

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM _{2.5} 分布格局演变及其影响因素	黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)
中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析	方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)
阳泉市秋冬季 PM _{2.5} 化学组分及来源分析	王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)
泰安市夏季 PM _{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源	衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)
黄山秋季大气颗粒物理化特性	卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)
北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性	曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)
淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征	王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)
鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析	付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)
浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数	滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)
基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征	王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)
薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征	牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 燕莹莹, 祁士华 (1107)
精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法	叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)
2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估	施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)
中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势	庞凯莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)
京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单	韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)
在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测	王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵玺乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)
参数选取对畜禽养殖业大气氨排放的影响: 以长三角地区为例	张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)
乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析	吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)
长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征	李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)
伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素	刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)
城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)
基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例	王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)
黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素	梁晓文, 郇田田, 王涛 (1217)
人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析	温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)
滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响	张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)
太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997~2017 年)	杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)
汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系	薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)
盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价	王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 刘向阳 (1265)
三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量	陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)
化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响	罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)
利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放	柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)
茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性	范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)
3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性	王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)
新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附	徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)
三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险	方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)
固城湖及出入湖河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估	阚可聪, 谷孝鸿, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)
衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)
北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估	张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)
基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性	马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)
PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性	王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)
中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化	付昆明, 杨宗珏, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)
抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响	代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 亮根祥, 胡双庆 (1401)
多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验	张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志成, 曹思雨 (1409)
剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响	邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)
硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响	何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)
工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析	李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)
耕地土壤重金属健康风险空间分布特征	姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)
黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析	赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)
不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响	李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)
红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征	章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)
有机肥与无机肥配施对潮土 N ₂ O 排放的影响	孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)
冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系	王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)
钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响	鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)
桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应	方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)
外源亚精胺对 As ⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响	刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩廿, 刘玉荣, 胡红青 (1505)
《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)	

北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性

曾唯^{1,2}, 郝庆菊^{1,2}, 赵仲婧^{1,2}, 熊维霞^{1,2}, 陈俊江^{1,2}, 辛金元³, 江长胜^{1,2*}

(1. 西南大学西南山地生态循环农业国家级培育基地, 重庆 400715; 2. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 3. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 为了解重庆市北碚区大气质量状况, 利用其 2014 年气溶胶光学厚度和颗粒物质量浓度的同步观测结果进行分析。结果表明, 北碚区 AOD_{500 nm} 的年均值为 1.46 ± 0.69 , 其随月份变化明显, 其中 11 月最高为 2.90 ± 1.85 , 9 月最低为 0.54 ± 0.05 。北碚区存在颗粒物污染的现象, PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的年均值分别为 $(62 \pm 40) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(94 \pm 51) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 均超出 GB 3095-2012《环境空气质量标准》二级标准限值, PM_{2.5} 与 PM₁₀ 的日均值超标率分别为 26% 和 15%。细粒子 PM_{2.5} 与可吸入颗粒物 PM₁₀ 浓度之间呈现显著性相关, 全年决定系数 R^2 能够达到 0.95 ($P < 0.01$), AOD 与 PM_{2.5}、PM₁₀ 之间全年均呈正相关特性, 全年决定系数 R^2 分别为 0.48 和 0.46, 且不同季节下的决定系数和相关函数均有差异, 其中冬季相关性最好, 夏季相关性最差。全年 AOD 与 AQI 呈正相关特性, 决定系数 R^2 为 0.15 ($P < 0.05$)。AOD 值受天气要素综合作用的影响, 观测期间也应将温度、湿度、水汽等要素数据进行同步采集。

关键词: 北碚区; 气溶胶光学厚度 (AOD); 颗粒物浓度; 空气质量指数 (AQI); 气象要素

中图分类号: X513 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2020)03-1067-11 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.201907068

Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration

ZENG Wei^{1,2}, HAO Qing-ju^{1,2}, ZHAO Zhong-jing^{1,2}, XIONG Wei-xia^{1,2}, CHEN Jun-jiang^{1,2}, XIN Jin-yuan³, JIANG Chang-sheng^{1,2*}

(1. State Cultivation Base of Eco-agriculture for Southwest Mountainous Land, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 3. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: To understand the atmospheric quality of the Beibei District of Chongqing, using the simultaneous observation data of aerosol optical depth and particulate matter concentration in 2014, we analyzed the characteristics of aerosol optical depth (AOD) in the urban area of Beibei and its correlation with particle concentration. The results showed that the annual average of AOD_{500nm} in Beibei District is 1.46 ± 0.69 , which varies significantly by month. The highest value in November was 2.90 ± 1.85 , and the lowest in September was 0.54 ± 0.05 . There is particulate matter pollution in Beibei District. The annual average values of PM_{2.5} and PM₁₀ are $(62 \pm 40) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(94 \pm 51) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, which exceed the secondary standard of GB 3095-2012 Ambient Air Quality Standard. The limit values, the daily average over-standard rates of PM_{2.5} and PM₁₀, are 26% and 15%, respectively. There was significant correlation between fine particle PM_{2.5} and PM₁₀ concentration of respirable particulate matter. The annual coefficient of determination R^2 could reach 0.95 ($P < 0.01$). The correlation between AOD and PM_{2.5} and PM₁₀ was positive throughout the year. The coefficient of determination R^2 was 0.48 and 0.46, respectively, and the coefficient of determination and correlation function were different in different seasons, among which the correlation in winter was the best and the correlation in summer was the worst. AOD and air quality index showed positive correlation characteristics throughout the year, and the coefficient of determination R^2 was 0.15 ($P < 0.05$). The AOD value was affected by the comprehensive effects of weather elements. The temperature, humidity, water vapor, and other factor data should also be collected synchronously during the observation period.

Key words: Beibei District; aerosol optical depth (AOD); particulate matter; air quality index (AQI); meteorological element

大气气溶胶是指均匀分散到大气中的固态或液态微粒所构成的稳定体系, 其通过直接或间接辐射能, 对许多重要的大气过程 (如大气能见度、空气质量以及反射部分太阳辐射等) 产生影响^[1~3]。PM_{2.5} 和 PM₁₀ 分别指空气动力学直径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 和 $\leq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒物, 其通过对可见光的消光会对大气能见度产生影响^[4], 对人体健康的危害也已经被各种流行病学和毒理学所证实^[5~7]。气溶胶光学厚度 (aerosol optical depth, AOD) 是指气溶胶消光系数

从地面到大气层顶的积分, 表征无云大气铅直气柱中气溶胶散射造成的消光程度^[8], 并用于推算大气中气溶胶含量, 能在一定程度上反映空气的混浊程度和污染状况^[9,10]。

收稿日期: 2019-07-08; 修订日期: 2019-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41977186); 重庆市基础研究与前沿探索项目 (cstc2018jcyjAX0476, cstc2019jcyj-msxmX0425)

作者简介: 曾唯 (1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制工程, E-mail: 844140107@qq.com

* 通信作者, E-mail: jiangcs@126.com

建立 AOD 与 PM 质量浓度之间的关系,提供了一种更有效的手段来监测大气颗粒物浓度的分布和变化,很好地弥补了一些地区面积较大但是监测点稀疏而导致部分区域存在监测盲区的问题.已有国内外学者开展了研究,如 Zhang 等^[11]的研究证明在得克萨斯州可以通过混合模型利用 AOD 来预测该地区 PM_{2.5} 的浓度,其预测效果较好;沈扬等^[12]的研究发现徐州市 AOD 与 PM_{2.5} 的直接相关性不理想,相关系数为 0.16,但是通过订正后相关系数可以显著提高到 0.71;部分学者在珠江三角洲、京津冀、新加坡等地区也先后展开研究,发现 AOD 经湿度和垂直订正后与 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度具有很高的相关性,可以用来建立 AOD-PM 浓度之间的相关函数^[13~16].

