

DOI: 10.20103/j.stxb.202312212773

牟磊, 幸丽君, 刘羽, 胡沁江, 严敏嘉. 多维城镇化要素对城市绿地时空暴露的影响机制——以长江经济带为例. 生态学报, 2024, 44(24): 11132-11145.

Mu L, Xing L J, Liu Y, Hu Q J, Yan M J. Influence mechanism of multidimensional urbanization factors on spatio-temporal exposure of urban green spaces: taking the Yangtze River Economic Belt as a case study. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(24): 11132-11145.

多维城镇化要素对城市绿地时空暴露的影响机制 ——以长江经济带为例

牟 磊¹, 幸丽君^{1,*}, 刘 羽², 胡沁江¹, 严敏嘉^{3,4}

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 广东省社会科学院环境与发展研究所, 广州 510635

3 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430072

4 中铁十一局集团第四工程有限公司, 武汉 430070

摘要:城市绿地与居民的身心健康密切相关,但快速城镇化使得城市绿地暴露空间格局发生了显著变化。随着社会经济发展,城镇化含义已经从单维的人口指标转变为了人口、经济、土地、社会和生态等多维的丰富内涵。虽然当前一些研究重点关注了城市绿地暴露的测度方法、时空特征和影响因素,但是从多维城镇化视角出发探索城镇化对城市绿地时空暴露的影响机制仍有待进一步探索。因此,研究以长江经济带为例,采用人口加权绿地暴露指标分析了城市绿地暴露时空特征,在构建多维城镇化指标的基础上运用地理探测器和地理加权回归模型识别影响绿地暴露时空差异的主导因子及其影响的时空异质性,并进一步分析其影响机制。研究结果表明:(1)长江经济带城市绿地暴露水平呈现“先增加,后下降”的趋势,整体上绿地暴露水平有所改善。但绿地暴露水平空间差异明显:中游地区>上游地区>下游地区;城镇化水平发展缓慢和绿地资源丰富的城市,其绿地暴露水平往往较大。(2)2005—2018年间,绿地覆盖率、PM_{2.5}、建成区面积、地区生产总值和高程一直是城市绿地暴露时空差异的主导因子;绿地覆盖率与其他因子之间的协同作用对城市绿地暴露的影响明显强于其单独作用;建成区面积、地区生产总值与其他因子之间的协同作用也随着时间发展而逐渐增强。(3)各主导因子的影响存在明显的时空异质性。整体上,绿地覆盖率对绿地暴露具有稳定的正向影响。随着年份的增加,经济发展对绿地暴露的负向影响逐渐覆盖所有城市,而生态环境的改善和城市扩张规模对绿地暴露的正向影响逐渐突显。研究深入解析了城镇化要素对城市绿地暴露时空格局的影响作用,研究结果对城市绿地空间优化布局、协调多维城镇化发展以改善人居环境具有重要的意义。

关键词:绿地暴露;时空格局;主导因子;影响异质性;长江经济带

Influence mechanism of multidimensional urbanization factors on spatio-temporal exposure of urban green spaces: taking the Yangtze River Economic Belt as a case study

MU Lei¹, XING Lijun^{1,*}, LIU Yu², HU Qinjiang¹, YAN Minjia^{3,4}

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

2 Institute of Environment And Development, Guangdong Academy of Social Science, Guangzhou 510635, China

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

4 China Railway 11th Bureau Group Fourth Engineering Company Limited, Wuhan 430070, China

Abstract: Urban green spaces (UGSs) are closely to residents' physical and mental health, but rapid urbanization has

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(42301330);广州市哲学社科规划课题项目(2023GZQN60);区域开发与环境响应湖北省重点实验室开放基金项目(2022(A)001)

收稿日期:2023-12-21; **网络出版日期:**2024-09-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ljxing2019@hubu.edu.cn

significantly changed the spatial pattern of UGSs exposure. With the development of social economy, the meaning of urbanization has changed from a single-dimensional demographic indicator to a multi-dimensional concept containing demographic, economic, land, social and ecological indicators. Although some existing studies have focused on the measurement methods, spatio-temporal characteristics and influencing factors of UGSs exposure, it is still necessary to further explore the influence mechanism of urbanization on UGSs exposure from the perspective of multi-dimensional urbanization. Therefore, the population-weighted UGSs exposure index was firstly used to analyze the spatio-temporal differences of UGSs exposure in the Yangtze River Economic Belt. Secondly, by constructing multi-dimensional urbanization indicators, the geographical detector model and geographically weighted regression model were used to identify the dominant impacting factors and explore their spatio-temporal heterogeneity impacts on the UGSs exposure. Finally, the influencing mechanism of multi-dimensional urbanization on spatio-temporal exposure of UGSs was further analyzed. The results showed that: (1) The level of UGSs exposure in the Yangtze River Economic Belt showed a trend of ‘increasing first and then decreasing’, but the overall value of UGSs exposure has improved. The spatial differences of UGSs exposure were also obvious: middle reaches > upper reaches > lower reaches. Moreover, the cities with slow urbanization and abundant green spaces tended to have a higher level of UGSs exposure. (2) From 2005 to 2018, green space coverage, $PM_{2.5}$, built-up area, gross domestic product, and elevation have always been the dominant factors for the spatial differences of UGSs exposure. The synergistic effect between green space coverage and other factors on the spatio-temporal of UGSs exposure was significantly stronger than its single effect. Meanwhile, the synergistic effect between built-up area, gross domestic product and other factors on the spatial differences UGSs exposure gradually also increased with time. (3) The influence of all dominant factors had obviously spatio-temporal heterogeneity. Overall, green space coverage had stably positive impact on UGSs exposure. From 2005 to 2018, the negative impact of economic development on UGSs exposure gradually covered all cities, while the positive impact of ecological improvement and urban sprawl on UGSs exposure were gradually significant. This study has deeply analyzed the influence mechanism of urbanization factors on the spatial and temporal pattern of UGSs exposure, and the results are helpful to optimize the layout of UGSs and coordinate the development of multi-dimensional urbanization to improve the residents’ living environment.

Key Words: green space exposure; spatio-temporal pattern; dominant factors; heterogeneity effect; Yangtze River Economic Belt

城市绿地是指在城市边界区域内所有类型的植被,包括了城市公园、森林、封闭小区内部的绿化带等。一方面,城市绿地在缓解大气污染、吸收噪声以及滞留降水等方面发挥了重要的生态作用^[1-3];另一方面,相关研究证实长期暴露于城市绿地中对居民的身心健康有积极影响^[4-5],例如提高睡眠质量^[6],增强邻里关系^[7],降低死亡率^[8]等。国外最早出现“暴露”是以环境为主要对象,即“环境暴露”与人类的关系研究,而绿地与健康关系研究相对成熟后逐渐出现“绿地暴露”。绿地暴露通常被定义为个体(或群体)与自然环境的接触,即实现自然环境对人类健康益处的前提是将人暴露于自然环境当中^[9-10]。大量研究已经对绿地暴露测度方法和指标进行了探索:具体包括了最小阻抗模型^[11]、引力模型^[12]和综合供需特征的二步移动搜索法(2SFCA)等可达性测度方法^[13-14];以表征可用性的归一化植被指数(NDVI)^[15]、叶面积指数(LAI)^[16]和绿地覆盖度^[17]等;采用街景数据计算的视觉暴露指标,例如绿景指数(GVI)等^[18]。可达性更多的反映了绿地暴露的供需水平;可用性可以反映一定范围内的绿地暴露的质量和数量水平,但无法反映供需关系;可视性受数据限制较大,只能反映有限街道空间的绿地暴露水平。最近 Zhang 等^[19]构建包含使用情况、有用性、可达性、吸引力和可视性等多维绿地暴露指标的评估框架能够完整反映数量、质量和邻近度等绿地属性,很好地弥补单一维度绿地暴露指标的局限性。但其提出的绿地暴露评估方法涉及了主观和客观暴露两个类别,主观暴露测度与个人自我报告的绿地使用情况有关,且各指标缺乏可比性,在多个城市尺度上进行绿地暴露计算和评价

