

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年3月

第43卷 第3期

Vol.43 No.3

目次

2000~2020年天津PM_{2.5}质量浓度演变及驱动因子分析 蔡子颖, 郝团, 韩素芹, 唐颖潇, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨(1129)

天津市PM_{2.5}-O₃复合污染特征及来源分析 肖致美, 徐虹, 高璟寰, 蔡子颖, 毕温凯, 李鹏, 杨宁, 邓小文, 戴运峰(1140)

基于随机森林模型的武汉市城区大气PM_{2.5}来源解析 张志豪, 陈楠, 祝波, 陶卉婷, 成海容(1151)

华北南部重污染城市周边区域二次气溶胶的化学特征及来源解析 任秀龙, 胡伟, 吴春苗, 胡偲豪, 高娜娜, 张崇崇, 岳亮, 王金喜, 樊景森, 牛红亚(1159)

“大气十条”实施结束川南城市群秋季霾污染过程中水溶性离子特征 吴安南, 黄小娟, 何仁江, 李金建, 叶秋麟, 吴涛, 肖智丹, 刘子锐, 王跃思, 张小玲, 张军科(1170)

郑州市典型污染过程PM₁₀中重金属浓度、来源及健康风险评估 翟诗婷, 王申博, 张栋, 赵孝因, 杨洁茹, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹(1180)

长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 孙颖琦(1190)

长三角地区PM_{2.5}浓度对土地利用/覆盖转换的空间异质性响应 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 张建珍, 濮励杰, 徐飞, 解雪峰(1201)

“2+26”城市春节和元宵节期间污染特征、气象影响和预报回顾分析 朱媛媛, 王晓斐, 汪巍, 刀谔, 王帅, 陈善荣(1212)

基于小波变换的山西省PM_{2.5}污染特征及影响因素 张可可, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 段小琳, 尹浩, 王凯, 邓萌杰(1226)

中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 赵楠, 卢毅敏(1235)

湖南省臭氧污染基本特征分析及长期趋势变化主控因素识别 刘妍妍, 杨雷峰, 谢丹平, 泽仁央宗, 黄志烟, 杨俊, 赵鹏, 韩静磊, 贾文超, 袁自冰(1246)

山东半岛近地面O₃浓度时空变化及潜在源区解析 李乐, 刘旻霞, 肖仕锐, 王思远, 米佳乐(1256)

COVID-19疫情期间雄安新区VOCs的变化特征、臭氧生成潜势及来源解析 刘新军, 王淑娟, 刘程, 范莉茹, 付翠轻, 齐莹, 宿文康(1268)

淄博市城区臭氧超标期间的VOCs污染特征与来源解析 王帅, 王秀艳, 杨文, 王雨燕, 白瑾丰, 程颖(1277)

淄博市夏季城区与背景点VOCs污染特征比较 秦涛, 徐勃, 王信梧, 李丽明, 杨文, 王晓丽, 耿春梅(1286)

四川省餐饮源挥发性有机物组分特征和清单 钱骏, 韩丽, 陈军辉, 王斌, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波(1296)

餐饮源气相与颗粒相多环芳烃排放特征 李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鹭(1307)

堆肥厂不同工作区空气真菌的多样性与群落结构 于奥园, 邢礼军, 孙兴滨, 仇天雷, 王旭明, 高敏(1315)

城市扬尘污染主要成因与精准治尘思路 李廷昆, 冯银厂, 毕晓辉, 张裕芬, 吴建会(1323)

黄河干流水质评价与时空变化分析 刘彦龙, 郑易安(1332)

典型山地城市河流营养元素空间分布特征及影响因素分析:以重庆市清水溪为例 王超, 叶秋, 贾伯阳, 何文战, 党超军, 黄焱, 杜浪(1346)

三峡库区支流的河-湖两态及其对沉积物不同形态磷含量的影响 黄伟, 张研, 罗晓佼, 张磊(1356)

派河及其支流溶解性有机质分子组成特征 詹亚, 尹浩, 冯景伟, 冯艾荣, 胡艳云, 张刘, 郑刘根(1365)

粤港澳大湾区典型潮间带环境多介质中Cd形态空间分布特征及其影响因素 崔新月, 莫武秋, 廖建波(1375)

骆马湖及主要入湖河流表层水体中抗生素的赋存特征及风险评估 龚润强, 赵华璋, 高占欣, 胡冠九, 卜元卿, 张圣虎, 邱惠(1384)

宁夏第三排水沟中抗生素的污染特征与生态风险评估 李富娟, 高礼, 李凌云, 卜兰香, 陶红, 杨桂钦(1394)

百年来北方湖泊沉积物PAHs的变化特征及其对人类活动的响应 龚雄虎, 赵中华, 丁琪琪, 张路, 姚书春, 薛滨(1404)

长江流域河流和湖库的浮游细菌群落差异 胡愈忻, 张静, 黄杰, 段春建, 李天翠, 刘威, 王英才, 胡圣(1414)

河套平原灌溉间歇期乌梁素海水体细菌群落结构特征 史玉娇, 李文宝, 张博尧, 姚国旺, 史小红(1424)

不同空间尺度的景观结构对袁河浮游细菌群落的影响 舒旺, 王鹏, 丁明军, 张华, 黄高翔, 聂明华(1434)

鄱阳湖白鹤保护区微塑料表面微生物群落结构特征 刘淑丽, 简敏菲, 邹龙, 胡启武(1447)

微塑料对变形杆菌生物膜生长发育的影响 陶辉, 戚怡婷, 于多, 杨兰, 顾颖, 厉彦辉(1455)

乌梁素海低密度微塑料聚合物沉降规律 刘禹, 史小红, 张生, 郝若男, 孙标, 赵胜男(1463)

老化前后微塑料对富里酸的吸附 宋亚丽, 俞娅, 郑磊, 汪华, 朱文芳(1472)

天津市滨海河流N₂O扩散通量及控制因子 汤梦瑶, 胡晓康, 王洪伟, 王云仓, 常素云, 王松庆, 钟继承(1481)

铁矿石和生物炭添加对潜流人工湿地污水处理效果和温室气体排放及微生物群落的影响 陈鑫童, 郝庆菊, 熊艳芳, 胡剑, 江长胜(1492)

降雨径流污染风险等级识别与优化方法 齐小天, 张质明, 赵鑫, 胡文翰, 刘迪(1500)

基于贝叶斯网络的给水管网消毒副产物生成因素分析 江杉杉, 王臻宇, 高权, 杨愿愿, 高方舟, 华佩, 应光国(1512)

聚硫代酰胺修饰活性炭对Au(III)的选择性吸附效果与机制 赵文金, 张顺, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 曲久辉(1521)

F/M对活性污泥微生物生态网络的影响 张冰, 孙展朝, 文湘华(1529)

城乡融合区土壤元素地球化学特征与源解析:以天府新区青龙片区为例 刘书准, 王德伟, 施泽明, 唐亮, 章凤英, 廖程, 李晓雨, 徐文斌(1535)

基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估 王蕊, 陈楠, 张二喜(1546)

湖南锡矿山周边土壤-农作物系统镉迁移转换特征及污染评价 张龙, 宋波, 黄凤艳, 肖乃川, 顿梦杰(1558)

生物炭负载氧化石墨烯对离子型稀土土壤中重金属的阻控效应 杨士, 刘祖文, 龙培, 毕永顺, 林苑, 左华伟(1567)

溶解性有机质强化棉花修复镉污染土壤 闵涛, 罗彤, 陈丽丽, 茹思博, 李俊华(1577)

铁锰氧化物-微生物负载生物炭材料对镉和砷的吸附机制 连斌, 吴骥子, 赵科理, 叶正钱, 袁峰(1584)

不同冬小麦品种镉富集转运及离子组特征差异 刘畅, 徐应明, 黄青青, 陶雪莹, 王林, 孙均兵, 赵立杰(1596)

镉胁迫下不同小麦品种对镉的积累特性 任超, 任或仲, 王浩, 朱利文, 李竞天, 杜倩倩, 李萍(1606)

嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响 刘坤和, 薛玉琴, 竹兰萍, 徐飞, 朱志豪, 张拓, 张富斌(1620)

蚯蚓/钾改性生物炭对As污染红壤中细菌多样性和群落结构的影响 苏倩倩, 李莲芳, 朱昌雄, 叶婧, 刘雪, 耿兵, 田云龙, 黄晓雅(1630)

DA-6和EDDS施用对龙葵生长、Cd吸收和土壤细菌群落结构的影响 罗洋, 孙丽, 刘方, 任军, 郭金梅, 闫修民(1641)

地膜覆盖对农田土壤养分和生态酶计量学特征的影响 胡志娥, 肖谋良, 王双, 童瑶瑶, 鲁顺保, 陈剑平, 葛体达(1649)

增温和增雨对黄土丘陵区撂荒地土壤呼吸的影响 王兴, 钟泽坤, 朱玉帆, 王佳懿, 杨改河, 任成杰, 韩新辉(1657)

秸秆还田、地膜覆盖及施肥对冬小麦田N₂O和N₂排放的影响 彭毅, 李惠通, 张少维, 阳婷, 王筱斐, 周春菊, 王林权(1668)

基于Meta分析的不同生产条件下秸秆还田对土壤挥发性的影响 赵政鑫, 王晓云, 田雅洁, 王锐, 彭青, 蔡焕杰(1678)

