

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 排放测量 ..... 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子珍, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)

黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合 ..... 陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)

沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究 ..... 苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)

南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析 ..... 秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)

太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征 ..... 曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)

2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系 ..... 程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)

机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成 ..... 袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)

DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响 ..... 楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)

紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附 ..... 李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)

三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征 ..... 江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)

三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 ..... 王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)

高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例 ..... 孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)

不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应 ..... 季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)

丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估 ..... 赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)

滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价 ..... 王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)

粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险 ..... 阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)

鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应 ..... 刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)

周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响 ..... 贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)

溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响 ..... 王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)

微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响 ..... 李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)

城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响 ..... 唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)

两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究 ..... 孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)

巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II) ..... 谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)

改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征 ..... 唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)

UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性 ..... 任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)

对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究 ..... 王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)

高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性 ..... 牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)

硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响 ..... 周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)

单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响 ..... 马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)

钛盐混凝剂调理对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制 ..... 王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)

城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律 ..... 孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)

低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析 ..... 信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆锋 (2259)

微丝菌 (*Microthrix parvicella*) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化 ..... 王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)

基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响 ..... 吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)

1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性 ..... 黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)

长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征 ..... 韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)

有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响 ..... 张名蒙, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)

生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响 ..... 张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘思新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)

多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源 ..... 孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)

苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征 ..... 陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)

河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 ..... 刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)

杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价 ..... 龚丹丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)

土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力 ..... 田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)

添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响 ..... 陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)

应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响 ..... 尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽烽, 孙国新, 崔岩山 (2353)

不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系 ..... 辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)

芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响 ..... 潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚闾, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)

维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化 ..... 徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)

苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素 ..... 许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)

g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> 复合物的制备及可见光催化降解 MO ..... 张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)

海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价 ..... 耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)

《环境科学》征订启事(2130) 《环境科学》征稿简则(2251) 信息(2178,2344)

# 南京夏秋季节大气干降水水溶性离子特征及来源分析

秦阳, 朱彬\*, 邹嘉南, 庞博

(南京信息工程大学, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶-云-降水重点开放实验室, 南京 210044)

**摘要:** 本研究利用采集的 2014 年 7~10 月南京地区 84 个有效干沉降样品, 探讨了南京夏秋季节大气干沉降中水溶性离子的化学组成及其来源。结果表明南京夏秋季干沉降样品平均 pH 为 6.2, 干沉降偏中性。Ca<sup>2+</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 是主要的阳离子, 日均浓度分别为 115.7 μeq·L<sup>-1</sup> 和 31.2 μeq·L<sup>-1</sup>, 分别占阳离子总量的 68.3% 和 18.6%。阴离子以 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Cl<sup>-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 为主, 日均浓度为 30.4、20.7 和 18.7 μeq·L<sup>-1</sup>, 共占总阴离子的 89.2%。干沉降浓度变化受温度湿度等气象条件和污染气团输送共同作用的影响, 其中本地气团对干沉降污染的影响较大, 干沉降污染具有局地性。南京夏秋季节固定源(燃煤)对大气干降水水溶性离子的贡献大于移动排放源(机动车), 8 月因举办青奥会而采取的环境管控措施对固定源的影响大于移动源。主要离子来源分析表明 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 大部分源自于人为排放, Cl<sup>-</sup> 主要为海洋输入, K<sup>+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 主要来自陆相输入。

**关键词:** 干沉降; 水溶性离子; 化学特征; 来源; 南京

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2025-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.06.004

## Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing

QIN Yang, ZHU Bin\*, ZOU Jia-nan, PANG Bo

(Key Laboratory for Aerosol-Cloud- Precipitation of China Meteorological Administration, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** A total of 84 effective dry deposition samples were collected from July to October, 2014 in Nanjing, and the chemical composition and source apportionment of water-soluble ions dry deposition in the summer and autumn season were discussed. The results indicated that the average pH was 6.2, and the dry deposition samples usually appeared neutral. Ca<sup>2+</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> were the major cations and their average daily concentrations were 115.7 μeq·L<sup>-1</sup> and 31.2 μeq·L<sup>-1</sup>, accounting for 68.3% and 18.6% of total cations, respectively. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> were the main anions, and their average daily concentrations were 30.4, 20.7 and 18.7 μeq·L<sup>-1</sup>, a total of 89.2% of the total anions, respectively. High temperature and humidity of meteorological factors and contaminated air mass affected dry deposition. Local air mass had greater impact on dry deposition pollution, which indicated that dry deposition pollution had local property. In summer and autumn seasons in Nanjing, the stationary sources had more contributions to atmospheric dry deposition of water-soluble ions than mobile sources, while the environmental control measures for the Nanjing Youth Olympic Games had greater effect on stationary sources than mobile sources. Studies of the origins of major ions indicated that SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> were mostly attributed by the anthropogenic activities, and Cl<sup>-</sup> was mainly from ocean sources, while K<sup>+</sup> and Mg<sup>2+</sup> were mostly from the terrestrial input.

**Key words:** dry deposition; water-soluble ions; chemical characteristics; source apportionment; Nanjing

大气沉降是大气气溶胶去除机制的主要途径。其中, 在没有降水情况下通过重力沉降与植物、建筑物或地面(土壤)相碰撞而被俘获的过程称为干沉降<sup>[1]</sup>。干沉降是清除大气气溶胶及其前体物和中间产物的主要汇机制, 对维持大气成分相对稳定起到非常重要的作用<sup>[2]</sup>。

国内外对大气干沉降开展了较多的研究, Bobbink 等<sup>[3]</sup>研究表明干沉降直接影响空气中污染物浓度的时空分布。胡正义等<sup>[4]</sup>和 Wang 等<sup>[5]</sup>研究表明干沉降是生态系统从大气中获得营养元素(如硫素和氮素)的重要过程之一。Tai 等<sup>[6]</sup>在研究芝加哥地区干沉降粒径形状后发现, 市区干沉降颗粒形状较城郊不规则。Zufall 等<sup>[7]</sup>和 Biryukov 等<sup>[8]</sup>研究

发现干沉降总质量是受大气粗颗粒物控制。Inomata 等<sup>[9]</sup>研究表明气象因素与当地排放源对于干沉降浓度影响较大。Balestrini 等<sup>[10]</sup>对比干、湿沉降后发现干沉降受当地污染源影响大, 有局地性。Rao 等<sup>[11]</sup>和蔡阳阳等<sup>[12]</sup>分别指出干沉降受季节变化影响明显。潘月鹏等<sup>[13]</sup>和黄强等<sup>[14]</sup>分别对京津冀和珠三角地区大气干沉降金属元素深入研究, 发现金属元素含量受周边环境和发展类型的影响显著。

