

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



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM _{2.5} 长期变化影响因素	南洋, 张倩倩, 张碧辉 (499)
我国PCDD/Fs网格化大气排放清单	陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民 (510)
成都平原PM _{2.5} 中碳质组分时空分布特征与来源	史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东 (520)
南京江北新区冬季PM _{2.5} 中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析	邱晨晨, 于兴娜, 丁铨, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红 (529)
南京北郊四季PM _{2.5} 中有机胺的污染特征及来源解析	李栩婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军 (537)
长三角背景点夏季大气PM _{2.5} 中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析	薛国艳, 王格慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健 (554)
2017年秋季长春市PM _{2.5} 中多环芳烃的污染来源及健康风险评价	张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟 (564)
京津冀及周边区域PM _{2.5} 叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析	朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军 (574)
河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析	齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹 (587)
河南省气溶胶光学特性的时空变化特征	张瑞芳, 于兴娜 (600)
黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM _{2.5} 中水溶性有机气溶胶	黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊 (609)
南京市黑炭气溶胶时间演变特征及其主要影响因素	杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬 (620)
连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势	乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月 (630)
挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较	羌宁, 史天哲, 缪海超 (638)
西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析	丁铨, 于兴娜, 侯思宇 (647)
4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的生物多样性及群落结构	沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明 (656)
辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析	金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧 (665)
国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性	钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能 (674)
南小河流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义	郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗 (682)
乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价	余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云 (691)
温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系	朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新 (702)
新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化	宣文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆 (713)
环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估	宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春 (728)
洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化	刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞 (734)
西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析	杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李兢, 徐会宁 (743)
透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响	张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田 (750)
微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B	朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠 (756)
锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除	周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏 (763)
载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能	宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章 (773)
复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能	孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董磊 (784)
磁性硅藻土负载纳米过氧化钙对水中磷酸盐吸附	徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇 (792)
污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应	汤宁, 李如忠, 王丰庆, 何瑞亮, 刘超 (801)
生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析	赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红 (809)
磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能	于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军 (815)
四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响	阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品 (823)
异养硝化细菌Pseudomonas aeruginosa YL的脱氮过程及N ₂ O产生特性	杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖 (831)
包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (839)
包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用	周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉 (849)
厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响	张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅 (856)
除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺	李冬, 刘博, 王文琪, 张杰 (867)
桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价	王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 虎瑞, 宋波 (876)
青藏高原表土重金属污染评价与来源解析	杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军 (886)
黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析	莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德 (895)
管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响	宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕊, 李秧秧 (905)
生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响	周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖 (914)
水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制	余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章 (922)
接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制	刘猷, 王磊, 曹湛波, 段灏 (932)
基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较	胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双 (941)
超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素	陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠 (952)
青菜中镉的吸收和累积对硒的响应规律	余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉 (962)
两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制	卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇 (970)
可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤	贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢 (979)
我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析	穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣凤, 李花粉 (986)
畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系	蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国 (997)
4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性	朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来 (1005)

黑炭气溶胶质谱仪 (SP-AMS) 分析春季 $PM_{2.5}$ 中水溶性有机气溶胶

黄雯倩¹, 陈彦彤¹, 李旭东¹, 赵竹子¹, 马帅帅¹, 叶招莲^{1*}, 盖鑫磊^{2*}

(1. 江苏理工学院化学与环境工程学院, 常州 213001; 2. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044)

摘要: 为探讨常州春季大气细颗粒物($PM_{2.5}$)的化学组成及污染特征, 于2017年3月1日~5月30日采集了84个有效样品, 对其水溶性离子(WSIIs)、碳质组分(OC和EC)等常规组分进行了测定和分析, 并采用黑炭-气溶胶质谱仪(SP-AMS)对水溶性有机气溶胶(WSOA)进行了分析。结果表明, 采样期间 $PM_{2.5}$ 的日均质量浓度为 $101.97 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 超标(环境空气质量标准二级标准)率达73.8%, 以轻度、中度和重度污染为主, 分别占总天数的39.3%、21.4%和13.1%。WSIIs约占 $PM_{2.5}$ 的39.86%, 其中二次离子(SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 和 NO_3^-)占WSIIs的81.85%, 阴阳离子电荷平衡的线性拟合直线的斜率(AE/CE)大于1(1.09), 表明 $PM_{2.5}$ 偏弱酸性。OC/EC比值为2.53, 说明受二次转化的影响。SP-AMS分析WSOA组分包含 C_xH_y^+ (32.1%)、 $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}^+$ (30.4%)、 $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_2^+$ (25.4%)和 H_3O^+ (4.7%), 其平均氧碳比(O/C)、氢碳比(H/C)、氮碳比(N/C)和有机质-有机碳比(OM/OC)分别为0.72、1.53、0.04和2.15, 高的O/C表明春季光化学反应导致的二次转化贡献较大。正定矩阵因子分析模型(PMF)对WSOA的质谱进行解析得到: 类烃OA(HOA)、半挥发氧化性-生物质燃烧排放OA(SVOOA-BBOA)和低挥发性氧化性OA(LVOOA)3种有机气溶胶, 分别占WSOA总量的18.4%、34.1%和47.4%。

关键词: 细颗粒物($PM_{2.5}$); 黑炭-气溶胶质谱(SP-AMS); 正定矩阵因子分解法(PMF); 水溶性有机气溶胶(WSOA); 源解析
中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0609-11 DOI: 10.13227/j.hj.kx.201907263

Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring $PM_{2.5}$ with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)

HUANG Wen-qian¹, CHEN Yan-tong¹, LI Xu-dong¹, ZHAO Zhu-zi¹, MA Shuai-shuai¹, YE Zhao-lian^{1*}, GE Xin-lei^{2*}

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To investigate the chemical composition and pollution characteristics of spring fine particles ($PM_{2.5}$) in Changzhou, a total of 84 $PM_{2.5}$ samples were collected from March 1st to May 30th, 2017. We measured and analyzed conventional components, such as water-soluble ions (WSIIs) and carbonaceous components (OC and EC). The water-soluble organic aerosol (WSOA) was also analyzed by an aerodyne soot particle aerosol mass spectrometer (SP-AMS). During the sampling period, the average daily $PM_{2.5}$ concentration was $101.97 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, with more than 73.8% sampling days exceeding the Target-2 standard of the national ambient air quality standard of China. The air quality during the sampling period was dominated by light, moderate, and heavy pollution, accounting for 39.3%, 21.4%, and 13.1% of the total days, respectively. The total WSIIs accounted for 39.86% of $PM_{2.5}$ mass, of which secondary ions (SO_4^{2-} , NH_4^+ , and NO_3^-) accounted for 81.85% of the total WSIIs. The slope of the linear fitted line of the anion and cation charge balance (AE/CE) was greater than 1 (1.09), which indicated that $PM_{2.5}$ was weakly acidic. The average OC/EC ratio was 2.53, indicating that $PM_{2.5}$ was influenced by the secondary conversion. WSOA included C_xH_y^+ (32.1%), $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}^+$ (30.4%), $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_2^+$ (25.4%), and H_3O^+ (4.7%) identified by SP-AMS. The average oxygen-to-carbon (O/C), hydrogen-to-carbon (H/C), nitrogen-to-carbon (N/C), and organic matter-to-organic carbon (OM/OC) ratios of the WSOA were 0.72, 1.53, 0.04, and 2.15, respectively. Higher O/C indicated higher contributions from secondary photochemical reaction conversion in spring. Positive matrix factorization (PMF) analysis for AMS mass spectra of WSOA identified three sources, namely hydrocarbon-like (HOA), semi-volatile oxygenated OA (SVOOA)-biomass burning OA (BBOA), and low-volatility oxygenated OA (LVOOA), which on average accounted for 18.4%, 34.1%, and 47.4% of the total WSOA, respectively.

Key words: fine particle ($PM_{2.5}$); soot particle aerosol mass spectrometer (SP-AMS); positive matrix factorization (PMF); water-soluble organic aerosol (WSOA); source apportionment

收稿日期: 2019-07-31; 修订日期: 2019-09-04

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20181476, BK20181048); 国家自然科学基金项目(91544220); 江苏省普通高校专业学位论文研究生实践创新计划项目(SJCX18_0987, SJCX19_0736)

作者简介: 黄雯倩(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气化学及污染控制, E-mail: 15061130535@163.com

* 通信作者, E-mail: bess_ye@jst.edu.cn; caxinra@163.com

中国快速的工业化和城市化进程导致能源消耗持续增长,空气污染逐渐成为严重制约可持续发展和生态文明建设的因素. 空气污染的首要污染物是细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$),其组分特性和来源受到学界的广泛关注^[1~3]. $\text{PM}_{2.5}$ 的化学成分复杂,包括水溶性离子(water-soluble ions, WSIIs)、有机气溶胶(organic aerosol, OA)、元素碳(EC)和微量元素等^[4]. 有机气溶胶是 $\text{PM}_{2.5}$ 中的重要组分,占 $\text{PM}_{2.5}$ 总质量的 20%~90%^[5]. OA 分为一次有机气溶胶(POA)和二次有机气溶胶(SOA). POA 来自生物质燃烧、煤燃烧、汽车尾气排放等一次排放源,SOA 由气态前体物的二次转化形成. 由于 OA 由成千上万的有机物组成,阐明 OA 的组成、化学性质和来源非常有必要.

