

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第5期

Vol.37 No.5

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

2015年12月北京市空气重污染过程分析及污染源排放变化 薛亦峰,周震,聂滕,潘涛,齐璐,聂磊,王占山,李云婷,李雪峰,田贺忠(1593)

北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源 周雪明,仝雪娇,项萍,谭吉华,段菁春,何晓明,贺克斌,马永亮(1602)

利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布 刘浪,张文杰,杜世勇,侯鲁健,韩斌,杨文,陈敏东,白志鹏(1609)

兰州城区大气 PM_{2.5} 污染特征及来源解析 王新,聂燕,陈红,王博,黄韬,夏敦胜(1619)

成都市西南郊区春季大气 PM_{2.5} 的污染水平及来源解析 林瑜,叶芝祥,杨怀金,张菊,殷蔚雯,李晓芬(1629)

中亚热带背景区重庆四面山大气气态总汞含量变化特征 刘伟明,马明,王定勇,孙涛,魏世强(1639)

固定源排放污染物健康风险评价方法的建立 陈强,吴焕波(1646)

北京市典型燃烧源颗粒物排放水平与特征测试 胡月琪,邬晓东,王琛,梁云平,马召辉(1653)

南京公园降尘中重金属污染水平及风险评价 王呈,钱新,李慧明,孙一轩,王金霞(1662)

CoCuMnO₂ 光催化氧化多组分 VOCs 特性及其动力学 孟海龙,卜龙利,刘嘉栋,高波,冯奇奇,谭娜,谢帅(1670)

大辽河感潮河段及近岸河口氮、磷的分布及潜在性富营养化 张雷,曹伟,马迎群,韩超南,秦延文,赵艳民,刘志超,杨晨晨(1677)

典型温冰川区湖泊的稳定同位素空间分布特征 史晓宜,蒲焘,何元庆,陆浩,牛贺文,夏敦胜(1685)

利用δ¹⁵N-NO₃⁻ 和 δ¹⁸O-NO₃⁻ 示踪北京城区河流硝酸盐来源 赵庆良,马慧雅,任玉芬,王效科,彭剑锋,贺成武,武俊良,刘梦贞,闫苗苗(1692)

柳江盆地浅层地下水硝酸盐分布特征及影响因素分析 王贺,谷洪彪,迟宝明,李海君,姜海宁(1699)

三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华(1707)

亚热带农区生态沟渠对农业径流中氮素迁移拦截效应研究 王迪,李红芳,刘锋,王毅,钟元春,何洋,肖润林,吴金水(1717)

平原河网典型污染物生物降解系数的研究 冯帅,李叙勇,邓建才(1724)

沉水植物对沉积物微生物群落结构影响:以洪泽湖湿地为例 张丁予,章婷曦,董丹萍,李德芳,王国祥(1734)

苏南水库硅藻群落结构特征及其控制因素 任杰,周涛,朱广伟,金颖薇,崔扬,许海,朱梦圆,夏明芳,陈伟民(1742)

河北衡水湖湿地汞污染现状及生态风险评价 王乃姗,张曼胤,崔丽娟,马牧源,颜亮,穆泳林,秦鹏(1754)

顺德水道土壤及沉积物中重金属分布及潜在生态风险评价 蔡怡敏,陈卫平,彭驰,王铁宇,肖荣波(1763)

台州电子垃圾拆解区水和沉积物中多溴联苯醚污染特征与生态风险 陈香平,彭宝琦,吕素平,陈强,张勇,黄长江,董巧香(1771)

乌江中上游段河水主要离子化学特征及控制因素 黄奇波,覃小群,刘朋雨,蓝芙宁,张连凯,苏春田(1779)

岩溶流域地下水 TOC 输出及影响因素分析:以重庆丰都雪玉洞地下河流域为例 王巧莲,蒋勇军,陈宇(1788)

广东英德宝晶宫洞穴滴水元素季节变化与影响因素 黄嘉仪,陈琳,陈琼,刘淑华,杨亮,童晓宁,贺海波,米小建,邓肖敏,彭小桃,李汉杰,杨琰,周厚云(1798)

基于 PCR-DGGE 和拟杆菌(*Bacteroides*) 16S rRNA 的岩溶地下水粪便污染源示踪研究:以重庆南山老龙洞地下河系统为例 张弘,蒋勇军,张远瞩,段逸凡,吕现福,贺秋芳(1805)

典型岩溶区地下河中溶解态脂类生物标志物来源解析及其变化特征 梁作兵,孙玉川,李建鸿,王尊波,谢正兰,张媚,廖昱,江泽利(1814)

钴活化过一硫酸盐氧化过程中卤代副产物的生成 刘阔,金浩,董为,季跃飞,陆隽鹤(1823)

天冬氨酸在氯化过程中生成消毒副产物二氯乙腈的研究 丁春生,李乃军,张涛,章梦青(1831)

臭氧氧化饮用水过程中可同化有机碳生成的影响因素 董秉直,张佳丽,何畅(1837)

污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析 程珣,张明凯,刘艳臣,施汉昌(1845)

HDTMA 改性沸石的制备及吸附废水中对硝基苯酚的性能和动力学 郭俊元,王彬(1852)

放射性废水处理中吸附剂的势优势藻种筛选 李鑫,胡洪营,余骏一,赵文玉(1858)

微米 Fe₃O₄ 磁粉调理-压力电场污泥脱水工艺过程研究 钱旭,王毅力,赵丽(1864)

间歇曝气 SBR 处理养猪沼液的短程脱氮性能 宋小燕,刘锐,税勇,川岸朋树,占新民,陈吕军(1873)

不同灌溉方式对华北平原冬小麦土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量的影响 郭树芳,齐玉春,尹飞虎,彭琴,董云社,贺云龙,闫钟清(1880)

卫河新乡市区段春季溶解 CH₄ 与 N₂O 浓度特征 侯翠翠,张芳,李英臣,王奇博,刘赛(1891)

模拟气沉降对内蒙古克氏针茅草原 N₂O 排放的影响 杨涵越,张婷,黄永梅,段雷(1900)

土壤呼吸与土壤有机碳对不同秸秆还田的响应及其机制 曹湛波,王磊,李凡,付小花,乐毅全,吴纪华,陆兵,徐殿胜(1908)

黑土丘陵区小流域土壤有机质空间变异及分布格局 高凤杰,马泉来,韩文文,单培明,周军,张少良,张志民,王宏燕(1915)

耕作方式对紫色水稻土团聚体中有机质及重金属的分布特征影响 史琼彬,赵秀兰,常同举,卢吉文(1923)

北京东南郊典型地层重金属分布特征与潜在生态风险 赵倩,马琳,刘翼飞,何江涛,李广贺(1931)

准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥(1938)

纳米 TiO₂ 对土壤重金属释放及形态变化的影响 张金洋,王定勇,梁丽,李楚娟,张成,周雄,刘娟(1946)

纳米零价铁铜双金属对铬污染土壤中 Cr(VI) 的还原动力学 马少云,祝方,商执峰(1953)

低分子有机酸对硫杆菌活性的抑制作用及对土壤重金属脱除的影响 宋永伟,王鹤茹,曹艳晓,李飞,崔春红,周立祥(1960)

粒径和包裹物对纳米银在海洋微藻中的毒性影响 黄俊,衣俊,强丽媛,程金平(1968)

萱草修复石油烃污染土壤的根际机制和根系代谢组学分析 王亚男,程立娟,周启星(1978)

高温堆肥过程对猪粪来源抗生素抗性基因的影响 郑宁国,黄南,王卫卫,喻曼,陈晓旻,姚燕来,王卫平,洪春来(1986)

磺胺抗性消长与堆肥进程的交互特征 林辉,汪建妹,孙万春,符建荣,陈红金,马军伟(1993)

《环境科学》征订启事(1830) 《环境科学》征稿简则(1977) 信息(1698,1851,1992)