难度较大。如何快速有效地测度多个城市尺度的绿地暴露水平,并反映整体的城市绿地建设水平,有助于科学评估城市间的绿地暴露差异。最近有研究提出了一种基于人口加权绿地暴露方法,能够较好地实现不同城市间的绿地暴露可比性^[20—21]。因此,本研究采用该指标来测度多个城市尺度下的绿地暴露水平,以揭示绿地暴露时空动态演变过程。

城市绿地空间的不均衡分布使得绿地暴露也存在明显的时空差异,相关研究也证实了不同年龄^[13, 22—23]、收入水平^[24]、以及种族群体^[25]在绿地暴露中的差异性。多数研究仅停留在对绿地暴露时空差异特征分析的层面,因此相关学者开始关注城市绿地时空差异的影响因素探索。其影响因素主要涉及了包含高程、坡度、降水量和自然地理分区等的自然环境特征^[26—27];以人均地区生产总值,政府财政收入以及居民收入水平等表征的城市经济水平^[28];城市产业结构^[29];人口密度表征的城市绿地需求特征^[28, 30—31];建成区面积范围和城市空间形态特征^[32—33];以及政府政策^[26]。这些研究不仅证实了自然环境特征和社会经济条件对绿地发展具有重要的影响,同时也分析了不同规模城市(例如超大城市、大城市、中等城市和小城市)、自然地理分区(例如东部、中部、西部、东北)和时间阶段下的各因素对绿地发展影响的差异变化。但上述研究多采用全局线性模型进行回归分析,并不能有效反映各因素在城市之间影响的异质性;而且缺乏分析不同时间阶段下各因素影响的空间异质性动态演变特征,无法深入探讨各城市发展动态过程对绿地发展差异的影响。因此,有必要探索绿地暴露影响因素的时空异质性。

值得注意的是,城市绿地的时空演变格局往往与城镇化发展演变有很大的关联^[28]。一方面,城镇边界的扩张延伸使得城市周边的绿地资源规模变小,形态破碎;另一方面,城市的更新改造和可持续发展理念的深入,也使得城市内部的绿地资源得到有益补充。城镇化发展对绿地暴露的影响显著,但城镇化发展与绿地暴露时空格局演变的关联尚不明确。城镇化是一个包含了人口城镇化、经济城镇化、土地城镇化和社会城镇化等的多维复合系统。其中,人口增长是核心,经济发展是动力,土地增长是载体,社会发展是目标^[34—35]。改革开放以来,中国社会经济的快速增长,促进了城镇人口的迅速增长和城镇空间范围的急剧扩大,同时也伴随着生态环境的改变^[36]。长期快速的土地城镇化加剧了城市绿地空间与其他建设用地的冲突矛盾^[37]。2014年中共中央和国务院颁布了《国家新型城镇化规划(2014—2020年)》,意味着中国城镇化建设和发展迈入了新的阶段^[38]。新型城镇化更加重视“以人为本”,强调可持续发展和生态环境的保护,逐渐形成了人口、城镇、土地、社会和生态相互协调的城镇化体系,这使得绿地空间等具有重要社会和生态效益的景观在城市发展规划中的地位更加突出^[39—40]。当前中国城镇化进入了高质量发展阶段,党的“二十大”提出了建设中国式的现代化,要坚持人与自然和谐共生的现代化,新型城镇化建设必须坚持绿色的城镇化发展道路^[41]。因此,研究城镇化发展与绿地空间暴露的关系,对促进城市区域高质量和可持续发展具有重大的意义。前文中绿地发展时空差异的影响因素涉及了城镇化的单一或者若干维度,但缺乏从多维视角对影响要素进行归类,以探索城镇化对绿地空间发展的影响机制。因此,系统地探索多维城镇化要素对绿地暴露影响的时空异质性规律,有助于解释中国不同城镇化发展阶段下绿地暴露健康效应。

鉴于此,本研究以城镇化发展具有明显时空差异的长江经济带为研究区,以 500 m×500 m 的网格为研究单元,基于 LUCC 土地利用、WorldPop 人口等多源数据,利用人口加权绿地暴露、地理探测器和地理加权回归等方法分析多个城市尺度下绿地时空暴露格局特征,识别和探索绿地时空暴露格局的主导因子以及其影响的时空异质性,以期在城镇化背景下跨区域绿地空间规划和管理提供科学参考。

1 数据来源与处理

1.1 研究区概况

长江经济带依托长江水道,地跨我国东中西三大区域,覆盖了上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、贵州和云南 9 省 2 市,面积约占全国的 21.4%,人口和经济占全国的比例均超过 40%^[40]。随着长江经济带城镇化水平的持续推进,城镇人口的持续增长和有限的城市绿地资源之间的不配套问题也日益严重。

国家先后批复长江经济带三大城市群(即长江三角洲城市群、长江中游城市群和成渝城市群)的发展规划,如何促进区域内部城镇化高质量和协调发展,对城市绿地有序和合理建设,进而提升城市人居环境和促进居民身心健康具有重要意义。本研究以长江经济带地级市以上城市作为研究单元,为了保证数据的可获取性,本研究最终选取了 108 个城市作为研究样本(不包括少数民族自治州、毕节市、铜仁市和湖北省辖的 4 个县级市、林区)(图 1)。对行政区划调整比较大的地级巢湖市,将 2010 年和 2005 年的相关数据按照比例折算到行政区划调整后的城市当中。

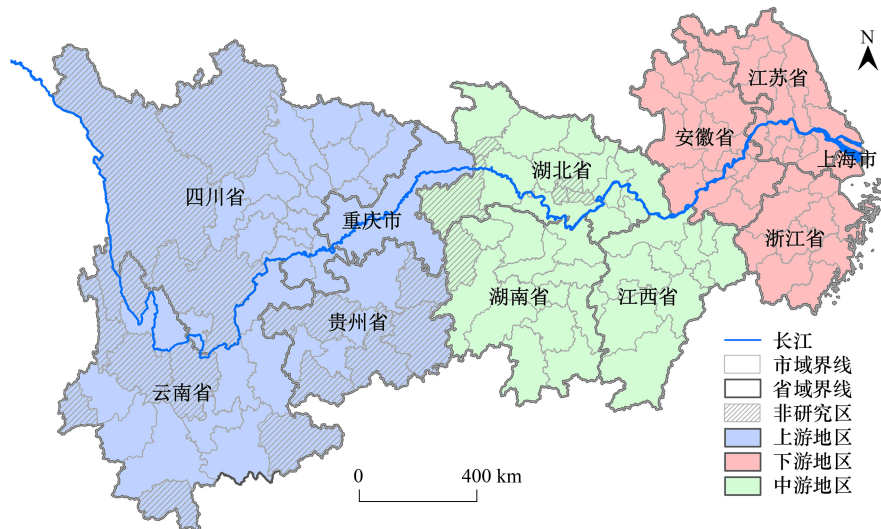


图 1 研究区概况图

Fig.1 Summary map of the study area

1.2 数据来源与处理

选取 2005、2010、2015、2018 年 4 个时期为研究时段,主要数据来源如下:(1)城市不透水面和绿地组分数据来源于 Kuang 等^[42]发布的中国城市不透水面与绿地空间数据集(CLOUD-Urban),该数据类型为栅格数据,空间分辨率为 30 m。该数据集结合了土地利用数据、NDVI 和谷歌影像,通过在 GEE 平台采用随机森林来训练获得每个城市中 30 m 像素级别的城市不透水面和城市绿地空间百分比,数据精度较高,能够满足城市环境问题和内部景观结构的相关研究;(2)土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,空间分辨率为 30 m,包括了耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 个一级类别;(3)人口数据来自 WorldPop 的中国人口栅格数据,空间分辨率为 100 m;(4)PM_{2.5}浓度数据来源于加拿大达尔豪斯大学大气成分分析组,该数据使用 WGS1984 投影,空间分辨率为 1 km;(5)DEM 数据来源于地理空间数据云,空间分辨率为 90 m;(6)其他数据来源于相应年份的《中国城市统计年鉴》、各省市《统计年鉴》,数据缺失的根据邻近年份进行补充。

