

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第4期

Vol.35 No.4

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

2008 ~2012 年上海黑碳浓度变化特征分析	王洪强,贺千山,陈勇航,亢燕铭 (1215)
乌鲁木齐市东南郊一次降雪过程的化学组成及其悬浮态颗粒形态特征	陆辉,魏文寿,崔彩霞,何清,王瑶 (1223)
典型地区大气中多溴联苯醚和新型溴代阻燃剂的水平及组成分布	吴辉,金军,王英,李明圆,何松洁,徐萌,孙一鸣 (1230)
某焦化厂周边大气 PM ₁₀ 重金属来源及健康风险评价	董婷,李天昕,赵秀阁,曹素珍,王贝贝,马瑾,段小丽 (1238)
基于车流和大气污染物浓度同步增量的机动车平均排放因子估算方法	李润奎,赵彤,李志鹏,丁文军,崔晓勇,许群,宋现锋 (1245)
珠江三角洲地区硫和氮沉降临界负荷研究	孙成玲,谢绍东 (1250)
低温等离子体-生物法处理硫化氢气体研究	李华琴,何觉聪,陈洲洋,黎宝仁,黄倩茹,张再利,魏在山 (1256)
太子河流域莠去津的空间分布及风险评价	郑磊,张依章,张远,朱鲁生,王志强 (1263)
一种大批量测定沉积物微量间隙水样品中溶解态磷和铁含量的方法	王燕,朱春刚,许笛,丁士明 (1271)
外源营养盐输入后水体中营养盐浓度的时空变化	傅玲,赵凯,王国祥,欧媛,范娟,毛丽娜,张佳,韩睿明 (1278)
基于物理过程的矿区地下水污染风险评价	孙法圣,程品,张博 (1285)
重庆典型岩溶地下水系统水文地球化学特征研究	杨平恒,卢丙清,贺秋芳,陈雪彬 (1290)
重庆老龙洞地下河流域氮、磷及微生物污染调查研究	蓝家程,杨平恒,任坤,陈雪彬,徐昕,胡宁 (1297)
苦草 (<i>Vallisneria natans</i>) 根系对沉积物中各形态磷的影响	李振国,王国祥,张佳,马久远,魏宏农,俞振飞 (1304)
循环廊道湿地中氮归趋过程模拟研究	彭剑峰,宋永会,袁鹏,张雪妍,胡小明 (1311)
不同环境因素下太湖中四环素的自然消减	段伦超,王凤贺,纪莹雪,张帆,赵斌,王国祥 (1318)
再生水中 5 种抗生素抗性菌的紫外线灭活及复活特性研究	黄晶晶,汤芳,席劲璇,庞宇辰,胡洪营 (1326)
二级处理出水的 UV-TiO ₂ 消毒及大肠杆菌和粪肠球菌光复活试验	王西峰,龚昕,胡晓莲,任伯帜 (1332)
水中 C ₆₀ 纳米颗粒的稳定性研究	方华,沈冰冰,荆洁,陆继来,王媛 (1337)
XDLVO 理论解析不同离子条件下海藻酸钠微滤膜污染	赵应许,纵瑞强,高欣玉,谢慧君,殷永泉,梁爽 (1343)
纳米零价铁催化过氧化氢强化修复 4-氯硝基苯污染地下水的研究	付融冰 (1351)
共存氯苯类同系物对六氯苯厌氧降解活性的影响	王琪,刘辉,姜林,唐军 (1358)
硫酸盐还原生物滤池对含镉废水去除效果试验研究	吴宣,谭科艳,胡希佳,顾远,杨宏 (1366)
基于氮平衡原理对南方污水处理厂中试脱氮工艺调控策略研究	姜应和,刘佩炬,王磊,田中凯,刘小英 (1372)
模拟电镀污泥阴离子浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	陈燕,黄芳,谢鑫源 (1377)
电活性生物膜介导 Cu ²⁺ 生物还原的试验研究	刘毅,周顺桂,袁勇,刘志 (1384)
模拟废旧线路板生物浸出液中铜的回收	程丹,朱能武,吴平霄,邹定辉,邢翊佳 (1391)
填埋垃圾浸提液与地下水污染物组成差异及成因	何小松,余红,席北斗,崔东宇,潘红卫,李丹 (1399)
化学合成施氏矿物与 H ₂ O ₂ 共存体系下光化学处理垃圾渗滤液的研究	王鹤茹,宋永伟,徐峙辉,崔春红,周立祥 (1407)
处理 BPA 模拟废水的 SBR 工况参数对污泥有机毒性的影响研究	杨娜,陈秀荣,林逢凯,黄华,章斐,赵骏,丁毅 (1414)
剩余污泥厌氧消化甲烷生成势与产甲烷菌多样性的比较研究	董慧岭,季民 (1421)
锰氧化菌 <i>Aminobacter</i> sp. H1 的分离鉴定及其锰氧化机制研究	晏平,姜理英,陈建孟,何智敏,肖少丹,蒋铁锋 (1428)
1 株铁基质自养反硝化菌的脱氮特性	王弘宇,杨开,张倩,季斌,陈丹,孙宇翀,田俊 (1437)
碘普罗胺降解菌 <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 共代谢降解性能研究	徐冰洁,高品,薛翌,何梦琦,吴凡 (1443)
利用流式细胞术研究鞘氨醇单胞菌 GY2B 降解非过程中细菌表面特性的变化	张梦露,党志,伍凤姬,梁旭军,郭楚玲,卢桂宁,杨琛 (1449)
毒性有机物 BPA 与普通小球藻的相互影响特性研究	陈善佳,陈秀荣,闫龙,赵建国,章斐,江子建 (1457)
缺镁胁迫对普通小球藻光合生理及油脂积累的影响	王珊,赵树欣,魏长龙,于水燕,史吉平,张保国 (1462)
微囊藻毒素对水稻根系生长和抗氧化系统的影响	王妮敏,邓琦,邹华,梁婢娟 (1468)
东北春大豆品种东生 1 号对臭氧胁迫的响应	张巍巍,王光华,王美玉,刘晓冰,冯兆忠 (1473)
生物结皮的发育演替与微生物生物量变化	吴丽,张高科,陈晓国,兰书斌,张德禄,胡春香 (1479)
老化土壤中铅对赤子爱胜蚓生长及繁殖的影响	陈丽红,刘征涛,方征,王晓南,王婉华 (1486)
土壤重金属镉标准值差异比较研究与建议	赵晓军,陆泗进,许人骥,李伯苓,吴国平,魏复盛 (1491)
藏北可可西里地区土壤元素背景值研究	柏建坤,王建力,李潮流,康世昌,陈鹏飞 (1498)
三峡库区香溪河消落带及库岸土壤重金属迁移特征及来源分析	胥焘,王飞,郭强,聂小倩,黄应平,陈俊 (1502)
浙江海宁电镀工业园区周边土壤重金属污染特征及生态风险分析	厉炯慧,翁珊,方婧,黄佳蕾,陆芳华,卢宇浩,张洪铭 (1509)
西湖景区土壤典型重金属污染物的来源及空间分布特征	张海珍,唐宇力,陆骏,周虹,徐芸茜,陈川,赵赞,王美娥 (1516)
生活垃圾焚烧厂周边土壤汞污染特征及评价	解惠婷,张承中,徐峰,李海凤,田振宇,唐琛,刘文彬 (1523)
上海滴水湖周边土壤和沉积物对磷的吸附特征	诸葛祥真,毕春娟,陈振楼,张焕焕,倪玮怡 (1531)
SDBS/Na ⁺ 对红壤胶体悬液稳定性的影响	唐颖,李航,朱华玲,田锐,高晓丹 (1540)
稳定化处理对矿渣中重金属迁移转化的影响研究	赵述华,陈志良,张太平,潘伟斌,彭晓春,车融,欧英娟,雷国建,周鼎 (1548)
藻类水体 Cd ²⁺ 毒性快速监测新方法研究	段静波,刘文清,张玉钧,赵南京,殷高方,肖雪,余晓娅,方丽 (1555)
用于 1,3-二硝基苯快速检测的免疫传感器研究	龙峰,施汉昌,王洪臣,盛建武 (1561)
Mg/Al 水滑石微波共沉淀法合成及其对 BrO ₃ ⁻ 吸附性能的研究	钟琼,李欢 (1566)
污染场地修复决策支持系统的几个关键问题探讨	廖晓勇,陶欢,阎秀兰,赵丹,林龙勇,李尤 (1576)
城市区域土壤铅含量空间变异的多尺度研究进展	杨孟,李凤英,刁一伟,吴丹 (1586)
水中细菌内毒素污染特性及检测方法研究进展	张灿,刘文君,张明露,田芳,杨毅,安代志 (1597)
六价铬细菌还原的分子机制研究进展	李斗,赵由才,宋立岩,尹雅洁,王洋清,徐中慧 (1602)
农副食品加工业高浓度废水的厌氧膜生物反应器技术	魏源送,郁达伟,曹磊 (1613)
《环境科学》征稿简则 (1427) 《环境科学》征订启事 (1497) 信息 (1383, 1390, 1398, 1560)	

