ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第6期

Vol.39 No.6

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 39 卷 第 6 期
2018 年 6 月 15 日

目 次

北京市二次有机气溶胶生成潜势的日变化规律 …… 刘俊, 楚碧武, 贺泓(2505)
太原冬季 $PM_{2.5}$ 影响霾污染的关键尺度谱特征 …… 杨素英, 余欣洋, 赵秀勇, 李义宇, 孙洪娉, 田芷洁, 李岩, 吴尚, 王梓航(2512)
盘锦市冬季 $PM_{2.5}$ 水溶性离子特征及来源分析 …… 张蕾, 姬亚芹, 王士宝, 赵静琦, 张军, 李越洋, 张伟(2521)
广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 …… 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 田智林, 李梅, 程鹏(2528)
热带树木燃烧颗粒物中脱水糖和醋菲烯的排放特征 …… 金诚妙, 崔敏, 韩勇, 陈颖军, 唐娇, 李军, 张干(2538)
天津地区污染天气分析中垂直扩散指标构建及运用 …… 蔡子颖, 韩素芹, 张敏, 姚青, 刘敬乐(2548)
亚热带农田和林地大气氮湿沉降与混合沉降比较 …… 朱潇, 王杰飞, 沈健林, 肖润林, 王娟, 吴金水, 李勇(2557)
京津冀地区黄标车政策的总量减排效益评估 …… 卢亚灵, 周佳, 程曦, 张伟, 蒋洪强(2566)
北京北运河河流生态系统健康评价 …… 顾晓昀, 徐宗学, 刘麟菲, 殷旭旺, 王汨(2576)
长江武汉段丰水期水体和沉积物中多环芳烃及邻苯二甲酸酯类有机污染物污染特征及来源分析 …… 董磊, 汤显强, 林莉, 郦超, 黎睿, 吴敏(2588)
福建省敖江下游抗生素抗性基因分布特征 …… 张丹丹, 郭亚平, 任红云, 周昕原, 黄福义, 张娴(2600)
三峡库区支流河口沉积物重金属分布特征及风险评价 …… 方志青, 陈秋禹, 尹德良, 王志康, 孙涛, 王永敏, 谢德体, 王定勇(2607)
三峡水库蓄水至 175 m 后干流沉积物理化性质与磷形态分布特征 …… 潘婵娟, 黎睿, 汤显强, 夏振尧, 李青云, 杨文俊, 许文年(2615)
基于水化学和稳定同位素的白洋淀流域地表水和地下水硝酸盐来源 …… 孔晓乐, 王仕琴, 丁飞, 梁慧雅(2624)
天目湖沙河水库热分层变化及其对水质的影响 …… 孙祥, 朱广伟, 笪文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽, 李恒鹏, 李慧赟(2632)
重庆雪玉洞洞穴滴水水文地球化学时空变化特征及其环境意义…… 曾泽, 蒋勇军, 吕现福, 曾思博, 胡刘婵, 雷佳琪(2641)
岩溶地表河旱季有色溶解有机质组成及来源:以金佛山碧潭河为例 …刘跃, 贺秋芳, 刘宁坤, 刘九缠, 王正雄, 段世辉(2651)
托来河流域不同海拔降水稳定同位素的环境意义 …李永格, 李宗省, 冯起, 肖莲桂, 吕越敏, 桂娟, 袁瑞丰, 张百娟(2661)
五里峡水库初级生产力对水气界面二氧化碳和甲烷排放速率时空变化的影响 …… 彭文杰, 李强, 宋昂, 靳振江(2673)
西南山区典型河道型水库藻类功能群时空演替特征及其影响因素:以紫坪铺水库为例 …… 张耀文, 李洪, 李嘉, 宋洋, 张陵蕾, 李永, 蒲迅赤, 黄文典(2680)
四明湖水库浮游植物功能类群的季节演替及其影响因子 …… 郑诚, 陆开宏, 徐镇, 郑忠明, 朱津永(2688)
营养盐添加对水华蓝藻——卵孢金孢藻生长和竞争影响的原位实验 …王梦梦, 张玮, 张军毅, 尚光霞, 杜彩丽, 王丽卿(2698)
植物配置与进水碳氮比对沉水植物塘水质净化效果的影响 …… 刘淼, 陈开宁(2706)
江汉平原水稻季灌排单元沟渠中氮磷变化特征及其环境风险…… 华玲玲, 张富林, 翟丽梅, 刘宏斌, 范先鹏, 王洪媛(2715)
冀西北典型北方小城镇污水处理厂中抗生素的分布和去除 …… 柴玉峰, 张玉秀, 陈梅雪, 王瑞, 柳蒙蒙, 郑嘉熹, 魏源送(2724)
臭氧-粉末炭联用作为预处理缓解膜污染的效果与机制 …… 董秉直, 高昊旸, 胡孟柳(2732)
中试 SAD-ASBR 系统处理含盐废水的启动与工艺特性 …… 于德爽, 唐佳佳, 张军, 王晓霞, 赵红, 韩长民, 孙捷(2740)
海藻酸锆/聚 *N*-异丙基丙烯酰胺半互穿网络凝胶球的除磷性能 …曾学阳, 骆华勇, 张耀坤, 荣宏伟, 曾子君, 钟广汇(2748)
玉米淀粉废水短程硝化快速启动及其稳定性 …… 龙北生, 刘迅雷, 刘红波, 杨靖新, 袁树森(2756)
硝化细菌的培养及包埋固定化中试 …… 杨宏, 胡银龙(2763)
不同运行策略下厌氧氨氧化的脱氮性能 …… 安芳娇, 彭永臻, 董志龙, 邵兆伟, 赵智超, 黄剑明, 陈永志(2770)
高含固污泥厌氧消化中蛋白质转化规律 …… 詹瑜, 施万胜, 赵明星, 许之扬, 阮文权, 宋联, 朱葛(2778)
污泥富磷堆肥前后重金属赋存形态及释放能力变化…… 李玉, 方文, 祁光霞, 魏勇红, 刘建国, 李润东(2786)
丝状菌污泥膨胀对脱氮除磷功能菌群的影响…… 高晨晨, 游佳, 陈轶, 郑兴灿, 尚巍, 张文安(2794)
同步去除并富集磷酸盐生物膜驯化过程中微生物种群分析 …… 孟璇, 潘杨, 章豪, 廖烜弘, 徐林建, 冯鑫, 单捷(2802)
四环素对人粪便好氧堆肥过程及微生物群落演替的影响 …… 时红蕾, 王晓昌, 李倩, 刘源(2810)
长期定位有机物料还田对关中平原夏玉米-冬小麦轮作土壤 NO 排放的影响…… 袁梦轩, 王晋峰, 谭跃慧, 魏静, 杨学云, 顾江新(2819)
菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响 …… 祁乐, 高明, 周鹏, 王富华, 高泳钦, 陈仕奇, 吴思琪, 邓静霖, 文婷(2827)
^{13}C脉冲标记法定量冬小麦光合碳分配及其向地下的输入 …… 孙昭安, 陈清, 韩笑, 吴文良, 孟凡乔(2837)
西南喀斯特区植被恢复对土壤氮素转化通路的影响 …… 杨怡, 欧阳运东, 陈浩, 肖孔操, 李德军(2845)
江苏海岸带土壤重金属来源解析及空间分布 …… 吕建树, 何华春(2853)
黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布 …… 于元赫, 吕建树, 王亚梦(2865)
典型小城市土壤重金属空间异质性及其风险评价:以临安市为例 …… 郑晴之, 王楚栋, 王诗涵, 林于也, 赵科理, 吴东涛, 傅伟军(2875)
西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价 …… 周艳, 陈檣, 邓绍坡, 万金忠, 张胜田, 龙涛, 李群, 林玉锁, 吴运金(2884)
典型山核桃产区土壤重金属空间异质性及其风险评价…… 张红桔, 赵科理, 叶正钱, 许斌, 赵伟明, 顾晓波, 张华锋(2893)
生物炭添加对湿地植物生长及氧化应激响应的影响 …… 黄磊, 陈玉成, 赵亚琦, 肖广全, 杨志敏(2904)
厌氧条件水稻土铁对砷释放的影响…… 王欣, 钟松雄, 陈志良, 何宏飞, 董家华, 陈晓丽(2911)
矿业活动影响区稻田土壤和稻米中重金属含量及健康风险 …… 田美玲, 钟雪梅, 张云霞, 余元元, 庞瑞, 周浪, 宋波(2919)
硅酸钙和生物腐殖肥复配对葱生长和镉吸收的影响 …… 刘德玲, 尹光彩, 陈志良, 林亲铁, 刘千钧, 钟松雄, 黄玲, 张建强(2927)
吉林四平设施土壤和蔬菜中重金属的累积特征 …… 李莲芳, 朱昌雄, 曾希柏, 李红娜, 叶婧, 李峰, 吴翠霞(2936)
喷施锌肥对油菜镉锌生物可给性的影响 …… 王林, 谷朋磊, 李然, 徐应明, 孙约兵, 梁学峰, 代晶晶(2944)
贵州草海底栖动物汞分布及其对沉积物汞的响应特征…… 许议元, 曾玲霞, 何天容, 陈梦瑜, 钱晓莉, 李振吉(2953)
废旧轮胎翻新过程中多环芳烃排放及健康风险 …… 付建平, 赵波, 黎玉清, 刘沙沙, 尹文华, 黄锦琼, 周长风, 张素坤, 贺德春, 韩静磊(2963)
县级尺度的重庆市碳排放时空格局动态 …… 孙秀锋, 施开放, 吴健平(2971)
颗粒尺寸对纳米氧化物环境行为的影响…… 严玉鹏, 唐亚东, 万彪, 王小明, 刘凡, 冯雄汉(2982)
防晒剂的海洋环境行为与生物毒性 …… 朱小山, 黄静颖, 吕小慧, 杜永芬, 蔡中华(2991)
《环境科学》征订启事(2527) 《环境科学》征稿简则(2723) 信息(2826, 2852, 2910)

