

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

1960~2013年我国霾污染的时空变化 ..... 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 ..... 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 ..... 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 ..... 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 ..... 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 ..... 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 ..... 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 ..... 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 ..... 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 ..... 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 ..... 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 ..... 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 ..... 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 ..... 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 ..... 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 ..... 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 ..... 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 ..... 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 ..... 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 ..... 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 ..... 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 ..... 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄翔峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响 ..... 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 ..... 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 ..... 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 ..... 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 ..... 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe<sup>0</sup>-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 ..... 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附 ..... 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 ..... 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 ..... 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 ..... 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 ..... 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 ..... 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 ..... 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 ..... 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 ..... 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 ..... 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 ..... 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆冲, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 ..... 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 ..... 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 ..... 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 ..... 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 排放的短期影响 ..... 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化及其影响因素 ..... 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 ..... 严俊霞, 郝忠, 荆雪雷, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 ..... 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 ..... 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 ..... 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 ..... 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 ..... 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517) 《环境科学》征稿简则 (3561) 信息 (3289, 3321, 3422)

# 南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析

肖思晗, 于兴娜\*, 朱彬, 何稼祺

(南京信息工程大学, 气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

**摘要:** 利用 2015 年 1~10 月黑碳小时平均质量浓度、PM<sub>2.5</sub> 浓度、污染气体及常规气象观测资料, 对南京北郊黑碳气溶胶的时间序列演变特征、污染特征及其影响因子进行了分析。结果表明, 观测期间南京北郊黑碳浓度均值为  $(2\,524 \pm 1\,754) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。黑碳浓度具有明显的季节变化, 冬季最高, 平均值达到  $(3\,468 \pm 2\,455) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ , 春季平均值最低, 为  $(2\,142 \pm 1\,240) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ; 其日变化也具有明显的双峰结构, 峰值出现在上午 07:00~08:00 和夜间 21:00~22:00。黑碳气溶胶与 NO<sub>x</sub> 的相关性较好, 说明黑碳浓度受机动车尾气排放的影响较大; 但观测期间  $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$  比值较低, 表明生物质燃烧可能是黑碳气溶胶的又一个重要来源。黑碳浓度随风速增加呈下降趋势, 所有季节中小于  $2\,000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$  的低黑碳浓度主要集中在正西风及相邻风向上, 秋冬季大于  $6\,000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$  的高黑碳浓度则多出现在偏东风下。灰霾和重度霾天气下的黑碳浓度平均值呈较高水平, 是非霾天气下的 2~2.3 倍。

**关键词:** 黑碳气溶胶; 日变化; 季节变化; 气象因素; 南京

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3280-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.09.005

## Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing

XIAO Si-han, YU Xing-na\*, ZHU Bin, HE Jia-qi

(Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** Based on the hourly averaged data of black carbon (BC) aerosol, PM<sub>2.5</sub>, gaseous pollutants, and meteorological data in the northern suburb of Nanjing from January to October 2015, characteristics and influencing factors of BC concentration variation were analyzed. The mean concentration of BC was found to be  $(2\,524 \pm 1\,754) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$  during the observation period. BC concentrations in Nanjing showed strong seasonality, the highest mean concentration of BC occurred during winter reaching  $(3\,468 \pm 2\,455) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ , and the lowest mean BC concentration was found during spring being  $(2\,142 \pm 1\,240) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ; a distinct diurnal variation of BC with two high peaks occurred, one in the morning during 07:00 to 08:00 and the other in late evening during 21:00 to 22:00 local time. The strong correlation between BC and NO<sub>x</sub> indicated a greater impact of vehicle emissions on BC concentration, while a lower rate of  $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$  was found in the northern suburb of Nanjing, suggesting that biomass burning emission might be another important source of BC in here. BC concentration increased with decreasing wind speed. BC concentration lower than  $2\,000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$  mainly occurred in westerly wind and adjacent wind in all seasons, whereas BC concentration higher than  $6\,000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$  more frequently appeared in easterly winds in autumn and winter. BC concentration was higher in hazy and heavy hazy weather, which were 2 and 2.3 times as large as that in non-hazy weather, respectively.

**Key words:** black carbon aerosol; diurnal variation; seasonal variation; meteorological factor; Nanjing

黑碳 (black carbon, BC) 气溶胶是大气气溶胶中重要组成部分, 它是含碳物质不完全燃烧产生的一种无定型碳质<sup>[1]</sup>, 如工业污染、煤和石油等化石燃料燃烧、汽车尾气等。由于黑碳的粒径一般为  $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ , 且其粒子表面可吸附一些污染以及有毒有害物质, 对人体健康和环境质量都会有重要影响<sup>[2]</sup>。黑碳气溶胶对从可见光到红外波长范围内的太阳和大气辐射都有强烈的吸收作用, 能直接影响地气系统的辐射平衡<sup>[3]</sup>。IPCC<sup>[4]</sup> 报告指出, 黑碳气

溶胶能够导致正的辐射强迫, 从而极大地减弱气溶胶对地球的冷却效果。有研究表明, 黑碳气溶胶是大气中引起全球变暖的仅次于 CO<sub>2</sub> 的重要成分<sup>[5]</sup>。此外, 黑碳气溶胶还可以与硫酸盐等水溶性气溶胶

收稿日期: 2016-03-14; 修订日期: 2016-04-25

基金项目: 国家重点研发计划专项 (2016YFC0203500); 国家自然科学基金项目 (41475142); 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB05030104); 江苏省高校“青蓝工程”项目; 江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD)

作者简介: 肖思晗 (1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气物理学与大气环境, E-mail: sihanshaw@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: xnyu@nuist.edu.cn

混合作为云凝结核或直接作为冰核改变云微物理过程,间接地影响气候系统<sup>[6,7]</sup>。

有研究认为,我国黑碳排放总量大约占全球排放总量的 1/4,是全球主要的排放源之一<sup>[8]</sup>,也是区域乃至全球气候与环境变化的一个重要驱动因子。

国内有关黑碳气溶胶的研究起步较晚,主要关注黑碳的源排放<sup>[9,10]</sup>、浓度变化特征<sup>[11~14]</sup>以及黑碳气溶胶的辐射强迫等<sup>[15,16]</sup>。汤洁等<sup>[12]</sup>于 1991 年在临安大气本底站和 1998 年在拉萨地区进行过短期的黑碳浓度观测;王庚辰等<sup>[17]</sup>于 1992 年及 1996~2001 年在北京市北郊测量了黑碳气溶胶的浓度。21 世纪后,随着我国工业化的高速发展和人口、能源消耗的急剧增加,城市空气质量不断恶化,针对珠江三角洲<sup>[16,18]</sup>、长江三角洲<sup>[19~22]</sup>、京津冀<sup>[23,24]</sup>以及其他地区<sup>[13,14,25,26]</sup>黑碳气溶胶的研究逐渐增多。然而,由于黑碳气溶胶辐射强迫作用的不确定性很大,辐射模式本身不是很完善,因此对黑碳气溶胶直接辐射强迫效应的估算还不够精确。另外,黑碳气溶胶在大气中停留时间相对温室气体较短,其空间和时间分布的差异性很大,所以加强观测和模式模拟仍是今后黑碳气溶胶气候效应研究的核心内容。

