

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2022.10.016

郑州市气溶胶空间分布及影响因素分析

靳焕¹, 董娜琳¹, 雷雅凯¹, 陈岚琪¹, 李华威^{1,2}, 徐兰兰¹

1. 河南农业大学 风景园林与艺术学院, 郑州 450002;

2. 匈牙利农业与生命科学大学 风景园林与城市学院, 布达佩斯 1118, 匈牙利

摘要: 基于郑州气溶胶光学厚度(AOD)数据、气象数据和GF-2遥感影像, 利用双变量空间自相关和地理加权回归模型, 分析并揭示绿地景观指数、气象因素与气溶胶光学厚度的空间分布特征及其相互作用关系。结果表明: ① 郑州市 AOD 值的空间分布差异有统计学意义, 呈现南低北高、西低东高的空间分布特征; ② AOD 与绿地斑块密度及凝聚度之间呈现空间负相关, 与风速之间呈负相关, 与气温、气压和比湿之间呈正相关, AOD 随气温、气压及比湿指标水平增大而增大, 而风速的增大使 AOD 降低; ③ 绿地及气象指标与 AOD 存在空间聚类关系, 低-低类型、高-低类型主要发生在人类活动干预相对较少的郑州西部山地丘陵区; ④ 影响 AOD 的因素空间差异较大, 地面气压的回归系数分布于 -7.433~8.031 之间, 波动性最大, 最大斑块指数分布于 -0.608~0.851 之间, 其波动性最小。气压与 AOD 的相关性更多受地形的影响, 而气温对 AOD 影响存在明显的城乡差异。在以大气污染缓解为导向的郑州绿地规划中, 应以郑州市北部、东部气溶胶污染热点区域, 局地低-高类型, 局地高-高类型区为重点治理对象, 根据不同区位与 AOD 的关系, 以绿地斑块凝聚度为重要调控指标, 优化绿地布局并最大程度地缓解气溶胶污染。

关 键 词: 景观格局; 气象因素; 气溶胶光学厚度; 双变量自相关

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2022)10-0150-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of Aerosol Spatial Distribution and Its Influencing Factors in Zhengzhou

JIN Huan¹, DONG Nalin¹, LEI Yakai¹,
CHEN Lanqi¹, LI Huawei^{1,2}, XU Lanlan¹

1. College of Landscape Architecture and Art, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

2. Department of Landscape Planning and Regional Development, Institute of Landscape Architecture,

Urban Planning and Garden Art, Hungarian University of Agriculture and Life Sciences, Budapest 1118, Hungary

Abstract: Based on aerosol optical depth (AOD) data, meteorological data and GF-2 remote sensing images in Zhengzhou City. the bivariate spatial autocorrelation and GWR models were used to analyze and reveal

收稿日期: 2021-08-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(31600579); 河南省科技攻关项目(162102310093); 河南省青年骨干教师资助项目(2020GGJS049); 河南省国际合作研究项目(HNGD2021035).

作者简介: 靳焕, 硕士研究生, 主要从事风景园林与公共健康研究.

通信作者: 徐兰兰, 硕士, 讲师.

the spatial distribution characteristics and interaction of Green Space Landscape Index, meteorological factors and Aerosol Optical Depth (AOD). The results showed that: ① The spatial distribution of AOD values in Zhengzhou City varied significantly, showing the spatial distribution characteristics of low in the south and high in the north, and low in the west and high in the east. ② There is a negative spatial correlation between AOD and green patch density, and cohesion. It also has a negative correlation with wind speed and positive correlations with air temperature, air pressure and specific humidity. AOD increases with the increase of air temperature, air pressure, and specific humidity index levels, while AOD decreases with the increase of wind speed. ③ There are spatial clustering relationships between green space and meteorological element indicators, and AOD. The low-low type and high-low type mainly occur in the mountainous and hilly areas of western Zhengzhou where there is relatively less intervention with human activities. ④ The regression coefficients of air pressure are distributed between $-7.433\text{--}8.031$ with the greatest volatility. The maximum patch index are distributed between $-0.608\text{--}0.851$ with the least volatility, then the influence of PAIR on AOD varies the most in different areas of Zhengzhou. The correlation between air pressure and AOD is more affected by topography. The influence of temperature on AOD is obviously different between urban and rural areas. In planning of Zhengzhou green space guided by air pollution mitigation, the hot areas of aerosol pollution in the north and east of Zhengzhou, and local low-high type and high-high type should be taken as the key control objects. According to the relationship between different locations and AOD, with green space patch cohesion as an important control index, the green space layout should be optimized and the aerosol pollution should be alleviated to the maximum extent.

Key words: landscape pattern; meteorological factors; aerosol optical depth; bivariate autocorrelation

世界卫生组织的一项研究表明, 大气环境中的颗粒物污染程度与人类死亡概率之间具有很强的联系^[1]。《新型冠状病毒肺炎诊疗方案》^[2]文件中曾提及: “经呼吸道飞沫和密切接触传播是主要传播途径, 在相对封闭的环境中长时间暴露于高浓度气溶胶情况下存在经气溶胶传播的可能”。虽然病毒离开活体后存活时间有限, 且气溶胶悬浮于衣物或皮肤外侧后通过口、鼻、眼进入体内的致病几率较小, 但在医院诊室或实验室等高浓度病毒区域仍具有一定的危害性^[3], 此外气溶胶粒子通过削弱大气能见度危害交通安全^[4]。Persad 等^[5]发现气溶胶排放的地理分布变化可以直接或间接影响全球范围内气候变化的幅度和空间分布; 范学花等^[6]和 Li 等^[7]发现, 对流层气溶胶, 尤其是近地面的气溶胶粒子在危害人体健康方面占有很大的比例。此外气溶胶的分布与颗粒物具有显著相关性^[8-11], 而颗粒物已经被证实会对人类健康产生不利影响^[12-13]。因此, 城市区域气溶胶空间分布特征及影响因素的研究, 对人类健康、城市大气环境改善和城市布局优化具有重要意义。

