

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第11期

Vol.38 No.11

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

天津市非道路移动源污染物排放清单开发 ..... 张意, Andre Michel, 李东, 张欣, 吴琳, 张衍杰, 马超, 邹超, 毛洪钧 (4447)  
基于移动监测和土地利用回归模型的上海市近地面黑碳浓度空间模拟 ..... 彭霞, 余倩楠, 龙凌波, 刘敏, 徐茜, 魏宁, 周陶冶 (4454)  
鄂东典型工业城市大气 PM<sub>10</sub> 中元素浓度特征和来源分析 ..... 占长林, 张家泉, 郑敬茹, 姚瑞珍, 刘红霞, 肖文胜, 刘先利, 曹军骥 (4463)  
常州夏秋季 PM<sub>2.5</sub> 中碳质气溶胶特征及来源 ..... 叶招莲, 刘佳澍, 李清, 马帅帅, 许澎 (4469)  
徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析 ..... 范美益, 曹芳, 张园园, 鲍孟盈, 刘晓妍, 张雯淇, 高嵩, 章炎麟 (4478)  
南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源 ..... 刘慧琳, 陈志明, 李宏姣, 蒋靖坤, 张强, 黄炯丽, 毛敬英, 梁桂云, 杨俊超, 张达标, 莫招育 (4486)  
西安市秋冬季不同空气质量下可培养微生物气溶胶浓度和粒径分布 ..... 李婉欣, 路瑞, 谢铮胜, 王金龙, 范春兰, 刘鹏霞, 李彦鹏 (4494)  
黄渤海海域秋季营养盐及有色溶解有机物分布特征 ..... 唐永, 孙语嫣, 石晓勇, 韩秀荣, 苏荣国 (4501)  
华东沿海滩涂区表层沉积物重金属含量特征及风险评价 ..... 张明, 鲍征宇, 陈国光, 雍太健, 朱意萍, 梁晓红 (4513)  
基于地球化学特性的海州湾海洋牧场沉积物重金属研究 ..... 李大鹏, 张硕, 张中发, 罗娜, 魏青青, 张瑞, 黄宏 (4525)  
尼洋河流域水化学特征及其控制因素 ..... 张涛, 蔡五田, 李颖智, 张智印, 耿婷婷, 边超, 赵森, 蔡月梅 (4537)  
南亚热带地区水库夏季铁、锰垂直分布特征 ..... 杨思远, 赵剑, 余华章, 彭亮, 肖利娟 (4546)  
辽河流域地表水中典型抗生素污染特征及生态风险评估 ..... 张晓娇, 柏杨巍, 张远, 马淑芹, 郭昌胜, 张莉 (4553)  
东太湖渔业养殖对沉积物营养盐的影响 ..... 何肖微, 储瑜, 曾巾, 赵大勇, 陆建明, 曹萍, 吴庆龙 (4562)  
浑太河不同水生态区营养盐对底栖硅藻的影响及阈值 ..... 张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 臧小苗, 张晓娇 (4570)  
水环境条件对三峡库区消落带狗牙根根磷养分淹水浸泡释放的影响 ..... 肖丽微, 朱波 (4580)  
野鸭湖湿地芦苇根际微生物多样性与磷素形态关系 ..... 滕泽栋, 李敏, 朱静, 宋明阳 (4589)  
人为扰动背景下城市边缘溪流底质硝化-反硝化潜力分析 ..... 李如忠, 郑侠, 高苏蒂, 叶舟 (4598)  
不同扰动下外源磷在形态磷间的分布规律 ..... 蔡顺智, 李大鹏, 唐鑫煜, 李浩冉, 朱伟, 黄勇 (4607)  
伊乐藻-高效脱氮微生物协同作用对污染水体氮素脱除机制的影响 ..... 王浩, 李正魁, 张一品, 丁帮璟 (4617)  
零价铁活化过硫酸钠去除废水中的砷(V) ..... 周孜迈, 邓文娜, 杨艺琳, 孙艳秋, 王悦, 柳昕义, 王中良 (4623)  
nZVI/AC 复合材料对水中锑的去除 ..... 蒋婷, 鲍玥, 李威, 方荣业, 史惠祥 (4632)  
流态对生物添加强化硝化效果的影响 ..... 于莉芳, 杜倩倩, 张茹, 杨秀玲, 李初, 滑思思, 冯云堂 (4641)  
温度对 SBR 生物脱氮效能及胞外聚合物的影响 ..... 孙洪伟, 陈翠忠, 吴长峰, 赵华南, 于雪, 方晓航 (4648)  
温度对间歇曝气 SBR 短程硝化及硝化活性的影响 ..... 刘宏, 彭永臻, 卢炯元, 李慧, 南彦斌, 王瑾, 陈永志 (4656)  
不同诱导模式下 CAST 工艺的亚硝酸盐型反硝化除磷能力 ..... 马娟, 王谨, 俞小军, 张伟, 魏雪芬, 陈永志, 田文清 (4664)  
污水处理厂 CANON 工艺小试 ..... 李冬, 赵世勋, 王俊安, 朱金凤, 关宏伟, 张杰 (4673)  
SBR 加载不同粒径活性炭对其污泥颗粒化进程的影响机制 ..... 信欣, 管蕾, 郭俊元, 刘洁, 冯梅, 余婷婷 (4679)  
常温下厌氧氨氧化污泥的储存及活性恢复 ..... 黄佳路, 王小龙, 高大文 (4687)  
同步脱氮除磷好氧颗粒污泥培养过程微生物群落变化 ..... 高景峰, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲, 张丽芳, 张树军, 高永青, 张帅 (4696)  
硫酸盐和 Fe(II) EDTA-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/Fe(III) EDTA 厌氧还原过程特性及微生物群落分析 ..... 张玉, 万方, 周集体 (4706)  
SBR 系统外加磁场对微生物群落多样性和处理效果的影响 ..... 耿淑英, 付伟章, 王静, 郑书联 (4715)  
安徽某铁矿排土场废矿石中产酸微生物群落 ..... 杜泽瑞, 郝春博, 裴理鑫, 卫朋飞, 张鑫, 鲁艳春 (4725)  
典型集雨人饮地区窖水微生物群落多样性及差异解析 ..... 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 武福平, 赵炜, 张洪伟, 张翔 (4733)  
表层沉积物中 6:2 氟调醇生物降解对细菌群落结构的影响 ..... 王丹, 侯珍, 张琪, 周莹, 卢晓霞 (4747)  
外源环烷酸在土壤中的降解过程及对微生物群落结构的影响 ..... 刘艳秋, 赵嫣然, 刘梦娇, 樊灏, 黄艺 (4756)  
1 株异养硝化-好氧反硝化细菌 DK1 的分离鉴定及其脱氮特性 ..... 牟东阳, 靳鹏飞, 彭永臻, 李夕耀, 张琼, 何建中 (4763)  
重庆缙云山 4 种典型植被覆盖下汞的释放通量及影响因素 ..... 杨光, 孙涛, 安思危, 马明 (4774)  
模拟氮沉降对闽江口淡水感潮沼泽湿地 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 排放通量的短期影响 ..... 李冬冬, 仝川, 谭立山, 陈坤龙, 孙东耀, 黄佳芳 (4782)  
地膜覆盖对稻-油轮作农田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 石将求, 郝庆菊, 冯迪, 张凯莉, 石孝均, 江长胜 (4790)  
西安市公园土壤多环芳烃污染特征、来源及风险评价 ..... 周燕, 卢新卫 (4800)  
不同沙生灌木下土壤颗粒及重金属空间分布特征 ..... 代豫杰, 郭建英, 董智, 李锦荣, 李红丽 (4809)  
不同水分梯度下 UV-B 辐射对 2 个稻田土壤碳氮转化的影响 ..... 蒋梦蝶, 王秋敏, 徐鹏, 周维, 鄧磊, 胡荣桂 (4819)  
喀斯特灌丛土壤丛枝菌根真菌群落结构及丰度的影响因素 ..... 梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧, 胡亚军 (4828)  
生物炭和草酸活化磷矿粉对镉镍复合污染土壤的应用效果 ..... 段然, 胡红青, 付庆灵, 寇长林 (4836)  
反复冻融与高温老化对砷污染土壤固化稳定化效果的影响 ..... 杨洁, 钱赵秋, 王旌 (4844)  
皂角苷和柠檬酸联合对污泥中 Cu、Pb 和 Zn 的去除及其稳定性特征 ..... 叶涛, 黄丽, 张克强, 张斌, 常红, 刘智杰, 杜连柱 (4850)  
针铁矿与胡敏酸的交互作用及其复合物的稳定性 ..... 王锐, 朱朝菊, 向文军, 方敦, 杨小洪, 吴少尉, 魏世勇 (4860)  
塑胶跑道中有机磷酸酯的含量及健康风险 ..... 印红玲, 刘琴, 廖林群, 王震, 罗怡, 邓旭, 丁浚刚, 唐铭 (4868)  
农业废物堆肥中理化参数对 GH6 家族基因影响 ..... 陈耀宁, 苟宇, 黎媛萍, 伍艳馨, 陈艳容, 李辉, 刘耀, 汪元南, 张道利, 朱福造, 曾光明 (4874)  
F/M 及 HRT 对果蔬垃圾厌氧发酵产氢的影响 ..... 李标, 孔晓英, 李连华, 李颖, 袁振宏, 孙永明, 吕鹏梅 (4882)  
环境模型中敏感性分析方法评述 ..... 陈卫平, 涂宏志, 彭驰, 侯鹰 (4889)  
《环境科学》征稿简则(4462) 《环境科学》征订启事(4672) 信息(4647, 4705, 4789)

