

北京城区PM_{2.5}各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献

PM_{2.5} 化学组成

SO₄²⁻ NH₄⁺ NO₃⁻
元素碳 Cl⁻ 有机物 地壳元素

源解析

二次
颗粒物

机动车

扬尘

工业

燃煤

生物质
燃烧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期
Vol.43 No.5

目次

北京城区 PM _{2.5} 各组分污染特征及来源分析	安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)
基于时空混合效应模型的京津冀 PM _{2.5} 浓度变化模拟	范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)
2000~2018 年京津冀城市群 PM _{2.5} 时空演变及其与城市扩张的关联	赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)
海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284)
硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟	张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)
省会城市不同功能区大气 PM _{2.5} 化学组分季节变化及来源分析	孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)
太原市冬季不同污染程度下 PM _{2.5} 的化学组成、消光特征及氧化潜势	任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)
郑州市冬季大气 PM _{2.5} 金属元素来源及健康风险评价	姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)
淄博市冬季 PM _{2.5} 载带金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析	白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)
承德市 PM _{2.5} 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价	贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)
珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移	付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)
华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源	张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)
基于模式过程分析技术天津地区 PM _{2.5} 污染气象成因分析	郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)
基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制	陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)
基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征	菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)
基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测	陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)
基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进	蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)
基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法	石耀耀, 胡京南, 褚咏昕, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)
重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估	曾景海, 王灿 (2436)
黄河流域水污染风险分区	周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)
黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征	李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)
黄河沉积物重金属时空分布与污染评价	王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)
APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源	沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)
河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系	肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)
太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析	胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)
洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性	胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)
富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹	郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)
基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析	马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)
暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析	张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)
鄱阳湖流域水葫芦 (<i>Eichhornia crassipes</i>) 对水体微塑料的吸附截留效应	李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)
太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价	刘舒娇, 丁剑楠, 石波哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)
骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量	姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)
太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示	蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)
辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析	李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李青乾, 郑娜 (2586)
面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变	薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)
微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响	李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)
白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建	张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)
人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响	高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)
鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征	江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)
负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO ₂ -Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A	符远航, 刘安迪, 黄伟斌, 唐彬彬, 张进忠 (2640)
磁性 Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ 催化 H ₂ O ₂ 降解亚甲基蓝效能及机制	徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)
两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响	蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)
AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素	张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)
三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响	卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)
污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析	李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)
基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析	张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)
铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价	陈航, 王颖, 王澍 (2719)
典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响	周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)
两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤	孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)
基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测	王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)
紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征	徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)
不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价	邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)
木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氮挥发的影响	申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)
生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响	郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)
戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素	何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)
模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响	王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)
中国主要城市的城市化对局地增温的贡献	李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)
《环境科学》征订启事 (2293)	
《环境科学》征稿简则 (2426)	
信息 (2585, 2672, 2708)	

华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源

张玲¹, 孔少飞^{1*}, 郑煌¹, 胡尧¹, 曾昕¹, 程溢¹, 祁士华^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 华北平原南部地区是当前我国大气污染的严重区域之一。作为连接南北方大气污染传输的关键区域,其大气环境研究相对薄弱。在华北平原南部某农村点位利用 AE-33 型黑碳仪,对 2018 年 2~8 月的黑碳(BC)气溶胶进行连续监测,采用光度计模型解析了黑碳来源。观测期间 $\rho(\text{BC})$ 的平均值为 $(3.51 \pm 2.29) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 冬季、春季和夏季的 $\rho(\text{BC})$ 平均值分别为 (8.21 ± 3.26) 、 (3.49 ± 1.69) 和 $(2.37 \pm 0.71) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。BC 的季节性变化由气象因素和排放源的季节性变化共同导致。 $\rho(\text{BC})$ 日变化在 08:00 [$(4.66 \pm 3.24) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] 和 20:00 [$(4.25 \pm 6.73) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] 出现峰值,与居民做饭时间一致;在 14:00 [$(2.44 \pm 3.33) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] 出现谷值,与边界层高度较高有关。气溶胶波长吸收指数(AAE)在 1.08~1.66 之间,冬季、春季和夏季的 AAE 平均为 1.41 ± 0.08 、 1.28 ± 0.10 和 1.20 ± 0.06 ,表明该区域的 BC 来源以化石燃料燃烧为主。冬季生物质燃烧排放对 BC 的贡献率最高 [$(41 \pm 12)\%$],与冬季居民燃烧木柴、秸秆等生物质燃料有关。冬季和春季受北方气团(40%)传输影响明显,夏季受南方气团(34%)传输影响明显。柴火堆取暖和民用煤炉使用等局地人为活动,以及周边区域气流的输送会导致该点位冬季 BC 浓度较高。研究结果对于了解农村地区黑碳气溶胶的浓度、来源及光学性质具有重要意义,也可作为南方和北方大气污染物相互传输影响研究提供关键节点的数据支撑。

关键词: 黑碳气溶胶; 华北平原南部; 农村地区; 来源解析; 源区分布

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2363-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108052

Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain

ZHANG Ling¹, KONG Shao-fei^{1*}, ZHENG Huang¹, HU Yao¹, ZENG Xin¹, CHENG Yi¹, QI Shi-hua^{1,2}

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: The southern North China Plain is currently one of the regions with serious air pollution in China. Despite its role as a key connection region for air mass transportation between south and north China, there are still few studies on the atmospheric environment in this region. To obtain the levels and sources of black carbon (BC) aerosol, an online continuous measurement of BC by Aethalometer Model AE-33 was conducted at a rural site in the southern North China Plain. The results indicated that the average $\rho(\text{BC})$ was $(3.51 \pm 2.29) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ during the observation period, and the average $\rho(\text{BC})$ were (8.21 ± 3.26) , (3.49 ± 1.69) , and $(2.37 \pm 0.71) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ in winter, spring, and summer, respectively. The seasonal variation in $\rho(\text{BC})$ was caused by the variations in meteorological factors and emission sources. $\rho(\text{BC})$ peaked at 08:00 [$(4.66 \pm 3.24) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] and 20:00 [$(4.25 \pm 6.73) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] within one day, which was consistent with the cooking time of local residents. The valley value appeared at 14:00 [$(2.44 \pm 3.33) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$] during the day, which was mainly related to the high boundary layer height. The aerosol absorption exponent (AAE) was between 1.08-1.66, and the average values were 1.41 ± 0.08 , 1.28 ± 0.10 , and 1.20 ± 0.06 in winter, spring, and summer, respectively. This indicated that fossil fuel burning was a main source of BC in the rural area of this region. In winter, the contribution of biomass fuel burning emissions to BC was the highest [$(41 \pm 12)\%$], which was related to the frequent burning activities of wood, straw, and other biomass fuels by local residents. The influence of northern air masses (40%) was obvious in winter and spring, and the influence of southern air masses (34%) was obvious in summer. The higher BC concentrations in winter were related to local human activities such as firewood heating and civil coal furnaces, as well as the long-range transportation of air masses. This study is helpful for understanding the concentration, source, and optical properties of BC in rural areas of China and also provides a dataset of the key note sites for investigating the interaction of atmospheric pollutant transport between North and South China.

