

DOI: 10.20103/j.stxb.202402040305

陈乾明, 郭青海, 毛齐正. 城市公园生态系统文化服务的空间格局特征及其影响因素. 生态学报, 2024, 44(21): 9567-9581.

Chen Q M, Guo Q H, Mao Q Z. Spatial pattern characteristics and influencing factors of cultural ecosystem services of urban park. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(21): 9567-9581.

城市公园生态系统文化服务的空间格局特征及其影响因素

陈乾明¹, 郭青海^{1,2,*}, 毛齐正³

¹ 浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018

² 浙江省生态文明研究院, 杭州 310018

³ 河南财经政法大学资源与环境学院, 郑州 450046

摘要: 城市公园作为城市生态空间的主要类型之一, 在维持、增加和提升城市生态系统服务中发挥着重要作用。人们对高质量生活的追求驱动着生态系统服务需求的演进, 生态系统文化服务也日益受到关注。然而, 对城市公园生态系统文化服务的空间格局特征及其影响因素的研究还显薄弱。以杭州市主城区 239 个城市公园作为研究对象, 以微博数据测算生态系统文化服务, 利用逐步多元线性回归和地理加权回归模型分析公园生态系统文化服务空间格局特征和影响因素的空间异质性。结果表明: (1) 杭州主城区城市公园的生态系统文化服务空间分布差异性明显, 生态系统文化服务小于 0.44 的公园, 集中在拱墅区、西湖区和上城区, 成条带状聚集; 生态系统文化服务在 0.45—0.54 的公园, 其空间分布呈现双核心聚集; 生态系统文化服务大于 0.55 的公园, 呈现多核心聚集分布特征, 并且分布最广, 涉及的公园最多。(2) 逐步多元回归分析表明城市公园面积、NDVI(归一化植被指数)、公园水景观、路网密度、丰富度指数和聚集度指数是公园生态系统文化服务的主要影响因素, 其中 NDVI、城市公园面积、公园水景观、斑块丰富度指数和聚集度指数对生态系统文化服务有显著正影响, 路网密度对生态系统文化服务有显著负影响。(3) 地理加权回归分析表明不同影响因素对公园生态系统文化服务呈现出不同的正负影响效应, 具有明显的空间异质性; 城市公园面积、NDVI、公园水景观和斑块丰富度指数对公园生态系统文化服务具有显著正向影响, 公园水面积占比、路网密度和公园 PM_{2.5} 浓度对公园生态系统文化服务具有显著负向影响, 人口密度、不透水面积占比、斑块数量和蔓延度指数对公园生态系统文化服务具有正负两种影响。对公园生态系统文化服务影响强度从高到低依次是公园路网密度、人口密度、NDVI、不透水面积占比、公园水景观、斑块丰富度指数、城市公园面积、斑块数量、公园 PM_{2.5} 浓度、蔓延度指数和公园水面积占比。

关键词: 社交媒体; 生态系统文化服务; 空间格局; 景观格局指数; 杭州市

Spatial pattern characteristics and influencing factors of cultural ecosystem services of urban park

CHEN Qianming¹, GUO Qinghai^{1,2,*}, MAO Qizheng³

¹ School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

² Zhejiang Academy of Ecological Civilization, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China

³ School of Resources and Environment, Henan University of Economics and Law, Zhengzhou 450046, China

Abstract: Urban parks are crucial urban ecological spaces that play a significant role in maintaining, enhancing, and improving urban ecosystem services. People's pursuit of high-quality life drives the evolution of ecosystem services, and cultural ecosystem services receive increasing attention. However, the research on the spatial pattern characteristics of cultural services and the influence elements of urban park ecosystem is still weak. This study focused on 239 urban parks in

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32371650, 31872688, 31600375)

收稿日期: 2024-02-04; 网络出版日期: 2024-08-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qhguo@zstu.edu.cn

Hangzhou main urban area to assess cultural ecosystem services using Weibo data. Spatial heterogeneity in the spatial patterns and influencing factors of park cultural ecosystem services was analyzed using gradual multiple linear regression and geographical weighted regression models. The results show that: (1) There is a noticeable spatial distribution difference in cultural ecosystem services among urban parks in Hangzhou main urban area. The parks with cultural ecosystem services below 0.44 are concentrated in Gongshu District, Xihu District and Shangcheng District. Parks with services ranging from 0.45 to 0.54 exhibit double core aggregation, while those with services above 0.55 show multi-core aggregation distribution, covering a wider area and involving more parks. (2) Gradually multiple regression analysis results show that the urban park area, NDVI(normalized difference vegetation index), park water landscape, road network density, richness index and aggregation index are the main influencing factors of park cultural ecosystem services. Among which, the NDVI, urban park area, park water landscape, patch richness index, and aggregation index have significantly positive impact, while road network density has significantly negative impact. (3) Geographical weighted regression analysis show that different influencing factors have different positive and negative effects on park cultural ecosystem services, with obviously spatial heterogeneity. The urban park area, NDVI, park water landscape and patch richness index have significantly positive effects on park cultural ecosystem services. The park water area proportion, road network density and park $PM_{2.5}$ concentration have significantly negative effects on park cultural ecosystem services. The population density, impervious area proportion, patch number and contagion index have positive and negative effects on park cultural ecosystem services. The influencing factors of the cultural ecosystem services of the park from high to low intensity are the park network density, population density, NDVI, impervious area proportion, park water landscape, patch richness index, urban park area, patch number, park $PM_{2.5}$ concentration, contagion index and park water area proportion.

Key Words: social media; cultural ecosystem services; spatial pattern; landscape pattern index; Hangzhou

随着城市化水平的提高,人们对高质量生活的追求日益强烈,驱动着城市生态系统服务需求的升级和演变。然而现有的城市生态系统服务已不能满足人们对高质量生活的需求,这种需求变化的滞后状态导致人类社会可持续发展严重受阻^[1]。后疫情时代,以城市公园为代表的城市生态空间,被赋予了更高的定位,来满足人们日益增长的美好生活需要,突出体现在城市公园开放共享、科学绿化和老旧小区改造等关乎百姓美好生活需要的民生福祉领域^[2-3]。然而城市建设用地的无序扩张与居民生活空间冲突加剧、供需矛盾日益突出,造成城市环境质量下降、生态功能受损以及城市交通拥堵等一系列问题^[4-5]。

2005 年千年生态系统评估将生态系统文化服务定义为“人类通过精神满足、认知能力发展等从生态系统中所获得的非物质收益”^[6]。通过生态系统文化服务可以有效地评估城市生态系统对人居环境幸福感的影响^[7],开展基于生态系统文化服务的城市景观格局调控、优化城市公园生态系统服务日益受到关注^[8-9]。有关公园绿地生态系统的供给、调节、支持服务已有较多研究,但其文化服务评估尚未形成统一的评价体系。国内外对生态系统文化服务评价的方法主要包括以旅行成本法、条件价值法为主的货币化价值评价,以及以调查与访谈、公众参与式制图为主的非货币化定量评价与定性描述^[10-13]。有研究利用 3S 技术与智能可穿戴传感器设备获取 GPS 定位和实时游览路线结合问卷调查来获取文化服务的时空变化^[14]。城市公园生态系统文化服务的研究,集中在生态系统文化服务价值、生态系统文化服务功能和生态系统文化服务影响要素三方面^[15]。主要采用在线公众参与地理信息系统(PPGIS)、结构方程模型、随机森林模型等方法分析环境要素对生态系统文化服务的影响^[16-20]。以往的研究以单个公园、城市居住区或自然生态区等为研究对象,尽管揭示其生态系统文化服务的价值和特点^[21],但对生态系统文化服务的评价维度较为单一,缺乏市域尺度上对城市公园生态系统文化服务空间格局特征与影响因素的分析。随着社交媒体在公众日常生活中的应用,社交媒体数据可以利用公众情绪的表达式来体现所获取的生态系统文化服务非物质收益的评价和感知偏好^[22-24]。这为生态系统文化服务研究提供了新的数据来源。社交媒体数据与调查问卷和访谈形式的数据相比,具有获取更

