

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性

涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年4月

第43卷 第4期

Vol.43 No.4

目次

2015~2019年河南省PM_{2.5}时空特征与驱动因素分析 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 郭恒亮 (1697)

郑州市大气PM_{2.5}中重金属的污染特征、来源及健康风险评估: 基于高分辨数据 曲光辉, 孙俊苹, 王申博, 姜楠, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 马双良 (1706)

宁波市春节期间水溶性离子污染来源和特征分析 杨梦蓉, 潘勇, 黄仲文, 张晶晶, 黄显军, 何萌萌, 肖航 (1716)

上海城区PM_{2.5}中有机组分及硝基芳香化合物分布特征 庄旻, 马英歌, 程玉璜, 周敏, 戴海夏, 黄成, 郁建珍, 朱书慧, 乔利平, 童张法 (1725)

南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源 陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 张书萌, 刘智艺, 王新锋, 盖鑫磊 (1738)

春节与疫情管控期间珠三角VOCs的组成和来源变化 江明, 袁鸾, 温丽容, 张莹, 方洪波, 杨满芽, 李成柳 (1747)

重庆市主要工业源VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势 李陵, 李振亮, 方维凯, 王晓宸, 蒲茜, 汪凌韬, 袁睿, 张卫东, 翟崇治 (1756)

珠三角某石化园区VOCs排放特征及影响评价 张雪驰, 沙青娥, 陆梦华, 王毓铮, 饶思杰, 明桂英, 李勤勤, 吴淑珠, 郑君瑜 (1766)

基于隧道测试的机动车VOCs排放特征及源解析 刘鑫会, 朱仁成, 金博强, 梅慧, 祖雷, 尹沙沙, 张瑞芹, 胡京南 (1777)

基于多通道分布式VOCs在线监测质谱系统精准识别企业污染源 韦啸, 张永杰, 王沛涛, 洪燕, 夏瑞, 高伟 (1788)

基于SOA和O₃生成潜势的杭州市PM_{2.5}和O₃协同控制 林旭, 严仁婧, 金嘉佳, 许凯儿 (1799)

超低排放燃煤电厂中湿式电除尘器对可凝结颗粒物排放特性的影响 王鹏程, 袁勃, 梁胜文, 蒋鹭翔, 成海容, 许睿光, 虞晓晗, 王祖武 (1808)

西安市住宅室内空气污染物实测分析与叠加效应 王秀茹, 樊灏, 范洁, 沈振兴 (1814)

大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性 涂晨, 田媛, 刘颖, 张馨宁, 骆永明 (1821)

基于在线观测本地因子的长三角家禽养殖氨排放时空分布特征 高宗源, 徐祀, 倪远之, 沈根祥, 苗文亮, 王振旗, 付侃, 钱晓雍, 曹国民 (1829)

西宁市农牧源氨排放清单及其分布特征 杨益, 姬亚芹, 高玉宗, 林孜, 林宇, 马妍 (1844)

“三水”统筹视角下京津冀地区城市水生态环境保护策略分析 廖雅, 侯晓姝, 任晓红 (1853)

中国居民饮用水镉暴露非致癌风险的年龄分层权重 秦宁, 阿依博塔·吐尔逊别克, 刘运炜, 侯荣, 徐翔宇, 官家丞, 段小丽 (1863)

新疆博尔塔拉河流域平原区地表水与地下水水化学特征及转化关系 雷米, 周金龙, 张杰, 陈亚鹏, 滕杰, 吴彤, 徐东升, 孙英, 纪媛媛 (1873)

珠江源区小黄泥河流域地表水水化学组成特征及控制因素 涂春霖, 尹林虎, 和成忠, 寸得欣, 马一奇, 令狐昌卫 (1885)

河套灌区浅层地下水NO₃⁻-N时空变化及驱动因素 袁宏颖, 杨树青, 张万锋, 王波, 韩天凯, 丁雪华 (1898)

盐城地区地下水溶质来源及其成因分析 王建, 张华兵, 许君利, 李永山 (1908)

白洋淀不同水体氢氧同位素特征及其指示意义 王雨山, 尹德超, 祁晓凡, 徐蓉桢 (1920)

东部地区大型湖库有色可溶性有机物来源组成及潜在驱动因素 陈丽丽, 肖启涛, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 韩龙飞 (1930)

松花湖沉积物溶解性有机质荧光光谱特性 程云轩, 赵可, 张越, 张渝婷, 焦立新 (1941)

区域土地利用类型对水源水中溶解性有机物丰度和荧光组分的影响 高静, 蒲晓, 张玉虎, 程红光, 张瑞宁, 刘训良, 董雪, 许新瑶 (1950)

