

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

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

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)	

2013 年 1 月南京北郊霾天气溶胶的光学特性

王利朋^{1,2}, 马嫣^{1,2*}, 郑军^{1,2}, 崔芬萍^{1,2}, 周瑶瑶^{1,2}

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044)

摘要: 2013 年 1 月南京出现了长时间、大范围和高浓度的灰霾。利用三波长光声黑碳光度计 (PASS-3) 对南京北郊气溶胶的吸收和散射系数进行实时在线原位观测。结果表明, 霾天气溶胶吸收和散射系数平均值分别为 $(83.20 \pm 35.24) \text{ Mm}^{-1}$ 和 $(670.16 \pm 136.44) \text{ Mm}^{-1}$, 分别为清洁天的 3.85 倍和 3.45 倍。吸收和散射系数均呈现早晚高中午低的双峰型日变化特征, 单散射反照率和散射埃系数平均值分别为 (0.89 ± 0.04) 和 (1.30 ± 0.27) , 说明霾天气溶胶主要以细粒子中的散射性物质为主。降雨对气溶胶有明显的清除作用。地面风速与气溶胶吸收和散射呈负相关关系, 与单散射反照率和埃系数呈正相关; 东南风时气溶胶散射系数最大, 西南风时气溶胶吸收系数最大。3 次霾污染事件中, Haze 1 主要受来自北部的老化污染气团影响, Haze 2 主要受来自西南的生物质燃烧污染气团影响, 而 Haze 3 主要由固定源污染引起。

关键词: 灰霾; 光学特征; 气象要素; PASS-3; 南京

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0816-09 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2016.03.005

Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013

WANG Li-peng^{1,2}, MA Yan^{1,2*}, ZHENG Jun^{1,2}, CUI Fen-ping^{1,2}, ZHOU Yao-yao^{1,2}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing 210044, China)

Abstract: In January 2013 large-scale, continuous and severe haze occurred in Nanjing. Three-wavelength photoacoustic soot spectrometer (PASS-3) was used for real-time, online and situ measurements of aerosol absorption and scattering coefficients in the northern suburb of Nanjing during January 2013. The results indicated that the average aerosol absorption and scattering coefficients were $(83.20 \pm 35.24) \text{ Mm}^{-1}$ and $(670.16 \pm 136.44) \text{ Mm}^{-1}$ during haze days, which were 3.85 and 3.45 times higher than those on clean days, respectively. The diurnal variation of absorption and scattering coefficients showed a bimodal distribution. The mean single scattering albedo and scattering Ångström exponent were (0.89 ± 0.04) and (1.30 ± 0.27) respectively, indicating the predominance of scattering fine particles during haze days in Nanjing. Aerosols could be significantly removed by precipitation. The absorption and scattering coefficients showed negative correlations with surface wind speed, and the single scattering albedo and Ångström exponent showed positive correlations with wind speed. Aerosol scattering coefficient was highest under southeasterly wind, whereas the absorption coefficient was highest under the southwesterly wind. In the three haze pollution events, Haze 1 and Haze 2 were mainly affected by long-range transportation of pollutants. Haze 1 was mainly affected by aging air mass from north Nanjing, Haze 2 was mainly affected by biomass burning air mass from southwest Nanjing, while Haze 3 was mainly caused by the high sulfate.

Key words: haze; optical properties; meteorological parameters; PASS-3; Nanjing

灰霾是悬浮在空气中的大量细小尘粒、烟粒或盐粒等集成的气溶胶颗粒物和气体的消光作用所导致空气浑浊、水平能见度小于 10 km 的一种天气现象^[1,2]。近年来,随着中国工业化和城市化进程的加快,大气污染物排放量逐渐增加,灰霾天气越来越频繁,日益成为公众关注的焦点。大量研究表明,灰霾颗粒物浓度与颗粒物的消光作用、消光系数和呼吸系统疾病的发病率存在明显的相关关系^[3~7]。

2013 年 1 月中国中东部地区经历了污染范围广、发生次数多、持续时间长、污染浓度高的雾霾天气^[8,9]。就此次污染研究表明,污染区域方面,主要集中在 4 个区域:A 京津冀地区以及周围区域,主

要包括北京、天津、河北的南部、山东西部和河南北部;B 长三角地区,主要有江苏省、浙江北部、安徽东部和上海;C 四川盆地;D 华中地区,主要集中在武汉、长沙和南昌^[10]。污染次数和持续时间方面,北京 1 月霾天总计达到 26 d,持续时间长达 5 d 的霾污染达 3 次^[11];长三角地区 1 月 16 号前已发生 3 次灰霾,每次持续时间长达 3 d 以上。污染物浓

收稿日期: 2015-07-06; 修订日期: 2015-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21377059, 41275142, 41030962); 江苏省自然科学基金项目 (BK2012861)

作者简介: 王利朋 (1988 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: lipwang1988@163.com

* 通讯联系人, E-mail: my_nj@163.com

度方面, 北京 $\text{PM}_{2.5}$ 的小时平均浓度超过 $200.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最高浓度达到 $600.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [12]. 南京 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $175.60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 最高浓度为 $416.50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 无锡、临安、合肥、杭州和绍兴的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度范围在 $110.80 \sim 147.30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [13]; 上海均值较低, 为 $(82.00 \pm 54.00) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ [9]. 在污染成因方面, Wang 等 [13] 发现南京地区重污染的形成是由于不利气象条件下污染物(硫酸盐、硝酸盐以及含碳化合物等)的高排放造成的. 周敏等 [9] 在上海的研究中发现硫-硝-铵盐和含碳组分对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献较大, 分别占 $\text{PM}_{2.5}$ 的 60.20% 和 23.20%. 程念亮等 [14] 通过气象要素分析发现低风速、高湿度、低边界层和持续逆温对持续性重污染起关键作用. 王琴等 [15] 和王丛梅等 [16] 分别对西安和河北中南部污染成因进行分析, 发现不利地形条件对污染持续起重要作用. 石春娥等 [17] 和李璇等 [18] 发现重污染日区域污染物的传输起着显著影响. 由此可知, 污染物的高排放是造成这次污染的主要原因, 不利的气象条件和地形是造成部分地区污染物浓度高的推动力.