加便捷,数据量更大和更加节约成本的特点,以及具有良好的即时性^[25—27]。

人们的活动和感知受到多种社会因素和自然要素的影响^[28]。城市生态环境存在空间异质性,城市公园景观配置存在差异性,这种环境异质性和景观配置差异性会对城市公园生态系统文化服务产生什么样的影响,城市公园生态系统文化服务是否也会存在空间异质性?为回答这些问题,本研究以杭州主城区范围内城市公园为研究对象,选取新浪微博文本数据作为公园生态系统文化服务的表征数据来源,分析城市公园生态系统文化服务空间异质性及其影响因素。

1 研究区域

杭州市主城区(29°85′—30°56′N,119°68′—120°72′E),属于亚热带季风气候,年平均气温 18℃,年降水量约 1100—1600mm,年平均相对湿度 76%—81%。杭州市人口为 1220 万,主城区人口为 950 万人口。2020 年,全市建成区绿地率 36.7%,建成区绿化覆盖率 40.29%,人均公园绿地面积 12.63m²,公园绿地服务半径覆盖率 90%。近年来,杭州市持续推进公园绿地建设,主城区已建和在建的城市公园数量 380 多个。但由于人口数量的快速增长,人均公园绿地面积在逐年减少,从 2018 年的人均 13.8m²,下降至 2020 年的 12.6m²。本研究选取主城区 239 个城市公园作为研究对象(图 1)。

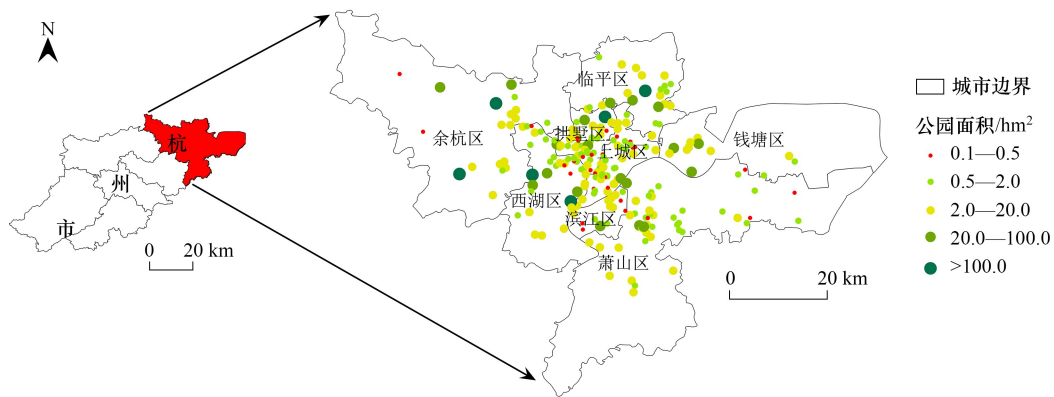


图 1 研究区位置与城市公园分布图

Fig.1 Location of the study area and distribution of urban parks

2 数据来源与分析方法

2.1 指标选择与数据处理

在公园尺度上,本研究选用 9 个生态环境指标和 7 个景观格局指数(表 1)。公园生态环境指标包括城市公园面积、归一化植被指数、地表温度、公园水面积占比、路网密度、不透水面积占比、人口密度、公园 PM_{2.5}浓度和公园水景观。景观格局指数包括斑块数量、Shannon 多样性指数、聚集度指数、斑块丰富度指数、景观分割指数、景观蔓延度指数和形状指数^[29]。

本研究中利用 Python 网络数据爬取,获得 2021 年 9 月百度地图中杭州主城区的城市公园矢量边界数据(AOI),并将坐标系转换为 GCS_WGS_1984。在 ArcGIS10.8 中,利用公园矢量数据对杭州主城区数据源进行分区统计,得到每个公园 7 个生态环境指标数据。针对公园人口密度的计算,对 5 类面积大小的公园分别建立 300m、500m、1000m、1500m 和 2000m 的缓冲区,用来计算公园缓冲区内的种群密度。最后,利用 GIS 软件将欧空局 2021 年 10m 的土地利用类型数据按属性提取,得到公园景观类型数据,在 Fragstats 软件中对公园进行景观水平上的景观格局指数计算。最终将获取的 16 个影响因素数据赋值于 239 个公园点上。

表 1 数据来源
Table 1 Data Sources

数据名称 Date name	计算公式 Calculation formula	描述 Description	来源 Source
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)}$	式中,NDVI 为归一化植被指数, NIR 为 Landsat-8 近红外波段, R 为 Landsat-8 红外波段	2021 年 9 月 27 日 Landsat-8 多光谱遥感影像反演
地表温度 Land surface temperature	辐射传输方程法		2021 年 9 月 27 日 Landsat-8 多光谱遥感影像反演
公园水景观 Park water landscape	/	公园内是否有水景观	2021 年 9 月 Open Street Map (OSM) 数据
公园水面积占比 Park water area proportion	$WP = \frac{W_i}{S_i}$	式中, WP 为水面积占比, W_i 为 i 公园的水面积 m^2 , S_i 为 i 公园面 积 m^2	2021 年 9 月 Open Street Map (OSM) 数据
路网密度 Road network density	$RD = \frac{R_i}{S_i}$	式中, RD 为路网密度 m/m^2 , R_i 为 i 公园路网长度 m , S_i 为 i 公园 面积 m^2	2021 年 9 月 Open Street Map (OSM) 数据
不透水面积占比 Impervious area proportion	$IAP = \frac{G_i}{S_i}$	式中, IAP 为不透水面积占比, G_i 为 i 公园的不透水面积 m^2 , S_i 为 i 公园面积 m^2	中国农业大学土地科学与 技术学院的城市环境监测 及建模 (UEMM) 团队 2021 年 9 月数据
人口密度 Population density	$PD = \frac{\sum_{j=1}^J P_j}{S_j}$	式中, PD 为人口密度, P_j 为 j 公 园缓冲区内人口数量, S_j 为 j 公 园缓冲区面积 hm^2	2021 年 9 月 LandScan 人口 栅格数据集精度 30 弧秒
公园 PM _{2.5} 浓度 Park PM _{2.5} concentration	/	PM _{2.5} 浓度,单位 $\mu g/m^3$	圣路易斯华盛顿大学 2021 年 9 月大气 PM _{2.5} 数据集合 https://zenodo.org/record/6398971
斑块数量 NP	$NP = N_i$	式中, N_i 为第 i 类景观斑块的 总数	欧空局 (ESA) 2021 年 10m 土地覆被数据 https://esa-worldcover.org/en
Shannon 多样性指数 SHDI	$SHDI = - \sum_{i=1}^m (P_i \ln P_i)$	P_i 为 i 类斑块占景观的比例, m 指景观中斑块类型的总数	
聚集度指数 AI	$AI = \left[\sum \left(\frac{g_{il}}{\max \rightarrow g_{il}} \right) \times p_i \right] \times 100$	其值反应景观斑块间的连通性, 其值趋向于 0 时,表明斑块聚合 度低,当值趋向于 100 时,说明 斑块聚合度高	
斑块丰富度指数 PR	$PR = m$	m 表示景观中不同斑块类型的 总数	
景观分割度指数 DIVISION	$DIVISION = 1 - \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_j}{TA} \right)^2$	其值大小反映景观类型的分散 程度,可以在一定程度上表征人 类活动的干扰程度	
蔓延度指数 CONTAG	$CONTAG = \left[1 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{P_{ij} \ln(P_{ij})}{2 \ln(m)} \right] (100)$	反应不同斑块类型的聚集程度 或延展趋势,其值越高表示斑块 间连通性越好	
形状指数 SHAPE	$SHAPE = \frac{P_{ij}}{4 \sqrt{u_{ij}}}$	反应斑块形状的复杂程度,形状 指数越高,斑块的形状越不规则 和复杂	

