

目 次

基于时间序列分解的京津冀区域PM _{2.5} 和O ₃ 空间分布特征	姚青, 丁净, 杨旭, 蔡子颖, 韩素芹	(2487)
基于随机森林的北京城区臭氧敏感性分析	周红, 王鸣, 柴文轩, 赵昕	(2497)
基于随机森林模型的四川盆地臭氧污染预测	杨晓彤, 康平, 王安怡, 臧增亮, 刘浪	(2507)
海口市臭氧浓度统计预报模型的构建与效果评估	符传博, 林建兴, 唐家翔, 丹利	(2516)
京津冀地区2015~2020年臭氧浓度时空分布特征及其健康效益评估	高冉, 李琴, 车飞, 张艳平, 祖永刚, 刘芬	(2525)
2022年北京市城区PM _{2.5} 水溶性离子含量及其变化特征	陈圆圆, 崔迪, 赵泽熙, 常森, 景宽, 沈秀娥, 刘保献	(2537)
郑州市冬春季PM _{2.5} 中金属元素污染特征、来源及健康风险评估	陶杰, 闫慧姣, 徐艺斐, 荆海涛	(2548)
淄博市供暖前后PM _{2.5} 中多环芳烃及其衍生物污染特征、来源及健康风险	孙港立, 吴丽萍, 徐勃, 高玉宗, 赵雪艳, 姬亚芹, 杨文	(2558)
西安市采暖季过渡期高时间分辨率细颗粒物组分特征及来源解析	李萌津, 张勇, 张倩, 田杰, 李丽, 刘卉昆, 冉伟康, 王启元	(2571)
天津冬季两个典型污染过程高浓度无机气溶胶成因及来源分析	卢苗苗, 韩素芹, 刘可欣, 唐晓, 孔磊, 丁净, 樊文雁, 王自发	(2581)
基于空间尺度效应的山东省PM _{2.5} 浓度时空变化及空间分异地理探测	徐勇, 韦梦新, 邹滨, 郭振东, 李沈鑫	(2596)
我国典型化工行业VOCs排放特征及其对臭氧生成潜势	武婷, 崔焱文, 肖威德, 翟增秀, 韩萌	(2613)
廊坊秋季大气污染过程中VOCs二次气溶胶生成潜势及来源分析	张敬巧, 刘铮, 丁文文, 朱瑶, 曹婷, 凌德印, 王淑兰, 王宏亮	(2622)
景观格局对河流水质影响的尺度效应 Meta 分析	王玉仓, 杜晶晶, 张禹, 吴昊, 胡敏敏, 陈丁江	(2631)
白洋淀夏季汛期入淀河流水体溶解性有机物的光谱特征及来源	孟佳靖, 宴红, 陈哲, 周石磊, 底怡玲, 武辰彬, 王晨光, 张家丰, 崔建升	(2640)
北京市丰台区永定河以东浅层地下水水化学演变规律及成因分析	胡昱欣, 周瑞静, 宋炜, 杨全合, 王鑫茹	(2651)
庐庐断裂带(安徽段)浅层地下水水化学特征、控制因素及水质评价	刘海, 魏伟, 宋阳, 徐洁, 管政亭, 黄健敏, 赵国红	(2665)
农药施用对兴凯湖水中农药残留的影响及其风险评价	王蔚青, 徐雄, 刘权震, 林利华, 吕婧, 王东红	(2678)
黄河兰州段河岸带土壤中微生物与耐药基因的赋存特征	韦程宸, 魏枫沂, 夏慧, 黄魁	(2686)
基于多源数据的巢湖蓝藻水华时空分布及驱动因素分析	金晓龙, 邓学良, 戴睿, 徐倩倩, 吴月, 范裕祥	(2694)
再生水构建水环境中沉水植物附着细菌群落特征	贺赞, 李雪梅, 李宏权, 魏琳琳, 姜春晖, 姜大伟, 李魁晚	(2707)
水位波动和植被恢复对三峡水库消落带土壤原核微生物群落结构的交互影响	梅渝, 黄平, 王鹏, 朱凯	(2715)
银川市典型湖泊沉积物细菌群落结构及其对重金属的响应关系	蒙俊杰, 刘双羽, 邱小琼, 周娟娟	(2727)
热水解时间对污泥厌氧消化系统微生物群落结构影响分析	张含, 张涵, 王佳伟, 高金华, 文洋, 李相昆, 任征然	(2741)
市政污水中吗啡来源辨析	邵雪婷, 赵悦彤, 蒋冰, 裴伟, 李彦莹, 谭冬芹, 王德高	(2748)
滦河流域生态环境动态遥感评价	李艳翠, 袁金国, 刘博涵, 郭豪	(2757)
黄河流域生态系统服务价值时空演化及影响因素	王奕洪, 孙学堂	(2767)
基于贝叶斯网络的生态系统服务权衡协同关系强度及其空间格局优化:以汾河流域为例	蔡进, 危小建, 江平, 梁玉琦	(2780)
贵州高原典型喀斯特县域生境质量时空演变及定量归因	李月, 冯霞, 吴路华, 罗光杰, 罗红芬	(2793)
2000~2021年黄土高原生态分区NEP时空变化及其驱动因子	周怡婷, 严俊霞, 刘菊, 王瑛	(2806)
基于SSP-RCP情景的黄土高原土地变化模拟及草原碳储量	崔伟, 董燕, 张露尹, 王荣臻	(2817)
京津冀城市群建设用地扩张多情景模拟及其对生态系统碳储量的影响	武爱彬, 陈辅国, 赵艳霞, 秦彦杰, 刘欣, 郭小平	(2828)
西南岩溶区土地利用变化对团聚体稳定性及其有机碳的影响	江可, 贾亚男, 杨琰, 陈坚淇, 禹朴家	(2840)
不同土地利用方式下土壤有机质分子组成变化的整合分析	黄世威, 赵一锴, 朱馨雨, 刘贺雷, 刘姣姣, 陈稍, 陈佳永, 张阿凤	(2848)
基于改进麻雀搜索算法优化BP神经网络的土壤有机质空间分布预测	胡志瑞, 赵万伏, 宋根先, 王芳, 林妍敏	(2859)
不同有机物料施用对菜地磷累积和转化的影响	孙凯, 崔玉涛, 李顺晋, 魏冰丽, 王媛, 杨宏博, 王孝忠, 张伟	(2871)
集约化柑橘种植抑制土壤磷循环微生物活性	周连吴, 曾全超, 梅唐英泽, 汪明霞, 谭文峰	(2881)
控释掺混肥对麦玉米轮作体系作物产量和温室气体排放的影响	高玮, 王学霞, 谢建治, 陈延华, 倪小会, 王甲辰, 董艳芳, 李子双, 曹兵	(2891)
生物炭对黄绵土中NO ₃ -N运移过程影响及模拟	白一茹, 刘旭, 张钰涵, 张睿媛, 马艳, 王幼奇	(2905)
中国农田土壤重金属污染分析与评价	杨雳, 白宗旭, 薄文浩, 林静, 杨俱佳, 陈涛	(2913)
城市土壤和地表灰尘重金属污染研究进展与展望	王晓雨, 刘恩峰, 杨祥梦, 王碧莲, 林锦阔, 颜梦霞, 毕世杰	(2926)
场地重金属污染土壤固化及MICP技术研究进展	陈玥如, 高文艳, 陈虹任, 薛生国, 吴川	(2939)
黄河流域山东段近河道煤矿区土壤重金属污染特征及源解析	戴文婷, 张晖, 吴霞, 钟鸣, 段桂兰, 董霁红, 张培培, 樊洪明	(2952)
拒马河流域河流沉积物与土壤重金属含量及风险评价	韩双宝, 袁磊, 张秋霞, 郑焰, 李甫成	(2962)
银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评估及来源解析	于路加, 马海军, 王翠平	(2971)
基于源导向和蒙特卡罗模型的广东省某城市土壤重金属健康风险评估	陈莲, 邹子航, 张培珍, 王雨茜, 王振江, 林森, 唐翠明, 罗国庆, 钟建武, 李智毅, 王圆	(2983)
西南典型碳酸盐岩高地背景区农田重金属化学形态、影响因素及回归模型	唐瑞玲, 徐进力, 刘彬, 杜雪苗, 顾雪, 于林松, 毕婧	(2995)
贵州省水田土壤-水稻Hg含量特征与安全种植区划	韦美溜, 周浪, 黄燕玲, 庞瑞, 王佛鹏, 宋波	(3005)
柠檬酸辅助甜高粱对南方典型母质土壤的镉修复效应	刘梦宇, 罗绪锋, 辜娇峰, 易轩韬, 周航, 曾鹏, 廖柏寒	(3016)
改性酒糟生物炭对紫色土壤镉形态及水稻吸收镉的影响	肖乃川, 王子芳, 杨文娜, 谢永红, 代文才, 高明	(3027)
生物炭对四环素和铜复合污染土壤生菜生长及污染物累积的影响	郑晨格, 裴欢欢, 张亚珊, 李嘉欣, 刘奋武, 乔星星, 秦俊梅	(3037)
基于Meta分析的蚯蚓堆肥对堆肥质量和重金属的影响效应	姜继韶, 侯睿, 崔慧林, 闫广轩, 刘栋	(3047)
微塑料对土壤N ₂ O排放及氮素转化的影响研究进展	刘一戈, 杨安琪, 陈舒欣, 牛英奕, 卢瑛, 李博	(3059)
土地利用对洱海罗时江小流域土壤微塑料污染的影响	戴柳云, 侯磊, 王化, 符立松, 王艳霞, 李晓琳, 王万宾, 梁启斌	(3069)
养殖海湾淤泥质海岸沉积物微塑料污染特征	宋可心, 贺金成, 李昌文, 解思琦, 刘宝堃, 黄伟, 冯志华	(3078)
聚乙烷微塑料对盐渍化土壤微生物群落的影响	李志超, 李哲, 李嘉晨, 屈忠义, 杨文煊, 李卫平	(3088)
鄱阳湖候鸟栖息地微塑料表面细菌群落结构特征与生态风险预测	俞锦丽, 赵俊凯, 罗思琦, 朱颖婷, 张文慧, 胡启武, 刘淑丽	(3098)
粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径	徐艺诺, 翁大维, 王硕, 胡喜生, 王占永, 张园园, 张兰怡	(3107)
电动重卡替代柴油重卡的全生命周期碳减排效益分析	徐圆圆, 龚德鸿, 黄正光, 杨浪	(3119)

基于空间尺度效应的山东省PM_{2.5}浓度时空变化及空间分异地理探测

徐勇^{1,2}, 韦梦新², 邹滨^{1*}, 郭振东², 李沈鑫¹

(1. 中南大学地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 2. 桂林理工大学测绘地理信息学院, 桂林 541006)

摘要: 基于PM_{2.5}遥感数据, 采用Theil-Sen Median趋势分析和Mann-Kendall显著性检验, 分析2000~2021年山东省PM_{2.5}浓度时空变化特征, 结合地理探测器, 在省-市-县三级空间尺度上探测影响山东省PM_{2.5}浓度空间分异的影响因子影响力。结果表明: ①时间上, 2000~2021年山东省 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值在38.15~88.63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 略微高于《环境空气质量标准》中可吸入颗粒物的二级标准限值(35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。在年际尺度上, 2013年是 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的峰值年, 其值为83.36 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 据此将山东省PM_{2.5}浓度变化趋势分为两个阶段: 持续上升和快速下降阶段。在季节尺度上, PM_{2.5}浓度呈现“夏低冬高, 春秋居中”分布特征和先降后升的“U”型变化规律。②空间上, 山东省PM_{2.5}浓度呈现出“西高东低”的空间分布格局, PM_{2.5}浓度高值区分布山东省西部地区, 低值区则分布在东部半岛地区。PM_{2.5}浓度空间变化趋势呈现显著的空间异质性, 极显著下降的区域主要分布在东部半岛地区。③因子探测结果表明, 气候因子是影响山东省PM_{2.5}浓度空间分异的重要影响因素, 平均气温对山东省PM_{2.5}浓度空间分异的影响最高, q 值为0.512。省-市-县多尺度探测结果显示, 影响PM_{2.5}浓度空间分异的影响因子及其影响力在不同空间尺度上具有差异性。省级尺度上, 平均气温、日照时数和坡度是影响PM_{2.5}浓度空间分异的主要影响因素; 市级尺度上, 降水、高程和相对湿度是影响PM_{2.5}空间分异的主要影响因素; 县级尺度上, 降水、平均气温和日照时数是影响PM_{2.5}浓度空间分异的主要影响因素。

关键词: 山东省; PM_{2.5}浓度; 多尺度; 时空变化; 地理探测器; 影响因素

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)05-2596-17 DOI: 10.13227/j.hjxx.202306066

Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM_{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect

XU Yong^{1,2}, WEI Meng-xin², ZOU Bin^{1*}, GUO Zhen-dong², LI Shen-xin¹

(1. School of Geosciences and Info-physic, Central South University, Changsha 410083, China; 2. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: PM_{2.5} remote sensing data was applied in this study, and Theil-Sen Median trend analysis and the Mann-Kendall significance test were utilized to analyze the temporal and spatial variation in PM_{2.5} in the Shandong Province from 2000 to 2021. The influencing power of the influencing factors on the spatial differentiation of PM_{2.5} concentration in the Shandong Province was detected at the provincial-city-county levels based on Geo-detector data. The results showed that: ① on the temporal scale, the mean $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in the Shandong Province ranged from 38.15 to 88.63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ from 2000 to 2021, which was slightly higher than the secondary limit of inhalable particulate matter (35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) in the Ambient Air Quality Standards. On the interannual scale, 2013 was the peak year for the variation in $\rho(\text{PM}_{2.5})$ with a value of 83.36 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, according to which the trend of PM_{2.5} concentrations in the Shandong Province was divided into two phases: a continuous increase and a rapid decrease. On the seasonal scale, PM_{2.5} concentration presented the distribution characteristics of “low in summer and high in winter and moderate in spring and autumn” and the U-shaped change rule of first decreasing and then increasing. ② On the spatial scale, the PM_{2.5} concentration in the Shandong Province presented a spatial distribution pattern of “high in the west and low in the east.” The areas with high PM_{2.5} concentration were distributed in the western area of the Shandong Province, whereas the areas with low PM_{2.5} concentration were distributed in the eastern peninsula region. The spatial variation in the changing trend of PM_{2.5} concentration showed significant spatial heterogeneity, and the extremely significant decrease was mainly distributed in the eastern peninsula region. ③ The results of factor detection showed that climate factor was an important factor affecting the spatial differentiation of PM_{2.5} concentration in the Shandong Province. Mean temperature had the highest influence on the spatial differentiation of PM_{2.5} concentration in the Shandong Province, with a q value of 0.512. Provincial-city-county multi-scale detection results showed that the influencing factors affecting the spatial differentiation of PM_{2.5} concentration and their influencing power differed at different spatial scales. At the provincial scale, mean temperature, sunshine duration, and slope were the main factors affecting the spatial differentiation of PM_{2.5} concentration. At the city level, precipitation, elevation, and relative humidity were the main factors affecting the spatial differentiation of PM_{2.5}. At the county level, precipitation, mean temperature, and sunshine duration were the main factors affecting the spatial variation in PM_{2.5} concentration.

Key words: Shandong Province; PM_{2.5} concentration; multi-scale; spatial-temporal variation; Geo-detector; influencing factors

细颗粒物(particulate matter 2.5, PM_{2.5})是一种颗粒直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 可吸入肺颗粒物^[1]. PM_{2.5}深刻地影响

收稿日期: 2023-06-08; 修订日期: 2023-07-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0117100); 国家自然科学基金项目(42271440); 广西科技基地和人才专项(桂科AD21220133); 广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297160)

作者简介: 徐勇(1988~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气污染时空探测和植被生态遥感, E-mail: yongxu@glut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: 210010@csu.edu.cn

着大气环境, 其粒径小、面积大, 能够较长时间悬浮于空气中, 富集空气中的有害物质并远距离输送, 对人类的身心健康、社会经济发展和大气环境有着严重的负面影响^[2,3]. 随着城市化进程的推进, 以 PM_{2.5} 为主导的大气污染已成为中国最突出的大气环境问题之一^[4].