近年来,气溶胶质谱仪(AMS)由于能够提供高时间分辨率的大气颗粒物化学成分及其粒径谱分布信息,被广泛用于测定气溶胶组分,更重要的是正定矩阵因子分解法(positive matrix factorization, PMF)与 AMS 的 OA 质谱矩阵相结合可以准确识别和量化 OA 来源^[6~8]. 然而,已有的报道中 AMS 通常用于气溶胶的外场观测,少数研究将其应用于离线 OA 分析^[9~12]. 与在线分析相比,离线分析由于滤膜中 OA 浓度高,可以更好地定量 OA 的元素组成(如 C、H、O 和 N)和氧化态,为 OA 的来源提供更准确的依据;此外离线检测无需费时部署观测站点,一定程度上可以扩大 AMS 的应用范围. 因此,AMS 应用于 OA 组分的离线观测,结合离线水溶性离子、碳质组分分析等,可以全面分析 $\text{PM}_{2.5}$ 的特征和来源.

常州地处长江三角洲,以制造业为主. 根据中国环境监测总站发布的城市空气质量状况报告,常州存在显著空气污染,成为长三角地区 25 个监测城市中空气污染最严重的城市之一. 目前针对常州开展的 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分及来源的研究还较少^[13~16],包括质量浓度分布、PAHs 定量分析、水溶性离子的时空分布特征和重金属元素分析. 本课题组也从 2015 年开始开展相关研究^[17,18],主要关注了碳质气溶胶、水溶性离子、类腐殖质等的特征和来源. 同时采用 AMS 离线分析了 2015 年 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性有机气溶胶(WSOA)^[17],然而,当时采集的颗粒物样品较少,代表性弱. 本研究于 2017 年 3~5 月(春季)在常州城郊区连续采集了 3 个月的样品,获得 84 个 $\text{PM}_{2.5}$ 颗粒物,除了分析 WSIIs、OC 及 EC 这些常规组分,利用黑炭-气溶胶质谱仪(SP-AMS)研究了 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性有机气溶胶的化学性质,并利用 PMF 对 WSOA 的来源进行了解析,以期对常州城区大气污染防治提供了详实数据和理论支撑,对长三角地区的发展具有重要的参考价值.

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样点位于常州市区西南部,江苏理工学院 57 号楼 9 层楼楼顶(离地面大约 40 m),紧邻京杭大运河和中吴大道,周围为居民区,无建筑物遮挡. 采用大流量采样器(KB-1000 型,青岛金仕达电子科技有限公司)以 $1.05 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 流量采集 $\text{PM}_{2.5}$ 样品到石英滤膜($20.3 \text{ cm} \times 25.4 \text{ cm}$, Whatman QM-A)上,共收集到 84 个有效 $\text{PM}_{2.5}$ 样品. 采样时间 2017 年 3 月 1 日~5 月 30 日(代表春季),每天采集 22 h. 采样前,将石英滤膜置于 500°C 马弗炉中焙烧 4 h,采样前放置在恒温恒湿干燥箱(温度 22°C , 湿度 45%)中平衡 48 h,用精度为 0.01 mg 的天平称重,然后用铝箔封装储存在 -20°C 低温冰柜中保存待分析.

1.2 样品分析

1.2.1 常规组分分析

将 1/16 的滤膜样本用石英剪刀剪碎放入 60 mL 高密度聚四氟乙烯瓶(美国 Nalgene)中,加入 50 mL 超纯水(电阻率: $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$),每个样品超声提取 45 min,取出摇匀,用一次性针头过滤器(孔径 $0.45 \mu\text{m}$, 直径 13 mm)过滤. 采用离子色谱仪(ThermoFisher, Aquion, USA)对滤液进行分析,最终测定出 12 种水溶性无机离子(F^- 、 Cl^- 、 PO_4^{3-} 、 NO_2^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 Li^+ 、 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}).

水溶性无机离子的具体测定条件可参照文献[18]. 配置稀释后的标准溶液用来确定标准曲线,每种离子标准曲线线性良好,相关系数 r^2 均在 0.99 以上. 用与样品膜同样的提取和前处理过程处理空白膜,且所有水溶性无机离子的浓度均用空白进行修正,用空白膜 3 倍标准偏差作为检出限,12 种离子的检测限均在 $0.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下.

采用热/光反射碳气溶胶分析仪(DRI Model 2001A, 美国沙漠所)测定样品中的 OC 和 EC. 具体方法见文献[18].

1.2.2 SP-AMS 分析 WSOA

1/16 滤膜溶解在 25 mL 超纯水中,用一次性针头过滤器过滤,滤液通过雾化器雾化成颗粒,通过硅胶干燥后送入 SP-AMS(美国 Aerodyne 公司)分析 WSOA. SP-AMS 工作原理:使用特制的空气动力学透镜,将环境空气中的细粒子聚集成束,粒子再经热分解(600°C)和电子轰击离子化(70 eV),最后进入飞行时间质谱仪得到其质谱. 使用基于 Wave Metrics Igor Pro 开发的 ToF-AMS 标准数据分析软件

包 SQUIRREL version 1.56D 和 PIKA version 1.15D 对 SP-AMS 数据进行处理. 根据 SP-AMS 所测得的有机物 MS 谱图数据可以获得 WSOA 的元素组成 (氧碳比 O/C; 氢碳比 H/C; 氮碳比 N/C; 硫碳比 S/C) 及有机质与有机碳比 (OM/OC) 等.

PMF 对 WSOA 进行来源解析时, 将因子数从 1 调整到 7, 并以 0.1 的增量从 -1 增加到 1 改变旋转强迫参数 (f_{peak}), 获得不同因子数下的源解析结果. 对于因子数的识别主要依靠拟合残差大小 (Q/Q_{exp}) 来确定, 选择拟合残差比较低时对应的因子数, 最终确定 $f_{\text{peak}} = 0$ 时, 3 个因子数最合理.

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度及污染状况

观测期间 $\text{PM}_{2.5}$ 的日均浓度变化时间序列如图 1 所示. 从中可知, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度变化范围为 $38.54 \sim 177.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均浓度为 (101.97 ± 35.45)

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 该值与课题组 2016 年采集的常州春季膜样品质量浓度相当 $[(106.0 \pm 24.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]^{[17]}$, 说明近 3 年来常州市空气质量没有明显地改善. 与长三角地区内其他城市如南京 ($117.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[19] 和杭州 ($108.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[20] 浓度水平一致, 但远低于济南 ($169 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[21]. $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化范围较大, 浓度受天气状况影响很大, 晴天或阴天时, 3 月 1 日 ($177.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 3 月 31 日 ($167.36 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 出现重污染, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过了二级标准 ($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的 2 倍以上; 雨天由于湿沉降的去除作用, 5 月 23 日出现谷值 ($38.54 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 远低于标准值.

$\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度为 $0 \sim 35$ 、 $35 \sim 75$ 、 $75 \sim 115$ 、 $115 \sim 150$ 、 $150 \sim 250$ 及 $>250 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 空气质量等级分别为优、良、轻度污染、中度污染、重度污染和超重污染. 春季 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染等级 (不同的颜色区分) 分布特征如图 2 所示. 从中可以看出, 采样期间未出现空气质量为优的天数, 且空气质量为良的天

