

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展 ..... 刁海玲, 赵三平, 周文 (1645)

环境损害评估: 国际制度及对中国的启示 ..... 张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)

不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示 ..... 徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)

蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展 ..... 张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)

基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究 ..... 刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)

我国东北地区地表水酸化现状 ..... 徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)

西安市对渭河水质的影响分析 ..... 于婕, 李怀恩 (1700)

极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究 ..... 叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)

应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准 ..... 韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)

长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法 ..... 蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)

温州城市降雨径流中 BOD<sub>5</sub> 和 COD 污染特征及其初始冲刷效应 ..... 王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)

影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究 ..... 余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)

香溪河库湾春季 pCO<sub>2</sub> 与浮游植物生物量的关系 ..... 袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)

紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究 ..... 雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 黄宁秋 (1761)

高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究 ..... 马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)

纳米 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 非均相 Fenton 反应催化氧化邻苯二酚 ..... 何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)

水中萘普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究 ..... 马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锬, 周丽华, 谢成屏 (1782)

酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究 ..... 康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)

镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究 ..... 柳王荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)

基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法 ..... 金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)

不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究 ..... 王金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)

壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果 ..... 张璐璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)

城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究 ..... 孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)

倒置 A<sup>2</sup>/O-MBR 处理城市污水的中试研究 ..... 张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)

不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究 ..... 袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)

短程同步硝化反硝化过程的脱氮与 N<sub>2</sub>O 释放特性 ..... 梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)

基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化 ..... 张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)

多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响 ..... 陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)

浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价 ..... 徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)

苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应 ..... 赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)

四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征 ..... 邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)

咪唑类离子液体毒性的 QSAR/QSPR 研究 ..... 赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)

宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征 ..... 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)

内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征 ..... 郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)

福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究 ..... 郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)

重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究 ..... 王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)

丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响 ..... 郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)

海洋细菌 N3 对几种赤潮藻的溶藻效应 ..... 史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)

1 株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌 LY01 的鉴定及其氧化特性研究 ..... 刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)

1 株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性 ..... 蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)

2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解 ..... 张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)

养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群 B-737 及发酵特性 ..... 裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)

1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析 ..... 陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)

黄山降水酸度及电导率特征分析 ..... 石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)

夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析 ..... 文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)

广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征 ..... 谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)

福建省三大城市冬季 PM<sub>2.5</sub> 中有机碳和元素碳的污染特征 ..... 陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)

上海市含碳大气颗粒物的粒径分布 ..... 袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘邃庆 (1995)

上海市浦东新区二次气溶胶生成的估算 ..... 崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)

沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义 ..... 钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)

厦门秋季近郊地面 CO<sub>2</sub> 浓度变化特征研究 ..... 李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)

GC-MS 和 GC-ECD 同时在线观测本底大气中的 HCFC-142b ..... 郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)

城市居家环境空气真菌群落结构特征研究 ..... 方治国, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2031)

城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究 ..... 郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)

内河多点分散码头大气污染叠加影响特征 ..... 刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)

义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究 ..... 刘瑞卿, 王钧伟 (2051)

基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究 ..... 谢元博, 李巍 (2057)

《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)

# 夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析

文彬, 银燕\*, 秦彦硕, 陈魁

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

**摘要:** 2011 年夏季在黄山 3 个不同高度上设观测点, 利用 Andersen 分级采样器同步采集大气气溶胶, 样品用离子色谱仪 (Metrohm IC) 进行分析。结果表明, 山底、山腰和山顶的平均总离子浓度分别为 13.32、10.94 和 9.97  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 大气气溶胶无机离子成分随高度增加呈递减趋势; 黄山大气气溶胶中主要离子质量浓度依次为  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^-$ ;  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  分别为最主要的阳离子和阴离子, 浓度随高度增加而递减最为显著, 两种离子浓度和在 3 个采样点中均占  $\text{PM}_{2.5}$  离子质量浓度的 75% 以上; 粗粒子中最主要的阳离子与阴离子则为  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{NO}_3^-$ 。  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  中阴阳离子线性回归线斜率近似为 1, 表明黄山大气气溶胶酸碱平衡。相关性分析表明,  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  的相关性高达 0.98, 这两种离子主要结合成  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和少量的  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  存在于颗粒物中。黄山地区气溶胶在一定程度上受到周边地区人为源的影响。后向轨迹模拟显示, 黄山夏季气团主要来源于南方沿海、东海、黄海及北方地区。由于途径重污染排放区, 北方气团细粒子离子浓度较高,  $\text{K}^+$  离子浓度近为西南气团的数倍。

**关键词:** 黄山; 气溶胶; 水溶性离子; 不同高度; 后向轨迹

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1973-09

## Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer

WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, CHEN Kui

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

**Abstract:** Aerosol was collected with Anderson cascade sampler at three altitudes of the Mount Huang in the summer 2011. Samples were analyzed by the ion chromatography (IC, Metrohm). The results showed that the mean mass concentrations of all the ions were 13.21  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 10.94  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 9.97  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , at the foot, mid height and the summit of the mountain, respectively. The mass concentration of water-soluble components of aerosol decreased with altitude. The major anion and cation of aerosols were  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{NH}_4^+$ , respectively. The descending order of mass concentration of major ionic species was:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^-$ .  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{NH}_4^+$  account for about 75% of total ionic concentrations of  $\text{PM}_{2.5}$  in three sampling sites. The concentration of  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{NH}_4^+$  decreased conspicuously with altitude. The major cation and anion of coarse mode particles were  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{NO}_3^-$ , respectively. The slope of the linear regression line between anion and cation of  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  approximates 1, indicating acid-base balance in aerosol particles. Aerosols over the region Mount Huang were influenced by anthropogenic source of surrounding areas to a certain extent. The result also suggested that the correlation between  $\text{NH}_4^+$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  was 0.98 and these ions predominantly existed in the form of  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  and  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ . Backward trajectory analysis revealed that the air mass was originated from southern coastal regions, the East China Sea, the Yellow Sea and the northern China. Due to the northern air masses go through heavily polluted areas, concentrations of water-soluble ions in these air masses were higher than that of other air masses. The concentration of  $\text{K}^+$  in northern air mass was several times higher than that in southwestern air mass.

