

苟爱萍,李皖新,王江波.重庆市绿色空间景观格局与PM_{2.5}浓度时空相关性[J].地球科学与环境学报,2024,46(1):25-37.

GOU Ai-ping, LI Wan-xin, WANG Jiang-bo. Spatiotemporal Correlation Between Green Space Landscape Pattern and PM_{2.5} Concentration in Chongqing City, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2024, 46(1): 25-37.

DOI:10.19814/j.jese.2023.08011

重庆市绿色空间景观格局与PM_{2.5}浓度时空相关性

苟爱萍¹,李皖新¹,王江波^{2*}

(1. 上海应用技术大学生态技术与工程学院,上海 201418; 2. 南京工业大学建筑学院,江苏南京 211816)

摘要:空气中的细颗粒物对人民群众身体健康产生严重威胁,探究绿色空间景观格局对PM_{2.5}浓度的影响,有助于通过调整绿色空间格局降低PM_{2.5}浓度。以重庆市1980~2020年土地利用遥感监测数据和PM_{2.5}浓度数据作为基础数据,通过景观格局指数法、空间自相关分析研究绿色空间景观格局及PM_{2.5}浓度变化特征,再通过时空地理加权回归(GTWR)模型研究绿色空间景观格局指数变化对PM_{2.5}浓度的影响及其时空异质性。结果表明:①重庆市PM_{2.5}浓度从1980年至2010年逐渐上升,2010年至今逐渐降低;同时,其空间分布具有显著聚集特征,主要显示为东部低-低聚集、西部高-高聚集的特征。②林地、草地和耕地的面积指数(TA)、斑块密度指数(PD)和斑块连接度指数(COHESION)与PM_{2.5}浓度具有显著的相关性。其中,林地面积指数呈负影响,耕地、草地面积指数呈正影响;林地、草地斑块密度指数呈正影响,耕地斑块密度指数呈负影响;林地、草地和耕地斑块连接度指数均呈负影响。③主城区都市区内,草地面积指数和耕地斑块密度指数对PM_{2.5}浓度的负影响较强。渝东北三峡库区城镇群和渝东南武陵山区城镇群内,林地聚合度指数(AI)、斑块密度指数和斑块连接度指数以及耕地面积指数对PM_{2.5}浓度的影响较强。

关键词:绿色空间;景观格局指数;消减效应;PM_{2.5}浓度;空间自相关分析;时空地理加权回归模型;时空异质性;重庆

中图分类号:X513;TU985

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2024)01-0025-13

Spatiotemporal Correlation Between Green Space Landscape Pattern and PM_{2.5} Concentration in Chongqing City, China

GOU Ai-ping¹, LI Wan-xin¹, WANG Jiang-bo^{2*}

(1. School of Ecological Technology and Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China; 2. College of Architecture, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China)

Abstract: Airborne fine particulate matter poses a serious threat to human health, and investigating the impact of green space landscape patterns on PM_{2.5} concentrations is conducive to reducing the risk of respiratory diseases by adjusting the green space pattern to decrease PM_{2.5} concentrations. Utilizing land use remote sensing monitoring data and PM_{2.5} concentration data in Chongqing city from 1980 to 2020 as the foundational dataset, the landscape pattern index method and spatial autocorrelation analysis were employed to study the characteristics of green space landscape patterns and PM_{2.5} concentration changes. Furthermore, a geographical and temporal

收稿日期:2023-08-07;修回日期:2023-12-13 投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(51778364,51978329)

作者简介:苟爱萍(1971-),女,重庆市人,教授,工学博士,E-mail:aipinggou@hotmail.com.

*通信作者:王江波(1976-),男,河南鹤壁人,教授,工学博士,E-mail:wjb623@163.com.

weighted regression (GTWR) model was applied to explore the influence of changes in green space landscape pattern indices on $PM_{2.5}$ concentrations and their spatiotemporal heterogeneity. The results show that ① $PM_{2.5}$ concentrations in Chongqing city gradually increase from 1980 to 2010, followed by a gradual decrease from 2010 to the present; simultaneously, the spatial distribution exhibits significant agglomeration characteristics, primarily manifesting as low-low agglomeration in the east and high-high agglomeration in the west. ② Area index (TA), patch density index (PD), and patch cohesion index (COHESION) of forest, grassland and agricultural land show significant correlations with $PM_{2.5}$ concentrations; specifically, area index of forest is negatively correlated, while area indexes of arable land and grassland are positively correlated; patch density indexes of forest and grassland are positively correlated, while patch density index of arable land is negatively correlated; patch cohesion indexes of forest, grassland and arable land are all negatively correlated. ③ In the metropolitan area, area index of grassland and patch density index of arable land exhibit a stronger negative impact on $PM_{2.5}$ concentrations; in the urban clusters of Three Gorges reservoir area in the northeast and Wuling mountain area in the southeast of Chongqing city, aggregation index (AI), patch density index, patch cohesion index of forest, and area index of arable land exert a stronger influence on $PM_{2.5}$ concentrations.

Key words: green space; landscape pattern index; reduction effect; $PM_{2.5}$ concentration; spatial autocorrelation analysis; GTWR model; spatiotemporal heterogeneity; Chongqing

0 引言

近年来城镇化和工业化进程不断加快,污染气体的排放、人口的扩张以及城市灰色基础设施的建设给城市带来了严重的空气污染问题。根据《2020中国生态环境状况公报》统计结果,全国337个地级及以上城市中有40.1%的城市面临着空气污染问题,并且 $PM_{2.5}$ 是重度及以上污染天气的主要污染物^[1-3]。绿地和绿色空间是研究城市自然系统生态效益的两个常见研究对象,其中绿地概念有狭义和广义之分,狭义的绿地指城市土地利用类型中的“G”大类,广义的绿地可等同于绿色空间^[4]。根据我国现有的城乡规划术语和规范,绿色空间可以被认为是城市空间中维持城乡区域环境的生态平衡、改善人居环境的生态空间^[5],包括城市绿地、农林用地等。绿色空间能够显著降低空气中颗粒物的浓度^[6-7],1 ha绿色空间可削减 $PM_{2.5}$ 22.71~33.36 kg^[8]。绿色空间能够降低 $PM_{2.5}$ 浓度主要是由于植被特殊的结构特征可以对空气颗粒物起到减尘、滞尘、吸尘、降尘和阻尘的作用^[9-10]。不同植被类型对 $PM_{2.5}$ 浓度影响程度不同,林地和草地是降低 $PM_{2.5}$ 浓度的主要绿色空间类型,且林地影响强度大于草地^[11-14]。同时,针阔混交林、灌木林和针叶林的单位面积 $PM_{2.5}$ 削减量要高于苗圃与果园、社区林和路旁林^[8]。

城镇化持续发展导致大量城市绿色空间转变为建设用地,造成其面积不断缩减^[15]。绿色空间格局对 $PM_{2.5}$ 浓度具有显著影响^[16-18],通过深入探究绿色空间景观格局对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响因子,尽可能在面积有限的情况下最大限度发挥绿色空间对于 $PM_{2.5}$ 浓度的削减作用。目前,从事相关研究的学者一般通过采用皮尔森相关性分析^[19-21]、斯皮尔曼相关性分析^[16]、多元线性回归分析^[13]或土地利用回归模型^[22-23]等来研究绿色空间景观格局与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性。Łowicki通过研究波兰空气站点周边区域绿色空间景观格局对 $PM_{2.5}$ 的影响,得出绿色空间面积越大、边界形状越复杂,其对 $PM_{2.5}$ 浓度的消减作用越强^[24];马博伦等通过多元线性回归分析得出景观优势度越高、斑块连接性越强,其越能够降低 $PM_{2.5}$ 浓度^[13];邱义山运用土地利用回归模型研究绿色空间景观格局对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响,得出在绿色空间面积比例不变的情况下,绿色空间破碎化程度越高、绿色空间形状越复杂、离散程度越低,其越有利于降低 $PM_{2.5}$ 浓度^[22]。但谭璐等利用皮尔森相关性分析对绿色空间数量指标、景观格局指数与 $PM_{2.5}$ 浓度的相关性进行研究,发现绿色空间聚集度和蔓延度越低, $PM_{2.5}$ 浓度越低,这可能是由于忽视了立体绿化的影响^[21]。王梦迪等通过皮尔森相关性分析得出西安市绿色空间的斑块面积越大、斑块越聚集、边缘密度越大,其越有助于降低

