环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第44卷 第1期
2023年1月15日

目 次

"大气十条"实施期间南京市 $PM_{2.5}$ 化学组成与来源的演变特征 …… 陈培林, 郭蓉, 王勤耕(1)
河南省北部区域霾污染过程中城市和农村点位 $PM_{2.5}$ 组分差异 …… 王申博, 王玲玲, 范相阁, 王楠, 马双良, 张瑞芹(11)
廊坊市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析 …… 朱淑贞, 佟洁, 鲍丰, 孙浩(20)
天津市采暖季不同气团来向 $PM_{2.5}$ 中重金属污染特征及健康风险评价 …… 李立伟, 邓小文, 肖致美, 元洁, 杨宁, 郭小龙, 白宇(30)
基于多属性决策方法的太原市冬季街道尘土中潜在有害元素关键来源解析 …… 邓文博, 刘文娟(38)
北京市 $PM_{2.5}$-O_3 复合污染数值响应解析 …… 刘添强(48)
长三角区域人为源活性挥发性有机物高分辨率排放清单 …… 田俊杰, 丁祥, 安静宇, 李曼, 王鑫, 黄成(58)
南京北郊工业乡村混合区秋季边界层 VOCs 垂直分布特征 …… 王泰, 朱彬, 施双双, 安俊琳, 唐贵谦, 徐家平(66)
广西柳城县 VOCs 组分特征、来源及其对臭氧生成的敏感性 …… 吴影, 莫招育, 吴琴琴, 陆嘉晖, 毛敬英, 陈雪梅, 粟少丽, 覃纹, 刘慧琳, 韦敏(75)
城市臭氧污染特征与高影响气象因子:以苏州为例 …… 何琰, 林惠娟, 曹舒娅, 宋璟璐, 孙伟, 熊宇(85)
华北平原曲周县人为源氨排放清单及分布特征 …… 康嘉慧, 孟凡磊, 刘学军, 许稳(94)
WRF 模式最优参数化方案在不同空气质量模式的应用 …… 杨景朝, 蒋兴文, 伯鑫, 王刚, 冯勇(104)
西安市春季生物气溶胶的分布特征和健康影响 …… 魏军强, 杨柳, 沈振兴, 王秀茹(118)
青岛近海不同天气下生物气溶胶中细菌浓度及存活率分布特征 …… 魏文淑, 祁建华, 常成(127)
中国沉积物多环芳烃的时空分布及驱动因子 …… 黄柱良, 蔡家伟, 王儒威(138)
长江口近岸地区抗生素抗性基因与微生物群落分布特征 …… 徐秋鸿, 刘曙光, 娄厦, Larisa Dorzhievna Radnaeva, Elena Nikitina, Makhinov Aleksei Nikolavich, Araruna José Tavares, 金宇辰, 李鑫(158)
人类活动影响下的高原湿地四环素类抗生素抗性基因赋存与微生物群落共现性 …… 秦荣, 喻庆国, 刘振亚, 王行(169)
我国东南地区饮用水源地多种农药的赋存特征及健康风险评估 …… 何姝, 董慧峪, 任南琪(180)
珠海市中部主要供水水库沉积物重金属时空分布与风险评价 …… 王恩瑞, 张坤锋, 昌盛, 张茉莉, 付青(189)
苏州水网地区河道底泥的重金属分布特征与污染风险 …… 郑敏慧, 白冬锐, 张涛, 陈坦, 王洪涛, 杨婷, 张冰, 金军(198)
长三角典型城郊流域生物可降解性有机质的分布及影响因素 …… 吴文雨, 马菁晟, 杨磊, 李敏, 唐剑锋(210)
过水性湖泊水质长期演变趋势及驱动因素:以骆马湖为例 …… 黄雪滢, 高鸣远, 王金东, 王明明, 陈思恩, 龚志军, 王腊春, 蔡永久(219)
渭河微塑料污染现状与风险评价 …… 山泽萱, 张妍, 张成前, 时鹏, 张鑫(231)
不同颜色聚碳酸酯塑料对附着藻类生长和群落结构的影响 …… 王梦雪, 尹思成, 王振方, 陈锦贤, 张玮, 王丽卿(243)
苦草叶表附生和水体浮游细菌群落多样性格局及其影响因素 …… 张梅婷, 刘晋仙, 苏嘉贺, 柴宝峰(252)
基于 16S rRNA 测序技术的青藏高原河流细菌群落多样性 …… 璩伟卿, 张博美, 黄雪, 任泽, 高红凯(262)
基于 eDNA 的硅藻群落时空异质性及生态健康评价 …… 姜山, 张颜, 李飞龙, 张效伟(272)
三峡库区澎溪河河段间水华程度差异及其机制 …… 罗晓佼, 张钘, 黄伟, 胡鹏飞, 谭炳圆, 张磊(282)
自然降雨下蔬菜地土壤侵蚀及氮素流失特征 …… 宁嘉丽, 黄艳荟, 李桂芳, 陈钊柱, 王坚桦(293)
绿色、蓝色和蓝-绿屋顶径流水质特征 …… 章孙逊, 张守红, 闫婧, 王恺, 杨航, 王任重远, 张文龙, 李华林(303)