**Key words:** Mount Huang; aerosol; water-soluble ion; different altitudes; backward trajectory

大气气溶胶对人体健康<sup>[1]</sup>、生态环境<sup>[2]</sup>和气候变化<sup>[3]</sup>都有重要影响, 是当今大气科学研究的热点。其化学组分非常复杂, 可能包含无机化合物、元素碳及有机化合物<sup>[4]</sup>。气溶胶中微量的水溶性物质, 如水溶性有机物, 都能对气溶胶活化和成云致雨起重要作用<sup>[5]</sup>。水溶性离子是气溶胶的重要组成部分, 具有吸湿性, 能促使气溶胶在低于饱和水汽压下方形成云雾滴, 因此在大气过程中起着重要作用<sup>[6]</sup>。

近几十年来国内外对气溶胶的物理、化学特性

及空间分布进行了大量研究。欧美等地较早就开始对气溶胶化学组分进行监测研究。美国大多数的研究表明<sup>[4]</sup>, 在细粒子中可以明显观测到硫酸盐、铵盐以及硝酸盐, 化石燃烧产生的元素碳、一次有机物和二次有机化合物以及某些过渡金属元

收稿日期: 2012-07-26; 修订日期: 2012-10-11

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)

作者简介: 文彬(1988~), 男, 硕士, 主要研究方向为大气气溶胶环境气候效应, E-mail: wenbinqz@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: yinyan@nuist.edu.cn

素,而在粗粒子中可以明显地观测到地壳元素,如钙、铝、硅、镁和铁等. 长江三角洲地区是我国空气污染比较严重的地区之一,国内外学者对该地区城市 and 个别背景区域气溶胶进行了研究. Wang 等<sup>[7,8]</sup>研究了南京  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  浓度特征、酸碱性、化学组分等. Wang 等<sup>[9]</sup>对上海  $PM_{2.5}$  与 TSP 季节变化、化学组成、污染来源进行了研究与探讨等. Cao 等<sup>[10]</sup>研究了杭州  $PM_{10}$  的季节变化、污染来源、化学特征. Yan 等<sup>[11]</sup>分析了临安与上甸子气溶胶浓度、化学特征等,并进行了质量闭合实验. 国内外对近地面气溶胶组分的研究较多,测量手段也成熟,但在垂直方向上研究较少,主要通过飞机、铁塔在个别地区进行气溶胶探测,对我国南方地区气溶胶污染的垂直分布研究较少,对长江三角洲背景地区气溶胶化学组分的研究更少. 黄山地处安徽南部山区,森林植被茂密,周围地区都是平原与丘陵地带,环境受人为局地影响相对较小,在黄山不同高度同时采样更具区域代表性,有利于研究高山地区边界层污染物的垂直分布特征,以及污染物在大气边界层和自由大气的交换过程,有利于更好地理解长江三角洲背景地区气溶胶化学特征.

## 1 材料与方 法

### 1.1 观测地点及仪器使用

黄山位于安徽省南部,南北长约 40 km,东西宽约 30 km,面积约 1 200 km<sup>2</sup>. 黄山处于亚热带季风气候区内,地处中亚热带北缘的常绿阔叶林、红壤黄壤地带. 由于山高谷深,气候呈垂直变化. 同时由于北坡和南坡受阳光的辐射差异较大,局部地形对其气候起主导作用,形成云雾多、湿度大、降水多的气候特点. 2011 年夏季 6~8 月在黄山不同高度设立气溶胶采样点,采样位置如图 1 所示. 由于黄山夏季主要风向为西南风,污染物易于由南向北输送,因此设立 3 个为南北走向的观测点进行采样. 山顶采样点为黄山光明顶气象观测站,海拔 1 840 m; 山腰采样点在半山寺消防宿舍区,海拔 1 351 m; 山底采样点为寨西人工影响天气示范基地,海拔 461 m. 黄山光明顶气象站年降雨量 2 369.3 mm,其中夏季平均降水量为 1 099 mm,年均雾日数为 259 d,山顶全年平均降水日数 180.6 d,在山底仅为 150~160 d. 2011 年夏季山顶平均气温为 18.4℃,平均风速为 5.3 m·s<sup>-1</sup>,山底平均气温为 24.7℃,平均风速为 0.6 m·s<sup>-1</sup>,黄山风速随高度增加而增大,500 hPa 高空和山顶观测站风场主要受东

亚副高压西北侧控制,盛行西南风. 夏季采样点相对湿度受降雨与云雾影响变化较大.

气溶胶采样使用辽阳市康洁仪器研究所生产的 FA-3 型 Anderson 气溶胶粒度分布采样器<sup>[12]</sup>. 采样器对粒子的 50% 切割空气动力学等效粒径 (EAD) 分别为:10.0、9.0、5.8、4.7、3.3、2.1、1.1、0.65 和 0.43 μm. 仪器采样流量为 28.3 L·min<sup>-1</sup>,采集时间为 24 h. 采样使用上海兴亚材料净化厂生产的 Teflon 滤膜. 将滤膜放置在每段的不锈钢托盘上,采样后使用干净自封袋封装. 气溶胶采样选择在非降水日以及非浓雾期间进行,并且在至少 2 个采样点可采集情况下进行同步采样. 由于 3 个采样点气象要素差异、仪器异常及其它不可抗拒因素的影响,3 个点采样日期不完全一致,部分为 2 个点同时采样. 山腰采集样本较少,分别在山底、山腰、山顶采集气溶胶样本 28、18 和 27 套.



图 1 黄山采样点位置分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites in the Mount Huang

### 1.2 样品分析及数据处理

取采集样品滤膜的 1/2,剪成碎片后放入 20 mL 容量的一次性 PET 塑料瓶中,加入 10 mL 去离子水,使用超声波振荡 1 h. 超声振荡过程中,每 15 min 换一次水,再使用恒温振荡器振荡 30 min,然后放置在冰箱中低温保存后待测. 每片滤膜(包括空白滤膜)都进行同样的处理. 实验使用瑞士万通 850 professional IC 型色谱仪测量各种水溶性离子成分. 仪器检测的主要离子成分为:  $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $NO_2^-$ 、 $NO_3^-$ 、 $SO_4^{2-}$ 、 $CH_3COO^-$ 、 $HCOO^-$ 、 $C_2O_4^{2-}$ 、 $Na^+$ 、 $NH_4^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ . 阳离子分离柱和保护柱型号分别为 Metrosep C4-150 和 Metrosep C4 GUARD, 阴离子分离柱和保护柱分别为 Metrosep A Supp 7-250 和 Metrosep A Supp 4/5. 阴、阳离子淋洗液分别

为:  $3.2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{CO}_3 + 1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{CO}_3$  和  $1.7 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ HNO}_3 + 0.7 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的吡啶二羧酸; 柱温为  $45^\circ\text{C}$ ; 流速为  $0.7 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  (阴离子),  $0.9 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  (阳离子); 进样体积为  $20 \mu\text{L}$ . 溶液配制和稀释均使用电阻率为  $18.2 \text{ M}\Omega$  的超纯水配制, 对测量结果进行严格的数据质量控制.  $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{CH}_3\text{COO}^-$ 、 $\text{HCOO}^-$ 、 $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  的最低检测限分别为  $0.02$ 、 $0.01$ 、 $0.01$ 、 $0.01$ 、 $0.01$ 、 $0.2$ 、 $0.2$ 、 $0.02$ 、 $0.001$ 、 $0.005$ 、 $0.001$ 、 $0.001$ 、 $0.001 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

为了进一步了解气溶胶中各离子的污染物来源, 本研究采用美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 研制的轨迹模式 HYSPLIT4<sup>[13]</sup> 和  $1^\circ \times 1^\circ$  NOAA 全球同化系统 (GDAS) 数据, 计算分析了到达观测点气团的传输路径.

