

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.10
第41卷 第10期

目次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析 方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强 (4345)

基于在线观测的天津市 PM_{2.5} 污染特征及来源解析 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐逸, 杨宁, 郑乃源, 陈魁 (4355)

2017~2018年北京大气 PM_{2.5} 中水溶性无机离子特征 李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4364)

北京南部城区 PM_{2.5} 中碳质组分特征 董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思 (4374)

成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析 冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政 (4382)

南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源 谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟 (4392)

2019年10~12月京津冀及周边“2+26”城市重污染减排效果评估 朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军 (4402)

保定市大气污染变化趋势及特征 苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康 (4413)

郑州市 VOCs 组分排放清单及其臭氧生成潜势 卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢 (4426)

郑州市少数民族运动会期间 O₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估 赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹 (4436)

我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征 柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启 (4446)

典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响 张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂 (4455)

不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及其减排分析 张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰 (4462)

天津市2017年移动源高分辨率排放清单 刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧 (4470)

四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征 徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏 (4482)

抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选 李品, 卫妍妍, 冯兆忠 (4495)

宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征 张军, 梁青芳, 高煜 (4504)

潮汕地区入海河流及水生生物中 PPCPs 分布特征及风险评估 秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会 (4514)

泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析 韩文亮, 刘豫, 冯凯文 (4525)

长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素 江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波 (4539)

沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征 王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波 (4547)

基于 DPeRS 模型的海河流域面源污染潜在风险评估 冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮 (4555)

降水空间异质性和非点源关键源区识别面积变化的影响 高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君 (4564)

硅藻群落指示的近50年来大理西湖湖泊生态系统演变规律 张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满 (4572)

海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征 王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生 (4581)

内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算 王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河 (4590)

透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响 姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇 (4599)

铁铜双金属有机骨架 MIL-101(Fe, Cu) 活化双氧水降解染料性能 梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟 (4607)

纳米 Cu⁰@Fe₃O₄ 活化 PMS 降解对-硝基苯酚的协同反应机制 石清清, 蒲生彦, 杨犀 (4615)

紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制 余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬煜, 杜尔登, 郑璐 (4626)

污水生物处理工艺低温下微生物种群结构 尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏 (4636)

不同 DN 与 PN-ANAMMOX 耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析 陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文焯 (4644)

全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析 齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶 (4653)

不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性 袁强军, 张宏星, 陈芳媛 (4661)

潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应 吴宪, 王蕊, 胡荷, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕 (4669)

不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征 孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏 (4682)

酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响 张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰 (4690)

稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响 陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅 (4701)

解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氮挥发 杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉 (4711)

外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响 霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾纭, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒 (4719)

水稻不同生育期 As 胁迫下 As 累积关键生育期 邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒 (4726)

铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价 周艳, 王金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡 (4733)

浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势 魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军 (4740)

重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析 王锐, 邓海, 严明书, 何忠库, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴 (4749)

重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价 彭秋, 王卫中, 徐卫红 (4757)

《环境科学》征订启事 (4435) 《环境科学》征稿简则 (4445) 信息 (4606, 4625, 4732)

南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源

谢锋^{1,2}, 林煜棋^{1,2}, 宋文怀^{1,2}, 鲍孟盈^{1,2}, 章炎麟^{1,2*}

(1. 南京信息工程大学应用气象学院, 耶鲁大学-南京信息工程大学大气环境中心, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044)

摘要: 黑碳(black carbon, BC)是含碳物质燃烧排放所产生的大气颗粒物(particulate matter, PM)中一种重要组分,其对辐射效应表现为对太阳辐射的吸收和散射,影响着地气系统的能量交换.本研究于2019年1~5月在南京北郊利用黑碳仪 AE33 (aethalometer, magee)测量了黑碳气溶胶浓度数据,对其日夜变化和季节变化进行分析,并筛选出污染天与清洁天,对其特征和来源进行分析.结果显示采样期间黑碳气溶胶的平均浓度为 $(3.8 \pm 2.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,冬季浓度为春季的1.3倍. BC浓度呈现明显的日变化,BC高值出现在日间交通高峰时间段,受到交通排放的影响较大. Ångström指数 α 冬春整体差异不大,春季为1.32冬季为1.30,此结果也指出BC排放源以机动车排放为主.此外,针对采样期间污染天与清洁天的BC来源特征进行分析,发现污染天机动车排放源占比为68%~87%,清洁天为72%~86%,清洁天来源小幅波动但均以机动车排放源为主,污染天相对而言存在一定的机动车源减少生物质和煤炭燃烧源增加的情况,取决于污染时段的排放情况,利用BC/CO(0.005)进一步验证了上述源解析结果.通过PSCF和CWT分析可以得到南京北郊大气BC颗粒物以本地来源为主,但冬季可能存在来自东南地区的机动车排放来源,春季可能存在来自西南地区的生物质及煤炭燃烧来源.总体看来南京北郊黑碳气溶胶分布以冬高春低,并存在明显日夜变化,主要来源为本地的机动车排放为主.

关键词: 黑碳气溶胶; 黑碳仪; 质量吸收效率(Ångström指数); 潜在源贡献函数法(PSCF); 浓度权重轨迹法(CWT); 南京
中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)10-4392-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202001128

Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing

XIE Feng^{1,2}, LIN Yu-chi^{1,2}, SONG Wen-huai^{1,2}, BAO Meng-ying^{1,2}, ZHANG Yan-lin^{1,2*}

(1. Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, International Joint Laboratory on Climate and Environment Change (ILCEC), School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Minister of Education, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Black carbon (BC) is an important component of atmospheric particulate matter (PM) emitted during the combustion process. Light absorption and scattering exhibited by BC affect the exchange of solar energy on Earth. In this study, continuous measurements of atmospheric particulate BC were carried out, using a BC analyzer (AE33) in the suburban area of Nanjing from January 2019 to May 2019, to realize the diurnal variations of BC during the different seasons and potential sources of BC during the clean (CD, $\text{PM}_{2.5} < 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) and haze days (PD, $\text{PM}_{2.5} > 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). The results showed that the average concentration of BC was $(3.8 \pm 2.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; a higher average BC concentration value of $(4.3 \pm 2.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ was observed during the winter, exceeding that during the spring period by a factor of 1.3. The higher BC concentrations during the winter was attributed to the stagnant weather conditions and additional emissions. Significant diurnal cycles of BC were observed with higher BC concentrations during rush hours of traffic, suggesting traffic origins. The Ångström exponent were 1.32 and 1.30 during the spring and winter periods, respectively, indicating that the BC was mainly produced from the traffic emissions during both the seasons. This hypothesis was also supported by the average BC/CO ratio of 0.005, which was similar to that of BC derived by traffic emissions. Moreover, we discovered that the contributions of traffic emissions to BC were 68%-87% and 72%-86% during the haze and clean periods, respectively. This indicated enhanced contributions of coal combustion and biomass burning to BC in Nanjing during the haze events. Finally, using the potential source contribution function (PSCF) and concentration weighted trajectory (CWT) analysis, we highlighted that the BC at the receptor site was mainly from the local emissions in the surrounding areas of Nanjing.

