

目次(卷终)

基于气象条件指数的我国重点区域 PM _{2.5} 和臭氧复合污染气象影响评估	杨欣, 杨元琴, 李红, 高健, 牛军捷, 储王辉, 刘世杰, 陈义珍, 何友江, 赵好希 (6433)
“2+26”城市 PM _{2.5} 与气象因子的尺度依存关系及影响因素分析	吴舒祺, 金团团, 郑冬阳, 顾杨吻, 赵文吉 (6441)
武汉军运会前后大气 PM _{2.5} 化学组分和来源	刘世豪, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 祁士华 (6452)
2016~2020年邯郸市冬季 PM _{2.5} 污染特征与来源解析	牛红亚, 高娜娜, 鲍晓磊, 胡伟, 胡偲豪, 吴春苗, 马心怡, 纪晓腾, 樊景森, 王金喜 (6463)
渭南市冬季 PM _{2.5} 化学组成及来源解析	郭景宁, 李小飞, 余锋, 张蕊, 高月, 杨雯 (6474)
长三角城郊冬季 PM _{2.5} 中铵盐的形成过程及来源解析	项妍琨, 曹芳, 张雯洪, 范美益, 章炎麟 (6486)
上海城区硝基芳香族化合物的化学组成及特征分析	杨露, 马英歌, 郁建珍, 吴宇航, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 黄成, 童张法 (6495)
吕梁市 PM _{2.5} 中多环芳烃的来源解析及健康风险评估	牟玲, 刘紫叶, 李杨勇, 李雪梅, 李晓帆, 刘添, 冯传阳, 姜辛 (6508)
广西背景大气中生物质燃烧对碳质气溶胶组成和吸光性的影响	吴星麒, 曹芳, 洪一航, 邢佳莉 (6518)
南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征	陈星州, 崔世杰, 张运江, 先久坤, 王镜雯, 汪俊峰, 盖鑫磊 (6529)
京津冀地区“煤改电”对 PM _{2.5} 污染的健康效益评估	张茹婷, 陈传敏, 刘松涛, 吴华成, 周卫青, 李朋 (6541)
基于化学损耗修正的青岛胶州市环境 VOCs 来源解析	孔翠丽, 吴雨彤, 顾瑶, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 刘保双 (6551)
聊城市城区夏季 VOCs 污染特征及来源解析	李万勇, 黄浩瑜, 王艳振, 朱子博, 王一秋, 高艳珊, 彭娜娜, 伦小秀, 黄亮, 冯如帆, 菅月诚, 王强 (6564)
基于三维空气质量模型的淄博市臭氧及前体物来源解析	张馨心, 赵秀颖, 黄凌, 薛金, 卞锦婷, 王杨君, 李莉 (6576)
中国高温下臭氧抑制事件的时空特征及其影响因素	欧林冲, 陈伟华, 伍永康, 吴乐敏, 王雪梅 (6586)
基于无人机的城市大气细颗粒物与臭氧污染探测与溯源研究进展	曲雅微, 王体健, 袁成, 吴昊 (6598)
京津冀地区机动车细颗粒物污染的健康影响分析	郝永佩, 宋晓伟, 宋晓东, 王京伟, 程鹏 (6610)
中国水泥行业通过 CCUS 技术的减排潜力评估	魏宁, 刘胜男, 魏凤, 李小春 (6621)
钢铁行业生命周期碳排放核算及减排潜力评估	宋晓璐, 杜帅, 邓陈宁, 谢明辉, 沈鹏, 赵慈, 陈忱, 刘晓宇 (6630)
珠江三角洲二氧化碳源汇演变特征及驱动因素	胡景心, 沙青娥, 刘慧琳, 张雪驰, 郑君瑜 (6643)
东莞市低碳路径下加速电气化对 CO ₂ 和污染物协同减排影响	吴乐敏, 陈丙寅, 欧林冲, 白玉洁, 刘可旋, 王伟文, 彭勃, 王雪梅 (6653)
县域尺度下长株潭地区城市化与碳排放的关系	刘贤赵, 李阳 (6664)
城市草坪温室气体排放特征及影响因素	陈丽涵, 刘硕, 林溢, 郭娜, 臧昆鹏, 陈圆圆, 李嘉鑫, 邱珊珊, 卿雪梅, 洪海祥, 蒋凯, 熊浩宇, 方双喜 (6680)
双视角下中国畜牧业甲烷排放的温室效应	刘舒乐, 严薇, 高庆先, 马占云 (6692)
中国典型流域有机磷酸酯的污染特征与风险评估	赵江陆, 路海健, 吕佳佩, 杨江涛, 罗莹, 曹渺, 孙善伟, 郭昌胜, 徐建 (6700)
黄河下游悬河段饮用水源地土壤重金属污染、来源及健康风险	彭超月, 任翀, 申浩欣, 王艳峰, 段海静, 王玉龙, 李旭辉, 刘德新, 马建华 (6710)
黄河干流沉积物重金属的赋存形态特征及污染评价	王依滴, 欧阳威, 刘连华, 陆中桂 (6720)
土地利用结构与空间格局对鄱阳湖流域中小河流水质的影响	温嘉伟, 王鹏, 黄高翔, 张华, 聂明华, 丁明军, 折远洋 (6728)
内蒙古典型湖泊水环境特征及水质评价	王欣远, 潘保柱, 王立新, 刘铁军, 廖梓龙, 韩译, 杨子杰 (6744)
锡林河上游雨季降水、河水和地下水转化关系	孙金, 王怡璇, 杨璐, 段利民, 褚少杰, 张桂馨, 张波, 刘廷玺 (6754)
西北盐湖流域地下水水化学特征及控制因素	艳艳, 高瑞忠, 刘廷玺, 房丽晶, 王银龙 (6767)
巴里坤-伊吾盆地平原区地下水污染风险评价	刘钰, 曾妍妍, 周金龙, 闫志云, 白凡 (6778)
亚硫酸氢盐强化微量 Fe ²⁺ 活化过二硫酸盐降解扑热息痛	莫苗婷, 聂淑华, 晏彩霞, 丁明军, 陈诗瑶, 聂明华 (6790)
污泥生物炭活化过一硫酸盐降解环丙沙星	郑大洋, 邹佳丽, 徐皓, 王滕, 石宇翔, 陈永健, 李彬阳, 王亚宜, 冯沁, 吴敏 (6801)
NaHCO ₃ 活化荞麦皮生物炭对碘酸钾的吸附	魏红, 赵江娟, 景立明, 钮金芬, 付冉, 董莹 (6811)
竹基 N、P 共掺杂活性炭的制备及其铜离子吸附性能	王贵龙, 刘艳艳, 江荣源, 李思敏, 林冠峰, 卢贝丽, 黄彪, 陈燕丹 (6823)
西南高山峡谷区植被变化及影响因素分析	赖金林, 齐实, 崔冉冉, 廖瑞恩, 唐颖, 李鹏 (6833)
生物炭施用对农田土壤团聚体及有机碳影响的整合分析	孟艳, 沈亚文, 孟维伟, 王旭清, 李宗新, 刘开昌, 代红翠 (6847)
农田土壤碳循环过程及其量化方法	孙昭安, 朱彪 (6857)
生物炭施用 5 a 后对桂北桉树人工林土壤有机碳组分的影响	牟芝熠, 沈育伊, 曹杨, 王紫卉, 陈运霜, 滕秋梅, 黄科朝, 毛馨月, 徐广平 (6869)
喀斯特地区植被恢复下土壤活性有机碳与碳库管理指数的演变特征	蔡华, 舒英格, 王昌敏, 廖远行, 罗秀龙, 龙慧, 李雪梅 (6880)
中国典型抗生素在环境介质中的污染特征与生态风险评估	陈丽红, 曹莹, 李强, 孟甜, 张森 (6894)
基于 MGWR 的土壤 pH 值空间建模及其影响因素分析	赵明松, 陈宣强, 徐少杰, 邱士其, 王世航 (6909)
某燃煤电厂周边农田土壤重金属污染特征及源解析	张军, 李旭, 刘磊玉, 李雨茹 (6921)
重庆典型在产石化场地土壤污染特征及来源解析	张渝蓉, 罗帅, 陈媛, 曹军, 刘斌, 刘元元 (6933)
高垦殖丘陵区不同类型农用地土壤中抗生素抗性基因分布特征	陈瑞, 程建华, 唐翔宇 (6947)
有机肥配施生物炭对果园土壤反硝化微生物和酶活性的影响	邓正昕, 高明, 熊子怡, 王莹燕, 谢军, 王子芳 (6955)
有机肥处理对旱地红壤细菌群落及玉米生产力的影响	林婷婷, 郑洁, 朱国繁, 梁璐, 杨叶钰萍, 刘佳, 徐勤松, 孙波, 蒋瑞霖 (6965)
微塑料和镉复合污染对狼尾草根际土壤微生物群落结构和功能的影响	段莉阳, 张玉, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 (6973)
设施番茄种植年限对土壤理化性质及微生物群落的影响	赵阳阳, 刘银双, 宋瑶, 张晓旭, 贾振华, 黄亚丽 (6982)
3 种氧化剂对焦化场地多环芳烃的修复效果与土著微生物的响应关系	李伟, 王伟伟, 孟祥宇, 孙英杰, 王亚楠, 李书鹏, 杨乐巍, 刘鹏, 刘渊文 (6992)
河北省不同盐渍化土壤类型的微生物多样性与种群结构	刘银双, 牛宏进, 赵阳阳, 孙宏勇, 陈晓波, 黄亚丽 (7004)
玉米根际微生物氮磷转化的功能基因组学分析	汪香君, 姜美彤, 李森, 倪浩为, 孙波, 梁玉婷 (7014)
外源菌剂联合柠檬酸强化龙葵修复土壤镉污染	王楷, 王丽, 王一钡, 游梦, 梁婷, 邹茸, 范洪黎 (7024)
1 株肠杆菌与硫酸盐联合施用对水稻积累镉的影响	张朴心, 姚俊帆, 刘玉玲, 张威宇, 尹雪斐, 铁柏清 (7036)
《环境科学》第 44 卷(2023 年)总目录	(7045)
《环境科学》征订启事(6507)	
《环境科学》征稿简则(6620)	
信息(6743, 6846, 6856)	

南京北郊大气棕碳吸光特性、来源及其季节变化特征

陈星州^{1,2}, 崔世杰², 张运江², 先久坤², 王镜云², 汪俊峰², 盖鑫磊^{2*}

(1. 南京信息工程大学化学与材料学院, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 大气棕碳(BrC)是对大气颗粒物中具有吸光能力的一类有机物的总称,其对空气能见度及气候系统均有重要影响.自2021年3月至2022年2月底于南京北郊利用黑碳仪测定了气溶胶中BrC的光吸收系数,利用最小相关性法分别定量一次(BrC_{pri})和二次棕碳(BrC_{sec})贡献,结合后向轨迹、潜在来源和日均变化,分析季节变化特征.结果表明,观测期间BrC的平均光吸收系数(370 nm)为(7.76 ± 7.17) Mm⁻¹,对于总气溶胶光吸收贡献率为(22.0 ± 8.8)%.不同波长下棕碳吸光系数在四季呈现U字形变化,即春季和冬季高,夏季和秋季低.BrC_{pri}和BrC_{sec}(370 nm)全年光吸收贡献分别为(62.9 ± 21.4)%和(37.1 ± 21.4)%;前者在四季均占主导,但随着波长增加,BrC_{sec}的贡献逐渐增加并最终占主导(如在660 nm时).除冬季以外,BrC在其他季节受到来自海上气团的显著影响,而冬季受当地及周边地区排放影响更为显著.交通排放对春、夏和秋季对一次排放BrC影响比冬季大,而燃煤和生物质燃烧则对冬季一次排放BrC影响较大.光化学和液相反应过程在不同季节对二次BrC有不同程度的影响,夏季主要来源于光化学反应,而冬季则主要来源于液相反应,而这两种反应也均是春季和秋季二次BrC重要生成途径.