2008 ~ 2012 年上海黑碳浓度变化特征分析

王洪强¹, 贺千山², 陈勇航¹, 亢燕铭^{1*}

(1. 东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 上海市气象局, 上海 200030)

摘要: 采用上海市城市环境气象中心 2008 ~ 2012 年黑碳质量浓度小时平均资料, 分析了上海市区黑碳质量浓度变化规律。结果表明, 2008 ~ 2012 年间上海黑碳平均质量浓度呈下降趋势, 各年黑碳平均质量浓度从 $(4\,045.3 \pm 3\,375.4) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 降至 $(2\,766.2 \pm 2\,078.9) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 观测期间的逐年变化率分别为 2.3%、-6.5%、-18.7% 和 -12.1%。与其它大城市相比, 黑碳平均质量浓度为中等偏低水平。从年平均变化看, 11 和 12 月的 5 年平均质量浓度最高, 分别为 $5\,426.6 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $5\,365.3 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 其次为 1、6 和 10 月, 分别为 $4\,402.5$ 、 $3\,763.3$ 和 $3\,412.7 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。工作日和休息日的 5 年平均日变化均呈明显双峰结构, 两峰分别出现在北京时间 07:00 ~ 10:00 和 18:00 ~ 22:00, 工作日第一峰高于第二峰, 休息日则相反。5 年间, 工作日黑碳平均质量浓度较休息日高 9%。此外, 根据有效观测数据, 通过回归整理, 给出了一个 5 年平均黑碳质量浓度日变化的逐时经验函数, 以方便估计和预测黑碳浓度水平。

关键词: 黑碳气溶胶; 平均质量浓度; 5 年观测; 日变化; 上海

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)04-1215-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.04.001

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012

WANG Hong-qiang¹, HE Qian-shan², CHEN Yong-hang¹, KANG Yan-ming¹

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. Shanghai Meteorological Bureau, Shanghai 200030, China)

Abstract: The variations of black carbon (BC) mass concentration in Shanghai are analyzed and discussed by using hourly averaged data monitored continuously at Shanghai Urban Environmental Meteorological Center from January 2008 to December 2012. The results show that the annual mean mass concentration of BC decreased from $(4\,045.3 \pm 3\,375.4) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ in 2008 to $(2\,766.2 \pm 2\,078.9) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ in 2012, and the annual changes are 2.3%, -6.5%, -18.7% and -12.1%, respectively. The yearly averaged BC mass concentration in Shanghai is on the low side of middle-level compared with other mega-cities of China. According to the test data, the highest monthly averaged concentration of BC appeared in November and December, which were $5\,426.6 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ and $5\,365.3 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively, and then in January, June and October, which were $4\,402.5$, $3\,763.3$ and $3\,412.7 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. The diurnal cycles of the BC mass concentration show that there are two obvious peaks during morning 07:00-10:00 and during evening 18:00-22:00 Beijing time (BT), and the first peak was higher than the second on weekdays, but opposite on weekends and holidays. The daily mean mass concentration of BC was 9% higher on weekdays than on weekends and holidays. In addition, an empirical equation is obtained for daily BC concentration estimation and prediction using all the effective test data during the 5-year observation period and employing the regression analysis.

Key words: black carbon aerosols; mean mass concentration; 5-year observation; diurnal variation; Shanghai

黑碳产生于含碳燃料的不完全燃烧, 是大气气溶胶中的重要成分, 并且是对光有强烈吸收作用的含碳物质^[1~3]。由于黑碳对气候、环境和人类健康有重要影响, 近 10 余年来, 已成为相关学科领域的研究热点^[4~16]。根据有关全球气候变化的研究, 黑碳对全球变暖的贡献占气溶胶对全球变暖贡献的 80% ~ 90%, 而大气气溶胶的辐射效应已成为全球大气系统中仅次于 CO₂ 的温变组分, 由此导致的全球变暖温度可能高达 0.2 ~ 0.37℃^[7, 10, 17, 18]。此外, 云与气溶胶中黑碳的作用在增强对太阳辐射吸收作用的同时, 也将加速云的蒸发, 从而改变云的存在时间^[19]。有研究表明, 黑碳通过加热大气可以改变区

域大气稳定度和垂直运动, 从而对区域大尺度环流和水循环有重要影响, 并导致农作物减产^[8, 20]。由于黑碳的粒径通常为 0.001 ~ 1 μm, 能进入人体的下呼吸道和肺泡^[21], 并直接与血液接触, 因而对人类健康造成潜在的危害。

上海是长三角地区最大的城市, 占地面积 6 430 km², 人口已超过 2 300 万^[22]。近 20 年来, 由于经济

收稿日期: 2013-08-29; 修订日期: 2013-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275157); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2011CB403405)

作者简介: 王洪强(1986~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气气溶胶, E-mail: 1119123@mail.dhu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: ymkang@dhu.edu.cn

和城市建设的快速发展,城市空气质量不断恶化.目前,上海全年霾日已超过 200 d,而研究还表明,黑碳是颗粒物中的重要成分.如 Feng 等^[23]在 2005 年 10 月,2006 年 1、4 和 7 月对上海地区黑碳进行了观测,发现在 $PM_{2.5}$ 中,碳质气溶胶成分高达 30%.杨溯等^[24]对上海浦东秋季黑碳气溶胶质量浓度进行了连续观测,发现其浓度达 $5\,621\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,仅次于北京等少数城市,并与空气污染指数值存在很高的一致性.肖秀珠等^[25]对比分析了 2007 年 12 月~2008 年 11 月期间市区和郊区黑碳的时间变化特征,并简要分析了气象要素对黑碳浓度的影响. Hou 等^[26]分析了 2006 年 4 月~2007 年 1 月间上海市中心东北区域气溶胶浓度和成分变化规律,认为有机碳和元素碳(黑碳)对霾的形成有重要作用. Geng 等^[15]发现黑碳与心血管疾病死亡率和总死亡率有较强相关性.

然而需要指出的是,上述对上海地区黑碳气溶胶问题的研究尚有值得进一步深入的必要性.比如,相关的研究结果发现,最近若干年,上海地区的黑碳气溶胶浓度有下降趋势,并且同一地区不同位置采样点得到的数据不一致^[23~25,27,28].因此,通过连续若干年的观测可能对了解其全年变化规律更为可靠,并有助于判断其浓度水平及增减特征,以便正确判断其来源.为此,本研究将利用对上海 2008~2012 年连续 5 年的黑碳气溶胶质量浓度变化的观测资料,分析上海黑碳的年际变化、年变化以及日变化规律,以期为进一步认识上海黑碳污染水平和变化特征现状和制定针对黑碳的大气污染控制策略提供必要的参考.

