

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第1期

Vol.38 No.1

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京北郊冬季挥发性有机物来源解析及苯系物健康评估 张玉欣,安俊琳,林旭,王俊秀,师远哲,刘静达(1)
南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布 蒋磊,汤莉莉,潘良宝,刘丹彤,花艳,张运江,周宏仓,崔玉航(13)
基于 GAM 模型分析影响因素交互作用对 PM_{2.5} 浓度变化的影响 贺祥,林振山(22)
模拟烹饪油烟的粒径分布与扩散 李双德,徐俊波,莫胜鹏,李文辉,高佳佳,曹亚裙,陈运法(33)
基于光谱分析仪的通量-梯度法测量小型池塘水-气界面温室气体交换通量 张维,唐翔宇,鲜青松(41)
闽江口短叶茳茅 + 芦苇沼泽湿地大、小潮日土壤间隙水溶解性 CH₄ 与 CO₂ 浓度日动态 谭立山,杨平,何雨露,黄佳芳,胡智强,全川(52)
河南鸡冠洞 CO₂ 季节和昼夜变化特征及影响因子比较 张萍,杨琰,孙喆,梁沙,张娜,田宁,李建仓,凌新有,张志钦(60)
蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质(FDOM)荧光光谱特征 陈俊伊,王书航,姜霞,黄晓峰,赵丽(70)
滇池沉积物有机质沉积特征与来源解析 韩秀秀,黄晓虎,余丽燕,杨浩,黄昌春,黄涛,余艳红,罗玉(78)
紫色土小流域浅层井水中胶体颗粒的季节变化 张维,唐翔宇,鲜青松(87)
太湖湖滨带春季悬浮物沉降特征与水体营养盐响应 祁闯,王国祥,吴馨婷,许晓光,韩睿明,吴松峻(95)
基于 LDI 的土地利用类型与湿地水质的相关性:以苏州太湖三山岛国家湿地公园为例 杨朝辉,苏群,陈志辉,白俊武,钱新强,张志敏(104)
基于分位数回归的洱海藻类对氮、磷及水质的响应特征 陈小华,李小平,钱晓雍,胡双庆(113)
深水型水库藻类生态功能组(MBFG)的季节演替特征 杨毓,卢金锁,张颖(121)
三峡库区水体中可溶性 C、N 变化及影响因素 范志伟,郝庆菊,黄哲,柴雪思,江长胜(129)
三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征 华玲玲,李文超,翟丽梅,崔超,刘宏斌,任天志,张富林,雷秋良(138)
黄土高原坝系流域干湿季交替下氮输出特征及其源解析:以羊圈沟为例 贾璐杰,高扬,陈维梁,郝卓,汪亚峰,陈利顶(147)
5 种沉水植物的氮、磷吸收和水质净化能力比较 金树权,周金波,包薇红,陈君,李丹丹,李洋(156)
骆马湖表层水体中 32 种 PPCPs 类物质的污染水平、分布特征及风险评估 张芹,张圣虎,汪贞,郭敏,刘济宁,石利利,古文(162)
大冶湖表层沉积物-水中多环芳烃的分布、来源及风险评价 张家泉,胡天鹏,邢新丽,郑煌,张丽,占长林,刘红霞,肖文胜,祁士华(170)
pH 和络合剂对五价砷在水钠锰矿和水铁矿表面吸附行为的影响 王华伟,李晓月,李卫华,孙英杰(180)
紫外辐射对高岭土混凝过程的影响机制 王文东,王昌鑫,刘荟,韩雨(188)
水环境中溶解态腐殖酸对锌抗甲状腺激素干扰效应的影响 艾扬,孔东东,于畅,沈扬,李剑(195)
污水中常见违禁药物分析方法优化及验证 高婷婷,杜鹏,徐泽琼,杨军,张华方,李喜青(201)
阴极电场增强活性炭纤维-臭氧体系去除水中硝基苯 赵纯,张帅,周宇,李琨,周炜,黎鹏宇,杨广,孙志华,郑怀礼(212)
碳纳米管改性 PVDF 中空纤维超滤膜处理二级出水抗污染性能研究 王利颖,石洁,王凯伦,关羽琪,郭瑾(220)
曝气生物滤池(Fe²⁺)-臭氧组合工艺强化处理石化二级出水 徐敏,吴昌永,周岳溪,郭明昆,王翼(229)
4 种反应器中厌氧氨氧化菌完整烷烃的特异性 王晗,方芳,李凯,邢晖,郭劲松,陈猷鹏,曾前松(238)
疏自养填充床反应器降解水中高浓度高氯酸盐的特性及菌群分析 张超,陶华强,宋圆圆,逯彩彩,郭延凯,廉静,郭建博(247)
CANON 在 SBAF 中的快速启动及其微生物特征 刘竹寒,岳秀,于广平,金腊华,唐嘉丽,吉世明(253)
高浓度游离氨冲击负荷对生物硝化的影响机制 季民,刘灵婕,翟洪艳,刘京,苏晓(260)
有机物对亚硝化颗粒污泥中功能菌活性的影响 王书永,钱飞跃,王建芳,沈耀良(269)
一种新型生物膜法除磷工艺中聚磷菌的富集培养过程 郑莹,潘杨,周晓华,廖旭弘,孟璇,夏健伟(276)
应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制:基于增强回归树分析 吴雁雯,张金池,郭晓平,刘鑫(283)
镉对铜绿假单胞菌降解水体中壬基酚的影响 史广宇,程媛媛,施维林(294)
华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响 石小霞,赵诣,张琳,吴文良,孟凡乔(301)
缙云山柑橘林土壤微生物磷脂脂肪酸(PLFAs)及酶活性的季节变化特征 李南洁,曾清苹,何丙辉,周飞(309)
中条山十八河铜尾矿库微生物群落组成与环境适应性 刘晋仙,李鑫,景炬辉,贾彤,刘兴港,王小云,柴宝峰(318)
安徽省部分城市土壤中全氟化合物空间分布及来源解析 李法松,倪卉,黄涵宇,徐志兵,张倩,李长霞,黄文秀,金陶胜(327)
不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响:对土壤活性有机碳的影响 赵世翔,于小玲,李忠徽,杨艳,刘丹,王旭东,张阿凤(333)
水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响 田桃,曾敏,周航,徐璐,杨文骏,辜娇峰,邹佳玲,张平,彭佩钦,廖柏寒(343)
苾、镉单一及复合污染胁迫下土壤生态功能稳定性的影响机制 陈欣瑶,杨惠子,李敏,牛晓丛,苏雨轩,张园(352)
生物炭、蒙脱石及其混合添加对复合污染土壤中重金属形态的影响 高瑞丽,唐茂,付庆立,郭光光,李响,胡红青(361)
某电镀厂六价铬污染土壤还原稳定化试剂筛选与过程监测 李培中,吕晓健,王海见,杨苏才,魏文侠,宋云(368)
多孔 SBA-15 颗粒对 Cd(II) 的吸附缝合及其对土壤 Cd(II) 的修复潜力 黄辉,宁西翠,郭瞻宇,郭堤,张增强,李荣华,王力,Ali Amjad(374)
卤系阻燃剂在东江水体中的生物富集 何明靖,杨婷,李琦,王登祥,赵佳渊(382)
广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价 陈志良,黄玲,周存宇,钟松雄,王欣,戴玉,蒋晓璐(389)
蔬菜镉(Cd)富集因子变化特征及其影响因素 杨阳,李艳玲,陈卫平,王美娥,彭驰(399)
施用污泥堆肥品对土壤和植物总汞及甲基汞的影响 余亚伟,杨雨洽,张成,易建婷,安思危,王定勇(405)
大气臭氧污染对冬小麦气孔吸收通量的影响机制及其时空格局 赵辉,郑有飞,曹嘉晨,徐静馨,黄积庆,袁月(412)
《环境科学》征稿简则(12) 《环境科学》征订启事(194) 信息(21, 51)

