北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于质量异质性的太原城市公园绿地可达性与公平性评价

景雨虹 潘淑桢 李擘 李芳 王美仙

Evaluation of accessibility and fairness of urban park green spaces in Taiyuan, Shanxi Province of northern China based on quality heterogeneity

Jing Yuhong, Pan Shuzhen, Li Bo, Li Fang, Wang Meixian

引用本文:
景雨虹, 潘淑桢, 李擘, 李芳, 王美仙. 基于质量异质性的太原城市公园绿地可达性与公平性评价[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(9):129–142. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240167
Jing Yuhong, Pan Shuzhen, Li Bo, Li Fang, Wang Meixian. Evaluation of accessibility and fairness of urban park green spaces in Taiyuan, Shanxi Province of northern China based on quality heterogeneity[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(9):129–142. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240167

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240167

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

基于可达性的北京市海淀区绿色开放空间供需关系分析和优化方向研究
Relationship between supply and demand of green open space in Haidian District of Beijing based on accessibility
北京林业大学学报, 2023, 45(2): 108–119. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210530

北京市城市公园绿地土壤种子库特征及其更新潜力
Characteristics and regeneration potential of soil seed banks in green space of urban parks in Beijing
北京林业大学学报, 2023, 45(10): 1–15. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230024

基于城市活力影响的滨河绿地评价研究
Research on the assessment of riverfront green space based on urban vitality impact: taking Beijing Haidian District as an example
北京林业大学学报, 2023, 45(11): 128–139. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220206

北京园林树木秋色盛期的空间异质性及其对热环境差异的响应
Spatial heterogeneity in leaf coloring date and the phenological response to thermal environment variations of Beijing landscape trees
北京林业大学学报, 2024, 46(1): 119–130. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210546

北京市朝阳区公园绿地中外来入侵植物与本地植物群落特征对比
Comparison of alien invasive plant and native plant community characteristics in park green space of Chaoyang District, Beijing
北京林业大学学报, 2025, 47(3): 116–127. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240388

广东省森林土壤养分异质性析因
Analysis on the heterogeneity of forest soil nutrients in Guangdong Province of southern China
北京林业大学学报, 2021, 43(2): 90–101. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200164

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240167

基于质量异质性的太原城市公园绿地可达性与公平性评价

景雨虹[1]　潘淑桢[1]　李　擘[2]　李　芳[2]　王美仙[1]
（1. 北京林业大学园林学院，国家花卉工程技术研究中心，城乡生态环境北京实验室，北京 100083；2. 太原市园林局，山西 太原 030002）

摘要:【目的】可达性与公平性是衡量城市居民使用绿地机会与便捷程度的重要指标，也是评估城市绿地资源空间配置合理性的关键因素。以太原城市公园绿地为研究对象，揭示不同质量公园绿地的可达性和公平性分布差异，并分析这些差异对居民使用公园绿地的影响，为优化太原公园绿地布局提供科学依据。**【方法】**基于 2007—2023 年的细粒度居住区人口、街道数据、公园绿地及通行时间等数据，提出一种考虑公园质量异质性的评价方法。采用综合多出行模式下的两步移动搜索法评估太原城市公园绿地可达性，并通过基尼系数评价其公平性。**【结果】**(1)太原城市公园绿地质量总体处于中等水平，其中综合公园和历史名园相较社区公园和游园质量较高，嘉节游园、北排洪沟带状游园、黄坡烈士陵园、兴墕公园的质量评价结果最低。(2)太原城市公园绿地可达性存在显著空间差异。高可达性区域集中于汾河两岸，沿东西方向逐渐递减，中心城区可达性整体优于郊区。尖草坪区可达性值为全市最高(60.97)，高可达性街道占比最大；晋源区可达性值为全市最低(25.97)，人口数量密集但公园数量较少。(3)万柏林区的公园绿地资源公平性指数为 0.154，最为公平；尖草坪区为 0.269，供需失衡较为明显。晋源区的金胜镇和杏花岭区的巨轮街道因建设年代较早，规划公园绿地数量不足。**【结论】**太原市不同类型公园存在显著差异，绿地可达性在空间上呈现明显分异，中心城区优于郊区，部分区域存在供需失衡现象；绿地资源的公平性在不同街道和行政区之间亦存在差异，个别区域分配不均。建议通过提升公园绿地质量、改善公共交通设施、优化绿地空间布局等措施促进城市绿色发展。

关键词：太原；公园绿地；质量异质性；可达性；公平性
中图分类号：TU986　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2025)09−0129−14
引文格式：景雨虹，潘淑桢，李擘，等. 基于质量异质性的太原城市公园绿地可达性与公平性评价 [J]. 北京林业大学学报，2025，47(9)：129−142. Jing Yuhong, Pan Shuzhen, Li Bo, et al. Evaluation of accessibility and fairness of urban park green spaces in Taiyuan, Shanxi Province of northern China based on quality heterogeneity[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(9): 129−142.

Evaluation of accessibility and fairness of urban park green spaces in Taiyuan, Shanxi Province of northern China based on quality heterogeneity

Jing Yuhong[1]　Pan Shuzhen[1]　Li Bo[2]　Li Fang[2]　Wang Meixian[1]
(1. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, National Flower Engineering Technology Research Center, Beijing Laboratory of Urban and Rural Ecological Environment, Beijing 100083, China;
2. Taiyuan Municipal Bureau of Landscaping, Taiyuan 030002, Shanxi, China)

Abstract: [**Objective**] Accessibility and equity are critical indicators for evaluating urban residents' opportunities and convenience in utilizing green spaces, as well as key factors in assessing the rationality of spatial distribution of urban green resources. This paper takes urban park green spaces in Taiyuan, Shanxi

收稿日期: 2024−05−23　**修回日期:** 2025−04−08
基金项目: 北京林业大学建设世界一流学科和特色发展引导专项(2019XKJS0322)，北京市教委科学研究与研究生培养共建科研项目(2019GJ-03)。
第一作者: 景雨虹。主要研究方向：植物景观规划设计。Email: jingyuhong2022@163.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学园林学院。
责任作者: 王美仙，副教授。主要研究方向：植物景观规划设计、生态修复。Email: wangmx@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

Province of northern China as the research object, aiming to reveal the spatial disparities in accessibility and fairness across parks of varying quality and analyze how these disparities influence residents' use of park resources. The findings provide a scientific basis for optimizing the spatial layout of park green spaces in Taiyuan. [**Method**] Based on fine-grained residential population data, street networks, park green space distribution, and travel time data from 2007 to 2023, this study proposed an evaluation method that accounted for the heterogeneity of park quality. The accessibility of urban park green spaces in Taiyuan was assessed using a two-step floating catchment area (2SFCA) method under multiple travel modes. Furthermore, the equity of accessibility distribution was evaluated through the Gini coefficient. [**Result**] (1) The overall quality of urban park green spaces in Taiyuan was at a moderate level. Among them, comprehensive parks and historical gardens exhibited higher quality compared with community parks and pocket parks. The lowest quality scores were observed in Jiajie Park, Beipaihonggou Linear Park, Huangpo Martyrs Cemetery, and Xingyan Park. (2) The accessibility of urban park green spaces in Taiyuan demonstrated significant spatial disparities. High-accessibility areas were concentrated along both sides of the Fen River, gradually decreasing from east to west. The central urban districts exhibited overall higher accessibility than suburban areas. Jiancaoping District had the highest accessibility value citywide (60.97), with the largest proportion of high-accessibility streets; in contrast, Jinyuan District had the lowest value (25.97), characterized by a dense population but a limited number of parks. (3) The equity index of park green space resources in Wanbailin District was the lowest (Gini coefficient = 0.154), indicating the highest level of fairness. Jiancaoping District showed a higher level of inequity (Gini coefficient = 0.269), suggesting a notable supply-demand imbalance. Due to earlier periods of urban development, areas such as Jinsheng Town in Jinyuan District and Julun Subdistrict in Xinghualing District lacked sufficient planned park green spaces. [**Conclusion**] Significant disparities exist in different types of parks in Taiyuan, with park green space accessibility exhibiting pronounced spatial differentiation, central urban areas generally outperform suburban districts. In some regions, a mismatch between supply and demand is evident. Furthermore, the fairness of green space resources varies across streets and administrative districts, with uneven distribution observed in certain areas. To promote sustainable urban green development, it is recommended to enhance park quality, improve public transportation infrastructure, and optimize the spatial layout of green spaces.

