

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

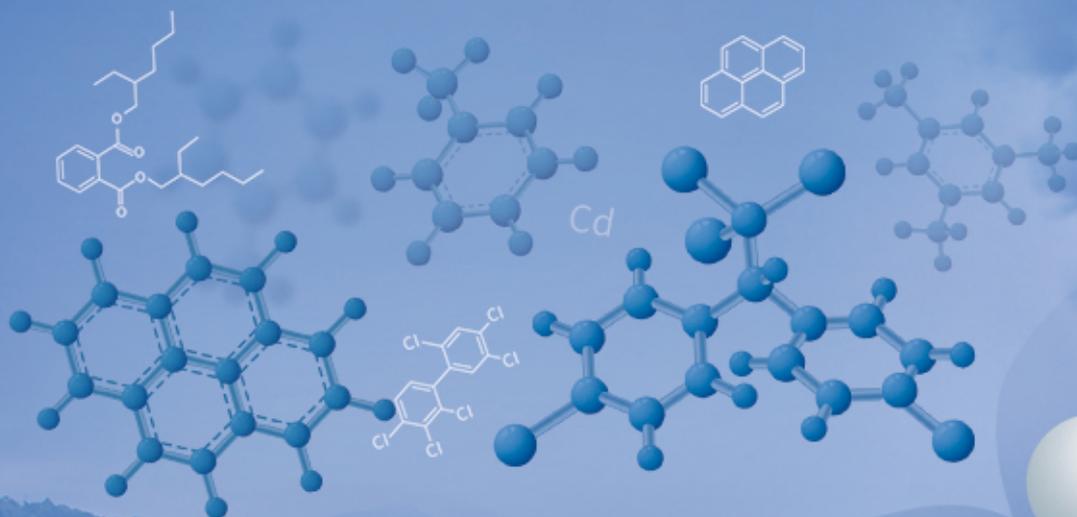
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

OCPs

PAEs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期

Vol.42 No.10

目次

PM_{2.5} 化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用 蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)

汾渭平原 PM_{2.5} 空间分布的地形效应 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)

华中地区冬季灰霾天气下 PM_{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例
..... 李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铨, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)

华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性 黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)

成都市春季 O₃ 污染特征及关键前体物识别 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)

基于边界观测的长三角某工业区 O₃ 来源特征 黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)

廊坊开发区 8~9 月 O₃ 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析 张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)

广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响
..... 曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)

厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应 徐超, 吴水平, 刘怡靖, 钟雪芬 (4650)

北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖芳, 朱晓婉 (4660)

两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响
..... 朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)

燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律 杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)

长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响 王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)

土地利用对太湖入流河道营养盐的影响 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)

基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征
..... 梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡暄, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)

三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价 任丙南, 耿静 (4717)

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价 龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)

天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素 杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)

华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素 张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)

快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)

盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析 王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)

基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度
..... 周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)

硼酸和磷酸对 PMS/Co²⁺ 均相催化氧化有机物的影响因素与机制 万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 李刚 (4789)

磁性生物炭负载 α-MnO₂ 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚 李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)

紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制 张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)

铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性 王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)

低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制 李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)

我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价 耿源濛, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝骁, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)

不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较 杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)

部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳 秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)

同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能 周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)

多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用 赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)

柴达木盆地土壤重金属污染与来源分析 陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)

快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险 李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)

广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素 刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)

炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害 邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)

海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险
..... 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)

环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索 苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)

银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估 张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)

施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响 李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)

我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析 吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)

青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析
..... 李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)

松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构
..... 王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)

不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征 南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)

稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应 罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)

铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析 曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)

有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响 周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)

水稻产量、稻田 CH₄ 和 N₂O 排放对长期大气 CO₂ 浓度升高的响应 于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)

原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响 闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)

中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因子 李宇, 周德成, 闫章美 (5037)

室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展 张万众, 张彭义 (5046)

《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)

两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响

朱燕¹, 赵天良^{1*}, 白永清², 徐家平³, 孙晓芸¹, 胡未央¹, 常嘉成¹, 杨婕¹, 朱从祯¹

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶-云-降水重点实验室, 南京 210044; 2. 中国气象局武汉暴雨研究所, 暴雨监测预警湖北省重点实验室, 武汉 430205; 3. 江苏省气候中心, 南京 210044)

摘要:为认识近年来长江流域中游两湖(湖南-湖北)盆地大气环境变化特征,本文利用两湖盆地2015~2019年冬季近地面PM_{2.5}和PM₁₀观测数据,结合风速、地形和植被指数等资料,探讨两湖盆地冬季大气颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀的变化特征及其与风速、地形和下垫面的关联。结果表明:①两湖盆地2015~2019年冬季PM_{2.5}污染频发,其中两湖盆地西北部的襄阳和荆门的冬季平均分别多达62 d和61 d出现PM_{2.5}污染(PM_{2.5} > 75 μg·m⁻³),襄阳重污染(PM_{2.5} > 150 μg·m⁻³)多达19 d,表明两湖盆地是长江流域中游地区一个区域性PM_{2.5}污染中心。②在空间上,两湖盆地污染呈现出西北重东南轻、城市群污染较重的特征,这主要与冬季风驱动的大气污染物的区域传输和两湖盆地城市地区的强排放有关。③近地面风速与PM_{2.5}和PM₁₀地面浓度变化呈现特殊的“U”型非线性关系,PM_{2.5}和PM₁₀浓度拐点值分别为153 μg·m⁻³和210 μg·m⁻³,揭示了两湖盆地局地大气颗粒物累积主导了轻/中度污染,大气污染物区域传输决定了重度污染的独特区域特征。④两湖盆地冬季PM_{2.5}和PM₁₀地面浓度与地形高度和植被指数均呈显著负相关,反映了两湖盆地地形和城市化下垫面变化的大气环境效应。

关键词:两湖盆地; 大气颗粒物; 气象要素; 地形; 下垫面

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4669-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103050

Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter

ZHU Yan¹, ZHAO Tian-liang^{1*}, BAI Yong-qing², XU Jia-ping³, SUN Xiao-yun¹, HU Wei-yang¹, CHANG Jia-cheng¹, YANG Jie¹, ZHU Cong-zhen¹

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Hubei Key Laboratory for Heavy Rain Monitoring and Warning Research, Institute of Heavy Rain, China Meteorological Administration, Wuhan 430205, China; 3. Jiangsu Climate Center, Nanjing 210044, China)

