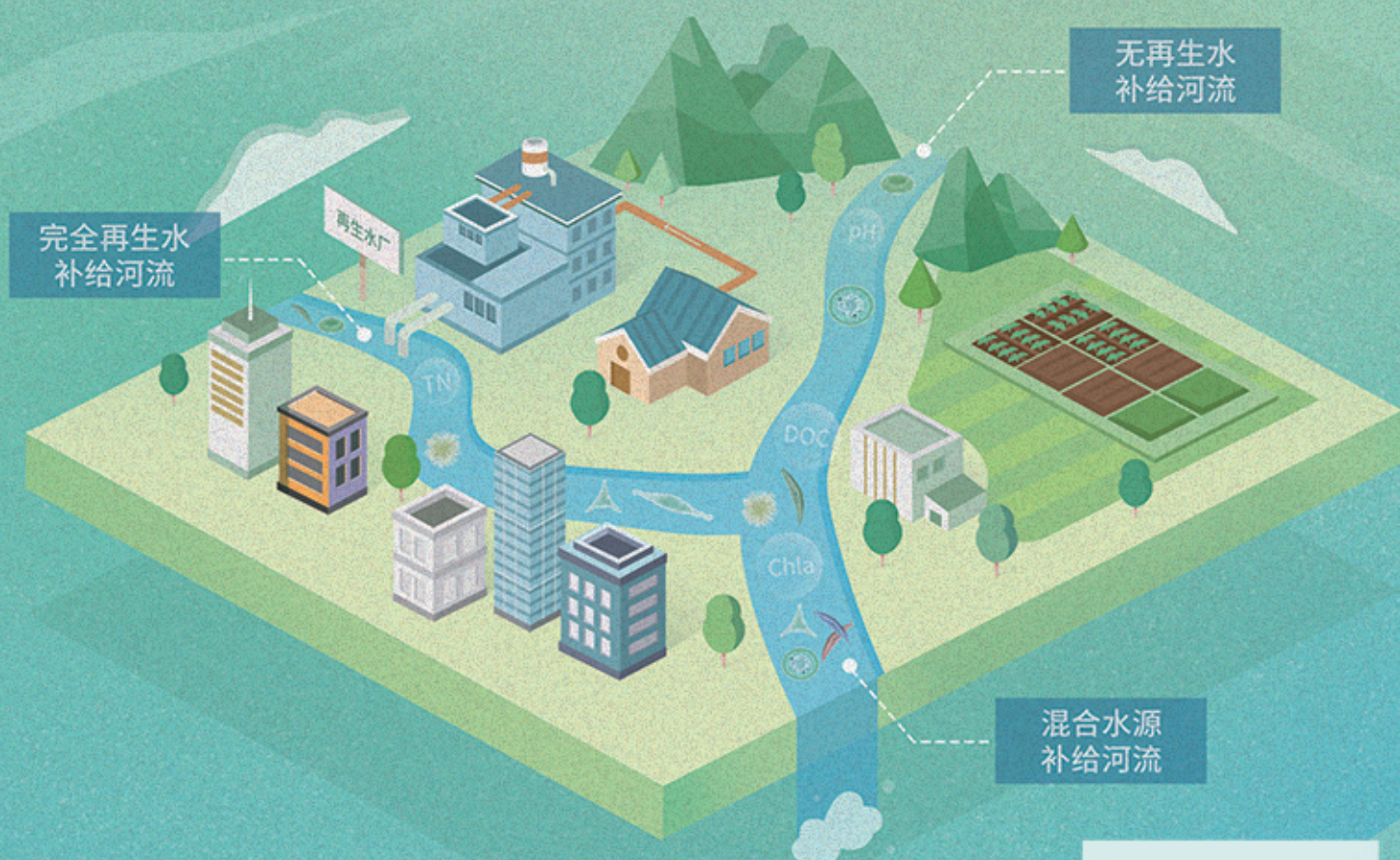


不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

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, 韩辉 (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, 孙煜豪, 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)	

关中平原城市群 $PM_{2.5}$ 时空演变格局及其影响因素

张军^{1,2}, 金梓函¹, 王玥¹, 李旭¹, 戴恩华¹

(1. 宝鸡文理学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室, 宝鸡 721013; 2. 长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安 710064)

摘要: $PM_{2.5}$ 作为大气污染的主要来源, 其时空演变格局和影响因素对于大气环境质量调控具有重要意义. 基于 2000 ~ 2020 年 $PM_{2.5}$ 遥感反演数据, 采用空间自相关和数理统计方法分析关中平原城市群 $PM_{2.5}$ 时空演变特征, 以海拔、年均气温和人均 GDP 等 10 种因子为自变量, 结合地理探测器和多尺度地理加权回归 (MGWR) 模型对 $PM_{2.5}$ 污染影响因素进行空间分异探究. 结果表明: ① 2000 ~ 2020 年, 关中平原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度总体呈下降趋势. 浓度高值区集中在研究区中东部, 低值区集中在研究区西部. 热点区域集中在临汾市和运城市, 冷点区域则集中在天水市和宝鸡市. ② 自然因子在关中平原城市群 $PM_{2.5}$ 污染中占主导地位, 2020 年 $PM_{2.5}$ 浓度主控影响因子按解释力大小排序依次为: 海拔 > 年均气温 > 地形起伏度 > 年均相对湿度 > 年降水量 > 人均 GDP > 植被覆盖度 > 能源消耗指数. ③ 主控影响因子按照作用尺度大小排序依次为: 植被覆盖度 > 年均气温 > 能源消耗指数 > 年降水量 > 地形起伏度 > 海拔 > 人均 GDP > 年均相对湿度. 其中人均 GDP、地形起伏度、能源消耗指数和年均气温主要为正向作用, 植被覆盖度、年降水量、海拔和年均相对湿度主要为负向作用. 研究得出了关中平原城市群 $PM_{2.5}$ 时空演变格局和影响因素, 可为相关部门制定大气污染防治政策提供决策依据, 同时丰富实证研究.

关键词: $PM_{2.5}$; 时空演变; 影响因素; 地理探测器; 多尺度地理加权回归 (MGWR) 模型

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5333-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202205336

Temporal and Spatial Evolution Pattern of $PM_{2.5}$ and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration

ZHANG Jun^{1,2}, JIN Zi-han¹, WANG Yue¹, LI Xu¹, DAI En-hua¹

(1. Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulation, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721013, China; 2. Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: $PM_{2.5}$ is the main source of air pollution, and its spatial-temporal evolution pattern and influencing factors are of great significance for the regulation of atmospheric environmental quality. Based on the remote sensing inversion data of $PM_{2.5}$ from 2000 to 2020, the spatial and temporal evolution characteristics of $PM_{2.5}$ in Guanzhong Plain urban agglomeration are analyzed by using spatial autocorrelation and mathematical statistics. Taking 10 factors such as altitude, annual average temperature and per capita GDP as independent variables, combined with geographical detector and multi-scale geographical weighted regression (MGWR) model, the spatial differentiation of influencing factors of $PM_{2.5}$ pollution is explored. The results show that: ① From 2000 to 2020, the concentration of $PM_{2.5}$ in Guanzhong Plain urban agglomeration shows a downward trend. The high concentration area is concentrated in the middle and east of the study area, and the low concentration area is concentrated in the west of the study area. Hot spots are concentrated in Linfen and Yuncheng, while cold spots are concentrated in Tianshui and Baoji. ② Natural factors play a dominant role in $PM_{2.5}$ pollution in Guanzhong Plain urban agglomeration. The main influencing factors of $PM_{2.5}$ concentration in 2020 were ranked as follows: altitude > average annual temperature > topographic relief > average annual relative humidity > annual precipitation > per capita GDP > vegetation coverage > energy consumption index. ③ The order of main controlling factors according to the size of action scale is: vegetation coverage > average annual temperature > energy consumption index > annual precipitation > topographic relief > altitude > per capita GDP > average annual relative humidity. Among them, GDP per capita, topographic relief, energy consumption index and annual average temperature are mainly positive, while vegetation cover, annual precipitation, altitude and annual average relative humidity are mainly negative. The temporal and spatial evolution pattern and influencing factors of $PM_{2.5}$ in Guanzhong Plain urban agglomeration were obtained, which can provide decision-making basis for relevant departments to formulate air pollution prevention policies, and enrich empirical research.

