

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

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

|                                                                 |                                                        |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| 南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 .....                                  | 邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)                            |
| 亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 .....                                | 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)                  |
| 亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 .....                                 | 袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)                              |
| 2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 .....                             | 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)                               |
| 在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 .....                        | 付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070) |
| PM <sub>10</sub> 可替代源成分谱的建立方法及其应用 .....                         | 陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)                                 |
| 夏季东海和南黄海一氧化氮的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 .....                           | 王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)                               |
| 三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 .....                                     | 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)                                |
| 浑太水系水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 .....                                     | 刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)                           |
| 深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究 .....                                 | 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)                                   |
| 滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 .....                                     | 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)                               |
| 金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 .....                               | 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)                 |
| 西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 .....                             | 谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)                                    |
| 西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 .....                                     | 袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)                                   |
| 城市不同下垫面降雨径流多环芳烃 (PAHs) 分布及源解析 .....                             | 武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)                    |
| 粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 .....                                    | 陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)                                    |
| 饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 .....                              | 杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)                               |
| 压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 .....                                       | 蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)                     |
| 基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 .....                                    | 王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)                          |
| 臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 .....                                       | 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)                           |
| 电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 .....                                      | 刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)                               |
| 铁铜复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(Ⅲ)吸附性能研究 .....                           | 张伟, 陈静, 张高生 (4198)                                     |
| 重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 .....                                         | 楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)                          |
| 光质对蛋白核小球藻 ( <i>Chlorella pyrenoidosa</i> ) 生长特征及生化组成的影响研究 ..... | 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)                              |
| 常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 .....                                     | 任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)                           |
| Fe <sup>2+</sup> 和 Fe <sup>3+</sup> 对厌氧氨氧化污泥活性的影响 .....         | 李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)                             |
| CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 .....                                      | 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)                          |
| 盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N <sub>2</sub> O 产生量的影响 .....                    | 王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)                                    |
| 硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 .....                                  | 曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)                         |
| 利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 .....                        | 王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)                      |
| 北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 .....                                     | 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)                          |
| 环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 .....                                  | 张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)                          |
| 稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 .....                           | 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)                                   |
| 典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 .....                                | 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)                 |
| 变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 .....                                        | 王莲阁, 高岩红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)                          |
| 铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响 .....                        | 刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)                               |
| 植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 .....                                | 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)                              |
| 不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 .....                                   | 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)                              |
| 不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 .....                                        | 李平, 郎漫, 徐向华, 李煜珊, 朱淑娟 (4321)                           |
| 转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 .....                            | 潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)               |
| 天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 .....                                 | 郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)                                   |
| 1-硝基芘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤 .....                             | 尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)                                 |
| 鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 .....                                    | 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)                      |
| 污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究 .....                                 | 窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)                                   |
| 上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 .....                                       | 田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)                                     |
| 硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N <sub>2</sub> O 产生的影响 .....                   | 卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)                              |
| 中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 .....                                    | 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)                               |
| 泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 .....                                  | 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)                                   |
| 基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 .....                                   | 张雪莹, 温宗国 (4395)                                        |
| 大气棕色碳的研究进展与方向 .....                                             | 闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)                                    |
| 《环境科学》征稿简则 (4094)                                               |                                                        |
| 《环境科学》征订启事 (4126)                                               |                                                        |
| 信息 (4243, 4266, 4274, 4328)                                     |                                                        |

## 亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系

袁亮, 银燕\*, 李琦, 肖辉, 李力

(南京信息工程大学大气物理学院, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

**摘要:** 为保障 2014 年青奥会空气质量和制定控制措施提供科学支持, 利用 2013 年 8 月南京市气溶胶的观测资料, 结合气象要素, 分析了南京地区气溶胶浓度变化特征, 并深入研究了气溶胶质量浓度与相对湿度对能见度的影响. 结果表明, 观测期间  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  质量浓度平均值分别为  $67.44 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $31.92 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$  粒径范围内的气溶胶粒子数浓度和体积浓度的平均值分别为  $2466.25 \text{ cm}^{-3}$  和  $19.89 \mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ ; 对数正态分布 (log-normal) 拟合平均谱分布得到两个模态的中值粒径分别为  $0.19 \mu\text{m}$  和  $1.12 \mu\text{m}$ ; 局地源强是影响南京气溶胶浓度的重要因子;  $PM_{10}$  和  $PM_{2.5}$  质量浓度日变化略有差异,  $PM_{10}$  浓度日变化主要受交通和边界层活动影响,  $PM_{2.5}$  浓度日变化则主要受交通排放和光化学反应生成的二次污染物的影响; 对能见度的统计分析表明, 能见度随  $PM_{2.5}$  浓度和相对湿度的增加而降低, 当相对湿度小于 70% 时,  $PM_{2.5}$  浓度对能见度的影响较大, 当相对湿度大于 70% 时, 相对湿度对能见度的影响较大.

**关键词:** 气溶胶; 浓度; 拟合; 能见度; 相对湿度

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4052-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.11.003

## Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility

YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, XIAO Hui, LI Li

(Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** To provide scientific support for improving air quality and for the policy-making during the Youth Olympic Games, the characteristics of aerosol concentration variation was analyzed with the data obtained during August in Nanjing, 2013. And further analysis was carried out to find the relationship between visibility and aerosol mass concentration as well as relative humidity (RH). The results show that the average mass concentration of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  are  $67.44 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and  $31.92 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. Integrated particle number and volume concentrations with diameter between  $0.1$  and  $10 \mu\text{m}$  are  $2466.25 \text{ cm}^{-3}$  and  $19.89 \mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ , respectively. A log-normal size distribution with 10-based logarithm applied to fit the measured aerosol size distributions shows two models with median diameters of  $0.19 \mu\text{m}$  and  $1.12 \mu\text{m}$ . Aerosol concentration in Nanjing is mainly affected by local source. The diurnal pattern of  $PM_{10}$  is influenced by the traffic density and the activity of boundary layer, while the daily variation of  $PM_{2.5}$  is slightly different because of the effects of traffic density and the formation of secondary pollutants during photochemical process. Statistical analysis on visibility reveals that visibility decreases with the increasing aerosol concentration and RH,  $PM_{2.5}$  concentration dominates the change of visibility when RH is less than 70%, while RH contributes more on the change for RH in excess of 70%.