Key words: black carbon aerosol; the southern North China Plain; rural region; source identification; source region

黑碳(black carbon, BC)气溶胶来自于化石燃料和生物质燃料的不完全燃烧过程^[1]。BC 具有正辐射强迫,是仅次于 CO₂ 的对全球变暖产生重要影响的大气成分^[2,3]。BC 能改变大气的垂直结构和稳定性,从而影响全球大气和水文循环^[4]。BC 也能吸附有毒有害物质,对人体健康造成危害^[5~7]。准确识别 BC 来源,是识别和减缓其气候、环境和健康效应的基础。

BC 来源解析的主要研究方法有排放清单法^[8]、光度计模型法^[9]和碳同位素溯源法^[10]等。

Wang 等^[11]的研究使用排放清单法编制了全国 BC 排放清单,发现 BC 排放的最大来源是民用燃煤,并估算 2050 年全国 BC 排放量为 920~2 183 Gg; Zhang 等^[12]使用光度计模型法对 6 个特大城市环境空气中 BC 的浓度和来源开展研究,发现北方城市

收稿日期: 2021-08-06; 修订日期: 2021-10-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830965, 42077202); 湖北省科技厅技术创新专项重大项目(2017ACA089)

作者简介: 张玲(1997~),女,硕士研究生,主要研究方向为棕碳及黑碳气溶胶的浓度特征和来源解析, E-mail: 852076300@qq.com

* 通信作者, E-mail: kongshaofei@cug.edu.cn

的 BC 浓度水平高于南方城市,广州和武汉的液体燃料燃烧对 BC 的贡献较大; Ni 等^[13]利用碳同位素溯源法对北京和西安地区大气中 BC 的研究发现,雾、霾期间 BC 主要来源于化石燃料燃烧,其次为生物质燃烧。

BC 的源排放具有明显的时间^[11]和空间^[14]差异.当前我国的 BC 研究主要集中在城市地区,对其它类型点位的研究较少. Chen 等^[15]的研究发现,农村地区的年雾、霾日数高于城市地区,需要更多地关注农村地区大气环境污染问题. Wang 等^[16]的研究指出,农村地区存在着更加显著的“穹顶效应”,即 BC 通过和气溶胶-大气边界层的相互作用来抑制边界层发展,从而加重重霾污染。

华北平原地区空气污染问题严重^[17~19]. 该地区既是我国农村人口分布密集的地区^[20],也是 BC 排放密集的地区^[21]. 华北平原南部地区位于华北平原和两湖平原、长三角地区大气污染传输的关键位置^[22],对该区域大气环境的观测研究,对于理解污染物跨区域传输转化影响具有重要意义。

基于此,本研究选择华北平原南部的某农村地区,对该点位 BC 开展连续在线观测,探讨华北平原南部典型农村地区的 BC 浓度变化. 采用黑碳仪光度计模型和浓度权重轨迹分析法(CWT)^[23],分析该地区 BC 的来源和区域传输,以期为该区域大气污染防治和污染物跨区域传输转化影响研究提供基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 观测地点和时间

观测地点位于河南省平顶山市某农村居民住房屋顶(33.94°N, 113.10°E, 海拔高度 112 m, 图 1), 观测站点离地面约 5 m. 观测点西南方 9 km 处为宝丰县城, 东北方 11 km 处是郏县县城, 观测点附近修有多条高速公路(G36)、省道(S238、S231)和乡镇公路. 观测点附近有大面积农田, 周围无明显工业污染源。

本研究的观测时间为 2018 年 2 月 12 日~8 月 8 日, 其中 2 月为冬季, 3~5 月为春季, 6~8 月为夏季。

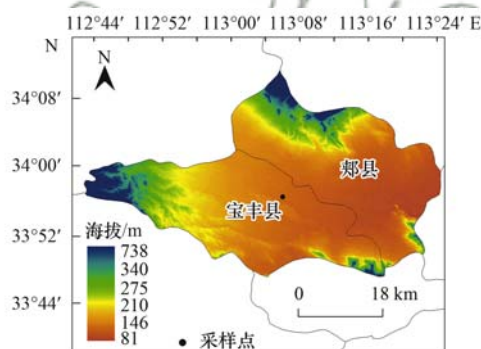


图 1 采样点位示意

Fig. 1 Location and surroundings of the sampling site

1.2 仪器和方法

1.2.1 观测仪器

本研究采用 AE-33 型黑碳仪测量大气中的 BC 浓度. 该仪器有 7 个不同波长的采集通道(370、470、520、590、660、880 和 950 nm). 本研究以 880 nm 处所测数据代表大气环境中实际 BC 浓度. 采样口连接 PM_{2.5} 切割头, 流量为 5 L·min⁻¹, 每 60 s 采样一次, 采样精度为 1 ng·m⁻³.

BC 浓度的测定基于光学测量法. 黑碳仪中的石英滤带连续采集空气中的气溶胶样品, 当光源照射滤纸时, 因 BC 吸收可见光而导致光的衰减, 如公式(1):

$$\text{ATN} = -100 \ln(I/I_0) \quad (1)$$

式中, ATN 为光衰减量, I 和 I_0 分别为通过样品滤带和空白滤带的光照强度. BC 的吸光系数 b_{abs} 如公式(2):

$$b_{\text{abs}} = \frac{S \times (\Delta \text{ATN}/100)}{F_1 \times \Delta t \times C} \quad (2)$$

式中, b_{abs} 为光衰减系数, S 为格点区域, F_1 为实际流量, t 为时间, C 为多重散射参数; AE-33 型黑碳仪采用双点位技术消除负载效应带来的误差, 提高测量的准确性. 当负载效应出现时, BC 与 ATN 呈线性关系, 如公式(3):

$$\text{BC} = \text{BC}_{\text{measured}} / (1 - k \times \text{ATN}) \quad (3)$$

式中, $\text{BC}_{\text{measured}}$ 为无负载效应下的理想 BC 值, k 为负载补偿参数; 两个不同负载程度的衰减点可计算出 k 值以及补偿到零载时的 BC 值, 如公式(4)和(5):

$$\text{BC1} = \text{BC} \times (1 - k \times \text{ATN1}) \quad (4)$$

$$\text{BC2} = \text{BC} \times (1 - k \times \text{ATN2}) \quad (5)$$

1.2.2 黑碳仪模型

黑碳仪模型被广泛用于识别化石燃料(fossil

fuel, ff) 和生物质燃料燃烧 (biomass burning, bb) 对 BC 的贡献率. 模型中假定大气环境中的 BC 来源于化石燃料燃烧排放的 BC (BC_{ff}) 和生物质燃烧排放的 BC (BC_{bb}), 某一波段下的 BC 吸收如公式 (6):

$$b_{abs}(BC) = b_{abs}(BC_{ff}) + b_{abs}(BC_{bb}) \tag{6}$$

式中, $b_{abs}(BC_{ff})$ 为化石燃料燃烧排放 BC 的吸收系数, $b_{abs}(BC_{bb})$ 为生物质燃烧排放 BC 的吸收系数. BC 可以吸收紫外到红外波段的光, BC 对光吸收依赖性的大小通常用波长吸收指数 AAE 来描述^[22,24]. 生物质燃烧产生的 BC 吸收系数对短波 (370 nm 或 470 nm) 的吸收作用远强于对长波 (880 nm 或 950 nm) 的吸收作用^[25,26]. b_{abs} 、波长、化石燃料燃烧和生物质燃烧对应的 AAE 关系, 以及生物质燃烧排放 BC 的贡献率, 可由公式 (7) ~ (11) 得到. 通常选择 AAE_{ff} 为 1.0^[22], AAE_{bb} 为 2.0^[27].

$$\frac{b_{abs}(370)_{ff}}{b_{abs}(880)_{ff}} = \left(\frac{370}{880}\right)^{-AAE_{ff}} \tag{7}$$

$$\frac{b_{abs}(370)_{bb}}{b_{abs}(880)_{bb}} = \left(\frac{370}{880}\right)^{-AAE_{bb}} \tag{8}$$

$$b_{abs}(370) = b_{abs}(370)_{ff} + b_{abs}(370)_{bb} \tag{9}$$

$$b_{abs}(880) = b_{abs}(880)_{ff} + b_{abs}(880)_{bb} \tag{10}$$

$$bb = \left[\frac{b_{abs}(880)_{bb}}{b_{abs}(880)} \right] \times 100\% \tag{11}$$

1.3 浓度权重轨迹分析法

本文通过浓度权重轨迹分析法 (CWT)^[23] 计算对观测点位 BC 浓度有贡献的地区. 本研究使用 Meteoinfo 软件中的 TrajStat 插件对采样点 250 m 高度处的气团轨迹进行后向 24 h 的轨迹模拟, 之后将气流轨迹覆盖区间划分为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的网格, 通过下式计算浓度权重:

$$c_{ij} = \left(\sum_{l=1}^m c_l \times \tau_{ijl} / \sum_{l=1}^m \tau_{ijl} \right) \times W_{ij} \tag{12}$$

式中, c_{ij} 为浓度权重, 该值越大, 则该气团来自 BC 潜在源区的可能性就越大. m 为第 ij 格内的轨迹条

数; c_l 为经过第 ij 格的 BC 浓度; τ_{ijl} 为该条轨迹在第 ij 格停留的时间; W_{ij} 为权重函数, 用来对 CWT 算法进行矫正.

