

目次

加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例	杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)
基于不同电力需求的中国减排降碳协同增效路径	向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)
城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用	张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)
基于可解释性机器学习的城市 O ₃ 驱动因素挖掘	董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)
基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析	朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)
基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O ₃ 来源解析	王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)
基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测	朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)
2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析	李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)
夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响	杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)
气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别	杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)
2000~2021 年成渝城市群 PM _{2.5} 时空变化及驱动机制多维探测	徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)
基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM _{2.5} 小时浓度估算	吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)
2013~2021 年邢台 PM _{2.5} 重污染过程输送和增长特性	江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)
基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源	朱书慧 (3760)
机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征	于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢峰, 曹芳, 章炎麟 (3771)
沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献	关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)
疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估	云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)
西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势	王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)
淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价	徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)
雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应	王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)
流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例	刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)
南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化	郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)
闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析	杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)
金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素	燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)
嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性	竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郭伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)
水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响	王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)
典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探	吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)
太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响	俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)
基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算	张有福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)
千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别	俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)
沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征	李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)
外秦淮河底泥污染及疏浚效果	张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)
新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为	葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)
镉砷在针铁矿界面共吸附的相互作用机制	苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)
环糊精催化 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H ₂ O ₂ 氧化水中有机微污染物	刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)
Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制	朱敬林, 汪舒 (3990)
微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征	谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)
中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价	王静, 魏恒, 潘波 (4006)
渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价	蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)
基于 PMF 模型的农田土壤重金属暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例	方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)
乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价	范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039)
荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制	黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)
近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展	赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)
改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展	吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)
沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析	赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)
两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果	梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)
秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响	王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)
秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质	赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)
基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断	黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)
地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价	张传华, 王钟书, 张力, 刘燕 (4142)
浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险	张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)
生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响	刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)
低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响	周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡延江 (4170)
沼液施用对麦茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响	乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)
大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征	刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)
马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响	姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)
《环境科学》征订启事(3648) 《环境科学》征稿简则(3659) 信息(3714, 4150, 4178)	

2000 ~ 2021 年成渝城市群 $PM_{2.5}$ 时空变化及驱动机制多维探测

徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷

(桂林理工大学测绘地理信息学院, 桂林 541006)

摘要: 研究成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化和驱动机制, 对区域大气环境保护和国家经济可持续发展具有重要意义. 基于 $PM_{2.5}$ 遥感数据、DEM 数据、基于站点的气象数据、MODIS NDVI 数据、人口密度数据、夜间灯光数据、路网数据和土地利用类型数据, 采用 Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 显著性检验等方法, 结合地理探测器, 在时空尺度上分析成渝城市群 $PM_{2.5}$ 时空变化, 并探测影响其变化的驱动机制. 结果表明, 2000 ~ 2021 年成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈波动下降态势, 冬季 $PM_{2.5}$ 污染最为突出. $PM_{2.5}$ 浓度具有明显的空间异质性, 呈现出“中间高, 四周低”的空间分布特征, $PM_{2.5}$ 浓度高值区主要集中在自贡、内江、资阳和广安, $PM_{2.5}$ 浓度呈显著下降的区域主要集中在重庆西部等地. 因子探测结果表明, 成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异受气候、地形、植被和人文因子共同影响. 高程、坡度和路网密度是影响成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异的主导因子. 地形因子对成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异相对作用最强, 而气候因子对成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异相对作用最弱. 2000 ~ 2021 年地形因子和人文因子对成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异的相对作用呈递增趋势, 气候因子和植被因子的相对作用呈递减趋势. 交互作用探测结果表明, 成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异较为显著的交互组合主要是高程与路网密度、坡度、降水、日照时数和土地利用类型. 城市尺度上, 交互作用探测结果表现出较大的地域差异, 例如, 成都、德阳和乐山 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异受不同类型因子间的交互作用十分显著, 而达州、眉山、雅安、资阳、内江和自贡 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异受单一类别因子交互作用十分显著.

关键词: 成渝城市群; $PM_{2.5}$ 浓度; 地理探测器; 驱动机制; 地形因子; 气候因子; 人文因子

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3724-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202207276

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

XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, DAI Qiang-yu, ZHAO Chun, HUANG Wen-ting

(College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China)

Abstract: Studies on the spatio-temporal variation and driving mechanism of $PM_{2.5}$ concentration in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration are of great significance for regional atmospheric environment protection and national economic sustainable development. Based on $PM_{2.5}$ remote sensing data, DEM data, in situ meteorological data, MODIS NDVI data, population density data, nighttime lighting data, road network data, and land use type data, a series of mathematical methods such as Theil-Sen Median analysis and Mann-Kendall significance test, combined with the Geo-detector model were used to analyze the spatio-temporal variation and multi-dimensional detection of the driving mechanism of $PM_{2.5}$ concentration in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration. The results showed that the overall $PM_{2.5}$ concentration showed a fluctuating downward trend in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration from 2000 to 2021, and the $PM_{2.5}$ pollution was the most prominent in winter. $PM_{2.5}$ concentration exhibited obvious spatial heterogeneity with “high in the middle and low in the surrounding areas.” The high- $PM_{2.5}$ concentration areas were mainly concentrated in Zigong, Neijiang, Ziyang, and Guang'an, and the areas with a $PM_{2.5}$ concentration decrease were mainly concentrated in the west of Chongqing. Influencing detection results showed that the spatial heterogeneity of $PM_{2.5}$ concentration in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration was influenced by the combined effects of climate factors, topographic factors, vegetation cover, and anthropogenic factors. Furthermore, elevation, slope, and road network density were regarded as the dominant factors influencing the spatial heterogeneity of $PM_{2.5}$ concentration in the study area. Topographic factors and climate factors showed the highest and lowest contribution rate to the spatial heterogeneity of $PM_{2.5}$ concentration, respectively. The contribution rate of topographic factors and anthropogenic factors had gradually increased, and the contribution rate of climate factors and vegetation cover had gradually decreased in the study area from 2000 to 2021. Interaction detection results showed that the spatial heterogeneity of $PM_{2.5}$ concentration in the Chengdu-Chongqing urban agglomeration was mostly affected by the interaction effects of elevation and road network density, slope, precipitation, sunshine duration, and land use type. The interaction detection results exhibited obvious regional differences on the city level. For instance, the spatial heterogeneity of $PM_{2.5}$ concentration in Chengdu, Deyang, and Leshan was mostly affected by the interaction between different influencing types, and the spatial heterogeneity of $PM_{2.5}$ concentration in Dazhou, Meishan, Ya'an, Ziyang, Neijiang, and Zigong was mostly affected by the interaction within a single influencing type.

Key words: Chengdu-Chongqing urban agglomeration; $PM_{2.5}$ concentration; Geo-detector; driving mechanism; topographic factor; climate factor; anthropogenic factor

收稿日期: 2022-07-29; 修订日期: 2022-10-09

基金项目: 广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297160); 广西科技基地和人才专项(桂科 AD21220133); 国家自然科学基金项目(42161028); 大学生创新创业训练计划项目(202210596388)

作者简介: 徐勇(1988 ~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境遥感、气候变化和植被覆盖反演, E-mail: yongxu@glut.edu.cn

$PM_{2.5}$ 主要指的是空气动力学中粒径 $\leq 2.5 \mu m$ 的细颗粒污染物, 目前已逐渐成为我国主要的大气污染物, 对社会经济、生态环境和人类健康产生了深刻的影响^[1]. 已有研究表明, $PM_{2.5}$ 具备一定的毒性, 且能够长时间滞留在空气中^[2], 高浓度的 $PM_{2.5}$ 能够引发雾-霾天气^[3], 进而引起人类呼吸道疾病发生^[4-6], 全球每年约有数百万人由于空气污染而间接性死亡^[7]. 近年来, $PM_{2.5}$ 浓度的时间变化与空间分布格局受到国内外学者的广泛关注. Lim 等^[8] 研究表明地处亚洲地区的中国和印度属于 $PM_{2.5}$ 浓度上升区, 欧洲、北美洲和大洋洲属于 $PM_{2.5}$ 浓度下降区, 且植被与 $PM_{2.5}$ 浓度具有一定的关联性. 姚青等^[9] 研究发现, 2017 ~ 2021 年京津冀地区冬季 $PM_{2.5}$ 浓度较高且下降趋势明显, $PM_{2.5}$ 浓度下降程度较大的城市主要是邢台、邯郸、石家庄和保定等河北中南部城市, 下降幅度较小的城市主要是承德、秦皇岛和张家口等河北北部山区城市. Xu 等^[10] 研究发现中国 264 个城市中, 接近 95% 的城市 2015 ~ 2019 年 $PM_{2.5}$ 浓度呈下降趋势. 城市发展对 $PM_{2.5}$ 浓度变化具有重要影响, 不同城市化指标对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的影响程度有所差异. 牛笑笑等^[11] 研究发现, 我国主要城市 $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度存在一定的交互规律, 中北部城市最为明显, 热点区域主要集中在京津冀、山西、河南和安徽等地带, 存在明显的西移和北移趋势, $PM_{2.5}$ 和 O_3 浓度的协同作用从春季到冬季主要呈下降趋势. 以上研究表明, $PM_{2.5}$ 浓度在时间和空间尺度上均具有明显的异质性.

同时, 国内外学者对于 $PM_{2.5}$ 浓度变化的驱动机制也展开了大量的研究. Casallas 等^[12] 研究发现, 以委内瑞拉、厄瓜多尔和哥伦比亚等为代表的南美洲西北部国家 $PM_{2.5}$ 浓度较高, 大多数国家的 $PM_{2.5}$ 浓度高是由野火和不合理排放引起的, $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化受政策影响十分显著. Lu 等^[13] 以长江三角洲地区为研究区, 分析土地利用和景观格局对长江三角洲地区 $PM_{2.5}$ 的影响机制, 发现具有较高植被覆盖度的林地和草地对 $PM_{2.5}$ 具有一定的抑制作用. 周志衡等^[14] 对中国中原城市群 $PM_{2.5}$ 浓度的驱动因子进行分析, 发现单因子中高程对 $PM_{2.5}$ 浓度变化的解释力最强, 因子间的交互效应对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响均表现为增强, 且高程和降水的交互作用对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响力最强, 人均 GDP、人口密度、夜间灯光、外商直接投资和第二产业均与 $PM_{2.5}$ 浓度之间存在一定的非线性关系. 张军等^[15] 研究发现, 海拔、气温、地形、相对湿度和降水等自然因子在关中平原城市群 $PM_{2.5}$ 污染中占有主导地位, 人均 GDP、地形起伏

度、能源消耗指数和年均气温等因子对 $PM_{2.5}$ 污染起到正向作用, 植被覆盖度、年降水量、海拔和年均相对湿度等因子对 $PM_{2.5}$ 污染起到负向作用.

