

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第3期

Vol.36 No.3

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

重庆市 PM_{2.5} 浓度空间分异模拟及影响因子 吴健生, 廖星, 彭建, 黄秀兰 (759)

2012 ~ 2013 年间北京市 PM_{2.5} 中水溶性离子时空分布规律及相关性分析 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 陈圆圆, 周健楠, 梁云平 (768)

南京地区大气 PM_{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析 姜文娟, 郭照冰, 刘凤玲, 芮茂凌, 石磊, 曾钢, 郭子研 (774)

太原市大气 PM_{2.5} 中碳质组成及变化特征 张桂香, 闫雨龙, 郭利利, 何秋生, 陈来国 (780)

朔州市市区 PM_{2.5} 中元素碳、有机碳的分布特征 刘凤娟, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 刘效峰, 李丽娟, 刘欣 (787)

中国 2013 年 1 月 PM_{2.5} 重污染过程卫星反演研究 薛文博, 武卫玲, 付飞, 王金南, 韩宝平, 雷宇 (794)

高空偏北风背景下北京地区高污染形成的环境气象机制研究 廖晓农, 孙兆彬, 唐宜西, 蒲维维, 李梓铭, 卢冰 (801)

重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量 覃蔡清, 王永敏, 彭玉龙, 王定勇 (809)

海南五指山大气气态总汞含量变化特征 雷育涛, 刘明, 陈来国, 谢东海, 林道征, 赵明江, 张毅强, 孙家仁 (817)

树叶烟尘中的有机碳和元素碳 陈惠雨, 刘刚, 徐慧, 李久海, 吴丹 (824)

介质阻挡放电对氯苯的降解特性及其产物分析 姜理英, 曹书岭, 朱润晔, 陈建孟, 苏飞 (831)

长江口及浙江近岸海域表层沉积物中多环芳烃分布、来源与风险评价 母清林, 方杰, 邵君波, 张庆红, 王晓华, 黄备 (839)

河流沉积物对典型 PPCPs 的吸附特性及其影响因素 王凯, 李侃竹, 周亦圆, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (847)

岩溶地下河表层沉积物多环芳烃的污染及生态风险研究 蓝家程, 孙玉川, 师阳, 梁作兵 (855)

岩溶地下河系统多介质中多环芳烃污染特征及来源解析 卢丽, 王喆, 裴建国 (862)

两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例 闫金龙, 江韬, 高洁, 魏世强, 卢松, 刘江 (869)

三峡库区典型农业小流域土壤溶解性有机质的紫外-可见及荧光特征 王齐磊, 江韬, 赵铮, 木志坚, 魏世强, 闫金龙, 梁俭 (879)

夏、冬季降雨中溶解性有机质 (DOM) 光谱特征及来源辨析 梁俭, 江韬, 魏世强, 卢松, 闫金龙, 王齐磊, 高洁 (888)

南水北调丹江口水库原水有机物分子组成规律及其强化混凝处理的效能对比 程拓, 徐斌, 朱贺振, 夏圣骥, 楚文海, 胡广新 (898)

夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素 杨丽标, 雷坤, 孟伟 (905)

太湖入湖河流溶解性有机碳来源及碳水化合物生物可利用性 叶琳琳, 吴晓东, 孔繁翔, 刘波, 闫德智 (914)

汉丰湖夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析 王宇飞, 赵秀兰, 何丙辉, 黄琪 (922)

三峡蓄水期间汉丰湖消落区营养状态时间变化 黄祺, 何丙辉, 赵秀兰, 王宇飞 (928)

太湖水华期营养盐空间分异特征与赋存量估算 金颖薇, 朱广伟, 许海, 朱梦圆 (936)

贝江浮游藻类群落特征及富营养化风险分析 苟婷, 马千里, 许振成, 王丽, 李杰, 赵学敏 (946)

物理和摇蚊幼虫组合扰动对内源磷再生和形态转化的协同作用 史晓丹, 李大鹏, 王忍, 黄勇 (955)

磷限制下光照和温度对水华鱼腥藻生长动力学的影响 殷志坤, 李哲, 王胜, 郭劲松, 肖艳, 刘静, 张萍 (963)

矿物基多孔颗粒材料净化石英纯化废水研究 王恩文, 雷绍民, 张世春, 黄腾 (969)

PAA 改性纳米铁强化还原降解水中亚甲基蓝 和婧, 王向宇, 王培, 刘坤乾 (980)

微球负载双核锰配合物作为新型非均相 CWPO 催化剂对活性蓝 P-3R 的脱色应用 宋敏, 张琳萍, 钟毅, 徐红, 毛志平 (989)

生物合成施氏矿物作为类芬顿反应催化剂降解甲基橙的研究 汪快兵, 方迪, 徐峙晖, 施瑛, 郑冠宇, 周立祥 (995)

污泥厌氧产酸发酵液作碳源强化污水脱氮除磷中试研究 罗哲, 周光杰, 刘宏波, 聂新宇, 陈宇, 翟丽琴, 刘和 (1000)

高含固污泥水热预处理中碳、氮、磷、硫转化规律 卓杨, 韩芸, 程瑶, 彭党聪, 李玉友 (1006)

MBR 与 SMBR 脱氮除磷特性及膜污染控制 郭小马, 赵焱, 王开演, 赵阳国 (1013)

基质 COD 浓度对单室微生物电解池产甲烷的影响 滕文凯, 刘广立, 骆海萍, 张仁铎, 符诗雨 (1021)

天然沸石中离子交换平衡的离子特异性研究 何云华, 李航, 刘新敏, 熊海灵 (1027)

开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳 (1037)

不同种植模式对土壤团聚体及有机碳组分的影响 邱晓蕾, 宗良纲, 刘一凡, 杜霞飞, 罗敏, 汪润池 (1045)

种植花椒对喀斯特石漠化地区土壤有机碳矿化及活性有机碳的影响 张文娟, 廖洪凯, 龙健, 李娟, 刘云飞 (1053)

江西铜矿及冶炼厂周边土壤和农作物稀土元素含量与评价 金姝兰, 黄益宗, 王斐, 徐峰, 王小玲, 高柱, 胡莹, 乔敏, 李季, 向猛 (1060)

镉与 S-异丙甲草胺对斜生栅藻的联合毒性作用 章小强, 胡晓娜, 陈彩东, 刘惠君 (1069)

高寒灌丛退化演替过程对生态系统呼吸温度敏感性的影响 李东, 罗旭鹏, 曹广民, 吴琴, 胡启武, 卓玛措, 李惠梅 (1075)

黄土高原纸坊沟流域不同植物叶片及枯落物的生态化学计量学特征研究 李鑫, 曾全超, 安韶山, 董扬红, 李娅芸 (1084)

单斜相纳米氧化钴基低温 SCR 催化剂脱硝机制研究 叶飞, 刘荣, 管昊, 贡湘君, 季凌晨 (1092)

不同有机物料中的磷形态特征研究 邓佳, 胡梦坤, 赵秀兰, 倪九派, 谢德体 (1098)

北京电动出租车与燃油出租车生命周期环境影响比较研究 施晓清, 孙赵鑫, 李笑诺, 李金香, 杨建新 (1105)

燃煤电厂排放细颗粒物的水溶性无机离子特征综述 段雷, 马子轸, 李振, 蒋靖坤, 叶芝祥 (1117)

菌根真菌重金属耐性机制研究进展 陈保冬, 孙玉青, 张莘, 伍松林 (1123)

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物特性研究进展 沈李东 (1133)

《环境科学》征订启事 (830) 《环境科学》征稿简则 (846) 信息 (838, 861, 913, 935)

南京地区大气 PM_{1.1} 中 OC、EC 特征及来源解析

姜文娟^{1,2}, 郭照冰^{1,2*}, 刘凤玲^{1,2}, 芮茂凌^{1,2}, 石磊^{1,2}, 曾钢^{1,2}, 郭子研²

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 采用 DRI Model 2001A 热/光碳分析仪测定了 2011 年南京地区大气 PM_{1.1} 中 OC、EC 的含量, 并具体探讨了其来源. 结果表明, 南师 OC、EC 年均浓度分别为 10.10 μg·m⁻³、2.52 μg·m⁻³, 南化分别为 11.22 μg·m⁻³、3.12 μg·m⁻³, 南化污染相对严重. 夏季两地 OC、EC 含量较低, 而冬春季较高, 这与冬春季燃煤量增加, 并且受内陆西风及逆温的影响, 污染物集中在南京市上空不易扩散有关. 两地 PM_{1.1} 中 SOC/TOC 均在夏季较高, 冬季最低. 秋季 SOC 和 O₃ 有较好的相关性, 表明秋季光化学反应是 SOC 的重要生成途径.

关键词: 南京地区; PM_{1.1}; 有机碳; 元素碳; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)03-0774-06 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2015.03.003

Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM_{1.1} from Nanjing

JIANG Wen-juan^{1,2}, GUO Zhao-bing^{1,2*}, LIU Feng-ling^{1,2}, RUI Mao-ling^{1,2}, SHI Lei^{1,2}, ZENG Gang^{1,2}, GUO Zi-yan²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: The concentrations of OC and EC in PM_{1.1} collected from Nanshi (NS) and Nanhua (NH) in 2011 were analyzed using DRI Model 2001A Thermal Optical Carbon Analyzer. In addition, source apportionment was simultaneously evaluated. The results showed that the annual average concentrations of OC and EC in PM_{1.1} were 10.10 μg·m⁻³ and 2.52 μg·m⁻³ in NS area, and 11.22 μg·m⁻³ and 3.12 μg·m⁻³ in NH area, respectively. This result indicated that OC and EC pollution in NH was more serious than that in NS area. Meanwhile, the concentrations of OC and EC in winter and spring were obviously higher compared to those in summer in these two sampling sites, which was mainly ascribed to the increased coal combustion and the unfavorable emission condition of air pollutants in summer and spring. We noted that the SOC/TOC value was the highest in summer and the lowest in winter. In addition, the SOC concentration was observed to show a positive correlation with ozone concentrations, which indicated that the photochemical reaction was a main way of SOC formation in autumn.

Key words: Nanjing; PM_{1.1}; OC; EC; source apportionment

碳质是大气气溶胶的主要组成部分^[1,2], 气溶胶中的碳质主要包括有机碳(OC)、元素碳(EC)与无机碳(IC). 其中 OC、EC 含量较高^[3,4]. OC 能通过光的散射降低大气的能见度, EC 主要存在于亚微米的颗粒物中^[5]. OC、EC 通过呼吸进入人体肺部乃至肺泡, 可带来各种呼吸性的疾病, 严重的甚至导致死亡. 研究发现, 大气细粒子的散射及其中的含碳物质是引起大气能见度降低的主要因素^[6], 有研究发现气溶胶粒径越小, 对人体健康危害越大, 并预测未来的研究必然会倾向于更小粒径的粒子^[7-9]. 因此, 近年来人们的研究热点主要聚焦在大气细粒子(PM_{2.5})上. 随着监测技术的优化, 同步开展了对大气 PM_{1.1} 中碳质成分的系统研究.

