

目次

中国省域差异化碳达峰评价方法与应用	刘润璞, 彭栓, 陈玉烁, 陈民, 张楠, Nihed Benani, 吕连宏, 阳平坚 (1233)
全生命周期视角下中国建筑碳排放空间关联网络演化及影响因素分析	任晓松, 李昭睿 (1243)
京津冀地区城市三生空间碳代谢效率特征及演进模式	田超, 程琳琳, 邵盈钊 (1254)
太原市“十四五”规划大气污染防治政策的 CO ₂ 协同效益评估	肖婷玉, 束赕, 李慧, 王涵, 李俊宏, 严沁, 张文杰, 姜华 (1265)
湖南省工业领域碳减排与空气质量改善协同	李楠, 刘弯弯, 朱书涵, 邢晓雯, 汤克勤, 王松伟, 白露 (1274)
“双碳”背景下河南省电力行业中长期控煤降碳路径	张静, 杨萌, 张伟, 曹东, 赵静, 李勃, 薛英岚, 蒋洪强 (1285)
郑州市公交车队电动化减排降碳环境效益	邹超, 汪亚男, 吴琳, 何敬, 倪经纬, 毛洪钧 (1293)
长江中游城市群城市化对 PM _{2.5} 浓度的多尺度驱动机制	张政, 周廷刚, 周志衡, 昌悦 (1304)
天山北坡城市群 PM _{2.5} 浓度时空分布特征及影响因素分析	王相男, 张喆, 刘方青 (1315)
天津市 PM _{2.5} 碳组分空间差异性来源解析	武甫亮, 吴建会, 戴启立, 肖致美, 冯银厂 (1328)
贵阳市花溪城区大气 PM _{2.5} 中碳质气溶胶的变化特征及来源解析	桂佳群, 杨员, 王显钦, 李云武, 闫广轩, 徐鹏 (1337)
新乡市大气 PM _{2.5} 中水溶性离子的污染特征、来源解析及气象影响分析	刘恒嘉, 李岚清, 李焕莉, 任言, 许梦源, 贾梦珂, 刘恒志, 杨莹, 宋天颂, 洪启航 (1349)
2017~2018 年冬季菏泽大气 PM _{2.5} 中金属元素特征及健康风险评估	杜虹萱, 任丽红, 赵明升, 韩慧霞, 徐义生 (1361)
北京市臭氧污染跳变型特征及影响因素分析	潘锦秀, 安欣欣, 刘保献, 李云婷, 李倩, 孙峰, 张章, 邱启鸿, 陈阳 (1371)
南京夏季大气臭氧光化学特征与敏感性分析	罗丽彤, 章炎麟, 林煜棋, Ahsan Mozaffar, 曹梦瑶 (1382)
苏州市初夏臭氧污染成因及年际变化	吴也正, 张鑫, 顾钧, 缪青, 魏恒, 熊宇, 杨倩, 吴斌, 沈文渊, 马强 (1392)
长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源	卢洪斌, 卢少勇, 李响, 张森霖, 黄张根 (1402)
基于 PCA-APCS-MLR 模型的乌梁素海表层沉积物重金属时空分布及来源解析	崔志谋, 史小红, 赵胜男, 卢俊平, 张昊, 刘莹慧, 郭鑫, 王彦隽 (1415)
重庆市长寿湖水表层水体重金属时空分布及风险评价	张瑞溪, 刘娅君, 罗泳楠, 李杰芹, 李彩霞, 李佳佳, 张成 (1428)
长江流域微塑料污染特征及生态风险评估	李思琼, 王华, 储林佑, 曾一川, 闫雨婷 (1439)
宜昌市东山运河微塑料污染评估及年排放量估算	丁爽, 李卫明, 张续同, 刘子健, 高雅坤, 李映成, 王芳炜 (1448)
汜水河(荥阳段)入河排污口水体微塑料赋存特征及风险评估	赵长民, 和兵, 李和通, 张瑞琪, 李银月, 张发文, 桂新, 马丽 (1457)
宁夏入黄排水沟中药物和个人护理品的污染特征与生态风险评价	高礼, 李凌云, 郑兰香, 吴海娟, 陶红, 刘邓超 (1468)
浙南瓯江流域水体抗生素污染特征及风险评价	钟奕昕, 李立湘, 吴鑫, 周施阳, 姚飞延, 董好刚 (1480)
鄱阳湖沉积物中多环芳烃的时空分布及源解析	马妍, 孙晨, 毕茹乐, 张波涛, 刘艳, 邵鹏, 刘统, 王圣瑞, 钟文军 (1492)
杭州湾南岸 20 a 水质净化功能变化及预测	王珊珊, 曹公平, 徐明伟, 黄君宝, 曾剑 (1502)
不同缓冲区的土地利用方式对地表水水质的影响:以海河流域天津段为例	代孟均, 张兵, 杜倩倩, 孙季琰, 田蕾, 王义东 (1512)
长江流域安庆段浅层地下水水化学特征及控制因素	刘海, 宋阳, 李迎春, 魏伟, 赵国红, 王旭东, 黄健敏 (1525)
富营养化湖泊藻华降解产生的溶解性有机质动态变化及其环境效应	张瑾, 陈明滢, 郝智能, 钟寰, 何欢, 雷沛杰 (1539)
紫外光活化亚硫酸盐降解水中卡马西平	林涛, 苑宇杰 (1553)
再生水消毒副产物的检测、生成与控制	廖雨枫, 王正, 潘旸, 李爱民 (1561)
3 种人工湿地基质材料对氨氮的吸附特性	何强, 陈博文, 杨雨静, 周全, 刘彦君, 王志刚, 程呈 (1577)
基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析	傅楷翔, 贾国栋, 余新晓, 王旭 (1586)
基于 AWRSEI 的岱海流域生态环境质量时空演变及驱动因子分析	赵嘉丽, 李兴, 孙冰 (1598)
定量评估气候变化对长江中下游地区植被 GPP _{GS} 变化的影响	徐勇, 盘钰春, 邹滨, 郑志成, 郭振东 (1615)
基于 Meta 分析的煤矿区植被恢复对土壤有机碳储量的影响	李健明, 康雨欣, 蒋福祯, 宋明丹, 祁凯斌, 卢素锦, 李正鹏 (1629)
连续周年轮作休耕对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响	鲁泽让, 李永梅, 杨春怀, 夏梓泰, 程伟威, 王自林, 赵吉霞, 范茂攀 (1644)
4 种改良剂对酸性紫色土肥力及活性有机碳组分的影响	丁馨茹, 严宁珍, 王子芳, 李志琦, 黄容, 王洋, 代文才, 高明 (1655)
不同植茶年限土壤氮素组分变化及其与环境因子关系	邵奇, 吴涛, 解雪峰, 徐梓晴, 李文琦, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞 (1665)
黄河下游典型湿地土壤养分及其生态化学计量特征	王传盈, 王凯月, 王浩然, 张梦迪, 周云凯 (1674)
覆膜年限和有机肥施用对花生田耕层土壤微塑料赋存特征的影响	宋宁宁, 李梦佳, 王学霞, 刘君, 王芳丽, 宗海英, 黄小丽, 王斌, 梁丽娜 (1684)
秸秆还田和添加生物炭对热带地区稻菜轮作体系中淹水后土壤温室气体排放的影响	胡天怡, 车佳玥, 胡煜杰, 陈琦琦, 张冬明, 雷菲, 曾建华, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (1692)
耕作深度调控秸秆还田对农田土壤呼吸的影响	陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 李天姿, 于媛, 李晶 (1702)
基于遥感时-空-谱特征及随机森林模型的土壤重金属空间分布预测	王泽强, 张冬有, 徐夕博, 王兆鹏, 杨东宇, 宋晓宁 (1713)
黄河流域农田土壤重金属污染特征及其优先控制源分析	李军, 李旭, 李开明, 焦亮, 台喜生, 臧飞, 曹素珍 (1724)
广西贺州市典型矿区周边耕层土壤 Cd 通量特征	杨烨宇, 李程, 杨忠芳, 张起钻, 邹胜章, 宋淑娥, 蔡贺清 (1739)
基于信息扩散模型的沔东地区土壤重金属潜在生态风险评估	杨楠楠, 韩玲, 刘明 (1749)
湘西地区土壤重金属污染溯源分析及环境质量评价	肖凯琦, 徐宏根, 甘杰, 戴亮亮, 李毅, 李凯, 许青阳, 张俊, 邓世民, 李颖 (1760)
典型行业再利用土壤重金属含量分布、来源解析及生态风险评估	沈城, 王文娟, 沙晨燕, 谢雨晴, 王敏, 吴健 (1769)
省级尺度土壤 As 迁移转化与水稻安全种植区划:以贵州省为例	董心月, 吴勇, 周子寒, 王佛鹏, 张云霞, 宋波 (1781)
谷壳灰硅肥改善土壤质量降低水稻镉砷累积的效应	易轩韬, 欧阳坤, 辜娇峰, 李倩, 游萍, 周航, 廖柏寒 (1793)
EDDS 对土壤铜镉有效性及蓖麻吸收转运的影响	刘文英, 吴刚, 胡红青 (1803)
叶面调理剂对复合污染农田小麦籽粒 Cd、As 和 Pb 累积的阻控效应	肖冰, 王秋实, 高培培, 赵全利, 杨威, 王钊, 刘文菊, 薛培英 (1812)
民勤绿洲退耕地土壤微生物群落结构与功能多样性特征	李常乐, 张富, 王理德, 赵赫然, 赵学成, 张恒平 (1821)
宏基因组揭示紫色土中邻苯二甲酸酯去除的微生物学机制	李雨桐, 余海, 刘坤, 柏宏成, 汪军, 朱正杰 (1830)
养鸡场空气微生物污染及工人呼吸暴露风险	白渔樵, 孙兴滨, 仇天雷, 郭雅杰, 高敏, 王旭明 (1840)
玛瑙河多环境介质和铜锈环螺体内微塑料的赋存特征	高雅坤, 李卫明, 张续同, 刘子健, 李映成, 丁爽, 王芳炜, 刘流 (1849)
不同官能团微塑料对斑马鱼胚胎菌群和代谢功能的胁迫效应	闫振华, 张燕, 包旭辉, 朱培元, 陈玉芳 (1859)

天山北坡城市群PM_{2.5}浓度时空分布特征及影响因素分析

王相男^{1,2,3}, 张喆^{1,2,3*}, 刘方青^{1,2,3}

(1. 新疆大学地理与遥感科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学绿洲生态自治区重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3. 智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要: 针对天山北坡城市群开展PM_{2.5}浓度时空分布特征和影响因素分析,对区域经济建设和环境保护具有积极的意义. 通过地理加权回归(GWR)模型,利用MCD19A2气溶胶产品结合气象因子,反演得到天山北坡城市群2015~2021年3~11月的PM_{2.5}浓度时空分布,继而实现变化趋势和影响因素分析. 结果如下:①研究区PM_{2.5}浓度高值主要分布在天山北麓和古尔班通古特沙漠之间的绿洲城市群地带,呈现“四周低,中间高”和“西低东高”的空间分布特征,2015~2021年研究区的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 年均值为 $16.98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,高值主要聚集在乌鲁木齐市市区部分,并向昌吉市和阜康市延伸递减; $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 月均值分布规律与年均一致,但存在季节差异,表现为:秋季($20.32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>春季($18.25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)>夏季($12.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),春季和冬季聚集现象会更明显;②研究区PM_{2.5}浓度年均值在2015~2021年呈现下降趋势,3~10月均值同样表现为下降趋势,仅11月表现为略有升高;从PM_{2.5}浓度变化趋势空间分布分析,下降集中在主要城市市区部分,尤其是乌鲁木齐市市区部分及其周边地区减少幅度最大,变化最为剧烈;③研究区气温、气压与PM_{2.5}浓度呈现正相关效应,而相对湿度,风速,大气边界层高度,降水量与PM_{2.5}浓度呈现负相关效应;各因子影响程度从高向低排列为:大气边界层高度>相对湿度>气压>气温>风速>降水量.