# 南宁市一次污染过程大气颗粒物理化特性及来源

刘慧琳<sup>1</sup>, 陈志明<sup>1</sup>, 李宏姣<sup>1</sup>, 蒋靖坤<sup>2</sup>, 张强<sup>2</sup>, 黄炯丽<sup>1</sup>, 毛敬英<sup>1</sup>, 梁桂云<sup>1</sup>, 杨俊超<sup>1</sup>, 张达标<sup>1</sup>, 莫招育<sup>1,3\*</sup>

(1. 广西壮族自治区环境保护科学研究院, 南宁 530022; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084; 3. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

**摘要:** 利用颗粒物粒径谱仪和单颗粒气溶胶质谱仪等, 对南宁市 2016 年 12 月 5 ~ 11 日大气污染过程进行实时监测, 分析颗粒物粒径分布特征、化学组分及其污染来源。结果表明, 观测期间南宁市 20 nm ~ 10 μm 颗粒物数浓度粒径主要集中在 23 ~ 395 nm 之间, 主峰值出现在 100 nm 左右。期间有 3 次新粒子生成现象, 下午 14:00 ~ 18:00 有 30 nm 左右新粒子开始生成, 晚 20:00 ~ 次日 06:00 碰并长大到 40 ~ 110 nm 左右, 3 次新粒子生成过程受机动车尾气一次排放的污染影响。对污染期间细颗粒物化学成分在线溯源分析发现, 污染期间有大量的二次反应颗粒物生成, 判定颗粒物来源主要有生物质燃烧源、扬尘源和燃煤源, 其中, 远距离传输对生物质燃烧源有贡献。

**关键词:** 粒径谱仪; 单颗粒气溶胶质谱仪; 数浓度; 粒径分布; 南宁

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)11-4486-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704240

## Physiochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China

LIU Hui-lin<sup>1</sup>, CHEN Zhi-ming<sup>1</sup>, LI Hong-jiao<sup>1</sup>, JIANG Jing-kun<sup>2</sup>, ZHANG Qiang<sup>2</sup>, HUANG Jiong-li<sup>1</sup>, MAO Jing-ying<sup>1</sup>, LIANG Gui-yun<sup>1</sup>, YANG Jun-chao<sup>1</sup>, ZHANG Da-biao<sup>1</sup>, MO Zhao-yu<sup>1,3\*</sup>

(1. Scientific Research Academy of Guangxi Environmental Protection, Nanning 530022, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** Distribution characteristics, chemical constituents, and sources of particulate matter were measured using a scanning mobility particle sizer and single particle aerosol mass spectrometer during pollution monitoring that occurred between December 5<sup>th</sup> and December 11<sup>th</sup>, 2016, in Nanning. Results showed that particulate matter (PM) sized between 20 nm-10 μm were concentrated in the 23 to 395 nm range, with a peak of 100 nm. Three new particle types were generated during the course of this monitoring. These new 30 nm particles came into existence between 14:00 to 18:00, and grew to a size of between 40 nm and 110 nm between 20:00 to 06:00 the next day. The generation of the all three new particles was affected by motor vehicle exhaust emissions. Many secondary particles were also produced during this period of pollution. The source of the fine particulate matter was mainly from the burning of biomass, dust, and the combustion of coal. In addition, a long-distance transmission also contributed to the particles from biomass burning.

**Key words:** particle sizing by spectrometry; single particle aerosol mass spectrometer; number concentration; particle size distribution; Nanning

大气颗粒物是造成大气能见度降低<sup>[1,2]</sup>、环境空气质量下降的主要原因, 严重时甚至形成灰霾<sup>[3,4]</sup>。大气颗粒物对环境空气的影响不仅与质量浓度和数浓度有关, 还受其粒径和化学组分等的影响。粒径谱是颗粒物重要特征之一, 它不但决定颗粒物动力学行为, 而且颗粒物几乎所有的物化特性都与其有关<sup>[5]</sup>。吴兑等<sup>[6]</sup>的研究表明, 灰霾的形成主要与细粒子污染有关。细粒子更易富集污染元素<sup>[7]</sup>, 尤其是超细粒子(粒径小于 100 nm)在人体肺部可渗透得更深、危害更大<sup>[3]</sup>。细粒子的来源和化学过程不同, 其形态、大小、化学组成也会不同, 研究其粒径、化学成分和变化特征, 有助于了解气溶胶的来源, 对于研究城市大气污染治理及其健康、

气候效应等方面具有重要意义。

国内已有很多学者开展颗粒物粒子数浓度粒径分布及单颗粒化学成分的相关研究, 且主要地区集中在京津冀、长三角及珠江三角等经济发达的地区。大气颗粒物粒径谱方面研究主要集中在大气颗粒物数浓度、粒径谱分布特征及来源研究, 如段菁春等<sup>[8]</sup>研究了北京冬季大气颗粒物数浓度的粒径分布特征及来源; 翟晴飞等<sup>[9]</sup>对石家庄春季大气气

收稿日期: 2017-04-25; 修订日期: 2017-06-02

基金项目: 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科合 14125008-2-11); 广西自然科学基金项目(2015GXNSFBA139203); 广西科技计划项目(桂科 AB16380292)

作者简介: 刘慧琳(1986~), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为大气环境研究与污染防治, E-mail: 517507123@qq.com

\* 通信作者, E-mail: 65678503@qq.com

溶胶数浓度和谱进行了观测; 崔虎雄等<sup>[10]</sup>对上海市浦东城区冬季颗粒物数浓度及其谱分布研究; 谢小芳等<sup>[11,12]</sup>研究了杭州市大气超细颗粒物数浓度谱的分布特征<sup>[13]</sup>; 黄祖照等<sup>[14]</sup>研究了广州城区大气细颗粒物谱分布特征. 单颗粒化学组分也有不少研究, 如何俊杰等<sup>[15]</sup>对鹤山灰霾期间大气单颗粒气溶胶特征进行了初步研究; 李梅等<sup>[16]</sup>运用单颗粒气溶胶质谱仪技术初步研究广州大气矿尘污染; 牟莹莹等<sup>[17]</sup>利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态等. 但同时结合粒径谱仪和单颗粒气溶胶质谱仪开展大气颗粒物的理化特性及来源研究非常缺乏.

