

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

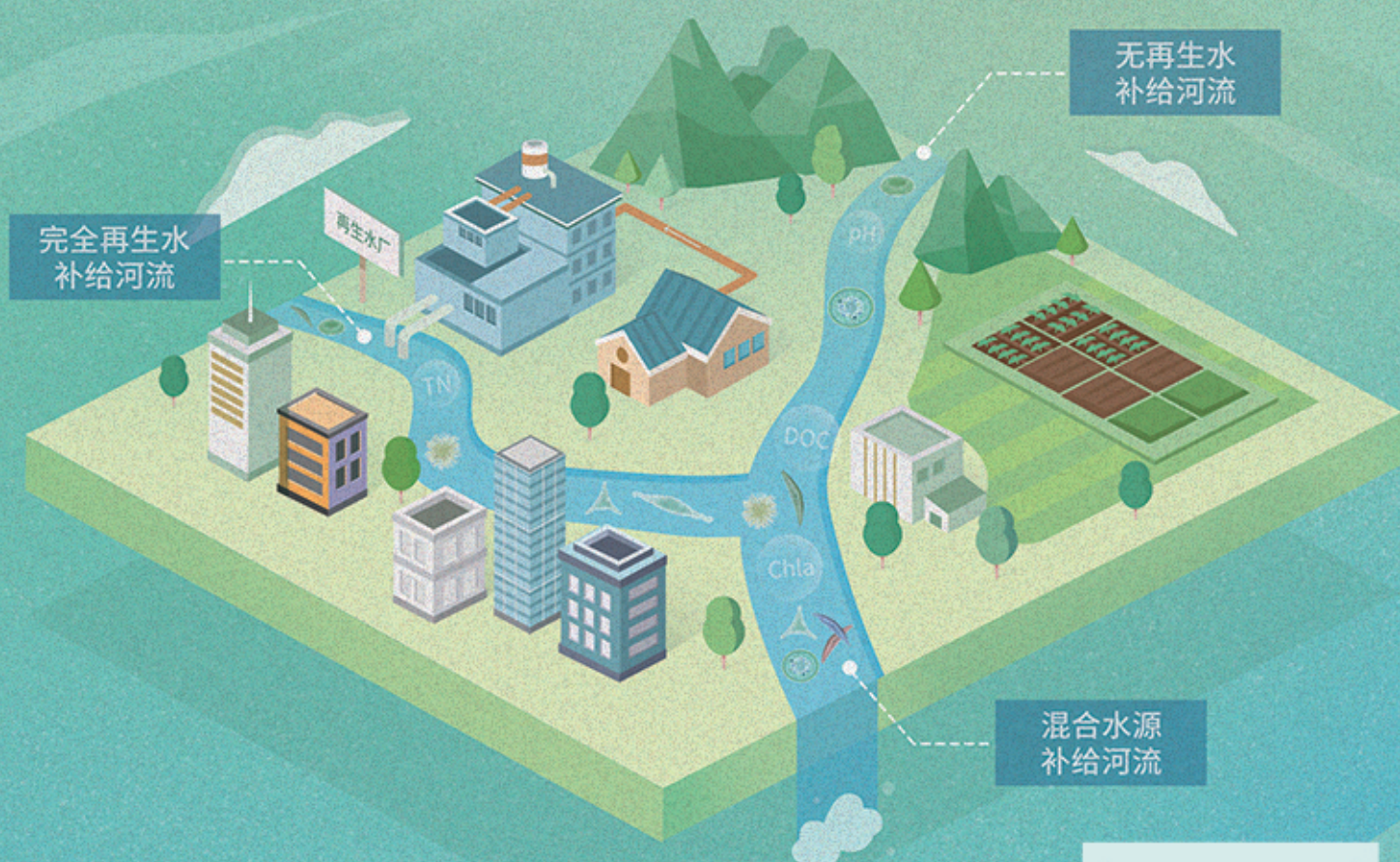
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩群 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于 g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜璨, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

中原城市群 PM_{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响

周志衡^{1,2}, 周廷刚^{1,2*}, 秦宁³

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 3. 安徽大学管理学院, 合肥 230601)

摘要: 城市群是中国 PM_{2.5} 污染防治的核心区. 为探究中原城市群 PM_{2.5} 浓度驱动因子的作用机制, 基于多源遥感数据和统计数据, 采用空间自相关、参数最优地理探测器以及系统动态面板回归模型等方法, 量化了 PM_{2.5} 浓度的驱动因子及因子间的联动效应, 进一步分析了社会经济因素对 PM_{2.5} 浓度的非线性影响并给出相应的治理建议. 结果表明: ①2012~2018 年, 中原城市群 PM_{2.5} 浓度下降程度存在空间分异, 北部较南部地区污染减弱更为显著. ②PM_{2.5} 浓度高值聚集有从中原城市群北部向东部转移的趋势, 而低值聚集情况相对稳定. ③高程对 PM_{2.5} 浓度的解释力最强, 因子间联动效应对 PM_{2.5} 污染的解释力均表现为增强, 其中高程与降水交互后解释力最强. ④人均 GDP、人口密度、夜间灯光、外商直接投资和第三产业占比均与 PM_{2.5} 浓度之间存在非线性关系. 结合中原城市群现状, 加大污染治理投入、调整城市结构形态、加强基础设施建设、调整人口分布与产业结构、保持较高的城市活跃水平、设定严格的环境法规和引入高质量外商投资等有助于治理 PM_{2.5} 污染.

关键词: PM_{2.5}; 非线性影响; 驱动因子; 联动效应; 中原城市群

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5344-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201046

Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM_{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration

ZHOU Zhi-heng^{1,2}, ZHOU Ting-gang^{1,2*}, QIN Ning³

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region (Ministry of Education), Chongqing 400715, China; 3. School of Management, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Urban agglomerations are the core areas of PM_{2.5} pollution and prevention in China. In order to explore the mechanism of PM_{2.5} concentration driving factors in the Central Plains Urban Agglomeration, we took multi-source remote sensing data and statistical data as the foundation and used spatial autocorrelation, an optimal parameters-based geographical detector, and a system dynamic panel regression model to quantify the driving factors of PM_{2.5} concentrations and the linkage between the factor effects. Furthermore, we analyzed the nonlinear influence of social and economic factors on PM_{2.5} concentration and gave corresponding suggestions for haze control. The results showed that: ① from 2012 to 2018, the degree of PM_{2.5} concentration decline in the Central Plains Urban Agglomeration showed spatial differentiation, and pollution reduction in the northern region was more significant than that in the southern region. ② The high concentration of PM_{2.5} had a tendency to shift from the north to the east of the Central Plains Urban Agglomeration, whereas the low concentration was relatively stable. ③ Elevation had the strongest explanatory power for PM_{2.5} concentration, and the explanatory power of the inter-factor linkage effect on PM_{2.5} pollution was enhanced, among which the interaction between elevation and precipitation had the strongest explanatory power. ④ PM_{2.5} concentration had a nonlinear relationship with per capita GDP, population density, night lighting, foreign direct investment, and the proportion of secondary industry. According to the status quo of the Central Plains Urban Agglomeration, increasing investment in pollution control, adjusting urban structure and form, strengthening infrastructure construction, adjusting population distribution and industrial structure, maintaining a high level of urban activity, setting strict environmental regulations, and introducing high-quality foreign investment can help control PM_{2.5} pollution.

