

百方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.9  
第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征 ..... 杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)

郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析 ..... 郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)

济南市背景区域大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及其对能见度的影响 ..... 别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)

聊城市冬季 PM<sub>2.5</sub> 中多环芳烃来源解析及健康风险评估 ..... 刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)

2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势 ..... 刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)

长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征 ..... 赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)

燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征 ..... 杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)

高速公路沿线 PM<sub>2.5</sub> 中重金属污染特征 ..... 李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)

北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险 ..... 胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)

风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用 ..... 秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春荣 (3935)

京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 ..... 刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)

成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱 ..... 周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)

工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估 ..... 孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)

典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析 ..... 王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)

不同方法制备 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 催化剂 CO-SCR 性能及机制 ..... 仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)

全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征 ..... 崔文杰, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)

江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素 ..... 史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笄文怡, 季鹏飞 (4000)

城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素:以宁波市小浞江为例 ..... 高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)

水华对沉积物中氮的转化和去除的影响 ..... 肖琳, 杨佳怡 (4018)

沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性 ..... 刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)

汾河下游雨季硝酸盐污染源解析 ..... 汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)

新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律 ..... 魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)

基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性 ..... 张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)

FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较:以贵州三座水库为例 ..... 陈倩, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)

天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制 ..... 邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)

镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb<sup>2+</sup> 的去除 ..... 何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)

2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb<sup>2+</sup> ..... 晋圣珧, 向阳, 张隽瑀, 张凯, 吉庆华 (4091)

钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验 ..... 白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)

大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除 ..... 贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建锋 (4105)

A<sup>2</sup>/O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化 ..... 荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)

上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能 ..... 杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)

微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析 ..... 张若晨, 陈川, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)

基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验 ..... 张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)

聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比 ..... 易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)

厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学 ..... 唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)

Ca<sup>2+</sup> 对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响 ..... 张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)

从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷 ..... 畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)

信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响 ..... 徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏漪旋 (4177)

海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响 ..... 胡越航, 宣丽霞, 袁琼芬 (4185)

耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析 ..... 赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)

稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响 ..... 保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)

地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响 ..... 陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)

氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)

三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N<sub>2</sub>O) 分布和释放 ..... 程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)

沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响 ..... 朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)

新建铅蓄电集聚区对周边土壤环境的影响:基于重金属空间特征 ..... 丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)

不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响 ..... 杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)

基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法 ..... 张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)

缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征 ..... 罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)

西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响 ..... 田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)

调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析 ..... 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)

海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源 ..... 陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)

《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)

# 济南市背景区域大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征及其对能见度的影响

别淑君<sup>1</sup>, 杨凌霄<sup>1\*</sup>, 高颖<sup>2</sup>, 姜盼<sup>1</sup>, 李岩岩<sup>1</sup>, 杨雨蒙<sup>1</sup>, 赵彤<sup>1</sup>, 王文兴<sup>1</sup>

(1. 山东大学环境研究院, 青岛 266237; 2. 山东大学环境科学与工程学院, 青岛 266237)

**摘要:** 为研究背景地区大气 PM<sub>2.5</sub> 化学组分季节变化特征及对能见度的影响, 本研究于 2016 年春、夏、秋、冬在济南市七星台采集大气 PM<sub>2.5</sub> 样品, 分析其中水溶性离子组分及 OC、EC 的污染特征并研究其区域传输贡献。结果表明, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 三者之和占年均离子总浓度的 90.24%, 二次生成的水溶性无机离子污染较为严重。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 呈现出明显的冬高夏低的季节性变化特征。各季节的 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 主要以 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 结合的形式存在。SOC/OC 的范围是 21.17% ~ 54.21%, 表明该地区存在较为严重的二次有机污染。四季 SOR 值均大于 0.1, 显示本区域四季均有 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的二次生成, 四季 NOR 的值均高于 SOR, 可知 NO<sub>2</sub> 的二次转化强于 SO<sub>2</sub> 的二次转化。大气消光系数 ( $B_{ext}$ ) 的范围是 172.68 ~ 320.61 Mm<sup>-1</sup>, 年均值为 256.48 Mm<sup>-1</sup>, 大气消光系数呈现明显的夏低冬高的季节性趋势。后推气流轨迹显示七星台地区春、夏季主要受长距离传输和海洋源的影响, 秋、冬季主要受局地源的影响。对比 2008 年济南市大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征研究, 结果显示机动车对大气环境影响显著提升。

**关键词:** 七星台; 背景区域; PM<sub>2.5</sub>; 组分特征; 能见度; 区域传输

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-3868-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901127

## Characteristics of Atmospheric PM<sub>2.5</sub> Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan

BIE Shu-jun<sup>1</sup>, YANG Ling-xiao<sup>1\*</sup>, GAO Ying<sup>2</sup>, JANG Pan<sup>1</sup>, LI Yan-yan<sup>1</sup>, YANG Yu-meng<sup>1</sup>, ZHAO Tong<sup>1</sup>, WANG Wen-xing<sup>1</sup>

(1. Environmental Research Institute, Shandong University, Qingdao 266237, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Qingdao 266237, China)