目前关于南宁市细粒子尤其是粒径小于 100 nm 的粒子数浓度及其粒径谱分布的研究较少. 本研究主要采用自主研发的颗粒物粒径谱仪对南宁市 2016 年 12 月一次污染过程 20 nm ~ 10  $\mu\text{m}$  的大气颗粒物数浓度和粒径谱特征进行分析, 同时结合单颗粒气溶胶质谱仪等仪器分析, 了解南宁市大气颗粒物谱分布特征、化学组分变化规律及其污染来源, 以期为进一步研究南宁市大气颗粒物理化特性和来源解析提供数据支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 观测地点和时间

观测点位设置于广西南宁市广西环境科学研究院(教育路 5 号)大气科学观测站楼顶, 距地面约 30 m. 该观测点位周围主要为办公楼、居民楼、学校和街道, 无明显工业源. 2016 年 12 月 5 ~ 11 日南宁市出现持续的轻度/中度污染, 利用多种手段对此次污染过程进行一次深入分析.

### 1.2 观测仪器

观测所使用的仪器包括颗粒物粒径谱仪(美国 TSI 公司)、0515 单颗粒气溶胶质谱仪(广州禾信仪器有限公司)、 $\beta$  射线法  $\text{PM}_{10}$  颗粒物监测仪、 $\beta$  射线法  $\text{PM}_{2.5}$  颗粒物监测仪、 $\beta$  射线法  $\text{PM}_1$  颗粒物监测仪(美国赛默飞世尔)、AE31 黑碳仪、环境空气自动站等.

本研究使用的颗粒物粒径谱仪为自主研发仪器, 结合电迁移率与空气动力学测量原理实现 20 nm ~ 10  $\mu\text{m}$  粒径分布测量. 仪器硬件系统由亚微米扫描电迁移率粒径分析仪 3772 (regular scanning mobility particle sizer, RSMPS) 和空气动力学粒径分析仪 3321 (aerodynamic particle sizer, APS) 组成, 粒径测量范围分别是 20 ~ 700 nm、550 nm ~ 100  $\mu\text{m}$ , 实现亚微米和微米两个粒径段粒径分布谱测量.

RSMPS 由 Long-DMA (differential mobility analyzer)、CPC (condensation particle counter) 和自制控制箱组成, 控制箱为 RSMPS 提供 DMA 所需的扫描电压和稳定的闭路循环鞘气流量. 软件系统基于 LabVIEW (laboratory virtual instrument engineering workbench) 软件编译了仪器自动控制程序, 软件实现了粒径谱仪的自动运行, 检测各仪器参数, 并对数据进行采集、存储、初步反演和显示. 粒径谱仪系统设计与搭建原理参见刘洁琼<sup>[18]</sup>关于 3 nm ~ 10  $\mu\text{m}$  气溶胶粒径分布测量仪的开发与测评.

广州禾信仪器公司生产的单颗粒气溶胶飞行时间质谱仪由进样系统、测径系统、激光电离系统和飞行时间质量分析器组成. 首先气溶胶颗粒通过空气动力学透镜加速聚焦进入真空系统, 在测径区域, 由两束测径激光测量其空气动力学直径并触发电离激光对测径的颗粒精确电离, 较高能量的脉冲激光能确保颗粒完全电离, 避免了由于颗粒物质的形状差异、表层内部成分差异所带来的影响, 电离产生的正离子和负离子通过飞行时间质量分析器检测其化学成分. 通过自适应共振神经网络算法 (adaptive resonance theory-2a, ART-2a) 进行颗粒物分类<sup>[19,20]</sup>, ART-2a 是一种高效且智能的分类方法, 模仿人脑自动学习分析行为, 将颗粒质谱信号相似度高度的归为一类, 实现了单颗粒气溶胶化学成分和颗粒物直径的同步检测.

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{PM}_1$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 与 $\text{PM}_{10}$ 观测结果

污染期间大气超标污染物以颗粒物(包含  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$ ) 为主, 其他气态污染物未出现超标现象. 大气  $\text{PM}_1$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  的质量浓度平均值分别为 36、74 和 10  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 最高浓度高达 88、136 和 223  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .  $\text{PM}_1$  占  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度的 48.6%,  $\text{PM}_{2.5}$  占  $\text{PM}_{10}$  质量浓度的 67.3%, 以细颗粒物污染为主. 由图 1 可见, 南宁市 12 月 5 ~ 11 日期间  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  与  $\text{PM}_1$  质量浓度变化趋势一致, 有明显的相关性; 颗粒物质量浓度的变化呈现一定的周期性的变化, 每日夜间至次日上午颗粒物浓度较高, 下午颗粒物浓度有下降趋势.

### 2.2 粒径谱仪观测结果

图 2 给出了污染期间平均颗粒物数浓度的粒径分布. 从中可以看出, 污染期间 20 nm ~ 10  $\mu\text{m}$  颗粒物的数浓度粒径主要集中在 23 ~ 395 nm 之间, 800 nm 以后就很少检测到. 主峰值出现在 100 nm 左

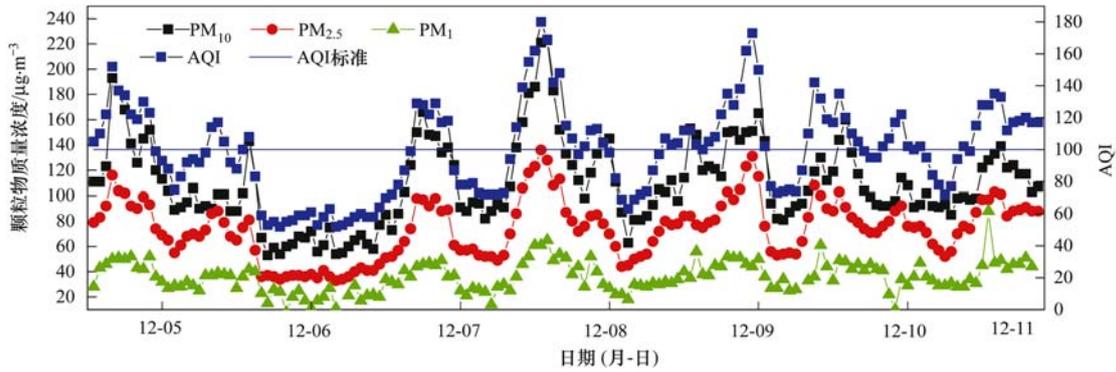


图1 12月5~11日AQI指数及颗粒物浓度变化趋势

Fig. 1 Time series of the air quality index and air pollutants between December 5<sup>th</sup> and 11<sup>th</sup>

右. 因此, 颗粒物数浓度污染以超细颗粒物为主.

新粒子生成是一次污染物氧化生成的过饱和蒸气在大气中冷凝为分子簇, 继而通过冷凝碰并形成颗粒物的过程<sup>[21,22]</sup>. 它不仅是气态污染物向颗粒态转化的重要途径, 也是大气二次转化的一个重要形式. 根据粒径谱仪每日观测结果显示 (如图3), 捕捉到3次新粒子生成现象, 即12月6日14:00左右开始至18:00, 颗粒物粒径由30~40 nm左右长大到40~110 nm左右; 12月7日13:00左右开始至18:00左右, 颗粒物粒径由30 nm左右长大到40~110 nm左右, 并一直维持较高数浓度; 12月8日

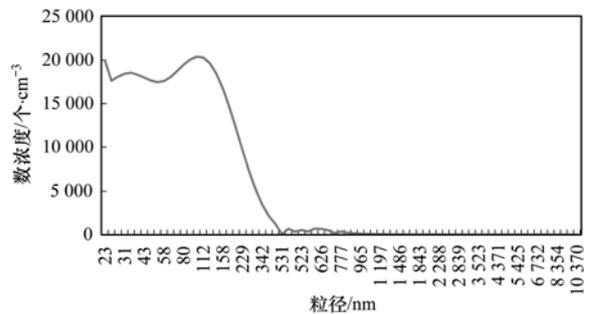


图2 12月5~11日颗粒物数浓度粒径分布

Fig. 2 Size distribution of particle number concentration between December 5<sup>th</sup> and 11<sup>th</sup>

