

DOI: 10.20103/j.stxb.202406011269

左为, 宋苑震, 贺蔚杰. 城市绿地暴露不平等分析——增长与收缩城市对比研究. 生态学报, 2024, 44(24): 11109–11120.

Zuo W, Song Y Z, He W J. Analysis of inequity in urban greenspace exposure: a comparative study between growing and shrinking cities. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11109–11120.

城市绿地暴露不平等分析 ——增长与收缩城市对比研究

左 为*, 宋苑震, 贺蔚杰

天津大学建筑学院, 天津 310000

摘要: 城市绿地是城市生态系统的重要组成部分, 其暴露及平等性日益受到重视。暴露不平等现象不仅存在于增长城市, 也出现在经历人口和绿地重构的收缩城市。研究探讨增长和收缩城市建成区内绿地暴露差异, 基于归一化植被指数和人口规模数据, 采用人口加权城市绿地暴露模型对长江中游城市群的城市绿地暴露进行测度, 并使用基尼系数度量不平等程度, 进一步明确其空间分布特征。结果显示: (1) 城市绿地覆盖均值仅为 0.35, 属低覆盖水平; 收缩城市绿地覆盖 (均值 0.355) 略优于增长城市 (均值 0.344)。(2) 不平等方面, 城市绿地暴露基尼系数 (基尼系数均值为 0.497) 远超警戒线, 约 24% 的城市表现为极端的不平等; 收缩城市不平等性 (均值 0.468) 显著优于增长城市 (均值 0.544)。收缩城市具有较优的绿地暴露水平和城市绿地暴露平等性, 为不同城市发展模式的差异化发展方向提供了科学指导。

关键词: 城市绿地暴露; 城市绿地暴露不平等; 收缩城市; 长江中游城市群

Analysis of inequity in urban greenspace exposure: a comparative study between growing and shrinking cities

ZUO Wei*, SONG Yuanzhen, HE Weijie

School of Architecture, Tianjin University, Tianjing 310000, China

Abstract: Urban greenspace plays a crucial role in urban ecosystems by enhancing environmental quality and promoting public health. The equitable distribution and accessibility of greenspace have garnered increasing attention, particularly in light of the varying developmental trajectories of cities. This study investigates greenspace exposure and its distributional equity across growing and shrinking cities, particularly focusing on the middle reaches of the Yangtze River Urban Agglomeration. We employed the normalized difference vegetation index (NDVI) and population data to measure greenspace exposure and used the Gini coefficient to quantify inequality levels. Our findings reveal significant differences between growing and shrinking cities regarding greenspace coverage, exposure, and equity. First, the average greenspace coverage across the studied cities was approximately 0.35, indicating a generally low level of urban greenery. Shrinking cities, with a mean greenspace coverage of 0.355, exhibited slightly better performance compared to growing cities, where the mean coverage was 0.344. Despite this marginal difference in coverage, shrinking cities consistently demonstrated better greenspace exposure and more equitable distribution patterns. For instance, shrinking cities showed a Gini coefficient of 0.468, significantly lower than the 0.544 recorded in growing cities. This implies that greenspace resources in shrinking cities are distributed more evenly, enhancing the overall environmental quality for residents. By contrast, growing cities tend to exhibit more severe inequalities in greenspace exposure, with the average inequality level being 1.16 times higher than in

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2023YFF1304705); 国家自然科学基金 (52308074)

收稿日期: 2024-06-01; **采用日期:** 2024-10-21

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zuowei@tju.edu.cn

shrinking cities. These disparities can be attributed to market forces that prioritize land value in growing cities, often leading to the underprovision of greenspace unless actively mitigated by administrative planning or policy interventions. Furthermore, approximately 24% of the cities studied had Gini coefficients exceeding 0.6, indicating extreme inequality. These findings suggest that unchecked population and land use expansion in growing cities exacerbate greenspace inequity, which could be mitigated through targeted planning efforts such as green infrastructure integration and land-use regulations. This research highlights the need for urban policymakers to prioritize improving greenspace distribution, especially in growing cities, where market pressures may lead to the marginalization of greenspace. Meanwhile, in shrinking cities, strategies such as the greening of brownfields and underutilized spaces could further enhance urban sustainability and equity. In conclusion, this study underscores the critical relationship between urban development models and greenspace distribution patterns, providing a foundation for differentiated planning and policy interventions aimed at achieving balanced and sustainable urban growth. Future research should focus on expanding this analysis to a national scale and incorporating more comprehensive metrics for greenspace quality, including distinctions between natural and artificial greenspace.

Key Words: urban greenspace exposure; urban greenspace exposure inequity; shrinking cities; Yangtze River Midstream Urban Agglomeration

城市绿地在生态、社会和经济功能上发挥着重要作用^[1],特别是在保障和提升居民身心健康方面具有积极影响^[2]。然而,城市绿地的时空破碎化和时空不平衡现象,影响了居民平等地享有绿地权益^[3]。此外,收缩城市的人口流失、重构以及绿地“再分配”和“再利用”现象,影响了“人”“绿”的时空关系^[4]。这些现象是否会影响收缩城市的绿地暴露?同样的,与增长城市相比,收缩城市绿地暴露及不平等性是否具有显著差异?在收缩城市日益增多的今天,上述问题值得进一步探索。

城市绿地暴露是评估城市人口和绿地时空关系的有力手段,广受学界关注^[5]。目前,关于城市绿地暴露的研究大致可分为三个领域。一是从城市绿地暴露理论入手,以描述总结或文献计量等方法为抓手,对城市绿地暴露的作用、途径、过程和特征等方面进行理论和文献研究的综合性文章^[6-7]。这些研究尤其关注绿地暴露的途径、量化方法和对居民健康的效应量关系^[8],并指出人口和绿地的时空匹配性是实现更优城市绿地暴露的关键。例如,吝涛等^[9]从暴露特征、量化表征和健康效应等方面系统论述了城市绿地暴露及其系统作用,认为该领域亟须建立通用理论和普适的绿地暴露量化指标。王兰等^[10]基于呼吸系统疾病视角,分析了绿地暴露方面同类研究结论不一致的潜在原因,强调了应用统一分析方法和数据的重要性。第二个领域是在问卷或者健康普查数据的基础上,从微观尺度探讨城市绿地暴露对居民健康的作用特征。例如,李智轩等^[11]结合问卷和街景数据,使用结构方程模型测度了绿地暴露与居民心理健康的效应。杨博逸等^[12]则从多个横截面和短期研究结果出发,对已有绿地暴露和健康关联进行对比,得出不同区域、社会经济地位等要素对于分析结果的差异化作用。更有学者从居民需求入手,探讨了不同社会经济地位群体在绿地空间惠宜过程中的差异化现象^[13]。相关研究证实了不同收入或地位人群获取绿地的差异。三是从宏观尺度入手,应用遥感数据对城市绿地暴露及不平等现象进行长时间序列的探究。Chen 等^[14]以全球 1028 个大城市为着眼点,验证了 Global North 城市在城市绿地暴露不平等上的显著优越性。Song 等^[15]则以城市扩张为主要关注点,分析了中国 290 个地级市及以上城市的绿色环境状况。相关研究揭示了不同区域城市或新老建成区间绿地暴露差异的程度^[16]。总的来说,现有研究成果丰富且全面,并验证了不同城市、国家乃至大陆之间城市绿地暴露不平等的存在。但对于收缩城市这一数目日益增多的城市类型中绿地暴露的特殊性研究相对缺乏,忽视了收缩城市居民的绿地权益^[17]。

