

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

长江经济带 $PM_{2.5}$ 分布格局演变及其影响因素

黄小刚^{1,2,3}, 赵景波^{2,3*}, 曹军骥², 辛未冬¹

(1. 山西师范大学地理科学学院, 临汾 041004; 2. 中国科学院地球环境研究所气溶胶化学与物理重点实验室, 西安 710061; 3. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119)

摘要: 2000 年以来, 长江经济带高强度的人类社会经济活动引发了严峻的环境污染问题, 灰霾污染尤为严重. 研究该区域 $PM_{2.5}$ 浓度的时空格局与影响因素是落实新发展理念、推进区域大气污染防治的迫切需要. 本文基于遥感反演数据, 研究了 2000~2016 年长江经济带 $PM_{2.5}$ 浓度分布格局的演变过程, 利用地理加权回归模型揭示了自然和社会经济因素对其影响的时空非平稳性. 结果表明: ① $PM_{2.5}$ 浓度分布总体表现为东高西低, 且城市群污染特征明显. ② 以 2007 年为界, 2000~2016 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度经历了逐年上升和波动下降的过程, 年均浓度由 $27.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升至 $44.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 后, 2016 年降至 $33.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 污染范围则先由长三角城市群、长江中游城市群和成渝城市群核心区域向四周快速扩展, 2007 年后开始往回收缩. ③ 空间自相关分析表明, $PM_{2.5}$ 浓度分布有显著的正空间自相关性, 热点持续稳定地分布在上海、江苏、安徽中北部、浙江北部和湖北中部, 冷点分布在云南、四川西部和南部及贵州西部. ④ 自然因素与社会经济因素对 $PM_{2.5}$ 浓度分布的影响具有时空差异性. 其中社会经济因素主要呈正向影响; 自然因素中, 降水量主要呈负向影响, 其余因子的影响大小和作用方向均随着时间和空间的变化而变化.

关键词: $PM_{2.5}$ 浓度; 空间格局; 演变; 影响因素; 长江经济带; 地理加权回归模型 (GWR)

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1013-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.201906158

Evolution of the Distribution of $PM_{2.5}$ Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors

HUANG Xiao-gang^{1,2,3}, ZHAO Jing-bo^{2,3*}, CAO Jun-ji², XIN Wei-dong¹

(1. College of Geographical Sciences, Shanxi Normal University, Linfen 041004, China; 2. Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 3. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

Abstract: Intensive social and economic activity has led to serious pollution in the Yangtze River economic belt since 2000. It is urgent to study the evolution of the distribution of $PM_{2.5}$ concentration and its influencing factors in this area, to adopt new ways of development into practice and promote comprehensive regional air pollution prevention and control. Based on $PM_{2.5}$ concentration estimated by remote sensing retrieval, this paper studied the evolution of the distribution of $PM_{2.5}$ concentration in the Yangtze River economic belt from 2000 to 2016, and analyzed spatial non-stationarity of the influence of natural and socio-economic factors on this evolution via a geographically weighted regression model. The results showed that: ① The general law of $PM_{2.5}$ concentration presented as higher in the east and lower in the west, with a significant trait of the pollution agglomerations corresponding to urban agglomerations. ② Taking the year 2007 as a divide, annual concentration of $PM_{2.5}$ went through a pattern of annually increasing from 2000 to 2007, and then wavelike decreasing from 2007 to 2016. The annual average concentration increased to $44.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2007 from the record of $27.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2000, and then decreased to $33.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ in 2016. In terms of regions polluted, before 2007, it covered areas including the Yangtze River Delta urban agglomerations, the Yangtze River Middle Reaches urban agglomerations, and the Chengdu-Chongqing urban agglomerations, before quickly stretching to their neighboring areas; after 2007, the extent of areas covered shrank. ③ Based on spatial auto-correlation analysis, $PM_{2.5}$ concentration had a significant spatial auto-correlation with hot spots spread over Shanghai, Jiangsu, north-central Anhui, northern Zhejiang, and the central part of Hubei, while cool spots were located in Yunnan, the western and southern parts of Sichuan, and the western part of Guizhou. ④ There is a space-time discrepancy by socio-economic and natural factors in the distribution of $PM_{2.5}$ concentration. The socio-economic factors mainly have a positive influence on the concentration, whereas precipitation, one of the natural factors, has a negative influence. The remaining natural factors not only varied in their degree of influence, but also triggered the influence either in a positive or negative manner from time to time and space to space.

Key words: $PM_{2.5}$ concentration; distribution; evolution; influencing factors; Yangtze River economic belt; geographically weighted regression (GWR)

收稿日期: 2019-06-20; 修订日期: 2019-10-10

基金项目: 中国科学院气溶胶化学与物理重点实验室项目 (KLACP-2018-01); 国家自然科学基金青年科学基金项目 (41701287)

作者简介: 黄小刚 (1978~), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为生态环境评价与治理, E-mail: huangxg@sxnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhaojb@snnu.edu.cn

长江经济带发展作为关系新时代国家发展全局的重大战略,是支撑中国经济持续增长的关键地带。但长期以来高强度的开发建设、高密度的人口产业布局和高排放的生产生活方式,使区域内大气污染问题突出,灰霾天气频发^[1]。灰霾不仅降低大气能见度,影响人们的日常生活,而且易通过呼吸进入人体循环系统,危害人体健康^[2]。持续严重的灰霾还损害城市整体形象,对招商引资、引进人才、发展旅游业等产生不利影响。灰霾污染已成为制约长江经济带实现可持续发展的重要因素。

PM_{2.5}是造成灰霾的主要元凶^[3],探讨 PM_{2.5}浓度的影响因素,为 PM_{2.5}污染防治提供理论依据已成为近年来学界研究的热点^[4]。国内外学者通过对 PM_{2.5}的物质组成^[5,6]、化学转化机制^[7]、排放清单^[8]、来源解析^[9]和大气传输^[10]等研究已认识到,PM_{2.5}主要来源于本地源排放,包括机动车尾气、燃煤、工业生产、扬尘和生物质燃烧等一次源和气态污染物(如 SO₂、NO_x 和 NH₃ 等)经过复杂化学反应形成的二次源,此外还有部分来源于区域传输,因此局地 PM_{2.5}浓度变化是自然因素和人为因素综合作用的结果。为定量分析自然因素和社会经济因素对长江经济带 PM_{2.5}浓度的影响,学者们采用相关分析^[11]、土地利用回归模型^[12]、广义可加模型(generalized additive model, GAM)^[13]、地理加权回归分析(geographically weighted regression, GWR)^[14]、灰色关联模型^[15]和空间计量模型^[16,17]等方法,从不同时空尺度做了广泛地研究。一般认为,经济快速增长、人口规模扩大、城镇化和工业化快速推进及不合理地能源消费结构是 PM_{2.5}浓度上升的内因,气象条件、植被和地形地貌等自然因素对 PM_{2.5}的二次生成、累积、传输、扩散和沉降有重要作用,也深刻影响着局地 PM_{2.5}浓度。

国内外学者在长江经济带 PM_{2.5}影响因素研究方面虽取得了较为丰硕的成果,但仍存在诸多薄弱环节:①研究时段多集中在 2013 年以来,对长时间序列的研究关注较少。目前对长江经济带 PM_{2.5}的研究主要采用实时监测数据,由于国内大气环境监测系统 2012 年才将 PM_{2.5}纳入监测指标体系,长江经济带大范围的 PM_{2.5}实时监测 2013 年才陆续开展,因此以 2013 年以前 PM_{2.5}浓度为研究对象的研究相对较少,利用遥感数据做长时间序列研究也仅限于局部地区^[14]。2000~2013 年长江经济带城镇化、工业化发展迅猛,城镇化率由 36.22% 上升到 51.72%,年均增加 1.41%,是空气质量恶化最快的阶段,研究该时段 PM_{2.5}浓度的空间演变过程及影响因素对全面认识经济快速增长对 PM_{2.5}浓度的影响