PM_{2.5}浓度^[19]。宋海啸发现绿色空间分离度与 PM_{2.5}浓度成显著正相关关系,绿色空间景观格局对 PM_{2.5}浓度的作用存在季节上和尺度上的差异^[25]。同时,相关研究表明,空气中 PM_{2.5}浓度在空间上的分布具有差异性^[26]。因此,在探究 PM_{2.5}浓度影响因素时,有必要将时间和空间因素纳入考虑范围内。目前,已有学者采用地理加权回归(Geographically Weighted Regression, GWR)模型研究得出经济发展、产业结构、能源消费结构等因素对 PM_{2.5}浓度影响具有空间分布差异性^[27],但未考虑时间因素对研究结果的影响。Huang 等将时间维度融入到地理加权回归模型中,提出时空地理加权回归(Geographical and Temporal Weighted Regression, GTWR)模型,用以解释空间和时间对于变量相互关系的影响^[28]。重庆市为我国西南地区主要的工业城市,长期面临严重空气污染问题^[29],同时其主要污染物 PM_{2.5}显著增加肺癌发病的风险,《重庆市 2020 年新发肿瘤登记报告》显示肺癌已成为重庆市发病率最高的癌症^[30-31]。Jaafari 等研究认为,绿色空间能够改善空气环境质量,进而降低呼吸道疾病患病的风险^[32]。因此,本文从时间和空间两个维度出发,利用 SPSS 23.0 和 ArcGIS 10.5 软件,采用时空地理加权回归模型研究重庆市 1980~2020 年绿色空间景观格局与 PM_{2.5}浓度的时空相关性,阐明绿色空间景观格局与 PM_{2.5}浓度的相关性强弱以及在时间维度和空间维度上的差异,指导重庆市绿色空间相关规划以及最大效率地发挥绿色空间的环境效益,从而改善人居环境条件、降低呼吸道疾病死亡率,为市民提供健康舒适的生活。

1 研究区概况、数据来源与分析方法

1.1 研究区概况

重庆市纬度范围为 28°10'N~32°13'N,经度范围为 105°11'E~110°11'E(图 1),为长江上游地区经济中心城市及西南最大的工业城市。污染物排放到空气中使得重庆市面临着空气污染问题。根据《重庆调查年鉴 2020》统计结果,全年地区生产总值为 25 002.79 亿元,人均消费性支出为 21 678 元,首次超过全国平均水平,人民对美好生活的向往愈加强烈^[33]。因此,研究重庆市绿色空间景观格局对 PM_{2.5}浓度的消减作用,对于顺应经济社会发展,提升居民生活幸福度具有极大意义。本文以重庆市 26 个区、8 个县、4 个自治县为研究对象,研究尺度到区县级别。根据《重庆市国土空间总体规划

(2021~2035 年)》“一区两群”协调发展格局^[34],本文所涉及的区县可划分为主城都市区、渝东北三峡库区城镇群和渝东南武陵山区城镇群。

1.2 数据来源

1.2.1 绿色空间数据

本文绿色空间基础数据来源于中国科学院资源环境数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。该数据集包括自 1980 年以来的土地利用数据,精度为 30 m。该数据集可以提供有关土地利用和土地覆盖的历史信息,能够满足本研究的需求。参考以往研究中的绿色空间分类体系^[35-36],绿色空间包括耕地、林地、草地、湿地、水域。由于所选用的土地利用数据在重庆市范围内没有湿地的分布,且绿色空间中主要是植被起到降低 PM_{2.5}浓度的作用,所以本文研究对象包括重庆市市域范围内的林地(林地、灌木林地、疏林地及其他林地)、草地(高覆盖度草地、中覆盖度草地及低覆盖度草地)以及耕地(水田及早地)。利用 ArcGIS 10.5 软件提取 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年及 2020 年的林地、草地和耕地栅格数据作为本研究的绿色空间数据。

1.2.2 景观格局指数

基于前人对绿色空间景观格局指数的选取方法^[6,12,22,25],为全面反映绿色空间格局特征,本文选取面积指数(TA)、最大斑块指数(LPI)、聚合度指数(AI)、面积加权形状指数(SHAPE_AM)、斑块密度指数(PD)以及斑块连接度指数(COHESION)6 个景观指数反映不同时期绿色空间景观格局特征;然后将收集到的绿色空间数据通过 Fragstats 软件进行景观格局指数的计算。

1.2.3 空气颗粒物数据

本文涉及的 PM_{2.5}浓度数据来源于 Zhong 等重建的中国 1960~2020 年 6 h 的 PM_{2.5}浓度数据集^[37]。考虑到 PM_{2.5}浓度数据的时段应与绿色空间数据的时段一致,因此,本文选取 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年及 2020 年重庆市 PM_{2.5}浓度数据作为研究数据,共包括重庆市 47 个站点数据。收集到的数据通过 ArcGIS 10.5 软件进行处理得到重庆市 38 个区县的 PM_{2.5}浓度。

1.3 分析方法

1.3.1 全局空间自相关分析

全局空间自相关分析用于衡量整个区域内各空间单元与相邻单元之间的集聚性。全局莫兰指数(Global Moran's I, I_G)表达式为

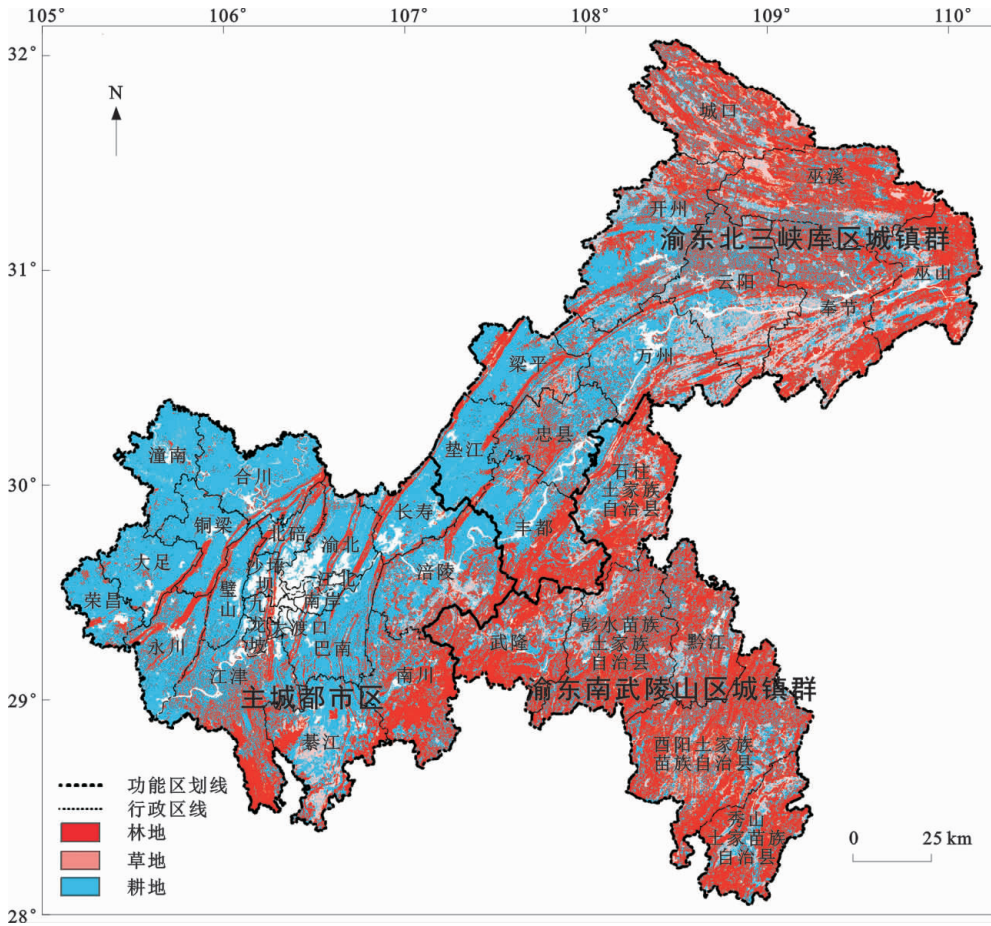


图1 2020年重庆市绿色空间分布

Fig. 1 Distribution of Green Space in Chongqing City in 2020

$$I_G = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i}^n \omega_{ij}} \quad (1)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