Abstract: To understand the recent characteristics of atmospheric environmental changes in the Twain-Hu (Hunan-Hubei) Basin, including the middle reaches of the Yangtze River, this paper uses near-surface PM_{2.5} and PM₁₀ observational data for the Twain-Hu Basin in the winters of 2015 to 2019, combined with wind-speed, topography, the normalized difference vegetation index (NDVI), and other datasets. The results show that: ① PM_{2.5} pollution occurred frequently in the winters of 2015-2019 in the Twain-Hu Basin, and Xiangyang and Jingmen in the western part of the basin, experience PM_{2.5} pollution on an average of 62 and 61 days in winter (PM_{2.5} > 75 μg·m⁻³). And the heavy pollution days in Xiangyang reached 19 more days (PM_{2.5} > 150 μg·m⁻³), indicating that the Twain-Hu Basin is an air pollution center in the middle reaches of the Yangtze River Basin; ② Spatially, pollution in the Twain-Hu Basin is heavier in the northwest than in the southeast, and in the urban agglomeration, which is mainly related to the regional transport of air pollutants by the winter monsoon and the high levels of emissions from urban areas; ③ A “U-shaped” nonlinear relationship was observed between near-surface wind speeds and PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations. The inflection points of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations were 153 and 210 μg·m⁻³, respectively. This implies that the accumulation of local atmospheric particulate matter in the Twain-Hu Basin dominates light/medium pollution, while the regional transport of air pollutants dominates period of severe pollution; and ④ PM_{2.5} and PM₁₀ in winter were significantly negatively correlated with terrain height and the NDVI, which reflects the atmospheric environmental effects of topography and urbanization.

Key words: Twain-Hu Basin; atmospheric particulate matter; meteorological elements; terrain; underlying surface

大气颗粒物(particulate matters, PM)是由悬浮在大气中的各种固态与液态微粒组成的混合物,是空气污染的主要成分^[1].受大气污染物排放源和气象条件影响,我国中东部地区主要存在4个大气颗粒物重污染事件频发区域,分别是华北平原、长三角地区、珠三角地区以及四川盆地^[2~5].近年来长江流域中游两湖(湖南-湖北)盆地重污染事件多发,成为一个新的大气污染高发区^[6~10].两湖盆地大气颗粒物污染变化及其成因亟待深入研究.

大气污染物排放源强决定了大气污染程度^[11~13],而大气颗粒物污染的暴发、维持和消散,则主要是由气象条件决定^[14~17].静稳天气下的弱风、强逆温层和低混合层高度等局地气象条件是大气污染形成和维持的重要原因^[18~21].风是驱动大气

收稿日期: 2021-03-06; 修订日期: 2021-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830965,91744209)

作者简介: 朱燕(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气环境与数值模拟, E-mail: zhuyan620@163.com

* 通信作者, E-mail: tlzhao@nuist.edu.cn

污染物输送的重要物理量^[22],静风和小风抑制大气污染物的有效扩散;强风驱使大气污染物向下风方输送^[23],使大气污染表现出明显的区域性传输特征^[24,25].此外,下垫面条件对局地空气质量变化也具有重要作用,不同下垫面地-气之间的热力交换和动量交换会改变大气边界层局地环流^[26,27],影响大气污染物的物理化学过程,是改变大气颗粒物浓度分布的一个重要环境因素^[28~31].

两湖盆地位于长江中游地区,具有典型的东亚季风气候,区域气象条件和大气污染物时空分布均受到东亚季风大气环流的调控^[32].“次盆地”地形、丰富的水网下垫面^[33]以及多样的生态系统增加了两湖盆地地表动力和热力条件的复杂性,影响大气温湿结构和大气边界层物理过程.此外,两湖盆地作为长江中游经济发展中心,拥有武汉和长株潭两大城市群,城市化导致了下垫面类型变化,改变了区域PM_{2.5}空间分布.两湖盆地核心城市武汉的大气颗粒物浓度存在显著的季节变化,冬季最高,夏季最低,而日变化呈现双峰型特征^[34,35].2019年冬季一次重污染过程中地形效应使两湖盆地西部的PM_{2.5}浓度增加12%^[36].来自华北平原长距离传输的大气颗粒物是导致武汉PM_{2.5}浓度急剧上升的主要原因^[37],尤其是在冬季,PM_{2.5}的区域性输送会加剧武汉独特的“非静稳”大气重污染^[10],使近地面高浓度的PM_{2.5}对应的风速较大^[8].然而现有分析大多针对单个城市或某一重污染事件,两湖盆地长时间序列的区域大气颗粒物的分布特征还需要完整认识,气象条件、“次盆地”地形和下垫面对两湖盆地大气颗粒物浓度的影响,亦亟待深入研究.

为完整研究两湖盆地冬季大气颗粒物(PM_{2.5}和PM₁₀)的变化特征,本文以湖南湖北相连的海拔高度低于200 m的平原地区为研究区域(图1),认识近5年来(2015~2019年)两湖盆地冬季大气颗粒物污染区域变化特征,探讨PM_{2.5}和PM₁₀的变化与风速和下垫面地形的关系,以期为华中地区的大气污染研究及防治提供参考.

1 材料与方法

本文研究时段为2015~2019年冬季(12月及

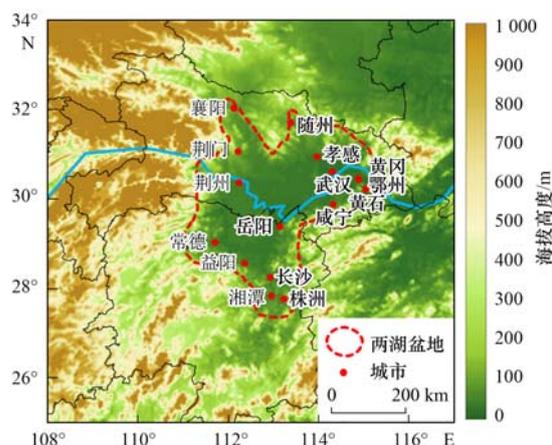


图1 两湖盆地及周边地区的海拔高度空间分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of altitude in the Twain-Hu Basin and surrounding areas

次年1、2月).大气颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀观测数据来源于中国环境监测总站的全国城市空气质量实时发布平台(<http://106.37.208.233:20035/>),时间分辨率为1 h.气象数据来源于国家气象信息中心.归一化差异植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据来源于搭载在Aqua卫星上的中分辨率成像光谱仪(moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS, <https://ladsweb.nascom.nasa.gov/>),选用3级产品(MYD13A3),空间分辨率为1 km,时间分辨率为1个月.

