E方知库
Eco-Environmental Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.4
第41卷 第4期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第4期
2020年4月15日

目 次

基于深度学习的华东地区 $PM_{2.5}$ 浓度遥感反演 …… 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 刘欣怡, 万一(1513)
秋冬季区域性大气污染过程对长三角北部典型城市的影响 …… 李瑞, 李清, 徐健, 李亮, 葛朝军, 黄凌, 孙登红, 刘子义, 张坤, 周国柱, 王杨君, 胡子梅, 宋燕西, 陈勇航, 李莉(1520)
基于GAM模型的西安市 O_3 浓度影响因素解析 …… 黄小刚, 邵天杰, 赵景波, 曹军骥, 吕晓虎(1535)
北京及周边6个城市大气 $PM_{2.5}$ 中左旋葡聚糖及其异构体的时空分布特征 …… 朱红霞, 陶雪梅, 王超, 张霖琳, 郑晓燕(1544)
典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析 …… 李明燕, 杨文, 魏敏, 朱红晓, 刘厚凤(1550)
成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析 …… 王璐, 袁亮, 张小玲, 贾月涛(1561)
天津夏季郊区VOCs对臭氧生成的影响 …… 姚青, 韩素芹, 张裕芬, 毕晓辉, 王晓佳, 蔡子颖(1573)
涂料制造行业挥发性有机物排放成分谱及影响 …… 吴健, 高松, 陈曦, 杨勇, 伏晴艳, 车祥, 焦正(1582)
典型超低排放燃煤电厂可凝结颗粒物特征和成因 …… 邓建国, 王刚, 张莹, 李妍菁, 段雷, 蒋靖坤(1589)
中国地表水硝酸盐分布及其来源分析 …… 张鑫, 张妍, 毕直磊, 山泽萱, 任丽江, 李琦(1594)
中、韩滨海城市化区域水体全氟化合物的空间特征及生态风险 …… 杨洪法, 史斌, 周云桥, 杨璐, 孟晶, 陈礼强, 王铁宇(1607)
小清河入海口近十年水质变化及驱动因素分析 …… 范新凤, 韩美, 王磊, 李秀萍, 周璟(1619)
浙江省H市水处理及供水系统4种人工甜味剂的分布特征 …… 马晓雁, 胡慧, 陆思嘉, 李青松, 薛乐飞, 李雪纯, 邓靖(1629)
三峡库区支流梅溪河附石藻类群落变化及其与环境因子的关系 …… 米文梅, 施军琼, 杨燕君, 杨宋琪, 何书晗, 吴忠兴(1636)
骆马湖浮游植物演替规律及驱动因子 …… 张庆吉, 王业宇, 王金东, 王日昕, 邓建明, 蔡永久, 彭凯, 陈业, 龚志军(1648)
拉鲁湿地水生植物群落多样性与水环境因子的关系 …… 王佳俊, 田瀚鑫, 周磊, 徐德福, 张建伟, 彭措次仁(1657)
基于网络分析解析水源水库春季水体反硝化群落演变特征及驱动因素 …… 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 黄廷林, 张春华, 方凯开, 曾明正, 李再兴, 崔建升(1666)
岱海水体氮、磷时空分布特征及其差异性分析 …… 赵丽, 陈俊伊, 姜霞, 郑朔方, 王书航(1676)
巢湖滨岸水塘洼地沉积物反硝化速率及对外源碳氮的响应 …… 李如忠, 王莉, 刘超(1684)
镁改性芦苇生物炭控磷效果及其对水体修复 …… 丁玉琴, 李大鹏, 张帅, 陈丽媛, 徐楚天, 陈姝彤, 朱企, 黄勇(1692)
氢氧化镁对水体内源磷释放的控制作用 …… 杨春懿, 詹艳慧, 林建伟, 邱波, 徐文隆, 俞阳, 黄良君(1700)
北京市道路雨水径流溶解性有机物化学组分特性 …… 陈梦瑶, 杜晓丽, 于振亚, 朱英杰, 梁卉, 吴凡(1709)
新型三维多孔光热材料制备及其高盐废水处理应用 …… 黄乐, 徐颖峰, 谢茜青, 赵娴, 冯华军(1716)
Ni掺杂 $Sb\text{-}SnO_2$ 瓷环粒子电极电催化氧化磺胺嘧啶 …… 石秋俊, 刘安迪, 唐柏彬, 魏世强, 张进忠(1725)
磁性 Fe_3O_4-CuO 非均相活化过碳酸钠降解AO7 …… 徐劼, 王琳, 陈家斌, 许芬, 王柯晴, 侯梓峰, 黄天寅(1734)
赤泥活化过一硫酸盐降解环丙沙星:性能和机制 …… 史京转, 魏红, 周孝德, 李克斌, 史颖娟(1743)
工业废水水质对微气泡臭氧化深度处理影响 …… 张静, 张守敬, 刘春, 施佳泽, 陈晓轩, 张磊, 张瑞娜(1752)
污泥水热炭对亚甲基蓝的吸附特性 …… 陈丽媛, 李大鹏, 朱文娟, 徐楚天, 丁玉琴, 黄勇(1761)
改性西瓜皮生物炭的制备及其对Pb(Ⅱ)的吸附特性 …… 毕景望, 单锐, 韩静, 袁浩然, 史月月, 张兴庆(1770)
A^2/O 短程硝化耦合厌氧氨氧化系统构建与脱氮特性 …… 刘小钗, 荣懿, 汶丽杰, 李党勇, 金鹏康(1779)
基于甲烷氧化菌的城镇污水厂尾水极限脱氮系统构建及机制 …… 杨娅男, 李彦澄, 李江, 吴攀, 杨钊, 向福亮(1787)
HRT对CSTR亚硝化颗粒污泥性能影响 …… 王建芳, 齐泽坤, 钱飞跃, 刘文如, 张俊, 王伟, 沈聪(1794)
低基质颗粒污泥反应器中亚硝化的实现过程及其污泥变化特征 …… 朱琳, 程诚, 宋家俊, 郭凯成, 汪倩, 刘文如, 沈耀良(1801)
不同HRT下污水中有机物在ABR中的转化过程及污泥形态特征 …… 程诚, 朱琳, 郭凯成, 汪倩, 宋家俊, 刘文如, 沈耀良(1808)
投加颗粒活性炭和二氧化锰对剩余污泥厌氧消化的影响 …… 杨波, 贾丽娟, 徐辉, 李方, 刘艳彪(1816)
中国193个城市规划区土壤微量元素污染与健康风险 …… 李括, 彭敏, 杨峥, 杨柯, 刘飞, 赵传冬, 成晓梦, 马宏宏, 郭飞, 唐世琪, 刘应汉, 成杭新(1825)
基于随机森林评价的兰州市主城区校园地表灰尘重金属污染 …… 胡梦珺, 王佳, 张亚云, 李春艳, 李娜娜(1838)
扬州市不同功能区表层土壤中多环芳烃的含量、来源及其生态风险 …… 姚成, 倪进治, 刘瑞, 杨柳明, 陈卫锋, 魏然(1847)
桂西南土壤镉地质异常区水稻种植安全性评估 …… 陈同斌, 庞瑞, 王佛鹏, 周浪, 宋波(1855)
重庆市主要农耕区土壤Cd生物有效性及影响因素 …… 王锐, 胡小兰, 张永文, 余飞, 朱海山, 李瑜(1864)
棉秆炭对碱性水稻土壤-水稻中镉迁移转化的阻控作用 …… 刘师豆, 朱新萍, 韩耀光, 赵一, 金航, 贾宏涛(1871)
连续4 a施有机肥降低紫泥田镉活性与稻米镉含量 …… 薛毅, 尹泽润, 盛浩, 马颗榴, 周清, 宋达清, 张杨珠(1880)
纳米氢氧化镁对不同类型土壤镉形态的影响 …… 邓继宝, 张春来, 徐卫红(1888)
矿业废弃地复垦土壤-作物硒吸收特征及其对重金属拮抗效应 …… 尹炳, 汪建飞, 师胜, 卜中原, 霍天满, 张世文(1904)
不同生物炭对酸性农田土壤性质和作物产量的动态影响 …… 杨彩迪, 宗玉统, 卢升高(1914)
化肥减量有机替代对紫色土旱坡地土壤氮磷养分及作物产量的影响 …… 朱浩宇, 高明, 龙翼,徐国鑫, 王富华, 王子芳(1921)
紫色土旱坡地氮流失通量对减肥配施秸秆的响应 …… 熊子怡, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 高明(1930)
浒苔生物炭对滨海盐碱土壤改良的效果及途径 …… 吴丹, 孙萍, 路鹏展, 陈友媛, 郭嘉梦, 刘明, 王磊, 张彩杰(1941)
极端干旱区咸水灌溉人工防护林土壤可溶性碳的垂直分布及其影响因素 …… 孟天歌, 吴路遥, 张少磊, 徐燕莹, 李雄, 张建国(1950)
红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应 …… 吕来新, 宋蕾, 刘志理, 张金波, 金光泽(1960)
稻田土壤 N_2O 消纳能力及 *nosZ-I* 型功能种群应答机制 …… 郭俊丽, 田美洁, 葛体达, 魏文学, 王光军, 孙志龙, 刘毅(1968)
京津冀电子废弃物回收利用潜力预测及环境效益评估 …… 陈盼, 施晓清(1976)
中国城市工业化发展与 $PM_{2.5}$ 的关系:兼论EKC曲线形成的内在机制 …… 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 侯孟阳, 姚顺波(1987)
《环境科学》征订启事(1618) 《环境科学》征稿简则(1635) 信息(1724, 1769, 1800)

Eco-Environmental Knowledge Web

环 境 科 学
Environmental Science

第41卷第4期 2020年4月
Vol.41, No.4 Apr., 2020

成都地区黑碳气溶胶变化特征及其来源解析

王璐[1,2], 袁亮[1*], 张小玲[1,3], 贾月涛[4]

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室, 成都 610225; 2. 金溪县气象局, 抚州 344800; 3. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089; 4. 乌拉特中旗气象局, 巴彦淖尔 015300)

摘要: 利用7波段黑碳仪(AE-33)于2017年12月1日至2018年11月30日在成都测量黑碳(BC)质量浓度,获得了成都地区BC浓度变化特征,并基于黑碳仪模型和后向轨迹模型对BC排放来源和潜在源区进行了分析. 结果表明,成都地区BC浓度冬季最大(8.18 μg·m^{-3}),其次为春季(5.11 μg·m^{-3})和秋季(3.91 μg·m^{-3}),夏季最小(3.28 μg·m^{-3}),年平均浓度(标准差)为5.26(4.67) μg·m^{-3}. 各季节BC浓度日变化受边界层和交通排放高峰的影响呈现出早晚双峰结构. 黑碳来源解析结果表明,液体燃料(如交通排放)对BC质量浓度的贡献在各季节均占主要地位,其中夏季最高,冬季最低. 受交通早晚高峰的影响,液体燃料对BC的贡献在各季节均呈现早晚峰值,夜间固体燃料排放贡献有所增加. 潜在源贡献分析(PSCF)和浓度轨迹权重分析(CWT)的结果表明,成都各季节BC的潜在源区受到气团来源的影响稍有差异,但主要以成都周边及以东至重庆局地区域(川渝城市群)的影响为主,该区域对成都BC的贡献值也较高,且主要为液体燃料燃烧贡献. 此外陕西南部和甘肃南部也存在BC的潜在源区,夏季在广西和贵州等地也存在源区分布,但贡献值较小.