近年来, 南京地区灰霾天气污染愈发严重, 碳组分对灰霾天气的形成有重要贡献^[10,11]. 2014 年南

京市承办第二届夏季青年奥林匹克运动会, 其大气环境质量已成为关注焦点. 本研究通过对南京地区大气 PM_{1.1} 中 OC、EC 组分进行分析, 揭示其污染特征, 以期为南京地区大气环境治理提供依据.

1 材料与方法

1.1 采样点的布设

采样点设在南京师范大学随园校区(南师, NS)和南京江北化工职业技术学院(南化, NH)教学楼

收稿日期: 2014-08-04; 修订日期: 2014-10-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373023); 教育部留学回国人员启动基金项目(2012s001); 江苏省“333 高层次人才培养”项目; 江苏省“六大人才高峰”项目; 江苏省高校产业化推进项目; 江苏省大学生创新创业训练计划项目(201410300011Z); 江苏省环境保护科研课题项目(2014t056); 江苏省高校优势学科建设工程项目

作者简介: 姜文娟(1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境监测, E-mail: jiangfavor@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: guocumt@nuist.edu.cn

楼顶(距地约 20 m), 见图 1. 南师地处鼓楼区(E118°47', N32°3'), 经济发达、交通繁忙、人口密集, 代表着典型的集居住、商业、交通、餐饮以及办公于一体的混合区; 南化地处浦口区(E118°40', N32°17'), 地处国道附近且化工企业较多, 代表着交通和工业区.



图1 南京地区大气 PM_{1.1} 采样点示意

Fig. Map of PM_{1.1} sampling sites in Nanjing

1.2 样品采集

FA-3 型气溶胶粒度分布采样器是 9 级多孔联级式撞击器, 0~9 级切割粒径分别为 9.0~10.0 μm、5.8~9.0 μm、4.7~5.8 μm、3.3~4.7 μm、2.1~3.3 μm、1.1~2.1 μm、0.65~1.1 μm、0.43~0.65 μm 和 <0.43 μm, 流速为 28.3 L·min⁻¹. 在南师和南化各设一个采样点进行同步采样, 以 2011 年 1 月、4 月、7 月、10 月分别代表冬、春、夏、秋四季, 每月持续采样 15 d. 采样前先将滤膜置于马弗炉 450℃ 环境中焙烧 4 h, 冷却后置于干燥皿平衡 24 h 备用.

1.3 样品分析

采用 DRI Model 2001A 热/光碳分析仪对各样品中的 OC、EC 进行测定. 测定采用程序升温, 分 2 个阶段, 第 1 阶段为纯氦环境下程序升温, 分别测出 OC₁、OC₂、OC₃ 和 OC₄, 第 2 阶段在含 2% 氧气的氦气环境下进行程序升温, 分别测出 EC₁、EC₂ 和 EC₃, 升温全程采用 633 nm 激光照射样品, 将反射光强回到初始状态时作 EC 的起点, 准确界定出 OC

碳化形成的裂解碳(OPC), 最终将 OC 定义为(OC₁ + OC₂ + OC₃ + OC₄ + OPC), EC 定义为(EC₁ + EC₂ + EC₃ - OPC). 仪器最低检测限: 总有机碳(TOC): 0.82 μg·cm⁻², 总元素碳(TEC): 0.20 μg·cm⁻², 总碳(TC): 0.93 μg·cm⁻².

1.4 质量保证

样品分析前, 对仪器进行检漏, 每 2 周进行一次流量平衡校正. 为保证测量精度, 每个膜样品进行 3 次平行样分析, 每 10 个样品随机抽取一个进行平行分析, 前后两次测量误差在 10% 以内再进行后续样品测定. 同时做样品空白.

1.5 气态污染物与气象数据

文中所用 O₃ 浓度数据以及风速、风向、温度等气象参数均来自南京环境监测站中心站(七号楼子站).

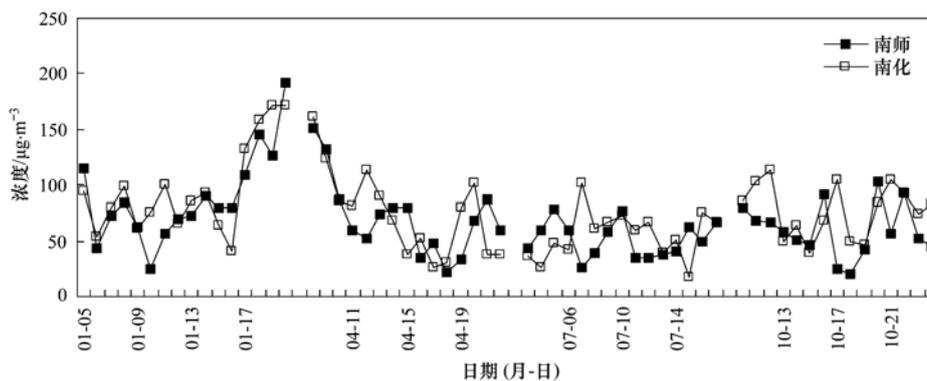
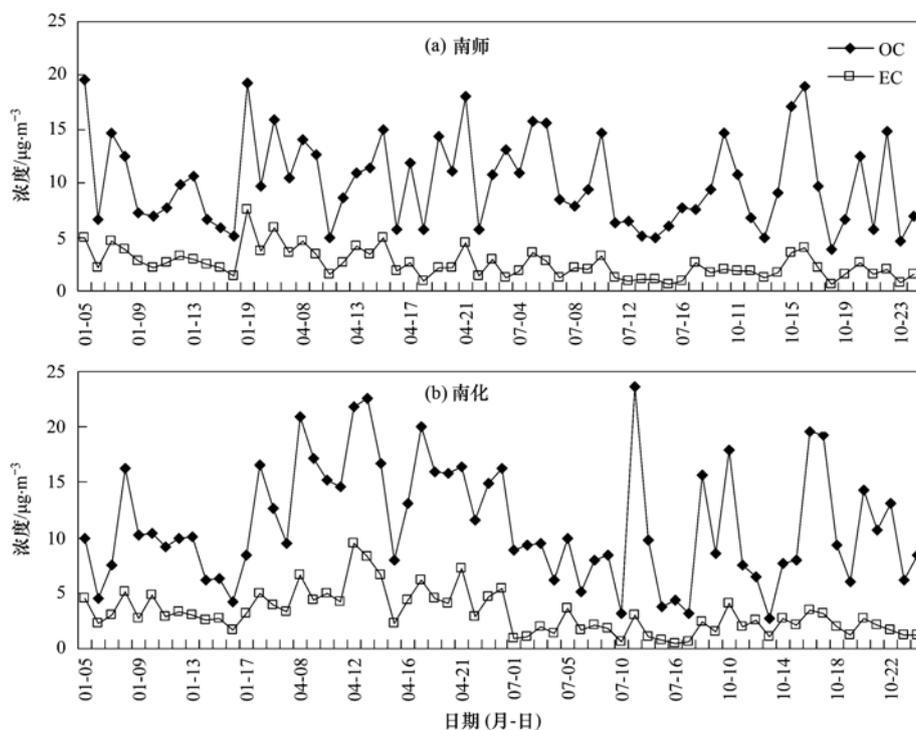
2 结果与讨论