2 结果与讨论

生物质燃烧排放气溶胶的 AAE 通常介于 1.57 ~ 2.27 之间^[24], 化石燃料燃烧排放气溶胶的 AAE 在 0.97 ~ 1.12 之间^[25]. 为计算不同 AAE 组合下黑碳仪光度计模型的不确定度, 本文采用蒙特卡洛模拟计算. 依据公式 (6) ~ (10) 构建方程, 其中 b_{abs1} 和 b_{abs6} 满足偏态分布; AAE_{bb} 和 AAE_{ff} 满足均匀分布, 其分布范围如上所述. 为充分评估不同计算参数组合下的结果, 本研究模拟次数选择 100 万次. 需要说明的是蒙特卡洛模拟会产生无意义的结果 (BC_{ff} 和 BC_{bb} 的计算结果均为负值等情况), 本研究剔除这些模拟结果, 最终得到 BC_{ff} 平均贡献率为 58.0% (95% 置信区间为 57.8% ~ 58.1%), BC_{bb} 平均贡献率为 42.0% (95% 置信区间为 41.9% ~ 42.1%).

2.1 BC 浓度与 AAE 的基本特征

本研究期间 $\rho(BC)$ 的平均值为 $(3.51 \pm 2.29) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 与城市地区相比 (表 1), 观测点位的 BC 浓度低于邯郸、北京和济南, 高于上海、南京和天津. 人口、车辆和工业集中的大城市具有较高浓度的 BC 排放^[27]. 华北平原北部地区的 BC 浓度高于南部地区. 与城市郊区相比, 观测点位的 BC 浓度低于石家庄郊区, 高于南京郊区、上海郊区和北京郊区, 呈现出 BC 浓度由北向南降低的规律. 与农村地区相比, 观测点位的 BC 浓度低于河北香河, 高于安徽寿县, 在从北到南的农村地区里 BC 浓度呈现出逐渐降低的趋势. 观测点位的 BC 浓度在典型城市地区和城市郊区处于中等水平, 表明该点位处于南北方传输的关键节点区域, 可以反映出南北方大气污染物浓度的空间分布差异.

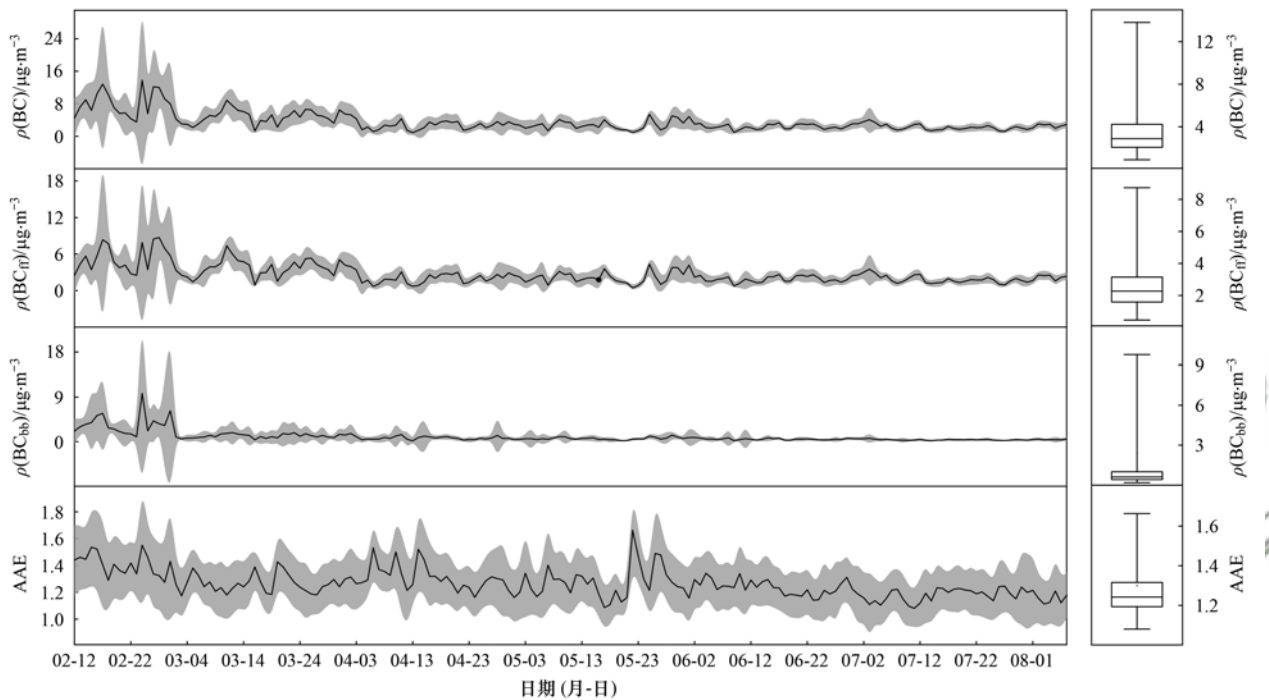
表 1 城市城区、郊区与农村地区 BC 浓度的对比

Table 1 Comparison of BC mass concentrations in urban, suburban and rural regions

地点	采样点环境	采样日期(年-月)	$\rho(BC)$ 平均值/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	文献
北京	城市	2015-09 ~ 2016-02	5.31 ± 6.26	[28]
天津	城市	2019-01 ~ 2019-12	3.42 ± 2.46	[29]
邯郸	城市	2013-03 ~ 2017-02	7.38	[30]
济南	城市	2018-09 ~ 2019-01	4.60 ± 2.50	[31]
上海	城市	2016-06 ~ 2017-06	1.17 ± 0.61	[32]
南京	城市	2018-04 ~ 2018-12	3.07 ± 1.42	[33]
南京	郊区	2016-01 ~ 2016-12	1.33 ± 1.20	[34]
石家庄	郊区	2018-09 ~ 2019-07	4.35 ± 3.59	[35]
上海	郊区	2016-06 ~ 2017-06	2.09 ± 0.97	[32]
北京	郊区	2018-08 ~ 2018-09	3.18 ± 2.38	[36]
香河	农村	2014-04 ~ 2015-05	4.90 ± 4.30	[37]
寿县	农村	2015-11 ~ 2016-11	2.84	[38]
河南	农村	2018-02 ~ 2018-08	3.51 ± 2.29	本研究

本研究期间 AAE 介于 1.08 ~ 1.66 之间(图 2), 平均值为 1.27 ± 0.17 . 观测期间 AAE 的平均值更加接近化石燃料燃烧排放气溶胶的 AAE, 表明化石燃料燃烧是该地区大气中 BC 的最主要来源. BC 源解析结果同样表明, 观测期间 BC_{ff} 的贡献率为 $(72 \pm 10)\%$, 是大气中 BC 最主要的来源. 生物质燃烧是 BC 的另一个重要来源. 研究区域未采取集中供暖, 居民取暖以燃烧玉米秸秆、木柴、树枝

和电暖气片等为主, 当地冬季 AAE 平均值最高 (1.41 ± 0.08), 春季次之 (1.28 ± 0.10), 夏季最低 (1.20 ± 0.06). 黑碳仪光度计模型的定量结果也表明, 冬季生物质燃烧排放 BC 的贡献率最高 [$(41 \pm 12)\%$], 夏季的贡献率最低 [$(20 \pm 4)\%$]. 该点位 BC 浓度和 AAE 的季节变化特征表明, 华北平原南部农村地区冬季生物质燃烧排放的污染物需要引起重视.