盘锦市冬季 $PM_{2.5}$ 水溶性离子特征及来源分析

张蕾[1], 姬亚芹[1*], 王士宝[1], 赵静琦[1], 张军[2], 李越洋[1], 张伟[1]
(1. 南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300350; 2. 盘锦市环境保护监测站, 盘锦 124010)

摘要: 为探讨盘锦市冬季 $PM_{2.5}$ 水溶性离子污染特征和来源, 于 2017 年 1 月采集 3 个点位的 $PM_{2.5}$ 样品, 用 ICS-900 离子色谱仪分析了 8 种离子(Na^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}、K^+、NH_4^+、SO_4^{2-}、Cl^- 和 NO_3^-). 开展了 $PM_{2.5}$ 和离子浓度特征分析、硫氧化率(SOR)和氮氧化率(NOR)计算、离子平衡计算、主成分分析等. 结果表明: 盘锦市冬季 $PM_{2.5}$ 浓度与水溶性离子浓度特征为文化公园 > 开发区 > 第二中学; SO_4^{2-}、NO_3^-、NH_4^+ 质量浓度较大; 冬季硫氧化率(SOR)和氮氧化率(NOR)的均值均大于 0.10, 说明 SO_4^{2-}、NO_3^- 主要由 SO_2 和 NO_x 转化而来; 阳离子和阴离子当量相关性较强; 开发区整体上呈现出中性, 文化公园与第二中学呈现出偏碱性; 盘锦市 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子主要来源于煤烟尘, 生物质燃烧, 二次粒子以及扬尘.

关键词: 盘锦市; 冬季; $PM_{2.5}$; 水溶性离子; 来源解析
中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)06-2521-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201710032

Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in $PM_{2.5}$ During Winter in Panjin

ZHANG Lei[1], JI Ya-qin[1*], WANG Shi-bao[1], ZHAO Jing-qi[1], ZHANG Jun[2], LI Yue-yang[1], ZHANG Wei[1]
(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Panjin Environmental Monitoring Center, Panjin 124010, China)

Abstract: In order to study the characteristics and source of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ in Panjin, $PM_{2.5}$ samples were collected at three sites in January of 2017, and the levels of eight ions (Na^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}, K^+, NH_4^+, SO_4^{2-}, Cl^-, and NO_3^-) were determined by ICS-900 ion chromatograph. The characteristics of $PM_{2.5}$, the water-soluble ion concentration, SOR and NOR calculation, and ion balance calculation were investigated, and a principal component analysis was conducted. The results showed that the concentration of $PM_{2.5}$ and water-soluble ions followed a descending sequence of park > development zone > the second middle school. SO_4^{2-}, NO_3^-, and NH_4^+ were the major components of the water-soluble ions at the three sampling sites. SOR and NOR values were all higher than 0.10, indicating that SO_4^{2-} and NO_3^- were mainly converted from SO_2 and NO_x. The ion balance calculation demonstrated that the cationic and anion equivalents in Panjin had great correlation in winter. Further study showed that the atmosphere in the development zone presented as neutral and that in the cultural park and the second middle school presented as partially alkaline. The principal component analysis further indicated that the water-soluble ions were mainly derived from fuel combustion, biomass burning, secondary particles, and re-suspended dust in winter.