**Abstract:** In order to study the seasonal variations in the chemical composition of atmospheric particulate matter with diameters less than 2.5 μm (PM<sub>2.5</sub>) and its influence on visibility in background areas, atmospheric PM<sub>2.5</sub> samples were collected in spring, summer, autumn, and winter 2016 at Qixingtai in Ji'nan. The pollution characteristics of water-soluble ions components, organic carbon (OC), and elemental carbon (EC) were analyzed, and their regional transmission contributions were studied. The results show that NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> were the main components of water-soluble ions, accounting for 90.24% of the annual total ion concentration. The secondary water soluble inorganic ions were polluted severely. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>/SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> presented obvious seasonal variations of high (low) levels in winter (summer). In each season, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> existed mainly in the form of (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. The value of secondary OC (SOC)/OC ranged from 21.17% to 54.21%, indicating the presence of relatively severe secondary organic pollution in this area. The sulfur oxidation ratio (SOR) value in all seasons was greater than 0.1, indicating that the secondary generation of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> occurs in all seasons in this region, and the value of nitrogen oxidation ratio (NOR) in all seasons was higher than the SOR value. The secondary transformation of NO<sub>2</sub> in the Qixingtai region was stronger than that of SO<sub>2</sub>. The range of atmospheric extinction coefficient ( $B_{ext}$ ) was 172.68-320.61 Mm<sup>-1</sup>, with an annual mean of 256.48 Mm<sup>-1</sup>. The atmospheric extinction coefficient showed an obvious seasonal trend of the lowest (highest) in summer (winter). The backward airflow trajectory shows that the Qixingtai was affected mainly by the long-distance transmission from Northwest China and the ocean in spring and summer and by local sources in autumn and winter. A comparison of the characteristics of atmospheric PM<sub>2.5</sub> pollution in Ji'nan in 2008 revealed that the influence of motor vehicles on the atmospheric environment has been significantly improved.

**Key words:** Qixingtai; background region; PM<sub>2.5</sub>; component characteristics; visibility; regional transport

大气细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 可对区域气候、环境系统及人体健康、能见度等方面产生显著影响<sup>[1]</sup>。水溶性无机离子是大气 PM<sub>2.5</sub> 的重要组成部分, 其化学组分和浓度直接影响能见度、降水酸度及云雾的形成, 从而影响区域气候和环境<sup>[2, 3]</sup>。碳质气溶胶含有复杂的有机化合物, 包含多种致畸、致癌和致突变物质, 对大气能见度有重要影响<sup>[4]</sup>。

目前国内外对城市大气细颗粒物的研究较多, 背景点的大气研究相对较少, 研究背景点的 PM<sub>2.5</sub>

收稿日期: 2019-01-15; 修订日期: 2019-03-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0200501)

作者简介: 别淑君 (1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 中有机成份污染特征、来源解析及形成机制, E-mail: bieshujun@163.com

\* 通信作者, E-mail: yanglingxiao@sdu.edu.cn

污染特征可以了解区域污染背景值, 便于与城市地区大气污染特征进行比较, 能够为更好地改善城市大气环境提供数据支持. 七星台距离济南约 25 km, 总面积 20 km<sup>2</sup>, 森林覆盖率高达 95%, 空气中每 cm<sup>3</sup> 负氧离子含量高达 2 000 个, 是一处绝佳的“天然氧吧”. 为探讨华北地区大气 PM<sub>2.5</sub> 中 OC、EC 及水溶性离子的组成及特征, 本研究于 2016 年四季选取典型月份在七星台采集大气 PM<sub>2.5</sub> 样品, 分析化学组分的季节特征, 并利用后推气流轨迹聚类分析对颗粒物中化学组分的来源进行初步分析, 结果将有助于了解华北地区背景区域大气 PM<sub>2.5</sub> 的组分特征及来源.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样地点

采样地位于山东省七星台风景区 (36° 29' N, 117° 19' E), 采样器放置在七星台宾馆楼顶, 距离地面约 12 m.

### 1.2 样品采集

2016 年春 (03-05 ~ 03-15)、夏 (06-02 ~ 06-15)、秋 (09-19 ~ 09-29) 和冬 (12-01 ~ 12-11) 分昼夜进行样品采集 (08:00 ~ 20:00, 20:30 ~ 次日 08:00), 其中降雨、降雪、大风及大雾天气均暂停采样, 春、夏、秋和冬的有效样品数分别为 19、23、21 和 20 个. 采样仪器为武汉天虹中流量悬浮微粒采样器 (TH-150 A), 采样流量 100 L·min<sup>-1</sup>. 采样膜为高纯度石英纤维滤膜 (Whatman, 英国), 采样前将滤膜用铝箔纸包裹置于马弗炉中, 经 600℃ 灼烧 6 h 以除去石英膜上附着的有机成分. 采样前后

将滤膜恒温 (20 ± 2)℃、恒湿 (相对湿度为 45% ~ 55%) 48 h, 并用 Sartorius ME5-F (灵敏度为 0.001 mg) 型分析天平称重. 采样后样品置于冰箱 -20℃ 避光保存, 每个季节均设置一套空白样品.

### 1.3 分析方法

使用 Dionex IC-90 型离子色谱仪测定无机水溶性离子 (Na<sup>+</sup>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、K<sup>+</sup>、Mg<sup>2+</sup>、Ca<sup>2+</sup>、Cl<sup>-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 质量浓度, 详细的操作方法见文献 [5]; 采用美国 (Sunset Laboratory, Tigard, OR, USA) OC/EC 碳分析仪对 OC/EC 进行分析测定, 具体处理过程见文献 [6]. 空白膜采用同样程序分析测定.