城市建成区和人口的提取。本研究所定义的城市建成区来源于中国城市不透水面与绿地空间数据集(CLOUD-Urban),以不透水面的边界作为城市建成区的边界。同时,本研究将面积小于 1 km²的图斑剔除掉以避免较小的城镇对结果的影响。以每个城市单元行政范围为界限,构建 500 m×500 m 的格网,并利用 ArcGIS 10.8 的相交以及空间连接等功能修正获取城市建成区内部的格网。然后,将 WorldPop 的 100 m 分辨率的栅格数据重采样为 500 m 分辨率的栅格数据。采用分区统计功能汇总每个格网内部的人口数据,以此作为城市人口的基本单元。

城市绿地的提取。城市绿地数据的提取借鉴了徐超等^[43]的研究,绿地包括了城市不透水面像元中所包含的绿地组分和不透水面像元之外的绿地。其中,城市不透水面中的绿地组分主要由 CLOUD-Urban 数据集中的绿地组分来计算,其数值是该像元中绿地面积占比扩大了 1000 倍。而不透水面以外的绿地通过提取土地

利用数据中的林地和草地面积获取,并将其栅格属性改为 1000,以表示像元内部的绿地面积占比为 100%。因此,像元对应的真实绿地面积为像元值乘以像元面积(900 m²),再除以 1000。最后,再将两个栅格数据融合为 30 m 分辨率的绿地空间分布栅格数据后,按照建成区边界裁剪出城市内部的绿地数据,并采用 ArcGIS 10.8 的栅格转点工具将其矢量化。

其他数据的处理。PM_{2.5}和 DEM 栅格数据按照建成区边界进行裁剪后,按照分区统计获取建成区内部的 PM_{2.5}和高程数据均值。

2 研究方法

2.1 人口加权的绿地暴露测算

本研究中绿地暴露用居住点一定缓冲区范围内的绿地覆盖率来表示,同时在计算每个城市绿地暴露水平时,考虑人口加权,以便更好地反映出人口密度和绿地的空间分布特征。结合前人的研究认为 500 m 缓冲半径是合理的^[44-45]。因此,每个城市的绿地暴露水平可以通过以下公式计算:

$$GE = \frac{\sum_{a=1}^n (p_a \times G_a)}{\sum_{a=1}^n p_a} \times 100\% \quad (1)$$

式中, GE 是城市绿地暴露水平, n 是城市边界内部的人口格网单元数量, p_a 是人口格网单元 a 的人口数量, G_a 是人口格网单元 a 周围 500 m 缓冲区范围内的绿地覆盖率。

2.2 地理探测器

地理探测器是用于探测地理要素空间分异性的重要模型,最初运用于探索分区地理要素对疾病的影响机制,该工具能够进行因子探测、交互探测、生态探测和风险探测,所需要的影响因子是类别数据,对于连续的数据需要进行离散处理^[46]。首先借助因子探测模块来识别影响绿地暴露的主导因子;其次利用交互探测模块来分析各主导因子之间的是否具有交互作用以及其相互作用的类型。

(1) 因子探测:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

式中, q 是探测因子的影响力, L 是探测因子的类别数量, N 是城市数量, N_h 是类别 h 的城市数量, σ^2 和 σ_h^2 分别是绿地暴露值在整个区域的方差和类别 h 的绿地暴露值的方差。

(2) 交互探测:

交互探测能够用于表征两个探测因子的交互作用对绿地暴露空间格局的影响程度。交互作用的探测结果包括了 5 种类型:若 $q(M \cap N) < \min(q(M), q(N))$, 表明因子 M 和 N 交互后非线性减弱;若 $\min(q(M), q(N)) < q(M \cap N) < \max(q(M), q(N))$, 表明因子 M 和 N 交互后单因子非线性减弱;若 $q(M \cap N) > \max(q(M), q(N))$, 表明两因子交互后双因子增强;若 $q(M \cap N) > q(M) + q(N)$, 表明两因子交互后非线性增强;若 $q(M \cap N) = q(M) + q(N)$, 表明两因子相互独立。

2.3 地理加权回归模型

为了进一步分析各主导因子对绿地暴露影响的时空异质性,本研究采用了地理加权回归(GWR)模型,将要素的空间关系特征纳入到模型中,有助于更好地估计主导因子影响的局部系数。在此之前,利用 OLS 线性回归模型来分析上文选出的主导因子之间是否存在严重的多重共线性,并以方差膨胀系数(VIF)小于 10 作为评价标准。GWR 模型的具体公式如下:

$$Y_i = \beta_{i0(u,v)} + \sum_{j=1}^m \beta_{ij(u,v)} X_{ij} + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中, Y_i 是城市 i 的绿地暴露水平, (u, v) 是城市的地理中心坐标, $\beta_{i0(u, v)}$ 是常数项, m 是变量的个数, $\beta_{ij(u, v)}$ 是第 j 个自变量的回归系数, X_{ij} 是第 j 个自变量, ε_i 是随机误差项。

3 绿地暴露时空格局特征

3.1 时间演变特征分析

如图 2 所示, 长江经济带城市绿地暴露水平呈现“先增加, 后下降”的趋势, 但绿地暴露水平整体上有所改善, 从 2005 年的 13.46% 增加到了 2018 年的 14.75%。2005—2010 年, 全域城市绿地暴露水平提升最大, 增加了 0.72%。不同区域之间的绿地暴露水平为: 中游地区 > 上游地区 > 下游地区。

上游和中游地区的城市绿地暴露水平与全域一致均表现为“先增加, 后下降”的趋势, 但 2015—2018 年间的下降趋势并不明显。上游地区城市绿地暴露水平提升最大的时间段是 2010—2015 年。除了 2010 年云南省的绿地暴露水平要略高于贵州省之外, 其他年份上游地区绿地暴露水平分省份排序为: 贵州省 > 云南省 > 重庆市 > 四川省。而中游地区城市绿地暴露水平提升最大的时间段是 2005—2010 年。不同年份中, 中游地区绿地暴露水平分省份排序差异明显, 各省份绿地暴露水平年际变化差异明显, 说明了中游地区城市绿地暴露影响因素复杂。与中上游不同的是, 下游地区的城市绿地暴露水平则呈现出持续增长的趋势, 但是 2015—2018 年间的增加明显趋缓。下游地区绿地暴露增加最多的时间段是 2010—2015 年。所有时间段内, 下游地区绿地暴露水平按省份排序为: 浙江省 > 安徽省 > 江苏省 > 上海市。除了安徽省以外, 其余省份的绿地暴露水平平均呈现增长趋势。

