

DOI: 10.5846/stxb202203290782

幸丽君, 杜赛南, 仝照民, 张蕾. 环境正义视阈下城市公园绿地时空可达性及其影响因素. 生态学报, 2023, 43(13): 5370-5382.

Xing L J, Du S N, Tong Z M, Zhang L. Spatial and temporal accessibility of urban green space and its influencing factors in Wuhan from the perspective of environmental justice. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(13): 5370-5382.

环境正义视阈下城市公园绿地时空可达性及其影响因素

幸丽君^{1,2}, 杜赛南^{2,*}, 仝照民³, 张蕾^{1,2}

1 湖北大学区域开发与环境响应湖北省重点实验室, 武汉 430062

2 湖北大学资源环境学院, 武汉 430062

3 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430072

摘要:从环境正义视阈出发, 重点关注选择步行和私家车出行的居民群体, 采用高斯两步移动搜索(2SFCA)模型和基尼系数测度 2000—2018 年武汉市中心城区公园绿地可达性和公平性的时空差异, 并运用梯度提升决策树(GBDT)模型进一步探析交通因素、用地因素和社会经济因素对公园绿地可达性的非线性影响及其阈值效应, 以为公平导向下的城市绿地规划提供相关参考。结果表明: (1) 研究时段内公园绿地供给与需求均呈现较快的增长, 居民出行成本在逐渐降低; (2) 居民选择两种交通方式出行的公园绿地可达性高值区域均呈现扩大趋势, 主要分布在长江两岸、湖泊和大型风景区周围, 但是不同时期步行方式可达性低值区域均多于车行; 同时, 基尼系数显示研究时段内两种交通出行的居民享受公园绿地服务的机会均不公平, 且步行可达不公平程度远大于车行; (3) 用地结构和社会经济因素对不同时期公园绿地服务可达性存在协同性影响, 而交通因素是不同交通方式出行可达性存在差异的主要原因; (4) 非线性关系图显示关键变量的阈值效应能够为城市绿地精细化规划与管理提供量化参考。

关键词:环境正义; 公园绿地; 高斯 2SFCA 模型; GBDT 模型; 武汉市中心城区

Spatial and temporal accessibility of urban green space and its influencing factors in Wuhan from the perspective of environmental justice

XING Lijun^{1,2}, DU Sainan^{2,*}, TONG Zhaomin³, ZHANG Lei^{1,2}

1 Hubei Key Laboratory of Regional Development and Environmental Response, Hubei University, Wuhan 430062, China

2 Faculty of Resources and Environment, Hubei University, Wuhan 430062, China

3 School of Resource and Environment Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: From the perspective of environmental justice, this study focuses on residents who choose to walk or travel by private car, and uses Gaussian-based two-step floating catchment area (2SFCA) model and Gini coefficient to measure the spatio-temporal disparity of the accessibility and equity of PGS in Wuhan's central urban area from 2000 to 2018. The non-linear influence and threshold effect of traffic factors, land use factors and socio economic factors on the accessibility of PGS are further analyzed by using the Gradient Boosted Decision Tree (GBDT) model, which is aimed at providing relevant reference for urban green space planning under the guidance of equity. The results showed that: (1) The supply and demand of PGS increased rapidly and the travel cost of residents decreased gradually during the study period; (2) The areas with high accessibility of PGS in two modes were expanded, and it was mainly distributed around the banks of the

基金项目:教育部人文社科基金(21YJJCZH185); 湖北省自然科学基金(2020CFB483); 湖北省教育厅哲学社会科学研究项目(19Q013)

收稿日期:2022-03-29; **网络出版日期:**2023-03-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dsnhubei@163.com

Yangtze River, lakes and large scenic areas, but the areas with low accessibility by walking were more than those of driving in different periods. Meantime, the Gini coefficient showed that residents enjoyed inequity opportunities to park green space services by walking and driving, and the degree of inequity by walking was much greater than that of driving; (3) Land use structure and socio economic factors had synergistic effects on the accessibility of PGS in different periods, and traffic factors were the main reason for the difference in accessibility between different modes; (4) The non-linear diagram showed that the threshold effect of key variables could provide a quantitative reference for the refined planning and management of urban green space.

Key Words: environmental justice; park green space; The Gaussian 2SFCA model; The GBDT model; Wuhan urban center

公园绿地是城市中面向居民开放的以休闲游憩为主要功能,同时具有景观生态、观赏美化、文化科普传承和防灾避难等综合功能的城市绿地^[1]。然而,已有研究均证实在大多数城市绿地呈现不均衡分布,且弱势的社会群体享有更少的绿地服务,进而形成了环境正义问题^[2-4]。“环境正义”早期关注的是分布在社会弱势群体附近有毒排放设施、废物堆积场和其他环境危害的分配^[5-6],同时倡导需要考虑不同社区的需求来公平分配危害和便利设施^[7]。当前环境正义研究主要关注不同社会属性群体享有公共服务的公平性,尤其是城市绿地^[8-10]。由于对环境正义议题的日益关注,努力为居民提供充足和公平的城市绿地服务也因此成为城市规划者的重要目标。

传统的公园绿地参数仅考虑数量等指标的地域均等,真正实现公园绿地的分配公平比较困难^[11-13]。可达性作为衡量城市公共资源分配公平性评价参数,被认为是研究环境正义问题的重要指标。目前国内外对城市公园绿地可达性的研究主要涉及两个方面:在内容上,探讨不同种族、年龄、经济能力等居民群体在获取公园绿地资源准入机会上的差异性^[14-16]以及可达性与居民公共健康效益之间的关系^[17-19],如 Carlson 等以老年人为关注群体,通过研究其社区步行能力与公园可达性探讨影响老年人体力活动的主要因素^[20],Schipperijn 等学者认为居民进行体力活动的频率与距离公园的远近成正相关关系^[21];在方法上,对城市公园绿地数据可达性的指标和测度方法进行探讨,如有学者选取不同的评价指标如公园绿地面积及形状、路网密度、景观格局指数和使用状况等评估城市公园绿地的可达性^[22-24],也有学者利用定量的评价方法如两步移动搜索法、网络分析法、最小邻近距离法等^[25-27]探究城市绿地的服务水平。

随着公园可达性研究的深入,影响因素也逐渐成为了研究重点。已有研究认为公园的客观特征及使用者的主观感知等都可能成为影响可达性的重要因素^[28-30]。如 Chen 等^[31]通过实证分析发现经济发展、收入水平、人口增长以及土地可用性等因素对城市公共绿地供给具有积极影响;Wang 等^[32]认为公园的物理和位置特征(例如,邻近性和行程花费时间)是影响感知可达性的最重要因素,其中物理和社会个人因素对公园可达性有显著贡献。同时,也有学者对居民使用绿地差异的影响因素进行了研究。如 Zhang 等^[33]根据扬州市各社区的发展模式、社区规模、人口密度和绿色资产等空间特征,评估了不同建筑环境的社区绿地供应差异,认为不同等级社区的建成环境导致绿地的供应公平性存在显著的差异;Xu 等^[34]以基尼系数为评价指标,运用 GWR 模型探讨了慕尼黑地区绿地公平性与社会经济变量之间的空间关系,认为较高的住房需求情景往往会增加绿地分布的空间不平等。

综上,国内外关于绿地可达性的研究大多数研究侧重于结果,较少关注城市公园可达性的变化过程;同时在影响因素方面,已有研究多受数据限制,缺少从时空尺度探讨不同因子对可达性变化影响的研究^[35-37]。鉴于此,本研究从环境正义视阈出发,重点关注步行和车行方式出行的居民群体,运用高斯两步移动搜索法分析 2000—2018 年武汉市中心城区公园绿地可达性和公平性的时空变化,并采用梯度提升决策树(GBDT)模型探讨了不同时期交通、用地和社会经济等客观因素对公园绿地可达性的影响及其规划启示,以期为人本尺度下的高密度城区绿地规划提供科学参考。

