

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

|                                             |                                            |                         |
|---------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| 2014年APEC前后北京城区PM <sub>2.5</sub> 中水溶性离子特征分析 | 杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明                 | (4325)                  |
| 2013年北京市不同方位PM <sub>2.5</sub> 背景浓度研究        | 李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨                  | (4331)                  |
| APEC期间北京空气质量改善对比分析                          | 李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达                     | (4340)                  |
| 嘉兴市春季PM <sub>10</sub> 、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应  | 沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥                   | (4348)                  |
| 烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响                       | 赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁                             | (4358)                  |
| 典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡                            | 张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤                       | (4366)                  |
| 上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应                      | 刘飞,褚慧敏,郑祥民                                 | (4374)                  |
| 重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析                        | 于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立                     | (4381)                  |
| 利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究                      | 梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤                              | (4389)                  |
| 低浓度CO <sub>2</sub> 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附        | 刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真                        | (4396)                  |
| 红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制               | 郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞                              | (4403)                  |
| 中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征                     | 安思危,孙涛,马明,王定勇                              | (4414)                  |
| 基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数              | 张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮                      | (4420)                  |
| 白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征               | 郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明                       | (4430)                  |
| 小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应                     | 李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰             | (4436)                  |
| 湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响               | 余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治                     | (4444)                  |
| 贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义                    | 沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖                  | (4455)                  |
| 碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析                  | 邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国             | (4464)                  |
| 钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征                | 张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳               | (4471)                  |
| 长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价                     | 田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣                         | (4479)                  |
| 城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例           | 齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁                          | (4486)                  |
| 柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响                    | 覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇                           | (4494)                  |
| 微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响                     | 左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩                          | (4501)                  |
| 扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律                     | 陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍                           | (4509)                  |
| 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应                            | 张树楠,肖润林,刘锋,吴金水                             | (4516)                  |
| 开放系统下方解石对磷的去除                               | 李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文                    | (4523)                  |
| 铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系                   | 李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生                         | (4531)                  |
| 基于优质碳源提供的CAMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究              | 程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良                             | (4539)                  |
| ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验                      | 周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵                      | (4546)                  |
| 基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价                        | 符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春               | (4553)                  |
| 北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析                   | 张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平                       | (4561)                  |
| 广州市小学生多环芳烃内暴露水平                             | 苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞                    | (4567)                  |
| 构建三元混合污染物的三维等效图                             | 刘雪,刘树深,刘海玲                                 | (4574)                  |
| 化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征                 | 张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新              | (4582)                  |
| 不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性                   | 严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑                            | (4591)                  |
| 基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图                          | 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩                         | (4600)                  |
| 土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究                            | 谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰                | (4609)                  |
| 纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响                      | 李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳                             | (4615)                  |
| 蜈蚣草中砷与铊的赋存特征及其相互作用                          | 张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚                      | (4623)                  |
| 纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响                      | 熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体 | (4630)                  |
| 黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响                   | 陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭         | (4642)                  |
| 耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化         | 马聪,秦丹,孙倩,于昌平                               | (4651)                  |
| 浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征                    | 李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎                          | (4659)                  |
| 缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化                | 曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源                      | (4667)                  |
| 华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响                       | 张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊                            | (4676)                  |
| 再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估                | 田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙                      | (4682)                  |
| 《环境科学》第36卷(2015年)总目录                        |                                            | (4690)                  |
| 《环境科学》征订启事(4347)                            | 《环境科学》征稿简则(4454)                           | 信息(4463,4530,4573,4581) |

# 2014年APEC前后北京城区PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子特征分析

杨懂艳, 刘保献, 张大伟\*, 石爱军, 周健楠, 景宽, 富佳明

(北京市环境保护监测中心, 大气颗粒物监测技术北京市重点实验室, 北京 100048)

**摘要:** 2014年10月至11月间, 在北京城区开展PM<sub>2.5</sub>监测并对其中的水溶性离子进行离线及在线分析. 其中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>在不同观测阶段均是PM<sub>2.5</sub>中的主要离子, APEC期间三者总浓度为(26.8 ± 22.5) μg·m<sup>-3</sup>, 占PM<sub>2.5</sub>质量浓度的(41.7 ± 8.5)%, 占所测水溶性离子组分的(84.7 ± 5.0)%; APEC期间NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度水平较高, 对PM<sub>2.5</sub>贡献最大. 对APEC期间水溶性离子的累积趋势研究发现, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>和Cl<sup>-</sup>均经历了3个不同的累积过程, 除气象条件外, 本地源排放及区域污染引起的累积效应仍不可忽视. 对颗粒物酸性特征研究发现, 不同观测期间, 颗粒物中主要水溶性离子浓度虽有不同, 但北京秋末冬初颗粒物无明显酸化特征.