Key words: Taiyuan; park green spaces; quality heterogeneity; accessibility; fairness

城市公园绿地作为城市中的重要自然资源，对居民的生活质量和城市的可持续发展具有重要意义[1−3]。2019 年底新冠疫情的暴发[4−5]，让居民开始重新审视公园绿地的功能[6]。《国家新型城镇化规划（2014—2020）》、“十四五”规划以及 2035 年远景目标中均强调“基本公共服务均等化”的重要性，而公园绿地可达性已成为评估社会公平、城市规划与管理有效性和居民生活质量的重要指标[7−9]。然而，公园绿地分布不均和数量不足的问题依然突出[10−11]，引发了广泛关注。

目前国内外关于公园绿地可达性的研究主要集中在 3 个方面：可达性计算方法优化、可达性对居民健康的影响以及可达性与社会公平的关系。常用的可达性计算方法包括缓冲区法[12]、费用加权距离法[13]、网络分析法[14]、引力模型法[15−16]等。Radke 和 Mu[17]提出的两步移动搜索法（2SFCA）应用广泛，该方法从公园绿地服务范围和居民出行视角出发，考虑的因素更为全面。研究表明，公园绿地可达性对居民的生理和心理健康有显著影响，居民身心健康与附近公园绿地面积[18]、公园绿地数量[19]、配套设施丰富程度[20]呈正相关，与最邻近公园绿地的距离呈负相关[21]。在可达性与社会公平方面，公园绿地的公平性通常指不同群体在访问公园资源时是否享有平等的机会，尤其是考虑到地理位置、社会经济地位和文化背景等因素的差异。公园绿地分布不均不仅体现在地理空间[11]上，还体现在社会经济收入[22]上。相关研究表明，高质量的公园绿地可以在一定程度上弥补可达性的不足，居民更愿意前往可达性不高但质量较高的公园，从而影响公平性[23−24]。总体来看，当前关于公园绿地自身质量的描述，多从规模[25−26]和人均公园绿地面积[27−28]两个方面进行评定；且关于可达性与公平性研究尺度多集中于行政区和

街道层面[24]。由于研究单元较少以居住区为单位，整体结果精度有待进一步提升，难以准确反映公园质量对城市居民的吸引力[29−32]，进而影响可达性评估结果。

近年来，太原市积极响应生态文明战略，在《2023 年太原市创建国家生态园林城市实施方案》中提出创建国家生态园林城市的目标。截至 2022 年底，已建成综合性公园 21 个、社区公园 50 个、专类公园 17 个、街头游园(广场)278 个，公园总量从 2012 年的 239 个增长至 653 个。然而，现有城市绿地公园面积仍显不足，分布集中且质量参差不齐[33]，居民对配套设施满意度较低[34]。可达性和公平性成为居民迫切需求的重点，也是未来指导建设的关键抓手。因此，以太原城市公园绿地为研究对象，基于谷歌地图、POI 数据、二手房交易平台、精确到居住区的人口数据等大数据，从公园属性、区位条件、景观环境、配套设施、游憩活力 5 个维度挖掘 17 个指标，提出一种考虑公园质量异质性的可达性和公平性评价方法。采用综合多出行模式下的两步移动搜索法评价可达性，并引入基尼系数评价公平性。该方法能够在最小空间尺度下较为精确地对公园绿地可达性与公平性进行评价，促使公园绿地更好地满足居民需求，推动城市绿色发展和宜居环境的建设。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究对象

太原市位于山西省中北部，地处黄土高原，晋中盆地北部，下辖 6 区 3 县。近年来，为创建国家生态园林城市，太原市公园绿地数量呈现快速增长趋势。根据最新发布的《2022 年度太原市人口变动情况抽样调查主要数据公报》，太原市常住人口达 543.5 万人。目前，太原市人口密度高、发展速度快的区域仍集中在绕城高速以内，选取该区域作为研究区，主要包括小店区、尖草坪区、晋源区、万柏林区、迎泽区和杏花岭区的部分区域。研究区地理坐标为 112°27′～112°38′E，37°44′～38°01′N，东西横距约 16 km，南北纵距约 32 km[35]，总面积为 358.64 km^2。

1.2　数据来源

1.2.1　居住区人口及街道

为提高可达性数据精度，本研究将数据从常规的行政区、街道层面细化至居住区层面，所以进行细粒度精度的居住区人口数据收集和处理，具体方法分为 4 个部分。(1)利用 Python 软件从贝壳网二手房交易平台爬取 2023 年太原市居住区兴趣点矢量数据，包含小区名称、地址、楼栋总数、总户数、经纬度坐标等属性信息。(2)以采集到的居民点质心点数据作为居民点出入口。(3)通过各小区总户数与所在行政区平均每户人数的乘积估算居住区人口数据。(4)利用 ArcGIS 10.4 对人口数据进行可视化处理，生成人口数量空间分布图(图 1)。可以看出，中环街内部居住小区密集，但以老旧小区为主，人口数量较少；中环街外围则以高层建筑为主，人口数量较多，对公园绿地的需求量更高。这种需求竞争可能导致拥挤现象，降低公园绿地的可用性和质量，从而影响可达性。此外，随着需求多样化增加，如果这些需求无法得到满足，也会影响居民对公园绿地的使用频率和可达性。

可达性研究通常需要考虑街道网络、交通设施、步行路径等要素，这些信息依赖于详细的街道数据，以评估居民从居住地步行或通过交通工具到达公园绿地的便利程度。同时，街道数据能够反映公园绿地在城市中的分布情况，从而分析不同街道之间的绿地分布均衡性，明确是否存在绿地分布不均问题。本研究所使用的太原市行政区街道边界矢量数据，来源于城六区人民政府与山西省地图集编纂委员会发布的行政区划图，并参考太原市民政局《太原市行政区划一览表(截至 2022 年底)》信息，设置好坐标后导入 ArcGIS 10.4 验证吻合程度。由于太原市行政划分无明显的街道和乡镇边界，因此将乡镇视为与街道同级别的研究单元，最终确定研究区内 47 个街道单元(图 2)。需注意的是，研究街道仅涵盖研究

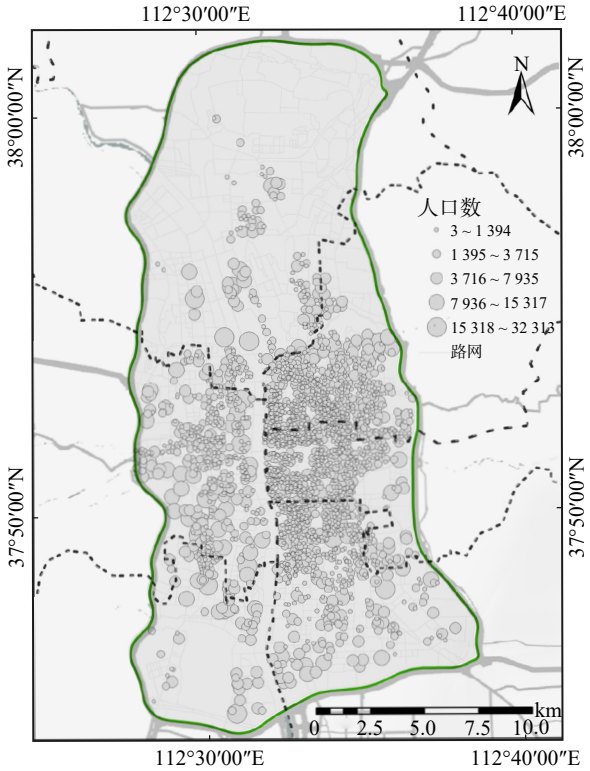


图 1　人口空间分布

Fig. 1　Spatial distribution of population

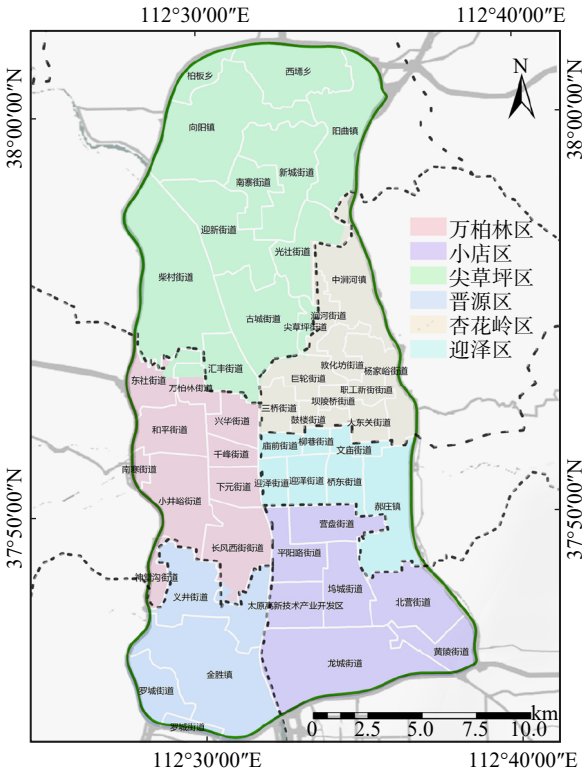


图 2 行政区街道划分

Fig. 2 Street division of administrative districts

区内部，不代表街道全部管辖范围。

1.2.2 考虑质量异质性的公园绿地

公园类型及数量。根据《城市绿地分类标准》（CJJ/T85—2017）和《太原市国家森林城市建设总体规划（2020—2035）》中的现状公园名录，结合 2023 年 Google Earth 影像图，对研究区域内的综合公园、社区公园、专类公园、游园 4 类公园绿地进行检索，共获得 51 个公园。考虑到部分收费公园可能影响居民游赏意愿，剔除收费公园后，最终确定研究区域内 48 个免费公园作为研究对象（图 3）。

公园入口数据。基于 Google 高清卫星遥感图像和高德地图路径规划功能，结合 2023 年 9—10 月实地调研的 48 个公园的 161 个可进入入口，通过 ArcGIS 标记并记录其坐标数据，共获取 161 个公园入口坐标。

公园质量指标数据。利用 Python 编程爬取交通路网数据、谷歌地图影像、高德地图的 POI 数据、百度热力图数据和网络点评等数据（表 1），对 48 个公园绿地进行质量指标评价。基于公园绿地游憩服务功能这一核心功能，筛选出公园属性、区位条件、景观环境、配套设施、游憩活力[36–37]5 个类别共 17 个指标，用以表征公园绿地的质量异质性（表 2）。

