

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

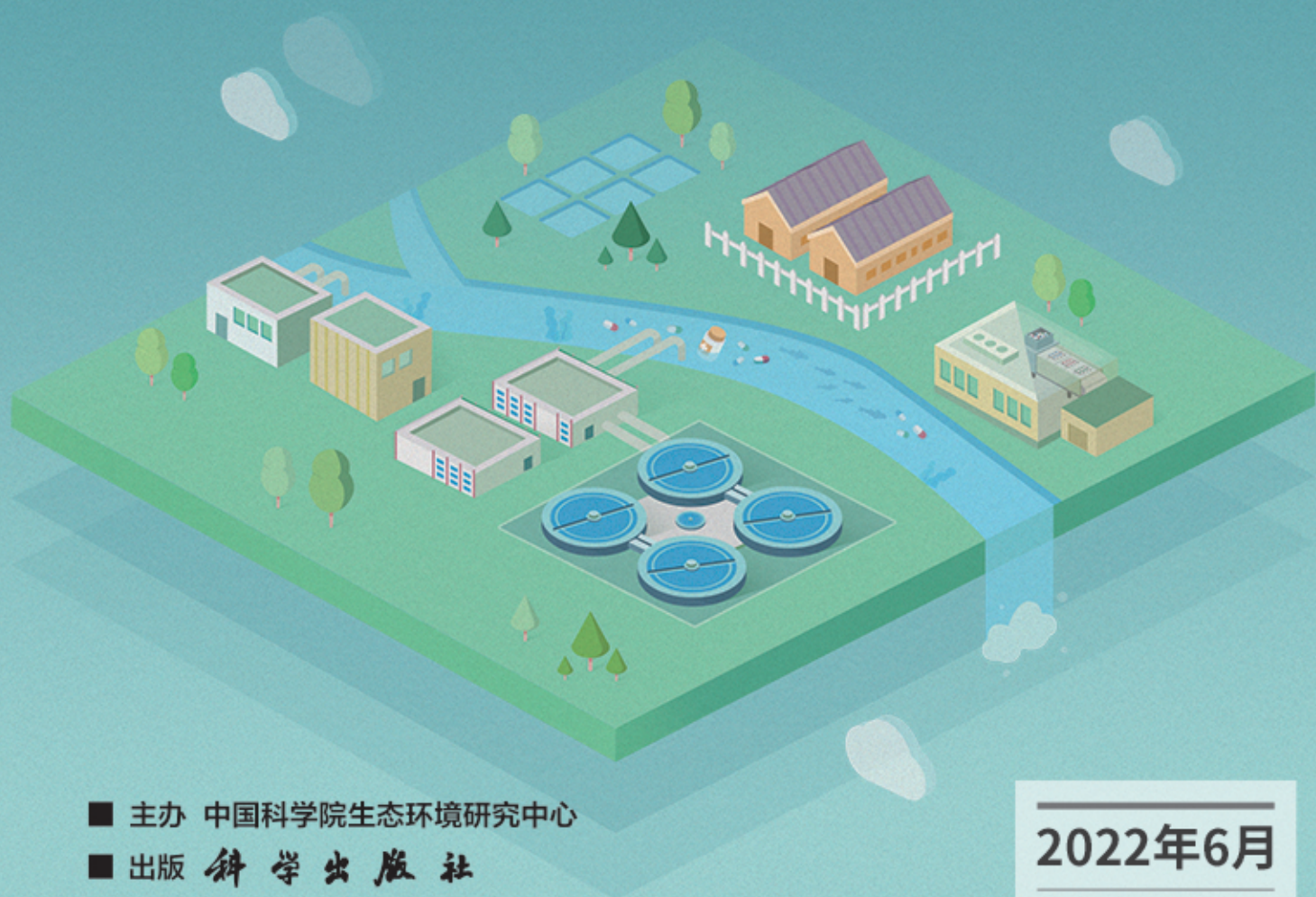
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期
Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM _{2.5} 浓度影响	邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)
新冠疫情管控措施对郑州市 PM _{2.5} 浓度、粒径分布、组分和来源的影响	黄兵役, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)
COVID-19 管控期间苏州市 PM _{2.5} 中金属元素浓度变化及来源解析	缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)
2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化	谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)
基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM _{2.5} 来源	彭超, 李振亮, 曹云攀, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)
保定市冬季 PM _{2.5} 的氧化潜势特征及其影响来源分析	吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)
南京江北新区 PM _{2.5} 中水溶性有机氮的污染特征及其来源	关璐, 丁铖, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)
广西十万大山背景点 PM _{2.5} 中非极性有机气溶胶组成及来源解析	邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)
大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例	张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)
基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因	唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)
天津市 PM _{2.5} -O ₃ 复合污染特征及气象影响分析	肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)
2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析	周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)
河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化	晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)
热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响	赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)
武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源	苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)
运城市夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析	温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)
我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁	范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)
长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价	武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)
内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险	张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思瑞, 孙兴滨, 王山军 (3005)
不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制	宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)
高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素	李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 陈安强, 张丹 (3027)
青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析	张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)
东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价	赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)
湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险	刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)
长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价	张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)
香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析	陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)
城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应	陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)
2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子	屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)
嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系	王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)
近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析	葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)
长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制	谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)
高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法	顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋云钟, 曹引, 赵红莉 (3140)
不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化	陈旭东, 高良敏 (3149)
生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染	石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)
不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响	吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)
北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析	席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐露, 荆红卫, 刘保献 (3177)
不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征	章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)
可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制	曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)
4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性	唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)
农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制	龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)
腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析	李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)
2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征	徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)
黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态学特征	孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)
青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析	温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)
西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响	刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴磊, 刘双燕 (3262)
贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价	张倩, 韩贵琳 (3269)
南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析	董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)
神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价	严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)
石灰泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复	许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)
水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响	谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)
改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应	罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)
土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应	罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)
小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响	靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)
重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征	廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)
长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征	廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)
基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应	梁建设, 白永平, 杨雪蕊, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)
《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)	

2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析

周梦鸽^{1,2}, 杨依^{1,2}, 孙媛³, 张凤英³, 李永华^{1*}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国环境监测总站, 北京 100012)

摘要: 基于 2016 ~ 2020 年山东省城市空气质量监测结果, 结合人口密度和城镇化率等社会经济数据以及风速、气温和相对湿度等气象要素, 综合应用地理加权回归模型 (GWR)、多尺度地理加权回归模型 (MGWR) 和小波分析等方法, 探究山东省空气污染物的时空分布特征及其与社会经济和气象要素的关系。结果表明: ①近 5 年来山东省空气质量整体呈好转趋势, 除 O_3 外, SO_2 、 NO_2 、 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 等污染物浓度逐年降低。空气污染物分布存在明显的空间差异, 沿海地区污染物浓度更低。②山东省 $PM_{2.5}$ 与人口密度和第二产业占比具有极显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 而与城镇化率呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$)。同时, 这种相关关系在空间上存在尺度差异, 人口密度、民用汽车量和工业用电量与 $PM_{2.5}$ 空间关系较平稳, 而城镇化率和第二产业占比对 $PM_{2.5}$ 的影响的空间异质性较高。③气象要素对菏泽和威海两市 $PM_{2.5}$ 的影响程度不同, 菏泽市 $PM_{2.5}$ 与气温、相对湿度和日照时数相关性更强, 而威海市海陆风盛行, $PM_{2.5}$ 与风速相关性更高。④小波分析表明每年冬季菏泽市比威海市空气污染频繁, 频率约为每次 1 ~ 2 周; 年周期上, 菏泽市 $PM_{2.5}$ 滞后于风速, 而威海市 $PM_{2.5}$ 和风速表现为同相位。山东省空气质量存在明显的时空差异, 并受社会经济和气象因素的综合影响。