**关键词:** 水溶性离子; PM<sub>2.5</sub>; 北京; APEC; 酸性特征

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4325-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.001

## Characterization of Water-soluble Ions in PM<sub>2.5</sub> of Beijing During 2014 APEC

YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei\*, SHI Ai-jun, ZHOU Jian-nan, JING Kuan, FU Jia-ming

(Beijing Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The mass concentration of PM<sub>2.5</sub> associated with its online and off-line water-soluble ions were obtained during 2014-10-2014-11. Secondary inorganic species NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> were the major components of PM<sub>2.5</sub> during different observation periods. The total concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> was (26.8 ± 22.5) μg·m<sup>-3</sup>, which contributed (41.7 ± 8.5)% to PM<sub>2.5</sub>. The concentration of NO<sub>3</sub><sup>-</sup> was higher than those of others and contributed most to PM<sub>2.5</sub>. The ions of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and Cl<sup>-</sup> all showed three different periods during 2014 Beijing APEC, besides the different meteorological condition, the cumulative effect caused by local emissions and regional pollution could also not be ignored. Although the characteristics of water-soluble ions was different during different observation periods, there was no obvious acidification of PM<sub>2.5</sub> in Beijing at the end of autumn and beginning of winter.

**Key words:** water-soluble ions; PM<sub>2.5</sub>; Beijing; APEC; acidification characteristics

2013年1月1日新的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)的实施, 标志着全国大气污染治理进入了新的阶段, 而细颗粒物PM<sub>2.5</sub>也成为了大气污染防治的焦点. 然而自9月以来北京及周边地区出现了几次严重空气污染事件, PM<sub>2.5</sub>浓度出现普遍超标现象<sup>[1,2]</sup>, 其来源及特征再度引起人们的广泛关注. 水溶性离子是细颗粒物的重要组成部分, 尤其是其中的二次离子NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (三者简称SNA)受人为因素影响较大, 具有较高的区域贡献, 其对能见度、大气光化学反应以及地气辐射产生直接或间接的影响<sup>[3~5]</sup>. 然而在国内实施的以保障大型会议或活动召开而实施的临时空气质量保障措施活动均证实, 除受气象条件影响外, 通过控制一次源排放, 也可大大降低细颗粒物及二次离子的浓度水平<sup>[6~13]</sup>. 刘辉等<sup>[6]</sup>通过研究发现, 受奥运会期间北京市大气污染临时减排措施的影响, 奥运期间北京

市污染物(SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>)排放量呈逐时段降低的趋势, PM<sub>2.5</sub>及水溶性离子浓度降至观测期间最低值. 2010年广州亚运会期间, 由于减排限行等措施的实施, 高峰时段NO<sub>x</sub>和O<sub>3</sub>平均体积分数以及颗粒物PM<sub>2.5</sub>质量浓度较2009年同期有明显下降<sup>[10,11]</sup>; 邹嘉南等<sup>[12]</sup>研究发现在亚青会期间南京市PM<sub>2.5</sub>浓度水平明显下降, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>比值降低, 移动源贡献降低.

2014年11月为保障亚太经济合作组织(APEC)会议的顺利召开, 京津冀及周边地区成立了大气污染防治协作小组, 并采取了比2008年更为严格的区域联防联控, 按照“两圈、两阶段”的总体部署, 在北京周边五省区市实施多种污染物协同减

收稿日期: 2015-05-15; 修订日期: 2015-07-14

基金项目: 北京市科技计划项目(Z141100002714002)

作者简介: 杨懂艳(1979~), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为环境监测技术, E-mail: ydongyan@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: zhangdawei@bjmemc.com.cn

排等措施,以保障北京市的环境空气质量<sup>[14]</sup>。然而,11月北京秋冬交替、静稳天气较多,非常不利于污染物的扩散;同时由于北方地区开始燃煤取暖,污染源排放量大等客观原因,11月北京PM<sub>2.5</sub>浓度水平较高,且二次离子贡献相对较大<sup>[15-18]</sup>。本研究在2014年10月1日~11月30日,北京市举办APEC峰会前期、期间及会后,在秋冬季交替和区域协同减排影响下,分析了北京市大气气溶胶PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子的浓度水平和变化规律,通过评估北京及周边地区临时性减排措施的效果,以期为进一步京津冀地区环境空气质量控制及污染治理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样地点

采样点位于北京城区海淀区西二环与西三环之间,监测中心6层楼顶上(39°55′51″N,116°19′9″E),离车公庄西路约50m,周边无明显人为排放源。可在一定程度上代表北京市城区区域大气污染水平。

### 1.2 样品采集

每日设置00:00~12:00和12:00~24:00两个采样时段;使用Thermo2025i单通道颗粒物采样器采集PM<sub>2.5</sub>细颗粒物,采样流量为16.7 L·min<sup>-1</sup>;采样膜采用whatman  $\phi$  45 mm 特氟龙材质滤膜。采样前将滤膜放入恒温恒湿箱中24 h,用十万分之一精密电子天平称重后放入冰箱中低温保存。采样后将采样膜放入恒温恒湿箱平衡24 h,称重后同样将滤膜样品低温保存在冰箱中等待分析。

