



环境科学
Environmental Science
ISSN 0250-3301, CN 11-1895/X

《环境科学》网络首发论文

题目: 2015—2019年河南省PM_{2.5}时空特征与驱动因素分析
作者: 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮
DOI: 10.13227/j.hjcx.202108085
收稿日期: 2021-08-09
网络首发日期: 2021-10-08
引用格式: 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮. 2015—2019年河南省PM_{2.5}时空特征与驱动因素分析[J/OL]. 环境科学. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202108085>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

2015—2019年河南省PM_{2.5}时空特征与驱动因素分析

葛岂序¹, 刘岩², 杨洪¹, 郭恒亮^{3*}

(1.郑州大学化学学院, 郑州 450001; 2.郑州大学地球科学与技术学院, 郑州 450001; 3.河南省超级计算中心, 郑州 450053)

摘要: PM_{2.5}是雾-霾中的主要成分, 河南省已成为PM_{2.5}污染防治重点地区之一。基于2015—2019年河南省PM_{2.5}浓度数据, 使用空间自相关和空间热点探测方法分析其时空特征, 引入地理探测器方法分析气象因素、空气质量因素和社会因素对PM_{2.5}浓度的解释力度。结果表明, 河南省2015—2019年PM_{2.5}浓度整体呈现降低趋势, 高污染天数减少和低污染天数增加, 高污染逐步向中污染转化; PM_{2.5}浓度具备明显的空间聚集特征, 全局空间自相关指数先降后升, 空间热点集中在豫北地区(安阳市、鹤壁市、新乡市和焦作市), 空间冷点集中在豫西地区(三门峡市、洛阳市和南阳市); 空间重心转移呈现出北上的趋势; 单因子探测显示, 在9个影响因子中, 土地利用类型(解释力度为0.511,下同)、降水量(0.312)和NO₂浓度(0.277)是影响PM_{2.5}浓度最明显的因子,其余因子影响力排序为PM₁₀浓度(0.255)、温度(0.209)、风速(0.183)、臭氧浓度(0.121)、GDP(0.073)和人口数量(0.046); 交互作用探测显示, 多因子共同作用比单因子影响更加显著。结果可以为治理河南省大气污染提供理论支持。

关键词: PM_{2.5}; 时空特征; 驱动因素; 空间热点探测; 空间重心转移; 地理探测器

DOI:10.13227/j.hjcx.202108085

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM_{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019

GE Qi-xu¹, LIU Yan², YANG Hong¹, GUO Heng-liang^{3*}

(1.School of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;2.School of Geoscience and Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;3.Henan Province Supercomputing Center, Zhengzhou 450053, China;)

Abstract: PM_{2.5} is the main component of haze, and Henan Province has become one of the key areas of PM_{2.5} pollution control. Based on the PM_{2.5} concentration data of Henan Province from 2015 to 2019, spatial autocorrelation, spatial hot spot detection and other methods are used to analyze its temporal and spatial characteristics, introduce the geodetector method to analyze the interpretation strength of meteorological factors, air quality factors, and social factors on PM_{2.5} concentration. The results show that: from 2015 to 2019, the concentration of PM_{2.5} in Henan Province showed an overall downward trend, the days of high pollution decreased, the days of low pollution increased, and the high pollution gradually transformed into medium pollution. The concentration of PM_{2.5} has obvious characteristics of spatial aggregation. The five-year global spatial autocorrelation index first drops and then rises, and the spatial hot spots are concentrated in northern Henan (Anyang, Hebi, Xinxiang, and Jiaozuo), the spatial cold spots are concentrated in western Henan (Sanmenxia, Luoyang, Nanyang). The shift of space center of gravity shows a trend of going north; Single factor detection shows that among the nine influencing factors, land use type (0.511), precipitation (0.312), and NO₂ (0.277) are the most obvious factors affecting PM_{2.5} concentration, and the other factors are PM₁₀(0.255), temperature (0.209),

收稿日期: 2021-08-09; 修订日期: 2021-09-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0505004-03); 河南省科技厅2020年度国家超级计算郑州中心创新生态系统建设科技专项(201400210800)

作者简介: 葛岂序(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境遥感和环境质量综合评价, E-mail: geqixu@163.com

*通信作者, E-mail: guohengliang@zzu.edu.cn

wind speed (0.183), O₃ (0.121), GDP (0.073), and population (0.046). Interaction detection showed that the combined effect of multiple factors was more significant than that of single factor. The results can provide theoretical support for the control of air pollution in Henan Province.

Key words: fine particulate matter (PM_{2.5}); spatial-temporal characteristics; driving factors; space hot spot detection; space center of gravity transfer; geodetector

大气污染问题是当今全球气候变化研究的重点关注问题, PM_{2.5} 是颗粒直径 $\leq 2.5\mu\text{m}$ 的可吸入肺颗粒物, 是大气污染中对人体危害较大的物质之一。已有研究表明^[1-3], PM_{2.5} 对人体呼吸系统、血液循环系统甚至神经系统都有危害。20 世纪 80 年代以来, 我国大部分城市空气质量逐步恶化, 雾-霾污染情况越来越严重^[4]。PM_{2.5} 是雾-霾中主要成分^[5], 特定温度下, 臭氧(O₃)、二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)和颗粒物在大气中产生复杂物化反应形成 PM_{2.5}。气象要素比如降水量和风速等影响 PM_{2.5} 的传播。研究 PM_{2.5} 的形成和传播对治理 PM_{2.5} 和减少雾-霾天气有积极作用^[6]。

近些年有不同学者针对 PM_{2.5} 时空分布情况研究以揭示 PM_{2.5} 形成和传播规律^[7]、化学构成^[8]和对人体健康的影响^[9]。有学者研究中国 PM_{2.5} 时空演化特征发现, 21 世纪以来中国 PM_{2.5} 污染平均浓度呈现快速增加后趋于稳定的演化态势^[10], 在空间上, PM_{2.5} 浓度整体上呈现北方高于南方, 东部高于西部趋势, 污染浓度高值区聚集在华北平原、长三角下游平原、四川盆地和塔克拉玛干沙漠四大区域。河南省处于华北平原高值聚集区, 研究河南省 PM_{2.5} 时空特征和驱动因素意义重大。在 PM_{2.5} 排放影响因素研究方面, 有学者研究了 2005—2014 年各个省份 PM_{2.5} 排放量发现^[11], 在这 10a 中各个省份 PM_{2.5} 排放量都有不同程度增加, 其中火力发电、生物质燃烧和建筑材料的使用是 PM_{2.5} 排放的主要来源, 由于地区生产总值(gross domestic product ,GDP)和人口数量的影响, 中国东部省份的 PM_{2.5} 排放量最大。在全国 PM_{2.5} 污染分布情况研究方面, 有学者以城市为单位^[12], 分析全国 338 个地级市 PM_{2.5} 浓度发现, 有 235 个城市超出国家年度 PM_{2.5} 浓度标准, PM_{2.5} 日均值变化大致呈现 W 型, 同时 PM_{2.5} 污染的热点区域在京津冀地区。