有关气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)与土地利用间关系的研究^[14-16]发现, 植被指数与 AOD 呈显著负相关, 绿地的最大斑块指数与 AOD 呈显著正相关, 斑块连接度与 AOD 呈显著负相关。同时有研究者发现人类活动加剧区域导致较高 AOD 的发生^[15], 而绿地面积的增加使得 AOD 下降至较低值。孙敏等^[17]的研究表明林地所占比例以及边缘密度在不同范围均对 PM_{2.5} 质量浓度产生缓解效应。有关气象要素与大气气溶胶间耦合关系的研究发现, 气溶胶散射系数易受风速和风向等气象要素的影响^[18], 气温、气压、风速和相对湿度均与气溶胶具有显著相关性^[19-20], 且对不同粒径气溶胶具有不同的影响效果^[21-22]。然而, 目前关于气溶胶与影响因素空间依赖关系方面的研究相对较少, 尤其是在考虑气象条件干扰下的城市绿地空间布局对气溶胶空间分布的影响方面, 还有待进一步研究。

Luo 等^[23]和张小曳^[24]对中国范围内的气溶胶进行分析后发现, 中国受人类活动影响的 AOD 高值区主要分布于华北平原、四川盆地、华中、长三角和珠三角地区, 而河南省郑州市也位于其中。郑州市作为河南省省会, 是河南省极具代表性的城市之一, 以郑州市作为研究对象具有较高的参考价值。在当前研究中, 对气溶胶空间特性及其影响因素分析的主要方法为 Pearson 相关分析^[25], 采用简单的线性回归模型分析^[4]

等,这些方法在气溶胶浓度数据及影响要素截面数据的空间自相关性方面的研究还有待进一步加强。基于此,本研究以郑州市为研究区域,对绿地景观指数、气象因素与 AOD 关系采用地理加权回归(geographical weighted regression, GWR)模型进行局地分析,在考虑变量空间自相关性的基础上探究绿地空间分布特征、气象因子对 AOD 空间分布的影响规律,为郑州市域以气溶胶污染控制为导向的绿地景观格局调控提供创新的研究依据,以提升郑州市生态环境质量,优化绿地景观格局。

1 数据来源与方法

1.1 研究区概况

郑州市域位于黄河中下游和伏牛山脉东北翼向黄淮平原过渡的交接地带,地理范围为东经 $112^{\circ}42' - 114^{\circ}14'$,北纬 $34^{\circ}16' - 34^{\circ}58'$ 区域(图 1),总面积 $7\,446 \text{ km}^2$,其中城市建成区面积 830.97 km^2 。区内属北温带大陆性季风气候,四季分明,春季干燥少雨,夏季炎热、降水集中,秋季凉爽短促,冬季漫长而干冷;多年平均气温为 15.6°C ,多年平均降雨量为 542.15 mm 。

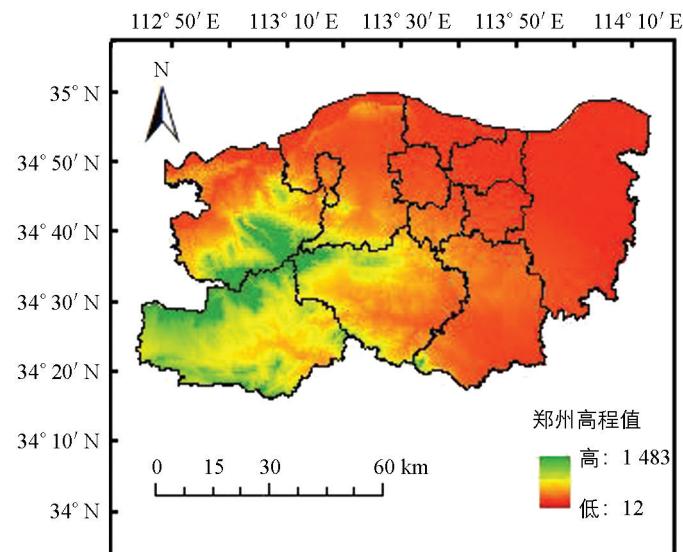
1.2 数据来源

1.2.1 MODIS04_3K 气溶胶遥感数据

MODIS04_3K AOD 数据来源于美国航空航天宇航局(NASA, <https://www.nasa.gov/>)的戈达德航天中心网络数据接口(LAADS),为 MODIS/Terra 传感器的 Collection 6 产品,分辨率为 3 km 。提取 2017 年 1 月 1 日—2017 年 12 月 31 日有效的日监测数据。利用 ENVI_IDL 对该数据集进行投影转换、裁剪、数据合成等操作以获取 AOD 栅格数据。利用 ArcGIS 10.2 通过裁剪、重采样获取郑州市域范围 AOD 栅格数据,采用克里金空间插值法补全缺失值。

1.2.2 景观格局指数

遥感影像数据为 2017 年 5 月分辨率 2 m 的高分二号卫星数据。利用 ENVI 5.0 对影像进行几何校正、拼接、裁剪等预处理,并通过目视解译以提高数据精度,将土地利用类型按照建设用地、耕地、水体、绿地和未利用地分为 5 类^[26-27],提取绿地类景观斑块。以 $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ 为样方单元(图 2),利用 Fragstats-V4.2.1 批处理,获取多类型景观格局指数 13 个(表 1)。为避免出现多重共线性问题,利用 SPSS 24 软件采用 Pearson 相关性检验及向后逐步回归方法对解释变量进行共线性检验,剔除相关度 0.9 及以上变量以及方差膨胀因子(VIF)大于 10 的变量,保留斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)以及斑块凝聚度(COHESION)3 个指数。