关键词: 空气质量; 时空分布; 多尺度地理加权回归; 小波分析; 山东省

中图分类号: X51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)06-2937-10 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202109020

Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020

ZHOU Meng-ge^{1,2}, YANG Yi^{1,2}, SUN Yuan³, ZHANG Feng-ying³, LI Yong-hua^{1*}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on the daily monitoring data of urban air quality in Shandong province from 2016 to 2020, combined with socio-economic data such as population density and urbanization rate, as well as meteorological data such as wind speed, temperature, and relative humidity, the methods of geographic weighted regression (GWR), multiscale geographically weighted regression (MGWR), and wavelet analysis were comprehensively applied to explore the temporal and spatial distribution characteristics of air pollutants and their relationship with socio-economic and meteorological elements. The results showed that: ① In the past five years, the air quality in Shandong province has shown an overall improvement trend. Except for ozone, the concentrations of SO_2 , NO_2 , $PM_{2.5}$, and PM_{10} decreased annually. Additionally, their distribution had obvious spatial differences, which was reflected in the lower concentration of air pollutants in coastal areas. ② $PM_{2.5}$ in Shandong province had an extremely significant positive correlation with population density and the proportion of secondary industry ($P < 0.01$) but had a very negative correlation with urbanization rate ($P < 0.01$). Moreover, there were scale differences in the spatial relationship. The spatial relationship between population density, civil vehicle volume, industrial power consumption, and $PM_{2.5}$ was relatively stable, whereas the spatial heterogeneity of the impact of urbanization rate and the proportion of secondary industry on $PM_{2.5}$ concentration was high. ③ Meteorological factors had different effects on $PM_{2.5}$ in Heze and Weihai. $PM_{2.5}$ in Heze had a stronger correlation with air temperature, relative humidity, and sunshine hours, whereas sea land breeze prevailed in Weihai, resulting in a higher correlation between $PM_{2.5}$ and wind speed. ④ Wavelet analysis showed that the frequency of air pollution in Heze was higher than that in Weihai, approximately one-two weeks/time in winter. In the annual cycle, the $PM_{2.5}$ in Heze lagged behind the wind speed, whereas the $PM_{2.5}$ and wind speed in Weihai were in the same phase. To summarize, there were obvious temporal and spatial differences in air quality in Shandong province, which was comprehensively affected by socio-economic and meteorological factors.

Key words: air quality; temporal and spatial distribution; multiscale geographically weighted regression; wavelet analysis; Shandong province

近年来,为了防治大气污染,国家出台了一系列法律法规。经过治理,我国大气环境质量目前稳中向好,但空气质量持续改善还面临许多困难和挑战。京津冀及周边地区大气污染物排放仍然偏高, $PM_{2.5}$ 浓度依然较高,与达标还有较大差距^[1]。严重的大气污染不仅影响日常生活,还会危害人体健康,引发各种疾病。有研究表明,大气颗粒物尤其是细颗粒物($PM_{2.5}$)上附着许多重金属、有机物和细菌病毒,这

些有毒有害的污染物质不仅导致人体免疫能力下降,也使呼吸系统、神经系统和心血管系统等相关疾病的发病率和死亡率显著增高^[2~4]。

收稿日期: 2021-09-02; 修订日期: 2021-11-08

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA26050202); 国家自然科学基金重点项目 (42130713)

作者简介: 周梦鸽 (1998 ~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为环境质量评估, E-mail: zhoumg.20b@ignrr.ac.cn

* 通信作者, E-mail: yhl@ignrr.ac.cn

区域空气质量受自然环境因素和人类活动共同作用. 人类生产生活导致的污染物排放是空气污染的主要来源, 地形差异及气象要素主要影响大气的自净能力和污染物扩散速度^[5, 6]. 有研究表明空气污染物浓度与风速、相对湿度和气压等气象要素关系显著^[7~9]. 2001~2011年广州空气污染指数(API)与气温、相对湿度、降水量和风速表现出负相关关系, 与气温日较差和气压呈正相关^[10]. 许文轩等^[11]通过对华北地区的空气质量的研究认为, 西部和北部高大的山脉阻碍了污染物的扩散, 导致局部地区污染加重. 经济发展、产业结构和城镇化等社会经济要素是导致城市空气质量变化的重要因子. 有研究表明人口密度、第二产业占比、人均私家车拥有量、森林覆盖率和研发经费等对城市 $PM_{2.5}$ 影响显著^[12~14].

山东省位于我国东部沿海、黄河下游, 其北邻京津冀, 南接江苏, 东濒渤海和黄海, 地理位置突出, 地形复杂多样. 山东省既是我国经济大省, 也是人口大省, 第七次全国人口普查结果显示山东省人口数位居全国第二^[15]. 发达的经济和众多的人口致使山东的资源消耗巨大, 以煤炭石油为主的能源结构导致了山东省严重复杂的空气污染问题^[16]. 因此, 探究山东省空气质量的时空分布特征是非常有必要的. 山东省空气质量存在明显的地域差异, 半岛地区空气质量最好, 而鲁中和鲁西北地区空气质量较差^[5]. 周睿智等^[17]对山东省 $PM_{2.5}$ 进行源解析的研究发现, 二次源是山东省 $PM_{2.5}$ 的首要贡献源, 其次

是尘源、煤源和机动车源. Yao等^[18]通过研究2015年山东省空气污染物的时空变化特征发现, $PM_{2.5}$ 平均年浓度与单位国内生产总值能耗、人均GDP和人口密度在空间尺度上有非常显著的相关性.

虽然已有许多学者探究了过去十几年里山东省空气质量的时空分布特征及影响因素, 但近几年关于山东省全省空气质量的研究鲜见; 已有研究大多侧重于单个城市、只关注气象因素或仅考虑社会经济因素, 将社会经济和气象要素结合起来的较少; 并且很少有学者利用小波分析来探究气象因子与 $PM_{2.5}$ 的关系. 因此, 本文以山东省为研究区域, 分析2016~2020年山东省空气污染物浓度的时空分布特征及其与社会经济和气象要素的关系, 旨在为山东省空气污染治理以及生态文明建设提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山东省位于 $34^{\circ}22' \sim 38^{\circ}23' N$ 和 $114^{\circ}19' \sim 122^{\circ}43' E$ 之间, 境域包括半岛和内陆两部分, 山东半岛突出于渤海和黄海之中, 内陆部分自北而南与河北、河南、安徽和江苏这4省接壤(图1). 山东省四季分明, 属暖温带季风性气候——春季天气多变, 少雨多风沙; 夏季受东南海洋性季风的控制, 盛行偏南风; 秋季天气晴爽, 冷暖适中; 冬季受大陆性季风的控制, 多偏北风. 境内中部山地突起, 西南、西北低洼平坦, 东部缓丘起伏, 形成以泰山、鲁山、沂