**Key words:** aerosol; concentration; fitting; visibility; relative humidity

大气气溶胶是悬浮在大气中的固态和液态颗粒物的总称<sup>[1]</sup>. 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 评估报告指出, 气溶胶在全球气候变化中的角色具有很大的不确定性<sup>[2]</sup>, 其对人体健康和生态环境的影响也不容忽视<sup>[3, 4]</sup>. 随着经济社会的迅速发展, 人为排放的气溶胶明显增加<sup>[5]</sup>, 且成为城市地区的主要污染物之一. 不同粒径的气溶胶粒子对健康和环境的影响不同, 因此掌握气溶胶谱分布对研究其健康环境效应至关重要<sup>[1, 6]</sup>. 国内外对气溶胶谱分布的观测研究起步较早, 从地基观测到卫星反演, 目前技术也相对较为成熟<sup>[7~9]</sup>. 以往的研究将大气中粒径在  $3 \sim 10 \mu\text{m}$  的颗粒物分为 4 个模态: 核模态 ( $3 \sim 25 \text{ nm}$ )、爱根核模态 ( $25 \sim 100 \text{ nm}$ )、积聚模态

( $100 \sim 1000 \text{ nm}$ ) 和粗粒子模态 ( $1000 \sim 10 \mu\text{m}$ )<sup>[7, 10~13]</sup>. 积聚模态气溶胶粒子由于其性质和特殊的来源, 导致其在大气中存在时间较长, 是影响空气质量最主要的颗粒物. 此模态气溶胶粒子的粒径与可见光波长 ( $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ ) 相当, 成为大气消光作用最强的颗粒物<sup>[14]</sup>, 这不仅影响地气辐射平衡, 而且造成大气能见度的降低. 在高相对湿度下, 该

收稿日期: 2014-03-29; 修订日期: 2014-07-04

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41030962); 江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (CXZZ12\_0500)

作者简介: 袁亮 (1990 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为气溶胶与云相互关系, E-mail: yuan\_l\_nuist@outlook.com

\* 通讯联系人, E-mail: yinyan@nuist.edu.cn

模态粒子具有较强的吸湿性<sup>[15]</sup>,消光作用剧增<sup>[16]</sup>,从而导致大气能见度显著降低.此外,该模态气溶胶粒子能被人体吸入到达肺部,对人类身体健康造成极大危害<sup>[3]</sup>.2014年,南京将举办青年奥林匹克运动会,保证空气质量成为此次盛会一项迫切而艰巨的任务,因此,2013年亚洲青年运动会召开期间,在南京市展开对气溶胶的观测,不仅有利于了解该地区气溶胶理化特性,也可为保障青奥会空气质量和制定控制措施提供科学支持.

## 1 资料与方法

### 1.1 观测时间和地点

2013年8月2~26日,在南京市建邺区南京高

等职业技术学校(118°46'E,32°03'N)对气溶胶展开连续观测(图1).该采样点毗邻奥体中心,距离市中心较近,离工厂排放源较远,其东南和西南方向为公路,车流量呈现早晚高峰,周围高大建筑较少.在此设置采样点可以充分探究交通等人为活动对南京市气溶胶颗粒物浓度和谱分布的影响,也有利于监测奥体中心区域空气质量.

### 1.2 仪器和方法

本次观测使用的气溶胶谱分布仪器为美国DMT(Droplet Measurement Technologies)公司气压空腔气溶胶探头地基型(Passive Cavity Aerosol Spectrometer Probe Ground-Based Instrument, Version 2, PCASP-X2).该仪器采样样流与鞘流流量分别为

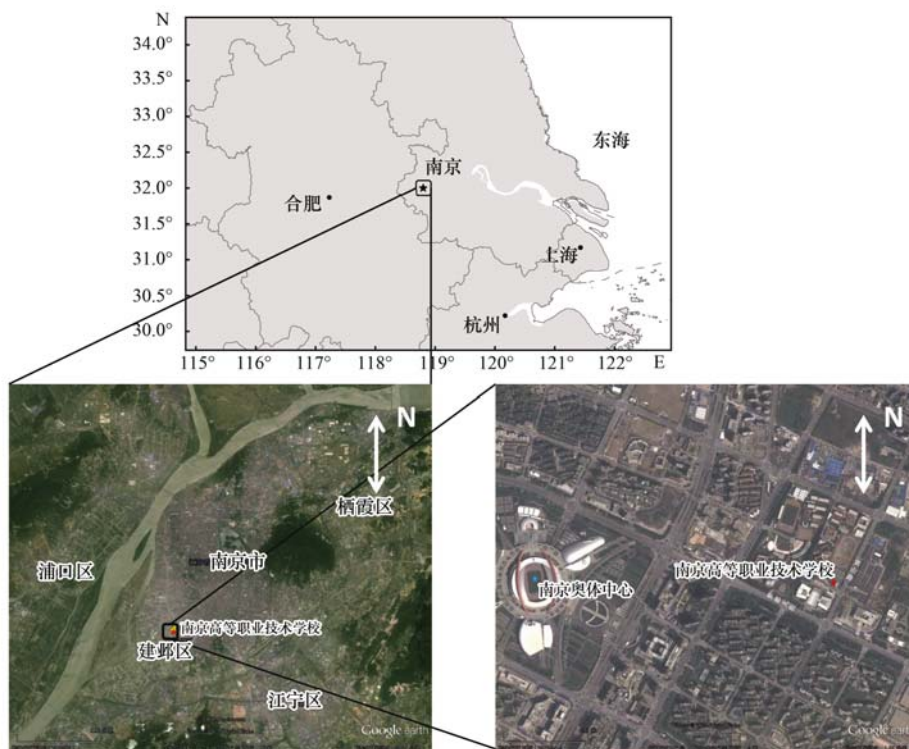


图1 观测地点示意

Fig. 1 Location of observation site

1 mL·s<sup>-1</sup>和15 mL·s<sup>-1</sup>,样流管内径小于0.5 mm以保证样本气溶胶粒子加速进入仪器内腔,当粒子通过激光束时会产生光脉冲,脉冲强度与其尺度和入射激光强度有关,PCASP-X2通过测量这些光脉冲得到颗粒物的尺度谱.该仪器测量气溶胶粒径范围为0.1~10 μm,将此粒径段分为40档,仪器时间分辨率为1 s,得到每档气溶胶粒子数浓度(cm<sup>-3</sup>).其稳定的性能使之常被用于飞机观测<sup>[17]</sup>,在城市气溶胶观测中还比较少见,但不少研究者使用与该仪器原理相同的德国Grimm公司便携式气溶胶光学粒

径谱仪(PAS)在城市地区进行观测并对仪器性能进行了评估<sup>[18~21]</sup>,证明了该原理仪器的适用性.2010年,Tan等<sup>[22]</sup>针对PCASP-X2与美国MSP公司的宽范围粒径谱仪(WPS)粒径在0.1~10 μm范围内气溶胶粒子数浓度的对比结果表明,PCASP-X2性能稳定,结果可信.采样前将该仪器经返厂维修并矫正,采样时架设在行政楼顶层房间内,采样管通过不锈钢管连接伸至室外,采样口距地面大约10 m.由于本次观测的是环境湿度下大气气溶胶谱分布情况,因此,在进气口前不加干燥管.

与本研究同步的气象资料和  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度小时平均数据来自南京环境保护中心位于本采样点的观测数据. 边界层(PBL)高度采用美国气象环境预报中心全球数据同化系统(NECP, GDAS)  $1^\circ \times 1^\circ$  的气象场数据<sup>[23]</sup>.

数据采集后,与同步的气象资料对应,将分辨率为 1 s 的数据经质量控制剔除异常值后进行小时平均. 体积谱分布由以下公式计算得到:

$$V(\lg D_p) = \frac{dV}{d(\lg D_p)} = \frac{\pi}{6} \cdot D_p^3 \cdot N(\lg D_p) \quad (1)$$

式中,  $N(\lg D_p)$  和  $V(\lg D_p)$  分别为数谱分布和体积谱分布;  $D_p$  为气溶胶粒径. 经计算后得到观测期间小

时平均样本数 543 组.