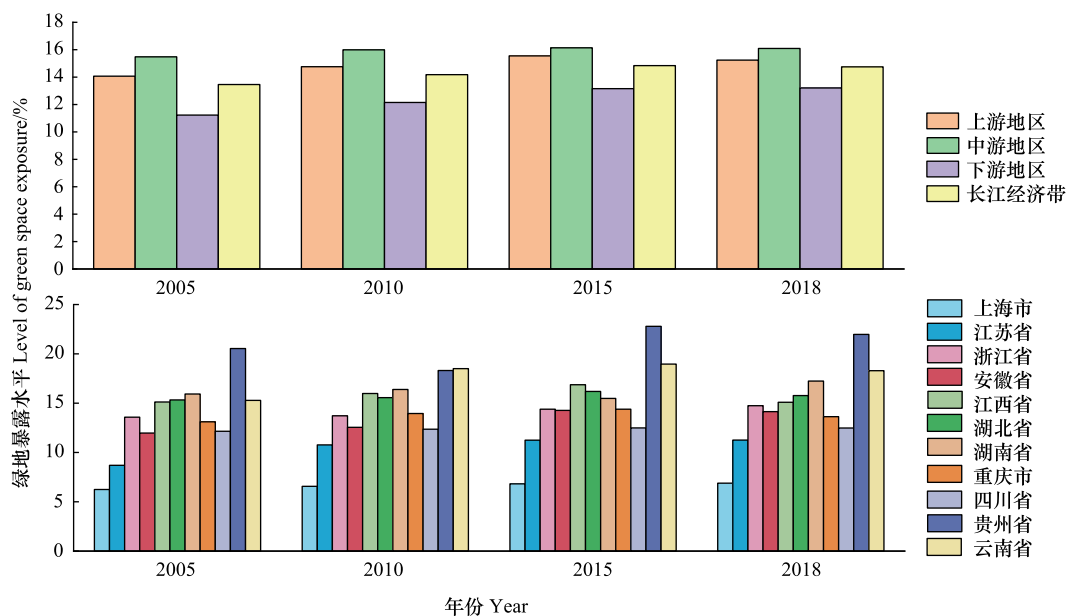


图 2 长江经济带绿地暴露时序演变

Fig.2 The temporal evolution of green space exposure of the Yangtze River Economic Belt

3.2 空间演变特征分析

如图 3 所示, 将四个时期的绿地暴露数据划分为 5 个类别来分析绿地暴露空间演变特征: 低绿地暴露 ($\leq 8\%$)、较低绿地暴露 ($8\%—12\%$)、中绿地暴露 ($12\%—16\%$)、较高绿地暴露 ($16\%—20\%$) 和高绿地暴露 ($> 20\%$)。2005 年, 城市绿地暴露水平维持在较低水平的区域主要集中在长江下游地区, 其中徐州、蚌埠、扬州、无锡和上海市的绿地暴露水平极低, 在 8% 以下; 中游地区主要以武汉为中心, 沿着湖北省边界向西北和西南两个方向延伸, 但是整体水平高于 8% ; 上游地区从四川省绵阳市一直延伸到云南省玉溪市, 呈现出“带状”分布的特点。其中绿地暴露水平在 8% 以下的城市有绵阳、资阳、乐山和昆明市。高绿地暴露区域空间分

布零散,主要分布在省际交接的边缘区域,例如丽江、攀枝花、遵义、十堰、咸宁、黄石和丽水市等,这些区域绿地资源丰富,有助于提升整体绿地暴露。2010年,长江下游地区绿地暴露水平较低的城市减少,主要是徐州市、蚌埠市和上海市;中游地区主要是襄阳、孝感、武汉、荆州和常德市;上游地区较低绿地暴露城市数量减少至10个,其中低绿地暴露的城市仅有绵阳市。同时,高绿地暴露城市数量也有所减少,但六盘水、临沧、萍乡、景德镇和黄山市转为了高绿地暴露城市。2015年和2018年,低绿地暴露城市均只剩下上海、徐州和绵阳3个城市,长江下游和中游地区较低绿地暴露的城市数量逐渐减少,但南昌市在2018年处于较低绿地暴露水平;上游地区中,四川省的成都、南充、德阳、眉山、资阳、内江、乐山和泸州市一直处于较低的绿地暴露水平,2018年较低绿地暴露城市新增了昆明和曲靖市。而高绿地暴露区域虽然在2015年有所增加,但整体分布上仍是处于省份边界或者研究区边缘地带。

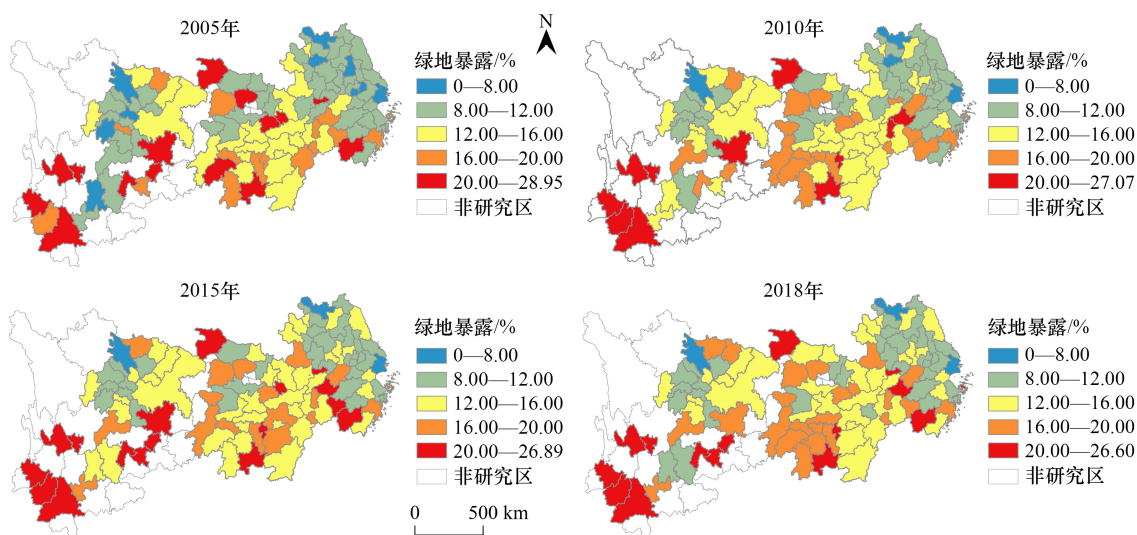


图3 2005—2018年绿地暴露空间分布

Fig.3 Spatial distribution of green space exposure from 2005 to 2018

4 城镇化要素对绿地时空暴露影响机制分析

4.1 影响因子选取与说明

由于社会城镇化往往比较复杂,难以进行简单地量化和表征,因此本研究重点关注了人口、经济、土地和生态4个核心的城镇化指标^[47]。同时,选取了气温、降水和高程3个自然环境特征作为控制变量,以表征自然地理环境的空间差异。鉴于此,本研究从人口、经济、土地和生态城镇化,以及自然环境特征5个指标维度中选取了10个影响因子作为自变量(表1),以城市绿地暴露水平作为因变量,在地级市尺度层面对长江经济带城市绿地暴露的影响因素进行分析。

人口城镇化反映的是城镇人口不断集聚的过程,即农村人口向城镇人口转换的趋势。随着城镇化水平的发展,城镇空间人口数量和密度发生了显著变化,这对城市绿地空间供需产生了重要的影响。因此,本研究选取了城镇人口比例和城镇人口密度2个影响因子来表征人口城镇化指标。经济城镇化反映了经济发展水平,一般指非农经济发展水平。本研究选取了地区生产总值来表征城市经济发展的规模,以第二三产业产值占比情况来表征非农产业结构的发展水平。土地城镇化反映的是城镇化在空间上的扩张和蔓延情况,城镇建设用地不断扩展发展,不仅改变了自然绿地的空间现状,也会影响人为绿地的规划布局。因此,本研究以城市建成区面积来表征土地城镇化程度。生态城镇化反映的是城镇化发展过程中对生态环境保护的力度,新型城镇化将生态文明建设放在首位,以及长江经济带的“生态优先,绿色发展”战略定位说明了生态环境质量是新型城

城镇化中不容忽视的重要指标^[48-49]。生态城镇化指标上首先选择了绿地覆盖率作为城市绿地总体建设水平。此外,大气环境质量的改善与城市绿地建设发展也具有重要的关联,本研究以 $PM_{2.5}$ 浓度值作为反映环境治理的重要指标。为避免数据之间存在单位不一致的问题,本研究对相关数据进行了对数化处理,以减少量纲影响。

