

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第5期

Vol.39 No.5

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

餐饮行业细颗粒物(PM _{2.5})排放测算方法:以上海市为例	王红丽, 景盛翱, 楼晟荣, 陶士康, 乔利平, 李莉, 黄成, 林立, 陈长虹 (1971)
上海夏季PM _{2.5} 中有机物的组分特征、空间分布和来源	高雅琴, 王红丽, 景盛翱, 乔利平, 李莉, 朱书慧, 楼晟荣, 陶士康, 冯加良, 李想, 陈长虹 (1978)
北京南郊区PM _{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析	高韩钰, 魏静, 王跃思 (1987)
基于样方法的天津市春季道路扬尘PM ₁₀ 中水溶性离子特征及来源解析	赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 王士宝, 李越洋 (1994)
广州秋季HONO污染特征及夜间来源分析	田智林, 杨闻达, 虞小芳, 张曼曼, 张贺伟, 程丁, 程鹏, 王伯光 (2000)
基于硫氧同位素研究南京北郊夏季大气中硫酸盐来源及氧化途径	韩珣, 任杰, 陈善莉, 王瑾瑾, 沈潇雨, 魏英, 郭照冰, 朱彬 (2010)
区县尺度机动车高分辨率排放清单建立方法及应用	樊守彬, 郭津津, 李雪峰 (2015)
典型工业生物质锅炉多环芳烃排放特征	林玉君, 白莉, 王焕香, 肖文, 刘军, 向运荣, 张春林 (2023)
多时间尺度HSPF模型参数不确定性研究	庞树江, 王晓燕, 马文静 (2030)
氮氧同位素联合稳定同位素模型解析水源地氮源	金赞芳, 张文辽, 郑奇, 朱晨阳, 李非里 (2039)
白洋淀水体挥发性有机物污染特征与风险评价	高秋生, 赵永辉, 焦立新, 田自强, 杨柳, 杨苏文, 崔志丹, 郝子峰 (2048)
太湖颗粒态有机质的荧光特征及环境指示意义	吕伟伟, 姚昕, 张保华, 刘延龙, 李元鹏 (2056)
长江口滩涂表层沉积物中微塑料的分布及沉降特点	朱晓桐, 衣俊, 强丽媛, 程金平 (2067)
桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征	卢晓漩, 李强, 靳振江, 彭文杰, 房君佳, 黄炳惠, 宋昂 (2075)
青藏高原多年冻土区典型植被下河流溶解性有机碳的生物可利用性	马小亮, 刘桂民, 吴晓东, 徐海燕, 叶琳琳, 张晓兰, 白炜 (2086)
城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性	梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 纵亚男, 唐剑锋 (2095)
溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析	张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 单晓静, 刘文, 赵振华, 姚昕, 邵明玉 (2104)
三峡库区澎溪河回水区溶解态金属离子来源和时空分布特征分析	赵晓松, 蔚建军, 付莉, 姜伟, 周川, 李波, Douglas Haffner, Christopher Weisener, 张磊 (2117)
澜沧江流域沉积物间隙水-上覆水营养盐特征与交换通量分析	望雪, 程豹, 杨正健, 刘德富, 徐雅倩 (2126)
蓄水期三峡水库香溪河沉积物-水系统营养盐分布特征	苏青青, 刘德富, 纪道斌, 宋林旭, 崔玉洁, 李欣, 陈秀秀, 刘心愿 (2135)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中各形态磷的影响	杨文斌, 高顺峰, 万锐, 孙祥, 王赢 (2145)
于桥水库沉积物-水界面氮磷剖面特征及交换通量	文帅龙, 龚琬晴, 吴涛, 郑小兰, 江雪, 李鑫, 钟继承 (2154)
岷江干流表层沉积物中磷形态空间分布特征	杨耿, 秦延文, 韩超南, 马迎群, 刘志超, 杨晨晨 (2165)
农业排水沟渠硝态氮吸收动力学特征及相关性分析	李如忠, 殷齐贺, 高苏蒂, 陈广洲 (2174)
不同合成条件对ZnAl-LDHs覆膜改性生物陶粒除磷效果的影响	向洋, 张翔凌, 雷雨, 方晨佳, 袁野, 姜应和, 徐舟影 (2184)
真空紫外/过二硫酸盐去除饮用水中嗅味物质	孙昕, 史路肖, 张燧, 杨煜, 唐晓 (2195)
石墨烯负载铁锰氧化物活化过一硫酸盐降解金橙G	夏文君, 刘峰, 郝尚斌, 黄天寅, 王忠明, 陈家斌 (2202)
载铜或铈生物炭吸附水体中As(V)的作用机制	李锦, 祖艳群, 李刚, 孙国新 (2211)
DOM不同相对分子质量组分在无机矿物上的吸附及其对卡马西平吸附的影响实验	梁雨, 何江涛, 张思 (2219)
污水处理厂中有机磷阻燃剂的污染特征	孙佳薇, 丁炜楠, 张占恩, 王俊霞, 顾海东 (2230)
低温污水前置强化混凝	刘海龙, 任宇霞, 张忠民 (2239)
印染废水反渗透脱盐系统运行性能及膜污堵特性	谭玉琨, 张泽田, 吴乾元, 姚颖, 胡洪营, 丘培文 (2249)
生物膜CANON反应器性能的优化:从FBBR到MBBR	付昆明, 李慧, 周厚田, 仇付国 (2256)
两次污泥颗粒化过程中微生物群落的动态变化	高景峰, 张丽芳, 张树军, 高永青, 王时杰, 樊晓燕, 潘凯玲 (2265)
铝、铁、钛3种金属盐基混凝剂调理污泥的性能比较	王晓萌, 王鑫, 杨明辉, 张淑娟 (2274)
热、热碱处理对污泥溶胞和溶解性有机物的影响	代勤, 张文哲, 于潘芬, 易皓, 刘俊新, 肖本益 (2283)
曝气时间比对亚硝化颗粒污泥形成的影响	李冬, 郭跃洲, 曹美忠, 劳会妹, 李帅, 张杰 (2289)
中国城市污泥中汞含量的时空分布特征	王宁, 刘清伟, 职音, 程柳, 麻冰涓, 毛宇翔 (2296)
夏季太湖湖/藻型湖区N ₂ O生成与迁移特征及其影响因素	郑小兰, 文帅龙, 李鑫, 龚琬晴, 刘德鸿, 钟继承 (2306)
太湖藻型湖区CH ₄ 、CO ₂ 排放特征及其影响因素分析	贾磊, 蒲旖旎, 杨诗俊, 苏荣明珠, 秦志昊, 张弥 (2316)
内蒙古典型草原季节性冻土区土壤剖面CO ₂ 、N ₂ O特征	李晋波, 姚楠, 李秀, 赵英, 张阿凤, 兰志龙, 范庭 (2330)
黄土高原成龄苹果园生态系统CO ₂ 通量特征	杨剑锋, 杨小妮, 王俊花, 段宇敏, 祁香宁, 张林森 (2339)
生物炭施用对紫色水稻土温室气体排放的影响	祁乐, 高明, 郭晓敏, 牛海东, 李婷, 孙涛, 曹群岭, 汤铭豪 (2351)
不同施肥处理对东北黑土温室气体排放的短期影响	李平, 郎漫, 李森, 魏玮, 李凯凯 (2360)
ITS高通量测序研究黄海微型真核浮游生物多样性及分布特征	张莉, 林佳宁, 张远, 王书平, 张晓娇 (2368)
不同排海方式城市尾水微生物扩散规律	郎秀璐, 宋志文, 徐爱玲, 牛成洁, 郭明月 (2380)
旅游活动对岩溶洞穴地下水中细菌群落的影响:以重庆丰都两个洞穴为例	吕现福, 贺秋芳, 王凤康, 赵瑞一, 张弘 (2389)
不同沼灌年限稻田土壤微生物群落分析	朱金山, 张慧, 马连杰, 廖敦秀, 杨星勇, 王龙昌, 王定勇 (2400)
生物炭对褐土理化特性及真菌群落结构的影响	阎海涛, 殷金玉, 丁松爽, 任天宝, 许家来, 宗浩, 高强, 刘国顺 (2412)
铅锌尾矿砂污染下的岩溶土壤微生物群落碳源代谢特征	房君佳, 李强, 刘畅, 靳振江, 梁月明, 黄炳惠, 卢晓漩, 彭文杰 (2420)
湖库沉积物好氧反硝化菌群脱氮特性及种群结构	康鹏亮, 张海涵, 黄廷林, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾亮宇 (2431)
反硝化菌群的氮代谢与反硝化偶联机制	张泽宇, 王明霞, 程永毅, 周志峰 (2438)
广西西江流域土壤铅空间分布与污染评价	张云霞, 宋波, 陈同斌, 伏凤艳, 黄飞, 庞瑞, 潘惠妹 (2446)
三峡库区消落带农业活动对土壤汞变化的影响	陈秋禹, 孙松, 尹德良, 王永敏, 张成, 王定勇 (2456)
水稻不同生长时期不同组织中抗肿内生菌的筛选与鉴定	王伯勋, 王学东, 段桂兰 (2464)
汞在酸性紫色水稻土的转化与水稻汞富集特征	李雨岑, 孙涛, 邓晗, 张成, 王永敏, 王定勇 (2472)
华北平原不同生产模式设施蔬菜生命周期环境影响评价	徐强, 胡克林, 李季, 韩卉, 杨合法 (2480)
基于细菌毒性测试与小鼠肺基因转录分析的PM _{2.5} 健康效应	宋鹏程, 陆书玉, 魏永杰, 陈倩倩, 罗丽娟 (2489)
中国PM _{2.5} 污染空间分布的社会经济影响因素分析	段杰雄, 翟卫欣, 程承旗, 陈波 (2498)