收稿日期: 2015-11-12; 修订日期: 2016-01-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41275143); 公益性行业(气象)科研专项(201206011); 江苏省高校自然科学研究重大基础研究项目(12KJA170003)

作者简介: 秦阳(1990~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境与大气化学, E-mail: 316444718@qq.com

\* 通讯联系人, E-mail: binzhu@nuist.edu.cn

近年来,随着经济的发展,以南京为代表的长三角地区成为我国大气污染最严重的区域之一. 因此一些学者对南京地区的大气干沉降进行了研究,如倪刘健等<sup>[15]</sup>研究表明南京不同功能区受到的大气干沉降人为活动的影响高于背景沉降的影响;黄顺生等<sup>[16]</sup>和 Zhang 等<sup>[17]</sup>发现工厂活动对南京城区降尘中的重金属含量贡献较大. 李山泉等<sup>[18]</sup>研发现南京中的土壤表层重金属的积累与大气沉降密切相关.

然而,目前国内对于大气干沉降的研究大多以氮、硫、磷等营养元素和重金属元素的沉降为主,而针对大气颗粒物的干降水溶性离子的研究分析报道不多. 本研究基于连续 4 个月的观测和分析,探讨了夏秋季节南京大气颗粒物干沉降的水溶性离子含量及其组成,进而分析其来源,以期认识南京夏秋季节大气干沉降特征和大气环境状况提供参考. 观测期间正逢青奥会环境管控(8 月),也以期南京大气环境治理成效和未来大气环境管控方案设计提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 区域与采样点

南京地处长江下游中部,是我国东部重要城市之一,夏季炎热湿度大,秋季干燥凉爽属于典型的亚热带季风气候. 采样点位于南京信息工程大学气象楼楼顶(32°207'N, 118°717'E)海拔高度 62 m,南京信息工程大学位于南京市北郊 8 km 处,距扬子工业区约 3 km; 其偏东方位 500 m 是宁六路,双向六车道; 东南方位约 900 m 是南京龙王山风景区,海拔约为 100 m.

### 1.2 采样和分析方法

本研究观测时间为南京夏秋季节,从 2014 年 6 月 30 日至 11 月 1 日采用青岛崂山电子仪器厂生产的 SYC-2 型自动采样器采集干沉降样品. 样品收集在直径 150 mm、容积 5 L 的聚乙烯桶内. 累积一天收集 1 个样品,为保证准确反映一天降尘情况,考虑到降雨对降尘清除的影响,若当天为雨天则收集的样品不做统计. 共采集 84 个有效干沉降样品. 将这些样品用 100 mL 去离子水冲洗定容<sup>[12]</sup>,然后用 pH 仪和电导率仪分别测量其 pH 值与电导率. 采用 0.45 μm 的滤膜过滤,滤后的样品储藏在 4℃ 以下的冰箱内待测定,并于 1 个月内完成离子测定. 采用瑞士万通公司生产的 850professionalIC 型离子色谱仪分析 10 种水溶性离子: Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、

Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. 水溶性离子分析方法见文献<sup>[19]</sup>. 本实验用水均使用 Million Q 仪器超滤至电阻率达 18.2 MΩ·cm 的超纯水.

### 1.3 数据质量

对干沉降阴阳离子进行相关性分析,如图 1 所示,阴离子总浓度与阳离子总浓度的相关系数  $R = 0.83$ ,阴阳离子相关性较好,分析数据质量基本可靠<sup>[20]</sup>. 但阴阳离子浓度比值  $< 1$ ,也即总阴离子数与总阳离子数相比有一定的缺失. 这种阴离子缺失的现象在实际测量中较常出现,这可能是由于干沉降样品中的 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 以及低分子量有机阴离子<sup>[21]</sup>等由于检测方法等原因未被检测到.

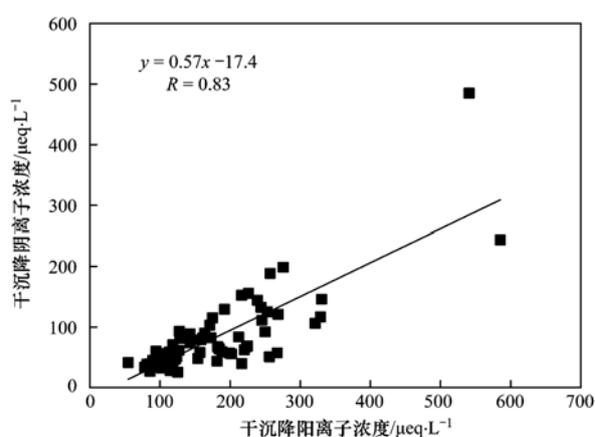


图 1 干沉降阴阳离子相关性分析

Fig. 1 Correlations between the sum of cations and anions in dry deposition

## 2 结果与分析

### 2.1 电导率、pH 及离子组成

电导率可判断干沉降中所含电解质的多少,在一定程度上能反映出干沉降水溶性离子的污染程度. 本研究收集的 84 个有效干沉降样品中,水溶性电导率范围为 3.8 ~ 69.9 μS·cm<sup>-1</sup>,电导率平均值为 17.4 μS·cm<sup>-1</sup>. 干沉降水溶性离子的浓度从 96.3 ~ 1 025.7 μeq·L<sup>-1</sup>,平均离子浓度为 247.6 μeq·L<sup>-1</sup>. 所得样品电导率与干沉降水溶性离子浓度的相关系数为 0.69(图 2),相关性良好,说明干沉降电导率主要是由干沉降中水溶性离子组分贡献.

干沉降样品的 pH 值范围为 5.2 ~ 7.2,从图 3 可以看出在所有干沉降样品中,66% 的干沉降 pH 值保持在 6.0 ~ 7.2 之间,干沉降样品 pH 平均值为 6.2,干沉降偏中性,表明大气颗粒物中含有大量的

碱性物质,这与南京地区土壤呈中性或偏碱性相符<sup>[22]</sup>

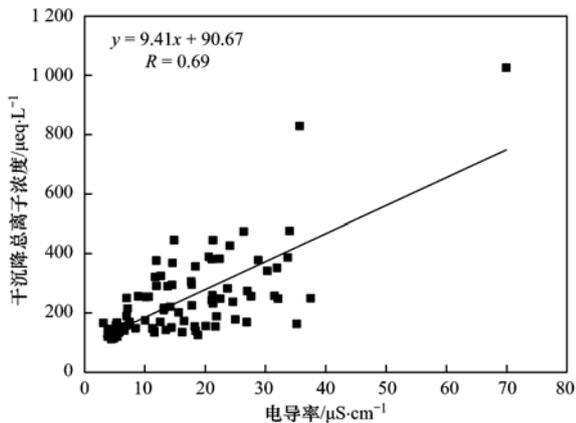


图2 干沉降总浓度与电导率的相关性

Fig. 2 Correlations between the total concentration of dry deposition and measured conductivity