式中： n 为区县总数量； S^2 为所有区县中 $PM_{2.5}$ 浓度的方差； x_i 和 x_j 分别表示第 i 个区县和第 j 个区县的 $PM_{2.5}$ 浓度； \bar{x} 为所有区县属性的平均值； ω_{ij} 为空间权重。

本文以区县为空间单元，通过全局莫兰指数来判断 $PM_{2.5}$ 浓度是否具有空间自相关性。全局莫兰指数的取值范围为 $[-1, 1]$ ，其大于0表示区域间 $PM_{2.5}$ 浓度及其影响因素存在空间正相关关系，小于0表示区域间存在空间负相关关系，等于0表示区域间不存在空间自相关关系。

1.3.2 局部空间自相关分析

局部空间自相关分析用以探究局部区域中变量分布的空间相关性。局部莫兰指数(Local Moran's I, I_L)表达式为

$$I_L = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n \mathbf{W}_{ij} (x_j - \bar{x})}{S^2} \quad (4)$$

式中： \mathbf{W}_{ij} 为通过K邻接关系法建立的空间权重矩阵。

本文以区县为空间单元，采用局部莫兰指数来研究 $PM_{2.5}$ 浓度在重庆市的空间集聚情况。

1.3.3 时空地理加权回归模型

地理加权回归技术是在“地理学第一定律”的基础上发展而来的，用于解释空间变量关系随位置变化而变化的情况^[38]。Huang等在此基础上提出时空地理加权回归模型，较好地描述了解释变量与因变量之间的时空关系^[28]。本文以重庆市38个区县为研究对象，通过时空地理加权回归模型探究绿色空间景观格局与 $PM_{2.5}$ 浓度的时空相关性。其表达式为

$$y_l = \beta_0(u_l, v_l, t_l) + \sum_{k=1}^n \beta_k(u_l, v_l, t_l) x_{lk} + \varepsilon_l \quad (5)$$

式中： y_l 为在 l 时空位置处的 $PM_{2.5}$ 浓度； x_{lk} 为在 l 时空位置处的景观格局指数， $k=1, 2, \dots, m$ ； (u_l, v_l, t_l) 为 l 时空位置的坐标； $\beta_0(u_l, v_l, t_l)$ 为时空截距；

$\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 为回归系数; ϵ_i 为模型残差。

带宽的选择影响时空权重确立,本文采用赤池信息准则自适应带宽^[39]。

2 结果分析

2.1 PM_{2.5}浓度时空异质性特征

2.1.1 时间异质性特征

1980~2020年重庆市PM_{2.5}浓度虽然局部有所波动,但是整体上呈现下降趋势(图2),同时不同季节PM_{2.5}浓度具有显著差异。由图2可知:1980~1990年PM_{2.5}浓度不断上升,1990~2010年PM_{2.5}浓度持续维持比较高的水平,其中2005年PM_{2.5}浓度达到 $80.86 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;2010~2020年PM_{2.5}浓度从 $71.38 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 逐渐降至 $32.27 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,符合国家标准《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)中规定的最高限值($35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)^[40],但仍高于2021年世界卫生组织(WHO)发布的《世卫组织全球空气质量指南》中PM_{2.5}年均浓度($5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)的国际标准值^[41]6倍以上。1980年、1990年、2000年、2010年和2020年PM_{2.5}月均浓度变化趋势较为一致,均在12月至次年1月达到最高值,在6月至8月达到最低值,具有明显的季节差异特征。根据气候统计学按照农历月份划分春季(3月至5月)、夏季(6月至8月)、秋季(9月至11月)和冬季(12月至次年2月),重庆市PM_{2.5}浓度在冬季和春初、秋末较高,在夏季、春末和初秋较低(图3)。

2.1.2 空间异质性特征

(1)全局空间自相关分析结果。通过ArcGIS 10.5软件中的全局莫兰指数分析工具对重庆市各区县PM_{2.5}年均浓度进行空间自相关分析,1980~2020年PM_{2.5}年均浓度莫兰指数均大于0(表1),呈

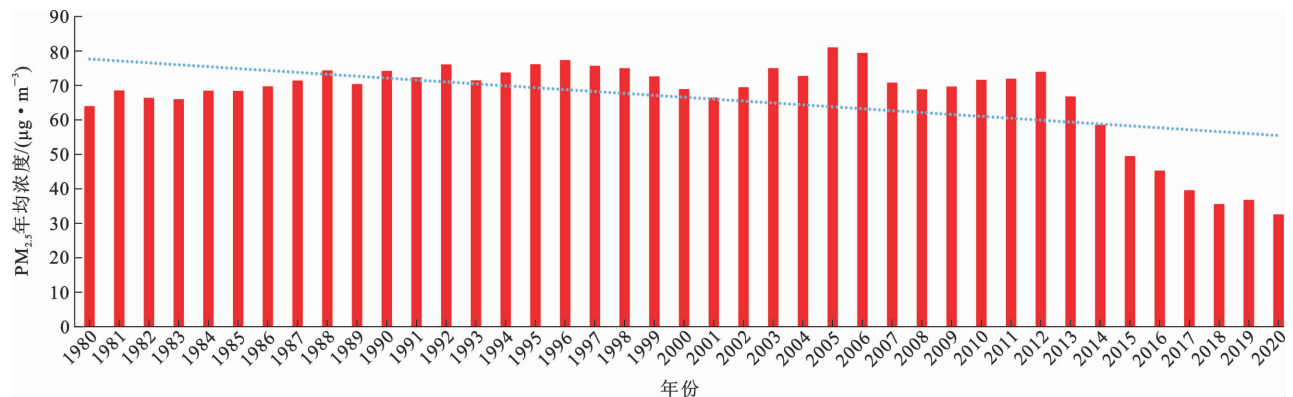
现出显著聚集性,说明PM_{2.5}浓度在空间上的分布不是随机的,而是具有空间聚集特征。因此,在探究影响PM_{2.5}浓度的因素时,需将空间因素纳入考虑范围内。

表 1 重庆市 PM_{2.5} 年均浓度全局空间自相关分析结果

Table 1 Global Spatial Autocorrelation Analysis Results of PM_{2.5} Annual Average Concentration in Chongqing City

参数	1980年	1990年	2000年	2010年	2020年
莫兰指数	0.26	0.42	0.49	0.45	0.42
P值	0.004 879	0.000 000	0.000 000	0.000 002	0.000 011
Z值	2.82	4.45	5.03	4.72	4.40

(2)PM_{2.5}浓度空间异质性特征。根据重庆市PM_{2.5}浓度高值或低值的聚类程度,可将其分为高-高、高-低、低-高和低-低4种聚集状态。高-高聚集区指PM_{2.5}浓度高的区县被其他PM_{2.5}浓度高的区县包围的区域;高-低聚集区指PM_{2.5}浓度高的区县被其他PM_{2.5}浓度低的区县包围的区域;低-高聚集区指PM_{2.5}浓度低的区县被其他PM_{2.5}浓度高的区县包围的区域;低-低聚集区指PM_{2.5}浓度低的区县被其他PM_{2.5}浓度低的区县包围的区域。重庆市PM_{2.5}浓度空间聚集特征体现在东部为低-低聚集区,西部为高-高聚集区,并且高-高聚集区从1980年至2020年逐渐由中东部向西部转移(图4)。由2020年重庆市PM_{2.5}浓度局部空间自相关分布可知,低-低聚集区主要分布在酉阳土家族苗族自治县、彭水苗族土家族自治县及黔江区在内的东部地区,该区域大部分为山地丘陵,植被覆盖率高,社会经济发展相对落后。重庆市PM_{2.5}浓度高-高聚集区主要集中在包括大足区、永川区及江津区在内的西部地区。该区域地势比较平坦,社会经济发达。同时,从1980年至2020年PM_{2.5}浓度高-高聚集区



图中虚线指示 1980~2020 年重庆市 PM_{2.5} 浓度的整体变化趋势

图 2 1980~2020 年重庆市 PM_{2.5} 年均浓度变化

Fig. 2 Change of PM_{2.5} Annual Average Concentration in Chongqing City from 1980 to 2020