南水北调东线枢纽湖泊表层水体甲烷释放特征及潜在影响因素 朱俊羽, 彭凯, 李宇阳, 俞晓琴, 陈慧敏, 周蕾, 周永强, 丁艳青 (1958)

千岛湖水体中邻苯二甲酸酯(PAEs)的分布特征及健康风险评价 弥启欣, 国晓春, 卢少勇, 邓义祥, 卢洪斌, 李响, 刘晓贺, 陈金明 (1966)

蓝藻越冬期湖湾沉积物磷吸附特征和释放风险 靳郑海, 涂成琪, 王书航, 陈俊伊, 卢昶雨, 黄威 (1976)

基于植物多样性的北京市湿地生态质量评价 李果, 孙光, 赵梓伊, 刘冬梅, 肖能文, 赵志平, 罗遵兰 (1988)

小清河专项治理对莱州湾环境和浮游植物的影响 张晶晶, 王玉珏, 李凡, 刘珂, 王英, 于洋, 高彦洁, 肖晓彤, 吕振波 (1997)

不同曝气方式对人工湿地细菌多样性、代谢活性及功能的影响 王飞鹏, 黄亚玲, 张瑞瑞, 岳琛, 李飞翔, 张超月, 穆景利 (2007)

南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析 岳桢钰, 李一平, 周玉璇, 郑可, 于珊, 伍彬 (2018)

老化作用对微塑料吸附镉的影响及其机制 王俊杰, 陈晓晨, 李权达, 金成俊, 黄艺佳, 范露健, 张剑宇, 刘宪华, 徐开钦 (2030)

碳化泡沫负载Co₃O₄活化过硫酸盐降解罗丹明B 王渊源, 阎鑫, 艾涛, 李卓, 牛艳辉 (2039)

低总氮浓度下Fe²⁺促进ANAMMOX生物膜反应器脱氮 郑旭文, 秦嘉富, 汪晓军, 陈浩川, 朱梓静, 陈振国 (2047)

污水管道增强通风作用下氧气的传质特性 杨洲, 张志强, 杨静, 卢金锁 (2055)

长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价 张义, 周心劝, 曾晓辉, 冯娇, 刘玉荣 (2062)

中国北方典型设施菜地土壤稀土元素分布特征及环境意义 王祖伟, 刘雅明, 王子璐, 苗钰婷 (2071)

贵州省典型铅锌矿区潜在有毒元素(PTEs)物源甄别、生态风险评价及控制因素 张富贵, 彭敏, 贺灵, 马宏宏 (2081)

地质高背景与污染叠加区不同土地利用方式下土壤重金属分布特征 王雪雯, 刘鸿雁, 顾小凤, 涂宇, 于恩江, 吴攀 (2094)

矿区周边农田土壤重金属分布特征及污染评价 王海洋, 韩玲, 谢丹妮, 胡慧娟, 刘志恒, 王祯 (2104)

农田-泥炭藓系统重金属富集特征与生态风险评价 朱迪, 张朝晖, 王智慧 (2115)

安顺市土壤pH空间变异及影响因素分析 陈清霞, 陆晓辉, 涂成龙 (2124)

方解石基组配钝化剂与低积累玉米协同修复效果 任超, 任或仲, 李竞天, 王浩, 朱利文, 肖建辉, 赵瑞, 杜倩倩 (2133)

伯克氏菌Y4对水稻幼苗损伤和镉吸收的影响 张雅荟, 刘月敏, 王常荣, 刘雅萍, 庞杰, 黄永春, 刘仲齐, 张长波 (2142)

我国长江中下游平原典型稻田含碳温室气体通量变化特性 刘硕, 甄晓杰, 刘钢, 冯兆忠 (2151)

地膜覆盖和生物炭添加对菜地N₂O排放的影响 胡剑, 江长胜, 陈鑫童, 熊艳芳, 郝庆菊 (2163)

化肥运筹对稻田CH₄和N₂O排放的影响 郑梅群, 刘娟, 姜培坤, 吴家森, 李永夫, 李松果 (2171)

松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性 王露莹, 孙慧珍, 杨雪 (2182)

棉秆还田对咸水滴灌棉田土壤酶活性和细菌群落结构多样性的影响 周永学, 陈静, 李远, 侯振安, 阎伟 (2192)

pH对水稻土全程氨氧化细菌丰度和群落结构组成影响 马瑞, 赵永鹏, 王智慧, 蒋先军 (2204)

生物炭对紫色土坡耕地侵蚀性耕层土壤有机碳的影响 张健乐, 曾小英, 史东梅, 倪书辉, 夏蕊, 王荣浩 (2209)

有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 林仕芳, 王小利, 段建军, 皮义均, 郭琴波, 龙大勇, 徐彬, 杨宏伟 (2219)