1 研究区概况

武汉市位于湖北省东部、长江与汉水交汇处,地理位置为北纬 $29^{\circ}58'—31^{\circ}22'$,东经 $113^{\circ}41'—115^{\circ}05'$,地处江汉平原东部、长江中游。世界第三大河长江及其最大支流汉江横贯市境中央,将武汉中心城区一分为三,形成武汉三镇隔江鼎立的格局。其中,江岸区、江汉区、硚口区、汉阳区、武昌区、洪山区、青山区为武汉市中心城区(图1),总面积为 955.15 km^2 。截至2020年11月1日零时,七个中心城区常住总人口为640.20万人,平均人口密度为 $0.67\text{ 万人}/\text{km}^2$ 。截至2021年,武汉市新增绿地 1002.8 hm^2 ,新建各类公园123个,全市建成区绿化覆盖率 43.07% ,绿地率 40.02% ,人均公园绿地面积 14.82 m^2 。

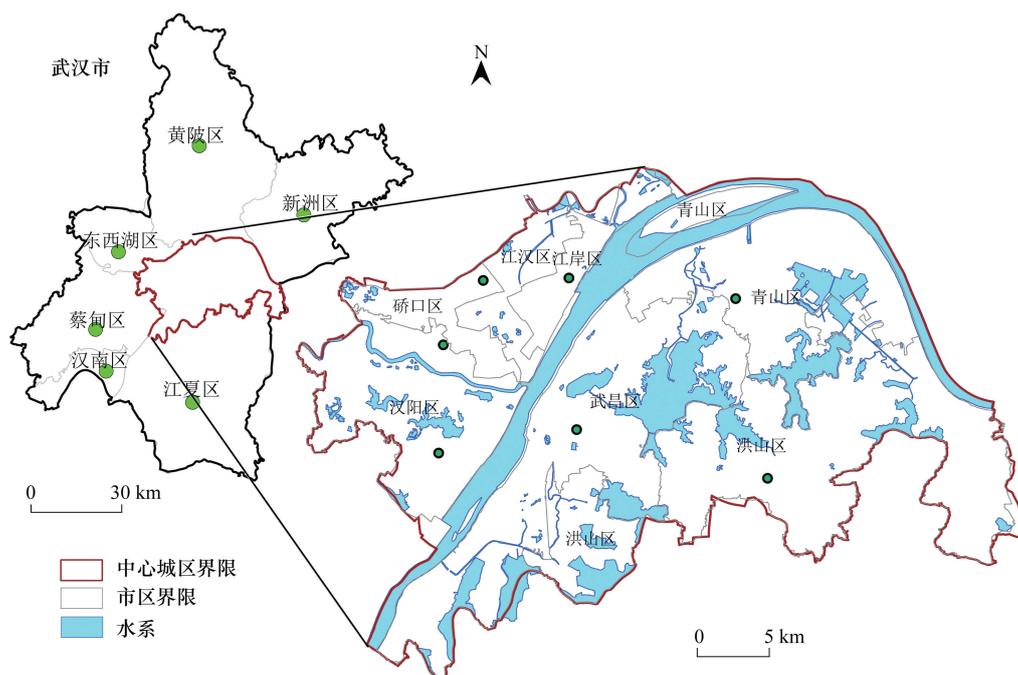


图1 研究区概况图

Fig.1 Summary map of the study area

2 数据处理与研究方法

2.1 数据来源与预处理

已有研究表明不同交通出行方式下的可达性结果有较大的差异性,现实生活中居民有自主选择交通方式的权利,尤其是去往城市公共空间。本研究重点关注选择步行和私家车出行的居民群体,其中选择步行的居民群体假设为去往公园绿地时优先或者只能以步行方式出行,车行出行的居民群体则假设优先使用私家车出行。由于公共交通线路及换乘的复杂性,本研究暂不考虑公共交通出行。同时,Tan等通过研究发现在较小空间尺度上绿地分配不公平的现象更加明显^[38],因此计算可达性和公平性时,武汉市中心城区被平均分割为3684个 $500\text{ m}\times 500\text{ m}$ 的格网作为研究基础单元。

数据来源主要包括:1)公园绿地矢量数据:基于城市用地现状、天地图以及《武汉市城市公园名录》^[39]可查询到的公园绿地,获取到了2000、2010和2018年的武汉市中心城区公园绿地位置、面积、类型等属性数据;为了研究时段数据具有可比性,根据《城市绿地分类标准》(CJJ/T85—2002)^[40]和(CJJ/T85—2017)^[41]进行对比调整,最终确定公园绿地类型等级统一标准为综合性公园和专类公园 I 级、区域性公园 II 级、社区公园 III 级以及街旁绿地 IV 级;2)研究时段的人口数据主要来源于五普、六普以及武汉市2018年“两标两实”的社区

人口调查,并以格网内的建筑面积进行人口分摊;3)建筑面积和道路网数据均来源于武汉市测绘院以及地理国情普查基础数据库,并通过 open street map 对 2018 年的道路数据来进行修正更新。

数据的预处理主要包括:1)以 2014 年和 2020 年的百度地图位置为基础,分别对 2010 和 2018 年的武汉市中心城区各类公园入口进行矢量化处理,2000 年的公园入口则参考 2010 年并结合公园历史资料进行修正,其中街旁绿地或者开放性社区游园采用道路交叉口作为入口来计算公园绿地可达性;2)不同交通出行速度决定了居民从社区到最近公园绿地的实际旅行时间成本,本研究参考研究区同类城市的平均步行速度,确定步行速度为 4 km/h^[42]。同时根据《中华人民共和国公路工程技术标准》(JT-GB—2003)中对不同道路等级车速设限,结合研究区的实际情况设定城市主干道(50 km/h)、次干道(40 km/h)、支路(30 km/h)的速度来进行出行成本的计算。

2.2 研究方法

2.2.1 高斯两步移动搜索(2SFCA)模型

两步移动搜索模型最早由 Radke 等提出^[43],由 Luo 等进一步改进,进而被大量推广使用^[44]。但是传统 2SFCA 模型在计算公园绿地供给服务系数 S_j 时,仅考虑了公园绿地的面积,其实公园类型及等级也是反映该公园吸引力和服务能力的重要体现^[45]。根据《公园设计规范》(GB51192—2016)以及结合已有研究^[46],将不同等级公园最舒适的容纳人口数量标准设定为:综合公园容纳标准为 60 m²/人,区域性公园容纳标准为 50 m²/人;社区公园容纳标准为 30 m²/人,以及街旁绿地容纳标准为 15 m²/人。单个公园的容量为单个公园面积与其相应等级公园容纳人口标准的比值。因此,公园供给能力系数 S_j 公式如下:

$$S_j = \frac{S_j^A}{pcpa_j} \quad (1)$$

式中, S_j^A 代表每个公园的面积; $pcpa_j$ 代表每个公园对应的容纳标准; f_w 代表每个公园的功能系数。

然后进行该模型的第一步得出每个公园在预定时间成本阈值内的供求比 R_j ,同时采用高斯函数 G 进行了时间距离的衰减,对每个需求点 i ,搜索所有在 i 搜寻半径 t_0 范围内的供给点 j (公园绿地入口),同时也进行高斯函数的衰减,将所有的供需比 R_j 加总得到 A_i :具体公式如下:

$$A_i = \sum_{j \in \{t_{ij} \leq t_0\}} G(t_{ij}, t_0) R_j = \sum_{j \in \{t_{ij} \leq t_0\}} G(t_{ij}, t_0) \frac{S_j}{\sum_{k \in \{t_{ik} \leq t_0\}} G(t_{ik}, t_0) P_k} \quad (2)$$

$$G(t_{ij}, t_0) = \begin{cases} \frac{e^{-(1/2) \times (t_{ij}/t_0)^2} - e^{-(1/2)}}{1 - e^{-(1/2)}}, & \text{if } t_{ij} \leq t_0 \\ 0, & \text{if } t_{ij} > t_0 \end{cases} \quad (3)$$