关键词: 地理加权回归(GWR)模型; 天山北坡城市群; 时空分布特征; 变化趋势; 影响因素分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)03-1315-13 DOI: 10.13227/j.hjks.202303017

Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM_{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains

WANG Xiang-nan^{1,2,3}, ZHANG Zhe^{1,2,3*}, LIU Fang-qing^{1,2,3}

(1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. Key Laboratory of Smart City and Environment Modelling of Higher Education Institute, Urumqi 830046, China)

Abstract: Analysis of the spatial and temporal distribution characteristics and influencing factors of PM_{2.5} concentrations for the urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountain is of positive significance for regional economic construction and environmental protection. The spatial and temporal distributions of PM_{2.5} concentrations in the Tianshan North Slope urban agglomeration from March to November 2015 to 2021 were obtained through the inversion of the MCD19A2 aerosol product combined with meteorological factors using a geographically weighted regression (GWR) model, followed by the analysis of change trends and influencing factors. The results were as follows: ① the high PM_{2.5} concentrations in the study area were mainly distributed in the oasis city cluster between the northern foot of Tianshan Mountain and the Gurbantunggut Desert, showing the spatial distribution characteristics of being “low around and high in the middle” and “low in the west and high in the east.” The annual average value of $\rho(\text{PM}_{2.5})$ in the study area was $16.98 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, with high values mainly concentrated in the urban part of Urumqi and decreasing towards Changji and Fukang. The monthly average $\rho(\text{PM}_{2.5})$ distribution pattern was consistent with the annual average, but there were seasonal differences as follows: autumn ($20.32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > spring ($18.25 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) > summer ($12.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). The accumulation phenomenon was more pronounced in spring and winter. ② The study area's annual average PM_{2.5} concentration showed a decreasing trend from 2015 to 2021, and the average value from March to October also showed a decreasing trend, with only a slight increase in November. From the analysis of the spatial distribution of PM_{2.5} concentration trends, the decrease was concentrated in the urban parts of major cities, especially in the urban part of Urumqi and its surrounding areas, where the decrease was the largest and the change was the most drastic. ③ Temperature and air pressure were positively correlated with PM_{2.5} concentrations, whereas relative humidity, wind speed, atmospheric boundary layer height, and precipitation were negatively correlated with PM_{2.5} concentrations. The degree of influence of each factor was ranked from high to low as follows: atmospheric boundary layer height > relative humidity > air pressure > air temperature > wind speed > precipitation.

Key words: geographically weighted regression (GWR) model; urban agglomerations on the northern slope of Tianshan Mountains; temporal and spatial distribution characteristics; change trend; analysis of influencing factors

随着社会经济快速发展,城镇化水平不断提高,大气环境污染问题日益严重,严重威胁到了当地居

民的正常生产生活. 可吸入颗粒物(PM_{2.5})是大气污染的重要来源之一,对公众身体健康安全影响很大,

收稿日期: 2023-03-02; 修订日期: 2023-05-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(42061066); 自治区重点实验室开放课题项目(2023D04066); 自治区教育厅天池博士计划项目(tcbs201817); 新疆大学博士科研启动基金项目(BS180236)

作者简介: 王相男(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气环境质量监测与评估, E-mail: 675982658@qq.com

* 通信作者, E-mail: zhangzhe_0110@yeah.net

被国际癌症研究机构(IARC)收录为重要致癌物之一。因此,分析 $PM_{2.5}$ 的时空分布和影响因素已成为国际热点研究方向之一^[1-3]。

目前常用的获取区域 $PM_{2.5}$ 的时空分布方法主要有两种。一是对 $PM_{2.5}$ 站点数据进行插值分析^[4],二是通过遥感反演获得 $PM_{2.5}$ 时空分布^[5]。目前,通过卫星遥感反演获得大尺度区域 $PM_{2.5}$ 数据已成为广泛选择的方法。气溶胶光学厚度(aerosol optical depth, AOD)与 $PM_{2.5}$ 等颗粒污染关系密切,通过AOD反演 $PM_{2.5}$ 成为相关领域研究重要的突破口^[6]。相关学者们先后使用土地利用回归模型^[7]、BP神经网络模型^[8]、线性混合模型^[9]和地理加权回归(geographically weighted regression, GWR)模型^[10]等用于反演 $PM_{2.5}$,通过模型估算实现监测和预测^[11-13]。其中GWR模型发展较为成熟,被广泛应用于反演 $PM_{2.5}$ ^[14]。张天琪^[15]和付宏臣等^[16,17]先后使用GWR模型反演新疆地区的 $PM_{2.5}$ 浓度,易唯等^[18]使用GWR模型反演天山北坡区域的 $PM_{2.5}$ 浓度,证明了GWR模型在天山北坡反演 $PM_{2.5}$ 的良好适用性。但前人研究缺少年际变化分析,没有从长时间尺度观察 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势,且因为所用到的AOD空间分辨率较低,以致反演得到的 $PM_{2.5}$ 空间分布特征缺少更细致变化展示。对于制定更精细的环保政策而言,其所提供的信息量是稍显不足的。因此利用更高时空分辨率的AOD反演 $PM_{2.5}$,分析天山北坡 $PM_{2.5}$ 的时空分布特征和变化趋势,以及影响因素研究,是十分必要的。赵仕伟等^[19]和张喆等^[20]研究已经证明高时空分辨率AOD数据MCD19A2在西北干旱区和天山北坡区域的良好适用性,因此使用GWR模型通过MCD19A2数据反演天山北坡 $PM_{2.5}$ 数据有很大可行性。

天山北坡城市群是国家规划的重点城市群之一,也是“一带一路”上的热点区域。作为自治区和国家重点发展的区域,国家向中亚、中东以及欧洲经济

联系的桥头堡和中转站,天山北坡城市群的环境友好型社会建设就显得十分重要。通过 $PM_{2.5}$ 浓度年际之间的变化分析也可以展示出国家对天山北坡环境保护的成果,加强国家与社会继续推进环保政策的决心。本文通过GWR模型,使用MCD19A2数据反演得到天山北坡城市群 $PM_{2.5}$ 浓度时空分布,分析研究区2015~2021年的 $PM_{2.5}$ 浓度的时空分布,总结变化趋势,探究对 $PM_{2.5}$ 浓度分布变化的影响因素,有助于掌握天山北坡城市群大气环境治理现状,以期政府决策提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

天山北坡城市群位于新疆维吾尔自治区的天山北麓和古尔班通古特沙漠南部区域,地理区位为东经 $79^{\circ}53'06''\sim 88^{\circ}58'19''$ 和北纬 $42^{\circ}55'19''\sim 46^{\circ}12'42''$ 之间约12万 km^2 的经济带,区域自然条件优越。天山北坡城市群是以乌鲁木齐市、克拉玛依市、石河子市和博乐市等主要城市为轴心包含着周边区县形成的一片带状城市群,该城市群是国务院2015年审定的城市群规划建设区域性城市群之一,属于国家二级城市群,战略地位十分突出。本研究是以阜康市、乌鲁木齐市、五家渠市和石河子市等共计12市5县为研究区(图1)。研究区是新疆经济最发达地区,多年来GDP占比全新疆40%以上,同时也是人口最为密集区域,城镇化率高达86.98%,该区域集中了全疆大部分的政治、经济、文化、科教和工业资源,其中包括全新疆80%以上的重工业和60%以上的轻工业。但经济的快速发展带来的空气污染等问题,危害当地人民身体健康,阻碍经济良好发展,延缓城市群建设进度。

1.2 数据的获取与处理

1.2.1 数据的获取

(1) $PM_{2.5}$ 浓度数据来源于中国环境监测总站

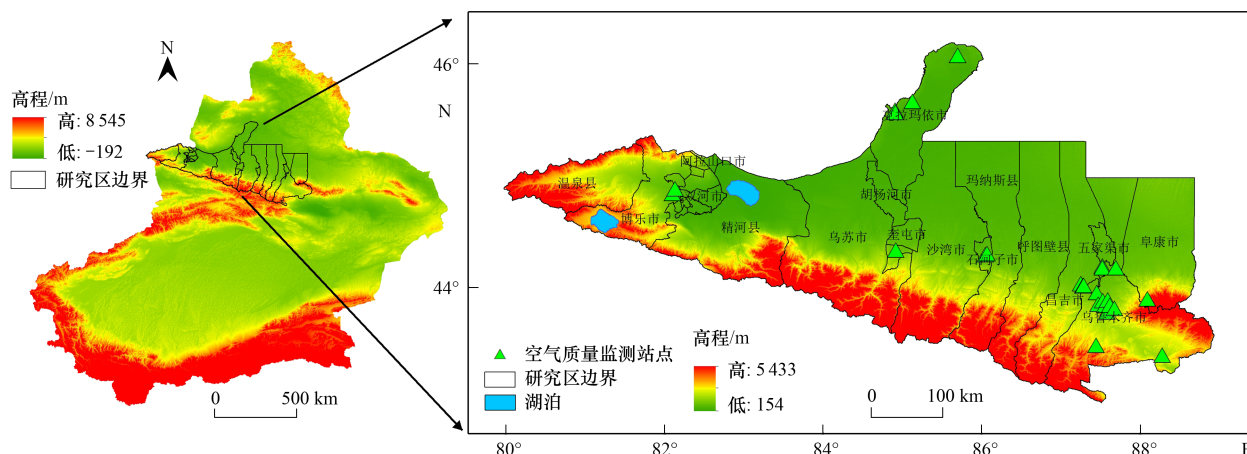


图1 研究区位置示意图及空气质量监测站点分布

Fig. 1 Location diagram of study area and distribution of air quality monitoring stations

(<http://www.cnemc.cn/sss/>), 时间分辨率为1 h. 研究区共有空气质量监测站点27个, 分布于乌鲁木齐市、昌吉市、五家渠市、阜康市、克拉玛依市、石河子市和博乐市. 数据时间段为2015~2021年的3~11月, 以每年3~11月均值作为该年年均值.

(2) 气象数据为ERA5月平均再分析数据, 数据来源于欧洲中期天气预报中心(<https://cds.climate.copernicus.eu>), 包括大气相对湿度(RH)、气温(TEM)、降水量(PRE)、风速(WS)、气压(PRS)和大气边界层高度数据(PBLH). 空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 时间分辨率为1 h, 选取时间段为2015~2021年的3~11月, 以每年3~11月均值作为该年年均值.