具有重要意义。②已有研究多采用全局统计的方法,回归方程很大程度上表现为所有关系的混合平均值,针对影响因素空间非平稳性的研究相对较少。而不同地区,由于自然条件和社会经济条件组合不同,各因素对 PM_{2.5}浓度的影响不尽相同。本文基于 2000~2016 年 PM_{2.5}遥感反演数据,利用探索性空间数据分析、传统线性回归模型和 GWR 等方法,研究长江经济带 PM_{2.5}浓度的空间演化过程,揭示不同时期自然和社会经济因素对 PM_{2.5}浓度影响的空间非平稳性,以为长江经济带 PM_{2.5}污染治理及治理政策的实施提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

PM_{2.5}年均浓度数据来源于大气成分分析组织(ACAG)发布的全球地面 PM_{2.5}浓度数据(http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140)。该数据将美国国家航天局(NASA)中等分辨率成像光谱仪(MODIS)、多角度成像光谱仪(MISR)和海洋观测宽视场传感仪(SeaWiFS)反演得到的气溶胶光学厚度(AOD)产品与地球化学传输模型(GEOS-Chem)相结合,模拟得到全球 PM_{2.5}年均浓度,再利用 GWR 与地面实测数据交互验证^[18]。是目前为止全球覆盖面积最大、时间跨度最长、精度最高的 PM_{2.5}遥感反演数据,在我国已得到广泛验证和有效应用^[19,20]。为验证该数据集在长江经济带的精度,通过全国城市空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035/>)获取了 2015~2016 年长江经济带实时监测数据,在按《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)和《环境空气质量评价技术规范(试行)》(HJ 663-2013)进行严格的数据有效性筛选后,计算了各站点的年均浓度,并与相应位置的 PM_{2.5}浓度遥感反演数据做相关分析。二者相关系数达 0.827,具有显著相关性,表明该数据集能满足地区尺度 PM_{2.5}的研究要求。

根据相关研究梳理^[11-17,19]及数据易获取的原则,选取了对 PM_{2.5}影响较大的经济密度、人均 GDP、二产比重、人口密度、城镇化率、能源消费指数、年均气温、降水量、平均风速、相对湿度和植被覆盖度等 11 个因子为解释变量。社会经济数据来源于文献[21],部分缺失的采用相应省市统计年鉴补充。能源消费指数包括工业生产、日常生活、交通运输等消耗的石油、煤、生物质等能源,有研究表明夜间灯光数据与能源消费显著线性相关^[22,23],本文使用夜间灯光数据间接反映能源消费情况,原始数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)

(<https://www.ngdc.noaa.gov>). 气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)发布的中国地面气候资料月值数据集,原始数据已经过严格的质量控制和检查. 植被覆盖度用归一化植被指数(NDVI)表示,数据来源于美国国家航空和宇航局(NASA)(<http://modis.gsfc.nasa.gov/>).

1.2 评价标准

PM_{2.5}空气质量评价标准按《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(HJ 633-2012)执行. PM_{2.5}年均浓度一级和二级限值分别为 15 μg·m⁻³和 35 μg·m⁻³,对应空气质量分别为优和良,超过 35 μg·m⁻³为超标.

1.3 研究方法

1.3.1 探索性空间数据分析

地理学第一定律认为地理事物或属性的空间分布具有相关性,且距离越近相关性越强^[24]. 探索性空间数据分析是一种揭示数据空间结构的分析方法,可识别空间数据的集聚模式和异常情况,常用全局空间自相关和局部空间自相关两种方法来测度.

全局空间自相关分析主要用来判断地理事物或属性的分布是否具有集聚现象,常用全局 Moran's *I* 来测度,计算公式如下^[17]:

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

式中, ω_{ij} 为空间权重矩阵,相邻为 1,不相邻为 0; x_i 和 x_j 为位置 *i* 和 *j* 的属性值; $\bar{x}$ 为平均值; S^2 为方差. Moran's *I* 的值域为[-1, 1],*I* < 0 表示负相关,相似值趋于离散分布;*I* = 0 表示不相关,呈随机分布状态;*I* > 0 表示正相关,相似值趋于集聚分布. |*I*| 越大,相关性越强.

局部空间自相关分析用于进一步揭示局部空间单元在相邻空间上的自相关性,常用局部 Moran's *I* 测度,计算公式如下^[17]:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S^2} \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (2)$$

式中,*I_i* 表示位置 *i* 的局部 Moran's *I*,其余符号含义

同公式(1). *I_i* > 0 表示属性值相似的地区相临近(高高集聚或低低集聚); *I_i* < 0 表示属性值差异较大的地区相临近(高低集聚或低高集聚). 本文将高高集聚的区域称为热点,低低集聚区域称为冷点.

全局 Moran's *I* 和局部 Moran's *I* 的显著性均采用标准化统计量 *Z* 检验.

1.3.2 GWR

传统线性回归模型是随机变量(*y*)与确定性变量(*x*₁, *x*₂, ..., *x_n*)的多元线性函数^[25]:

$$y_i = \beta_0 + \sum_k \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \quad (3)$$

式中,*y_i* 是位置 *i* 的属性值; β_0 为回归截距; β_k 为第 *k* 个解释变量的回归系数;*x_{ik}* 为第 *k* 个解释变量在位置 *i* 的值;*k* 为解释变量记数; ε_i 为模型误差项. 模型参数估计一般采用经典的普通最小二乘法(OLS),它假定回归参数与样本的空间位置无关,即变量间的关系是同质的. 忽略了变量的空间非平稳性,可能掩盖局部的影响特征,所得结论可能出现偏差.

GWR 是一种局部统计方法,将数据的空间位置嵌入到回归参数中,以探索被解释变量与解释变量在空间上的变化关系,有效地解决了空间非平稳性^[4],所得结果往往更符合实际. GWR 的基本形式如下^[25]:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中,(*u_i*, *v_i*) 为位置 *i* 的中心坐标; $\beta_k(u_i, v_i)$ 为位置 *i* 第 *k* 个变量的回归系数; $\beta_0(u_i, v_i)$ 、 ε_i 分别为模型在位置 *i* 的截距和误差项.

1.4 数据预处理

由于气象数据为点状,能源消费指数和 NDVI 为栅格数据,建模前需按评价单元进行匹配和统计. 为此,首先使用 Aunspline 软件将气象指标插值成栅格,再利用 ArcGIS 10.2 分区统计功能对栅格数据按评价单元进行分区统计. 其中能源消费指数做求和运算,代表能源消费总量,其余变量求平均值.

选取的解释变量可能存在多重共线性关系,会造成信息冗余,影响回归模型的估计结果,建模前应将这些变量剔除. 本文使用方差膨胀因子(VIF)诊断解释变量的多重共线性,阈值设为 7.5,将 VIF 大于 7.5 的变量剔除. 结果表明(表1),2000、2007

表 1 影响因素多重共线性诊断结果

Table 1 Results of multicollinearity test of influencing factors

年份	指标	经济密度	人均 GDP	二产比重	人口密度	城镇化率	NDVI	能源消费指数	年均气温	降水量	平均风速	相对湿度
2000	容差	0.103	0.114	0.432	0.175	0.394	0.449	0.048	0.553	0.537	0.432	0.541
	VIF	9.685	8.758	2.314	5.705	2.538	2.225	20.924	1.807	1.864	2.315	1.848
2007	容差	0.141	0.107	0.550	0.212	0.361	0.277	0.060	0.685	0.615	0.534	0.541
	VIF	7.077	9.358	1.820	4.715	2.769	3.605	16.590	1.460	1.626	1.873	1.849
2016	容差	0.140	0.123	0.636	0.178	0.176	0.187	0.107	0.664	0.528	0.594	0.309
	VIF	7.125	8.153	1.571	5.620	5.673	5.344	9.381	1.505	1.893	1.683	3.232

和 2016 年人均 GDP 和能源消费指数的 VIF 均超过 7.5, 予以剔除. 2000 年经济密度的 VIF 虽然也超过 7.5, 但其主要与人均 GDP、能源消费指数存在共线性关系, 将这两个变量剔除后再计算, 经济密度的 VIF 值小于 7.5. 因此, 模型最终使用的解释变量为经济密度、二产比重、人口密度、城镇化率、年均气温、降水量、平均风速、相对湿度和植被覆盖度等 9 个变量. 此外, 为使数据符合正态分布, 消除模型异方差性, 建模前对解释变量和被解释变量进行 Z-score 标准化处理.