2.1 PM_{1.1} 浓度特征

图 2 反映了南师、南化采样期间 PM_{1.1} 浓度的变化情况. 南师、南化两地冬季 PM_{1.1} 浓度波动最大, 春季次之, 夏秋季相对较平稳. 南师冬、春、夏、秋 PM_{1.1} 平均浓度分别为(89.14 ± 41.19)、(71.23 ± 35.04)、(51.45 ± 16.05)、(59.95 ± 24.33) μg·m⁻³, 年均浓度为(68.29 ± 33.40) μg·m⁻³; 南化四季 PM_{1.1} 平均浓度分别为(96.63 ± 41.12)、(75.32 ± 39.05)、(55.23 ± 21.43)、(77.68 ± 24.18) μg·m⁻³, 年均浓度为(76.66 ± 35.27) μg·m⁻³, 南化污染较严重, 这与周围化工工业与频繁过往机动车尾气排放密切相关. 与国内外一些大城市相比, 南京地区 PM_{1.1} 浓度整体高于德国 Melpitz^[12](12 μg·m⁻³)、英国 Birmingham^[13](12 μg·m⁻³)、希腊 Lykovrissi^[14](19 μg·m⁻³)、台湾高雄^[15](52 μg·m⁻³) 和香港^[16,17](44 μg·m⁻³), 说明南京地区大气细粒子 PM_{1.1} 污染比较严重.

2.2 OC、EC 浓度变化特征

图 3 是南师、南化 PM_{1.1} 中 OC、EC 浓度的季节性变化特征. OC、EC 浓度整体变化趋势相似, OC 浓度相对较高且波动幅度较大, EC 相对较低且稳定. 南师 OC、EC 年均浓度分别为 10.10 μg·m⁻³、2.52 μg·m⁻³, 呈现冬春季大于夏秋季之势, 冬季 OC、EC 浓度分别是夏季的 1.13 和 1.98 倍; 南化 OC、EC 年均浓度分别为 11.22 μg·m⁻³、3.12 μg·m⁻³, 春季最高, 夏季最低, 春季 OC、EC 浓度分别是夏季的 1.90 和 3.44 倍. OC、EC 浓度南师均低于南化, 说明南化

图 2 南京地区不同季节 $PM_{1.1}$ 的质量浓度Fig. 2 Mass concentration of $PM_{1.1}$ during different seasons in Nanjing图 3 南京地区 $PM_{1.1}$ 中 OC、EC 浓度的季节性变化Fig. 3 Seasonal concentrations of OC and EC in $PM_{1.1}$ in Nanjing

工业区污染更严重。夏季 OC、EC 浓度均最低,这主要是因为夏季降水充沛,对大气颗粒物起到冲刷稀释的作用,且南京夏季主风向为东南风,来自海洋的洁净气团可以一定程度地稀释当地气体。冬春两季,南京主要受到西风的影响,内陆西风将污染物带到南京上空中,加上冬季出现的逆温现象使污染物不易扩散,导致南京空气污染加重。

2.3 OC、EC 相关性和来源解析

大气气溶胶中 OC 主要来自于污染源的直接排放和光化学反应的生成,EC 则来源于生物质和化石燃料的不完全燃烧。研究 OC 与 EC 的相关性,能够

识别它们是否来自同一类污染源^[18]。由表 1 可见,南师秋冬季 OC、EC 相关性较好, R^2 分别达到 0.808 4、0.867 6,说明这两季 OC、EC 来源相对稳定,主要是由于冬季大气层结相对稳定,污染物相对集中,可能主要来自采样点附近的燃煤和交通排放。而春夏两季相关性不高,说明 OC、EC 来源相对复杂,主要是由于春季风速较大,风向多变,携带其他地区的污染物至采样点地区,而夏季降水充足,加上台风的作用,清除了部分污染物。南化地区冬春季 OC、EC 的相关性较高,可能由于南化地处工业区,冬春季工业发电和工业生产的燃煤排放起主导作