收缩城市中绿地等人居环境要素的变化,也引起了诸多学者关注。Zhu 等^[18]指出收缩城市中破败的绿地往往有损公众健康。然而,另有学者认为收缩城市更易获得优质绿地^[19],并具有较低的开发和维护成本,从而具有可持续发展的可能^[20]。目前,日益增多的收缩城市所涉及地区和人口广泛程度的增加,提升了收缩

城市居民绿地权益的研究的必要性。在我国,增长和收缩城市等城市发展模式对绿地暴露的影响路径和逻辑经历了以下演变。改革开放至 21 世纪初是中国城镇化水平和用地规模翻番上升阶段,增长城市在这一阶段扮演了主角^[21]。在此期间,城市发展以效率为先、规模为重,用地的低效蔓延促使建筑、铺砖等不透水面迅速取代原有的生态空间。重建设、轻更新的发展路径辅以符合规范下限的绿化指标,造成绿地规模下降、质量弱化和空间破碎^[22]的同时迫使区域生态系统失稳^[23]。上述种种现象,使得城市绿地丧失了保育能力,造成了城市绿地覆盖总量的大量下滑,后续虽有所好转,但绿地空间分布也日趋紧张^[24]。近年来,随着以人口规模下降为主要特征的收缩城市日益增多^[25],城市人口规模变动和人口的时空重构同样改变了居民和城市绿地的时空相互关系,导致城市绿地暴露的变化。在收缩城市中,人口规模的下降促使城市从以往的扩张式蔓延逐渐转向扩张与填充相结合的致密化模式^[26]。同时,收缩城市的居民倾向于动迁至成本更低或生活更便利的城市中心或大型绿地周边,更容易造成城市绿地暴露的空间失调^[27]。另外,人口规模的下降往往意味着城市活力的丧失和公共服务的失位,这使得新建或改善城市绿地规模和质量更为困难。然而,仍有收缩城市走出了高水准低成本的绿地优化路径^[28]。综上所述,收缩城市中的城市绿地既面临挑战,也存在机遇。但纵观现有文献,缺乏对增长和收缩城市间的系统化比较,相关路径虽在不同研究中得到了验证^[29],但通常仅基于收缩城市的单一视角^[16],无法体现增长和收缩城市绿地暴露的差异。

为弥补收缩城市居民绿地权益研究不足的缺陷,本文选取增长与收缩城市并存的长江中游城市群作为研究范围,基于 2020 年的归一化植被指数和人口规模栅格数据,重点探讨增长和收缩城市间城市绿地暴露及不平等的差异。本文重点解决以下两个问题:(1)长江中游城市群城市居民与绿地的空间关系如何,即绿地暴露水平;(2)因发展模式和导向的不同,增长和收缩城市绿地暴露及不平等有无差异及差异程度如何?在收缩城市日益普遍的今日旨在为城市群生态优化、绿地等方面提供科学依据和指导。

1 材料与方法

1.1 研究范围

拥有“一江两湖”优势资源并肩负重大的经济社会责任的长江中游城市群^[30],以丰富的湿地和动植物资源著称,是具有相当生态敏感性和经济地位的国家级生态安全屏障区^[31]。该区域国土面积约为 32 万 km²,常住人口规模高达 1.3 亿。同时,有学者指出^[32],该区域增长与收缩城市并存。总而言之,生态环境和城市的螺旋式发展,促使该区域下垫面生态本底急速变化,并影响城市绿地暴露和平等性问题^[33],使得居民的绿地权益受到影响。

本文参考国家发展改革委印发的《长江中游城市群发展“十四五”实施方案》,选取湖北省、湖南省和江西省境内的 218 个县级行政单元(后称城市)作为研究范围和研究单元(图 1)。

城市绿地暴露往往考虑的是城市集中建成区内的居民接触绿地的范围和程度,是一个具有空间限定的具化指标。因此,本文使用 global artificial impervious area 数据集来界定城市建成区范围^[34]。该数据集具有算法统一、分辨率高和多时相等优点。

1.2 研究数据

所用研究数据包括归一化植被覆盖指数数据(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)和人口规模栅格数据。其中,NDVI 数据来源于 MOD13A1 V6 Terra 卫星的中分辨率成像光谱仪 MODIS/006/MOD13A1,并且基于 Google Earth Engine 平台进行年度最大值合成所得。人口规模栅格数据则主要采用未调整的 1000m 空间分辨率的 Worldpop 数据集。该数据具有较高的时空分辨率,已被广泛运用于城市人口规模计算、城市建成区识别和城市绿地分析等方面的研究^[35]。