有关这次污染的研究多侧重于 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组分和污染成因, 而对于这次重污染期气溶胶光学特性以及消光机制的研究较少. 本研究利用三波长光声黑碳光度计实时在线原位观测这次灰霾的光学特性, 结合气象要素和化学组成, 探讨气溶胶消光机制和气象要素对其光学特性的影响, 对深入了解灰霾产生机制具有积极的指导意义.

1 材料与方法

1.1 采样点

这次观测的采样点位于南京市北郊南京信息工程大学大气环境监测站 ($118^{\circ}70'E$, $32^{\circ}20'N$, 海拔 62 m) 内, 距南京市区约 15 km, 北临南京市浦口区盘城镇, 南依龙王山, 偏东约 2 km 有南京钢铁厂、东北约 10 km 为南京市扬子石化、氮肥厂等大型企业 [3, 19]. 这个观测点代表复杂的环境, 包括居民区、交通区和工业区.

1.2 仪器介绍

观测仪器放置在校园内大气环境监测站的恒温控制集装箱中. 样气经集装箱顶 $\text{PM}_{2.5}$ 切割头后经过 Nafion drier 干燥后进入各仪器. 这次观测采用三波长光声黑碳光度计 (Three-wavelength photoacoustic soot spectrometer, PASS-3, 美国 DMT) 在线原位测定 3 个波长 (405、532 和 781 nm) 下气溶胶吸收

(absorption coefficient, β_{abs}) 和散射系数 (scattering coefficient, β_{sca}). PASS-3 的测定范围 $< 8000 \text{ Mm}^{-1}$, 测量精度 $< 10\%$, 时间分辨率 2 s, PASS-3 的原理和技术在 Arnott 等 [20] 的文章已给予详细的介绍. 观测前后均对 PASS-3 进行校正, 分别采用激光功率计、 NO_2 标气和聚苯乙烯乳胶球 (250 nm) 校正每个波长下的激光能量、吸收系数和散射系数.

$\text{PM}_{2.5}$ 离子成分分析采用半连续颗粒物-液体转换采集系统 (Particle into liquid sampler, PILS, 瑞士万通 ADI2081)/离子色谱仪 (戴安 IC-2000, IC-3000) 的测定. PILS 详细设计已有报道 [21~23], 这里仅简单介绍 PILS 的原理. PILS 是颗粒物进入液体的一个预处理装置, 含有样品的空气流 ($16.70 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$) 与高纯度的水蒸气混合, 在过饱和的状态下, 气溶胶颗粒长成液体, 由于惯性撞击到撞击器上, 用固定流速的标准浓度的 LiBr 溶液淋洗收集到收集器中用于离子组分的分析.

PILS 收集的每小时一个的样品, 经过 $0.22 \mu\text{m}$ 亲水 PTFE 针式滤器 (上海安普科学仪器有限公司) 在线过滤后分别用 IC-2000 测定 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} , IC-3000 测定 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} . 阴阳离子测定时仪器的参数设置如下: IC-2000 分离柱 AS11-HC $4 \times 250 \text{ mm}$, 抑制器 ASRS 4 mm, 淋洗液 $30 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ KOH}$ 溶液, 流速 $1.00 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$; IC-3000 分离柱 CS16 $5 \times 250 \text{ mm}$, 抑制器 CSRS 4 mm, 淋洗液 $32 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 甲烷磺酸, 流速 $1.00 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

1.3 光学特征的计算

散射埃系数 (scattering Ångström exponent, $\mathring{A}_{\text{sca}}$) 的计算根据公式 (1):

$$\mathring{A}_{\text{sca}} = - \frac{\ln\left(\frac{\beta_{\text{sca}}\lambda_1}{\beta_{\text{sca}}\lambda_2}\right)}{\ln\left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)} \quad (1)$$

在这项研究中, PASS-3 测定的波长 405 nm 和 781 nm 下的 β_{sca} 用于计算 $\mathring{A}_{\text{sca}}$. 其大小可表征气溶胶颗粒尺寸的大小 [24], Kaufman 等 [25] 研究表明散射埃系数可较好地指示细粒子 (粒径 r 为 $0.057 \sim 0.21 \mu\text{m}$) 与粗粒子 (r 为 $1.8 \sim 4 \mu\text{m}$) 的相对比例. $\mathring{A}_{\text{sca}} < 1$ 表明气溶胶主要以粗模态形式存在, $\mathring{A}_{\text{sca}} > 1$ 表明气溶胶主要以细模态形式存在 [26].

为了判断吸收性气溶胶的组成, 计算了吸收埃系数 (absorption Ångström exponent, $\mathring{A}_{\text{abs}}$) (按照公式 (1) 计算, 只是将 β_{sca} 换成 β_{abs}) [24]. Lack 等 [27] 研究

发现当 $\hat{A}_{\text{abs}} > 1.60$ 时,气溶胶光吸收主要是有机碳的吸收。

单散射反照率(single scattering albedo, ω)是给定波长下的 β_{sca} 与 $(\beta_{\text{sca}} + \beta_{\text{abs}})$ 的比值。

$$\omega = \frac{\beta_{\text{sca}}(\lambda)}{\beta_{\text{sca}}(\lambda) + \beta_{\text{abs}}(\lambda)} \quad (2)$$

1.4 后向轨迹及气象数据

后向轨迹是采用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的空气资源实验室网站上 HYSPLIT 后向轨迹模型计算。本研究主要计算了每次污染最高时刻的 72 h 后向轨迹。南京信息工程大学气象观测站测定了小时平均的气象数据,主要包括能见度、降雨量、风速和风向。

2 结果与分析

2.1 气溶胶光学特性的逐时变化特征

图 1 显示了 2013 年 1 月 25 日至 2 月 4 日整个观测期气溶胶在 532 nm 处的吸收系数($\beta_{\text{abs } 532}$)、散射系数($\beta_{\text{sca } 532}$)和单散射反照率(ω)以及降雨和能见度的变化趋势。这次观测期南京北郊气溶胶 $\beta_{\text{abs } 532}$ 、 $\beta_{\text{sca } 532}$ 和 ω 的变化范围分别为 9.71 ~ 230.54 Mm^{-1} 、88.78 ~ 1 177.16 Mm^{-1} 和 0.78 ~ 0.96,平均