南京冬季重污染过程中黑碳气溶胶的混合态及粒径分布

蒋磊¹, 汤莉莉^{1,2*}, 潘良宝^{1,2}, 刘丹彤³, 花艳¹, 张运江¹, 周宏仓¹, 崔玉航¹

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 江苏省环境监测中心, 南京 210036; 3. Centre for Atmospheric Science, School of Earth, Atmospheric and Environmental Sciences, University of Manchester, Manchester M139PL, UK)

摘要: 2013 年 12 月, 我国中东部地区暴发持续性重污染过程. 本研究利用单颗粒黑碳光度计 (SP2), 分析这次过程中黑碳气溶胶 (BC) 的质量浓度、混合态以及粒径分布特征. 结果表明, 观测期间南京 BC 质量浓度在 $1.01 \sim 14.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间, 平均为 $4.39 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 污染较重时呈现夜间高白天低的日变化特征, 污染较轻时则为早晚双峰型; 用相对包裹层厚度 (D_p/D_c) 表示 BC 混合态特征, 污染较轻时日变化为凌晨及午后较高, 早晚出行高峰期较低, 说明在凌晨及午后 BC 的老化程度较深, 早晚机动车排放高峰时段 BC 多为近地源排放的新鲜粒子. 污染较重时 D_p/D_c 日变化相对平缓, 区域性污染特征更为明显并在高相对湿度下体现出气-固转化的过程; BC 质量和数谱的粒径分布均为单峰型, 数谱峰值粒径在污染较轻时分布在 91 nm 左右, 污染较重时为 100 nm, 不同污染程度下质量谱峰值粒径均为 210 nm, 通过对比全球范围的观测结果可以体现出 BC 一次源的区域性差异. 本研究对深入认识长三角地区大气 BC 污染特征, 具有重要的参考价值.

关键词: 黑碳; 南京; 单颗粒黑碳光度计 (SP2); 混合态; 粒径分布

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)01-0013-09 DOI: 10.13227/j.hjxk.201605167

Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event

JIANG Lei¹, TANG Li-li^{1,2*}, PAN Liang-bao^{1,2}, LIU Dan-tong³, HUA Yan¹, ZHANG Yun-jiang¹, ZHOU Hong-cang¹, CUI Yu-hang¹

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology (CICAEET), School of Environmental Science and Engineering, University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Environmental Monitoring Center, Nanjing 210036, China; 3. Centre for Atmospheric Science, School of Earth, Atmospheric and Environmental Sciences, University of Manchester, Manchester M139PL, UK)

Abstract: In December 2013, a lasting haze pollution event occurred in the Central and East regions of China. Here in this paper, using a single-particle soot photometer (SP2), we studied mass concentrations, mixing states, and size distributions of black carbon (BC) in this event. The results showed that BC mass concentration in Nanjing during the observation period was in the range of $1.01 \sim 14.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ with an average of $4.39 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, showing the characteristics of double peaks for lighter pollution, and high in the nighttime and low in the daytime during heavier pollution. Using the relative coating thickness (D_p/D_c) to define mixing state of black carbon, diurnal variations were higher in early morning and noon when slightly polluted, and lower during rush hour, indicating the degree of BC ageing was deeper in the morning and afternoon, with fresher particles near the ground source emissions during rush hour. The relative coating thickness did not vary greatly throughout the day when heavily polluted, which was expected to be linked to regional pollutants and it also showed Gas-solid transformation under high relative humidity. The average mass and number size distribution had single peaking with the same BC volume-equivalent diameter in different degrees of pollution, with the peak diameter at 100 nm for the number distribution when heavily polluted, at 91 nm when slightly polluted, and at 210 nm for the mass distribution regardless of the degree of pollution. We could find regional differences of BC sources by comparing the observed research worldwide. This study has very important reference value for the in-depth understanding of BC pollution in Yangtze River Delta.

Key words: black carbon; Nanjing; single particle soot photometer (SP2); mixing state; size distribution

黑碳 (black carbon, BC) 气溶胶是大气细粒子的重要组成部分, 粒径一般分布在 $0.01 \sim 1.0 \mu\text{m}$ 之间, 由于其显著的气候效应^[1] 和对人类健康的危害^[2] 而成为研究热点. BC 是气溶胶中主要吸光物质, 同时也是导致大气能见度降低和灰霾天气重要因素之一^[3]. 其表面结构疏松多孔, 易吸附硫酸盐、硝酸盐等其他化学组分, 为污染物二次反应提供场所, 从

而导致颗粒物的物理化学性质发生变化^[4]. BC 主

收稿日期: 2016-05-16; 修订日期: 2016-08-06

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目 (D0512/91544231); 江苏省环保科研课题项目 (2015017); 江苏省基础研究计划 (自然科学基金) 项目 (BK2012884); 江苏省环境监测科研基金项目 (1016)

作者简介: 蒋磊 (1993 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为黑碳气溶胶. E-mail: jianglei1836209@163.com

* 通信作者, E-mail: lily3258@163.com

要来自于自然源和人为源^[5],前者主要来自火山爆发、森林大火、土壤扬尘等;而人为源主要由化石燃料和生物质燃烧产生,相较于自然源,人为源具有长期性和持续性^[6],是城市大气 BC 的主要来源。

国际上对 BC 研究较早,20 世纪 70 年代,美国科学家开始对 BC 进行系统测量,90 年代在亚洲 (ACE-Asia)^[7]、北美 (RACE)、大洋洲 (ACE-I)、欧洲和非洲地区 (ACE-II) 的多次大规模实验,都将 BC 列为重点观测项目^[8]。BC 可以在中低空直接吸收太阳辐射加热大气,并且产生的加热效果有可能抵消矿物气溶胶及硫酸盐气溶胶的冷却效果^[5], Jacobson^[9] 通过研究发现 BC 已经超越 CH₄,对全球变暖的贡献仅次于二氧化碳。多年来科学家对 BC 的浓度变化^[10]、气候效应^[11]、光学性质^[12]、混合状态^[13]、老化过程^[14] 等展开了一定的研究,并逐渐成为热点。国内对 BC 的研究相对较晚,20 世纪 80 年代开始对北京冬季供暖产生的 BC 进行连续监测^[5],90 年代初,浙江临安和青海瓦里关建立了区域和全球本底站^[15]。随着经济的快速发展和城市化的进程,我国 BC 减排形势日益严峻,研究表明中国的黑碳排放量占到全球的 30%^[8]。通过北京及周边地区从 1997 ~ 2001 年的连续观测^[16],发现由于供暖烧煤秋冬季 BC 平均浓度高达 22.37 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。张靖等^[17] 通过对 BC 的辐射强迫以及气候效应进行敏感性实验,发现 BC 浓度的上升是造成我国夏季南涝北旱的重要影响因素。实验室观测及模式研究^[18,19] 均表明,BC 表面包裹其他物质后光吸收作用会显著增强,进而影响其辐射强迫作用。此外,BC 颗粒表面吸附的硫酸盐等非难溶组分,可使 BC 颗粒由原来的疏水性变为亲水性,从而影响 BC 颗粒的寿命。目前全国主要城市都陆续开展对 BC 理化特征等相关研究,但观测对象主要是气溶胶整体,鲜有对 BC 单颗粒性质(如粒径分布和混合态)的连续观测研究。本研究采用美国 DMT (Droplet Measurement Technologies, CO., USA) 公司开发的单颗粒黑碳光度计 (single particle soot photometer, SP2) 对南京冬季重污染过程中的 BC 进行连续监测,获得了 BC 浓度特征,深入分析 BC 的混合态及粒径分布,以期为深入研究长三角地区 BC 的污染特征提供了理论依据和数据基础。