1.3 研究方法

1.3.1 研究流程和技术路线

结合图 2,对研究思路进行简要说明。本文综合考虑 worldpop 人口栅格和第六、七次全国人口普查数据,

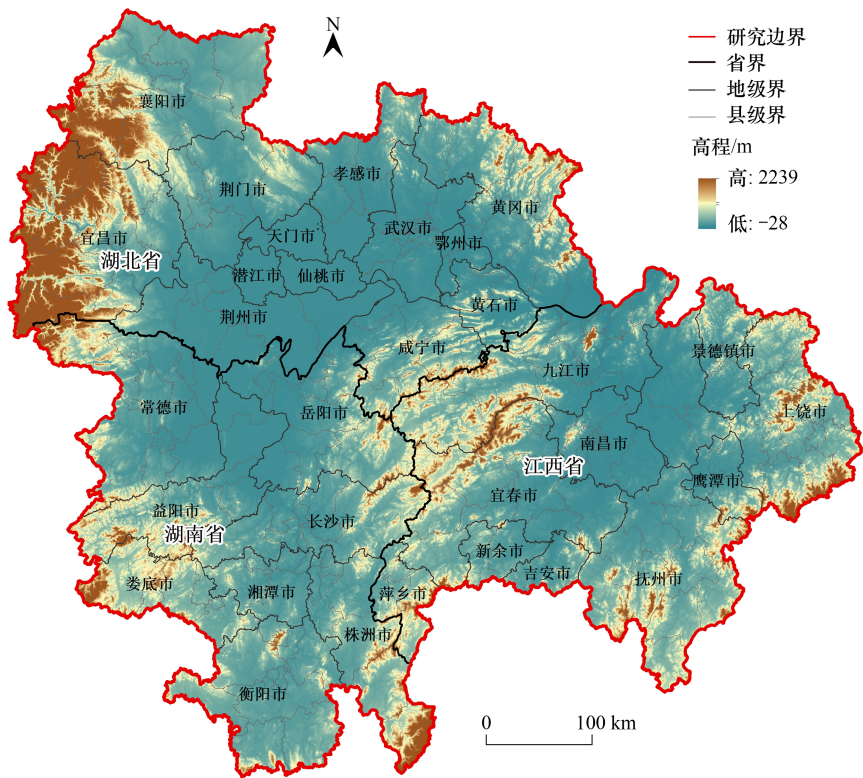


图 1 研究范围及单元示意

Fig.1 Research scope and unit schematic

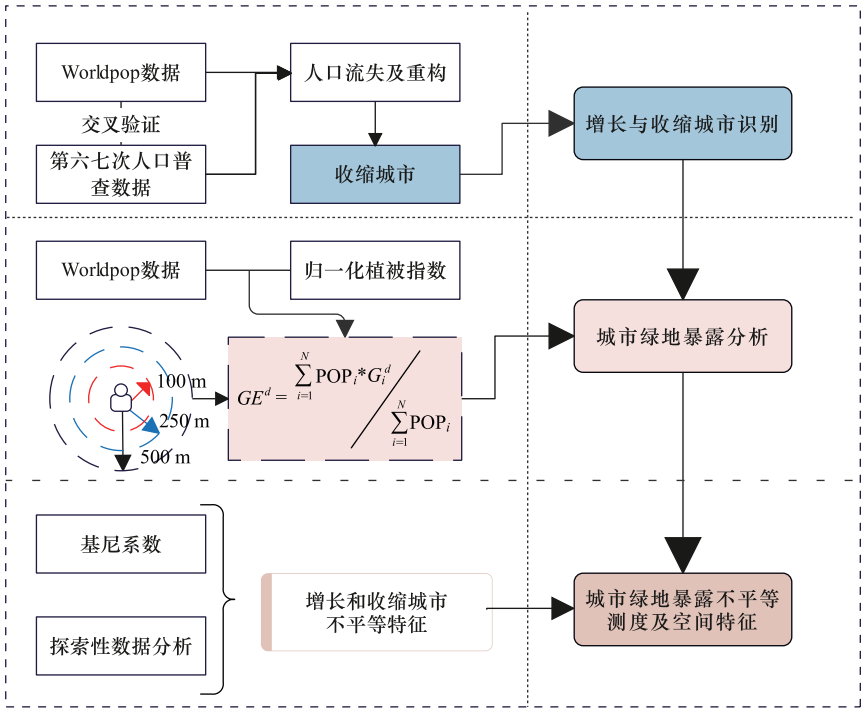


图 2 研究技术路线

Fig.2 Research technology route

GE_d 为在 d 的缓冲区半径下的绿地暴露, POP_i 为栅格点 i 的人口值, G_i^d 则表示第 i 个栅格在 d 的缓冲区半径下的绿地覆盖

将人口规模下降作为收缩城市的识别依据。计算结果显示,长江中游城市群中共有 132 个收缩城市,占比约为 60%,并将其余城市定义为增长城市;并将增长和收缩城市统称为城市发展模式。另外,后文所称“收缩城市”专指城市建成区内人口减少的县级行政单元,反之为“增长城市”。本文主要聚焦于城市绿地暴露及其不公平性,因此对收缩型城市的具体分析不在本文讨论范围内。随后,本文借鉴人口加权城市绿地暴露模型,对居民常用出行半径(500m)内的居民与城市绿地的空间关系进行准确测度,并使用 100m、250m 等不同出行半径进行敏感性检验,以获取城市绿地暴露结果。最后,本文采用基尼系数作为测度不平等的指标,并使用探索性数据分析等方法对增长和收缩城市绿地暴露不平等进行数值和空间分析,以实现明确不平等程度的目标,并为提升绿地暴露的公平性提供依据。

1.3.2 人口加权城市绿地暴露模型

目前,城市绿地暴露的度量指标主要侧重于绿地供给能力^[9,35],由此衍生出了绿地可获得性^[36]、绿地可达性^[37]和绿视率等评价方法。但上述方法存在忽视居民和绿地空间分布关系的弊端。为弥补上述不足,提出人口加权绿地暴露模型^[38]。该模型能够统筹人口和绿地的空间关系^[39],实现自下而上科学评估城市绿地暴露的目的。具体公式如下:

$$GE^d = \frac{\sum_{i=1}^N P_i \times G_i^d}{\sum_{i=1}^N P_i} \quad (1)$$

式中, P_i 代表第 i 个单元的人口规模, G_i^d 则表示第 i 个单元在 d 的缓冲区半径下的绿地覆盖, N 为单元个数, GE_d 则是相应的城市绿地暴露。

考虑到本文数据形式和计算思路,在公式(1)的基础上构建基于栅格点的城市绿地暴露模型,具体公式如下:

$$GE_i = \frac{P_i}{\bar{P}} \times G_i \quad (2)$$

式中, GE_i 为第 i 个栅格处的绿地暴露, P_i 为该栅格的人口规模, $\bar{P}$ 则表示相应分析单元中所有栅格点的人口规模均值, G_i 为该点的绿地覆盖。

由此,基于人口加权城市绿地暴露模型,对单个栅格点以及县级行政单元的绿地暴露进行测度和科学量化。

1.3.3 基尼系数度量

基尼系数作为衡量国家或地区收入分配不均衡程度的主要指标^[14],已被广泛应用于城市绿地不平等研究。常用公式如下^[40]:

$$\text{Gini} = \sum (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (3)$$

式中, x_i 为各单元人口累计百分比, y_i 为指标的累计百分比,其中 i 表示各单元指标由小到大的排序号,Gini 为基尼系数的计算结果。Gini 值处于[0,1]的区间,其值越小,表明单元间差异越小。该方法主要应用场景是不同组别、不同个体间城市绿地暴露不平等的度量,主要是 2.2 部分。

参考联合国开发计划署和相关文献^[41],本文对基尼系数的数值分布进行如下界定:基尼系数低于 0.300 可称为“平衡状态”,是指不同城市或分组间城市绿地暴露平等性较高;0.300—0.399 表示相对均衡,为“合理状态”;0.400 则是差距较大的警戒线,是“预警状态”的起始值;0.600 以上表示差距极为悬殊,称为“危险状态”^[41]。