有“雾都”之称的重庆是我国的老工业基地之一,其特殊的地理位置并不利于大气污染物扩散,一些学者前期仅对重庆地区 AOD 或 PM 质量浓度分别进行了研究,但关于重庆地区 AOD 与 PM 浓度二者相关性的研究还相对较少.张天宇等^[17]的研究发现 1961~2013 年间重庆地区 AOD 位于西南地区高值中心的最大处,年均值达到了 1.06;任红丽等^[18]对重庆地区 2012 年 2~12 月 PM 浓度进行分析,发现其年均值超 GB 3095-2012《环境空气质量标准》二级标准限值两倍以上.已有的研究中对 AOD 观测常用的方法是卫星观测或者地基观测^[19],部分学者对两种反演方式结果进行比较,发现两者有着较为一致的变化趋势和较好的相关性^[20],地基观测所采用的手持式太阳光度计有便于携带,操作简单,且有着同样的精确性等优点.为此,本研究基于地基观测方法对得到的 AOD 数据拟展开:①北碚上空 AOD 及 PM 浓度的变化特征研究;②利用 AOD 和 PM 浓度数据建立二者间的相关函数,并进行相关性分析.本研究结果将对北碚地区空气质量监测和预报具有积极意义.

1 材料与方法

1.1 仪器使用方法和原理

本次气溶胶光学厚度监测采用 MICROTOPS II 型 5 通道手持式太阳光度计(美国 Solar Light 公司),该仪器能够监测 440、500、675、870 和 936 nm 这 5 个波段气溶胶散射的光学厚度,AOD 相对偏差能够控制在 0.03 以内,定标周期短和成本低.其使用方法为:通过打开传感器的封盖,手持仪器,对准太阳,让太阳光通过仪器的感光孔径后在仪器的太阳目标校准盘中心形成亮点进行测量.内含计算 AOD 程序,可独立观测使用,也可作为参考仪器使

用^[21].

其主要利用 Beer-Lambert-Bouguer(朗伯-比尔)定律反演 AOD 来确定.其理论公式:

$$\tau_{a,\lambda} = \tau - \tau_{R,\lambda} - \tau_{g,\lambda}$$

式中, τ 为大气中总的光学厚度; $\tau_{a,\lambda}$ 为气溶胶光学厚度; $\tau_{R,\lambda}$ 是空气分子散射的光学厚度; $\tau_{g,\lambda}$ 为气体吸收的光学厚度.这里气体吸收部分中主要包括水汽、臭氧、二氧化氮、氧气等,其中在 936 nm 波段对水汽的吸收较强,而其它波段下对臭氧和其他气体吸收能力较弱,因此利用太阳光度计时可以直接省略这一部分.即从 τ 减去 $\tau_{R,\lambda}$ 就能得到气溶胶光学厚度.详细的反演计算参照文献[22~24].

1.2 数据来源

北碚区 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度数据来源于中国空气质量在线监测分析平台历史数据(<https://www.aqistudy.cn/historydata/sponsor.php>)和真气网(<https://www.zq12369.com>)中天生监测站点自动监测的数据(监测点设立在北碚中心城区之中,位置上与西南大学采样点非常靠近,不仅能较好地体现北碚上空的空气质量状况,而且与本实验采样点在空间上也能够较好地匹配,有利于减少误差).北碚区各种气象要素状况数据来自于中国气象数据网(<https://data.cma.cn/>).

1.3 观测地点与数据处理

重庆市位于中国西南部,地貌起伏较大主要以山地、丘陵为主,北碚区是重庆市主城九区之一,其背靠缙云山,南邻嘉陵江,属亚热带季风湿润气候.采样点位于北碚城区西南大学资源环境学院楼顶(东经 106° 24'58",北纬 29° 48'43"),距地面 35 m 高,该区域地形平坦,受局地环流影响较小,周围 5 km 内多为文教、行政和居民区,无高大的建筑物和明显的局地排放源,观测地点具有较好地代表性.

本研究从 2012 年起对北碚城区上空大气气溶胶进行观测,观测采样方式为人工观测,进行观测的条件应满足天气晴朗无云,大气透明度高.观测时间大多选在当天 10:00~14:00,每隔 30 min 对 AOD 的数据进行一次记录;若在观测期间出现降雨、雾等情况时,应对记录的数据进行排除.在天气状态符合观测条件的情况下,对观测到的数据进行质控,剔除同一天中的异常数据,剩余符合要求的同一波长数据进行平均,来代表在该波长下气溶胶光学厚度的日均值.将该月监测得到的数据采取同样的方法进行处理得到月平均值.缺失月份的 AOD 数据用 NA 表示.

观测气溶胶光学厚度对天气有较高的要求,因此本文选择观测天数和次数都较好,数据较为完整

的 2014 年的 AOD 数据进行分析,能较好地代表北碚区上空 2014 年 AOD 的变化趋势特征.

2 结果与分析

2.1 气溶胶光学厚度的变化特征

2.1.1 气溶胶光学厚度随波长变化特征

一定波长的 AOD 随气象条件和地理位置的变化会有所不同,甚至会有完全不同的变化规律^[25]. 表 1 为 2014 年 1~11 月北碚区不同波长下 AOD 变化趋势情况. 从中可见,在 440 nm 通道处,AOD 具有最大值,其 AOD 的值随通道波长的增大而减小,最小值出现在 936 nm 通道处. AOD 在 4、8 和 11 月出现 3 个峰值. 11 月出现 AOD 的最大值,对应 5 个

波长下的 AOD 分别为 3.16 ± 1.57 、 2.90 ± 1.85 、 2.69 ± 1.68 、 2.58 ± 1.77 和 2.35 ± 1.61 . 在 4 月,5 个波长下的 AOD 值分别为 1.81 ± 0.98 、 1.72 ± 0.93 、 1.30 ± 0.86 、 1.04 ± 0.81 和 0.95 ± 0.74 . 8 月 AOD 则分别为 1.60 ± 0.95 、 1.47 ± 0.90 、 1.19 ± 0.88 、 1.01 ± 0.90 和 0.91 ± 0.82 ,均低于 4 月和 11 月的值. 另一方面,在 9 月,出现全年最小值,5 个波长下的 AOD 值分别为 0.60 ± 0.05 、 0.54 ± 0.05 、 0.40 ± 0.09 、 0.24 ± 0.02 和 0.22 ± 0.02 . 5 个波长下全年 AOD 均值分别为 1.56 ± 0.75 、 1.46 ± 0.69 、 1.19 ± 0.67 、 0.99 ± 0.66 和 0.90 ± 0.61 . 总的来说,北碚地区 AOD 值随波长的增加而不断减小,这与前人的观测结果一致^[26~28].

表 1 北碚区 2014 年 1~11 月不同波段下的光学厚度

Table 1 Optical depth at different bands from January to November in 2014 in Beibei District

月份	440 nm	500 nm	675 nm	870 nm	936 nm
1	1.33 ± 0.68	1.25 ± 0.68	0.95 ± 0.73	0.79 ± 0.75	0.72 ± 0.68
3	1.78 ± 1.04	1.66 ± 1.15	1.23 ± 1.12	0.95 ± 0.94	0.86 ± 0.85
4	1.81 ± 0.98	1.72 ± 0.93	1.30 ± 0.86	1.04 ± 0.81	0.95 ± 0.74
5	0.91 ± 0.68	0.86 ± 0.62	0.70 ± 0.47	0.55 ± 0.42	0.50 ± 0.38
6	1.21 ± 0.52	1.13 ± 0.52	0.85 ± 0.53	0.65 ± 0.54	0.59 ± 0.49
7	0.95 ± 0.62	0.89 ± 0.60	0.72 ± 0.55	0.53 ± 0.49	0.48 ± 0.44
8	1.60 ± 0.95	1.47 ± 0.90	1.19 ± 0.88	1.01 ± 0.90	0.91 ± 0.82
9	0.60 ± 0.05	0.54 ± 0.05	0.40 ± 0.09	0.24 ± 0.02	0.22 ± 0.02
10	2.26 ± 1.71	2.17 ± 1.76	1.93 ± 1.94	1.57 ± 1.83	1.43 ± 1.66
11	3.16 ± 1.57	2.90 ± 1.85	2.69 ± 1.68	2.58 ± 1.77	2.35 ± 1.61

2.1.2 气溶胶光学厚度月、年变化特征

通常利用卫星反演获取的 AOD 值大多来源于 550 nm 波长处^[29,30],为了能够与不同方法反演的 AOD 值进行比较,笔者利用地基观测获取了 5 个波长下的 AOD 数据并选择了最为接近的 AOD_{500 nm} 来研究 AOD 月、季节变化趋势,并用该值来研究 AOD 与 PM 浓度及 AQI 值之间的相关性.