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; WP :公园水面积占比 Park water area proportion; RD :路网密度 Road network density; IAP :不透水面积占比 Impervious area proportion; PD :人口密度 Population density; NP :斑块数量 Number of patches; $SHDI$:Shannon 多样性指数 Shannon diversity index; AI :聚集度指数 Aggregation index; PR :斑块丰富度指数 Patch richness; $DIVISION$:景观分割度指数 Landscape division index; $CONTAG$:蔓延度指数 Contagion index; $SHAPE$:形状指数 Shape index

2.2 微博文本数据

微博数据已经广泛地应用于公众情绪表达,评价公众感知情绪^[30]。本研究微博数据为 2021 年 9 月 1 日到 9 月 30 日之间,从微博端口爬取用户在杭州主城区城市公园范围内自愿分享的签到文本数据,共获取到 19.4 万条文本数据。剔除广告、重复语句、表情和短语文本,获得有效微博数据 4.9 万条有效微博数据。

2.3 生态系统文化服务评估

将收集到的微博文本数据进行语义情感分析,计算文本数据的平均值,将均值赋值于对应公园,表征该公园生态系统文化服务水平,计算公式如下:

$$CES_{\text{value}} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i}{n} \quad (1)$$

式中, CES_{value} 为各公园生态系统文化服务,取值范围为 0.0—1.0, E_i 为各公园微博情绪价值总和, n 为各公园内微博文本数量。

微博文本的语义情感分析利用百度开放智能平台的文本情感分析模型进行文本赋值。首先将微博文本进行分词处理,构建中文词段,利用其带有分数的百度情感词典对每一条微博文本进行打分。模型情感范围包括积极、中性和消极 3 类,取值为 0.0—1.0,0.0 代表极度消极,1.0 代表极度积极。积极和消极情感分别代表城市公众对于公园生态系统文化服务的正向和负向感知评价。最后取文本数据的平均值评估公园生态系统文化服务^[31—33]。

2.4 逐步多元线性回归

利用逐步多元线性回归揭示公园生态系统文化服务与影响因素之间在全局尺度上的相关关系。利用斯皮尔曼相关性检验,筛选显著影响生态系统文化服务的因素($P < 0.05$),同时剔除掉共线性 VIF 值大于 10.0 的因素。公式如下:

$$EV_i = \alpha_0 + \alpha_1 X_i + \alpha_2 X_2 + \cdots + \alpha_n X_n + \varepsilon \quad (2)$$

式中, EV_i 表示第 i 个公园的生态系统文化服务值, α_0 为常数, α_n 为对应自变量的系数, X_i 是经过斯皮尔曼相关性检验后第 i 个公园所对应的控制变量, ε 为随机变量。

2.5 地理加权回归模型

利用地理加权回归模型在局部尺度分析公园环境和景观格局空间差异对城市公园生态系统文化服务的空间异质性影响^[34]。计算公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_r x_{ir} \beta_r(u_i, v_i) + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中, u_i, v_i 是第 i 个公园点的质心坐标; y_i 表示第 i 个公园的生态系统文化服务; x_{ir} 表示第 i 个公园中第 r 个自变量; β_r 表示第 i 个公园中第 r 个自变量的回归系数; ε_i 表示随机误差项; β_0 为截距。

3 结果

3.1 城市公园生态环境指标的异质性

杭州市主城区内 239 个公园总面积为 4528.1hm²,其中,公园面积大于 0.1hm²小于等于 0.5hm²的公园有 31 个,占比 12.97%,主要集中在城区的中心区域;大于 0.5hm²小于等于 2.0hm²的公园有 87 个,占比 36.40%,主要分布在上城区和萧山区的南部;大于 2.0hm²小于等于 20.0hm²的公园 96 个,占比 40.16%,在各城区内均有分布;大于 20.0hm²小于等于 100.0hm²的公园有 19 个,占比 7.94%;100.0hm²以上的公园有 6 个,占比 2.51%,这两类公园主要位于城区的北部。公园分布呈现出以中心聚集、四周扩散的特点。上城区、拱墅区和萧山区中部的公园分布密度较高;钱塘区、临平区和余杭区的公园数量相对较少(图 1)。

生态环境指标空间分布存在显著差异(图 2)。公园 NDVI 值在 0.002—0.504 之间,高 NDVI 值的公园主要分布在拱墅区、西湖区、余杭区,低 NDVI 值公园主要分布在上城区和萧山区。公园地表温度在 30.1—

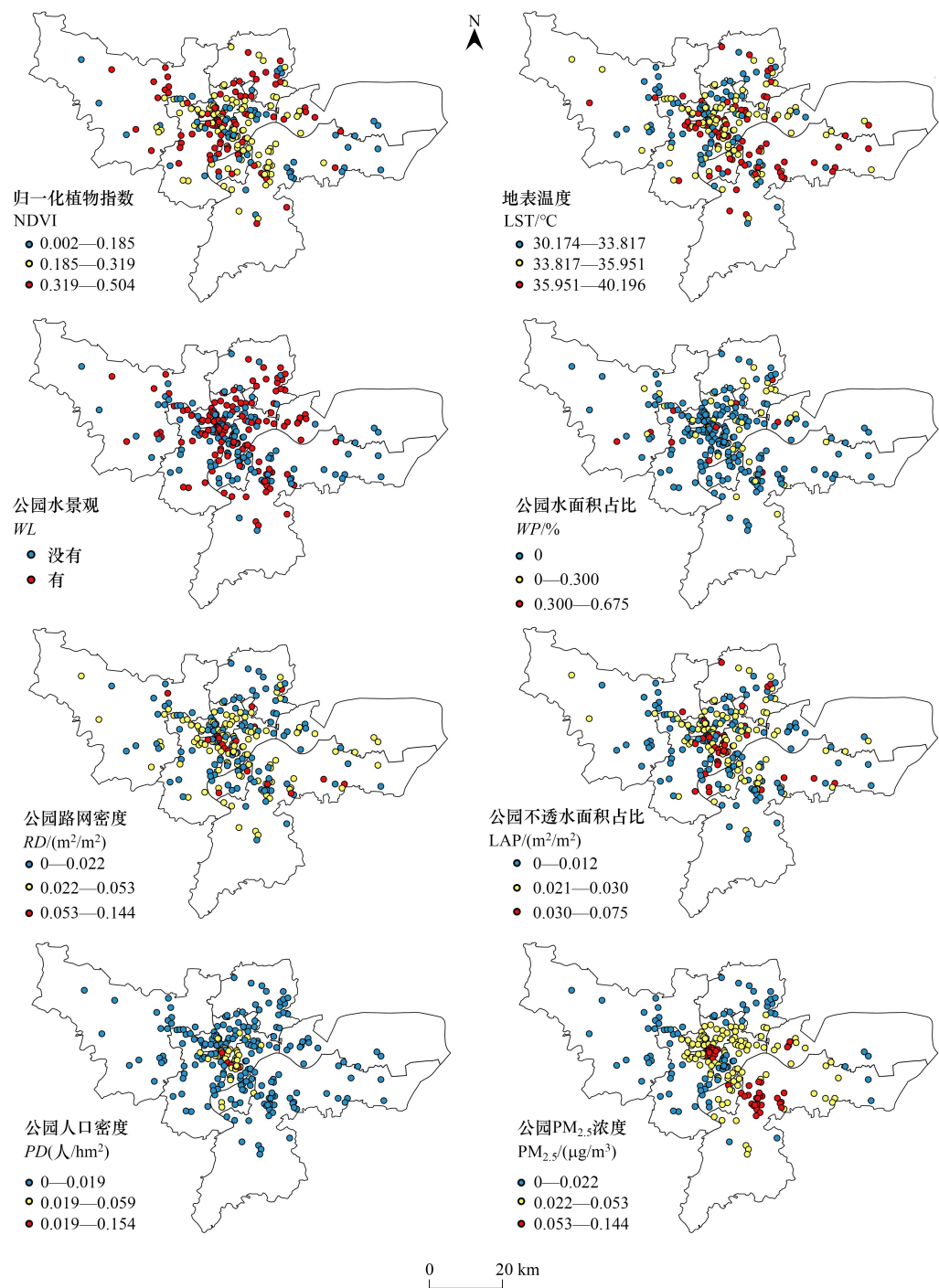


图2 杭州主城区公园生态环境指标的空间异质性

Fig.2 Spatial heterogeneity of ecological and environment indicators of parks in Hangzhou