北京南郊区 PM_{2.5} 中水溶性无机盐季节变化及来源分析

高韩钰¹, 魏静^{1*}, 王跃思²

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院, 保定 071001; 2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

摘要: 为研究北京偏南地区细颗粒物(PM_{2.5})中水溶性无机离子的变化特征, 利用大气细颗粒物快速捕集系统及化学成分分析系统 RCFP-IC, 于 2016 年对北京南郊区大兴 PM_{2.5} 中 9 种水溶性无机离子(Cl⁻、NO₂⁻、NO₃⁻、SO₄²⁻、Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺ 和 Ca²⁺)展开为期 1 a 的连续在线观测. 结果表明, 观测期间, 9 种水溶性无机离子总质量浓度为 38.6 μg·m⁻³, 并呈现冬春高, 夏秋低的特征, 浓度水平高低顺序为 SO₄²⁻ > NO₃⁻ > NH₄⁺ > Ca²⁺ > NO₂⁻ > Cl⁻ > Na⁺ > K⁺ > Mg²⁺; 在冬季, SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 浓度占比高达 75.7%; 春季次之, 为 72.8%; 夏季最低, 仅为 60.2%. 并且随着空气污染的加剧, SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 浓度显著增加, 这表明 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 与空气质量的恶化密切相关, 但相比 NO₃⁻ 和 NH₄⁺, SO₄²⁻ 在二次离子形成过程中占据主导地位; SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 存在显著的日变化特征, SO₄²⁻ 统计日变化为双峰型, 峰值分别出现在 10:00 和 18:00 左右, 而 NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 呈单峰型, 峰值出现在 10:00 左右. 基于后向轨迹聚类分析结果发现, 对南郊区污染有影响的气团主要有 3 类, 分别来自东南方向、西部和来自蒙古高原的高空气团, 东南方向气流会加重南郊区水溶性盐的累积, 而偏北气流有利于污染物扩散和稀释; 基于主成分分析发现, 北京南郊区水溶性盐的污染来源分别为二次源、燃煤源和土壤风沙尘及建筑扬尘的混合源. 利用潜在源贡献因子分析法对南郊区冬季水溶性盐的潜在污染源区进行分析发现, 影响大兴水溶性盐浓度潜在源区主要分布在南郊区的东南部.

关键词: PM_{2.5}; 水溶性无机盐; 季节变化; 日变化; 来源

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)05-1987-07 DOI: 10.13227/j.hjlx.201709003

Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in PM_{2.5} in the Southern Suburbs of Beijing

GAO Han-yu¹, WEI Jing^{1*}, WANG Yue-si²

(1. College of Resources and Environment Science, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to study the variation of water-soluble inorganic ions in the four suburbs of Beijing using the atmospheric fine particulate matter rapid trapping system and chemical composition analysis system (RCFP-IC), we carried out measurements for nine water-soluble inorganic ions (Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺, Ca²⁺) in PM_{2.5} with continuous on-line observations for one year in Beijing's southern suburbs in 2016. The transport process of pollutants and the potential sources of pollutants were evaluated by combining a trajectory clustering method and potential source contribution factor analysis method (PSCF). During the observation period, the total concentration of the nine water-soluble inorganic ions was 38.6 μg·m⁻³, and results showed that the concentration in winter and spring was high and in summer and autumn was low. The order of the concentration from high to low was SO₄²⁻ > NO₃⁻ > NH₄⁺ > Ca²⁺ > NO₂⁻ > Cl⁻ > Na⁺ > K⁺ > Mg²⁺. In winter, the SO₄²⁻, NO₃⁻ and NH₄⁺ accounted for 75.7% of the total measured water-soluble ions, followed by 72.8% in spring and 60.2% in summer. With an increase in air pollution, the concentrations of SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺ increased significantly, indicating that SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺ were closely related to the deterioration of air quality. SO₄²⁻ was dominant in the formation of secondary ions compared to NO₃⁻ and NH₄⁺; and SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺ had significant diurnal variations. The diurnal variation of the SO₄²⁻ statistic (hours) was bimodal, and the peak values were at about 10:00 and 18:00. The diurnal variation of NO₃⁻ and NH₄⁺ had single peaks, with the peak appearing at 10:00. The trend of the diurnal variation for these two ions was similar. Finally, the sources of pollution in the southern suburbs of Beijing mainly included secondary sources, coal-fired sources, and mixed sources of dust and dust. The main potential source of pollution in the southern suburbs was in the southeastern part of the observation site, while the northeastern airflow was favorable for the diffusion and dilution of pollutants.

Key words: PM_{2.5}; water-soluble inorganic ions; seasonal variation; diurnal variation; source

收稿日期: 2017-09-01; 修订日期: 2017-11-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0210000); 北京市科技计划项目(ZL171100000617002)

作者简介: 高韩钰(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气化学, E-mail: mona327@163.com

* 通信作者, E-mail: weijing_199@163.com

大气细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$ 空气动力学直径 $\leq 2.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒物),是多数城市首要空气污染物之一^[1].当前,我国大气霾污染频发与高浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 密切相关^[2], $\text{PM}_{2.5}$ 由于比表面积大、粒径小,容易在空气中滞留等特点,容易成为其他污染物的反应体和载体,从而富集更多有害的化学组分^[3]. $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组分包括有机碳、元素碳、水溶性离子、地壳元素和各种微量元素等,其中水溶性无机离子是 $\text{PM}_{2.5}$ 的一类重要组分,其对大气气溶胶酸碱度产生直接贡献,并对成核和云滴增长起到了重要的作用^[4].