施肥对农田土壤抗生素抗性基因影响的整合分析 冉继伟, 肖琼, 黄敏, 蔡岸冬, 张文菊(1688)

《环境科学》征订启事(1331) 《环境科学》征稿简则(1403) 信息(1462, 1511, 1605)

长江经济带 PM_{2.5} 空间异质性和驱动因素的地理探测

王丽丽, 刘笑杰, 李丁*, 孙颖琦

(兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 基于地面站点监测数据, 运用空间自相关分析和地理探测器等模型方法, 探究了 2018 年长江经济带 PM_{2.5} 污染的时空分异特征与驱动因素. 结果表明: ① 长江经济带 PM_{2.5} 浓度呈明显的夏低冬高、春秋居中的季节变化、U 形月度变化和脉冲型逐日变化特征, 低值区集中在上游的南岸地区, 高值区位于中下游的江北地区; ② 流域 PM_{2.5} 污染存在稳定的空间正相关, 局部空间关联格局展现显著的 HH 型和 LL 型的空间趋同现象; ③ 长江经济带 PM_{2.5} 空间相关强度随地理距离的增大而减小, 其空间自相关性阈值约为 870 km, 在该范围内 PM_{2.5} 空间集聚性较为强烈; ④ 自然和人文因子对 PM_{2.5} 影响程度具有显著的空间差异性特征, 海拔高度、地形起伏度和人口密度是长江流域 PM_{2.5} 污染的高作用力影响因子. 因子交互作用后对 PM_{2.5} 污染解释力远超单因子, 主导交互因子为产业结构 ∩ 海拔高度, 反映出长江流域大气污染的驱动因素具有复杂性特征.

关键词: PM_{2.5}; 空间异质性; 驱动因素; 地理探测器; 长江经济带

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)03-1190-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202106113

Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM_{2.5} in the Yangtze River Economic Belt

WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding*, SUN Ying-qi

(College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on ground monitoring data, we explored the spatiotemporal characteristics and drivers of PM_{2.5} in the Yangtze River Economic Belt (YREB) in 2018 using spatial autocorrelation analysis and geodetector modeling methods. The results showed that: ① the PM_{2.5} concentration in the YREB posed the obvious characteristics of low values in summer and high values in winter, seasonal variation in spring and autumn, monthly U-shaped variation, and daily pulse variation. The low value area was mainly concentrated in the south bank of the upper reaches, whereas the high value area was located in the north of the middle-lower reaches of the YREB. ② PM_{2.5} pollution in the YREB had a stable positive spatial correlation, and the local association pattern showed a significant HH and LL spatial convergence. ③ The spatial correlation of PM_{2.5} in the YREB decreased with the increase in geographical distance, and its spatial autocorrelation threshold was approximately 870 km, within which the spatial agglomeration of PM_{2.5} pollution was strong. ④ The influences of natural and anthropogenic factors on PM_{2.5} had significant spatial differences. Altitude, relief, and population density were the high impact factors of PM_{2.5} pollution in the YREB. The interaction of factors had a far greater explanatory power on PM_{2.5} pollution than that of single factors. The dominant interaction factor was industrial structure ∩ altitude, which reflected the complexity of the drivers of air pollution in the YREB.

Key words: PM_{2.5}; spatial heterogeneity; drivers; geodetector; Yangtze River Economic Belt

近年来,中国相继颁布了一系列环境保护法律法规,采取了长期的大气防控措施,使硫化物、氮化物和尘埃等污染物明显减少.然而随着城市能源使用方式的改变和机动车数量的快速增长,PM_{2.5}(空气动力学直径小于 2.5 μm 的颗粒物)已成为国内的主要大气污染物,并逐步成为影响区域经济社会可持续发展的重要障碍^[1].有研究表明,PM_{2.5}是造成灰霾天气的首要污染物,因携带毒害物质,在空气中滞留时间长、输送距离远等特性,对人类健康和大气环境产生重要影响^[2].PM_{2.5}不仅降低大气能见度,影响交通出行,还能改变辐射平衡影响生态与气候变化^[3].医学研究证实,PM_{2.5}易损害人体免疫系统,增加暴露人群发病率与死亡率^[4].2013年国际癌症研究机构认定暴露于空气污染会增加罹患肺癌和膀胱癌的风险,并首次将 PM_{2.5}列为人类致癌物^[5].2017年中国仍有 81%的人口生活在 PM_{2.5}超过世卫组织目标限值的地区,约有 85 万人因 PM_{2.5}污染而过早死亡,期间儿童肺炎患者数量急剧增

加^[6].2018年中国以 PM_{2.5}为首要污染物的天数占重度污染天数的 60%.有关清洁空气的问题已经成为多方关注的热点话题.

当前,PM_{2.5}的时空分布与驱动因素等环境问题受到国内外学界的广泛关注.其中,针对 PM_{2.5}空间格局的研究主要通过识别其分布状态及空间效应提出环境应对政策,并常用泰尔指数^[7]、重力模型^[8]、收敛性分析^[9]、层次聚类分析^[10]和空间自相关分析^[11]等模型方法来揭示 PM_{2.5}的区域差异、空间分布与集聚规律.有研究表明,PM_{2.5}受气象、地形和排放源强度的影响,具有显著的时空变异性^[12],能借助大气环流或人类活动等外部力量扩散转移到邻近地区,造成空间溢出效应^[13].准确识别

收稿日期: 2021-06-15; 修订日期: 2021-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271141); 中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2017-it100)

作者简介: 王丽丽(1996~),女,硕士研究生,主要研究方向为城市生态和可持续发展, E-mail:wanglili19@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail:liding@lzu.edu.cn

PM_{2.5}驱动因素是合理制定相关环境政策和控制措施的基础和前提,从方法论来看,土地利用回归模型^[14]、贝叶斯最大熵映射法^[15]、灰色关联模型^[16]、地理加权回归模型^[17]、地理探测器^[8, 18]和空间计量模型^[11, 19, 20]等方法被应用于探究 PM_{2.5}的具体影响因素. 一般认为, PM_{2.5}与经济社会活动密切相关,主要来源于汽车尾气、工业活动、土壤扬尘、生物质和煤炭燃烧等一次源,以及其它气体污染物经复杂化学反应形成的二次源^[21, 22]. 气象因素也是影响空气质量的关键因素,在 PM_{2.5}的产生、积累、扩散和沉降过程中扮演着重要角色,对京津冀和粤港澳大湾区的 PM_{2.5}浓度具有重要影响^[23, 24]. 综合来看,区域 PM_{2.5}浓度变化是自然要素与人为因素耦合作用的结果,其中,与人类活动有关的社会经济因素是 PM_{2.5}污染的内因,气象环境条件则是影响地面 PM_{2.5}变化的外因. 尽管这些因素具有较高的不确定性,但甄别并量化它们与 PM_{2.5}之间的关系,可以厘清 PM_{2.5}积累和消散的演化规律,为精准制定区域空气污染减排策略提供科学指导.

长江经济带作为新时期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^[25]. 但长期以来,粗放型经济增长方式与非生态的城镇化模式造成长江流域生态功能退化、空气质量恶化等环境问题日益严重^[26]. 长江经济带是我国重要的工业走廊,集聚着全国 40% 以上的造纸、化工以及 70% 以上的印染产业,同时也是城市化快速推进的区域,2018 年城镇化率达 59.5%. 近年来长江中下游部分地区灰霾事件天数超过 100 d,个别城市甚至超过 200 d^[27]. 2017 年长江流域 140 个监测城市中,117 个城市 PM_{2.5}浓度未达到国家二级标准,在此背景下亟需开展灰霾防治模式与机制研究. 然而,我国现有灰霾天气研究多集中在东部地区和污染敏感型城市^[28],对长江流域大气污染研究相对较少. 长江流域是我国生态环境污染防治攻坚的重点区域^[29],研究空气污染对流域生态文明建设和保障国家生态安全意义重大. 鉴于此,基于 2018 年 PM_{2.5}实时监测数据,本文以长江经济带 126 个城市为研究单元,综合运用空间自相关分析和地理探测器等模型方法探究 PM_{2.5}时空演化特征及驱动因素,以期为长江经济带合理制定城市空气污染减排策略提供依据.

1 材料与方法

1.1 研究方法

1.1.1 空间自相关分析

空间自相关表示临近观测单元具有相似的变量

取值,常用于揭示区域变量的空间依赖性和空间异质性,它分为全局测度和局部测度^[30]. 本文采用经典的全局 Moran's *I* 指数作为考察长江经济带市域 PM_{2.5}污染空间自相关检验指标. 计算公式为:

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

式中, x_i 和 \bar{x} 为 i 城市 PM_{2.5}水平和区域 PM_{2.5}均值; n 为空间单元数(126 个); w_{ij} 为空间权重矩阵; I 取值 $[-1, 1]$, $I > 0$ ($I < 0$) 为空间正(负)自相关, $I \approx 0$ 则分布随机. 局部 Moran's *I* 在散点图中存在 LL、LH、HL 和 HH 这 4 种局部关联类型,其中, LL (HH) 为邻域间的空间正相关,即 PM_{2.5}污染低(高)地区存在空间集聚效应; LH (HL) 为邻域间为空间负相关,即 PM_{2.5}低(高)污染地区被高(低)污染地区围绕. 局部空间自相关能够刻画局域空间单元属性值的分布特征,诊断集聚发生的位置,通常由空间关联的局域指标 LISA 度量,包括局部 Moran's *I*、局部 Geary's *C* 和局部 Getis-Ord G^* 等统计量^[31].

