

DOI: 10.20103/j.stxb.202403310679

徐智邦, 黄毅熠, 雷玮倩, 蓝婷, 王豪伟, 聂镭. 2000—2020 年中国城市绿地与人口的标度关系演化. 生态学报, 2024, 44(24): 11121–11131.

Xu Z B, Huang Y Y, Lei W Q, Lan T, Wang H W, Nie L. Evolving scaling dynamics between urban green space and population in China from 2000 to 2020. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11121–11131.

2000—2020 年中国城市绿地与人口的标度关系演化

徐智邦¹, 黄毅熠¹, 雷玮倩², 蓝婷¹, 王豪伟¹, 聂镭^{1,*}

1 中国科学院城市环境研究所城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021

2 河海大学公共管理学院, 南京 211100

摘要: 作为城市系统的一部分, 城市绿地与系统整体间存在着复杂的相互作用。现有城市绿地研究大多只关注绿地本身, 较少关注其在更宏观城市体系系统中的规律, 对包括规模、质量和分布的绿地多维特征与数量、年龄、性别的社会人口构成之间的潜在非线性时空演化关系鲜有涉足。从复杂系统视角出发, 基于城市标度律理论, 使用 2000—2020 年的多源遥感和人口数据面向中国城市绿地与人口间的多维标度关系演化开展了特征计算, 进一步考虑规模效应识别了城市绿地效能的时空模式。结果显示: 20 年间中国城市绿地与人口总体呈现长期稳健的次线性标度关系, 体现了规模经济效应。绿地标度因子从 0.497 稳步上升至 0.614, 但仍远低于 0.85 的理论值, 反映了城区绿地供应规模的普遍不足, 尤其是对于 60 岁以上的老年人群。不同绿地质量的城市之间存在着显著的标度特征差异, 与城市标度律理论的假设有所背离, 其中, 绿地覆盖率最高的城市的规模效应最为显著, 而中高绿地生物量城市的标度特征演化逐渐趋同。考虑规模效应影响后, 全国整体的城市绿地效能表现出稳步提升的态势, 同时呈现显著的聚类分布格局; 尤其是从华北平原至长江三角洲区域, 绿地效能日益显现出“高-高”聚集模式。研究证实了城市绿地演化过程中普遍存在的次线性规模经济效应, 以及不同人群、不同城市之间的规模经济和局地表现的时空差异。在老龄化和城镇化深入的当下, 研究能为更好地满足不同规模和人口结构城市的绿地规划建设提供决策依据, 助力城市可持续发展目标的实现。

关键词: 城市绿地; 城市标度律; 标度因子; 老年人口; 城市体系

Evolving scaling dynamics between urban green space and population in China from 2000 to 2020

XU Zhibang¹, HUANG Yiyi¹, LEI Weiqian², LAN Ting¹, WANG Haowei¹, NIE Lei^{1,*}

1 Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

2 School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 211100, China

Abstract: As an integral component of urban systems, Urban Green Spaces (UGS) exhibit complex and multifaceted interactions with the overall system. Current studies mainly focused on UGS characteristics, paying less attention to their broader urban system patterns. Few studies explore the multi-dimensional features of UGS—such as scale, quality, and distribution—and their non-linear spatiotemporal relationships with urban populations, including count, age, and gender. Hence, from the perspective of complex systems, this study employs urban scaling theory to analyze the multi-dimensional scaling relationship evolution between UGS and population in Chinese cities using multi-source remote sensing and population data from 2000 to 2020. The characteristic calculations were performed, and further analysis was conducted to consider scale effects and identify the spatiotemporal patterns of UGS performance. Our results indicate that over the past 20 years, the relationship between UGS and population in Chinese cities has exhibited a consistently robust sub-linear scaling

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (2023J05080); 厦门市自然科学基金项目 (3502Z202372054); 中央高校基本科研业务费 (B240207014)

收稿日期: 2024-03-31; **网络出版日期:** 2024-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lnjie@iue.ac.cn

relationship, reflecting the economies of scale. The green space scaling exponent steadily increased from 0.497 to 0.614, yet it remains significantly below the theoretical value of 0.85, indicating a general insufficiency in the supply of UGS, particularly for the elderly population aged 60 and above. Notably, there are significant differences in scaling characteristics among cities with varying quality of green spaces, which deviate from the assumptions of urban scaling theory. The cities with the highest green space coverage exhibit the most pronounced economies of scale, whereas the scaling characteristics of cities with medium to high green biomass gradually converge. After accounting for the influence of scale effects, the overall performance of UGS in China has shown a steady upward trend, accompanied by a significant clustering distribution pattern. Specifically, the performance of green spaces increasingly exhibits a “high-high” clustering mode, particularly in the region extending from the North China Plain to the Yangtze River Delta. Our research confirms the widespread presence of sub-linear economies of scale in the evolution of UGS, as well as the spatiotemporal variations in scale economies and local performance among different populations and cities. In the context of deepening aging and urbanization, this study provides a decision-making basis for better meeting the needs of green space planning and construction in cities of varying scales and population structures, thereby supporting the achievement of sustainable urban development goals.

Key Words: urban green space; urban scaling laws; scaling exponents; elderly population; system of cities

绿地是城市环境的重要组成,在城市治理和规划中能发挥多重作用^[1]。城市绿地能为城市居民提供休闲空间^[2]、调节温度缓解热岛效应^[3-4]、促进社会互动增强环境认同感^[5],还能支持生物多样性保护^[6],为城市带来供给、调节、文化和支持等多样化的服务。城市绿地对城市居民福祉和城市生态系统健康的各类影响,突显了科学配置和规划城市绿地在当前和未来城市可持续发展中的重要性。在全球气候变化和持续城镇化的背景下,绿地已成为绿色基础设施和自然解决方案在城市中的主要依托载体^[7]。因此,城市绿地是生态学、环境科学和地理学等多学科领域的关注重点,并在健康城市 and 社区的构建实践中受到越来越多重视^[8]。

现有城市绿地研究主要聚焦于两大类主题:一是关注城市绿地的生态环境效应;诸如降温、增湿、固碳、释氧、降噪、抗污以及保护生物多样性等^[9]。另一方面,关注城市绿地对居民健康福祉的影响,既包括绿地经由生态系统服务对居民健康带来的效益,又包括绿地对居民生理、心理、社会健康造成的影响^[7]。诸如减少各类急、慢性疾病^[10-11],睡眠、压力等心理风险^[12],及增强社会联系和凝聚力^[13]等。在城市绿地之于生态环境和居民健康的两大类主题之下,一些经典议题受到了持续广泛关注,例如绿地的时空演化与评价^[14-15]、绿地的可达性^[16-18]、可得性^[19]和公平性^[20-21]、绿地生态网络构建与优化^[22-23]等,一些跨学科视角也被引入和提炼,例如暴露科学^[24-27]。这都反映了城市绿地研究的活力和影响。