1.3.4 组间差异检验

为检验增长和收缩城市绿地暴露及不平等的组间差异,本文使用 stata 软件中的 t test 命令对两组样本间的均值差异进行比较。该命令原理如下:独立样本 t 检验(independent two-sample t -test)是用于比较两组独立

样本的均值是否存在显著差异,根据样本方差是否相等,可选择等方差(pooled) *t* 检验或不等方差(unpooled) *t* 检验。其中不等方差 *t* 检验(Welch's *t* 检验)公式如下:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \tag{4}$$

式中, $\bar{X}_1$ 和 $\bar{X}_2$ 分别为两组样本的均值, n_1 和 n_2 为两组样本的大小, s_1 和 s_2 为两组样本的标准差。在本文中,该方法常见于增长和收缩城市间绿地暴露及其不公平显著性的度量。

1.3.5 探索性数据分析

以地理学第一定律为核心的空间自相关分析方法被广泛应用于城市生态和绿地方面的研究^[42]。空间自相关的主要度量方法包括 Moran's *I*^[43] 和 local indicators of spatial association^[44] 等。上述方法分别用于全局和局部空间自相关度量,用于本文空间分析部分。

2 结果与分析

2.1 城市绿地暴露特征分析

对长江中游城市群城市绿地覆盖进行分析。采用 100、250m 和 500m 等三种出行半径对城市建成区内城市绿地覆盖进行计算^[38],探讨增长和收缩城市间的差异(表 1)。

表 1 增长和收缩城市绿地覆盖描述统计

Table 1 Describes of green space coverage in growing and shrinking cities

出行 半径/m Travel radius	增长城市 Growing cities				收缩城市 Shrinking cities			
	江西省 (71 个) Jiangxi Province	湖北省 (82 个) Hubei Province	湖南省 (65 个) Hunan Province	所有增 长城市 Total	江西省 (71 个) Jiangxi Province	湖北省 (82 个) Hubei Province	湖南省 (65 个) Hunan Province	所有收 缩城市 Total
100	0.328±0.038	0.340±0.032	0.353±0.027	0.340±0.034	0.337±0.043	0.367±0.050	0.348±0.036	0.351±0.045
250	0.328±0.038	0.341±0.032	0.354±0.027	0.341±0.034	0.338±0.044	0.367±0.051	0.349±0.034	0.352±0.045
500	0.330±0.040	0.343±0.032	0.356±0.028	0.344±0.034	0.342±0.046	0.368±0.051	0.352±0.033	0.355±0.046

表中数值为平均值±标准差

如表 1 所示,不同半径结果间差异微弱,100m 和 250m 的结果与居民常用步行出行半径——500m 的差距均在 1%之下。因此,选取 500m 出行半径进行分析。结果表明,城市绿地覆盖的极端低值和高值分别为 0.226 和 0.491,0.350 的均值表明长江中游城市群基本上处于低覆盖水平^[45]。不同城市发展模式下,收缩城市绿地覆盖(均值 0.355)略优于增长城市(均值 0.344),揭示出收缩城市在一定程度上可能更能维持或提升其绿地水平。

为探索城市绿地覆盖和城市绿地暴露间的差异,应用 1.3.2 中的人口加权城市绿地暴露模型进行计算,并获取描述统计表(表 2)和城市绿地暴露分布图(图 3)。

对比城市绿地暴露(增长城市均值为 0.326,收缩城市均值为 0.341)和城市绿地覆盖(增长城市均值为 0.344,收缩城市均值为 0.355)可得,城市绿地覆盖可能被高估。即单纯依据绿地时空和数量分布的绿地覆盖更容易表现为相对高值。

随后重点分析城市绿地暴露水平。从城市个体来看,南昌市的西湖区和东湖区等位于城市绿地暴露榜单倒数前列;类似的现象也出现在人口较多的武汉市硚口区和武昌区等市辖区。这与上述省会区域的发展惯性和改造难度密切相关。以南昌市为例,西湖区和东湖区同样表现为收缩。作为南昌市的老城区,上述地区面临开发早、建设密、标准低、改造难等难题;仅能够保留以人均绿地标准为下限的城市绿化标准。另外,大量存在的城中村进一步加大了存量改造和提升了的难度。外加近年来,南昌市陆续通车的轨道交通线路,大大刺激

了城市建设用地的快速外延和线路沿线用地的迭代升级,挤占了绿地建设,进一步弱化了人口和绿地的空间关系,中心城区绿地暴露水平不断下跌。如此一来,居住环境恶化,人口外移,造成城市收缩和绿地萎缩,影响了城市绿地暴露水平。相对而言,人口规模较小的江西省铜鼓县和湖北省五峰土家族自治县表现出了较优的城市绿地暴露。这些城市由于城市化进程缓慢、自然资源丰富,保留了原有的自然本底,因此能够在较低的人口规模下实现相对优质的绿地暴露,达到“出门见绿,移步见景”的效果。

表 2 增长和收缩城市绿地暴露描述统计

Table 2 Describes of greenspace exposure in growing and shrinking cities

出行 半径/m Travel radius	增长城市 Growing cities				收缩城市 Shrinking cities			
	江西省 (71 个) Jiangxi Province	湖北省 (82 个) Hubei Province	湖南省 (65 个) Hunan Province	所有增 长城市 Total	江西省 (71 个) Jiangxi Province	湖北省 (82 个) Hubei Province	湖南省 (65 个) Hunan Province	所有收 缩城市 Total
100	0.316±0.046	0.324±0.034	0.332±0.040	0.324±0.040	0.328±0.053	0.350±0.055	0.338±0.035	0.339±0.050
250	0.315±0.044	0.326±0.033	0.323±0.040	0.325±0.040	0.328±0.053	0.350±0.055	0.339±0.033	0.340±0.050
500	0.316±0.045	0.327±0.033	0.335±0.042	0.326±0.404	0.330±0.054	0.351±0.055	0.342±0.034	0.341±0.050