Key words: $PM_{2.5}$; spatio-temporal evolution; influencing factors; geographical detector; multi-scale geographically weighted regression (MGWR) model

随着全球气候变化、经济快速发展和城市化进程快速推进, 诸多经济、社会和生态环境等问题接踵而来, 大气污染尤为严重^[1,2]. 细微颗粒物 ($PM_{2.5}$) 是大气污染的主要来源^[3]. $PM_{2.5}$ 易于远距离乃至跨境传输, 对公众健康具有重大影响, 国际癌症研究机构 (IARC) 在 2013 年将其列为人类致癌物^[4,5]. “一带一路”沿线国家的经济发展呈现出“高增长、高排放、高能耗”粗放式的特征, 其中, 空气污染是这些国家普遍面临的问题^[4]. 城市群作为中国新型城镇化主体形态, 是支撑中国经济增长、促进区域协

调发展和参与国际分工合作的重要平台, 也是空气污染的核心区域^[6]. 以西安为首的关中平原城市群作为丝绸之路的起点, 正处于我国内外联通的关键节点位置. 在继京津冀、长三角和中原地区之后, 关

收稿日期: 2022-05-30; 修订日期: 2022-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771215); 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室 (长安大学) 开放基金项目 (300102290504); 陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室项目 (20JS012); 宝鸡文理学院校级研究生创新科研项目 (YJSCX22ZD09)

作者简介: 张军 (1974 ~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为区域环境演变及风险评价, E-mail: zhangjun1190@126.com

中平原城市群地区也成为我国大气污染严重的重灾区之一^[7,8]. 因此,研究关中平原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空演变格局和影响因素对于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染防治有重要作用.

针对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染态势,国内外学者在其预测^[9~11]、时空分布^[12~14]、影响因素^[15~17]和暴露风险^[18,19]等方面开展了大量研究. 而针对 $\text{PM}_{2.5}$ 时空演变的研究中,康博等^[20]基于实时监测数据对关中平原城市群 2015~2018 年 $\text{PM}_{2.5}$ 时空变化规律进行研究,发现 $\text{PM}_{2.5}$ 污染总体呈向好趋势,空间上存在明显分异性和集聚性特征. 曾德珩等^[15]基于 2015~2017 年成渝城市群监测数据,利用反距离插值法等方法分析其时空分布差异,发现成渝城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度存在明显的时空差异,时间上以 2015 年 $\text{PM}_{2.5}$ 污染最严重,空间上,高值区集中在研究区南部,低值区集中在研究区东北部. 在 $\text{PM}_{2.5}$ 时空演变研究中学者多侧重于多时间尺度研究,而长时间序列研究较少. 在影响因素方面, $\text{PM}_{2.5}$ 主要受自然因素和社会经济因素等共同作用. 有研究表明自然因子中气温^[16,21]、风速^[22]、降水^[23,24]和湿度^[25,26]等气象要素和海拔高度^[27]、植被覆盖^[28]和地形起伏^[29,30]等环境要素对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染有重要影响. 对于社会经济因子,有研究表明人口密度^[31,32]、经济发展水平^[33]、交通排放^[34]、煤炭^[35]和能源消耗^[17,36]等对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染有着显著影响. 周志凌等^[37]基于 2018 年 297 个中国地级市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据,采用多尺度地理加权回归 (MGWR) 模型分析了各影响因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的作用尺度与影响效果的空间异质性,发现各因素对于中国城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响均存在着不同程度的空间异质性. 地理探测器与地理加权回归 (GWR) 模型结合定量分析,可以消除 GWR 多因子共线性问题,又能将影响因子定量空间可视化^[38]. MGWR 模型与 GWR 模型相比,它允许每个变量各自不同的空间平滑水平,降低了估计的误差. 因此,将地理探测器与多尺度地理加权回归模型结合,可更准确对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染影响因素定量空间可视化.

基于上述文献梳理、数据精度、数据时间序列长度和数据可获得性,确定了本文的 $\text{PM}_{2.5}$ 影响因子体系,自然因子为:年均气温、年均风速、年降水量、海拔、年均相对湿度、植被覆盖度和地形起伏度;社会经济因子为:人口密度、人均 GDP 和能源消费指数. 本文从地理学视角出发,采用空间自相关分析和数理统计方法分析关中平原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空演变格局,并用地理探测器结合多尺度地理加权回归,识别污染的主控影响因子,并分析其空间异质性,旨在为关中平原城市群大气污染防治提供参考

依据,并丰富城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 时空演变的实证研究.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

关中平原城市群位于甘肃省、陕西省和山西省范围内. 地处中国内陆中心,以西安市为中心,是西部地区第二大城市群. 具体范围包括西安、咸阳、宝鸡、渭南、铜川、天水这 6 市和商洛、临汾、运城、平凉、庆阳这 5 市的部分区县(图 1),区域总国土面积 10.71 万 km^2 ,南靠秦岭山脉、北接黄土高原,形成了类似于盆地的地貌,气候类型上属于温带半湿润性季风气候,季节分异显著^[20]. 近几年来,在“一带一路”战略的推动下,关中平原城市群的综合经济得到了高速发展,与此同时更加重了该地区城市空气质量的恶化,大气污染现状不容乐观^[4].

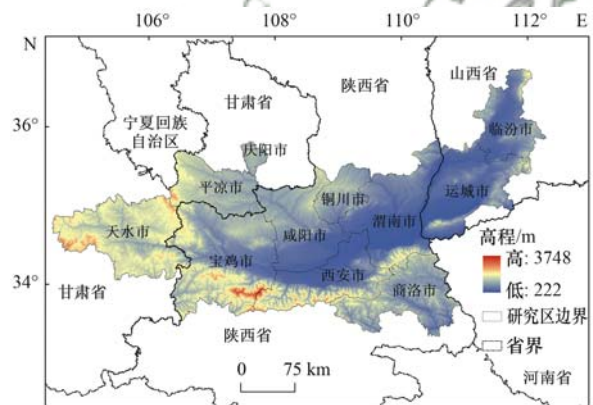


图 1 研究区概况示意

Fig. 1 Outline of the study area

1.2 数据来源

本文数据源由以下 4 个部分组成:① $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据. 2000~2020 年关中平原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据来源于国家科技资源共享服务平台-国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>). ②自然数据. 包括年均气温、年降水量、年均风速、年均相对湿度、植被覆盖度、地形起伏度和海拔这 7 个指标. 其中,年均气温、年降水量、年均风速、年均相对湿度来自于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>). 地形起伏度和海拔由数字高程模型 (DEM) 计算得到, DEM 数据和植被覆盖度数据均来自于地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/>). ③社会经济数据. 包括人口密度、人均 GDP 和能源消费指数 3 个指标,分别反映人口密集水平、经济发展水平和人类生产生活能耗对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响. 其中,人口密度数据由人口数量栅格数据计算得到,人口数量栅格数据来自于 Scientific Data 的 World Pop 数据集. 人均 GDP 数据来源于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>)、地理遥感生态网 ([http://](http://www.geodata.cn)

www.gisrs.cn/) 和中国城市统计年鉴(2000 年和 2015 年). 有研究表明夜间灯光与能源消费呈显著线性相关^[39,40], 本文利用夜间灯光数据, 用行政区域内栅格值总和与面积之比表征能源消费情况, 夜间灯光数据来自于国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>). ④基础地理信息数据. 文中空间行政边界来自国家基础地理信息中心, 根据关中平原城市群区划利用 ArcGIS 得到行政边界.