当前,国内外学者针对北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 长期变化研究主要集中在 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度时空分布变化特征,化学组成(水溶性离子、无机元素、碳质组分与单体有机物等)和来源等方面^[5-7],然而上述研究主要集中在北京城市区域,缺少对北京郊区的观测.根据环境保护部公布的《2016年空气质量公报》显示^[8],北京从北到南 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度呈现递增趋势.因此对北京南郊 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性盐开展观测研究有助于污染成分分析和空气质量改善等.当前研究表明北京深受 $\text{PM}_{2.5}$ 污染影响并且 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 是能见度降低的主要贡献者,然而,关于时间变化(尤其是日变化)和南郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 水溶性离子来源分配的分析缺乏,而且对于水溶性无机离子的研究多采用传统的滤膜采样技术,缺少高时间分辨率在线观测技术.

本研究基于对北京南郊区代表站点大兴站 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子(Cl^- 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+})展开为期1a的观测,同时结合 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度,对南郊区水溶性无机离子浓度水平、季节变化、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 日变化及水溶性无机离子来源进行分析,探讨了不同空气质量级别下主要离子的变化规律,并对冬季进行气团轨迹聚类的基础上采用PSCF(潜在源贡献因子分析法)识别了 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的潜在源区,以期为掌握北京南郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子污染特征提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样地点和采样时间

采样地点(116.336°E , 39.493°N)位于北京大兴区榆垓南 $8\ \text{km}^2$ 范围内,国家野生动物园南侧站点附近 $1\ \text{km}$ 区域内无污染源,站点有较好的空间代表性.站点所在区域年平均气温 12.0°C ,年平均降雨量为 $398\ \text{mm}$,降雨主要集中在夏季.采样时间

为2016年1月1日至2016年12月31日.

1.2 方法和仪器

利用RCFP-IC对 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性盐浓度展开连续观测.RCFP-IC实验原理及基本性能参数见文献[9].大气细颗粒物进入系统前通过串联的扩散管去除酸性和碱性气体,热的过饱和水蒸气与冷的气溶胶流正交混合,绝热膨胀,使细粒子长大成为能被惯性撞击器捕集的大粒子;长大的粒子在增长器末端与气体垂直分离,在惯性力的作用下沿轴线方向撞入带有内标的收集液,在蠕动泵推动下收集液被送入离子色谱进行在线的分离检测.系统为在线连续自动采样,采样分析频率设定为 $30\ \text{min}$.水溶性无机离子分析仪器使用的是美国Dionex公司的ICS-900离子色谱,阴离子分析柱为Ionpac AS14, $4\ \text{mm} \times 250\ \text{mm}$,淋洗液为 $3.5\ \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}\ \text{Na}_2\text{CO}_3 + 1.0\ \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}\ \text{NaHCO}_3$,阳离子分析柱为Ionpac CS12A, $4\ \text{mm} \times 250\ \text{mm}$,淋洗液为 $20\ \text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 甲烷磺酸.

颗粒物质量浓度观测采用美国赛默飞世尔公司生产的双通道1405DF型振荡天平法的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 分析仪,观测粒径为 $2.5\ \mu\text{m}$ 以下颗粒物.该仪器最低检测限 $0.06\ \mu\text{g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$,质量分辨率为 $0.10\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.数据质控和保证方法详见 $\text{PM}_{2.5}$ 质控手册^[10].

1.3 RCFP-IC质量控制

RCFP-IC质量控制选用外标法和内标法结合.内标物示踪法是为了校正蠕动泵和抽气泵产生的气体流量和液体流量,控制系统的稳定性,添加大气中不存在的 Li^+ ,内标物为 100×10^{-6} (体积比, $1\ \text{mL}\ \text{LiF}$ 和 $1\ \text{mL}$ 去离子水) LiF 溶液,以保证数据准确.外标法是对大气颗粒物中的水溶性离子的定量分析,用不同浓度的标准溶液以每月一次的频率对仪器进行标定.要获得水溶性离子的检出限,将 $1\ \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的离子标准溶液稀释至 $1\ \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,然后逐渐进行稀释直至IC检测出的离子峰值高出噪声峰值的3倍,取一个稀释浓度,重复6次,并测量得到标准偏差.3倍标准差对应正常运转下的RCFP得到的各离子浓度为RCFP-IC的检测限^[11].

RCFP-IC系统的背景空白主要是进样口膜上的痕量离子,实验数据需要扣除系统空白.空白试验是在更换进样口膜以及添加实验用去离子水的情况下进行的.空白实验采用电阻率为 $18.2\ \text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ 的去离子水 $1\ \text{mL}$,重复3次,实验期间,系统空白均低于 $1\ \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$.

1.4 数据分析方法

(1) 实验中选用的源解析技术: 因子分析法 (PCA) 是根据相关性及方差分析, 将颗粒物的化学成分数据中的多个变量归结为真正起作用的最少数目的独立因子, 以期获得主要的污染来源, 该模型在本次研究中选用 SPSS19.0 软件实现。

(2) 在本实验中, 使用 TrajStat 软件^[12], 该软件利用 NOAA Air Resources Laboratory 研发的 HYSPLIT 模式的计算模块, 并结合了美国环境预报中心和国家大气研究中心联合执行的全球再分析资料, 对有效的小时样本数据, 计算观测期间到达南郊区的 1435 条 48 h 后向轨迹, 轨迹计算的起始点高度为距地高度 500 m AGL (Above Ground Level), 并对计算出的后向轨迹进行聚类分析。

(3) 在得到的后向轨迹基础上使用 PSCF (潜在源贡献因子分析法) 估计污染物的潜在源区。该方法原理及具体的操作步骤详见文献^[13]。PSCF 的值越大, 表明该网格点对观测点的离子浓度贡献越大。高 PSCF 值所对应的网格组成的区域就是南郊区硫酸盐、硝酸盐及铵盐浓度的潜在源区, 经过该区域的轨迹就是对离子浓度有影响的输送路径。

2 结果与讨论

2.1 2016 年南郊区水溶性无机离子浓度水平分析

图 1 为南郊区 PM_{2.5} 中主要的水溶性无机离子浓度分布特征。从中可知, 南郊区总水溶性无机离子年平均浓度为 38.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 并呈现冬春高, 夏秋低的特征。春夏秋冬水溶性无机离子的平均浓度分别为 45.1、31.9、33.4 和 54.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 春季水溶性无机离子质量浓度较高, 整个夏季质量浓度较低且变化范围不大, 秋季水溶性无机离子质量浓度开始回升, 冬季达到最高, 这一变化规律与杨懂艳等^[14]对北京市 PM_{2.5} 中水溶性无机离子变化的研究具有很好的一致性。各离子质量浓度高低顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{NO}_2^- > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, 其中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 平均质量浓度分别为 14.5、9.9 和 4.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其次是 Ca^{2+} 和 Cl^- , 两种离子的平均质量浓度分别为 4.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 1.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 而 Na^+ 和 K^+ 仅为 1.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 0.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 质量浓度之和占所测水溶性离子浓度之和的 70.5%, 占 PM_{2.5} 的质量分数高达 31%, 其中, 3 种离子在冬季浓度占比最高为 75.7%; 春季次之, 为 72.8%; 夏季最低, 仅为 60.2%, 说明二次无机离子是 PM_{2.5} 的主要组