2 结果与讨论

2.1 观测期间气象要素的变化特征

受副热带高压的影响,南京夏季多高温日( $T > 35^\circ\text{C}$ ),图 2 为观测期间采样点气象要素变化的时间序列,明显可以看出,观测站温度连续 14 日最高温度超过  $35^\circ\text{C}$ . 相对湿度日变化明显,最大值可超过 80%. 8 月 13 日后,夜间相对湿度能达到 70% 以上. 此外,观测期间,南京少雨,多为偏南风,风速较小,最大风速不超过  $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,不利于污染物扩散与输送.

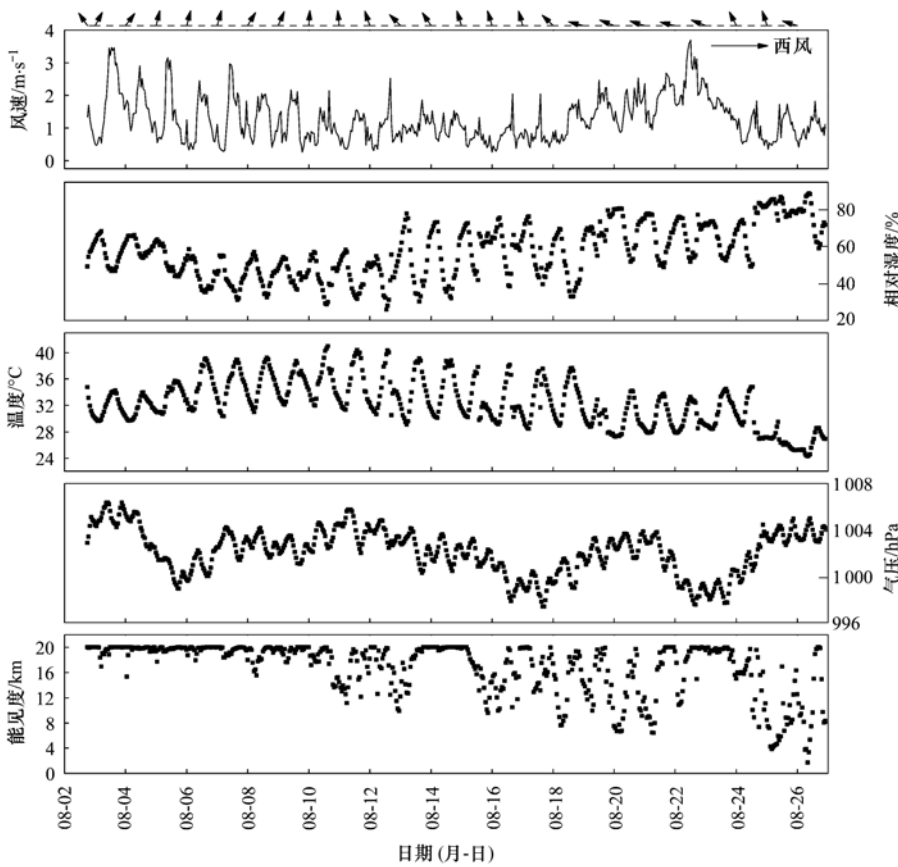


图 2 观测期间气象要素的时间序列

Fig. 2 Temporal variation of meteorological parameters during the observation period

2.2 气溶胶谱分布的统计特征

对观测期间气溶胶粒子各浓度小时平均值的统计(表 1)发现,观测期间  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  浓度均在国家二级标准以下<sup>[24]</sup>,平均值分别为  $67.44 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  和  $31.92 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . 粒径在  $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$  范围内的气溶胶粒子数浓度平均值为  $2466.25 \text{ cm}^{-3}$ ,其中粒径小于  $1 \mu\text{m}$  的气溶胶粒子占到总颗粒物的 99.97%,平均体积浓度为  $19.89 \mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ . 各浓度最小值、

5%分位点、中值、95%分位点以及最大值在较大的范围变化. 表 2 总结了国内外其他测站积聚模态与粗模态气溶胶粒子的数浓度,发现本研究中南京地区积聚模态气溶胶浓度相对国内北京<sup>[7]</sup>、天津<sup>[8]</sup>,甚至泰山<sup>[10]</sup>,都处于较低的状态,但远高于我国黄山背景区<sup>[25]</sup>. 与 2006 年南京北郊<sup>[9]</sup>的观测结果相比,数浓度显著降低,考虑到观测仪器的不同导致的误差,笔者参照 Tan 等<sup>[22]</sup>关于 WPS<sup>TM</sup>与

PCASP-X2 的对比观测, 将此次观测的平均值订正后得到 0.1 ~ 1 μm 颗粒物数浓度水平与 2006 年南京北郊依然有明显降低, 然而此水平相对发达国家和城市和乡村地区<sup>[12, 26]</sup>仍然偏高.

表 1 观测期间气溶胶粒子浓度与相对湿度和能见度的统计

| Table 1 Statistics of aerosol concentration and visibility as well as relative humidity |                   |         |          |          |          |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|---------|----------|----------|----------|----------|
| 统计量                                                                                     | Mean (std)        | Minimum | 5%       | Median   | 95%      | Maximum  |
| 数浓度/cm <sup>-3</sup>                                                                    | 2 466.05 (968.54) | 567.86  | 1 103.73 | 2 358.53 | 4 186.91 | 6 590.82 |
| 体积浓度/μm <sup>3</sup> ·cm <sup>-3</sup>                                                  | 19.89 (7.28)      | 4.12    | 9.97     | 19.01    | 33.86    | 49.81    |
| PM <sub>2.5</sub> 质量浓度/μg·m <sup>-3</sup>                                               | 31.92 (12.91)     | 4.34    | 12.35    | 30.32    | 55.96    | 71.19    |
| PM <sub>10</sub> 质量浓度/μg·m <sup>-3</sup>                                                | 67.44 (26.27)     | 6.00    | 29.86    | 65.01    | 114.09   | 146.78   |
| 能见度/km                                                                                  | 16.71 (4.19)      | 1.72    | 7.67     | 18.80    | 20.00    | 20.00    |
| 相对湿度/%                                                                                  | 57.19             | 25.88   | 34.65    | 56.34    | 80.38    | 88.94    |

表 2 国内外测站积聚模态和粗模态气溶胶粒子数浓度<sup>1)</sup>

| Table 2 Number concentration of accumulation mode aerosol at different sites |                   |                             |                   |                    |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|--------------------|
| 观测地点                                                                         | 观测时段              | 各粒径段气溶胶数浓度/cm <sup>-3</sup> |                   | 使用仪器 <sup>2)</sup> |
|                                                                              |                   | 0.1 ~ 1 μm                  | 1 ~ 10 μm         |                    |
| 北京 <sup>[7]</sup>                                                            | 2004 ~ 2006       | 7 800                       | 7                 | 1, 2               |
| 南京北郊 <sup>[9]</sup>                                                          | 2006-07 ~ 2006-12 | 9 187                       | 7                 | 3                  |
| 天津 <sup>[8]</sup>                                                            | 2009-07 ~ 2009-08 | 6 710                       | —                 | 4                  |
| 黄山光明顶 <sup>[25]</sup>                                                        | 2008-06 ~ 2008-07 | 576                         | 0.35              | 3                  |
| 泰山日观峰 <sup>[10]</sup>                                                        | 2010-07 ~ 2011-12 | 3 715                       | —                 | 1, 4               |
| 美国 Pittsburgh (城市) <sup>[26]</sup>                                           | 2001-07 ~ 2002-07 | 2 188                       | 0.59 (1 ~ 2.5 μm) | 2, 4               |
| 美国 Florence (乡村) <sup>[26]</sup>                                             | 2002-02 ~ 2002-03 | 1 900 (0.1 ~ 0.5 μm)        | —                 | 4                  |
| 德国 Leipzig <sup>[12]</sup>                                                   | 1997-02 ~ 2001-02 | 1 383 (0.1 ~ 0.8 μm)        | —                 | 1                  |
| 南京河西 (本研究)                                                                   | 2013-08           | 2 465.27                    | 0.78              | 5                  |