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关分析

全局莫兰指数(Moran's I)可以描述关中平原城市群 PM_{2.5}在整体空间分布上的集聚情况^[41], 计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中, x_i 和 x_j 为城市群内 i 和 j 城市的 PM_{2.5} 浓度; $\bar{x}$ 为城市群整体 PM_{2.5} 浓度均值; w_{ij} 为空间权重矩阵中的第 i 行第 j 列的一个元素, 以度量区域 i 与区域 j 之间的距离; n 为城市群内城市的数量. 莫兰指数的取值在 $[-1, 1]$ 之间, $I < 0$, 为空间负相关, 表明 PM_{2.5} 污染倾向于空间分散; $I > 0$, 为空间正相关, 表明 PM_{2.5} 污染倾向于空间聚集; $I = 0$, 则表明 PM_{2.5} 污染在空间上为随机分布.

采用 Getis-Ord G_i^* 热点分析方法, 分析关中平原城市群 PM_{2.5} 局部自相关性, 计算公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \bar{X} \sum_{j=1}^n w_{ij}}{S \cdot \sqrt{\frac{\left[n \sum_{j=1}^n w_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^n w_{ij} \right)^2 \right]}{n-1}}} \quad (2)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (3)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - \bar{X}^2} \quad (4)$$

式中, G_i^* 为统计学意义上的得分, 得分越高, 热点聚类就越紧密, 反之, 冷点的聚类就越紧密^[24]. S 为 PM_{2.5} 在关中平原城市群整体上的标准差.

1.3.2 地理探测器

地理探测器是探测空间分异并揭示背后驱动因子的一种新的统计学方法, 可以保证对多个自变量共线性的免疫^[32]. 此方法无线性假设, 基本原理是若自变量对因变量有重要影响, 其空间分布应具有

相似性^[42]. 地理探测器包括 4 个探测器, 本文主要通过因子探测器识别关中平原城市群 PM_{2.5} 污染的主控影响因子. 计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (5)$$

式中, L 为影响因子的分类数量, N 为城市数量; N_h 为类别 h 的城市数; σ^2 和 σ_h^2 分别为 PM_{2.5} 在每个城市群的方差和 PM_{2.5} 在类别 h 区域的方差; q 用来度量 PM_{2.5} 的空间分异性以及某因子对 PM_{2.5} 的空间分异的解释力.

1.3.3 多尺度地理加权回归

与经典 GWR 模型相比, MGWR 模型允许每个变量各自不同的空间平滑水平, 这降低了估计的偏差, 同时也产生了更真实有用的空间过程模型^[37], 计算公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^k \beta_{bwj}(u_i, v_i) x_{ij} + \varepsilon_i \quad (6)$$

式中, (u_i, v_i) 为位置 i 处的中心坐标; y_i 为 i 处的属性值; bwj 为第 j 个变量回归系数使用的带宽; $\beta_{bwj}(u_i, v_i)$ 为 i 处第 j 个变量的回归系数; $\beta_0(u_i, v_i)$ 和 ε_i 分别为模型在 i 处的截距和误差项. 变量带宽衡量了各个过程的空间作用尺度, 作用尺度越大表明该影响因素作用效果的空间异质性越小, 反之空间异质性则越大^[37].

2 结果与分析

2.1 关中平原城市群 PM_{2.5} 时序特征

由 2000 ~ 2020 年关中平原城市群 PM_{2.5} 浓度变化可知, 2000 ~ 2020 年关中平原城市群 PM_{2.5} 浓度总体呈现下降的趋势, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值从 2000 年的 $48.2 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 减小到 2020 年的 $36.0 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 下降率达 25.3% (图 2). 但研究期间关中平原城市群 PM_{2.5} 浓度年均值均高于《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)^[43] 中年均限值 ($35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 大气污染

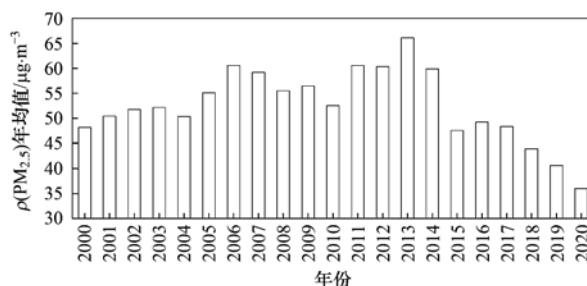


图 2 2000 ~ 2020 年关中平原城市群 PM_{2.5} 浓度变化趋势

Fig. 2 Variation trend of PM_{2.5} concentration in Guanzhong Plain urban agglomeration from 2000 to 2020

状况不容乐观.

2000 ~ 2013 年可视为 $PM_{2.5}$ 浓度年均值的波动增长阶段,2013 ~ 2020 年为 $PM_{2.5}$ 浓度年均值的下降阶段. 2013 年 $PM_{2.5}$ 浓度年均值为研究期间的最高值,其原因可能是 2013 年全国遭史上最严重霾天气,波及 25 个省份的 100 多个大中型城市^[32],大气污染排放物增加且受气候变化影响(如平均风速和雨日数都在减少),更容易出现静稳天气.

由 2000 ~ 2020 年关中平原城市群城市 $PM_{2.5}$ 浓度年均值可知,城市群内部各城市 $PM_{2.5}$ 浓度呈现相

似的变化趋势(表 1),且与城市群整体变化趋势一致,2013 年是关中平原城市群 $PM_{2.5}$ 污染情况由波动上升转为逐步改善的重要拐点. 2013 年大范围的霾现象引起了国家高度重视,相继出台多种政策宏观调控大气污染^[44]. 2000 ~ 2015 年 11 个市的 $\rho(PM_{2.5})$ 均值均高于 $35 \mu g \cdot m^{-3}$,2016 年天水 $\rho(PM_{2.5})$ 均值开始小于 $35 \mu g \cdot m^{-3}$,2019 年开始宝鸡、平凉、庆阳、商洛和天水也开始小于限值,该地区大气环境处于良好状况. 临汾、铜川、渭南、西安、咸阳、运城污染情况虽然从 2013 年开始逐步好转,但仍高于 $35 \mu g \cdot m^{-3}$.

表 1 2000 ~ 2020 年关中平原城市群城市 $PM_{2.5}$ 浓度年均值/ $\mu g \cdot m^{-3}$

Table 1 Annual average value of $PM_{2.5}$ in the Guanzhong Plain urban agglomeration from 2000 to 2020/ $\mu g \cdot m^{-3}$