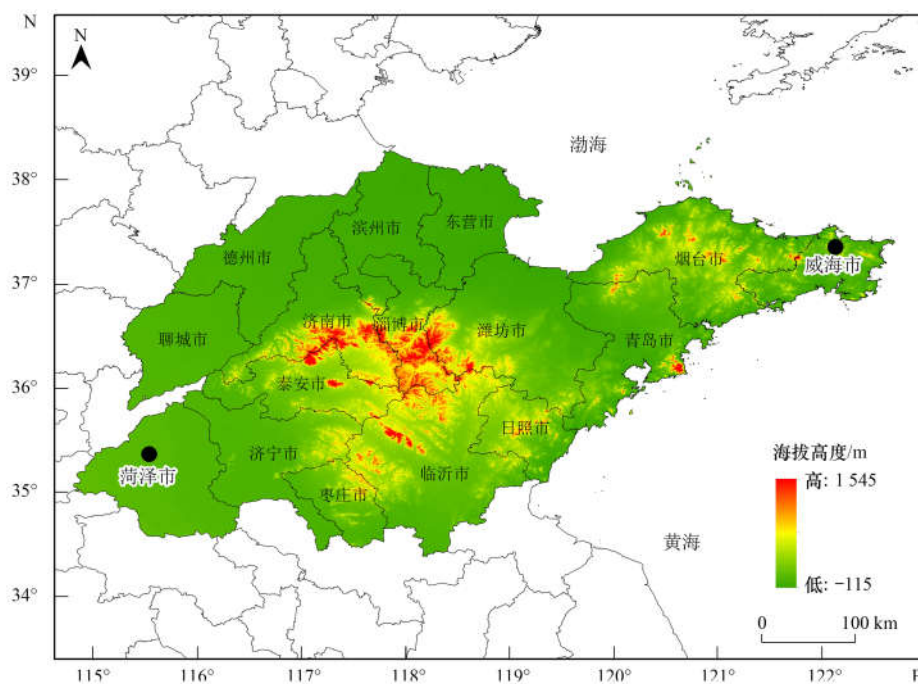


图1 研究区位置示意

Fig. 1 Location of the study area

山和蒙山等海拔千米以上的中山,构成鲁中山地的主体,四周由低山和丘陵逐渐过渡到平原。

1.2 数据来源

山东省空气质量数据来源于国家生态环境监测网,主要为 2016~2020 年山东省 16 个地级及以上城市空气质量监测结果,包括二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)、最大 8h 臭氧(O₃)滑动平均值、可吸入颗粒物(PM₁₀)和细颗粒物(PM_{2.5})等空气污染物的逐日浓度及空气质量指数(AQI)。社会经济数据来源于文献[16]。气象数据来自中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn/site/index.html>)的中国地面气候资料日值数据集,包括平均气压、平均气温、2 min 平均风速(风速)和平均相对湿度等。

1.3 分析方法

利用 Arcgis 可视化展示 2016~2020 年山东省空气质量时空变化,并进行热点分析(hot spot analysis);采用地理加权回归(GWR)和多尺度地理加权回归(MGWR)模型探究影响 PM_{2.5} 浓度的社会经济要素,GWR 和 MGWR 在软件 MGWR 2.2 中实现;剔除缺失值后,利用 R 4.05 软件分析菏泽、威海两市 PM_{2.5} 浓度与气象因子间的 Pearson 相关性;在 MATLAB R2016b 中利用小波分析探究菏泽和威海两市 PM_{2.5} 浓度与风速的周期性关系,分析自然因子对 PM_{2.5} 浓度的影响机制。在 Excel 中对所使用数据进行标准化处理。

1.3.1 地理加权回归模型

地理加权回归模型是一种将空间相关性纳入回归模型的新方法^[19,20],允许回归系数在空间上变化。GWR 模型的表达形式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_j \beta_j(u_i, v_i)x_{ij} + \varepsilon_i \quad (1)$$

式中, (u_i, v_i) 表示第 i 个观察点的空间坐标, $\beta(u_i, v_i)$ 为第 i 个观察点第 j 个自变量的回归系数, $\beta_0(u_i, v_i)$ 为模型在第 i 个观察点的截距, ε_i 为误差项^[21]。

1.3.2 多尺度地理加权回归模型

MGWR 模型是 GWR 模型的延伸,两者之间最大的差别在于带宽。GWR 中所有变量均为同一带宽,而 MGWR 为每个变量指定专用带宽,允许有各自不同的空间平滑水平,降低了估计偏误,也使空间过程模型更真实有用^[22,23],其计算公式如下:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_j \beta_{bwj}(u_i, v_i)x_{ij} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中, (u_i, v_i) 为位置 i 的坐标, bwj 表示第 j 个变量回归系数使用的带宽, $\beta_{bwj}(u_i, v_i)$ 为 i 处第 j 个变量的回归系数^[21]。

1.3.3 小波分析

小波分析是建立在傅里叶分析基础上,其优点在于能从时域和频域两方面展示被分析对象的局部化特征^[24~26]。小波分析的核心是小波变换,小波变换是不同尺度和位移的小波叠加,对于一维数据,可定义为:

$$W(a, x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \psi\left(x - \frac{b}{a}\right) dx \quad (3)$$

式中, $f(x)$ 为分析小波; $\psi(x)$ 为基小波; a 为空间尺度参数; b 为小波在空间上的中心位置。

小波相干用于研究两个序列数据在多时间尺度上的相关性,其系数可通过小波能量谱进行计算,公式如下:

$$R_{YZ}^2(s) = \frac{|\langle W^{YZ}(s) \rangle|^2}{|\langle W^Y(s) \rangle|^2 |\langle W^Z(s) \rangle|^2} \quad (4)$$

式中, Y 和 Z 分别为数据序列; $R_{YZ}^2(s)$ 为小波相干系数; $W^{YZ}(s)$ 为数据序列 YZ 的小波交叉谱;而 W_i^Y 和 W_i^Z 分别为数据序列 Y 、 Z 的小波系数;“ $\langle \rangle$ ”为小波能量谱的光滑函数。

2 结果与分析

2.1 山东省 2016~2020 年空气质量时空分布特征

山东省空气中 SO₂、NO₂、O₃、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 等污染物浓度年均变化情况如图 2。从中可见,污染物浓度分布存在显著的时空差异性。一方面,海陆差异明显,东部沿海地区(包括威海市、青岛市和烟台市)空气污染物浓度普遍小于其他地区;另一方面,SO₂、NO₂、PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度总体表现为下降,而 O₃ 浓度总体呈上升趋势。与 2016 年相比,2020 年山东省各城市 SO₂ 浓度下降 47.82%~69.57%,NO₂ 浓度变化 -21.51%~14.45%,其中滨州市和枣庄市 NO₂ 浓度有逐年增加趋势,这主要与当地产业结构有关,滨州市以化工业为主,而枣庄市支柱产业为煤炭建材,两市发达的重工业导致 NO₂ 浓度不减反增;PM₁₀ 浓度下降 13.56%~36.98%,PM_{2.5} 下降 17.55%~38.12%。德州市由于之前空气污染较为严重,污染物浓度下降幅度最大,空气质量改善最明显。

O₃ 浓度变化为 -1.1%~49.60%,2016~2019 年大部分城市 O₃ 浓度逐年增加,2020 年在大气污染防治措施的严格执行以及全球新冠肺炎疫情的影响下,全省 O₃ 浓度有所下降。但在气候变暖、人为排放以及区域大范围传输等因素影响下,全球臭氧背景浓度呈增长趋势,特别是北半球,增长幅度较

