

目 次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用	刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)
全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析	任晓松, 李昭睿 (1243)
京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式	田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)
太原市“十四五”规划大气污染防治政策的 CO ₂ 协同效益评估	肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)
湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同	李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)
“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径	张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)
郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益	邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)
长江中游城市群城市化对 PM _{2.5} 浓度的多尺度驱动机制	张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)
天山北坡城市群 PM _{2.5} 浓度时空分布特征及影响因素分析	王相男, 张喆, 刘方青 (1315)
天津市 PM _{2.5} 碳组分空间差异性来源解析	武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)
贵阳市花溪城区大气 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的变化特征及来源解析	桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)
新乡市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析	刘恒嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)
2017~2018 年冬季菏泽大气 PM _{2.5} 中金属元素特征及健康风险评估	杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)
北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析	潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)
南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析	罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)
苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化	吴也正, 张鑫, 顾钧, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)
长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源	卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张森霖, 黄张根 (1402)
基于 PCA-APCS-MLR 模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析	崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)
重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价	张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)
长江流域微塑料污染特征及生态风险评估	李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)
宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算	丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)
汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估	赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)
宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评价	高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)
浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评价	钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)
鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析	马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)
杭州湾南岸 20 a 水质净化功能变化及预测	王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)
不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例	代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)
长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素	刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)
富营养化湖泊藻华降解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应	张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛杰 (1539)
紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平	林涛, 苑宇杰 (1553)
再生水消毒副产物的检测、生成与控制	廖雨枫, 王正, 潘旸, 李爱民 (1561)
3 种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性	何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)
基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析	傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)
基于 AWRSEI 的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析	赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)
定量评估气候变化对长江中下游地区植被 GPP _{GS} 变化的影响	徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志成, 郭振东 (1615)
基于 Meta 分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响	李健明, 康雨欣, 蒋福祯, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)
连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响	鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)
4 种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响	丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)
不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系	邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)
黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征	王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)
覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响	宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)
秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响	胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)
耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响	陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)
基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测	王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)
黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)
广西贺州市典型矿区周边耕层土壤 Cd 通量特征	杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娥, 蔡贺清 (1739)
基于信息扩散模型的沔东地区土壤重金属潜在生态风险评估	杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)
湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价	肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)
典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估	沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)
省级尺度土壤 As 迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例	董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)
谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉砷累积的效应	易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)
EDDS 对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响	刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)
叶面凋制剂对复合污染农田小麦籽粒 Cd、As 和 Pb 累积的阻控效应	肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)
民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征	李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)
宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制	李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)
养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险	白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅杰, 高敏, 王旭明 (1840)
玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征	高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)
不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应	闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

长江中游城市群城市化对PM_{2.5}浓度的多尺度驱动机制

张政^{1,2}, 周廷刚^{1,2*}, 周志衡^{1,2}, 昌悦^{1,2}

(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)

摘要: 探究城市化对PM_{2.5}浓度的非线性影响及其驱动机制,对城市的大气污染治理具有重要意义。基于2002~2020年长江中游城市群的遥感数据和统计数据,采用空间自相关、系统动态面板回归模型和时空地理加权回归模型等方法,揭示长江中游城市群PM_{2.5}浓度的时空演变,并探究不同空间尺度下城市化对PM_{2.5}浓度的驱动机制。结果表明:①2002~2020年长江中游城市群PM_{2.5}浓度整体呈下降趋势,在空间上大致呈“北高南低”的分布格局。②热点城市有向长江中游城市群西部扩张的趋势,冷点城市空间相关程度有所增强。③PM_{2.5}浓度与经济城市化、土地城市化和人口城市化之间分别存在“N”型、倒“U”型和“U”型曲线关系。第二产业和能源消耗对PM_{2.5}浓度变化呈显著促进作用,降水和植被能够有效地削弱PM_{2.5}污染。④各城市化因子在局部的整体驱动效应均发生了转化,其主要影响区域集中在长江中游城市群的东南、西北和西南等边缘地带城市。结合长江中游城市群的城市发展现状和区域特征,推进产业绿色转型,合理规划城市空间布局和人口分布,增强基础设施建设将有助于实现城市发展和环境保护之间的协调发展。

关键词: PM_{2.5}浓度; 城市化; 长江中游城市群; 时空演变; 驱动机制

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1304-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202303231

Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM_{2.5} Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River

ZHANG Zheng^{1,2}, ZHOU Ting-gang^{1,2*}, ZHOU Zhi-heng^{1,2}, CHANG Yue^{1,2}

(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)

Abstract: Exploring the nonlinear effect of urbanization on PM_{2.5} concentration and its driving mechanism is crucial for controlling urban air pollution. Based on remote sensing data and statistical data from 2002 to 2020, spatial autocorrelation, systematic dynamic panel regression, and spatio-temporal geographical weighted regression models were used to analyze the spatio-temporal evolution of PM_{2.5} concentration in the urban agglomeration of the middle reaches of the Yangtze River and explore the driving mechanism of urbanization on PM_{2.5} concentration at different spatial scales. The results showed that: ① PM_{2.5} concentration in the middle reaches of the Yangtze River showed an overall decreasing trend from 2002 to 2020, with a spatial distribution pattern of "high in the north and low in the south." ② Hot spot cities expanded towards the western part of the urban agglomeration, whereas cold spot cities showed enhanced spatial correlation. ③ The relationship between PM_{2.5} concentration and economic, land, and population urbanization followed N-shaped, U-shaped, and U-shaped curves, respectively. Secondary industry and energy consumption significantly promoted the change in PM_{2.5} concentration, and precipitation and vegetation helped mitigate PM_{2.5} pollution. ④ The overall driving effects of all urbanization factors in local areas were transformed, and the main areas of influence were concentrated in the southeast, northwest, and southwest of the study area. Considering the current urban development status and regional characteristics of the urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River, promoting green industrial transformation, rational planning of urban spatial distribution and population distribution, and enhancing infrastructure construction will facilitate the coordinated development between urbanization and environmental protection.

Key words: PM_{2.5} concentrations; urbanization; urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River; spatio-temporal evolution; driving mechanism

城市是人口、经济和空间等社会经济结构的载体^[1]。改革开放以来,中国的城市化发展成果显著,截至2020年底,中国城镇化率达到63.89%。然而,在享受城市化为经济发展带来便利的同时,城市化的快速发展也导致了严重的雾、霾污染。已有研究表明,工业生产、人口聚集、能源消费和城市扩张是影响PM_{2.5}排放的主要因素^[2,3],而城市化的进展通过改变与PM_{2.5}排放有关的社会经济因素,从而影响PM_{2.5}的空间分布^[4]。相较于东部沿海地区,我国中西部地区城镇化率较低,具有巨大的发展空间^[5],因此,探究PM_{2.5}的时空演变及其与城市化之间的作用关系对构建环境友好型城市,实现城市可持续发展具有重要

意义。

围绕城市化如何影响PM_{2.5}浓度的问题,已有许多学者开展了相关研究。时空地理加权回归模型^[6]、时空LMDI分解法^[3]、贝叶斯时空层次模型^[7]、地理探测器^[8]和空间计量模型^[9]等常被用于解析PM_{2.5}与城市化之间的关系。近年来,有学者尝试从人口、经济和社会等多个维度量化城市化对PM_{2.5}的影响,并

收稿日期: 2023-03-28; 修订日期: 2023-06-06

基金项目: 国务院三峡办重庆库区重要支流(涪陵-巫山段)水生态环境状况调查与评估项目(5000002013BB5200002)

作者简介: 张政(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为城市发展与大气环境遥感, E-mail: zhangz_swu@163.com