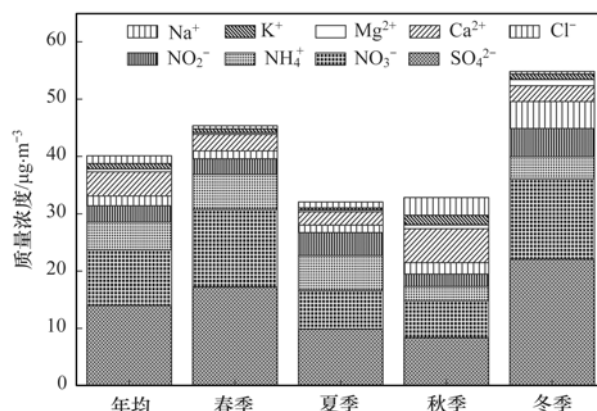


图1 PM_{2.5} 中主要水溶性无机离子季节变化特征

Fig. 1 Seasonal variation of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5}

成部分。

根据 PM_{2.5} 质量浓度将环境空气质量划分为 6 种级别, 分别为优 (0 ~ 35 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、良 (35 ~ 75 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、轻度污染 (75 ~ 115 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、中度污染 (115 ~ 150 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、重度污染 (150 ~ 250 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、严重污染 (250 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上)。PM_{2.5} 中各水溶性无机离子的平均质量浓度随污染程度增强而增大。观测期间, 除二次离子 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 外, Ca^{2+} 和 Cl^- 这 2 种离子浓度也较高, 是 PM_{2.5} 中水溶性无机离子的主要组分。图 2 是不同 PM_{2.5} 级别的水溶性无机离子质量浓度及各离子浓度占水溶性无机离子浓度的百分比变化特征。如图所示, 在轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染程度下, 这 5 种水溶性无机离子的质量浓度 (WSIIs) 分别为 41.9、52.5、61.2 和 92.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 在这 4 种级别下, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 分别占 WSIIs 的 77.9%、82.0%、84.9% 和 87.9%, 说明随污染程度增加, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 这 3 种水溶性无机离子的贡献增加。

另外, 本文对不同 PM_{2.5} 级别中各离子浓度占水溶性无机离子浓度的百分比变化特征进行分析, 随着 PM_{2.5} 质量浓度的增加, Ca^{2+} 、 Cl^- 占 PM_{2.5} 的比例降低, 而 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 这 3 种离子质量浓度占 PM_{2.5} 质量浓度的比值急剧上升, 说明 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 是 PM_{2.5} 质量浓度增加的主导离子。在严重污染程度中 SO_4^{2-} 的累积速率最明显, 说明 SO_4^{2-} 的快速增长对 PM_{2.5} 的形成有较大贡献。观测期间, SO_4^{2-} 浓度水平明显高于以往北京市的研究结果^[15,16], 也明显高于背景站上甸子^[17]及南方城市上海及香港的水平^[18,19]。南郊区代表站点大兴站与同是郊区站点的韩国光州科技学院站点相比,

SO_4^{2-} 比光州科技学院站点显著高出 73.36%^[20].

燃煤、生物质燃烧和海盐都是 Cl^- 的排放源, 但北京属于内陆城市, 基本不受海盐离子的影响, 而北京冬季采暖会燃烧大量化石燃料, 排放较高浓度的 Cl^- 和 K^+ . K^+ 作为生物质燃烧的示踪物^[21], 本观测结果中未见冬季 K^+ 浓度显著升高, 因此推

测南郊区冬季 Cl^- 主要来源于供暖燃煤, 且 Cl^- 浓度在冬季最高 ($4.67 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 其在总离子中的比例也上升到 9.3%, 说明 Cl^- 的浓度变化受冬季燃煤影响最大. 受到春季沙尘的影响, 主要来源于矿尘的 Ca^{2+} ^[22] 在春季最高, 平均浓度为 $2.67 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其对总离子的贡献比例达到 6.3%.

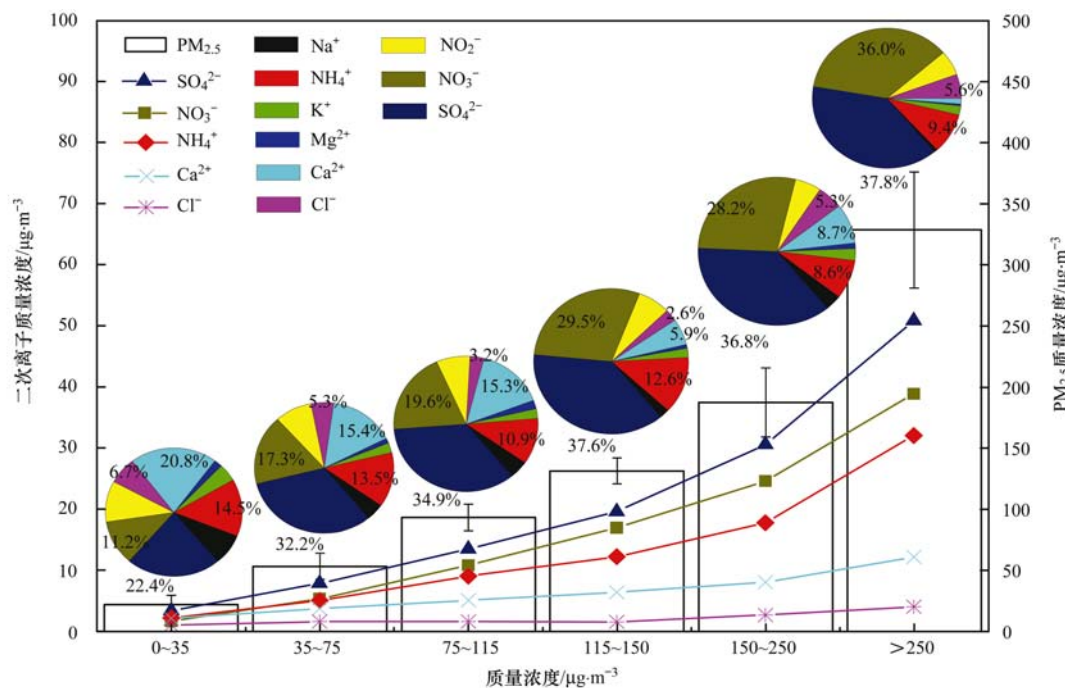


图2 不同 $\text{PM}_{2.5}$ 级别的水溶性离子质量浓度及占比变化

Fig. 2 Variation of concentrations of water-soluble ions at different $\text{PM}_{2.5}$ levels

2.2 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 的日变化特征分析

SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 这 3 种水溶性无机离子是水溶性离子的主要组分, 且这 3 种水溶性无机离子的日变化会受到人为源的干预(如汽车排放和化石燃料燃烧)及其产生机制的显著影响^[23]. 因此本文将探讨 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 这 3 种水溶性无机离子日均浓度的变化规律, 如图 3 所示, 其浓度范围分别是 $31.85 \sim 39.40$ 、 $12.06 \sim 29.41$ 和 $21.64 \sim 37.28 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.