成渝城市群是我国西部地区发展的重要支点, 在我国经济发展中具有举足轻重的战略地位^[16,17]. 然而, 目前有关成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度的研究中, 在空间尺度上, 大多数研究以省、市、县行政区或以城市群整体作为研究区^[11,14,15,18], 忽略了城市群各城市间 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化格局和驱动机制的差异性; 在时间尺度上, 大多使用季或单年等小尺度数据对 $PM_{2.5}$ 浓度进行分析, 忽略了在长时间序列下 $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化特征和影响其空间分异的驱动因子. 因此, 开展成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化的分析和基于时间和空间尺度的多维地理探测显得尤为重要. 本文以成渝城市群为研究区, 从年和季尺度上分析成渝城市群及各城市 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化格局, 并在时间(多个年份)和空间(城市群和城市)尺度上探测地形因子(高程、坡度和坡向)、气候因子(气温、降水、日照时数、相对湿度和风速)、植被因子(NDVI)和人文因子(道路密度、人口密度、夜间灯光和土地利用类型)以及因子间的交互作用对成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异的影响, 以期为当地大气环境保护政策的制定提供参考, 推动区域生态经济可持续发展.

1 研究区概况

成渝城市群位于中国西南地区, 地理范围在 $27^{\circ}39' \sim 33^{\circ}02'N$, $101^{\circ}56' \sim 110^{\circ}12'E$ 之间, 高程在 62 ~ 5 150 m 之间, 地势“四周高, 中部低”, 位于四川盆地的核心地带(图 1). 气候主要以亚热带季风气候为主, 四季分明, 水热条件丰沛, 年平均气温在 $16 \sim 18^{\circ}C$ 之间, 年均降水量大于 1 200 mm, 土壤肥沃, 资源丰富, 自然禀赋优良. 成渝城市群城市化率高, 交通体系完善, 人口数量庞大, 是我国重要的产业和

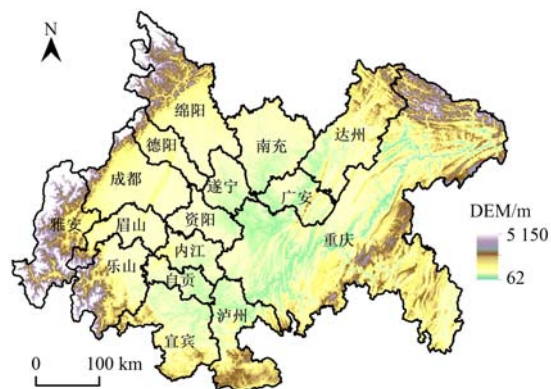


图 1 研究区示意

Fig. 1 Location of the study area

经济集聚区,是促进西部地区快速发展和增强国家综合实力的核心支点之一,在我国具有举足轻重的战略地位^[16],包括成都、德阳、绵阳、眉山、资阳、遂宁、乐山、雅安、自贡、泸州、内江、南充、宜宾、达州、广安和重庆。

2 材料与方法

2.1 数据来源与预处理

本文数据源主要由以下几个部分构成: $PM_{2.5}$ 数据集、自然因子数据集和人文因子数据集. $PM_{2.5}$ 数据集 (V5. GL. V4) 来源于 ChinaHigh $PM_{2.5}$ 数据集 (<https://weijing-rs.github.io/product.html>), 该数据集由韦晶博士和李占清教授团队开发与维护, 时间跨度为 2000~2021 年, 时间分辨率为每月, 空间分辨率为 1 km^[19,20]. 本文需要对数据进行投影、重采样和裁剪等操作, 得到空间分辨率为 1 km 的成渝城市群地区 $PM_{2.5}$ 数据集. 本文中定义春季为 3~5 月, 夏季为 6~8 月, 秋季为 9~11 月, 冬季为 12 月至次年 2 月, 由于缺少 2022 年 1 月和 2 月 $PM_{2.5}$ 数据, 因此, 取 2021 年 12 月 $PM_{2.5}$ 数据为 2021 年冬季数据.

自然因子数据包括气候因子、地形因子和 NDVI. 气候因子包括气温、降水、日照时数、相对湿度和风速, 主要来自国家气象科学数据中心 (<https://data.cma.cn/>) 提供的 2000~2021 年中国 2 416 个气象站点的逐日数据. 对于缺失的数据, 本文利用 IBMSPSS 软件进行数据插补, 并通过 ANUSPLIN 插值模型, 在考虑经度、纬度和高程的基础上生成空间分辨率为 1 km 的各气象因子的时间序列. 地形因子包括高程、坡向和坡度. DEM 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>), 其空间分辨率为 1 km, 并经过派生提取坡度和坡向. NDVI 数据集来自美国国家航天局发布的 MOD13A3 产品 (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), 时间分辨率为每月, 空间分辨率为 1 km, 时间跨度为 2000 年 2 月至 2021 年 12 月. 为了避免 2000 年 1 月 NDVI 数据缺失带来的影响, 本文对 NDVI 数据集进行了影像镶嵌、重采样、投影转换、裁剪和最大值合成等预处理, 得到成渝城市群地区 2000~2021 年 NDVI 年最大值数据集.

人文因子数据集包括道路密度、人口密度、夜间灯光和土地利用类型. 道路密度数据来源于 Open Street Map (<https://www.openstreetmap.org/#map=5/29.363/108.281>) 发布的道路路网数据, 对原始数据进行核密度分析, 得到道路密度数据. 人口密度数据来源于 WorldPop 发布的 PopulationDensity 数据 (<https://www.worldpop.org/>), 夜间灯光数据来源于

于 HarvardDataverse 发布的全球 NPP-VIIRS-like 扩展时间系列的夜间灯光数据 (<https://dataverse.harvard.edu/>), 土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/Default.aspx>), 人口密度数据、夜间灯光数据的时间分辨率均为每年, 空间分辨率均为 1 km, 时间跨度均为 2000~2020 年. 土地利用数据空间分辨率均为 1 km, 自 2000 年起, 每 5 a 一期.

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 非参数估计法的运算效率较高, 并且不受数据异常值干扰, 因此被广泛应用于长时间序列变化趋势的计算中^[21]. 本文利用 Theil-Sen Median 趋势分析法在年和季节尺度上得到成渝城市群地区 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:

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

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 $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$; Median 为取中值函数. 当 $\beta_{\text{slope}} > 0$ 时, 表示在研究时段内成渝城市群地区 $PM_{2.5}$ 浓度呈上升趋势, $PM_{2.5}$ 污染加剧; 当 $\beta_{\text{slope}} = 0$ 时, 表示在研究时段内成渝城市群地区 $PM_{2.5}$ 浓度基本不变; 当 $\beta_{\text{slope}} < 0$ 时, 表示在研究时段内成渝城市群地区 $PM_{2.5}$ 浓度呈下降趋势, $PM_{2.5}$ 污染减轻.

Mann-Kendall 显著性检验法可以用来检验变量在时间序列上变化的显著性^[21], 不需要方差的正态性假设, 从而能够避免异常值对最终结果的影响. 其公式如下:

给定 $PM_{2.5}$ 时间序列:

$$\{PM_{2.5i}\}, i = 2000, 2001, 2002, \dots, 2021 \quad (2)$$

计算检验统计量 S :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(PM_{2.5j} - PM_{2.5i}) \quad (3)$$

符号函数 sgn :

$$\text{sgn}(PM_{2.5j} - PM_{2.5i}) = \begin{cases} 1, & PM_{2.5j} - PM_{2.5i} > 0 \\ 0, & PM_{2.5j} - PM_{2.5i} = 0 \\ -1, & PM_{2.5j} - PM_{2.5i} < 0 \end{cases} \quad (4)$$

计算方差:

$$\text{VAR}(S) = \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(t_i-1)(2t_i+5) \right] \quad (5)$$

定义标准化统计量 Z :

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & S > 0, \\ 0, & S = 0, \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}}, & S < 0. \end{cases} \quad (6)$$

对于给定的显著性水平 α , 当 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ 时, 表明成渝城市群地区 PM_{2.5} 在研究时段内发生了显著变化, 反之则为轻微变化。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 $|Z| > 1.96$, 即置信水平为 95% 以下时, 为显著变化, 当 $0 < |Z| \leq 1.96$ 时, 为不显著变化。

2.2.2 地理探测器

地理探测器能够探测地理现象空间分异, 揭示其驱动机制^[22]。地理探测器基本原理为: 若自变量对因变量有着较强的影响, 那么其空间分布存在一定的相似性。本文利用地理探测器中的因子探测和交互探测模块, 探测 2000、2010 和 2021 年各影响因素对成渝城市群地区 PM_{2.5} 浓度空间分异的影响力, 以及因子间交互作用对 PM_{2.5} 浓度空间分异的影响, 以消除单一年份探测结果带来的不确定性, 从而更加准确地评估 2000 ~ 2021 年各影响因素对成渝城市群地区 PM_{2.5} 浓度空间分异的驱动作用强度。由于缺少 2021 年土地利用类型、人口密度和夜间灯光数据, 本文使用年份较为接近的 2020 年的数据代替。

因子探测计算公式如下:

$$q = 1 - \left(\frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \right) \quad (9)$$

式中, q 为因子对 PM_{2.5} 浓度空间分异的影响力, 取值区间为 $[0, 1]$, q 值越大则象征该因子对 PM_{2.5} 浓度空间分异的影响越大。 $h(1, 2, \dots, L)$ 为探测因子 X 的子区域数; L 为变量的分层, N 和 N_h 分别为总样本数和区域 h 样本数; σ^2 和 σ_h^2 分别为总区域的方差和区域 h 的方差。

交互作用部分主要用于探究因子和因子之间是否存在相互影响, 并且能够探测出因子在交互作用下对因变量的影响程度。如表 1 所示, 本文选取 13 种影响因素, 以格网为基本单元, 对成渝城市群地区 PM_{2.5} 进行因子探测和交互探测。

3 结果与分析

3.1 成渝城市群 PM_{2.5} 浓度时空变化特征

3.1.1 成渝城市群 PM_{2.5} 浓度时间变化特征

如图 2 所示, 从整体上看, 成渝城市群年、春

表 1 影响因素分类

Table 1 Types of influencing factors	
因子类型	变量名称
地形因子	高程(X_1)、坡向(X_2)和坡度(X_3)
气候因子	气温(X_4)、降水(X_5)、日照时数(X_6)、相对湿度(X_7)和风速(X_8)
植被因子	NDVI(X_9)
人文因子	路网密度(X_{10})、人口密度(X_{11})、夜间灯光(X_{12})和土地利用类型(X_{13})