利用 SPAMS 分析北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐季节变化特征及潜在源区分布

刘浪¹, 张文杰¹, 杜世勇², 侯鲁健², 韩斌¹, 杨文¹, 陈敏东³, 白志鹏¹

(1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 济南市环境保护科学研究院, 济南 250014; 3. 南京信息工程大学大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 采用单颗粒气溶胶质谱仪 (SPAMS) 于 2013 年 12 月至 2014 年 11 月在中国环境科学研究院内对大气颗粒物进行全年在线观测, 采用特征离子法提取了观测结果中硫酸盐、硝酸盐和铵盐 (SNA) 的小时均值数据, 分析了 SNA 混合特征和粒径分布随季节的变化。采用 Hysplit 模拟气团 48 h 的后向轨迹, 并结合浓度权重轨迹方法 (CWT), 计算得到了影响北京市各季节 SNA 的潜在源区分布。结果表明, 春、夏季颗粒物中硫酸盐、硝酸盐和铵盐混合比例较秋、冬季更加稳定。硫酸盐和硝酸盐的粒径分布特征十分相似, 表明硫酸盐和硝酸盐成分在颗粒物中大多同时存在。颗粒物中 SNA 粒径分布的季节变化特征为: 秋季 SNA 最大粒径段 > 夏季 > 春季 > 冬季。SNA 潜在源区分布有较为相似的空间分布特征, 对北京市 SNA 高贡献的潜在源区主要分布在北京本地以及南部区域, 以天津、廊坊、衡水、保定、石家庄等地为主。

关键词: 单颗粒质谱; 硫酸盐; 硝酸盐; 铵盐; 潜在源区

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)05-1609-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.05.003

Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry

LIU Lang¹, ZHANG Wen-jie¹, DU Shi-yong², HOU Lu-jian², HAN Bin¹, YANG Wen¹, CHEN Min-dong³, BAI Zhi-peng¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Ji'nan Institute for Environmental Protection, Ji'nan 250014, China; 3. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Single particle aerosol mass spectrometry (SPAMS) was deployed to continuously observe the aerosol particles of Beijing urban area from 2013-12 to 2014-11, and the hourly average data of sulfate, nitrate and ammonium (SNA) were obtained using the characteristic ion tracer method. The mixing state and size distribution of SNA were analyzed. In addition, based on Hysplit 48 h back air mass trajectory results in combination with Concentration Weighted Trajectory method (CWT), we obtained the seasonal potential source contribution area of SNA. The results showed that the mixture of sulfate, nitrate and ammonium in spring and summer was more stable than that in autumn and winter. The size distribution of sulfate and nitrate was very similar. The size distribution characteristics of SNA followed the order of autumn > summer > spring > winter. The potential source region of SNA had similar spatial distribution characteristics, and the potential source region of SNA was mainly located in Beijing and south areas, especially at Tianjin, Langfang, Hengshui, Baoding and Shijiazhuang.

Key words: single particle mass spectrometry; sulfate; nitrate; ammonium; potential source region

在大气颗粒物研究中, 硫酸盐、硝酸盐和铵盐 (SNA) 被认为是二次无机气溶胶的重要成分^[1]。重污染过程中, SNA 也是 PM_{2.5} 中最主要的组分^[2-5]。对于北京地区, 重污染过程中, 水溶性离子 SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 的浓度比非重污染过程高出 10 倍以上^[6], 反映出 SNA 在重污染过程形成中的重要作用。因此, 研究影响北京市 SNA 的潜在源区具有重要意义。

分析某一区域大气颗粒物潜在源区的常用方法是通过分析该区域气团后向轨迹, 并结合潜在源贡

献因子分析法 (potential source contribution function, PSCF) 或浓度权重轨迹方法 (concentration weighted trajectory, CWT) 对该区域大气颗粒物输送情况进行分析。目前, 该方法已经被应用于兰州、天津、济南以及舟山等地大气颗粒物以及气态污染物潜在源区

收稿日期: 2015-10-25; 修订日期: 2015-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41205115)

作者简介: 刘浪 (1991 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为气溶胶化学, E-mail: liulang1991@foxmail.com

的研究中^[7-11]. 此外, Zhang 等^[12]利用 PSCF 方法分析了北京市大气颗粒物中各化学组分的潜在源区分布. 但是, 上述研究中, 大气颗粒物及组分数据的获取多为传统的滤膜采样分析结果, 其时间分辨率较低(日均值数据), 无法满足大气颗粒物组分高时间精度的分析, 且样品在存储和运输过程中会存在化学组分的挥发和变性, 因此, 实时在线测量大气颗粒物组分对了解大气颗粒物污染特征具有重要意义.

自 20 世纪 90 年代起, 国外就开始利用在线单颗粒物气溶胶质谱技术对大气颗粒属性进行研究, 最具有代表性的为加州大学 Prather 教授所带领的小组, 他们利用自主研发的单颗粒气溶胶飞行时间质谱仪 (aerosol time-of-flight mass spectrometer, ATOFMS) 进行了大量的外场和实验室研究工作, 其中包括研究了墨西哥北部大气颗粒物的典型类型以及混合状态^[13], 南加州 8 种生物质燃烧排放的颗粒物粒径和化学属性, 并就此发现左旋葡聚糖能够作为生物质燃烧颗粒物的标识物之一^[14], 对沿海城市大气颗粒物进行观测研究并揭示其灰霾形成的基本原因^[15], 对煤烟尘排放颗粒物的混合特性、光学特性进行外场观测并研究其对辐射的影响^[16]. 另外, 他们改进并开发了一种适合高空测量的机载式气溶胶单颗粒质谱仪 (aircraft aerosol time-of-flight mass spectrometer, AATOFMS), 并将其应用于生物质燃烧排放的颗粒物在初始和老化阶段对云凝结核形成的影响研究中^[17]. 此外, Healy 等^[18]利用 ATOFMS 研究了法国巴黎大气颗粒物中不同粒径下元素碳颗粒的源和混合状态. 我国单颗粒气溶胶质谱的研究起步较晚, 比较有代表性的是复旦大学杨新教授所带领的小组, 他们利用 ATOFMS 研究了上海夏季草酸的颗粒物混合状态和形成机制, 发现生物质燃烧是颗粒物中草酸的主要一次源^[19]. Bi 等^[20]利用单颗粒气溶胶质谱仪 (single particle aerosol mass spectrometry, SPAMS) 分析了 2010 年 4~5 月间珠三角区域城市亚微米气溶胶的粒径和化学组成, 认为生物质燃烧为亚微米颗粒的一个显著来源. Zhang 等^[21]利用 SPAMS 对比分析了广州地区春秋亚微米含碳颗粒的混合状态, 比较了不同季节硝酸盐的形成机制, 结果表明秋季颗粒物中硝酸盐更容易与生物质颗粒和 OC 结合. Li 等^[22]利用 SPAMS 研究了北京市 2011 年春季大气颗粒物特征, 并着重研究了沙尘过程中大气颗粒物的粒径分布和化学组分特征. 综上所述, 由于在线单颗粒质谱技术具有较高的时间分辨率, 并具有同时得到单个颗粒物的粒

径和化学组分信息等优势^[23], 已被广泛应用于各地大气颗粒物化学组分和混合状态的研究中^[24,25].

本研究利用 SPAMS (single particle aerosol mass spectrometry) 对 2014 年北京市大气颗粒物化学组分进行为期一年多的观测, 统计得到时间分辨率为 1 h 的颗粒物组分长时间序列数据, 并首次将 SPAMS 数据同浓度权重轨迹方法 (CWT) 结合, 分析影响北京市 SNA 的潜在源区贡献, 以期为提高北京市及周边地区空气质量提供科学依据, 也为拓展 SPAMS 的应用领域提供经验和参考.

1 材料与方法

1.1 采样点信息

如图 1 所示, 采样点位于北京市朝阳区北五环外, 中国环境科学研究所内 (E116.415°, N40.042°). 利用单颗粒气溶胶质谱仪 (SPAMS 0515, 广州禾信分析仪器有限公司) 对北京市大气颗粒物进行全年连续观测, SPAMS 采样头高度距离地面约 5 m. 将 2013 年 12 月~2014 年 2 月、2014 年 3~5 月、2014 年 6~8 月和 2014 年 9~11 月分别做为冬季、春季、夏季和秋季, 并对各季节大气颗粒物中硫酸盐、硝酸盐和铵盐 (SNA) 进行提取和分析.



图 1 采样点位置示意

Fig. 1 Location of sampling site

1.2 分析方法

1.2.1 特征离子法

本研究利用特征离子法对 SPAMS 数据中的 SNA 进行提取, 其依据见表 1. 付怀于等^[26]利用该方法提取了北京市 2013 年 1 月不同污染过程下大气颗粒物中的 SNA, 并与同期滤膜分析结果进行对比, 结果表明, 特征离子法提取的硫酸盐、硝酸盐和

铵盐与滤膜分析结果有很好的-致性,且在重污染过程中适用性更好.因此,本研究采用特征离子法对 SNA 进行提取,并统计得到北京市 2014 年全年 SNA 的小时均值数据.