基于地理探测器的山西省 2000~2020 年 NPP 时空变化特征及驱动力分析 …… 邵嘉豪, 李晶, 闫星光, 马天跃, 张瑞(312)
2000~2020 年西南地区植被 NDVI 时空变化及驱动机制探究 …… 徐勇, 戴强玉, 黄雯婷, 盘钰春, 郑志威, 郭振东(323)
青海湖周边地区表层土壤重金属含量和抗性基因丰度及相关性 …… 胡石磊, 瞿剑里, 章丽, 赵美蓉(336)
四川盆地典型农耕区土壤重金属含量、污染及其影响因素 …… 刘属灵, 吴梅, 刘志远, 刘双燕, 刘永林, 赵家宇, 刘怡(347)
宁夏引黄灌区农田土壤重金属生态风险评价及来源解析 …… 陈林, 马琨, 马建军, 王金保, 李虹, 贾彪, 倪细炉, 马进鹏, 梁翔宇(356)
铜冶炼场地周边土壤重金属污染特征与风险评价 …… 彭驰, 刘旭, 周子若, 姜智超, 郭朝晖, 肖细元(367)
西南地区典型土壤酸化特征及其与重金属形态活性的耦合关系 …… 凌云, 刘汉燚, 张小婷, 魏世强(376)
外源 Cd 在不同类型土壤中的稳定化特征 …… 王港, 佘海英, 黄化刚, 张路, 左洪菊(387)
基于有效硒的富硒土壤阈值及有效硒的影响因素 …… 王莹, 马彦斌, 王泽晶(395)
基于成土母质分区的土壤-作物系统重金属累积特征与健康风险评价 …… 陈子万, 许晶, 侯召雷, 彭敏, 杨帆, 陈杰, 徐永强, 杨树云, 李家云, 于林松(405)
贵州省旱地土壤和玉米 As 含量特征及其种植安全性评估 …… 黄凤艳, 周浪, 宋波, 庞瑞, 吴勇, 王佛鹏, 张云霞(415)
象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力 …… 王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 王小燕(426)
1 株高耐性肠杆菌的筛选及对镉、砷同步钝化 …… 尹雪斐, 刘玉玲, 伍德, 黄薪铭, 张朴心, 铁柏清(436)
黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系 …… 朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 苏玉博, 简俊楠, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉(444)
设施农业土壤磷素累积迁移转化及影响因素 …… 方兵, 陈林, 王阳, 祝亚飞, 王瑞, 宋桂芳, 刘俊, 杨斌, 张世文(452)
优化秸秆管理提高麦玉农田碳氮效率与经济效益 …… 王良, 钱欣, 高英波, 张慧, 刘开昌, 陈国庆, 李宗新(463)
缓控释肥深施对黏性土壤麦田氮素去向的影响 …… 侯朋福, 薛利祥, 袁文胜, 曹帅, 刘颖多, 薛利红, 杨林章(473)
黄河下游冲积平原轮作休耕农田土壤真菌群落结构与功能 …… 南镇武, 刘柱, 孟维伟, 代红翠, 徐杰, 王娜, 刘灵艳, 王旭清, 刘开昌(482)
红壤区退化林地表土真菌群落结构对土壤改良措施的响应 …… 管鸿智, 黄荣珍, 王金平, 朱丽琴, 邹显花, 姬绍晖, 林丽靖, 房焕英, 杨梦佳, 廖迎春(494)
半干旱-亚湿润干旱沙区樟子松根内真菌群落结构和功能时空动态特征 …… 赵珮杉, 郭米山, 高广磊, 丁国栋, 张英, 任悦(502)
基于 QMEC 分析的青藏高原不同类型冰川前缘地土壤微生物功能潜力 …… 张洁洁, Anders Priemé, 陈显轲, 周汉昌, 张沁唯, 庄绪亮, 秦翔, 庄国强, 马安周(512)
中国主粮作物生物炭产量效应的 Meta 分析 …… 于滨杭, 姬建梅, 王丽学, 刘静, 高欢, 刘丹(520)
生物炭影响抗生素在土壤中环境行为的 Meta 分析 …… 李经涵, 张建强, 夏丽琼, 郑世界, 杨红薇, 何杨(531)
不同农作物秸秆原料制备生物炭特性及重金属浸出行为 …… 李家康, 邱春生, 赵佳奇, 王晨晨, 刘楠楠, 王栋, 王少坡, 孙力平(540)
中国县域碳排放时空演变与异质性 …… 宋苑震, 曾坚, 王森, 梁晨(549)
近 20 年重庆市主城区碳排放的时空动态演进及其重心迁移 …… 向书江, 杨春梅, 谢雨琦, 王丹, 王子芳, 高明(560)
中国 1991~2018 年突发环境事件时空特征及影响因素 …… 佘光辉, 王非凡, 刘贤赵, 李文慧, 向云波(572)
季铵盐抗菌剂在环境中的迁移转化行为及其毒性效应 …… 张利兰, 覃存立, 钱瑶, 易美玲(583)