季、夏季、秋季和冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值分别为 49.60、47.75、32.43、43.76 和 74.17 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。年际尺度上, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最小值出现在 2020 年, 为 28.98 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 最大值出现在 2013 年, 为 63.02 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。2000 ~ 2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 浓度年均值呈波动下降趋势, 变化斜率为 $-0.91 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ 。季节尺度上, 冬季 PM_{2.5} 浓度下降最快, 变化斜率为 $-1.26 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$, 夏季 PM_{2.5} 浓度下降最慢, 为 $-0.72 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ 。

从各城市尺度上看, 2000 ~ 2021 年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 多年均值较高的城市主要是自贡(62.80 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、内江(59.95 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和资阳(56.96 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值最低的城市是雅安(33.00 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。各城市 PM_{2.5} 浓度均在冬季达到最大值, 夏季达到最小值。年际尺度上, 2000 ~ 2021 年各城市 PM_{2.5} 浓度均呈下降趋势, 下降较快的城市主要是资阳 $[-1.27 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}]$ 、遂宁 $[1.27 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}]$ 和内江 $[-1.25 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}]$, 下降最慢的城市是雅安 $[-0.43 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}]$ 。季节尺度上, 4 个季节 PM_{2.5} 浓度下降最慢的均为雅安, 而浓度下降较快的城市在不同季节呈现出一定差异, 例如, 春季 PM_{2.5} 浓度下降较快的城市主要是资阳、遂宁和内江; 夏季和秋季表现较为一致, 主要是内江、资阳和自贡; 冬季 PM_{2.5} 浓度下降较快的城市主要是广安、遂宁和资阳。

综上所述, 2000 ~ 2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 污染较为严重, 各年 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值均超过环境空气质量标准(GB 3095-2012)所规定的 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 尤其是冬季 PM_{2.5} 污染最为突出, 但 2000 ~ 2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 浓度整体呈波动下降态势。在年际和季节尺度上, 自贡、内江、资阳和广安的 PM_{2.5} 浓度均值较高且 PM_{2.5} 浓度下降较快, 雅安 PM_{2.5} 浓度均值较低且 PM_{2.5} 浓度下降较慢。

3.1.2 成渝城市群 PM_{2.5} 浓度空间变化特征

由图 3(a) 和表 2 可知, 从整体上看, 成渝城市群年、春季、夏季、秋季和冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值分别在 17.92 ~ 73.30、18.32 ~ 68.86、16.14 ~ 48.83、

16.83 ~ 67.37 和 19.75 ~ 109.74 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均呈现出“中间高, 四周低”的空间分布格局. 年际尺度上, 2000 ~ 2021 年成渝城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化趋势呈现出明显的空间异质性, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 变化斜率在 $-1.70 \sim -0.05 \mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{a})^{-1}$ 之间, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈显著下降的面积占 11.76%, 主要分布在重庆西部. 季节尺度上, 夏季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈显著下降的面积占比最大, 为 91.25%, 分布于成渝城市群全域; 春季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈显著下降的面积占比次之, 为 41.02%, 主要分布在自贡、内江、重庆西部和成都东部等成渝城市群中部; 冬季 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 呈显著下降的面积占比最小, 为 16.77%, 主要分布在重庆西部和东北部.

从各城市尺度上看, 2000 ~ 2021 年成渝城市群年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈显著下降趋势的面积占比较大的主要是泸州 (22.39%)、眉山 (18.98%) 和宜宾 (18.17%), 而呈显著下降趋势面积最小的是达州 (0.15%)、遂宁 (0.04%) 和南充 (0.00%). 季节尺度上, 春季成渝城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈显著下降趋势的面积占比较大的主要是遂宁 (75.52%)、和广安 (71.51%), 呈显著下降趋势面积最小的城市是自贡 (10.99%). 夏季成渝城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈显著下降趋势的面积占比较大的主要是资阳 (99.43%)、自贡 (97.09%) 和内江 (96.63%), 面积占比较小的城市主要是达州和雅安, 分别为 5.88% 和 2.95%. 秋季除乐山和雅安 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈显著下降趋势的面

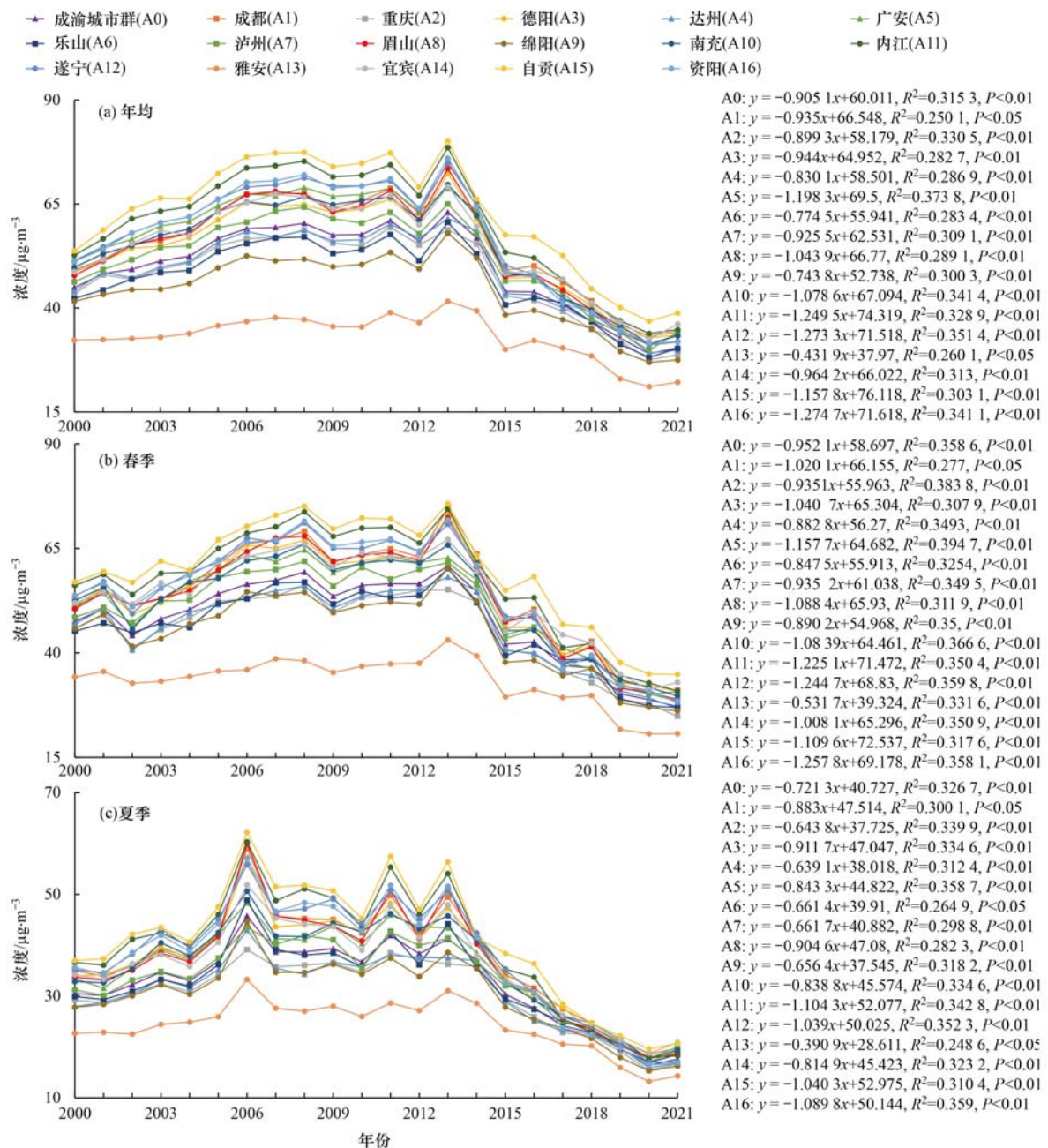


图2 2000 ~ 2021 年成渝城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时间变化

Fig. 2 Temporal variation in $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021

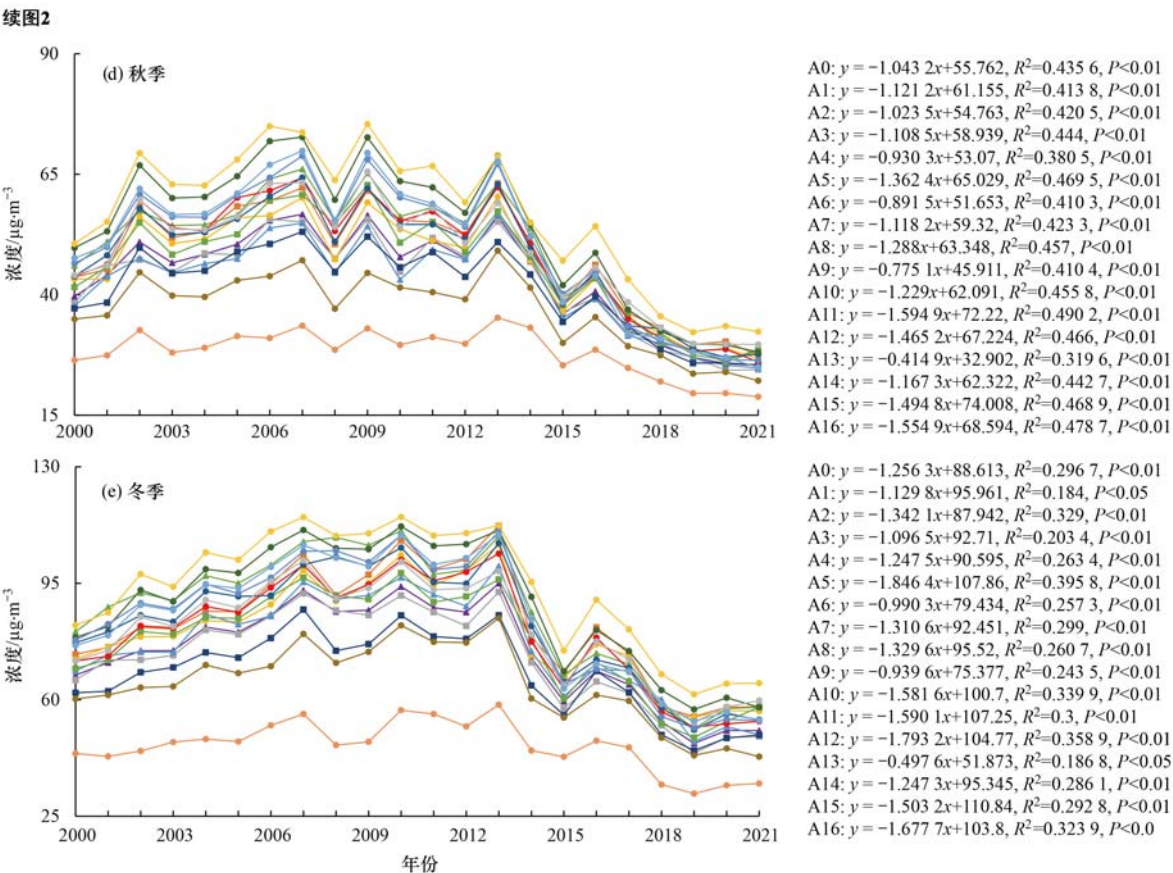


表 2 2000 ~ 2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 浓度变化显著性统计/%

Table 2 Statistical results of the significance test of PM_{2.5} concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021/%

