

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

**2017**

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)

京津冀区域 PM<sub>2.5</sub> 污染相互输送特征 ..... 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)

顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应 ..... 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)

基于多源数据的 PM<sub>2.5</sub> 浓度时空分布预测与制图 ..... 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)

华东区域 PM<sub>2.5</sub> 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 ..... 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)

南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 ..... 张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)

菏泽市 PM<sub>2.5</sub> 碳组分季节变化特征 ..... 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)

辽宁典型城市道路扬尘 PM<sub>10</sub> 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 ..... 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)

天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 ..... 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)

高原城市昆明公路隧道大气中 PM<sub>2.5</sub> 理化特征分析 ..... 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)

2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 ..... 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)

不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 ..... 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远 (4983)

ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 ..... 董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)

我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 ..... 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)

新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 ..... 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)

三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 ..... 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)

三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 ..... 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)

太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 ..... 李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)

典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例 ..... 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)

缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 ..... 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)

基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 ..... 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)

北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险 ..... 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)

深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 ..... 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)

供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 ..... 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)

低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 ..... 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)

臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 ..... 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)

碱化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 ..... 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)

MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 ..... 王九妹, 关泽宇, 王金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)

常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 ..... 徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)

载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 ..... 成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)

不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 ..... 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)

ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 ..... 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)

海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 ..... 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)

游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验 ..... 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)

西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 ..... 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)

厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 ..... 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)

SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 ..... 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)

活性污泥中硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的富集及其动力学参数 ..... 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)

pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 ..... 张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)

接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 ..... 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)

活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 ..... 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)

长期暴露下纳米 TiO<sub>2</sub> 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 ..... 李慧婷, 崔福义 (5229)

长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 ..... 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)

不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 ..... 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)

有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 ..... 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)

上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 ..... 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)

大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 ..... 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)

工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 ..... 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)

上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 ..... 周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)

基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 ..... 高子翔, 周航, 杨文毅, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)

水稻对气态单质汞的吸收与挥发 ..... 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)

麦田 O<sub>3</sub> 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 ..... 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)

缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 ..... 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)

生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)

成都平原不同类型沟渠 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放通量特征及其影响因素 ..... 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)

河流 CO<sub>2</sub> 与 CH<sub>4</sub> 排放研究进展 ..... 王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)

《环境科学》第 38 卷(2017 年) 总目录 ..... (5367)

《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

# 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

张伟<sup>1</sup>, 姬亚芹<sup>1\*</sup>, 张军<sup>2</sup>, 张蕾<sup>1</sup>, 王伟<sup>3</sup>, 王士宝<sup>1</sup>

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 盘锦市环境保护监测站, 盘锦 124010; 3. 鞍山市环境监测中心站, 鞍山 114004)

**摘要:** 为了解辽宁省典型城市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中水溶性无机离子组分特征及其来源, 分别于 2014 年和 2016 年采集了鞍山市和盘锦市道路扬尘样品, 利用再悬浮采样器将其悬浮到滤膜上, 用离子色谱仪分析了其中的水溶性无机离子组分, 分别用相关分析法和比值法分析了其污染特征, 用主成分法初步解析了其污染源. 结果表明, 盘锦市和鞍山市 8 种水溶性无机离子分别占道路扬尘  $PM_{2.5}$  的  $5.83\% \pm 3.34\%$  和  $5.84\% \pm 1.15\%$ . 盘锦市  $NH_4^+$  与  $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$  的结合方式主要为  $(NH_4)_2SO_4$  和  $NH_4NO_3$ , 鞍山市  $NH_4^+$  与  $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$  的主要结合方式为  $NH_4HSO_4$  和  $NH_4NO_3$ . 盘锦市和鞍山市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中  $NO_3^-/SO_4^{2-}$  的均值分别为  $0.52 \pm 0.55$  和  $0.46 \pm 0.13$ , 表明固定源(燃煤)对其道路扬尘  $PM_{2.5}$  的影响较显著. 盘锦市道路扬尘  $PM_{2.5}$  主要来源于生物质燃烧源、海盐粒子、建筑水泥尘和机动车尾气; 鞍山市道路扬尘  $PM_{2.5}$  主要来源于燃煤源、生物质燃烧源、海盐粒子和钢铁冶炼尘.

**关键词:** 辽宁省; 道路扬尘;  $PM_{2.5}$ ; 水溶性无机离子; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-4951-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704182

## Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust $PM_{2.5}$ in Selected Cities in Liaoning Province

ZHANG Wei<sup>1</sup>, JI Ya-qin<sup>1\*</sup>, ZHANG Jun<sup>2</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>3</sup>, WANG Shi-bao<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China; 2. Panjin Environmental Monitoring Center, Panjin 124010, China; 3. Anshan Environmental Monitoring Center, Anshan 114004, China)