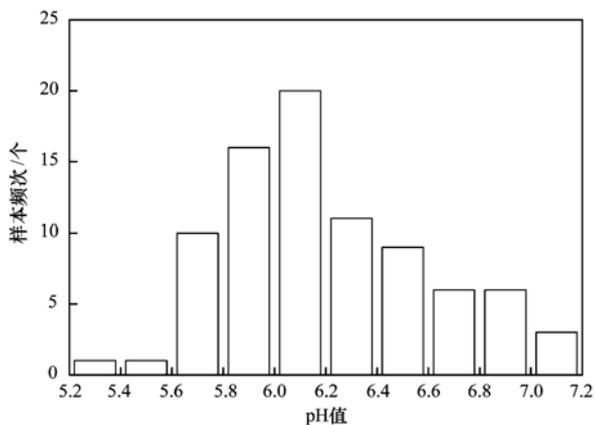


图3 干沉降样品的PH值频次分布

Fig. 3 Frequency of pH values

从图4(a)可知降尘中  $\text{Ca}^{2+}$  是最主要的阳离子,占阳离子总和的 68.3%,日平均浓度为  $115.7 \mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$ 。其次是占了 18.6% 的  $\text{NH}_4^+$ ,日均浓度为  $31.5 \mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$ 。  $\text{Mg}^{2+}$  占了阳离子总和的 7.2%,日均

浓度为  $12.2 \mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$ 。作为典型的地壳元素,  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  占了干沉降总离子的 51%。而  $\text{Na}^+$  和  $\text{K}^+$  的含量相对较少,日均浓度分别为  $9.0 \mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1.1 \mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$ 。阴离子以  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$  为主[图4(b)],其总和占总阴离子的 89.2%,日平均浓度分别为  $30.4$ 、 $20.7$  和  $18.7 \mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$ 。  $\text{F}^-$  和  $\text{NO}_2^-$  含量较少,只占阴离子浓度的 8.1% 和 2.7%。可知南京夏秋季节大气颗粒物中干沉降主要离子为  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$ ,而主要由人为活动产生的离子  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  占干沉降总当量浓度的 29%,说明人为因素对于干沉降有重要的影响。相比于北京<sup>[12]</sup>,南京大气干沉降主要离子种类相同,浓度略高于北京。而与意大利北部距米兰约 100 km 采样点相比,主要离子高了 6.3 ~ 13 倍之多<sup>[10]</sup>。这可能跟采样点周围环境有关,意大利采样点周边是乡村包围的居民区,而南京与北京的采样点距主城区较近,特别是南京采样点临近工业区,因此受周围环境的影响主要干沉降离子浓度较高。

## 2.2 干沉降碱基离子的中和作用

由前述可知干沉降水溶液偏中性,干沉降中含有大量的碱性物质,而  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  是水溶液中最主要的酸性因子。Balasubramanian 等<sup>[23]</sup>给出了水溶液的自由酸度(FA)的公式:

$$\text{FA} = \frac{[\text{H}^+]}{[\text{NO}_3^-] + [\text{SO}_4^{2-}]}$$

用来代表水溶液中未被中和  $\text{H}^+$  的比例,式中,  $[\text{H}^+]$ 、 $[\text{NO}_3^-]$ 、 $[\text{SO}_4^{2-}]$  为对应的离子浓度,  $\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$ 。如果  $\text{FA} = 1$ ,说明  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  产生的自由酸度完全没有被碱性物质中和。南京夏秋季节大气干沉降水溶液  $\text{FA} = 0.018$ ,表明干沉降水溶液中由  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  产生的自由酸度被干沉降中的碱性物质中和了 98.2%。南京大气干沉降中的 pH 与 FA 之间的相关性如图 5 所示, pH 与 FA 呈现出明

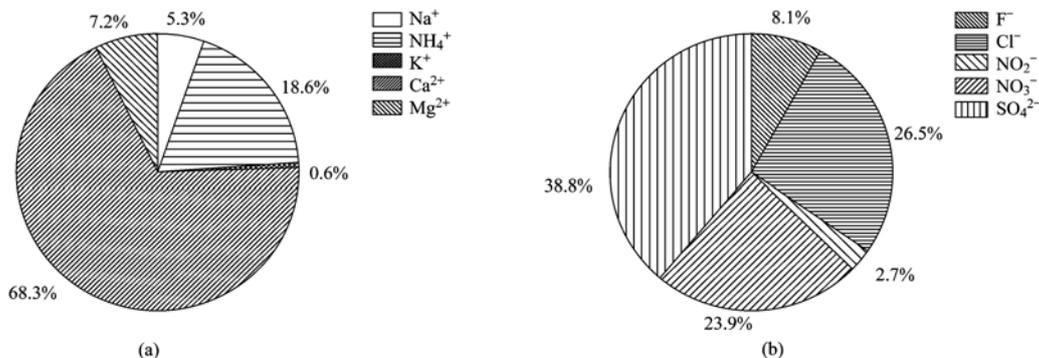


图4 干沉降阳离子和阴离子百分比

Fig. 4 Fractions of cations and anions in dry deposition

显的负指数函数相关性,  $R^2 = 0.79$ . 这说明南京大气干降水溶液中的 pH 主要受  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  浓度的控制.

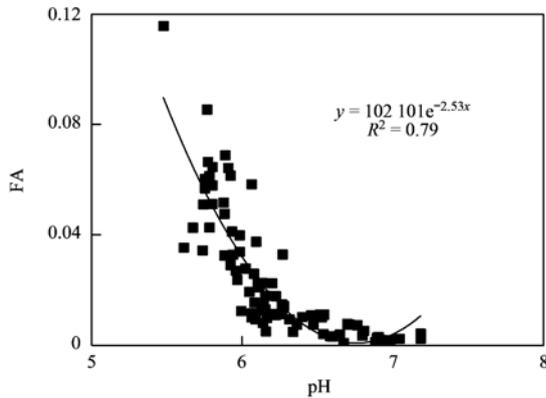


图5 大气干沉降中的 pH 与 FA 之间的相关性  
Fig. 5 Correlation of pH and FA in dry deposition

中和因子 NF 是用来评价水溶液中不同碱性物质的中和程度的参数,由 Possanzini 等<sup>[24]</sup>提出的公式计算得到:

$$\text{NF}_i = \frac{[X_i]}{[\text{NO}_3^-] + [\text{SO}_4^{2-}]}$$

式中,  $[X_i]$  是碱性离子  $X_i$  的离子浓度,  $\mu\text{eq}\cdot\text{L}^{-1}$ . NF 越大,表明碱性物质中和酸性物质的能力越强.