值 ± 标准偏差分别为 $(61.65 \pm 40.59) \text{ Mm}^{-1}$ 、 $(511.47 \pm 239.58) \text{ Mm}^{-1}$ 和 (0.89 ± 0.04) 。研究表明,北京冬季 $\beta_{\text{abs } 532}$ 和 $\beta_{\text{sca } 532}$ 分别 $(58.00 \pm 57.00) \text{ Mm}^{-1}$ 和 $(259.00 \pm 284.00) \text{ Mm}^{-1}$ [28],上海冬季为 $(66.00 \pm 47.00) \text{ Mm}^{-1}$ 和 $(293.00 \pm 206.0) \text{ Mm}^{-1}$ [29],广州冬季为 $(78.00 \pm 43.00) \text{ Mm}^{-1}$ 和 $(469.00 \pm 279.00) \text{ Mm}^{-1}$ [30],均小于南京北郊,但南京北郊气溶胶的吸收与散射系数小于西安冬季的 $(104.00 \pm 69.60) \text{ Mm}^{-1}$ 和 $(657.40 \pm 436.90) \text{ Mm}^{-1}$ [31],整体相比可见南京北郊空气污染相对严重,并且气溶胶的散射效应大于吸收效应。同时,笔者发现 ω 与 $\beta_{\text{abs } 532}$ 呈现极显著的负相关, Pearson 相关系数 -0.57 [Sig. (2-tailed) < 0.01],在 1 月 29 日傍晚至 1 月 30 日中午 $\beta_{\text{abs } 532}$ 出现观测期间的最高峰值,相应的 ω 出现最低峰,最低值为 0.78。 $\beta_{\text{sca } 532}$ 与能见度存在极显著负相关, Pearson 相关系数 -0.60 [Sig. (2-tailed) < 0.01],表明气溶胶光散射是导致能见度降低的主要原因。1 月 31 日傍晚至 2 月 1 日凌晨有明显的降雨过程,气溶胶 $\beta_{\text{abs } 532}$ 从降雨前的 60.00 Mm^{-1} 降至 28.22 Mm^{-1} , $\beta_{\text{sca } 532}$ 从降雨前的 600.00 Mm^{-1} 降至 121.97 Mm^{-1} ,表明降水对大气中气溶胶粒子具有明显的清除作用。

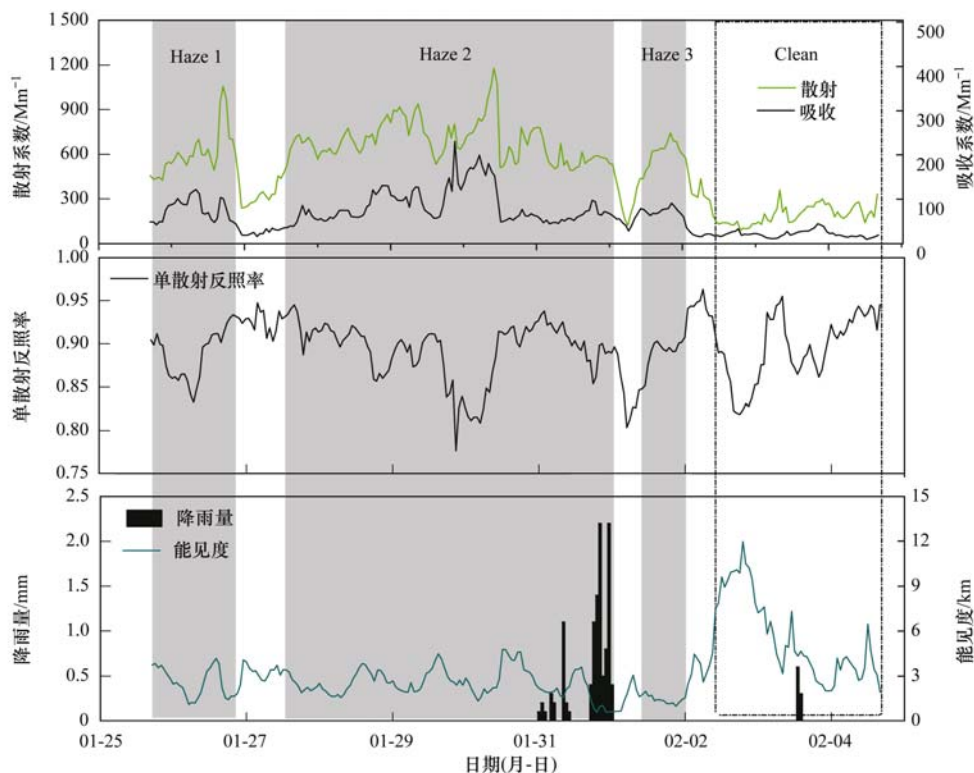


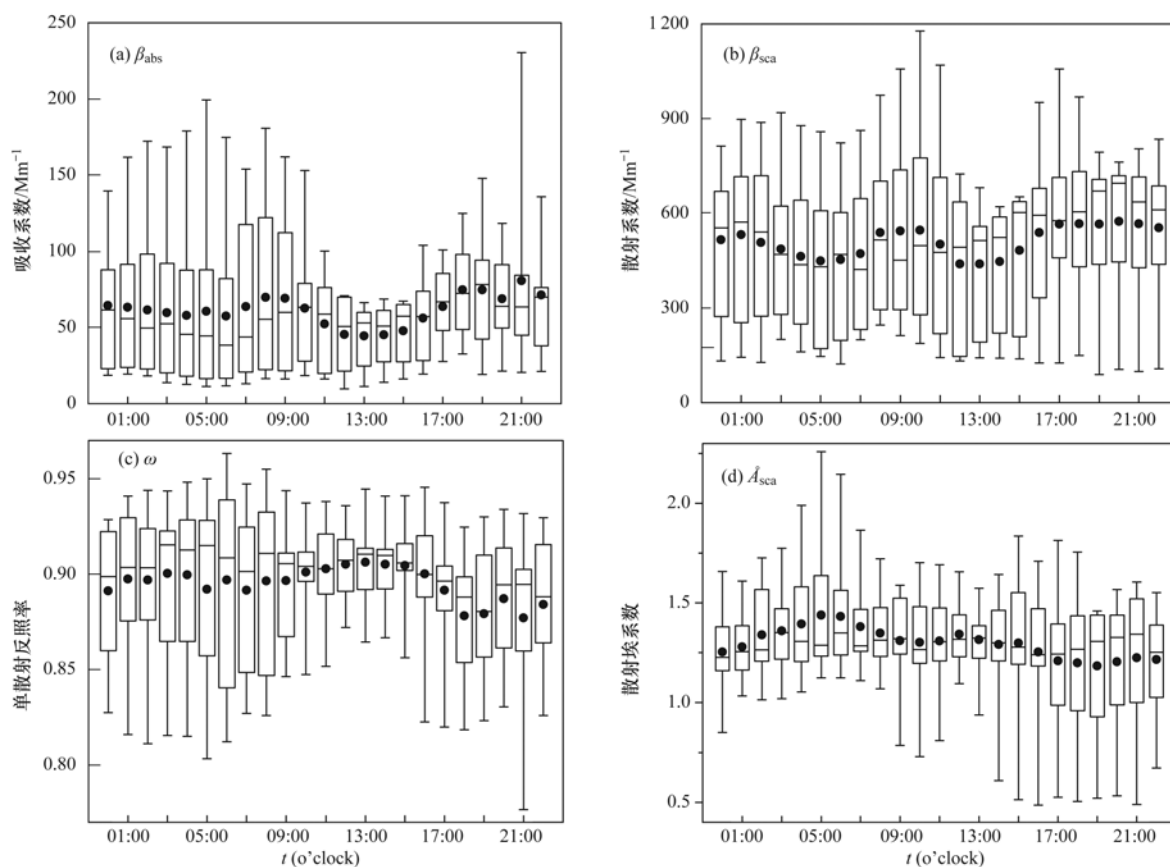
图 1 2013 年 1 月 25 日至 2 月 4 日 532 nm 波长下气溶胶散射与吸收系数、单散射反照率及降雨量和能见度的实时变化