近年来, 对于 PM_{2.5} 浓度的相关研究已成为环境科学界的研究热点之一, 国内外学者对 PM_{2.5} 浓度时空变化特征展开了大量的研究. Li 等^[5]研究发现, 1998 ~ 2016 年期间全球 PM_{2.5} 污染在国家间的两极分化现象逐渐加剧, 污染最严重的地区主要分布在中国南部与东部、印度北部和中南半岛中部. Qi 等^[6]探讨中国不同气候带 PM_{2.5} 浓度的时空演变特征, 发现 2000 ~ 2018 年中国 PM_{2.5} 平均浓度呈现波动增长后逐渐下降的趋势, PM_{2.5} 浓度的空间分布呈现出高浓度区域逐渐增加、区域差异较大的趋势; 温带季风气候区内 PM_{2.5} 浓度高的城市数量远远大于其他气候区, 且 PM_{2.5} 高浓度城市主要集中在京津冀城市群和山东半岛城市群. 王丽丽等^[7]探究 2018 年长江经济带 PM_{2.5} 污染的时空分异特征, 发现 2018 年长江经济带 PM_{2.5} 浓度呈明显的夏低冬高和春秋居中的季节变化. PM_{2.5} 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. 姚青等^[8]研究发现, 京津冀城市群在冬季 PM_{2.5} 浓度较高, 其中, 邢台、邯郸和保定等河北中南部城市下降幅度较为显著.

同时, 学者也对影响 PM_{2.5} 浓度空间分异的影响因素进行了大量的研究与分析. Lim 等^[9]对 PM_{2.5} 浓度与人口、城市比率和植被绿色度这 3 个社会环境影响因素之间的空间关系进行了时间序列分析, 结果表明: 在印度和撒哈拉以南的非洲, 总人口的增加与 PM_{2.5} 浓度密切相关; 发达国家和发展中国家的城市比率都有所上升, 但发达国家出现了“脱钩”现象, 城市扩张持续, PM_{2.5} 浓度下降; 尽管城市扩张和人口增长会降低植被的绿色度, 但深度稳定区国家在保持绿化率的同时 PM_{2.5} 浓度降低, 而发展中国家在高风险区的植被绿色度显著下降. Jin^[10]等选取归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、降水、气温、风速和高程数据, 分析各变量对中国不同地区 PM_{2.5} 的影响, 结果显示: 在西北地区, 风速和温度对 PM_{2.5} 的影响较大; 在华北地区, 风速对 PM_{2.5} 的影响较大; 在南部地区, 气温和 NDVI 对 PM_{2.5} 的影响更大. Lu 等^[11]分析长江三角洲地区土地利用和景观格局对当地 PM_{2.5} 的影响, 发现林地和草地能够有效地减弱 PM_{2.5} 污染. Tuhteti 等^[12]评估了气象和社会经济条件对 PM_{2.5} 浓度的关联强度, 结果表明, U 型风和土地利用变化对西安市

PM_{2.5} 的影响较强; 人口密度、土地利用变化、工业 GDP 和单位 GDP 能耗与 PM_{2.5} 呈正相关, 高程则相反; 此外, 土地利用变化与其他因子的交互作用对 PM_{2.5} 浓度的影响较大, 人口密度和人口与其他因子的交互作用较小. 以上研究表明, 影响 PM_{2.5} 浓度空间分异的影响因素在时间和空间上具有显著的差异性.

山东省是我国的经济大省和人口大省, 以煤炭、石油为主的传统能源结构导致了严重的大气污染, 是我国 PM_{2.5} 污染重点防治区域之一^[13,14]. 2013 年《大气污染防治行动计划》发布和实施以来, 国家和地方层面实施了一系列大气污染防治措施, 使 PM_{2.5} 污染得到了有效控制^[15], 山东省也于 2016 年颁布了《山东省大气污染防治条例》, 但根据 2022 年中国生态环境部发布的全国生态环境质量简况来看, 全国 168 个重点城市中环境空气质量相对较差的 20 个城市, 淄博、菏泽、枣庄、聊城和滨州等均位列其中, 山东省大气污染情况依然十分严峻. 目前, 已有大量研究应用地理探测器来探测影响 PM_{2.5} 浓度空间分异的驱动机制. 地理探测器作为探测自变量与因变量之间关联程度的模型, 只能利用一个定量的值来概括某一因子对于 PM_{2.5} 浓度空间分异的影响力, 但不能获得某一因子对 PM_{2.5} 影响力的空间分布; 而在时间上, 大多数研究仅探测单年或较短时间尺度下的影响因子对 PM_{2.5} 空间分异的影响, 忽略了长时间序列下驱动机制的变化特征. 基于此, 以山东省为研究区, 采用 2000 ~ 2021 年山东省 PM_{2.5} 遥感数据, 分析山东省 PM_{2.5} 浓度的时空变化特征; 并在省-市-县三级空间尺度上基于地理探测器探测地形因子(高程、坡向、和坡度)、气候因子(平均气温、降水、日照时数和相对湿度)、植被因子(NDVI)和人文因子(路网密度、人口密度和土地利用类型)对山东省 PM_{2.5} 浓度空间分异的影响, 以期全面地分析山东省 PM_{2.5} 浓度时空变化特征, 并揭示其影响机制的时空特性, 为区域大气污染防治行动提供参考.

1 研究区概况

山东省地处我国东部环渤海地区, 为黄河中下游的出海口, 位于 34° 22.9' ~ 38° 24.01' N, 114° 47.5' ~ 122° 42.3' E 之间(图 1). 山东省地形复杂, 以山地丘陵为主, 中部山脉突起, 西部和北部是鲁西北平原区, 东部半岛缓丘起伏. 山东省气候温和, 降水集中, 雨热同季, 四季分明, 属于暖温带季风气候; 山东“山水林田湖”自然禀赋得天独厚, 是全国粮食作物和经济作物重点产区, 矿产资源储量

较丰富,资源储量在全国占有重要的地位.据山东省统计局发布的统计数据,截至2020年,山东省人口约为1.02亿,地区生产总值73 129亿元,经济实力位居全国前列,是我国的人口大省与经济大省.

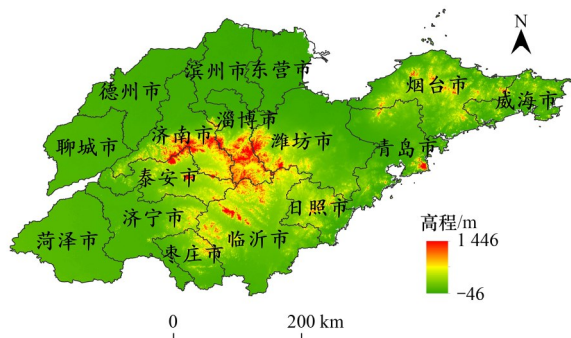


图1 研究区高程空间分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of the elevation of the study area

2 材料与方法

2.1 数据来源与预处理

2.1.1 PM_{2.5}数据

PM_{2.5}数据集(V5.GLV4)来源于中国高分辨率高质量近地空气污染物数据集中的PM_{2.5}数据集(ChinaHighPM_{2.5}),该数据集由韦晶博士和李占清教授团队开发、维护和更新,并依托于Github和Zenodo平台向全球用户免费开放,数据时序为2000~2021年,时间分辨率为每月,空间分辨率为1 km^[16,17].为得到空间分辨率为1 km的山东省PM_{2.5}数据集,需要对原始数据进行投影、重采样和裁剪等预处理.由于缺少2022年1月和2月PM_{2.5}数据,取邻近的2021年12月PM_{2.5}数据作为2021年冬季数据.按气象四季划分法划分:春季(3~5月)、夏季(6~8月)、秋季(9~11月)和冬季(12月至次年2月).

2.1.2 自然因子数据

选取的自然因子数据包括气候因子、地形因子和NDVI.气候因子来自国家气象科学数据中心,选取覆盖了中国2 416个气象站点,2000~2021年平均气温、降水、日照时数和相对湿度的逐日数据.对于缺失的数据,利用IBMSPSS软件进行数据插补,在考虑经度、纬度和高程的基础上通过ANUSPLIN插值模型生成空间分辨率为1 km的气候因子时间序列.地形因子包括高程、坡向和坡度,高程数据由中国科学院资源环境科学与数据云平台提供,空间分辨率为1 km,并经过派生提取坡度和坡向.NDVI数据集来源于美国国家航天局发布的MOD13A3产品,时间分辨率为每月,空间分辨率为1 km,时间时序为2000年2月至2021年12月.由于缺失2000年1月NDVI数据,对NDVI数据集进行了

影像镶嵌、重采样、裁剪和最大值合成等预处理,在此基础上得到2000~2021年山东省NDVI年最大值数据集.

2.1.3 人文因子数据

对于人文因子数据集,选取了路网密度、人口密度和土地利用类型作为研究对象.路网密度数据来源于Open Street Map发布的2021年道路路网数据,需要对原始数据进行核密度分析,最终得到路网密度数据.人口密度数据来源于WorldPop发布的PopulationDensity数据,时间分辨率均为每年,空间分辨率为1 km,时间时序为2000~2020年.土地利用类型数据空间分辨率为1 km,自2000年开始,每5 a为一期,由中国科学院资源环境科学与数据中心提供.

2.2 研究方法

2.2.1 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验法

Theil-Sen Median是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法,计算效率高,对于测量误差和离群数据不敏感,适用于长时间序列数据的趋势分析.利用Theil-Sen Median趋势分析法得到山东省2000~2021年PM_{2.5}浓度变化趋势,并根据Mann-Kendall显著性检验,检验其变化趋势的显著性.Theil-Sen Median计算公式为:

$$\beta_{\text{slope}} = \text{Median} \left(\frac{PM_{2.5j} - PM_{2.5i}}{j - i} \right), \quad \forall j > i \quad (1)$$

式中,PM_{2.5i}和PM_{2.5j}为第*i*年和第*j*年的PM_{2.5}浓度值,其中*i*和*j*=1,2,3,⋯,*n*;Median为取中值函数.当β_{slope}>0时,表示在整个研究时段内山东省PM_{2.5}浓度呈上升趋势,PM_{2.5}污染加重;当β_{slope}=0时,表示在整个研究时段内山东省PM_{2.5}浓度基本保持不变;当β_{slope}<0时,表示在整个研究时段内山东省PM_{2.5}浓度有明显的降低,PM_{2.5}污染减轻.

Mann-Kendall检验是一种非参数的时间序列趋势性检验方法,其不需要测量值服从正态分布,不受缺失值和异常值的影响,适用于长时间序列数据的趋势显著检验.对于给定的显著性水平α,当|Z|>Z_{1-α/2}时,表明山东省PM_{2.5}在整个研究过程中发生了显著变化,反之则为无显著趋势变化.按照Mann-Kendall显著性检验的|Z|值,可以将PM_{2.5}变化趋势分为4个等级:显著下降、不显著下降、不显著上升和显著上升.当|Z|>1.96,即置信水平低于95%时,属于显著变化,当0<|Z|≤1.96时,属于不显著变化.

2.2.2 地理探测器

地理探测器是量化和探测地理现象的空间分异性以及揭示其背后影响因子的一种新的统计学方法. 地理探测器 q 统计量, 可用以度量空间分异性、探测解释因子、分析变量之间交互关系, 已经在自然和社会科学多领域应用^[18]. 使用分异及因子探测模块分析山东省 PM_{2.5} 空间分异的影响因子.

分异及因子探测可用来探测因变量 Y 的空间层次分异性; 以及探测某因子 X 多大程度上解释了因变量的空间分异, 它使用 q 统计量来量化某因子 X 的相对重要性, 表达式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{j=1}^L n_j \sigma_j^2}{n \sigma^2} \quad (2)$$

式中, q 为因子对 PM_{2.5} 空间分异的影响力, 范围为 $[0, 1]$, q 值越大则该因子对 PM_{2.5} 空间分异的影响越大, 因子解释能力越强, $q = 0$ 表示 X 和 Y 之间没有关联, $q = 1$ 表示 X 和 Y 完全相关. $j(1, 2, \dots, L)$ 为探测因子 X 的子区域数; L 为变量的分层; n_j 和 n 分别为区域 j 样本和总样本数; σ_j^2 和 σ^2 分别为区域 j 的方差和总区域的方差.

共选取地形因子(高程、坡向和坡度)、气候因子(平均气温、降水、日照时数和相对湿度)、植被因子(NDVI)和人文因子(路网密度、人口密度和土地利用类型), 共计 11 种影响因子. 时间上选择 2000、2010、2021 年数据及 2000 ~ 2021 全年平均数据, 空间上选择山东省省级、市级和县级为研究单位, 将因子数据进行离散化处理, 利用自然间断法将因子重分类为 6 类, 再利用地理探测器探测山东省 PM_{2.5} 浓度空间分异的影响因子, 从自然与社会两方面来探讨影响山东省 PM_{2.5} 浓度空间分异的影响因子. 由于路网密度只有 2021 年数据, 故 2000 和 2010 年数据用 2021 年数据代替, 而 2021 年人口密度和土地利用数据则用与之对应的 2020 年数据代替.

3 结果与分析

3.1 PM_{2.5} 浓度时间变化特征

3.1.1 PM_{2.5} 浓度年际变化特征

2000 ~ 2021 年山东省 PM_{2.5} 浓度变化斜率为 $-0.69 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$, 整体上 PM_{2.5} 浓度呈现波动下降态势, 2000 ~ 2021 年山东省 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值为 $65.26 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 超过《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 中二级浓度限值 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, PM_{2.5} 污染较为严重. 由图 2 可知, 2013 年是山东省 PM_{2.5} 浓度均值的峰值年, 据此将 2000 ~ 2021 年山东省 PM_{2.5} 浓度总体变化趋势分为 2 个阶段. ①持续上升阶段: 2000 ~

2013 年山东省 PM_{2.5} 浓度处于持续上升状态, 且该阶段前期 2000 ~ 2006 年, PM_{2.5} 浓度呈现极显著地上升态势, 这是由于该时段是中国工业化和城市化发展最快速度最快的时期之一, 粗放式经济发展模式导致空气质量持续恶化, PM_{2.5} 污染进一步加剧^[19]; 该阶段后期 2006 ~ 2012 年, PM_{2.5} 浓度处于波动上升状态, 该时段国家实施节能减排综合性工作方案, 国家生态文明建设、生态补偿、污染调查和环保政策的落实、产业结构调整 and 能效提高^[20], 一定程度上抑制了污染物和细颗粒物的排放. ②快速下降阶段: 2013 ~ 2021 年山东省 PM_{2.5} 浓度呈现快速下降趋势, 可能是因为 2013 年国务院发布《大气污染防治行动计划》, 出台的加大污染物综合治理力度、调整优化产业结构和健全相应法律法规体系等十条措施, 使全国主要大气污染物排放量明显下降; 另外, 2013 年山东省政府印发实施了《山东省 2013 ~ 2020 年大气污染防治规划》, 2016 年颁布了《山东省大气污染防治条例》等, 引导污染企业调整结构、积极构建大气污染联防联控机制与推进扬尘污染治理等措施, 极大促进了山东省大气环境的改善.