表 1 大气颗粒物中 SNA 提取依据

Table 1 Typical markers used to identify SNA containing aerosol particles

颗粒类型	$m/z(\pm 0.5)$	特征离子	相对峰面积	逻辑关系
Sulfate	-96 & no ± 36	$[\text{SO}_4]^-$	0.005	or
	-97	$[\text{HSO}_4]^-$	0.005	
Nitrate	-46	$[\text{NO}_2]^-$	0.005	or
	-62	$[\text{NO}_3]^-$	0.005	
Ammonium	18	$[\text{NH}_4]^+$	0.005	

1.2.2 Hysplit 后向轨迹分析

本研究利用美国国家大气海洋局(NOAA)研制的 Hysplit 4.0 后向轨迹模式对北京市 2014 年全年的气团后向轨迹进行模拟,选取距离采样点 500 m 高度处的气团,模拟气团 48 h 的后向轨迹,每天每小时模拟一次,并根据气团轨迹的属性(移动速度,来源方向等)将轨迹进行聚类,以此反映采样点周围的气团运动特征.利用 TrajStat 软件,将各条轨迹对应的 SNA 小时均值数据添加至轨迹上,得到影响采样点 SNA 的气团输送路径.

1.2.3 浓度权重轨迹分析法

浓度权重轨迹分析法(concentration weighted trajectory, CWT)是一种基于气团轨迹来分析源区贡献的方法,其详细原理介绍见文献[27, 28].首先选择覆盖采样点气团轨迹的区域为研究区域,并将其网格化($0.2^\circ \times 0.2^\circ$),利用浓度权重轨迹分析法计算轨迹的权重浓度,以反映不同轨迹的污染程度.在 CWT 分析法中,每个网格都有一个权重浓度,它可以通过计算经过该网格的所有轨迹所对应的污染物的平均值来实现,计算方法如下:

$$c_{ij} = \frac{1}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \sum_{l=1}^M c_l \tau_{ijl} \times W_{ij} \quad (1)$$

式中, c_{ij} 是网格 ij 上的平均权重浓度; l 是轨迹; c_l 是轨迹 l 经过网格 ij 时对应的污染物浓度; τ_{ijl} 是轨迹 l 在网格 ij 停留的时间.当 c_{ij} 值较大时,说明经过网格 ij 的空气团会对研究点位造成较高的污染,该网格所对应的区域是主要源区.

式(1)中, W_{ij} 是权重函数,当经过某一网格的所有轨迹数(y_{ij})较小时, CWT 的值会有一定的不确定性.为了减少这种不确定性,引入了权重函数 W_{ij} , 即

当某一网格中的 y_{ij} 小于研究区内每个网格平均轨迹端点数的 3 倍时,就要使用 W_{ij} 来减小 CWT 的不确定性.选取北纬 $33^\circ \sim 56^\circ$, 东经 $101^\circ \sim 118^\circ$ 为研究区域,将研究区域分为 9 775 个 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 的小网格,例如冬季该区域内所有轨迹点数是 103 680 个,则冬季每个网格的平均轨迹端点数大约为 10 个,即当 y_{ij} 约小于 30 的时候,就要使用权重函数,见式(2):

$$W_{ij} = \begin{cases} 1.00, & 30 < y_{ij} \\ 0.70, & 10 < y_{ij} \leq 30 \\ 0.42, & 5 < y_{ij} \leq 10 \\ 0.17, & y_{ij} \leq 5 \end{cases} \quad (2)$$

2 结果与讨论

2.1 SNA 季节变化特征

2.1.1 时间变化

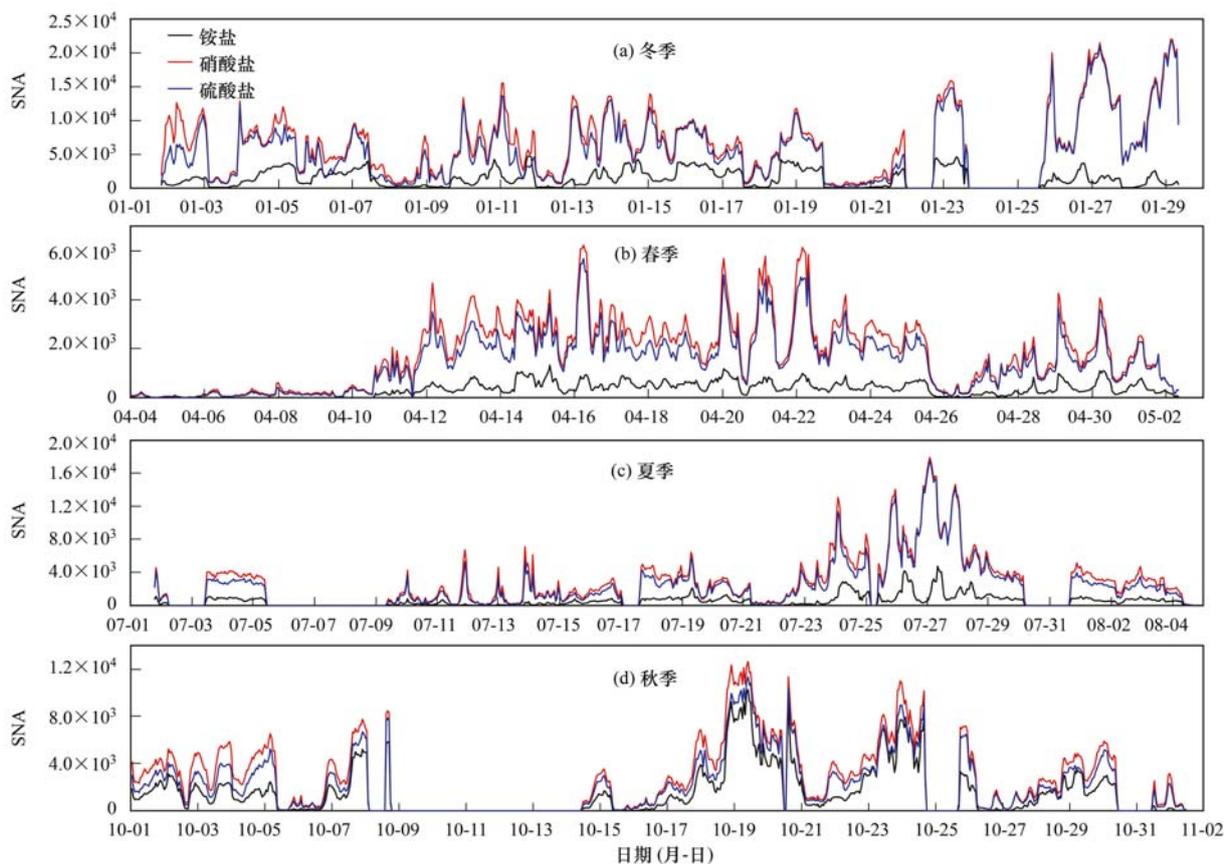
根据 1.2.1 节的方法将 SPAMS 数据中的 SNA 进行提取,得到 2014 年北京市 SNA 的小时均值数据.由于全年数据量较大,因此本研究只列出了各季节代表月份的 SNA 小时均值数据(冬季代表月份为 1 月,春季为 4 月,夏季为 7 月,秋季为 10 月),见图 2.

由图 2 可知,各季节代表月份中,硫酸盐和硝酸盐变化趋势均非常一致,反映出颗粒物中硫酸盐和硝酸盐成分大多同时存在,表明硫酸盐和硝酸盐在颗粒物中具有很好的混合特征,其中 10 月大气颗粒物中硫酸盐、硝酸盐和铵盐这 3 种成分均混合较好.

2.1.2 混合状态

在 2.1.1 节中只是列出了各季节代表月份的 SNA 时间变化趋势,为了更进一步了解各季节颗粒物中 SNA 的混合状态,本研究分别将各季节所有月份(春季: 3~5 月,夏季: 6~8 月,秋季: 9~11 月,冬季: 2013 年 12 月~2014 年 2 月)的 SNA 数据进行归一化处理,利用三元图分析各季节颗粒物中 SNA 之间的关系,见图 3.