1) “—”表示文章中没有相关数据; 2) 文献中使用的测量仪器用数字表示: “1”为双电迁移性颗粒物粒径分析仪 (TDMPS), TSI Inc, USA; “2”为空气动力学颗粒物粒径分析仪 (APS), TSI Inc, USA; “3”为宽范围粒径谱仪 (WPS), MSP, USA; “4”为扫描迁移性粒径观测仪 (SMPS), TSI Inc, USA; “5”为 PCASP-X2, DMT, USA

许多研究者利用多模态对数正态分布 (log-normal) 对气溶胶数谱进行拟合<sup>[11~13, 17]</sup>, 为数值模式和空气质量预报提供可靠的气溶胶数谱参量, 其表达式为:

$$\frac{dN}{d(\lg D_p)} = \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{\sqrt{2\pi} \lg(\sigma_{g,i})} \cdot \exp\left[-\frac{[\lg(D_p) - \lg(D_{g,i})]^2}{2\lg^2(\sigma_{g,i})}\right] \quad (3)$$

式中,  $n$  为模态个数,  $D_p$  为粒子直径,  $N_i$  为模态  $i$  的数浓度,  $D_{g,i}$  为模态  $i$  的中值粒径,  $\sigma_{g,i}$  为模态  $i$  的几何标准差.

由于本次观测的主要是积聚模态和粗模态的气溶胶粒子, 本研究采用 2 个模态来拟合气溶胶谱, 分别对应积聚模态和粗模态气溶胶, 利用最小二乘法确定的两个正态分布参数如表 3 所列: 两个模态对应的中值粒径分别为 0.19 μm 和 1.12 μm, 模态几何标准差分别为 2.60 和 1.82, 相比梁思等<sup>[8]</sup>拟合的天津气溶胶谱的积聚模态, 几何标准差偏大, 与沈小静<sup>[10]</sup>在泰山拟合的谱型相近, 说明不同环境大气下, 气溶胶谱分布受到源排放、气象条件和地形地

势等因素的影响, 浓度水平和谱分布存在着很大差异.

表 3 对数正太分布拟合模态参数

| Table 3 Parameters of log-normal fitting |                      |                |                       |
|------------------------------------------|----------------------|----------------|-----------------------|
| 模态                                       | $N_i/\text{cm}^{-3}$ | $\sigma_{g,i}$ | $D_{g,i}/\mu\text{m}$ |
| 模态 1                                     | 5 886.56             | 2.60           | 0.19                  |
| 模态 2                                     | 3.50                 | 1.82           | 1.12                  |

图 3(a) 为对本次观测平均数谱分布的拟合与观测值的对比, 图 3(b) 给出了通过拟合的数谱分布计算得到的体积谱分布. 拟合结果较为准确地再现了实际数谱分布和体积谱分布. 对比两个谱分布可以发现, 积聚模态粒子对二者的贡献都是最大的, 但相比数谱, 粗模态粒子在体积谱中的贡献增加, 原因在于其较大的粒径使气溶胶粒子具有较大的体积.

2.3 气溶胶时间变化特征

为了统一粒径, 图 4 给出观测期间 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度、0.1 ~ 2.5 μm 气溶胶体积浓度、数浓度和中值半径日均值及谱分布的时间序列, 其中还给出了中值 (红色实线) 的变化特征来避免极端值对日均值的影响. 图 4 中显示 8 月 11 日和 17 日气溶胶质量

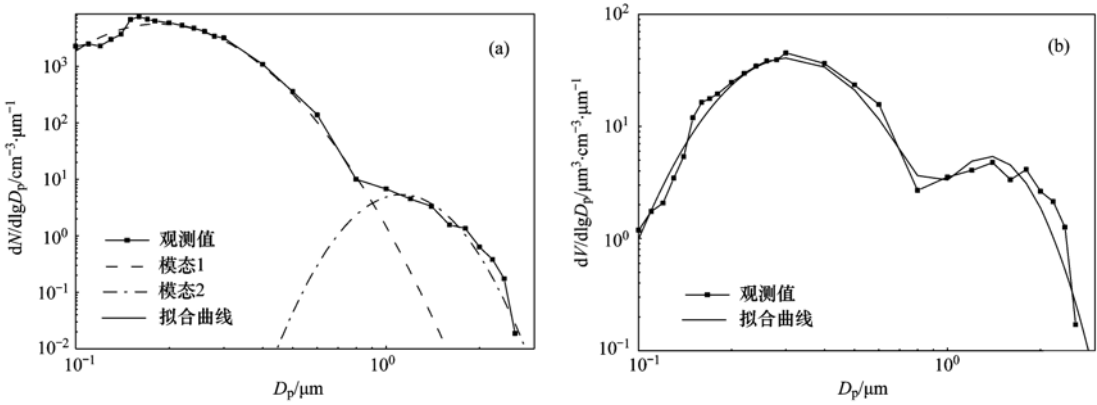


图 3 对数正态分布拟合数浓度谱分布和根据此拟合曲线计算的体积谱分布与观测值的比较  
Fig. 3 Comparison between measured value and calculated value from log-normal fitting of number size distribution and volume size spectral based on the fitting parameters

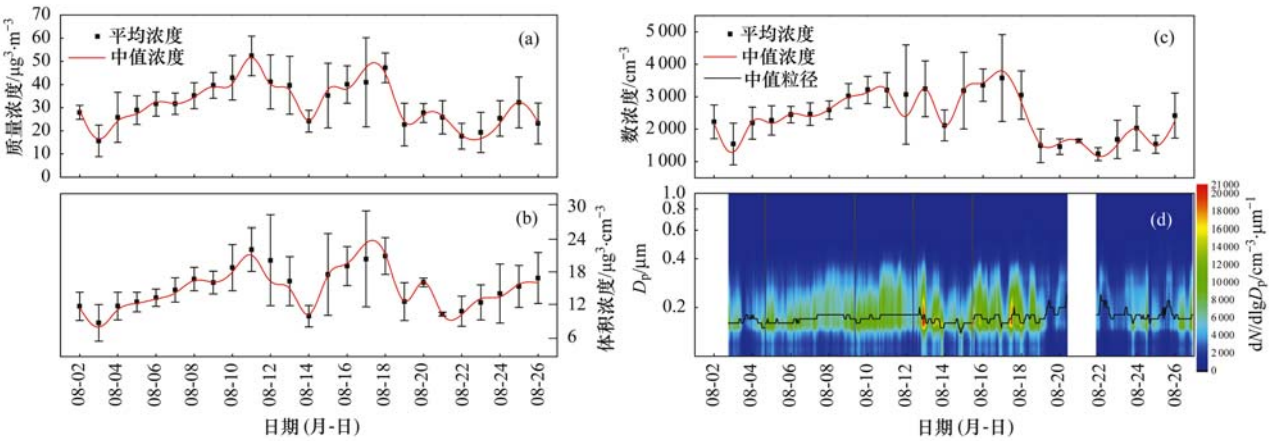


图 4  $PM_{2.5}$  质量浓度、 $0.1 \sim 2.5 \mu m$  颗粒物体积浓度、数浓度和谱分布的时间序列  
Fig. 4 Time series of aerosol  $PM_{2.5}$  mass concentration, particle volume concentration, number concentration and size distribution with diameter from  $0.1 \sim 2.5 \mu m$