经计算,南京大气干沉降中  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{K}^+$  的中和因子 NF 分别为 2.3、0.63、0.25、0.18. 可知  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{NH}_4^+$  是主要碱性中和物质,说明大气干沉降中含有大量的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{NH}_4^+$  是干沉降呈偏中性的主要原因.

### 2.3 干沉降离子的时间变化特征

将干降水溶性离子通量按日变化与中国环境监测总站发布的对应天的  $\text{PM}_{10}$  结合(图6),图6中日期上未显示降水通量值表示当天为雨天. 可以看到降雨当天  $\text{PM}_{10}$  比附近未下雨天低,降雨之后离子浓度较降雨之前有减少趋势,说明降雨对大气颗粒物污染物有明显清除作用,有利于空气质量的改善. 从图6看出,8月19~22日、9月3~6日、9月23~27日和10月12~18日这4个时间段(图6中加框)干降水溶性离子通量随着  $\text{PM}_{10}$  浓度的增加而升高,可能跟这四段时间为静稳天气有关,静稳天气条件下大气中颗粒物主要是通过干沉降去除,因此随着大气颗粒物的增加干沉降离子浓度增加.

根据研究期间所得干沉降样品的离子浓度按照各月作日平均,得出研究期间干沉降离子浓度日均值随月份变化的趋势图(图7). 从图7中看出,7月除  $\text{NH}_4^+$  外,其他离子均达到了最大值;8月各离子

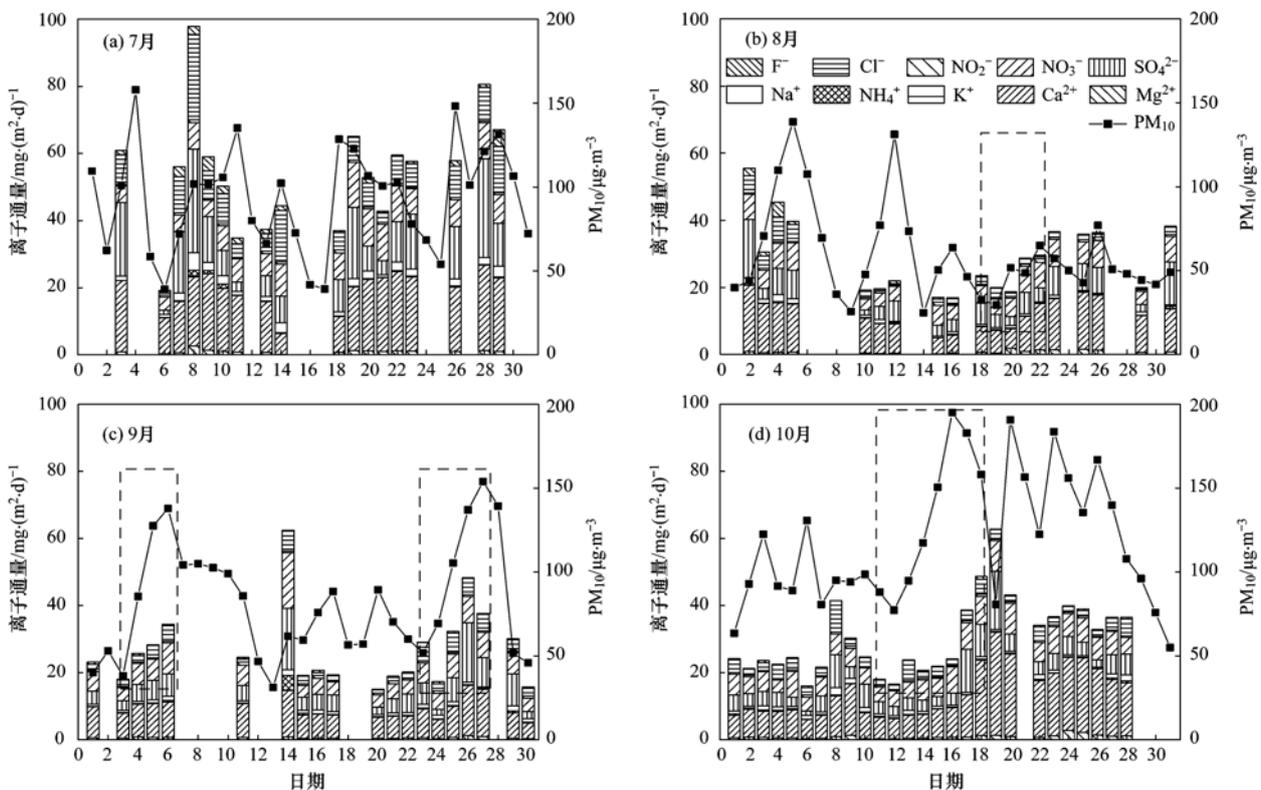


图6 干降水溶性离子含量各月日变化与  $\text{PM}_{10}$

Fig. 6 Daily variations of water-soluble ionic composition in dry deposition in each month and  $\text{PM}_{10}$

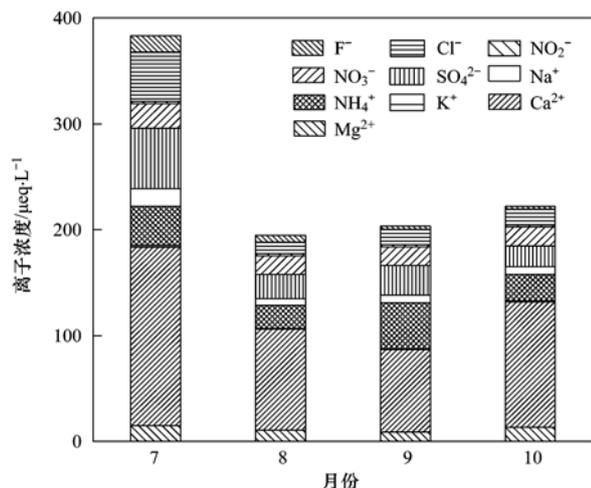


图7 干降水溶性离子含量各月日均值变化

Fig. 7 Daily average variations of water-soluble ionic composition in dry deposition in each month