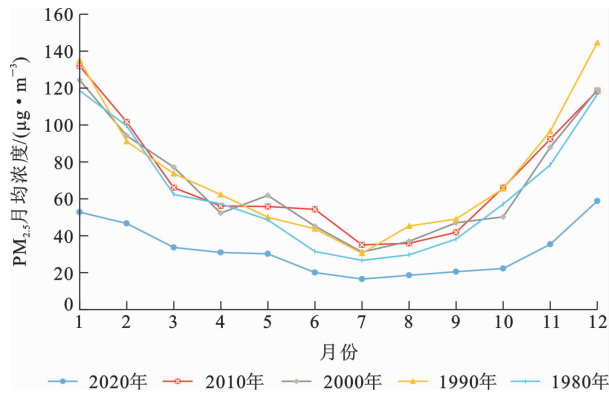


图3 1980~2020年重庆市PM_{2.5}月均浓度变化

Fig. 3 Change of PM_{2.5} Monthly Average Concentration in Chongqing City from 1980 to 2020

由渝北部梁平区逐渐向渝西南部江津区和永川区转移。

2.2 绿色空间时空异质性特征

图5展示了1980~2020年重庆市绿色空间面积变化。从图5可以看出,重庆市绿色空间主要位于渝东北三峡库区城镇群和渝东南武陵山区城镇群。重庆市主城都市区中部(如江北区、渝中区、南岸区和大渡口区)林地、草地和耕地面积相对较少。林地和草地主要分布在渝东南武陵山区城镇群和渝东北三峡库区城镇群,其中黔江区、酉阳土家族苗族自治县、彭水苗族土家族自治县、城口县、奉节县和巫山县等区域面积较多。耕地主要分布在主城都市区和重庆市中部地区。此外,耕地、草地和林地面积均在2010年至2020年明显减少,但渝东南武陵山区城镇群南部区县林地面积有所增加。总体上,重庆市中部城区和西部地区的绿色空间遭受了较严重的破坏,尽管东北和东南地区的绿色空间面积不断减少,但由于林地增加,东南地区的绿色空间状况有所改善。

2.3 绿色空间景观格局与PM_{2.5}浓度相关性检验

在进行相关性分析之前,利用SPSS 23.0软件对所选取的景观格局指数变量进行多重共线性检验(表2)。结果显示:仅草地的最大斑块指数和面积加权形状指数的方差膨胀系数(Variance Inflation Factor, VIF)大于10,其余5个变量的方差膨胀系数均小于5。对此再进行多元线性回归分析,结果显示耕地、林地和草地的面积指数、斑块密度指数和斑块连接度指数均与PM_{2.5}浓度具有显著的相关性($P < 0.05$)。其中,林地面积指数与PM_{2.5}浓度成负相关关系,即林地面积越大,则PM_{2.5}浓度越低;耕地和草地的面积指数与PM_{2.5}浓度成正相关关系。

表2 重庆市绿色空间景观格局指数与PM_{2.5}浓度多元线性回归分析结果

Table 2 Multiple Linear Regression Analysis Results of Green Space Landscape Pattern Index and PM_{2.5} Concentration in Chongqing City

土地利用类型	自变量	PM _{2.5} 浓度			
		回归系数	标准化回归系数	显著性	方差膨胀系数
耕地	面积指数	6.710×10^{-5}	0.202	0.010	1.573
	斑块密度指数	4.793	0.183	0.042	2.075
	最大斑块指数	0.180	0.322	0.010	3.902
	面积加权形状指数	0.425	0.170	0.025	1.454
	斑块连接度指数	-1.127	-0.160	0.034	1.440
	聚合度指数	0.883	0.195	0.134	4.313
林地	面积指数	-8.084×10^{-5}	-0.378	0.005	3.476
	斑块密度指数	20.347	0.224	0.014	1.592
	最大斑块指数	-0.385	-0.406	0.018	5.702
	面积加权形状指数	0.409	0.487	0.015	7.690
	斑块连接度指数	-4.893	-0.223	0.035	2.153
	聚合度指数	4.405	0.452	0.001	3.240
草地	面积指数	0.000	0.392	0.013	4.031
	斑块密度指数	64.011	0.282	0.006	1.691
	最大斑块指数	-2.795	-0.654	0.011	10.763
	面积加权形状指数	0.914	0.424	0.150	14.195
	斑块连接度指数	-5.413	-0.804	0.000	7.984
	聚合度指数	2.543	0.539	0.007	6.501

耕地、林地和草地斑块密度指数与PM_{2.5}浓度均成正相关关系,即绿色空间破碎化程度越高,PM_{2.5}浓度越高。耕地、林地和草地斑块连接度指数与PM_{2.5}浓度均成负相关关系,即绿色空间越聚集,PM_{2.5}浓度越低。此外,林地和草地的最大斑块指数与PM_{2.5}浓度成显著负相关关系,即优势度越高,PM_{2.5}浓度越低。

2.4 绿色空间景观格局与PM_{2.5}浓度相关性整体时空差异化特征

采用时空地理加权回归模型进行相关性分析,

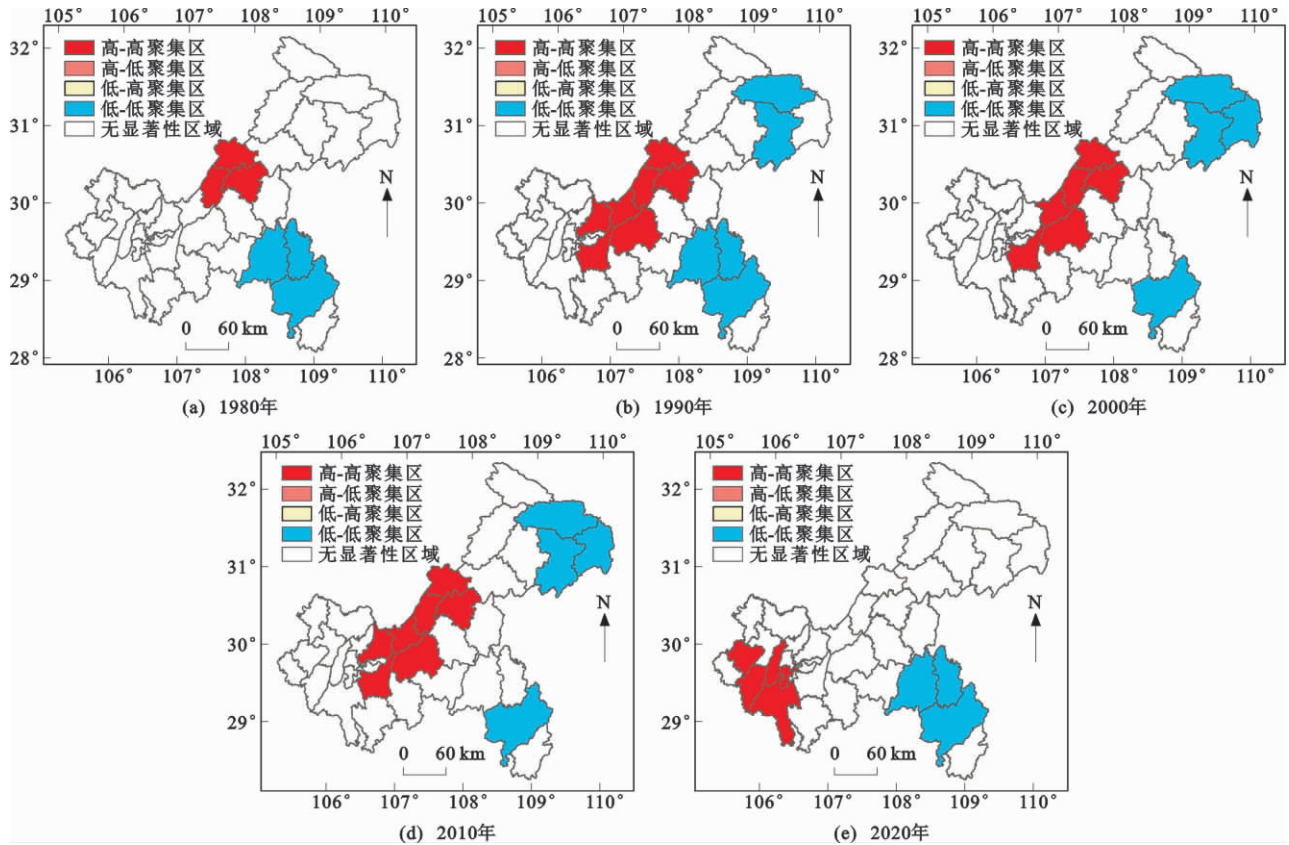


图 4 1980~2020 年重庆市 PM_{2.5} 浓度局部空间自相关分布

Fig. 4 Local Spatial Autocorrelation Distributions of PM_{2.5} Concentration in Chongqing City from 1980 to 2020