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同高度水溶性离子组分特征

水溶性离子是气溶胶粒子中重要的组成成分, 在大气化学中扮演着重要角色. Whitby<sup>[14]</sup> 提出气溶

胶中细粒子与粗粒子的来源、产生及化学性质通常完全不同. 由于 Anderson 采样器没有  $2.5 \mu\text{m}$  粒径切割, 仪器粗细粒子的分界定于  $2.1 \sim 3.3 \mu\text{m}$  粒径段. 为了便于讨论, 本研究将空气动力学直径小于  $2.1 \mu\text{m}$  的气溶胶粒子视为细粒子, 大于  $2.1 \mu\text{m}$  的粒子视为粗粒子.

黄山 3 个点气溶胶粒子水溶性组分质量浓度如表 1 所示. 可见,  $\text{PM}_{10}$  中水溶性组分质量浓度在山底、山腰和山顶分别为  $17.62$ 、 $14.64$  和  $14.50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 样品  $\text{PM}_{10}$  的中位数与平均值相差较小, 表明平均值可较好代表 3 个点的浓度. 由于各个测站的垂直落差不同, 山底  $\text{PM}_{10}$  离子浓度比山顶高 20% 以上, 而山腰与山顶  $\text{PM}_{10}$  浓度较为接近. 细粒子中离子浓度在 3 个采样点的差异明显, 山底总离子质量浓度高出山腰 30%, 山腰也比山顶高 10%.  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  在 3 个采样点的变化情况, 都表明总体上气溶胶中水溶性组分质量浓度随高度递减. 山底离子浓度的标准偏差都比山腰与山顶大, 且山底离子浓度最大值都高出其他观测点  $10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 这都表明山底周边污染源的影响较大.

表 1 黄山气溶胶水溶性离子浓度统计汇总/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 1 Statistical summary of the total water-soluble ionic concentration at the Mount Huang/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	观测点	平均值	最大值	最小值	标准偏差	中位数
$\text{PM}_{10}$	山底	17.62	34.54	6.22	8.07	16.48
	山腰	14.64	22.12	6.31	4.15	14.76
	山顶	14.50	25.0	6.20	4.91	13.0
$\text{PM}_{2.5}$	山底	13.31	28.78	2.82	7.53	12.48
	山腰	10.94	18.46	3.05	3.88	11.04
	山顶	9.97	19.29	3.01	4.37	9.51

气溶胶成分的垂直变化易受大气稳定状况、污染物传输、局地气象条件、边界层发展等影响, 使得气溶胶组分呈现不同的垂直分布. 为进一步了解黄山大气气溶胶在不同高度的特性, 对气溶胶水溶性无机组分进行详细分析. 图 2 给出了黄山夏季 3 个采样点  $\text{PM}_{2.5}$  水溶性组分浓度. 可以看出, 3 个采样点气溶胶各种离子浓度比例相近, 主要离子浓度顺序排列为  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^-$ , 这几种离子的浓度和在 3 个采样点均占  $\text{PM}_{2.5}$  总离子浓度的 85% 以上, 其中最主要的阴离子成分为  $\text{SO}_4^{2-}$ , 阳离子为  $\text{NH}_4^+$ . 山底、山腰及山顶  $\text{SO}_4^{2-}$  平均浓度高达  $7.96$ 、 $6.33$  和  $5.72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\text{NH}_4^+$  平均浓度分别为  $2.58$ 、 $2.09$  和  $1.77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{NH}_4^+$  浓度和占  $\text{PM}_{2.5}$  总离子浓度的 75% 以上, 表明黄山地区  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{NH}_4^+$  对细颗粒物水溶性组分贡献率最大,

二次转化对黄山气溶胶形成方面起着重要作用. 这与很多地区的研究结果相似, 如 Putaud 等<sup>[15]</sup> 分析西欧多个地区站点的气溶胶成分发现, 细粒子中以铵盐、非海盐硫酸盐、有机粒子、黑碳为主. 而其他离子种类 ( $\text{Cl}^-$ 、 $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ ) 含量较少, 平均浓度在  $0.1 \sim 0.3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间, 对气溶胶总离子浓度贡献较少.

细粒子中不同水溶性离子种类随高度增加略有差异.  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{NH}_4^+$  作为最主要的离子成分, 浓度随高度增加而递减显著.  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  浓度随高度增加也呈递减趋势. 一般而言, 地面作为人类生活区, 存在大量的污染排放, 是气溶胶离子成分主要来源, 所以与排放源的距离越近, 越易受到污染源影响, 因此山底采样点气溶胶离子成分的浓度较高. 由图 2 可见, 山底  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度较高, 具有较大的

误差线,表明近地面层气溶胶成分受污染源影响变化更为剧烈.  $\text{SO}_4^{2-}$  的垂直分布与其他研究结果相似,如 2001 年在东亚进行的 ACE-Asia 大型观测实验发现<sup>[16]</sup>,硫酸盐在 1 km 以下污染层中浓度较高. 而  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$  浓度随高度增加变化情况则较为复杂.

不同高度粗粒子(空气动力学等效直径  $> 2.1 \mu\text{m}$ )中各离子组分质量浓度各有差异(图 3). 与  $\text{PM}_{2.1}$ 相比,粗粒子中最明显的区别为  $\text{Ca}^{2+}$  与  $\text{NO}_3^-$  浓度较高. 3 个采样点粗粒子主要离子成分一致,均为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ . 粗粒子中含量最高的阳离子为  $\text{Ca}^{2+}$ ,在山底、山腰和山顶中分别占总离子浓度的 24.33%、29.09%、21.50%. 3 个采样点粗粒子中最主要的阴离子略有不同. 山底、山腰粗粒子含量最高的阴离子为  $\text{NO}_3^-$ ,占总离子浓度的比值分别为 21.80%、18.19%,而山顶则为  $\text{SO}_4^{2-}$ . 夏季硝酸盐主要来源于气溶胶的多相反应<sup>[17]</sup>,但高温易使硝酸盐挥发,难以采集<sup>[18]</sup>,而  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  较为稳定,因而使得  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$  主要富集于粗粒子中.