2000 ~ 2021 年山东省各城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值均超过《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 二级浓度限值 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 由图 2 可知, 各城市 PM_{2.5} 浓度变化均呈现下降趋势, PM_{2.5} 污染状况有明显的改善; 其中, PM_{2.5} 浓度下降最快的 3 个城市为聊城、德州和菏泽市, 变化斜率分别为: -0.99 、 -0.98 和 $-0.88 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$. 参考 GB 3095-2012《环境空气质量标准》, 将 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 范围划分为以下 6 个区间: 优 ($0 \sim 15 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)、良 ($15 \sim 35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)、轻度污染 ($35 \sim 55 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)、中度污染 ($55 \sim 75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)、重度污染 ($75 \sim 95 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 和严重污染 ($> 95 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). 2000 ~ 2021 年, 聊城、菏泽和德州市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值均超过 $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 属于重度污染, 空气污染严重; 烟台、威海和青岛市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值小于 $55 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 属于轻度污染状态, 空气质量相对较好; 其余城市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值在 $55 \sim 75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 范围之内, 属于中度污染. 统计区间内山东省各城市 PM_{2.5} 污染情况数目占比见图 3, 将统计结果进一步分析: 2000 ~ 2021 年, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值低于 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ (二级浓度限值) 的城市数量占比由 2000 年的 0 个增加至 2021 年的 3 个, 占 18.8%; PM_{2.5} 中度污染的城市数量占比由 50% 降至 0; PM_{2.5} 轻度污染转变为良, 中度污染向轻度污染转变, 重度污染向中度污染转变, 总体上城市 PM_{2.5} 污染状况明显改善.

综上, 截至 2021 年, 山东省 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 为 $40.84 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 超过国家二级标准 $35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 但 2000 ~

2021年山东省PM_{2.5}浓度整体上呈现波动下降趋势, 空气质量有所改善. 根据山东省PM_{2.5}浓度均值峰值年2013年, PM_{2.5}浓度总体变化趋势分为2个阶段: 持续

上升阶段和快速下降阶段. 2000~2021年, 山东省各城市PM_{2.5}浓度变化均呈现下降趋势, PM_{2.5}轻度、中度和重度污染减少, 城市PM_{2.5}污染状况明显改善.

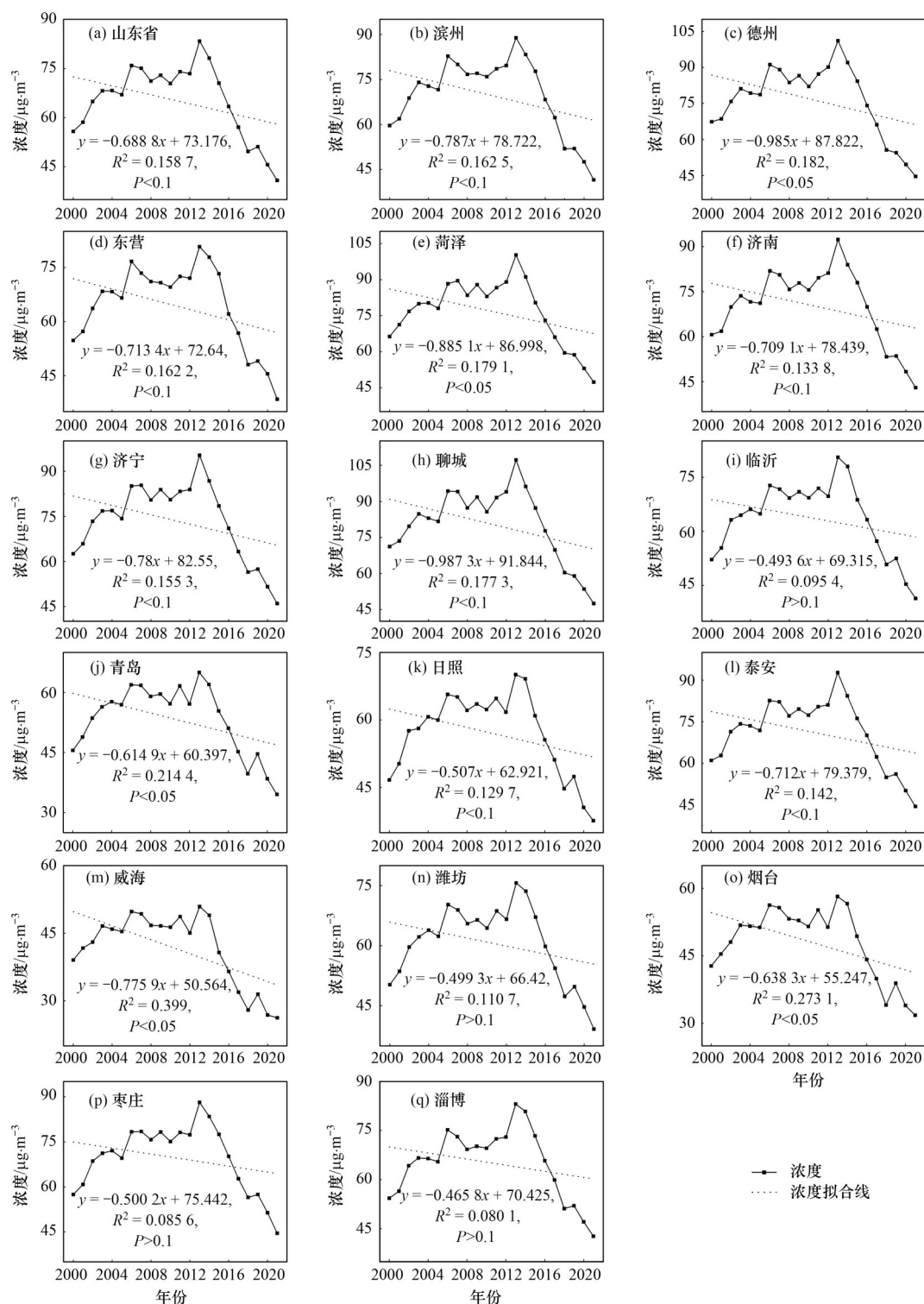


图2 2000~2021年山东省年PM_{2.5}浓度时间变化

Fig. 2 Temporal variation in annual average PM_{2.5} concentration in the Shandong Province from 2000 to 2021

3.1.2 PM_{2.5}浓度季节变化特征

山东省2000~2021年春季、夏季、秋季和冬季ρ(PM_{2.5})均值分别为60.48、46.89、62.38和91.16 μg·m⁻³, 如图4所示, PM_{2.5}浓度呈现“夏低冬高,

春秋居中”的季节分布特征和先降后升的“U”型时间变化规律. 整体上看, 各季节PM_{2.5}浓度均呈现下降趋势, 其中, 秋季PM_{2.5}浓度变化斜率为-0.94 μg·(m³·a)⁻¹, PM_{2.5}浓度下降最快; 冬季PM_{2.5}变化斜

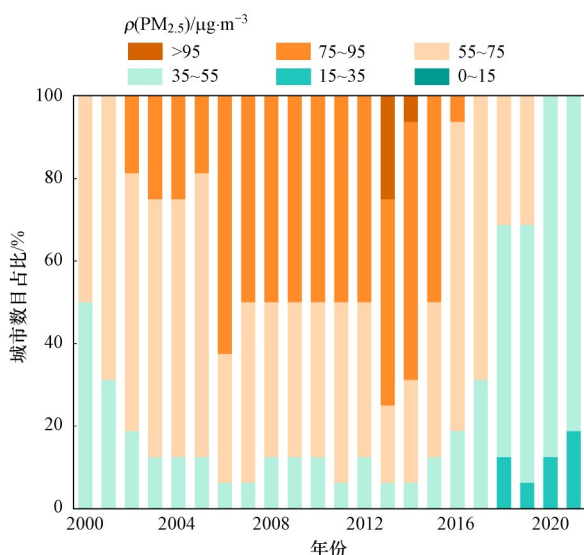


图3 2000~2021年山东省PM_{2.5}浓度区间城市数目占比

Fig. 3 Proportion of the number of cities in the PM_{2.5} concentration range in the Shandong Province from 2000 to 2021

率为 $-0.70 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$ ，下降最慢。与山东省PM_{2.5}浓度季节变化相似，山东省各城市PM_{2.5}浓度季节变化也显著呈现“夏低冬高，春秋居中”特征。各城市2000~2021年冬季PM_{2.5}污染严重，除威海与烟台属于中度污染外，其余城市均属于PM_{2.5}重度污染与严重污染状态；各城市2000~2021年夏季PM_{2.5}浓度处于较低水平，绝大部分城市属于PM_{2.5}轻度污染状态。2000~2021年各城市各季节的PM_{2.5}浓度均呈现下降趋势，其中，春季PM_{2.5}浓度下降最显著的城市为德州，变化斜率分别为 $-0.91 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$ ，下降最慢的城市为淄博，变化斜率为 $-0.46 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$ ；夏季PM_{2.5}浓度下降最快的城市为聊城，变化斜率为 $-1.31 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$ ；秋季，聊城PM_{2.5}浓度变化斜率为 $-1.30 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$ ，下降最显著；冬季PM_{2.5}浓度下降最快的城市为德州和聊城，变化斜率均为 $-1.11 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$ ，而枣庄变化斜率为 $-0.29 \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{a})^{-1}$ ，下降最慢。冬季为采暖期大量使用煤炭，大量燃放烟花爆竹，烟尘、细颗粒物排放过多，造成了PM_{2.5}的短期增长^[21]；且气温降低，静稳天气频发，容易形成较强的逆温层，不利于PM_{2.5}的扩散和稀释，易造成细颗粒物在近地面层积聚^[22,23]，这一系列原因致使冬季PM_{2.5}浓度高于其他季节。夏季PM_{2.5}浓度低，原因可能是太阳辐射强，边界层较高，受季风气候影响降水增多，良好的大气扩散条件与降水过程的协同作用使PM_{2.5}的去除效果更明显^[24,25]。

3.2 PM_{2.5}浓度空间变化特征

由图5可知，山东省年、春季、夏季、秋季和冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值范围分别为38.15~88.63、41.52~88.09、26.89~88、32.67~86.14和47.79~122.05

$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在空间分布上，年和各季节PM_{2.5}浓度均由沿海至内陆逐步升高，呈现出“西高东低”的空间分布格局。年和各季节PM_{2.5}浓度变化趋势均呈现显著的空间异质性，PM_{2.5}浓度呈极显著下降的区域主要是东部半岛地区，其中，秋季PM_{2.5}浓度呈现极显著下降的面积占比最大，年PM_{2.5}浓度呈极显著下降的面积占比最小。山东省年与各季节PM_{2.5}浓度聚集模式显著，PM_{2.5}浓度高值区主要分布在山东省西部地区，西北部尤甚，如聊城、菏泽和德州市PM_{2.5}污染严重；该地区位于山东省内陆地区，降水较少，对PM_{2.5}的稀释沉降作用弱，邻近京津冀和河南省等PM_{2.5}污染严重地区，空气污染物的区域输送，加剧该地区的空气污染，且在冬季盛行的北风和西北风影响下，该现象更显著^[26, 27]。PM_{2.5}浓度低值区为东部半岛，如烟台和威海PM_{2.5}浓度较低，空气质量较好；该地区邻近黄渤海，降水丰富，对PM_{2.5}污染有较强的沉降作用^[28, 29]，且东部地区地势平缓，受海陆风影响气体流动较快，高风速有助于通过促进PM_{2.5}的扩散来缓解PM_{2.5}污染^[30, 31]。综上所述，整体上，山东省年与各季节PM_{2.5}浓度均呈现“西高东低”的空间分布格局；PM_{2.5}浓度均值呈现极显著下降的区域主要是东部半岛地区，秋季PM_{2.5}浓度均值呈极显著下降的面积占比最大，主要分布在威海、烟台和青岛等市。山东省年与季节PM_{2.5}浓度聚集模式显著，PM_{2.5}浓度高值区主要分布在山东省西部地区，低值区则为东部半岛地区。

3.3 PM_{2.5}浓度影响因子多时空尺度探测

3.3.1 基于省级尺度的影响因子地理探测

省级尺度因子探测结果如图6所示，2000~2021年，影响山东省PM_{2.5}浓度空间分异的影响因子具有明显的规律性，表现为气候因子对PM_{2.5}的影响显著大于其他因子。具体为：气候因子(0.027~0.512)>地形因子(0.005~0.234)>植被因子(0.093)>人文因子(0.010~0.064)，其中，影响力均值排前3的因子分别为：平均气温(0.512)、日照时数(0.289)和坡度(0.234)。平均气温对山东省PM_{2.5}浓度空间分异的影响最为显著，且2000~2021年其影响力呈现上升趋势。山东省工业发达，其中，重化工业占有重要地位，工业生产时大量工业排放导致近地面大气温度升高以及PM_{2.5}等大气污染物浓度显著增加，温度进一步影响PM_{2.5}的形成和大气中复杂的化学物理反应，加剧PM_{2.5}形成，工业污染和局部温度升高同时产生，使得气温与PM_{2.5}浓度的空间分异十分相似^[32~34]；从季节角度出发，冬季采暖期间燃煤量大幅增加，使PM_{2.5}浓度急剧上升，冬季气温降低，易出现静风和逆温现象，导致颗粒污染频发；而夏季气温高，大

气对流活动加强,对大气污染物具有较好的扩散作用^[35,36],这些可能是气温显著影响山东省PM_{2.5}浓度空间分异现象的原因.日照时数因子影响力仅次于平均气温,有研究表明^[37,38],日照时数与PM_{2.5}之间可能是互为因果的关系,一方面,日照有助于加速细颗粒的运动速度,促进污染物的扩散,从而减少PM_{2.5}污

染;另一方面,PM_{2.5}浓度增加,也将导致能见度降低,从而减少日照时数.坡度因子对山东省PM_{2.5}浓度空间分异也有较大影响,山东省地形以山地丘陵为主,因为人口主要集中在地势低平的平原地区^[39],地形起伏度在一定程度上能反映人口与人类活动分布的情况,地形起伏度大的地区相较于地形平缓地

