

目次

基于机器学习方法研究气象及排放变化对长三角地区主要城市大气污染物的影响 ..... 付文星, 黄琳, 丁嘉豪, 秦墨梅, 于兴娜, 谢放尖, 胡建林 (5879)

不同行业减排对我国东部地区空气质量及大气温度的影响 ..... 龙籽谕, 朱佳, 李柯, 陈磊, 杜楠, 廖宏 (5889)

冬奥会期间京津冀及周边区域空气质量时空特征、气象影响和减排效果评估 ..... 侯露, 朱媛媛, 刘冰, 李健军 (5899)

中国印刷业 VOCs 排放趋势及未来减排潜力 ..... 梁小明, 吴彭珍, 陈来国, 刘明, 卢清, 朱李华, 孙西勃, 叶代启 (5915)

济南市典型行业 VOCs 排放特征及减排潜力分析 ..... 吴文璐, 单春艳, 赵菁林, 崔羽浓 (5924)

南京市溧水区大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 阮兆元, 燕鸥, 王体健, 王勤耕, 罗干, 文金科 (5933)

我国近 10 年城市生活垃圾处置单元温室气体排放时空变化及减排潜力分析 ..... 张昕雪, 高淑丹, 滕晓, 蒋旭彤, 陈纪宏, 高晨琦, 卞荣星, 孙英杰, 李卫华, 王亚楠, 王华伟 (5946)

中国重点城市大气污染与健康风险的时空分布特征 ..... 涂佩玥, 杨欢, 陈兰洲, 牛笑笑, 杨璐, 易嘉慧, 柯碧钦, 田雅, 叶志祥, 梅新, 洪松, 何超 (5954)

中国 PM<sub>1</sub> 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析(2014~2017年) ..... 袁丽梅, 马芳芳, 卞泽, 秦凯 (5964)

长株潭城市群 PM<sub>2.5</sub> 中二次无机离子特征及生成机制 ..... 马杰利, 罗达通, 刘欣, 王蕾, 王幸, 刘湛, 沈健, 张俊丰, 李晟 (5975)

周口市 2022 年冬季重污染过程中细颗粒物污染特征及成因分析 ..... 马英歌, 杨露, 狄睿苗, 马南, 乔利平, 吴宇航, 周文鑫, 赵新华, 张越, 孙志华, 陈长虹, 陈学军, 楼晟荣, 黄成 (5986)

兰州市 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃的污染特征和来源解析 ..... 马可婧, 孙丽娟 (5997)

北京市门头沟区大气降尘污染特征及其化学组分特征与质量重构 ..... 王志焱, 姚琦, 吕富, 王雨薇, 王珊, 王铮, 胡月琪 (6007)

典型热带海滨城市臭氧污染特征与成因分析 ..... 韩淑艳, 张鑫, 谢荣富, 霍思思, 高利澳, 吴泓锦, 党娟, 徐文帅, 邢巧, 张庆竹, 王文兴 (6015)

珠江源块泽河流域地表水水化学特征及控制因素 ..... 陶兰初, 寸得欣, 涂春霖, 马一奇, 刘振南, 尹林虎, 和成忠, 庞龙, 张七道 (6025)

淮南煤矿区地表水和地下水水化学特征及控制因素 ..... 刘海, 康博, 管政亭, 宋阳, 柴义伦 (6038)

巴伊盆地平原区地下水水化学特征及污染源识别 ..... 姜凤, 周金龙, 周殷竹, 孙英, 韩双宝, 鲁涵 (6050)

滇池周边浅层地下水硝酸盐来源及转化过程识别 ..... 陈清飞, 陈安强, 崔荣阳, 叶远行, 闵金恒, 付斌, 闫辉, 张丹 (6062)

典型铅锌矿流域土壤重金属累积与分布的影响因素分析 ..... 潘泳兴, 陈盟, 王樯樯 (6071)

铅锌矿周边岩溶流域重金属污染及健康风险评价 ..... 廖红为, 蒋忠诚, 周宏, 覃小群, 黄奇波, 吴华英 (6085)

开封市主要河道沉积物重金属时空分布特征及生态风险评价 ..... 丁亚鹏, 卢希昊, 王晓婧, 武鲲鹏, 张浩杰, 李欢, 付贤志, 王洪涛 (6095)

霍邱县城湖泊沉积物重金属环境容量评价与预测 ..... 刘海, 魏伟, 宋阳, 潘杨 (6106)

基于宏条形码技术的白洋淀水华藻类识别及其驱动因子分析 ..... 陈婷, 杜珣, 陈义永, 郭道宇, 熊薇 (6116)

基于种群、功能群对比分析洞庭湖浮游植物群落驱动因素及水质评价 ..... 严广寒, 殷雪妍, 汪星, 黄民生, 黄代中, 王思瑞, 张韵宇 (6125)

南水北调东线山东境内调蓄湖库蓝藻种群分布特征及环境驱动因子 ..... 韦洁琳, 崔玉静, 李亦真, 张莎莎, 徐杭州, 庞一鸣, 裴海燕 (6137)

广东省药物活性化合物的污染特征及生态风险评价 ..... 罗嘉豪, 王煜凯, 原珂, 卢耀斌, 罗丽娟, 栾天罡 (6149)

紫外老化微塑料衍生 DOM 理化特性及其与磺胺嘧啶、铜的络合机制 ..... 王筱, 晏彩霞, 聂明华, 莫茜婷, 丁明军, 徐鳌雪, 邓思维 (6159)

共混塑料在海水中的光降解及海洋环境风险 ..... 张洪瑜, 高嘉蔚, 陈思宝, 林千惠, 葛安琪, 赵莎莎, 郑浩, 李锋民 (6172)

铁改型蓝藻生物炭的制备及对地表水中磷的协同吸附机制 ..... 韩杰, 黄鑫, 杨昆仓, 宋超凡, 缪恒锋 (6181)

基于改进输出系数模型的非点源污染评估及关键源区识别: 以北运河上游流域为例 ..... 李华林, 张守红, 于佩丹, 宋卓远, 谢晨新, 张建军 (6194)

农村黑臭水体沉积物细菌群落结构特征 ..... 任宏伟, 田彦芳, 路金霞, 石雅君, 王进, 岳正波, 刘晓玲 (6205)

气候变化背景下人类活动对承德坝区植被净初级生产力的影响 ..... 单振东, 刘顿, 骆汉, 刘建伟, 张丽梅, 魏宇航 (6215)

氮沉降对陆地生态系统土壤有机碳含量影响的 Meta 分析 ..... 杨灵芳, 孔东彦, 刁静文, 郭鹏 (6226)

生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机氮组分和活性氮的影响 ..... 曹杨, 沈育伊, 陈运霜, 王紫卉, 牟芝熠, 徐广平, 张德楠, 孙英杰, 毛馨月 (6235)

稻田微氧层和还原层土壤有机碳矿化对氮素添加的响应 ..... 毛婉琼, 夏银行, 马冲, 朱光旭, 王忠诚, 涂强, 陈香碧, 吴金水, 苏以荣 (6248)

保护性耕作对玉米田土壤中除草剂残留的影响 ..... 刘沅, 汪祖丞, 刘美华, 张天宇, 王健 (6257)

土壤中微塑料对陆生植物的毒性及其降解机制研究进展 ..... 刘微, 李宇欣, 荣飒爽, 汪晚晴, 王鑫鑫, 郭嘉朋, 韩冰, 王树涛 (6267)

南水北调丹江口库区土壤中微塑料分布特征及风险评估 ..... 王峰, 公玮, 刘哲, 朱重宁, 张润琴, 李志国, 刘毅 (6279)

北京市城市公园土壤铅累积特征、来源及健康风险 ..... 安江梅朵, 张瑞卿, 郭广慧, 王云涛 (6287)

锌冶炼废渣重金属在土壤中的垂向迁移特征及归趋 ..... 杨爱萍, 王小燕, 肖细元, 王倩如, 胡建华, 郭朝晖, 彭驰 (6297)

典型硫铁矿农区土壤-作物系统重金属生态风险及迁移富集特征 ..... 成晓梦, 赵辰, 吴超, 孙彬彬, 曾道明, 贺灵 (6309)

不同土壤-小麦体系中铅镉交互作用与转运特征 ..... 寇萌, 樊宇, 苏梦贤, 熊娟, 汪明霞, 谭文峰 (6319)

开花后小麦地上部镉、砷分布及其转运特征 ..... 王秋实, 华桂丽, 李翔宇, 冯柳旭, 唯康鑫, 耿丽平, 薛培英, 刘文菊 (6328)

黑河上游不同植被类型土壤细菌群落多样性、功能及季节动态 ..... 王竹, 刘扬, 王芳, 王义成 (6339)

典型煤炭产业园区土壤重金属污染对细菌群落结构的影响 ..... 郑丹凤, 刘娟, 苏超, 张红 (6354)

增氧模式对水稻根际微生物多样性和群落结构的影响 ..... 肖德顺, 徐春梅, 王丹英, 陈松, 褚光, 刘元辉 (6362)

紫色土硝化势和氨氧化微生物群落对化肥和有机肥配施生物炭的响应 ..... 李越, 王子芳, 贾丽娟, 谢军, 熊子怡, 高明 (6377)

连作对党参根际土壤理化性质、微生物活性及群落特征的影响 ..... 杨阳, 李海亮, 马凯丽, 虞凡枫, 牛世全 (6387)

粪肥施用对抗生素在土壤上吸附的影响 ..... 罗珊, 胡锦昇, 唐翔宇, 耿春文, 程建华 (6399)

基于脱钩指数的工业园区碳排放与经济发展关系 ..... 陈四瑜, 刘晶晶, 孙光明 (6412)

近 5 年我国部分城市群生活垃圾特性 ..... 王小波, 刘安琪, 钟慧琼, 赵增立 (6421)

《环境科学》征订启事(5963) 《环境科学》征稿简则(6193) 信息(5923, 6024, 6037)

# 中国 PM<sub>1</sub> 浓度时空特征及其与 AOD 的相关性分析 (2014 ~ 2017 年)

袁丽梅<sup>1</sup>, 马芳芳<sup>2</sup>, 卞泽<sup>1</sup>, 秦凯<sup>1\*</sup>

(1. 中国矿业大学环境与测绘学院, 徐州 221116; 2. 中国移动通信集团有限公司地图生产部, 沈阳 110000)

**摘要:** 整合 2014 ~ 2017 年全国 PM<sub>1</sub> 监测站点数据, 基于时间序列统计方法和空间系统聚类方法揭示了 PM<sub>1</sub> 浓度的时空分布特征与演变规律. 并结合 MODIS 遥感卫星气溶胶光学厚度 (AOD) 数据, 分析了 PM<sub>1</sub>-AOD 相关性的时空特征. 结果显示, 2014 ~ 2017 年中国年均 PM<sub>1</sub> 浓度逐年下降, 四季 PM<sub>1</sub> 浓度呈现“冬高夏低”的变化特征, 月均 PM<sub>1</sub> 浓度呈“U”型变化特征, 在节假日前后 PM<sub>1</sub> 浓度呈现“M”型变化特征, 在一周中星期一和星期五 PM<sub>1</sub> 浓度为高值点, 星期日为低值点. 基于空间系统聚类法将全国年均 PM<sub>1</sub> 浓度分为 7 类区, 全国 PM<sub>1</sub> 浓度整体呈现“东高西低, 北高南低”的空间分布格局, 年均  $\rho$  (PM<sub>1</sub>) 值在华中地区最高 (54.59  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 新青藏地区年均最低 (11.37  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). PM<sub>1</sub>-AOD 关系整体上呈正相关, 华中地区相关系数最高 (0.55), 中南地区相关系数最低 (0.36).