南京地处长江三角洲,石油、钢铁等重工业规模较大,大气污染状况日趋严重。自 20 世纪 90 年代以来,南京每年霾日数均超过 100 d<sup>[27]</sup>。但是,在南京地区开展的黑碳气溶胶观测仍然非常有限。因此,加强对黑碳气溶胶的观测研究尤为重要。本研究运用 2015 年 1~10 月南京北郊黑碳气溶胶的观测结果,结合 PM<sub>2.5</sub>、污染气体及常规气象观测资料,对该地大气中黑碳气溶胶浓度变化特征和影响因素进行讨论分析,以为研究黑碳的气候和环境效应提供基础数据资料以及深入开展和制定针对黑碳的大气污染防治工作提供必要的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器和数据

观测黑碳的仪器为美国 Magee 公司生产的 AE-33 型黑碳测量仪(Aethalometer)。AE-33 是新一代黑碳仪,相比于上一代产品 AE-31,它采用双点位测量技术,消除了气溶胶负载效应引起的变化,并加以负载补偿参数的实时计算,赋予了仪器更加高效精准的测量性能。仪器经自动校准流量计校准后流量为 5.0 L·min<sup>-1</sup>。该仪器有 7 个通道:370、470、525、590、660、880 和 940 nm,时间分辨率为 1 s,采样头切割粒径为 PM<sub>2.5</sub>,本研究选取 880 nm 波段上

的观测数据。

AE-33 型黑碳仪的测量原理与 AE-31 型类似,其工作原理建立在石英滤纸带所收集的粒子对光的吸收造成的衰减上,相对黑碳气溶胶的吸收来说,气溶胶其他成分对可见光的吸收可忽略不计,属于光学灰度测量法。仪器的详细工作原理及资料处理方法可参考文献<sup>[16]</sup>。

风速、风向等地面气象数据来源于南京信息工程大学校园内中国气象局气象探测试验基地 CAWSD600 型自动气象站;能见度数据来自 CJY-1 型能见度仪;PM<sub>2.5</sub>数据由 FH62C14 系列 β 射线在线大气颗粒物浓度观测仪器观测获得。

### 1.2 观测地点和时间

观测时间分别为 2015 年 1 月 1 日~1 月 31 日(冬季)、3 月 9 日~5 月 31 日(春季)、6 月 1 日~7 月 15 日(夏季)、9 月 6 日~10 月 31 日(秋季)。观测地南京地区位于西风带上,又属于季风性气候,春夏季多为东南风,而秋冬季节多以西北、偏北风为主。AE-33 型黑碳仪设在南京信息工程大学气象楼顶,海拔高度 62 m。在其东北和东南方向上分布有扬子石化、南京钢铁集团等大型化工、能源企业,同时东面紧邻交通要道宁六公路,该地区空气质量具有一定的污染区域特性,位置见图 1 所示。CJY-1 型能见度仪和 CAWSD600 型自动气象站观测地点位于校内的中国气象局综合观测培训实习基地。



图 1 观测点及周边地区

Fig. 1 Measurement site and the surrounding areas

## 2 结果与分析

### 2.1 南京北郊黑碳气溶胶浓度水平

2015 年南京北郊黑碳浓度小时平均值的变化范围很大,在 210.8~18 627 ng·m<sup>-3</sup>之间;观测期间的平均值(±标准偏差)达到了(2 524 ± 1 754)

$\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ . 本研究采用最大频数浓度法<sup>[7]</sup>,对黑碳小时平均浓度频数分布进行拟合,最大出现频次所对应浓度值则反映了该地区最具代表性大气状况下的黑碳气溶胶浓度. 拟合结果表明,观测期间南京北郊黑碳浓度小时平均值呈正态分布,位于 95% 置信区间,最大频数所对应的浓度值为  $1\,431\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  (区间步长  $100\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 该值可作为南京北郊大气黑

碳气溶胶浓度本底值参考. 为便于对比,表 1 列出了近些年在全国部分地区黑碳气溶胶浓度观测结果. 相比而言,南京北郊地区黑碳气溶胶浓度为中等偏低水平,远低于西安、深圳、杭州、天津,但高于兰州、敦煌的观测值. 而导致这种差异的原因主要与各地的能源结构、天气条件和地域环境等相关.

表 1 我国部分地区黑碳气溶胶浓度观测结果

Table 1 Observational result of BC concentration in some regions of China

地点	观测时间	仪器型号	粒径	黑碳浓度/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$
南京北郊(本研究)	2015-01 ~ 2015-10	AE-33	$\text{PM}_{2.5}$	$2\,524 \pm 1\,754$
西安 <sup>[13]</sup>	2006-03 ~ 2007-02	AE-16-ER	$\text{PM}_{2.5}$	10 000
深圳 <sup>[18]</sup>	2009	AE-31	$\text{PM}_{2.5}$	5 720
杭州 <sup>[19]</sup>	2011-07 ~ 2012-06	AE-31	$\text{PM}_{2.5}$	$5\,140 \pm 2\,510$
上海 <sup>[21]</sup>	2008-01 ~ 2012-12	AE-31	$\text{PM}_{2.5}$	$3\,625.9 \pm 3\,049.3$
苏州 <sup>[22]</sup>	2012-01 ~ 2012-12	AE-31	TSP	3 300
天津 <sup>[23]</sup>	2010-09 ~ 2011-01	AE-31	$\text{PM}_{2.5}$	$6\,890 \pm 5\,930$
北京 <sup>[24]</sup>	2006 ~ 2012	AE-31	TSP	$2\,200 \pm 2\,400$
兰州 <sup>[25]</sup>	2007-01 ~ 2009-08	AE-31	$\text{PM}_{2.5}$	1 568
敦煌 <sup>[26]</sup>	2006-04 ~ 2006-05	AE-31	TSP	1 890

## 2.2 黑碳气溶胶的季节变化

观测数据表明,南京北郊黑碳浓度呈现出冬季高春季低的变化特点,春季、夏季、秋季和冬季这 4 个季节浓度分别为  $(2\,142 \pm 1\,240)$ 、 $(2\,468 \pm 1\,447)$ 、 $(2\,562 \pm 1\,973)$  和  $(3\,468 \pm 2\,455)\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ,

其中冬季黑碳浓度约为春季的 1.6 倍. 黑碳浓度季节变化的原因取决于各个季节黑碳的污染源强,与天气过程、盛行风向等也有密切关系. 冬季黑碳浓度较高主要与冬季燃煤活动的增加、以及冬季频繁出现的逆温天气有关. 图 2 给出了不同季节黑碳小