黑线为变化情况, 阴影为误差范围; 右侧为各数据的箱线图, 箱内黑线指示中位数

图 2 观测期间 BC、 BC_{ff} 、 BC_{bb} 浓度和 AAE 的时间序列

Fig. 2 Time series of the mass concentrations for BC, BC_{ff} , and BC_{bb} and the variation in AAE

2.2 气象和排放对 BC 浓度季节性变化的影响

该点位的 $\rho(BC)$ 表现为冬季最高 [$(8.21 \pm 3.26) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$], 春季次之 [$(3.49 \pm 1.69) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$], 夏季最低 [$(2.37 \pm 0.71) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]. 冬季 $\rho(BC_{ff})$ 最高, 为 $(5.40 \pm 8.29) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 春季为 $(2.69 \pm 2.31) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 夏季最低, 为 $(1.95 \pm 1.12) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 冬季 $\rho(BC_{bb})$ 最高, 为 $(3.43 \pm 6.58) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 春季为 $(0.92 \pm 2.28) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 夏季最低, 为 $(0.46 \pm 0.63) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

2.2.1 气象因素影响

BC 浓度的季节变化与气象条件密切相关. 较大的风速有利于 BC 的水平扩散^[39], 较高的边界层高度有利于 BC 的垂直扩散^[40], 较高温度下 BC 浓度相对较低^[41], 相对湿度较大时 BC 易于被清除^[42]. 相关性分析表明, BC 浓度与温度 ($r = -0.54$, $P < 0.01$)、边界层高度 ($r = -0.48$, $P < 0.01$) 和大气能见度 ($r = -0.33$, $P < 0.01$) 呈显著性负相关; BC

浓度与风速呈负相关 ($r = -0.10$), 但并不显著 ($P = 0.17$); BC 浓度与相对湿度也呈并不显著 ($P = 0.21$) 的负相关关系 ($r = -0.10$).

本研究期间, 温度、相对湿度、大气能见度和边界层高度的季节特征表现为夏季最高、冬季最低. 冬季气温低 [$(6.6 \pm 4.6)^\circ\text{C}$], 燃料消耗增多, 致使 BC 排放增多^[43]; 边界层高度较低且稳定 [$(415 \pm 419) \text{m}$], 有利于 BC 在地表附近积累^[44]; 相对湿度较低 [$(59.6 \pm 22.0)\%$], 不利于 BC 的清除^[45]. 同时大气能见度为 $(8430 \pm 3166) \text{m}$, 可见冬季较高的 BC 浓度与不利的气象因素有关. 夏季边界层高度 [$(667 \pm 656) \text{m}$] 较高, BC 更易于扩散^[46]; 降水频繁 (188 mm), 相对湿度较高 [$(71.4 \pm 21.2)\%$], 有利于 BC 的湿清除^[42]; 平均温度为 $(28.1 \pm 4.2)^\circ\text{C}$, 大气能见度为 $(8941 \pm 1933) \text{m}$, 使得夏季 BC 浓度较低.

由图 3 可知, 6 月 18 日出现了降水高值 (62 mm), 当天的 $\rho(BC)$ 为一周内最低 ($1.80 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),

降水前 3 d 的 $\rho(\text{BC})$ 为 $(1.99 \pm 0.28) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 降水后 3 d 的 $\rho(\text{BC})$ 为 $(2.87 \pm 0.38) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 8 月 5 日也出现了降水高峰值 (81 mm), 当天的 $\rho(\text{BC})$ 为一周内最低 ($1.99 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$), 降水前 3 d 的 $\rho(\text{BC})$ 为 $(2.96 \pm 0.14) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 降水后 3 d 的 $\rho(\text{BC})$ 为 $(2.71 \pm 0.45) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 可见降水 (相对湿度增大) 有利于当日 BC 的清除^[39,47]. 4 月 3 ~ 9 日, 风速处于较大值 $[(3.59 \pm 1.00) \text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$, 此时风向以北风为主, $\rho(\text{BC})$ 为 $(2.32 \pm 1.04) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 远低于前后一个月内的 $\rho(\text{BC})$ $[(3.70 \pm 1.69) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$; 5 月 26 日出现了风速最大值 ($5.33 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), 全天刮北风, 当日 $\rho(\text{BC})$ 为 $3.14 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 5 月 25 日风向仍以北风为主,

$\rho(\text{BC})$ 为 $5.39 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 5 月 27 日风向以西北风为主, $\rho(\text{BC})$ 为 $1.54 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 可见当地北风强劲, 较高的风速有利于 BC 的扩散和稀释^[45].

2.2.2 排放的影响

BC 浓度不仅受到温度、相对湿度、大气能见度和边界层高度等气象因素的影响, 还受到排放源的影响^[48]. 为识别排放对 BC 浓度的影响, 本文采用通风系数 VC (边界层高度 $\times$ 水平风速) 来表征大气污染物的扩散潜力^[49], 并利用 BC/VC 定性反映污染源的排放变化. 由表 2 可知, 冬季 BC/VC 远高于春季和夏季, BC_{ff}/VC 和 BC_{bb}/VC 在冬季的高值, 也表明冬季 BC 的排放量高于春季和夏季.