* 通信作者, E-mail: zhoutg@163.com

发现在城市化初期, $\text{PM}_{2.5}$ 污染会随城市化水平的提高而加剧, 当城市化水平达到特定阈值后, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度则随着城市发展而不断降低, 即 $\text{PM}_{2.5}$ 与城市化之间存在倒“U”型的环境库兹涅茨曲线(EKC)关系。此外, 也有学者指出, $\text{PM}_{2.5}$ 污染的后期减少可能是一种短暂现象, $\text{PM}_{2.5}$ 污染将随着城市发展而再次增加, 即“N”型的 EKC 结果^[10]。Qi 等^[11]发现中国的人口城市化和经济城市化均与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈倒“U”型关系。Du 等^[12]发现经济城市化对空气质量的影响强于土地城市化和人口城市化, 被认为是表征城市化的主要影响。城市化水平的不同可能会造成 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间格局的差异, 目前多数研究从单一空间尺度出发, 难以体现城市化对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响的尺度差异化^[13]。

长江中游城市群连接中原城市群、长三角和四川盆地等重污染地区, 独特的地理位置使得长江中游城市群成为大气污染传输的重要枢纽^[14]。目前, 针对长江流域城市化对 $\text{PM}_{2.5}$ 的驱动作用研究大多集中在长三角和西南地区^[15,16], 而长江中游地区的相关研究较少。因此, 本文基于长江中游城市群 2002~2020

年的城市面板数据和遥感数据, 采用系统动态面板回归模型探究长江中游城市群多维城市化与 $\text{PM}_{2.5}$ 之间的非线性关系, 并运用时空地理加权回归模型探究城市化因子驱动作用的时空异质性, 以为长江中游城市群的大气污染防治和城市可持续发展提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

长江中游城市群是由武汉都市圈、长株潭城市群和环鄱阳湖城市群为主体构成的国家级特大型城市群。根据 2022 年国家发展改革委印发的《长江中游城市群发展“十四五”实施方案》, 长江中游城市群包括湖北、湖南和江西三省 27 个地级市和 3 个县级市(图 1), 总面积约 32.46 万 km^2 , 约占中国国土面积的 3.38%(因数据不完整, 本研究不含吉安市)。长江中游城市群地处长江经济带中部, 是东部沿海地区带动中西部地区经济发展的过渡地带, 在促进形成国内大循环新发展格局和中国经济协调发展中具有承东启西、连接南北的重要战略意义^[17]。

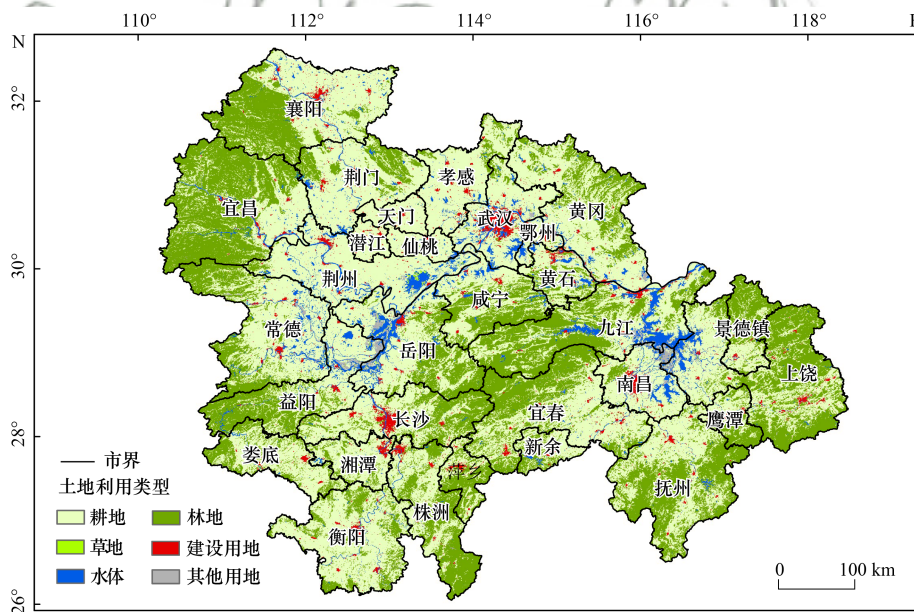


图 1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of the study area

1.2 指标选取与数据来源

年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据源自 China High $\text{PM}_{2.5}$ 数据集 (<https://zenodo.org/>), 时间序列为 2002~2020 年, 空间分辨率为 1 km。该数据集基于多角度大气校正(MAIA)气溶胶光学深度(AOD)产品, 结合土地覆盖、人口分布和气象等辅助数据, 通过时空-极端随机树模型反演得到, 取得了较高的精度, 其 R^2 值在 0.92~0.94 之间, 均方根误差值在 5.1~10.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

之间^[18,19]。

基于已有研究^[11,15], 选择经济城市化、土地城市化和人口城市化表征城市的多维演变。经济城市化的本质是农村经济向城市经济的转化, 生产要素和消费得到升级和聚集的过程, 而人均 GDP(PGDP)能较好地表征这一过程; 土地城市化是城市向外扩张, 迫使自然地表转为建设用地的过程, 采用建成区面积占比(BUA)表征; 人口城市化是农村人口将剩余劳

动力转移到非农业生产活动中,并由农村向城市迁移和聚集的过程,采用城镇化率(UR)表征.由于2009年后不再统计非农业人口,为保持数据的连续性,采用城区人口占总人口的比重计算城镇化率. PGDP、UR 和 BUA 数据主要来自2002~2020年《中国城市统计年鉴》和《中国城市建设统计年鉴》,部分缺失数据从对应年份的国民经济和社会发展统计公报补充.

为了减小忽略变量所带来的偏差,根据以往的研究,本文选取了第二产业比重(IND)、能源消耗指数(EC)、降水(PRE)和归一化植被指数(NDVI)这4

种控制变量. IND数据源自《中国城市统计年鉴》;由于能源消耗与夜间灯光存在一定的线性相关关系,使用行政单元内的栅格灰度值之和间接衡量能源消耗指数,夜间灯光数据来源于Wu等^[20]研发的“类DMSP-OLS”夜间灯光遥感数据集;PRE栅格数据由国家地球系统科学数据中心(<https://www.geodata.cn/>)提供;年均NDVI数据通过谷歌地球引擎云平台(Google Earth Engine),对MODIS植被指数产品(MOD13A2)进行年合成得到. 基于Stata16.0检验各变量之间的方差膨胀因子(VIF),发现所有变量VIF均小于10(表1),说明变量之间不存在多重共线性.

表1 指标选取及其描述¹⁾

Table 1 Indicator selection and description

变量名称	符号	变量定义	单位	均值	最小值	最大值	VIF
PM _{2.5} 浓度	PM	PM _{2.5} 年均浓度	μg·m ⁻³	54.38	23.91	82.92	
经济城市化	PGDP	人均GDP	元·人 ⁻¹	35 167.77	3 357	145 545	2.72
土地城市化	BUA	建成区面积/总面积	%	1.24	0.09	10.33	6.72
人口城市化	UR	城区人口/总人口	%	19.81	2.79	68.80	5.40
第二产业占比	IND	第二产业增加值/GDP	%	48.62	28.56	74.84	1.40
能源消耗	EC	能源消耗	/	29 367.69	2 230.00	218 531.00	2.48
降水量	PRE	年降水量	mm	1 380.51	738.518	2 477.53	1.08
归一化植被指数	NDVI	归一化植被指数	/	0.52	0.37	0.66	1.82

1)“/”表示无量纲

1.3 研究方法

1.3.1 空间自相关分析

采用全局莫兰指数(global Moran's I)检验PM_{2.5}浓度在长江中游城市群的全局自相关性,其定义为:

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

式中, n 为研究单元个数; x_i 和 x_j 表示城市 i 和城市 j 的PM_{2.5}浓度; W_{ij} 为空间权重矩阵. I 的取值范围为 $[-1, 1]$, $I > 0$ ($I < 0$)说明空间呈正(负)相关, $I = 0$ 表示无集聚,空间呈随机分布.

结合Getis-Ord G_i^* 指数检测城市尺度单元的局部空间集聚特性^[21],其定义如下:

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

式中, W_{ij} 表示第 i 个和第 j 个城市之间的空间权重, S 为城市PM_{2.5}的标准差.

