

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力

李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年12月

第42卷 第12期
Vol.42 No.12

目次(卷终)

基于碳减排目标与排放标准约束情景的火电大气污染物减排潜力	李辉, 孙雪丽, 庞博, 朱法华, 王圣, 晏培 (5563)
汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策	王海林, 杨涛, 聂磊, 方莉, 张中申, 郝郑平 (5574)
西宁市生物质燃烧源大气污染物排放清单	高玉宗, 姬亚芹, 林孜, 林宇, 杨益 (5585)
新冠疫情期间四川盆地空气质量及影响因素分析	陈军辉, 冯小琼, 李媛, 王书肖 (5594)
基于 iLME + Geoi-RF 模型的四川省 PM _{2.5} 浓度估算	吴宇宏, 杜宁, 王莉, 蔡宏, 周彬, 吴磊, 敖迪 (5602)
《大气污染防治行动计划》后期成都大气 PM _{2.5} 中水溶性无机离子特征	李佳琪, 张军科, 董贵明, 邓嘉琳, 刘子锐, 王跃思 (5616)
洛阳市大气细颗粒物化学组分特征及溯源分析	孙佳侯, 董喆, 李利萍, 刘洋, 陈红阳, 张瑞芹 (5624)
北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素	曹阳, 安欣欣, 刘保献, 景宽, 王琴, 罗霄旭 (5633)
天津市郊夏季 VOCs 化学特征及其时间精细化的来源解析	王艺璇, 刘保双, 吴建会, 张裕芬, 冯银厂 (5644)
沈阳市挥发性有机物污染特征及反应活性	杜寒冰, 王男, 任万辉, 苏枞枞, 胡建林, 于兴娜 (5656)
典型化工集中区环境空气 SVOCs 污染特征及来源解析	葛祥, 吴健, 高松, 冯加良, 陈俊伟, 张舒惟, 焦正 (5663)
南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估	张子金, 林煜棋, 张煜烟, 曹梦瑶, 章炎麟 (5673)
基于排放清单和实地测试的工业 VOCs 排放特征: 以郑州市高新区为例	任何, 卢轩, 刘洋, 尹沙沙, 胡鹤霄 (5687)
我国水性建筑涂料 VOCs 排放特征及其环境影响	高美平, 王海林, 刘文文, 聂磊, 李国昊, 安小栓 (5698)
VOCs 源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析	王峰, 汪健伟, 杨宁, 翟菁, 侯灿 (5713)
山东省 O ₃ 时空分布及影响因素分析	张森, 丁椿, 李彦, 王桂霞, 林晶晶, 孟赫, 许杨 (5723)
2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性	钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 姜涛, 韩丽, 王成辉, 李英杰, 王波, 刘政 (5736)
基于高分辨率在线测量的轻型汽油车含氧挥发性有机物排放模型构建	郝钰琦, 袁自冰, 王梦雷, 沙青娥, 杜新悦, 刘元向, 刘学辉, 段乐君, 袁斌, 郑君瑜, 邵敏, 闫宇 (5747)
三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析	张凯, 吴凤平, 成长春 (5757)
长江流域总氮排放量预测	丁肇慰, 郑华 (5768)
1980~2015 年长江流域净人为氮输入与河流氮输出动态特征	姚梦雅, 胡敏鹏, 陈丁江 (5777)
黄河水环境特征与氮磷负荷时空分布	韩谔, 潘保柱, 陈越, 刘亚平, 侯易明 (5786)
基于氮氧同位素解析不同降雨条件下硝酸盐污染源	邢子康, 余钟波, 衣鹏, 钱睿智, 王嘉毅 (5796)
水源水库真核微生物种群结构季相演替特征	张海涵, 黄鑫, 黄廷林, 刘凯文, 马曼丽, 刘祥, 苗雨甜, 宗容容 (5804)
达里湖表层水体浮游细菌群落结构的夏-冬季节差异	李文宝, 郭鑫, 张博尧, 杜蕾, 田雅楠 (5814)
尾水排放对受纳水体底栖生物膜细菌群落和水溶性有机质的影响机制	王钰涛, 范晨阳, 朱金鑫, 李轶, 王龙飞 (5826)
武汉典型饮用水水源中典型 POPs 污染特征与健康风险评估	张坤峰, 付青, 涂响, 昌盛, 樊月婷, 孙兴滨, 王山军 (5836)
上海沙田湖养殖区及周边水体中氟喹诺酮类抗性基因的分布特征及其与环境因子关系	徐慕, 李世豪, 马巾, 王丽卿, 张玮 (5848)
曝气人工湿地脱除低污染水中氮的影响因素	李琳琳, 李荣涛, 孔维静, 杨苹果, 杜志超, 毕斌, 卢少勇 (5857)
水平潜流人工湿地对畜禽养殖废水中特征污染物的去除	赵伟, 范增增, 杨新萍 (5865)
木屑生物炭对填料土的氮磷吸附及雨水滞留改良影响	孟依柯, 王媛, 汪传跃, 王报 (5876)
黑臭河道中聚乙烯醇/海藻酸钠固定微米沸石粉去除氨氮	魏超, 陈涛, 江桥, 王姝, 邱伟建, 成小英 (5884)
玉米秸秆生物炭对灰钙土吸附金霉素的影响	南志江, 蒋煜峰, 毛欢欢, 梁新茹, 邓雪儒 (5896)
饮用水砂滤池中微生物对微量污染物的降解潜力与途径	周洁, 王东麟, 林慧, 柏耀辉 (5905)
污水分析方法监测城市毒品滥用长期趋势	曹禹, 董小棠, 邵雪婷, 刘琳, 王德高 (5912)
阿奇霉素和铜对活性污泥古菌群落和 ARGs 的胁迫影响及后效应	高玉玺, 李星, 赵君如, 张忠兴, 樊晓燕 (5921)
典型冶炼行业场地土壤重金属空间分布特征及来源解析	李强, 曹莹, 何连生, 王耀峰, 龚成, 何书涵 (5930)
我国焦化场地多环芳烃和重金属分布情况及生态风险评价	王耀峰, 何连生, 姜登岭, 曹莹, 李强, 官健 (5938)
浙江省香榧主产区土壤重金属空间异质性及其生态风险	王敏, 董佳琦, 白龙龙, 张勇, 蒋仲龙, 姜雯雯, 吴家森, 张璐瑶, 方嘉, 傅伟军 (5949)
北方农田镉污染土壤玉米生产阈值及产区划分初探	管伟豆, 郭堤, 王萍, 张增强, 李荣华 (5958)
典型铅锌矿区耕地土壤团聚体重金属含量与农作物含量相关性及其风险评价	强瑞, 李英菊, 罗谦, 陈美凤, 李海燕, 黄先飞, 秦樊鑫 (5967)
雄安新区企业周边农田土壤-作物系统重金属污染风险及累积效应	周亚龙, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟, 杨志斌 (5977)
铜仁土壤-水稻重金属累积效应与安全种植区划	朱亮亮, 吴勇, 周浪, 唐乐斌, 宋波 (5988)
干湿交替对铈锰改性生物炭固定红壤 As 的影响	黄晓雅, 李莲芳, 朱昌雄, 黄金丽, 吴翠霞, 叶婧 (5997)
铵态氮肥和腐殖酸协同促进孔雀草对土壤中 Cd 的去除	王冰清, 阳琴, 李虹颖, 熊启中, 徐刚, 孙瑞波, 田达, 李军利, 郇建建, 叶新新 (6006)
稻田灌溉河流 CH ₄ 和 N ₂ O 排放特征及影响因素	吴双, 杨蔚桐, 盛扬悦, 方贤滔, 张天睿, 胡靖, 刘树伟, 邹建文 (6014)
节水灌溉和控释肥施用耦合措施对单季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	王永明, 徐永记, 纪洋, 冯彦房 (6025)
有机无机配施下西北旱区麦田土壤 N ₂ O 的排放特征及微生物特性	王楷, 史雷, 马龙, 王书婷, 张然, 郑伟, 李紫燕, 翟丙年 (6038)
不同秸秆还田方式对旱地红壤细菌群落、有机碳矿化及玉米产量的影响	孔培君, 郑洁, 栾璐, 陈紫云, 薛敬荣, 孙波, 蒋瑞霖 (6047)
氮磷添加对盐渍化草地土壤微生物特征的影响	杨建强, 刁华杰, 胡姝姝, 陈晓鹏, 王常慧 (6058)
化肥和有机肥配施生物炭对紫色土壤养分及磷赋存形态的影响	向书江, 余砾, 熊子怡, 罗东海, 王莹燕, 邓正昕, 王子芳, 高明 (6067)
浒苔生物炭与木醋液复配改良碱化土壤效果及提高油菜产量	王正, 孙兆军, Sameh El-Sawy, 王珍, 何俊, 韩磊, 邹本涛 (6078)
《环境科学》第42卷(2021年)总目录	(6091)
《环境科学》征订启事(5593) 《环境科学》征稿简则(5623) 信息(5643, 5835, 5883)	

北京市黑碳气溶胶浓度特征及其主要影响因素

曹阳^{1,2}, 安欣欣^{1,2}, 刘保献^{1,2*}, 景宽^{1,2}, 王琴^{1,2}, 罗霄旭^{1,2}

(1. 北京市生态环境监测中心, 北京 100048; 2. 大气颗粒物监测技术北京市重点实验室, 北京 100048)