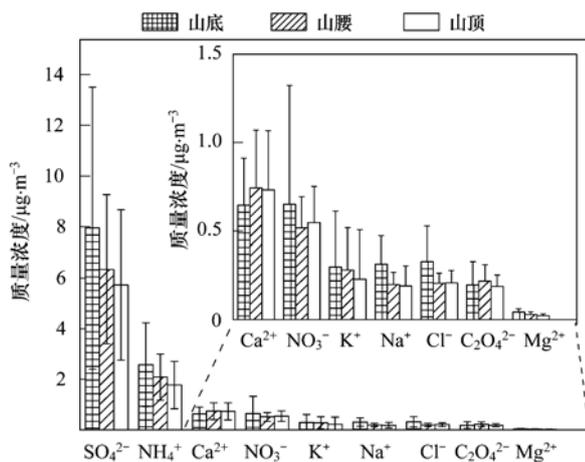


图 2  $\text{PM}_{2.1}$  中水溶性离子浓度

Fig. 2 Concentration of water-soluble ions in  $\text{PM}_{2.1}$

粗粒子中各种离子质量浓度垂直分布较为复杂. 3 个采样点对比可见,山腰  $\text{Ca}^{2+}$  浓度最高,达  $1.05 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 同时粗粒子  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$  的垂直变化与细粒子中一致,表明  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$  在粗、细粒子中来源或形成机制较为一致. 山腰观测点处于悬崖峭壁之下,周围裸露的山石对  $\text{Ca}^{2+}$  浓度有一定的贡献,使得山腰  $\text{Ca}^{2+}$  浓度较高,同时山腰部分数据缺失也可能有一定的影响.  $\text{NO}_3^-$  易受到周围环境湿影响,边界层的发展也可能直接影响污染物的垂直分布. 3 个采样点气象要素存在明显的垂直变化,如 7 月 21 日采样,3 个采样点从上至下温度分

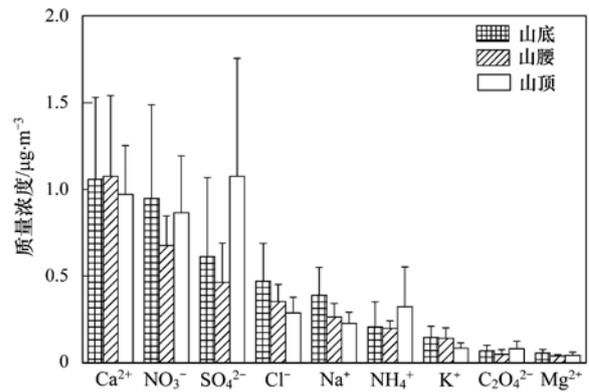


图 3  $\text{PM}_{2.1-10}$  中无机离子质量浓度

Fig. 3 Concentration of water-soluble ions in coarse particles

别为  $19.1$ 、 $21.8$ 、 $27.1^\circ\text{C}$ ,湿度分别为 83%、80%、74%,这使得不同采样点  $\text{NO}_3^-$  采集效率不同. WRF 模拟显示晴天光明顶周边地区边界层顶在 1900 m 左右维持几小时<sup>[19]</sup>,而边界顶上的逆温层会将向上传输的部分污染物阻挡在边界层顶,从而增加  $\text{NO}_3^-$  的浓度与转化效率. Morgan 等<sup>[20]</sup>进行飞机观测发现,硝酸盐在边界层内的变化较为复杂,浓度分别在近地面与边界层顶出现高值.

山顶粗粒中  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度较高,浓度分别为  $0.31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $1.11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,这与山顶特殊环境有密切关系. 山顶经常有云雾形成、消散,或有云团经过观测点,使得山顶采样有可能采集到少量云滴,从而增加采样器前几级的离子浓度. 利用 FM-100 雾滴谱仪及 VPF-730 能见度仪 24 h 监测云雾的资料发现,午夜或凌晨在观测点偶尔有云雾形成并维持. 云雾对粗粒子有一定的影响,而对细粒子影响较小. 采样期间有云雾维持时粗粒子中  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{NH}_4^+$  平均浓度较高,分别达  $1.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $0.41 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,并有 3 次采样过程  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度超过了  $2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,其他离子浓度影响非常小. 采样期间观测点无云雾时粗粒子中  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{NH}_4^+$  浓度分别为  $0.55 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $0.16 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 同时山顶平均相对湿度高达 88%,而在相对湿度高于 80% 时,撞击式采样器在颗粒物粒径切割时会有一定误差,会使得吸湿性的小颗粒物吸湿长大被采样在比自身更大的粒径段<sup>[21]</sup>.

## 2.2 与其它地区气溶胶化学组分研究的对比分析

为了更好地理解黄山地区气溶胶中离子组份特征与周边地区对黄山大气的影响,与其他地区气溶胶的研究进行对比分析(表 2). 黄山顶气溶胶浓度仅为泰山顶的 1/5,且小于龙凤山的 1/2. 玉龙雪

山、贡嘎山与长白山气溶胶细粒子中离子浓度较低,其中玉龙雪山气溶胶中  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度仅为黄山山顶的 1/4. 黄山气溶胶离子浓度也远大于瓦里关本底站的测量值,为瓦里关本底站的数十倍. 然而,黄山周边地区气溶胶浓度普遍较高,远距离传输会对黄山大气有一定的影响. 黄山以东地区如南京、杭州、上海,  $\text{PM}_{2.5}$  离子浓度都为黄山的数倍. 而临安大气本底站浓度亦为黄山山顶的 3 倍. 黄山以西地区如金沙、常德太阳山的离子浓度也非常高,达黄山离子浓度的 2~5 倍. 黄山气溶胶离子浓度介于西部较清洁地区与东部污染地区之间,在一定程度上受周边地区人为污染的影响.

与其他地区相比,黄山主要的无机离子种类有

表 2 各地区气溶胶离子浓度对比<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison between ionic concentrations of aerosol in different areas

采样地点	采样时间	离子质量浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$								
		$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{NH}_4^+$	$\text{Na}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\Sigma$
上海( $\text{PM}_{2.5}$ ) <sup>[9]</sup>	2003~2005 年	10.39	6.23	3.00	3.78	0.57	1.28	0.63	0.28	26.1
南京( $\text{PM}_{2.5}$ ) <sup>[27]</sup>	2007 年夏季	24.59	1.19	1.17	10.82	1.457*	1.23*	1.37*	0.95*	37.77
杭州( $\text{PM}_{10}$ ) <sup>[10]</sup>	2001-09~2002-08	20.10	7.12	0.94	7.03	1.15*	4.17*	4.16*	0.50*	45.17
临安(TSP) <sup>[18]</sup>	2002-08,2003-07,2004-08	16.62	1.72	0.70	5.97	1.70	3.24	1.78	0.34	32.07
金沙( $\text{PM}_{10}$ ) <sup>[28]</sup>	2006-06~2006-12	23.9	3.5	0.6	6.6	2.1	1.7	1.5	0.3	40.2
瓦里关(TSP),海拔3 816 m <sup>[29]</sup>	1994-10,1995-01	0.2	0.12	0.28	0.29	—	—	—	—	—
长白山自然保护区,海拔 763 m( $\text{PM}_{2.5}$ ) <sup>[30]</sup>	2005-12~2006-01	3.60	1.30	0.34	1.30	0.2	0.4	0.3	0.05	7.49
贡嘎山,海拔1 640 m( $\text{PM}_{2.5}$ ) <sup>[23]</sup>	2005-12~2006-01	3.50	0.60	0.17	1.50	0.07	0.34	0.24	0.04	6.46
玉龙雪山,海拔3 100 m(TSP) <sup>[31]</sup>	2010-01~2010-02	1.77	0.58	0.26	0.37	0.12	3.94	0.27	0.09	7.4
泰山顶,海拔1 536 m(TSP) <sup>[32]</sup>	2006-06	18.47	13.07	2.97	8.76	1.11	4.42	4.28	0.35	53.43
常德太阳山,海拔 563 m( $\text{PM}_{10}$ ) <sup>[28]</sup>	2006-06~2006-12	21.7	2.8	0.3	3.6	2.9	4	1.3	0.4	37
龙凤山,海拔 330 m( $\text{PM}_{10}$ ) <sup>[28]</sup>	2006-06~2006-12	13.4	2.2	0.2	2.3	2.5	3.8	0.9	0.4	25.7
黄山山顶,海拔1 840 m( $\text{PM}_{2.1}$ )	2011 年夏季	5.72	0.55	0.21	1.77	0.19	0.73	0.23	0.02	9.97