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时间变化特征

2000 ~ 2016 年, 长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度先升后降 (图 1). 其中, 2000 ~ 2007 年为上升阶段, 年均浓度由 $27.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升至 $44.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 年均增加 $2.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 2003 年开始年均浓度超过二级标准限值 ($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), $\text{PM}_{2.5}$ 污染持续恶化的趋势非常明显. 2008 ~ 2016 年为波动下降阶段, 年均浓度在经历了 2010 和 2013 年的波动起伏后, 2016 年已下降到 $33.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 年均下降 $1.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 可见, 2007 年是长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 污染由持续恶化向趋于改善的重要“拐点”. 可能是因为国家“十五”提出的主要污染物排放总量控制、加快产业结构调整、转变经济发展方式及建立节能降耗、污染减排的统计、监测和考核体系和制度等政策初见成效. 尤其是 2013 年国务院批复实施《大气污染防治行动计划》以来, $\text{PM}_{2.5}$ 污染改善趋势更加明显, 2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度已低于二级标准限值, 为 2003 年以来首次低于该限值. 2010 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度出现小幅反弹, 可能是因为 2008 年国际金融危机全面暴发后, 国家推出了进一步扩大内需、促进经济平稳较快增长的十项措施, 到 2010 年底累计投资 4 万亿元开展了大规模的基础设施建设. 由于政策影响的滞后性,

2010 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度出现反弹. 2013 年和 2014 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也出现反弹, 除政策因素外, 可能还与极端气候有关. 2013 年和 2014 年小风日数 (风速 $\leq 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) 多, 气象条件不利于大气污染物扩散. 如 2014 年全国平均风速为 $1.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 小风日数达 237 d, 全国共出现 13 次大范围、持续性霾过程^[26].

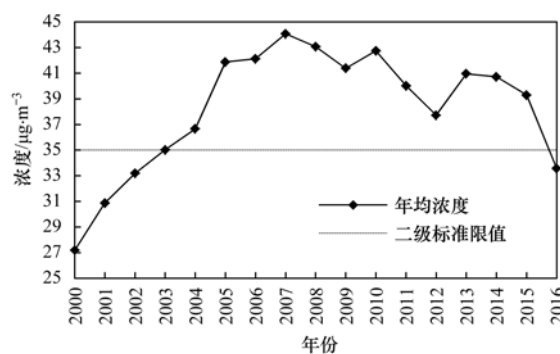


图 1 2000 ~ 2016 年长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的年际变化

Fig. 1 Inter-annual variations of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Yangtze River economic belt from 2000 to 2016

为进一步了解 $\text{PM}_{2.5}$ 的变化特征, 将 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度划分为 9 个区间, 分析各区间内栅格占比的变化情况 (图 2). 从图 2 可见, 以 2007 年为拐点, 2000 ~ 2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度 $\leq 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (二级标准限值) 的栅格比例经历了先降后升的过程, 由 2000 年的 85.2% 下降到 2007 年的 48.4% 后, 2016 年回升至 76.9%. 其中 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度 $\leq 15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (一级标准限值) 的栅格比例由 2000 年的 31.3% 下降到 2007 年的 20.6% 后, 2016 年上升至 24.3%. 而年均浓度 $> 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的栅格比例则经历了先升后降的过程, 由 2000 年的 14.8% 上升到 2007 年的 51.6% 后, 2016 年下降至 23.1%. 可见 2007 年以来, $\text{PM}_{2.5}$ 空气质量确有提高. 但 $\text{PM}_{2.5}$ 污染仍未获得根本性改善, 与 2000 年相比, 2016 年有 73.3% 的栅格 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升, 其中有 22.3% 的栅格增幅在 50% 以上, $\text{PM}_{2.5}$ 污染治理仍面临严峻挑战.

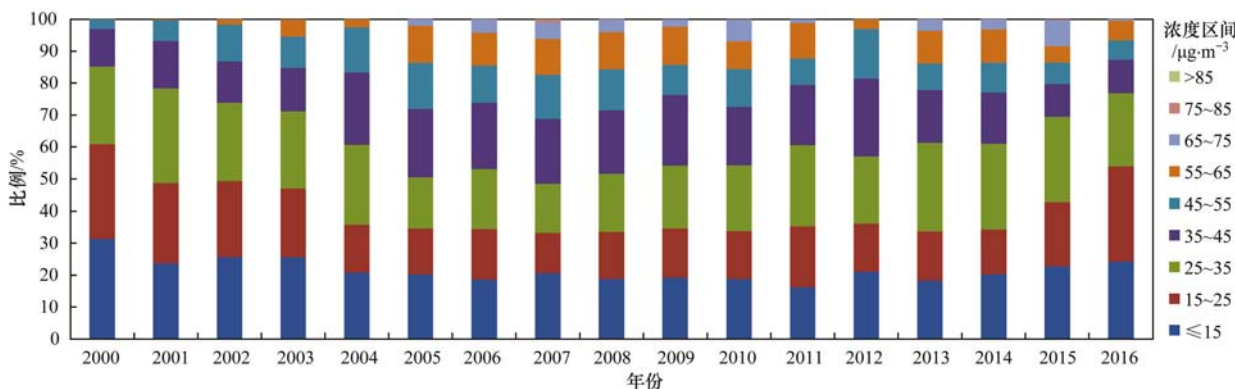


图 2 2000 ~ 2016 年长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分区间栅格比例变化情况

Fig. 2 Raster percentage of $\text{PM}_{2.5}$ concentration by range in the Yangtze River economic belt from 2000 to 2016

2.2 PM_{2.5} 浓度总体分布格局

计算 2000 ~ 2016 年各栅格 PM_{2.5} 浓度的平均值,用以反映长江经济带 PM_{2.5} 浓度的分布格局(图 3)。结果表明,PM_{2.5} 浓度分布总体表现为东部高西部低,且城市群特征明显。东部的上海、江苏、浙江、安徽 PM_{2.5} 浓度最高,污染范围最广,平均浓度为 48.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,远超二级标准限值。其中江苏、上海、安徽中北部和浙江北部已形成连片的 PM_{2.5} 高污染区域,浓度多在 55 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,是长江经济带分布面积最广、污染最严重的地区。中部湖南、湖北、江西次之,平均浓度 39.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,大部分地区超过了二级标准限值。其中湖北中部和湖南北部等长江中游城市群核心区域污染最严重,浓度多在 50 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,但分布范围和污染程度比东部小。西部的重庆、四川、贵州、云南浓度最低,平均浓度 19.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,低于二级标准限值。其中成渝城市群污染相对较严重,部分地区超过 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。四川西部和云南北部则多在一级标准限值以下,PM_{2.5} 空气质量良好。