受不同排放源的影响, 不同离子的日变化特征也不同. SO_4^{2-} 在四季均出现两个浓度高峰, 随着太阳的升高浓度增加并在 10:00 左右完成浓度累积并达到峰值, 随着时间的推移浓度降低在 18:00 附近出现第二个峰值, 而且白天浓度明显高于夜间浓度. 这一规律可以解释为早峰浓度增加, 由于光化学作用增强; 傍晚峰值, 由于边界层高度降低的污染物累积的结果, 这与济南、珠三角观测结果类似^[24,25]. 白天浓度高可以解释为白天太阳辐射较强, 光化学或非均相化学反应会促进 SO_4^{2-} 的产

生^[26].

观测期间, 春、夏和秋季, NO_3^- 峰值出现在早上 07:00 ~ 09:00, 下午 16:00 ~ 18:00 达到 NO_3^- 浓度最低值. 上午的峰值与早高峰机动车污染排放有关, 下午边界层高度增加导致低浓度 NO_3^- 出现. 冬季, NO_3^- 日变化不明显, 可能由于低温下热力学平衡的微小影响^[27]. 在四季, NH_4^+ 与 NO_3^- 的日变化特征相似, 表明存在 NH_4NO_3 .

2.3 水溶性无机离子的来源

为了解析南郊区 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性无机离子的来源, 利用主成分分析方法对全年水溶性无机离子进行解析, 获得表 1 的 PCA 结果, 结果显示对水溶性无机离子提取了 2 个主成分因子, 共解释了 63.64% 的污染源. 因子 1 中载荷值较高的为 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 和 Cl^- , 相关系数依次为 0.879、0.890、0.717 和 0.604, 解释了总方差的 37.38%. SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 是二次源的典型代表物种^[28], Cl^- 的来源比较复杂多样, 海盐、燃煤等均有可

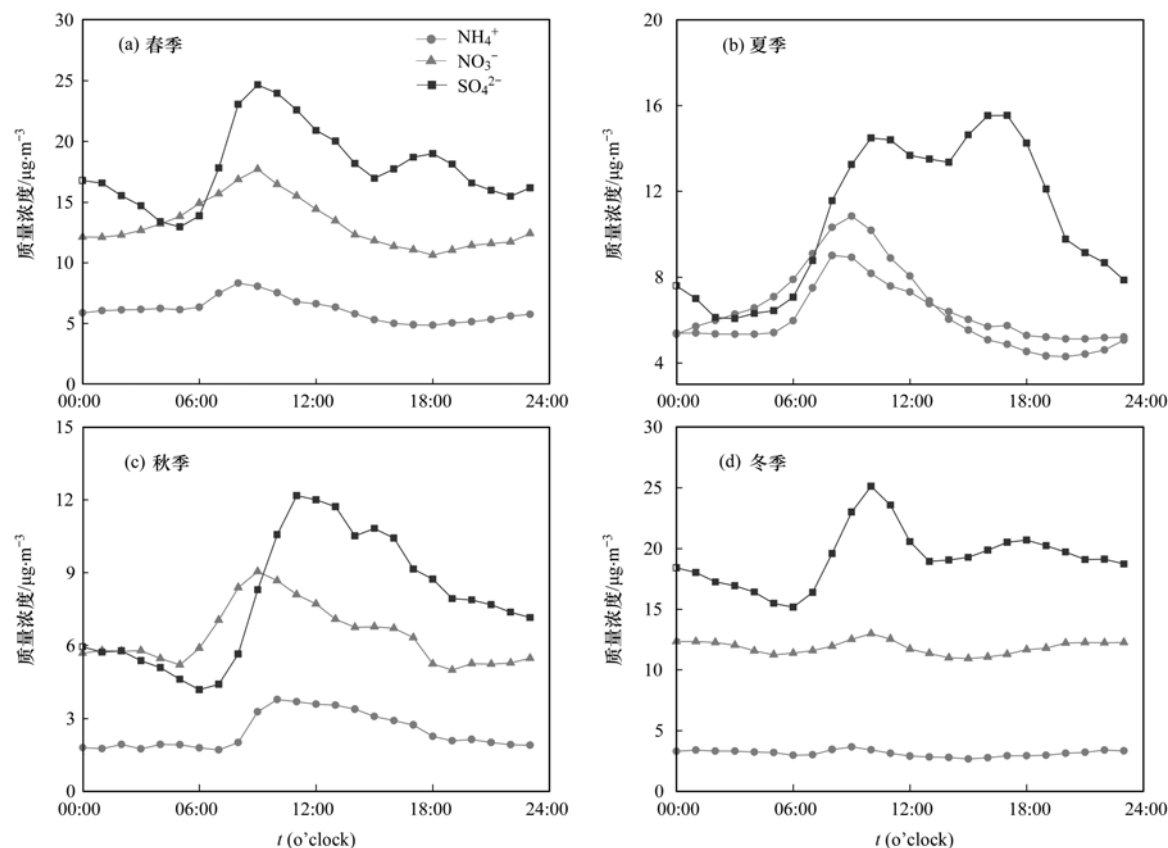


图3 SO₄²⁻、NO₃⁻ 和 NH₄⁺ 四季的日变化

Fig. 3 Diurnal profiles of SO₄²⁻, NO₃⁻, and NH₄⁺ in the four seasons

能^[29],但北京离海有150 km以上^[30],所以忽略Cl⁻来自海上气溶胶的输送可能,因此因子1定义为二次源和燃煤源,因子2解释了总方差的26.26%,其中Ca²⁺和Mg²⁺载荷值较高,分别是0.92和0.90,这两种离子主要来源于建筑扬尘或土壤风沙尘^[31],因此将因子2定义为土壤风沙尘和建筑扬尘的混合源。

表1 南郊区PCA结果

Table 1 Results of PCA in the Daxing district			
组分	因子1	因子2	公因子方差
SO ₄ ²⁻	0.879	0.07	0.777
NO ₃ ⁻	0.89	-0.028	0.794
NH ₄ ⁺	0.717	0.181	0.546
Cl ⁻	0.604	0.013	0.365
K ⁺	0.421	0.486	0.413
Na ⁺	0.11	0.721	0.532
Mg ²⁺	-0.002	0.903	0.815
Ca ²⁺	-0.021	0.921	0.849
方差贡献/%	37.4	26.3	63.6

2.4 潜在污染源区分析

PM_{2.5}中水溶性无机离子变化特征不仅受本地污染源的影响,外来气团的输送也会对其造成影

响,而冬季是四季中污染最严重的季节,离子浓度均有明显升高,尤其SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺这3种离子的质量浓度增加明显。

为了进一步探究南郊区冬季PM_{2.5}中水溶性无机离子的污染来源,利用后向轨迹聚类分析方法对到达南郊区的气团进行聚类,获得图4(a)所示结果,再利用潜在源贡献因子分析方法(PSCF)对SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺这3种离子可能的污染源区进行解析,获得图4(b)~4(d)的结果显示,A轨迹主要来自东南方向,该轨迹较短,途经河北及天津,可以发现,SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺的高PSCF值(PSCF大于0.6)区域均主要集中在南郊区东南部,重污染源区从青岛、淄博、衡水、沧州延伸到保定天津廊坊等地大于0.6的PSCF值逐渐增大,颜色逐渐加深,对大兴的离子浓度影响逐渐增强。B轨迹主要来自西部,对应SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺的中等PSCF值,主要污染源来自西部草原、沙漠与黄土地区等。C轨迹主要来自于西伯利亚,经蒙古高原到达观测站点,且气流轨迹长、风速大,有利于污染物扩散和稀释,由图4(b)~4(d)对比可看到当C类轨迹带来的气团增多时红色区域和绿色区域的覆