### 1.3 水溶性离子分析

将PM<sub>2.5</sub>滤膜放入一次性聚氯乙烯消解瓶中,加入50 mL超纯水,超声1 h,为防止含N组分的挥发及损失,超声过程中放置一定数量的冰块。样品取出冷却至室温后,混匀后用一次性0.45  $\mu$ m过滤头过滤后分析。实验用水均为Million Q仪器超滤至电阻率达18.2 M $\Omega$ ·cm的超纯水。水溶性无机阴离子(F<sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)采用Dionex公司生产的ICS-5000离子色谱仪进行分析;水溶性阳离子(Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>)使用Dionex公司生产的ICS-2000离子色谱仪进行分析。阴、阳离子色谱柱型号分别为:AS-11HC和CS12A;阴离子淋洗液为30 mmol·L<sup>-1</sup> KOH溶液,流速为1.0 L·min<sup>-1</sup>,进样量为250  $\mu$ L。阳离子淋洗液为20 mmol·L<sup>-1</sup> 甲烷磺酸淋洗液,流速为1.0 L·min<sup>-1</sup>,进样量为100  $\mu$ L。

### 1.4 在线数据采集

为了解颗粒物中水溶性离子的实时变化规律,同时利用气溶胶在线检测仪(Thermo URG9000)每1 h收集一次气溶胶(PM<sub>2.5</sub>)样品,并对其中8种水溶性离子(Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)浓度进行检测分析。为保证数据的可比性,定期对仪器进行校准,并保证滤膜采集-实验室分析所获日均值与在线监测仪所获日均值两者相对标准偏差控制在40%以内<sup>[18-20]</sup>。温度、相对湿度等常规气象资料数据均来源于北京市环境保护监测中心。

## 2 结果与分析

### 2.1 二次无机离子浓度水平

为更深入了解APEC峰会前期及期间PM<sub>2.5</sub>中水溶性离子的浓度水平,本研究提取了北京市环境保护监测中心在2013年11月1~15日期间(APEC同期)开展PM<sub>2.5</sub>监测的历史数据以便比较。同时,本研究将2014年10月1日~11月2日定义为APEC前期,11月3~12日定义为APEC会期,11月13~30日定义为APEC后期。

由表1可知,与APEC前期及2013年同期相比,APEC期间所测9种水溶性离子浓度水平均有不同程度的下降;APEC后各离子组分均呈上升趋势。与2013年同期略有不同的是,APEC前期、期间及后期3种主要的水溶性离子浓度高低顺序均为NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup>;而2013年同期各离子浓度顺序为NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > NH<sub>4</sub><sup>+</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>。APEC期间三者占PM<sub>2.5</sub>质量浓度的(41.7  $\pm$  8.5)%,占所测水溶性离子组分的(84.7  $\pm$  5.0)%。APEC期间NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度水平较高,为(13.4  $\pm$  13.6)  $\mu$ g·m<sup>-3</sup>;虽然其浓度水平比APEC前期下降了63%,但与2013年同期水平。比较其百分含量发现,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>百分含量最高;虽然APEC期间NO<sub>3</sub><sup>-</sup>浓度水平有一定程度的下降,但其对颗粒物的贡献仍维持在较高水平<sup>[18]</sup>;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>主要来源于前体物NO<sub>x</sub>的二次转化,APEC前期及期间,北京及周边地区的联合减排以及临时交通管理措施,NO<sub>x</sub>的排放量虽比同期降低了38%,但APEC期间正值北京冬季,且静稳天气居多,机动车绝对运行量仍保持在极高水平,相对较高的本地源排放及适宜的二次转化条件造成其对颗粒物的贡献相对较大<sup>[21]</sup>。

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>和NH<sub>4</sub><sup>+</sup>浓度水平相差不大,分别为(5.39

$\pm 4.82$ )  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $(4.38 \pm 3.33) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 均明显低于 APEC 前期浓度水平; 从其日均值来看, 随着北京及周边省市地区临时性减排措施的有效实行, APEC 期间  $\text{NH}_4^+$  下降幅度最明显, 其浓度水平分别比 APEC 前期及 2013 年同期下降了 72% 和 52%; 其次为  $\text{SO}_4^{2-}$ , 其浓度分别比 APEC 前期及 2013 年同期下降了 69% 和 46%.  $\text{SO}_4^{2-}$  主要来自于人为排放的  $\text{SO}_2$  的转化, 本次区域协同控制,  $\text{SO}_2$  作为主要气态污染物, 其临时减排效果显著, 浓度水平仅达到  $8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 比同期下降了 57%, 又值 APEC 期间温度相对较低, 气象条件不利于  $\text{SO}_4^{2-}$  生成, 导致  $\text{SO}_4^{2-}$  下降幅度显著<sup>[22]</sup>;  $\text{NH}_4^+$  主要来源于人为活动及自然排放所产生的  $\text{NH}_3$ , 并与大气中的酸性组分  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  反应形成硫酸铵和硝酸铵; APEC 期间  $\text{NH}_4^+$  的大幅度下降, 一方面是由于主要前体物  $\text{NH}_3$  排放量的下降, 另一方面大气中的酸性组分  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  的大幅度降低

也减弱了细颗粒物凝结条件<sup>[23~25]</sup>.