关键词: 棕碳(BrC);黑碳仪(AE33);吸光;来源;最小相关性法(MRS)

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)12-6529-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202212194

Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing

CHEN Xing-zhou^{1,2}, CUI Shi-jie², ZHANG Yun-jiang², XIAN Jiu-kun², WANG Jing-yun², WANG Jun-feng², GE Xin-lei^{2*}

(1. School of Chemistry and Materials Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Brown carbon (BrC) refers to a group of organic compounds in fine atmospheric particles (PM_{2.5}) that are able to absorb light in the ultraviolet and visible range. They have a significant impact on the visibility of air and on the earth's climate. In this study, we used a black carbon analyzer (Model AE33) to conduct field measurements in northern suburban Nanjing from March 2021 to February 2022. We measured the light absorption coefficients of BrC in PM_{2.5} and quantified the contributions of primary (BrC_{pri}) and secondary brown carbon (BrC_{sec}) in BrC by using the minimum correlation method (MRS), combined with the backward trajectories, potential source contribution function (PSCF) analysis, and diurnal patterns to analyze the seasonal characteristics of BrC. The results showed that the annual average light absorption of BrC was (7.76 ± 7.17) Mm⁻¹ (at 370 nm), and its contribution to the total aerosol light absorption was (22.0 ± 8.8)%. BrC light absorption at different wavelengths all showed a U-shape seasonal variation of high in spring and winter and low in summer and fall. MRS analysis showed that the annual average contributions of BrC_{pri} and BrC_{sec} were (62.9 ± 21.4)% and (37.1 ± 21.4)% (at 370 nm), respectively; however, the contribution of BrC_{sec} increased with the increase in wavelength, and it became dominant in longer wavelengths such as 660 nm. Backward trajectory and PSCF analysis showed that BrC was heavily influenced by air masses from the sea in spring, summer, and fall but was influenced greatly by local and regional continental emissions in winter. Traffic emissions in spring, summer, and fall were more intense to contribute to BrC_{pri} than that in winter, whereas coal and biomass combustion had a greater impact on BrC_{pri} in winter. Detailed analysis revealed that gas-phase photochemistry and aqueous chemistry had different influences on BrC_{sec} formation in different seasons. It was mainly from gas-phase photochemistry in summer but was dominated by aqueous process in winter; both processes, however, were important pathways to BrC_{sec} in spring and fall.

Key words: brown carbon (BrC); aethalometer (AE33); light absorption; source; minimum correlation method (MRS)

大气细粒子(PM_{2.5},等效粒径小于2.5 μm的颗粒物)因粒径较小易由呼吸道进入人体,引起各种健康危害,同时对地球气候也有重要影响.碳质组分是PM_{2.5}最主要的组成部分,主要包括元素碳(elemental carbon)和有机(organic carbon, OC)^[1].众所周知,元素碳(或者黑碳)是大气中十分重要的吸光物质,但在OC中,也有部分有机物在近紫外到可见光波段内对光有明显的吸收作用,即“棕碳”(brown carbon, BrC)^[2]. BrC不是某一种化合物的名称,而是一系列具有光吸收特性的化合物的总称.由

于大气中的BrC也能通过消光作用改变大气能见度,影响大气辐射过程,对气候和环境产生不可忽视的影响^[3],因此关于BrC光学性质目前也受到了大气环境学者的广泛关注.

现阶段关于BrC的研究较多基于实验室分析,

收稿日期: 2022-12-26; 修订日期: 2023-02-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(42021004, 21976093); 江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX22_0368)

作者简介: 陈星州(1998 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气颗粒物的光学性质分析, E-mail: Chanxingzhou@163.com

* 通信作者, E-mail: caxinra@163.com

如通过滤膜采集大气颗粒物,对溶剂(如水或甲醇^[4-7])萃取的组分进行化学分析和吸光/荧光性质测定等,探究其组成和光学特性.目前大量研究显示,BrC 包括一些大分子有机化合物(尤其是包含芳环的高度共轭的化合物)、或具有一些含氮、含氧等极性官能团的有机物、或腐殖酸类物质(HULIS)^[5,8,9].在外场观测方面,由于在线仪器时间分辨率高,能够更加实时动态地反映 BrC 的变化趋势,因此近几年来也有所增加.此类仪器如烟尘颗粒物吸收光度计(PSAP)、黑碳仪(aethalometer, AE33)、光声消光仪(PAX)和光声光谱仪(PAS)等,可通过测量气溶胶的光吸收系数推算出 BrC 的光吸收贡献^[10-12],再结合其他仪器如气溶胶质谱仪(AMS)测得的气溶胶化学组成和来源解析结果,可探究不同组分及来源对于 BrC 光吸收的影响^[13-16].当前研究表明,一次排放和二次生成均对 BrC 有重要贡献.一次排放包括交通尾气、煤炭与生物质燃烧和工业排放等.二次生成指空气中的一些前体物分子(包括挥发性或半/中挥发性有机物等)通过一系列复杂的化学反应^[17,18](包括气相、液相或非均相反应等^[19-22])生成.例如,有研究发现在一些地区^[23,24],生物质燃烧排放物的大气氧化产物是 BrC 的一个主要来源,且产生的 BrC 吸光能力有较强的光谱依赖性^[25].

本研究将通过在南京开展的一年期大气细颗粒物光学性质的在线测量,结合气象和常规气体污染物数据和后向轨迹分析等,探究大气棕碳的吸光性、一次和二次来源的贡献及其季节性变化特征,以期理解当地棕碳污染特征及防治提供一定参考.

1 材料与方法

1.1 观测站点和仪器

本研究观测时间为 2021 年 3 月初到 2022 年 2 月底(一年整),观测地点位于江苏省南京北郊的南京信息工程大学校园内气象观测场(32°12′20.82″N,118°42′25.46″E).该观测地点周围可能的污染来源包括交通排放(东侧约 2 km 为江北快速公路,上下班车流量大)、工业园区排放(采样点临近工业园区,东部和东南部约 5 km 有大量石油化工、化学材料、冶金工厂和燃煤发电厂)以及包括居民活动在內等的人为排放(观测点四周有较多居民住宅和农田).

本研究所用在线观测仪器为黑碳仪 AE33.该仪器主要原理是利用 2.5 μm 切割头采集空气中的细颗粒物,通过 7 个波长(370、470、520、590、660、880 和 950 nm)的光透过含有采集颗粒物的滤纸,根

据光透过的衰减变化而得到各个波长下的气溶胶光吸收系数.其中 880 nm 下测得的光吸收系数经换算所得颗粒物浓度,即为环境大气黑碳浓度(等效黑碳浓度,eBC).本研究中,AE33 设置的采样时间分辨率为 1 min,流速为 5 L·min⁻¹.与之前型号的 AE30 和 AE31 相比,AE33 采用“双点位采样”对“负载效应”^[26]进行了校正;具体做法是让大气颗粒物以不同的流速沉积在滤带上,通过比较不同流速下颗粒物沉积在滤带上相邻两个点得到一个实时补偿参数 K 对误差进行修正^[27].

除 AE33 测定气溶胶光吸收系数之外,气象参数包括温度(T)、相对湿度(RH)、风向(WD)、风速(WS)和常规空气污染物(CO、NO₂、SO₂、O₃、PM_{2.5})浓度数据均来自于临近的江苏省南京市环境监测站点(距离观测点约 4 km),数据时间分辨率为 1 h.

1.2 数据分析

1.2.1 光吸收参数的计算

气溶胶在各个波长下的吸光强度由光吸收系数(Mm⁻¹)表示,它由仪器输出的等效黑碳浓度(eBC)和该波长下的光吸收截面(mass absorption cross-section, MAC)经验值的积得到,公式如下:

$$\text{babs}_\lambda = \text{eBC} \times \text{MAC}_{\text{BC},\lambda} \quad (1)$$

式中,babs_λ为气溶胶在波长 λ 下的光吸收系数,MAC_{BC,λ}为波长 λ 下 BC 光吸收截面经验参数(例如 880 nm 下的 MAC 值为 7.77 m²·g⁻¹,该值仅为一个经验参数,并不能完全代表实际大气中的 MAC 值).BC 和 BrC 在某波长(λ₁)下光吸收系数分别如式(2)和式(3)所示:

$$\text{babs}_{\text{BC}\lambda_1} = \text{babs}_{\text{BC}880} \times (\lambda_1/880)^{-\text{AAE}_{\text{BC}}} \quad (2)$$

$$\text{babs}_{\text{BrC}\lambda_1} = \text{babs}_{\lambda_1} - \text{babs}_{\text{BC}\lambda_1} \quad (3)$$

式中,AAE_{BC}取值和大多数研究一样为 1^[25,28](也即 BC 吸光没有波长依赖性).大部分研究表明,利用 BC 和 BrC 在不同波长下的吸光差异可以分离出气溶胶中 BrC 的吸光.一般认为气溶胶在近红外区域的吸光全部由 BC 贡献,利用式(2)得到 BC 在短波长 λ₁ 下的吸光系数,同时该短波长下气溶胶的光吸收由 BC 和 BrC 两部分贡献,因此气溶胶的总吸光和 BC 吸光的差值即为 BrC 的吸光系数(babs_{BrCλ₁})如式(3).

由于气溶胶在近红外波段(880~950 nm)的光吸收被认为全部由 BC 贡献,因此也可用 babs₉₅₀ 表示 BC 的光吸收.BC 的光吸收根据来源的不同可分为机动车排放(babs_{BCff})和非机动车排放(babs_{BCnon_ff})部分,如式(4)所示.以往研究认为 BC 主要来自交通排放和生物质燃烧^[29],并且利用溯源

模型计算了 BC_{ff} 和 BC_{bb} ^[30]. 本研究将 BC_{bb} 改为 BC_{non_ff} , 因为 BC_{non_ff} 随着季节的不同, 其主要来源可能会有差异. 式(5)和式(6)中, 交通排放和非交通排放的 AAE 值根据当地排放类型选取了较为合理的值, AAE_{ff} 和 AAE_{non_ff} 分别为 0.9 和 1.8^[31,32].

$$babs_{950} = babs_{BC_{ff950}} + babs_{BC_{non_ff950}} \quad (4)$$

$$babs_{BC_{ff470}}/babs_{BC_{ff950}} = (470/950)^{-AAE_{ff}} \quad (5)$$

$$babs_{BC_{non_ff470}}/babs_{BC_{non_ff950}} = (470/950)^{-AAE_{non_ff}} \quad (6)$$

$$babs_{ff950}/babs_{950} = BC_{ff}/BC \quad (7)$$

气溶胶对于光的波长依赖性 (AAE), 本研究选用 370 ~ 880 nm 的 AAE 值, 由式(8)得到:

$$AAE_{\lambda_1-\lambda_2} = -[\ln(babs_{\lambda_1}/babs_{\lambda_2})/\ln(\lambda_1/\lambda_2)] \quad (8)$$

1.2.2 一次和二次棕碳的分离

本研究使用最小相关性 (MRS) 的方法分离出 BrC 中的一次 (BrC_{pri}) 和二次 (BrC_{sec}) 的吸光贡献, 如式(9)和式(10)所示:

$$babs_{BrC_{sec}} = babs_{\lambda} - (babs_{\lambda}/eBC)_{pri} \times eBC \quad (9)$$

$$babs_{BrC_{pri}} = babs_{BrC_{\lambda}} - babs_{BrC_{sec}} \quad (10)$$

式中, eBC 为 880 nm 下的等效黑碳浓度. MRS 方法是一种示踪法, 它以 BC 为示踪物, 通过假设的一系列 ($babs_{\lambda}/eBC$) 的比值算出一系列对应的 $babs_{BrC_{sec}}$ 假设值. 通过比较 BrC_{sec} 与 eBC 的相关性, 当相关性最低时表明 BrC_{sec} 的假设值是最合理的. 目前该方法由于计算所需条件低且仅需要黑碳仪一台仪器数据, 因而被广泛运用于 BrC 在线观测研究中^[33,34].