关键词: 黑碳(BC); 变化特征; 来源解析; 后向轨迹; 成都

中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)04-1561-12 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201908190

Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu

WANG Lu[1,2], YUAN Liang[1*], ZHANG Xiao-ling[1,3], JIA Yue-tao[4]

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Jinxi Meteorological Bureau, Fuzhou 344800, China; 3. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China; 4. Wulatezhongqi Meteorological Bureau, Bayannur 015300, China)

Abstract: Black carbon (BC) was measured at Chengdu from December 1, 2017, to November 30, 2018, using a seven-channel aethalometer (AE-33). The variation characteristics of BC were obtained. BC sources were explored based on the aethalometer model and a hybrid single particle Lagrangian integrated trajectory model (Hysplit-4). The results showed the BC concentration was the highest in the winter (8.18 μg·m^{-3}) with the monthly mean of 11.11 μg·m^{-3} peaking in December, followed by the spring (5.11 μg·m^{-3}) and autumn (3.91 μg·m^{-3}), and was the lowest in summer (3.28 μg·m^{-3}) with the lowest monthly mean of 2.30 μg·m^{-3} in July. The annual average concentration of BC was 5.26 μg·m^{-3} with a standard deviation of 4.27 μg·m^{-3}. The diurnal variations of BC showed typical bimodal patterns in four seasons mainly due to the influence of the boundary layer and traffic rush. The source apportionment of BC showed that the liquid fuel (e.g., vehicle emission) had higher contribution to total BC concentration during all seasons (ranging from 69% in winter to 82% in summer) than solid fuel (e.g., coal and biomass combustion). The contribution of liquid fuel to the total BC was higher in summer, while solid fuel had a higher contribution in winter. The diurnal cycles of BC source apportionment demonstrated that the contribution of liquid fuel increased in the rush hours. The results of potential source contribution function and concentration weighted trajectory showed that the potential sources of BC in Chengdu were slightly different in different seasons and were mainly affected by the different air mass sources. However, the main potential source regions were the surrounding areas of Chengdu and the areas between Chengdu and Chongqing (the Chuanyu City group). The mass contribution to the BC in Chengdu was high in the region where liquid fuel most affected the total BC. Additionally, the southern part of Shaanxi and the southern part of Gansu were also potential sources of BC, and in Summer, some regions in Guangxi and Guizhou could become the source regions of BC in Chengdu.

Key words: black carbon(BC); variation characteristics; source apportionment; backward trajectory; Chengdu

黑碳气溶胶(black carbon, BC)主要是由化石燃料和生物质燃料不充分燃烧产生[1]. 虽然BC的质量浓度在$PM_{2.5}$(空气动力学直径≤2.5 μm的颗粒)中的占比较小,一般为百分之几到百分之十几. 但作为大气中主要的光吸收性气溶胶,其对大气的加热能力仅次于CO_2这样的温室气体[2],从而对气候和环境造成较大影响. 主要表现在:①大气中的BC吸收可见光,削弱了到达地面的太阳辐射,造成地气系统辐射收支改变[3];②BC的光吸收效应使大气上层增温,底层降温,大气稳定度因

收稿日期: 2019-08-22; **修订日期**: 2019-11-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFA0602004, 2018YFC0214002);四川省科技计划项目(2018JY0011, 2018SZDZX0023);国家自然科学基金重大研究计划项目(91644226)

作者简介: 王璐(1996~),女,主要研究方向为大气气溶胶与大气环境,E-mail:1574229596@qq.com

* 通信作者,E-mail:yuanl_nuist@outlook.com

此而增强,造成强烈的“穹顶”效应[4],导致大气垂直活动减弱,极不利于其中水汽的循环和污染物的扩散;③BC在大气中的老化过程中能够吸附各类污染物,并为这些污染物的非均相转化过程提供活性载体,这一方面会增强 BC 自身对可见光的散射和吸收能力,不仅会促进和加强上述两个过程,而且能够降低大气能见度[5,6],另一方面使原本无法活化成为云凝结核的 BC 在老化之后能够直接作为云凝结核或者冰核[7,8],改变云的微物理特征和辐射特性,进而对气候造成间接影响. 此外,老化的 BC 还可以进入人类的呼吸系统,严重危害人体健康[9].

中国作为 BC 的主要源区之一[1,10],曹国良等[1]和 Zhang 等[10]利用统计和模型的手段获得了我国 BC 排放清单,其结果表明四川盆地作为中国西部人口密度和经济发展水平较高的区域,BC 的排放量已经成为继长江三角洲(长三角)地区和京津冀地区后的第三高排放区,该地区也成为除京津冀地区、长三角地区和珠江三角洲(珠三角)地区外,我国第四大污染较严重区域[11,12]. 成都地处四川盆地,四面环山,复杂的地形所导致独特的气象条件(逆温常年出现)极不利于污染物的扩散[13,14]. 其作为我国西南地区科技、商贸、金融和交通枢纽中心,人口超过1 600万,城市机动车拥有量已超过 500 万辆(http://www.sc.stats.gov.cn/),在成都开展针对黑碳气溶胶的研究显得尤为重要. 一般观测研究中,测量 BC 浓度的仪器主要为黑碳仪[15],该仪器通过光学手段得到不同波长 BC 的质量浓度,选用特定波长下的数据,则可尽量减少有机碳(棕碳)的影响[5,16]. 我国学者秦世广等[17]于 1999 ~ 2000 年在四川温江进行了 BC 浓度观测,分析得出 BC 浓度及其变化特征与盆地气候、人为活动以及降水湿清除之间有很大的关系;孙欢欢等[18]系统分析了成都市 2013 ~ 2014 年 BC 污染特征及其与气象因子的关系,并对 BC 和 $PM_{2.5}$、降水、风速等做了相关性分析;郑超[19]对成都地区 2013 ~ 2015 年 BC 长期变化特征进行了分析,获得了 BC 的浓度变化规律及生物质燃烧影响下 BC 的特征. 然而,总体来看,在成都地区开展的有关 BC 的观测研究还显得较为缺乏,尤其在近年来大力整治大气环境的背景下,虽然成都市 $PM_{2.5}$ 水平有所下降(http://www.cdepb.gov.cn/),但该地区 BC 的基本变化特征和来源尚不十分清晰,造成数值模式在该区域的气候和环境效应的评估存在较大的偏差. 因此,本文利用 2017 年 12 月至 2018 年 11 月的 BC 资料,对其质量浓度进行统计分析,获得了成都地区 BC 浓度的日,月,季节变化特征;利用黑碳仪模型解析了 BC 排放来源特征(液体燃料排放,例如交通排放,或固体燃料排放,例如煤和生物质燃烧);同时结合后向轨迹模型,应用潜在源贡献因子法(PSCF)和浓度权重轨迹分析法(CWT),探清了成都地区 BC 的潜在源区及浓度贡献.

1 材料与方法

1.1 观测时间和地点

本次观测于 2017 年 12 月 1 日至 2018 年 11 月 30 日在成都信息工程大学城市环境气象综合观测站(30°35′N, 103°59′E)设点(图 1),对该时段内 BC 的质量浓度进行了连续观测,该采样点位于居住区和工业区的混合区, 2 km 范围内无明显大气污染源,一定程度上能够代表成都地区大气污染物水平. 为了方便讨论 BC 浓度的季节变化特征,将观测时段中 12 ~ 2 月分为冬季, 3 ~ 5 月分为春季, 6 ~ 8 月分为夏季, 9 ~ 11 月分为秋季.

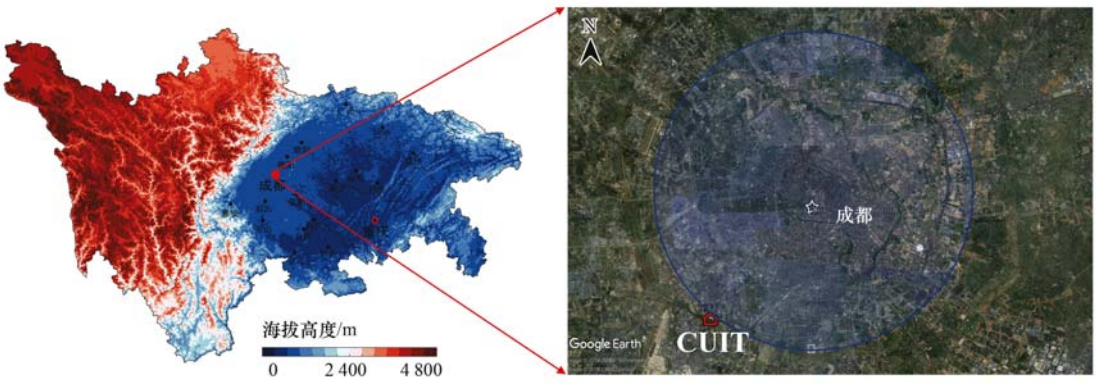


图 1 本研究观测站点示意

Fig. 1 Location of the sampling site in this study

1.2 观测仪器和数据

黑碳质量浓度由黑碳仪 AE-33(Magee,USA)获得. 该仪器提供了 7 个波段(分别为 370、470、520、590、660、880 和 950 nm)黑碳质量浓度,放置于观

测站恒温的集装箱内，采样口带有 $PM_{2.5}$ 切割头，距地面高度约 3 m，体积流量为 5 $L\cdot min^{-1}$，数据时间分辨率为 5 min. 与 AE-31 相比，AE-33 消除了气溶胶负载效应引起的测量误差，提高了仪器的高效性和精确性[20].

黑碳仪中，气溶胶样品被连续采集到黑碳仪内石英滤纸带上. 当光源照射附有 BC 的滤纸袋时，BC 对可见光的吸收而造成光的衰减（ATN）[公式(1)].

$$ATN = 100 \cdot \ln(I_0/I) \tag{1}$$

式中，I_0 和 I 分别代表滤纸带上参照点和采样点的衰减量. AE-33 测量 BC 对不同波长光的衰减量 ATN_λ，计算不同波长下 BC 的吸光系数 σ_{abs}[21,22][公式(2)～(3)].

$$\sigma_{ATN,\lambda} = \frac{S \times (\Delta ATN_\lambda/100)}{F_{in}\Delta t} \tag{2}$$

$$\sigma_{abs,\lambda} = \sigma_{ATN,\lambda}/C \tag{3}$$

$$M_{BC,\lambda} = \sigma_{abs,\lambda}/MAC_\lambda \tag{4}$$

式中，σ_{ATN}、S、F_{in} 和 C 分别指光衰减系数，采样点大小，仪器流量以及采样点处气溶胶散射所导致吸收系数偏高的校正因子[23]；MAC_λ 为质量吸收系数，$M_{BC,\lambda}$ 为 BC 质量浓度. 考虑到 880 nm 处其他气溶胶粒子（例如棕碳或矿物粉尘）的吸收并不显著[20,24]，本文使用 880 nm 处测得的数据作为 BC 浓度值. 观测期间因电路改造导致仪器关闭数次，将仪器每次开机前 5 个数据及明显异常值（5 min 平均值大于或小于前 10 个数据滑动平均的 3 倍）提出后，做小时平均，得到 BC 浓度的小时时间序列.