1) \* 表示气溶胶元素测量值

### 2.3 气溶胶酸碱性及来源分析

气溶胶的酸碱性作为气溶胶的重要性质之一,直接关系到人们的健康,影响森林生态系统,腐蚀建筑材料等. 大气颗粒物的酸碱性对降水的 pH 值有重要影响,它可能引起降水的酸化或中和降水的酸性<sup>[33]</sup>. 由于没有直接测量采样滤膜的酸碱度,本研究采用阴阳离子平衡法<sup>[34]</sup>来说明黄山地区气溶胶的酸碱性质.

离子平衡公式为:

$$\text{CE} = \omega(\text{Na}^+)/23 + \omega(\text{NH}_4^+)/18 + \omega(\text{K}^+)/39 + \omega(\text{Mg}^{2+})/12 + \omega(\text{Ca}^{2+})/20 \quad (1)$$

$$\text{AE} = \omega(\text{SO}_4^{2-})/48 + \omega(\text{NO}_3^-)/62 + \omega(\text{Cl}^-)/35.5 + \omega(\text{C}_2\text{O}_4^{2-})/44 \quad (2)$$

式中,CE 和 AE 分别为阳离子和阴离子的当量浓度. 气溶胶酸碱性可由线性回归线斜率  $k$  来衡量.

一定差别,这与各地区污染源的贡献有关. 城市中交通污染排放明显,  $\text{NO}_3^-$  比例明显较高,如广州夏季霾天  $\text{PM}_{10}$  中  $\text{NO}_3^-$  浓度高达  $16.50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,仅次于  $\text{SO}_4^{2-}$ <sup>[22]</sup>,而非霾天最主要的阴阳离子种类与黄山山顶一致. 高山站或大气本底站受周边污染情况不同,主要无机离子种类略有差异. 泰山地处华北平原,区域污染物排放浓度较高,  $\text{NO}_3^-$  高达  $13.07 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 黄山人为活动影响较小,汽车尾气、化石燃料燃烧等对  $\text{NO}_3^-$  的贡献相对较少,  $\text{NO}_3^-$  浓度低于泰山山顶的 1/10. 黄山气溶胶主要是以  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{NH}_4^+$  为主,这与大部分高山气溶胶组分的研究一致,如贡嘎山<sup>[23]</sup>、日本富士山<sup>[24]</sup>、美国大烟山<sup>[25]</sup>、瑞士少女峰<sup>[26]</sup>等地区.

图 4 给出 3 个采样点每组样品  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.1}$  中 CE、AE 值,可见,阴阳离子浓度具有较好的相关性,3 个点  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.1}$  相关系数  $r$  均大于 0.8,表明所分析的粒子中水溶性组分为主要种类,无重要离子遗漏. 可见,山底、山腰、山顶  $\text{PM}_{10}$  中斜率  $k$  分别为 0.98、0.98 和 1.07,  $\text{PM}_{2.1}$  中斜率  $k$  分别为 1.08、1.09 和 1.04,3 个采样点  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.1}$  结果较为一致,表明黄山大气气溶胶中酸碱平衡,并未表现出较强酸性或碱性. 黄山以东如南京<sup>[7]</sup>  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  均呈现较强的酸性,上海<sup>[9]</sup> 细粒子略微呈酸性. 而黄山地区与临安大气本底站<sup>[35]</sup> 气溶胶酸碱平衡,表现一致,可能与动植物活动及农业生产排放的氨气足以中和  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  有关. 上述结果也说明长江三角洲区域污染对黄山气溶胶酸碱性影响不明显.

3 个采样点  $\text{PM}_{10}$  中都含有高浓度的  $\text{NH}_4^+$ 、

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. 为了进一步分析两者之间的关联,对 3 个采样点的数据进行线性回归计算. 相关性分析发现这两种离子的相关性达到 0.98 以上,线性回归方程显示(图 5)3 个采样点的斜率分别为 3.45、3.29、

3.09,大于 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 完全结合形成(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的质量比率 2.75,说明 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 主要以结合形成的(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和少量 NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> 而存在于颗粒物中.

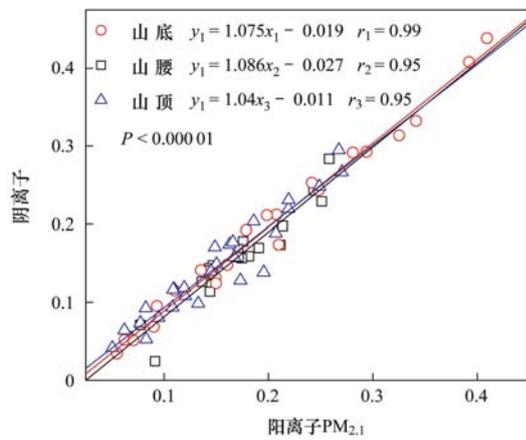
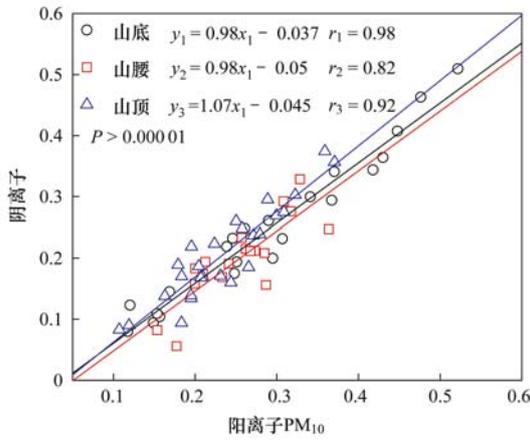


图 4 PM<sub>10</sub>与 PM<sub>2.1</sub>中阴阳离子平衡

Fig. 4 Equivalent between anions and cations in PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.1</sub>

