities layout optimization models[J]. *City Planning Review*, 2019, 43(8): 60-68, 88.
- [24] 杜浩国,林旭川,张方浩,等.基于蚁群优化算法的应急避难场所选址模型研究[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(2): 89-101.
DU Haoguo, LIN Xuchuan, ZHANG Fanghao, et al. Study on emergency shelter location model based on ant colony optimization algorithm[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(2): 89-101.
- [25] NEEMA M N, OHGAI A. Multi-objective location modeling of urban parks and open spaces: continuous optimization[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2010, 34(5): 359-376.
- [26] 李金泽,唐芃,龙灏.基于多源数据的城市公共应急服务设施选址模型研究[J]. *建筑科学*, 2021, 37(12): 62-70, 168.
LI Jinze, TANG Peng, LONG Hao. Research on the location selection model of emergency service facilities based on multi-source data[J]. *Building Science*, 2021, 37(12): 62-70, 168.
- [27] 马潇雅,刘远刚,赵翔.城市公共服务设施优化配置模型研究的近期进展与展望[J]. *测绘通报*, 2020(2): 9-16.
MA Xiaoya, LIU Yuangang, ZHAO Xiang. The recent progress and expectation of research on model for urban public service facilities location optimization problems[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2020(2): 9-16.
- [28] 东熠,刘景发,刘文杰.基于多目标蚁群算法的主题爬虫策略[J]. *计算机工程*, 2020, 46(9): 274-282.
DONG Yi, LIU Jingfa, LIU Wenjie. Focused crawler strategy based on multi-objective ant colony algorithm[J]. *Computer Engineering*, 2020, 46(9): 274-282.
- [29] 陈志芬,李俊伟,卢方欣,等.城市消防站选址布局优化及对雄安新区的启示[J]. *中国安全生产科学技术*, 2018, 14(9): 12-17.
CHEN Zhifen, LI Junwei, LU Fangxin, et al. Optimizing location of fire stations and its enlightenments for Xiongan New Area[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2018, 14(9): 12-17.
- [30] 蒋华雄.西方规划支持系统的实施困境、解决路径及其启示[J/OL]. *国际城市规划*: 1-10[2022-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5583.TU.20200916.1423.002.html>.
- JIANG Huaxiong. Planning support system: the implementation gap, solutions and new development trends[J/OL]. *Urban Planning International*: 1-10[2022-04-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5583.TU.20200916.1423.002.html>.
- [31] 李哲睿,甄峰,张姗姗,等.面向国土空间安全的工业园区风险监测评估系统设计思路[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(9): 2437-2448.
LI Zherui, ZHEN Feng, ZHANG Shanqi, et al. Design idea of risk monitoring and evaluation system for industrial park oriented to territorial spatial safety[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(9): 2437-2448.
- [32] 秦萧,甄峰,魏宗财.未来城市研究范式探讨——数据驱动亦或人本驱动[J]. *地理科学*, 2019, 39(1): 31-40.
QIN Xiao, ZHEN Feng, WEI Zongcai. The discussion of urban research in the future: data driven or human-oriented driven[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2019, 39(1): 31-40.

基于复杂适应系统理论的城市色彩系统建构和方法探索*——以北京王府井街区为例

Construction and Method Exploration of Urban Color System Based on CAS Theory: A Case Study of Wangfujing Block in Beijing

张梦宇 顾重泰 陈易辰 张晓东 ZHANG Mengyu, GU Zhongtai, CHEN Yichen, ZHANG Xiaodong

摘要 在国土空间规划背景下,色彩被纳入城市设计的管控要素,成为延续城市文脉、塑造城市特色的重要手段。结合国内外色彩发展经验,总结当前城市色彩管控的主要问题,针对问题引入复杂适应系统(CAS)理论,从主体、特征和机制3方面剖析城市色彩系统内涵,提出体系框架。在此基础上,明确色彩系统与城市设计体系的适应关系,包括总体设计、街区控规、设计引导和实施评估4个阶段的运用方法,细化技术手段及运用场景。以北京王府井街区为例进行技术验证,通过不同尺度色彩识别形成街区更新治理的管控方案,并利用社交网络平台搭建公众参与机制,实现色彩感知与设计的结论运用,使得一向难以量化的城市色彩具备纳入规划指标体系并且长效监测的基础条件,为城市大数据支持规划设计提供新思路。

Abstract In the context of national territory spatial planning, color is incorporated into the control elements of urban design, which has become an important means to extend the urban context and shape the urban characteristics. Combined with the experience of color development at home and abroad, this study summarizes the main problems of current urban color management and control, introduces the complex adaptive system (CAS) theory, analyzes the connotation of urban color system from three aspects of subject, characteristics and mechanism, and puts forward the system framework. On this basis, the paper clarifies the adaptive relationship between the color system and the urban design system, including the application methods in the four stages of overall design, block planning control, design guidance and implementation evaluation, and refines the technical means and application scenarios. It then takes the Beijing Wangfujing block as an example for technical verification, the control scheme for block renewal and governance is formed through color recognition of different scales, and the public participation mechanism is built by using the social network platform to realize the application of color perception and design, which makes the urban color that has always been difficult to quantify have the basic conditions for inclusion in the planning index system and long-term monitoring, and provides a new idea for urban big data to support planning and design.

关键词 城市设计;CAS;城市色彩系统;色彩管控;王府井街区

Key words urban design; CAS; urban color system; color control; Wangfujing block

文章编号 1673-8985 (2022) 03-0030-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j.supr.20220305

作者简介

张梦宇
北京工业大学城市建设学部
博士研究生
顾重泰
北京市城市规划设计研究院
工程师, 硕士

陈易辰
北京市城市规划设计研究院
工程师
张晓东 (通信作者)
北京市城市规划设计研究院
数字技术规划中心 主任, 教授级高级工程师
zhangxd-bicp@outlook.com

0 引言

我国古代就有城市色彩的相关实践,而有意识的现代城市色彩规划大约从20世纪90年代开始。近年我国出台一系列政策标准,指导城市色彩的保存、传递、交流和识别等。

2017年4月,住建部发布《城市设计管理办法》,提出重点地区城市设计应当塑造城市风貌特色,并确定建筑色彩的控制要求。同年

*基金项目:国家重点研发计划基金“城市复杂系统模型和平行城市计算理论”(编号2020YFB2104001)资助。

10月,《历史文化名城名镇名村保护条例》修订后正式发布,规定历史文化街区、名镇、名村核心保护范围内的历史建筑应当保持原有的高度、体量、外观形象及色彩等。2020年4月,住房和城乡建设部联合发布《关于进一步加强城市与建筑风貌管理的通知》,旨在延续城市文化,加强对建筑色彩、空间环境等方面的要求。同时,自然资源部发布《国土空间规划城市设计指南》,要求在总体规划中对中心城区城市天际线、色彩等要素进行系统构建,提出管控要求;在详细规划中,加强对建筑体量、界面、风格、色彩、第五立面等要素的管控。从中可以看出,将城市色彩纳入城市设计的管控要素,是延续城市历史文脉、塑造城市风貌特色的重要手段。在新的国土空间规划体系下,不仅要关注建筑色彩和空间环境,还应结合规划层级进行系统构建,实现城市色彩的整体引导和管控。

1 国内外城市色彩相关研究

1.1 城市色彩相关理论

国际上,20世纪上半叶欧洲出现“色彩调整方法”,意大利、英国、美国、日本等国开展了城市环境和建筑色彩的规划设计工作^[1]。这些研究受到“色彩地理学”的影响,从自然色彩、环境色彩等方面进行设计实践。例如,意大利都灵围绕街道和广场,建立“色彩数据库”,利用流行色制定城市推荐色彩图谱^[2]。日本将建筑色彩拓展到城市景观,从“协调”与“特色”两大角度提出城市色彩的管控方法^[3]。我国以“城市”为视角的色彩研究起步较晚,早期研究为1999年宋建明教授所著的《色彩设计在法国》,之后不同学者发展了城市色彩理论。例如,尹思瑾^[4]提出城市色彩景观规划设计的理论框架,崔唯^[5]论述了城市环境色彩规划的构成要素,张长江^[6]提出预测、引导、调节的色彩管控方法,王京红^[7]提出用色彩表达人的体验等。

近年来,随着信息技术的高速发展,大数据的方法被广泛运用到城乡规划领域,不同学者尝试对城市空间及环境品质进行数字化转译。例如,许雪琳^[8]提取色彩SHL参数进行由孟

塞尔色彩体系向SHL色彩体系的数字化转译,提出厦门城市色彩数字化精准管控。龙瀛^[9]通过街景图像测量北京封闭社区周围及内部公共空间,评估微公共空间的价值。这些研究对城市色彩规划的理论框架和技术方法起到重要的推动作用,但是目前基于图像信息对城市色彩量化计算的研究仍然较少,存在数据精度和计算方法的诸多问题,亟待进一步研究探索。

1.2 城市色彩相关实践

我国已有多个城市编制了城市色彩规划,在

数据采集方法和管控措施等方面进行实践(见表1-表2)。北京从2000年开始通过多项规划工作和多部法规条例,保护和改善北京色彩风貌,这些法规条例主要涉及历史文化名城的保护工作。2017年,《北京城市总体规划(2016年—2035年)》获批,将城市色彩提高到总体规划层面,发布了北京城市基调与多元化研究成果报告、白皮书和资料汇编,各分区也开始制定城市设计导则,包含城市色彩专题。这些文件的出台对北京城市色彩管理起到重要的推动作用。纵观我国城市色彩规划的编制和实

表1 中国城市色彩规划现状

Tab.1 Current situation of urban color planning in China

城市	基础研究对象	调研方法	控制方法
天津市	自然色彩、文化色彩; 传统建筑色彩、现状建筑色彩	《常用建筑色 02J503-1》; 物卡目视比对	色彩总谱; 城市主色调
武汉市	自然环境、历史文化	使用孟塞尔色彩系统,进行专业的 色彩预算、数据记录和拍照存档	功能分区; 分区色谱
哈尔滨市	地理气候、传统建筑文化; 历史建筑、现代类型建筑	拍照、色彩提取	主色调; 色彩控制单元
杭州市	城市区域; 重点街道; 部分单体建筑	拍照、色彩提取形成图谱	主色调; 色彩分区; 建筑类型
温岭市	6大类型建筑色彩	中国建筑物卡国家标准物卡; 数码相机	色彩总谱、分区色谱; 基调色、强调色
广州市	自然环境; 人文色彩; 人工色彩	提取色谱、物卡测色	宏观城市色彩规划体系; 中观功能组织和空间结构景观 色彩规划指引
苏州市	总体色彩; 街道色彩	对照物卡进行视觉测色	主色调、街道色彩; 建筑色彩、环境设施色彩
重庆市	现状自然色彩; 人文色彩; 人工色彩	利用《中国建筑物卡国家标准》对 照片进行色彩比对 (没有太阳的晴天 10:00—15:00 之间拍照)	基调色色谱; 建筑分类; 第五立面
洛阳市	自然地理色彩; 人文地理色彩; 人工色彩	图像采集; 物卡比对仪测量	总体控制:基调色; 分区控制:屋顶色、基调色、 辅助色、点缀色
长沙市	自然景观要素; 民俗特产元素; 城市人工景观	中国建筑物卡国家标准物卡	总体控制:暖色主色调; 相对自由运用明度; 严格控制色彩艳度
郑州市	城市概况、自然地理、历史文化、 建筑、交通、广告、色彩喜好的 倾向等	中国建筑物卡国家标准物卡	主色调色谱; 建筑分类控制:色相、黑度、 白度、色系对比
扬州市	自然环境、人文历史; 历史城市建筑色彩	实地调研提取城市推荐色谱	基调色控制:“扬州灰、明 月白、烟雨青、暖秋彩、深 浅黛”
西安市	自然地理、人文历史、城市发展 脉络、建筑类型	中国建筑物卡国家标准物卡	主旋律定位; 片区色彩深化
北京市	人文历史、土壤植被、建筑风格、 人工色彩	中国建筑物卡国家标准物卡	基调色; 建筑材质及配色方案
呼和浩特市	历史文化街区、自然地理、人文 地理、不同时期建筑色彩	图像采集、物卡比色	建筑色谱、主色调、辅色调
上海市	色彩控制分区、实施路径、气候 特征、地区气质、现状色彩基础	3万多处街景影像、HSV值	色彩主题、色彩控制分区、 实施引导 基调色、辅助色、点缀色
济南市	城市色彩地域属性、土壤色彩、光 环境分析、人文环境、建筑色彩	实地调研、物卡比色	城市色彩推荐色谱(分色系)

资料来源:笔者自制。

表2 新兴数据和方法支持的色彩分析与实践

Tab.2 Color analysis and practice supported by emerging data and methods

作者	分析与实践内容	数据方法
褚欣 ^[10]	上海市普陀区色彩规划与治理	以网络地图街景数据为基础,采用深度学习技术,对每一张街景地图进行场景切割区分其中要素,并借助白平衡算法还原建筑的色彩数据
白兰 ^[11]	成都市色彩规划实践	利用百度街景图进行建筑立面信息采集,利用 Matlab 软件提取建筑色彩的色相、亮度、彩度
傅倩 ^[12]	长沙市主城区建筑色彩基因提取与分析研究	通过提取城市空间内街景图像,对空间内的色彩进行等分取样,分为不同的抽象空间,模拟人眼在城市空间片段中的色彩认知
周尚意 ^[13]	北京故宫建筑群基调管控	通过眼动实验记录人对某一色彩观察时的进入时间、注视时长、瞳孔大小变化等,直观反映被试者的心理活动及感知特征
叶宇 ^[14]	开封市建筑色彩定量测度	运用 Python 计算机语言访问百度地图 API 进行街道路网抓取,利用 GIS 生成等距采样点及其坐标,获取百度街景影像数据,运用 SegNet 深度学习的图像识别技术来提取建筑影像
.....

资料来源:笔者自制。

施,仍然存在以下问题。

(1) 色彩基础数据匮乏,尚未形成系统数据库。目前我国城市色彩数据主要通过实时影像拍摄和物卡比对的方式进行采集,采集数据有限,精度参差不齐。虽然个别城市已引入大数据的方法,但未形成完整的技术方案,无法支撑数据库的系统建设。

(2) 不同数据存在自身的局限性,数据之间缺乏有效关联。大数据或人工拍照采集的图像数据与真实环境色彩相比存在偏色、比例失真等问题,难以保证数据的准确性;物卡比色的方式则耗时耗力。不同方法采用不同的色彩空间导致数据之间无法关联。

(3) 未形成科学的管控方法,色彩规划实施困难。目前,城市色彩规划主要通过色彩总谱和分区分谱的方式进行管控,这些专家导向型的色谱与实际建成环境存在较大差异。因此,构建复杂色彩系统,适应真实环境,建立自上而下的城市决策与自下而上的城市建造之间的关系是亟待解决的问题。

2 基于CAS理论的城市色彩系统体系构架

2.1 色彩系统的理论认知

对于个体色彩感知来说,好的城市色彩是种审美体验,是独特的、创造性的、不可重复的,但对于群体来说,却存在共同的体验^[15]。城市色彩及其演化规律不能通过其构成要素的简单相加来理解,必须以不可分割的整体观、

相互联系的有机观、每个要素的能动观来重现城市的复杂性^[16]。结合物理学家韦斯特^[17]的规模法则,复杂系统可进行量化和预测,促使了社会物理学在城市量化领域的发展。因此,以经典物理学方法对城市色彩的构成层次和要素进行功能性剖析而形成的色彩图谱往往实施困难。针对上述问题,本文引入复杂适应系统(CAS)理论,借助复杂性科学对于系统耦合及系统适应性的关注^[18],在剖析色彩层次和要素功能的基础上,建立不同色彩要素之间和不同规划层级之间的相互联系,利用大数据的方法更大范围、更小颗粒识别色彩要素,自下而上形成色彩系统适应规划实施,为色彩数据库的运用和推广奠定理论基础。

在复杂适应系统中,城市色彩基于主体^①、介主体^②和适应^③,形成4个特征和3个机制^④^[19],明确主体、介主体和运行机制是构建色彩系统的基础。色彩主体即“色彩基因”,对于城市来说,“色彩基因”可以分为建筑本体、景观绿化、路面铺装等。对于单体来说,建筑本体可以分为建筑部位、建筑构件等。不同构件组成不同建筑,不同建筑组成不同街区,不同街区组成城市整体,形成不同层次的介主体。“色彩基因”和介主体的适应性体现在与色彩环境的协调。色彩系统中,标识是指普遍存在的特性,它为色彩集聚提供了边界,例如一定区域的主题色,该边界为模糊边界;内部模型是色彩系统的核心技术;积木机制是色彩更新机制,如自然选择和动态学习。

2.2 色彩系统的体系架构

(1) 总体原则

在明确主体和机制的基础上,城市色彩作为复杂系统应充分适应城市发展机制,关注主体施色特征,协调与环境的关系。因此,系统构建需遵循以下原则:①整体性原则:色彩系统应将城市作为整体来考虑,感知内容包括整体标识、运行机制、主体属性及其环境关系等;②多样性原则:感知对象尽可能涵盖多主体,包括不同建筑本体、景观绿化、路面铺装等;③地域性原则:结合色彩地理学,充分考虑地理气候、经济社会、文化风俗等因素的影响;④可量化原则:量化色彩感知,选取易获取数据;⑤数据兼容性:充分发挥新数据对传统数据的补充作用,考虑多源数据之间的兼容性和转化关系;⑥以人为本:充分关注市民需求与个人价值的实现。

(2) 系统架构

基于以上理论,构建城市色彩系统框架,包括系统要素、系统运行、运行结果和对应规划层级。首先,在主体和介主体的基础上,将色彩系统分为宏观、中观、微观层面,对应规划管控层级。宏观层面对应城市整体,中观层面对应城市街区,微观层面对应城市建筑。其次,依据城市设计理论,将不同层级系统细分为不同要素,构建纵向衔接关系,城市整体和城市街区细分为色彩廊道、色彩片区、色彩节点、色彩标识等;城市建筑细分为建筑本体、景观绿化、路面铺装等。结合复杂适应系统机制,明确色彩系统的运行方法和运算结果,其中运行方法主要包括色彩感知、色彩校正、协调度评估,不同层级采用相应的运算方法识别色彩要素特征。建筑层面通过色彩感知和色彩校正识别单体要素的施色特征;街区层面在建筑层面的基础上总结街区空间特征,通过色彩协调度评估单体与环境的关系,提炼街区主题色和代表性单体颜色,评估其色彩搭配;城市层面结合公众参与,考虑区域属性,如文化、气候、材质等,识别整个城市的色彩空间秩序。该色彩系统建立了要素与整体的关系,充分适应规划层级,在主体识别的基础上,更加关注环境的协调关系,是认识论上的转变。在色彩系统框架下,色彩管控有4个核心工

注释:① 主体: CAS由大量具有主动性的元素组成,这些主体无论在形式上还是性能上都各不相同。不同的CAS过程具有不同的时间尺度,但适应的概念可以应用于所有的CAS主体。