**关键词:** PM<sub>1</sub>; 时间变化; 空间分布; 气溶胶光学厚度 (AOD); 相关性分析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)11-5964-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202208245

## Spatial and Temporal Variations in PM<sub>1</sub> Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017

YUAN Li-mei<sup>1</sup>, MA Fang-fang<sup>2</sup>, BIAN Ze<sup>1</sup>, QIN Kai<sup>1\*</sup>

(1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Map Production Department, China Mobile Communications Group Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

**Abstract:** Based on the PM<sub>1</sub> mass concentration data from all the air quality monitoring stations in China from 2014 to 2017, the temporal and spatial distribution characteristics of PM<sub>1</sub> concentration were studied using the time series statistical and spatial hierarchical clustering methods, and the PM<sub>1</sub> spatiotemporal evolution characteristics were revealed. Combined with AOD data of the MODIS remote-sensing satellite, the temporal and spatial variation in PM<sub>1</sub>-AOD correlation was analyzed on a fine scale. The results showed that, from 2014 to 2017, the annual average PM<sub>1</sub> concentration in China decreased yearly, the seasonal PM<sub>1</sub> concentration showed the characteristics of “high in winter and low in summer,” and the monthly average PM<sub>1</sub> concentration showed a “U”-shaped variation. An “M”-shaped PM<sub>1</sub> variation pattern was presented before and after the holidays. Weekly variation showed that high PM<sub>1</sub> values occurred on Mondays and Fridays, and low ones occurred on Sundays. Based on the spatial clustering method, the national average annual PM<sub>1</sub> concentration in China was divided into seven categories, and the overall spatial distribution pattern was “high in the east and low in the west and high in the north and low in the south.” The highest and the lowest values of average PM<sub>1</sub> concentration occurred in central China (54.59  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) and in Xinjiang-Qinghai-Xizang (11.37  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), respectively. The PM<sub>1</sub>-AOD relationship was positively correlated as a whole, the highest correlation coefficient was 0.55 in central China, and the lowest value was 0.36 in central and southern China.

**Key words:** PM<sub>1</sub>; temporal variations; spatial distribution; aerosol optical depth (AOD); correlation analysis

颗粒物是大气污染物中的主要成分, 与粗颗粒物相比, 细颗粒物对大气环境质量和人群健康影响更大<sup>[1-3]</sup>. 超细颗粒物 (空气动力学直径在 1  $\mu\text{m}$  以下的颗粒物, PM<sub>1</sub>) 主要来源于日常发电、工业生产、排放等过程中经过燃烧而排放的残留物, 大多含有重金属等有毒物质<sup>[4-7]</sup>. PM<sub>1</sub> 因其直径相对较小更易进入人体并滞留于肺部器官, 其含有的大量有毒物质甚至可穿透肺泡随血液循环危害人体的其他组织器官<sup>[8-11]</sup>. 由于粒径小, PM<sub>1</sub> 在大气中漂浮时间更长, 随着空气的流动可实现远距离传输, 并且很可能成为大气中反应活性气体发生非均相反应的重要场所<sup>[12,13]</sup>. 同时, PM<sub>1</sub> 对光散射和大气能见度也有重要影响<sup>[14,15]</sup>.

当前, 针对大气 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 污染的相关研究

较为全面和深入, 但对 PM<sub>1</sub> 的研究相对不足. 当前 PM<sub>1</sub> 相关研究主要集中于 PM<sub>1</sub> 的化学成分、来源和形成过程<sup>[16-23]</sup>、城市和区域尺度短期内 PM<sub>1</sub> 污染时空分布特性<sup>[24,25]</sup> 和运用卫星遥感和统计模型等手段估算近地面 PM<sub>1</sub> 水平<sup>[26-30]</sup> 等方面. Zhang 等<sup>[31]</sup> 研究北京重大空气污染事件期间 PM<sub>1</sub> 的化学成分、来源和形成过程, 发现 PM<sub>1</sub> 主要化学成分包括有机物、硫酸盐、硝酸盐、氨和氯化物. Lee 等<sup>[32]</sup> 对中国道路 PM<sub>1</sub> 的研究表明, PM<sub>1</sub> 是汽车尾气和运输气团中占主导地位的颗粒物. 韩茜等<sup>[33]</sup>

收稿日期: 2022-08-27; 修订日期: 2023-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41975041)

作者简介: 袁丽梅 (1978 ~), 女, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为大气颗粒物污染特性. E-mail: lmmmyuan@163.com

\* 通信作者, E-mail: qinkai@cumt.edu.cn

研究发现乌鲁木齐市  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  颗粒物浓度在进入采暖季后急剧增加,并通过  $PM_{2.5}/PM_{10}$ 、 $PM_{10}/PM_{10}$  和  $PM_{10}/PM_{2.5}$  这 3 个值得出四季污染程度越高,细粒子含量越高的结论. 陈慧娟等<sup>[34]</sup> 研究证实大气湿度对  $PM_{10}$  与  $PM_{2.5}$  有不同影响,相比之下  $PM_{10}$  来源更稳定且基本不受季节变化影响,而高湿度环境下  $PM_{10}$  占  $PM_{2.5}$  更大比例. Wang 等<sup>[35]</sup> 采用国内 24 个  $PM_{10}$  监测站点的数据,首次分析了 2006 ~ 2014 全国范围内的  $PM_{10}$  浓度时空分布和变化特征.

开展对全国的  $PM_{10}$  污染时空分布特征的研究,能够客观地反映出全国和各区域与城市群间  $PM_{10}$  污染的真实情况,对全国  $PM_{10}$  污染的监测与防控具有重要意义. 然而,到目前为止,对全国范围尺度、多站点和长时间跨度的  $PM_{10}$  污染时空分布特征相关的研究较为有限. 本研究以 2014 ~ 2017 年全国城市地基监测站点的  $PM_{10}$  浓度为数据源,探讨  $PM_{10}$  在全国范围较长时间跨度期间的时空分布变化特征;分析  $PM_{10}$  浓度的年度、季度、月度和节假日变化规律,并揭示全国城市  $PM_{10}$  污染的区域性空间分布情况和季节变化特性;同时,对不同区域  $PM_{10}$ -AOD 的相关性进行了分析,以期利用卫星产品获取大面积  $PM_{10}$  浓度数据的相关研究提供参考.

## 1 材料与与方法

### 1.1 数据来源和预处理

本研究区域为中国大陆地区,使用的地基  $PM_{10}$  浓度数据来自中国气象局,时间覆盖范围为 2014 年 1 月至 2017 年 12 月. 数据通过全国 129 个  $PM_{10}$  监测站点的 GRIMM EDM 180 在线气溶胶粒径谱仪测得,该仪器有 31 个粒径通道,采用激光散射原理,可记录 0.25 ~ 32  $\mu m$  颗粒粒径谱分布,并将结果实时转化为  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  质量浓度,仪器采样流量为 1.2  $L \cdot min^{-1}$ ,时间分辨率为 5 min.  $PM_{10}$  监测站点涵盖了 31 个省级行政区,站点具体位置见图 1.

$PM_{10}$  浓度数据处理方法和质量控制方法<sup>[36]</sup>:

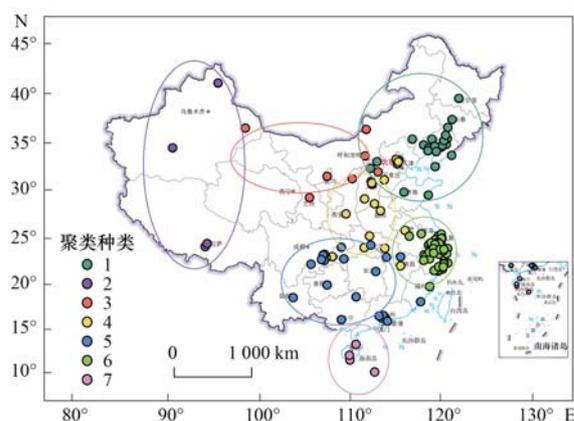
①  $PM_{10}$  浓度原始数据时间分辨率为 5 min,剔除原始数据中  $\rho(PM_{10})$  大于 1000  $\mu g \cdot m^{-3}$  和小于 0  $\mu g \cdot m^{-3}$  的数据; ②以日为单位,计算标准差,剔除大于 3 倍标准差的数据; ③计算年均值时,若监测站点 1 a 内监测数据不足 180 d,则该监测点年均值记为无效并剔除; ④计算季均值时,以 3 ~ 5 月为春季,6 ~ 8 月为夏季,9 ~ 11 月为秋季,12 月 ~ 次年 2 月为冬季. 若监测站点一个季度内监测数据不足 45 d,则该监测点季度均值记为无效并剔除; ⑤计算月均值时,

若监测点一个月内监测数据不足 15 d,则该监测点月均值记为无效并剔除. 计算 129 个地面监测站  $PM_{10}$  的 4 a 的日均浓度,描述性分析  $PM_{10}$  在全国的地理分布情况,计算各个区域在不同季节和每月的平均浓度.

### 1.2 聚类分析方法

利用 SPSS 软件中的 Ward 系统聚类方法对全国 2014 ~ 2017 年 4 a 的数据进行均值处理,将 129 个检测站点的  $PM_{10}$  平均浓度和与之一一对应的经纬度坐标数据作为 129 个样本,对  $PM_{10}$  平均浓度进行空间聚类. 将 129 个  $PM_{10}$  样本数据按照聚类规则进行分类,分为同一类的数据性质相近,而该类数据与其他类别的数据性质相异. 采用 Ward 系统聚类法和欧氏距离作为标准,先将每个样本自成一类,通过计算类重心间方差,将离差平方和增加幅度最小的两类首先合并,再依次将所有类别逐级合并,最后直到类别合并为 1 类.