底图源于国家测绘地理信息局标准地图服务网站“郑州市地图”,
审图号为豫 S(2019)017 号。

图 1 郑州市域高程图

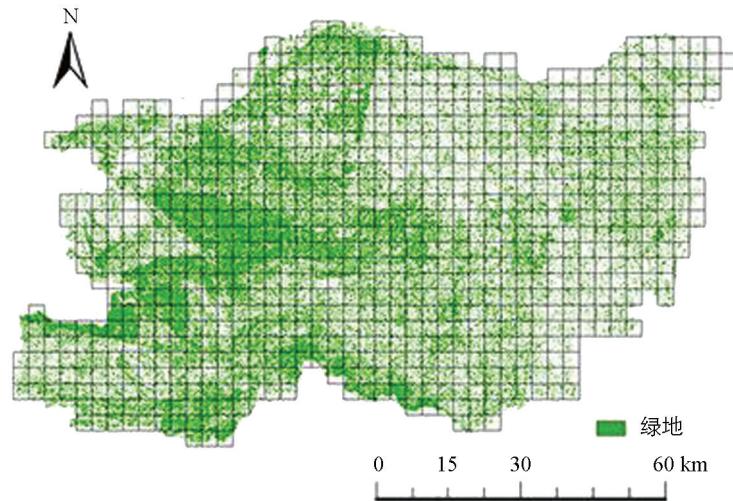


图 2 郑州市绿地景观网格划分($3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$)

表 1 景观格局指数含义及单位

类型	英文缩写	指数名称	英文全称	单位
面积指数	TA	景观面积	total landscape area	hm ²
	AREA_AM	加权平均斑块面积	mean patch size	hm ²
	AREA_MN	平均斑块面积	patch area mean	hm ²
斑块密度及差异	LPI	最大斑块指数	largest patch index	%
	NP	斑块数量	number of patches	$n \geq 1$
	PD	斑块密度	patch density	$n / 100 \text{ hm}^2$
形状指数	LSI	景观形状指数	landscape shape index	1
	SPLIT	景观分离度	splitting index	%
聚散性	AI	景观聚合度	aggregation index	%
	PLADJ	相似邻近比例	proportion of like adjacency	%
	COHESION	斑块凝聚度(整体性)	patch cohesion index	%
	DIVISION	景观分裂指数	landscape division index	%
	MESH	有效粒度面积	effective mesh size	%

1.2.3 环境数据

气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)，采集 2017 年每周五的中国陆面数据同化系统(chinese land date assimilation system, CLDAS)栅格数据，选取地面气压、2 m 比湿、2 m 气温和 10 m 风速等 4 个气象因素，空间分辨率为 $0.0625^\circ \times 0.0625^\circ$ ，时间分辨率为 d。由于 2017 年 1 月数据尚未公开，故选取 2018 年 1 月数据代替。

1.3 方法

1.3.1 空间自相关分析

基于双变量空间自相关探究影响因素与 AOD 的空间关系^[28]，双变量空间自相关 Moran's I 指数的表达式为：

$$I_{kl}^i = z_k^i \sum_{j=1}^n w_{ij} z_l^j \quad (1)$$

式中： $Z_k^i = \frac{x_k^i - \bar{x}_k}{k}$ ， $Z_l^j = \frac{x_l^j - \bar{x}_l}{l}$ ， Z_k^i 表示研究区域 i 处影响因素的标准化值， Z_l^j 表示研究区域 j 处 AOD

的标准化值； w_{ij} 表示空间区域 i 和 j 之间的空间权重矩阵； I_{kl}^i 表示 Z_k^i 与 Z_l^j 的线性相关程度。

1.3.2 地理加权回归模型

地理加权回归模型具有地理变化系数，一般通过局部样本单元数据进行局域回归，获取各研究单元上具有地理变化的拟合系数，探究响应变量和解释变量之间的地理变化关系。地理加权回归等空间计量分析的前提是度量区域间的空间距离^[29]，需要根据数据需求选取合适的空间权重函数，根据张芳毓^[30]的研究，本研究中采用 bi-square 空间函数，确定其权重。计算公式为：

$$y_i = \sum_k \beta_k ((u_i, v_i) x_{k,i} + \epsilon_i) \quad (2)$$

式中： y_i 为在 i 区域的响应变量， $x_{k,i}$ 为在 i 区域的第 k 个解释变量， β_k 为 $x_{k,i}$ 的拟合系数(常数)， (u_i, v_i) 是样本的地理空间位置， ϵ_i 是第 i 个区域的随机误差。同时，通常第一个变量需要通过 $x_{k,i}=1$ 设置为常量，作为模型中的截距。

2 结果与分析

2.1 绿地景观与气象因素指标及 AOD 的空间分布

郑州市绿地景观在空间分布上具有明显的东西差异(图 3a—图 3c)，巩义市、荥阳市、新密市和登封市

的 PD, LPI 以及 COHESION 均高于其他县区, 且 LPI 高值样本单元分布相对分散。气象因素空间分布上(图 3d—图 3g), 气压(PAIR)的空间分布从东北至西南方向逐渐降低, 与郑州市地理高程空间分布一致; 比湿(QAIR)在郑州市西部及中部区域较小, 高值区主要集中在中心城区与中牟城区; 气温(TAIR)高值区主要分布于郑州市北部区域, 山区较低; 风速(WIND)高值区域主要集中于巩义市与新密市, 低值区在东北区域。AOD 值为 0.401~0.803, 高值区主要分布在惠济区东部、金水区、管城区、中牟县、新郑和航空港区, 低值区分布在登封、巩义和新密 3 市间的嵩山区域(图 3h)。