该模型中的搜索阈值是影响可达性结果的关键参数之一。以往的研究提出 15 分钟社区生活圈来打造社区生活的基本单元,形成健康、安全、友好、舒适、绿色的社会基本生活平台^[47-48]。根据 2021 年武汉市政府工作报告,将打造 15 分钟社区便民商业生活圈,配套完善社区公共文化体育设施。因此,本文以 15 min 为搜索时间阈值,分别计算步行和车行方式下的公园绿地服务可达性。

2.2.2 梯度提升决策树(GBDT)

为得出哪些政策因子是影响城市公园绿地服务可达公平性的主要政策因素,本文首先对选取的变量进行了空间 logistic 回归分析,结果发现线性关系并不明显,最后采用 GBDT 模型探索其非线性关系及阈值效应。GBDT 模型是一种集成多个弱分类器的机器学习方法,在解决数据特征分布相对集中的离散分类问题时,精度要高于支持向量机、随机森林等算法^[49]。已有研究表明基于决策树集成的模型能够拟合自变量在不同范围内对因变量的影响,而不是生成固定的系数,显著提升了模型的可解释性^[50-51]。该模型对变量相对重要性和局部关系的可靠识别,近年来已被引入到城市交通领域,例如出行选择^[52]及出行距离预测^[53]。由于 GBDT 模型和其他机器学习模型一样,存在过拟合的可能,本文通过多折交叉验证的方法来降低过拟合的影响;最后是模型生成的局部相关图在样本较少的区间可能产生异常噪声值,本文结合样本的分布来弱化不可靠的估计

区间。GBDT 是一种基于决策树的集成方法,是对多个决策树结果的组合,其对一组独立变量 x 的逼近函数 $f(x)$ 是对多个单决策树 $h(x; a_m)$ 的累加^[52]:

$$f(x) = \sum_{m=1}^M f_m(x) = \sum_{m=1}^M \beta_m h(x; a_m) \quad (4)$$

式中, M 是决策树的个数; a_m 是单决策树 $h(x; a_m)$ 的残差系数; β_m 是最小化损失函数 L 的参数,为了估计函数中的参数, Friedman 提出了梯度提升算法^[54],具体实现如下:

首先初始化决策树:

$$f_0(x) = \operatorname{argmin}_{\beta} \sum_{i=1}^N L(y_i, \beta) \quad (5)$$

对于所有 N 个样本的总损失为:

$$L_{\text{all}} = \sum_{i=1}^N L(y_i, f_m(x_i)) \quad (6)$$

式中, y_i 和 $f_m(x_i)$ 分别为样本 x_i 的实际值及第 m 个模型的预测值。对于每次迭代,其负梯度函数为:

$$\bar{y}_{im} = - \left[\frac{\partial L(y_i, f_m(x_i))}{\partial f(x_i)} \right]_{f=f_{m-1}} \quad (7)$$

计算梯度下降步长为:

$$\beta_m = \operatorname{argmin}_{\beta} \sum_{i=1}^N L(y_i, f_{m-1}(x_i) + \beta h(x_i; a_m)) \quad (8)$$

将计算结果更新至模型,同时引入学习率 ξ 来控制每个服务树的贡献:

$$f_m(x) = f_{m-1}(x) + \xi \cdot \beta_m h(x; a_m), 0 < \xi \leq 1 \quad (9)$$

最终模型为:

$$f(x) = \sum_{m=1}^M f_m(x) \quad (10)$$

对模型中的超参数进行调整,可以获得更优的模型结果。首先是学习率,较小的学习率可以改善模型的预测效果,但需要添加更多的决策树,为了平衡运行时间和预测性能,我们选取 5000 颗决策树,将学习率定为 0.001。同时,引入五重交叉验证方法来减少过拟合的影响,即将原始数据集分为五部分,在每次迭代中使用其中四个不同的子集进行拟合,由剩余的子集进行验证。

2.3 变量选择

根据已有研究^[30,35-36],城市公园绿地可达性的影响因素主要包括主观因素和客观因素。主观因素主要包括公园绿地本身的质量、形状和面积等因素,本文仅探讨影响可达性及其变化的客观因素。结合研究时段武汉市相关数据可获得性,选取交通因素、用地因素和社会经济因素包括 11 个指标变量进行线性和非线性关系探析,具体指标解释及计算方法见表 1。

3 公园绿地可达与公平性变化分析

3.1 供需变化分析

图 2 显示 2000—2018 年武汉市中心城区公园绿地供给和人口需求呈现出显著增长趋势。其中,综合性公园和专类公园数量由 2000 年的 23 个增加到 2018 年的 36 个,区域性公园由 14 个增加到 31 个,社区公园由 16 个增加到 236 个,街旁绿地由 268 个增加到 385 个。人均公园绿地面积由 2000 年 2.14 m²/人增加到 7.35 m²/人,增长了约 3.4 倍,增加的类型主要是社区公园和街旁绿地。此外,各类公园在空间分布上集聚度增加明显,特别是长江和汉江两岸聚集特征明显,如武昌区、江岸区、江汉区和硚口区。人口规模和集聚度在 2000—2018 年呈显著增长态势。2000 年人口分布较为分散,人口密度普遍较低,人口集聚度较高的区域为武昌区东北部、硚口区东南部和江汉区南部等区域;2010 年各城区人口数量相比 2000 年增速明显,到 2018 年

人口规模和集聚度大幅度提高,人口数量大于 5000 人的区域增长较大的区域主要有武昌区中南部、汉阳区北部和江岸区北部等。总体来看,武汉市中心城区公园绿地的面积与空间分布、人口数量与空间分布均呈现出增长和扩散趋势。

表 1 客观因素变量的指标解释及计算方法

Table 1 The index explanation and calculation method of objective factor variables

因素类型 Types of Factors	指标名称 Name of indicators	指标解释及计算方法 Index interpretation and calculation method
交通因素 Traffic factors	道路密度/(m/m^2)	该指标反映道路系统的完善情况,计算格网内道路总长度与格网面积之比
	道路交叉口数量/个	该指标反映道路的连通性,计算格网内道路交叉口数量
用地因素 Land use factors	商业用地占比/%	该指标反映商业用地分布,计算商业用地面积与格网面积之比
	住宅用地占比/%	该指标反映住宅用地分布,计算住宅用地面积与格网面积之比
	工业用地占比/%	该指标反映工业用地分布,计算工业用地面积与格网面积之比
	公服用地占比/%	该指标反映公共服务用地分布,计算公共服务用地面积与格网面积之比
	建筑密度/%	该指标反映建筑集聚状况,计算格网内建筑物的基地面积与格网面积之比
社会经济因素 Social economic factors	人口密度/($人/m^2$)	该指标反映人口集聚情况,根据建筑面积(建筑基地面积*容积率)来分摊格网内的人口数量
	人均 GDP/(元/人)	该指标反映经济发展水平,将各区 GDP 按照格网人口数量分摊到每个格网中
	公共财政预算收入/万元	该指标间接反映政府对公共服务设施的投入,将各区的公共财政预算按照格网人口数量分摊到每个格网中
	消费品零售额/元	该指标反映城乡居民生活水平,将各区的消费品零售总额按照格网人口数量分摊到每个格网中