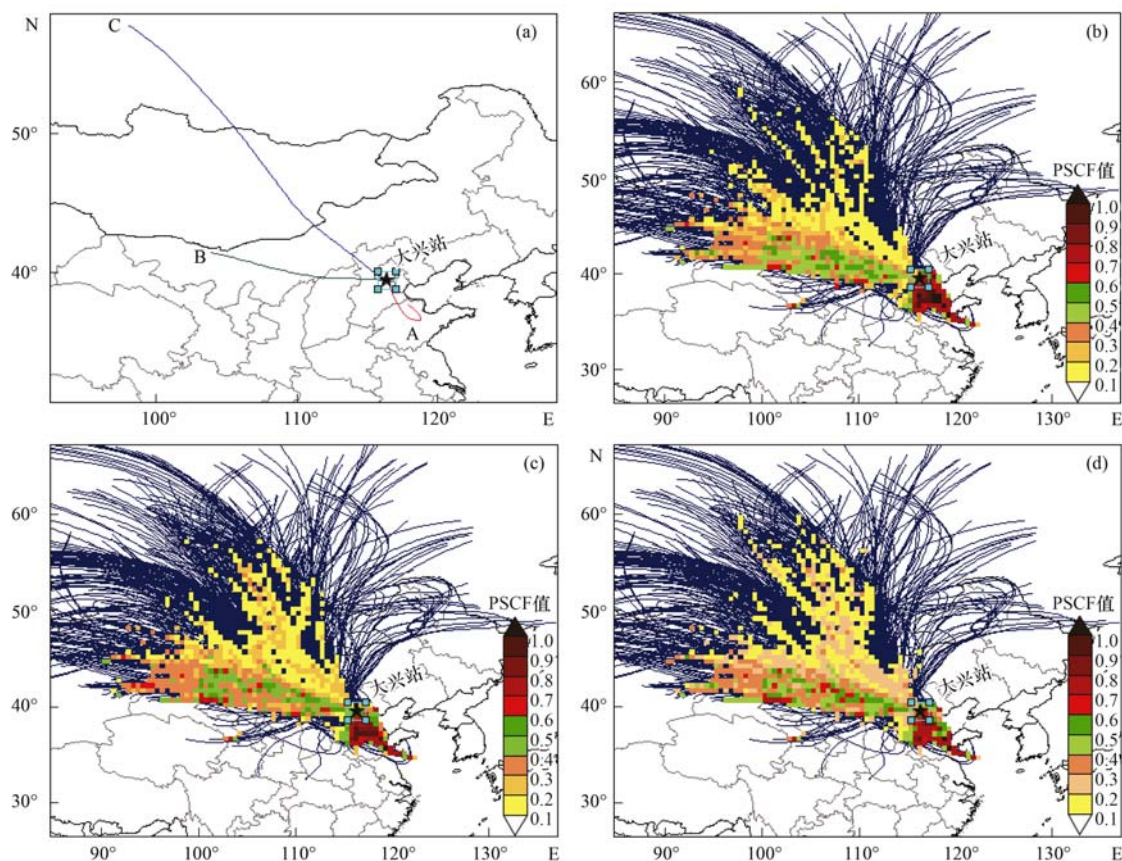


图4 冬季后向轨迹聚类及SNA潜在源区

Fig. 4 Backward trajectory clustering in winter and the potential source areas for SO_4^{2-} , NO_3^- , and NH_4^+

盖面会明显减少, 该类情况在对北京市区的研究中也有出现^[32], 对应的低PSCF值, 甚至有些网格区域的PSCF值为0, 因此C类气团会使南郊区污染浓度降低.

3 结论

(1) 北京南郊区9种水溶性离子总浓度达到 $38.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 是水溶性无机离子的主要组分; 随着 $\text{PM}_{2.5}$ 级别的增加, Ca^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 均有不同程度地增大, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度占总离子质量浓度比例明显增加, 相反 Ca^{2+} 、 Cl^- 所占比例呈现降低趋势.

(2) SO_4^{2-} 统计日变化为双峰型, 峰值分别出现在 10:00 和 18:00 左右, NO_3^- 和 NH_4^+ 呈单峰型, 峰值出现在 10:00 左右, 两种离子的日变化趋势相似.

(3) 主成分分析结果表明, 南郊区主要污染物为 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ , 来源为二次源. Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 也有贡献, 来源为燃煤源和土壤风沙尘及建筑扬尘的混合源.

(4) 南郊区冬季 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 及 NH_4^+ 的主要潜在污染源区位于观测点东南部, 而偏北气流有利于污染物扩散和稀释.

参考文献:

- [1] Zhang Q H, Zhang J P, Xue H W. The challenge of improving visibility in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(16): 7821-7827.
- [2] 杨露, 袁雅冬. $\text{PM}_{2.5}$ 的氧化损伤机制及其与呼吸系统疾病关系[J]. *临床荟萃*, 2016, **31**(4): 433-438.
- [3] Wang W T, Primbs T, Tao S, *et al.* Atmospheric particulate matter pollution during the 2008 Beijing Olympics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(14): 5314-5320.
- [4] Cao J J, Shen Z X, Chow J C, *et al.* Winter and summer $\text{PM}_{2.5}$ chemical compositions in fourteen Chinese cities [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2012, **62**(10): 1214-1226.
- [5] Ocskay R, Salma I, Wang W, *et al.* Characterization and diurnal variation of size-resolved inorganic water-soluble ions at a rural background site [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2006, **8**(2): 300-306.
- [6] Li X R, Wang L L, Wang Y S, *et al.* Chemical composition and size distribution of airborne particulate matters in Beijing during the 2008 Olympics [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **50**: 278-286.
- [7] Sun K, Qu Y, Wu Q, *et al.* Chemical characteristics of size-