**Abstract:** In order to collect comprehensive information on the characteristics and sources of water-soluble inorganic ions in road dust (RD)  $PM_{2.5}$  in Liaoning Province, samples of road dust were collected in 2014 and 2016 in Anshan and Panjin and then re-suspended on filters using an NK-ZXF sampler. The concentrations of the major water-soluble inorganic ions were analyzed by ion chromatography. A correlation analysis, ratios, and a principal component analysis were used to analyze the sources of RD. The results showed that the total water-soluble inorganic ions in Panjin and Anshan accounted for  $5.83\% \pm 3.34\%$  and  $5.84\% \pm 1.15\%$  in RD  $PM_{2.5}$ , respectively.  $NH_4^+$ ,  $SO_4^{2-}$ , and  $NO_3^-$  in RD  $PM_{2.5}$  coexisted in the forms of  $(NH_4)_2SO_4$ , and  $NH_4NO_3$  in Panjin, and  $NH_4HSO_4$  and  $NH_4NO_3$  in Anshan. The average values of  $NO_3^-/SO_4^{2-}$  were  $0.52 \pm 0.55$  and  $0.46 \pm 0.13$  for Panjin and Anshan, respectively, indicating that the effects of stationary sources (e.g., coal combustion) on  $PM_{2.5}$  were more significant. The main sources of RD  $PM_{2.5}$  in Panjin were biomass burning, sea salt particles, construction dust, and mobile sources, while the main sources of RD  $PM_{2.5}$  in Anshan were coal combustion, biomass burning, sea salt particles, and steel smelting dust.

**Key words:** Liaoning Province; road dust;  $PM_{2.5}$ ; water-soluble inorganic ions; source apportionment

2015 年中国环境状况公报表明, 在开展空气质量新标准监测的 338 个地级以上城市中, 有 265 个城市空气质量超标, 30 个城市达标天数比例不足 30%, 超标天数中以细颗粒物 ( $PM_{2.5}$ ) 为首要污染物的天数占 66.8%, 可见, 大气颗粒物是影响我国很多城市空气质量的首要污染物. 随着我国对工业源排放和机动车尾气排放的有效控制, 以及我国城市道路交通建设的不断加快和机动车保有量的不断上升, 道路扬尘排放已成为城市大气颗粒物的主要来源之一<sup>[1]</sup>. 控制道路扬尘成为治理城市空气颗粒物污染和提高局地空气质量的重点<sup>[2-4]</sup>.

目前有关道路扬尘的研究大都集中在其排放清单和排放特征<sup>[5-7]</sup>, 有关其化学组分的研究较少<sup>[8]</sup>. 流行病学研究发现,  $PM_{2.5}$  对于居民健康的影响不仅取决于其浓度, 还与其成分有关<sup>[9-11]</sup>. 水溶性无机离子作为道路扬尘  $PM_{2.5}$  中重要的化学组分之一, 能增加神经系统患病风险<sup>[12]</sup>, 影响大气酸碱度, 并对成核和云滴增长起重要作用<sup>[13]</sup>. 因此, 研

收稿日期: 2017-04-18; 修订日期: 2017-06-14

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409004)

作者简介: 张伟(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气颗粒物污染控制, E-mail: 1936506052@qq.com

\* 通信作者, E-mail: jiyaqin@nankai.edu.cn

究道路扬尘中水溶性无机离子的污染特征, 对了解环境空气颗粒物污染状况、改善空气质量具有一定的指导意义。

盘锦市地处辽宁省西南部, 作为一座新型的石油化工城市, 以辽河油田为支柱, 工业废气排放、燃煤、机动车尾气污染、扬尘污染等因素的共同作用, 使得其环境空气细颗粒物污染日益凸现; 鞍山市地处辽宁省中部, 是辽宁省典型的资源能源型重工业城市, 鞍山市以鞍钢为支柱产业, 工业、交通等多种污染源综合作用, 导致鞍山市长期以来以大气颗粒物为首要污染物。

本文以盘锦市和鞍山市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中水溶性无机离子为研究对象, 分别采集了两个城市的道

路扬尘样品, 分析了其水溶性无机离子的组分特征, 并利用相关分析、比值法和主成分分析法, 探讨了其主要来源, 旨在为辽宁省典型城市改善空气质量、控制主要污染源提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点位布设

2014年9月和2016年5月分别采集鞍山市和盘锦市道路扬尘样品。鞍山市共采集9条主要道路, 每条道路布置2~4个采样点位, 每个采样点位布置3个子采样点位; 盘锦市共采集20条主要道路, 每条道路布置3个采样点, 采样点位如图1所示。



图1 鞍山市和盘锦市道路扬尘采样点位示意

Fig. 1. Sampling points for road dust in Anshan City and Panjin City

### 1.2 样品采集和处理

用细软毛刷采集同一条道路上不同位置的道路扬尘样品, 鞍山市将同一个采样点的3个子采样点位的样品混合得到26个样品, 盘锦市将同一条道路的3个采样点位的样品混合得到20个样品。样品室内阴干后用200目泰勒标准筛进行筛分; 将筛分后的粉末样品, 利用NK-ZXF采样器悬浮到空气滤膜上, 分别得到鞍山市和盘锦市道路扬尘  $PM_{2.5}$  滤膜样品。NK-ZXF采样器是由南开大学自主研发的再悬浮采样器, 主要包括送样系统、再悬浮箱、切割器和采样气路等, 其中, 送样系统是将筛分后干燥的尘样品送至再悬浮箱中和干净的空气混合, 通过不同粒径的切割器得到不同粒径的颗粒物样品<sup>[14]</sup>。