2014 年 1~12 月的 AOD_{500 nm} 数据以及观测天数、次数见表 2. 根据气象学规定,定义 3~5 月为春季,6~8 月为夏季,9~11 月为秋季,12~次年 2 月为冬季. 由表 1 可得,北碚区 2014 年 AOD 年均值为 1.46 ± 0.69 ,最高月均值出现在 11 月为 2.90 ± 1.85 ,最低月均值出现在 9 月为 0.54 ± 0.05 ,且随月、季的波动较大. 该地与中国其它城市相比整体

上年均值较高,如徐州市 2014~2017 四年间 AOD 值在 0.39~1.10 之间^[12],北京春季出现沙尘时 AOD 也只有 $1.55^{[31]}$,临安地区 2017 年 AOD 年均值为 $0.46 \pm 0.34^{[32]}$. 2014 年 1~11 月北碚各种气象要素观测数据见表 3,北碚区全年 AOD 值较高的原因可能因为重庆地区受四川盆地的影响,全年风力级别小,但相对湿度较高,导致气溶胶粒子长期聚集;其次,AOD 最大值出现在秋冬季,可能不仅受风力小、湿度大、多雾、逆温的影响,观测大多处在阴雨天前后,且秋冬季雨量较夏季少,反而导致气溶胶更难沉降,还会对观测天数、次数数据产生一定的影响,加之冬季燃料使用增加污染物排放增多等诸多因素导致. 北碚上空 AOD 随季节变化情况:秋、冬季>春季>夏季.

表 2 2014 年 AOD_{500 nm} 月均值和观测天数及次数¹⁾

Table 2 Monthly average and observation days and times of AOD_{500 nm} in 2014

项目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
AOD	1.25 ± 0.68	NA	1.66 ± 1.15	1.72 ± 0.93	0.86 ± 0.62	1.13 ± 0.52	0.89 ± 0.60	1.47 ± 0.90	0.54 ± 0.05	2.17 ± 1.76	2.90 ± 1.85	NA
观测天数/d	1	NA	9	5	4	4	8	7	1	7	2	NA
观测次数(n)/次	31	NA	253	108	101	71	242	90	10	286	15	NA

1) NA 表示数据缺失

2.2 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 的浓度变化特征

根据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中发

布的限值,PM_{2.5} 的一级和二级年平均标准分别为 $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,PM₁₀ 则分别为 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 70

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的二级日均值标准则为 $77\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $150\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 2014 年北碚城区大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度变化情况和超标天数数据见表 4. 从中得出, 2014 年全年北碚城区大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的年均值为 $(62\pm40)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超出国家二级标准 75%. 其中 $\text{PM}_{2.5}$ 超标天数为 94 d, 日均值超标率为 26%; PM_{10} 的年平均值为 $(94\pm51)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超出国家二级标准 34%, PM_{10} 超标天数为 58 d, 日均值超标率为 15%. PM_{10} 与 $\text{PM}_{2.5}$ 相比日超标率较低, 说明在重庆地区,

$\text{PM}_{2.5}$ 的日均值污染更容易超过国家所规定的二级标准. 另外, 根据统计的 PM 数据发现, 其超标天数有着明显的季节差异, 春夏时节 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的超标天数仅为 5 d 和 3 d, 主要的超标天数集中在秋冬两季. 还发现 PM 质量浓度月均值差呈现出春夏较低而秋冬较高的趋势. 这可能也与重庆地区春夏季空气质量较好, 而秋冬季出现雾多、湿冷、风力小、逆温和污染物不易扩散等有关, 这一点与彭小乐等^[33] 的研究发现冬季颗粒物的浓度水平较春夏高的情况相符合.

表 3 2014 年北碚逐月气象要素观测数据

Table 3 Monthly observation data of meteorological elements of Beibei in 2014							
月份	最高气温/℃	最低气温/℃	平均气温/℃	相对湿度/%	最小相对湿度/%	雨天次数/d	风级情况
1	19	3	10	76	70	13	1
3	27	8	13.8	75	55	12	1
4	30	13	18.9	78	66	16	1
5	30	13	20.4	77	56	20	1
6	35	19	23.2	84	65	23	1
7	40	20	28.9	66	45	7	1
8	40	20	26.8	73	49	12	1
9	35	19	23.8	80	57	17	1
10	29	14	19.5	79	58	14	1
11	19	8	13.1	86	74	18	1

表 4 2014 年每月 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度及超标天数

Table 4 Monthly concentration of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} and the number of days exceeding standards in 2014												
项目	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
$\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	130 ± 34	85 ± 45	55 ± 22	42 ± 14	47 ± 17	35 ± 15	30 ± 10	31 ± 10	38 ± 18	70 ± 37	86 ± 36	95 ± 31
$\text{PM}_{10}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	181 ± 47	117 ± 62	89 ± 35	69 ± 22	84 ± 29	58 ± 19	61 ± 17	57 ± 18	67 ± 27	103 ± 49	123 ± 52	119 ± 38
$\text{PM}_{2.5}$ 超标/d	30	13	4	0	1	0	0	0	0	9	14	23
PM_{10} 超标/d	24	9	2	0	1	0	0	0	0	5	10	7

$\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 之间具有较为一致的月变化趋势, 2014 年 1 ~ 12 月, $\text{PM}_{2.5}$ 以及 PM_{10} 的最高值都出现在 1 月, 分别为 $(130\pm34)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(181\pm47)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, $\text{PM}_{2.5}$ 的最低值出现在 7 月为 $(30\pm10)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, PM_{10} 的最低值出现在 8 月为 $(57\pm18)\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. PM 质量浓度随季节变化情况是冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季, 这与吉莉等^[34] 对重庆北碚地区 PM 类污染物的研究结果一致. 其中污染集中在秋冬两季, 而春夏两季的空气状况较好, 原因可能是因为: 重庆春季昼夜温差大, 伴有春雨和季风, 夏季迎来雨季的冲刷作用所致; 而秋冬季颗粒物浓度上升, 在 1 月出现最大值, 这与北碚地区冬季大气稳定, 地面容易发生辐射降温, 如果边界层存在固态气溶胶粒子, 尤其是吸湿性的, 能够加快辐射冷却作用. 低层输送水汽的同时输送热量, 辐射与平流的共同作用, 易使大气层结更加稳定, 形成逆温层. 加之冬季气温低, 日较差小, 近地层湍流较弱, 使得污染物不断积聚, 造成超标天数增加.

2.3 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 之间的相关性分析

图 1 为北碚区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 之间的日均值以及不同季节日均值间的相关性曲线. 从中可见, 2014 年全年 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 二者的日均值具有显著的正相关关系 ($P < 0.01$), 线性回归方程为 $y = 1.25x + 16.03$, 其中决定系数 R^2 达到了 0.95. 随后按照不同季节分别对二者的日均值进行相关性分析, 发现二者的相关性存在季节性差异, 夏季相关性明显较秋冬三季差. 相比于春秋冬季, 夏季观测数据也更为分散, 相关系数的差异可能与重庆夏季多雨有关, 由表 3 得知, 6、7 和 8 月分别有 23、7 和 12 d 出现降雨的情况, PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 受到降雨清除作用的程度不同从而导致相关系数会出现差异. 因此, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 间的相关性方程和决定系数会随季节变化而有所不同.