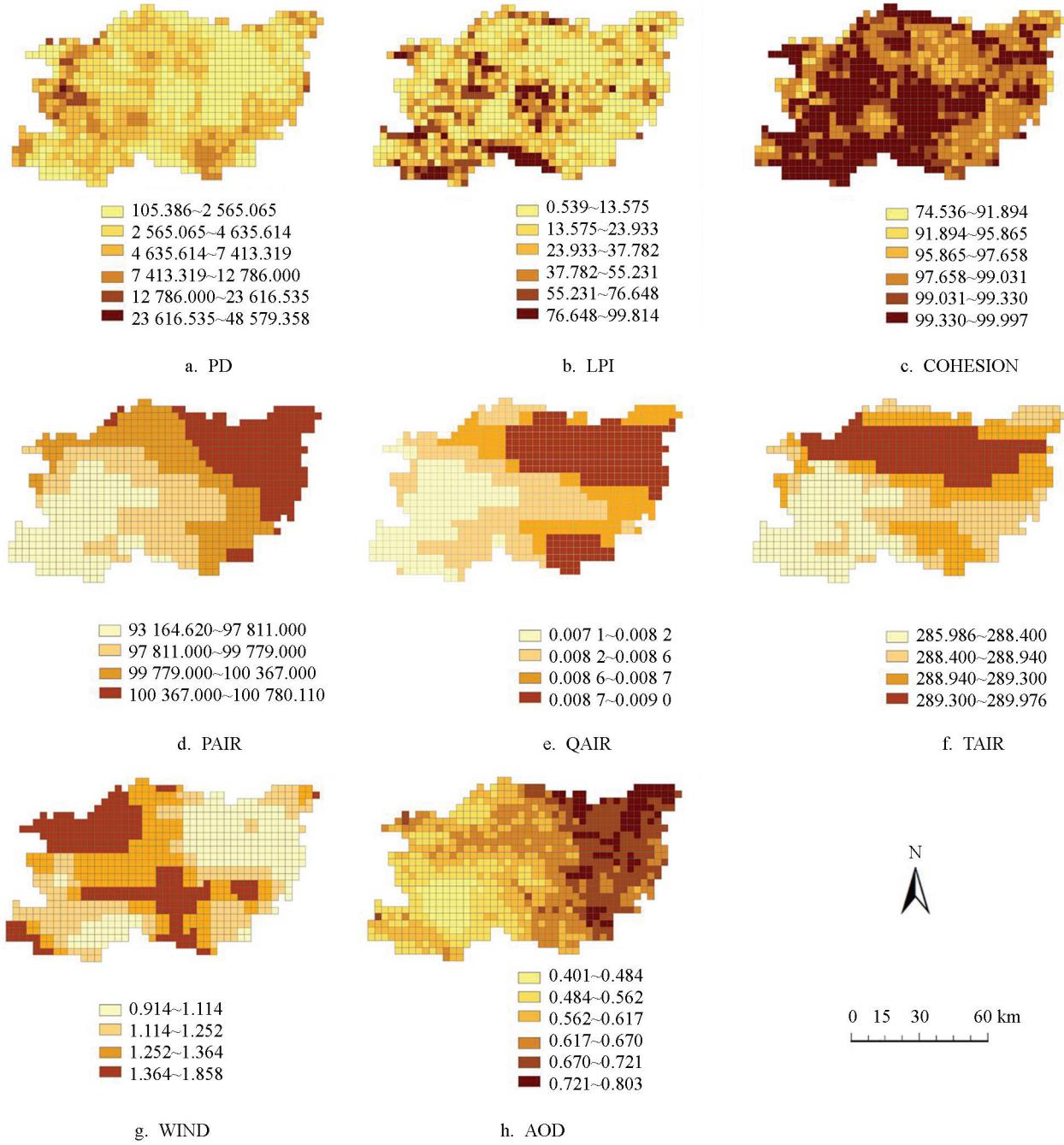


图 3 绿地景观指数、气象因素及 AOD 空间分布图

2.2 绿地景观及气象因素指标与 AOD 的空间相关性分析

影响因素 PD, LPI, COHESION, PAIR, QAIR, TAIR 和 WIND 与 AOD 的双变量全局空间自相关 Moran's *I* 指数($p < 0.05$), 分别为 -0.242, -0.287, -0.213, 0.743, 0.649, 0.561, -0.314(图 4)。PD, LPI, COHESION 和 WIND 与 AOD 之间呈现显著空间负相关, 表明绿地斑块破碎化程度越高, 结合程度

越低, 使得 AOD 增大, 而增大风速使得 AOD 降低。此外 PAIR, QAIR, TAIR 与 AOD 之间具有显著的空间正相关, PAIR, QAIR, TAIR 的增大会导致 AOD 值的增大。

在绿地景观指数影响下, 高-低类型(高 PD 值、高 LPI 值、高 COHESION 值和低 AOD 值)是研究区内绿地空间布局与 AOD 的主要关系类型, 主要分布在郑州西部地区的巩义市、登封市和新密市, 该区绿地面积大且相对集中, 对 AOD 具有减缓的作用; 低-高类型(低 PD 值、低 LPI 值、低 COHESION 值和高 AOD 值)分布范围相对较大, 主要分布在郑州东部及东北部地区的中牟县、新郑市和管城回族区; 低-低和高-高类型数量相对较少(图 4a—图 4c)。

在气象指标影响下, 高-高类型(高 PAIR 值、高 QAIR 值、高 TAIR 值和高 AOD 值)和低-低类型(低 PAIR 值、低 QAIR 值、低 TAIR 值和低 AOD 值)是气象因素与 AOD 的主要关系类型(图 4d—图 4g)。高-高类型主要分布在郑州东部及东北部地区的中牟县、新郑市和管城回族区, 低-低类型主要分布在西部地区的巩义市、登封市、新密市。WIND 与 AOD 低-高类型主要分布在中牟县; 高-低类型主要分布在新密市西部、荥阳市北部、巩义市东部地区; 其中低-低类型分布范围较广, 主要集中在登封市和巩义市山区。