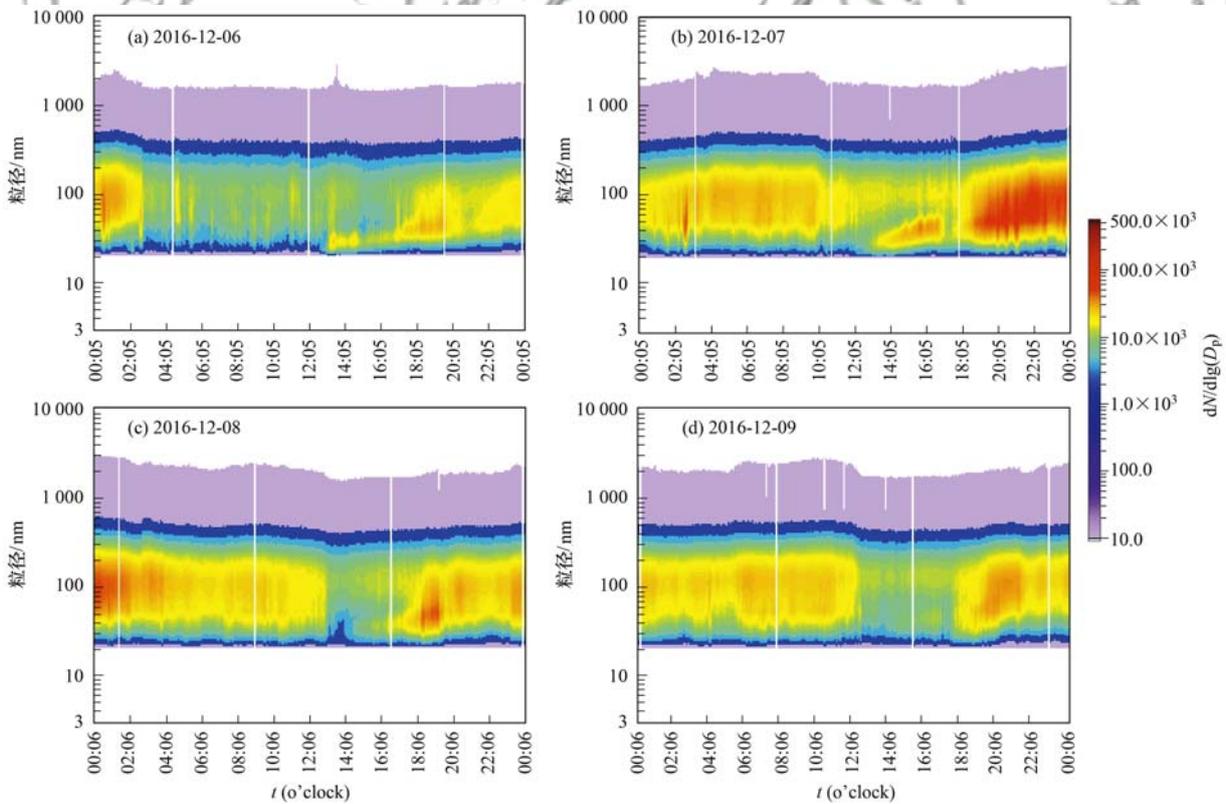


图3 12月6~9日粒径谱仪在线观测结果

Fig. 3 Particle size from online spectrometer observations between December 6<sup>th</sup> and 9<sup>th</sup>

16:00 左右开始至 18:00 左右,颗粒物粒径由 30 nm 左右长大到 40 ~ 110 nm 左右. 其中,12 月 7 日新粒子生成与增长现象尤为明显,此时也发生较严重的污染事件. 随着小粒径颗粒物碰并形成大粒径颗粒物,小粒径颗粒物数浓度降低,大粒径颗粒物数浓度升高. 对应图 1 可以看出,新粒子长大后,颗粒物质量浓度也开始升高.

具体深入分析来佐证新粒子生成时段,对比不同时段颗粒物数浓度粒径分布(如图 4),可以看出,下午 14:00、16:00 和 18:00 时颗粒物数浓度较高值主要集中分布在 23 ~ 47 nm 左右,此时主要是新的细粒子生成,粒径相对较小;晚上 20:00 ~ 次日 06:00,颗粒物数浓度较高值主要集中分布在 50 ~ 180 nm 左右,此时细粒子碰并长大,粒径逐渐变粗. 这与南京市<sup>[23]</sup>夏季几次新粒子形成时间不同,南京市新粒子形成主要是发生在 00:00 ~ 06:00 左右,颗粒物由 10 ~ 25 nm 左右集中分布变为 30 ~ 210 nm 左右.

监测期间分析黑碳(BC)数据发现,PM<sub>2.5</sub>与 BC 呈现明显的正相关性,相关系数 R 为 0.49. 从图 5

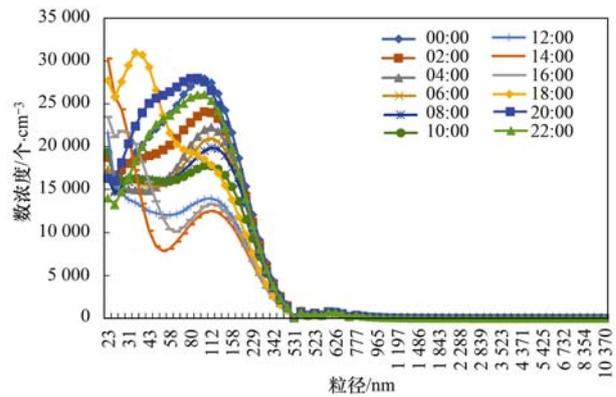


图 4 12 月 5 ~ 11 日颗粒物数浓度不同时段粒径分布

Fig. 4 Particle number concentration of the particle size distribution during the different periods between December 5<sup>th</sup> and 11<sup>th</sup>

可知,在颗粒物质量浓度升高的过程中,均呈现 BC/PM<sub>2.5</sub>上升,PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub>下降的趋势. 对应上述 3 次新粒子生成过程,BC/PM<sub>2.5</sub>也同样上升,说明在污染过程一次排放源增加,也可能受不同源的影响.

与此同时,分析气态污染物(NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub>)数据发现(见图 6),新粒子生成过程中颗粒物数浓度与 CO 和 NO<sub>2</sub> 呈现正相关性,相关系数为

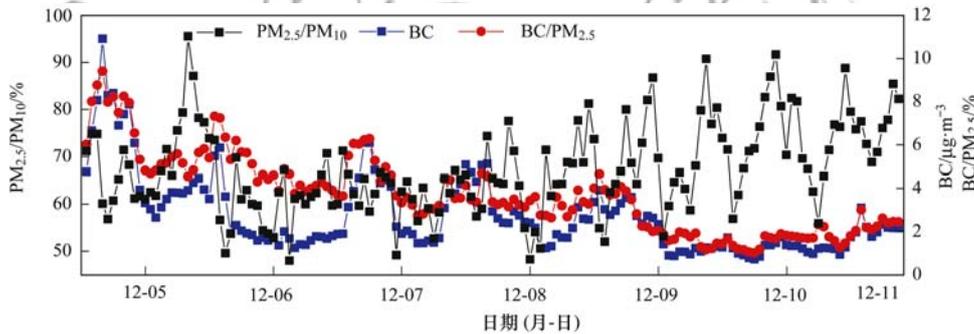


图 5 12 月 5 ~ 11 日 BC/PM<sub>2.5</sub> 及 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 质量浓度变化趋势

Fig. 5 Mass concentration trends for BC/PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> between December 5<sup>th</sup> and 11<sup>th</sup>

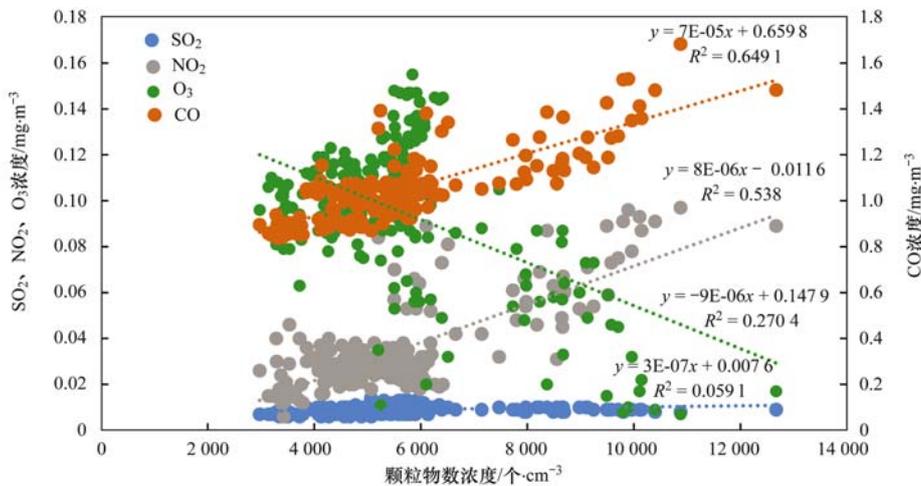


图 6 新粒子生成期间颗粒物数浓度与气态污染的相关性

Fig. 6 Correlation between the particle number concentration and gaseous pollution during new particle formation episodes

0.65 和 0.54; 与 O<sub>3</sub> 呈现负相关; 与 SO<sub>2</sub> 相关性不大. 温作赢等<sup>[24,25]</sup>的研究表明,NO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 对气溶胶成核有贡献. 因此,表明南宁市这 3 次新粒子生成与机动车尾气一次排放有关.

