

目次

复合污染条件下人为源 VOCs 的 SOA 生成研究进展 陈天增, 刘俊, 马庆鑫, 楚碧武, 张鹏, 刘永春, 刘昌庚, 贺泓(1201)

全氟和多氟烷基化合物微生物降解与转化研究进展 孙红文, 方博, 陈浩, 赵茂森, 张耀之, 乔碧汀, 喻蒙(1214)

湖泊水质参数遥感监测研究进展 王思梦, 秦伯强(1228)

淡水环境中微塑料与重金属的“木马效应”研究进展 赵伟高, 田一梅, 赵鹏, 赵令铨, 金超(1244)

长江经济带二氧化碳净排放时空演变特征及脱钩效应 吴一帆, 许杨, 唐洋博, 贾宁, 李玮, 李翀, 殷国栋(1258)

中国土地利用碳排放变化及协调分区 李缘缘, 魏伟, 周俊菊, 郝瑞军, 陈帝伯(1267)

基于 STIRPAT 模型天津减排降碳协同效应多维度分析 刘茂辉, 岳亚云, 刘胜楠, 李婧, 刘佳泓, 孙猛(1277)

基于燃料生命周期的中国铁路排放趋势 佟惠, 范朝阳, 梁晓宇, 孙露娜, 门正宇, 赵肖阳, 毛洪钧(1287)

浙江省大气颗粒物 PM_{2.5} 化学组分污染特征分析 周菁清, 余磊, 陈书鑫, 陆佳锋, 许亚璐, 季海冰, 张柳芳, 刘劲松, 王静(1297)

南京亚微米级颗粒物化学组成的季节变化、粒径分布和来源 徐振麒, 尚玥, 丁峰, 谢鸣捷, 王勤耕(1310)

洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析: 棕碳的重要贡献 闫广轩, 侯明阳, 张朴真, 王洁琦, 王虎, 李崇浩, 王跃思(1319)

江苏省 2019 年 S/IVOCs 排放清单及分布特征 宋童艾, 张佳颖, 关璐, 胡建林, 于兴娜(1328)

珠三角典型工业区挥发性有机物(VOCs)组成特征: 含氧挥发性有机物的重要性 宋鑫, 袁斌, 王思行, 何贤俊, 李小兵, 彭钰雯, 陈钰彬, 齐吉朋, 蔡嘉骅, 黄山, 胡丹, 魏文, 刘可旋, 邵敏(1336)

2000~2020 年天津市机动车全过程 VOCs 排放特征及演变 孙露娜, 仲崇智, 孙世达, 刘妍, 佟惠, 吴亚君, 宋鹏飞, 张丽娜, 黄旭, 吴琳, 毛洪钧(1346)

港口自有移动源大气污染物排放清单 徐小凡, 王宝庆, 吴俊成, 李怡诺(1357)

基于改进水资源生态足迹模型的中国水资源可持续利用仿真及调控 欧阳兴涛, 廖浩宇, 姜秋香, 王子龙(1368)

黄河流域入海口典型区域有机磷酸酯分布特征和风险评估 曹渺, 郭昌胜, 张恒, 刘士清, 陈苗, 吕佳佩, 侯嵩, 尤新军, 徐建(1378)

桂林会仙岩溶湿地水体与沉积物中有机氯农药污染特征 余悦, 邢新丽, 程敏, 刘威杰, 张标, 孔祥胜, 李森, 余海阔, 罗为群, 祁士华(1387)

广东茂名主要水系表层沉积物重金属风险评估及源解析 陈小霞, 张敏, 李蓓, 温鹏翀, 丁平, 姚玲爱, 马千里, 李廷真, 蔡丹, 胡国成(1397)

宁波市地表水重金属时空分布特性和健康风险评估 徐美娟, 杨佳, 任晓景, 赵红燕, 高夫燕, 蒋跃军(1407)

典型西北山地-绿洲系统不同水体水化学特征及其水力关系分析 王诗语, 孙从建, 陈伟, 周思捷, 张鑫(1416)

牟汶河中上游孔隙水化学特征及控制因素 刘元晴, 周乐, 吕琳, 李伟, 王新峰, 邓启军, 郑一迪, 李常锁(1429)

石河子-昌吉地区地下水水质时空变化及污染源解析 丁启振, 周金龙, 季彦桢, 杨方源, 张淑霞(1440)

北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析 温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 张志刚, 田鹏飞(1452)

拉林河流域底栖硅藻群落结构特征及水生态健康评价 单涛, 袁安龙, 黄子芮, 周静怡, 陆欣鑫, 范亚文(1465)

南昌市湖泊丰水期浮游细菌群落结构及影响因素 高鹏飞, 王鹏, 黄伟, 丁明军, 张华, 聂明华, 黄高翔(1475)

调蓄水库细菌群落季节变化特征与影响因素 丁宁, 杨莹莹, 万年新, 徐爱玲, 葛建华, 宋志文(1484)

典型城市内河细菌组成与氮循环功能垂向分布及溯源分析 谭秋阳, 吕金燕, 白献宇, 程莉蓉, 李晚艳, 郑蕾(1497)

滇中高原水库外源污染负荷贡献解析与环境容量核算 郭玉静, 李红兵, 王树明, 白乙娟, 任良锁, 丁爱中(1508)

窄孔径含磷棉秆生物质炭的制备及对四环素的吸附机制 曾少毅, 李坤权(1519)

高比表面硫脲改性花生壳炭的制备及对四环素和铜的吸附 闵炳坤, 李坤权(1528)

不同供水管材生物膜抗生素抗性基因分布特征 刘晨旭, 白晓慧(1537)

水蚀环境植被恢复对土壤有机碳固存和团聚体稳定的影响: Meta 分析 杨睿哲, 杨世龙, 翁希哲, 徐灵颖, 刘雪健, 杜运田, 张雪辰, 郑伟, 翟丙年, 王朝辉, 李紫燕(1542)

增温施肥对稻麦农田土壤有机碳及其活性组分的影响 邓旭哲, 韩晨, 薛利祥, 侯朋福, 薛利红, 杨林章(1553)

三江源地区高寒草地土壤功能的水平分异特征及其沿发生层的垂直变化 李柏键, 申聪聪, 刘四义, 吴华勇, 王继琛, 赵冬辉, 葛源(1562)

鄱阳湖平原直播稻 CH₄ 通量及其与 CO₂ 通量的综合温室效应 时元智, 崔远来, 才硕, 洪大林, 程婕(1572)

不同土地利用类型土壤多环芳烃的纵向污染特征及来源解析 周芷嫣, 张秀秀, 王飞, 朱昌达, 潘剑君(1583)

石家庄道路灰尘中全氟/多氟化合物及其新型替代品的污染特征及健康风险评估 李鹏飞, 王媛, 杨晨, 史亚利, 崔建清(1593)

南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价 杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清(1602)

三峡库区(重庆段)菜地土壤重金属污染特征、潜在生态风险评估及源解析 石雨佳, 方林发, 方标, 叶莘莘, 范晓霞, 高坤鹏, 陈征, 肖然(1611)

兰州市耕地表层土壤重金属的积累特征及其影响因素分析 康乐, 彭鑫波, 马延龙, 张利瑞, 张妍娥, 王泉灵, 张松林(1620)

粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评估 王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨(1636)

三门峡某铝厂遗留场地土壤重金属空间分布特征及来源解析 卢小慧, 余方中, 范一鸣, 杨阳(1646)

某试验场土壤重金属分布特征及其污染评价 王诗雨, 李淳, 赵洪伟, 陈希, 张慧君, 朱勇兵, 赵三平, 计超, 刘晓东(1657)

化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制 马强, 卫泽斌, 吴启堂(1668)

再生铜冶炼过程中重金属排放特征和控制 林炳丞, 吴广龙, 郑明辉, 刘国瑞(1678)

长江流域(安徽段)土壤-作物系统重金属污染特征及健康风险评估 刘海, 魏伟, 黄健敏, 赵国红(1686)

稻-麦轮作模式下不同钝化材料对镉污染农田土壤的原位钝化效应 张路, 唐婵, 余海英, 李廷轩, 张锡洲, 黄化刚(1698)

巯基化蒙脱石用于镉污染农田安全生产的效果及其持久性 冯先翠, 陈亚刚, 焦洪鹏, 曹鹏, 朱凤榕, 李媛媛, 江海燕(1706)

蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与翅果菊修复镉污染土壤的影响 陈敏妮, 袁小奇, 张李峰, 何川黔, 高波(1714)

地质高背景区富 Se 耕地可利用性研究及区划建议 王锐, 李瑜, 余京, 周皎, 余飞, 张云逸, 蒋玉莲(1727)

张家口市北新屯地区蔬菜种植区微量元素富集特征及成因分析 安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 李文娟, 鲁青原(1735)

三峡库区消落带落羽杉人工林土壤细菌群落结构多样性及动态变化 谭雪, 董智, 张丽苗, 袁中勋, 李昌晓(1748)

黄土丘陵区退耕还林对土壤真菌群落的影响 张蕾, 王强, 杨新月, 吕俊平(1758)

化肥减量配施有机肥对土壤功能微生物和柠檬产量及品质的影响 王蕊燕, 熊子怡, 罗东海, 王子芳, 高明(1768)

鸡粪和猪粪生物发酵过程中抗生素抗性基因的动态变化 张丹, 彭双, 王丹青, 王-明, 林先贵(1780)

牛粪还田对土壤微生物群落特征的影响 张雅丽, 郭晓明, 胡慧, 郭暖, 徐小涛, 李建林(1792)

《环境科学》征订启事(1406) 《环境科学》征稿简则(1592) 信息(1635, 1667, 1677)