### 1.4 后推气流轨迹计算

采用混合单粒子拉格朗日积分轨道 (HYSPLIT 4) 计算到达采样点 48 h 的后推气流轨迹. 气象数据来自 ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/PUB/files/gdas1. 本研究每隔 6 h 计算一次模型, 海拔高度 680 m.

## 2 结果与讨论

### 2.1 水溶性无机离子 SNA (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 质量浓度的季节特征

表 1 为七星台大气 PM<sub>2.5</sub> 中主要水溶性无机离子的季均质量浓度, 七星台大气 PM<sub>2.5</sub> 中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 占年均总水溶性离子质量浓度的 90.24%, 百分比低于济南<sup>[7]</sup>, 但高于成都<sup>[8]</sup>、西安<sup>[9]</sup>、太原<sup>[10]</sup> 等城市和长白山<sup>[5]</sup>、贡嘎山<sup>[11]</sup> 背景区域, 表明七星台地区二次无机离子污染严重. SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 浓度夏季最高, 主要受 SO<sub>2</sub> 液相转化的影响<sup>[12]</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度冬季最高.

表 1 七星台四季水溶性离子平均浓度水平

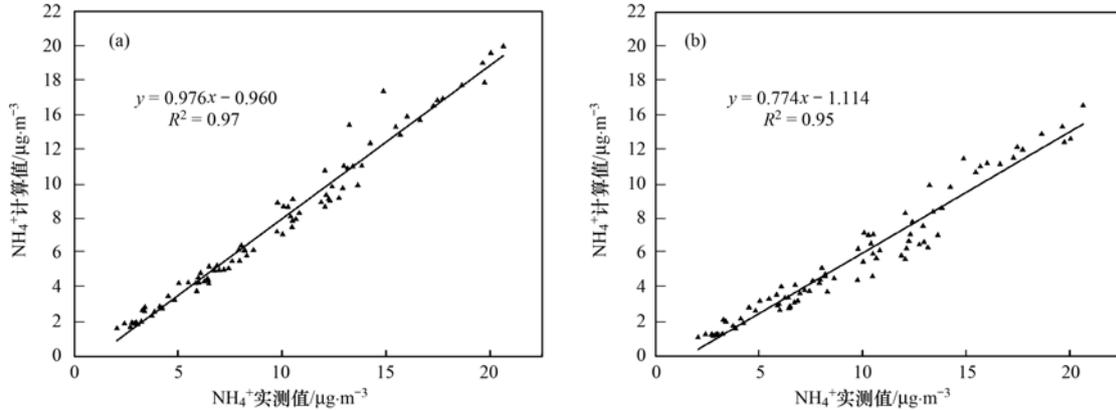
Table 1 Mean concentrations of water-soluble inorganic ions in Qixingtai

项目	春	夏	秋	冬
Na <sup>+</sup> /μg·m <sup>-3</sup>	0.74 ± 0.35	0.99 ± 0.86	0.51 ± 0.10	0.51 ± 0.12
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /μg·m <sup>-3</sup>	9.90 ± 5.08	8.73 ± 4.30	7.03 ± 3.78	12.33 ± 5.04
K <sup>+</sup> /μg·m <sup>-3</sup>	0.85 ± 0.35	0.54 ± 0.27	0.67 ± 0.38	1.01 ± 0.37
Mg <sup>2+</sup> /μg·m <sup>-3</sup>	0.19 ± 0.10	0.03 ± 0.02	0.03 ± 0.02	0.05 ± 0.03
Ca <sup>2+</sup> /μg·m <sup>-3</sup>	2.64 ± 1.72	0.27 ± 0.21	0.34 ± 0.27	0.85 ± 0.57
Cl <sup>-</sup> /μg·m <sup>-3</sup>	2.65 ± 0.93	0.67 ± 1.31	0.48 ± 0.36	1.88 ± 1.05
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /μg·m <sup>-3</sup>	10.62 ± 6.34	12.69 ± 7.63	8.77 ± 4.29	11.66 ± 5.22
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /μg·m <sup>-3</sup>	17.81 ± 10.23	8.80 ± 6.11	8.59 ± 6.88	22.17 ± 11.66
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.77 ± 0.53	0.77 ± 0.44	0.98 ± 0.51	1.88 ± 0.55
nss-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /μg·m <sup>-3</sup>	10.44 ± 6.16	12.76 ± 7.82	8.64 ± 4.19	11.53 ± 5.08
SNA/μg·m <sup>-3</sup>	38.15 ± 20.53	29.78 ± 17.02	24.26 ± 13.67	46.03 ± 20.85
总离子质量浓度/μg·m <sup>-3</sup>	45.4 ± 25.10	32.72 ± 20.71	26.42 ± 16.08	50.46 ± 24.06

若 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 以 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 和 NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub> 的形式存在, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (单位: μg·m<sup>-3</sup>) 可通过公式 [NH<sub>4</sub><sup>+</sup>] = 0.192 [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] + 0.29 [NO<sub>3</sub><sup>-</sup>] 计算; 若 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 和

NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 以 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 和 (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的形式存在, NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (单位: μg·m<sup>-3</sup>) 可通过公式 [NH<sub>4</sub><sup>+</sup>] = 0.38 [SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>] + 0.29 [NO<sub>3</sub><sup>-</sup>] 计算得到<sup>[13]</sup>.