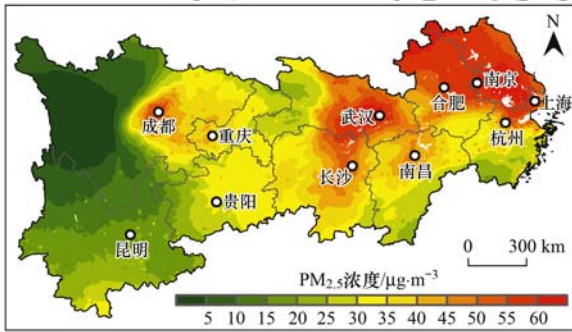


图 3 2000 ~ 2016 年长江经济带 PM_{2.5} 平均浓度的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of PM_{2.5} concentration in the Yangtze River economic belt

2.3 PM_{2.5} 浓度空间格局演变特征

为直观反映 PM_{2.5} 浓度空间分布格局的演变过程,图 4(a) ~ 4(i) 展示了不同年份 PM_{2.5} 年均浓度的空间分布,图 4(j) ~ 4(l) 分别列出了 2000 ~ 2007、2007 ~ 2016 和 2000 ~ 2016 年 PM_{2.5} 年均浓度的变化幅度。由图 4 可知,在 2000 ~ 2007 年 PM_{2.5} 浓度上升阶段,PM_{2.5} 污染范围分别由长三角城市群、长江中游城市群和成渝城市群的核心区快速向四周扩大,且东部恶化的范围和强度大于中西部,东部高西部低的空间格局进一步增强。东部地区 PM_{2.5} 平均浓度由 33.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升到 55.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,上升了 22.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。年均浓度 > 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的栅格比例由 45.0% 上升到 87.4%,除浙江南部外多超过了二级标准限值,其中上海、江苏大部、安徽中北部和浙江北部年均浓度甚至超过 60 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。中部地区次

之,年均浓度由 28.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升到 47.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,上升了 19.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。年均浓度 > 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的栅格比例由 22.7% 上升到 83.6%,除湖北西部和江西南部外其余地区年均浓度多超标,武汉等长江中游城市群核心区域已达 55 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上。西部地区年均浓度由 14.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升到 22.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,上升了 7.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。年均浓度 > 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的栅格比例由 1.2% 上升到 22.7%,主要集中在四川盆地及贵州东部。2007 ~ 2016 年 PM_{2.5} 浓度波动下降阶段,PM_{2.5} 污染范围收缩,强度减弱。除江苏中北部和四川西南部部分地区年均浓度出现了 1 ~ 5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的上升外,其余大部分地区出现了下降,四川盆地、湖南、湖北东部、江西北部 and 浙江北部降幅最大,降幅达 15 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上。2016 年,东部年均浓度已降至 46.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,较 2007 年下降了 9.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,年均浓度 > 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的栅格比例为 69.5%,降低了 17.9 个百分点。中部年均浓度降至 33.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,较 2007 年下降了 14.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,年均浓度 > 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的栅格比例为 36.1%,下降了 47.5 个百分点。西部年均浓度降至 15.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,较 2007 年降低了 6.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,已接近 2000 年的浓度水平。年均浓度 > 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的栅格比例为 1.9%,下降了 22.3 个百分点,超标地区收缩至以成都为中心的区域。综合来看,2000 ~ 2016 年,东部的上海、江苏及安徽的中北部 PM_{2.5} 空气质量恶化最严重,PM_{2.5} 浓度多上升了 20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上;其次是中部的江西及湖南的南部,PM_{2.5} 浓度上升了 10 ~ 20 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;其余地区变化幅度不大,浙江、贵州、湖北西部和湖南北部则略有改善。

2.4 PM_{2.5} 浓度空间集聚特征

鉴于 2007 年是 PM_{2.5} 浓度变化的拐点,且 2000 ~ 2016 年 PM_{2.5} 污染范围主要围绕长三角城市群、长江中游城市群和成渝城市群扩展和收缩,本文以 2000、2007 和 2016 年为时间断点来分析长江经济带 PM_{2.5} 浓度空间集聚的变化特征,PM_{2.5} 浓度分布影响因素分析也主要针对这 3 个年份进行。空间自相关分析结果表明(表 2),2000、2007 和 2016 年 PM_{2.5} 年均浓度全局 Moran's I 均大于 0,且通过了信度为 99% 的显著性检验。表明长江经济带 PM_{2.5} 年

表 2 长江经济带 PM_{2.5} 年均浓度全局 Moran's I

Table 2 Global Moran's I of PM_{2.5} concentration in the Yangtze River economic belt

指标	2000 年	2007 年	2016 年
Moran's I	0.832	0.844	0.877
Z-score	15.550	15.771	16.393
P-value	0.000	0.000	0.000

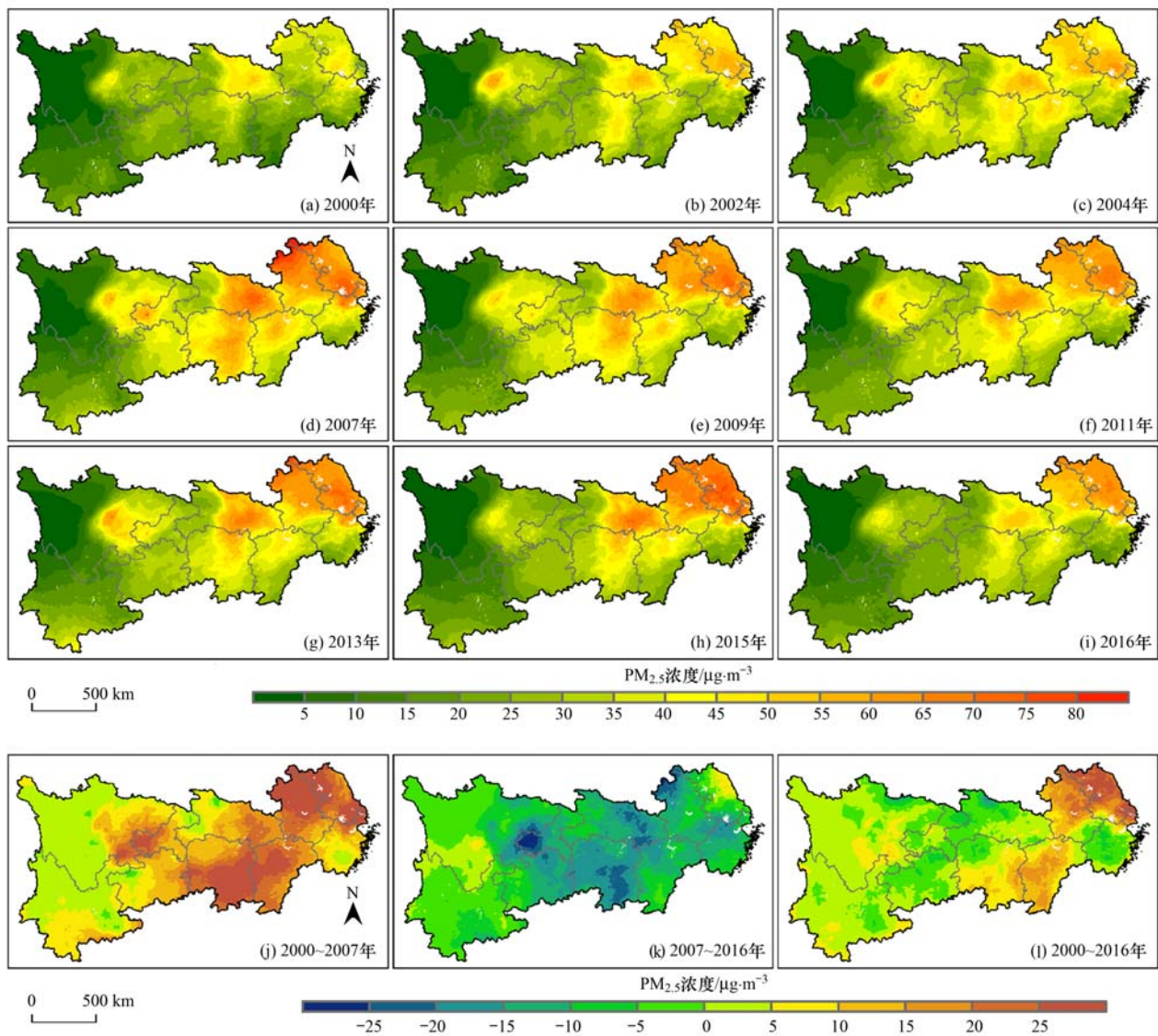


图4 2000~2016年长江经济带 $PM_{2.5}$ 浓度的空间演变

Fig. 4 Spatial evolution of $PM_{2.5}$ concentration in the Yangtze River economic belt from 2000 to 2016