Key words: Panjin City; winter; $PM_{2.5}$; water-soluble ions; source apportionment

2013 年中国遭遇有观测记录以来最严重的雾-霾天气[1], $PM_{2.5}$ 已成为我国城市大气环境的主要污染物. 《中国环境状况公报》显示, 2016 年以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的天数占重度及以上污染天数的 80.3%. $PM_{2.5}$ 浓度的增加不仅降低大气能见度, 同时影响人体健康[2]. $PM_{2.5}$ 由多种化学组分组成, 包括水溶性离子, 元素和碳等[3], 其中, 水溶性离子是 $PM_{2.5}$ 的重要组成部分, 占总质量浓度的 30% 以上[4], 但因各地气象条件, 能源结构等的不同, 其组成结构和浓度水平存在较大差异[5~7]. 其中, SO_4^{2-}、NO_3^- 和 NH_4^+ (SNA)是大气颗粒物中最主要的水溶性离子. SO_4^{2-} 主要来自于 SO_2 与 OH 自由基的气相氧化过程或由溶解在云滴、雾滴、颗粒物水膜中的 SO_2 液相氧化生成[8]; NO_x 主要来源于化石燃料燃烧、闪电固氮、生物质燃烧和土壤微生物释放, 通过一系列的化学反应, 最终以 NO_3^- 形式沉降; NH_3 和大气中酸性气体(SO_2、NO_x)反应生成无机铵盐; 无机铵盐的浓度不仅与大气中 SO_2、NO_x 浓度有关, 也同样受大气 NH_3 浓度的限制[9].

近年来, 对大中型城市细颗粒物中水溶性离子的研究较深入[10~14]. 盘锦市位于辽宁省中南部,

收稿日期: 2017-10-09; **修订日期**: 2017-11-28
作者简介: 张蕾(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染及其控制, E-mail:995421075@qq.com
* 通信作者, E-mail:jiyaqin@nankai.edu.cn

辽河三角洲中心地带，辽河入海口，东北邻鞍山市，东南隔大辽河与营口市相望，西北邻锦州市，南临渤海辽东湾，为地级市. 随着城市化进程的加快，大气质量也面临挑战，但以往研究并未对盘锦市环境空气 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子进行研究，仅张伟等[15]对盘锦和鞍山市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子进行了特征分析. 本研究通过采集盘锦市 3 个点位冬季环境空气 $PM_{2.5}$ 样品和组分分析，探讨了 8 种水溶性离子的时空分布特征和污染来源，以期为有效控制盘锦市 $PM_{2.5}$ 污染提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

选取盘锦市开发区、文化公园、第二中学作为采样点位，见图 1，采样点位详细信息见表 1. 采样时段为 2017 年 1 月 4 ~ 17 日，采样仪器为武汉天虹中流量颗粒物采样器，每日 08:00 ~ 次日 08:00 进行连续 24 h 采样. 采样滤膜为石英滤膜，采样所得滤膜有效张数为 42 张(同时对各污染源进行样品采集，共采集有效样品数 161 个). 采样前，将石英膜放入 550℃的马弗炉中烘 2 h，以降低滤膜中的挥发份对称重和组分含量的影响；滤膜在烘烤后和采样后均放入恒温恒湿天平室中平衡 3 d，以降低温度、湿度等对称重的影响. 每天采集 1 张全程空白样品，以扣除组分空白.

表 1 采样点详细情况

Table 1 Description of sampling points

点位名称	经度(E)	纬度(N)	属性	所属行政区
开发区	122°01′49″	41°08′56.00″	国控点	兴隆台区
文化公园	122°03′22″	41°07′20.00″	市控点	兴隆台区
第二中学	122°02′31.00″	41°06′50.00″	自选点	大洼区

图 1 采样点位示意

Fig. 1 Location of sampling sites

1.2 样品分析

样品制备方法为:将采集样品的石英滤膜截取四分之一，用干净的陶瓷剪刀剪碎到 10 mL 玻璃试管中，加水 8 mL，盖上盖子放入超声波清洗器内，在 40℃的条件下超声提取 20 min. 待提取液冷却至室温后，取上清液经 0.22 μm 微孔滤膜过滤至聚乙烯样品瓶后上机进行测试. 利用美国戴安公司的 ICS-900 型离子色谱仪，分析 Cl^-、NO_3^-、SO_4^{2-}、Na^+、NH_4^+、K^+、Mg^{2+}、Ca^{2+}.

1.3 精密度与检出限

配置 3 份标液并进行测定，求出测量的平均值以及与标准参考值之间的相对误差. 在标准溶液的浓度范围内，选择 3 个浓度，每一个浓度水平上分别重复测定，求出每个浓度水平的标准偏差 S_1、S_2、S_3. 用线性回归法求得截距 S_0，定义 $3S_0$ 为方法的检测下限. S_0 为零浓度时的空白样品的标准偏差(表 2).

1.4 质量保证与质量控制

每次采样前，对 $PM_{2.5}$ 采样泵的流量进行标定校准；采样时，有专人负责巡检采样泵的流量，并做好记录，防止因采样流量误差而影响浓度的准确性;每2 d清洗一次采样头;雨、雪、大风等特殊天

表 2 ICS-900 型离子色谱仪的准确度和检出限

Table 2 ICS-900 ion chromatography accuracy and detection limit

离子名称	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
检出限/mmol·L^{-1}	0.012 45	0.001 95	0.003 15	0.002 625	0.004 95	0.007 2	0.038 5	0.069 6
相对偏差/%	0.25	0.09	0.09	0.47	0.49	0.18	2.37	0.71

气不进行采样；在各个传输环节没有样品丢失；每次进样时更换滤头.

实验人员在操作过程中佩戴一次性手套，以防样品受到污染；操作台上平铺铝箔，以防样品受到污染；镊子，剪刀在实验前用乙醇清洗；离心管在使用之前，用去离子水清洗，用超声波振荡萃取 10 min，之后置于烘箱中烘干待用. 样品测定过程中每 10 个样品间加入一个标准样品进行测定，以检测仪器的稳定性.

2　结果与分析

2.1　$PM_{2.5}$ 质量浓度特征

采样期间 $PM_{2.5}$ 质量浓度详见图 2. 开发区 $PM_{2.5}$ 质量浓度为(89.68 ± 39.24) μg·m^{-3}，文化公园 $PM_{2.5}$ 质量浓度为(94.01 ± 46.92) μg·m^{-3}，第二中学 $PM_{2.5}$ 质量浓度为(89.35 ± 43.87) μg·m^{-3}，开发区、文化公园和第二中学 $PM_{2.5}$ 平均浓度为环境空气质量标准(GB 3095-2012)二级标准日均浓度限值(75 μg·m^{-3})的 1.20、1.25 和 1.19 倍. 盘锦市冬季供暖主要以燃煤为主，采样期间风速为 0.74 ~ 2.25 m·s^{-1}，采样期间气象条件不利于污染物的扩散，导致颗粒物持续积累.