Key words: black carbon aerosol; aethalometer; Ångström exponent; potential source contribution function (PSCF); concentration weighted trajectory (CWT); Nanjing

黑碳(black carbon, BC)是大气气溶胶的重要组成部分之一,主要来自化石燃料燃烧和生物质燃烧排放,是大气污染物的重要组成部分之一^[1].黑碳在 $\text{PM}_{2.5}$ 普遍存在,是雾、霾形成的重要因素之一^[2].黑碳的物理化学性质稳定,很少与大气成分发生反应,但由于其吸附能力强,所以经常吸附其他污染物并

且为其提供大气化学反应的催化条件^[3].此外黑碳

收稿日期: 2020-01-14; 修订日期: 2020-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977305); 江苏省杰出青年基金项目(BK20180040); 江苏省双创团队基金项目

作者简介: 谢锋(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气碳质气溶胶, E-mail: 20181208039@nuist.edu.cn

* 通信作者, E-mail: dryanlinzhang@outlook.com

微粒的直径在 $2.5 \mu\text{m}$ 以下,属于可入肺颗粒物,容易携带被吸附的挥发性有机物(VOCs)和多环芳烃(PAHs)等可致癌物质进入人体,引发多种疾病^[4].而且黑碳本身是诱导体内发生氧化应激,产生活性自由基(ROS),诱发炎症因子分泌和炎症反应的物种,所以其对人体健康有重大影响^[5].黑碳在可见光波段有强吸收性^[6],其本身也是雾、霾过程中导致能见度降低的主要因素^[7],且容易被植物表面吸附而影响植物的生长发育^[8].除了环境影响外,黑碳也是仅次于二氧化碳的重要辐射强迫因子^[9],其表现为对光的正辐射强迫,是造成气候变暖的重要指标之一^[10].在局地,黑碳也会影响大气辐射平衡,造成局部湍流变化规律的变化^[11].所以BC的分布和来源一直是大气气溶胶化学的重要课题.

黑碳气溶胶常用的溯源方法有化学平衡模型法(CMB)、正矩阵分解法(PMF)、放射性碳法和一些专用模型^[12~14].CMB和PMF可以得到较为准确的来源结果,但是其需要有很多气溶胶分析中的化学物质数据才能支撑运算,使用起来较为复杂^[15].而¹³C溯源方法,其分析技术难度较高,而且其仅能区分化石源和非化石源,因此在黑碳来源的分析上难以普及^[16].黑碳仪模型是根据不同排放源的吸光特征进行源解析,只需要有多波段下测量的黑炭数据就可以,但这种方法的解析结果较为单一,能区分的源较少(化石燃料燃烧和生物质燃烧)^[17],所以在对源并没有精细化要求的情况下,黑碳模型是最为简单快捷的.

中国是世界上黑碳主要排放源之一,2016年中国黑碳排放量达 1.8 Tg ,占全球排放量的近四分之一^[10,18].尤其京津冀地区、长三角地区、珠三角地区是黑碳的重要排放区域,3个区域黑碳气溶胶分布特征及来源也是众多科学家们研究的议题^[19~22].南京位于长三角地区,该地污染除了本地排放外,还包括长三角城市群及京津冀远程传输的污染物贡献^[23].陈诚等^[24]对比了2013年苏州和南京的污染发现苏州的黑碳污染较南京更加严重,受到风的影响较重,在静稳污染更重.肖思晗等^[25]通过对南京2015年黑碳观测发现,南京BC含量随着冬、秋、夏、春季递减,日变化呈现双峰型,高值主要出现在07:00~08:00,机动车来源对BC的贡献量会随季节变化但均高于75%.杨晓旻等^[26]则通过对南京2018年不同季节4个月的黑碳进行观测后发现,BC为春、冬、秋、夏递减,日变化依旧呈现双峰型,且风速对BC浓度的影响大于相对湿度对BC的影响.

本研究于2019年1~5月在南京北郊利用黑碳仪对大气黑炭气溶胶进行连续观测,结合大气污染

数据($\text{PM}_{2.5}$ 、CO、 SO_2)和黑碳仪模型探讨本地区黑碳气溶胶污染分布特征及来源,利用潜在源贡献函数法(potential source contribution function, PSCF)^[27]和浓度权重轨迹法(concentration weighted trajectory, CWT)^[28]探索黑炭气溶胶的可能源区,并提取了清洁和污染典型日进行了来源分析.

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究自2019年1月2日至5月31日于南京市利用了黑碳仪(Model AE33, Magee Scientific, USA)进行了5个月的黑碳气溶胶的测量.采样点位于南京北郊南京信息工程大学(NUIST, 32.207°N , 118.717°E ,如图1)7层高的教学楼顶,采样点周围的污染源主要以当地的交通及工业污染为主.



A: 农田; B: 居民区; C 林地; D: 工业区

图1 采样点分布示意

Fig. 1 Map of sampling location

AE33黑碳仪通过滤带上采样点对光产生的光学衰减(ATN)来测量等效黑碳浓度,本研究设定仪器对光学衰减测量频率为60s(即60s一个黑碳数据),以880nm的光衰减来计算黑碳的浓度,其在880nm光源下质量吸收截面(MAC)为 $7.77 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ^[29,30].此外,本研究期间大气CO、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和气象数据均来自于中国环境监测平台实时发布的最近站点(距离采样点10km以内)逐小时数据,用以代表采样点空气质量的的结果.

1.2 黑碳仪测量原理

AE33采用了7个波段的光($\lambda = 370$ 、470、520、590、660、880和950nm)对采集到滤带上的样品进行照射并测量其光衰减系数,其光衰减可以利用下式进行计算:

$$\text{ATN} = 100 \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (1)$$

式中, I_0 和 I 分别为空白滤带和含有气溶胶的滤带的激光强度,ATN为基于比尔朗博定律计算得到的

光衰减. 通过 ATN 可以计算得到滤带上不同波长下
单点采集到的 BC 浓度值 ($\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$):

$$\text{BC} = \frac{S \cdot (\Delta \text{ATN}/100)}{\sigma_{\text{air}} \cdot C \cdot F_{\text{in}} \Delta t} \quad (2)$$

式中, S 为滤纸样品截面积 (m^2), F_{in} 为实时采样流量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$), C 为滤带对光的散射导致的增强因子系数, σ_{air} 为质量吸收截面 ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$).

但是通过单点计算出来的 BC 浓度值会随着滤带上面颗粒物的累积导致测量的结果逐渐不准确^[31], 所以 AE33 通过两个不同流量的点同时计算 BC 后计算负载曲线来矫正 BC 产生的负载效应:

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

式中, $\text{BC}_{\text{measured}}$ 是通过单点计算出来的 BC 浓度, k 为负载矫正系数.

1.3 黑碳仪溯源原理

不同波段的光对 BC 的吸收系数可利用下式表示:

$$b_{\text{abs}}(\lambda) \propto \lambda^{-\alpha} \quad (4)$$

式中, $b_{\text{abs}}(\lambda)$ 为波长 λ 的光对 BC 的光吸收系数, α 为 Ångström 指数^[32]. 颗粒物中不同物质对不同波长光的 Ångström 指数有明显的不同. 当光的波长为 950 nm 时, 除了 BC 外, 气溶胶其他成分的光吸收效应并不明显, 故可以用波长为 950 nm 黑碳的吸收特性对 BC 的浓度值进行定量, 此外, 假设国内 BC 主要的来源为机动车排放和生物质与煤炭燃烧来源^[17], 因此, 在波长 950 nm 处检测到的 BC 来源可利用(7)式表示.

$$b_{\text{abs}}(\text{BC}) = b_{\text{abs}}(\text{BC}_{\text{ff}}) + b_{\text{abs}}(\text{BC}_{\text{bb}}) \quad (5)$$

式中, $b_{\text{abs}}(\text{BC})$ 为 950 nm 处总的光衰减系数, $b_{\text{abs}}(\text{BC}_{\text{ff}})$ 为机动车排放源造成的光衰减, $b_{\text{abs}}(\text{BC}_{\text{bb}})$ 为生物质和煤炭燃烧来源造成的光衰减.