1 材料与方法

1.1 观测地点

长三角是中国重要的经济区,也是 BC 污染最

为严重的地区之一。南京地处长三角西部,如图 1 所示,是拥有近千万人口的省会,也是长三角的核心城市,石油化工、钢铁等传统重工业规模较大,周边森林覆盖率较低,沿江城市群较为集中。本研究的观测地点设置于南京市鼓楼区凤凰西街。仪器置于江苏省环境监测中心院内六楼,垂直距地面约 18 m。周边环境以居民区、餐饮、办公楼和交通干道等为主,属于典型的生活、商业、办公和交通的混合区域,代表着城市所具有的基本环境特征。观测时间从 2013 年 12 月 4 日至 2013 年 12 月 19 日。

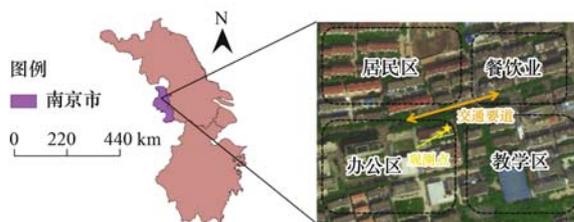


图 1 观测点示意

Fig. 1 Sampling site of Nanjing

1.2 SP2 工作原理

SP2 是根据 BC 在红外波段的吸光性,利用钕 (Nd) 激光器发出波长为 1024 nm 的连续激光束逐个加热气溶胶粒子。当颗粒物垂直通过激光束时,此波段只有 BC 粒子可以被加热产生激光诱导燃烧 (laser induced incandescence, LII),产生白炽信号,其他颗粒物只产生对光的散射作用而发出散射信号。气溶胶粒子产生的散射信号和白炽信号由 4 个不同的光检测器进行捕获^[20],BC 的质量与燃烧产生的光强成正比,因此可由白炽信号的峰值得 BC 质量^[21]。当 BC 独立于其他组分存在,散射光同时被加热,散射信号与白炽信号几乎同时出现,而当 BC 在空气中停留包裹其他颗粒物后,首先把热量传递给表面的组分,此时只能产生散射信号,待其表面组分气化后,BC 才能被加热燃烧产生白炽信号。所以,可以利用 BC 所产生的散射信号和白炽信号的位置关系来判断 BC 的混合态^[20]。

实际环境中 BC 以链状结构存在,在计算时需要将其等效成球型结构,再根据 Mie 理论 (The Mie Theory) 来计算等效直径。当 BC 粒子刚从污染源排放出来,此时由碳元素组成,相对于空气中的其他组分独立存在,这种 BC 存在方式称为外混态 BC,以外混态存在的 BC 粒径称为 BC 的核直径 (the black carbon core diameter),计为 (D_c)^[22]。随着 BC 在空气中老化过程的进行,BC 颗粒表面不断附着硫

酸盐、硝酸盐等其他组分, BC 的粒径不断增大, 以这种方式存在的 BC 称为内混态 BC, 此时的 BC 粒径称为 BC 实际直径 (the entire particle diameter), 计为 (D_p) 如图 2 所示. BC 的混合状态可以用相对包裹层厚度 (D_p/D_c) 来表示^[23]. 计算方法如下, 式中 i 代表单个 BC 粒子.

$$\frac{D_p}{D_c} = \left(\frac{\sum_i D_p^3, i^{\frac{1}{3}}}{\sum_i D_c^3, i} \right)^{\frac{1}{3}}$$

D_p/D_c 越大, 相对包裹层厚度越厚, BC 的老化程度越深, D_p/D_c 越小, 相对包裹层厚度越薄, 此时大气中的 BC 粒子较为新鲜^[23].

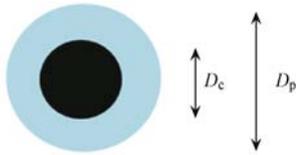


图 2 BC 颗粒的等效模型
Fig. 2 Equivalent Model of BC particles

SP2 的宽波段检测器对单颗粒 BC 质量的检测范围为 $0.2 \sim 67 \text{ fg} \cdot \text{颗粒}^{-1}$, 对应的 BC 体积等效直径为 $67 \sim 305 \text{ nm}$; 窄波段检测器对单颗粒 BC 质量的检测范围为 $0.6 \sim 130 \text{ fg} \cdot \text{颗粒}^{-1}$, 对应的 BC 体积等效直径为 $82 \sim 550 \text{ nm}$, 覆盖了环境大气中绝大部分 BC 粒子. 采样流量设为 $60 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. 使用胶体石墨 (Aquadag) 对 SP2 进行校准, 利用气溶胶发生器产生 BC 粒子, 使其通过一台差分迁移率分析仪 (DMA), 调节电压来获得 $80 \sim 500 \text{ nm}$ 内约一万个

BC 粒子数据, 各粒径粒子对应的宽通道光信号峰值高度与粒子质量建立函数关系进行校准^[24].

1.3 其他仪器及资料来源

同时段应用 NO-NO₂-NO_x 分析仪 (Model 42i, 美国 Thermo 公司) 通过化学发光法监测氮氧化物 (NO_x) 浓度, 采样流量为 $650 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 时间分辨率 10 s ; 应用 CO 分析仪 (Model 48i, 美国 Thermo 公司) 监测一氧化碳 (CO) 浓度, 采样流量为 $750 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 时间分辨率 1 s . 同一观测点使用 AE-31 型黑碳测量仪 (aethalometer, AE, 美国 Magee 公司) 同时测量, 验证观测结果的准确性. 所有气象资料均来自于南京信息工程大学气象台. 日均空气质量指数 (AQI) 数据来自江苏省环保厅官网 (<http://www.jshb.gov.cn/jshbw/index.html>). 后期分析中 BC 数据、在线气体数据及气象数据统一处理为 1 h 分辨率.

2 结果与讨论

2.1 黑碳的浓度特征

2.1.1 时间序列

图 3 给出了 SP2 和 AE-31 以及 PM₁、PM_{2.5} 观测结果的对比, 图 3 (a) 所示两台仪器测量值的相关系数 $r^2 = 0.93$. 通过对比全时段的数据发现在 BC 浓度较高时, AE 的测定值高于 SP2 的结果, BC 浓度较低, 二者偏差很小. 这是因为虽然两台仪器都是利用 BC 的光学性质进行测量, 但 AE 的光衰减系数 (σ_{ATN}) 并非恒值, 而是与 BC 的浓度变化保持一致, 导致在 BC 浓度较高时测定的结果偏高^[25]. 由