表 1 不同季节 OC、EC 浓度值线性拟合结果
Table 1 Linear regression of OC and EC concentrations
in different seasons

| 季节 | 样品数 | 南师 | 南化 |
|----|-----|------------------------------------------|------------------------------------------|
| 春 | 30 | $y = 2.4787x + 3.5965$ $R^2 = 0.6354$ | $y = 1.7010x + 7.1859$ $R^2 = 0.7624$ |
| 夏 | 30 | $y = 3.0895x + 3.8744$ $R^2 = 0.5890$ | $y = 4.1027x + 2.2061$ $R^2 = 0.4958$ |
| 秋 | 30 | $y = 4.6844x + 0.7333$ $R^2 = 0.8084$ | $y = 4.6539x + 0.2273$ $R^2 = 0.6203$ |
| 冬 | 30 | $y = 2.7237x + 1.0279$ $R^2 = 0.8676$ | $y = 2.9562x - 0.4482$ $R^2 = 0.7287$ |

用,而秋季由于农作物秸秆的焚烧以及本地交通源排放,导致 OC、EC 来源相对复杂多变. 不同来源的稳定碳同位素组成存在差异,可以利用同位素示踪法对 OC、EC 的来源进行解析. 南师四季 $\delta^{13}\text{C}$ 均值的范围在 -24.42% ~ -25.79% 之间,有研究表明汽油车尾气 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -25.41% ,由此可推知南师 OC、EC 主要来源于汽油车尾气的排放. 南化四季 $\delta^{13}\text{C}$ 均值的范围在 -25.31% ~ -25.55% ,与汽车尾气排放的值接近,但冬春季 $\delta^{13}\text{C}$ 值波动较大,1 月达

表 2 南京地区 PM_{1.1} 中二次有机碳浓度特征

Table 2 Concentration characteristics of SOC in PM_{1.1} in Nanjing

| 季节 | 南师(NS) | | | 南化(NH) | | |
|----|------------------------|--------------------------------------|----------|------------------------|--------------------------------------|----------|
| | (OC/EC) _{min} | SOC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | SOC/OC/% | (OC/EC) _{min} | SOC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | SOC/OC/% |
| 春 | 2.62 | 3.19 | 29.73 | 2.28 | 4.08 | 25.02 |
| 夏 | 2.80 | 4.38 | 46.90 | 2.81 | 4.22 | 49.12 |
| 秋 | 3.78 | 2.49 | 25.35 | 2.48 | 5.02 | 47.90 |
| 冬 | 2.57 | 1.56 | 14.76 | 1.99 | 2.82 | 29.68 |
| 全年 | 2.57 | 3.63 | 35.94 | 1.99 | 5.02 | 44.74 |

2.5 SOC 与 O₃ 的相关性分析

通过对南师、南化两地不同季节的 SOC 浓度、O₃ 浓度进行相关性分析,发现两地秋季具有一定的相关性(R^2 分别为 0.3606、0.3028, $n = 15$),而其余 3 个季节相关性不强. 有研究表明,阴雨天的臭氧平均浓度仅为晴天时的一半左右^[24,25],这主要是因为臭氧是光化学反应的产物,充足的紫外辐射是产生臭氧的最关键因素;而雨水的冲刷又是去除臭氧的一个重要途径,因此,晴天时臭氧浓度要明显高于阴雨天. 总体来说,这些条件有利于 O₃ 的生成,但同时也会被消耗一部分,两个过程同时进行,但生成比消耗明显,占优势. SOC、O₃ 含量不仅与紫外辐射等气象要素有关,还与其前体物(NO_x、VOCs)也密切相关^[26]. 前体物在高温、阳光充足的条件下,会生成臭氧. 夏季植被排放的 VOCs(如异戊二烯、萜烯等)增多,可能最终转化为 SOC 和 O₃. 夏

到最大值 -21.57% ,4 月达到最小值 -26.96% ,这与燃煤排放以及生物质(C₃、C₄ 植物)的燃烧排放密切相关.

2.4 二次有机碳(SOC)的估算

有研究认为^[19],OC/EC 比值可用于评价 OC 中二次来源的部分,当 OC/EC 比值超过 2.0 时,认为存在二次反应生成的 SOC^[20-22]. 采样期间南师、南化两地 OC/EC 比值均大于 2.0,说明南京地区细颗粒物中普遍存在二次有机物污染. 表 2 是南师、南化 PM_{1.1} 中 SOC 浓度特征. 由此看出,南师、南化 SOC 的年均浓度分别为 $3.63 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $5.02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,SOC/TOC 分别达到 35.94%、44.74%,说明 SOC 是南京大气 PM_{1.1} 中 OC 的重要组成部分. 两地 PM_{1.1} 中均是夏季 SOC/OC 最高,达到了 45%,夏季温度高,太阳辐射强,大气中碳氢化合物易发生光化学反应,各种气象条件均利于 SOC 的生成,这与国内外许多学者研究的结果相一致^[23]. 南化秋季 SOC 明显高于南师,主要是因为秋季农田中大量秸秆燃烧排放的碳氢化合物、VOCs 也相对较多,可能最终转化生成 SOC.

季是雷雨天气最多的季节,采样期间夏季雷雨天气占 2/3,频繁的雨水冲刷使 SOC、O₃ 浓度有所降低,且夏季台风的登陆加速了空气的流动扩散,导致二者相关性下降. 南京秋季气温相对较高,雷雨天气少,SOC 和 O₃ 主要由光化学反应生成,二者来源相对较一致,使 SOC 与 O₃ 具有较好的相关性.