1 材料与方法

观测设备为 AE-31 型黑碳仪(Aethalometer, Model AE-31, Magee Scientific Co., USA). 吴兑等^[29]对其可靠度和实测准确度进行过比对和分析. AE-31 为连续在线观测型仪器,共有 7 个通道,本研究采用 AE-31 标准通道(波长 880 nm)的采样结果作为黑碳气溶胶质量浓度的代表值.实测时,仪器放置在上海市城市环境气象中心业务楼的屋顶上($31^{\circ}14'N$, $121^{\circ}32'E$, 距离地面高度约为 10 m),采样观测箱与最近的城市道路水平距离大于 30 m,与世纪公园的水平距离为 50 m,位置见图 1 所示.

AE-31 的采样流量为 $5\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,采样频率 5 min,进气口使用 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 切割头.仪器置于观测集装箱内,采样进气口位于箱顶,采样口离地面高度大

于 12 m,仪器所在楼顶无障碍物遮挡.其余采样信息与文献[29]相同.

根据 AE-31 的测量原理,当一束强度为 I_0 的光照射附着有黑碳的滤膜时,由于光衰减与滤膜上黑碳质量呈线性比例关系,因此,通过测量透过采样滤膜的光学衰减量,即可确定样品中黑碳气溶胶含量.在一定范围内,光学衰减量与黑碳含量 M_{BC} 的关系如下:

$$ATN_{\lambda} = \ln(I_0/I) = \sigma_{\lambda} M_{BC} \quad (1)$$

式中, ATN_{λ} 为采样一个周期的光学衰减量, I 为透过滤膜后的光强, σ_{λ} 为某一波长黑碳气溶胶的比衰减系数,即单位面积沉积在滤膜上的单位质量黑碳气溶胶对光的衰减率, $\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$. 根据黑碳气溶胶的不同来源及混合状态, σ_{λ} 一般在 $10\sim19\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 间变化. 本文采用的是厂家推荐的 $16.6\text{ m}^2\cdot\text{g}^{-1}$, M_{BC} 为单位面积采样膜上的黑碳质量, $\text{ng}\cdot\text{m}^{-2}$. 有关 AE-31 的其他技术信息可见文献[24,29,30].

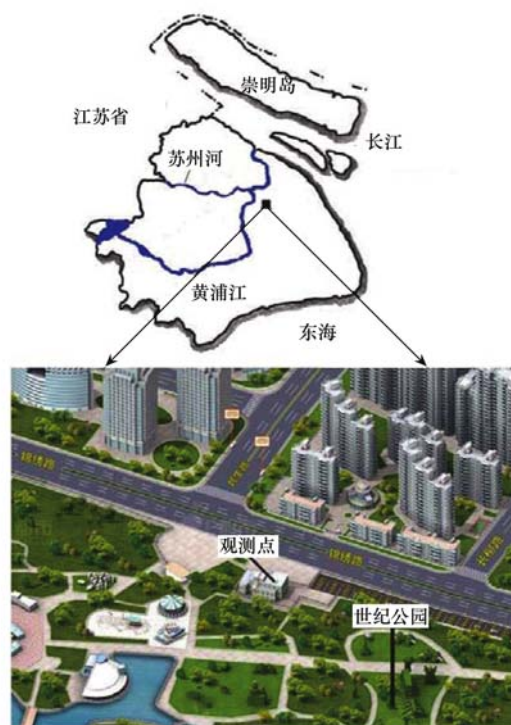


图 1 上海市区观测点示意

Fig. 1 A map of the sampling location in Shanghai

观测得到的数据为 2008 年 1 月~2012 年 12 月连续测量的黑碳质量浓度小时平均值. AE-31 工作过程中,采样频率设定为 5 min,各时刻点的测量值均为 1 h 平均.取平均时,剔除明显异常的输出值和仪器标记为坏点的值.观测过程其他信息可见文献[25].经统计,5 年观测获得的有效数据共有 39 406 个.考虑到降雨对黑碳的清除作用,本研究仅对非降

雨情况进行分析. 根据测量记录, 非降雨天有效数据共 24 113 个, 其中非降雨天工作日 16 579 个, 休息日 7 534 个. 需要说明的是, 若 1 d 内有超过 1 h 降雨, 即作为降雨天处理. 另外, 考虑到本研究观测点的具体位置, 认为观测结果可以代表二类功能区中商业交通居民混合区、文化区和一般工业区的一般水平.

2 结果与讨论

2.1 黑碳年际和年变化特征

利用 2008 年 1 月 ~ 2012 年 12 月间观测获得的非降雨天黑碳浓度小时平均值数据, 可得到 5 年的黑碳年平均质量浓度 C_{BC} 的年际变化特征, 结果示于图 2.

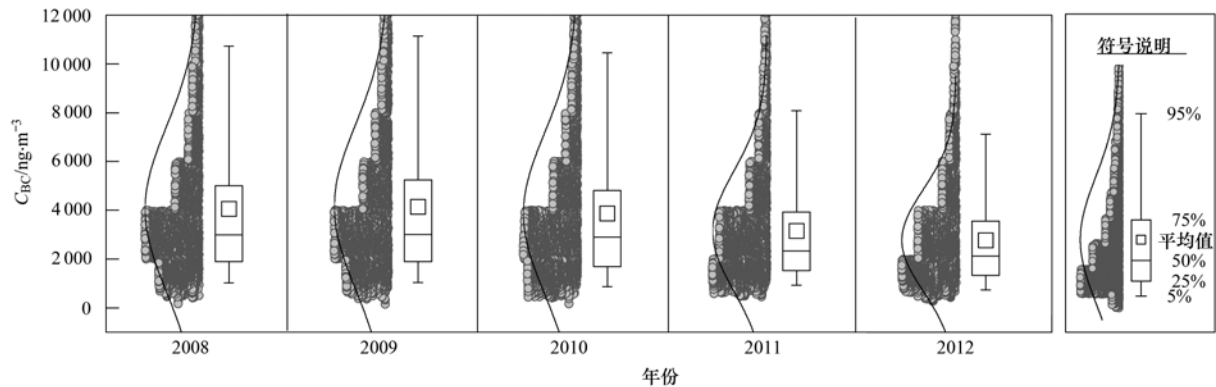


图 2 黑碳质量浓度 C_{BC} 年际变化特征 (2008 ~ 2012)

Fig. 2 Characteristics of annual variation of BC mass concentration C_{BC} (2008-2012)

从图 2 中可以看出, 2009 年黑碳质量浓度的平均值最大, 从浓度分布百分比来看, C_{BC} 小于 3 000 和小于 11 000 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 的观测值分别占总观测值的 50% 和 95%, 并且 90% 的观测值分布在 1 000 ~ 11 000 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 之间. 2009 ~ 2012 年间, 黑碳年平均

质量浓度呈逐年下降趋势, C_{BC} 从 $(4\,138.2 \pm 3\,376.8) \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降为 $(2\,766.2 \pm 2\,078.9) \text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$, 即 2012 年黑碳年平均质量浓度较 2009 年下降了约 33.2%. 为便于对比, 表 1 给出了相近年份其他地区黑碳浓度平均值.