气溶胶光学厚度(AOD)是指垂直方向上介质消光系数的积分, 在研究大气环境中具有重要作用。PM_{2.5} 时空分布和影响因素相关研究使用的 PM_{2.5} 数据主要是经过线性回归模型(OLS)^[13]、地理加权回归模型(GWR)^[14]、混合模型^[15-18]和深度学习模型^[19-22]反演气溶胶光学厚度数据产生。以上研究方法主要涉及基于 ArcGIS、MATLAB 等的空间计量方法比如全局 Moran's *I* 指数和空间热点分析 Getis-Ord *G*_i^{*} 等。在探究空间分异性的研究方法方面, 地理探测器是由王劲峰等^[23]提出的一种新的探测空间分异性及揭示其背后驱动因子的统计方法, 其包含的分异及因子探测可以探测单因子对因变量的解释力度; 交叉作用探测可以探测不同影响因子对因变量的交互作用; 风险区探测可以判断两个影响因子之间属性均值是否有显著差别; 生态探测用于比较两个影响因子对因变量的空间分布影响是否有显著差异。

本研究基于河南省 2015—2019 年 PM_{2.5} 日均值数据, 结合空间自相关和空间重心转移模型, 分析 5 年来河南省 PM_{2.5} 浓度时空特征。引入地理探测器, 分析臭氧浓度(O₃)、PM₁₀ 浓度、二氧化氮浓度(NO₂)、降水量、温度、风速、GDP、人口数量和土地利用类型等多个影响因子对 PM_{2.5} 浓度解释力度大小, 探讨 PM_{2.5} 浓度变化的驱动因素。本研究对于分析河南省 PM_{2.5} 污染情况和制定治理大气污染政策提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河南省地势西高东低, 地形以平原旱地为主, 豫西有大面积有林地, 中部地区和豫南有大面积水田。河南西部有秦岭太行山脉, 北部横跨黄河。大部分地处暖温带, 属于大陆性季

风气候。根据河南省统计局 2016 年统计年鉴数据^[24],截至 2015 年底全省人口 10722 万人,其中城镇人口 5053 万人,农村人口 5699 万人,GDP 全年 37002 亿元。图 1 为研究区域高程和气象监测站点分布。本文以河南省为研究区域,应用空间自相关、空间重力转移模型和空间热点探测模型等方法分析 2015—2019 年 $PM_{2.5}$ 在时间和空间上的变化特征,应用地理探测器探讨 2015 年研究区域内人口数量、土地利用类型、GDP、臭氧浓度、风速、温度、 PM_{10} 浓度、 NO_2 浓度和降水量对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响。

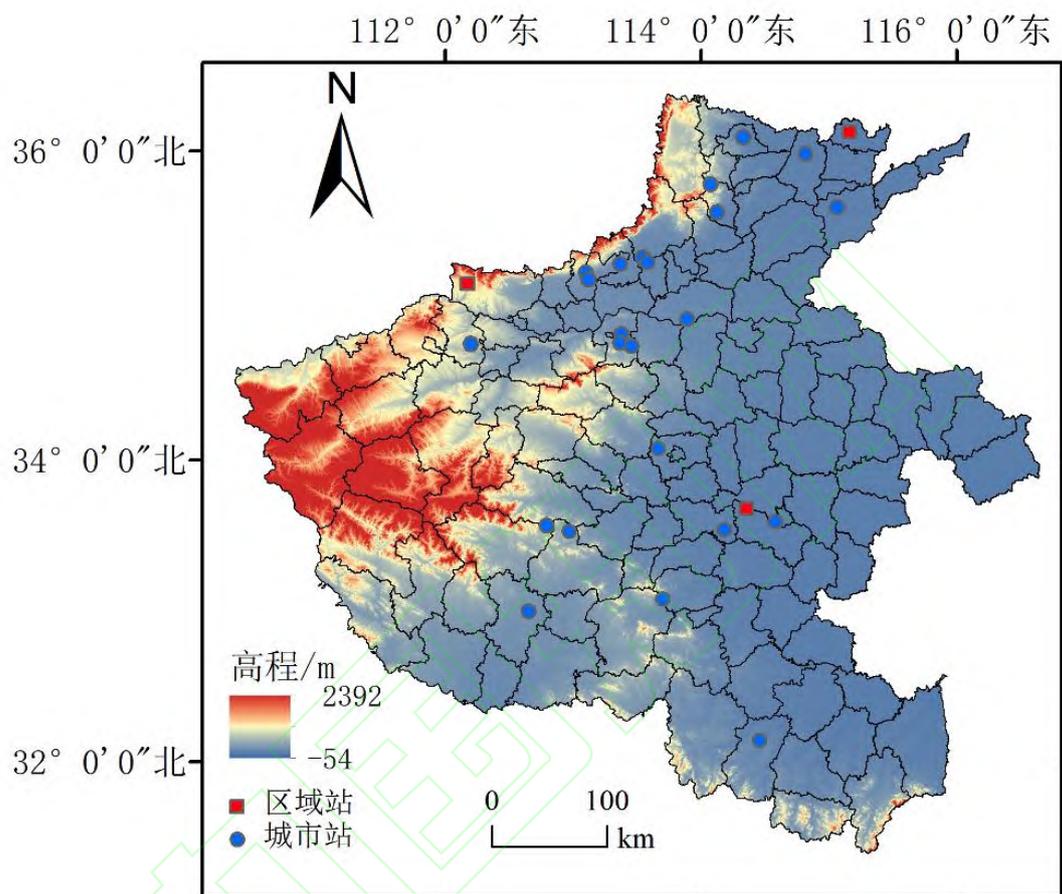


图 1 高程和监测站点分布

Fig.1 Distribution of monitoring stations and elevation

1.2 研究数据

1.2.1 $PM_{2.5}$ 数据

$PM_{2.5}$ 浓度数据来自达尔豪斯大学 ACAG(Atmospheric Composition Analysis Group)组织。该数据包含 MIN、MAX、RANGE、MEAN、STD 和 SUM 数据,使用 MATLAB R2018b 处理并导出为 TIFF 数据。该产品是当前全球应用广泛的 $PM_{2.5}$ 浓度数据,具有覆盖面积广和时间序列长的优点。如图 2 为处理后的研究区域内 $PM_{2.5}$ 浓度数据年均值空间分布。