2.2 其它离子

其他离子组分中,  $\text{Cl}^-$  浓度水平略高, 为  $(2.18 \pm 1.93) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 但其浓度水平明显低于 2013 年同期水平; APEC 会期后  $\text{Cl}^-$  浓度有明显上升.  $\text{Cl}^-$  主要来源于化石燃料燃烧, APEC 会期, 为保障北京空气质量, 除污染减排外, 虽值冬季, 北京及周边地区并未启动燃煤供暖方案, 保障了 APEC 会期间  $\text{Cl}^-$  处于较低浓度水平.  $\text{K}^+$  浓度为  $(0.76 \pm 0.61) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 略高于 2013 年同期水平,  $\text{K}^+$  除与秸秆燃烧外, 烟花爆竹燃放对其也有一定的影响<sup>[18]</sup>;  $\text{Na}^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$  浓度水平相差不大, 分别为  $(0.32 \pm 0.26) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $(0.33 \pm 0.20) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 均明显低于 2013 年同期水平;  $\text{Mg}^{2+}$  浓度水平也有大幅度下降; 这些元素的明显下降也反映了 APEC 期间扬尘污染控制措施的有效实施.

表 1 APEC 前期、会期、后期及 2013 年同期 PM<sub>2.5</sub> 及水溶性离子浓度分布

Table 1 Mass concentration of PM<sub>2.5</sub> and the water-soluble ions at different periods of 2014 APEC and during 2013 APEC

| 组分                                                                                                       | APEC 前期         | APEC 会期         | APEC 后期         | 2013 年同期        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $\text{NO}_3^-/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$                                                            | $36.7 \pm 34.3$ | $13.4 \pm 13.6$ | $23.2 \pm 18.2$ | $13.1 \pm 8.8$  |
| $\text{SO}_4^{2-}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$                                                         | $17.4 \pm 16.6$ | $5.39 \pm 4.82$ | $15.3 \pm 13.2$ | $6.75 \pm 4.05$ |
| $\text{NH}_4^+/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$                                                            | $15.8 \pm 15.5$ | $4.38 \pm 3.33$ | $12.6 \pm 11.1$ | $9.11 \pm 6.04$ |
| $\text{Cl}^-/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$                                                              | $2.83 \pm 2.02$ | $2.18 \pm 1.93$ | $7.86 \pm 6.23$ | $4.53 \pm 4.27$ |
| $\text{K}^+/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$                                                               | $1.78 \pm 2.08$ | $0.76 \pm 0.61$ | $3.65 \pm 4.97$ | $0.72 \pm 0.54$ |
| $\text{Na}^+/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$                                                              | $0.49 \pm 0.35$ | $0.32 \pm 0.26$ | $0.80 \pm 0.64$ | $0.61 \pm 0.26$ |
| $\text{Mg}^{2+}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$                                                           | $0.31 \pm 1.01$ | $0.04 \pm 0.02$ | $0.13 \pm 0.07$ | $0.17 \pm 0.11$ |
| $\text{Ca}^{2+}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$                                                           | $0.54 \pm 0.36$ | $0.33 \pm 0.20$ | $0.76 \pm 0.34$ | $1.16 \pm 1.12$ |
| 离子总量/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$                                                                    | $75.9 \pm 67.3$ | $26.8 \pm 22.5$ | $64.6 \pm 49.0$ | $36.5 \pm 23.5$ |
| 离子占 PM <sub>2.5</sub> 比例/%                                                                               | $48.1 \pm 41.3$ | $41.7 \pm 8.5$  | $40.8 \pm 10.8$ | $34.2 \pm 14.9$ |
| SNA 占总离子比例/%                                                                                             | $87.9 \pm 11.7$ | $84.7 \pm 5.0$  | $77.0 \pm 9.3$  | $79.1 \pm 5.7$  |
| $(\text{Ca}^{2+} + \text{NH}_4^+)/(\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^-)/\mu\text{eq}\cdot\mu\text{eq}^{-1}$ | $1.05 \pm 0.34$ | $1.04 \pm 0.37$ | $1.00 \pm 0.15$ | $1.44 \pm 0.34$ |
| $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}/\mu\text{eq}\cdot\mu\text{eq}^{-1}$                                      | $1.62 \pm 0.69$ | $1.62 \pm 0.81$ | $1.30 \pm 0.34$ | $1.53 \pm 0.36$ |
| $\text{Ca}^{2+}/\text{NH}_4^+/\mu\text{eq}\cdot\mu\text{eq}^{-1}$                                        | $0.08 \pm 0.12$ | $0.12 \pm 0.15$ | $0.05 \pm 0.05$ | $0.18 \pm 0.24$ |

2.3 水溶性离子累积效应分析

APEC 期间在不同的气象条件、本地源排放及外来传输的影响下, 细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 中 8 种主要的水溶性离子经历了不同的累积过程. 其中第一次累积过程发生在 10 月 30 日 ~ 11 月 1 日, 在此期间北京城区受冷高压控制, 地面温度较低, 风速较小, 且相对湿度较高 (48% ~ 67%), 有利于本地一次排放源及二次污染累积<sup>[1]</sup>,  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  累积效应明显, 10 月 31 日 00:00 达到最大小时均值, 分别为  $42.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $73.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\text{SO}_4^{2-}$  浓度水平变化不大, 且呈波浪式变化趋势 (图 1). 在此期间北京正值秋季, 温度在 20℃ 以下, 不利于  $\text{SO}_4^{2-}$  生成, 加上本地源排放量大幅下降, 从而缓解了

$\text{SO}_4^{2-}$  累积效应.