(3) AOD数据来源于NASA官网(<https://earthdata.nasa.gov/>) MCD19A2(v006)气溶胶数据产品. MCD19A2(v006)是一款最新由中分辨率成像光谱(MODIS) Terra和Aqua组合多角度大气校正(MAIA)陆地气溶胶光学深度(AOD)网格化2级产品, 该产品具有高时间分辨率和高空间分辨率, 每天以1 km像素分辨率生产, 每日具有4~6景影像. MCD19A2产品使用多角度大气校正算法中的气溶胶算法产生, 其反演范围广, 有效弥补了暗像元和深蓝算法的缺陷, 针对亮地表精度优于深蓝算法, 适合西北地区的气溶胶反演^[21,22]. 由于冬季积雪影响造成AOD数值大面积缺失, 因此选取2015~2021年的3~11月作为研究时段, 以每年3~11月均值作为该年年均值.

(4) 地基AOD观测数据来源于乌鲁木齐市、石河子市、乌苏市和精河县的气溶胶观测站点和手持太阳光度计测量, 观测时间段为2015~2021年的4~10月之间. 测量结果包括440、675、870、936和1 020 nm等5个波段的AOD, 观测时段为每日08:00~21:00, 采样时间间隔15 min, 每次观测连续测量3组读数.

1.2.2 MODIS AOD的验证

以地基AOD数据作为实际值检验研究区MCD19A2数据的可靠性. 卫星遥感获得的MODIS AOD数据波段为550 nm. 而太阳光度计所测量结果并不包含550 nm波段, 因此需要用到Angström公式通过440 nm和870 nm波段插值得到的550 nm波段. 公式如下:

$$\alpha = \frac{\ln[AOD(\lambda_1)/AOD(\lambda_2)]}{\ln(\lambda_1/\lambda_2)} \quad (1)$$

式中, α 表示Angström波长指数; $AOD(\lambda)$ 表示某一波长下的AOD; λ_1 和 λ_2 表示不同波长.

对MODIS AOD数据以地基观测站点为中心, 取 $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ ^[21]空间范围以及 $\pm 30 \text{ min}$ ^[22,23]的时间区间

的平均值与地基AOD数据匹配. 并选取决定系数(R^2)、相关系数(R)和均方根误差(RMSE)进行结果评价. 同时引入期望误差(EE)对样本点落入区间进行划分, $EE = \pm(0.05 + 0.02 \text{ 地基 AOD})$, 当地基AOD - $|EF| \leq \text{MODIS AOD} \leq \text{地基 AOD} + |EE|$.

地基AOD与MODIS AOD对比结果如图2, 相关系数 R 为0.81, 决定系数 R^2 为0.66, 均方根误差RMSE为0.06. 相关系数和决定系数较高, 均方根误差较低说明该数据源较为可靠. 图2中虚线和实线分别表示期望误差线和线性拟合线, 有72.06%的样本在期望误差范围内, 17.41%的样本超过了误差上限, 10.53%的样本超过了误差下限, 本次反演的MODIS AOD总体质量较好, 但存在17.41%的高估和10.53%的低估. 综合来看, MCD19A2数据在天山北坡具有不错的可靠性和较好的反演结果, 可以作为反演PM_{2.5}的优良数据源.

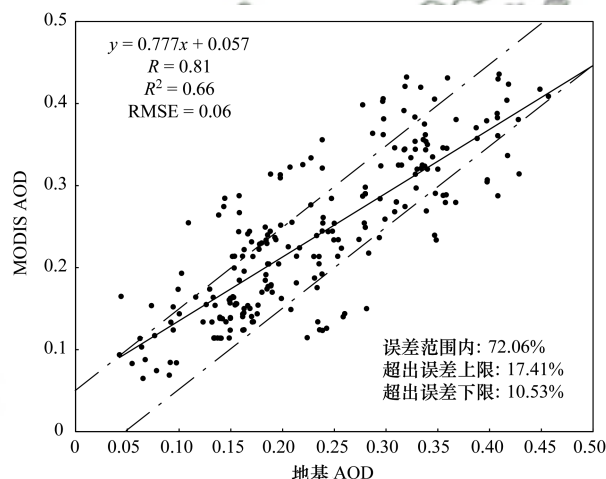


图2 MODIS AOD与地基AOD对比

Fig. 2 Comparison between MODIS AOD and foundation AOD

1.2.3 AOD与站点PM_{2.5}数据匹配

选取监测站点周围 $15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$ 范围内的非空像元取AOD日均值作为站点AOD实际值与PM_{2.5}站点日均值数据匹配, 如果站点邻域的非空像元大于5个, 则说明这个取值是有效的, 可以匹配, 否则为无效. 同时由于监测站点受自然环境和设备安装时间影响, 会出现部分站点部分时段缺失数值的情况, 因此对缺失时段剔除, 不进行数据匹配. 本研究27个站点中平均每个站点每年匹配对数在37~273对样本之间, 通过求月均值得到2015~2021年之间3~11月样本集, 样本数分别为173、191、196、213、199、217和221对, 共计匹配1410对AOD-PM_{2.5}月均值数据.

1.2.4 AOD的垂直订正和湿度订正

AOD是大气消光系数在垂直方向上的积分, 是大气颗粒物在垂直方向上的总和. 站点PM_{2.5}浓度是

指近地面经过烘干后的干燥条件下细颗粒物的质量浓度,二者具有不同的物理意义.对AOD进行垂直订正和湿度订正,可以使AOD数据所代表的物理意义更贴近于 $PM_{2.5}$,以此来提高AOD与 $PM_{2.5}$ 的相关性,在构建GWR模型中,AOD作为最重要自变量,二者相关性的提高有助于提升GWR模型模拟结果的精度.通过大气边界层高度数据对AOD进行垂直订正,旨在获取代表近地面干湿粒子混合的AOD数据,即表示近地面消光系数.以近地面相对湿度数据对垂直订正后的AOD进行湿度订正,旨在获取代表近地面干粒子的AOD数据,即近地面“干”的消光系数.

订正结果如表1所示, $PM_{2.5}$ 与AOD整体线性相关系数的平均数在垂直订正后和湿度订正后提升0.036,约提升了10.74%,标准差由0.189降为0.178,后续处理均基于订正后的AOD数据.

表1 AOD与 $PM_{2.5}$ 相关性

Table 1 Correlation between AOD and $PM_{2.5}$

订正状态	AOD与 $PM_{2.5}$ 相关系数			
	最大值	最小值	平均值	标准差
订正前	0.84	-0.25	0.34	0.189
订正后	0.86	-0.24	0.37	0.178

1.2.5 反演 $PM_{2.5}$ 数据时间段选择

以往在AOD反演 $PM_{2.5}$ 的研究中,通常数据源都是单颗卫星每日一景影像,为了反演的科学性和准确性,往往会选取卫星过境的时刻前后一定时段站点 $PM_{2.5}$ 数据取均值匹配,大概为1~2 h之间,以此作为日均值.以每日1~2 h站点 $PM_{2.5}$ 数据作为日均值,与实际日均值差距较大,无法正常反映实际的 $PM_{2.5}$ 日均值,在此基础上求算的月均值与年均值也会与实际值存在出入.

研究区位于东经 $79^{\circ}53'06''\sim 88^{\circ}58'19''$ 和北纬 $42^{\circ}55'19''\sim 46^{\circ}12'42''$ 之间,Terra和Aqua卫星过境研究区的北京时间为12:30和15:30.MCD19A2数据具有每日4~6景影像,影像成像时间均分布于卫星过境时间前后一定时段,经过对研究区2021年3月影像成像时间统计得到,09:00~11:00、11:00~13:00、13:00~15:00和15:00~17:00分别成像15、64、127和97景.高时间分辨率可以匹配更长时间段的站点 $PM_{2.5}$ 数据,以此的反演结果也更贴近于实际值.图3为研究区监测站点 $\rho(PM_{2.5})$ 多年平均逐小时变化情况,均值为 $31.88 \mu g \cdot m^{-3}$. $\rho(PM_{2.5})$ 呈现01:00和11:00为双峰值,分别为 $37.7 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $34.85 \mu g \cdot m^{-3}$.在07:00和19:00为双谷值,分别是 $31.70 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $26.10 \mu g \cdot m^{-3}$.结果表明研究区 $PM_{2.5}$ 浓度不同时段小时均值差距是较大的,通过AOD反演 $PM_{2.5}$ 时选择较短时间段会造成反演结果与实际值偏差过大,不能

很好代表实际的 $PM_{2.5}$ 浓度情况.故本研究选取时间段为09:00~17:00,时间跨度为8h,研究时段 $\rho(PM_{2.5})$ 均值为 $31.50 \mu g \cdot m^{-3}$,与多年日均值($31.88 \mu g \cdot m^{-3}$)仅相差 $0.33 \mu g \cdot m^{-3}$,差别为1.01%,所以研究时间段选取较为合理,同时兼顾了反演的科学性以及实际 $PM_{2.5}$ 浓度情况.

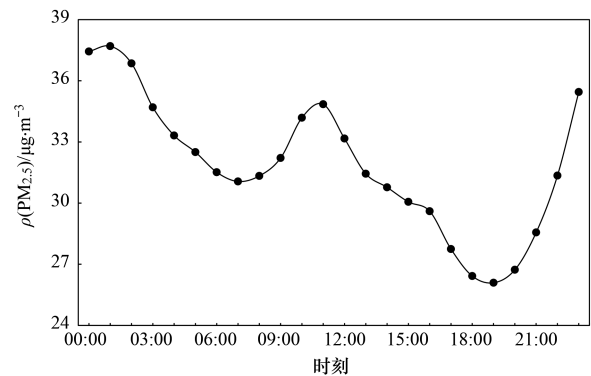


图3 研究区监测站点 $PM_{2.5}$ 浓度多年平均逐小时变化
Fig. 3 Annual average hourly change in $PM_{2.5}$ concentration at monitoring stations in the study area

1.2.6 数据处理流程

本文数据处理流程如图4,通过对数据源的时空匹配,进而实现地基AOD数据对MCD19A2数据的精度验证,并根据卫星过境时间确定求取地面站点 $PM_{2.5}$ 数据日均值的时间段,在此基础上完成对AOD- $PM_{2.5}$ 日均值样本的获取,累加得到AOD- $PM_{2.5}$ 月均值样本,垂直订正和湿度订正提高AOD- $PM_{2.5}$ 的相关性.基于AOD、站点 $PM_{2.5}$ 和气象因子等数据构建及验证GWR模型,使用地理探测器探测建模因子影响力,从而完成对区域 $PM_{2.5}$ 浓度分布的特征分析及影响因素分析.

1.3 研究方法

1.3.1 构建GWR模型并验证

GWR模型是为了解决数据在全局回归模型中存在的非平稳性,即空间异质性而提出的一种局部线性回归模型.和其他线性回归模型相比,GWR模型注意到了数据在空间分布上的不均匀性,自变量与因变量关系的空间差异,所以在不同空间位置会根据变量的不同产生相应的局部回归系数,适合大区域尺度的空间回归分析研究.