1.1.2 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^[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. 公式如下:

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

式中, q 为因子对 PM_{2.5}空间分异的影响力,取值 $[0, 1]$,值越大则该因子对 PM_{2.5}空间分异的影响越大, PM_{2.5}空间差异的决定力通过各因子间的 q 值来识别. $h(1, 2, \dots, L)$ 为探测因子 X 的子区域数; L 为变量的分层; N_h 和 N 分别为区域 h 样本和总样本数; σ_h^2 和 σ^2 分别为区域 h 的方差和总区域的方差.

此外,交互作用探测用于检测两个因素结合时解释是增强还是减弱,或者这些因素的解是相互独立的. 计算 PM_{2.5}浓度的两个因子 X_1 和 X_2 值. 将 $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$ 的值与 $q(X_1 \cap X_2)$ 的交互值进行比较^[32].

1.2 数据来源与处理

本文数据源主要由以下 4 个部分组成:①PM_{2.5}监测数据. 2018 年 1 月 1 日至 12 月 31 日长江经济带城市 PM_{2.5}实时数据源自中国环境监测总站 (<http://www.cnemc.cn/>),并按照春(3~5 月)、夏(6~8 月)、秋(9~11 月)和冬(1~2 月、12 月)划分四季;②自然数据. 包括年均气温、年降水量、植被覆盖度、地形起伏度和海拔高度等指标. 其中,归

一化植被指数(NDVI)是反映地表植被覆盖状况的一种遥感指标,能有效表征大范围内植被生长状态和过程^[33],原数据来源美国国家航空和宇航局(<https://modis.gsfc.nasa.gov/>).气温和降水等气象数据来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>);地形起伏度与海拔高度由数字高程模型(DEM)计算得到,地形起伏度是基于 ArcGIS 软件平台以 15×15 邻域先计算整个研究区,然后利用分区统计工具,统计各市州空间单元的地形起伏度均值;DEM 数据来源于资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>);③社会经济数据.涵盖表征经济发展水平的人均 GDP、表征人口集聚状况的人口密度、表征城市发展程度的城市化率,表征产业结构的二产比重、表征能源消耗量的能源消费指数.其中,能源消费指数涵盖生物质能和石油煤炭等能源类型的消费.有研究表明,VIIRS/DNB 夜景灯光数据与能源消耗量呈显著线性相关^[34].本文将灯光亮度转换成灰度像素值,以各区域灰色像素平均值作为表征该地区能源消耗的指标^[35].VIIRS/

DNB 平均灯光辐射数据集来源于美国国家海洋和大气管理局(<https://www.ngdc.noaa.gov/>),其余指标来自 2019 年中国城市统计年鉴及相应的各地区国民经济和社会发展统计公报;④基础地理信息数据.文中所使用行政边界以 2019 年行政区划为基准,利用 ArcGIS 归并处理最终得到 126 个市域单元,空间矢量图来自全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>).表 1 为解释变量的描述统计与相关性检验,其中,峰度与偏度表明部分变量数据不符合正态分布.相关系数是各解释变量与 $PM_{2.5}$ 的斯皮尔曼相关性检验结果,可看到除年降水量和年均气温外,剩余变量与 $PM_{2.5}$ 均存在显著的相关性.从相关系数正负性看出,人文解释变量与 $PM_{2.5}$ 主要呈正相关,自然解释变量多为负相关.此外,空间自相关检验结果显示,解释变量的 Moran's I 值均通过了 1% 显著性检验,说明解释变量存在显著空间关联性.图 1 为所有变量的地图可视化展示,以便清晰观察不同解释因子在空间上的集聚与分布态势.

表 1 解释变量的描述统计和相关性检验¹⁾

Table 1 Descriptive statistics and correlation test of explanatory variables

解释变量	符号	均值	最小值	最大值	标准差	偏度	峰度	相关系数	Moran's I
人均 GDP/万元	X_1	5.95	1.60	17.43	3.50	1.34	1.29	0.335***	0.512***
人口密度/人·km ⁻²	X_2	446.78	8.00	3 809.00	412.77	4.64	34.75	0.624***	0.611***
二产比重/%	X_3	43.06	17.72	62.30	7.51	-0.57	0.76	0.376***	0.304***
城市化率/%	X_4	55.37	30.80	88.10	12.35	0.21	-0.51	0.441***	0.444***
能源消费指数	X_5	2.66	0.74	16.18	1.98	3.60	18.92	0.238***	0.478***
年均气温/℃	X_6	17.13	8.00	21.10	1.92	-2.05	8.02	-0.090	0.436***
年降水量/mm	X_7	1 271.16	630.90	2 161.30	281.72	0.43	0.35	-0.094	0.382***
植被覆盖指数	X_8	0.79	0.51	0.88	0.07	-1.78	4.12	-0.343***	0.599***
地形起伏度	X_9	134.07	0.59	443.71	98.40	0.50	-0.20	-0.724***	0.799***
海拔高度/m	X_{10}	650.52	1.30	4 188.77	822.54	1.94	4.04	-0.730***	0.758***

1) *** 表示在 0.01 级别显著

2 结果与分析

2.1 时序演变特征

图 2 反映了 2018 年长江经济带 $PM_{2.5}$ 浓度随季节、月度和逐日的变化特征.具体来看:①因大气扩散条件存在明显的季节变化,相应的市域 $PM_{2.5}$ 浓度水平呈显著的夏低冬高、春秋居中的季节变化规律.其中,夏、冬季节的平均 $\rho(PM_{2.5})$ 分别为 $18.42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $45.69 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,春、秋季节的 $\rho(PM_{2.5})$ 均值分别为 $29.34 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $27.58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.冬季 $PM_{2.5}$ 浓度较高主要受取暖等的影响,导致排放的污染物更多,而且冬季大气低空易出现逆温层,空气流通交换能力变弱,排放的污染物被限制在浅层大气中,并逐渐集聚成霾;② $PM_{2.5}$ 月均浓度呈 U 形起伏的变化规律,1~7 月为下降趋势,7~12 月为上升

态势.其中,1 月 $\rho(PM_{2.5})$ 最高,达到 $50.12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,2 月和 12 月 $\rho(PM_{2.5})$ 分别为 $46.12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $40.83 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,均高于 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 国家二级年均浓度限值,3~11 月 $\rho(PM_{2.5})$ 均在国家二级年均浓度限值 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以下,且 7 月 $\rho(PM_{2.5})$ 最低,为 $16.40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;③ $PM_{2.5}$ 日均浓度呈脉冲型起伏变化,全年日均浓度整体为 U 形走势.其中,春冬季 $PM_{2.5}$ 逐日变化波动周期较短但波幅较大,夏秋季波动周期较长而波幅较小.期间,日均 $\rho(PM_{2.5})$ 极大值出现在 2 月,为 $84.48 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,日均极小值出现在 6 月,为 $11.86 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,全年 $PM_{2.5}$ 日均浓度超过国家一级浓度限值 ($35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的比例为 29.04%,而大多数时间 $PM_{2.5}$ 日均值低于国家二级浓度限值 ($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);④ 长江经济带各省域单元