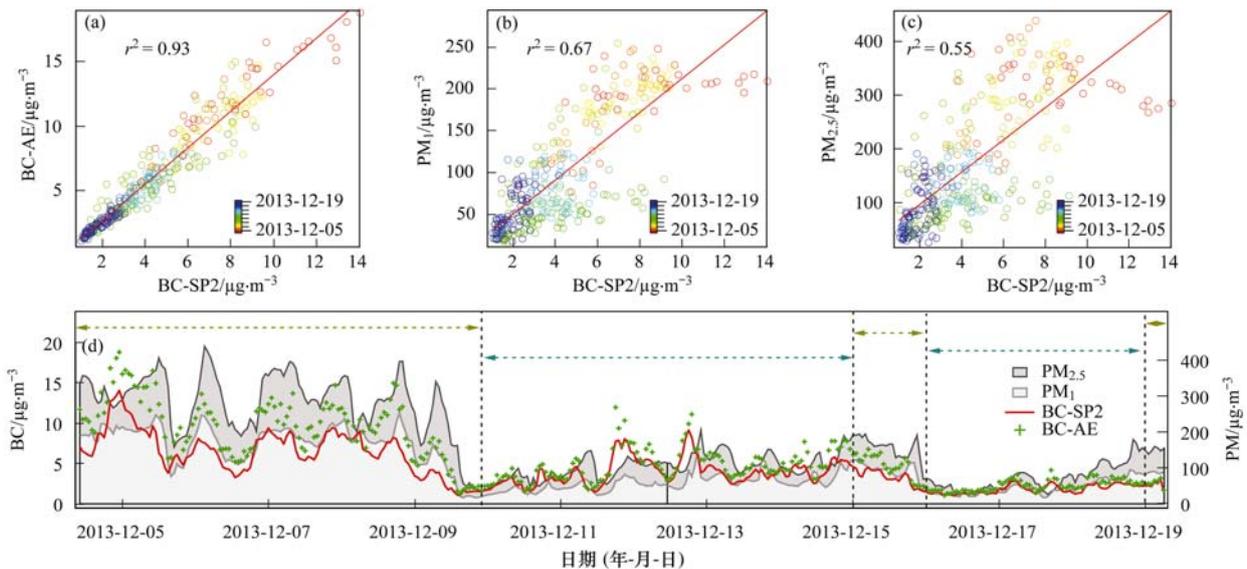


图 3 SP2 与 AE-31、PM₁、PM_{2.5} 观测结果对比

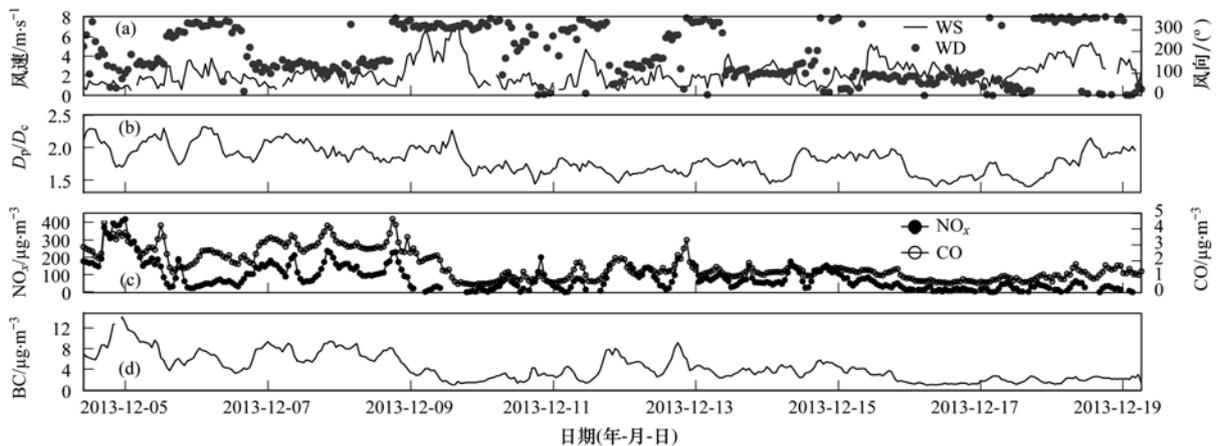
Fig. 3 Comparative observations by SP2 with AE-31, PM₁ and PM_{2.5}

于 BC 粒子的吸收特性与粒子的老化程度、尺度分布等有关,少数沙尘和土壤颗粒会对测量产生影响,在空气中停留较长时间时,表面可能包裹部分有机碳(OC)^[26],也会导致 AE 的观测结果偏高. 通过与 PM₁ 及 PM_{2.5} 的相关性分析发现观测期间 BC 与 PM₁ 的相关性明显高于 PM_{2.5},因为环境中 BC 粒径主要分布在爱根核模态和积聚模态,以 1.0 μm 以内的超细粒径段为主,因此 BC 与 PM₁ 的相关性高于 PM_{2.5}.

观测期间的气象要素[风速(WS)、风向(WD)]、 D_p/D_c 、NO_x、CO 和 BC 的质量浓度的时间序列变化如图 4 所示. BC 质量浓度在 1.01 ~ 14.05 μg·m⁻³之间,在 12 月 4 日 23:00 达到峰值,12 月 16 日 06:00 出现谷值,平均质量浓度为(4.39

±2.66) μg·m⁻³,低于 2009 年南京同期^[27]和 2013 年 1 月^[28]的 BC 浓度,与冬季国内其他南方城市^[29,30]的观测结果接近,明显低于京津冀^[24]和西北地区^[31]的同期 BC 浓度,这主要是因为北方地区冬季气温较低而采取集中供暖措施,大量的煤炭燃烧导致冬季北方 BC 浓度明显增高,南京地处淮河以南,所以冬季 BC 排放量不会因为供暖而出现爆发性增长.

对比国内外主要城市冬季 BC 浓度发现(表 1),国内城市 BC 浓度明显高于英国^[32]、法国^[33]及韩国^[34]等其他国家主要城市的观测值. 说明我国城市地区黑碳气溶胶污染形式依然十分严峻. 由于南京冬季天气形势较复杂,静稳天气频发,同时又受西北冷空气影响,导致观测时段内 BC 浓度波动明显.



(a) 风速及风向; (b) 相对包裹层厚度; (c) NO_x 和 CO 质量浓度;
(d) BC 质量浓度; 部分数据缺失是由于仪器故障和对仪器维护而造成的

图 4 观测期间各项指标的时间序列变化

Fig. 4 Time series of different indicators during the observation period

表 1 其他地区黑碳质量浓度观测结果

Table 1 Black carbon concentration observations of different places

观测地点	观测时间	分析仪器 ¹⁾	BC 浓度/μg·m ⁻³
南京(本研究)	2013-12-04 ~ 2103-12-19	SP2	4.4
南京 1 ^[27]	2009-12-01 ~ 2009-12-31	AE	5.9
南京 2 ^[28]	2013-01-01 ~ 2103-01-31	AE	6.38
深圳 ^[29]	2009-01-14 ~ 2009-02-27	SP2	4.1
上海 ^[30]	2012-12-05 ~ 2012-12-10	SP2	3.4
西安 ^[31]	2003-09 ~ 2003-11	AE	10.2
天津 ^[24]	2009-12-01 ~ 2009-12-31	SP2	15.0
英国 London ^[32]	2012-01-16 ~ 2012-02-05	SP2	1.5
法国 Paris ^[33]	2010-01-17 ~ 2010-02-10	SP2	0.9
韩国 Gwangju ^[34]	2012-12-01 ~ 2013-03-01	AE	2.4

1) SP2: 单颗粒黑碳光度计; AE: 黑碳仪

根据江苏省环保厅官网发布的环境空气质量数据显示,12 月 4 ~ 8 日是一次严重的污染过程,这段时间 AQI 均超过 300,空气质量类别属于严重污染.

此时间段内 BC 平均质量浓度为(7.4 ± 2.12) μg·m⁻³, D_p/D_c 均值为 2.00 ± 0.16,明显高于观测期间 D_p/D_c 均值 1.81 ± 0.21,说明这段时期 BC 污

染严重,空气中的 BC 老化程度较深,受到区域传输的影响. 12 月 9 日伴随一次明显的北方冷空气东移南下,BC 浓度迅速下降, D_p/D_c 由 2.00 ± 0.16 降至 12 月 9 日的均值 1.92 ± 0.18 ,此时污染源排放的新鲜的 BC 粒子贡献较为明显.

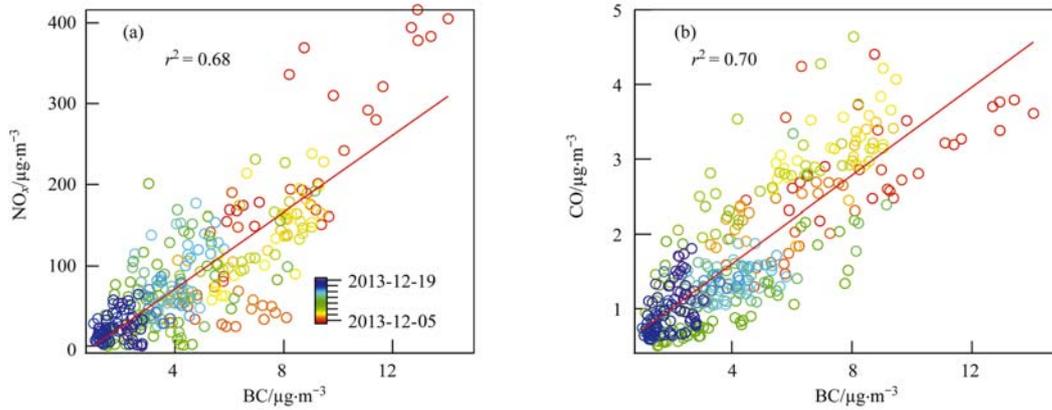


图 5 BC 与 NO_x 和 CO 观测结果比对

Fig. 5 Comparative observations by BC, NO_x and CO

2.1.2 黑碳质量浓度日变化

根据国务院发布的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012),以 AQI 值 200 为界,将观测期间空气质量分为污染较重和污染较轻两组,其中污染较重 8 d,由图 3(d) 黄色箭头部分表示,占总观测时间的 50%,污染较轻 8 d,由图 3(d) 蓝色箭头部分表示,占总观测时间的 50%.