表 1 黑碳仪 880 nm 波段测量波段下不同城市黑碳浓度

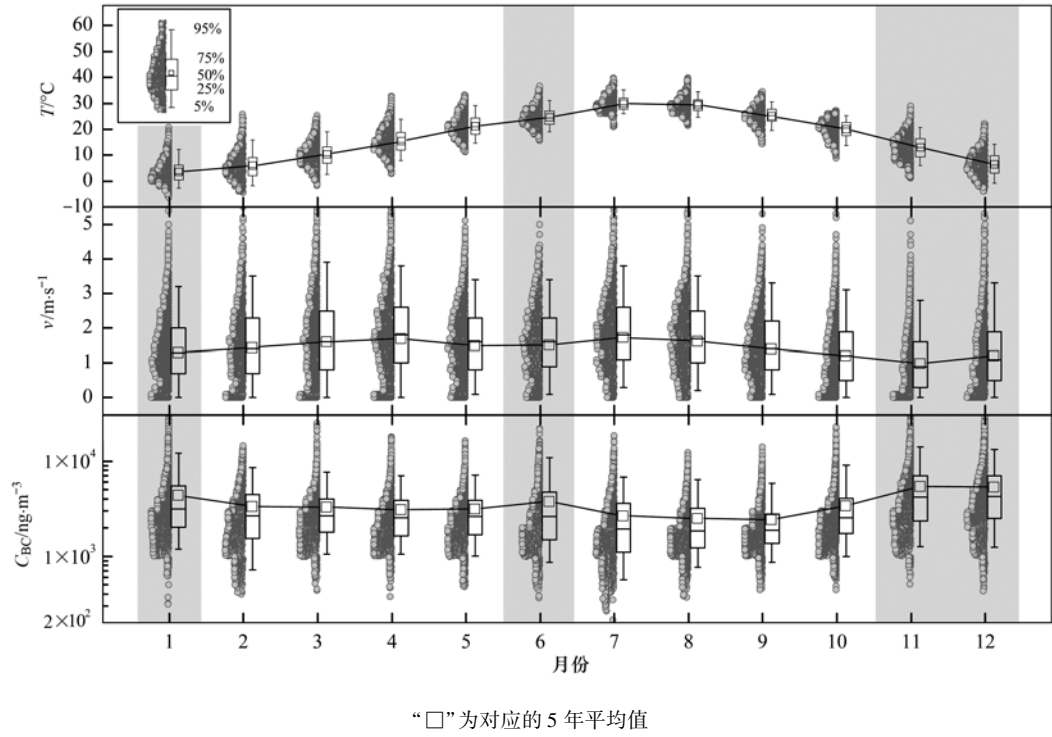
Table 1 BC mass concentration by 880 nm Aethalometer for different urban locations

实验地点	观测时间 (年·月)	黑碳浓度/ $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$	文献
美国, 纽约	2004-01-12 ~ 2004-02-05	1 380	[33]
塞内加尔, 达喀尔	2008-06 ~ 2009-07	$10\,500 \pm 3\,500$	[34]
印度, 新德里	2011-01 ~ 2011-12	$6\,700 \pm 5\,700$	[35]
尼泊尔, 加德满都	2009-05 ~ 2010-04	$8\,600 \pm 4\,400$	[30]
中国, 北京	2009-04 ~ 2009-05	$2\,319 \pm 18$	[36]
中国, 兰州	2007-04 ~ 2008-03	1 793.3	[37]
中国, 番禺	2004-01 ~ 2007-12	8 400	[29]
中国, 东莞	2009-01 ~ 2009-12	5 270	[38]
中国, 西安	2003-09 ~ 2004-08	$14\,700 \pm 9\,500$	[39]
中国, 上海	2008-01 ~ 2012-12	$3\,625.9 \pm 3\,049.3$	本研究

从表 1 中可以看出, 上海地区黑碳质量浓度与其它国家或我国其它城市相比, 为中等偏低水平. 根据图 2 的结果, 自 2008 年 ~ 2012 年, 上海地区黑碳质量浓度逐年变化率依次为 2.3%、- 6.5%、- 18.7% 和 - 12.1%. 按相关文献的综合分析, 上海黑碳排放的一个重要来源是汽车尾气^[23, 31], 约占碳质气溶胶排放量的 50%, 而燃煤和工业窑炉排放仅分别占 15% 和 10% 左右^[32]. 因此, 2010 年之后黑碳

下降率较高, 可能与上海 2010 年开始为举办世博会采取的一系列环保措施有关, 如机动车出行限制和燃油质量控制等.

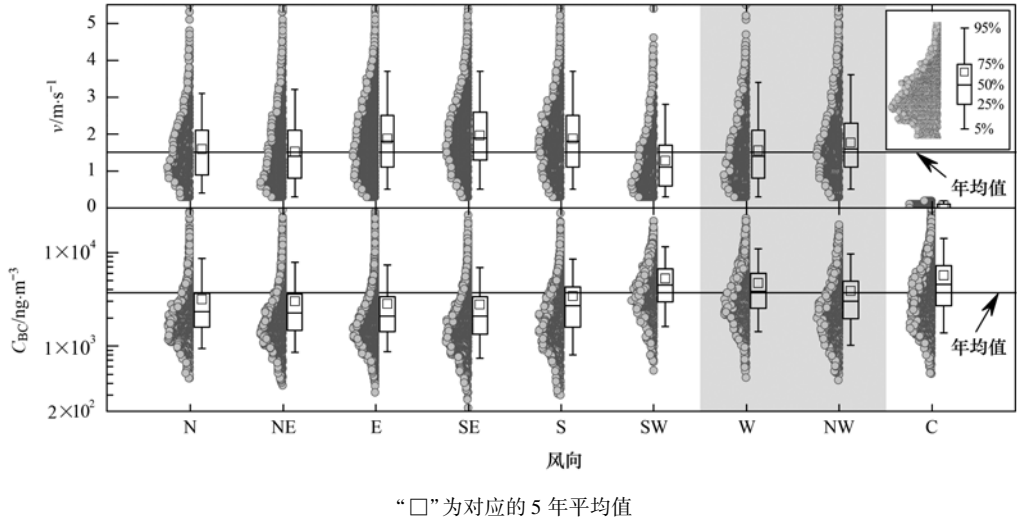
为进一步分析连续 5 年的观测期内, 黑碳气溶胶质量浓度逐月变化特点及与风速、风向和温度的关系, 根据有效观测数据, 图 3 和图 4 分别给出了 2008 年 1 月 ~ 2012 年 12 月间黑碳浓度 C_{BC} 、风速 v 和温度 T 变化特征和不同风向下 C_{BC} 与 v 的关系. 图



“□”为对应的 5 年平均值

图 3 黑碳浓度、风速和温度 5 年月平均值对比

Fig. 3 Comparison of monthly averaged C_{BC} with wind speed and ambient temperature during the 5-year period



“□”为对应的 5 年平均值

图 4 不同风向下黑碳浓度和风速 5 年月平均值对比

Fig. 4 Comparison of monthly averaged C_{BC} with wind speed during the 5-year period under different wind directions

5 则根据观测结果的特征给出了两个不同时段的风向频率分布。

从图 3 容易看出,5 年里黑碳平均质量浓度在 11 和 12 月最高,分别为 $5\,426.6\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $5\,365.3\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,其次是 1、6 和 10 月,分别为 $4\,402.5$ 、 $3\,763.3$ 和 $3\,412.7\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 。11、12 和 1 月黑碳浓度值高,主要有以下几方面的原因,一是该时间段为典型冬季,上海气温较低,燃料燃烧效率会下降,交通高峰时段怠速导致的黑碳排放量会增大,并且此时

大气稳定度较高,不利于黑碳扩散;二是该段时间平均风速相比其他月份小,这 3 个月的平均风速为 $1.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而其它 9 个月的平均风速为 $1.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,因此,风对该时段黑碳大气扩散的影响总体上弱于其他月份。此外,从图 4 来看,风向为西风 and 西北风时,风速较高,黑碳浓度亦较高,与其他风向相比,显然西风 and 西北风较其他风向会带来更多异地黑碳;而从图 5 则更容易看出,这一时段与其它月相比,西风和西北风频率明显较高。因此,上海 11、12 和 1