浓度均大幅减少,干沉降离子浓度日均值最小,其中 $K^+$ 、 $NH_4^+$ 、 $Na^+$ 、 $NO_3^-$ 、 $Cl^-$ 等离子浓度达到最低值;9月除 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $F^-$ 外,其它离子浓度有所回升;10月 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$ 等离子较8、9月有大幅度的增加。7月干沉降离子浓度高,其他月份离子浓度低,这与蔡阳阳等<sup>[12]</sup>研究北京大气干降水溶性离子得出秋季大部分离子比夏季减少和戴灵慧等<sup>[25]</sup>研究南京大气降尘发现降尘通量在秋季有明显减少的结论相符,其认为夏季温度高、湿度大、辐射强,气溶胶等容易凝结增长并最终沉降。蔡阳阳等<sup>[12]</sup>指出夏季干沉降离子浓度较高与高温高湿的天气条件有关,且高温高湿的天气条件有利于如 $SO_2$ 、 $NO_x$ 分别向 $SO_4^{2-}$ 和 $NO_3^-$ 转化,而后者易于同矿物颗粒反应存在于粗颗粒中进而易于沉降。因此,高温高湿的气象因素影响南京夏秋季节干沉降离子浓度变化。另一方面根据下文研究,离子浓度的变化也受气团的来源及输送影响。

另外,8月离子浓度降低还与当月在南京举办的青奥会采取的减排措施有关。根据环境保护部制定的《第二届夏季青年奥林匹克运动会环境质量保障工作方案》,在整个8月期间,南京及其附近地区采取一系列减排限行措施<sup>[26]</sup>。赵辉等<sup>[27]</sup>研究表明青奥会期间 $PM_{10}$ 、 $NO_2$ 、 $SO_2$ 等污染物浓度较往年同期有大幅度的减小,降幅分别为59.4%、34.8%和67.7%。谢放尖等<sup>[28]</sup>发现8月南京主要污染物浓度均低于周边的扬州、镇江等市,在江苏各城市中处于较低水平,其中 $PM_{10}$ 浓度全省最低, $PM_{2.5}$ 与 $SO_2$ 浓度为第二低。以上研究表明环境保障措施的

实施是8月大气污染物大幅减少的主要原因,同时降水等气象因素也有助于污染物的降低。减排措施的实施使得大气污染物减少,进而使得大气干降水溶性离子浓度减少。

大气颗粒物中 $NO_3^-$ 和 $SO_4^{2-}$ 的质量浓度比值通常可以用于比较移动源(机动车)和固定源(燃煤)相对重要性,因此常用大气颗粒物中 $NO_3^-$ 和 $SO_4^{2-}$ 的质量比是否大于1来判断某一区域是以移动排放源(如汽车尾气)污染还是以固定排放源(燃煤)污染为主,大于1以移动源为主,小于1则主要贡献来自固定源<sup>[29]</sup>。南京夏秋季节干沉降中 $NO_3^-$ 和 $SO_4^{2-}$ 的质量浓度比值范围为0.11~3.18,质量比平均值为0.81。通常大气降尘粒径与大气中总悬浮颗粒(TSP)粒径相近<sup>[30]</sup>。与国内其他城市大气TSP水溶性离子相比,南京夏秋季节 $NO_3^-/SO_4^{2-}$ 与上海(0.83)相当<sup>[31]</sup>,高于西安(0.41)<sup>[32]</sup>,低于青岛的(1.31)<sup>[33]</sup>,表明南京夏秋季节固定源(燃煤)对大气干降水溶性离子的贡献大于移动排放源(机动车)。通过比较 $NO_3^-/SO_4^{2-}$ 月份变化发现,8月 $NO_3^-/SO_4^{2-}$ 为0.97,高于7月的0.52和9月的0.80,表明在8月由于举办青奥会而采取的环境管控措施使得移动源的贡献相对增加,固定源贡献相对降低,说明南京青奥会的环境管控措施对固定源的影响较大。

## 2.4 离子来源分析

### 2.4.1 后向轨迹聚类分析

为探究气团输送对大气干沉降的影响,本文应用轨迹模式HYSPLIT\_4.9<sup>[34]</sup>。后向轨迹主要输入参数:轨迹的起点设为观测点所在地南京信息工程大学气象楼前(32°12'N,118°43'E),考虑到大气干沉降主要对大气边界层的近地层及下垫面的影响较大,因此起始模拟高度选取为100 m。分别对南京7~10月(夏秋季节)每月降尘日进行72 h的后向轨迹计算,并将计算结果进行聚类分析,各月后向轨迹分布图如图8所示,其中括号内的百分数表示各类型气团轨迹出现的平均值。可根据气团轨迹的长短判断气团移动的速度,长的轨迹说明对应气团移动速度快,短的轨迹表明对应气团移动速度较慢。由图8可知,南京7月气团为源自江苏南部的本地气团、台湾以东洋面及朝鲜半岛南部的海洋性气团。8月主要为黄海气团(73%),而源自江苏东南部的本地气团占22%。9月气团源自黄海、日本海和东内蒙古地区的北方气团,主要为海洋性气团为主。10月气团为源自辽东半岛、西伯利亚大陆性北方