1.3.1.1 构建模型

GWR模型实质是一种距离加权回归方法,通过对样本点赋予不同局部回归系数,并根据到样本点的距离分配权重,以此来获得所有区域的回归系数.本研究中的空气质量监测站点分布不均,所以选取自适应型高斯函数为权重核函数,采用交叉验证的方法确定最佳带宽.方差膨胀因子(VIF)是用来判断

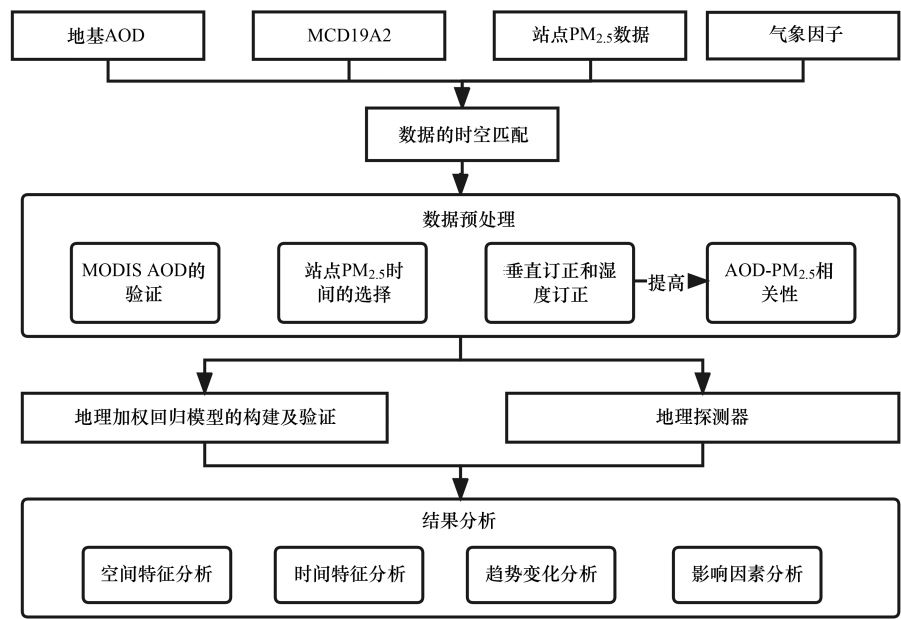


图 4 数据处理流程
Fig. 4 Data processing flow chart

某单独一自变量可以被其他自变量解释程度的指标之一,如果 $VIF > 7.5$,即表示模型存在多重共线性,自变量会互相影响造成结果偏差. 因此,在构建 GWR 模型之前,使用最小二乘模型选取 $VIF \leq 7.5$ 中决定系数 R^2 较大的自变量组合构建 GWR 模型. 本研究以 AOD、RH、TEM、PRE、WS、PRS 和 PBLH 为自变量,PM_{2.5} 为因变量,构建研究区 2015~2021 年的 3~11 月的 PM_{2.5} 浓度月均值和年均值模型,公式如下:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^m \beta_k(u_i, v_i)x_{ik} + \varepsilon_i \quad (2)$$

式中, Y_i 表示模型的因变量; $x_{ik} (k=1, 2, \dots, n)$ 表示 (u_i, v_i) 处自变量 k 的值; (u_i, v_i) 表示第 i 个监测站点的坐标; $\beta_k(u_i, v_i) (k=1, 2, \dots, n)$ 表示相应自变量 k 在点 (u_i, v_i) 处的系数项; $\beta > 0$ 时表示解释变量与被解释变量是正相关的; $\beta < 0$ 时表示解释变量与被解释变量是负相关的; $\beta = 0$ 时表示不相关; $\beta_0(u_i, v_i)$ 为常数项; ε_i 为模型随机误差.

表 2 为 2015~2021 年年均模型自变量选取情况,表 3 为 2021 年月均模型自变量选取情况,由于本研究基于 AOD 与 PM_{2.5} 相关性构建 GWR 模型,故此 AOD 作为模型自变量必选项不做分析.

表 2 年均 GWR 模型因子选择¹⁾
Table 2 Annual GWR model factor selection

年份	R^2	VIF					
		WS	PRS	TEM	PBLH	PRE	RH
2015	0.56	3.56	6.22	—	1.26	3.65	0.69
2016	0.54	5.24	1.35	6.33	1.35	—	5.45
2017	0.77	3.26	6.54	3.99	0.98	3.99	—
2018	0.45	6.23	2.33	—	4.23	4.95	—
2019	0.69	2.99	1.32	—	3.25	1.56	6.55
2020	0.32	2.85	1.98	1.68	6.32	—	3.54
2021	0.58	1.68	1.57	5.88	2.54	3.56	—

1)“—”表示文章中被剔除的数据

1.3.1.2 模型验证

在 GWR 模型精度验证中,本文采用了基于站点的十折交叉验证方法,基于站点的交叉验证是将研究区 27 个地面监测站点全部随机打乱并分成 10 组,被选为验证站点的样本点全部用于模型检验,其余站点所有样本均用于建模. 本文采用决定系

数 R^2 , 平均绝对误差 MAE 以及均方根误差 RMSE 来评价模型估算精度. R^2 越接近于 1, 表明模型的模拟效果越好, 模型的估算值越接近于观测值. MAE 与 RMSE 表示模型的估算值与观测值的偏差程度, 值越小表明偏差程度越小, 模型精度越高. 公式如下:

表 3 2021 年月均 GWR 模型因子选择¹⁾
Table 3 Monthly average GWR model factor selection for 2021

月份	R^2	VIF					
		WS	PRS	TEM	PBLH	PRE	RH
3	0.69	1.36	3.24	3.25	1.26	2.35	—
4	0.57	3.25	3.65	5.21	1.24	4.23	0.36
5	0.74	4.63	1.26	—	1.68	6.32	4.21
6	0.68	3.56	4.32	—	1.49	1.35	3.22
7	0.71	6.35	5.98	2.64	1.78	2.65	4.25
8	0.59	6.25	5.34	6.24	1.92	—	3.26
9	0.66	4.65	1.89	3.22	0.98	3.89	—
10	0.78	4.59	4.65	—	1.56	4.54	3.21
11	0.73	3.25	3.65	1.24	2.11	3.23	6.65

1)“—”表示文章中被剔除的数据

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - x_i|}{n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - x_i)^2}{n}} \quad (4)$$

式中, X_i 表示预测值, 即模型估算值; x_i 表示实际测量值; n 表示样本数.

1.3.2 最小二乘法拟合

通过最小二乘法拟合研究区逐像元的 $PM_{2.5}$ 浓度的年均值, 可以表示每个像元在累计观测年内的变化趋势, 以此来反映研究区 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化情况. 具体如下:

$$\text{slope} = \frac{n \sum_{i=1}^n ix_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (5)$$

式中, slope 表示 2015~2021 年 $PM_{2.5}$ 浓度变化趋势斜率; n 表示观测年限, 即 $n=7$; i 表示年序号, 从 2015~2021 年分别为 1~7, x_i 表示第 i 年的 $PM_{2.5}$ 浓度; slope<0 表示 $PM_{2.5}$ 浓度呈现降低的趋势; slope=0 表示 $PM_{2.5}$ 浓度几乎没有变化; slope>0 表示 $PM_{2.5}$ 浓度呈现上升的趋势.

1.3.3 地理探测器

地理探测器是探测目标空间分异性并显示其驱动因子影响力的一种统计学方法, 被广泛应用于环境影响因子分析. 地理探测器共有 4 个探测器, 本研究使用到分异及因子探测. 因子探测是衡量影响因子多大程度上解释了研究区 $PM_{2.5}$ 的空间异质性, 公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2}{N \delta^2} \quad (6)$$

式中, q 取值为 $[0, 1]$, q 值越大表示该影响因子和

$PM_{2.5}$ 空间分布越相似, 即对 $PM_{2.5}$ 空间分布影响越强; $h=1, 2, \dots, n$ 表示影响因子的分类; N_h 和 N 分别表示子单元和全部单元的 $PM_{2.5}$ 的总值, δ_h^2 和 δ^2 分别表示单元 h 和全部单元 $PM_{2.5}$ 值的方差.

2 结果与分析

2.1 模型结果与验证

通过 GWR 模型反演得到各站点 2015~2021 年的 $PM_{2.5}$ 浓度模拟值, 对各站点估算的模拟值和实测值绘制月均值和年均值散点图(图 5), 并分别计算 R^2 、MAE 和 RMSE.

由图 5 可知, 模型估算的 $PM_{2.5}$ 浓度模拟值与实际测量值吻合程度较高, R^2 在 0.56~0.87 之间, MAE 在 2.98~9.21 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, RMSE 在 3.08~12.89 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间. 说明各月份与年均的拟合情况普遍较好, 模型精度较高. 不同月份的拟合情况略有不同, 其中 3 月、8 月、11 月和年均的 R^2 均大于 0.7, 优于其他月份, 4 月和 7 月的拟合程度较低, R^2 均低于 0.6. 整体而言, GWR 模型反演 $PM_{2.5}$ 浓度结果普遍较好, 反演结果可用于时空分析.

2.2 天山北坡城市群 $PM_{2.5}$ 浓度时空变化特征

2.2.1 空间变化特征

由天山北坡城市群 2015~2021 年多年平均 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布可知(图 6), 天山北坡城市群 $\rho(PM_{2.5})$ 分布在 2~47 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 均值为 16.98 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 总体呈现四周低, 中部高, 西部低, 东部高等特点. 浓度自天山高海拔向山前绿洲快速增加, 其中高浓度区域主要在天山北坡的城市群区域, 和绿洲分布几乎吻合, 绿洲高值区域与沙漠低值区域的分界线较为明显. 可见天山北坡城市群 $PM_{2.5}$ 浓度的分布受人类活动影响较大, 同时自然来源以及人类活动产生的 $PM_{2.5}$ 会受到天山高大山体的阻挡, 聚集在山麓前的城市群区域, 受西风带的常年盛行西风影响, 污染会

