

# 基于地理探测器的合肥市 PM<sub>2.5</sub> 时空分布与 土地利用关系研究

冯 艳<sup>1</sup>, 瞿华莹<sup>1\*</sup>, 李佳龙<sup>2</sup>

(1. 云南国土资源职业学院, 国土空间信息学院, 昆明 652501;

2. 昆明长水国际机场有限责任公司, 昆明 650000)

**摘 要:**针对合肥市大气污染问题,本研究搜集了合肥市 2000–2022 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度遥感数据,运用时间序列分析法、LISA 聚类图分析了 22 年来合肥市 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空变化特征,然后基于地理探测器探究了 PM<sub>2.5</sub> 与土地利用类型之间的关系,其结果为:(1) 2000–2022 年合肥市 PM<sub>2.5</sub> 浓度时间序列呈现典型倒“U”型特征,在 2013 年达到峰值,从 2013 年到 2022 年变现为逐年下降;(2) 合肥市 PM<sub>2.5</sub> 浓度以高–高、低–低聚类为主,不同时间其聚类模式和空间分布存在差异;(3) 通过地理探测器发现林地占比对 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化单因子作用最强,二者负相关,裸地占比解释力最弱,林地占比和水体占比对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的交互作用最强。

**关键词:**PM<sub>2.5</sub>; 土地利用; 地理探测器; 时间序列分析法; LISA 聚类图

**中图分类号:**X513      **文献标志码:**A      **文章编号:**1672–2736(2025)08–0083–8

## 0 引言

从 20 世纪 80 年代开始,我国城市化进程不断提高,工业生产规模迅速扩张,引起了一系列的环境问题,空气污染尤为典型<sup>[1,2]</sup>。大气中的细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 是引起空气污染的首要原因<sup>[3]</sup>,PM<sub>2.5</sub> 是指空气中直径小于等于 2.5 微米的细颗粒物<sup>[4]</sup>,它能够长时间停留在空气中,空气中的 PM<sub>2.5</sub> 浓度越大表明大气污染越严重<sup>[5]</sup>。高浓度的 PM<sub>2.5</sub> 会影响人类的身体健康,增加呼吸系统和心血管疾病的患病风险,较严重者可能会导致癌症或过早死亡<sup>[6]</sup>。因此分析 PM<sub>2.5</sub> 的时空分布规律,探寻导致 PM<sub>2.5</sub> 浓度增加的原因已刻不容缓。

目前,国内外很多学者通过对 PM<sub>2.5</sub> 的监测、研究、分析发现,PM<sub>2.5</sub> 浓度与土地利用、人类活动、气候、海拔、地形地貌等因素密切相

关<sup>[7]</sup>。由于气候、海拔、地形地貌因素不能被人改变,并且有研究表明土地利用在局部尺度对 PM<sub>2.5</sub> 的浓度有一定的缓解<sup>[8]</sup>,因此本研究选择探析土地利用与 PM<sub>2.5</sub> 浓度的关系。近年来,已有很多学者使用不同方法研究了 PM<sub>2.5</sub> 浓度与土地利用之间的关系。杨伟<sup>[9]</sup>等运用地理加权回归分析法发现华北地区 PM<sub>2.5</sub> 与土地利用/覆被变化有明显响应,其中建设用地对 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响最大。李巍<sup>[10]</sup>等运用相关性分析了太原市 PM<sub>2.5</sub> 与土地利用的关系,发现林地面积的增加会导致 PM<sub>2.5</sub> 浓度的下降。本研究在前人研究的基础之上,选用地理探测器探测 PM<sub>2.5</sub> 浓度与土地利用类型之间的关系。

合肥市作为安徽省的省会城市,是我国城市扩张的核心区域,具有人口集聚、经济发达、人为活动剧烈等特征,城市扩张对其 PM<sub>2.5</sub> 暴露风险影响效果显著,是研究城市扩张与大气污染暴