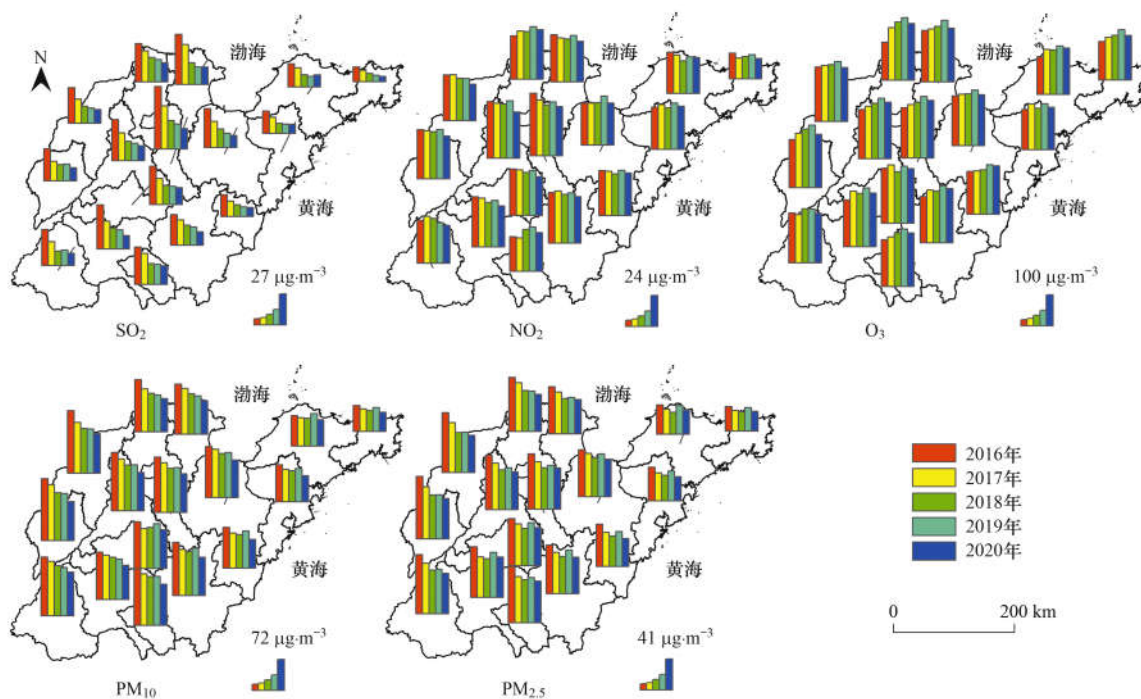


图2 山东省主要空气污染物逐年分布

Fig. 2 Annual distribution map of main air pollutants in Shandong province

大^[27,28].同时,作为 O_3 的重要前体物,氮氧化物和挥发性有机物的排放一直未得到有效控制.臭氧治理迫在眉睫.

图3为山东省空气污染物的热点分析结果,其中进一步表明污染物的时空分布存在显著性差异.5年来,东部半岛地区的污染物浓度一直相对较低,但污染物浓度较高的区域在发生变化. SO_2 浓度的高值区域位于山东省北部,由2016年的济南、淄博和滨州三市转移至2020年滨州和东营两市; NO_2 的高值区域从济南市转移到淄博市;而 O_3 污染区域在扩大,由2016年的济南市发展到2020年德州、滨州、济南和淄博四市;与 O_3 相反, PM_{10} 的高值区域在消失,2017年后,全省不再有大于90%显著性的高值区域; $PM_{2.5}$ 的高值区域发生明显变化,从西部的聊城和德州两市转移至南部的济宁市.

进一步分析山东省2016~2020年城市空气质量等级分布情况(图4).可以看出,山东省西北部和西南部地区重污染天数多,其中德州和聊城两市污染问题突出,5年来“中度污染”以上天气所占比例分别为15.38%、15.11%.山东半岛空气质量状况较好,特别是威海市,5年来“优、良”级别所占比例达88.62%.2019年山东省城市空气“优良”级别所占比例最小,只有58.5%.相较于2016年,2019年 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 等污染物浓度有所下降,但有机污染和二次污染在加剧^[29].

虽然2020年全省16个城市 SO_2 和 NO_2 均达到

国家一级标准,但对于 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$,仅有威海、青岛和烟台这3市达到国家二级标准.因此,目前山东省大气环境形势依旧严峻.

2.2 社会经济因子对山东省空气质量的影响:基于GWR和MGWR模型

为了探究社会经济因子对山东省空气质量的影响,本研究选择公众最为关注的 $PM_{2.5}$ 作为代表污染物,选择人口数量、人口密度、城镇化率、GDP、人均GDP、第二产业占比、第一产业占比、民用汽车量、工业用电量和城市绿化面积作为候选社会经济因子.本研究利用2019年数据进行分析,首先根据OLS回归结果的VIF(variance inflation factor)值剔除多余因子($VIF < 7.5$),解决多重共线问题,最终选定人口密度(万人· km^{-2})、城镇化率(%)、第二产业占比(%)、民用汽车数量(辆)和工业用电量(亿千瓦时)这5个社会经济因子.人口密度表示人口密集程度,城镇化率代表经济发展水平,第二产业占比代表产业结构,民用汽车数量和工业用电量分别表征汽车尾气排放量和工业排放量.OLS模型和GWR模型回归结果如表1所示.

根据AICc、 R^2 和调整 R^2 可以判断,GWR模型的拟合效果比OLS模型更好.由于不同空间尺度对各因子与因变量之间空间关系的作用方式和强度不同.为了探究空间尺度的影响,本文进一步利用MGWR模型分析山东省社会经济要素与 $PM_{2.5}$ 浓度的空间关系,结果如表2所示.