表中数值为平均值±标准差

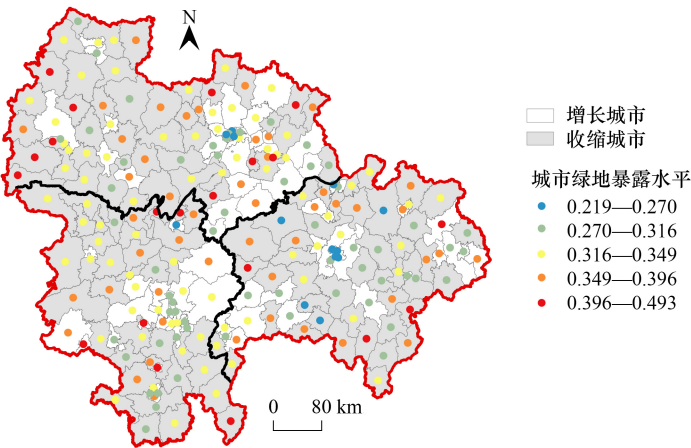


图 3 城市绿地暴露空间分布

Fig.3 Spatial distribution of urban greenspace exposure

点为建成区质心

为进一步探索城市绿地暴露的空间特征,本文应用 1.3.5 中所述的 Moran's *I* 指数对全局空间自相关进行测度,所得结果:Moran's *I* 为 0.490,*z* 值为 9.915,*P* 值为 0.000;该结果验证了显著的正向全局空间自相关的存在。本文对城市绿地暴露的局部空间自相关特征进行分析,所得结果如图 4、5 所示。

结果显示,高高聚集区域呈现出点团状散乱分布的空间态势,其分布模式在自然条件和城市发展方面表现出显著的双重特征。具体来说,高高聚集区主要由两部分组成:一是自然条件优越但城市化缓慢并重的自然优势区,主要集中在研究区西部云贵高原和大巴山交界处,少数依附于北侧的秦岭山脉;另一部分则是城市化进程稳定且和谐的城市密集区,以长沙市辖区为主要代表。上述特征充分体现了自然条件和城市建设对于绿地覆盖的综合影响。低低聚集区的空间规律明显,在空间上形成南昌市辖区和武汉市辖区两个“空间俱乐部”。进一步的分析表明,这些聚集区内的城市人口规模普遍较大,而且城市绿地暴露普遍低于平均水平,呈现出数量与空间双重定位的特点。从数据分布态势来看(图 5),高高聚集组在表现为均值最高的同时,呈现出极值差距大、均值附近数据少的态势,说明了高高聚集内部也存在一定的异质性,表明了分析个体或空间异

质性方法的重要性。

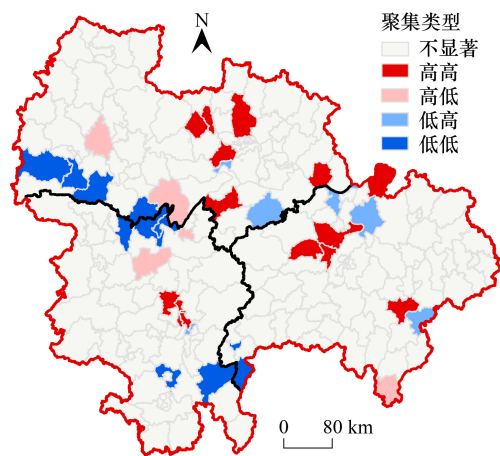


图 4 城市绿地暴露局部空间自相关

Fig.4 Local indicators of spatial association of urban greenspace exposure

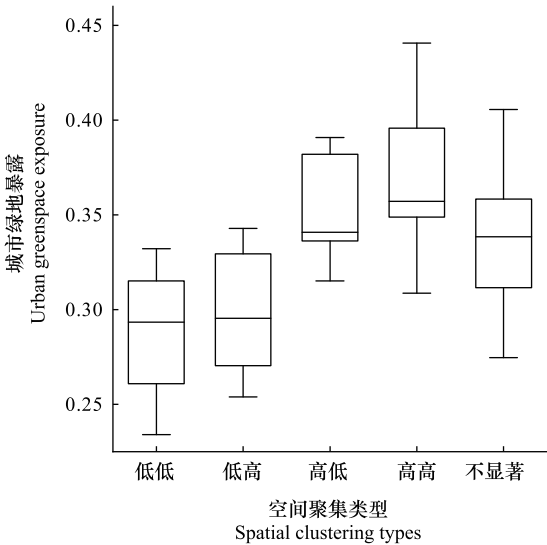


图 5 局部空间自相关聚类箱型图

Fig.5 Box diagram of local indicators of spatial association

2.2 城市绿地暴露不平等特征分析

本文使用 1.3.3 中所述基尼系数等方法对城市绿地暴露不平等进行测度,所得描述统计结果如表 3 所示,同时绘制绿地暴露不平等分布图(图 6)和分城市发展模式箱型图(图 7)。

表 3 增长和收缩城市绿地暴露不平等描述统计

Table 3 Describes of urban greenspace exposure inequity in growing and shrinking cities

出行 半径/m Travel radius	增长城市 Growing cities				收缩城市 Shrinking cities			
	江西省 (71 个) Jiangxi Province	湖北省 (82 个) Hubei Province	湖南省 (65 个) Hunan Province	所有增 长城市 Total	江西省 (71 个) Jiangxi Province	湖北省 (82 个) Hubei Province	湖南省 (65 个) Hunan Province	所有收 缩城市 Total
100	0.553±0.105	0.554±0.132	0.532±0.118	0.547±0.119	0.496±0.121	0.479±0.139	0.428±0.130	0.470±0.132
250	0.550±0.106	0.553±0.133	0.532±0.118	0.545±0.120	0.495±0.121	0.478±0.139	0.427±0.130	0.469±0.132
500	0.546±0.107	0.552±0.135	0.531±0.118	0.544±0.120	0.492±0.121	0.478±0.140	0.430±0.131	0.468±0.133

表中数值为平均值±标准差

正如表 3 所示,100m 和 250m 半径的结果,与常用的 500m 出行半径具有相当的一致性,差距仅为 -1.282%和-0.732%;说明 500m 的相关结果可为城市绿地优化提供可靠的指导。另外,如图 6 和 7 所示,度量城市群中城市绿地暴露不平等的基尼系数均值高达 0.497,远超 0.4 的不平等警戒线。

就城市绿地暴露不平等的分布特征来看,仅有约 6%的城市基尼系数低于 0.300,尚处于“平衡状态”(基尼系数低于 0.300)。此类城市多为人口规模较小的收缩城市。此类城市坐拥优质绿地资源的同时人口多集中在城市中心,故实现了城市绿地暴露的内部均衡。在空间上,此类城市散乱分布于山区地区,并与区域中心城市-省会遥遥相望。另外,约 21%的城市的绿地暴露处于“合理状态”(基尼系数位于 0.300—0.399 之间);典型代表包括汨罗市、萍乡市湘东区等非省会城市。上述城市主要集中在研究区西部,由西部的大巴山-云贵高原和东部罗霄山脉-九嶷山拱卫呈从北至南的连续带状区域。然而,约有 73%的城市基尼系数越过了 0.4 的警戒线;此类城市广泛且蔓延分布在研究区内,涵盖多种地形地貌和城市类型。其中,甚至有 24%左右的城市绿地暴露进入到“危险状态”的区间(基尼系数大于 0.600),并形成了武汉市、南昌市市辖区两大空间集团,