值得注意的是,城市绿地作为城市系统的一部分,整体系统的演化对城市绿地同样具有多维度影响。特别是考虑到城市是一个复杂系统,复杂系统的一大特性是:在宏观总体层面会涌现出个体层面无法观察到的性质^[28-30],也就是整体大于部分之和。城市复杂性科学的研究者发现:城市要素和城市人口规模之间会呈现普遍的非线性增长关系,并且不同城市要素存在不同的固有模式^[31]。例如,在城市体系中,城市的人口规模和城市的地区生产总值可以用一个指数约为 1.15 的幂函数表示,这意味着超线性增长的模式,即城市人口规模每增加 1 倍,地区生产总值将约增长 1.15 倍^[32],而对城市基础设施,如道路长度,其相应的指数约为 0.85,属于另外的次线性增长模式。这一发现挑战了传统城市增长的线性思维,并被系统总结为城市标度律理论,逐渐受到跨学科城市研究者的广泛关注而成为了一个新兴的城市研究方向^[33-34]。对于城市绿地而言,现有研究大多只关注绿地本身的特征,忽视了城市绿地作为城市系统的一部分,在更宏观的城市体系中所展现出的规律,鲜有诸如城市标度律等复杂系统视角的必要探索,同时,传统城市绿地供需研究主要建立在绿地人均指标的线性关系假设基础上,对于潜在非线性关系的量化仍旧关注不足,并以区域研究为主^[35-36]。对包括规模、质量和分布的绿地多维特征与数量、年龄、性别的社会人口构成之间的长时间序列、全样本覆盖下的标度关系演化认识鲜有探讨。

综合上述分析,对于中国城市绿地和人口的演化,两者之间是否存在非线性的增长关系?如果有,这种非线性增长在时间上是否稳定?绿地和人口的不同维度在这种关系上是否有差异?不同城市的表现及其空间分布又呈现何种格局?本文使用多源遥感数据和城市标度律方法,以 2000—2020 年为研究时段,从中国城市人口的数量、年龄、性别和绿地的规模、质量、分布的多维特征出发,量化和识别标度关系,并结合标度关系开展城市绿地效能的计算和时空模式识别。研究旨在从复杂系统的视角下深入理解城市绿地与人口间的供需关系,为城市绿地的优化配置提供决策依据,助力城市的可持续发展。

1 材料与方法

研究基于多源遥感数据和识别算法提取城区绿地,使用人口空间化产品应用城市标度律方法,综合人口数量、年龄、性别和绿地规模、质量、分布展开多维分析,总体框架如图 1。

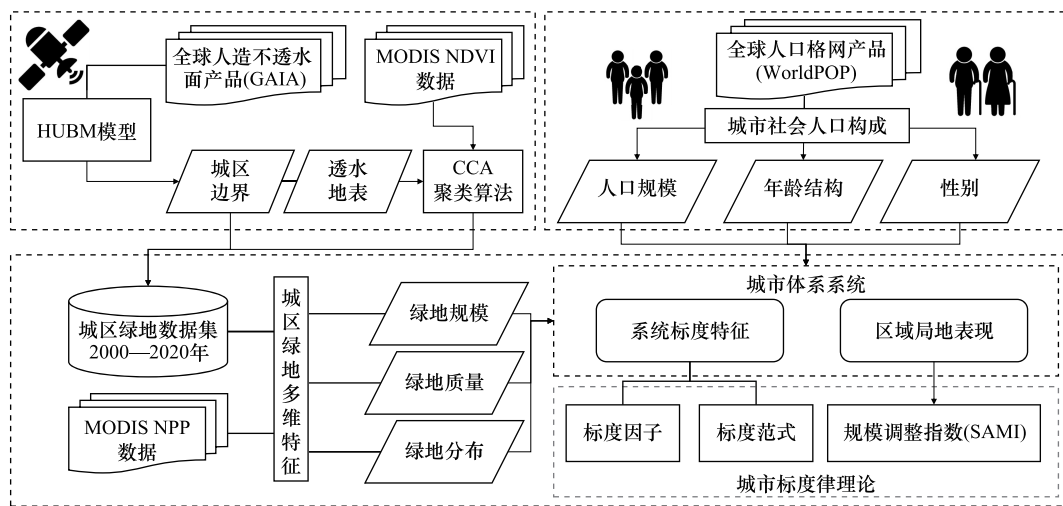


图 1 研究的总体方法框架

Fig.1 The overall methodological framework

MODIS: 中分辨率成像光谱仪; NDVI: 归一化植被指数; HUBM: 城市多层次边界制图模型; CCA: 城市聚类法; NPP: 净初级生产力

1.1 城市绿地空间提取

遥感是快速获取大范围长时序城市绿地分布数据的主要技术手段,本文使用成熟的高分辨率遥感数据产品和方法识别城市绿地。首先,基于全球 30 米空间分辨率的遥感不透水面产品 GAIA^[37],结合 HUBM 方法^[38]识别城市边界内除水体和建成区(不透水表面)以外的透水地表,然后结合 MODIS 的 16 天合成 NDVI 产品(13Q1v6),计算对应区域的年度 NDVI 均值,进一步结合 CCA^[39]聚类算法识别绿地。最终构建中国 2000—2020 年每 5 年间隔的城区绿地长时间序列数据集矢量产品。此外,研究使用 MODIS 的植被 NPP(初级净生产力)产品(17A3HG)来作为城区绿地质量的表征。

1.2 城市体系复杂系统与城市标度律

城市作为一种复杂系统,具有两方面概念含义:一方面城市个体是一个复杂系统,另一方面由多个城市个体组成的城市体系也是一个复杂系统。复杂系统的一大特性在于其总体涌现出个体上所观察不到的性质。城市标度律是城市复杂系统的前沿理论之一^[40],它由圣塔菲研究所的 Bettencourt 等提出^[31]。简单来说,它指的是在城市体系中,同一时点下城市的各类要素(指标)与城市人口规模之间可以建立由幂函数定量表达的数学模型,其公式如下:

$$Y = Y_0 N^\beta \quad (1)$$

$$\log Y \sim \log Y_0 + \beta \log N \quad (2)$$

式中, Y 代表城市要素值, 例如建成区面积、城市生产总值等, Y_0 为标准化常量, N 表示城市的人口规模, β 为标度因子。通常对公式(1)两侧取对数, 转换成式(2)的形式, 即可在双对数坐标系下, 通过线性拟合求得标度因子值。根据标度因子与 1 的大小关系, 城市要素又可分成三种模式, 分别是: ①次线性模式($\beta < 1$), 该类要素随城市人口呈次线性增长, 通常是与城市基础设施相关的要素, 如建成区面积; ②超线性模式($\beta > 1$), 该类城市要素随城市人口呈超线性增长, 通常是与社会交互相关的要素, 如地区生产总值; ③线性模式($\beta \approx 1$), 该类要素随城市人口呈线性增长, 通常是与个人需求相关的要素, 如工作岗位数。作为城市用地中的一种重要类型, 城市绿地是典型的基础服务设施要素。从城市标度律理论的预期看, 其预期应属于次线性模式。