表 1 绿地暴露影响指标选取和说明

Table 1 Selection and explanation of green space exposure impact indicators

指标 Indicator	影响因子 Influencing factor	符号 Symbol	单位 Unit
人口城镇化 Population urbanization	城镇人口比例	Popr	%
	城镇人口密度	Popden	人/km ²
经济城镇化 Economic urbanization	地区生产总值	GDP	万元
	第二三产业产值占比	IN2_3	%
土地城镇化 Land urbanization	建成区面积	UA	km ²
生态城镇化 Ecological urbanization	绿地覆盖率	GCR	%
	$PM_{2.5}$	$PM_{2.5}$	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
自然环境特征 Natural environment	气温	Tem	℃
	降水	Pre	mm
	高程	DEM	m

4.2 基于地理探测器的主导因子识别

采用地理探测器来识别影响城市绿地暴露的主导因子,有助于降低因子之间潜在的多重共线性,并确保筛选出具有最强解释力的因子。利用 ArcGIS 10.8 中的 Jenks 自然断点法将上一小节中选出的所有连续变量分为 5 类,并采用地理探测器进行因子探测,最后,将 q 值按照从大到小进行排序。从表 2 中可知:2005—2018 年,绿地覆盖率、 $PM_{2.5}$ 、建成区面积、地区生产总值和高程对长江经济带城市绿地暴露的影响一直排在前 5 位,除了在 2005 年 $PM_{2.5}$ 的影响没有通过显著性水平,其他均通过了 0.05 的显著性水平。2005 年的影响大小排序为:绿地覆盖率>建成区面积>高程>地区生产总值> $PM_{2.5}$;2010 年的影响大小排序为:绿地覆盖率> $PM_{2.5}$ >建成区面积>高程>地区生产总值;2015 和 2018 年的影响大小排序均为:绿地覆盖率> $PM_{2.5}$ >建成区面积>地区生产总值>高程。绿地覆盖率是城市绿地暴露空间差异的最重要的影响因子,其 q 值从 2005 年的 0.663 增加至 2018 年的 0.753,远高于其他因子,说明城市绿地建设水平是决定城市绿地暴露量的基础前提,对城市绿地暴露的空间分异解释力度超过了 66%。2005—2018 年,建成区面积和地区生产总值的 q 值逐渐增加; $PM_{2.5}$ 的 q 值在 2015 年达到最大值(0.301),而在 2018 年下降到了 0.283;高程的 q 值在 2010 年达到最大值(0.218),随后其 q 值逐渐下降,影响逐渐减弱。

城市绿地暴露的空间分异不仅受到单一因子影响,而且可能更多受到不同影响因子间的交互作用。本研究进一步对排名前 5 的主导因子进行交互探测(图 4)。探测结果表明了 5 个主导因子之间存在着增强的交互作用,各因子对城市绿地暴露的影响并不相互独立。除了 2005、2010 年地区生产总值 $\cap$ $PM_{2.5}$,以及 2005 年建成区面积 $\cap$ $PM_{2.5}$ 是非线性增强外,其余因子之间的交互作用均为双因子增强。所有年份中,绿地覆盖率与其余四个因子的交互作用 q 值均不低于 0.699,除了绿地覆盖率 $\cap$ $PM_{2.5}$ 的 q 值在 2015 年略有降低以外,绿地覆盖率与地区生产总值、城镇规模和高程的交互作用 q 值逐年增加。此外, $PM_{2.5}$ 与地区生产总值和城镇规模的交互作用 q 值在 2010—2018 年也超过了 0.5,但 q 值随着时间而降低,彼此之间的交互作用渐趋弱化。值得注意的是,地区生产总值与城镇规模之间的交互作用在逐渐增强,从 2005 年的 0.246 增加至 2018 年的 0.418。

4.3 基于 GWR 的主导因子空间异质性

采用 GWR 来探索各主导因素影响的空间异质性。首先采用 OLS 线性回归模型诊断各年份自变量之间

是否存在多重共线性,从方差膨胀因子检验的结果来看,各年份自变量的 VIF 均小于 10,说明彼此之间并没有出现多重共线性,可以进行 GWR 分析。GWR 拟合后的 Adjusted R^2 从 2005—2018 年依次为 0.745、0.864、0.792 和 0.829,说明了模型拟合良好,自变量影响的回归系数空间异质性如图 5 所示。

表 2 2005—2018 年长江经济带城市绿地暴露影响因子探测

Table 2 Factor detection results of green space exposure from 2005 to 2018

影响因子 Influencing factor	2005 年		2010 年		2015 年		2018 年	
	q 值 q value	排序 Ranking	q 值 q value	排序 Ranking	q 值 q value	排序 Ranking	q 值 q value	排序 Ranking
Popr	0.031	8	0.104 *	7	0.124 *	6	0.094	8
Popden	0.005	10	0.056	9	0.015	10	0.018	10
GDP	0.187 **	4	0.212 ***	5	0.216 ***	4	0.265 ***	4
IN2_3	0.024	9	0.102 *	8	0.055	8	0.132	6
UA	0.203 ***	2	0.266 ***	3	0.268 ***	3	0.280 ***	3
GCR	0.663 ***	1	0.722 ***	1	0.744 ***	1	0.753 ***	1
PM _{2.5}	0.151	5	0.282 ***	2	0.301 ***	2	0.283 ***	2
Tem	0.062	7	0.116	6	0.051	9	0.118	7
Pre	0.069	6	0.054	10	0.056	7	0.028	9
DEM	0.193 ***	3	0.218 ***	4	0.207 ***	5	0.199 ***	5

***、** 和 * 分别表示 P 在 0.01、0.05 和 0.1 的水平上显著; q 为探测因子的影响力

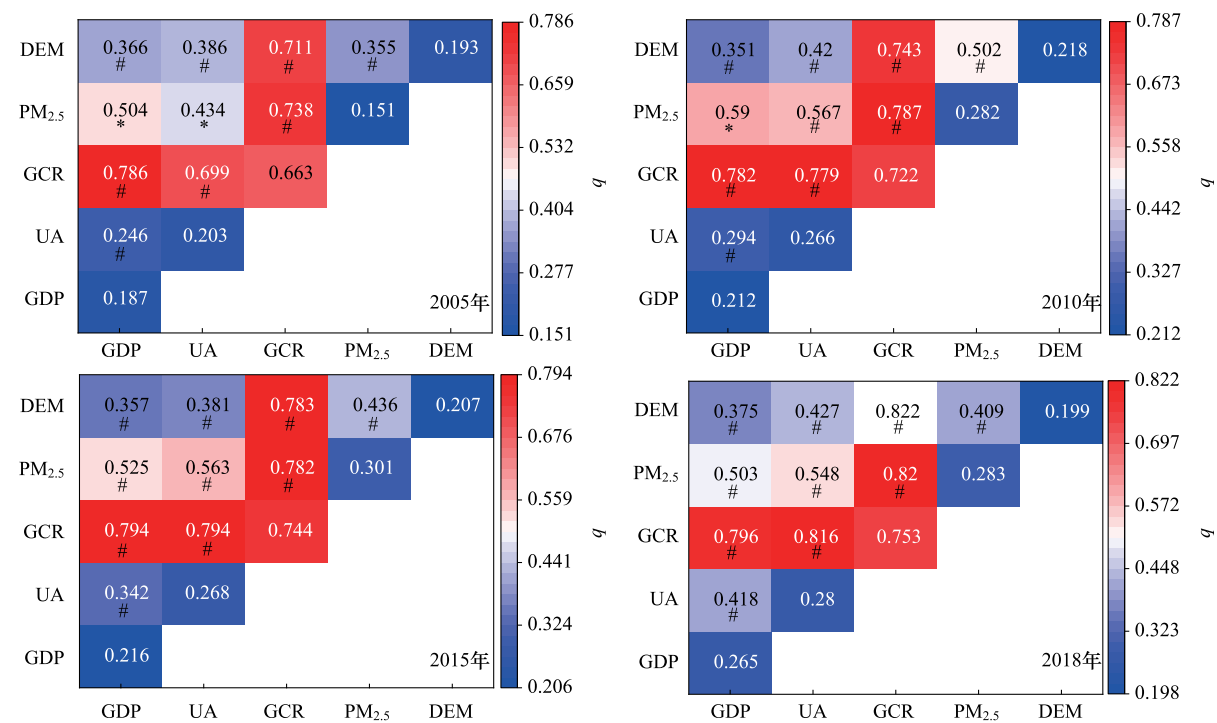


图 4 2005—2018 年长江经济带城市绿地暴露主导因子交互探测

Fig.4 Interaction detection results of the dominant factors of green space exposure from 2005 to 2018