1.2.3 通行时间数据

基于高德地图 WebAPI 提供的路径规划功能，将收集到的各居住小区点到公园入口的路径关系赋予唯一的标识编号，地理坐标统一为高德坐标。在 2023 年 11 月 23—30 日期间非高峰出行时间段内，利用路径规划 2.0 接口，并通过 Python 编程语言抓取步行、骑行、公交及驾驶的最短出行时间，共获取

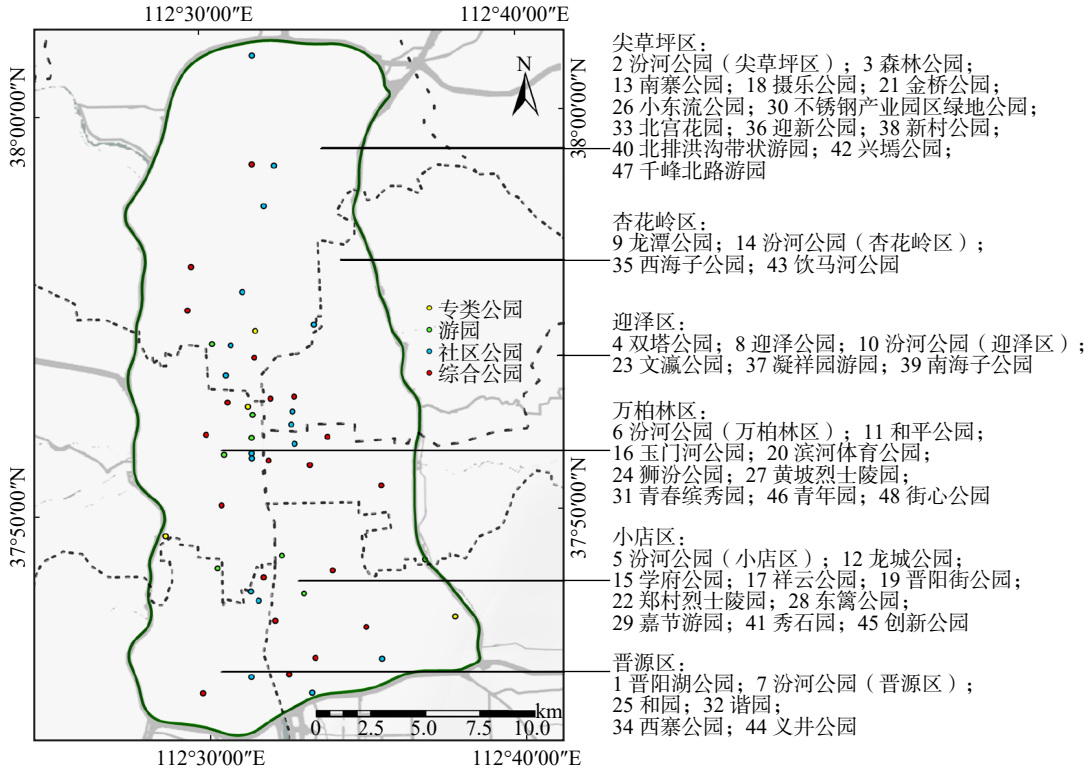


图 3 太原城市公园绿地分布

Fig. 3 Distribution of urban parks and green spaces in Taiyuan

表 1　数据来源

Tab. 1　Data sources

数据名称	数据来源	数据说明	年份
公园绿地数据	太原市园林局谷歌地图（https://earth.google.com/web/）	《太原市国家森林城市建设总体规划(2020—2035)》、《太原市总体城市设计(2018—2035)》、太原市公园绿地明细表(2021.8.24)、2023 年谷歌地图公园绿地轮廓；ArcGis进行人工目视解译并通过实地调研修正	2021
交通路网数据	高德地图开放平台（https://www.amap.com/）	高速公路、国道、省道、县道、乡道以及城市一级、二级道路；ArcGis进行清洗和简化	2023
植被指数	美国地质勘探局网站（https://earthexplorer.usgs.gov/）	2020 年 Landsat8OLI 遥感影像数据	2020
建筑轮廓数据	高德地图开放平台（https://www.amap.com/）	采集到研究区建筑数量：60 259栋；	2023
POI数据	高德地图开放平台（https://www.amap.com/）	经数据清洗后得到20个大类127 118条POI 数据；ArcGis进行数据清洗、简化	2023
百度热力图数据	百度地图慧眼（https://huiyan.baidu.com/）	采集太原市 2023年9月18日至24日一周内6:00-21:00的各个时刻的百度热力图原始点数据；ArcGis进行坐标转换、核密度分析	2023
大众点评数据	大众点评网（https://www.dianping.com/）	Python获取平台用户id、点评时间、内容、星级；经ArcGis清洗后得到6 269条点评数据	2007—2023
高德点评数据	高德地图开放平台（https://www.amap.com/）	Python获取平台用户id、点评时间、内容、星级；经ArcGis清洗后得到3 220条点评数据	2012—2023
微博评论数据	微博官网（https://weibo.com/）	Python获取平台用户id、点评时间、内容；经ArcGis清洗后得到9 492条博文数据	2018—2023

表 2　公园质量指标及权重

Tab. 2　Park quality indices and their weights

类别	层次分析法指标层权重/%	类别权重/%	指标层	指标层释义	层次分析法指标层权重/%	指标层权重/%	排序
A公园属性	3.24	9.87	A1公园面积	面积越大，所能承载的功能越多	2.43	6.80	6
			A2公园类型	不同性质的公园绿地能吸引到的城市居民数量和吸引的范围不同	0.81	3.06	12
B区位条件	4.23	7.49	B1全局整合度	反映评价单元相对于整个研究区的中心性，高值区通常为整个研究区最繁华的核心街道	0.52	1.36	15
			B2局部整合度	反映评价单元相对局部空间的中心性，高值通常为研究区局部空间上的核心街道	0.49	1.24	16
			B3周边设施多样性	衡量周边是否有丰富的公共服务设施资源，周边设施多样性越丰富，公园绿地的区位条件越好	1.03	0.73	17
			B4周边设施密度	周边设施密度越大，公园绿地的区位条件越好	2.19	4.16	8
C景观环境	41.54	35.91	C1形状指数	用以衡量城市绿地的生态服务水平和景观格局特征，表征绿地内部景观形状复杂程度，与公园绿地的质量成正比	3.42	5.69	7
			C2香农多样性指数	衡量绿地在结构、类型和分布等方面的复杂程度，与公园质量高度相关，类型丰富的空间单元提供给居民参与机会更多	6.79	4.00	10
			C3植被覆盖率	衡量公园内绿色植物覆盖状况	18.14	10.01	4
			C4水体覆盖率	水体覆盖率值越大，表示绿地生态环境更好，绿地质量也越高	8.78	13.74	2
			C5视野开阔度	500 m缓冲区内的天空开阔度值越高，景观环境视觉效果越好	4.41	2.48	13
D配套设施	36.34	29.19	D1公园内部设施密度	衡量公园内部是否有足够的公共服务资源。内部设施密度越大，公园绿地的配套设施越好	19.61	18.18	1
			D2公园内部设施多样性	衡量公园内部是否有丰富的公共服务设施资源，内部设施多样性越丰富，公园绿地的配套设施越好	10.79	6.99	5
			D3内部道路密度	道路的总长度与公园绿地面积的比值，代表公园平均每平方米的道路长度，其值越高，可用于开展活动的空间越大	5.94	4.02	9
E游憩活力	14.64	17.54	E1百度热力度	表征人流量的大小，反映活力度	3.49	3.85	11
			E2网络点评密度	反映公园绿地的使用状况，点评密度越大，公园绿地的使用程度越大，游憩活力越高	9.15	12.28	3
			E3网络评分	反映公园使用后满意度，评分越高，公园绿地游憩活力越高	2.00	1.41	14

1 764 560 条时间成本数据。相比以往建立缓冲区使用街道人口数据的方法，本研究显著提升了精确度。

以《城市绿地规划标准(GB/T 51346—2019)》和相关研究[38–39]为参考，结合太原市公园绿地的实际情况，将公园分为市级、区级和社区级公园，依据公园绿地分级设置要求，将各规模公园绿地的服务半径作为居民可达范围的上限。根据步行速度[40–42]，将居民可接受的步行、骑行、公交和驾车时间阈值分别设定为 15、20、30、30 min。