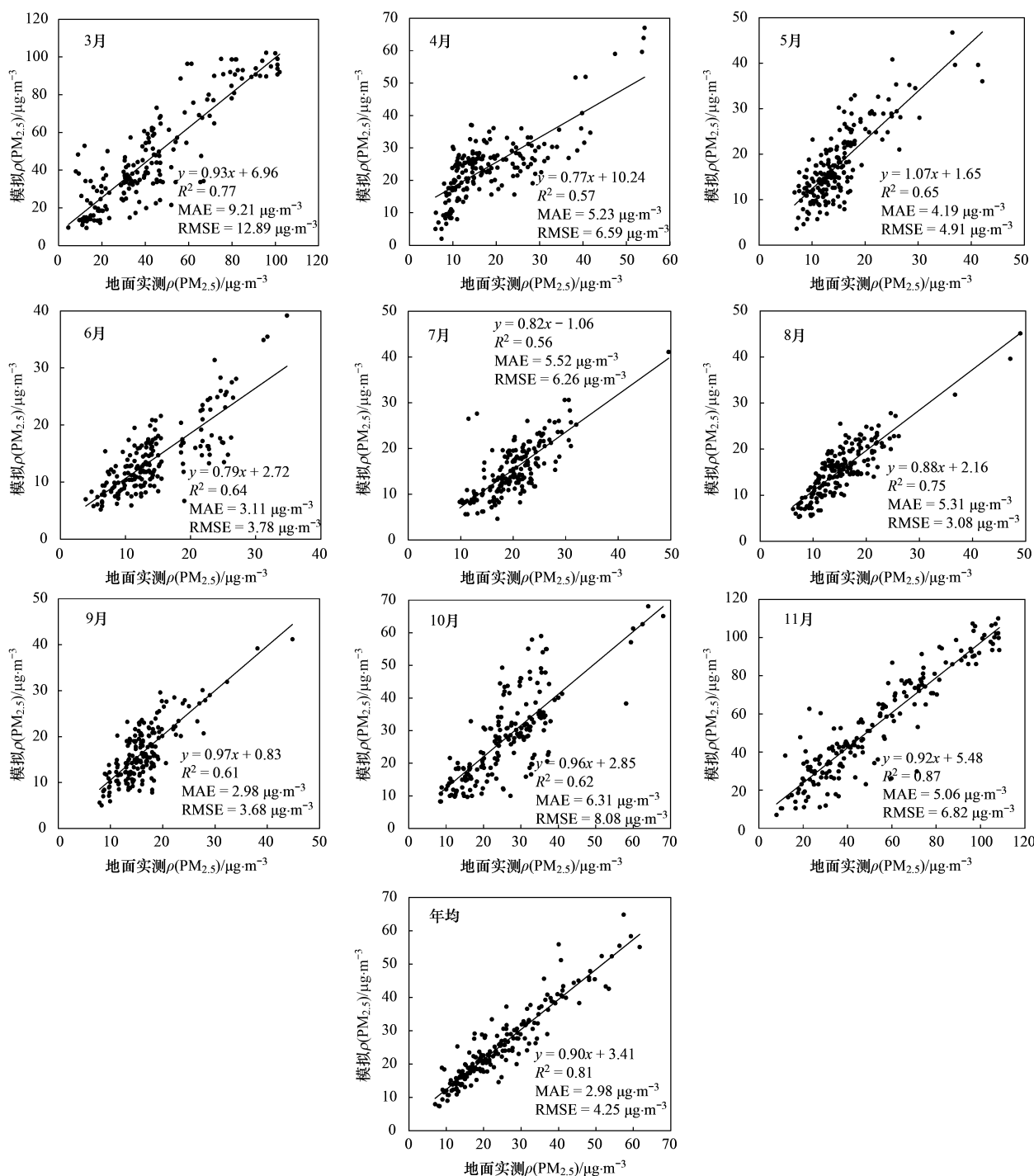


图5 GWR模型逐月平均和年均拟合散点图

Fig. 5 Scatter chart of monthly average and annual average fitting of GWR model

向东南转移^[24].

根据天山北坡各市县浓度统计情况得到图7,温泉县 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值最低为 $12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,石河子 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值最高为 $27 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.石河子市、五家渠市和奎屯市的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值介于 $23\sim 27 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,以上城市都具有行政区域面积较小,人口密集,工农业发达的特点.精河县的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分布最为离散,最大值和最小值分别为 $47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,这主要是受艾比湖的自然尘源影响.克拉玛依市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值为 17

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,因其地形平坦,面积广阔,有利于污染的扩散.乌鲁木齐市 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值为 $22 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最大值为 $39 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,乌鲁木齐市三面环山,地势上南高北低,特殊的地形不利于 $\text{PM}_{2.5}$ 的扩散,同时乌鲁木齐市作为新疆经济、政治和文化中心,工业发达,人口稠密,本身也是 $\text{PM}_{2.5}$ 的产生区域,因此乌鲁木齐市的城市场区域 $\text{PM}_{2.5}$ 普遍较高,其余人口稀疏区域较低.

2.2.2 时间变化特征

图8为天山北坡城市群2015~2021年逐月平均

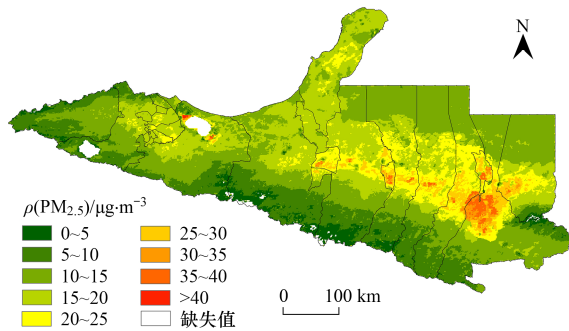


图6 天山北坡城市群2015~2021年多年平均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of multi-year average $\text{PM}_{2.5}$ concentration in urban agglomerations on the northern slope of Tianshan Mountains from 2015 to 2021

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布,整体而言,月均值的空间分布与年均值基本一致,污染主要集中在山前的绿洲区域.随着海拔的升高, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度随之降低也与年均值的规律一致.高值区域主要集中在乌鲁木齐市及其周边城市市区部分,研究区3月和11月 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 均值最高,分别为 $25.24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $28.80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,最高值分别为 $102 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $110.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (图9),因城市处于供暖季,燃煤供暖造成空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度剧烈上升.受惠于“煤改气”工程,以清洁能源天然气代替燃煤供暖,乌鲁木齐 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年均值在逐年下降(图10),政策效果较为明显.研究区4~10月均值和最大值都表现出“U”型的变化规律,即先减少后增加.其中6月的

均值最低,为 $12.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,8月的最高值为 $72.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,为各月最低.从季节来比较,研究区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值呈现:秋季(9~11月)>春季(3~5月)>夏季(6~8月),随着气温升高大气活动更剧烈频繁,有利于污染物扩散,同时降雨的增加,加速了空气的净化速度^[25,26].

研究区 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 在2015~2021年存在3次振荡(图11),在2015~2017年、2018~2019年和2020~2021年均值升高,分别增加了2、1.2和 $3.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.这与研究区城镇化建设加速,外来人口流入有关.在2017~2018年和2019~2020年均值有两次下降,分别为 $0.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $5.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.通过分析主要几个城市年均值在2015~2021年的变化,发现主要城市的变化规律和研究区年均值变化基本一致,在2018年和2020年均值普遍有两次下降.2020年研究区以及主要城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值有大幅下降,研究区整体降幅为31.1%,主要城市博乐市、昌吉市、石河子市、五家渠市、乌鲁木齐市和克拉玛依市的降幅达到18.8%~43.8%.尽管部分年份研究区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染会随经济发展、政策发布和城镇化建设等因素带来一定的增长^[27,28].但从7 a的时间跨度整体来看, $\text{PM}_{2.5}$ 污染总体是在不断减少,这与国家大力推进环保政策及社会各界为保护环境而做出的贡献密不可分.

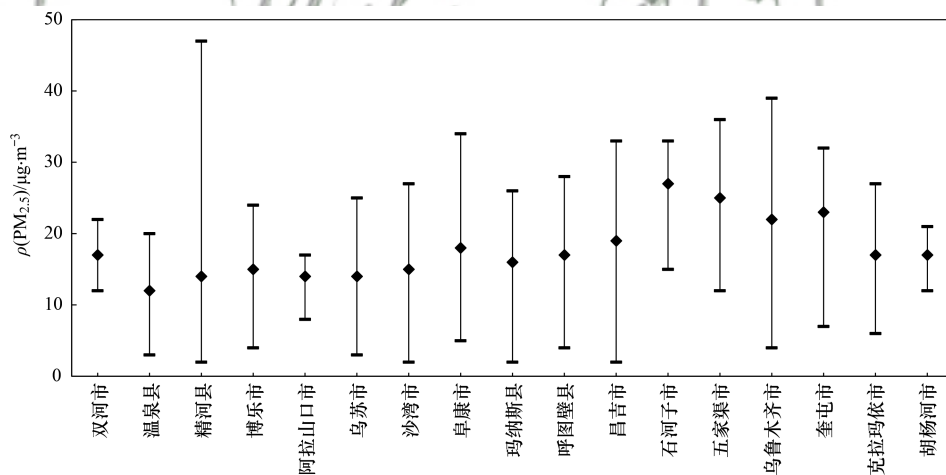


图7 天山北坡各市县 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值

Fig. 7 Mean value of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in cities and counties on the northern slope of Tianshan Mountains

2.2.3 趋势变化特征

通过线性趋势分析研究区2015~2021年的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年均值变化(图12),可知天山北坡城市群区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度整体呈现降低的趋势.其中乌鲁木齐市变化趋势呈现下降的区域面积占比53.4%,五家渠市变化趋势呈现下降的区域面积占比96.3%,其他城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度年均值呈下降趋势区域面积在8.6%~98%之间.各个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均呈现不同程度的下降趋

势,不仅局限于城市市区部分,乡村部分也会有明显的减少.同时高海拔区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化区域较小,几乎没有变化,受人类影响较小.

根据逐月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度趋势变化可知(图13和图14),研究区3~10月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化趋势均值在 $-0.99\% \sim -0.28\%$ 之间,呈下降趋势,11月变化趋势均值为0.22%,略有上升.3月和11月的离散程度远大于其他月份,其中3月和11月最低值分别为

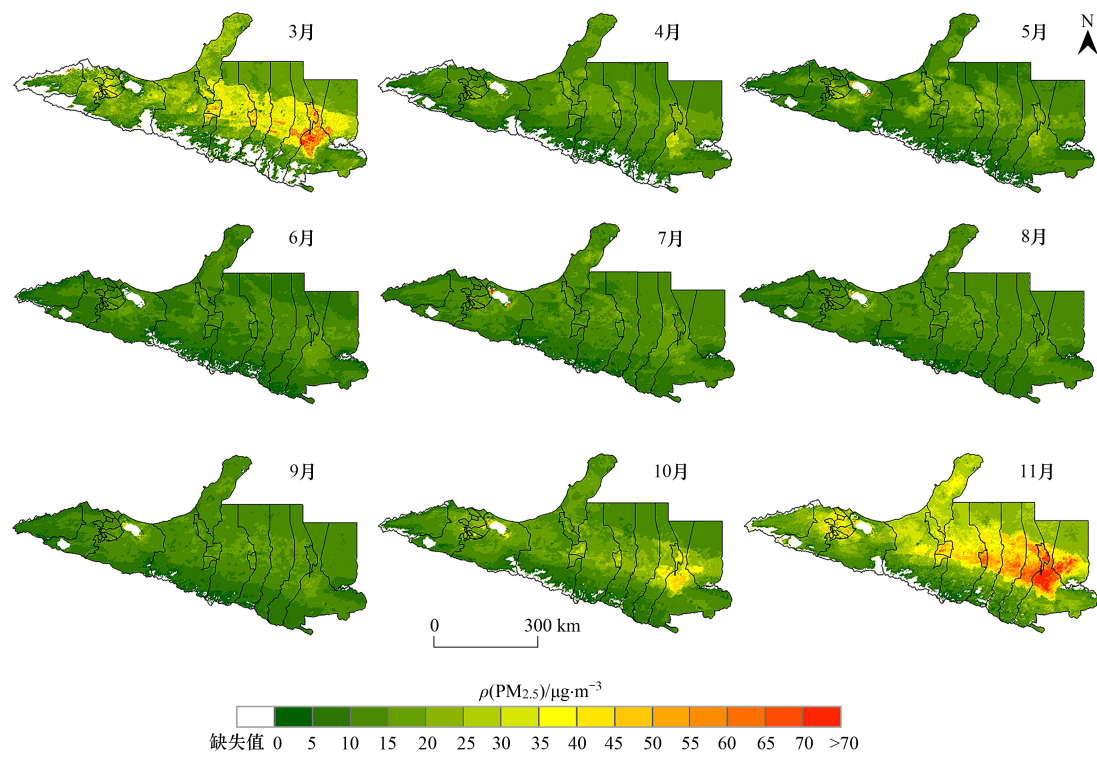


图8 天山北坡城市群2015~2021年逐月平均PM_{2.5}浓度分布

Fig. 8 Monthly average PM_{2.5} concentration distribution of urban agglomerations on the northern slope of Tianshan Mountains from 2015 to 2021