**基金项目:**云南国土资源职业学院科技创新团队“国土乡村振兴服务”(2022KJTD01);云南省教育厅科学研究基金项目“滇金丝猴生境因子评价与潜在栖息地预测研究”(2022J1368);云南省教育厅科学研究基金项目“绿春山区乡村居民点空间布局优化研究”(2023J1605)。

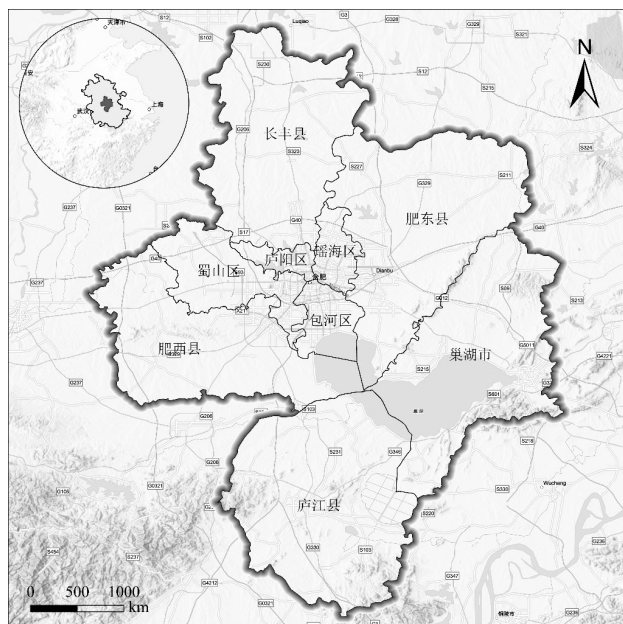


图 1 研究区概况图

(审图号:GS(2024)0650 号)

露风险耦合关系的重点区域,因此本研究选择合肥市作为研究对象,基于地理信息空间技术,研究了合肥市 2000–2022 年 22 年的 PM<sub>2.5</sub> 浓度的时空变化特征,运用地理探测器探测了合肥市土地利用类型和 PM<sub>2.5</sub> 浓度之间的关系。

## 1 研究区概况

合肥市简称“庐”或“合”<sup>[11]</sup>,是安徽省的省会城市,是我国华东地区的特大城市,下辖瑶海区、庐阳区、蜀山区、包河区、长丰县、肥东县、肥西县、庐江县、巢湖市<sup>[12]</sup>,总土地面积为 11445km<sup>2</sup>。截止 2024 年末,总人口 812.7 万人<sup>[13]</sup>。合肥市位于安徽省中部,东经 E117°13′18.25″,北纬 N31°49′21.30″,如图 1 所示,合肥市属亚热带湿润季风气候,四季分明,气候温和,年平均气温 15.7℃,年平均降雨量为 1000mm。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源与处理

PM<sub>2.5</sub> 浓度数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<https://www.geodata.cn>) 中国 1km 高分辨率高质量逐年 PM<sub>2.5</sub> 数据集(CHAP),时间跨度为 2000–2022 年,数据格式为 NC。首

先基于 ArcPy,将 2000–2022 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度数据由 NC 转为 TIFF 格式,然后对其进行栅格投影、掩膜提取等处理,最后运用 ArcGIS 模型构建器,迭代栅格提取合肥市 2000–2022 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度数值。

土地利用数据来源于 Esri Land Cover (<https://www.esrichina.hk/en-hk/home>),分辨率为 10m,时间为 2022 年,该数据集将土地覆盖类型分为水体、林地、草地、淹没植被、耕地、灌木、建设用地、裸地、雪/冰、云十类。本研究运用 ArcGIS Pro 和 Fragstats4.2 批量计算合肥市 2022 年 1000 米渔网内 10 米土地利用数据。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 时间序列分析法

时间序列分析法是以数理统计学和随机过程理论为基础,将某地区 PM<sub>2.5</sub> 的浓度数值按照时间序列进行排列,分析该地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度数值的时间变化特征<sup>[14,15]</sup>。本研究基于 Excel 对合肥市 2000–2022 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度值按照时间序列排序,分析了 22 年来合肥市 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化特征。