1.3 研究方法

1.3.1 层次分析–熵值法

通过层次分析–熵值法确定了各类别和指标层权重(表 3)。

层次分析法：分别确定类别层和指标层，并建立层次结构模型。采用两两比较的方式对每一层的评价指标进行比较，构建比较标度数值表，判断各评价指标的重要性。邀请 13 名专家进行打分赋值。打分赋值问卷根据层次分析法的形式设计，衡量尺度划分为 1 ~ 9 九个等级，其中 9、7、5、3、1 分别对应绝对重要、十分重要、稍微重要、同样重要；8、6、4、2 表示重要程度介于相邻的两个等级之间。专家点击电子问卷中相应单元格自动生成比较矩阵。之后使用方根法求取判断矩阵的特征向量，即通过对每一行参数连乘取 n 次方根并归一化，得到该层指标的权重向量 W_i。为判断矩阵一致性，引入最大特征根 λ_{max}，它表示将判断矩阵与权重向量相乘后所得新向量与原权重向量之间的拟合程度，是一致性检验中的核心参数。若判断矩阵完全一致，则有 $\lambda_{max}=n$；偏离越大，则说明判断越不一致。将问卷结果导入 Yaahp 软件，为了避免出现权重系数出现矛盾，引入平均随机一致性指标(RI)值，对判断矩阵进行一致性指标计算，对计算不一致的问卷进行修正。一致性检验的步骤如下：计算矩阵一致性 CR 见公式(1)。当满足 CR > 0.1 时，该层次模型成立；当不满足 CR < 0.1 时，则需要重新构造比较矩阵。以上过程均通过 yaahp 软件进行，一致性指数 CR > 0.1，检验通过。

$$CR=\frac{\lambda_{max}-n}{RI(n-1)} \tag{1}$$

熵值法：熵值法是一种根据指标变异程度来确定权重的客观赋权方法，能够减少层次分析法和专家打分法等主观赋权方法的偏误。原始数据标准化处理由于各变量计量单位、值域范围不同，首先需要通过标准化的方法消除各个变量间的量纲及数量级差异，本文采用极值标准化法，公式如下所示。

正向指标

$$y=\frac{x-x_{min}}{x_{max}-x_{min}}+C \tag{2}$$

负向指标

$$y=\frac{x_{max}-x}{x_{max}-x_{min}}+C \tag{3}$$

式中：x_{min} 是变量当中的最小值，x_{max} 则是变量当中的最大值。C 为正数常量，目的是将坐标轴向右平移 C 个单位，使处理后的数值均为正数，满足熵值法对数据取值范围的基本要求，在本次研究中 C 取 0.000 1。

计算第 j 个指标下第 i 个数值的比重

$$f_{ij}=\frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}y_{ij}}\ (i=1,2,\cdots,m;\ j=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

计算第 j 个指标的熵值

$$H_j=-k\sum_{j=1}^{n}f_{ij}\ln\left(f_{ij}\right),\ 其中 k=\frac{1}{\ln n} \tag{5}$$

计算第 j 个指标的权重

$$W_j=\frac{1-H_j}{n-\sum_{j=1}^{n}H_j},\ \sum_{j=1}^{n}W_j=1 \tag{6}$$

层次分析法–熵值法将主客观赋分法结合，所得权重更具科学性，将层次分析法和熵值法所得权重各乘 0.5，得到综合权重，将各指标归一化后通过权重累加，即可得到各公园类别及指标层权重(表 2)。

1.3.2 综合多出行模式的高斯两步移动搜索法(Multi-mode GA2SFCA)

可达性起源于地理学和交通规划领域，主要研究人们在空间中的移动能力及其对地理空间的影响，

表 3 公园质量综合评价等级划分

Tab. 3 Classification of comprehensive evaluation levels for park quality

评分等级	公园数量	公园名称
好	4	文瀛公园、迎泽公园、龙潭公园、创新公园
较好	14	学府公园、南海子公园、晋阳街公园、西海子公园、街心公园、汾河公园(万柏林区)、晋阳湖公园、和平公园、玉门河公园、森林公园、汾河公园(晋源区)、汾河公园(小店区)、汾河公园(尖草坪区)、龙城公园
一般	12	漪汾公园、饮马河公园、双塔公园、汾河公园(迎泽区)、南寨公园、祥云公园、汾河公园(杏花岭区)、谐园、滨河体育公园、金桥公园、青春缤秀园、和园
较差	11	青年园、东篱公园、迎新公园、小东流公园、摄乐公园、义井公园、千峰北路游园、西寨公园、郑村烈士陵园、北宫花园、凝祥园游园
差	7	秀石园、不锈钢产业园区绿地公园、新村公园、嘉节游园、北排洪沟带状游园、黄坡烈士陵园、兴塢公园

是评估公园绿地空间布局公平性的重要基础。本文应用考虑供需特征的 Multi-mode GA2SFCA 进行计算。基于高德地图服务获取不同时段城市动态综合交通网络下步行、骑行、公共交通及驾车出行的最优时间路径，同时考虑多级搜寻半径和公园质量异质性对可达性的影响，对传统的高斯两步移动搜索法（GA2SFCA）进行改进。为使可达性的测度更加真实准确，本研究将 4 种不同的出行模式整合到模型中[43]，从居住小区尺度探讨太原市中心城区公园绿地的可达性指数。

第一步，计算综合多出行方式下公园绿地的供需比。具体公式如式（7～8）所示。

$$R_j=\frac{P_jw_1+L_jw_2+E_jw_3+F_jw_4+V_jw_5}{\begin{aligned}&\sum_{k\in\{T_{i,j}(W)\leqslant T_0\}}G\left(T_{kj}(W),T_0\right)P_k\cdot\alpha_1+\\&\sum_{k\in\{T_{k,j}(B)\leqslant T_0\}}G\left(T_{kj}(B),T_0\right)P_k\cdot\alpha_2+\\&\sum_{k\in\{T_{kj}(D)\leqslant T_0\}}G\left(T_{kj}(D),T_0\right)P_k\cdot\alpha_3+\\&\sum_{k\in\{T_{kj}(T)\leqslant T_0\}}G\left(T_{kj}(T),T_0\right)P_k\cdot\alpha_4\end{aligned}} \tag{7}$$

$$G(T_{kj}(W),T_0)=\begin{cases}\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}\times\left(\frac{T_{kj}(W)}{T_0}\right)^2}-\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}}\\1-\mathrm{e}^{-\frac{1}{2}}\\0,T_{kj}(W)>T_0\end{cases},T_{kj}(W)\leqslant T_0 \tag{8}$$

式中：R_j为公园绿地 j的供需比；P_j、L_j、E_j、F_j、V_j 分别为公园绿地 j的公园属性、区位条件、景观环境、配套设施和游憩活力，w_1、w_2、w_3、w_4、w_5 代表上述指标的权重（表 2），乘积之和表征公园绿地的吸引力；P_k 是公园绿地 j的居住小区作用域内（$T_{kj}\leqslant T_0$）居住小区 k 的人口数量；T_{kj} 是在步行、骑行、公共交通、驾车 4 种方式下从居住小区 k 中心点到公园绿地 j 入口的出行时间成本；T_0 是公园绿地服务时间阈值；a_1、a_2、a_3、a_4 分别为居住小区 k 内步行、骑行、公共交通、汽车出行的人口比例；G为高斯衰减函数，步行（W）方式下的高斯衰减函数计算公式见式（2），并与骑行、公共交通、驾车的高斯衰减函数计算方法一致。为使研究结果更易于比较，将公园的综合评分结果扩大一百万倍数值。

第二步，计算综合多出行方式下居住小区的公园可达性指数。

$$\begin{aligned}A_k=&P_k\alpha_1\sum_{j\in(T_{kl}(W)\leqslant T_{kl})}G\left(T_{kj}(W),T_0\right)R_j+\\&P_k\alpha_2\sum_{j\in(T_{kl}(B)\leqslant T_0)}G\left(T_{kj}(B),T_0\right)R_j+\\&P_k\alpha_3\sum_{j\in(T_{kl}(D)\leqslant T_0)}G\left(T_{kj}(D),T_0\right)R_j+\\&P_k\alpha_4\sum_{j\in(T_{kl}(T)\leqslant T_0)}G\left(T_{kj}(T),T_0\right)R_j\end{aligned} \tag{9}$$

式中：A_k 表示居住小区 k 公园绿地可达性，T_0 是居民出行心理时间阈值。公园可达性指数 A_k 数值越大，可达性越好。

1.3.3　基于洛伦兹曲线的基尼系数

公平性是指在资源分配、权益保障等方面每个人都能享有平等的机会和权利。基于洛伦兹曲线的基尼系数是评价社会公平的重要指标[44]，最初用于收入分配，现逐渐扩展至教育资源、医疗资源、水资源等多个领域。通过基尼系数反映不同街道居民所得公园绿地的差异。计算公式如下

$$G_u=1-\sum_{k=1}^{n}(P_k-P_{k-1})(C_k+C_{k-1}) \tag{10}$$

$$C_k=\frac{\sum_{i=1}^{k}A_ir_i}{\sum_{i=1}^{n}A_ir_i} \tag{11}$$

式中：G_u 为地理单元 u（区或街道）的绿地公平性指数；n 为地理单元 u 内的小区总数；k 为小区点的绿地可达性按照从小到大进行排序后的第 k 个小区点，A_i 为小区点 i 的绿地可达性值；r_i 为小区 i 的人口；C_k 是从小区点 1 到小区点 k 的绿地可达性与小区点人口乘积的累积比例，$C_0=0$，$C_n=1$；P_k 为从小区点 1 到小区点 k 的人口累积比例，$P_0=0$，$P_n=1$。$G_u\leqslant 0.2$ 时，公园绿地分配高度平均；$0.2<G_u\leqslant 0.3$ 时，公园绿地分配相对平均；$0.3<G_u\leqslant 0.4$ 时，公园绿地分配产生一定差距；$0.4<G_u\leqslant 0.5$ 时，公园绿地分配差距较大；$G_u>0.5$ 时，公园绿地分配差距悬殊，不公平程度严重。