Key words: PM_{2.5}; nonlinear effect; driving factor; linkage effect; Central Plains Urban Agglomeration

中国的工业化和城市化快速推进, 综合国力和影响力不断提升, 但也带来了一系列生态环境问题, 特别是近些年来频发的空气污染问题, 影响着我国可持续发展的道路^[1]. PM_{2.5} 污染是众多空气污染类型中危害较大的一种, 以 PM_{2.5} 为主要成分的雾-霾污染不仅显著降低能见度而干扰交通, 而且人们长期吸入会导致过早死亡^[2], 已经引起了政府、企业和广大学者的广泛关注^[3~5]. 近年来, 城市群被认为是中国新型城镇化的主体形态, 参与国际分工合作的新区单元^[6], 也是 PM_{2.5} 污染治理的核心区域. 据文献^[7], 2019 年全国 337 个地级及以上城市中, 仍有 43.3% 的城市空气质量超标. PM_{2.5} 为首要污染物的超标天数占总超标天数的 51.0%. 城市环境空

气质量排名倒数后 10 名中有 5 名位于中原城市群. 中原城市群人口聚集且经济规模庞大, 是中国 PM_{2.5} 污染最为严重的城市群之一^[8].

导致 PM_{2.5} 浓度变化的因素多而复杂, 关于单个自然或社会经济驱动因子已经得到广泛研究^[9, 10]. 有研究指出地理空间属性和区域经济与 PM_{2.5} 浓度之间存在显著的空间关联效应^[11]. 因此, 在对 PM_{2.5} 浓度与其驱动力的关系进行量化时, 考虑空间异质

收稿日期: 2022-01-05; 修订日期: 2022-04-07

基金项目: 国务院三峡办三峡后续工作专项 (5000002013BB5200002)

作者简介: 周志衡 (1998~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境遥感和大气污染控制, E-mail: zzh_gua@163.com

* 通信作者, E-mail: zhouzg@163.com

性是有必要的. 地理探测器作为一种探测空间分异性, 揭示背后驱动因子的新的统计方法^[12], 用于 $\text{PM}_{2.5}$ 影响因子的量化有其独特的优势. 地理探测器不仅可以定量描述单个因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 的作用强度, 还可以解释双因子的联动效应, 可以很好地弥补以往研究只集中于分析单因子作用的缺陷. 与地理探测器相比, 基于最优参数的地理探测器 (optimal parameters-based geographical detector, OPGD) 模型通过寻找离散化和空间尺度参数的最优组合, 提高了分析空间分层异质性的能力^[13]. 随着研究的深入, 人们开始对驱动因素和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度之间的关系进行量化, 如利用最小二乘法 (OLS)^[14]、灰色关联模型^[15] 和空间计量模型^[16] 等进行探究, 但以上模型大多分析两者之间的线性关系, 且忽略了前期的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度带来的时滞效应^[17]. 已有研究证明中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染存在区域环境库兹尼茨曲线 (EKC) 关系^[18], 系统动态面板回归模型不仅能探究非线性关系, 还能很好地解决滞后效应和内生性问题, 具有很好的效率和稳健性^[19].

本研究的目的是利用空间自相关模型量化中原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空分布特征及其空间聚集属性, 利用 OPGD 模型量化 $\text{PM}_{2.5}$ 驱动因子解释力, 探究多因子之间的联动效应对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响, 并运用系统动态面板回归模型探究社会经济因素与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度之间的非线性关系, 以期为实现中原城市群环境友好型发展和制定合理治霾方案提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

中原城市群位于中国中东部地区 (图 1), 区域范围涵盖河南全部城市, 安徽、河北、山西和山东等部分地级市, 共计 30 个地级市. 截至 2019 年底, 区域面积约 28.70 万 km^2 , 占全国面积的 3%; 年末总人口 16 433 万, 占全国总人口的 12%; GDP 总量 8.47 万亿元, 仅次于三大国家级城市群. 中原城市群被国家定位为中国经济发展的新增长极, 新欧亚大陆桥经济走廊极具活力的核心地带^[20], 但其长期受到霾污染的影响, 改善空气质量已经成为亟待解决的问题.

1.2 数据来源与处理

本文所使用数据包括: ① $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度栅格数据来自达尔豪斯大学大气成分分析组, 空间分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$. 该数据集已经在不同的空间尺度上得到广泛应用, 并在中国区域的可靠性得到验证^[21]; ② 自然源因子. 温度 (TEM)、降水量 (PRE) 和风速 (WIND) 等气象数据来源于国家气象科学数

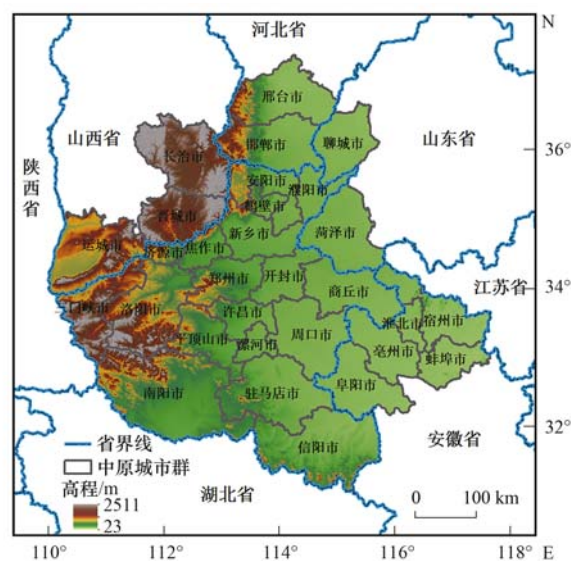


图 1 中原城市群空间分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of Central Plains Urban Agglomeration

据中心, 归一化植被指数 (NDVI) 和数字高程模型 (DEM) 数据由中国科学院资源环境科学与数据中心提供; ③ 社会经济因子. 本文采用人口密度 (POP) 表征人口分布聚集情况、人均国内生产总值 (GDPPC) 表征经济发展水平、第二产业占比 (IS) 表征产业结构、外商直接投资 (FDI) 表征贸易开放水平、NPP-VIIRS 夜间灯光 (NSL) 表征城市活跃程度以及道路密度 (ROAD_D) 和河网密度 (RIVER_D) 表征基础设施水平. POP 栅格数据来源于 World Pop 数据集 (<https://www.worldpop.org/>). NPP-VIIRS 月度夜间灯光数据来自于美国国家地球物理数据中心 (<https://www.ngdc.noaa.gov/>), 空间分辨率约为 500 m, 本研究将月度数据进行年度合成, 并对其进行去噪处理^[22] 以消除渔光和火灾等短暂光的影响. GDPPC 数据包括 2015 年 GDP 栅格数据和 2012 ~ 2018 年的 GDPPC 统计数据, 分别来源于中国科学院资源环境科学与数据中心和城市统计年鉴. 路网和河网数据来自 2015 年 OpenStreetMap 历史数据集, 并利用 ArcGIS 计算得到 ROAD_D 和 RIVER_D. IS 和 FDI 统计数据收集于 2013 ~ 2019 年中国城市统计年鉴. ④ 中国行政区划数据来自于国家地理信息中心.

为保证数据的可比性, 将所有具有空间信息属性的数据重新投影到 WGS84 地理坐标系和 Albers 投影坐标系中, 并重新采样至 1km 的空间分辨率, 使各驱动因子与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据空间单元相匹配, 各因子的缺失值采用栅格邻域计算进行补全.