#### 2.2.2 LISA 聚类图

LISA 聚类图是 ArcGIS 提供的一种局部空

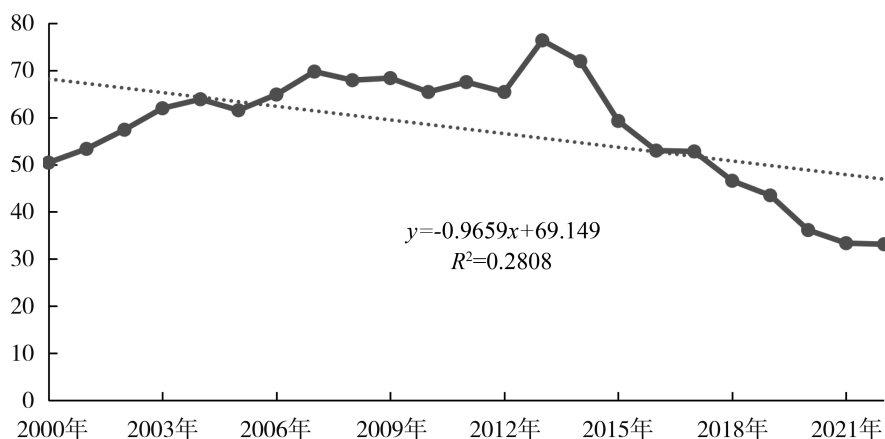


图2 2000—2022年合肥市PM<sub>2.5</sub>浓度年均变化趋势

间自相关分析功能,通过分析研究区域内各空间对象与其领域对象间的相关性和差异程度,发现局部区域的空间异质性<sup>[16]</sup>。本研究通过LISA聚类图反映2000—2022年合肥市PM<sub>2.5</sub>浓度值在不同时期的聚类模式和分布特征,输出结果包括:不显著、高-高聚集、高-低聚集、低-高聚集、低-低聚集5种模式。

### 2.2.3 地理探测器

地理探测器是探测某事物的空间分异性,发现该事物背后驱动力的一种统计学方法。包括分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测、生态探测四个探测器<sup>[17]</sup>。其中,分异及因子探测器探测某因子对某事物空间分异性的影响程度;交互作用探测器揭示各影响因子间的交互作用是增强或减弱;风险区探测器探测出最有利于某事物发展的各因子状态值;生态探测器探测出各因子对某事物的影响是否显著<sup>[18]</sup>。本研究基于地理探测器探测不同土地利用类型对PM<sub>2.5</sub>浓度的影响,揭示PM<sub>2.5</sub>浓度值与土地利用的关系。

## 3 结果与分析

### 3.1 PM<sub>2.5</sub>时空分布特征

#### 3.1.1 PM<sub>2.5</sub>时间序列特征

2000—2022年合肥市PM<sub>2.5</sub>浓度时间序列呈现典型倒“U”型特征,如图2所示,2000—2013年合肥市PM<sub>2.5</sub>浓度值呈波动上升的状态,从

2000年的50.4479μg/m<sup>3</sup>上升到2013年的76.3543μg/m<sup>3</sup>,在2013年达到峰值,13年间合肥市PM<sub>2.5</sub>浓度值共上涨了51.35%。从2013年开始合肥市PM<sub>2.5</sub>浓度值开始逐年下降,到2022年下降到最低值33.0923μg/m<sup>3</sup>,相较2000年合肥市PM<sub>2.5</sub>浓度值下降了34.04%,从总体来看,2000—2022年22年间,合肥市PM<sub>2.5</sub>浓度值呈下降趋势,其下降速率为-0.9653/a。