1.2.3 后向轨迹和潜在源区分析

本研究利用 MeteorInfo 软件^[35] 分析了 BrC 气团轨迹以及聚类类型, 计算初始高度为 500 m, 时间为 36 h. 潜在来源分析法 (PSCF) 是基于后向轨迹模型判断污染物潜在方位的一种分析方法, 它能够分析出 BrC 在当地及周围地区的可能来源. 本研究中区域网格的分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 计算式如下所示:

$$PSCF_{ij} = \frac{M_{ij}}{N_{ij}} \quad (11)$$

式中, ij 为二维网格单元. M_{ij} 为观测得到的棕碳光吸收系数高于 75 百分位数阈值的轨迹端点数. N_{ij} 为每个网格单元的轨迹端点总数 (i, j).

2 结果与讨论

2.1 棕碳的光吸收特性

2.1.1 棕碳的光吸收贡献

本研究将 2021 ~ 2022 全年观测划分为四季 (2021 年 3 ~ 5 月为春季, 2021 年 6 ~ 8 月为夏季, 2021 年 9 ~ 11 月为秋季, 2021 年 12 月 ~ 2022 年 2

月为冬季). 全年及四季平均 BC 和 BrC 光吸收系数以及占总气溶胶光吸收的比例如图 1(a) 所示. 由于 370 nm 下 BrC 的光吸收最强, 因此通常选用 $babs_{BrC370}$ 来表征 BrC 的吸光性质. 总的来看, 气溶胶的光吸收仍主要由 BC 贡献, 但是 BrC 的光吸收也不容忽视; 全年 $babs_{BrC370}$ 平均值为 $(7.76 \pm 7.17) Mm^{-1}$ (平均值 $\pm$ 标准偏差, 下同), 贡献率为 $(22.0 \pm 8.8)\%$, 这一比例高于此前研究中珠三角城市广州 (14.0%) ^[36] 和深圳 (11.7%) ^[37], 但低于重庆郊区 (33.9%) 的观测值^[38]. 与南京地区此前研究对比, 本研究中 BrC 光学参数 (吸光系数和吸光贡献) 相较 2013 ~ 2015 年冬季外场观测值 $(6.30 Mm^{-1}, 16.7\%)$ ^[39] 要高. 同时, 此前对在本研究同一观测点采集的 2015 年四季 $PM_{2.5}$ 样品研究显示, 其水溶性 BrC 四季均值为 $5.7 Mm^{-1}$ ^[40], 低于本次观测值以及南京城郊 2013 ~ 2015 年观测值 $(6.30 Mm^{-1})$ ^[39], 这意味着非水溶性组分也是 BrC 重要的组成部分之一.

从季节变化来看, 春季以及冬季 BrC 的光吸收系数均值分别为 $(8.90 \pm 9.33) Mm^{-1}$ 和 $(8.31 \pm 5.84) Mm^{-1}$, 相较于夏季 $(6.70 \pm 9.32) Mm^{-1}$ 和秋季 $(6.75 \pm 7.18) Mm^{-1}$ 明显要高; 但春夏秋冬四季 BrC 对总气溶胶光吸收贡献分别为 $(22.5 \pm 9.13)\%$ 、 $(19.3 \pm 8.29)\%$ 、 $(21.5 \pm 8.6)\%$ 和 $(24.9 \pm 7.9)\%$, 差别不大, 但四季 BrC 吸光贡献率存在显著性差异 ($P < 0.05$, 95% 显著置信区间). BrC 在四季的吸光强度变化呈现 U 字型分布 (370 nm 下总吸光强度呈现同样规律), 其中夏季 $babs_{BrC370}$ 最低; 夏季观测时间气温平均为 $(27.6 \pm 3.7)^{\circ}C$, 较其他季节要高, 但本研究中夏季 BrC 吸光贡献率高于 2013 ~ 2015 年南京夏季的观测值 (14.0%) ^[39]. 同时春季的 BrC 吸光强度高于冬季, 但 BrC 吸光贡献率在这两个季节是相反的, 即春季小于冬季. 相较来看, 全年整个观测期间, $\rho (PM_{2.5})$ 均值为 $(32.84 \pm 24.64) \mu g \cdot m^{-3}$, 季节变化亦呈现 U 型分布. 此外, 如图 1(c) 和 1(d) 所示, 各个季节 BC_{ff} 的浓度均值和贡献率均占主导, 表明交通排放是 BC 的最主要来源; BC_{non_ff} 浓度均值及其贡献率在冬季较其他几个季节高, 这可能是因为冬季燃煤及生物质燃烧活动较多从而导致较多 BC_{non_ff} .

以上为 370 nm 下 BrC 的吸光性季节特征, 图 2(a) 进一步给出了 BrC 在不同波段下吸光系数的四季和全年分布. 总体上和之前的研究^[41] 类似, BrC 的吸光能力随着波长的增加而明显减少; 其年均值从 370 nm 下的 $7.76 Mm^{-1}$ 降低至 660 nm 时的 0.48

Mm^{-1} , 更长波长下的吸光几乎可以忽略. 同时, 在各波段下 BrC 吸光系数的季节变化是一致的, 均呈 U 字型, 春季和冬季较高, 大于夏季和秋季, 同时春季和冬季、夏季和秋季之间的差异并不显著. AAE 的频数图显示[图 2(b)], 冬季 AAE 值明显高于其他几个季节, 表明冬季 BrC 的存在可导致气溶胶光吸收能力显著提升. 同时图中冬季 AAE 频数分布峰宽

的距离比其他几个季节要大, 说明冬季的污染排放更加复杂, BrC 来源更广泛. 图 2(c) 为四季 BrC 的光吸收贡献 (370 nm 下) 频数分布, 结果显示冬季 BrC 的吸光贡献也大于其他 3 个季节, 这可能是由于冬季观测点周围燃烧活动增加以及机动车排放增加导致, 这些也是大部分地区 BrC 的主要来源^[42,43].

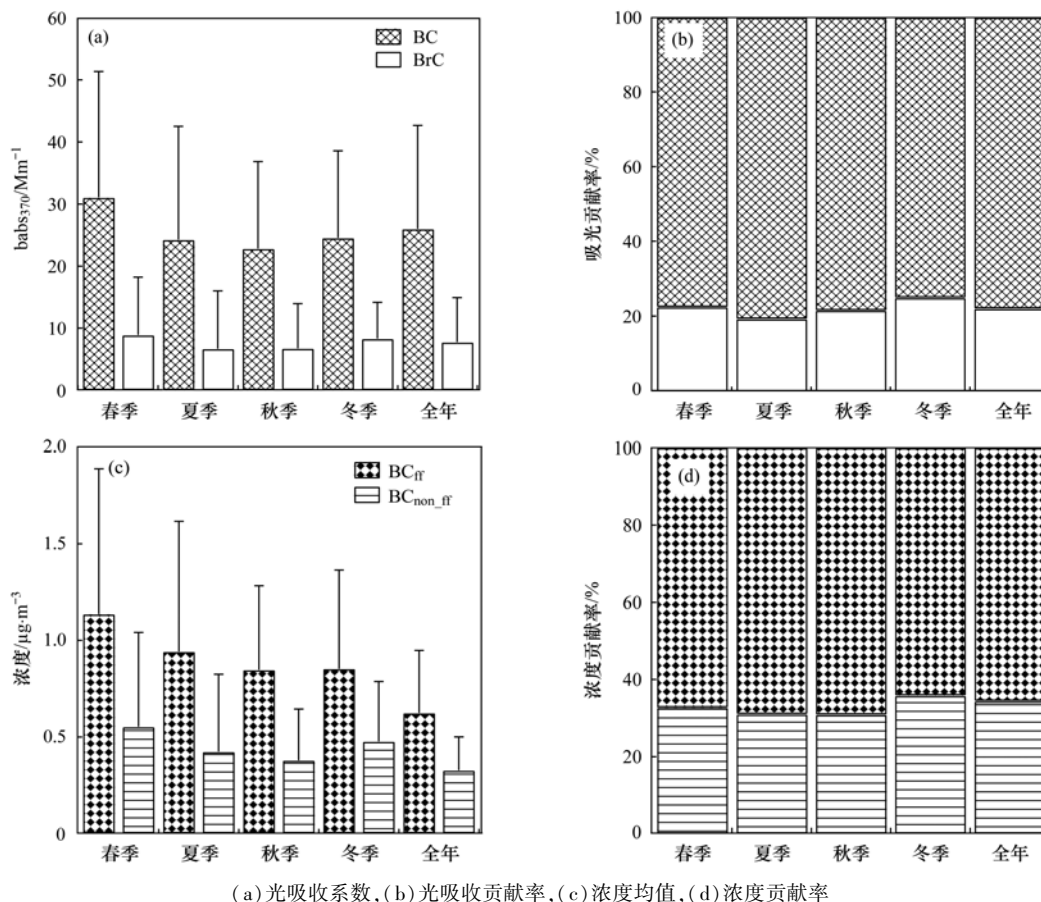


图 1 四季以及全年 BC 和 BrC 在 370 nm 下光吸收系数和吸光贡献率及 BC_{ff} 和 BC_{nonff} 的浓度均值和浓度贡献率

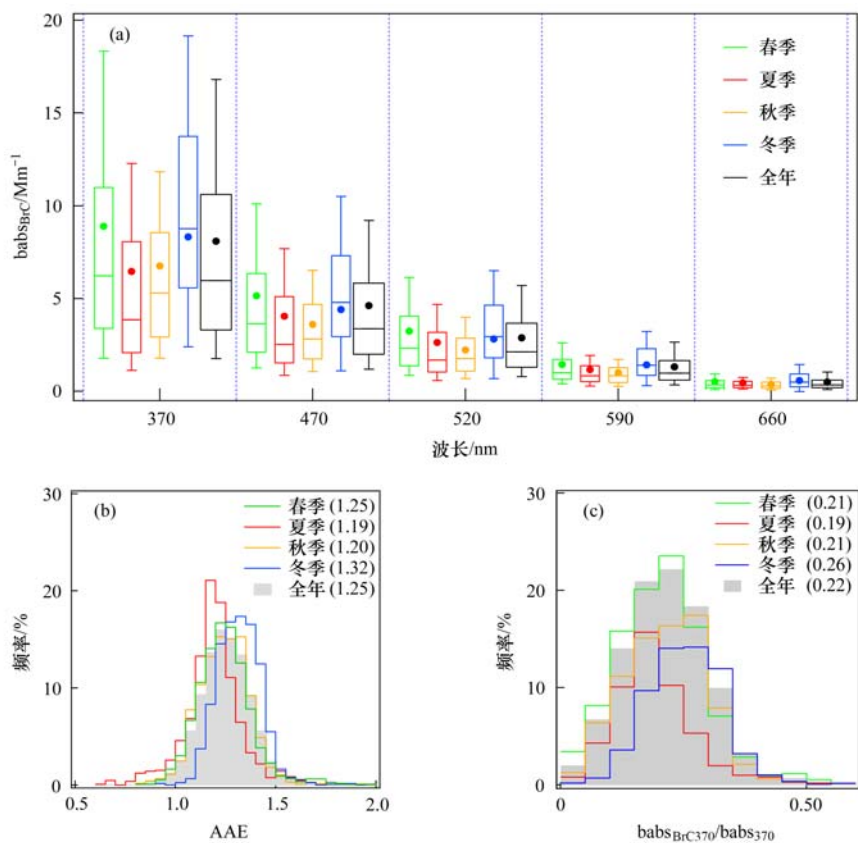
Fig. 1 Average light absorption and contribution of BC and BrC to the total light absorption at 370 nm, average mass concentration and contribution of BC_{ff} and BC_{nonff} to the total BC, in four seasons and the whole year