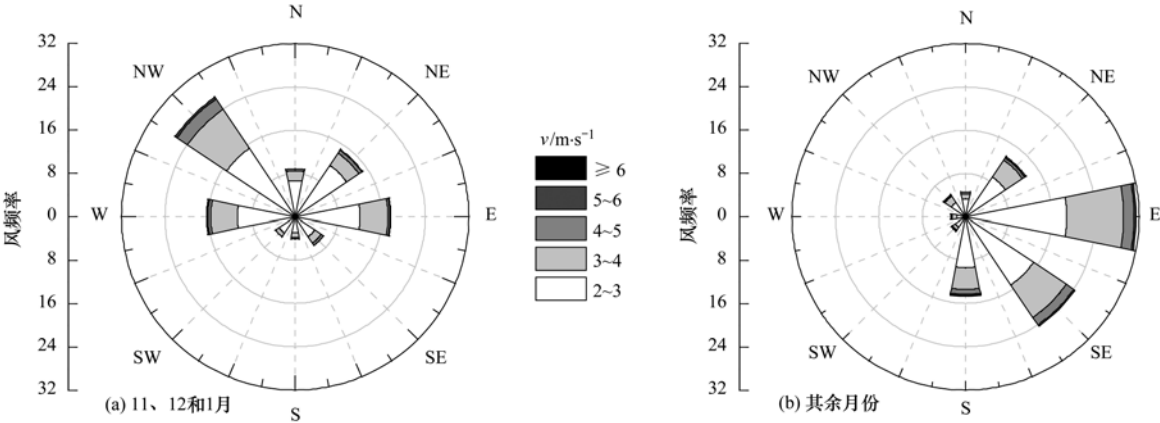


图5 5年不同时段风向频率对比

Fig. 5 Comparison of wind directions in different time periods during the 5 years

月的黑碳浓度比其它月受异地源影响更为明显。

自图3和图4的结果还可以得知,实测的5年间,6月的黑碳平均浓度与5月和7月相比明显偏高,而这3个月的气象条件相差不大.所以,可能6月较高的 C_{BC} 也是受外来源影响的结果.因为据兰春剑^[40]的研究,2010年6月,曾监测到长三角区域麦收期间共存在682个秸秆火点,而生物质燃烧是黑碳的一个重要来源^[41].因此,6月黑碳浓度值高与上海远郊及周边地区秸秆露天焚烧可能有直接关系.由于类似的原因,10月与6月情况相似,为秋季农作物收割和田地秸秆集中处理时段.

2.2 黑碳气溶胶质量浓度的日变化特征

图6给出的是所观测的5年间,各年12个月的非降雨天工作日黑碳质量浓度逐时变化情况统计平均结果.图中每个月每个时刻点的黑碳浓度值,均为5年间该月所有该时刻点对应的黑碳浓度的算术平均值.例如,5年间所有1月,除去因数据缺失(仪器工作中断和降雨)、周末和假期外,非降雨天在时刻01:00的数据有65个,于是1月01:00的黑碳气溶

胶浓度值即为这65个浓度值的算术平均值。

由图6可知,就5年的统计结果来看,上海全年12个月的黑碳浓度每日逐时变化均有两个明显的峰值,一个峰值出现在07:00~09:00,另一个出现在18:00~21:00.这与市民出行规律有关,并显然与交通排放特征吻合.上海每日07:00~09:00为集中上班高峰,该时段道路交通繁忙,并经常出现车辆怠速现象.因此,该时段黑碳浓度达到最高.18:00~21:00为下班返家及晚间出行高峰时段,城区道路上车辆拥堵和怠速情况亦较严重;另一方面,该时段易出现大气逆温现象,不利于污染物扩散,故造成了该时段的黑碳浓度峰值。

这一结论与Sharma等^[30]对加德满都的研究和Cao等^[39]对西安的研究结果相似,Sharma等利用2009年3月~2010年4月数据研究了尼泊尔首都加德满都黑碳浓度日变化规律,结果显示两个峰值一个出现在当地时间08:00左右,另一个出现在20:00左右.Cao等利用2003年9月~2005年8月期间的黑碳质量浓度资料发现,黑碳质量浓度日变化的一个峰值出现在上午08:00~09:00,另一个出现在晚上21:00~23:00. Tripathi等^[11]利用2004年12月在印度坎普尔观测的资料也得出了类似的规律.但图4中表现出的两个浓度谷值的原因可能不同.第一个谷值在凌晨03:00左右出现,原因是晚间黑碳排放来源较少,加上陆地风的自然净化作用,黑碳浓度自前一日21:00后逐渐降低,至03:00左右降到最低,此后,黑碳浓度开始缓慢上升.至上班高峰期07:00~09:00,出现第一个峰值.第二个谷值出现在15:00前后,可能有两方面原因,一方面是上班高峰期过后,因交通排放产生的排放相对减少;另一方面,由于太阳辐射增强,加强了大气对流,从

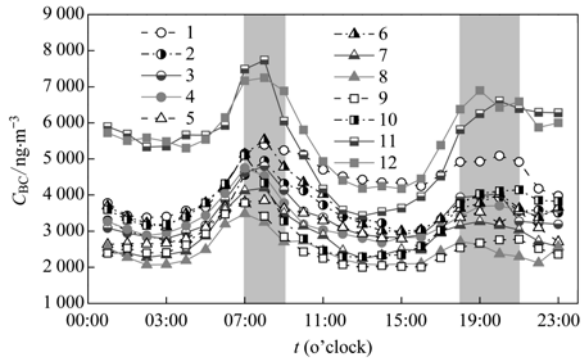


图6 5年工作日黑碳浓度日变化

Fig. 6 Diurnal variations of BC mass concentration on weekdays during the 5-year test period

而有利于颗粒污染物的扩散. Madhavi Latha 等^[12]在研究印度南部城市海德拉巴 2003-01 ~ 2003-07 黑碳日变化规律时,也得到了相似的结论.

为与工作日黑碳气溶胶浓度的日变化规律进行对比,图 7 给出了实测的 5 年间非降雨天 12 个月的休息日黑碳质量浓度日变化情况.

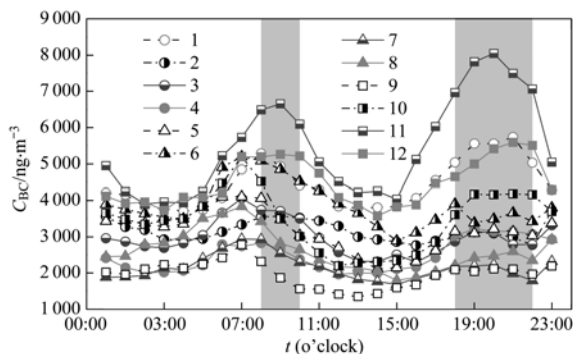


图 7 5 年非降雨周末及假期黑碳浓度日变化

Fig. 7 Diurnal variation of BC mass concentration on weekends and holidays during the 5 years

图 7 的结果说明,休息日的 C_{BC} 也表现出了明显的双峰结构.但与工作日相比,休息日黑碳浓度的日变化双峰结构是第二个峰的峰值高于第一个峰,这个特征与工作日相反.看来这与周末市民的出行特点相关性明显.原因是周末及假期,多数市民更倾向于在家休息,故白天出行频率降低,时间推后.平均而言,第一个浓度值有后移的趋势,而傍晚和晚间则通常是外出高频时段,故浓度较上午偏高.

对上述结果的统计分析表明,5 年间工作日和休息日黑碳平均质量浓度分别为 $3\,661.7\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $3\,352.1\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$,工作日较休息日高出约 9%,这可能是由于工作日工厂、企业黑碳排放较休息日高,同时,这个结果进一步表明,黑碳质量浓度的变化与城市道路情况和工业排放密切相关.