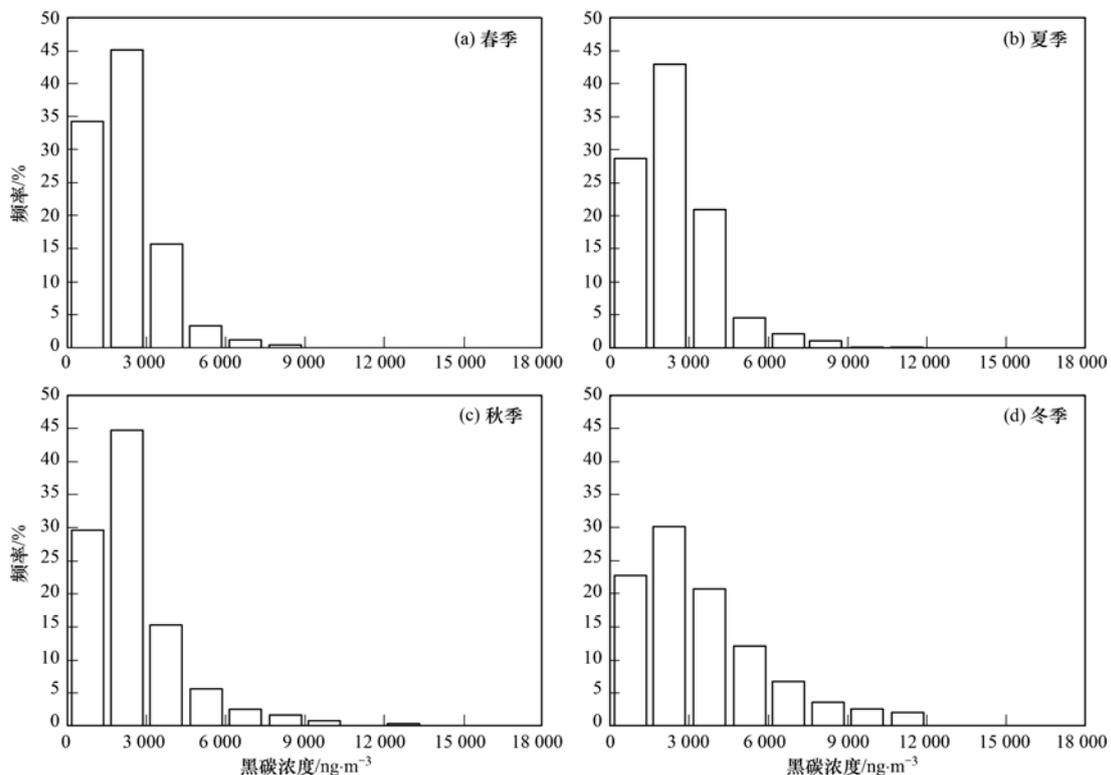


图 2 黑碳小时平均浓度频率分布

Fig. 2 Frequency distribution of hourly BC concentration

时平均浓度的频率分布,4 个季节黑碳小时高频值对应的数值范围基本都在  $1\,500 \sim 3\,000 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  之间. 冬季黑碳浓度小于  $3\,000 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  的数据占总体的 53%, 而春季、夏季和秋季浓度小于  $3\,000 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  的数据所占比例基本相当, 分别为 79%、71% 和 73%. 同时, 春、夏、秋季黑碳浓度几乎都在  $6\,000 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  以内, 大于  $6\,000 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  的高值所占比例很小, 而冬季黑碳浓度不仅高值多且占的比例也偏高, 大于  $6\,000 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  的高值占到了 27%. 通过以上黑碳浓度季节变化和频率分布情况表明了南京北郊冬季黑碳重污染事件明显高于其他 3 个

季节.

### 2.3 黑碳气溶胶逐日变化和日变化特征

图 3 为南京北郊 2015 年 1 ~ 10 月黑碳日平均浓度的变化趋势分布, 空白区数据缺失. 可以看出观测期间南京北郊黑碳小时平均浓度变化波动较大, 秋冬季黑碳浓度变化尤为显著, 其中 1 月 21 ~ 26 日以及 10 月 13 ~ 19 日左右黑碳浓度在图中表现出的高值可能与该时间段内南京地区持续的雾霾天气相关. 而春夏季由于降水过程增多、大气湍流作用的加强, 黑碳浓度值整体偏低且波动程度与秋冬季相比相对较小.

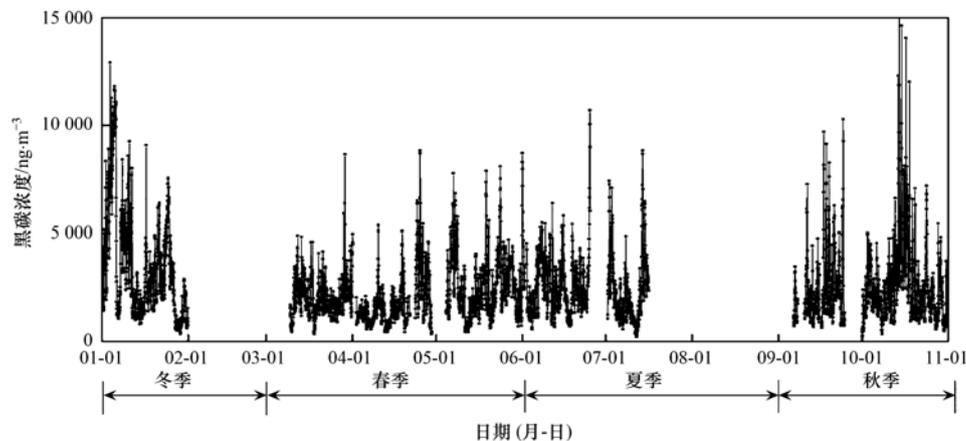


图 3 观测期间黑碳小时平均浓度变化序列

Fig. 3 Time series of hourly mean BC concentration during the observation period

图 4 分析了南京北郊黑碳气溶胶平均日变化特征. 从中可知, 各季节黑碳浓度日变化趋势基本相同, 均有明显的峰值和谷值, 峰值分别出现在 07:00 ~ 08:00 和 21:00 ~ 22:00, 谷值出现在 13:00 ~ 15:00. 日出后人为活动逐渐增多, 特别是上班高峰期 07:00 前后, 来往的机动车辆增加, 汽车尾气的大量排放使得黑碳排放显著增多; 此外, 清晨大气逆温现象的发生, 也会导致黑碳浓度升高<sup>[14]</sup>, 从而在 07:00 ~ 08:00 达到全天最大值. 而后随着大气边界层持续抬高, 对流、湍流作用加强, 污染物不断扩散, 黑碳浓度也随之逐渐下降, 在 13:00 ~ 15:00 达全天最小值. 17:00 以后伴随着下班高峰期和居民烹饪活动, 黑碳气溶胶排放持续增加, 同时日落后气层结趋于稳定, 黑碳气溶胶易在近地面堆积, 于 21:00 形成一个次高值区. 午夜后由于人为活动的减少以及机动车尾气排放的降低, 黑碳浓度略有下降, 但仍然维持在一个较高的水平, 夏季和春季黑碳浓度维持在  $2\,400 \sim 2\,700 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ , 秋季和冬季维持在  $2\,900 \sim 3\,700 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ . 主要原因可能在于南京具有很高的逆温频率, 逆温层在傍晚时分即可形成, 随

时间的推移, 其强度也在不断的增大, 导致黑碳气溶胶不易扩散<sup>[28]</sup>.