GDP: 国内生产总值 Gross Domestic Product

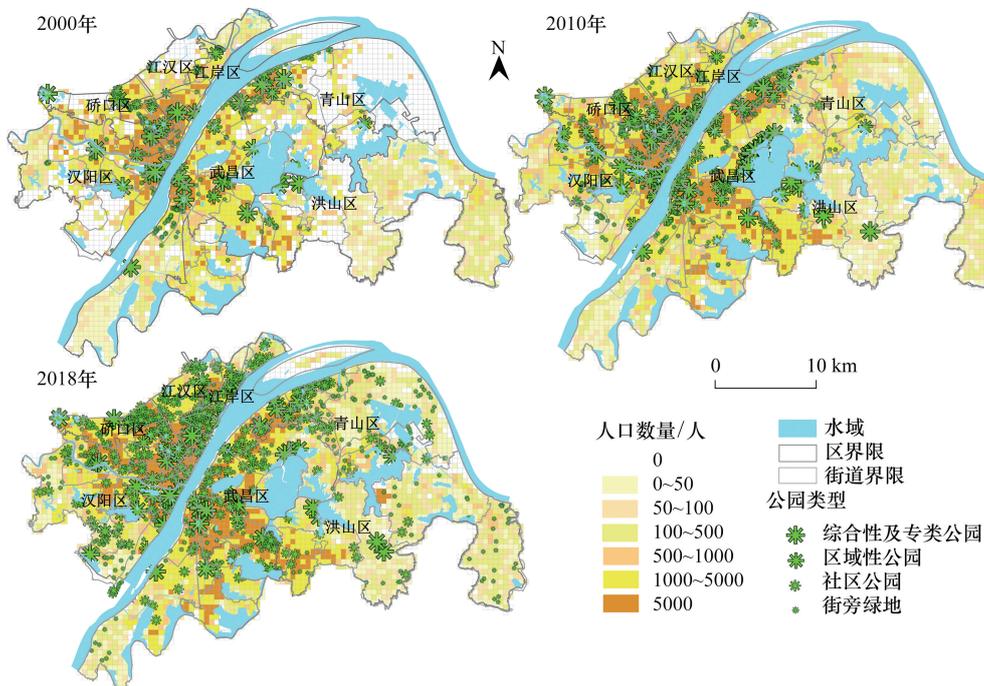


图 2 2000—2018 年人口和公园绿地空间分布图

Fig.2 Spatial distribution of population and park green space from 2000 to 2018

3.2 可达性变化分析

2000—2018 年武汉市中心城区公园绿地可达性整体呈上升趋势,但是不同交通出行的居民群体存在差异(见图 3)。步行情景的高可达性区域呈分散增加,车行则由长江沿岸核心区域向城区边缘扩展。对于步行

出行居民,2000年可达性较高的区域集中在长江两岸、洪山区东湖、武昌区沙湖以及汉阳区莲花湖周围,其他区域可达性普遍较低;2010年和2018年由于绿地供给的持续增加和区域间的人口流动,高可达性区域呈分散增加,城区边缘的可达性明显改善。对于车行出行居民,2000年可达性较高的区域主要集中在长江两岸核心区域,城区边缘可达性较低;2010年高可达性区域明显向东湖周围和长江两岸的汉口江滩、武昌江滩扩展;到2018年可达性值高值区域迅速扩大,中心城区内较高可达性区域达90%,仅有少部分区域如武昌区南部成为较低可达性集聚区。这可能是由于交通系统的不断改善,道路密度、居住区级道路和道路连通性等均有所提升,从而减少了居民的出行时间成本,增加了可达区域的覆盖范围。

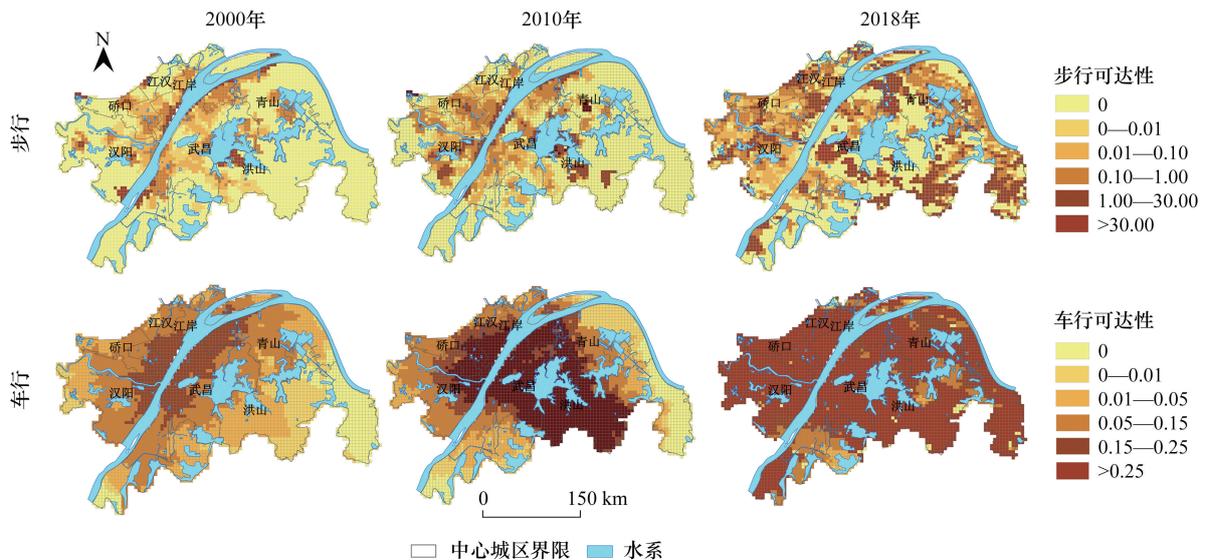


图3 2000、2010和2018年武汉市中心城区公园绿地可达性空间分布

Fig.3 Spatial distribution of accessibility of park green space in central Wuhan in 2000, 2010 and 2018

图4分为两个阶段显示了武汉市中心城区采用两种交通方式出行的居民群体公园绿地服务可达性变化也存在明显的差异。第一阶段(2000—2010年):步行的居民群体公园绿地可达性提高的区域明显小于车行,主要集中在沿江中心区域;步行可达性未发生变化的区域远大于车行可达性,主要分布在中心城区边缘的不可达区域;步行可达性降低的区域相对车行较分散,车行不可达主要分布在青山区东北部和洪山区南部;以上说明尽管武汉市为创建园林城市新建了大量公园,但是到2010年时仍有一些区域并未得到改善,原因可能是城市绿地规划时优先保证了核心区的公园建设,同时道路的发展还不能满足城区边缘的居民群体。第二阶段(2010—2018年):两种交通方式出行的居民可达性提高的区域相对于第一阶段均有较大改善,尤其对车行出行的居民。但是,步行可达性由于城市更新交通设施的建设出现了部分可达性降低的区域,同时绿地供给分布仍然存在未供给的区域。总的来说,第二阶段相对于第一阶段两种出行方式下公园绿地可达性有了较大提高,尤其是车行出行的居民,但是当前提倡绿色出行的背景下,规划的重点更倾向提高步行可达性。