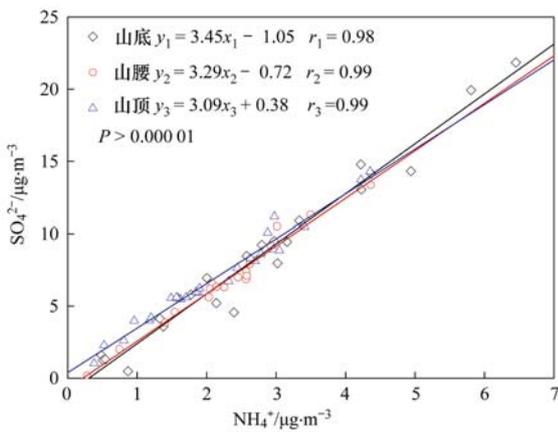
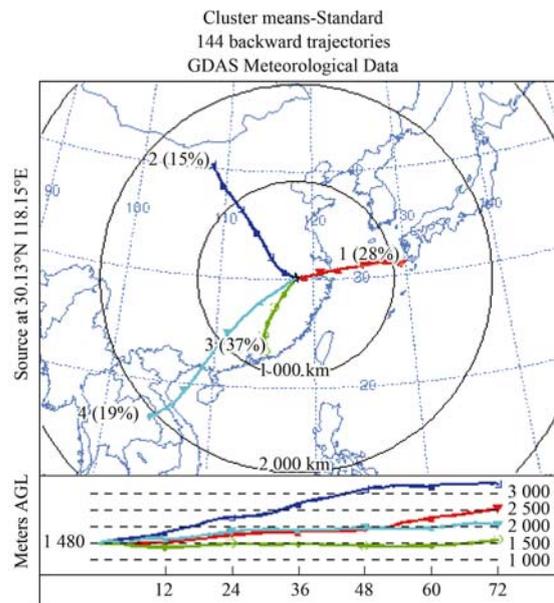


图 5 PM<sub>10</sub>中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的相关性

Fig. 5 Correlation between NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in PM<sub>10</sub>

黄山地区受局地人为源的影响不明显,大气气溶胶成分主要受自然源与人为源的远距离传输共同影响. 为了进一步了解这些化学组分的来源,运用 HYSPLIT4 轨迹模式模拟了观测期间影响黄山的主要空气团来源. 由于气溶胶在大气中的典型生命期为 3~10 d<sup>[36]</sup>,所以本研究只计算后向 72 h 气团轨迹. 黄山顶观测点海拔 1 840 m,其后向轨迹模拟能代表黄山大气整体的来源方向. 采样期间每天每 6 h 模拟一次,模拟高度为黄山顶海拔高度 1 840 m,即黄山平均地面相对高度 1 480 m,共获得 144 条后向轨迹. 轨迹分型结果(图 6)显示,气团主要来源于中南半岛、南方沿海、东海、黄海及北方地区. 由于夏季季风环流的影响,黄山风向主要以西南风

为主. 采样期间有 55% 以上的气团来源于黄山以南,少量气团来源于其他方向.



Meters AGL 为轨迹相对地面高度

图 6 黄山顶夏季后向轨迹模拟

Fig. 6 Major air mass backward trajectories at summit of the Mount Huang

### 2.4 不同气团 PM<sub>2.1</sub>组分特征的个例分析

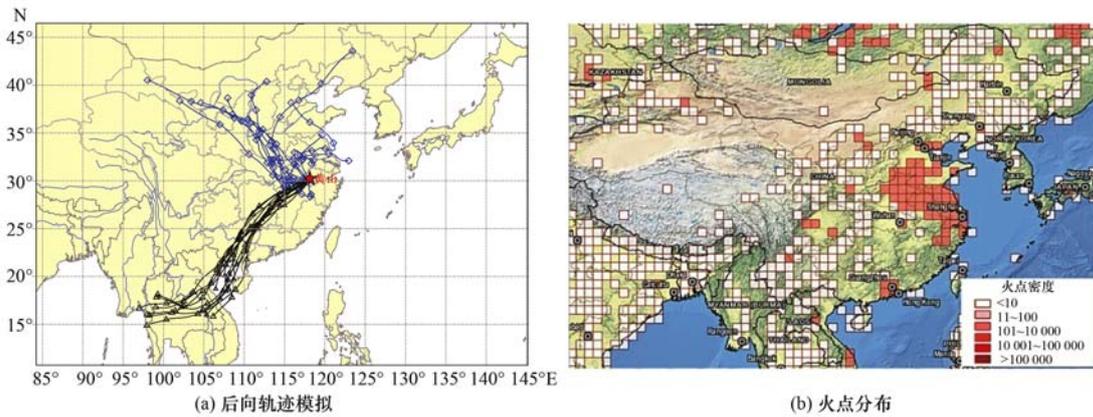
观测期间人为源对气溶胶水溶性离子成分的贡献时高时低,如 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、K<sup>+</sup> 偶尔出现异常偏高. 不同日期采集的气溶胶组分各有差异,这与气溶胶的来源密切相关. PM<sub>2.1</sub> 作为黄山大气气

溶胶的主要组成部分,同时  $PM_{2.1}$  对人体的健康危害较大,因此选取北方和西南两种不同气团控制黄山地区的情况,对黄山地区  $PM_{2.1}$  组分进行详细分析.

选取 6 月 7、8 及 27 日,代表北方气团,而 7 月 3、4 及 6 日代表南方气团(图 7). 由于来源不同,两种气团中各种离子比例与浓度差异较大(图 8). 北方气团  $PM_{2.1}$  中离子浓度较高,山顶  $PM_{2.1}$  离子浓度高达  $20.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,而在西南气团控制下,山顶  $PM_{2.1}$  的总离子浓度为  $9.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 两种气团细粒子中主要的阳离子与阴离子成分为  $NH_4^+$  和  $SO_4^{2-}$ . 北方气团影响下  $PM_{2.1}$  离子浓度约为西南气团的两倍,其中北方气团控制下山底  $SO_4^{2-}$ 、 $NH_4^+$  分别高达  $17.51$  和  $5.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 北方气团中  $SO_4^{2-}$  和  $NH_4^+$  占总离子浓度比例均高于西南气团. 北方气团控制下 3 个采样点细粒子的主要离子成分一致,均为  $SO_4^{2-}$ 、 $NH_4^+$ 、 $K^+$ 、 $Ca^{2+}$ , 占总离子浓度的 85% 以

上. 与北方气团相比,西南气团控制下细粒子的主要离子成分略有不同,3 个采样点离子浓度大小排列为  $SO_4^{2-} > NH_4^+ > NO_3^- > Ca^{2+}$ , 也占总离子浓度的 85% 以上.

与西南气团相比,北方气团中较为明显的特征是  $K^+$  离子浓度较高,山底、山腰及山顶测站的浓度分别为  $0.95$ 、 $0.77$ 、 $0.83 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,为西南气团控制下  $K^+$  浓度 3~7 倍.  $K^+$  主要来源于生物质燃烧、土壤、燃煤与燃油以及海洋源等<sup>[37]</sup>,特别是生物质燃烧产生的  $K^+$  含量较高<sup>[38]</sup>. 图 7 为卫星监测的东亚地区火点图,其中显示我国出华北平原夏季火点密集. 夏季华北地区农作物收割,有大量的秸秆焚烧,燃烧产生的大量钾离子主要分布在细粒子中<sup>[9, 39]</sup>. 本研究计算的北方气团细粒子中含有较高浓度的  $K^+$ ,表明北方气团控制下气溶胶中  $K^+$  主要是华北平原生物质燃烧的贡献.