摘要: 为探究北京市黑碳 (black carbon, BC) 气溶胶时空分布特征及其主要影响因素, 对 4 个站点 2019 年的 $\rho(\text{BC})$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{CO})$ 和 $\varphi(\text{NO}_x)$ 及同期气象因子进行比对分析。结果表明, 背景区 (BA)、城区 (UA)、城区路边 (UR) 和外环路边 (HR) 的平均 $\rho(\text{BC})$ 分别为 (1.58 ± 1.15) 、 (2.27 ± 1.67) 、 (3.35 ± 2.13) 和 $(3.57 \pm 2.40) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\omega(\text{BC}/\text{PM}_{2.5})$ 分别为 $(5.3 \pm 1.6)\%$ 、 $(6.0 \pm 2.3)\%$ 、 $(9.0 \pm 3.6)\%$ 和 $(8.1 \pm 3.5)\%$; 除 UR 站点 $\rho(\text{CO})$ 高于 HR 站点以外, 4 个站点的 $\rho(\text{BC})$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{CO})$ 和 $\varphi(\text{NO}_x)$ 由低到高排序均为: 背景区 < 城区 < 城区路边 < 外环路边, 且采暖季是非采暖季的 1.1 ~ 1.7 倍; 用最大频率法估算各站本底 $\rho(\text{BC})$, UR 站点最高, BA 站点最低, 分别为 $0.56 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.19 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 交通排放导致路边站点本底 $\rho(\text{BC})$ 、平均 $\rho(\text{BC})$ 和 $\omega(\text{BC}/\text{PM}_{2.5})$ 均高于其他站点。 $\rho(\text{BC})$ 日变化曲线呈双峰型结构, 非采暖季早高峰时段 (07:00 ~ 08:00) 峰值较高, 采暖季全天浓度高于非采暖季且凌晨时段 (00:00 ~ 02:00) 峰值较高, 谷值均在午后 (14:00 ~ 16:00) 出现。4 个站点的平均吸收埃斯特朗指数 (AAE) 为 1.38、1.34、1.26 和 1.26, 表明全市 BC 主要来自化石燃料燃烧; 采暖季平均 AAE 为 1.46, 高于非采暖季的 1.23, 主要是由于采暖季生物质燃烧排放占比增加; 非采暖季各站点 AAE 日变化曲线主要受机动车活动时间影响, 一致呈凌晨低、午后高的分布特点, 采暖季曲线各异。BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、 NO_x 、风速和相对湿度的 Pearson 相关系数 (r) 为 0.86、0.81、0.69、-0.37 和 0.34; 由于燃煤源作为 4 种污染物的共同来源贡献增加, 采暖季较非采暖季 $|r|$ 更高。4 个站点的 $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$ 值分别为 3.1×10^{-3} 、 3.5×10^{-3} 、 3.9×10^{-3} 和 4.1×10^{-3} 。一次污染过程中, 城区站点 BC 以区域传输为主要来源, 路边站点局地排放 BC 积累过程较明显, 易发生颗粒物二次生成过程。

关键词: 黑碳 (BC); 路边站; 浓度特征; 日变化; 吸收埃斯特朗指数 (AAE); 污染过程

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)12-5633-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202103049

Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing

CAO Yang^{1,2}, AN Xin-xin^{1,2}, LIU Bao-xian^{1,2*}, JING Kuan^{1,2}, WANG Qin^{1,2}, LUO Xiao-xu^{1,2}

(1. Beijing Municipal Ecological and Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 2. Beijing Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing 100048, China)

Abstract: Black carbon (BC), $\text{PM}_{2.5}$, CO, NO_x , and meteorological factors were observed throughout 2019 at four different sites. The spatial and temporal characteristics of BC were analyzed along with the main influencing factors. The main results were as follows: the average $\rho(\text{BC})$ were (1.58 ± 1.15) , (2.27 ± 1.67) , (3.35 ± 2.13) , and $(3.57 \pm 2.40) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ at the background area (BA), urban area (UA), urban roadside (UR), and highway roadside (HR), respectively. BC accounted for $(5.3 \pm 1.6)\%$, $(6.0 \pm 2.3)\%$, $(9.0 \pm 3.6)\%$, and $(8.1 \pm 3.5)\%$ of $\text{PM}_{2.5}$ at the four sites. The $\rho(\text{BC})$, $\rho(\text{PM}_{2.5})$, $\rho(\text{CO})$, and $\varphi(\text{NO}_x)$ at the four sites ranked in the order of BA < UA < UR < HR, except that $\rho(\text{CO})$ at UR was higher than that at HR. Pollutants during the heating season were 1.1-1.7 times higher than those in the non-heating season. The background $\rho(\text{BC})$ were estimated using the maximum frequency method, with the maximum value ($0.56 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) and minimum value ($0.19 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) being at UR and BA, respectively. The background $\rho(\text{BC})$, the average $\rho(\text{BC})$, and the proportion of BC in $\text{PM}_{2.5}$ at UR and HR were higher than those at UA and BA, as a result of traffic emissions. The $\rho(\text{BC})$ showed bimodal diurnal variations, and the heating season curve was higher than the non-heating season curve throughout the day. Further, the morning peak (07:00-08:00) was higher in the non-heating season, and the midnight peak (00:00-02:00) was higher during the heating season, with the minimum always occurring in the afternoon (14:00-16:00). The absorption Angstrom exponents (AAE) were 1.38, 1.34, 1.26, and 1.26 at the four sites (BA, UA, UR, and HR, respectively). It was concluded that BC was dominated by fossil fuel emissions in the entire city. AAE in the heating season (1.46) was higher than that in the non-heating season (1.23) as a result of the high proportion of biomass combustion. The diurnal variation trend of the AAE at the four sites showed the similar trend during the non-heating season of high values in the afternoon and low values in the early morning, indicating that low AAE was caused by vehicle activity. The Pearson correlation coefficients (r) between BC and $\text{PM}_{2.5}$, CO, NO_x , wind speed, and relative humidity were 0.86, 0.81, 0.69, -0.37, and 0.34, respectively. The $|r|$ was higher during the heating season because coal combustion contributed more as the common source of these pollutants. The $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$ ratio at the four sites (BA, UA, UR, and HR) were 3.1×10^{-3} , 3.5×10^{-3} , 3.9×10^{-3} , and 4.1×10^{-3} , respectively. In a pollution episode, the increase in $\rho(\text{BC})$ at UA was mainly caused by regional transmission, whereas the accumulation process of BC at UR was obvious. The secondary generation process of particulate matter might occur due to the high concentration of precursors at UR.

Key words: black carbon (BC); roadside site; concentration characteristic; diurnal variation; absorption Angstrom exponent (AAE); pollution episode

近年来北京市空气质量逐渐转好, 燃煤锅炉管控、民用能源清洁化和产业结构优化等相关举措起到了主要作用^[1]。工业源大幅减排的背景下, 移动源对大气污染的贡献日益凸显, 在大中型城市, 已成为大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要来源^[2]。颗粒物源解析结果显

收稿日期: 2021-03-05; 修订日期: 2021-06-01

基金项目: 北京市科技计划项目 (Z181100005418003, Z191100009119014)

作者简介: 曹阳 (1990 ~), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为大气环境监测, E-mail: caoyang1990x@hotmail.com

* 通信作者, E-mail: liubaixian28@163.com

示,北京本地排放源中移动源占比已高达 45%^[3]. 虽然北京市自 1998 年至今相继实施了一系列针对移动源排放控制的措施和计划,并且取得了显著的成效^[4],但 2019 年市区机动车保有量已达 636.5 万辆且近年来呈每年增加 5% 左右的趋势,可见未来的一段时间内,机动车排放对大气环境的威胁仍不容忽视.

黑碳(black carbon, BC)是机动车排放的关键示踪因子^[5],研究其浓度特征对解析机动车污染、评价交通管控措施的效果有重要意义. BC 同时是 PM_{2.5}中的重要组分,主要来自碳质燃料(煤、生物质、天然气和石油)的不完全燃烧. 有研究指出民用燃煤和生物质燃烧是发展中国家 BC 的主要贡献源,而发达国家 50% 以上 BC 来自机动车排放^[6],随着我国经济发展,机动车对 BC 的贡献可能会出现增加的趋势. 虽然 BC 浓度通常只占 PM_{2.5} 的 5% ~ 10% 左右,但是由于其多孔结构极易吸附多环芳烃和重金属等有害物质,不仅对人体健康造成威胁^[7],而且能够为颗粒物二次反应提供载体,在城市重污染发展过程中起到关键性作用^[8];同时 BC 对红外波段的光有强吸收,对大气直接产生加热作用,造成温室效应的能力仅次于 CO₂^[9],而且通过影响成云过程,对气候产生间接影响^[10]. 有研究结果表明,BC 的吸收散射特性能够使高空大气升温同时降低地表温度,使近地面逆温层结更稳定,为污染物积累提供条件^[11]. 综上所述,研究 BC 浓度特征可以对 PM_{2.5} 污染控制及来源解析、气候和人体健康效应评估起重要作用.

近几年,国内外学者对 BC 形态机制、浓度特征、影响因素和来源解析开展了较广泛地研究^[12~16]. 结果显示,即便在同一城市,不同类型监测区域及监测时段下获取的 BC 浓度和特性也存在较大差异. 基于单站点或短时间的观测结果对表征区域 BC 浓度缺乏代表性和可比性. 为了更全面反映北京市 BC 整体特征,本研究分析比较了 4 种典型站点的全年 BC 及其相关污染物浓度,获得了 BC 气溶胶的时空分布特征以及和其他污染物、气象因子的相关性,并计算了 BC 的吸收埃斯特朗指数(absorption Angstrom exponent, AAE),探讨了不同类型监测点污染的来源与影响因素的异同点,以期 BC 减排和机动车管控措施的制定提供科学依据.

1 材料与方法

监测时间为 2019 年全年,其中 1 月 1 日 ~ 3 月 15 日和 11 月 15 日 ~ 12 月 31 日为采暖季,其余天

为非采暖季. 4 个监测点分别位于密云地区、车公庄地区、南三环路边和京沪高速路边,如图 1 所示,代表的区域为:背景区(BA)、城区(UA)、城区路边(UR)和外环路边(HR). 文中对 4 个站点的数据描述均按上述顺序排列.

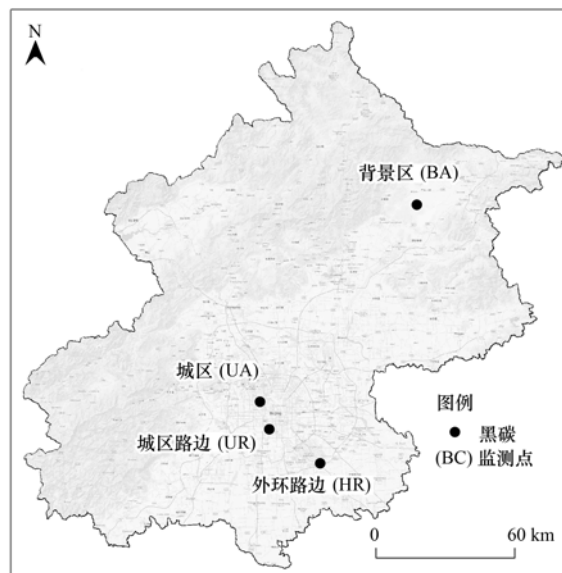


图 1 BC 监测点位示意

Fig. 1 Location of the BC sampling sites

采用 AE33 黑碳仪(Aethalometer Model AE33, MAGEE SCIENTIFIC)前置 PM_{2.5} 切割器对 BC 进行 24 h 观测,该仪器原理是通过连续测量沉积在膜上的 BC 对不同波段光的衰减变化,结合采样体积和质量吸收效率,获得实时 BC 浓度,并采用双点位技术,补偿了非线性偏差,颗粒物多角度散射效应和遮蔽效应导致的偏差通过设置仪器内部参数进行补偿和规避. 7 个波段波长分别是:370、470、520、590、660、880 和 950 nm. 本研究中“BC”均代指 AE33 测得的 BC,并以 880 nm 测值作为 $\rho(\text{BC})$.