位置	显著下降面积占比					不显著下降面积占比				
	年	春季	夏季	秋季	冬季	年	春季	夏季	秋季	冬季
成渝城市群(A0)	11.76	32.58	41.02	91.25	16.77	88.24	67.42	58.98	8.75	83.23
成都(A1)	4.72	16.41	68.02	90.53	0.51	95.28	83.59	31.98	9.47	99.49
重庆(A2)	17.88	30.44	26.12	96.60	33.37	82.12	69.56	73.88	3.40	66.63
德阳(A3)	11.31	56.50	65.26	90.97	0.00	88.69	43.50	34.74	9.03	100.00
达州(A4)	0.15	14.34	5.88	97.43	3.03	99.85	85.66	94.12	2.57	96.97
广安(A5)	10.85	71.51	88.45	97.32	45.82	89.15	28.49	11.55	2.68	54.18
乐山(A6)	4.40	16.19	57.65	74.32	1.81	95.60	83.81	42.35	25.68	98.19
泸州(A7)	22.39	40.70	34.14	96.52	11.95	77.61	59.30	65.86	3.48	88.05
眉山(A8)	18.98	20.81	80.41	89.68	0.60	81.02	79.19	19.59	10.32	99.40
绵阳(A9)	7.57	59.23	29.05	85.53	8.77	92.43	40.77	70.95	14.47	91.23
南充(A10)	0.00	28.49	17.01	100.00	16.64	100.00	71.51	82.99	0.00	83.36
内江(A11)	15.24	33.18	96.63	100.00	5.03	84.76	66.82	3.37	0.00	94.97
遂宁(A12)	0.04	75.52	83.75	100.00	0.71	99.96	24.48	16.25	0.00	99.29
雅安(A13)	7.66	28.65	2.95	44.81	8.31	92.34	71.35	97.05	55.19	91.69
宜宾(A14)	18.17	25.53	84.40	99.98	6.98	81.83	74.47	15.60	0.02	93.02
自贡(A15)	11.18	10.99	97.09	99.95	10.70	88.82	89.01	2.91	0.05	89.30
资阳(A16)	5.60	40.17	99.43	100.00	11.52	94.40	59.83	0.57	0.00	88.48

积占比分别为 74.32% 和 44.81% 以外,其余城市 PM_{2.5} 浓度呈显著下降趋势的面积占比均高于 85%,其中,南充、内江、遂宁和资阳 PM_{2.5} 浓度呈显著下降趋势的面积占比均为 100%。冬季成渝城市群各城市 PM_{2.5} 浓度呈显著下降趋势的面积占比均较小,除广安和重庆的面积占比分别为 45.82% 和 33.37% 外,其余城市的面积占比均小于 17%,其中,德阳 PM_{2.5} 浓

度呈显著下降趋势面积占比为 0.00%。

综上所述,2000 ~ 2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 浓度在年际和季节尺度上均呈现出“中间高,四周低”的空间分布格局。年际尺度上,PM_{2.5} 浓度呈显著下降的区域主要集中在重庆西部等地;季节尺度上,秋季 PM_{2.5} 浓度呈显著下降的面积占比最大,主要分布在南充、内江、遂宁和资阳等市,而冬季 PM_{2.5} 浓

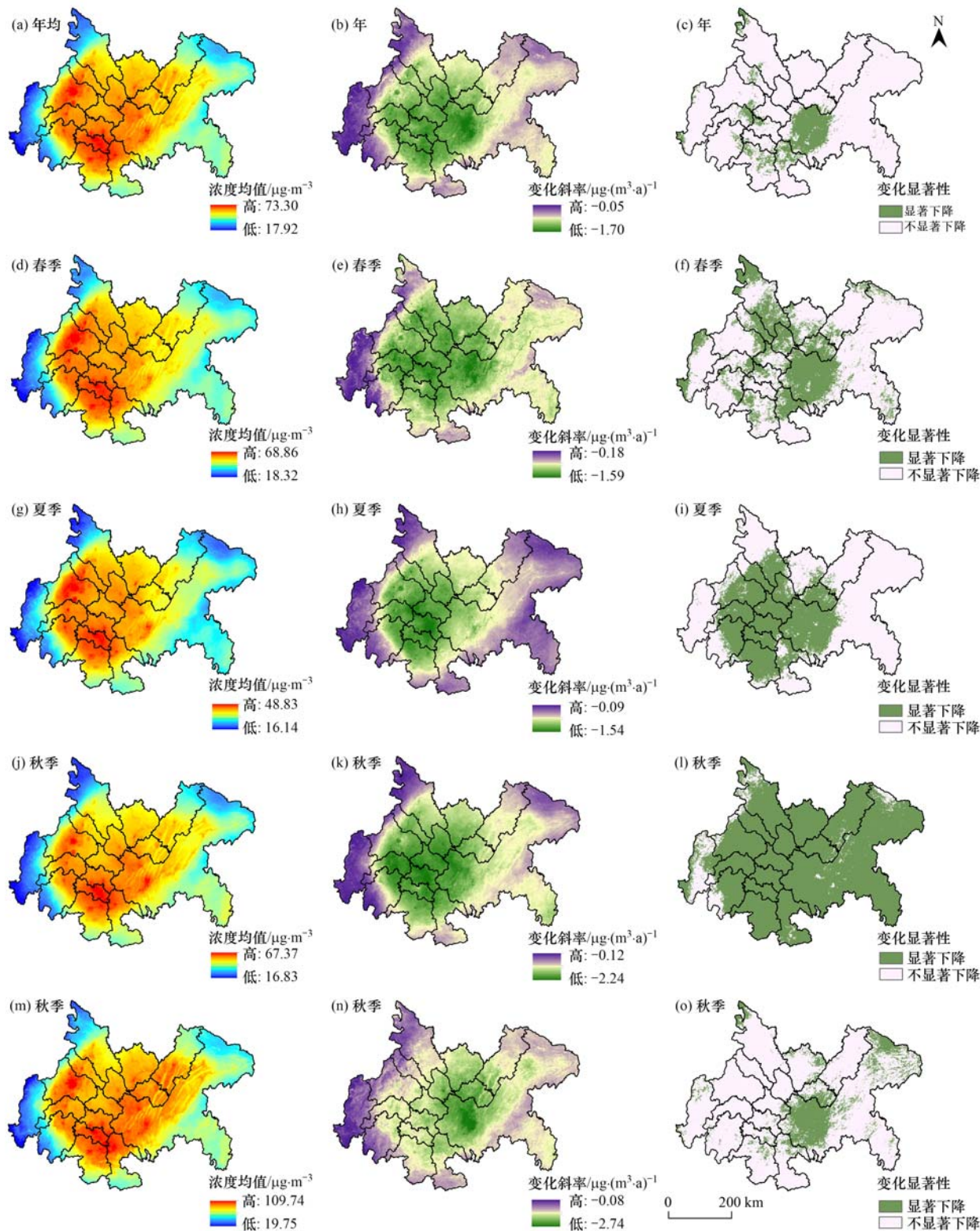


图3 2000~2021年成渝城市群PM_{2.5}浓度均值、变化斜率和显著性检验空间分布

Fig. 3 Spatial variation in the average, changing trend, and significance test of PM_{2.5} concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021

度呈显著下降的面积占比最小,主要分布在广安和重庆.

3.2 成渝城市群PM_{2.5}浓度影响因子多维探测

3.2.1 成渝城市群PM_{2.5}浓度因子探测

本文在年际尺度上探测2000、2010和2021年

各驱动因子对成渝城市群PM_{2.5}浓度空间分异的影响力,并统计各年份影响力前3的影响因子以揭示驱动成渝城市群PM_{2.5}浓度空间分异的主导因子,结果如表3所示.从整体上看,2000~2021年成渝城市群PM_{2.5}浓度空间分异的主要驱动因子为高程、

坡度和路网密度. 从各城市尺度上看, 2000 ~ 2021 年各城市出现频率较高且影响力较大的单因子分别为: 高程(成都、乐山、泸州、眉山和宜宾)、坡度(成都)、气温(德阳和绵阳)、日照时数(资阳)、相对湿度(南充和雅安)和路网密度(成都、重庆、达州、乐山、泸州、绵阳、内江、雅安、宜宾和自贡).

对各年份各人文因子、地形因子、植被因子和气候因子探测的 q 值取平均, 得出各年份四大因子影响力占比大小(图 4). 从整体上看, 2000 ~ 2021 年影响成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度空间分异的因子影响力占比大小为: 地形因子 (40.14%) > 人文因子

(23.88%) > 植被因子 (23.14%) > 气候因子 (12.85%). 此外, 2000 ~ 2021 年, 地形因子的相对作用占比从 51.39% 上升至 54.17%, 人文因子的相对作用占比从 29.89% 上升至 34.51%, 而植被因子和气候因子的相对作用占比有所下降, 分别从 30.52% 降低至 24.52% 和从 18.72% 下降至 11.32%. 从各城市尺度上看, 2000 ~ 2021 年受地形因子主导的城市主要有: 成都、德阳、广安、乐山、泸州和宜宾; 受人文因子主导的城市主要有内江和自贡; 受植被因子主导的城市主要是眉山; 受气候因子主导的城市主要有重庆、达州、绵阳、南充、