② 介主体: 主体通过聚集可以形成更高级的主体——介主体,这些介主体的相互作用通常可以用它们的聚集特性很好地描述出来。

③ 适应: 在CAS中,任何特定的适应性主体所处环境的主要部分都由其他适应性主体组成,所以,任何主体在适应上所做的努力就是要去适应别的适应性主体。这个特征是CAS生成的复杂动态模式的主要根源。

④ 7个基本点: 包括对所有CAS都通用的4个特性和3个机制, 4个特性为聚集、非线性、流、多样性, 3个机制为标识、内部模型、积木。

作:①完善感知方法,适应城市设计体系;②细化运行技术,强化应用路径;③搭建公众参与机制;④实现年度监测。本文将围绕色彩管控的4个核心工作展开进一步探讨(见图1)。

3 城市色彩系统适应城市设计体系

本文引入数据增强设计理论优化色彩系统框架下的色彩管控路径。数据增强设计(DAD)强调以定量城市分析为驱动,为规划设计的全过程提供调研、分析、方案设计、评价、追踪等支持工具的方法论^[20]。本文结合数据增强设计方法论,拟定并实践城市色彩总体设计阶段、街区控规分区管控阶段、建筑设计引导阶段和城市色彩实施评估阶段4个层面的城市色彩系统应用方法(见图2)。

3.1 城市色彩总体设计阶段

在城市色彩总体设计阶段,传统工作模式是通过人工对重点建筑进行采样,提出整体意向和分区管控原则。数据增强框架下的城市色彩设计,首先通过大规模街景色彩感知和分区区域调研校正的方式批量获取单位尺度(如以10 m为单元)的城市色彩样本;其次,基于协调度认知和指标测算对问题区域进行初筛;最后,将现行“城市映像式”规划原则进一步细

化到空间管控单元,使得总体城市设计有空间落位的基础抓手。

3.2 街区控规分区管控阶段

控规分区管控阶段色彩管控的传统方式是将色彩纳入引导性指标,在方案实施阶段由专家介入,然而该方式对于色彩评价存在一定主观性。数据增强框架下的城市色彩设计,首先是形成稳定的色彩管控指标,以孟塞尔(Munsell)的色相、明度、彩度等色彩形态变化指标对其进行量化,增加了人眼视觉的可读性;其次是形成将认知映像转化为客观指标的方法。针对色彩协调性评估,将以往管控中倾向于主观感受的概念进行量化。最后是基于现状色彩的分级管控方式,通过色彩聚类方法和神经网络聚类方法将大范围城市色彩进行聚类评估,同时提供个性建筑主体色、辅助色、点缀色的弹性设计空间。

3.3 建筑设计引导阶段

在以往的建筑设计引导色彩管控中以专家建议的形式开展,色彩引导存在较大的主观性。数据增强框架下的城市色彩设计在完成控规分区导引的基础上,具备了空间传导(百米尺度)和稳定指标(Musell色彩体系)传导

的技术基础。此外,针对街道的协调性评价可精细到10 m单元。基于网络数据库积累的城市街景基础数据为建筑色彩的历史回溯提供了有效手段,拓宽了以往城市色彩关注单一空间或典型案例的分析维度。

3.4 城市色彩实施评估阶段

城市色彩实施评估往往随着重点项目的开展以典型案例形式“附加式”进行。数据增强框架下的城市色彩设计依托历年街景数据和自主采集数据的积累,具备开展持续性色彩监测评估的技术基础。对于街道问题区域的发现可通过人工智能目标识别的方式,宜在专家评估专项专题之前进行。此外,“基调色、其他代表色”和“主体色、辅助色、点缀色”组成的便携式色卡可作为规划基层(如责任规划师)实施监督管理的依据。

3.5 技术方法及应用路径

色彩系统的技术方法及应用路径主要包括以下几个步骤。首先,明确识别不同层次色彩数据的获取路径。其次,通过色彩感知、色彩校正和色彩评估进行数据计算:色彩感知结合大数据和传统数据的特征,限定感知方法和获取精度,利用计算机算法提取色值;色

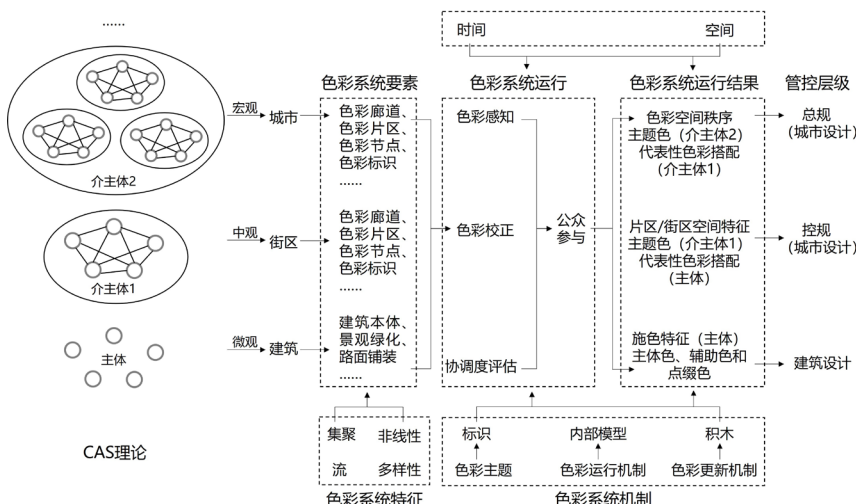


图1 基于CAS理论的城市色彩系统体系架构
Fig.1 Architecture of urban color system based on CAS theory

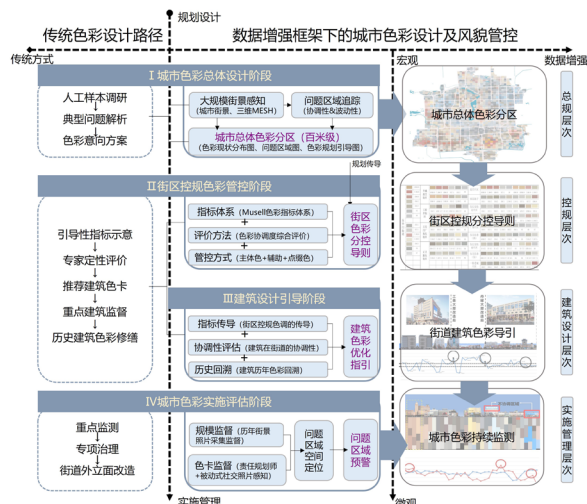


图2 城市色彩系统适应城市设计体系
Fig.2 Urban color system adapts to urban design system

资料来源:笔者自绘。

资料来源:笔者自绘。

彩校正通过色彩空间转换和修正系数的方法实现不同路径的关联;色彩评估基于色彩协调值,进行主体与环境适应性评价。最后,依据城市设计理论,结合第三方评估和公众参与,形成色彩管控建议色谱,可运用于城市更新或街区治理。

4 北京王府井街区色彩感知与管控

本文以“首都功能核心区—东单门街道—王府井街区”为例进行方法验证。北京老城区王府井街区历史悠久,形成以王府井大街为轴线的棋盘式道路网格。20世纪末,街区坚持规划先行,开展了三期城市设计整治工程,保留传统商铺、延续原有肌理、整治建筑立面与街道空间环境。当前,为进一步落实《北京城市总体规划(2016年—2035年)》《首都功能核心区控制性详细规划(街区层面)(2018—2035)》,东城区政府编制了《王府井商业区更新治理规划》以推进解决街区更新治理的难点问题。在新一轮更新治理规划中,引入城市色彩数据库系统,通过对街区尺度、街道尺度及建筑尺度的色彩感知,形成空间管控的设计要求,以期对其他领域大数据增强设计提供借鉴。

4.1 多尺度的色彩感知和设计

基于上述色彩系统,结合城市设计理论,以王府井街区为研究对象,识别色彩形态和空间结构,形成街区更新改造方案。将王府井街区色彩系统细分为“街区—街道—建筑”3个层级,街区层面识别色彩空间秩序形成整体管控要求;街道层面识别色彩廊道和色彩节点,提出街道立面管控要求;建筑层面通过色彩校正识别节点施色特征,并依据以上管控要求,细化节点建筑整治方案。在此基础上,借助互联网平台搭建公众参与的长效监测机制,最终形成管控建议色谱和实施引导措施。

(1) 街区尺度的色彩标识识别

从街区尺度识别色彩系统标识,明确色彩空间的主题色,依据主题色出现频率,划分基调色和其他代表色,作为街区色彩空间的统一标

准。按照王府井街区范围在系统数据库中获取源数据集进行分析,通过图片读取和计算机视觉语义分割提取图像中的建筑空间,采用色彩平衡处理校正不同角度、光照、方向等带来的影像失真;基于K-means算法提取每段影像一次聚类色,按照街道朝向进行二次聚类并提取占比排在前10的聚类色,再将不同朝向的二次聚类色进行综合聚类,最终得到10个占比较大的色彩,作为街区主题色。根据色彩的出现频率,将频率较高的5个色彩定位为基调色,剩余色彩为其他代表色。此外,考虑设备的感知偏差,适当选取无彩度灰色(N)作为补充(见图3)。

通过以上方法,得出王府井街区整体色彩管控要求。王府井街区基调色以暖色系为主,包括黄色(5Y、7.5Y)、红黄色(10YR)。明度主要为中高明度6—7,搭配部分低明度2—3的色彩。彩度以中低彩度1—2为主。其他代表色同样以暖色系为主,包括黄色(2.5Y、5Y)、红黄色(2.5YR、7.5YR)、红色(10R)。明度集中在中高明度4—7。彩度变化值较大,从低彩度1—2至中高彩度8均有分布。

(2) 街道尺度的协调度评估

从街道尺度进行协调度评估,识别色彩廊道的空间特征。按照色相、明度、彩度三要素及色彩心理学相关理论基础,提出街道层面的色彩协调度评估方法,分别对沿街立面色彩协调度进行分析(式(1)、式(2))。

结合色彩心理学相关理论研究,孟塞尔色彩理论中将面积、明度与彩度的关系归纳为(A色的明度×彩度)/(B色的明度×彩度)=B面积/A面积,即:

$$\frac{L_A \times C_A}{L_B \times C_B} = \frac{S_B}{S_A} \quad (1)$$

式中:A、B分别表示两个颜色; L_A 、 L_B 分别表示A色、B色的明度; C_A 、 C_B 分别表示A色、B色的彩度; S_A 、 S_B 分别表示A色、B色的面积。

简而言之,高明度、高彩度、小面积的色彩和低明度、低彩度、大面积的色彩对人眼的冲击是相似的,基于这一理论基础出发,本文将街道的色彩协调度归纳为式(2)。

$$CH = \sum_{i=1}^M L_A^i \times C_A^i \times S_A^i \quad (2)$$

式中:CH代表色彩协调值(Color Harmonization Value); T_M 表示研究单元内的色彩数; L_A 为A色的明度; C_A 为A色的彩度; S_A 为A色的面积占比。协调值为0—100之间的浮点小数。

以王府井大街为例,采用K-means聚类方法,提取街道立面的色相、明度、彩度,计算出色彩协调值。依据协调值曲线可知,王府井大街存在7个主要的波动折点,图4中黄色虚线的5个区域为街道景观节点,其协调值波动符合设计要求;而A、B两个红色框线区域则是由于不协调的广告牌带来的色彩波动,不符合设计要求,应作为整治对象。

通过以上分析,得出王府井大街立面色彩的评估结论及设计建议。街道整体色彩空间主要通过色相和明度进行统一,变化体现在节点建筑的彩度波动,波动范围控制在 ≤ 5 。大街西侧整体协调,色相统一,以暖色系红黄色(7.5YR、10YR)、黄色(2.5Y、5Y、7.5Y)为主。明度集中在5—7,搭配部分高明度8和少量中低明度3—4的色彩。彩度以中低彩度为主,相对变化较大,峰值主要出现在代表性商业建筑。但有少量高明度、高彩度冷色系出现在商业建筑外立面广告牌上,对街道界面有一定影响,建议调整。大街东侧相对协调,色相以暖色系为主,主要为红黄色(10YR)、黄色(2.5Y、5Y、7.5Y),较大街西侧更多使用冷色系的色彩,主要为玻璃幕墙,对街道界面有一定影响,建议控制使用。明度集中在5—7,搭配部分高明度8和少量中低明度3—4的色彩。彩度主要为低彩度1—3,部分大体量玻璃幕墙建筑出现中彩度4—6(见图5)。

(3) 建筑尺度的施色特征识别

对节点建筑和标志性建筑进行具体分析,总结景观节点的施色特征,并通过街景数据、拍摄数据和物卡比色数据的对比,得出修正系数,运用于前两个层次的聚类分析。选取街区内景观节点或代表光环境类型的重要建筑进行分析,以北京饭店为例进行色彩校正。校正方法以物卡比色数据为基准,判断街景数据和

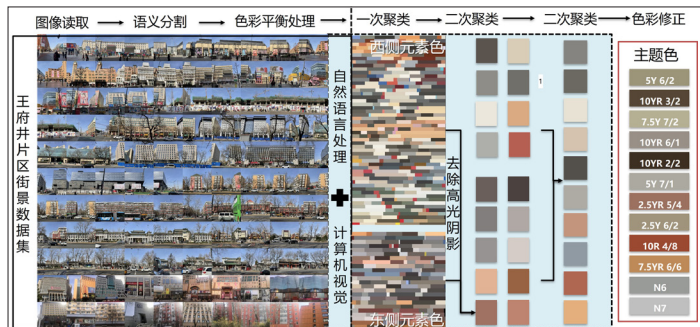


图3 街区层面城市色彩感知及分析路径
Fig.3 Urban color perception and analysis path at block level

资料来源:笔者自绘。

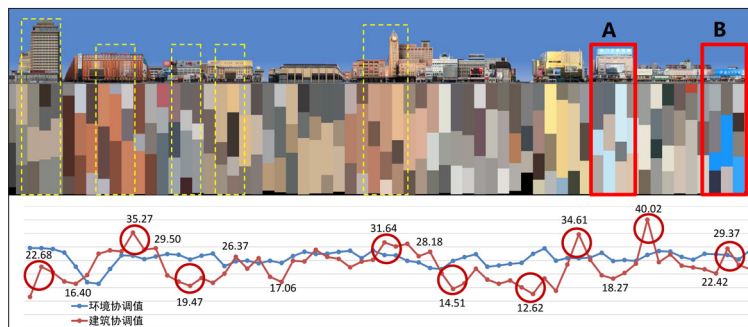


图4 街道立面色彩协调值曲线
Fig.4 Color coordination value curve of street facade

资料来源:笔者自绘。

拍摄数据的偏色情况。可以看出,街景数据色相准确,拍摄数据整体偏向黄色;明度普遍偏高1—2个值;中明度红黄色(YR)彩度吻合,高明度色彩(Y)基本偏高2。因此,对街景数据进行明度和彩度修正,对补充拍摄数据进行色相、明度、彩度的修正,修正后的色彩用作聚类分析(见图6)。经过修正后,指导北京饭店的色彩更新设计。该建筑历史悠久,作为王府井大街南端点融合了东西方文化,主体色为红黄色(7.5YR8/4),搭配红黄色(10YR6/2)和黄色(2.5Y7/2)的辅助色,形成浓郁而不失活泼的色彩风格,在更新设计中需重点延续色彩风貌,避免周围建筑的影响。

在节点建筑施色特征识别的基础上,依据街区尺度和街道尺度的管控要求,提出节点建筑的整治方案,并对整治后的环境协调度进行评估。以好友世界为例,该建筑为非代表性建筑,通过拆除高明度高彩度广告牌,改用低彩度中明度暖色系为主体色,使其协调值由34降至均值20,与周围环境达到协调。通过王府井大街东西侧建筑整治前后的色彩协调度曲线可以看出,节点建筑在整治改造后色彩整体趋向稳定,好友世界、工美大厦改造后的正向影响显著(见图7)。

4.2 色彩管控公众参与机制搭建

在构建多尺度城市色彩感知与设计的基础上,搭建基于基层规划师与公众的色彩监测和运营反馈制度,以保障色彩规划能够有效落实到基层街道治理,形成重要的色彩管控机制保障。

一是依托大范围色彩感知编制以街道为单

元的责任规划师色彩引导册,以色谱、代表色、基调色、点缀色协同引导的方式为街道责任规划师提供可操作的地方性色彩指引标准,方便基层开展城市管理工作。具体而言,主要是通过大范围、精细尺度的城市色彩感知和K-means聚类得到更贴合每一个街道基础建筑色调和高协调指标的色彩引导册,将引导册与现行责任规划师制度结合,使得基层规划建设有规则可依、贴近当地现实,可落实到具体指标管理上,保障自上而下色彩规划的传导畅通。

二是制作以重要历史文化建筑、特色建筑、网红建筑等为故事线的城市色彩普及宣传册,使得民众可以从身边的建筑理解城市色彩设计的内容,同时针对名片建筑提出保护更新和引导的建议。具体而言,在各区域民众对当地建筑有较深刻认识的基础上,通过对重要节点建筑的量化分析,将城市色彩专业理论与民众的普遍认识相结合,使其了解规划的色彩管控如何落实到日常生活中;民众认为有不合理之处也可及时提出,形成自下而上的色彩反馈链。

三是通过第三方社交网络平台对研究区域进行分析,形成互联网第三方视角的大众点评册。站在第三方的视角反映游客心目中各个景区、历史街区、网红景点的建筑色彩具有什么特点,同时大众评分情况在一定程度上反映了民众对该地区建筑风貌的认可度(见图8)。

4.3 色彩持续监测管控方法应用

在开源街景数据基础上及自主采集技术逐步完善的当前,对于城市色彩的管控在技术

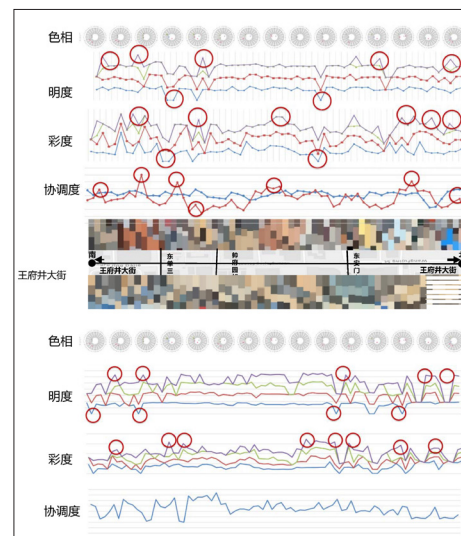


图5 王府井步行街色彩协调度评估
Fig.5 Evaluation of color coordination degree of Wangfujing pedestrian street

资料来源:笔者自绘。

层面已经具备了进行持续监测的基础,可构建普适的、可逐年追踪的持续监测机制。

一是建立逐年更新的数据基础。本文涉及首都功能核心区年度更新开源数据15万张,自主采集结合规迹®街景采集APP众筹获得,可保证各街区尺度色彩的稳定获取;二是构建稳定的色彩指标评估方法。本文结合PSPNet模糊神经网络及孟塞尔色彩指标构建的色彩评估方法,可对各街区色彩值的明度、彩度、色相、协调度进行大规模计算;三是形成稳定的街区评估单元。本研究以首都功能核心区作为对象,以250 m为街区感知固定单元,初步绘制了北京老城色彩地图®(见图9),对区域主题色进行监测,重点提取区域内明度、彩度均较高