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关分析

为描述 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在中原城市群整体的分布情

况,利用 Moran's I 指数检验其全局空间自相关性,用 P 值和 Z 得分衡量 Moran's I 指数的显著性水平,该系数和 Z 得分定义如下:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (1)$$

$$Z_I = [I - E(I)] \cdot [E(I^2) - E(I)^2]^{-1/2} \quad (2)$$

式中, w_{ij} 为空间权重矩阵, n 为中原城市群城市单元个数, z_i 和 z_j 分别为城市单元 i 、 j 和所有城市单元平均值之差. I 的取值在 $-1 \sim 1$, 当 $I > 0$, 表明相邻城市单元正相关; 当 $I = 0$, 相邻城市单元为不相关; 当 $I < 0$, 相邻城市单元呈负相关. $E(I)$ 为 I 的数学期望.

为探究城市尺度单元 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度之间的差异,用局部空间自相关来识别其空间聚集以及空间异质性^[23]. 局部 Moran's I 定义如下:

$$I_i = n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^m w_{ij} z_j / \sum_{i=1}^n z_i^2 \quad (3)$$

式中, x_i 和 x_j 分别为不同的城市单元 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值, m 为城市单元 i 相邻的单元个数, w_{ij} 、 n 、 z_i 和 z_j 含义同式(1).

Z 得分同样可以描述局部 Moran's I 的显著水平,采用 $P = 0.05$ 的显著性水平进行检验. 满足显著性水平条件的空间单元可划分为 4 种聚集类型: $I > 0$ 且 $Z(I) > 0$, 为“高-高”; $I > 0$ 且 $Z(I) < 0$, 为“低-低”; $I < 0$ 且 $Z(I) > 0$, 为“高-低”; $I < 0$ 且 $Z(I) < 0$, 为“低-高”.

1.3.2 参数最优地理探测器分析

本文利用因子探测器^[12]来量化单个驱动因子对于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响程度. 常用 q 值表示,其定义如下:

$$q = 1 - \left[\frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \right] \quad (4)$$

式中, $h = 1, \dots, L$ 表示 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和驱动因子的分类数, N 和 N_h 分别为全区和 h 子区内的单元数, σ^2 和 σ_h^2 分别为 $\text{PM}_{2.5}$ 在全区和 h 子区的方差. q 的取值范围为 $[0, 1]$, q 值越大,表明解释程度越高.

用交互探测器来考察双驱动因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分异的联动效应影响. 假设两个驱动因子 X_a 和 X_b 对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的解释力分别为 $q(X_a)$ 和 $q(X_b)$, 两个解释层叠加后得到的新解释层为 $X_a \cap X_b$, 其解释力为 $q(X_a \cap X_b)$, 根据三者 q 值大小得到 5 种交互类型(表 1).

1.3.3 系统动态面板回归分析

前期的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染会影响当前的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状

表 1 两个影响因素间的交互类型

Table 1 Type of interaction between two influencing factors	
判断标准	交互类型
$q(X_a \cap X_b) = q(X_a) + q(X_b)$	独立
$q(X_a \cap X_b) > q(X_a) + q(X_b)$	非线性增强
$q(X_a \cap X_b) > \text{Max}[q(X_a), q(X_b)]$	双因子增强
$q(X_a \cap X_b) < \text{Min}[q(X_a), q(X_b)]$	非线性减弱
$\text{Min}[q(X_a), q(X_b)] < q(X_a \cap X_b) < \text{Max}[q(X_a), q(X_b)]$	单变量非线性减弱

况,即时滞效应^[24]. 为解决这种效应影响,考虑采用动态面板数据模型(DPDM),通过在静态面板数据模型中加入被解释变量滞后项作为解释变量,可有效解决内生性偏误问题,并且可检测变量的动态性质及其影响. 在动态面板模型中,由于系统广义矩估计比差分广义矩估计具有更好的效率和稳健性^[25],因此本文采用系统广义矩估计进行分析. 通过在模型中引入核心解释变量及其多次项来探究中原城市群社会经济因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的非线性作用. 计量模型如下:

$$\ln \text{PM}_{it} = a_0 + a_1 \ln \text{PM}_{i,t-1} + a_2 X_{it} + a_3 X_{it}^2 + \theta \text{CV}_{it} + \varepsilon_{it} \quad (5)$$

式中, i 为城市, t 为年份, $\ln \text{PM}_{it}$ 代表 i 城市 t 年的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度值; X_{it} 为核心解释变量; $\ln \text{PM}_{i,t-1}$ 为 $\ln \text{PM}_{it}$ 的滞后一期; CV_{it} 为控制变量矩阵; a_0 为常数项; θ 为控制变量集的系数; ε_{it} 为随机误差项. 对所有变量取对数以消除数据异方差的影响.

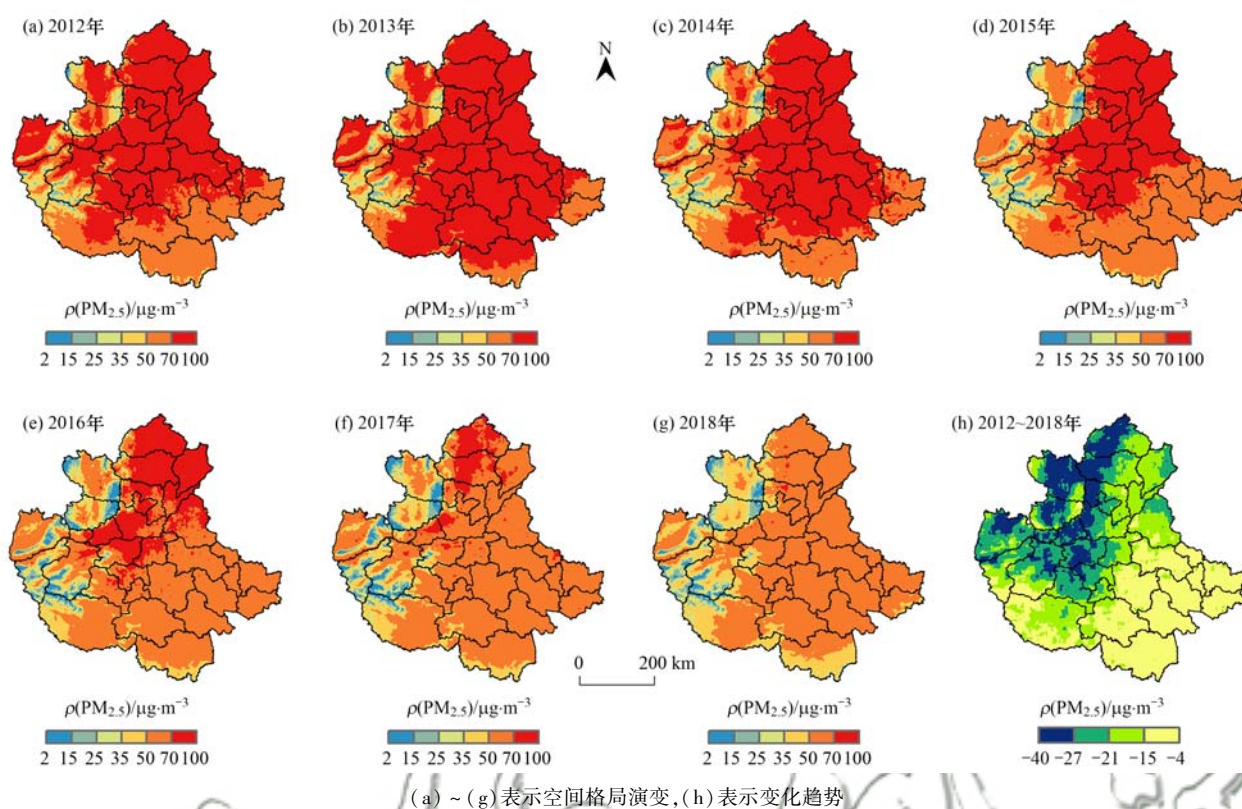
2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空异质性