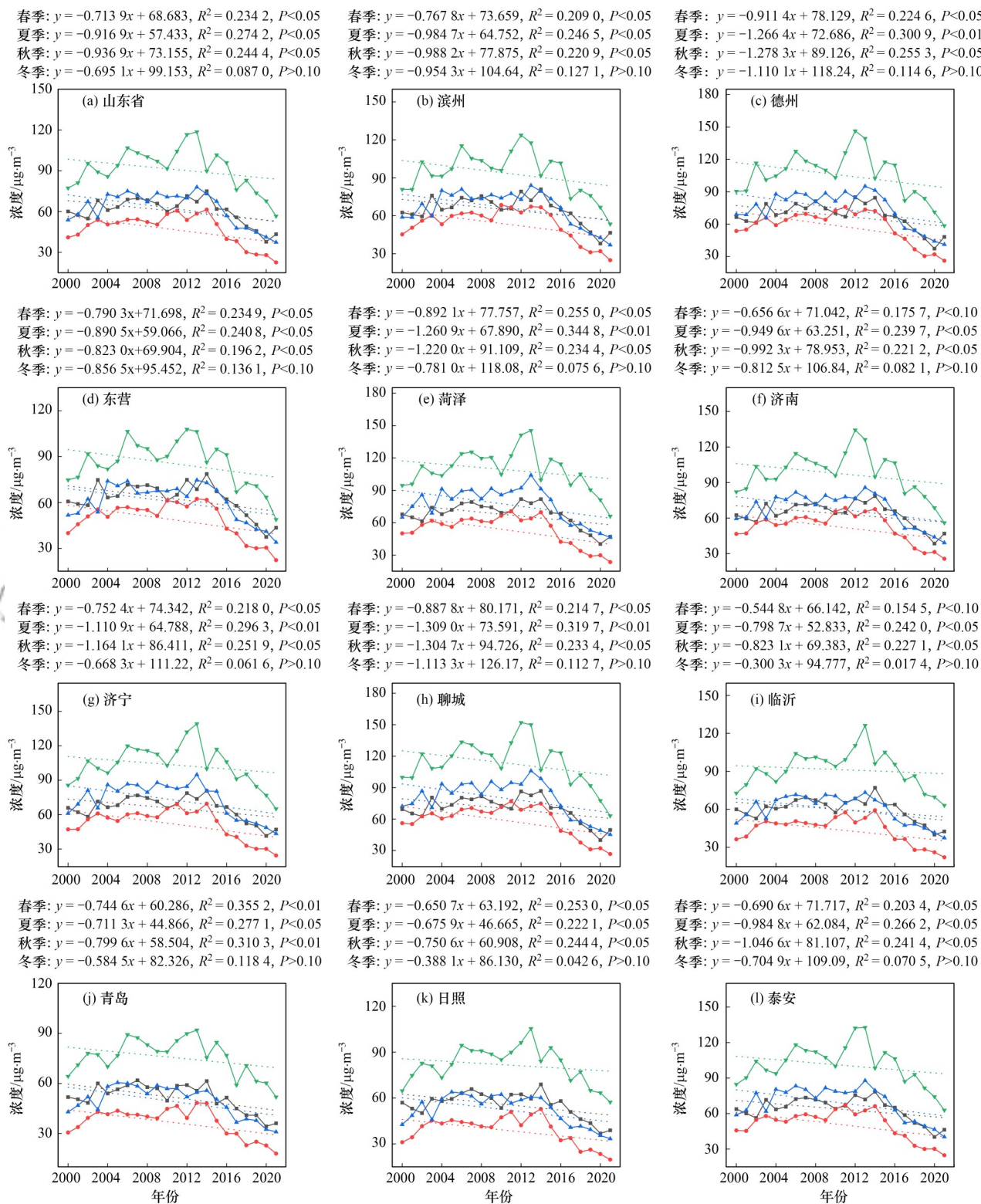
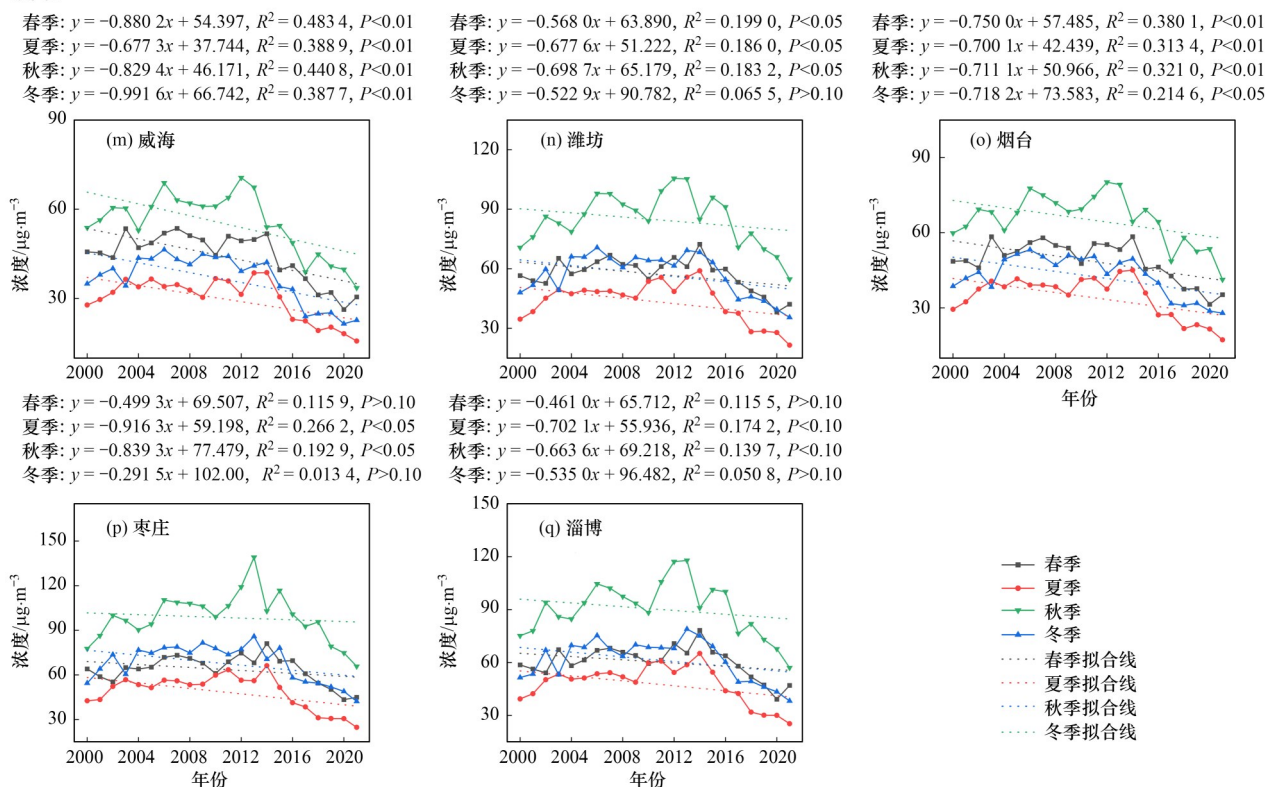


图4 2000~2021年山东省季节PM_{2.5}浓度时间变化

Fig. 4 Temporal variation in seasonal PM_{2.5} concentration in the Shandong Province from 2000 to 2021

续图4



区人口少、人类活动与工业生产活动也较少, PM_{2.5} 细颗粒物等大气污染物浓度也较低。

3.3.2 基于市级尺度的影响因子地理探测

如图 7 所示, 2000 ~ 2021 年山东省市级因子探测影响力均值排前 3 的因子分别为降水(0.549)、高程(0.387)和相对湿度(0.347), 丰富的降水对 PM_{2.5} 污染有较强的清除作用^[28]; 山东省中部山脉突起, 与南部地区共同构成鲁中南山地丘陵区, 地形主要通过影响人口分布和大气水平扩散能力来间接影响 PM_{2.5} 空间分布^[40]; 已有研究表明, 相对湿度的增加有利于细气溶胶的吸湿增长, 加强气溶胶液相和非均相反应的进行, 导致气溶胶的浓度进一步增加, 加重 PM_{2.5} 污染^[41]。

如图 8 ~ 11 所示, 主要对 2000 ~ 2021 年山东省市级因子探测影响力均值排前 3 的影响因子空间分布格局进行分析。2000 年, 降水因子影响力最高的城市为淄博市, 西北部的城市降水因子影响力也较高; 高程因子影响力最高的为淄博与济南市; 受相对湿度因子主导的城市则为济南与泰安市。2010 年, 位于山东省中部的泰安等市受降水因子影响最显著; 淄博、济南和泰安市的高程因子影响力较高; 相对湿度影响力较高的城市则为济宁、菏泽和日照市。2021 年, 降水因子影响力较高的城市主要为菏泽和烟台市; 高程因子影响力较高的则为德州、泰安和济宁市; 日照、聊城和菏泽市的相对湿度因子

影响力较高。2000 ~ 2021 全年, 降水因子影响力最高的城市为泰安、菏泽和淄博市; 受高程因子主导的城市为淄博与济南市; 相对湿度因子影响力最高的城市为东营市。

综上, 降水是影响山东省市级 PM_{2.5} 浓度空间分异最显著的因子, 但在研究时段内其影响力呈现下降的趋势, 而山东省中部与西部的城市受降水因子影响十分显著。高程是影响力仅次于降水的因子, 其影响力呈上升趋势, 受高程因子主导的城市主要是山东省中部与南部的城市。相对湿度因子对山东省市级 PM_{2.5} 浓度空间分异也有较强影响, 且研究时段内相对湿度因子影响力呈现上升态势, 研究时段前期受相对湿度主导的城市主要是中部的济南和泰安市, 后期受相对湿度因子主导的城市则为日照、聊城和菏泽市。

3.3.3 基于县级尺度的影响因子地理探测

2000、2010、2021 年及 2000 ~ 2021 年平均影响因子数据的 q 统计值如图 12 所示。2000 ~ 2021 全年山东省县级因子探测影响力均值排前 3 的因子分别为降水(0.447)、平均气温(0.361)和日照时数(0.355)。山东省 PM_{2.5} 县级因子探测影响力空间分布如图 13 ~ 16 所示。2000 年, 受降水因子主导的主要是山东省西北部地区, 如利津县和青州市等县域; 受平均气温因子主导的县域为西南部的嘉祥县、曹县等地; 而受日照时数因子主导的县域地区则主要

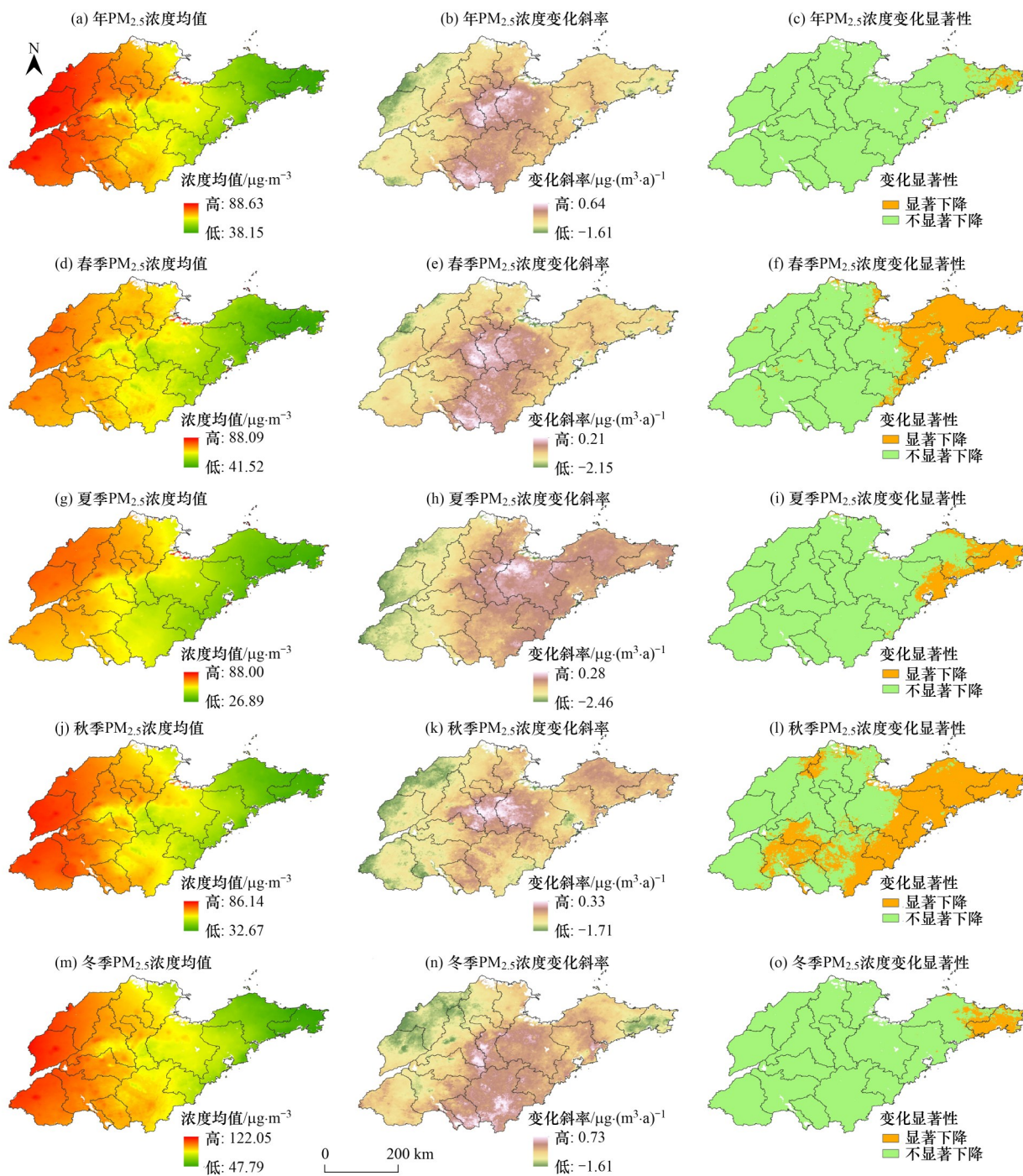


图5 2000~2021年山东省PM_{2.5}浓度均值、变化斜率与显著性检验空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of mean value, changing rate, and significance test of PM_{2.5} concentration in the Shandong Province from 2000 to 2021

是中部的青州市等地。2010年,降水因子影响力较高的县域集中分布于山东省中部与东部的县域,如泰安市市辖区、诸城市等地;平均气温因子影响力较高的县域则零散分布于山东省各地区;而日照时数因子影响力最高的是东部的平度市。2021年,降水因子影响力较高的县域主要是西部的曹县与东部的栖霞市等地;平均气温因子影响力较高的县域则是西北部的乐陵市与南部的邹城市等地;而受日照时数因子主导的县域主要是东部的五莲县和诸城市等地。2000~2021全年,受降水因子主导的县域主要是西

部的郯城县和中部的淄博市市辖区等地;受平均气温因子主导的县域是西北部的宁津县与乐陵市等地;而受日照时数因子主导的县域主要是南部的曲阜市、西北部的滨州市市辖区与东部的乳山市等地。值得关注的是,除气候因子和地形因子影响力较大外,路网密度(0.279)对山东省县域PM_{2.5}浓度空间分异也有较大影响,受路网密度因子主导的县域主要是中部的淄博市市辖区和昌乐县等地;路网密度在一定程度上能够体现出汽车排放对于PM_{2.5}的贡献强度,而汽车尾气排放是细颗粒物(PM_{2.5})排放的主要来

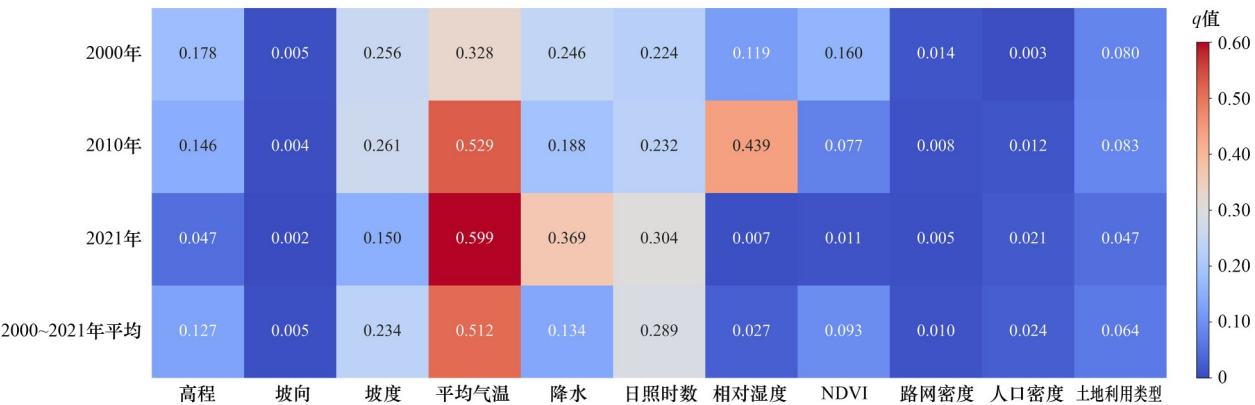


图6 山东省PM_{2.5}浓度影响因子省级尺度探测q值均值统计

Fig. 6 Statistics on the mean value of q value of provincial-level detection of PM_{2.5} concentration influencing factors in the Shandong Province