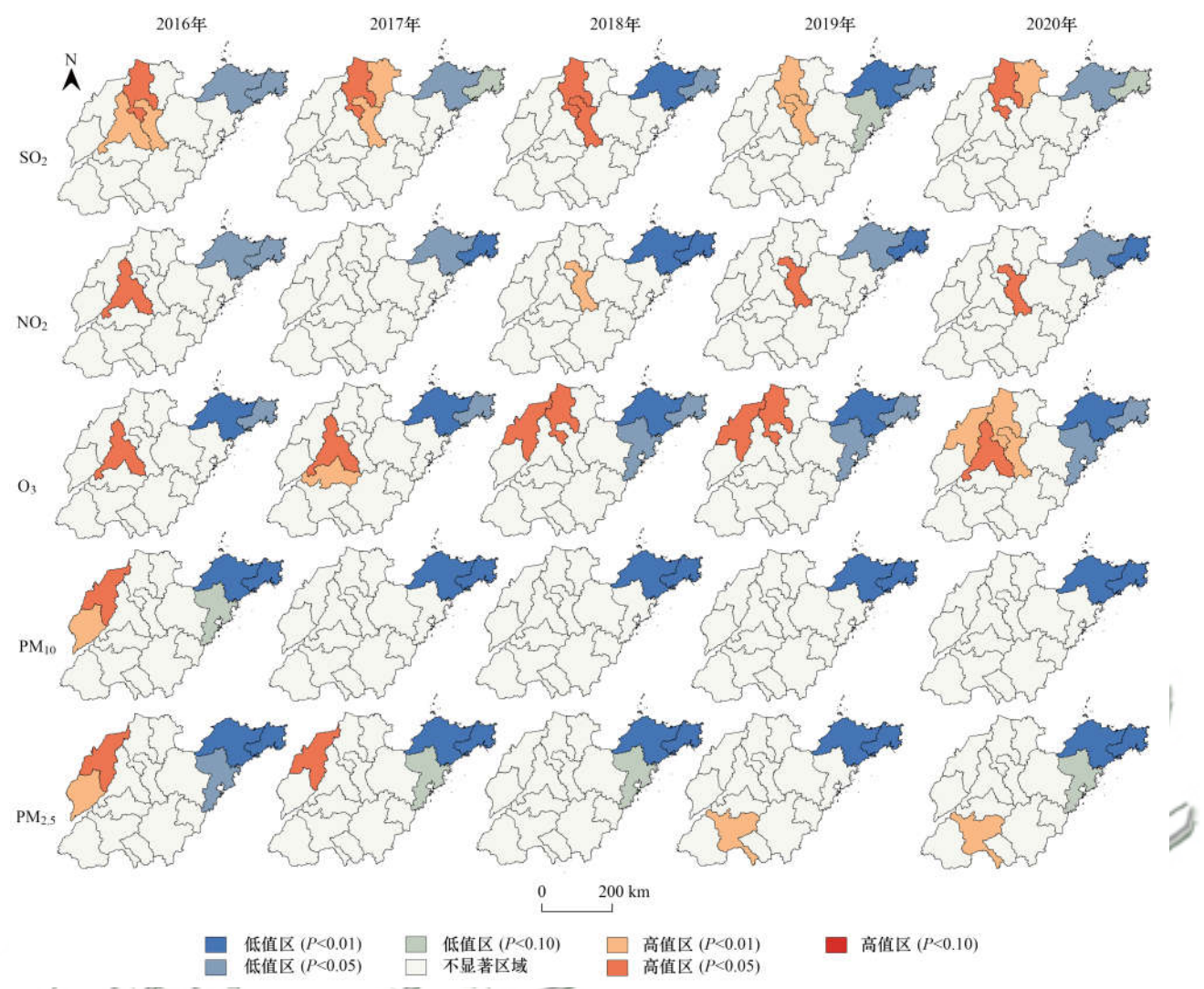


图 3 山东省主要空气污染物逐年热点分析结果

Fig. 3 Hot spot analysis results of main air pollutants in Shandong province

表 1 模型回归结果¹⁾

变量	OLS 模型			GWR 模型		
	系数	P	VIF	系数最大值	系数均值	系数最小值
人口密度	0.849	0.004 **	1.88	0.909	0.817	0.736
城镇化率	-0.725	0.004 **	1.28	-0.592	-0.703	-0.845
第二产业占比	0.667	0.021 *	2.08	0.204	0.159	0.118
民用汽车数量	0.165	0.478	1.75	0.800	0.641	0.510
工业用电量	0.274	0.191	1.34	0.272	0.257	0.235
AICc	53.299			52.924		
BIC				41.292		
R ²	0.715			0.792		
调整 R ²	0.573			0.629		
P(Joint F-statistic)	0.014 6 *					
P(BP statistic)	0.295 1					
P(Jarque-Bera statistic)	0.674 2					
带宽				4.76		

1) AICc 和 BIC 表示模型的拟合优度,值越小,拟合优度越高;当 P (BP statistic) < 0.05 时,表明该模型在统计学上是显著异方差性的和/或非稳态的,适合进行 GWR 分析;当 P (BP statistic) 不具有统计显著性时,认为“Joint F-statistic”是可信的;Joint F-statistic 用于检验模型是否具有显著性, $P < 0.05$ 表示模型统计具有显著性;Jarque-Bera statistic 用于指示残差是否呈正态分布,当 $P < 0.05$ 时,指示模型有偏差; * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

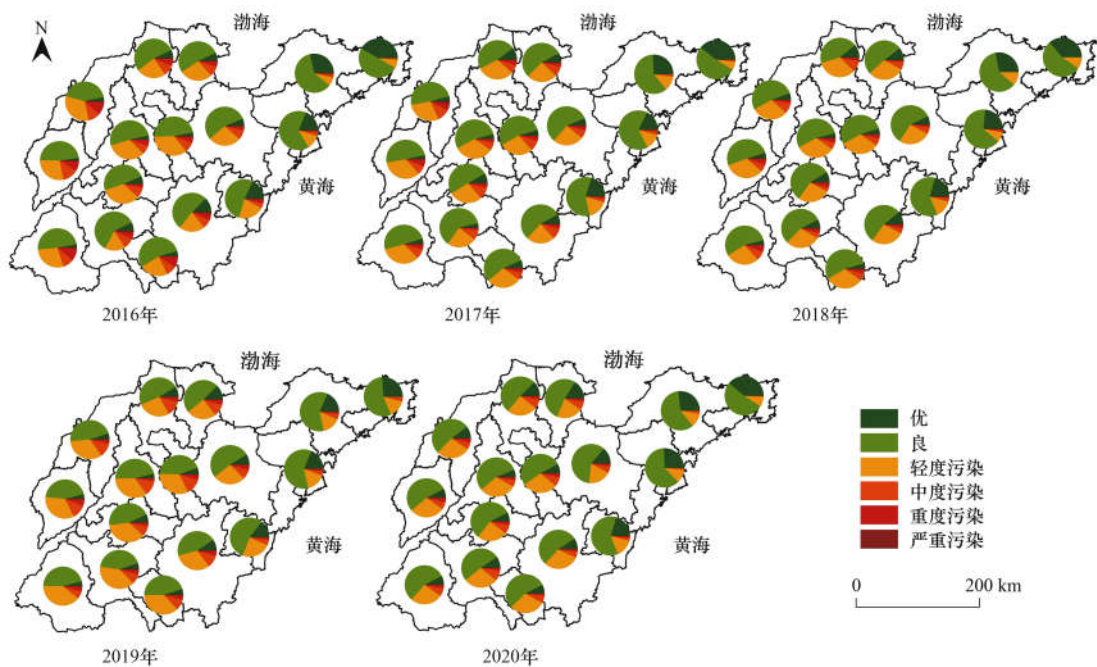


图 4 2016 ~ 2020 年山东省空气质量等级分布

Fig. 4 Distribution map of air quality grades in Shandong province from 2016 to 2020

表 2 MGWR 模型回归结果

Table 2 MGWR model regression results

变量	MGWR 模型				
	系数最大值	系数均值	系数最小值	标准差	带宽
人口密度	0.498	0.497	0.496	0.000	14.04
城镇化率	-0.262	-0.488	-0.929	0.203	1.45
第二产业占比	0.335	0.315	0.299	0.010	3.56
民用汽车数量	0.132	0.131	0.130	0.000	14.04
工业用电量	-0.103	0.103	0.103	0.000	14.04
AICc	65.265				
BIC	19.434				
R ²	0.968				
调整 R ²	0.913				

MGWR 模型的 AICc 值高于 GWR,但 BIC 值低于 GWR,表明 MGWR 模型数据预测的拟合优度低于 GWR 模型,但对现有数据的拟合程度更好^[30].同时, MGWR 模型的 R^2 和调整 R^2 值远高于 GWR 模型拟合结果,变量解释程度高达 96.8%,说明 MGWR 模型在空间要素的拟合度方面具有较大的优势.

MGWR 结果显示,2019 年 $PM_{2.5}$ 与人口密度和第二产业占比呈极显著正相关关系($P < 0.01$),与城镇化率呈极显著负相关关系($P < 0.01$).可能是由于人口密集地区,资源消耗巨大,对 $PM_{2.5}$ 的贡献量也更大;产业结构会影响 $PM_{2.5}$ 浓度,第二产业占比越重的城市, $PM_{2.5}$ 浓度越高;城镇化率与 $PM_{2.5}$ 具有负相关关系,说明经济发展水平高的区域,对大气污染治理的投入成本也高,也反映了山东省经济发展不再以污染环境为代价.与工业排放相比,汽车尾气排放贡献量更大.山东省在实

施相关行动方案后^[31],高架源治理效果显著,但汽车作为重要的交通工具,即使采用更为清洁的能源,汽车保有量和使用量仍逐年增加,移动源控制效果并不好.因此,在未来的大气污染治理过程中,应更加关注移动源污染,开发清洁能源,加快新能源汽车发展.

MGWR 模型中不同带宽可以揭示社会经济要素作用于 $PM_{2.5}$ 浓度变化的尺度效应,一般来说,带宽越大,空间异质性越低^[23].本研究中人口密度、民用汽车量和工业用电量对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的作用方式及强度在较大的空间尺度范围内大致相同,空间异质性低,空间关系趋近平稳.城镇化率和第二产业占比对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响的空间异质性较高,具体来说,越靠近海洋的城市,城镇化率和第二产业占比对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响越大(图 5).