九龙江河口潮滩湿地土壤有机碳储量、活性组分及稳定性沿淹水梯度的分布特征 黄小清, 全川, 罗敏, 杨洋, 谭凤凤, 潘哲妍, 刘娜, 陈欣, 黄佳芳 (2226)

碳中和战略下煤矿区生态碳汇体系构建及功能提升展望 刘祥宏, 阎永军, 刘伟, 黄占斌 (2237)

《环境科学》征订启事(1929) 《环境科学》征稿简则(1975) 信息(1996, 2029, 2080)

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. 郑州大学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

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)04-1697-09 DOI: 10.13227/j.hjkk.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 University, 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 were used to analyze its temporal and spatial characteristics, and the geodetector method was introduced to analyze the interpretation strength of meteorological factors, air quality factors, and social factors on PM_{2.5} concentration. The results showed 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} had obvious characteristics of spatial aggregation. The five-year global spatial autocorrelation index first dropped and then rose, and the spatial hot spots were concentrated in northern Henan (Anyang, Hebi, Xinxiang, and Jiaozuo); the spatial cold spots were concentrated in western Henan (Sanmenxia, Luoyang, and Nanyang). The shift in space center of gravity showed a trend of going north. Single-factor detection showed that among the nine influencing factors, land use type (0.511), precipitation (0.312), and NO₂ (0.277) were the most obvious factors affecting PM_{2.5} concentration, and the other factors were PM₁₀ (0.255), temperature (0.209), 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 factors. These 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

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, 201400210700)

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@zhu.edu.cn

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 10 a 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 (O_3)、 PM_{10} 浓度、二氧化氮浓度 (NO_2)、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 10 722 万人, 其中城镇人口 5 053 万人, 农村人口 5 699 万人, GDP 全年 37 002 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.

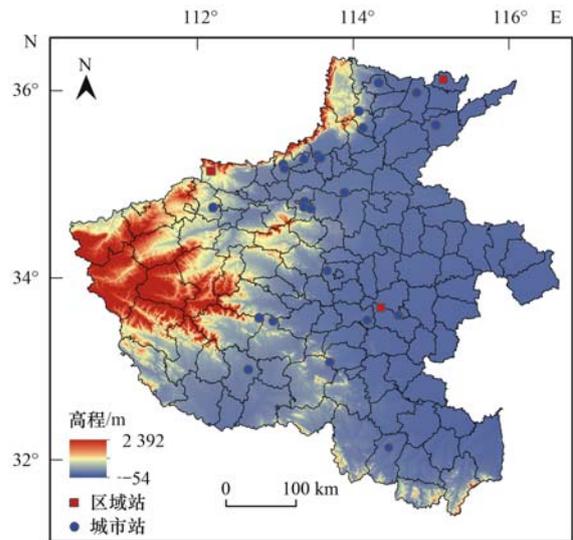


图 1 高程和监测站点分布

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.

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、 PM_{10} 浓度和 NO_2 浓度等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、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、臭氧、 NO_2 和 SO_2 等数据. 其中 NO_2 、 PM_{10} 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