NDVI:归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; LST:地表温度 Land surface temperature; WL:公园水景观 Park water landscape; WP:公园水面积占比 Park water area proportion; RD:路网密度 Road network density; LAP:不透水面积占比 Impervious area proportion; PD:人口密度 Population density

40.2℃之间,萧山区中心和上城区中心的公园地表温度高于其它城区公园地表温度。124 个公园内部有水景观,分散在不同城区内,有水景观的公园中水体面积占比在 0.1%—67.5%之间,公园水面积占比较大的公园分布在杭州西北部。公园的主干道路网密度在 0.01—0.14m/m²之间,公园路网密度较大的公园位于西湖区东部和上城区西部地区。公园的不透水面占比在 0—7.5%之间,不透水面积占比高的公园位于杭州主城区中心

地带。人口密度分布在 1.3—1540.2 人/hm²之间,公园人口密度较大的公园分布在以西湖名胜区为中心的上城区、拱墅区和西湖区交界处。杭州主城区公园 PM_{2.5}浓度在 21.90—39.45 μg/m³之间,主城区空气质量普遍为优,浓度相对较高区域集中在拱墅区、萧山区和钱塘区。

3.2 城市公园景观格局特征

城市公园景观格局指数存在显著的空间差异(图 3)。公园斑块数量差异较大,斑块数量较多的公园主要

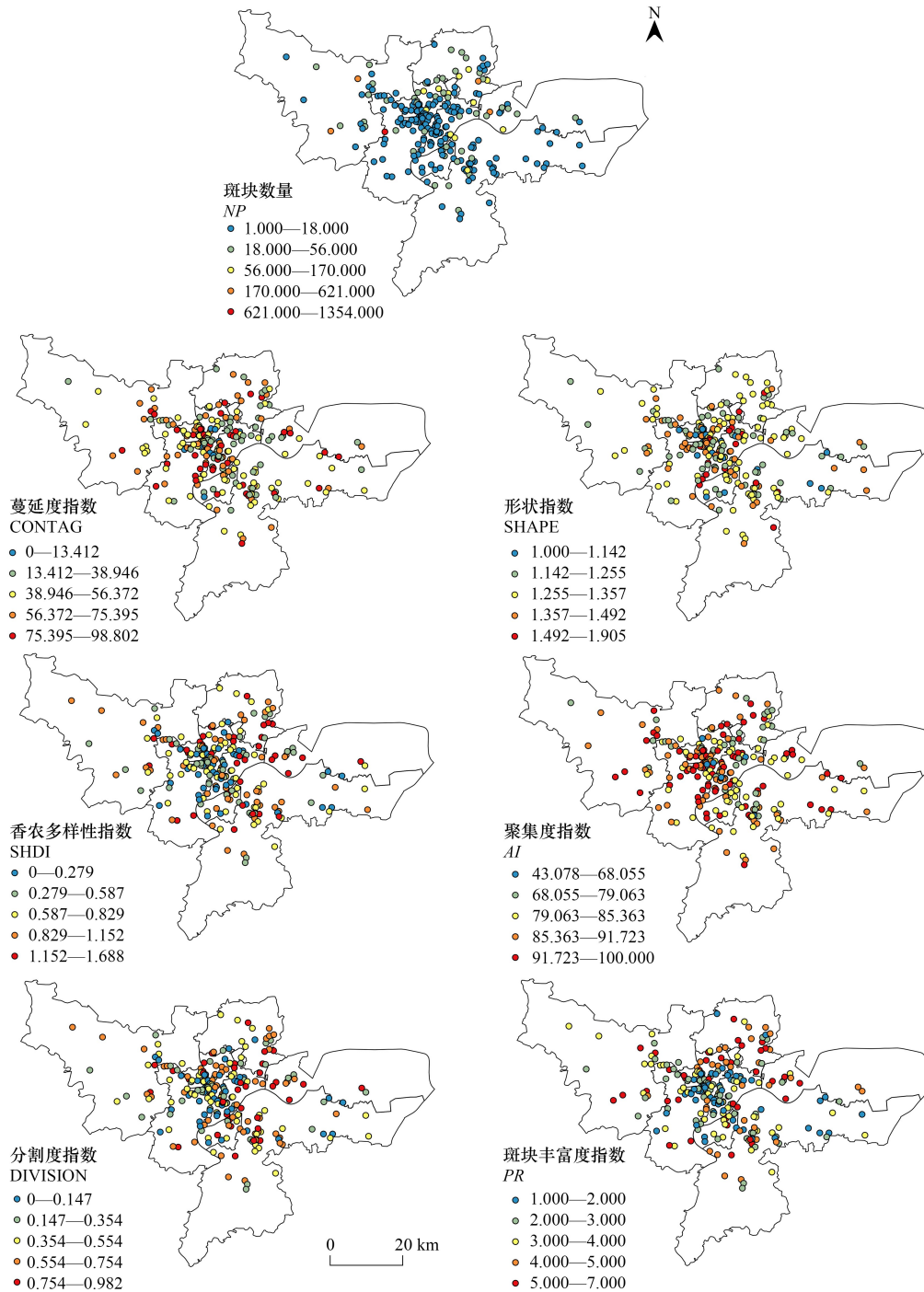


图 3 杭州主城区公园景观格局指数

Fig.3 Park landscape pattern index in Hangzhou main urban area

NP: 斑块数量 Number of patches; SHDI: Shannon 多样性指数 Shannon diversity index; AI: 聚集度指数 Aggregation index; PR: 斑块丰富度指数 Patch richness; DIVISION: 景观分割度指数 Landscape division index; CONTAG: 蔓延度指数 Contagion index; SHAPE: 形状指数 Shape index

分布在杭州北部的余杭区、拱墅区和临平区,其中斑块数量最多的公园是西溪国家湿地公园(1354个)。公园蔓延度指数在0—98之间,蔓延度指数较高的公园主要分布在上城区和西湖区,蔓延度指数较低的公园主要分布在拱墅区。公园形状指数在1.0—1.9之间,形状指数较高的公园主要分布在上城区,形状指数较低的公园分布在萧山区和滨江区。公园Shannon多样性指数在0.0—1.68之间,公园的Shannon多样性指数差别不大,均匀分布在各个城区。聚集度指数在43—100之间,公园聚集度指数整体较高,最低的是梦笔园公园,最高的是远洋心里-中央公园。公园景观分割度指数在0.0—0.98之间,公园分割度指数较低的公园主要聚集在上城区和拱墅区,分割度指数较高的公园均匀分布在主城区。斑块丰富度指数在1—7之间,杭州公园的丰富度指数整体差别不明显,指数较低的公园主要集中在萧山区、上城区和拱墅区。从杭州城市公园的景观格局分布可以看出,各公园内部斑块数量丰富,斑块连通性较好,景观异质性较强,斑块间分割程度均衡,公园内的斑块呈现聚集状态等特征。

3.3 生态系统文化服务特征

公园生态系统文化服务分为高(0.55—1.0)、中(0.45—0.54)、低(0—0.44)3类(图4)。生态系统文化服务高值的公园占公园总数的53.14%,呈现多核心聚集,并且分布最广,涉及的公园最多,大部分集中在钱塘江以北的城区公园,钱塘江以南主要集中在萧山区。公园生态系统文化服务中值的公园占29.71%,空间分布呈现双核心聚集,一处核心位于拱墅区和上城区交界处德胜公园处,并向东西方向延申,一处核心位于萧山区永兴公园处。公园生态系统文化服务低值的公园占17.15%,空间分布集中在拱墅区、西湖区和上城区,在滨江区和萧山区形成条带状聚集,其中生态系统文化服务最低的公园是位于余杭区的永峥公园。整体来看,杭州市主城区公园的生态系统文化服务分布空间差异性明显,热点区域集中在上城区的CBD公园、拱墅区的城北体育公园、萧山区的钱江世纪公园等大型公园中。距离杭州中心区较远的公园生态系统文化服务水平相对较低。