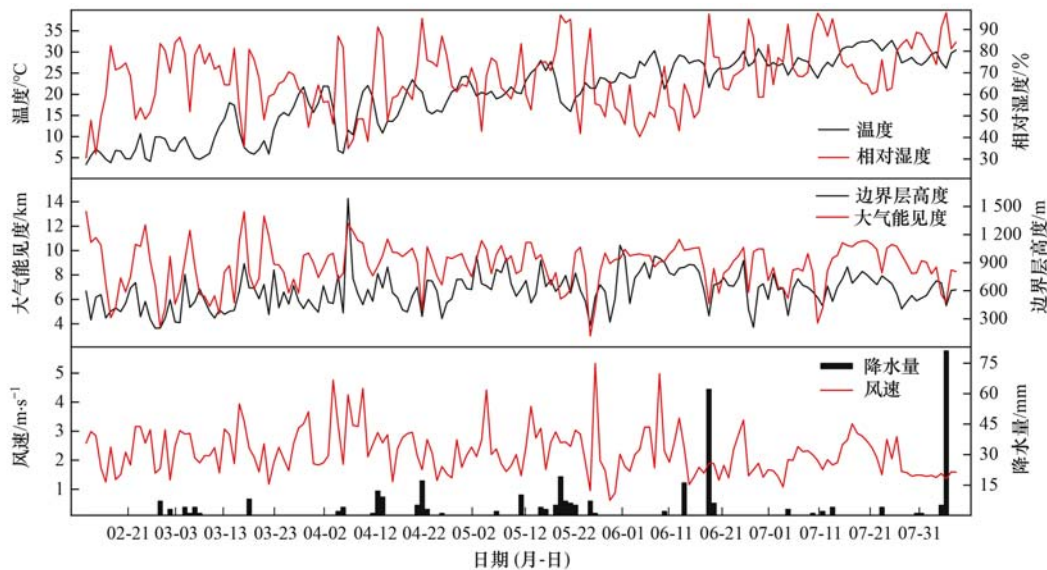


图 3 各气象要素的时间序列

Fig. 3 Time series of meteorological parameters during the observation period

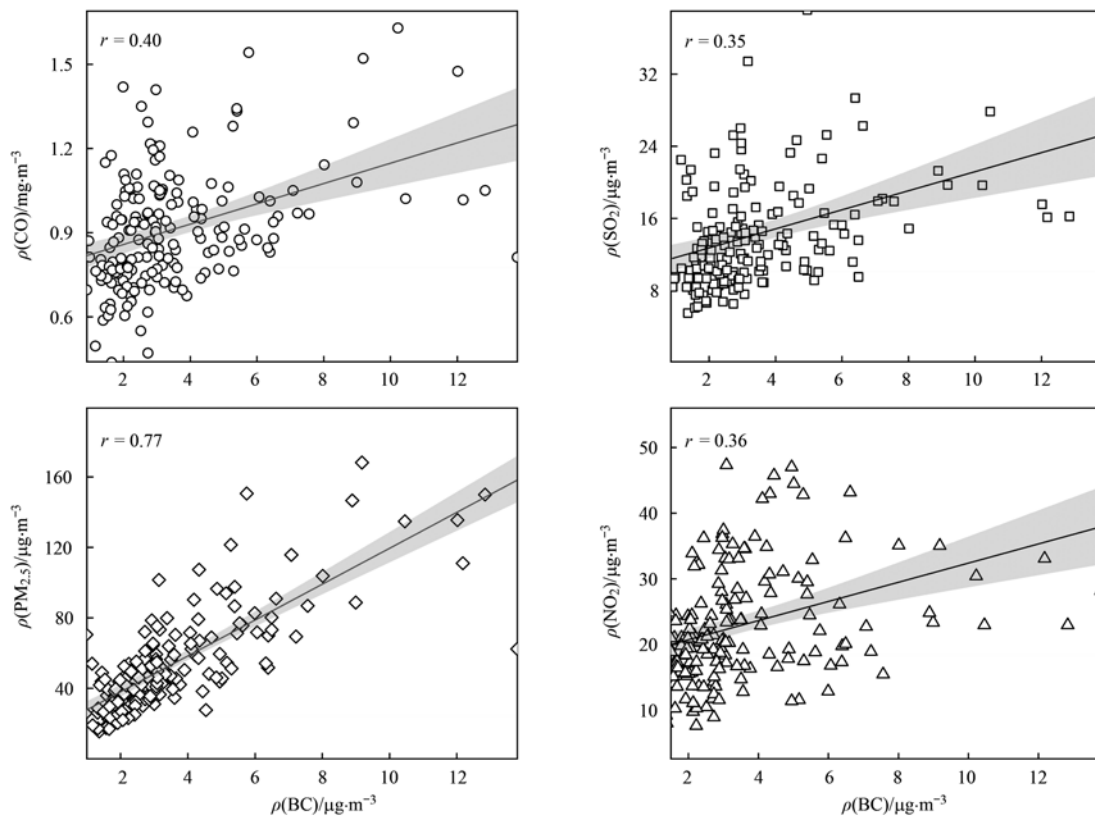
表 2 不同季节 BC/VC、BC_{ff}/VC、BC_{bb}/VC、BC/CO、BC/SO₂ 和 BC/NO₂ 的比较

项目	冬季	春季	夏季
BC/VC	12.46 ± 11.13	3.37 ± 2.91	1.98 ± 0.88
BC _{ff} /VC	8.26 ± 7.76	2.90 ± 3.54	1.75 ± 1.05
BC _{bb} /VC	4.90 ± 4.14	1.00 ± 1.41	0.41 ± 0.25
BC/CO	0.007 0 ± 0.009 4	0.002 3 ± 0.001 5	0.001 2 ± 0.000 7
BC/SO ₂	0.36 ± 0.41	0.15 ± 0.11	0.09 ± 0.05
BC/NO ₂	0.28 ± 0.30	0.09 ± 0.07	0.05 ± 0.02

相关性分析表明 (图 4), BC 和 PM_{2.5} 呈显著正相关 ($r=0.77, P<0.01$), BC 与 CO ($r=0.40, P<0.01$)、NO₂ ($r=0.36, P<0.01$) 和 SO₂ ($r=0.35, P<0.01$) 都为正相关. 与 BC 类似, 大气中的 CO 主要来源于燃烧过程. BC 和 CO 比值季节性变化可以反映 BC 来源的季节性变化. 该点位冬季 BC/CO 为 $0.007 0 \pm 0.009 4$, 远高于夏季 ($0.001 2 \pm 0.000 7$), 表明冬季由生物质燃烧排放 BC 的比例远高于夏季^[50]. SO₂ 和 NO₂ 主要来源于工业固定点源、机动

车尾气等移动源, BC 与 SO₂ 以及 BC 与 NO₂ 比值的季节性特征同样表现为冬季高 (BC/SO₂ = 0.36 ± 0.41 ; BC/NO₂ = 0.28 ± 0.30), 夏季低 (BC/SO₂ = 0.09 ± 0.05 ; BC/NO₂ = 0.05 ± 0.02). 可以推断, 冬季 BC 的排放量高于夏季.

综上, 冬季不利的气象条件和较高的排放量导致了 BC 浓度的季节性变化, 表现为冬季高 $[(8.21 \pm 3.26) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$, 夏季低 $[(2.37 \pm 0.71) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$.



黑线为拟合曲线,阴影为误差范围

图4 大气污染物与BC的相关性

Fig. 4 Correlations between atmospheric pollutants and BC

2.3 清洁日/污染日BC浓度的昼夜变化

为区分清洁日和污染日BC的变化特征,本文将 $\rho(\text{PM}_{2.5}) < 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 定义为清洁天, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 处于 $75 \sim 115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 定义为轻度污染天, $\rho(\text{PM}_{2.5}) > 115 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 定义为重度污染天. 3种不同污染条件下的BC、 BC_{ff} 、 BC_{bb} 、AAE、边界层高度和风速的日变化如图5.

有研究表明,随着空气质量的恶化,大气环境中的BC浓度也逐渐增加^[43]. 观测期间,清洁天、轻度污染天和重度污染天的 $\rho(\text{BC})$ 分别为 (2.79 ± 4.06) 、 (5.97 ± 7.64) 和 $(9.49 \pm 9.56) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 从清洁天到重度污染天,BC、 BC_{ff} 和 BC_{bb} 的浓度分别增加了240%、190%和314%. 化石燃料燃烧对BC浓度的贡献率在污染日下降了6%. 在不同的空气质量条件下,AAE值也出现了不同程度的变化^[22]. 清洁天、轻度污染天和重度污染天的AAE分别为 1.27 ± 0.17 、 1.32 ± 0.20 和 1.36 ± 0.17 ,AAE值从清洁天到重度污染天增长了7%,佐证了污染日生物质燃烧贡献率的增加.

重度污染天时,11:00 [$(13.11 \pm 32.66) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]和20:00 [$(12.28 \pm 19.20) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]出现了 $\rho(\text{BC})$ 高值;轻度污染天时,08:00 [$(7.66 \pm 4.89) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]和20:00 [$(10.29 \pm 23.73) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]

出现了 $\rho(\text{BC})$ 高值. 污染日的午间和晚间BC污染强度最大^[51]. BC_{ff} 浓度的日变化情况与BC浓度的日变化情况一致,重度污染天,11:00 [$(9.55 \pm 24.99) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]和20:00 [$(7.08 \pm 6.84) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]出现 $\rho(\text{BC}_{\text{ff}})$ 高值;轻度污染天,20:00 [$(5.37 \pm 9.65) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]出现 $\rho(\text{BC}_{\text{ff}})$ 高值. BC_{bb} 浓度的日变化情况与BC浓度日变化情况较为相近,14:00 [$(4.23 \pm 7.86) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]和20:00 [$(5.20 \pm 13.14) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]重度污染天出现了 $\rho(\text{BC}_{\text{bb}})$ 高值,20:00 [$(4.92 \pm 15.36) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$]轻度污染天出现了 $\rho(\text{BC}_{\text{bb}})$ 高值. 可见在污染日晚间,化石燃料燃烧和生物质燃烧都对BC浓度有较高贡献.

清洁天的边界层高度 [$(630 \pm 611) \text{m}$] 高于轻度污染天 [$(479 \pm 451) \text{m}$] 和重度污染天 [$(393 \pm 399) \text{m}$]. 全天边界层高度在08:00~17:00逐渐升高,在17:00~20:00迅速下降,夜间边界层高度趋于稳定. 风速在清洁天 [$(2.29 \pm 1.45) \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] 与轻度污染天 [$(2.42 \pm 1.61) \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] 相近,大于重度污染天 [$(1.82 \pm 1.24) \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]. 全天风速在00:00~07:00逐渐上升,08:00~16:00逐渐下降,之后处于稳定状态. 清晨边界层高度低 [$(218 \pm 194) \text{m}$], 风速相对较大 [$(3.35 \pm 1.47) \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], 容易携带周边地区的大气污染物,夜间形成的稳定边界层一定

程度上限制了 BC 的扩散. 大气中的 BC 浓度自 05:00 开始升高, 在 09:00 达到峰值 [$(4.52 \pm 3.48) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]; 08:00 开始, 大气边界层逐渐抬升 [$(383 \pm 241) \text{m}$], 随着大气污染物的垂向扩散, $\rho(\text{BC})$ 开始下降, 并在 14:00 达到谷值 [$(2.44 \pm 3.33) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]; 傍晚 (20:00) 边界层高度迅速降低至 $(200 \pm 232) \text{m}$ 、风速减弱至 $(1.57 \pm 1.22) \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 大气污染物扩散速度减慢, $\rho(\text{BC})$ 逐渐上升并在 20:00 达到峰值 [$(4.25 \pm 6.73) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]; 夜间大气边界层高度 [$(164 \pm 204) \text{m}$] 和风速 [$(1.79 \pm 1.23) \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] 稳定, 人为活动减少, $\rho(\text{BC})$ 趋于稳定 [$(3.63 \pm 2.52) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$].