同期的气象资料（风速、风向、温度、相对湿度和降水等）来源于气象数据共享网（http://data.cma.cn/）双流站，常规污染物（$PM_{2.5}$、PM_{10}、CO、NO_2、SO_2 和 O_3）双流站数据来源于成都市环境监测站（http://sthj.chengdu.gov.cn/），时间分辨率为 1 h；小时边界层高度值来源于欧洲中期天气预报中心（ECMWF）0.25° × 0.25° ERA5 再分析资料（https://cds.climate.copernicus.eu/）. 成都周边排放源（主要为燃烧源）的分布参考美国国家航空航天局可见光红外成像辐射仪观测的火点分布（https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/）.

1.3　黑碳仪模型

由于 BC 主要来自液体燃料（例如交通排放）和固体燃料（例如煤和生物质）的燃烧[10]，黑碳仪模型基于 BC 对不同波长光的吸收特征，获得上述两种不同来源 BC 的比例. 模型中假定吸收系数主要由液体燃料和固体燃料产生的 BC 贡献：

$$\sigma_{abs}(BC) = \sigma_{abs}(BC_{liquid}) + \sigma_{abs}(BC_{solid}) \tag{5}$$

根据 AE-33 厂商推荐的质量吸收系数（$MAC_{370\ nm}$ = 18.47 $m^2\cdot g^{-1}$ 和 $MAC_{880\ nm}$ = 7.77 $m^2\cdot g^{-1}$）可计算得到 370 nm 和 880 nm 处 BC 的吸收系数 $\sigma_{abs(370\ nm)}$ 和 $\sigma_{abs(880\ nm)}$，更详细的信息见文献[20]. 两个波长下液体燃料来源和固体燃料来源的吸收系数满足波长的幂指数关系[25][公式(6)和公式(7)]，即 $\sigma_{abs,\lambda}$-$\lambda^{-\alpha}$，其中 α 为吸收 Ångström 指数.

$$\frac{\sigma_{abs(370\ nm)liquid}}{\sigma_{abs(880\ nm)liquid}} = \left(\frac{370}{880}\right)^{-\alpha_{liquid}} \tag{6}$$

$$\frac{\sigma_{abs(370\ nm)solid}}{\sigma_{abs(880\ nm)solid}} = \left(\frac{370}{880}\right)^{-\alpha_{solid}} \tag{7}$$

式中，α_{liquid} = 1 和 α_{solid} = 2 分别表示液体燃料和固体燃料的 Ångström 指数[26,27]. 通过求解[方程(4)～(7)]计算液体来源贡献的 P 部分：

$$P = \frac{\sigma_{abs,liquid}}{\sigma_{abs}} = \frac{M_{liquid}}{M_{BC}} \tag{8}$$

1.4　潜在源贡献分析法

本文利用潜在源贡献分析法（potential source contribution function，PSCF）[28]，结合气团轨迹和观测 BC 浓度给出观测站点 BC 的潜在源区. 该方法基于美国国家海洋和大气管理局（NOAA）空气研究实验室（ARL）和澳大利亚气象局联合开发的 Hybrid single particle lagrangian integrated trajectory 模式（Hysplit-4）[29].

本文利用 Wang 等[30]开发的 Meteoinfo 软件中 TrajStat 插件（1.4.4R6 版本）将研究区域划分为 0.25° ×0.25°的网格，PSCF 值为某网格内气团到达观测点时所研究的要素值（本文为黑碳浓度和液体燃料来源贡献 P）超过设定阈值的条件概率[28]. PSCF 值越大，表明该网格区域内要素值大于阈值的概率越大，其经过的网格区域对观测点要素值贡献的可能性就越大[5]. 如果令网格中所有轨迹端点数为 $n_{i,j}$，落在该网格内要素值浓度高于设定阈值的轨迹端点数为 $m_{i,j}$，那么网格的 PSCF 值则为：

$$PSCF_{i,j} = \frac{m_{i,j}}{n_{i,j}} \tag{9}$$

当网格区域内 $n_{i,j}$ 较小时，PSCF 算法存在较大的不确定性. 因此，为了降低计算的不确定性，引入 Zeng 等[31]所建议的权重函数 $W_{i,j}$：

$$W_{i,j} = \begin{cases} 1.0 & (n_{i,j} > 3n_{ave}) \\ 0.7 & (3n_{ave} < n_{i,j} < 3n_{ave}) \\ 0.42 & (n_{ave} < n_{i,j} < 1.5n_{ave}) \\ 0.05 & (n_{i,j} < n_{ave}) \end{cases} \tag{10}$$

式中，n_{ave} 为研究区域内的平均轨迹端点数. 此时 PSCF 可通过公式(11)计算得到：

$$PSCF_{i,j} = \frac{m_{i,j}}{n_{i,j}} \cdot W_{i,j} \quad (11)$$

1.5 浓度权重轨迹分析法

PSCF 反映的是某网格中污染轨迹所占的比例,定性的给出对成都地区 BC 浓度有贡献的区域. 在此基础上,结合 Hsu 等[32]建立的浓度权重轨迹分析法(concentration weighted trajectory,CWT)进一步计算轨迹的浓度权重,以反映不同源区对观测点要素值的贡献大小[31]. 与 PSCF 分析相同,在 CWT 分析中,研究区域被划分为 0.25° × 0.25°的网格,每个网格点都有一个权重浓度 $C_{i,j}$,当轨迹穿过网格点 (i,j)时,观测点处的加权浓度值 $C_{i,j}$如下:

$$C_{i,j} = \frac{\sum_{l=1}^{M} C_l \cdot \tau_{i,j,l}}{\sum_{l=1}^{M} \tau_{i,j,l}} \cdot W_{i,j} \quad (12)$$

式中,M 是通过网格点(i, j)的轨迹条数,C_l 是观测点处的要素值,$\tau_{i,j,l}$是轨迹 l 在网格点(i, j)停留的时间,$W_{i,j}$是 PSCF 中的权重函数.

2 结果与讨论

2.1 黑碳质量浓度变化特征

2.1.1 黑碳总体变化特征

图 2 为整个观测期间(2017 年 12 月 1 日至 2018 年 11 月 30 日)成都地区小时平均和日平均 BC 质量浓度的时间序列. 可以看出,观测期间 BC 浓度变化波动较明显,最低值仅为 0.18 μg·m^{-3},最高值高达 40.51 μg·m^{-3},其中以冬季 BC 浓度的变化幅度最大. BC 年平均浓度(标准差)为 5.26 (4.67) μg·m^{-3}. 表 1 列出了中国其他地区不同类型站点 BC 的浓度值. 从中可见,当前成都 BC 浓度水平与 2013 年前的北京地区的 BC 浓度相当,但低于广州地区. 然而,随着近几年大气环境问题的凸显,中国针对颗粒物严格的排放政策下,中部地区(以武汉为例)、长三角地区(以上海和南京为例)和珠三角地区(以深圳为例)的黑碳浓度明显得到控制. 相比于 2013 ~ 2015 年,尽管当前该地区的 BC 浓度在一定程度上有所降低,但还远高于长三角以及珠三角城市地区 BC 浓度水平,总体处于偏高水平,仅略低于华北污染较为严重的邯郸地区. 虽然成都地区地处深盆地形,较小的风速下导致污染物不易扩散[13],但成都地区黑碳排放控制依然需要进一步加强.

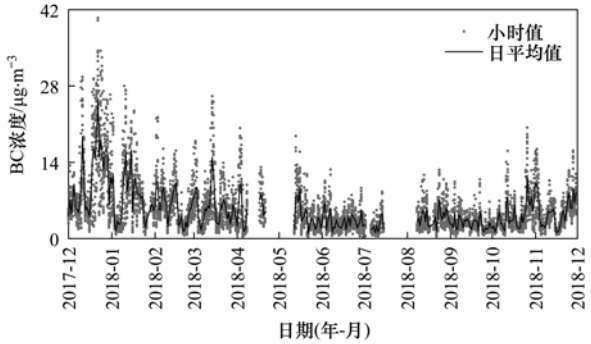
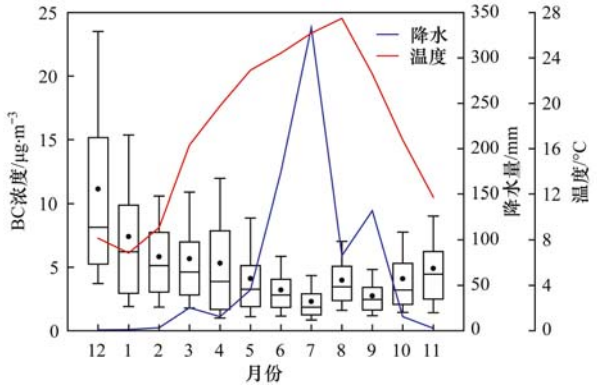


图 2 2017 年 12 月 1 日至 2018 年 11 月 30 日成都地区黑碳(BC)质量浓度的时间序列

Fig. 2 Time series of BC concentration in Chengdu from December 1, 2017, to November 30, 2018

2.1.2 黑碳的月及季节变化特征

图 3 为观测期间月均值的统计特征,反映出成都地区 BC 浓度的季节变化:呈现冬季最高,夏季最低. 季节平均值由高到低依次为:冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季. 冬季 BC 的平均浓度为(8.18 ± 4.84) μg·m^{-3},是夏季(3.28 ± 1.39) μg·m^{-3}的 2.5 倍,而春季和秋季 BC 平均浓度分别为(5.11 ± 2.78) μg·m^{-3}和(3.91 ± 2.25) μg·m^{-3}. BC 的月平均浓度在 12 月达到峰值,为 11.11 μg·m^{-3}, 7 月份为谷值,仅为 2.30 μg·m^{-3}. 图 4 给出了不同季节 BC 小时平均浓度的频率分布. 春季、夏季和秋季的高频值对应的 BC 浓度范围基本都分布在 0 ~ 6 μg·m^{-3}之间,占比分别为 65%、97% 和 82%,大于 9 μg·m^{-3}的值占比很小,夏季 BC 浓度值在 9 μg·m^{-3}以上的占比为 0. 但冬季 BC 浓度值高频分布向大值区延展,高值(>9 μg·m^{-3})占比较高,达到了 42%. 从图 3 中 BC 浓度与月累积降水量和月平均温度的变化关系来看,成都地区冬季 BC 浓度最高,夏季最低. 这种浓度的季节差异与各季节扩散和清除条件有关. 由于 BC 在大气中不易与其他物质发生反应,夏季气温高,大气湍流作用强烈,再加上降水量较大,这有利于 BC 的扩散与湿清除;冬季气温较低,多静稳



箱线图触须底部和顶部、箱体底部和顶部及箱体中间横线分别为 10% 和 90% 分位数、25% 和 75% 分位数及中值,圆点为平均值

图 3 BC 质量浓度与温度月平均值和降水量月累计值变化

Fig. 3 Monthly average of BC concentration and temperature and the monthly precipitation