年份	宝鸡	临汾	平凉	庆阳	商洛	天水	铜川	渭南	西安	咸阳	运城
2000	41.9	58.3	43.0	45.0	40.4	39.7	47.3	56.1	49.3	51.2	60.4
2001	44.2	59.4	44.6	46.0	44.0	40.7	49.3	58.4	52.2	53.5	63.5
2002	44.8	61.8	45.7	47.5	43.3	41.3	51.2	61.0	53.3	56.2	65.6
2003	45.1	62.4	45.4	47.7	43.0	40.2	51.2	62.2	54.7	56.9	67.2
2004	43.2	60.9	43.2	45.2	41.6	39.0	48.6	59.9	52.6	54.6	65.6
2005	48.9	63.5	47.5	50.0	46.5	42.7	53.9	64.8	58.3	60.7	69.2
2006	52.6	72.7	52.1	55.0	50.2	45.0	60.4	73.2	62.9	66.8	78.2
2007	51.4	70.6	51.1	54.3	50.0	43.8	57.8	70.9	62.1	65.5	76.3
2008	48.9	64.8	48.3	50.2	47.5	43.7	53.6	64.6	59.0	59.8	70.1
2009	47.8	68.0	48.9	52.2	47.6	42.6	55.8	67.9	58.3	61.7	74.2
2010	45.3	62.5	45.3	47.9	43.4	41.9	50.4	62.5	54.6	57.0	67.7
2011	53.2	70.2	52.9	55.2	51.8	46.6	60.5	71.3	63.7	66.8	76.2
2012	52.9	70.5	50.8	52.9	51.9	43.6	59.4	72.2	64.9	66.9	77.9
2013	57.9	74.2	55.2	56.5	55.3	49.1	63.0	80.1	72.4	74.6	85.1
2014	53.8	68.4	51.7	53.8	52.1	46.4	58.9	70.5	62.3	64.5	76.0
2015	40.7	59.6	41.6	40.7	39.8	35.2	47.4	57.1	47.9	51.0	63.2
2016	42.4	62.4	40.3	38.3	39.5	34.9	47.5	60.6	52.0	55.2	64.7
2017	40.9	64.3	38.8	39.2	37.4	33.5	45.7	59.1	51.6	54.1	65.8
2018	37.9	54.9	37.4	36.0	35.3	33.6	41.9	52.4	45.8	48.3	57.2
2019	34.4	52.5	32.2	33.1	32.5	26.4	39.7	50.7	43.0	46.1	55.9
2020	30.8	45.0	29.3	30.8	28.8	23.7	36.1	44.9	38.2	41.0	48.8

2.2 关中平原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度时空演变特征

由 2000 ~ 2020 年关中平原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布可知,各年份 $PM_{2.5}$ 浓度在空间上分布相似(图 3),高值集中在研究区中东部,低值区则集中在研究区西部. 2000 ~ 2013 年 $PM_{2.5}$ 浓度处于波动上升阶段, $\rho(PM_{2.5})$ 由 2000 年的 $48.2 \mu g \cdot m^{-3}$ 上升到了 2013 年的 $66.1 \mu g \cdot m^{-3}$. $PM_{2.5}$ 污染高值区范围由西安、运城和临汾快速向四周扩大,形成连片 $PM_{2.5}$ 污染高值区. 天水 and 宝鸡存在部分地区大气状况良好,但低值区范围在逐步缩减,以 2013 年污染最为严重,关中平原城市群 $\rho(PM_{2.5})$ 整体均高于 $35 \mu g \cdot m^{-3}$,最高值达到了 $116.2 \mu g \cdot m^{-3}$. 2013 ~ 2020 年 $PM_{2.5}$ 浓度处于下降阶段,

$\rho(PM_{2.5})$ 由 2013 年的 $66.1 \mu g \cdot m^{-3}$ 降低至 2020 年的 $36.0 \mu g \cdot m^{-3}$. $PM_{2.5}$ 污染低值区范围由宝鸡和天水快速向四周扩大,其中天水、平凉和庆阳于 2019 年开始 $PM_{2.5}$ 浓度整体均低于二级标准限值,大气状况良好. $PM_{2.5}$ 污染高值区逐步缩减, $PM_{2.5}$ 浓度大幅下降,表明自 2013 年以来关中平原城市群大气污染防治取得较好成果.

2.3 关中平原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度空间集聚特征

本文以 2000、2005、2010、2015 和 2020 年为时间断点来分析关中平原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度空间集聚的变化特征, $PM_{2.5}$ 浓度分布影响因素也通过这 5 个年份来进行分析. 由空间自相关分析结果可知,5 个年份的全局 Moran's I 均大于 0(表 2),表明关中南

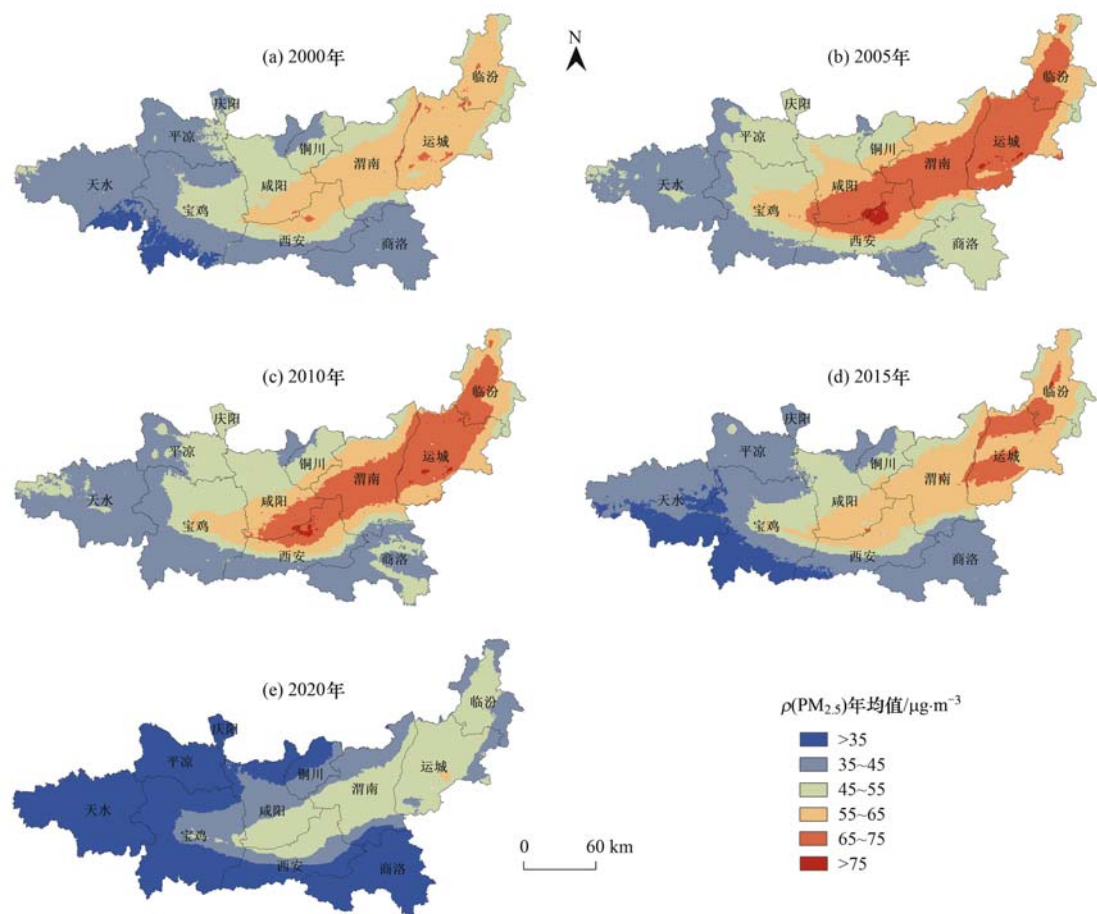


图3 2000~2020年关中平原城市群PM_{2.5}浓度空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of PM_{2.5} concentration in Guanzhong Plain urban agglomeration from 2000 to 2020

表2 关中平原城市群PM_{2.5}年均浓度全局Moran's I

Table 2 Global Moran's I of PM_{2.5} annual average concentration in the Guanzhong Plain urban agglomeration

项目	2000 年	2005 年	2010 年	2015 年	2020 年
指数	0.28	0.25	0.26	0.31	0.28
Z-score	1.93	1.80	1.85	2.11	1.92
P-value	0.05	0.07	0.06	0.04	0.05