PM_{2.5}、CO 和 NO_x 监测所用仪器: β 射线法颗粒物自动监测仪(5030SHARP, Thermo SCIENTIFIC)、CO 分析仪(T300, TeledyneAPI)和 NO_x 分析仪(T200, TeledyneAPI). 各类浓度数据先计算为小时平均值后进行汇总分析. 气象因子由多参数气象传感器(WTX-520, VAISALA)获取.

2 结果与讨论

2.1 BC 及其相关污染物平均浓度特征

2.1.1 BC 浓度特征

对 4 个站点的日均 $\rho(\text{BC})$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{CO})$ 和 $\varphi(\text{NO}_x)$ 进行统计分析,结果见图 2. $\rho(\text{BC})$ 由低到高排序为: BA < UA < UR < HR, 平均值分别为 (1.58 ± 1.15) 、 (2.27 ± 1.67) 、 (3.35 ± 2.13) 和

(3.57 ± 2.40) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, BA 站点平均值最低, 标准偏差最小, 与该点位较大范围内无明显道路交通及其他相关污染源有关; HR 站点平均值最高, 标准偏差最大, 这是由于该站点位于东南郊区的高速路边, 不同时段机动车活动水平差异明显, 而且来自东南方向的污染传输过程可能导致 $\rho(\text{BC})$ 波动较大^[17]; UR 站点平均值略低于 HR 站点, 较 UA 站点高 50% 左右, 这可能与城市道路高峰期机动车行驶速度缓慢、怠速排放量大有关, 说明了城区机

动车对 BC 的重要贡献, 路边环境污染需引起重视; UA 站平均值介于 BA 站和 UR 站之间. 相比于北京市其他研究结果, 2019 年(本研究) $\rho(\text{BC})$ 处于较低水平, 且近几年呈下降趋势, 见表 1. 背景点 $\rho(\text{BC})$ 下降代表了区域整体空气质量好转, 可能与采取大范围燃煤治理措施相关; 路边站 $\rho(\text{BC})$ 降幅更大, 可见近年来机动车减排措施对 BC 削减起到了重要作用. 与深圳、上海研究结果相比, 北京城区站点 $\rho(\text{BC})$ 较低.

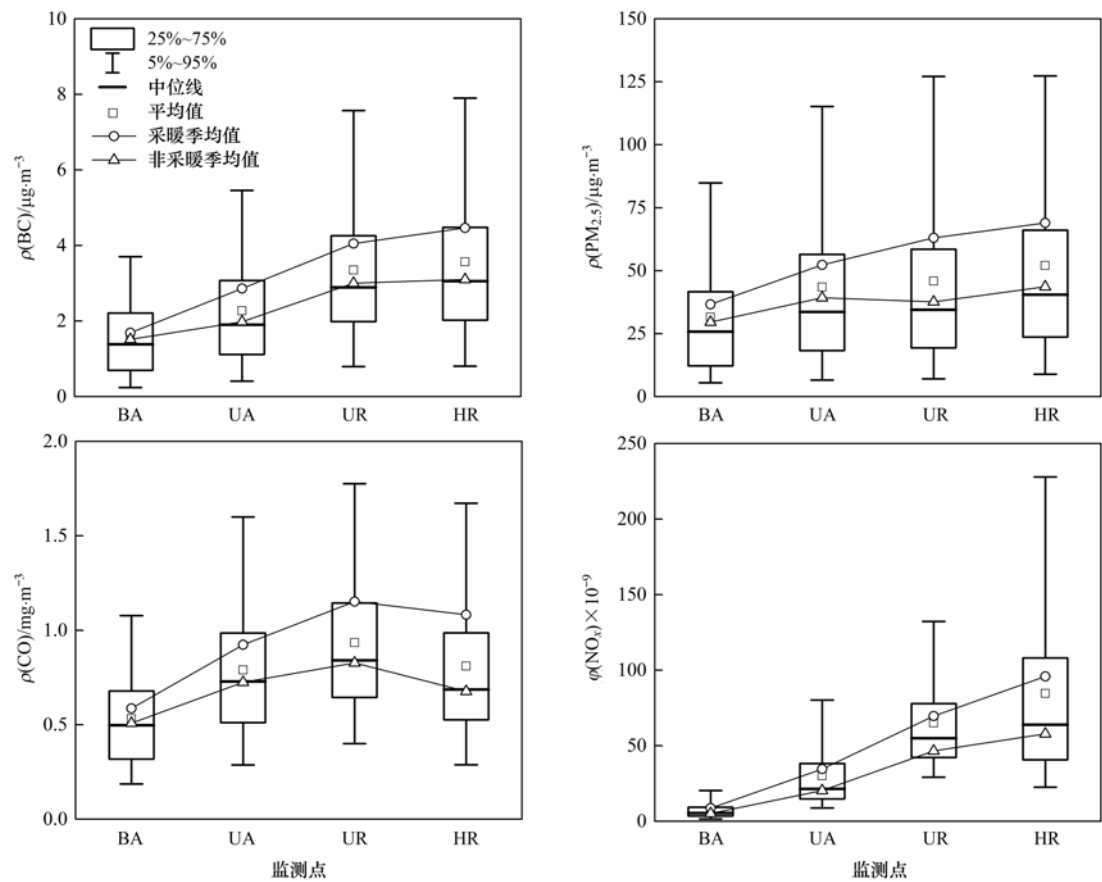


图 2 污染物日均浓度箱式图

Fig. 2 Box plot of pollutants based on daily average concentrations

表 1 相关研究中 $\rho(\text{BC})$

时间	$\rho(\text{BC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$				仪器型号	地点
	背景或郊区	城区或其他	城区路边	外环路边		
2003 年夏季 ^[18]		8.80 ± 2.59			AE16	北京
2003 年冬季 ^[18]		11.40 ± 8.18			AE16	北京
2006 ~ 2012 年 ^[12]	2.2 ± 2.4	6.5 ± 7.3			AE31	北京
2009 年冬、夏季 ^[19]			14.1 ± 9.5		AE51	北京
2014 年 ^[20]		4.4 ± 3.7			AE31	北京
2013 ~ 2015 年 ^[21]		4.77 ± 4.49			AE31	北京
2019 年(本研究)	1.58 ± 1.15	2.27 ± 1.67	3.35 ± 2.13	3.57 ± 2.4	AE33	北京
2016 年 ^[22]	1.83 ± 1.71	2.41 ± 1.54			AE31	上海
2014 ~ 2015 年 ^[23]	1.12 ± 0.90	2.58 ± 2.00			AE31	深圳

2.1.2 $\text{PM}_{2.5}$ 及气态污染物浓度特征

4 个站点的平均 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 分别为 (31 ± 26)、(44

± 35)、(45 ± 40) 和 (52 ± 44) $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 与平均 $\rho(\text{BC})$ 高低顺序一致, 但各站点间相对差异较小, 可见

PM_{2.5}与BC污染的来源不尽相同. 4个站点的 $\omega(\text{BC}/\text{PM}_{2.5})$ 为 $(5.3 \pm 1.6)\%$ 、 $(6.0 \pm 2.3)\%$ 、 $(9.0 \pm 3.6)\%$ 和 $(8.1 \pm 3.5)\%$,路边站点UR和HR高于城区和背景站点,体现了机动车排放的BC对路边环境PM_{2.5}贡献较大. 平均 $\rho(\text{CO})$ 分别为 (0.53 ± 0.28) 、 (0.79 ± 0.40) 、 (0.94 ± 0.46) 和 $(0.81 \pm 0.48) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,路边站点高于其他站点,其中UR站点最高,可能主要来自城市道路大量汽油车的排放^[24]. 平均 $\varphi(\text{NO}_x)$ 分别为 $(7.0 \pm 5.5) \times 10^{-9}$ 、 $(28.2 \pm 20.9) \times 10^{-9}$ 、 $(62.9 \pm 33.4) \times 10^{-9}$ 和 $(81.4 \pm 62.1) \times 10^{-9}$,不同站点间差异较大,HR站点的 $\varphi(\text{NO}_x)$ 是BA点的11倍左右,这是由于NO_x大气寿命相对较短,主要来自本地排放^[25],而且机动车尤其是重型柴油车是NO_x主要来源^[26, 27],因此路边站浓度远高于其他站点. 各站点4种污染物浓度平均值均大于中值,可见1a中低于平均浓度天数占一半以上;BA点二者差值最小,路边点差值较大,可能是因为背景点污染物更多来自混合均匀的传输气团,污染物浓度更接近正态分布,而路边站距污染源较近,突发性高值较多,致使浓度平均值高于中值. 4个站点的采暖季 $\rho(\text{BC})$ 分别是非采暖季的1.1、1.5、1.4和1.4倍,其他3种污染物也增加到1.2~1.7倍.

2.1.3 BC月均浓度特征

如图3所示,除BA外,其他站点全年月均 $\rho(\text{BC})$ 具有较一致的变化特征:1~4月 $\rho(\text{BC})$ 呈下降趋势,之后维持在较低水平,9~12月开始升高,随后维持在较高值. 4站点月均 $\rho(\text{BC})$ 介于 $2.01 \sim 4.18 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间,最高值是最低值2倍左右,分别出现在1月和8月,BA月均 $\rho(\text{BC})$ 变化最小,HR月均 $\rho(\text{BC})$ 差异最大. 造成这种全年分布特点的主要原因是:①北方城市秋、冬季消耗较多煤及其他生

物质作为采暖燃料,BC排放增加;②秋、冬季气温降低,边界层不高,大气逆温现象频发,导致扩散条件转差,局地移动源排放BC容易发生积累效应,浓度升高. ③夏季化石燃料燃烧较少,大气扩散条件较好,利于局地污染扩散,而且降水能够促使BC通过湿沉降清除.