空间聚类类别个数设置为 5 ~ 9 类,从中选取最优的分类结果. 根据不同的聚类结果选取最优聚类效果,将全国站点分为 7 类(如图 1),由北向南依次为: 1. 大东北地区(DDB): 黑龙江、吉林、辽宁、北京、天津、河北、山东和山西北部; 2. 新青藏地区(XQZ): 新疆、青海和西藏; 3. 内甘宁地区(NGN): 内蒙古、甘肃、宁夏和陕西北部; 4. 华中地区(HZ): 以河南为中心,河南、山西中南部、陕西中南部、湖北和安徽北部; 5. 长三角地区(CSJ): 江苏、浙江、上海、安徽中南部和福建北部; 6. 中南地区(ZN): 湖南、江西、贵州、重庆、四川、云南、广西、广东和福建南部; 7. 海南岛地区(HND): 海南岛及周边.



审图号为 GS(2019)1823 号的标准地图制作

图 1 中国  $PM_{10}$  监测站点位置和  $PM_{10}$  浓度聚类分布

Fig. 1  $PM_{10}$  air quality monitoring sites and cluster distribution of  $PM_{10}$  concentration in China

## 2 结果与讨论

### 2.1 中国 PM<sub>1</sub> 浓度时间变化特征

#### 2.1.1 中国 PM<sub>1</sub> 浓度年际变化特征

根据数据预处理结果,2014~2017年4 a内中国 PM<sub>1</sub> 浓度数据有效站点数量分别为100、111、

107和105个,年均 $\rho(\text{PM}_{10})$ 分别为40.34、35.22、32.67和29.94  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , PM<sub>1</sub> 浓度空间分布演变情况如图2所示.可见,研究期间我国 PM<sub>1</sub> 污染呈逐年明显减轻的趋势,空气质量在不断改善,说明我国近些年采取的一系列大气污染防治措施取得了较明显的成效.

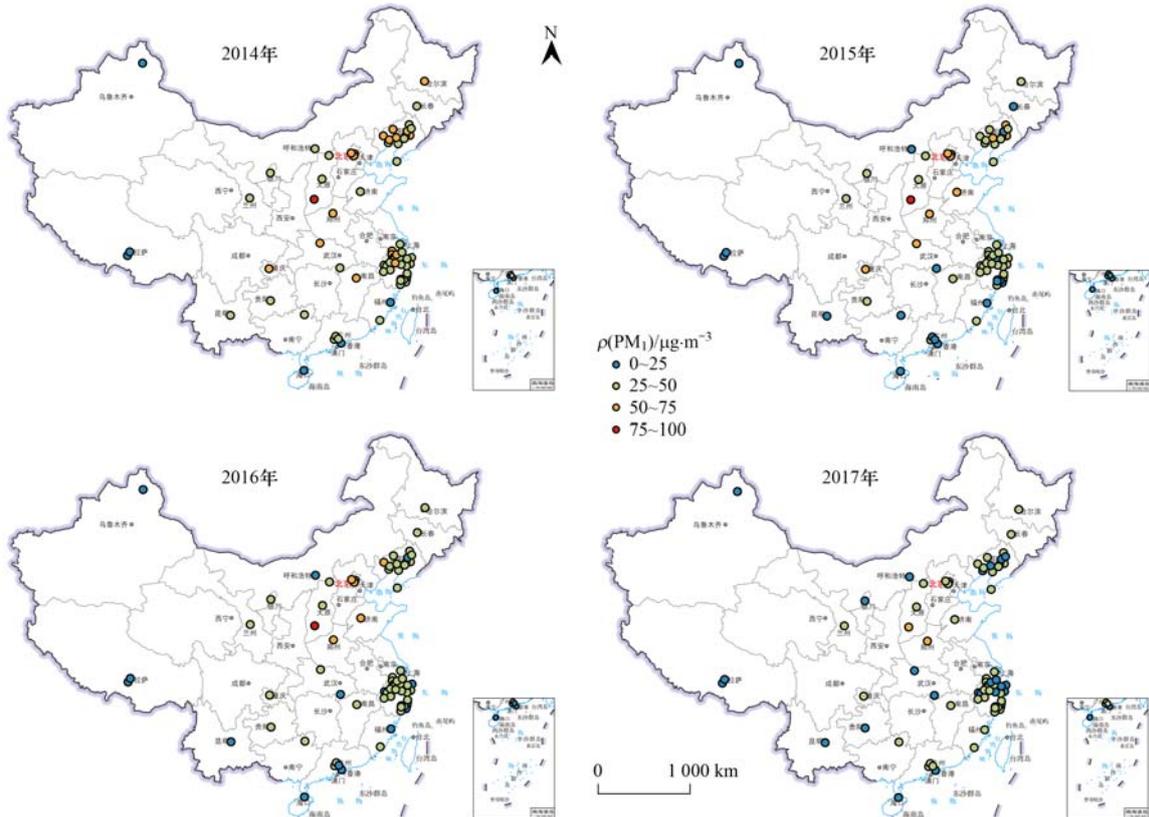


图2 2014~2017年中国 PM<sub>1</sub> 年均浓度空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of average annual PM<sub>1</sub> concentration in China from 2014 to 2017

具体来说,2014年年均 $\rho(\text{PM}_{10})$ 最高的城市为山西临汾市,达99.04  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其次浓度较高的城市是河北石家庄、辽宁本溪、湖北襄阳和陕西泾河.年均 $\rho(\text{PM}_{10})$ 最低为内蒙古二连浩特,为7.52  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其次为西藏贡嘎、海南西沙、新疆阿克达拉和海南三亚.2015年年均 $\rho(\text{PM}_{10})$ 最高为山西临汾市,达94.11  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其次为重庆、河南郑州、北京和山西晋城.年均 $\rho(\text{PM}_{10})$ 最低为西藏贡嘎,为7.48  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其次为海南西沙、内蒙古二连浩特、新疆阿克达拉和湖北荆门.与2014年相比,东北地区和长三角地区高浓度站点明显下降,华南地区的部分站点浓度也有所下降.2016年年均 $\rho(\text{PM}_{10})$ 最高为山西临汾市,达82.07  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其次为北京、河南郑州市、山西小店和辽宁朝阳.年均 $\rho(\text{PM}_{10})$ 最低为西藏贡嘎,为6.68  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其次为新疆塔中、海南西沙、新疆阿克达拉和西藏拉萨.与2015年相比,PM<sub>10</sub>高浓度主要缩小范围在河北、山西、河南

和山东,全国范围内 PM<sub>10</sub> 浓度都有所下降.

2017年 $\rho(\text{PM}_{10})$ 均值最高为重庆市,达57.18  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其次为河南郑州、山西临汾、安徽寿县和北京;年均 $\rho(\text{PM}_{10})$ 最低为辽宁葫芦岛市(连山区),达5.22  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其次为西藏拉萨、西藏贡嘎、新疆阿克达拉和重庆万州区.与2016年相比,PM<sub>10</sub>高浓度基本消减,全国范围内 $\rho(\text{PM}_{10})$ 再次下降.连续3 a居污染首位的临汾市也明显下降到第3,为51.32  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .

根据监测站点日 PM<sub>10</sub> 浓度变化水平,将 PM<sub>10</sub> 污染分为4个级别:轻度污染(0~25  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、中度污染(25~50  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、重度污染(50~75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )和严重污染(75~100  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ).对比分析2014~2017年不同 PM<sub>10</sub> 浓度区间站点占比情况(图3),2014年到2017年处于轻度污染的站点分别有17、29、26和35个,占比分别为17%、26%、24%和33%,与前一年相比分别上升9%、-2%和9%;

处于中度污染的站点分别有 57、67、73 和 67 个, 占比分别为 57%、60%、68% 和 64%, 与前一年相比分别上升 3%、8%、-4%; 处于重度污染的站点分别有 24、14、7 和 3 个, 占比分别为 24%、13%、7% 和 3%, 与前一年相比分别下降 11%、6% 和 4%。表明就污染程度而言, 重度污染大幅度降低, 虽然不能消除  $PM_{10}$  的污染, 但整体上污染程度大大减轻。

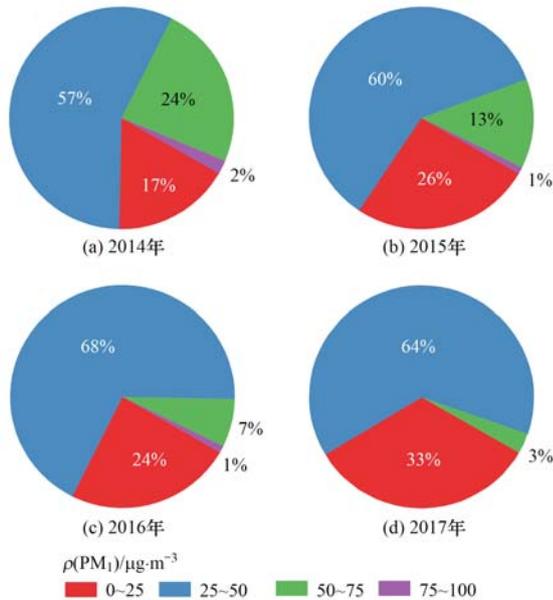


图3 2014 ~ 2017 年不同  $PM_{10}$  浓度区间站点占比

Fig. 3 Proportion of sites in different  $PM_{10}$  concentration intervals from 2014 to 2017

### 2.1.2 中国 $PM_{10}$ 浓度季节变化特征

人类活动和气候气象条件均会对大气中的污染物浓度水平产生影响<sup>[37~39]</sup>。根据统计计算, 全国  $PM_{10}$  浓度变化呈现明显的季节性特征, 如图 4 所示, 2014 ~ 2017 年中国  $PM_{10}$  浓度在各个季度内均逐年下降, 且总体呈现冬高夏低、春秋居中的变化特征。冬季  $\rho(PM_{10})$  明显高于其他季节, 2014 ~ 2017 年均值分别为 56.32、53.19、45.18 和 44.31  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。这主要由于冬季气候寒冷, 近地面风速低, 湿度高, 强逆温等不利污染物扩散的静稳天气频繁, 使大气边界层低导致污染物不易扩散, 特别是北方地区供暖需大量燃煤, 增加了大气污染物排放量,  $PM_{10}$  浓度明显升高<sup>[40~42]</sup>。全国大部分地区春季  $PM_{10}$  浓度有所下降, 4 a 春季  $\rho(PM_{10})$  均值分别为 38.56、31.22、31.31 和 29.00  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。主要是受天气渐暖, 逆温效应有所削弱的影响。夏季雨量增多, 风力较大, 有利于污染物的扩散与稀释,  $\rho(PM_{10})$  全年最低, 4 a 中夏季均值分别为 28.60、22.35、21.25 和 21.14  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。秋季降水减少, 雨量小, 对空气中污染物的冲刷和稀释能力变弱。加之部分地区秋收秸秆燃烧释放大量污染物, 导致秋季  $PM_{10}$  浓度有所升

高, 4 a 秋季  $\rho(PM_{10})$  均值分别为 38.18、33.32、29.92 和 27.12  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