3 讨论

3.1 重庆北碚区 AOD 及 PM 与其他城市的对比

图 2 为重庆北碚地区 AOD、 $\text{PM}_{2.5}$ 以及 PM_{10} 年

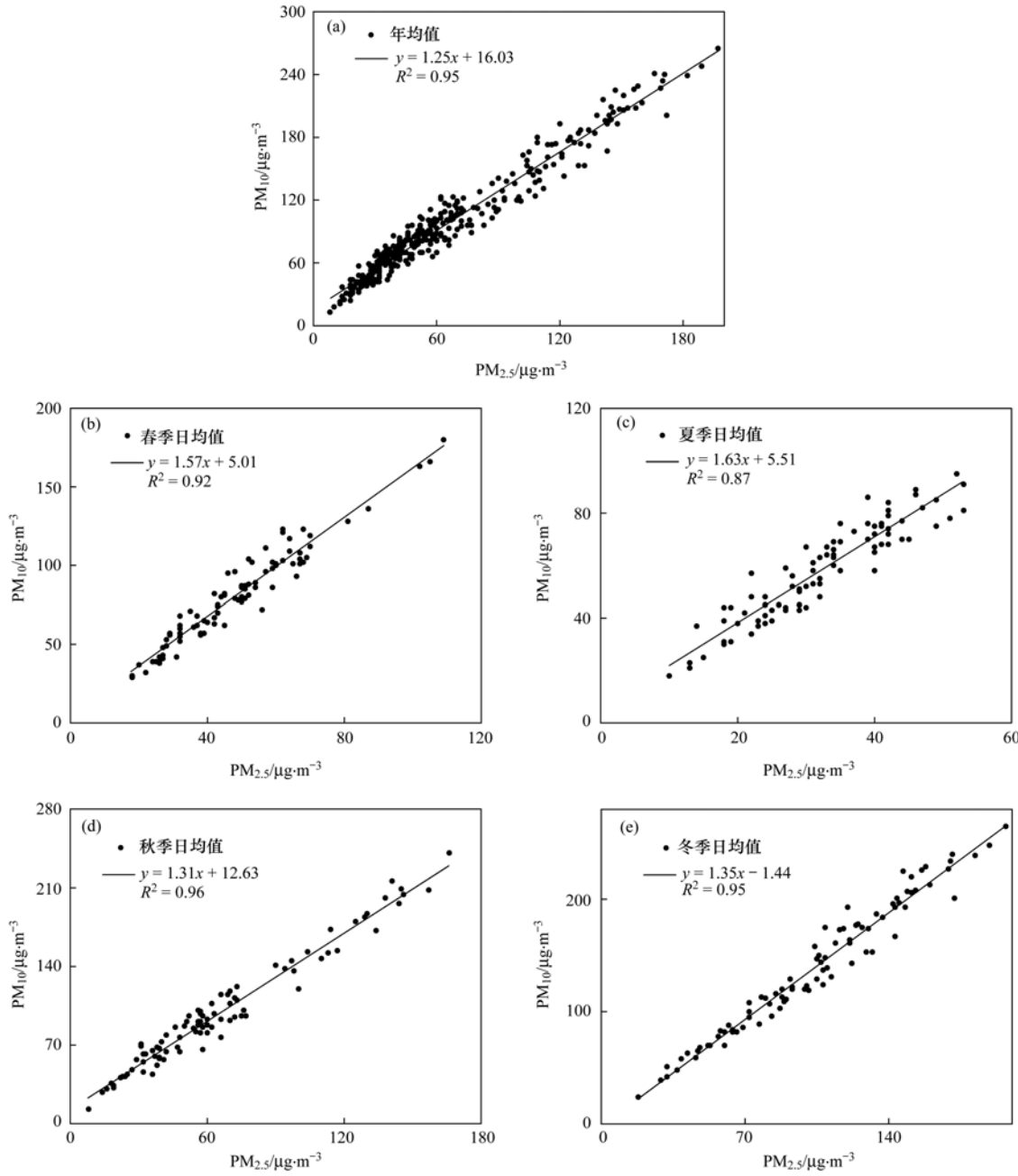


图 1 2014 年北碚区全年以及不同季节内 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的日均值相关性

Fig. 1 Correlation between daily average $PM_{2.5}$ and PM_{10} in the whole year in different seasons in Beibei District in 2014

均值与国内外其他城市的对比。从中可见,重庆北碚地区 AOD 年均值在相比较的 8 个城市中,处于较高的水平,与国内其它直辖市相比,北碚区 AOD 年均值均高于北京市和上海市 3 倍以上;与均位于四川盆地中地理位置靠近重庆的成都比,其 AOD 年均值明显低于重庆北碚地区;而放眼于和重庆相同均为重工业城市的长春市,其 AOD 年均值也远低于重庆北碚地区;而与另外一些城市如徐州、广州相比,重庆北碚地区 AOD 年均值也较高。而与美国这样的发达国家相比,其 AOD 和 PM 浓度的年均值更远远低于重庆以及国内其它城市,这说明在空气质量上,重庆北碚地区还较差,国内城市与发达国家城市比

也还有较大差距。

Allen^[35]的研究发现,如果所研究城市上空中 AOD < 0.02 时,城市表现出干净状态; < 0.2 时,呈现出局部污染状况; > 0.4 时,则会呈现出明显大气污染的状况。北碚上空 AOD 不论是年均值还是月均值均 > 0.4,表现为明显呈现出城市大气污染的状态,虽然这些年重庆北碚地区空气质量有所改善,但仍亟待加强。

从 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度水平上来看,这些相比较的国内城市均超过国家规定的颗粒物浓度二级标准,这也说明这些国内城市都存在着不同程度的大气污染状况^[36~38],其中重庆北碚地区 $PM_{2.5}$ 浓度水