3.4 公园生态系统文化服务影响因素

3.4.1 逐步多元回归分析

对16个变量与公园生态系统文化服务进行双变量分析与共线性检验,剔除了形状指数($P<0.05$)以及Shannon多样性指数和景观分割度指数($VIF>10.0$),将其余13个自变量引入逐步回归模型,逐步多元回归模型为 $EV=0.194+0.03\times PR+0.27\times NDVI+2.323\times 10^{-8}\times UPA-0.925\times RD+0.002\times AI+0.039\times WL$ 。模型结果显示NDVI($B=0.270, P<0.05$)和路网密度($B=-0.925, P<0.05$)对公园生态系统文化服务的影响最强(表2)。

表2 逐步多元回归分析结果
Table 2 Results of the stepwise multiple regression analysis

解释变量 Explanatory variables	模型参数 Model parameter			模型结果 Model result
	B	Significance	VIF	
常量 Constant	0.194	0.007		
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	0.270	0.000	1.528	$R=0.741$
城市公园面积 Urban park area	2.323×10^{-8}	0.000	1.387	$R^2=0.548$
公园水景观 Park water landscape	0.039	0.002	1.158	调整后 $R^2=0.535$
路网密度 Road network density	-0.925	0.001	1.160	
丰富度指数 Patch richness	0.030	0.000	1.386	
聚集度指数 Aggregation index	0.002	0.006	1.232	

VIF: 方差膨胀系数 Variance inflation factor

3.4.2 地理加权回归分析

通过普通最小二乘法(OLS)检验保留11个影响因素^[35],包括公园面积、NDVI、公园水景观、公园水面积占比、路网密度、不透水面积占比、人口密度、公园PM_{2.5}浓度、斑块数量、斑块丰富度指数和蔓延度指数。利用地理加权回归模型对杭州主城区公园生态系统文化服务影响因素的空间异质性进行分析。

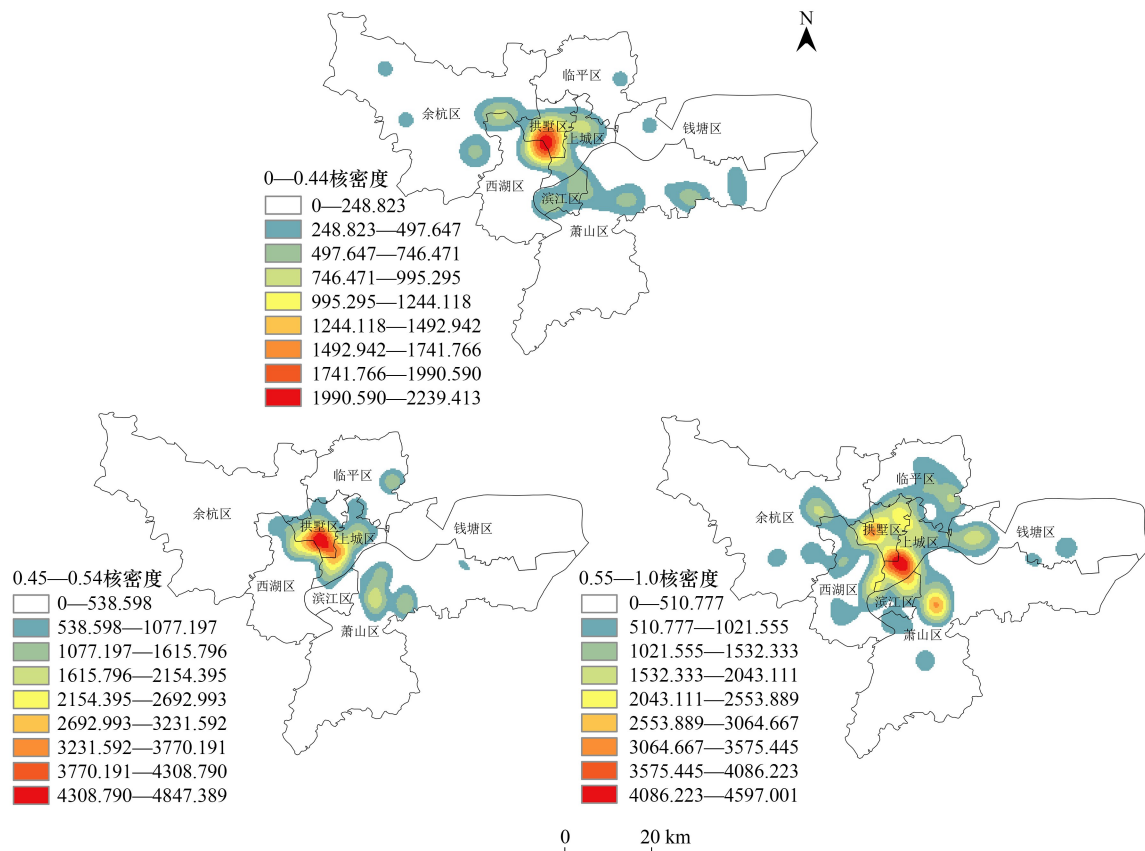
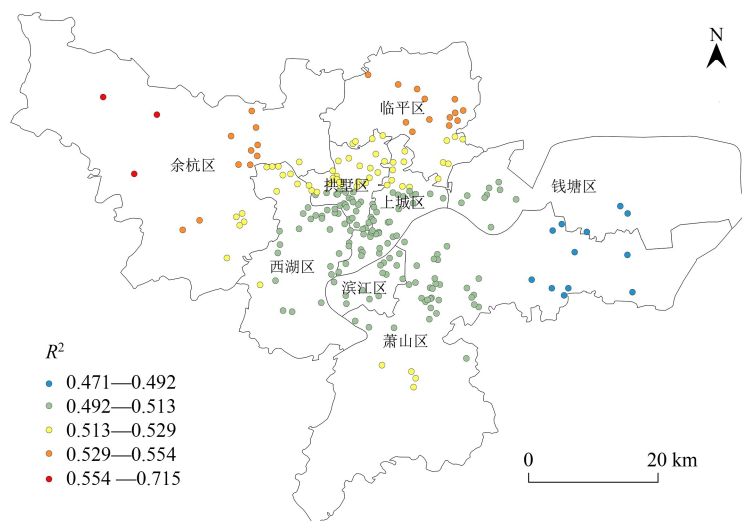


图4 生态系统文化服务分布特征

Fig.4 Distribution characteristics of cultural ecosystem services

分析结果显示局部 R^2 分布在 0.47—0.71 之间,杭州主城区北部的 R^2 值相对较大,表明该区域影响因素的解释力度较强;南部区域的 R^2 值较小,表明该区域的影响因素对公园生态系统文化服务的解释度较弱(图 5)。

图5 地理加权回归分析 R^2 Fig.5 The R^2 distribution of the geographically weighted regression analysis

地理加权回归模型中的每个因子对公园生态系统文化服务的作用效果各不相同(表3)。从回归分析的正负值来看,不同因子对公园生态系统文化服务有不同的正负效应,这也说明影响因子在空间上的不稳定,空间异质性明显。从地理加权回归模型各因子回归系数绝对值的平均值来看,公园路网密度对生态系统文化服务影响最大,其次是人口密度、NDVI、不透水面积占比、水景观和斑块丰富度指数;城市公园面积、斑块数量、公园PM_{2.5}浓度、蔓延度指数和水面积占比数影响较小。

表 3 地理加权回归分析结果
Table 3 Results of the geographically weighted regression analysis