2.1.1 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空格局及年际变化

为方便分析中原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况,参考世界卫生组织(WHO)和中国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012),将 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度划分为 6 个等级:优质区: $2 \sim 15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 良好区: $15 \sim 25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 中等区: $25 \sim 35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 轻污染区: $35 \sim 50 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 中污染区: $50 \sim 70 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 重污染区: $> 70 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

2012 ~ 2018 年间中原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间变化明显[图 2(a) ~ 2(g)],除 2012 ~ 2013 年期间重度污染区有向中原城市群东南部蔓延外,2013 ~ 2018 年期间重度污染区域均自东南向西北方向递减. 截至 2018 年,重度污染区已基本已全部转化为中、轻污染区. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低的优质区和良好区都分布于中原城市群西部山地丘陵区,而中原城市群东部平原 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度偏高且分布均匀,表明中原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 污染格局与地形有密切联系. 2012 ~ 2018 年



(a) ~ (g) 表示空间格局演变, (h) 表示变化趋势

图2 2012~2018年中原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度变化

Fig. 2 Changes in $PM_{2.5}$ concentration in the Central Plains Urban Agglomeration from 2012 to 2018

中原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度变化结果表明[图2(h)], 整个中原城市群地区 $PM_{2.5}$ 浓度均有下降, 但下降程度存在空间分异, 整体上看, 中原城市群北部较南部地区污染减弱更为显著。

2.1.2 $PM_{2.5}$ 浓度空间关联特征

利用 GeoDa 和 ArcGIS 软件进行空间自相关检验, 以全局 Moran's I 散点图(图3)和空间聚集特征(图4)定量分析中原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度的空间关联特征。由图3可知, 2012~2015年 Moran's I 指数呈增大趋势, 2016~2018年 Moran's I 指数下降趋于稳定。本研究期间内 Moran's I 指数均显著($P \leq 0.01$)且为正值, 介于0.4078~0.5034之间, 表明中原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度在空间上聚集现象明显, 浓度值相近的城市大多相邻。图3中, 第一象限为高-高型聚集, 第二象限为低-高型聚集, 第三象限为低-低型聚集, 第四象限为高-低型聚集, 结果表明研究区 $PM_{2.5}$ 浓度低-低聚集和高-高聚集现象更为明显。

由图4可知, 研究期内 $PM_{2.5}$ 浓度聚集情况发生显著变化, 高值聚集有从中原城市群北部向东部转移的趋势, 濮阳是唯一始终保持着高值聚集现象的城市。而低值聚集情况相对稳定, 集中分布于中原城市群西南部, 包括运城、三门峡、洛阳和南阳等城市。在2017年, 焦作市 $PM_{2.5}$ 浓度呈现高-低型聚集, 表明该年份焦作市与周边地区 $PM_{2.5}$ 浓度存在显著

的空间差异, 究其原因, 焦作市虽然由资源型(煤炭)城市向旅游城市转型, 但是煤炭产业仍是其支柱产业之一。

2.2 $PM_{2.5}$ 浓度驱动因子分析

2.2.1 单因子探测分析

有研究指出^[26~29], 温度通过影响大气条件、地形和风速通过改变传播的路径和方向、降水影响细颗粒物沉降过程、植被具有的吸附作用以及人类活动都会对 $PM_{2.5}$ 浓度变化产生重要影响。考虑到2015年相关驱动因子栅格数据最为完整, 因此选择 TEM、DEM、PRE、WIND、NDVI、POP、GDPPC、ROAD_D、RIVER_D 和 NSL 等连续空间格网数据在像元尺度上分析2015年 $PM_{2.5}$ 浓度的驱动力。结果表明, 驱动因子均通过了显著性检验($P \leq 0.01$)。由表2可知, 各驱动因子解释力(q 值)从大到小依次是: DEM > TEM > POP > GDPPC > NSL > WIND > NDVI > PRE > ROAD_D > RIVER_D。中原城市群地形以平原为主, 城市群西部山区呈“C”型分布, 导致大气污染物的传播受到严重阻碍。地形对于中原城市群的人口分布和社会活动影响很大, DEM(0.573)因此成为中原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度的最强解释力因子。此外, TEM(0.535)、POP(0.531)、GDPPC(0.432)和 NSL(0.369)都是中原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异的重要主导因子。ROAD_D

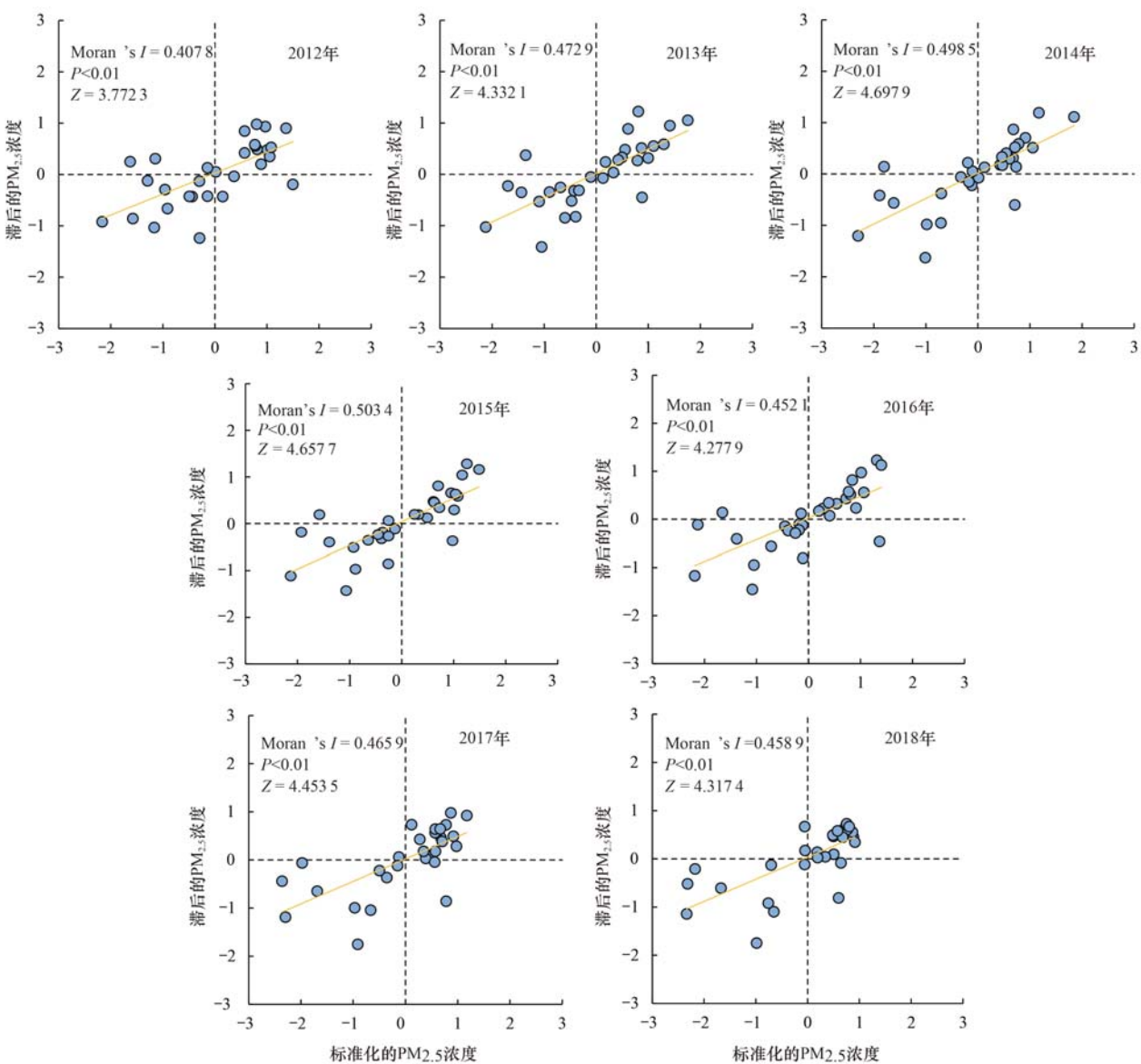


图3 2012~2018 年中原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 Moran's I 散点图