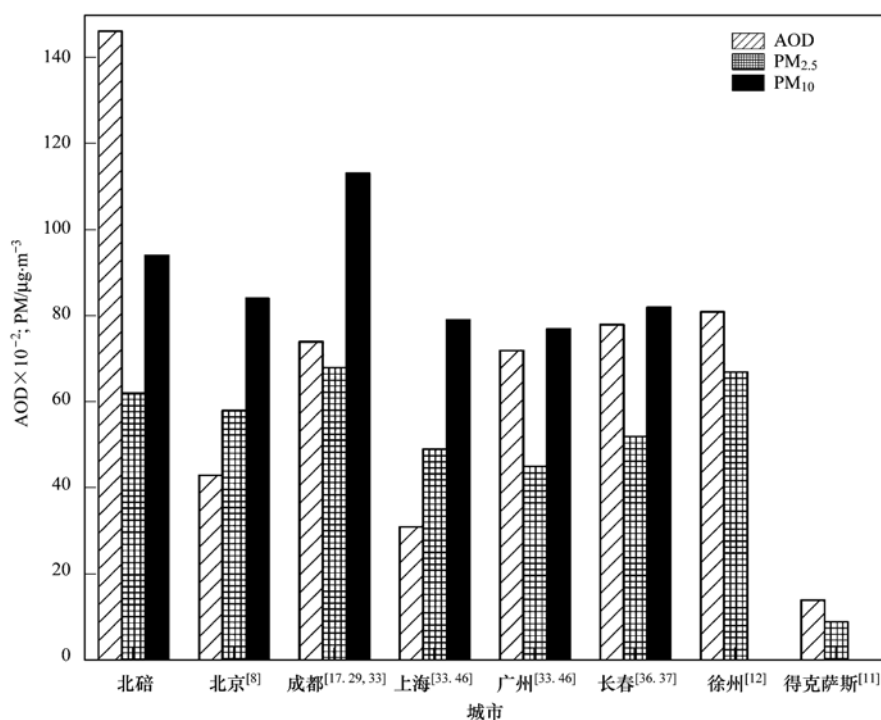


图2 不同城市之间 AOD 及 PM 浓度年均值对比

Fig. 2 Comparison of annual average AOD and PM between different cities

平处于相比较城市的中等位置. 就 PM_{10} 浓度水平, 重庆地区低于成都近 $20 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 但重庆仍高于国内其他 6 个城市的浓度值. 主要原因是重庆出现静风或微风的次数较多, 不利于污染物的扩散和稀释, 也为污染物的聚集提供了条件; 其次, 重庆还受地形的影响, 处于长江流域的盆地, 地势相当闭塞. 从海洋吹来的风, 受山地、丘陵阻挡, 当风到达盆地时, 水蒸气不多, 就不能成云致雨, 温度也越来越高, 热量不容易散发, 加剧了气溶胶的运动, 使得重庆在夏季大气污染物并不严重但也会出现 AOD 的高值情况. 秋冬季来自嘉陵江和长江的水汽导致空气相当潮湿. 白天, 地面温度比较高, 蒸发作用不断加强, 从而使空气容纳了许多的水汽; 夜晚, 地面的辐射冷却十分明显, 盆地边缘山地的冷空气会沿着山坡下沉, 从而使近地面的空气降温十分剧烈, 最终导致空气中能够容纳水汽的能力不断降低, 而多余的水汽就会凝结形成雾, 导致秋冬季出现大量雾天^[39]. 在高空气流控制下, 近地面容易发生辐射降温, 如果存在固态气溶胶粒子, 尤其是吸湿性的, 它们还能加快辐射冷却作用. 低层气流在输送水汽的同时输送热量, 辐射与平流的共同作用, 使大气层结更加稳定, 进而形成逆温层. 逆温层形成之后, 覆盖在盆地上空, 冬季气温又低, 近地层湍流较弱, 使得污染物不断积聚. 再加上供暖生物质燃煤的燃烧, 使 AOD 和 PM 成分增多, 导致了重庆大气污染物水平较高.

3.2 AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 之间的相关性分析

为讨论 AOD 与 PM 之间的相关性, 本研究对相关数据按照全年和不同季节分别进行了分析. 发现 2014 年全年 PM 的日均值较为完整, 但由于 AOD 的观测条件受到很多气象因素的限制, 出现有些月份数据较少, 因此, 分析 2014 年冬季的数据选择了 2013 年冬季的数据进行代替分析, 其 PM 的浓度也替换成对应月份的浓度, 春夏秋三季 AOD 与 PM 数据仍为 2014 年, 其相关性分析结果见图 3. 从中可知, AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性系数要大于 AOD 与 PM_{10} , 主要因为气溶胶光学厚度是消光系数的积分, 气溶胶的消光主要来源于细粒子的消光, 粗粒子的消光贡献相对较低, PM_{10} 与 $\text{PM}_{2.5}$ 相比, 粗颗粒所占的比例大, 因此对气溶胶的消光也相对降低^[8], 从而出现相关系数差异的结果. 全年 AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 呈正相关特性 ($P < 0.01$), 决定系数 R^2 达到 0.48. 不同季节下 AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 之间的决定系数也有差异, 冬季和秋季相关性最好, R^2 达到 0.89 和 0.65. 春季 R^2 也达到 0.47, 但夏季 AOD 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性较差.

针对相关性系数的差异, 本文推测重庆地区气溶胶不仅与气溶胶粒子的浓度有关, 还与气溶胶粒子的理化性质有关^[40]. AOD 与 PM 颗粒物以及相对湿度的变化见图 4. 从中可知, AOD 与颗粒物浓度随月份变化的关系相对复杂. 秋冬季以来 AOD 与 PM 浓度显示出了相同的趋势, 出现 AOD 的年最大值,

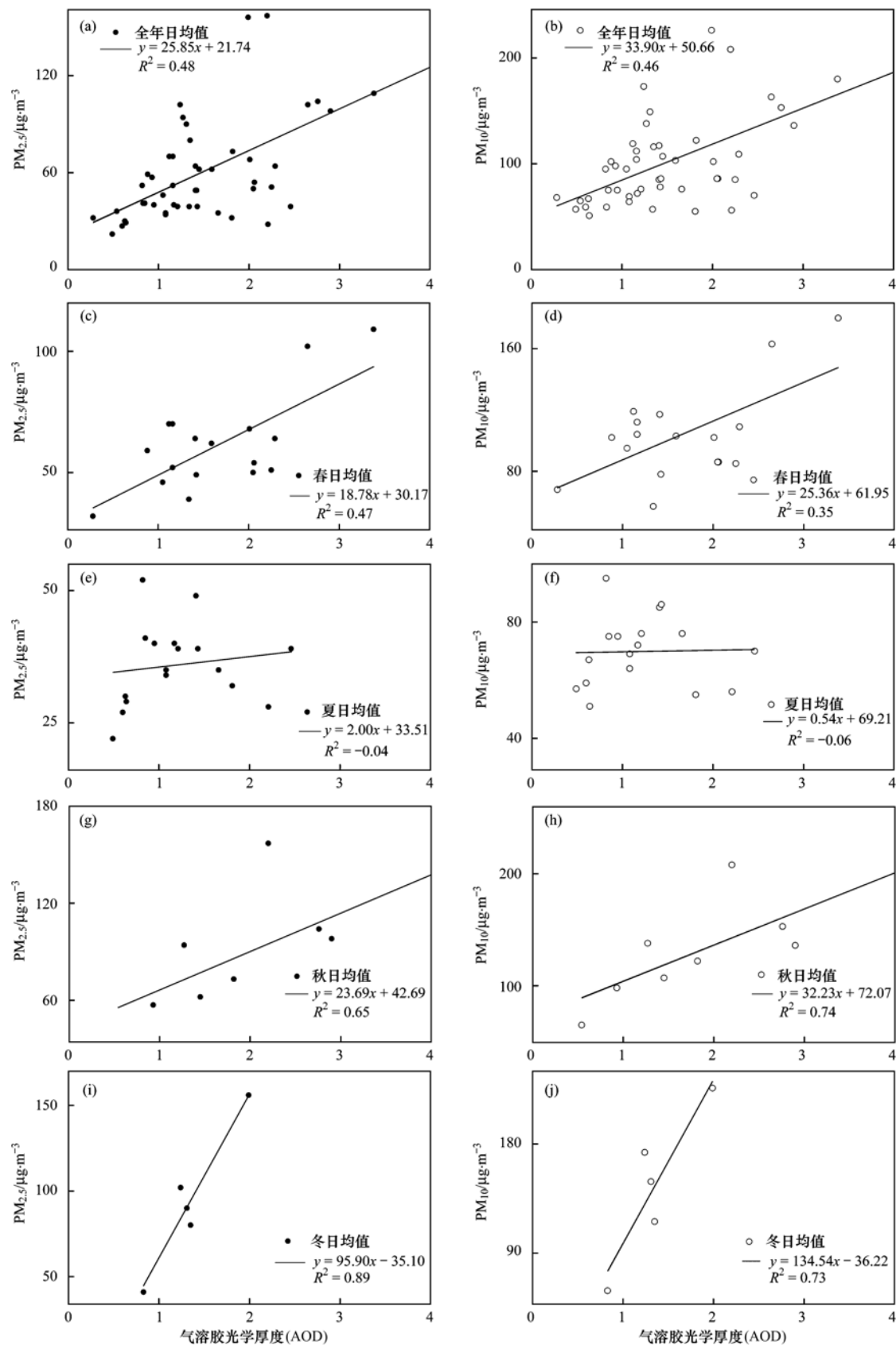


图3 2014年AOD与PM_{2.5}、PM₁₀全年和季节日均值相关性

Fig. 3 Correlation between annual and seasonal average AOD and PM_{2.5} or PM₁₀ in 2014

由2.2节中得知PM颗粒物的超标也集中在秋冬季,两者相关性好离不开秋冬季的高湿度、逆温、多雾的影响;有可能AOD的消光主要来源于PM颗

颗粒物浓度.然而对其余月份来说,相关性并不理想.这种现象可能反映了气溶胶粒子的吸湿性增长,特别是在夏季,8月与7月相比,伴随着相对湿度的上

升,气溶胶运动加剧,加快气溶胶的气粒转化,从而积聚效应明显.此外,夏季太阳辐射强,光化学反应活跃,导致二次气溶胶的形成^[41],使得 AOD 值升高,而 PM 反映了干气溶胶粒子的浓度,伴随着夏季强降雨的冲刷,以及风的扩散作用,PM 的浓度较低.这可能是导致夏季的 AOD 和 PM 颗粒物浓度相关性较差的原因^[42,43].这与于彩霞等^[44]的研究结果相符合.