2.3 黑碳日变化特征的唯像分析

根据以上分析,可以看出,黑碳浓度 C_{BC} 在全年都基本上表现出日变化的两个峰值特征,以下将尝试将所有有效数据点(5 年间全部非降水天数据)回归成一个方便使用的曲线.

通过回归分析发现,若令 t 为时间,则引入中间变量 x 后,每日黑碳浓度变化规律可分为两个时间段:

$$x = \begin{cases} 4.8 + 0.1t, & 0 \leq t \leq 3 \\ 2.8 + 0.1(t - 4), & 4 \leq t \leq 23 \end{cases} \quad (1)$$

利用上述分段函数,每日不同时刻的黑碳质量浓度 C_{BC} 可表示为:

$$C_{BC} = a[\exp(b \cdot x) \cdot \cos(c \cdot x^d + e) + f] \quad (2)$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 、 e 和 f 这 6 个参数,因地区而异,对于上海地区,这 6 个参数分别为 3 161.48、-0.39、3.38、1.16、-0.74 和 1.12,相关系数 $R^2 = 0.89$.

由上述函数得到的黑碳浓度值与 5 年间每日不同时刻对应值的关系示于图 8.可见方程(2)可以很好地给出每日对应时刻的相应浓度水平.其中的阴影部分反映了计算值与实际观测平均值间的最大偏差范围.因此,作为经验型关联,图 6 的结果可以方便地用于相关的计算和预测研究.当然,方程(2)中的回归系数较多,并且至少跟地域及其黑碳排放源的特点有关,但对于同一地区中短期的黑碳质量浓度的统计和水平预报、以及观测可靠性的比对应,可以起到参考作用.

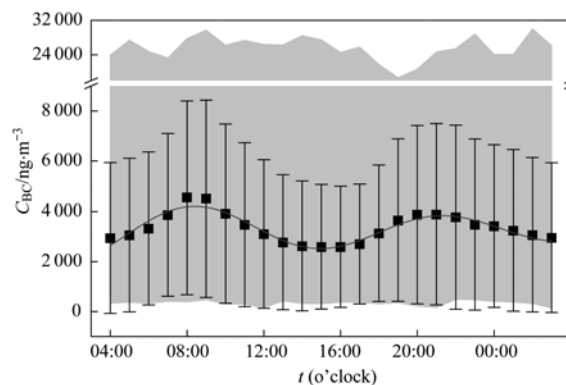


图 8 上海 5 年黑碳平均浓度日变化回归曲线

Fig. 8 Regressed diurnal cycle of the 5-year averaged BC mass concentration in Shanghai

从图 8 可知,第一峰的增长和衰减率均较第二峰快.第一峰黑碳增长率最快时高达 $644\text{ ng}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,最快衰减率高达 $561\text{ ng}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$,第二峰时最快增长率和衰减率分别为 $500\text{ ng}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$ 和 $283\text{ ng}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{h})^{-1}$.当然,由于图 8 是根据连续 5 年的实测结果并通过统计回归方法得到的经验曲线,虽然可以准确预计黑碳气溶胶浓度日变化的波动特点,但不能准确求得任意时刻的浓度,见灰色条带构成的变化范围.然而,鉴于上述曲线是在大量有效数据的基础上得到,故其变化形态也反映了每天及全年的黑碳散放特点,如每日浓度峰值的出现时刻与城市道路交通强度正相关;灰色条带的上下限则在某种程度上显示了交通、燃煤和其他主要源对全年不同季节黑碳浓度的影响.因此,式(2)对于粗略估计不同季节或每日不同时刻浓度的大致水平仍有实际意义.

3 结论

(1) 2008 ~ 2012 年黑碳年平均质量浓度从 $(4\,045.3 \pm 3\,375.4) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 降至 $(2\,766.2 \pm 2\,078.9) \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 呈逐年下降趋势, 黑碳年平均质量浓度与我国其他城市相比属于中等偏低水平. 2012 年的年平均浓度较 2008 年下降了约 31.6%.

(2) 连续 5 年实测间, 月平均黑碳质量浓度 11 和 12 月最高, 分别为 $5\,426.6 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $5\,365.3 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 其次是 1、6 和 10 月, 分别为 $4\,402.5$ 、 $3\,763.3$ 和 $3\,412.7 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$. 11、12 和 1 月黑碳浓度值高, 原因一是冬季平均风速低, 而风速较高时又受西方和西北方外来源影响较大. 二是温度较低导致机动车燃烧效率低. 同时, 冬季较高的大气稳定度及逆温现象都影响了污染物的大气扩散. 6 和 10 月黑碳浓度较高, 则主要是郊区及上风向周围地区乡村于夏、秋收期间秸秆露天焚烧所致.

(3) 工作日和休息日 5 年平均黑碳质量浓度日变化均呈明显双峰结构, 两峰分别出现在北京时间 07:00 ~ 10:00 和 18:00 ~ 22:00, 工作日第一峰高于第二峰, 休息日则相反, 5 年黑碳平均质量浓度工作日较休息日高约 9%, 与城市工作时间和生活规律有明显的相关性.

(4) 利用 5 年全部有效观测数据, 通过回归分析, 拟合出了一个描述上海市区黑碳平均质量浓度时间序列的半经验函数, 以粗略估计或预计不同时刻黑碳质量浓度的大致水平.

致谢: 本研究所用观测数据均来源于上海市城市环境气象中心, 谨致谢忱.

参考文献:

- [1] Wang R, Tao S, Wang W, *et al.* Black carbon emissions in China from 1949 to 2050 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, **46**(14): 7595-7603.
- [2] Chow J C, Watson J G, Doraiswamy P, *et al.* Aerosol light absorption, black carbon, and elemental carbon at the Fresno Supersite, California [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **93**(4): 874-887.
- [3] Seinfeld J. Atmospheric science: Black carbon and brown clouds [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(1): 15-16.
- [4] 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): 1-22.
- [5] Ramanathan V, Carmichael G. Global and regional climate changes due to black carbon [J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(4): 221-227.
- [6] 陈颖军, 蔡伟伟, 黄国培, 等. 典型排放源黑碳的稳定碳同位素组成研究 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 673-678.
- [7] Chung S H, Seinfeld J H. Climate response of direct radiative forcing of anthropogenic black carbon [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, **110**(D11): D11102, doi: 10.1029/2004JD005441.
- [8] 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.
- [9] Ackerman A S, Toon O B, Stevens D E. Reduction of tropical cloudiness by soot [J]. *Science*, 2000, **288**(5468): 1042-1047.
- [10] Jacobson M Z. Strong radiative heating due to the mixing state of black carbon in atmospheric aerosols [J]. *Nature*, 2001, **409**(6821): 695-697.
- [11] Tripathi S N, Dey S, Tare V, *et al.* Aerosol black carbon radiative forcing at an industrial city in northern India [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(8): doi: 10.1029/2005GL022515.
- [12] Madhavi Latha K, Badarinath K V S. Black carbon aerosols over tropical urban environment—a case study [J]. *Atmospheric Research*, 2003, **69**(1-2): 125-133.
- [13] Zora J E, Sarnat S E, Raysoni A U, *et al.* Associations between urban air pollution and pediatric asthma control in El Paso, Texas [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **448**: 56-65.
- [14] Wang X, Chen R, Meng X, *et al.* Associations between fine particle, coarse particle, black carbon and hospital visits in a Chinese city [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **458-460**: 1-6.
- [15] Geng F, Hua J, Mu Z, *et al.* Differentiating the associations of black carbon and fine particle with daily mortality in a Chinese city [J]. *Environmental Research*, 2013, **120**: 27-32.
- [16] Anenberg S C, Schwartz J, Shindell D, *et al.* Global air quality and health co-benefits of mitigating near-term climate change through methane and black carbon emission controls [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2012, **120**(6): 831-839.
- [17] 石广玉, 王标, 张华, 等. 大气气溶胶的辐射与气候效应 [J]. *大气科学*, 2008, **32**(4): 826-840.
- [18] Panicker A S, Park S H, Lee D I, *et al.* Observations of black carbon characteristics and radiative forcing over a global atmosphere watch supersite in Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 98-104.
- [19] Quaas J. Global warming: the soot factor [J]. *Nature*, 2011, **471**(7339): 456-457.
- [20] Chameides W L, Yu H, Liu S C, *et al.* Case study of the effects of atmospheric aerosols and regional haze on agriculture: An opportunity to enhance crop yields in China through emission controls [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1999, **96**(24): 13626-13633.
- [21] 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.
- [22] 上海市统计局. 上海统计年鉴 [J]. 上海: 上海市统计出版社, 2010.