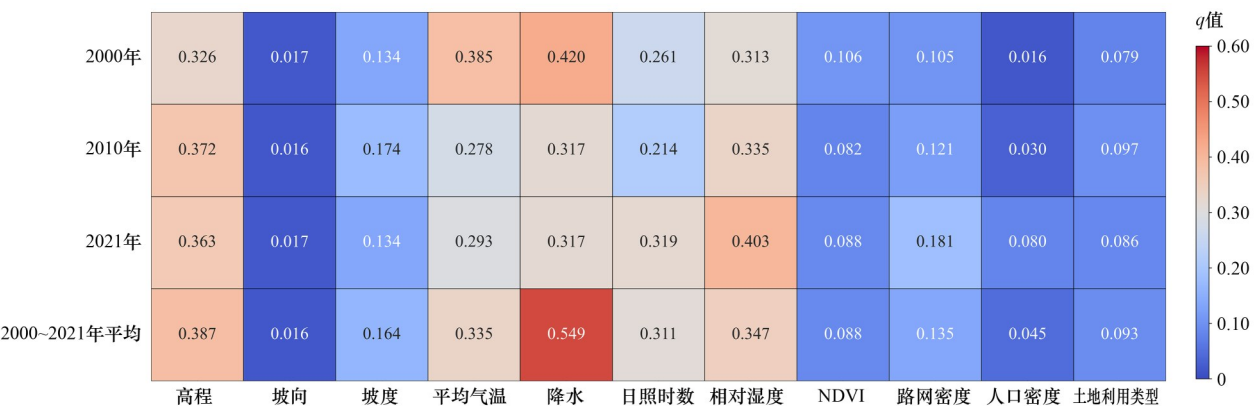


图7 山东省PM_{2.5}浓度影响因子市级尺度探测q值均值统计

Fig. 7 Statistics on the mean value of q value of city-level detection of PM_{2.5} concentration influencing factors in the Shandong Province

源^[42,43]，因此，山东省县域地区应重视交通运输尾气的进一步减排，以减少大气中的PM_{2.5}浓度。

综上，降水是影响山东省县域地区PM_{2.5}浓度空间分异的主导影响因子，但研究时段内降水对PM_{2.5}浓度的影响力呈现下降趋势，影响力较高的地区主要分布在山东省中部、西部与东部的县域地区。平均气温和日照时数影响因子对山东省县域地区PM_{2.5}浓度空间分异也具有显著影响，平均气温影响力较高的地区主要分布在山东省西部、南部的县域地区，日照时数影响力较高的地区为西北部和东部的县域地区；其中平均气温影响力呈现下降趋势，日照时数影响力则呈现上升态势。此外，路网密度因子对山东省县域地区PM_{2.5}浓度空间分异的影响也不容忽视。

整体来说，影响2000~2021年山东省PM_{2.5}浓度空间分异的影响因子表现出明显的规律性，具体表现为气候因子对PM_{2.5}的影响比地形因子、植被因子和人文因子更显著，说明气候因子是影响山东省PM_{2.5}的主导因子，PM_{2.5}浓度空间分异受气候条件影响更显著，这与已有的研究结论基本一致^[44~46]，气象条件是影响PM_{2.5}浓度的重要因素，良好的气象条件对降低PM_{2.5}浓度具有积极作用。从

省-市-县三级空间尺度探测影响山东省PM_{2.5}浓度空间分异的影响因子，结果显示，不同尺度下探测影响PM_{2.5}空间分异的影响因子，其影响力空间分布格局具有明显的差异性：平均气温、日照时数和坡度因子是影响山东省PM_{2.5}空间分异的主要影响因子；降水、高程和相对湿度因子是影响山东省市级PM_{2.5}空间分异的主要影响因子；降水、平均气温和日照时数因子是影响山东省县级PM_{2.5}浓度空间分异的主要影响因子。这是由于不同空间尺度下，城市的地理位置、城市化进程、产业布局 and 气候等具有差异性，自然条件和社会经济条件空间分布的不一致性给区域内城市带来独特的影响，从而导致不同空间尺度下研究城市PM_{2.5}污染程度和PM_{2.5}污染主导影响因素存在差异^[47,48]。因此，在面对全省PM_{2.5}污染治理的严峻挑战，从省-市-县这3个尺度出发，科学识别影响PM_{2.5}浓度空间分异的影响因素，根据地区的差异有针对性地制定PM_{2.5}污染治理策略十分必要。

4 山东省PM_{2.5}防治策略和建议

2021年，山东省ρ(PM_{2.5})均值为40.84 μg·m⁻³，

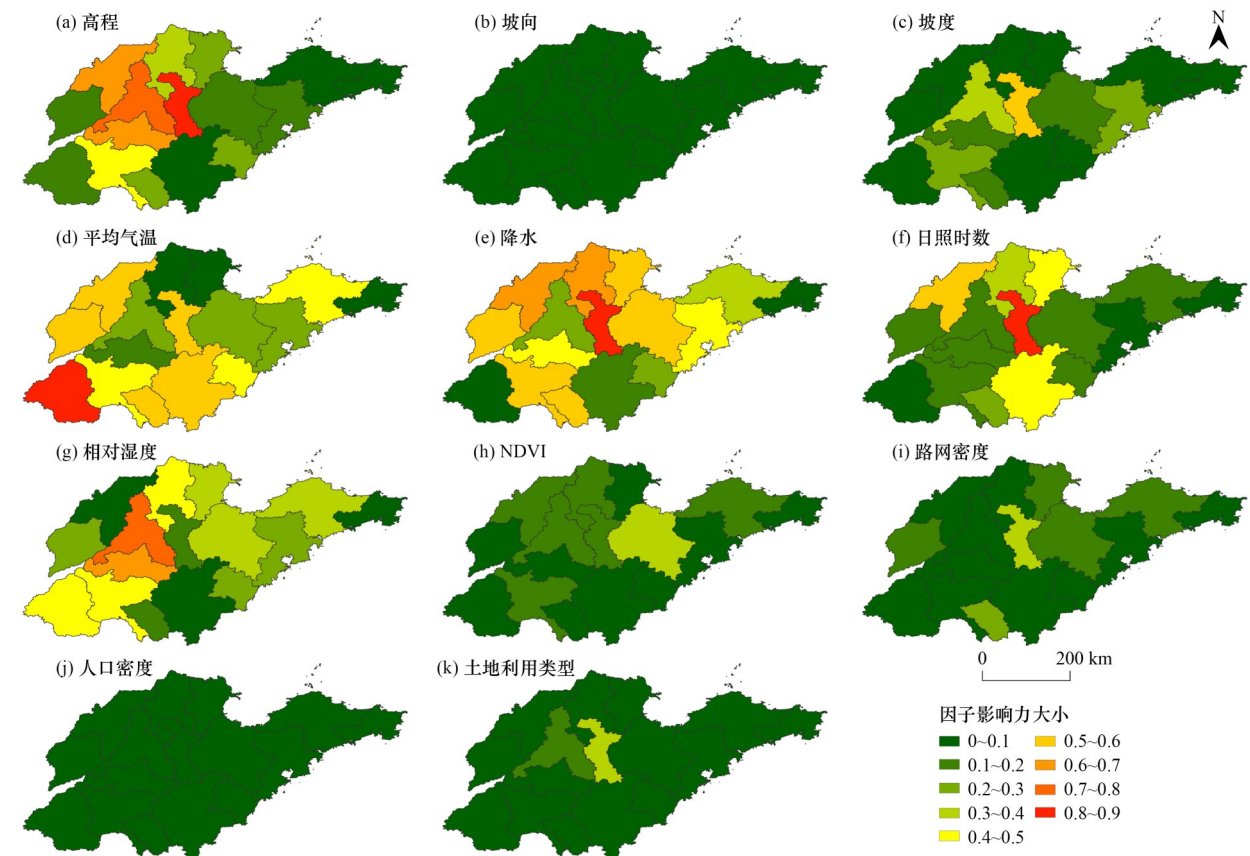


图 8 2000 年山东省 $PM_{2.5}$ 浓度市级尺度影响因子影响力空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of influencing factors of $PM_{2.5}$ concentration at city level in the Shandong Province in 2000

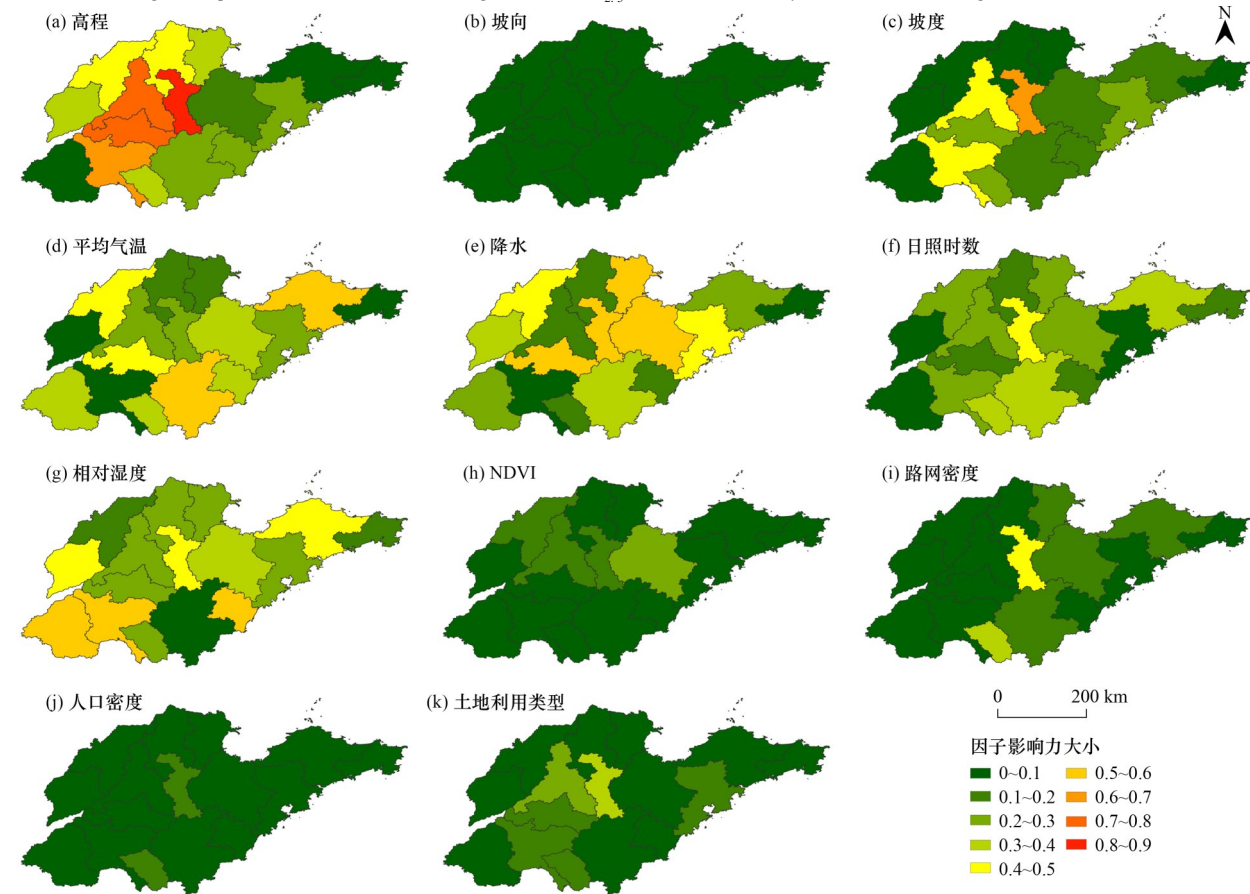


图 9 2010 年山东省 $PM_{2.5}$ 浓度市级尺度影响因子影响力空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of influencing factors of $PM_{2.5}$ concentration at city level in the Shandong Province in 2010

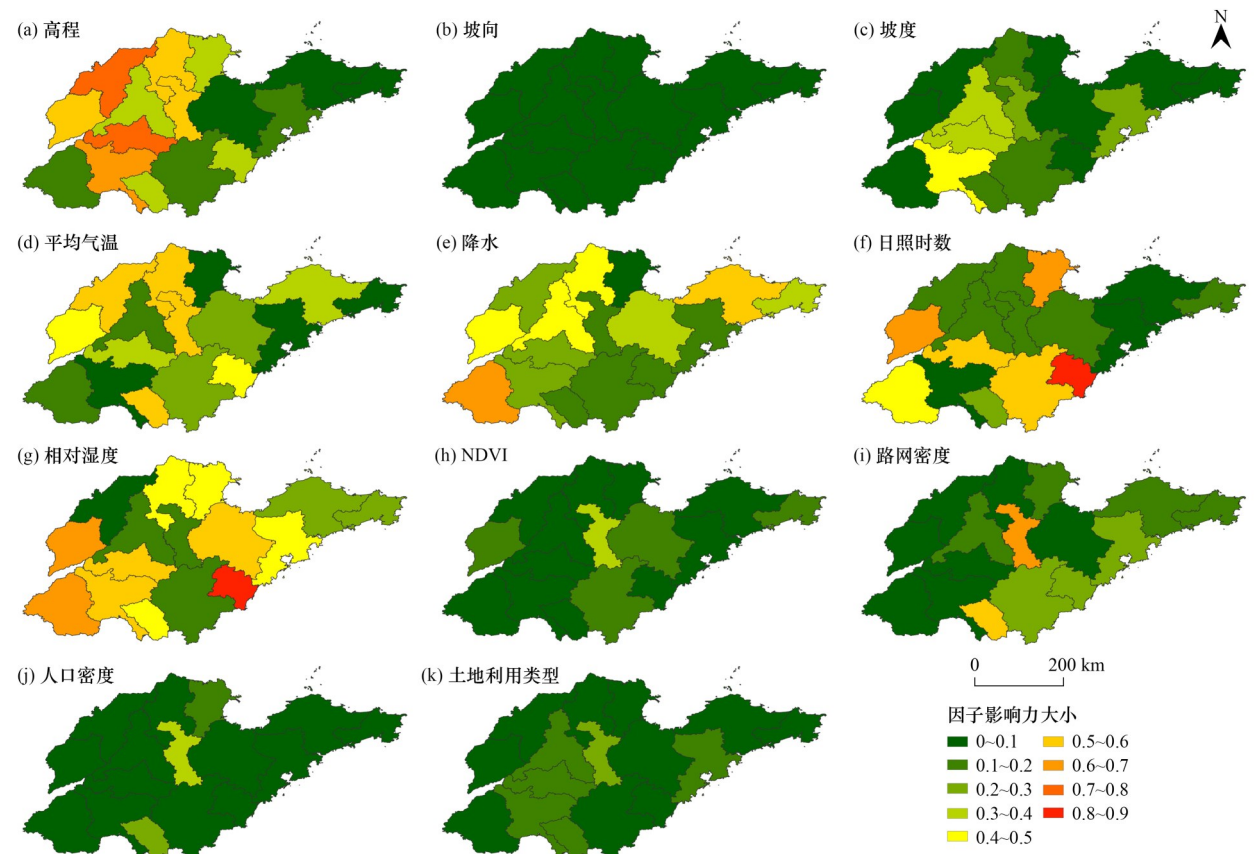


图 10 2021 年山东省 PM_{2.5} 浓度市级尺度影响因子影响力空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of influencing factors of PM_{2.5} concentration at city level in the Shandong Province in 2021