不同季节黑碳浓度日变化特征略有差异, 冬季最高峰值、最低谷值分别出现于 08:00 和 15:00, 分别较其他 3 个季节晚 1 h, 其产生的原因主要与逆温层和人类活动规律有关, 冬季逆温现象出现频繁, 抑

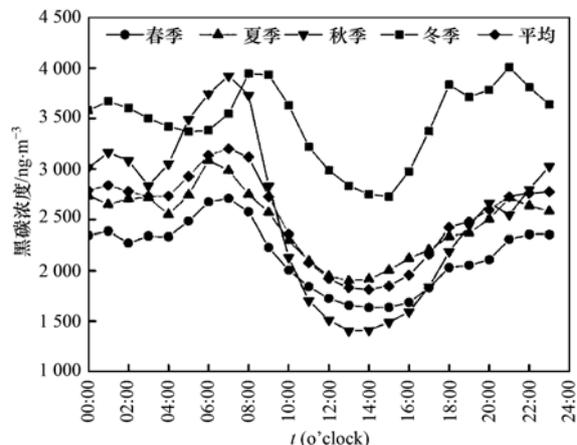


图 4 不同季节黑碳小时平均浓度日变化

Fig. 4 Diurnal variation of hourly mean BC concentration in different seasons

制对流扩散,从而有利于黑碳的堆积. 冬季由于人类活动的推后,黑碳排放时间也随之延迟. 另外,秋季黑碳浓度在 1 d 内波动程度较其他 3 季的更加明显和突出,秋季的最大日内浓度差达  $2\,516\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其他 3 季仅在  $1\,072\sim 1\,279\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  内,黑碳浓度的日内变化幅度反映了排放源的排放特征,同时也和不同季节的气象要素变化的影响有关.

为了深入分析人为排放对黑碳浓度的影响,按照工作日和休息日将黑碳小时资料进行分组讨论. 如图 5 所示,南京北郊工作日和休息日黑碳气溶胶的日变化特征均为双峰结构. 相比秋冬季,春夏季工作日和休息日之间的变化差异较小,表明春夏季

黑碳浓度的变化受风场和降水作用影响较大. 秋季休息日黑碳小时平均浓度低于工作日,休息日由于人为活动以及来往机动车的减少,因此黑碳浓度相对较低;而冬季黑碳浓度则表现出休息日高于工作日的特征,这可能与期间稳定的天气形势有关. 冬季近地层逆温较为严重,使得污染物不易扩散,在近地层逐渐累积,从而黑碳维持较高水平. 虽然工作日黑碳排放量比休息日大,但累积效应使得休息日黑碳浓度反而高于工作日. 此外,由于本研究选取分析的冬季时间较短,与实际冬季休息日和工作日黑碳浓度变化的平均状况可能还存在一定误差,明确的结论需要更多的数据来进一步验证.

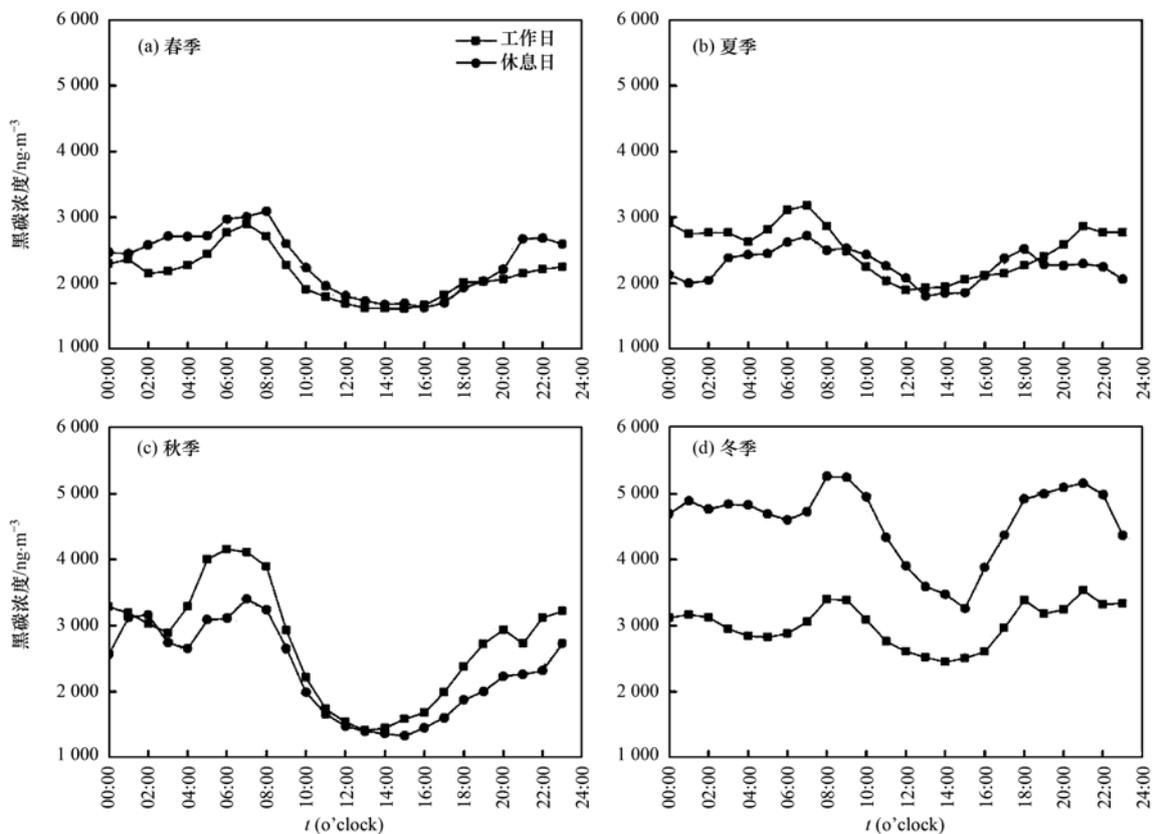


图 5 工作日和休息日黑碳小时平均浓度日变化

Fig. 5 Diurnal variation of hourly mean BC concentration on workday and non-workday