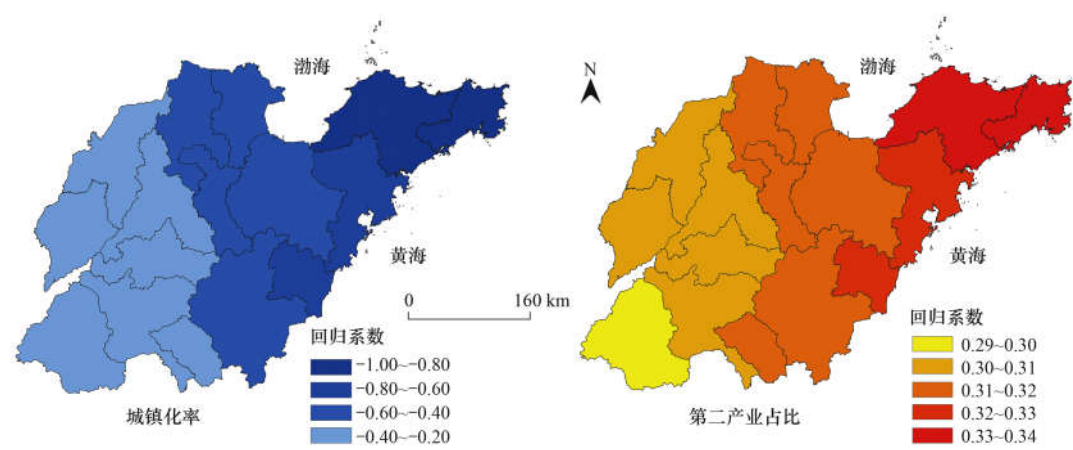


图5 MGWR 回归系数分布
Fig. 5 Distribution of MGWR regression coefficient

2.3 气象因子对菏泽、威海两市空气质量的影响

山东省地理位置特殊,不仅有绵延的海岸线,还有广袤的内陆,海陆差异显著.为了探究海陆气象差异对山东省 PM_{2.5} 浓度的影响,本文选择菏泽市和威海市作为内陆和沿海城市的代表,

选取风速 (m·s⁻¹)、平均气温 (℃)、平均相对湿度 (%) 和日照时数 (h) 作为气象影响因子,探究其与菏泽和威海两市 PM_{2.5} 浓度的关系.表 3 为菏泽市和威海市 PM_{2.5} 和气象因子间的相关分析结果.

表 3 2019 年菏泽和威海两市 PM_{2.5} 与气象因子的 Pearson 相关系数¹⁾

Table 3 Pearson correlation coefficient between PM _{2.5} and meteorological factors in Heze and Weihai in 2019					
	气象因子	PM _{2.5}	风速	平均气温	平均相对湿度
菏泽	风速	-0.149 5 **			
	平均气温	-0.654 6 **	-0.022 0		
	平均相对湿度	0.160 2 **	-0.290 5 **	0.040 8	
	日照时数	-0.356 1 **	0.097 7 *	0.322 5 **	-0.525 9 **
威海	风速	-0.238 5 **			
	平均气温	-0.264 7 **	-0.289 8 **		
	平均相对湿度	-0.002 7	-0.155 9 **	0.448 2 **	
	日照时数	-0.155 1 **	-0.043 5	0.147 3 **	-0.308 5 **

1) * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$

Pearson 相关系数表明,除平均相对湿度外,其他气象要素与菏泽、威海两市 PM_{2.5} 均呈负相关关系,也就是风速增大、气温升高和日照时数延长均会导致 PM_{2.5} 浓度降低.一般来说,冬季供暖导致能源消耗增加,空气污染物排放量增多,加之静稳态天气等气象条件不利于污染物扩散,导致菏泽和威海两市平均气温与 PM_{2.5} 之间均呈现极显著负相关性.

气象要素对两市 PM_{2.5} 的影响存在明显差异.总体而言,与威海市相比,菏泽市 PM_{2.5} 与气象因子的相关性更强,特别是平均气温和日照时数这 2 个气象要素.而威海市 PM_{2.5} 与风速间的相关性更强,这与威海市特殊的地理位置有关,濒临海洋,2019 年平均风速为 5.18 m·s⁻¹,强劲的海陆风有利于 PM_{2.5} 的输送扩散.菏泽市相对湿度与 PM_{2.5} 呈显著正相关.一般来说,相对湿度较大时,颗粒物吸湿使其表面积增大,导致污染物吸附量增加,污染加重^[32];同时,湿度大也不利于污染物的扩散.当污

染颗粒物扩散输送到菏泽市时,由于相对湿度较大,能够截留空气中大量的污染物,使 PM_{2.5} 浓度增加.而威海市相对湿度与 PM_{2.5} 呈微弱负相关关系,这可能是因为威海市位于山东省最东边,延伸入海,受海洋蒸发影响,平均相对湿度较大,但 PM_{2.5} 含量相对较少.

2.4 小波分析

为了进一步探究风速对山东省 PM_{2.5} 的影响,利用小波分析威海和菏泽两市 2016 ~ 2020 年 PM_{2.5} 和风速的周期性变化及两者之间的关系.

从图 6 中可以看出,菏泽市与威海市 PM_{2.5} 浓度变化存在 1 a 左右的周期,具有季节变化特征,冬季 PM_{2.5} 浓度较高,夏季较低.同时,每年冬季存在多个短周期.菏泽市短周期出现频次更多,表明菏泽市污染更频繁,约为每次 1 ~ 2 周.在新冠肺炎疫情的影响以及一系列综合治理措施的实施下,2020 年菏泽市和威海市 PM_{2.5} 浓度有所下降,污染发生频率减

少. 风速也存在明显的年周期性, 具体表现为冬春季风速较大, 夏季强风天气较少, 平均风速较低. 春季大风是华北地区的气象特征之一. 随着气温回升, 地面接收太阳辐射逐步增多, 加热较快, 于是形成了

比较强烈的冷空气下沉、暖空气上升运动, 使地面风速加大. 2019 年年初威海市强风较往年同期发生频率低, 这在一定程度上导致了 2019 年威海市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度偏高.

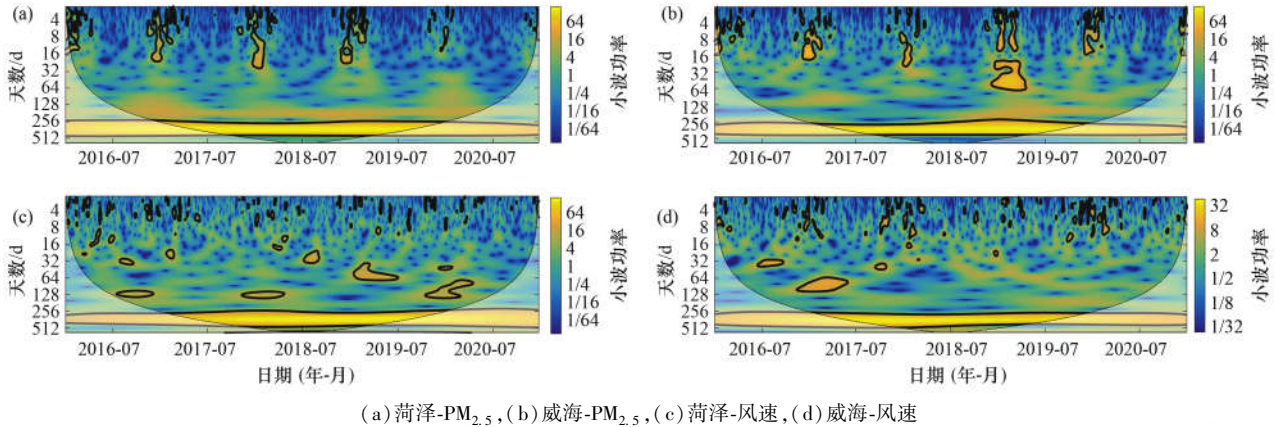


图 6 $\text{PM}_{2.5}$ 与风速的小波图

Fig. 6 Wavelet diagram of $\text{PM}_{2.5}$ and wind speed

图 7 和图 8 表明菏泽、威海两市 $\text{PM}_{2.5}$ 和风速的年周期变化不同. 在年周期上, 菏泽市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化滞后于风速, 而威海市 $\text{PM}_{2.5}$ 和风速表现为同相位, 同时增大. 主要是因为两地大风天气多发时段不