本文选取两湖盆地的襄陽、荊門、荊州、隨州、武漢、鄂州、黃岡、黃石、孝感、咸寧、岳陽、常德、益陽、長沙、株洲和湘潭共16个主要城市为研究区域(图1),分析两湖盆地大气颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀的区域变化.基于两湖盆地16个城市(共88个观测站点)冬季每天24 h的PM_{2.5}及PM₁₀数据,计算2015~2019年冬季PM_{2.5}和PM₁₀的日均值,由日均值求得各站点冬季月平均及冬季平均值.

根据环境保护部环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)(HJ 633-2012)中地面PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度日均值等级划分标准(表1),本研究将2015~2019年冬季PM_{2.5}及PM₁₀质量浓度划分为6个等级.此外,根据环境空气质量标准(GB 3095-2012),PM_{2.5}年均浓度>35 μg·m⁻³超过国家空气质量二级标准,PM₁₀年均浓度>70 μg·m⁻³超过国家空气质量二级标准.

表1 大气颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度日均值等级划分标准/μg·m⁻³

Table 1 Classification standards for daily average atmospheric particulate matter(PM_{2.5} and PM₁₀) mass concentrations/μg·m⁻³

项目	优	良	轻度污染	中度污染	重度污染	严重污染
PM _{2.5}	≤35	35~75	75~115	115~150	150~250	>250
PM ₁₀	≤50	50~150	150~250	250~350	350~420	>420

在进行大气颗粒物与 NDVI 相关分析时,选取与观测站点经纬度最接近的格点和周围 8 个格点的数据平均值作为空气质量观测站点的 NDVI,对冬季大气颗粒物月均数据与 NDVI 进行相关分析.为了探讨两湖盆地冬季大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的变化与地形、下垫面和风速的关联,采用 Pearson 相关系数分析法确定大气颗粒物地面浓度与海拔高度和 NDVI 的变化关系,采用二次曲线拟合方法探究大气颗粒物与近地面风速之间的关系.

2 结果与讨论

2.1 大气颗粒物污染时空变化

2.1.1 空间分布

2015~2019 年两湖盆地冬季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的空间分布存在明显差异(图 2).近 5 年两湖盆地冬季平均 $PM_{2.5}$ 质量浓度由最低值 $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (黄

石)到最高值 $115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (襄阳)不等.空气质量处于轻度以上污染水平,即平均浓度超过 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的站点达到 45 个,主要位于两湖盆地西北部、武汉城市群以及长株潭城市群内.不存在平均浓度低于 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的站点,表明两湖盆地所有城市的 $PM_{2.5}$ 冬季平均浓度均超过国家空气质量二级标准.

PM_{10} 的空间分布与 $PM_{2.5}$ 类似.近 5 年两湖盆地冬季平均 PM_{10} 质量浓度由最低值 $80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (常德)到最高值 $153 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (荆门)不等.平均浓度超过 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的站点有 2 个,分别是位于盆地西北部的襄阳和荆门,其余站点的 PM_{10} 平均浓度均处于 $70 \sim 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间,表明两湖盆地所有城市的 PM_{10} 冬季平均浓度均超过国家空气质量二级标准.总体看来,两湖盆地冬季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度的空间分布可能与当地经济水平、周边环境和气象条件等因素关系密切^[38].

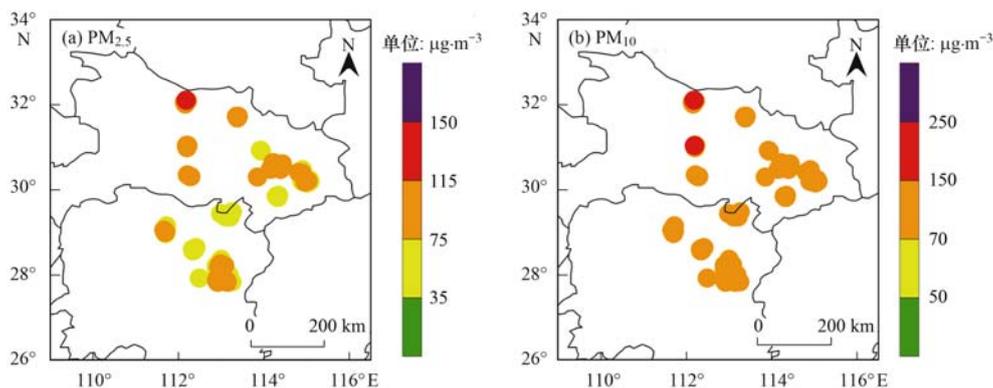


图 2 两湖盆地 2015~2019 年冬季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 季节平均浓度的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} seasonal average concentrations in the Twain-Hu Basin during the winters of 2015-2019

对两湖盆地冬季 $PM_{2.5}$ 污染天数作进一步统计发现,与大气颗粒物质量浓度空间分布类似, $PM_{2.5}$ 污染天数空间分布存在差异(图 3),总体呈现西北高东南低、城市群高于周边地区的特征.两湖盆地冬季平均轻度污染天为 20 d(株洲)至 48 d(荆门)不等[图 3(a)].盆地西北部荆门、武汉、襄阳

和随州的轻中度污染日超过 40 d,而盆地东南部株洲、益阳和黄石轻中度污染日均维持在 30 d 左右.两湖盆地冬季平均重污染日从 1 d(岳阳和咸宁)至 19 d(襄阳)不等[图 3(b)],区域平均重污染日为 5 d.从轻中度污染天和重度污染天的空间分布中,亦可发现长株潭及武汉城市圈的污染日明显高