#### 2.4 黑碳气溶胶和污染物浓度的关系

大气中黑碳主要来源于燃煤、生物质燃烧和机动车尾气等,其中有大部分源于燃煤和生物质燃烧<sup>[29]</sup>. 图 6 给出了黑碳气溶胶与  $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{SO}_2$  浓度的相关散点图. 黑碳气溶胶与  $\text{PM}_{2.5}$  相关系数达 0.61,由于黑碳气溶胶是其中的重要组成成分,故两者的相关性较显著.  $\Delta\text{BC}/\Delta\text{PM}_{2.5}$  为 0.022,该比值低于上海夏季的 0.075,与北京夏季的 0.027 接近<sup>[30]</sup>. 虽然上海和南京同处长江三角洲,但

$\text{PM}_{2.5}$  中黑碳质量浓度受污染源和气象条件的共同作用的影响. 黑碳气溶胶和  $\text{NO}_x$  也有着较好的相关性,相关系数达 0.67,表明二者有共同的来源. 本研究观测点靠近高速公路,因此受汽车尾气排放的影响大,汽车尾气的排放导致  $\text{NO}_x$  浓度的升高,这也清楚地解释了二者之间较好的相关性. 黑碳气溶胶与  $\text{CO}$ 、 $\text{SO}_2$  的相关系数分别为 0.46 和 0.44,表明  $\text{CO}$ 、 $\text{SO}_2$  和黑碳气溶胶也均存在着部分共同的来源. 黑碳气溶胶和  $\text{CO}$  都来

自化石燃料、生物质以及生物燃料的燃烧<sup>[30]</sup>, 不同地区、不同季节因为污染源排放的差异,  $\Delta BC/\Delta CO$  比值大小也不同. 观测期间  $\Delta BC/\Delta CO$  为 0.0010, 该值远低于杭州的 0.0029<sup>[19]</sup>. 由于  $\Delta BC/\Delta CO$  比值很大程度上受生物质燃烧的影响,

且生物质燃烧期间该比值低于一般水平<sup>[31]</sup>, 杭州的观测地点设在市中心, 而本研究观测位于郊区, 受秸秆等生物质燃烧影响更大, 从而导致  $\Delta BC/\Delta CO$  较低.  $SO_2$  主要来源为工业燃煤等排放, 对黑碳气溶胶浓度也有一定的贡献.

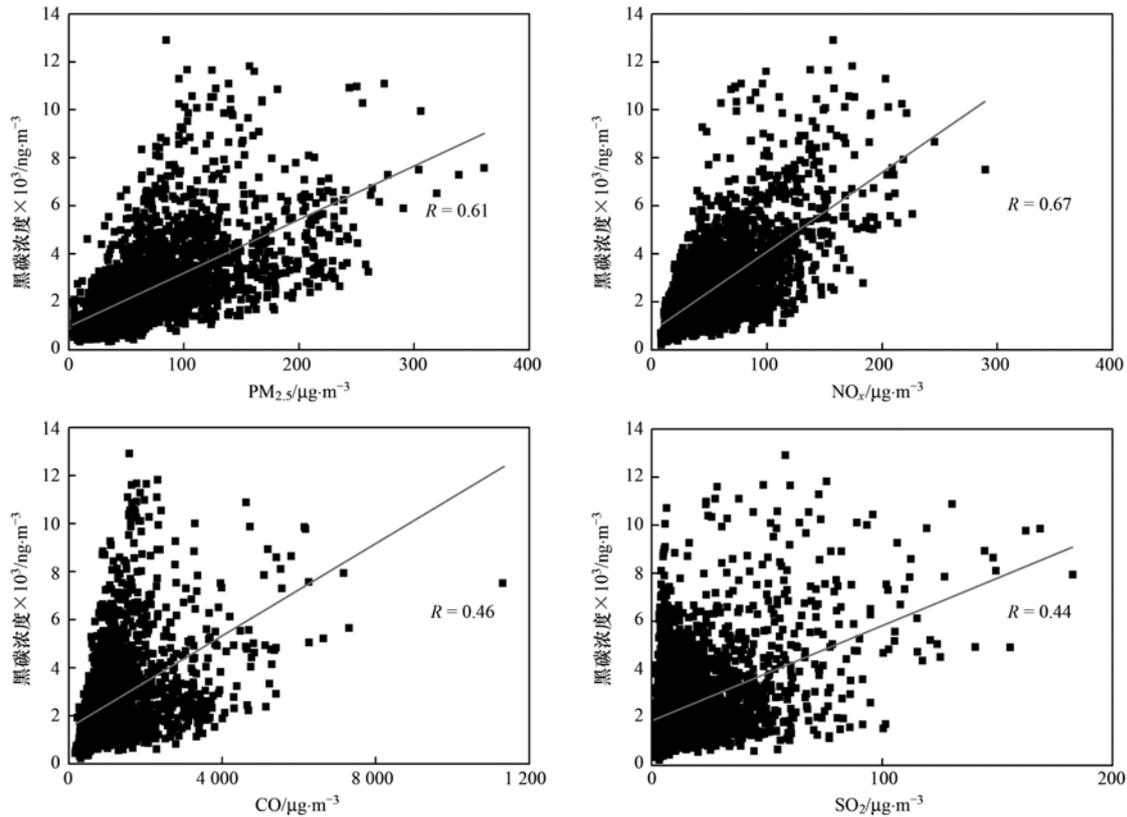


图6 黑碳气溶胶与气态污染物及颗粒物浓度的相关性

Fig. 6 Relationships between BC and gaseous pollutants and particle concentrations

## 2.5 风向和风速对黑碳气溶胶浓度的影响

将观测期间南京北郊小时平均风速分成 16 个等级区间, 并计算不同风速区间内黑碳浓度的平均值. 由图 7 可见, 南京北郊大气中黑碳气溶胶质量浓度的变化受风速影响显著, 其浓度随风速增大而逐步减小; 而在静风和小风条件下, 黑碳气溶胶平均质量浓度值较大. 这与沙漠地区风速增大后 (大于  $3.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 黑碳气溶胶浓度值增加有一定的区别<sup>[32]</sup>. 而不同风向气团的输送对黑碳气溶胶的浓度也有不同影响 (图 8). 观测期间南京北郊盛行西风 and 西-西南风, 且该风向下输送气团较为清洁. 然而, 不同季节间存在一定差异. 小于  $2000 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  的低黑碳浓度事件在各个季节对应的高频风向分别是: 春季为正西和西-西北风向; 夏季和秋季均为正西风向; 冬季为西-西南风向. 冬季整体黑碳质量浓度水平较高, 期间东风和东-东南风占主导地位, 且该风向下黑碳气溶胶超过  $6000 \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$  的高浓度事