1.3.4　基于 Moran's *I* 的空间自相关

空间自相关主要用于研究事物在空间分布上的依赖关系，度量空间的集聚程度。基于 Moran's *I* 研究公园绿地可达性的空间集聚差异，其中全局 Moran's *I* 用于整体分析空间数据是否出现聚集或者异常值，局部 Moran's *I* 则在全局 Moran's *I* 基础上进一步分析空间数据聚集或异常值出现的区域。Moran's *I* 的取值范围为−1～1，正值表示空间数据整体呈正相关（聚集）趋势，即存在可达性高−高、高−低、低−高、低−低 4 种聚集情况；负值表示空间数据整体呈负相关（离散）趋势，即可达性聚集情况不明显，随机性较大；0 则表示无空间相关性。

2　结果与分析

2.1　公园质量评价

从公园属性、区位条件、景观环境、配套设施和游憩活力 5 个方面对 48 个城市公园评分，并采用“自然间断点分级法”，将公园绿地社会服务分为“好”、“较好”、“一般”、“较差”和“差”5 级。结果表明，评分等级“较差”和“差”的公园有 30 个，占比 62.5%（表 3），可见太原市公园绿地质量总体表现

一般。

秀石园、不锈钢产业园区绿地公园、新村公园、嘉节游园、北排洪沟带状游园、黄坡烈士陵园和兴堰公园的质量评价结果最低。从公园属性来看，黄坡烈士陵园以纪念性用途为主，其游憩功能较为单一，缺乏具有较强吸引力的娱乐或休闲设施。从区位条件来看，嘉节游园、北排洪沟带状游园和兴堰公园位置偏远，周边公共服务设施密度较低，可达性水平不高。从景观环境来看，秀石园、新村公园和北排洪沟带状游园内部景观组成较为单调，仅包含 3 ~ 5 种用地类型，景观多样性不足。在配套设施方面，这些公园普遍存在座椅、厕所、饮水点等基础设施配置不足的问题，整体服务功能较弱。综合各指标维度分析，上述公园在功能、区位、景观与设施等方面均存在一定短板，影响了其综合质量评价表现。

2.2 公园绿地可达性评价

2.2.1 公园绿地可达性评价

太原城市公园绿地可达性高值集中于汾河两岸，沿东西方向呈递减趋势。可达性值处于中等偏上的居住区占比 33.5%，集中于中环街内部(图 4)；可达性最高值分布在尖草坪区森林公园和南寨公园附近的街道(图 5)，如向阳镇、南寨街道、新城街道、迎新街道和古城街道等 16 个街道的可达性值均高于均值；可达性低值分布在外围区域，尤其是迎泽区东部、晋源区和小店区南部，公园绿地供给能力不足。从

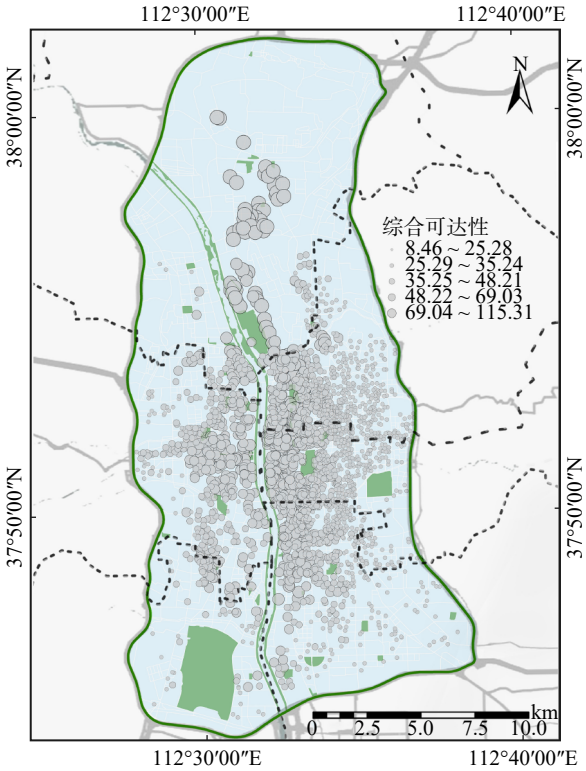


图 4 居民点可达性空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of settlement accessibility

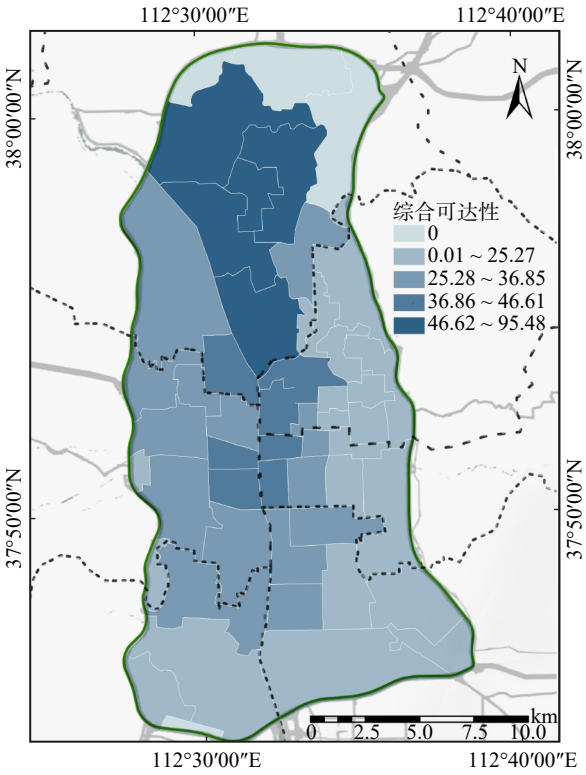


图 5 街道可达性空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of street accessibility

行政区层面看，尖草坪区可达性值最高(60.97)，且高可达性街道占比最大，晋源区可达性值最低(25.97)，人口数量密集但公园数量少，各行政区之间差距较大(表 4)。

可达性得分较高的尖草坪区公园绿地分布较为均匀，尖草坪区社区公园整体可达性较好，其次为综合公园。可能的原因是 2012 年太原市园林局编制的《太原市城市绿地系统规划》(2012—2020)中明确提出建设以汾河为景观依托，河渠为纽带，多元渗透的动态绿地网络系统。汾河作为太原的主要河流，其两岸的自然景观与绿化条件为公园绿地建设提供了良好基础。同时中环街内部和沿河区域的交通基础设施较为完善，便于周围居民到达，且该区域属于太原市旧城区，居住区密集但人口数量较少(图 1)，促使汾河两岸公园绿地可达性较高。此外，市园林局积极推进尖草坪区北部(包括森林公园、南寨公园等)社区公园和综合公园绿地建设，并依托改建契机发展了较完备的交通系统。该区域居住人口较少，且拥有森林公园、南寨公园等面积大、服务能力强的公园，供大于求，因此可达性值在各行政区中最高。

迎泽区东部、晋源区和小店区南部的可达性得分较低，公园绿地分布不均，综合公园整体可达性得分较低。可能的原因是这些区域属于太原市规划的新区，多为高层建筑，人口密度较高，但由于土地利用类型多样化(如农业用地、工业用地)且经济发展

表 4　各行政区街道可达性等级划分

Tab. 4　Classification of street accessibility levels for each administrative district

行政区	街道可达性等级				
	低可达性	较低可达性	中等可达性	较高可达性	高可达性
尖草坪区		柴村街道、尖草坪街道	光社街道	汇丰街道	南寨街道、向阳镇、新城街道、迎新街道、古城街道
杏花岭区	中涧河镇、大东关街道、职工新街街道、杨家峪街道	涧河街道、敦化坊街道、坝陵桥街道、杏花岭街道	鼓楼街道	三桥街道、巨轮街道	
万柏林区	神堂沟街道	东社街道、南寨街道	兴华街道、长风西街街道、小井峪街道、万柏林街道、和平街道	千峰街道、下元街道	
迎泽区	桥东街道、文庙街道、郝庄镇		迎泽街道、柳巷街道	庙前街道	
小店区	黄陵街道、北营街道	营盘街道、坞城街道、龙城新区	太原高新技术产业开发区、平阳路街道		
晋源区	罗城街道	金胜镇	义井街道		

水平相对较低，导致公园绿地数量少、布局相对稀疏，造成公园绿地供给与居民需求错配，供不应求，因此可达性值最低。此外，晋阳湖公园虽然面积较大，但出入口布置较少且集中于一侧，给居民出行带来不便，因此可达性也较低。未来城市规划应重点增加迎泽区东部、晋源区和小店区南部公园绿地，尤其是综合公园的数量，合理布局出入口位置，尽量选择靠近人口密集区、交通枢纽或公共交通站点的位置，同时确保分布均匀以减少拥堵，提高居民进出公园的便利性。

2.2.2　公园绿地可达性空间集聚差异

基于 Moran's *I* 的空间自相关分析结果显示，在社区尺度下 Moran's *I* 为 0.503，在街道尺度下 Moran's *I* 为 0.359，均为正值，$P < 0.05$，表明各居住区和街道与公园绿地可达性指数之间存在显著的空间正相关性和空间聚集性。从空间分布上看，各公园可达性空间集聚差异明显，可达性总体分布不均(图 6、图 7)。