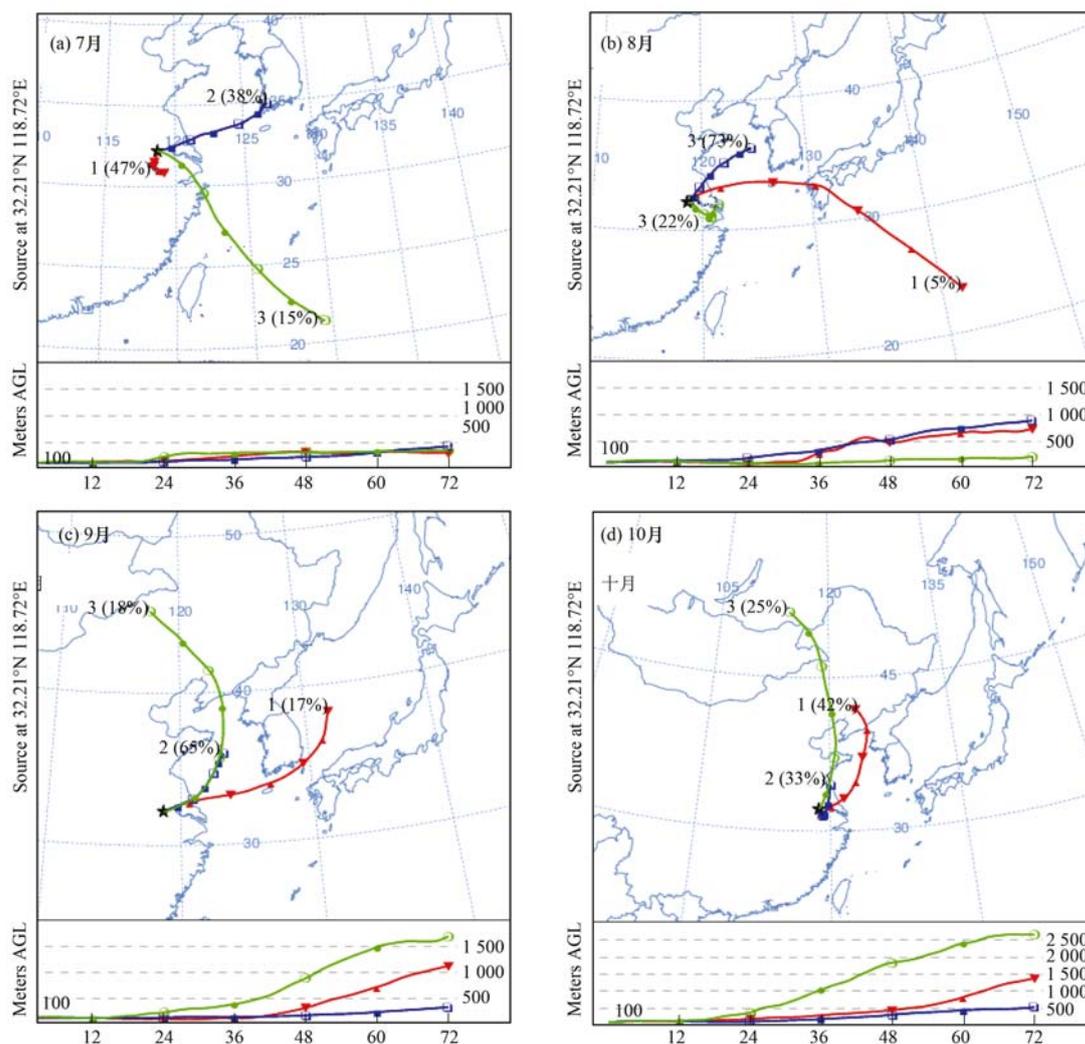


图 8 各月气团后向轨迹

Fig. 8 Back trajectories of the air parcel in each month

气团和江苏东北部本地气团。可以看出本地气团、海洋性气团,北方气团是影响南京夏秋季节的干沉降的主要气团。

后向轨迹图结合前文干沉降离子的时间变化特征,分析气团对干沉降的影响。7月气团均为500 m以下的底层气团,受近地面的污染影响较大,且作为主要气团的本地气团(47%)移动速度偏慢,有利于污染物的积累;8月受干净海洋性气团影响,再加上青奥会的举办南京及其周边的减排限行,是8月污染物大幅度减少的两个主要原因。9月份主要受海洋气团的影响,污染较少;10月则受大陆性气团的影响 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等地壳土壤元素增加明显(图7),虽然本地气团(33%)移动缓慢利于污染物的累积,但主要气团均为移速快,且较为干净的高层北方气团,因此对南京的影响不如7月。可以看出南京地区夏秋季节的干沉降水溶性离子量主要受本地气

团输送的影响,本地气团是造成离子浓度升高的主要气团,说明干沉降受本地污染的影响较大,具有局地性。

#### 2.4.2 相关分析

干沉降中相关性较好的离子通常在物质来源或化学反应过程上有着一定的相似性<sup>[35]</sup>,因此相关性分析可作为研究干沉降离子来源的重要手段。相关系数矩阵如表1所示,从中可看出 $\text{SO}_4^{2-}$ 与 $\text{NO}_3^-$ 相关系数为0.61,有较好的相关性,这是因为二者主要分别来自 $\text{SO}_2$ 和 $\text{NO}_x$ ,其排放方式和在大气中的传输途径较为一致。 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 的浓度相关系数为0.76,相关性很大,两者为地壳矿物元素,来源相似。同时, $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 与 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 相关性较好,表明大气中矿物元素 $\text{Ca}^{2+}$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 容易与 $\text{SO}_4^{2-}$ 和 $\text{NO}_3^-$ 相结合。 $\text{NH}_4^+$ 与 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 的相关系数分别为0.63和0.46,表明铵盐化合物在大气中主要

以硫酸铵形式存在,少部分以硝酸铵的形式存在。 $\text{Cl}^-$  与  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$  的相关系数较高,分别为 0.90、0.80,说明  $\text{Cl}^-$  在大气颗粒物的干沉降中主要以  $\text{NaCl}$ 、 $\text{KCl}$  形式存在,同时  $\text{Cl}^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  的相关系数

为 0.79,表明干沉降中  $\text{Cl}^-$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  有相同的排放源, $\text{SO}_4^{2-}$  多来自工矿企业化石燃料的燃烧,所以干沉降中有一部分  $\text{Cl}^-$  来自化石燃料的燃烧,这也说明了干沉降中  $\text{Cl}^-$  的多源性。

表 1 干沉降中各离子浓度间的相关系数矩阵<sup>1)</sup>

Table 1 Matrix of correlation coefficients of ionic concentrations in dry deposition

	$\text{F}^-$	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_2^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$
$\text{F}^-$	1									
$\text{Cl}^-$	0.54**	1								
$\text{NO}_2^-$	0.07	0.06	1							
$\text{NO}_3^-$	0.11	0.33**	0.1	1						
$\text{SO}_4^{2-}$	0.29**	0.79**	0.04	0.61**	1					
$\text{Na}^+$	0.63**	0.90**	0.05	0.32**	0.66**	1				
$\text{NH}_4^+$	0.13	0.34**	-0.08	0.46**	0.63**	0.35**	1			
$\text{K}^+$	0.29**	0.80**	0.11	0.08	0.68**	0.65**	0.39**	1		
$\text{Ca}^{2+}$	0.36**	0.46**	0.04	0.54**	0.52**	0.41**	0.14	0.29**	1	
$\text{Mg}^{2+}$	0.12	0.35**	0.1	0.41**	0.45**	0.24*	0.15	0.37**	0.76**	1