2.6 OC、EC 与气象要素的相关性

采样期间记录了南京地区温度、湿度和风速,经分析得出 OC、EC 和温度、湿度、风速的相关性,见表 3. 南京雨量充沛,年均降水量在 1200 mm 左右,且主要集中在夏季. 市区 OC、EC 与风速呈显著负相关性,市区人口密度大,建筑物密集,风速越大,洁净气团对 OC、EC 的稀释扩散作用越明显,这也证明了夏季台风登陆有助于稀释污染物. 郊区相对空旷,风速的影响没有市区显著. EC 与温度有显著负相关,温度升高有助于 EC 的转化. 而在南化工

业区,EC 不仅与温度还与湿度有显著负相关性,这可能是由于南化工业区靠近长江,空气湿度相对较

高,湿度增加,EC 可以起到凝结核作用形成云滴最终通过降雨被清除。

表3 南师和南化 OC、EC 与温度、相对湿度、风速的相关性¹⁾

Table 3 Correlations among OC, EC, temperature, humidity and wind velocity in NS and NH

| 地点 | | OC | EC | 温度 | 相对湿度 | 风速 |
|----|------|----|----------|-----------|-----------|-----------|
| 南师 | OC | 1 | 0.799 ** | -0.071 | -0.051 | -0.302 * |
| | EC | | 1 | -0.405 ** | -0.047 | -0.363 ** |
| | 温度 | | | 1 | 0.558 ** | 0.088 |
| | 相对湿度 | | | | 1 | -0.107 |
| | 风速 | | | | | 1 |
| 南化 | OC | 1 | 0.757 ** | -0.128 | -0.172 | -0.226 |
| | EC | | 1 | -0.412 ** | -0.448 ** | -0.130 |
| | 温度 | | | 1 | 0.594 ** | 0.093 |
| | 相对湿度 | | | | 1 | -0.192 |
| | 风速 | | | | | 1 |

1) ** 为在 0.01 水平上显著相关; * 为在 0.05 水平上显著相关

3 结论

(1) 采样期间,南师 $PM_{1.1}$ 年均质量浓度低于南化,说明南师 $PM_{1.1}$ 污染更严重;两地 $PM_{1.1}$ 中 OC、EC 浓度均在冬春季达到最高值。

(2) 南京地区大气 $PM_{1.1}$ 中 OC、EC 浓度在冬春季具有较好的正相关性,说明冬春季 OC、EC 来源稳定,且主要来自移动交通源及燃煤排放,秋季还与生物质的燃烧有关。

(3) 南师、南化两地 SOC/TOC 在夏季达到峰值,夏季高温、强辐射明显加强了大气中的光化学反应,促进 SOC 的生成,但夏季雷雨天气较多,雨水的冲刷降低了 SOC、 O_3 的含量,导致其相关性下降。南化秋季 SOC 含量高于南师,且两地秋季 SOC、 O_3 的相关性较好。

致谢: 本实验采样工作由南京师范大学和南京化工职业技术学院同学协助完成,在此表示感谢。

参考文献:

[1] 王东方,高松,段玉森,等. 上海中心城区冬季 $PM_{2.5}$ 中有机碳和元素碳组成变化特征[J]. 环境科学与技术, 2012, **35** (7): 55-58, 72.

[2] 尚倩,李子华,杨军,等. 南京冬季大气气溶胶粒子谱分布及其对能见度的影响[J]. 环境科学, 2011, **32** (9): 2750-2760.

[3] 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,等. 南京市 $PM_{2.1}$ 中有机碳和元素碳污染特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2013, **33** (7): 1160-1166.

[4] 李杏茹,王英锋,郭雪清,等. 2008 年奥运期间北京不同粒径大气颗粒物中元素碳和有机碳的变化特征[J]. 环境科学, 2011, **32** (2): 313-318.

[5] 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.

[6] Chan Y C, Simpson R W, McTainsh G H, *et al.* Source apportionment of visibility degradation problems in Brisbane (Australia) using the multiple linear regression techniques[J]. Atmospheric Environment, 1999, **33** (19): 3237-3250.

[7] Witsaman R J, Comstock R D, Smith G A. Pediatric fireworks-related injuries in the United States: 1990-2003[J]. Pediatrics, 2006, **118** (1): 296-303.

[8] Ravindra, Mittal A K, Van Grieken R. Health risk assessment of urban suspended particulate matter with special reference to polycyclic aromatic hydrocarbons: A review[J]. Reviews on Environmental Health, 2001, **16** (3): 169-189.

[9] Van Kamp I, Van Der Velden P G, Stellato R K, *et al.* Physical and mental health shortly after a disaster: first results from the Enschede firework disaster study[J]. The European Journal of Public Health, 2006, **16** (3): 252-258.

[10] 陈魁,银燕,魏玉香,等. 南京大气 $PM_{2.5}$ 中碳组分观测分析[J]. 中国环境科学, 2010, **30** (8): 1015-1020.

[11] 谢鸣捷,王格慧,胡淑圆,等. 南京夏秋季大气颗粒物和 PAHs 组成的粒径分布特征[J]. 中国环境科学, 2008, **28** (10): 867-871.

[12] Spindler G, Brüggemann E, Gnauk T, *et al.* A four-year size-segregated characterization study of particles PM_{10} , $PM_{2.5}$ and PM_1 depending on air mass origin at Melpitz[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44** (2): 164-173.

[13] Yin J X, Harrison R M. Pragmatic mass closure study for $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$ and PM_{10} at roadside, urban background and rural sites[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42** (5): 980-988.

[14] Koulouri E, Grivas G, Gerasopoulos E, *et al.* Study of size-segregated particle (PM_1 , $PM_{2.5}$, PM_{10}) concentrations over Greece[J]. Global NEST Journal, 2008, **10** (2): 132-139.