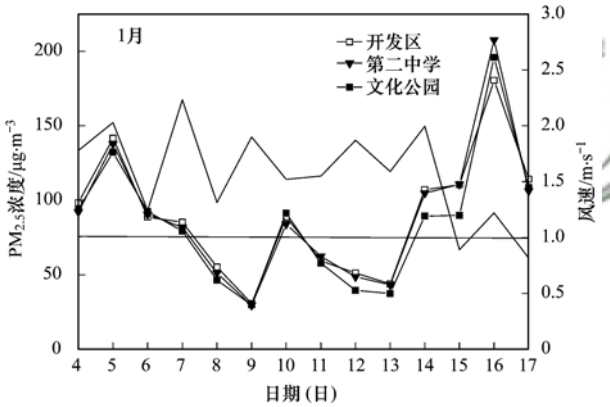

图 2　采样期间 $PM_{2.5}$ 日均浓度变化及风速

Fig. 2　$PM_{2.5}$ daily concentration and wind speed during the sampling period

2.2　水溶性离子特征

采样期间盘锦市各点位水溶性离子的浓度见图 3. 开发区、文化公园和第二中学的水溶性离子总质量浓度分别为 25.15、29.67 和 25.04 μg·m^{-3}，与 $PM_{2.5}$ 空间分布特征相同，分别占到 $PM_{2.5}$ 浓度的 28.05%、31.56% 和 28.02%. 盘锦市冬季水溶性离子质量浓度顺序为：开发区 $SO_4^{2-} > NO_3^- > NH_4^+ > Cl^- > K^+ > Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$；文化公园 $SO_4^{2-} > NO_3^- > NH_4^+ > Cl^- > K^+ > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$；第二中学 $SO_4^{2-} > NO_3^- > NH_4^+ > Cl^- > K^+ > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$. 水溶性离子总质量浓度均表现出 SO_4^{2-}、NO_3^-、NH_4^+ 质量浓度较大，同时 3 个点位仅 Na^+ 和 Ca^{2+} 质量浓度空间特征存在变化，但总体上浓度变化并不明显，说明 3 个点位的污染源总体相同. 由表 3 可知，与国内其他城市冬季水溶性离子浓度进行对比，盘锦市 $PM_{2.5}$ 水溶性离子处于中等水平，盘锦市地处东北地区，冬季供暖主要以燃煤为主，使得盘锦市冬季离子浓度较厦门和台湾高，但是由于其产业结构的单一以及重污染工业的缺乏，使得盘锦市冬季的离子浓度较石家庄和北京低.

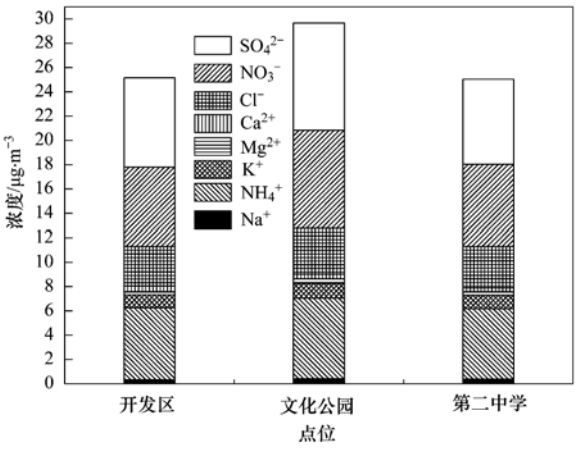

图 3　盘锦冬季各点位离子浓度

Fig. 3　Ion concentrations at each sites during winter in Panjin

表 3　本研究与其他城市冬季水溶性离子对比/μg·m^{-3}

Table 3　Comparison of water-soluble ions in this study to that in other cities/μg·m^{-3}

城市/区域	采样日期(年-月)	$PM_{2.5}$	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
厦门[16]	2014-12	77.80	0.20	4.30	0.50	0.03	0.40	1.50	5.50	3.90
北京[17]	2014-01	116.60	0.20	9.10	1.50	0.30	0.90	5.00	14.80	13.30
石家庄[17]	2014-01	267.70	0.40	25.50	3.70	0.40	3.70	12.70	28.50	36.60
徐州[18]	2016-02	164.80	0.60	13.20	3.30	0.30	3.80	6.00	22.50	17.50
台湾[19]	2015-01	36.10	0.80	4.50	0.40	0.60	1.00	1.00	4.80	4.20
本研究	2017-01	91.01	0.37	6.10	1.13	0.30	0.40	3.47	7.07	7.70

2.3 二次离子转化率

SO_4^{2-}、NO_3^-、NH_4^+ 多由 SO_2、NO_x 和 NH_3 转化而来[18]，在开发区、文化公园和第二中学分别占总水溶性离子浓度的 78.56%、79.19% 和 78.01%，二次离子一定程度上受到前体物浓度的影响[20]，为了更好地表示 SO_2、NO_x 向 SO_4^{2-}、NO_3^- 的转化程度，已有学者采用硫氧化率(SOR)和氮氧化率(NOR)来表征二次离子的转化，计算公式为[21]：

$$SOR = \frac{n(SO_4^{2-})}{n(SO_4^{2-}) + n(SO_2)} \quad (1)$$

$$NOR = \frac{n(NO_3^-)}{n(NO_3^-) + n(NO_x)} \quad (2)$$

式中，n 代表各污染物的量(mol)．一般认为当 SOR 和 NOR 大于 0.1 时，大气中 SO_2 和 NO_x 发生光化学氧化．较高的 SOR 与 NOR 表示前体物更多地向二次气溶胶转化．

根据采样期间 SO_2 及 NO_x 质量浓度可得盘锦市 SOR 和 NOR，详见图 4．从中可知盘锦市冬季 SOR 均值为 0.19，大于 0.10，说明盘锦市冬季 SO_2 二次转化明显；NOR 均值为 0.12，略大于 0.10，说明 NO_x 二次转化不明显．由于 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 常与 NH_4^+ 结合形成二次硫酸盐和二次硝酸盐，故将 SO_4^{2-}、NO_3^- 与 NH_4^+ 进行 Pearson 相关性分析，结果如表 4 所示，可知 NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 均存在较好的相关性，表明 NH_4^+ 主要以 NH_4NO_3 的形式存在．通过线性拟合可知，$[NH_4^+] = 0.833\,75[SO_4^{2-}] - 0.633\,5$，由于 NH_4^+ 与 HSO_4^- 的平衡比为 1∶1，NH_4^+ 与 SO_4^{2-} 的平衡比为 0.5∶1，所以 NH_4^+ 可能以 $(NH_4)_2SO_4$ 与 NH_4HSO_4 的形式存在．

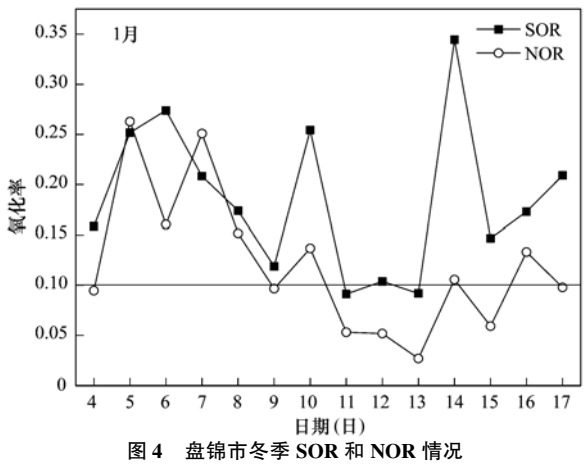

图 4 盘锦市冬季 SOR 和 NOR 情况

Fig. 4 Values of SOR and NOR in winter in Panjin

2.4 离子平衡及城市酸碱度

离子平衡计算可以用来研究城市气溶胶离子之间的酸碱平衡，进而对城市各点位的酸碱度进行分析，计算阴阳离子电荷平衡的方程式为[22]：

表 4 各点位 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 与 NH_4^+ 相关性分析

Table 4 Correlation of SO_4^{2-} and NO_3^- with NH_4^+

项目	开发区		文化公园		第二中学	
	SO_4^{2-}	NO_3^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	SO_4^{2-}	NO_3^-
双尾检验 P 值	0.06	0.05	0.06	0.02	0.04	0.03
相关系数	0.52	0.53	0.52	0.60	0.56	0.59

$$阴离子当量 = \frac{SO_4^{2-}}{48} + \frac{NO_3^-}{62} + \frac{Cl^-}{35.5} \quad (3)$$

$$阳离子当量 = \frac{Na^+}{23} + \frac{NH_4^+}{18} + \frac{K^+}{39} + \frac{Mg^{2+}}{12} + \frac{Ca^{2+}}{20} \quad (4)$$