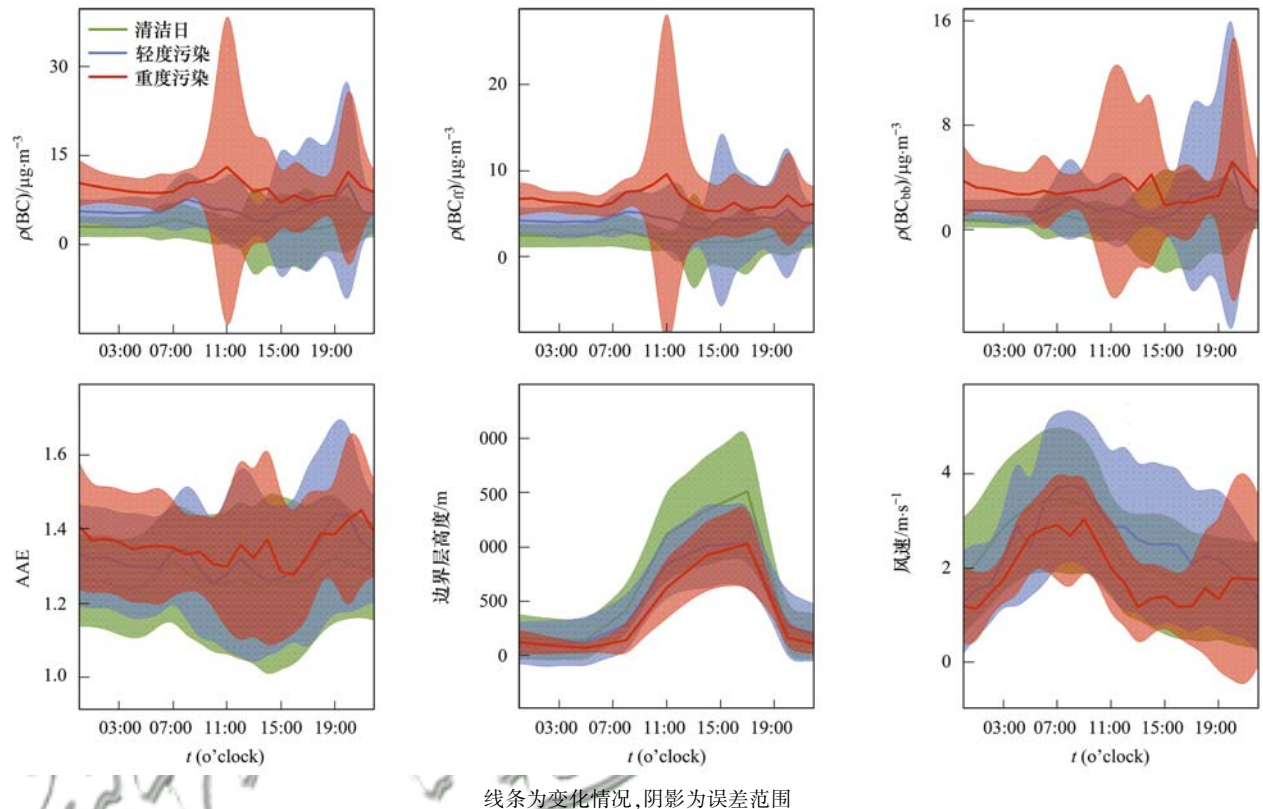


图 5 不同空气污染条件下 BC、BC_{ff}、BC_{bb}、AAE、边界层高度和风速的日变化特征

Fig. 5 Diurnal variation in BC, BC_{ff}, BC_{bb}, AAE, height of boundary layer, and wind speed under different air pollution conditions

在不同的污染条件下, BC、BC_{ff} 和 BC_{bb} 出现峰值的时间并不固定. 可见该地区农村点位的 BC 排放源存在随机性和复杂性^[22]. 由图 6 可知, 化石燃料燃烧贡献是该地区 BC 的主要来源, 重度污染天生物质燃烧的贡献率高于其它季节, 其生物质燃烧贡献率达 32.3%; 清洁天生物质燃烧贡献率最小, 为 25.0%.

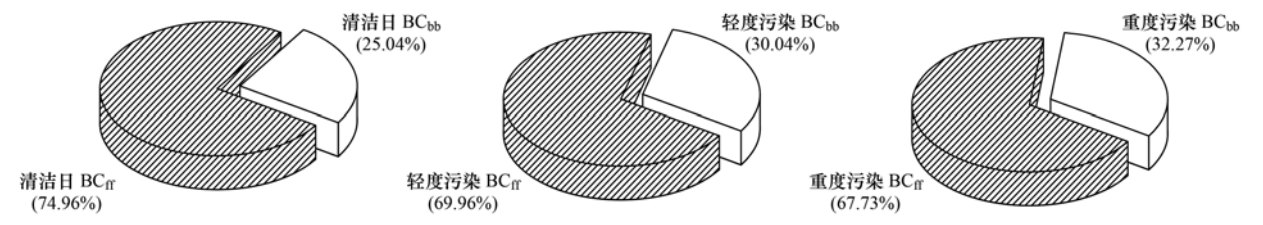


图 6 不同空气污染条件下 BC_{ff} 与 BC_{bb} 的贡献情况

Fig. 6 Contribution of BC_{ff} and BC_{bb} under different air pollution conditions

2.4 BC 潜在源区差异

在整个观测期间, 来自山东西南部的气团所占比最高, 达到 35.9%. 其次是来自湖北中部和河南南部的气团, 贡献比例分别为 24.4% 和 23.8%. 不同季节气团的来源并不相同, 冬季和春季观测点位存在明显的北方大气传输, 西北方气团对当地 BC 浓度的贡献率分别为 15.7% 和 26.8%, 东北方气团

对当地 BC 浓度的贡献率分别为 24.3% 和 27.6%. 夏季则仅有来自华北平原东部地区和南方地区 (33.7%) 的气团. 由此可见, 不同地区的气团贡献差异导致了 BC 潜在地理来源的差异.

冬季、春季、夏季和整个观测期间的 BC 浓度权重轨迹分析 (CWT) 结果如图 7 所示. 冬季较大的 CWT 值 ($> 9.00 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) 分布在河南东南部和南

部、河北南部和山东北部地区. 有研究表明, 河南省年均 BC 排放量为 117.6 kt, 平顶山市的排放量位居全省第二(9.5%)^[52]; 河北省的 BC 年均排放量为 136.7 kt, 山东省的 BC 年均排放量为 139.0 kt, 且山东省冬季的 BC 排放量约为夏季的两倍^[53]. 可见该地区在冬季受华北平原东部地区 BC 排放的影响大于西部地区. 春季, 较大的 CWT 值($>4.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)出现在河南南阳和襄阳地区, 南阳市是河

南省碳质气溶胶排放量较大的地区^[54], 已经成为了一个 BC 排放的重点关注区域. 河南和湖北地区 $[0.6 \sim 1.0 \text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}]$ 的 BC 排放量高于其他地区^[22], 两省交界处也属于大气污染区域. 夏季, 较大的 CWT 值($>2.70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)出现在河南中部地区. 有研究表明, 平顶山市因煤炭资源丰富(占全省煤炭产量 35.1%), 是河南省 BC 排放的主要城市^[48].