原城市群PM_{2.5}年均浓度在空间分布存在显著的自相关关系,即空间上呈集聚分布。

基于全局空间自相关分析的结果,对关中平原城市群PM_{2.5}浓度进行Getis-Ord G_i^* 热点分析,探讨其局部空间分布规律,结果如图4所示。从空间分布看,热点集中于研究区东部,冷点集中于研究区西部。其中2000、2010和2015年冷热点分布一致,天水、平凉和宝鸡为冷点聚集区,表明这些区域PM_{2.5}浓度较低。咸阳和庆阳为次冷点。运城和临汾为热点聚集区,表明这些区域是关中平原城市群持续稳定的PM_{2.5}高污染区。西安、铜川、渭南和商洛为次热点。在2005和2020年冷点减少而热点增加,热点聚集区扩展到了渭南,而冷点聚集区缩小至了天水 and 宝鸡。

2.4 关中平原城市群PM_{2.5}时空分布影响探测

2.4.1 关中平原城市群PM_{2.5}主控影响因子

基于文献梳理、数据精度、数据时间序列长度和数据可获得性共选取影响因子10个。利用地理探测器识别关中平原城市群PM_{2.5}污染的主控影响因子,结果如表3所示。从结果可以看到,2000年和2005年PM_{2.5}污染的主控影响因子相同,其中影响力最大的均为海拔,其它影响力较大的影响因子分别为能源消耗指数、植被覆盖度、地形起伏度、年降水量、年均气温和年均相对湿度。2010年和2020年PM_{2.5}污染的主控影响因子相同,其中影响力最大的均为海拔,其它影响力较大的影响因子为人均GDP、能源消耗指数、植被覆盖度、地形起伏度、年降水量、年均气温和年均相对湿度。2015年则主要受到自然因素

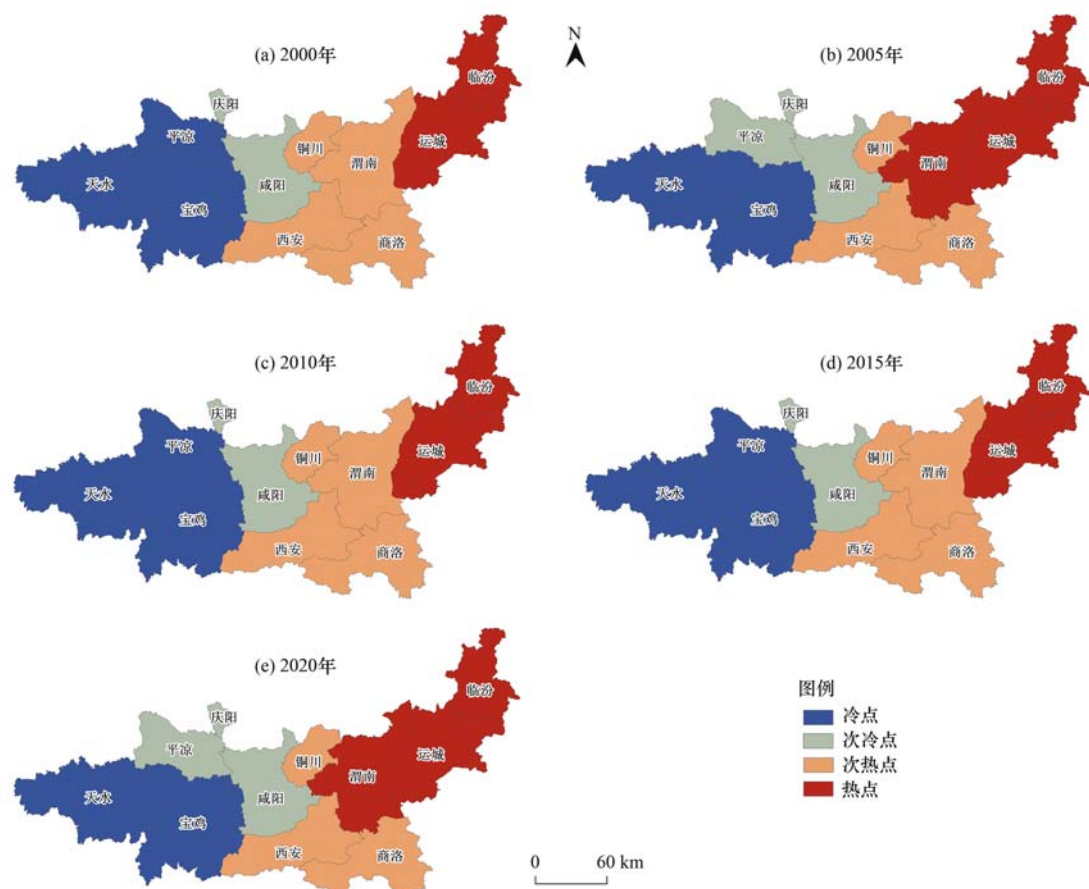


图 4 空间冷热点分布
Fig. 4 Distribution of hot and cold spots in space

表 3 因子探测分析结果

Table 3 Factor probing analysis results

探测指标	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	<i>q</i>	<i>P</i>	<i>q</i>	<i>P</i>	<i>q</i>	<i>P</i>	<i>q</i>	<i>P</i>	<i>q</i>	<i>P</i>
人均 GDP	0.047 1	0.459 4	0.083 6	0.000	0.203 0	0.000	0.101 0	0.000	0.331 3	0.000
人口密度	0.036 0	0.1692	0.029 4	0.174 4	0.043 1	0.027 8	0.032 9	0.108 3	0.039 9	0.025 1
能源消耗指数	0.410 3	0.000	0.417 8	0.000	0.388 6	0.000	0.108 1	0.000	0.206 1	0.000
植被覆盖度	0.276 1	0.000	0.265 4	0.000	0.295 2	0.000	0.292 6	0.000	0.268 9	0.000
地形起伏度	0.563 4	0.000	0.570 2	0.000	0.597 4	0.000	0.539 7	0.000	0.534 4	0.000
海拔	0.746 3	0.000	0.804 8	0.000	0.799 0	0.000	0.756 7	0.000	0.778 1	0.000
年均风速	0.086 5	0.000	0.045 3	0.000	0.073 2	0.000	0.072 9	0.000	0.029 6	0.000
年降水量	0.225 9	0.000	0.413 8	0.000	0.276 2	0.000	0.215 7	0.000	0.406 6	0.000
年均气温	0.498 5	0.000	0.614 9	0.000	0.587 0	0.000	0.529 4	0.000	0.692 9	0.000
年均相对湿度	0.460 9	0.000	0.519 4	0.000	0.560 9	0.000	0.468 7	0.000	0.474 8	0.000

影响,主要为植被覆盖度、地形起伏度、海拔、年降水量、年均气温和年均相对湿度. 相较于社会经济因子,自然因子对关中平原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 变化影响的程度更大.

2.4.2 关中平原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 影响因子空间异质性
考虑到时效性问题并综合地理探测器方法的相关特点^[32],本文对 2020 年关中平原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓

度分布的主控影响因子进行 MGWR 模型拟合(表 4). 由表 3 可知 2020 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度主控影响因子按解释力大小排序依次为:海拔 > 年均气温 > 地形起伏度 > 年均相对湿度 > 年降水量 > 人均 GDP > 植被覆盖度 > 能源消耗指数. 由表 4 可知主控影响因子按照作用尺度大小排序依次为:植被覆盖度 > 年均气温 > 能源消耗指数 > 年降水量 > 地形起伏度 >

表 4 MGWR 模型拟合结果¹⁾
Table 4 MGWR model fitting results

指标	常数项	人均 GDP	植被覆盖度	地形起伏度	海拔	年降水量	能源消耗指数	年均气温	年均相对湿度
变量带宽	43	45	474	59	51	76	169	429	44

1) 调整 R^2 为 0.93

海拔 > 人均 GDP > 年均相对湿度.