1.3 城市人口构成的分类和数据来源

根据联合国人口基金等机构的标准并结合中国退休政策, 本文主要使用了城市人口总数量, 不同年龄段人口数量和不同年龄段分性别数量三类指标参与分析, 其中年龄段划分为四类, 分别是儿童(0—14 岁), 青少年(15—24 岁), 成年(25—59 岁), 老年(60 岁及以上)。人口统计使用了成熟的 WorldPop 人口空间化格网产品, 其空间分辨率为 1km, 能完整覆盖本文研究时段, 在具体计算时, 基于前述识别的城区边界对人口格网数据进行统计汇总。

1.4 城市绿地效能的计算

根据城市标度律理论, 城市要素和城市人口规模之间的非线性增长关系普遍存在, 而传统在比较不同规模城市时常使用的人均指标评价方法的潜在假设前提是城市要素随人口规模线性增长, 故其显然会产生偏倚, 从而难以真正认识城市个体独立于规模效应的真正的局地表现。对此, SAMI (Scale Adjusted Metropolitan Indicator)^[41] 方法应运而生, 其可用以比较城市要素实际表现相对于其考虑规模效应后预期表现的定量大小。基于 SAMI, 可考虑规模效应来量化城市个体的绿地效能, 即绿地实际达到其对应人口下预期规模的程度。考虑到城市绿地作为一种城市公共服务设施, 是一种正向收益要素, 即实际表现值高于预期较好, 故参考先前研究^[42] 来使用 SAMI 方法量化城市的绿地效能, 其计算公式如下:

$$UGP_i = \log UG_i - \log UG(N_i) = \log \frac{UG_i}{Y_0 N_i^{\beta_{UG}}} \quad (3)$$

式中, UGP_i 指城市 i 的绿地效能, UG_i 代表城市 i 的实际绿地规模, $UG(N_i)$ 是根据城市标度律方程计算的城市 i 的绿地预期规模, 可以经由公式(1)和(2)计算得到, β_{UG} 为城市绿地的标度因子。

2 结果与分析

2.1 绿地规模与人口构成的标度特征演化

不同于传统的线性增长认识, 结果显示: 从 2000 到 2020 年, 中国城市体系的绿地与人口规模间呈现出一种长期稳定的次线性增长趋势。换言之, 相较于人口较少的小城市, 人口众多的大城市在绿地规模的增长上并未与人口规模保持同步, 其增长比例低于 1 (图 2)。从城市标度律的角度审视, 这一现象突显了城市绿地规模增长的规模经济性, 揭示了随着人口向大城市不断集聚, 绿地服务的供应成本在逐渐降低。在时间维度上, 标度因子由 0.497 稳步提升至 0.614, 这既表明城区绿地规模与人口增长之间的次线性关系长期保持稳定, 又揭示了随着城市人口的逐步增长, 其带来的边际效益呈现下降趋势。作为城市基础设施的重要组成部分, 城区绿地在研究时段内的标度因子虽然呈现出增长态势, 但增速逐渐放缓, 且与城市标度律的理论预期值 0.85 仍存在一定的数值差距, 本质上仍旧说明当前中国城市体系的绿地供应规模不足, 不能满足人民对城市绿色空间美好生活的需求。

从人口构成的角度看, 城区绿地规模与儿童、青少年、成年和老年, 以及不同性别之间均呈现出相对稳定的次线性增长模式, 同时也全部未达到 0.85 的理论预期值 (表 1)。值得注意的是, 四个年龄段中, 老年人口的绿地规模标度因子值在 2010 年前一直处于最低水平, 反映了老年人口的绿地供应规模紧张, 之后其标度因子在 2015 年超过了儿童和青少年人口, 说明其规模经济性有所下降, 进一步的多元线性回归结果 (表 1) 也表

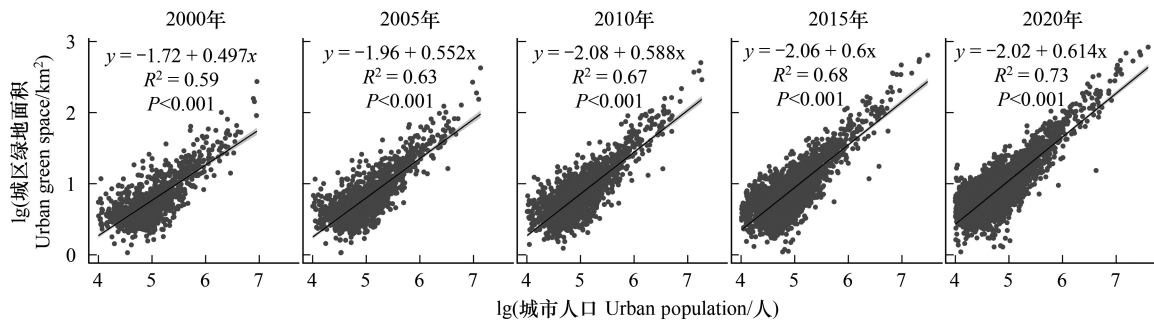


图 2 2000—2020 年城区绿地规模和总人口的标度关系的时间演化

Fig.2 Temporal evolution of the scaling relationship between urban green space and urban population during 2000—2020

明老年人数量对绿地规模的相对贡献也远低于其他人群。然而,老年人对绿地公园的使用频率又高于年轻人,这启发城市绿地规划有必要在主要使用人群与绿地规模之间做出更为细致的权衡。至于不同性别人群方面,绿地规模的标度因子之间的差距微乎其微,尤其是老年男性和女性的绿地标度因子在近 20 年间的差距逐步缩小,并于 2020 年达到相同水平。这说明了不同城市在绿地供应方面对不同性别老年人群保持了较高等度的公平和协调,提供了相对均等的绿色空间服务。

表 1 不同人口构成与城区绿地的标度因子及多元线性回归结果

Table 1 Scaling exponent and multiple linear regression results of different population compositions and urban green spaces