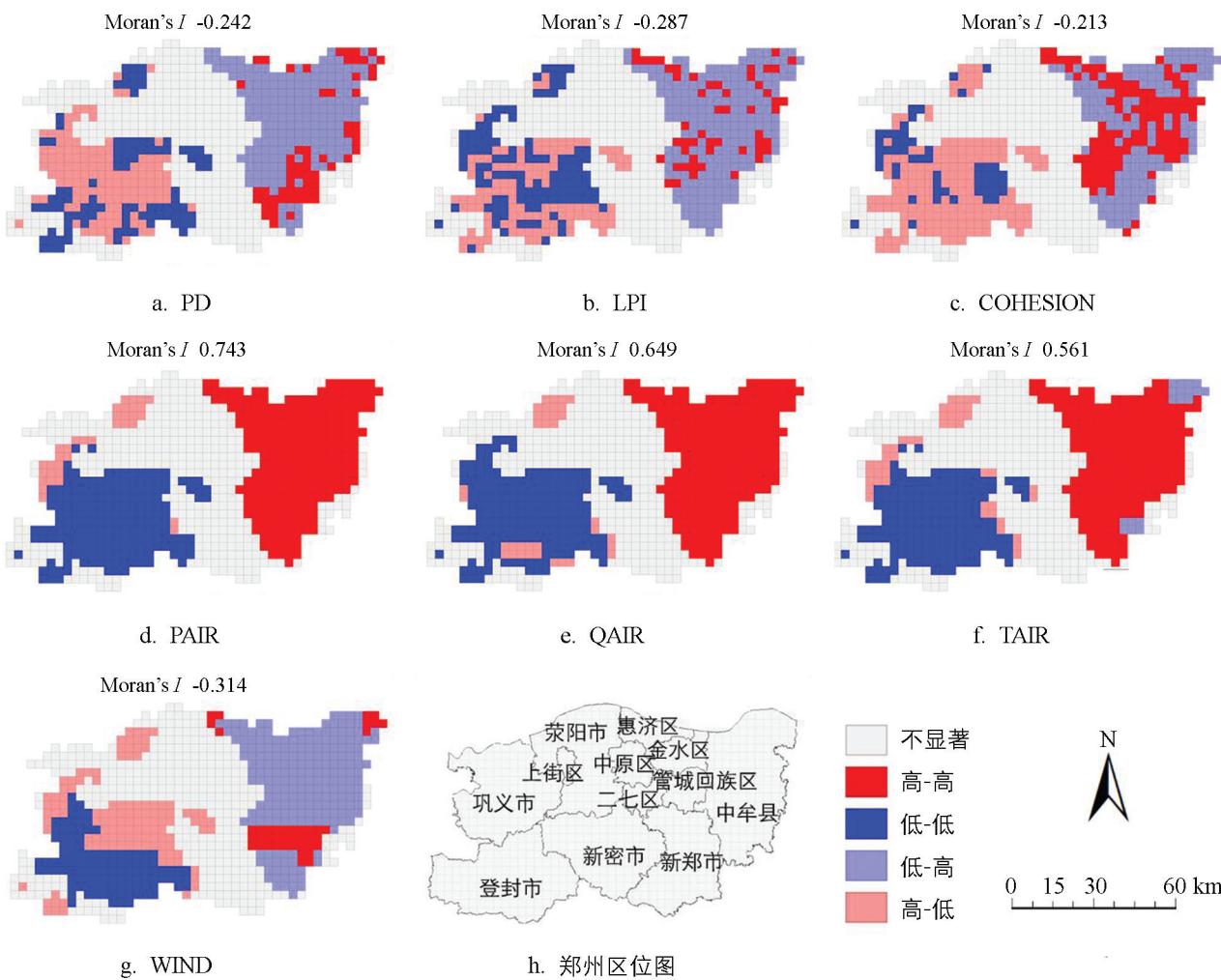


图 4 3 km 格网尺度上绿地景观指数、气象因素与 AOD 空间 LISA 聚类图及其 Moran's I 指数

2.3 绿地景观及气象因素指标对 AOD 空间分异影响研究

利用 ArcGIS 10.2 对 OLS 和 GWR 回归模型效果进行分析, 较低的赤池信息量准则(Akaike information criterion, AICc)值能够更好地拟合观测数据^[31-32](表 2), OLS 回归模型的 AICc 值(1 577.827~1 963.985)均明显大于 GWR 回归模型的 AICc 值(818.870~1 411.558), 其最小二乘回归模型的 R^2 (0.409~0.627)和调整 R^2 (0.404~0.624)均明显低于 GWR 模型结果中的 R^2 (0.808~0.924)

和调整 R^2 ($0.744 \sim 0.886$)。此外模型标准残差呈现出随机分布特征 ($p > 0.05$)，通过了残差检验，说明地理加权回归模型是可信的，更适合气溶胶影响因子分析，且自变量的解释能力更高，回归结果更准确。

表 2 基于 OLS 和 GWR 郑州市 AOD 回归模型对比表

因变量	GWR 模型			OLS 模型		
	AICc	R^2	调整 R^2	AICc	R^2	调整 R^2
AODsp	825.514	0.907	0.874	1 592.898	0.619	0.616
AODsu	1 339.483	0.830	0.769	1 963.985	0.409	0.404
AODau	1 320.101	0.834	0.775	1 868.131	0.473	0.469
AODwi	1 411.558	0.808	0.744	1 812.020	0.506	0.502
AODY	818.870	0.924	0.886	1 577.827	0.627	0.624

表 3 GWR 模型残差空间自相关检验

因变量	Moran's I	p 值
AODsp	0.032	0.064
AODsu	0.020	0.250
AODau	0.018	0.289
AODwi	-0.005	0.827
AODY	0.008	0.629

如表 4 所示，PAIR 的回归系数分布在 $-7.433 \sim 8.031$ 之间，波动性最大，表明地面气压对 AOD 的影响在不同地区差异最大；LPI 的回归系数分布在 $-0.608 \sim 0.851$ 之间，波动性最小，表明最大斑块指数对 AOD 的影响在地区间差异最小。此外 LPI, COHESION, QAIR, WIND 在不同区域的影响以负相关为主，即大部分区域内，因素的增加使得 AOD 降低；PD, PAIR, TAIR 的影响以正相关为主，即大部分区域内，3 个因素的增加使得 AOD 增大。

表 4 气溶胶光学厚度 GWR 模型参数估计的描述性统计量

参数	最小值	第一四分位数	中位数	第三四分位数	最大值	均值	标准差
斑块密度(PD)	-0.865	-0.150	0.003	0.139	0.828	-0.014	0.250
最大斑块指数(LPI)	-0.608	-0.174	-0.036	0.116	0.851	-0.020	0.220
斑块凝聚度(COHESION)	-1.419	-0.240	-0.008	0.234	1.492	-0.011	0.379
地面气压(PAIR)	-7.433	-0.360	0.392	1.282	8.031	0.546	1.919
2 m 比湿(QAIR)	-6.275	-0.956	-0.355	0.429	6.026	-0.342	1.496
2 m 气温(TAIR)	-8.045	-0.703	0.108	0.629	6.197	-0.160	1.490
10 m 风速(WIND)	-2.631	-0.381	-0.131	0.088	1.628	-0.183	0.508