浓度和体积浓度出现峰值,结合气象要素资料[图(2)]和南京周边火点图[图 5(a),图 5(c),<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/firemap/>]分析不难发现,该峰值由南京周边大量焚烧以及连续多日高温小风天气导致污染物难以扩散而不断累积所致。8月14日气溶胶浓度的谷值与图 5(b)对应,也说明南京周边焚烧对南京城区空气质量有着重要影

响。图 4(c)中显示气溶胶数浓度在 8 月 13 日出现峰值,这主要来源于  $0.3 \mu m$  以下气溶胶浓度的增加[图 4(d)],该粒径范围气溶胶可能为正午高温低湿条件下,光化学反应产生的二次污染物。该粒径范围气溶胶粒子对数浓度的贡献较大,对体积浓度和质量浓度的贡献并不明显,因此, $PM_{2.5}$  体积浓度与质量浓度并没有在 13 日出现峰值。

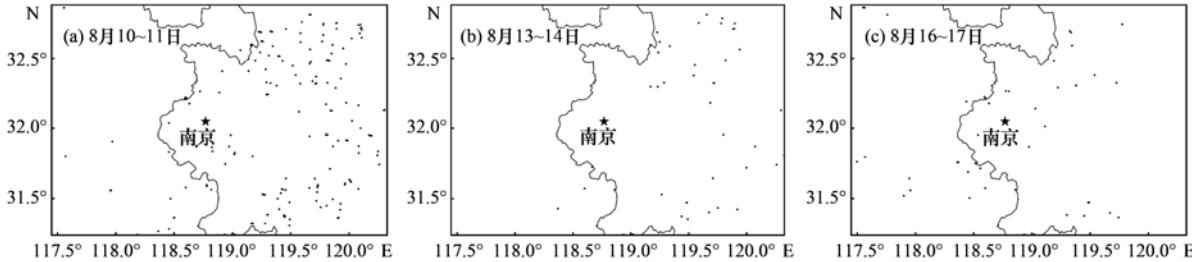


图 5 观测期间 8 月 10 ~ 11 日,8 月 13 ~ 14 日和 8 月 16 ~ 17 日 MODIS 卫星火点图  
Fig. 5 Fire map on 10<sup>th</sup>-11<sup>th</sup> August, 13<sup>th</sup>-14<sup>th</sup> August and 16<sup>th</sup>-17<sup>th</sup> August from MODIS

综合观测期间气象要素与气溶胶浓度的分析结果,观测期间影响南京空气质量的主要污染物来源为局地源,局地源强的变化是气溶胶浓度变化的主要因素。

## 2.4 气溶胶日变化特征

图 6 为观测期间气溶胶质量浓度日变化特征,图 7 展示了气象要素的日变化特征和归一化后的  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的质量浓度与边界层高度的关系,可以发现  $PM_{10}$  日变化相对较为明显,呈双峰分布,分别在早晨 06:00 ~ 08:00 与晚间 21:00 ~ 00:00 出现峰值,而在正午时段 (10:00 ~ 14:00) 出现低值,此变化与一些其他城市地区日变化趋势相似<sup>[8, 9, 12]</sup>。考虑到交通排放呈现早晚两个高峰,可以推断早晨时段的峰值主要由于交通排放和路面扬尘在风速小和高度低的边界层内不易扩散导致。日间太阳辐射的不断增强,边界层活动逐渐变得剧烈,高度逐渐抬升,使边界层内污染物在垂直方向得以充分混合稀释,同时交通排放相对减少,风速逐渐增强[图 7 (a)],污染物得以在边界层内扩散。夜间时段温度的降低,边界层下降,风速降低,加上交通排放的晚间高峰期,污染物在夜间较低的边界层内聚集,造成污染物的夜间高峰。值得注意的是,  $PM_{2.5}$  的日变化

趋势没有双峰分布,正午时段出现了高值,从谱分布日变化[图 6(c)]中不难看出,这可能是正午 10:00 ~ 14:00 高温下光化学反应生成二次污染物的所致。晚间 18:00 ~ 00:00 细粒子的大量出现是由于交通高峰以及边界层的下沉,加上较高的相对湿度下,更加有利于硝酸盐的形成<sup>[27]</sup>,并在浅薄的边界层内堆积,造成  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  质量浓度的升高。从图 7(b) 还可以清楚地看出,  $PM_{10}$  的质量浓度与边界层高度具有较强的负相关性,  $PM_{2.5}$  与边界层高度的相关性稍弱。因此,影响南京城区  $PM_{10}$  浓度日变化的主要因素为交通和边界层活动,而  $PM_{2.5}$  浓度日变化主要与交通和高温下光化学反应生成的二次污染物有关。