Fig. 3 Moran's I scatter plot of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Central Plains Urban Agglomeration from 2012 to 2018

表2 中原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度驱动因子 q 值结果

Table 2 Results of q value of $\text{PM}_{2.5}$ concentration driving factor in the Central Plains Urban Agglomeration										
因子	DEM	NDVI	TEM	PRE	WIND	NSL	POP	GDPPC	ROAD_D	RIVER_D
解释力(q)	0.573	0.178	0.535	0.144	0.259	0.369	0.531	0.432	0.039	0.006

(0.039)和 RIVER_D(0.006)对于中原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分异的解释力较低.

2.2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度驱动因子的联动效应分析

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分异通常不是单个影响因素所能决定的,故利用交互探测器来量化多因子交互后对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响的联动效应.交互探测器结果表明(图5):各影响因素间只存在双因子增强和非线性增强两种交互类型,即任意因子相互作用后都增强了对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的解释力,中原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分异是多驱动因素相互作用后显现的结果.

DEM 仅与 PRE 交互结果表现为双因子增强类

型,但该结果 q 值超过了所有的非线性增强类型,为 $\text{PRE} \cap \text{DEM}$ (0.891),说明 $\text{PRE} \cap \text{DEM}$ 最能解释 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分异性.双因子增强交互类型大多存在于 PRE、RIVER_D 与其他因子交互时,非线性增强类型占据交互类型的大多数.

2.3 社会经济因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的非线性影响分析

以研究目的为基准,参考前人研究^[24,30,31],从人口聚集、经济发展、产业结构、贸易开放和城市活跃等多角度选取指标,以便能全面的考量社会经济因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的非线性影响.将 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度设为被解释变量,POP、GDPPC、IS、FDI 和 NSL 等社会

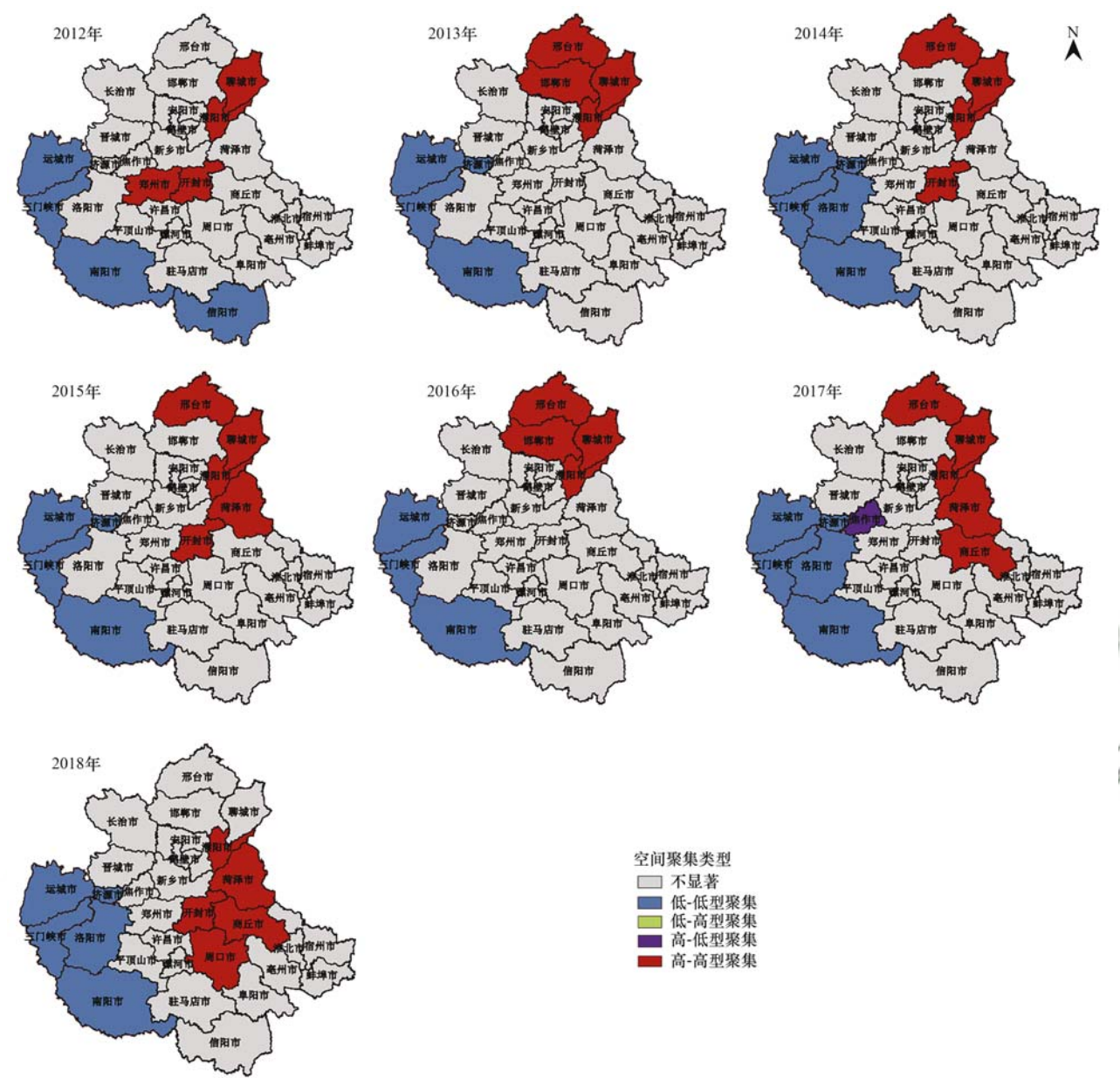


图 4 2012 ~ 2018 年中原城市群 PM_{2.5} 浓度空间集聚特征

Fig. 4 Spatial agglomeration characteristics of PM_{2.5} concentration in the Central Plains Urban Agglomeration from 2012 to 2018

经济因子作为核心解释变量,DEM、PRE、TEM、NDVI 和 WIND 等自然源因子设为控制变量. 变量的描述性统计见表 3. 使用动态面板回归模型前,利用Stata16.0软件

表 3 所选变量的描述性统计

Table 3 Descriptive statistics of selected variables

变量	单位	观测数	均值	标准差	最小值	最大值
PM _{2.5}	μg·m ⁻³	210	68.63	14.63	15.97	109.25
NSL	/	210	34 092.50	20 347.88	5 497.77	144 357.20
POP	人·km ⁻²	210	446.16	171.32	161.49	1 003.30
GDPPC	元	210	38 124.15	15 726.09	12 617	101 349
IS	%	210	51.32	9.28	36.31	75.63
FDI	万美元	210	74 254.12	87 630.510	897	755 317
TEM	℃	210	14.87	1.15	9.99	16.66
PRE	mm	210	696.27	190.05	409.13	1 386.99
WIND	m·s ⁻¹	210	2.08	0.22	1.45	2.56
DEM	m	210	246.73	299.99	21.41	1 157.76
NDVI	/	210	0.78	0.04	0.61	0.86