第二次累积过程发生在 11 月 3 日 ~ 11 月 5 日, 在此期间, 北京地区受低压控制, 扩散条件变得不利, 污染物受本地源及河北等南部地区区域传输影响较大, 4 种主要的离子积累效应明显; 其中  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  累积效应明显大于第一次累积过程, 并于 11 月 4 日 17:00 时达到浓度高峰, 为  $60 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\text{Cl}^-$  累积过程与  $\text{SO}_4^{2-}$  略有不同, 积累初期受本地源影响较大, 11 月 3 日 20:00 其浓度水平略有升高, 随后缓慢积累, 11 月 4 日 15:00 后受本地源及远距离传输源共同影响其浓度快速增加, 11 月 5 日 01:00 浓度累积增至  $15.31 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  主要来源于化石燃料燃烧, APEC 会期, 本地排放源虽有

不同程度的下降,但受北京及周边环境本底及区域排放源的影响,在不利的天气条件下, $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{Cl}^-$  受化石燃料燃烧影响显著,其累积效应不容忽视.在此期间  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  也均经历了一次快速的累积过程,随后 11 月 5 日晚间到 11 月 7 日,受弱冷空气影响,扩散条件较好,4 种主要的水溶性离子均降低到较低水平.

第三次累积过程虽然受 11 月 8 日、9 日弱高压控制,扩散条件转差,相对湿度有所上升等气象条件的影响,但水溶性离子浓度累积速率明显低于前两

次累积过程,且受 APEC 期间各项减排措施的影响,环境本底浓度已有所降低,受区域污染传输的影响较小,导致累积过程趋缓.

4 种水溶性阳离子中  $\text{K}^+$  受一次源排放影响较大,且主要来源于生物质及烟花爆竹燃烧,累积过程明显; $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Na}^+$  累积过程不明显, $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Ca}^{2+}$  主要来源于建筑和土壤扬尘, $\text{Na}^+$  除受还盐影响外,土壤风沙也是其主要来源,三者浓度水平在 APEC 期间维持在较低水平也再次证实了本地源中扬尘及土壤风沙尘在此期间均得到了有效遏制.

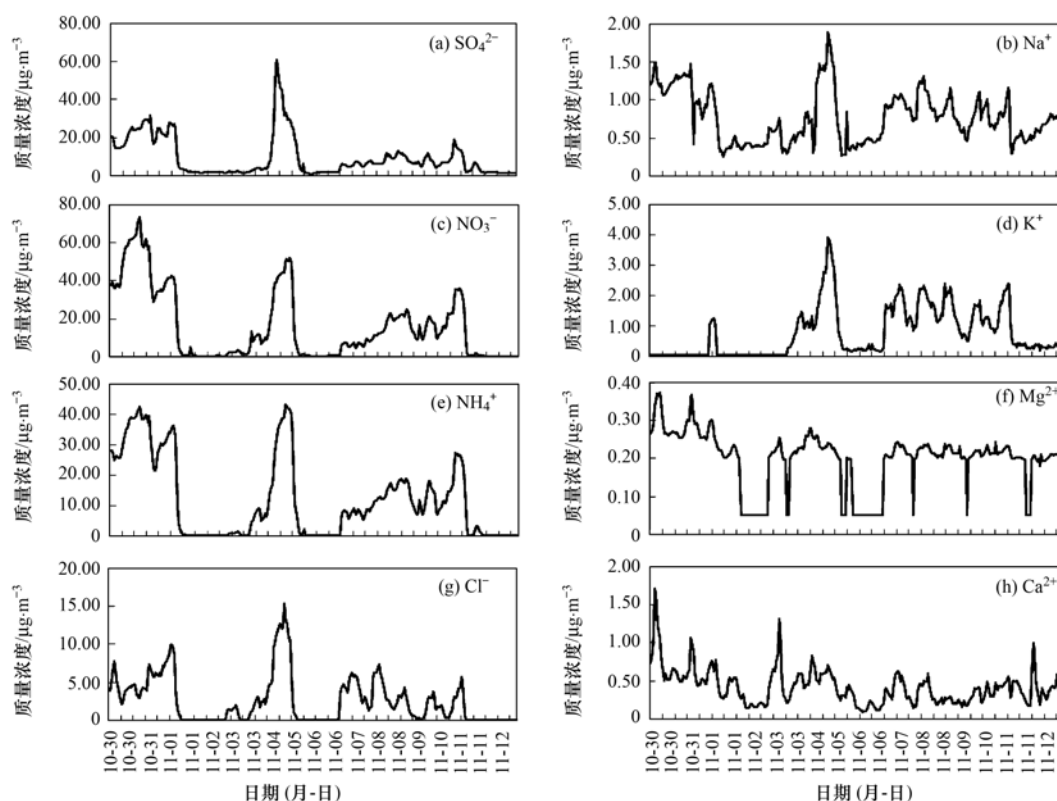


图 1 北京 APEC 期间城区  $\text{PM}_{2.5}$  中水溶性离子浓度变化趋势

Fig. 1 Temporal variation of concentration of water-soluble ions in  $\text{PM}_{2.5}$  during 2014 Beijing APEC