### 1.3 样品分析

将悬浮后滤膜剪碎溶于5 mL超纯水中, 超声提取2次, 每次持续25 min, 然后用美国戴安公司的ICS3000型离子色谱仪分析提取液中的水溶性无机离子, 其中阴离子包括  $Cl^-$ 、 $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$ , 阳离子包括  $NH_4^+$ 、 $Na^+$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  和  $K^+$ 。

### 1.4 质量控制

空白石英滤膜使用前在马弗炉中600℃下灼烧3 h, 以除去杂质; 采样前后分别将石英膜在恒温恒湿的天平室内平衡48 h, 以降低湿度、温度对于滤膜称重的影响。

## 2 结果与讨论

### 2.1 道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子质量分数

盘锦市和鞍山市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中8种水溶性无机离子质量分数如图2和表1所示。盘锦市8种水溶性无机离子占道路扬尘  $PM_{2.5}$  的  $5.83\% \pm 3.34\%$ , 其呈现的规律为:  $Ca^{2+} > NH_4^+ > SO_4^{2-} > Na^+ > Cl^- > Mg^{2+} > NO_3^- > K^+$ , 其中只有  $Ca^{2+}$  质量分数大于1%, 占道路扬尘  $PM_{2.5}$  的  $2.91\% \pm 2.13\%$ ; 由图3可知,  $Ca^{2+}$  占总离子的  $46.08\% \pm 12.33\%$ 。鞍山市8种水溶性无机离子占道路扬尘  $PM_{2.5}$  的  $5.84\% \pm 1.15\%$ , 其呈现的规律为:  $Na^+ > SO_4^{2-} > Ca^{2+} > Cl^- > NO_3^- > NH_4^+ > K^+ > Mg^{2+}$ , 其中  $Na^+$  和  $SO_4^{2-}$  质量分数均高于1%, 分别占道路扬尘  $PM_{2.5}$  的  $2.53\% \pm 0.74\%$ 、 $1.09\% \pm 0.42\%$ ;

由图 3 可知，以上 2 种离子分别占总离子的 43.27% ± 9.71%、18.50% ± 5.88%。

由图 2 可知，盘锦市水溶性无机离子总量在道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中所占质量分数与鞍山市基本相同；其中，鞍山市 Na<sup>+</sup> 质量分数高于盘锦市，由于 NaCl 是钢铁烧结工艺中脱硫剂的主要成分<sup>[15]</sup>，因此这可能与鞍山市以鞍钢为主要产业有关；盘锦市 Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 质量分数明显高于鞍山市质量分数，分别为鞍山市的 4.14 倍和 3.27 倍，这可能是由于盘锦市作为一个新兴城市，大量的建筑活动使得道路上运送渣土车辆撒漏现象较多，从而导致其 Ca<sup>2+</sup> 和 Mg<sup>2+</sup> 质量分数高于鞍山市。由图 3 可知，盘锦市和鞍山市 8 种水溶性离子在总离子中质量分数差别较大，这可能与其道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子的来源不同有关。与上海市主干道道路扬尘中水溶性无机离子<sup>[16]</sup> 相比，本研究道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中

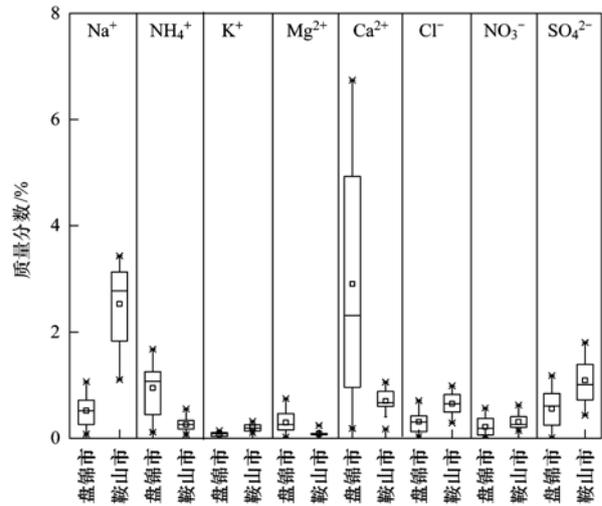


图 2 盘锦市和鞍山市 8 种水溶性无机离子在道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中质量分数对比

Fig. 2 Comparison of the water-soluble inorganic ions in road dust PM<sub>2.5</sub> in Anshan City and Panjin City

表 1 不同城市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中 8 种水溶性无机离子质量分数/%

Table 1 Percentage of water-soluble inorganic ions in road dust PM<sub>2.5</sub> in different cities/%