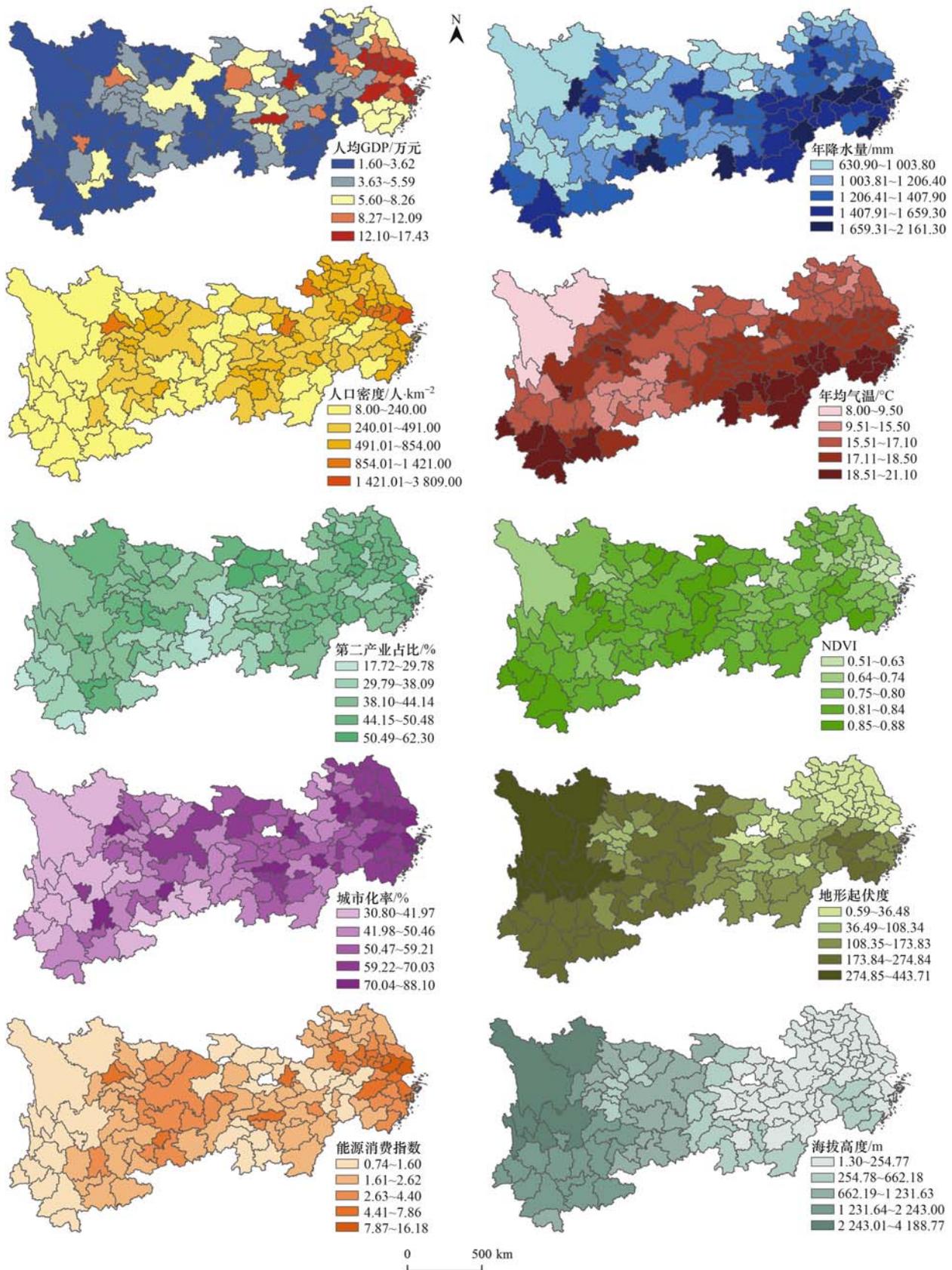
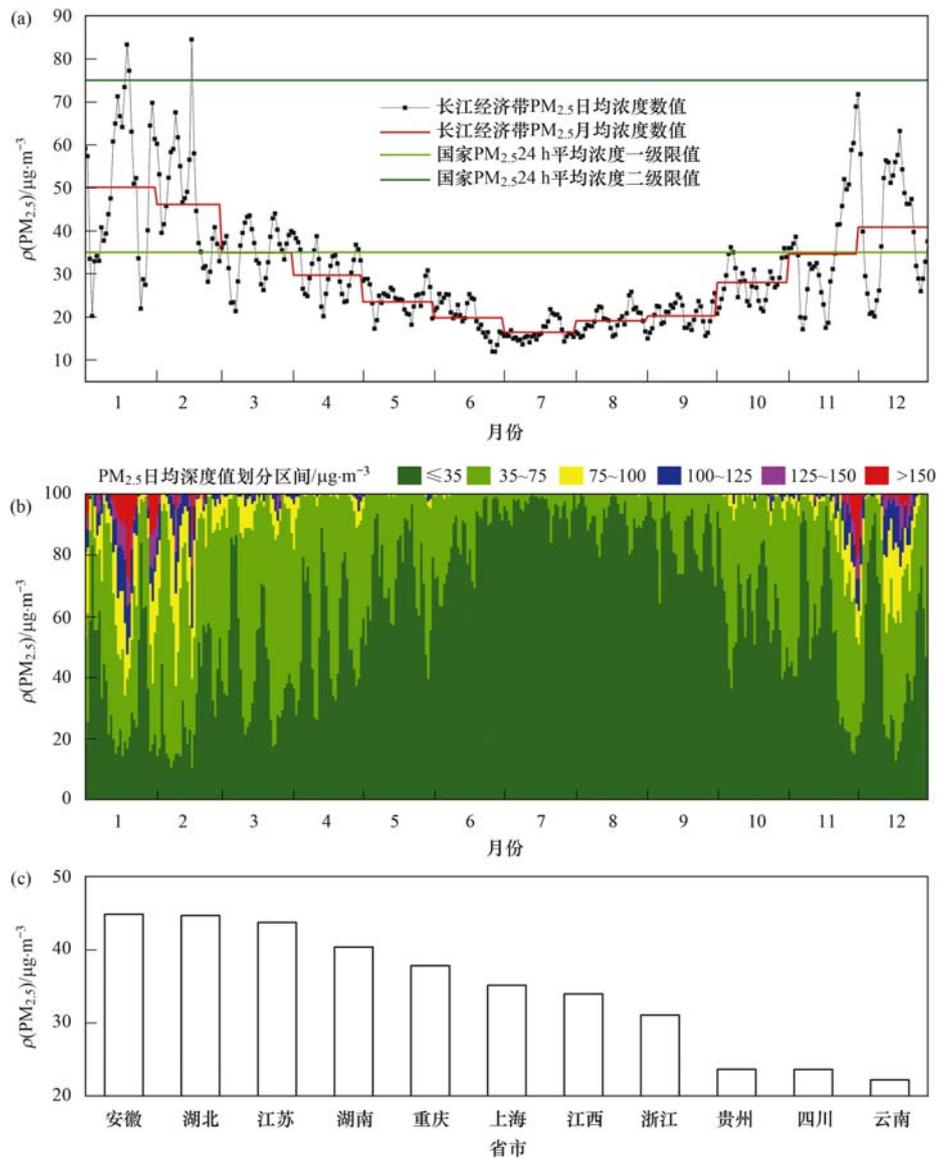


图1 解释变量的空间分布示意

Fig. 1 Spatial distribution schematic diagram of explanatory variables

PM_{2.5}浓度水平存在较大差异, PM_{2.5}年度值从高至低依次为:安徽、湖北、江苏、湖南、重庆、上海、江西、浙江、贵州、四川和云南. 综合来看, 长江经

济带 PM_{2.5}浓度高值区主要分布在下游的皖、鄂和苏等省域, 这些地区具有快速工业化和大规模城市化的特征, 而 PM_{2.5}低值区则集中分布在上游的黔、

图2 长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度演变特征Fig. 2 Evolution characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ in the Yangtze River Economic Belt

川和滇等省域。

2.2 空间分异特征

基于2018年的地面站点监测数据分析,探讨长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的季节性空间格局(图3)。 $\text{PM}_{2.5}$ 呈现明显的季节性空间分异特征,具体来看: ①春秋季节的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布格局基本一致,大部分地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 处于 $25 \sim 50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 高于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的主要为徐州、常州、镇江、宿迁、淮北和宿州等苏皖北部城市, 低于 $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的城市主要分布在川西、云贵高原和浙东南部等地区; ②夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染范围相对较小, 空气质量总体较好, 大部分地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 低于 $25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而低于 $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的城市分布在川西、云南和黔西南等地区; ③冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染范围相对较大, 空气质量整体较差, 长江中下游平原地区是污染重灾区, 大部分地区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 高于

$50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而川西、云贵等地区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 多处在 $15 \sim 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 整体空气质量有所下降; ④流域 $\text{PM}_{2.5}$ 的全局 Moran's I 指数显著为正且呈增加趋势, 表明市域 $\text{PM}_{2.5}$ 污染存在稳定的空间集聚规律, 即污染较高的城市趋于同污染较高的城市集聚分布, 污染较低的城市同污染较低的城市倾向于邻近分布, 呈现高低差异显著的两大阵营。此外, $\text{PM}_{2.5}$ 污染具有明显的空间溢出效应, 意味着局地 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化会影响到周边的地理区域, 因此在减少灰霾污染方面应具有全局视野。

利用 GeoDa 软件计算2018年长江经济带逐月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度标准化值 ($\text{STD_PM}_{2.5}$) 及其空间滞后量 ($\text{LAG_PM}_{2.5}$) 来分析 $\text{PM}_{2.5}$ 空间自相关的时空演化特征。首先将运算得到的样本点 (12 个月份 \times 126 个城市 = 1512) 绘制成散点图, 相同月份的样点颜