注释: ⑤ 北京市城市规划设计研究院开发的街景照片自主采集移动端APP。

⑥ 色彩感知网格采用适应单个道路围合街区大小的250m×250m网格,便于与实际街区大小对应。

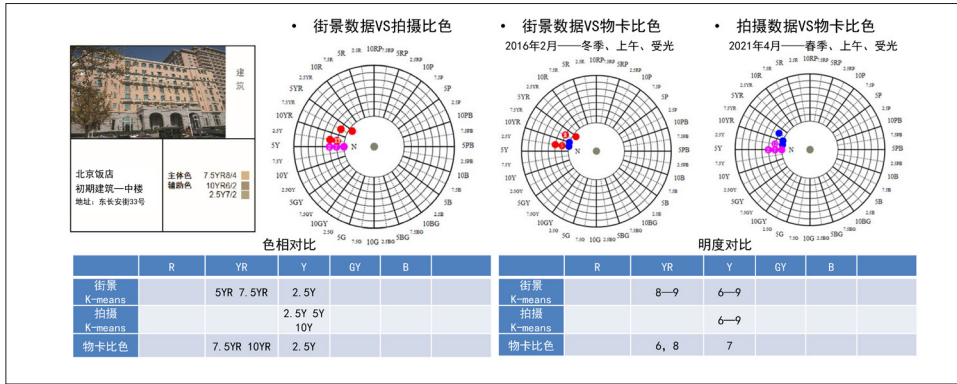


图6 单体建筑层面的色彩数据标定及校准参数确定

Fig.6 Calibration of color data and determination of calibration parameters at the level of single

资料来源:笔者自绘。

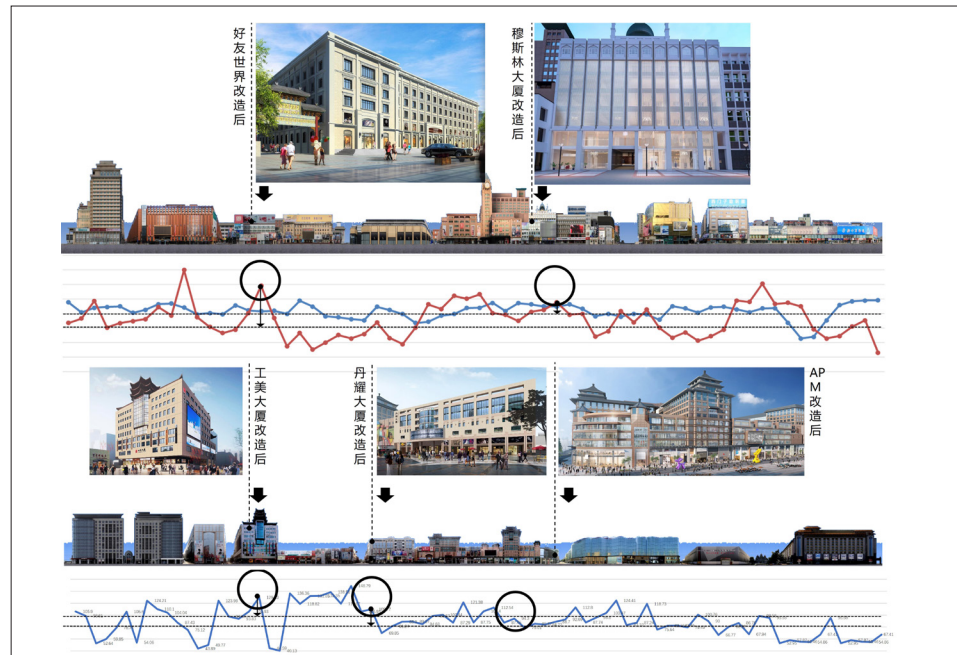


图7 王府井东西两侧建筑整治前后色彩协调值对比

Fig.7 Comparison of color coordination values of buildings on the east and west sides of Wangfujing before and after renovation

资料来源:笔者自绘。



图8 社交网络平台重点关注建筑及其色彩分析

Fig.8 The social networking platform focusing on architecture and its color analysis

资料来源:笔者自绘。

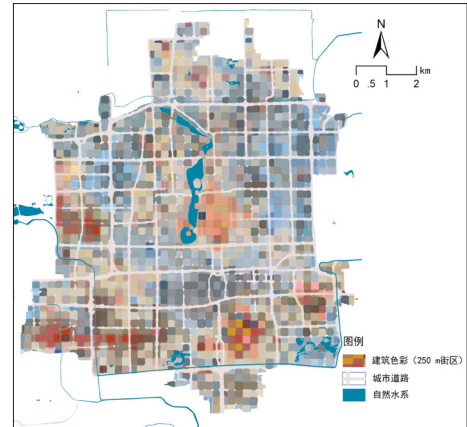


图9 首都功能核心区老城立面色彩映像地图

Fig.9 Color image map of the facade of the old city in the capital functional core area

资料来源:笔者自绘。

的颜色,在固定街区评估单元的基础上可对各单元的色彩进行持续追踪监测和对比分析。

色彩数据库系统的构建实现了城市色彩的量化处理,为建立长效监测评估机制提供了基础条件。监测评估的对象主要包括区域或线性空间的基调色、其他代表色等,通过数据库运算,监测色彩空间的标识性和协调性,并结合空间结构、文化价值、专家问卷、公众参与等综合评判色彩空间秩序。

5 结论

本文结合复杂适应系统和城市设计理论,论述“城市色彩总体设计阶段、街区控规分区管控阶段、建筑设计引导阶段、城市色彩实施评估阶段”的城市色彩规划的数据驱动方法。着重提出了针对中观层面城市色彩的监测与管控体系:一方面,基于孟塞尔标准色系,结合计算机图形学将《北京城市色彩城市设计导则》提出的总体基调原则落实到以街区、街道为基础的“空间主体”上;另一方面,通过色彩协调度评价提出了可量化街区色彩管理的阈值,为建筑单体或建筑群融入街道色彩管控提供实操手段,在保证街道整体色彩协调性的同时兼顾重点建筑色彩的个性和文化符号。

在色彩系统框架下,针对4个核心工作,开展城市色彩设计实践。以王府井街道更新为案例,在现状色彩协调度评估、单体建筑色彩

引导、设计方案比选、管控策略生成等方面验证了方法的实效性。同时着重提出色彩协调度的量化方法,探讨色彩管控公众参与机制的搭建,为城市色彩持续监测提供数据来源、评估方法和空间单元上的统一机制,为城市色彩的持续量化提供一种系统思路。

研究仍存在后续开展的必要,包括多源数据校正系数的地区性差异,宏观层面色彩聚类的方法,微观层面不同建筑环境、材质、时段带来的协调值变化等。此外,本文提出的色彩协调值等指标具有一定的探索性,针对其普适性及应用维度仍需进一步验证。当前相关研究已在北京市开展系列实践,技术方法已具备向其他城市推广的条件,具体参数可结合当地实际进行调整。

参考文献 References

- [1] 张梦宇. 北京老城地理色彩保护规划要略研究[D]. 北京:北京建筑大学, 2018.
ZHANG Mengyu. A study on the planning of geography color protection in the old city of Beijing[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2018.
- [2] 包晓雯, 邱惠英. 国外城市色彩规划实践及其对上海的启示[J]. 上海城市规划, 2018 (4): 115-118.
BAO Xiaowen, QIU Huiying. Foreign experience on urban colour construction and the enlightenment of Shanghai[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2018(4): 115-118.
- [3] 刘隽瑶, 柯珂, 龚志渊, 等. 日本乡村地区色彩管控体系和特点解析[J]. 小城镇建设, 2021, 39 (6): 100-107.
LIU Junyao, KE Ke, GONG Zhiyuan, et al. Analysis of color control system and characteristics in rural areas of Japan[J]. Development of Small Cities & Towns, 2021, 39(6): 100-107.
- [4] 尹思谨. 城市色彩景观规划设计[M]. 南京: 东南大学出版社, 2004.
YIN Sijin. Planning and design of the city's colorscape[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2004.
- [5] 崔唯. 城市环境色彩规划与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
CUI Wei. The color programme and design of city environment[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.
- [6] 张长江. 城市环境色彩管理与规划设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
ZHANG Changjiang. Color management and planning design in urban context[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [7] 王京红. 城市色彩表达精神[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
WANG Jinghong. City color: expressing city spirit[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [8] 许雪琳, 朱郑炜, 马毅. 厦门市城市色彩管控体系构建研究[J]. 规划师, 2020, 36 (18): 77-82.
XU Xuelin, ZHU Zhengwei, MA Yi. The practice of establishing city color management system in Xiamen[J]. Planners, 2020, 36(18): 77-82.
- [9] 徐婉婷, 张玉阳, 龙瀛. 对微公共空间的价值评估: 基于北京房价的视角[J]. 城市规划与发展杂志, 2022, 148 (2): 04022012.
XU Wanting, ZHANG Yuyang, LONG Ying. Valuing the micropublic space: a perspective from Beijing housing prices[J]. Journal of Urban Planning and Development, 2022, 148(2): 04022012.
- [10] 褚欣, 叶锺楠, 黄莎莎. 城市建成区色彩规划与治理——以上海市普陀区为例[J]. 上海城市规划, 2020 (3): 75-81.
CHU Xin, YE Zhongnan, HUANG Shasha. Urban color planning and management in urban built environment: a case study of Putuo District of Shanghai[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2020(3): 75-81.
- [11] 白兰, 李成楠, 张欣. 城市色彩规划的实践探索——以成都市为例[J]. 城市建筑, 2021, 18 (35): 48-51.
BAI Lan, LI Chengnan, ZHANG Xin. Exploration on urban color planning practice: a case of Chengdu[J]. Urbanism and Architecture, 2021, 18(35): 48-51.
- [12] 傅倩, 王喧, 黄钰靖, 等. 长沙市主城区建筑色彩基因提取与分析研究[J]. 长沙大学学报, 2021, 35 (4): 30-37.
FU Qian, WANG Xuan, HUANG Yujing, et al. Extraction and analysis of architectural color gene in the main urban areas of Changsha City[J]. Journal of Changsha University, 2021, 35(4): 30-37.
- [13] 周尚意, 苏娟. 面向城市基调控的建筑群色彩感知和认知分析——以北京故宫建筑群为例(提纲)[C]//第三届城市文化发展高峰论坛论文集. 2018: 110.
ZHOU Shangyi, SU Xian. Analysis on architectural complex color perception under city control: a case study of the Forbidden City (outline)[C]//Proceedings of the 3rd City Culture Development Forum. 2018: 110.
- [14] 叶宇, 仲腾, 钟秀明. 城市尺度下的建筑色彩定量测度——基于街景数据与机器学习的人本视角分析[J]. 住宅科技, 2019, 39 (5): 7-12.
YE Yu, ZHONG Teng, ZHONG Xiuming. Quantitative measurement of architectural color at city scale: a humanistic perspective analysis based on street view data and machine learning[J]. Housing Science, 2019, 39(5): 7-12.
- [15] 王京红. 什么是好的城市色彩[J]. 流行色, 2014 (11): 118-127.
WANG Jinghong. What is good city color[J]. Fashion Colour, 2014(11): 118-127.
- [16] 刘春成. 城市隐秩序复杂适应系统理论的城市应用[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2017.
LIU Chuncheng. The hidden order of city: complex adaptive system theory in urban studies[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press (China), 2017.
- [17] 杰弗里·韦斯特. 规模: 复杂世界的简单法则[M]. 张培, 译. 北京: 中信出版社, 2018.
WEST G. Scale: the universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies[M]. ZHANG Pei, translate. Beijing: Citic Press, 2018.
- [18] 张晓东, 许丹丹, 王良, 等. 基于复杂系统理论的平行城市模型架构与计算方法[J]. 指挥与控制学报, 2021, 7 (1): 28-37.
ZHANG Xiaodong, XU Dandan, WANG Liang, et al. Model architecture and urban computing for parallel cities based on complex adaptive systems[J]. Journal of Command and Control, 2021, 7(1): 28-37.
- [19] 约翰·H·霍兰. 隐秩序适应性造就复杂性[M]. 周晓牧, 韩辉, 译. 上海: 上海科技教育出版社, 2019.
HOLLAND J. Hidden order: how adaptation builds complexity[M]. ZHOU Xiaomu, HAN Hui, translate. Shanghai: Shanghai Science and Technology Education Press, 2019.
- [20] 龙瀛. 【专辑特送】《上海城市规划》之数据增强设计专辑[EB/OL]. (2016-05-03) [2022-06-10]. https://mp.weixin.qq.com/s/?_biz=MjM5ODI3ODQ3Ng==&mid=2653247495&idx=1&sn=2687defa4e0d31be271cca46befd52a9&scene=4#wechat_redirect.
LONG Ying. [Special album] Data enhancement design album of Shanghai Urban Planning Review[EB/OL]. (2016-05-03) [2022-06-10]. https://mp.weixin.qq.com/s/?_biz=MjM5ODI3ODQ3Ng==&mid=2653247495&idx=1&sn=2687defa4e0d31be271cca46befd52a9&scene=4#wechat_redirect.
- [21] 龙瀛, 张思嘉. 数据增强设计框架下的智慧规划研究展望[J]. 城市规划, 2019, 43 (8): 34-40, 52.
LONG Ying, ZHANG Enjia. Smart urban planning under the framework of data augmented design[J]. City Planning Review, 2019, 43(8): 34-40, 52.
- [22] GOU A. 基于空间结构的城市色彩规划方法[J]. 颜色资源应用, 2013, 38 (1): 65-72.
GOU A. Method of urban color plan based on spatial configuration[J]. Color Research Application, 2013, 38(1): 65-72.
- [23] WEINMANN M. 用于城市环境语义解释的高光谱、多光谱、颜色和三维点云信息的融合[J]. 国际摄影测量学、遥感和空间信息科学档案馆——ISPRS档案馆, 2019, 42 (2/W13): 1899-1906.
WEINMANN M. Fusion of hyperspectral, multispectral, color and 3D point cloud information for the semantic interpretation of urban environments[J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 2019, 42(2/W13): 1899-1906.

基于多源数据的建筑综合风险评估与更新优化策略* ——以福州市仓山区为例

Building Comprehensive Risk Assessment and Optimization Strategy Based on Multi-source Data: A Case Study of Cangshan District, Fuzhou

李苗裔 黄俐 党安荣 LI Miaoyi, HUANG Li, DANG Anrong

摘要 评估建筑安全是城市更新的重要基础环节,既往的建筑预警评估体系存在准确性低、主观性强、测度尺度有限的问题。以正处于快速发展阶段的福建省福州市仓山区为对象,应用PS-InSAR技术与机器学习相结合的方法测度建筑自身风险,划定高风险建筑集聚区;基于多源数据构建综合风险评估模型,实现多维度建筑风险评估,为城市开发建设提供量化分析路径。得出结论:PS-InSAR技术结合机器学习所得到的建筑自身风险符合实际情况,其结果可进一步快速、科学测定高风险建筑集聚区;综合社会经济因素与自然环境因素,结合实地调研,可分析不同风险区发展前景及更新次序,从而提出针对性的更新优化策略。

Abstract Evaluation of building safety is an important factor in urban renewal. The previous early warning evaluation system has problems of low accuracy, strong subjectivity and limited measure scale. Taking the Cangshan District of Fuzhou as the object, which is in the rapid development stage, the PS-InSAR technology combined with the machine learning method is used to measure the risk of building itself, and the high-risk building cluster area is defined. The comprehensive risk assessment model is constructed based on multi-source data to realize multi-dimensional building risk assessment and provide a quantitative analysis path for urban development and construction. It is concluded that the building risk obtained by PS-InSAR technology combined with machine learning is in line with the actual situation, and the results can further determine the high-risk building cluster area quickly and scientifically. The development prospect and renewal order of different risk areas can be analyzed by combining social and economic factors and natural environment factors and field investigation, so as to put forward targeted renewal and optimization strategies.

关键词 多源数据;PS-InSAR技术;建筑风险;城市更新

Key words multi-source data; PS-InSAR technology; construction risk; urban renewal

文章编号 1673-8985 (2022) 03-0038-08 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20220306

作者简介

李苗裔

福州大学建筑与城乡规划学院
教授, 院长助理
福建福大建筑规划设计研究院有限公司
总经理(院长), myli@fzu.edu.cn

黄俐

福州大学建筑与城乡规划学院
硕士研究生

党安荣

清华大学建筑学院
教授, 博士生导师

0 引言

随着城镇化快速发展,我国城镇建筑的保有率逐年上升。然而按照建筑物的设计使用年限标准,我国有相当数量的房屋已进入寿命中期,极易产生安全隐患^[1]。“又因建造过程追求高速度、低成本、人为原因的管理不善、近年自然灾害频发等原因”^[1],导致多地多次发生房屋倒塌事故,如福建长汀老旧房屋“6·3”坍塌、福建三明永安民房“7·17”坍塌等,造成严重人员伤亡与重大财产损失,对社会秩序与稳定造成严重影响。为此,建筑安全已成为城

市安全方面的重要课题之一。

建筑安全同时也关系着建设节约型社会和可持续发展等重要问题,是城市体检、城市更新的重要基础环节。2016年住建部门发文《住房城乡建设部关于进一步开展危险房屋安全排查整治工作的通知》提出要完善应急机制,对危险房屋实行动态监管,密切关注风险变化,防范倒塌事故发生。2021年6月24日,住房和城乡建设部召开进一步推进房屋安全排查整治工作视频会议,提出增强抓好房屋安全排查整治工作的责任感和紧迫感,坚决防

*基金项目:国家自然科学基金“多源数据融合的城市外来人口识别及其职住空间特征研究——以福州市为例”(编号52008112)资助。

范房屋安全事故。多个城市体检试点城市在实施方案工作过程中明确提出“无体检不更新”原则,坚守底线,严防大拆大建。

从近年来建筑风险评估的研究重心可以看出,不同学科领域对其评估的研究内容有较大差异。城乡规划领域对建筑安全的量化评价较少^[2],多从文化价值角度建立建筑评价体系^[3],也因此研究对象多局限于历史文化街区,且在评估过程中缺乏统一的标准^[4],较多依靠人为主观判断。建筑设计、土木工程等学科基于建筑结构、灾害风险等多维度建立评估指标体系,对于建筑质量判定需具备一定的专业性^[5-6],多依靠专业人士进行细致判定,因而研究尺度仅能集中于少量或特定建筑范围^[7]。在各研究领域虽已有将InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达干涉测量)、GIS (Geographic Information System, 地理信息系统)等新技术应用于建筑物安全监测,如沈体雁等^[8]利用InSAR技术以宁波鄞州区为研究对象进行建筑形变监测及风险分析,但其风险测定聚焦于建筑形变这一维度,尚未在大面积的建筑物安全监测基础上实现其他维度对建筑风险评估的影响。综上,对于建筑风险的评估工作,目前仍然没有一套适用于城区尺度的综合评价方法作为支撑。实现快速、大范围检测建筑自身风险,建立科学合理的城区建筑综合风险评估标准,是城市体检的重要基础,可保证后续城市更新工作的有效进行。