1) \*\* 表示在 0.05 水平上显著相关; \* 表示在 0.01 水平上显著相关

#### 2.4.3 富集因子及源贡献

大气化学研究中,为揭示酸沉降化学成分来源特征,常用富集因子(EF)来了解酸沉降中水溶性离子的来源,以估算海洋源和非海洋源对酸沉降离子浓度的贡献。富集因子远大于 1 时,表示沉降中的离子相对于参考因子被富集;远小于 1 时,表示离子相对于参考因子被稀释。通常可认为  $\text{Na}$  全部来源于海洋,是海洋源的参考元素,而  $\text{Ca}$  是典型的亲石元素,成分不会轻易改变,因此可认为是陆源的参考元素<sup>[36]</sup>。利用以下公式计算干沉降离子的富集因子。

$$EF_{(\text{marine})} = \frac{([X]/[\text{Na}^+])}{([X]/[\text{Na}^+])_{\text{marine}}} \quad (1)$$

$$EF_{(\text{soil})} = \frac{([X]/[\text{Ca}^{2+}])}{([X]/[\text{Ca}^{2+}])_{\text{soil}}} \quad (2)$$

式中, $X$  指干沉降中要讨论的离子;  $[X/\text{Na}^+]_{\text{marine}}$  和

$[X/\text{Ca}^{2+}]_{\text{soil}}$  的比值分别参考 Keene 等<sup>[37]</sup> 的海水成分数据和 Taylor<sup>[38]</sup> 的地壳成分数据。

根据公式(1)、(2)计算相对于  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  的富集因子系数如表 2 所示。南京夏秋季节干沉降中  $\text{Cl}^-$  的  $EF_{(\text{marine})}$  比海水高 0.778,而  $EF_{(\text{soil})}$  远大于 1,说明降尘中  $\text{Cl}^-$  相对于海洋源与陆源均被富集,说明  $\text{Cl}^-$  既来自陆相,也来自海洋,海洋贡献高于陆源的贡献。 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的  $EF_{(\text{marine})}$  和  $EF_{(\text{soil})}$  远高于 1,相对于海水和土壤都是高富集,因此可认为干沉降中  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  绝大部分来自人为源的贡献。干沉降中  $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  的  $EF_{(\text{marine})}$  均大于 1,表明 3 种离子相对海洋富集,而  $\text{Ca}^{2+}$  离子的  $EF_{(\text{marine})}$  为 290.68,相比  $\text{K}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}$  更大,可判断干沉降中的  $\text{Ca}^{2+}$  基本来自地表土壤的贡献, $\text{K}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}$  主要来自陆相输入。

表 2 干沉降中离子组成相对于土壤和海洋的富集因子

Table 2 Enrichment factor of ion concentrations in dry precipitation relative to seawater and soil

项目	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$
海洋	1.167	0.000 02	0.12	0.044	0.022	0.227
干沉降	2.27	2.07	3.335	12.79	0.115	1.36
$EF_{(\text{marine})}$	1.945	103 500	26.68	290.68	5.227	5.99
土壤	0.003 1	0.002 1	0.018 8	—	0.504	0.561
干沉降	0.161 9	0.260 9	0.177 8	—	0.009	0.107
$EF_{(\text{soil})}$	57.355	77.095	13.878	—	0.018	0.191

忽略火山及其它天然源的贡献,大气颗粒物主要来源包括海水溅射、岩石、土壤风化和人为活动。为了进一步了解干沉降各种水溶性离子不同源的组成,通过下列公式计算海相输入(SSF)、岩石/土壤风化(CF)、人为活动输入(ASF)的相对贡献:

$$SSF\% = \frac{100(\text{Na}^+)(X/\text{Na}^+)_{\text{marine}}}{X} \quad (3)$$

$$CF\% = \frac{100(\text{Ca}^{2+})(X/\text{Ca}^{2+})_{\text{soil}}}{X} \quad (4)$$

$$ASF\% = 100 - SSF(\%) - CF(\%) \quad (5)$$

其中  $X$  为要计算的离子。

由表 3 可见,南京夏秋季节干沉降中,  $\text{Cl}^-$  除了 51.4% 来自海相来源之外,还有 46.8% 来自人为源的输入。而  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  海相来源和岩石/土壤风化的只占很少一部分,主要来自人为源输入,所占比重分别为 98.7% 和 89%。干沉降中 99.7% 的  $\text{Ca}^{2+}$  来自陆源输入。 $\text{K}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}$  跟前文一致,部分来自海洋源输入,但大部分来自陆源输入,所占比例分别为 81.1% 和 83.3%。

表 3 大气降尘水溶性离子不同来源的贡献组成/%

Table 3 Source contributions for different ionic constituents in dry precipitation/%

离子	SSF	NSSF	
		CF	ASF
$\text{Cl}^-$	51.4	1.8	46.8
$\text{NO}_3^-$	—	1.3	98.7
$\text{SO}_4^{2-}$	3.8	7.2	89.0
$\text{Ca}^{2+}$	0.3	99.7	
$\text{K}^+$	18.9	81.1	
$\text{Mg}^{2+}$	16.7	83.3	

### 3 结论

(1) 南京夏秋季节 2014 年 7 月至 2014 年 10 月干沉降样品平均 pH 为 6.2,干沉降偏中性。 $\text{Ca}^{2+}$  是主要的阳离子,占阳离子总量的 68.3%。阴离子以  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$  和  $\text{NO}_3^-$  为主,占总阴离子的 89.2%。

(2) 南京地区夏秋季节的干沉降浓度变化受温度湿度等气象条件和气团输送共同作用的影响,同时本地气团对干沉降污染的影响较大,干沉降污染具有局地性。

(3) 南京夏秋季节固定源对大气干沉降水溶性离子的贡献大于移动排放源,8 月因为举办青奥会而采取的环境管控措施对固定源的削减较大。

(4) 大气干沉降中不同化学组分的来源差异较大。 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  大部分来自于人为排放源。 $\text{Cl}^-$  主要为海洋输入(51.4%),但是人为源输入(46.8%)的贡献不容忽视。 $\text{Ca}^{2+}$  主要来自地壳, $\text{K}^+$  和  $\text{Mg}^{2+}$  部分来自海洋输入,但主要来自陆相输入。

#### 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. 47-48.

[2] 王明星. 大气化学[M]. 北京:气象出版社,1999. 67-87.

[3] Bobbink R, Hornung M, Roelofs J G M. The effects of air-borne nitrogen pollutants on species diversity in natural and semi-natural European vegetation[J]. *Journal of Ecology*, 1998, **86**(5): 717-738.

[4] 胡正义,王体健,曹志洪,等. 大气干沉降向农田生态系统输入硫素通量研究[J]. *土壤学报*, 2001, **38**(3): 357-364.

[5] Wang X M, Wu Z Y, Shao M, et al. Atmospheric nitrogen deposition to forest and estuary environments in the Pearl River Delta region, southern China[J]. *Tellus Series B: Chemical and Physical Meteorology*, 2013, **65**: 20480.