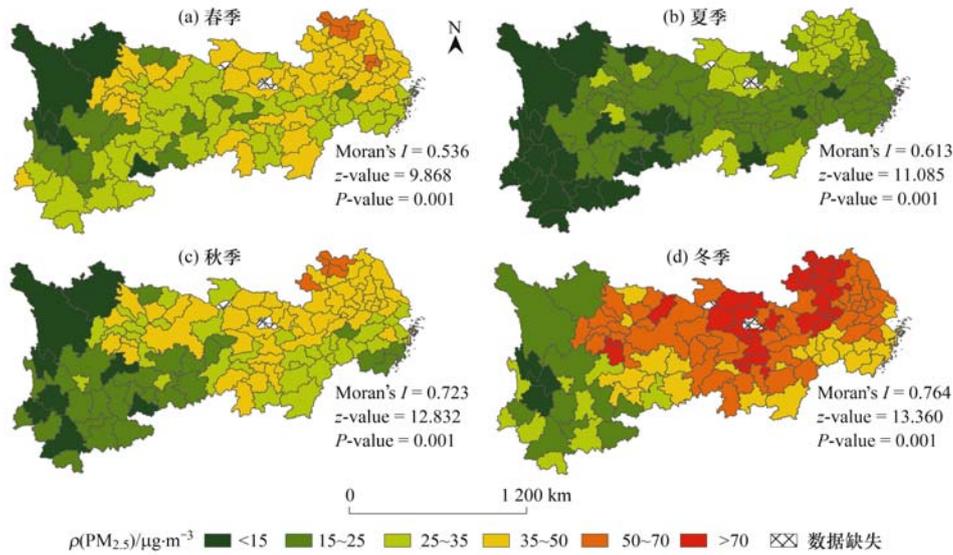


图 3 长江经济带 PM_{2.5} 浓度季节性特征

Fig. 3 Seasonal characteristics of PM_{2.5} in the Yangtze River Economic Belt

色一致,并按照 1~12 月颜色由浅到深表示.图 4 (a) 显示,拟合曲线斜率为正,即市域 PM_{2.5} 浓度的空间相关性为正,说明 PM_{2.5} 污染较高的城市将会对邻近城市空气质量产生消极影响.图 4 (a) 中浅色点到深色点的分布由发散转为相对集聚,表明 1 月 PM_{2.5} 空间分异较大,夏季空间分异最小,此后 PM_{2.5} 的空间分异特征又逐渐明显.最后,运用 GS+ 软件计算不同门槛距离情况下 PM_{2.5} 浓度的 Moran's I 指数.从图 4 (b) 可看到,在一定范围内 PM_{2.5} 空间自相关随地理距离的增大而减小,长江经济带 PM_{2.5} 的空间自相关阈值约为 870 km,在该区间内 PM_{2.5} 空间集聚性较为明显.当地理空间距离超过该范围阈值后,PM_{2.5} 污染的空间溢出效应变得不再显著,甚至转为负向影响效应,市域间 PM_{2.5} 污染逐渐呈现低-高或高-低的空间分布状态.这表明大气 PM_{2.5} 在特定范围内能强有力地扩散或传输到其他区域,具有较强的空间溢出效应.

为反映具体区域 PM_{2.5} 污染集聚分布状态,采用 LISA 集聚图刻画长江经济带 PM_{2.5} 污染的局部空间关联特征(图 5).结果显示:①PM_{2.5} 污染总体呈现出显著的 HH 型和 LL 型的空间俱乐部趋同现象,其中,高-高型聚类有 27 个,占比为 21.43%,主要集中在长江中下游的鄂皖苏地区,这些地区处在快速工业化和城市化进程,能源密集型产业集聚发展,资源要素流动频繁,污染物排放量大,易形成大气污染高集聚状态.低-低型聚类有 22 个,比例为 17.46%,主要分布在川西、湘西和云贵等空气质量优良的少数民族地区,这些区域地广人稀,城市间作用较弱,经济发展水平低,污染排放量小,生态环境对内稀释能力较强,地形对外来污染物阻碍作用突出,形成稳定的低值集聚区;②图 5 呈现出基本一致的 PM_{2.5} 污染空间集聚特征,其中,空气质量较好的地区主要集中在长江上游的南岸,而 PM_{2.5} 污染重灾区位于中下游的江北地区,且二者大致呈对角空间分布格局.

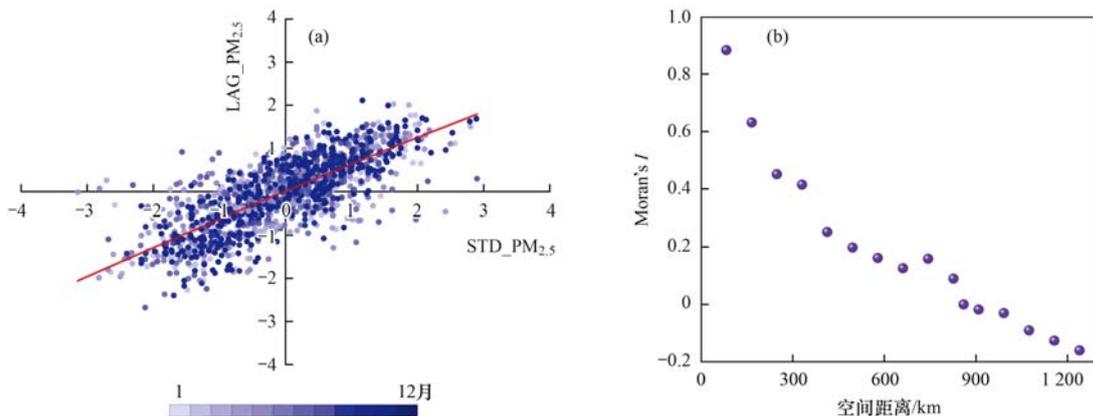


图 4 长江经济带 PM_{2.5} 的空间自相关演变特征

Fig. 4 Spatial autocorrelation characteristics of PM_{2.5} in the Yangtze River Economic Belt

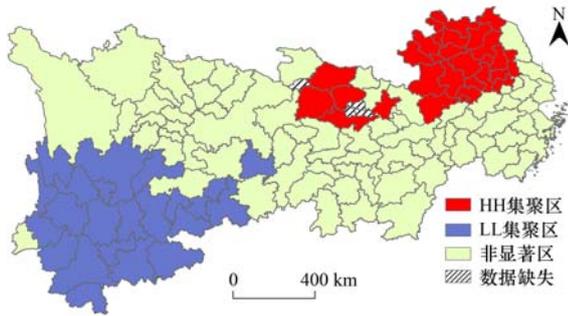


图 5 长江经济带 PM_{2.5} 浓度的空间集聚格局

Fig. 5 Spatial agglomeration patterns of PM_{2.5} in the Yangtze River Economic Belt

2.3 PM_{2.5} 空间分异的驱动因素探测

PM_{2.5} 时空差异显著,且空间自相关检验表明不同地理单元间存在明显的空间关联特征.综合考量研究区状况,从人地关系地域系统耦合视角分析,人文与自然因素非均衡交互作用下直接导致了长江流域 PM_{2.5} 浓度的时空分异.因此,本文利用地理探测器的因子探测与交互探测模块,采用自然断点法对影响因子进行空间分类(图 1),从社会经济与自然气象两方面探究长江经济带 PM_{2.5} 污染空间分异的驱动因素.同时,结合表 1 中各解释变量与 PM_{2.5} 的斯皮尔曼相关性检验,以此弥补地理探测器无法探明影响因子正负效应的不足.风险因子探测显示,探测因子多处在显著性水平,即选取的影响因子可以较好解释流域 PM_{2.5} 的时空分异格局.因子交互探测表明,探测因子经交互作用后均增强了对 PM_{2.5} 变异的解释程度,说明流域大气 PM_{2.5} 空间分异格局的形成是驱动因子共同作用的结果.此外,为进一步揭示不同地区影响 PM_{2.5} 浓度变化的主导因子,依据文献

[36] 将长江经济带划分成上游、中游和下游 3 个片区,其中,上游包括川、渝、黔和滇等地区的 47 个单元,中游包括鄂、湘和赣等地区的 38 个单元,下游包括江、浙、沪和皖等地区的 41 个单元,分别对各片区 PM_{2.5} 年均浓度进行空间分异因子探测.

由表 2 可知,人文解释变量中各数值型探测因子对长江经济带 PM_{2.5} 浓度主要表现正向效应,自然解释变量中各数值型探测因子主要呈现负向效应,且 PM_{2.5} 污染的影响因子存在明显的地域差异性.另外,无论是单一因子还是交互因子,影响长江经济带、上游、中游和下游地区市域 PM_{2.5} 污染的因子驱动力值不尽相同.此外,利用地理探测器计算各影响因子间相互组合对市域 PM_{2.5} 污染的影响力值 q ,其中极大值即为主导交互因子.不难看出,主导交互因子 q 值显然高于单一因子的 q 值,交互作用明显,全流域和各片区的主导交互因子存在显著差异.可见,长江流域 PM_{2.5} 浓度变化是多重要素共同作用的结果,缓解各片区市域 PM_{2.5} 污染恶化应采取多管齐下的减排与适应策略.具体地,主导长江经济带整体 PM_{2.5} 污染的因素为海拔高度(0.59)、地形起伏度(0.56)和人口密度(0.47),主导交互因子为产业结构 \cap 海拔高度(0.77).长江流域内部包括平原、丘陵、盆地和高原等多种地形特征,地势起伏海拔落差较大,而人口与产业布局主要集中在地势平坦的平原地区,因此起伏度较小的低地平原 PM_{2.5} 浓度往往高于起伏度较大的周边山区.人口稠密将直接导致生产和生活区域空气污染物排放的增加,此期间长江流域大气污染治理力度仍显薄弱,使得人口密度对城市空气质量的影响强度较为显著.