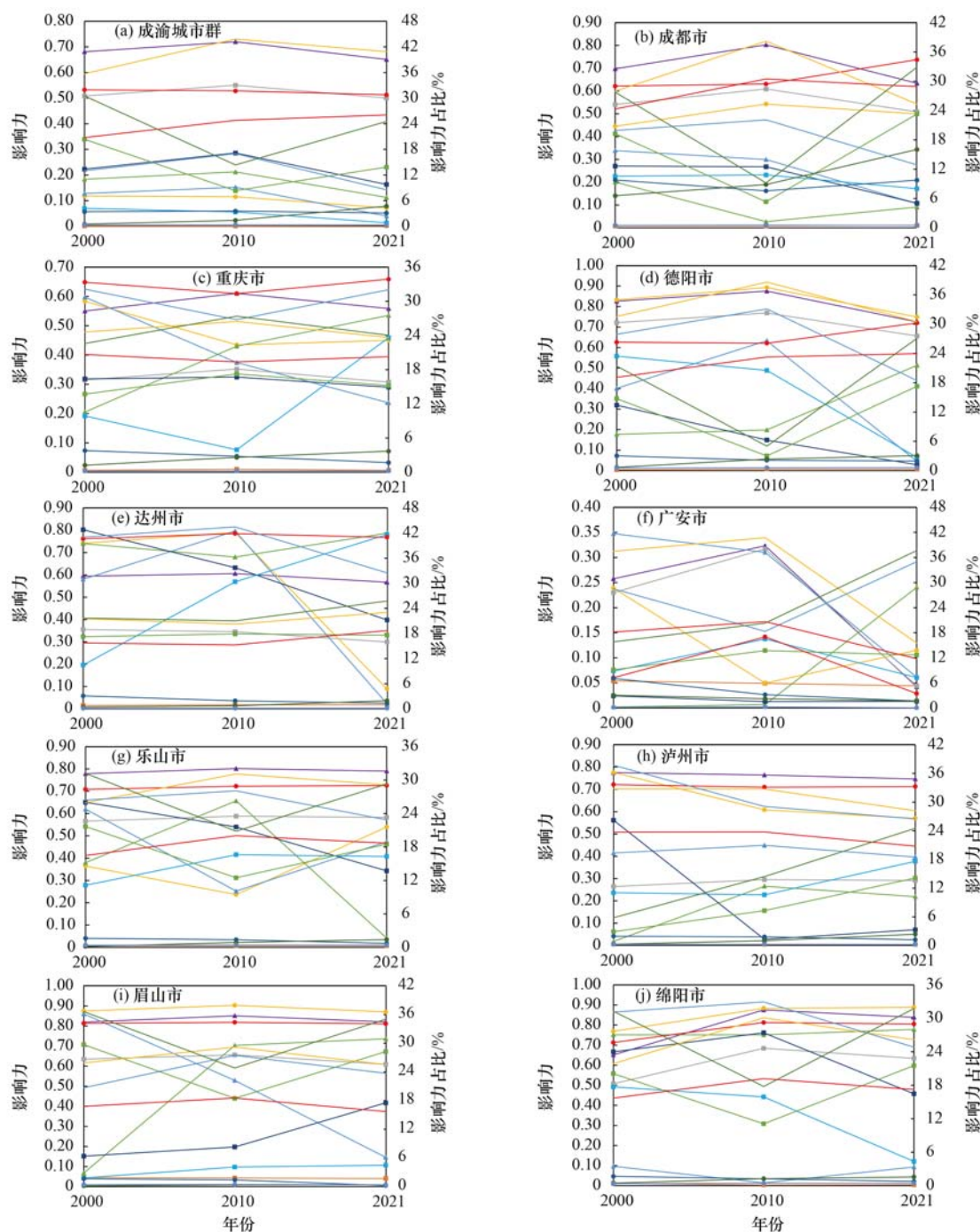
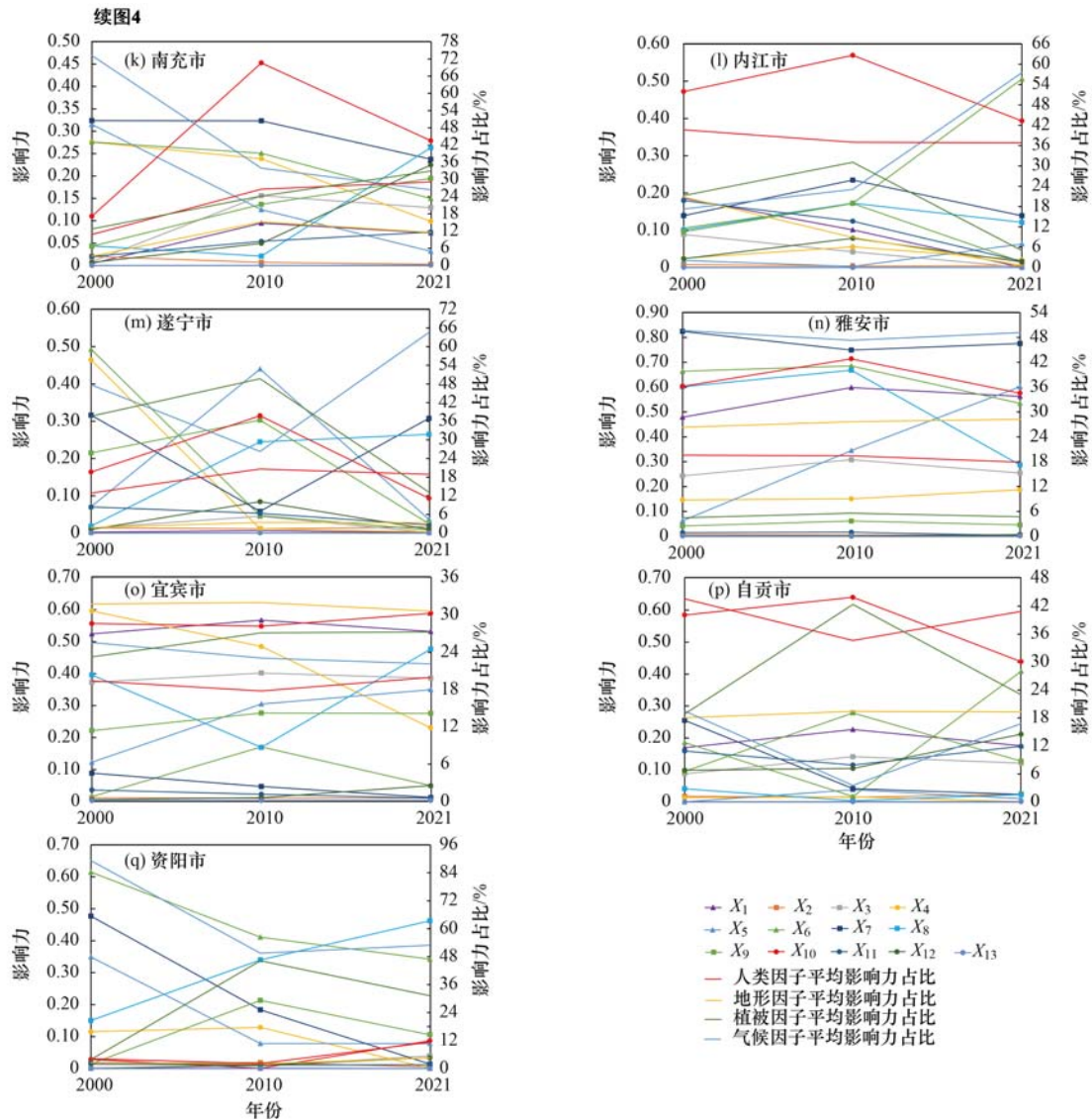


图 4 2000、2010 和 2021 年成渝城市群 $PM_{2.5}$ 因子探测

Fig. 4 Influencing detection of $PM_{2.5}$ concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration in 2000, 2010, and 2021

表 3 2000、2010 和 2021 年成渝城市群因子前 3 探测 q 值Table 3 Top three q values of influencing factors in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration in 2000, 2010, and 2021

位置	2000 年	2010 年	2021 年
成渝城市群 (A0)	X_1 (0.68)、 X_{10} (0.53) 和 X_3 (0.51)	X_1 (0.72)、 X_3 (0.55) 和 X_{10} (0.53)	X_1 (0.65)、 X_{10} (0.51) 和 X_3 (0.50)
成都 (A1)	X_1 (0.70)、 X_{10} (0.62) 和 X_3 (0.54)	X_1 (0.80)、 X_{10} (0.63) 和 X_3 (0.61)	X_{10} (0.74)、 X_1 (0.63) 和 X_3 (0.51)
重庆 (A2)	X_{10} (0.65)、 X_5 (0.60) 和 X_4 (0.58)	X_1 (0.61)、 X_{10} (0.61) 和 X_4 (0.43)	X_{10} (0.66)、 X_1 (0.56) 和 X_6 (0.54)
德阳 (A3)	X_1 (0.83)、 X_4 (0.83) 和 X_3 (0.72)	X_4 (0.89)、 X_1 (0.88) 和 X_3 (0.77)	X_4 (0.75)、 X_1 (0.73) 和 X_{10} (0.72)
达州 (A4)	X_7 (0.80)、 X_{10} (0.76) 和 X_4 (0.74)	X_5 (0.80)、 X_4 (0.79) 和 X_{10} (0.79)	X_6 (0.79)、 X_8 (0.78) 和 X_{10} (0.77)
广安 (A5)	X_5 (0.35)、 X_1 (0.26) 和 X_4 (0.24)	X_1 (0.32)、 X_3 (0.32) 和 X_5 (0.31)	X_6 (0.24)、 X_4 (0.11) 和 X_9 (0.11)
乐山 (A6)	X_1 (0.78)、 X_{10} (0.71) 和 X_7 (0.65)	X_1 (0.80)、 X_{10} (0.72) 和 X_6 (0.66)	X_1 (0.79)、 X_{10} (0.73) 和 X_3 (0.58)
泸州 (A7)	X_4 (0.78)、 X_1 (0.77) 和 X_{10} (0.72)	X_1 (0.76)、 X_{10} (0.71) 和 X_4 (0.61)	X_1 (0.75)、 X_{10} (0.71) 和 X_3 (0.57)
眉山 (A8)	X_4 (0.87)、 X_5 (0.86) 和 X_1 (0.82)	X_4 (0.90)、 X_1 (0.85) 和 X_{10} (0.82)	X_4 (0.87)、 X_1 (0.82) 和 X_{10} (0.81)
绵阳 (A9)	X_4 (0.77)、 X_6 (0.75) 和 X_{10} (0.71)	X_1 (0.88)、 X_4 (0.88) 和 X_{10} (0.81)	X_4 (0.87)、 X_1 (0.84) 和 X_{10} (0.81)
南充 (A10)	X_5 (0.32)、 X_7 (0.32) 和 X_6 (0.28)	X_{10} (0.45)、 X_7 (0.32) 和 X_6 (0.25)	X_{10} (0.28)、 X_8 (0.26) 和 X_7 (0.24)
内江 (A11)	X_{10} (0.47)、 X_1 (0.19) 和 X_{11} (0.18)	X_{10} (0.57)、 X_7 (0.23) 和 X_8 (0.17)	X_6 (0.51)、 X_{10} (0.39) 和 X_7 (0.14)
遂宁 (A12)	X_6 (0.49)、 X_4 (0.46) 和 X_7 (0.32)	X_5 (0.44)、 X_{10} (0.31) 和 X_9 (0.30)	X_7 (0.31)、 X_8 (0.26) 和 X_{10} (0.09)
雅安 (A13)	X_7 (0.82)、 X_6 (0.66) 和 X_{10} (0.60)	X_7 (0.75)、 X_{10} (0.71) 和 X_6 (0.69)	X_7 (0.78)、 X_5 (0.60) 和 X_{10} (0.58)
宜宾 (A14)	X_4 (0.60)、 X_{10} (0.56) 和 X_1 (0.52)	X_1 (0.57)、 X_{10} (0.55) 和 X_4 (0.48)	X_{10} (0.59)、 X_1 (0.53) 和 X_8 (0.48)
自贡 (A15)	X_{10} (0.58)、 X_7 (0.26) 和 X_6 (0.19)	X_{10} (0.64)、 X_9 (0.28) 和 X_1 (0.23)	X_{10} (0.44)、 X_6 (0.41) 和 X_{12} (0.21)
资阳 (A16)	X_6 (0.61)、 X_7 (0.48) 和 X_5 (0.35)	X_6 (0.41)、 X_8 (0.34) 和 X_9 (0.21)	X_8 (0.46)、 X_6 (0.34) 和 X_9 (0.11)