2.2 BC浓度频率分布

对不同站点小时 $\rho(\text{BC})$ 频率分布进行分析,区间间隔选为 $0.125 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,结果如图4所示. 4个站点均呈右偏态分布,偏度分别为1.6、3.2、2.6和1.9,主要原因是 $\rho(\text{BC})$ 低值出现频率更高,这与其他城市的 $\rho(\text{BC})$ 分布特点相似^[28, 29]. 4个站点的最高频率分别为9.6%、6.5%、3.8%和4.5%,对应 $\rho(\text{BC})$ 为0.19、0.31、0.56和 $0.44 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,多个研究中将此值作为当地本底值^[23, 30],BA站点本底浓度最低且出现频率最高,UR站点本底浓度最高且出现频率最低. UR站点本底值高于其他站点,可能由于机动车连续行驶导致的局地BC难以完全消散,浓度维持较高水平,HR站点地处郊区,机动车活动水平波动较大,大气扩散条件较好,本底 $\rho(\text{BC})$ 低于UR站点. 采暖季 $\rho(\text{BC})$ 分布频率与全年分布类似,最高频率浓度一致,可见采暖季排放并未对4站点的本底 $\rho(\text{BC})$ 造成明显影响,原因可能是由于采暖季的排放影响时段与每日 $\rho(\text{BC})$ 最低时间不一致. 非采暖季期间,两个路边站点出现了高于本底值且与本底值频率相似的其他浓度,可能是因为道路边存在一定强度的周期性的机动车排放.

2.3 BC浓度日变化特征

$\rho(\text{BC})$ 日变化曲线能够大致反映源排放时间以及边界层变化情况. 如图5所示,4个站点日变化基本呈双峰型分布:早高峰峰值出现在07:00~08:00,这主要是由于此时段内交通及其他人为活动引起BC排放量大,且日出前后大气垂直扩散条件较差,导致浓度在一段时间内出现积累升高;凌晨峰值出现在00:00~02:00,主要是由于夜间机动车尤其是限行政策下柴油车凌晨通行的排放,而且夜间边界层有下降过程,导致夜间 $\rho(\text{BC})$ 缓慢升高^[19];谷值在14:00~16:00出现,主要是由于机动车活动减少且午后边界层抬升. 这种分布与我国许多城市类似^[31, 32],而有部分城市 $\rho(\text{BC})$ 在20:00前后达到峰值后明显下降,可能与当地夜间机动车活动明显减少有关^[22, 28]. 路边站(UR和HR)受交通排放影响更大,峰值较其他站点更显著;HR与UR站点相比,峰值更高而谷值更低,这可能由于HR处于外环路段,机动车活动时间集中在夜间和早高峰且柴油车比例更高,导致 $\rho(\text{BC})$ 较高,午后机动车

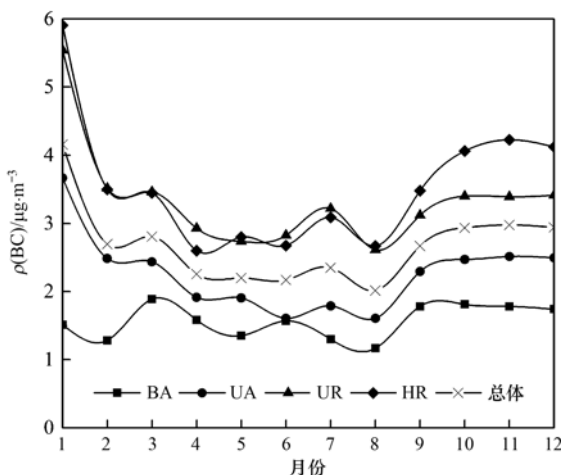


图3 月均 $\rho(\text{BC})$ 变化特征

Fig. 3 Variations of monthly $\rho(\text{BC})$

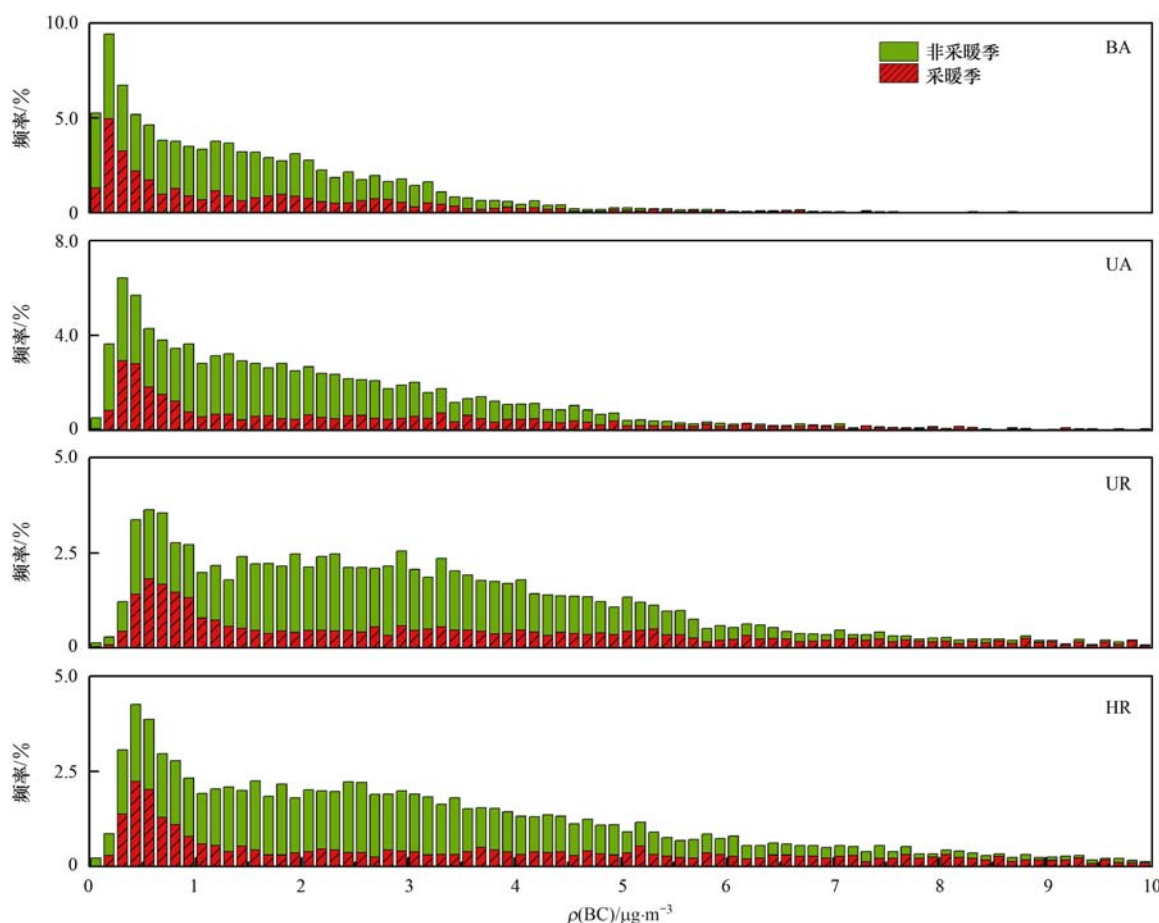


图4 小时 $\rho(\text{BC})$ 的频率分布
Fig. 4 Frequency distribution of hourly $\rho(\text{BC})$

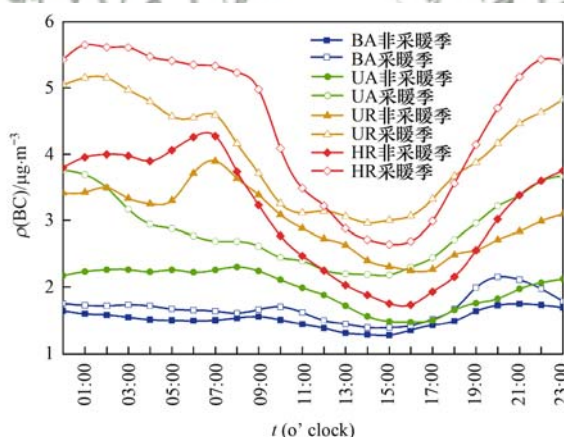


图5 $\rho(\text{BC})$ 日变化特征

Fig. 5 Diurnal variations of $\rho(\text{BC})$

活动水平低于城区道路导致 $\rho(\text{BC})$ 较低. BA点日变化曲线较平缓,有小幅早晚高峰峰值.

双峰的相对高度存在季节性差异:非采暖季早高峰峰值较高,采暖季凌晨峰值较高;由于同一季节夜间与早晨边界层高度与大气扩散条件基本相似,因此峰值相对高度能够大体反映BC排放相对强度;可以看出非采暖季早间交通排放对BC贡献最大,而采暖季夜间燃煤和交通排放对BC有较大贡献.采暖季全天空平均 $\rho(\text{BC})$ 均高于非采暖季,且凌晨前后差异最

大,正午前后差异最小,可见采暖季排放造成 $\rho(\text{BC})$ 增加主要集中于夜间,这与2.2节中“采暖季本底 $\rho(\text{BC})$ 与全年本底值相同”结论大体一致.

2.4 BC浓度影响因素分析

2.4.1 吸收埃斯特朗指数(AAE)分析

BC属于强吸光性颗粒物,吸光度随检测波长减小而增大,该特性可以用公式(1)表示,

$$\sigma_{\text{abs}}(\lambda) = K \cdot \lambda^{-\text{AAE}} \quad (1)$$

式中, $\sigma_{\text{abs}}(\lambda)$ 代表在 λ 波长下,BC的吸收值,可由黑碳仪获得, K 为常数,其中AAE的大小代表了物质吸光的光谱依赖性^[33,34].公式两边取对数后求导,得到AAE公式(2):

$$\text{AAE} = - \frac{d[\ln(\sigma_{\text{obs}})]}{d[\ln(\lambda)]} \quad (2)$$

有研究表明,靠近交通源排放的BC,吸光度对光谱依赖性较低,AAE值在1左右;生物质燃烧排放的BC光谱依赖性较高,AAE通常大于2^[35,36];有研究者将BC来源归为化石燃料和生物质燃料两类,并在计算中用1和2分别代表两类物质的AAE^[37].颗粒物的粒径大小,化学组分和包覆状态也会对AAE值有一定影响^[38~40],因此通过AAE的

值能够获取颗粒物的相关信息,并进一步对其大致来源以及形态变化过程做出推断.国内有不少学者开展了 AAE 的研究,陈慧忠等^[41]的研究使用 AE31 得到东莞和帽峰山颗粒物 AAE 分别为 1.02 和 0.89,随月份变化不明显,得出两地污染均来自化石燃料燃烧的结论;杨晓旻等^[42]的研究使用 AE33 得到南京颗粒物 AAE 均值为 1.31,秋季最高,夏季最低,分别为 1.40 和 1.14,认为当地液体燃料贡献大而固体燃料贡献小.