## 2.4 颗粒物酸性特征分析

由于颗粒物的酸度很难直接获得,颗粒物中水溶性离子  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NH}_4^+$  之间的平衡关系可从一定程度上反映颗粒物的酸性特征<sup>[26,27]</sup>. 当大气中的氨及其它碱性离子不能全部中和所生成的酸性物质,颗粒物呈现出酸性特征. 由于北京地处华北平原,地壳组分  $\text{Ca}^{2+}$  在中和颗粒物酸性组分中也起到不可忽视的作用,因此本研究将阳离子( $\text{NH}_4^+$  和  $\text{Ca}^{2+}$ )与阴离子( $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$ )摩尔浓度之比  $R_{\text{CA}}$  来反映北京城区  $\text{PM}_{2.5}$  的酸度水平<sup>[28,29]</sup>. APEC 前期、期间及 2013 年同期两者比值见表 1,不同期间以  $\text{NH}_4^+$  为基准所能中和两种主要的酸性组分

( $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$ ) 的散点图见图 2.

从表 1 可以看出,2014 年 APEC 前期、期间及后期,阴阳离子平衡比值  $R_{\text{CA}}$  (1.05、1.04、1.00) 明显低于 2013 年同期水平 (1.44),但其比值均大于 1; 比较  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  比值发现,4 个不同时期该比值并无显著差异,表明即使 APEC 期间实行了严格的污染减排措施,酸性组分  $\text{NO}_3^-$  对颗粒物的贡献仍维持在较高水平; 比较  $\text{Ca}^{2+}/\text{NH}_4^+$  比值发现,APEC 期间该比值略低于 2013 年同期水平,也证明了因扬尘所造成的碱性组分得到一定程度的降低; 该结论与 He 等<sup>[22]</sup> 在 2005~2006 年间对北京城、郊区的研究结论基本一致,表明北京秋末冬初季节颗粒物中酸



性物质基本能被碱性物质中和,并无明显酸化特征.但也反映出,随着清洁降尘有效措施的実施,地壳元素对颗粒物的中和作用减弱,当  $\text{NH}_4^+$  不能中和所有的酸性组分时,颗粒物酸性特征则会变得突出.

颗粒物中的酸性组分  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  主要来源于大气中的  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$ ,而在颗粒物形成过程中,充足的  $\text{NH}_3$  来源会有效促进硝酸盐和硫酸盐颗粒物的生成,从而造成颗粒物的迅速累积<sup>[23,30,31]</sup>.从图 2 可以看出,2013 年同期、APEC 前期、APEC 期间及后期  $\text{NH}_4^+$  与  $(\text{NO}_3^- + 2\text{SO}_4^{2-})$  两者之均显现出良好的相关性 ( $R^2$  在 0.93 ~ 0.96 之间),但不

同时期,  $\text{NH}_4^+$  对酸性组分  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  中和作用略有不同.

2013 年同期 [图 2(a)] 与 APEC 前期 [图 2(b)],  $([\text{NO}_3^-] + 2[\text{SO}_4^{2-}]) / [\text{NH}_4^+]$  斜率均小于 1.0,表明有足够的  $\text{NH}_4^+$  能中和所有的  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$ ; APEC 会期 [图 2(c)] 及后期 [图 2(d)],虽然  $[\text{NH}_4^+] / [\text{SO}_4^{2-}]$  比值大于 2,但  $([\text{NO}_3^-] + 2[\text{SO}_4^{2-}]) / [\text{NH}_4^+]$  斜率分别为 1.477 6 和 1.353 9,酸性组分  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  对颗粒物酸性特征的影响变得显著.