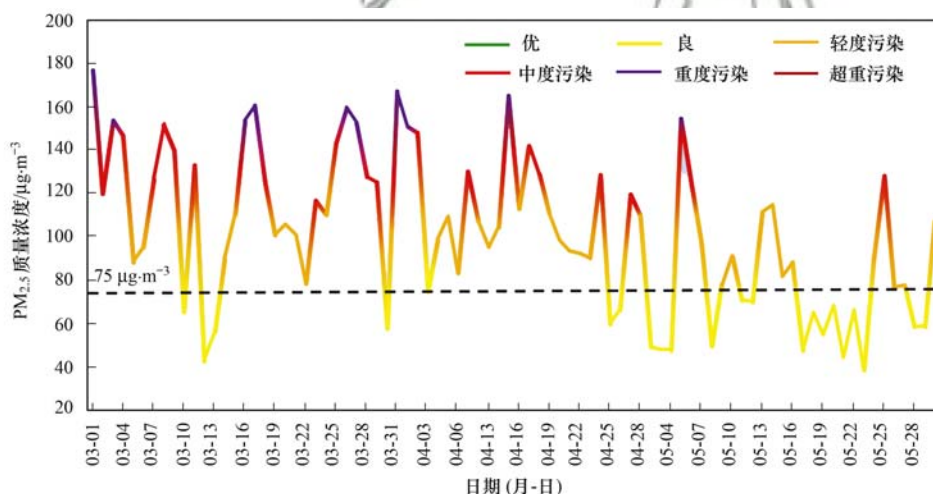


图 1 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的时间变化序列

Fig. 1 Time series of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration

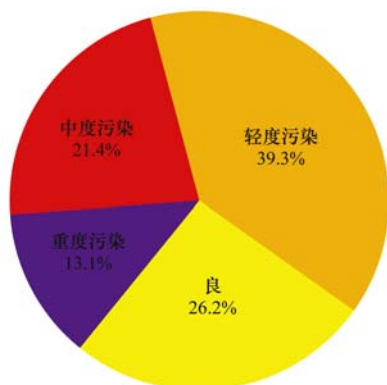


图 2 空气污染等级分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of air pollution levels

数仅占总天数的 26.2%, $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度普遍高于《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 规定的二级日均值标准 ($75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 超标率高达 73.8%, 以轻

度、中度和重度污染为主, 分别占总天数的 39.3%、21.4% 和 13.1%. 可见常州春季 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度水平较高, 空气污染仍处于较高水平.

2.2 水溶性离子分析

2.2.1 水溶性离子浓度及占比

图 3 为 $\text{PM}_{2.5}$ 中 12 种水溶性离子 (WSIIs) 质量浓度及占比时间序列变化, 表 1 为每种离子的日平均质量浓度、变化范围及在总 WSIIs 中的占比. 由表 1 可知, 采样期间总 WSIIs 浓度变化范围为 $16.01 \sim 81.74 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 日均浓度为 $(39.55 \pm 15.21) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 该结果与苏州接近 ($43.95 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[22], 低于北京 ($60.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和天津 ($63.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[23]. 本研究所得到的 WSIIs 浓度水平低于 2016 年常州春季 $[(66.5 \pm 17.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$. 二次离子 NO_3^- 、

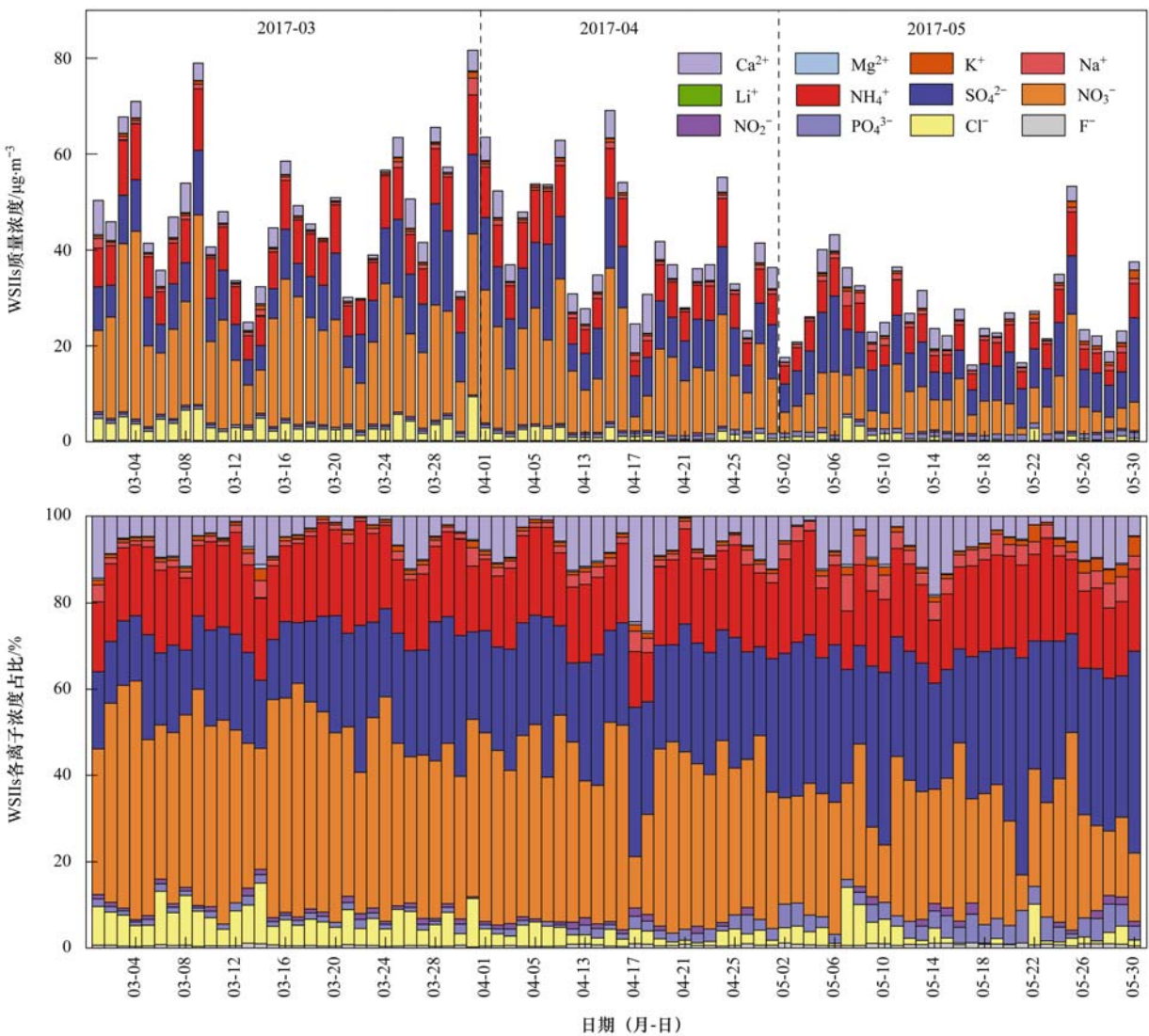


图 3 PM_{2.5} 中水溶性离子浓度及占比时间序列变化

Fig. 3 Temporal variation of water-soluble ion concentrations and contents in PM_{2.5}

表 1 水溶性离子的平均质量浓度及占比

Table 1 Average mass concentration and percentage of water soluble ions

组分	平均值 ± 标准偏差/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	范围/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	比例/%
F ⁻	0.24 ± 0.04	0.18 ~ 0.35	0.60
Cl ⁻	1.91 ± 1.76	0.00 ~ 9.15	4.82
PO ₄ ³⁻	0.76 ± 0.28	0.00 ~ 1.24	1.93
NO ₂ ⁻	0.29 ± 0.20	0.00 ~ 0.58	0.74
NO ₃ ⁻	15.13 ± 9.00	1.34 ~ 39.57	38.25
SO ₄ ²⁻	9.96 ± 3.38	5.10 ~ 21.14	25.18
NH ₄ ⁺	7.28 ± 2.50	3.08 ~ 12.87	18.42
Li ⁺	0.002 ± 0.007	0.00 ~ 0.07	0.005
Na ⁺	0.86 ± 0.50	0.23 ~ 3.53	2.18
K ⁺	0.40 ± 0.27	0.06 ~ 1.65	1.01
Mg ²⁺	0.09 ± 0.06	0.00 ~ 0.31	0.22
Ca ²⁺	2.63 ± 1.77	0.00 ~ 8.17	6.66
∑ WSIs	39.55 ± 15.21	16.01 ~ 81.74	—
∑ WSIs/PM _{2.5} /%	39.86 ± 10.52	17.27 ~ 78.62	—

SO₄²⁻ 和 NH₄⁺ 浓度较高, 随时间变化特征明显, Na⁺、K⁺、PO₄³⁻ 和 NO₂⁻ 等离子质量浓度较低, 随

时间变化的波动范围不大. Ca²⁺ 的平均浓度为 2.63 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占 WSIs 的 6.66%, 受人为活动引起的建

筑和道路扬尘影响较大; Cl^- 的日均浓度为 $1.91 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 占 WSIs 的 4.82%, 主要来自化石燃料燃烧, 可能受附近交通干道汽车尾气排放的影响。