遂宁、雅安和资阳。地形因子和人文因子相对作用占比上升最为显著的城市均为南充,下降最为显著的城市均为内江,而气候因子相对作用占比上升最为显著的城市是内江,下降最为显著的城市是南充,植被因子相对作用占比上升最为显著的城市为资阳,下降最为显著的城市是遂宁。

综上所述,2000 ~ 2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 浓度空间分异受地形、人文、植被和气候因子共同影响,主要驱动因子为高程、坡度和路网密度,地形因子对成渝城市群 PM_{2.5} 空间分异相对作用最强,气候因子成渝城市群 PM_{2.5} 空间分异相对作用最弱,且研究时段内,地形因子和人文因子的相对作用呈递增趋势,气候因子和植被因子的相对作用呈递减趋势。

3.2.2 成渝城市群 PM_{2.5} 浓度交互探测

如表 4 所示,2000 ~ 2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 浓度影响因子的双因子作用 q 值整体上大于单因子 q 值,各影响因子交互作用主要表现出双因子增强或非线性增强。从整体上看,2000、2010 和 2021 年成渝城市群浓度空间分异均受高程 $\cap$ 路网密度和高程 $\cap$ 坡度的影响。除此之外,2000、2010 和 2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 空间分异还分别受高程 $\cap$ 降水(0.47)、高程 $\cap$ 日照时数(0.76)和高程 $\cap$ 土地利用类型(0.68)的影响。

从各城市群尺度上看,各城市 PM_{2.5} 浓度空间分

异受地形因子、气候因子和人文因子的综合作用。从 2000、2010 和 2021 年这 3 个年份中选取各城市出现频率较高且影响力较大的因子组合,可以发现,受地形因子 $\cap$ 气候因子组合较为明显的城市及平均组合影响力为:乐山[相对湿度 $\cap$ 高程(0.90)],受地形因子 $\cap$ 人文因子组合较为明显的城市及平均组合影响力为:成都[高程 $\cap$ 路网密度(0.88)],受气候因子 $\cap$ 人文因子组合较为明显的城市及平均组合影响力为:成都[路网密度 $\cap$ 气温(0.85)]、德阳[路网密度 $\cap$ 气温(0.91)]和乐山[路网密度 $\cap$ 相对湿度(0.92)]。部分城市受单一类别影响因子的交互十分显著,达州、眉山、雅安和资阳受单一气候因子交互作用(气候因子 $\cap$ 气候因子)十分显著,内江和自贡受单一人文因子(人文因子 $\cap$ 人文因子)交互作用十分显著。

综上所述,2000 ~ 2021 年影响成渝城市群 PM_{2.5} 空间分异较为显著的交互组合主要是高程与路网密度、坡度、降水、日照时数和土地利用类型。受地形因子 $\cap$ 气候因子组合较为明显的城市为乐山,受地形因子 $\cap$ 人文因子组合较为明显的城市为成都,受气候因子 $\cap$ 人文因子组合较为明显的城市为成都、德阳和乐山,达州、眉山、雅安和资阳受单一气候因子(气候因子 $\cap$ 气候因子)交互作用十分显著,内江和自贡受单一人文因子(人文因子 $\cap$ 人文因子)交互作用十分显著。

表 4 2000、2010 和 2021 年成渝城市群前 3 交互探测 q 值

Table 4 Top three q values of interaction detection between influencing factors in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration in 2000, 2010, and 2021

位置	2000 年	2010 年	2021 年
成渝城市群(A0)	$X_{10} \cap X_1(0.77)$ 、 $X_3 \cap X_1(0.73)$ 和 $X_5 \cap X_1(0.72)$	$X_{10} \cap X_1(0.80)$ 、 $X_3 \cap X_1(0.78)$ 和 $X_6 \cap X_1(0.76)$	$X_{10} \cap X_1(0.74)$ 、 $X_3 \cap X_1(0.70)$ 和 $X_{13} \cap X_1(0.68)$
成都(A1)	$X_{10} \cap X_1(0.84)$ 、 $X_{10} \cap X_4(0.81)$ 和 $X_{10} \cap X_9(0.81)$	$X_{10} \cap X_1(0.91)$ 、 $X_{10} \cap X_4(0.88)$ 和 $X_9 \cap X_1(0.86)$	$X_{10} \cap X_1(0.89)$ 、 $X_{10} \cap X_4(0.87)$ 和 $X_{10} \cap X_9(0.85)$
重庆(A2)	$X_{10} \cap X_5(0.79)$ 、 $X_{10} \cap X_1(0.77)$ 和 $X_1 \cap X_5(0.77)$	$X_{10} \cap X_1(0.78)$ 、 $X_7 \cap X_1(0.76)$ 和 $X_6 \cap X_1(0.76)$	$X_{10} \cap X_5(0.82)$ 、 $X_{10} \cap X_8(0.79)$ 和 $X_{10} \cap X_1(0.78)$
德阳(A3)	$X_{10} \cap X_4(0.89)$ 、 $X_8 \cap X_1(0.89)$ 和 $X_{10} \cap X_1(0.89)$	$X_{10} \cap X_4(0.94)$ 、 $X_4 \cap X_1(0.93)$ 和 $X_{13} \cap X_4(0.92)$	$X_9 \cap X_1(0.91)$ 、 $X_{10} \cap X_4(0.91)$ 和 $X_{10} \cap X_3(0.88)$
达州(A4)	$X_6 \cap X_4(0.88)$ 、 $X_7 \cap X_5(0.88)$ 和 $X_7 \cap X_6(0.88)$	$X_6 \cap X_5(0.92)$ 、 $X_6 \cap X_4(0.89)$ 和 $X_{10} \cap X_6(0.88)$	$X_8 \cap X_6(0.90)$ 、 $X_8 \cap X_4(0.89)$ 和 $X_{10} \cap X_8(0.89)$
广安(A5)	$X_5 \cap X_3(0.47)$ 、 $X_5 \cap X_{13}(0.47)$ 和 $X_4 \cap X_1(0.45)$	$X_{13} \cap X_5(0.52)$ 、 $X_5 \cap X_3(0.52)$ 和 $X_5 \cap X_1(0.49)$	$X_8 \cap X_4(0.37)$ 、 $X_7 \cap X_6(0.35)$ 和 $X_8 \cap X_6(0.32)$
乐山(A6)	$X_{10} \cap X_7(0.91)$ 、 $X_7 \cap X_1(0.89)$ 和 $X_{10} \cap X_1(0.87)$	$X_{10} \cap X_7(0.92)$ 、 $X_7 \cap X_1(0.90)$ 和 $X_5 \cap X_1(0.90)$	$X_{10} \cap X_7(0.93)$ 、 $X_7 \cap X_1(0.91)$ 和 $X_{10} \cap X_8(0.89)$
泸州(A7)	$X_4 \cap X_1(0.88)$ 、 $X_{10} \cap X_4(0.88)$ 和 $X_5 \cap X_4(0.87)$	$X_{10} \cap X_1(0.85)$ 、 $X_4 \cap X_1(0.83)$ 和 $X_5 \cap X_1(0.83)$	$X_{10} \cap X_6(0.87)$ 、 $X_{10} \cap X_1(0.84)$ 和 $X_{10} \cap X_5(0.82)$
眉山(A8)	$X_7 \cap X_4(0.94)$ 、 $X_{10} \cap X_4(0.93)$ 和 $X_8 \cap X_4(0.93)$	$X_{10} \cap X_4(0.95)$ 、 $X_6 \cap X_4(0.95)$ 和 $X_6 \cap X_5(0.94)$	$X_7 \cap X_4(0.95)$ 、 $X_6 \cap X_4(0.94)$ 和 $X_7 \cap X_1(0.93)$
绵阳(A9)	$X_7 \cap X_1(0.86)$ 、 $X_4 \cap X_1(0.85)$ 和 $X_6 \cap X_1(0.84)$	$X_6 \cap X_4(0.95)$ 、 $X_{10} \cap X_5(0.95)$ 和 $X_{10} \cap X_4(0.94)$	$X_{10} \cap X_4(0.94)$ 、 $X_{10} \cap X_6(0.93)$ 和 $X_6 \cap X_4(0.93)$
南充(A10)	$X_5 \cap X_3(0.48)$ 、 $X_7 \cap X_3(0.46)$ 和 $X_5 \cap X_2(0.45)$	$X_{10} \cap X_6(0.58)$ 、 $X_{10} \cap X_4(0.53)$ 和 $X_{10} \cap X_3(0.52)$	$X_9 \cap X_7(0.51)$ 、 $X_{12} \cap X_8(0.46)$ 和 $X_{12} \cap X_{10}(0.46)$
内江(A11)	$X_{11} \cap X_{10}(0.57)$ 、 $X_{10} \cap X_7(0.52)$ 和 $X_{10} \cap X_9(0.52)$	$X_{10} \cap X_9(0.65)$ 、 $X_{10} \cap X_6(0.64)$ 和 $X_{11} \cap X_{10}(0.62)$	$X_8 \cap X_6(0.62)$ 、 $X_{10} \cap X_8(0.58)$ 和 $X_{10} \cap X_6(0.58)$
遂宁(A12)	$X_6 \cap X_4(0.63)$ 、 $X_{11} \cap X_6(0.59)$ 和 $X_9 \cap X_6(0.57)$	$X_9 \cap X_5(0.61)$ 、 $X_8 \cap X_5(0.54)$ 和 $X_{12} \cap X_5(0.53)$	$X_8 \cap X_7(0.38)$ 、 $X_{10} \cap X_7(0.36)$ 和 $X_7 \cap X_6(0.34)$
雅安(A13)	$X_7 \cap X_4(0.86)$ 、 $X_8 \cap X_7(0.86)$ 和 $X_9 \cap X_7(0.85)$	$X_{10} \cap X_7(0.87)$ 、 $X_{10} \cap X_8(0.86)$ 和 $X_7 \cap X_1(0.86)$	$X_7 \cap X_4(0.89)$ 、 $X_7 \cap X_6(0.89)$ 和 $X_7 \cap X_1(0.87)$
宜宾(A14)	$X_8 \cap X_4(0.78)$ 、 $X_{10} \cap X_4(0.77)$ 和 $X_4 \cap X_1(0.75)$	$X_{10} \cap X_4(0.74)$ 、 $X_{10} \cap X_1(0.74)$ 和 $X_4 \cap X_1(0.73)$	$X_{10} \cap X_1(0.74)$ 、 $X_{10} \cap X_8(0.74)$ 和 $X_{10} \cap X_3(0.71)$
自贡(A15)	$X_{11} \cap X_{10}(0.69)$ 、 $X_{12} \cap X_{10}(0.66)$ 和 $X_{10} \cap X_9(0.66)$	$X_{10} \cap X_9(0.76)$ 、 $X_{10} \cap X_5(0.74)$ 和 $X_{12} \cap X_{10}(0.70)$	$X_{12} \cap X_6(0.65)$ 、 $X_{12} \cap X_{10}(0.63)$ 和 $X_{10} \cap X_8(0.56)$
资阳(A16)	$X_6 \cap X_4(0.73)$ 、 $X_8 \cap X_6(0.70)$ 和 $X_7 \cap X_4(0.66)$	$X_9 \cap X_6(0.56)$ 、 $X_8 \cap X_6(0.52)$ 和 $X_9 \cap X_8(0.49)$	$X_8 \cap X_6(0.64)$ 、 $X_8 \cap X_7(0.61)$ 和 $X_8 \cap X_5(0.52)$