表 1　中国部分地区 BC 质量浓度

Table 1　Mass concentrations of BC in some regions of China

地点	观测点类型	日期(年-月)	BC 浓度 ± 标准差/μg·m^{-3}	仪器型号
成都(本研究)	城区	2017-12 ~ 2018-11	5.26 ± 4.67	AE-33
成都[19]	城区	2013-09 ~ 2015-07	6.87	AE-31
北京[33]	城区	2006-01 ~ 2012-07	6.5 ± 7.3	AE-31
邯郸[34]	城区	2013-03 ~ 2017-02	7.38	MAAP-5012
合肥[35]	城区	2012-06 ~ 2013-05	3.5 ± 2.5	AE-31
上海[36]	城区	2016-06 ~ 2017-06	1.17 ± 0.61	AE-31
南京[37]	城区	2015-01 ~ 2015-10	1.33 ± 1.20	AE-33
武汉[38]	城区	2015-09 ~ 2016-02	3.91 ± 2.10	AE-51
广州[39]	城区	2007-12 ~ 2008-02	10.5 ± 7.7	AE-31
深圳[40]	城区	2014-01 ~ 2015-06	2.58 ± 2.00	AE-31
北京[33]	本底	2008-11 ~ 2012-07	2.2 ± 2.4	AE-31
上海[36]	郊区	2016-06 ~ 2017-06	2.09 ± 0.97	AE-31
深圳[40]	郊区	2014-01 ~ 2015-06	1.12 ± 0.9	AE-31

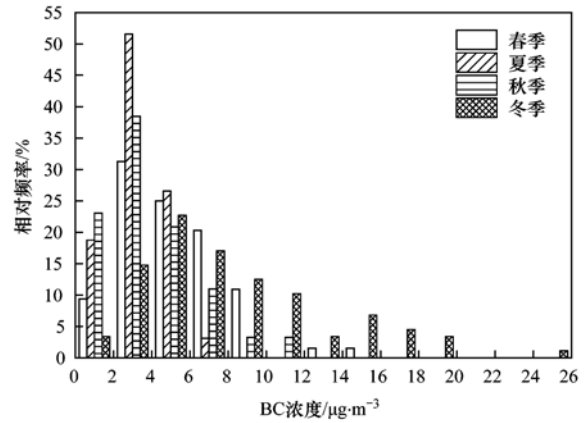


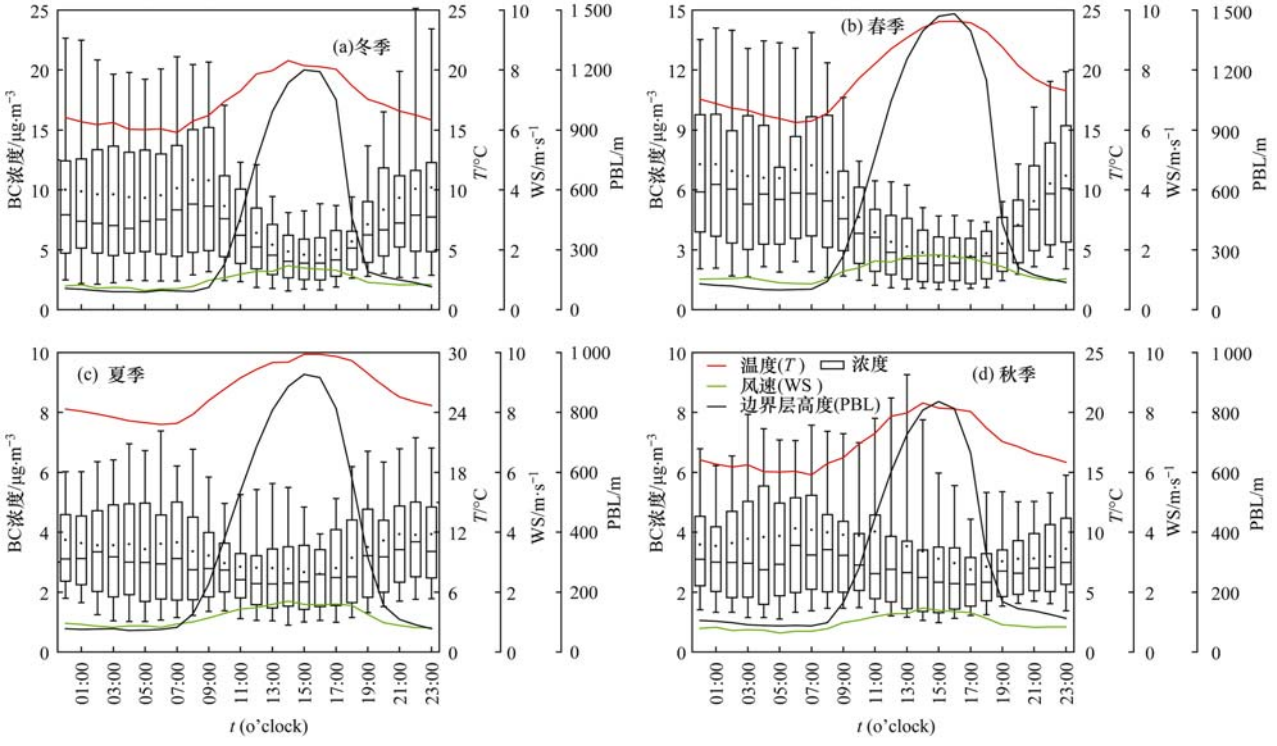
图 4　不同季节 BC 质量浓度频率分布

Fig. 4　Frequency distribution of BC mass

天气,降水也较少,不利于 BC 在垂直方向上的扩散和清除,导致 BC 在近地面累积,浓度升高.

2.1.3　黑碳的日变化特征

不同季节 BC 浓度、温度、风速及边界层高度的日变化绘制于图 5,以探讨 BC 质量浓度的日变化特征及其影响因素. 总体来看, 4 个季节 BC 日变化均呈现出早晚峰值,午间和夜间低值的分布. 这与大多数城市气溶胶浓度变化特征相一致[41, 42]. BC 浓度在早间(06:00 ~ 09:00)的浓度峰值主要是由于该时段内为上班高峰,交通排放增加,在较低的边界层内累积所致. 从图 5 中还可以看出,冬季上午峰值较其他季节相对滞后, 09:00 左右才开始出现最大值,



箱线图触须底部和顶部、箱体底部和顶部及箱体中间横线分别为 10% 和 90% 分位数、25% 和 75% 分位数及中值,圆点为平均值

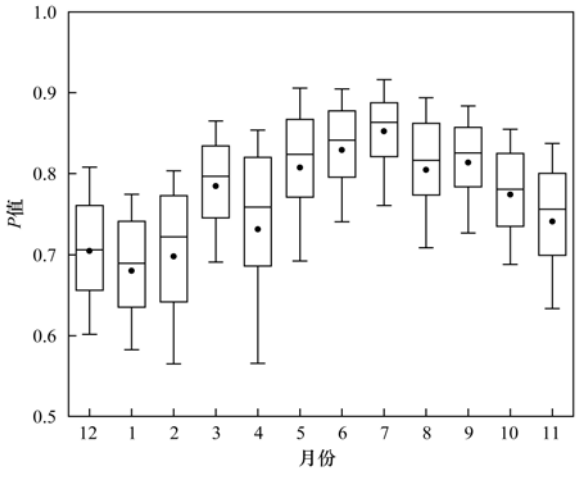
图 5　不同季节 BC 浓度的日变化

Fig. 5　Diurnal variations of BC concentration in different seasons

这一定程度上与冬季人为活动时间较晚有关. 此外,BC 浓度的日变化在下午 14:00 ~ 17:00 时间段呈现低值,一方面,由于边界层活动的日变化影响,随着一天中的辐射增强,地面温度逐渐升高,大气湍流活动随之加强,大气边界层高度抬升,风速也稍有增加,有助于 BC 的垂直输送和扩散稀释;另一方面,该时段内车辆数量相比于早晚高峰期有明显的减少. 晚间(18:00 ~ 次日 00:00)BC 浓度出现了缓慢的上升,并在 00:00 ~ 05:00 这一时间段内呈现出相对稳定,略有下降的状态,这种变化趋势由夜间边界层的下降,加上下班交通高峰的影响,BC 再次在边界层内累积导致. 夜间至凌晨,人为活动减少,BC 的沉降导致其浓度稍有降低,但由于 BC 一般所处粒径范围较小(0.01 ~ 1 μm)[10],其沉降作用有限,所以其浓度仅呈现略微下降的趋势.

2.2 黑碳的排放来源解析

为了探究成都地区不同季节 BC 的排放来源,采用 1.3 节描述的黑碳仪模型,将排放源分为液体燃料和固体燃料来源. 计算所得 P 值月平均如图 6 所示,其变化表明 BC 排放来源的不同. 各季节 P 值由高到低依次为:夏季(0.82) > 春季(0.78) = 秋季(0.78) > 冬季(0.69),表明液体燃料来源是 BC 全年的主要来源,尤其是在夏季. 相比于其他季节,冬季固体燃料贡献的 BC 比例最高. Jing 等[21]在南京的研究结果显示,南京地区 P 值在冬季最高,表明由液体燃料燃烧贡献的 BC 比例在冬季最大,这与本研究结论有较大差异,这主要与两省能源结构和农业发展程度有很大关系,四川为农业和农村人口大省[1],冬季农村散煤燃烧排放在低风速,低边界层内累积,会造成固体燃料排放 BC 比例的增加,因此成都 P 值在冬季最小.



箱线图触须底部和顶部、箱体底部和顶部及箱体中间横线分别为 10% 和 90% 分位数、25% 和 75% 分位数及中值,圆点为平均值

图 6 P 值的月变化特征

Fig. 6 Monthly variations of P values

BC 与大气中一些污染性气体,例如 NO_2、SO_2 和 CO,可来源于相同的燃烧过程. BC 和 CO 一般来自于不完全燃烧,NO_2 能够作为交通排放的指示物,SO_2 能够作为燃煤排放的指示物[43]. 表 2 列出了 4 个季节 BC 与 NO_2、CO、和 SO_2 的相关系数,可以看出,BC 和 NO_2 的相关系数在 4 个季节都较高(0.75 ~ 0.81),表明交通排放对成都 BC 的贡献在 4 个季节都占有主导地位,该结论与上述黑碳仪模型得到的结果具有一致性. BC 和 SO_2 的相关系数存在较大的季节变化,表明燃煤排放对 BC 的贡献存在较明显的季节变化,呈现出夏季最低,冬季最高的变化,说明燃煤排放来源夏季较弱,冬季较强,这也与上述黑碳仪器模型所得到的固体燃料燃烧排放对 BC 的贡献在冬季升高的结果较为一致. 表 2 中还可以发现,BC 在夏季与 CO 的相关性较差,主要是由于夏季较多的降水对 BC 和 CO 不同的清除效率,造成夏季 BC 与 CO 相关系数的低值.