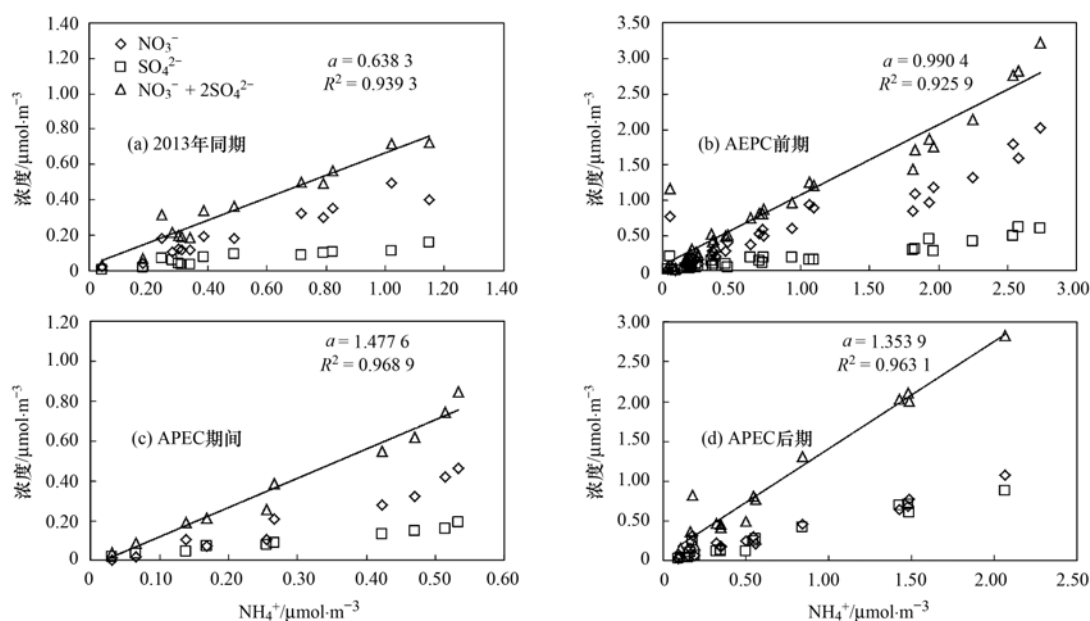


图 2 不同时期 SNA 浓度散点图

Fig. 2 Scattered plots of SNA during different periods

### 3 结论

(1) 2014 年 APEC 会期 8 种主要的水溶性离子浓度均有不同程度的下降; APEC 期间  $\text{NO}_3^-$  浓度水平较高,为  $(13.4 \pm 13.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,比 APEC 前期下降了 63%,但其对颗粒物的贡献最大.

(2) 观测期间,水溶性离子经历了 3 次明显的污染累积过程; APEC 期间温度相对较低,湿度合适,本地排放源虽有不同程度的下降,但受北京及周边环境本底及区域排放源的影响,  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NH}_4^+$  和  $\text{Cl}^-$  累积效应仍不可忽视.

(3) 不同观测期间,颗粒物中主要水溶性离子浓度虽有不同,但北京秋末冬初季节颗粒物中酸性组分基本能被碱性物质中和,并无明显酸化特征.但随着清洁降尘有效措施的実施,地壳元素对颗粒

物的中和作用减弱,酸性组分  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  对颗粒物酸性特征的影响变得显著.

### 参考文献:

- [1] 刘庆阳,刘艳菊,杨峰,等. 北京城郊冬季一次大气重污染过程颗粒物的污染特征[J]. 环境科学学报, 2014, **34** (1): 12-18.
- [2] 程念亮,李云婷,张大伟,等. 2014 年 10 月北京市 4 次典型空气重污染过程成因分析[J]. 环境科学研究, 2015, **28** (2): 163-170.
- [3] Calvo A I, Alves C, Castro A, et al. Research on aerosol sources and chemical composition: Past, current and emerging issues [J]. Atmospheric Research, 2013, **120-121**: 1-28.
- [4] Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J. Correlations between fine particulate matter ( $\text{PM}_{2.5}$ ) and meteorological variables in the united states: Implications for the sensitivity of  $\text{PM}_{2.5}$  to climate change[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44** (32): 3976-3984.