年龄段 Age group		城区绿地各年份的标度因子 β Scaling exponents(β) of urban green space in different years					绿地规模的多元线性回归 Multiple linear regression for scale of urban green space	
		2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年	标准化系数	相对贡献
儿童(0—14 岁) Children(0—14 years)	总和	0.516 ***	0.563 ***	0.584 ***	0.578 ***	0.588 ***	0.617 ***	0.516
	男性	0.512 ***	0.558 ***	0.578 ***	0.572 ***	0.583 ***		
	女性	0.518 ***	0.567 ***	0.589 ***	0.583 ***	0.592 ***		
青少年(15—24 岁) Adolescents(15—24 years)	总和	0.471 ***	0.526 ***	0.562 ***	0.571 ***	0.583 ***	-0.130 ***	0.109
	男性	0.473 ***	0.528 ***	0.562 ***	0.571 ***	0.583 ***		
	女性	0.469 ***	0.523 ***	0.56 ***	0.569 ***	0.582 ***		
成年(25—59 岁) Adults(25—59 years)	总和	0.483 ***	0.543 ***	0.582 ***	0.598 ***	0.613 ***	0.372 ***	0.311
	男性	0.484 ***	0.544 ***	0.583 ***	0.598 ***	0.613 ***		
	女性	0.481 ***	0.54 ***	0.58 ***	0.596 ***	0.611 ***		
老年(60 岁以上) Elderly(60+ years)	总和	0.455 ***	0.516 ***	0.56 ***	0.586 ***	0.597 ***	0.077 ***	0.064
	男性	0.456 ***	0.517 ***	0.559 ***	0.586 ***	0.596 ***		
	女性	0.453 ***	0.513 ***	0.558 ***	0.584 ***	0.596 ***		

*** $P \leq 0.001$

2.2 绿地质量与人口规模的标度特征演化

为探究绿地质量与人口之间的标度特征,研究选取了城区绿地覆盖率和初级植被净生产力(NPP)两个指标进行进一步分析。采用分位数分类法将各个城市的城区绿地覆盖率和绿地 NPP 从优至劣依次划分为“高、较高、中、较低、低”五个等级。随后针对不同等级的城市个体及其对应数据进行了详尽的标度律分析,得到标度因子随时间演化的趋势图(图 3 和 4)。

绿地覆盖率方面,不同等级的城市在时间演化上展现出差异化的趋势。绿地覆盖率表现类别为“高”的城市,在过去的 20 年间的整体覆盖率区间逐渐上升,中位数稳步增长。相比之下,“较高”城市的绿地演化则保持了一定的稳定性。然而,其他三类城市的绿地覆盖率普遍呈现出整体下降的趋势。标度因子的时间演化方面,不同绿地覆盖率等级的城市之间呈现出稳定的相对大小关系。有趣的是,绿地覆盖率较低城市的标度

因子反而较高,绿地覆盖高城市的标度因子最低,说明高绿地覆盖城市在绿地建设方面展现出了较强的规模经济效应。值得注意的是,覆盖率最低的城市其标度因子最为接近理论值 0.85。从城市规模角度来看,绿地覆盖率较高城市多在百万人口以下,而规模更大的城市在绿地覆盖率方面的表现则相对落后,对应的覆盖率等级较低。这为不同规模城市的绿地覆盖规划提供了参考依据。

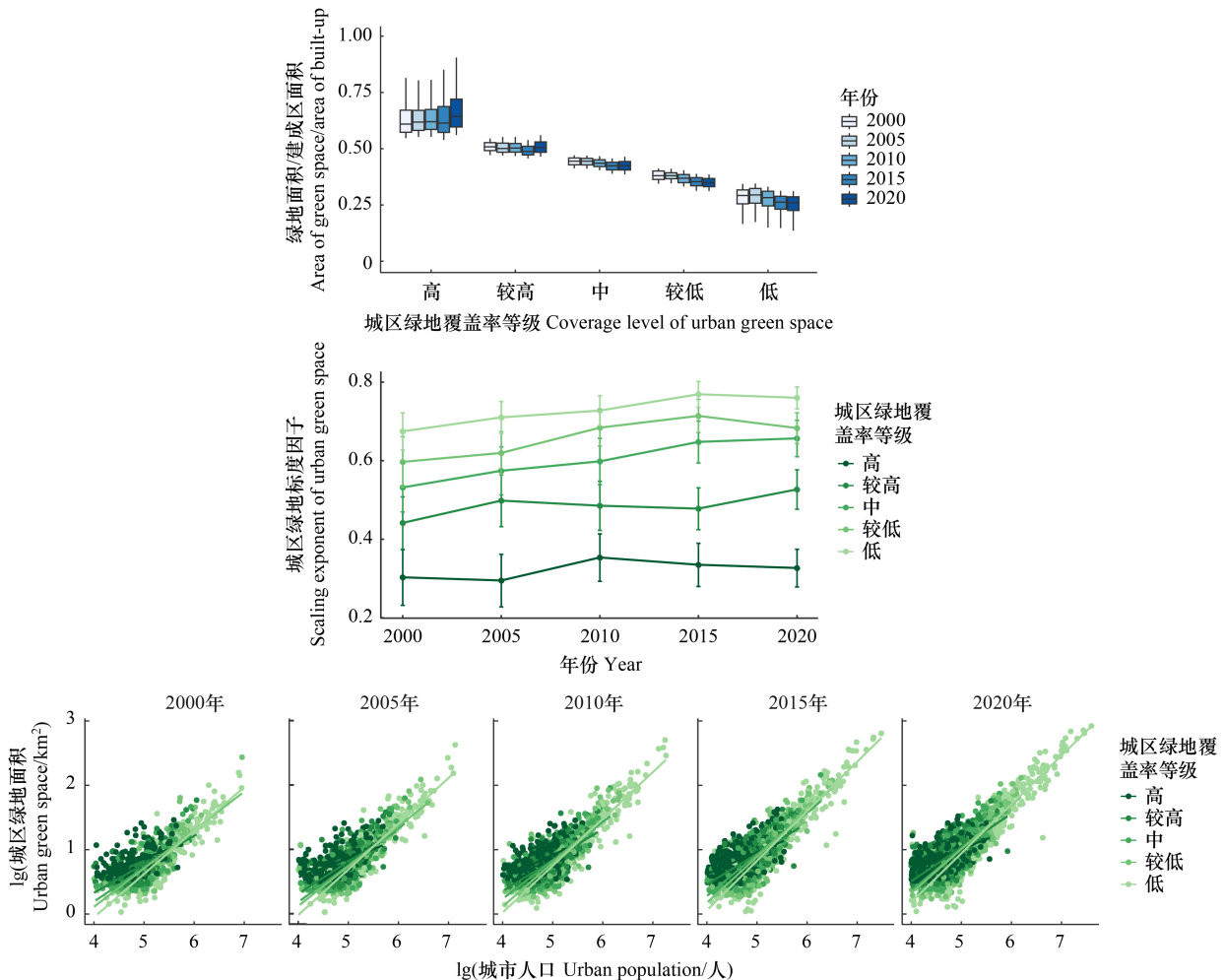


图3 城区绿地的覆盖率等级、标度因子及标度律拟合的时间演化

Fig.3 Temporal evolution of urban green space in coverage levels, scaling exponents, and scaling fitting