所以机动车排放来源和生物质与煤炭燃烧来源的 Ångström 指数满足式(6)和式(7).

$$\frac{b_{\text{abs}}(470 \text{ nm})_{\text{ff}}}{b_{\text{abs}}(950 \text{ nm})_{\text{ff}}} = \left(\frac{470}{950}\right)^{-\alpha_{\text{ff}}} \quad (6)$$

$$\frac{b_{\text{abs}}(470 \text{ nm})_{\text{bb}}}{b_{\text{abs}}(950 \text{ nm})_{\text{bb}}} = \left(\frac{470}{950}\right)^{-\alpha_{\text{bb}}} \quad (7)$$

式中, α_{ff} 和 α_{bb} 分别为机动车排放来源和生物质与煤炭燃烧来源排放黑碳的 Ångström 指数. 而不同源的 BC 占比都可以通过 950 nm 换算得到:

$$\text{BB}(\%) = \frac{b_{\text{abs}}(950 \text{ nm})_{\text{bb}}}{b_{\text{abs}}(950 \text{ nm})} = \frac{\text{BC}_{\text{biomas}}}{\text{BC}} \quad (8)$$

式中, $b_{\text{abs}}(950 \text{ nm})_{\text{bb}}$ 为生物质燃烧和煤炭来源在 950 nm 所占的光吸收系数.

1.4 PSCF 和 CWT

为了探讨污染物的可能来源区域, 本研究利用 NOAA 建立的 HYSPLIT4 软件计算采样位置 3 598 条 48 h 后向轨迹, 初始高度设定为 500 m. 500 m 高空为边界层中间位置左右, 可以更好地计算边界层内污染物的可能移动路径, 并利用 PSCF 和 CWT 分析采样时间和污染物的潜在源区.

1.4.1 PSCF 原理

PSCF 可以结合污染物浓度和空气质量信息推算特定受体的主要源区和传输途径^[27,33,34], 将研究区域划分成为一定分辨率的网格, 设定污染浓度后便可计算出单个栅格内部污染气团的驻留时间和总驻留时间(该时间以栅格内部点的数量为代表), 其计算公式如下所示:

$$\text{PSCF}_{ij} = \frac{m_{ij}}{n_{ij}} \times W(n_{ij}) \quad (9)$$

式中, m_{ij} 为栅格 (i, j) 内部污染轨迹端点个数, 而 n_{ij} 为栅格 (i, j) 内部所有轨迹端点个数. $W(n_{ij})$ 为权重函数, 主要是用于降低 PSCF 的不确定性. 通常的权重函数是基于 n 的平均值进行计算的, 而此次是通过 Waked 等^[35] 和 Bressi 等^[36] 的研究结果, 利用 $\lg(n+1)$ 进行的权重:

$$W(n_{ij}) = \begin{cases} 1, & \lg(n+1) > 0.85 \times \max[\lg(n+1)] \\ 0.725, & 0.6 \times \max[\lg(n+1)] < \lg(n+1) \leq 0.85 \times \max[\lg(n+1)] \\ 0.475, & 0.35 \times \max[\lg(n+1)] < \lg(n+1) \leq 0.6 \times \max[\lg(n+1)] \\ 0.175, & \lg(n+1) \leq 0.35 \times \max[\lg(n+1)] \end{cases} \quad (10)$$

1.4.2 CWT 原理

由于 PSCF 仅为轨迹占比值, 在 PSCF 值相同浓度不同时网格贡献度大小无法区分, 为了弥补之一问题可以采用 CWT 计算每个网格中权重浓度^[37,38]:

$$C_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^M C_k \cdot \tau_{ijk}}{\sum_{k=1}^M \tau_{ijk}} \cdot W(n_{ij}) \quad (11)$$

式中, C_{ij} 为某栅格内部的浓度权重, C_k 为轨迹 k 经过网格 (i, j) 时候的粒子浓度, τ_{ijk} 是轨迹 k 经过网格 (i, j) 时候的驻留时间(端点个数). $W(n_{ij})$ 为权重函数, 具体与 PSCF 相同.

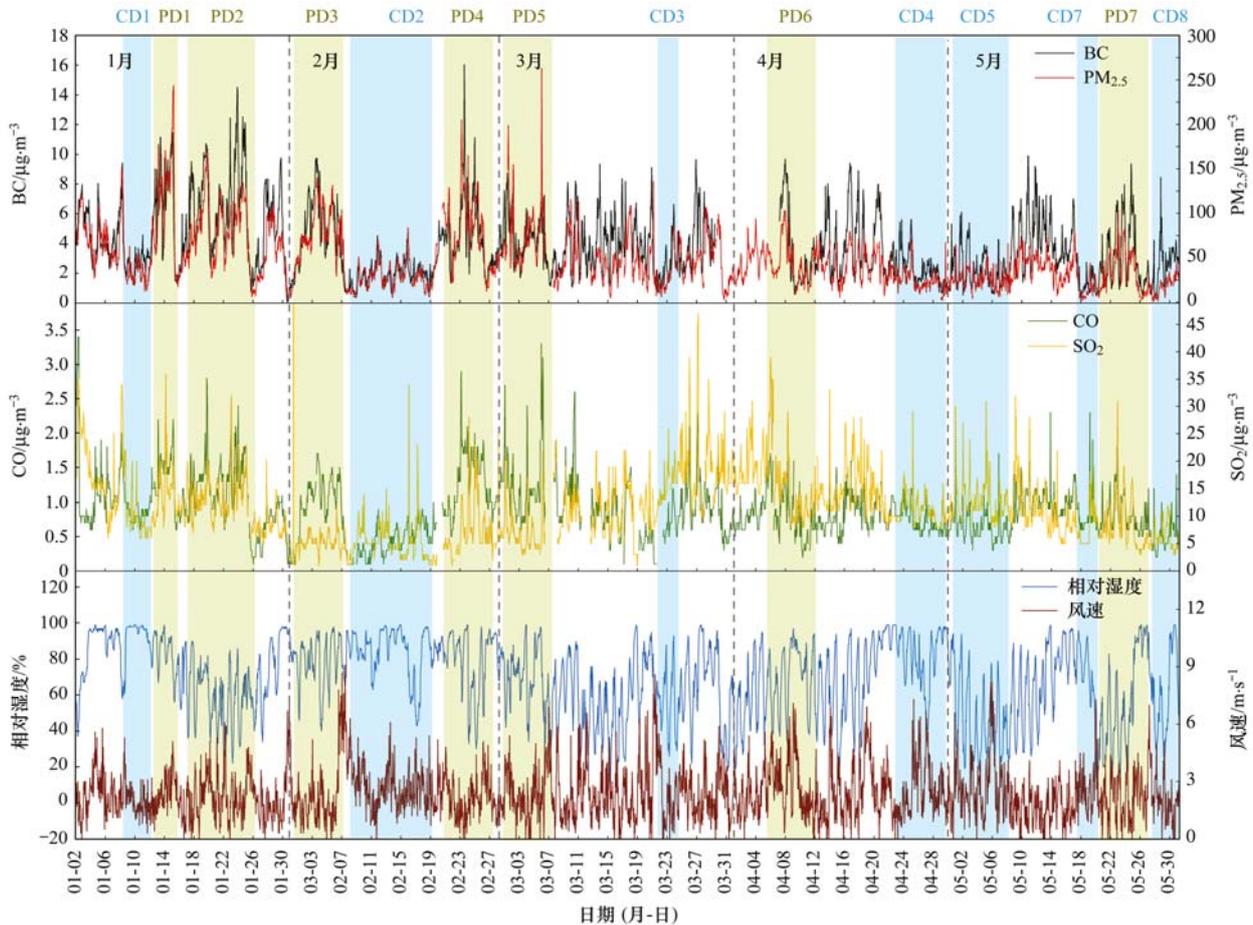
2 结果与讨论

2.1 BC 整体分布

南京北郊黑碳自 2019 年 1 月至 2019 年 5 月整

体分布如图 2 所示, 观测期间本采样点黑碳浓度平均为 $(3.8 \pm 2.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中冬季浓度为 $(4.3 \pm 2.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 春季为 $(3.3 \pm 1.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 冬季 BC

含量普遍较高, 进入春季后 BC 浓度整体而言较春季低. 在 2 月中旬有明显的两次污染过程, 春季则没有这么明显的污染过程. 采样期间 BC 和 CO 存在



CD 为典型清洁日, PD 为典型污染日

图 2 采样期间南京市 BC 浓度时间序列

Fig. 2 Time series of BC concentrations in Nanjing during the sampling period

相似的变化规律, 冬季高春季低, 冬季相对湿度整体大于春季, 风速整体小于春季, 污染物相对扩散能力减弱且冬季人为排放较大导致冬季高春季低. 根据 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度定义: 典型清洁天 (CD, clean days, 连续 2 d 以上 $\text{PM}_{2.5} < 35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的时段) 及典型污染天 (PD, pollution days, 连续 2 d 以上 $\text{PM}_{2.5} > 75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 时段), 整体看来典型污染日过程中, $\text{PM}_{2.5}$ 、CO 和 BC 变化趋势相同, 且污染日期间风速普遍低于清洁日. 清洁日前或中期普遍有 $6 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风, 说明 BC 污染的下降与风速关系密切. 典型日污染来源在 2.4 节中详细探究.