洛阳地区碳质组分季节特征及来源解析：棕碳的重要贡献

闫广轩¹, 侯明阳¹, 张朴真², 王洁琦¹, 王虎¹, 李崇浩¹, 王跃思^{1,3}

(1. 河南师范大学环境学院, 黄淮水环境污染与防治教育部重点实验室, 新乡 453007; 2. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 中国科学院大学大气物理研究所, 大气边界层物理与化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 为探究洛阳地区碳质气溶胶尤其是棕碳的季节、污染特征及其来源解析, 于2018~2019年的四季共采集到98个样品, 并分析了碳质气溶胶浓度特征和光学特性。4个季节 ρ [有机碳(OC)]和 ρ [元素碳(EC)]介于 $(7.04 \pm 1.82) \sim (23.81 \pm 8.68) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(2.96 \pm 1.4) \sim (13.41 \pm 7.91) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 呈现冬高夏低的季节变化趋势; 与2015年相比, 碳质组分的占比升高了8.33%~141.03%, 二次有机气溶胶占比(SOC/OC)升高了0.77%~63.14%。碳质气溶胶光吸收截面(MAC)值与碳质组分的浓度呈现出不同的季节变化, 秋季 $(7.67 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}) >$ 冬季 $(5.65 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}) >$ 春季 $(5.13 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}) >$ 夏季 $(3.84 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$, 445 nm处的MAC值 $(3.84 \sim 7.67 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$ 明显低于新产生煤灰值。棕碳的光吸收和其占总光吸收的贡献值 $(b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}, b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}/b_{\text{abs, 405 nm}})$ 的季节变化为冬季 $(31.57 \text{ Mm}^{-1}, 33\%)$ 、秋季 $(11.40 \text{ Mm}^{-1}, 25\%)$ 、春季 $(4.88 \text{ Mm}^{-1}, 23\%)$ 和夏季 $(2.12 \text{ Mm}^{-1}, 21\%)$, 在污染过程中, 碳质组分占比在降低, 而 $b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}/b_{\text{abs, 405 nm}}$ 变化相反, 强调棕碳对总光吸收的重要贡献。综合PMF结果和 $b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}$ 与 $\text{PM}_{2.5}$ 组分的相关系数的结果, 机动车和二次硝酸盐分别贡献了27.7%和24.0%。研究结果为洛阳地区碳质气溶胶, 尤其在棕碳的深度治理提供了科学依据。

关键词: 碳质气溶胶; 季节特征; 污染过程; 棕碳; 光学特性; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)03-1319-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202203234

Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution

YAN Guang-xuan¹, HOU Ming-yang¹, ZHANG Pu-zhen², WANG Jie-qi¹, WANG Hu¹, LI Chong-hao¹, WANG Yue-si^{1,3}

(1. Key Laboratory for Yellow River and Huai River Water Environment and Pollution Control, Ministry of Education, School of Environment, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: A total of 98 samples were collected to analyze the seasonal variation and source apportionment of carbonaceous components, especially brown carbon (BrC), of $\text{PM}_{2.5}$ in Luoyang during 2018-2019. The concentrations of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) ranged from $(7.04 \pm 1.82) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ to $(23.81 \pm 8.68) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(2.96 \pm 1.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ to $(13.41 \pm 7.91) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, showing the seasonal variation of being high in winter and low in summer; the carbonaceous fraction and secondary organic aerosol percentages were higher by 8.33%-141.03% and by 0.77%-63.14%, respectively, compared with that in 2015. The light absorption cross section (MAC) values showed different seasonal variations with the concentration of carbonaceous fraction, shown in descending order as autumn $(7.67 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}) >$ winter $(5.65 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}) >$ spring $(5.13 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}) >$ summer $(3.84 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$. The MAC values ranged from 3.84 to $7.67 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ at 445 nm, which was lower than that in coal ash. Seasonal variation in light absorption and the contribution of BrC to total light absorption $(b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}, b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}/b_{\text{abs, 405 nm}})$ in descending order was winter $(31.57 \text{ Mm}^{-1}, 33\%)$, autumn $(11.40 \text{ Mm}^{-1}, 25\%)$, spring $(4.88 \text{ Mm}^{-1}, 23\%)$, and summer $(2.12 \text{ Mm}^{-1}, 21\%)$. The proportion of carbonaceous components decreased as haze episodes evolved, whereas the contribution of light absorption of BrC increased, highlighting the important contribution of BrC to the total light absorption. The results of PMF and correlation coefficients of $b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}$ and $\text{PM}_{2.5}$ components indicated that motor vehicles and secondary nitrate contributed 27.7% and 24.0%, respectively. Our findings have significant scientific implications for the deep controlling of carbonaceous aerosol, especially for BrC, in Luoyang in the future.

Key words: carbonaceous aerosol; seasonal variation; pollution process; brown carbon; optical properties; source apportionment

碳质气溶胶对大气能见度, 人体健康以及全球辐射平衡具有重要影响, 在细颗粒中含量可达20%~50%^[1], 其中包括元素碳(element carbon, EC)和有机碳(organic carbon, OC)。EC与黑碳(black carbon, BC)^[2]相关性很高, 经常替代BC进行光吸收分析。OC通常被认为是单纯的散射组分。现在研究发现, OC中存在一种与BC类似具有吸光能力的物质, 称为棕碳(brown carbon, BrC), 其光吸收能力

具有很强的波长依赖性。由于对BrC吸光特性、化学成分、来源以及在大气中传输转化过程的认识有限^[3], 所以颗粒物中碳质气溶胶的光学性质受到广泛关注。

收稿日期: 2022-03-25; 修订日期: 2022-05-30

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41807327)

作者简介: 闫广轩(1983~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为大气环境与气溶胶, E-mail: xuanxuaneeec@163.com

当前我国对碳质气溶胶的研究主要集中在华北平原、珠三角地区 (PRD)、长三角地区 (YRD) 和关 中平原地区^[4~7]。西安地区^[7] OC 和 EC 浓度 ($29 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 是嘉善地区^[8] 的 3 倍,北京^[4] 的 OC 浓度是嘉善的 1.5 倍,说明碳质组分的浓度和组成具有较大的南北地区差异。但是这些地区强烈的大气消光都指向了棕色碳的显著贡献,例如,北京地区^[4] 的光吸收值在 25.2 Mm^{-1} ,棕碳的光吸收占 21.2%,长三角上海崇明岛^[9] 冬季醇溶态棕碳在 365 nm 波段光吸收值为 $(5.39 \pm 3.33) \text{ Mm}^{-1}$,AAE 值为 5.88 ± 0.21 ,珠三角地区广州^[10] 在 405 nm 波段 MAC 值为 $0.7 \sim 1.3 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,而以上研究发现棕碳的产生主要来自生物质和化石燃料燃烧源。有研究发现棕碳的来源也会受到地理因素影响,例如,华山山地地区^[11] 棕碳的二次转化占到 87%。因此,对于山前平原城市而言,由于受到地理因素的影响,以石油化工为支柱行业的能源使用结构极有可能具备更高的棕碳生成潜力。

近年来位于汾渭平原的洛阳地区出现了严重雾-霾问题,洛阳是河南省第二大经济生产城市,高度工业化和城市化,到 2019 年底总能耗(以标准煤当量计)为 1 338.52 万 t,车辆为 110 万,当地工业排放和交通污染可能是造成雾-霾形成的原因。洛阳位于河南西部,整体地势西高东低,加上境内山川丘陵交错不利于污染物扩散。当前针对洛阳以石化企业为主要支柱产业城市的研究相对较少。本研究对洛阳市 2018~2019 年碳质气溶胶浓度和光学特征进行年、季节和不同污染过程的分析,拟探究洛阳地区碳质气溶胶尤其是棕碳的季节、污染特征及其来源,以期对洛阳市碳质气溶胶的深度治理提供科学支撑。

1 材料与方法

1.1 采样

采样地点位于河南省洛阳市西工区凯旋路小学,处于居民和交通中心区。采样期从 2018 年 10 月 17 日到 2019 年 7 月 8 日 4 个季节分别获得 32、23、23 和 20 个样品。每天从 10:00 开始至次日 09:00 (23 h) 由 TH-150 中体积空气采样器(中国武汉天虹有限公司)在石英滤膜上采集 $\text{PM}_{2.5}$ 样品,流量为 $100 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。所有石英滤膜均在 450°C 下预烤 4 h 以去除滤膜中的有机物。采样前后,滤膜在 23°C 和相对湿度 50% 的条件平衡 48 h,称重后,在 -18°C 保存,直到预处理。现场空白样品与同批次实际样品一起进行恒重和称量。气象数据来自于中国气象数据网,包括温度(T)、相对湿度(RH)、风速(WS)和

大气压(p)。

1.2 化学组分(水溶性离子、无机元素)的测定

将采集的石英纤维滤膜打两个直径为 16 mm 的孔,放置于干净的 PET 瓶中,加入 30 mL 超纯水进行超声溶解,超声过程中放入冰袋,以防止温度过高造成易挥发物质的损失,使用 $0.22 \mu\text{m}$ 的滤膜过滤超声浸提液后,通过离子色谱仪(Dionex ICS-1100)测定样品中的水溶性阴离子和阳离子(F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 K^+) 的浓度。

无机元素分析采用微波消解将 1/4 滤膜消解为溶液态待分析,消解使用的酸体系为 6 mL HNO_3 + 2 mL H_2O_2 + 0.6 mL HF 混合酸体系。消解结束后消解罐温度降至室温,将消解液转移至 PET 塑料瓶中,用去超纯水定容至 50 mL 并在 4°C 避光保存至分析。无机元素分析使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent7800)测定了 Na、Mg、Al、K、Ca、Ti、Mn、Co、Cu、Zn、Ag、Cd、Pb、Fe、Cr、Ni、V、As、Se 和 Sb。