4 讨论

2000~2021年成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度呈现出“中间高,四周低”的空间分布特征,近年来 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈波动下降趋势,呈下降趋势的面积覆盖全域,这与已有的结论一致^[23~25].结合因子探测结果可知,人文因子对成渝城市群 $PM_{2.5}$ 空间分异的影响力呈上升趋势.自2003年以来,中国国务院启动了大气污染防治重点(APPCCK)计划和大气污染防治行动计划等多项大气污染治理措施^[26~28],以减小环境污染和经济发展之间的矛盾.这可能是使得成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度呈下降趋势的原因之一.成渝城市群冬季 $PM_{2.5}$ 污染相较于其余季节更为严重.一方面,受冬季冷空气和产业耗能增加的影响, $PM_{2.5}$ 产量高,但扩散速率降低,大量的 $PM_{2.5}$ 在四川盆地内形成堆积,另一方面,成渝城市群冬季降水较少, $PM_{2.5}$ 沉降和溶解速率减慢,导致冬季 $PM_{2.5}$ 污染达到顶峰,这与已有研究的结论基本一致^[29~32].

成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度污染严重, $PM_{2.5}$ 浓度呈显著下降的区域集中在重庆西部等地带. $PM_{2.5}$ 的一次源,即最初产生来源,主要为汽车尾气、工业废气排放和土壤扬尘等,以上来源和城市工业化息息相关^[33~35].除此以外, $PM_{2.5}$ 浓度和城市化进程有着密切的联系^[36~38].由刘青云等^[39]的研究可知,成渝城市群具有较高的城市紧凑性,而紧凑型的城市分布格局在成渝城市群 $PM_{2.5}$ 的污染中起到了负面作用^[23],这可能是导致成渝城市群 $PM_{2.5}$ 污染较为严重的原因之一.加之,重庆西部位于成渝城市群中心地带,地势相对平缓,受盆地地形和风速的影响^[24], $PM_{2.5}$ 容易形成堆积,导致该区域 $PM_{2.5}$ 污染严重.已有研究表明,中国经济发达地带的 $PM_{2.5}$ 污染控制效率(PPCE)显著高于欠发达地带,技术进步是提高PPCE的重要因素^[40],重庆经济水平较高^[41],且在 $PM_{2.5}$ 的治理上与周边川东北城市群和川南城市群建立大气污染联防联控工作^[42],这可能是使得重庆西部地带 $PM_{2.5}$ 浓度呈显著下降的原因之一,这与地理探测结果基本一致.

高程、坡度和路网密度是影响成渝城市群 $PM_{2.5}$ 空间分异的最主要因子,地形因子 $\cap$ 人文因子对成渝城市群 $PM_{2.5}$ 空间分异的影响十分显著.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,而汽车排放是 $PM_{2.5}$ 产生的重要来源^[43,44],深刻地影响着区域 $PM_{2.5}$ 浓度变化.由郭晓梅等^[45]的研究可知,地形在四川盆地 $PM_{2.5}$ 的贡献中约占70%,是成渝城市群 $PM_{2.5}$ 污染问题的核心要

素.值得一提的是,已有研究表明,植被具有降低 $PM_{2.5}$ 的功能^[46~48],南充、遂宁、雅安和资阳等城市的 $PM_{2.5}$ 空间分异受植被因子影响显著.因此,在防治成渝城市群 $PM_{2.5}$ 污染问题时,应当具备全局视野,节能减排的同时需要注重合理规划工业产业布局 and 交通线路,减弱地形因子对 $PM_{2.5}$ 污染的负面作用,同时要在主要道路和山地进行植被保护,多方位协同治理 $PM_{2.5}$ 污染.

2000~2021年地形因子和人文因子对成渝城市群 $PM_{2.5}$ 空间分异的相对作用呈上升趋势,而气候因子和植被因子的相对作用呈下降趋势.结合时空分析结论可知,成渝城市群 $PM_{2.5}$ 整体呈下降趋势,这一定程度上能够反映出地形因子和人文因子在降低 $PM_{2.5}$ 上产生了一定的正向作用,而植被因子和气候因子在一定程度上起到了负向作用.从人文因子上看,随着国家提出“十五计划”^[49]和“气十条”^[50]等相关环保政策,极大地推动人类活动朝向减轻 $PM_{2.5}$ 的方向发展,使得人文因子的相对作用不断增强,这与已有研究的结论一致^[26~28].从气候因子上看,受全球变暖趋势的影响,成渝城市群近年来温度不断攀升,空气湿度下降,干旱严重,高温天气促进了 $PM_{2.5}$ 污染加剧,这可能是导致气候因子相对作用呈下降趋势的原因之一,这与已有的研究结论基本一致^[51~53].从植被因子上看,吴小波等^[54]和Peng等^[55]的研究发现,成渝城市群整体植被覆盖度呈上升趋势,但中部地带植被覆盖呈现出一定的下降趋势,生态环境不断恶化.而结合空间分析可知,成渝城市群中部地区为 $PM_{2.5}$ 重灾区,植被的减少和生态环境的恶化可能是导致成渝城市群植被因子对 $PM_{2.5}$ 空间分异的相对作用减小的原因之一.

5 结论

(1)2000~2021年成渝城市群 $PM_{2.5}$ 污染严重,从年尺度上看, $PM_{2.5}$ 浓度最大值出现在2013年, $PM_{2.5}$ 浓度最小值出现在2020年.从季节尺度看,冬季 $PM_{2.5}$ 污染最为严重,夏季 $PM_{2.5}$ 污染最轻.近年来,成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度整体呈波动下降态势.自贡、内江、资阳和广安的 $PM_{2.5}$ 浓度均值较高且 $PM_{2.5}$ 浓度下降较快,雅安 $PM_{2.5}$ 浓度均值较低且 $PM_{2.5}$ 浓度下降较慢.

(2)2000~2021年成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势呈现出明显的空间异质性, $PM_{2.5}$ 浓度分布呈现出“中间高,四周低”的形态.成渝城市群 $PM_{2.5}$ 浓度全域均呈下降趋势, $PM_{2.5}$ 浓度呈显著下降的区域主要集中在重庆西部等地带,秋季 $PM_{2.5}$ 浓度呈显著下降的面积最大,南充、内江、遂宁和资阳最为突出,冬

季 PM_{2.5} 浓度呈显著下降的面积最小, 德阳最为突出。

(3) 2000 ~ 2021 年成渝城市群 PM_{2.5} 空间分异受气候、地形、植被和人文因子共同影响, 主要驱动因子为高程、坡度和路网密度, 地形因子对成渝城市群 PM_{2.5} 空间分异相对作用最强, 气候因子成渝城市群 PM_{2.5} 空间分异相对作用最弱, 并且地形因子和人文因子的相对作用呈递增趋势, 气候因子和植被因子的相对作用呈递减趋势。

(4) 2000 ~ 2021 年影响成渝城市群 PM_{2.5} 空间分异较为显著的交互组合主要是高程与路网密度、坡度、降水、日照时数和土地利用类型。达州、眉山、雅安和资阳受单一气候因子交互作用十分显著, 内江和自贡受单一人文因子交互作用十分显著。

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] 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.
- [4] Shamsollahi H R, Yunesian M, Kharrazi S, *et al.* Characterization of persistent materials of deposited PM_{2.5} in the human lung[J]. *Chemosphere*, 2022, **301**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.134774.
- [5] Wu Y Y, Zhang T, Wang Y Y, *et al.* Spatial heterogeneity in health risks of illness-related absenteeism associated with PM_{2.5} exposure for elementary students[J]. *Environmental Research*, 2022, **212**, doi: 10.1016/j.envres.2022.113473.
- [6] Bu X, Xie Z L, Liu J, *et al.* Global PM_{2.5}-attributable health burden from 1990 to 2017: estimates from the global burden of disease study 2017[J]. *Environmental Research*, 2021, **197**, doi: 10.1016/j.envres.2021.111123.
- [7] Yang X R, Zhang T C, Zhang Y, *et al.* Global burden of COPD attributable to ambient PM_{2.5} in 204 countries and territories, 1990 to 2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **796**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148819.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 等. 2015-2020 年中国城市 PM_{2.5}-O₃ 复合污染时空演变特征[J]. *环境科学*, 2023, **44**(4): 1830-1840.
- Niu X X, Zhong Y M, Yang L, *et al.* Spatiotemporal evolution characteristics of PM_{2.5}-O₃ compound pollution in Chinese cities from 2015 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 1830-1840.
- [12] Casallas A, Castillo-Camacho M P, Guevara-Luna M A, *et al.* Spatio-temporal analysis of PM_{2.5} and policies in Northwestern South America[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **852**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158504.
- [13] 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.
- [14] 周志衡, 周廷刚, 秦宁. 中原城市群 PM_{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5343-5353.
- Zhou Z H, Zhou T G, Qin N. Linkage effect and nonlinear impact of PM_{2.5} concentration driving factors in Central Plains Urban Agglomeration[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5343-5353.
- [15] 张军, 金梓函, 王玥, 等. 关中平原城市群 PM_{2.5} 时空演变格局及其影响因素[J]. *环境科学*, 2022, **43**(12): 5333-5343.
- Zhang J, Jin Z H, Wang Y, *et al.* Temporal and spatial evolution pattern of PM_{2.5} and its influencing factors in Guanzhong Plain urban agglomeration[J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5333-5343.
- [16] Lu H, Zhang C, Jiao L D, *et al.* Analysis on the spatial-temporal evolution of urban agglomeration resilience: a case study in Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration, China[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, **79**, doi: 10.1016/j.ijdr.2022.103167.
- [17] Liu X P, Zou B, Feng H H, *et al.* Anthropogenic factors of PM_{2.5} distributions in China's major urban agglomerations: a spatial-temporal analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **264**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121709.
- [18] Bai L, Jiang L, Yang D Y, *et al.* Quantifying the spatial heterogeneity influences of natural and socioeconomic factors and their interactions on air pollution using the geographical detector method: a case study of the Yangtze River Economic Belt, China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **232**: 692-704.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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 of PM_{2.5} concentration and its relationship with vegetation landscape patterns in typical economic zones, China from 2000 to 2020[J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(4): 1852-1864.