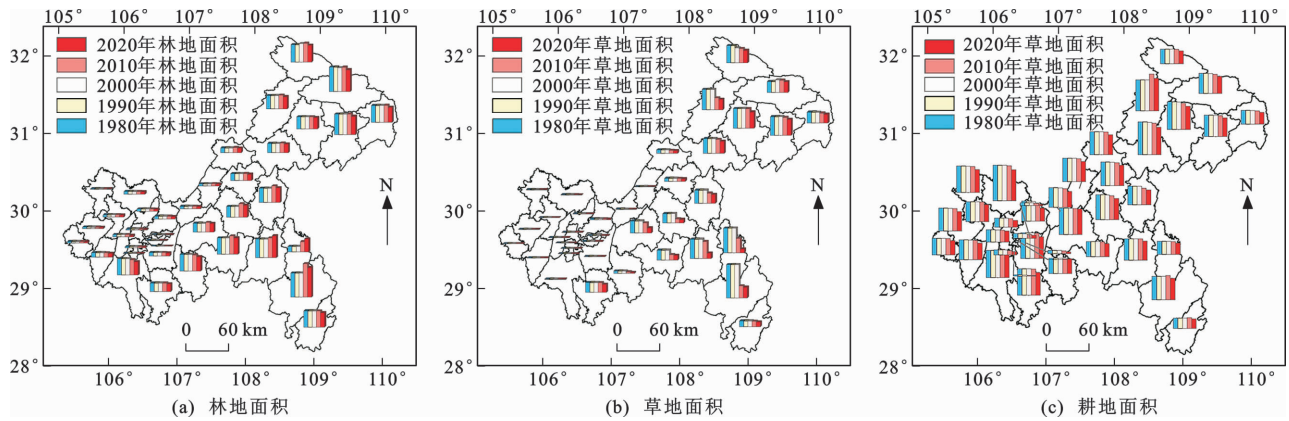


图 5 1980~2020 年重庆市绿色空间面积变化

Fig. 5 Changes of Green Space Area in Chongqing City from 1980 to 2020

得到的回归系数揭示不同年份、不同位置绿色空间景观格局指数对 PM_{2.5} 的影响程度的变化趋势及空间分布特征。不同年份、不同绿色空间类型的景观格局对 PM_{2.5} 浓度的影响具有显著的差异性。林地、草地和耕地的面积指数、斑块密度指数和斑块连接度指数对 PM_{2.5} 浓度的影响均在 2000~2010 年发生显著波动,各类型绿色空间面积指数、草地斑块连接度指数和林地斑块密度指数影响相对稳定(图 6)。其中,林地面积指数和草地斑块连接度指数呈

负影响,草地、林地面积指数和林地斑块密度指数呈正影响。

草地面积和斑块密度在大部分地区对 PM_{2.5} 浓度呈正影响,其中草地面积影响强的区域分布在渝东北三峡库区城镇群北部区县,而斑块密度影响强的区域主要分布在主城都市区区县。草地斑块连接度对 PM_{2.5} 浓度整体呈负影响,影响强的区域位于重庆市中部区县;林地面积、斑块密度和斑块连接度对 PM_{2.5} 浓度影响强的区域位于渝东北三峡库区城

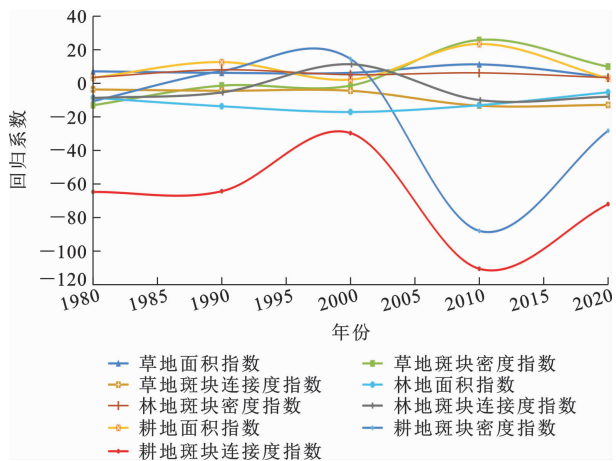


图6 基于时空地理加权回归模型的重庆市1980~2020年PM_{2.5}浓度解释变量标准系数随时间变化

Fig. 6 Change of Standard Coefficient of PM_{2.5}

Concentration Explanatory Variable with Time in

Chongqing City from 1980 to 2020 Based on GTWR Model

镇群东部、北部区县和渝东南武陵山区城镇群南部区县,其中面积和斑块连接度绝大部分地区呈负影响,斑块密度绝大部分呈正影响;耕地面积对PM_{2.5}浓度绝大部分地区呈正影响,影响程度强的区域主要位于渝东北三峡库区城镇群东部、北部区县。耕地斑块密度和斑块连接度对PM_{2.5}浓度整体呈负影响,斑块密度对PM_{2.5}浓度的影响程度在主城都市区较强,在渝东北三峡库区城镇群东部、北部区县较弱,而斑块连接度影响程度分布与之相反(图7)。

3 讨论

3.1 PM_{2.5}浓度的演变特征

PM_{2.5}浓度与城市的经济发展、产业结构、能源消费结构、交通运输发展、环境规制、自然条件等因素相关^[27],因此重庆市不同时期、不同地区PM_{2.5}浓度显示出巨大的差异性特征。1990~2010年为重庆市工业化快速发展的阶段,重庆市成为内陆地区工业发展的中心,排放到空气中的PM_{2.5}浓度较高。而2010年之后,重庆市相关部门出台“蓝天行动”以及贯彻国务院《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等环境规制政策,使得空气中PM_{2.5}浓度显著降低。重庆市PM_{2.5}浓度在冬季、春初、秋末较高,在夏季、春末和初秋较低,这与吴江华等的研究结果^[15,42-43]一致,PM_{2.5}月均浓度变化呈现“V”型特征。重庆市夏季多雨,颗粒物去除效率高,气温偏高,颗粒物二次转化增强^[44]。重庆市地域宽广,各地区社会经济和自然环境差别较大,PM_{2.5}浓度也具有显著的差异。重庆市主城都市区中部由于经济发展水平比较高,

绿色空间面积少,PM_{2.5}浓度较高。随着2004年重庆市政府启动企业搬迁工作,将具有污染的工业企业由中心区域搬迁至主城都市区西南区域,造成渝西南区县PM_{2.5}浓度不断增加^[45-46]。渝东北三峡库区城镇群和渝东南武陵山区城镇群主要为山区、林地面积高,社会经济水平相对落后,且2000年重庆市成为国家退耕还林工程建设试点地区,各种类型的林地和园地面积显著增加^[47],对PM_{2.5}浓度的消减作用显著增强。