相较之下,反映城区绿地生物量的 NPP 分析结果揭示了一种不同的趋势。2000—2020 年间,五个等级的城区绿地 NPP 均显示出增长趋势,城区绿地生物量普遍提高。然而,不同等级城市的绿地标度因子的时间变化模式更为复杂,等级间呈现出交错现象。在 NPP 相对最低的类别中,城市的标度因子在约 0.54 的水平上保持稳定,而其他四类城市的标度因子则有所增长。其中,中间三个等级的标度因子逐渐趋同,而 NPP 最高等级的城市的标度因子却相对较低。这些意味着 NPP 表现最差的城市在规模效应上保持了稳定性,而 NPP 表现更佳的城市规模效应则有所减弱。与绿地覆盖率不同,在 NPP 等级最高的类别中包含了众多大城市,而在 NPP 表现相对较差的类别中,城市的规模普遍较小,以中小城市为主,这一发现暗示了城市绿地生物量与城市规模之间的潜在关联。

2.3 考虑规模效应的城市绿地效能分布演化

基于 SAMI 方法消除规模效应,计算了 2000—2020 年五个时点的城区绿地效能(图 5)。从宏观层面分析,20 年来绿地效能优于预期的城市群体呈现出不断扩散的趋势;绿地效能与区域自然地理条件之间呈现出

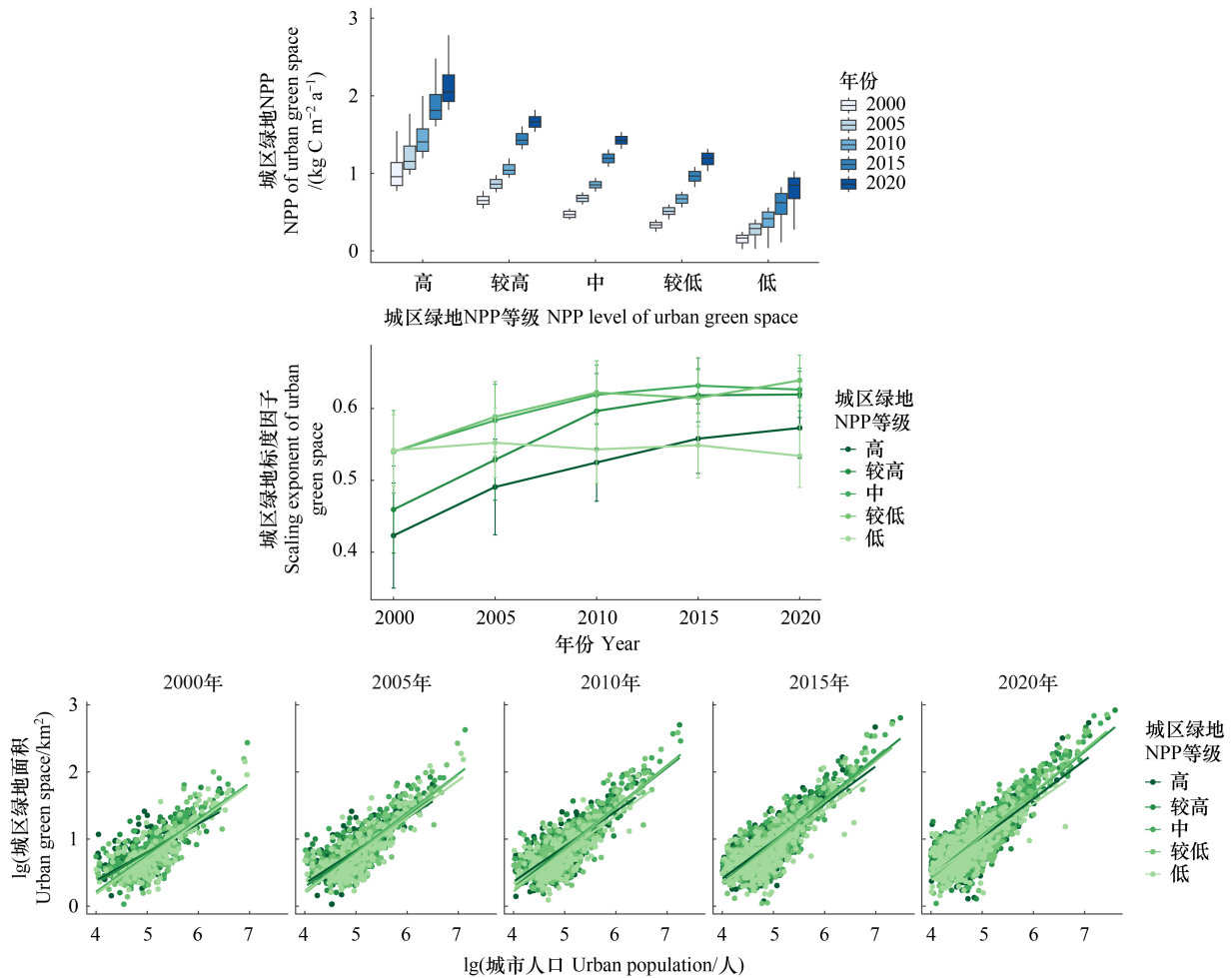


图 4 城区绿地的 NPP 等级、标度因子及标度律拟合的时间演化

Fig.4 Temporal evolution of urban green space in NPP levels, scaling exponents, and scaling fitting

显著的分布规律:华北平原地区集中了较多效能表现卓越的城市,长江沿岸城市的绿地效能有所提升;相对而言,山地和丘陵地区的城市在绿地效能上大多未能达到预期水平。在城市个体层面,可观察到厦门和泉州自 2005 年以来,其绿地效能一直维持在较高水平;无锡、常州、南通在 2015 至 2020 年间的表现也颇为出色,临沂在这段时间内同样有良好表现,但在 2010 年左右出现了一定波动;广州、深圳、东莞以及大庆在 2000 至 2015 年间的绿地效能表现不俗,然而到了 2020 年却有所下滑;还有一些城市在特定时间段内展现出较好的绿地效能,例如 2000 至 2005 年的乌鲁木齐、2010 年的北京、2015 年的杭州和天津,以及 2000 年的台北等。相形之下,位于中部、西部以及南部山地丘陵地区的城市,在绿地效能上的表现普遍较为逊色。