1.3.2 基于EKC的面板回归模型

环境库兹涅茨(EKC)曲线的计量经济学模型一般由二级和三级的简化公式和通过添加控制变量创

建的结构公式组成. 考虑到PM_{2.5}污染本身具有滞后效应^[22],系统广义估计法(SGMM)可以引入被解释变量的滞后项作为水平值的工具变量,通过合理增加工具变量来克服模型的内生性问题,并得到一致性的无偏结果^[23]. 因此,采用SGMM模型检测长江中游城市群多维城市化与PM_{2.5}之间潜在的EKC关系,其公式如下:

$$\ln PM_{it} = \alpha + \beta_1 \ln PM_{i,t-1} + \beta_2 \ln Ur_{it} + \beta_3 \ln Ur_{it}^2 + \lambda_i x_{it} + \varepsilon_{it} \quad (3)$$

$$\ln PM_{it} = \alpha + \beta_1 \ln PM_{i,t-1} + \beta_2 \ln Ur_{it} + \beta_3 \ln Ur_{it}^2 + \beta_4 \ln Ur_{it}^3 + \lambda_i x_{it} + \varepsilon_{it} \quad (4)$$

式中,PM_{it}为各城市的年均PM_{2.5}浓度值;PM_{i,t-1}为PM_{it}的一阶滞后变量;Ur_{it}和 x_{it} 分别表示核心解释变量和控制变量; α 为常数项; ε_{it} 为随机误差项.

1.3.3 时空地理加权回归模型

时空地理加权回归(GTWR)模型在地理加权回归模型的基础上引入了时间维度,通过构建局部模型来探究研究区域内变量的时空非平稳关系,适用于反映探究对象的时空异质性^[24]. GTWR模型插件源自黄波教授团队开发的ArcGIS插件(<https://www.researchgate.net/>). 其基本公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i, t_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i, t_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (5)$$

式中, $\beta_0(u_i, v_i, t_i)$ 和 $\beta_k(u_i, v_i, t_i)$ 分别为样本点 i 的回归

常数 and 样本点 i 的第 k 个回归常数, 其中 u_i, v_i 和 t_i 分别为样本点 i 的经度、纬度和时间; x_{ik} 为 GTWR 模型指标体系中量化指标 x_k 在 i 点的值; ε_i 为残差项。

2 结果与讨论

2.1 长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时序变化

2002~2020 年长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度总体呈先升后降的变化趋势[图 2(a)], 其内部各子城市群的变化趋势与研究区总体变化趋势基本一致, 呈现出武汉都市圈($57.71 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>长株潭城市群($51.30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>环鄱阳湖城市群($44.99 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的空间异质性态势。具体来看, 2002~2007 年长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度快速增长, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 由 $48.03 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 增加至 $63.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 增幅达 31.54%, $\text{PM}_{2.5}$ 污染加剧明显。2007~2013 年研究区内 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的增长趋势整体放缓, 呈波动上升趋势。2013~2020 年长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度显著下降, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 由 $64.31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下

降至 $31.09 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 降幅达 51.66%。

参考中国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 和世界卫生组织(WHO)标准, 将长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度划分为 6 个区间[图 2(b)]。可以看出, 在研究期间内, 长江中游城市群还未有区域达到国家一级浓度限值($15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 而低于国家二级浓度限值($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的区域由 2002 年的 6.31%, 先锐减至 2007 年的 0.00%, 再逐步增加至 2020 年的 71.21%, 整体占比大幅增加。长江中游城市群 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最大值出现在 2014 年, 为 $102 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 浓度超过 $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的高污染时期集中在 2004~2014 年, 其中 2013 年最为严重, 为 33.95%。

总体而言, 得益于大气污染防治政策的启动和实施, 以及研究区内构成 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来源的工业企业得到升级改造, 长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 污染得到了有效改善。但仍有超 1/4 区域还未达到国家二级浓度限值要求, 说明长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 污染有待进一步改善。

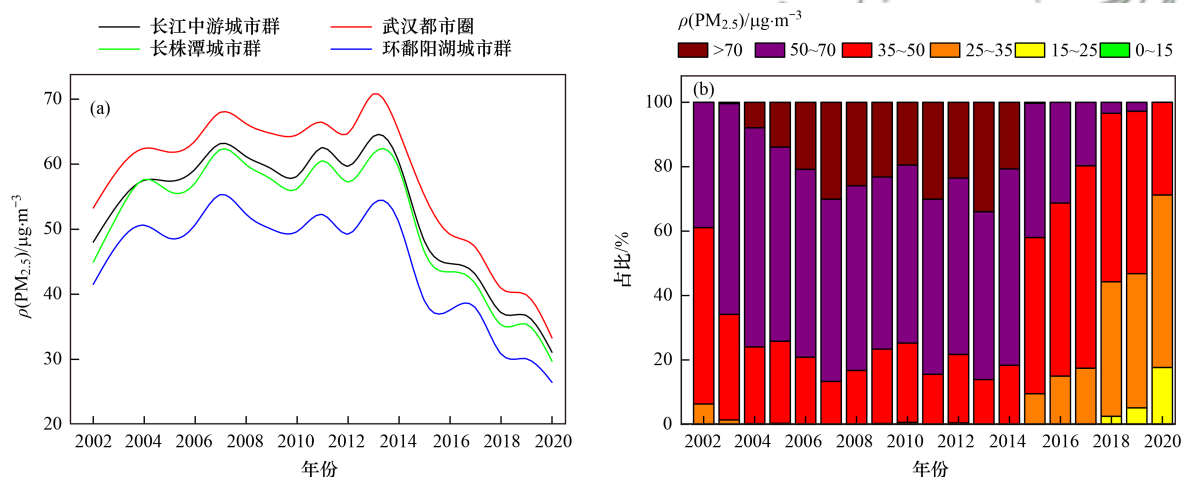


图 2 2002~2020 年长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 时间变化趋势

Fig. 2 Temporal variation trend of $\text{PM}_{2.5}$ in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River from 2002 to 2020

2.2 长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空演变特征

2002~2020 年长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化趋势明显[图 3(a)~3(e)]. 2002~2013 年为 $\text{PM}_{2.5}$ 增长阶段, 以仙桃、武汉和荆州为中心的重污染区, 在汉江平原快速蔓延。2013~2020 年 $\text{PM}_{2.5}$ 污染得到有效改善, 重度污染区域由南向北递减, 其中抚州市整体 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度率先于 2015 年低于二级标准限值。由图 3(f) 知, 2002~2020 年长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度整体呈下降趋势, 变化斜率位于 $[-0.52, -2.19]$ 之间, 汉江平原、洞庭湖西部和鄱阳湖西南部的城市下降趋势更为显著。

总体来看, 长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在空间上大致呈“北高南低”的分布格局, 这与已有结论一致^[25]。究其成因, 研究区北部城市的资源环境密集型产业比重较大, 自身污染排放严重, 且地形平坦, 容

易受到中原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的侵扰。而南部城市工业化和城市化水平较低, 自身污染排放量小, 且城市周围多为丘陵和山地, 阻挡了北部污染物的扩散, 因而大气状况较好。

2.3 长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间聚集特征

对 2002~2020 年长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度进行全局空间自相关分析(图 4)。结果显示, 研究期间内全局 Moran's I 均为正值, 介于 $[0.589, 0.748]$, 并在 1% 置信水平上显著, 表明长江中游城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度存在显著的空间聚集效应, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高的区域往往聚集在其他高值区域附近, 低值聚集在其他低值区域附近。此外, 本研究期间内全局 Moran's I 值呈波动上升趋势, 表明 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的空间集聚格局逐渐增强。

以 Getis-Ord G_i^* 指数为指标, 检测研究区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓