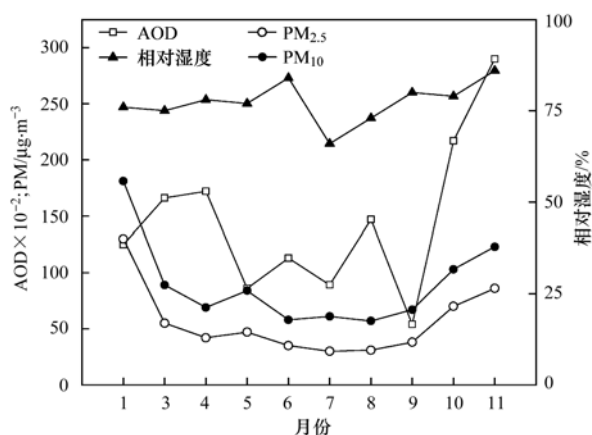


图 4 2014 年北碚 AOD 和 PM 颗粒物及相对湿度月变化

Fig. 4 Monthly variation of AOD, PM, and relative humidity in Beibei in 2014

在北碚地区全年任一时间上若想 AOD 与 PM 均有较好的相关性,在以下方面上还存在困难:一是 AOD 的数据误差.来源于太阳光度计中光电部件老化,滤光片磨损等;人工观测也很难保证每一次测量操作的准确性;AOD 对天气状态影响较大的一些月份都存在不同程度的缺失,秋冬季常出现雾天导致观测次数、天数明显少于春夏季,而且秋冬季大气颗粒物污染严重,往往不能达到使用太阳光度计的条件,这是影响秋冬季观测的主要因素^[45].二是两者数据的采集时间影响.在能观测的条件下利用当天早上 10:00 到下午 14:00 的均值来代替该天 AOD 值,而 PM_{2.5}和 PM₁₀的数据来源则为地面观测日均值,很难在时空上完全配合;另外,出现高湿天气会使 AOD 的值吸湿变大^[46],但 PM 的数据指的是干质量浓度,高湿天气对 PM_{2.5}浓度的值影响并不大,但也可能会对相关性分析产生影响.有关 PM 和 AOD 的研究也发现,PM 颗粒物并不能完全代表大气气溶胶,AOD 的消光并不一定都来源于 PM 颗粒物.此外,一些季节性变化的环境因素如温度、边界层高度等气象条件的作用也会对 AOD 和 PM 浓度产生一定的影响.部分研究者对 PM_{2.5}和 PM₁₀进行湿度订正,对 AOD 进行高度订正之后,两者之间的相关性有明显提高.因此,在北碚地区全年范围内若用观测的 AOD 值来准确预测 PM 的浓度还有待进

一步地探究^[47].

3.3 AOD 与 AQI 之间的相关性分析

图 5 表示 AOD 与 AQI 两者之间的相关性结果.从中可见,两者呈正相关特性($P < 0.05$),两变量间线性回归方程为: $y = 76.11x + 15.77$, 其中 R^2 为 0.15,比 AOD 与 PM_{2.5}和 PM₁₀单一相关性的 R^2 均低.一方面,是因为 AQI 的分级计算参考的标准是采用《环境空气质量标准》(GB 3095-2012),参与的评价物包括 SO₂、NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、O₃ 和 CO 等,但是在 AQI 中的评价物能够对 AOD 产生消光贡献主要是 PM_{2.5},因此导致相关性结果减弱.另一方面, AOD 反映了气溶胶从地面至大气层顶垂直方向上消光系数的积分,而 AQI 只是地面测量值,变量之间具有不同的物理意义.它们之间的相关性受气溶胶垂直分布以及空气中相对湿度的影响,导致 AOD 与 AQI 的相关性结果变差.

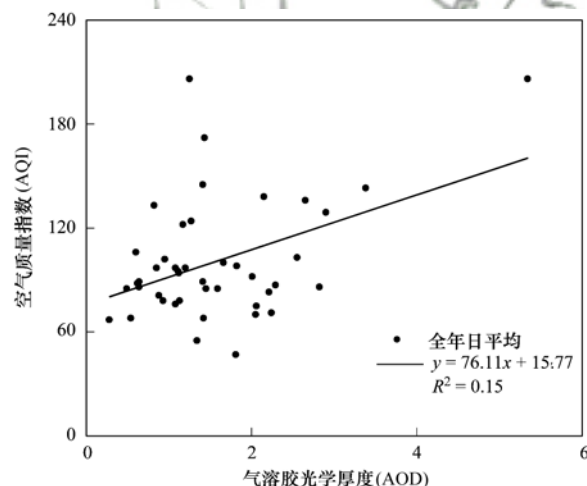


图 5 AOD 与 AQI 的全年日均值相关性

Fig. 5 Correlation between annual average AOD and AQI

3.4 AOD 与大气要素之间的关系

在进行 AOD 与 PM 以及 AQI 之间相关性的讨论时,发现某些大气要素也会对相关性的产生影响,大气要素主要包括气温、相对湿度、风级和 24 h 前降雨量等,因为重庆全年风力级别均较小,因此本文未研究 AOD 与风速的影响.表 5 是 2014 年观测期间具有代表性的一些天 AOD 值及当天相关大气要素的情况.从中可见,8 月 4 日和 8 月 5 日两天的各种气象要素基本上具有一致性,其 AOD 值相差不大;但在 3 月 16 日和 8 月 30 日除温度外其他天气要素差别不大,8 月 30 日温度高于 3 月 16 日近 10℃,其观测的 AOD 值也较高.4 月 17 日和 7 月 9 日相比,前者的相对湿度要高于后者,观测得到的 AOD 值也比 9 日高.这说明 AOD 的值会受到空气中温度和湿度升高的影响,加剧气溶胶的运动进而吸湿变高;另外,与 4 月 17 日相比,在 8 月 30 日观测前 24 h 出

现了降雨的情况,其观测得到的 AOD 值变高,降雨会使大气中含有许多水汽,导致 AOD 吸收水汽变高;10 月 23 日和 10 月 24 日得到的观测值处在较高的水平,与其它观测日相比,重庆入秋后就容易出现雾天,大气中水汽较多,加之观测时天空并不是绝对的晴朗无云,进而观测次数也较少,导致出现异常

高值的情况. 综上说明,温度、湿度、水汽的增加的确会使 AOD 吸湿吸水而出现值变大的情况,观测天气的晴朗程度也会导致 AOD 值的变化,但观测得到的 AOD 值是受各种天气要素综合作用的结果,因此在观测期间对各种天气要素的收集有利于合理地对比 AOD 数据进行分析.

表 5 部分观测日 AOD 值以及相关气象要素

Table 5 AOD and meteorological elements in corresponding observation dates					
观测日期 (年-月-日)	AOD 值	最高温度 /℃	最低温度 /℃	相对湿度 /%	24 h 前降雨量 /mm
2014-03-16	0.88	24	10	71	20
2014-04-17	1.82	30	21	72	0
2014-07-09	1.08	32	24	60	0
2014-08-04	1.20	38	27	57	0
2014-08-05	1.17	40	26	56	0
2014-08-30	2.21	34	24	71	24
2014-10-23	2.82	25	16	77	0
2014-10-24	5.34	26	16	78	8

4 结论

(1)北碚上空 AOD 随着波长的加大而减小,年均值为 1.46 ± 0.69 ,呈现出较高的 AOD 值,说明了北碚地区仍存在大气污染的状况. AOD 值随季节变化显著,表现为秋、冬季 > 春季 > 夏季.