均浓度空间分布存在显著的空间自相关,即相似值趋于集聚分布。

进一步使用局部自相关分析探测 $PM_{2.5}$ 年均浓度集聚的具体区域(图5)。结果表明, $PM_{2.5}$ 浓度集聚类型主要为高高集聚(热点)和低低集聚(冷点),未出现高低集聚和低高集聚类型。由图5可见,3个年份的热点和冷点的位置变化不大。冷点主要分布

在西部的云南、四川西部和南部及贵州西部,表明这些区域 $PM_{2.5}$ 浓度较低,是长江经济带持续稳定的 $PM_{2.5}$ 空气质量优良区。热点主要分布在中部和东部地区,其中中部热点主要分布在长江中游城市群的核心区域,东部热点主要分布在上海、江苏及安徽中北部和浙江北部,表明这些区域是长江经济带持续稳定的 $PM_{2.5}$ 高污染区。

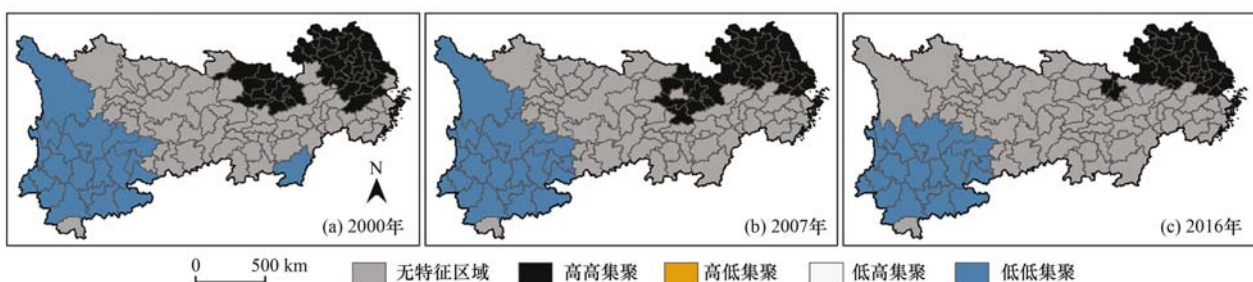


图5 2000~2016年长江经济带 $PM_{2.5}$ 浓度空间集聚的演变

Fig. 5 Spatial agglomeration of $PM_{2.5}$ concentrations in the Yangtze River economic belt from 2000 to 2016

2.5 PM_{2.5} 浓度分布影响因素分析

2.5.1 基于 OLS 模型的影响因素综合分析

为从全局上反映解释变量对长江经济带 PM_{2.5} 浓度的影响并与 GWR 进行比较,首先使用传统多元线性回归模型进行拟合,模型参数用

OLS 估计(表 3)。结果显示,3 个年份的模型均在 99% 水平下显著,表明选定的解释变量均能较好地解释 PM_{2.5} 浓度空间分布格局,调整后的拟合优度(Adjusted R²)分别为 0.454、0.599 和 0.634。

表 3 OLS 模型回归结果¹⁾

Table 3 Results of the OLS model for PM_{2.5} concentration

解释变量	2000			2007			2016		
	系数	Sig.	VIF	系数	Sig.	VIF	系数	Sig.	VIF
经济密度	0.398	0.001 **	3.084	0.458	0.000 **	4.837	0.633	0.000 **	5.847
二产比重	0.021	0.804	1.646	-0.112	0.104	1.484	-0.062	0.342	1.475
人口密度	0.736	0.000 **	3.428	0.925	0.000 **	3.025	0.851	0.000 **	4.262
城镇化率	0.224	0.029 *	2.380	0.363	0.000 **	2.504	0.251	0.008 **	2.979
NDVI	0.183	0.064	2.219	0.187	0.070	3.294	-0.312	0.004 **	3.830
年均气温	0.180	0.040 *	1.725	0.098	0.139	1.362	-0.097	0.145	1.500
降水量	-0.202	0.025 *	1.836	0.041	0.569	1.609	-0.140	0.050 *	1.882
平均风速	0.279	0.004 **	2.038	0.047	0.541	1.825	-0.152	0.031 *	1.680
相对湿度	-0.025	0.781	1.835	0.046	0.544	1.825	0.233	0.015 *	3.025
AIC	293.974			254.711			243.232		
R ²	0.498			0.631			0.663		
Adjusted R ²	0.454			0.599			0.634		
F-statistics	11.491			19.856			22.832		
Sig.	0.000 **			0.000			0.000 **		

1) * 表示在 95% 水平下显著, ** 表示在 99% 水平下显著

2000 年模型拟合结果显示(表 3),经济密度、人口密度、城镇化率、年均气温、降水量和平均风速对 PM_{2.5} 浓度有显著影响,其中降水量的作用方向为负,其余指标为正,基本符合理论预期。具体来看,经济密度、人口密度和城镇化率有显著的正向影响,这在全国^[4, 27]、区域^[14, 15, 17, 23]和城市^[28]等不同尺度的研究已得到证实。城市是我国 PM_{2.5} 的主要来源^[29],因而 PM_{2.5} 污染具有经济发展、人口分布和城镇化发展指向性。二产比重系数未通过显著性检验,表明产业结构对 PM_{2.5} 的影响不大。这可能与长江经济带正处于经济转型期有关,部分经济发达的城市产业结构调整虽取得了较大进展,但总体对工业的依赖度仍较高,产业结构调整的环境效应并未显现^[30]。气温对 PM_{2.5} 的作用主要表现为 2 方面:一方面,气温高一般边界层较高,有利于污染物的对流扩散,气温低则易形成静稳天气,有利于 PM_{2.5} 的累积^[31],这是冬季 PM_{2.5} 浓度比夏季高的主要原因^[20];另一方面,较高的气温有利于光化学反应,有利于气态污染物向 PM_{2.5} 转换,引起 PM_{2.5} 浓度上升^[32]。气温呈显著的正向影响,说明从空间分布上看,气温对 PM_{2.5} 的影响主要表现为促进气态污染物向 PM_{2.5} 转换,京津冀地区^[23]和汾渭平原^[33]也有类似的发现。降水对 PM_{2.5} 有冲刷作用,能显著降低 PM_{2.5} 浓度^[34],因而对 PM_{2.5} 浓度有显著的负向作用。一般说来,风对污染物有显著的扩散作用,且风