在居住区尺度下，低–低聚类主要集中于研究区边缘欠发展片区，高–高聚类主要集中于高速发展的中心地带，两类占据了研究区的绝大部分区域。此外，空间异常值分布较为紧密，其中高–低聚类表示高值被低值包围，低–高聚类表示低值被高值包围，二者集中分布于迎泽区中心部位(图 7)。这表明公园绿地供给水平与居民需求之间存在显著不平衡，可能原因为包括局部地区公园绿地供给能力不足、公交等交通设施条件不完善以及与周边区域差异较大。在街道尺度下，大部分空间聚类状态不显著，高–高聚类和低–高聚类集中于尖草坪区。南寨街道及其周边相邻街道中，高–高聚类尤为聚集，该街道内部配备较多公园，整体呈现供大于求的状态(图 7)。而低–高聚类分布于尖草坪区外围的柴村街道，原因是该街道人口密度较高，但公园绿地供给不足，且邻近街道拥有较多公园绿地。由此可见，尖草坪区公园绿地供需失调问题突出，亟需改进。

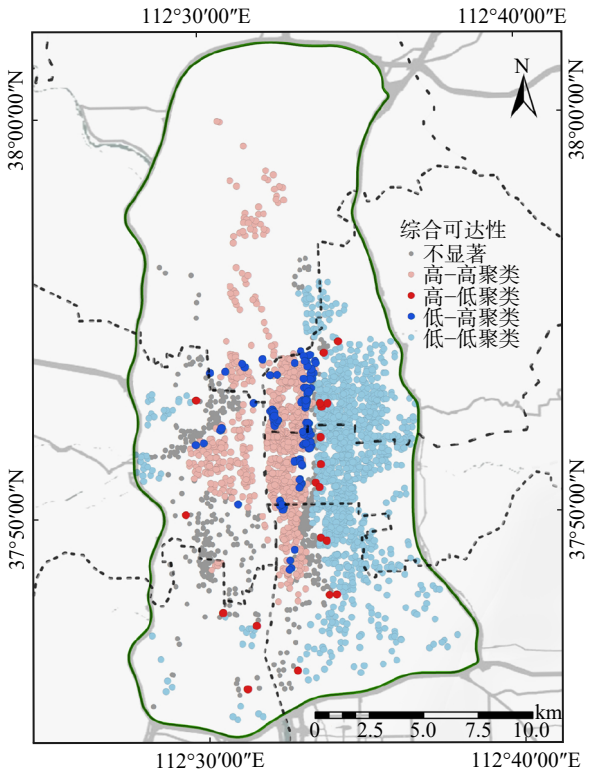


图 6　居民点可达性聚类空间格局

Fig. 6　Spatial pattern of residential accessibility clustering

2.3　公园绿地公平性评价

太原城市绿地公平性指数为 0.243，整体处于相对平均状态。图 8 反映了各行政区之间公园绿地资源的差异：万柏林区公园绿地资源公平性指数最低(0.154)，表明该区公园绿地分配最为公平；尖草坪区公平性指数最高(0.269)，表明该区公园绿地供需失衡。尖草坪区北部人口密度较低，但公园面积大且数量相对较多，较少人口享有较多绿地资源。可能的原因是，尖草坪区大部分位于城市扩展的边缘区域，尚未完全开发和居住化。这意味着未来可能会有更多人口流入，但目前居民数量尚未达到绿地供需平衡水平。对于绿地资源较少的居民而言，前 10% 和 20% 的居民仅有约 4.9% 和 10.9% 的公园绿

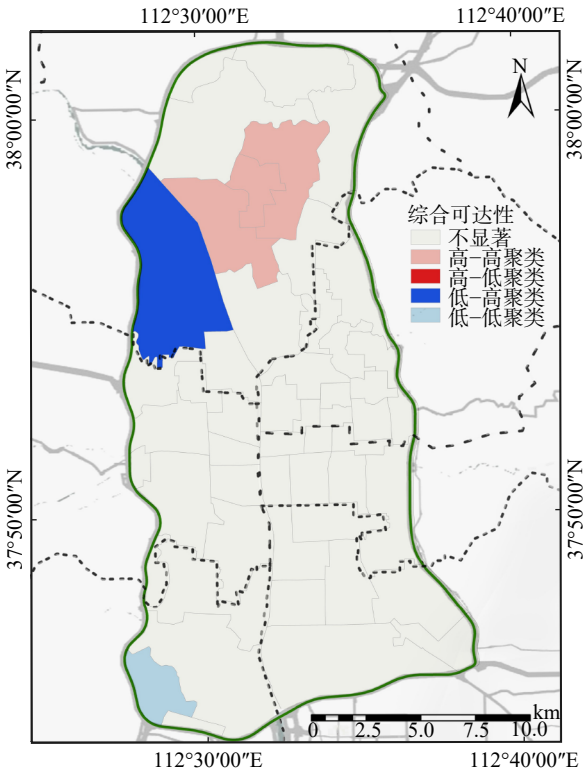


图 7 街道可达性聚类空间格局

Fig. 7 Spatial pattern of street accessibility clustering

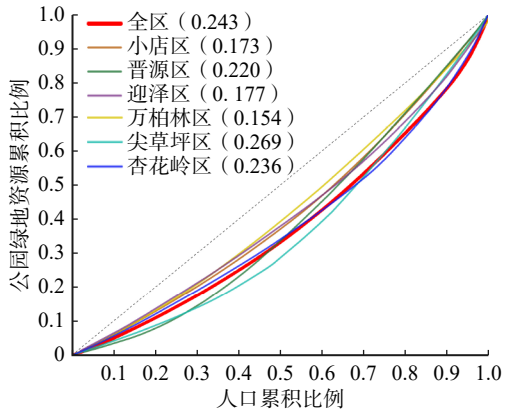


图 8 全区及各行政区公园绿地资源分配洛伦兹曲线

Fig. 8 Lorenz curves of park green space resource allocation for the entire area and each administrative district

地；对于绿地资源较多的居民，前 10% 和 20% 分别享有 21.6% 和 34.8% 的公园绿地，而可见居民拥有的绿地资源存在一定差距。

为进一步探究公园绿地的空间特征和区域差异，以街道为单元展开研究，通过 ArcGis 10.6 采用“自然间断点分级法”将数据重分类为 5 级（图 9）。整体来看，太原城市街道绿地公平性值为 0.097，近 95.74% 的街道基尼系数小于 0.2，表明各街道间公园绿地公平性较高，资源分配高度均衡。尖草坪区的向阳镇、南寨街道、大东关街道、下元街道和晋源街道基尼系数较低，街道内部绿地可达性差距小，因此公平性较高；而晋源区的金胜镇和杏花岭区的巨

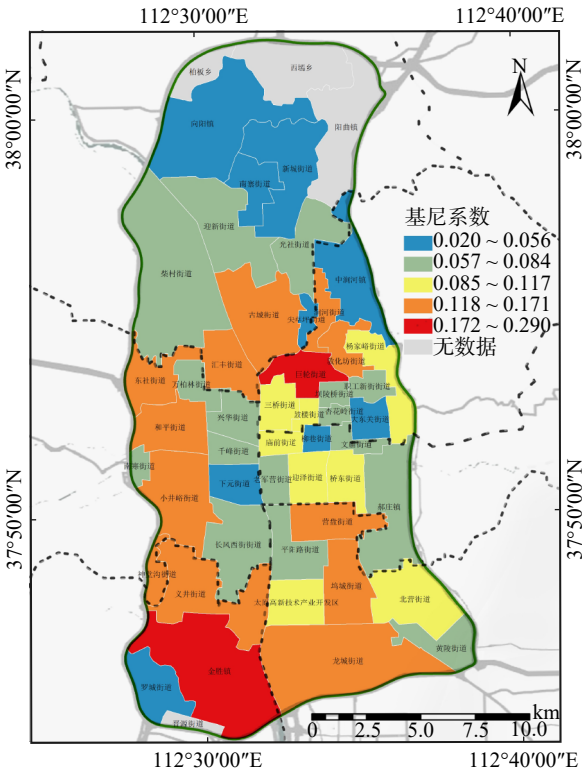


图 9 街道基尼系数空间分布格局

Fig. 9 Spatial distribution pattern of the Gini coefficient for streets

轮街道基尼系数较高，原因在于，金胜镇的晋阳湖公园和西寨公园吸引力指数差距较大，导致居民可获得的绿地资源差异显著；位于杏花岭区的巨轮街道内部缺少公园绿地，公园绿地可达性较差，因此整体公平性较低。

3 结论与讨论

本文基于谷歌地图、POI、二手房交易平台及居住区人口等数据，在居住区与街道尺度下，从公园质量异质性出发，构建了包括公园属性、区位条件、景观环境、配套设施与游憩活力 5 大类 17 项供给侧指标，并结合步行、骑行、公共交通与驾车的多交通模式需求侧变量，综合评估太原市公园绿地的可达性与公平性。

太原城市公园绿地质量总体处于中等水平。文瀛公园、迎泽公园、龙潭公园和创新公园的质量评价最高；嘉节游园、北排洪沟带状游园、黄坡烈士陵园和兴墕公园的质量评价最低。各公园绿地质量的差异与地理位置和城市规划密切相关。质量较高的公园多为历史名园，生态本底条件较好，基本分布在中环街以内，因地理位置优越、经济发展水平高、交通便利且文化资源丰富，质量普遍较高。Wu 等[23]研究表明综合公园和历史名园相较于社区公园和游园质量更高，与本文研究结果一致。质量较差的公园多为社区公园和游园，位于研究区边缘地带，受限于用

地条件和经济投入,配套设施简陋,难以满足居民需求[10, 39]。同时,这些公园位置偏远、经济发展滞后、交通不便且文化吸引力不足,质量相对较低,与黄玖菊等[2]研究结果一致。