采样期间 BC 与 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性 (R^2) 可以达到 0.8 (如图 3), 且 BC 随 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的上升而增加. 并且 1~2 月分布较为分散, BC 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比较小, 3~5 月数据分布越来越紧密, 且 BC 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比不断增大. 表明冬季 BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染来源可能存在一定的差异.

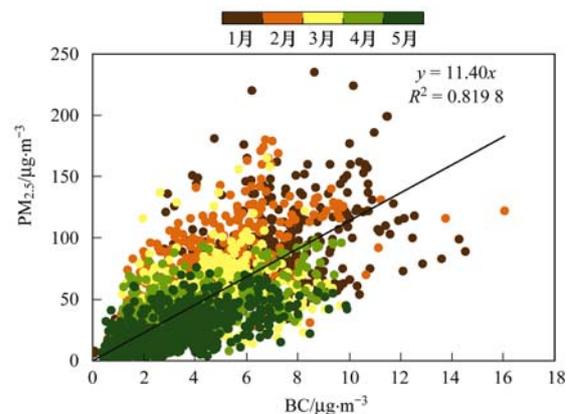


图 3 BC 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的相关性

Fig. 3 Correlation between BC and $\text{PM}_{2.5}$

2.2 BC 日变化

黑碳的日变化与污染源的排放和气象条件的变化有关系, 图 4 为 1~5 月黑碳浓度的日变化情形, 从中可知, 春季与冬季黑碳浓度日变化相似, 黑碳整体浓度呈现夜晚高白天低的趋势, 且早上 07:00 ~

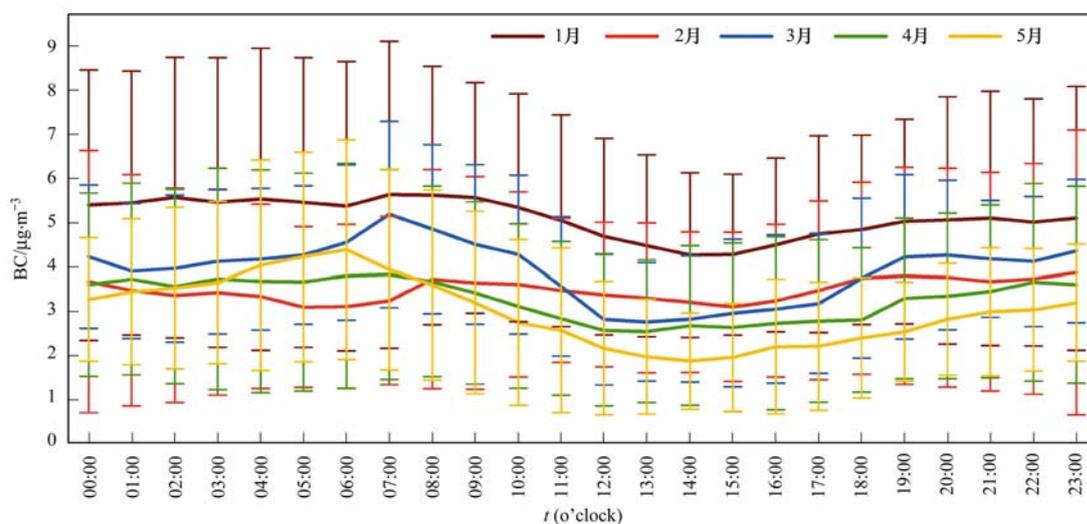


图4 采样期间南京市BC日变化

Fig. 4 Diurnal variations of BC concentrations in Nanjing during the sampling period

08:00 出现了 BC 的一个高峰, 在中午 12:00 ~ 14:00 出现一个低谷. 白天黑碳的高峰出现在交通高峰时间, 因此, 此黑碳浓度增高可能与交通污染源有关, 而中午及下午出现的黑碳低值, 可能与大气边界层高度增加, 大气扩散能力强有关.

2.3 BC 来源变化

黑碳主要来源为化石燃料燃烧, 过去的研究表明可以通过已知的 Ångström 指数来区分黑碳的污染来源. 图 5 为采样期间黑碳消光吸收系数 b_{abs} 值与测量波长之间的关系, 利用指数拟合可以得到 Ångström 的指数, 结果显示 1~5 月, Ångström 指数变化不大, 其值介于 1.22~1.35 之间, 过去研究结果表明, 当 Ångström 指数接近 1 的时候, 黑碳的来源主要为不完全燃烧排放如机动车, 而当 Ångström 指数接近 2 的时候, 生物质燃烧与煤炭燃烧则为大气黑碳气溶胶的主要贡献源, 因此, 从 Ångström 指数指数显示, 南京北郊整体气溶胶污染物来源变化不大, 且以不完全燃烧的机动车源为主.

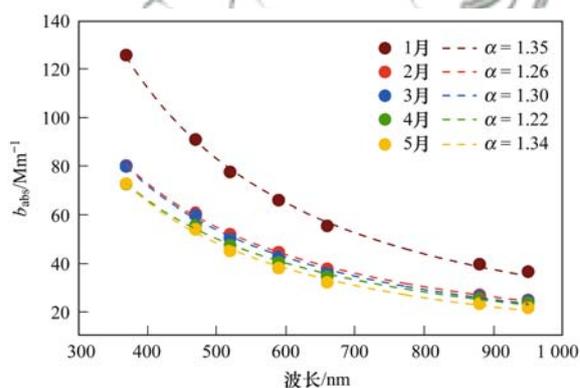


图5 采样期间南京市 Ångström 指数

Fig. 5 Ångström exponent in Nanjing during the sampling period

根据黑碳仪模型, 与机动车来源互补来源为生物质燃烧和煤炭燃烧(BB), 图 6 显示春季和冬季生物质燃烧占比在 10%~40% 之间, 冬季异常值较少, 而春季有明显高于 50% 的异常值, 甚至有些时刻能达到 60% 以上. 结合黑碳结果可以发现, 黑碳冬春均值相差 $1 \mu\text{g}$ 左右, 冬季略高且有明显浮动变化,

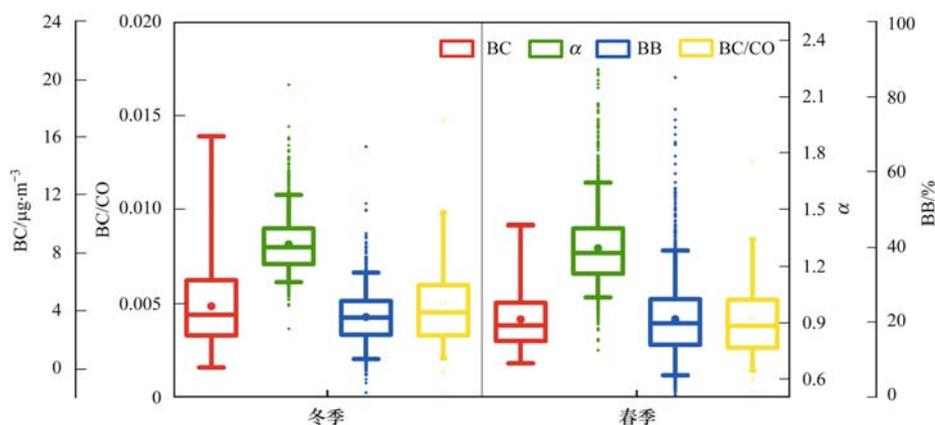


图6 冬春期间南京市BC浓度、BC/CO比值及BB对BC贡献量的盒形图

Fig. 6 Box plots of BC concentration, BC/CO ratios, and the relative contribution of BB to BC in Nanjing during the sampling period

但其来源分布却较为单一, Ångström 指数变化不大, BC/CO 变化不大, BC/CO 为无量纲参数, 可以反映出各个污染阶段主要的污染物来源^[21], 证明一次和二次产生 BC 分布不大. 通过异常值分布可以看出, 春季来源较冬季更为复杂多变.