总 WSIs 质量浓度的最大值出现在 3 月 31 日 ($81.74 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 该日为阴天天气, 相对湿度较高 (54%), 温度偏低 (10°C); 最小值出现在 5 月 17 日 ($16.01 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 当天相对湿度较低 (33%), 风速较大 ($4.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 说明风是稀释扩散污染物浓度的重要因素。整体来看, 3、4 月总 WSIs 的质量浓度普遍高于 5 月, 可能是初春时期气温还偏低, 较低的边界层不利于局地污染物的扩散。从图 3 看出, 4 月 17 日和 4 月 18 日的 Ca^{2+} 在 WSIs 中占比很大, 分别达到了 24.39% 和 26.53%, 可能是由于采样期间旁边正在建筑施工, 风速较大使扬尘中 Ca^{2+} 对 PM_{2.5} 贡献增加^[24], 导致这两天大气 WSIs 中 Ca^{2+} 污染较严重。浓度占比可知, 阳离子平均浓度由大到小呈现的规律为 $\text{NH}_4^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Mg}^{2+}$, 阴离子呈现 $\text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{PO}_4^{3-} > \text{NO}_2^- > \text{F}^-$ 的规律, 其中二次离子 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 是 PM_{2.5} 中主要的水溶性离子, 三者浓度之和占总 WSIs 浓度的 81.85%, 说明在观测期间大气污染呈二次污染为主的复合污染特征。同时, 观测期间较高的 Cl^- 浓度说明汽车、煤等燃烧源排放对本地 PM_{2.5} 的贡献较大^[25]。

2.2.2 NH_4^+ (铵盐) 的存在形态及电荷平衡

在环境空气中, NH_4^+ 通常是中和硫酸、硝酸和盐酸的主要化合物。 NH_4^+ 与阴离子最常见的结合方式有 NH_4NO_3 、 NH_4HSO_4 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4Cl 。铵盐在颗粒物中的存在形态可以通过比较 NH_4^+ 的实测浓度 ($\text{NH}_4^+_{\text{meas}}$) 和理论计算浓度 [$\text{NH}_4^+_{\text{pred}} =$

$\left(\frac{\text{NO}_3^-}{62} + \frac{\text{SO}_4^{2-}}{48} + \frac{\text{Cl}^-}{35.5}\right) \times 18$] 来判断^[26], 根据 $\text{NH}_4^+_{\text{meas}}$ 与 $\text{NH}_4^+_{\text{pred}}$ 的相关性和回归斜率值来判断 NH_4^+ 的可能结合方式。由图 4 可知, 本研究中 $\text{NH}_4^+_{\text{meas}}$ 与 $\text{NH}_4^+_{\text{pred}}$ 的线性回归系数 (R^2) 为 0.94, 说明本实验中 NH_4^+ 主要以 NH_4NO_3 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 和 NH_4Cl 的形式存在, 部分 NH_4^+ 可能以 NH_4HSO_4 的铵盐形式存在。拟合斜率远远小于 1, 说明可能存在铵态氮的亏损。原因可能有两个, 一是测定结果不准确, 测量的 NH_4^+ 浓度偏低或者阴离子浓度偏高; 另一个原因是部分 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Cl^- 可能与其它阳离子如 K^+ 、 Na^+ 和 Ca^{2+} 等结合。为了弄清楚原因, 进而计算离子的电荷平衡来分析 PM_{2.5} 酸碱性, 阳离子摩尔当量 (CE, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$) 与阴离子摩尔当量 (AE, $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$) 的平衡公式如下 (由于 Li^+ 浓度太低, 忽略不计):

$$\text{CE} = \frac{\text{Na}^+}{23} + \frac{\text{NH}_4^+}{18} + \frac{\text{K}^+}{39} + \frac{\text{Mg}^{2+}}{12.2} + \frac{\text{Ca}^{2+}}{20} \quad (1)$$

$$\text{AE} = \frac{\text{F}^-}{19} + \frac{\text{Cl}^-}{35.5} + \frac{\text{NO}_2^-}{46} + \frac{\text{NO}_3^-}{62} + \frac{\text{PO}_4^{3-}}{31.7} + \frac{\text{SO}_4^{2-}}{48} \quad (2)$$

根据公式 (1) 和 (2) 计算得到 PM_{2.5} 中阴阳离子电荷平衡分析结果见图 4。从中可知, 线性拟合直线的斜率值 (AE/CE) 为 1.09, 略大于 1, 说明 PM_{2.5} 样品中阳离子仅仅轻微亏损, 验证了 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 Cl^- 可能与其它阳离子如 K^+ 、 Na^+ 和 Ca^{2+} 等结合的推测。同时, 图 3 中阴阳离子较高的相关性 ($r^2 = 0.81$), 测定结果准确, 实验结论可靠。PM_{2.5} 呈现弱酸性, 原因可能是采样点靠近交通主干道, 附近机动车排放的 SO_2 和 NO_x 气态前体物, 经过二次反应生成高浓度的 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 。

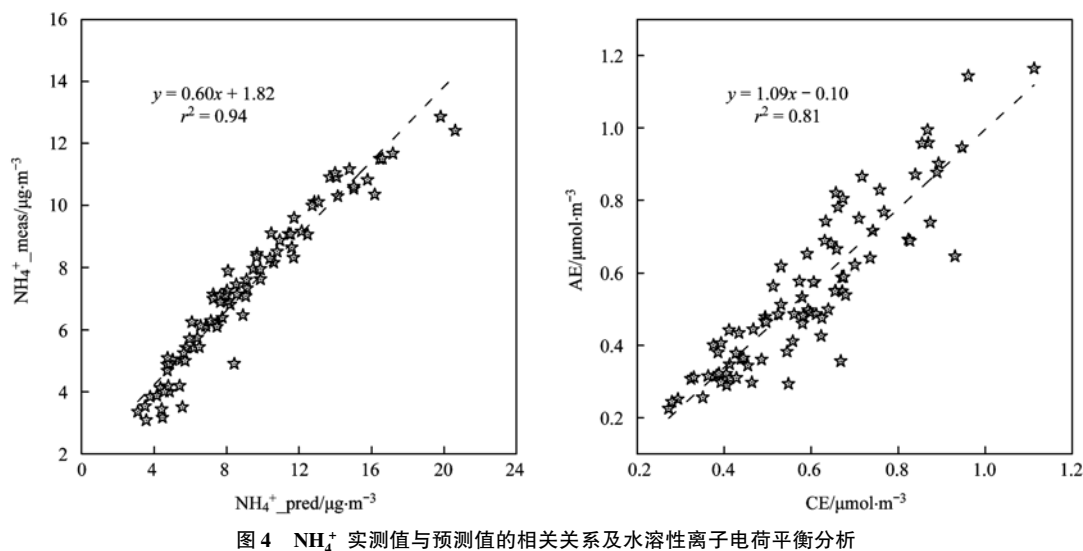


图 4 NH_4^+ 实测值与预测值的相关关系及水溶性离子电荷平衡分析

Fig. 4 Correlations between measured and predicted NH_4^+ concentrations, and charge balance analysis of water soluble ions

2.3 碳质组分(OC 和 EC)分析

图 5 显示了常州春季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OC 和 EC 的浓度、 $\text{OM} = (1.9\text{OC} + \text{EC})/\text{PM}_{2.5}$ 及 OC/EC 比值的时间变化序列. 有研究表明^[27,28], 城市 $\text{PM}_{2.5}$ 中 OM/OC 通常为 1.6, 而城郊等为 2.1. 本研究后续采用 SP-AMS 测定了 WSOA 中 OM/OC 为 2.15, 由于非水溶性 OA 通常为一次源, OM/OC 通常比 WSOA 低, 因此本研究中 OM/OC 采用 1.6 和 2.15 的平均值 1.9. OC 日均浓度变化范围为 $2.46 \sim 24.54 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均浓度为 $11.10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; EC 日均浓度变化范围为 $1.63 \sim 7.83 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均浓度为 $4.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; OM 的日均浓度变化范围为 $6.55 \sim 51.81 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 平均浓度为 $25.55 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, OM 对 $\text{PM}_{2.5}$ 质量贡献 (OM/ $\text{PM}_{2.5}$) 的逐日变化范围为 13.37% ~ 42.84%, 平均占比为 25.73%, 这一数值与大多数城市测定的值 (20% ~ 30%) 接近^[29]. 可见, 碳质组分是常州春季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的重要组分, 同时控制有机物尤其是挥发性有机物 (VOCs)、汽车尾气 NO_x 的排放, 从而控制二次光化学反应导致二次有机气溶胶形成具有重大意义^[30]. 从图 5 中可以看出,

5 月 4 日的 OC 和 OM 质量浓度最低, 浓度分别为 $2.46 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $6.55 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 当天的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度也相对较低 ($47.78 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 风速较大 ($6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 相对湿度较大 (69%), 不利于污染物的聚集. 4 月 15 日的 EC 和 OM 质量浓度最高, 浓度分别为 $7.83 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $51.81 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, OM 浓度值是 5 月 4 日的 7 倍之多; 当天的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度很高 ($165.51 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$), 相对湿度较低 (44%), 风速很小 ($2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), 空气条件稳定不利于污染物的扩散, 霾污染较为严重.