相对于其他分析方法,三元图可以提供更多的信息.由图 3 可知,全年大气颗粒物中二次无机成分主要以硝酸盐和硫酸盐为主,而铵盐的含量相对较少(约 30% 以下).其中,春季颗粒物二次成分中硫酸盐占 30%~50%,硝酸盐占 40%~60%,铵盐为 25% 以下;夏季颗粒物二次成分中硫酸盐(30%~50%)、硝酸盐(40%~60%)和铵盐(20% 以下)混合特征同春季较为相似,但是,相比于春季,夏季颗粒物中 SNA 混合状态更为稳定,表现为三元图中数据散点分布集中,从侧面反映出夏季颗粒物的来源



图中仅为各季节代表月份的数据

图2 利用特征离子法提取的SNA小时均值数据

Fig. 2 Hourly average data of SNA extracted using characteristic ion tracer method

及其源贡献更加稳定. 秋季颗粒物中铵盐的占比(约30%以下)较春夏两季有所增加,且秋季颗粒物中SNA的混合特征有向两种状态分离的趋势,这一趋势在冬季更加明显,即低铵盐含量(8%以下)和高铵盐含量(10%~30%)两种混合状态. 此外,冬季颗粒物中SNA占比波动较大,其中以硫酸盐占比波动最大(20%~60%),反映出冬季影响硫酸盐成分的污染源贡献波动较大. 对于大气颗粒中的硫酸盐成分,其主要来自于燃煤排放和光化学反应的二次生成,其中夏季以光化学反应为主,冬季受燃煤采暖、二次生成以及北方供暖地区输送的综合影响^[29],因此冬季的硫酸盐成分占比波动较大. 纵观全年,硝酸盐的占比基本稳定在50%左右,已有的研究表明^[3, 5, 30],硝酸盐主要由 NO_x 转化形成,而机动车排放的 NO_x 在全年相对稳定,以及硝酸盐具有热不稳定性等特性^[30],这可能是硝酸盐占比稳定的一个原因.

2.1.3 粒径分布

颗粒物化学组分的粒径分布可以提供颗粒物来

源的信息^[31]. SPAMS可测颗粒物粒径范围为0.2~2 μm ,为了更好地分析SNA粒径分布随着季节的变化特征,本研究将整个粒径范围分为9段,即0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、0.8~1.0、1.0~1.2、1.2~1.4、1.4~1.6、1.6~1.8、1.8~2.0 μm . 见图4.

由图4可知,硫酸盐和硝酸盐的粒径分布特征非常相似,表明硫酸盐和硝酸盐成分在颗粒物中大多同时存在,且混合较好. 以硝酸盐为例,春季硝酸盐粒径分布主要以0.6~0.8 μm 为主,其次为0.8~1.2 μm ,夏季以0.6~1.0 μm 为主,其次为1.0~1.2 μm ,秋季硝酸盐粒径分布向大粒径段有一定偏移,主要为0.8~1.4 μm ,其次为1.4~1.6 μm 和0.6~0.8 μm ,冬季则仍旧集中在0.6~0.8 μm 段,其次为0.8~1.2 μm 和0.4~0.6 μm . 硝酸盐和硫酸盐粒径分布的季节变化特征为:秋季粒径分布>夏季>春季>冬季. 对于铵盐,春季其粒径分布主要在0.6~1.4 μm 段,夏季主要为0.6~1.2 μm ,最大粒径段为0.8~1.0 μm ,其次为0.6~0.8 μm 和

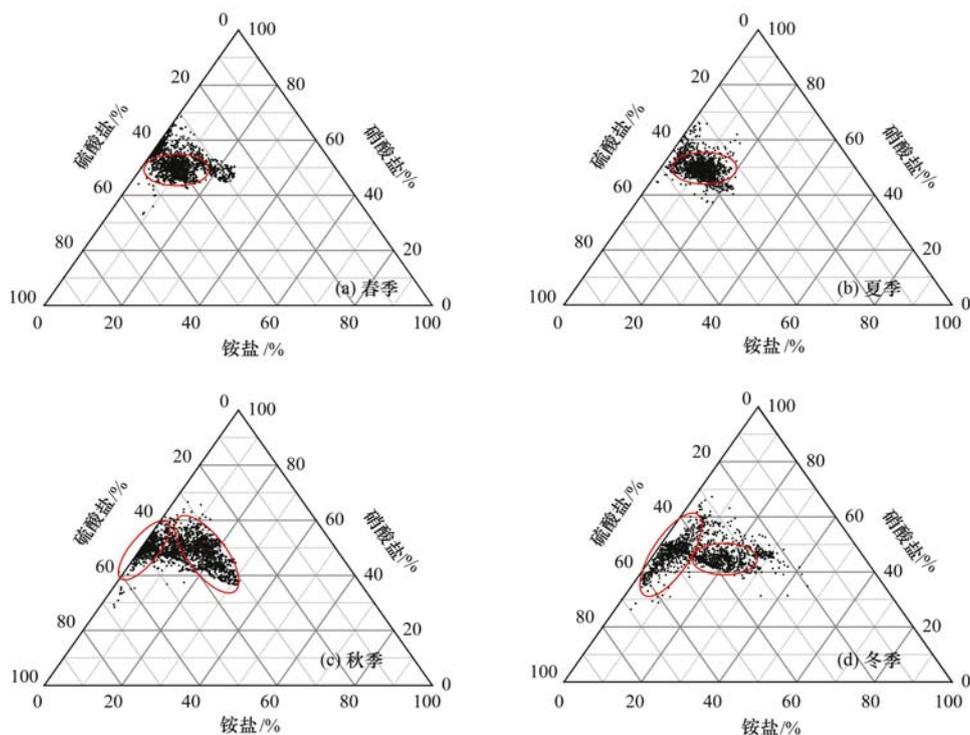


图3 各个季节硫酸盐、硝酸盐和铵盐三元图

Fig. 3 Seasonal ternary diagram of SNA

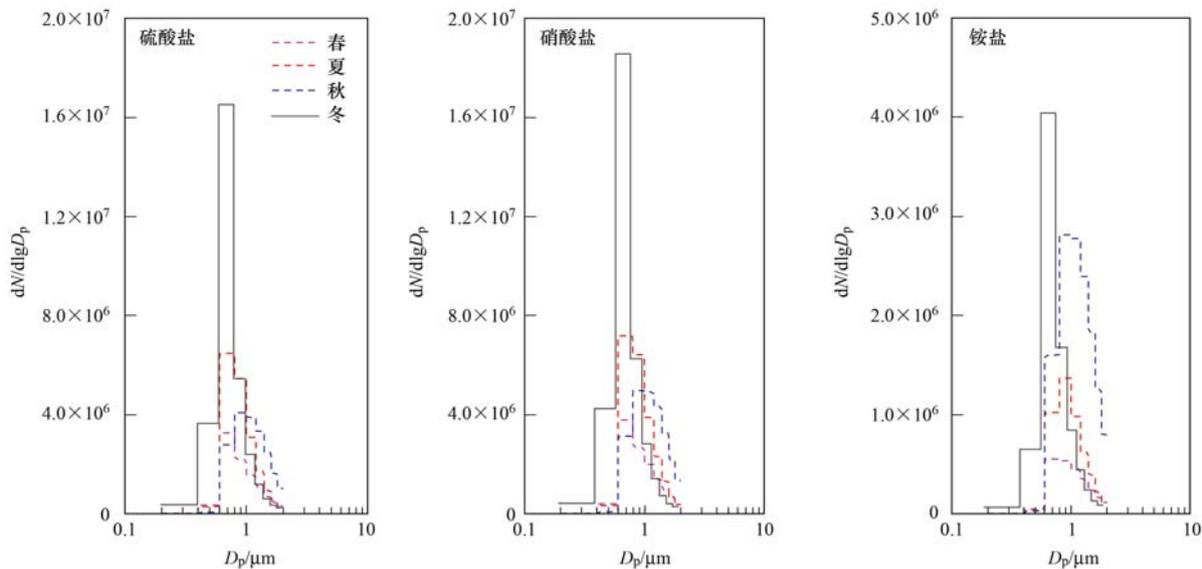


图4 SNA 粒径分布随季节变化特征

Fig. 4 Seasonal size distribution of SNA

1.0 ~ 1.2 μm , 秋季则以 0.8 ~ 1.2 μm 为最大粒径段,其次以 1.2 ~ 1.4 μm 为主,冬季集中在 0.6 ~ 0.8 μm 段,其次为 0.8 ~ 1.2 μm . 铵盐粒径分布季节变化特征为:秋季粒径分布 > 夏季 > 春季 > 冬季. 综上可知,秋季和夏季颗粒物中 SNA 的粒径分布比其他季节有向大粒径段偏移的趋势. 吴志军^[32]研究了北京市大气颗粒物粒径的季节变化,其结果显示

夏季和秋季北京大气颗粒物在积聚模态(大粒径段)的粒径范围内占比大,表明大气中存在较多“老化”的颗粒物,同样地说明了与其他季节相比,夏秋两季颗粒物粒径有向大粒径段偏移的特征. 而相对于大粒径的颗粒,颗粒物粒径越小,越具有极大的比表面积,颗粒物会活跃地参与各类气体分子与液态或固态颗粒物之间的交互作用,通过形成成分和结

构更复杂的混合颗粒物,对人体造成更大的危害^[30].