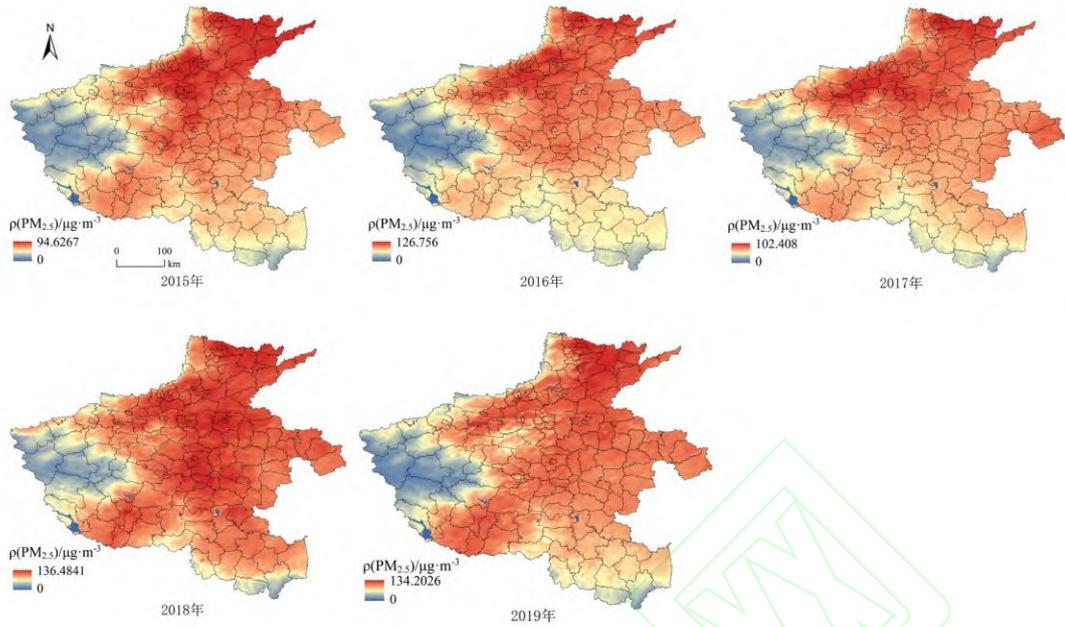


图 2 2015—2019 年 PM_{2.5} 浓度年均值空间分布

Fig.2 Spatial distribution of annual mean value of PM_{2.5} concentration from 2015 to 2019

1.2.2 气象数据和社会因素数据

已有研究表明气象因素对 PM_{2.5} 有影响^[25-28]。本研究使用的空气质量数据包括臭氧浓度、PM₁₀ 浓度和 NO₂ 浓度等数据来自中国环境监测总站(<http://106.37.208.233:20035/>)，源数据包含 2015—2019 年 AQI、PM_{2.5}、PM₁₀、臭氧、NO₂ 和 SO₂ 等数据。其中 NO₂、PM₁₀ 浓度和臭氧浓度经过插值，计算年平均值。气象数据包括气温、风速和降水量等数据来自美国国家气候数据中心(www.ncdc.noaa.gov/)。除了气象要素外，社会因素诸如全年 GDP 和人口数量等因素也对 PM_{2.5} 浓度有较大的影响。本研究引入全年 GDP、土地利用类型和人口数量因素，探讨对 PM_{2.5} 浓度的影响。其中 GDP 栅格数据来自中国科学院地理科学与资源研究所中国 GDP 空间分布公里网格数据集^[29]。人口数量栅格数据来自 Scientific Data 的 World Pop 数据集^[30]。2015 年气象数据和社会因素数据较为完整，因此本研究使用 2015 年数据研究 PM_{2.5} 驱动因素，栅格数据构建格网读取格网中心值，对于缺失数据使用插值方法补全。图 3 为研究区域内格网划分和影响因子栅格数据。

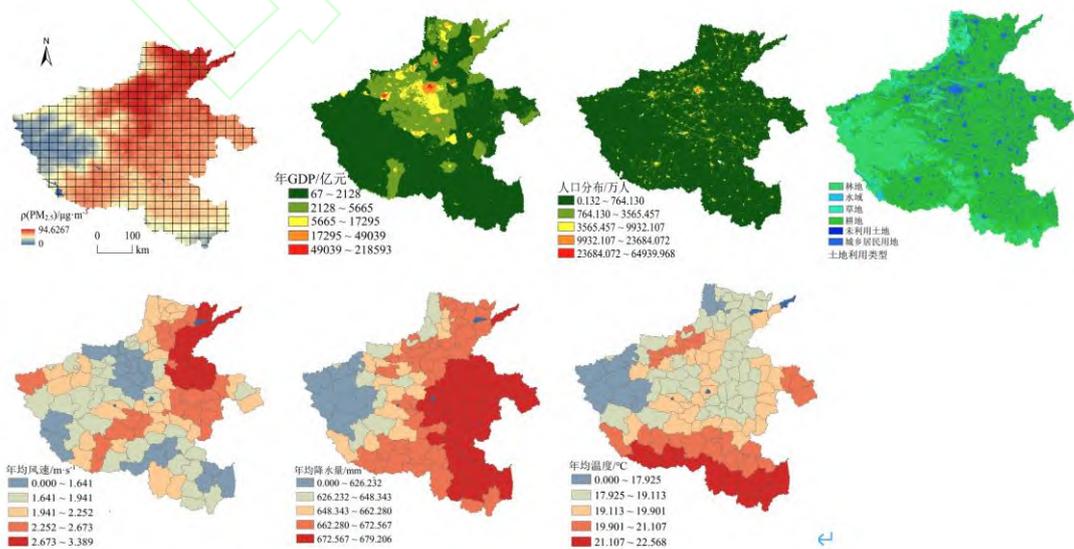


图3 格网划分和影响因子栅格数据

Fig.3 Grid division and impact factor raster data

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关分析

空间自相关 Moran's I 统计可以表示为:

$$I = \frac{n}{S_0} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} (y_i - \bar{y})(y_j - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, i \neq j \quad (1)$$