3.3 可达公平性分析

基尼系数和洛伦兹曲线是衡量城市居民享受公园绿地服务机会的公平程度的重要指标^[55-56]。通过比较步行和车行两种交通方式出行下的居民群体享受公园绿地服务,能够在一定程度上反映区域内的不同交通出行居民群体的环境正义问题。根据联合国开发计划署等组织规定,0.382为基尼系数划定公平与否的“警戒值”,基尼系数高于0.382视为不公平,基尼系数低于0.382视为公平。图5显示居民在步行和车行方式下享受公园绿地服务可达的基尼系数均呈现出连续增高的趋势。研究时段车行基尼系数在0.84—0.96之间,步行基尼系数在0.24—0.51之间,其中2000年车行居民群体享受绿地服务的机会最大,2018年步行居民群体享受绿地服务的机会最小。由此可见,武汉市中心城区居民两种方式出行的居民群体享受公园绿地服务的机会

均为不公平,步行居民群体更为严峻。

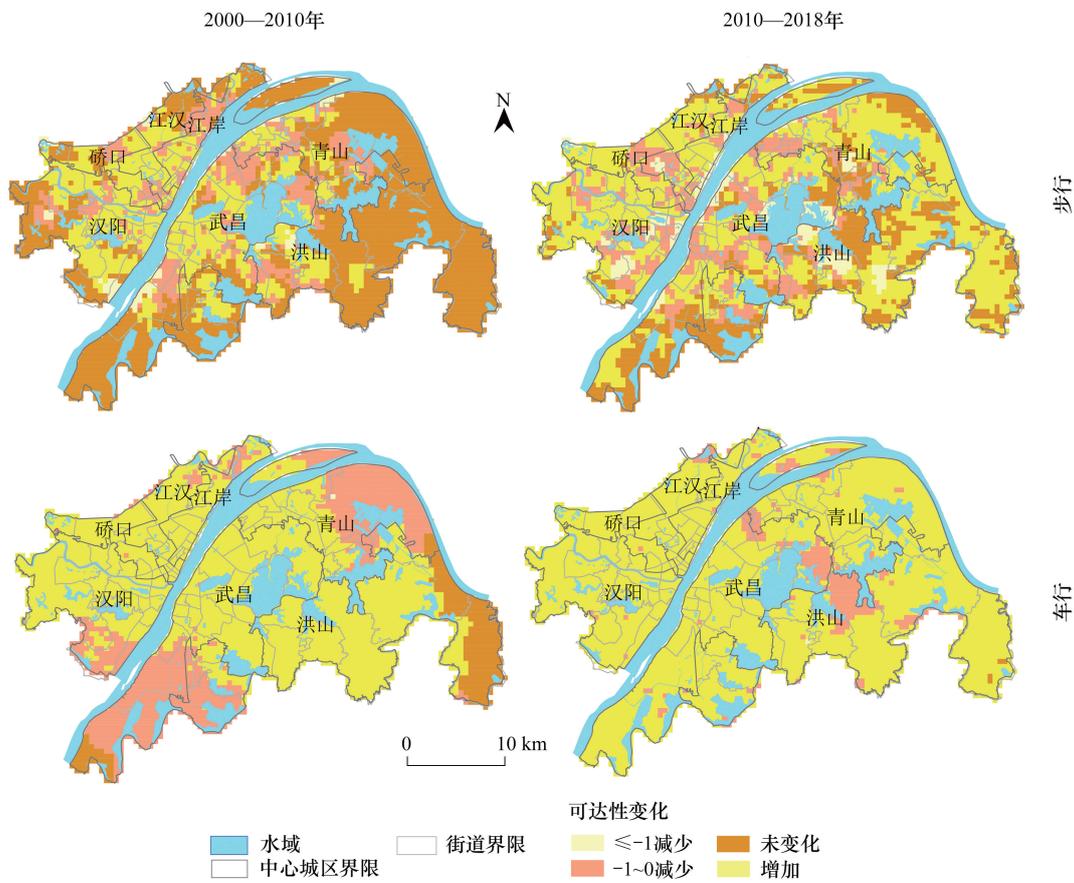


图 4 2000—2018 年武汉市中心城区公园绿地可达性变化

Fig.4 Changes of green space accessibility in central Wuhan from 2000 to 2018

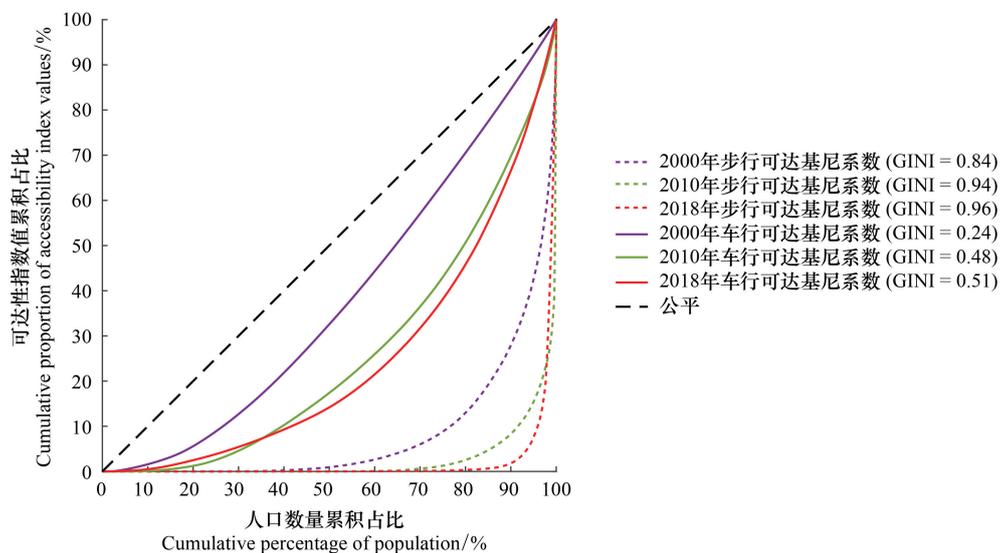


图 5 2000、2010、2018 年两种出行方式下的可达性基尼系数

Fig.5 Gini coefficient of accessibility under two traffic modes in 2000, 2010 and 2018

4 可达性的非线性影响及规划启示

4.1 影响因素的相对重要性分析

通过 GBDT 模型的拟合结果,发现不同时期三类因素对可达性的非线性影响有显著性,但是对于研究时段变化的驱动因素的拟合显著性较弱,因此本文只对不同时期的可达性影响因素相对重要性进行对比分析。表 2 显示交通、用地结构和社会经济因素在不同时期对两种出行居民群体公园绿地可达性影响的相对重要性排序及影响因子间的差异性和协同性。

从影响因素类型的相对重要性来看,2000 年和 2010 年对步行和车行可达性重要贡献度依次均为用地因素、社会经济因素和交通因素,用地因素和社会区经济因素存在较强的协同性;2018 年影响因素对车行可达性的重要贡献度未发生变化,但是交通因素的贡献度有所提升,用地和社会经济因素贡献度相对下降。值得注意的是交通因素对步行可达性的贡献度有显著提升,而社会经济因素不再是主导,说明经济发展对可达性的影响已经趋于稳定,而交通因素是步行和车行可达性差异的主要因素。

从具体影响变量的相对重要性来看,研究时段内不同时期影响步行可达性的关键变量具有不稳定性,居住用地和公共服务用地占比、建筑密度、公共财政预算收入、GDP 分别在三个时期贡献度较高,但是居住用地占比在后期贡献度明显降低;三个时期道路交叉口数量、建筑密度、人口密度和公共财政预算收入等因素对车行可达性的影响相对重要性较高且具有相对稳定性,变量的重要性程度均呈现出上升趋势,到 2018 年四个变量的总贡献率均超过 50%,具有较强的协同性。