速越大扩散效应越明显。但该模型评价结果中,风的影响却是正向的,这可能与 2 个方面的原因有关。一是与研究的空间尺度大小有关。从单个城市来看,风的确是城市空气质量改善重要的因素,尤其是北京等^[28]污染严重的城市。从城市群尺度来看,除核心城市外,多数城市经济发展水平相近,污染物排放量空间差异相对较小,风速一般也与污染物浓度分布呈负相关关系^[23]。但长江经济带横跨东、中、西部,经济发展水平和污染物排放量的东西差异很大,2000 年东、中、西部经济密度分别为 631.0、174.2 和 74.2 万元·km⁻²,东部约为西部的 8.5 倍。受距海远近和地形的影响,长江经济带年均风速总体也表现为东高西低,2000 年东、中、西部平均风速分别为 2.6、1.6 和 1.3 m·s⁻¹,与经济发展水平分布格局大体一致,两者在空间分布上有正相关关系。尽管风对污染物有一定的扩散作用,但不足以改变 PM_{2.5} 浓度的整体分布格局,因而评价结果为正向影响。二是风对上风向城市大气污染物有扩散作用的同时,也易使下风向城市污染物浓度升高^[30],部分下风向城市大气污染物浓度可能与风速呈正相关关系。理论上,低覆盖度植被易引起扬尘,高覆盖度植被则有利于 PM_{2.5} 的吸收和沉降,因而植被覆盖度对 PM_{2.5} 浓度一般有负向作用^[23, 33]。较高的相对湿度有利于大气气溶胶粒子吸湿增长,并向积聚模态转化,促使 PM_{2.5} 浓度上升^[35];但相对湿度过高则利于

PM_{2.5} 沉降,引起 PM_{2.5} 浓度下降. 因此,相对湿度在阈值范围内一般与 PM_{2.5} 呈正相关关系,超过阈值后则呈负相关关系^[36]. 但 NDVI、相对湿度的影响都不显著,说明这 2 个因子对长江经济带 PM_{2.5} 浓度的调节作用较小.

与 2000 年模型拟合结果不同,2007 年除经济密度、人口密度和城镇化率这 3 个社会经济因子有显著的正向影响外,其余因子未通过显著性检验. 可能原因在于,2000~2007 年是长江经济带工业化和城镇化高速发展的时期,大气污染物排放量显著增多,PM_{2.5} 污染持续恶化,社会经济因子对 PM_{2.5} 浓度分布起支配作用,自然因素的调节作用变得不明显. 2016 年,随着大气污染治理的加强,PM_{2.5} 浓度下降,除年均气温和二产比重外,其余因子的系数都通过了显著性检验. 与 2000 年和 2007 年模型相同,2016 年经济密度、人口密度和城镇化率有显著的正向影响,降水量有显著的负向影响. 但 2016 年 NDVI 呈显著的负向影响,说明植被对 PM_{2.5} 的抑制作用已明显增强. 这可能与我国植被的快速恢复和发展有关,我国森林覆盖率已由 2000 年的 16.56% 上升到 2016 年的 21.93%,植被已成为 PM_{2.5} 的重要抑制因素.

2.5.2 基于 GWR 模型的影响因素时空差异分析

由于二产比重在 3 个年份的 OLS 模型都不显著,不纳入 GWR 模型,利用其余 8 个指标分别对 2000、2007 和 2016 年长江经济带 PM_{2.5} 浓度分布的影响因素进行 GWR 模型拟合(表 4). 结果表明,3 个年份的 GWR 模型的赤池信息量(AIC)分别为 168.213、86.191 和 67.210,显著小于 OLS 模型,Adjusted R² 分别为 0.873、0.925 和 0.937,显著高于 OLS,可见 GWR 模型拟合结果显著优于 OLS 模型.

表 4 2000、2007 和 2016 年 GWR 模型拟合结果

模型参数	2000 年	2007 年	2016 年
Sigma	0.357	0.273	0.250
AIC	168.213	86.191	67.210
R ²	0.926	0.952	0.961
Adjusted R ²	0.873	0.925	0.937

由 GWR 回归系数分布箱形图可知(图 6),经济密度、人口密度和城镇化率等社会经济因子的回归系数在 3 个年份都主要为正值. 其中人口密度系数的均值最大,对 PM_{2.5} 的影响最大;经济密度系数的分布区间最长,说明其空间差异最明显;城镇化率的系数相对较小,是社会经济因子中影响最小因子. 降水量的回归系数主要为负,说明降水对各地均有

显著的抑制作用. 其余因子的回归系数在正、负区间均有分布,且不同年份差异较大,其中 NDVI、气温的分布区间最长,时空异质性最明显. 综合来看,OLS 分析结果基本反映 GWR 分析结果的平均值,但 GWR 能识别各影响因素的空间非平稳性.

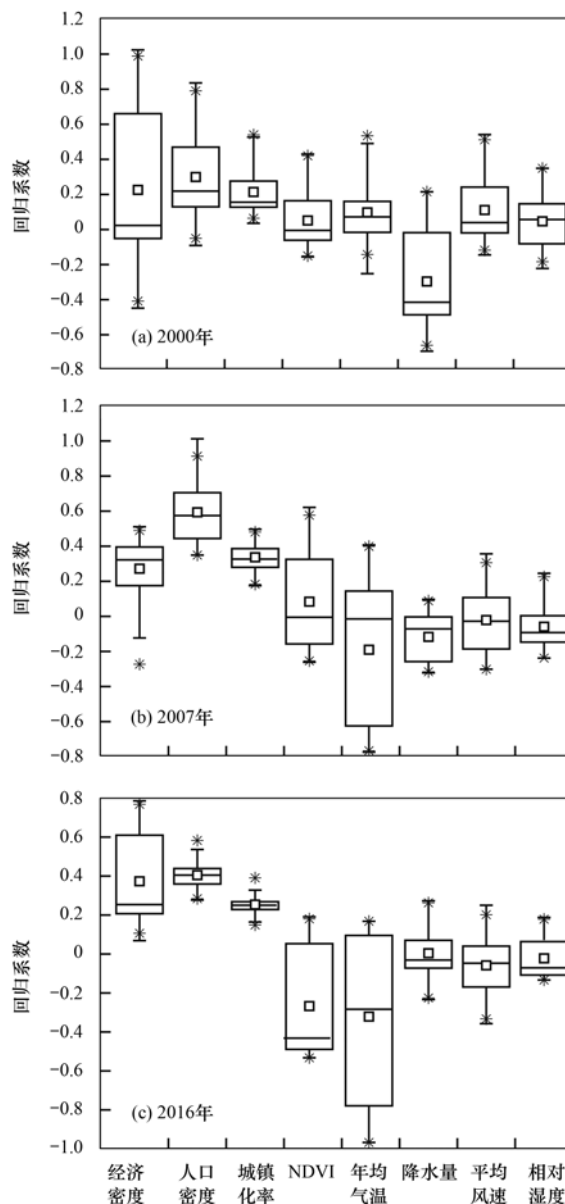


图 6 GWR 模型回归系数分布箱形图

Fig. 6 Box chart of coefficient distribution in the GWR model

(1) 社会经济因素影响的时空分异(图 7) 从时间变化来看,2000~2007 年,社会经济因子的回归系数总体变大,尤以人口密度和城镇化率最为明显. 表明在此期间,由于经济发展方式较为粗放,人类活动强度的增强加剧了 PM_{2.5} 的污染. 2007~2016 年,社会经济因子的回归系数总体减小,说明随着长江经济带经济发展方式转型及污染治理工作的推进,环境随经济发展而恶化的趋势已得到遏制. 但回归系数并未转负,则说明经济发展的环境效应