式中, n 为研究区 (本研究为县级行政单位) 的个数, y_i 和 y_j 为研究区 i 研究区 j 的 $PM_{2.5}$ 浓度均值, \bar{y} 为所有的研究区的 $PM_{2.5}$ 浓度均值, S_0 为所有空间权重的聚合:

$$S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{i,j} \quad (2)$$

空间自相关计算了观察指数值后将计算期望指数值, 并将期望指数值和观察指数值进行对比, 在给定数据的情况下, 计算标准化统计量 $Z(I)$ 用以进行显著性检验:

$$Z(I) = \frac{[I - E(I)]}{\sqrt{\text{Var}(I)}} \quad (3)$$

式中, $Z(I)$ 为衡量全局指数值的显著性水平值, $E(I)$ 为全局指数值的数学期望值, $\text{Var}(I)$ 为全局指数值的方差。

本研究采用 Getis-Ord G_i^* 热点分析方法, 分析 $PM_{2.5}$ 局部自相关性。Getis-Ord G_i^* 局部统计可表示为:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{i,j} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{i,j}}{S \sqrt{\frac{[n \sum_{j=1}^n w_{i,j}^2 - (\sum_{j=1}^n w_{i,j})^2]}{n-1}}} \quad (4)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (5)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - \bar{X}^2} \quad (6)$$

式中, S 为 $PM_{2.5}$ 在整体研究区域上的标准差。 G_i^* 为统计学意义上的得分, 得分越高, 热点的聚类就越紧密, 反之, 冷点的聚类就越紧密。

1.3.2 空间重心转移模型

空间重心常用于城市发展、土地利用类型变化研究, 为了深入分析 $PM_{2.5}$ 时空特征, 引入物理学中重心概念用于展示 $PM_{2.5}$ 在研究区域内的转移情况。定义研究区域内污染空间重心坐标为:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times S_i \times X_i}{\sum_{i=1}^n W_i \times S_i} \quad (7)$$

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \times S_i \times Y_i}{\sum_{i=1}^n W_i \times S_i} \quad (8)$$

式中 \bar{X} 和 \bar{Y} 为污染空间重心经纬度, n 为划分研究区域的格网数量, S_i 为第 i 个格网的面积, W_i 为第 i 个格网的 $PM_{2.5}$ 浓度值。

1.3.3 地理探测器

地理探测器包含 4 个探测器: 分异及因子探测、交互作用探测、风险区探测和生态探测。本研究主要使用分异及因子探测和交互作用探测解释 $PM_{2.5}$ 的驱动因素。

分异及因子探测是探测属性 Y 的空间分异性和某因子 X 对属性 Y 的解释力，这个数值用 q 度量， q 的计算公式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (9)$$

式中， q 为 $PM_{2.5}$ 影响因子的解释力， h 为 $PM_{2.5}$ 浓度影响因子的分层， N_h 和 N 分别为影响因子 h 和影响因子总数， σ^2 和 σ_h^2 分别是研究区域整体样本量和分层 h 的方差。

交互作用探测是探测两个或多个影响因子共同作用对属性 Y 的影响程度，首先应分别计算两种影响因子 X_1 和 X_2 对属性 Y 的解释力度 $q(X_1)$ 和 $q(X_2)$ ，再计算他们交互时的值 $q(X_1 \cap X_2)$ ，将 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 和 $q(X_1 \cap X_2)$ 进行对比，此时有以下 5 种情况，见表 1。

表 1 交互作用类型

Table 1 Types of interactions

对比	交互作用
$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非独立增强

2 结果与分析

2.1 时间分布特征

根据中国环境空气质量标准，将 $PM_{2.5}$ 浓度范围划分为 5 个等级：汇总 2015—2019 年日均值对应各个等级的天数所占全年的比重，结果如图 4。其中： ρ ($PM_{2.5}$) 日均值处于 $0 \sim 35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的占比从 2015 年的 1.9% 逐年增加到 2019 年的 7.6%；处于 $35 \sim 55 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的占比在 2016~2018 年这 3a 有所下降，但 2015 年和 2019 年仍然达到了 30.9% 和 29.5% 的高占比；处于 $55 \sim 75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的占比从 2015 年开始下降直到 2017 年后又升高。其中最高占比在 2015 年，达到 42.1%，最低占比在 2017 年为 24.6%。处于 $75 \sim 100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的占比先是从 2015 年 20.8% 上升到 2016 年 38.9% 后 2019 年又回落到 20.5%。处于 $100 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的占比从 2015 年的 4.1% 到 2018 年的 13.6% 逐年递增，在 2019 年比重大幅度下降到 0.5%。

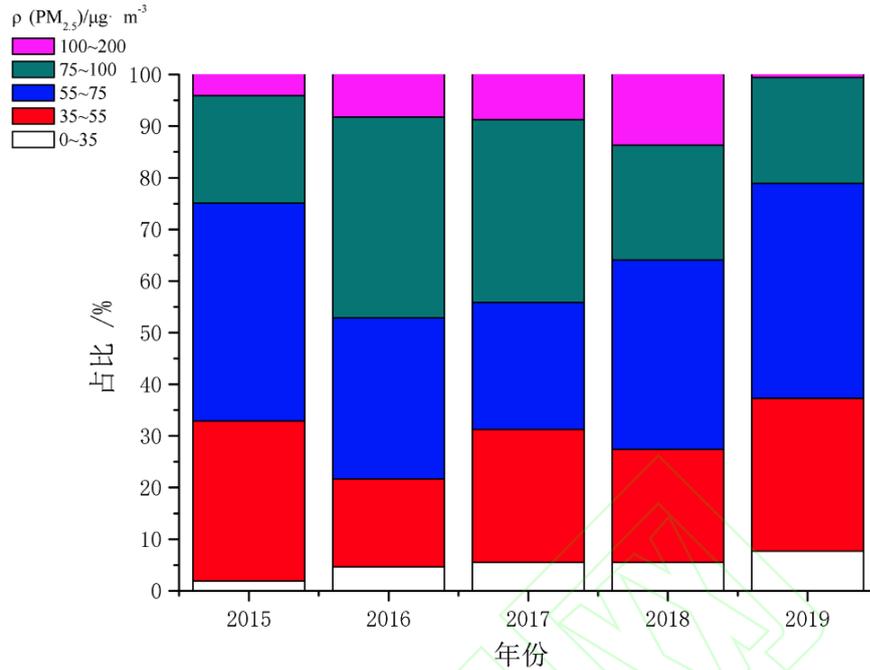


图4 2015—2019年PM_{2.5}浓度变化趋势

Fig.4 Variation tend of PM_{2.5} concentration from 2015 to 2019

2015—2019年河南省 ρ (PM_{2.5})均值时间分布表明: 高于 $100\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的极高污染天数在2019年得到改善; 而 $75\sim 100\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的高污染天数从2016年之后持续下降; $75\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上的天数在2019年相比之前的年份有明显下降, 自2017年以后, 全年超过50%天数PM_{2.5}浓度处于 $75\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下, 这表明PM_{2.5}浓度整体呈现下降的趋势。