### 2.3 单颗粒气溶胶质谱仪源解析结果

除用粒径谱仪了解此次污染过程颗粒物粒径变化特征外,还采用单颗粒气溶胶质谱仪对南宁市 12 月 5 ~ 11 日大气 PM<sub>2.5</sub> 中的离子成分作了分析(见图 7),细颗粒物成分以 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 为主,占比分别为 22.3%、21.8%、19.5% 和 12.8%; 还含有较高的 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 和 Fe<sup>2+</sup> 等离子. 较高的硝酸根、亚硝酸根、硫酸根等离子又表明污染期间有大量的二次反应颗粒物生成,说明此次污染是一次排放和二次反应累加形成的结果. 同时扬尘源有一

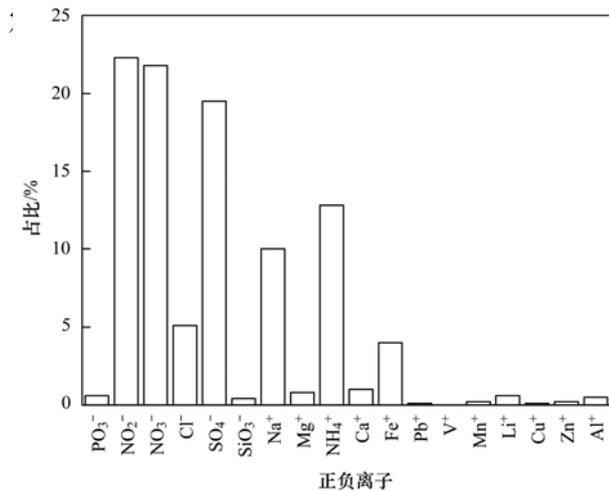


图 7 12 月 5 ~ 11 日颗粒物离子成分占比

Fig. 7 Particulate matter ion composition proportions between December 5<sup>th</sup> and 11<sup>th</sup>

贡献,对粗颗粒影响较大.

将污染期间大气 PM<sub>2.5</sub> 的化学成分进行聚类分析,共得到 9 类化学成分,其数浓度占比由大到小依次为元素碳、富钾颗粒、元素碳有机碳、矿物质、左旋葡聚糖、有机碳、其他、重金属、高分子有机物(见图 8). 其中,元素碳数浓度占比就达 30%,其主要来源于燃煤、机动车尾气以及生物质燃烧排放等;同时有较高的富钾颗粒、左旋葡聚糖和矿物质,说明污染期间燃煤、生物质燃烧、扬尘源等的污染影响较大.

根据大气 PM<sub>2.5</sub> 化学成分随时间变化的情况来看(图 9),各化学成分随时间变化趋势与 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度变化趋势相似,在 PM<sub>2.5</sub> 超标时段,各化学

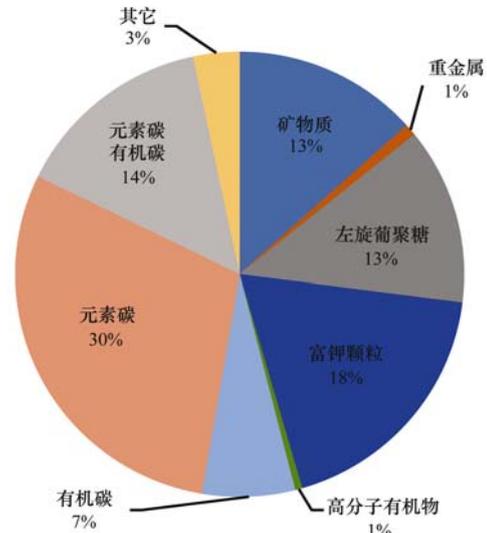


图 8 12 月 5 ~ 11 日颗粒物成分数浓度占比

Fig. 8 Number concentration of particulate matter components on December 5-11

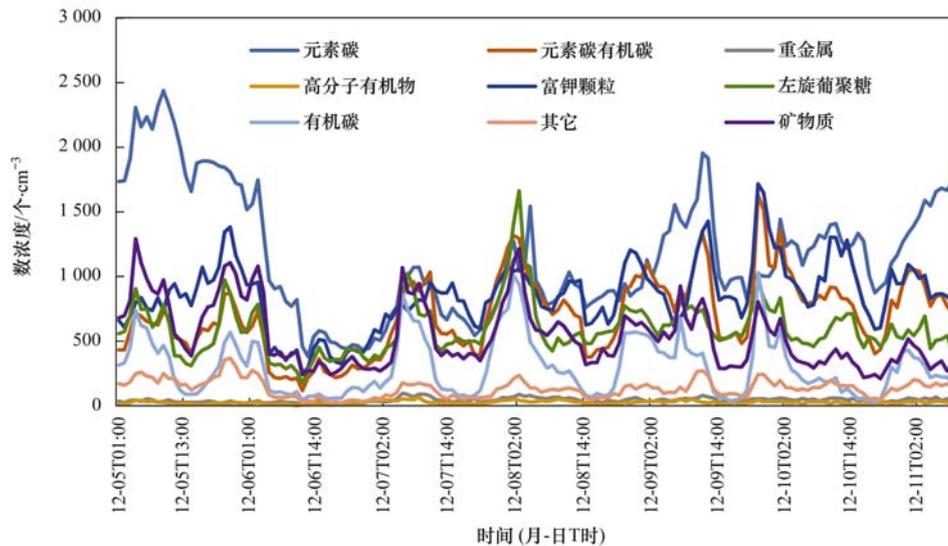


图 9 12 月 5 ~ 11 日颗粒物成分数浓度随时间变化趋势

Fig. 9 Particulate matter components and number concentration trends over time between December 5<sup>th</sup> and 11<sup>th</sup>

成分的数浓度都有增加. 3 次新粒子生成过程中 (12 月 6 日), 左旋葡聚糖、富钾颗粒、元素碳等均有上升, 说明此时有生物质燃烧等现象发生; 12 月 7 日, 新粒子长大过程对应有有机碳、元素碳、元素碳有机碳、左旋葡聚糖、富钾颗粒和矿物质均有明显上升, 说明此时有机动车尾气、燃煤燃烧、生物质燃烧和扬尘源等污染源大量排放; 12 月 8 日与 12 月 7 日类似, 说明污染都是多方共同造成的结果.

在线源解析结果表明, 此次南宁市污染过程细颗粒物来源主要为生物质燃烧源、扬尘源和燃煤源, 三者数浓度占比分别为 27.0%、18.1% 和 16.0%, 见图 10.

2.4 激光雷达观测结果

结合激光雷达观测结果, 由图 11 可见, 污染期间天气静稳, 没有明显的天气活动现象, 空中较少云分布. 从雷达图像上看同一时刻 355 的消光 (表征



图 10 5~11 日大气 PM<sub>2.5</sub> 颗粒物污染来源数浓度占比  
Fig. 10 Number concentration of PM<sub>2.5</sub> pollution sources between December 5<sup>th</sup> and 11<sup>th</sup>

细颗粒物) >532 (表征较粗颗粒物) 消光, 由此可以说明此次污染主要以细颗粒为主, 与粒径谱仪分析颗粒物粒径分布结果一致.