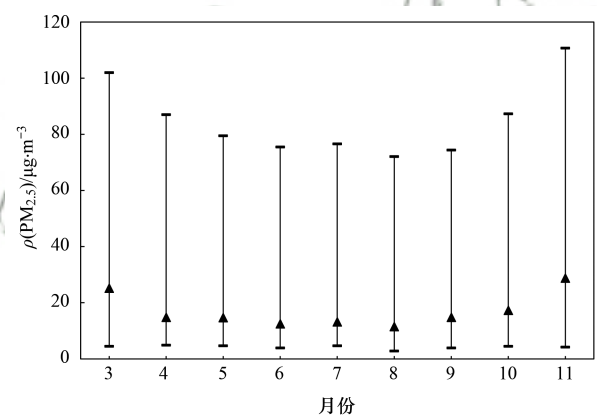


图9 天山北坡城市群2015~2021年逐月平均PM_{2.5}浓度变化

Fig. 9 Monthly average PM_{2.5} concentration change of urban agglomerations on the northern slope of Tianshan Mountains from 2015 to 2021

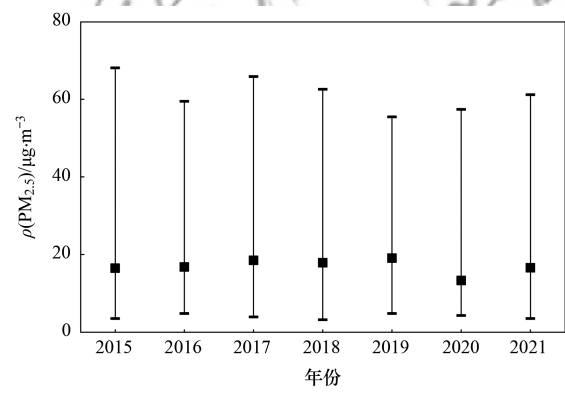


图11 天山北坡城市群逐年平均PM_{2.5}浓度变化

Fig. 11 Annual average PM_{2.5} concentration change in urban agglomerations on the northern slope of Tianshan Mountains

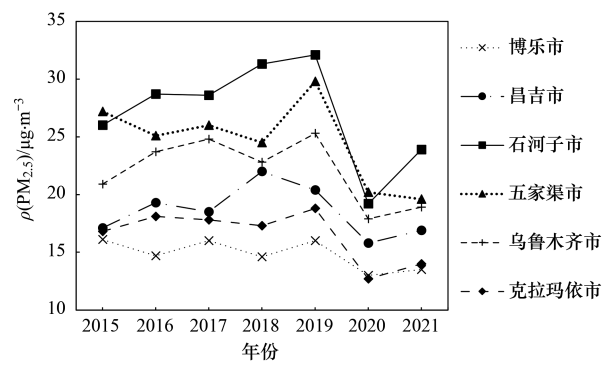


图10 天山北坡主要城市2015~2021年浓度均值变化

Fig. 10 Average concentration change of major cities on the north slope of Tianshan Mountains from 2015 to 2021

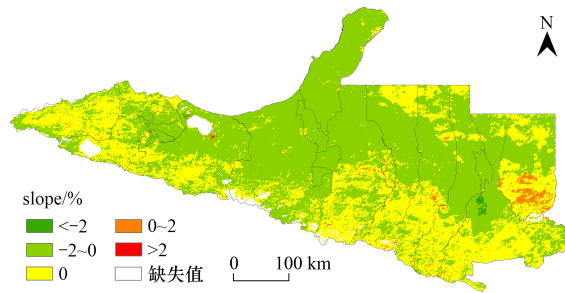


图12 天山北坡城市群2015~2021年PM_{2.5}浓度趋势变化空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of PM_{2.5} concentration trend in urban agglomerations on the northern slope of Tianshan Mountains from 2015 to 2021

-17.7%和-14.2%,最高值分别为8.9%和8.62%,这主要是因为3月和11月易受供暖等人活动影响,

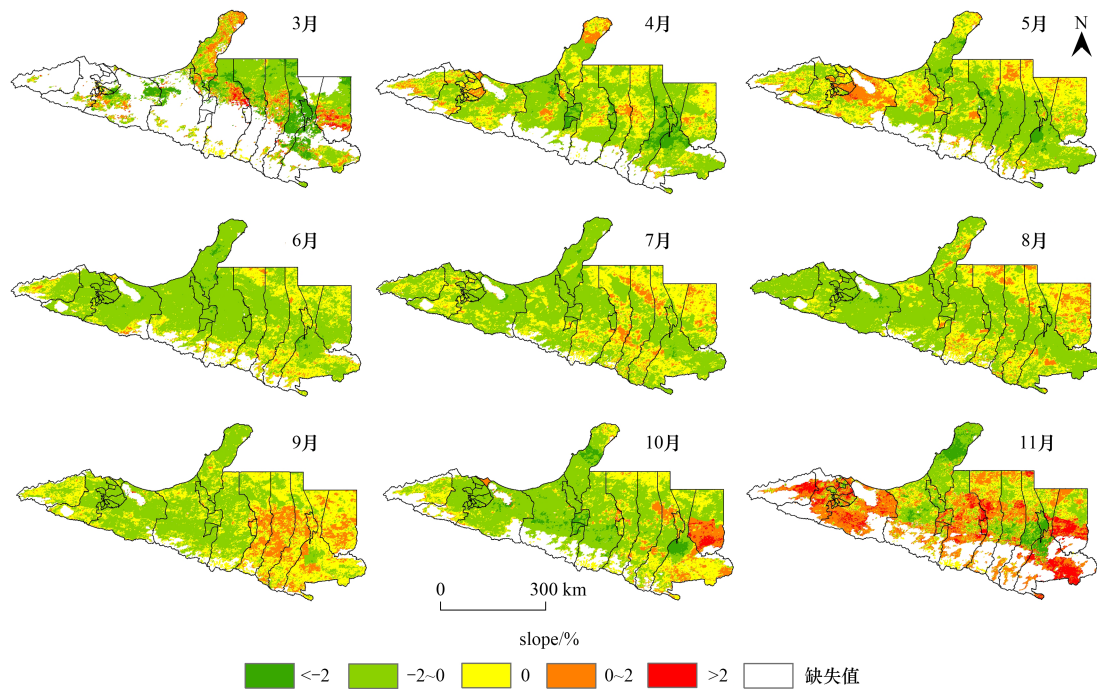


图 13 天山北坡城市群 2015~2021 年逐月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度趋势变化空间分布

Fig. 13 Spatial distribution of monthly $\text{PM}_{2.5}$ concentration trend in urban agglomerations on the northern slope of Tianshan Mountains from 2015 to 2021

部分区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化剧烈, 出现大幅升高或者大幅降低的现象. 相比而言, 4~9 月大部分区域虽发生变化, 但变化较小, 总体表现为减少趋势. 其中 6 月变化区间在 1.76% ~ -3.9% 之间, 变化程度最小.

研究区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化趋势在年尺度和月尺度基本保持一致, 在月尺度上 3 月和 11 月的变化相比其他月份会表现得更剧烈, 在年尺度上的变化表现得更缓和. 在空间上变化的区域主要集中分布在绿洲带等人口密集区域, 其中变化较大的区域集中在乌鲁木齐市市区部分及其周边区域. 说明 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化在时空分布上是很不均衡的, 人口密集的城市群区域贡献了较大比例的减少.

2.3 影响因素分析

2.3.1 影响因素相关性分析

通过 GWR 模型对天山北坡城市群 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的反演估算的协变量的回归系数进行统计. 由表 4 可知, 在天山北坡城市群区域, 各影响因素中气温、气压与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现正相关效应, 而相对湿度、风速、大气边界层高度、降水量呈现负相关效应.

气温对 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度具有正相关效应, 气温的升高使得空气中污染物的理化反应更频繁, 影响颗粒物的形成^[29,30]. 同时温度变化的过程有可能出现逆温层^[31], 会阻碍大气的对流以及局部的空气环流, 进而造成局部 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的升高. 部分区域气温对 $\text{PM}_{2.5}$ 具有负相关效应, 主要是因为气温升高, 大气运动更为活跃, 空气的上下对流更频繁以及 $\text{PM}_{2.5}$ 的粒子运动

加速, 有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的扩散和稀释^[32].

相对湿度对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有负相关效应, 空气湿度的增大, 有利于水汽吸附 $\text{PM}_{2.5}$, 部分 $\text{PM}_{2.5}$ 会因吸附向着更大直径颗粒物转化, 从而造成 $\text{PM}_{2.5}$ 的降低. 部分区域相对湿度对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也会存在正相关效应, 主要是因为相对湿度的增加有助于 AOD 的吸湿增长, 向聚集模态转化, 从而提升了空气中的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度^[33].

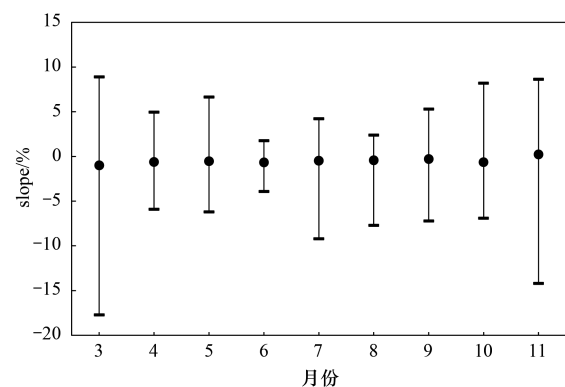


图 14 天山北坡城市群 2015~2021 年逐月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化趋势

Fig. 14 Monthly change in $\text{PM}_{2.5}$ concentration in urban agglomerations on the northern slope of Tianshan Mountains from 2015 to 2021

风速对 $\text{PM}_{2.5}$ 呈现负相关效应, 风速的提高有利于污染物的扩散. 气压对 $\text{PM}_{2.5}$ 呈现正相关效应, 气压的升高造成空气密度增大, 单位体积空气的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度会伴随升高. 大气边界层高度对 $\text{PM}_{2.5}$ 呈现负相

关效应,即大气边界层高度越高有利于污染物的扩散.降水量对PM_{2.5}主要呈现负相关效应,降水和降雪的过程会吸附空气中颗粒物沉降从而对空气中的PM_{2.5}起到清除作用^[34,35].

2.3.2 影响因素驱动力分析

为了探究天山北坡城市群PM_{2.5}浓度的影响因素对其解释力度,因此引入地理探测器.通过对研究区2021年PM_{2.5}年均浓度、年均相对湿度、年均气压、年均气温、年均降水量、年均风速和年均大气边界层高度栅格数据上构建5 km×5 km的网格,读取网格

均值数据并将其导入到地理探测器^[36].

表5为分异及因子探测结果,可知影响因素对PM_{2.5}浓度分布影响程度区间为0.02~0.33.大气边界层高度对PM_{2.5}浓度分布的影响力最强,影响力为0.33.影响力最低为降水量,影响力仅为0.02.影响力由高到低排列依次为:大气边界层高度>相对湿度>气压>气温>风速>降水量.在大气PM_{2.5}污染防治过程中结合影响因素的相关性及影响程度共同分析,会对相关治理工作开展有着指导性的帮助.