2.2 空间分布特征

2.2.1 空间自相关

为了分析研究区域内PM_{2.5}浓度空间分布特征, 以行政单位县级为单位, 进行河南省2015—2019年PM_{2.5}浓度的全局空间自相关分析。分析其Moran's *I*发现(表2): 从2015—2019年Moran's *I*均为正值, 且通过了 $P=0.01$ 的显著性检验, 有明显的空间自相关性, 具有明显的空间聚集特征。全局Moran's *I*指数从2015年开始下降到2017年, 2018年和2019年自相关性显著大于前3a, 整体符合先降后升的特征。

表2 2015—2019年全球Moran's *I*指数

Table 2 Global Moran's *I* index from 2015 to 2019

项目	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年
指数	0.436	0.367	0.368	0.51	0.4545
Z-score	4.634	4.114	3.083	7.47	6.57
P-value	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

2.2.2 空间热点分析

基于全局空间自相关分析的结果, 进行空间Getis-Ord G_i^* 热点分析, 探讨局部PM_{2.5}浓度空间分布规律。分析结果显示(如图5): 2015—2019年研究区域整体呈现强聚集性, 其中2015、2018和2019年局部地区呈现99%置信的聚集区域, 2016年和2017年呈现95%置信的聚集区域。从空间分布看, 热点聚集区集中在豫中、豫北地区, 这些地区空间相关程度高, 冷点聚集区集中在豫西地区, 2018年和2019年豫南地区有冷点聚集区, 这些地区空间相关程度低。2015—2017年热点区域主要集中在焦作市、新乡市和安阳市等地, 冷点区域主要集中在洛阳市和南阳市的部分地区。2018年热点区域主要集中在许昌市、漯河市、郑州市、

开封市和安阳市的部分地区，冷点区域集中在洛阳市、南阳市和信阳市的部分地区。2019年空间分布和2018年大致相同但是极热点区域在空间上向北转移由许昌市来到安阳市。从时间上看，PM_{2.5}浓度在河南省的空间自相关性整体呈现加强趋势，2019年局部自相关性相比2015年有明显加强。从空间看，空间自相关热点区域呈现北上的趋势，从许昌市和焦作市等地逐步转移至豫北的安阳市地区。

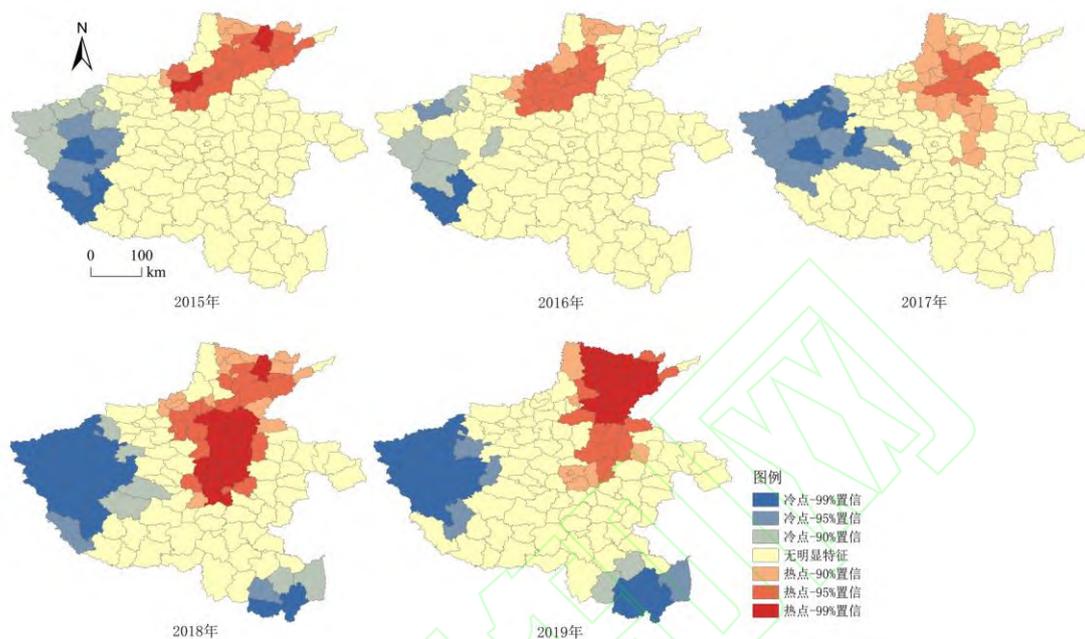


图5 空间冷热点分布

Fig.5 Distribution of cold and hot spots in space

2.2.3 空间重心转移分析

引入物理学重心概念，计算PM_{2.5}浓度在空间上的重心迁移轨迹如图6。2015—2019年这5a的PM_{2.5}浓度空间重心大体都处于河南省中部地区，从2015年以后空间重心整体呈现北上的趋势，这表明PM_{2.5}浓度大体有向北方转移的趋势，这也和空间自相关的结果相同。2015年PM_{2.5}空间浓度重心位于漯河市；2016年向西北方向转移至许昌市；2017年继续向西北方向转移至长葛市；2018年向东北方向转移至开封市；2019年向西北方向转移至郑州市，整体转移路线呈现N字型。