随着新数据与新技术的快速发展,智能化算法与多源数据支撑下的城区建筑综合风险精细量化成为可能。SAR (Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达) 遥感数据具有时空协调、全天对地观测的优点,PS-InSAR (Persistent Scatterer Interferometric Synthetic Aperture Radar, 永久散射体—合成孔径雷达干涉测量) 技术为基于InSAR技术识别选取具有稳定散射特性的相干点目标,通过分析这些PS点相位来反演形变信息^{[9]14},该技术可较好地利用城区尺度内的建筑物构成大量永久散射体^{[9]15},快速实现城区全覆盖、长时间、高精度的形变监测。近年来该技术已成为地表现形监测领域具

有发展潜力的新手段,而机器学习算法的加入则使得PS-InSAR技术识别建筑形变结果取得更高的识别精度。同时,结合多源数据,可从多维度的观察视角实现城区建筑的综合风险评估,弥补过往评估方法过于单一、主观的缺点^[10]。本文应用PS-InSAR技术与机器学习相结合的方法测度城区范围建筑自身风险,划定高风险建筑集聚区,同时基于多源数据构建建筑综合风险评估模型,实现多维度下的建筑综合风险精细化评估,致力于为城市开发建设提供科学的量化分析路径。以福建省福州市仓山区为例进行实证研究,结合模型分析结果与实地调研,对风险区进行具体分析,提出针对性的更新优化策略。该评估过程实现了对建筑风险这一难以评价要素的大范围、多维度的细化测度,具备一定的实际意义及易用性。

1 研究方法与数据

1.1 研究区域

选择福州市仓山区作为本文的研究区域,共涉及5个镇、8个街道、1个农场(见图1),区域面积为142 km²,加上洲地面积约为150 km²。

仓山区地处福州市城区南部,位于福州其余市辖四区(鼓楼、台江、晋安、马尾)与闽侯、长乐接壤地带,为“东进南下、沿江向海”发展战略的重要位置。随着台江区、鼓楼区发展以来,福州市核心区正在向周围扩张,仓山区也迎来了新机遇与新挑战——仓山区既包含三叉街、烟台山一带的旧城片区,该片区内人文底蕴浓郁,公园绿地、教育医疗资源云集,也不乏大量20世纪的历史建筑;又包含三江口、火车站等新片区,该片区内当前建设强度较小,有较多闲置城市用地,配套设施尚未完备。仓山区的城市更新需同时考虑到增量建设与存量提质两种要求,即对已经存在的老城区和即将步入发展的新城区这两种情况的考虑,因而对仓山区进行建筑风险评估研究具有普遍性和典型性。

1.2 数据源

本文所使用的数据主要包括SAR数据、手

机信令数据、DEM (Digital Elevation Model, 数字高程模型) 数据、土地利用类型、POI (Point of Interest, 兴趣点) 数据、自然环境相关数据等。其中, SAR影像信息(见表1) 监测时间为2016年6月8日至2019年12月30日。手机信令数据为基于基站的工参数据,划分网格,并计算加权质心点,将用户定位从原来基站小区范围转变为250 m×250 m的网格位置,经过一定算法处理得到精细化网格级别的常住人口数,已与第六次全国人口普查街道数据进行校核,其人口规律在街道层面呈现一致性,样本数据的采集时间为2020年。POI数据、建筑矢量数据、河流矢量数据、DEM数据为通过互联网开放平台获取并处理。地震活动断层数据来源于第五代地震区划图基础数据,因活动断层的地震危害性较强,其余类型的断层危险性相对偏小,故选取活动断层数据结合福州市历年

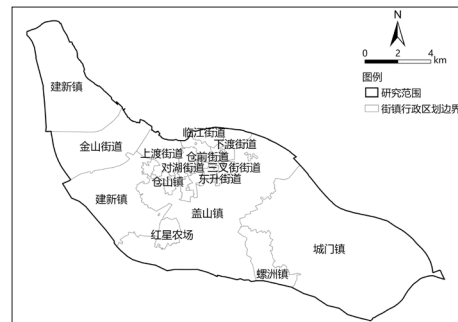


图1 福州市仓山区行政区划图

Fig.1 Administrative division of Cangshan District
资料来源:笔者自绘。

表1 SAR影像基本参数信息

参数	数值
卫星类型	COSMO-SkyMed
成像模式	StripMap (条带成像) 模式
数据波段	X 波段 (3.1 cm)
空间分辨率	3 m
升/降轨模式	升轨
极化方法	HH 单极化
中心入射角	24.96°
影像数量	68
数据级别	SLC 数据 (单视复)
监测时间	20160608-20191230
处理方法	PS-InSAR

资料来源:北京东方远科技股份有限公司。

发生过的地质灾害影响范围来表征地质灾害风险。台风是指在太平洋海域发生的具有一定强度的热带气旋,因研究范围限制,福州市五区范围内仅有两座可公开查询到的气象监测站,无法从降雨量与风速对区县尺度进行台风风险判定,故选取近3年热带气旋数据结合DEM数据综合评定。本文统一使用墨卡托投影,将数据转换为WGS-1984墨卡托投影坐标系。

1.3 分析方法

1.3.1 PS-InSAR技术结合机器学习方法排查建筑自身风险

应用PS-InSAR和机器学习相结合的技术,进行城区建筑物的精细化形变监测,可快速排查城区尺度建筑自身风险隐患(见图2)。基于建筑自身风险排查结果,进一步利用核密度与热点分析划定高风险建筑集聚区。

根据PS-InSAR原理,对于建筑物这类散射特性较为稳定的地物目标,可通过固定位置的多次雷达回波,得到一系列较为有效的观测值。利用N幅同一地区不同时期的SAR单视复数影像,实现计算连接图、生成差分干涉图对,识别选取PS点、相位解缠、去除相干误差、形变速率反演与地理编码7个步骤的智能化处理^{[9][14]},可精确测量符合条件的地物目标上某一点(探测出的点称为PS点)的三位空间位置及时序上的微小变化,监测精度在毫米量级,形成目标区域PS-InSAR形变数据库。结合建筑矢量框确定每栋建筑对应的PS点集合后,采用聚类算法,将PS点聚合,并选出最能反映建筑形变特征的1—2个聚类点开展后续分析。通过计算,可获取建筑物的高度信息和8项关键形变指标,基于建筑相关标准选择阈值,分别评估8项指标所对应的形变风险等级(见表2),进而综合评估建筑物形变风险等级。目前建筑自身风险评估的等级包括A、B、C、D这4个等级(见表3),当建筑物被划分为C级或D级时,开展现场踏勘或测量等后续工作,以此为基础划定建筑高风险集聚区。进一步筛选“值得关注”与“重点关注”建筑进行高风险建筑集聚区

范围划定,将筛选后的矢量建筑进行要素转点操作,计算其核密度,利用热点分析提取热值聚类区域,将其划分为高风险建筑集聚区。

1.3.2 建立建筑综合风险评估模型

根据城市更新需求,从建筑自身风险、自然环境风险和社会经济风险3个维度,基于层次分析法构建建筑综合风险评估模型(见图3)。

(1) 指标体系构建

基于手机信令数据、土地利用类型、POI数据、自然环境数据等多源数据,构建建筑综合风险评估体系。综合国内外既有研究的城市风险评估体系,可知目前城市风险的研究主要集中于社会、经济、环境、制度维度^{[11][8]},结合城市更新实际需求,将准则层(主要风险源)定为建筑自身风险、社会经济风险和自然环境风险3类。准则层不仅突出建筑物自身方面的内容,还特别强调社会经济、自然环境带来的风险,例如在人员密集、土地价值高的地段,当建筑发生意外事故后所造成的损失程度也相应上升,故将社会经济和自然环境风险纳入指标体系对未来一定时期内城市空间布局优化工作具有实际意义^[13]。指标层则包括建筑物异常形变、洪涝敏感性、地质灾害敏感性、台风敏感性、人口密度和土地价值6个单项评估指标。

(2) 指标权重计算

邀请福州市相关领域的5名专家(包括福州大学、福建工程学院、福建省建筑科学研究院3家单位)及15名从业人员(包括福建福建建筑规划设计研究院有限公司、福建省城乡规划设计研究院、福州市勘测院等多家单位)对指标进行一轮打分,运用层次分析法进行权重计算,得到各子系统和各指标分权重^[14](见表4),判断矩阵均通过一致性检验。建筑质量是导致建筑安全事故的主要原因。在本次评估中,建筑自身风险比重最大,占到57.14%。其次土地人口属性、灾害敏感性都在一定程度上加剧着该区域的建筑风险,二者比重分别为28.57%、14.29%。

(3) 指标计算及标准化处理

指标计算主要分为3步。①建筑自身风险评估具体步骤如1.3.1节所述。②社会经济风险包括

人口密度与土地价值两项评估指标。人口密度为基于手机信令数据处理后得到的250 m×250 m网格常住人口数,利用自然断点法将其分为5类,再借助GIS中的模糊隶属度工具将其数值归一化处理,转换得到人口密度栅格。土地价值为基于土地利用分类数据与POI数据判断。土地利用分类方面,按照其经济产出、造成的社会经济影响从高到低排序将建设用地划分为4个等级,其中一级包括公共管理与公共服务用地(A)、商业服务业设施用地(B),二级包括居住用地(R)、道路与交通设施用地(S)、公用设施用地(U),三级包括绿地与广场用地(G)、工业用地(M)、物流仓储用地(W),四级包括H4(特殊用地)、在建用

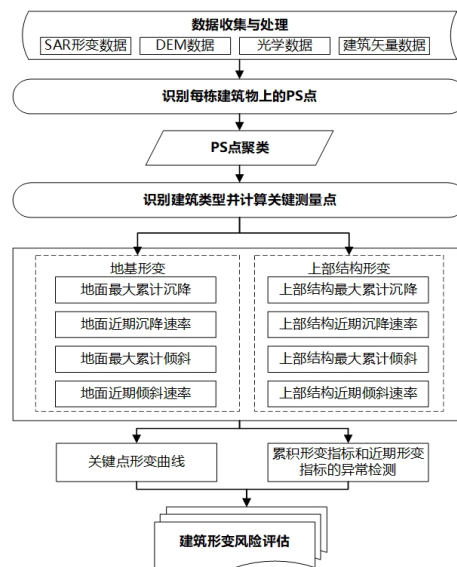


图2 建筑自身风险排查技术路线图

Fig.2 Technical roadmap of building risk investigation
资料来源:笔者根据福州仓山建筑物潜在风险排查报告整理。

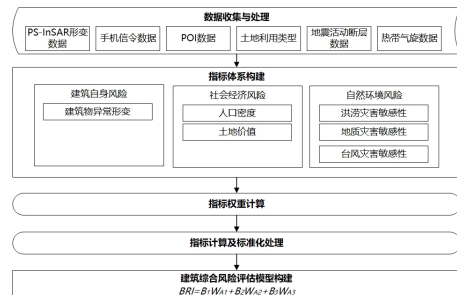


图3 建筑综合风险评估技术路线图

Fig.3 Technical roadmap of building comprehensive risk assessment
资料来源:笔者自绘。

地;POI数据筛选方面,亦选取经济产出高、社会经济影响大的设施类型,如学校、医院、酒店等,计算核密度,同上借助模糊隶属度工具归一化处理,叠加得到土地价值栅格。③自然环境风险结合福州实际情况,设置洪涝灾害敏感性、地质灾害敏感性和台风灾害敏感性3项评估指标。洪涝灾害敏感性基于河流矢量数据进行缓冲区分析,叠加由DEM数据得出的地形起伏度,转换得到洪涝灾害风险栅格。地质灾害敏感性为基于地震活动断层数据与历年来仓山区发生过的地质灾害数据进行缓冲区分析与叠加,转换得到地质灾害风险栅格。台风灾害敏感性为基于NOAA(美国国家海洋和大气管理局)近3年热带气旋数据进行缓冲区分析,叠加由DEM数据得出的地表粗糙度栅格,转换得到台风灾害风险栅格。

(4) 建筑综合风险评估模型构建

建筑综合风险是建筑物自身、自然环境和经济社会3方面综合作用的结果。

本文建筑综合风险指数计算表达式为:

$$BRI=B_1W_{A1}+B_2W_{A2}+B_3W_{A3} \quad (1)$$

式中:*BRI* (Building Risk Index) 为建筑综合风险指数;*B*₁、*B*₂、*B*₃分别表示建筑自身风险、自然环境风险、社会经济风险;*W*_{A1}、*W*_{A2}、*W*_{A3}分别表示对应权重。*BRI*指数越高,代表该单位面积的风险越高,当意外发生时,造成的损失越严重。

基于GIS空间分析技术实现建筑综合风险指数的栅格化,再利用栅格转点工具以最近点为原则连接回建筑矢量框,可得到每一栋建筑的综合风险指数。基于自然断点法进行划分,可保证组间差异最大化、组内差异最小化,其划分原则适用于本文对建筑的风险分级,由此将建筑物综合风险划分为高、较高、中、较低、低5个等级。

2 实证研究

2.1 建筑自身风险评估

通过对建筑自身风险进行评估,可在建筑物尺度判定建筑质量,确定高风险建筑集聚区。对高风险建筑进行抽样调研,验证该技术

表2 分项关键形变指标阈值表

Tab.2 Threshold table of key deformation indicators by item

序号	等级	B 级	C 级	D 级
1	地基 3 年沉降	18 mm	24 mm	48 mm
2	地基近期沉降速率	1.0 mm/mon	2.0 mm/mon	2.6 mm/mon
3	地基 3 年累积倾斜	1.0‰	1.5‰	3.0‰
4	地基近期倾斜速率	0.06‰ /mon	0.08‰ /mon	0.16‰ /mon
5	上部结构 3 年累积沉降	18 mm	24 mm	48 mm
6	上部结构近期沉降速率	1.0 mm/mon	2.0 mm/mon	2.6 mm/mon
7	上部结构 3 年累积倾斜	1.0‰	1.5‰	3.0‰
8	上部结构近期倾斜速率	0.06‰ /mon	0.08‰ /mon	0.16‰ /mon

资料来源:北京东方至远科技股份有限公司。

表3 建筑自身风险评估标准表

Tab.3 Standard table of construction risk assessment

序号	等级	说明	准则
1	A	安全	累计形变指标和近期形变指标均未超过阈值的 60%
2	B	不稳定状态	累计形变指标和近期形变指标至少有 1 项超过阈值的 60%
3	C	值得关注	累计形变指标和近期形变指标至少有 1 项超过阈值
4	D	重点关注	累计形变指标和近期形变指标全部超过阈值

资料来源:北京东方至远科技股份有限公司。

表4 指标权重计算结果

Tab.4 Calculation results of index weight

名称	权重	名称	权重	指标解释
建筑自身风险	0.5714	建筑物异常形变	0.5714	根据地基点沉降、地基倾斜、结构点沉降、结构倾斜形变参数超过阈值识别中高风险建筑
社会经济风险	0.2857	人口密度	0.1905	根据手机信令数据识别该地 250 m×250 m 网格常住人口密度
		土地价值	0.0952	根据土地利用分类及 POI 点密度综合判断不同功能的土地的实际价值
自然环境风险	0.1429	洪涝灾害敏感性	0.0402	结合河流水文因素、地形起伏度综合判断
		地质灾害敏感性	0.0472	结合历年地质灾害、地震活动断层受波及区域综合判断
		台风灾害敏感性	0.0554	结合热带气旋受波及区域、地表粗糙度综合判断

资料来源:笔者自制。

排查建筑自身风险的有效性。

根据1.3.1节的技术路线对仓山区每栋建筑的自身风险进行排查,其中约80%的建筑处于低风险,7%的建筑处于中风险,剩余13%的建筑处于高风险。基于各等级建筑物占比与风险权重,对仓山区各街镇建筑自身风险平均值进行计算与划分等级。结果显示,红星农场的平均风险值最高,建新镇的平均风险值最低,仓山区大部分街镇处于中风险区段。

从建筑物尺度看,中高风险建筑呈现一定的集聚现象,从建筑肌理可判断为城中村、城郊村居多,主要出现在盖山镇、螺洲镇、城门镇;从城区尺度看,仓山区建筑自身风险自西

向东呈现“低—高一低”的规律分布趋势,相邻街镇的风险较为接近(见图4)。风险值在中部区域达到顶峰,为红星农场与盖山镇,该区域建筑年代久远,存在较多老旧建筑。较高风险街镇主要分布在仓山区东部,包括城门镇与螺洲镇,该范围内还存在较多旧村,导致风险偏高。中低风险街镇主要分布在仓山区中西部,最低值出现在建新镇。随着闽侯县的迅速发展,仓山区西部成为闽侯县与主城区交接的主要枢纽地带,其既有洪塘大桥、橘园洲特大桥、浦上大道等主要桥梁工程,又有地铁2号线在金山街道内设的4个站点,可知该范围城市建设开发力度较大,老旧建筑翻新速度快,