3 讨论

2000 ~ 2020 年关中平原城市群 PM_{2.5} 浓度年均

值总体呈下降趋势, 整体污染得到了有效地防治. 2013 ~ 2020 年, PM_{2.5} 浓度大幅下降, 其中天水、平凉、庆阳和商洛整体转为无污染区. 这与长江三角洲城市群^[36] 2013 ~ 2017 年 PM_{2.5} 年平均浓度的趋

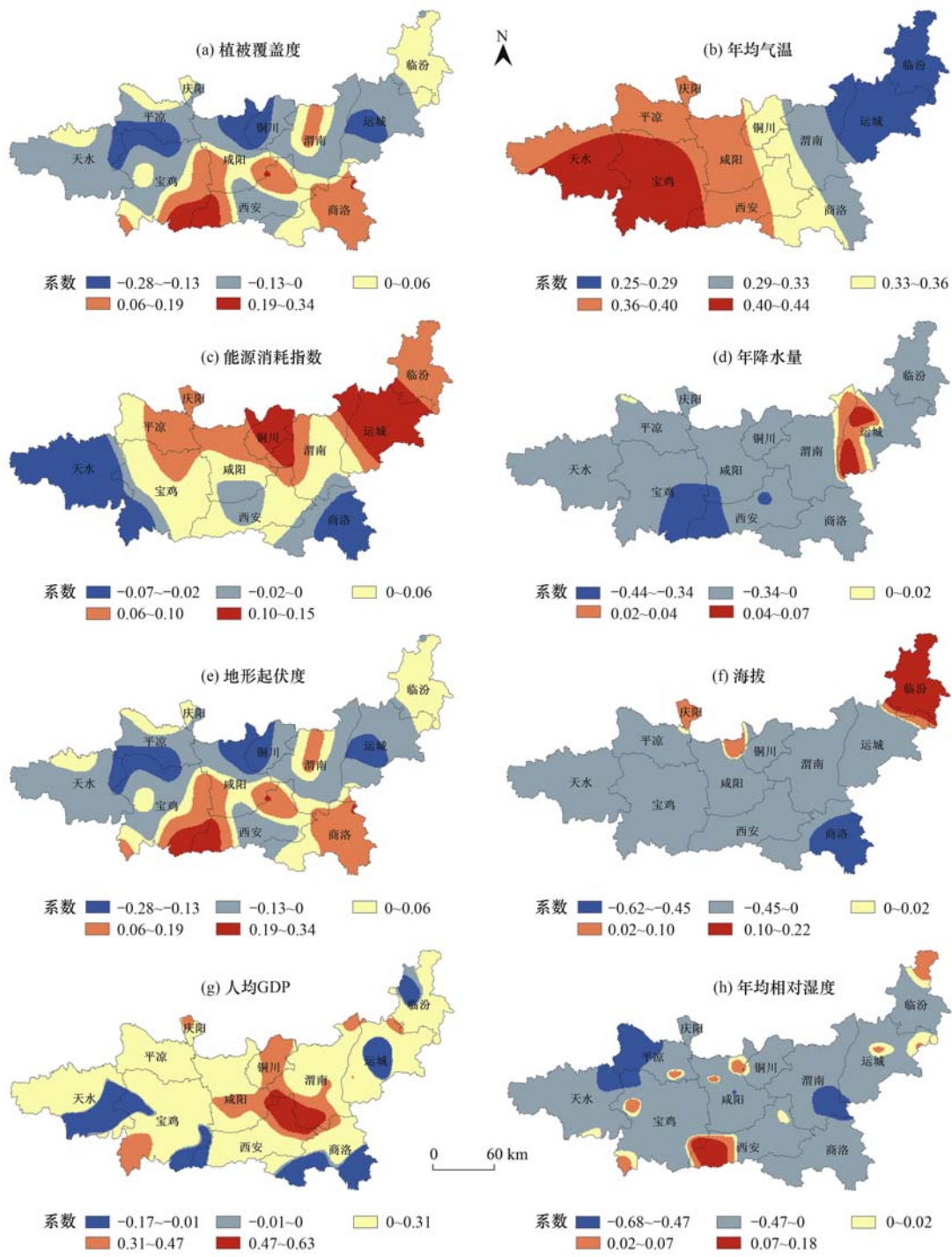


图 5 PM_{2.5} 影响因素回归系数
Fig. 5 Regression coefficient of PM_{2.5} influencing factors

势一致,其 $\text{PM}_{2.5}$ 污染主要受工业生产影响. 由表 3 可知关中平原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 污染解释力最强的影响因子为海拔,与对中原城市群研究的结果一致^[17]. 相较于能源消耗等社会经济因素关中平原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 污染受自然因素影响更大.

基于对相关文献梳理、数据精度、数据时间序列长度和数据可获得性共选取影响因子 10 个,通过地理探测器筛选出解释力相对较强的影响因子同时避免共线性问题,采用 MGWR 模型进行拟合,并将影响因子回归系数定量空间可视化(图 5). 由 $\text{PM}_{2.5}$ 影响因素回归系数空间分布可知,人均 GDP、地形起伏度、能源消耗指数、年均气温的回归系数总体上为正,对关中平原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 污染起到了正向增强作用,其余因子的回归系数总体上为负,对污染起到了抑制作用. 社会经济因子中,人均 GDP 作用的空间差异显著,作用强度大的地区集中在西安、渭南、咸阳和铜川交界的地方,这些地区人均 GDP 较高,表明在这些地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染受经济发展影响较大,因此在大力发展经济的同时也需注意大气污染防治;能源消耗指数作用强度大的地区集中在运城和铜川,表明这两地的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染可能主要来源于能源消耗,因此需要大力发展清洁能源. 自然因子中,年降水量总体上对污染起抑制作用,这是由于降雨会使 $\text{PM}_{2.5}$ 沉降从而使其浓度降低. 年均相对湿度总体上是对污染起抑制作用,当空气中相对湿度较大时, $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物四周会被水分包围,在重力作用下发生沉降从而降低 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度^[33]. 年均气温与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有相似的空间分布特征,对关中平原城市群整体 $\text{PM}_{2.5}$ 污染均为正向增强作用,主要原因为:温度影响颗粒物形成,高温能促进前驱体间的光化学反应^[45]. 其对研究区东部作用强度最大,该地区温度低且降雨多、空气相对湿度大,不利于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的形成和扩散,因此该地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低. 植被覆盖度总体上对污染起抑制作用,一般而言,较好的植被覆盖有利于大气颗粒物的吸收和沉降^[29]. 地形起伏度总体上为负向作用, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值区集中在地形起伏度低的地区,可能是由于关中平原城市群南靠秦岭山脉、北接黄土高原,形成了类似于盆地的地貌,阻碍了 $\text{PM}_{2.5}$ 的扩散. 海拔总体上为负向作用,这是由于人口和产业布局主要集中在地势平坦的平原地区,因此低地平原 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度往往高于周边地区^[29].

$\text{PM}_{2.5}$ 污染由外因(自然影响因子)和内因(社会经济影响因子)共同作用,在不同区域大气污染的主导因素相差很大,哪一方占主导没有一个统一的答案^[5]. 如宋洁等^[46]研究发现自然因素对淮海经

济区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响更大. 李衡等^[32]研究发现黄河流域社会经济因子占主导地位. 本文的定量分析显示,虽然自然影响因子对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响更大,但自然影响因素很难进行大的调整,因此针对关中平原城市群具体情况,应该对于社会经济因素指定有效的调控措施,如提高使用清洁能源比例,优化临汾和运城等城市的能源产业结构,并且提高公众环保意识,加大污染排放监管力度.