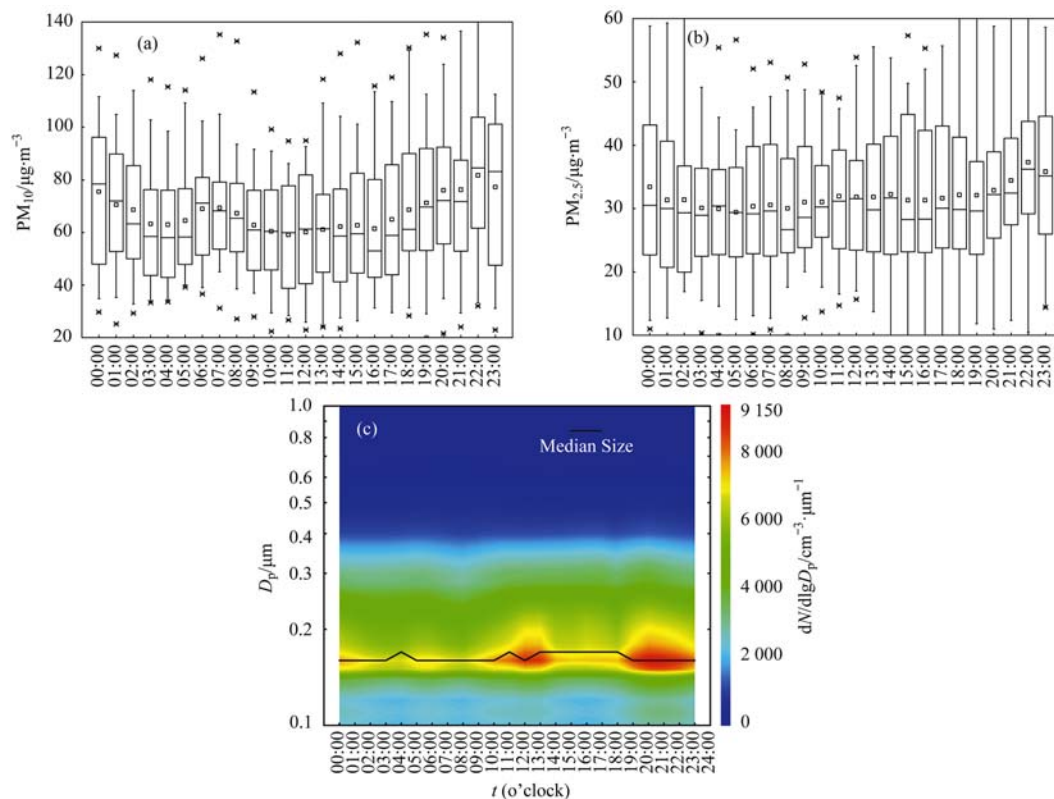
## 2.5 能见度、气溶胶质量浓度和相对湿度

### 2.5.1 能见度与气溶胶浓度和相对湿度的关系

人类最能清楚感知的一种气溶胶污染导致的环境后果就是能见度的降低<sup>[28]</sup>。Seinfeld 等<sup>[28]</sup> 给出能见度与大气中气体和颗粒物总消光的关系,即:

$$L_v = \frac{3.91}{\sigma_e} \quad (4)$$

式中,  $L_v$  是能见度; 3.91 是 Koschmieder 常数;  $\sigma_e$  是大气中气体和气溶胶颗粒物的总消光。研究者发



各时次的箱型表示质量浓度的 25%, 75% 百分位, 触须表示 5%, 95% 百分位

图 6  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  和气溶胶数谱分布日变化

Fig. 6 Diurnal patterns of  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  and aerosol number size distribution

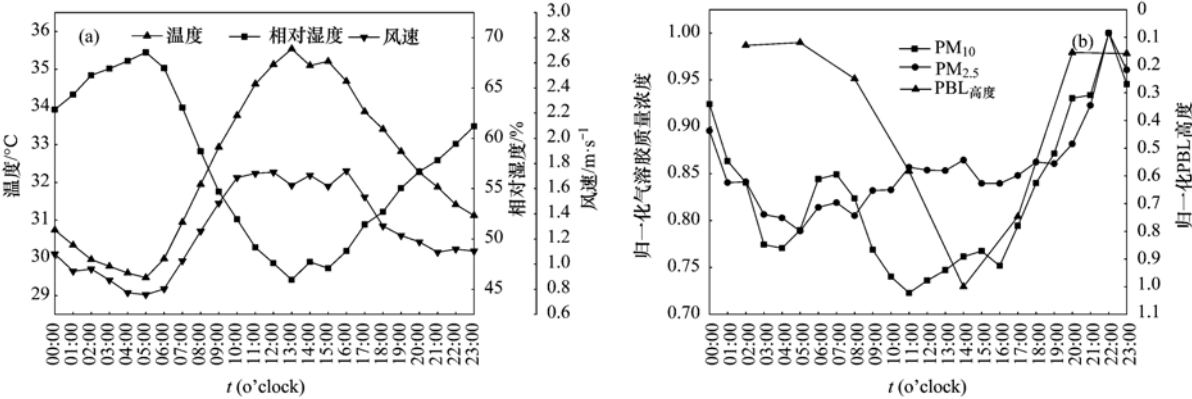


图 7 气象要素,归一化的  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  质量浓度与边界层高度的日变化特征

Fig. 7 Characteristics of diurnal patterns of meteorological parameters, normalized  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  and normalized planetary boundary layer height

现,在总消光作用中,气体组分的消光作用仅占 11.85%,而气溶胶颗粒物的消光作用占 88.15%,其中光的吸收作用占 14.62%,光的散射作用占 85.38%<sup>[29]</sup>. 因此,气溶胶粒子对能见度的影响较大,而相对湿度通过影响气溶胶粒子的粒径,对能见度同样有着重大影响.

本次观测期间,平均能见度超过 15 km,但也存在图 2 中显示 8 月 15 日下午至 8 月 22 日能见度波动较大的现象,8 月 23~26 日出现能见度小于 5 km 时段. 为了深入了解影响能见度的因子,本研究对小时平均的  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度与相对湿度进行分档统计,质量浓度的谱宽为  $15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,相对湿度谱宽为 10%,将相对湿度小于 40% 的值并为一档. 将能见度信息分档统计到质量谱和相对湿度谱,结果如图 8(a) 所示. 其中可以看出,质量浓度频率最高的区间为  $15\sim30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,在国家 1 级标准以下,其次是  $30\sim45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  档,超过  $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的质量浓度仅为 3.10%. 此外随着质量浓度和相对湿度的增加,大

于 15 km 的能见度的百分比逐渐下降,较低能见度的频率增加. 当相对湿度超过 80% 时,能见度降低更明显,大于 15 km 能见度的比例降低到 8.82%,小于 5 km 的能见度迅速提升到 26.47%,5~10 km 能见度频率也从 25.81% 提升到 50.0%,观测期间能见度最低值(1.72 km)就出现在此相对湿度区间. 然而,整个观测期间相对湿度超过 80% 的时段并不多,仅占总时次的 5.85%,相对湿度一般维持在 40%~60% 区间,为低能见度的形成提供了不利条件.

将上述数据绘制成散点图 8(b) 可以发现,当  $\text{PM}_{2.5}$  浓度较高时,相对湿度较低的情况下,能见度也会很高.  $\text{PM}_{2.5}$  浓度较低时( $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} < \text{PM}_{2.5} < 30 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),相对湿度较高的情况下,能见度也可能很低. 因此,能见度是由  $\text{PM}_{2.5}$  浓度与相对湿度共同决定的. 从图 8 中还能发现,当气溶胶浓度小于  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  时,能见度与相对湿度的关系较小,能见度始终较高. 当相对湿度小于 70% 时,能见度随

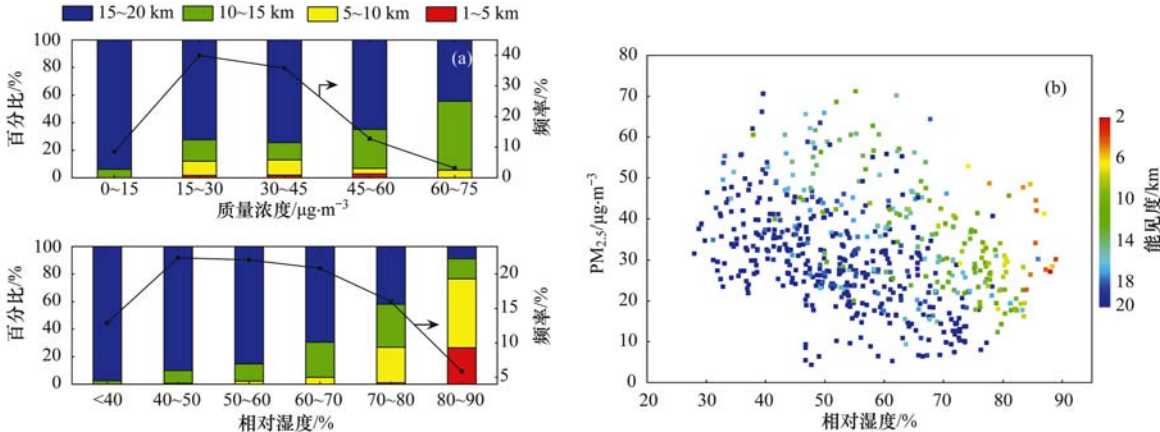


图 8 能见度与  $\text{PM}_{2.5}$  及相对湿度的关系

Fig. 8 Relationship between visibility and  $\text{PM}_{2.5}$ , as well as relative humidity