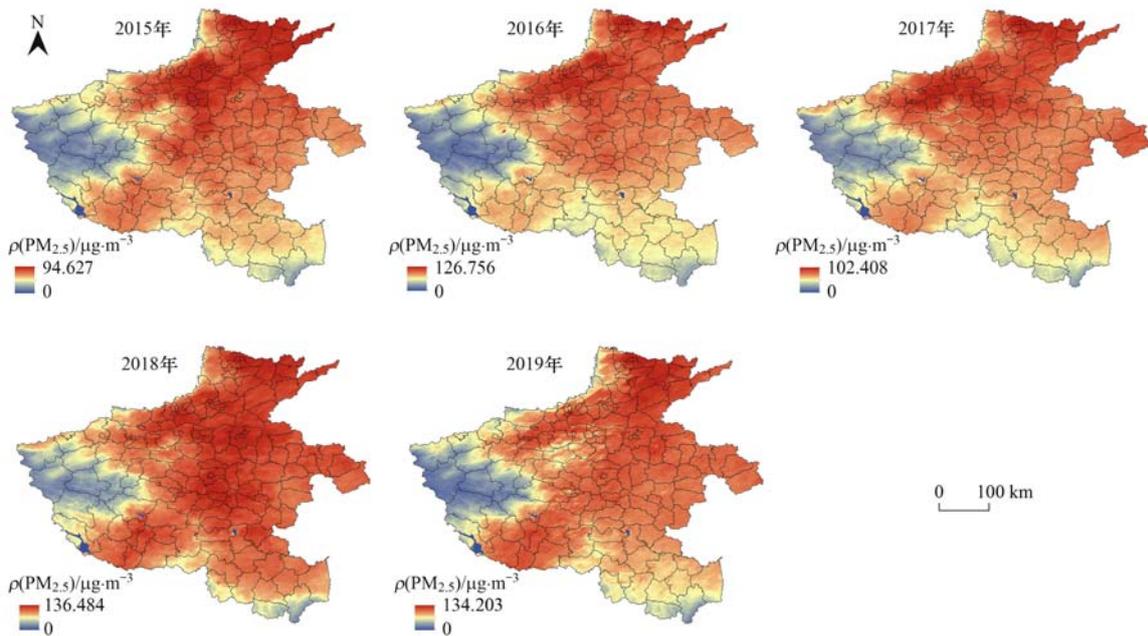


图 2 2015 ~ 2019 年 PM_{2.5} 浓度年均值空间分布

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

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充. 图 3 为研究区域内格网划分和影响因子栅格数据.

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:

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

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, *y* 为所有的研究区的 PM_{2.5} 浓度均值, *S₀* 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:

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

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, *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:

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

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

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

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:

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

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

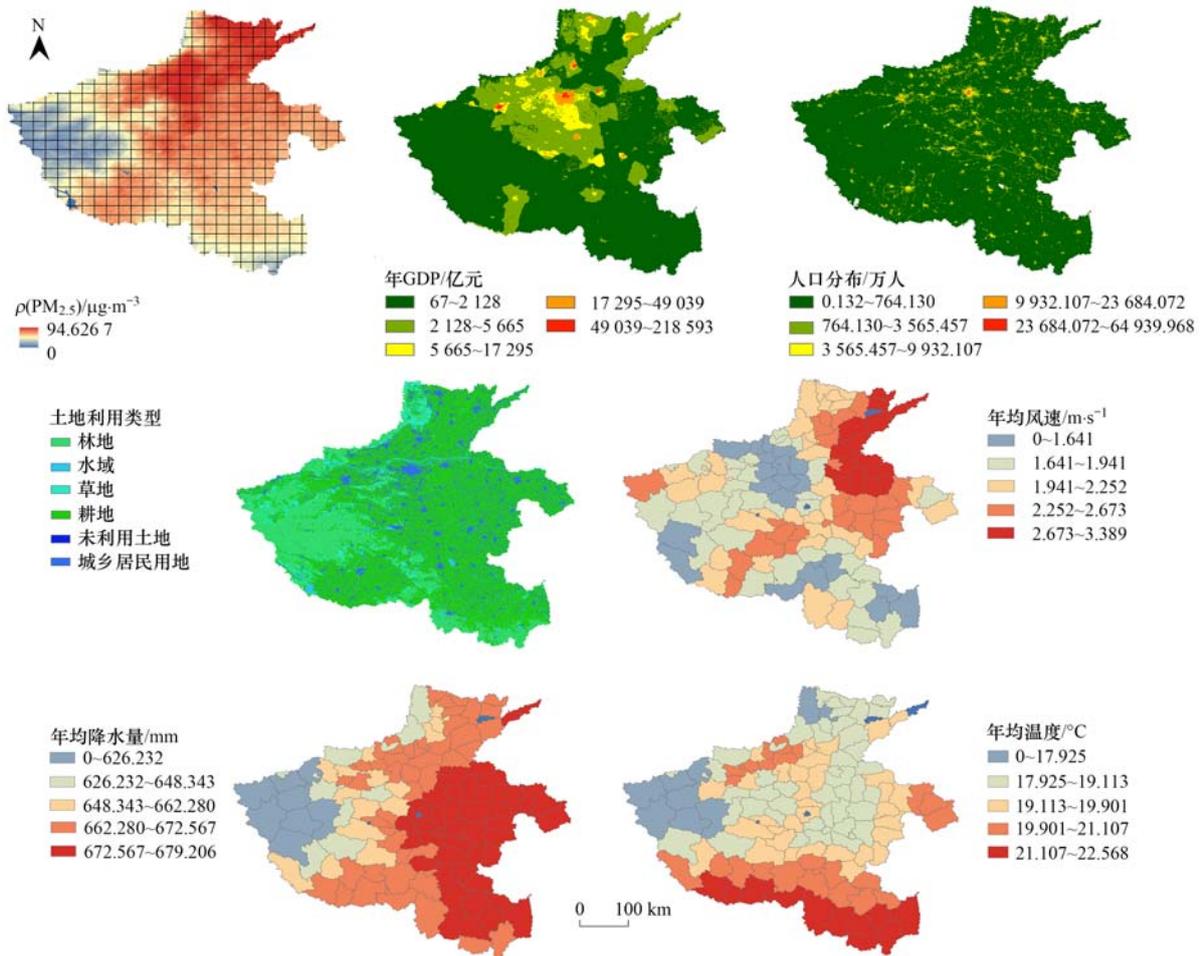


图 3 网格划分和影响因子栅格数据

Fig. 3 Grid division and impact factor raster data

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:

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

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: $\rho(PM_{2.5})$ 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 3 a 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 55~75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 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 75~100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 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%.