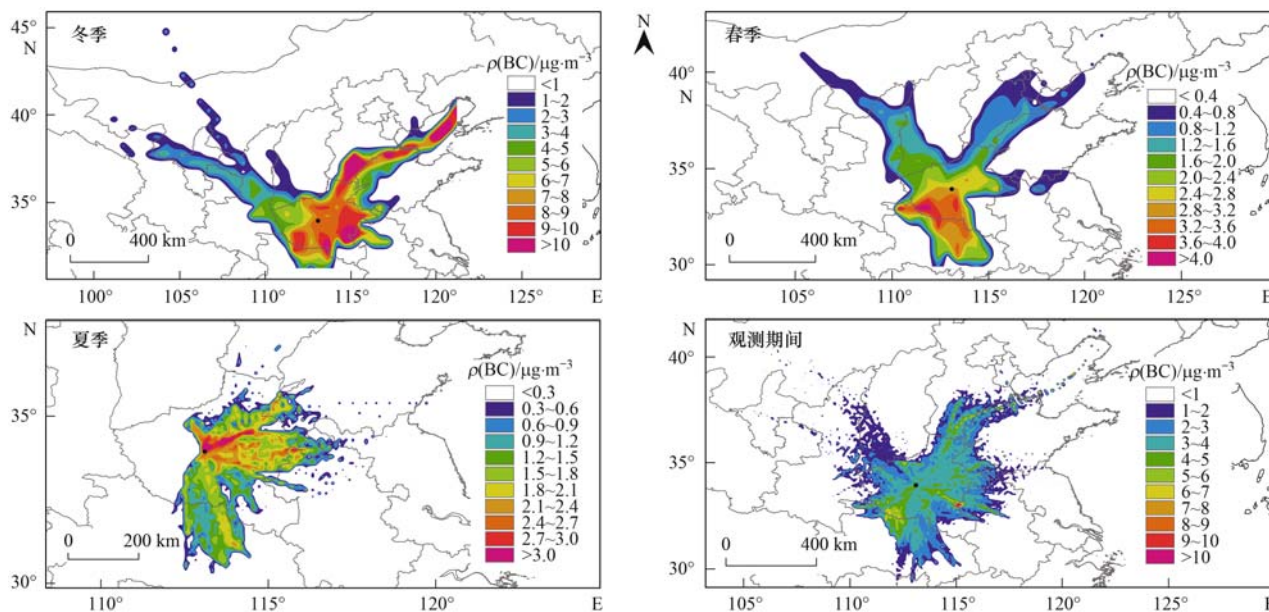


图7 冬季、春季、夏季和观测期间浓度权重轨迹模拟结果

Fig. 7 Results of concentration-weighted trajectory (CWT) of BC in winter, spring, summer, and whole observation period

3 结论

(1) 本研究期间, $\rho(\text{BC})$ 平均值为 $(3.51 \pm 2.29) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 冬季、春季和夏季的 $\rho(\text{BC})$ 平均值为 (8.21 ± 3.26) 、 (3.49 ± 1.69) 和 $(2.37 \pm 0.71) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 气象因素和排放源的季节性变化共同导致了 BC 的季节性变化.

(2) AAE 的值介于 1.08 ~ 1.66 之间, 表明该区域 BC 来源以化石燃料燃烧贡献为主. 研究期间生物质燃烧对 BC 的贡献为 $(28 \pm 10)\%$; 冬季生物质燃烧贡献最高 $[(41 \pm 12)\%]$, 夏季贡献最低 $[(20 \pm 4)\%]$.

(3) 污染日午间 $[(13.11 \pm 32.66) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 和晚间 $[(12.28 \pm 19.20) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 的 $\rho(\text{BC})$ 最高, 污染日午后的化石燃料燃烧对 BC 的贡献率更多 $[(73 \pm 67)\%]$, 午间生物质燃烧贡献率上升 $[(18 \pm 75)\%]$, 晚间生物质燃烧贡献率 $[(38 \pm 66)\%]$ 高于白天; 该地区农村点位的 BC 排放源存在随机性和复杂性.

(4) 柴火堆取暖、民用煤炉使用等局地人为活动, 以及河北南部、河南东南部、山东北部、湖北北

部等地污染输送导致该点位冬季 BC 浓度增高.

参考文献:

- [1] Kuhlbusch T A J. Black carbon and the carbon cycle[J]. Science, 1998, **280**(5371): 1903-1904.
- [2] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols[J]. Nature, 2001, **409**(6821): 695-697.
- [3] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon[J]. Nature Geoscience, 2008, **1**(4): 221-227.
- [4] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India[J]. Science, 2002, **297**(5590): 2250-2253.
- [5] Geng F H, Hua J, Mu Z, et al. Differentiating the associations of black carbon and fine particle with daily mortality in a Chinese city[J]. Environmental Research, 2013, **120**: 27-32.
- [6] Wang X, Chen R J, Meng X, et al. Associations between fine particle, coarse particle, black carbon and hospital visits in a Chinese city[J]. Science of the Total Environment, 2013, **458-460**: 1-6.
- [7] Jeong C H, Herod D, Dabek-Zlotorzynska E, et al. Identification of the sources and geographic origins of black carbon using factor analysis at paired rural and urban sites[J]. Environmental Science & Technology, 2013, **47**(15): 8462-8470.
- [8] McDuffie E E, Smith S J, O'Rourke P, et al. A global anthropogenic emission inventory of atmospheric pollutants from

- sector- and fuel- specific sources (1970-2017): an application of the Community Emissions Data System (CEDS) [J]. *Earth System Science Data*, 2020, **12**(4): 3413-3442.
- [9] Vaishya A, Singh P, Rastogi S, *et al.* Aerosol black carbon quantification in the central Indo-Gangetic Plain: seasonal heterogeneity and source apportionment [J]. *Atmospheric Research*, 2017, **185**: 13-21.
- [10] Liu D, Li J, Zhang Y L, *et al.* The use of levoglucosan and radiocarbon for source apportionment of PM_{2.5} carbonaceous aerosols at a background site in East China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(18): 10454-10461.
- [11] Wang R, Tao S, Wang W T, *et al.* Black carbon emissions in China from 1949 to 2050 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(14): 7595-7603.
- [12] Zhang Q, Shen Z X, Zhang T, *et al.* Spatial distribution and sources of winter black carbon and brown carbon in six Chinese megacities [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **762**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143075.
- [13] Ni H Y, Huang R J, Cosijn M M, *et al.* Measurement report: dual-carbon isotopic characterization of carbonaceous aerosol reveals different primary and secondary sources in Beijing and Xi'an during severe haze events [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(24): 16041-16053.
- [14] Li Y, Meng J, Liu J F, *et al.* Interprovincial reliance for improving air quality in China: a case study on black carbon aerosol [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(7): 4118-4126.
- [15] Chen H P, Wang H J. Haze days in north China and the associated atmospheric circulations based on daily visibility data from 1960 to 2012 [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2015, **120**(12): 5895-5909.
- [16] Wang Z L, Huang X, Ding A J. Dome effect of black carbon and its key influencing factors: a one-dimensional modelling study [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(4): 2821-2834.
- [17] Calkins C, Ge C, Wang J, *et al.* Effects of meteorological conditions on sulfur dioxide air pollution in the North China plain during winters of 2006-2015 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **147**: 296-309.
- [18] An Z S, Huang R J, Zhang R Y, *et al.* Severe haze in northern China: a synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(18): 8657-8666.
- [19] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [20] Zhang K, Ge L L, Li X J, *et al.* Monitoring ground surface deformation over the North China Plain using coherent ALOS PALSAR differential interferograms [J]. *Journal of Geodesy*, 2013, **87**(3): 253-265.
- [21] Li H Y, Zhang Q, Zhang Q, *et al.* Wintertime aerosol chemistry and haze evolution in an extremely polluted city of the North China Plain: significant contribution from coal and biomass combustion [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(7): 4751-4768.
- [22] Zheng H, Kong S F, Wu F Q, *et al.* Intra-regional transport of black carbon between the south edge of the North China Plain and central China during winter haze episodes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(7): 4499-4516.
- [23] Kompalli S K, Babu S S, Moorthy K K, *et al.* Aerosol black carbon characteristics over Central India: temporal variation and its dependence on mixed layer height [J]. *Atmospheric Research*, 2014, **147-148**: 27-37.
- [24] Zhang L, Luo Z H, Du W, *et al.* Light absorption properties and absorption emission factors for indoor biomass burning [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **267**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115652.
- [25] Becerril-Valle M, Coz E, Prévôt A S H, *et al.* Characterization of atmospheric black carbon and co-pollutants in urban and rural areas of Spain [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **169**: 36-53.
- [26] Zotter P, Herich H, Gysel M, *et al.* Evaluation of the absorption Ångström exponents for traffic and wood burning in the Aethalometer-based source apportionment using radiocarbon measurements of ambient aerosol [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(6): 4229-4249.
- [27] Sandradewi J, Prévôt A S H, Szidat S, *et al.* Using aerosol light absorption measurements for the quantitative determination of wood Burning and traffic emission contributions to particulate matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(9): 3316-3323.
- [28] Liu Y, Yan C Q, Zheng M. Source apportionment of black carbon during winter in Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **618**: 531-541.
- [29] Zhao J W, Liu Y X, Shan M, *et al.* Characteristics, potential regional sources and health risk of black carbon based on ground observation and MERRA-2 reanalysis data in a coastal city, China [J]. *Atmospheric Research*, 2021, **256**, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105563.
- [30] 齐孟姚, 王丽涛, 张城瑜, 等. 邯郸市黑碳气溶胶浓度变化及影响因素分析 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(5): 1751-1758.
- Qi M Y, Wang L T, Zhang C Y, *et al.* Variation of black carbon aerosol concentration and its influencing factors in Handan City, Hebei Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(5): 1751-1758.
- [31] Zhou H C, Lin J J, Shen Y, *et al.* Personal black carbon exposure and its determinants among elderly adults in urban China [J]. *Environment International*, 2020, **138**, doi: 10.1016/j.envint.2020.105607.
- [32] Peng X, Liu M, Zhang Y, *et al.* The characteristics and local-regional contributions of atmospheric black carbon over urban and suburban locations in Shanghai, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113188.
- [33] 杨晓旻, 施双双, 张晨, 等. 南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 620-629.
- Yang X M, Shi S S, Zhang C, *et al.* Temporal evolution and main influencing factors of black carbon aerosol in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 620-629.
- [34] Jing A K, Zhu B, Wang H L, *et al.* Source apportionment of black carbon in different seasons in the northern suburb of Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **201**: 190-200.
- [35] 关亚楠, 卢晶晶, 张毅森, 等. 石家庄南郊黑碳气溶胶污染特征与来源分析 [J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(9): 3146-3154.
- Guan Y N, Lu J J, Zhang Y S, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of black carbon aerosol in the south suburb of Shijiazhuang City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(9): 3146-3154.
- [36] Chen T Z, Liu J, Liu Y C, *et al.* Chemical characterization of