1.3 热/光碳分析

采用 DRI Model 2015 多波段热/光碳分析仪^[12] 对样品中碳质组分(OC、EC)进行定量分析。分析时,取一个直径 8 mm 石英纤维滤膜样品,依据 IMPROV A 升温协议进行升温。首先在纯氦气条件下逐步升温到 580°C ,OC 散逸出来,经过催化氧化为 CO_2 (催化剂为 MnO_2),进入非分散红外(NDIR)检测器进行定量检测。在含 2% 氧气的环境中逐步升温到 840°C ,EC 散逸出来。在升温的同时可以测定每个滤膜中颗粒物在 7 个波段(405、445、532、635、780、808 和 980 nm)下的透射光和反射光信号。测定过程中得到的 OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2、EC3 以及 OP。通过计算得到: $\text{OC} = \text{OC1} + \text{OC2} + \text{OC3} + \text{OC4} + \text{OP}$; $\text{EC} = \text{EC1} + \text{EC2} + \text{EC3} - \text{OP}$ 。裂解碳(OP)是反射激光达到初始强度时,测得碳的量。使用邻苯二甲酸氢钾标准溶液每半年建立一次分析仪的校准曲线,使用石英滤膜采集的样品测试碳组分时,质量保证与质量控制见文献[12]。

1.4 BrC 的估算

AAE 法为利用 BC 和 BrC 波长依赖性的差异,将 BrC 光吸收与总吸收进行分离的方法^[13, 14]。公式(1)是光吸收的埃斯特朗指数 AAE 的定义式,表示光吸收系数 $b_{\text{abs},\lambda}$ 与波长 λ 之间的函数关系,在一定程度上可以表示吸光颗粒物的类型。

$$\text{AAE} = \alpha(\lambda) = -\frac{\text{dln}(b_{\text{abs},\lambda})}{\text{dln}(\lambda)} \quad (1)$$

公式(2)为光吸收系数 $b_{\text{abs},\lambda}$ 与吸收光学厚度 $\tau_{\alpha,\lambda}$ 之间的关系:

$$b_{\text{abs},\lambda} = \tau_{\alpha,\lambda} \times (A/V) \quad (2)$$

式中, $b_{\text{abs},\lambda}$ 的单位 Mm^{-1} , A 为滤膜沉淀面积(即采样面积)单位为 cm^2 , V 为采样空气的体积单位为 m^3 .

吸收光学厚度 $\tau_{\alpha,\lambda}$ 仅代表光的吸收特性, 并且气溶胶的光吸收随着波长的增加呈幂指数下降, 如果没有滤膜载荷效应和散射效应的影响, 在一定的波长范围, ATN_λ 与 $\tau_{\alpha,\lambda}$ 应该是相等的. 根据 Chen 等^[12] 的研究发现 ATN_λ 与 $\tau_{\alpha,\lambda}$ 之间的关系[公式(4)], 由于在 532 nm 处低信噪比, 没有使用此处的光信号, A_λ 和 B_λ 是关于光散射和载荷效应的系数.

$$\tau_{\alpha,\lambda} = C \times \lambda^{-\alpha(\lambda)} \quad (3)$$

$$\tau_{\alpha,\lambda} = A_\lambda \times \text{ATN}_\lambda + B_\lambda \times \text{ATN}_\lambda \quad (4)$$

$$\text{ATN}_\lambda = -\ln\left(\frac{\text{LT}_{\lambda,i}}{\text{LT}_{\lambda,f}}\right) \quad (5)$$

式中, ATN_λ 为沉积在滤膜上颗粒物的透射光衰减量, $\text{LT}_{\lambda,i}$ 和 $\text{LT}_{\lambda,f}$ 分别为热分析前后滤膜样品透射光信号的初始值和结束值, $\text{LT}_{\lambda,f}$ 近似于空白膜的光衰减, 由于加热碳已经逸散.

$$\text{MAC}_\lambda = b_{\text{abs},\lambda} / \text{EC} \quad (6)$$

式中, MAC_λ 为吸收截面, 是气溶胶光学性质的重要参数.

$$\text{AAE}_{\lambda_1-\lambda_2} = \ln\left(\frac{b_{\text{abs},\lambda_1}}{b_{\text{abs},\lambda_2}}\right) / \ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \quad (7)$$

$$b_{\text{abs},\lambda} = b_{\text{abs},\lambda, \text{BC}} + b_{\text{abs},\lambda, \text{BrC}} \\ = q_{\text{BC}} \times \lambda^{-\text{AAE}_{\text{BC}}} + q_{\text{BrC}} \times \lambda^{\text{AAE}_{\text{BrC}}} \quad (8)$$

式中, q_{BC} 和 q_{BrC} 分别为 BC 和 BrC 的衰减系数. 之前的研究, 没有考虑到实际 AAE_{BC} 的变化, 直接假设 AAE_{BC} 为 1.0 或其他值^[15], 从而导致在评估 AAE_{BrC} 时出现较大的偏差. 本文中采用了 Chow 等^[16] 提出的方法, 利用公式(7)估算 AAE_{BC} 实际值. 然后基于最小二乘法, 估算 BrC 的 AAE 值.

1.5 PMF 模型

正交矩阵因子分解(positive matrix factorization, PMF)模型是一种不需要测定源成分谱, 只需要输入受体点成分谱信息, 即颗粒物中各化学物种的浓度及测量偏差, 然后利用最小二乘法解出源贡献量和源谱信息的模型. 本研究中使用 PMF 5.0 对 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分的来源进行解析, 最终共使用 18 种元素, 5 种离子, OC 和 EC, 得到 6 个因子. 输入数据前, 需要对数据进行处理, 将对化学组分缺失的数据以及低于仪器检测限的数据进行补齐, 化学组分缺失的值由该化学组分的平均值代替, 相应的偏差为 4 倍均值. 当化学成分浓度低于仪器检测限 (MDL)

时, 不确定度为 $\text{Unc} = (5/6) \text{MDL}$; 化学成分浓度高于仪器检测限时, 不确定度用公式(9)计算.

$$\text{Unc} = \sqrt{(\text{EF} \times \text{concentration})^2 + (0.5 \times \text{MDL})^2} \quad (9)$$

式中, EF(error fraction)为误差分数, concentration 为样品浓度.

2 结果与讨论

2.1 碳质气溶胶浓度特征

洛阳地区 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 的年均值分别为 $13.28 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $6.02 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 与 2015 年^[17] 相比分别降低了 17.87% 和 2.4% (表 1), 但高于珠三角地区 125.5% 和 276.25%. 碳质气溶胶对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献的年均值 ($\text{TC}/\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{OC}/\text{PM}_{2.5}$ 和 $\text{EC}/\text{PM}_{2.5}$) 较 2015 年分别升高了 30.19%、27.46% 和 36.26%. OC 和 EC 的季节特征与 $\text{PM}_{2.5}$ 一致, 其浓度范围分别为 $7.04 \sim 23.81 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $2.96 \sim 13.41 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 与国内其他城市相比, 高于嘉兴市^[8]、北京市^[18] 和 PRD 地区^[19] 8%~76%. 洛阳地区夏秋冬季二次有机气溶胶 SOC^[20] (EC-示踪法) 和 SOC/OC 均高于 PRD 地区, SOC/OC 接近于北京地区. 较 2015 年, 夏季 OC 浓度升高了 42%, SOC 升高了 133.79%, 其占比 SOC/OC 升高了 62%. 这可能是夏季高温高湿的气象条件有利于 SOC 的产生. 冬春季 OC 和 SOC 浓度都降低, 但是 SOC/OC 变化不明显; 秋季 OC 浓度降低, SOC 升高, SOC/OC 增加了 63%. 夏、秋、冬三季 SOC/OC 达到 45% 以上. 说明加强二次碳质组分的研究对于洛阳地区的碳质成分的深度治理有重要意义.

为了进一步探究碳质气溶胶在污染过程中的作用, 本研究对污染过程(清洁、发展和消散)其变化特征进行了分析(表 2). 秋季, 与清洁期相比, 发展过程 $\rho(\text{OC})$ 、 $\rho(\text{EC})$ 和 $\rho(\text{SOC})$ 均值分别增加了 6.25、3.05 和 $0.98 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 与发展过程相比, 消散过程 $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 降低了 $1.63 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $1.49 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, $\rho(\text{SOC})$ 升高了 $0.72 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 可见在污染过程中, SOC 的浓度并不会随着 OC 和 EC 的清除而降低, 这可能和气溶胶老化或二次有机气溶胶的持续生成有关. 冬季 OC、EC 和 SOC 浓度变化趋势与秋季相似. 冬季各阶段 OC、EC 和 SOC 浓度均高于秋季. 发展到消散阶段, 冬季相对于秋季 OC 浓度降低不明显(秋季降低 10.69%, 冬季降低 0.19%), 但是 SOC 浓度明显增加(秋季增加 11.5%, 冬季增加 55%). 结果再次印证了碳质组分二次转化在污染过程中有重要作用.