2.2 SNA 各季节潜在源区贡献

2.2.1 各季节气团后向轨迹结果

图 5 为利用 Hysplit 模型模拟的不同季节 48 h

气团后向轨迹结果,利用 TrajStat 软件通过分析气团轨迹的运行速度、传输方向及高度等特征,分别将各季节的气团轨迹进行聚类并统计聚类后轨迹的来向和占比情况(见表 2),以此反映不同季节采样点的气团输送特征.

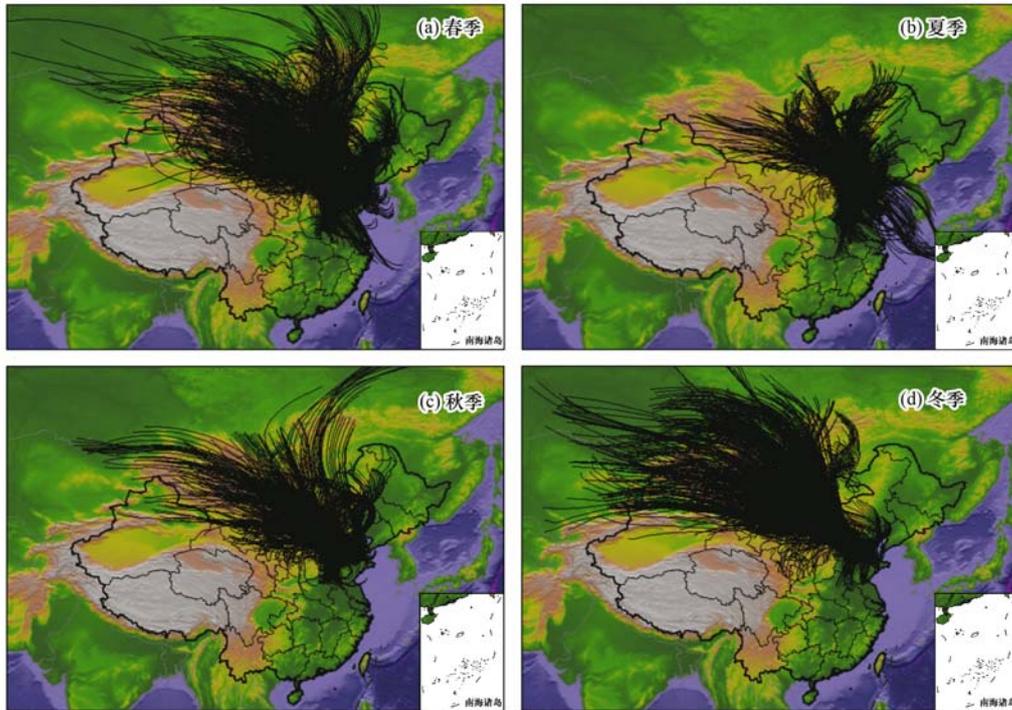


图 5 各季节气团 48 h 后向轨迹模拟结果

Fig. 5 Seasonal 48 h back air mass trajectory results

表 2 不同季节气团来源聚类结果

Table 2 Clustering results of air mass sources in different seasons

项目	春季				夏季				秋季			冬季	
	西北向	东北向	北向	南向	西北向	北向	南向	东南向	西北向	东北向	南向	西北向	东南向
百分比/%	29.3	25.6	5.8	39.3	7.5	23.7	35.9	32.9	30.6	15.0	54.4	56.3	43.7

综上可知,春季气团主要来自于南向的区域传输(39.3%)、西北向长距离传输(29.3%)以及东北向跨区域传输(25.6%);夏季气团主要以南向(35.9%)和东南向(32.9%)为主,其次为北向(23.7%);秋季气团主要来自于南向区域传输(54.4%)以及西北向长距离输送(30.6%);冬季气团则主要为西北向长距离传输(56.3%)和东南向区域输送(43.7%)。

2.2.2 不同季节 SNA 潜在源区贡献

本研究利用 CWT 方法,结合上述气团后向轨迹模拟结果,对各季节硫酸盐、硝酸盐和铵盐潜在源区贡献进行了分析(见图 6~8),其中 CWT 高值区

(颜色深)即为对观测点 SNA 贡献大的潜在区域。

颗粒物中硫酸盐成分潜在源区贡献的季节变化结果见图 6. 春季硫酸盐 CWT 高值区主要集中在采样点以南的区域,包括北京本地南部区域、天津、保定和衡水等地. 此外,春季硫酸盐有两条较为明显的潜在污染传输路径:“天津-北京”以及“衡水-保定-北京”. 夏季采样点南部和东部区域 CWT 值较高,以保定和廊坊最高,另外,夏季受季风的影响,潜在输送路径有向沿海偏移的趋势,山东西南部区域也有一定的输送. 秋季整个京津冀范围内 CWT 值稳定在比较高的水平,其中北京本地贡献最高. 冬季硫酸盐 CWT 高值主要集中在北京本地和天津等地,冬

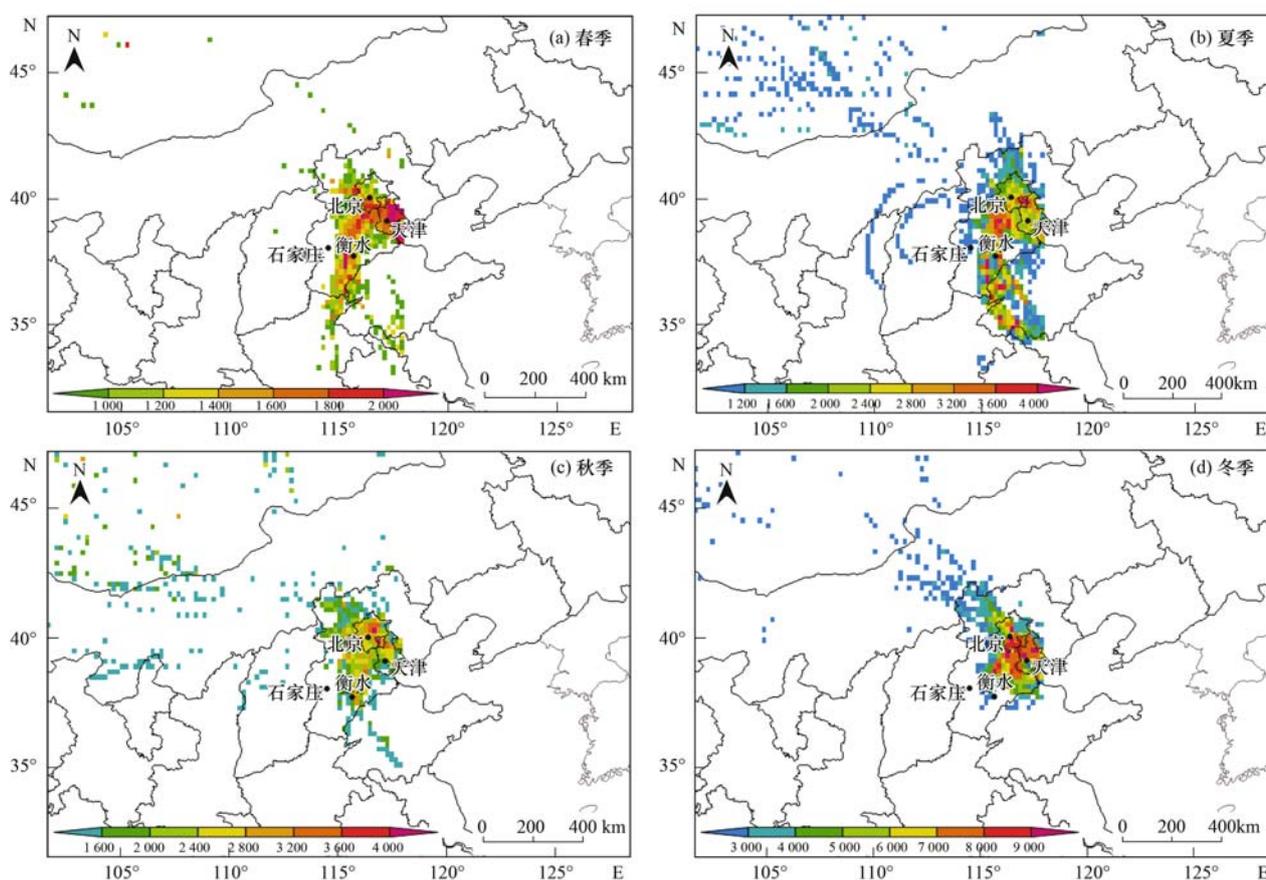


图 6 硫酸盐潜在源区贡献季节变化

Fig. 6 Seasonal variation of the potential source contribution of sulfate

季污染物扩散范围较为集中,主要原因可能为持续低压控制下的静稳天气条件不利于污染物的输送. 总体来看,影响北京市硫酸盐的潜在区域主要为北京本地和南部区域的输送,虽然 2.2.1 节中西北向的气团也有较大占比(例如冬季来自西北向的气团占 56.3%),但是该方向的气团所携带的污染物少,因此,来自西北向的气团所经过的区域并不是影响北京市硫酸盐的潜在源区(虽然有贡献但是贡献不大). 此外,除了北京本地的高贡献外,南向气团所经过的地区则是影响北京市大气颗粒物中硫酸盐成分最主要的输送区域.