城市	观测日期	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>
盘锦市	2016-05 ~ 2016-07	0.52 ± 0.29	0.95 ± 0.47	0.08 ± 0.04	0.29 ± 0.19	2.91 ± 2.13	0.31 ± 0.19	0.22 ± 0.16	0.56 ± 0.32
鞍山市	2014-09	2.53 ± 0.74	0.26 ± 0.11	0.20 ± 0.06	0.09 ± 0.05	0.70 ± 0.21	2.08 ± 0.20	1.43 ± 0.14	1.96 ± 0.42
上海市 <sup>[16]</sup>	— <sup>1)</sup>	—	0.02 ± 0.01	—	—	—	—	0.15 ± 0.01	0.07 ± 0.01
石家庄市 <sup>[17]</sup>	2013-05	2.571	—	1.249	0.49	11.491	1.286	1.478	2.978

1) 没有相关数据

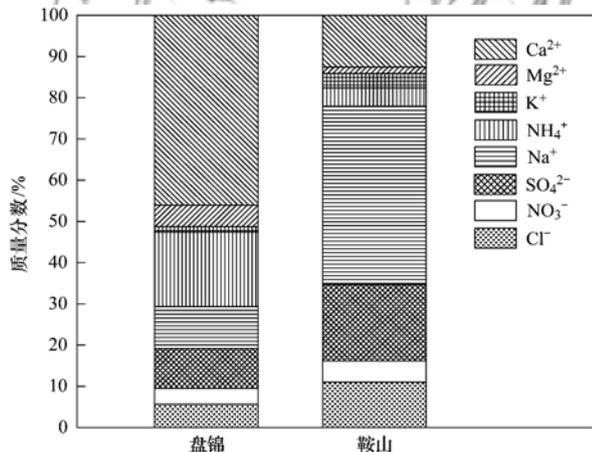


图 3 盘锦市和鞍山市 8 种水溶性无机离子在总离子中质量分数对比

Fig. 3 Comparison of the percentage of water-soluble inorganic ions in total ions in Panjin City and Anshan City

NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的质量分数总体较高；与石家庄市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子相比<sup>[17]</sup>，本研究中盘锦市和鞍山市离子总量以及 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 质量分数均较低，且其呈现的规律也有一定区别，这可能与不同城市中道路扬尘

PM<sub>2.5</sub> 的主要来源不同有关。

### 2.2 主要离子间的关系

通过分析道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子的相关关系，可以初步了解离子的来源和相互结合方式<sup>[18]</sup>。运用 SPSS16.0 软件对盘锦市和鞍山市道路扬尘中水溶性无机离子进行斯皮尔曼相关分析，其相关性矩阵分别见表 2 和表 3。

由表 2 可知，盘锦市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中 Cl<sup>-</sup> 与 Na<sup>+</sup> 和 K<sup>+</sup> 相关性较好，其相关系数均为 0.933，表明 Cl<sup>-</sup> 除来源于海盐粒子外，还有一部分来源于生物质燃烧；Ca<sup>2+</sup> 与 Mg<sup>2+</sup> 相关系数较高，为 0.789，说明二者具有同源性，初步判断可能来源于建筑尘。此外，其余水溶性无机离子相关系数都相对较高，说明盘锦市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子来源较为复杂。

由表 3 可知，鞍山市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中 Cl<sup>-</sup> 与 K<sup>+</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 相关性较好，其相关系数分别为 0.784 和 0.804，这说明同盘锦市一样，Cl<sup>-</sup> 除来源于海盐粒子外，还有一部分来源于生物质燃烧或燃煤；NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 同 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 相关性较差，同 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 相关性较好，这

初步说明了  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  的结合方式;  $\text{K}^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  相关性则较好, 说明二者可能来源于同一类源, 马召辉<sup>[19]</sup> 和郝吉明<sup>[20]</sup> 等的研究表明  $\text{SO}_4^{2-}$

是生物质燃烧中较为丰富的组分, 推测道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  中  $\text{SO}_4^{2-}$  除来源于燃煤外, 还可能来源于生物质燃烧.

表 2 盘锦市 8 种水溶性无机离子相关系数<sup>1)</sup>

Table 2 Correlation coefficient matrix for eight kinds of water-soluble inorganic ions in Panjin City

	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$
$\text{Cl}^-$	1							
$\text{NO}_3^-$	0.707 **	1						
$\text{SO}_4^{2-}$	0.711 **	0.589 **	1					
$\text{Na}^+$	0.933 **	0.637 **	0.786 **	1				
$\text{NH}_4^+$	0.896 **	0.544 *	0.621 **	0.872 **	1			
$\text{K}^+$	0.933 **	0.677 **	0.716 **	0.954 **	0.812 **	1		
$\text{Mg}^{2+}$	0.925 **	0.668 **	0.682 **	0.889 **	0.849 **	0.881 **	1	
$\text{Ca}^{2+}$	0.695 **	0.581 **	0.716 **	0.614 **	0.619 **	0.646 **	0.789 **	1

1) \*\* 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; \* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, 下同

表 3 鞍山市 8 种水溶性无机离子相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix for eight kinds of water-soluble inorganic ions in Anshan City