#### 3.1.2 PM<sub>2.5</sub>空间分布特征

在ArcGIS软件中对合肥市2000—2022年PM<sub>2.5</sub>浓度值进行空间自相关分析,具体操作为通过空间统计工具-聚类分析制图-聚类和异常值分析对合肥市2000—2022年PM<sub>2.5</sub>浓度值绘制LISA聚类图,如图3所示,通过LISA聚类图反映合肥市PM<sub>2.5</sub>浓度空间分布特征。LISA聚类图显示,研究区PM<sub>2.5</sub>浓度以高-高、低-低聚类为主,但在不同时期的聚类模式和分布并不相同。在研究初期(2000—2009年),高-高聚集主要集中在城区及北部地区;低-低聚集主要集中在东部和南部。到了研究中期(2010—2016年),高-高聚集主要集中在城区,北部地区高值聚集区暂时消失;低-低聚集位置保持不变,主要集中在东部和南部。到了研究后期(2017—2022年),高-高聚集主要由城区转移至北部;低-低聚集在除北部的东、南、西部区域均有存在。研究表明,PM<sub>2.5</sub>浓度空间变异性较大,这可能是受到人为污染以及跨区域污染传输的影响。

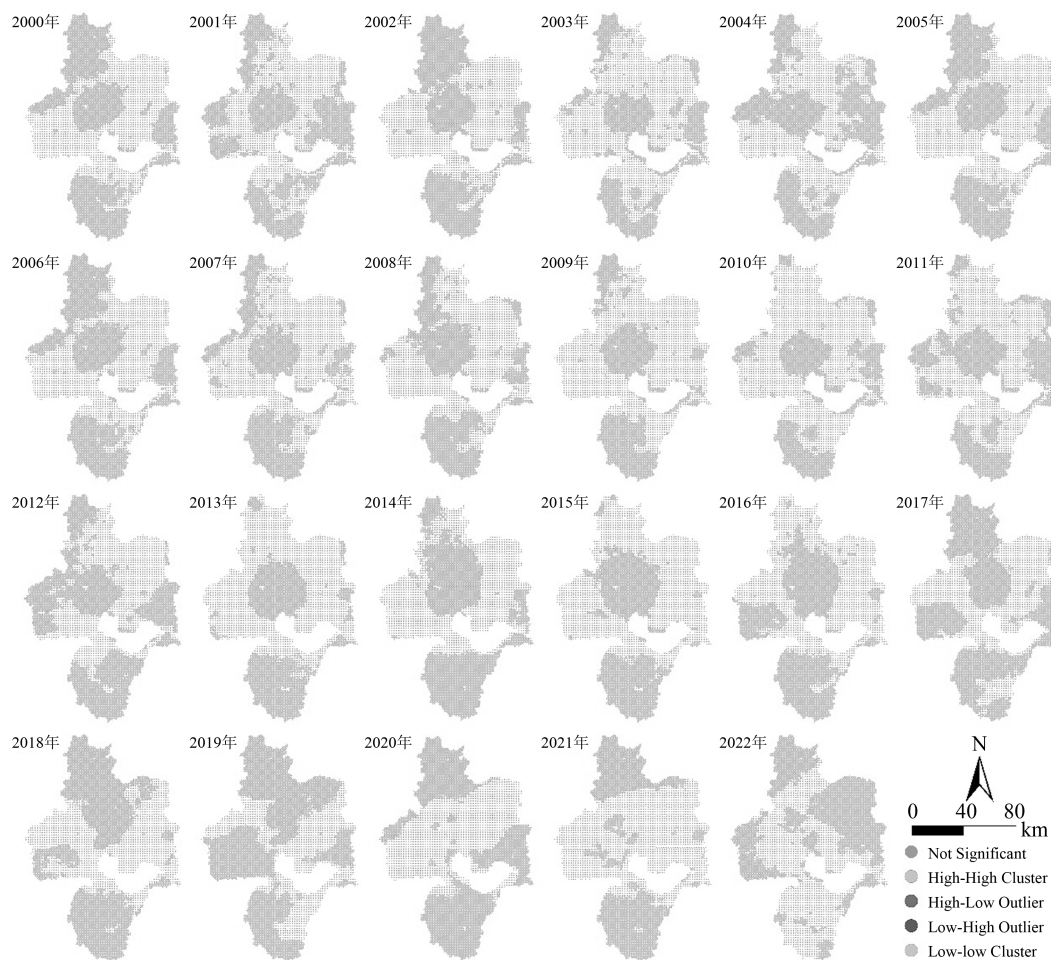


图3 2000—2022年合肥市PM<sub>2.5</sub>浓度LISA聚类图

### 3.2 PM<sub>2.5</sub>与土地利用类型关系分析

#### 3.2.1 土地利用现状

运用 ArcGIS 对合肥市 2022 年土地利用类型分布情况和数量进行统计,其结果如图 4 所示,通过分析合肥市土地利用类型有耕地、林地、草地、水体、建设用地、裸地六种类型,耕地面积为 6654.4082km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 62.29%,耕地广泛分布在研究区外围;林地面积为 684.6694km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 6.41%,林地分布在研究区的东、南、西部分区域;草地面积为 137.758km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 