表 2 BC 浓度与污染性气体浓度的相关系数[1)]

Table 2 Correlation coefficient of BC and tracer gas

项目	NO_2	SO_2	CO
春季 BC	0.80**	0.47**	0.74**
夏季 BC	0.76**	0.16**	0.49**
秋季 BC	0.81**	0.39**	0.74**
冬季 BC	0.75**	0.77**	0.85**

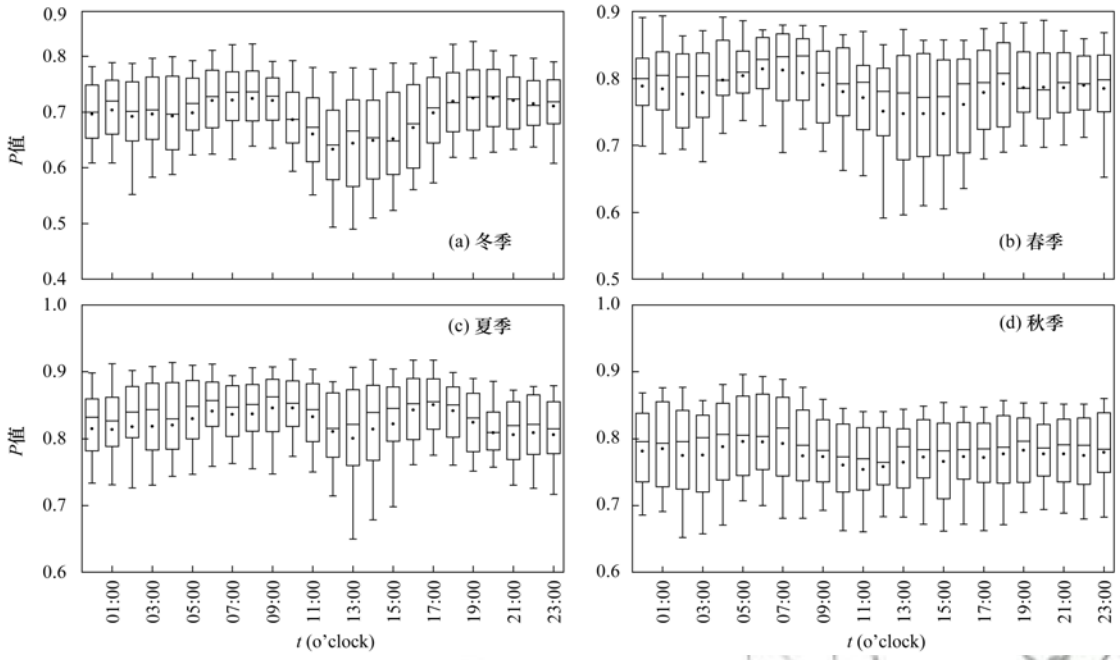
1) ** 表示在 0.01 水平双侧检验下相关性显著

图 7 为 P 值的日变化,可以发现,P 值日变化趋势呈现出双峰特征,即早晚高,午间低,早晚高峰由于交通排放贡献增加,导致 P 值的峰值. 不同季节峰值出现的时间在夏季最早,冬季最晚. P 值日变化与 BC 浓度日变化特征稍有差异,晚高峰后 P 值稍有回落,但 BC 日变化显示该时段 BC 浓度值在低边界层内继续升高,说明夜间煤炭或生物质等固体燃料燃烧排放有所增加.

2.3 成都地区黑碳源地分析

2.3.1 后向轨迹聚类分析

气团可携带包括 BC 在内的大量污染物,为了追踪不同季节成都地区 BC 的可能源地,本文首先利用 Hysplit-4 模式对观测期间影响成都的气团进行后向轨迹模拟,并对轨迹进行聚类分型. 模式采用美国气象环境预报中心全球数据同化系统(NCEP, GDAS)分辨率为 1° × 1°的气象场资料,轨迹终点设定在成都信息工程大学城市气象综合观测站(30°35′N, 103°59′E),模式高度为地面以上 500 m (500 m AGL). 选取数据完整的 1、3、6 和 10 月每日 24 个时次进行了 72 h 后向轨迹模拟,根据组内



箱线图触须底部和顶部、箱体底部和顶部及箱体中间横线分别为 10% 和 90% 分位数、25% 和 75% 分位数及中值，圆点为平均值

图 7　不同季节 *P* 值的日变化

Fig. 7　Diurnal variations of *P* values in different seasons

各轨迹差异较小，组外差异较大的原则[29]，将各月模拟得到的轨迹进行分型，结果如图 8 所示，分别代表冬季、春季、夏季和秋季，其中轨迹两个标记点间的距离代表了该气团的传输速度，距离越长，传播速度越快.

图 8 显示，4 个季节影响成都的主要气团均源自于四川东部，占比达到 65%～79%，该气团传输距离较短，扩散高度相对较低，属于局地类气团. 由图 1 可知，川渝城市群主要集中于四川东部，污染严重，该气团以较缓慢的速度经过此区域，将携带大量污染物及老化的 BC 到达成都，造成成都地区 BC 的堆积. 此外，各季节其他气团来源存在着较大差异，冬季气团 2(15%)和气团 3(12%)的气流轨迹均从西边传输而来，占比较小，移动速度快，为远距离输送，扩散高度在2 000 m以上，此类气团属于清洁气团；春季气团 2(11%)源于甘肃途经甘肃南部抵达成都，扩散高度可达2 500 m，气团 3(10%)源于河南途经湖北、重庆从四川东北部上空抵达成都，扩散高度低于1 500 m，两气团均从成都北部进入，并造成影响，属于区域输送；夏季气团 2(16%)源于青海中部从四川西北部上空抵达成都，气团 3(11%)源于陕西南部从四川东北部上空抵达成都，两者的扩散高度均超过2 000 m，同样属于区域性输送气团. 此外，夏季还存在来自南方，经广西，贵州抵达成都的气团 4，但占比较小(8%)；秋季气团 2(7%)轨迹与春季气团 2 轨迹来向接近，但传输距离相对较远，气团 3(14%)来自西部青藏高原，经高原后迅速下沉影响成都，该气团属于清洁气团. 因此总结可以发现，局地污染对成都 BC 浓度贡献具有重要作用，在影响成都的各气团中，仅夏季存在南方气团输送的影响，且夏季局地气团影响的占比在 4 个季节最低，这也成为成都夏季 BC 浓度较低的原因之一. 此外，成都各季节 BC 除了主要受到局地气团传输的影响，来自北方偏北、偏西或偏东方向的气团输送也对成都 BC 有一定影响.

2.3.2　潜在源贡献分析和浓度权重轨迹分析

为了更清楚地说明 BC 源地，本文在后向轨迹分型的基础上，使用 PSCF 对研究期间 1、3、6 和 10 月的 BC 的潜在源区进行分析，以代表各季节，给出成都地区 BC 的潜在源区. 模型中设定各月份 BC 的平均浓度(7.41、5.66、3.21 和 4.09 $\mu g \cdot m^{-3}$)为阈值. 图 9 显示了观测期间成都地区各季节 BC 潜在源贡献区域的计算结果，同一时期内的火点也呈现在图 9 中. 可以看出，各季节 BC 的潜在源区分布主要集中在成都周边以东至重庆局地区域，对应川渝城市群，该区域火点分布也相对较为密集，这一结果与影响成都的主要气团来源方向一致. 总体上，冬季源区的分布范围相对其他季节较小，且较为集中，春季、夏季和秋季源区分布较分散. 具体来看，冬季在靠近四川东南部等地区，存在一个 PSCF 高值带，重庆西部、陕西和甘肃南部也存在 BC 可能源区，此外成都以西至四川西北部分地区也存在可能源区，但该源区对应火点较少，结合轨迹分型结果来看，主要是由于冬季存在较大比例(27%)从西边远距离输

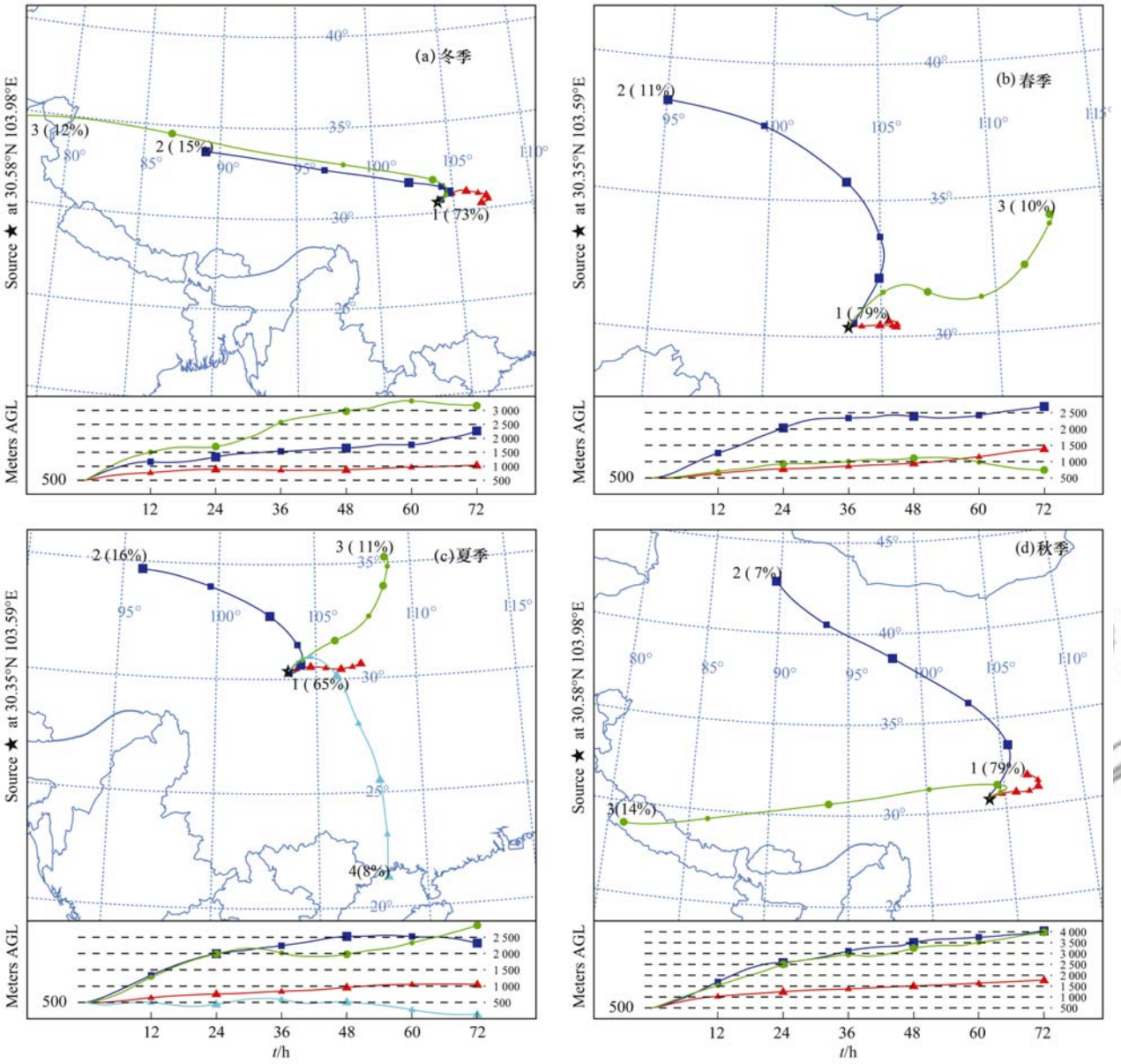


图 8 不同季节气团 72 h 后向轨迹聚类分型

Fig. 8 Cluster analyses of 72 h backward trajectories in different seasons

送的气团,因此在潜在源区计算中,该区域所占权重较大,导致 PSCF 值较高;春季 BC 的潜在源区主要分布在四川中部偏西和东南部局地和重庆地区,甘肃南部以及陕西南部等地区也存在分散的源区,各源区内火点较为明显,其分布与后向轨迹分型中的主要气团方向较为一致;夏季 BC 的高潜在源区主要集中在四川东部,重庆和湖北交界处的小部分区域,甘肃南部也存在 BC 源区,与其他季节不同的是,广西,贵州等地也有源区分布,该区域分布于夏季影响成都的南方气团有关;秋季 BC 的高潜在源区主要分布在四川东南部成都周边区域,陕西南部、重庆南部和贵州北部等小部分区域,此外,四川、青海、甘肃三省交界处存在一个东西走向的 BC 高值带. BC 潜在源区的季节变化,不仅与各季节影响成都的主要气团来源有关,也与各季节排放源分布(火点分布)的差异有关.