(a) 中蓝色线为 6 月 7、8 日及 27 日后向轨迹,黑色线为 7 月 3、4 日及 6 日的后向轨迹,火点分布来源于火点网站(<http://firefly.geog.umd.edu/firemap/>)

图 7 采样期间山顶后向轨迹模拟与火点分布

Fig. 7 Air mass backward trajectories at summit and distribution of fire sites during sampling period

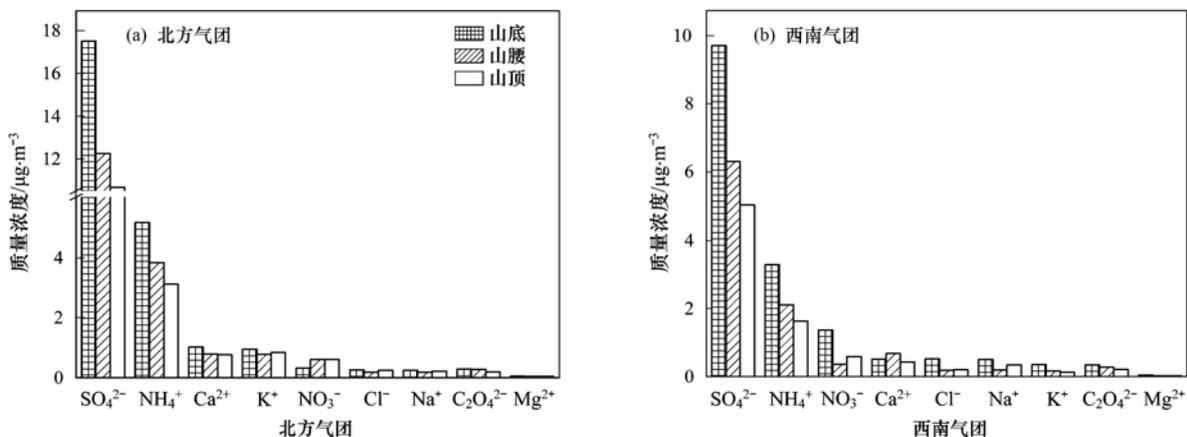


图 8 不同来源  $PM_{2.1}$  中各离子浓度

Fig. 8 Concentration of fine particle of different origins

华北平原人口稠密,工业生产旺盛、农业活动密集,排放的各种污染物浓度都较高<sup>[40]</sup>. 曹国良等<sup>[41]</sup>计算的中国区域颗粒物及污染气体的排放清单显示,山西、河南、山东、河北等省各类污染排放量都较大. 虽然北方气团大部分来源于西北地区,较为清洁,但大部分气团途经山西、河南等重污染地区,其中部分气团途经山东、江苏等地区. 气团经过重污染地区时,会携带部分污染物到达观测点,因此使得北方气团控制黄山地区时,气溶胶离子浓度较高.

### 3 结论

(1)黄山地区大气气溶胶中无机成分含量随高度显著递减,山底、山腰、山顶的  $PM_{2.1}$  总离子浓度分别为 13.32、10.94、9.97  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 黄山地区大气气溶胶中主要的阳离子和阴离子分别为  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{SO}_4^{2-}$ , 主要离子浓度依次为  $\text{SO}_4^{2-} > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^-$ . 二次离子为黄山气溶胶水溶性离子的主要组分,  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{NH}_4^+$  之和在不同高度的采样点中均占  $PM_{2.1}$  总离子浓度的 75% 以上,其它离子种类贡献相对较小.

(2)细粒子中  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{NH}_4^+$  浓度随高度增加而递减显著,  $\text{K}^+$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  随高度的增加也呈递减趋势,而  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$  浓度随高度增加变化较为复杂. 粗粒子中含量最高的阳离子和阴离子分别为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NO}_3^-$ , 各离子种类随高度增加变化情况复杂. 山顶云雾的影响会增大粗粒中  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{NH}_4^+$  浓度.

(3)黄山气溶胶离子浓度介于西部较清洁地区与东部污染地区之间,在一定程度上受周边地区人为污染的影响. 各地区受污染程度不一,主要的离子成分略有差异,但黄山气溶胶主要离子种类与大部分高山地区研究较为一致.

(4)黄山大气气溶胶酸碱平衡,长江三角洲地区对黄山气溶胶酸碱性的影响不明显. 3 个采样点  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  的相关性均高达 0.98, 计算显示  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  主要以结合成  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和少量的  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  而存在于颗粒物中. 夏季黄山气团主要来源于中南半岛、南方沿海、东海、黄海及北方地区.

(5)个例分析显示,北方气团与西南气团中  $PM_{2.1}$  离子浓度差异明显. 由于途径重污染排放区,北方气团细粒子离子浓度普遍较高. 夏季华北平原

生物质燃烧的贡献,使得  $\text{K}^+$  在北方气团中离子浓度为西南气团数倍.

### 参考文献:

- [ 1 ] Pope C A, Dockery D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect [ J ]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2006, 56(6): 709-742.
- [ 2 ] Matson P, Lohse K A, Hall S J. The globalization of nitrogen deposition: consequences for terrestrial ecosystems [ J ]. Ambio: A Journal of the Human Environment, 2002, 31(2): 113-119.
- [ 3 ] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing [ A ]. In: Climate change 2007: The physical science basis, contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [ M ]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 129-234.
- [ 4 ] 美国环境保护署, 联邦环境评估中心办公室, 美国环境保护署研究和发发展办公室. 北京市环境保护局, 北京市环境保护科学研究院, 北京市环境保护监测中心(译). 颗粒物环境空气质量 USEPA 基准(上卷) [ M ]. 北京: 中国环境科学出版社, 2008. 11-103.
- [ 5 ] Andreae M O, Rosenfeld D. Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part I. The nature and sources of cloud-active aerosols [ J ]. Earth-Science Reviews, 2008, 89(1-2): 13-41.
- [ 6 ] 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. 269-364.
- [ 7 ] Wang G H, Wang H, Yu Y J, et al. Chemical characterization of water-soluble components of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  atmospheric aerosols in five locations of Nanjing, China [ J ]. Atmospheric Environment, 2003, 37(21): 2893-2902.
- [ 8 ] Wang G H, Huang L M, Gao S X, et al. Characterization of water-soluble species of  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  aerosols in urban area in Nanjing, China [ J ]. Atmospheric Environment, 2002, 36(8): 1299-1307.
- [ 9 ] Wang Y, Zhuang G S, Zhang X Y, et al. The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of  $PM_{2.5}$  and TSP aerosol in Shanghai [ J ]. Atmospheric Environment, 2006, 40(16): 2935-2952.
- [ 10 ] Cao J J, Shen Z X, Chow J C, et al. Seasonal variations and sources of mass and chemical composition for  $PM_{10}$  aerosol in Hangzhou, China [ J ]. Particuology, 2009, 7(3): 161-168.
- [ 11 ] Yan P, Zhang R J, Huan N, et al. Characteristics of aerosols and mass closure study at two WMO GAW regional background stations in eastern China [ J ]. Atmospheric Environment, 2012, 60: 121-131.
- [ 12 ] Tanner P A, Law P T, Tam W F. Comparison of aerosol and dry deposition sampled at two sites in Southern China [ J ]. Journal of Aerosol Science, 2001, 32(4): 461-472.
- [ 13 ] Draxler R R, Rolph G D. HYSPLIT (Hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory) Model access via NOAA ARL READY. Website [ Z ]. NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD. <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>. 2003.
- [ 14 ] Whitby K T. The physical characteristics of sulfur aerosols [ J ].