- [ 5 ] Zhao P S, Dong F, He D, *et al.* Characteristics of concentrations and chemical compositions for  $PM_{2.5}$  in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [ J ]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(9): 4631-4644.
- [ 6 ] 刘辉, 贺克斌, 马永亮, 等. 2008 年奥运前后北京城、郊  $PM_{2.5}$  及其水溶性离子变化特征 [ J ]. *环境科学学报*, 2011, **31**(1): 177-185.
- [ 7 ] 刘子锐, 孙扬, 李亮, 等. 2008 奥运和后奥运时段北京大气颗粒物质量浓度和数浓度比对研究 [ J ]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 913-923.
- [ 8 ] 张菊, 欧阳志云, 苗鸿, 等. 奥运前期与奥运期间北京市大气细颗粒物特征比较分析 [ J ]. *环境科学*, 2013, **34**(7): 2512-2518.
- [ 9 ] 郭照冰, 包春晓, 陈天蕾, 等. 北京奥运期间气溶胶中水溶性无机离子浓度特征及来源解析 [ J ]. *大气科学学报*, 2011, **34**(6): 683-687.
- [ 10 ] 吴兑, 廖碧婷, 吴晟, 等. 2010 年广州亚运会期间灰霾天气分析 [ J ]. *环境科学学报*, 2012, **32**(3): 521-527.
- [ 11 ] 陶俊, 柴发合, 高健, 等. 16 届亚运会期间广州城区  $PM_{2.5}$  化学组分特征及其对霾天气的影响 [ J ]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 409-415.
- [ 12 ] 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 等. 亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 [ J ]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4044-4051.
- [ 13 ] 袁亮, 银燕, 李琦, 等. 亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 [ J ]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4052-4060.
- [ 14 ] 国家环境保护部. 京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则 [ R ]. 环发[2013]104 号, 2013.
- [ 15 ] 张仁健, 王明星, 胡非, 等. 采暖期前和采暖期北京大气颗粒物的化学成分研究 [ J ]. *中国科学院研究生院学报*, 2002, **19**(1): 75-81.
- [ 16 ] Zhao X J, Zhang X L, Xu X F, *et al.* Seasonal and diurnal variations of ambient  $PM_{2.5}$  concentration in urban and rural environments in Beijing [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(18): 2893-2900.
- [ 17 ] Wang Y, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* The ion chemistry and the source of  $PM_{2.5}$  aerosol in Beijing [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(21): 3771-3784.
- [ 18 ] 杨懂艳, 刘保献, 张大伟, 等. 2012 ~ 2013 年间北京市  $PM_{2.5}$  中水溶性离子时空分布规律及相关性 [ J ]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 768-773.
- [ 19 ] Wu W S, Wang T. On the performance of a semi-continuous  $PM_{2.5}$  sulphate and nitrate instrument under high loadings of particulate and sulphur dioxide [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(26): 5442-5451.
- [ 20 ] Godri K J, Evans G J, Slowik J, *et al.* Evaluation and application of a semi-continuous chemical characterization system for water soluble inorganic  $PM_{2.5}$  and associated precursor gases [ J ]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2009, **62**(2): 65-80.
- [ 21 ] Rumsey I C, Cowen K A, Walker J T, *et al.* An assessment of the performance of the Monitor for aerosols and gases in ambient air (MAGAR): a semi-continuous method for soluble compounds [ J ]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(11): 5639-5658.
- [ 22 ] He K, Zhao Q, Ma Y, *et al.* Spatial and seasonal variability of  $PM_{2.5}$  acidity at two Chinese megacities: insights into the formation of secondary inorganic aerosols [ J ]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(3): 1377-1395.
- [ 23 ] Ortega I K, Kurtén T, Vehkamäki H, *et al.* The role of ammonia in sulfuric acid ion induced nucleation [ J ]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(11): 2859-2867.
- [ 24 ] Wang Z B, Hu M, Yue D L, *et al.* Evaluation on the role of sulfuric acid in the mechanisms of new particle formation for Beijing Case [ J ]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(24): 12663-12671.
- [ 25 ] Li X, Brauers T, Häseler R, *et al.* Exploring the atmospheric chemistry of nitrous acid (HONO) at a rural site in Southern China [ J ]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(3): 1497-1513.
- [ 26 ] Pathak R K, Louie P K K, Chan C K. Characteristics of aerosol acidity in Hong Kong [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(19): 2965-2974.
- [ 27 ] Sun J Y, Zhang Q, Canagaratna M R, *et al.* Highly time- and size-resolved characterization of submicron aerosol particles in Beijing using an aerodyne Aerosol Mass Spectrometer [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(1): 131-140.
- [ 28 ] Adams P J, Seinfeld J H, Koch D M. Global concentrations of tropospheric sulfate, nitrate, and ammonium aerosol simulated in a general circulation model [ J ]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, **104**(D11): 13791-13823.
- [ 29 ] Zhang X Y, Cao J J, Li L M, *et al.* Characterization of atmospheric aerosol over Xian in the South Margin of the Loess Plateau, China [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(26): 4189-4199.
- [ 30 ] Wen L, Chen J M, Yang L X, *et al.* Enhanced formation of fine particulate nitrate at a rural site on the North China Plain in summer: The important roles of ammonia and ozone [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2015, **101**: 294-302.
- [ 31 ] Zhou Y, Cheng S Y, Lang J L, *et al.* A comprehensive ammonia emission inventory with high-resolution and its evaluation in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China [ J ]. *Atmospheric Environment*, 2015, **106**: 305-317.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                  |                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Characterization of Water-soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> of Beijing During 2014 APEC .....                                                                    | YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)   |
| PM <sub>2.5</sub> Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013 .....                                                                      | LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331) |
| Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC .....                                                                              | LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)     |
| Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing .....                                          | SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)       |
| Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta .....                                                          | ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)       |
| Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry .....                                                                | ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)   |
| Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution .....                                                          | LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)                      |
| Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinpo Mountain, Chongqing .....                                                            | YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381) |
| Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material .....                                                        | MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)         |
| Low-Concentration CO <sub>2</sub> Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites .....                                                                            | LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)            |
| Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area .....                     | HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)         |
| Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem .....                                                     | AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)                 |
| Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data .....                      | ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)        |
| Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs .....                                                   | GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)                |
| Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir .....                                                              | LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)            |
| Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics .....       | YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)    |
| Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research .....                           | SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)         |
| Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis .....                                           | ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)     |
| Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section .....                | ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)      |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River .....          | TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)        |
| Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang .....                                     | QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)            |
| Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir .....                 | QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)             |
| Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season .....                        | ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)              |
| Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake .....                                                                                    | CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)          |
| Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches .....                                                           | ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)       |
| Removal of Phosphate by Calcite in Open-System .....                                                                                                             | LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)  |
| Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties .....                           | LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)          |
| Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR .....                                      | CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)      |
| Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions .....                                                        | ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)              |
| Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS .....                                                                                   | FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)             |
| Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing .....                            | ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)               |
| Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou .....                                                                                   | SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)               |
| Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures .....                                                                               | LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)                        |
| Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques .....                                  | ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582) |
| Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales .....                                                | YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)     |
| Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects .....                                                                   | SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)     |
| Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies .....                                                                           | XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)       |
| Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO <sub>4</sub> and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize .....                                                   | LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)         |
| Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L. ....                                                         | ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)         |
| Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage .....                                                                       | XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)    |
| Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil .....                                          | CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)      |
| Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization ..... | MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)                  |
| Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River .....                             | LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)           |
| Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests .....                                                          | ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)   |
| Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain .....                                            | ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)              |
| Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector .....                                                      | TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)     |

# 《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)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行