图 5 表明，阳离子和阴离子当量相关性较强，分析数据质量基本可靠．开发区，文化公园与第二中学的相关系数分别为 0.94、0.94 和 0.97．对 3 个点位分别进行分析，可得采样期间开发区阴离子和阳离子当量的比值为 0.96，文化公园比值为 0.85，第二中学比值为 0.91．开发区整体上呈现出中性，阴阳离子得到较好地中和；文化公园与第二中学明显可以看出呈现出偏碱性，盘锦冬季整体上呈现出偏碱性，所以对于盘锦市冬季大气治理，可以适当根据城市酸碱度选择适宜的治理方案．

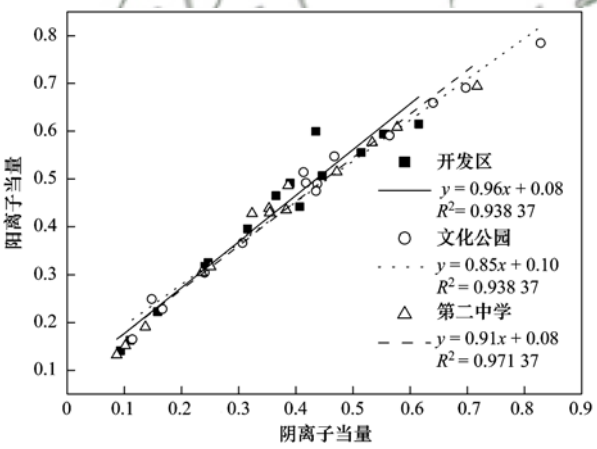

图 5 $PM_{2.5}$ 中离子平衡关系

Fig. 5 Ion balance relationship within $PM_{2.5}$

2.5 主成分分析

在 CMB 模型算法中，灵敏度(modified pseudo-inverse matrix，MPIN)是反映元素对 CMB 模型模拟灵敏程度的矩阵，该矩阵提出了判断标识组分的方法[23]．本研究根据盘锦市污染源与受体离子成分谱信息，将数据代入 CMB 模型，得出各类源的灵敏度矩阵，详见表 5，可知扬尘的标识组分为 Ca^{2+}，煤烟尘的标识组分为 SO_4^{2-}，生物质燃烧的标识组

表 5　盘锦市主要颗粒物源类 MPIN 灵敏度矩阵

Table 5　MPIN sensitivity matrix of main particulate matter in Panjin

项目	扬尘	煤烟尘	生物质燃烧	$(NH_4)_2SO_4$	NH_4NO_3	海盐粒子
Cl^-	0.14	−0.29	0.03	0.16	−0.01	1.00
NO_3^-	−0.25	0.25	−0.05	−0.41	1.00	−0.01
SO_4^{2-}	−1.00	1.00	−0.21	−0.31	−0.10	−0.04
NH_4^+	0.68	−0.68	0.14	1.00	0.07	0.03
Na^+	−0.30	0.59	−0.06	−0.48	0.01	0.30
K^+	−0.11	−0.13	1.00	0.12	−0.05	−0.56
Mg^{2+}	0.40	−0.18	0.03	0.10	−0.03	−0.05
Ca^{2+}	0.94	−0.13	−0.05	0.00	−0.06	−0.20

分为 K^+，二次粒子的标识组分为 NH_4^+ 和 NO_3^-，海盐粒子的标识组分为 Cl^-.

主成分分析是一种用较少的有代表性的因子来说明众多变量，依据标识组分识别污染源的方法[24]. 为了进一步了解各种污染源对 $PM_{2.5}$ 中各水溶性离子组分的贡献，本研究利用 SPSS 软件对盘锦市各点位采样期间 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子进行主成分分析.

表 6 分别为 3 个采样点位的主成分正交旋转因子荷载矩阵. 其中，开发区的 2 个主成分因子共解释了 76.90% 的来源，因子 1 解释了 55% 的离子，NH_4^+、K^+、SO_4^{2-} 的作用显著，其中 SO_4^{2-} 主要为煤烟尘的标识组分，K^+ 主要为生物质燃烧的标识组分，NH_4^+ 为二次粒子的标识组分，主要来自于二次转化；因子 2 的贡献为 21.90%，其中主要为 Mg^{2+} 的作用，Mg 为地壳中含量丰富的元素，Mg^{2+} 主要来自于扬尘[25]，因此，开发区 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子主要来源于煤烟尘，生物质燃烧，二次粒子以及扬尘. 文化公园的 3 个主成分因子共解释了 91.57% 的来源，因子 1 解释了 57.96% 的离子，NH_4^+、K^+、SO_4^{2-} 的作用显著，与开发区相同；因子 2 的贡献为 20.59%，其中主要为 Mg^{2+}；因子 3 的贡献为 13.02%，其中主要为 Ca^{2+}，Ca^{2+} 主要来自于扬尘，因此，文化公园 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子主要来源于煤烟尘，生物质燃烧，二次粒子以及扬尘. 第二中学的 2 个主成分因子共解释了 79.56% 的来源，因子 1 解释了 60.71% 的离子，NH_4^+、K^+、SO_4^{2-} 的作用显著，与开发区相同；主成分 2 的贡献为 18.85%，其中主要为 Ca^{2+}，与文化公园相同，因此，第二中学 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子主要来源于煤烟尘，生物质燃烧，二次粒子以及扬尘.

通过对各点位冬季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子进行来源解析，可以看出各点位之间存在交叉污染现象，各污染源之间的差异并不大.