- resolved aerosols in winter in Beijing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(8): 1641-1650.
- [8] 北京市环境保护局. 北京市环境状况公报[EB/OL]. <http://www.bjepb.gov.cn/bjhrb/xxgk/jgzj/jsgzsjzz/xcyj/xwfb/815044/index.html>, 2016.
- [9] Vedantham R, Landis M S, Olson D, *et al.* Source identification of PM_{2.5} in Steubenville, Ohio using a hybrid method for highly time-resolved data [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(3): 1718-1726.
- [10] 温天雪, 张士昱, 王跃思, 等. 大气颗粒物中可溶性离子在线分析方法的建立与应用[J]. *环境化学*, 2005, **24**(1): 104-105.
- [11] 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.
- Liu Z R, Sun Y, Li L, *et al.* Particle mass concentrations and size distribution during and after the Beijing olympic games[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(4): 913-923.
- [12] Kong L D, Yang Y W, Zhang S Q, *et al.* Observations of linear dependence between sulfate and nitrate in atmospheric particles [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119**(1): 341-361.
- [13] Wang Y Q, Zhang X Y, Draxler R R. TrajStat: GIS-based software that uses various trajectory statistical analysis methods to identify potential sources from long-term air pollution measurement data [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2009, **24**(8): 938-939.
- [14] 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分析[J]. *环境科学*, 2015(3): 768-773.
- Yang D Y, Liu B X, Zhang D W, *et al.* Correlation, seasonal and temporal variation of water-soluble ions of PM_{2.5} in Beijing during 2012-2013[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 768-773.
- [15] 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.
- [16] He K B, Yang F M, Ma Y L, *et al.* The characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(29): 4959-4970.
- [17] 陈璐, 赵东风, 薛建良, 等. 环境空气中 PM_{2.5} 的分布特征[J]. *现代化工*, 2013, **33**(9): 5-8.
- Chen L, Zhao D F, Xue J L, *et al.* Distribution characterization and source apportionment of PM_{2.5} in China [J]. *Modern Chemical Industry*, 2013, **33**(9): 5-8.
- [18] 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.
- [19] Wang Y, Zhuang G S, Zhang X Y, *et al.* The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of PM_{2.5} and TSP aerosol in Shanghai [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(16): 2935-2952.
- [20] Cheng Y, Lee S C, Ho K F, *et al.* Chemically-specified on-road PM_{2.5} motor vehicle emission factors in Hong Kong[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(7): 1621-1627.
- [21] Chow J C, Watson J G, Lowenthal D H, *et al.* Size-resolved aerosol chemical concentrations at rural and urban sites in Central California, USA [J]. *Atmospheric Research*, 2008, **90**(2): 243-252.
- [22] 刘庆阳, 刘艳菊, 杨峥, 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.
- Liu Q Y, Liu Y J, Yang Z, *et al.* Daily variations of chemical properties in airborne particulate matter during a high pollution winter episode in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(1): 12-18.
- [23] Ghosh S, Jung K, Jeon E C, *et al.* Seasonal and diurnal trend of carbon dioxide in a mountainous site in Seoul, Korea [J]. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2010, **4**(3): 166-176.
- [24] Arimoto R, Duce R A, Ray B J, *et al.* Trace elements in the atmosphere over the North Atlantic [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, **100**(D1): 1199-1213.
- [25] Osada K, Kido M, Nishita C, *et al.* Changes in ionic constituents of free tropospheric aerosol particles obtained at Mt. Norikura (2770m a. s. l.), central Japan, during the Shurin period in 2000 [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(35): 5469-5477.
- [26] Gao X M, Yang L X, Cheng S H, *et al.* Semi-continuous measurement of water-soluble ions in PM_{2.5} in Jinan, China: temporal variations and source apportionments [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(33): 6048-6056.
- [27] Park S S, Ondov J M, Harrison D, *et al.* Seasonal and shorter-term variations in particulate atmospheric nitrate in Baltimore [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(11): 2011-2020.
- [28] Wu Z J, Hu M, Shao K S, *et al.* Acidic gases, NH₃ and secondary inorganic ions in PM₁₀ during summertime in Beijing, China and their relation to air mass history [J]. *Chemosphere*, 2009, **76**(8): 1028-1035.
- [29] 陈永桥, 张逸, 张晓山. 北京城乡结合部气溶胶中水溶性离子粒径分布和季节变化 [J]. *生态学报*, 2005, **25**(12): 3231-3236.
- Chen Y Q, Zhang Y, Zhang X S. Size distribution and seasonal variation of ions in aerosol at semi-urban site in Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, **25**(12): 3231-3236.
- [30] 张凯, 王跃思, 温天雪, 等. 北京夏末秋初大气细粒子中水溶性盐连续在线观测研究 [J]. *环境科学学报*, 2007, **27**(3): 459-465.
- Zhang K, Wang Y S, Wen T X, *et al.* On-line analysis the water-soluble chemical of PM_{2.5} in late summer and early autumn in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, **27**(3): 459-465.
- [31] 古金霞, 吴丽萍, 霍光耀, 等. 天津市 PM_{2.5} 中水溶性无机离子污染特征及来源分析 [J]. *中国环境监测*, 2013, **29**(3): 30-34.
- Gu J X, Wu L P, Huo G Y, *et al.* Pollution character and source of water-soluble inorganic ions in PM_{2.5} over Tianjin [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, **29**(3): 30-34.
- [32] 任传斌, 吴立新, 张媛媛, 等. 北京城区 PM_{2.5} 输送途径与潜在源区贡献的四季差异分析 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(9): 2591-2598.
- Ren C B, Wu L X, Zhang Y Y, *et al.* Analyze to the seasonal differences of transport pathways and potential source-zones of Beijing urban PM_{2.5} [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(9): 2591-2598.