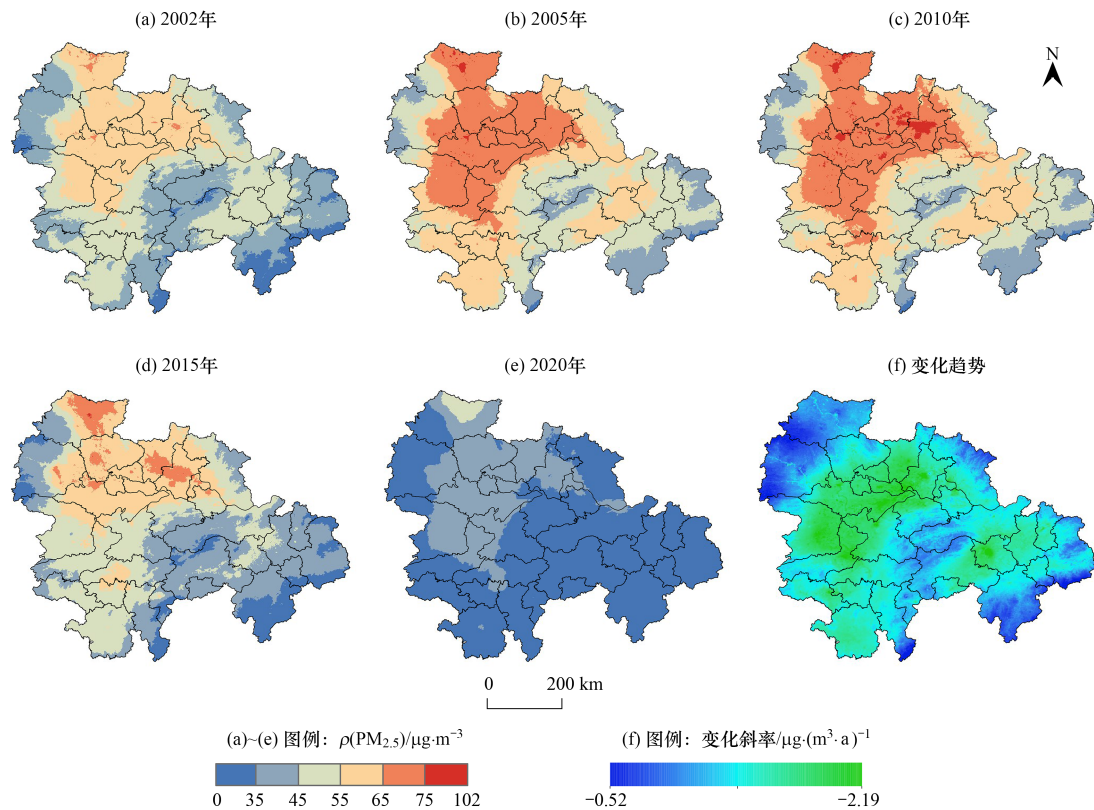


图3 2002~2020年长江中游城市群PM_{2.5}浓度时空演变

Fig. 3 Temporal and spatial evolution of PM_{2.5} in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River from 2002 to 2020

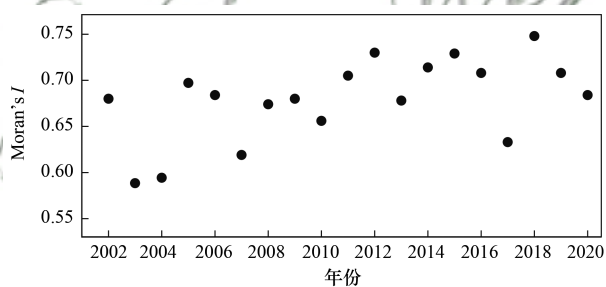


图4 2002~2020年长江中游城市群PM_{2.5}浓度全局Moran's I指数变化

Fig. 4 Changes in global Moran's I index in urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River from 2002 to 2020

度聚集特征的局域差异. 由图5可知,热点聚集区主要分布在武汉、孝感和仙桃等鄂中地区,2002、2005和2010年的热点聚集区分布一致,2015年新增黄冈热点,但空间相关程度较低,2020年,黄冈热点消退,热点聚集区扩展至宜昌、南昌、鹰潭和上饶等环鄱阳湖城市为冷点城市聚集区,2005年长沙冷点消退,新增九江和景德镇冷点区,2010年,九江冷点消退,之后3个时期冷点范围保持不变,但空间相关程度整体呈增强趋势.

2.4 对PM_{2.5}浓度影响探测

2.4.1 长江中游城市群城市化对PM_{2.5}浓度整体影响探析

为回避因单位根造成的伪回归现象,在构建模

型前,借助Stata 16.0对所有变量进行LLC和ADF单位根检验. 整理回归结果可知(表2),SGMM模型中的解释变量滞后项系数均位于基准回归(OLS)和固定效应(FE)之间,说明SGMM的结果是可靠的. AR(1)均在1%水平上显著,AR(2)在10%水平上不显著,表明随机误差项存在一阶自相关的同时,不存在二阶自相关. 对于所有核心解释变量,Hansen过度检验结果均接受了“没有过度识别的工具变量”的原假设,说明模型选择的工具变量是合理的.

以PGDP为核心解释变量的SGMM回归结果表明(表2),PGDP的一次项和三次项系数均为显著正,二次项为显著负,说明PM_{2.5}浓度与城市经济化的关系符合EKC经典理论,为“N”型曲线,这与Fang的结论一致^[26]. 当PGDP低于13027元时,PM_{2.5}浓度的弹性系数为33.078,此阶段PM_{2.5}浓度将随着城市经济发展而逐渐增强. 这是因为中国早期的经济发展模式多为过度依赖资源环境投入的“黑色发展模式”,快速扩张的工业生产具有高能耗和污染大的特点,这不可避免地加剧了PM_{2.5}污染^[27]. 当PGDP介于13027~91051元时,PM_{2.5}浓度的弹性系数减小为-3.194,PGDP对PM_{2.5}浓度呈显著的负效应,目前研究区内多数城市的PGDP处于该阶段. 此阶段,城市利用已有的资金基础对产业结构进行优化,各地严格制定环境法规,推进清洁能源的研发和使用,以此

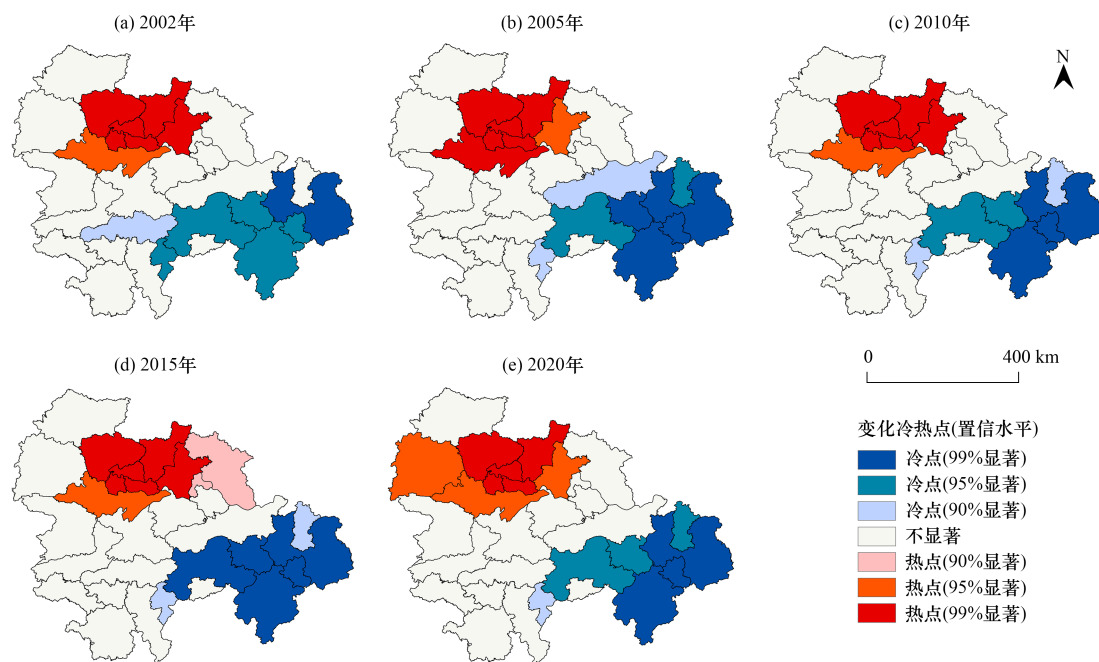


图5 2002~2020年长江中游城市群 $PM_{2.5}$ 浓度冷热点分布

Fig. 5 Distribution of cold and hot spots of $PM_{2.5}$ in urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River from 2002 to 2020

缓解 $PM_{2.5}$ 污染^[28]. 当PGDP高于91 051元时,经济城市化将恢复对 $PM_{2.5}$ 浓度的促进作用. 技术的研发和推广都需要承担巨额的成本, Alvarez等^[10]认为,当技术改进的潜力耗尽或过于昂贵时,经济活动产生的负面影响将掩盖技术提升带来的积极效应,城市经济与环境污染之间的关系将回到污染水平上升的道路上.