表 2 不同时期变量对可达性非线性影响的相对重要性

Table 2 Relative importance of nonlinear effects of variables on accessibility in different periods

变量 Variables	步行(排名/相对重要性%) Walking (rank/relative importance%)			车行(排名/相对重要性%) Driving (rank/relative importance%)		
	2000	2010	2018	2000	2010	2018
交通因素 Traffic factors	18.04	2.09	27.48	18.41	15.02	19.01
道路密度 Road density	(6)4.14	(7)1.75	(3)15.91	(8)7.99	(10)3.58	(7)8.73
道路交叉口数量 Number of road intersections	(3)13.90	(9)0.34	(5)11.57	(4)10.43	(3)11.45	(3)10.28
用地因素 Land use factors	44.22	29.37	57.57	37.08	46.14	37.51
商业用地占比 Proportion of commercial land	(11)0.05	(10)0.17	(9)2.39	(9)6.23	(11)1.87	(9)5.93
住宅用地占比 Proportion of residential land	(1)38.23	(8)0.88	(4)13.20	(10)5.45	(4)10.10	(10)5.62
工业用地占比 Proportion of industrial land	(7)3.45	(6)2.14	(11)0.46	(11)5.38	(9)3.82	(11)5.21
公服用地占比 Proportion of public service land	(8)2.25	(11)0.01	(1)22.62	(7)8.49	(5)8.66	(8)8.71
建筑密度 Building density	(9)0.24	(2)26.17	(2)18.90	(2)11.53	(1)21.69	(2)12.04
社会经济因素 Social economic factors	38.12	69.09	15.10	45.09	39.31	44.10
人口密度 Population density	(10)0.06	(4)11.90	(7)4.15	(1)14.10	(2)19.45	(1)14.73
人均 GDP Per capital GDP	(5)8.90	(1)29.59	(6)6.99	(5)9.82	(7)6.81	(6)8.92
公共财政预算收入 Budget revenue of public finance	(2)18.05	(5)8.19	(8)2.87	(3)10.78	(6)7.51	(4)10.27
消费品零售额 Retail sales of consumer goods	(4)10.73	(3)18.85	(10)0.93	(6)9.80	(8)5.07	(5)9.57
R^2	0.38	0.56	0.25	0.58	0.47	0.61

由于 OLS 模型拟合结果不存在显著性,因此未列入表格中进行对比

4.2 关键变量的非线性阈值效应

根据影响因素的相对重要性分析,不同时期交通、用地和社会经济因素对可达性的影响具有差异性,关键变量的影响作用存在不稳定性,不同时期关键变量的阈值目前缺乏选择标准。遵循时效性原则,本文对 2018 年的影响因素中贡献率大于 10% 的变量做出非线性相关图(见图 6),来说明影响变量对两种出行方式下可达公平性的非线性影响趋势和阈值效应。

公共服务用地面积占比、住宅用地面积占比和道路密度与步行可达性总体上呈正相关,道路交叉口个数和建筑密度则呈现负相关。当格网内公共服务用地面积占比增加 1% 时对可达性的影响最大,超过 1% 对可达性的影响减弱;当格网内住宅用地面积占比增加到 4% 时,可达性增幅最大,增加到 8% 时,可达性出现小幅度下降,超过 8% 后可达性影响不变;当格网内道路密度达到在 0.007 左右时可达性达到最大;随着道路交叉口个数和建筑密度的增加,可达性呈现明显的下降趋势,且当建筑密度达到 5 和道路交叉口个数为 8 时,可达性降到最低值。

公共财政预算收入和建筑密度与车行可达性总体上呈正相关,人口密度和道路交叉口个数则呈现负相关。当公共财政预算收入达到 40 亿元时可达性达到最高值,超过此阈值对可达性无影响;当建筑密度增加到 3 时,对可达性的正向影响最大;人口密度的增加促使可达性呈现下降趋势,当格网内人口密度增加到 0.14 时可达性最差;当格网内道路交叉口个数为 10 个左右时可达性达到最小,超过后可达性呈现出小幅上升趋势。

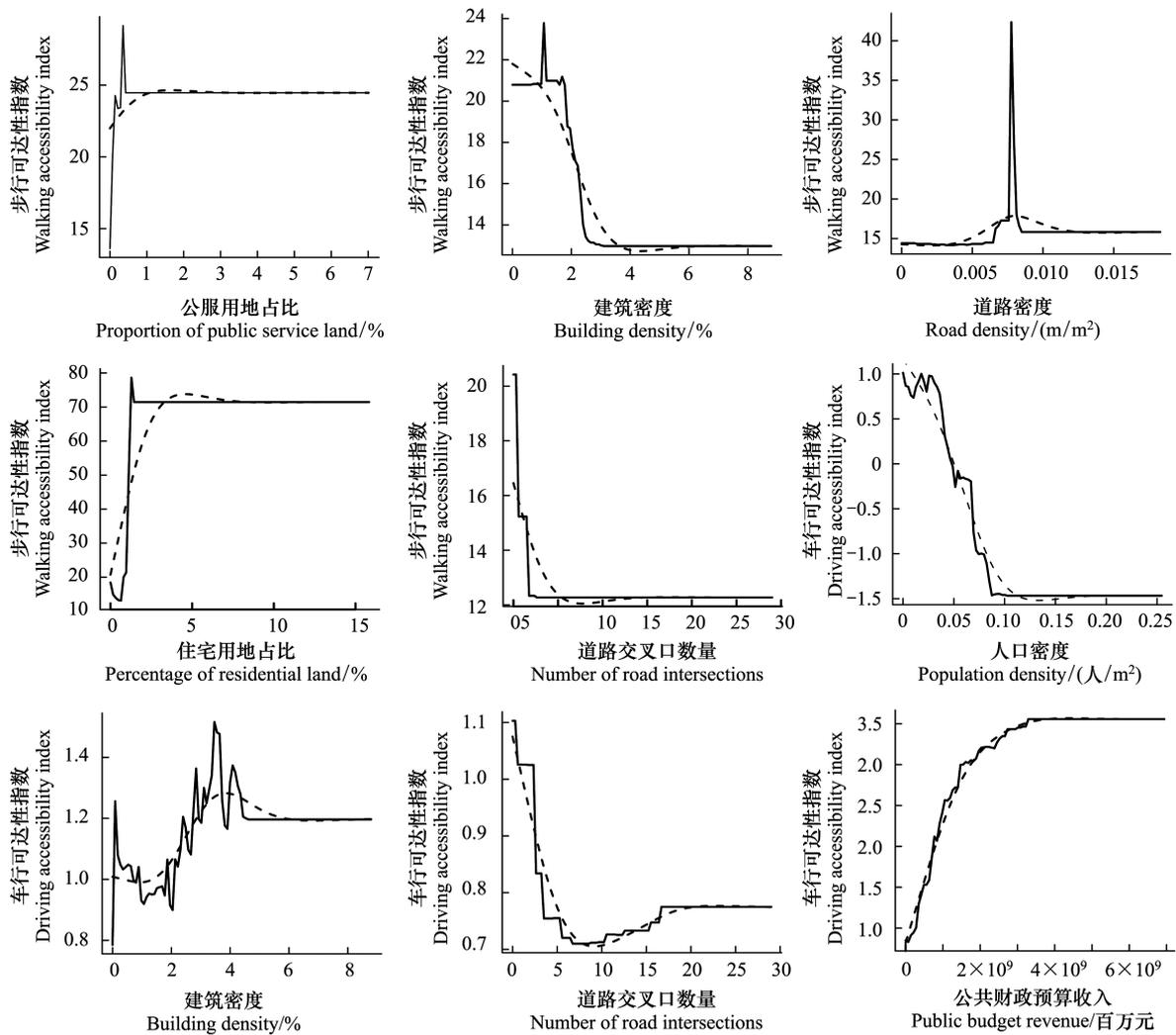


图 6 2018 年两种出行方式下关键变量对可达性的非线性影响

Fig.6 Nonlinear effects of key variables on accessibility under two modes in 2018