本研究将黑碳仪输出的 7 个波段数值,通过公式(2)计算得到 AAE 值.从各站点平均 AAE 来看,由高到低的顺序为:BA (1.38) > UA (1.34) > UR (1.26) $\approx$ HR (1.26),表明北京市 BC 来源以化石燃料燃烧为主,其中路边站点受交通排放源影响较大,AAE 较低;背景站远离交通源且受郊区生物质燃烧排放影响,AAE 较高;4 站点非采暖季和采暖季 AAE 分别为 1.23 和 1.46,这是由于采暖季生物质燃烧排放增多,导致 AAE 明显增大.

AAE 日变化见图 6,非采暖季 4 个站点的变化趋势基本一致,呈凌晨低、午后高的分布,推断是由于非采暖季 BC 来源以交通排放为主,且机动车活动时间较为一致,凌晨机动车排放的 BC 引起了 AAE 低值,Cyawali 等^[38]的研究同样观测到因为当地交通排放导致的早高峰时期 AAE 的低值;采暖季时段,BA 站点 07:00 前后的高值可能与生物质的低温燃烧排放有关;UA 站点日变化差异不明显;UR 和 HR 站点的 AAE 低值出现可能与机动车活动时间相关联:UR 站点机动车多在白天通行,HR 站点夜间进出京货车较多,因此 UR 站点 AAE 值白天较低,HR 站点夜间较低.

根据 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 对空气质量进行划分,并比较 4 个站点的 AAE 值.如图 7 所示,4 个站点在任何天

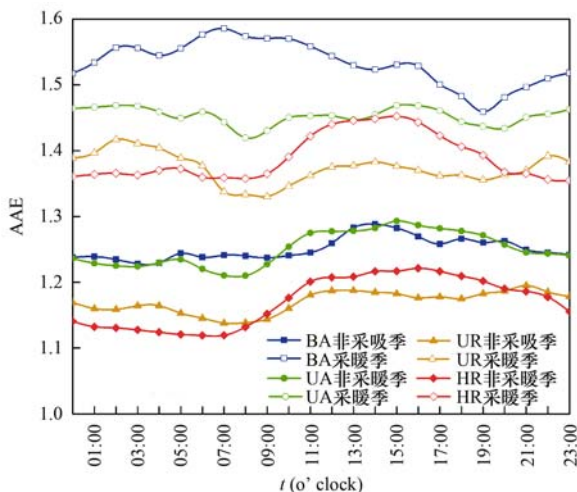


图 6 AAE 日变化特征

Fig. 6 Diurnal variations of AAE

气等级下采暖季 AAE 均高于非采暖季,可见采暖季 AAE 较高的主要原因是生物质燃烧对 BC 贡献增加,与 $\rho(\text{BC})$ 大小相关性不大.采暖季 AAE 随空气质量转差呈先升高后降低趋势.这可能是由于优级空气条件下,BC 以机动车排放为主要来源(尤其是路边站点),随着空气质量转差,生物质燃烧对 BC 贡献增加,因此出现了 AAE 由低变高的趋势,之后污染逐渐加重,BC 遇到大量有机物以及二次盐类,发生凝结碰并导致粒径增大,AAE 出现降低趋势^[43].有研究者观测到在较高污染等级下,BC 会发生更显著的被其他物质包裹现象导致粒径增大^[44];针对合肥地区的 BC 研究结果也发现了类似特点^[45],即污染天 AAE 低于非污染天.非采暖季气温较高,而且大气中其他物质浓度较低,BC 不易发生凝结碰并过程,因此 AAE 随空气质量变化较小.

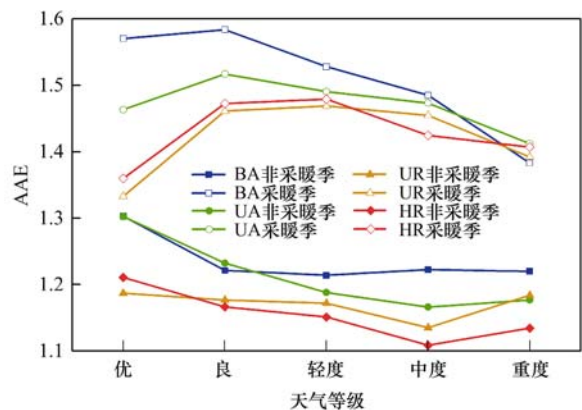


图 7 不同天气等级下 AAE

Fig. 7 AAE in different weather levels

2.4.2 BC 与其它因子的相关性分析

对 BC 与其他污染物以及气象因子进行相关性分析,平均 Pearson 相关系数(r)见表 2.4 个站点全年的 $|r|$ 由高到低分别为 $\text{PM}_{2.5}$ (0.86)、CO (0.81)、 NO_x (0.69)、风速 (-0.37)、相对湿度 (0.34)、气温 (-0.15) 和气压 (0.03),BC 与其他污染物浓度、相对湿度呈正相关,可见 BC 是 $\text{PM}_{2.5}$ 中重要组分部分,且与 CO 和 NO_x 来源相似;虽然湿沉降有利于 BC 的清除,但在扩散条件较差的环境下相对湿度通常较高,BC 局地积累加快,浓度易出现高值^[46],在两种作用综合影响下,二者呈正相关;其他研究结果发现,BC 浓度随相对湿度变化呈单峰分布,相对湿度在 50%~60% 下 BC 浓度最高^[22];也有研究认为相对湿度与 BC 相关性不强,对 BC 浓度影响不大^[47].BC 与风速呈负相关,这是由于风速增加能够加速 BC 消散.BC 与气温和气压相关性不明显.

采暖季污染物与 BC 的 $|r|$ 高于非采暖季,这

表 2 不同污染物及气象因子与 BC 相关系数 r
Table 2 Correlation coefficient between BC and different pollutants/meteorological factors

项目	采暖季	非采暖季	全年
PM _{2.5}	0.90 ± 0.04	0.79 ± 0.07	0.86 ± 0.04
CO	0.88 ± 0.02	0.68 ± 0.05	0.81 ± 0.03
NO _x	0.74 ± 0.05	0.59 ± 0.06	0.69 ± 0.01
风速	-0.42 ± 0.10	-0.37 ± 0.12	-0.37 ± 0.10
气温	-0.01 ± 0.14	-0.07 ± 0.10	-0.15 ± 0.10
相对湿度	0.50 ± 0.05	0.40 ± 0.06	0.34 ± 0.04
气压	-0.32 ± 0.08	0.00 ± 0.03	0.03 ± 0.03

是因为燃煤源作为 4 种污染物共同来源在采暖季的贡献增加所致. 气压与 BC 的 $|r|$ 在采暖季有明显增加, 可能与秋冬季高压对污染物清除作用有关.

BC 和 CO 均为不完全燃烧产物, 燃料种类及燃烧环境会引起二者排放比例不同, 因此研究中多用 $\Delta BC/\Delta CO$ 值来辨识污染物来源. 对 4 个站点的采暖季和非采暖季的 $\rho(BC)$ 和 $\rho(CO)$ 做散点图, 并做拟合直线, 直线斜率作为 $\Delta BC/\Delta CO$ 值, 散点图和拟合公式分别见图 8 和表 3.

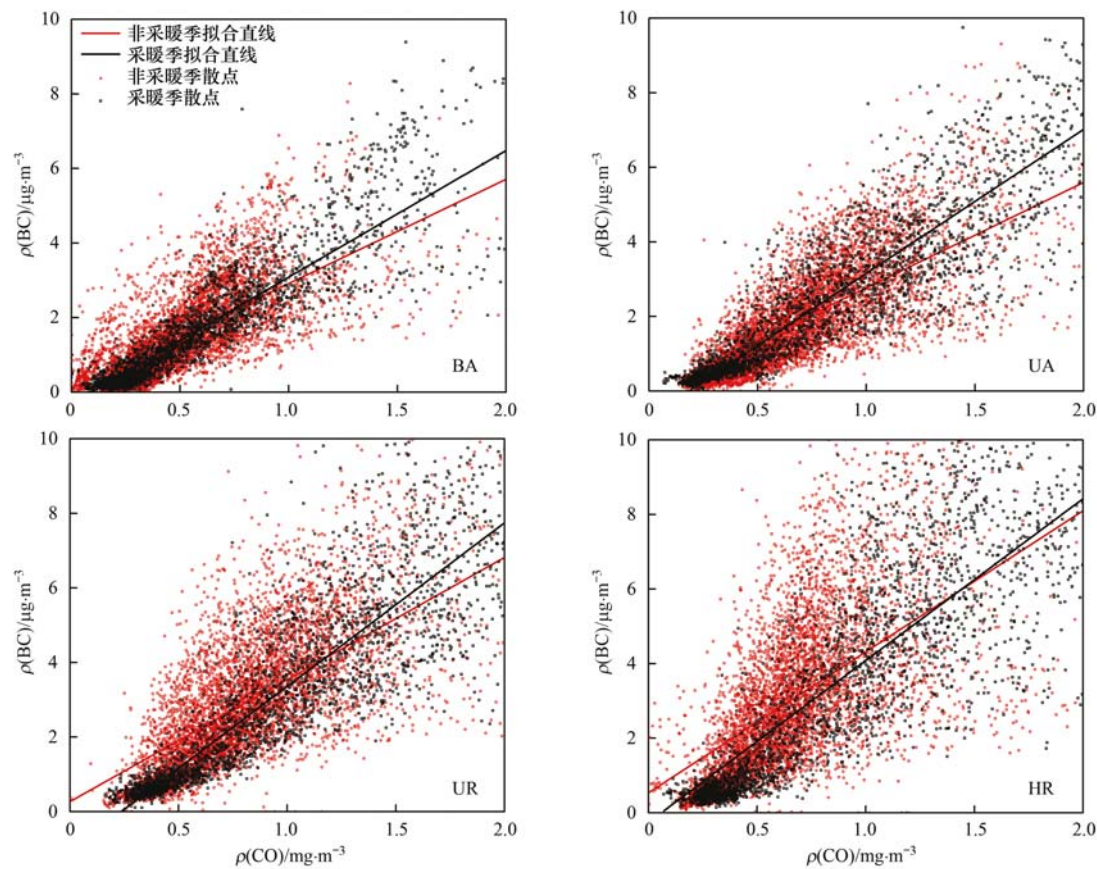


图 8 $\rho(BC)$ 与 $\rho(CO)$ 散点图
Fig. 8 Scatter plot and regression line of $\rho(BC)$ and $\rho(CO)$

4 个站点的平均 $\Delta BC/\Delta CO$ 值分别为 3.1×10^{-3} 、 3.5×10^{-3} 、 3.9×10^{-3} 和 4.1×10^{-3} . 由于重型柴油车 BC 排放因子较高, 轻型汽油车的 CO 排放因子较高, 重型柴油车 $\Delta BC/\Delta CO$ 值远高于轻型汽油车^[48], 因此重型车通行比例较大的 HR 站点比值最高. 文献[4]计算得到轻型汽油车和重型柴油车标况下排放的 $\Delta BC/\Delta CO$ 值分别是 2.0×10^{-3} 和 17.6×10^{-3} . 结果表明北京道路排放以轻型汽油车

为主要来源, 重型柴油车排放也占有一定比例.