(2)北碚地区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 年均浓度分别为 $(62 \pm 40) \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $(94 \pm 51) \mu g \cdot m^{-3}$. 全年日超标天数主要集中在秋冬两季. 与历年颗粒物浓度相比,有着下降的趋势,说明了北碚地区空气质量有着明显改善.

(3)通过 AOD 与 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 进行相关分析发现,北碚地区春、秋、冬季 AOD 与 PM 浓度相关性结果较好,利用 AOD 来预测 PM 浓度较为准确,有可行性;但夏季相关性结果较差,利用该季 AOD 来预测 PM 浓度不准确.

参考文献:

[1] Kaiser D P, Qian Y. Decreasing trends in sunshine duration over China for 1954-1998: indication of increased haze pollution? [J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(21): 2024.

[2] Twomey S A. The influence of pollution on the shortwave albedo of clouds[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1977, 34(7): 1149-1152.

[3] Lohmann U, Lesins G. Stronger constraints on the anthropogenic indirect aerosol effect[J]. Science, 2002, 298(5595): 1012-1015.

[4] Wang K C, Dickinson R E, Liang S L. Clear sky visibility has decreased over land globally from 1973 to 2007[J]. Science, 2009, 323(5920): 1468-1470.

[5] Kocifaj M, Horvath H, Jovanović O, et al. Optical properties of urban aerosols in the region Bratislava-Vienna I. Methods and tests[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(11): 1922-1934.

[6] Espinosa A J F, Rodríguez M T, De La Rosa F J B, et al. A

chemical speciation of trace metals for fine urban particles[J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(5): 773-780.

[7] Pillai P S, Babu S S, Moorthy K K, et al. A study of PM, PM_{10} and $PM_{2.5}$ concentration at a tropical coastal station [J]. Atmospheric Research, 2002, 61(2): 149-167.

[8] 林海峰, 辛金元, 张文煜, 等. 北京市近地层颗粒物浓度与气溶胶光学厚度相关性分析研究[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 826-834.

Lin H F, Xin J Y, Zhang W Y, et al. Comparison of atmospheric particulate matter and aerosol optical depth in Beijing City[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 826-834.

[9] 张宸赫, 赵天良, 王富, 等. 2003~2014 年东北三省气溶胶光学厚度变化分析[J]. 环境科学, 2017, 38(2): 476-484.

Zhang C H, Zhao T L, Wang F, et al. Variations in aerosol optical depth over three northeastern provinces of China, in 2003-2014[J]. Environmental Science, 2017, 38(2): 476-484.

[10] Qi Y L, Ge J M, Huang J P. Spatial and temporal distribution of MODIS and MISR aerosol optical depth over northern China and comparison with AERONET [J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(20): 2497-2506.

[11] Zhang X Y, Chu Y Y, Wang Y X, et al. Predicting daily $PM_{2.5}$ concentrations in Texas using high-resolution satellite aerosol optical depth[J]. Science of the Total Environment, 2018, 631-632: 904-911.

[12] 沈扬, 张连蓬, 方星, 等. 徐州市气溶胶光学厚度与 $PM_{2.5}$ 相关性年周期特征[J]. 地球与环境, 2019, 47(1): 34-42.

Shen Y, Zhang L P, Fang X, et al. Correlation analysis and annual cycle characteristics of aerosol optical depth and $PM_{2.5}$ concentrations in the Xuzhou city[J]. Earth and Environment, 2019, 47(1): 34-42.

[13] 郑卓云, 陈良富, 郑君瑜, 等. 高分辨率气溶胶光学厚度在珠三角及香港地区区域颗粒物监测中的应用研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1154-1161.

Zheng Z Y, Chen L F, Zheng J Y, et al. Application of retrieved high-resolution AOD in regional PM monitoring in the Pearl River Delta and Hong Kong region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(6): 1154-1161.

[14] 陈辉, 厉青, 王中挺, 等. 利用 MODIS 资料监测京津冀地区近地面 $PM_{2.5}$ 方法研究[J]. 气象与环境学报, 2014, 30(5):

- 27-37.
- Chen H, Li Q, Wang Z T, *et al.* Study on monitoring surface $PM_{2.5}$ concentration in Jing-Jin-Ji regions using MODIS data[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2014, **30**(5): 27-37.
- [15] 谢志英, 刘浩, 唐新明. 北京市 MODIS 气溶胶光学厚度与 PM_{10} 质量浓度的相关性分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(10): 3292-3299.
- Xie Z Y, Liu H, Tang X M. 2015. Correlation analysis between MODIS aerosol optical depth and PM_{10} concentration over Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(10): 3292-3299.
- [16] Chew B N, Campbell J R, Hyer E J, *et al.* Relationship between aerosol optical depth and particulate matter over Singapore: effects of aerosol vertical distributions [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, **16**(11): 2818-2830.
- [17] 张天宇, 王勇, 程炳岩. 1961—2013 年四川盆地气溶胶光学厚度的长期变化及与气温的联系[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(3): 793-802.
- Zhang T Y, Wang Y, Cheng B Y. Long-term variation of aerosol optical depth over Sichuan Basin of China during 1961—2013 and its relationship with temperature [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(3): 793-802.
- [18] 任丽红, 周志恩, 赵雪艳, 等. 重庆主城区大气 PM_{10} 及 $PM_{2.5}$ 来源解析[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(12): 1387-1394.
- Ren L H, Zhou Z E, Zhao X Y, *et al.* Source apportionment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in urban areas of Chongqing[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(12): 1387-1394.
- [19] Xin J Y, Wang L L, Wang Y S, *et al.* Trends in aerosol optical properties over the Bohai Rim in northeast China from 2004 to 2010 [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(35): 6317-6325.
- [20] 李兆麟. 基于 6S 模型的自定义气溶胶类型对北京地区气溶胶光学厚度反演研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019. 22-26.
- Li Z L. Custom aerosol type based on 6S model in Beijing area inversion of aerosol optical depth [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. 22-26.
- [21] 张龙, 李保生, 李凯涛, 等. MICROTOPS II 型太阳光度计对比定标分析[J]. *遥感信息*, 2013, **28**(5): 32-36.
- Zhang L, Li B S, Li K T, *et al.* Analysis of comparison-calibration methods based on MICROTOPS II 5-channels sun photometer[J]. *Remote Sensing Information*, 2013, **28**(5): 32-36.
- [22] 王中挺, 李莘莘, 陈良富, 等. 基于 MATLAB 的大气污染原型系统开发[J]. *微计算机信息*, 2009, **25**(4-3): 17-18, 38.
- Wang Z T, Li S S, Chen L F, *et al.* Atmosphere pollution RS monitoring prototype system using MATLAB[J]. *Microcomputer Information*, 2009, **25**(4-3): 17-18, 38.
- [23] 毕雪岩, 吴兑, 谭浩波, 等. MICROTOPS II 型太阳光度计的使用、计算及定标[J]. *气象科技*, 2007, **35**(4): 583-588.
- Bi X Y, Wu Q, Tan H B, *et al.* Application, calculation and calibration of MICROTOPS II sunphotometer[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2007, **35**(4): 583-588.
- [24] 蒋秀兰, 刘玉光, 刘亚豪, 等. 手持式五波段太阳光度计[J]. *气象水文海洋仪器*, 2007, (3): 54-58.
- Jiang X L, Liu Y G, Liu Y H, *et al.* Five channel hand-held sunphotometer[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2007, (3): 54-58.
- [25] 刘芮伶, 李礼, 余家燕, 等. 重庆市城区大气气溶胶光学厚度的在线测量及特征研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(4): 819-825.
- Liu R L, Li L, Yu J Y, *et al.* On-line measurements and characteristic analysis of aerosol optical depth in the atmosphere of urban Chongqing[J]. *Acta Scientiae circumstantiae*, 2014, **34**(4): 819-825.
- [26] 张玉平, 杨世植, 王先华, 等. 合肥地区气溶胶光学厚度的时间变化特征[J]. *中国科学技术大学学报*, 2010, **40**(1): 15-19, 30.
- Zhang Y P, Yang S Z, Wang X H, *et al.* The temporal characteristics of atmospheric aerosol optical depth over Hefei [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2010, **40**(1): 15-19, 30.
- [27] 李明明, 王雁, 闫世明, 等. 基于太阳光度计大气气溶胶光学厚度变化特征研究[A]. 见: 第 35 届中国气象学会年会 S12 大气成分与天气、气候变化与环境影响暨环境气象预报及影响评估[C]. 合肥: 中国气象学会, 2018. 7.
- Li M M, Wang Y, Yan S M, *et al.* Variation characteristics of atmospheric aerosol optical depth in Taiyuan[A]. In: *Chinese Meteorological Society. 35th Annual Meeting of Chinese Meteorological Society S12 Atmospheric Composition and Weather, Climate Change and Environmental Impact and Environmental Meteorological Forecast and Impact Assessment* [C]. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2018. 7.
- [28] 朱琳, 徐青山, 张广, 等. 气溶胶光学厚度的日变化及 Angstrom 指数计算方法[A]. 见: 第 34 届中国气象学会年会 S9 大气成分与天气、气候变化及环境影响论文集[C]. 郑州: 中国气象学会, 2017. 3.
- Zhu L, Xu Q S, Zhang G, *et al.* Diurnal variation of aerosol optical depth and calculation method of Angstrom index[A]. In: *Chinese Meteorological Society. 34th Annual Meeting of Chinese Meteorological Society S9 Proceedings of Atmospheric Composition and Weather, Climate Change and Environmental Impact* [C]. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2017. 3.
- [29] 韩可欣. 基于 MODIS 数据的西南地区气溶胶光学厚度时空分布及影响因素研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2017. 18-19.
- Han K X. Spatial and temporal distribution and influencing factors of aerosol optical depth based on MODIS data in southwest China[D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2017. 18-19.
- [30] 徐青山, 胡欢陵, 魏合理. 地基消光测量确定大气气溶胶模型[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(9): 1451-1456.
- Xu Q S, Hu H L, Wei H L. Determination of the atmospheric aerosol model by ground-based spectral extinction measurements [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(9): 1451-1456.
- [31] 吕睿, 于兴娜, 沈丽, 等. 北京春季大气气溶胶光学特性研究[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(6): 1660-1668.
- Lü R, Yu X N, Shen L, *et al.* Aerosol optical properties in spring over urban Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(6): 1660-1668.
- [32] 姚杰. 临安地区大气气溶胶光学厚度特征分析[A]. 见: 第 35 届中国气象学会年会 S12 大气成分与天气、气候变化与环境影响暨环境气象预报及影响评估[C]. 合肥: 中国气象学会, 2018. 8.
- Yao J. Analysis of atmospheric aerosol optical thickness characteristics in Lin'an area [A]. In: *Chinese Meteorological Society. 35th Annual Meeting of Chinese Meteorological Society S12 Atmospheric Composition and Weather, Climate Change and Environmental Impact and Environmental Meteorological Forecast and Impact Assessment* [C]. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2018. 8.
- [33] 彭小乐, 郝庆菊, 温天雪, 等. 重庆市北碚城区气溶胶中有