2.1.2 一次和二次棕碳相对贡献

利用最小相关性 (MRS) 法可计算得出一次 (BrC_{pri}) 和二次棕碳 (BrC_{sec}) 在波长 370 ~ 660 nm 下四季以及全年的光吸收系数以及对 BrC 的吸光贡献率, 如图 3 所示. 总体而言, 四季以及全年 BrC 在 370 nm 下的光吸收能力最强, BrC_{pri} 占据主导 [$(6.16 \pm 5.04) \text{Mm}^{-1}$, $(62.9 \pm 21.4)\%$], BrC_{sec} 则占次要地位 [$(3.79 \pm 3.88) \text{Mm}^{-1}$, $(37.1 \pm 21.4)\%$], 四季 BrC_{pri} 和 BrC_{sec} 的吸光贡献率存在显著性差异 ($P < 0.05$, 95% 显著置信区间). BrC_{pri} (在 370nm 下) 的季节变化和 BrC 的趋势较一致[图 2(a)], 呈现 U 字型变化; 一次 BrC 吸光贡献率较高表明一次排放如交通、工业以及住宅燃烧等有重要贡献; 冬季由于气温低, 居民住宅燃烧活动增多, 其

中可能包括生物质燃烧在内的源对 BrC_{pri} 贡献较其他季节更大, 因此冬季 BrC_{pri} 吸光系数及贡献率均为四季中最高. BrC_{sec} (在 370nm 下) 吸光系数的变化与 BrC_{pri} 则有较大不同, 呈现春夏秋冬依次减少的规律, 但是从对 BrC 的贡献率来看, 其在夏季最高, 占比为 $(44.2 \pm 30.5)\%$. 这可能是由于夏季温度较高, 日照时间充足, 相对较高的 O_3 浓度和高湿度 (RH) 增加了大气氧化性, 使得 BrC 的二次生成加剧. 和冬季相比, 3 月的 BrC_{sec} 吸光贡献率较高, 也使得春季 babs_{BrC} 略高于冬季.

图 3 中 BrC_{pri} 和 BrC_{sec} 的 AAE 值大小反映其波长依赖程度, 结果显示, BrC_{pri} 的波长依赖性明显强于 BrC_{sec} . BrC_{pri} 的四季 AAE 值在 4.91 (冬季) ~ 5.39 (春季) 之间, 而 BrC_{sec} 的 AAE 值则位于 2.45



(a) 光吸收系数 (盒子外上下横线分别为 90% 和 10% 值; 盒子上下缘分别为 75% 和 25% 值; 盒子中横线和圆点分别为中位值和平均值), (b) AAE 值和 (c) 光吸收贡献 (括号中四季和全年值为最高频率对应值)

图 2 四季和全年 BrC 在 370 ~ 660 nm 的光吸收系数, 370 nm 下 BrC 光吸收贡献和 AAE 的频数分布

Fig. 2 Average light absorption of BrC in wavelength of 370-660nm, the frequency distributions of AAE values of BrC at 370 nm and its relative contributions to the total light absorption at four seasons and the whole year

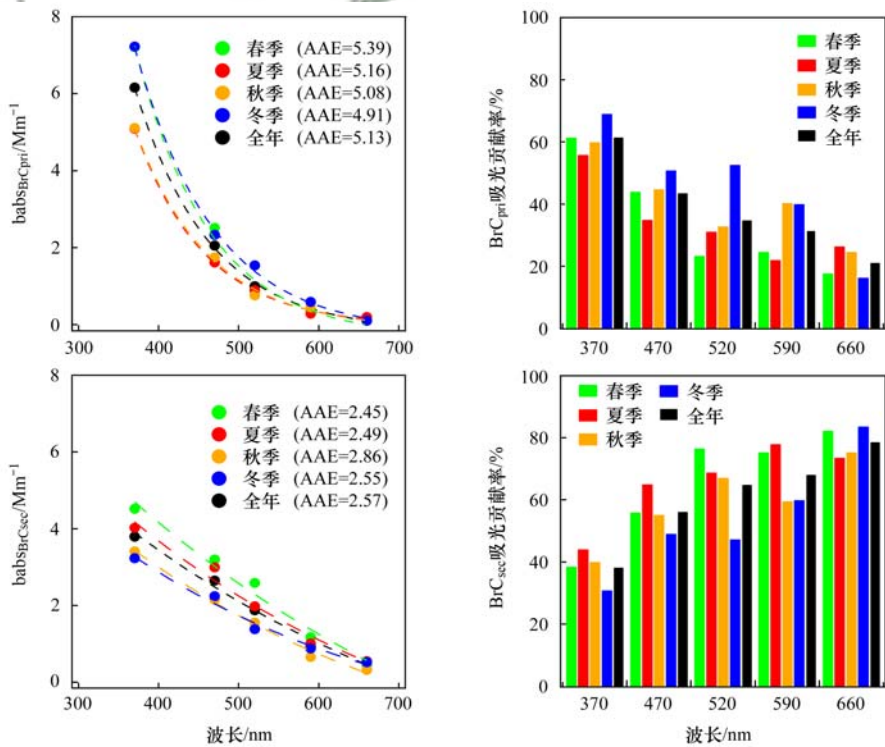


图 3 四季以及全年 BrC_{pri} 和 BrC_{sec} 在 370 ~ 660 nm 下光吸收系数、吸收贡献率和 AAE 值

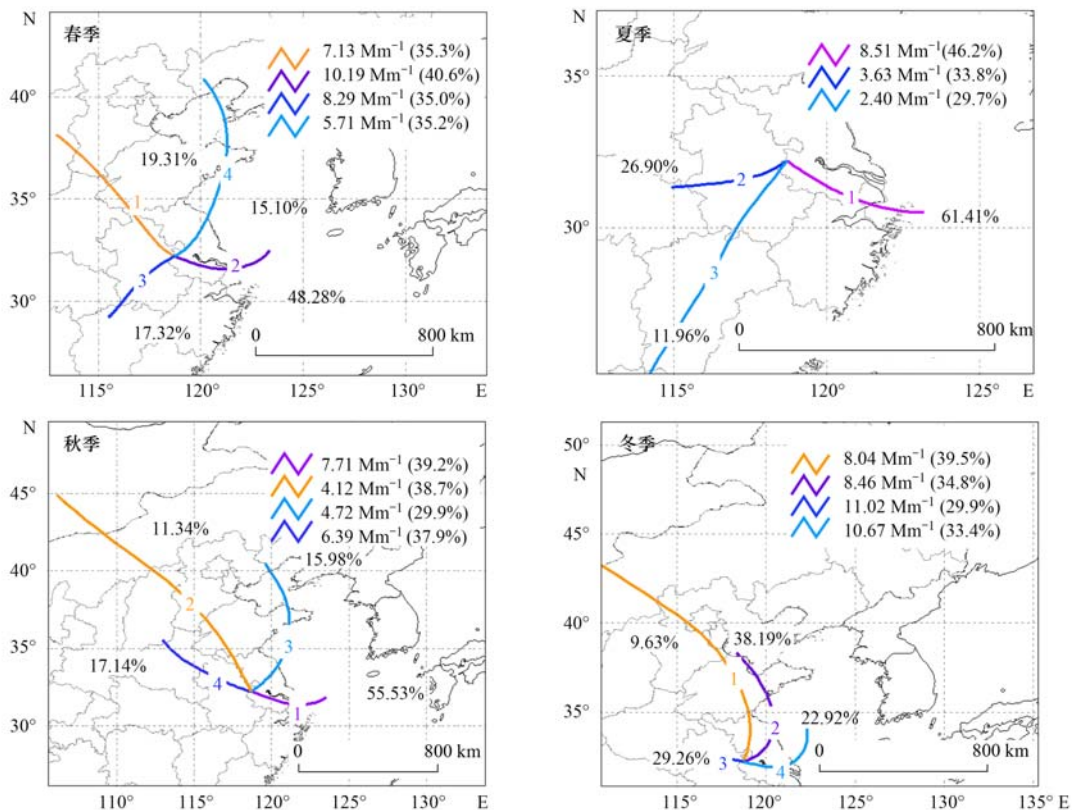
Fig. 3 Light absorption, contribution, and AAE of BrC_{pri} and BrC_{sec} at a wavelength of 370-660 nm in four seasons and the whole year

(春季)~2.86(秋季)之间. 此前曾有研究^[44]定量了不同来源的有机气溶胶吸光能力和波长依赖性, 结果显示交通排放产生的有机气溶胶(AAE = 5.86)相较于煤炭和生物质燃烧(AAE 为 5.43 和 4.26)具有更高的 AAE 值. 根据这一结果, 可以认为本研究中冬季 BrC_{pri} 具有更低的 AAE 可能最主要是受煤炭和生物质燃烧的影响, 机动车尾气的排放对于冬季 BrC 的影响则相对较小. 以 BrC_{pri} 贡献较大的冬季为例, 其在 370 nm 时占据主导[(69.1 ± 16.7)%], 但随着波长增加, 其贡献率逐渐降低, 分别为 470 nm [(50.9 ± 15.0)%]、520 nm [(52.7 ± 15.2)%]、590 nm [(40.0 ± 16.9)%] 和 660 nm [(16.4 ± 10.2)%]. 在较长波长下, BrC_{sec} 占据了主导; 其他季节中, BrC_{sec} 在更短的波长下即可占据吸光贡献的主导地位(尤其是春夏季). 这主要是因为 BrC_{pri} 的波长依赖性更强, 因此在长波长的变化更大, 而 BrC_{sec} 的波长依赖性较低, 它在长波长的吸光能力变化相对而言要小, 因此长波长下 BrC_{sec} 具有相对更强的光吸收能力, 吸光贡献率也更大.