- submicron aerosol in summertime Beijing: a case study in southern suburbs in 2018 [J]. *Chemosphere*, 2020, **247**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.125918.
- [37] Ran L, Deng Z Z, Wang P C, *et al.* Black carbon and wavelength-dependent aerosol absorption in the North China Plain based on two-year aethalometer measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **142**: 132-144.
- [38] 魏夏璐, 王成刚, 凌新锋, 等. 安徽寿县黑碳气溶胶浓度观测分析研究 [J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(11): 3630-3638. Wei X L, Wang C G, Ling X F, *et al.* Observational study of black carbon at Shouxian in Anhui Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(11): 3630-3638.
- [39] Tiwari S, Srivastava A K, Bisht D S, *et al.* Diurnal and seasonal variations of black carbon and PM_{2.5} over New Delhi, India: influence of meteorology [J]. *Atmospheric Research*, 2013, **125-126**: 50-62.
- [40] Li J, Fu Q Y, Huo J T, *et al.* Tethered balloon-based black carbon profiles within the lower troposphere of Shanghai in the 2013 East China smog [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **123**: 327-338.
- [41] Barman N, Gokhale S. Urban black carbon-source apportionment, emissions and long-range transport over the Brahmaputra River Valley [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **693**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.383.
- [42] Tyagi S, Tiwari S, Mishra A, *et al.* Characteristics of absorbing aerosols during winter foggy period over the National Capital Region of Delhi: impact of planetary boundary layer dynamics and solar radiation flux [J]. *Atmospheric Research*, 2017, **188**: 1-10.
- [43] Xiao H W, Mao D Y, Huang L L, *et al.* Evaluation of black carbon source apportionment based on one year's daily observations in Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **773**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145668.
- [44] de Arruda Moreira G, Guerrero-Rascado J L, Bravo-Aranda J A, *et al.* Study of the planetary boundary layer height in an urban environment using a combination of microwave radiometer and ceilometer [J]. *Atmospheric Research*, 2020, **240**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.104932.
- [45] Meena G S, Mukherjee S, Buchunde P, *et al.* Seasonal variability and source apportionment of black carbon over a rural high-altitude and an urban site in western India [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(2): 32-45.
- [46] Chen X T, Kang S C, Yang J H. Investigation of distribution, transportation, and impact factors of atmospheric black carbon in the Arctic region based on a regional climate-chemistry model [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113127.
- [47] Choi Y, Kanaya Y, Takigawa M, *et al.* Investigation of the wet removal rate of black carbon in East Asia: validation of a below- and in-cloud wet removal scheme in FLEXible PARTicle (FLEXPART) model v10.4 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(21): 13655-13670.
- [48] Liu S H, Hua S B, Wang K, *et al.* Spatial-temporal variation characteristics of air pollution in Henan of China: Localized emission inventory, WRF/Chem simulations and potential source contribution analysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **624**: 396-406.
- [49] Saha D, Soni K, Mohanan M N, *et al.* Long-term trend of ventilation coefficient over Delhi and its potential impacts on air quality [J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2019, **15**, doi: 10.1016/j.rsase.2019.05.003.
- [50] Girach I A, Nair V S, Babu S S, *et al.* Black carbon and carbon monoxide over Bay of Bengal during W-ICARB: source characteristics [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **94**: 508-517.
- [51] Ramachandran S, Rajesh T A, Cherian R. Black carbon aerosols over source vs. background region: atmospheric boundary layer influence, potential source regions, and model comparison [J]. *Atmospheric Research*, 2021, **256**, doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105573.
- [52] Zhang H, Yin S S, Bai L, *et al.* Establishment and evaluation of anthropogenic black and organic carbon emissions over Central Plain, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **226**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117406.
- [53] Liu X Y, He K B, Zhang Q, *et al.* Analysis of the origins of black carbon and carbon monoxide transported to Beijing, Tianjin, and Hebei in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **653**: 1364-1376.
- [54] Li C L, Hu Y J, Zhang F, *et al.* Multi-pollutant emissions from the burning of major agricultural residues in China and the related health-economic effects [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(8): 4957-4988.

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Urban Area of Beijing	AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)
Modeling of PM _{2.5} Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model	FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)
Spatio-temporal Evolution Patterns of PM _{2.5} and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018	ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274)
Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence	TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)
Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem	ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)
Source Apportionment and Seasonal Changes in PM _{2.5} Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City	SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)
Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM _{2.5} Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan	REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM _{2.5} in the Winter of Zhengzhou	YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)
Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM _{2.5} During Winter in Zibo City	BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)
Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)
Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China	FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)
Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain	ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)
Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology	HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)
Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity	CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)
Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China	YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)
Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030	CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)
Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation	CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)
Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis	SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)
Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert	ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)
Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin	ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)
Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin	LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)
Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River	WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)
APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen	SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)
Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments	XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)
Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City	HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)
Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake	HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)
Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication	ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)
Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology	MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)
Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm	ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)
Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin	LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)
Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake	LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)
Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake	YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)
Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment	CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)
Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River	LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)
Non-point Source Pollution (NPS) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River	XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)
Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments	LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)
Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period	ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)
Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir	GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)
Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake	JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)
Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO ₂ -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes	FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)
Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H ₂ O ₂ Catalyzed by Magnetic Mn _{0.4} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄ @SiO ₂	XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)
Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite	JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)
Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material	ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)
Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates	LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)
Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors	LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)
Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions	ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)
Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area	CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)
Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)
Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils	MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)
Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem	WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)
Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field	XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)
Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers	XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)
Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil	SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)
Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain	GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)
Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain	HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)
Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland	WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)
Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)