表4 GWR影响因子回归系数统计
Table 4 Regression coefficient statistics of GWR impact factors

影响因子	指标值	回归系数均值			
		最大值	最小值	平均值	标准差
TEM/°C	12.32	5.22	-3.93	0.91	5.32
RH/%	54.25	0.65	-1.54	-0.13	3.25
PRS/hPa	889	0.01	-0.01	0.01	0.89
WS/m·s ⁻¹	3.14	0.99	-10.62	-3.35	2.66
PBLH/km	0.56	2.32	-0.52	-0.27	1.45
PRE/mm	32.54	-0.03	-0.2	-0.12	1.37

表5 单因子探测结果¹⁾
Table 5 Single factor detection results

项目	TEM	WS	PRE	PRS	RH	PBLH
q 值	0.09	0.04	0.02	0.14	0.17	0.33
p 值	0.11	0.1	0.14	0.09	0.05	0.16

1)q 值表示该因子解释力,p 值表示该因子的显著性

3 讨论

以往在新疆地区的相关研究中,相关学者通常使用暗像元算法的3 km空间分辨率AOD和深蓝算法的10 km空间分辨率AOD融合得到3 km空间分辨率AOD进行遥感反演PM_{2.5}^[17,18].本研究使用的MCD19A2空间分辨率为1 km,更高空间分辨率的AOD反演得到的PM_{2.5}浓度分布也更为精细,说明高精度的AOD反演得到的PM_{2.5}浓度分布精度也更高.通过对2015~2021年逐小时的站点PM_{2.5}浓度分析,可以发现研究区PM_{2.5}浓度在小时尺度变化是较大的.在保证反演科学性的前提下,选取更长时段PM_{2.5}浓度求取日均值可以提升结果的准确性,可见高时间分辨率AOD反演PM_{2.5}更具优势.

随着遥感反演的时空分辨率的提高,部分PM_{2.5}污染高值区域和低值区域会表现得更明显,通过分析PM_{2.5}浓度分布时,可以发现在研究区西北部艾比湖区域存在高值区,这里以盐渍化土壤为主.一方面,盐渍化地表会影响到地表反射率,造成反演的AOD的准确性降低,进而影响到该区域PM_{2.5}浓度反演结果^[37].另一方面,艾比湖西北处为风口,特殊的

地形造成地表常年向区域大气输送盐尘颗粒物,这也会增加区域PM_{2.5}浓度^[38].未来工作中可以对该区域的PM_{2.5}的分布进行更细致的分析,这有利于掌握研究区PM_{2.5}浓度变化的细致情况.为未来环保政策的制定和改进提供参考,助力于国家“一带一路”建设.

4 结论

(1)研究区PM_{2.5}浓度高值在天山北坡区域主要分布在天山北麓和古尔班通古特沙漠之间的绿洲城市群地带,呈现“四周低,中间高”和“西低东高”的空间分布.2015~2021年研究区的ρ(PM_{2.5})年均值为16.98 μg·m⁻³,高值主要聚集在乌鲁木齐市市区部分,并向昌吉市和阜康市延伸递减;ρ(PM_{2.5})月均值分布规律与年均一致,但存在季节差异,表现为:秋季(20.32 μg·m⁻³)>春季(18.25 μg·m⁻³)>夏季(12.47 μg·m⁻³);受天山山体阻挡和供暖季等影响,PM_{2.5}污染在乌鲁木齐市附近聚集形成高值区域,在春季和冬季该现象会更明显.

(2)研究区PM_{2.5}浓度年均值在2015~2021年呈现下降趋势.3~10月均值也都表现为下降趋势,11月

略有升高;从PM_{2.5}浓度变化趋势空间分布分析,下降主要都集中在主要城市市区部分,尤其是乌鲁木齐市市区部分及其周边地区减少幅度最大,变化最为剧烈,说明近些年环保政策的实行效果明显.

(3)对于研究区的PM_{2.5}浓度影响因素分析发现,气温、气压与PM_{2.5}浓度主要呈现正相关效应,而相对湿度,风速,大气边界层高度,降水量主要呈现负相关效应.2021年各因子影响程度从高向低排列为:大气边界层高度>相对湿度>气压>气温>风速>降水量.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 刘琳, 张正勇, 刘芬, 等. 天山北坡经济带城市PM_{2.5}质量浓度时空分布及模拟分析[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(11): 1849-1857.
Liu L, Zhang Y Z, Liu F, et al. Spatial-temporal distribution and simulation analysis of PM_{2.5} concentration of the cities in the northern slope economic zone of Tianshan Mountain[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(11): 1849-1857.
- [5] Lin C Q, Li Y, Yuan Z B, et al. Using satellite remote sensing data to estimate the high-resolution distribution of ground-level PM_{2.5}[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, **156**: 117-128.
- [6] 李慧娟, 胡列群, 李帅. 北疆地区MODIS 3km气溶胶光学厚度与PM₁₀质量浓度的相关性分析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(3): 1109-1116.
Li H J, Hu L Q, Li S. A correlation analysis of MODIS 3 km aerosol optical depth and PM₁₀ concentration in Northern Xinjiang[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(3): 1109-1116.
- [7] 吴健生, 王茜, 李嘉诚, 等. PM_{2.5}浓度空间分异模拟模型对比: 以京津冀地区为例[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2191-2201.
Wu J S, Wang X, Li J C, et al. Comparison of models on spatial variation of PM_{2.5} concentration: a case of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2191-2201.
- [8] 石灵芝, 邓启红, 路婵, 等. 基于BP人工神经网络的大气颗粒物PM₁₀质量浓度预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, **43**(5): 1969-1974.
Shi L Z, Deng Q H, Lu C, et al. Prediction of PM₁₀ mass concentrations based on BP artificial neural network[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, **43**(5): 1969-1974.
- [9] Ma Z W, Liu Y, Zhao Q Y, et al. Satellite-derived high resolution PM_{2.5} concentrations in Yangtze River Delta Region of China using improved linear mixed effects model [J]. Atmospheric Environment, 2016, **133**: 156-164.
- [10] Mcmillen D P. Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships [J]. American Journal of Agricultural Economics, 2004, **86**(2): 554-556.
- [11] Chen J Q, Wei H, Li N, et al. Exploring the spatial-temporal dynamics of the Yangtze River Delta urban agglomeration based on night-time light remote sensing technology [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, **13**: 5369-5383.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 陈辉, 厉青, 张玉环, 等. 基于地理加权模型的我国冬季PM_{2.5}遥感估算方法研究[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(6): 2142-2151.
Chen H, Li Q, Zhang Y H, et al. Estimations of PM_{2.5} concentrations based on the method of geographically weighted regression [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(6): 2142-2151.
- [15] 张天棋. 基于MODIS影像的中国地区气溶胶产品验证与PM_{2.5}反演[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
Zhang T Q. Evaluation of the aerosol optical depth production and retrieval of the PM_{2.5} in China using MODIS images [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [16] 付宏臣, 孙艳玲, 景悦. 基于地理加权回归模型的新疆地区PM_{2.5}遥感估算[J]. 天津师范大学学报(自然科学版), 2019, **39**(1): 63-70, 80.
Fu H C, Sun Y L, Jing Y. Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations of Xinjiang based on geographically weighted regression model [J]. Journal of Tianjin Normal University (Natural Science Edition), 2019, **39**(1): 63-70, 80.
- [17] 付宏臣, 孙艳玲, 陈莉, 等. 基于AOD数据与GWR模型的2016年新疆地区PM_{2.5}和PM₁₀时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(1): 27-35.
Fu H C, Sun Y L, Chen L, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in Xinjiang region in 2016 based on AOD data and GWR model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(1): 27-35.
- [18] 易唯, 杨东, 李茜荣. 基于GWR模型的天山北坡经济带PM_{2.5}浓度反演及时空特征分析[J]. 地球与环境, 2021, **49**(1): 51-58.
Yi W, Yang D, Li X R. Inversion of PM_{2.5} concentration in the economic zone of northern Tianshan Mountain slope based on the GWR model and the temporal and spatial characteristics[J]. Earth and Environment, 2021, **49**(1): 51-58.
- [19] 赵仕伟, 高晓清. 利用MODIS C6数据分析中国西北地区气溶胶光学厚度时空变化特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2637-2646.
Zhao S W, Gao X Q. Analysis of Spatio-temporal distribution and variation characteristics of aerosol optical depth over the northwest of China by MODIS C6 product [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2637-2646.
- [20] 张喆, 丁建丽, 王瑾杰, 等. 天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征[J]. 环境科学, 2021, **42**(5): 2202-2212.
Zhang Z, Ding J L, Wang J J, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of aerosol optical properties in urban

- agglomerations on the north slope of the Tianshan Mountains[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2202-2212.
- [21] 李忠宾, 王楠, 张自力, 等. 中国地区MODIS气溶胶光学厚度产品综合验证及分析[J]. *中国环境科学*, 2020, **40**(10): 4190-4204.
- Li Z B, Wang N, Zhang Z L, *et al.* Validation and analyzation of MODIS aerosol optical depth products over China [J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(10): 4190-4204.
- [22] He Q Q, Zhang M, Huang B, *et al.* MODIS 3km and 10km aerosol optical depth for China: evaluation and comparison [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **153**: 150-162.
- [23] Anderson J C, Wang J, Zeng J, *et al.* Long-term statistical assessment of Aqua-MODIS aerosol optical depth over coastal regions: bias characteristics and uncertainty sources[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2013, **65** (1), 10. 3402/tellusb. v65i0. 20805.
- [24] 高宇潇, 刘志辉, 王敬哲. 乌鲁木齐市PM_{2.5}浓度与MODIS气溶胶光学厚度相关性分析[J]. *干旱区地理*, 2018, **41**(2): 298-305.
- Gao Y X, Liu Z H, Wang J Z. Correlation analysis of PM_{2.5} concentration and MODIS aerosol optical depth in Urumqi City[J]. *Arid Land Geography*, 2018, **41**(2): 298-305.
- [25] 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.
- [26] 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 等. 近20年来中国PM_{2.5}污染演变的时空过程[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 1-13.
- Shi Y, Liu R M, Luo Y, *et al.* Spatiotemporal variations of PM_{2.5} pollution evolution in China in recent 20 years[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 1-13.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 张军, 金梓函, 王玥, 等. 关中原城市群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.
- [31] 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.
- [32] 寿亦萱, 张大林. 城市热岛效应的研究进展与展望[J]. *气象学报*, 2012, **70**(3): 338-353.
- Shou Y X, Zhang D L. Recent advances in understanding urban heat island effects with some future prospects [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2012, **70**(3): 338-353.
- [33] 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): 5344-5353.
- Zhou Z H, Zhou T G, Qin L. Linkage effect and nonlinear impact of PM_{2.5} concentration driving factors in Central Plains urban agglomeration [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(12): 5344-5353.
- [34] 曹杨, 刘炜桦, 王晨曦, 等. 成都市降水对大气污染物的清除效果分析[J]. *环境科学研究*, 2020, **33**(2): 305-311.
- Cao Y, Liu W H, Wang C X, *et al.* Scavenging effect of precipitation on removal of atmospheric pollutants in Chengdu City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, **33** (2): 305-311.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 陈香月, 丁建丽, 王敬哲, 等. 艾比湖流域气溶胶光学厚度时空演变及影响因素[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 4824-4832.
- Chen X Y, Ding J L, Wang J Z, *et al.* Spatiotemporal evolution and driving mechanism of aerosol optical depth in the Ebinur Lake Basin [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 4824-4832.
- [38] 张喆, 丁建丽, 王瑾杰. 艾比湖地区气溶胶光学特性分析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(8): 3484-3491.
- Zhang Z, Ding J L, Wang J J. Aerosol optical properties over the Ebinur Region [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(8): 3484-3491.