GDP:地区生产总值;UA:建成区面积;GCR:绿地覆盖率;PM_{2.5}:PM_{2.5}颗粒物浓度;DEM:高程;*表示非线性增强;#表示双因子增强; q 为探测因子的影响力

(1) 地区生产总值对绿地暴露的负向作用随着时间的推移逐渐占据整个长江经济带。2005 年地区生产总值对绿地暴露具有正向影响的区域主要集中在地区是四川省的广元、南充和巴中市,2010 年又增加了达

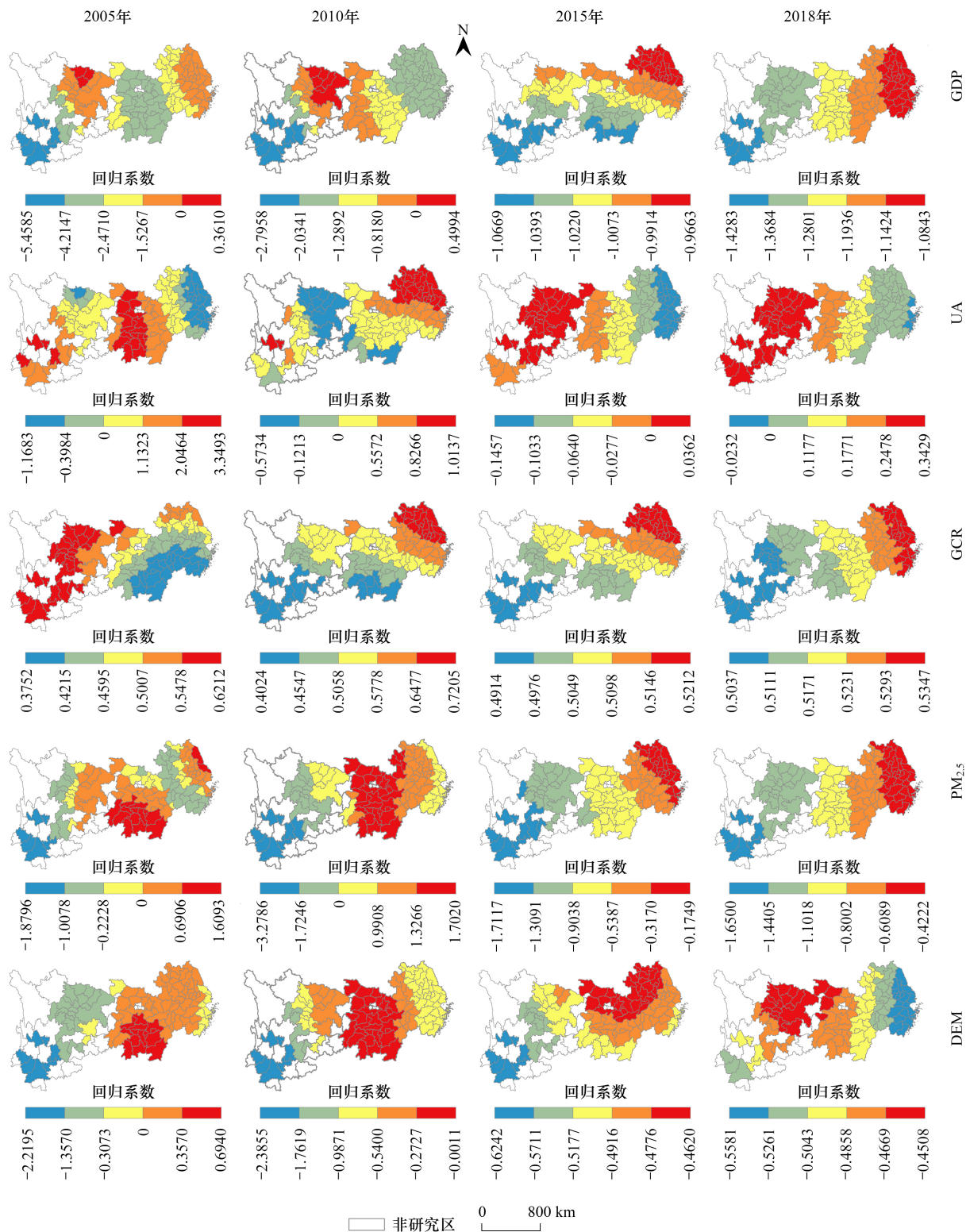


图 5 2005—2018 年长江经济带城市绿地暴露主导因子的空间异质性

Fig.5 Spatial heterogeneity of the dominant factors of green space exposure from 2005 to 2018

州、广安和重庆市。除此之外,地区生产总值对这两个年份的其他城市的绿地暴露均呈现不同程度的负向影响。2015 和 2018 年地区生产总值所有城市的绿地暴露均呈现负向影响。地区生产总值对绿地暴露一直产生较强负向影响的区域是云南省的昆明、丽江、玉溪、普洱、临沧和保山市,以及四川省的攀枝花市。2005 年,

地区生产总值对绿地暴露产生较为显著负向影响的区域主要集中在长江上游地区的西南部、长江中游地区的东北部以及长江下游地区的西北部;2010—2018年,地区生产总值对绿地暴露产生较为显著负向影响的区域从东部逐渐向中部和西部转变,说明随着社会经济的发展,长江中上游地区绿地暴露受到的负面效应逐渐增强。

(2)城镇规模对全域绿地暴露的作用存在着显著的空间差异,但大多数区域的正向关系表明了城镇规模的扩大有助于绿地暴露的提升。2005年城镇规模回归系数高值区域主要集中在长江中部地区,云南省的昆明、保山和丽江市以及四川省的攀枝花市。但2010年,回归系数高值的区域主要集中在长江下游地区的北部区域;回归系数低值区域集中在长江上游地区的东部以及中游地区的南部地区。2015—2018年,回归系数高值区域基本转移到整个长江上游地区,城市规模对绿地暴露产生正向影响的区域逐渐扩大。

(3)绿地覆盖率对城市绿地暴露一直具有正向的作用。2005年,回归系数高值区域主要集中在湖北省的十堰市、四川省的西部和南部、以及云南省,这些区域城市大多开发程度较低,绿地覆盖程度较高;而回归系数低值区域主要集中在整个长江经济带的东南侧,具体包括了湘南、赣南、皖南、苏南和浙南。但2010—2018年,绿地覆盖率回归系数高值区域逐渐转移到皖北和苏北,最终转移到整个江苏省、上海市和浙江省的大部分地区;而低值区域从长江经济带中部逐渐向西部过渡。

(4) $PM_{2.5}$ 对绿地暴露影响的负向作用随时间而逐渐显著。2005—2010年, $PM_{2.5}$ 的影响系数空间范围差异逐渐增大,高低值分别达到1.7020和-3.2786,且 $PM_{2.5}$ 正向影响的区域增加,主要集中在中部地区的湖南省和江西省以及江苏省的盐城和南通市。2015、2018年, $PM_{2.5}$ 对所有区域的绿地暴露的影响均为负数。其负向影响从西向东逐渐减弱,且影响的空间差异也逐渐缩小。

(5)地形因素对城市绿地暴露的影响随时间而弱化,空间差异逐渐缩小。2005年,长江经济带西部城市的绿地暴露受到了高程的负向影响,而大部分中东部地区的城市受到正向的影响显著。从2010年之后,整个区域城市绿地暴露与高程之间均维持着负向关系,但其影响的时空差异逐年减小。回归系数高值区从中部地区向长江中下游地区北部转变,进而转移至中游地区西北部和上游地区的东北部;而回归系数低值区从云南省转移至长江下游东部。