2.2 后向轨迹和潜在源区分析

为探究远距离传输对于 BrC 吸光特性的影响, 本研究针对不同季节, 进行了后向轨迹和聚类分析, 同时结合 PSCF 对 BrC 潜在源区进行了分析. 图 4

显示, 除了夏季的气团分为三簇, 其他季节均分为四簇; 同时还计算得到了来自每个气团的 BrC 在 370 nm 下吸光均值以及 BrC_{sec} 吸光贡献率. 其中, 春夏秋三季中, 来自海上的气团(春季轨迹 2、夏季轨迹 1 和秋季轨迹 1)占比均较高, 为 48.28%、61.14% 和 55.53%; 同时其 $\text{babs}_{\text{BrC}370}$ 的吸光强度也较高(14.14、11.10 和 10.71 Mm^{-1}), 再结合这几个季节中 BrC_{sec} 的吸光贡献率也相对较高, 因此可以推测来自海洋的气团可能导致尤其是夏季和秋季的 BrC 老化程度偏高, 使得 BrC_{sec} 生成增强, 从而对 BrC 产生显著影响. 冬季 BrC 在 4 个轨迹的 BrC_{sec} 均值相差不大, 主要受轨迹 2、3 和 4 的影响, 轨迹 2 和轨迹 3 主要来自观测点西部和东北部, 说明冬季受当地排放和远距离气团传输, 即主要来自南京当地及西部邻省. 图 5 给出了不同季节 BrC 的源区分布情况, 不同季节具有明显的差异. 春季和夏季的高 PSCF 值主要分布在采样地当地及周边地区, 表明这两个季节主要受当地排放的影响. 秋季的高 PSCF 值分布在南京当地局部区域, 但相对比较分散, 到冬季的时候 PSCF 高值区域变得相对集中主要在南京当地和西部邻省, 这可能是因为冬季气温转凉, 燃烧等排放活动的增加导致冬季的排放区域更为集中.



图例数值表示 BrC 在 370 nm 下光吸收均值 ($\text{babs}_{\text{BrC}370}$) 光吸收贡献率)

图 4 四季 BrC 后向轨迹

Fig. 4 Backward trajectories of BrC in four seasons

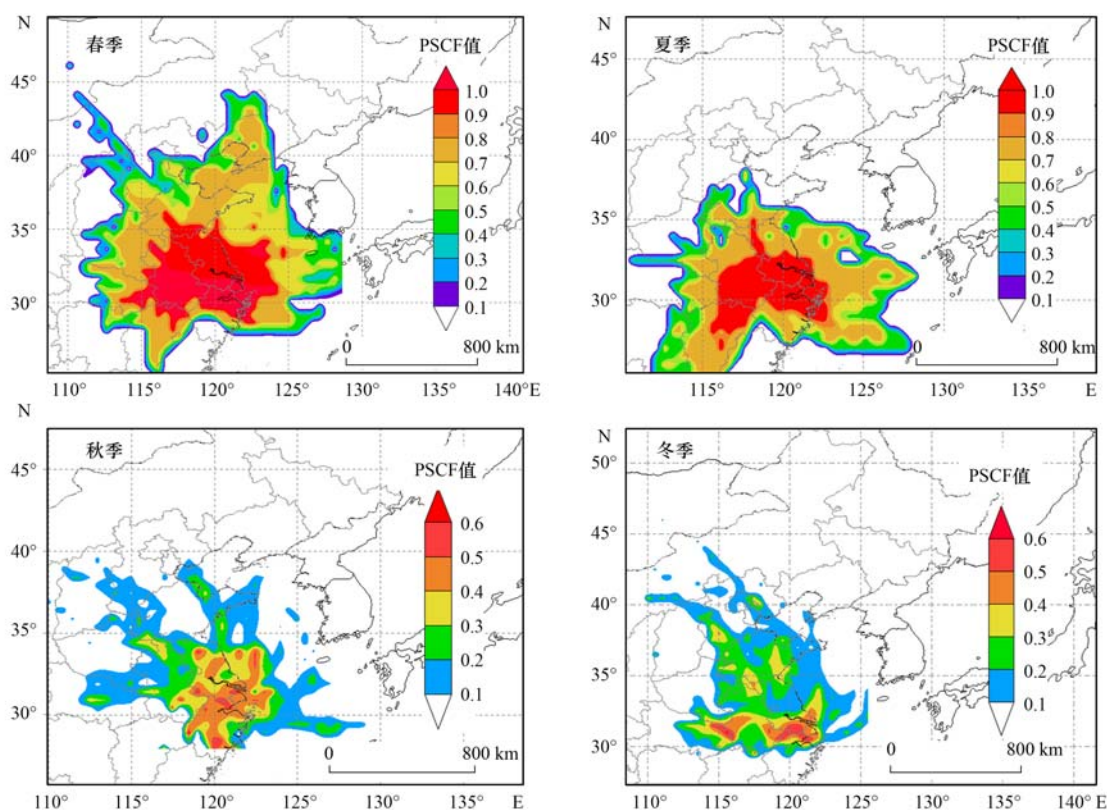


图5 四季 BrC 潜在源区分布
Fig. 5 Potential source areas of BrC in four seasons

2.3 不同时期棕碳污染特征分析

2.3.1 四季污染日变化分析

本节探究 BrC 的来源及季节变化特征, 从日变化尺度针对一次和二次 BrC (在 370 nm 下) 进行了分析. 图 6 给出了 BrC、BC、 O_x 和相对湿度(RH)的日均变化图, 前文讨论已知 BC 主要来自于交通排放, 因此将 BC 作为交通排放的示踪物以探究交通排放 BrC 的影响, 使用相对湿度(RH)和 O_x 浓度 [$\rho(O_x) = \rho(NO_2) + \rho(O_3)$] 分别指征液相反应^[45~49]和光化学反应^[50,51], 以探究这两个过程对于 BrC_{sec} 生成的影响. 如图 6 所示, 对于 BrC_{pri} 而言, 除冬季外其余 3 个季节 $babs_{BrC_{pri}370}$ 和 BC 在早晚高峰出现的时间较为吻合, 而冬季 BC 早高峰(09:00 左右)滞后于 BrC_{pri} 早高峰(08:00 左右), 同时 BC 浓度在春冬季之间有明显的差异, 而 $babs_{BrC_{pri}370}$ 在这两个季节的差异不显著, 因此可以推断交通排放 BrC 的作用在冬季比其他 3 个季节偏弱. 夏天 BrC_{sec} 的吸光值和贡献率最高, 该季 O_x 浓度相对其他季节高, 表明光化学反应在夏季较强, 从而加剧 BrC_{sec} 的生成, 这和前面的讨论一致. $babs_{BrC_{sec}370}$ 在秋季和春季日变化趋势相似, 且这两个季节 BrC_{sec} 吸光贡献率、 O_x 和 RH 也无明显差异, 因此推断春季和秋季 BrC_{sec} 主要生成途径也较为相似. 南京北郊地区之前的研究结果显示^[52], 液相反应是冬季 BrC_{sec} 的主要

生成途径, 然而本研究中冬季 RH 在四季最低因此该季节液相反应在四季中相对较弱, 导致 BrC_{sec} 吸光值和吸光贡献率在四季中相对较低.

由于 BrC 在 370 nm 下春季和冬季吸光贡献率相对较高, 后续章节将重点分析春季和冬季这两个典型棕碳污染季节的吸光变化特征, 尤其是二次生成的影响机制.

2.3.2 典型污染季——春季分析

根据气象条件和 PM_{2.5} 污染程度, 本研究将春季分成 5 个时期, 包括 EP1 (污染期, 2021 年 3 月 5 ~ 20 日)、EP2 (过渡期, 2021 年 3 月 21 ~ 31 日)、EP3 (平稳期, 2021 年 4 月 1 ~ 15 日)、EP4 (清洁期, 2021 年 4 月 16 日至 5 月 12 日)、EP5 (第二污染期, 2021 年 5 月 13 ~ 31 日). EP1 和 EP5 两个时期由于污染状况比其他几个时期明显, $babs_{BrC_{370}}$ 比其他几个时期明显高, 因此被命名为污染期和第二污染期. EP2 时期气温开始上升, 气候转暖因此被命名为过渡期. EP3 时期气象条件和污染物的趋势在过渡期之后较为平缓因此被定义为平稳期. EP4 时期因在整个春季污染状况最低被命名为清洁期. 5 个时期的 BrC 光吸收均值(370 nm)以及相对贡献如图 7(a) 所示. 前文通过分析四季光学特征已经得知, 春季 BrC_{sec} 的吸光值是四季中最高的. 从图 7(a) 可以看出 EP2 时期的 BrC_{sec} 的吸光贡献率

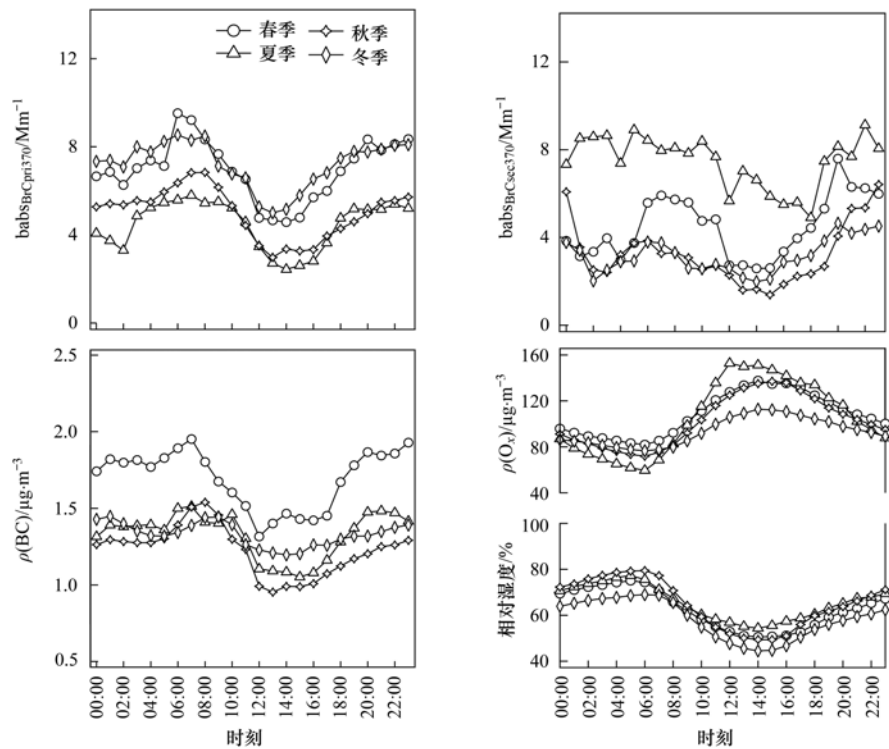


图 6 四季 $\text{babs}_{\text{BrCpri370}}$ 、 $\text{babs}_{\text{BrCsec370}}$ 、 BC 、 O_3 和相对湿度的日变化

Fig. 6 Diurnal cycles of $\text{babs}_{\text{BrCpri370}}$, $\text{babs}_{\text{BrCsec370}}$, BC , O_3 , and RH

(48.3%) 相对于其他几个时期 (33.7 ~ 36.9%) 明显要高. EP2 时期属于 3 月份中旬, 气温开始回温并且上升, 同时各种气态污染物浓度亦呈上升趋势.