图 1 为  $\text{NH}_4^+$  实测值和计算值的线性回归线, 从中可以看出,  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  以  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  和  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  的形式存在时, 计算值和实测值更为



(a)  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  以  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  和  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  的形式存在 (b)  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{SO}_4^{2-}$  以  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  和  $\text{NH}_4\text{HSO}_4$  的形式存在

图 1 七星台地区  $\text{PM}_{2.5}$  中  $[\text{NH}_4^+]$  计算值与实测值的相关性

Fig. 1 Correlation between calculated and measured value of  $[\text{NH}_4^+]$  in  $\text{PM}_{2.5}$  at Qixingtai

$\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  质量比是否大于 1 可作为判断 固定源和移动源相对贡献的依据<sup>[14]</sup>, 大气颗粒物中  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  质量比越大, 表明移动源对大气中  $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  贡献越大. 本研究中  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  的变化范围为 0.77~1.88, 年均值为 1.35, 且冬春季比值均高于 1, 表明七星台受移动源影响较大<sup>[15-19]</sup>.  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  呈现出明显的冬高夏低的季节性变化特征, 夏季比值最低, 可能由于夏季高温高湿, 太阳辐射较强, 更有利于  $\text{SO}_4^{2-}$  的形成,  $\text{NO}_3^-$  高温下易分解, 从而导致低  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  比值, 冬季  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  比值最高, 主要受低温抑制  $\text{NO}_3^-$  挥发, 以及机动车排放的影响<sup>[16]</sup>.

## 2.2 SOR、NOR 的季节特征

硫的氧化率 (SOR) 和氮的氧化率 (NOR) 表示二次气溶胶的生成和转化过程,  $\text{SOR} = [\text{nss-SO}_4^{2-}] / ([\text{nss-SO}_4^{2-}] + \text{SO}_2)$ , 其中, 非海盐硫酸根离子  $[\text{nss-SO}_4^{2-}] = [\text{SO}_4^{2-}] - 0.2517 [\text{Na}^+]$ ,  $\text{NOR} = [\text{NO}_3^-] / ([\text{NO}_3^-] + \text{NO}_2)$ <sup>[18]</sup>. 有研究发现, 一次污染物中 SOR 和 NOR 值通常小于 0.1, 高 SOR 值和高 NOR 值表示有更多的  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  转化成二次气溶胶粒子<sup>[19]</sup>. 有研究指出, 在寒冷季节中, 非均相反应在气相  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_x$  转化成  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  的过程中起主要作用<sup>[20]</sup>.

表 2 为七星台四季 SOR 和 NOR 的季均值, 七星台 SOR 和 NOR 值均大于 0.1, 表明大气中存在较高程度的  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  光化学氧化过程<sup>[21]</sup>. 通常, 硫酸盐的生成途径有:  $\text{SO}_2$  与  $\text{O}_3$ 、 $\text{OH}^-$  的均相氧化反应;  $\text{SO}_2$  在气溶胶或液滴表面的非均相氧化反

吻合, 因此在七星台细颗粒物中, 各季节的  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NH}_4^+$  主要以  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  和  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  的形式存在.

应. 七星台夏季 SOR 值明显高于其他季节, 可能主要受高温及高湿度的影响, 有研究指出, SOR 与温度和相对湿度呈正相关, 温度越高, 大气的氧化性越强, 且随着相对湿度升高,  $\text{SO}_2$  在液滴表面的非均相氧化反应也得到增强<sup>[22]</sup>. 四季 NOR 值没有明显的季节变化, 整体高于 SOR, 表明四季中  $\text{NO}_2$  的二次转化强于  $\text{SO}_2$  的二次转化.

表 2 七星台四季 SOR 和 NOR

Table 2 SOR and NOR values in Qixingtai

季节	SOR	NOR
春	0.12	0.43
夏	0.28	0.40
秋	0.18	0.33
冬	0.17	0.38

## 2.3 OC、EC 及 SOC(二次有机碳)的季节特征

七星台四季 OC、EC 和 SOC 的季均质量浓度如表 3 所示, 七星台冬季 OC 浓度约为夏季 OC 浓度的 1.8 倍、冬季 EC 浓度约为夏季 EC 的 1.4 倍, 这主要是由于冬季供暖燃煤增加且扩散条件不利, 夏季气温相对较高, 空气流动性好, 小分子有机物易挥发.

OC 和 EC 的相关性可以初步反映碳质气溶胶

表 3 七星台 OC、EC 及 SOC 的平均质量浓度

Table 3 Mean concentrations of OC, EC, and SOC in 2016 at Qixingtai

项目	春	夏	秋	冬
OC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	11.06 ± 3.69	7.02 ± 1.67	8.85 ± 3.10	13.17 ± 4.35
EC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	1.72 ± 0.74	0.70 ± 0.22	0.69 ± 0.25	0.98 ± 0.36
SOC/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	4.20 ± 2.67	2.31 ± 1.08	4.82 ± 2.15	2.86 ± 2.01
SOC/OC	0.38 ± 0.17	0.33 ± 0.13	0.54 ± 0.14	0.22 ± 0.13

的同源性,若相关性好,则说明来源相同<sup>[23,24]</sup>。如图 2 所示,七星台冬季 OC 和 EC 相关性强 ( $R^2 = 0.78$ ),表明冬季 OC 与 EC 具有较为相似的来源(燃煤、尾气和生物质燃烧)<sup>[15]</sup>;其他 3 个季节相关性弱,OC 和 EC 来源较为复杂。