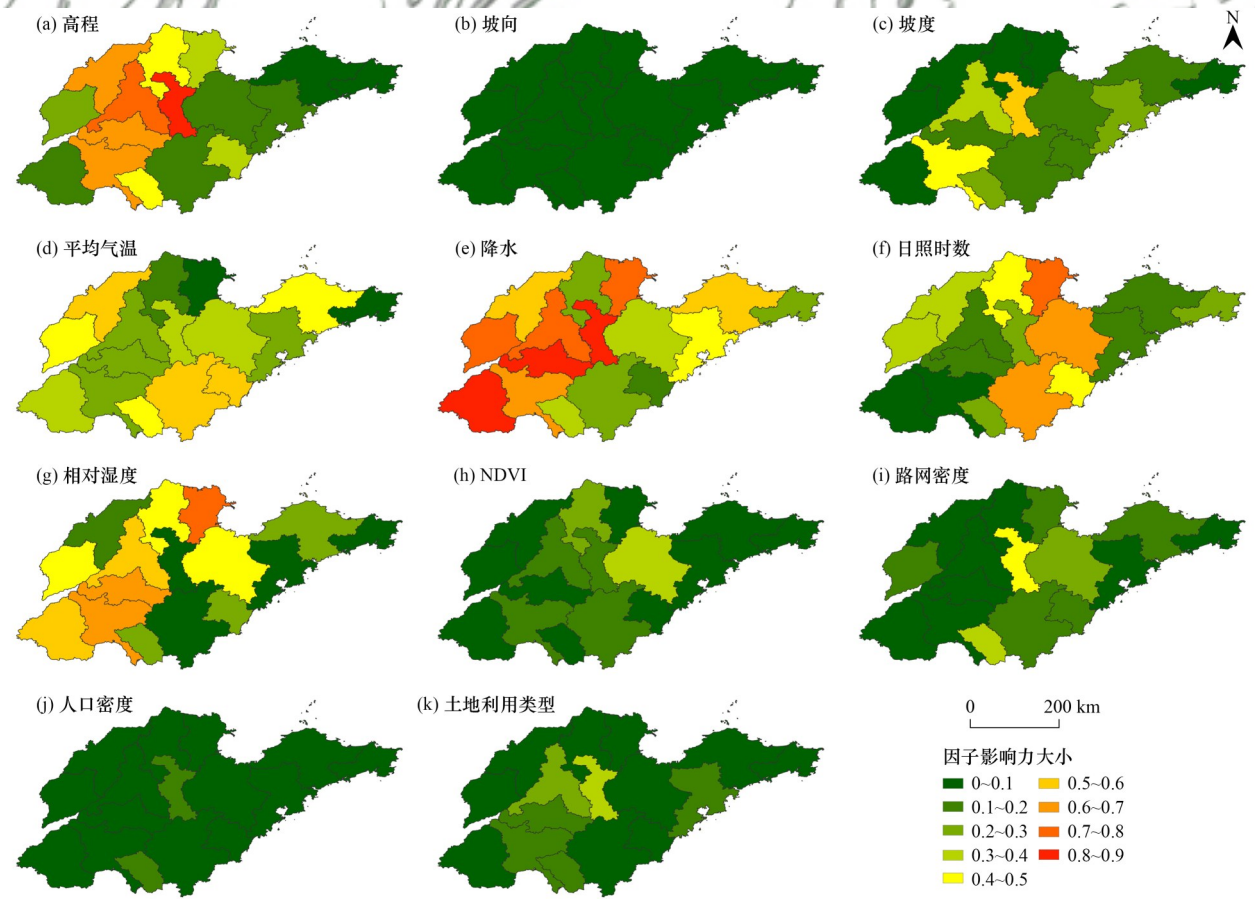


图 11 2000~2021 年山东省 PM_{2.5} 浓度市级尺度影响因子影响力均值空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of mean values of influencing factors of PM_{2.5} concentration at city level in the Shandong Province from 2000 to 2021

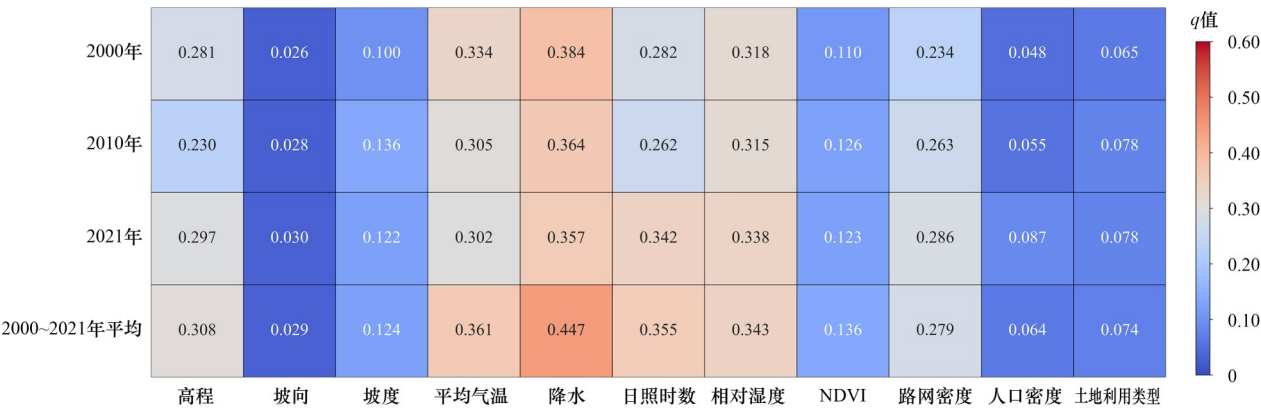


图 12 山东省 PM_{2.5} 浓度影响因子县级尺度探测 q 值均值统计

Fig. 12 Statistics on the mean value of q value of county-level detection of PM_{2.5} concentration influencing factors in the Shandong Province

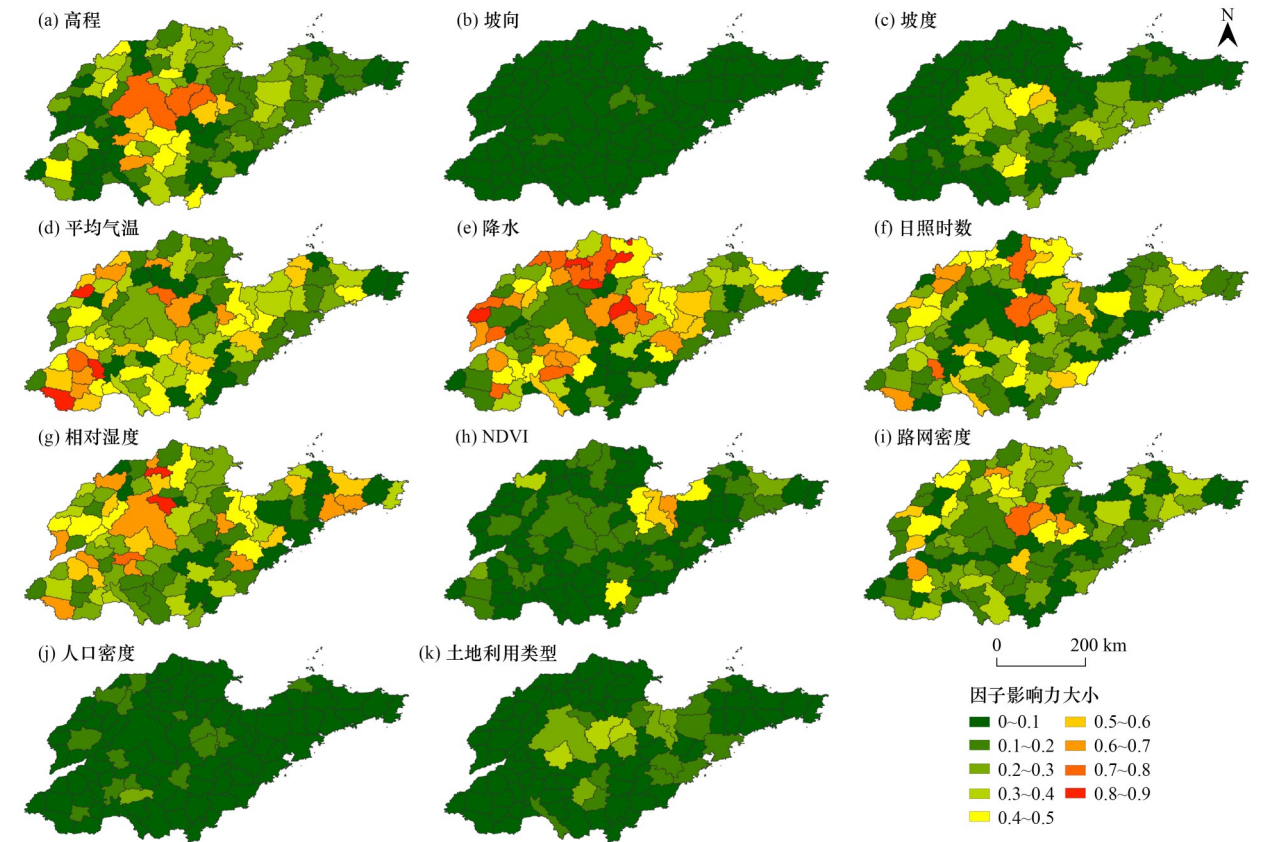


图 13 2000 年山东省 PM_{2.5} 浓度县级尺度影响因子影响力空间分布

Fig. 13 Spatial distribution of influencing factors of PM_{2.5} concentration at county level in the Shandong Province in 2000

属于轻度污染状态，未达到《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)二级浓度限值 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ；但相较 2000 年，PM_{2.5} 浓度下降 19.6%，相较 PM_{2.5} 污染严重的 2013 年，PM_{2.5} 浓度下降达 51%，大气环境质量有明显改善，说明国家《大气污染防治行动计划》和《山东省 2013 ~ 2020 年大气污染防治规划》等政策的实行对降低大气 PM_{2.5} 浓度有显著成效. 山东省应当继续实施调整能源和产业结构、深化重点行业污染治理和加强机动车尾气污染防治等措施，进一步完善法规政策体系，以促进大气环境的持续改善. 由于地理位置、地形等因素的影响，区域内各

城市 PM_{2.5} 浓度有较大差别，因此山东省在建立区域大气污染联合防御机制的同时，有必要考虑区域内各地区的差异，可将 PM_{2.5} 污染严重的城市列为防控重点城市，针对不同地区的特点制定不同的城市发展战略以及大气污染防控措施.

综合因子多尺度探测结果，不同尺度下探测的因子影响力空间分布具有差异性，因此，需要根据地区的影响因子的差异有针对性地制定 PM_{2.5} 污染治理策略. 其中，气候因子对山东省 PM_{2.5} 浓度空间分异起主导作用，因此，山东省各地区在实施大气保护防控政策时，考虑气候因素对 PM_{2.5} 的影响十分重

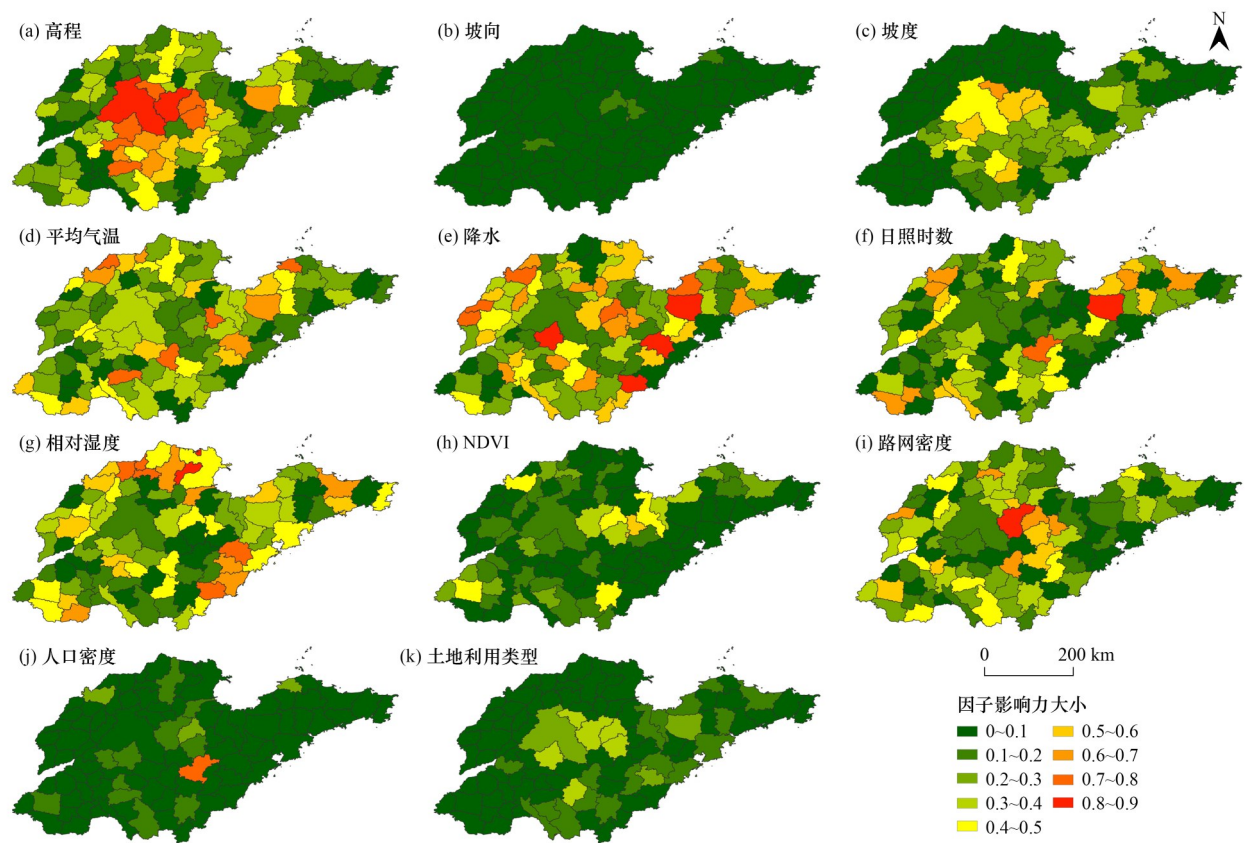


图 14 2010 年山东省 PM_{2.5} 浓度县级尺度影响因子影响力空间分布

Fig. 14 Spatial distribution of influencing factors of PM_{2.5} concentration at county level in the Shandong Province in 2010

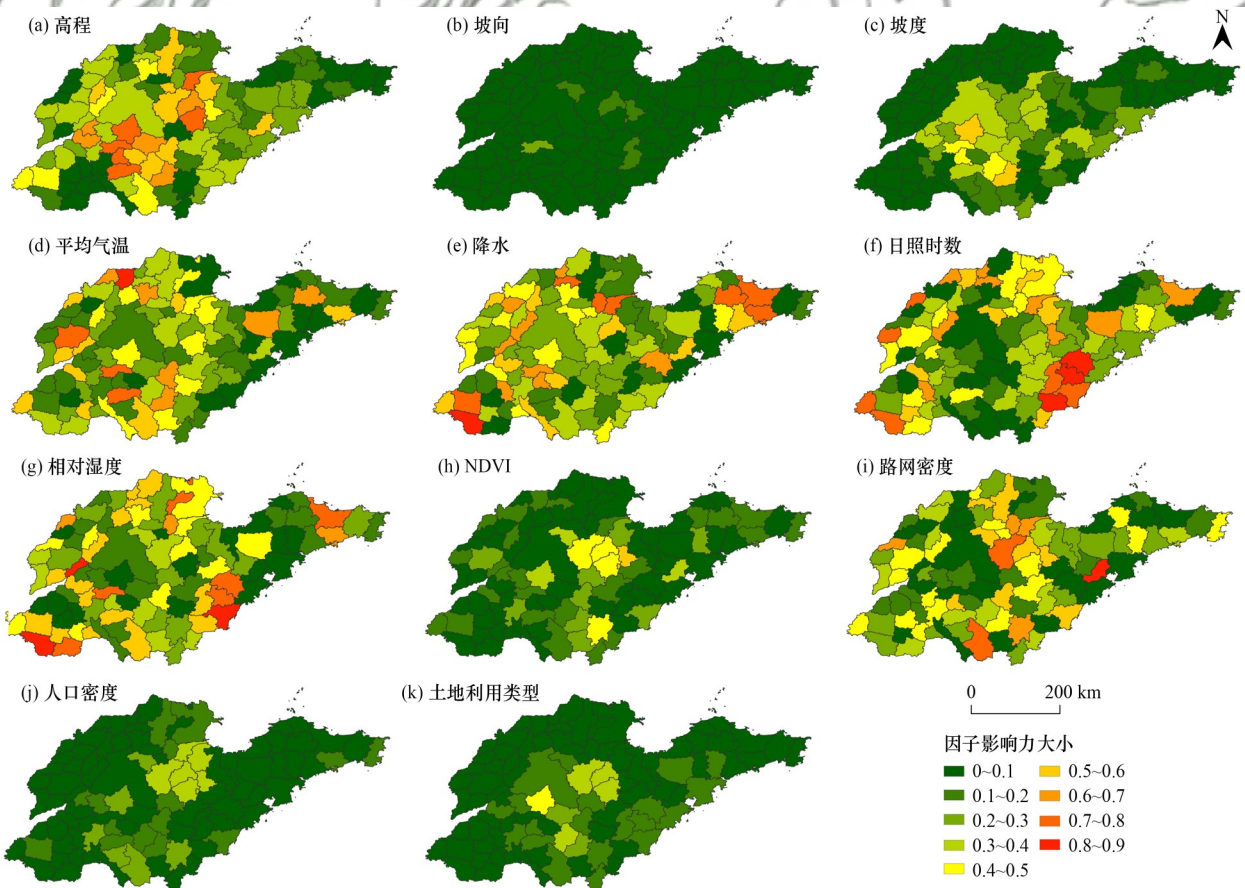


图 15 2021 年山东省 PM_{2.5} 浓度县级尺度影响因子影响力空间分布

Fig. 15 Spatial distribution of influencing factors of PM_{2.5} concentration at county level in the Shandong Province in 2021