突显了高密度城市人绿空间失衡的问题。

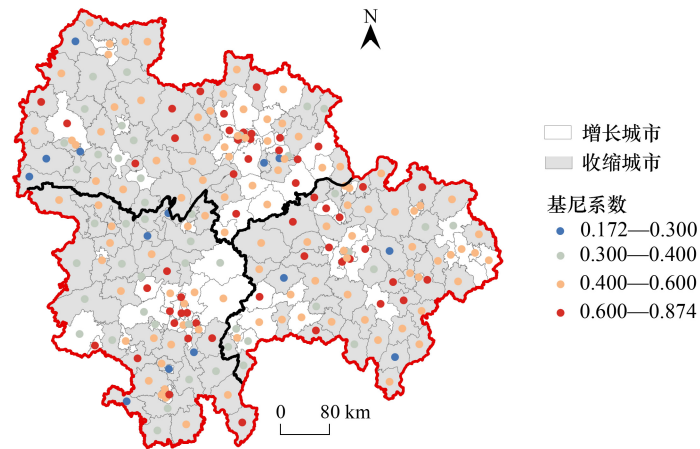


图6 城市绿地暴露不平等空间分布

Fig.6 Spatial distribution of urban greenspace exposure inequality

点为建成区质心

不同城市发展模式间差异显著,收缩城市显著优于增长城市。具体而言,收缩城市基尼系数(均值为0.468)与增长城市(均值0.544)间差异显著。并使用 t test 命令对组间差异进行假设检验,检验结果中 $t = 4.371$, Satterthwaite's degrees of freedom = 194.162, 显著拒绝了组间差异为0的原假设,确认组间差异的存在。另外,湖南省在城镇化进程相似、城市规模差异较小的情况下,为避免“强省会”的虹吸效应,采取了大中小城市协同发展的策略,尊重自然的发展理念,成功实现了城镇体系优化和自然环境和谐发展,使得城市人口与绿地的空间关系相对协调,从而实现了较好的公平性。同样的,该结果显示,我国城市发展模式与城市绿地暴露存在脱钩现象,在提振收缩城市发展,优化增长城市道路的今天,迫切需要针对城市绿地等生态文明建设和人居环境福祉等进行妥善的规划和建设。

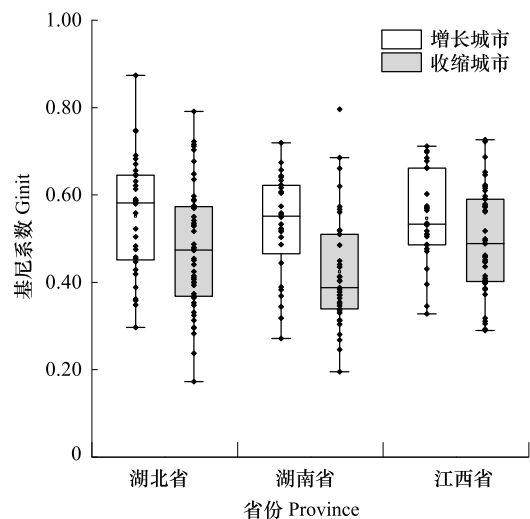


图7 城市绿地暴露不平等箱型图

Fig.7 Box diagram of greenspace exposure inequality

具体到城市个体层面,人口最多的十个城市呈现出不同的不平等特征。其中,武汉市洪山区(基尼系数为0.690)、武汉市武昌区(基尼系数为0.517)、长沙市雨花区(基尼系数为0.644)的不平等程度严重。相较之下,武汉市江汉区(基尼系数为0.313)、武汉市硚口区(基尼系数为0.415)却表现为相对的平等。但值得注意的是,武汉市硚口区,同样出现在城市绿地暴露倒数前列。结合相关文献可得,诸如武汉市硚口区等表现为人口总量收缩、但新建城区开发活跃、活力充足的的城市,其新建城区往往具有优质的绿地等公共资源和人口吸引力^[28]。这导致原有城区人口和绿地双下降、新建城区人口和绿地均上升,从而加剧了城市内部的不平等。而不平等程度最高的十个城市,基本上均为人口规模和经济体量较小且地形起伏程度较高的收缩型山地城市。此类城市多受地形限制,人口多集中在“崎岖逼狭”的山间谷地中,不免为求生存而向周边用地寻求建设机会,导致建设区极易呈点状或带状的飞地式蔓延而“插入”周边绿地中^[46]。如此一来,新建城区人口规模和绿地均得到较大提升,对比老城区而言更易获得较好的绿地暴露,从而形成了较为严重的不平等现象。

然而,长沙市岳麓区(基尼系数为 0.720)同样跻身不平等城市前列,辖区内岳麓山风景名胜区等优质绿地资源广泛分布于辖区内,逐渐增强的绿地空间聚集程度^[47]吸引了人口在绿地周边集中^[48],但占地面积巨大的绿地资源,难以全部为居民平等适用,加剧了不平等的程度。

3 讨论

本文研究结果表明,相较于增长城市,收缩城市的绿地覆盖和暴露上表现更佳;城市绿地暴露平等性也更优,增长城市的不平等性程度约为收缩城市的 1.16 倍。由此可见,收缩城市居民居住环境附近的绿地供应更为均衡且平等。人口持续增长和用地不断扩张的增长型城市的土地价值被市场化,绿地等公共物品的价值受到更多的压缩,只有通过行政规划等手段才能为城市增加绿地^[49]。在一定程度上加剧了增长城市的绿地不平等。

这一发现有助于明确减小城市环境平等性差异的政策导向和规划对策的优先顺序。实现协调人口、用地增长与城市绿地等生态环境和谐发展的可持续目标。此外,城市群尺度的研究为省级乃至中央政府对城市发展动态和绿地暴露之间可能存在的脱钩现象提供了进一步的证据和支持^[50]。基于不同城市发展模式的差异化结果,有助于明确识别人口和绿地在空间上的高度脆弱地区,有助于在绿地暴露有限但不平等性严重的城市实现优先改善绿地配置的问题^[51]。

此外,从绿地相关指标可以看出,既往关于绿化率、人均绿地面积、绿地占总建设用地的比例等传统的“环境平等”三大规划指标^[52]难以满足或者说无法保证平等地满足居民对绿地的需求^[53],因此城市绿地平等应从“地域均等”转向相对平等的“群体均好”^[54]。简单来说,就是关注不同城市类型中各类人群对于绿地的价值判断。如收缩城市中,部分留驻人口往往缺乏足够的空间转移能力,可通过优化城市中闲置用地、棕地绿化、重构邻里布局等方式实现可持续的绿地发展^[55-56];而增长城应关注人口的空间汇流区位,或引导人口“潮流”或提升“洼地”绿化,实现人口和绿地的空间协调。