表 1 洛阳地区碳质气溶胶浓度

Table 1 Carbonaceous aerosol concentrations in Luoyang region

年份	季节	仪器	$\rho(\text{PM}_{2.5})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{OC})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\rho(\text{EC})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	OC/ $\text{PM}_{2.5}$ /%	EC/ $\text{PM}_{2.5}$ /%	TC/ $\text{PM}_{2.5}$ /%	OC/EC	$\rho(\text{SOC})$ / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	SOC/OC /%	文献
	年均		97.80	13.28	6.02	14.25	5.9	20.18	2.58	6.28	41.72	
	春季		67.82	8.61	3.72	12.99	5.47	18.46	2.47	2.07	26.00	
2018	夏季	DRI Model 2015	54.44	7.04	2.96	13.98	5.41	19.40	2.62	3.39	50.07	本研究
	秋季		114.38	13.95	4.81	13.43	4.39	17.81	3.04	6.60	46.12	
	冬季		154.69	23.81	13.41	16.95	8.79	25.74	2.08	11.41	47.78	
	年均		140.99	16.17	6.17	11.18	4.33	15.50	2.60	5.54	30.75	
	春季		90.50	10.79	4.63	11.92	5.12	17.04	2.33	2.85	25.80	
2015	夏季	DRI Model 2001A	91.70	4.94	2.44	5.39	2.66	8.05	2.02	1.45	30.85	[17]
	秋季		190.80	21.52	6.78	11.28	3.55	14.83	3.17	5.93	28.27	
	冬季		204.30	28.42	11.31	13.91	5.54	19.45	2.51	11.60	46.40	

表 2 秋冬季按污染过程划分的碳质组分的浓度和光学性质

Table 2 Mass concentrations and optical properties of carbonaceous components by pollution process in autumn and winter

季节	项目	清洁	发展	消散
秋季	$\rho(\text{OC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	9	15.25	13.62
	$\rho(\text{EC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	2.82	5.87	4.38
	OC/ $\text{PM}_{2.5}$ /%	16.25	11.80	12.94
	EC/ $\text{PM}_{2.5}$ /%	4.77	4.36	3.97
	$\rho(\text{SOC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	5.3	6.28	7.49
	SOC/OC/%	54	40	54
	SOC/EC	1.91	1.12	1.94
	$b_{\text{abs},405\text{ nm}}/\text{Mm}^{-1}$	21.42	49.04	43.34
	$\text{MAC}_{445\text{ nm}}/\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	6.67	7.43	8.15
	$b_{\text{abs},\text{BrC},405\text{ nm}}/\text{Mm}^{-1}$	5.45	13.51	11.81
冬季	$b_{\text{abs},\text{BrC},405\text{ nm}}/b_{\text{abs},405\text{ nm}}/\%$	22.80	26.05	28.11
	$\rho(\text{OC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	12.27	25.83	25.78
	$\rho(\text{EC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	5	15.33	9.06
	OC/ $\text{PM}_{2.5}$ /%	22.27	15.95	17.50
	EC/ $\text{PM}_{2.5}$ /%	9.08	8.94	6.36
	$\rho(\text{SOC})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	7.42	11.75	17
	SOC/OC/%	61	44	65
	SOC/EC	1.50	0.98	1.91
	$b_{\text{abs},405\text{ nm}}/\text{Mm}^{-1}$	34.2	100.11	73.89
	$\text{MAC}_{445\text{ nm}}/\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$	5.79	5.59	6.88
$b_{\text{abs},\text{BrC},405\text{ nm}}/\text{Mm}^{-1}$	8.97	34.93	28.47	
$b_{\text{abs},\text{BrC},405\text{ nm}}/b_{\text{abs},405\text{ nm}}/\%$	27.58	33.46	34.18	

2.2 碳质气溶胶的光学特征

2.2.1 碳质气溶胶的光吸收系数

为了探究碳质气溶胶的组成,分析了吸光物质的光学特性.碳质气溶胶在 405 nm 波长的光吸收系数 b_{abs} 年均值为 41.94 Mm^{-1} . b_{abs} 呈现出的季节性变化(图 1),冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季,与其他研究中得到的变化结果(即冬季 > 夏季)一致^[21, 22]; b_{abs} 与 OC 和 EC 浓度的季节性变化(图 1)相同,都是秋冬季远高于春夏季,说明碳质组分的浓度可能对吸光变化具有一定的影响.本研究中秋季高于春季的现象与西安地区^[23]的季节变化(冬季 > 春季 > 夏季 > 秋季)相反,洛阳地区 OC/EC(表 1)和 SOC/OC 的季节特点与西安^[7]地区也相反,这可能与来源及

其排放强度有关.

随着污染事件发生的过程,光吸收值与碳质组分浓度变化呈现相似的趋势.秋、冬季发展阶段的 $b_{\text{abs},405\text{ nm}}$ 相比于清洁期分别增加了 128.94% 和 192.72%,消散阶段相比于发展阶段分别降低了 11.62% 和 26.19%.冬季相较于秋季各阶段光吸收值和变化程度都更高.从清洁到发展过程碳质组分的占比在降低,但 $b_{\text{abs},405\text{ nm}}$ 反而升高,这可能是由于碳质组分中存在光吸收能力更强的物质所致.在冬季污染发展阶段,1月1日和1月4日两天 OC 增加 EC 降低(图 1), b_{abs} 却在升高,1月5日 OC 大幅降低,EC 变化不大, b_{abs} 和 OC 一样也大幅降低,说明 OC 中可能存在具有吸光能力的物质.

2.2.2 碳质气溶胶的 MAC 值

MAC 也是气溶胶光学性质的一个重要参数,在 445 nm 波段 MAC 的年均值为 $5.77\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$.在 445 nm 波段 MAC($\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)的季节变化为:秋季(7.67) > 冬季(5.65) > 春季(5.13) > 夏季(3.84).冬季高于夏季的变化与三峡库区(渝北、涪陵和万州)^[21]相同,但与青岛地区^[24]相反,这是由于夏季更高的湿度导致黑碳周围包裹更多的有机物,从而导致夏季黑碳的 MAC 相对(7.12)高于冬季(6.66).这说明碳质气溶胶的季节特征存在很大的空间变异,可能与碳质组分不同有关.在污染发生的过程中,秋冬两季在消散阶段 MAC 不断升高,这与 SOC 的变化趋势相同.秋季各阶段 MAC 和 SOC/EC 都高于冬季,说明 SOC 的相对变化对 MAC 可能具有一定的影响.这和 b_{abs} 污染过程分析 OC 与碳质组分光学性质的变化相一致.

MAC 的差异可以进行来源分析.有研究指出新产生煤灰(没有涂层包裹)的 MAC 在 $6.3\sim 8.7\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ (550 nm) 或者 $3.9\sim 5.4\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ (880 nm)^[2].兰州地区^[25] MAC_{EC} 在紫外和可见光波段约为 $8.5\sim 10.2\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$,其来源可能与化石燃料燃烧

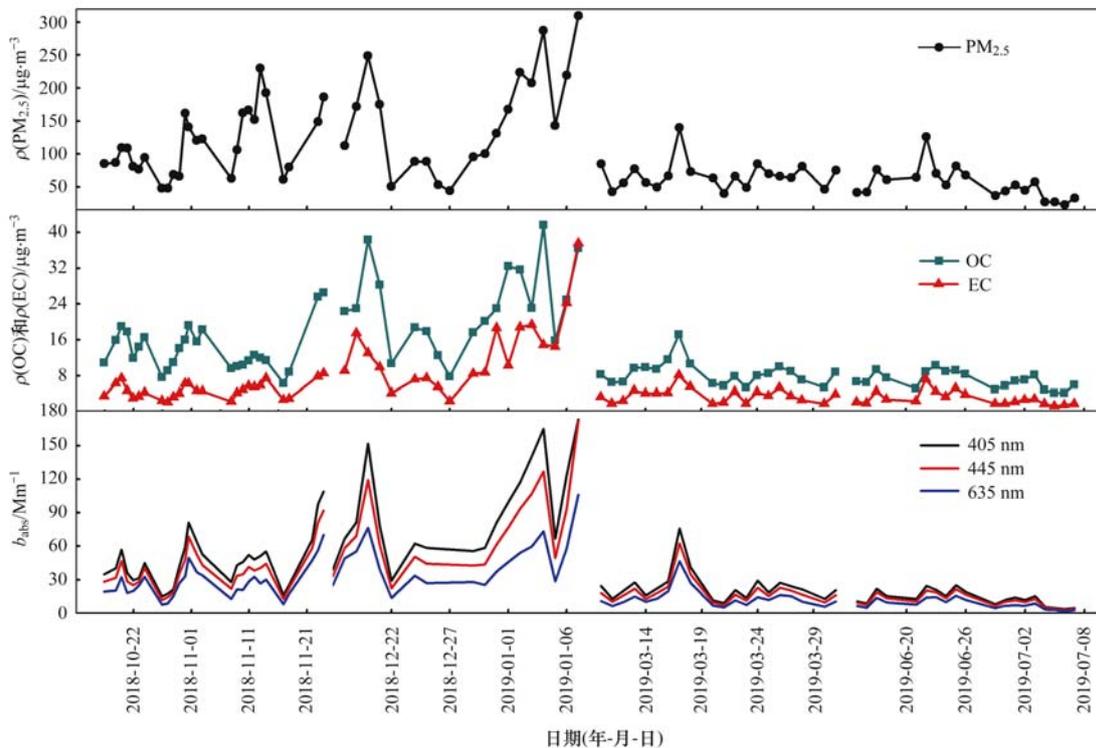


图1 $PM_{2.5}$ 、OC、EC 浓度和 405、445、635 nm 光吸收物质的吸光值的季节变化

Fig. 1 Seasonal variation in $PM_{2.5}$, OC, EC, concentration and absorbance values of 405, 445, and 635 nm light absorbing substances

有关. 巴黎地区^[26] 950 nm 处 MAC_{BC} 为 $7.3 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 其来源可能与生物质燃烧和 SOA 的形成有关. 南黄海夏季在 678 nm 处 MAC 为 $5.70 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ^[24], 主要来源与二次气溶胶和煤炭燃烧有关, 样品中可能存在棕碳等其它物质. Cheng 等^[27] 在 MAC 的研究中提到棕碳或者受到生物质燃烧影响可能会引起 EC 的 MAC 降低. 本研究得到的秋季 MAC ($5.50 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 635 nm) 低于新产生煤灰的值大约 27%, 这个比例高于韩国高山地区^[28] (MAC_{BC} 在 635 nm 处为 $6.4 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, 低于新产生煤灰的值 15%), 说明可能是 EC 受到棕碳的影响更大, 从而 MAC 降低更多.