各站点采暖季 $\Delta BC/\Delta CO$ 高于非采暖季, 取暖用煤及其他生物质燃料的大量燃烧可能是主要原因, Pan 等^[49]的研究通过观测发现来自城市地区的气团中 $\Delta BC/\Delta CO$ 值为 $(7.0 \pm 0.7) \times 10^{-3}$, 来自生物质燃烧气团为 $(8.2 \pm 0.2) \times 10^{-3}$, Spackman 等^[50]的研究同样也得到城市大气的 $\Delta BC/\Delta CO$ 明显低于生物质燃烧烟羽的结论.

表 3 $\rho(BC)$ 与 $\rho(CO)$ 线性拟合公式
Table 3 Linear fitting formula of $\rho(BC)$ and $\rho(CO)$

项目	BA	UA	UR	HR
采暖季	$y = 3.394x - 0.307$	$y = 3.861x - 0.706$	$y = 4.386x - 1.028$	$y = 4.337x - 0.254$
非采暖季	$y = 2.798x + 0.114$	$y = 2.826x - 0.058$	$y = 3.273x + 0.271$	$y = 3.781x + 0.537$
全年平均	$y = 3.120x - 0.085$	$y = 3.516x - 0.498$	$y = 3.949x - 0.370$	$y = 4.092x + 0.223$

2.5 污染过程中 BC 浓度特征

为了研究污染过程中 $\rho(\text{BC})$ 变化特征及主要影响因素,选取 2 月一次污染过程中 UA 和 UR 两站点 BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据以及相关气象因子进行分析,如图 9 所示. 结合风速风向与 $\text{PM}_{2.5}$ 变化趋势,将整个过程分为 3 个阶段:污染上升期(1~10 h)、污染发展期(11~19 h)和污染消散期(20~27 h).

污染上升期风向由偏北风转为偏南风,两站点 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{BC})$ 同时升高,体现了污染区域性传输特征, $\omega(\text{BC}/\text{PM}_{2.5})$ 逐渐降低,说明污染物可能以二次盐类为主要组分. 污染发展期,风速逐渐降低,扩散条件转差,UA 站点 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{BC})$ 在 15 h 同时到达峰值,分别为 $228 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $6.32 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,之后开始下降. UR 站点 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{BC})$ 峰值分别形成于 17 h 和 18 h,峰值浓度为 $257 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $10.21 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, BC 峰值形成时间滞后于 $\text{PM}_{2.5}$ 可能的原因是:路边机动车 BC 排放量大,不利气象条件下积累较多,与区域传输 BC 叠加,形成峰值晚于

$\text{PM}_{2.5}$. 污染消散期,偏东北风的清除作用下, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{BC})$ 降低, $\text{PM}_{2.5}$ 相对降速更快,可能与二次组分在洁净空气稀释下的加速挥发有关. Liu 等^[51]的研究通过风速和污染物浓度的统计也发现风对 $\text{PM}_{2.5}$ 的去除效率高于 BC ,并认为稀释效应是城区污染物去除的主要因素. 污染发生后两站点 AAE 大体呈下降趋势,UR 站点局地交通排放 BC 较多,AAE 始终低于 UA 站点.

整个过程来看,两站点起始 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{BC})$ 相似,路边站由于受不利扩散条件影响,局地 BC 积累明显, $\rho(\text{BC})$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 峰值分别是城区站的 1.6 和 1.1 倍,有相关研究也得出类似结论,认为 BC 在低风速下有易积累的特点^[46]. 可见路边站在扩散条件不利时,局地交通排放积累明显增多,大量 BC 及气态污染物为颗粒物二次生成提供了更多的附着体与前体物,可能会加速 $\text{PM}_{2.5}$ 中二次组分生成,导致空气污染加重. 因此,重污染期间采取道路交通减排措施对于扼制污染发展有重要意义.

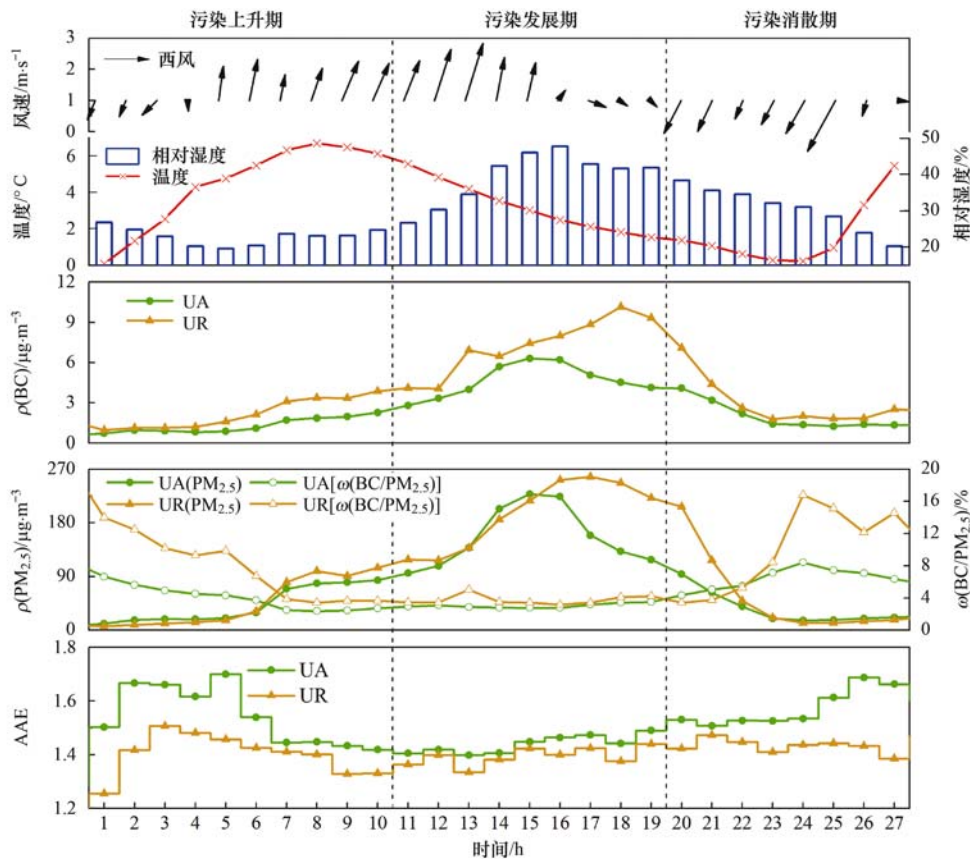


图 9 污染过程中气象因子和污染物浓度变化时间序列

Fig. 9 Variations of pollutants and meteorological factors during a pollution episode

3 结论

(1) BA、UA、UR 和 HR 站点平均 $\rho(\text{BC})$ 为 (1.58 ± 1.15) 、 (2.27 ± 1.67) 、 (3.35 ± 2.13) 和

$(3.57 \pm 2.40) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均 $\rho(\text{BC})$ 、 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 、 $\rho(\text{CO})$ 和 $\varphi(\text{NO}_x)$ 除了 UR 站点 $\rho(\text{CO})$ 高于 HR 站点以外,由低到高顺序均为: $\text{BA} < \text{UA} < \text{UR} < \text{HR}$. 机动车排放导致路边站污染物浓度均高于非路边站.

秋冬季燃煤、生物质燃烧增多、扩散条件变差和春夏季降水的清除作用等,导致采暖季 $\rho(\text{BC})$ 高于非采暖季。

(2) $\rho(\text{BC})$ 日变化曲线呈双峰型结构:非采暖季早高峰时段(07:00~08:00)峰值较高,采暖季全天浓度高于非采暖季且凌晨时段(00:00~02:00)峰值较高,谷值均在午后(14:00~16:00)出现。这可能是由于非采暖季 BC 主要来自交通排放,而采暖季交通与夜间燃煤排放对 BC 有较大贡献。

(3)4 个站点的平均 AAE 值为 1.38、1.34、1.26 和 1.26,化石燃料燃烧为 BC 主要来源,采暖季平均 AAE 为 1.46,高于非采暖季的 1.23,主要是由于采暖季生物质燃烧排放占比增加。非采暖季各站点日变化曲线主要受机动车活动时间影响,一致呈白天高、凌晨低的分布特点,采暖季曲线各异。AAE 随空气质量变差大体呈减小趋势。

(4)BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 、CO、 NO_x 、风速和相对湿度的 r 为 0.86、0.81、0.69、-0.37 和 0.34,采暖季 $|r|$ 更高。4 站点 $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$ 值分别为 3.1×10^{-3} 、 3.5×10^{-3} 、 3.9×10^{-3} 和 4.1×10^{-3} ,可见北京市道路排放以轻型汽油车为主,生物质燃烧和重型柴油车排放均可能是高值的原因。

(5)针对污染过程,UA 站点的 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{BC})$ 变化较同步,区域传输为主要污染源;UR 站点局地排放 BC 积累过程较明显,二次污染易发生;重污染期间采取道路交通减排措施对扼制污染发展有重要意义。

参考文献:

- [1] Cheng J, Su J P, Cui T, *et al.* Dominant role of emission reduction in $\text{PM}_{2.5}$ air quality improvement in Beijing during 2013-2017: a model-based decomposition analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(9): 6125-6146.
- [2] Chen Z Y, Chen D L, Wen W, *et al.* Evaluating the "2+26" regional strategy for air quality improvement during two air pollution alerts in Beijing: variations in $\text{PM}_{2.5}$ concentrations, source apportionment, and the relative contribution of local emission and regional transport[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(10): 6879-6891.
- [3] 北京市生态环境局. 最新科研成果新一轮北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析正式发布[EB/OL]. <http://sthjj.beijing.gov.cn/bjhrb/index/xxgk69/zfxgk43/fdzdgnr2/xwfb/832588/index.html>, 2018-05-14.
- [4] Song S J, Wu Y, Xu J Y, *et al.* Black carbon at a roadside site in Beijing: temporal variations and relationships with carbon monoxide and particle number size distribution[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 213-221.
- [5] Song W W, He K B, Lei Y. Black carbon emissions from on-road vehicles in China, 1990-2030 [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **51**: 320-328.
- [6] 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.
- [7] Shrestha G, Traina S J, Swanston C W. Black carbon's properties and role in the environment: a comprehensive review [J]. *Sustainability*, 2010, **2**(1): 294-320.
- [8] Peng J F, Hu M, Guo S, *et al.* Markedly enhanced absorption and direct radiative forcing of black carbon under polluted urban environments [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(16): 4266-4271.
- [9] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(4): 221-227.
- [10] Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, *et al.* Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(11): 5380-5552.
- [11] Ding A J, Huang X, Nie W, *et al.* Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China [J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, **43**(6): 2873-2879.
- [12] 张骁, 汤洁, 武云飞, 等. 2006-2012 年北京及周边地区黑碳气溶胶变化特征[J]. *中国粉体技术*, 2015, **21**(4): 24-29, 35.
Zhang X, Tang J, Wu Y F, *et al.* Variations of black carbon aerosol observed in Beijing and surrounding area during 2006-2012 [J]. *China Powder Science and Technology*, 2015, **21**(4): 24-29, 35.
- [13] Singh V, Ravindra K, Sahu L, *et al.* Trends of atmospheric black carbon concentration over the United Kingdom [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **178**: 148-157.
- [14] Taheri A, Aliasghari A, Hosseini V. Black carbon and $\text{PM}_{2.5}$ monitoring campaign on the roadside and residential urban background sites in the city of Tehran [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **218**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116928.
- [15] 谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 等. 南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4392-4401.
Xie F, Lin Y Q, Song W H, *et al.* Distribution characteristics and source of black carbon aerosols in the northern suburbs of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4392-4401.
- [16] 王璐, 袁亮, 张小玲, 等. 成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1561-1572.
Wang L, Yuan L, Zhang X L, *et al.* Characteristics and source apportionment of black carbon in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1561-1572.
- [17] 徐冉, 张恒德, 杨孝文, 等. 北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3405-3414.
Xu R, Zhang H D, Yang X W, *et al.* Concentration characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ and the causes of heavy air pollution events in Beijing during autumn and winter [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3405-3414.
- [18] 娄淑娟, 毛节泰, 王美华. 北京地区不同尺度气溶胶中黑碳含量的观测研究[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(1): 17-22.
Lou S J, Mao J T, Wang M H. Observational study of black carbon aerosol in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(1): 17-22.
- [19] 严晗, 吴烨, 张少君, 等. 北京典型道路交通环境机动车黑碳排放与浓度特征研究[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(8): 1891-1899.
Yan H, Wu Y, Zhang S J, *et al.* Emission characteristics and concentrations of vehicular black carbon in a typical freeway traffic environment of Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*,

- 2014, **34**(8): 1891-1899.
- [20] Ji D S, Li L, Pang B, *et al.* Characterization of black carbon in an urban-rural fringe area of Beijing [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **223**: 524-534.
- [21] 张宸赫, 程兴宏, 赵天良, 等. 不同季节气象条件对北京城区高黑碳浓度变化的影响[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(6): 2255-2264.
- Zhang C H, Cheng X H, Zhao T L, *et al.* Impact of meteorological conditions on high black carbon concentrations in urban area of Beijing in different seasons [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(6): 2255-2264.
- [22] 井安康, 朱彬, 丁德平, 等. 中国长江三角洲地区黑碳特征和来源分析[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(9): 3585-3594.
- Jing A K, Zhu B, Ding D P, *et al.* Characteristics and source apportionment of black carbon in the Yangtze River Delta Region of China [J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(9): 3585-3594.
- [23] 程丁, 吴晟, 吴兑, 等. 深圳市城区和郊区黑碳气溶胶对比研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(5): 1653-1662.
- Cheng D, Wu C, Wu D, *et al.* Comparative study on the characteristics of black carbon aerosol in urban and suburban areas of Shenzhen [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(5): 1653-1662.
- [24] 姚志良, 张明辉, 王新彤, 等. 中国典型城市机动车排放演变趋势[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(9): 1565-1573.
- Yao Z L, Zhang M H, Wang X T, *et al.* Trends in vehicular emissions in typical cities in China [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(9): 1565-1573.
- [25] Liu D, Flynn M, Gysel M, *et al.* Single particle characterization of black carbon aerosols at a tropospheric alpine site in Switzerland [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(15): 7389-7407.
- [26] 马品, 曹生现, 刘永红, 等. 2006—2012 年广东省机动车尾气排放特征及变化规律[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(6): 855-861.
- Ma P, Cao S X, Liu Y H, *et al.* Analysis of vehicle emission characteristics and variations in Guangdong province from 2006 to 2012 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, **28**(6): 855-861.
- [27] Wu Y, Zhang S J, Li M L, *et al.* The challenge to NO_x emission control for heavy-duty diesel vehicles in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(19): 9365-9379.
- [28] 徐昶, 沈建东, 叶辉, 等. 杭州黑碳气溶胶污染特性及来源研究[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 3026-3033.
- Xu C, Shen J D, Ye H, *et al.* Characteristics and source of black carbon aerosol pollution in Hangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12): 3026-3033.
- [29] 张昕, 李忠勤, 明镜, 等. 乌鲁木齐河源区黑碳气溶胶浓度特征及其来源分析[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(1): 212-221.
- Zhang X, Li Z Q, Ming J, *et al.* Characteristics of black carbon aerosol and source apportionment at the headwater of Urumqi River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 212-221.
- [30] 汤洁, 温玉璞, 周凌晞, 等. 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究[J]. *应用气象学报*, 1999, **10**(2): 160-170.
- Tang J, Wen Y P, Zhou L X, *et al.* Observational study of black carbon in clean air area of western China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1999, **10**(2): 160-170.
- [31] 汤莉莉, 祝愿, 牛生杰, 等. 南京北郊大气细粒子中黑碳气溶胶的观测研究[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(4): 709-716.
- Tang L L, Zhu Y, Niu S J, *et al.* Observation of black carbon in fine particulate matter in the north suburb of Nanjing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(4): 709-716.
- [32] 张灿, 周志恩, 翟崇治, 等. 重庆市黑碳气溶胶特征及影响因素初探[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(4): 812-818.
- Zhang C, Zhou Z E, Zhai C Z, *et al.* Characteristics and influencing factors of black carbon aerosol in Chongqing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(4): 812-818.
- [33] Liu C, Chung C E, Yin Y, *et al.* The absorption Ångström exponent of black carbon: from numerical aspects [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(9): 6259-6273.
- [34] Bond T C. Spectral dependence of visible light absorption by carbonaceous particles emitted from coal combustion [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(21): 4075-4078.
- [35] Kirchstetter T W, Novakov T, Hobbs P V. Evidence that the spectral dependence of light absorption by aerosols is affected by organic carbon [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109**(D21), doi: 10.1029/2004JD004999.
- [36] Russell P B, Bergstrom R W, Shinozuka Y, *et al.* Absorption Ångström Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(3): 1155-1169.
- [37] Sandradewi J, Prevot 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.
- [38] Gyawali M, Arnott W P, Lewis K, *et al.* In situ aerosol optics in Reno, NV, USA during and after the summer 2008 California wildfires and the influence of absorbing and non-absorbing organic coatings on spectral light absorption [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(20): 8007-8015.
- [39] Flowers B A, Dubey M K, Mazzoleni C, *et al.* Optical-chemical-microphysical relationships and closure studies for mixed carbonaceous aerosols observed at Jeju Island; 3-laser photoacoustic spectrometer, particle sizing, and filter analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(21): 10387-10398.
- [40] Lack D A, Cappa C D. Impact of brown and clear carbon on light absorption enhancement, single scatter albedo and absorption wavelength dependence of black carbon [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(9): 4207-4220.
- [41] 陈慧忠, 吴兑, 廖碧婷, 等. 东莞与帽峰山黑碳气溶胶浓度变化特征的对比[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(4): 605-612.
- Chen H Z, Wu D, Liao B T, *et al.* Compare of black carbon concentration variation between Dongguan and maofengshan [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(4): 605-612.
- [42] 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.
- [43] Scarnato B V, Vahidinia S, Richard D T, *et al.* Effects of internal mixing and aggregate morphology on optical properties of black carbon using a discrete dipole approximation model [J].

- Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13** (10): 5089-5101.
- [44] Yang Y F, Xu X F, Zhang Y J, *et al.* Seasonal size distribution and mixing state of black carbon aerosols in a polluted urban environment of the Yangtze River Delta region, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, **654**:300-310.
- [45] Zhang X L, Rao R Z, Huang Y B, *et al.* Black carbon aerosols in urban central China[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2015, **150**: 3-11.
- [46] Cao J J, Zhu C S, Chow J C, *et al.* Black carbon relationships with emissions and meteorology in Xi'an, China[J]. Atmospheric Research, 2009, **94**(2): 194-202.
- [47] 刘立忠, 王宇翔, 么远, 等. 西安市黑碳气溶胶浓度特征及与气象因素和常规污染物相关性[J]. 中国环境监测, 2016, **32**(5): 45-50.
Liu L Z, Wang Y X, Yao Y, *et al.* Concentration characteristics and the correlations of black carbon aerosols with meteorological factors and conventional pollutants in Xi'an[J]. Environmental Monitoring in China, 2016, **32**(5): 45-50.
- [48] Kondo Y, Komazaki Y, Miyazaki Y, *et al.* Temporal variations of elemental carbon in Tokyo [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, **111** (D12), doi: 10.1029/2005JD006257.
- [49] Pan X L, Kanaya Y, Wang Z F, *et al.* Correlation of black carbon aerosol and carbon monoxide in the high-altitude environment of Mt. Huang in Eastern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(18): 9735-9747.
- [50] Spackman J R, Schwarz J P, Gao R S, *et al.* Empirical correlations between black carbon aerosol and carbon monoxide in the lower and middle troposphere [J]. Geophysical Research Letters, 2008, **35**(19), doi: 10.1029/2008GL035237.
- [51] Liu Q Y, Ma T M, Olson M R, *et al.* Temporal variations of black carbon during haze and non-haze days in Beijing [J]. Scientific Reports, 2016, **6**(1), doi: 10.1038/srep33331.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2020年12月29日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续19次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定。该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响。