- [23] Feng Y, Chen Y J, Guo H, *et al.* Characteristics of organic and elemental carbon in PM_{2.5} samples in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **92**(4): 434-442.
- [24] 杨溯, 张武, 韩晶晶, 等. 上海市浦东新区秋冬季黑碳气溶胶特性 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2008, **44**(4): 66-70.
- [25] 肖秀珠, 刘鹏飞, 耿福海, 等. 上海市区和郊区黑碳气溶胶的观测对比 [J]. *应用气象学报*, 2011, **22**(2): 158-168.
- [26] Hou B, Zhuang G, Zhang R, *et al.* The implication of carbonaceous aerosol to the formation of haze; revealed from the characteristics and sources of OC/EC over a mega-city in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **190**(1-3): 529-536.
- [27] 蔡婧, 修光利, 张大年, 等. 上海某地铁站黑碳浓度水平及个体暴露特征 [J]. *环境科学研究*, 2012, **25**(12): 1328-1335.
- [28] 袁宁, 刘卫, 赵修良, 等. 上海市含碳大气颗粒物的粒径分布 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 1995-2002.
- [29] 吴兑, 毛节泰, 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(D辑): 地球科学*, 2009, **39**(11): 1542-1553.
- [30] Sharma R K, Bhattarai B K, Sapkota B K, *et al.* Black carbon aerosols variation in Kathmandu valley, Nepal [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **63**: 282-288.
- [31] Cao J J, Zhu C S, Tie X X, *et al.* Characteristics and sources of carbonaceous aerosols from Shanghai, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(2): 803-817.
- [32] Feng J, Chan C K, Fang M, *et al.* Characteristics of organic matter in PM_{2.5} in Shanghai [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(8): 1393-1400.
- [33] Venkatachari P, Zhou L, Hopke P K, *et al.* Spatial and temporal variability of black carbon in New York City [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, **111**(D10): doi: 10.1029/2005JD006314.
- [34] Dombia E H T, Lioussé C, Galy-Lacaux C, *et al.* Real time black carbon measurements in West and Central Africa urban sites [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **54**: 529-537.
- [35] Tiwari S, Srivastava A K, Bisht D S, *et al.* Diurnal and seasonal variations of black carbon and PM_{2.5} over New Delhi, India: Influence of meteorology [J]. *Atmospheric Research*, 2013, **125-126**: 50-62.
- [36] 刘艳菊, 张美根, 张仁健, 等. 2009年北京市春季大气颗粒PM_{2.5}和黑碳浓度变化特征 [J]. *中国粉体技术*, 2010, **16**(1): 18-22.
- [37] 杨溯, 张武, 史晋森, 等. 半干旱地区黑碳气溶胶特征初步分析 [J]. *气候与环境研究*, 2010, **15**(6): 756-764.
- [38] 陈慧忠, 吴兑, 廖碧婷, 等. 东莞与帽峰山黑碳气溶胶浓度变化特征的对比 [J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(4): 605-612.
- [39] Cao J J, Zhu C S, Chow J C, *et al.* Black carbon relationships with emissions and meteorology in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Research*, 2009, **94**(2): 194-202.
- [40] 兰春剑. 长三角地区秸秆焚烧所引起的黑碳气溶胶排放及环境影响研究 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2012. 1-39.
- [41] 伍德侠, 魏庆农, 魏健琨, 等. 秸秆焚烧期的碳黑气溶胶观测及研究 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(12): 3304-3309.