2.3 棕碳的光学特性

洛阳地区 BrC 在 405 nm 处光吸收 ($b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}$) 及其贡献 ($b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}/b_{\text{abs, 405 nm}}$) 的年平均值为 12.07 Mm^{-1} 和 25.56%. BrC 的季节变化为冬季 (31.57 Mm^{-1} , 33%) > 秋季 (11.40 Mm^{-1} , 25%) > 春季 (4.88 Mm^{-1} , 23%) > 夏季 (2.12 Mm^{-1} , 21%), 夏季 $b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}/b_{\text{abs, 405 nm}}$ 最低, 分别低于冬、秋、春这 3 个季节 36.3%、16%、8.7%. 这可能是在较强的日照条件下, BrC 发生光解老化促使 BrC 的吸光能力下降^[29]. BrC 的光吸收呈现明显的冬季高夏季低的变化趋势(表 3), 相似的趋势在西安地区^[23] 和南京地区^[13] 也有报道. 然而, 洛阳地区 $b_{\text{abs, BrC}}$ 和 $b_{\text{abs, BrC}}/b_{\text{abs}}$ 的季节变化幅度与这些

地区存在明显的差异, 夏季 $b_{\text{abs, BrC}}$ 较西安地区低 80.5%, 但是 $b_{\text{abs, BrC}}/b_{\text{abs}}$ 却高出 22%, 这种变化幅度虽然相对于西安地区较小, 但是却高于南京地区和三峡库区(渝北、涪陵、万州)^[21], 且洛阳地区 $b_{\text{abs, 405 nm}}/b_{\text{abs, 980 nm}}$ 的均值高达 2.4, 说明 BrC 污染对光吸收的贡献不容忽视^[21].

在污染发生过程中, 秋冬季 $b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}$ 在发展阶段相较于清洁阶段增加了 147.89% 和 289.41%. $b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}/b_{\text{abs, 405 nm}}$ 在发展阶段相较于发生阶段增加了 14.25% 和 21.32%, 消散阶段相较于发展阶段增加了 7.91%、2.15%. 从发展到消散的过程, 秋冬两季 $b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}$ 的变化趋势与碳质组分的变化趋势相同, 最高值出现在发展阶段, $b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}/b_{\text{abs, 405 nm}}$ 呈现逐渐增加的趋势, 在消散阶段出现最高值. 碳质组分占比在降低, 而 BrC 光吸收的贡献率在持续增加, 说明 BrC 在消散阶段对光吸收的变化具有重要作用.

有研究表明, 兰州地区 BrC 在 635 nm 处的年平均贡献率可达 34%^[25]; 北京、郑州和新乡三地冬季 405 nm 处 BrC 的贡献率约为 21.22%、23.28% 和 48.58%, 都主要来自于化石燃料燃烧, 新乡地区高贡献率来源于有机溶剂的高排放^[4]. 三门峡冬季 BrC 在 370 和 470 nm 处光吸收的贡献率分别为 37.7% 和 25.1%, 主要来自于生物质燃烧、煤燃烧

和交通排放^[30]. 西安冬季 370 nm BrC 的贡献率达到 41%, 主要来自于供暖的燃煤和生物质燃烧^[23]; 深圳城市地区冬季和秋季在 405 nm 处的贡献率分别为 11.7% 和 6.3%, 农村地区秋季 12.1%, 城市地区冬季 BrC 主要来自于化石燃料燃烧, 农村地区秋

季 BrC 主要来自于生物质燃烧^[5]. 成都地区冬季的 BrC 的贡献率在 17.8%, 主要来自于煤燃烧和二次转化^[31]. 与其它地区 BrC 来源的贡献率比较, 洛阳地区 BrC 的主要来源很可能与化石燃料和生物质燃烧有关.

表 3 洛阳地区碳质气溶胶的光学性质

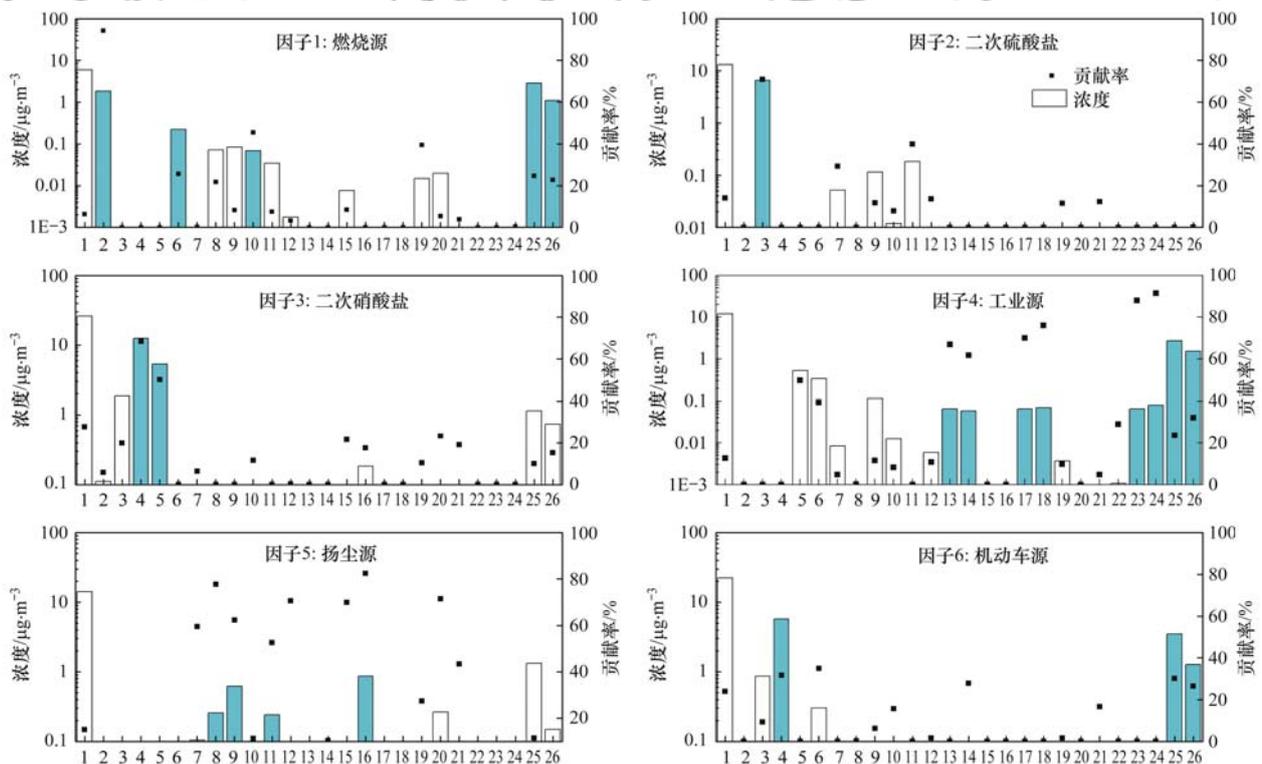
Table 3 Optical properties of carbonaceous aerosols in Luoyang region

季节	$b_{\text{abs},405 \text{ nm}}$ /Mm ⁻¹	MAC _{445 nm} /m ² ·g ⁻¹	MAC _{635 nm} /m ² ·g ⁻¹	$b_{\text{abs},\text{BrC},405 \text{ nm}}$ /Mm ⁻¹	$b_{\text{abs},\text{BrC},405 \text{ nm}}/b_{\text{abs},405 \text{ nm}}$ /%
秋季	46.13	7.67	5.50	11.40	25
冬季	91.56	5.65	3.63	31.57	33
春季	23.89	5.13	3.57	4.88	23
夏季	13.42	3.84	2.68	2.12	21

2.4 棕碳的来源解析

本研究利用 PMF 模型对 2018~2019 年采样期内 PM_{2.5} 化学组分进行源解析, 最终确定因子数目为 6 时得到合适准确具有物理意义的结果(图 2). 不同来源的贡献率如表 4 所示, 整个采样期内源贡献率从高到低依次为二次硝酸盐(27.7%)、机动车源(24.0%)、扬尘源(15.1%)、二次硫酸盐(14.0%)、工业源(12.8%)和燃烧源(6.4%). 不

同来源具有一定的季节性特征, 二次硝酸盐在秋、冬、春三季中的贡献率都高于 25%, 其中秋季贡献率最高, 为 35.3%, 二次硫酸盐的贡献在夏季比较明显, 贡献率为 33.0%, 机动车源在秋冬季节的贡献率为 27.4% 和 28.0%, 燃烧源在冬季和春季的贡献率为 9.3% 和 7.3%, 明显高于其他两个季节. 受风沙、施工活动以及建筑扬尘影响, 扬尘源在春季贡献较高, 贡献率为 26%.