着气溶胶浓度的增加而降低。当相对湿度大于 70% 时,由于一些化学成分主要为亲水性物质的气溶胶颗粒吸湿增长后增强了对光的削弱<sup>[15, 30, 31]</sup>,能见度随着相对湿度的升高而降低。该结果与 Chen 等<sup>[16]</sup>在武清的研究结果相似。

### 2.5.2 能见度与气溶胶浓度和相对湿度的关系个例分析

为了进一步说明能见度与相对湿度和  $PM_{2.5}$  浓度的变化关系,笔者选取了观测期间能见度波动较大的两天(8月18~19日)作为个例来具体分析三者之间的关系,图9展示了8月18~19日能见度、相对湿度、 $PM_{2.5}$ 质量浓度以及其他气象要素的小时变化序列;相对湿度随温度的日变化明显,风速较小,能见度出现较大的波动(7.50~19.91 km)。18日凌晨至06:00左右,相对湿度随着温度的降低逐渐升高,达到69.54%,此段时间 $PM_{2.5}$ 质量浓度并没有发生较大改变,能见度随着相对湿度的增加而不断降低至10 km以下。18日日间,随着温度不断升高,相对湿度减小,能见度也逐渐升高,此时 $PM_{2.5}$ 质量浓度较凌晨有所增加,因此该时段相对湿度是

能见度的首要影响因子。8月19日凌晨~19日下午,当 $PM_{2.5}$ 质量浓度水平较低时,温度的降低,使相对湿度升高至70%以下,此时能见度却高于前日。19日下午,随着 $PM_{2.5}$ 浓度的继续降低,能见度在相对湿度为60%~70%的情况下升高到接近20 km,这也进一步证明了前文所得出的结论,此时段影响能见度的主要因素为 $PM_{2.5}$ 浓度。19日下午至夜间时段,相对湿度继续升高至大于70%, $PM_{2.5}$ 质量浓度也有所增加,低于18日凌晨水平,然而,此时能见度却低于18日凌晨,其主要原因在上节也已经说到,虽然相对湿度不算很高, $PM_{2.5}$ 老化或所含亲水物质开始吸湿增长,粒径增大,消光作用增加导致能见度降低至10 km以下,气象学将此现象称为霾<sup>[32]</sup>,此时段相对湿度再次成为影响能见度的主要原因。

综上讨论可知,能见度与相对湿度及 $PM_{2.5}$ 浓度的关系较为复杂,能见度的高低,是由气溶胶粒子与相对湿度共同决定的。相对湿度较难改变,因此保证较低的气溶胶浓度成为高能见度的前提和保证。

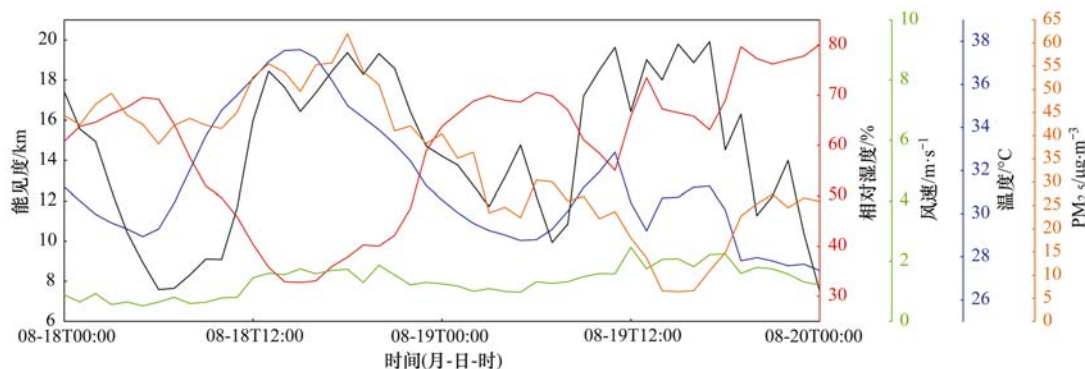


图9 8月18日00:00~8月20日00:00能见度与 $PM_{2.5}$ 及气象要素小时序列

Fig. 9 Hourly mean of visibility and  $PM_{2.5}$ , as well as relative humidity from 00:00, 18<sup>th</sup> August to 00:00, 20<sup>th</sup> August

## 3 结论

(1) 观测期间 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 浓度低于国家二级标准,平均值分别为 $67.44 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $31.92 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。粒径在 $0.1 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内的气溶胶粒子数浓度平均值为 $2466.25 \text{ cm}^{-3}$ ,其中粒径小于 $1 \mu\text{m}$ 的气溶胶粒子占到总颗粒物的99.97%,平均体积浓度为 $19.89 \mu\text{m}^3\cdot\text{cm}^{-3}$ 。对数正态分布(log-normal)拟合观测期间平均谱分布,得到两个模态的中值粒径分别为 $0.19 \mu\text{m}$ 对应积聚模态粒子和 $1.12 \mu\text{m}$ 对应粗模态粒子。

(2)  $0.1 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 气溶胶颗粒物体积浓度与

$PM_{2.5}$ 质量浓度变化趋势一致,数浓度变化受到细粒子的影响与前两者稍有不同。气溶胶浓度水平主要受到局地源影响,变化趋势能很好地反映南京市近郊焚烧、高温下光化学反应导致的二次污染物的生成。

(3)  $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 质量浓度日变化稍有差异, $PM_{10}$ 浓度主要受交通高峰和边界层活动影响,呈现早晚两高峰,正午低谷的日变化特征, $PM_{2.5}$ 浓度日变化主要与交通排放和白天高温下光化学反应生成的二次污染物有关,在中午存在峰值。

(4) 对能见度的统计分析表明,能见度受气溶胶浓度和相对湿度共同影响,随颗粒物浓度和相对

湿度的增加而降低. 当颗粒物浓度小于  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  时,能见度与相对湿度的关系较小,能见度始终较高. 当相对湿度小于 70% 时,颗粒物浓度对能见度的贡献较大,当相对湿度大于 70% 时,相对湿度对能见度的贡献较大.