CONTENTS

Analysis of Characteristics of Black Carbon Concentration in Shanghai from 2008 to 2012	WANG Hong-qiang, HE Qian-shan, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (1215)
Chemical Characteristics and Insoluble Particulates' Surface Morphology of a Snowfall Process in the Southeastern Suburb of Urumqi	LU Hui, WEI Wen-shou, CUI Cai-xia, <i>et al.</i> (1223)
Comparative Study of the Level and Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers and New Brominated Flame Retardants in the Atmosphere of Typical Urban	WU Hui, JIN Jun, WANG Ying, <i>et al.</i> (1230)
Source and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Ambient Air PM ₁₀ from One Coking Plant	DONG Ting, LI Tian-xin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1238)
Estimation of Average Traffic Emission Factor Based on Synchronized Incremental Traffic Flow and Air Pollutant Concentration	LI Run-kui, ZHAO Tong, LI Zhi-peng, <i>et al.</i> (1245)
Study on Critical Loads of Sulfur and Nitrogen in the Pearl River Delta	SUN Cheng-ling, XIE Shao-dong (1250)
Hydrogen Sulfide Removal by the Combination of Non-Thermal Plasma and Biological Process	LI Hua-qin, HE Jue-cong, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (1256)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Atrazine in Taizi River Basin, China	ZHENG Lei, ZHANG Yi-zhang, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (1263)
Development of a Method for Measuring Dissolved Reactive Phosphorus (DRP) and Dissolved Ferrous Iron in Large Batch in Pore Water Samples of Sediments with Micro-volumes	WANG Yan, ZHU Chun-gang, XU Di, <i>et al.</i> (1271)
Temporal and Spatial Variation of Water Nutrient Level After Exogenous Nutrient Input	FU Ling, ZHAO Kai, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (1278)
Physical Process Based Risk Assessment of Groundwater Pollution in the Mining Area	SUN Fa-sheng, CHENG Pin, ZHANG Bo (1285)
Hydrogeochemical Characteristics of a Typical Karst Groundwater System in Chongqing	YANG Ping-heng, LU Bing-qing, HE Qiu-fang, <i>et al.</i> (1290)
Investigation of Nitrogen, Phosphorus and Microbial Contamination in Laolongdong Underground River System of Chongqing	LAN Jia-cheng, YANG Ping-heng, REN Kun, <i>et al.</i> (1297)
Effects on Phosphorus Fraction Distribution in Sediment by Roots of <i>Vallisneria spiralis</i>	LI Zhen-guo, WANG Guo-xiang, ZHANG Jia, <i>et al.</i> (1304)
Modeling Nitrogen Transformation in a Novel Circular-Flow Corridor Wetland	PENG Jian-feng, SONG Yong-hui, YUAN Peng, <i>et al.</i> (1311)
Natural Attenuation of Tetracycline in the Water of Taihu Lake Under Different Environmental Conditions	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, JI Ying-xue, <i>et al.</i> (1318)
Inactivation and Reactivation of Antibiotic-Resistant Bacteria During and After UV Disinfection in Reclaimed Water	HUANG Jing-jing, TANG Fang, XI Jin-ying, <i>et al.</i> (1326)
Photoreactivation of <i>Escherichia coli</i> and <i>Enterococcus faecalis</i> in the Secondary Effluent Disinfected by UV-TiO ₂	WANG Xi-feng, GONG Xin, HU Xiao-lian, <i>et al.</i> (1332)
Stability of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, SHEN Bing-bing, JING Jie, <i>et al.</i> (1337)
Fouling Behavior of Sodium Alginate During Microfiltration at Various Ionic Compositions; XDLVO Approach	ZHAO Ying-xu, ZONG Rui-qiang, GAO Xin-yu, <i>et al.</i> (1343)
Enhanced Remediation of 4-Chloronitrobenzene Contaminated Groundwater with Nanoscale Zero-valence Iron (nZVI) Catalyzed Hydrogen Peroxide (H ₂ O ₂)	FU Rong-bing (1351)
Effect of the Coexistence of Chlorobenzene Homologue on Anaerobic Degradation of Hexachlorobenzene	WANG Qi, LIU Hui, JIANG Lin, <i>et al.</i> (1358)
Research on Removal Efficiency of Cd(II)-bearing Wastewater by Sulfate-reducing Biological Filter	WU Xuan, TAN Ke-yan, HU Xi-jia, <i>et al.</i> (1366)
Control Strategies of Nitrogen Removal Process in a Pilot Test of the Southern WWTP Based on the Nitrogen Balance	JIANG Ying-he, LIU Pei-ju, WANG Lei, <i>et al.</i> (1372)
Effect of Simulated Inorganic Anion Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	CHEN Yan, HUANG Fang, XIE Xin-yuan (1377)
Microbial Reduction of Cu ²⁺ Mediated by Electroactive Biofilms	LIU Yi, ZHOU Shun-gui, YUAN Yong, <i>et al.</i> (1384)
Copper Recovery from Artificial Bioleaching Lixivium of Waste Printed Circuit Boards	CHENG Dan, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1391)
Difference of Contaminant Composition Between Landfill Leachates and Groundwater and Its Reasons	HE Xiao-song, YU Hong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1399)
Photochemical Degradation of Landfill Leachate Facilitated by Combined Schwertmannite and H ₂ O ₂	WANG He-ru, SONG Yong-wei, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> (1407)
Effects of Operating Parameters on Organic Toxicity of Sludge Treating Synthetic Bisphenol A Wastewater	YANG Na, CHEN Xiu-rong, LIN Feng-kai, <i>et al.</i> (1414)
Comparative Study on Biological Methane Potential and Methanogen Biodiversity in the Anaerobic Digestion of Excess Sludge	DONG Hui-yu, JI Min (1421)
Isolation and Identification of Mn Oxidizing Bacterium <i>Aminobacter</i> sp. H1 and Its Oxidation Mechanism	YAN Ping, JIANG Li-ying, CHEN Jian-meng, <i>et al.</i> (1428)
Nitrate Removal by a Strain of Nitrate-Dependent Fe(II)-Oxidizing Bacteria	WANG Hong-yu, YANG Kai, ZHANG Qian, <i>et al.</i> (1437)
Study on the Iopromide-Degrading Characteristics of Strain <i>Pseudomonas</i> sp. I-24 via Co-Metabolism	XU Bing-jie, GAO Pin, XUE Gang, <i>et al.</i> (1443)
Using Flow Cytometry to Explore the Changes of <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B Bacterial Surface Characteristics in the Process of Degrading Phenanthrene	ZHANG Meng-lu, DANG Zhi, WU Feng-ji, <i>et al.</i> (1449)
Research on Characteristic of Interrelationship Between Toxic Organic Compound BPA and <i>Chlorella vulgaris</i>	CHEN Shan-jia, CHEN Xiu-rong, YAN Long, <i>et al.</i> (1457)
Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthetic Physiology and Triacylglyceride (TAG) Accumulation of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Shan, ZHAO Shu-xin, WEI Chang-long, <i>et al.</i> (1462)
Effects of Microcystins on Growth and Antioxidant System of Rice Roots	WANG Wei-min, DENG Yu, ZOU Hua, <i>et al.</i> (1468)
Responses of Soybean Cultivar Dongsheng-1 to Different O ₃ Concentrations in Northeast China	ZHANG Wei-wei, WANG Guang-hua, WANG Mei-yu, <i>et al.</i> (1473)
Development and Succession of Biological Soil Crusts and the Changes of Microbial Biomasses	WU Li, ZHANG Gao-ke, CHEN Xiao-guo, <i>et al.</i> (1479)
Effects of Lead on the Growth and Reproduction of <i>Eisenia fetida</i> with Aged Soils	CHEN Li-hong, LIU Zheng-tao, FANG Zheng, <i>et al.</i> (1486)
Soil Heavy Metal Cadmium Standard Limit and Range of Background Value Research	ZHAO Xiao-jun, LI Si-jin, XU Ren-ji, <i>et al.</i> (1491)
Study on Soil Element Background Values of the Hoh Xil Area in North Tibet	BAI Jian-kun, WANG Jian-li, LI Chao-liu, <i>et al.</i> (1498)
Transfer Characteristic and Source Identification of Soil Heavy Metals from Water-Level-Fluctuating Zone Along Xiangxi River, Three-Gorges Reservoir Area	XU Tao, WANG Fei, GUO Qiang, <i>et al.</i> (1502)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Ecological Risk Analysis for Soil Around Haining Electroplating Industrial Park	LI Jiong-hui, WENG Shan, FANG Jing, <i>et al.</i> (1509)
Sources and Spatial Distribution of Typical Heavy Metal Pollutants in Soils in Xihu Scenic Area	ZHANG Hai-zhen, TANG Yu-li, LU Jun, <i>et al.</i> (1516)
Distribution and Assessment of Mercury in the Ambient Soil of a Municipal Solid Waste Incinerator	XIE Hui-ting, ZHANG Cheng-zhong, XU Feng, <i>et al.</i> (1523)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Soils and Sediments Surrounding Dishui Lake in Shanghai	ZHUO Xiang-zhen, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1531)
Impact of SDBS/Na ⁺ on Red Soil Colloidal Stability	TANG Ying, LI Hang, ZHU Hua-ling, <i>et al.</i> (1540)
Effects of Stabilization Treatment on Migration and Transformation of Heavy Metals in Mineral Waste Residues	ZHAO Shu-hua, CHEN Zhi-liang, ZHANG Tai-ping, <i>et al.</i> (1548)
Study on a New Method of Fast Monitoring Toxicity of Cd ²⁺ by Algal in Water	DUAN Jing-bo, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, <i>et al.</i> (1555)
Immunosensor for Rapid Detection of 1,3-Dinitrobenzene	LONG Feng, SHI Han-chang, WANG Hong-chen, <i>et al.</i> (1561)
Mg/Al Layered Double Hydroxides Prepared by Microwave-Assisted Co-Precipitation Method for the Removal of Bromate	ZHONG Qiong, LI Huan (1566)
Discussion on Several Key Points of Decision Support System for Remediation of Contaminated Sites	LIAO Xiao-yong, TAO Huan, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (1576)
A Review of Multi-Scale Studies on Spatial Variation of the Lead (Pb) Concentration in Urban Soils	YANG Meng, LI Feng-ying, DIAO Yi-wei, <i>et al.</i> (1586)
Review on Characteristics and Detecting Assay of Bacterial Endotoxin Contamination in Water Environment	ZHANG Can, LIU Wen-jun, ZHANG Ming-lu, <i>et al.</i> (1597)
Advances in Molecular Mechanism of Bacterial Reduction of Hexavalent Chromium	LI Dou, ZHAO You-cai, SONG Li-yan, <i>et al.</i> (1602)
Anaerobic Membrane Bioreactors for Treating Agricultural and Food Processing Wastewater at High Strength	WEI Yuan-song, YU Da-wei, CAO Lei (1613)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 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)

2014年4月15日 35卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 4 Apr. 15, 2014

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	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
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	中国国际图书贸易总公司 (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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行