图 6 是观测期间 BC 质量浓度的日变化规律. 当污染较轻时,BC 浓度变化呈现双峰结构. BC 浓度第一个峰值提前约 3 h,出现在 05:00 左右. 因为观测时间处于 2014 年南京青奥会施工建设时期,观测点距离青奥会主场馆较近,为了赶工程进度,夜间重型柴油车的运行会排放出大量的 BC 粒子,对比图 7 可以看出从 02:00 以后,BC 的老化程度也在不断加深,长距离 BC 传输也在不断累积,综合作用使 BC 浓度在 05:00 左右出现第一次峰值. 随着太阳

如图 5 所示,观测期间 BC 与 NO_x 和 CO 质量浓度呈现出良好的相关性,相关系数分别为 0.68 和 0.70. 南京地区 NO_x 和 CO 主要来自于本地源的排放,这说明整个观测时段内 BC 受内源排放影响较大.

辐射增强,大气对流运动逐渐变强,BC 浓度逐渐下降. 13:00 ~ 15:00 左右太阳辐射达到最强,对流边界层抬升,有利于污染物扩散,BC 浓度在此时出现谷值. 17:00 之后随着晚高峰的来临,机动车尾气排放导致 BC 浓度不断升高,同时边界层的降低抑制了空气的对流,出现第二次高峰. 当污染较重时,主要受冷高压控制,风速较低,不利于近地面污染物的稀释和扩散. 夜间太阳辐射较弱,大气边界层较低,大气对流活动较弱,导致污染物的聚集,大气边界层在 07:00 左右开始抬升,早高峰的到来使 BC 浓度在 08:00 出现微弱的峰值,由于夜间累积基础较高,使得该峰值不明显. 14:00 左右边界层达到峰值随后开始下降,BC 继续累积,导致 BC 浓度出现白天较低、夜间较高的昼夜交替现象.

2.2 黑碳的混合态特征

BC 的混合态特征如图 7 所示,污染较轻时,BC

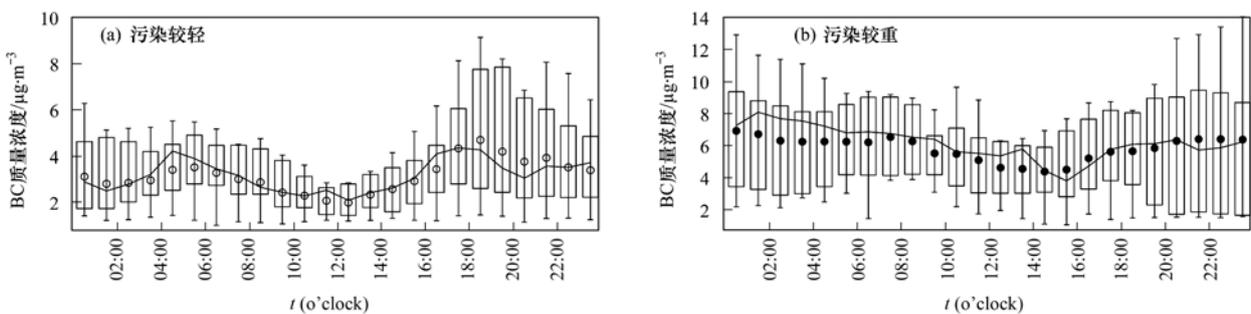
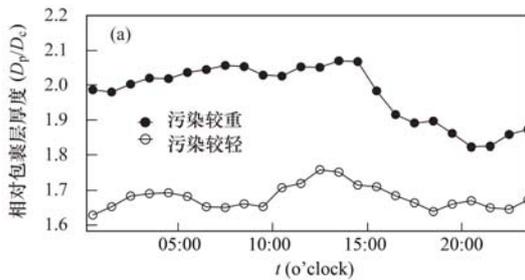


图 6 BC 质量浓度日变化

Fig. 6 Mean diurnal variation patterns of BC mass concentration

的混合态呈现凌晨及午后 D_p/D_c 较高,早晚较低的趋势,这表明在凌晨及午后 BC 的老化程度较深,早晚空气中的 BC 粒子较为新鲜. 因为夜间大气边界层较低,污染物难以扩散导致不断聚集,BC 粒子表面结构疏松多孔,不断吸附硫酸盐、有机物等其他组分,导致粒径增大,老化程度加深,午后由于边界层的不断抬升使得近地面新鲜排放的 BC 粒子得到有效稀释,使 D_p/D_c 变大. 07:00 左右出现低值是由于此时大气边界层尚未明显抬升,而同时正处于上班早高峰期,机动车等本地源排放出新鲜的 BC 颗粒,使 D_p/D_c 降低. 18:00~20:00 左右 D_p/D_c 的谷值可归结为晚高峰的作用,随后大气边界层持续降低使得 D_p/D_c 上升.

对比不同污染程度下 D_p/D_c 变化趋势,发现



污染较轻时 D_p/D_c 随时间变化波动更为明显,因为污染较轻时 BC 多为近地面源排放,其受源排放强度和气象条件的直接影响更为明显,污染较重时 BC 老化程度较深,其大气中分布更均匀,受排放源和边界层高度变化的直接影响不显著,进一步反映了重污染条件下 BC 的区域性污染特征. 且重污染条件下,相对湿度较高,由于老化的 BC 粒子表面包裹了多种物质,部分物质遇水发生了液相反应,因为高相对湿度对于气粒转化和气溶胶粒子的碰并聚合作用明显使 BC 粒子出现一定的吸湿增长^[35,36],反映出 BC 的混合态与大气传输及气-固转化过程密切相关,白天太阳辐射较强也有利于光化学反应的进行,综合作用使得 BC 老化程度不断加深.

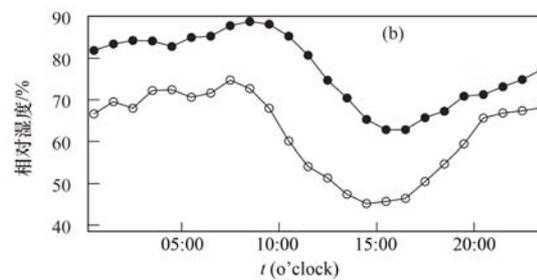


图 7 BC 混合态及相对湿度日变化

Fig. 7 Mean diurnal variation patterns of BC mixing state and relative humidity

利用正定矩阵因子分析法 (positive matrix factorisation, PMF) 来定量解析有机物 (Org)、硫酸盐 (SO_4^{2-})、硝酸盐 (NO_3^-) 对于包裹层的贡献,分别将 Org、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 对 BC 的比值 (Org/BC、 SO_4^{2-} /BC、 NO_3^- /BC) 和 BC 包裹层贡献率 [$f_{\text{BC}} = (D_p - D_c)/D_c$] 代入 PMF 模型,显示出观测值的良好相关性 (污染较轻时 r^2 为 0.88、0.99、0.99、0.85,污染较重时 r^2 为 0.85、0.99、0.99、0.81).

如图 8 所示,污染较轻时,3 个因子对包裹层的贡献分别为 7%、63%、29%,污染较重时分别为

14%、63%、23%. 不同污染程度下,因子 1 都呈现较高的 SO_4^{2-} /BC,因子 2 显示较高的 Org/BC,因子 3 呈现较高的 NO_3^- /BC,表明 3 个因子中硫酸盐,有机物,硝酸盐分别占到了主要成分. 对比图 8 两组数据发现有机物都占到了主要比重,在不同污染程度下对包裹层的贡献都超过了 60%,但污染较重时,因子 1 的贡献量明显高于污染较轻时,由于因子 1 主要表现为硫酸盐的贡献,南京地区硫酸盐主要来自于区域传输^[37],该结论进一步验证了重污染条件下 BC 的区域性污染特征.