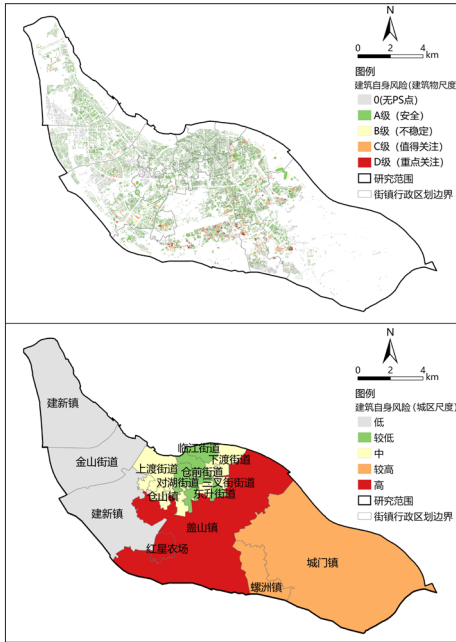


图4 建筑自身风险评估
Fig.4 Building risk assessment

资料来源:笔者自绘。

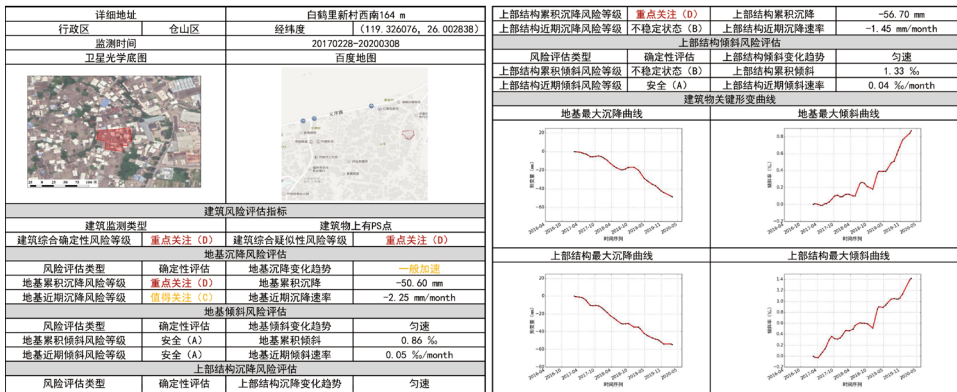


图5 建筑形变评估信息示例
Fig.5 Example of building deformation index information

资料来源:笔者根据福州仓山建筑物潜在风险排查报告整理。

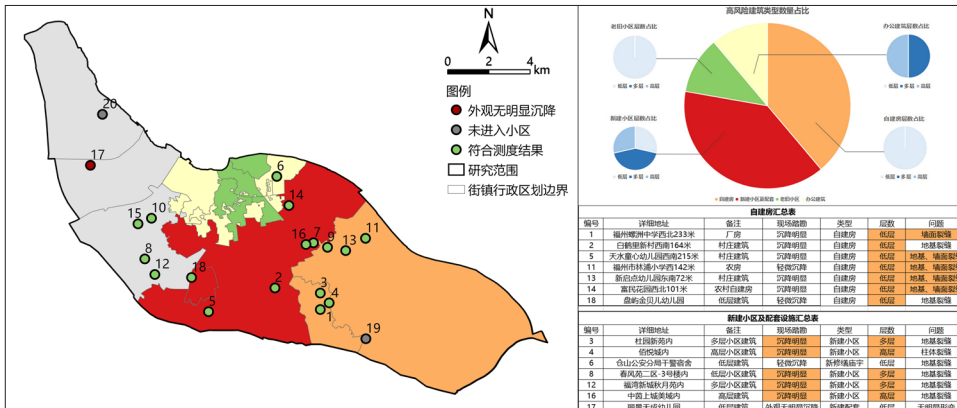


图6 高风险建筑实地调研情况
Fig.6 Field investigation of high-risk buildings

资料来源:笔者自绘。

从而降低了仓山区西部的建筑自身风险。

对于由建筑自身风险评估得出的高风险建筑,可基于评估的8项关键指标生成建筑形变评估信息(见图5),进一步判定独栋建筑的具体风险。由于客观条件受限,无法对所有高风险建筑进行实地详细调研,仅从高风险建筑中随机选取20处进行实地调研并检验该技术的有效性,保证其抽取的建筑层数涵盖低层至高层,建筑用途涵盖住宅、办公等。由实地调研情况(见图6)可知,基于PS-InSAR技术与机器学习方法得到的建筑自身风险评估与实际情况较为相符。在20栋建筑中,除去未能进入小区的2栋建筑外,仅有1栋在调研过程中未发现外观明显形变。对所调研的高风险建筑类型进行分类,可看出其中自建房、新建小区及配套设施的占比相当,都高达38%。

笔者所调研的高风险建筑中,自建房多分

布在仓山区中部及东部,如盖山镇、城门镇等地,其层数较低,多为3层以下,大部分同时存在地基裂缝与墙面裂缝。农村自建房在初期建设时,因节省成本多为自行搭建,所用材料与建造过程都较为随意;加建现象严重,且在加建过程中结构混搭,更是加大了安全隐患^{[15]38}。针对此类建筑,不仅应关注其结构的受力,也应同时注意砌体结构与构件的裂缝险情。所调研的高风险建筑中,新建小区及配套设施多分布在仓山区中部,如建新镇、盖山镇、螺洲镇等地,其中发生明显沉降的均为高层建筑,地基存在明显裂缝,墙表面情况良好。新建小区的建设单位主要为开发商,部分企业在建设过程中可能因为服务意识薄弱、企图降低成本等原因忽视建设质量。针对此类建筑,应重点关注地基的稳固性,定期观测其沉降值^[16],进行周期性形变监测。

进一步对C级、D级风险建筑进行处理,提取热值区域,共得到7处高风险建筑集聚区(见图7),均位于仓山区中部。其中4处覆盖范围较广,包含建筑较多;另有3处为小范围风险区。结合风险区所在的行政街道,将其命名为建新镇风险区、红星农场盖山镇风险区、盖山镇北部风险区、盖山镇中部风险区、盖山镇螺洲镇风险区、城门镇风险区、螺洲镇南部风险区。

2.2 建筑综合风险评估

通过对社会经济风险进行评估,可量化建筑风险发生时造成的财产与生命安全损失。根据1.3.2节计算方法,得到仓山区社会经济

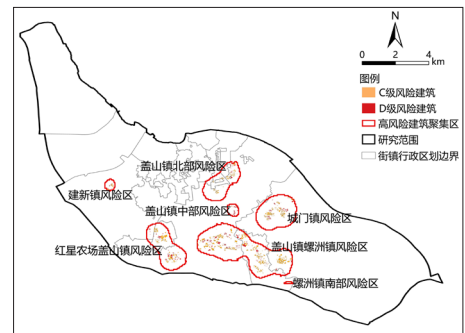


图7 高风险建筑集聚区划定
Fig.7 Delineation of high-risk building cluster areas

资料来源:笔者自绘。

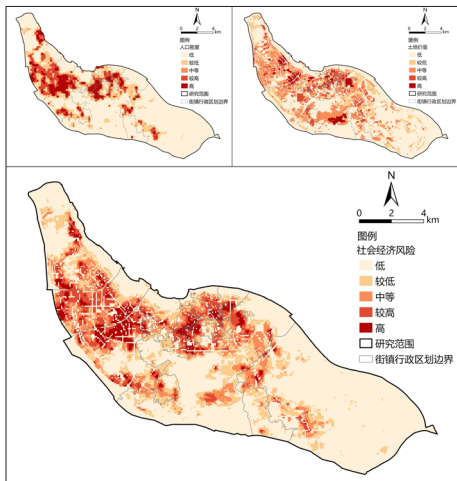


图8 社会经济风险评估
Fig.8 Socio-economic risk assessment

资料来源:笔者自绘。

风险栅格(见图8)。经栅格平均值计算,社会经济风险排名靠前的街镇均集中在仓山区中北部,仓山区北部区域的社会经济风险明显高于南部区域。这与区域的开发程度有很大的关联性。社会经济中高风险区域与人口密度分布、功能混合度呈现一定的吻合趋势,如对湖街道、下渡街道、金山街道、临江街道,其为仓山区人口密集区,用地性质多为居住用地、商业用地,且大量人口集中于小面积土地。这些区域的建筑安全应备受关注。低风险类区域集中于东南部及中南部,如城门镇、螺洲镇、盖山镇,都处于初步发展阶段,其用地功能较为单一,且存在较多山体、水域,对应的人口密度也较低。

通过对自然环境风险进行评估,可对地区发生自然灾害风险的可能性进行量化分析,但因灾害的不确定性与不可预测性,此维度仅作为概率参考。根据1.3.2节计算方法可得出仓山区自然环境风险栅格(见图9)。从空间上看,仓山区自然环境风险整体较高,中等及以上风险栅格数占比达到64.5%,其风险等级沿岛的长边由北至南呈现3级递增的状态。

通过三维度共同测度所得的建筑综合风险评估结果,根据1.3.2节构建的建筑综合风险评估模型可得到仓山区建筑综合风险等级(见图10)。从建筑物尺度看,中高风险建筑数量在

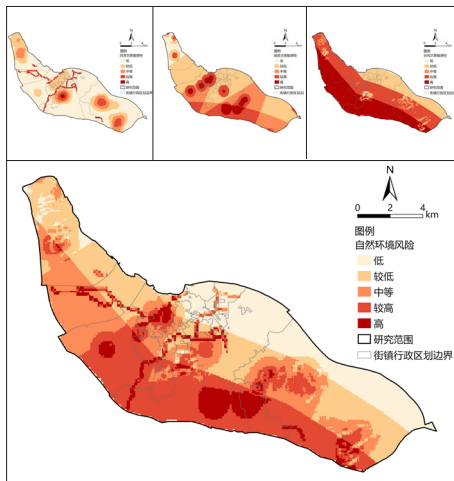


图9 自然环境风险评估
Fig.9 Natural environment risk assessment

资料来源:笔者自绘。

各个街镇均明显增多。从城区尺度看,高风险街镇集中于仓山区中北部区域,风险值在中部的对湖街道达到最高,该区域既有极为丰富的教育资源,包括福建师范大学在内的11所大中专院校,也有数量相当的近现代历史建筑群;其次为下渡街道、金山街道、仓山镇、红星农场、临江街道、上渡街道,这些街镇在空间位置上均较为紧邻。风险值较低的街镇主要分布于两翼,其中最低值出现在螺洲镇。

2.3 更新优化策略

通过探究建筑自身风险与建筑综合风险两种测度结果,在一定程度上可为城市更新的风险范围划定、确定更新次序、确定具体更新方式3大环节提供参考,有助于明确造成建筑风险的具体成因,做到小规模、渐进式有机更新和微改造。

对于建筑自身风险测度出的高风险建筑,建议根据PS点判定出的具体风险进行相应的动态化监测。其中对于自建房类型的高风险建筑,建议长时序监测其沉降差异与构造情况,从而判断受力承载水平和砌体结构构件裂缝险情,对房屋存在的危险点合理加固^{[15]39},条件允许的情况下尽量翻建,同时需培养村民建筑安全意识,提高建造标准。对于新建小区及配套类型的高风险建筑,建议重点关注地基

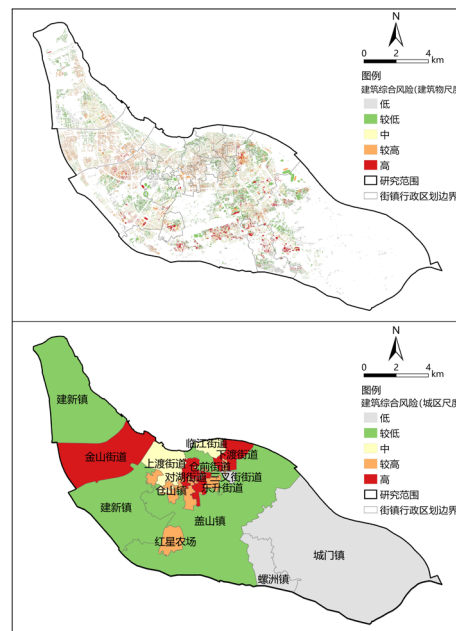


图10 建筑综合风险评估
Fig.10 Comprehensive building risk assessment

资料来源:笔者自绘。

的稳固性,对于已建成的高层建筑应根据沉降值分析变形规律,根据变化趋势及速率来采取相关预防措施^[16];对于仍在施工的高层建筑,应通过沉降数据稳健地进行施工以消除微幅沉降,防止日后投入使用后建筑产生倾斜、沉降等危险变化^[17]。

对建筑自身风险划定的建筑高风险集聚区进一步分析,通过对比其自身建筑风险与建筑综合风险结果,可看出多数风险区两者结果均存在差异。针对各风险区展开实地调研,对其建筑类型、总体特征、物质环境、聚居人群等情况进行分析^[18],结合风险测度结果判断其发展前景与更新策略(见表5)。对于优先更新的4个风险区,建议建新镇风险区优先考虑土地功能置换、拆除简易厂房;建议盖山镇螺洲镇风险区与螺洲镇南部风险区重视防灾预警工程建设,前者整体社会经济风险较高,应在此基础上再向周围低风险街镇进行人口疏导,后者建筑数量较少,根据其PS点分析可知其累积沉降风险极高,应再重点关注高风险建筑物的地基稳定性;建议盖山镇中部风险区加大人才住房和保障性住房的配建力度。对于次级更新的两个风险区,建议城门镇风险区先挖掘现

表5 仓山区高风险建筑集聚区分析结果与更新优化策略

Tab.5 Analysis results and update optimization strategy of high-risk building cluster area

风险区类型	名称	总体特征	物质环境	发展前景	建筑自身风险与综合风险测度结果	更新优化策略
风险区类型 I: 建筑综合风险高于建筑自身风险	建新镇风险区	位于较先城市化的路段, 但附近并无完整公共服务配套, 整体房租低廉, 人流量较大, 多为工厂工人	建筑多为汽修厂厂房及制造业公司厂房、物流仓库, 建筑层数低, 结构简单, 面积体块较大, 空地较多	建筑多为临时厂房, 质量堪忧, 且因区域内社会经济与自然环境风险均高, 建议考虑土地功能置换		优先更新 建筑质量堪忧, 安全风险高, 建议考虑土地功能置换
	盖山镇螺洲镇风险区	中部正处于更新改造阶段, 环境优美, 交通便捷, 两侧则为城郊村。聚居人群多为本地居民, 生活条件良好	片区中部存在部分安置房, 自建房建筑肌理良好, 住区绿化、道路等条件均较好; 片区两侧村庄密集居民房众多	片区整体社会经济风险较高, 建议向周围低风险街镇进行人口疏导, 西部自然环境风险高, 建议注重防灾预警工程建设		优先更新 建筑质量堪忧, 安全风险高, 建议考虑土地功能置换
风险区类型 II: 建筑综合风险、建筑自身风险测度结果接近, 且二者均高	螺洲镇南部风险区	位于城区边缘地带, 居住环境较好, 交通便捷。聚居人群多为对生活要求质量较高、收入水平较高人群	建筑为低层住宅, 容积率低, 建造年代较新	其容积率极低、容纳户数低, 但自然环境风险和建筑自身风险均较高, 建议重点关注建筑地基稳定性, 重视防灾预警工程建设		优先更新 建筑质量堪忧, 安全风险高, 建议考虑土地功能置换
	盖山镇中部风险区	周边正处于更新改造阶段, 存在居住小区与工业园区、城中村等。人员较为混杂, 流动性强, 文化差异大	建筑多为城中村自建房, 体量较小, 多为多层, 环境杂乱	建筑自身风险与综合风险均较高, 周边开发建设条件较为成熟, 建议加大人才住房和保障性住房配建力度, 满足多层次、多样化的住房需求		优先更新 建筑质量堪忧, 安全风险高, 建议考虑土地功能置换
风险区类型 III: 部分区域建筑综合风险高于建筑自身风险	城门镇风险区	虽然位于城区边缘位置, 但周边地区城市化均较为成熟, 交通便捷。有一定的人口流失现象, 居民居住时间较长, 地缘认同感较强	建筑多为城郊村自建房, 建筑层数较低, 有基本的生活配套与宗教信仰建筑	部分地段人口流失及自然环境风险较低, 建筑综合风险呈现中部与四周的两级分化状态, 建议先挖掘村特色文化与传统		次级更新 建筑质量堪忧, 安全风险高, 建议考虑土地功能置换
	红星农场盖山镇风险区	位于较为偏僻的边缘地带, 为城郊村, 周边有大量工业企业入驻。当地原居民或外来流动务工人员居多	建筑多为城郊村自建房及简易棚户屋, 缺少规划导致宅院、道路分布凌乱, 部分建筑存在加建现象	部分建筑质量存在极高风险, 其旧住宅与道路肌理延续价值较低, 建议先采用利益引导、产业转移等方式进行区域人口疏导		次级更新 建筑质量堪忧, 安全风险高, 建议考虑土地功能置换
风险区类型 IV: 建筑综合风险低于建筑自身风险	盖山镇北部风险区	周边地区城市化均较为成熟, 多为居住小区, 其建造时间较早。聚居人群多为本地居民	建筑多为居住建筑, 包括老旧小区与城中村自建房, 居住环境单调, 公共活动场所较少	状态较稳定, 除部分体量极小的建筑仍为高风险, 其余综合风险均较低, 建议先对道路等资源进行梳理		三级更新 建筑质量堪忧, 安全风险高, 建议考虑土地功能置换

资料来源: 笔者自制。

存村的特色文化与传统, 红星农场盖山镇风险区则优先采用利益引导、产业转移等方式进行区域人口疏导^{[11][19]}。对于暂缓更新的盖山镇北部风险区, 其大部分建筑的综合风险等级较低, 建议优先对道路进行整改, 利用智能化设

备更新老旧小区, 提升居民的居住体验感。

3 结论与讨论

在城市发展从增量向存量转型的背景下, 本文基于多源数据, 利用PS-InSAR技术与机

器学习相结合的方法测度建筑自身风险, 划定高风险建筑集聚区, 通过实地抽样调研验证了该方法的有效性。并从多维度建立建筑综合风险评估模型, 评估仓山区建筑综合风险等级, 根据评估结果提出更新优化策略, 一定程度上

为城市更新基础工作提供了量化参考依据,以数据实证提高设计的科学性^[20]。

本文的研究结果具有一定的现实意义,以定量城市分析为驱动,为城市更新的基础环节提供科学支持。但还存在以下不足:其一,利用PS-InSAR技术获取的大范围建筑自身风险识别结果仅为数据分析,本文通过抽样检测验证了该技术的有效性,但若需确定每一栋建筑物风险等级的准确性,还需和所有建筑的实地调研结果进行综合研究^[21],未来的研究重点将放在结合风险识别结果批量布设地面传感设备,通过空地一体化建筑预警技术来代替人力检测其准确程度。其二,由于涉及自然环境风险的相关数据有限,仅能粗略地评估各类灾害敏感性^{[22][52]},精确度较低,未来的研究重点将放在对指标系统的完善方面,同时避免多源数据的有偏性,以期构建更加精细与合理化的风险评估模型^{[22][57]},更加贴合城市的实际情况。■

(感谢北京东方志远科技股份有限公司在InSAR基础数据采集与处理方面提供的支持。)