表 6　主成分旋转因子载荷矩阵

Table 6　Rotated component matrix of the principle component analysis

项目	开发区		文化公园			第二中学	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2
Na^+	0.69	0.65	0.70	0.63	0.00	0.74	0.57
NH_4^+	0.94	−0.31	0.91	−0.40	−0.02	0.92	−0.36
K^+	0.95	0.09	0.96	−0.08	0.06	0.96	0.03
Mg^{2+}	0.07	0.87	0.22	0.87	−0.26	0.05	0.87
Ca^{2+}	0.35	−0.39	0.07	0.15	0.97	0.59	0.10
Cl^-	0.73	0.38	0.86	0.30	0.12	0.85	0.28
NO_3^-	0.82	−0.38	0.85	−0.45	−0.07	0.81	−0.42
SO_4^{2-}	0.90	−0.16	0.94	−0.08	−0.10	0.91	−0.13
贡献率/%	55.00	21.90	57.96	20.59	13.02	60.71	18.85

3　结论

(1)盘锦市冬季 $PM_{2.5}$ 浓度顺序为：文化公园 > 开发区 > 第二中学，各点位 $PM_{2.5}$ 浓度均超过国家环境空气质量二级标准；盘锦市水溶性离子质量浓度顺序为：开发区 $SO_4^{2-} > NO_3^- > NH_4^+ > Cl^- > K^+ > Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$；文化公园 $SO_4^{2-} > NO_3^- > NH_4^+ > Cl^- > K^+ > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$；第二中学 $SO_4^{2-} > NO_3^- > NH_4^+ > Cl^- > K^+ > Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$，水溶性离子总质量浓度均表现出 SO_4^{2-}、NO_3^-、NH_4^+ 质量浓度较大.

(2)通过对硫氧化率(SOR)和氮氧化率(NOR)计算来表征二次离子的转化，可知盘锦市冬季的 SOR 均值为 0.18，大于 0.10，说明本地冬季 SO_2 二次转化明显；NOR 均值为 0.12，略大于 0.10，说明 NO_x 二次转化不明显；通过离子平衡计算，可得开发区阴离子和阳离子当量的比值为 0.96，文化公园比值为 0.85，第二中学比值为 0.91，开发区整体上呈现出中性，文化公园与第二中学呈现出偏碱性.

(3)通过主成分分析对盘锦市冬季各点位水溶性离子进行来源解析，可知盘锦市 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子主要来源于煤烟尘，生物质燃烧，二次粒子以及扬尘.

参考文献：

[1] 王振波，方创琳，许光，等. 2014 年中国城市 $PM_{2.5}$ 浓度的时空变化规律[J]. 地理学报，2015，**70**(11)：1720-1734.
Wang Z B，Fang C L，Xu G，*et al*. Spatial-temporal characteristics of the $PM_{2.5}$ in China in 2014 [J]. Acta Geographica Sinica，2015，**70**(11)：1720-1734.

[2] Yin H，Pizzol M，Xu L Y. External costs of $PM_{2.5}$ pollution in Beijing，China：uncertainty analysis of multiple health impacts and costs[J]. Environmental Pollution，2017，**226**：356-369.

[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] Wang H L，Zhu B，Shen L J，*et al*. Water-soluble ions in atmospheric aerosols measured in five sites in the Yangtze River Delta，China：size-fractionated，seasonal variations and sources [J]. Atmospheric Environment，2015，**120**：370-379.

[5] 王念飞，陈阳，郝庆菊，等. 苏州市 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的季节变化及来源分析[J]. 环境科学，2016，**37**(12)：4482-4489.
Wang N F，Chen Y，Hao Q J，*et al*. Seasonal variation and source analysis of the water-soluble inorganic ions in fine particulate matter in Suzhou[J]. Environmental Science，2016，**37**(12)：4482-4489.

[6] Xu L L，Duan F K，He K B，*et al*. Characteristics of the secondary water-soluble ions in a typical autumn haze in Beijing [J]. Environmental Pollution，2017，**227**：296-305.

[7] Bhuyan P，Barman N，Bora J，*et al*. Attributes of aerosol bound water soluble ions and carbon，and their relationships with AOD over the Brahmaputra Valley [J]. Atmospheric Environment，2016，**142**：194-209.

[8] 何俊杰，吴耕晨，张国华，等. 广州雾霾期间气溶胶水溶性离子的日变化特征及形成机制[J]. 中国环境科学，2014，**34**(5)：1107-1112.
He J J，Wu G C，Zhang G H，*et al*. Diurnal variations and formation mechanisms of water-soluble inorganic ions in aerosols during a haze-fog period in Guangzhou[J]. China Environmental Science，2014，**34**(5)：1107-1112.

[9] 胡清静. 大气中氨气、铵盐和有机胺盐的研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2015.

[10] 王璐，刘子锐，温天雪，等. 海南三亚大气颗粒物中水溶性无机离子浓度及其粒径分布特征[J]. 环境科学，2017，**38**(4)：1298-1306.
Wang L，Liu Z R，Wen T X，*et al*. Characteristics of the size distribution of water soluble inorganic ions in Sanya，Hainan[J]. Environmental Science，2017，**38**(4)：1298-1306.

[11] 蒋燕，贺光艳，罗彬，等. 成都平原大气颗粒物中无机水溶性离子污染特征[J]. 环境科学，2016，**37**(8)：2863-2870.
Jiang Y，He G Y，Luo B，*et al*. Pollution characteristics of inorganic water-soluble ions in atmospheric particulate matter in Chengdu plain [J]. Environmental Science，2016，**37**(8)：2863-2870.

[12] 秦阳，朱彬，邹嘉南，等. 南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析[J]. 环境科学，2016，**37**(6)：2025-2033.
Qin Y，Zhu B，Zou J N，*et al*. Characteristics and source apportionment of water-soluble ions in dry deposition in the summer and autumn of Nanjing [J]. Environmental Science，2016，**37**(6)：2025-2033.

[13] 王新，聂燕，陈红，等. 兰州城区大气 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析[J]. 环境科学，2016，**37**(5)：1619-1628.
Wang X，Nei Y，Chen H，*et al*. Pollution characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ in Lanzhou city [J]. Environmental Science，2016，**37**(5)：1619-1628.

[14] 周佳佳，石金辉，李丽平，等. 青岛大气中酸碱气体及 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系[J]. 环境科学，2015，**36**(9)：3135-3143.
Zhou J J，Shi J H，Li L P，*et al*. Concentrations of acidic gases，ammonia and related water-soluble ions in $PM_{2.5}$ and gas-particle partitioning in Qingdao[J]. Environmental Science，2015，**36**(9)：3135-3143.

[15] 张伟，姬亚芹，张军，等. 辽宁典型城市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析[J]. 环境科学，2017，**38**(12)：4951-4957.
Zhang W，Ji Y Q，Wang J，*et al*. Characteristics and source apportionment of water-soluble inorganic ions in road dust $PM_{2.5}$ in selected cities in Liaoning Province [J]. Environmental Science，2017，**38**(12)：4951-4957.

[16] 张棕巍，胡恭任，于瑞莲，等. 厦门市大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子污染特征及来源解析[J]. 中国环境科学，2016，**36**(7)：1947-1954.
Zhang Z W，Hu G R，Yu R L，*et al*. Characteristics and sources apportionment of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ of Xiamen city，China[J]. China Environmental Science，2016，**36**(7)：1947-1954.