对回归系数进行可视化处理，从绿地结构上看，绿地指数对 AOD 的影响空间差异较大(图 5)。PD 的正值区主要分布在荥阳市中部、二七区、管城回族区及中牟县的北部地区，负值区主要分布在山区及开发程度相对较低的新郑市。LPI 的系数值负值区所占比例较大，且大范围集中于郑州中部地区，边缘及中间小部分区域则为正值区。COHESION 的系数值整体分布与 PD 趋于一致。

从气象影响因素分析，PAIR 和 TAIR 正值区占比比较大，除去登封市与新密市交汇处、新密市中部地区、上街区、新郑市和中牟县的东部边缘地区，PAIR 与 AOD 呈正相关；TAIR 的系数正值区主要分布于中牟县、新密市和荥阳市；负值区则主要分布于巩义市、登封市及郑州市主城区。QAIR 和 WIND 的系数

值整体呈现低值分布, 较少地区为正值区。此外 QAIR 的系数正值区集中分布在登封市中部地区、新密市中部地区、上街区、巩义市北部边缘地区及管城区。WIND 的系数高值区则主要分布于郑州中部地区、巩义市东部边缘地区及中牟县北部边缘地区。

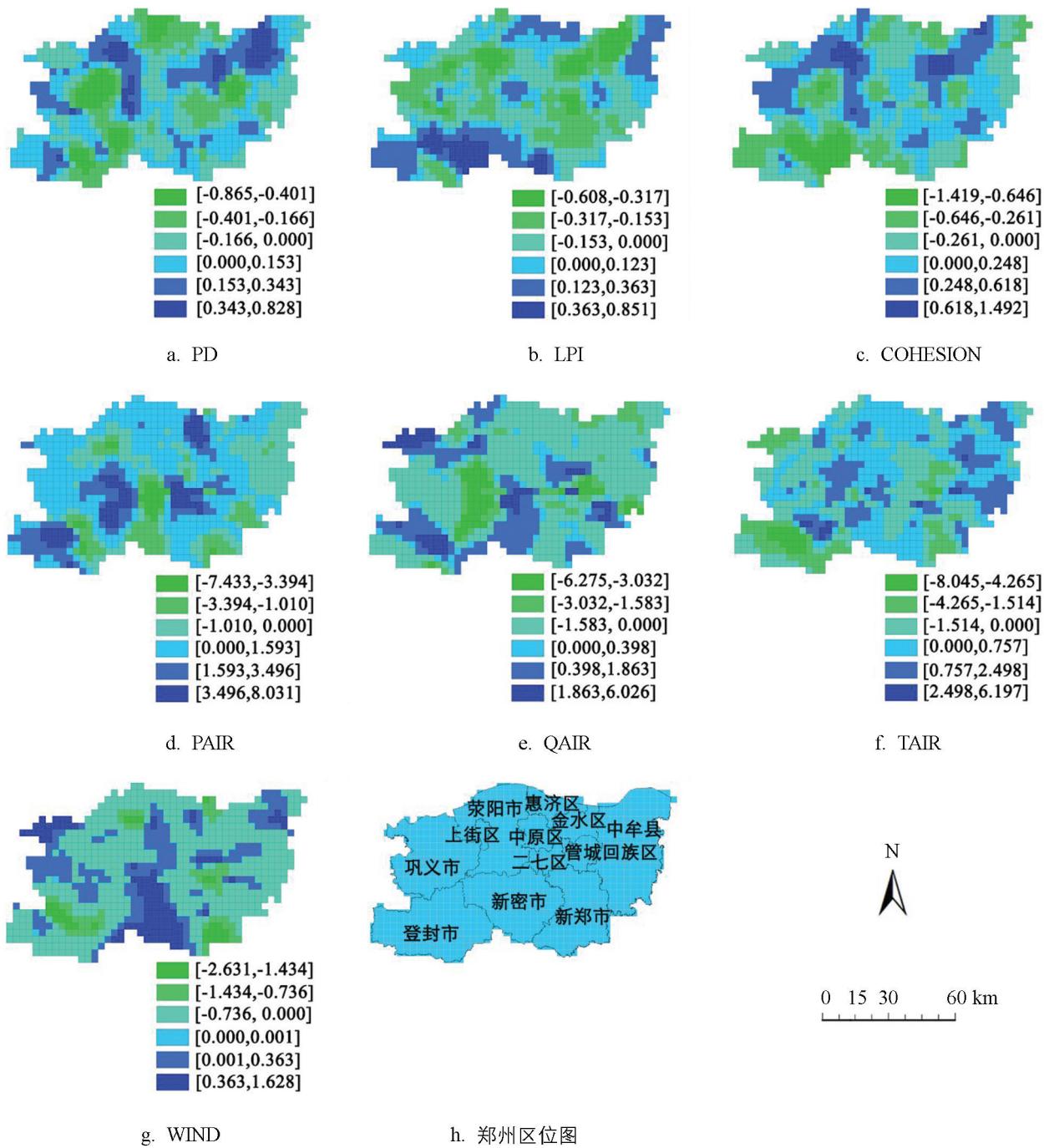


图 5 3 km 格网尺度绿地景观指数、气象因素与 AOD 回归系数空间分布图

3 结论与讨论

3.1 结论

基于郑州市 GF-2 遥感影像、气象数据、AOD 数据集, 利用双变量空间自相关和 GWR 模型, 分析并揭示绿地景观指数、气象因素与 AOD 的空间分布特征及其相互作用关系。

1) 郑州市 AOD 值的空间分布差异有统计学意义, 呈现南低北高、西低东高的空间分布特征。

2) 绿地 PD 及 COHESION 与 AOD 之间呈现空间负相关; 此外 WIND 与 AOD 之间呈负相关, TAIR, PAIR, QAIR 与 AOD 之间呈正相关。

3) 绿地景观及气象要素指标与 AOD 存在空间聚类关系, 低-低类型、高-低类型主要发生在人类活动干预相对较少的郑州西部山地丘陵区; 低-高类型、高-高类型主要发生在郑州的东部地区。