图 7 为颗粒物中硝酸盐成分潜在源区的季节变化. 从中可知,硝酸盐各季节潜在源区同硫酸盐有十分相似的空间分布特征. 春季硝酸盐 CWT 高值区依旧集中在采样点以南的区域,其中“天津-北京”和“衡水-保定-北京”两条路径经过的区域对采样点硝酸盐的潜在贡献最高. 夏季硝酸盐 CWT 高值出现在保定和廊坊. 秋季高值区出现在北京本地,且范围较小(< 50 km). 冬季主要集中在“北京-天津-衡水”

这一区域.

图 8 为颗粒物中铵盐成分潜在源区的季节变化. 其中春季高值区出现在北京本地西部区域,潜在区域传输则主要以“天津-北京”这一路径为主. 夏季整个京津冀区域 CWT 值均处于较高的状态,其中以廊坊和天津最甚,“山东西南部-衡水-北京”这一路径也有较高的贡献. 秋季 CWT 高值区为廊坊、衡水等地. 冬季主要集中在“北京-天津-衡水”这一潜在区域.

此外, Zhang 等^[12]利用潜在源贡献方法分析了 2009 年 4 月~2010 年 1 月北京市硫酸盐、硝酸盐和铵盐的潜在源区,结果表明,硫酸盐、硝酸盐和铵盐有相似的空间分布,高贡献源区主要集中在北京东部和南部区域,其中以天津、石家庄和郑州贡献最大. Sun 等^[33]也利用此方法分析了 2011 年 7 月~2012 年 6 月北京市硫酸盐和硝酸盐的潜在源区,结果同样表明,硫酸盐和硝酸盐具有非常相似的空间分布特征,北京南部和东南区域为潜在高贡献区,以“衡水-保定-廊坊-北京”为最主要的传输路径,本研

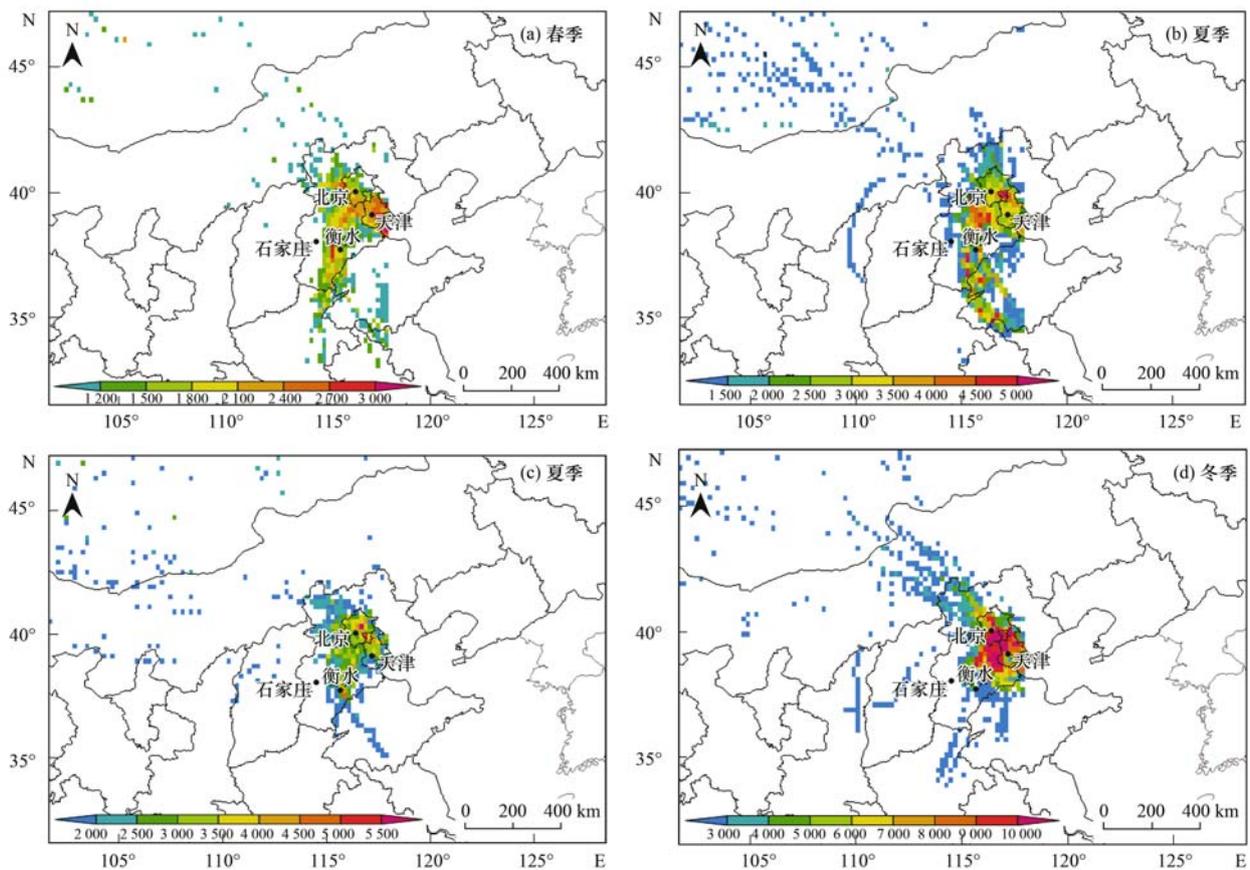


图7 硝酸盐潜在源区贡献季节变化

Fig. 7 Seasonal variation of the potential source contribution of nitrate

究结果与其十分相似。

3 结论

(1) 春、夏季颗粒物中硫酸盐、硝酸盐和铵盐混合状态较秋、冬季更加稳定,且秋季颗粒物中硫酸盐、硝酸盐和铵盐的混合特征有向两种状态分离的趋势,即低铵盐含量($<8\%$)和高铵盐含量($10\% \sim 30\%$)两种混合状态,且这一趋势在冬季更加明显。

(2) 硫酸盐和硝酸盐的粒径分布特征十分相似。颗粒物中SNA的粒径分布季节变化特征为:秋季最大粒径段 $>$ 夏季 $>$ 春季 $>$ 冬季,即秋季和夏季颗粒物中SNA的粒径分布比其他季节有向大粒径段偏移的趋势。

(3) 硫酸盐、硝酸盐和铵盐潜在源区分布有较为相似的空间特征,其中硫酸盐和硝酸盐最为相似。潜在的高贡献源区主要集中在北京本地和南部区域,以天津、廊坊、衡水、保定、石家庄等地为主。

参考文献:

[1] 郝吉明, 吕子峰, 楚碧武, 等. 大气二次有机气溶胶污染特征及模拟研究[M]. 北京: 科学出版社, 2015. 1-2.