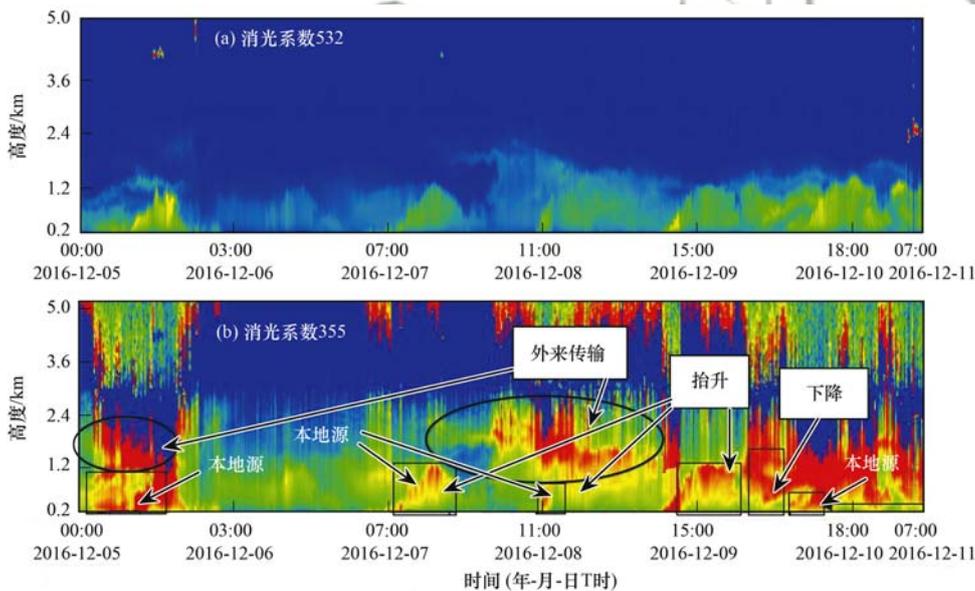


图 11 12 月 5~11 日激光雷达图

Fig. 11 Laser radar map between December 5<sup>th</sup> and 11<sup>th</sup>

颗粒物浓度较高时激光雷达的消光也偏高, 相反颗粒物浓度较低时激光雷达的消光也偏低. 由图 11 可以看出, 12 月 5 日和 8 日高空 1.2~1.8 km 左右高空有一污染气团, 可以判断此时有外来传输的污染物, 同时近地面消光也同样很高, 可以判断有本地源排放; 而在 12 月 7 日白天和 12 月 8 日午后, 近地面消光较高, 同时有抬升过程, 可以判断此时受本地污染源排放影响, 与粒径谱仪分析结果一致.

2.5 传输影响分析

12 月 8 日 11:00 和 12 月 9 日 10:00 站点上空

的气团来自于四川、贵州、广西、南宁, 见图 12, 由此可以判断, 激光雷达监测到该时段的高空污染物可能来自于这个方向, 12 月 6~9 日该地区大气环境质量呈现轻度/中度/重度污染. 12 月 5 日 08:00 站点上空的气团来自于缅甸、云南、越南、广西, 并辅以 12 月 6~7 日南宁市周围火点分布 (见图 13), 可知广西的西北/西部的火点分布较多, 尤其在越南北部, 火点集中分布. 由此可以判断生物质传输也是主要的外来源, 对南宁市空气质量有影响. 说明空气污染除了本地排放, 还有远程输送的叠加影响.



图 12 后向轨迹图

Fig. 12 Backward trajectory figure

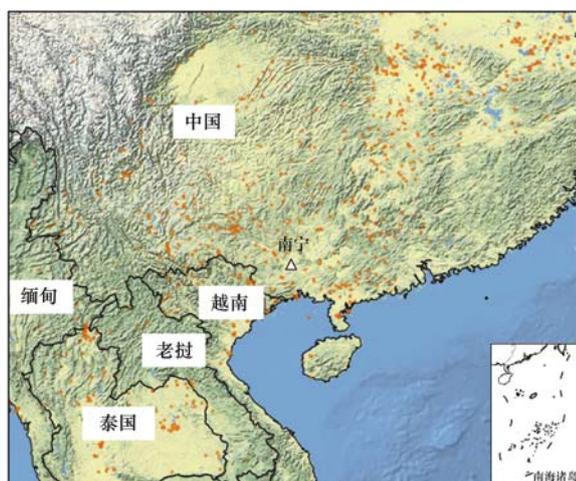


图 13 南宁市周围 12 月 6 ~ 7 日火点分布

Fig. 13 Figure Distribution around a fire in Nanning between December 6<sup>th</sup> and 7<sup>th</sup>

### 3 结论

(1) 污染期间大气超标污染物以超细颗粒物为主, 大气  $PM_{10}$  占  $PM_{2.5}$  质量浓度的 48.6%,  $PM_{2.5}$  占  $PM_{10}$  质量浓度的 67.3%, 颗粒物的数浓度粒径主要集中在 23 ~ 395 nm 之间, 主峰值出现在 100 nm 左右。

(2) 污染期间有 3 次新粒子生成现象, 下午 14:00 ~ 18:00 新粒子开始生成, 碰并长大到晚上 20:00 ~ 次日 06:00, 颗粒物粒径由 30 nm 长大到 40 ~ 110 nm 左右, 并一直维持较高数浓度。BC/ $PM_{2.5}$  以及颗粒物数浓度与 CO、NO<sub>2</sub> 的正相关性表明, 三次新粒子生成过程受机动车尾气一次排放的污染影响。

(3) 对细颗粒物化学成分在线实时溯源分析发现, 细颗粒物成分以 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 为主,

还含有较高的 Na<sup>+</sup>、Cl<sup>-</sup> 和 Fe<sup>2+</sup> 等离子, 表明污染期间有大量的二次反应颗粒物生成。成分浓度占比较大的是元素碳、富钾颗粒、元素碳有机碳、矿物质和左旋葡聚糖, 判定颗粒物来源主要为生物质燃烧源, 数浓度占比为 27.0%, 其次是扬尘源和燃煤源, 数浓度占比分别为 18.1% 和 16%。

(4) 结合激光雷达和卫星遥感分析表明此次污染以本地排放叠加外来传输影响, 污染气团主要来自于四川、贵阳、越南北部等地, 途经区域当日火点较多, 且四川、贵州等地的大气整体为污染, 认为远距离传输对此次南宁的污染过程的主要污染源 (生物质燃烧源) 有贡献。

#### 参考文献:

- [1] Wang J L, Zhang Y H, Shao M, *et al.* Quantitative relationship between visibility and mass concentration of  $PM_{2.5}$  in Beijing[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, **18**(3): 475-481.
- [2] 梁延刚, 胡文志, 杨敬基. 香港能见度、大气悬浮粒子浓度与气象条件的关系[J]. *气象学报*, 2008, **66**(3): 461-469.  
Liang Y G, Hu W Z, Yang J J. A study on the relationship among visibility, atmospheric suspended particulate concentration and meteorological conditions in Hong Kong [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2008, **66**(3): 461-469.
- [3] Zhang R Y, Khalizov A, Wang L, *et al.* Nucleation and growth of nanoparticles in the atmosphere [J]. *Chemical Reviews*, 2012, **112**(3), 1957-2011.
- [4] 顾卓良. 灰霾天气不同粒径的颗粒物污染特征分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2012, **24**(2): 31-33.  
Gu Z L. Characteristics analysis of particulate matters with different size in haze[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2012, **24**(2): 31-33.
- [5] 宋宇, 唐孝炎, 张远航, 等. 北京市大气能见度规律及下降原因[J]. *环境科学研究*, 2003, **16**(2): 10-12.  
Song Y, Tang X Y, Zhang Y H, *et al.* The study of the status and degradation of visibility in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2003, **16**(2): 10-12.
- [6] 吴兑. 近十年中国灰霾天气研究综述[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(2): 257-269.  
Wu D. Hazy weather research in China in the last decade: a review[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(2): 257-269.
- [7] 洪也, 马雁军, 李潮流, 等. 沈阳冬季灰霾日大气颗粒物元素粒径分布特征[J]. *环境科学研究*, 2011, **24**(6): 637-644.  
Hong Y, Ma Y J, Li C L, *et al.* Elemental size distribution characteristics of atmospheric particles on hazy days during winter in Shenyang[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, **24**(6): 637-644.
- [8] 段青春, 李兴华, 谭吉华, 等. 北京冬季大气颗粒物数浓度的粒径分布特征及来源[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(10): 1134-1140.  
Duan J C, Li X H, Tan J H, *et al.* Size distribution and source apportionment of atmospheric particle number concentration in winter in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*,