表 2 长江经济带及分区 PM_{2.5} 浓度影响因子探测结果¹⁾

Table 2 Detection results of PM_{2.5} impact factors in the Yangtze River Economic Belt and its sub-regions

探测因子	q			
	长江经济带	上游地区	中游地区	下游地区
X_1	0.14	0.27 *	0.30	0.21
X_2	0.47 ***	0.63 ***	0.16 *	0.31 ***
X_3	0.16	0.20	0.37 **	0.18 *
X_4	0.36 ***	0.46 **	0.27 *	0.17 ***
X_5	0.11	0.26	0.17	0.46 *
X_6	0.23 ***	0.36 *	0.33 **	0.58 ***
X_7	0.07 ***	0.16 ***	0.38 ***	0.44 ***
X_8	0.11	0.07 *	0.16	0.34
X_9	0.56 ***	0.42 **	0.20 ***	0.57 **
X_{10}	0.59 ***	0.57 ***	0.15 **	0.24 ***
主导交互因子	$X_3 \cap X_{10}$	$X_1 \cap X_{10}$	$X_3 \cap X_6$	$X_3 \cap X_{10}$
主导交互因子 q 值	0.77 **	0.91 **	0.95 **	0.95 **

1) *、** 和 *** 分别表示在 0.1、0.05 和 0.01 水平显著

从各分区来看,上游地区基本处于长江流域空气污染的低-低聚集区,主导该地区市域 PM_{2.5} 浓度

分异的因素为人口密度(0.63)、海拔高度(0.57)、城市化水平(0.46),主导交互因子为人均 GDP \cap 海

拔高度(0.91),而植被覆盖度(0.07)和年降水量(0.16)处于较低影响力水平.上游地区的人口与产业主要集中在成渝经济区,而周边中小城市特别是少数民族集聚区人烟稀少,人口分布的极不均衡致使社会生产生活过程中 PM_{2.5}排放量的空间差异显著^[17].此外,成渝城市群处于快速扩张时期,城市空间的增大延长了居民通勤时间,促使私家车数量快速增长,对汽车依赖增强使得能源消耗和废气排放显著增加.另一方面,城市空间的扩张侵蚀了周围绿地,绿地的减少和湿地的退化导致生态系统的自我调节功能下降,而大量建筑施工扬尘进入空气环境中,加剧市域灰霾污染.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,而丰沛的降水对空气污染物具有冲刷作用,能显著改善局域 PM_{2.5}污染^[23].植被与降水对上游地区市域 PM_{2.5}空间异质性的影响效应相对较小,可能是由于上游地区的年降水量与地表植被生长整体较为均衡且稳定,对各市域单元低水平的颗粒物排放影响差异并不明显.

中游地区总体处于长江流域大气污染的高-高聚集区,主导该地区市域 PM_{2.5}浓度分异的因素为年降水量(0.38)、产业结构(0.37)和年均气温(0.33),主导交互因子为产业结构∩年均气温.工业源一直是大气灰霾的重要来源,特别是重化工业份额过高的城市相较于以第三产业为主导的城市污染物排放量要高.长江中下游地区产业结构以化工能源、机械制造等资源能源密集型为主,其直接产生的能耗较多,排放大量有害气体及尘埃到空气中,同时,这些地区对原有产业模式发展的路径依赖性较强,短时期内难以从根本上改变其产业结构的重型化特征,致使该地区城市灰霾污染较为严重.已有研究表明,气温高的大气边界层较高,有利于空气污染物的对流扩散,降低局域 PM_{2.5}浓度水平,但较高的气温促进气态污染物通过光化学反应向 PM_{2.5}转换,引起 PM_{2.5}浓度增加^[37].表1的相关性检验显示气温呈显著的负向效应(-0.09),说明气温对长江流域灰霾的影响整体表现为促进颗粒污染物的对流扩散.

下游地区整体处于长江流域灰霾污染的高-高聚集区,主导该地区市域 PM_{2.5}浓度分异的因素为年均气温(0.58)、地形起伏度(0.57)、能源消费量(0.46),主导交互因子为产业结构∩海拔高度(0.95),而城市化水平(0.17)、产业结构(0.18)和人均GDP(0.21)处于较低影响力水平.地形起伏度总体为负向效应,或许由于下游地区地势相对平坦,为灰霾提供了较好的扩散条件,而且下游沿海地区风速较强,风速的增大也易于 PM_{2.5}的消散.化石燃料燃烧是灰霾污染的重要来源,长江中下游地区近

年来通过提高清洁绿色能源利用水平,在一定程度上缓解能源化石消耗对环境的影响,但由于传统能源结构较为单一、能源消费需求量大,且主要锁定在以高污染的煤炭和碳密集化石燃料的现状在短期内难以改变,同时该地区交通基础设施相对更加完善,机动车辆增长及交通强度更高对能源的需求持续激增,致使该区域灰霾更为严重^[26].城市化、经济发展与产业结构对下游地区 PM_{2.5}空间异质性的影响效应相对较小,原因可能是长三角地区城镇化进程趋于成熟,城市建设用地与开发空间有限,大规模城市建设基本停滞,利于降低颗粒污染物的排放量.另外,长三角地区产业结构以服务业为主,产业结构较为稳定,污染物排放量较低,使得产业结构对该地区 PM_{2.5}的影响强度较弱.此外,经济基础较好的长三角地区借助产业结构的优化与科技进步的带动,区域内部城市的经济发展情况和周围环境基本协调.

3 讨论

提出新常态下灰霾防治的具有针对性的政策建议,是本研究的落脚点.本文通过探测长江流域 PM_{2.5}影响因素,发现自然因子显著性较高,但自然因子弹性系数难以有较大地变动,实则人文因子比自然因子的实际弹性更好.故面对显著的环境因素,不能仅仅等风来,更要找到有效的适应性措施,如合理设计城市风道与道路绿带、加强水土保持与生态廊道建设、优化居住与工业布局等.另一方面,人类不健康的生产方式是造成灰霾问题的根本原因,从灰霾频发的社会经济根源着手,严控人类活动的污染物排放,实现人地关系协调发展是破解 PM_{2.5}污染问题的关键.据此,提出以下政策建议.

3.1 构建区域间灰霾联防联控机制

大气污染具有典型的外部性,地区间霾污染不仅受到自身污染物排放的影响,且不可避免的要为周围地区的污染买单.虽然各地政府已尝试开展跨界污染治理行动,但因落实不彻底、机制不健全等问题,未能实现长期有效控制区域大气污染的目的.区域生态环境是一个有机整体,灰霾治理不能各自为战,在控制本地污染源排放的同时需打破行政界线,协同防治区域霾污染.长江经济带 PM_{2.5}污染重灾区主要集中在成渝地区、武汉城市群及苏皖北部,呈现以城市群为中心向外围梯度递减的空间分异特征,因此要以高污染的城市群为重点,统筹环境承载力与经济发展现状,合理划定 PM_{2.5}红线,适当提高减排目标,强化排污监管问责机制;其次,建立互联互通的环境监测网络与联合执法机制,为实现

区域灰霾统一监测、环境信息共享以及突发事件应急响应提供技术支撑,为处理边界污染违法行为和跨界重大污染纠纷等提供保障;最后,建立配套的灰霾防治成效评估考核体系,通过中央的监督及经济带领导小组的考核评价加大地方政府的执行压力,确保环保规划落到实处。

3.2 推动新型城镇化建设

城市是灰霾污染的主要前沿,当前我国快速城市化进程所产生的副产物是区域灰霾频发的主要诱因,妥善处理好两者间的关系是实现灰霾防治的有效途径。研究发现,长江经济带城镇化对 $PM_{2.5}$ 的影响机制存在显著的空间差异,各地区应量身定制合理的城镇化推进策略。上游地区多处在城市化加速阶段,基础设施建设相对不足,土地扩张欲望较强,应注重优化建设用地结构以及有效控制城市扬尘污染;中游地区应以产业和人口的城镇化效应为重要途径,降低人口城镇化效应对灰霾的影响,加强环境规划促进产业转型升级;下游地区应树立绿色城市规划的理念,着重关注城市内涵式发展,适度推动产城融合。此外,完善交通运输网络,积极发展城市公共交通,倡导低碳出行方式,推动新能源汽车普及,从而减少因交通拥堵和机动车尾气排放产生的颗粒物。

3.3 加快产业结构调整,推进节能减排建设

灰霾的主要源头是第二产业,尤其是以重化工业为特征,高能耗产业结构使得大量废气、粉尘等排放到大气环境中,加剧霾污染,加快产业结构升级优化,实现传统产业新旧动能转换是从源头治理 $PM_{2.5}$ 污染的有效手段。长江流域产业发展对灰霾的作用路径存在显著的区域差异,上游生态脆弱区应注重生态环境保护,加快新能源利用设施建设,推动风能、太阳能等清洁能源产业的发展;污染较重的中游地区应加强污染源监测与管治,加快产业改造升级与能源消费结构调整,严控“三高—低”产业的过度膨胀,推进清洁生产和节能减排建设,在承接下游产业就近转移的过程中合理设置绿色环保门槛,警惕其成为高能耗、高污染企业的避难所;经济基础发达的下游地区应积极构建现代化的循环产业链条,并在绿色技术创新、污染防治攻关、科研合作、成果转化等方面发挥模范带头作用。

3.4 转变经济增长方式,提高绿色发展水平

环境问题归根结底是发展问题,长期以来粗放的经济增长方式是造成长江流域灰霾日益严重的深层次原因。当前长江经济带正处在高质量绿色发展的关键转型期,因此要完善绿色低碳循环发展的生产、流通、消费体系,加快经济增长方式向可持续

发展转变,提高科技进步对经济增长的贡献。一方面,地方政府要加快服务职能转变,深化供给侧结构性改革,推进全流域要素资源市场化。另一方面,要坚持创新驱动发展战略,强化人才队伍建设与技术投入,促进科研成果的应用,培育经济发展新动能,引导经贸结构朝深加工、高附加值方向发展。此外,坚持生态优先,绿色发展理念,不断厚植高质量发展的生态底色。

4 结 论

(1)2018 年长江经济带 $PM_{2.5}$ 浓度呈现明显的夏低冬高、春秋居中的季节变化、U 形月度变化及脉冲型逐日变化特征。大气 $PM_{2.5}$ 浓度时空差异显著,高值区主要分布在长江中下游平原的鄂、皖和苏等地区,低值区则稳定集中在上游的黔、川和滇等地区,低地平原指向性明显。