- [2] 王笑非. 上海市大气二次气溶胶的单颗粒质谱研究[D]. 上海: 复旦大学, 2009. 9-11.
- [3] Guo S, Hu M, Zamora M L, *et al.* Elucidating severe urban haze formation in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111** (49): 17373-17378.
- [4] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [5] Zhang J K, Sun Y, Liu Z R, *et al.* Characterization of submicron aerosols during a month of serious pollution in Beijing, 2013[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(6): 2887-2903.
- [6] Sun Y L, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* Chemical characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in haze-fog episodes in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40** (10): 3148-3155.
- [7] 刘娜, 余晔, 何建军, 等. 兰州冬季大气污染源分析[J]. *环境科学研究*, 2015, **28**(4): 509-516.
- [8] 王珏, 王郭臣, 陈莉. 济南市四季PM₁₀、PM_{2.5}输送来源及其传输过程[J]. *环境科学与技术*, 2015, **38**(5): 175-182.
- [9] 方利江, 傅贤康, 谢立峰, 等. 舟山本岛大气污染输送过程的数值模拟分析[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(10): 1087-1094.
- [10] 王郭臣, 王珏, 信玉洁, 等. 天津PM₁₀和NO₂输送路径及潜

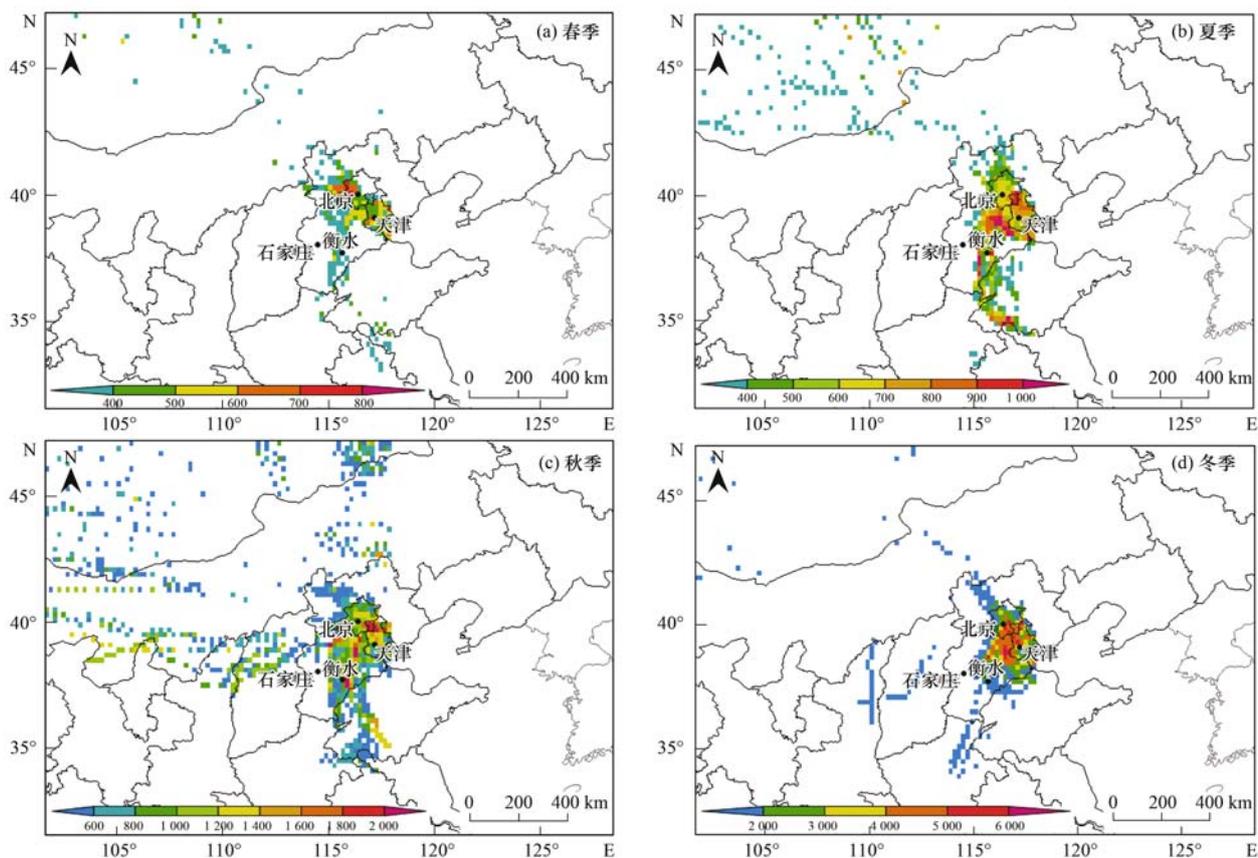


图 8 铵盐潜在源区贡献季节变化

Fig. 8 Seasonal variation of the potential source contribution of ammonium

在源区研究[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(12): 3009-3016.

- [11] 刘娜, 余晔, 陈晋北, 等. 兰州春季沙尘过程 PM₁₀ 输送路径及其潜在源区[J]. 大气科学学报, 2012, **35**(4): 477-486.
- [12] Zhang R, Jing J, Tao J, *et al.* Chemical characterization and source apportionment of PM_{2.5} in Beijing: seasonal perspective [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(14): 7053-7074.
- [13] Moffet R C, de Foy B, Molina L T, *et al.* Measurement of ambient aerosols in northern Mexico City by single particle mass spectrometry[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(16): 4499-4516.
- [14] Silva P J, Liu D Y, Noble C A, *et al.* Size and chemical characterization of individual particles resulting from biomass burning of local Southern California species[J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(18): 3068-3076.
- [15] Gard E E, Kleeman M J, Gross D S, *et al.* Direct observation of heterogeneous chemistry in the atmosphere[J]. *Science*, 1998, **279**(5354): 1184-1187.
- [16] Moffet R C, Prather K A. In-situ measurements of the mixing state and optical properties of soot with implications for radiative forcing estimates [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, **106**(29): 11872-11877.

- [17] Pratt K A, Murphy S M, Subramanian R, *et al.* Flight-based chemical characterization of biomass burning aerosols within two prescribed burn smoke plumes[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(24): 12549-12565.
- [18] Healy R M, Sciare J, Poulain L, *et al.* Sources and mixing state of size-resolved elemental carbon particles in a European megacity: Paris[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(4): 1681-1700.
- [19] Yang F, Chen H, Wang X N, *et al.* Single particle mass spectrometry of oxalic acid in ambient aerosols in Shanghai: mixing state and formation mechanism [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(25): 3876-3882.
- [20] Bi X H, Zhang G H, Li L, *et al.* Mixing state of biomass burning particles by single particle aerosol mass spectrometer in the urban area of PRD, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(20): 3447-3453.
- [21] Zhang G, Bi X, Li L, *et al.* Mixing state of individual submicron carbon-containing particles during spring and fall seasons in urban Guangzhou, China: a case study [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(9): 4723-4735.
- [22] Li L, Li M, Huang Z X, *et al.* Ambient particle characterization by single particle aerosol mass spectrometry in an urban area of Beijing[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **94**: 323-331.
- [23] Li L, Huang Z X, Dong J G, *et al.* Real time bipolar time-of-

- flight mass spectrometer for analyzing single aerosol particles[J]. *International Journal of Mass Spectrometry*, 2011, **303** (2-3): 118-124.
- [24] 周静博, 任毅斌, 洪纲, 等. 利用 SPAMS 研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因[J]. *环境科学*, 2015, **36** (11): 3972-3980.
- [25] 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.
- [26] 付怀于, 闫才青, 郑攻, 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.
- [27] Hoh E, Hites R A. Sources of toxaphene and other organochlorine pesticides in North America as determined by air measurements and potential source contribution function analyses [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38** (15): 4187-4194.
- [28] Gao N, Cheng M D, Hopke P K. Potential source contribution function analysis and source apportionment of sulfur species measured at Rubidoux, CA during the Southern California Air Quality Study, 1987 [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1993, **277** (2): 369-380.
- [29] Zhang R, Wang G, Guo S, *et al.* Formation of urban fine particulate matter [J]. *Chemical Reviews*, 2015, **115** (10): 3803-3855.
- [30] 曹军骥. *PM_{2.5}与环境* [M]. 北京: 科学出版社, 2014. 79-81.
- [31] 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. 275-276.
- [32] 吴志军. *北京城市大气细和超细颗粒物数谱分布特征及变化规律* [D]. 北京: 北京大学, 2007. 45-48.
- [33] Sun Y L, Wang Z F, Du W, *et al.* Long-term real-time measurements of aerosol particle composition in Beijing, China: seasonal variations, meteorological effects, and source analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15** (17): 10149-10165.