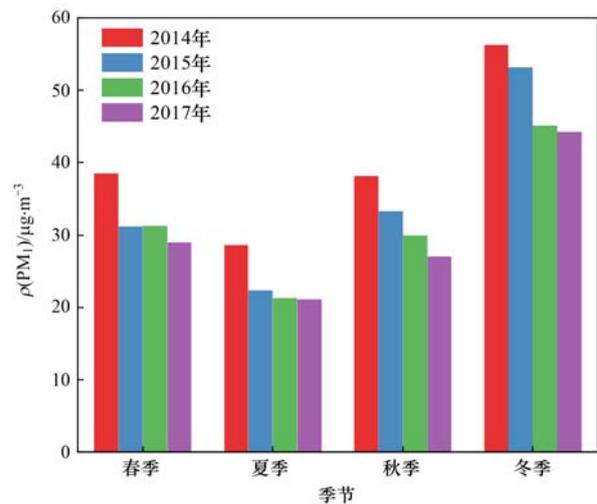


图4 2014 ~ 2017 年中国  $PM_{10}$  季均浓度变化统计

Fig. 4 Statistical chart of seasonal mean  $PM_{10}$  concentration change in China from 2014 to 2017

### 2.1.3 中国 $PM_{10}$ 浓度月变化特征

2014 ~ 2017 年  $PM_{10}$  的月平均浓度变化情况如图 5 所示。  $PM_{10}$  浓度最低值出现在 8 月(夏季), 2014 ~ 2017 年 8 月  $\rho(PM_{10})$  月均值分别为 26.40、22.93、19.38 和 19.74  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\rho(PM_{10})$  最高值出现在 1 月(冬季), 2014 ~ 2017 年 1 月  $\rho(PM_{10})$  月均值分别为 67.88、58.31、46.91 和 48.32  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

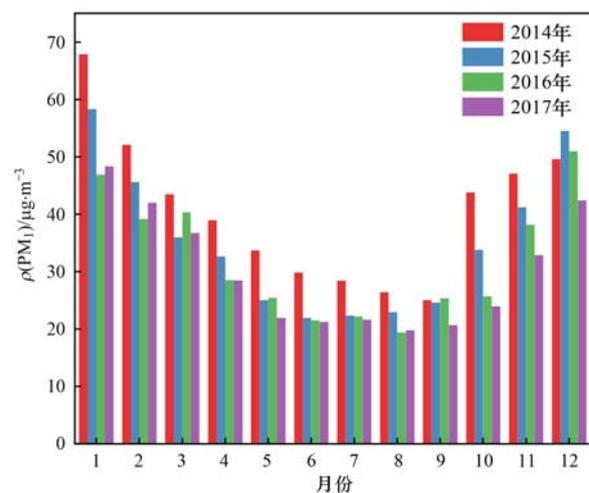


图5 2014 ~ 2017 年中国  $PM_{10}$  月均浓度变化统计

Fig. 5 Statistical chart of mean  $PM_{10}$  concentration change in China from 2014 to 2017

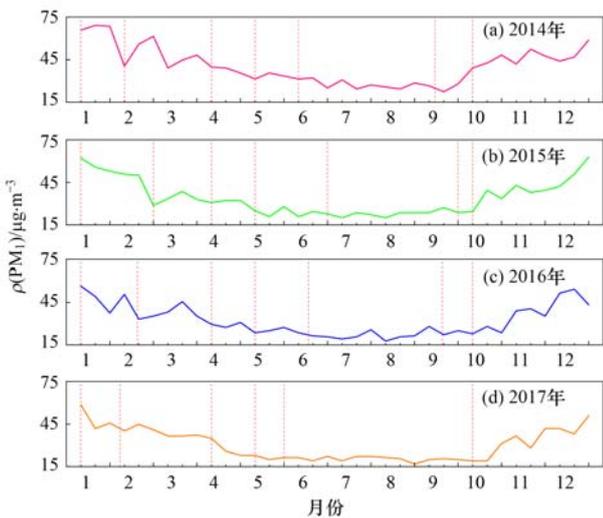
总体上看, 1 ~ 5 月  $PM_{10}$  浓度逐月降低, 6 ~ 9 月  $PM_{10}$  浓度波动较为平稳, 从 10 月开始  $PM_{10}$  浓度有明显升高且 10 ~ 12 月逐月上升, 总体上呈现“U”型变化规律, 其变化规律与季节变化规律相一致。由此可见,  $PM_{10}$  浓度变化受人为因素和气候变化因素影响较大<sup>[43,44]</sup>。

### 2.1.4 中国 PM<sub>1</sub> 浓度节假日变化特征

基于 2014 ~ 2017 年 129 个站点 PM<sub>1</sub> 浓度的日均值,从我国法定节假日和周末休息日两种角度探讨节假日前后 PM<sub>1</sub> 浓度的变化规律. 选择 7 个全民法定公休节日进行研究,分别为元旦、春节、清明节、劳动节、端午节、中秋节和国庆节.

以日均 PM<sub>1</sub> 浓度为单元,再将每月分为上中下旬分别做均值,从而得出每年 36 个 PM<sub>1</sub> 浓度均值. 再标出节日所在的时间节点,粗略观察节日前后 PM<sub>1</sub> 浓度变化规律(图 6). 将每年节日的法定休息日和节日前后 9 d 的 PM<sub>1</sub> 浓度数据提取出来,并求取 4 a 均值,从而更加细致地分析节日前后 PM<sub>1</sub> 浓度的变化过程(图 7).

PM<sub>1</sub> 浓度和人们的日常出行活动密切相关,而



红色虚线表示节日起点,依次为元旦、春节、清明、劳动、端午、中秋和国庆节

图 6 中国 2014 ~ 2017 年法定节日 PM<sub>1</sub> 浓度变化

Fig. 6 Change in PM<sub>1</sub> concentration on legal holidays in China from 2014 to 2017

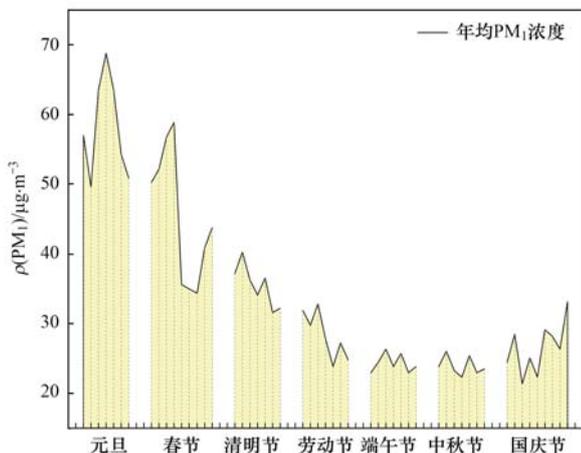


图 7 中国法定节日前后 PM<sub>1</sub> 浓度变化

Fig. 7 PM<sub>1</sub> concentration changes before and after Chinese legal holidays

法定假日很大程度上促进或制约人类活动. 分析结果表明,元旦期间一般为 1 a 内 PM<sub>1</sub> 浓度的峰值日,由于该阶段是采暖的关键时期,且人们在元旦出行活动频繁,因此空气污染不断加剧是导致该特征的主要原因. 春节期间相比其前后 PM<sub>1</sub> 浓度存在一个明显的低谷,这是由于春节期间人们回家团圆,多数废气排放工厂放假停工,人类出行大量减少,致使大气污染物排放降低. 五一劳动节、中秋等假期时间较短,整体没有大范围波动,但均呈现出“两高一低”类似“M”型的变化特征,即假期开始和结束日污染较高,假期中间日污染较低,这是由于人们出行高峰主要集中在节假日两端,而在中间出行极少. 国庆节虽然为 7 a 小长假,但同样呈现“两高一低”的特征,图 7 中数据表明节日的第 5 d 或第 6 d 污染快速上升,表明人们在此期间返程较多,与人们的出行习惯一致.

除法定节日 PM<sub>1</sub> 呈现出的分布特征外,传统的周末休息日 PM<sub>1</sub> 浓度也具有一定的分布规律. 统计 2014 ~ 2017 年星期一至星期日的 PM<sub>1</sub> 浓度均值变化如图 8 所示. 从中可知,整体来看 2014 ~ 2017 年期间星期一至星期日的污染程度呈逐年降低趋势,尤其在 2014 ~ 2015 年期间下降最为剧烈,这是由于在 2015 年 1 月新《环境保护法》正式实施,全国范围内大力监控空气污染排放. 星期一和星期五为一周内 PM<sub>1</sub> 的峰值日,星期日一般为一周内的低谷日,且在休息日期间整体呈下降趋势,这是由于星期一和星期五人们的出行活动最为频繁,而在休息日期间人们的出行活动较少.

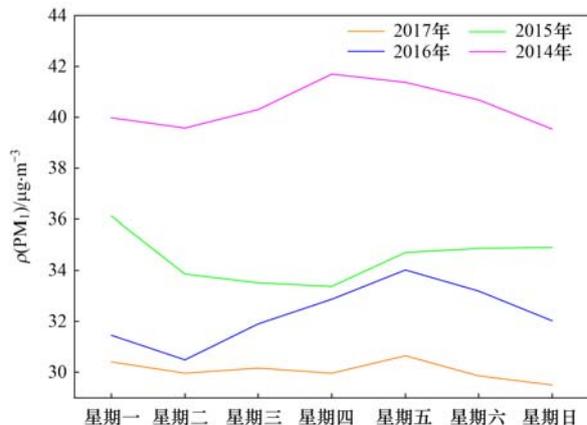


图 8 中国 2014 ~ 2017 周均值 PM<sub>1</sub> 浓度变化

Fig. 8 Weekly mean PM<sub>1</sub> concentration change in China from 2014 to 2017

### 2.2 中国 PM<sub>1</sub> 浓度空间变化特征

根据空间聚类分布情况分析 2014 ~ 2017 年中国 PM<sub>1</sub> 浓度区域变化特征,图 9 为按照 7 个区域划分得出的各区域年均 PM<sub>1</sub> 浓度变化情况,可见,中

国 PM<sub>1</sub> 浓度变化空间差异性明显。

结合表 1 可知,2014 ~ 2017 年我国 PM<sub>1</sub> 年均浓度变化由高到低依次为华中地区、大东北地区、长三角地区、中南地区、内甘宁地区、海南岛地区和新青藏地区。总体上呈现出“东高西低,北高南低”的空间分布格局。其原因在于华中地区以河南省为中心,人口最为密集,且近年来河南省发展迅速。同时,华中地区的山西省都属于重工业城市聚集地,如太原、大同等城市为能源重工业城市,西安是国防军工制造业基地,所以华中地区大气污染较其他地区严重,PM<sub>1</sub> 浓度最高。

大东北地区的总年均  $\rho(\text{PM}_{10})$  比华中地区低  $14.54 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,该地区涵盖了北京、天津、河北、辽宁和山西北部这 5 个工业城市聚集地。著名的京津唐工业基地以北京、天津和唐山为顶点的三角地带。辽中南工业基地位于辽宁,以沈阳和大连为工业