OC 和 EC 的比值可用于评估碳质气溶胶的二次来源贡献. 从图 5 中可以看出采样期间的 OC/EC 基本都大于 2, 整体的变化范围为 1.31 ~ 5.60 (平均值为 2.53), 说明 OC 可能受到光化学反应等二次反应的影响. 与长三角地区碳质气溶胶的相关研究对比, 长三角地区的 OC/EC 比值基本都大于 2. 有研究表明^[31], 机动车排放影响的大气 $\text{PM}_{2.5}$ OC/EC 比值为 1.0 ~ 4.2, 煤炭燃烧排放的 OC/EC 比值为 2.5 ~ 10.5^[32], 推测观测期间采样点受机动车尾气排放影响较大.

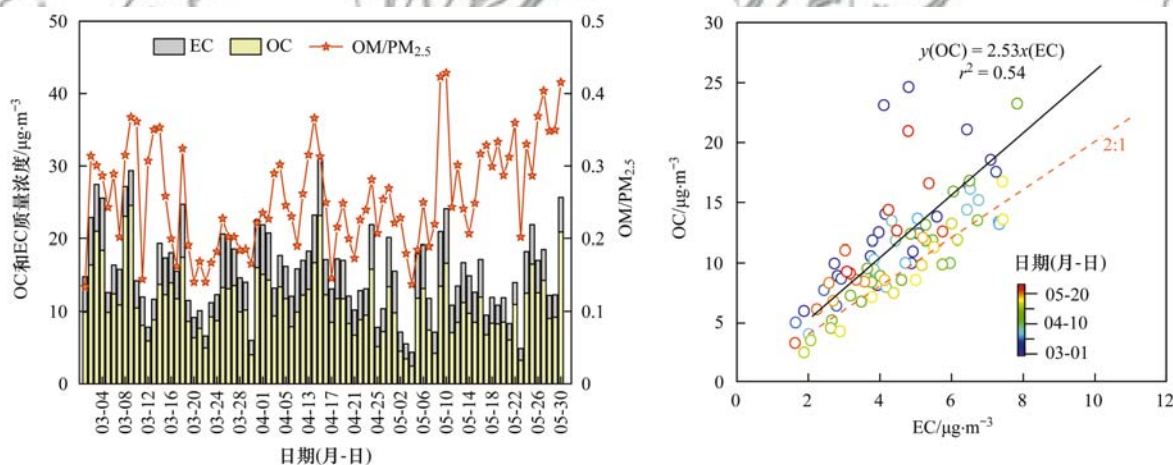


图 5 OC、EC 质量浓度、OM/ $\text{PM}_{2.5}$ 占比的时间序列及 OC 与 EC 的相关性

Fig. 5 Time series of OC and EC mass concentration, OM/ $\text{PM}_{2.5}$ ratio, and correlation of OC vs. EC

2.4 水溶性有机气溶胶 (WSOA) 特征和来源

2.4.1 WSOA 的组分特征分析

上述研究表明, OM 在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的占比较大 (平均 25.73%). 要获得 OM 的成分, 采用分子水平手段往往只能分析出少量的 OM, 例如正构烷烃、多环芳香烃等. 为全面了解大气颗粒物中有机物的特性, 利用 SP-AMS 对 $\text{PM}_{2.5}$ 样品中水溶性组分进行分析, 测得的 84 个样品的平均质谱见图 6. 其中用颜色将 WSOA 的碎片离子区分为 6 类: C_xH_y^+ 、 $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_1^+$ 、 $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_2^+$ 、 H_3O_1^+ 、 $\text{C}_x\text{H}_y\text{N}_p^+$ 和 $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z\text{N}_p^+$, 图中横坐标为离子质荷比 (m/z), 纵坐标为各离子在总信号中归一化占比. 图中占比最高的离子为 $m/z = 44$

(90% 以上为 CO_2^+) 和 $m/z = 28$ (80% 以上为 CO^+), 分别属于 CHO_2^+ 和 CHO_1^+ 离子群, 代表 OA 的氧化程度. 图 6 中饼图为 6 类碎片离子群在 WSOA 中的占比. 从中可知, 含氧离子在质谱中的总信号占比最大, 分别为 $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}^+$ (30.4%)、 $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_2^+$ (25.4%) 和 H_3O^+ (4.7%), 说明 WSOA 组分高度氧化; 碳氢化合物离子 (C_xH_y^+) 占总信号的 32.1%, 其余 7.4% 由含氮离子 $\text{C}_x\text{H}_y\text{N}_p^+$ 和 $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z\text{N}_p^+$ 组成. 根据质谱图, 计算出 WSOA 中元素 C、H、O、N、S 的占比, 其中 C (57.5%) 和 O (33.5%) 为主, H (6.0%)、N (2.8%) 和 S (0.1%) 贡献较小, 元素 S 基本可忽略, 说明有机硫氧化物含量很低.

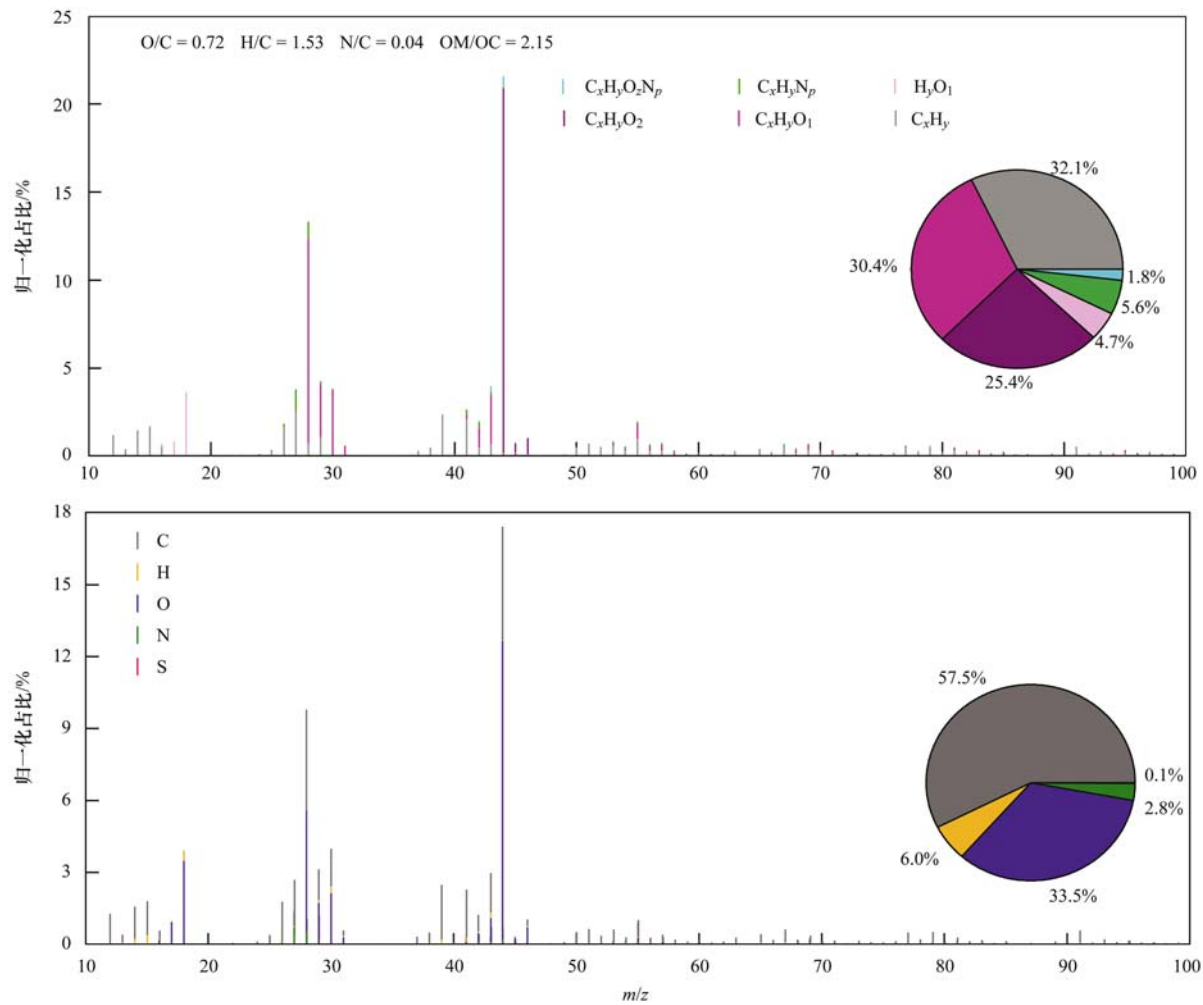


图 6 6 个离子群和 5 个元素 (C、H、O、N 和 S) 占比表示的 averages WSOA 质谱图

Fig. 6 Average WSOA mass spectrum colored according to contributions of six ion categories and five elements (C, O, H, N, and S)