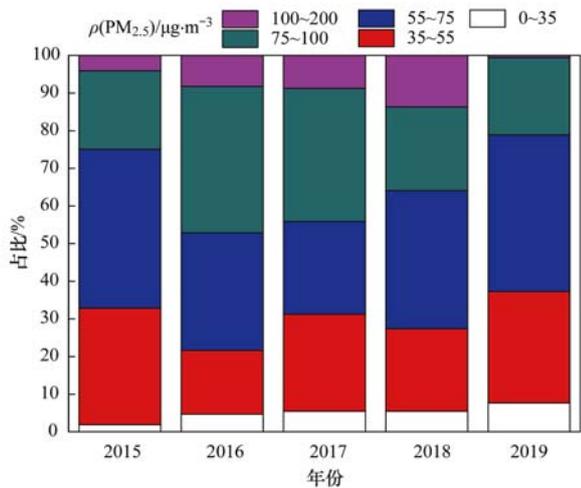


图4 2015~2019年PM_{2.5}浓度变化趋势

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

2015~2019年河南省 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 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 75~100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 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 3 a,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^* 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

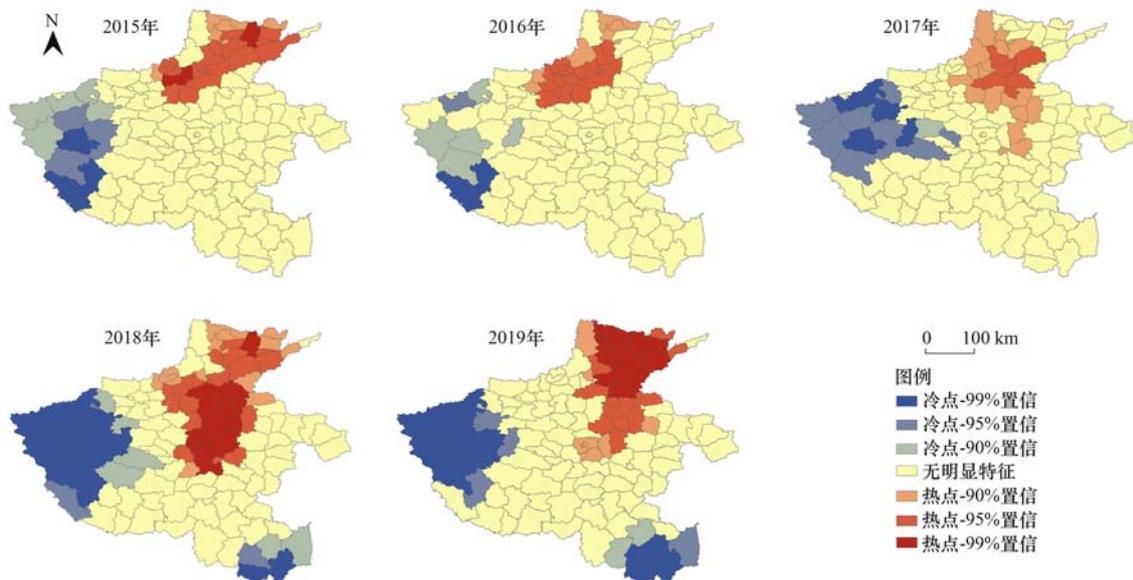


图5 空间冷热点分布

Fig. 5 Distribution of cold and hot spots in space

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.

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 5 a 的 PM_{2.5}浓度空间重心大体都处于河南省中部地区,从

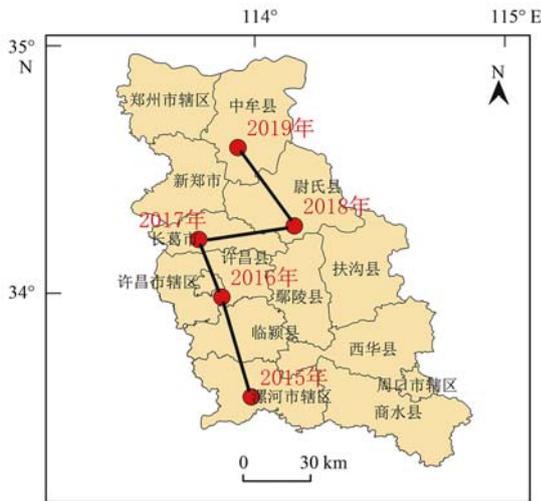


图 6 空间重心转移路线

Fig. 6 Space center of gravity transfer route

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.