图 7 表述了采样期间秋季及冬季南京市北郊黑碳浓度、Ångström 指数以及生物质燃烧对黑碳贡献量的日夜变化, 冬季生物质燃烧占比 (BB) 介于 19%~23%, 没有明显的日夜变化, 然而春季出现了明显的日变化趋势, 早上 03:00~10:00 之间 BB 对黑碳的贡献比例有明显的低值, 此期间尤其是 06:00~09:00 为交通早高峰时期, 此 BB 贡献的降低可能与此时段交通污染源贡献量的增加有关, 而且此阶段风速较低, 相对湿度较高, 气象条件处于稳定状态, 有利于 BC 污染物的聚集. 自 10:00 起 BB 对黑

碳的贡献逐渐增加至夜晚 21:00 达到最大, BC 含量也稳定较高, 由于夜晚机动车运行少, 机动车来源占比明显下降, 导致了 BB 的增大. 对应 CO 的日变化也可以看到, 冬季 CO 含量普遍较高, 但是没有明显的日变化, 而春季期间 CO 出现了较为明显的日变化趋势, 在早上 05:00~08:00 出现了最大值. 这也是黑碳含量最高的时间段. 当 CO 含量有明显下降时, BC 也发生了明显的下降, 但通过 BB 分布可知, 这个阶段机动车来源也有所下降, 当夜晚 CO 有所回升时, BC 也持续回升, 但 BB 占比增加, 证明了夜晚出现的生物质及煤炭燃烧情况的存在. 除此之外, 夜晚风速趋于稳定, 大气底层趋于逆温使得 BC 含量增高, 这种情况下 BB 的增高进一步证明了南京夜晚的煤炭和生物质燃烧来源的存在.

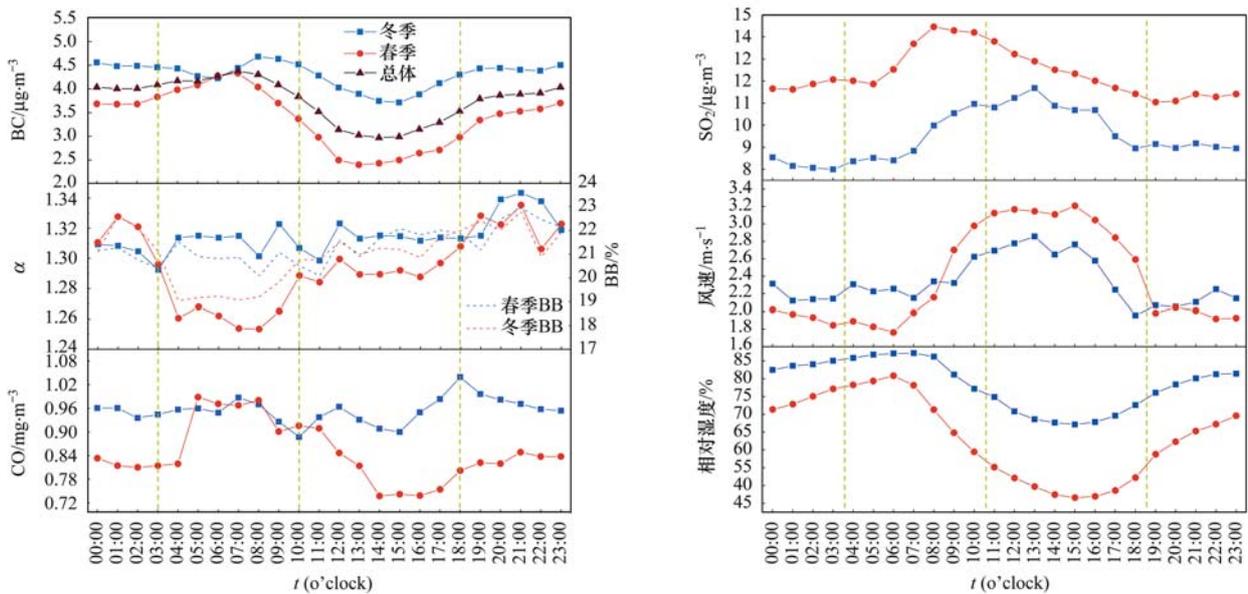


图 7 采样期间黑炭浓度、生物质燃烧贡献量的日夜变化

Fig. 7 Diurnal cycles of BC concentrations and relative contributions of BB to BC mass during the sampling period

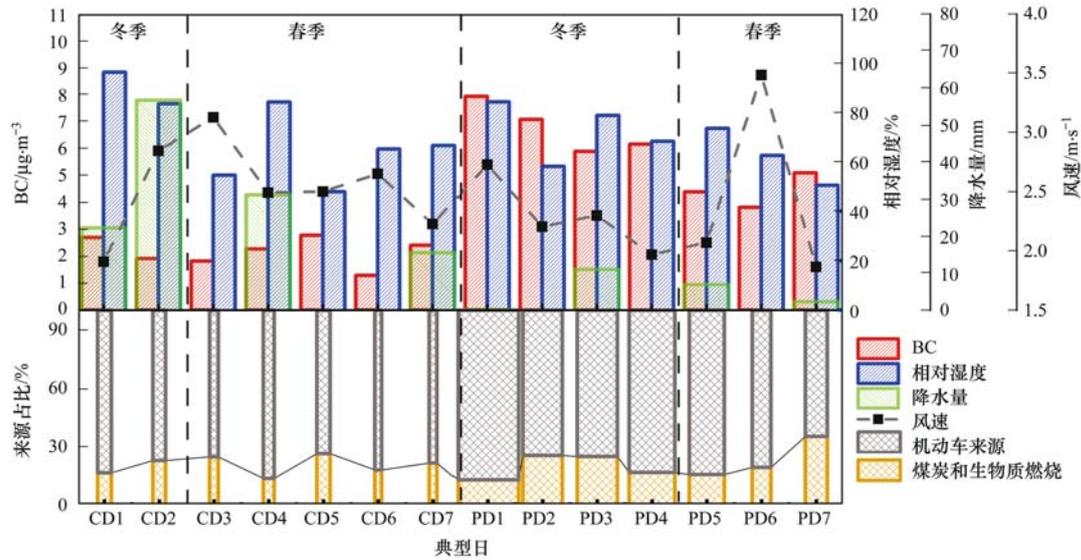
整体而言, 南京北郊冬春季生物质燃烧对黑碳的平均贡献量约为 20%. 由于冬季没有集中供暖, 排放结构不会发生较大的变化, 所以不论是 Ångström 指数的季节对比或是日变化都没有很明显的差异. 春季却出现了明显的日夜变化, 夜晚生物质和煤炭燃烧来源较多, 却在早晨出现了明显的机动车来源增加的现象.

2.4 典型日分析

为了进一步探讨不同 $PM_{2.5}$ 污染程度下, 交通污染源与生物质污染源对黑碳的贡献情况, 本研究针对清洁天和污染天的黑碳浓度和来源进行分析.