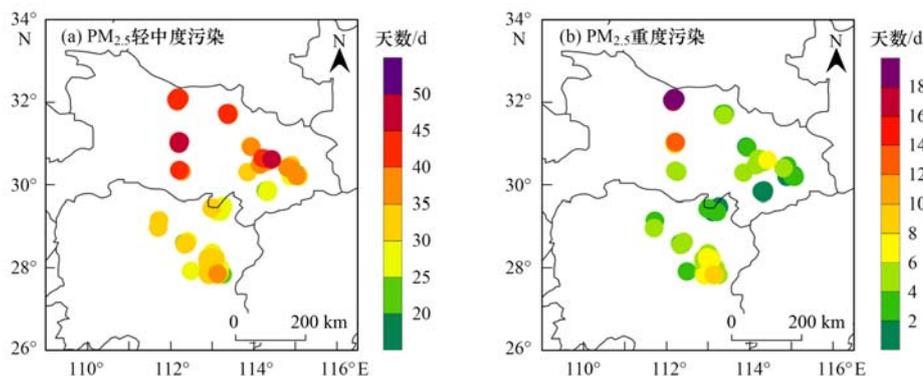


图 3 两湖盆地 2015~2019 年冬季 $PM_{2.5}$ 轻/中度污染以及重度污染平均天数的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of average light, moderate, and heavy $PM_{2.5}$ pollution days in the Twain-Hu Basin during the winters of 2015-2019

于周边地区.此外,襄阳和荆门的污染最为严重,冬季平均分别存在 62 d 和 61 d 的污染天,即 2/3 冬季均处在污染天中,表明两湖盆地是我国大气环境变化中一个重污染中心.

总体而言,两湖盆地大气颗粒物污染呈现出西北重东南轻、城市群污染较重的分布特征,这与 Hu 等^[36]的研究发现两湖盆地西北部污染更加严重的结论一致.之所以出现这样的空间分布,与大气颗粒物的区域传输和本地排放有关.长江中游位于连接中国 4 个主要空气污染区的交通枢纽位置,在东亚冬季风的作用下,冷空气驱动大气污染物产生区域输送,使主要大气颗粒物污染区与长江流域中游地区之间形成特殊的源-汇关系^[10,21].两湖盆地近 50% 的污染事件与来自其上游源区空气污染物的远距离传输有关^[39],尤以来自华北平原大气颗粒物的区域传输最为明显,造成外源性污染物成为两湖盆地冬季重污染的主要来源^[34],加剧襄阳、荆门和荆州等盆地西北部城市的大气污染.而在武汉及长株潭城市群地区城市化程度相对较高,本地污染物的累积是造成其污染程度高于周边地区的一个重要原因.

2.1.2 年际变化

对 2015 ~ 2019 年 $PM_{2.5}$ 的冬季逐日数据进行分级统计,发现两湖盆地冬季优良天数最多(图 4),平均占比为 49.58% (表 2),轻度污染天数次之(31.14%),中度污染天数居中(11.81%),重度污

染天数最少(7.47%),表明两湖盆地污染越重,发生频率越低,这与绝大多数地区的大气污染状况一致.从年际变化上来看,两湖盆地冬季优良天数呈上升趋势,年际变率为 $10.93\% \cdot a^{-1}$.污染天数均在波动下降,中度污染天数的降幅最大($19.30\% \cdot a^{-1}$),重度污染天数次之($15.79\% \cdot a^{-1}$),轻度污染天数最小($6.29\% \cdot a^{-1}$).尽管两湖盆地污染天数在波动下降,其占比仍不可小觑,冬季污染天数平均占比达 50.42%,两湖盆地近半个冬季处在污染天之中.在长三角地区,2013 ~ 2016 年冬季的污染天数仅占 38.53%^[40],表明两湖盆地污染程度已赶超长三角地区,成为我国大气环境变化中一个新的区域性重污染中心.

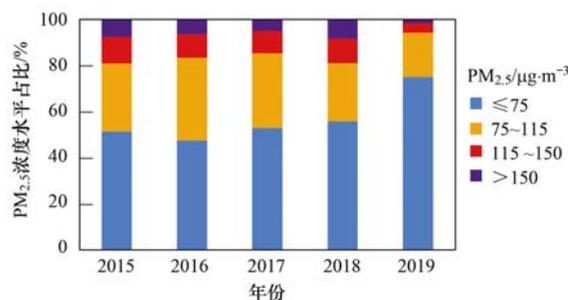


图 4 两湖盆地 2015 ~ 2019 年冬季 $PM_{2.5}$ 各浓度等级占比的年际分布

Fig. 4 Interannual distribution of the proportions of $PM_{2.5}$ concentrations levels in the Twain-Hu Basin during the winters of 2015-2019

表 2 两湖盆地 2015 ~ 2019 年冬季 $PM_{2.5}$ 各浓度等级占比的年际变化统计¹⁾

项目	$PM_{2.5}/\mu g \cdot m^{-3}$			
	≤75	75 ~ 115	115 ~ 150	> 150
近 5 年均值占比/%	49.58	31.14	11.81	7.47
线性趋势/%	5.42	-1.96	-2.28	-1.18
年际变率/ $\% \cdot a^{-1}$	10.93	-6.29	-19.30	-15.79

1) 年际变率为线性趋势与年均值之比,表示基线浓度的分数变化率^[41]

对 2015 ~ 2019 年 PM_{10} 的冬季逐日数据的分级统计发现(表 3),与 $PM_{2.5}$ 类似, PM_{10} 污染等级占比表现为:优良(76.43%) > 轻度污染(21.17%) > 中度污染(2.14%) > 重度以上污染(0.26%)。但 PM_{10} 污染天数明显降低,表明两湖盆地大气污染以细颗粒物为主.在年际变率方面, PM_{10} 与 $PM_{2.5}$ 的年际变化也是一致的,优良天数波动上升,年际变率为 $8.10\% \cdot a^{-1}$,污染天数存在下降趋势,降幅表现为:中度污染($35.04\% \cdot a^{-1}$) > 重度污染天数($30.97\% \cdot a^{-1}$) > 轻度污染($25.32\% \cdot a^{-1}$)。但比较 $PM_{2.5}$ 与 PM_{10} 各污染等级的年际变率,发现 PM_{10} 污染的变化幅度更大,表明在近年大气环境中细颗粒

物的二次转化逐渐增强^[42,43].尽管两湖盆地 PM_{10} 质量浓度在逐年下降,但其污染天数占比依然较高,尤其是近 5 年两湖盆地存在 $PM_{10} > 350 \mu g \cdot m^{-3}$ 以上的极端重污染现象,这可能与局地污染排放有关.

总体看来,两湖盆地的冬季空气质量逐年好转,但污染天数仍处于较高水平,近半个冬季处在 $PM_{2.5}$ 污染之中,表明两湖盆地已成为我国大气环境中一个新的区域性 $PM_{2.5}$ 污染中心.此外不同污染等级的变化率略有差异,中/重度污染情况变化明显,轻度污染天的降幅较小且占比较高,表明在未来两湖盆地污染管控工作中,有效降低轻度污染天数将会成为改善两湖盆地空气质量至关重要的一步.