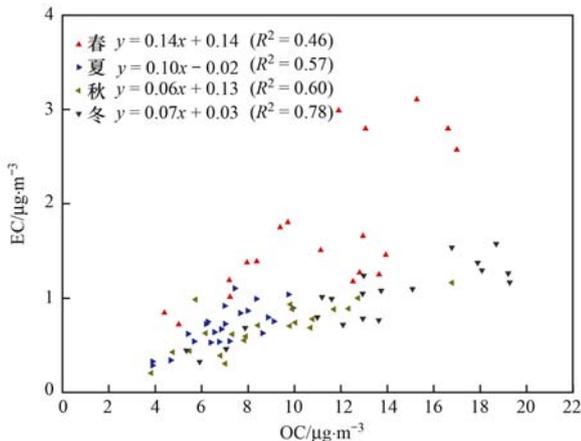


图 2 七星台 OC 和 EC 间相关性的季节变化

Fig. 2 Seasonal variation in correlation of OC and EC in Qixingtai

EC 主要来自燃料燃烧,具有化学惰性和热稳定性,可作为一种污染源排放的示踪物, SOC 是由大气中的挥发性有机物(VOCs)经气固反应生成,难以对其进行定量分析,常用间接法估算 SOC<sup>[25]</sup>。本文采用 Turpin 等<sup>[26]</sup>提出的 SOC 经验公式:

$$\text{SOC} = \text{OC} - \text{EC} \times (\text{OC}/\text{EC})_{\min}$$

式中,  $(\text{OC}/\text{EC})_{\min}$  为样品中 OC/EC 最小值。七星台四季 SOC 的质量浓度变化范围是 2.31 ~ 4.82  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 秋季浓度最高,夏季浓度最低,可能由于夏季降水对 OC 的清除作用抑制了 SOC 的生成<sup>[27]</sup>。七星台冬季 SOC/OC 最低,且 SOC 值不高,可能是由于冬季气温较低,光化学反应较其他季节弱,不利于 SOC 的生成。

#### 2.4 七星台大气消光系数

使用美国 IMPROVE 研究计划得到的颗粒物消光系数( $B_{\text{ext}}$ )计算公式计算七星台大气颗粒物消光系数,公式如下<sup>[28]</sup>:

$$B_{\text{ext}} \approx 2.2 \times f_s(\text{RH}) \times [\text{small ammonium sulphate}] + 4.8 \times f_L(\text{RH}) \times [\text{large ammonium sulphate}] + 2.4 \times f_s(\text{RH}) \times [\text{small ammonium nitrate}] + 5.1 \times f_L(\text{RH}) \times [\text{large ammonium nitrate}] + 2.8 \times [\text{small organic mass}] + 6.1 \times [\text{large organic mass}] + 10 \times [\text{elemental carbon}] + 1 \times [\text{soil dust}] + 1.7 \times f(\text{RH}) \times [\text{sea salt}] + 0.6 \times [\text{coarse mass}] + \text{Rayleigh scattering} + b_{\text{NO}_2}$$

监测期间七星台  $B_{\text{ext}}$  的年均值为 256.48  $\text{Mm}^{-1}$ , 低于杭州(428  $\text{Mm}^{-1}$ )<sup>[29]</sup> 和天津(370  $\text{Mm}^{-1}$ )<sup>[30]</sup> 等

城市地区,表明七星台相较于城市地区大气能见度较好。采样期间七星台  $B_{\text{ext}}$  分别为春季 215.82  $\text{Mm}^{-1}$ , 夏季 172.68  $\text{Mm}^{-1}$ , 秋季 268.16  $\text{Mm}^{-1}$ , 冬季 320.61  $\text{Mm}^{-1}$ , 呈现明显冬高夏低的季节性变化,由于冬季采暖污染物排放量增大,且易于出现逆温、灰霾等不利天气,导致整体散射消光水平较高<sup>[31]</sup>。

#### 2.5 水溶性无机离子及 OC、EC 浓度受区域输送影响分析

利用 HYSPLIT 气流轨迹模型,得到七星台四季的日平均 48 h 后推气流轨迹,如图 3 所示,根据气流在垂直和水平方向上的运动速率和方向将气流轨迹分为 4 类。采样期间,春季簇 4 气团(23%)起源于山东省东南部,气团中污染物浓度最高,簇 1(33%)起源于我国蒙古,经山西、河北到达采样点,传输距离长,气团携带的污染物浓度较高,表明七星台春季主要受局地源和远距离传输的影响。夏季簇 1 气团(38%)来源于山东东部黄海地区,途经污染严重的济南、淄博等城市,携带污染物浓度较高,表明夏季七星台受到海洋源的影响。秋季来自山东东南部地区的簇 3 气团(48%)所含污染物浓度较高,主要因为这簇气团途经污染物排放强度较大的人口密集区,气团中携带的污染物含量相应增加,七星台秋季主要受局地源的影响。冬季簇 1 气团(53%)是主要的传输路径,气团起源于山东省西北部地区,表明七星台冬季主要受局地源影响。