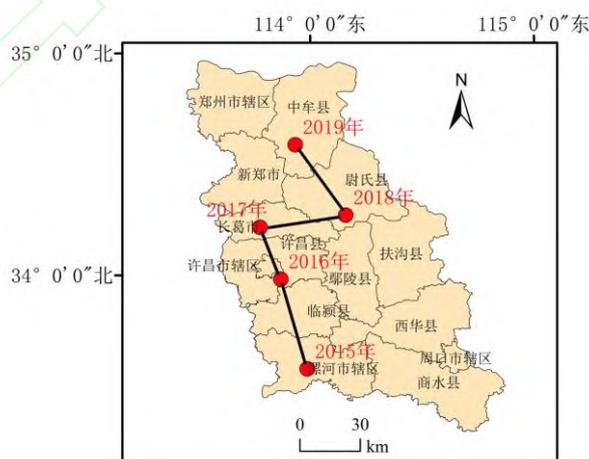


图6 空间重心转移路线

Fig.6 Space center of gravity transfer route

2.3 驱动因素分析

为了探讨河南省 PM_{2.5} 驱动因素对其的解释力度，引入地理探测器，考察分异及因子探测、交互作用探测和生态探测等多个探测器指标，评价驱动因素的解释力度。在 PM_{2.5} 和影响因子栅格数据上构建 25km×25km 格网，读取格网中心值点数据并将其导入地理探测器。

2.3.1 单因子探测分析

利用分异及因子探测器确定各个影响因子对 PM_{2.5} 变化的影响程度，结果如表 3 所示。从结果可以看到，所有影响因子对 PM_{2.5} 浓度变化的影响程度在 0.046~0.511 之间。总体而言，风速、降水量和温度等气象因素对 PM_{2.5} 浓度变化的影响比空气质量因素臭氧浓度、PM₁₀ 和 NO₂ 浓度更明显。这和之前的研究相吻合^[31~33]。对 PM_{2.5} 浓度变化影响最大的单因子为土地利用类型(解释力度 0.511,下同)，影响最小的单因子为人口数量(0.046)。已有研究表明^[34~37]，土地利用等人为活动对 PM_{2.5} 形成起到关键作用。降水可以有效缓解 PM_{2.5} 传播和形成速度，减少雾-霾天数。同时风速也在 PM_{2.5} 传播中起到重要作用，温度主要影响 PM_{2.5} 的形成和大气中复杂的化学物理反应，这些反应会加剧 PM_{2.5} 形成，导致严重的雾-霾天气，PM_{2.5} 指数暴增。

表 3 单因子探测分析结果

Table 3 Single factor detection analysis results

因子	臭氧	PM ₁₀	NO ₂	风速	降水量	温度	GDP	人口数量	土地利用类型
解释力度	0.121	0.255	0.277	0.183	0.312	0.209	0.073	0.046	0.511

2.3.2 交互作用分析

交互作用探测器主要是探讨两个影响因子对 PM_{2.5} 浓度变化的共同影响，结果如表 4 所示。从结果可以看到，任何两个影响因子对 PM_{2.5} 浓度变化的共同影响都要比单一影响因子明显，相对于其他交互作用，臭氧浓度和 GDP 的交互作用相对值(0.125)最低，表明两者对 PM_{2.5} 浓度变化共同影响小于其他影响因子组合的共同影响。土地利用类型影响因子在和其余影响因子组合后均有显著提升，这也和单因子探测分析中得到的结果吻合。在实验结果中，交互作用探测多为非线性增强，只有 GDP 和风速为双因子增强，这表明多个因素共同作用会显著增强对 PM_{2.5} 浓度变化的解释力，对 PM_{2.5} 浓度变化的影响更加显著。可以预见的是，以上影响因子在复杂条件下产生多种变化会对 PM_{2.5} 浓度产生明显的影响。

表 4 交互作用结果

Table 4 Interaction results

	臭氧	PM ₁₀	NO ₂	风速	降水量	温度	GDP	人口数量	土地利用类型
臭氧	0.121	—	—	—	—	—	—	—	—
PM ₁₀	0.256	0.255	—	—	—	—	—	—	—
NO ₂	0.221	0.286	0.277	—	—	—	—	—	—
风速	0.213	0.268	0.232	0.183	—	—	—	—	—
降水量	0.328	0.379	0.366	0.390	0.312	—	—	—	—
温度	0.236	0.325	0.281	0.236	0.321	0.209	—	—	—
GDP	0.125	0.263	0.279	0.193	0.334	0.233	0.073	—	—
人口数量	0.170	0.261	0.288	0.270	0.316	0.224	0.166	0.046	—
土地利	0.537	0.545	0.549	0.539	0.611	0.542	0.533	0.526	0.511

3 讨论

空气的形成和传播过程受到人为因素和自然条件影响,科学的分析方法可以揭示 $PM_{2.5}$ 形成的驱动因素和传播的空间分布情况。本研究以2015—2019年 $PM_{2.5}$ 浓度日均值为基础,分析时间分布特征,计算全局空间自相关 Moran's I 指数,分析局部空间热点区域;引入物理学重心概念,分析逐年 $PM_{2.5}$ 浓度重心变化轨迹,揭示 $PM_{2.5}$ 传播情况。以2015年 $PM_{2.5}$ 浓度日均值和2015年气象数据和社会因素数据为基础,引入地理探测器,探讨臭氧浓度、 PM_{10} 浓度、 NO_2 浓度、风速、降水量、日均气温、年GDP、年人口数量和土地利用类型等影响因子对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的影响,得到对 $PM_{2.5}$ 浓度变化影响显著的因素。

在时间特征分布方面,2015—2019年 $\rho(PM_{2.5})$ 整体呈现降低的趋势,这主要表现在 $100\mu g \cdot m^{-3}$ 以上的高污染天数明显减少,在2019年高污染天数只占到全年的0.5%。同时在2015—2019年 $\rho(PM_{2.5})$ 低于 $35\mu g \cdot m^{-3}$ 的低污染天数逐步增加,高度污染逐渐转变为中度污染,中度污染逐步转变为低污染。空气质量指数降低、空气污染减少表明人为治理取得成效,关停工厂、汽车单双号限行等节能减排行为,减少了颗粒物、 SO_2 和氮氧化物的排放,从 $PM_{2.5}$ 形成的角度减少 $PM_{2.5}$ 浓度。

在空间特征分布方面,全局空间自相关分析表明2015—2019年 $PM_{2.5}$ 浓度有明显的空间自相关性,具有明显的空间聚集特征,且5a的空间自相关性先降后升,大体呈现U型。空间热点分析表明,5a的 $PM_{2.5}$ 浓度热点区域均位于豫北地区,安阳市、鹤壁市、新乡市、焦作市和郑州市等地表现为明显的热点区域,而三门峡市、洛阳市和南阳市等地表现为明显的冷点区域。豫北地区人口众多、经济相对河南其他地区较为发达,因此在汽车尾气、工厂排放和花粉等自然源排放等因素方面影响较大,这些人为因素对 $PM_{2.5}$ 浓度变化影响较大,空气质量相对较差。而在冷点区域,由于秦岭和太行山脉的影响, $PM_{2.5}$ 的形成和传播受到阻碍,相对河南省其他地区, $PM_{2.5}$ 浓度长期处于较低水平,空气质量较好,这点从2015—2019年 $PM_{2.5}$ 年均值空间分布中也可以看出来。空间重心转移分析揭示了2015—2019年每年 $PM_{2.5}$ 浓度的重心范围,可以看到整体呈现北上的趋势,大致呈现N型。