[17] 王晓琦，周颖，程水源，等. 典型城市冬季 $PM_{2.5}$ 水溶性离子污染特征与传输规律研究[J]. 中国环境科学，2016，**36**(8)：2289-2296.
Wang X Q，Zhou Y，Cheng S Y，*et al*. Characterization and regional transmission impact of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ during winter in typical cities[J]. Environmental Science，2016，**36**(8)：2289-2296.

[18] 范美益，曹芳，张园园，等. 徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析[J]. 环境科学，2017，**38**(11)：4479-4485.
Fan M Y，Cao F，Zhang Y Y，*et al*. Characteristics and sources of water soluble inorganic ions in fine particulate matter during winter in Xuzhou[J]. Environmental Science，2017，**38**(11)：4479-4485.

[19] Hsu C Y，Chiang H C，Chen M J，*et al*. Ambient $PM_{2.5}$ in the residential area near industrial complexes：spatiotemporal variation，source apportionment，and health impact[J]. Science of the Total Environment，2017，**590-591**：204-214.

[20] 蒋斌. 鹤山超级站大气细颗粒成分特征及二次污染过程成因研究[D]. 广东：暨南大学，2016.

[21] Huang X J，Liu Z R，Zhang J K，*et al*. Seasonal variation and secondary formation of size-segregated aerosol water-soluble inorganic ions during pollution episodes in Beijing [J]. Atmospheric Research，2016，**168**：70-79.

[22] Yang Y J，Zhou R，Yu Y，*et al*. Size-resolved aerosol water-soluble ions at a regional background station of Beijing，Tianjin，and Hebei，north China[J]. Journal of Environmental Sciences，2017，**55**：146-156.

[23] 张灿，周志恩，翟崇治，等. 基于重庆本地碳成分谱的 $PM_{2.5}$ 碳组分来源分析[J]. 环境科学，2014，**35**(3)：810-819.

Zhang C, Zhou Z N, Zhai C Z, *et al*. Carbon source apportionment of $PM_{2.5}$ in Chongqing based on local carbon profiles[J]. Environmental Science, 2014, **35**(3): 810-819.

[24] Urbančok D, Payne A J R, Webster R D. Regional transport, source apportionment and health impact of PM_{10} bound polycyclic aromatic hydrocarbons in Singapore's atmosphere [J]. Environmental Pollution, 2017, **229**: 984-993.

[25] 孟琛琛, 王丽涛, 张芬芬, 等. 邯郸市 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子污染特征及来源解析[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(11): 3443-3451.
Meng C C, Wang L T, Zhang F F, *et al*. Pollution characteristics and source apportionment of water soluble inorganic ions in $PM_{2.5}$ in Handan city[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(11): 3443-3451.

欢迎订阅 2018 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊.

《环境科学》自创刊以来,始终坚持"防治污染,改善生态,促进发展,造福人民"的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等.

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等.

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续.

《环境科学》2018 年为大 16 开本,全年 12 期.

国内统一刊号:CN11-1895/X　国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205　国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱)　邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@ rcees. ac. cn;网址:www. hjkx. ac. cn