Fig. 1 Time series of aerosol scattering and absorption coefficients and ω at 532 nm, and precipitation and visibility from 25 January to 4 February 2013

2.2 光学特性的日变化

图 2 显示 $\beta_{\text{abs } 532}$ 、 $\beta_{\text{sca } 532}$ 、 ω 和 $\hat{A}_{\text{sca}}$ 的日变化情况. 盒子中间的线、圆点、顶部和底部分别代表中值、平均值、75% 和 25%, 上下误差棒分别代表第 95% 和 5%. 从中可知, $\beta_{\text{abs } 532}$ 的日变化呈现双峰型. $\beta_{\text{abs } 532}$ 在早上的 06:00 ~ 09:00 增加, 最大值出现在 08:00 ~ 09:00 之间, $\beta_{\text{abs } 532}$ 的增加可能主要由于早晨交通和人为排放的影响, 同时清晨太阳辐射弱, 边界层高度较低, 有利于地面大气中颗粒物的聚集. 随后由于太阳辐射增强、地表温度及大气边界层升

高, 对流增加, 有利于污染物的垂直扩散, 致使 $\beta_{\text{abs } 532}$ 呈现降低的趋势, 在 14:00 左右出现最低值. 之后, 随着太阳辐射的减弱、地表温度和大气边界层的再次降低, 污染物再次积聚, $\beta_{\text{abs } 532}$ 开始缓慢地上升, 18:00 ~ 19:00 $\beta_{\text{abs } 532}$ 再次达到最大值, 与下班高峰期交通和烹饪排放有关, 夜间基本稳定在较高值. $\beta_{\text{sca } 532}$ 与 $\beta_{\text{abs } 532}$ 的日变化趋势相似, 也呈双峰型分布, 但 $\beta_{\text{sca } 532}$ 在早间的最高值较 $\beta_{\text{abs } 532}$ 有所推迟, 出现在 09:00 ~ 10:00, 可能与光化学氧化形成的二次气溶胶有关.



盒子的顶部和底部分别代表 75% 和 25%, 上下误差棒分别表示 95% 和 5%

图 2 $\beta_{\text{abs } 532}$ 、 $\beta_{\text{sca } 532}$ 、 ω 和 $\hat{A}_{\text{sca}}$ 的日变化

Fig. 2 Average diurnal variation of $\beta_{\text{abs } 532}$, $\beta_{\text{sca } 532}$, ω and $\hat{A}_{\text{sca}}$

ω 与 $\beta_{\text{abs } 532}$ 和 $\beta_{\text{sca } 532}$ 呈现相反的变化趋势, 分别在早上的 07:00 和晚上的 18:00 出现两个低值, 在中午 13:00 出现最高值, Xu 等^[29] 在上海和 Soni 等^[32] 在印度的研究中也得到类似的结果. ω 早晚出现低值的原因可能是由于烹饪和交通高峰期排放的黑碳浓度增加^[33], 导致气溶胶对光的吸收增加引起的. 然而 ω 在 09:00 开始增加并在中午出现最高值可能有两个原因: ①随大气混合高度的增加一次污染源排放的吸收性物质的稀释速率比散射性物质快^[29], ②由于光化学氧化产生的二次气溶胶增加了

气溶胶光散射^[26]. 观测期的散射系数的日变化范围为 1.18 ~ 1.44, 平均值 1.30, 高于北京雾霾天的 1.11^[2], 是北京沙尘天的 2 倍多(0.51)^[34], 表明沙尘天气气溶胶主要以粗离子为主, 而霾天气时气溶胶主要以细粒子为主.

2.3 气溶胶光学特性与风向风速的关系

由图 3 可知, 2013 年 1 月 25 日 ~ 2 月 4 日外场观测中, 东风(E)、东南风(SE)和南风(S)为主导风向分别占到总风向的 32.50%、17.08% 和 16.67%, 且不同风向气溶胶吸收和散射系数不同,

可能由于不同风向下气溶胶来源及化学组成不同^[3,19]. 主导风向 E、SE 和 S 风向的 $\beta_{\text{abs } 532}$ 和 $\beta_{\text{sca } 532}$ 分别为 $(46.87 \pm 35.28) \text{ Mm}^{-1}$ 和 $(431.68 \pm 241.68) \text{ Mm}^{-1}$ 、 $(86.10 \pm 41.93) \text{ Mm}^{-1}$ 和 $(652.67 \pm 225.36) \text{ Mm}^{-1}$ 、 $(76.37 \pm 40.58) \text{ Mm}^{-1}$ 和 $(579.40 \pm 161.14) \text{ Mm}^{-1}$. 可以看出,SE 和 S 风向下气溶胶的吸收和散射系数明显高于 E 风向,表明来自 SE 和 S 的气团携

带的污染物的浓度比 E 方向的高,这可能是由于 SE 和 S 的气团经过较多的发达城市^[35]. 同时在这次观测中发现,西南风(SW)仅占总风向的 5.42%,但 $\beta_{\text{abs } 532}$ 和 $\beta_{\text{sca } 532}$ 高达 $(88.76 \pm 52.67) \text{ Mm}^{-1}$ 和 $(606.45 \pm 239.94) \text{ Mm}^{-1}$,表明来自西南的气团污染较为严重,Kang 等^[3]2009 年 10 月也发现来自西南的生物质燃烧气团对南京北郊产生较高的污染.