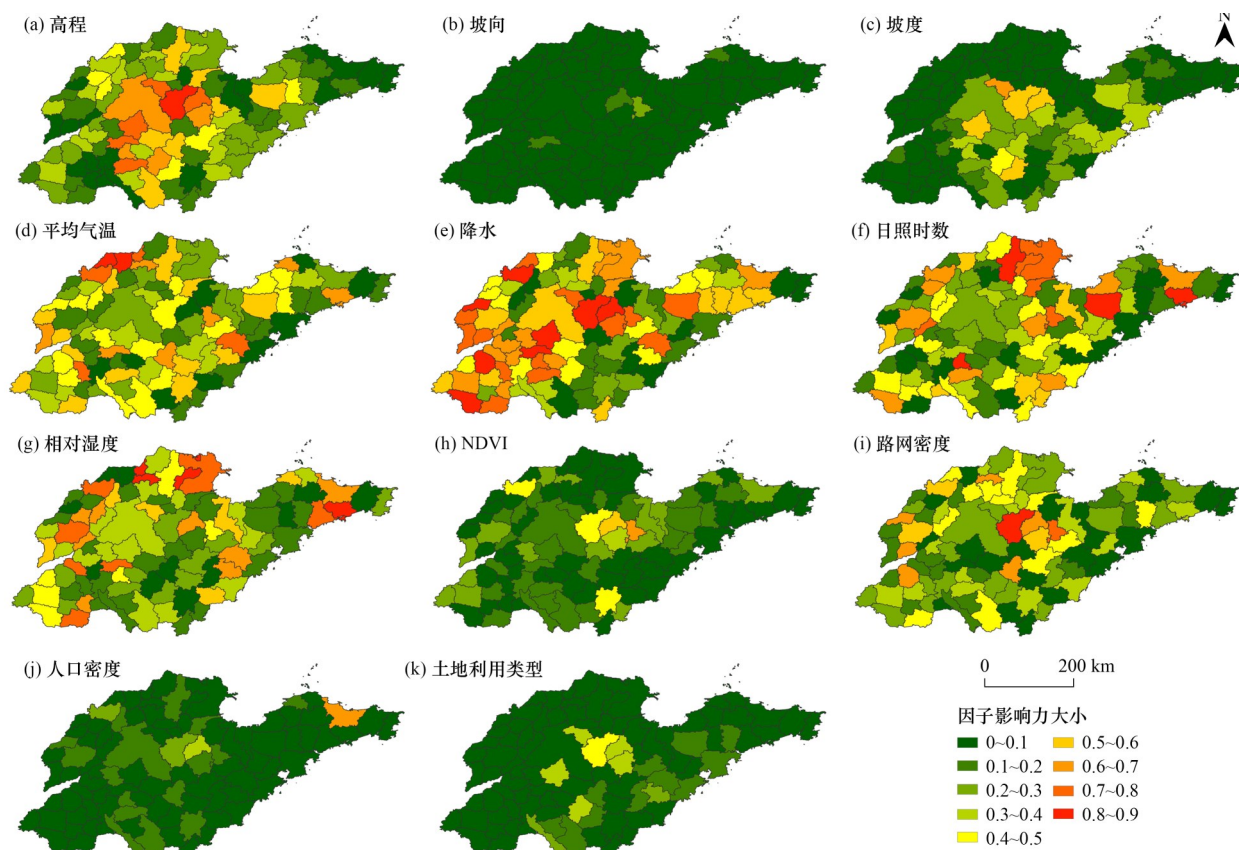


图 16 2000~2021 年山东省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度县级尺度影响因子影响力均值空间分布

Fig. 16 Spatial distribution of mean values of influencing factors of $\text{PM}_{2.5}$ concentration at county level in the Shandong Province from 2000 to 2021

要, 在气象条件不佳时, 大气扩散条件差, 易发 $\text{PM}_{2.5}$ 空气污染, 当地有关部门需加强对气象要素的监测能力, 积极构建重污染天气应急响应机制, 做好大气环境质量和 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天气预测预报工作, 在发生 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染天气时提醒民众做好防护措施. 地形因子对于山东省中部地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分异影响显著, 该地区城市在进行城市规划建设时, 需重视地形对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响, 科学合理规划城市、工业生产布局与交通路线, 防止城市建设形态对 $\text{PM}_{2.5}$ 造成负面影响. 路网密度对淄博市和昌乐县等市级和县域地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有较显著影响, 该地区应重视机动车尾气污染防治和相应大气污染物的进一步减排, 大力推广使用新能源汽车、鼓励绿色出行. NDVI 对于青州市和昌乐县等县域的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也具有较大影响, 因此, 这些县域地区应注重保护城市绿化植被, 提高绿化率和森林覆盖率, 以促进城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的持续降低.

5 结论

(1) 时间特征方面, 2000~2021 年山东省 $\text{PM}_{2.5}$ 污染严重, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值在 $38.15 \sim 88.63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 但总体呈现波动下降态势; 2000~2021 年各城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也呈下降趋势, 属于 $\text{PM}_{2.5}$ 轻度、中度和

重度污染的城市数量占比减少, 城市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染有明显改善; 2013 年是 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化的峰值年, 其值为 $83.36 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 基于此, 2000~2021 年山东省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化分为 2 个阶段: ①持续上升阶段(2000~2013 年)和②快速下降阶段(2013~2021 年); 山东省和各城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均呈现“夏低冬高, 春秋居中”的季节分布特征和先降后升的“U”型变化规律.

(2) 空间特征方面, 山东省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度由沿海至内陆逐步升高, 呈现出“西高东低”的空间分布格局, 空间变化趋势呈现显著的空间异质性, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值极显著下降的区域主要是东部半岛地区, 秋季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现极显著下降的面积占比最高; 山东省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度聚集模式显著, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值区分布在以聊城、菏泽和德州为代表的山东省西部地区; $\text{PM}_{2.5}$ 浓度低值区主要是以烟台和威海为代表的东部沿海地区.

(3) 影响因子方面, 气候因子是影响山东省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分异的主导因素; 省-市-县多尺度探测结果表明, 区域内不同尺度影响 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分异的影响因子及其影响力空间分布格局具有明显的差异性, 省级因子探测解释力前 3 的影响因子为平均气温、日照时数和坡度, 市级因子探测解释力前 3 的影响因子为降水、高程和相对湿度, 县级因子探测解释力前 3 的影响因子为降水、平均气温和日照时数.

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] Guo X H, Wang Y F, Mei S Q, et al. Monitoring and modelling of PM_{2.5} concentration at subway station construction based on IoT and LSTM algorithm optimization [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 360, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132179.
- [3] Liang C S, Duan F K, He K B, et al. Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of PM_{2.5} [J]. Environment International, 2016, 86: 150-170.
- [4] 张哲, 乔利平, 周敏, 等. 环境空气PM_{2.5}化学组分监测数据审核指标的建立: 以长三角地区为例[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 4786-4802.
- Zhang Z, Qiao L P, Zhou M, et al. Audit indicators and suggested ranges for data validation of chemical components in ambient PM_{2.5}: a case study of the Yangtze River Delta [J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 4786-4802.
- [5] Li J M, Han X L, Jin M J, et al. Globally analysing spatiotemporal trends of anthropogenic PM_{2.5} concentration and population's PM_{2.5} exposure from 1998 to 2016 [J]. Environment International, 2019, 128: 46-62.
- [6] Qi G Z, Wei W D, Wang Z B, et al. The spatial-temporal evolution mechanism of PM_{2.5} concentration based on China's climate zoning [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 325, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116671.
- [7] 王丽丽, 刘笑杰, 李丁, 等. 长江经济带PM_{2.5}空间异质性和驱动因素的地理探测[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1190-1200.
- Wang L L, Liu X J, Li D, et al. Geographical detection of spatial heterogeneity and drivers of PM_{2.5} in the Yangtze River economic belt [J]. Environmental Science, 2022, 43(3): 1190-1200.
- [8] 姚青, 杨旭, 唐颖潇, 等. 京津冀城市群冬季二次PM_{2.5}的时空分布特征[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2421-2429.
- Yao Q, Yang X, Tang Y X, et al. Spatio-temporal distribution characteristics of secondary aerosol in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in winter [J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2421-2429.
- [9] Lim C H, Ryu J, Choi Y, et al. Understanding global PM_{2.5} concentrations and their drivers in recent decades (1998-2016) [J]. Environment International, 2020, 144, doi: 10.1016/j.envint.2020.106011.
- [10] Jin H Y, Chen X H, Zhong R D, et al. Influence and prediction of PM_{2.5} through multiple environmental variables in China [J]. Science of the Total Environment, 2022, 849, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157910.
- [11] Lu D B, Mao W L, Yang D Y, et al. Effects of land use and landscape pattern on PM_{2.5} in Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2018, 9(4): 705-713.
- [12] Tuheti A, Deng S X, Li J H, et al. Spatiotemporal variations and the driving factors of PM_{2.5} in Xi'an, China between 2004 and 2018 [J]. Ecological Indicators, 2023, 146, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.109802.
- [13] Yang Y, Christakos G. Spatiotemporal characterization of ambient PM_{2.5} concentrations in Shandong Province (China) [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(22): 13431-13438.
- [14] 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 等. 2016~2020年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2022, 43(6): 2937-2946.
- Zhou M G, Yang Y, Sun Y, et al. Spatio-temporal characteristics of air quality and influencing factors in Shandong Province from 2016 to 2020 [J]. Environmental Science, 2022, 43(6): 2937-2946.
- [15] 王韵杰, 张少君, 郝吉明. 中国大气污染治理: 进展·挑战·路径[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1755-1762.
- Wang Y J, Zhang S J, Hao J M. Air pollution control in China: progress, challenges and future pathways [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(10): 1755-1762.
- [16] Wei J, Li Z Q, Lyapustin A, et al. Reconstructing 1-km-resolution high-quality PM_{2.5} data records from 2000 to 2018 in China: spatiotemporal variations and policy implications [J]. Remote Sensing of Environment, 2021, 252, doi: 10.1016/j.rse.2020.112136.
- [17] Wei J, Li Z Q, Cribb M, et al. Improved 1 km resolution PM_{2.5} estimates across China using enhanced space-time extremely randomized trees [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2020, 20(6): 3273-3289.
- [18] 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.
- [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] 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 2015 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(2): 253-270.
- [21] Erkin N, Simayi M, Ablat X, et al. Predicting spatiotemporal variations of PM_{2.5} concentrations during spring festival for county-level cities in China using VIIRS-DNB data [J]. Atmospheric Environment, 2023, 294, doi: 10.1016/j.atmosenv.2022.119484.
- [22] 黄俊, 王超群, 周宝琴, 等. 广州PM_{2.5}污染特征及与气象因子的关系分析[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(2): 176-181, 186.
- Huang J, Wang C Q, Zhou B Q, et al. Characteristics of PM_{2.5} pollution and its relationship with meteorological factors in Guangzhou [J]. Environmental Pollution & Control, 2020, 42(2): 176-181, 186.
- [23] Zhang Y Q, Ma Z K, Gao Y, et al. Impacts of the meteorological condition versus emissions reduction on the PM_{2.5} concentration over Beijing-Tianjin-Hebei during the COVID-19 lockdown [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2021, 14(4), doi: 10.1016/j.aosl.2020.100014.
- [24] 张智胜, 陶俊, 谢绍东, 等. 成都城区PM_{2.5}季节污染特征及来源解析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(11): 2947-2952.
- Zhang Z S, Tao J, Xie S D, et al. Seasonal variations and source apportionment of PM_{2.5} at urban area of Chengdu [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(11): 2947-2952.
- [25] Zhang H D, Jiang Q, Wang J K, et al. Analysis on the impact of two winter precipitation episodes on PM_{2.5} in Beijing [J]. Environmental Science and Ecotechnology, 2021, 5, doi: 10.1016/j.ese.2021.100080.
- [26] Liu S, Zhao W H, Li L J, et al. Meteorological mechanisms of regional PM_{2.5} and O₃ transport in the North China Plain driven by the east Asian monsoon [J]. Atmospheric Pollution Research, 2023, 14(1), doi: 10.1016/j.apr.2022.101638.
- [27] Zhen J L, Guan P B, Yang R H, et al. Transport matrix of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei and Yangtze River delta regions: assessing