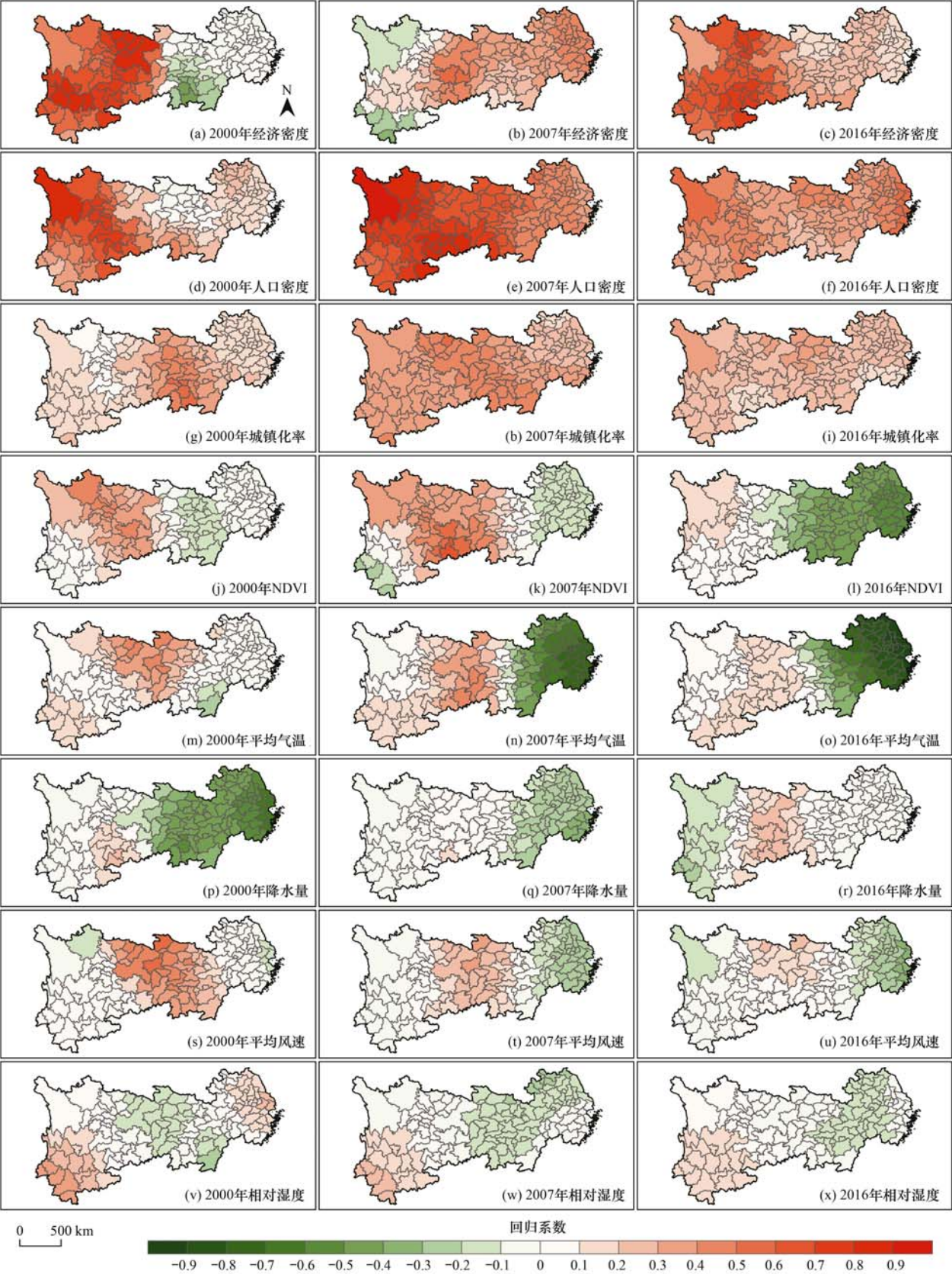


图 7 2000、2007 和 2016 年长江经济带 $PM_{2.5}$ 影响因素回归系数分布

Fig. 7 Spatial distributions of the coefficients of the GWR models in the Yangtze economic belt in 2000, 2007, and 2016

并未显现,这与杨冕等^[16]的研究结论一致.从空间变化来看,3个社会经济因子表现出不同的特征.经济密度的回归系数在2000、2016年总体表现为

西部高中东部低,在2007年则相反.说明在 $PM_{2.5}$ 浓度较低时,经济相对落后的地区 $PM_{2.5}$ 对经济发展水平更敏感.可能原因在于西部地区的发展方式更粗

放,经济发展的环境代价更高,根据黄磊等^[37]的研究,长江下游、中游和上游地区的工业绿色发展效率呈明显的梯度递减格局. 2007 年中东部地区经济密度回归系数更高,则是中东部地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染恶化更快的原因之一. 人口密度的回归系数在 3 个年份的空间分布大体相同,均由内陆地区向沿海递减,其中 2000、2007 年东西差异最明显,2016 年趋于均质. 表明人口越稀疏的地区,人口密度对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布的影响越明显,这也从另一个侧面说明西部地区经济发展方式更粗放. 城镇化率的回归系数在 3 个年份的时空分异都较小且主要为正值,说明城镇化是造成 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升的较稳定的影响因素.

(2) 自然因素影响的时空分异(图 7) NDVI 的负向作用主要表现在中东部,且 2000~2016 年回归系数的绝对值逐渐增大,说明植被对 $\text{PM}_{2.5}$ 的抑制作用随着森林覆盖率的提高已逐渐增强. 平均气温和平均风速对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响规律大体一致,主要表现为:中西部以正向为主,且回归系数由中部向西部递减;东部以负向为主,且越靠近沿海负向影响越大,以 2007 和 2016 年最为典型. 这可能与地形和季风的影响有关,沿海地区多为冲积平原,地形平坦,受季风和气温差异引起的局地环流的影响,来自海洋的洁净空气对污染物有重要的稀释作用,因而系数主要为负. 而中西部地区,尤其是四川盆地由于受封闭地形的影响,限制了气流的扩散作用,风的传输使区域内污染物相互影响,因而回归系数主要为正,在同为盆地地形的汾渭平原^[33]也有类似的发现. 3 个年份降水量对 $\text{PM}_{2.5}$ 的负向作用都由沿海向内地递减. 可能原因在于,沿海地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高,降水量也比内陆大,因而降水对 $\text{PM}_{2.5}$ 的冲刷作用也更明显. 总体来看,相对湿度对长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响不大,其时空分异也没有明显的规律.

3 结论

(1) 长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布总体呈东部高西部低的态势,且城市群污染特征明显. 其中江苏、上海、安徽中北部和浙江北部是长江经济带连续分布面积最广、污染最严重的区域,长江中游城市群、成渝城市群次之,四川西部和云南北部则是 $\text{PM}_{2.5}$ 空气质量优良区.

(2) 2000~2016 年,长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度先升后降,2007 年是 $\text{PM}_{2.5}$ 污染由持续恶化向趋于改善的“拐点”. 2000~2007 年年均浓度由 $27.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升至 $44.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,年均浓度超标的栅格比例由 14.8% 上升到 51.6%. 2008~2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度波动下降至 $33.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超标栅格比例降至

23.1%.

(3) 2000~2007 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度上升阶段, $\text{PM}_{2.5}$ 污染范围分别由长三角城市群、长江中游城市群和成渝城市群的核心区快速向四周扩大,且东部恶化的范围和强度大于中西部,东部高西部低的空间格局进一步增强. 2007~2016 年 $\text{PM}_{2.5}$ 波动下降阶段, $\text{PM}_{2.5}$ 污染范围收缩、强度减弱,其中四川盆地、湖南、湖北东部、江西北部 and 浙江北部降幅最大.

(4) 自然因素与社会经济因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布的影响具有时空差异性. 其中社会经济因素主要呈正向影响;自然因素中,降水量主要呈负向影响,其余因子的影响大小和作用方向均随着时间和空间的变化而变化.