表 3 两湖盆地 2015 ~ 2019 年冬季 PM₁₀ 各浓度等级占比的年度变化统计

项目	PM ₁₀ /μg·m ⁻³			
	≤150	150 ~ 250	250 ~ 350	> 350
2015 年占比/%	58.71	36.42	4.52	0.35
2016 年占比/%	76.46	21.45	1.83	0.26
2017 年占比/%	78.09	19.73	1.69	0.49
2018 年占比/%	83.83	14.19	1.84	0.14
2019 年占比/%	85.96	13.24	0.77	0.03
近 5 年均值占比/%	76.43	21.17	2.14	0.26
线性趋势/%	6.19	-5.36	-0.75	-0.08
年际变率/%·a ⁻¹	8.10	-25.32	-35.04	-30.97

2.2 大气颗粒物变化的影响因子

2.2.1 近地面风速独特驱动作用

风是反映大气动力稳定性的重要特征量,影响大气污染物的扩散和输送^[17]. 一般而言,风速越大,大气颗粒物扩散能力越强,污染物浓度较小;

反之,风速越小,大气颗粒物的扩散能力越小,污染物浓度越高^[29]. 与其他地区不同的是,两湖盆地冬季风速与大气颗粒物浓度的关系呈“U”型非线性分布(图 5),且变化趋势通过了 99% 的置信度检验.

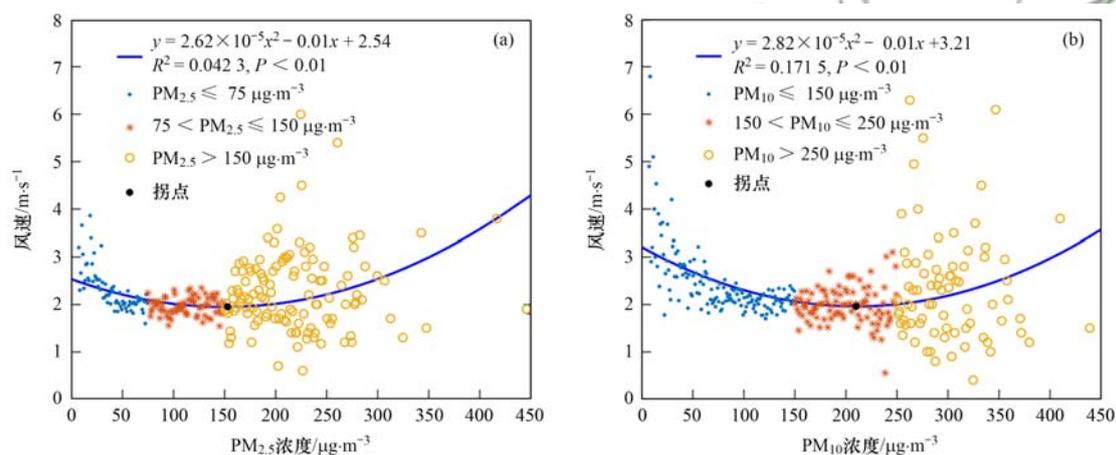
图 5 两湖盆地 2015 ~ 2019 年冬季近地面风速分别与 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度的变化关系

Fig. 5 Relationships between the near-surface wind speed and the concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ in the Twain-Hu Basin during the winters of 2015-2019

在静稳气象条件下的大气污染过程中,近地面风速和大气污染物浓度通常呈现反相关关系,即风速越小,大气扩散能力越弱,越易于局地污染物累积,加重大气污染物浓度,这是局地污染物累积的大气污染典型特征^[17,44]. 大气污染物区域传输对于我国中东地区大气污染变化具有重要的影响,东亚冬季风冷空气南下驱动北方大气污染物区域传输导致了长江中下游地区大气颗粒物污染,形成区域传输型大气污染事件,以大风的强扩散能力加重下风向地区大气污染为典型特征^[8,10,45]. 近 5 年的两湖盆地环境-气象观测统计揭示了东北风盛行的冬季近地面风速与 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 地面浓度变化呈现特殊的“U”型非线性关系,与本研究对静稳天气导致的局地污染物累积的大气污染认知相反,反映风场对局地累积型和区域传输型大气污染的相反的作用,这是两湖盆地大气环境变化中一个特殊的气象影响,

值得深入研究.

当 PM_{2.5} < 153 μg·m⁻³ 时[图 5(a)],地面风速与 PM_{2.5} 质量浓度呈负相关,表明风越小越有利于污染物的累积. 可见当两湖盆地的大气颗粒物浓度处于轻中度污染时,大气颗粒物污染以局地累积为主,反映了局地污染物的累积效应. 而当 PM_{2.5} > 153 μg·m⁻³ 时,地面风速与 PM_{2.5} 质量浓度呈正相关,表明强风会加剧两湖盆地的大气颗粒物污染. 可见当两湖盆地的大气颗粒物浓度处于重度污染时,大气颗粒物污染以外源输送为主. 随着冬季冷空气的南下,在偏北风的驱动下,大气污染物由北向两湖盆地内输送,且盆地北部风速越大,越有利于污染物输送,导致两湖盆地大气颗粒物浓度升高,出现重污染事件^[8,10,46,47],反映了大气污染物区域传输的重要性. 两湖盆地 PM₁₀ 与风速的关系与 PM_{2.5} 类似[图 5(b)],拐点为 210 μg·m⁻³. 这一特殊的“U”型非线性

性关系(图5)表明局地污染物累积主导了两湖盆地的轻中度污染,而大气污染物区域传输决定了两湖盆地的重度污染.

2.2.2 盆地地形效应

对2015~2019年城市冬季平均大气颗粒物浓度与海拔高度的研究发现,大气颗粒物浓度与海拔高度呈显著负相关(图6). $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 与海拔高度相关系数分别为-0.60和-0.70,且分别通过95%和99%的显著性检验,表明在两湖盆地,地势越低,大气污染越重,这与两湖盆地地形有关.本研究分析了两湖盆地16个主要城市海拔高度与2015~2019年冬季近地面平均风速的变化关系(图7).两湖盆地海拔高度与近地面风速呈显著的正相关,反映了地势高地区具有较好的大气扩散条件,可影响区域空气质量变化.在区域传输和局地排放的双重影响下,地势较低地区大气扩散条件差,易形成污染物积累,造成污染物浓度较高的现象^[36].两湖盆地特殊的地形使盆地内大气颗粒物浓度相对较高,表明在一定程度上盆地地形会加重两湖盆地的大气污染.