解释变量 Explanatory variables	最小值 Minimum	中位数 Median	最大值 Maximum	平均值 Mean	正值/% Positive proportion	负值/% Negative proportion
城市公园面积 Urban park area	1.47×10^{-8}	2.52×10^{-8}	4.60×10^{-8}	2.56×10^{-8}	100.00	0.00
归一化植被指数 Normalized difference vegetation index	0.22	0.33	0.59	0.33	100.00	0.00
公园水景观 Park water landscape	0.03	0.04	0.06	0.04	100.00	0.00
公园水面积占比 Park water area proportion	-2.00×10^{-4}	-1.90×10^{-4}	-4.42×10^{-5}	1.82×10^{-4}	0.00	100.00
路网密度 Road network density	-1.26	-1.16	0.10	1.11	0.42	99.58
不透水面积占比 Impervious area proportion	-0.16	0.14	0.45	0.16	13.80	86.20
人口密度 Population density	-0.49	-0.41	0.79	0.37	3.77	96.23
公园PM _{2.5} 浓度 Park PM _{2.5} concentration	-1.24×10^{-3}	-0.28×10^{-3}	0.99×10^{-3}	0.33×10^{-3}	1.26	98.74
斑块数量 Number of patches	-0.01	1.08×10^{-3}	0.05	0.59×10^{-2}	65.69	34.31
丰富度指数 Patch richness	0.02	0.02	0.03	0.02	100.00	0.00
蔓延度指数 Contagion index	-0.36×10^{-3}	-0.31×10^{-3}	0.1×10^{-2}	0.30×10^{-3}	6.70	93.30

3.4.3 影响因素的空间异质性

从地理加权回归分析结果来看,对公园生态系统文化服务存在空间异质性的影响因素如图6所示。公园NDVI对公园生态系统文化服务呈正向影响,有明显的东西向空间变化。与图3对比,正向影响较强的公园集中在NDVI值相对较高的余杭区北部、西湖区西部、滨江区南部和萧山区南部,正向影响较弱的公园集中在钱塘区和临平区。公园水景观对公园生态系统文化服务呈正向影响,正向影响较强的公园位于临平区北部和拱墅区北部,正向影响较弱的公园位于滨江区南部和萧山区西南部,对公园生态系统文化服务的影响有明显北强南弱的空间差异。公园路网密度对公园生态系统文化服务有99.58%为负向影响,0.42%呈现正向影响。正向影响的公园只有一处,为钱塘区的众力公园。与图3对比,发现负向影响较明显的公园集中在公园路网密度较高的拱墅区南部、上城区南部、西湖区和滨江区,呈现东西向的空间异质性。公园不透水面积占比对生态系统文化服务有13.80%呈正向影响,86.20%呈负向影响。与图3对比,发现公园不透水面积占比正向影响较强的公园集中在不透水面积占比较低的余杭区、西湖区北部和拱墅区,负向影响较强的公园集中在不透水面积占比较高的萧山区中心区域,呈现南北向空间差异。人口密度对公园生态系统文化服务有96.23%呈负向影响,3.77%呈正向影响。与图3对比,发现负向影响较强的公园集中在人口密度较高的拱墅区和上城区,正向影响的公园集中在人口密度相对较低的钱塘区东部和余杭区北部。

景观格局指数中,公园斑块数量对公园生态系统文化服务有65.69%呈正向影响,34.31%呈负向影响。正

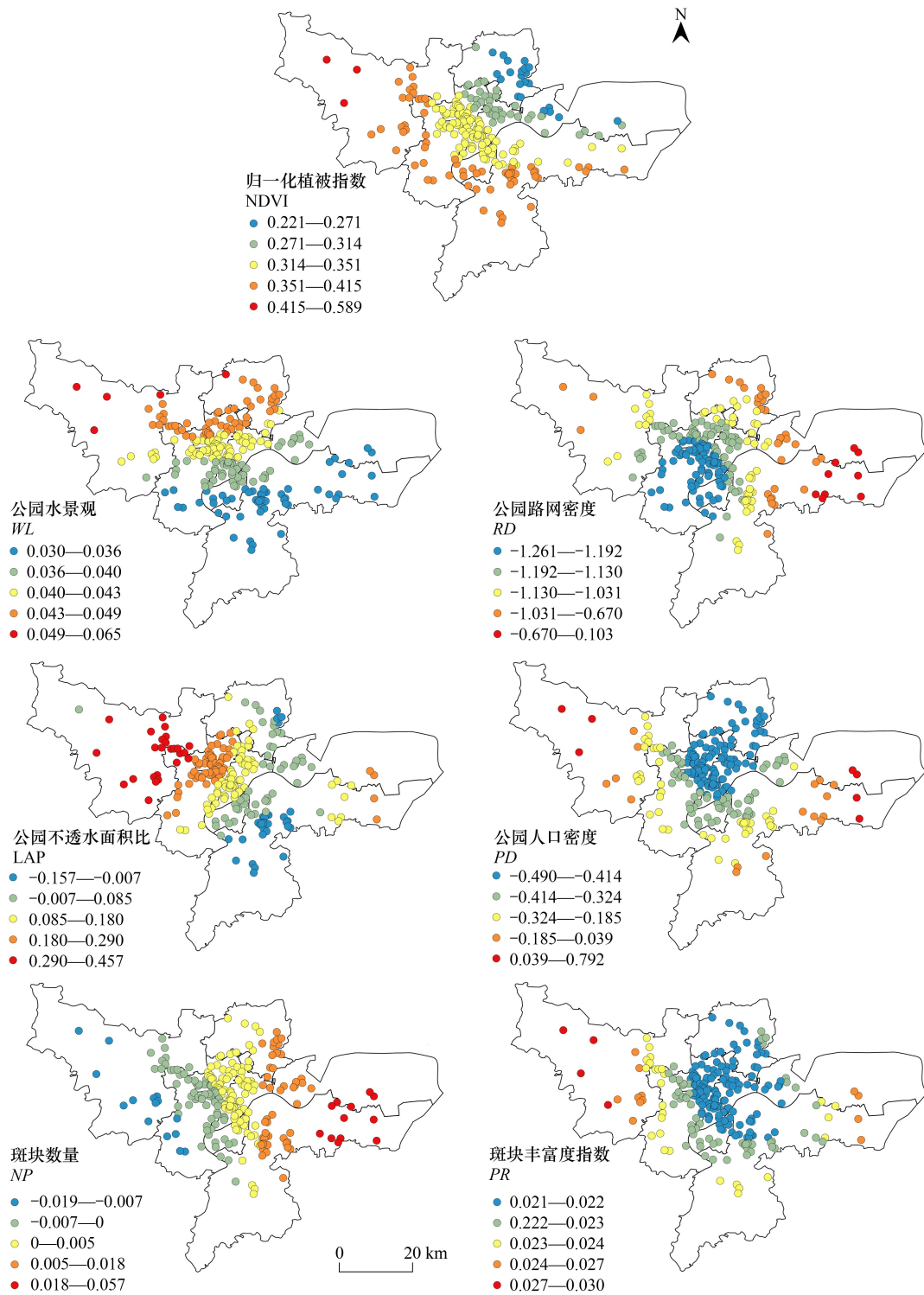


图6 地理加权回归模型的回归系数

Fig.6 Spatial distribution of regression coefficients of geographically weighted regression models

向影响的公园集中在杭州中部的上城区与东部的临平区、萧山区和钱塘区,有明显的东西向空间差异;负向影响的公园集中在余杭区和西湖区。公园斑块丰富度指数对公园生态系统文化服务呈正向影响。正向影响相对较强的公园集中在余杭区,影响相对较弱的公园集中在上城区和拱墅区。

4 讨论

4.1 城市公园生态系统文化服务的空间异质性

有研究认为在不同的城市绿色空间中,公众的感知和满意度存在显著差异^[36—37];城市小型公园绿地的生态系统文化服务对居民的供给与需求在空间上存在不同的分布特征等^[38]。也有研究认为访客居住地与公园的可达性与公园面积会影响公众对公园生态系统文化服务感知的可能性^[39]。此外,植被覆盖度、水体景观或休闲服务设施等与城市公园生态系统文化服务密切相关^[40—41]。公园周边的人口密度同样影响城市绿地生态系统文化服务^[42]。以往研究多是以单一的公园或不同类型的公园作为研究对象,较少考虑公园的生态环境和景观格局的差异性对市域尺度上公园生态系统文化服务的异质性影响^[43—44]。本研究在市域尺度上对杭州主城区 239 个公园的生态系统文化服务开展空间分布特征研究,结果显示,具有较低生态系统文化服务的公园占比较少且分布较为离散,具有一般生态系统文化服务的公园分布较为集中,具有较高生态系统文化服务的公园分布最广泛(图 4)。