1.29%,草地分布在研究区的中部;水域面积为 737.9057km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 6.91%,水域分布在巢湖;建设用地面积为 2445.6257km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 22.89%,建设用地分布在研究区的中部;裸地面积为 22.6151km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 0.21%,

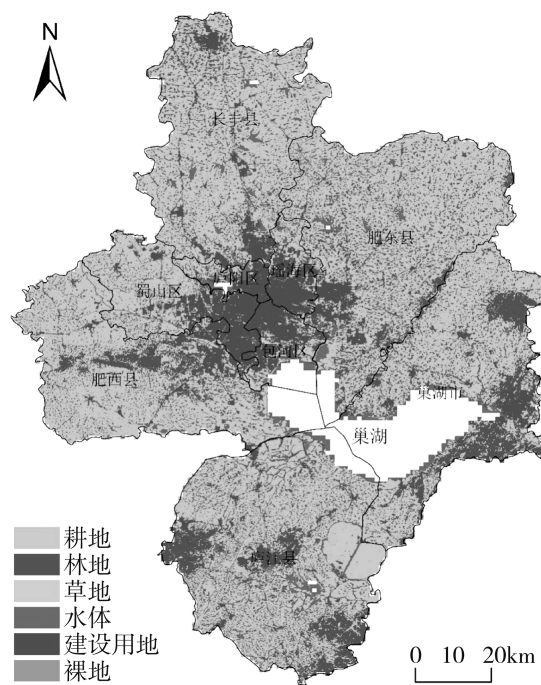


图4 2022年合肥市土地利用类型分布情况

表 1 2022 年土地利用类型与 PM2.5 浓度值的解释程度

项目	水体占比 ( $X_1$ )	林地占比 ( $X_2$ )	耕地占比 ( $X_3$ )	建设用地占比 ( $X_4$ )	裸地占比 ( $X_5$ )	草地占比 ( $X_6$ )
q 值	0.009038	0.086802	0.018254	0.011728	0.000831	0.017562

裸地分布在研究区的西部和建设用地外围。

### 3.2.2 PM2.5 与土地利用类型关系地理探测

为探究不同土地利用类型对 PM2.5 浓度值的影响,本研究将 PM2.5 浓度值作为因变量,将水体占比( $X_1$ )、林地占比( $X_2$ )、耕地占比( $X_3$ )、建设用地占比( $X_4$ )、裸地占比( $X_5$ )、草地占比( $X_6$ )作为自变量,运用地理探测器探测 PM2.5 浓度值与不同土地利用类型之间的关系。

(1)分异及因子探测。如表 1 所示,林地占比、耕地占比、草地占比三个因子对 PM2.5 浓度的解释力最强,说明林地占比、耕地占比和建设用地占比是影响 PM2.5 浓度值的主导因子,林地、耕地、草地面积的变化对 PM2.5 浓度影响至关重要,其中林地占比对 PM2.5 浓度变化单因子作用最强。裸地占比对 PM2.5 浓度值解释力最弱,说明裸地占比对 PM2.5 浓度值变化的单