CONTENTS

Emission Reduction Potential of Air Pollutants of Thermal Power Industry Based on Carbon Emission Reduction Target and Emission Standard Constraint Scenarios	LI Hui, SUN Xue-li, PANG Bo, <i>et al.</i> (5563)
Volatile Organic Compounds in the Vehicle Repairing Industry of China: Emission, Management, Purification, and Policy	WANG Hai-lin, YANG Tao, NIE Lei, <i>et al.</i> (5574)
Pollutant Emission Inventory of Biomass Combustion Sources in Xining City	GAO Yu-zong, JI Ya-qin, LIN Zi, <i>et al.</i> (5585)
Analysis of Air Quality and Influencing Factors in Sichuan Basin During the COVID-19 Outbreak	CHEN Jun-hui, FENG Xiao-qiong, LI Yuan, <i>et al.</i> (5594)
Estimation of PM _{2.5} Concentration in Sichuan Province Based on Improved Linear Mixed Effect Model and Geo-intelligent Random Forest	WU Yu-hong, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (5602)
Characterization of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric PM _{2.5} in Chengdu During the Later Stage of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan	LI Jia-qi, ZHANG Jun-ke, DONG Gui-ming, <i>et al.</i> (5616)
Characteristics of Chemical Composition and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particulate Matter in Luoyang	SUN Jia-bin, DONG Zhe, LI Li-ping, <i>et al.</i> (5624)
Characteristics and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Beijing	CAO Yang, AN Xin-xin, LIU Bao-xian, <i>et al.</i> (5633)
Chemical Characteristics and Source Apportionment with Temporal Refinement for VOCs in Tianjin Suburb in Summer	WANG Yi-xuan, LIU Bao-shuang, WU Jian-hui, <i>et al.</i> (5644)
Pollution Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds in Shenyang	DU Han-bing, WANG Nan, REN Wan-hui, <i>et al.</i> (5656)
Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric SVOCs Around Typical Chemical Industry Zones	GE Xiang, WU Jian, GAO Song, <i>et al.</i> (5663)
Source Analysis and Health Risk Assessment of Toxic Volatile Organic Compounds in Nanjing in Summer and Winter	ZHANG Zi-jin, LIN Yu-chi, ZHANG Yu-xian, <i>et al.</i> (5673)
Emission Characteristics of Industrial VOCs Based on Emission Inventory and Field Test: A Case Zhengzhou High-tech Zone	REN He, LU Xuan, LIU Yang, <i>et al.</i> (5687)
VOCs Emission Characteristics of Water-based Architectural Coatings and the Influence on the Atmospheric Environment in China	GAO Mei-ping, WANG Hai-lin, LIU Wen-wen, <i>et al.</i> (5698)
WRF-Chem Simulations of the Impacts of Uncertainty in VOCs Emissions on Ozone Formation and Control Strategies	WANG Feng, WANG Jian-wei, YANG Ning, <i>et al.</i> (5713)
Spatial and Temporal Distribution of Ozone and Influencing Factors in Shandong Province	ZHANG Miao, DING Chun, LI Yan, <i>et al.</i> (5723)
Chemical Characteristics and Contaminant Sensitivity During the Typical Ozone Pollution Processes of Chengdu in 2020	QIAN Jun, XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (5736)
Development of an Emission Model for Oxygenated Volatile Organic Compounds from Gasoline Vehicles Based on the Online Measurement	HAO Yu-qi, YUAN Zi-bing, WANG Meng-lei, <i>et al.</i> (5747)
Dynamic Evolution Characteristics of Water Resources Utilization Efficiency in China Under the Constraint of Triple Attribute Carrying Capacity	ZHANG Kai, WU Feng-ping, CHENG Chang-chun (5757)
Prediction of Total Nitrogen Load in Yangtze River Basin	DING Zhao-wei, ZHENG Hua (5768)
Dynamic of Net Anthropogenic Nitrogen Inputs and Riverine Nitrogen Export in the Yangtze River Basin in 1980-2015	YAO Meng-ya, HU Min-peng, CHEN Ding-jiang (5777)
Characteristics of Water Environment and Spatial-temporal Distribution of Nitrogen and Phosphorus Load in the Yellow River	HAN Xu, PAN Bao-zhu, CHEN Yue, <i>et al.</i> (5786)
Analysis of Nitrate Pollution Sources Under Different Rainfall Conditions Based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Values	XING Zi-kang, YU Zhong-bo, YI Peng, <i>et al.</i> (5796)
Seasonal Variation Characteristics of Eukaryotic Microbial Community Composition in the Source Water Reservoir	ZHANG Hai-han, HUANG Xin, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5804)
Characteristics of Planktonic Bacteria Community Between Summer and Winter Surface Water in Dali Lake	LI Wen-bao, GUO Xin, ZHANG Bo-yao, <i>et al.</i> (5814)
Impacts of Wastewater Effluent Discharge on Bacteria Community and Water-soluble Organic Matter in Benthic Biofilm in Receiving River	WANG Yu-tao, FAN Chen-yang, ZHU Jin-xin, <i>et al.</i> (5826)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical POPs in Typical Drinking Water Sources in Wuhan	ZHANG Kun-feng, FU Qing, TU Xiang, <i>et al.</i> (5836)
Investigation on Fluoroquinolone Resistance Genes in the Intensive Aquaculture Area of Shatianhu Intensive Aquaculture Farm and Surrounding Waterbodies in Shanghai, China	XU Mu, LI Shi-hao, MA Jin, <i>et al.</i> (5848)
Influencing Factors of Nitrogen Removal from Low-Pollution Water by Aerated Constructed Wetland	LI Lin-lin, LI Rong-tao, KONG Wei-jing, <i>et al.</i> (5857)
Removal of Characteristic Pollutants in Livestock Wastewater by Horizontal Subsurface Flow Constructed Wetlands	ZHAO Wei, FAN Zeng-zeng, YANG Xin-ping (5865)
Improvement of Nitrogen and Phosphorus Adsorption and Stormwater Retention Capacity by Hardwood Biochar as an Additive Material in Filler Soil	MENG Yi-ke, WANG Yuan, WANG Chuan-yue, <i>et al.</i> (5876)
Removal of Ammonia Nitrogen from Polyvinyl Alcohol/Sodium Alginate Fixed Micron Zeolite Powder in Black and Smelly Rivers	WEI Chao, CHEN Tao, JIANG Qiao, <i>et al.</i> (5884)
Effect of Corn Stalk Biochar on the Adsorption of Aureomycin from Sierozem	NAN Zhi-jiang, JIANG Yu-feng, MAO Huan-huan, <i>et al.</i> (5896)
Microbial Degradation Potential and Transformation Pathway of Micropollutants in Sand Filters of Drinking Water Treatment Plants	ZHOU Jie, WANG Dong-lin, LIN Hui, <i>et al.</i> (5905)
Long-term Trends in Illicit Drugs Abuse in the City Assessed by Wastewater Analysis	CAO Yu, DONG Xiao-tang, SHAO Xue-ting, <i>et al.</i> (5912)
Stress and Post Effects of Azithromycin and Copper on Archaeal Community and ARGs in Activated Sludge	GAO Yu-xi, LI Xing, ZHAO Jun-ru, <i>et al.</i> (5921)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Soil Heavy Metals at Typical Smelting Industry Sites	LI Qiang, CAO Ying, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (5930)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Heavy Metals in Coking Sites in China	WANG Yao-feng, HE Lian-sheng, JIANG Deng-ling, <i>et al.</i> (5938)
Spatial Variation and Risk Assessment of Heavy Metals in Soils of Main <i>Torreya grandis</i> Plantation Region in Zhejiang Province	WANG Min, DONG Jia-qi, BAI Long-long, <i>et al.</i> (5949)
Investigations on the Derivation of Safe Maize-Producing Threshold of Soil Cd Content and on Classification of Cd Contaminated Maize-Producing Areas in Northern China	GUAN Wei-dou, GUO Di, WANG Ping, <i>et al.</i> (5958)
Relationship Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Contents in Soil Aggregates and in Crops Around a Typical Pb-Zn Mining Area	QIANG Yu, LI Ying-ju, LUO Qian, <i>et al.</i> (5967)
Heavy Metal Pollution and Cumulative Effect of Soil-crop Systems Around Typical Enterprises in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, WANG Qiao-lin, WANG Cheng-wen, <i>et al.</i> (5977)
Heavy Metal Accumulation Effect and Safe Planting Zoning of Soil and Rice in Tongren	ZHU Liang-liang, WU Yong, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (5988)
Effect of Dry-Wet Alternation on the Immobilization of Arsenic in Red Soil by Cerium Manganese Modified Biochar	HUANG Xiao-ya, LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, <i>et al.</i> (5997)
Ammonium Nitrogen Fertilizer and Humic Acid Synergically Promote the Removal of Cd from Soil by <i>Tagetes patula</i> L.	WANG Bing-qing, YANG Qin, LI Hong-ying, <i>et al.</i> (6006)
Characteristics and Influencing Factors of the Dissolved Methane and Nitrous Oxide Concentrations and Emissions from a Rice Paddy Drainage River in China	WU Shuang, YANG Wei-tong, SHENG Yang-yue, <i>et al.</i> (6014)
Coupling Effects of Water-saving Irrigation and Controlled-release Fertilizer (CRF) Application on CH ₄ and N ₂ O Emission in Single Cropping Paddy Field	WANG Yong-ming, XU Yong-ji, JI Yang, <i>et al.</i> (6025)
Effects of Manure Combined Chemical Fertilizers on Soil N ₂ O Emission and Microbial Characteristics of Wheat Crop System in Northwest Arid	WANG Kai, SHI Lei, MA Long, <i>et al.</i> (6038)
Effects of Different Types of Straw Returning on the Bacterial Community, Organic Carbon Mineralization and Maize Yield in Upland Red Soil	KONG Pei-jun, ZHENG Jie, LUAN Lu, <i>et al.</i> (6047)
Effects of Nitrogen and Phosphorus Additions on Soil Microorganisms in Saline-alkaline Grassland	YANG Jian-qiang, DIAO Hua-jie, HU Shu-ya, <i>et al.</i> (6058)
Effects of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Nutrients and Phosphorus Forms in Purple Soils	XIANG Shu-jiang, YU Luo, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i> (6067)
Effects of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochar and Wood Vinegar Co-application on Takyric Solonetz Improvement and Yield of Oil Sunflower	WANG Zheng, SUN Zhao-jun, Sameh El-Sawy, <i>et al.</i> (6078)