同, 菏泽市地区处于北方内陆, 春季大风天气居多, 而威海市濒临海洋, 冬季风力强. 因此, 对于菏泽市, 风速与 $\text{PM}_{2.5}$ 存在一个滞后关系. 在短周期上, 菏泽、威海两市的风速与 $\text{PM}_{2.5}$ 多是反相位关系, 说明风速

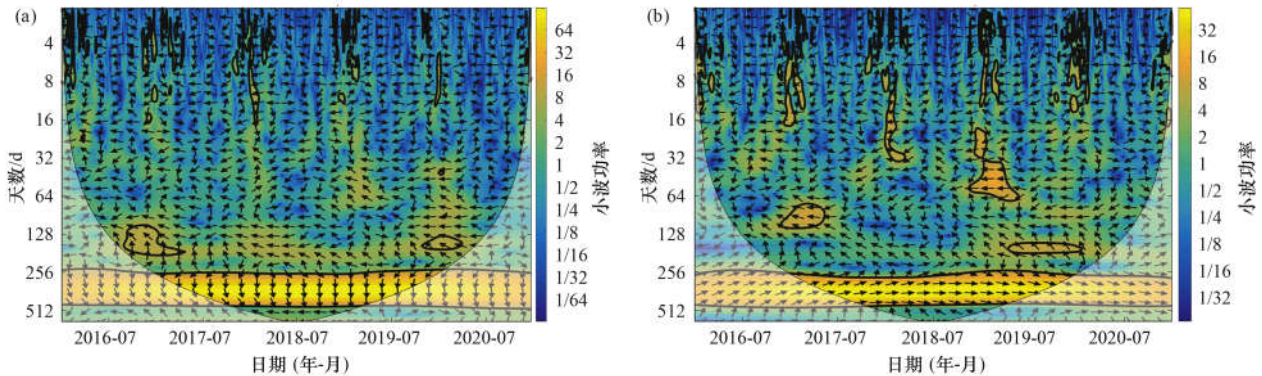


图 7 $\text{PM}_{2.5}$ 与风速的交叉小波图

Fig. 7 Cross wavelet diagram of $\text{PM}_{2.5}$ and wind speed

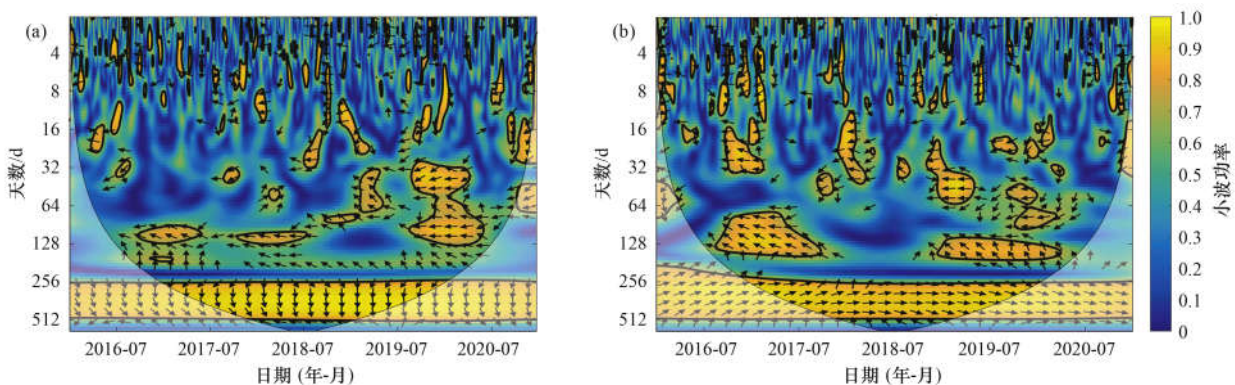


图 8 $\text{PM}_{2.5}$ 与风速的小波相干图

Fig. 8 Wavelet coherence diagram of $\text{PM}_{2.5}$ and wind speed

越大, $\text{PM}_{2.5}$ 含量越少. 大风可以通过水平输送和稀释扩散效应降低细颗粒物浓度^[33]. 已有研究^[34]表明当风速增大到一定程度时, 会使颗粒物浓度增加, 污染加重. 而威海市虽然风速大, 但大风大多来源于海上, 并不会携带大量的尘沙及其他颗粒物, 因此, 不会导致大气中颗粒物浓度加重.

3 结论

(1) 山东省空气污染物均存在明显的时空分布差异. 一方面, 海陆差异明显, 东部半岛地区空气质量状况普遍好于其他地区; 另一方面, 除 O_3 外, 各地其他污染物浓度呈现逐年改善趋势.

(2) 山东省 $\text{PM}_{2.5}$ 与人口密度和第二产业占比呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$), 与城镇化率呈极显著负相关关系 ($P < 0.01$). 人口越密集或第二产业越发达的城市, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度越高; 经济发展水平高的区域, 大气污染治理效果显著; 与工业排放相比, 汽车尾气排放贡献量更大. 人口密度、民用汽车量和工业用电量对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的作用方式及强度在较大的空间尺度范围内大致相同, 空间异质性低, 而城镇化率和第二产业占比的空间异质性高, 对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响存在明显差异性.

(3) 气象要素对菏泽和威海两市 $\text{PM}_{2.5}$ 影响程度不同. 作为内陆城市, 菏泽市 $\text{PM}_{2.5}$ 受气象要素影响更大, 与平均气温、平均相对湿度和日照时数相关性更强. 威海作为沿海城市, 受海陆风影响, 风速与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性更高.