图 7(b) ~ 7(f) 给出了 EP1 ~ EP5 这 5 个时期内, BrC_{sec} 占总 BrC (370 nm) 的比例随 RH 和 O_3 的变化情况. 由图 7(c) 可以看出, EP2 时期, 当 $\rho(\text{O}_3)$ 小于 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, BrC_{sec} 总体上随着 $\rho(\text{O}_3)$ 的增

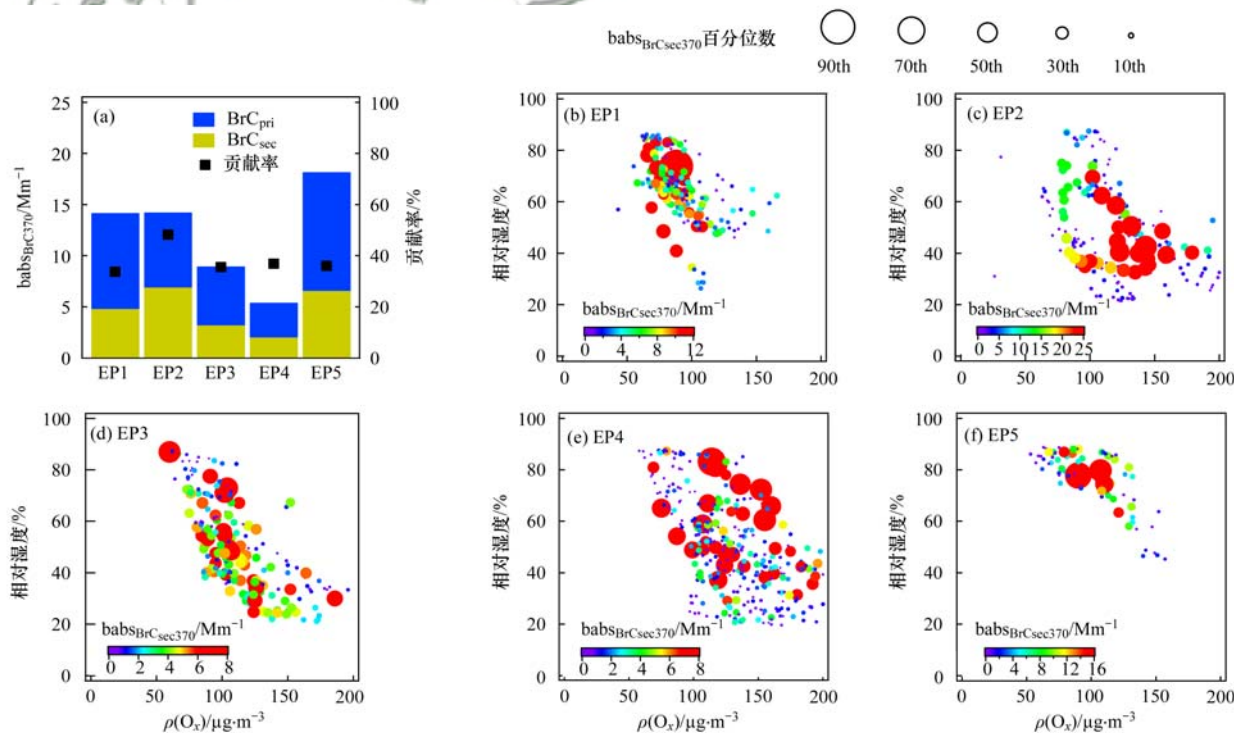


图 7 EP1 ~ EP5 时期 BrC_{pri} 和 BrC_{sec} 的光吸收系数, BrC_{sec} 吸收贡献以及吸收系数随相对湿度和 O_3 浓度的分布

Fig. 7 Light absorption and contribution of BrC_{pri} and BrC_{sec} to total BrC (at 370 nm), and distributions of light absorption of BrC_{sec} and its contribution from EP1 to EP5

大而增大,当浓度超过 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 时, BrC_{sec} 呈现下降趋势,同时 EP1, EP3, EP4 和 EP5 的 BrC_{sec} 都有随着 O_x 浓度增加而略微下降的总体趋势,这可能是由于光漂白的影响,即气溶胶的光化学老化使得其光吸收能力下降. 总体而言, EP2 时期相较于其他几个时期, O_x 浓度较大时, BrC_{sec} 占比相对偏高,即高 BrC_{sec} 主要出现在偏右下角,说明 O_x 而不是 RH 对于 BrC_{sec} 的影响是明显要强的,因此 BrC_{sec} 的生成受光化学反应影响偏大. 从随 RH 的变化来看, EP2 时期 BrC_{sec} 贡献在不同 RH 下较为平均,而 EP3 和 EP4 总体上随着 RH 增加占比呈现一定减少,因此可以推断这 3 个时期受到液相反应的影响不是很大. 与此相对的是, EP1 和 EP5 时期在 RH 小于 80% 时, BrC_{sec} 有明显上升的趋势, RH 为 80% 以上占比的下降可能是因为降雨的湿沉降的作用所导致的. EP1 和 EP5 时期的高 BrC_{sec} 值出现在图中左上角的位置,同时很少的点分布在高 O_x 浓度区域,进一步说明 RH 相较于 O_x 对 BrC_{sec} 的影响是明显要强的,因此 EP1 和 EP5 时期 BrC_{sec} 的生成受液相反应的影响较大. EP3 和 EP4 时期, BrC_{sec} 分布没有明显的规律,说明 BrC 生成可能受两者综合影响,且其贡献大小难以区分. 总而言之,整个春季在全年的 BrC 较强光吸收的主要是由于较高 BrC_{sec} 的吸光贡献所导致的,且 BrC_{sec} 生成在不同时期内受到光化学反应和液相反应不同程度的影响.

需特别指出的是,秋季和春季污染日变化特征相似,因此秋季在不同时期内也可能受到上述两种反应不同程度的影响.

2.3.3 典型污染季——冬季分析

本研究将整个冬季以 2022 年 1 月 20 日为界限分为前后两个时期,即 T1 (2021 年 12 月 1 日 ~ 2022 年 1 月 20 日) 和 T2 (2022 年 1 月 21 日 ~ 2 月 28 日) 以探究研究冬季前后时期的棕碳污染特征及变化. 划分的原因是因为 1 月 20 日与观测地点所在学校放寒假时间相吻合,因此 T2 时期由于学校人流量大幅减少从而导致相应的人为活动排放有所减少. T1 和 T2 时期 $\text{babs}_{\text{BrC}370}$ 分别为 $(11.91 \pm 6.34) \text{ Mm}^{-1}$ 和 $(6.67 \pm 3.72) \text{ Mm}^{-1}$, $\rho(\text{BC})$ 为 $(1.62 \pm 0.82) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(0.95 \pm 0.44) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 后者和前者相比下降幅度超过 40%,由此可见人为活动排放的减少有着非常重要的影响. 然而,对于 BrC_{sec} 而言,其绝对值虽然也减少(由 T1 时期的 3.66 Mm^{-1} 减少到 T2 时期的 2.64 Mm^{-1}),然而其占比确是增加的(由 T1 时期的 30.7% 提升为 T2 时期的 39.6%),增加幅度接近 10%.

图 8 给出了 BrC 以及 BC 相关参数在 T1 和 T2 时期的日均变化. 可以很明显地看出, BrC_{sec} 在 T1 和 T2 两个时期的日变化趋势并没有特别大的区别,但是 BrC_{pri} 的趋势在前后两个时期却出现了显著差异. BrC_{pri} 在 T1 时期有非常明显的早晚高值,而 T2 时期全天变化均很平稳,这也导致总 BrC 在早晚两个时段 T1 和 T2 时期出现了一定差异. 与 BrC_{pri} 类似,总 BC 浓度在 T1 和 T2 时期的日变化也有明显差异, T1 存在早晚高值,而 T2 早晚高值不明显(寒假影响,造成观测点周边人为活动排放的减少). 进一步按照不同来源划分的 BC_{ff} 和 $\text{BC}_{\text{non-ff}}$ 中, $\text{BC}_{\text{non-ff}}$

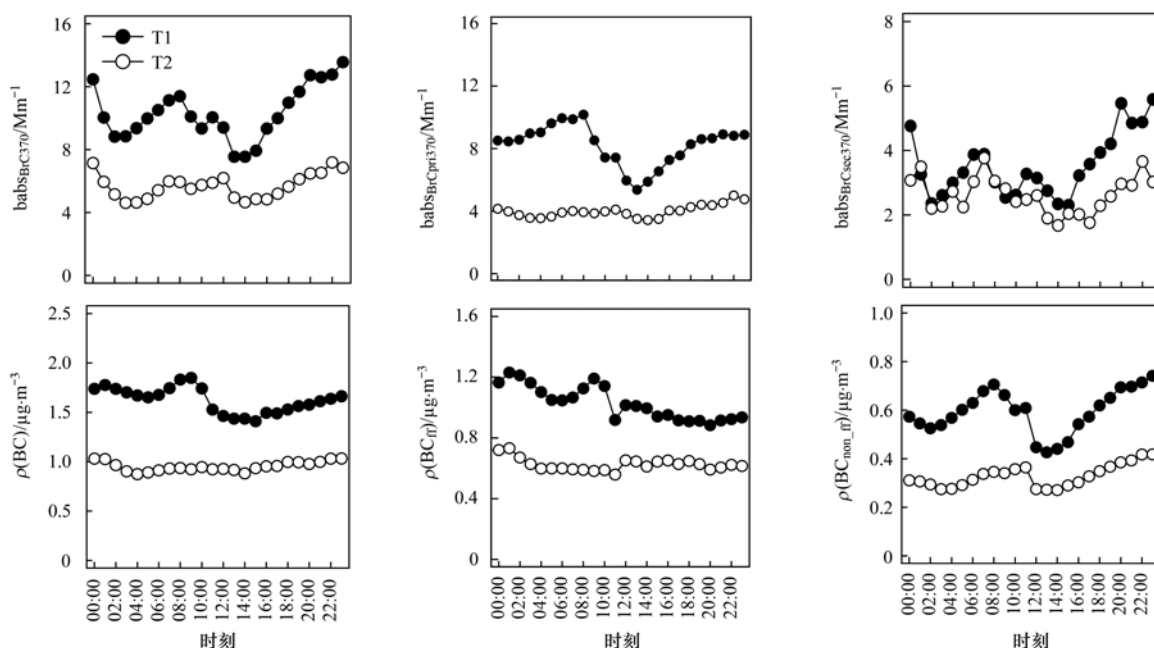


图 8 2022 年 1 月 20 日前后 (T1 和 T2 时期) 370 nm 下 babs_{BrC} 、 $\text{babs}_{\text{BrC}_{\text{pri}}}$ 、 $\text{babs}_{\text{BrC}_{\text{sec}}}$ 、 BC 、 BC_{ff} 和 $\text{BC}_{\text{non-ff}}$ 的日变化

Fig. 8 Diurnal cycles of babs_{BrC} , $\text{babs}_{\text{BrC}_{\text{pri}}}$, $\text{babs}_{\text{BrC}_{\text{sec}}}$, BC , BC_{ff} , and $\text{BC}_{\text{non-ff}}$ before and after January 20th in 2022

和 BrC_{pri} 在 T1 时期的日均变化尤为一致(尤其是 08:00 左右的峰值)。冬季,观测点的 $\text{BC}_{\text{non-ff}}$ 主要来源于煤炭和生物质燃烧,同时南京北郊地区之前的研究显示^[52~54],冬季一次排放有机气溶胶主要来源于交通排放,煤炭燃烧和生物质燃烧也是重要组成部分。T1 时期 BC_{ff} 和 BC 在早上也确实存在峰值(即 09:00),且其绝对数值是高于 $\text{BC}_{\text{non-ff}}$ 的,说明了交通排放对 BC 的重要贡献。但是,与 BC 不同,很显然对于 BrC 来说,主导 T1 和 T2 时期日变化差异的主导因素也是一次排放的变化,但一次排放中煤炭和生物质燃烧较交通排放更为重要。

3 结论

(1)2021 年 3 月至 2022 年 2 月,南京地区全年 $\text{babs}_{\text{BrC}370}$ 平均值为 $(7.76 \pm 7.17) \text{ Mm}^{-1}$,对气溶胶总光吸收贡献为 $(22.0 \pm 8.8)\%$, BrC 对于气溶胶的光吸收影响不可忽视。 BrC 不同波长下的吸光系数均呈现春季和冬季高,夏季和秋季低的 U 字型分布。MRS 分析结果表明,370 nm 下 BrC_{pri} 的贡献占据主导,但随着波长增加,其贡献逐渐减少; BrC_{pri} 季节变化和 BrC 相似也呈现 U 字形分布,但 BrC_{sec} 则呈现春夏秋冬依次减少的规律。

(2)后向轨迹和潜在源区分析结果表明,不同季节 BrC 受到运距离传输和排放情况的影响有明显的差异。春季、夏季和秋季的污染气团受来自海洋的影响明显,同时海上的气团会使得 BrC 的老化程度提高进而影响 BrC_{sec} 的生成。冬季 BrC 受到当地和周围排放影响更显著,导致一次排放的 BrC 占比更大。

(3)四季棕碳来源和污染特征分析表明,春季、夏季和秋季一次 BrC 受到交通排放的影响比冬季强,而燃煤和生物质燃烧,主导冬季 BrC 的日均变化,是一次 BrC 主要的来源。光化学和液相反应在不同季节对 BrC_{sec} 贡献不同,夏季以光化学反应为主,冬季以液相反应为主,但在春季、秋季两者均是二次 BrC 生成的重要途径。

参考文献:

[1] Jacobson M C, Hansson H C, Noone K J, *et al.* Organic atmospheric aerosols: review and state of the science [J]. *Reviews of Geophysics*, 2000, **38**(2): 267-294.