[6] Tai H S, Lin J J, Noll K E. Characterization of atmospheric dry deposited particles at urban and non-urban locations[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1999, **30**(8): 1057-1068.

[7] Zufall M J, Davidson C I, Caffrey P F, et al. Airborne concentrations and dry deposition fluxes of particulate species to surrogate surfaces deployed in Southern Lake Michigan[J]. *Environmental Science & Technology*, 1998, **32**(11): 1623-1628.

[8] Biryukov S. An experimental study of the dry deposition mechanism for airborne dust[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1998, **29**(1-2): 129-139.

[9] Inomata Y, Igarashi Y, Chiba M, et al. Dry and wet deposition of water-insoluble dust and water-soluble chemical species during spring 2007 in Tsukuba, Japan[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(29): 4503-4512.

[10] Balestrini R, Galli L, Tartari G. Wet and dry atmospheric deposition at prealpine and alpine sites in northern Italy[J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(9): 1455-1470.

[11] Rao P S P, Khemani L T, Momin G A, et al. Measurements of wet and dry deposition at an urban location in India[J]. *Atmospheric Environment, Part B, Urban Atmosphere*, 1992, **26**(1): 73-78.

[12] 蔡阳阳,杨复沫,贺克斌,等. 北京城区大气干沉降的水溶性离子特征[J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(7): 1071-1076.

[13] 潘月鹏,王跃思,杨勇杰,等. 区域大气颗粒物干沉降采集及金属元素分析方法[J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 553-559.

[14] 黄强,宋建中,彭平安,等. 珠江三角洲大气干沉降金属元素浓度和来源分析[J]. *地球与环境*, 2013, **41**(5): 498-505.

[15] 倪刘建,张甘霖,阮心玲,等. 南京市不同功能区大气降尘的沉降通量及污染特征[J]. *中国环境科学*, 2007, **27**(1): 2-6.

[16] 黄顺生,华明,金洋,等. 南京市大气降尘重金属含量特征及来源研究[J]. *地学前缘*, 2008, **15**(5): 161-166.

[17] Zhang H. An assessment of heavy metals contributed by industry in urban atmosphere from Nanjing, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **154**(1-4): 451-458.

[18] 李山泉,杨金玲,阮心玲,等. 南京市大气降尘中重金属特征及对土壤环境的影响[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(1): 22-29.

[19] 薛国强,朱彬,王红磊. 南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(5): 1633-1643.

[20] 张林静,张秀英,江洪,等. 沈阳市降水化学成分及来源分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(6): 2081-2088.

[21] Zhang F Z, Zhang J Y, Zhang H R, et al. Chemical composition of precipitation in a forest area of Chongqing, southwest China

- [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1996, **90**(3-4): 407-415.
- [22] 吴新民, 潘根兴, 姜海洋, 等. 南京城市土壤的特性与重金属污染的研究[J]. *生态环境*, 2003, **12**(1): 19-23.
- [23] Balasubramanian R, Victor T, Chun N. Chemical and statistical analysis of precipitation in Singapore[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, **130**(1-4): 451-456.
- [24] Possanzini M, Buttini P, Di Palo V. Characterization of a rural area in terms of dry and wet deposition[J]. *Science of the Total Environment*, 1988, **74**: 111-120.
- [25] 戴灵慧, 邱玉珺. 南京北郊大气降尘通量及离子分布特征[J]. *宁夏农林科技*, 2012, **53**(10): 165-168, 182.
- [26] 国家环境保护部. 第二届夏季青年奥林匹克运动会环境质量保障工作方案 [EB/OL]. [http://www.mep.gov.cn/zhxx/hjyw/201407/t20140728\\_280549.htm](http://www.mep.gov.cn/zhxx/hjyw/201407/t20140728_280549.htm).
- [27] 赵辉, 郑有飞, 吴晓云, 等. 青年奥林匹克运动会期间南京市主要大气污染物浓度变化与分析[J]. *环境化学*, 2015, **34**(5): 824-831.
- [28] 谢放尖, 李文青, 喻义勇, 等. 南京青奥期间空气质量保障措施及绩效研究[J]. *环境与可持续发展*, 2015, **40**(4): 78-80.
- [29] Xiao H Y, Liu C Q. Chemical characteristics of water-soluble components in TSP over Guiyang, SW China, 2003 [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(37): 6297-6306.
- [30] 张家泉, 胡天鹏, 刘浩, 等. 316 国道黄石-武汉段大气降尘中水溶性离子污染特征[J]. *中国粉体技术*, 2014, **20**(6): 34-39.
- [31] Wang Y, Zhang G S, Zhang X Y, *et al.* The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of PM<sub>2.5</sub> and TSP aerosol in Shanghai [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(16): 2935-2952.
- [32] 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.
- [33] 王琳. 青岛近海大气气溶胶中水溶性无机离子分布特征及来源解析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013. 23-24.
- [34] Draxler R R, Hess G D. Description of the Hysplit<sub>4</sub> modeling system [R]. NOAA Technical Memorandum ERIARL- 224, 1997.
- [35] Başak B, Alagha O. The chemical composition of rainwater over Büyükçekmece Lake, Istanbul [J]. *Atmospheric Research*, 2004, **71**(4): 275-288.
- [36] Zhang M Y, Wang S J, Wu F C, *et al.* Chemical compositions of wet precipitation and anthropogenic influences at a developing urban site in southeastern China [J]. *Atmospheric Research*, 2007, **84**(4): 311-322.
- [37] Keene W C, Pszenny A A P, Galloway J N, *et al.* Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, **91**(D6): 6647-6658.
- [38] Taylor S R. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1964, **28**(8): 1273-1285.

## CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM <sub>10</sub> and PM <sub>2.5</sub> Emissions from Stationary Sources .....	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer .....	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing .....	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan .....	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014 .....	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust .....	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus .....	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation .....	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters .....	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas .....	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan .....	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities .....	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir .....	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System .....	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi .....	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake .....	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure .....	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i> .....	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria .....	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River .....	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling .....	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite .....	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar .....	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater .....	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag .....	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite .....	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water .....	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor .....	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Floes .....	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System .....	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition .....	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH) .....	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology .....	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency .....	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments .....	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils .....	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation .....	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope .....	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu .....	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang .....	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou .....	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu <sup>2+</sup> -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter .....	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism .....	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model .....	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar .....	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i> .....	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition .....	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu .....	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C <sub>3</sub> N <sub>4</sub> /Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange .....	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province .....	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行