(2)长江流域 $PM_{2.5}$ 污染存在稳定的空间自相关特征。局部空间关联格局展现显著的 HH 型和 LL 型的空间俱乐部趋同现象,其中,低-低型聚类主要集中在上游的南岸地区,高-高型聚类则位于中下游的江北地区,二者大致呈对角空间分布格局;且长江经济带 $PM_{2.5}$ 空间关联强度随地理空间距离的增大而减小,其空间自相关性阈值约为 870 km,在该范围内 $PM_{2.5}$ 污染空间集聚性较为强烈。

(3)地理探测结果显示,自然与人文因子对 $PM_{2.5}$ 的影响程度具有显著的空间异质性特征,其中,海拔高度、地形起伏度、人口密度是长江流域 $PM_{2.5}$ 污染的高作用力影响因子,产业结构 \cap 海拔高度为主导交互因子。因子交互作用后对 $PM_{2.5}$ 污染解释力远超单因子,而主导不同地区的影响因子和交互因子存在显著的空间差异。

参考文献:

- [1] Gao X, Li W D. A graph-based LSTM model for $PM_{2.5}$ forecasting[J]. Atmospheric Pollution Research, 2021, 12(9), doi: 10.1016/j.apr.2021.101150.
- [2] Figueres C, Landrigan P J, Fuller R. Tackling air pollution, climate change, and NCDs: time to pull together[J]. The Lancet, 2018, 392(10157): 1502-1503.
- [3] Ma J H, Cao Y, Xu J M, et al. $PM_{2.5}$ concentration distribution patterns and influencing meteorological factors in the central and eastern China during 1980-2018 [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 311, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.127565.
- [4] Masiol M, Hopke P K, Felton H D, et al. Source apportionment of $PM_{2.5}$ chemically speciated mass and particle number concentrations in New York City[J]. Atmospheric Environment, 2017, 148: 215-229.
- [5] Xu P, Chen Y F, Ye X J. Haze, air pollution, and health in China[J]. The Lancet, 2013-2014, 382(9910): 2067.
- [6] Yin P, Brauer M, Cohen A J, et al. The effect of air pollution on deaths, disease burden, and life expectancy across China and its

- provinces, 1990-2017: an analysis for the Global Burden of Disease Study 2017[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2020, **4** (9): e386-e398.
- [7] 汪克亮, 刘蕾, 孟祥瑞, 等. 区域大气污染排放效率: 变化趋势、地区差距与影响因素——基于长江经济带 11 省市的面板数据[J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2017, **19** (6): 38-48.
Wang K L, Liu L, Meng X R, *et al.* Study on the trend, regional difference and influencing factors of air pollution emission efficiency——based on provincial panel data from 11 provinces of Yangtze River economic zone[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2017, **19** (6): 38-48.
- [8] 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.
- [9] Jiang L, He S X, Zhou H F. Spatio-temporal characteristics and convergence trends of PM_{2.5} pollution: a case study of cities of air pollution transmission channel in Beijing-Tianjin-Hebei region, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120631.
- [10] 刘鹏华, 姚尧, 梁昊, 等. 耦合卡尔曼滤波和多层次聚类的中国 PM_{2.5} 时空分布分析[J]. *地球信息科学学报*, 2017, **19** (4): 475-485.
Liu P H, Yao Y, Liang H, *et al.* Analyzing spatiotemporal distribution of PM_{2.5} in China by integrating Kalman filter and multi-level clustering [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2017, **19** (4): 475-485.
- [11] 李光勤, 秦佳虹, 何仁伟. 中国大气 PM_{2.5} 污染演变及其影响因素[J]. *经济地理*, 2018, **38**(8): 11-18.
Li G Q, Qin J H, He R W. Spatial-temporal evolution and influencing factors of China's PM_{2.5} pollution [J]. *Economic Geography*, 2018, **38**(8): 11-18.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 许刚, 焦利民, 肖丰涛, 等. 土地利用回归模型模拟京津冀 PM_{2.5} 浓度空间分布[J]. *干旱区资源与环境*, 2016, **30** (10): 116-120.
Xu G, Jiao L M, Xiao F T, *et al.* Applying land use regression model to estimate spatial distribution of PM_{2.5} concentration in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2016, **30**(10): 116-120.
- [15] 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 等. 基于多源数据的 PM_{2.5} 浓度时空分布预测与制图[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 4913-4923.
Xiao L, Lang Y C, Xia L, *et al.* Space-time estimations and mapping of PM_{2.5} fine particulates based on multi-source data [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4913-4923.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 马丽梅, 刘生龙, 张晓. 能源结构、交通模式与雾霾污染——基于空间计量模型的研究[J]. *财贸经济*, 2016, **37** (1): 147-160.
Ma L M, Liu S L, Zhang X. Study on haze pollution induced by energy structure and transportation: based on spatial econometric model analysis [J]. *Finance & Trade Economics*, 2016, **37**(1): 147-160.
- [20] 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.
- [21] 韩立建. 城市化与 PM_{2.5} 时空格局演变及其影响因素的研究进展[J]. *地理科学进展*, 2018, **37**(8): 1011-1021.
Han L J. Relationship between urbanization and urban air quality: an insight on fine particulate dynamics in China [J]. *Progress in Geography*, 2018, **37**(8): 1011-1021.
- [22] 周曙东, 欧阳纬清, 葛继红. 京津冀 PM_{2.5} 的主要影响因素及内在关系研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, **27** (4): 102-109.
Zhou S D, Ouyang W Q, Ge J H. Study on the main influencing factors and their intrinsic relations of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2017, **27**(4): 102-109.
- [23] 杨兴川, 赵文吉, 熊秋林, 等. 2016 年京津冀地区 PM_{2.5} 时空分布特征及其与气象因素的关系[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(10): 1747-1754.
Yang X C, Zhao W J, Xiong Q L, *et al.* Spatio-temporal distribution of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) area in 2016 and its relationship with meteorological factors [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(10): 1747-1754.
- [24] 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.

- [25] 陆大道. 建设经济带是经济发展布局的最佳选择——长江经济带经济发展的巨大潜力[J]. 地理科学, 2014, **34**(7): 769-772.
Lu D D. Economic belt construction is the best choice of economic development layout: the enormous potential for the Changjiang River Economic Belt [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, **34**(7): 769-772.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] Bai L, Jiang L, Yang D Y, *et al.* Quantifying the spatial heterogeneity influences of natural and socioeconomic factors and their interactions on air pollution using the geographical detector method: a case study of the Yangtze River Economic Belt, China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **232**: 692-704.
- [29] Feng Y Y, Ning M, Lei Y, *et al.* Defending blue sky in China: effectiveness of the "air pollution prevention and control action plan" on air quality improvements from 2013 to 2017 [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, **252**, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109603.
- [30] 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.
- [31] 昌晶亮, 余洪, 罗伟伟. 珠三角地区 PM_{2.5} 浓度空间自相关分析[J]. 生态与农村环境学报, 2015, **31**(6): 853-858.
Chang J L, Yu H, Luo W W. Spatial autocorrelation analysis of PM_{2.5} concentration in the Pearl River Delta [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, **31**(6): 853-858.
- [32] 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.
- [33] 沈斌, 房世波, 余卫国. NDVI 与气候因子关系在不同时间尺度上的结果差异[J]. 遥感学报, 2016, **20**(3): 481-490.
Shen B, Fang S B, Yu W G. Different correlations between NDVI and meteorological factors at temporal-time scales [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, **20**(3): 481-490.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 环境保护部, 发展改革委, 水利部. 长江经济带生态环境保护规划 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201707/t20170718_418053.htm, 2017-07-17.
- [37] 张小曳, 徐祥德, 丁一汇, 等. 2013~2017 年气象条件变化对中国重点地区 PM_{2.5} 质量浓度下降的影响 [J]. 中国科学: 地球科学, 2020, **50**(4): 483-500.
Zhang X X, Xu X D, Ding Y H, *et al.* The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on PM_{2.5} mass reduction in key regions in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2020, **62**(12): 1885-1902.