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 39 No. 6

Jun 15, 2018

CONTENTS

Diurnal Variation of SOA Formation Potential from Ambient Air at an Urban Site in Beijing ····· LIU Jun, CHU Bi-wu, HE Hong (2505)
Characteristics of Key Size Spectrum of $PM_{2.5}$ Affecting Winter Haze Pollution in Taiyuan ····· YANG Su-ying, YU Xin-yang, ZHAO Xiu-yong, *et al.* (2512)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in $PM_{2.5}$ During Winter in Panjin ····· ZHANG Lei, JI Ya-qin, WANG Shi-bao, *et al.* (2521)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in the Rainy Season of Guangzhou City ····· GU Ying-gang, YU Xiao-fang, YANG Wen-da, *et al.* (2528)
Emission Characteristics of Dehydrated Sugar and Acephenanthrylene in Particles from Tropical Forest Burning ····· JIN Cheng-miao, CUI Min, HAN Yong, *et al.* (2538)
Construction and Application of Vertical Diffusion Index for Analyzing Weather During Pollution Events in Tianjin ····· CAI Zi-ying, HAN Su-qin, ZHANG Min, *et al.* (2548)
Comparison Between Atmospheric Wet-only and Bulk Nitrogen Depositions at Two Sites in Subtropical China ····· ZHU Xiao, WANG Jie-fei, SHEN Jian-lin, *et al.* (2557)
Emission Reduction Benefits When Eliminating Yellow-label Vehicles in the Jing-jin-ji Region ····· LU Ya-ling, ZHOU Jia, CHENG Xi, *et al.* (2566)
Health Assessment of the Stream Ecosystem in the North Canal River Basin, Beijing, China ····· GU Xiao-yun, XU Zong-xue, LIU Lin-fei, *et al.* (2576)
Pollution Characteristics and Source Identification of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Phthalic Acid Esters During High Water Level Periods in the Wuhan Section of the Yangtze River, China ····· DONG Lei, TANG Xian-qiang, LIN Li, *et al.* (2588)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Downstream Areas of the Aojiang River, Fujian Province ····· ZHANG Dan-dan, GUO Ya-ping, REN Hong-yun, *et al.* (2600)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Sediments of the Estuary of the Tributaries in the Three Gorges Reservoir, SW China ····· FANG Zhi-qing, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, *et al.* (2607)
Assessment of Physico-chemical Properties and Phosphorus Fraction Distribution Characteristics in Sediments after Impounding of the Three Gorges Reservoir to 175 m ····· PAN Chan-juan, LI Rui, TANG Xian-qiang, *et al.* (2615)
Source of Nitrate in Surface Water and Shallow Groundwater Around Baiyangdian Lake Area Based on Hydrochemical and Stable Isotopes ····· KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, DING fei, *et al.* (2624)
Thermal Stratification and Its Impacts on Water Quality in Shahe Reservoir, Liyang, China ····· SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, *et al.* (2632)
Spatial and Temporal Variation Characteristics of Drip Water Hydrogeochemistry in the Xueyu Cave of Chongqing and Its Implications for Environmental Research ····· ZENG Ze, JIANG Yong-jun, LÜ Xian-fu, *et al.* (2641)
Distinguishing the Compositions and Sources of the Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Typical Karst River During the Dry Season: A Case Study in Bitan River, Jinfo Mountain ····· LIU Yue, HE Qiu-fang, LIU Ning-kun, *et al.* (2651)
Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation at Different Altitudes in the Tuolai River Basin ····· LI Yong-ge, LI Zong-xing, FENG Qi, *et al.* (2661)
Spatial-Temporal Variations of CO_2 and CH_4 Flux Through a Water-air Interface Under the Effect of Primary Productivity in Wulixia Reservoir ····· PENG Wen-jie, LI Qiang, SONG Ang, *et al.* (2673)
Spatiotemporal Succession Characteristics of Algal Functional Groups and Its Impact Factors for a Typical Channel-Type Reservoir in a Southwest Mountainous Area ····· ZHANG Yao-wen, LI Hong, LI Jia, *et al.* (2680)
Seasonal Succession of Phytoplankton Functional Groups and Their Driving Factors in the Siminghu Reservoir ····· ZHENG Cheng, LU Kai-hong, XU Zhen, *et al.* (2688)
Effects of Nutrient Addition on the Growth and Competition of Bloom Forming Cyanobacterium *Chrysosporum ovalisporum*: An In-situ Experiment ····· WANG Meng-meng, ZHANG Wei, ZHANG Jun-yi, *et al.* (2698)
Purification Effect of Submerged Macrophyte System with Different Plants Combinations and C/N Ratios ····· LIU Miao, CHEN Kai-ning (2706)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Concentration Dynamics in Natural Ditches Under an Irrigation-Drainage Unit in the Jianghan Plain ····· HUA Ling-ling, ZHANG Fu-lin, ZHAI Li-mei, *et al.* (2715)
Distribution and Treatment of Antibiotics in Typical WWTPs in Small Towns in China ····· CHAI Yu-feng, ZHANG Yu-xiu, CHEN Mei-xue, *et al.* (2724)
Effects and Mechanism of the Combination of Ozone-PAC as a Pretreatment for the Reduction of Membrane Fouling ····· DONG Bing-zhi, GAO Hao-yang, HU Meng-liu (2732)
Start-up and Process Characteristics of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) in a Pilot-scale Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR) ····· YU De-shuang, TANG Jia-jia, ZHANG Jun, *et al.* (2740)
Phosphate Removal on Zirconium Alginate/Poly(*N*-isopropyl acrylamide) Hydrogel Beads with a Semi-interpenetrating Network ····· ZENG Xue-yang, LUO Hua-yong, ZHANG Yao-kun, *et al.* (2748)
Shortcut Nitrification Rapid Start and Stability of Corn Starch Wastewater ····· LONG Bei-sheng, LIU Xun-lei, LIU Hong-bo, *et al.* (2756)
Nitrifying Bacteria Culture in Entrapment Immobilization ····· YANG Hong, HU Yin-long (2763)
Performance of the Removal of Nitrogen During Anaerobic Ammonia Oxidation Using Different Operational Strategies ····· AN Fang-jiao, PENG Yong-zhen, DONG Zhi-long, *et al.* (2770)
Transformation of Protein in Sludge During High Solids Anaerobic Digestion ····· ZHAN Yu, SHI Wan-sheng, ZHAO Ming-xing, *et al.* (2778)
Changes in Heavy Metal Speciation and Release Behavior Before and After Sludge Composting Under a Phosphate-rich Atmosphere ····· LI Yu, FANG Wen, QI Guang-xia, *et al.* (2786)
Effect of Denitrification and Phosphorus Removal Microorganisms in Activated Sludge Bulking Caused by Filamentous Bacteria ····· GAO Chen-chen, YOU Jia, CHEN Yi, *et al.* (2794)
Microbial Population Dynamics During Domestication and Cultivation of Biofilm to Remove and Enrich Phosphate ····· MENG Xuan, PAN Yang, ZHANG Hao, *et al.* (2802)
Effects of Elevated Tetracycline Concentrations on Aerobic Composting of Human Feces: Composting Behavior and Microbial Community Succession ····· SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian, *et al.* (2810)
Effect of Long-term Organic Amendments on Nitric Oxide Emissions from the Summer Maize-Winter Wheat Cropping System in Guanzhong Plain ····· YUAN Meng-xuan, WANG Jin-feng, TAN Yue-hui, *et al.* (2819)
Effects of Mushroom Residue Application Rates on Net Greenhouse Gas Emissions in the Purple Paddy Soil ····· QI Le, GAO Ming, ZHOU Peng, *et al.* (2827)
Estimation of Winter Wheat Photosynthesized Carbon Distribution and Allocation Belowground via ^{13}C Pulse-labeling ····· SUN Zhao-an, CHEN Qing, HAN Xiao, *et al.* (2837)
Effects of Vegetation Restoration on Soil Nitrogen Pathways in a Karst Region of Southwest China ····· YANG Yi, OUYANG Yun-dong, CHEN Hao, *et al.* (2845)
Identifying the Origins and Spatial Distributions of Heavy Metals in the Soils of the Jiangsu Coast ····· LÜ Jian-shu, HE Hua-chun (2853)
Source Identification and Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils in Typical Areas Around the Lower Yellow River ····· YU Yuan-he, LÜ Jian-shu, WANG Ya-meng (2865)
Spatial Variation of Soil Heavy Metals in Lin'an City and Its Potential Risk Evaluation ····· ZHENG Jing-zhi, WANG Chu-dong, WANG Shi-han, *et al.* (2875)
Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China ····· ZHOU Yan, CHEN Qiang, DENG Shao-po, *et al.* (2884)
Spatial Variation of Heavy Metals in Soils and Its Ecological Risk Evaluation in a Typical *Carya cathayensis* Production Area ····· ZHANG Hong-ju, ZHAO Ke-li, YE Zheng-qian, *et al.* (2893)
Influence of Biochar Application on Growth and Antioxidative Responses of Macrophytes in Subsurface Flow Constructed Wetlands ····· HUANG Lei, CHEN Yu-cheng, ZHAO Ya-qi, *et al.* (2904)
Effect of Iron on the Release of Arsenic in Flooded Paddy Soils ····· WANG Xin, ZHONG Song-xiong, CHEN Zhi-liang, *et al.* (2911)
Concentrations and Health Risk Assessments of Heavy Metal Contents in Soil and Rice of Mine Contaminated Areas ····· TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, ZHAGN Yun-xia, *et al.* (2919)
Effect of Calcium Silicate-biological Humus Fertilizer Composite on Uptake of Cd by Shallots from Contaminated Agricultural Soil ····· LIU De-ling, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, *et al.* (2927)
Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Greenhouse Soil and Vegetables in Siping City, Jilin Province ····· LI Lian-fang, ZHU Chang-xiong, ZENG Xi-bai, *et al.* (2936)
Effect of Foliar Zinc Application on Bioaccessibility of Cadmium and Zinc in Pakchoi ····· WANG Lin, GU Peng-lei, LI Ran, *et al.* (2944)
Mercury Distribution of Benthonic Animals and Response to Mercury in Sediments in Caohai Wetland, Guizhou Province ····· XU Yi-yuan, ZENG Ling-xia, HE Tian-rong, *et al.* (2953)
Discussion of Emissions and Health Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from the Retreading Process of Waste Tires ····· FU Jian-ping, ZHAO Bo, LI Yu-qing, *et al.* (2963)
Spatiotemporal Dynamics of CO_2 Emissions in Chongqing: An Empirical Analysis at the County Level ····· SUN Xiu-feng, SHI Kai-fang, WU Jian-ping (2971)
Impact of Size on Environmental Behavior of Metal Oxide Nanoparticles ····· YAN Yu-peng, TANG Ya-dong, WAN Biao, *et al.* (2982)
Fate and Toxicity of UV Filters in Marine Environments ····· ZHU Xiao-shan, HUANG Jing-ying, LÜ Xiao-hui, *et al.* (2991)