4 结论与不足

4.1 研究结论

(1)城市绿地覆盖均值约为 0.35,属低覆盖水平;收缩城市绿地覆盖略优于增长城市。

(2)城市绿地暴露方面,普遍低于城市绿地覆盖,揭露了城市绿地覆盖可能被高估的现状。收缩城市显著优于增长城市;并且多数省会城市市辖区在表现为收缩的同时,拥有较低的城市绿地暴露。

(3)在城市绿地暴露不平等方面,增长城市不平等(均值 0.544)程度约为收缩城市(均值 0.468)的 1.16 倍。研究区内城市绿地暴露不平等程度(基尼系数均值 0.497)已超过警戒线,甚至有 24%城市的基尼系数超过 0.6,进入“危险状态”。但收缩城市(基尼系数均值为 0.468)远比增长城市(均值为 0.544)平等,揭露了城市发展模式与绿地暴露脱钩的情况。人口最多的十大城市不平等现象差异明显,反而是人口较少的城市获得了较优的平等程度。

4.2 研究不足

选取长江中游城市群进行分析,虽能够为局部地区提供有价值的地方性见解和针对性建议,但无法捕捉到全国范围内城市人口和绿地空间关系的宏观趋势和模式。二是,无法准确测度城市内部关系。如绿地暴露和基尼系数结果冲突较大的武汉市硚口区,虽然采用相同的分析方法和数据对城市群内各城市的绿地情况进行了详细、系统且连续的分析,但无法对城市内部绿地和人口的空间关系进行细致度量。辨析重点区域,选取典型城市进行中微观尺度分析。三是绿地指数多样化不足。以常用的 NDVI 指数作为城市绿地暴露的衡量指标,但该指数多体现的是整体植被密度和数量,是无量纲指标,可提供经验化的类型阈值范围。但作为一种简化的绿地表达方式,该指数既无法有效准确地区分绿化类型、种类,也丧失了对人工和自然绿地加以甄别的能力。后续研究应使用更为全面和立体的遥感数据,对城市绿地类型、种类进行细化辨别。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Maes M J A, Pirani M, Booth E R, Shen C, Milligan B, Jones K E, Toledano M B. Benefit of woodland and other natural environments for adolescents' cognition and mental health. *Nature Sustainability*, 2021, 4: 851-858.
- [3] Chen B, Nie Z, Chen Z Y, Xu B. Quantitative estimation of 21st-century urban greenspace changes in Chinese populous cities. *Science of the Total Environment*, 2017, 609: 956-965.
- [4] Li G Q, Feng L, Zhang X, Hu J N, Liang Y Q. Will urban shrinkage affect the level of basic public services supply? —the empirical evidence from 298 prefecture-level cities in China. *Cities*, 2024, 149: 104875.
- [5] Zhang J G, Yu Z W, Zhao B, Sun R H, Vejre H. Links between green space and public health: a bibliometric review of global research trends and future prospects from 1901 to 2019. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(6): 063001.
- [6] 杨春, 谭少华, 董明娟. 基于 ESs 的城市绿地健康影响研究: 服务功能、内涵及机制. *中国园林*, 2021, 37(3): 32-37.
- [7] 杨春, 谭少华, 高银宝, 董明娟, 陈璐瑶. 基于荟萃分析的城市绿地居民健康效应研究. *城市规划*, 2023, 47(6): 89-109.
- [8] 邵大伟, 伍萱, 吴殿鸣. 基于文献计量分析的国外城市绿地与居住空间关系研究进展及其转向. *现代城市研究*, 2022, 37(9): 34-42.
- [9] 吝涛, 曾志伟, 姚霞, 耿红凯, 余兆武, 王兰, 林美霞, 张浚茂, 郑毅诚. 城市绿地暴露与人群健康效应研究. *生态学报*, 2023, 43(23): 10013-10021.
- [10] 王兰, 张雅兰, 汪子涵. 针对慢性非传染性呼吸系统疾病的绿色空间定量研究进展. *南方建筑* 2021, (3), 1-7.
- [11] 李智轩, 何仲禹, 张一鸣, 金霜霜, 王雪梅, 朱捷, 刘师岑. 绿色环境暴露对居民心理健康的影响研究——以南京为例. *地理科学进展*, 2020, 39(5), 779-791.
- [12] 杨博逸, 张一丹, 黄文忠, 董光辉. 绿地暴露与中国人群健康关联的研究进展. *环境与职业医学*, 2022, 39(1), 30-35.
- [13] 杨赫, 曾智, 陈天宇, 米锋. 居民需求视角下超大城市绿色空间的公平性研究——来自天津市 1655 个微观样本的证据. *城市问题*, 2021(10): 36-45.
- [14] Chen B, Wu S B, Song Y M, Webster C, Xu B, Gong P. Contrasting inequality in human exposure to greenspace between cities of Global North and Global South. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4636.
- [15] Song Y M, Chen B, Kwan M P. How does urban expansion impact people's exposure to green environments? A comparative study of 290 Chinese cities. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 246: 119018.
- [16] Lu Y T, Chen R N, Chen B, Wu J Y. Inclusive green environment for all? An investigation of spatial access equity of urban green space and associated socioeconomic drivers in China. *Landscape and Urban Planning*, 2024, 241: 104926.
- [17] Chen J, Kinoshita T, Li H Y, Luo S X, Su D E, Yang X Q, Hu Y Q. Toward green equity: an extensive study on urban form and green space equity for shrinking cities. *Sustainable Cities and Society*, 2023, 90: 104395.
- [18] Zhu R, Newman G, Li D Y, Song Y, Zou L. Associations between vacant urban lands and public health outcomes in growing and shrinking cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2023, 89: 128127.
- [19] Frazier A E, Bagchi-Sen S. Developing open space networks in shrinking cities. *Applied Geography*, 2015, 59: 1-9.
- [20] Mullenbach L E, Stanis S A W, Piontek E, Baker B L, Mowen A J. Centering environmental justice: Gentrification beliefs, attitudes, and support of park development in a shrinking city. *Landscape and Urban Planning*, 2021, 216: 104253.
- [21] 徐智邦, 焦利民, 王玉. 1988—2018 年中国城市实体地域与行政地域用地扩张对比. *地理学报*, 2022, 77(10): 2514-2528.
- [22] 王静, 周伟奇, 许开鹏, 颜景理. 京津冀地区城市化对植被覆盖度及景观格局的影响. *生态学报*, 2017, 37(21): 7019-7029.
- [23] 唐茂钢, 王克强. 经济发展、土地城市化与环境质量. *华东师范大学学报(哲学社会科学版)*, 2018, 50(2), 137-147, 173.
- [24] Huang C H, Yang J, Clinton N, Yu L, Huang H B, Dronova I, Jin J. Mapping the maximum extents of urban green spaces in 1039 cities using dense satellite images. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(6): 064072.
- [25] 孟祥凤, 马爽, 项雯怡, 阚长城, 吴康, 龙瀛. 基于百度慧眼的中国收缩城市分类研究. *地理学报*, 2021, 76(10): 2477-2488.
- [26] He Q S, Zeng C, Xie P, Tan S K, Wu J Y. Comparison of urban growth patterns and changes between three urban agglomerations in China and three metropolises in the USA from 1995 to 2015. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 50: 101649.
- [27] Lewis O, Sousa S, Pinho P. Multifunctional Green Infrastructure in Shrinking Cities: How Does Urban Shrinkage Affect Green Space Planning? *Urban Planning*, 2022, 7, 186-201.
- [28] Nefs M, Alves S, Zasada I, Haase D. Shrinking cities as retirement cities? opportunities for shrinking cities as green living environments for older individuals. *Environment and Planning A: Economy and Space*, 2013, 45(6): 1455-1473.