- 2009, **22**(10): 1134-1140.
- [9] 翟晴飞, 金莲姬, 林振毅, 等. 石家庄春季大气气溶胶数浓度和谱的观测特征[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(6): 886-891.
- Zhai Q F, Jin L J, Lin Z Y, *et al.* Observational characteristic of aerosol number concentration and size distribution at Shijiazhuang in spring season[J]. China Environmental Science, 2011, **31**(6): 886-891.
- [10] 崔虎雄, 任小龙, 张华. 上海市浦东城区冬季颗粒物数浓度及其谱分布特征[J]. 中国环境监测, 2014, **30**(6): 62-66.
- Cui H X, Ren X L, Zhang H. Size distribution properties of atmospheric aerosol particles during winter in the downtown of Pudong, Shanghai [J]. Environmental Monitoring in China, 2014, **30**(6): 62-66.
- [11] 谢小芳, 孙在, 杨文俊. 杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 436-441.
- Xie X F, Sun Z, Yang W J. Characterization of ultrafine particle size distribution in the urban atmosphere of Hangzhou in spring [J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 436-441.
- [12] 谢小芳, 孙在, 付志民, 等. 杭州市大气超细颗粒数浓度谱季节性特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 434-440.
- Xie X F, Sun Z, Fu Z M, *et al.* Study on number concentration distribution of atmospheric ultrafine particles in Hangzhou [J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 434-440.
- [13] 陈秋方, 孙在, 谢小芳. 杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(8): 2851-2856.
- Chen Q F, Sun Z, Xie X F. Distribution of atmospheric ultrafine particles during haze weather in Hangzhou [J]. Environmental Science, 2014, **35**(8): 2851-2856.
- [14] 黄祖照, 玉杰, 刘建国, 等. 广州城区大气细颗粒物粒谱分布特征分析[J]. 中国环境科学, 2012, **32**(7): 1177-1181.
- Huang Z Z, Wang J, Liu J G, *et al.* The analysis of the characterization of fine particle size distribution in urban area of Guangzhou [J]. China Environmental Science, 2012, **32**(7): 1177-1181.
- [15] 何俊杰, 张国华, 王伯光, 等. 鹤山灰霾期间大气单颗粒气溶胶特征的初步研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(8): 2098-2104.
- He J J, Zhang G H, Wang B G, *et al.* Analysis of single particle characteristics during haze events in Heshan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(8): 2098-2104.
- [16] 李梅, 李磊, 黄正旭, 等. 运用单颗粒气溶胶质谱技术初步研究广州大气粉尘污染[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(6): 632-636.
- Li M, Li L, Huang Z X, *et al.* Preliminary study of mineral dust particle pollution using a single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) in Guangzhou [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, **24**(6): 632-636.
- [17] 牟莹莹, 楼晟荣, 陈长虹, 等. 利用 SPAMS 研究上海秋季气溶胶污染过程中颗粒物的老化与混合状态[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2071-2080.
- Mu Y Y, Lou S R, Chen C H, *et al.* Aging and mixing state of particulate matter during aerosol pollution episode in autumn shanghai using a single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) [J]. Environmental Science, 2013, **34**(6): 2071-2080.
- [18] 刘洁琼. 3 nm ~ 10 μm 气溶胶粒径分布测量仪的开发与评测 [D]. 北京: 清华大学, 2014.
- Liu J Q. A spectrometer for measuring particle size distributions in the range of 3nm to 10μm [D]. Beijing: Tsinghua University, 2014.
- [19] 付怀于, 闫才青, 郑玫, 等. 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[J]. 环境科学, 2014, **35**(11): 4070-4077.
- Fu H Y, Yan C Q, Zhang M, *et al.* Application of on-line single particle aerosol mass spectrometry (SPAMS) for studying major components in fine particulate matter [J]. Environmental Science, 2014, **35**(11): 4070-4077.
- [20] 张莉, 李梅, 李磊, 等. 基于单颗粒质谱信息气溶胶分类方法的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2013, **36**(3): 190-195.
- Zhang L, Li M, Li L, *et al.* Research Progress in aerosol clustering based on single particle's mass spectrum information [J]. Environmental Science & Technology, 2013, **36**(3): 190-195.
- [21] Yue D L, Hu M, Zhang R Y, *et al.* The roles of sulfuric acid in new particle formation and growth in the mega-city of Beijing [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(10): 4953-4960.
- [22] Sipilä M, Berndt T, Petäjä T, *et al.* The role of sulfuric acid in atmospheric nucleation [J]. Science, 2010, **327**(5970): 1243-1246.
- [23] 王红磊, 朱彬, 沈利娟, 等. 南京市夏季大气气溶胶新粒子生成事件分析[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 701-710.
- Wang H L, Zhu B, Shen L J, *et al.* Atmospheric particle formation events in Nanjing during summer 2010 [J]. Environmental Sciences, 2012, **33**(3): 701-710.
- [24] 温作赢, 顾学军, 荣华, 等. NO<sub>2</sub> 对 SO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O/空气体系气溶胶成核过程的影响[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(5): 609-616.
- Wen Z Y, Gu X J, Rong H, *et al.* Effects of NO<sub>2</sub> on new particle formation in SO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O/air mixtures [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(5): 609-616.
- [25] Riccobono F, Schobesberger S, Scott C E, *et al.* Oxidation products of biogenic emissions contribute to nucleation of atmospheric particles [J]. Science, 2014, **344**(6185): 717-721.