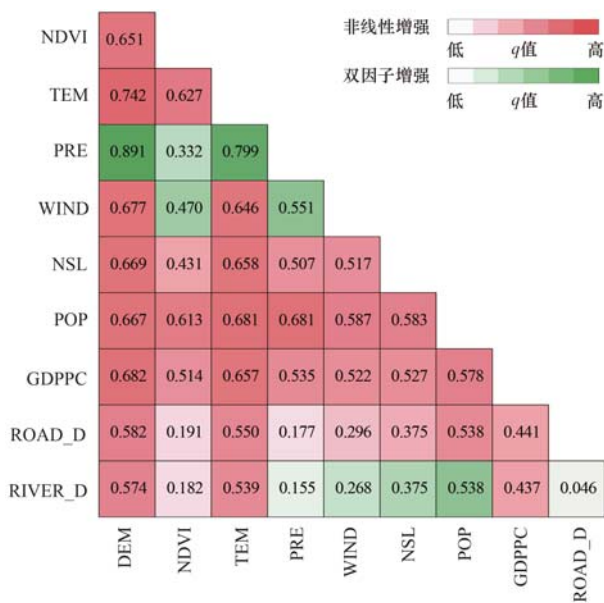


图5 中原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度驱动因子间交互情况

Fig. 5 Interaction between $PM_{2.5}$ concentration driving factors in the Central Plains Urban Agglomeration

进行数据的平稳性检验,以避免面板数据非平稳性造成伪回归现象.每次选择一个核心解释变量通过Stata16.0软件分别进行系统动态面板回归.自相关检验结果表明,AR(1)均通过显著性检验,AR(2)未通过10%水平的显著性检验,随机误差项存在一阶序列相关但无二阶序列相关.由Hansen检验的结果得出,该模型所采用的工具变量是合理有效的.综上所述,SGMM模型的设置是合理的.以GDPPC、POP、NSL、IS和FDI等为核心解释变量再分别进行基准回归(OLS)和固定效应回归(FE),发现系统动态面板模型计算的 $PM_{2.5}$ 浓度一阶滞后项系数均处于OLS和FE模型计算得到的系数之间,表明SGMM结果是稳健的(表4).

有研究发现中国城市GDPPC与 $PM_{2.5}$ 浓度之间是倒“U”型关系^[32],也有研究认为两者之间是“U”型关系^[33],本研究结果(表4中③列)支持后者的观点.当GDPPC小于66171元时对 $PM_{2.5}$ 浓度有抑制效应,而当跃过该拐点后,GDPPC的提高会使 $PM_{2.5}$ 浓度也随之提高.目前中原城市群大部分城市仍位于“U”型曲线的下降阶段,对于郑州、济源、洛阳和焦作等已位于“U”型曲线上升阶段的城市,需加大污染治理的资金投入,空气质量才能得到进一步改善.

以POP为核心解释变量的SGMM面板回归结果显示(表4中⑥列), $PM_{2.5}$ 浓度与人口密度之间也存在“U”型关系.人口密度小于572人· km^{-2} 时,随着人口的集中化,城市污染防控政策的严格实施以及人口规模集约效应得到显现,可使城市基础服务

设施以及各种资源得到高效利用,从而达到缓解 $PM_{2.5}$ 污染的目的.然而,当人口密度大于572人· km^{-2} 后,住房、交通和土地等紧缺资源受到过大压力,汽车尾气、建筑扬尘和工业废气等大量产生,使 $PM_{2.5}$ 浓度不断提升.此时,应规划调整城市结构形态,加强城市基础服务设施建设,合理控制人口规模,调整人口分布,以防止人口密度过大带来的 $PM_{2.5}$ 污染加剧.

以NSL为核心解释变量的SGMM面板回归结果显示(表4中⑨列),NSL其一次项系数为正,二次项系数为负,两者均显著,即 $PM_{2.5}$ 浓度与NSL之间存在倒“U”型关系.本研究发现中原城市群各市NSL总强度与 $PM_{2.5}$ 的关系曲线拐点为15429,当各市NSL总强度小于该拐点时, $PM_{2.5}$ 浓度会随着NSL总强度的升高而升高,但截至2018年,中原城市群大部分地区已经处于倒“U”型曲线的下降部分.由结果可知,较高的城市活跃水平会显著抑制中原城市群的 $PM_{2.5}$ 污染.

以IS为核心解释变量的SGMM面板回归结果显示(表4中⑫列),IS其一次项系数为正,二次项系数为负,三次项系数为正,三者均显著,IS与 $PM_{2.5}$ 浓度之间存在“N”形曲线关系.当第二产业占比低于38.78%时,随着第二产业占比升高, $PM_{2.5}$ 污染会加剧.此时工业发展水平较低,随着工业化的发展,对能源的消耗急剧增加,且此阶段消耗多为高污染的化石燃料.当第二产业占比介于38.78%~61.74%时,随着第二产业占比升高, $PM_{2.5}$ 污染会得到缓解.此时简单粗放的工业发展模式向清洁可持续的模式发生转变,且清洁能源得到更有效的利用,从而使工业带来的 $PM_{2.5}$ 污染得到有效控制.当第二产业占比超过61.74%时,过多的工业活动已经使污染物的排放超过环境承载力的容纳水平, $PM_{2.5}$ 浓度水平将进一步提高.

以FDI为核心解释变量的SGMM面板回归结果显示(表4中⑮列),中原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度与FDI之间存在倒“U”型关系.外商投资小于52052万美元时,随着外商直接投资的增大, $PM_{2.5}$ 浓度有所上升.中原城市群部分城市并不是外商投资的重点区域,存在为吸引外资而设置的环境准入门槛较低的可能,以致引入了低质量的外商投资从而加剧了该地区的霾污染.外商投资高于52052万美元时,随着外商直接投资的增大, $PM_{2.5}$ 浓度有所下降.有研究发现^[24],FDI对于霾污染的影响取决于制定环境法规的严格水平.外商投资高的地区很可能环境政策收紧,引入了更多高质量的外商投资以及污染治理的高新技术,从而使霾污染得到缓解.