#### 2.6 七星台背景区域与苗圃背景区域化学组分对比

2008 年杨凌霄<sup>[15]</sup>对济南市郊区苗圃地区大气 PM<sub>2.5</sub> 中化学组分及能见度进行了研究,表 4 为七星台和苗圃背景区域大气 PM<sub>2.5</sub> 中化学组分浓度对比情况,相较于苗圃,七星台  $\text{NO}_3^-$  质量浓度显著升高,为苗圃地区的 2.6 倍,七星台  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  年均值为 1.35,是苗圃的 4.5 倍,表明近年来我国机动车对大气环境影响明显增大。七星台地区  $\text{NH}_4^+$  与苗圃地区差别不大,七星台  $\text{SO}_4^{2-}$ 、OC、EC 和 SOC

表 4 七星台和苗圃背景区域化学组分年均质量浓度对比/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 4 Annual average mass concentration of chemical components at Qixingtai and Miaopu/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

化学组分	七星台	苗圃 <sup>[15]</sup>
$\text{SO}_4^{2-}$	10.94	18.43
$\text{NO}_3^-$	14.34	5.49
$\text{NH}_4^+$	9.50	7.97
OC	10.16	20.2
EC	1.02	4.3
SOC	3.55	10.9

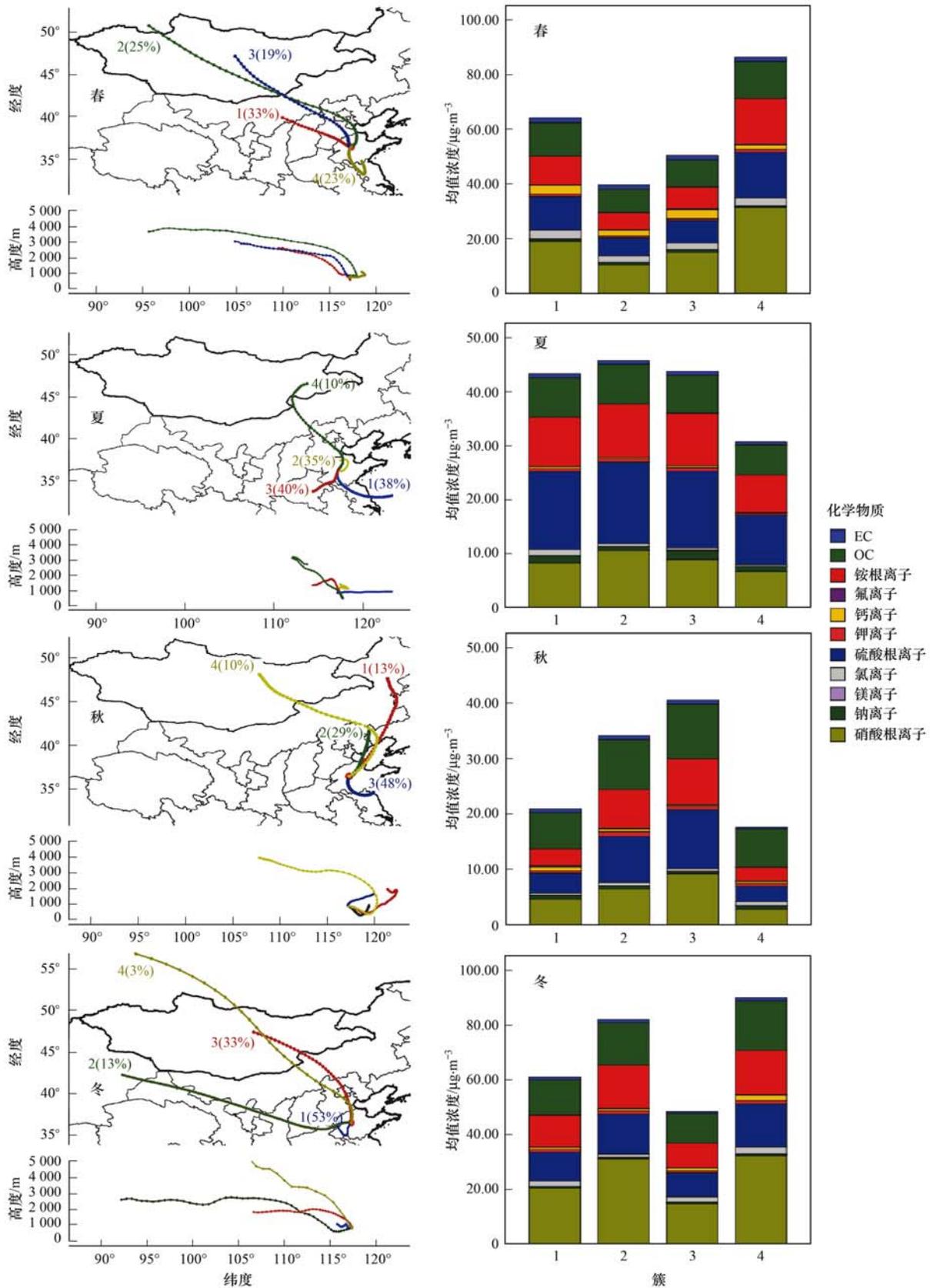


图3 七星台 OC、EC 及水溶性离子的季节传输

Fig. 3 Seasonal transport of OC, EC, and water-soluble ions in Qixingtai

相较于苗圃地区有明显下降,分别为苗圃的 59.36%、50.3%、23.7%和32.6%,对比结果可看出近年济南市大气环境有所改善.

### 3 结论

(1) 七星台 SNA 占年均离子总浓度的

90.24%, 二次生成的水溶性无机离子污染较为严重. 七星台各季节的  $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NH}_4^+$  主要以  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  结合的形式存在. 七星台  $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$  年均值是苗圃地区的 4.5 倍, 表明近年来机动车对大气环境的影响显著增强.