	$\text{Cl}^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Na}^+$	$\text{NH}_4^+$	$\text{K}^+$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+}$
$\text{Cl}^-$	1							
$\text{NO}_3^-$	0.418 *	1						
$\text{SO}_4^{2-}$	0.804 **	0.242	1					
$\text{Na}^+$	0.237	0.775 **	-0.055	1				
$\text{NH}_4^+$	0.075	0.500 *	-0.257	0.574 **	1			
$\text{K}^+$	0.784 **	0.302	0.841 **	-0.066	-0.058	1		
$\text{Mg}^{2+}$	0.523 **	0.307	0.486 *	0.237	0.318	0.538 **	1	
$\text{Ca}^{2+}$	0.207	-0.389	0.488 *	-0.607 **	-0.591 **	0.404 *	0.308	1

### 2.3 二次离子污染特征

二次离子主要包括  $\text{NH}_4^+$ 、非海盐硫酸盐 [ $\text{NSS}(\text{SO}_4^{2-})$ ] 和  $\text{NO}_3^-$ , 主要由人为排放的  $\text{NH}_3$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  经二次转化产生<sup>[21,22]</sup>, 是导致颗粒物形成的重要物质<sup>[23]</sup>. 盘锦市道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  中  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  相关系数分别为 0.621 和 0.544, 表明  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  均具有较好的相关性; 鞍山市道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  中  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  相关系数分别为 -0.257 和 0.500, 表明  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  相关性较差, 与  $\text{NO}_3^-$  相关性则相对较好. 盘锦市  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  的质量分数之比为 1.93,  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{NO}_3^-$  的质量分数之比为 4.97; 鞍山市  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  的质量分数之比为 0.29,  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{NO}_3^-$  的质量分数之比为 0.90. 如果  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  全部结合成  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , 则  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  当量浓度比为 2:1; 如果  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  全部结合成  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$ , 则  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  当量浓度比为 1:1. 由此可知, 盘锦市  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  的结合方式主要为  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 鞍山市  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  的主

要结合方式为  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ .

有研究表明<sup>[23]</sup>, 氨与酸性气体, 如硫酸, 硝酸和盐酸反应生成硫酸铵, 氯化铵和硝酸铵. 当硫酸、硝酸、氯化物共存时, 因为硫酸铵较稳定, 氨首先与硫酸反应, 再与其他粒子反应, 因此当铵根离子浓度较高时, 硫酸根的存在主要以铵盐为主<sup>[24]</sup>. 对美国加州中部的城市和农村的研究中发现, 硝酸铵是硝酸根存在的主要形式<sup>[25]</sup>. 由图 2 可知, 鞍山市道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  中,  $\text{NH}_4^+$  的质量分数远小于  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  的质量分数; 由表 2 中可知,  $\text{SO}_4^{2-}$  与  $\text{K}^+$ 、 $\text{NO}_3^-$  与  $\text{Na}^+$  相关系数均比较高, 充分说明  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  除与  $\text{NH}_4^+$  结合外, 还与其他离子结合. 对盘锦市道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  中  $\text{NH}_4^+$  与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Cl}^-$  之和进行回归分析, 结果见图 4.

由图 4 可知,  $\text{NH}_4^+$  的质量分数与  $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{Cl}^-$  的质量分数之和的相关系数  $R^2$  为 0.7539, 说明其存在较好的相关关系; 但其斜率为 0.6875, 低于 1, 说明道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  中的氨不足以中和酸性离子, 酸性离子的量高于氨的量.

$\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  作为重要的二次气溶胶离子, 在

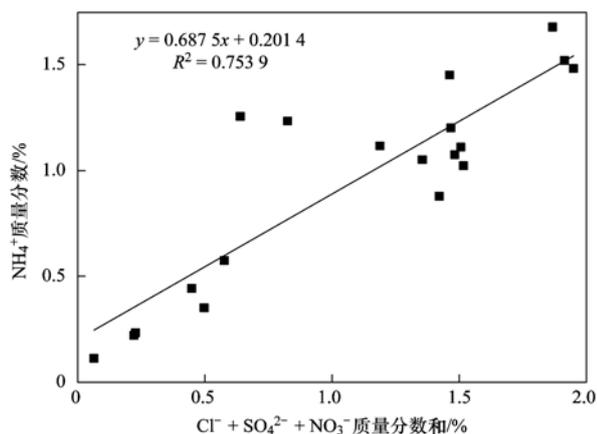


图4 盘锦市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 之和回归分析结果

Fig. 4 Regression analysis of NH<sub>4</sub><sup>+</sup> and SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, and Cl<sup>-</sup> in road dust PM<sub>2.5</sub> in Panjin City

一定程度上反映了人类活动对大气环境的影响。其中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 主要来自煤炭燃烧释放的 SO<sub>2</sub>, 多为固定源排放; 而 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 主要来自石油、天然气等化石燃料