生态系统文化服务水平在市域尺度上存在空间异质性,造成这种现象可能是因为杭州各城区发展水平不均衡以及新城区公园建设和旧城区改造存在差异。公园生态系统文化服务存在空间异质性,造成公众对公园生态系统文化服务的感知差异和文化体验不公平。本研究认为市域尺度上生态环境和景观配置存在异质性,造成生态系统文化服务的空间异质性。在城市公园营造过程中,除了考虑小尺度公园中的绿化率、水体、道路、植物搭配等生态景观营造,还应考虑将公园生态环境指标和景观格局特征结合起来研究。本研究只针对空间异质性开展假设验证,时间异质性方面还需进一步研究。

4.2 生态系统文化服务影响因素的空间异质性

有学者认为自然环境和人类活动等多因素在不同程度上共同影响生态系统文化服务^[45]。研究指出自然环境因素从基础上决定生态系统文化服务分布不均的问题,人为影响因素随着人类社会的发展,影响越来越强烈^[46]。也有研究表明不同尺度的气候条件和地域人文差异也是导致生态系统文化服务的影响因素^[47]。这些研究证明生态系统文化服务影响因素类别的重要,但是在不同时空尺度上,影响因素与生态系统文化服务的空间异质性还没有充分研究。

利用地理加权回归模型分析影响因素对公园生态系统服务的空间异质性,结果表明显著正向影响的指标有城市公园面积、NDVI、公园水景观和斑块丰富度指数;显著负向影响的有路网密度、公园水面积占比和 PM_{2.5} 浓度;存在正负两种影响的有公园不透水面积占比、人口密度、斑块数量和蔓延度指数(表 3),与全局空间关系不同,地理加权回归模型对影响因素进行了精确的局部描述,很好地解释了变量的局部空间关系的差异与空间异质性,不同城区内影响因素的作用强度不同(图 6)。本研究认为是各城区的生态环境差异和景观格局特征的异质性所导致的。在一些公园感知评价中,按照公众的感知评价和供需关系进行研究,认为公园生态环境和景观格局指数对公众的感知体验、游览意愿和幸福感表达存在相关性^[48—52],这些与本研究结果一致。在此基础上,本研究证实了市域尺度上公园生态环境指标和景观格局指数对公园生态系统文化服务的影响存在空间异质性的特点。

有研究指出性别、年龄和人格属性的不同也会影响公众在公园内的感知体验和景观评价^[53]。京津冀城市群城乡生态系统文化服务的供需关系具有空间异质性,不同性别、年龄、收入、城乡情况的人群对文娱服务的偏好具有异质性^[54]。由于微博文本数据本身缺少年龄、性别和职业等个人信息,无法确定不同人群特征与公园生态系统文化服务之间存在怎样的差异^[55]。在未来的研究中,需将公众对于生态系统文化服务的主观评价与大数据的感知评价进行差异化研究。由于数据的局限性,本研究中市域尺度的社会经济因素并未涉及。此外,关于城市公园生态系统文化服务的时空变化也是一个值得深入探讨的问题。随着时间的推移,公园生态系统文化服务存在动态演变,然而这方面的研究较缺乏。

5 结论

(1) 市域尺度上城市公园的生态系统文化服务水平分布不均。具有较低生态系统文化服务的公园占比较少并且分布较为离散,具有一般生态系统文化服务的公园分布较为集中,具有较高生态系统文化服务的公园分布最广泛。

(2) 逐步多元回归分析表明城市公园面积、NDVI、公园水景观、路网密度、丰富度指数和聚集度指数是公园生态系统文化服务主要影响因素。其中 NDVI、公园面积、公园水景观、斑块丰富度指数和聚集度指数对生态系统文化服务有显著正影响,路网密度对生态系统文化服务有显著负影响。

(3) 地理加权回归分析表明不同影响因素对公园生态系统文化服务呈现出不同的正负影响效应,具有明显的空间异质性;城市公园面积、公园 NDVI、公园水景观和斑块丰富度指数对公园生态系统文化服务具有显著正向影响;公园水面积占比、路网密度和公园 $PM_{2.5}$ 浓度对公园生态系统文化服务具有显著负向影响,人口密度、公园不透水面积占比、斑块数量和蔓延度指数对公园生态系统文化服务具有正负两种影响。在影响强度方面,公园路网密度对生态系统文化服务影响最大,其次是人口密度、NDVI、不透水面积占比、公园水景观和斑块丰富度指数,相对而言,城市公园面积、斑块数量、公园 $PM_{2.5}$ 浓度、蔓延度指数和公园水面积占比影响较小。

参考文献 (References):

- [1] 李征远, 李胜鹏, 曹银贵, 王舒菲, 刘施含, 张振佳. 生态系统服务供给与需求: 基础内涵与实践应用. 农业资源与环境学报, 2022, 39 (3): 456-466.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 周亮, 车磊, 周成虎. 中国城市绿色发展效率时空演变特征及影响因素. 地理学报, 2019, 74(10): 2027-2044.
- [5] 汶武娟, 林源. 从城市公园系统的初兴与发展看 20 世纪 20—30 年代中国城市绿地系统的建设. 中国园林, 2023, 39(8): 133-138.
- [6] Assessment Millennium Ecosystem. Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [7] Lauwers L, Leone M, Guyot M, Pelgrims I, Remmen R, Van den Broeck K, Keune H, Bastiaens H. Exploring how the urban neighborhood environment influences mental well-being using walking interviews. Health & Place, 2021, 67: 102497.
- [8] Bazrafshan M, Tabrizi A M, Bauer N, Kienast F. Place attachment through interaction with urban parks: a cross-cultural study. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 61: 127103.
- [9] Zhu X, Gao M, Zhang R, Zhang B. Quantifying emotional differences in urban green spaces extracted from photos on social networking sites: a study of 34 parks in three cities in Northern China. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 62: 127133.
- [10] Wang Z F, Zhu Z W, Xu M, Qureshi S. Fine-grained assessment of greenspace satisfaction at regional scale using content analysis of social media and machine learning. The Science of the Total Environment, 2021, 776: 145908.
- [11] Ta N, Li H, Zhu Q Y, Wu J Y. Contributions of the quantity and quality of neighborhood green space to residential satisfaction in suburban Shanghai. Urban Forestry & Urban Greening, 2021, 64: 127293.
- [12] 周昱辰, 尹丹, 黄庆旭, 张玲, 白岩松. 基于生态系统服务参与式制图的“三生”空间优化建议——以白洋淀流域为例. 自然资源学报, 2022, 37(8): 1988-2003.
- [13] Pinto L V, Inácio M, Bogdzevič K, Kalinauskas M, Gomes E, Pereira P. Factors affecting cultural ecosystem services use in Vilnius (Lithuania): a participatory mapping survey approach. Heliyon, 2023, 9(4): e15384.
- [14] 韩贵锋, 王运鑫, 程晓雪. 城市公园景观感知效应动态评价方法——基于景观视觉与热舒适性的叠加研究. 中国园林, 2021, 37(5): 38-43.
- [15] Márquez L A M, Rezende E C N, Machado K B, Do Nascimento E L M, Castro J D B, Nabout J C. Trends in valuation approaches for cultural ecosystem services: A systematic literature review. Ecosystem Services, 2023, 64: 101572.
- [16] 高艳, 刘康, 马桥, 李影, 范亚宁, 李秀清, 古超. 基于 SolVES 模型与游客偏好的生态系统服务社会价值评估——以太白山国家森林公园为例. 生态学杂志, 2017, 36(12): 3564-3573.