表 4 系统动态面板回归分析结果¹⁾

Table 4 System dynamic panel regression analysis results

解释变量	lnGDPPC				lnPOP				lnNSI				lnIS				lnFDI			
	①OLS	②FE	③SCMM	④OLS	⑤FE	⑥SCMM	⑦OLS	⑧FE	⑨SCMM	⑩OLS	⑪FE	⑫SCMM	⑬OLS	⑭FE	⑮SCMM	⑯OLS	⑰FE	⑱SCMM	⑲OLS	⑳SCMM
lnPM _{t-1, t-1}	0.825 ^{***} (40.97)	0.683 ^{***} (18.34)	0.732 ^{***} (17.81)	0.892 ^{***} (29.85)	0.740 ^{***} (11.48)	0.880 ^{***} (9.12)	0.906 ^{***} (30.60)	0.818 ^{***} (15.85)	0.821 ^{***} (11.27)	0.842 ^{***} (42.22)	0.713 ^{***} (18.61)	0.834 ^{***} (7.65)	0.890 ^{***} (26.01)	0.810 ^{***} (13.77)	0.809 ^{***} (13.74)	0.890 ^{***} (26.01)	0.810 ^{***} (13.77)	0.809 ^{***} (13.74)	0.890 ^{***} (26.01)	0.810 ^{***} (13.77)
X	1.119 (0.71)	-0.116 (-0.04)	-13.654 [*] (-1.85)	-0.102 (-0.23)	-7.941 (-1.36)	-4.012 ^{**} (-2.11)	-0.280 [*] (-1.92)	-0.119 (-0.13)	2.411 ^{**} (2.40)	64.796 (1.55)	43.315 (1.08)	490.627 ^{**} (2.44)	0.029 (0.51)	0.226 (1.33)	0.478 ^{***} (3.36)	0.029 (0.51)	0.226 (1.33)	0.478 ^{***} (3.36)	0.029 (0.51)	0.226 (1.33)
X ²	-0.061 (-0.80)	0.004 (0.04)	0.615 [*] (1.75)	0.010 (0.27)	0.517 (1.13)	0.316 ^{**} (2.05)	0.014 [*] (1.89)	0.005 (0.11)	-0.125 ^{**} (-2.43)	-17.067 (-1.62)	-11.285 (-1.11)	-126.549 ^{**} (-2.48)	-0.001 (-0.49)	-0.012 (-1.46)	-0.022 ^{***} (-3.16)	-0.001 (-0.49)	-0.012 (-1.46)	-0.022 ^{***} (-3.16)	-0.001 (-0.49)	-0.012 (-1.46)
X ³	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1.50 [*] (1.70)	0.981 (1.14)	10.842 ^{**} (2.51)	—	—	—	—	—	—	—	—
lnTEM	-0.003 (-0.04)	-0.982 ^{***} (-2.95)	-0.515 (-1.32)	0.289 ^{**} (2.06)	-1.469 ^{***} (-3.37)	-0.004 (-0.01)	0.287 ^{***} (2.93)	-1.379 ^{***} (-2.84)	0.834 (0.96)	0.034 (0.60)	-0.811 ^{**} (-2.49)	0.419 (1.15)	0.318 ^{***} (2.84)	-1.342 ^{***} (-3.03)	-0.303 (-0.70)	0.318 ^{***} (2.84)	-1.342 ^{***} (-3.03)	-0.303 (-0.70)	0.318 ^{***} (2.84)	-1.342 ^{***} (-3.03)
lnPRE	-0.009 (-0.43)	0.039 (0.96)	0.086 (0.91)	-0.206 ^{***} (-5.92)	-0.326 ^{***} (-6.29)	-0.075 (-0.75)	-0.212 ^{***} (-6.64)	-0.317 ^{***} (-5.99)	-0.158 (-1.32)	-0.018 (-0.86)	0.026 (0.65)	-0.068 (-0.75)	-0.214 ^{***} (-6.73)	-0.311 ^{***} (-5.95)	-0.073 (-0.80)	-0.214 ^{***} (-6.73)	-0.311 ^{***} (-5.95)	-0.073 (-0.80)	-0.214 ^{***} (-6.73)	-0.311 ^{***} (-5.95)
lnWIND	-0.278 ^{***} (-3.53)	-0.342 ^{***} (-5.15)	-0.407 ^{**} (-2.44)	0.078 (0.77)	-0.001 (-0.01)	-0.310 (-1.69)	0.076 (0.76)	0.004 (0.04)	-0.817 ^{**} (-2.65)	-0.246 ^{***} (-3.12)	-0.319 ^{***} (-4.90)	-0.417 (-1.26)	0.076 (0.74)	-0.001 (-0.01)	0.103 (0.38)	0.076 (0.74)	-0.001 (-0.01)	0.103 (0.38)	0.076 (0.74)	-0.001 (-0.01)
lnDEM	-0.031 ^{***} (-6.43)	0 (-)	-0.066 ^{***} (-3.42)	-0.023 ^{***} (-2.78)	0 (-)	-0.141 ^{**} (-2.52)	-0.025 ^{***} (-3.87)	0 (-)	-0.044 (-1.20)	-0.030 ^{***} (-6.56)	0 (-)	-0.025 (-0.75)	-0.026 ^{***} (-4.31)	0 (-)	-0.012 (-0.55)	-0.026 ^{***} (-4.31)	0 (-)	-0.012 (-0.55)	-0.026 ^{***} (-4.31)	-0.012 (-0.55)
lnNDVI	-0.192 ^{**} (-1.76)	-0.745 ^{***} (-3.42)	-0.086 (-0.20)	0.616 ^{***} (4.36)	1.202 ^{***} (4.28)	-0.423 (-0.80)	0.675 ^{***} (4.92)	1.313 ^{***} (4.43)	-2.230 ^{**} (-2.19)	-0.167 [*] (-1.74)	-0.687 ^{***} (-3.16)	0.941 ^{**} (2.14)	0.527 ^{***} (3.46)	1.291 ^{***} (4.53)	-1.231 ^{**} (-2.30)	0.527 ^{***} (3.46)	1.291 ^{***} (4.53)	-1.231 ^{**} (-2.30)	0.527 ^{***} (3.46)	-1.231 ^{**} (-2.30)
Constant	1.709 ^{***} (3.36)	6.888 ^{***} (5.18)	2.569 (1.23)	-1.344 (-0.87)	30.876 (0.109)	16.153 ^{**} (2.61)	-0.490 (-0.59)	1.481 (0.29)	-0.757 (-0.17)	1.486 ^{***} (3.36)	6.133 ^{***} (4.71)	-4.039 [*] (-1.75)	-1.366 [*] (-1.81)	-0.279 (-0.13)	4.913 ^{**} (2.14)	-1.366 [*] (-1.81)	-0.279 (-0.13)	4.913 ^{**} (2.14)	-1.366 [*] (-1.81)	-0.279 (-0.13)
AR(1)	—	—	0.016	—	—	0.006	—	—	0.015	—	—	0.008	—	—	0.000	—	—	0.000	—	—
AR(2)	—	—	0.113	—	—	0.204	—	—	0.525	—	—	0.695	—	—	0.387	—	—	0.387	—	—
Hasen Test	—	—	0.160	—	—	0.113	—	—	0.737	—	—	0.122	—	—	0.248	—	—	0.248	—	—
拐点	—	—	66 171	—	—	572	—	—	15 429	—	—	38.78% 和 61.74%	—	—	52 052	—	—	52 052	—	—

1) lnPM_{t-1, t-1} 表示取对数后滞后一期的 PM_{2.5} 浓度；*、** 和 *** 分别表示为 10%、5% 和 1% 的显著性水平；括号中数值表示 *t* 统计值；“X”表示核心解释变量；各核心解释变量的单位与表 3 相同

3 结论

(1)中原城市群 $PM_{2.5}$ 污染格局跟地形有密切联系.2012~2018年,整个中原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度均有下降,但下降程度存在空间分异,整体上看,中原城市群北部较南部地区污染减弱更为显著.

(2)2012~2018年中原城市群 $PM_{2.5}$ 污染空间聚集性明显.研究期内 $PM_{2.5}$ 浓度高值聚集有从中原城市群北部向东部转移的趋势,而低值聚集情况相对稳定,集中分布于中原城市群西南部.

(3)DEM (0.573 1)是中原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度的最强解释力因子,TEM、POP、GDPPC 和 NSL 是中原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异的重要主导因子.各影响因素间只存在双因子增强和非线性增强两种交互类型,其中又以非线性增强类型为主.PRE $\cap$ DEM (0.891)对 $PM_{2.5}$ 浓度解释力最强,为双因子增强类型.