[2] Laskin A, Laskin J, Nizkorodov S A. Chemistry of atmospheric brown carbon[J]. *Chemical Reviews*, 2015, **115**(10): 4335-4382.

[3] Vassura I, Venturini E, Marchetti S, *et al.* Markers and influence of open biomass burning on atmospheric particulate size and composition during a major bonfire event[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **82**: 218-225.

[4] Kirillova E N, Andersson A, Han J, *et al.* Sources and light absorption of water-soluble organic carbon aerosols in the outflow

from Northern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(3): 1413-1422.

[5] Chen Y, Bond T C. Light absorption by organic carbon from wood combustion [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(4): 1773-1787.

[6] Zhang X L, Lin Y H, Surratt J D, *et al.* Sources, composition and absorption Ångström exponent of light-absorbing organic components in aerosol extracts from the Los Angeles Basin[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47**(8): 3685-3693.

[7] 陈前, 陈庆彩. 西安市大气棕碳污染特性及发色团种类[J]. *环境科学*, 2021, **42**(3): 1236-1244.

Chen Q, Chen Q C. Pollution characteristics and chromophore types of brown carbon in Xi'an [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(3): 1236-1244.

[8] Hoffer A, Gelencsér A, Guyon P, *et al.* Optical properties of humic-like substances (HULIS) in biomass-burning aerosols [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(11): 3563-3570.

[9] Pöschl U. Aerosol particle analysis: challenges and progress[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2003, **375**(1): 30-32.

[10] Selimovic V, Yokelson R J, Warneke C, *et al.* Aerosol optical properties and trace gas emissions by PAX and OP-FTIR for laboratory-simulated western US wildfires during FIREX [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(4): 2929-2948.

[11] Mason B, Wagner N L, Adler G, *et al.* An intercomparison of aerosol absorption measurements conducted during the SEAC⁴RS campaign[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2018, **52**(9): 1012-1027.

[12] Sun J Y, Wu C, Wu D, *et al.* Amplification of black carbon light absorption induced by atmospheric aging: temporal variation at seasonal and diel scales in urban Guangzhou[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(4): 2445-2470.

[13] Wang J F, Ye J H, Zhang Q, *et al.* Aqueous production of secondary organic aerosol from fossil-fuel emissions in winter Beijing haze [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, **118**(8), doi: 10.1073/pnas.2022179118.

[14] Chen Y F, Xie X C, Shi Z, *et al.* Brown carbon in atmospheric fine particles in Yangzhou, China: light absorption properties and source apportionment [J]. *Atmospheric Research*, 2020, **244**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105028.

[15] Qin Y M, Tan H B, Li Y J, *et al.* Chemical characteristics of brown carbon in atmospheric particles at a suburban site near Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(22): 16409-16418.

[16] Singh A, Rastogi N, Kumar V, *et al.* Sources and characteristics of light-absorbing fine particulates over Delhi through the synergy of real-time optical and chemical measurements[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **252**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118338.

[17] Balachandran S, Pachon J E, Lee S, *et al.* Particulate and gas sampling of prescribed fires in south Georgia, USA [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **81**: 125-135.

[18] Wang Y X, Pan Z Y, Ho Y K, *et al.* The structural and dynamical properties of Al clusters adsorbed on Ni surface[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2001, **180**(1-4): 251-256.

[19] Ou Y, Nie D Y, Chen H, *et al.* Characterization of products from the aqueous-phase photochemical oxidation of benzene-diols

- [J]. *Atmosphere*, 2021, **12** (5), doi: 10.3390/atmos12050534.
- [20] Liu Y, Lu J C, Chen Y F, *et al.* Aqueous-phase production of secondary organic aerosols from oxidation of dibenzothiophene (DBT) [J]. *Atmosphere*, 2020, **11** (2), doi: 10.3390/atmos11020151.
- [21] Chen Y T, Chen Y F, Xie X C, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} and water-soluble organic nitrogen in Yangzhou, China [J]. *Atmosphere*, 2019, **10**, doi: 10.3390/atmos10040178.
- [22] Li X D, Tao Y, Zhu L W, *et al.* Optical and chemical properties and oxidative potential of aqueous-phase products from OH and ³C* -initiated photooxidation of eugenol [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2022, **22**(11): 7793-7814.
- [23] Zhang Y J, Albinet A, Petit J E, *et al.* Substantial brown carbon emissions from wintertime residential wood burning over France [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **743**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140752.
- [24] 朱先磊, 张远航, 曾立民, 等. 北京市大气细颗粒物 PM_{2.5} 的来源研究[J]. *环境科学研究*, 2005, **18**(5): 1-5.
Zhu X L, Zhang Y H, Zeng L M, *et al.* Source identification of ambient PM_{2.5} in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18**(5): 1-5.
- [25] Yan J P, Wang X P, Gong P, *et al.* Review of brown carbon aerosols: recent progress and perspectives [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **634**: 1475-1485.
- [26] Lack D A, Cappa C D, Covert D S, *et al.* Bias in filter-based aerosol light absorption measurements due to organic aerosol loading: evidence from ambient measurements [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2008, **42**(12): 1033-1041.
- [27] Lim S, Lee M, Kim S W, *et al.* Absorption and scattering properties of organic carbon versus sulfate dominant aerosols at Gosan climate observatory in northeast Asia [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(15): 7781-7793.
- [28] Drinovec L, Močnik G, Zotter P, *et al.* The “dual-spot” aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(5): 1965-1979.
- [29] Zhou X H, Gao J, Wang T, *et al.* Measurement of black carbon aerosols near two Chinese megacities and the implications for improving emission inventories [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(25): 3918-3924.
- [30] 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.
- [31] Deng J J, Guo H, Zhang H L, *et al.* Source apportionment of black carbon aerosols from light absorption observation and source-oriented modeling: an implication in a coastal city in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(22): 14419-14435.
- [32] Zhang Y J, Favez O, Petit J E, *et al.* Six-year source apportionment of submicron organic aerosols from near-continuous highly time-resolved measurements at SIRTa (Paris Area, France) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19** (23): 14755-14776.
- [33] Wu C, Yu J Z. Determination of primary combustion source organic carbon-to-elemental carbon (OC/EC) ratio using ambient OC and EC measurements: secondary OC-EC correlation minimization method [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(8): 5453-5465.
- [34] Wu C, Wu D, Yu J Z. Quantifying black carbon light absorption enhancement with a novel statistical approach [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(1): 289-309.
- [35] Petit J E, Favez O, Albinet A, *et al.* A user-friendly tool for comprehensive evaluation of the geographical origins of atmospheric pollution: wind and trajectory analyses [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2017, **88**: 183-187.
- [36] Li S, Zhu M, Yang W Q, *et al.* Filter-based measurement of light absorption by brown carbon in PM_{2.5} in a megacity in South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 1360-1369.
- [37] Yuan J F, Huang X F, Cao L M, *et al.* Light absorption of brown carbon aerosol in the PRD region of China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(3): 1433-1443.
- [38] Peng C, Tian M, Wang X L, *et al.* Light absorption of brown carbon in PM_{2.5} in the Three Gorges Reservoir region, Southwestern China: implications of biomass burning and secondary formation [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **229**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117409.
- [39] Wang J P, Nie W, Cheng Y F, *et al.* Light absorption of brown carbon in eastern China based on 3-year multi-wavelength aerosol optical property observations and an improved absorption Ångström exponent segregation method [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(12): 9061-9074.
- [40] Chen Y F, Ge X L, Chen H, *et al.* Seasonal light absorption properties of water-soluble brown carbon in atmospheric fine particles in Nanjing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **187**: 230-240.
- [41] Washenfelder R A, Attwood A R, Brock C A, *et al.* Biomass burning dominates brown carbon absorption in the rural southeastern United States [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, **42**(2): 653-664.
- [42] Lin N H, Tsay S C, Maring H B, *et al.* An overview of regional experiments on biomass burning aerosols and related pollutants in southeast Asia: from BASE-ASIA and the Dongsha experiment to 7-SEAS [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **78**: 1-19.
- [43] Lee C T, Ram S S, Nguyen D L, *et al.* Aerosol chemical profile of near-source biomass burning smoke in Sonla, Vietnam during 7-SEAS campaigns in 2012 and 2013 [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2016, **16**(11): 2603-2617.
- [44] Zhang Y, Wang Q Y, Tian J, *et al.* Impact of COVID-19 lockdown on the optical properties and radiative effects of urban brown carbon aerosol [J]. *Geoscience Frontiers*, 2022, **13**(6), doi: 10.1016/j.gsf.2021.101320.
- [45] 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.
- [46] Robinson A L, Donahue N M, Shrivastava M K, *et al.* Rethinking organic aerosols: semivolatile emissions and photochemical aging [J]. *Science*, 2007, **315** (5816): 1259-1262.
- [47] Link M F, Kim J, Park G, *et al.* Elevated production of NH₄NO₃ from the photochemical processing of vehicle exhaust: implications for air quality in the Seoul metropolitan region [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **156**: 95-101.
- [48] Xue J, Griffith S M, Yu X, *et al.* Effect of nitrate and sulfate relative abundance in PM_{2.5} on liquid water content explored through half-hourly observations of inorganic soluble aerosols at a polluted receptor site [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **99**: 24-31.

- [49] Jiang H H, Frie A L, Lavi A, *et al.* Brown carbon formation from nighttime chemistry of unsaturated heterocyclic volatile organic compounds [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2019, **6**(3): 184-190.
- [50] Canonaco F, Slowik J G, Baltensperger U, *et al.* Seasonal differences in oxygenated organic aerosol composition: implications for emissions sources and factor analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15** (12): 6993-7002.
- [51] Wang Q Y, Huang R J, Zhao Z Z, *et al.* Effects of photochemical oxidation on the mixing state and light absorption of black carbon in the urban atmosphere of China [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, **12**(4), doi: 10.1088/1748-9326/aa64ea.
- [52] 陈艳芳. 基于离线 AMS 技术研究大气棕色碳化学、光学特性及来源[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2020.
- Chen Y F. Chemical characteristics, optical properties and source apportionment of atmospheric brown carbon based on offline AMS technology [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2020.
- [53] Gu C J, Cui S J, Ge X L, *et al.* Chemical composition, sources and optical properties of nitrated aromatic compounds in fine particulate matter during winter foggy days in Nanjing, China [J]. *Environmental Research*, 2022, **212**, doi: 10.1016/j.envres.2022.113255.
- [54] 陈美娟, 钱姿合, 顾陈娟, 等. 南京北郊大气细粒子硝基苯酚类化合物污染特征与来源[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 1738-1746.
- Chen M J, Qian Z H, Gu C J, *et al.* Characteristics and sources of nitrated phenols in atmospheric fine particles of northern suburban Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 1738-1746.