件分为 4.8% 和 5.2%, 略高于其他风向上所占比例. 虽然秋季黑碳浓度整体水平低于冬季, 但黑碳高浓度事件也多出现在东风下, 可能是受到采样点

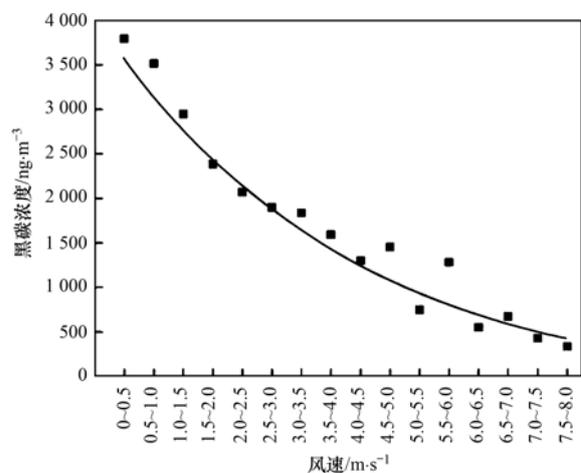


图7 风速与黑碳浓度的关系

Fig. 7 Relationship between BC and wind speed

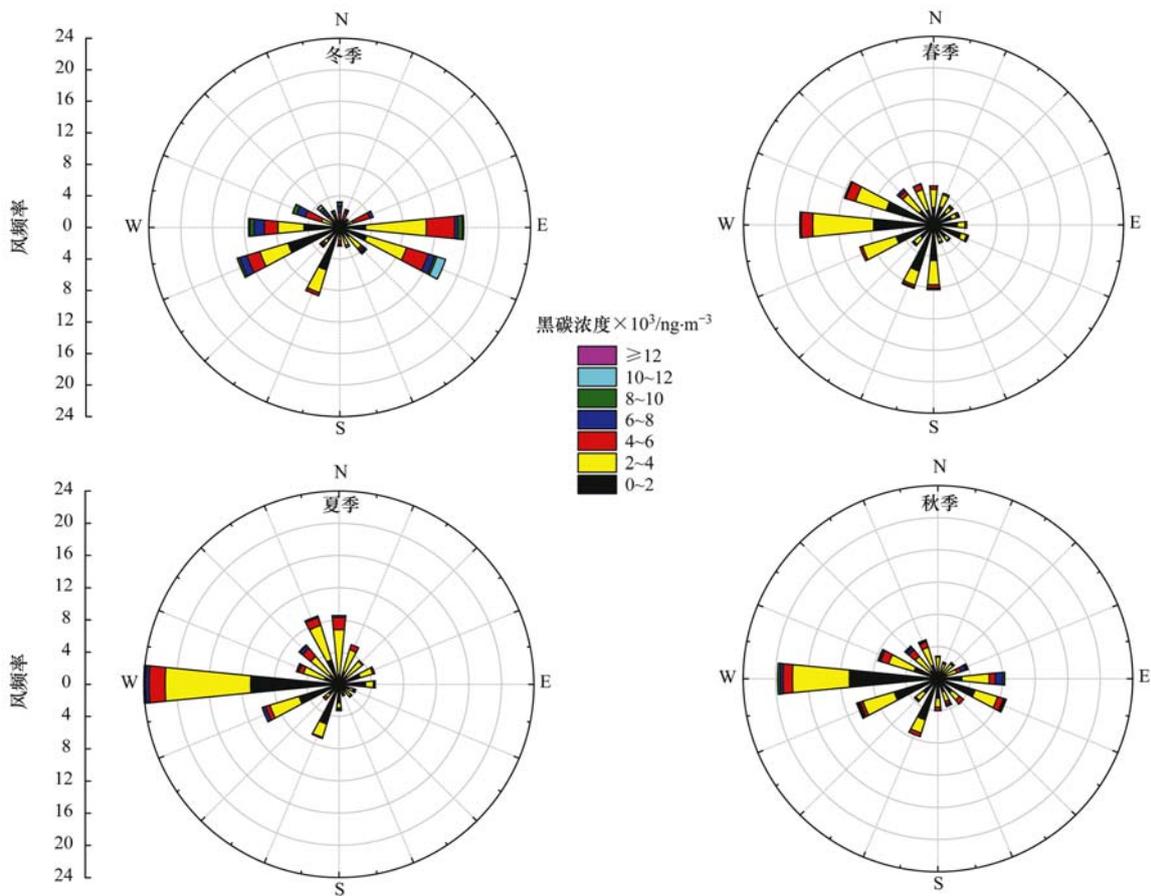


图 8 不同季节不同风向下黑碳浓度分布

Fig. 8 Distributions of BC concentrations in different wind directions in different seasons

东南部钢铁能源企业污染排放等影响。

## 2.6 污染期间黑碳浓度特征

为深入了解污染条件下黑碳气溶胶浓度的变化特征,根据气象行业标准对霾定义的表述<sup>[33]</sup>将观测期间4 774 h的观测数据按能见度大小加以筛选分类,结果如表2。对比非霾天气,可以发现灰霾期间 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 等污染气体浓度明显偏高,同时风速和温度相对较低、RH值较大,重度霾天气状态下这种差异更明显。随污染加重(即大气能见度下降),黑碳浓度呈逐渐上升的趋势。灰霾天气下的平均黑碳浓度约为非霾天气下的2倍;重度霾天气时的黑碳浓度分别是灰霾和非霾的1.2倍和2.3倍。本研究的采样点靠近高速公路,且周围分布有大型化工企业,局地的汽车尾气排放和工业污染较严重。排放的汽车尾气和工业污染物在灰霾天风速、温度相对较低、相对湿度较高的静稳天气条件下,受不利大气扩散条件的影响,更易在近地层积聚从而使黑碳浓度偏高;此外,周边地区的黑碳排放也可能导致输送型污染。

表 2 霾与非霾条件下颗粒物、污染气体浓度及气象要素水平

Table 2 Concentrations of particle and gaseous pollutants and meteorological factors in hazy and non-hazy weather

观测项目	非霾 ( $V \geq 10$ km)	灰霾 ( $V < 10$ km)	重度霾 ( $V < 2$ km)
样本数	348	3 028	345
黑碳浓度/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$	$1\,396 \pm 661$	$2\,662 \pm 1\,756$	$3\,189 \pm 1\,831$
$\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$31 \pm 12.9$	$73.6 \pm 47.1$	$117.4 \pm 69.2$
$\text{NO}_x/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$35.8 \pm 20$	$54.8 \pm 35.8$	$56.2 \pm 28.5$
$\text{SO}_2/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	$16.3 \pm 13$	$16.9 \pm 19.3$	$17.9 \pm 8.3$
风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$2.65 \pm 1.23$	$1.93 \pm 0.99$	$1.51 \pm 0.76$
RH/%	$40.4 \pm 17.5$	$67.3 \pm 20.1$	$88.3 \pm 6.67$
温度/ $^{\circ}\text{C}$	$19.2 \pm 9.14$	$16.1 \pm 9$	$12.3 \pm 9.4$