在驱动因素方面,单因子分析结果表明土地利用类型是对 $PM_{2.5}$ 浓度变化影响最大的影响因子,降水量、风速和温度等气象要素的影响比臭氧浓度、 PM_{10} 浓度和 NO_2 浓度等空气质量因素更加显著。交互作用探测结果表明任何两种影响因子的组合都比两者单一的影响明显,且大部分为非线性增强。这意味着多种影响因子共同作用会显著增加对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的影响,这和已有研究结果相吻合^[38-40],这也表明治理 $PM_{2.5}$ 应当从多方面下手,单方面治理可能成效甚微。

4 结论

(1) 河南省2015—2019年 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈现降低的趋势,这主要表现在高污染天数减少、低污染天数逐步增加,高污染逐步向中污染转化。

(2) 河南省2015—2019年 $PM_{2.5}$ 浓度具有明显的空间自相关,有显著的空间聚集特征,且5a的全局空间自相关 Moran's I 指数先降后升,整体呈现U型;空间热点区域主要集中在豫北地区,包含安阳市、鹤壁市、新乡市、焦作市和郑州市等地。冷点区域主要集中在豫西地区,包含三门峡市、洛阳市和南阳市等地。空间热点区域的形成主要是因为汽车尾气、工厂排放等人为因素,而空间冷点区域的形成主要是因为秦岭和太行山脉的影响。2015—2019年5a空间重心转移呈现出北上的趋势,整体呈现N型。

(3) 基于2015年 $PM_{2.5}$ 浓度数据和其他影响因子数据所做的地理探测器分析表明,对

河南省 2015 年 PM_{2.5} 浓度变化影响最大的因子是土地利用类型, 同时气象因素降水量、风速和温度等对 PM_{2.5} 浓度变化的影响比空气质量因素臭氧浓度、PM₁₀ 浓度和 NO₂ 更加显著。多个影响因子同时作用会比单因子更加显著。

参考文献:

[1] Lin H, Guo Y, Kowal P, *et al.* Exposure to air pollution and tobacco smoking and their combined effects on depression in six low- and middle-income countries[J]. *British Journal of Psychiatry*, 2017, **211**(3):157-162.

[2] Chen Y, Luo X S, Zhao Z, *et al.* Summer-winter differences of PM_{2.5} toxicity to human alveolar epithelial cells (A549) and the roles of transition metals[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **165**:505-509.

[3] Yang N, Wu S, Ji W, *et al.* The exposure metric choices have significant impact on the association between short-term exposure to outdoor particulate matter and changes in lung function: findings from a panel study in chronic obstructive pulmonary disease patients[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **542**:264-270.

[4] Xin L, Zhi Q G, LI Y B, *et al.* Meteorological conditions for severe foggy haze episodes over north China in 2016–2017 winter[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **199**:284-298.

[5]张哲,乔利平,周敏,等.环境空气 PM_{2.5} 化学组分监测数据审核指标的建立:以长三角地区为例[J].*环境科学*,2020,**41**(11):4786-4802.

Zhe Z, Qiao L P, Zhou M, *et al.* Audit indicators and suggested ranges for data validation of chemical components in ambient PM_{2.5}: a case study of the Yangtze River Delta[J]. *Environmental Science*,2020,**41**(11):4786-4802.

[6]吴健,杨子涵,胡蕾.基于空间依赖性的城市生态空间空气质量改善效益研究——以北京市为例[J].*中国环境科学*,2021,doi: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210511.001.

Wu J, Yang Z H, Hu L. Air-quality improvement and its benefit from urban ecological space: the case of Beijing with insights of spatial dependency [J]. *China Environmental Science*,2021. doi:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20210511.001.

[7]李梦真,张廷斌,易桂花,等.四川盆地 PM_{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析[J].*环境科学*,2021,**42**(7):3136-3146.

Li M Z, Zhang T B, Yi G H, *et al.* Spatio-temporal variation characteristics monitored by remotely sensed technique of PM_{2.5} concentration and its influencing factor analysis in Sichuan basin, China[J]. *Environmental Science*,2021,**42**(7):3136-3146.

[8]刘保献,杨懂艳,张大伟,等.北京城区大气 PM_{2.5} 主要化学组分构成研究[J].*环境科学*,2015,**36**(7):2346-2352.

Liu B X, Yang D Y, Zhang D W, *et al.* Chemical species of PM_{2.5} in the urban area of Beijing[J].*Environmental Science*,2015,**36**(7):2346-2352.

[9]郭云,蒋玉丹,黄炳昭,等.我国大气 PM_{2.5} 及 O₃ 导致健康效益现状分析及未来 10 年预测[J].*环境科学研究*,2021,**34**(4):1023-1032.

Guo Y, Jiang Y D, Huang B Z, *et al.* Health impact of PM_{2.5} and O₃ and forecasts for next 10 years in China[J].*Research of Environmental Science*,2021,**34**(4):1023-1032.

[10]周亮,周成虎,杨帆,等.2000-2011 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征及驱动因素解析[J].*地理学报*,2017,**72**(11):2079-2092.

Zhou L, Zhou C H, Yang F, *et al.* Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM_{2.5} in China between 2000 and 2015[J]. *Acta Geographica Sinica*,2017,**72**(11):2079-2092.