因子作用最小。

(2)交互作用探测。利用地理探测器中的交互作用探测器,探测六个因子对 PM2.5 浓度交互作用的影响程度,交互作用的解释力越大表明两个因子对 PM2.5 交互作用影响力越强,其中双因子增强表示两个因子的交互作用结果大于两个因子中单因子解释力的最大值,非线性增强表示两个因子的交互作用结果大于两个因子单因子解释力之和<sup>[17]</sup>。如图 5 所示,交互探测的结果显示,除林地占比和耕地占比、建设用地占比、草地占比,耕地占比和草地占比,建设用地占比和裸地占比交互作用为非线性增强以外,其余因子交互作用均为双因子增强,其中林地占比和水体占比对 PM2.5 浓度的交互作用最强,q 值为 0.1101。

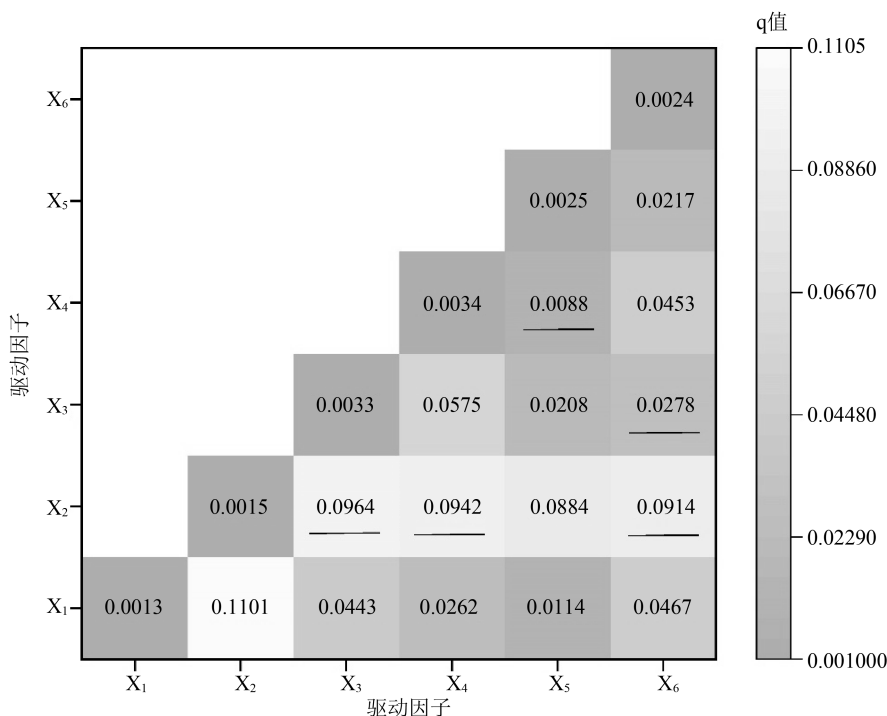


图 5 2022 年合肥市土地利用类型与 PM2.5 浓度关系交互探测器结果

注:带下划线表示双因子间呈非线性增强,否则为双因子增强。

表 2 风险区探测结果

因子	相关性	最佳比例	PM2.5 浓度最低值( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
水体占比( $X_1$ )		3.66%–9.05%	32.9626
林地占比( $X_2$ )	-	81.3%–100%	31.8104
耕地占比( $X_3$ )	+	$\leq 2.49\%$	32.7415
建设用地占比( $X_4$ )	+	$\leq 3.66\%$	33.0142
裸地占比( $X_5$ )		5.97%–12.3%	33.0583
草地占比( $X_6$ )	-	9.08%–76.6%	32.7119

(3) 风险区探测。为确定 PM2.5 浓度最低时水体占比、林地占比、耕地占比、建设用地占比、裸地占比、草地占比的最佳值,运用地理探测器的风险区探测器进行探测,其结果如表 2 所示,其中林地和草地与 PM2.5 浓度值负相关,林地占比和草地占比越大 PM2.5 浓度越低,耕地和建设用地与 PM2.5 浓度值正相关,耕地和建设用地占比越小,PM2.5 浓度值越低,其他用地类型对 PM2.5 浓度值影响不大。