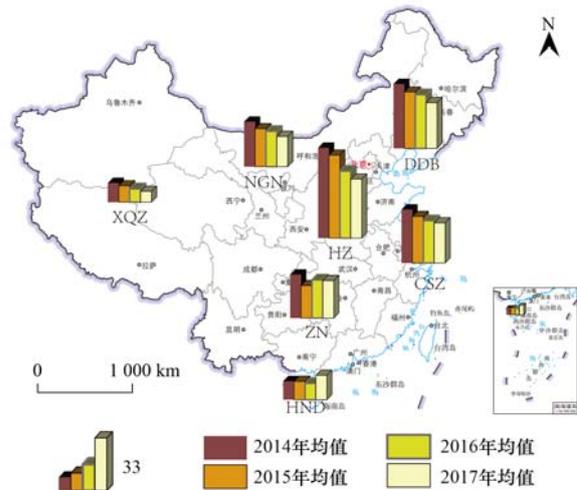


图 9 中国 2014 ~ 2017 年 7 个区域年均 PM<sub>1</sub> 浓度分布

Figure 9 Annual average PM<sub>1</sub> concentration distribution

in seven regions of China from 2014 to 2017

表 1 2014 ~ 2017 年 7 个区域年均  $\rho(\text{PM}_{10})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Average annual  $\rho(\text{PM}_{10})$  in seven regions from 2014 to 2017/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

地区	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年	年均值
大东北	46.80	40.96	39.03	33.26	40.05
新青藏	13.93	11.91	9.74	7.83	11.37
内甘宁	32.75	27.56	25.73	22.01	24.21
华中	65.69	60.32	48.72	42.90	54.59
中南	31.56	23.60	27.75	27.23	27.64
长三角	38.44	33.41	30.35	28.73	32.37
海南岛	13.43	13.31	11.85	17.76	12.90

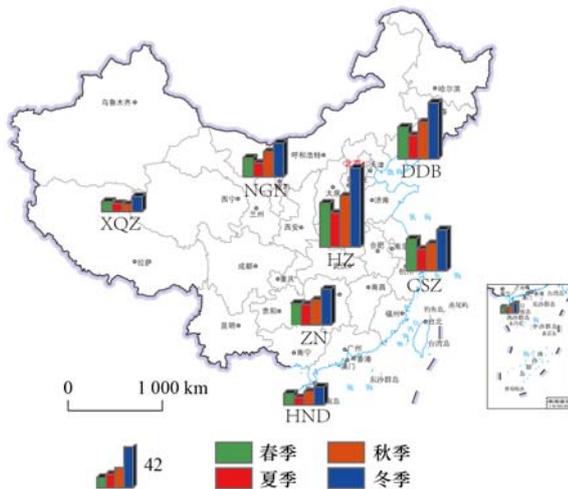
中心,还包含抚顺、本溪、辽阳和鞍山等工业城市。但是大东北地区的 PM<sub>10</sub> 总年均浓度比华中地区低很多,这表明人类活动对 PM<sub>10</sub> 的变化影响更加深远。

长三角地区总年均  $\rho(\text{PM}_{10})$  比大东北地区低  $7.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,位于该地区的沪宁杭工业基地以上海、南京、杭州为中心,是我国第一大综合性工业基地,轻重工业都十分发达且人员流动大人口密度高,且长三角地区地理位置优越,地处长江三角洲平原,水资源丰富,降雨充沛,植被茂盛,有利于净化大气,降低污染浓度。此外,受华中地区、长三角地区内工业城市污染物排放和区域传输的影响,加之低海拔、不临海的地理条件,中南地区的总年均  $\rho(\text{PM}_{10})$  仅低于长三角地区  $4.73 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。中南地区与长三角地区类似,发展迅猛,人类活动频繁,但该地区的珠江三角洲工业基地以轻工业为主。而内甘宁地区和新青藏为典型的地广人稀地区,虽然这里降水量少,植被稀疏,但这里季风气候明显,有助于污染物扩散且没有大型重工业的污染排放,所以 PM<sub>10</sub> 浓度很低。

随着时间推移,大东北地区、新青藏地区、内甘宁地区、华中地区、长三角地区年均浓度持续降低,根据表 1 中 7 个区域的年均 PM<sub>10</sub> 浓度和 4 a 的各个区域总年均 PM<sub>10</sub> 浓度显示,从 2014 ~ 2015 年年均浓度下降最为明显。主要是自从 2013 年我国多地出现雾、霾围城事件后,国家开始关注大气污染现象,积极治理,随着全国各项大气污染防治法规政策的颁布实施,各地逐渐完善大气污染治理措施,逐步加大大气污染治理力度,使得 PM<sub>10</sub> 高浓度范围逐年缩小,其中华中地区污染程度最重,仍为全国高浓度中心地带,但逐年下降幅度也是最大的。

此外,中南地区在 2016 年 PM<sub>10</sub> 年均浓度有所上升,分析发现主要是广东和广西两省各个站点 PM<sub>10</sub> 浓度在 2016 年起都有略微升高,海南岛地区在 2017 年 PM<sub>10</sub> 年均浓度有所上升,分析数据发现海南海口市在 2017 年 PM<sub>10</sub> 浓度与上一年相比基本每月都有所上升。主要是广东近年来发展迅速,特别是深圳的飞速发展吸引了很多人前往,人口密度的增加加大了人类活动,而且该地区没有需要大力治理的重工业基地,从而导致 PM<sub>10</sub> 浓度有轻微上升。

图 10 是按照 7 个区域划分得出的各区域 4 a 的季均  $PM_{10}$  浓度变化情况,由于不同地区的污染物排放差异和气候环境差异,使得不同地区季均  $PM_{10}$  浓度差异明显.整体来看,7 个区域均表现为“夏低冬高”的变化规律,且与春、夏、秋季节相比,冬季增幅最为明显.主要是冬季北方地区需要供暖,煤炭燃烧增多使大气污染物排放增多,其次冬季气候寒冷,逆温现象频繁,静稳天气增多都不利于污染物扩散,从而导致冬季近地面污染物浓度高.夏季  $PM_{10}$  浓度处于低值主要受气象影响,夏季气温升高,使大气环流增强,利于污染物扩散,降水多有利于清除大气污染物.新青藏地区  $PM_{10}$  浓度春季、夏季、秋季变化不甚明显,主要是新青藏地区地广人稀,气候干燥,降雨少,风力强劲,使得大气中  $PM_{10}$  含量低.



图例中 42 表示最右侧柱形高度所代表的数值为  $42 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

图 10 中国 2014~2017 年 7 个区域季均  $PM_{10}$  浓度分布

Fig. 10 Quarterly average  $PM_{10}$  concentration distribution in seven regions of China from 2014 to 2017

### 2.3 中国不同区域 $PM_{10}$ 与 AOD 相关性特征分析

由于  $PM_{10}$  监测分布稀疏且不均,特别是在中国西部人口稀少的地区,这一点不利于对  $PM_{10}$  进行连续的时空监测,而具有广泛观测视野的先进卫星遥感可以有效地弥补地面测量的局限<sup>[45,46]</sup>.为此,本研究根据系统聚类的分类结果分 7 个区域探究全国尺度  $PM_{10}$  与 AOD 的关系.首先对  $PM_{10}$  浓度数据和获取的 MODIS AOD 数据进行时空匹配,时间范围统一为 2014 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日.由于 MODIS 卫星过境时间为每天 10:30 和 14:30,故使用的  $PM_{10}$  浓度数据为每日 10:00~11:00 和 14:00~15:00 共 2 h 的均值.

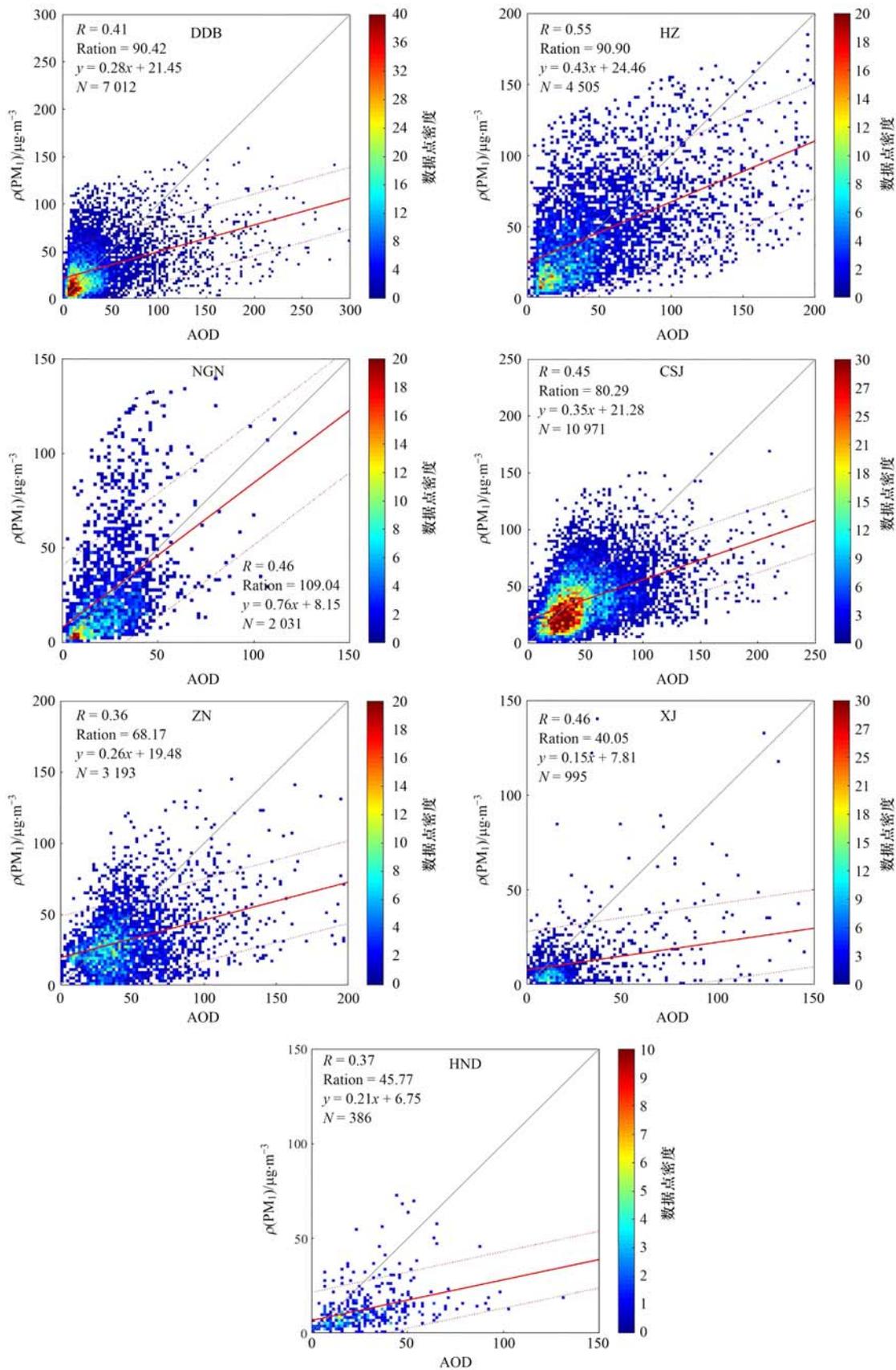
本研究集中在中国的主要城市,通过对数据进行有效性控制,将空值多的站点剔除,最终选取了 90 个站点,较为均匀地分布于 7 个区域内(华中地区、大东北地区、长三角地区、中南地区、内甘宁