2015年1月23~25日,南京北郊连续72 h大气能见度不足10 km,最低小时能见度仅0.94 km,3 d的平均相对湿度为71%。根据文献<sup>[33]</sup>的气象行业标准,将这3 d作为典型霾日来分析霾期间黑碳浓度变化时间序列和输送特征。此次霾期间南京北郊 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度小时均值达 $(192 \pm 60) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,黑碳浓度达到了 $(4\,641 \pm 1\,465) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ,约为观测期平均值的1.8倍。如图9,霾期间黑碳和 $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓

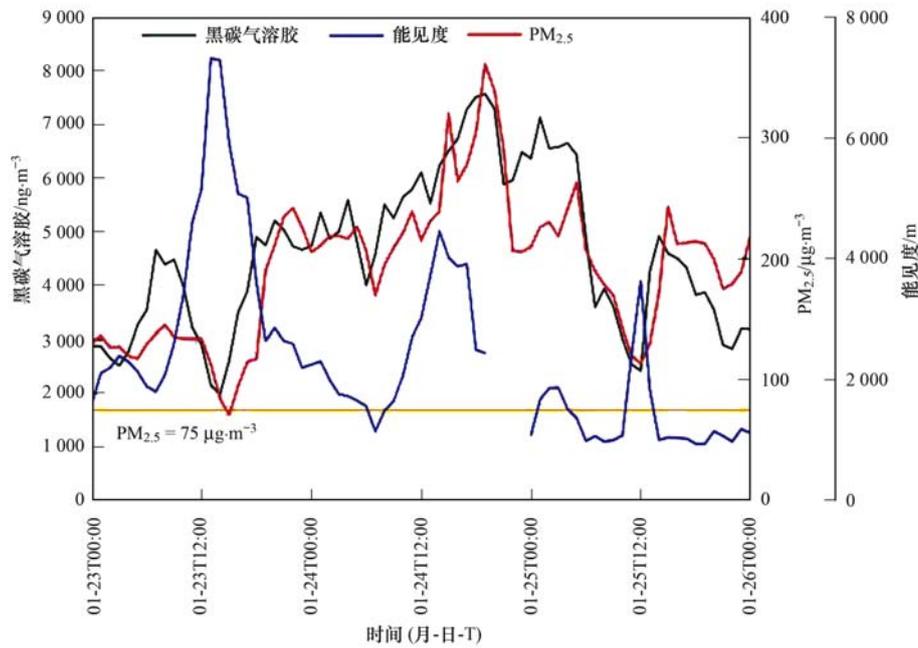


图9 污染期间南京北郊能见度和黑碳、PM<sub>2.5</sub>浓度日变化

Fig. 9 Variations of visibility, and concentration of BC, PM<sub>2.5</sub> during haze days

度变化趋势基本一致,但峰值并没有出现在同一时刻,PM<sub>2.5</sub>比黑碳浓度峰值早出现1~2 h,这与二者的来源有关,黑碳浓度主要来源于机动车尾气排放,而PM<sub>2.5</sub>浓度除了来源于机动车尾气外,还与工业烟(粉)尘、建筑扬尘有关<sup>[34]</sup>. 霾期间黑碳气溶胶和能见度的相关系数很低,仅为-0.14,这说明南京北郊大气能见度的降低主要是由散射型的气溶胶成分引起,比如硫酸盐、硝酸盐以及有机物等影响因素<sup>[35]</sup>. 利用美国国家海洋和大气局(NOAA)等开发

的HYSPLIT-4模式分析了1月23~25日每日48 h的后向气流轨迹,设置100、500、1000 m这3个高度. 由图10可见,1月23日南京北郊中高空主要受偏西北气团,途经山西、河南、安徽的影响;低层受源自北部气流的影响,途经河北、安徽、江苏北部到达南京. 1月24日中高空受到西部气团影响;低空气流来自东南部,且输送距离较短,说明低层受局地源排放影响较多. 而1月25日低空仍受东南气流作用,中高空则由受途经湖北、安徽等地的影响

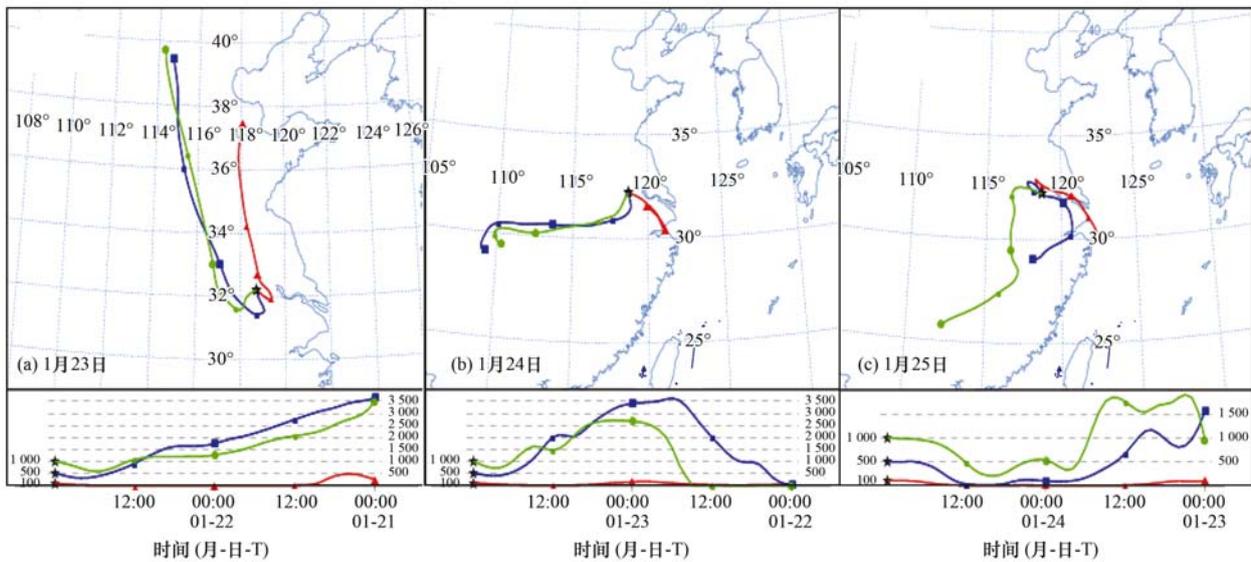


图10 1月23~25日气团后向轨迹

Fig. 10 Backward trajectory charts for Jan. 23-25

转为西南部途经江西、浙江气团的影响。此次霾过程中高空气流波动较大,而近地面气流趋于平稳。

### 3 结论

(1) 观测期间南京北郊大气黑碳气溶胶浓度小时浓度均值为  $(2\,524 \pm 1\,754) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ , 本底值为  $1\,431 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。黑碳浓度季节变化呈冬季高春季低的特点,其中冬季黑碳浓度约为春季的 1.6 倍。不同季节黑碳浓度的频率分布表明,南京北郊冬季黑碳重污染事件明显高于其他 3 个季节。黑碳浓度在各个季节表现出明显的双峰特征,峰值出现在上午 07:00~08:00 和夜间 21:00~22:00。