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 25 km × 25 km 网格,读取网格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

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	—
土地利用类型	0.537	0.545	0.549	0.539	0.611	0.542	0.533	0.526	0.511

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。

3 讨论

空气污染的传播过程受到人为因素和自然条件影响,科学地分析方法可以揭示 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、PM₁₀ 浓度、NO₂ 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 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 整体呈现降低的趋势,这主要表现在 100 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 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 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 低于 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 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、SO₂ 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 5 a 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,5 a 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看出。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、PM₁₀ 浓度和 NO₂ 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性,有显著的空间聚集特征,且 5 a 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 5 a 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 L, Guo Y F, 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]. The 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 W, Ji W J, *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] Li X, Gao Z Q, 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.
Zhang 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] Matos P, Vieira J, Rocha B, *et al.* Modeling the provision of air-quality regulation ecosystem service provided by urban green spaces using lichens as ecological indicators[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **665**: 521-530.
- [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 Sciences*, 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 2011 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(11): 2079-2092.
- [11] Jin Q, Fang X Y, Wen B, *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 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]. *Journal of Spatial Science*, 2021, **66**(2): 279-297.
- [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**: 333-346.
- [17] Xiao L, Lang Y C, 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**: 295-305.
- [18] Yang Q Q, Yuan Q Q, Yue L W, *et al.* Investigation of the spatially varying relationships of PM_{2.5} with meteorology, topography, and emissions over 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 F, Belle J H, Meng X, *et al.* Estimating PM_{2.5} concentrations in the conterminous United States using the random forest approach [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(12): 6936-6944.
- [22] Wei J, Huang W, Li Z Q, *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 2016 [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 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**: 1125-1133.
- [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 J. WorldPop, open data for spatial demography [J]. *Scientific Data*, 2017, **4**, doi: 10.1038/sdata.2017.4.
- [31] Yang D Y, Wang X M, Xu J H, *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 S, Chen J, Wang S J. 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 L, He Y R, Jiang Y T, *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 L, Xue W B, 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*, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117215.
- [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 Y, Liu P F, Wang T H, *et al.* Effects of meteorological factors and anthropogenic precursors on PM_{2.5} concentrations in cities in China [J]. *Sustainability*, 2020, **12**(9), doi: 10.3390/su12093550.
- [39] Huang C H, 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): 31767-31777.