4.4 城镇化要素对绿地暴露影响机制分析

长江经济带城市绿地暴露的时空格局演变是长期复杂的过程。在探索了长江经济带城市绿地暴露时空分异的主导因子及其影响的空间异质性后发现:自然环境特征中,高程的影响逐渐弱化,而气温和降水对城市绿地暴露的影响并不显著;人口、经济、土地和生态城镇化因子对城市绿地暴露时空分异影响存在着明显的差异。

人口城镇化因子对绿地暴露时空分异影响较小。人口城镇化率越高意味着城镇绿地的需求更大,有利于促进城市绿地的建设;但城镇人口的增多又会导致现有绿地“供不应求”局面的出现。例如,上海市城市内部绿地建设逐年增加,但其持续增加的常住城镇人口,可能降低了城市绿地的整体暴露水平。而城镇人口密度与绿地暴露关联不强说明城市内部绿地建设与人口需求存在着明显的错配现象。

经济城镇化过程对绿地暴露时空分异影响随时间发展而强化。地区生产总值对绿地暴露的整体影响稳定在前5位,且其 q 值也逐渐增加,说明了经济的持续发展会增强其对长江经济带城市绿地暴露水平时空分异的影响。城市经济条件的改善,会在一定程度上增加财政收入,用以支持环境保护和城市绿地建设的资金更能得到保障。从第二三产业产值占地区生产总值的比值来看,产业结构的高级化并不会显著提升城市绿地暴露水平。但产业结构逐渐完善和发展一定程度上会降低经济发展所带来的城市问题,促使绿地建设,缓解城市居民生活中绿地不足的现状。

土地城镇化对绿地暴露时空分异的影响也随时间变化而强化,但其影响程度逐渐减小。城镇土地的扩张往往由城镇人口增加和经济发展需要决定,城市的无序扩张可能会导致城市绿地空间的破坏和减少。尤其是中西部城市,逐渐承接东部地区产业发展经济的同时,其城市绿地资源在配合城市经济发展所需的土地扩张

中逐步破碎化。但是,随着城市不断向外扩张,原有城市内部人口外移,使得部分区域土地被改造成为绿地资源,可能会增加原有城市内部的绿地暴露水平。

随着生态城镇化的不断推进,城镇绿地覆盖率提高和城市环境质量的改善对绿地暴露时空分异格局影响逐渐增强,但其对绿地暴露产生积极影响的空间差异逐渐缩小。早期的绿地更多是一种资源禀赋,中西部地区绿地水平明显高于东部地区,因此绿地覆盖率影响的高值区域主要集中在中西部地区。而党的“十八大”以来,生态文明建设被提到了前所未有的高度,“新型城镇化”更加强调“以人为本”和“生态文明”,绿地建设和生态保护力度加大,生态城镇化指标对绿地暴露影响的空间分异性逐渐缩小。

总之,各因子对城市绿地暴露的影响程度存在着明显的时空分异状况。影响的基本机制是以自然地理环境特征为基础,在现有绿地资源禀赋的基础逐渐演变的。经济城镇化与人口城镇化和土地城镇化之间相互促进,彼此之间共同影响着城市绿地暴露的现状,但其影响的双面性加剧了城市间的绿地暴露差异。生态城镇化的持续推进将有助于城市绿地规划建设,也极大促进了生产方式和生产结构的调整,进而改善人居绿地暴露水平和质量。

5 讨论与结论

5.1 讨论

本研究是对 Yu 等提出的暴露生态学理论框架中的“客体-现实”模型的运用和扩展^[9, 50]。“客体”是指绿地空间格局的分布,“现实”是指真实的绿地环境。城市绿地空间格局分布直接影响着居民的绿地暴露水平和质量,进而影响其身心健康。《2022 年联合国可持续发展报告》可持续发展目标 11.7 明确提出了在拥挤的城市地区,绿地空间对社会和经济生活具有至关重要的作用。研究不仅分析了长江经济带各地级城市绿地暴露水平的时演变格局,同时也从多维城镇化的视角下识别了不同时期绿地暴露空间差异的主导因子及其影响的时空异质性,这对于因地制宜地制定政策来实现城市绿地资源的优化配置和提高居民生活质量具有重要的借鉴意义。结合研究结果,认为可以从以下几个方面来改善城市绿地暴露水平:(1)促进城市社会经济发展与有序的城市扩张将更有利于减少绿地暴露在空间上的差异性,以避免经济快速增长和无序的城市扩张对现有绿地的破坏;(2)对高密度的中心城区,要有效利用空地打造合理的绿地空间,“见缝插针”布局街心公园和口袋公园,满足居民的日常绿地需求^[51];(3)合理调控城市人口布局,分散城市中心较为密集的居民,尽量做到规划在前,确保城市绿地的合理分配;(4)加大环境保护以维持现有绿地空间范围,加强绿地建设以扩大绿地资源基础。

虽然采用多种量化方法探索了长江经济带城市绿地时空暴露格局及其影响机制,但也存在以下局限性:一方面,虽然采用了当前学者广泛采用的 500 m 格网和缓冲区尺度来研究城市绿地暴露,但不同尺度和缓冲区下是否会对结果产生尺度效应并没有进行深入探究;另一方面,城镇化因素仍然还有许多指标,选取了一些当前研究中较为重要的来进行探索,后续研究有待扩充更为完整的城镇化指标体系;绿地暴露计算虽然采取了 30 m 的绿地组分数据和土地利用数据,但不同分辨率水平下的绿地暴露水平可能存在一定的差距,如何选取合适的绿地分辨率尚待探究。

5.2 结论

(1)从不同时期的城市绿地暴露水平来看,长江经济带城市绿地暴露水平呈现“先增加,后下降”的趋势,但整体上绿地暴露水平有所改善;绿地暴露水平空间差异明显:中游地区>上游地区>下游地区。此外,城镇化水平发展缓慢和绿地资源丰富的城市,其绿地暴露水平往往较大,说明了自然禀赋和城镇化均对城市绿地时空暴露格局具有重要的影响。

(2)因子探测结果表明绿地覆盖率、PM_{2.5}、建成区面积、地区生产总值和高程是城市绿地暴露水平时空差异的主导因子。城镇化水平的提升强化了对绿地暴露水平空间差异的影响,而自然环境的影响逐渐弱化。交互探测的结果表明了绿地覆盖率与其他因子之间的协同作用对城市绿地暴露的影响明显强于其单独作用。

建成区面积和地区生产总值与其他因子之间的交互作用并不明显,但二者之间的协同作用随着时间发展而逐步增强。

(3)GWR 的结果表明了各主导因子对城市绿地暴露的影响存在明显的时空异质性。随着年份的增加,经济发展对绿地暴露的负向影响逐渐增强,尤其是东部地区。绿地覆盖率的提高和环保力度的增强,使得城市绿地暴露水平得到改善。建成区面积的扩张从无序到有序发展,使其对城市绿地暴露的正向影响逐渐凸显。

参考文献(References):