本文将地理探测器与多尺度地理加权回归(MGWR)模型结合定量分析,可以消除 MGWR 模型多因子共线性问题,同时 MGWR 模型允许每个影响因子各自不同的空间平滑水平,可更准确地对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染影响因子定量空间可视化. 未来的研究期望能获取更多尺度、更高精度和更长时间序列的 $\text{PM}_{2.5}$ 和人口格网数据,实现更高精度和多时间尺度的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染研究,并剖析 $\text{PM}_{2.5}$ 人口暴露风险的时空演变格局和驱动机制,以期更准确地治理 $\text{PM}_{2.5}$ 污染,合理控制污染范围.

4 结论

(1)2000~2020 年,关中平原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度总体呈下降趋势. 其中 2000~2013 年为波动上升阶段,2013~2020 年为下降阶段. $\text{PM}_{2.5}$ 污染高值区由西安、运城和临汾向四周扩大并形成连片高值区,集中在研究区中东部,低值区集中在研究区西部. 热点区域集中在临汾市和运城市,冷点区则集中在天水 and 宝鸡.

(2)相较于社会经济因子,自然因子对关中平原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 污染影响更显著,2020 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度主控影响因子解释力大小排序依次为:海拔(0.778 1) > 年均气温(0.692 9) > 地形起伏度(0.534 4) > 年均相对湿度(0.474 8) > 年降水量(0.406 6) > 人均 GDP(0.331 3) > 植被覆盖度(0.268 9) > 能源消耗指数(0.206 1).

(3)主控影响因子按照作用尺度大小排序依次为:植被覆盖度(474) > 年均气温(429) > 能源消耗指数(169) > 年降水量(76) > 地形起伏度(59) > 海拔(51) > 人均 GDP(45) > 年均相对湿度(44). 人均 GDP、地形起伏度、能源消耗指数和年均气温的回归系数总体上为正,对关中平原城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 污染起到了正向增强作用,植被覆盖度、年降水量、海拔和年均相对湿度主要为负向作用,对污染起到了抑制作用.

致谢:感谢国家科技资源共享服务平台-国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn>)提供数据支撑.

参考文献:

- [1] 张永年, 潘竟虎. 基于 DMSP/OLS 数据的中国碳排放时空模拟与分异格局[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(4): 1436-1446.
- Zhang Y N, Pan J H. Spatio-temporal simulation and differentiation pattern of carbon emissions in China based on DMSP/OLS nighttime light data [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(4): 1436-1446.
- [2] 南国卫, 孙虎, 朱一梅. 陕西省 PM_{2.5} 时空分布规律及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(5): 834-843.
- Nan G W, Sun H, Zhu Y M. Spatial and temporal characteristics of PM_{2.5} in Shaanxi Province and its driving factors [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(5): 834-843.
- [3] Chan C K, Yao X H. Air pollution in mega cities in China[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(1): 1-42.
- [4] 慕航, 何超, 阮秋明, 等. “一带一路”沿线国家 PM_{2.5} 污染与人口暴露风险的时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(6): 2229-2240.
- Mu H, He C, Nguyen T, et al. Spatiotemporal distribution characteristics and population exposure risks to PM_{2.5} in countries along the Belt and Road [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(6): 2229-2240.
- [5] 刘海猛, 方创琳, 黄解军, 等. 京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析[J]. 地理学报, 2018, **73**(1): 177-191.
- Liu H M, Fang C L, Huang J J, et al. The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, **73**(1): 177-191.
- [6] 王振波, 梁龙武, 王旭静. 中国城市群地区 PM_{2.5} 时空演变格局及其影响因素[J]. 地理学报, 2019, **74**(12): 2614-2630.
- Wang Z B, Liang L W, Wang X J. Spatio-temporal evolution patterns and influencing factors of PM_{2.5} in Chinese urban agglomerations [J]. Acta Geographica Sinica, 2019, **74**(12): 2614-2630.
- [7] 姜涵月, 闫亚琛, 李海蓉. 中国 2013 年城市大气污染现状及探索性空间数据分析[J]. 安全与环境学报, 2016, **16**(2): 352-357.
- Jiang H Y, Yan Y C, Li H R. Urban air pollution status in-situ in China and an exploratory spatial data analysis in the year of 2013 [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, **16**(2): 352-357.
- [8] 苏英, 郭玲霞, 刘宇峰. 关中 5 市环境空气质量特征与成因分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2018, **10**(5): 616-622.
- Su Y, Guo L X, Liu Y F. Analysis of characteristics and causes of air quality in the five cities of the Guanzhong area [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, **10**(5): 616-622.
- [9] 李慧敏, 刘新贵, 孙傲辉, 等. 中国重点区域 PM_{2.5} 时空变化分析与预测[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, **45**(1): 175-181.
- Li H M, Liu X G, Sun A H, et al. Analysis and prediction of the spatial and temporal changes of PM_{2.5} in key regions of China [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022, **45**(1): 175-181.
- [10] 杨晓辉, 宋春杰, 范丽行, 等. 京津冀地区高分辨率 PM_{2.5} 浓度时空变化模拟与分析[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4083-4094.
- Yang X H, Song C J, Fan L H, et al. High-resolution estimation of spatio-temporal variation in PM_{2.5} concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4083-4094.
- [11] Liu X W, Qin M C, He Y, et al. A new multi-data-driven spatiotemporal PM_{2.5} forecasting model based on an ensemble graph reinforcement learning convolutional network [J]. Atmospheric Pollution Research, 2021, **12**(10), doi: 10.1016/j.apr.2021.101197.
- [12] 张运林, 睢晋玲, 吴娴, 等. 粤港澳大湾区 PM_{2.5} 时空分布特征及其与气象要素的关系[J]. 生态学报, 2021, **41**(6): 2272-2281.
- Zhang Y L, Sui J L, Wu X, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of PM_{2.5} and its relationship with meteorological factors in Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(6): 2272-2281.
- [13] Deng C X, Tian S, Li Z W, et al. Spatiotemporal characteristics of PM_{2.5} and ozone concentrations in Chinese urban clusters [J]. Chemosphere, 2022, **295**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.133813.
- [14] Xu W Y, Jin X B, Liu M M, et al. Analysis of spatiotemporal variation of PM_{2.5} and its relationship to land use in China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2021, **12**(9), doi: 10.1016/j.apr.2021.101151.
- [15] 曾德珩, 陈春江. 成渝城市群 PM_{2.5} 的时空分布及其影响因素研究[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(11): 1834-1843.
- Zeng D H, Chen C J. Spatial-temporal characteristics and influence factors of PM_{2.5} concentrations in Chengdu-Chongqing urban agglomeration [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(11): 1834-1843.
- [16] 甄贞, 刘佳宇, 牛亚洲, 等. 基于多元时间序列的哈尔滨市 PM_{2.5} 影响因素分析[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2022, **50**(1): 98-107.
- Zhen Z, Liu J Y, Niu Y Z, et al. Analysis of impact factors of PM_{2.5} in Harbin based on multivariate time series [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2022, **50**(1): 98-107.
- [17] 周志衡, 周廷刚, 秦宁. 中原城市群 PM_{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(12): 5344-5353.
- Zhou Z H, Zhou T G, Qin N. Linkage effect and nonlinear impact of PM_{2.5} concentration driving factors in central plains urban agglomeration [J]. Environmental Science, 2022, **43**(12): 5344-5353.
- [18] 黄晓军, 祁明月, 李艳雨, 等. 关中地区 PM_{2.5} 时空演化及人口暴露风险[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5245-5255.
- Huang X J, Qi M Y, Li Y Y, et al. Spatio-temporal evolution and population exposure risk to PM_{2.5} in the Guanzhong area [J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5245-5255.
- [19] 赵辉, 郑有飞, 张誉馨, 等. 京津冀大气污染的时空分布与人口暴露[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(1): 1-12.
- Zhao H, Zheng Y F, Zhang Y X, et al. Spatiotemporal distribution and population exposure of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(1): 1-12.
- [20] 康博, 刘强, 赵强. 基于 2015~2018 年实时监测数据对关中平原城市群 PM_{2.5} 时空变化规律的研究[J]. 地球与环境, 2020, **48**(2): 161-170.
- Kang B, Liu Q, Zhao Q. Spatiotemporal variations of PM_{2.5} in the urban agglomeration of the Guanzhong Plain based on real-time monitoring data during 2015-2018 [J]. Earth and Environment, 2020, **48**(2): 161-170.