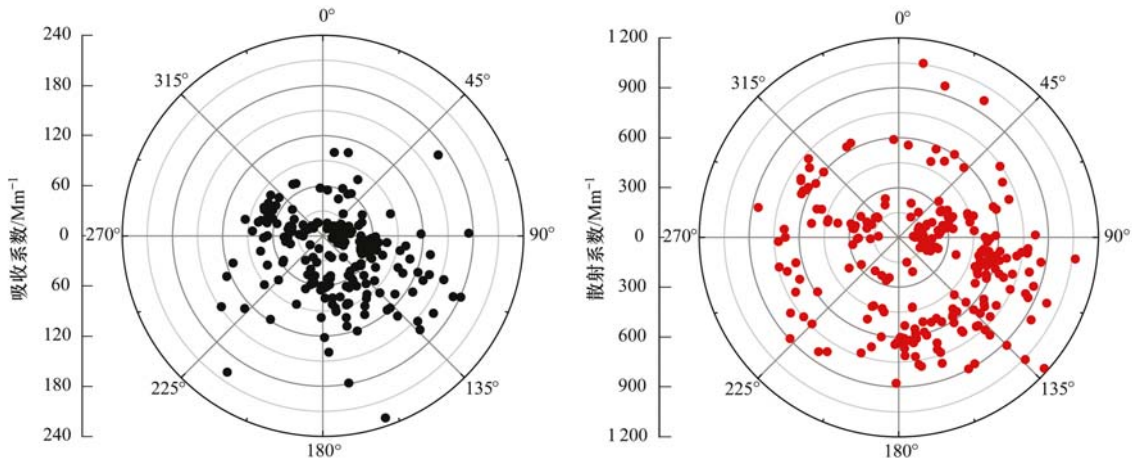


图 3 观测期间不同风向下 $\beta_{\text{abs } 532}$ 和 $\beta_{\text{sca } 532}$

Fig. 3 The $\beta_{\text{abs } 532}$ and $\beta_{\text{sca } 532}$ in different wind directions during the observation period

由表 1 可见,这次外场观测平均风速偏低,风速小于 $3.00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的累积频率达到 69.53%,这可能与东亚冬季风减弱,导致中国东部地区上空对流层低层的偏南风异常,造成地表风速减弱有关^[8]. 本研究发现风速与气溶胶的光学特性存在较好的相关性, $\beta_{\text{abs } 532}$ 和 $\beta_{\text{sca } 532}$ 均与风速存在极显著的负相关,Pearson 相关系数分别为 -0.60 [Sig. (2-tailed) < 0.01] 和 -0.50 [Sig. (2-tailed) < 0.01], ω 、 $\bar{A}_{\text{sca}}$ 和 $\bar{A}_{\text{abs}}$ 与风速存在显著的正相关,Pearson 相关系数分别为 0.28 [Sig. (2-tailed) < 0.01]、 0.38 [Sig. (2-

tailed) < 0.01] 和 0.16 [Sig. (2-tailed) $= 0.01$],主要原因可能为低风速不利于污染物在水平方向上的传输,导致近地表污染物浓度的积聚^[3, 12],从而导致气溶胶对光的吸收和散射增强. 杨欣等^[36]研究发现地表风速与大气边界层(PBL)高度存在一定的联系,当风速较大时,PBL 高度也相应增高. 此外,近地面细颗粒物浓度和消光系数与 PBL 高度也具有较好的负相关. 例如,在 PBL 高度为 1.50 km 时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度是 $50.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,当 PBL 降低到 0.50 km 时, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增加到 $150.00 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[12].

表 1 气溶胶光学特性与风速的关系

Table 1 Relationship between aerosol optical properties and wind speed

风速 / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	频率 /%	$\beta_{\text{abs } 532}$ (SD) / Mm^{-1}	$\beta_{\text{sca } 532}$ (SD) / Mm^{-1}	ω (SD)	$\bar{A}_{\text{sca}}$ (SD)	$\bar{A}_{\text{abs}}$ (SD)
静风 < 0.20	0.42	178.89	788.07	0.81	1.22	1.09
0.20 ~ 1.00	14.17	107.48 (39.84)	681.16 (157.89)	0.86 (0.03)	1.23 (0.11)	1.08 (0.17)
1.00 ~ 2.00	32.92	72.54 (38.80)	594.90 (207.54)	0.89 (0.03)	1.22 (0.26)	1.15 (0.28)
2.00 ~ 3.00	22.08	49.28 (28.64)	465.30 (208.35)	0.91 (0.03)	1.23 (0.32)	1.16 (0.43)
3.00 ~ 4.00	20.83	38.71 (21.22)	396.64 (247.74)	0.90 (0.04)	1.43 (0.25)	1.25 (0.76)
4.00 ~ 5.00	7.92	33.32 (17.61)	335.84 (232.63)	0.90 (0.04)	1.50 (0.17)	1.26 (0.52)
> 5.0	1.66	13.18 (2.61)	233.61 (91.49)	0.94 (0.01)	1.59 (0.03)	1.60 (0.67)

2.4 霾天与清洁天的比较

Li 等^[26]在上海的观测中将消光系数大于 500 Mm^{-1} 定义为空气污染事件,此次观测中,消光系数

大于 500 Mm^{-1} 主要有 3 个时段,并且在这 3 个时段中能能见度均小于 5 km ,将这 3 次污染分别定义为 Haze 1、Haze 2 和 Haze 3 (见图 1). 3 次污染事件的