参考文献 References

- [1] 钟兴润. 既有房屋建筑物安全性评价及其管理研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2010.
ZHONG Xingrun. Research of the safety evaluation of existing buildings and management[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.
- [2] 周婷婷,熊茵. 基于存量空间优化的城市更新路径研究[J]. 规划师, 2013, 29 (z2):36-40.
ZHOU Tingting, XIONG Yin. Inventory optimization of land use and urban renewal[J]. Planners, 2013, 29(z2): 36-40.
- [3] 徐进亮,吴群. 历史建筑价值评价关键指标遴选研究——以苏州历史民居为例[J]. 北京建筑工程学院学报, 2013, 29 (2) :7-11, 31.
XU Jinliang, WU Qun. Selection of key indicators of historic building value assessment: a case study of historic buildings in Suzhou[J]. Journal of Beijing Institute of Civil Engineering and Architecture, 2013, 29(2): 7-11, 31.
- [4] 欧阳卓. 存量开发导向下旧城片区更新策略研究[D]. 西安:长安大学, 2016.
OUYANG Zhuo. Research on urban renewal strategy of built-up area under the development of inventory[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [5] 袁春燕. 城镇房屋安全管理与应急体系研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2008.
YUAN Chunyan. Researches on the system of the existing building safety and crisis management in city[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.
- [6] 焦立川. 城镇既有房屋建筑物安全管理研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2010.
JIAO Lichuan. Research on the safety management of the existing building in city[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2010.
- [7] 王英,蔡乐刚,陈洋. 多层次的房屋安全综合评估模型及应用[J]. 建筑结构, 2017, 47 (z1) :987-992.
WANG Ying, CAI Legang, CHEN Yang. Study and application of the comprehensive evaluation model for the safety evaluation of existing buildings[J]. Building Structure, 2017, 47(z1): 987-992.
- [8] 沈体雁,何飞,史雪静,等. IDI风险管理新技术探索——基于InSAR技术的建筑形变风险评估[J]. 上海保险, 2019 (7) :47-51.
SHEN Tiyan, HE Fei, SHI Xuejing, et al. Exploration of new technology of IDI risk management: risk assessment of building deformation based on InSAR technology[J]. Shanghai Insurance Monthly, 2019(7): 47-51.
- [9] 常占强,官辉力,张景发,等. D-InSAR与PS-InSAR的理论模型、技术特点及应用领域[J]. 河北师范大学学报(自然科学版), 2008 (1) :113-116.
CHANG Zhanqiang, GONG Huili, ZHANG Jingfa, et al. Theoretical models characteristics and suitable applied areas for D-InSAR and PS-InSAR[J]. Journal of Hebei Normal University (Natural Science Edition), 2008(1): 113-116.
- [10] 徐敏,王成晖. 基于多源数据的历史文化街区更新评估体系研究——以广东省历史文化街区为例[J]. 城市发展研究, 2019, 26 (2) :74-83.
XU Min, WANG Chenghui. Research on the evaluation system of historical and cultural block renewal based on multi-source data: taking the historical and cultural blocks of Guangdong Province as an example[J]. Urban Development Studies, 2019, 26(2): 74-83.
- [11] 李亚,翟国方. 我国城市灾害韧性评估及其提升策略研究[J]. 规划师, 2017, 33 (8) :5-11.
LI Ya, ZHAI Guofang. China's urban disaster resilience evaluation and promotion[J]. Planners, 2017, 33(8): 5-11.
- [12] 李彤玥,牛品一,顾朝林. 弹性城市研究框架综述[J]. 城市规划学刊, 2014 (5) :23-31.
LI Tongyue, NIU Pinyi, GU Chaolin. A review on research frameworks of resilient cities[J]. Urban Planning Forum, 2014(5): 23-31.
- [13] 赵明. 建筑房屋结构的安全评价体系研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2019.
ZHAO Ming. Study on safety evaluation system of building structure[D]. Jiaozuo: He'nan Polytechnic University, 2019.
- [14] 邵任薇,陈绮珊. 城市更新社会排斥风险评估[J]. 城市问题, 2019 (7) :77-85.
SHAO Renwei, CHEN Qishan. Risk assessment on social exclusion in urban renewal[J]. Urban Problems, 2019(7): 77-85.
- [15] 朱伯肃. 关于农村自建房现状及房屋安全的思考[J]. 福建建材, 2016 (7) :38-39, 52.
ZHU Bosu. Reflections on the current situation and housing safety of rural self-built houses[J]. Fujian Building Materials, 2016(7): 38-39, 52.
- [16] 付凤扬,韩秀娟. 高层建筑物沉降变形监测及相关数据处理分析[J]. 中华建设, 2014 (4) :124-125.
FU Fengyang, HAN Xiujuan. Settlement deformation monitoring and related data processing analysis of high-rise buildings[J]. China Construction, 2014(4): 124-125.
- [17] 乔淑荣. 高层建筑物沉降观测及成果分析[J]. 工程勘察, 2003 (3) :61-63.
QIAO Shurong. Settlement observation and analysis on high rising building[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2003(3): 61-63.
- [18] 罗仁朝,王德. 上海市流动人口不同聚居形态及其社会融合差异研究[J]. 城市规划学刊, 2008 (6) :92-99.
LUO Renchao, WANG De. A study on the difference of social integration of the different floating population aggregation types in Shanghai[J]. Urban Planning Forum, 2008(6): 92-99.
- [19] 徐江,邵亦文. 韧性城市:应对城市危机的新思路[J]. 国际城市规划, 2015, 30 (2) :1-3.
XU Jiang, SHAO Yiwen. Resilient cities: a new shift to urban crisis management[J]. Urban Planning International, 2015, 30(2): 1-3.
- [20] 龙瀛,沈尧. 数据增强设计——新数据环境下的规划设计回应与改变[J]. 上海城市规划, 2015 (2) :81-87.
LONG Ying, SHEN Yao. Data augmented design: urban planning and design in the new data environment[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2015(2): 81-87.
- [21] 金艳,高晓雄,胡琼,等. InSAR技术的城市建筑形变风险评估[J]. 测绘科学, 2021, 46 (10) :76-79, 107.
JIN Yan, GAO Xiaoxiong, HU Qiong, et al. Risk assessment of urban buildings based on InSAR technology[J]. Science of Surveying and Mapping, 2021, 46(10): 76-79, 107.
- [22] 吴舒祺,赵文吉,王志恒,等. 基于GIS的洪涝灾害风险评估及区划——以浙江省为例[J]. 中国农村水利水电, 2020 (6) :51-57.
WU Shuqi, ZHAO Wenji, WANG Zhiheng, et al. Assessment and zoning of flood disasters risk based on GIS: a case study of Zhejiang Province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(6): 51-57.

基于多源数据的小学空间服务绩效评价方法及优化策略——以武汉东西湖区为例

Evaluation Method and Optimization Strategy of Primary School Spatial Service Performance Based on Multi-source Data: A Case Study of Dongxihu District, Wuhan

牛强 张永雄 吴宛娴 陈伟 宁玲 彭阳 NIU Qiang, ZHANG Yongxiong, WU Wanxian, CHEN Wei, NING Ling, PENG Yang

摘要 优化小学空间服务绩效对于完善公共服务体系、推进基本教育资源均等化配置具有重要意义。尝试基于多源数据的综合应用构建一个推广性强、科学合理的小学空间服务绩效评价方法,并以湖北省武汉市东西湖区为例进行评价分析,提出优化策略。首先,通过文献梳理确定以步行友好作为评价原则。其次,通过社会调查确定步行可达性与步行安全性两个评价指标及其标准。再次,通过多源大数据,从小学服务的每个个体的出行感受出发,以学区为单位对小学空间服务绩效进行精细化评价。评价结果显示,东西湖区部分小学存在学区面积过大、学校布点不合理、道路系统不完善等问题。最后,针对以上问题提出新增学校、调整学校布点、调整学区、优化步行路网、增加过街设施等优化策略,并选取3个典型小学进行具体的优化方案分析。通过对数据增强设计的一次有益探索,为小学布局、学区设置及道路和用地规划等提供科学依据。

Abstract Optimizing the performance of elementary school spatial services is important for improving the public service system and promoting the equal allocation of basic education resources. This paper attempts to construct a generalized, scientific and reasonable evaluation method for the spatial service performance of elementary schools based on the comprehensive application of multi-source data, and using Dongxihu District of Wuhan City as a specific case to evaluate, analyze and propose optimization strategies. Firstly, the evaluation principle of pedestrian friendliness is determined through a literature review. Then two evaluation indexes and criteria of pedestrian accessibility and safety are determined through a social survey. From the perspective of each student's travel experience, the school-district-based spatial service performance of elementary schools is finely evaluated through a comprehensive analysis of multi-source data. The evaluation results find that the school districts of some elementary schools in Dongxihu District are too large, the distribution of schools is unreasonable, and the road system is not perfect. In response to these problems, we propose optimization strategies such as adding new schools, adjusting school distribution, adjusting school districts, optimizing the pedestrian network, and increasing street crossing facilities, and select three typical elementary schools for specific optimization plan analysis. This study is a useful exploration of Data Augmented Design, and provides a relatively scientific basis for primary school layout, school district setting, road and land planning.

关键词 小学;空间服务绩效;优化策略;多源数据;武汉市

Key words elementary school; spatial service performance; optimization strategy; multi-source data; Wuhan City

文章编号 1673-8985 (2022) 03-0046-09 中图分类号 TU984 文献标志码 A

DOI 10.11982/j. supr. 20220307

作者简介

牛强
武汉大学城市设计学院
城乡规划系主任,教授,博士生导师
niuqiang@whu.edu.cn
张永雄
广州市城市规划勘测设计研究院
助理规划师,硕士
吴宛娴
武汉大学城市设计学院 硕士研究生

陈伟
武汉市土地利用和城市空间规划研究中心
副总工程师,正高级工程师
宁玲
湖北工业大学
高级工程师,硕士
彭阳
武汉市土地利用和城市空间规划研究中心
高级工程师,硕士

0 引言

党的十九大提出“完善公共服务体系,保障群众基本生活,不断满足人民日益增长的美好生活需要,不断促进社会公平正义,使人民获得感、幸福感、安全感更加充实、更有保障、更可持续”。公共服务设施的服务绩效对于居

民生活水平具有重要的影响,科学合理地规划配置公共服务设施是新时代贯彻“以人为本”理念的基本要求,亦是推动城市可持续发展的重要因素。小学作为儿童接受初等正规教育的场所,对于提高人口素质和社会知识启蒙具有重要的作用,是最重要的城乡公共服务设施之一,因而优化小学服务绩效对于完善公共服务体系、推进基本教育资源均等化配置具有重要意义。

服务绩效的概念源于经济管理学领域中衡量社会经济管理活动成效及资源配置效率的“绩效”^[1]。公共服务绩效则是用于衡量公共部门所提供服务的结果和成效的概念,以对公共服务目标实现程度及效率进行衡量与反馈^[2]。城乡规划领域对于小学服务绩效评价的相关研究主要基于学校空间布局的视角展开,即小学的空间服务绩效,通过GIS空间分析技术对小学布局的均衡性^[3-5]、公平性^[6-7]、可达性^[8-10]等进行评价,并针对其在空间布局上存在的问题提出相应的优化建议。以往关于小学空间服务绩效的研究由于数据和方法上的局限,在数据精度、研究深度等方面存在一定欠缺:如对于上学距离的测算多采用服务半径,未能反映学生具体步行的距离;另外,相关研究多以社区或小区为基本单元,忽略了小区内部的空间差异性。

随着信息与通信技术的发展,大数据应用逐渐普及化,为城乡规划量化研究提供了新的数据来源,且具有数据样本全面、数据精度高等方面的明显优势^[11-13],推动了城乡规划量化研究向空间高精度、时间动态连续、以人为本、开源众包^①等方向转变^[14-15],能显著提高城乡规划量化研究的数据精度与研究深度。在此背景下,综合应用多源数据分析,以推动数据增强设计在实际规划设计中的应用,开拓规划与设计的新视角、新方法。多源数据综合应用将成为提高规划设计科学性及促进智慧规划的重要途径^[16-17]。

本文尝试基于多源数据综合应用构建一个推广性强、科学合理的小学空间服务绩效评价方法,并以湖北省武汉市东西湖区为具体案例进行评价及策略优化分析。首先,通过文献梳理及社会调查确定小学服务绩效的评价指

标体系;其次,综合应用多源数据,从小学服务的每个个体的出行感受出发,以学区为单位对小学空间服务绩效进行精细化的评价分析;最后,根据评价结果挖掘当前东西湖区小学在空间服务绩效上存在的问题,并针对不同问题提出相应的优化策略,以期小学布局、学区设置及道路和用地规划等提供科学依据。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域概况

东西湖区位于武汉市西北部,地处长江左岸,汉江、汉北河及府环河汇合处。全境东西长38 km,南北宽22.5 km,总面积495 km²,区内包括城区部分及郊区部分,是武汉市流动人口和城市建设用地增长快速的区域,也是当前武汉市城乡规划的重点区域,如图1所示。

本文以东西湖区内的小学学区为研究单元,东西湖区现有小学43所,其中完全小学39所,九年一贯制学校4所(见图1)。随着东西湖区的快速发展,居民对于小学服务的需求日益增长,小学规划建设现状与社会需求发展存在一定脱节,在空间分布上存在空间失衡、布点不合理等问题,对其小学的空间服务绩效进行评价优化具有迫切性和典型性。

1.2 研究数据来源

本文研究数据主要包括基础数据、手机信令数据和高德地图路径规划数据(见表1)。基础数据来源于武汉市自然资源和规划局的武汉市规划管理“一张图”,包括社区人口数据、小学数据、居住建筑数据、交通路网数据。其中社

区人口数据包括每个社区的人口统计数据;小学数据包括小学的空间点位、对应学区范围、占地面积和相应的在校人数等数据;居住建筑数据包括建筑基底面积及建筑层数;交通路网数据包括道路路线的矢量数据和道路等级属性数据。手机信令数据由中国联通智慧足迹数据科技有限公司的授权数据平台提供,通过脱敏匿名用户的长期昼夜时空行为观察识别出用户的居住地点,数据精度为与联通信号基站分布相关联的250 m×250 m网格。高德地图路径规划数据通过API(Application Programming Interface,应用程序接口)从高德地图中获取学生的步行上学路径,抓取时间为2019年3月。经核对,该路径与现实步行出行路径高度吻合,充分拟合了小区出入口限制、人行道、过街天桥/隧道、小学校门开口等现实情况。

2 研究思路

2.1 评价指标体系

2.1.1 评价原则

随着社会经济发展和人民生活水平的提

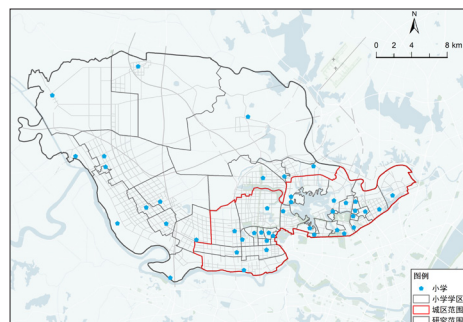


图1 东西湖区范围及其内部的小学空间分布
Fig.1 Dongxihu District scope and spatial distribution of elementary schools within it

资料来源:笔者自绘。

表1 研究数据来源
Tab.1 Sources of study data

数据类型	数据内容	数据年份	数据来源
基础数据	社区人口数据	社区范围、社区常住人口	2019
	小学数据	学校点位、学区范围、占地面积、在校人数	2019
	居住建筑数据	建筑基底面积、建筑层数	2018
	交通路网数据	道路矢量数据、道路等级	2018
	手机信令数据	250 m×250 m 网格内居住人数	2018
高德地图路径规划数据	学生的步行上学路径	2019	高德地图

资料来源:笔者自制。

注释: ①众包(crowd-sourcing)是互联网带来的新的生产组织形式,即利用互联网将原先单一机构内的工作任务以自由自愿的形式分配给机构外的志愿人员(通常为个人)完成,这一组织方式可以充分利用志愿者的创意和技能,以更低的成本、更高的效率完成任务。

高,步行作为一种健康、低碳的出行方式越来越受重视^[18]。步行友好的建成环境能提高居民步行出行的频率,有效促进居民的心理健康,提高居民的生活质量^[19-20];同时也能减少机动车出行,有利于城市低碳交通的发展,促进碳中和的实现^[21-22]。通学环境作为儿童最常接触的环境,其步行友好性对于儿童的健康成长具有重要作用^[23]。相关研究表明步行友好的通学环境能增加小学生的户外活动和社交,进而激发小学生的创造力和想象力^[24]。因而,本文将步行友好作为小学服务绩效的评价原则,并根据社会调查确定具体的评价指标,首先针对小学生和家长的半结构访谈确定影响小学生步行上学的主要指标,其次通过问卷调查数据确定相关指标的评价标准。

2.1.2 评价指标

笔者于2019年3月随机选取了10位东西湖区小学生和家长开展半结构化访谈,以了解影响小学生步行上学的主要指标。整理访谈结果发现步行上学可达性与步行上学安全性是当前小学生和家长关于步行上学较为关注的两个方面。在步行上学可达性方面,由于小学生的体力有限,其可承受的步行上学距离较为有限,因而步行上学距离是影响其步行上学最重要的指标;在步行上学安全性方面,由于小学生的身心发育尚未健全、安全意识不够,步行上学的交通安全也成为学生与家长普遍担心的问题。当前,机动交通快速发展且城市道路普遍存在“大马路”现象,小学生穿越城市干道存在一定的危险系数,因而上学途中穿越城市干道的次数是影响小学生上学交通安全的主要因素。同时,家长也表示人行天桥或者隧道等立体过街设施能有效提高小学生的交通安全性,而人行横道等平面过街设施对于安全意识不够的小学生仍存在一定的危险性,因此本文所指的穿越城市干道均为平面穿越,不包括立体穿越。基于以上访谈结果,本文选取步行上学可达性与步行上学安全性作为东西湖区小学空间服务绩效的评价指标。

2.1.3 评价标准

在确定步行上学可达性与步行上学安全

性两个评价指标的基础上,笔者针对东西湖区小学生和家长发放问卷调查,调查内容主要为小学生能接受的具体步行上学距离与穿越干道次数,用于确定可达性与安全性的评价指标。笔者于2019年3月—4月通过线上与线下结合的方式共发放调查问卷852份,收回有效问卷844份。

小学生能接受的步行上学距离统计如图2所示。能接受的步行上学距离在0—500 m的小学生比例为12.91%,在500—1 000 m的比例为57.70%,在1 000 m以上的比例为29.38%。其中,能接受的步行上学距离在1 000 m以内的总占比为70.62%,且1 000 m的上学距离与国家相关规范及15分钟生活圈的要求相契合,因此本文选取1 000 m步行距离作为小学合理服务半径。

小学生能接受的步行上学穿越干道次数统计如图3所示。不能接受穿越任何干道的小学生比例为23.70%,能接受穿越干道1次的小学生比例为32.58%,而能接受穿越干道次数在2次、3次、4次及以上的比例分别为32.70%、7.46%、3.55%。其中能接受的穿越干道次数在1次及以下的总占比为56.28%,有43.72%的小学生能接受穿越干道2次或以上,整体接受度偏高,与小学生上学不穿越城市干道的规划理念相差较远。考虑到小学生对穿越干道次数的接受程度会受到现状环境的影响,本文选取步行上学平面穿越干道1次及以下作为小学生步行上学的安全标准。

2.2 评价方法

2.2.1 人口分布数据校核

人口数据校核是指将不同来源的人口空间分布数据进行互相校核以得到精细且准确的人口空间分布数据,是后文进行小学服务绩效评价的基础。本文人口分布相关数据包括社区人口统计数据、联通手机信令数据和居住建筑数据,其中社区人口统计数据来源可靠准确,但空间精度较低,不能反映人口在社区内部的微观空间分布;手机信令数据较社区人口统计数据来说空间精度更高,但由于联通用户只占部分市场份额,不能准确反映全样本的人口情况;居

住建筑数据可以通过人均建筑面积的换算大致估算居住人口,但由于人均居住面积在不同的社区有所差异,因此也有一定的误差。本文综合社区人口统计数据、手机信令数据和居住建筑数据,通过相互校核得到准确且精细的人口空间分布数据。具体校核步骤如下:

(1) 以社区为空间单元对联通用户数进行汇总,再以每个社区单元的统计人数与联通用户数之比作为每个社区内的联通扩样系数。

(2) 将每个250 m网格的联通用户数乘上其所在社区的联通扩样系数,得到每个250 m网格的真实常住人口数。

(3) 汇总每个250 m网格内的居住建筑总面积,将每个网格内的常住人口数按照每栋居住建筑的居住面积占其所在250 m网格居住建筑总面积的比例分配到每栋居住建筑上,得到建筑尺度下的精细人口分布数据。由于小学生的手机普及率不高,通过手机信令数据识别出的小学生数量与实际数量有较大差异,因此本文使用全口径的人口分布数据进行分析。