#### 参考文献:

- [1] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 268-275.
- [2] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [3] 黄志军.  $\text{PM}_{2.5}$  成分与高血压相关心脑血管疾病急诊的关系及对 RAS 基因表达的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [4] Buseck P R, Pósfai M. Airborne minerals and related aerosol particles: effects on climate and the environment [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1999, **96**(7): 3372-3379.
- [5] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, **58**(13): 1178-1187.
- [6] 段青春, 李兴华, 郝吉明. 北京市冬季大气细粒子数浓度的粒径分布特征[J]. 中国环境监测, 2008, **24**(2): 54-59.
- [7] Wu Z J, Hu M, Lin P, *et al.* Particle number size distribution in the urban atmosphere of Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(34): 7967-7980.
- [8] 梁思, 马楠, 徐婉筠, 等. 天津郊区夏季气溶胶谱分布特征观测研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, **48**(2): 246-252.
- [9] 钱凌, 银燕, 童尧青, 等. 南京北郊大气细颗粒物的粒径分布特征[J]. 中国环境科学, 2008, **28**(1): 18-22.
- [10] 沈小静. 泰山大气气溶胶数谱分布特征及光学特性研究[D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2012.
- [11] Hussein T, Puustinen A, Aalto P P, *et al.* Urban aerosol number size distributions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2004, **4**(2): 391-411.
- [12] Wehner B, Wiedensohler A. Long term measurements of submicrometer urban aerosols: statistical analysis for correlations with meteorological conditions and trace gases[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2003, **3**(3): 867-879.
- [13] Birmili W, Wiedensohler A, Heintzenberg J, *et al.* Atmospheric particle number size distribution in central Europe: Statistical relations to air masses and meteorology [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2001, **106**(D23): 32005-32018.
- [14] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. New York: Wiley, 2008.
- [15] Liu P F, Zhao C S, Göbel T, *et al.* Hygroscopic properties of aerosol particles at high relative humidity and their diurnal variations in the North China Plain[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, **11**(7): 3479-3494.
- [16] Chen J, Zhao C S, Ma N, *et al.* A parameterization of low visibilities for hazy days in the North China Plain [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(11): 4935-4950.
- [17] Sun X, Yin Y, Sun Y W, *et al.* Seasonal and vertical variations in aerosol distribution over Shijiazhuang, China[J]. Atmospheric Environment, 2013, **81**: 245-252.
- [18] Burkart J, Steiner G, Reischl G, *et al.* Characterizing the performance of two optical particle counters (Grimm OPC<sub>1.108</sub> and OPC<sub>1.109</sub>) under urban aerosol conditions [J]. Journal of Aerosol Science, 2010, **41**(10): 953-962.
- [19] Cheng Y H. Comparison of the TSI Model 8520 and Grimm Series 1.108 portable aerosol instruments used to monitor particulate matter in an iron foundry[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2008, **5**(3): 157-168.
- [20] Colls J J, Micallef A. Measured and modelled concentrations and vertical profiles of airborne particulate matter within the boundary layer of a street canyon[J]. Science of the Total Environment, 1999, **235**(1-3): 221-233.
- [21] Peters T M, Ott D, O'Shaughnessy P T. Comparison of the Grimm 1.108 and 1.109 portable aerosol spectrometer to the TSI 3321 aerodynamic particle sizer for dry particles[J]. Annals of Occupational Hygiene, 2006, **50**(8): 843-850.
- [22] Tan W, Yin Y, Chen K, *et al.* An experimental study of aerosol particles using PCASP-X2 and WPS<sup>TM</sup> [A]. In: 2010 Second IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing [C]. Qingdao: IEEE, 2010. 586-589.
- [23] Ye X N, Tang C, Yin Z, *et al.* Hygroscopic growth of urban aerosol particles during the 2009 Mirage-Shanghai Campaign[J]. Atmospheric Environment, 2013, **64**: 263-269.
- [24] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [25] 银燕, 陈晨, 陈魁, 等. 黄山大气气溶胶微观特性的观测研究[J]. 大气科学学报, 2010, **33**(2): 129-136.
- [26] Stanier C O, Khlystov A Y, Pandis S N. Ambient aerosol size distributions and number concentrations measured during the Pittsburgh Air Quality Study (PAQS) [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(20): 3275-3284.
- [27] 程雅芳, 张远航, 胡敏. 珠江三角洲大气气溶胶辐射特性: 基于观测的模型方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 70-71.
- [28] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change[M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc, 2006. 703-707.
- [29] 刘新罡, 张远航, 曾立民, 等. 广州市大气能见度影响因子的贡献研究[J]. 气候与环境研究, 2006, **11**(6): 733-738.
- [30] 颜鹏, 潘小乐, 汤洁, 等. 北京市区大气气溶胶散射系数亲水增长的观测研究[J]. 气象学报, 2008, **66**(1): 111-119.
- [31] 张立盛, 石广玉. 相对湿度对气溶胶辐射特性和辐射强迫的影响[J]. 气象学报, 2002, **60**(2): 230-237.
- [32] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003. 23-24.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                   |                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb .....                                                                                  | SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)             |
| Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China .....                                                             | ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)      |
| Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility .....                                                       | YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)                  |
| Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013 .....                                                                               | LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)     |
| Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter .....                                                           | FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)         |
| Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM <sub>10</sub> .....                                                                                                            | CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)             |
| Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer .....                                                                   | WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)       |
| Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region .....                                                        | WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)            |
| Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds .....                                                                       | LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)              |
| Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen .....                                                                                                                  | ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)              |
| Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake .....                                                                               | XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)   |
| Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake .....                                                                        | ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)       |
| Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet .....                                                                      | XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)                     |
| Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an .....                                                                                                                   | YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)                 |
| Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff .....                                                                                   | WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)                 |
| Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality .....                                                                                                      | CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)                          |
| Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process .....                                            | DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)          |
| Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process .....                                                                                       | JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)     |
| Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein .....                                                                                    | WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)       |
| Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution .....                                                                                             | CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)      |
| Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor .....                                                                                                                          | LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)       |
| Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoabsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions .....                                                                                | ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)                      |
| Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress .....                                                                                                                       | LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)    |
| Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> .....                                                                            | TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)    |
| Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration .....                                                                                  | REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)           |
| Effect of Fe <sup>2+</sup> and Fe <sup>3+</sup> on the Activity of ANAMMOX .....                                                                                                                  | LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)              |
| Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor .....                                                                                                | YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)   |
| Effects of Salinity on N <sub>2</sub> O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge .....                                                                                       | WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)                     |
| Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor .....                                                                              | ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244) |
| Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique .....             | WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)            |
| Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing .....                                                                        | SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)           |
| Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil .....                                                                                   | ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)     |
| Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil .....                                                                               | LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)                    |
| Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle .....                                                                                        | JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)       |
| Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils .....                                                                                                 | WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291) |
| Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis( <i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols ..... | LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)     |
| Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator .....                                                                                        | WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)       |
| Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales .....                                                                                                | LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)      |
| Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years .....                                                                                            | LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)             |
| Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI <sub>Ac</sub> Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity .....                                       | PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)    |
| Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables .....                                                              | ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)                |
| Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells .....                                                                                       | SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)         |
| Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals .....                                                                                              | BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)             |
| Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char .....                                                                                  | DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)                    |
| Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer .....                                                                                                       | TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)                           |
| Impact of Nitrate Continuous Injection on N <sub>2</sub> O Releases from Bioreactor Landfill .....                                                                                                | BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)  |
| Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth .....                                                                         | JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)        |
| Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta .....                                                                                  | ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)                 |
| Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation .....                                                                                      | ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)                               |
| Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon .....                                                                                                                                 | YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)                   |

# 《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11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 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)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>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<br>(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