CONTENTS

Research on the Evaluation Method and Application of Provincial Differentiated Carbon Peaking in China	LIU Run-pu, PENG Shuan, CHEN Yu-shuo, <i>et al.</i>	(1233)
Evolution and Influencing Factors of Spatial Correlation Network of Construction Carbon Emission in China from the Perspective of Whole Life Cycle	REN Xiao-song, LI Zhao-rui	(1243)
Efficiency Characteristics and Evolution Patterns of Urban Carbon Metabolism of Production-Living-Ecological Space in Beijing-Tianjin-Hebei Region	TIAN Chao, CHENG Lin-lin, SHAO Ying-chao	(1254)
Assessment of CO ₂ Co-benefits of Air Pollution Control Policies in Taiyuan's 14th Five-Year Plan	XIAO Ting-yu, SHU Yun, LI hui, <i>et al.</i>	(1265)
Coordinated Control of Carbon Emission Reduction and Air Quality Improvement in the Industrial Sector in Hunan Province	LI Nan, LIU Wan-wan, ZHU Shu-han, <i>et al.</i>	(1274)
Coal Control and Carbon Reduction Path in Henan Province's Power Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target: A Medium- and Long-term Study	ZHANG Jing, YANG Meng, ZHANG Wei, <i>et al.</i>	(1285)
Environmental Benefits of Pollution and Carbon Reduction by Bus Fleet Electrification in Zhengzhou	ZOU Chao, WANG Ya-nan, WU Lin, <i>et al.</i>	(1293)
Multi-scale Driving Mechanism of Urbanization on PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomeration in the Middle Reaches of the Yangtze River	ZHANG Zheng, ZHOU Ting-gang, ZHOU Zhi-heng, <i>et al.</i>	(1304)
Analysis of Spatio-temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} Concentration in Urban Agglomerations on the Northern Slope of Tianshan Mountains	WANG Xiang-nan, ZHANG Zhe, LIU Fang-qing	(1315)
Spatial Variability and Source Apportionment of PM _{2.5} Carbon Components in Tianjin	WU Fu-liang, WU Jian-hui, DAI Qi-li, <i>et al.</i>	(1328)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Aerosols in PM _{2.5} in Huaxi District, Guiyang	GUI Jia-qun, YANG Yuan, WANG Xian-qin, <i>et al.</i>	(1337)
Pollution Characteristics, Source Apportionment, and Meteorological Response of Water-soluble Ions in PM _{2.5} in Xinxiang, North China	LIU Huan-jia, LI Lan-qing, LI Huan-li, <i>et al.</i>	(1349)
Characterization of Metal Elements in Atmospheric PM _{2.5} and Health Risk Assessment in Heze in Winter from 2017 to 2018	DU Hong-xuan, REN Li-hong, ZHAO Ming-sheng, <i>et al.</i>	(1361)
Analysis of the Jumping Characteristics and Influencing Factors of Ozone Pollution in Beijing	PAN Jin-xin, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i>	(1371)
Analysis of Photochemical Characteristics and Sensitivity of Atmospheric Ozone in Nanjing in Summer	LUO Li-tong, ZHANG Yan-lin, LIN Yu-qi, <i>et al.</i>	(1382)
Ozone Pollution in Suzhou During Early Summertime: Formation Mechanism and Interannual Variation	WU Ye-zheng, ZHANG Xin, GU Jun, <i>et al.</i>	(1392)
Distribution Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Source Tracing of Heavy Metals in the Sediments of Typical Lakes in the Middle Reaches of the Yangtze River	LU Hong-bin, LU Shao-yong, LI Xiang, <i>et al.</i>	(1402)
Spatiotemporal Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surface Sediments in Lake Ulansuhai Based on PCA-APCS-MLR Model	CUI Zhi-mou, SHI Xiao-hong, ZHAO Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1415)
Spatial and Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Water of Changshou Lake Reservoir, Chongqing	ZHANG Rui-xi, LIU Ya-jun, LUO Yong-nan, <i>et al.</i>	(1428)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Microplastics in the Yangtze River Basin	LI Si-qiong, WANG Hua, CHU Lin-you, <i>et al.</i>	(1439)
Assessment of Microplastic Pollution and Estimation of Annual Emission Volume in the Dongshan Canal of Yichang City	DING Shuang, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i>	(1448)
Occurrence Characteristic and Risk Assessment of Microplastics in Sishui River (Xingyang Section)	ZHAO Chang-min, HE Bing, LI He-tong, <i>et al.</i>	(1457)
Contamination Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Drains Flowing into the Yellow River of Ningxia	GAO Li, LI Ling-yun, ZHENG Lan-xiang, <i>et al.</i>	(1468)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Oujiang River Basin in Southern Zhejiang Province	ZHONG Yi-xin, LI Li-xiang, WU Xin, <i>et al.</i>	(1480)
Spatial-temporal Distribution and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Poyang Lake	MA Yan, SUN Chen, BI Jia-le, <i>et al.</i>	(1492)
Change and Prediction of Water Purification Function in the South Bank of Hangzhou Bay in the Past 20 Years	WANG Shan-shan, CAO Gong-ping, XU Ming-wei, <i>et al.</i>	(1502)
Effects of Land Use Types on Water Quality at Different Buffer Scales: Tianjin Section of the Haihe River Basin as an Example	DAI Meng-jun, ZHANG Bing, DU Qian-qian, <i>et al.</i>	(1512)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Shallow Groundwater in Anqing Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, SONG Yang, LI Ying-chun, <i>et al.</i>	(1525)
Dynamic Changes of Dissolved Organic Matter Derived from Algal Decomposition and the Environmental Effects in Eutrophic Lakes	ZHANG Jin, CHEN Ming-ying, HAO Zhi-neng, <i>et al.</i>	(1539)
Degradation of Carbamazepine in Water by UV-activated Sulfite Process	LIN Tao, YUAN Yu-jie	(1553)
Detection, Generation, and Control of Disinfection By-products of Reclaimed Water	LIAO Yu-feng, WANG Zheng, PAN Yang, <i>et al.</i>	(1561)
Absorption of Ammonium by Three Substrates Materials in Constructed Wetland System	HE Qiang, CHEN Bo-wen, YANG Yu-jing, <i>et al.</i>	(1577)
Ecological Environment Assessment and Driving Mechanism Analysis of Nagqu and Amdo Sections of Qinghai-Xizang Highway Based on Improved Remote Sensing Ecological Index	FU Kai-xiang, JIA Guo-dong, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1586)
Spatial-temporal Evolution and Driving Factors Analysis of Ecological Environment Quality in Daihai Basin based on AWRSEI	ZHAO Jia-li, LI Xing, SUN Bing	(1598)
Quantitative Assessment of the Impact of Climate Change on the Growing Season of Vegetation Gross Primary Productivity in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River	XU Yong, PAN Yu-chun, ZOU Bin, <i>et al.</i>	(1615)
Effect of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Storage in Coal Mining Areas Based on Meta-analysis	LI Jian-ming, KANG Yu-xin, JIANG Fu-zhen, <i>et al.</i>	(1629)
Effects of Continuous Annual Crop Rotation and Fallow on Soil Aggregate Stability and Organic Carbon	LU Ze-rang, LI Yong-mei, YANG Chun-huai, <i>et al.</i>	(1644)
Effects of Four Amendments on Fertility and Labile Organic Carbon Fractions of Acid Purple Soil	DING Xin-ru, YAN Ning-zhen, WANG Zi-fang, <i>et al.</i>	(1655)
Changes in Soil Nitrogen Components and Their Relationship with Environmental Factors with Different Tea Plantation Ages	SHAO Qi, WU Tao, XIE Xue-feng, <i>et al.</i>	(1665)
Nutrients and Ecological Stoichiometry Characteristics of Typical Wetland Soils in the Lower Yellow River	WANG Chuan-ying, WANG Kai-yue, WANG Hao-ran, <i>et al.</i>	(1674)
Effect of Film Mulching Age and Organic Fertilizer Application on the Distribution Characteristics of Microplastics in the Soil of a Peanut Field	SONG Ning-ning, LI Meng-jia, WANG Xue-xia, <i>et al.</i>	(1684)
Effects of Straw Returning and Biochar Addition on Greenhouse Gas Emissions from High Nitrate Nitrogen Soil After Flooding in Rice-vegetable Rotation System in Tropical China	HU Tian-yi, CHE Jia-yue, HU Yu-jie, <i>et al.</i>	(1692)
Tillage Depth Regulation and the Effect of Straw Return on Soil Respiration in Farmland	CHEN Xi, ZHANG Yan-jun, ZOU Jun-lie, <i>et al.</i>	(1702)
Distribution Prediction of Soil Heavy Metals Based on Remote Sensing Temporal-Spatial-Spectral Features and Random Forest Model	WANG Ze-qiang, ZHANG Dong-you, XU Xi-bo, <i>et al.</i>	(1713)
Characteristics and Identification Priority Source of Heavy Metals Pollution in Farmland Soils in the Yellow River Basin	LI Jun, LI Xu, LI Kai-ming, <i>et al.</i>	(1724)
Characteristics of Cd Flux in Topsoil Around Typical Mining Area in Hezhou, Guangxi	YANG Ye-yu, LI Cheng, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i>	(1739)
Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Fengdong New District Based on Information Diffusion Model	YANG Nan-nan, HAN Ling, LIU Ming	(1749)
Traceability Analysis and Environmental Quality Assessment of Soil Heavy Metal Pollution in West Hunan Province	XIAO Kai-qi, XU Hong-gen, GAN Jie, <i>et al.</i>	(1760)
Distribution Characteristics, Source Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Typical Industry Reclaimed Soil	SHEN Cheng, WANG Wen-juan, SHA Chen-yan, <i>et al.</i>	(1769)
Provincial-scale Soil As Migration and Transformation and Rice Safe Planting Zoning: A Case Study of Guizhou Province	DONG Xin-yue, WU Yong, ZHOU Zi-han, <i>et al.</i>	(1781)
Effect of Silica Fertilizer(Husk Ash) to Improve Soil Quality and Reduce Cd and As Accumulation in Rice	YI Xuan-tao, OUYANG Kun, GU Jiao-feng, <i>et al.</i>	(1793)
Effect of EDDS Application on Soil Cu/Cd Availability and Uptake/transport by Castor	LIU Wen-ying, WU Gang, HU Hong-qing	(1803)
Blocking Effects of Foliar Conditioners on Cadmium, Arsenic, and Lead Accumulation in Wheat Grain in Compound-contaminated Farmland	XIAO Bing, WANG Qiu-shi, GAO Pei-pe, <i>et al.</i>	(1812)
Soil Microbial Community Structure and Functional Diversity Character of Abandoned Farmland in Minqin Oasis	LI Chang-le, ZHANG Fu, WANG Li-de, <i>et al.</i>	(1821)
Microbial Mechanisms of Removal of Phthalic Acid Esters in Purple Soils Revealed Using Metagenomic Analysis	LI Yu-tong, YU Hai, LIU Kun, <i>et al.</i>	(1830)
Air Microbial Contamination and Risk of Respiratory Exposure of Workers in Chicken Farms	BAI Yu-qiao, SUN Xing-bin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i>	(1840)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Multi-environmental Media and <i>Bellamyia aeruginosa</i> of Manao River	GAO Ya-kun, LI Wei-ming, ZHANG Xu-tong, <i>et al.</i>	(1849)
Biological Effect of Microplastics with Different Functional Groups on the Bacterial Communities and Metabolic Functions of Zebrafish (<i>Danio rerio</i>) Embryos	YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, BAO Xu-hui, <i>et al.</i>	(1859)