参考文献:

- [1] 严翔, 成长春, 易高峰, 等. 长江经济带城镇化对能源消费的经济门槛效应[J]. 经济地理, 2019, **39**(1): 73-81.
Yan X, Cheng C C, Yi G F, et al. Economic threshold effect of urbanization on energy consumption: take the Yangtze River Economic Zone as an example[J]. Economic Geography, 2019, **39**(1): 73-81.
- [2] Sofowote U M, Su Y S, Dabek-Zlotorzynska E, et al. Constraining the factor analytical solutions obtained from multiple-year receptor modeling of ambient $\text{PM}_{2.5}$ data from five speciation sites in Ontario, Canada[J]. Atmospheric Environment, 2015, **108**: 151-157.
- [3] Li M N, Zhang L L. Haze in China: current and future challenges[J]. Environmental Pollution, 2014, **189**: 85-86.
- [4] 段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 等. 中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染空间分布的社会经济影响因素分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(5): 2498-2504.
Duan J X, Zhai W X, Cheng C Q, et al. Socio-economic factors influencing the spatial distribution of $\text{PM}_{2.5}$ concentrations in China: an exploratory analysis [J]. Environmental Science, 2018, **39**(5): 2498-2504.
- [5] Turpin B J, Cary R A, Huntzicker J J. An in situ, time-resolved analyzer for aerosol organic and elemental carbon[J]. Aerosol Science and Technology, 1990, **12**(1): 161-171.
- [6] 刘可可, 张红, 刘桂建. 合肥市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中元素组成特征及重污染成因分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(8): 3415-3420.
Liu K K, Zhang H, Liu G J. Elemental composition characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} , and heavy pollution analysis in Hefei [J]. Environmental Science, 2019, **40**(8): 3415-3420.
- [7] Zhao X J, Zhao P S, Xu J, et al. Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(11): 5685-5696.
- [8] 陈国磊, 周颖, 程水源, 等. 承德市大气污染源排放清单及典型行业对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4069-4079.
Chen G L, Zhou Y, Cheng S Y, et al. Air pollutant emission inventory and impact of typical industries on $\text{PM}_{2.5}$ in Chengde [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4069-4079.
- [9] Jiang C, Wang H, Zhao T L, et al. Modeling study of $\text{PM}_{2.5}$ pollutant transport across cities in China's Jing-Jin-Ji region

- during a severe haze episode in December 2013[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2015, **15**(3): 3745-3776.
- [10] 王晓琦, 郎建奎, 程水源, 等. 京津冀及周边地区 PM_{2.5} 传输规律研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(11): 3211-3217.
Wang X Q, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Study on transportation of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and its surrounding area[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(11): 3211-3217.
- [11] 赵子菁, 魏永杰, 张祥志, 等. 南京市霾天气与主要气象条件的相关分析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(12): 3570-3580.
Zhao Z J, Wei Y J, Zhang X Z, *et al.* The correlation analysis of Nanjing haze days and meteorological factors [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(12): 3570-3580.
- [12] 吴健生, 廖星, 彭建, 等. 重庆市 PM_{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 759-767.
Wu J S, Liao X, Peng J, *et al.* Simulation and influencing factors of spatial distribution of PM_{2.5} concentrations in Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 759-767.
- [13] 贺祥, 林振山. 基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 22-32.
He X, Lin Z S. Interactive effects of the influencing factors on the changes of PM_{2.5} concentration based on GAM model[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 22-32.
- [14] 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.
- [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] 杨冕, 王银. 长江经济带 PM_{2.5} 时空特征及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, **27**(1): 91-100.
Yang M, Wang Y. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} and its influencing factors in the Yangtze River Economic Belt[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, **27**(1): 91-100.
- [17] 汪聪聪, 王益澄, 马仁锋, 等. 经济集聚对雾霾污染影响的空间计量研究——以长江三角洲地区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, **28**(1): 1-11.
Wang C C, Wang Y C, Ma R F, *et al.* Impact of economic agglomeration on pollution of smog based on spatial econometric model: the case study of Yangtze River delta[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, **28**(1): 1-11.
- [18] Van Donkelaar A, Martin R V, Brauer M, *et al.* Global estimates of fine particulate matter using a combined geophysical-statistical method with information from satellites, models, and monitors[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(7): 3762-3772.
- [19] 周亮, 周成虎, 杨帆, 等. 2000~2011 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征及驱动因素解析[J]. *地理学报*, 2017, **72**(11): 2079-2092.
Zhou L, Zhou C H, Yang F, *et al.* Spatio-temporal evolution and the influencing factors of PM_{2.5} in China between 2000 and 2011 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, **72**(11): 2079-2092.
- [20] Xie R, Sabel C E, Lu X, *et al.* Long-term trend and spatial pattern of PM_{2.5} induced premature mortality in China [J]. *Environment International*, 2016, **97**: 180-186.
- [21] 国家统计局城市社会经济调查司. 中国城市统计年鉴 (2001, 2008, 2017 年)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001, 2008, 2017.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region[J]. *Economic Geography*, 1970, **46**(S1): 234-240.
- [25] Fotheringham A S, Charlton M, Brunsdon C. The geography of parameter space: an investigation of spatial non-stationarity[J]. *International Journal of Geographical Information Systems*, 1996, **10**(5): 605-627.
- [26] 中国气象局. 2014 年中国气候公报[R]. 北京: 中国气象局, 2014.
- [27] Han L J, Zhou W Q, Li W F, *et al.* Impact of urbanization level on urban air quality: a case of fine particles (PM_{2.5}) in Chinese cities[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **194**: 163-170.
- [28] Han L J, Zhou W Q, Li W F. Fine particulate (PM_{2.5}) dynamics during rapid urbanization in Beijing, 1973-2013[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 23604.
- [29] Han L J, Zhou W Q, Li W F. City as a major source area of fine particulate (PM_{2.5}) in China [J]. *Environmental Pollution*, 2015, **206**: 183-187.
- [30] 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 等. 中国城市 O₃ 浓度时空变化特征及驱动因素[J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1120-1131.
Huang X G, Zhao J B, Cao J J, *et al.* Spatial-temporal variation of ozone concentration and its driving factors in China [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1120-1131.
- [31] 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 等. 重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 820-829.
Xu P, Hao Q J, Ji Q S, *et al.* Observation of atmospheric pollutants in the urban area of Beibei district, Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 820-829.
- [32] 沈利娟, 李莉, 吕升, 等. 2013 年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1662-1670.
Shen L J, Li L, Lü S, *et al.* Observation of a photochemical event in Jiaxing during summer 2013 [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(5): 1662-1670.
- [33] 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.
- [34] 于彩霞, 邓学良, 石春娥, 等. 合肥地面气象要素对大气 PM_{2.5}、PM₁₀ 的清除作用分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(12): 4620-4629.

- Yu C X, Deng X L, Shi C E, *et al.* The scavenging effect of surface meteorological elements on $PM_{2.5}$ and PM_{10} in Hefei [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(12): 4620-4629.
- [35] 宋明, 韩素芹, 张敏, 等. 天津大气能见度与相对湿度和 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 的关系 [J]. *气象与环境学报*, 2013, **29**(2): 34-41.
- Song M, Han S Q, Zhang M, *et al.* Relationship between visibility and relative humidity, PM_{10} , $PM_{2.5}$ in Tianjin [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2013, **29**(2): 34-41.
- [36] 王祎嶝, 王真祥. 上海市 $PM_{2.5}$ 浓度变化特征及其气象因子分析 [J]. *干旱区地理*, 2018, **41**(5): 1088-1096.
- Wang Y D, Wang Z X. Characteristics of $PM_{2.5}$ concentration variability and its meteorological factors in Shanghai [J]. *Arid Land Geography*, 2018, **41**(5): 1088-1096.
- [37] 黄磊, 吴传清. 长江经济带城市工业绿色发展效率及其空间驱动机制研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2019, **29**(8): 40-49.
- Huang L, Wu C Q. Industrial green development efficiency and spatial driven mechanism in cities of the Yangtze River Economic Belt [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2019, **29**(8): 40-49.

欢迎订阅 2020 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE;Scopus;化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA);Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA);Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS);Life Sciences Abstracts等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Typess on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)