1. PM_{2.5}, 2. Cl⁻, 3. SO₄²⁻, 4. NO₃⁻, 5. NH₄⁺, 6. K⁺, 7. Na, 8. Mg, 9. Al, 10. K, 11. Ca, 12. Ti, 13. V, 14. Cr, 15. Mn, 16. Fe, 17. Co, 18. Ni, 19. Cu, 20. Zn, 21. As, 22. Ag, 23. Cd, 24. Pb, 25. OC, 26. EC; 有颜色的组分表示突出贡献

图 2 2018~2019 年 PM_{2.5} 化学组分 PMF 源解析因子浓度和因子贡献率

Fig. 2 Factor concentrations and contribution rates of PMF sources of PM_{2.5} chemical components from 2018 to 2019

表 4 不同季节内 6 种来源的贡献率/%

Table 4 Contribution rate from six sources in different seasons/%

项目	燃烧源	二次硫酸盐	二次硝酸盐	工业源	扬尘源	机动车源
秋季	2.6	8.8	35.3	12.2	13.7	27.4
冬季	9.3	10.2	27.2	15.0	10.4	28.0
春季	7.3	18.0	26.5	7.1	26.0	15.2
夏季	1.9	33.0	14.4	17.2	14.6	18.8
全年	6.4	14.0	27.7	12.8	15.1	24.0

通过分析四季的碳质组分、水溶性离子、元素成分和气态前体物与 $b_{\text{abs,BrC},405 \text{ nm}}$ 之间相关性(表 5 和表 6),说明不同季节各组分与一次 BrC 的同源性. 秋季 $b_{\text{abs,BrC},405 \text{ nm}}$ 的相关性说明 BrC 的来源可能与机动车尾气的一次排放和二次转化有关. 液体化石燃料燃烧排放物可能会伴随着挥发性有机化合物^[32],低温能够促进石化产品中半挥发性有机物在气溶胶表面凝结或凝聚形成有机颗粒物^[33, 34]. 冬季相对于秋季温度更低,更加有利于挥发性有机物的凝结. 冬季 $b_{\text{abs,BrC},405 \text{ nm}}$ 的相关性相对更高,说明来自化石燃料和工业生产的一次排放与二次转化对 BrC 有重要贡献^[35]. 春季 $b_{\text{abs,BrC},405 \text{ nm}}$ 与 NO_3^- 和 NH_4^+ 的相关性高于秋季,春秋季 BrC 贡献值相当但光吸收

表 5 不同季节 $b_{\text{abs,BrC},405 \text{ nm}}$ 与碳质组分、水溶性离子和元素的相关系数¹⁾Table 5 Correlation coefficients of $b_{\text{abs,BrC},405 \text{ nm}}$ with carbonaceous fraction, water-soluble ions, and elements in different seasons

项目	秋季	冬季	春季	夏季	夏季(RH < 60%)
OC1	0.53 **	0.85 **	0.11	-0.06	-0.23
OC2	0.55 **	0.88 **	-0.04	-0.08	-0.35
OC3	0.45 *	0.72 **	0.10	-0.06	-0.31
OC4	0.62 **	0.83 **	0.12	0.00	-0.22
EC1	0.71 **	0.90 **	0.48 *	-0.11	-0.4
EC2	-0.17	0.14	-0.05	-0.37	-0.41
EC3	-0.07	0.55 *	-0.20	0.15	-0.37
POC	0.61 **	0.75 **	0.15	-0.03	-0.43
SOC	0.35	0.12	0.05	-0.09	0.48
F ⁻	0.46 *	-0.26	-0.42	0.08	0.12
Cl ⁻	-0.09	0.72 **	0.02	0.05	-0.23
NO ₂ ⁻	0.38	0.53 *	-0.17	-0.14	-0.21
SO ₄ ²⁻	0.30	0.90 **	0.31	0.00	-0.28
NO ₃ ⁻	0.43 *	0.89 **	0.73 **	0.05	-0.40
NH ₄ ⁺	0.48 *	0.40	0.74 **	0.01	-0.35
K ⁺	0.65 **	0.54 *	0.36	0.12	0.02
V	0.10	0.53 *	-0.16	0.26	-0.34
Cr	0.56 **	0.72 **	-0.40	0.00	0.00
Fe	0.02	-0.26	-0.52 *	-0.05	-0.09
Ni	-0.28	-0.25	-0.51 *	0.02	-0.15
Se	-0.25	0.81 **	-0.06	0.32	0.40
Sb	0.07	0.57 *	0.36	-0.36	-0.29

1) * 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著, ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著

表 6 不同季节 $b_{\text{abs,BrC},405 \text{ nm}}$ 与气态前体物的相关系数¹⁾Table 6 Correlation coefficients of $b_{\text{abs,BrC},405 \text{ nm}}$ with gaseous precursors in different seasons

项目	秋季	冬季	春季	夏季	夏季 RH < 60%
SOR	0.29	0.87 **	0.25	-0.23	-0.52 *
NOR	0.34	0.88 **	0.69 **	0.05	-0.36
SO ₂	-0.05	-0.36	0.00	0.40	0.58 *
NO ₂	0.51 **	0.63 **	0.22	-0.11	-0.08
CO	0.69 **	0.37	0.27	-0.1	-0.22

1) * 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著, ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著

值低于秋季,说明春季主要受到二次转化的影响,但二次转化过程中光漂白的作用可能会降低 BrC 光吸收能力. 夏季 $b_{\text{abs,BrC},405 \text{ nm}}$ 没有明显的相关性,可能是温度和相对湿度升高同排放源物质湿沉降,将相对湿度(RH)超过 60% 的数据去除后,出现 $b_{\text{abs,BrC},405 \text{ nm}}$ 与 SO₂ 和 SOR^[36] 的相关性明显增加,说明 BrC 的产生可能与 SO₂ 的生成有关,但是 SO₂ 通过气相氧化和/或水反应参与化学转化的过程可能会降低 BrC 的光吸收.

AAE_{BrC} 也可以解释棕碳的来源,如表 7 所示,总结了不同研究中不同地区有关的 AAE_{BrC}. 当 AAE_{BrC} 为 1~3 时,生物质不完全燃烧产生 BrC 具有主要贡献; AAE_{BrC} 大于 1(接近于 1),BrC 主要来自化石燃料的燃烧; AAE > 3 时,可能新产生的 BrC 会被氧化为二次 BrC^[37]. 全球平均的 AAE_{BrC} 为 4(388 nm)^[38]. Shen 等^[39] 提到煤燃烧的 AAE_{BrC,340~500 nm} 大约为 4.38. 印度孟买受到 SOA 的影响,其 AAE_{BrC,370~950 nm} 为 4.4 ± 2.1 ^[40]. 本研究中春夏秋冬四季的 AAE_{BrC} 分别为 4.13、3.01、3.55 和 3.66. 本文的 AAE 与西安地区^[23] 春季的 AAE_{BrC} (3.91) 相当. 洛阳地区棕色碳的来源可能与化石燃料的一次排放以及二次转化有关,这与利用相关性分析得到的结果相一致. 与 PM_{2.5} 进行 PMF 源解析得到的结果同时进行分析,发现与棕碳产生有关的化石燃料的一次排放和二次转化在 PM_{2.5} 中也占有重要贡献.

表 7 不同地区 BrC 的 AAE 值

Table 7 AAE values of BrC in different regions

地点	季节	样本来源	类型	波长/nm	主要来源	AAE	文献
洛阳	春季	PM _{2.5}	BrC	405 ~ 980	化石燃料的一次排放和二次转化	4.13	本研究
	夏季					3.01	
	秋季					3.55	
	冬季					3.66	
西安	春季	PM _{2.5}	BrC	370 ~ 950	生物质燃烧、燃煤的一次排放和二次转化	3.91	[23]
	夏季					3.31	
	秋季					2.86	
	冬季					2.67	
三门峡	冬季	PM _{2.5}	BrC	370 ~ 520	燃煤、交通和生物质燃料的一次排放	4.22	[30]
美国洛杉矶	夏季	PM _{2.5}	BrC	300 ~ 800	化石燃料的二次转化	3.2	[41]
意大利米兰	冬季	PM _{2.5}	水溶 BrC	330 ~ 500	二次转化	4.6	[22]
			甲醇 BrC			3.3	
二连浩特		TSP	水溶 BrC	300 ~ 400	煤炭燃烧	5.04	[42]
兰州		TSP	水溶 BrC	300 ~ 400	燃煤锅炉	4.77	[43]
东北		PM _{2.5}	BrC	375 ~ 635	玉米秸秆开放燃烧	4.5	[44]

3 结论

(1) 2018 ~ 2019 年二次碳质气溶胶的影响呈现不同程度的增加, $\rho(\text{OC})$ 和 $\rho(\text{EC})$ 年均值为 $13.28 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $6.02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 相对于 2015 年, 明显下降了 17.87% 和 2.4%, 但 $\text{TC}/\text{PM}_{2.5}$ 升高了 30.19%. OC 和 EC 浓度季节特征为冬季高夏季低, 相较于 2015 年, SOC/OC 增加了 0.8% ~ 62%. 4 个季节 445 nm 处 MAC 值介于 $3.84 \sim 7.67 \text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 在污染过程中的变化趋势与 SOC 一致.

(2) 棕碳对总的光吸收有重要贡献, $b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}$ 和 $b_{\text{abs, BrC, 405 nm}}/b_{\text{abs, 405 nm}}$ 冬季最高 (31.57 Mm^{-1} 和 33%), 夏季最低 (2.12 Mm^{-1} 和 21%), 与碳质组分浓度的季节变化趋势相同. 在污染过程中, 碳质组分占比降低, 而 BrC 光吸收的贡献率增加. 综合 PMF 结果和 BrC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 组分的相关系数结果, 发现机动车和二次硝酸盐分别贡献了 27.7% 和 24.0%.