消光系数最高值分别出现在当地时间的 1 月 26 日 17:00、1 月 30 日 10:00 和 2 月 1 日 20:00。2 月 2 日 12:00 至 2 月 4 日 16:00 消光系数均低于 500 Mm^{-1} , 平均能见度大于 5 km, 将这段时间定义为清洁天 (Clean)。由表 2 可见, 霾天气溶胶 $\beta_{\text{abs } 532}$ 和 $\beta_{\text{sca } 532}$ 平均分别为 $(83.20 \pm 35.24) \text{ Mm}^{-1}$ 和 $(670.16 \pm 136.44) \text{ Mm}^{-1}$, 分别为清洁天的 3.85 倍和 3.45 倍, 高于济南的 2.60 倍和 2.80 倍^[37], 但明显低于北京上甸子的 10.90 倍和 20.00 倍^[38]。由表 2 可知, Haze 1 和 Haze 2 污染特征较为相似, 具有较高的吸收、散射系数和 NO_3^- 与 SO_4^{2-} 浓度, 结合后向轨迹图 4(a) 和 4(b) 推断可能受到内陆污染气团的长距离传输影响, 但是两次污染形成的原因不同。Gyawali 等^[39]研究中发现 $\bar{A}_{\text{abs}} \leq 1$ 时, 可能是黑碳与无机和有机气溶胶发生内混, 增强了黑碳对光的吸收, 并且对红光的增强效果比紫光的大, 导致 $\bar{A}_{\text{abs}}$ 降低。此次研究发现 Haze 1 期间 $\bar{A}_{\text{abs}}$ 接近 1, 可能是由于经过河北、山东、安徽和江苏北部的污染气团

在长时间的传输过程中黑碳充分老化, 与大气中存在的硫酸盐、硝酸盐等污染物形成内混状态有关^[10]。Haze 2 中 1 月 30 日具有较高的吸收系数 (图 1), 可能与来自安徽南部的污染气团 [图 4(b)] 中含有较高的吸光性黑碳组分有关。由图 5 中 Haze 2 期间火点图可知, 南京西南方向存在明显的火点, 并且 Haze 2 期间 K^+ 浓度明显高于其他时段, 表明生物质燃烧可能是导致本次污染的主要原因。Kang 等^[3]2009 年 10 月也发现来自西南的生物质燃烧气团导致南京北郊气溶胶吸收系数升高。Haze 3 期间气溶胶的化学组成特征明显不同于 Haze 1 和 Haze 2, NO_3^- 的质量浓度较低而 SO_4^{2-} 的质量浓度较高。 $[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 值常用来表征固定源和移动源污染的相对贡献, 较低的 $[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$ 表明在 Haze 3 期间固定源污染较为显著。Haze 3 发生在降雨后受外来污染物的传输影响较小, 较高的 SO_4^{2-} 可能与观测点周围化工园化石燃料的燃烧有关。

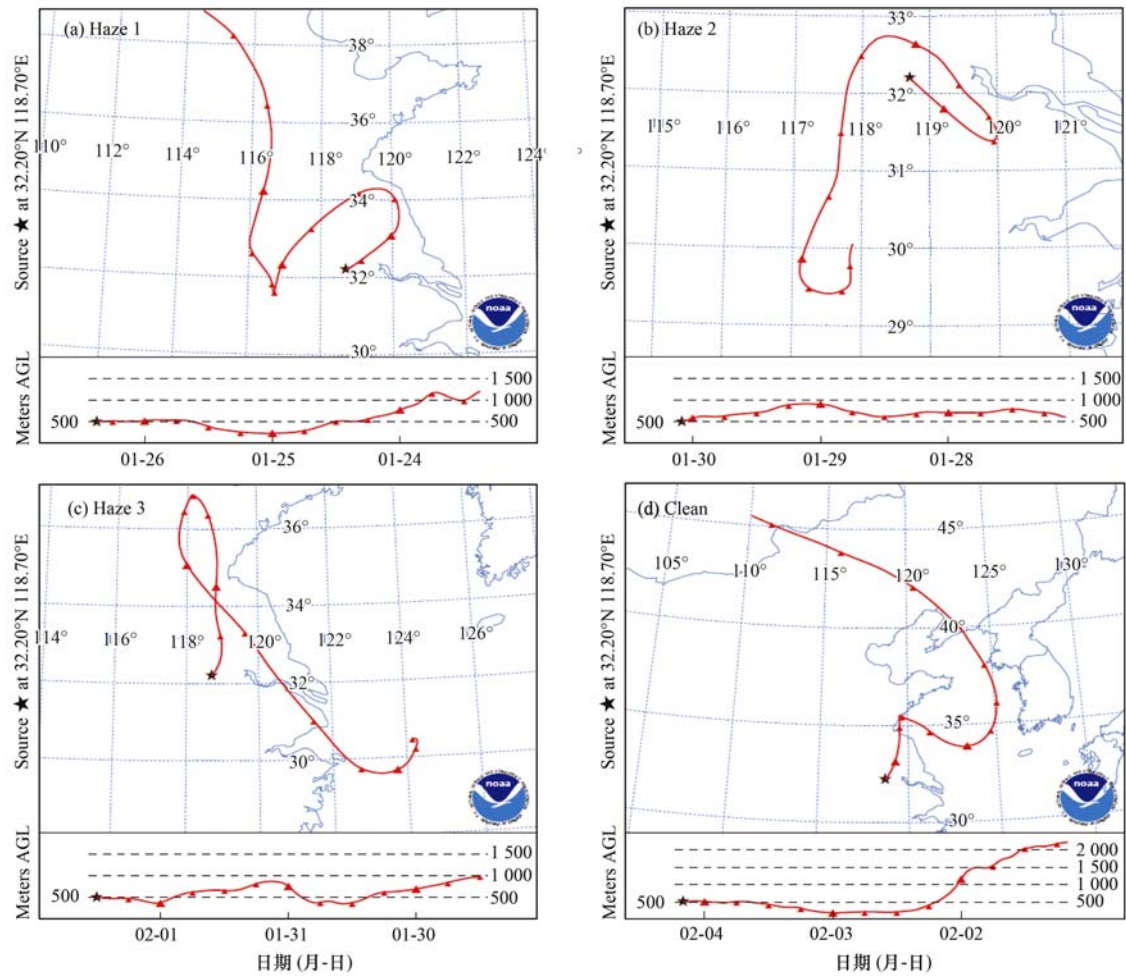


图 4 观测期南京北郊观测地 72 h 后向轨迹

Fig. 4 Typical 72 h backward trajectories terminating at measurement site in the north suburb of Nanjing during the observation period

表 2 2013 年 1 月外场观测期间霾天和清洁天气溶胶光学特性和主要离子浓度的比较
Table 2 Comparison between aerosol optical properties and concentrations of major ions
during haze episodes and clean periods in January 2013 filed campaign