(4) 生态探测。生态探测器能够探测双因子对 PM2.5 的作用是否存在显著性,其结果表明各因子对 PM2.5 的双因子作用均存在显著性。

#### 4 结语

本研究运用合肥市 2000–2022 年 PM2.5 浓度遥感影像数据,基于 GIS 技术分析了合肥市 PM2.5 时空变化特征,然后结合合肥市土地利用数据,基于地理探测器,探寻合肥市土地利用类型与 PM2.5 浓度的关系,其结论如下:

(1) 2000–2022 年 20 年间,合肥市 PM2.5 浓度时间序列呈现典型的倒“U”型特征,在 2013 年达到峰值,从 2013 年到 2022 年 PM2.5 呈现下降趋势。这是由于 2013 年国务院出台了《大气污染防治行动计划》,全国各城市积极落实国家政策,合肥市开始加大大气污染防治,加上生产技术的进步,生产要素对环境变得更友好,因此使 PM2.5 浓度在 2013 年开始逐渐下降。这与周靖承<sup>[19]</sup>等的研究结果一致,说明从 2013 年国务院出台相关政策后,全国各地区的 PM2.5

在逐渐下降。

(2) 通过 LISA 聚类图显示,合肥市 PM2.5 浓度以高-高、低-低聚类为主,合肥市 PM2.5 浓度空间变异性较大,不同时期空间分布特征不同。

(3) 通过地理探测器发现不同土地利用类型对 PM2.5 浓度变化有不同的影响,其中林地对降低 PM2.5 浓度有显著效果,这与张学林<sup>[20]</sup>等、李巍<sup>[10]</sup>等的研究结果一致,而耕地和建设用地的增加则会使 PM2.5 浓度加大,其他土地利用类型对 PM2.5 浓度影响不显著。两个因子对 PM2.5 浓度影响具有交互增强性,且其中林地占比和水体占比对 PM2.5 浓度的交互作用最强,同时本研究还探测了合肥市对于 PM2.5 浓度的最合理土地利用类型组合方式。为了降低合肥市 PM2.5 浓度值,建议未来合肥市的土地利用规划应增加林地的占比,注意控制建设用地的数量,不随意砍伐林业,从政策上加强对森林的保护。

#### 参考文献(References):

- [1] Luo Y, Teng M F, Yang K, et al. Research on PM2.5 estimation and prediction method and changing characteristics analysis under long temporal and large spatial scale—A case study in China typical regions[J]. Science of the Total Environment, 2019, 696: 133983.
- [2] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. Nature, 2014, 514 (7521): 218–222.