CONTENTS

Estimation of Fine Particle ($PM_{2.5}$) Emission Inventory from Cooking: Case Study for Shanghai	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1971)
Chemical Characterization, Spatial Distribution, and Source Identification of Organic Matter in $PM_{2.5}$ in summertime Shanghai, China	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, JING Sheng-ao, <i>et al.</i> (1978)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Salts in $PM_{2.5}$ in the Southern Suburbs of Beijing	GAO Han-yu, WEI Jing, WANG Yue-si (1987)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ During Spring in Tianjin Using the Quadrat Sampling Method	ZHAO Jing-qi, JI Ya-qin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (1994)
HONO Pollution Characteristics and Nighttime Sources During Autumn in Guangzhou, China	TIAN Zhi-lin, YANG Wen-da, YU Xiao-fang, <i>et al.</i> (2000)
Sulfur Sources and Oxidation Pathways in Summer Aerosols from Nanjing Northern Suburbs Using S and O Isotopes	HAN Xun, REN Jie, CHEN Shan-li, <i>et al.</i> (2010)
Methods for Determining and Applications of High-Resolution Vehicle Emission Inventory at County Scale	FAN Shou-bin, GUO Jin-jin, LI Xue-feng (2015)
Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Emitted from Typical Industrial Biomass Boilers	LIN Yu-jun, BAI Li, WANG Huan-xiang, <i>et al.</i> (2023)
Research of Parameter Uncertainty for the HSPF Model Under Different Temporal Scales	PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, MA Wen-jing (2030)
Contribution of Nitrogen Sources in Water Sources by Combining Nitrogen and Oxygen Isotopes and SIAR	JIN Zan-fang, ZHANG Wen-liao, ZHENG Qi, <i>et al.</i> (2039)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Volatile Organic Compounds in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, ZHAO Yong-hui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2048)
Fluorescent Characteristics and Environmental Significance of Particulate Organic Matter in Lake Taihu, China	LÜ Wei-wei, YAO Xin, ZHANG Bao-hua, <i>et al.</i> (2056)
Distribution and Settlement of Microplastics in the Surface Sediment of Yangtze Estuary	ZHU Xiao-tong, YI Jun, QIANG Li-yuan, <i>et al.</i> (2067)
Water Chemistry and Characteristics of Dissolved Organic Carbon During the Wet Season in Wulixia Reservoir, SW China	LU Xiao-xuan, LI Qiang, JIN Zhen-jiang, <i>et al.</i> (2075)
Bioavailability of Dissolved Organic Carbon in Rivers for Typical Vegetation Types in the Permafrost Regions on the Qinghai-Tibet Plateau	MA Xiao-liang, LIU Gui-min, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (2086)
Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) and Relationship with Dissolved Heavy Metals in a Peri-urban and an Urban River	LIANG Meng-qi, SHAO Mei-ling, CAO Chang-li, <i>et al.</i> (2095)
Migration and Transformation of Dissolved Organic Matter in Karst Water Systems and an Analysis of Their Influencing Factors	ZHANG Lian-kai, LIU Peng-yu, QIN Xiao-qun, <i>et al.</i> (2104)
Source and Distribution of Dissolved Metal Ions in the Backwater Area of Pengxi River in Three Gorges Reservoir	ZHAO Xiao-song, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (2117)
Differences in Diffusive Fluxes of Nutrients from Sediment Between the Natural River Areas and Reservoirs in the Lancang River Basin	WANG Xue, CHENG Bao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (2126)
Nutrient Distribution Characteristics of the Sediment-water System in the Xiangxi River During the Impoundment of TGR	SU Qing-qing, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2135)
Effects of Submerged Macrophytes on Different Phosphorus Fractions in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, GAO Shun-feng, WAN Rui, <i>et al.</i> (2145)
Distribution Characteristics and Fluxes of Nitrogen and Phosphorus at the Sediment-water Interface of Yuqiao Reservoir	WEN Shuai-long, GONG Wan-qing, WU Tao, <i>et al.</i> (2154)
Distribution of Phosphorus Fractions in Surface Sediments of Minjiang Mainstreams	YANG Geng, QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, <i>et al.</i> (2165)
Nitrate Uptake Kinetics and Correlation Analysis in an Agricultural Drainage Ditch	LI Ru-zhong, YIN Qi-he, GAO Su-di, <i>et al.</i> (2174)
Influencing Factors for Phosphorus Removal by Modified Bio-ceramic Substrates Coated with ZnAl-LDHs Synthesized by Different Modification Conditions	XIANG Yang, ZHANG Xiang-ling, LEI Yu, <i>et al.</i> (2184)
Removal of Odorants in Drinking Water Using VUV/Persulfate	SUN Xin, SHI Lu-xiao, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (2195)
Degradation of OG with Peroxymonosulfate Activated by a $MnFe_2O_4$ -graphene Hybrid	XIA Wen-jun, LIU Feng, HAO Shang-bin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism of As(V) Removal from Water by Lanthanum and Cerium Modified Biochars	LI Jin, ZU Yan-qun, LI Gang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption of Dissolved Organic Matter with Different Relative Molecular Masses on Inorganic Minerals and Its Influence on Carbamazepine Adsorption Behavior	LIANG Yu, HE Jiang-tao, ZHANG Si (2219)
Pollution Characteristics of Organophosphorus Flame Retardants in a Wastewater Treatment Plant	SUN Jia-wei, DING Wei-nan, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (2230)
Enhanced Coagulation as a Pretreatment for Low Temperature Wastewater	LIU Hai-long, REN Yu-xia, ZHANG Zhong-min (2239)
Operating Characteristics and Fouling Characteristics of a RO Membrane System for Desalination of Dyeing Wastewater	TAN Yu-jun, ZHANG Ze-tian, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (2249)
Optimization of the Nitrogen Removal Performance on the CANON Process in a Biofilm Reactor: From FBBR to MBBR	FU Kun-ming, LI Hui, ZHOU Hou-tian, <i>et al.</i> (2256)
Microbial Community Dynamics During Two Sludge Granulation Processes	GAO Jing-feng, ZHANG Li-fang, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2265)
Sludge Conditioning Performance of Polyaluminum, Polyferric, and Titanium Xerogel Coagulants	WANG Xiao-meng, WANG Xin, YANG Ming-hui, <i>et al.</i> (2274)
Effects of Heat and Heat-alkaline Treatments on Disintegration and Dissolved Organic Matter in Sludge	DAI Qin, ZHANG Wen-zhe, YU Pan-fen, <i>et al.</i> (2283)
Effect of Different Ratios of Anaerobic Time and Aeration Time on the Formation of Partial Nitrification Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, CAO Mei-zhong, <i>et al.</i> (2289)
Spatial and Temporal Variation of Mercury in Municipal Sewage Sludge in China	WANG Ning, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (2296)
Characteristics of N_2O Release and Influencing Factors in Grass-type and Algae-type Zones of Taihu Lake During Summer	ZHENG Xiao-lan, WEN Shuai-long, LI Xin, <i>et al.</i> (2306)
Analysis of Greenhouse Gas Emission Characteristics and Their Influencing Factors in the Algae Zone of Lake Taihu	JIA Lei, PU Yi-ni, YANG Shi-jun, <i>et al.</i> (2316)
Dynamics of CO_2 and N_2O in Seasonal Frozen Soil Profiles for a Typical Steppe in Inner Mongolia	LI Jin-bo, YAO Nan, LI Xiu, <i>et al.</i> (2330)
Characteristics of CO_2 Flux in a Mature Apple (<i>Malus domestica</i>) Orchard Ecosystem on the Loess Plateau	YANG Jian-feng, YANG Xiao-ni, WANG Jun-hua, <i>et al.</i> (2339)
Effects of Biochar Application Rates on Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil	QI Le, GAO Ming, GUO Xiao-min, <i>et al.</i> (2351)
Short-Term Effects of Different Fertilization Treatments on Greenhouse Gas Emissions from Northeast Black Soil	LI Ping, LANG Man, LI Miao, <i>et al.</i> (2360)
Eukaryotic Micro-plankton Community Diversity and Characteristics of Regional Distribution in the Yellow Sea by ITS High-throughput Sequencing	ZHANG Li, LIN Jia-ning, ZHANG Yuan, <i>et al.</i> (2368)
Influence of Different Patterns of Discharge on Microbial Diffusion in Municipal Treated Wastewater	LANG Xiu-lu, SONG Zhi-wen, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (2380)
Impact of Tourism on Bacterial Communities of Karst Underground River: A Case Study from Two Caves in Fengdu, Chongqing	LÜ Xian-fu, HE Qiu-fang, WANG Feng-kang, <i>et al.</i> (2389)
Diversity of the Microbial Community in Rice Paddy Soil with Biogas Slurry Irrigation Analyzed by Illumina Sequencing Technology	ZHU Jin-shan, ZHANG Hui, MA Lian-jie, <i>et al.</i> (2400)
Effect of Biochar Amendment on Physicochemical Properties and Fungal Community Structures of Cinnamon Soil	YAN Hai-tao, YIN Quan-yu, DING Song-shuang, <i>et al.</i> (2412)
Carbon Metabolism Characteristics of the Karst Soil Microbial Community for Pb-Zn Mine Tailings	FANG Jun-jia, LI Qiang, LIU Chang, <i>et al.</i> (2420)
Denitrification Characteristics and Community Structure of Aerobic Denitrifiers from Lake and Reservoir Sediments	KANG Peng-liang, ZHANG Hai-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (2431)
Investigation of the Coupling Mechanism between Naphthalene Degradation and Denitrification of a Naphthalene Degraded Bacterial Consortium Under Denitrification	ZHANG Ze-yu, WANG Ming-xia, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2438)
Spatial Distribution Study and Pollution Assessment of Pb in Soils in the Xijiang River Drainage of Guangxi	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2446)
Effects of Agricultural Activities on Soil Mercury Changes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	CHEN Qiu-yu, SUN Song, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2456)
Screening and Identification of Arsenic-resistant Endophytic Bacteria from Different Rice Tissues (<i>Oryza sativa</i> L.) in Different Growth Stages	WANG Bo-xun, WANG Xue-dong, DUAN Gui-lan (2464)
Characteristics of Mercury Transformation in Soil and Accumulation in Rice Plants in an Acidic Purple Paddy Soil Area	LI Yu-qin, SUN Tao, DENG Han, <i>et al.</i> (2472)
Life Cycle Environmental Impact Assessment on Different Modes of Greenhouse Vegetable Production in the North China Plain	XU Qiang, HU Ke-lin, LI Ji, <i>et al.</i> (2480)
Health Effects of $PM_{2.5}$ Based on Bacterial Toxicity Test and Transcriptional Analysis in Lungs of Mice	SONG Peng-cheng, LU Shu-yu, WEI Yong-jie, <i>et al.</i> (2489)
Socio-economic Factors Influencing the Spatial Distribution of $PM_{2.5}$ Concentrations in China: An Exploratory Analysis	DUAN Jie-xiong, ZHAI Wei-xin, CHENG Cheng-qi, <i>et al.</i> (2498)