参考文献:

- [1] Zheng H, Kong S F, Yan Q, *et al.* The impacts of pollution control measures on $\text{PM}_{2.5}$ reduction: insights of chemical composition, source variation and health risk [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **197**: 103-117.
- [2] Bond T C, Bergstrom R W. Light Absorption by carbonaceous particles: an investigative review [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2006, **40**(1): 27-67.
- [3] 闫才青, 郑玫, 张远航. 大气棕色碳的研究进展与方向 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4404-4414.
Yan C Q, Zheng M, Zhang Y H. Research progress and direction of atmospheric brown carbon [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4404-4414.
- [4] Luo L N, Tian H Z, Liu H J, *et al.* Seasonal variations in the mass characteristics and optical properties of carbonaceous constituents of $\text{PM}_{2.5}$ in six cities of North China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.115780.
- [5] 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.
- [6] Cui F P, Pei S X, Chen M D, *et al.* Absorption enhancement of black carbon and the contribution of brown carbon to light absorption in the summer of Nanjing, China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2021, **12**(2): 480-487.
- [7] 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 等. 西安市 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质气溶胶污染特征 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(4): 1529-1536.
Mu Z, Chen Q C, Wang Y Q, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol pollution in $\text{PM}_{2.5}$ in Xi'an [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(4): 1529-1536.
- [8] 张颖龙, 李莉, 吴伟超, 等. 嘉善冬季碳质气溶胶变化特征及其来源解析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(9): 4116-4125.
Zhang Y L, Li L, Wu W C, *et al.* Variation characteristics and source analysis of carbonaceous aerosols in winter in Jiashan [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(9): 4116-4125.
- [9] 赵宇, 吴灿, 王益倩, 等. 中国长三角背景点冬季大气棕碳污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(7): 3127-3135.
Zhao Y, Wu C, Wang Y Q, *et al.* Pollution characteristics and sources of wintertime atmospheric brown carbon at a background site of the Yangtze River Delta region in China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(7): 3127-3135.
- [10] Li S, Zhu M, Yang W Q, *et al.* Filter-based measurement of light absorption by brown carbon in $\text{PM}_{2.5}$ in a megacity in South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **633**: 1360-1369.
- [11] Gao Y, Wang Q Y, Li L, *et al.* Optical properties of mountain primary and secondary brown carbon aerosols in summertime [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, **806**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.150570.
- [12] Chen L W A, Chow J C, Wang X L, *et al.* Multi-wavelength optical measurement to enhance thermal/optical analysis for carbonaceous aerosol [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(1): 451-461.
- [13] 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.
- [14] Shen Z X, Lei Y L, Zhang L M, *et al.* Methanol extracted brown carbon in $\text{PM}_{2.5}$ over Xi'an, China: seasonal variation of optical properties and sources identification [J]. *Aerosol Science and*

- Engineering, 2017, **1**(2): 57-65.
- [15] Lack D A, Langridge J M. On the attribution of black and brown carbon light absorption using the Ångström exponent [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(20): 10535-10543.
- [16] Chow J C, Chen L W A, Wang X L, *et al.* Improved estimation of PM_{2.5} brown carbon contributions to filter light attenuation [J]. Particuology, 2021, **56**: 1-9.
- [17] Yan G X, Zhang P Z, Yang J, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in a petrochemical city: implications for primary and secondary carbonaceous component [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, **103**: 322-335.
- [18] 董贵明, 唐贵谦, 张军科, 等. 北京南部城区 PM_{2.5} 中碳质组分特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(10): 4374-4381.
Dong G M, Tang G Q, Zhang J K, *et al.* Characteristics of carbonaceous species in PM_{2.5} in southern Beijing [J]. Environmental Science, 2020, **41**(10): 4374-4381.
- [19] Lu M H, Zheng J Y, Huang Z J, *et al.* Insight into the characteristics of carbonaceous aerosols at urban and regional sites in the downwind area of Pearl River Delta region, China [J]. Science of the Total Environment, 2021, **778**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146251.
- [20] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. Atmospheric Environment, 1995, **29**(23): 3527-3544.
- [21] 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.
- [22] Gilardoni S, Massoli P, Marinoni A, *et al.* Spatial and temporal variability of carbonaceous aerosol absorption in the Po Valley [J]. Aerosol and Air Quality Research, 2020, **20**(12): 2624-2639.
- [23] Zhu C S, Qu Y, Zhou Y, *et al.* High light absorption and radiative forcing contributions of primary brown carbon and black carbon to urban aerosol [J]. Gondwana Research, 2021, **90**: 159-164.
- [24] 曹飞艳. 青岛和南黄海 PM_{2.5} 的化学成分、来源解析、吸光特征[D]. 济南: 山东大学, 2020.
Cao F Y. Chemical and light absorption characteristics of particulate matters and their source apportionment over Qingdao and South Yellow Sea [D]. Ji'nan: Shandong University, 2020.
- [25] Zhang Y L, Kang S C. Characteristics of carbonaceous aerosols analyzed using a multiwavelength thermal/optical carbon analyzer: a case study in Lanzhou City [J]. Science China Earth Sciences, 2019, **62**(2): 389-402.
- [26] Sciare J, d'Argouges O, Sarda-Estève R, *et al.* Large contribution of water-insoluble secondary organic aerosols in the region of Paris (France) during wintertime [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, **116**(D22), doi: 10.1029/2011jd015756.
- [27] Cheng Y, He K B, Zheng M, *et al.* Mass absorption efficiency of elemental carbon and water-soluble organic carbon in Beijing, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(22): 11497-11510.
- [28] Cho C, Kim S W, Lee M, *et al.* Observation-based estimates of the mass absorption cross-section of black and brown carbon and their contribution to aerosol light absorption in East Asia [J]. Atmospheric Environment, 2019, **212**: 65-74.
- [29] Wong J P S, Nenes A, Weber R J. Changes in light absorptivity of molecular weight separated brown carbon due to photolytic aging [J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(15): 8414-8421.
- [30] Zhang W Y, Wang W G, Li J, *et al.* Light absorption properties and potential sources of brown carbon in Fenwei Plain during winter 2018-2019 [J]. Journal of Environmental Sciences, 2021, **102**: 53-63.
- [31] Peng C, Yang F M, Tian M, *et al.* Brown carbon aerosol in two megacities in the Sichuan Basin of southwestern China: light absorption properties and implications [J]. Science of the Total Environment, 2020, **719**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137483.
- [32] Yan C Q, Zheng M, Shen G F, *et al.* Characterization of carbon fractions in carbonaceous aerosols from typical fossil fuel combustion sources [J]. Fuel, 2019, **254**, doi: 10.1016/j.fuel.2019.115620.
- [33] Zhao P S, Dong F, Yang Y D, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmospheric Environment, 2013, **71**: 389-398.
- [34] Odum J R, Hoffmann T, Bowman F, *et al.* Gas/particle partitioning and secondary organic aerosol yields [J]. Environmental Science & Technology, 1996, **30**(8): 2580-2585.
- [35] 潘湘龙. 焦作市 PM_{2.5} 水溶性离子组成特征与来源解析[D]. 南昌: 东华理工大学, 2020.
Pan X L. Composition characteristics and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} in Jiaozuo city [D]. Nanchang: East China University of Technology, 2020.
- [36] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in haze-fog episodes in Beijing [J]. Environmental Science & Technology, 2006, **40**(10): 3148-3155.
- [37] 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.
- [38] Wang X, Heald C L, Sedlacek A J, *et al.* Deriving brown carbon from multiwavelength absorption measurements: method and application to AERONET and Aethalometer observations [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(19): 12733-12752.
- [39] Shen Z X, Zhang Q, Cao J J, *et al.* Optical properties and possible sources of brown carbon in PM_{2.5} over Xi'an, China [J]. Atmospheric Environment, 2017, **150**: 322-330.
- [40] Rathod T D, Sahu S K. Measurements of optical properties of black and brown carbon using multi-wavelength absorption technique at Mumbai, India [J]. Journal of Earth System Science, 2022, **131**(1), doi: 10.1007/s12040-021-01774-0.
- [41] Zhang X L, Lin Y H, Surratt J D, *et al.* Light-absorbing soluble organic aerosol in Los Angeles and Atlanta: a contrast in secondary organic aerosol [J]. Geophysical Research Letters, 2011, **38**(21), doi: 10.1029/2011gl049385.
- [42] Wen H, Zhou Y, Xu X Y, *et al.* Water-soluble brown carbon in atmospheric aerosols along the transport pathway of Asian dust: optical properties, chemical compositions, and potential sources [J]. Science of the Total Environment, 2021, **789**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147971.
- [43] Yang Y R, Qin J J, Qi T, *et al.* Fluorescence characteristics of particulate water-soluble organic compounds emitted from coal-fired boilers [J]. Atmospheric Environment, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117297.
- [44] Wang Q L, Wang L L, Li X R, *et al.* Emission characteristics of size distribution, chemical composition and light absorption of particles from field-scale crop residue burning in Northeast China [J]. Science of the Total Environment, 2020, **710**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136304.