项目	Haze 1	Haze 2	Haze 3	Clean
$\beta_{\text{abs } 532}/\text{Mm}^{-1}$	80.87 ± 23.87	85.44 ± 40.47	71.56 ± 12.45	21.59 ± 7.71
$\beta_{\text{sca } 532}/\text{Mm}^{-1}$	637.85 ± 147.84	687.48 ± 136.00	602.73 ± 89.43	194.34 ± 62.89
ω	0.90 ± 0.03	0.89 ± 0.03	0.89 ± 0.02	0.89 ± 0.04
$\hat{A}_{\text{abs}}$	1.01 ± 0.15	1.14 ± 0.22	1.08 ± 0.20	1.40 ± 0.86
$\hat{A}_{\text{sca}}$	1.04 ± 0.14	1.30 ± 0.1	0.76 ± 0.29	1.49 ± 0.24
$\text{NO}_3^-/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	13.21 ± 4.18	14.32 ± 3.75	8.43 ± 3.34	3.13 ± 1.92
$\text{SO}_4^{2-}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	35.86 ± 12.16	32.10 ± 10.81	47.48 ± 13.19	14.22 ± 7.30
$\text{NH}_4^+/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	20.50 ± 5.30	21.23 ± 5.22	20.93 ± 5.56	5.81 ± 2.85
$\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$	0.38 ± 0.10	0.47 ± 0.11	0.18 ± 0.06	0.24 ± 0.14
$\text{K}^+/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	1.19 ± 0.23	1.44 ± 0.45	1.11 ± 0.35	0.78 ± 0.26

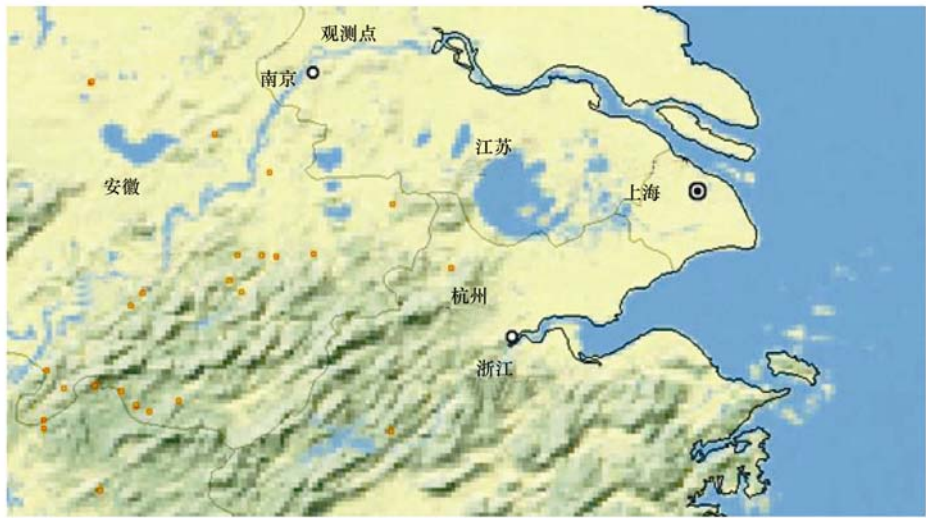


图 5 观测期 2013 年 1 月 27 ~ 30 日火点
Fig. 5 Fire mapper during 27-30 January 2013

3 结论

(1)2013 年 1 月南京北郊持续污染期间气溶胶平均吸收系数、散射系数分别为 $(61.65 \pm 40.59) \text{ Mm}^{-1}$ 和 $(511.47 \pm 239.58) \text{ Mm}^{-1}$,其中霾天气溶胶吸收和散射系数平均值分别为 $(83.20 \pm 35.24) \text{ Mm}^{-1}$ 和 $(670.16 \pm 136.44) \text{ Mm}^{-1}$,分别为清洁天的 3.85 倍和 3.45 倍.

(2)气溶胶吸收和散射系数的日变化呈现双峰型,表现为早晚高,中午低的特征;单散射反照率和散射埃系数平均值分别为 (0.89 ± 0.04) 和 (1.30 ± 0.27) ,说明南京北郊霾天气溶胶主要以细粒子的散射性物质为主.

(3)气象条件对光学特性的影响较大. 降雨对气溶胶有明显的清除作用,降雨前后散射系数大约相差 480 Mm^{-1} . 散射系数与能见度存在明显的负相关,相关系数为 -0.60 . 地面风向风速对气溶胶

光学特性也有较大的影响,东南风时散射系数最大,西南风时吸收系数最大;风速与 $\beta_{\text{abs } 532}$ 和 $\beta_{\text{sca } 532}$ 存在极显著的负相关,与 ω 、 $\hat{A}_{\text{sca}}$ 和 $\hat{A}_{\text{abs}}$ 存在显著的正相关.

(4)3 次霾污染事件中,Haze 1 和 Haze 2 主要受长距离污染物的传输影响,其中 Haze 1 主要受来自南京北部老化程度较高的污染气团影响,Haze 2 主要受来自西南生物质燃烧的污染气团影响,而 Haze 3 主要由固定源污染引起.

参考文献:

[1] Zhao W C, Cheng J P, Li D L, *et al.* Urban ambient air quality investigation and health risk assessment during haze and non-haze periods in Shanghai, China [J]. Atmospheric Pollution Research, 2013, 4(3): 275-281.

[2] 于兴娜,李新妹,登增然登,等. 北京雾霾天气期间气溶胶光学特性[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1057-1062.