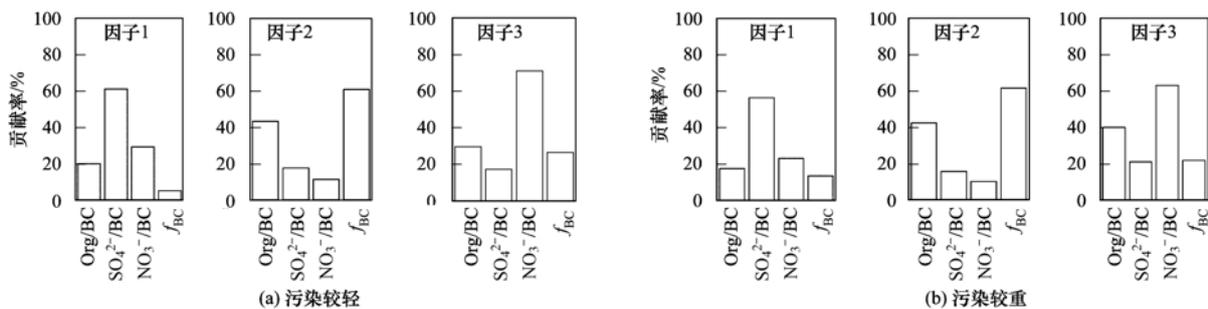


图 8 不同组分对包裹层的贡献率

Fig. 8 Contribution rates of different components to coating thickness

2.3 黑碳的粒径分布特征

BC 质量谱和数谱的粒径分布如图 9 所示均呈单峰型正态分布. 观测期间 BC 粒径主要分布在 60 ~ 500 nm 的范围内. 其中, 不同污染程度下 BC 的质量谱峰值粒径均分布在 210 nm 附近, 高于 McMeeking 等^[38] 在英国 Manchester (165 nm), Schwarz 等^[20] 在美国 Texas (170 nm) 以及 Wang 等^[26] 在中国西藏 (175 nm) 的观测结果, 与 Huang 等^[29] 在中国深圳 (211 nm), Gong 等^[30] 在中国上海 (200 nm) 以及 Kondo 等^[39] 在日本 (210 nm) 的观测结果类似. 而 BC 数谱峰值粒径在污染较重时约为 100 nm, 污染较轻时约为 91 nm, 呈现出微弱的区别. 实际大气环境中 BC 表面包裹的多种物质经过液相、非均相等反应会改变其包裹层的厚度, 而 BC 本身的核粒径只受限于一次排放源, 传输、反应老化等并不能改变其核粒径, 但不同一次排放源所产生的 BC 核粒径存在差别^[34]. 综上, 这些均说明粒径分布的差别只能代表 BC 来源的不同, 南京与国内及亚洲城市的 BC 来源呈现一致性. 环境的差异, 如城市与高原地区 BC 粒径分布也表现出明显的不同.

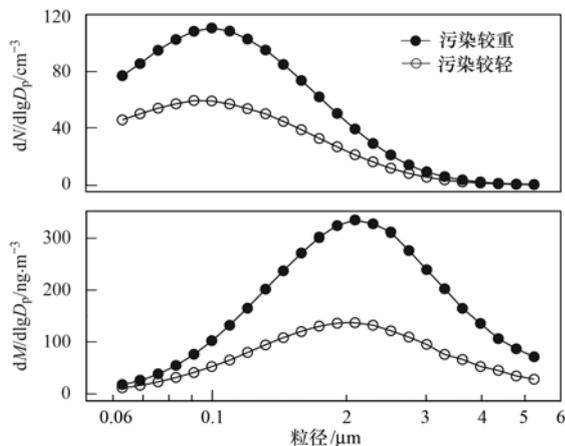


图 9 BC 粒径分布

Fig. 9 Average number and mass size distribution of BC in volume equivalent diameter

3 结论

(1) 南京冬季重污染时期 BC 质量浓度均值 $(4.39 \pm 2.66) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其变化受内源排放和外界传输共同影响.

(2) 不同污染程度下, BC 质量浓度日变化规律表现出差异, 污染较重时呈现夜间高白天低的昼夜交替变化趋势; 污染较轻时呈现出典型的早晚“双峰型”特征. 说明在污染较重时 BC 主要受本地累

积和区域传输的共同影响, 而污染较轻时则以本地源为主.

(3) BC 的混合态在污染较轻时呈现出凌晨及午后 D_p/D_c 较高, 早晚较低的趋势, 说明在凌晨及午后 BC 的老化程度较深, 早晚空气中的 BC 粒子较为新鲜. 重污染条件下 BC 混合态更加稳定, 区域性传输更为明显, 并在高相对湿度下呈现吸湿增长的特性, 定量解析得出, 不同污染条件下有机物都是 BC 包裹层的主要贡献成分, 重污染条件下硫酸盐的贡献更加明显.

(4) BC 数谱和质量谱的粒径均呈单峰型正态分布, 且在不同污染程度下 BC 质量谱峰值粒径均分布在 210 nm 左右, 数谱粒径随污染程度的变化呈现微弱的差别, 其峰值受一次排放源的不同体现出区域性的差异.

致谢: 感谢江苏省环境监测中心张祥志研究员和瑞士保罗谢尔研究所 (PSI) André Prévôt 教授提出的宝贵意见.

参考文献:

- [1] Levy II H, Schwarzkopf M D, Horowitz L, *et al.* Strong sensitivity of late 21st century climate to projected changes in short-lived air pollutants [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2008, **113** (D6): D06102.
- [2] Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, *et al.* Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution [J]. *JAMA-Journal of the American Medical Association*, 2002, **287** (9): 1132-1141.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Andreae M O. The dark side of aerosols [J]. *Nature*, 2001, **409** (6821): 671-672.
- [6] IPCC. *Climate Change 2001: Chapter 5. Aerosols, Their Direct and Indirect Effects* [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 298-299.
- [7] Alfaro S C, Comes L, Rajot J L, *et al.* Chemical and optical characterization of aerosols measured in spring 2002 at the ACE-Asia supersite, Zhenbeitai, China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108** (D23): 8641.
- [8] 安林昌. 单颗粒黑碳测量仪的标定及其在天津武清和北极地区的应用 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2011.
- [9] 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): ACH 16-1-ACH 16-22.
- [10] Schwarz J P, Gao R S, Spackman J R, *et al.* Measurement of the mixing state, mass, and optical size of individual black carbon particles in urban and biomass burning emissions [J].