地区、海南岛地区和新青藏地区,由于青海和西藏两省内站点对应的卫星 AOD 数据缺失较多,在此只保留了新疆的两个监测站点的数据用于分析,故将新青藏地区改为新疆地区).7 个区域  $PM_{10}$  浓度和 AOD 的关系如图 11 所示.可见,虽然整体上  $PM_{10}$  浓度与 AOD 呈现出明显的相关性,但不同地区  $PM_{10}$ -AOD 的相关性存在很大差异,强相关性集中在华中地区、长三角地区、内甘宁地区和新疆地区,中南地区在 7 个区域内相关性最低.这种空间差异主要是气溶胶类型和性质变化和地表植被的不同分布导致的结果.不同地区的污染物排放程度、天气条件、气溶胶氧化与稀释的速度和 AOD 受不同类型前体物的贡献等因素不同,导致相关性显示出强烈的地区差异<sup>[29]</sup>.

结合各个区域  $PM_{10}$  浓度和 AOD 的区域均值变化情况分析,华中地区的  $PM_{10}$  浓度最高,其区域相关系数也是最高的为 0.55,可见该地区  $PM_{10}$  与 AOD 来源一致,且环境与人类活动对两者的影响相似.在单个监测站点的相关性变化中,重庆市的相关系数最高为 0.57,江西南昌市的相关系数最低为 0.25,而两个城市的总年均  $\rho(PM_{10})$  相近,分别为  $50.50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $45.94 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .重庆市地处中国西部发达地区,人口密集人类活动较多,且属于亚热带季风性湿润气候,由于地形原因云雾较多,导致大气污染颗粒物不易扩散,易于产生二次气溶胶,  $PM_{10}$  与 AOD 来源一致.而南昌市地处丘陵,水网密集,湖泊众多,气候温和湿润,与重庆市相比,经济发展上相较落后,且云雾天气较少,  $PM_{10}$  与 AOD 同源性差,进一步说明人类活动和气候气象因素对  $PM_{10}$ -AOD 相关性影响较大<sup>[47]</sup>.

在大东北地区其区域相关系数为 0.41,7 个区域相比相关系数属于倒数第 3,但大东北地区的年均  $PM_{10}$  浓度仅次于华中地区.大东北地区与华中地区一样都属于重工业城市较多的区域,且两地区的年均  $PM_{10}$  浓度也相近,但  $PM_{10}$ -AOD 相关性却相差较远,导致这一结果的主要因素在于华中地区的人口密度比大东北地区更加密集,并且气候差异明显,大东北地区有很多沿海城市,大气更湿润,且地理位置偏北,气温更低.这一差异导致两地区 AOD 来源不同,从而影响  $PM_{10}$ -AOD 相关性.

在大东北地区抚顺市的相关系数最高为 0.47,大同市的相关系数最低为 0.29,而大同市和抚顺市的总年均  $\rho(PM_{10})$  分别为  $34.20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $37.10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $PM_{10}$  浓度相近但  $PM_{10}$ -AOD 相关性相差很大.大同市和抚顺市都属于重工业城市,据统计到 2018 年为止,大同市和抚顺市常住人口分别约为



红线表示回归曲线,两条红色虚线表示期望误差的上限和下限,黑线表示 y = x 平分线,Ratio 表示 PM<sub>1</sub>/AOD,数据点密度是常量,无单位

图 11 7 个区域 PM<sub>1</sub> 浓度和 AOD 的散点图

Fig. 11 Scatter plots of PM<sub>1</sub> concentration and AOD in seven regions

345.6 万和 313.8 万,生产总值分别约为 1 100 亿元和 954 亿元. 将环境因素相比,大同市属于温带大陆

性季风气候,抚顺市属于季风气候,高空偏北风盛行,大气温度较低,大气湿度更高. 由此可见,两城市

的经济发展相近,影响  $PM_{10}$ -AOD 关系的主要因素在于气候条件的差异,大气湿度对 AOD 影响很大。

内甘宁地区与新疆地区情况与大东北地区相反,内甘宁地区和新疆地区总年均  $\rho(PM_{10})$  较低,分别为  $24.21 \mu g \cdot m^{-3}$  和  $11.38 \mu g \cdot m^{-3}$ ,而两区域  $PM_{10}$ -AOD 相关系数均为 0.46,相关性较高。说明内甘宁地区和新疆地区  $PM_{10}$  与 AOD 来源高度一致。内甘宁地区中,兰州市的相关系数最低为 0.21,内蒙古二连浩特的相关系数最高为 0.48,兰州市属于重工业城市,总年均  $\rho(PM_{10})$  为  $35.16 \mu g \cdot m^{-3}$ ,而二连浩特市受环境污染较轻,总年均  $\rho(PM_{10})$  为  $7.96 \mu g \cdot m^{-3}$ ,但二连浩特市  $PM_{10}$ -AOD 相关性更高。二连浩特位于内蒙古中部偏北地区,地处锡林郭勒高原,多大风天气,降水集中,气温较低。这一差异现象突出了气候气象条件对  $PM_{10}$ -AOD 相关性的影响,风速、降水量和温度都是重要的影响因素<sup>[48]</sup>。

新疆地区,选取了两个监测站点进行分析,处于南疆的塔中站点具体位于新疆塔克拉玛干沙漠中部偏东地区, $PM_{10}$  与 AOD 的相关性为 0.42;处于北疆的阿克达拉站点具体位于新疆北边的阿勒泰地区, $PM_{10}$  与 AOD 的相关性为 0.11。南疆  $PM_{10}$  与 AOD 来源一致相关性较高,相关系数远高于北疆,南北地域差异明显。主要由于新疆地形地貌差异明显,在北疆有大片绿洲,与南疆相比,大气更湿润,人口比南疆更为密集。塔克拉玛干沙漠占据南疆大片范围,导致南疆气候干燥,且大气粗颗粒物较多,全年降水比北疆少。可见当  $PM_{10}$  与 AOD 来源一致时相关性较高,但相似条件下,大气湿度不同会导致  $PM_{10}$ -AOD 关系产生明显差异。

长三角地区区域相关系数为 0.45,单个监测站点的相关系数中,江苏南京市、安徽合肥市和福建晋安市相关系数都为 0.31,上海市相关系数最高为 0.57。中南地区区域相关系数为 0.36,在 7 个区域中相关系数最低,但中南地区的总年均  $\rho(PM_{10})$  为  $27.64 \mu g \cdot m^{-3}$ ,仅低于华中地区、大东北地区和长三角地区。中南地区人口密度低于华中地区和长三角地区,但人流量较大,经济发展飞速,不过中南地区发展以轻工业为主,大力开展新兴产业和第三产业,所以大气污染并不严重。同时中南地区全年高温多雨,降水量充足,植被生长茂盛且种类繁多。高温湿润的环境使 AOD 的来源复杂化,是影响  $PM_{10}$ -AOD 相关性的主要原因。海南岛地区与中南地区气候条件较为相似,只是海南岛及周边人口较为稀少,气候温暖湿润,所以海南岛地区的 AOD 产生来源多样,与  $PM_{10}$  来源有部分一致,但来源复杂性使  $PM_{10}$ -AOD 相关性不高。

### 3 结论

(1)2014~2017 年中国大陆年均  $PM_{10}$  浓度呈逐年下降趋势,中轻度污染的比例不断上升,重污染发生的比例明显降低,空气质量发展趋势向好。中国  $PM_{10}$  浓度冬季最高,秋季和春季次之,夏季最低,这一特点与大气扩散条件和人为活动(冬季取暖)等因素有关。月均  $PM_{10}$  浓度总体上呈“U”型变化规律,1~5 月  $PM_{10}$  浓度显著下降,6~9 月浓度基本保持平稳,略有降低,10~12 月浓度显著回升。节假日期间居民进行休息或出行更多,人类活动等对  $PM_{10}$  浓度的影响较大, $PM_{10}$  浓度特征规律相对明显。节假日前后期间  $PM_{10}$  浓度基本呈现“M”型变化特征, $PM_{10}$  浓度在星期一和星期五为峰值日,星期日为低谷日。

(2)2014~2017 年中国  $PM_{10}$  年均浓度均有明显的空间差异性,浓度变化由高到低依次为华中地区、大东北地区、长三角地区、中南地区、内甘宁地区、海南岛地区和新青藏地区,呈现出“东高西低,北高南低”空间分布格局。全国大部分地区年均  $PM_{10}$  浓度污染逐年减轻,总体呈重度和严重污染减少,高浓度范围缩小,轻度和中度污染增多,中低浓度范围扩增的特征。在季节变化上 7 个区域均表现为“夏低冬高”的变化规律。

(3)AOD 与  $PM_{10}$  呈正相关性,表明所选中国各地区总气溶胶均含有大量  $PM_{10}$ 。总体上  $PM_{10}$  浓度越高的地区,AOD 也越大。但不同地区  $PM_{10}$  与 AOD 的相关性存在很大差异,华中地区相关性最高,相关系数达到 0.55,中南地区相关性最低,仅为 0.36。这种空间差异主要是气溶胶类型和性质变化和地表植被的不同分布导致的结果,同时,与不同地区的污染气体排放程度、气候条件、气溶胶的来源和氧化、稀释的速度等因素也有关。

#### 参考文献:

- [1] Zhang Y, Guo J P, Yang Y J, *et al.* Vertical wind shear modulates particulate matter pollutions: a perspective from radar wind profiler observations in Beijing, China [J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(3), doi: 10.3390/rs12030546.
- [2] Song C B, Wu L, Xie Y C, *et al.* Air pollution in China: status and spatiotemporal variations [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **227**: 334-347.
- [3] Li Y Y, Chang M, Ding S S, *et al.* Monitoring and source apportionment of trace elements in  $PM_{2.5}$ : Implications for local air quality management [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, **196**: 16-25.
- [4] 翟诗婷,王申博,张栋,等.郑州市典型污染过程  $PM_{10}$  中重金属浓度、来源及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1180-1189.  
Zhai S T, Wang S B, Zhang D, *et al.* Concentration, source, and health risk assessment of  $PM_{10}$  heavy metals in typical