- [3] 张理博, 孙鹏, 罗淑年. 大气细颗粒物 PM 2.5 的危害及其治理政策的研究[J]. 科环境管理, 2020, 45(04): 102-105.
- [4] Yang D, Meng F, Liu Y, et al. Scale effects and regional disparities of land use in influencing PM2.5 concentrations: A case study in the zheng zhou Metropolitan Area, China[J]. Land, 2022, 11: 1538.
- [5] Pope C A 3rd, Burnett R T, Thun M J, et al. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution[J]. JAMA, 2002, 287(09): 1132-1141.
- [6] 万好, 王琴. 武汉市典型道旁绿地消减空气细微颗粒物的作用研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(03): 237-242.
- [7] 祁沛昕, 裴婷婷, 王雯等. 黄土高原土地利用变化对 PM2.5 浓度的影响[J]. 资源开发与市场, 2025, 41(03): 344-352.
- [8] Liu C, Henderson B H, Wang D F, et al. A land use regression application into assessing spatial variation of intra-urban fine particulate matter (PM2.5) and nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) concentrations in City of Shanghai, China [J]. Science of the Total Environment, 2016, 565: 607-615.
- [9] 杨伟, 姜晓丽. 华北地区大气细颗粒物 (PM2.5) 年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应[J]. 环境科学, 2020, 41(07): 2995-3003.
- [10] 李巍, 卢文字. 太原市 PM2.5 浓度与土地利用及植被覆盖的关系[J]. 黑龙江科技大学学报, 2024, 34(02): 249-254.
- [11] 5 名专家考证发现合肥发源于蜀山[N]. 市场星报, 2018-08-10.
- [12] 国家统计局. 2023 年统计用区划代码[EB/OL]. (2023-06-30) [2025-05-17]. <http://www.stats.gov.cn/sj/tjbz/tjyqhdmhcxhfdm/2023/index.html>.
- [13] 合肥市统计局. 合肥市 2024 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2025-03-28) [2025-05-17]. <https://tjj.hefei.gov.cn/tjyw/tjgb/15299317.html>
- [14] 刘圆圆. 时间序列分析及其应用[J]. 科技创新导报, 2011, 7(27): 255.
- [15] 明安远, 胡晓, 李新举, 等. 济南市 PM2.5 时空分布特征及其与土地利用的相关性研究[J]. 矿山测量, 2020, 48(01): 6-11.
- [16] 冯彬, 周建伟, 于涛. 冻融影响下生态系统服务价值和生态风险的时空演变特征及关联性-以南羌塘盆地东区为例[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2024, 56(05): 77-90.
- [17] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(01): 116-134.
- [18] 田苗, 郑浩浩, 易文利, 等. 山西省 PM2.5 时空特征及其影响因素的地理探测[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2022, 40(09): 1495-1501.
- [19] 周靖承, 姚衡, 曹艳晓, 等. 2001-2020 年湖北省 PM2.5 时空分布特征及气象驱动因子分析[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(12): 1559-1567.
- [20] 张学林, 冯祥, 王建雄. 滇东南地区 PM2.5 的时空分布与土地利用研究[J]. 江西农业学报, 2022, 34(09): 156-161.

---

**作者简介:**

第一作者: 冯艳, 1985 年生, 女, 云南临沧人, 硕士, 云南国土资源职业学院, 讲师, 主要研究方向为土地资源管理、地理信息系统。Email: 125211496@qq.com;

通讯作者: 瞿华莹, 1982 年生, 男, 重庆人, 硕士, 云南国土资源职业学院, 副教授, 主要研究方向为国土资源信息化管理。Email: 94298984@qq.com

---

## Research on the Relationship between Spatial and Temporal Distribution of PM<sub>2.5</sub> and Land Use in Hefei City based on Geographic Detector

FENG Yan<sup>1</sup>, QU Huaying<sup>1\*</sup>, LI Jialong<sup>2</sup>

(1. Yunnan Land and Resources Vocational College, Department of Land and Spatial Information, Kunming 652501, China

2. Kunming Changshui International Airport Co., Ltd, Kunming 650000, China)

**Abstract:** In response to the air pollution problem in Hefei City, this study collected remote sensing data on PM<sub>2.5</sub> concentration from 2000 to 2022. Time series analysis and LISA clustering were used to analyze the spatiotemporal variation characteristics of PM<sub>2.5</sub> concentration in Hefei City over the past 22 years. Then, based on geographic detectors, the relationship between PM<sub>2.5</sub> and land use types was explored. The results showed that: (1) the time series of PM<sub>2.5</sub> concentration in Hefei City from 2000 to 2022 exhibited a typical inverted “U” shape, reaching its peak in 2013 and gradually decreasing from 2013 to 2022; (2) the PM<sub>2.5</sub> concentration in Hefei City is mainly composed of high–high and low–low clusters, and there are differences in their clustering patterns and spatial distribution at different times; (3) Through a geographic detector, it was found that the proportion of forest land had the strongest single factor effect on changes in PM<sub>2.5</sub> concentration, with a negative correlation between the two. The proportion of bare land had the weakest explanatory power, while the proportion of forest land and water had the strongest interactive effect on PM<sub>2.5</sub> concentration.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; land use; geographic detector; time series analysis method; LISA clustering diagram