采样期间一共挑选出 7 个典型污染天, 7 个典型清洁天, 其中污染日集中在冬季, 清洁日集中在春季. 图 8 展示了不同典型日对应 BC 与气象条件和

来源占比结果, 其中 1 月中旬发生的污染事件 (PD1) 中生物质和煤炭燃烧源仅占 13%, 而交通污染源的贡献则占 87%. 而春节前到春节这一段 (PD2 和 PD3) 产生的 BC 中机动车源占 75% 左右, 春节后大风和连续阴雨天气 (CD2) 对污染物进行了扩散和冲刷, 其中机动车来源占比在 77%, 随即在 2 月末到 3 月初出现了两次连续污染 (PD4 和 PD5), 其机动车来源占比也均上升至 83%~85%. 所以通过对春节前后为分割可以发现, 春节期间机动车源明显下降, 同时 BC 含量也明显下降, 这与中国人节日生活安排有明显关系, 节日期间大多数人放假休息, 机动车源降低. 在气象上看来, PD2、PD3 和 PD4、PD5 湿度和风速变化不大, 而 CD2 有明显的降水和风, PD5 和 CD5 对比可以发现气象条件相似, 可以认为 BC



CD 为典型清洁日,PD 为典型污染日,来源占比的柱宽随 $PM_{2.5}$ 含量变化

图 8 污染天与清洁天交通与生物质和煤炭燃烧对 BC 贡献量

Fig. 8 Relative contributions of traffic emission and coal and biomass burning to BC mass during the CD and PD events

污染天形成主要原因是人为排放,而清洁的主要原因为气象条件.而在 1 月中旬以及 2 月末又能明显发现机动车源发生了增长.典型清洁天主要集中在春季,以 4~5 月为主(CD4、CD5、CD6 和 CD7),整体依旧以机动车来源为主,4 月仅有两个连续过程(PD6 和 CD4),机动车来源占比均在 84%,5 月的清洁天机动车来源占比在 74%~77%,春季唯一的污染过程出现在 5 月末,机动车来源占比下降到了 68%.对比所有的清洁天可以发现,机动车来源占比在 75%左右较多,而污染天占比较为复杂,春节期间为 75%,夏季前夕为 69%,其余以 85%左右居多.综合看来南京北郊以机动车源为主,占 BC 含量的 75%~85%左右,污染天和清洁天分布情况相近,仅有 10%左右的浮动.

为进一步判断影响 BC 含量的主要因素,将 CD1 和 CD2 对比可以发现,相近的湿度条件下,风速越大 BC 含量越小,且机动车来源占比会相对减少,对比 CD4 和 CD5 可以发现,相近风速条件下,降水可以使得 BC 含量降低,但机动车含量占比会增加.但对比 CD6 和 CD7,在相近湿度条件下,风速越小,机动车占比却轻微增大.所以可以认为,BC 污染的减少是受到气象条件限制的,但是来源解析不会受到气象条件影响,气象条件不会针对某个来源 BC 进行限制,BC 来源主要还是受到人为排放的影响.再对比 PD 和 CD 可以发现,PD 与 CD 的相对湿度、降水条件变化不明显,而风速 CD 大多大于 PD,证明风对 BC 污染物污染的扩散效果好于降水对 BC 污染物的冲刷.但对比 PD 和 CD 也能发现,气象对污染的清除是有限的,污染的飙升还是以人为活动为主.

此外通过 BC 与 CO 的比值可以反映出各个污染阶段主要的污染物来源^[21],如表 1 所示,交通和工业区的 BC/CO 在 0.01 以下,主要对应着交通产生的不完全燃烧来源和工业区煤炭燃烧产生的污染,住宅区 BC/CO 的值较高,主要对应住宅区居民生活产生的生物质燃烧来源.则较高的 BC/CO 可以在某种程度上印证来源分析结果.

表 1 不同污染来源排放 BC/CO 比值^[21]

Table 1 BC/CO ratios emitted from different emission sources

来源	BC/CO
工业区	0.007 2
发电厂	0.017 7
住宅区	0.037 1
交通	0.005 2

计算 7 个典型污染天和 7 个典型清洁天的 BC/CO (如图 9),有研究表明^[21],交通来源的 BC/CO 主要来源在 0.005 左右,远远低于生物质燃烧 (BC/CO

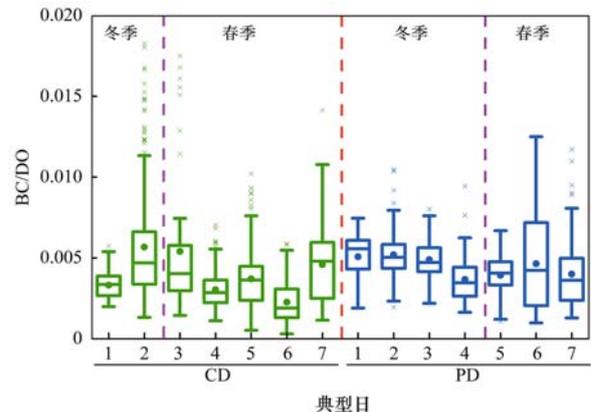


图 9 特征日 BC 与 CO 比值

Fig. 9 Ratios of BC/CO during the CD and PD events

=0.037),也低于煤炭来源的0.007~0.01左右.本研究BC/CO的分布整体在0.005左右,显示以机动车源排放为主.春季整体看来,BC/CO没有明显的差异,比值显示以机动车为主,但也有个别阶段(CD2、CD7和PD6)会出现比值大于0.01的情况,显示此期间BC的来源可能以工业排放为主.CD2和CD7均为典型的连续降水阶段,可能是雨水对BC的冲刷效率的不同导致了数值的轻微变动.从污染阶段来看,春节前后的过程(PD2、PD3和CD2)的BC/CO较其他时期有相对高值,证明该阶段机动车来源确实有明显下降,分布表现为工业区占比增加,尤其是连续降水的CD2时期,比值能达到0.01以上.其

余时期均在0.005以下,证明了南京地区BC污染主要以机动车控制为主.

2.5 PSCF和CWT分析

PSCF和CWT分析可以在空间上对污染物可能来源地进行推断,从图10的PSCF结果分析来看,冬季南京北郊以东、东北、东南向气流为主,黑碳气溶胶主要以南京本地及长三角地区来源为主,而春季气流方向变化较为频繁,但也指出了南京北郊可能的污染物来源为以南京为中心的长三角地区和安徽东部地区,根据火点也可以看到安徽东部的密集火点以及长三角地区火点.南京北郊整体受到京津冀地区的影响很少.

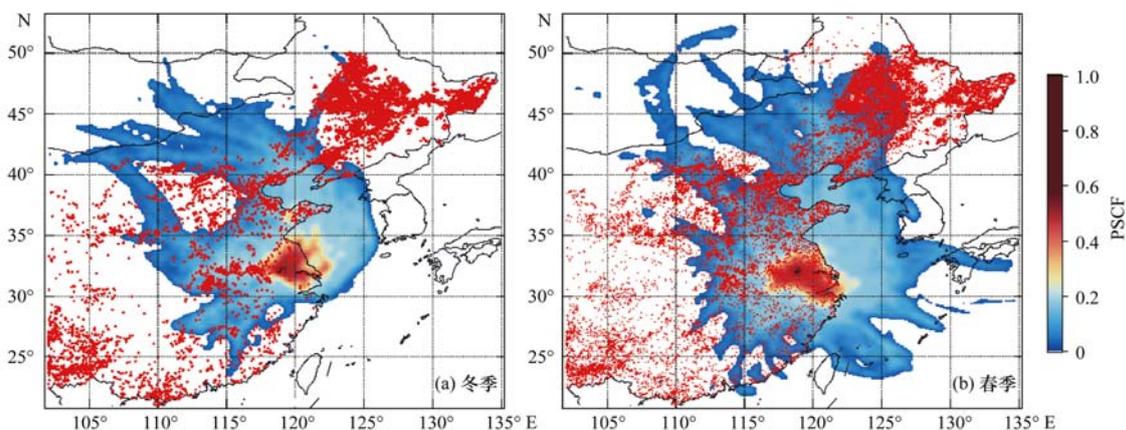


图10 黑碳的PSCF结果

Fig. 10 PSCF results of black carbon

图11为BC的CWT分析结果,不论冬季还是春季,黑碳的污染源依旧是南京本地为主要来源,冬季BC的主要来源为南京及其东南部常州、无锡等市以及福建西北部,浓度可达 $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上.其次有部分来自北边淮安连云港方向可达 $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上.而上海市却并非为明显源地,仅 $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 左右,分布与火点一致,与南京2015年对比CWT热点位置相近,但污染物浓度整体有所下降^[25].春季BC