CONTENTS

Analysis on Spatial-temporal Characteristics and Driving Factors of PM _{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019	GE Qi-xu, LIU Yan, YANG Hong, <i>et al.</i>	(1697)
Pollution Characterization, Source Identification, and Health Risks of Atmospheric Particle-Bound Heavy Metals in PM _{2.5} in Zhengzhou City: Based on High-resolution Data	QU Guang-hui, SUN Jun-ping, WANG Shen-bo, <i>et al.</i>	(1706)
Source Analysis and Composition Characteristics of Water-soluble Ions During Spring Festival in Ningbo	YANG Meng-rong, PAN Yong, HUANG Zhong-wen, <i>et al.</i>	(1716)
Characteristics of Nitroaromatic Compounds in PM _{2.5} in Urban Area of Shanghai	ZHUANG Min, MA Ying-ge, CHENG Yu-huang, <i>et al.</i>	(1725)
Characteristics and Sources of Nitrated Phenols in Atmospheric Fine Particles of Northern Suburban Nanjing	CHEN Mei-juan, QIAN Zi-he, GU Chen-juan, <i>et al.</i>	(1738)
Variety of the Composition and Sources of VOCs During the Spring Festival and Epidemic Prevention in the Pearl River Delta	JIANG Ming, YUAN Luan, WEN Li-rong, <i>et al.</i>	(1747)
Speciated Emission Inventory of VOCs from Industrial Sources and Their Ozone Formation Potential in Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, FANG Wei-kai, <i>et al.</i>	(1756)
Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Influences Assessment of a Petrochemical Industrial Park in the Pearl River Delta Region	ZHANG Xue-chi, SHA Qing-e, LU Meng-hua, <i>et al.</i>	(1766)
Characteristics and Source Apportionment of Vehicular VOCs Emissions in a Tunnel Study	LIU Xin-hui, ZHU Ren-cheng, JIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1777)
Accurate Identification of Pollution Sources in a Chemical Enterprise Based on a Distributed Multi-channel VOCs Online Monitoring Mass Spectrometry System	WEI Xiao, ZHANG Yong-jie, WANG Pei-tao, <i>et al.</i>	(1788)
Coordinated Control of PM _{2.5} and O ₃ in Hangzhou Based on SOA and O ₃ Formation Potential	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i>	(1799)
Effect of WESP on Emission Characteristics of Condensable Particulate Matter from Ultra-low Emission Coal-fired Power Plants	WANG Peng-cheng, YUAN Chang, LIANG Sheng-wen, <i>et al.</i>	(1808)
Measurement Analysis and Superposed Effect of Residential Indoor Air Pollutants in Xi'an	WANG Xiu-ru, FAN Hao, FAN Jie, <i>et al.</i>	(1814)
Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn	TU Chen, TIAN Yuan, LIU Ying, <i>et al.</i>	(1821)
Spatiotemporal Distribution of Ammonia Emissions from Poultry Farming in the Yangtze River Delta Based on Online Monitoring Derived Local Emission Factors	GAO Zong-yuan, XU Chang, NI Yuan-zhi, <i>et al.</i>	(1829)
Agricultural Ammonia Emission Inventory and Its Distribution in Xining City	YANG Yi, JI Ya-qin, GAO Yu-zong, <i>et al.</i>	(1844)
Analysis of the Urban Water Eco-environment Protection Strategy in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from "Three Waters" Overall Planning	LIAO Ya, HOU Xiao-shu, REN Xiao-hong	(1853)
Non-carcinogenic Risk Assessment of Cadmium Exposure Through Drinking Water in Chinese Residents Based on Age-stratification Weight	QIN Ning, Ayibota Tuexunbieke, LIU Yun-wei, <i>et al.</i>	(1863)
Hydrochemical Characteristics and Transformation Relationship of Surface Water and Groundwater in the Plain Area of Bortala River Basin, Xinjiang	LEI Mi, ZHOU Jin-long, ZHANG Jie, <i>et al.</i>	(1873)
Hydrochemical Composition Characteristics and Control Factors of Xiaohuangni River Basin in the Upper Pearl River	TU Chun-lin, YIN Lin-hu, HE Cheng-zhong, <i>et al.</i>	(1885)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Driving Factors of Nitrogen of Shallow Groundwater in Hetao Irrigation District	YUAN Hong-ying, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i>	(1898)
Provenance of Groundwater Solute and Its Controlling Factors in Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i>	(1908)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics of Different Water and Indicative Significance in Baiyangdian Lake	WANG Yu-shan, YIN De-chao, QI Xiao-fan, <i>et al.</i>	(1920)
Optical Composition and Potential Driving Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Large Lakes and Reservoirs in the Eastern Region of China	CHEN Li-li, XIAO Qi-tao, YU Xiao-qin, <i>et al.</i>	(1930)
Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Songhua Lake Sediment	CHENG Yun-xuan, ZHAO Ke, ZHANG Yue, <i>et al.</i>	(1941)
Abundance and Fluorescent Components of Dissolved Organic Matter Affected by Land Use in a Drinking Water Source	GAO Jing, PU Xiao, ZHANG Yu-hu, <i>et al.</i>	(1950)
Emission of Methane from a Key Lake in the Eastern Route of the South-to-North Water Transfer Project and the Corresponding Driving Factors	ZHU Jun-yu, PENG Kai, LI Yu-yang, <i>et al.</i>	(1958)
Distribution Characteristics and Ecological and Health Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Surface Water of Qiandao Lake, China	MI Qi-xin, GUO Xiao-chun, LU Shao-yong, <i>et al.</i>	(1966)