(2) 七星台 SOC 的范围是  $2.31 \sim 4.82 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 说明该地区存在较为严重的二次有机污染. 四季 SOR 值均大于 0.1, 表明七星台四季均有  $\text{SO}_4^{2-}$  的二次生成, NOR 值整体高于 SOR, 本区域  $\text{NO}_2$  的二次转化强于  $\text{SO}_2$  的二次转化.

(3) 七星台  $B_{\text{ext}}$  的范围是  $172.68 \sim 320.61 \text{ Mm}^{-1}$ , 年均值为  $256.48 \text{ Mm}^{-1}$ , 呈现明显的冬高夏低季节性趋势. 七星台水溶性无机离子和 OC 及 EC 主要来自局地源和高污染区域的远距离输送.

#### 参考文献:

- [1] Qi M, Zhu X, Du W, *et al.* Exposure and health impact evaluation based on simultaneous measurement of indoor and ambient PM<sub>2.5</sub> in Haidian, Beijing [J]. *Environmental Pollution*, 2017, **220**: 704-712.
- [2] 杨复沫, 贺克斌, 马永亮, 等. 北京 PM<sub>2.5</sub> 浓度的变化特征及其与 PM<sub>10</sub>、TSP 的关系[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(6): 506-510.  
Yang F M, He K B, Ma Y L, *et al.* Variation characteristics of PM<sub>2.5</sub> concentration and its relationship with PM<sub>10</sub> and TSP in Beijing[J]. *China Environmental Science*, 2002, **22**(6): 506-510.
- [3] Zhang T, Cao J J, Tie X X, *et al.* Water-soluble ions in atmospheric aerosols measured in Xi'an, China: seasonal variations and sources [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **102**(1-2): 110-119.
- [4] 康晖, 朱彬, 王红磊, 等. 长三角典型站点冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 中 OC、EC 污染特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(3): 961-971.  
Kang H, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characterization and variation of organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) in PM<sub>2.5</sub> during the winter in the Yangtze River delta region, China[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(3): 961-971.
- [5] 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 等. 长白山 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子观测研究[J]. *环境化学*, 2011, **30**(4): 812-815.  
Zhao Y N, Wang Y S, Wen T X, *et al.* Observation and analysis of water-soluble inorganic ions in PM<sub>2.5</sub> from mount Changbai [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, **30**(4): 812-815.
- [6] 杨雨蒙, 杨凌霄, 张俊美, 等. 济南市冬季灰霾日 PM<sub>1.0</sub> 和 PM<sub>1.0-2.5</sub> 污染特征[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2017, **47**(2): 111-116.  
Yang Y M, Yang L X, Zhang J M, *et al.* Characteristics of PM<sub>1.0</sub> and PM<sub>1.0-2.5</sub> in haze days during winter in Jinan [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2017, **47**(2): 111-116.
- [7] Gao X M, Yang L X, Cheng S H, *et al.* Semi-continuous measurement of water-soluble ions in PM<sub>2.5</sub> in Jinan, China: temporal variations and source apportionments [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(33): 6048-6056.
- [8] 陶月乐, 李亲凯, 张俊, 等. 成都市大气颗粒物粒径分布及水溶性离子组成的季节变化特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4034-4043.  
Tao Y L, Li Q K, Zhang J, *et al.* Seasonal variations in particle size distribution and water-soluble ion composition of atmospheric particles in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4034-4043.
- [9] 韩月梅, 沈振兴, 曹军骥, 等. 西安市大气颗粒物中水溶性无机离子的季节变化特征[J]. *环境化学*, 2009, **28**(2): 261-266.  
Han Y M, Shen Z X, Cao J J, *et al.* Seasonal variations of water-soluble inorganic ions in atmospheric particles over Xi'an [J]. *Environmental Chemistry*, 2009, **28**(2): 261-266.
- [10] 王璐, 温天雪, 苗红妍, 等. 太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3249-3257.  
Wang L, Wen T X, Miao H Y, *et al.* Concentrations and size distributions of water-soluble inorganic ions in aerosol particles in Taiyuan, Shanxi [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3249-3257.
- [11] 赵亚南, 王跃思, 温天雪, 等. 贡嘎山大气气溶胶中水溶性无机离子的观测与分析研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(1): 9-13.  
Zhao Y N, Wang Y S, Wen T X, *et al.* Observation and analysis on water-soluble inorganic chemical compositions of atmospheric aerosol in Gongga Mountain [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(1): 9-13.
- [12] Meng Z Y, Seinfeld J H. On the source of the submicrometer droplet mode of urban and regional aerosols [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1994, **20**(3): 253-265.
- [13] Lee Y L, Sequeira R. Water-soluble aerosol and visibility degradation in Hong Kong during autumn and early winter, 1998 [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **116**(2): 225-233.
- [14] 徐昶. 中国特大城市气溶胶的理化特性、来源及其形成机制 [D]. 上海: 复旦大学, 2010.  
Xu C. Characteristics, source and the formation mechanism of aerosol in mega-city, China [D]. Shanghai: Fudan University, 2010.
- [15] 杨凌霄. 济南市大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征、来源解析及其对能见度的影响 [D]. 济南: 山东大学, 2008.  
Yang L X. Characteristics, source apportionment and influence on visual range of PM<sub>2.5</sub> in Jinan [D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [16] 姬洪亮, 赵宏, 孔少飞, 等. 天津近岸海域大气颗粒物无机组分季节变化及源析 [J]. *中国环境科学*, 2011, **31**(2): 177-185.  
Ji H L, Zhao H, Kong S F, *et al.* Seasonal variation of inorganic composition in ambient particulate matter in Tianjin offshore area and its source analysis [J]. *China Environmental Science*, 2011, **31**(2): 177-185.
- [17] 张秋晨, 朱彬, 龚佃利. 南京地区大气气溶胶及水溶性无机离子特征分析 [J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(2): 311-316.  
Zhang Q C, Zhu B, Gong D L. Characterization of water-soluble ion species of aerosol in Nanjing, China [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(2): 311-316.
- [18] 姚青, 韩素芹, 毕晓辉. 天津 2009 年 3 月气溶胶化学组成及其消光特性研究 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(2): 214-220.  
Yao Q, Han S Q, Bi X H, *et al.* Main components and extinction characteristic of aerosol during March 2009 at Tianjin [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(2): 214-220.
- [19] Wang Y, Zhang 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.
- [20] Wang Y, Zhuang G S, Zhang X Y, *et al.* The ion chemistry,