CONTENTS

Analysis of Change and Driving Factors of PM _{2.5} Mass Concentration in Tianjin from 2000 to 2020	CAI Zi-ying, HAO Jian, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (1140)
Source Analysis of Ambient PM _{2.5} in Wuhan City Based on Random Forest Model	ZHANG Zhi-hao, CHEN Nan, ZHU Bo, <i>et al.</i> (1151)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Aerosols in the Surrounding District of a Heavily Polluted City in the Southern Part of North China	REN Xiu-long, HU Wei, WU Chun-miao, <i>et al.</i> (1159)
Characteristics of Water-soluble Ions in an Autumn Haze Process in the Southern Sichuan Urban Agglomeration After the Implementation of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan	WU An-nan, HUANG Xiao-juan, HE Ren-jiang, <i>et al.</i> (1170)
Concentration, Source, and Health Risk Assessment of PM ₁ Heavy Metals in Typical Pollution Processes in Zhengzhou	ZHAI Shi-ting, WANG Shen-bo, ZHANG Dong, <i>et al.</i> (1180)
Geographical Detection of Spatial Heterogeneity and Drivers of PM _{2.5} in the Yangtze River Economic Belt	WANG Li-li, LIU Xiao-jie, LI Ding, <i>et al.</i> (1190)
Spatial Heterogeneity of PM _{2.5} Concentration in Response to Land Use/Cover Conversion in the Yangtze River Delta Region	ZHOU Li-xia, WU Tao, JIANG Guo-jun, <i>et al.</i> (1201)
Analysis of Pollution Characteristics, Meteorological Impact, and Forecast Retrospective During the Spring Festival and the Lantern Festival in "2 + 26" Cities	ZHU Yuan-yuan, WANG Xiao-fei, WANG Wei, <i>et al.</i> (1212)
Pollution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} in Shanxi Province Based on Wavelet Transform	ZHANG Ke-ke, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (1226)
Estimation of Surface Ozone Concentration and Health Impact Assessment in China	ZHAO Nan, LU Yi-min (1235)
Analysis of Ozone Pollution Spatio-temporal Evolution Characteristics and Identification of Its Long-term Variation Driving Factor over Hunan Province	LIU Yan-yan, YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, <i>et al.</i> (1246)
Temporal and Spatial Variation in O ₃ Concentration Near the Surface of Shandong Peninsula and Analysis of Potential Source Areas	LI Le, LIU Min-xia, XIAO Shi-ni, <i>et al.</i> (1256)
Characteristics, Ozone Formation Potential, and Source Apportionment of VOCs During the COVID-19 Epidemic in Xiong'an	LIU Xin-jun, WANG Shu-juan, LIU Cheng, <i>et al.</i> (1268)
Characteristics and Source Analysis of VOCs Pollution During the Period of Ozone Exceeding the Standard in Zibo City	WANG Shuai, WANG Xiu-yan, YANG Wen, <i>et al.</i> (1277)
Comparison of VOCs Pollution Characteristics Between an Urban Site and a Background Site in Summer in Zibo	QIN Tao, XU Bo, WANG Xin-wu, <i>et al.</i> (1286)
Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from Cooking in Sichuan Province	QIAN Jun, HAN Li, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (1296)
Emission Characteristics of Gas-and Particle-Phase Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Cooking	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1307)
Diversity and Community Structure of Airborne Fungi in Different Working Areas of Composting Plants	YU Ao-yuan, XING Li-jun, SUN Xing-bin, <i>et al.</i> (1315)
Main Problems and Refined Solutions of Urban Fugitive Dust Pollution in China	LI Ting-kun, FENG Yin-chang, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (1323)
Water Quality Assessment and Spatial-temporal Variation Analysis in Yellow River Basin	LIU Yan-long, ZHENG Yi-an (1332)
Spatial Distribution and Influential Factors of Nutrients in Rivers of a Typical Mountainous City: A Case Study of the Qingshuixi River in Chongqing	WANG Chao, YE Qiu, JIA Bo-yang, <i>et al.</i> (1346)
River-Lake States in the Tributary of the Three Gorges Reservoir Area and Their Effects on the Phosphorus Content of Different Forms in the Sediment	HUANG Wei, ZHANG Xing, LUO Xiao-jiao, <i>et al.</i> (1356)
Molecular Signatures of Dissolved Organic Matter in the Paihe River and Its Tributaries	ZHAN Ya, YIN Hao, FENG Jing-wei, <i>et al.</i> (1365)
Multiphase Spatial Distribution Characteristics of Cd Morphology in Typical Intertidal Zones in the Guanglong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and Its Influencing Factors	CUI Xin-yue, MO Wu-qiu, LIAO Jian-bo (1375)
Occurrence Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics in the Surface Water of Luoma Lake and Its Main Inflow Rivers	GONG Run-qiang, ZHAO Hua-jin, GAO Zhan-qi, <i>et al.</i> (1384)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in the Third Drain of Ningxia	LI Fu-juan, GAO Li, LI Ling-yun, <i>et al.</i> (1394)
Historical Changes and Responses to Human Activities of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Lake Sediments from Northern China During the Past 100 Years	GONG Xiong-hu, ZHAO Zhong-hua, DING Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Characteristics of Bacterioplankton Community Between River and Lake/Reservoir in the Yangtze River Basin	HU Yu-xin, ZHANG Jing, HUANG Jie, <i>et al.</i> (1414)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Wuliangs Lake During an Irrigation Interval in Hetao Plain	SHI Yu-jiao, LI Wen-bao, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (1424)
Effects of Landscape Structures on Bacterioplankton Communities at Multi-spatial Scales in the Yuanhe River	SHU Wang, WANG Peng, DING Ming-jun, <i>et al.</i> (1434)
Microbial Community Structure on Microplastic Surface in the <i>Grus leucogeranus</i> Reserve of Poyang Lake	LIU Shu-li, JIAN Min-fei, ZOU Long, <i>et al.</i> (1447)
Influence of Microplastics on the Development of <i>Proteus</i> Biofilm	TAO Hui, QI Yi-ting, YU Duo, <i>et al.</i> (1455)
Deposition Law of Low-Density Microplastics Aggregation in Wuliangs Lake	LIU Yu, SHI Xiao-hong, ZHANG Sheng, <i>et al.</i> (1463)
Adsorption of Fulvic Acid on Virgin and Aging Microplastics	SONG Ya-li, YU Ya, ZHENG Lei, <i>et al.</i> (1472)
Diffusive Fluxes and Controls of N ₂ O from Coastal Rivers in Tianjin City	TANG Meng-yao, HU Xiao-kang, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (1481)
Effects of Hematite and Biochar Addition on Wastewater Treatment Efficiency, Greenhouse Gas Emission, and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetland	CHEN Xin-tong, HAO Qing-ju, XIONG Yan-fang, <i>et al.</i> (1492)
Identification and Optimization Method of Rainfall-Runoff Pollution Risk Level	QI Xiao-tian, ZHANG Zhi-ming, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (1500)
Factor Analysis of Disinfection Byproduct Formation in Drinking Water Distribution Systems Through the Bayesian Network	JIANG Shan-shan, WANG Zhen-yu, GAO Quan, <i>et al.</i> (1512)
Selective Adsorption of Au(III) by Activated Carbon Supported Polythioamides and Adsorption Mechanism	ZHAO Wen-jin, ZHANG Shen, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (1521)
Impacts of F/M Ratio on Microbial Networks in Activated Sludge	ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, WEN Xiang-hua (1529)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Soil Elements in an Urban-rural Integration Area: A Case Study in the Qinglong Area of Tianfu New District	LIU Shu-huai, WANG De-wei, SHI Ze-ming, <i>et al.</i> (1535)
Ecological and Health Risk Assessments Based on the Total Amount and Speciation of Heavy Metals in Soils Around Mining Areas	WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (1546)
Characteristics of Antimony Migration and Transformation and Pollution Evaluation in a Soil-Crop System Around a Tin Mine in Hunan Province	ZHANG Long, SONG Bo, HUANG Feng-yan, <i>et al.</i> (1558)
Effect of Controlling Heavy Metals in Soil of Rare Earth Mining Area by Biochar Supported Graphene Oxide	YANG Shi, LIU Zu-wen, LONG Bei, <i>et al.</i> (1567)
Enhanced Remediation of Cd Contaminated Soil by Cotton with DOM	MIN Tao, LUO Tong, CHEN Li-li, <i>et al.</i> (1577)
Novel Insight into the Adsorption Mechanism of Fe-Mn Oxide-Microbe Combined Biochar for Cd(II) and As(III)	LIAN Bin, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i> (1584)
Variations in Cadmium Accumulation and Transport and Ionic Traits Among Different Winter Wheat Varieties	LIU Chang, XU Ying-ming, HUANG Qing-qing, <i>et al.</i> (1596)
Cadmium Accumulation Characteristics of Different Heat Varieties Under Cadmium Stress	REN Chao, REN Yu-zhong, WANG Hao, <i>et al.</i> (1606)
Effect of Different Land Use Types on the Diversity of Soil Bacterial Community in the Coastal Zone of Jialing River	LIU Kun-he, XUE Yu-qin, ZHU Lan-ping, <i>et al.</i> (1620)
Effects of Earthworms/Biochar on Bacterial Diversity and Community in As-contaminated Red Soil	SU Qian-qian, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (1630)
Effects of DA-6 and EDDS on Growth and Cd Uptake by <i>Solanum nigrum</i> L. and on the Soil Bacterial Community Structure	LUO Yang, SUN Li, LIU Fang, <i>et al.</i> (1641)
Effects of Plastic Mulch Film on Soil Nutrients and Ecological Enzyme Stoichiometry in Farmland	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, WANG Shuang, <i>et al.</i> (1649)
Effects of Warming and Increased Precipitation on Soil Respiration of Abandoned Grassland in the Loess-Hilly Regions	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (1657)
Effect of Film Mulching, Straw Retention, and Nitrogen Fertilization on the N ₂ O and N ₂ Emission in a Winter Wheat Field	PENG Yi, LI Hui-tong, ZHANG Shao-wei, <i>et al.</i> (1668)
Effects of Straw Returning on Soil Ammonia Volatilization Under Different Production Conditions Based on Meta-analysis	ZHAO Zheng-xin, WANG Xiao-yun, TIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1678)
Impacts of Fertilization on Soil Antibiotic Resistance Genes Across Croplands: A Meta-Analysis	RAN Ji-wei, XIAO Qiong, HUANG Min, <i>et al.</i> (1688)