土地是人类社会经济活动的重要载体. 以BUA为核心解释变量的SGMM回归结果表明(表2),BUA的主项和平方项分别为显著负和正,即 $PM_{2.5}$ 浓度与BUA之间存在倒“U”型关系. 当BUA低于1.70%时,BUA每提升1%, $PM_{2.5}$ 浓度也将增长0.526%. 一方面,长江中游地区早期的土地扩张占用了大量的农业和生态用地,耕地的减少和湿地的退化导致了土地自我调节能力的弱化^[29]. 另一方面,城市规模的扩张也延长了居民的通勤距离,间接导致私家车量的快速增长,以及相关能源消耗强度的增大. 当BUA越过1.70%的拐点后,其弹性系数由0.526减小为-0.300,这主要是由于城市规模的提升促使居民环保意识的觉醒,政府通过合理规划资源调配和城市空间布局,调整工业企业向郊区转移,降低区域企业密度,推动城市公共设施建设,从而改善城市的 $PM_{2.5}$ 污染^[30].

与Qi等^[11]的结论不同,本文发现研究区的 $PM_{2.5}$ 浓度与UR之间遵循“U”型关系(表2). 当UR低于23.65%时, $PM_{2.5}$ 浓度的弹性系数为-1.284,此时UR的提升有助于改善城市 $PM_{2.5}$ 污染状况. 在城市化初

期,城市人口密度低,这意味着城市资源环境足够承担人类活动所产生的环境压力,且人口向城市的适当集中能够形成集聚效应,促进城市公共设施和自然资源的共享,提高城市资源的利用效率^[9]. 当UR高于23.65%时, $PM_{2.5}$ 浓度的弹性系数增大至0.205. 究其原因,城市人口规模的膨胀导致对交通、住房和能源的需求增加,促进建筑扬尘、汽车尾气和煤烟等 $PM_{2.5}$ 一次源的排放,而已有的公共基础设施可能无法满足城市人口快速增长的需求,从而造成 $PM_{2.5}$ 污染的加剧^[31].

SGMM回归结果也表明各控制变量的驱动效应. IND对 $PM_{2.5}$ 浓度呈显著的积极作用,这与已有的研究结论一致^[15]. 长江中游地区的产业结构多为能源化工和机械制造等资源环境密集型产业,其生产过程会排放大量的废气和建筑扬尘^[32]. 此外,研究区的经济发展长期依赖于煤炭和石油等化石能源,而化石能源的燃烧是 $PM_{2.5}$ 污染的重要来源,因此,优化能源结构问题,推广清洁能源的使用显得至关重要. PRE和NDVI对 $PM_{2.5}$ 污染的负面影响已经得到许多研究的证实^[16,25]. 降水不仅对 $PM_{2.5}$ 污染具有冲刷作用,伴随降水的强风也能加速 $PM_{2.5}$ 的转移^[33]. 植被能够通过气孔吸收气态污染物并沉淀颗粒物,净化空气中的 $PM_{2.5}$ 颗粒^[34].

2.4.2 长江中游城市群城市化对 $PM_{2.5}$ 浓度影响空间异质性探析

SGMM模型虽能够检测出城市化因子的整体驱动效应,但无法评估各城市化因子对 $PM_{2.5}$ 浓度的影

表2 多维城市化对PM_{2.5}浓度的非线性影响回归结果¹⁾

Table 2 Regression results of nonlinear effects of multidimensional urbanization on PM_{2.5}

自变量	经济城市化			人口城市化			土地城市化		
	OLS	FE	SGMM	OLS	FE	SGMM	OLS	FE	SGMM
L.lnPM _{2.5}	0.965*** (73.600)	1.070*** (58.890)	1.018*** (56.770)	0.982*** (106.150)	1.078*** (57.750)	1.064*** (22.550)	0.982*** (103.640)	1.082*** (58.220)	1.018*** (23.390)
lnUr	8.679** (2.390)	4.908 (1.440)	33.078*** (3.590)	-0.250* (-1.810)	-0.220 (-1.490)	-1.284** (-2.210)	0.014 (0.500)	-0.037 (-1.220)	0.526** (2.350)
lnUr2	-0.741* (-2.010)	-0.409 (-1.190)	-3.194*** (-3.510)	0.031 (1.320)	0.031 (1.240)	0.205** (2.170)	-0.023* (-1.910)	0.008 (0.450)	-0.300*** (-3.410)
lnUr3	0.021 (1.690)	0.011 (0.980)	0.102*** (3.400)	— —	— —	— —	— —	— —	— —
lnIND	0.144*** (3.570)	0.102** (2.520)	0.618*** (4.710)	0.302*** (8.340)	0.172*** (4.680)	0.330** (2.610)	0.286*** (7.190)	0.168*** (4.570)	0.192** (2.100)
lnEC	0.120*** (7.800)	0.138*** (8.310)	0.142*** (5.450)	0.112*** (7.810)	0.132*** (8.130)	0.222*** (4.280)	0.112*** (7.900)	0.133*** (8.130)	0.186*** (4.210)
lnPRE	-0.167*** (-10.420)	-0.298*** (-14.130)	-0.299*** (-11.370)	-0.159*** (-8.740)	-0.302*** (-14.620)	-0.180*** (-4.550)	-0.166*** (-9.230)	-0.308*** (-14.930)	-0.414*** (-8.000)
lnNDVI	-0.026 (-0.640)	-0.261*** (-3.230)	0.173 (1.510)	0.003 (0.080)	-0.316*** (-3.800)	0.404 (1.670)	-0.011 (-0.290)	-0.310*** (-3.770)	-0.145 (-1.260)
_cons	1.266*** (9.660)	1.635*** (9.090)	2.172*** (9.480)	1.192*** (8.860)	1.615*** (10.180)	1.254*** (4.040)	1.228*** (9.030)	1.638*** (10.200)	2.738*** (6.130)
AR(1)	—	—	0.000	—	—	0.000	—	—	0.000
AR(2)	—	—	0.177	—	—	0.150	—	—	0.135
Hansen test	—	—	0.535	—	—	0.417	—	—	0.590

1)***、**和*分别表示在1%、5%和10%水平上显著;括号内为t统计量;L.lnPM_{2.5}表示PM_{2.5}浓度对数化后的一阶滞后项;Ur为核心解释变量;“—”表示模型中没有相关数据

响在局部上的时空变化. 因此,应用GTWR模型深入探索各城市化因子对PM_{2.5}浓度影响的时空异质性. GTWR模型回归估计参数中(表3),R²和校正后R²均达到了0.951,说明GTWR模型能够很好地解释各个变量对PM_{2.5}浓度的影响.