- [11] Qiang J, Fang X, Bo W, *et al.* Spatio-temporal variations of PM_{2.5} emission in China from 2005 to 2014[J]. *Chemosphere*, 2017, **183**:429-436.
- [12] Ye W F, Ma Z Y, Ha X Z. Spatial-temporal patterns of PM_{2.5} concentrations for 338 Chinese cities[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **631-632**:524-533.
- [13] 杨昆, 杨玉莲, 朱彦辉, 等. 中国 PM_{2.5} 污染与社会经济的空间关系及成因[J]. *地理研究*, 2016, **35**(6):1051-1060.
- Yang K, Yang Y L, Zhu Y H, *et al.* Social and economic drivers of PM_{2.5} and their spatial relationship in China[J]. *Geographical Research*, 2016, **35**(6):1051-1060.
- [14] Zou B, Fang X, Feng H, *et al.* Simplicity versus accuracy for estimation of the PM_{2.5} concentration: a comparison between LUR and GWR methods across time scales[J]. *Spatial Science*, 2019, **307**:1-19.
- [15] Beckerman B S, Jerrett M, Serre M, *et al.* A hybrid approach to estimating national scale spatiotemporal variability of PM_{2.5} in the contiguous United States[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(13):7233-7241.
- [16] Ghotbi S, Sotoudeheian S, Arhami M. Estimating urban ground-level PM₁₀ using MODIS 3km AOD product and meteorological parameters from WRF model[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **141**, doi:10.1016/j.atmosenv.2016.06.057.
- [17] Xiao L, Lang Y, Christakos G. High-resolution spatiotemporal mapping of PM_{2.5} concentrations at Mainland China using a combined BME-GWR technique[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **173**, doi:10.1016/j.atmosenv.2017.10.062.
- [18] Yang Q, Yuan Q, Yue L, *et al.* Investigation of the spatially varying relationships of PM_{2.5} with meteorology, topography, and emissions in China in 2015 by using modified geographically weighted regression[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **262**, doi:10.1016/j.envpol.2020.114257.
- [19] 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 等. 基于深度学习的华东地区 PM_{2.5} 浓度遥感反演[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4):1513-1519.
- Liu L Y, Zhang Y J, Li Y S, *et al.* PM_{2.5} inversion using remote sensing data in eastern China based on deep learning[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4):1513-1519.
- [20] Chen W Q, Ran H F, Cao X Y, *et al.* Estimating PM_{2.5} with high-resolution 1-km AOD data and an improved machine learning model over Shenzhen, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **746**, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141093.
- [21] Hu X, Belle J H, Xia M, *et al.* Estimating PM_{2.5} concentrations in the conterminous United States using the random forest approach[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**, doi:10.1021/acs.est.7b01210.
- [22] Wei J, Huang W, Li Z, *et al.* Estimating 1-km-resolution PM_{2.5} concentrations across China using the space-time random forest approach[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, **231**, doi:10.1016/j.rse.2019.111221.
- [23] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, **72**(1):116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(1): 116-134.
- [24] 河南省统计局. 河南统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [25] 赵阳, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 2013年南昌市区 PM_{2.5} 的浓度水平及时空分布特征与来源[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(6):854-863.
- Zhao Y, HU G R, YU R L, *et al.* Concentrations and spatial-temporal characteristics and

source analysis of PM_{2.5} in Nanchang city in 2013[J]. Research of Environmental Sciences,2017,**30**(6):854-863.

[26]梁丹,王彬,王云琦,等.重庆市冬季PM_{2.5}及气态污染物的分布特征与来源[J].环境科学研究,2015,**28**(7):1039-1046.

Liang D, Wang B, Wang Y Q, *et al.* Distribution characteristics and sources of PM_{2.5} and gaseous pollutants in winter in Chongqing[J]. Research of Environmental Sciences,2015,**28**(7):1039-1046.

[27]陈菁,彭金龙,徐彦森.北京市2014~2020年PM_{2.5}和O₃时空分布与健康效应评估[J].环境科学,2021, **42**(9): 4071-4082.

Chen J, Peng J L, Xu Y S. Spatiotemporal distribution and health impacts of PM_{2.5} and O₃ in Beijing, from 2014 to 2020[J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4071-4082.

[28] Gui K, Che H Z, Wang Y Q, *et al.* Satellite-derived PM_{2.5} concentration trends over Eastern China from 1998 to 2016: relationships to emissions and meteorological parameters[J].Environmental Pollution, 2019,**247**,doi:10.1016/j.envpol.2019.01.056.

[29] 徐新良. 中国GDP空间分布公里网格数据集[EB/OL].<https://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=33>,2017-01-31.

[30]Tatem, A. WorldPop, open data for spatial demography[EB/OL].<https://www.nature.com/articles/sdata20174/>,2017-01-31.

[31]Yang D, Wang X, XU J *et al.* Quantifying the influence of natural and socioeconomic factors and their interactive impact on PM_{2.5} pollution in China[J]. Environmental Pollution, 2018, **241**:475-483.

[32] Isojunno S , Sadykova D , Deruiter S , *et al.* Individual, ecological, and anthropogenic influences on activity budgets of long-finned pilot whales[J]. Ecosphere, 2017, **8**(12), doi:10.1002/ecs2.2044.

[33] Zhou C, Chen J, Wang S. Examining the effects of socioeconomic development on fine particulate matter (PM_{2.5}) in China's cities using spatial regression and the geographical detector technique[J]. Science of the Total Environment, 2018, **619-620**:436-445.

[34] Yun G, He Y, Jiang Y, *et al.* PM_{2.5} spatiotemporal evolution and drivers in the Yangtze river delta between 2005 and 2015[J]. Atmosphere, 2019, **10**(2), doi:10.3390/atmos10020055.

[35] Yan J W, Tao F, Zhang S Q, *et al.* Spatiotemporal distribution characteristics and driving forces of PM_{2.5} in three urban agglomerations of the Yangtze River economic belt[J]. International journal of environmental research and public health, 2021,**18**(5), doi:10.3390/ijerph18052222.

[36] Xu Y, Xue W, Lei Y, *et al.* Spatiotemporal variation in the impact of meteorological conditions on PM_{2.5} pollution in China from 2000 to 2017[J]. Atmospheric Environment, 2019,**223**: 117-215.

[37]杨伟, 姜晓丽. 华北地区大气细颗粒物(PM_{2.5})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**(7): 2995-3003.

Yang W, Jiang X L. Interannual characteristics of fine particulate matter in North China and its relationship with land use and land cover change[J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 2995-3003.

[38] Jing Z, Liu P, Wang T, *et al.* Effects of meteorological factors and anthropogenic precursors on PM_{2.5} concentrations in cities in China[J]. Sustainability,2020,**12**(9):1-13.

[39] Huang C, Liu K, Zhou L. Spatio-temporal trends and influencing factors of PM_{2.5} concentrations in urban agglomerations in China between 2000 and 2016[J]. Environmental

Science and Pollution Research,2021,**28**(9):10988-11000.

[40] Jin N, Li J, Jin M, *et al.* Spatiotemporal variation and determinants of population's PM_{2.5} exposure risk in China, 1998-2017: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,**27**(25),doi:10.1007/s11356-020-09484-8.