- the contributions from emission reduction and meteorological conditions [J]. *Atmospheric Environment*, 2023, **304**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2023.119775.
- [28] Hu W Y, Zhao T L, Bai Y Q, *et al.* Importance of regional PM_{2.5} transport and precipitation washout in heavy air pollution in the Twain-Hu Basin over central China: observational analysis and WRF-Chem simulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **758**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143710.
- [29] Wang X H, Qin J H, Zhang S Y, *et al.* The differential impact of 2015–2020 El Niño and El Niño Modoki on warm- and cold-season PM_{2.5} concentration and distribution across China [J]. *Atmospheric Environment*, 2023, **305**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2023.119816.
- [30] 李梦真, 张廷斌, 易桂花, 等. 四川盆地 PM_{2.5} 浓度时空变化特征遥感监测与影响因子分析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3136–3146.
- Li M Z, Zhang T B, Yi G H, *et al.* Spatio-temporal variation characteristics monitored by remotely sensed technique of PM_{2.5} concentration and its influencing factor analysis in Sichuan Basin, China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3136–3146.
- [31] Duan W J, Wang X Q, Cheng S Y, *et al.* Influencing factors of PM_{2.5} and O₃ from 2016 to 2020 based on DLNM and WRF-CMAQ [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **285**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.117512.
- [32] 葛岂序, 刘岩, 杨洪, 等. 2015–2019 年河南省 PM_{2.5} 时空特征与驱动因素分析 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 1697–1705.
- Ge Q X, Liu Y, Yang H, *et al.* Analysis on spatial-temporal characteristics and driving factors of PM_{2.5} in Henan Province from 2015 to 2019 [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1697–1705.
- [33] 徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 等. 2000–2020 年中国典型经济区 PM_{2.5} 时空变化及其与植被景观格局的关系 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 1852–1864.
- Xu Y, Li X Y, Huang W T, *et al.* Spatio-temporal variation in PM_{2.5} concentration and its relationship with vegetation landscape patterns in typical economic zones in China from 2000 to 2020 [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 1852–1864.
- [34] 徐勇, 郭振东, 郑志威, 等. 运用地理探测器研究京津冀城市群 PM_{2.5} 浓度变化及影响因素 [J]. *环境科学研究*, 2023, **36**(4): 649–659.
- Xu Y, Guo Z D, Zheng Z W, *et al.* Study of the PM_{2.5} concentration variation and its influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration using geo-detector [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2023, **36**(4): 649–659.
- [35] 郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 等. 郑州市 2014–2017 年大气污染特征及气象条件影响分析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 3856–3867.
- Guo M M, Jiang N, Wang S B, *et al.* Analysis of air pollution characteristics and meteorological conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 3856–3867.
- [36] Shao M, Xu X Y, Lu Y T, *et al.* Spatio-temporally differentiated impacts of temperature inversion on surface PM_{2.5} in Eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, **855**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158785.
- [37] 王海畅, 吴泽邦, 周景博, 等. 北京上甸子站 PM_{2.5} 浓度与气象要素关系分析 [J]. *气象与环境学报*, 2015, **31**(5): 99–104.
- Wang H C, Wu Z B, Zhou J B, *et al.* Relationship between PM_{2.5} concentration and meteorological elements at Shangdianzi station of Beijing [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2015, **31**(5): 99–104.
- [38] 黄善斌, 李本轩, 王文青. 济南 PM_{2.5} 质量浓度与气象条件相关性初步研究 [J]. *海洋气象学报*, 2020, **40**(1): 90–97.
- Huang S B, Li B X, Wang W Q. A preliminary study on the correlation between PM_{2.5} mass concentration and meteorological conditions in Ji'nan [J]. *Journal of Marine Meteorology*, 2020, **40**(1): 90–97.
- [39] 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.
- [40] 刘状, 孙曦亮, 刘丹, 等. 2001–2017 年中国北方省份气溶胶光学厚度的时空特征 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(8): 3177–3184.
- Liu Z, Sun X L, Liu D, *et al.* Spatio-temporal characteristics of aerosol optical depth over Beijing-Tianjin-Hebei-Shandong-Henan-Shanxi-Shaanxi region during 2001–2017 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(8): 3177–3184.
- [41] 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 Y, 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*, 2019, **62**(12): 1885–1902.
- [42] Wang B Q, Li Y N, Tang Z Z, *et al.* Effects of vehicle emissions on the PM_{2.5} dispersion and intake fraction in urban street canyons [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **324**, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129212.
- [43] 徐勇, 郭振东, 郑志威, 等. 2000–2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测 [J]. *环境科学*, 2023, **44**(7): 3724–3737.
- Xu Y, Guo Z D, Zheng Z W, *et al.* Spatio-temporal variation and multi-dimensional detection of driving mechanism of PM_{2.5} concentration in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration from 2000 to 2021 [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(7): 3724–3737.
- [44] 魏文静, 谢炳庚, 周楷淳, 等. 2013–2018 年山东省大气 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染时空变化及其影响因素 [J]. *环境工程*, 2020, **38**(12): 103–111.
- Wei W J, Xie B G, Zhou K C, *et al.* Research on temporal and spatial variations of atmospheric PM_{2.5} and PM₁₀ and the influencing factors in Shandong, China during 2013–2018 [J]. *Environmental Engineering*, 2020, **38**(12): 103–111.
- [45] Xu Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Spatiotemporal variation in the impact of meteorological conditions on PM_{2.5} pollution in China from 2000 to 2017 [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117215.
- [46] Xu W T, Yao L, Fu X C, *et al.* Response of PM_{2.5} variations to changing urbanization process in different climatic backgrounds of China [J]. *Urban Climate*, 2022, **45**, doi: 10.1016/j.uclim.2022.101273.
- [47] Wang Y X, Sun S, Xu W T, *et al.* Spatial variability of PM_{2.5} pollution in imbalanced natural and socioeconomic processes: evidence from the Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2023, **33**(1): 161–174.
- [48] Li W L, Yang G F, Qian X Y. The socioeconomic factors influencing the PM_{2.5} levels of 160 cities in China [J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, **84**, doi: 10.1016/j.scs.2022.104023.

CONTENTS

Spatial Distribution Characteristics of PM _{2.5} and O ₃ in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Time Series Decomposition	YAO Qing, DING Jing, YANG Xu, <i>et al.</i>	(2487)
Ozone Sensitivity Analysis in Urban Beijing Based on Random Forest	ZHOU Hong, WANG Ming, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i>	(2497)
Prediction of Ozone Pollution in Sichuan Basin Based on Random Forest Model	YANG Xiao-tong, KANG Ping, WANG An-yi, <i>et al.</i>	(2507)
Establishment and Effective Evaluation of Haikou Ozone Concentration Statistical Prediction Model	FU Chuan-bo, LIN Jian-xing, TANG Jia-xiang, <i>et al.</i>	(2516)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Ozone Concentration and Health Benefit Assessment in the Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2015 to 2020	GAO Ran, LI Qin, CHE Fei, <i>et al.</i>	(2525)
Water-soluble Inorganic Ion Content of PM _{2.5} and Its Change Characteristics in Urban Area of Beijing in 2022	CHEN Yuan-yuan, CUI Di, ZHAO Ze-xi, <i>et al.</i>	(2537)
Pollution Characteristics, Source, and Health Risk Assessment of Metal Elements in PM _{2.5} Between Winter and Spring in Zhengzhou	TAO Jie, YAN Hui-jiao, XU Yi-fei, <i>et al.</i>	(2548)
Characteristics, Sources Apportionment, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs and Their Derivatives Before and After Heating in Zibo City	SUN Gang-li, WU Li-ping, XU Bo, <i>et al.</i>	(2558)
Components Characteristic and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Transition Period of Heating Season in Xi'an with High Time Resolution	LI Meng-jin, ZHANG Yong, ZHANG Qian, <i>et al.</i>	(2571)
Source and Cause Analysis of High Concentration of Inorganic Aerosol During Two Typical Pollution Processes in Winter over Tianjin	LU Miao-miao, HAN Su-qin, LIU Ke-xin, <i>et al.</i>	(2581)
Spatial-temporal Variation and Spatial Differentiation Geographic Detection of PM _{2.5} Concentration in the Shandong Province Based on Spatial Scale Effect	XU Yong, WEI Meng-xin, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(2596)
Characteristics of VOCs Emissions and Ozone Formation Potential for Typical Chemicals Industry Sources in China	WU Ting, CUI Huan-wen, XIAO Xian-de, <i>et al.</i>	(2613)
Formation Potential of Secondary Organic Aerosols and Sources of Volatile Organic Compounds During an Air Pollution Episode in Autumn, Langfang	ZHANG Jing-qiao, LIU Zheng, DING Wen-wen, <i>et al.</i>	(2622)
Scale Effects of Landscape Pattern on Impacts of River Water Quality: A Meta-analysis	WANG Yu-cang, DU Jing-jing, ZHANG Yu, <i>et al.</i>	(2631)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter in Inflow Rivers of Baiyangdian Lake Water in Summer Flood Season	MENG Jia-jing, DOU Hong, CHEN Zhe, <i>et al.</i>	(2640)
Analysis on Hydrochemical Evolution of Shallow Groundwater East of Yongding River in Fengtai District, Beijing	HU Yu-xin, ZHOU Rui-jing, SONG Wei, <i>et al.</i>	(2651)
Hydrochemical Characteristics, Controlling Factors and Water Quality Evaluation of Shallow Groundwater in Tan-Lu Fault Zone (Anhui Section)	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i>	(2665)
Effects of Pesticides Use on Pesticides Residues and Its Environmental Risk Assessment in Xingkai Lake (China)	WANG Wei-qing, XU Xiong, LIU Quan-zhen, <i>et al.</i>	(2678)
Characteristics of Microorganisms and Antibiotic Resistance Genes of the Riparian Soil in the Lanzhou Section of the Yellow River	WEI Cheng-chen, WEI Feng-yi, XIA Hui, <i>et al.</i>	(2686)
Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Algal Blooms and Its Driving Factors in Chaohu Lake Based on Multi-source Datasets	JIN Xiao-long, DENG Xue-liang, DAI Rui, <i>et al.</i>	(2694)
Characteristics of Epiphytic Bacterial Community on Submerged Macrophytes in Water Environment Supplemented with Reclaimed Water	HE Yun, LI Xue-mei, LI Hong-quan, <i>et al.</i>	(2707)
Effects of Water Level Fluctuations and Vegetation Restoration on Soil Prokaryotic Microbial Community Structure in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	MEI Yu, HUANG Ping, WANG Peng, <i>et al.</i>	(2715)
Bacterial Community Structure of Typical Lake Sediments in Yinchuan City and Its Response to Heavy Metals	MENG Jun-jie, LIU Shuang-yu, QIU Xiao-cong, <i>et al.</i>	(2727)
Effect of Thermal Hydrolysis Pretreatment Time on Microbial Community Structure in Sludge Anaerobic Digestion System	ZHANG Han, ZHANG Han, WANG Jia-wei, <i>et al.</i>	(2741)
Source Apportionment of Morphine in Wastewater	SHAO Xue-ting, ZHAO Yue-tong, JIANG Bing, <i>et al.</i>	(2748)
Ecological Environment Dynamical Evaluation of Hutuo River Basin Using Remote Sensing	LI Yan-cui, YUAN Jin-guo, LIU Bo-han, <i>et al.</i>	(2757)
Spatiotemporal Evolution and Influencing Factors of Ecosystem Service Value in the Yellow River Basin	WANG Yi-qi, SUN Xue-ying	(2767)
Ecosystem Service Trade-off Synergy Strength and Spatial Pattern Optimization Based on Bayesian Network: A Case Study of the Fenhe River Basin	CAI Jin, WEI Xiao-jian, JIANG Ping, <i>et al.</i>	(2780)
Spatial-temporal Evolution and Quantitative Attribution of Habitat Quality in Typical Karst Counties of Guizhou Plateau	LI Yue, FENG Xia, WU Lu-hua, <i>et al.</i>	(2793)
Spatio-temporal Variation in NEP in Ecological Zoning on the Loess Plateau and Its Driving Factors from 2000 to 2021	ZHOU Yi-ting, YAN Jun-xia, LIU Ju, <i>et al.</i>	(2806)
Land Change Simulation and Grassland Carbon Storage in the Loess Plateau Based on SSP-RCP Scenarios	CUI Xie, DONG Yan, ZHANG Lu-yin, <i>et al.</i>	(2817)
Multi-scenario Simulation of Construction Land Expansion and Its Impact on Ecosystem Carbon Storage in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration	WU Ai-bin, CHEN Fu-guo, ZHAO Yan-xia, <i>et al.</i>	(2828)
Effects of Land Use Change on Soil Aggregate Stability and Soil Aggregate Organic Carbon in Karst Area of Southwest China	JIANG Ke, JIA Ya-nan, YANG Yan, <i>et al.</i>	(2840)
Integrated Analysis of Soil Organic Matter Molecular Composition Changes Under Different Land Uses	HUANG Shi-wei, ZHAO Yi-kai, ZHU Xin-yu, <i>et al.</i>	(2848)
Prediction Spatial Distribution of Soil Organic Matter Based on Improved BP Neural Network with Optimized Sparrow Search Algorithm	HU Zhi-rui, ZHAO Wan-fu, SONG Yin-xian, <i>et al.</i>	(2859)
Effects of Application of Different Organic Materials on Phosphorus Accumulation and Transformation in Vegetable Fields	SUN Kai, CUI Yu-tao, LI Shun-jin, <i>et al.</i>	(2871)
Intensive Citrus Cultivation Suppresses Soil Phosphorus Cycling Microbial Activity	ZHOU Lian-hao, ZENG Quan-chao, MEI Tang-ying-ze, <i>et al.</i>	(2881)
Effects of Controlled-release Blended Fertilizer on Crop Yield and Greenhouse Gas Emissions in Wheat-maize Rotation System	GAO Wei, WANG Xue-xia, XIE Jian-zhi, <i>et al.</i>	(2891)
Effect of Biochar on NO ₃ ⁻ -N Transport in Loessial Soil and Its Simulation	BAI Yi-ru, LIU Xu, ZHANG Yu-han, <i>et al.</i>	(2905)
Analysis and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil in China: A Meta-analysis	YANG Li, BAI Zong-xu, BO Wen-hao, <i>et al.</i>	(2913)
Critical Review on Heavy Metal Contamination in Urban Soil and Surface Dust	WANG Xiao-yu, LIU En-feng, YANG Xiang-meng, <i>et al.</i>	(2926)
Research Progress on Solidification and MICP Remediation of Soils in Heavy Metal Contaminated Site	CHEN Yue-ru, GAO Wen-yan, CHEN Hong-ren, <i>et al.</i>	(2939)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metal in Coal Mine Area near the Yellow River in Shandong	DAI Wen-ting, ZHANG Hui, WU Xia, <i>et al.</i>	(2952)
Heavy Metal Content and Risk Assessment of Sediments and Soils in the Juma River Basin	HAN Shuang-bao, YUAN Lei, ZHANG Qiu-xia, <i>et al.</i>	(2962)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in the Yellow River Floodplain of Yinchuan City	YU Lu-jia, MA Hai-jun, WANG Cui-ping	(2971)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of a City in Guangdong Province Based on Source Oriented and Monte Carlo Models	CHEN Lian, ZOU Zi-hang, ZHANG Pei-zhen, <i>et al.</i>	(2983)
Chemical Speciation, Influencing Factors, and Regression Model of Heavy Metals in Farmland of Typical Carbonate Area with High Geological Background, Southwest China	TANG Rui-ling, XU Jin-li, LIU Bin, <i>et al.</i>	(2995)
Hg Content Characteristics and Safe Planting Zoning of Paddy Soil and Rice in Guizhou Province	WEI Mei-liu, ZHOU Lang, HUANG Yan-ling, <i>et al.</i>	(3005)
Cadmium Phytoremediation Effect of Sweet Sorghum Assisted with Citric Acid on Typical Parent Soil in Southern China	LIU Meng-yu, LUO Xu-feng, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(3016)
Effects of Modified Distillers' Grains Biochar on Cadmium Forms in Purple Soil and Cadmium Uptake by Rice	XIAO Nai-chuan, WANG Zi-fang, YANG Wen-na, <i>et al.</i>	(3027)
Effects of Biochar on Growth and Pollutant Accumulation of Lettuce in Soil Co-contaminated with Tetracycline and Copper	ZHENG Chen-ge, PEI Huan-huan, ZHANG Ya-shan, <i>et al.</i>	(3037)
Effects of Vermicomposting on Compost Quality and Heavy Metals: A Meta-analysis	JIANG Ji-shao, HOU Rui, CUI Hui-lin, <i>et al.</i>	(3047)
Advances in the Effects of Microplastics on Soil N ₂ O Emissions and Nitrogen Transformation	LIU Yi-ge, YANG An-qi, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(3059)
Effects of Land Use Patterns on Soil Microplastic Pollution in the Luoshijiang Sub-watershed of Erhai Lake Basin	DAI Liu-yun, HOU Lei, WANG Hua, <i>et al.</i>	(3069)
Characteristics of Microplastic Pollution in Sediment of Silty Coast in Culture Bay	SONG Ke-xin, HE Jin-cheng, LI Chang-wen, <i>et al.</i>	(3078)
Effect of Polyethylene Microplastics on the Microbial Community of Saline Soils	WANG Zhi-chao, LI Zhe, LI Jia-chen, <i>et al.</i>	(3088)
Characterization of Microplastic Surface Bacterial Community Structure and Prediction of Ecological Risk in Poyang Lake, China	YU Jin-li, ZHAO Jun-kai, LUO Si-qi, <i>et al.</i>	(3098)
Energy-saving and Emission Reduction Path for Road Traffic in Key Coastal Cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang	XU Yi-nuo, WENG Da-wei, WANG Shuo, <i>et al.</i>	(3107)
Life Cycle Carbon Reduction Benefits of Electric Heavy-duty Truck to Replace Diesel Heavy-duty Truck	XU Yuan-yuan, GONG De-hong, HUANG Zheng-guang, <i>et al.</i>	(3119)