## CONTENTS

Development of a Non-Road Mobile Source Emissions Inventory for Tianjin .....	ZHANG Yi, Andre Michel, LI Dong, <i>et al.</i> (4447)
Spatial Simulation of Black Carbon Concentrations Based on a Land Use Regression Model and Mobile Monitoring over Shanghai, China .....	PENG Xia, SHE Qian-nan, LONG Ling-bo, <i>et al.</i> (4454)
Characteristics and Sources of Elements of a PM <sub>10</sub> Measurements from a Typical Industrial City in Eastern Hubei Province .....	ZHAN Chang-lin, ZHANG Jia-quan, ZHENG Jing-ru, <i>et al.</i> (4463)
Characteristics and Source Identification of Carbonaceous Aerosols in PM <sub>2.5</sub> Measurements During Summer and Fall in Changzhou .....	YE Zhao-lian, LIU Jia-shu, LI Qing, <i>et al.</i> (4469)
Characteristics and Sources of Water Soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter During Winter in Xuzhou .....	FAN Mei-yi, CAO Fang, ZHANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (4478)
Physicochemical Properties and Sources of Atmospheric Particulate Matter During Pollution Monitoring in Nanning, China .....	LIU Hui-lin, CHEN Zhi-ming, LI Hong-jiao, <i>et al.</i> (4486)
Concentration and Size Distribution Characteristics of Culturable Bioaerosols at Various Air Quality Levels During Fall and Winter in Xi'an, China .....	LI Wan-xin, LU Rui, XIE Zheng-sheng, <i>et al.</i> (4494)
Distribution Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter and Nutrients from the Yellow Sea and Bohai Sea in Autumn .....	TANG Yong, SUN Yu-yan, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (4501)
Characteristics and Risks of Heavy Metals Content in Surface Sediment of Tidal Flat Areas in Eastern China .....	ZHANG Ming, BAO Zhen-yu, CHEN Guo-guang, <i>et al.</i> (4513)
Heavy Metals in Sediments from the Haizhou Bay Marine Ranching Based on Geochemical Characteristics .....	LI Da-peng, ZHANG Shuo, ZHANG Zhong-fa, <i>et al.</i> (4525)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Water of the Niyang River Basin .....	ZHANG Tao, CAI Wu-tian, LI Ying-zhi, <i>et al.</i> (4537)
Vertical Distribution Characteristics of Fe and Mn in Subtropical Reservoirs During Summer .....	YANG Si-yuan, ZHAO Jian, YU Hua-zhang, <i>et al.</i> (4546)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water in the Liaohe River Basin, China .....	ZHANG Xiao-jiao, BAI Yang-wei, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4553)
Effects of Optimized Fish Farming on the Sediment Nutrients of Eastern Lake Taihu .....	HE Xiao-wei, CHU Yu, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4562)
Responses of the Benthic Diatom Community to Nutrients and the Identification of Nutrient Thresholds in Three Aquatic Ecoregions of the Huntai River, Northeast China .....	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (4570)
Impacts of Environmental Conditions on the Soaking Release of Nitrogen and Phosphorus from <i>Cynodon dactylon</i> (Linn.) Pers. in the Water-level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region .....	XIAO Li-wei, ZHU Bo (4580)
Effects of Soil Microbial Diversity on the Phosphate Fraction in the Rhizosphere of <i>Phragmites communis</i> in the Yeyahu Wetland in Beijing, China .....	TENG Ze-dong, LI Min, ZHU Jing, <i>et al.</i> (4589)
Nitrification and Denitrification Potential of Benthic Sediments in a Suburban Stream under Intense Human Disturbance Scenarios .....	LI Ru-zhong, ZHENG Xia, GAO Su-di, <i>et al.</i> (4598)
Distribution of External Phosphorus in the Sedimentary Phosphorus forms Under Different Disturbances .....	CAI Shun-zhi, LI Da-peng, TANG Xin-yu, <i>et al.</i> (4607)
Effect of <i>Elodea nuttallii</i> -Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria on the Mechanism of Nitrogen Removal in Polluted River Water .....	WANG Hao, LI Zheng-kui, ZHANG Yi-pin, <i>et al.</i> (4617)
Zero-Valent Iron (ZVI) Activation of Persulfate (PS) for Oxidation of Arsenic (V) Form Aqueous Solutions .....	ZHOU Zi-mai, DENG Wen-na, YANG Yi-lin, <i>et al.</i> (4623)
Removal of Antimony from Water by Nano Zero-Valent Iron/Activated Carbon Composites .....	JIANG Ting, BAO Yue, LI Wei, <i>et al.</i> (4632)
Effect of the Flow Patterns of Main-stream Reactors on the Efficiency of Nitrification Enhancement with Bioaugmentation .....	YU Li-fang, DU Qian-qian, ZHANG Ru, <i>et al.</i> (4641)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance and the Extracellular Polymeric Substance (EPS) in a Sequencing Batch Reactor (SBR) .....	SUN Hong-wei, CHEN Cui-zhong, WU Chang-feng, <i>et al.</i> (4648)
Effects of Temperature on Shortcut Nitrification and Nitrification Activity of Nitrification in an Intermittent Aeration Sequencing Batch Reactor .....	LIU Hong, PENG Yong-zhen, LU Jiong-yuan, <i>et al.</i> (4656)
Nitrite Type Denitrifying Phosphorus Removal Capacity of Cycle Activated Sludge Technology Processes Under Different Inducing Patterns .....	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (4664)
Laboratory-scale CANON Processes Applied to Wastewater Treatment Plants .....	LI Dong, ZHAO Shi-xun, WANG Jun-an, <i>et al.</i> (4673)
Effects of Magnetic Activated Carbon with Different Particle Sizes on Sludge Granulation in a SBR System .....	XIN Xin, GUAN Lei, GUO Jun-yuan, <i>et al.</i> (4679)
Storage and Reactivation of Anaerobic Ammonium Oxidation (ANAMMOX) Sludge at Room Temperature .....	HUANG Jia-lu, WANG Xiao-long, GAO Da-wen (4687)
Microbial Population Dynamics During Sludge Granulation in a Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal System .....	GAO Jing-feng, WANG Shi-jie, FAN Xiao-yan, <i>et al.</i> (4696)
Anaerobic Reduction Process Characteristics and Microbial Community Analysis for Sulfate and Fe(II)/EDTA-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /Fe(III) EDTA .....	ZHANG Yu, WAN Fang, ZHOU Ji-ti (4706)
Treatment Efficiency and Microbial Community Diversity in a Magnetic Field Enhanced Sequencing Batch Reactor (SBR) .....	GENG Shu-ying, FU Wei-zhang, WANG Jing, <i>et al.</i> (4715)
Molecular Research of Acid-Generating Microbial Communities in Abandoned Ores in the Waste Dump of an Iron Mine in Anhui Province .....	DU Ze-rui, HAO Chun-bo, PEI Li-xin, <i>et al.</i> (4725)
Microbial Community Diversity and Differences in Cellar water of Typical Rainwater Harvesting Area .....	YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, <i>et al.</i> (4733)
Impact of the Biodegradation of 6:2 Fluorotelomer Alcohol on the Bacterial Community Structure of Surface Sediment .....	WANG Dan, HOU Zhen, ZHANG Qi, <i>et al.</i> (4747)
Degradation Process of Exogenous Naphthenic Acids and Their Effects on Microbial Community Structure in Soil .....	LIU Yan-qiu, ZHAO Yan-ran, LIU Meng-jiao, <i>et al.</i> (4756)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of the Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterial Strain DK1 .....	MU Dong-yang, JIN Peng-fei, PENG Yong-zhen, <i>et al.</i> (4763)
Mercury Release Flux and Its Influencing Factors Under Four Typical Vegetation Covers at Jinyun Mountain, Chongqing .....	YANG Guang, SUN Tao, AN Si-wei, <i>et al.</i> (4774)
Short-term Effects of Nitrogen Deposition on CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Fluxes from Wetlands in the Minjiang River Estuary .....	LI Dong-dong, TONG Chuan, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (4782)
Effects of Plastic Film Mulching on Methane and Nitrous Oxide Emissions from a Rice-Rapeseed Crop Rotation .....	SHI Jiang-lai, HAO Qing-ju, FENG Di, <i>et al.</i> (4790)
Assessment of Pollution, Sources, and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil from Urban Parks in Xi'an City, China .....	ZHOU Yan, LU Xin-wei (4800)
Spatial Distribution of Soil Particles and Heavy Metals Under Different Psammophilic Shrubs in the Ulan Buh Desert .....	DAI Yu-jie, GUO Jian-ying, DONG Zhi, <i>et al.</i> (4809)
Effects of UV-B Radiation on Soil Carbon and Nitrogen Transformation under Different Soil Moisture Contents from Two Paddy Fields .....	JIANG Meng-die, WANG Qiu-min, XU Peng, <i>et al.</i> (4819)
Various effects on the Abundance and Composition of Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in Soils in Karst Shrub Ecosystems .....	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (4828)
Remediation of Cd/Ni Contaminated Soil by Biochar and Oxalic Acid Activated Phosphate Rock .....	DUAN Ran, HU Hong-qing, FU Qing-ling, <i>et al.</i> (4836)
Effects of Repeated Freezing and Thawing and High Temperature Aging on the Solidification and Stabilization of Arsenic Contaminated Soil .....	YANG Jie, QIAN Zhao-qiu, WANG Jing (4844)
Evaluation of the Combined Removal of Heavy Metals by Saponin and Citric Acid from Municipal Sewage Sludges and Metal Stability Features .....	YE Tao, HUANG Li, ZHANG Ke-qiang, <i>et al.</i> (4850)
Interactions between Goethite and Humic Acid and the Stability of Goethite-Humic Acid Complex .....	WANG Rui, ZHU Chao-ju, XIANG Wen-jun, <i>et al.</i> (4860)
Contents and Health Risks of Organic Phosphorus Esters in Plastic Runway Products .....	YIN Hong-ling, LIU Qin, LIAO Lin-qun, <i>et al.</i> (4868)
Effects on Physico-chemical Parameters of Glycoside Hydrolase Family 6 Genes During Composting of Agricultural Waste .....	CHEN Yao-ning, GOU Yu, LI Yuan-ping, <i>et al.</i> (4874)
Effect of the Food to Mass Ratio and Hydraulic Retention Time on Hydrogen Production from Fruit and Vegetable Waste .....	LI Biao, KONG Xiao-ying, LI Lian-hua, <i>et al.</i> (4882)
Comment on Sensitivity Analysis Methods for Environmental Models .....	CHEN Wei-ping, TU Hong-zhi, PENG Chi, <i>et al.</i> (4889)