CONTENTS

Exploring the Severe Haze in Beijing During December, 2015; Pollution Process and Emissions Variation	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, NIE Teng, <i>et al.</i> (1593)
Pollution Characteristics and Source of HULIS in the Fine Particle During the Beijing APEC	ZHOU Xue-ming, QI Xue-jiao, XIANG Ping, <i>et al.</i> (1602)
Seasonal Variation Characteristics and Potential Source Contribution of Sulfate, Nitrate and Ammonium in Beijing by Using Single Particle Aerosol Mass Spectrometry	LIU Lang, ZHANG Wen-jie, DU Shi-yong, <i>et al.</i> (1609)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} in Lanzhou City	WANG Xin, NIE Yan, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1619)
Pollution Level and Source Apportionment of Atmospheric Particles PM _{2.5} in Southwest Suburb of Chengdu in Spring	LIN Yu, YE Zhi-xiang, YANG Huai-jin, <i>et al.</i> (1629)
Variation Characteristics of Total Gaseous Mercury at Simian Mountain Background Station in Mid-subtropical Region	LIU Wei-ming, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1639)
Establishment of Method for Health Risk Assessment of Pollutants from Fixed Sources	CHEN Qiang, WU Huan-bo (1646)
Testing of Concentration and Characteristics of Particulate Matters Emitted from Stationary Combustion Sources in Beijing	HU Yue-qi, WU Xiao-dong, WANG Chen, <i>et al.</i> (1653)
Pollution Evaluation and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in the Parks of Nanjing	WANG Cheng, QIAN Xin, LI Hui-ming, <i>et al.</i> (1662)
CoCuMnO ₂ Photocatalyzed Oxidation of Multi-component VOCs and Kinetic Analysis	MENG Hai-long, BO Long-li, LIU Jia-dong, <i>et al.</i> (1670)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Tidal Reach and Estuary of the Daliao River and Analysis of Potential Eutrophication	ZHANG Lei, CAO Wei, MA Ying-qun, <i>et al.</i> (1677)
Spatial Distribution of Stable Isotope from the Lakes in Typical Temperate Glacier Region	SHI Xiao-yi, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (1685)
$\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$ and $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ Tracing of Nitrate Sources in Beijing Urban Rivers	ZHAO Qing-liang, MA Hui-ya, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (1692)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Nitrate Pollution in Shallow Groundwater of Liujiang Basin	WANG He, GU Hong-biao, CHI Bao-ming, <i>et al.</i> (1699)
Nitrogen Losses Under the Action of Different Land Use Types of Small Catchment in Three Gorges Region	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1707)
Interception Effect of Ecological Ditch on Nitrogen Transport in Agricultural Runoff in Subtropical China	WANG Di, LI Hong-fang, LIU Feng, <i>et al.</i> (1717)
Biodegradation Coefficients of Typical Pollutants in the Plain Rivers Network	FENG Shuai, LI Xu-yong, DENG Jian-cai (1724)
Influence of Submerged Plants on Microbial Community Structure in Sediment of Hongze Lake	ZHANG Ding-yu, ZHANG Ting-xi, DONG Dan-ping, <i>et al.</i> (1734)
Community Structure Characteristics of Diatom in Reservoirs Located in the South of Jiangsu Province, China and Its Control Factors	REN Jie, ZHOU Tao, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1742)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Mercury in Hengshuihu Wetland, Hebei Province	WANG Nai-shan, ZHANG Man-yin, CUI Li-juan, <i>et al.</i> (1754)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils and Sediments in Shunde Waterway, Southern China	CAI Yi-min, CHEN Wei-ping, PENG Chi, <i>et al.</i> (1763)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of PBDEs in Water and Sediment from an Electronic Waste Dismantling Area in Taizhou	CHEN Xiang-ping, PENG Bao-qi, LÜ Su-ping, <i>et al.</i> (1771)
Major Ionic Features and Their Controlling Factors in the Upper-Middle Reaches of Wujiang River	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (1779)
Export of Total Organic Carbon (TOC) from Karst Watershed and Its Influencing Factors; An Example from Xueyudong Underground River System, Chongqing	WANG Qiao-lian, JIANG Yong-jun, CHEN Yu (1788)
Seasonal Variations and Controlling Factors of the Element Contents in Drip Waters Collected from the Baojingong Cave in Guangdong Province	HUANG Jia-yi, CHEN Lin, CHEN Qiong, <i>et al.</i> (1798)
Tracing the Fecal Contamination Sources Based on <i>Bacteroides</i> 16S rRNA PCR-DGGE in Karst Groundwater; Taking Laolongdong Underground River System, Nanshan, Chongqing as an Example	ZHANG Hong, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (1805)
Sources and Variation Characteristics of Dissolved Lipid Biomarkers in a Typical Karst Underground River	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, LI Jian-hong, <i>et al.</i> (1814)
Formation of Halogenated By-products in Co ²⁺ Activated Peroxymonosulfate Oxidation Process	LIU Kuo, JIN Hao, DONG Wei, <i>et al.</i> (1823)
Aspartic Acid Generated in the Process of Chlorination Disinfection By-product Dichloroacetonitrile	DING Chun-sheng, LI Nai-jun, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (1831)
Influencing Factors of Assimilable Organic Carbon (AOC) Formation in Drinking Water During Ozonation Process	DONG Bing-zhi, ZHANG Jia-li, HE Chang (1837)
Wastewater Quantity and Quality Fluctuation Characteristics of Typical Area of Hybrid Sewage System	CHENG Xun, ZHANG Ming-kai, LIU Yan-chen, <i>et al.</i> (1845)
Preparation of HDTMA-modified Zeolite and Its Performance in Nitro-phenol Adsorption from Wastewaters	GUO Jun-yuan, WANG Bin (1852)
Selection of Suitable Microalgal Species for Sorption of Uranium in Radioactive Wastewater Treatment	LI Xin, HU Hong-ying, YU Jun-yi, <i>et al.</i> (1858)
Magnetic Fe ₃ O ₄ Microparticles Conditioning-Pressure Electro-osmotic Dewatering (MPEOD) of Sewage Sludge	QIAN Xu, WANG Yi-li, ZHAO Li (1864)
Stability of Short-cut Nitrification Nitrogen Removal in Digested Piggery Wastewater with an Intermittently Aerated Sequencing Batch Reactor	SONG Xiao-yan, LIU Rui, SHUI Yong, <i>et al.</i> (1873)
Effect of Irrigation Patterns on Soil CO ₂ and N ₂ O Emissions from Winter Wheat Field in North China Plain	GUO Shu-fang, QI Yu-chun, YIN Fei-hu, <i>et al.</i> (1880)
Characteristics of Dissolved CH ₄ and N ₂ O Concentrations of Weihe River in Xinxiang Section in Spring	HOU Cui-cui, ZHANG Fang, LI Ying-chen, <i>et al.</i> (1891)
Effect of Stimulated N Deposition on N ₂ O Emission from a <i>Stipa krylovii</i> Steppe in Inner Mongolia, China	YANG Han-yue, ZHANG Ting, HUANG Yong-mei, <i>et al.</i> (1900)
Response of Soil Respiration and Organic Carbon to Returning of Different Agricultural Straws and Its Mechanism	CAO Zhan-bo, WANG Lei, LI Fan, <i>et al.</i> (1908)
Spatial Variability and Distribution Pattern of Soil Organic Matter in a Mollisol Watershed of China	GAO Feng-jie, MA Quan-lai, HAN Wen-wen, <i>et al.</i> (1915)
Effects of Tillage on Distribution of Heavy Metals and Organic Matter Within Purple Paddy Soil Aggregates	SHI Qiong-bin, ZHAO Xiu-lan, CHANG Tong-ju, <i>et al.</i> (1923)
Distribution Characteristics and Potential Ecological Hazards Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing	ZHAO Qian, MA Lin, LIU Yi-fei, <i>et al.</i> (1931)
Contamination Assessment and Sources Analysis of Soil Heavy Metals in Opencast Mine of East Junggar Basin in Xinjiang	LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, <i>et al.</i> (1938)
Effect of Nano-TiO ₂ on Release and Speciation Changes of Heavy Metals in Soil	ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, LIANG Li, <i>et al.</i> (1946)
Reduction Kinetics of Cr(VI) in Chromium Contaminated Soil by Nanoscale Zerovalent Iron-copper Bimetallic	MA Shao-yun, ZHU Fang, SHANG Zhi-feng (1953)
Inhibition of Low Molecular Organic Acids on the Activity of <i>Acidithiobacillus</i> Species and Its Effect on the Removal of Heavy Metals from Contaminated Soil	SONG Yong-wei, WANG He-ru, CAO Yan-xiao, <i>et al.</i> (1960)
Contribution of Particle Size and Surface Coating of Silver Nanoparticles to Its Toxicity in Marine Diatom <i>Skeletonema costatum</i>	HUANG Jun, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (1968)
Rhizospheric Mechanisms of <i>Hemerocallis middendorfii</i> Trautv. et Mey. Remediating Petroleum-contaminated Soil and Metabonomic Analyses of the Root Systems	WANG Ya-nan, CHENG Li-juan, ZHOU Qi-xing (1978)
Effects of Thermophilic Composting on Antibiotic Resistance Genes (ARGs) of Swine Manure Source	ZHENG Ning-guo, HUANG Nan, WANG Wei-wei, <i>et al.</i> (1986)
Interaction Between Sulfonamide Antibiotics Fates and Chicken Manure Composting	LIN Hui, WANG Jian-mei, SUN Wan-chun, <i>et al.</i> (1993)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年5月15日 第37卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 5 May 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@reces. 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@reces. 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