- pollution processes in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1180-1189.
- [ 5 ] Wang K, Wang W Y, Li L L, *et al.* Seasonal concentration distribution of PM<sub>1.0</sub> and PM<sub>2.5</sub> and a risk assessment of bound trace metals in Harbin, China: Effect of the species distribution of heavy metals and heat supply [J]. *Scientific Reports*, 2020, **10**(1), doi: 10.1038/s41598-020-65187-7.
- [ 6 ] Prakash J, Lohia T, Mandariya A K, *et al.* Chemical characterization and quantitative assessment of source-specific health risk of trace metals in PM<sub>1.0</sub> at a road site of Delhi, India [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, **25**(9): 8747-8764.
- [ 7 ] 闫丽娜, 左昊, 张聚全, 等. 石家庄市大气 PM<sub>1</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 中重金属元素分布特征及来源的对比研究 [J]. *地学前缘*, 2019, **26**(3): 263-270.  
Yan L N, Zuo H, Zhang J Q, *et al.* Comparative study on the distribution characteristics and sources of heavy metal elements in PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Shijiazhuang city [J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, **26**(3): 263-270.
- [ 8 ] Zhang Y Y, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Chemical composition and sources of PM<sub>1</sub> and PM<sub>2.5</sub> in Beijing in autumn [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **630**: 72-82.
- [ 9 ] Zhang Y Q, Ding, Z, Xiang Q Q, *et al.* Short-term effects of ambient PM<sub>1</sub> and PM<sub>2.5</sub> air pollution on hospital admission for respiratory diseases: Case-crossover evidence from Shenzhen, China [J]. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 2020, **224**, doi: 10.1016/j.ijheh.2019.11.001.
- [ 10 ] Yang B Y, Guo Y M, Morawska L, *et al.* Ambient PM<sub>1</sub> air pollution and cardiovascular disease prevalence: insights from the 33 Communities Chinese Health Study [J]. *Environment International*, 2019, **123**: 310-317.
- [ 11 ] Nemmar A, Vanbilloen H, Hoylaerts M F, *et al.* Passage of intratracheally instilled ultrafine particles from the lung into the systemic circulation in hamster [J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2001, **164**(9): 1665-1668.
- [ 12 ] Wang Y G, Ying Q, Hu J L, *et al.* Spatial and temporal variations of six criteria air pollutants in 31 provincial capital cities in China during 2013- 2014 [J]. *Environment International*, 2014, **73**: 413-422.
- [ 13 ] Qin K, Wang L Y, Wu L X, *et al.* A campaign for investigating aerosol optical properties during winter hazes over Shijiazhuang, China [J]. *Atmospheric Research*, 2017, **198**: 113-122.
- [ 14 ] 于建勇, 周蕊, 王帅. 徐州冬季雾霾天气 PM<sub>1.0</sub> 单颗粒污染特征分析 [J]. *电子显微学报*, 2017, **36**(2): 120-130.  
Yu J Y, Zhou R, Wang S. Individual particle analysis of the pollution characteristics of PM<sub>1.0</sub> in fog and brown haze in Xuzhou winter [J]. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2017, **36**(2): 120-130.
- [ 15 ] 林瑜, 叶芝祥, 杨怀金, 等. 成都市中心城区大气 PM<sub>1</sub> 的污染特征及来源解析 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(9): 3220-3226.  
Lin Y, Ye Z X, Yang H J, *et al.* Pollution level and source apportionment of atmospheric particles PM<sub>1</sub> in downtown area of Chengdu [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(9): 3220-3226.
- [ 16 ] Wang Q Q, Zhao J, Du W, *et al.* Characterization of submicron aerosols at a suburban site in central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **131**: 115-123.
- [ 17 ] Lyu X P, Wang Z W, Cheng H R, *et al.* Chemical characteristics of submicron particulates (PM<sub>1.0</sub>) in Wuhan, Central China [J]. *Atmospheric Research*, 2015, **161-162**: 169-178.
- [ 18 ] Rai P, Chakraborty A, Mandariya A K, *et al.* Composition and source apportionment of PM<sub>1</sub> at urban site Kanpur in India using PMF coupled with CBPF [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **178-179**: 506-520.
- [ 19 ] Rogula-Kozłowska W, Majewski G, Widziewicz K, *et al.* Seasonal variations of PM<sub>1</sub>-bound water concentration in urban areas in Poland [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(1): 267-273.
- [ 20 ] Zhao S P, Yin D Y, Yu Y, *et al.* PM<sub>1</sub> chemical composition and light absorption properties in urban and rural areas within Sichuan Basin, southwest China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **280**, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116970.
- [ 21 ] Chen W, Tian H M, Zhao H M, *et al.* Multichannel characteristics of absorbing aerosols in Xuzhou and implication of black carbon [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **714**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136820.
- [ 22 ] Bai K X, Wu C, Li J J, *et al.* Characteristics of chemical speciation in PM<sub>1</sub> in six representative regions in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, **38**(7): 1101-1114.
- [ 23 ] 刘子杨, 张宜升, 张厚勇, 等. 青岛秋冬季 PM<sub>1</sub> 中金属元素污染特征及健康风险评估 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(9): 4448-4457.  
Liu Z Y, Zhang Y S, Zhang H Y, *et al.* characteristics and health risk assessment of trace elements in atmospheric PM<sub>1</sub> during autumn and winter in Qingdao [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(9): 4448-4457.
- [ 24 ] Zhao S P, Yu Y, Yin D Y, *et al.* Annual and diurnal variations of gaseous and particulate pollutants in 31 provincial capital cities based on in situ air quality monitoring data from China National Environmental Monitoring Center [J]. *Environment International*, 2016, **86**: 92-106.
- [ 25 ] Chen G B, Morawska L, Zhang W Y, *et al.* Spatiotemporal variation of PM<sub>1</sub> pollution in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **178**: 198-205.
- [ 26 ] Huang L, Mao F Y, Zang L, *et al.* Estimation of hourly PM<sub>1</sub> concentration in China and its application in population exposure analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **273**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115720.
- [ 27 ] Zang L, Mao F Y, Guo J P, *et al.* Estimation of spatiotemporal PM<sub>1.0</sub> distributions in China by combining PM<sub>2.5</sub> observations with satellite aerosol optical depth [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **658**: 1256-1264.
- [ 28 ] Li R, Guo J P, Geng G N, *et al.* Satellite-derived long-term estimates of full-coverage PM<sub>1</sub> concentrations across China based on a stacking decision tree model [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **255**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118448.
- [ 29 ] Chen G B, Knibbs L D, Zhang W Y, *et al.* Estimating spatiotemporal distribution of PM<sub>1</sub> concentrations in China with satellite remote sensing, meteorology, and land use information [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 1086-1094.
- [ 30 ] Zang L, Mao F Y, Guo J P, *et al.* Estimating hourly PM<sub>1</sub> concentrations from Himawari-8 aerosol optical depth in China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **241**: 654-663.
- [ 31 ] Zhang Y M, Wang Y Q, Zhang X Y, *et al.* Chemical components, variation, and source identification of PM<sub>1</sub> during the heavy air pollution episodes in Beijing in December 2016 [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2018, **32**(1): 1-13.
- [ 32 ] Lee S C, Cheng Y, Ho K F, *et al.* PM<sub>1.0</sub> and PM<sub>2.5</sub>

- characteristics in the roadside environment of Hong Kong [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2006, **40**(3): 157-165.
- [33] 韩茜, 魏文寿, 刘新春, 等. 乌鲁木齐市  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  和  $PM_{1.0}$  浓度及分布变化特征[J]. *沙漠与绿洲气象*, 2015, **9**(1): 32-38.  
Han X, Wei W S, Liu X C, *et al.* Characteristic of the concentration and distribution of  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  and  $PM_{1.0}$  in Urumqi [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2015, **9**(1): 32-38.
- [34] 陈慧娟, 刘君峰, 张静玉, 等. 广州市  $PM_{2.5}$  和  $PM_{1.0}$  质量浓度变化特征[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(10): 87-91.  
Chen H J, Liu J F, Zhang J Y, *et al.* Characteristics of mass concentration variations of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{1.0}$  at Guangzhou [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(10): 87-91.
- [35] Wang Y Q, Zhang X Y, Sun J Y, *et al.* Spatial and temporal variations of the concentrations of  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  and  $PM_1$  in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(23): 13585-13598.
- [36] Qin K, Zou J H, Guo J P, *et al.* Estimating  $PM_1$  concentrations from MODIS over Yangtze River Delta of China during 2014-2017 [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **195**: 149-158.
- [37] 武文琪, 张凯山. 区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 523-533.  
Wu W Q, Zhang K S. Contributions of emissions reduction and regional meteorological conditions to air quality improvement [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 523-533.
- [38] Xu Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Spatiotemporal variation in the impact of meteorological conditions on  $PM_{2.5}$  pollution in China from 2000 to 2017 [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117215.
- [39] 李明明, 王雁, 闫世明, 等. 太原市  $PM_{2.5}$  浓度的气象特征影响分析及预报[J]. *环境科学*, 2023, **44**(2): 611-625.  
Li M M, Wang Y, Yan S M, *et al.* Meteorological characteristics, influence analysis and prediction of  $PM_{2.5}$  concentration in Taiyuan city [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(2): 611-625.
- [40] Sun Y L, Wang Z F, Du W, *et al.* Long-term real-time measurements of aerosol particle composition in Beijing, China: seasonal variations, meteorological effects, and source analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(17): 10149-10165.
- [41] Xie M J, Feng W, He S Y, *et al.* Seasonal variations, temperature dependence, and sources of size-resolved PM components in Nanjing, east China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, **121**: 175-186.
- [42] Mikuška P, Vojtěšek M, Křůmal K, *et al.* Characterization and source identification of elements and water-soluble ions in submicrometre aerosols in Brno and Šlapanice (Czech Republic) [J]. *Atmosphere*, 2020, **11**(7), doi: 10.3390/atmos11070688.
- [43] Tao J, Shen Z X, Zhu C S, *et al.* Seasonal variations and chemical characteristics of sub-micrometer particles ( $PM_1$ ) in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **118**: 222-231.
- [44] 徐振麒, 尚玥, 丁峰, 等. 南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源[J]. *环境科学*, 2023, **44**(3): 1310-1318.  
Xu Z Q, Shang Y, Ding F, *et al.* Seasonal variations, size distributions, and sources of chemical components of submicron particulate matter in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2023, **44**(3): 1310-1318.
- [45] Guo J P, Zhang X Y, Che H Z, *et al.* Correlation between  $PM_1$  concentrations and aerosol optical depth in eastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(37): 5876-5886.
- [46] Schäfer K, Harbusch A, Emeis S, *et al.* Correlation of aerosol mass near the ground with aerosol optical depth during two seasons in Munich [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(18): 4036-4046.
- [47] Ferrero L, Riccio A, Ferrini B S, *et al.* Satellite AOD conversion into ground  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  and  $PM_1$  over the Po valley (Milan, Italy) exploiting information on aerosol vertical profiles, chemistry, hygroscopicity and meteorology [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(6): 1895-1912.
- [48] Li R, Cui L L, Fu H B, *et al.* Estimating high-resolution  $PM_1$  concentration from Himawari-8 combining extreme gradient boosting-geographically and temporally weighted regression (XGBoost-GTWR) [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **229**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117434.