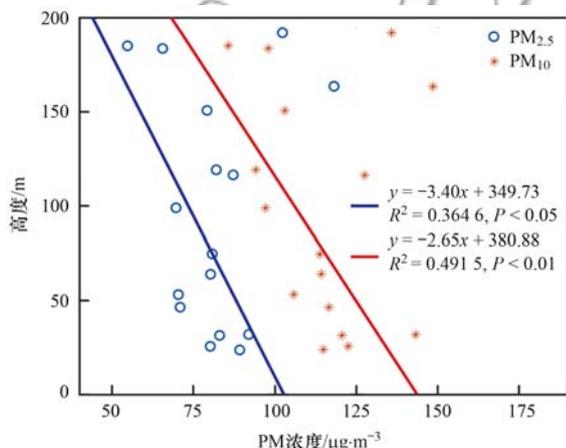


图6 两湖盆地16个主要城市海拔高度与2015~2019年冬季平均 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的变化关系

Fig. 6 Relationships between the altitude of 16 major cities and the average $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations in the Twain-Hu Basin during the winters of 2015-2019

2.2.3 下垫面变化的影响

归一化差异植被指数能够很好地显示出植被生长状态以及植被的覆盖程度,在一定程度上也能表明城市化程度.因其具有较长时间序列的历史数据,是目前应用较广的植被指数数据,其计算公式见式(1):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (1)$$

式中, ρ_{NIR} 与 ρ_R 分别为近红外和红光波段的反射率^[48].通过遥感数据计算得到的NDVI值在[-1, 1]之间,负值表示地表对可见光的反射率较高,一

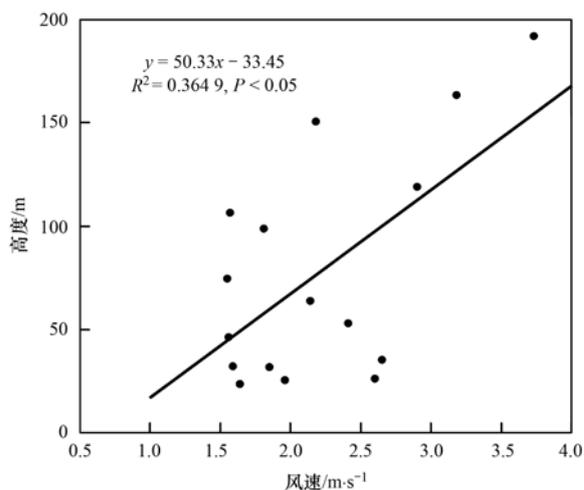


图7 两湖盆地16个主要城市海拔高度与2015~2019年冬季近地面平均风速的变化关系

Fig. 7 Relationships between the altitude of 16 major cities and the average surface-level wind speed in the Twain-Hu Basin during the winters of 2015-2019

般为云、水和雪等;0值附近则表示近红外反射率与红光反射率值相近,地表覆盖类型一般为裸地等;当NDVI值为正值时,表示地表存在植被,且数值越大,植被覆盖度越大.

从2015~2019年两湖盆地冬季大气颗粒物浓度与NDVI的变化关系中可见(图8),二者呈显著负相关, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 与NDVI的相关系数分别为-0.51和-0.40,且均通过99%的显著性检验.分析表明植被覆盖率对大气颗粒物质量浓度变化有较大影响,这可能是因为植被具有较好的调节气温的作用,影响垂直热对流以及水平热交换,改变大气边界层局地环流^[27,28],使大气污染物的物理化学过程发生变化,且大面积的植被具有吸滞尘埃的作用,植

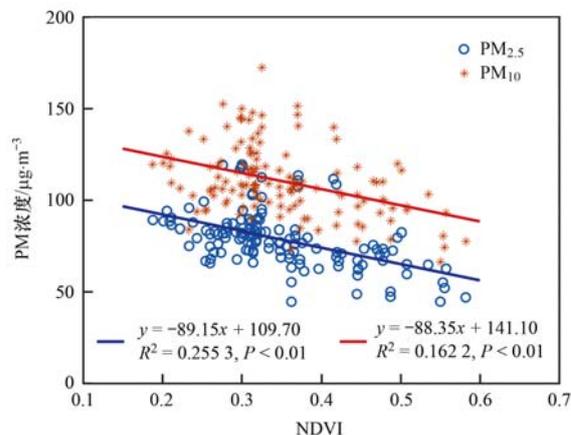


图8 两湖盆地城市观测点2015~2019年冬季NDVI与 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的变化关系

Fig. 8 Relationships between NDVI and $PM_{2.5}$ and PM_{10} concentrations at urban observation points in the Twain-Hu Basin during the winters of 2015-2019

被覆盖度较高地区的大气颗粒物浓度往往趋于较低水平^[49]. 可见在两湖盆地城市化进程中, 下垫面的变化对大气颗粒物具有一定的大气环境效应.

3 结论

(1) 两湖盆地 2015 ~ 2019 年冬季空气污染严重, 冬季平均 $PM_{2.5}$ 污染天数占比达 50.42%, 盆地西北部的襄阳和荆门冬季平均分别多达 62 d 和 61 d 出现 $PM_{2.5}$ 污染 ($PM_{2.5} > 75 \mu g \cdot m^{-3}$), 襄阳重污染 ($PM_{2.5} > 150 \mu g \cdot m^{-3}$) 多达 19 d, 表明两湖盆地是长江流域中游地区一个区域性 $PM_{2.5}$ 污染中心.

(2) 在空间上, 大气颗粒物的区域传输造成两湖盆地大气颗粒物呈现西北重东南轻的特征, 而大气污染物的局地排放使武汉和长株潭城市群地区的大气污染重于周边地区.

(3) 两湖盆地 2015 ~ 2019 年冬季近地面风速与 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 地面浓度变化呈现特殊的“U”型非线性关系, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度拐点值分别为 $153 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $210 \mu g \cdot m^{-3}$. 这种特殊的“U”型关系揭示了局地大气颗粒物累积主导了两湖盆地的轻/中度污染, 而大气颗粒物的区域传输决定了两湖盆地的重度污染.