- [1] 李琪, 陈文波, 郑蕉, 谢涛, 卢陶捷. 南昌市中心城区绿地景观对 PM_{2.5} 的影响. 应用生态学报, 2019, 30(11): 3855-3862.
- [2] Van Renterghem T, Botteldooren D. View on outdoor vegetation reduces noise annoyance for dwellers near busy roads. Landscape and Urban Planning, 2016, 148: 203-215.
- [3] 谢紫霞, 张彪, 余欣璐, 郝亮. 上海城市绿地夏季降温效应及其影响因素. 生态学报, 2020, 40(19): 6749-6760.
- [4] 齐涛, 曾志伟, 姚霞, 耿红凯, 余兆武, 王兰, 林美霞, 张浚茂, 郑毅诚. 城市人群绿地暴露及其健康效应研究综述. 生态学报, 2023, 43(23): 10013-10021.
- [5] 刘晔, 何嘉锐, 王若宇, 李志刚. 城市绿色空间对心理健康的影响: 研究进展与展望. 热带地理, 2023, 43(9): 1747-1759.
- [6] Grigsby-Toussaint D S, Turi K N, Krupa M, Williams N J, Pandi-Perumal S R, Jean-Louis G. Sleep insufficiency and the natural environment: Results from the US Behavioral Risk Factor Surveillance System survey. Preventive Medicine, 2015, 78: 78-84.
- [7] Xu J X, Wang F H, Chen L, Zhang W Z. Perceived urban green and residents' health in Beijing. SSM-Population Health, 2021, 14: 100790.
- [8] Li C C, Du Z C, Fan S J, Mute Browning M H E, Knibbs L D, Bloom M S, Zhao T Y, Jalaludin B, Heinrich J, Liu X X, Li J X, Zhang Y D, Hu L X, Xiang M D, Chen G B, Wang Q, Han C L, Li S S, Guo Y M, Dadvand P, Dong G H, Zhang Z B, Yang B Y. Association between long-term green space exposure and mortality in China: a difference-in-differences analysis of national data in 2000, 2010 and 2019. Science of The Total Environment, 2023, 887: 164023.
- [9] Yu Z W, Ma W Y, Hu S Y, Yao X H, Yang G Y, Yu Z W, Jiang B. A simple but actionable metric for assessing inequity in resident greenspace exposure. Ecological Indicators, 2023, 153: 110423.
- [10] 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.
- [11] 翟宇佳, 周聪惠. 基于实例的城市公园可达性评价模型比较. 中国园林, 2019, 35(1): 78-83.
- [12] 赵洋, 徐枫, 万义良. 基于改进引力模型的公园绿地空间可达性及供需平衡分析方法. 地球信息科学学报, 2022, 24(10): 1993-2003.
- [13] 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: 102405.
- [14] 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.
- [15] Martinez A I, Labib S M. Demystifying normalized difference vegetation index (NDVI) for greenness exposure assessments and policy interventions in urban greening. Environmental Research, 2023, 220: 115155.
- [16] Russette H, Graham J, Holden Z, Semmens E O, Williams E, Landguth E L. Greenspace exposure and COVID-19 mortality in the United States: January-July 2020. Environmental Research, 2021, 198: 111195.
- [17] You H Y. Characterizing the inequalities in urban public green space provision in Shenzhen, China. Habitat International, 2016, 56: 176-180.
- [18] Aikoh T, Homma R, Abe Y. Comparing conventional manual measurement of the green view index with modern automatic methods using google street view and semantic segmentation. Urban Forestry & Urban Greening, 2023, 80: 127845.
- [19] Zhang J G, Liu Y H, Zhou S, Cheng Y Y, Zhao B. Do various dimensions of exposure metrics affect biopsychosocial pathways linking green spaces to mental health? A cross-sectional study in Nanjing, China. Landscape and Urban Planning, 2022, 226: 104494.
- [20] Han Y, He J H, Liu D F, Zhao H Z, Huang J L. Inequality in urban green provision: A comparative study of large cities throughout the world. Sustainable Cities and Society, 2023, 89: 104229.
- [21] Song Y M, Chen B, Ho H C, Kwan M P, Liu D, Wang F, Wang J H, Cai J X, Li X J, Xu Y, He Q Q, Wang H Z, Xu Q Y, Song Y Z. Observed inequality in urban greenspace exposure in China. Environment International, 2021, 156: 106778.
- [22] Shen Y N, Sun F Y, Che Y. Public green spaces and human wellbeing: Mapping the spatial inequity and mismatching status of public green space in the Central City of Shanghai. Urban Forestry & Urban Greening, 2017, 27: 59-68.

- [23] Wen C, Albert C, Von Haaren C. Equality in access to urban green spaces: A case study in Hannover, Germany, with a focus on the elderly population. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 55: 126820.
- [24] 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.
- [25] Liu D, Kwan M P, Kan Z H. Analysis of urban green space accessibility and distribution inequity in the City of Chicago. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2021, 59: 127029.
- [26] Liu W, Li H X, Xu H, Zhang X T, Xie Y C. Spatiotemporal distribution and driving factors of regional green spaces during rapid urbanization in Nanjing metropolitan area, China. *Ecological Indicators*, 2023, 148: 110058.
- [27] 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: 107080.
- [28] Wang J, Zhang Y Z, Zhang X L, Song M Q, Ye J P. The spatio-temporal trends of urban green space and its interactions with urban growth: Evidence from the Yangtze River Delta region, China. *Land Use Policy*, 2023, 128: 106598.
- [29] Li X, Ma X D, Hu Z N, Li S Y. Investigation of urban green space equity at the city level and relevant strategies for improving the provisioning in China. *Land Use Policy*, 2021, 101: 105144.
- [30] 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.
- [31] 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. *Science of The Total Environment*, 2022, 809: 151123.
- [32] 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.
- [33] Ke X L, van Vliet J, Zhou T, Verburg P H, Zheng W W, Liu X P. Direct and indirect loss of natural habitat due to built-up area expansion: A model-based analysis for the city of Wuhan, China. *Land Use Policy*, 2018, 74: 231-239.
- [34] Friedmann J. Four Theses in the Study of China's Urbanization. *International Journal of Urban and Regional Research*, 2006, 30(2): 440-451.
- [35] 范擎宇, 杨山. 长三角地区城镇化协调发展的空间特征及形成机理. *地理科学进展*, 2021, 40(1): 124-134.
- [36] 尹上岗, 杨山. 长三角地区城市人口-绿地面积异速增长特征及驱动机制. *地理研究*, 2021, 40(10): 2780-2795.
- [37] Wu L F, Kim S K. Does socioeconomic development lead to more equal distribution of green space? Evidence from Chinese cities. *Science of the Total Environment*, 2021, 757: 143780.
- [38] 李汝资, 黄晓玲, 刘耀彬. 2010—2020 年中国城镇化的时空分异及影响因素. *地理学报*, 2023, 78(4): 777-791.
- [39] 曾国军, 徐雨晨, 王龙杰, 钟淑如. 从在地化、去地化到再地化: 中国城镇化进程中的人地关系转型. *地理科学进展*, 2021, 40(1): 28-39.
- [40] 秦尊文, 聂夏清. 长江经济带城镇化效率与水资源效率协调发展时空演变及驱动因素. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(11): 2237-2253.
- [41] 方创琳, 赵文杰. 新型城镇化及城乡融合发展促进中国式现代化建设. *经济地理*, 2023, 43(1): 10-16.
- [42] Kuang W H, Zhang S, Li X Y, Lu D S. A 30 m resolution dataset of China's urban impervious surface area and green space, 2000—2018. *Earth System Science Data*, 2021, 13(1): 63-82.
- [43] 徐超, 黄乾元, 蒋纬宇, 苏美蓉. 珠三角城市不透水面绿地空间公平性评价及其时空分异研究. *环境保护*, 2020, 48(19): 25-32.
- [44] 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.
- [45] Song Y M, Chen B, Kwan M. 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.
- [46] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [47] 陈立恒, 龚健, 王雄, 郑欣璐. 长江中游地区生态系统服务平衡与城镇化的空间关系. *生态学报*, 2021, 41(14): 5546-5556.
- [48] 梅予健, 贺清云, 欧阳晓, 王坤. 长株潭城市群城镇化水平与生态质量的冲突与交互作用. *生态学报*, 2023, 43(11): 4527-4538.
- [49] 尹上岗, 杨山, 李在军. 长三角地区生态城镇化空间格局及影响因素. *自然资源学报*, 2022, 37(6): 1494-1506.
- [50] 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 nexus of natural ecosystem, exposure and health. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2024, 10: 165.
- [51] 王子琳, 李志刚, 程晗蓓. 社区网格尺度下城市密度对居民绿地暴露水平的影响——以特大城市武汉市为例. *经济地理*, 2022, 42(12): 82-91, 161.