表3 GTWR模型回归估计参数

Table 3 Regression estimation parameters of GTWR model

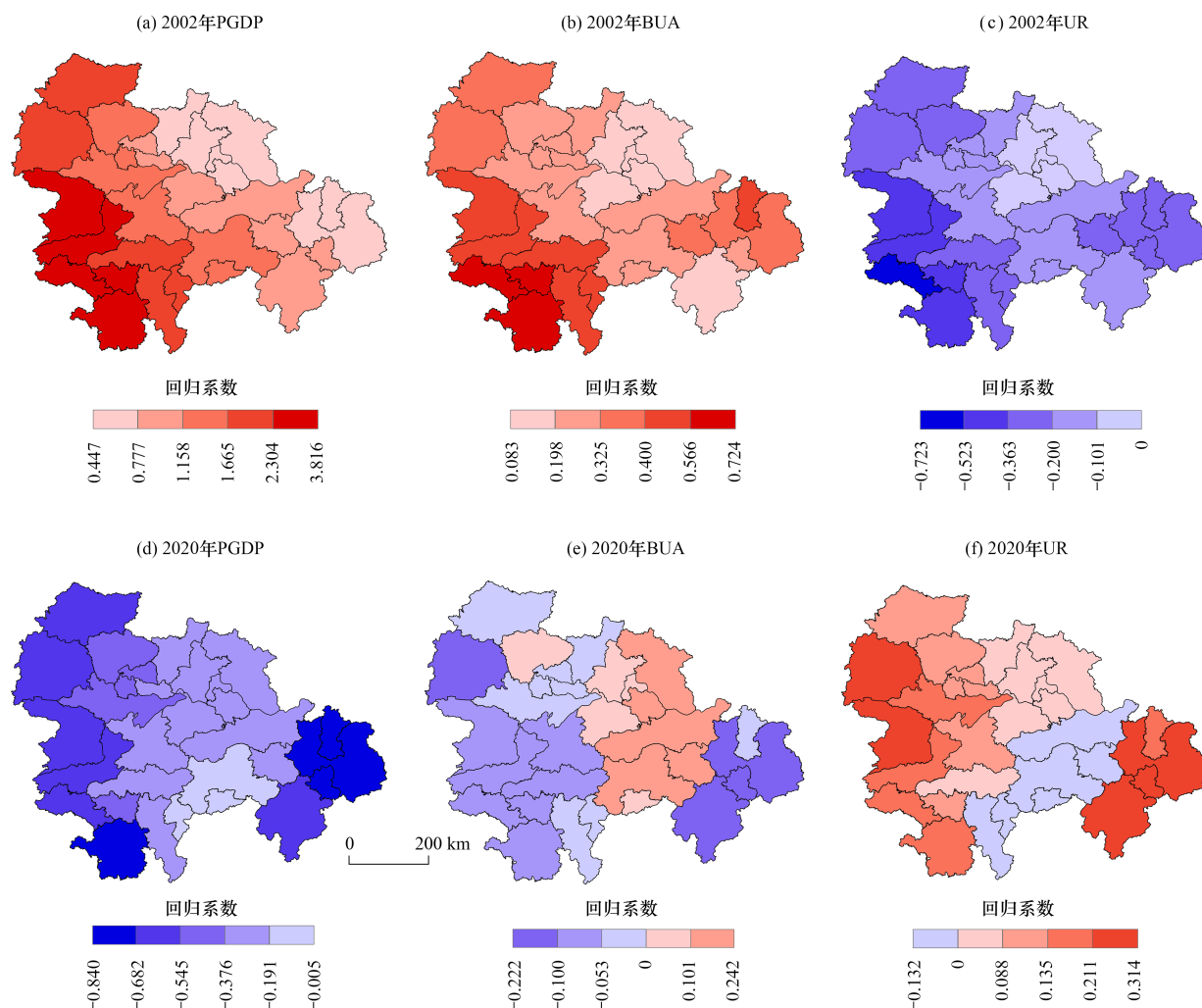
评价指标	带宽	R ²	校正后R ²	AICc	残差平方
数值	0.115	0.951	0.951	204.586	27.782

长江中游地区早期的经济发展多为以环境为代价的粗放式发展. 2002年PGDP与PM_{2.5}浓度之间呈显著正相关[图6(a)],PGDP的影响回归系数由西南向东北方向移动. 而到2020年,研究区内各城市的PGDP驱动效应基本完成了由正向负的转化[图6(d)],说明大气污染治理措施的环境效益已经显现,尤其是在衡阳(-0.682)、景德镇(-0.703)、上饶(-0.840)和鹰潭(-0.806)等西部和东部城市. 以上城市在严格把控排放标准,逐步淘汰过时产能,推进绿色制造体系建设的同时,也充分发挥资源特色,大力推动旅游业和生态农业的发展,从而实现城市经济增长与环境保护的双赢^[35].

城市规模的急剧扩张不仅导致污染物排放量的增加,城市内高密度的建筑也会阻碍PM_{2.5}的扩散.

BUA对PM_{2.5}浓度的驱动效应在2002年呈显著的促进作用[图6(b)],联系最显著的区域主要位于西南部,包括湘潭、衡阳和娄底等. 随着城市规模的提升,居民对生态产品需求的提高要求政府调整城市空间布局,改善城市空气质量. 截至2020年,约66.66%的城市BUA驱动效应转化为负效应[图6(e)],鹰潭、上饶和抚州等位于边缘城市的BUA产生了更强的负效应,这可能是因为以上城市扩张幅度较低,在空间上呈分布相对分散,从而促进PM_{2.5}的扩散和转移^[36,37]. 荆门、黄石和九江等中部城市仍然保持正相关关系,这意味着以上城市需要继续加大城市的精细化管理,改善城市公共交通设施,增加城市绿地.

2002年的UR影响系数的空间分布表明[图6(c)],人口集中将有助于PM_{2.5}水平的降低,这与SGMM模型中的结论一致. 娄底UR对PM_{2.5}的负面影响最强,UR每增加1%,PM_{2.5}浓度就会减少0.723%,其次是衡阳、湘潭、常德和益阳. 约80%的城市UR的驱动效应在2020年转化为正向[图6(f)],说明多数城市的人口增长已经超过了环境承载的极限,需要更多的基础设施和交通来重建人口与生态之间的平衡. 常德、宜昌和上饶等西部和东南部城市UR的正向驱动效应更为显著,这可能是因为以上城市地

图6 城市化子系统对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响系数分布Fig. 6 Distribution of influence coefficient of urbanization subsystem on $\text{PM}_{2.5}$ concentration

处南方红壤丘陵地,土地过垦,水土流失,地表水蚀严重,环境承载能力弱,对人口聚集带来的影响更加敏感^[38,39].

综上所述,各城市化因子的驱动效应均表现出明显的时空异质性,3个城市化因子的区域驱动效应都发生了转变,这进一步验证了城市化因子EKC曲线的存在.此外,本文还发现部分城市的拐点效应被提前或延缓触发,如南昌、武汉和长沙的PGDP已经越过“N”型曲线的第二拐点,但在局部影响中仍然呈显著的负驱动效应;常德、荆州和上饶等城市的UR在还未达到拐点的情况下提前显现出正驱动效应.《长江中游城市群发展计划》和《推进“一江两湖”系统治理合作协议》等政策均指出要加快长江中游地区的“两型”城市建设.武汉、南昌和长沙等发达城市加快产业高级化和产业链现代化,鼓励新能源、新材料和生物医药等新兴产业发展,优化能源结构和煤炭资源的清洁化利用,以科技创新和政策引导构建绿色经济体系,有助于控制城市发展带来的

不良影响,延缓进入污染加剧的阶段.而常德和荆州等城市多为单一发展中心的集中增长型,人口和能源等要素的配置和利用存在不合理和低效问题,忽视了土地资源的承载力和可持续发展,在控制环境污染的同时,城市发展带来的环境效益相当有限,从而降低了进入环境恶化的门槛.因此,缓解城市化和环境污染之间的矛盾需要充分调查城市的发展进程、资源禀赋和功能定位,加强科技创新在产业绿色转型和升级中的推动作用,优化土地资源开发与人口配置,实现城市发展与环境保护之间的协调发展.

各控制变量对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响回归系数如图7所示.具体来看:①IND对 $\text{PM}_{2.5}$ 整体呈显著的促进作用,强正效应城市主要分布在西南部和东部,弱正效应城市分布在黄冈、黄石和九江等北部地区;②EC以正向影响为主,并在空间上表现出“西正东负”的分布态势.这可能是因为,东部城市积极推动新能源的研发,加快能源结构转型,有效降低了单位生产总值能耗,而西部城市虽然也开展了多项节能减排措

施,但可能仍不及其工业的扩展速度,技术改革和产业升级所产生的环境效益还未显现^[40];③PRE有效地减弱了长江中游城市群的 $PM_{2.5}$ 污染,这与周侗等^[13]的研究结论一致.值得一提的是,PRE在九江、黄石

和宜春等长江中游城市群中部区域所带来的环境效益更显著;④NDVI对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响呈显著负效应,上饶、景德镇、鹰潭和衡阳这4个城市表现出的抑制作用最为强烈.