的燃烧, 多为移动源排放。因此, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的浓度之比可以作为燃煤等固定排放源和机动车等移动排放源的排放强度的指示因子。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的浓度比已经成为分辨固定排放源和移动排放源的相对贡献大小的指标<sup>[26,27]</sup>。盘锦市和鞍山市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的均值分别为 0.52 ± 0.55 和 0.46 ± 0.13, 与石家庄市的 0.4963 持平, 低于上海市的 2.0041, 由此可见, 盘锦市和鞍山市的 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 处于较低水平, 固定源(燃煤)对于其道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 的影响更为显著, 但不同城市由于燃煤量以及机动车保有量不同, 其比值也存在一定差异; 上海市机动车保有量较大, 排放氮氧化物量较大, 道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 受移动源(机动车)的影响较大。

#### 2.4 道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 来源解析

采用 SPSS 16.0 软件进行主成分分析来分别解析盘锦市和鞍山市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 的来源, 主成分特征值、贡献率及旋转因子载荷矩阵见表 4。

表 4 主成分特征值、贡献率及旋转因子载荷矩阵

Table 4 Eigenvalue and contribution rates of major components and rotated component matrix

项目	盘锦市			鞍山市		
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 1	主成分 2	主成分 3
Cl <sup>-</sup>	<b>0.836</b> <sup>1)</sup>	0.310	0.362	0.833	0.155	0.345
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.351	0.265	<b>0.896</b>	0.568	0.725	-0.079
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.670	0.520	0.217	<b>0.959</b>	-0.159	0.037
Na <sup>+</sup>	<b>0.934</b>	0.209	0.220	0.098	<b>0.899</b>	-0.019
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<b>0.866</b>	0.344	0.250	-0.201	0.827	0.379
K <sup>+</sup>	<b>0.863</b>	0.305	0.339	<b>0.882</b>	-0.119	0.268
Mg <sup>2+</sup>	0.649	0.584	0.273	0.345	-0.010	<b>0.907</b>
Ca <sup>2+</sup>	0.265	<b>0.927</b>	0.222	0.399	-0.808	0.240
特征值	6.207	0.654	0.492	3.387	2.727	0.887
贡献率/%	77.589	8.175	6.148	42.340	34.085	11.086

1) 黑体字表示载荷因子较高的组分

由表 4 可知, 对于盘锦市, 第 1 个主成分的特征值为 6.207, 贡献率为 77.589%, 第 2 个主成分的特征值为 0.654, 贡献率为 8.175%, 第 3 个主成分的特征值为 0.492, 贡献率为 6.148%, 前 3 个主成分的贡献率已经达到 91.912%, 说明前 3 个主成分已经能够提供原始数据的足够信息; 对于鞍山市, 第 1 个主成分的特征值为 3.387, 贡献率为 42.340%, 第 2 个主成分的特征值为 2.727, 贡献率为 34.085%, 第 3 个主成分的特征值为 0.887, 贡献率为 11.086%, 前 3 个主成分的贡献率已经达到 87.511%, 说明前 3 个主成分已经能够提供原始数据的足够信息。

由表 4 可知, 对于盘锦市, 主成分 1 主要与

Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 等离子的相关性较强, 载荷因子为 0.934、0.866 和 0.863, 因此主成分 1 表征海盐粒子和生物质燃烧源的混合源; 主成分 2 主要与 Ca<sup>2+</sup> 的相关性较强, 载荷因子为 0.927, Ca<sup>2+</sup> 主要与建筑尘有关, 因此主成分 2 表征建筑尘; 主成分 3 主要与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 相关性较强, 载荷因子为 0.896, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 主要来源于移动源, 因此主成分 3 表征移动源。对于鞍山市, 主成分 1 主要与 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、K<sup>+</sup> 等离子的相关性较强, 载荷因子分别为 0.959 和 0.882, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 通过气态前体物经复杂的大气化学反应而形成, 与燃煤及生物质燃烧有关, K<sup>+</sup> 主要来源于生物质燃烧, 因此主成分 1 表征燃煤源和生物质燃烧源的混合源; 主成分 2 主要与 Na<sup>+</sup> 有关, 因此主成分

2 表征海盐粒子; 主成分 3 与  $Mg^{2+}$  的相关性较强, 载荷因子为 0.907, 由于  $Mg^{2+}$  主要来源于钢铁冶炼尘和建筑尘, 鞍山市以鞍钢为支柱, 因此主成分 3 表征钢铁冶炼尘. 由此可知, 盘锦市道路扬尘  $PM_{2.5}$  主要来源于生物质燃烧源、海盐粒子、建筑尘和移动源; 鞍山市道路扬尘  $PM_{2.5}$  主要来源于燃煤源、生物质燃烧源、海盐粒子和钢铁冶炼尘.

### 3 结论

(1) 盘锦市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中 8 种水溶性无机离子总质量分数为  $5.83\% \pm 3.34\%$ , 其中  $Ca^{2+}$  质量分数为  $2.91\% \pm 2.13\%$ ; 鞍山市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中 8 种水溶性无机离子总质量分数为  $5.84\% \pm 1.15\%$ . 其中  $Na^+$  和  $SO_4^{2-}$  质量分数分别为  $2.53\% \pm 0.74\%$ 、 $1.09\% \pm 0.42\%$ . 两个城市水溶性无机离子质量分数差别较大, 可能与其主要排放源不同有关.