(4) $PM_{2.5}$ 浓度与 GDPPC、POP 之间均存在“U”型关系,曲线拐点分别为 GDPPC = 66 171 元和 POP = 572 人 $\cdot$ km $^{-2}$. $PM_{2.5}$ 浓度与 NSL、FDI 之间均存在倒“U”型关系. $PM_{2.5}$ 浓度与 IS 之间存在“N”型非线性关系,第二产业占比介于 38.78%~61.74%时,随着第二产业占比升高, $PM_{2.5}$ 污染会得到缓解.为应对霾污染,中原城市群地区应加大污染治理的资金投入、规划调整城市结构形态、增强城市基础设施服务设施建设、调整人口分布、调整产业结构、保持较高的城市活跃水平、设定严格的环境法规和引入高质量的外商投资.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 谢元博, 陈娟, 李巍. 雾霾重污染期间北京居民对高浓度 $PM_{2.5}$ 持续暴露的健康风险及其损害价值评估[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 1-8.
Xie Y B, Chen J, Li W. An assessment of $PM_{2.5}$ related health risks and impaired values of Beijing residents in a consecutive high-level exposure during heavy haze days[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(1): 1-8.
- [3] 李名升, 任晓霞, 于洋, 等. 中国大陆城市 $PM_{2.5}$ 污染时空分布规律[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(3): 641-650.
Li M S, Ren X X, Yu Y, *et al.* Spatiotemporal pattern of ground-level fine particulate matter ($PM_{2.5}$) pollution in mainland China[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(3): 641-650.
- [4] 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 $PM_{2.5}$ 污染与气溶胶光学特征分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 416-423.
Zhao X J, Pu W W, Meng W, *et al.* $PM_{2.5}$ pollution and aerosol optical properties in fog and haze days during autumn and winter in Beijing area[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 416-423.
- [5] 王新, 聂燕, 陈红, 等. 兰州城区大气 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(5): 1619-1628.
Wang X, Nie Y, Chen H, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ in Lanzhou city [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1619-1628.
- [6] Liu X P, Zou B, Feng H H, *et al.* Anthropogenic factors of $PM_{2.5}$ distributions in China's major urban agglomerations: a spatial-temporal analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121709.
- [7] 中华人民共和国生态环境部. 2019 年中国生态环境状况公报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2020.
- [8] Mi Y F, Sun K, Li L, *et al.* Spatiotemporal pattern analysis of $PM_{2.5}$ and the driving factors in the middle Yellow River urban agglomerations[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **299**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126904.
- [9] Cherian D, Hyun K Y, Jaegoo H, *et al.* Assessing the distributional characteristics of PM_{10} , $PM_{2.5}$, and PM_1 exposure profile produced and propagated from a construction activity[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **276**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124335.
- [10] Vohra K, Vodonos A, Schwartz J, *et al.* Global mortality from outdoor fine particle pollution generated by fossil fuel combustion: results from GEOS-Chem [J]. *Environmental Research*, 2021, **195**, doi: 10.1016/j.envres.2021.110754.
- [11] Ma Y R, Ji Q, Fan Y. Spatial linkage analysis of the impact of regional economic activities on $PM_{2.5}$ pollution in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **139**: 1157-1167.
- [12] 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.
- [13] Song Y Z, Wang J F, Ge Y, *et al.* An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: cases with different types of spatial data[J]. *Giscience & Remote Sensing*, 2020, **57**(5): 593-610.
- [14] 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.
- [15] 贺祥, 林振山, 刘会玉, 等. 基于灰色关联模型对江苏省 $PM_{2.5}$ 浓度影响因素的分析[J]. *地理学报*, 2016, **71**(7): 1119-1129.
He X, Lin Z S, Liu H Y, *et al.* Analysis of the driving factors of $PM_{2.5}$ in Jiangsu province based on grey correlation model[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, **71**(7): 1119-1129.
- [16] Zeng J J, Liu T, Feiock R, *et al.* The impacts of China's provincial energy policies on major air pollutants: a spatial econometric analysis[J]. *Energy Policy*, 2019, **132**: 392-403.
- [17] Wang Y X, Yao L, Xu Y, *et al.* Potential heterogeneity in the relationship between urbanization and air pollution, from the perspective of urban agglomeration [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **298**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126822.
- [18] Hao Y, Liu Y M. The influential factors of urban $PM_{2.5}$ concentrations in China: a spatial econometric analysis [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, **112**: 1443-1453.
- [19] 郭向阳, 穆学青, 丁正山, 等. 长三角多维城市化对 $PM_{2.5}$ 浓度的非线性影响及驱动机制[J]. *地理学报*, 2021, **76**(5): 1274-1293.

- Guo X Y, Mu X Q, Ding Z S, *et al.* Nonlinear effects and driving mechanism of multidimensional urbanization on PM_{2.5} concentrations in the Yangtze River Delta[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(5): 1274-1293.
- [20] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于印发中原城市群发展规划的通知[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201701/t20170105_962218.html, 2016-12-29.
- [21] Wu T, Zhou L X, Jiang G J, *et al.* Modelling spatial heterogeneity in the effects of natural and socioeconomic factors, and their interactions, on atmospheric PM_{2.5} concentrations in China from 2000-2015[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(11), doi: 10.3390/rs13112152.
- [22] Shi K F, Yu B L, Hu Y J, *et al.* Modeling and mapping total freight traffic in China using NPP-VIIRS nighttime light composite data[J]. *Giscience & Remote Sensing*, 2015, **52**(3): 274-289.
- [23] Anselin L. Local indicators of spatial association—LISA[J]. *Geographical Analysis*, 1995, **27**(2): 93-115.
- [24] Zhang M, Liu X X, Sun X R, *et al.* The influence of multiple environmental regulations on haze pollution: evidence from China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, **11**(6): 170-179.
- [25] Blundell R, Bond S. Initial conditions and moment restrictions in dynamic panel data models[J]. *Journal of Econometrics*, 1998, **87**(1): 115-143.
- [26] 朱倩茹, 刘永红, 徐伟嘉, 等. 广州 PM_{2.5} 污染特征及影响因素分析[J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(2): 15-21.
- Zhu Q R, Liu Y H, Xu W J, *et al.* Analysis on the pollution characteristics and influence factors of PM_{2.5} in Guangzhou[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(2): 15-21.
- [27] 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 等. 汾渭平原 PM_{2.5} 空间分布的地形效应[J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4582-4592.
- Huang X G, Zhao J B, Sun C J, *et al.* Orographic influences on the spatial distribution of PM_{2.5} on the Fen-Wei plain[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4582-4592.
- [28] 王嫣然, 张学霞, 赵静瑶, 等. 2013—2014 年北京地区 PM_{2.5} 时空分布规律及其与植被覆盖度关系的研究[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(1): 103-111.
- Wang Y R, Zhang X X, Zhao J Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of PM_{2.5} and its relationship with vegetation coverage in Beijing during the period of 2013—2014[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(1): 103-111.
- [29] 吴浪, 周廷刚, 温莉, 等. 基于遥感数据的 PM_{2.5} 与城市化的时空关系研究——以成渝城市群为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, **27**(9): 2142-2152.
- Wu L, Zhou T G, Wen L, *et al.* Study on spatio-temporal relationship between PM_{2.5} and urbanization based on remote sensing data—a case study of Chengdu-Chongqing urban agglomeration[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2018, **27**(9): 2142-2152.
- [30] Wang K, Yan M Y, Wang Y W, *et al.* The impact of environmental policy stringency on air quality[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **231**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117522.
- [31] Zhu W W, Wang M C, Zhang B B. The effects of urbanization on PM_{2.5} concentrations in China's Yangtze River Economic Belt: new evidence from spatial econometric analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **239**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118065.
- [32] Wang S J, Zhou C S, Wang Z B, *et al.* The characteristics and drivers of fine particulate matter (PM_{2.5}) distribution in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **142**: 1800-1809.
- [33] Wu X H, Chen Y F, Guo J, *et al.* Spatial concentration, impact factors and prevention-control measures of PM_{2.5} pollution in China[J]. *Natural Hazards*, 2017, **86**(1): 393-410.

CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)