- seasonal cycle, and sources of PM<sub>2.5</sub> and TSP aerosol in Shanghai [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(16): 2935-2952.
- [21] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al.* Descriptive analysis of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(12): 2079-2112.
- [22] 吴丹, 蒯少龙, 杨焕强, 等. 杭州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的污染特征及其消光贡献 [J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2656-2666.
- Wu D, Lin S L, Yang H Q, *et al.* Pollution characteristics and light extinction contribution of water-soluble ions of PM<sub>2.5</sub> in Hangzhou [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2656-2666.
- [23] 汤莉莉, 沈宏雷, 汤蕾, 等. 冬季南京北郊大气气溶胶中水溶性阴离子特征 [J]. *大气科学学报*, 2013, **36**(4): 489-498.
- Tang L L, Shen H L, Tang L, *et al.* Characteristics of water-soluble anions in atmospheric aerosol in northern suburb of Nanjing in winter [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2013, **36**(4): 489-498.
- [24] 沙丹丹, 王红磊, 朱彬, 等. 冬季 PM<sub>2.5</sub> 中含碳气溶胶的污染特征——长江三角洲地区一次区域重污染过程分析 [J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(10): 3611-3622.
- Sha D D, Wang H L, Zhu B, *et al.* Pollution characteristics of carbonaceous aerosols in PM<sub>2.5</sub> during a regional heavy air pollution episode in winter in the Yangtze River Delta [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(10): 3611-3622.
- [25] Turpin B J, Cary R A, Huntzicker J J. An in situ, time-resolved analyzer for aerosol organic and elemental carbon [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1990, **12**(1): 161-171.
- [26] Turpin B J, Huntzicker J J. Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(23): 3527-3544.
- [27] 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 等. 济南市夏、冬季 PM<sub>2.5</sub> 中化学组分的季节变化特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(9): 4014-4025.
- Liu X D, Meng J J, Hou Z F, *et al.* Analysis of seasonal variations in chemical characteristics and sources of PM<sub>2.5</sub> during summer and winter in Ji'nan City [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(9): 4014-4025.
- [28] Pitchford M, Malm W, Schichtel B. *et al.* 2007. Revised algorithm for estimating light extinction from IMPROVE particle speciation data [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(11): 1326-1336.
- [29] 徐昶, 叶辉, 沈建东, 等. 杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4422-4430.
- Xu C, Ye H, She J D, *et al.* Light scattering extinction properties of atmospheric particle and pollution characteristics in hazy weather in Hangzhou [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4422-4430.
- [30] 谭学士. 天津市大气颗粒物中 OC/EC 污染特征与细粒径来源解析 [D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- Tan X S. Concentration and size distribution of OC/EC in atmospheric aerosol in Tianjin, China [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [31] 向洪, 余家燕, 王军, 等. 重庆城区能见度特征与颗粒物消光贡献 [J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(7): 110-116.
- Xiang H, Yu J Y, Wang J, *et al.* Study on visibility characteristics of Chongqing's urban area and the extinction contribution by particulate matter [J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, **41**(7): 110-116.

## CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols .....	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017 .....	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan .....	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, CAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Liaocheng City .....	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017 .....	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta .....	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers .....	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> Near Highway .....	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing .....	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant .....	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei .....	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu .....	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources .....	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China .....	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> Catalysts .....	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China .....	..... CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province .....	..... SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City .....	..... GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal .....	..... XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs .....	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River .....	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang .....	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons .....	..... ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau .....	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals .....	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb <sup>2+</sup> from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent .....	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb <sup>2+</sup> by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode .....	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> .....	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jian-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants .....	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A <sup>2</sup> /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater .....	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment .....	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions .....	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal .....	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal .....	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge .....	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca <sup>2+</sup> on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge .....	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge .....	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur .....	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage .....	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process .....	..... ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils .....	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland .....	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N <sub>2</sub> O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover .....	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River .....	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters .....	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment; A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals .....	..... DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings .....	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety .....	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns in Jinyun Mountain .....	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China .....	..... TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice .....	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo .....	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)