- Geophysical Research Letters, 2008, **35**(13): L13810.
- [11] Twohy C H, Petters M D, Snider J R, *et al.* Evaluation of the aerosol indirect effect in marine stratocumulus clouds: droplet number, size, liquid water path, and radiative impact [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2005, **110**(D8): D08203.
- [12] Bond T C, Habib G, Bergstrom R W. Limitations in the enhancement of visible light absorption due to mixing state [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2006, **111**(D20): D20211.
- [13] Liu D, Allan J, Whitehead J, *et al.* Ambient black carbon particle hygroscopic properties controlled by mixing state and composition [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(4): 2015-2029.
- [14] Saathoff H, Naumann K H, Schnaiter M, *et al.* Coating of soot and (NH₄)₂SO₄ particles by ozonolysis products of α -pinene [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2003, **34**(10): 1297-1321.
- [15] 张灿, 周志恩, 翟崇治, 等. 重庆市黑碳气溶胶特征及影响因素初探 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(4): 812-818.
Zhang C, Zhou Z E, Zhai C Z, *et al.* Characteristics and influencing factors of black carbon aerosol in Chongqing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(4): 812-818.
- [16] 王庚辰, 孔琴心, 任丽新, 等. 北京地区大气中的黑碳气溶胶及其变化特征 [J]. *过程工程学报*, 2002, **2**(S): 284-288.
Wang G C, Kong Q X, Ren L X, *et al.* Black carbon aerosol and its variations in the urban atmosphere in Beijing area [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2002, **2**(S): 284-288.
- [17] 张靖, 银燕. 黑碳气溶胶对我国区域气候影响的数值模拟 [J]. *南京气象学院学报*, 2008, **31**(6): 852-859.
Zhang J, Yin Y. Numerical simulations of effect of black carbon aerosol on regional climate in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2008, **31**(6): 852-859.
- [18] Peng J F, Hu M, Guo S, *et al.* Markedly enhanced absorption and direct radiative forcing of black carbon under polluted urban environments [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, **113**(16): 4266-4271.
- [19] Bond T C, Habib G, Bergstrom R W, *et al.* Limitations in the enhancement of visible light absorption due to mixing state [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2006, **111**(D20): D20211.
- [20] Schwarz J P, Gao R S, Fahey D W, *et al.* Single-particle measurements of midlatitude black carbon and light-scattering aerosols from the boundary layer to the lower stratosphere [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2006, **111**(D16): D16207.
- [21] Slowik J G, Cross E S, Han J H, *et al.* An inter-comparison of instruments measuring black carbon content of soot particles [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2007, **41**(3): 295-314.
- [22] Taylor J W, Allan J D, Liu D, *et al.* Assessment of the sensitivity of core/shell parameters derived using the single-particle soot photometer to density and refractive index [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, **7**(6): 5491-5532.
- [23] Liu D, Allen J D, Young D E, *et al.* Size distribution, mixing state and source apportionment of black carbon aerosol in London during wintertime [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(18): 10061-10084.
- [24] 安林昌, 孙俊英, 张养梅, 等. 天津武清地区单颗粒黑碳气溶胶特征观测分析 [J]. *应用气象学报*, 2011, **22**(5): 577-583.
An L C, Sun J Y, Zhang Y M, *et al.* Characteristics of black carbon at Wuqing observed by single particle soot photometer [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2011, **22**(5): 577-583.
- [25] Jeong C H, Hopke P K, Kim E, *et al.* The comparison between thermal-optical transmittance elemental carbon and aethalometer black carbon measured at multiple monitoring sites [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(31): 5193-5204.
- [26] Wang Q Y, Schwarz J P, Cao J J, *et al.* Black carbon aerosol characterization in a remote area of Qinghai-Tibetan Plateau, western China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **479-480**: 151-158.
- [27] 汤莉莉, 祝愿, 牛生杰, 等. 南京北郊大气细粒子中黑碳气溶胶的观测研究 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(4): 709-716.
Tang L L, Zhu Y, Niu S J, *et al.* Observation of black carbon in fine particulate matter in the north suburb of Nanjing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(4): 709-716.
- [28] 汤莉莉, 张运江, 孙业乐, 等. 南京持续雾霾天气中亚微米细颗粒物化学组分及光学性质 [J]. *科学通报*, 2014, **59**(20): 1955-1966.
Tang L L, Zhang Y J, Sun Y L, *et al.* Components and optical properties of submicron aerosol during the lasting haze period in Nanjing [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2014, **59**(20): 1955-1966.
- [29] Huang X F, Sun T L, Zeng L W, *et al.* Black carbon aerosol characterization in a coastal city in South China using a single particle soot photometer [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **51**: 21-28.
- [30] Gong X D, Zhang C, Chen H, *et al.* Size distribution and mixing state of black carbon particles during a heavy air pollution episode in Shanghai [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(8): 5399-5411.
- [31] 朱崇抒, 曹军骥, 沈振兴, 等. 西安黑碳气溶胶的污染特征及其成因分析 [J]. *中国粉体技术*, 2009, **15**(2): 66-71.
Zhu C S, Cao J J, Shen Z X, *et al.* Variability of black carbon aerosol and analysis of influence factors over Xi'an atmosphere [J]. *China Powder Science and Technology*, 2009, **15**(2): 66-71.
- [32] Liu D, Flynn M, Gysel M, *et al.* Single particle characterization of black carbon aerosols at a tropospheric alpine site in Switzerland [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(15): 7389-7407.
- [33] Laborde M, Crippa M, Tritscher T, *et al.* Black carbon physical properties and mixing state in the European megacity Paris [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(11): 5831-5856.
- [34] Park S S, Lee K H. Characterization and sources of black carbon in PM_{2.5} at a site close to a roadway in Gwangju, Korea, during winter [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2015, **17**(10): 1794-1805.
- [35] Lewis K A, Arnott W P, Moosmüller H, *et al.* Reduction in

- biomass burning aerosol light absorption upon humidification: roles of inorganically-induced hygroscopicity, particle collapse, and photoacoustic heat and mass transfer [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(22): 8949-8966.
- [36] Liu D, Allan J, Whitehead J, *et al.* Ambient black carbon particle hygroscopic properties controlled by mixing state and composition[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(4): 2015-2029.
- [37] Zhang Y J, Tang L L, Wang Z, *et al.* Insights into characteristics, sources, and evolution of submicron aerosols during harvest seasons in the Yangtze River delta region, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(3): 1331-1349.
- [38] McMeeking G R, Hamburger T, Liu D, *et al.* Black carbon measurements in the boundary layer over western and northern Europe [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(19): 9393-9414.
- [39] Kondo Y, Sahu L, Moteki N, *et al.* Consistency and traceability of black carbon measurements made by laser-induced incandescence, thermal-optical transmittance, and filter-based photo-absorption techniques [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2011, **45**(2): 295-312.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

2016年10月12日,中国科技论文统计结果发布会在北京举行,会议公布了“百种中国杰出学术期刊”获奖名单。《环境科学》连续15次荣获“百种中国杰出学术期刊”称号。“百种中国杰出学术期刊”是根据中国科技学术期刊综合评价指标体系进行评定。该体系利用总被引频次、影响因子、基金论文比、他引总引比等多个文献计量学指标进行统计分析,对期刊分学科进行评比,其评价结果客观公正,为我国科技界公认,并具有广泛影响。