4.3 非线性影响分析下的规划启示

综合三类因素的相对重要性,用地结构和社会经济两大类因素对两种出行方式下的公园绿地服务可达性存在协同性影响,而交通因素是步行和车行方式下公园绿地服务可达性存在差异的主要原因。在当前绿色出行、低碳生活和“15 分钟社区生活圈”等生活理念的倡导下,武汉中心城区需要更加注重倾向步行出行的居民

群体公园绿地可达性的改善。1)在用地结构方面,适当调整区域内的各类用地面积比例,合理配置用地结构,研究表明提高当格网内公共设施用地和住宅用地的面积占比分别增加到 1%和 4%左右时能够明显提高可达性;2)在交通规划方面,道路密度的提高意味着道路网络规模的扩大、道路供给和连通性的提升,这对居民步行出行具有重要的促进作用;而道路交叉口是行人和车辆的汇聚之地,且往往有交通信号灯和标志线等限制,过多的交叉口反而会增加居民出行的时间花费和降低出行安全性,因此要合理规划街道内居住区级道路,减少断头路的出现,设置科学合理的交叉口数量。例如非线性阈值结果表明格网内道路密度在 0.007 左右,道路交叉口保持在 3 个以内,能够保证可达性提高到最佳值;3)在社会经济发展方面,公共财政预算收入对可达性呈现正向影响,增加单元内的公共财政预算收入有助于可达性的提升;4)在综合因素调控方面,对于交通较发达且居民采用车行出行方式较多的城市,则要侧重于对社会经济、用地和交通三类因素的综合调控,例如武汉市中心城区格网内建筑密度增加到 3 和公共财政预算收入达到 40 亿元时,可达性会有明显改善。

5 结论与讨论

本文从过程的视角关注步行和车行交通方式出行的居民群体享受公园绿地服务机会公平性的时空差异,揭示了高密度城区公园绿地可达性和公平性的变化规律,同时运用非线性模型探讨了影响不同时期公园绿地可达公平性的因素相对重要性及其阈值效应,并提出相应的交通、用地以及经济发展调整对策,为武汉市中心城区绿地规划及精细化调控管理提供参考。与以往的研究相比,本研究有以下两个方面值得进一步讨论:

一方面,与以往的人均数量指标相比,可达性指标能够考虑不同交通出行方式下更加实际的识别城市公园绿地服务不可达和不公平的区域,有助于城市精细化规划管理,也为解决环境正义问题提供了有效的途径。通过过程视角下的可达性结果可以发现武汉市中心城区公园绿地可达性虽然逐步提升,但是区域内的可达公平性却在明显降低,尤其是步行可达性仍然存在不可达区域且不公平性较为严峻,说明公平导向下的城市绿地资源的优化配置仍然是未来一段时期内的重要目标;另一方面,相比于传统的多元线性回归和离散选择模型,GBDT 模型不需要遵循任何假设,可以减少来自异常值的影响,更好的处理多重共线性,提供更精确的预测结果。本研究利用该模型识别研究时段内可达性影响因素的相对重要性,同时输出自变量与因变量之间的潜在非线性关系图,能够更好的揭示可达性关键影响变量的阈值效应;基于本研究武汉市中心城区公园绿地可达性非线性影响的实证分析结果,我们认为可达性和公平性的改善需要考虑用地结构和社会经济因素中关键变量的阈值效应,综合考虑不同区域居民出行的实际情况来确定合理的阈值,为城市精细化规划和管理提供量化参考。值得一提的是,本研究虽然不同时期可达性的非线性影响拟合效果较线性影响好,但是驱动因素的分析效果并不理想,对于可达性的变化的影响因素仍然需要进一步探讨和论证,以期为城市绿地资源的优化配置以及可持续性管理提供科学参考。

尽管本研究通过多种定量方法组合测度了可达公平性的变化和关键影响因素相对重要性及阈值效应,可为武汉市绿地系统规划与管理提供决策依据与规划参考,但当前研究中还存在以下不足:1)本文忽略了不同群体在享用公园资源的需求差异和使用偏好,如老年人更偏向于距离近的公园,儿童则更倾向于娱乐型的公园,残疾人则更倾向于特殊需求设施完善的公园,因此使得其可达性结果与实际情况可能会有所偏差。未来需要通过实地调研或者大数据挖掘等方式研究不同群体偏好差异,进一步丰富城市绿地空间公平性研究;2)量化模型的应用虽然能够在一定程度上为城市精细化规划与管理提供参考,但是模型的稳定性以及在不同区域的适用性还有待进一步验证,因此未来需要更多的实证研究来探讨新模型的应用以及结果的可靠性。

参考文献(References):

- [1] 徐宇曦,陈一欣,苏杰,尹海伟,程龙,曾辉. 环境正义视角下公园绿地空间配置公平性评价——以南京市主城区为例.应用生态学报, 2022, 33(6): 1589-1598.
- [2] Zhang R, Zhang C Q, Cheng W, Lai P C, Schütz B. The neighborhood socioeconomic inequalities in urban parks in a High-density City: An