3.2 绿色空间景观格局对PM_{2.5}浓度的影响

已有研究表明,林地、草地和耕地对PM_{2.5}浓度具有显著影响^[6-7,11-12,25,48]。本文选取林地、草地和耕地作为绿色空间,进一步研究不同景观格局状态下,绿色空间对PM_{2.5}浓度的降解作用。结果表明,所选景观格局指数中林地、草地和耕地的面积指数、斑块密度指数和斑块连接度指数对PM_{2.5}浓度具有显著影响。林地面积越大、斑块密度越小、斑块连接度越大,越有利于降低PM_{2.5}浓度,而草地面积越小越能降低PM_{2.5}浓度。这与Chen等研究得出的增大林地面积、提升聚集度有利于降低PM_{2.5}浓度的结论^[11-12,48]一致,与Cai等研究得出的草地面积增加有助于降低PM_{2.5}浓度的结论^[12]相反。其原因在于林地对PM_{2.5}浓度的作用强于草地^[11-12],更多的草地可能会导致林地面积减少,削弱绿色空间降解PM_{2.5}浓度的能力。而耕地斑块密度指数对PM_{2.5}浓度的正、负影响在多元线性回归模型和时空地理加权回归模型中分析结果不同,由于时空地理加权回归模型考虑到时间和空间因素,模型解释能力远高于多元线性回归模型,所以确定耕地斑块密度指数对PM_{2.5}浓度呈负影响。耕地面积越大、斑块密度及斑块连接度越小,越会增加PM_{2.5}浓度,这与宋海啸研究得出耕地降低PM_{2.5}浓度的结果^[25]相反。此前,相关学者研究得出耕地对PM_{2.5}浓度具有“源”“汇”作用交错的现象^[48]。一方面,耕地作为一种植被覆盖类型能够通过叶片的吸附能力滞尘;另一方面,耕地在收割和播种的季节,由于地表裸露会产生扬尘现象。

各绿色空间类型的面积指数、斑块密度指数和斑块连接度指数的影响强度均在2010年前后发生明显变化,原因在于林地、草地及耕地的面积在2010年前后明显降低,同时《重庆都市区绿地系统规划(2007~2020)》强调对绿色空间进行一体化考虑,在优化绿色空间格局方面取得显著进展^[49]。重庆市不同区域绿色空间对PM_{2.5}浓度的影响具有显

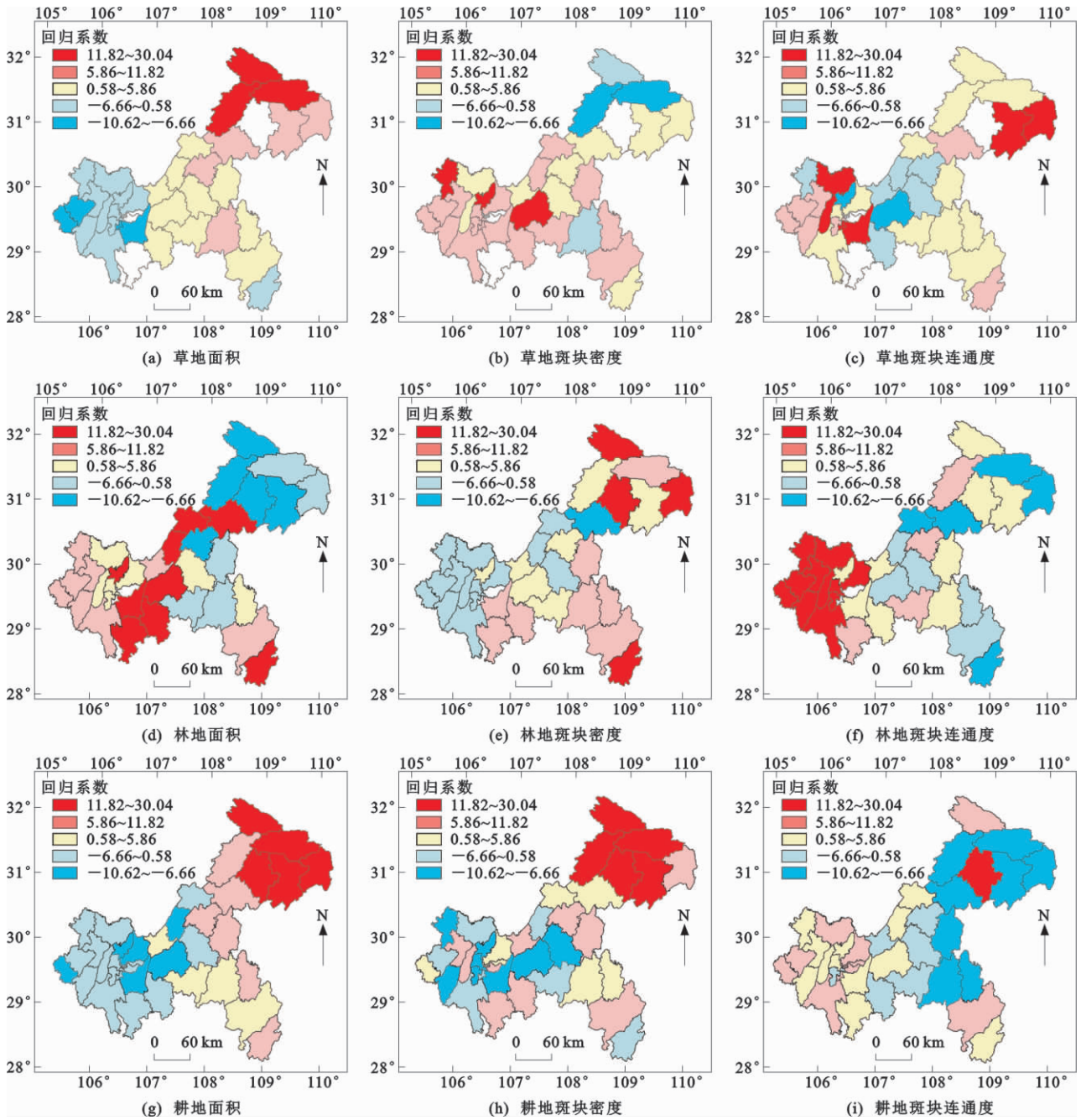


图 7 1980~2020 年重庆市 PM_{2.5} 年均浓度时空地理加权回归模型回归系数分布

Fig. 7 Distributions of Regression Coefficient of GTWR Model for PM_{2.5} Annual Average Concentration in Chongqing City from 1980 to 2020

著差异。主城都市区内,草地面积指数和耕地斑块密度指数对 PM_{2.5} 浓度的影响较强,且呈负影响,因此主城都市区内可增加草地以覆盖裸露城市地面。渝东北三峡库区城镇群和渝东南武陵山区城镇群为重庆市山区,经济社会发展相对落后,林地面积较多,林地对 PM_{2.5} 浓度的负影响最强,而耕地面积指数正影响较强。因此,该区域减少耕地面积,增加林地面积,降低林地破碎度以及增加林地之间的连接度能够更大地发挥绿色空间降低 PM_{2.5} 浓度的

作用。

4 结 语

本文从时间和空间两个维度出发探究重庆市绿色空间景观格局对 PM_{2.5} 浓度的影响。所选的 6 个景观格局指数中仅面积指数、斑块密度指数和斑块连接度指数与 PM_{2.5} 浓度具有显著相关性,并进一步分析了其相关性的时空异质性特征。

(1)重庆市 PM_{2.5} 浓度具有显著的时空差异性。

1990~2010年PM_{2.5}浓度较高,并且2010年之后逐渐下降。PM_{2.5}浓度在冬季、春初、秋末较高,在夏季、春末和初秋较低。PM_{2.5}浓度的分布具有空间聚集特征,主要显示为东部低-低聚集、西部高-高聚集的特征。

(2)林地、耕地和草地的面积指数、斑块密度指数和斑块连接度指数与PM_{2.5}浓度具有显著相关性。林地面积指数呈负影响,耕地、草地面积指数呈正影响;林地、草地斑块密度指数呈正影响,耕地斑块密度指数呈负影响;林地、草地和耕地斑块连接度指数均呈负影响。

(3)绿色空间景观格局指数与PM_{2.5}浓度的相关性具有显著的时空差异化特征。林地、草地和耕地的景观格局指数对PM_{2.5}浓度的影响均在2010年前后发生较大的变化。主城都市区内,草地面积指数和耕地斑块密度指数对PM_{2.5}浓度的负影响较强。渝东北三峡库区城镇群和渝东南武陵山区城镇群内,林地聚合度指数、斑块密度指数和斑块连接度指数以及耕地面积指数对PM_{2.5}浓度的影响最强。

(4)本文所选绿色空间数据以年为单位进行度量,难以聚焦到不同季节绿色空间的变化对PM_{2.5}浓度所产生的影响,但从宏观分析出绿色空间景观格局对PM_{2.5}浓度的影响。根据研究结论,重庆市及下属各区县的园林绿化主管部门可采取以下绿色空间规划措施以降低区域PM_{2.5}浓度:①主城都市区可以通过建设人工草地和适量林地覆盖裸露地面,在提升绿色空间降低PM_{2.5}浓度的同时,为市民提供更多的户外活动空间;②对于渝东北三峡库区城镇群和渝东南武陵山区城镇群,一方面通过植树造林和退耕还林等工程增加林地面积,修复三峡水利工程等项目的建设给林地造成的破坏;另一方面可通过划分自然保护区以保护现有林地的完整性,防止林地破碎,同时可增设廊道以提升不同绿色空间斑块之间的连通性,以增加绿色空间对PM_{2.5}浓度的消减作用。

参考文献:

References:

[1] 中华人民共和国生态环境部. 2020中国生态环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2020.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Bulletin of the State of China's Ecological Environment in 2020[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic

of China, 2020.