[15] Lin J J, Lee L C. Characterization of the concentration and distribution of urban submicron (PM_1) aerosol particles[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38** (3): 469-475.

[16] Cheng Y, Zou S C, Lee S C, *et al.* Characteristics and source apportionment of PM_1 emissions at a roadside station[J]. Journal

- of Hazardous Materials, 2011, **195**: 82-91.
- [17] Cheng Y, Ho K F, Lee S C, *et al.* Seasonal and diurnal variations of PM_{1.0}, PM_{2.5} and PM₁₀ in the roadside environment of Hong Kong[J]. *China Particology*, 2006, **4**(6): 312-315.
- [18] 张美根, 徐永福, 张仁健, 等. 东亚地区春季黑碳气溶胶源排放及其浓度分布[J]. *地球物理学报*, 2005, **48**(1): 46-51.
- [19] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [20] 霍宗权, 沈振兴, 田晶, 等. 西安市大气 PM₁₀ 中水溶性有机碳的季节变化及来源解析[J]. *西安交通大学学报*, 2010, **44**(9): 128-132.
- [21] 崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 等. 上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算[J]. *环境科学*, 2013, **34**(5): 2003-2009.
- [22] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(23): 3527-3544.
- [23] Chow J C, Watson J G, Kuhns H, *et al.* Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational study [J]. *Chemosphere*, 2004, **54**(2): 185-208.
- [24] Geng F H, Tie X X, Guenther A, *et al.* Effect of isoprene emissions from major forests on ozone formation in the city of Shanghai, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**: 10449-10459.
- [25] 刘琼, 耿福海, 陈勇航, 等. 上海城区典型臭氧浓度偏低年的成因分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2013, **22**(7): 900-907.
- [26] 吴方堃, 王跃思, 安俊琳, 等. 北京奥运时段 VOCs 浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 10-16.