Phosphorus Adsorption Characteristics and Loss Risk in Sediments of Lake Bay During the Overwinter Period of Cyanobacteria	JIN Zheng-hai, TU Cheng-qi, WANG Shu-hang, <i>et al.</i>	(1976)
Ecological Quality Assessment of the Wetlands in Beijing: Based on Plant Diversity	LI Guo, SUN Guang, ZHAO Zi-yi, <i>et al.</i>	(1988)
Effects of Pollution Control of Xiaoqing River on Environment Factors and Phytoplankton Community in the Laizhou Bay	ZHANG Jing-jing, WANG Yu-jue, LI Fan, <i>et al.</i>	(1997)
Effects of Different Aeration Treatments on Bacterial Diversity, Metabolic Activity, and Function in Constructed Wetlands	WANG Fei-peng, HUANG Ya-ling, ZHANG Rui-ni, <i>et al.</i>	(2007)
Analysis on the Source Tracing and Pollution Characteristics of Rainfall Runoff in the Old Urban Area of Nanning City	YUE Zhen-wu, LI Yi-ping, ZHOU Yu-xuan, <i>et al.</i>	(2018)
Effects of Aging on the Cd Adsorption by Microplastics and the Relevant Mechanisms	WANG Jun-jie, CHEN Xiao-chen, LI Qian-da, <i>et al.</i>	(2030)
Carbonized Foam Supported Co ₃ O ₄ Activated Peroxymonosulfate Towards Rhodamine B Degradation	WANG Yuan-yuan, YAN Xin, AI Tao, <i>et al.</i>	(2039)
Promoting Nitrogen Removal in ANAMMOX Biofilm Reactor by Fe ²⁺ Under Low Nitrogen Concentration	ZHENG Xu-wen, QIN Jia-fu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i>	(2047)
Investigation on Oxygen Gas-liquid Mass Transfer in Sewage Pipelines Under Enhanced Ventilation	YANG Zhou, ZHANG Zhi-qiang, YANG Jing, <i>et al.</i>	(2055)
Characteristics and Assessment of Heavy Metal Contamination in Soils of Industrial Regions in the Yangtze River Economic Belt	ZHANG Yi, ZHOU Xin-quan, ZENG Xiao-min, <i>et al.</i>	(2062)
Distribution and Environmental Significance of Rare Earth Elements in Typical Protected Vegetable Soil, Northern China	WANG Zu-wei, LIU Ya-ming, WANG Zi-lu, <i>et al.</i>	(2071)
Sources Identification, Ecological Risk Assessment, and Controlling Factors of Potentially Toxic Elements in Typical Lead-Zinc Mine Area, Guizhou Province, Southwest China	ZHANG Fu-gui, PENG Min, HE Ling, <i>et al.</i>	(2081)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils Affected by Different Land Use Types in a Superimposed Pollution Area with High Geological Background	WANG Xue-wen, LIU Hong-yan, GU Xiao-feng, <i>et al.</i>	(2094)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Areas and Pollution Assessment	WANG Hai-yang, HAN Ling, XIE Dan-ni, <i>et al.</i>	(2104)
Concentration Characteristics of Heavy Metals in Farmland-Sphagnum System and Ecological Risk Assessment	ZHU Di, ZHANG Zhao-hui, WANG Zhi-hui	(2115)
Spatial Variation and Influencing Factors of Soil pH in Anshun City	CHEN Qing-xia, LU Xiao-hui, TU Cheng-long	(2124)
Synergistic Repair Effect of Calcite-Based Passivator and Low-Accumulation Maize	REN Chao, REN Yu-zhong, LI Jing-tian, <i>et al.</i>	(2133)
Effects of <i>Burkholderia</i> sp. Y4 on Cadmium Damage and Uptake in Rice Seedlings	ZHANG Ya-hui, LIU Yue-min, WANG Chang-rong, <i>et al.</i>	(2142)
Changing Characteristics of Carbon-Based Greenhouse Gas Fluxes in Paddy Field in the Middle-Lower Yangtze Plain in China	LIU Shuo, ZHEN Xiao-jie, LIU Gang, <i>et al.</i>	(2151)
Effects of Plastic Film Mulching and Biochar Application on N ₂ O Emission from a Vegetable Field	HU Jian, JIANG Chang-sheng, CHEN Xin-tong, <i>et al.</i>	(2163)
Effects of Nitrogen Fertilizer Management on CH ₄ and N ₂ O Emissions in Paddy Field	ZHENG Mei-qun, LIU Juan, JIANG Pei-kun, <i>et al.</i>	(2171)
Structure and Functional Diversity of Bacterial Community in Rhizosphere Soil of Typical Vegetation in the Riparian Zone Along the Downstream of Songhua River	WANG Lu-ying, SUN Hui-zhen, YANG Xue	(2182)
Effects of Cotton Stalk Returning on Soil Enzyme Activity and Bacterial Community Structure Diversity in Cotton Field with Long-term Saline Water Irrigation	ZHOU Yong-xue, CHEN Jing, LI Yuan, <i>et al.</i>	(2192)
Effect of pH on the Abundance and Community Structure of Comammox <i>Nitrospira</i> in Paddy Soils	MA Rui, ZHAO Yong-peng, WANG Zhi-hui, <i>et al.</i>	(2204)
Effects of Biochar on Soil Organic Carbon of Eroded Cultivated Layer of Slope Farmland in Purple Hilly Area	ZHANG Jian-le, ZENG Xiao-ying, SHI Dong-mei, <i>et al.</i>	(2209)
Effects of Organic Fertilizer Replacing Chemical Fertilizer on Organic Carbon Mineralization and Active Organic Carbon in Dryland Yellow Soil	LIN Shi-fang, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, <i>et al.</i>	(2219)
Soil Organic Carbon Storage, Active Component Contents, and Stability Along a Flooding Gradient in the Tidal Wetland of the Julong River Estuary	HUANG Xiao-qing, TONG Chuan, LUO Min, <i>et al.</i>	(2226)
System Construction and the Function Improvement of Ecological Carbon Sink in Coal Mining Areas Under the Carbon Neutral Strategy	LIU Xiang-hong, YAN Yong-jun, LIU Wei, <i>et al.</i>	(2237)