- [2] 华琨, 罗忠伟, 贾斌, 等. 天津市空气污染的健康影响分析[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2492-2501.
HUA Kun, LUO Zhong-wei, JIA Bin, et al. Health Impacts of Air Pollution in Tianjin[J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2492-2501.
- [3] 涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 等. 中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征[J]. 环境科学, 2023, 44(11): 5954-5963.
TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, et al. Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China[J]. Environmental Science, 2023, 44(11): 5954-5963.
- [4] 李方正. 基于多源数据分析的北京市中心城绿色空间格局演变和优化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
LI Fang-zheng. Evolution and Optimization of Green Space Pattern in Central Beijing Based on Multi-source Data[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.
- [5] 雷芸. 持续发展城市绿地系统规划理法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
LEI Yun. A Study on Theory and Method of Urban Green Space System Planning Based on the Sustainable Development[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [6] 杨婉莹, 刘艳芳, 刘耀林, 等. 基于LUR模型探究城市景观格局对PM_{2.5}浓度的影响: 以长株潭城市群为例[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(9): 2251-2261.
YANG Wan-ying, LIU Yan-fang, LIU Yao-lin, et al. Investigating the Effect of Urban Landscape Pattern on PM_{2.5} Concentration Based on LUR Model: A Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration Case Study[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(9): 2251-2261.
- [7] 张阔. PM_{2.5}时空分布特征及土地利用空间分布的影响机制研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2021.
ZHANG Kuo. Spatial and Temporal Distribution Characteristics of PM_{2.5} and Impact Mechanism of Land Use Spatial Distribution[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2021.
- [8] 肖玉, 王硕, 李娜, 等. 北京城市绿地对大气PM_{2.5}的削减作用[J]. 资源科学, 2015, 37(6): 1149-1155.
XIAO Yu, WANG Shuo, LI Na, et al. Atmospheric PM_{2.5} Removal by Green Spaces in Beijing[J]. Resources Science, 2015, 37(6): 1149-1155.
- [9] 左海军, 王彦辉, 于澎涛, 等. 绿化植物防治空气颗粒

- 物污染研究进展[J]. 世界林业研究, 2016, 29(2): 33-37.
- ZUO Hai-jun, WANG Yan-hui, YU Peng-tao, et al. Overview of Studies on Greening Plants Effects on Particulate Air Pollution Control[J]. World Forestry Research, 2016, 29(2): 33-37.
- [10] 谢滨泽, 王会霞, 杨佳, 等. 北京常见阔叶绿化植物滞留 PM_{2.5} 能力与叶面微结构的关系[J]. 西北植物学报, 2014, 34(12): 2432-2438.
- XIE Bin-ze, WANG Hui-xia, YANG Jia, et al. Retention Capability of PMs and It's Explanation by Leaf Surface Micro-structure of Common Broad-leaved Plant Species in Beijing[J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica, 2014, 34(12): 2432-2438.
- [11] CHEN M, DAI F, YANG B J, et al. Effects of Urban Green Space Morphological Pattern on Variation of PM_{2.5} Concentration in the Neighborhoods of Five Chinese Megacities [J]. Building and Environment, 2019, 158: 1-15.
- [12] CAI L Y, ZHUANG M Z, REN Y. A Landscape Scale Study in Southeast China Investigating the Effects of Varied Green Space Types on Atmospheric PM_{2.5} in Mid-winter[J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2020, 49: 126607.
- [13] 马博伦, 王雷, 滑永春. 北京市细颗粒污染物与土地覆被景观格局关联分析[J]. 林业资源管理, 2021(4): 94-103.
- MA Bo-lun, WANG Lei, HUA Yong-chun. Correlation Analysis of Fine Particulate Pollutants and Land Cover Landscape Pattern in Beijing[J]. Forest Resources Management, 2021(4): 94-103.
- [14] 方云皓, 赵丽元, 窦碧莹, 等. 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[J]. 生态学报, 2024, 44(1): 117-128.
- FANG Yun-hao, ZHAO Li-yuan, DOU Bi-ying, et al. Reduction Effect of Green Infrastructure on PM_{2.5} in the Built-up Areas of Urban Agglomerations in the Yangtze River's Middle Reaches[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1): 117-128.
- [15] 吴江华, 刘康, 张红娟, 等. 西安市主城区景观格局演变对地表径流的影响[J]. 水土保持通报, 2021, 41(4): 83-92.
- WU Jiang-hua, LIU Kang, ZHANG Hong-juan, et al. Impacts of Landscape Pattern Changes on Surface Runoff in Main Urban Area of Xi'an City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4): 83-92.
- [16] 王珏, 徐海韵, 岳峰, 等. 北京市中心城区绿地空间布局与 PM_{2.5} 的关联性研究[J]. 北京建筑大学学报, 2023, 39(1): 44-52.
- WANG Jue, XU Hai-yun, YUE Feng, et al. Research on the Correlation Between Green Space Layout and PM_{2.5} in the Central Urban Area of Beijing[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2023, 39(1): 44-52.
- [17] 冯一凡, 冯君明, 李翹. 生态韧性视角下绿色空间时空演变及优化研究进展[J]. 生态学报, 2023, 43(14): 5648-5661.
- FENG Yi-fan, FENG Jun-ming, LI Chi. Progress of the Spatiotemporal Change and Improvement of Green Space from the Perspective of Ecological Resilience [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5648-5661.
- [18] 陈明, 杨超, 戴菲. 城市公园绿地及周围建成环境对 PM_{2.5} 的影响: 以武汉市 10 个公园绿地为例[J]. 中国园林, 2023, 39(10): 104-110.
- CHEN Ming, YANG Chao, DAI Fei. Effects of Urban Park Green Spaces and Surrounding Built Environments on PM_{2.5}: A Case Study of Ten Park Green Spaces in Wuhan [J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(10): 104-110.
- [19] 王梦迪, 吉文丽, 李凯媛. 西安市 PM₁₀、PM_{2.5} 的时空特征及其与土地利用的关系[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4): 249-256.
- WANG Meng-di, JI Wen-li, LI Kai-yuan. Spatial and Temporal Distributions of PM₁₀ and PM_{2.5} in Xi'an and Their Relationships with Land Use Pattern[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 249-256.
- [20] 吴海天. 浙江地区绿地景观格局对颗粒物的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- WU Hai-tian. Effects of Green Space Landscape Patterns on Particulate Matter in Zhejiang Province, China [D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University, 2018.
- [21] 谭璐, 秦华. PM_{2.5} 相关的重庆市主城区绿地景观格局评价指标体系构建[J]. 林业调查规划, 2020, 45(6): 179-185.
- TAN Lu, QIN Hua. Construction of PM_{2.5}-related Evaluation Index System of Green Space Landscape Pattern in Main Urban Areas of Chongqing[J]. Forest Inventory and Planning, 2020, 45(6): 179-185.
- [22] 邱义山. 武汉市大气污染物分布与绿地景观格局的相关性[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- QIU Yi-shan. Correlation Between Air Pollutants Distribution and Greenspace Landscape Pattern in Wuhan [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.
- [23] 张珂凡. 城市绿地景观格局与 PM_{2.5} 浓度分布响应的