本研究中采集的 84 个 WSOA 样品的元素比 (O/C、H/C、N/C、S/C) 和有机质/有机碳比 (OM/OC) 见图 7。从中可知, O/C、H/C、N/C 和 OM/OC 变化区间分比为 0.47 ~ 0.97、1.43 ~ 1.76、0.03 ~ 0.09 和 1.80 ~ 2.52, S/C 基本接近零, 所有样品

的平均值分别为 0.72、1.53、0.04 和 2.15。AMS 在线测定多个地区颗粒物研究表明^[33, 34], 城区 OA 的 O/C 通常在 0.2 ~ 0.8 之间, OM/OC 在 1.5 ~ 1.8 之间, 郊区或农村 OA 氧化性更高, O/C 和 OM/OC 更高。N/C 平均比值为 0.04, 与北京等其

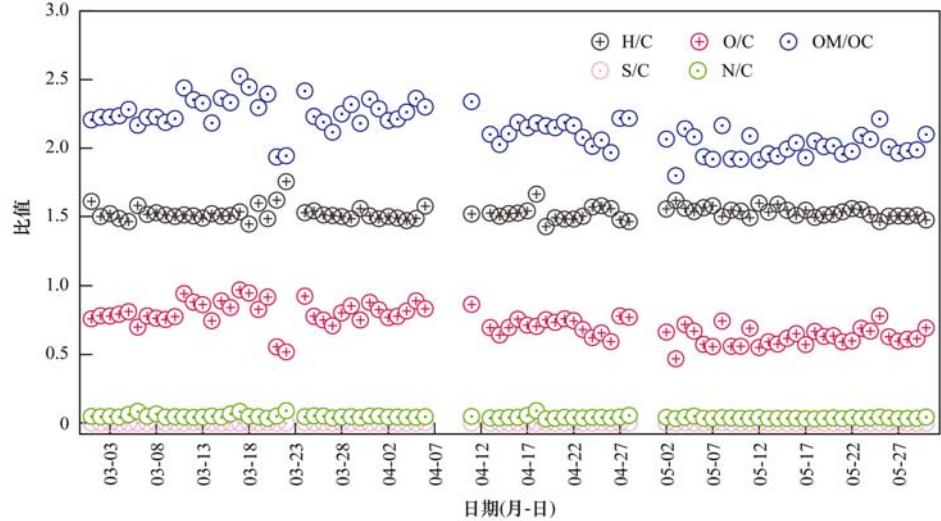


图 7 WSOA 元素比和 OM/OC 时间序列

Fig. 7 Temporal variation of elemental ratios and OM/OC ratio of WSOA

他地区的观测结果一致^[35]. 本研究较高的 O/C 和 OM/OC 表明 WSOA 的氧化程度较高,说明常州春季大气受光化学反应影响较大,导致二次有机气溶胶(SOA)的贡献大. 有研究证实^[36],二次有机气溶胶组分由于氧化程度较高,因此大多数为极性化合物,比一次有机气溶胶更容易溶于水,例如大

气颗粒物中的水溶性有机碳(WSOC)通常来自生物质燃烧和二次转化.

2.4.2 WSOA 来源解析

利用 PMF 对 SP-AMS 得到的 WSOA 质谱图进行解析,共解析出 3 个来源因子,相应的指纹谱(质谱)、元素组成、OM/OC 及每个因子与相关的示踪

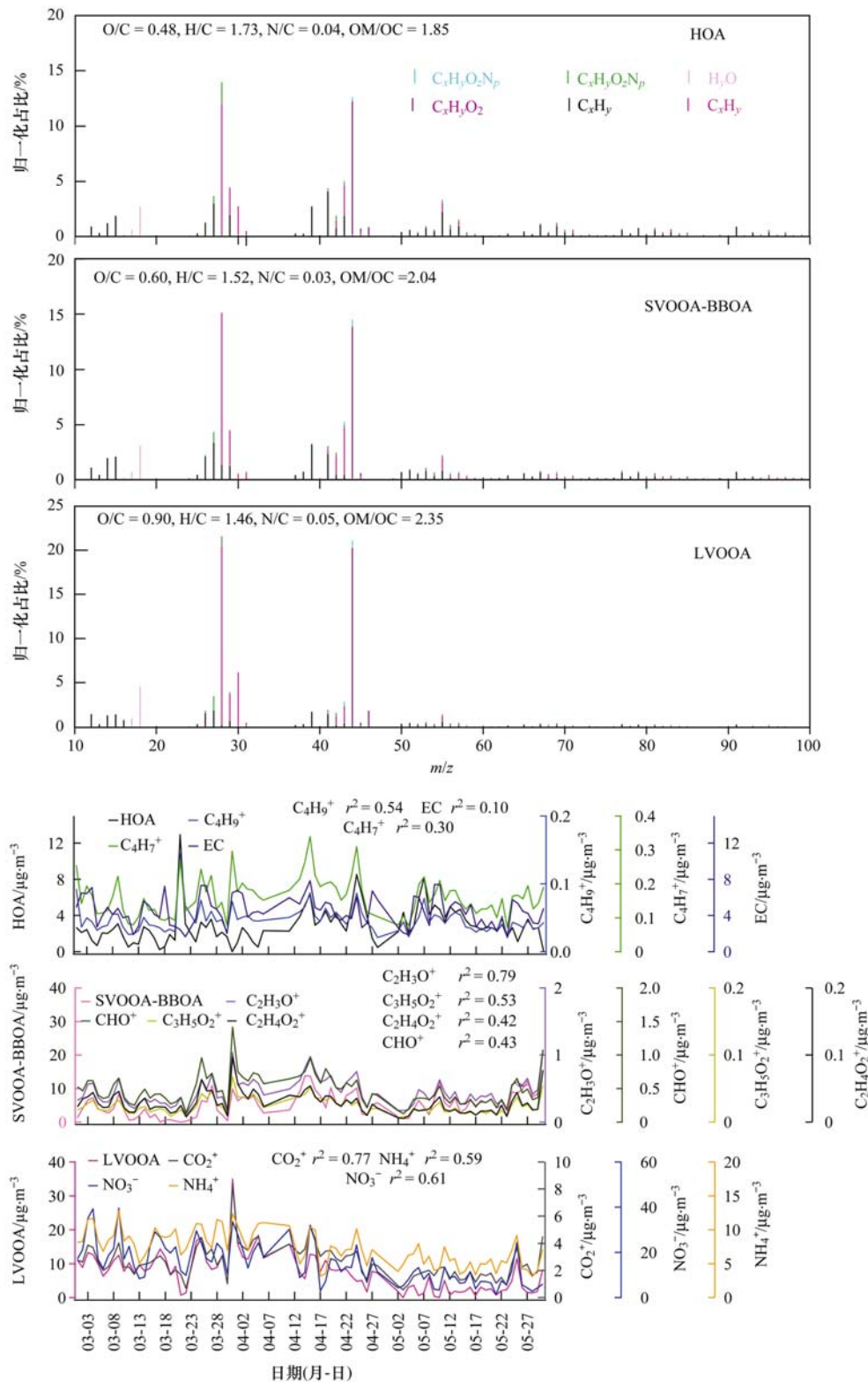


图8 3个 WSOA 因子的指纹图谱(质谱图)及与示踪离子的相关性

Fig. 8 Mass spectra of three WSOA factors identified by PMF, and correlations between factors with relevant tracers

物的日变化规律和相关性见图 8. AMS 谱图中某些离子可以作为源特征离子碎片, 与 PMF 解析的源进行关联可以用于进一步验证 WSOA 的来源. 因子 1 的 O/C、H/C 和 OM/OC 分别为 0.48、1.73 和 1.85, 与 $C_4H_7^+$ ($r^2 = 0.30$) 和 $C_4H_9^+$ ($r^2 = 0.54$) 相关性好. 有研究表明^[37], 含类烃有机气溶胶 (hydrocarbon-like OA, HOA) 通常富含烷基碎片离子 ($C_nH_{2n+1}^+$ 或 $C_nH_{2n-1}^+$), 通常与交通排放、化石燃料燃烧等一次排放源相关. 因子 1 的 O/C 在 3 个因子中最低, 本研究将其归为 HOA, 其 O/C 高于其他城市在线监测的 PM_{2.5} 解析出的 HOA 因子 (0.04 ~ 0.26)^[38]. 然而, 本研究中 HOA 与 EC 相关性不强, 可能是因为本研究测定的是水溶性 OA, 而 EC 通常不溶于水. 因子 2 的质谱图显示了在 CO^+ ($m/z = 28$) 和 CO_2^+ ($m/z = 44$) 的特征峰, 说明其存在大量的含氧有机物. 因子 2 与 $C_2H_3O^+$ 相关性强, 相关系数 r^2 为 0.79, 与 CHO^+ 也具有一定的相关性 ($r^2 = 0.43$), 推断该因子归属于半挥发氧化性 OA (SVOOA); 进一步发现因子 2 质谱图中生物质燃烧源 OA (biomass burning OA, BBOA) 的示踪离子 $C_2H_4O_2^+$ ($m/z = 60$) 和 $C_3H_5O_2^+$ ($m/z = 73$) 的信号值相对较强, 且因子与 $C_2H_4O_2^+$ ($r^2 = 0.42$) 和 $C_3H_5O_2^+$ ($r^2 = 0.53$) 相关性较好, $C_2H_4O_2^+$ 和 $C_3H_5O_2^+$ 为木质素裂解生成的左旋葡聚糖的特征碎片离子^[39]. 因此, 因子 2 为混合的 SVOOA-BBOA, 其 O/C、OM/OC 比值分别为 0.50 和 2.04. AMS 在线观测表明^[40], 有机气溶胶的 O/C 通常呈现: HOA < BBOA < SVOOA < LVOOA.