(2) 根据相关分析结果, 盘锦市 8 种水溶性无机离子相关系数都相对较高, 说明其道路扬尘  $PM_{2.5}$  中水溶性无机离子来源较为复杂; 鞍山市  $Cl^-$  与  $K^+$  和  $SO_4^{2-}$  相关性较好, 这说明  $Cl^-$  除来源于海盐外, 还有一部分来源于生物质燃烧和燃煤.

(3) 根据二次离子分析结果, 盘锦市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中的  $NH_4^+$  的质量分数与  $SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$  和  $Cl^-$  的相关性较好, 但其氨不足以中和酸性离子, 酸性离子的量高于氨的量; 鞍山市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中,  $NH_4^+$  的质量分数远小于  $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$  的质量分数,  $SO_4^{2-}$  和  $NO_3^-$  除与  $NH_4^+$  结合外, 还与其他离子结合.

(4) 盘锦市和鞍山市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中  $NO_3^-/SO_4^{2-}$  的均值分别为  $0.52 \pm 0.55$  和  $0.46 \pm 0.13$ , 显著低于石家庄和上海的  $NO_3^-/SO_4^{2-}$  的值.

(5) 根据主成分分析结果, 盘锦市道路扬尘  $PM_{2.5}$  主要来源于生物质燃烧源、海盐粒子、建筑尘和移动源; 鞍山市道路扬尘  $PM_{2.5}$  主要来源于燃煤源、生物质燃烧源、海盐粒子和钢铁冶炼尘.

#### 参考文献:

- [1] 张诗建. 基于快速检测法的天津市道路扬尘排放清单研究[D]. 天津: 南开大学, 2016.
- [2] 刘泽常, 张猛, 郝长瑞, 等. 济南市道路扬尘排放因子估算及其影响因素研究[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(1): 150-154.  
Liu Z C, Zhang M, Hao C R, et al. Road dust emission factors in Jinan City[J]. Environmental Science & Technology, 2012, **35**(1): 150-154.
- [3] 罗恢泓, 廖雷, 刘超, 等. 桂林市中心区域道路扬尘细颗粒物污染特征研究[J]. 工业安全与环保, 2015, **41**(11): 16-19, 32.
- [4] 杨德容, 叶芝祥, 杨怀金, 等. 成都市铺装道路扬尘排放清单及空间分布特征研究[J]. 环境工程, 2015, **33**(11): 83-87.
- [5] 彭康, 杨杨, 郑君瑜, 等. 珠江三角洲地区铺装道路扬尘排放因子与排放清单研究[J]. 环境科学学报, 2013, **33**(10): 2657-2663.  
Peng K, Yang Y, Zheng J Y, et al. Emission factor and inventory of paved road fugitive dust sources in the Pearl River Delta region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, **33**(10): 2657-2663.
- [6] 张伟, 姬亚芹, 李树立, 等. 天津市春季样方法道路扬尘  $PM_{2.5}$  粒度乘数特征[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(7): 1955-1959.  
Zhang W, Ji Y Q, Li S L, et al.  $PM_{2.5}$  size multiplier feature of road dust in Tianjin during spring with quadrat sampling method [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(7): 1955-1959.
- [7] 樊守彬, 张东旭, 田灵娣, 等. 北京市交通扬尘  $PM_{2.5}$  排放清单及空间分布特征[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(1): 20-28.  
Fan S B, Zhang D X, Tian L D, et al. Emission inventory and spatial distribution of road fugitive dust  $PM_{2.5}$  in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(1): 20-28.
- [8] Kong S F, Lu B, Ji Y Q, et al. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in size-differentiated re-suspended dust on building surfaces in an oilfield city, China [J]. Atmospheric Environment, 2012, **55**: 7-16.
- [9] Ostro B, Roth L, Malig B, et al. The effects of fine particle components on respiratory hospital admissions in children [J]. Environmental Health Perspectives, 2009, **117**(3): 475-480.
- [10] Polichetti G, Cocco S, Spinali A, et al. Effects of particulate matter ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  and  $PM_1$ ) on the cardiovascular system [J]. Toxicology, 2009, **261**(1-2): 1-8.
- [11] 杜鹏瑞, 杜睿, 任伟珊. 城市大气颗粒物毒性效应及机制的研究进展[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(9): 2815-2827.  
Du P R, Du R, Ren W S. Research progress on toxicological characteristics and mechanisms of urban atmospheric particulate matters [J]. China Environmental Science, 2016, **36**(9): 2815-2827.
- [12] 顾双, 贾玉巧. 可吸入颗粒物( $PM_{10}$ )不同组分与健康效应的关系及其毒性机制的研究进展[J]. 环境卫生学杂志, 2016, **6**(6): 446-450.  
Gu S, Jia Y Q. Progress on relationship between different components of particulate matter ( $PM_{10}$ ) and health effects and  $PM_{10}$ 's toxic mechanisms [J]. Journal of Environmental Hygiene, 2016, **6**(6): 446-450.
- [13] 苗红妍, 温天雪, 王璐, 等. 沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2017-2024.  
Miao H Y, Wen T X, Wang L, et al. Characteristics of water-soluble inorganic ions in atmospheric aerosols in Shenyang [J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2017-2024.
- [14] 陈魁, 白志鹏. 颗粒物再悬浮采样器研制与应用[J]. 环境工程, 2006, **24**(5): 67-68, 81.
- [15] 孙英明, 吴建会, 马威, 等. 烧结工艺颗粒物中水溶性离子排放特性分析[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(8): 2270-