进一步通过聚类分析和异常值分析探索城市绿地效能空间分异的演化特征(图 6),以期通过发现不同聚类模式的空间分异变化来更好的认识和指导区域绿地规划政策。以华北平原到长江三角洲地区为例,该区域逐渐从“低-高异常”转变为“高-高聚类”,这反映了城市绿地效能“由点到面”的改善。长江中上游沿线城市则从原先的“低-低聚类”和“高-低异常”的散状分布,逐渐演变为以“高-低异常”为主,这表明沿线部分城市的绿地效能得到了显著提升,但仍有相当数量的城市绿地效能处于较低水平;东北地区也呈现出类似的变化趋势,但在 2015 至 2020 年间,部分城市的绿地效能高低聚类模式变得不再显著。在华南地区,与 2000 至 2010 年相比,2015 至 2020 年的城区绿地效能聚类模式发生了显著变化,原先的“高-高聚集”和“低-高异常”被“高-低异常”所取代。这一变化既表明了绿地效能的整体提升,也揭示了局部层面绿地效能的极化现

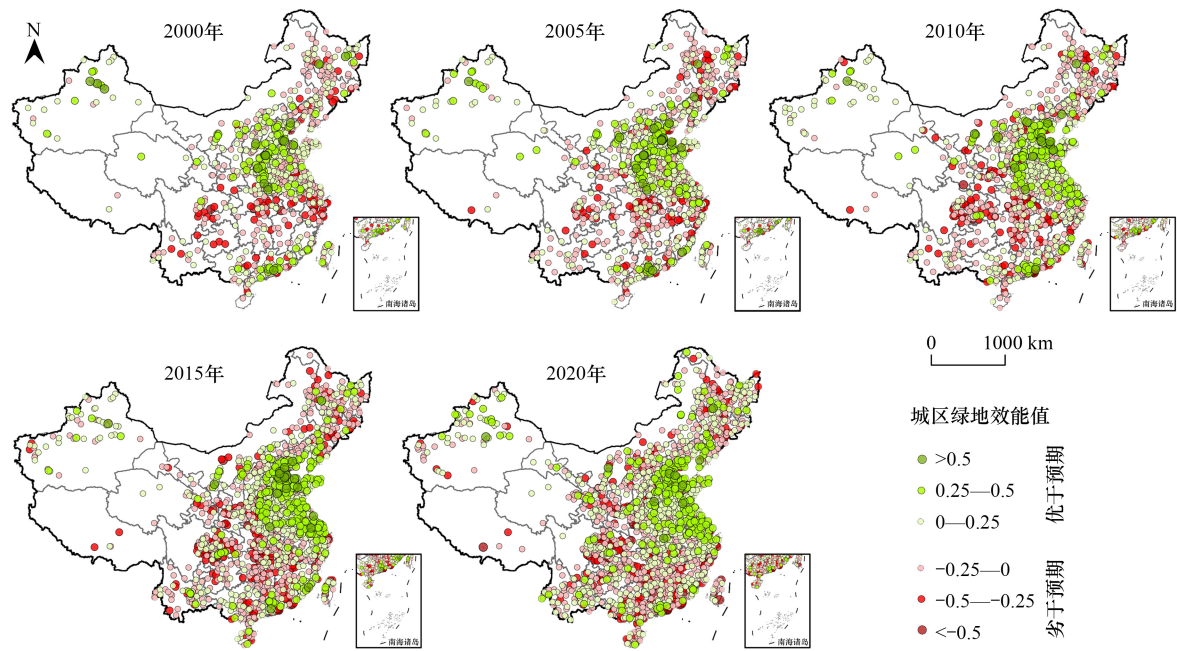


图5 中国城区绿地效能的时空演化

Fig.5 Spatiotemporal evolution of urban green space performance in China

SAMI: 规模调整指数

象,即部分城市绿地效能显著提升,而另一部分则相对滞后。总体上,20 年来,中国城市绿地效能更多地向“高-高聚类”和“高-低异常”的模式演化,反映出宏观层面城市绿地建设不断改善的趋势,不过,在华中和华南部分地区,城市间绿地效能的局部差距逐渐扩大,绿地规划建设的区域协调性值得关注。