太原城市公园绿地可达性空间差异明显。公园绿地总体分布不均,中心城区可达性整体优于郊区,与周末等[45]研究结果一致。可达性较高的区域集中在汾河两岸,作为城市核心自然景观带,汾河周边在城市规划中得到了重点发展,绿地资源丰富,交通设施完善。可达性较低的区域集中在外围,特别是迎泽区东部、晋源区和小店区南部。公园绿地供需失衡,北部区域供大于求,宜居性较好;东部和南部人口密集,公园数量不足,资源竞争激烈。这种差异主要由城市规划、经济发展水平和交通便利性等因素决定。北部新城在规划时预留了更多绿地,交通便利;而东部和南部经济发展相对滞后,交通尤其是公交系统还不完善,公园绿地数量少,无法满足高密度人口需求。太原城市公园绿地分异明显。太原城市公园绿地整体分布相对均衡,但各行政区之间存在差异。万柏林区公园绿地分布最为平均,尖草坪区供需失衡,分异明显。尖草坪区的向阳镇、南寨街道、大东关街道、下元街道和晋源街道公平性较高,公园绿地分配高度均衡;晋源区的金胜镇和杏花岭区的巨轮街道公平性较低,这些街道建设年代较早,早期城市规划公园绿地数量不足,而现今居住区密集、人口增加,需要优先优化绿地布局。

近年来太原市在公园建设上取得了较大的成绩,公园绿地建成数量整体呈上升趋势。针对可达性和公平性方面的现有不足,今后可以在以下 3 个方面提升。

(1)提升公园绿地质量,满足居民游憩需求。公园质量参差不齐是导致不公平的主要原因[24]。尖草坪区拥有 5 个评分“较差”、4 个评分“差”的公园,在景观环境和配套设施方面需重点提升。北排洪沟带状游园、黄坡烈士陵园可利用墙面、栏杆等空间增加垂直绿化,提高三维绿量;嘉节游园、北排洪沟带状游园、黄坡烈士陵园和兴堰公园需完善园内基础设施,针对不同年龄段居民需求完善园内基础设施如增设健身器材、儿童游乐设施、休闲座椅和遮阳棚等,并及时更新老旧且存在安全隐患的设施,以提高公园吸引力。郑村烈士陵园、北排洪沟带状游园、兴堰公园、黄坡烈士陵园游憩活力较低,可通过定期举办文化活动提升公园活力。上述建议可结合太原市《关于贯彻新发展理念全面提升城镇园林绿化水平的意见》(2022)同步实施,具有较强的可操作性。

(2)改善公共交通,提升公园绿地可达性。结合《关于印发山西省“十四五”现代综合交通运输体系发展规划的通知》(2021),对于青年园、创新公园、不锈钢产业园区绿地公园等距离市中心较远且交通欠发达的绿地,需优化太原市公交线路规划,增设直达公园的公交线路或调整现有线路的路线,扩大其覆盖范围;对于青春缤秀园、和园、摄乐公园等位于市中心但距离公交站较远的绿地,需根据客流需求和道路通行能力,在靠近公园的主要入口处增设公交站点,缩短步行距离[46]。对于迎泽公园、双塔公园等知名度较高且人流量较大的绿地,应提供综合换乘设施,方便不同出行方式,从而优化公共交通网络连接,提升绿地可达性[26]。

(3)优化绿地空间布局,体现布局公平性。从图 7 和图 8 可以看出,迎泽区东部、晋源区和小店区南部的远郊地区属于供给盲区,可以结合太原市城市公园新建改建契机,合理进行多尺度公园增补[11];杏花岭区的巨轮街道缺少公园绿地,可以选择适宜地段增设面积大于 1 hm^2 的社区公园[47],缓解供需失衡现状;对于尖草坪区古城街道、汇丰街道,万柏林区东社街道、和平街道、小井峪街道、神堂沟街道,杏花岭区敦化坊街道、涧河街道,小店区营盘街道、坞城街道、龙城街道,可利用空置地穿插口袋公园、街心花园等微型绿地[24],形成东南部分的绿地空间新格局,进一步提升公平性。

《太原市国土空间总体规划》(2021—2035 年)提出“构建‘市级、区级、居住区’三级城市公园绿地体系,按照‘300 米见绿、500 米入园’的标准,优化公园绿地布局,提升公园服务效率。到 2035 年,公园绿地、广场步行 5 分钟覆盖率达到 90% 以上。”对比公园绿地布局现状,该规划增加了尖草坪区的向阳绿轴公园、向阳西园、向阳东园、太白铁路遗址公园,杏花岭区的牛驼寨烈士陵园、北沙公园,万柏林区的西山中央公园、矿山公园,迎泽区的白云寺公园、北齐遗址公园、东山大墓遗址公园、枣园中央公园,小店区的南坪头公园、环城公园,晋源区的千峰绿轴公园、晋阳古城公园,共计 16 个公园,与本研究提出的各区均需增加公园数量相吻合。但在空间布局中晋源区和小店区南部远郊地区以及尖草坪区古城街道、汇丰街道等外围区域尚缺少公园绿地,还需合理增加。因此,本研究结果为绿地系统规划中公园绿地的增补和落位提供借鉴与参考,同时有助于优化绿地资源的空间配置,为绿地公平性及未来居民生活质量提升提供依据。

本研究的创新点主要体现在获取精确到居住区的人口数据,引入了公园绿地质量评价指标,并探讨了步行、骑行、公交、驾车综合多出行模式下的可达

性。研究不足之处在于：在获取网络点评数据时，推测其使用者更多为中青年，老年人和儿童点评数量较少，研究群体可能较单一。基于本研究，提出未来展望如下：(1)考虑到老人、儿童对公园绿地需求的差异，在未来研究中可以结合线下问卷补全该年龄段人群的评价，对不同人群的可达性差异进行量化；(2)可运用多种评价分析方法，在综合两步移动搜索法的基础上叠加缓冲区分析，进一步从公园角度分析不同类型公园的可达性差异。

参 考 文 献

[1] Maas J, Verhei J R, Groenewegen P P, et al. Green space, urbanity, and health : how strong is the relation [J]. Journal of Epidemiology and Community Health, 2006, 60(7): 587−592.

[2] 黄玖菊, 林伊婷, 陶卓霖, 等. 社会公平视角下深圳公园绿地可达性研究 [J]. 地理科学, 2022, 42(5): 896−906.
Huang J J, Lin Y T, Tao Z L, et al. Evaluation of park green space accessibility in Shenzhen from the perspective of social equity[J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(5): 896−906.

[3] Li H, Na T, Yu B L, et al. Are the accessibility and facility environment of parks associated with mental health? A comparative analysis based on residential areas and workplaces[J]. Landscape and Urban Planning, 2023, 237: 104807.

[4] 付彦荣, 贾建中, 王洪成, 等. 新冠肺炎疫情期间城市公园绿地运行管理研究 [J]. 中国园林, 2020, 36(7): 32−36.
Fu Y R, Jia J Z, Wang H C, et al. Research on the operational management of urban parks and green spaces during the novel coronavirus pneumonia outbreak[J]. Chinese Landscape Architecture, 2020, 36(7): 32−36.

[5] 李肇旗, 冶建明, 马恒卓, 等. 疫情防控常态化下居民公园出行意愿影响因素研究: 一个条件过程模型检验 [J]. 中国园林, 2023, 39(5): 104−108.
Li Z Q, Ye J M, Ma H Z, et al. Research on the influencing factors of residents' willingness to park travel under the normalization of epidemic prevention and control: test of a conditional process model[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(5): 104−108.

[6] 杨高原, 余兆武, 张金光, 等. 暴露生态学视角下绿地暴露健康效益研究进展 [J]. 生态学报, 2024, 44(14): 5914−5924.
Yang G Y, Yu Z W, Zhang J G, et al. Research progress on the health benefits of green space exposure from the perspective of exposure ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(14): 5914−5924.

[7] Feng J, Zhong Y. The spatial structure of urban residents' quality of life in Changzhou based on residential environment[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(6): 1237−1255.

[8] Yang X, Wang D, Jia F. Exploring the disparities in park access through mobile phone data: evidence from Shanghai, China[J]. Landscape and Urban Planning, 2019, 181: 80−91.

[9] 刘琴琴, 李明诗, 王楠, 等. 合肥市公园绿地空间可达性不同度量方法的比较 [J]. 生态学杂志, 2023, 42(9): 2276−2285.
Liu Q Q, Li M S, Wang N, et al. Differences in measurement methods for quantifying spatial accessibility of park green spaces in Hefei City[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(9): 2276−2285.

[10] Xu M Y, Xin J, Su S L, et al. Social inequalities of park accessibility in Shenzhen, China: the role of park quality, transport modes, and hierarchical socioeconomic characteristics[J]. Journal of Transport Geography, 2017, 62: 38−50.

[11] 孟露, 李倓. 基于可达性的北京市海淀区绿色开放空间供需关系分析和优化方向研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(2): 108−119.
Meng L, Li L. Relationship between supply and demand of green open space in Haidian District of Beijing based on accessibility[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(2): 108−119.

[12] Li Z, Diaoxia H E, Jian Z. Spatial distribution and factors influencing elderly care service facilities based on accessibility evaluation: taking Wuxi City as an example[J]. Journal of Resources and Ecology, 2024, 15(1): 130−139.