- 2274.
- Sun Y M, Wu J H, Ma X, *et al.* Emission characteristics of water-soluble ions in the particulate matters from sintering process [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(8): 2270-2274.
- [16] 陈筱佳, 程金平, 江璇, 等. 上海市中心城区主干道道路扬尘组分特征及来源解析[J]. *环境污染与防治*, 2015, **37**(6): 10-13.
- [17] 康苏花, 李海峰, 赵鑫, 等. 石家庄市开放源颗粒物化学组成特征分析[J]. *科学技术与工程*, 2015, **15**(13): 221-225.
- Kang S H, Li H F, Zhao X, *et al.* Analysis of characteristics and chemical composition of open source particulate matter in Shijiazhuang City [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, **15**(13): 221-225.
- [18] 张诗建, 王伟, 姬亚芹, 等. 鞍山市城区夏季 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子组分特征与来源解析[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2015, **48**(1): 40-45, 72.
- Zhang S J, Wang W, Ji Y Q, *et al.* Component characteristics and sources of water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> in summer of Anshan City [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2015, **48**(1): 40-45, 72.
- [19] 马召辉, 梁云平, 张健, 等. 北京市典型排放源 PM<sub>2.5</sub> 成分谱研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(12): 4043-4052.
- Ma Z H, Liang Y P, Zhang J, *et al.* PM<sub>2.5</sub> profiles of typical sources in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 4043-4052.
- [20] 郝吉明, 段雷, 易红宏, 等. 燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008. 72-74, 151-164.
- [21] 于萌萌, 周健楠, 刘保献, 等. 2015年北京城区大气 PM<sub>2.5</sub> 中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 及前体气体的污染特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(4): 1307-1316.
- Ding M M, Zhou J N, Liu B X, *et al.* Pollution characteristics of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> in PM<sub>2.5</sub> and their precursor gases during 2015 in an urban area of Beijing [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(4): 1307-1316.
- [22] Lin J J. Characterization of water-soluble ion species in urban ambient particles [J]. *Environment International*, 2002, **28**(1-2): 55-61.
- [23] 刀谓, 张霖琳, 王超, 等. 京津冀冬季与夏季 PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> 及其水溶性离子组分区域性污染特征分析? [J]. *环境化学*, 2015, **34**(1): 60-69.
- Dao X, Zhang L L, Wang C, *et al.* Characteristics of mass and ionic compounds of atmospheric particles in winter and summer of Beijing-Tianjin-Hebei area, China [J]. *Environmental Chemistry*, 2015, **34**(1): 60-69.
- [24] Shantz N C, Aklilu Y A, Ivanis N, *et al.* Chemical and physical observations of particulate matter at Golden Ears Provincial Park from anthropogenic and biogenic sources [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(34): 5849-5860.
- [25] 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*, 2007, **90**(2-4): 243-252.
- [26] Wang Y, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* The ion chemistry and the source of PM<sub>2.5</sub> aerosol in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(21): 3771-3784.
- [27] Ye B M, Ji X L, Yang H Z, *et al.* Concentration and chemical composition of PM<sub>2.5</sub> in Shanghai for a 1-year period [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(4): 499-510.

## CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM <sub>2.5</sub> in Jingjinji Region, 2015 .....	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks .....	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM <sub>2.5</sub> Fine Particulates Based on Multi-source Data .....	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM <sub>2.5</sub> in East China .....	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing .....	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM <sub>2.5</sub> in Heze .....	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM <sub>2.5</sub> in Selected Cities in Liaoning Province .....	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin .....	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM <sub>2.5</sub> in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming .....	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015 .....	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus .....	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ( $\delta^2\text{H}$ ) and Oxygen ( $\delta^{18}\text{O}$ ) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai .....	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China .....	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO <sub>2</sub> Emissions from the Xin'anjiang Reservoir .....	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area .....	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir .....	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin .....	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin .....	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain .....	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model .....	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing .....	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen .....	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems .....	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter .....	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent .....	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water .....	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate .....	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature .....	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite .....	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes .....	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater .....	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater .....	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process .....	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an .....	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX .....	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms .....	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization .....	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate .....	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor .....	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR .....	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO <sub>2</sub> Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor .....	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta .....	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers .....	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir .....	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai .....	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City .....	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area .....	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai .....	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants .....	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice .....	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield .....	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields .....	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N <sub>2</sub> O Emission in the North China Plain .....	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , and N <sub>2</sub> O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain .....	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions from Rivers .....	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)