- [21] 潘晨, 康志明. 2001~2019年气象条件对江苏省PM_{2.5}分布的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(2): 649-662.
Pan C, Kang Z M. Impact of meteorological conditions on PM_{2.5} in Jiangsu Province from 2001 to 2019 [J]. Environmental Science, 2022, **43**(2): 649-662.
- [22] 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.
- [23] 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 等. 长江经济带PM_{2.5}分布格局演变及其影响因素[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1013-1024.
Huang X G, Zhao J B, Cao J J, *et al.* Evolution of the distribution of PM_{2.5} concentration in the Yangtze River economic belt and its influencing factors [J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1013-1024.
- [24] 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 等. 2015~2019年河南省PM_{2.5}时空特征与驱动因素分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(4): 1697-1705.
Ge Q X, Liu Y, Yang H, *et al.* Analysis on spatial-temporal characteristics and driving factors of PM_{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019[J]. Environmental Science, 2022, **43**(4): 1697-1705.
- [25] 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 等. 天津市冬季空气湿度对PM_{2.5}和能见度的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5143-5151.
Ding J, Tang Y X, Hao T Y, *et al.* Impact of air humidity on PM_{2.5} mass concentration and visibility during winter in Tianjin [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5143-5151.
- [26] 柏玲, 姜磊, 陈忠升. 长江中游城市群PM_{2.5}时空特征及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, **27**(5): 960-968.
Bai L, Jiang L, Chen Z S. Spatio-temporal characteristics of PM_{2.5} and its influencing factors of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, **27**(5): 960-968.
- [27] Alvarez H B, Echeverria R S, Alvarez P S, *et al.* Air quality standards for particulate matter (PM) at high altitude cities[J]. Environmental Pollution, 2013, **173**: 255-256.
- [28] 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 等. 汾渭平原PM_{2.5}浓度的影响因素及空间溢出效应[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(8): 3539-3548.
Huang X G, Shao T J, Zhao J B, *et al.* Influence factors and spillover effect of PM_{2.5} concentration on Fen-Wei Plain [J]. China Environmental Science, 2019, **39**(8): 3539-3548.
- [29] 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 等. 长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1190-1200.
Wang L L, Liu X J, Li D, *et al.* Geographical detection of spatial heterogeneity and drivers of PM_{2.5} in the Yangtze River economic belt[J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1190-1200.
- [30] 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.
- [31] 杨文涛, 譙鹏, 刘贤赵, 等. 2011~2017年中国PM_{2.5}多尺度时空分异特征分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5236-5244.
Yang W T, Qiao P, Liu X Z, *et al.* Analysis of multi-scale spatio-temporal differentiation characteristics of PM_{2.5} in China from 2011 to 2017[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5236-5244.
- [32] 李衡, 韩燕. 黄河流域PM_{2.5}时空演变特征及其影响因素分析[J]. 世界地理研究, 2022, **31**(1): 130-141.
Li H, Han Y. Analysis on the spatial-temporal evolution characteristics of PM_{2.5} and its influencing factors in the Yellow River Basin[J]. World Regional Studies, 2022, **31**(1): 130-141.
- [33] 陈优良, 邹文敏. 2015-2019年长三角PM_{2.5}时空变化特征及其影响因子分析[J]. 安全与环境学报, 2022, **22**(1): 476-485.
Chen Y L, Zou W M. Temporal-spatial characteristics of PM_{2.5} and impact factors analysis in Yangtze River Delta from 2015 to 2019[J]. Journal of Safety and Environment, 2022, **22**(1): 476-485.
- [34] Lin Y C, Lin Y C, Shangdiar S, *et al.* Assessment of PM_{2.5} and PAH content in PM_{2.5} emitted from mobile source gasoline-fueled vehicles in concomitant with the vehicle model and mileages[J]. Chemosphere, 2019, **226**: 502-508.
- [35] 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 等. 汾渭平原临汾市2019年春节期大气污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5122-5130.
Liu W J, Hu T P, Mao Y, *et al.* Characteristics and origin analysis of air pollution during the spring festival in Linfen, Fenwei Plain [J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5122-5130.
- [36] 王昭, 严小兵. 长江三角洲城市群PM_{2.5}时空演变及影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2020, **29**(7): 1497-1506.
Wang Z, Yan X B. Temporal-spatial evolution of PM_{2.5} and driving factors in Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, **29**(7): 1497-1506.
- [37] 周志凌, 程先富. 基于MGWR模型的中国城市PM_{2.5}影响因素空间异质性[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(6): 2552-2561.
Zhou Z L, Cheng X F. Spatial heterogeneity of influencing factors of PM_{2.5} in Chinese cities based on MGWR model [J]. China Environmental Science, 2021, **41**(6): 2552-2561.
- [38] 韩静, 芮旸, 杨坤, 等. 基于地理探测器和GWR模型的中国重点镇布局定量归因[J]. 地理科学进展, 2020, **39**(10): 1687-1697.
Han J, Rui Y, Yang K, *et al.* Quantitative attribution of national key town layout based on geodetector and the geographically weighted regression model[J]. Progress in Geography, 2020, **39**(10): 1687-1697.
- [39] Xie Y H, Weng Q H. World energy consumption pattern as revealed by DMSP-OLS nighttime light imagery[J]. GIScience & Remote Sensing, 2016, **53**(2): 265-282.
- [40] 吴健生, 牛妍, 彭建, 等. 基于DMSP/OLS夜间灯光数据的1995-2009年中国地级市能源消费动态[J]. 地理研究, 2014, **33**(4): 625-634.
Wu J S, Niu Y, Peng J, *et al.* Research on energy consumption dynamic among prefecture-level cities in China based on DMSP/OLS nighttime light[J]. Geographical Research, 2014, **33**(4): 625-634.
- [41] 陈彦光. 基于Moran统计量的空间自相关理论发展和方法改进[J]. 地理研究, 2009, **28**(6): 1449-1463.
Chen Y G. Reconstructing the mathematical process of spatial autocorrelation based on Moran's statistics [J]. Geographical

- Research, 2009, **28**(6): 1449-1463.
- [42] 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.
- [43] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
GB 3095-2012, Ambient air quality standard[S].
- [44] 黄鑫宇, 王雷, 潘虹, 等. 长三角城市群的 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 演变趋势及空间效应分析[J]. 环境污染与防治, 2021, **43**(10): 1309-1315.
Huang X Y, Wang L, Pan H, *et al.* Evolution trend and spatial differentiation characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in Yangtze River Delta urban agglomeration [J]. Environmental Pollution and Control, 2021, **43**(10): 1309-1315.
- [45] Hajiloo F, Hamzeh S, Gheysari M. Impact assessment of meteorological and environmental parameters on PM_{2.5} concentrations using remote sensing data and GWR analysis (case study of Tehran) [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(24): 24331-24345.
- [46] 宋洁, 徐建斌, 刘佳, 等. 淮海经济区 PM_{2.5} 时空特征及影响因素 [J]. 长江流域资源与环境, 2021, **30**(8): 2038-2047.
Song J, Xu J B, Liu J, *et al.* Spatial and temporal characteristics and influencing factors of PM_{2.5} in Huaihai economic zone[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, **30**(8): 2038-2047.



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)