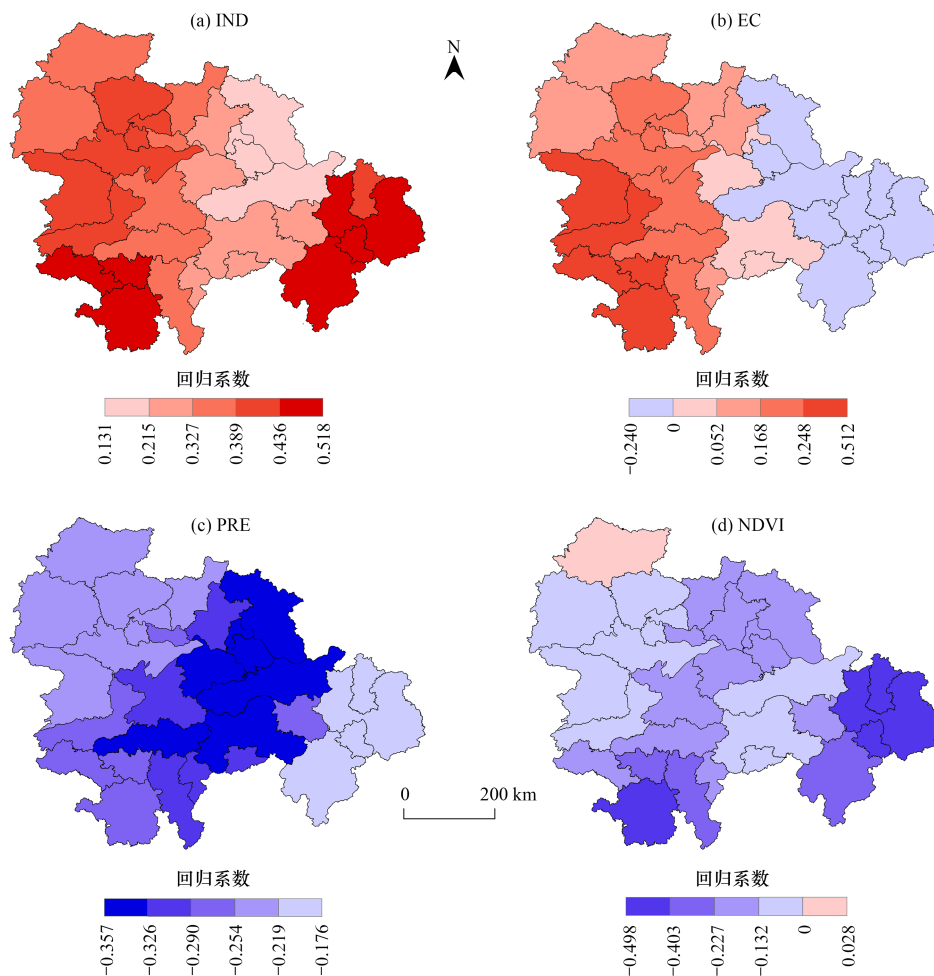


图7 控制变量对 $PM_{2.5}$ 浓度影响系数分布

Fig. 7 Influence coefficient distribution of control variables on $PM_{2.5}$ concentration

3 结论

(1)2002~2020年长江中游城市群 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈下降趋势, $PM_{2.5}$ 浓度在空间上大致呈“北高南低”的分布格局,显著下降区域主要分布在汉江平原、洞庭湖西部和鄱阳湖西南部.

(2)长江中游城市群 $PM_{2.5}$ 浓度具有显著的空间自相关性.热点城市集中分布在鄂中地区,并有向西扩张的趋势,冷点城市主要聚集在环鄱阳湖城市群内,其空间相关程度整体呈增强趋势.

(3) $PM_{2.5}$ 浓度与PGDP、BUA和UR之间分别存在“N”型、倒“U”型和“U”型曲线关系.各控制变量对 $PM_{2.5}$ 浓度影响存在差异,IND和EC对 $PM_{2.5}$ 浓度变化呈显著的促进作用,PRE和NDVI这2个自然因子能够有效削弱 $PM_{2.5}$ 污染.

(4)各城市化因子的局部驱动效应存在显著的

时空异质性.从2002~2020年,PGDP、BUA和UR在局部的整体驱动效应均发生了较大的转化,三者的演变过程基本符合其对应的EKC曲线.城市化因子的主要影响区域集中在研究区的东南、西北和西南等边缘地带城市,在继续推进产业转型的同时,充分调查城市发展进程和区域特征,合理规划城市空间布局 and 人口分布,增强基础设施建设将是促进城市可持续发展和大气深层治理的切入点.

参考文献:

- [1] 高帆. 中国城市化的逻辑转换: 含义及意义[J]. 社会科学, 2022, (8): 109-119.
Gao F. The logical transformation of China's urbanization: implications and significance [J]. Journal of Social Sciences, 2022, (8): 109-119.
- [2] Pui D Y H, Chen S C, Zuo Z L. $PM_{2.5}$ in China: measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation [J]. Particuology, 2014, 13: 1-26.
- [3] 王班班, 廖晓洁, 谭秀杰. 城市化对雾霾暴露的贡献——基