- 机碳和元素碳的污染特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(8): 3502-3510.
- Peng X L, Hao Q J, Wen T X, *et al.* Pollution characteristics of organic carbon and elemental carbon in atmospheric aerosols in Beibei district, Chongqing[J]. Environmental Science, 2018, **39**(8): 3502-3510.
- [34] 吉莉, 李强, 司云燕, 等. 重庆北碚大气污染物的变化特征及其与气象要素的相关性[J]. 中国农学通报, 2017, **33**(18): 88-93.
- Ji L, Li Q, Si Y Y, *et al.* Atmospheric pollutants in Beibei: variation characteristics and correlation with meteorological elements[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, **33**(18): 88-93.
- [35] Allen W H. Dictionary of technical terms for aerospace use[R]. Washington, DC: NASA, 1965.
- [36] 王沐威. 长春市气溶胶光学特性的反演与分析[D]. 长春: 东北师范大学, 2011. 13-19.
- Wang M W. The inversion and analysis of atmospheric aerosol optical depth (AOD) of Changchun[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2011. 13-19.
- [37] 武发新, 药明, 冯喜媛. 长春市气溶胶质量浓度变化特征浅析[J]. 吉林气象, 2013, (2): 6-7, 24.
- Wu F X, Yao M, Feng X Y. Analysis of the variation characteristics of aerosol mass concentration in Changchun City [J]. Jilin Meteorology, 2013(2): 6-7, 24.
- [38] 刘鲁宁, 申雨璇, 辛金元, 等. 秦皇岛大气污染物浓度变化特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2089-2097.
- Liu L N, Shen Y X, Xin J Y, *et al.* Variation of atmospheric pollutants in Qinhuangdao City [J]. Environmental Science, 2013, **34**(6): 2089-2097.
- [39] 刘莹, 林爱文, 覃文敏, 等. 1990~2017年中国地区气溶胶光学厚度的时空分布及其主要影响类型[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2572-2581.
- Liu Y, Lin A W, Qin W M, *et al.* Spatial-temporal distribution of aerosol optical depth and its main influence types in China during 1990-2017[J]. Environmental Science, 2019, **40**(6): 2572-2581.
- [40] 巫俊威, 赵胡笏, 杨东, 等. 基于地基观测的成都彭州气溶胶光学特性研究[J]. 气象与环境学报, 2019, **35**(2): 32-39.
- Wu J W, Zhao H J, Yang D, *et al.* Ground-based observation of aerosol optical properties in Pengzhou, Chengdu[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019, **35**(2): 32-39.
- [41] Xia X G, Li Z Q, Holben B, *et al.* Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze Delta region of China[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, **112**(D22): D22S12, doi: 10.1029/2007JD008859.
- [42] 李强, 吉莉, 马君, 等. 重庆北碚地区大气污染物与气象要素的相关性分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, **41**(8): 64-72.
- Li Q, Ji L, Ma J, *et al.* Correlation analysis of atmospheric pollutants and meteorological factors in Beibei area of Chongqing [J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2016, **41**(8): 64-72.
- [43] 赵胡笏, 马雁军, 王扬锋, 等. 沈阳大气气溶胶光学特性及其影响因子[J]. 气象与环境学报, 2015, **31**(3): 43-49.
- Zhao H J, Ma Y J, Wang Y F, *et al.* Aerosol optical characteristics and its influencing factor over Shenyang [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, **31**(3): 43-49.
- [44] 于彩霞, 邓学良, 石春娥, 等. 降水和风对大气 PM_{2.5}、PM₁₀ 的清除作用分析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(12): 4620-4629.
- Yu C X, Deng X L, Shi C E, *et al.* The scavenging effect of precipitation and wind on PM_{2.5} and PM₁₀ [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(12): 4620-4629.
- [45] 杨世琦, 刘灿, 杨茜. 重庆市主城区气溶胶光学厚度分布初探[A]. 见: 第八届全国优秀青年气象科技工作者学术研讨会论文集汇编[C]. 宜兴: 中国气象学会, 2014. 6.
- Yang S Q, Liu C, Yang X. A preliminary study on aerosol optical thickness distribution in the main urban area of Chongqing [A]. In: Chinese Meteorological Society. The 8th National Excellent Young Meteorological Science and Technology Workers Symposium Compilation [C]. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2014. 6.
- [46] Yuan Q Q, Yuan Q Q, Yue L W, *et al.* The relationships between PM_{2.5} and aerosol optical depth (AOD) in mainland China: about and behind the spatio-temporal variations [J]. Environmental Pollution, 2019, **248**: 526-535.
- [47] Song J J, Xia X G, Zhang X L, *et al.* Weekday AOD smaller than weekend AOD in eastern China on the basis of the MODIS AOD product[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, **132**(3-4): 1019-1027.

CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	JI Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvio-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)