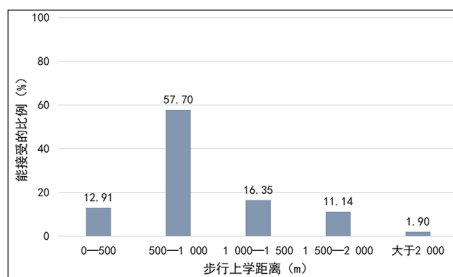


图2 小学生能接受的步行上学距离分布图

Fig.2 Distribution of acceptable walking distance to school for elementary school students

资料来源:笔者自绘。

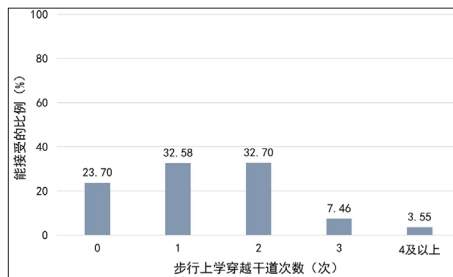


图3 小学生能接受的步行上学平面穿越干道次数分布图

Fig.3 Distribution of acceptable number of times to walk across arterial roads from the ground for elementary school students

资料来源:笔者自绘。

2.2.2 步行上学可达性评价

衡量学生步行上学可达性的指标是步行上学距离,本文通过高德地图路径规划API获取学生的步行上学距离。路径规划API是网络电子地图服务商提供的HTTP编程数据接口,用户可以通过此接口获取指定始终点和出行方式的实时出行路径信息,返回数据包括出行路径轨迹、出行距离、出行时间等。通过路径规划API获取出行成本数据相对于传统的通过GIS平台构建拓扑路网进行网络分析而言,具有精确性、实时性和使用方便等优势^[25-26]。

具体计算过程中以研究区域内每栋居住建筑为出发点,以对应学区内学校为到达点,通过高德开放平台的路径规划API获取学生步行上学路径数据并在GIS平台进行矢量化,最终得到每栋居住建筑中的居民到对应学校的步行上学路径轨迹和步行距离,并以此为基础测度各学校的步行1 000 m覆盖率作为小学步行上学可达性的评价指标,具体计算方法如公式(1)所示。

$$\text{步行1 000 m覆盖率} = \frac{\text{步行1 000 m距离内的人数}}{\text{学区内的总人数}} \quad (1)$$

2.2.3 步行上学安全性评价

衡量学生步行上学安全性的主要指标是步行上学穿越干道次数,即学生从家步行到达学校的过程中需要穿越干道的次数(由于本文研究区域包含城区与郊区,此处的干道包括城区的城市干道与郊区的公路),是学生步行上学安全性的主要指标。对于上学穿越干道次数的计算,主要通过ArcGIS平台的空间连接工具计算各栋居住建筑中居民步行上学的矢量路径与干道平面相交的次数得到,并通过街景地图与实地踏勘进行检查校核。调研表明能接受超过2 000 m的步行上学距离的学生家长比例仅有1.90%,在步行2 000 m范围外的学生大部分会采用公交车、家长接送等方式上学,因此本文仅考虑2 000 m内的步行上学安全性。通过计算各学校步行距离2 000 m内的学生步行上学平面穿越干道1次及以下的覆盖率作为小学步行上学安全性的评价指标,具体计

算方法如公式(2)所示。

$$\text{穿越干道1次及以下覆盖率} = \frac{\text{步行2 000 m内平面穿越干道1次及以下的人数}}{\text{学区步行距离2 000 m内的总人数}} \quad (2)$$

3 评价结果及优化策略

3.1 评价结果

3.1.1 步行上学可达性

各栋居住建筑到所在学区小学的步行距离如图4所示。从总体上来看,东西湖区有大量居住建筑位于小学1 000 m步行覆盖范围外,小学1 000 m步行覆盖率较低。从空间分布上来看,研究区域内城区与郊区的空间差异较大:东南部城区小学分布密度较高,其1 000 m步行覆盖率也相对较高;而西北部郊区小学分布密度则明显低于城区,其1 000 m步行覆盖率也明显低于城区。

对不同步行上学距离所覆盖居住建筑及人口的比例进行统计汇总,结果如图5所示。从图中可看出,不同步行上学距离的居住建筑覆盖率与人口覆盖率有较大差距:2 000 m以内的人口覆盖率均高于居住建筑覆盖率,2 000 m以上的人口覆盖率则远低于居住建筑覆盖率;其中1 000 m步行距离内的居住建筑覆盖率为28.35%,明显低于相应的人口覆盖率(53.83%)。根据实地调研情况显示,居住建筑覆盖率与人口覆盖率不同步的原因在于东西湖区位于武汉主城区边缘,仍处于快速发展阶段,研究区域内既有城区也有郊区,不同区域的开发强度差异较大:其居住建筑类型及高度也不同,学校一般位于中心片区,其附近的居住建筑以中高层为主,每栋居住建筑的居住人数较多;而远离学校片区开发强度较低,居住建筑以低层为主,步行距离2 000 m以上的居住建筑主要为郊区自建平房,总体上每栋居住建筑的平均居住人数明显低于学校附近的居住建筑。

对各小学1 000 m步行范围内覆盖的人口进行汇总统计,结果如图6所示。东南部城区小学的步行1 000 m覆盖率明显高于西北部郊区小学,进一步印证了上文所呈现的城郊空间异质性。其中覆盖率在80%—100%区间的学校有12所,此类学校大部分位于东南部城区,且学区

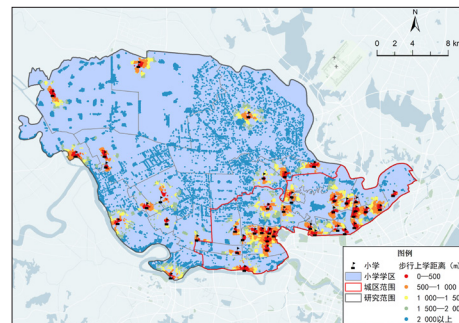


图4 各栋居住建筑到对应小学的步行距离
Fig.4 Walking distance from each residential building to the corresponding elementary school

资料来源:笔者自绘。

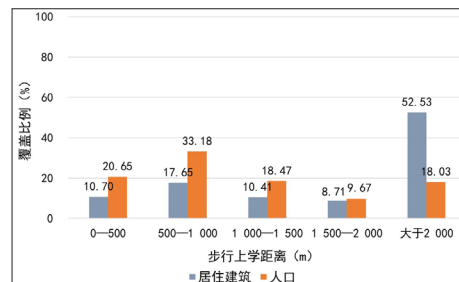


图5 不同步行上学距离所覆盖的居住建筑及人口比例
Fig.5 Proportion of residential buildings and population covered by different walking distances to school

资料来源:笔者自绘。

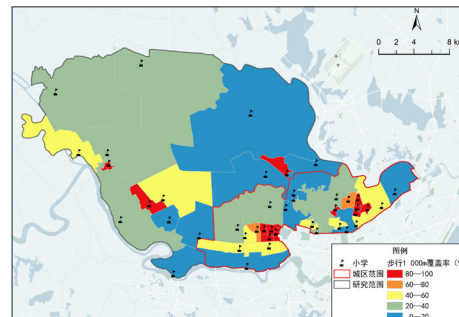


图6 各小学的步行1 000 m覆盖率
Fig.6 Walking 1 000 m coverage of each elementary school

资料来源:笔者自绘。

面积较小;而覆盖率低的学校多位于郊区且学区面积过大。覆盖率低于20%的学区有12所。此类学区普遍存在学区面积过大、学校位于学区边缘等问题。

3.1.2 步行上学安全性

各栋居住建筑到所在学区小学步行穿越干道次数如图7所示。从总体上来看,存在大量居住建筑到对应学校的步行路径需要穿越干道1次以上,步行上学穿越干道1次及以下的覆盖率较低。从空间分布上来看,城区学校

的学生上学穿越干道次数少于郊区学校。郊区学校的学区面积普遍较大,学生上学距离总体上较远,上学途中穿越干道的概率也较大。而城区虽然大部分学校的学区面积较小,学生上学距离较短,但由于城区干道密度较高,也有部分学校的学生需要穿越多次干道上学。

对步行2 000 m距离内上学穿越不同干道次数所覆盖居住建筑及人口的比例进行统计,结果如图8所示。上学途中不需要穿越干道所覆盖的居住建筑与人口分别为38.49%与32.05%,需穿越1次干道所覆盖的居住建筑与人口分别为30.54%与31.86%,需穿越2次干道及以上所覆盖的居住建筑与人口分别为

30.97%与36.09%。总体上来看,步行上学安全性一般,在步行2 000 m距离内仍有较大比例的学生上学需穿越干道2次及以上。

对各小学步行2 000 m距离内上学只需穿越干道1次及以下的人口比例进行汇总统计,结果如图9所示。研究区域内43个学区中共有20个学区的覆盖率在80%以上,有10个学区覆盖率低于40%,其余学区的覆盖率在40%—80%之间不等。在空间分布方面:城区学校的两极分化现象较为明显,部分学校上学穿越干道1次及以下覆盖率较高,同时部分学校上学穿越干道1次及以下覆盖率较低;而郊区由于路网密度相对城区较低,其上学穿越干道1次及以下覆盖率大多处于较高水平。

3.2 优化策略探讨

3.2.1 整体性问题与优化策略

在分别评价步行上学可达性与安全性的基础上,综合考量各小学的可达性与安全性两个指标,深入挖掘其空间服务绩效存在的问题,作为优化空间布局的依据。以步行1 000 m覆盖率和步行上学穿越干道1次及以下覆盖率两个指标为特征变量,在SPSS平台对研究区域内各小学进行K-means聚类,根据特征变量的相似性将研究区域内的小学进行聚类,聚类结果如图10所示。共得到5个特征相似的聚类,各聚类成员小学的空间分布如图11所示。

聚类1成员小学的可达性与安全性水平均较高,综合服务绩效表现较好。此类小学共有9

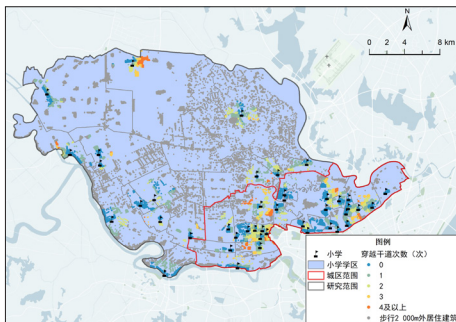


图7 各栋居住建筑到对应小学步行穿越干道次数
Fig.7 The number of times crossing arterial roads from each residential building to the corresponding elementary school on foot

资料来源:笔者自绘。

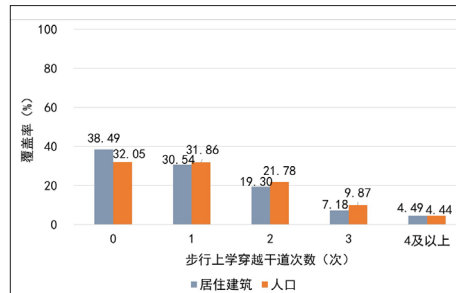


图8 上学穿越不同干道次数所覆盖的居住建筑及人口比例
Fig.8 Proportion of residential buildings and population in terms of the number of times crossing arterial roads to go to school

资料来源:笔者自绘。

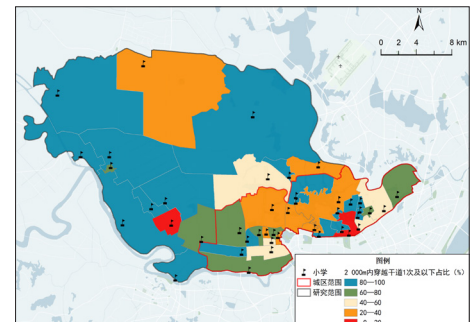


图9 各小学上学穿越干道1次及以下覆盖率
Fig.9 Coverage of elementary schools in terms of crossing arterial roads once and below to go to school

资料来源:笔者自绘。

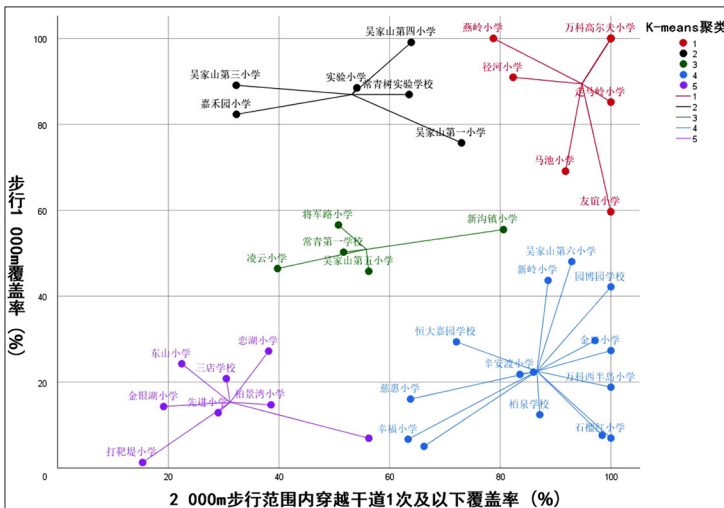


图10 各小学服务绩效聚类散点图
Fig.10 Scatterplot of service performance clustering by elementary schools

资料来源:笔者自绘。

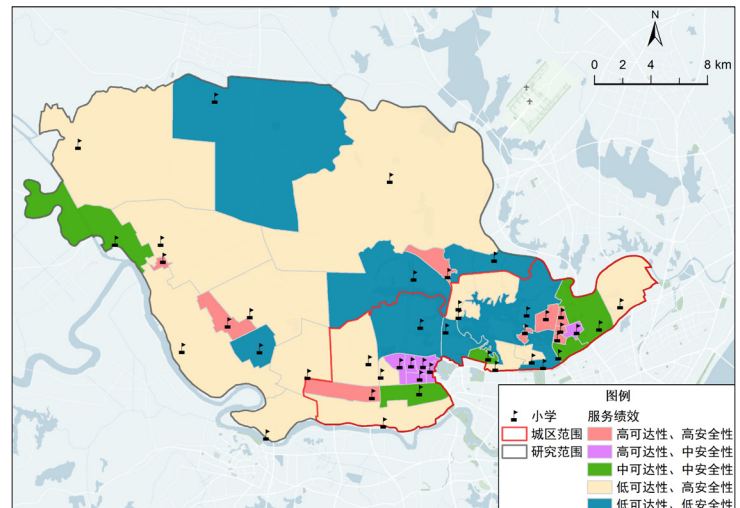


图11 各聚类成员小学的空间分布情况
Fig.11 Spatial distribution of elementary schools by clusters

资料来源:笔者自绘。

所,其学区面积普遍较小、学校位于学区中心或者主要居住片区附近,多数学生可以短距离上学,其所需穿越的干道也少。

聚类2成员小学的可达性水平较高,而安全性处于中等水平。此类小学共有5所,全部位于城区且多位于城区核心区,学区面积较小,学生上学距离较短;但由于学区内干道稍密,导致学生上学途中需穿越干道的次数略多。

聚类3成员小学的可达性与安全性均处于中等水平,综合服务绩效一般。此类小学共有5所,其学区面积适中,但是学区内路网稍密,也存在穿越干道次数略多的问题。针对此类中等安全性学校,由于学区内基本已经开发建设,调整道路网的难度过高,可以考虑适当增加过街指示牌、人行天桥等过街设施,以提高学生上学的安全性。

聚类4成员小学的可达性水平较低,但安全性水平较高。此类小学共有15所,其特征是学区空间跨度过大或者学校位于学区的边缘地区,导致学生需要远距离上学;同时学区位于郊区或者城区开发强度较低的区域,内部的干道密度较低,因而学生上学需穿越的干道也不多。针对此类小学,可以考虑调整学校布点,将学校调整到学区中心位置或者学区内主要居住片区附近,以提高小学的步行上学覆盖率;另外也可以与周边学校联合优化,将学区内远离学校的居住片区调整到距离较近且用地较为充足的周边学校,从整体上提高该片区学校的综合服务绩效。

聚类5成员小学的可达性与安全性水平平均

较低,综合服务绩效较低。此类小学共有8所,普遍存在学区面积过大、学校位于学区边缘地区、道路网络不合理等问题,是本文重点优化调整的对象。针对此类学校,可以从适当增加学校、调整学区或者学校布点、优化步行网络系统等方面进行优化。

3.2.2 典型学校优化方案

在整体性问题分析及相应优化策略的基础上,在低可达性—低安全性、低可达性—高安全性、高可达性—中安全性3类学校里分别选取一个典型学校进行优化方案分析(见表2)。

低可达性—低安全性的典型学校是三店

学校(见图12),其学区面积较大,学校位于学区内偏东的位置,学区内西部片区学生步行上学的可达性与安全性均较差,导致学区的整体空间服务绩效偏低。

根据实地调研及相关规划分析:三店学校学区位于城郊边界,其东部区域基本已建设开发完成,而西部区域开发强度不高,仍存在大片的乡村及农田,但在下一轮的相关规划中,西部区域会继续开发建设,且会新增大量居住用地(见图13)。另外,三店学校作为一所九年一贯制学校,其服务范围过大,因而办学规模也较大(见表3)。综上分析,可考虑在学区西部

表2 各类小学的问题及优化策略

Tab.2 Problems and optimization strategies for various types of elementary schools

聚类	服务绩效	特征与问题	优化策略
1	高可达性 高安全性	学区面积小、学校位于学区中心或者主要居住片区附近	—
2	高可达性 中安全性	学区面积较小、学区位于城区、干道密度较高	增加立体过街设施
3	中可达性 中安全性	学区面积适中,学区内路网密度较高	增加立体过街设施
4	低可达性 高安全性	学区位于郊区或者大型居住片区内、学校位于学区边缘	调整学校布点、调整学区、增加学校
5	低可达性 低安全性	学区面积过大、学校位于学区边缘地区、道路网络不合理	增加学校、调整学校布点、优化路网