(4) 两湖盆地冬季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 地面浓度与地形高度和植被指数均呈显著负相关, 反映了两湖盆地的地形和城市化下垫面变化的大气环境效应.

参考文献:

[1] 盛裴轩. 大气物理学[M]. (第二版). 北京: 北京大学出版社, 2013.

[2] Zhang X Y, Wang Y Q, Niu T, *et al.* Atmospheric aerosol compositions in China: spatial/temporal variability, chemical signature, regional haze distribution and comparisons with global aerosols[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(2): 779-799.

[3] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. *科学通报*, 2013, **58**(13): 1178-1187.
Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, *et al.* Factors contributing to haze and fog in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, **58**(13): 1178-1187.

[4] Xu X, Zhao T, Liu F, *et al.* Climate modulation of the Tibetan Plateau on haze in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(3): 1365-1375.

[5] Lin C Q, Liu G, Lau A K H, *et al.* High-resolution satellite remote sensing of provincial $PM_{2.5}$ trends in China from 2001 to 2015[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **180**: 110-116.

[6] 谭成好, 赵天良, 崔春光, 等. 近 50 年华中地区霾污染的特征[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(8): 2272-2280.
Tan C H, Zhao T L, Cui C G, *et al.* Characterization of haze pollution over Central China during the past 50 years[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(8): 2272-2280.

[7] 白永清, 祁海霞, 刘琳, 等. 武汉大气能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度及相对湿度关系的非线性分析及能见度预报[J]. *气象学报*, 2016, **74**(2): 189-199.

Bai Y Q, Qi H X, Liu L, *et al.* Study on the nonlinear relationship among the visibility, $PM_{2.5}$ concentration and relative humidity in Wuhan and the visibility prediction [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, **74**(2): 189-199.

[8] 白永清, 祁海霞, 赵天良, 等. 湖北 2015 年冬季 $PM_{2.5}$ 重污染过程的气象输送条件及日变化特征分析[J]. *气象学报*, 2018, **76**(5): 803-815.
Bai Y Q, Qi H X, Zhao T L, *et al.* Analysis of meteorological conditions and diurnal variation characteristics of $PM_{2.5}$ heavy pollution episodes in the winter of 2015 in Hubei province [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, **76**(5): 803-815.

[9] Shen L J, Wang H L, Zhao T L, *et al.* Characterizing regional aerosol pollution in central China based on 19 years of MODIS data: spatiotemporal variation and aerosol type discrimination [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114556.

[10] Yu C, Zhao T L, Bai Y Q, *et al.* Heavy air pollution with a unique “non-stagnant” atmospheric boundary layer in the Yangtze River middle basin aggravated by regional transport of $PM_{2.5}$ over China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(12): 7217-7230.

[11] Zhou Y J, Zhou J X. Urban atmospheric environmental capacity and atmospheric environmental carrying capacity constrained by GDP- $PM_{2.5}$ [J]. *Ecological Indicators*, 2017, **73**: 637-652.

[12] Zhang H, Yuan H O, Liu X H, *et al.* Impact of synoptic weather patterns on 24 h-average $PM_{2.5}$ concentrations in the North China Plain during 2013-2017 [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 200-210.

[13] Zhao C F, Wang Y, Shi X Q, *et al.* Estimating the contribution of local primary emissions to particulate pollution using high-density station observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124**(3): 1648-1661.

[14] 刘瑞金, 廖宏, 常文渊, 等. 基于国际大气化学—气候模式比较计划模式数据评估未来气候变化对中国东部气溶胶浓度的影响[J]. *大气科学*, 2017, **41**(4): 739-751.
Liu R J, Liao H, Chang W Y, *et al.* Impact of climate change on aerosol concentrations in eastern China based on atmospheric chemistry and climate model intercomparison project (ACCMIP) datasets [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, **41**(4): 739-751.

[15] Tie X X, Huang R J, Cao J J, *et al.* Severe pollution in China amplified by atmospheric moisture [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1), doi: 10.1038/s41598-017-15909-1.

[16] An Z S, Huang R J, Zhang R Y, *et al.* Severe haze in northern China: a synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(18): 8657-8666.

[17] Chen Z Y, Chen D L, Zhao C F, *et al.* Influence of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ concentrations across China: a review of methodology and mechanism [J]. *Environment International*, 2020, **139**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105558.

[18] Zhao X J, Zhao P S, Xu J, *et al.* Analysis of a winter regional haze event and its formation mechanism in the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(11): 5685-5696.

[19] Xu J M, Chang L Y, Qu Y H, *et al.* The meteorological modulation on $PM_{2.5}$ interannual oscillation during 2013 to 2015 in Shanghai, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **572**: 1138-1149.