图 10 为对应各月成都地区 BC 浓度权重轨迹分析(CWT)结果,以反映不同源区对成都 BC 浓度的贡献大小. 可以看出,CWT 结果分布范围与 PSCF 大致相同. 各季节 CWT 高值区与火点分布基本一致. 冬季 CWT 高值区主要集中分布在四川中西部、东南部以及重庆南部等地区,陕西南部和甘肃南部潜在源区对 BC 的贡献超过 9 $\mu g \cdot m^{-3}$. 春季 CWT 高值区较为分散,且各源区的贡献值较冬季低,说明成都地区春季的 BC 浓度是各区域贡献并累积的结果. 此外,就各源区的贡献来看,四川东南部、四川东部和重庆西部区域贡献大约在 5 ~ 9 $\mu g \cdot m^{-3}$. 夏季 CWT 整体较小,BC 源区贡献的最大值不超过 5 $\mu g \cdot m^{-3}$,较大值集中分布在四川东部和甘肃陕西交界地区. 秋季的 CWT 分布分散,与其他 3 个季节不

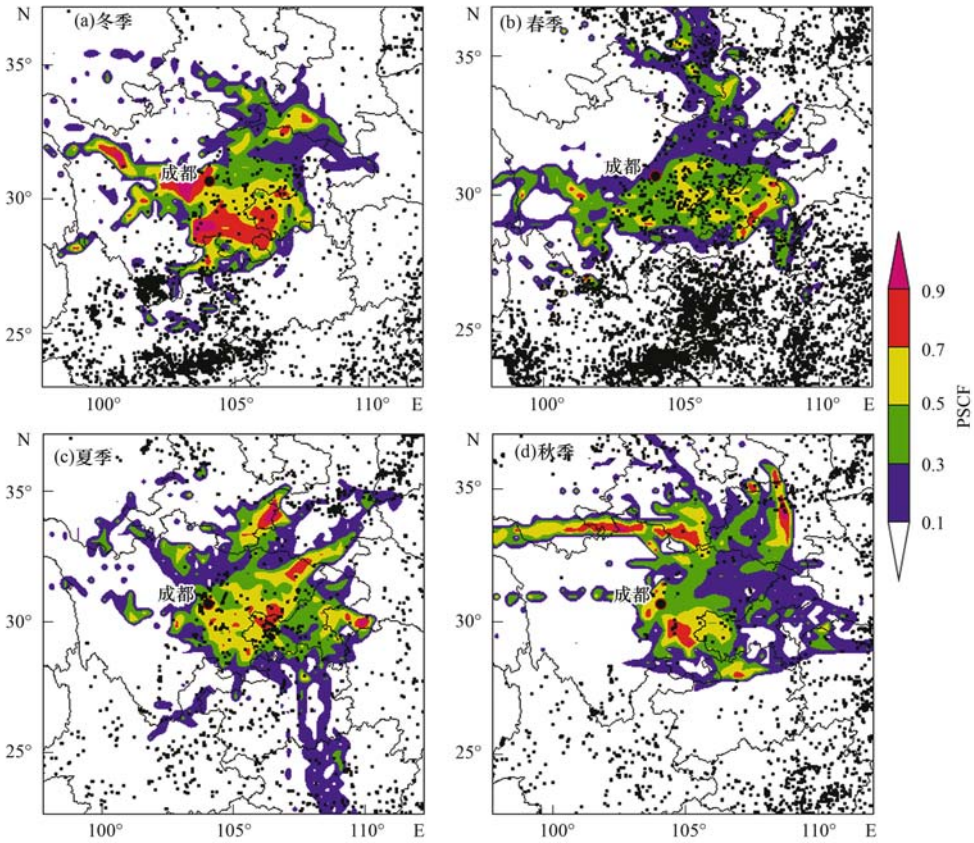


图 9　不同季节 BC 的潜在源贡献分析(PSCF)分析

Fig. 9　PSCF analyses of BC in different seasons

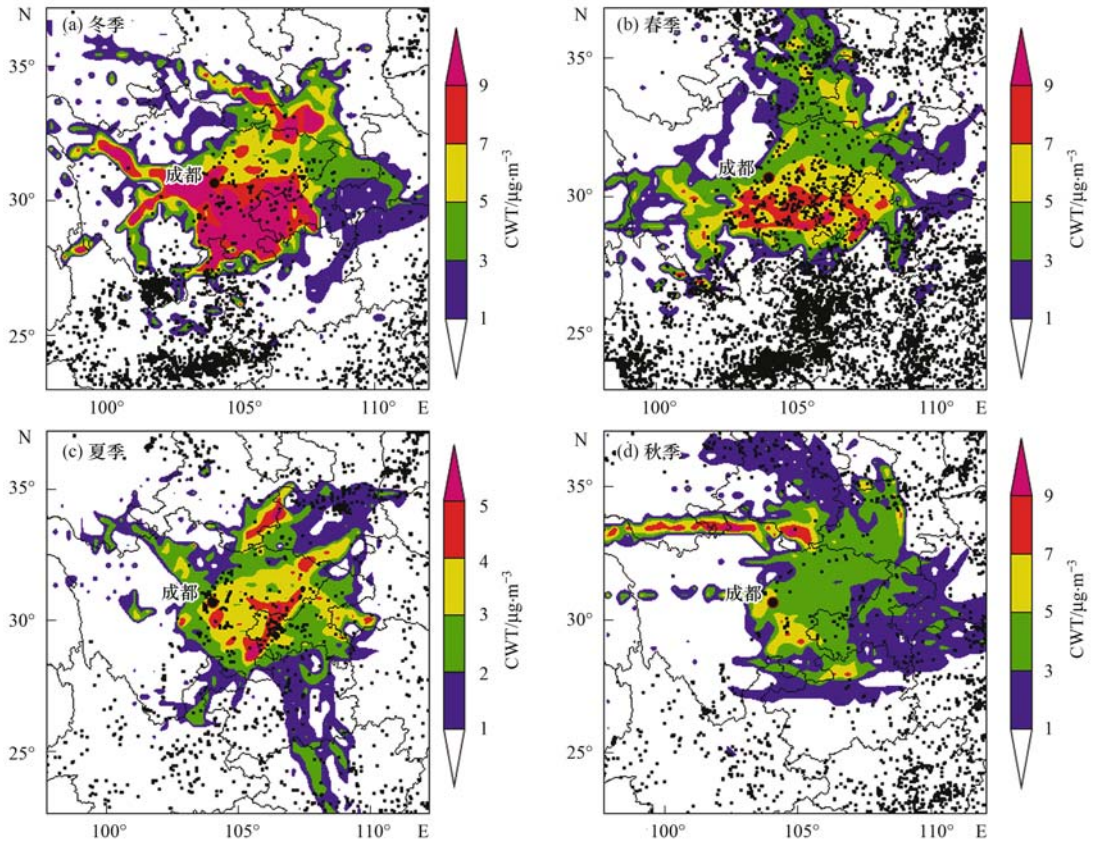


图 10　不同季节 BC 的浓度权重轨迹分析(CWT)分析

Fig. 10　CWT analyses of BC in different seasons

同的是,秋季 CWT 的高值区分布在四川、青海和甘肃三省交界等小范围地区,同时四川东南部和贵州小范围区域内也存在 CWT 较大值(5 ~ 7 μg·m^{-3}). 因此,综合上述 PSCF 和 CWT 的结果可知,成都 BC 排放源区以及高贡献源区主要集中分布在成都周边以东地区,这与后向轨迹分析结果一致.

运用同样的方法,本文对成都四季 *P* 值做了潜在源分析(PSCF). 需要说明的是,*P* 值是交通排放 BC 占总 BC 的比例. 因此,PSCF 高值区代表交通源排放的源区,低值区代表燃煤和生物质燃烧排放的源区,结果如图 11 所示. 可以看出,尽管源区内火点分布较为密集,但成都地区 4 个季节 BC 都主要还是由液体燃料燃烧排放所贡献,即主要受到交通排放源的影响,这主要是由于川渝城市群的影响. 结合 4 个季节 *P* 值源区,可以发现,成都以东区域的液体燃料燃烧排放对各季节 BC 起到主要贡献作用. 在源区外侧边缘,固体燃料燃烧排放 BC 的贡献才稍有增加.

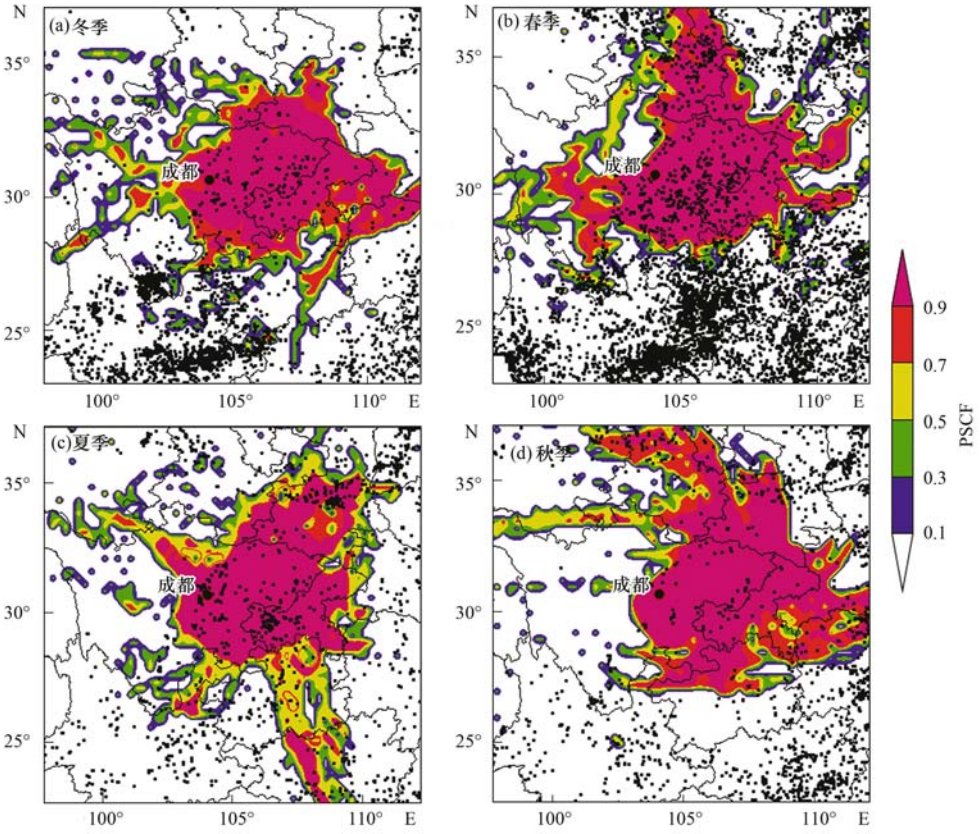


图 11 不同季节 *P* 值的 PSCF 分析

Fig. 11 PSCF analyses of *P* values in different seasons

3 结论

(1)观测期间 BC 的小时浓度变化范围为 0.18 ~40.51 μg·m^{-3},年平均浓度为 5.2 μg·m^{-3}(标准差为 4.67 μg·m^{-3}). BC 的季节平均值由高到低依次为:冬季[(8.18 ±4.84) μg·m^{-3}] > 春季[(5.11 ±2.78) μg·m^{-3}] > 秋季[(3.91 ±2.25) μg·m^{-3}] > 夏季[(3.28 ±1.39) μg·m^{-3}]. 春季、夏季和秋季的 BC 浓度在高值(>9 μg·m^{-3})区域内占比很少,冬季的占比高达 42%. BC 的月平均浓度在 12 月达到峰值,为 11.11 μg·m^{-3}, 7 月份为谷值,为 2.30 μg·m^{-3}.