4) 影响 AOD 的因素空间差异较大, PAIR 的回归系数分布在 $-7.433 \sim 8.031$ 之间, 波动性最大; LPI 的回归系数分布在 $-0.608 \sim 0.851$ 之间, 波动性最小。绿地及气象指标的回归系数的高值区大部分分布于新密市、新郑市及登封市内, 且郑州市北侧区域相关系数较南侧略差。PAIR 与 AOD 相关性更多受地形影响, TAIR 对 AOD 的影响存在明显的城乡差异。

3.2 讨论

1) 影响因素与 AOD 值的 Moran's *I* 指数分析。PD, LPI, COHESION 和 WIND 与 AOD 之间呈现显著的空间负相关, 表明绿地斑块破碎化程度越高, 结合程度越低将导致空气中 AOD 增大^[33]; 增大 WIND, 加快气溶胶扩散, 可降低 AOD 值^[34]。此外 PAIR, QAIR, TAIR 与 AOD 之间呈正相关, 研究表明城市化程度增强将会导致地区热岛效应的增强^[35], 同时空气中湿度增大, 会黏附大量颗粒物, 则导致 AOD 值的增大^[36]。低-低类型、高-低类型地区表明气象因素水平调节和绿地景观结构的合理性显著, 即绿地 PD 大, COHESION 高, TAIR 和 QAIR 相对较低对 AOD 值有抑制或降低的作用, 而低-高类型、高-高类型地区需要进行适度调节及合理规划。

2) 绿地景观指数对 AOD 值影响的空间异质性分析。山区及开发程度相对较低的新郑市 PD 和 COHESION 以负相关为主, 正相关区域主要在城市区域; 郑州中部大范围区域, LPI 与 AOD 大致呈负相关。这可能是郑州市的绿地分布基于地理高程、人居活动等原因表现出一定地域差异。在高海拔区, 人类活动干预少, 植被区发育好; 退耕还林等政策使得绿地斑块增加, 绿地 COHESION 大, 破碎化程度低, 降低了气溶胶光学厚度^[37-38]。城区由于用地基本保持饱和状态, 内部绿地分布破碎性强, 使得斑块数量增加, 公园、街旁等类型绿地系统性较差, 无法形成气溶胶沉降网络, 导致 AOD 上升。中部地区城市化程度、产业活动强度较高, 当绿地 PD 大, 斑块面积相对较高时, AOD 会相对降低^[39]。

3) 气象因素对 AOD 值影响的空间异质性分析^[19-40]。PAIR 与 AOD 具有强相关性的区域基本分布在丘陵、山地区域。TAIR 与 AOD 的相关性强度在整体上北侧稍弱于南侧。TAIR 高值区分散于郑州市域, 负相关系数高值区则集中于登封市东南侧的乡镇辖区。WIND 的相关系数高值区主要分布在人类活动强度较大区域。其原因是: 市域温度较高, 而 AOD 值会受到空气中温度升高的影响, 加剧气溶胶的运动^[41]; 山地丘陵区域交通、人口分布等不突出, AOD 受其他因素干扰的程度较小, 气压的影响则更明显。有研究发现风速通过控制气溶胶扩散途径与速度, 对全局 AOD 分布产生影响, 持续的弱风和静风可能导致局地排放的气溶胶污染粒子发生集聚现象^[42-43]。此外 AOD 值的空间分布呈现南低北高, 可能由于北侧整体城市建设及发展水平高于南部地区, 造成气象因子在郑州市北侧的影响力受干扰后下降, 这与段彦博等^[44]的研究结果一致。