- [29] Chen B, Tu Y, Wu S B, Song Y M, Jin Y F, Webster C, Xu B, Gong P. Beyond green environments: Multi-scale difference in human exposure to greenspace in China. *Environment International*, 2022, 166: 107348.
- [30] 梁玉琦, 危小建, 江平, 蔡进, 谢名睿. 基于力学平衡模型的生态系统服务协同与权衡关系研究——以长江中游城市群为例. *中国环境科学*, 2023, 43(11): 5974-5986.
- [31] 吕添贵, 邱蓉, 赵巧, 李锐, 陈安莹, 肖佳. 基于 DPSIRM 模型的长江中游城市群生态安全时空特征及障碍因素. *水土保持研究*, 2024, 31(2): 379-388.
- [32] 张明斗, 王亚男. 城市收缩的空间格局、异质性与机制分析——以长江经济带 110 个地级及以上城市为例. *江汉论坛*, 2021, (5), 32-40.
- [33] 方云皓, 赵丽元, 窦碧莹, 王书贤, 周枫. 长江中游城市群建成区绿色基础设施对 PM_{2.5} 的消减效应. *生态学报*, 2024, 44(1): 117-128.
- [34] Li X C, Gong P, Zhou Y Y, Wang J, Bai Y Q, Chen B, Hu T Y, Xiao Y X, Xu B, Yang J, Liu X P, Cai W J, Huang H B, Wu T H, Wang X, Lin P, Li X, Chen J, He C Y, Li X, Yu L, Clinton N, Zhu Z L. Mapping global urban boundaries from the global artificial impervious area (GAIA) data. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(9): 094044.
- [35] Labib S M, Lindley S, Huck J J. Spatial dimensions of the influence of urban green-blue spaces on human health: a systematic review. *Environmental Research*, 2020, 180: 108869.
- [36] Bratman G N, Anderson, C B, Berman M G, Cochran B, de Vries S, Flanders J, Folke C, Frumkin H, Gross J. J, Hartig T, Kahn P H, Kuo M, Lawler J J, Levin P S, Lindahl T, Meyer-Lindenberg A, Mitchell R, Ouyang Z, Roe J, Scarlett L, Smith J. R, van den Bosch M, Wheeler B W, White M P, Zheng H, Dail G C. Nature and Mental Health: An Ecosystem Service Perspective., *Science Advances*, 2019, 5(7), eaax0903.
- [37] Ekkel E D, de Vries S. Nearby green space and human health: evaluating accessibility metrics. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 157: 214-220.
- [38] Wu S B, Chen B, Webster C, Xu B, Gong P. Improved human greenspace exposure equality during 21st century urbanization. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 6460.
- [39] Gini C. Measurement of inequality of incomes. *The Economic Journal*, 1921, 31(121): 124-125.
- [40] 施卫国. 一种简易的基尼系数计算方法. *江苏统计*, 1997(2): 16-18.
- [41] 林毅夫; 蔡昉; 李周. 中国经济转型时期的地区差距分析. *经济研究*, 1998, (6), 5-12.
- [42] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 1970, 46: 234.
- [43] Moran P A P. Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika*, 1950, 37(1/2): 17-23.
- [44] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [45] 冯飞, 杨鑫, 贾宝全, 李晓婷, +位作者. 中国 328 个城市的植被覆盖度长期变化特征及其驱动因子. *中国科学: 地球科学*, 2024, 54(2): 486-502.
- [46] 王玺, 周亮, 唐相龙, 陈志杰, 孙东琪. 西北典型山地城市绿色空间时空演化特征——以兰州市为例. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(1): 106-112.
- [47] 周筱雅, 刘志强, 王俊帝, 洪亘伟. 中国建制市人均公园绿地面积的探索性空间数据分析. *生态经济*, 2019, 35(10): 86-93.
- [48] 冉钊, 周国华, 张鸿辉, 唐承丽, 陈伟杨. 城市健康资源与人口分布空间关联性——以长沙中心城区为例. *资源科学*, 2019, 41(8): 1488-1499.
- [49] 梁东成, 陈小奎, 张培培. 城市绿地的经济效益分析与评价. *林业经济问题*, 2012, 32(5): 458-460, 465.
- [50] 哈思杰, 肖志中, 程逸, 汤诚. 脱钩与否? 超大城市公园绿地与建设用地关系矛盾与策略——以武汉市为例. *武汉社会科学*, 2022, (3), 122-127.
- [51] 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.
- [52] 李悦, 郭竹梅. 回归与延展——对现行城市园林绿化指标的思考及建议. *中国园林*, 2017, 33(3): 82-86.
- [53] 陈佑淋, 余珮珩, 李志刚, 王静, 陈奕云. 基于 SDG11 的城市绿地环境公平测度 ——以武汉市中心城区为例. *地理与地理信息科学*, 2021, 37(4): 81-89.
- [54] 周聪惠. 公园绿地规划的“公平性”内涵及衡量标准演进研究. *中国园林*, 2020, 36(12): 52-56.
- [55] 周盼, 吴佳雨, 吴雪飞. 基于绿色基础设施建设的收缩城市更新策略研究. *国际城市规划*, 2017, 32(1), 91-98.
- [56] 黄鹤. 精明收缩: 应对城市衰退的规划策略及其在美国的实践. *城市与区域规划研究*, 2011, 4(3), 157-168.