的主要可能来源为西南部安庆、铜陵等地,可在 $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,其次为常州、湖州、无锡、苏州等地达到 $1.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上.上海依旧在 $1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

而对生物质燃烧和煤炭燃烧占比做CWT可以发现(如图12),在冬季,南京以外地区的生物质和煤炭燃烧对黑碳气溶胶的贡献不到10%,能使得生物质和煤炭燃烧占比达到20%及以上的地区均为距南京50 km左右的本地源排放.春季除了本地可

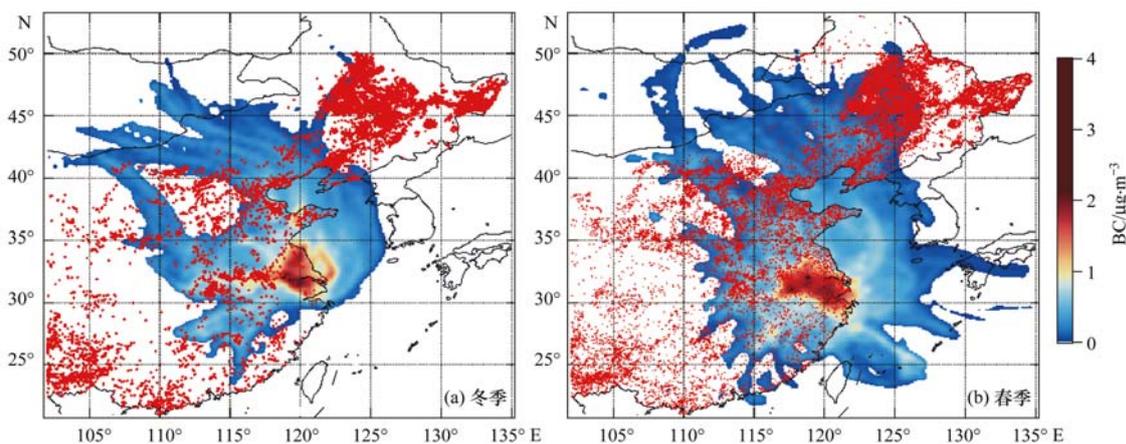


图11 黑碳的CWT结果

Fig. 11 CWT results of black carbon

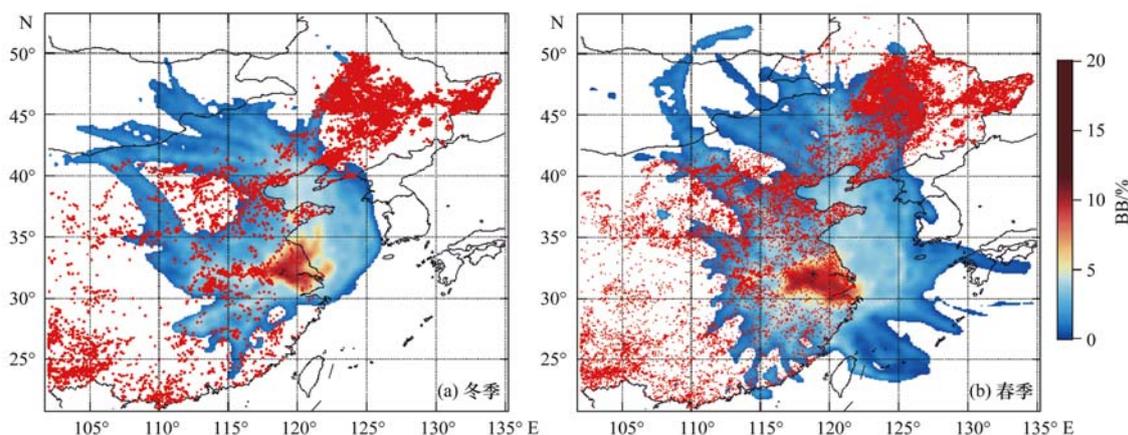


图 12 生物质和煤炭燃烧源占比的 CWT 结果

Fig. 12 CWT results of the proportion of biomass and coal combustion sources to BC

能来源外,西南部位马鞍山、芜湖等地也有较明显的生物质燃烧和煤炭燃烧源,其生物质和煤炭燃烧对黑炭气溶胶贡献可达到 15% 左右。

所以空间上可以发现,不论冬季还是春季,南京北郊黑炭的主要影响为本地源,冬季存在常州无锡等地迁移的机动车排放源,春季存在马鞍山、芜湖等地迁移的生物质燃烧和煤炭燃烧源。

3 结论

(1) 本研究针对南京北郊黑炭气溶胶进行研究,采样期间南京北郊的黑炭浓度平均为 $(3.77 \pm 2.27) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,冬季浓度为 $(4.31 \pm 2.61) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,夏季为 $(3.38 \pm 1.92) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在日夜变化方面,冬春 BC 在交通高峰时间段均出现了高值,显示出了明显的交通影响。整体看来南京北郊主要的污染源为机动车排放,但会随着人为活动的变化发生变化。从日变化来看,早高峰时机动车源占比会增高,而夜间燃煤和生物质燃烧源会增高。

(2) 从污染过程来看,南京黑炭气溶胶来源主要以机动车排放为主,占 80% 左右,2019 春节期间黑炭浓度会下降,主要由于气象条件的影响,而春节前后污染来源的变化受气象条件影响小,而以人类活动为主。且南京北郊黑炭污染的清除过程中风的效果大于降水,但主要的污染物下降来自于人为排放的降低。

(3) 从空间传输看,冬季可能存在来自常州无锡等地的机动车排放源传输,春季存在马鞍山、芜湖等地的生物质和煤炭燃烧源传输。

参考文献:

- [1] Richmond-Bryant J, Saganich C, Bukiewicz L, *et al.* Associations of $\text{PM}_{2.5}$ and black carbon concentrations with traffic, idling, background pollution, and meteorology during school dismissals[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(10): 3357-3364.
- [2] 赵敬德, 亢燕铭. 黑碳气溶胶浓度测量的研究进展[J]. *能源与环境*, 2007, (3): 92-94.
- [3] Janssen N A, Gerlofs-Nijland M E, Lanki T, *et al.* Health effects of black carbon[M]. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe, 2012.
- [4] Janssen N A H, 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 $\text{PM}_{2.5}$ [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2011, **119**(12): 1691-1699.
- [5] Highwood E J, Kinnersley R P. When smoke gets in our eyes: the multiple impacts of atmospheric black carbon on climate, air quality and health [J]. *Environment International*, 2006, **32**(4): 560-566.
- [6] Bond T C, Doherty S J, Fahey D W, *et al.* Bounding the role of black carbon in the climate system: a scientific assessment [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(11): 5380-5552.
- [7] Chung S H, Seinfeld J H. Climate response of direct radiative forcing of anthropogenic black carbon [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2005, **110**(D11): D11102.
- [8] Keiluweit M, Nico P S, Johnson M G, *et al.* Dynamic molecular structure of plant biomass-derived black carbon (biochar) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(4): 1247-1253.
- [9] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(4): 221-227.
- [10] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, *et al.* Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. *Science*, 2002, **297**(5590): 2250-2253.
- [11] Kuhlbusch T A J. Black carbon and the carbon cycle [J]. *Science*, 1998, **280**(5371): 1903-1904.
- [12] Begum B A, Biswas S K, Hopke P K. Source apportionment of air particulate matter by Chemical Mass Balance (CMB) and comparison with Positive Matrix Factorization (PMF) model [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2007, **7**(4): 446-468.
- [13] Cesari D, Donato A, Conte M, *et al.* Inter-comparison of source apportionment of PM_{10} using PMF and CMB in three sites nearby an industrial area in central Italy [J]. *Atmospheric Research*, 2016, **182**: 282-293.
- [14] Feng XJ, Gustafsson Ö, Holmes R M, *et al.* Multimolecular tracers of terrestrial carbon transfer across the pan-arctic: ^{14}C characteristics of sedimentary carbon components and their environmental controls [J]. *Global Biogeochemical Cycles*,