[20] Wang Y R, Guo L Y, Yin L Z. Progress in the heterogeneous

- catalytic cyclization of CO₂ with epoxides using immobilized ionic liquids[J]. *Catalysis Letters*, 2019, **149**(4): 985-997.
- [21] Zhong J T, Zhang X Y, Wang Y Q, *et al.* The two-way feedback mechanism between unfavorable meteorological conditions and cumulative aerosol pollution in various haze regions of China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(5): 3287-3306.
- [22] Jiang C, Wang H, Zhao T, *et al.* Modeling study of PM_{2.5} pollutant transport across cities in China's Jing-Jin-Ji region during a severe haze episode in December 2013[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(10): 5803-5814.
- [23] Miao Y C, Guo J P, Liu S H, *et al.* Relay transport of aerosols to Beijing-Tianjin-Hebei region by multi-scale atmospheric circulations[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **165**: 35-45.
- [24] Wang Y J, Li L, Chen C H, *et al.* Source apportionment of fine particulate matter during autumn haze episodes in Shanghai, China[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119**(4): 1903-1914.
- [25] Hu W Y, Zhao T L, Bai Y Q, *et al.* Importance of regional PM_{2.5} transport and precipitation washout in heavy air pollution in the Twain-Hu Basin over Central China: observational analysis and WRF-Chem simulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **758**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143710.
- [26] Ding Y H, Liu Y J. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, **57**(1): 36-46.
- [27] Lai S C, Zhao Y, Ding A J, *et al.* Characterization of PM_{2.5} and the major chemical components during a 1-year campaign in rural Guangzhou, Southern China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **167**: 208-215.
- [28] 冯鑫媛, 张莹. 川渝地区大气污染物质量浓度时空分布特征[J]. *中国科技论文*, 2018, **13**(15): 1708-1715.
Feng X Y, Zhang Y. Temporal and spatial distribution characteristics of air pollutant concentrations in Sichuan and Chongqing area[J]. *China Sciencepaper*, 2018, **13**(15): 1708-1715.
- [29] 高嵩, 田蓉, 郭彬, 等. 长三角典型城市 PM_{2.5} 浓度变化特征及与气象要素的关系[J]. *科学技术与工程*, 2018, **18**(9): 142-155.
Gao S, Tian R, Guo B, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} concentration and its relations with meteorological factors in typical cities of the Yangtze River Delta[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, **18**(9): 142-155.
- [30] 蒋超, 龚建周, 孙家仁, 等. 2013-2016 年珠三角地区 PM_{2.5} 分布时空演变[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(9): 1698-1705.
Jiang C, Gong J Z, Sun J R, *et al.* Spatial-temporal evolution of PM_{2.5} distribution in Pearl River Delta region in 2013-2016 [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(9): 1698-1705.
- [31] Lu D B, Xu J H, Yue W Z, *et al.* Response of PM_{2.5} pollution to land use in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, **244**, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118741.
- [32] 丁一汇, 村上滕人. 亚洲季风[M]. 北京: 气象出版社, 1994.
- [33] 胡东生, 张华京, 徐冰, 等. 长江中游荆江流域环境演变及两湖平原盆地形成过程[J]. *中国工程科学*, 2010, **12**(1): 36-42.
Hu D S, Zhang H J, Xu B, *et al.* On the environment involvement of Jingjiang River Valley and the forming processes of Twain-Hu Plain Basin in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Engineering Science*, 2010, **12**(1): 36-42.
- [34] Gong W, Zhang T H, Zhu Z M, *et al.* Characteristics of PM_{1.0}, PM_{2.5}, and PM₁₀, and their relation to black carbon in Wuhan, Central China[J]. *Atmosphere*, 2015, **6**(9): 1377-1387.
- [35] 高正旭, 王晓玲, 向华, 等. 武汉市 2014—2017 年大气污染物分布特征及其潜在来源分析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(11): 4440-4453.
Gao Z X, Wang X L, Xiang H, *et al.* Variation characteristics and potential sources of air pollutants during 2014-2017 in Wuhan [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(11): 4440-4453.
- [36] Hu W Y, Zhao T L, Bai Y Q, *et al.* Contribution of regional PM_{2.5} transport to air pollution enhanced by sub-basin topography: a modeling case over Central China [J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(11), doi: 10.3390/atmos11111258.
- [37] Lu M M, Tang X, Wang Z F, *et al.* Investigating the transport mechanism of PM_{2.5} pollution during January 2014 in Wuhan, Central China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, **36**(11): 1217-1234.
- [38] 吕桅桅, 李兰. 湖北省主要观测站 PM_{2.5} 污染特征及气象要素的影响分析[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(11): 2073-2080.
Lu W W, Li L. PM_{2.5} Pollution characteristics in main observation stations in Hubei and the impact analysis of meteorological factors[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, **27**(11): 2073-2080.
- [39] Shen L J, Zhao T L, Wang H L, *et al.* Importance of meteorology in air pollution events during the city lockdown for COVID-19 in Hubei Province, Central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **754**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142227.
- [40] 赵丽芳. 长三角地区冬季 PM_{2.5} 时空分布特征及大气复合污染物间关联性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [41] Seo J, Park D S R, Kim J Y, *et al.* Effects of meteorology and emissions on urban air quality: a quantitative statistical approach to long-term records (1999-2016) in Seoul, South Korea [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(21): 16121-16137.
- [42] 赵辉, 郑有飞, 徐静馨, 等. 中国典型城市大气污染物浓度时空变化特征分析[J]. *地球与环境*, 2016, **44**(5): 549-556.
Zhao H, Zheng Y F, Xu J X, *et al.* Temporal and spatial variations of atmospheric pollutants in typical cities in China[J]. *Earth and Environment*, 2016, **44**(5): 549-556.
- [43] Zhang Y M, Van Vu T, Sun J Y, *et al.* Significant changes in chemistry of fine particles in wintertime Beijing from 2007 to 2017: impact of clean air actions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, **54**(3): 1344-1352.
- [44] He J J, Gong S L, Yu Y, *et al.* Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014-2015 in major Chinese cities[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 484-496.
- [45] Zhou Y, Bai Y Q, Yue Y Y, *et al.* Characteristics of the factors influencing transportation and accumulation processes during a persistent pollution event in the middle reaches of the Yangtze River, China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(5): 1420-1434.
- [46] 祁海霞, 崔春光, 赵天良, 等. 2015 年冬季湖北省 PM_{2.5} 重污染传输特征及影响天气系统的数值模拟[J]. *气象*, 2019,

- 45(8): 1113-1122.
- Qi H X, Cui C G, Zhao T L, *et al.* Numerical simulation on the characteristics of PM_{2.5} heavy pollution and the influence of weather system in Hubei Province in winter 2015 [J]. *Meteorological Monthly*, 2019, **45**(8): 1113-1122.
- [47] 马德栗, 李兰, 鞠英芹. 湖北省霾日数气候特征及夏季典型霾过程气象因子分析[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(11): 148-153.
- Ma D L, Li L, Ju Y Q. Climate characteristics of haze days and analysis of summer haze weather event in Hubei province [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(11): 148-153.
- [48] 王煜东, 赵小艳, 徐向华, 等. 南京地区地表热通量的遥感反演分析[J]. *生态环境学报*, 2016, **25**(4): 636-646.
- Wang Y D, Zhao X Y, Xu X H, *et al.* Analysis and inversion on surface heat flux with remote sensing in Nanjing area [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, **25**(4): 636-646.
- [49] Srbínovská M, Andová V, Mateska A K, *et al.* The effect of small green walls on reduction of particulate matter concentration in open areas [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, **279**, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123306.

环境科学

CONTENTS

Continuous PM _{2.5} Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM _{2.5} on the Fen-Wei Plain	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O ₃ Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O ₃ Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O ₃ Pollution Between August to September, Langfang Development Zones	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO ₃ -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co ²⁺ System; Influencing Factors and Mechanisms	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported α -MnO ₂	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvo-aquic Soil Under Different Rotation Fallow	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH ₄ , and N ₂ O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO ₂ Concentrations	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)