(2)四季 BC 日变化均呈现出早晚峰值,午间和夜间低值的结构. BC 浓度各季节的日变化存在一定的差异,春季、夏季和秋季早间峰值出现在 06:00 ~ 09:00 时段内,而冬季则是在 9:00 左右出现峰值,这与冬季人为活动较晚有关. 14:00 ~17:00 时间段 BC 浓度较低,这与该时段内车辆数量显著减少,大气边界层高度抬升,风速提升,BC 的输送和扩散稀释能力增强有关. 18:00 ~次日 00:00 时段内 BC 浓度缓慢上升,并在 00:00 ~05:00 时间段内呈现出相对稳定,略有下降的状态,这主要与夜间边界层的下降和下班交通高峰有关. 此外,夜间至凌晨,人为活动减少,BC 的沉降导致其浓度稍有降低.

(3)各季节液体燃料贡献(主要为交通排放)(*P* 值)由高到低依次为:夏季(0.82) > 春季(0.78) = 秋季(0.78) > 冬季(0.69). 液体燃料来源对 BC 的贡献在所有季节都占主导地位. 冬季固体燃料燃

烧排放(燃煤和生物质燃烧)的贡献较其他季节有所增加. P 值的日变化呈现出双峰特征,即早晚高,午间低. 不同季节峰值出现的时间在夏季最早,冬季最晚. P 值日变化与 BC 浓度日变化特征的差异主要表现在晚高峰后 P 值稍有回落而 BC 浓度继续升高,这与夜间煤炭或生物质等固体燃料燃烧增加有关.

(4)后向轨迹结果表明,成都四季 BC 除了主要受局地气团传输的影响外,北方偏北、偏西或偏东的气团输送对成都 BC 也有一定的贡献. 潜在源贡献分析(PSCF)及浓度权重轨迹分析(CWT)表明,成都各季节主要源区为成都周边及以东至重庆局地区域(川渝城市群),该区域对成都 BC 浓度的贡献值较高,且主要为液体燃料燃烧贡献区. 此外,陕西南部和甘肃南部也存在 BC 的潜在源区. 受气团来源和排放源分布的影响,不同季节的源区分布稍有差异,夏季在广西,贵州等地存在源区分布,但贡献值较小.

参考文献:

[1] 曹国良, 张小曳, 王亚强, 等. 中国大陆黑碳气溶胶排放清单[J]. 气候变化研究进展, 2006, **2**(6): 259-264.
Cao G L, Zhang X Y, Wang Y Q, *et al*. Inventory of black carbon emission from China[J]. Advances in Climate Change Research, 2006, **2**(6): 259-264.

[2] Jacobson M Z. Control of fossil-fuel particulate black carbon and organic matter, possibly the most effective method of slowing global warming [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2002, **107**(D19): 4410.

[3] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis[M]. New York: Cambridge University Press, 2013.

[4] Ding A J, Huang X, Nie W, *et al*. Enhanced haze pollution by black carbon in megacities in China[J]. Geophysical Research Letters, 2016, **43**(6): 2873-2879.

[5] 袁亮. 黄山地区气溶胶光学性质和混合状态的观测和模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.
Yuan L. Observational and modeling study of aerosol optical properties and mixing state at Mt. Huang[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2017.

[6] Koch D. Transport and direct radiative forcing of carbonaceous and sulfate aerosols in the GISS GCM[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, **106**(D17): 20311-20332.

[7] Khalizov A F, Zhang R Y, Zhang D, *et al*. Formation of highly hygroscopic soot aerosols upon internal mixing with sulfuric acid vapor [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2009, **114**(D5): D05208, doi: 10.1029/2008JD010595.

[8] 张华, 王志立. 黑碳气溶胶气候效应的研究进展[J]. 气候变化研究进展, 2009, **5**(6): 311-317.
Zhang H, Wang Z L. Advances in studies of black carbon effects on climate[J]. Advances in Climate Change Research, 2009, **5**(6): 311-317.

[9] Janssen N A, Hoek G, Simic-Lawson M, *et al*. Black carbon as an additional indicator of the adverse health effects of airborne particles compared with PM_{10} and $PM_{2.5}$ [J]. Environmental Health Perspectives, 2011, **119**(12): 1691-1699.

[10] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al*. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, **9**(14): 5131-5153.

[11] Tao J, Zhang L M, Cao J J, *et al*. A review of current knowledge concerning $PM_{2.5}$ chemical composition, aerosol optical properties and their relationships across China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(15): 9485-9518.

[12] Tian P F, Cao X J, Zhang L, *et al*. Aerosol vertical distribution and optical properties over China from long-term satellite and ground-based remote sensing[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(4): 2509-2523.

[13] Liao T T, Gui K, Jiang W T, *et al*. Air stagnation and its impact on air quality during winter in Sichuan and Chongqing, southwestern China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **635**: 576-585.

[14] Ning G C, Wang S G, Yim S H L, *et al*. Impact of low-pressure systems on winter heavy air pollution in the northwest Sichuan Basin, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(18): 13601-13615.

[15] Hansen A D A. The Aethalometer™[M]. Berkeley, California: Magee Scientific Company, 2005.

[16] Zhuang B L, Wang T J, Liu J, *et al*. Continuous measurement of black carbon aerosol in urban Nanjing of Yangtze River Delta, China[J]. Atmospheric Environment, 2014, **89**: 415-424.

[17] 秦世广, 汤洁, 石广玉, 等. 四川温江黑碳气溶胶浓度观测研究[J]. 环境科学学报, 2007, **27**(8): 1370-1376.
Qin S G, Tang J, Shi G Y, *et al*. Observational study of black carbon at Wenjiang, Sichuan province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, **27**(8): 1370-1376.

[18] 孙欢欢, 倪长健, 崔蕾. 成都市黑碳气溶胶污染特征及与气象因子的关系[J]. 环境工程, 2016, **34**(6): 119-124, 129.
Sun H H, Ni C J, Cui L. Characteristics of black carbon aerosol pollution in Chengdu and the relationship between meteorological factors[J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(6): 119-124, 129.

[19] 郑超. 成都大气中黑碳浓度及其颗粒物特征研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
Zheng C. Study on the characteristics of black carbon concentration and particulate matter in the atmosphere of Chengdu [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[20] 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.

[21] Jing A K, Zhu B, Wang H L, *et al*. Source apportionment of black carbon in different seasons in the northern suburb of Nanjing, China [J]. Atmospheric Environment, 2019, **201**: 190-200.

[22] Hansen A D A, Rosen H, Novakov T. The aethalometer — An instrument for the real-time measurement of optical absorption by aerosol particles[J]. Science of the Total Environment, 1984, **36**: 191-196.

[23] Weingartner E, Saathoff H, Schnaiter M, *et al*. Absorption of light by soot particles: determination of the absorption coefficient by means of aethalometers [J]. Journal of Aerosol Science, 2003, **34**(10): 1445-1463.

[24] Sandradewi J, Prévôt A S H, Weingartner E, *et al*. A study of wood burning and traffic aerosols in an Alpine valley using a multi-wavelength Aethalometer[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(1): 101-112.

[25] Ångström A. The parameters of atmospheric turbidity [J]. Tellus, 1964, **16**(1): 64-75.

[26] Harrison R M, Beddows D C S, Jones A M, *et al*. An evaluation of some issues regarding the use of aethalometers to measure woodsmoke concentrations[J]. Atmospheric Environment, 2013, **80**: 540-548.

[27] Olson M R, Garcia M V, Robinson M A, *et al*. Investigation of black and brown carbon multiple-wavelength-dependent light absorption from biomass and fossil fuel combustion source emissions[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2015, **120**(13): 6682-6697.

[28] Gao N, Cheng M D, Hopke P K. Potential source contribution function analysis and source apportionment of sulfur species measured at Rubidoux, CA during the Southern California Air Quality Study, 1987[J]. Analytica Chimica Acta, 1993, **277**(2): 369-380.

[29] Draxler R, Hess G. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system of trajectories, dispersion and deposition [J]. Australian Meteorological Magazine, 1998, **47**: 295-308.

[30] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data[J]. Environmental Modelling & Software, 2009, **24**(8): 938-939.

[31] Zeng Y, Hopke P K. A study of the sources of acid precipitation in Ontario, Canada[J]. Atmospheric Environment (1967), 1989, **23**(7): 1499-1509.

[32] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago[J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(4): 545-562.

[33] 张骁, 汤洁, 武云飞, 等. 2006—2012 年北京及周边地区黑碳气溶胶变化特征[J]. 中国粉体技术, 2015, **21**(4): 24-29, 35.
Zhang X, Tang J, Wu Y F, *et al*. Variations of black carbon aerosol observed in Beijing and surrounding area during 2006—2012[J]. China Powder Science and Technology, 2015, **21**(4): 24-29, 35.

[34] 齐孟姚, 王丽涛, 张城瑜, 等. 邯郸市黑碳气溶胶浓度变化及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(5): 1751-1758.
Qi M Y, Wang L T, Zhang C Y, *et al*. Variation of black carbon aerosol concentration and its influencing factors in Handan City, Hebei Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(5): 1751-1758.

[35] Zhang X L, Rao R Z, Huang Y B, *et al*., Black carbon aerosols in urban central China[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2015, **150**: 3-11.

[36] Peng X, Liu M, Zhang Y, *et al*. The characteristics and local-regional contributions of atmospheric black carbon over urban and suburban locations in Shanghai, China[J]. Environmental Pollution, 2019, **255**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113188.

[37] 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 等. 南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3280-3289.
Xiao S H, Yu X N, Zhu B, *et al*. Characteristics of black carbon aerosol and influencing factors in northern Suburbs of Nanjing[J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3280-3289.

[38] 黄超. 武汉市区黑碳气溶胶分布规律及潜在源区分析[D]. 武汉: 湖北大学, 2018.
Huang C. The distribution law of black carbon aerosol in Wuhan city and analysis of potential source area[D]. Wuhan: Hubei University, 2018.

[39] 陶俊, 朱李华, 韩静磊, 等. 广州城区冬季黑碳气溶胶污染特征及其来源初探[J]. 中国环境监测, 2009, **25**(2): 53-56.
Tao J, Zhu L H, Han J L, *et al*. Study on characteristics of black carbon aerosol pollution and preliminary exploration on its source in Guangzhou urban area during the winter[J]. Environmental Monitoring in China, 2009, **25**(2): 53-56.

[40] 程丁, 吴晟, 吴兑, 等. 深圳市城区和郊区黑碳气溶胶对比研究[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(5): 1653-1662.
Cheng D, Wu C, Wu D, *et al*. Comparative study on the characteristics of black carbon aerosol in urban and suburban areas of Shenzhen[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(5): 1653-1662.