- 研究:以西安市为例[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2020.
- ZHANG Ke-fan. Study on the Correlation with Urban Green Space Landscape Pattern and $PM_{2.5}$ Concentration Distribution: A Case of Xi'an[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.
- [24] LOWICKI D. Landscape Pattern as an Indicator of Urban Air Pollution of Particulate Matter in Poland[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 97: 17-24.
- [25] 宋海啸. 城市绿地景观格局对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度时空变异的影响:以徐州市主城区为例[D]. 聊城:聊城大学, 2020.
- SONG Hai-xiao. The Influence of Urban Green Landscape Pattern on $PM_{2.5}$ and PM_{10} : A Case Study in Xuzhou Main City Area [D]. Liaocheng: Liaocheng University, 2020.
- [26] YANG D Y, MENG F, LIU Y, et al. Scale Effects and Regional Disparities of Land Use in Influencing $PM_{2.5}$ Concentrations: A Case Study in the Zhengzhou Metropolitan Area, China[J]. *Land*, 2022, 11(9): 1538.
- [27] 马忠玉, 肖宏伟. 中国区域 $PM_{2.5}$ 影响因素空间分异研究:基于地理加权回归模型的实证分析[J]. *山西财经大学学报*, 2017, 39(5): 14-26.
- MA Zhong-yu, XIAO Hong-wei. The Research on a Spatial Differentiation of Influence Factors of Regional $PM_{2.5}$ in China: The Empirical Analysis Based on Geographically Weighted Regression Model[J]. *Journal of Shanxi University of Finance and Economics*, 2017, 39(5): 14-26.
- [28] HUANG B, WU B, BARRY M. Geographically and Temporally Weighted Regression for Modeling Spatio-temporal Variation in House Prices[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(3): 383-401.
- [29] 刘永明, 陈盛梁, 周竹渝. 重庆市主城区空气污染成因分析及改善大气扩散条件的措施建议[J]. *重庆环境科学*, 2001, 23(4): 22-25.
- LIU Yong-ming, CHEN Sheng-liang, ZHOU Zhu-yu. Cause of Air Pollution in Urban Area of Chongqing and the Suggestions to Improve Air Diffusive Condition[J]. *Chongqing Environmental Science*, 2001, 23(4): 22-25.
- [30] 江文华, 周国兵, 陈道劲, 等. 重庆中心城区空气污染特征及气象影响因素分析[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2022, 47(1): 74-81.
- JIANG Wen-hua, ZHOU Guo-bing, CHEN Dao-jin, et al. Analysis on Characteristics and Influencing Meteorological Factors of Air Pollution in Central Urban Area of Chongqing[J]. *Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition)*, 2022, 47(1): 74-81.
- [31] RAASCHOU-NIELSEN O, ANDERSEN Z J, BEELEN R, et al. Air Pollution and Lung Cancer Incidence in 17 European Cohorts: Prospective Analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE)[J]. *The Lancet Oncology*, 2013, 14(9): 813-822.
- [32] JAAFARI S, SHABANI A A, MOEINADDINI M, et al. Applying Landscape Metrics and Structural Equation Modeling to Predict the Effect of Urban Green Space on Air Pollution and Respiratory Mortality in Tehran[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, 192(7): 412.
- [33] 重庆市统计局, 国家统计局重庆调查总队. 重庆调查年鉴 2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- Chongqing Bureau of Statistics, Chongqing Investigation Team of National Bureau of Statistics. *Chongqing Survey Yearbook 2020* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [34] 重庆市规划和自然资源局. 重庆市国土空间总体规划(2021~2035年)[R]. 重庆: 重庆市规划和自然资源局, 2021.
- Chongqing Bureau of Planning and Natural Resources. *Territorial Spatial Planning of Chongqing Municipality(2021 - 2035)* [R]. Chongqing: Chongqing Bureau of Planning and Natural Resources, 2021.
- [35] 樊柏青, 刘东云, 王思远, 等. 城市绿色空间地表温度的时空演变特征:以北京市六环内区域为例[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(5): 197-204.
- FAN Bai-qing, LIU Dong-yun, WANG Si-yuan, et al. Spatio-temporal Evolution of Surface Temperature in Urban Green Space: A Casestudy Within the Sixth Ring Road in Beijing[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)*, 2023, 47(5): 197-204.
- [36] 何楠琴, 许浩, 刘伟. 大城市郊区绿色空间格局演变及驱动力研究:以南京市江宁区为例[J]. *西北林学院学报*, 2023, 38(5): 235-242, 269.
- HE Nan-qin, XU Hao, LIU Wei. Evolution of Green Spatial Pattern and Driving Forces in Suburban Areas of large Cities: A Case Study of the Jiangning District of Nanjing[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2023, 38(5): 235-242, 269.
- [37] ZHONG J T, ZHANG X Y, GUI K, et al. Reconstructing 6-hourly $PM_{2.5}$ Datasets from 1960 to 2020 in China[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(7):

- 3197-3211.
- [38] 卢宾宾,葛咏,秦昆,等.地理加权回归分析技术综述[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(9):1356-1366.
LU Bin-bin, GE Yong, QIN Kun, et al. A Review on Geographically Weighted Regression [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(9):1356-1366.
- [39] 吴小影,杨山,尹上岗,等.基于GTWR模型的长三角地区城市建设用地时空动态特征及其驱动机理[J].长江流域资源与环境,2021,30(11):2594-2606.
WU Xiao-ying, YANG Shan, YIN Shang-gang, et al. Spatial-temporal Dynamic Characteristics and Its Driving Mechanism of Urban Built-up Area in Yangtze River Delta Based on GTWR Model [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(11): 2594-2606.
- [40] GB 3095—2012,环境空气质量标准[S].
GB 3095—2012, Environmental Air Quality Standards [S].
- [41] WHO. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide [R]. Geneva: WHO, 2021.
- [42] 陈源,谢绍东,罗彬,等.重庆市主城区大气细颗粒物污染特征与来源解析[J].环境科学学报,2017,37(7):2420-2430.
CHEN Yuan, XIE Shao-dong, LUO Bin, et al. Pollution Characterization and Source Apportionment of Fine Particles in Urban Chongqing [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(7): 2420-2430.
- [43] 赵慧洁,马云峰,王帅,等.沈阳市一次PM_{2.5}污染天气过程成因分析[J].环境工程,2022,40(9):33-43.
ZHAO Hui-jie, MA Yun-feng, WANG Shuai, et al. Cause Analysis of a Heavy PM_{2.5} Pollution Process Occurred in Shenyang [J]. Environmental Engineering, 2022, 40(9): 33-43.
- [44] 娄彩荣,刘红玉,李玉玲,等.大气颗粒物(PM_{2.5}、PM₁₀)对地表景观结构的响应研究进展[J].生态学报,2016,36(21):6719-6729.
LOU Cai-rong, LIU Hong-yu, LI Yu-ling, et al. Research on the Response of Air Particles (PM_{2.5}, PM₁₀) to Landscape Structure: A Review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(21): 6719-6729.
- [45] 张彦涛.重庆市工业布局变迁及区位优势研究[D].重庆:西南大学,2009.
ZHANG Yan-tao. Study on the Change of Industrial Distribution and the Location Optimization in Chongqing [D]. Chongqing: Southwest University, 2009.
- [46] 重庆市人民政府.重庆市工业生产布局调整规划[R].重庆:重庆市人民政府,2004.
Chongqing Municipal People's Government. Chongqing Industrial Productivity Distribution Adjustment Plan [R]. Chongqing: Chongqing Municipal People's Government, 2004.
- [47] 袁霄.近20年来重庆市土地利用碳排放的时空格局及低碳优化[D].重庆:西南大学,2018.
YUAN Xiao. Spatial-temporal Pattern and Low-carbon Optimization of Land Use Carbon Emissions in Chongqing in Recent 20 Years [D]. Chongqing: Southwest University, 2018.
- [48] 欧维新,张振,陶宇.长三角城市土地利用格局与PM_{2.5}浓度的多尺度关联分析[J].中国人口·资源与环境,2019,29(7):11-18.
OU Wei-xin, ZHANG Zhen, TAO Yu. Multi-scale Correlation Analysis of Urban Landscape Pattern and PM_{2.5} Concentration in the Yangtze River Delta [J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(7): 11-18.
- [49] 刘骏,向冷霓.城市绿地系统规划与建设对山地特征的响应探析:以重庆市为例[J].中国名城,2022,36(5):56-64.
LIU Jun, XIANG Ling-ni. Analysis of Mountain Characteristic Response of Urban Green Space System Planning and Construction: Taking Chongqing as an Example [J]. China Ancient City, 2022, 36(5): 56-64.