- [22] 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.
- [23] Shi K F, Li Y, Chen Y, *et al.* How does the urban form-PM_{2.5} concentration relationship change seasonally in Chinese cities? A comparative analysis between national and urban agglomeration scales[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, **239**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118088.
- [24] 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.
- [25] 李琛, 吴映梅, 高彬, 等. 西南地区 PM_{2.5} 人口暴露风险时空演变及与景观格局关联分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, **31**(9): 2035-2047.
Li C, Wu Y M, Gao B P, *et al.* Spatiotemporal evolution of PM_{2.5} population exposure risk and correlation with landscape patterns in Southwest China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, **31**(9): 2035-2047.
- [26] Wang S J, Zhou C S, Wang Z B, *et al.* The characteristics and drivers of fine particulate matter (PM_{2.5}) distribution in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, **142**: 1800-1809.
- [27] Li X Z, Du K R, Ouyang X L, *et al.* Does more stringent environmental regulation induce firms' innovation? Evidence from the 11th Five-year plan in China[J]. Energy Economics, 2022, **112**, doi: 10.1016/j.eneco.2022.106110.
- [28] 周杨, 罗彬, 杨文文, 等. 基于 2012—2018 年内江市 PM_{2.5} 化学组分变化对《大气污染防治行动计划》实施效果的评估[J]. 环境科学研究, 2020, **33**(3): 563-571.
Zhou Y, Luo B, Yang W W, *et al.* Evaluation of effects of air pollution prevention and control action plan based on variations of chemical components in PM_{2.5} during 2012-2018 in Neijiang City[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, **33**(3): 563-571.
- [29] 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.
- [30] Yang Q Q, Yuan Q Q, Yue L W, *et al.* Investigation of the spatially varying relationships of PM_{2.5} with meteorology, topography, and emissions over China in 2015 by using modified geographically weighted regression[J]. Environmental Pollution, 2020, **262**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114257.
- [31] Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J. Correlations between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological variables in the United States: implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(32): 3976-3984.
- [32] 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.es.2021.100080.
- [33] 韩立建. 城市化与 PM_{2.5} 时空格局演变及其影响因素的研究进展[J]. 地理科学进展, 2018, **37**(8): 1011-1021.
Han L J. Relationship between urbanization and urban air quality: an insight on fine particulate dynamics in China[J]. Progress in Geography, 2018, **37**(8): 1011-1021.
- [34] 周曙东, 欧阳纬清, 葛继红. 京津冀 PM_{2.5} 的主要影响因素及内在关系研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2017, **27**(4): 102-109.
Zhou S D, Ouyang W Q, Ge J H. Study on the main influencing factors and their intrinsic relations of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei[J]. China Population, Resources and Environment, 2017, **27**(4): 102-109.
- [35] Han X Y, CAO T Y. Urbanization level, industrial structure adjustment and spatial effect of urban haze pollution: evidence from China's Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. Atmospheric Pollution Research, 2022, **13**(6), doi: 10.1016/j.apr.2022.101427.
- [36] Gupta M, Saini S, Sahoo M. Determinants of ecological footprint and PM_{2.5}: role of urbanization, natural resources and technological innovation[J]. Environmental Challenges, 2022, **7**, doi: 10.1016/j.envc.2022.100467.
- [37] She Q N, Cao S S, Zhang S Q, *et al.* The impacts of comprehensive urbanization on PM_{2.5} concentrations in the Yangtze River Delta, China[J]. Ecological Indicators, 2021, **132**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108337.
- [38] Chen G J, Hu Y, Zhang R, *et al.* Evolution of South-North transport and urbanization effects on PM_{2.5} distribution with increased pollution levels in Beijing[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, **72**, doi: 10.1016/j.scs.2021.103060.
- [39] 刘清云, 范俊甫, 陈政, 等. 夜间灯光遥感数据一致性校正下成渝城市群扩张分析[J]. 测绘科学, 2022, **47**(6): 99-108.
Liu Q Y, Fan J F, Chen Z, *et al.* Expansion analysis of Chengdu-Chongqing urban agglomeration under nighttime light remote sensing data consistency correction[J]. Science of Surveying and Mapping, 2022, **47**(6): 99-108.
- [40] Zhang Y, Chen X, Mao Y Y, *et al.* Analysis of resource allocation and PM_{2.5} pollution control efficiency: evidence from 112 Chinese cities[J]. Ecological Indicators, 2021, **127**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107705.
- [41] 王一, 郝利娜, 赵美龄, 等. 2001—2018 年重庆植被 NDVI 变化及其对气候因子和人类活动的响应[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(5): 222-229.
Wang Y, Hao L N, Zhao M L, *et al.* Variation of vegetation NDVI and its response to climatic factors and human activities in Chongqing from 2001 to 2018[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(5): 222-229.
- [42] 蒲茜, 李振亮, 曹云擎, 等. 重庆市 2015—2020 年秋冬季 PM_{2.5} 污染传输路径与潜在源贡献分析[J]. 环境科学学报, 2022, **42**(5): 49-59.
Pu X, Li Z L, Cao Y Q, *et al.* Transport pathways and potential source contribution of PM_{2.5} pollution in Chongqing from 2015 to 2020[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, **42**(5): 49-59.
- [43] Lin S Y, Liu Y, Chen H B, *et al.* Impact of change in traffic flow on vehicle non-exhaust PM_{2.5} and PM₁₀ emissions: a case study of the M25 motorway, UK[J]. Chemosphere, 2022, **303**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2022.135069.
- [44] 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.
- [45] 郭晓梅. 四川盆地空气质量气候特征及其大地形影响效应的观测模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016.
Guo X M. Observed and simulated research on climate characteristic of air quality and the topographic induced effects in Sichuan Basin[D]. Nanjing: Nanjing University of Information

- Science & Technology, 2016.
- [46] Huang Q Y, Xu C, Jiang W Y, *et al.* Urban compactness and patch complexity influence PM_{2.5} concentrations in contrasting ways: evidence from the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China[J]. *Ecological Indicators*, 2021, **133**, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108407.
- [47] Wu J S, Luo K Y, Wang Y, *et al.* Urban road greenbelt configuration; the perspective of PM_{2.5} removal and air quality regulation[J]. *Environment International*, 2021, **157**, doi: 10.1016/j.envint.2021.106786.
- [48] Sheng Q Q, Zhang Y L, Zhu Z L, *et al.* An experimental study to quantify road greenbelts and their association with PM_{2.5} concentration along city main roads in Nanjing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **667**: 710-717.
- [49] 黄俊, 廖碧婷, 王春林, 等. 广州市 PM_{2.5}污染特征及潜在贡献源区分析[J]. *环境科学与技术*, 2019, **42**(4): 109-118.
Huang J, Liao B T, Wang C L, *et al.* Analysis of the characteristics and potential source contribution of PM_{2.5} pollution in Guangzhou[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, **42**(4): 109-118.
- [50] Chen L L, Wu Z F, Tu W, *et al.* Applying LUR model to estimate spatial variation of PM_{2.5} in the Greater Bay Area, China [A]. In: Li L X, Zhou X L, Tong W T (Eds.). *Spatiotemporal Analysis of Air Pollution and Its Application in Public Health*[M]. Amsterdam: Elsevier, 2020. 207-215, doi: 10.1016/B978-0-12-815822-7.00010-8.
- [51] Li C B, Adu B, Wu J, *et al.* Spatial and temporal variations of drought in Sichuan Province from 2001 to 2020 based on modified temperature vegetation dryness index (TVDI) [J]. *Ecological Indicators*, 2022, **139**, doi: 10.1016/j.ecolind.2022.108883.
- [52] Yuan J C, Lin Q Y, Chen S S, *et al.* Influence of global warming and urbanization on regional climate of Megacity: a case study of Chengdu, China[J]. *Urban Climate*, 2022, **44**, doi: 10.1016/j.uclim.2022.101227.
- [53] Wang Y R, Hessen D O, Samset B H, *et al.* Evaluating global and regional land warming trends in the past decades with both MODIS and ERA5-Land land surface temperature data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, **280**, doi: 10.1016/j.rse.2022.113181.
- [54] 吴小波, 范晓雨, 刘晓敬, 等. 基于 Google Earth Engine 云平台的成渝城市群生态环境质量时空变化[J]. *生态学杂志*, 2023, **42**(3): 759-768.
Wu X B, Fan X Y, Liu X J, *et al.* Temporal and spatial changes of ecological quality of Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration based on Google Earth Engine cloud platform[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, **42**(3): 759-768.
- [55] Peng W F, Kuang T T, Tao S. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, **233**: 353-367.

CONTENTS

Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region	YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)
Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China	XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)
Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance	ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)
Revealing Driving Factors of Urban O ₃ Based on Explainable Machine Learning	DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)
Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology	ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)
Analysis of O ₃ Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model	WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)
Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM	ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)
Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province	LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)
Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China	DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)
Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020	YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)
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	XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)
Estimation of PM _{2.5} Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model	WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)
Transmission and Growth Characteristics of Severe PM _{2.5} Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei	JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers	ZHU Shu-hui (3760)
Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles	YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)
Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer	GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)
Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area	YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)
Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an	WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)
Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei	XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)
Spatial-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area	WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)
Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City	LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)
Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang	ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin	YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River	YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)
Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River	ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)
Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction	WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)
Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas	WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)
Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region	YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)
Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches	ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)
Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region	YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)
Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River	LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)
Sediment Pollution and Dredging Effect of Waqinhuai River	ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)
Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)
Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite	SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H ₂ O ₂ and Oxidize Organic Micropollutants in Water	LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)
Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid)	ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)
Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics	XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)
Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China	WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)
Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing	JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)
Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province	FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi	FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)
Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)
Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review	ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059)
Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review	LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)
Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis	ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)
Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)
Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation	WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)
Application of Desulphurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta	ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)
Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA	HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)
Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area	ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)
Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province	ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)
Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i>	LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)
Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk	ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4170)
Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period	QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)
Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong	LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)
Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning	YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)