- environmental justice perspective. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 211: 104099.
- [3] Kabisch N, Haase D. Green justice or just green? Provision of urban green spaces in Berlin, Germany. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 122: 129-139.
- [4] Taleai M, Sliuzas R, Flacke J. An integrated framework to evaluate the equity of urban public facilities using spatial multi-criteria analysis. *Cities*, 2014, 40: 56-69.
- [5] Boone C G, Buckley G L, Grove J M, & Sister, C. Parks and people: An environmental justice inquiry in Baltimore, Maryland. *Annals of the Association of American Geographers*, 2009, 99(4), 767-787.
- [6] Jennings W G, Reingle J M. On the number and shape of developmental/life-course violence, aggression, and delinquency trajectories: A state-of-the-art review. *Journal of Criminal Justice*, 2012, 40(6): 472-489.
- [7] Schlosberg D. Reconceiving environmental justice: Global movements and political theories. *Environmental Politics*, 2004, 13(3): 517-540.
- [8] Rigolon A. A complex landscape of inequity in access to urban parks: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 2016, 153: 160-169.
- [9] Wolch J R, Byrne J, Newell J P. Urban green space, public health, and environmental justice: the challenge of making cities "just green enough". *Landscape and Urban Planning*, 2014, 125: 234-244.
- [10] Xing L J, Liu Y F, Wang B S, Wang Y H, Liu H J. An environmental justice study on spatial access to parks for youth by using an improved 2SFCA method in Wuhan, China. *Cities*, 2020:96, 102495.
- [11] Hughey S M, Kaczynski A T, Child S, Moore J B, Porter D, Hibbert J. Green and lean: is neighborhood park and playground availability associated with youth obesity? Variations by gender, socioeconomic status, and race/ethnicity. *Preventive Medicine*, 2017, 95: S101-S108.
- [12] Rigolon A. Parks and young people: An environmental justice study of park proximity, acreage, and quality in Denver, Colorado. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 165: 73-83.
- [13] 刘常富, 李小马, 韩东. 城市公园可达性研究——方法与关键问题. *生态学报*, 2010, 30(19): 5381-5390.
- [14] Taleai M, Sliuzas R, Flacke J. An integrated framework to evaluate the equity of urban public facilities using spatial multi-criteria analysis. *Cities*, 2014, 40: 56-69.
- [15] Comber A, Brunson C, Green E. Using a GIS-based network analysis to determine urban green space accessibility for different ethnic and religious groups. *Landscape and Urban Planning*, 2008, 86(1): 103-114.
- [16] Seeland K, Nicolè S. Public green space and disabled users. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, 5(1): 29-34.
- [17] Kaczynski A T, Henderson K A. Environmental correlates of physical activity: a review of evidence about parks and recreation. *Leisure Sciences*, 2007, 29(4): 315-354.
- [18] Coombes E, Jones A P, Hillsdon M. The relationship of physical activity and overweight to objectively measured green space accessibility and use. *Social Science & Medicine*, 2010, 70(6): 816-822.
- [19] 屠星月, 黄甘霖, 邬建国. 城市绿地可达性和居民福祉关系研究综述. *生态学报*, 2019, 39(2): 421-431.
- [20] Carlson J A, Sallis J F, Conway T L, Saelens B E, Frank L D, Kerr J, Cain K L, King A C. Interactions between psychosocial and built environment factors in explaining older adults' physical activity. *Preventive Medicine*, 2012, 54(1): 68-73.
- [21] Schipperijn J, Cerin E, Adams M A, Reis R, Smith G, Cain K, Christiansen L B, van Dyck D, Gidlow C, Frank L D, Mitúš J, Pratt M, Salvo D, Schofield G, Sallis J F. Access to parks and physical activity: an eight country comparison. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2017, 27: 253-263.
- [22] 徐慧锋, 徐丽华, 吴亚琪, 施益军, 陆张维. 杭州城市公共绿地的可达性和公平性分析. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2019, 39(6): 152-159.
- [23] 徐欣, 胡静, 贾焱焱, 田小波. 武汉市多维度城市公园绿地空间公平性分析. *地理科学*, 2021, 41(12): 2138-2148.
- [24] Wei F. Greener urbanization? Changing accessibility to parks in China. *Landscape and Urban Planning*, 2017, (157): 542-552.
- [25] 许基伟, 方世明, 刘春燕. 基于 G2SFCA 的武汉市中心城区公园绿地空间公平性分析. *资源科学*, 2017, 39(3): 430-440.
- [26] 陈秋晓, 侯焱, 吴霜. 机会公平视角下绍兴城市公园绿地可达性评价. *地理科学*, 2016, 36(3): 375-383.
- [27] 吴健生, 司梦林, 李卫锋. 供需平衡视角下的城市公园绿地空间公平性分析——以深圳市福田区为例. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2831-2838.
- [28] 刘韬, 杨德刚, 张豫芳, 蔡天毅. 城市公园绿地可达性时空变化及影响因素——以乌鲁木齐市为例. *中国科学院大学学报*, 2021, 38(3): 350-359.
- [29] 木皓可, 高宇, 王子尧, 张云路. 供需平衡视角下城市公园绿地服务水平与公平性评价研究——基于大数据的实证分析. *城市发展研究*, 2019, 26(11): 10-15.
- [30] 王敏, 朱安娜, 汪洁琼, 卢天凤. 基于社会公平正义的城市公园绿地空间配置供需关系——以上海徐汇区为例. *生态学报*, 2019, 39(19): 7035-7046.

- [31] Chen W Y, Hu F Z Y, Li X, Hua J Y. Strategic interaction in municipal governments' provision of public green spaces; a dynamic spatial panel data analysis in transitional China. *Cities*, 2017, 71: 1-10.
- [32] Wang D, Brown G, Zhong G P, Liu Y, Mateo-Babiano I. Factors influencing perceived access to urban parks: a comparative study of Brisbane (Australia) and Zhongshan (China). *Habitat International*, 2015, 50: 335-346.
- [33] Zhang J G, Yu Z W, Cheng Y Y, Chen C J, Wan Y, Zhao B, Vejre H. Evaluating the disparities in urban green space provision in communities with diverse built environments: the case of a rapidly urbanizing Chinese City. *Building and Environment*, 2020, 183: 107170.
- [34] Xu C, Haase D, Pribadi D O, Pauleit S. Spatial variation of green space equity and its relation with urban dynamics: a case study in the region of Munich. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 512-523.
- [35] 尹红岩, 李俊英, 施拓, 赵冬, 杨婧荟, 李金鑫. 公园绿地可达性的客观影响因素. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3387-3393.
- [36] 刘正纲, 李玲. 基于 GIS 的城市公园绿地可达性时空变化分析. *测绘工程*, 2018, 27(9): 69-74.
- [37] 王子琳, 李志刚, 程哈蓓. 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. *地理科学进展*, 2022, 41(4): 621-635.
- [38] Tan P Y, Samsudin R. Effects of spatial scale on assessment of spatial equity of urban park provision. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 158: 139-154.
- [39] 武汉市城市公园名录.(2010-09-17) <http://www.whylj.gov.cn/Item/1864.aspx>.
- [40] 《城市绿地分类标准》(CJJ/T85—2002), <http://www.mohurd.gov.cn>.
- [41] 《城市绿地分类标准》(CJJ/T85—2017), <http://www.mohurd.gov.cn>.
- [42] Millward H, Spinney J, Scott D. Active-transport walking behavior: destinations, durations, distances. *Journal of Transport Geography*, 2013, 28: 101-110.
- [43] Radke J, Mu L. Spatial decompositions, modeling and mapping service regions to predict access to social programs. *Geographic Information Sciences*, 2000, 6(2): 105-112.
- [44] Luo W, Qi Y. An enhanced two-step floating catchment area (E2SFCA) method for measuring spatial accessibility to primary care physicians. *Health & Place*, 2009, 15(4): 1100-1107.
- [45] Xing L J, Liu Y F, Liu X J, Wei X J, Mao Y. Spatio-temporal disparity between demand and supply of park green space service in urban area of Wuhan from 2000 to 2014. *Habitat International*, 2018, 71: 49-59.
- [46] 《公园设计规范》(GB51192—2016). <http://www.mohurd.gov.cn>.
- [47] 程蓉. 15 分钟社区生活圈的空间治理对策. *规划师*, 2018, 34(5): 115-121.
- [48] 奚东帆, 吴秋晴, 张敏清, 郑轶楠. 面向 2040 年的上海社区生活圈规划与建设路径探索. *上海城市规划*, 2017(4): 65-69.
- [49] 毛亚萍, 房世峰. 基于机器学习的参考作物蒸散量估算研究. *地球信息科学学报*, 2020, 22(8): 1692-1701.
- [50] Elith J, Leathwick J, Hastie T. A working guide to boosted regression trees. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802-813.
- [51] Friedman J. Greedy function approximation: a gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, 2001, 29: 1189-1232.
- [52] Ding C, Cao X Y, Wang Y P. Synergistic effects of the built environment and commuting programs on commute mode choice. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, 118: 104-118.
- [53] Tao T, Wang J Y, Cao X Y. Exploring the non-linear associations between spatial attributes and walking distance to transit. *Journal of Transport Geography*, 2020, 82: 102560.
- [54] Friedman, J.H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine. Institute of Mathematical Statistics, 2001, 29, 1189-1232.
- [55] Nesbitt L, Meitner M J, Girling C, Sheppard S R J, Lu Y H. Who has access to urban vegetation? A spatial analysis of distributional green equity in 10 US cities. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 181: 51-79.
- [56] Wu, L. F., & Kim, S. K. Exploring the equality of accessing urban green spaces: A comparative study of 341 Chinese cities. *Ecological Indicators*, 2021, 121:107280.