- Atmospheric Environment, 1978, **12**(1-3): 135-159.
- [15] Putaud J P, Raes F, Van Dingenen R, *et al.* A European aerosol phenomenology 2: chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe [J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(16): 2579-2595.
- [16] Bahreini R, Jimenez J L, Wang J, *et al.* Aircraft-based aerosol size and composition measurements during ACE-Asia using an Aerodyne aerosol mass spectrometer [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, **108**(D23): 8645.
- [17] 叶兴南, 陈建民. 大气二次细颗粒物形成机理的前沿研究 [J]. 化学进展, 2009, **21**(Z1): 288-296.
- [18] 张养梅, 颜鹏, 杨东贞, 等. 临安大气气溶胶理化特性季节变化 [J]. 应用气象学报, 2007, **18**(5): 635-644.
- [19] 张小培. 黄山顶大气气溶胶粒子来源和输送过程的数值模拟 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [20] Morgan W T, Allan J D, Bower K N, *et al.* Vertical distribution of sub-micron aerosol chemical composition from North-Western Europe and the North-East Atlantic [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, **9**(15): 5389-5401.
- [21] Fang C P, McMurry P H, Marple V A, *et al.* Effect of flow-induced relative humidity changes on size cuts for sulfuric acid droplets in the microorifice uniform deposit impactor (MOUDI) [J]. Aerosol Science and Technology, 1991, **14**(2): 266-277.
- [22] Tan J H, Duan J C, Chen D H, *et al.* Chemical characteristics of haze during summer and winter in Guangzhou [J]. Atmospheric Research, 2009, **94**(2): 238-245.
- [23] 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 等. 贡嘎山大气气溶胶中水溶性无机离子的观测与分析研究 [J]. 环境科学, 2009, **30**(1): 9-13.
- [24] Suzuki I, Hayashi K, Igarashi Y, *et al.* Seasonal variation of water-soluble ion species in the atmospheric aerosols at the summit of Mt. Fuji [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(34): 8027-8035.
- [25] Lee T, Yu X Y, Kreidenweis S M, *et al.* Semi-continuous measurement of PM<sub>2.5</sub> ionic composition at several rural locations in the United States [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(27): 6655-6669.
- [26] Henning S, Weingartner E, Schwikowski M, *et al.* Seasonal variation of water-soluble ions of the aerosol at the high-alpine site Jungfraujoch (3580 m asl) [J]. Journal of Geophysical Research, 2003, **108**(D1): 4030.
- [27] 银燕, 童尧青, 魏玉香, 等. 南京市大气细颗粒物化学成分分析 [J]. 大气科学学报, 2009, **32**(6): 723-733.
- [28] 栾玉荣. 我国多站点主要水溶性气溶胶的空间分布和时间变化特征 [D]. 北京: 中国气象科学研究院, 2008.
- [29] 杨东贞, 于晓岚, 房秀梅, 等. 区域站和基准站气溶胶的分析 [J]. 应用气象学报, 1996, **7**(4): 396-405.
- [30] 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 等. 长白山 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子观测研究 [J]. 环境化学, 2011, **30**(4): 812-815.
- [31] Meng Z, Seinfeld J H, Saxena P, *et al.* Atmospheric gas-aerosol equilibrium: IV. thermodynamics of carbonates [J]. Aerosol Science and Technology, 1995, **23**(2): 131-154.
- [32] 徐宏辉, 王跃思, 杨勇杰, 等. 泰山顶夏季大气气溶胶中水溶性离子的浓度及其粒径分布研究 [J]. 环境科学, 2008, **29**(2): 2305-2309.
- [33] 沈振兴, 霍宗权, 韩月梅, 等. 采暖期和非采暖期西安大气颗粒物中水溶性组分的化学特征 [J]. 高原气象, 2009, **28**(1): 151-158.
- [34] 姚青, 孙玫玲, 张长春, 等. 天津大气气溶胶化学组分的粒径分布和垂直分布 [J]. 气象科技, 2008, **35**(6): 692-696.
- [35] Wang T, Wong C H, Cheung T F, *et al.* Relationships of trace gases and aerosols and the emission characteristics at Lin'an, a rural site in eastern China, during spring 2001 [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, **109**(D19): D19S05.
- [36] Meinrat O A. Chapter 10 Climatic effects of changing atmospheric aerosol levels [J]. World Survey of Climatology, 1995, **16**: 347-398.
- [37] 陈永桥, 张逸, 张晓山. 北京城乡结合部气溶胶中水溶性离子粒径分布和季节变化 [J]. 生态学报, 2005, **25**(12): 3231-3236.
- [38] Raveendran K, Ganesh A, Khilar K C. Influence of mineral matter on biomass pyrolysis characteristics [J]. Fuel, 1995, **74**(12): 1812-1822.
- [39] 王丹, 屈文军, 曹国良, 等. 秸秆燃烧排放颗粒物的水溶性组分分析及其排放因子 [J]. 中国粉体技术, 2007, **13**(5): 31-34.
- [40] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, **9**(14): 5131-5153.
- [41] 曹国良, 张小曳, 龚山陵, 等. 中国区域主要颗粒物及污染气体的排放源清单 [J]. 科学通报, 2011, **56**(3): 261-268.

## CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies .....	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China .....	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China .....	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective .....	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China .....	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China .....	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River .....	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011 .....	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River .....	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI .....	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD <sub>5</sub> and COD in Urban Runoff of Wenzhou City .....	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters .....	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO <sub>2</sub> and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring .....	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment .....	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate .....	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> -H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> System .....	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products .....	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud .....	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment .....	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring .....	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors .....	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water .....	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties .....	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A <sup>2</sup> /O-MBR Process .....	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors .....	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N <sub>2</sub> O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process .....	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples .....	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i> .....	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province .....	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds .....	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province .....	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids .....	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China .....	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia .....	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province .....	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites .....	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings .....	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China .....	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage .....	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics .....	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether .....	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics .....	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011 .....	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang .....	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer .....	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou .....	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM <sub>2.5</sub> During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China .....	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China .....	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai .....	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event .....	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO <sub>2</sub> Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China .....	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method .....	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing .....	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant .....	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port .....	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal .....	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing .....	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

# 《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)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行