[3] Kang H Q, Zhu B, Su J F, *et al.* Analysis of a long-lasting haze episode in Nanjing, China[J]. Atmospheric Research, 2013,

- 120-121: 78-87.
- [4] Lin Y F, Huang K, Zhuang G S, *et al.* A multi-year evolution of aerosol chemistry impacting visibility and haze formation over an Eastern Asia megacity, Shanghai[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **92**: 76-86.
- [5] Yang L X, Gao X M, Wang X F, *et al.* Impacts of firecracker burning on aerosol chemical characteristics and human health risk levels during the Chinese New Year Celebration in Jinan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **476-477**: 57-64.
- [6] Wang X M, Ding X, Fu X X, *et al.* Aerosol scattering coefficients and major chemical compositions of fine particles observed at a rural site in the central Pearl River Delta, South China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(1): 72-77.
- [7] 赵秀娟, 蒲维维, 孟伟, 等. 北京地区秋季雾霾天 $PM_{2.5}$ 污染与气溶胶光学特征分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 416-423.
- [8] 张人禾, 李强, 张若楠. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2013, **44**(1): 27-36.
- [9] 周敏, 陈长虹, 乔利平, 等. 2013 年 1 月中国中东部大气重污染期间上海颗粒物的污染特征[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(11): 3118-3126.
- [10] Wang H, Tan S C, Wang Y, *et al.* A multisource observation study of the severe prolonged regional haze episode over eastern China in January 2013 [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 807-815.
- [11] 马小会, 甘璐, 张爱英, 等. 北京 2013 年 1 月持续雾霾天气成因分析[A]. 见: 中国气象学会. 创新驱动发展 提高气象灾害防御能力——S16 第二届城市气象论坛——灾害·环境·影响·应对[C]. 北京: 中国气象学会, 2013.
- [12] Quan J N, Tie X X, Zhang Q, *et al.* Characteristics of heavy aerosol pollution during the 2012-2013 winter in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **88**: 83-89.
- [13] Wang H L, An J L, Shen L J, *et al.* Mechanism for the formation and microphysical characteristics of submicron aerosol during heavy haze pollution episode in the Yangtze River Delta, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **490**: 501-508.
- [14] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2013 年 1 月北京市一次空气重污染成因分析[J]. *环境科学*, 2015, **34**(4): 1154-1163.
- [15] 王琴, 苑魁魁, 江鸿宾, 等. 西安市一次持续性灰霾污染过程的气象条件分析[A]. 见: 中国环境科学学会. 中国环境科学学会 2013 年学术年会论文集(5)[C]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013. 4845-4851.
- [16] 王丛梅, 杨永胜, 李永占, 等. 2013 年 1 月河北省中南部严重污染的气象条件及成因分析[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(7): 695-702.
- [17] 石春娥, 邓学良, 杨元建, 等. 2013 年 1 月安徽持续性霾天气成因分析[J]. *气候与环境研究*, 2014, **19**(2): 227-236.
- [18] 李璇, 聂滕, 齐珺, 等. 2013 年 1 月北京市 $PM_{2.5}$ 区域来源解析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1148-1153.
- [19] Lu C S, Niu S J, Tang L L, *et al.* Chemical composition of fog water in Nanjing area of China and its related fog microphysics [J]. *Atmospheric Research*, 2010, **97**(1-2): 47-69.
- [20] Arnott W P, Moosmüller H, Rogers C F, *et al.* Photoacoustic spectrometer for measuring light absorption by aerosol: instrument description [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(17): 2845-2852.
- [21] Lee T, Yu X Y, Kreidenweis S M, *et al.* Semi-continuous measurement of $PM_{2.5}$ ionic composition at several rural locations in the United States [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(27): 6655-6669.
- [22] Orsini D A, Ma Y L, Sullivan A, *et al.* Refinements to the particle-into-liquid sampler (PILS) for ground and airborne measurements of water soluble aerosol composition [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(9-10): 1243-1259.
- [23] Xue J, Lau A K H, Yu J Z. A study of acidity on $PM_{2.5}$ in Hong Kong using online ionic chemical composition measurements [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(39): 7081-7088.
- [24] Flowers B A, Dubey M K, Mazzoleni C, *et al.* Optical-chemical-microphysical relationships and closure studies for mixed carbonaceous aerosols observed at Jeju Island; 3-laser photoacoustic spectrometer, particle sizing, and filter analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(21): 10387-10398.
- [25] Kaufman Y J, Gitelson A, Karnieli A, *et al.* Size distribution and scattering phase function of aerosol particles retrieved from sky brightness measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, **99**(D5): 10341-10356.
- [26] Li L, Chen J M, Wang L, *et al.* Aerosol single scattering albedo affected by chemical composition: An investigation using CRDS combined with MARGA [J]. *Atmospheric Research*, 2013, **124**: 149-157.
- [27] Lack D A, Cappa C D. Impact of brown and clear carbon on light absorption enhancement, single scatter albedo and absorption wavelength dependence of black carbon [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(9): 4207-4220.
- [28] He X, Li C C, Lau A K H, *et al.* An intensive study of aerosol optical properties in Beijing urban area [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(22): 8903-8915.
- [29] Xu J W, Tao J, Zhang R J, *et al.* Measurements of surface aerosol optical properties in winter of Shanghai [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **109-110**: 25-35.
- [30] Tao J, Zhang L M, Kinfa H, *et al.* Impact of $PM_{2.5}$ chemical compositions on aerosol light scattering in Guangzhou-the largest megacity in South China [J]. *Atmospheric Research*, 2014, **135-136**: 48-58.
- [31] Cao J J, Wang Q Y, Chow J C, *et al.* Impacts of aerosol compositions on visibility impairment in Xi'an, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **59**: 559-566.
- [32] Soni K, Singh S, Bano T, *et al.* Variations in single scattering albedo and Angstrom absorption exponent during different seasons at Delhi, India [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(35):

- 4355-4363.
- [33] 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.
- [34] Yu X N, Shi C Z, Ma J, *et al.* Aerosol optical properties during firework, biomass burning and dust episodes in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **81**: 475-484.
- [35] 于兴娜, 袁帅, 马佳, 等. 南京北郊 2011 年春季气溶胶粒子[J]. *大气科学学报*, 2013, **36**(3): 354-360.
- [36] 杨欣, 陈义珍, 刘厚凤, 等. 北京 2013 年 1 月连续强霾过程的污染特征及成因分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(2): 282-288.
- [37] 徐政, 李卫军, 于阳春, 等. 济南秋季霾与非霾天气下气溶胶光学性质的观测[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(4): 546-552.
- [38] 颜鹏, 刘桂清, 周秀骥, 等. 上甸子秋冬季雾霾期间气溶胶光学特性[J]. *应用气象学报*, 2010, **21**(3): 257-265.
- [39] Gyawali M, Arnott W P, Lewis K, *et al.* In situ aerosol optics in Reno, NV, USA during and after the summer 2008 California wildfires and the influence of absorbing and non-absorbing organic coating on spectral light absorbing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(20): 8007-8015.

《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

网 址:www.hjkx.ac.cn

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supermicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 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	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

国内外公开发刊