3.3 建议

以大气污染缓解为导向的郑州绿地规划中, 应以郑州市北部、东部气溶胶污染热点区域, 局地低-高类型, 局地高-高类型区为重点治理对象, 根据不同区位与气溶胶厚度的关系, 以绿地斑块凝聚度为重点调控指数, 优化绿地布局并最大程度缓解气溶胶污染情况。此外注重气溶胶、绿地格局的潜在空间相关性的同时, 可以加入气象数据排除干扰, 在考虑空间数据非平稳性的基础上能够更加精准地估计局地参数, 对郑州的绿地布局优化具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] ANDERSON H R, ATKINSON R W, PEACOCK J L, et al. Meta-Analysis of Time Series Studies and Panel Studies of Particulate Matter (PM) and Ozone (O_3) [R]. London: Report of a WHO Task Group, 2004.
- [2] 王春燕, 王希营, 金红. 新型冠状病毒肺炎诊疗方案(试行第七版) [J]. 兰州大学学报(医学版), 2020, 46(2): 1-7.
- [3] 原静民, 任徽, 孙妍, 等. 2019新型冠状病毒传播途径分析与思考 [J]. 西安交通大学学报(医学版), 2020, 41(4): 497-501.
- [4] 杨茜, 高阳华, 李振亮. 重庆市霾天气下大气能见度与颗粒污染物的关系 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(9): 134-140.
- [5] PERSAD G G, CALDEIRA K. Divergent Global-Scale Temperature Effects from Identical Aerosols Emitted in Different Regions [J]. Nature Communications, 2018, 9: 3289-1-3289-9.
- [6] 范学花, 陈洪滨, 夏祥鳌. 中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展 [J]. 大气科学, 2013, 37(2): 477-498.
- [7] LI X, FENG Y J. Estimating Spatio-Temporal Variations of $PM_{2.5}$ over Hong Kong Using an Improved GTWR Model and SARA AOD Retrievals [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2018, 84(12): 761-769.
- [8] ZHANG K N, DE LEEUW G, YANG Z Q, et al. Estimating Spatio-Temporal Variations of $PM_{2.5}$ Concentrations Using VIIRS-Derived AOD in the Guanzhong Basin, China [J]. Remote Sensing, 2019, 11(22): 2679-1-2679-22.
- [9] 雷雅凯, 段彦博, 马格, 等. 城市绿地景观格局对 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 分布的影响及尺度效应 [J]. 中国园林, 2018, 34(7): 98-103.
- [10] PANI S K, CHANTARA S, KHAMKAEW C, et al. Biomass Burning in the Northern Peninsular Southeast Asia: Aerosol Chemical Profile and Potential Exposure [J]. Atmospheric Research, 2019, 224: 180-195.
- [11] 刘灿, 高阳华, 易静, 等. 基于 MODIS 数据的西南地区气溶胶光学厚度时空变化特征分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2014, 36(5): 182-189.
- [12] 高鄰, 卢杰, 李江荣, 等. 林芝市主城区典型生态用地空气质量评价 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(1): 130-137.
- [13] 赵福梅, 李绍才, 孙海龙, 等. 堆场扬尘污染控制措施的绩效评估研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(7): 154-161.
- [14] 韦晶, 孙林, 刘双双, 等. 大气颗粒物污染对土地覆盖变化的响应 [J]. 生态学报, 2015, 35(16): 5495-5506.
- [15] QIE K, TIAN W S, WANG W K, et al. Regional Trends of Lightning Activity in the Tropics and Subtropics [J]. Atmospheric Research, 2020, 242: 104960-1-104960-14.
- [16] XU J H, JIANG H, ZHANG X Y, et al. Study on Spatial-Temporal Variation of Aerosol Optical Depth over the Yangtze Delta and the Impact of Land-Use/Cover [J]. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(5): 1741-1755.
- [17] 孙敏, 陈健, 林鑫涛, 等. 城市景观格局对 $PM_{2.5}$ 污染的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2018, 35(1): 135-144.
- [18] 徐丽娜, 李兴华, 冯震, 等. 呼和浩特市大气污染特征及气象影响因子研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(6): 150-157.
- [19] 艾泽, 陈权亮. 四川地区气溶胶光学厚度时空分布及其与气象因子的相关性分析 [J]. 四川环境, 2019, 38(4): 79-86.
- [20] ENGSTRÖM A, EKMAN A M L. Impact of Meteorological Factors on the Correlation between Aerosol Optical Depth and Cloud Fraction [J]. Geophysical Research Letters, 2010, 37(18): L18814-1-L18814-4.
- [21] 杜翔, 赵普生, 董群, 等. 气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征 [J]. 环境科学, 2019, 40(9): 3849-3855.
- [22] 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 等. 西安市 $PM_{2.5}$ 中碳质气溶胶污染特征 [J]. 环境科学, 2019, 40(4): 1529-1536.
- [23] LUO Y X, ZHENG X B, ZHAO T L, et al. A Climatology of Aerosol Optical Depth over China from Recent 10 Years of MODIS Remote Sensing Data [J]. International Journal of Climatology, 2014, 34(3): 863-870.
- [24] 张小曳. 中国不同区域大气气溶胶化学成分浓度、组成与来源特征 [J]. 气象学报, 2014, 72(6): 1108-1117.
- [25] 吴宝军. 中原城市群对大气污染时空影响研究 [D]. 郑州: 河南农业大学, 2017.

- [26] 王芳, 杨武年, 王建, 等. GF-2 影像城市地物分类方法探讨 [J]. 测绘通报, 2019(7): 12-16.
- [27] 陈铸, 傅伟聪, 黄钰麟, 等. 福州市土地利用景观格局变化及驱动力研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2020, 45(1): 99-107.
- [28] ANSELIN L, REY S. Modern Spatial Econometrics in Practice: a Guide to GeoDa, GeoDaSpace and PySAL [M]. Chicago: GeoDa Press LLC, 2014.
- [29] 陈强. 高级计量经济学及 Stata 应用 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [30] 张芳毓. 基于 GWR 模型的全国肺结核病影响因素分析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [31] FOTHERINGHAM A S, Brunsdon C, CHARLTON M E. Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varing Relationships [M]. San Francisco: John Wiley and Sons Ltd, 2002.
- [32] 吕帝江. 基于多源地理大数据的地铁客流影响因素研究 [D]. 广州: 广州大学, 2019.
- [33] 娄彩荣, 刘红玉, 李玉玲, 等. 大气颗粒物($PM_{2.5}$ 、 PM_{10})对地表景观结构的响应研究进展 [J]. 生态学报, 2016, 36(21): 6719-6729.
- [34] YAN L B, LIU X D, YANG P, et al. Study of the Impact of Summer Monsoon Circulation on Spatial Distribution of Aerosols in East Asia Based on Numerical Simulations [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2011, 50(11): 2270-2282.
- [35] RENDÓN A M, SALAZAR J F, PALACIO C A, et al. Effects of Urbanization on the Temperature Inversion Breakup in a Mountain Valley with Implications for Air Quality [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(4): 840-858.
- [36] 陈挚秋, 王建力, 杨平恒. 2014 年重庆市大气污染物浓度变化特征及其与气象条件的关系 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(10): 147-153.
- [37] 岳峰, 戴菲, 傅凡, 等. 基于时间序列遥感的武汉绿地景观格局与气溶胶光学厚度的相关性 [J]. 中国城市林业, 2020, 18(1): 13-19.
- [38] 赵小锋, 刘嘉慧, 赵颜创, 等. 城市气溶胶光学厚度空间格局特征多指标综合分析 [J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(3): 360-367.
- [39] 邹滨, 许珊, 张静. 土地利用视角空气污染空间分异的地理分析 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(2): 216-222.
- [40] 周云云, 张德英, 施润和. 多种气象要素及其变化对 AOD 与 $PM_{2.5}$ 关联模型的影响研究 [J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 204-211.
- [41] 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 等. 北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 [J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1067-1077.
- [42] 曾惠雨, 康平, 王式功, 等. 西南涡对气溶胶光学厚度变化特征的影响研究 [J]. 环境科学学报, 2020, 40(2): 418-428.
- [43] 黄少妮, 袁媛, 井宇, 等. 陕西关中地区冬季一次重霾污染过程及气象条件影响分析 [J]. 干旱气象, 2016, 34(6): 1037-1046.
- [44] 段彦博, 田国行, 吴宝军, 等. 中原城市群城市化程度对气溶胶时空分异的影响 [J]. 生态环境学报, 2017, 26(11): 1924-1934.