因子 3 的 O/C 最高 (0.90), CO_2^+ ($m/z = 44$) 的特征峰强度也最高 (超过 20%), 表明它是种低挥发性 OOA (LVOOA), 与示踪剂离子 CO_2^+ 相关性良好, 相关系数 r^2 为 0.77, 且与二次无机离子 NO_3^- ($r^2 = 0.61$) 和 NH_4^+ ($r^2 = 0.59$) 相关性强. 值得说明的是, 本研究测定的 HOA、SVOOA-BBOA 和 LVOOA 的 O/C 值都高于在线观测中^[37]对应的 O/C 值 (HOA: O/C = 0.10, SVOOA: O/C = 0.35, BBOA: O/C = 0.31, LVOOA: O/C = 0.73), 这是由于本次离线测定的是 OA 中水溶性组分, 而水溶性组分中通常二次组分占有很大的比重, 具有更高的 O/C 值, 因此比在线测定的 OA 氧化性更高. 文献也表明, WSOA 的平均 O/C 冬季为 0.61, 夏季为 0.51^[39], 均比在线 OA 测定的结果高.

综上, WSOA 组分包括类烃 OA (HOA)、半挥发氧化性-生物质排放 OA (SVOOA-BBOA) 和低挥发性 OOA (LVOOA).

AMS 谱图中 f44 和 f43, 代表 m/z 44 和 43 分别占总有机物的质量分数, 常用于表征 OA 的氧化程度. 图 9 显示了 3 个因子 (方框表示) 及采样期间所有样品 (圆点表示) 对应的 f44 与 f43 的比对. 从中可知, 大多数数据点都位于三角形区域最左侧, 说明 f44 具有较高的值, 也证实采样期间 WSOA 具有较高的氧化性. HOA、SVOOA-BBOA 和 LVOOA 这 3 个组分的 f44 值分别为 0.13、0.14 和 0.21, 与文献^[33]归纳的多个城市采用 AMS 测定的 f44: HOA (0 ~ 0.05)、SVOOA (0.04 ~ 0.14, 平均 0.07) 及 LVOOA (0.10 ~ 0.25, 平均 0.17) 吻合. HOA、SVOOA-BBOA 和 LVOOA 分别占 WSOA 的 18.4%、34.1% 和 47.4%, 说明 SOA 对 WSOA 的贡献比较高, 这与 2.3 节中得出的 OC/EC (2.53) 较高的结果非常一致, 说明本次观测期间 SOA 占比远高于 POA, OA 的氧化性高, LVOOA 占比高达 47.4%.

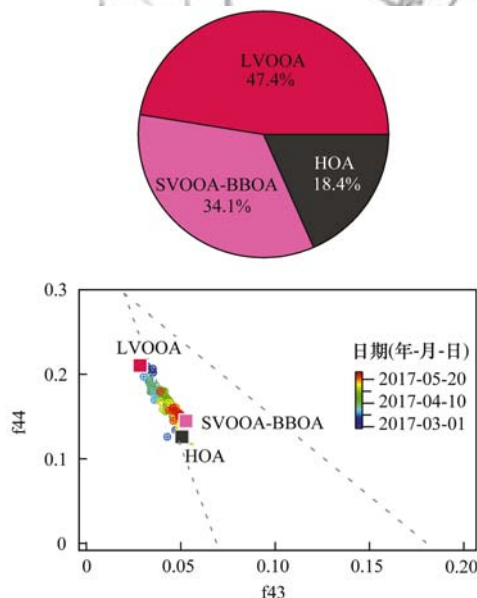


图 9 PMF 解析的 3 个 WSOA 因子的 f44 与 f43 的三角图及质量贡献

Fig. 9 Average mass contributions and f44 vs f43 "triangle plot" of three WSOA components

3 结论

(1) 春季 PM_{2.5} 日均浓度为 $(101.97 \pm 35.45) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 以轻度、中度和重度污染为主, 超标率为 73.8%.

(2) 水溶性离子占 PM_{2.5} 的 39.86%, 其中二次离子 (SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 和 NO_3^-) 占 WSIs 的 81.85%. NH_4^+ 主要以 NH_4NO_3 、 $(NH_4)_2SO_4$ 和 NH_4Cl 的形式存在, 阴阳离子电荷平衡的线性拟合直线斜率 (AE/CE) 为 1.09, 表明 PM_{2.5} 呈现轻微弱酸性. OC/EC 平均值为 2.53, 表明有机气溶胶受二次来源的影响.

(3) AMS 分析 WSOA 成分表明,含氧离子在质谱中的占比较大,分别为 $C_xH_yO^+$ (30.4%)、 $C_xH_yO_2^+$ (25.4%) 和 H_yO^+ (4.7%),而还原性的 $C_xH_y^+$ 仅占 32.1%;相应地,WSOA 的平均 O/C、H/C、N/C 和 OM/OC 分别为 0.72、1.53、0.04 和 2.15,说明 WSOA 组分高度氧化。

(4) PMF 解析 AMS 质谱表明 WSOA 包含 HOA、SVOOA-BBOA 和 LVOOA 这 3 个因子,其占比分别为 18.4%、34.1% 和 47.4%,说明本次观测期间 SOA 对 WSOA 的贡献较大,二次转化对常州春季大气气溶胶污染不容忽视。

参考文献:

- [1] 高杰, 乔利平, 楼晟荣, 等. 上海城区二次气溶胶的形成: 光化学氧化与液相反应对二次气溶胶形成的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(6): 2510-2518.
- Gao J, Qiao L P, Lou S R, *et al.* Secondary aerosol formation in urban Shanghai: insights into the roles of photochemical oxidation and aqueous-phase reaction[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(6): 2510-2518.
- [2] 周雪明, 亓雪娇, 项萍, 等. 北京 APEC 期间大气颗粒物中类腐殖酸的污染特征及来源[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1602-1608.
- Zhou X M, Qi X J, Xiang P, *et al.* Pollution characteristics and source of HULIS in the fine particle during the Beijing APEC[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(5): 1602-1608.
- [3] Gao J J, Tian H Z, Cheng K, *et al.* The variation of chemical characteristics of $PM_{2.5}$ and PM_{10} and formation causes during two haze pollution events in urban Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **107**: 1-8.
- [4] Huang T, Chen J, Zhao W T, *et al.* Seasonal variations and correlation analysis of water-soluble inorganic ions in $PM_{2.5}$ in Wuhan, 2013[J]. *Atmosphere*, 2016, **7**: 49.
- [5] Feng Y L, Chen Y J, Guo H, *et al.* Characteristics of organic and elemental carbon in $PM_{2.5}$ samples in Shanghai, China[J]. *Atmospheric Research*, 2009, **92**(4): 434-442.
- [6] Huang X F, He L Y, Hu M, *et al.* Highly time-resolved chemical characterization of atmospheric submicron particles during 2008 Beijing Olympic Games using an aerodyne high-resolution aerosol mass spectrometer[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(18): 8933-8945.
- [7] Sun Y, Zhang Q, Macdonald A M, *et al.* Size-resolved aerosol chemistry on Whistler Mountain, Canada with a high-resolution aerosol mass spectrometer during INTEX-B[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(9): 3095-3111.
- [8] Zhang Q, Jimenez J L, Canagaratna M R, *et al.* Understanding atmospheric organic aerosols via factor analysis of aerosol mass spectrometry: a review[J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2011, **401**(10): 3045-3067.
- [9] Ge X L, Li L, Chen Y F, *et al.* Aerosol characteristics and sources in Yangzhou, China resolved by offline aerosol mass spectrometry and other techniques[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **225**: 74-85.
- [10] Chen Y T, Chen Y F, Xie X C, *et al.* Chemical Characteristics of $PM_{2.5}$ and water-soluble organic nitrogen in Yangzhou, China[J]. *Atmosphere*, 2019, **10**: 178.
- [11] Daellenbach K R, Bozzetti C, Krepešlová A, *et al.* Characterization and source apportionment of organic aerosol using offline aerosol mass spectrometry[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, **9**(1): 23-39.
- [12] Chen Y F, Ge X L, Chen H, *et al.* Seasonal light absorption properties of water-soluble brown carbon in atmospheric fine particles in Nanjing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **187**: 230-240.
- [13] 蒋少杰, 薛银刚, 滕加泉, 等. 常州市秋季大气 $PM_{2.5}$ 中多环芳烃污染水平及来源[J]. 中国环境监测, 2015, **31**(5): 40-44.
- Jiang S J, Xue Y G, Teng J Q, *et al.* Study on the pollution characteristics and source identification of PAHs on ambient $PM_{2.5}$ in fall of Changzhou[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, **31**(5): 40-44.
- [14] 汤莉莉, 汤蕾, 花艳, 等. 苏南三市秋冬季 $PM_{2.5}$ 中水溶性离子和元素特征及源解析[J]. 大气科学学报, 2015, **38**(5): 686-693.
- Tang L L, Tang L, Hua Y, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble ions and elements in $PM_{2.5}$ in three cities of South Jiangsu in autumn and winter[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2015, **38**(5): 686-693.
- [15] 王强, 戴玄吏, 巢文军, 等. 常州市春季大气 $PM_{2.5}$ 中金属元素的分析及污染特征[J]. 环境工程学报, 2015, **9**(1): 323-330.
- Wang Q, Dai X L, Chao W J, *et al.* Analysis and pollution characteristics of metal elements in $PM_{2.5}$ in Changzhou during spring[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(1): 323-330.
- [16] 王振, 余益军, 徐圃青, 等. 基于快速聚类方法分析常州市区 $PM_{2.5}$ 的统计特性[J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3723-3729.
- Wang Z, Yu Y J, Xu P Q, *et al.* Statistical characteristics of urban Changzhou $PM_{2.5}$ based on k-means analysis[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3723-3729.
- [17] Ye Z L, Liu J S, Gu A J, *et al.* Chemical characterization of fine particulate matter in changzhou, china, and source apportionment with offline aerosol mass spectrometry[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(4): 2573-2592.
- [18] 叶招莲, 刘佳澍, 李清, 等. 常州夏秋季 $PM_{2.5}$ 中碳质气溶胶特征及来源[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4469-4477.
- Ye Z L, Liu J S, Li Q, *et al.* Characteristics and source identification of carbonaceous aerosols in $PM_{2.5}$ measurements during summer and fall in Changzhou[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(11): 4469-4477.
- [19] Li B, Zhang J, Zhao Y, *et al.* Seasonal variation of urban carbonaceous aerosols in a typical city Nanjing in Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **106**: 223-231.
- [20] Liu G, Li J H, Wu D, *et al.* Chemical composition and source apportionment of the ambient $PM_{2.5}$ in Hangzhou, China[J]. *Particuology*, 2015, **18**: 135-143.
- [21] Gu J X, Du S Y, Han D W, *et al.* Major chemical compositions, possible sources, and mass closure analysis of $PM_{2.5}$ in Jinan, China[J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2014, **7**(3): 251-262.
- [22] 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.
- [23] Li X R, Wang L L, Ji D S, *et al.* Characterization of the size-segregated water-soluble inorganic ions in the Jing-Jin-Ji urban agglomeration: spatial/temporal variability, size distribution and sources[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 250-259.
- [24] 张云峰, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 泉州市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子季节变化特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4044-4053.
- Zhang Y F, Yu R L, Hu G R, *et al.* Seasonal variation and source apportionment of water-soluble ions in $\text{PM}_{2.5}$ in Quanzhou City[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4044-4053.
- [25] Ye Z L, Li Q, Liu J S, *et al.* Investigation of submicron aerosol characteristics in Changzhou, China: composition, source, and comparison with co-collected $\text{PM}_{2.5}$ [J]. *Chemosphere*, 2017, **183**: 176-185.
- [26] Zhang Q, Jimenez J L, Worsnop D R, *et al.* A case study of urban particle acidity and its influence on secondary organic aerosol [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(9): 3213-3219.
- [27] Aiken A C, Salcedo D, Cubison M J, *et al.* Mexico City aerosol analysis during MILAGRO using high resolution aerosol mass spectrometry at the urban supersite (T0)-Part 1: fine particle composition and organic source apportionment[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(17): 6633-6653.
- [28] Turpin B J, Lim H J. Species contributions to $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations: revisiting common assumptions for estimating organic mass [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **35**(1): 602-610.
- [29] Feng Y L, Chen Y J, Guo H, *et al.* Characteristics of organic and elemental carbon in $\text{PM}_{2.5}$ samples in Shanghai, China[J]. *Atmospheric Research*, 2009, **92**(4): 434-442.
- [30] Guo S, Hu M, Zamora M L, *et al.* Elucidating severe urban haze formation in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014, **111**(49): 17373-17378.
- [31] Costa V, Bacco D, Castellazzi S, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosols in Emilia-Romagna (northern Italy) based on two fall/winter field campaigns[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **167**: 100-107.
- [32] 黄炯丽, 陈志明, 莫招育, 等. 广西玉林市大气 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中有机碳和元素碳污染特征分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 27-37.
- Huang J L, Chen Z M, Mo Z Y, *et al.* Characteristics of organic and elemental carbon in PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ in Yulin City, Guangxi [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 27-37.
- [33] Aiken A C, Decarlo P F, Kroll J H, *et al.* O/C and OM/OC ratios of primary, secondary, and ambient organic aerosols with high-resolution time-of-flight aerosol mass spectrometry [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(12): 4478-4485.
- [34] Xu J, Zhang Q, Chen M, *et al.* Chemical composition, sources, and processes of urban aerosols during summertime in Northwest China: insights from high-resolution aerosol mass spectrometry [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(23): 12593-12611.
- [35] Sun Y L, Zhang Q, Schwab J J, *et al.* Characterization of the sources and processes of organic and inorganic aerosols in New York city with a high-resolution time-of-flight aerosol mass spectrometer[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(4): 1581-1602.
- [36] 郭松, 胡敏, 尚冬杰, 等. 基于外场观测的大气二次有机气溶胶研究[J]. *化学学报*, 2014, **72**(2): 145-157.
- Guo S, Hu M, Shang D J, *et al.* Research on secondary organic aerosols basing on field measurement[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2014, **72**(2): 145-157.
- [37] Ng N L, Canagaratna M R, Zhang Q, *et al.* Organic aerosol components observed in northern Hemispheric datasets from aerosol mass spectrometry [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(10): 4625-4641.
- [38] Hu W, Hu M, Hu W W, *et al.* Seasonal variations in high time-resolved chemical compositions, sources, and evolution of atmospheric submicron aerosols in the megacity Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(16): 9979-10000.
- [39] Bozzetti C, Sosedova Y, Xiao M, *et al.* Argon offline-AMS source apportionment of organic aerosol over yearly cycles for an urban, rural, and marine site in northern Europe [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(1): 117-141.
- [40] Hu W W, Hu M, Hu W, *et al.* Chemical composition, sources, and aging process of submicron aerosols in Beijing: contrast between summer and winter [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, **121**(4): 1955-1977.

CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, <i>et al.</i> (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, <i>et al.</i> (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, <i>et al.</i> (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, <i>et al.</i> (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, <i>et al.</i> (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, <i>et al.</i> (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, <i>et al.</i> (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, <i>et al.</i> (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, <i>et al.</i> (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, <i>et al.</i> (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohegou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, <i>et al.</i> (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, <i>et al.</i> (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, <i>et al.</i> (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, <i>et al.</i> (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, <i>et al.</i> (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, <i>et al.</i> (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, <i>et al.</i> (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, <i>et al.</i> (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, <i>et al.</i> (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, <i>et al.</i> (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, <i>et al.</i> (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, <i>et al.</i> (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i> (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, <i>et al.</i> (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, <i>et al.</i> (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, <i>et al.</i> (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-yang, LIU Hong-fei, <i>et al.</i> (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, <i>et al.</i> (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, <i>et al.</i> (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, <i>et al.</i> (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, <i>et al.</i> (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, <i>et al.</i> (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, <i>et al.</i> (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, <i>et al.</i> (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, <i>et al.</i> (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, <i>et al.</i> (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, <i>et al.</i> (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, <i>et al.</i> (1005)