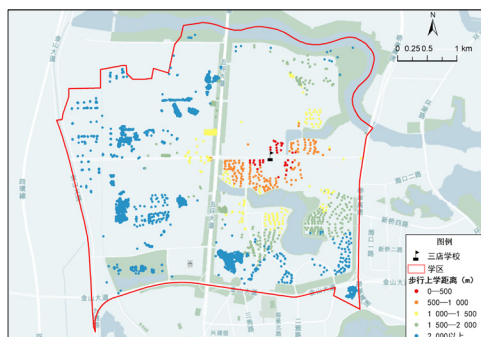
资料来源:笔者自制。

表3 三店学校办学规模情况

Tab.3 The scale of Sandian School

小学生数/人	初中生数/人	小学班数/个	初中班数/个	占地面积/m ²	生均用地/(m ² /人)
1 790	543	33	12	90 571	38.82

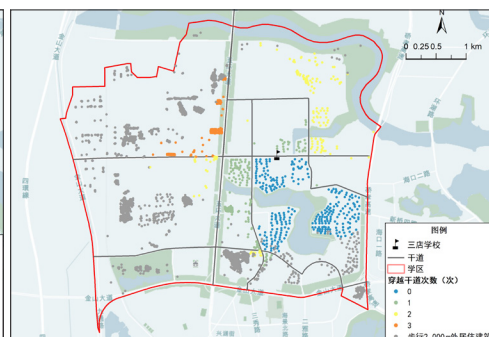
资料来源:笔者自制。



a 步行上学距离

图12 三店学校学区内学生步行上学情况

Fig.12 Analysis of students walking to school in Sandian School District



b 步行上学穿越干道次数

资料来源:笔者自绘。

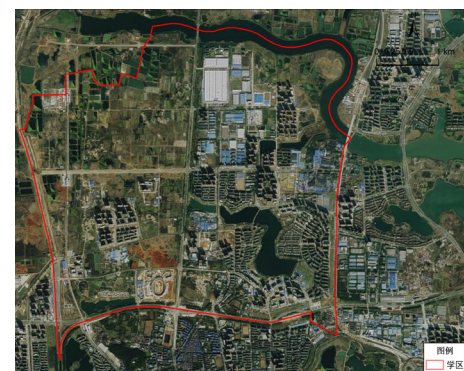


图13 三店学校学区内卫星图

Fig.13 Satellite map of Sandian School District

资料来源:天地图。

新增一所小学,既可以解决西部区域学生上学可达性及安全性较低的问题,也可以减轻当前三店学校过大的办学负担,同时还可以为该片区未来开发建设后新增的居民预留一定的学位资源,提高规划的弹性。

低可达性—高安全性的典型学校是东方红小学,其学区呈西北—东南走向的狭长条状,空间跨度较大,同时学校位于学区内偏西的区域,学区内西北部、东南部及东部3片区域内的学生上学距离较远(见图14a);而由于其位于郊区,干道密度较低,学生上学途中需穿越的干道较少(见图14b)。

东方红小学周边小学生均用地及其学区空间分布情况分别如表4和图15所示,其中燕岭小学、打靶堤小学分别位于东方红小学学区西北、东南两侧,能较好地覆盖该区域内需要远距离到东方红小学上学的学生。同时其生均用地分别为 $365.49 \text{ m}^2/\text{人}$ 、 $657.54 \text{ m}^2/\text{人}$,学校用地较为充足,因此可考虑将东方红小学学区西北侧片区划归燕岭小学,东南片区划归打靶堤小学,从而使周边学校的的服务资源得以充分利用,总体上提高该片区内学校的的服务绩效。

高可达性—中安全性的典型学校是嘉禾园小学,其学区面积较小,学生上学距离普遍较短,大部分学生上学距离都在 $1\ 000 \text{ m}$ 以内,只有南部少数区域的上学距离在 $1\ 000—1\ 500 \text{ m}$,整体步行上学可达性较好(见图16a)。同时,学区位于东西湖区城区的核心区,干道密度较高,学生上学途中需穿越的干道次数较多,学生步行上学安全性总体上偏低(见图16b)。

考虑到学区位于城区核心区,开发建设已经较为完善,难以进行大幅度的调整,针对其步行上学安全性偏低的问题,可以考虑在适当的位置增加步行过街设施,提高学生上学的步行友好度及安全性。通过对学区内居住建筑、干道空间分布情况及其空间关系的分析发现,学区南部区域有东吴大道、田园街、一清路等多条干道。该区域学生步行上学安全性较低,其中大部分学生上学途中需要穿越东吴大道,因此可考虑在东吴大道增加人行天桥等立体过街设施

(见图17),提高学生步行上学的安全性。增加立体过街设施后,学生上学需平面穿越干道的次数明显减低,整体安全性得到较大的提升。

4 总结

本文是数据增强设计的一次有益探索,同时也证实了小学空间服务绩效评价方法的效用。

表4 东方红小学周边学校生均用地

Tab.4 Per capita land for schools around Dongfanghong Primary School

学校	在校学生数 / 人	占地面积 / m^2	生均用地 / ($\text{m}^2/\text{人}$)
打靶堤小学	72	47 343	657.54
燕岭小学	107	39 107	365.49
东方红小学	530	26 057	49.16
幸福小学	489	18 821	38.49
走马岭小学	748	24 093	32.21
石榴红小学	129	17 644	136.78
荷包湖小学	284	23 506	82.77
新沟镇小学	361	36 511	101.14

资料来源:笔者自制。

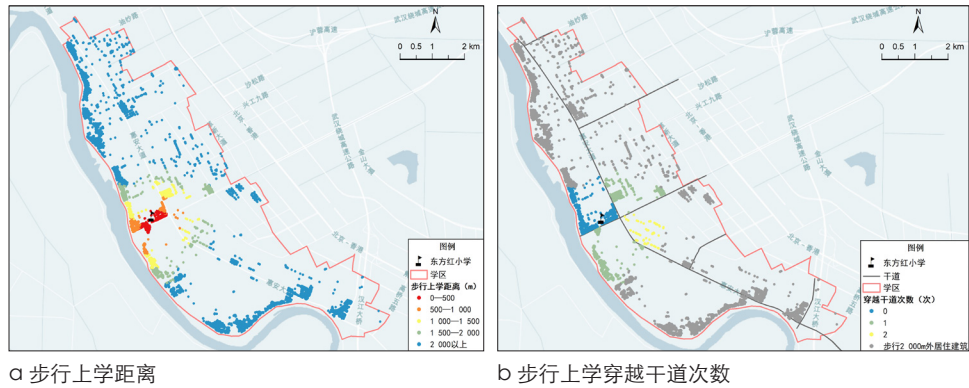


图14 东方红小学学区内学生步行上学情况

Fig.14 Analysis of students walking to school in Dongfanghong Primary School District

资料来源:笔者自绘。

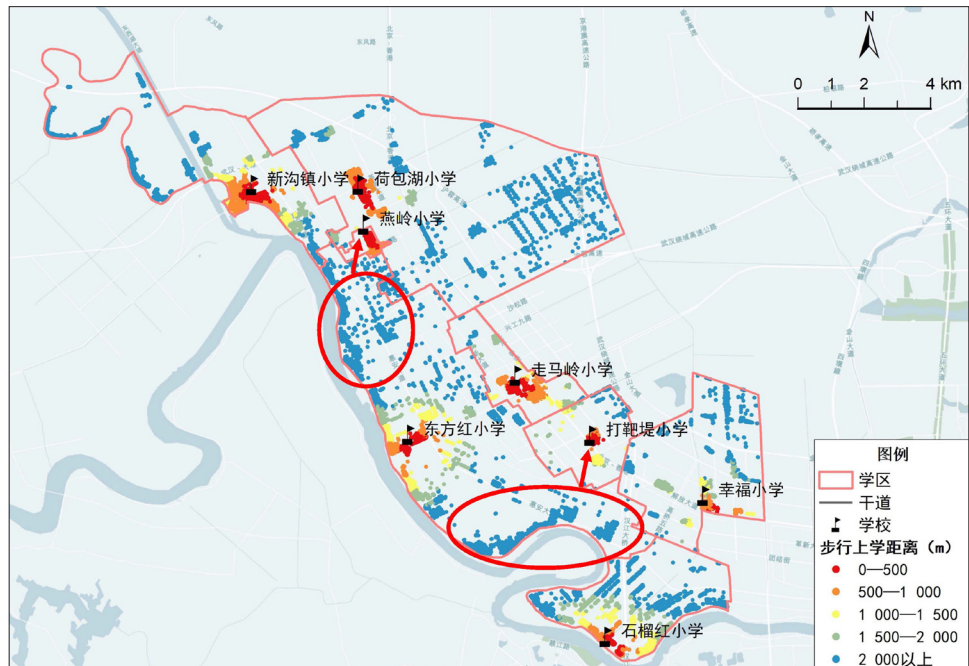
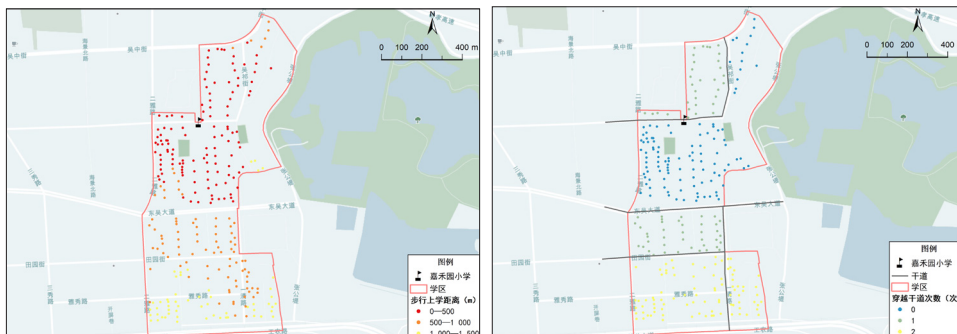


图15 东方红小学优化策略示意图

Fig.15 Diagram of optimization strategy of Dongfanghong Primary School

资料来源:笔者自绘。



a 步行上学距离 b 步行上学穿越干道次数

图16 嘉禾园小学学区内学生步行上学情况
Fig.16 Analysis of students walking to school in Jiaheyuan Elementary School District

资料来源:笔者自绘。



图17 嘉禾园小学优化示意图
Fig.17 Optimization diagram of Jiaheyuan Elementary School

资料来源:笔者自绘。

但也存在一些不足之处,尽管研究中通过社区人口统计数据、手机信令数据和居住建筑数据相互校核得到了较准确且精细的人口空间分布数据,但由于不同区域人口的年龄结构及社会结构均有所差异,导致人口空间分布与实际的小学生空间分布有一定的差异。后续研究中可结合更精细的人口普查、各学校的生源等数据对人口空间分布进行修正,得到更接近小学生真实空间分布的数据,进一步提高小学空间服务绩效评价分析的准确性。

参考文献 References

[1] 姚栋,黄明卓. 基于ICT技术的社区养老设施空间绩效研究[J]. 建筑学报, 2017 (2) :44-47.
YAO Dong, HUANG Mingzhuo. A spatial performance study of community-based facilities for the elderly based on ICT data[J]. Architectural Journal, 2017(2): 44-47.
[2] 诸大建,王欢明. 公共服务绩效评价的价值取向、评价方法和评价指标[J]. 上海市经济管理干部学院学报, 2013, 11 (2) :1-10.
ZHU Dajian, WANG Huanming. The value orientation, evaluation method and evaluation index of performance evaluation of public services[J]. Journal of Shanghai Economic Management College,

2013, 11(2): 1-10.
[3] 刘天宝,郑莉文,杜鹏. 市域义务教育资源均衡水平的空间特征与分布模式——以大连市小学为例[J]. 经济地理, 2018, 38 (7) :67-74.
LIU Tianbao, ZHENG Liwen, DU Peng. Spatial characteristics and distribution pattern of the equilibrium level of municipal compulsory education resources: take Dalian Primary School as an example[J]. Economic Geography, 2018, 38(7): 67-74.
[4] 刘凯,刘荣增. 城镇化背景下中部农区县域中小学空间集中趋势与非均衡发展研究——以河南省泌阳县为例[J]. 地理研究, 2017, 36 (9) : 1680-1696.
LIU Kai, LIU Rongzeng. Spatial concentration tendency and unbalanced development of elementary and middle schools under the background of urbanization in central rural area: a case study of Biyang County in Henan Province[J]. Geographical Research, 2017, 36(9): 1680-1696.
[5] 郑童,吕斌,张纯. 北京流动儿童义务教育设施的空间不均衡研究——以丰台区为例[J]. 城市发展研究, 2011, 18 (10) :115-123.
ZHENG Tong, LYU Bin, ZHANG Chun. Research on the inequity of compulsory education infrastructure for migrant children in Beijing: a case study of Fengtai District[J]. Urban Studies, 2011, 18(10): 115-123.
[6] 尹上岗,胡信,马志飞,等. 基于教育公平视角的城市学区房价价格时空效应——以南京主城区公办小学为例[J]. 经济地理, 2019, 39 (9) :82-93.
YIN Shangang, HU Xin, MA Zhifei, et al. Spatial and temporal effects of housing price in urban school districts based on education equity: a case study of public primary school in the main urban area of Nanjing[J]. Economic Geography, 2019, 39(9): 82-93.
[7] 蔡辉,王少博,余侃华. 公平与效益视角下乡村地区基础教育设施配置初探——以陕西省泾阳县为例[J]. 现代城市研究, 2016 (3) :83-91.
CAI Hui, WANG Shaobo, YU Kanhua. Preliminary study of basic education facility configuration in rural area under the perspective of fairness and beneficial result: a case study of Jingyang, Shaanxi[J]. Modern Urban Research, 2016(3): 83-91.
[8] 王侠,陈晓键,焦健. 基于家庭出行的城市小学可达性分析研究——以西安市为例[J]. 城市规划, 2015, 39 (12) :64-72.
WANG Xia, CHEN Xiaojian, JIAO Jian. Accessibility of urban primary schools based on family travel behavior: a case study of Xi'an[J]. City Planning Review, 2015, 39(12): 64-72.
[9] 韩增林,董梦如,刘天宝,等. 社区生活圈基础教育设施空间可达性评价与布局优化研究——以大连市沙河口区为例[J]. 地理科学, 2020, 40 (11) :1774-1783.
HAN Zenglin, DONG Mengru, LIU Tianbao, et al. Spatial accessibility evaluation and layout

- optimization of basic education facilities in community life circle: a case study of Shahekou in Dalian[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(11): 1774-1783.
- [10] 宋伟轩,涂唐奇,尹上岗,等. 南京义务教育资源的社会——空间可达性差异及效应研究[J]. *地理研究*, 2019, 38 (8): 2008-2026.
SONG Weixuan, TU Tangqi, YIN Shanggang, et al. The differentiation and effects of social-spatial accessibility in compulsory education resources in Nanjing[J]. *Geographical Research*, 2019, 38(8): 2008-2026.
- [11] 秦萧,甄峰,熊丽芳,等. 大数据时代城市时空行为研究方法[J]. *地理科学进展*, 2013, 32 (9): 1352-1361.
QIN Xiao, ZHEN Feng, XIONG Lifang, et al. Methods in urban temporal and spatial behavior research in the big data era[J]. *Progress in Geography*, 2013, 32(9): 1352-1361.
- [12] 李苗裔,王鹏. 数据驱动的城市规划新技术:从GIS到大数据[J]. *国际城市规划*, 2014, 29 (6): 58-65.
LI Miaoyi, WANG Peng. New technology in data-driven urban planning: from GIS to big data[J]. *Urban Planning International*, 2014, 29(6): 58-65.
- [13] 牛强. 城市规划大数据的空间化及利用之道[J]. *上海城市规划*, 2014 (5): 35-38.
NIU Qiang. The spatialization of urban planning big data and its using methods[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2014(5): 35-38.
- [14] 龙瀛,刘伦. 新数据环境下定量城市研究的四个变革[J]. *国际城市规划*, 2017, 32 (1): 64-73.
LONG Ying, LIU Lun. Four transformations of Chinese quantitative urban research in the new data environment[J]. *Urban Planning International*, 2017, 32(1): 64-73.
- [15] 魏伟,陶煜,杨欢. 大城市中心区小学布局满意度提升规划策略[J]. *规划师*, 2020, 36 (16): 13-18.
WEI Wei, TAO Yu, YANG Huan. Satisfaction improvement on layout of primary schools in central area of big city[J]. *Planners*, 2020, 36(16): 13-18.
- [16] 龙瀛,沈尧. 数据增强设计——新数据环境下的规划设计回应与改变[J]. *上海城市规划*, 2015 (2): 81-87.
LONG Ying, SHEN Yao. Data Augmented Design: urban planning and design in the new data environment[J]. *Shanghai Urban Planning Review*, 2015(2): 81-87.
- [17] 龙瀛,张恩嘉. 数据增强设计框架下的智慧规划研究展望[J]. *城市规划*, 2019, 43 (8): 34-40, 52.
LONG Ying, ZHANG Enjia. Smart urban planning under the framework of Data Augmented Design[J]. *City Planning Review*, 2019, 43(8): 34-40, 52.
- [18] 赵梦妮,甄峰,姜玉培. 城市社区步行环境综合评价及优化策略研究——以南京主城区为例[J]. *现代城市研究*, 2021 (2): 41-48.
ZHAO Mengni, ZHEN Feng, JIANG Yupei. Study on comprehensive evaluation and optimization strategy of urban community pedestrian environment: a case study of main urban area of Nanjing[J]. *Modern Urban Research*, 2021(2): 41-48.
- [19] HIRSCH J A, DIEZ R A V, MOORE K A, et al. Change in walking and body mass index following residential relocation: the multi-ethnic study of atherosclerosis[J]. *American Journal of Public Health*, 2014, 104(3): e49-e56.
- [20] FRANK D L, ENGELKE O P. The built environment and human activity patterns: exploring the impacts of urban form on public health[J]. *Journal of Planning Literature*, 2001, 16(2): 202-218.
- [21] 关成贺,迈克尔·凯斯,安迪·洪,等. 大数据时代步行城市和社区的设计[J]. *国际城市规划*, 2019, 34 (5): 9-15.
GUAN Chenghe, KEITH M, HONG A, et al. Designing walkable cities and neighborhoods in the era of urban big data[J]. *Urban Planning International*, 2019, 34(5): 9-15.
- [22] 刘珺,王德,王昊阳,等. 国外城市步行环境评价方法及研究动态[J]. *现代城市研究*, 2015 (11): 27-33.
LIU Jun, WANG De, WANG Haoyang, et al. Assessment tools for foreign urban walking environment[J]. *Modern Urban Research*, 2015(11): 27-33.
- [23] 王婷. 易诱发儿童交往行为发生的老城街巷空间研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.
WANG Ting. Research on the district space in ancient cities causing children communication behaviors[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [24] 武凤文,陈明远. 儿童健康安全视角下的步行通学道评测与优化策略[J]. *城市发展研究*, 2020, 27 (7): 20-27.
WU Fengwen, CHEN Mingyuan. The evaluation and improvement strategy of the way to elementary school from the perspective of children[J]. *Urban Development Studies*, 2020, 27(7): 20-27.
- [25] NIU Q, WANG Y, XIA Y, et al. Detailed assessment of the spatial distribution of urban parks according to day and travel mode based on web mapping API: a case study of main parks in Wuhan[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(8): 1725.
- [26] 牛强,张永雄,张伟铭,等. 基于网络地图API开放地图访问和高斯两步移动搜索法的武汉市大型公园可达性评价[C]//智慧规划·生态人居·品质空间——2019年中国城市规划信息化年会论文集. 北京:中国建筑工业出版社, 2019:322-328.
NIU Qiang, ZHANG Yongxiong, ZHANG Weiming, et al. Accessibility evaluation of large parks in Wuhan City based on web map API open map access and Gaussian Two-step Movement search method[C]//Intelligent planning - ecological habitat - quality space: proceedings of the 2019 China Annual Conference on Urban Planning Informatization. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019: 322-328.