CONTENTS

Meteorological Impact Assessment of PM _{2.5} and O ₃ Complex Pollution in Key Regions of China Based on Meteorological Conditions Index	YANG Xin, YANG Yuan-qin, LI Hong, <i>et al.</i>	(6433)
Scale Dependence Between PM _{2.5} and Meteorological Factors and Its Influencing Factors in “2+26” Cities	WU Shu-qi, JIN Jian-nan, ZHENG Dong-yang, <i>et al.</i>	(6441)
Chemical Constituents and Sources of PM _{2.5} Around the Wuhan Military Games Period	LIU Shi-hao, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i>	(6452)
Characteristics and Sources of PM _{2.5} Pollution During Winter in Handan City from 2016 to 2020	NIU Hong-ya, GAO Na-na, BAO Xiao-lei, <i>et al.</i>	(6463)
Chemical Compositions and Sources of PM _{2.5} in Weinan City	GUO Jing-ning, LI Xiao-fei, YU Feng, <i>et al.</i>	(6474)
Analysis of Formation Processes and Sources of PM _{2.5} Ammonium During Winter and Summer in Suburban Area of the Yangtze River Delta	XIANG Yan-kun, CAO Fang, ZHANG Wen-qi, <i>et al.</i>	(6486)
Chemical Composition and Characterization of Nitroaromatic Compounds in Urban Areas of Shanghai	YANG Lu, MA Ying-ge, YU Jian-zhen, <i>et al.</i>	(6495)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} , Liliang City	MU Ling, LIU Zi-ye, LI Yang-yong, <i>et al.</i>	(6508)
Effect of Biomass Burning on Carbonaceous Aerosol Composition and Light Absorption in Guangxi Regional Background Site	WU Xing-qi, CAO Fang, HONG Yi-hang, <i>et al.</i>	(6518)
Characteristics of Light Absorption, Sources, and Seasonal Variation of Atmospheric Brown Carbon in Northern Nanjing	CHEN Xing-zhou, CUI Shi-jie, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i>	(6529)
Health Benefit Assessment of Coal-to-electricity Policy on PM _{2.5} Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region	ZHANG Ru-ting, CHEN Chuan-min, LIU Song-tao, <i>et al.</i>	(6541)
Source Apportionment of Ambient VOCs in Qingdao Based on Photochemical Loss Correction	KONG Cui-li, WU Yu-tong, GU Yao, <i>et al.</i>	(6551)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of VOCs in Urban Areas of Liaocheng in Summer	LI Wan-yong, HUANG Hao-yu, WANG Yan-zhen, <i>et al.</i>	(6564)
Source Analysis of Ozone and Its Precursors in Zibo Based on 3-D Air Quality Model	ZHANG Xin-xin, ZHAO Xiu-ying, HUANG Ling, <i>et al.</i>	(6576)
Spatio-temporal Characteristics and Influencing Factors of Ozone Suppression Events Under High Temperature in China	OU Lin-chong, CHEN Wei-hua, WU Yong-kang, <i>et al.</i>	(6586)
Review of UAV-based Atmospheric Fine Particulate Matter and Ozone Pollution Detection and Source Localization	QU Ya-wei, WANG Ti-jian, YUAN Cheng, <i>et al.</i>	(6598)
Health Impact Analysis of Fine Particulate Pollution from Vehicles in the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Yong-pei, SONG Xiao-wei, ZHU Xiao-dong, <i>et al.</i>	(6610)
Assessment of Emission Reduction Potential of CO ₂ Capture, Geological Utilization, and Storage in Cement Industry of China	WEI Ning, LIU Sheng-nan, WEI Feng, <i>et al.</i>	(6621)
Life Cycle Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Potential Assessment of Steel Industry	SONG Xiao-cong, DU Shuai, DENG Chen-ning, <i>et al.</i>	(6630)
Evolution Characteristics and Driving Forces of Carbon Dioxide Emissions and Sinks in the Pearl River Delta Region, China	HU Jing-xin, SHA Qing-e, LIU Hui-lin, <i>et al.</i>	(6643)
Impact of Accelerated Electrification Under the Low Carbon Path in Dongguan City on the Coordinated Emission Reduction of CO ₂ and Pollutants	WU Le-min, CHEN Bing-yin, OU Lin-chong, <i>et al.</i>	(6653)
Relationship Between Urbanization and Carbon Emissions in the Chang-Zhu-Tan Region at the County Level	LIU Xian-zhao, LI Yang, <i>et al.</i>	(6664)
Characteristics and Influencing Factors of Greenhouse Fluxes from Urban Lawn	CHEN Li-han, LIU Shuo, LIN Yi, <i>et al.</i>	(6680)
Dual-Perspective Analysis of the Warming Effect of the Methane Emissions from Animal Husbandry in China	LIU Shu-le, YAN Wei, CAO Qing-xian, <i>et al.</i>	(6692)
Pollution Level and Risk Assessment of OPEs in Typical River Basins of China	ZHAO Jiang-lu, LU Hai-jian, LÜ Jia-pei, <i>et al.</i>	(6700)
Soil Heavy Metal Contamination, Sources, and Health Risk of Typical Drinking Water Sources in the Suspended Reach of the Lower Yellow River	PENG Chao-yue, REN Chong, SHEN Hao-xin, <i>et al.</i>	(6710)
Fraction Characteristic and Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Yellow River Mainstream	WANG Yi-di, OUYANG Wei, LIU Lian-hua, <i>et al.</i>	(6720)
Influence of Land Use Structure and Spatial Pattern on Water Quality of Small and Medium-sized Rivers in Poyang Lake Basin	WEN Jia-wei, WANG Peng, HUANG Gao-xiang, <i>et al.</i>	(6728)
Water Environment Characteristics and Water Quality Assessment of Typical Lakes in Inner Mongolia	WANG Xin-yuan, PAN Bao-zhu, WANG Li-xin, <i>et al.</i>	(6744)
Relationship Between Precipitation, River Water, and Groundwater Conversion in the Upper Reaches of Xilin River During the Rainy Season	SUN Jin, WANG Yi-xuan, YANG Lu, <i>et al.</i>	(6754)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Groundwater in the Northwest Salt Lake Basin	YAN Yan, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, <i>et al.</i>	(6767)
Groundwater Pollution Risk Assessment in Plain Area of Barkol-Yiwu Basin	LIU Yu, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i>	(6778)
Bisulfite Promoted Minute Fe ²⁺ -Activated Peroxydisulfate for Paracetamol Degradation	MO Xi-ting, NIE Shu-hua, YAN Cai-xia, <i>et al.</i>	(6790)
Degradation of Ciprofloxacin by Activating Peroxymonosulfate with Sludge Biochar	ZHENG Da-yang, ZOU Jia-li, XU Hao, <i>et al.</i>	(6801)
Adsorption of Iopamidol by NaHCO ₃ -activated Buckwheat Biochar	WEI Hong, ZHAO Jiang-juan, JING Li-ming, <i>et al.</i>	(6811)
Preparation of Bamboo-based N, P Co-doped Activated Carbon and Its Lanthanum Ion Adsorption Performance	WANG Gui-long, LIU Yan-yan, JIANG Rong-yuan, <i>et al.</i>	(6823)
Analysis of Vegetation Change and Influencing Factors in Southwest Alpine Canyon Area	LAI Jin-lin, QI Shi, CUI Ran-ran, <i>et al.</i>	(6833)
Effect of Biochar on Agricultural Soil Aggregates and Organic Carbon: A Meta-analysis	MENG Yan, SHEN Ya-wen, MENG Wei-wei, <i>et al.</i>	(6847)
Carbon Cycling Processes in Croplands and Their Quantification Methods	SUN Zhao-an, ZHU Biao, <i>et al.</i>	(6857)
Effects of Biochar Application on Soil Organic Carbon Component in <i>Eucalyptus</i> Plantations After Five Years in Northern Guangxi	MOU Zhi-yi, SHEN Yu-yi, CAO Yang, <i>et al.</i>	(6869)
Evolution Characteristics of Soil Active Organic Carbon and Carbon Pool Management Index Under Vegetation Restoration in Karst Area	CAI Hua, SHU Ying-ge, WANG Chang-min, <i>et al.</i>	(6880)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Typical Antibiotics in Environmental Media in China	CHEN Li-hong, CAO Ying, LI Qiang, <i>et al.</i>	(6894)
Spatial Prediction Modeling for Soil pH Based on Multiscale Geographical Weighted Regression (MGWR) and Its Influencing Factors	ZHAO Ming-song, CHEN Xuan-qiang, XU Shao-jie, <i>et al.</i>	(6909)
Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Around a Coal-fired Power Plant	ZHANG Jun, LI Xu, LIU Lei-yu, <i>et al.</i>	(6921)
Characteristics of Soil Pollution and Source Analysis of Typical Pollutants in the Petrochemical Site	ZHANG Yu-rong, LUO Shuai, CHEN Yuan, <i>et al.</i>	(6933)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes Distribution in Different Types of Agricultural Land Soils in Highly Cultivated Hilly Areas	CHEN Rui, CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6947)
Effects of Organic Fertilizer Combined with Biochar on Denitrifying Microorganisms and Enzyme Activities in Orchard Soil	DENG Zheng-xin, GAO Ming, XIONG Zi-yi, <i>et al.</i>	(6955)
Effects of Organic Fertilization on Bacterial Community and Maize Productivity in Dryland Red Soil	LIN Ting-ting, ZHENG Jie, ZHU Guo-fan, <i>et al.</i>	(6965)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Cadmium on Microbial Community Structure and Function of <i>Pennisetum hybridum</i> Rhizosphere Soil	DUAN Li-yang, ZHANG Yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>	(6973)
Effects of Tomato Planting Years on Soil Physical and Chemical Properties and Microbial Communities	ZHAO Yang-yang, LIU Yin-shuang, SONG Yao, <i>et al.</i>	(6982)
Remediation of Three Oxidants on Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Coking Contaminated Soil and Its Response to Indigenous Microorganisms	LI Wei, WANG Hua-wei, MENG Xiang-yu, <i>et al.</i>	(6992)
Microbial Diversity and Population Structure of Different Salinized Soil Types in Hebei Province	LIU Yin-shuang, NIU Hong-jin, ZHAO Yang-yang, <i>et al.</i>	(7004)
Functional Genomics Analysis of Nitrogen and Phosphorus Transformation in Maize Rhizosphere Microorganisms	WANG Xiang-jun, JIANG Mei-tong, LI Sen, <i>et al.</i>	(7014)
Remediation of Soil Cadmium Contamination by <i>Solanum nigrum</i> L. Enhanced by the Combination of Exogenous Bacteria and Citric Acid	WANG Kai, WANG Li, WANG Yi-kun, <i>et al.</i>	(7024)
Effect of Combined Application of an <i>Enterobacter</i> and Sulfur Fertilizer on Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice	ZHANG Pu-xin, YAO Jun-fan, LIU Yu-ling, <i>et al.</i>	(7036)