- 于对中国城市群的时空分解[J]. 中国人口·资源与环境, 2021, **31**(7): 63-74.
- Wang B B, Liao X J, Tan X J. Urbanization and its contribution to haze exposure: a spatial-temporal decomposition of Chinese urban agglomerations [J]. China Population, Resources and Environment, 2021, **31**(7): 63-74.
- [4] Han L, Zhao J Y, Gao Y J, *et al.* Spatial distribution characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in Xi'an city predicted by land use regression models[J]. Sustainable Cities and Society, 2020, **61**, doi: 10.1016/j.scs.2020.102329.
- [5] 杨振, 雷军. 中国地级及以上城市城镇化发展的时空格局及影响因素[J]. 中国科学院大学学报, 2019, **36**(1): 82-92.
- Yang Z, Lei J. Spatio-temporal pattern and influencing factors of urbanization development of cities at prefecture level and above in China[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2019, **36**(1): 82-92.
- [6] Huang Q Y, Chen G D, Xu C, *et al.* Spatial variation of the effect of multidimensional urbanization on PM_{2.5} concentration in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) urban agglomeration [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, **18**(22), doi: 10.3390/ijerph182212077.
- [7] Zhang X X, Gu X C, Cheng C X, *et al.* Spatiotemporal heterogeneity of PM_{2.5} and its relationship with urbanization in north China from 2000 to 2017 [J]. Science of the Total Environment, 2020, **744**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140925.
- [8] Wei G E, Zhang Z K, Ouyang X, *et al.* Delineating the spatial-temporal variation of air pollution with urbanization in the Belt and Road Initiative area [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2021, **91**, doi: 10.1016/j.eiar.2021.106646.
- [9] 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.
- [10] Alvarez-Herranz A, Balsalobre-Lorente D, Shahbaz M, *et al.* Energy innovation and renewable energy consumption in the correction of air pollution levels[J]. Energy Policy, 2017, **105**: 386-397.
- [11] Qi G Z, Wang Z B, Wei L J, *et al.* Multidimensional effects of urbanization on PM_{2.5} concentration in China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, **29**(51): 77081-77096.
- [12] Du Y Y, Wan Q, Liu H M, *et al.* How does urbanization influence PM_{2.5} concentrations? Perspective of spillover effect of multi-dimensional urbanization impact [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **220**: 974-983.
- [13] 周侗, 张帅倩, 闫金伟, 等. 长江经济带三大城市群 PM_{2.5} 时空分布特征及影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(4): 878-889.
- Zhou T, Zhang S Q, Yan J W, *et al.* Spatiotemporal distribution characteristics of PM_{2.5} and its influencing factors of the three urban agglomerations in the Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, **31**(4): 878-889.
- [14] 王莹, 智协飞, 白永清, 等. 长江中游地区 PM_{2.5} 重污染过程的典型天气环流分型及区域传输影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(8): 3913-3922.
- Wang Y, Zhi X F, Bai Y Q, *et al.* Analysis of typical weather circulation patterns of heavy PM_{2.5} pollution and the transport pattern in the Yangtze River Middle Basin [J]. Environmental Science, 2022, **43**(8): 3913-3922.
- [15] She Q N, Cao S S, Zhang S Q, *et al.* The impacts of comprehensive urbanization on PM_{2.5} concentrations in the Yangtze River Delta, China[J]. Ecological Indicators, 2021, **132**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108337.
- [16] Wang S C, Sun P J, Sun F, *et al.* The direct and spillover effect of multi-dimensional urbanization on PM_{2.5} concentrations: a case study from the Chengdu-Chongqing urban agglomeration in China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, **18**(20), doi: 10.3390/ijerph182010609.
- [17] 陈万旭, 赵雪莲, 钟明星, 等. 长江中游城市群生态系统健康时空演变特征分析[J]. 生态学报, 2022, **42**(1): 138-149.
- Chen W X, Zhao X L, Zhong M X, *et al.* Spatiotemporal evolution patterns of ecosystem health in the middle reaches of the Yangtze River urban agglomerations[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(1): 138-149.
- [18] Wei J, Li Z Q, Lyapustin A, *et al.* Reconstructing 1-km-resolution high-quality PM_{2.5} data records from 2000 to 2018 in China: spatiotemporal variations and policy implications [J]. Remote Sensing of Environment, 2021, **252**, doi: 10.1016/j.rse.2020.112136.
- [19] Wei J, Li Z Q, Cribb M, *et al.* Improved 1 km resolution PM_{2.5} estimates across China using enhanced space-time extremely randomized trees[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, **20**(6): 3273-3289.
- [20] Wu Y Z, Shi K F, Chen Z Q, *et al.* Developing improved time-series DMSP-OLS-Like data (1992-2019) in China by integrating DMSP-OLS and SNPP-VIIRS [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022, **60**, doi: 10.1109/TGRS.2021.3135333.
- [21] 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.
- [22] Li L, Liu X M, Ge J J, *et al.* Regional differences in spatial spillover and hysteresis effects: a theoretical and empirical study of environmental regulations on haze pollution in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **230**: 1096-1110.
- [23] 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.
- [24] Liu Q Q, Wu R, Zhang W Z, *et al.* The varying driving forces of PM_{2.5} concentrations in Chinese cities: insights from a geographically and temporally weighted regression model [J]. Environment International, 2020, **145**, doi: 10.1016/j.envint.2020.106168.
- [25] 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.
- [26] Fang J. Impacts of high-speed rail on urban smog pollution in China: a spatial difference-in-difference approach [J]. Science of the Total Environment, 2021, **777**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146153.
- [27] 彭智敏, 吴哈哈. 长江经济带能源消费、生态环境污染与产业转型升级[J]. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(8): 1694-1704.

- Peng Z M, Wu H H. Energy consumption, eco-environmental pollution and industrial restructuring and upgrading in Yangtze River Economic Belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, **31**(8): 1694-1704.
- [28] 刘晨跃, 尚远红. 雾霾污染程度的经济社会影响因素及其时空差异分析——基于 30 个大中城市面板数据的实证检验[J]. *经济与管理评论*, 2017, **33**(1): 75-82.
- Liu C Y, Shang Y H. The economic and social influential factors of the degree of smog pollution and the difference of time and space—an empirical test based on panel data of 30 large and medium cities [J]. *Review of Economy and Management*, 2017, **33**(1): 75-82.
- [29] Yang H O, Chen W B, Liang Z F. Impact of land use on PM_{2.5} pollution in a representative city of middle China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2017, **14**(5), doi: 10.3390/ijerph14050462.
- [30] Jiang N N, Jiang W, Zhang J N, *et al.* Can national urban agglomeration construction reduce PM_{2.5} pollution? Evidence from a quasi-natural experiment in China [J]. *Urban Climate*, 2022, **46**, doi: 10.1016/j.uclim.2022.101302.
- [31] Lin B Q, Zhu J P. Changes in urban air quality during urbanization in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **188**: 312-321.
- [32] 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.
- [33] Sun Y, Zhao C F, Su Y F, *et al.* Distinct impacts of light and heavy precipitation on PM_{2.5} mass concentration in Beijing [J]. *Earth and Space Science*, 2019, **6**(10): 1915-1925.
- [34] Zhai H R, Yao J Q, Wang G H, *et al.* Study of the effect of vegetation on reducing atmospheric pollution particles [J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(5), doi: 10.3390/rs14051255.
- [35] Zhang Q, Zheng Y X, Tong D, *et al.* Drivers of improved PM_{2.5} air quality in China from 2013 to 2017 [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of American*, 2019, **116**(49): 24463-24469.
- [36] 朱政, 朱翔, 李霜霜. 长江中游城市群空间结构演变历程与特征 [J]. *地理学报*, 2021, **76**(4): 799-817.
- Zhu Z, Zhu X, Li S S. Evolution process and characteristics of spatial structure of urban agglomeration in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, **76**(4): 799-817.
- [37] Sun J N, Zhou T. Reconsidering the effects of urban form on PM_{2.5} concentrations: an urban shrinkage perspective [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, **30**: 38550-38565.
- [38] 杨振山, 张富荣, 王洪. 中国生态脆弱区的差异及绿色发展途径分析 [J]. *生态环境学报*, 2020, **29**(6): 1071-1077.
- Yang Z S, Zhang F R, Wang H. Analysis on the differences and its green development ways of ecologically fragile areas in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, **29**(6): 1071-1077.
- [39] She Y Y, Chen Q Y, Ye S, *et al.* Spatial-temporal heterogeneity and driving factors of PM_{2.5} in China: a natural and socioeconomic perspective [J]. *Frontiers in Public Health*, 2022, **10**, doi: 10.3389/fpubh.2022.1051116.
- [40] Lai W W, Hu Q L, Zhou Q. Decomposition analysis of PM_{2.5} emissions based on LMDI and tapio decoupling model: study of Hunan and Guangdong [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, **28**(32): 43443-43458.

CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i> (1233)
Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle	REN Xiao-song, LI Zhao-rui (1243)
Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region	TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao (1254)
Assessment of CO ₂ Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i> (1265)
Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province	LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i> (1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study	ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou	ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i> (1293)
Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River	ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i> (1304)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains	WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing (1315)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM _{2.5} Carbon Components in Tianjin	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i> (1328)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} in Huaxi District, Guiyang	GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i> (1337)
Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xinxiang, North China	LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i> (1349)
Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM _{2.5} and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018	DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i> (1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing	PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i> (1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i> (1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River	LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i> (1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i> (1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing	ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i> (1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i> (1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City	DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1448)
Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xingyang Section)	ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i> (1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i> (1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province	ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i> (1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i> (1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years	WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i> (1502)
Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example	DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i> (1512)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i> (1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes	ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i> (1539)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process	LIN Tao, YUAN Yu-jie (1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i> (1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System	HE Qiang, CHEN Bo-wen, YANG Yu-jing, <i>et al.</i> (1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index	FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i> (1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI	ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing (1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i> (1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis	LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i> (1629)
Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i> (1644)
Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil	DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (1655)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages	SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i> (1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River	WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i> (1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i> (1684)
Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China	HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i> (1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland	CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-lie, <i>et al.</i> (1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i> (1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (1724)
Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi	YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (1739)
Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model	YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming (1749)
Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province	XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i> (1760)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i> (1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i> (1781)
Effect of Silica Fertilizer (Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice	YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (1793)
Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor	LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing (1803)
Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland	XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pe, <i>et al.</i> (1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i> (1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i> (1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamyia aeruginosa</i> of Manao River	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i> (1849)
Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish (<i>Danio rerio</i>) Embryos	YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i> (1859)