## CONTENTS

Elucidating the Impacts of Meteorology and Emission Changes on Concentrations of Major Air Pollutants in Major Cities in the Yangtze River Delta Region Using a Machine Learning De-weather Method .....	FU Wen-xing, HUANG Lin, DING Jia-hao, <i>et al.</i> (5879)
Impact of Emission Reduction in Different Sectors on Air Quality and Atmospheric Temperature in Eastern China .....	LONG Zi-yu, ZHU Jia, LI Ke, <i>et al.</i> (5889)
Analysis of Spatio-temporal Characteristics of Air Quality, Meteorological Impact, and Emission Reduction Effect During the Winter Olympics in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas .....	HOU Lu, ZHU Yuan-yuan, LIU Bing, <i>et al.</i> (5899)
Emission Trends and Reduction Potential of VOCs from Printing Industry in China .....	LIANG Xiao-ming, WU Peng-zhen, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> (5915)
Analysis of VOCs Emission Characteristics and Emission Reduction Potential of Typical Industries in Jinan, China .....	WU Wen-lu, SHAN Chun-yan, ZHAO Jing-lin, <i>et al.</i> (5924)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Lishui Area of Nanjing .....	RUAN Zhao-yuan, YAN Ou, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (5933)
Spatio-temporal Change in City-level Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Sector in China During the Last Decade and Its Potential Mitigation .....	ZHANG Ting-xue, GAO Shu-dan, TENG Xiao, <i>et al.</i> (5946)
Spatiotemporal Distribution Characteristics of Air Pollution and Health Risks in Key Cities of China .....	TU Pei-yue, YANG Huan, CHEN Lan-zhou, <i>et al.</i> (5954)
Spatial and Temporal Variations in PM <sub>1</sub> Concentration and its Correlation with AOD in China from 2014 to 2017 .....	YUAN Li-mei, MA Fang-fang, BIAN Ze, <i>et al.</i> (5964)
Characteristics and Generation Mechanism of Secondary Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan City Group .....	MA Jie-li, LUO Da-tong, LIU Xin, <i>et al.</i> (5975)
Characteristics and Cause of PM <sub>2.5</sub> During Haze Pollution in Winter 2022 in Zhoukou, China .....	MA Ying-ge, YANG Lu, DI Rui-miao, <i>et al.</i> (5986)
Characterization and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM <sub>2.5</sub> in Lanzhou .....	MA Ke-jing, SUN Li-juan (5997)
Characteristics of Atmospheric Dust Fall Pollution and Its Chemical Composition and Mass Reconstruction in Mentougou District of Beijing .....	WANG Zhi-yao, YAO Qi, LÜ Fu, <i>et al.</i> (6007)
Ozone Pollution Characteristics and Formation Mechanism in a Typical Tropical Seaside City .....	HAN Shu-yan, ZHANG Xin, XIE Rong-fu, <i>et al.</i> (6015)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water in Kuaize River Basin at the Upper Pearl River .....	TAO Lan-chu, CUN De-xin, TU Chun-lin, <i>et al.</i> (6025)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Surface Water and Groundwater in Huainan Coal Mine Area .....	LIU Hai, KANG Bo, GUAN Zheng-ting, <i>et al.</i> (6038)
Hydrochemical Characteristics and Pollution Source Identification of Groundwater in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin .....	JIANG Feng, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (6050)
Identification of Nitrate Source and Transformation Process in Shallow Groundwater Around Dianchi Lake .....	CHEN Qing-fei, CHEN An-qiang, CUI Rong-yang, <i>et al.</i> (6062)
Analysis of Influencing Factors on the Accumulation and Distribution of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-zinc Mine Watershed .....	PAN Yong-xing, CHEN Meng, WANG Xiao-tong (6071)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment in Karst Basin Around a Lead-Zinc Mine .....	LIAO Hong-wei, JIANG Zhong-cheng, ZHOU Hong, <i>et al.</i> (6085)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Heavy Metals in Main Rivers Sediments and Ecological Risk Assessment in Kaifeng City .....	DING Ya-peng, LU Xi-hao, WANG Xiao-jing, <i>et al.</i> (6095)
Evaluation and Prediction of Environmental Capacities of Heavy Metals in the Surface Sediments of Lakes in Huoqiu County .....	LIU Hai, WEI Wei, SONG Yang, <i>et al.</i> (6106)
Metabarcoding Profiling of Phytoplankton Communities Associated with Algal Blooms and Determining Related Drivers in Baiyangdian Lake .....	CHEN Ting, DU Xun, CHEN Yi-yong, <i>et al.</i> (6116)
Driving Factors Analyze of Phytoplankton Community by Comparison of Population and Functional Groups and Water Quality Evaluation in Dongting Lake .....	YAN Guang-han, YIN Xue-yan, WANG Xing, <i>et al.</i> (6125)
Distribution Characteristics and Environmental Driving Factors of Cyanobacteria Community in Impounded Lakes and Reservoirs in Shandong on the East Route of South-to-North Water Diversion Project .....	WEI Jie-lin, CUI Yu-jing, LI Yi-zhen, <i>et al.</i> (6137)
Characteristics and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical Active Compounds in Guangdong Province .....	LUO Jia-hao, WANG Yu-kai, YUAN Ke, <i>et al.</i> (6149)
Characteristics of Microplastic-derived Dissolved Organic Matter(MPDOM) and the Complexation Between MPDOM and Sulfadiazine/Cu <sup>2+</sup> .....	WANG Xiao, YAN Cai-xia, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (6159)
Photodegradation of Plastic Blends in Seawater and Its Risk to the Marine Environment .....	ZHANG Hong-yu, GAO Jia-wei, CHEN Si-bao, <i>et al.</i> (6172)
Preparation of Iron-improved Blue Algae Biochar and Its Co-adsorption Mechanism for Phosphorus in Surface Water .....	HAN Jie, HUANG Xin, YANG Kun-lun, <i>et al.</i> (6181)
Estimation and Critical Source Area Identification of Non-point Source Pollution Based on Improved Export Coefficient Models: A Case Study of the Upper Beiyun River Basin .....	LI Hua-lin, ZHANG Shou-hong, YU Pei-dan, <i>et al.</i> (6194)
Characteristics of Bacterial Community Structure in the Sediment of Rural Black and Odorous Water Bodies .....	REN Hong-wei, TIAN Yan-fang, LU Jun-xia, <i>et al.</i> (6205)
Impacts of Human Activities on the Net Primary Productivity of Vegetation in Chengde's Transitional Region from Plateau to Plain in the Context of Climate Change .....	SHAN Zhen-dong, LIU Dun, LUO Han, <i>et al.</i> (6215)
Meta-analysis on the Effects of Nitrogen Addition on Soil Organic Carbon Content in Terrestrial Ecosystems .....	YANG Ling-fang, KONG Dong-yan, DIAO Jing-wen, <i>et al.</i> (6226)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Nitrogen Component and Active Nitrogen in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi .....	CAO Yang, SHEN Yu-yi, CHEN Yun-shuang, <i>et al.</i> (6235)
Response of Organic Carbon Mineralization to Nitrogen Addition in Micro-aerobic and Anaerobic Layers of Paddy Soil .....	MAO Wan-qiong, XIA Yin-hang, MA Chong, <i>et al.</i> (6248)
Effects of Conservation Tillage on Herbicide Residues in Maize Field Soil .....	LIU Yuan, WANG Zu-cheng, LIU Mei-hua, <i>et al.</i> (6257)
Research Progress on Toxicity of Microplastics in Soil to Terrestrial Plants and Their Degradation Mechanism .....	LIU Wei, LI Yu-xin, RONG Sa-shuang, <i>et al.</i> (6267)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Soil in Danjiangkou Reservoir Area of South-to-North Water Diversion Project .....	WANG Feng, GONG Wei, LIU Zhe, <i>et al.</i> (6279)
Accumulation Characteristics, Sources, and Health Risks of Soil Lead of Urban Parks in Beijing .....	AN Jiang-mei-duo, ZHANG Rui-qing, GUO Guang-hui, <i>et al.</i> (6287)
Vertical Migration Characteristics and Fate of Heavy Metals from Zinc Smelting Slag in Soil Profile .....	YANG Ai-ping, WANG Xiao-yan, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (6297)
Ecological Risk Assessment and Migration and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil-crop System from Typical Pyrite Mining Area .....	CHENG Xiao-meng, ZHAO Chen, WU Chao, <i>et al.</i> (6309)
Interaction and Transport Characteristics of Lead and Cadmium in Different Soil-wheat Systems .....	KOU Meng, FAN Yu, SU Meng-xian, <i>et al.</i> (6319)
Distribution and Transport of Cadmium and Arsenic in Different Aboveground Parts of Wheat After Flowering .....	WANG Qiu-shi, HUA Gui-li, LI Xiang-yu, <i>et al.</i> (6328)
Effects of Vegetation Types and Seasonal Dynamics on the Diversity and Function of Soil Bacterial Communities in the Upper Reaches of the Heihe River .....	WANG Zhu, LIU Yang, WANG Fang, <i>et al.</i> (6339)
Ecological Responses of Soil Bacterial Communities to Heavy Metal Contamination Surrounding a Typical Coal-based Industrial Region .....	ZHENG Dan-feng, LIU Di, SU Chao, <i>et al.</i> (6354)
Effects of Aeration Methods on Microbial Diversity and Community Structure in Rice Rhizosphere .....	XIAO De-shun, XU Chun-mei, WANG Dan-ying, <i>et al.</i> (6362)
Response of Nitrification Potential and Ammonia Oxidation Microbial Community in Purple Soils to the Application of Biochar Combined with Chemical Fertilizer and Manure .....	LI Yue, WANG Zi-fang, JIA Li-juan, <i>et al.</i> (6377)
Effect of Continuous Cropping on the Physicochemical Properties, Microbial Activity, and Community Characteristics of the Rhizosphere Soil of <i>Codonopsis pilosula</i> .....	YANG Yang, LI Hai-liang, MA Kai-li, <i>et al.</i> (6387)
Effect of Manure Application on the Adsorption of Antibiotics to Soil .....	LUO Shan, HU Jin-sheng, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i> (6399)
Relationship Between Carbon Emissions and Economic Development of Industrial Parks Based on Decoupling Index .....	CHEN Si-yu, LIU Jing-ru, SUN Guang-ming (6412)
Characteristics of Municipal Solid Waste in Some Urban Agglomeration in the Past Five Years .....	WANG Xiao-bo, LIU An-qi, ZHONG Hui-qiong, <i>et al.</i> (6421)