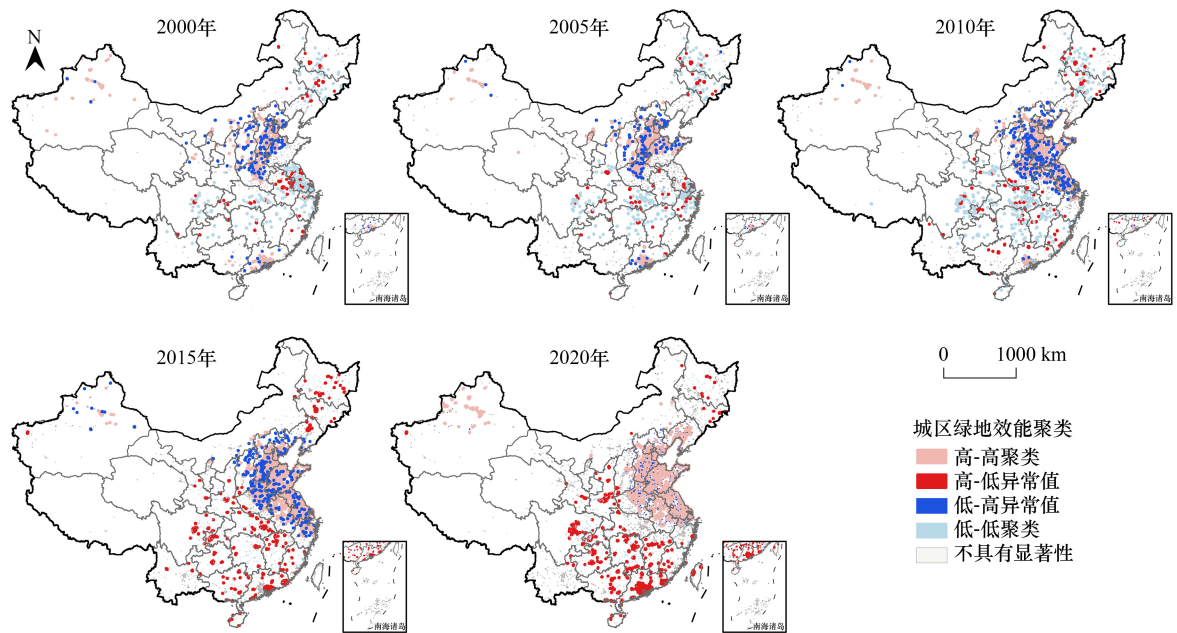


图6 中国城区绿地效能聚类的时空演化

Fig.6 Clustering pattern evolution of urban green space performance in China

3 讨论与结论

3.1 城市体系复杂系统视角下的绿地与人口配置

现代信息通信和交通技术的发展,使得大范围、网络化的人类交互更加频繁,城市要素和资源的流动和配置受整个城市体系的影响日益加深。传统聚焦单个城市的案例式研究逐渐显露出局限,个体城市的演化和互动在城市体系复杂系统层面的表现愈发受到重视^[43]。对城市绿地而言,其空间规划和建设不仅受到管理部门自上而下的调控,横向层面城市之间的相互影响^[44],还受到人口居住和迁徙等自下而上因素的作用,这些调控、影响和作用都嵌入在更广阔的城市体系中。考虑到城市体系系统自身的复杂性特征^[45],本文从城市标度律视角出发深入探讨城市绿地与人口间的标度关系演化,显得尤为重要和必要。研究发现中国城市绿地与人口间长期呈现出的次线性关系,与城市要素线性增长的通常思维形成鲜明对比,揭示了城市绿地作为一种城市基础设施同样存在规模效应。研究还发现拥有高质量绿地的城市往往具有较小的标度因子和更强的规模效应。这可能是由于大城市中高质量绿地的相对稀缺,或是小城市中高质量绿地的相对过剩所导致的。这些发现为政策制定者提供了重要启示:在制定人口与绿地配置规划时,应充分考虑两者间次线性演化的客观规律,避免过度追求配置的绝对平衡。同时应协调不同规模城市间不同质量绿地的供应比例,既要提高大城市的绿地覆盖率并注重绿地质量,也要合理控制中小城市中绿地的质量结构,实现高低搭配。

3.2 老龄化和城镇化放缓背景下的城市绿地供给

相较其他人群,老年人对城市绿地更频繁的访问^[11]以及城市绿地对老年人健康的积极作用^[46]已被研究证实。当前,中国城市正处于老龄化、人口负增长、城镇化进入后半程等多重影响叠加之下,2023 年中国 21.1%(29697 万)的老龄人口更是远超联合国老龄社会 10% 的阈值标准。因此,从城市体系的宏观角度出发,理解和满足不同人群特别是老年人群的城市绿地需求显得尤为关键。研究对政策启示在于:城市绿地的规划和建设在确保与人口规模相匹配的同时,要尤其关注老年人等高需求群体,以在效率和公平之间找到平衡。本文关于老年人口的绿地标度因子相对较小的发现,反映出大城市在绿地供应上的规模效应更为显著。这既体现了大城市在服务老年人口方面的独特优势,也凸显了大城市在满足老年人口人均绿地需求方面所面临的挑战。城市绿地的发展与城市用地的扩张紧密相连。在国家严格控制城市无序开发、保障耕地和生态保护红线的政策背景下,如何在城区绿地规模增长受限的情况下有效提升绿地质量,成为未来城市绿地规划中亟待解决的重要问题。鉴于全国范围内绿地效能存在的空间分异现象,需要从全局体系和地区差异的双重角度出发,切实提升城市绿地效能,以实现城市绿地福祉的空间均衡与和谐。这不仅有助于满足老年人群等特定群体的需求,也是推动城市可持续发展、构建宜居环境的重要途径。

3.3 结论和展望

通过引入前沿的城市标度律方法,本研究探索了复杂系统视角下城市绿地与人口的标度关系演化的科学问题。发现绿地标度因子从 0.497 稳步上升至 0.614,但仍远低于 0.85 的理论预期,证实了 2000—2020 年中国城市绿地与人口间稳健的次线性缩放关系,揭示了普遍的规模效应;不同人群的标度范式特征存在差异,老年人的标度因子相对更小,但不同性别间的差距不大。不同绿地覆盖率和 NPP 等级的城市间同样存在标度演化差异,绿地覆盖率高的城市的规模效应显著,绿地 NPP 差的城市的规模效应波动较少。发现全国范围层面城市绿地效能的普遍提升,尤其是华北平原至长江三角洲区域出现显著的“高-高”集聚。本研究能为老龄化和城镇化放缓背景下的城市绿地配置和规划决策提供科学依据,助力城市的可持续发展。未来,需要进一步细化城市绿地的类型结构分析,并深入探索不同人群对于城市绿地的可得性差异,从而进一步促进城市绿地的公平和协调配置。

参考文献 (References):

- [1] Haq S M A. Urban green spaces and an integrative approach to sustainable environment. *Journal of Environmental Protection*, 2011, 2(5):

601-608.