CONTENTS

Source Apportionment of Volatile Organic Compounds and Health Assessment of Benzene Series in Northern Suburb of Nanjing in Winter	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, LIN Xu, <i>et al.</i> (1)
Size Distribution and Mixing State of Black Carbon Aerosol in Nanjing During a Heavy Winter Pollution Event	JIANG Lei, TANG Li-li, PAN Liang-bao, <i>et al.</i> (13)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of PM _{2.5} Concentration Based on GAM Model	HE Xiang, LIN Zhen-shan (22)
Particle Size Distribution and Diffusion for Simulated Cooking Fume	LI Shuang-de, XU Jun-bo, MO Sheng-peng, <i>et al.</i> (33)
Greenhouse Gas Fluxes at Water-Air Interface in Small Pond Using Flux-Gradient Method Based on Spectrum Analyzer	ZHAO Jia-yu, ZHANG Mi, XIAO Wei, <i>et al.</i> (41)
Diurnal Variations of Concentration of Porewater Dissolved CH ₄ and CO ₂ in a Brackish Marsh Dominated by <i>Cyperus malaccensis</i> and <i>Phragmites australis</i> During Neap and Spring Tidal Days in the Minjiang River Estuary	TAN Li-shan, YANG Ping, HE Lu-lu, <i>et al.</i> (52)
Comparisons Between Seasonal and Diurnal Patterns of Cave Air CO ₂ and Control Factors in Jiguan Cave, Henan Province, China	ZHANG Ping, YANG Yan, SUN Zhe, <i>et al.</i> (60)
Fluorescence Spectral Characteristics of Fluorescent Dissolved Organic Matter (FDOM) in the Surface Sediments from Lihu Lake	CHEN Jun-yi, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (70)
Sedimentary Characteristics and Sources of Organic Matter in Sediments of Dianchi Lake	HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, YU Li-yan, <i>et al.</i> (78)
Seasonal Variation of Colloid Particles in the Shallow Well Water of a Small Watershed of Purple Soil	ZHANG Wei, TANG Xiang-yu, XIAN Qing-song (87)
Deposition Characteristics of Suspended Solids and the Response of Dissolved Nutrients in Spring in the Western Lakeside of Taihu Lake	QI Chuang, WANG Guo-xiang, WU Xin-ting, <i>et al.</i> (95)
Correlation Between LDI-based Land Use Types and Water Quality in Sanshan Island of Taihu Lake National Wetland Park, Suzhou	YANG Zhao-hui, SU Qun, CHEN Zhi-hui, <i>et al.</i> (104)
Response Characteristics of Algal Chlorophyll-a to Nitrogen, Phosphorus and Water Temperature in Lake Erhai Based on Quantile Regression	CHEN Xiao-hua, LI Xiao-ping, QIAN Xiao-yong, <i>et al.</i> (113)
Seasonal Succession Characteristics of the Morphologically-based Functional Groups (MBFG) in Deep-water Reservoir	YANG Yu, LU Jin-suo, ZHANG Ying (121)
Change and Influencing Factors of Dissolved Carbon and Dissolved Nitrogen in Water of the Three Gorges Reservoir	FAN Zhi-wei, HAO Qing-ju, HUANG Zhe, <i>et al.</i> (129)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions in the Gufu River Small Watershed of the Three Georges Reservoir Area	HUA Ling-ling, LI Wen-chao, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (138)
Characteristics of Nitrogen Transport and Its Source Trace in Loess Plateau's Dam Watershed in Alternating Wet and Dry Seasons: A Case Study of Yangjuangou Watershed	JIA Jun-jie, GAO Yang, CHEN Wei-liang, <i>et al.</i> (147)
Comparison of Nitrogen and Phosphorus Uptake and Water Purification Ability of Five Submerged Macrophytes	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, BAO Wei-hong, <i>et al.</i> (156)
Pollution Level, Distribution Characteristics and Risk Assessment of 32 PPCPs in Surface Water of Luomahu Lake	ZHANG Qin, ZHANG Sheng-hu, WANG Zhen, <i>et al.</i> (162)
Distribution, Sources and Risk Assessment of the PAHs in the Surface Sediments and Water from the Daye Lake	ZHANG Jia-quan, HU Tian-peng, XING Xin-li, <i>et al.</i> (170)
Effects of pH and Complexing Agents on Sb(V) Adsorption onto Birnessite and Ferrihydrite Surface	WANG Hua-wei, LI Xiao-yue, LI Wei-hua, <i>et al.</i> (180)
Effects of UV Radiation on the Coagulation Process of Kaolin and Involved Mechanisms	WANG Wen-dong, WANG Chang-xin, LIU Hui, <i>et al.</i> (188)
Effect of Dissolved Humic Acid on Thyroid Receptor Antagonistic Activity of Zinc in Aquatic Environment	AI Yang, KONG Dong-dong, YU Chang, <i>et al.</i> (195)
Optimization and Validation of the Analytical Method to Detect Common Illicit Drugs in Wastewater	GAO Ting-ting, DU Peng, XU Ze-qiong, <i>et al.</i> (201)
Cathode Electric Field Enhanced Removal of Nitrobenzene from Aqueous Solution Based on Activated Carbon Fibers (ACF)-Ozone Technique	ZHAO Chun, ZHANG Shuai, ZHOU Yu, <i>et al.</i> (212)
Effect of PVDF Hollow Fiber Ultrafiltration Membranes Modification with Carbonnanotube on Membrane Fouling Control During Ultrafiltration of Sewage Effluent	WANG Li-ying, SHI Jie, WANG Kai-lun, <i>et al.</i> (220)
Enhanced Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Biological Aerated Filter (Fe ²⁺)-Ozonation Process	XU Min, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (229)
Specificity of Intact Ladderane Lipids in Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria from Four Reactors	WANG Han, FANG Fang, LI Kai, <i>et al.</i> (238)
Characteristics of Perchlorate Reduction and Analysis of Consortium Structure in a Sulfur-Based Reactor at a High Perchlorate Concentration	ZHANG Chao, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (247)
Fast Start-up of SBAF System Assisted CANON Process and the Microbial Analysis	LIU Zhu-han, YUE Xiu, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (253)
Mechanism for Effects of High Free Ammonia Loadings on Biological Nitrification	JI Min, LIU Ling-jie, ZHAI Hong-yan, <i>et al.</i> (260)
Impact of Biodegradable Organic Matter on the Functional Microbe Activities in Partial Nitrification Granules	WANG Shu-yong, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (269)
Process of Enrichment and Culture of PAOs on a Novel Biofilm Process of Dephosphorization	ZHENG Ying, PAN Yang, ZHOU Xiao-hua, <i>et al.</i> (276)
Identification of Efficient Strain Applied to Mining Rehabilitation and Its Rock Corrosion Mechanism: Based on Boosted Regression Tree Analysis	WU Yan-wen, ZHANG Jin-chi, GUO Xiao-ping, <i>et al.</i> (283)
Effect of Cadmium on Biodegradation of Nonylphenol by <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, CHENG Yuan-yuan, SHI Wei-lin (294)
Effects of Different Agricultural Practices on Soil Carbon Pool in North China Plain	SHI Xiao-xia, ZHAO Yi, ZHANG Lin, <i>et al.</i> (301)
Seasonal Variations of Soil Microbial PLFAs and Soil Enzyme Activity Under the Citrus Plantation in Mt. Jinyun, Chongqing	LI Nan-jie, ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (309)
Composition and Environmental Adaptation of Microbial Community in Shibabe Copper Tailing in Zhongtiao Mountain in Shanxi	LIU Jin-xian, LI Cui, JING Ju-hui, <i>et al.</i> (318)
Spatial Distribution and Source of Perfluorinated Compounds in Urban Soil from Part of Cities in Anhui Province, China	LI Fa-song, NI Hui, HUANG Han-yu, <i>et al.</i> (327)
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components; Influence on the Soil Active Organic Carbon	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> (333)
Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice	TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (343)
Mechanism of Soil Eco-Functional Stability Under Pyrene/Cadmium Simplex and Combined Pollution Stress	CHEN Xin-yao, YANG Hui-zi, LI Min, <i>et al.</i> (352)
Fractions Transformation of Heavy Metals in Compound Contaminated Soil Treated with Biochar, Montmorillonite and Mixed Addition	GAO Rui-li, TANG Mao, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (361)
Screening of the Reduction/Stabilization Reagent for Cr(VI) Contaminated Soil in a Planting Site and Reaction Process Monitoring	LI Pei-zhong, LÜ Xiao-jian, WANG Hai-jian, <i>et al.</i> (368)
Cd(II) Ion Adsorption and Sealing onto SBA-15 Mesoporous Particles and the Related Potential on Cd(II) Polluted Soil Remediation	HUANG Hui, NING Xi-cui, GUO Zhan-yu, <i>et al.</i> (374)
Bioaccumulation of Halogenated Flame Retardants in Fish of Dongjiang River	HE Ming-jing, YANG Ting, LI Qi, <i>et al.</i> (382)
Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Vegetables in Guangzhou	CHEN Zhi-liang, HUANG Ling, ZHOU Cun-yu, <i>et al.</i> (389)
Variation Characteristics of Vegetables Cadmium Uptake Factors and Its Relations to Environmental Factors	YANG Yang, LI Yan-ling, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (399)
Effect of Sewage Sludge Compost Products Application on Total Mercury and Methylmercury in Soil and Plants	YU Ya-wei, YANG Yu-han, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (405)
Influencing Mechanism and Spatio-temporal Pattern of Stomatal Ozone Flux of Winter Wheat Under Ozone Pollution	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, CAO Jia-chen, <i>et al.</i> (412)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2017年1月15日 第38卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 1 Jan. 15, 2017

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172