- 2015, **29**(11): 1855-1873.
- [15] Jaekels J M, Bae M S, Schauer J J. Positive Matrix Factorization (PMF) analysis of molecular marker measurements to quantify the sources of organic aerosols [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(16): 5763-5769.
- [16] Liu J W, Li J, Ding P, *et al.* Optimizing isolation protocol of organic carbon and elemental carbon for ^{14}C analysis using fine particulate samples [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **154**: 9-19.
- [17] 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.
- [18] Wang R, Balkanski Y, Boucher O, *et al.* Estimation of global black carbon direct radiative forcing and its uncertainty constrained by observations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, **121**(10): 5948-5971.
- [19] Xue P, Ji D S, An J L, *et al.* Continuous observation of black carbon aerosol during winter in urban Beijing, China [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2018, **11**(6): 491-498.
- [20] Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, *et al.* Black carbon emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(25): 4281-4296.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 张海潇, 郭照冰, 陈善莉, 等. 南京北郊秋冬季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳质组分浓度及同位素组成研究 [J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(9): 3424-3429.
- Zhang H X, Guo Z B, Chen S L, *et al.* Concentration and isotopic composition of carbonaceous components in $\text{PM}_{2.5}$ during winter and summer in the northern suburb of Nanjing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(9): 3424-3429.
- [24] 陈诚, 王晨波, 秦玮, 等. 南京市和苏州市大气黑碳气溶胶污染特征比对研究 [J]. *四川环境*, 2019, **38**(1): 53-59.
- Chen C, Wang C B, Qin W, *et al.* Comparative study on characteristics of black carbon aerosol pollution in Nanjing and Suzhou [J]. *Sichuan Environment*, 2019, **38**(1): 53-59.
- [25] 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 等. 南京北郊黑碳气溶胶的来源解析 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 9-17.
- Xiao S H, Yu X N, Zhu B, *et al.* Source apportionment of black carbon aerosol in the north suburb of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 9-17.
- [26] 杨晓旻, 施双双, 张晨, 等. 南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 [J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 620-629.
- Yang X M, Shi S S, Zhang C, *et al.* Temporal evolution and main influencing factors of black carbon aerosol in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 620-629.
- [27] 王郭臣, 王珏, 信玉洁, 等. 天津 PM_{10} 和 NO_2 输送路径及潜在源区研究 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 3009-3016.
- Wang G C, Wang J, Xin Y J, *et al.* Transportation pathways and potential source areas of PM_{10} and NO_2 in Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12): 3009-3016.
- [28] 李莉, 蔡黎琳, 周敏, 等. 2013 年 12 月中国中东部地区严重灰霾期间上海市颗粒物的输送途径及潜在源区贡献分析 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(7): 2327-2336.
- Li L, Cai J L, Zhou M, *et al.* Potential source contribution analysis of the particulate matters in Shanghai during the heavy haze episode in Eastern and Middle China in December, 2013 [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(7): 2327-2336.
- [29] Davy P M, Tremper A H, Nicolosi E M G, *et al.* Estimating particulate black carbon concentrations using two offline light absorption methods applied to four types of filter media [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **152**: 24-33.
- [30] Rajesh T A, Ramachandran S. Black carbon aerosol mass concentration, absorption and single scattering albedo from single and dual spot aethalometers: radiative implications [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2018, **119**: 77-90.
- [31] Virkkula A, Mäkelä T, Hillamo R, *et al.* A simple procedure for correcting loading effects of aethalometer data [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(10): 1214-1222.
- [32] Sandradewi J, Prévôt A S H, Alfarra M R, *et al.* Comparison of several wood smoke markers and source apportionment methods for wood burning particulate mass [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2008, **8**(2): 8091-8118.
- [33] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. Traj Stat: 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.
- [34] 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.
- [35] Waked A, Favez O, Alleman L Y, *et al.* Source apportionment of PM_{10} in a north-western Europe regional urban background site (Lens, France) using positive matrix factorization and including primary biogenic emissions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(7): 3325-3346.
- [36] Bressi M, Sciare J, Ghersi V, *et al.* Sources and geographical origins of fine aerosols in Paris (France) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(16): 8813-8839.
- [37] 王郭臣, 王东启, 陈振楼. 北京冬季严重污染过程的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征和输送路径及潜在源区 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(7): 1931-1937.
- Wang G C, Wang D Q, Chen Z L. Characteristics and transportation pathways and potential sources of a severe $\text{PM}_{2.5}$ episodes during winter in Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 1391-1397.
- [38] 王爱平, 朱彬, 银燕, 等. 黄山顶夏季气溶胶数浓度特征及其输送潜在源区 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(4): 852-861.
- Wang A P, Zhu B, Yin Y, *et al.* Aerosol number concentration properties and potential sources areas transporting to the top of mountain Huangshan in summer [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(4): 852-861.

CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival	FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, <i>et al.</i> (4345)
Characterization and Source Apportionment of PM _{2.5} Based on the Online Observation in Tianjin	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, <i>et al.</i> (4355)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} in Beijing During 2017-2018	LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4364)
Characteristics of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Southern Beijing	DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, <i>et al.</i> (4374)
Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter	FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, <i>et al.</i> (4382)
Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing	XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, <i>et al.</i> (4392)
Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area(“2+26” Cities) from October to December 2019	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, <i>et al.</i> (4402)
Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City	GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, <i>et al.</i> (4413)
Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential	LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)
Evolution and Evaluation of O ₃ and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period	ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, <i>et al.</i> (4436)
Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China	KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, <i>et al.</i> (4446)
Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers	ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, <i>et al.</i> (4455)
Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction	ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, <i>et al.</i> (4462)
Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017	LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, <i>et al.</i> (4470)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (4482)
Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution	LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)
Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City	ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea	XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (4514)
Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)
Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River	JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, <i>et al.</i> (4539)
Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin	WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4547)
Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPERS Model	FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, <i>et al.</i> (4555)
Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution	GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, <i>et al.</i> (4564)
Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years	ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, <i>et al.</i> (4572)
Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone	WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, <i>et al.</i> (4581)
Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia	WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (4590)
Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment	JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, <i>et al.</i> (4599)
Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101(Fe, Cu) Toward H ₂ O ₂ for Degradation of Dyes	LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, <i>et al.</i> (4607)
Synergistic Reaction Mechanism of Cu ⁰ @Fe ₃ O ₄ Activated PMS for Degradation of <i>p</i> -nitrophenol	SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)
Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process	YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, <i>et al.</i> (4626)
Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter	SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, <i>et al.</i> (4636)
Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment	LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (4644)
Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge	QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4653)
Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio	YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)
Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvo-aquic Soil	WU Xian, WANG Rui, HU He, <i>et al.</i> (4669)
Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns	SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, <i>et al.</i> (4682)
Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province	ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, <i>et al.</i> (4690)
Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields	CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, <i>et al.</i> (4701)
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i> Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization	YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, <i>et al.</i> (4711)
Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress	HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4719)
Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages	DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (4726)
Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area	ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, <i>et al.</i> (4733)
Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend	WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, <i>et al.</i> (4740)
Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing	WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, <i>et al.</i> (4749)
Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing	PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)