- [2] Bertram C, Rehdanz K. The role of urban green space for human well-being. *Ecological Economics*, 2015, 120: 139-152.
- [3] Aram F, Higuera García E, Solgi E, Mansournia S. Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*, 2019, 5(4): e01339.
- [4] 苏王新, 常青, 刘筱, 张刘宽. 城市蓝绿基础设施降温效应研究综述. *生态学报*, 2021, 41(7): 2902-2917.
- [5] Derksen M L, van Teeffelen A J, Nagendra H, Verburg P H. Shifting roles of urban green space in the context of urban development and global change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2017, 29: 32-39.
- [6] Kabisch N, Strohbach M, Haase D, Kronenberg J. Urban green space availability in European cities. *Ecological Indicators*, 2016, 70: 586-596.
- [7] 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.
- [8] 张国钦, 李妍, 吝涛, 李新虎, 王兰, 刘文惠. 景观生态学视角下的健康社区构建. *生态学报*, 2020, 40(22): 8130-8140.
- [9] 苏泳娴, 黄光庆, 陈修治, 陈水森, 李智山. 城市绿地的生态环境效应研究进展. *生态学报*, 2011, 31(23): 302-315.
- [10] Gascon M, Triguero-Mas M, Martínez D, Dadvand P, Rojas-Rueda D, Plasencia A, Nieuwenhuijsen M J. Residential green spaces and mortality: a systematic review. *Environment International*, 2016, 86: 60-67.
- [11] van den Berg M, Wendel-Vos W, van Poppel M, Kemper H, van Mechelen W, Maas J. Health benefits of green spaces in the living environment: a systematic review of epidemiological studies. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(4): 806-816.
- [12] Bratman G N, Hamilton J P, Hahn K S, Daily G C, Gross J J. Nature experience reduces rumination and subgenual prefrontal cortex activation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2015, 112(28): 8567-8572.
- [13] Orban E, Sutcliffe R, Dragano N, Jöckel K H, Moebus S. Residential surrounding greenness, self-rated health and interrelations with aspects of neighborhood environment and social relations. *Journal of Urban Health: Bulletin of the New York Academy of Medicine*, 2017, 94(2): 158-169.
- [14] Huang Y Y, Lin T, Zhang G Q, Jones L, Xue X Z, Ye H, Liu Y Q. Spatiotemporal patterns and inequity of urban green space accessibility and its relationship with urban spatial expansion in China during rapid urbanization period. *The Science of the Total Environment*, 2022, 809: 151123.
- [15] 毛齐正, 罗上华, 马克明, 邬建国, 唐荣莉, 张育新, 宝乐, 张田. 城市绿地生态评价研究进展. *生态学报*, 2012, 32(17): 5589-5600.
- [16] 俞孔坚, 段铁武, 李迪华, 彭晋福. 景观可达性作为衡量城市绿地系统功能指标的评价方法与案例. *城市规划*, 1999, 23(8): 7-10, 42, 63.
- [17] 幸丽君, 杜赛南, 全照民, 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.
- [18] 汪森, 陈振杰, 周琛. 基于加权两步移动搜索法的城市绿色开敞空间可达性研究——以南京市中心城区为例. *生态学报*, 2023, 43(13): 1-10.
- [19] 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 Jr, Kuo M, Lawler J J, Levin P S, Lindahl T, Meyer-Lindenberg A, Mitchell R, Ouyang Z Y, Roe J, Scarlett L, Smith J R, van den Bosch M, Wheeler B W, White M P, Zheng H, Daily G C. Nature and mental health: an ecosystem service perspective. *Science Advances*, 2019, 5(7): eaax0903.
- [20] 尹海伟, 孔繁花, 宗跃光. 城市绿地可达性与公平性评价. *生态学报*, 2008, 28(7): 3375-3383.
- [21] 王春晓, 黄舒语, 邓孟婷, 魏伟. 供需耦合协调视角下高密度城市公园绿地公平性研究——以深圳龙华区为例. *中国园林*, 2023, 39(1): 79-84.
- [22] 孔繁花, 尹海伟. 济南城市绿地生态网络构建. *生态学报*, 2008, 28(4): 1711-1719.
- [23] 周媛, 唐密, 陈娟, 黎贝. 基于形态学空间格局分析与图谱理论的成都市绿地生态网络优化. *生态学杂志*, 2023, 42(6): 1527-1536.
- [24] 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.
- [25] Zhang R, Zhang C Q, Rhodes R E. The pathways linking objectively-measured greenspace exposure and mental health: a systematic review of observational studies. *Environmental Research*, 2021, 198: 111233.
- [26] Yu Z W, Yang G Y, Lin T, Zhao B, Xu Y Y, Yao X H, Ma W Y, Vejre H, Jiang B. Exposure ecology drives a unified understanding of the nexus of (urban) natural ecosystem, ecological exposure, and health. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2024, 10: 0165.
- [27] 杨高原, 余兆武, 张金光, 刘红晓, 金贵, 居阳, 洪波, 赵卓慧, 张理卿, 姚希晗, 马文娟, 熊浚祺, 邵钰涵, 姜斌. 暴露生态学视角下绿地暴露健康效益研究进展与展望. *生态学报*, 2024, 44(14): 1-11.
- [28] Batty M. Building a science of cities. *Cities*, 2012, 29: S9-S16.
- [29] West G. Scale: the universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies. New York: Penguin Press, 2017.
- [30] Li R Q, Dong L, Zhang J, Wang X R, Wang W X, Di Z R, Stanley H E. Simple spatial scaling rules behind complex cities. *Nature Communications*, 2017, 8(1): 1841.
- [31] Bettencourt L M A, Lobo J, Helbing D, Kühnert C, West G B. Growth, innovation, scaling, and the pace of life in cities. *Proceedings of the*

- National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(17): 7301-7306.
- [32] Bettencourt L, West G. A unified theory of urban living. *Nature*, 2010, 467: 912-913.
- [33] 龚健雅, 许刚, 焦利民, 秦昆. 城市标度律及应用. *地理学报*, 2021, 76(2): 251-260.
- [34] 焦利民, 雷玮倩, 许刚, 徐智邦, 周正梓. 中国城市标度律及标度因子时空特征. *地理学报*, 2020, 75(12): 2744-2758.
- [35] 刘志强, 范胜寒, 余慧, 洪亘伟. 长三角城市绿地标度因子的时空特征分析. *风景园林*, 2023, 30(8): 97-102.
- [36] 尹上岗, 孙恬, 朱奕衡, 杨山. 长三角地区城区面积-绿地面积异速增长关系及协调性研究. *地理科学*, 2024, 44(4): 670-680.
- [37] Gong P, Li X C, Wang J, Bai Y Q, Chen B, Hu T Y, Liu X P, Xu B, Yang J, Zhang W, Zhou Y Y. Annual maps of global artificial impervious area (GAIA) between 1985 and 2018. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 236: 111510.
- [38] Xu Z B, Jiao L M, Lan T, Zhou Z Z, Cui H, Li C P, Xu G, Liu Y L. Mapping hierarchical urban boundaries for global urban settlements. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 103: 102480.
- [39] Rozenfeld H D, Rybski D, Andrade J S Jr, Batty M, Stanley H E, Makse H A. Laws of population growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2008, 105(48): 18702-18707.
- [40] Rybski D, Arcaute E, Batty M. Urban scaling laws. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, 2019, 46(9): 1605-1610.
- [41] Bettencourt L M A, Lobo J, Strumsky D, West G B. Urban scaling and its deviations: revealing the structure of wealth, innovation and crime across cities. *PLoS One*, 2010, 5(11): e13541.
- [42] 徐智邦, 焦利民, 贾琦琪, 雷玮倩, 蓝婷, 赵睿, 许刚. 标度律视角的城市效能测度及中国城市多维要素效能分析. *地理研究*, 2021, 40(6): 1596-1609.
- [43] Batty M. *The new science of cities*. Cambridge: MIT press, 2013.
- [44] 许乙青, 成雨萍. 中国城市绿地建设的空间溢出效应研究——基于 286 个地级及以上城市的数据. *生态经济*, 2018, 34(6): 163-167, 193.
- [45] Berry B J L. Cities as systems within systems of cities. *Papers of the Regional Science Association*, 1964, 13(1): 147-163.
- [46] Mitchell R, Popham F. Greenspace, urbanity and health: relationships in England. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 2007, 61(8): 681-683.