[41] 袁亮, 银燕, 李琦, 等. 亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4052-4060.
Yuan L, Yin Y, Li Q, *et al*. Aerosol concentration variation in nanjing during Asian Youth games and the relationship between aerosol concentration and visibility[J]. Environmental Science, 2014, **35**(11): 4052-4060.

[42] Yu X N, Ma J, Raghavendra Kumar K, *et al*. Measurement and analysis of surface aerosol optical properties over urban Nanjing in the Chinese Yangtze River Delta[J]. Science of the Total Environment, 2016, **542**: 277-291.

[43] 井安康, 朱彬, 丁德平, 等. 中国长江三角洲地区黑碳特征和来源分析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(9): 3585-3594.
Jing A K, Zhu B, Ding D P, *et al*. Characteristics and source apportionment of black carbon in the Yangtze River Delta Region of China[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(9): 3585-3594.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 41 No. 4

Apr. 15, 2020

CONTENTS

$PM_{2.5}$ Inversion Using Remote Sensing Data in Eastern China Based on Deep Learning ····· LIU Lin-yu, ZHANG Yong-jun, LI Yan-sheng, *et al.* (1513)

Regional Air Pollution Process in Winter over the Yangtze River Delta and Its Influence on Typical Northern Cities ····· LI Rui, LI Qing, XU Jian, *et al.* (1520)

Influencing Factors of Ozone Concentration in Xi'an Based on Generalized Additive Models ····· HUANG Xiao-gang, SHAO Tian-jie, ZHAO Jing-bo, *et al.* (1535)

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Levoglucosan and Its Isomers in $PM_{2.5}$ in Beijing and Six Surrounding Cities ····· ZHU Hong-xia, TAO Xue-mei, WANG Chao, *et al.* (1544)

Characteristics and Sources Apportionment of Fine Particulate Matter in a Typical Coastal City During the Heating Period ····· LI Ming-yan, YANG Wen, WEI Min, *et al.* (1550)

Characteristics and Source Apportionment of Black Carbon in Chengdu ····· WANG Lu, YUAN Liang, ZHANG Xiao-ling, *et al.* (1561)

Effects of VOCs on Ozone Formation in the Tianjin Suburbs in Summer ····· YAO Qing, HAN Su-qin, ZHANG Yu-fen, *et al.* (1573)

Source Profiles and Impact of Volatile Organic Compounds in the Coating Manufacturing Industry ····· WU Jian, GAO Song, CHEN Xi, *et al.* (1582)

Characteristics of Condensable Particulate Matter in Ultra-low Emission Coal-Fired Power Plants ····· DENG Jian-guo, WANG Gang, ZHANG Ying, *et al.* (1589)

Distribution and Source Analysis of Nitrate in Surface Waters of China ····· ZHANG Xin, ZHANG Yan, BI Zhi-lei, *et al.* (1594)

Spatial Characteristics and Ecological Risks of Perfluoroalkyl Substances in Coastal Urbanized Areas of China and South Korea ····· YANG Hong-fa, SHI Bin, ZHOU Yun-qiao, *et al.* (1607)

Analysis of Water Quality Change and Its Driving Factors of the Xiaoqing River Estuary in Recent Ten Rears ····· FAN Xin-feng, HAN Mei, WANG Lei, *et al.* (1619)

Distribution of Four Artificial Sweeteners in Water Treatment and Water Supply System in City H of Zhejiang Province ····· MA Xiao-yan, HU Hui, LU Si-jia, *et al.* (1629)

Changes in Epilithic Algae Community and Its Relationship with Environmental Factors in the Meixi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir ····· MI Wen-mei, SHI Jun-qiong, YANG Yan-jun, *et al.* (1636)

Succession Pattern of Phytoplankton and Its Drivers in Lake Luoma, Jiangsu Province ····· ZHANG Qing-ji, WANG Ye-yu, WANG Jin-dong, *et al.* (1648)

Relationship Between Diversity of Aquatic Plant Communities and Water Environmental Factors in Lhalu Wetland ····· WANG Jia-jun, TIAN Han-xin, ZHOU Lei, *et al.* (1657)

Evolution Characteristics and Driving Factors of Denitrification Community Based on Network Analysis in the Process of Spring Thermal Layer Formation in Zhoucun Reservoir ····· ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, *et al.* (1666)

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Difference Analysis of Nitrogen and Phosphorus in Daihai Lake ····· ZHAO Li, CHEN Jun-yi, JIANG Xia, *et al.* (1676)

Sediment Denitrification Rate and Its Response to Exogenous Carbon and Nitrogen in the Ponds and Bottomland of the Chaohu Lakeshore Zone ····· LI Ru-zhong, WANG Li, LIU Chao (1684)

Phosphate Control Effect and Water Body Remediation of Magnesium Modified Reed Biochar ····· DING Yu-qin, LI Da-peng, ZHANG Shuai, *et al.* (1692)

Efficiency of Magnesium Hydroxide Capping and Amendment to Control Phosphorus Release from Sediments ····· YANG Chun-yi, ZHAN Yan-hui, LIN Jian-wei, *et al.* (1700)

Characteristics of Chemical Fractions of Dissolved Organic Matter in Road Runoff in Beijing ····· CHEN Meng-yao, DU Xiao-li, YU Zhen-ya, *et al.* (1709)

3D Porous Photothermal Materials for High Salt Wastewater Treatment ····· HUANG Le, XU Ying-feng, XIE Qian-qing, *et al.* (1716)

Electrocatalytic Oxidation of Sulfadiazine with Ni-Doped Sb-SnO_2 Ceramic Ring Particle Electrode ····· SHI Qiu-jun, LIU An-di, TANG Bo-bin, *et al.* (1725)

Degradation of AO7 with Magnetic Fe_3O_4-CuO Heterogeneous Catalyzed Sodium Percarbonate System ····· XU Jie, WANG Lin, CHEN Jia-bin, *et al.* (1734)

Red Mud-activated Peroxymonosulfate for Ciprofloxacin Degradation: Efficiency and Mechanism ····· SHI Jing-zhuan, WEI Hong, ZHOU Xiao-de, *et al.* (1743)

Influence of Industrial Wastewater Quality on Advanced Treatment of Microbubble Ozonation ····· ZHANG Jing, ZHANG Shou-jing, LIU Chun, *et al.* (1752)

Adsorption Properties of Sludge-hydrochar for Methylene Blue ····· CHEN Li-yuan, LI Da-peng, ZHU Wen-juan, *et al.* (1761)

Preparation of Modified Watermelon Biochar and Its Adsorption Properties for Pb(Ⅱ) ····· BI Jing-wang, SHAN Rui, HAN Jing, *et al.* (1770)

Construction and Denitrification Performance of A^2/O Based on Partial Nitrification Coupled with an ANAMMOX System ····· LIU Xiao-chai, RONG Yi, WEN Li-jie, *et al.* (1779)

Construction and Mechanism of Methanotroph-based Ultimate Denitrification System for Tailwater of Urban Sewage Plants ····· YANG Ya-nan, LI Yan-cheng, LI Jiang, *et al.* (1787)

Impact of Hydraulic Retention Time on Performance of Partial Nitrification Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor ····· WANG Jian-fang, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, *et al.* (1794)

Realization Process of Nitritation and Changes in Sludge Characteristics in Granular Sludge Reactor for Low Strength Sewage Treatment ····· ZHU Lin, CHENG Cheng, SONG Jia-jun, *et al.* (1801)

Characteristics of Organics Transformation and Sludge Morphology in an ABR for Sewage Treatment with Different HRTs ····· CHENG Cheng, ZHU Lin, GUO Kai-cheng, *et al.* (1808)

Effect of Adding Granular Activated Carbon (GAC)/Manganese Dioxide (MnO_2) for the Anaerobic Digestion of Waste Activated Sludge ····· YANG Bo, JIA Li-juan, XU Hui, *et al.* (1816)

Trace Metals Pollution and Health Risks for Planning Area Soils of 193 Chinese Cities ····· LI Kuo, PENG Min, YANG Zheng, *et al.* (1825)

Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust of Lanzhou Schools Based on Random Forests ····· HU Meng-jun, WANG Jia, ZHANG Ya-yun, *et al.* (1838)

Contents, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Soils of Various Functional Zones in Yangzhou City, China ····· YAO Cheng, NI Jin-zhi, LIU Rui, *et al.* (1847)

Safety Assessment of Rice Planting in Soil Cadmium Geological Anomaly Areas in Southwest Guangxi ····· CHEN Tong-bin, PANG Rui, WANG Fo-peng, *et al.* (1855)

Bioavailability and Influencing Factors of Soil Cd in the Major Farming Areas of Chongqing ····· WANG Rui, HU Xiao-lan, ZHANG Yong-wen, *et al.* (1864)

Control of Cadmium Migration and Transformation in Alkaline Paddy Soil-Rice Using Cotton Stalk Biochar ····· LIU Shi-dou, ZHU Xin-ping, HAN Yao-guang, *et al.* (1871)

Reduction of Soil Cadmium Activity and Rice Cadmium Content by 4-year-consecutive Application of Organic Fertilizer ····· XUE Yi, YIN Ze-run, SHENG Hao, *et al.* (1880)

Effects of Nano-magnesium Hydroxide on the Forms of Cadmium in Different Types of Soil ····· DENG Ji-bao, ZHANG Chun-lai, XU Wei-hong (1888)

Selenium Uptake Characteristics of Reclaimed Soil-Crop from Mining Wasteland and Its Antagonistic Effects on Heavy Metals ····· YIN Bing, WANG Jian-fei, SHI Sheng, *et al.* (1904)

Dynamic Effects of Different Biochars on Soil Properties and Crop Yield of Acid Farmland ····· YANG Cai-di, ZONG Yu-tong, LU Sheng-gao (1914)

Effects of Fertilizer Reduction and Application of Organic Fertilizer on Soil Nitrogen and Phosphorus Nutrients and Crop Yield in a Purple Soil Sloping Field ····· ZHU Hao-yu, GAO Ming, LONG Yi, *et al.* (1921)

Response of Nitrogen Loss Flux in Purple Soil Sloping Field to Reduced Fertilizer and Combining Straw ····· XIONG Zi-yi, WANG Zi-fang, LONG Yi, *et al.* (1930)

Effect and Approach of *Enteromorpha prolifera* Biochar to Improve Coastal Saline Soil ····· WU Dan, SUN Ping, LU Peng-zhan, *et al.* (1941)

Vertical Distribution of Soil Dissolved Carbon and Its Influencing Factors in the Artificial Shelterbelt Irrigated with Saline Water in an Extreme Drought Desert ····· MENG Tian-ge, WU Lu-yao, ZHANG Shao-lei, *et al.* (1950)

Response of Soil Enzyme Activity and Chemical Properties to Nitrogen Addition in a Korean Pine Plantation ····· LÜ Lai-xin, SONG Lei, LIU Zhi-li, *et al.* (1960)

Consumption Capacity of N_2O in Paddy Soil and the Response Mechanism of *nosZ-I*-containing Communities ····· GUO Jun-li, TIAN Mei-jie, GE Ti-da, *et al.* (1968)

Predicting the Recycling Potential and Evaluating the Environmental Benefits of Waste Electrical and Electronic Equipment in Beijing-Tianjin-Hebei ····· CHEN Pan, SHI Xiao-qing (1976)

Relationship Between Urban Industrialization and $PM_{2.5}$ Concentration in China and the Internal Mechanism of EKC ····· LI Ya-nan, DING Zhen-min, DENG Yuan-jie, *et al.* (1987)