CONTENTS

Research Progress of SOA Formation from Anthropogenic VOCs Under Complex Pollution Condition	CHEN Tian-zeng, LIU Jun, MA Qing-xin, <i>et al.</i>	(1201)
Advances in Microbial Degradation and Transformation of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFASs)	SUN Hong-wen, FANG Bo, CHEN Hao, <i>et al.</i>	(1214)
Research Progress on Remote Sensing Monitoring of Lake Water Quality Parameters	WANG Si-meng, QIN Bo-qiang	(1228)
Research Progress on Trojan-horse Effect of Microplastics and Heavy Metals in Freshwater Environment	ZHAO Wei-gao, TIAN Yi-mei, ZHAO Peng, <i>et al.</i>	(1244)
Temporal and Spatial Characteristics of Net CO ₂ Emissions and Decoupling Analysis in Yangtze River Economic Belt	WU Yi-fan, XU Yang, TANG Yang-bo, <i>et al.</i>	(1258)
Changes in Land Use Carbon Emissions and Coordinated Zoning in China	LI Yuan-yuan, WEI Wei, ZHOU Jun-ju, <i>et al.</i>	(1267)
Multi-dimensional Analysis of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in Tianjin Based on the STIRPAT Model	LIU Mao-hui, YUE Ya-yun, LIU Sheng-nan, <i>et al.</i>	(1277)
Railway Emission Trends in China Based on Fuel Life Cycle Analysis	TONG Hui, FAN Zhao-yang, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>	(1287)
Pollution Characteristics of PM _{2.5} Chemical Composition in Zhejiang Province	ZHOU Jing-qing, YU Lei, CHEN Shu-xin, <i>et al.</i>	(1297)
Seasonal Variations, Size Distributions, and Sources of Chemical Components of Submicron Particulate Matter in Nanjing	XU Zhen-qi, SHANG Yue, DING Feng, <i>et al.</i>	(1310)
Seasonal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Components in Luoyang: Implication for Brown Carbon Contribution	YAN Guang-xuan, HOU Ming-yang, ZHANG Pu-zhen, <i>et al.</i>	(1319)
Establishment and Spatial Distribution of S/IVOCs Emission Inventory in Jiangsu Province in 2019	SONG Tong-ai, ZHANG Jia-ying, GUAN Lu, <i>et al.</i>	(1328)
Compositional Characteristics of Volatile Organic Compounds in Typical Industrial Areas of the Pearl River Delta: Importance of Oxygenated Volatile Organic Compounds	SONG Xin, YUAN Bin, WANG Si-hang, <i>et al.</i>	(1336)
Evolution and Characteristics of Full-process Vehicular VOCs Emissions in Tianjin from 2000 to 2020	SUN Lu-na, ZHONG Chong-zhi, SUN Shi-da, <i>et al.</i>	(1346)
Port-owned Mobile Source Air Pollutant Emission Inventory	XU Xiao-fan, WANG Bao-qing, WU Jun-cheng, <i>et al.</i>	(1357)
Simulation and Regulation of Sustainable Utilization of Water Resources in China Based on Improved Water Resources Ecological Footprint Model	OUYANG Xing-tao, LIAO Hao-yu, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i>	(1368)
Occurrence Distribution and Risk Assessment of Organophosphate Esters in A Typical Area of the Estuary in the Yellow River Basin	CAO Miao, GUO Chang-sheng, ZHANG Heng, <i>et al.</i>	(1378)
Pollution Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Sediments of Huixian Karst Wetland in Guilin	YU Yue, XING Xin-li, CHENG Cheng, <i>et al.</i>	(1387)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Surface Sediments from Major River Systems in Maoming City, Guangdong Province	CHEN Xiao-xia, ZHANG Min, LI Bei, <i>et al.</i>	(1397)
Temporal-spatial Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Water of Ningbo	XU Mei-juan, YANG Jia, REN Xiao-jing, <i>et al.</i>	(1407)
Analysis of Water Chemistry Characteristics and Hydraulic Relationships of Different Water Bodies in Typical Mountain-oasis Systems in the Northwest Inland Area	WANG Shi-yu, SUN Cong-jian, CHEN Wei, <i>et al.</i>	(1416)
Hydrochemical Characteristics and Control Factors of Pore-water in the Middle and Upper Reaches of Muwen River	LIU Yuan-qing, ZHOU Le, LÜ Lin, <i>et al.</i>	(1429)
Spatial-temporal Variation in Groundwater Quality and the Contamination Source Analysis in Shihezi-Changji Area	DING Qi-zhen, ZHOU Jin-long, JI Yan-zhen, <i>et al.</i>	(1440)
Analysis of Mechanism and Start-up Thresholds of Seasonal Algal Blooms in a Northern Eutrophic Stratified Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, KONG Chang-hao, <i>et al.</i>	(1452)
Characteristics of Benthic Diatom Community Structure and Water Ecological Health Evaluation in the Lalin River Basin	SHAN Tao, YUAN An-long, HUANG Zi-ni, <i>et al.</i>	(1465)
Bacterioplankton Communities and Assembly Mechanisms in Wet Season of Lakes, Nanchang	GAO Peng-fei, WANG Peng, HUANG Yi, <i>et al.</i>	(1475)
Seasonal Variation and Influencing Factors of Bacterial Communities in Storage Reservoirs	DING Ning, YANG Ying-ying, WAN Nian-xin, <i>et al.</i>	(1484)
Vertical Distribution and Source Tracking Analysis of Bacteria Composition and Nitrogen Metabolism Function of a Typical Urban Inland River	TAN Qiu-yang, LÜ Jin-yan, BAI Xian-yu, <i>et al.</i>	(1497)
Contribution Analysis of External Source Pollution Load and Environmental Capacity Estimation of Reservoirs in Central Yunnan Plateau	GUO Yu-jing, LI Hong-bing, WANG Shu-ming, <i>et al.</i>	(1508)
Preparation of Narrow Pore Diameter Phosphorus Containing Cotton Stalk Carbon and Its Adsorption Mechanism for Tetracycline	ZENG Shao-yi, LI Kun-quan	(1519)
Preparation of High Specific Surface Thiourea Modified Peanut Shell Carbon and Adsorption of Tetracycline and Copper	MIN Bing-kun, LI Kun-quan	(1528)
Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes on Different Water Supply Pipes	LIU Chen-xu, BAI Xiao-hui	(1537)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Organic Carbon Sequestration and Aggregate Stability in Water-Eroded Environment: A Meta-analysis	YANG Rui-zhe, YANG Shi-long, WENG Xi-zhe, <i>et al.</i>	(1542)
Effects of Warming and Fertilization on Soil Organic Carbon and Its Labile Components in Rice-wheat Rotation	DENG Xu-zhe, HAN Chen, XUE Li-xiang, <i>et al.</i>	(1553)
Horizontal Variation Characteristics of Alpine Grassland Soil Function and Vertical Changes Along Soil Genetic Horizons in the Three-River Headwaters Region	LI Bo-jian, SHEN Cong-cong, LIU Si-yi, <i>et al.</i>	(1562)
CH ₄ Fluxes and Their Comprehensive Greenhouse Effects with CO ₂ Fluxes in Direct-seeded Rice in Poyang Lake Plain	SHI Yuan-zhi, CUI Yuan-lai, CAI Shuo, <i>et al.</i>	(1572)
Vertical Pollution Characteristics and Source Analysis of Soil PAHs in Different Land Use Types	ZHOU Zhi-yan, ZHANG Xiu-xiu, WANG Fei, <i>et al.</i>	(1583)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Per- and Polyfluoroalkyl Substances and Emerging Alternatives in Road Dust, Shijiazhuang	LI Peng-fei, WANG Yuan, YANG Chen, <i>et al.</i>	(1593)
Spatial Distribution Characteristics and Assessment of Heavy Metal Pollution in Cultivated Soil of Agricultural Small Watershed in Typical Mining Area in South China	YANG Yu, GUO Ting-ting, LIU Xiao-li, <i>et al.</i>	(1602)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Vegetable Field in the Three Gorges Reservoir Area (Chongqing Section)	SHI Yu-jia, FANG Lin-fa, FANG Biao, <i>et al.</i>	(1611)
Accumulation Characteristics and Influencing Factors of Heavy Metals in Cultivated Land Surface Soil in Lanzhou	KANG Le, PENG Xin-bo, MA Yan-long, <i>et al.</i>	(1620)
Enrichment Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Industrial and Mining Area of Northern Guangdong Province	WANG Yue, MO Li, YU Xin-xiao, <i>et al.</i>	(1636)
Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soil of a Lead Plant in Sanmenxia	LU Xiao-hui, YU Fang-zhong, FAN Yi-ming, <i>et al.</i>	(1646)
Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soils of a Testing Range	WANG Shi-yu, LI Chun, ZHAO Hong-wei, <i>et al.</i>	(1657)
Effectiveness and Mechanisms of Chemical Leaching Combined with Electrokinetic Technology on the Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil	MA Qiang, WEI Ze-bin, WU Qi-tang	(1668)
Emission Characteristics and Control of Heavy Metals in Secondary Copper Smelting Process	LIN Bing-cheng, WU Guang-long, ZHENG Ming-hui, <i>et al.</i>	(1678)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Soil-crops System in Anhui Section of the Yangtze River Basin	LIU Hai, WEI Wei, HUANG Jian-min, <i>et al.</i>	(1686)
In-situ Remediation Effect of Cadmium-polluted Agriculture Land Using Different Amendments Under Rice-wheat Rotation	ZHANG Lu, TANG Chan, YU Hai-ying, <i>et al.</i>	(1698)
Effect and Persistent Effect of Thiolated Montmorillonite on Safe Production in Cadmium-contaminated Cropland	FENG Xian-cui, CHEN Ya-gang, JIAO Hong-peng, <i>et al.</i>	(1706)
Effects of Earthworm, Straw, and Citric Acid on the Remediation of Zn, Pb, and Cd Contaminated Soil by <i>Solanum photeinocarpum</i> and <i>Pterocypselia indica</i>	CHEN Min-ni, NIE Xiao-qi, ZHANG Xing-feng, <i>et al.</i>	(1714)
Availability of Se-rich Arable Land in High Geological Background Area and Suggestions for Zoning	WANG Rui, LI Yu, YU Jing, <i>et al.</i>	(1727)
Characteristics and Causes of Ge Enrichment in Vegetable Growing Areas of Beixintun Town, Zhangjiakou City	AN Yong-long, YIN Xiu-lan, JIN Ai-fang, <i>et al.</i>	(1735)
Structural Diversity and Its Temporal Variation in the Soil Bacterial Community Under Plantations of <i>Taxodium distichum</i> in the Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir Area	TAN Xue, DONG Zhi, ZHANG Li-miao, <i>et al.</i>	(1748)
Effect of the Process of Returning Farmland to Forest in the Loess Hilly Area on Soil Fungal Communities	ZHANG Lei, WANG Qiang, YANG Xin-yue, <i>et al.</i>	(1758)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Substitute with Organic Fertilizer on Soil Functional Microbes and Lemon Yield and Quality	WANG Ying-yan, XIONG Zi-yi, LUO Dong-hai, <i>et al.</i>	(1768)
Dynamic Changes in Antibiotic Resistance Genes During Biological Fermentation of Chicken Manure and Pig Manure	ZHANG Dan, PENG Shuang, WANG Dan-qing, <i>et al.</i>	(1780)
Effects of Cow Manure Application on Soil Microbial Community in Farmland	ZHANG Ya-li, GUO Xiao-ming, HU Hui, <i>et al.</i>	(1792)