CONTENTS

| | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------|
| Simulation and Influencing Factors of Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentrations in Chongqing | WU Jian-sheng, LIAO Xing, PENG Jian, <i>et al.</i> | (759) |
| Correlation, Seasonal and Temporal Variation of Water-soluble Ions of PM _{2.5} in Beijing During 2012-2013 | YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> | (768) |
| Characteristics and Sources Apportionment of OC and EC in PM _{1.1} from Nanjing | JIANG Wen-juan, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> | (774) |
| Composition and Variation Characteristics of Atmospheric Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Taiyuan, China | ZHANG Gui-xiang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> | (780) |
| Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Shouzhou City | LIU Feng-xian, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> | (787) |
| Satellite Retrieval of a Heavy Pollution Process in January 2013 in China | XUE Wen-bo, WU Wei-ling, FU Fei, <i>et al.</i> | (794) |
| Meteorological Mechanism for the Formation of a Serious Pollution Case in Beijing in the Background of Northerly Flow at Upper Levels | LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, TANG Yi-xi, <i>et al.</i> | (801) |
| Concentrations and Deposition Fluxes of Different Mercury Species in Precipitation in Jinyun Mountain, Chongqing | QIN Cai-qing, WANG Yong-min, PENG Yu-long, <i>et al.</i> | (809) |
| Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Wuzhi Mountain (Wuzhishan) Background Station in Hainan | LEI Yu-tao, LIU Ming, CHEN Lai-guo, <i>et al.</i> | (817) |
| Organic and Element Carbon in Foliar Smoke | CHEN Hui-yu, LIU Gang, XU Hui, <i>et al.</i> | (824) |
| Analysis of Characteristics and Products of Chlorobenzene Degradation with Dielectric Barrier Discharge | JIANG Li-ying, CAO Shu-ling, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> | (831) |
| Distribution, Sources and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Sediments of Yangtze Estuary and Zhejiang Coastal Areas | MU Qing-lin, FANG Jie, SHAO Jun-bo, <i>et al.</i> | (839) |
| Adsorption Characteristics of Typical PPCPs onto River Sediments and Its Influencing Factors | WANG Kai, LI Kan-zhu, ZHOU Yi-yuan, <i>et al.</i> | (847) |
| Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediment in Karst Underground River | LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> | (855) |
| Contamination Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Multimedium in Karst Underground River | LU Li, WANG Zhe, PEI Jian-guo, <i>et al.</i> | (862) |
| Characteristics of Absorption and Fluorescence Spectra of Dissolved Organic Matter from Confluence of Rivers; Case Study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River | YAN Jin-long, JIANG Tao, GAO Jie, <i>et al.</i> | (869) |
| Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter (DOM) in Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Region | WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> | (879) |
| Absorption and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Rainwater and Sources Analysis in Summer and Winter Season | LIANG Jian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> | (888) |
| Composition of NOM in Raw Water of Danjiangkou Reservoir of South-to-North Water Diversion Project and Comparison of Efficacy of Enhanced Coagulation | CHENG Tuo, XU Bin, ZHU He-zhen, <i>et al.</i> | (898) |
| Denitrification in Water of Daliao River Estuary in Summer and the Effect of Environmental Factors | YANG Li-biao, LEI Kun, MENG Wei, <i>et al.</i> | (905) |
| Sources of Dissolved Organic Carbon and the Bioavailability of Dissolved Carbohydrates in the Tributaries of Lake Taihu | YE Lin-lin, WU Xiao-dong, KONG Fan-xiang, <i>et al.</i> | (914) |
| Canonical Correspondence Analysis of Summer Phytoplankton Community and Its Environmental Factors in Hanfeng Lake | WANG Yu-fei, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> | (922) |
| Temporal Variation of Trophic Status in Drawdown Area of Hanfeng Lake in the Storage Period of Three Gorges Reservoir in China | HUANG Qi, HE Bing-hui, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> | (928) |
| Spatial Distribution Pattern and Stock Estimation of Nutrients During Bloom Season in Lake Taihu | JIN Ying-wei, ZHU Guang-wei, XU Hai, <i>et al.</i> | (936) |
| Phytoplankton Community Structure and Eutrophication Risk Assessment of Beijing River | GOU Ting, MA Qian-li, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> | (946) |
| Synergistic Effect of Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combined Disturbance on Regeneration and Transformation of Internal Phosphorus | SHI Xiao-dan, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> | (955) |
| Effect of Light and Temperature on Growth Kinetics of <i>Anabaena flosaquae</i> Under Phosphorus Limitation | YIN Zhi-kun, LI Zhe, WANG Sheng, <i>et al.</i> | (963) |
| Purification of the Wastewater of Quartz Processing by Mineral-based Porous Granulation Material | WANG En-wen, LEI Shao-min, ZHANG Shi-chun, <i>et al.</i> | (969) |
| Enhanced Reductive Decoloration of Methylene Blue by Polyacrylic Acid Modified Zero-valent Iron Nanoparticles | HE Jing, WANG Xiang-yu, WANG Pei, <i>et al.</i> | (980) |
| Decolorization of Reactive Blue P-3R with Microsphere-supported Binuclear Manganese Complex as a Novel Heterogeneous CWPO Catalyst | SONG Min, ZHANG Lin-ping, ZHONG Yi, <i>et al.</i> | (989) |
| Biosynthetic Schwertmannite as Catalyst in Fenton-like Reactions for Degradation of Methyl Orange | WANG Kuai-bing, FANG Di, XU Zhi-hui, <i>et al.</i> | (995) |
| Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Wastewater by Using Sludge Anaerobic Fermentation Liquid as Carbon Source in a Pilot-scale System | LUO Zhe, ZHOU Guang-jie, LIU Hong-bo, <i>et al.</i> | (1000) |
| Transformation Characteristics of Carbon, Nitrogen, Phosphorus and Sulfur During Thermal Hydrolysis Pretreatment of Sludge with High Solid Content | ZHUO Yang, HAN Yun, CHENG Yao, <i>et al.</i> | (1006) |
| Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Control of Membrane Fouling in MBR and SMBR | GUO Xiao-ma, ZHAO Yan, WANG Kai-yan, <i>et al.</i> | (1013) |
| Influence of Substrate COD on Methane Production in Single-chambered Microbial Electrolysis Cell | TENG Wen-kai, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> | (1021) |
| Ion Specificity During Ion Exchange Equilibrium in Natural Clinoptilolite | HE Yun-hua, LI Hang, LIU Xin-min, <i>et al.</i> | (1027) |
| Assessment of Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risks of Urban Soils in Kaifeng City, China | LI Yi-meng, MA Jian-hua, LIU De-xin, <i>et al.</i> | (1037) |
| Effects of Different Cultivation Patterns on Soil Aggregates and Organic Carbon Fractions | QIU Xiao-lei, ZONG Liang-gang, LIU Yi-fan, <i>et al.</i> | (1045) |
| Effects of Chinese Prickly Ash Orchard on Soil Organic Carbon Mineralization and Labile Organic Carbon in Karst Rocky Desertification Region of Guizhou Province | ZHANG Wen-juan, LIAO Hong-kai, LONG Jian, <i>et al.</i> | (1053) |
| Rare Earth Elements Content in Farmland Soils and Crops of the Surrounding Copper Mining and Smelting Plant in Jiangxi Province and Evaluation of Its Ecological Risk | JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, WANG Fei, <i>et al.</i> | (1060) |
| Combined Toxicity of Cadmium and S-metolachlor to <i>Scenedesmus obliquus</i> | ZHANG Xiao-qiang, HU Xiao-na, CHEN Cai-dong, <i>et al.</i> | (1069) |
| Effect of Degradation Succession Process on the Temperature Sensitivity of Ecosystem Respiration in Alpine <i>Potentilla fruticosa</i> Scrub Meadow | LI Dong, LUO Xu-peng, CAO Guang-min, <i>et al.</i> | (1075) |
| Ecological Stoichiometric Characteristics in Leaf and Litter Under Different Vegetation Types of Zhifanggou Watershed on the Loess Plateau, China | LI Xin, ZENG Quan-chao, AN Shao-shan, <i>et al.</i> | (1084) |
| Denitration Mechanism of Monoclinic-phase Nano Zirconium Oxide-based Catalysts | YE Fei, LIU Rong, GUAN Hao, <i>et al.</i> | (1092) |
| Characterization of Phosphorus Forms in Different Organic Materials | DENG Jia, HU Meng-kun, ZHAO Xiu-lan, <i>et al.</i> | (1098) |
| Comparative Life Cycle Environmental Assessment Between Electric Taxi and Gasoline Taxi in Beijing | SHI Xiao-qing, SUN Zhao-xin, LI Xiao-nuo, <i>et al.</i> | (1105) |
| Characteristics of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particles Emitted from Coal-Fired Power Plants | DUAN Lei, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> | (1117) |
| Underlying Mechanisms of the Heavy Metal Tolerance of Mycorrhizal Fungi | CHEN Bao-dong, SUN Yu-qing, ZHANG Xin, <i>et al.</i> | (1123) |
| Research Progress on Microbial Properties of Nitrite-Dependent Anaerobic Methane-Oxidising Bacteria | SHEN Li-dong | (1133) |

《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)

2015年3月15日 第36卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 3 Mar. 15, 2015

| | | | | |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行