(2) 黑碳气溶胶和  $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  相关性较好,相关系数分别达到了 0.67 和 0.61,存在共同来源。黑碳气溶胶和  $\text{CO}$ 、 $\text{SO}_2$  存在一定相关性,有部分共同来源。但  $\Delta\text{BC}/\Delta\text{CO}$  比值较低,说明南京北郊生物质燃烧排放较多。

(3) 黑碳气溶胶浓度受风向、风速影响显著。其随风速增加呈下降趋势;所有季节中小于  $2\,000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$  的低黑碳浓度主要集中在正西风及相邻风向上,秋冬季大于  $6\,000 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$  高黑碳浓度则多出现在偏东风下。

(4) 灰霾和重度霾天气下,黑碳浓度平均值分别是非霾天气下的 2 倍和 2.3 倍;局地排放对灰霾期间黑碳高值有一定贡献。1 月 23~25 日霾污染事件分析发现,期间黑碳高浓度过程可能与来自测站偏西部中高空气流的输送以及低层来自北部、东南方向气团的输送有关。

#### 参考文献:

- [1] 章秋英, 牛生杰, 沈建国, 等. 半干旱区冬春季黑碳气溶胶吸收特性的观测研究[J]. 中国沙漠, 2009, **29**(1): 183-188.
- [2] 许黎, 王亚强, 陈振林, 等. 黑碳气溶胶研究进展 I: 排放、清除和浓度[J]. 地球科学进展, 2006, **21**(4): 352-360.
- [3] 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.
- [4] 张华, 马井会, 郑有飞. 黑碳气溶胶辐射强迫全球分布的模拟研究[J]. 大气科学, 2008, **32**(5): 1147-1158.
- [5] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols[J]. Nature, 2001, **409**(6821): 695-697.
- [6] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon[J]. Nature Geoscience, 2008, **1**(4): 221-227.
- [7] 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.
- [8] 张楠, 覃栋, 谢绍东. 中国黑碳气溶胶排放量及其空间分布[J]. 科学通报, 2013, **58**(19): 1855-1864.
- [9] 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.
- [10] Bond T C, Streets D G, Yarber K F, et al. A technology-based global inventory of black and organic carbon emissions from combustion[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2004, **109**(D14): D14203.
- [11] 秦世广, 汤洁, 温玉璞. 黑碳气溶胶及其在气候变化研究中的意义[J]. 气象, 2001, **27**(11): 3-7.
- [12] 汤洁, 温玉璞, 周凌晔, 等. 中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究[J]. 应用气象学报, 1999, **10**(2): 160-170.
- [13] 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.
- [14] 李杨, 曹军骥, 张小曳, 等. 2003 年秋季西安大气中黑碳气溶胶的演化特征及其来源解析[J]. 气候与环境研究, 2005, **10**(2): 229-237.
- [15] 田军, 王体健, 庄炳亮, 等. 南京北郊黑碳气溶胶的浓度观测及辐射强迫研究[J]. 气候与环境研究, 2013, **18**(5): 662-670.
- [16] 吴兑, 毛节奏, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2009, **39**(11): 1542-1553.
- [17] 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[A]. 见: 中国颗粒学会. 中国颗粒学会 2002 年年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会会议论文集[C]. 桂林: 中国颗粒学会, 2002. 5.
- [18] 孙杰, 孙天乐, 何凌燕. 深圳市环境空气中黑碳气溶胶的污染特征研究[J]. 中国测试, 2012, **38**(3): 8-11.
- [19] 徐昶, 沈建东, 叶辉, 等. 杭州黑碳气溶胶污染特性及来源研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(12): 3026-3033.
- [20] 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.
- [21] 王洪强, 贺千山, 陈勇航, 等. 2008~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(4): 1215-1222.
- [22] 丁铭, 邹强, 葛顺, 等. 苏州市黑碳气溶胶的污染特征分析[J]. 中国环境监测, 2014, **30**(6): 67-71.
- [23] 姚青, 蔡子颖, 韩素芹, 等. 天津城区秋冬季黑碳气溶胶观测与分析[J]. 环境化学, 2012, **31**(3): 324-329.
- [24] 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.
- [25] 张磊, 张镭, 张丁玲, 等. 兰州远郊区黑碳气溶胶浓度特征[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(8): 1248-1255.
- [26] 高润祥, 牛生杰, 张华, 等. 2006 年春季西北地区黑碳气溶胶的观测研究[J]. 南京气象学院学报, 2008, **31**(5): 655-661.
- [27] 童尧青, 银燕, 钱凌, 等. 南京地区霾天气特征分析[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(5): 584-588.
- [28] 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.
- [29] Streets D G, Gupta S, Waldhoff S T, et al. Black carbon emissions in China[J]. Atmospheric Environment, 2001, **35**(25): 4281-4296.
- [30] 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.
- [31] Girach I A, Nair V S, Babu S S, *et al.* Black carbon and carbon monoxide over Bay of Bengal during W \_ ICARB: source characteristics[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **94**: 508-517.
- [32] 陆辉, 魏文寿, 崔彩霞, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地黑碳气溶胶浓度[J]. *中国沙漠*, 2014, **34**(4): 1087-1093.
- [33] QX/T 113-2010, 霾的观测和预报等级[S].
- [34] 黄辉军, 刘红年, 蒋维楣, 等. 南京市 PM<sub>2.5</sub> 物理化学特性及来源解析[J]. *气候与环境研究*, 2006, **11**(6): 713-722.
- [35] 沈家芬, 冯建军, 谢利, 等. 广州市大气能见度的特征及其影响因子分析[J]. *生态环境*, 2007, **16**(4): 1199-1204.
- 

## 《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjkx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址: 北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编: 100085

电 话: 010-62941102, 010-62849343

传 真: 010-62849343

E-mail: [hjkx@rcees.ac.cn](mailto:hjkx@rcees.ac.cn)

网 址: [www.hjkx.ac.cn](http://www.hjkx.ac.cn)

## CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013 .....	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi .....	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang .....	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing .....	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing .....	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai .....	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir .....	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station .....	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter .....	LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains .....	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section) .....	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors .....	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake .....	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System .....	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing .....	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply .....	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release .....	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC .....	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water .....	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI) .....	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir .....	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater .....	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i> .....	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment .....	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou .....	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process .....	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource .....	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe <sup>0</sup> -PRB Systems .....	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd <sup>2+</sup> from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles .....	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPY/AQDS in Microbial Fuel Cells .....	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrate .....	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i> (3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment .....	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR) .....	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin .....	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils .....	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China .....	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile .....	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice .....	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination .....	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil .....	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils .....	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing .....	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain .....	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary .....	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)
Variation of Soil CO <sub>2</sub> Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment .....	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City .....	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil .....	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i> .....	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin .....	LI Hong-juan, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process .....	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene .....	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)

# 《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)

2016年9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 15, 2016

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	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行