[13] Xu B C, Pan J H. Spatial distribution characteristics of national protected areas in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(12): 2047−2068.

[14] 姚晓洁, 陈璐. 皖北地区城市公园绿地服务质量评价研究: 以蚌埠市为例 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(6): 242−249.
Yao X J, Chen L. Service quality evaluation of urban park green space in northern Anhui Province: a case study of Bengbu City[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(6): 242−249.

[15] Dai D J. Racial/ethnic and socioeconomic disparities in urban green space accessibility: where to intervene?[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 102(4): 234−244.

[16] 刘常富, 李小马, 韩东. 城市公园可达性研究: 方法与关键问题 [J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5381−5390.
Liu C F, Li X M, Han D. Accessibility analysis of urban parks: methods and key issues[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(19): 5381−5390.

[17] Radke J, Mu L. Spatial decompositions, modeling and mapping service regions to predict access to social programs[J]. Geographic Information Sciences, 2002, 6(2): 105−112.

[18] Picavet H S J, Milder I, Kruize H, et al. Greener living environment healthier people? Exploring green space, physical activity and health in the Doetinchem cohort study[J]. Preventive Medicine, 2016, 89: 7−14.

[19] Veitch J, Abbott G, Kaczynski A T, et al. Park availability and physical activity, TV time, and overweight and obesity among women: findings from Australia and the United States[J]. Health & Place, 2016, 38: 96−102.

[20] Julia M W B, Laura R A, Eugenia H, et al. Exploring the quality

of urban green spaces and their association with health: an epidemiological study on obesity using street view technology[J]. Public Health, 2024, 237: 44−50.

[21] Akpinar A. How is quality of urban green spaces associated with physical activity and health?[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2016, 16: 76−83.

[22] Zhang Y Z, Luo F B. Linkages among socio-economic status, green space accessibility, and health outcomes: an environmental justice perspective in Australia[J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 114: 105784.

[23] Wu N, Tian Q S, Cui M Y, et al. A delicacy evaluation method for park walkability considering multidimensional quality heterogeneity[J]. Journal of Transport Geography, 2023, 112: 103688.

[24] Zhang R, Peng S J, Sun F Y. Assessing the social equity of urban parks: an improved index integrating multiple quality dimensions and service accessibility[J]. Cities, 2022, 129: 103839.

[25] 李嘉欣, 陈兵, 章银柯, 等. 城市公园绿地可达性与社会公平性研究 [J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(4): 820−829.
Li J X, Chen B, Zhang Y K, et al. Accessibility and social equity of urban parks[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(4): 820−829.

[26] 汪淼, 陈振杰, 周琛. 城市绿色开敞空间可达性研究: 以南京市中心城区为例 [J]. 生态学报, 2023, 43(13): 5347−5356.
Wang M, Chen Z J, Zhou C. Accessibility of urban green open space based on weighted two-step floating catchment area method: a case study of the central district of Nanjing City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(13): 5347−5356.

[27] 王敏, 宋昊洋, 汪洁琼. 城市公园总体满意度影响因素的宏微观比较与供需智慧调控: 以江苏省昆山市为例 [J]. 风景园林, 2022, 29(10): 109−114.
Wang M , Song H Y , Wang J Q. A macro-micro comparison of factors influencing urban park overall satisfaction and intelligent regulation of supply and demand: a case study of Kunshan City, Jiangsu Province[J]. Landscape Architecture, 2022, 29(10): 109−114.

[28] 幸丽君, 杜赛南, 仝照民, 等. 环境正义视阈下城市公园绿地时空可达性及其影响因素 [J]. 生态学报, 2023, 43(13): 5370−5382.
Xing L J, Du S N, Tong Z M, et al. Spatial and temporal accessibility of urban green space and its influencing factors in Wuhan from the perspective of environmental justice[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(13): 5370−5382.

[29] Chen W, Christian A, Christina V H. The elderly in green spaces: exploring requirements and preferences concerning nature-based recreation[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 38: 582−593.

[30] Xing L J, Liu Y F, Liu X J. Measuring spatial disparity in accessibility with a multi-mode method based on park green spaces classification in Wuhan, China[J]. Applied Geography, 2018, 94: 251−261.

[31] 任家怿, 王云. 基于改进两步移动搜索法的上海市黄浦区公园绿地空间可达性分析 [J]. 地理科学进展, 2021, 40(5): 774−783.
Ren J Y, Wang Y. Spatial accessibility of park green space in Huangpu District of Shanghai based on modified two-step floating catchment area method[J]. Progress in Geography, 2021, 40(5): 774−783.

[32] 陈津, 游巍斌, 何东进, 等. 福州市中心城区公园绿地的供需关系及空间异质性 [J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(6): 1300−1310.
Chen J, You W B, He D J, et al. Supply and demand relationship and its spatial heterogeneity of urban parks in downtown area of Fuzhou[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2023, 40(6): 1300−1310.

[33] 岳凡煜. 基于区位熵与可达性的太原市中心城区城市公园服务绩效评价与优化研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
Yue F Y. Research on performance evaluation and optimization of urban park service in Taiyuan City center based on location entropy and accessibility [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022.

[34] 颜祯, 徐敏, 李擘, 等. 基于 POE 的太原市中心城区公园绿地市民使用偏好和满意度 [J]. 中国城市林业, 2023, 21(3): 117−124.
Yan Z, Xu M, Li B, et al. Citizens' preference and satisfaction of park green spaces in the central urban area of Taiyuan based on POE[J]. Chinese Urban Forestry, 2023, 21(3): 117−124.

[35] 雒峰. 太原城市绿地景观格局时空动态变化研究及其驱动力分析 [D]. 太谷: 山西农业大学, 2017.
Luo F. Study on temporal and spatial dynamics of urban green space landscape pattern and its driving forces in Taiyuan [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2017.

[36] 王思睿. 景观游憩服务结构化指标库及应用 [D]. 北京: 北京大学, 2020.
Wang S R. An indicator pool for assessing recreational services [D]. Beijing: Peking University, 2020.

[37] Knobel P, Dadvand P, Alonso L, et al. Development of the urban green space quality assessment tool (RECITAL)[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 57: 126895.

[38] 王子琳, 李志刚, 程晗蓓. 中国大城市公园绿地可达性的公平性研究: 以武汉市中心城区为例 [J]. 地理科学进展, 2022, 41(4): 621−635.
Wang Z L, Li Z G, Cheng H B. The equity of urban park green space accessibility in large Chinese cities: a case study of Wuhan City[J]. Progress in Geography, 2022, 41(4): 621−635.

[39] 杨文越, 李昕, 陈慧灵, 等. 基于多出行模式两步移动搜索法的广州多尺度绿地可达性与公平性研究 [J]. 生态学报, 2021, 41(15): 6064−6074.
Yang W Y , Li X , Chen H L, et al. Multi-scale accessibility of green spaces and its equity in Guangzhou based on multi-mode two-step floating catchment area method (M2SFCA)[J]. Acta

Ecologica Sinica, 2021, 41(15): 6064−6074.

[40] 徐欣. 城市生态游憩空间公平性评价及优化研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2023.
Xu X. Research on the equity evaluation and optimization of urban ecological recreation space: take Wuhan urban development area as an example [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2023.

[41] 赵欣悦. 基于 GIS 的哈尔滨市中心城区公园绿地可达性研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
Zhao X Y. GiS-based accessibility analysis of park green space in downtown Harbin [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023.

[42] 雷芸, 吴岩, 李孟颖. 城市交通对北京大型城市公园假日游憩出行利用的影响作用研究 [J]. 中国园林, 2016, 32(3): 47−51.
Lei Y, Wu Y, Li M Y. Study on the influence of urban transportation to holiday recreation use of large urban parks in Beijing[J]. Chinese Landscape Architecture, 2016, 32(3): 47−51.

[43] 刘锂莹. 儿童友好视角下广州市 13 个儿童公园空间布局公平性评价研究 [D]. 广州: 广州大学, 2023.
Liu L Y. A study on the fairness evaluation of spatial layout of 13 children’s parks in Guangzhou from the perspective of child-friendliness [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023.

[44] Lucas K, van Wee B, Maat K. A method to evaluate equitable accessibility: combining ethical theories and accessibility-based approaches[J]. Transportation, 2016, 43: 473−490.

[45] 周末, 王兰会. 公园绿地社会公平性变动及其驱动因素: 基于人口老龄化视角 [J]. 中国园林, 2023, 39(2): 62.
Zhou M, Wang L H. Change of park green space social equity and its driving forces: from the perspective of population aging[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(2): 62.

[46] 邱文, 贺利平, 钟乐, 等. 南昌市城市公园可达性综合评价 [J]. 风景园林, 2023, 30(4): 78−86.
Qiu W, He L P, Zhong L, et al. Comprehensive evaluation of accessibility of urban parks in Nanchang[J]. Landscape Architecture, 2023, 30(4): 78−86.

[47] 徐振, 王健慧, 陈妍, 等. 存量更新背景下综合公园−周边社区步行可达性评估及微更新分析: 以石家庄市长安公园为例 [J]. 中国园林, 2023, 39(11): 47.
Xu Z, Wang J H, Chen Y, et al. Evaluating pedestrian accessibility and adaptive retrofit for comprehensive parks and surrounding communities: an existing stock based case study of Chang’an park in Shijiazhuang City[J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(11): 47.

（责任编辑 范 娟
责任编委 李 雄）