- [17] 张业臣, 张宏梅, 虞虎. 基于游客感知的生态系统服务社会价值评估——以钱江源国家公园为例. *旅游科学*, 2020, 34(6): 66-85.
- [18] Ridding L E, Redhead J W, Oliver T H, Schmucki R, McGinlay J, Graves A R, Morris J, Bradbury R B, King H, Bullock J M. The importance of landscape characteristics for the delivery of cultural ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 2018, 206: 1145-1154.
- [19] 毛小岗, 宋金平, 冯微微, 赵倩. 基于结构方程模型的城市公园居民游憩满意度. *地理研究*, 2013, 32(1): 166-178.
- [20] Baumeister C F, Gerstenberg T, Plieninger T, Schraml U. Exploring cultural ecosystem service hotspots: linking multiple urban forest features with public participation mapping data. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 48: 126561.
- [21] Miriam T, Hanna H, Johanna J, Antti K. The multidimensionality of urban nature: the well-being and integration of immigrants in Finland. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2022, 74: 127645.
- [22] Ghermandi A. Benefits of coastal recreation in Europe: identifying trade-offs and priority regions for sustainable management. *Journal of Environmental Management*, 2015, 152: 218-229.
- [23] Nathan F, Graham Laura J, Felix F, Bullock James M, Parks Katherine E. Enriching social media data allows a more robust representation of cultural ecosystem services. *Ecosystem Services*, 2021, 50: 101328.
- [24] Cao H J, Wang M, Su S L, Kang M J. Explicit quantification of coastal cultural ecosystem services: a novel approach based on the content and sentimental analysis of social media. *Ecological Indicators*, 2022, 137: 108756.
- [25] 梁启凡, 李畅, 林倍多, 翟俊. 基于社交媒体数据的文化生态系统服务供需评估与优化研究——以苏州市为例. *中国园林*, 2023, 39(11): 125-131.
- [26] Clemente P, Calvache M, Antunes P, Santos R, Cerdeira J O, Martins M J. Combining social media photographs and species distribution models to map cultural ecosystem services: the case of a Natural Park in Portugal. *Ecological Indicators*, 2019, 96: 59-68.
- [27] Chen Y, Parkins J R, Sherren K. Using geo-tagged Instagram posts to reveal landscape values around current and proposed hydroelectric dams and their reservoirs. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 170: 283-292.
- [28] Arbutnot Katherine D. Nature exposure and social health: Prosocial behavior, social cohesion, and effect pathways. *Journal of Environmental Psychology*, 2023, 90: 102109.
- [29] 张秋菊, 傅伯杰, 陈利顶. 关于景观格局演变研究的几个问题. *地理科学*, 2003, 23(3): 264-270.
- [30] 谢永俊, 彭霞, 黄舟, 刘瑜. 基于微博数据的北京市热点区域意象感知. *地理科学进展*, 2017, 36(9): 1099-1110.
- [31] Liao J P, Liao Q L, Wang W W, Shen S Y, Sun Y, Xiao P, Cao Y C, Chen J A. Quantifying and mapping landscape value using online texts: a deep learning approach. *Applied Geography*, 2023, 154: 102950.
- [32] Cheng Y Y, Zhao B, Peng S Q, Li K, Yin Y, Zhang J G. Effects of cultural landscape service features in national forest parks on visitors' sentiments: a nationwide social media-based analysis in China. *Ecosystem Services*, 2024, 67: 101614.
- [33] Li J, Gao J, Zhang Z H, Fu J, Shao G F, Zhao Z Y, Yang P P. Insights into citizens' experiences of cultural ecosystem services in urban green spaces based on social media analytics. *Landscape and Urban Planning*, 2024, 244: 104999.
- [34] Brunsdon C, Fotheringham A S, Charlton M E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity. *Geographical Analysis*, 1996, 28(4): 281-298.
- [35] 王润泽, 王申林, 石鑫, 尹潇, 周鹏. 基于多源数据的武汉房价时空模式与驱动机制研究. *地理信息世界*, 2022, 29(4): 88-96.
- [36] 姜芊孜, 王广兴, 李金煜. 城市公园生态系统文化服务的公众感知研究——以济南市主城区城市公园为例. *风景园林*, 2022, 29(2): 127-133.
- [37] Mao Q Z, Wang L Y, Guo Q H, Li Y Z, Liu M, Xu G H. Evaluating cultural ecosystem services of urban residential green spaces from the perspective of residents' satisfaction with green space. *Frontiers in Public Health*, 2020, 8: 226.
- [38] 庄思冰, 龚建周, 陈康林, 李江涛. 粤港澳大湾区小型公园绿地生态系统文化服务的供需匹配特征. *生态学报*, 2023, 43(14): 5714-5725.
- [39] Giles-Corti B, Broomhall M H, Knuiam M, Collins C, Douglas K, Ng K, Lange A, Donovan R J. Increasing walking: how important is distance to, attractiveness, and size of public open space? *American Journal of Preventive Medicine*, 2005, 28(2 Suppl 2): 169-176.
- [40] Dallimer M, Davies Z G, Irvine K N, Maltby L, Warren P H, Gaston K J, Armsworth P R. What personal and environmental factors determine frequency of urban greenspace use? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11(8): 7977-7992.
- [41] Mao Q Z, Hu C J, Guo Q H, Li Y Z, Liu M. How does vegetation landscape structure of urban green spaces affect cultural ecosystem services at multiscale: based on PLS-SEM model. *Forests*, 2023, 14(7): 1401.
- [42] Mowen A, Orsega-Smith E, Payne L, Ainsworth B, Godbey G. The role of park proximity and social support in shaping park visitation, physical activity, and perceived health among older adults. *Journal of Physical Activity & Health*, 2007, 4(2): 167-179.
- [43] 殷允可, 李昊瑞, 张铭, 王良杰, 姜姜. 不同气候区生态系统服务权衡空间异质性及其驱动因素——以川滇-黄土高原生态屏障带为例. *生态学报*, 2024, 44(1): 107-116.

- [44] 危小建, 辛思怡, 张颖艺, 龙英豪, 张茜. 不同格网尺度下生态系统服务价值空间分异及其影响因素差异——以大南昌都市圈为例. 生态学报, 2023, 43(18): 7585-7597.
- [45] Sun X, Tang H J, Yang P, Hu G, Liu Z H, Wu J G. Spatiotemporal patterns and drivers of ecosystem service supply and demand across the conterminous United States; a multiscale analysis. *The Science of the Total Environment*, 2020, 703: 135005.
- [46] 赵文武, 刘月, 冯强, 王亚萍, 杨思琪. 人地系统耦合框架下的生态系统服务. 地理科学进展, 2018, 37(1): 139-151.
- [47] Guo R Z, Lin L, Xu J F, Dai W H, Song Y B, Dong M. Spatio-temporal characteristics of cultural ecosystem services and their relations to landscape factors in Hangzhou Xixi National Wetland Park, China. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110910.
- [48] 孙雅文, 谭少华, 申纪泽. 公园绿化覆盖率对人群情感恢复的影响研究. 风景园林, 2021, 28(4): 85-91.
- [49] 费凡, 岳邦瑞, 聂静. 文化可持续性导向下的湿地公园滨水景观设计对策. 中国园林, 2022, 38(S2): 35-40.
- [50] 马薛骑, 袁鸿菲. 基于网络照片数据与 Auto ML 模型的湖泊公园景观意象特征及感知偏好研究. 中国园林, 2022, 38(10): 86-91.
- [51] Huai S, van de Voorde T. Which environmental features contribute to positive and negative perceptions of urban parks? A cross-cultural comparison using online reviews and Natural Language Processing methods. *Landscape and Urban Planning*, 2022, 218: 104307.
- [52] Clement F, Orange D, Williams M, Mulley C, Epprecht M. Drivers of afforestation in Northern Vietnam: assessing local variations using geographically weighted regression. *Applied Geography*, 2009, 29(4): 561-576.
- [53] 单宇璠, 郭青海, 龚高锋, 陈乾明, 周聪. 内生驱动因素对景感意愿度差异的影响——从城市公园斑块-廊道-基质景观角度. 生态学报, 2023, 43(22): 9402-9415.
- [54] Sun X, Liu H X, Liao C, Nong H F, Yang P. Understanding recreational ecosystem service supply-demand mismatch and social groups' preferences; implications for urban-rural planning. *Landscape and Urban Planning*, 2024, 241: 104903.
- [55] 罗俊杰, 雷泽鑫, 胡一可, 王苗, 曹磊. 基于深度学习的城市公园游客情感倾向分析——以天津水上公园为例. 中国园林, 2021, 37(9): 65-70.