(4) 菏泽市和威海市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有季节变化特征, 冬季浓度高, 夏季浓度低. 菏泽市比威海市空气污染频率高, 冬季约为 1~2 周/次. 两市 $\text{PM}_{2.5}$ 与风速在短周期中均表现出反相位关系. 在年周期上, 菏泽市 $\text{PM}_{2.5}$ 滞后于风速, 而威海市 $\text{PM}_{2.5}$ 和风速表现为同相位, 同时增大.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 生态环境部部长黄润秋国新办新闻发布会答记者问[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/ywdt/zfbt/202108/t20210818_858184.shtml, 2021-08-18.
- [2] 殷永文, 程金平, 段玉森, 等. 上海市霾期间 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析[J]. 环境科学, 2011, 32(7): 1894-1898.
Yin Y W, Cheng J P, Duan Y S, et al. Correlation analysis between the $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} which were taken in the hazy day and the number of outpatient about breathing sections, breathing sections of pediatrics in Shanghai[J]. Environmental Science, 2011, 32(7): 1894-1898.
- [3] Kim K H, Kabir E, Kabir S. A review on the human health impact of airborne particulate matter [J]. Environment International, 2015, 74: 136-143.
- [4] 郭恒亮, 王孟飞, 龚喜云, 等. 2016—2018 年河南洛阳市主要大气污染物对心脑血管疾病门诊量的影响[J]. 环境与职业医学, 2021, 38(4): 389-396.
- [5] Guo H L, Wang M F, Gong X Y, et al. Influence of main air pollutants on hospital outpatient visits for cardiovascular and cerebrovascular diseases in Luoyang of Henan Province in 2016-2018[J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2021, 38(4): 389-396.
- [6] 许海超, 李子君, 姜爱霞, 等. 山东省空气质量指数的时空分布特征[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2017, 31(2): 168-175.
Xu H C, Li Z J, Jiang A X, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of air quality index in Shandong province, China[J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2017, 31(2): 168-175.
- [7] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 1936-1943.
Li X F, Zhang M J, Wang S J, et al. Variation characteristics and influencing factors of air pollution index in China [J]. Environment International, 2012, 33(6): 1936-1943.
- [8] 张建忠, 孙瑾, 王冠岚, 等. 北京地区空气质量指数时空分布特征及其与气象条件的关系[J]. 气象与环境科学, 2014, 37(1): 33-39.
Zhang J Z, Sun J, Wang G L, et al. Relation between the spatial-temporal distribution characteristics of air quality index and meteorological conditions in Beijing[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2014, 37(1): 33-39.
- [9] 臧振峰, 张凤英, 李永华, 等. 我国主要粮产区 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 时空分布特征及影响因素——以河南省为例[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5): 1163-1175.
Zang Z F, Zhang F Y, Li Y H, et al. Spatio-temporal distribution and affecting factors of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} in major grain producing areas in China: a case study of Henan province[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(5): 1163-1175.
- [10] 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 等. 石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5131-5142.
Nie S S, Wang S, Cui J S, et al. Spatio-temporal characteristics and potential source areas of seasonal atmospheric pollution in Shijiazhuang [J]. Environmental Science, 2021, 42(11): 5131-5142.
- [11] Li L, Qian J, Ou C Q, et al. Spatial and temporal analysis of air pollution index and its timescale-dependent relationship with meteorological factors in Guangzhou, China, 2001-2011 [J]. Environmental Pollution, 2014, 190: 75-81.
- [12] 许文轩, 田永中, 肖悦, 等. 华北地区空气质量空间分布特征及成因研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 3085-3096.
- [13] Xu W X, Tian Y Z, Xiao Y, et al. Study on the spatial distribution characteristics and the drivers of AQI in North China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(8): 3085-3096.
- [14] 王少剑, 高爽, 陈静. 基于 GWR 模型的中国城市雾霾污染影响因素的空间异质性研究[J]. 地理研究, 2020, 39(3): 651-668.
- [15] Wang S J, Gao S, Chen J. Spatial heterogeneity of driving factors of urban haze pollution in China based on GWR model [J]. Geographical Research, 2020, 39(3): 651-668.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [14] 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.
- [15] 国家统计局. 第七次全国人口普查公报(第三号)[EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/zjtj/zdtjgz/zgrkpc/dqcrkpc/ggl/202105/t20210519_1817696.html, 2021-05-11.
- [16] 山东省统计局, 国家统计局山东调查总队. 山东统计年鉴2020[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [17] 周睿智, 闫才青, 崔敏, 等. 山东省大气细颗粒物来源解析的研究现状与展望[J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(7): 3029-3042.
- Zhou R Z, Yan C Q, Cui M, *et al.* Research status and prospects on source apportionment of atmospheric fine particulate matter in Shandong Province[J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(7): 3029-3042.
- [18] Yao Y R, He C, Li S Y, *et al.* Properties of particulate matter and gaseous pollutants in Shandong, China: daily fluctuation, influencing factors, and spatiotemporal distribution[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **660**: 384-394.
- [19] Wang Y N, Chen W, Kang Y Q, *et al.* Spatial correlation of factors affecting CO₂ emission at provincial level in China: a geographically weighted regression approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, **184**: 929-937.
- [20] 卢宾宾, 葛咏, 秦昆, 等. 地理加权回归分析技术综述[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2020, **45**(9): 1356-1366.
- Lu B B, Ge Y, Qin K, *et al.* A review on geographically weighted regression [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, **45**(9): 1356-1366.
- [21] Fotheringham A S, Yang W B, Kang W. Multiscale geographically weighted regression (MGWR) [J]. *Annals of the American Association of Geographers*, 2017, **107**(6): 1247-1265.
- [22] 何超, 慕航, 杨璐, 等. 中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素[J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4168-4179.
- He C, Mu H, Yang L, *et al.* Spatial variation of surface ozone concentration during the warm season and its meteorological driving factors in China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4168-4179.
- [23] 周丽霞, 吴涛, 蒋国俊, 等. 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[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1201-1211.
- Zhou L X, Wu T, Jiang G J, *et al.* Spatial heterogeneity of PM_{2.5} concentration in Response to land use/cover conversion in the Yangtze River delta region [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1201-1211.
- [24] Grinsted A, Moore J C, Jevrejeva S. Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series [J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2004, **11**(5-6): 561-566.
- [25] 孙春媛, 李令军, 赵文吉, 等. 基于小波变换的北京市 PM_{2.5} 时空分布特征及成因分析[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(8): 1343-1350.
- Sun C Y, Li L J, Zhao W J, *et al.* Temporal and spatial characteristic and factors analysis of PM_{2.5} on the basis of wavelet transformation in Beijing [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(8): 1343-1350.
- [26] 徐芝英, 胡云锋, 甄霖, 等. 基于小波的浙江省 NDVI 与自然—人文因子多尺度空间关联分析[J]. *地理研究*, 2015, **34**(3): 567-577.
- Xu Z Y, Hu Y F, Zhen L, *et al.* Wavelet-based multi-scale analysis of NDVI and background factors in Zhejiang province [J]. *Geographical Research*, 2015, **34**(3): 567-577.
- [27] Xia N, Du E Z, Guo Z D, *et al.* The diurnal cycle of summer tropospheric ozone concentrations across Chinese cities: Spatial patterns and main drivers [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **286**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117547.
- [28] Wu S L, Mickley L J, Jacob D J, *et al.* Effects of 2000-2050 changes in climate and emissions on global tropospheric ozone and the policy-relevant background surface ozone in the United States [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**, doi: 10.1029/2007JD009639.
- [29] Reader M C, Plummer D A, Scinocca J F, *et al.* Contributions to twentieth century total column ozone change from halocarbons, tropospheric ozone precursors, and climate change [J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(23): 6276-6281.
- [30] Vrieze S I. Model selection and psychological theory: a discussion of the differences between the Akaike Information Criterion (AIC) and the Bayesian Information Criterion (BIC) [J]. *Psychological Methods*, 2012, **17**(2): 228-243.
- [31] 省委, 省政府. 山东省加强污染源防治推进“四减四增”三年行动方案(2018-2020年)[EB/OL]. http://sthj.shandong.gov.cn/dtxx/hbyw/201808/t20180803_1439597.html, 2018-08-03.
- [32] 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 等. 天津市冬季空气湿度对 PM_{2.5} 和能见度的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(11): 5143-5151.
- Ding J, Tang Y X, Hao T Y, *et al.* Impact of air humidity on PM_{2.5} mass concentration and visibility during winter in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(11): 5143-5151.
- [33] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 等. 冬季 PM_{2.5} 的气象影响因素解析[J]. *生态学报*, 2016, **36**(24): 7897-7907.
- Zhang S P, Han L J, Zhou W Q, *et al.* Relationships between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological factors in winter at typical Chinese cities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(24): 7897-7907.
- [34] 刘彩霞, 边玮璿. 天津市空气质量与气象因子相关分析[J]. *中国环境监测*, 2007, **23**(5): 63-65, 70.
- Liu C X, Bian W L. The correlation of air quality and meteorologic factors in Tianjin [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2007, **23**(5): 63-65, 70.

CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM _{2.5} Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM _{2.5} Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China	 HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} During COVID-19 Control in Suzhou	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM _{2.5} Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM _{2.5} in Baoding City in Winter	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM _{2.5} in Jiangbei New Area, Nanjing	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transportation and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM _{2.5} -O ₃ Compound Pollution in Tianjin	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River	 WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia	 ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area	 ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-jen, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water	 CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City	 WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years	 GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China	 TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland	 SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau	 WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China	 LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province	 ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey (<i>Rhinopithecus roxellana</i>) Habitat in Shennongjia Mountains	 YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation	 XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)