《环境科学》征订启事(29) 《环境科学》征稿简则(57) 信息(443, 481, 530)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第44卷第1期 2023年1月
Vol.44, No.1 Jan., 2023

“大气十条”实施期间南京市 $PM_{2.5}$ 化学组成与来源的演变特征

陈培林[1], 郭蓉[1], 王勤耕[1,2*]
(1. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023; 2. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 为深入认识“大气污染防治行动计划”(“大气十条”)对大气细颗粒物($PM_{2.5}$)污染的影响,基于“大气十条”实施期间南京市主城区(草场门)$PM_{2.5}$的化学组分监测资料,研究了 $PM_{2.5}$ 主要组分的浓度和占比、富集因子和酸度等变化特征,并采用正定矩阵因子分解法(PMF)进行了 $PM_{2.5}$ 的来源解析. 结果发现,“大气十条”实施期间,南京市 $PM_{2.5}$ 中硫酸根(SO_4^{2-})的占比总体下降,但硝酸根(NO_3^-)和铵根(NH_4^+)的占比均明显上升,两者的占比从 2014 年的 25.58% 上升到 2017 年的 37.15%; 碳组分(OC 和 EC)的浓度在“大气十条”早期出现大幅下降,但后期的下降趋势明显变缓,其中,有机碳(OC),特别是二次有机碳(SOC)的占比不降反升; $PM_{2.5}$ 酸性显著减弱,阴阳离子的摩尔当量比值(CE/AE)从 2014 年的 0.83 上升到 2017 年的 1.13; 燃煤、冶金和石化等污染源排放对 $PM_{2.5}$ 的贡献率总体呈下降趋势,然而,机动车的贡献率快速上升,从 2014 年的 8.78% 增长到 2017 年的 13.92%; 扬尘的贡献波动较大,其中,土壤扬尘的贡献率呈现上升态势. 结果表明,“大气十条”实施期间,燃煤和工业等污染源的 $PM_{2.5}$ 直接排放得到了有效控制,但二次气溶胶的贡献日益突出,大力开展 NO_x、NH_3 和 VOCs 等前体物的减排是未来 $PM_{2.5}$ 控制的重点. 另外,颗粒物碱性化和大气氧化性增强对于 $PM_{2.5}$ 污染的影响也需要进一步关注.

关键词:细颗粒物; 源解析; 颗粒物酸度; 富集因子; “大气污染防治行动计划”(APPCAP)
中图分类号: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2023)01-0001-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202204060

Evolution of $PM_{2.5}$ Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP

CHEN Pei-lin[1], GUO Rong[1], WANG Qin-geng[1,2*]
(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resources Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To acquire a deeper understanding about the impact of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan (APPCAP) on ambient fine particulate matter ($PM_{2.5}$), measurements of $PM_{2.5}$ chemical components were conducted in the urban area of Nanjing during the implementation of the APPCAP. Evolution characteristics of several properties of the $PM_{2.5}$ were studied, including the concentrations, proportions, and enrichment factors of major $PM_{2.5}$ components and the acidity of the $PM_{2.5}$. In addition, the source apportion of the $PM_{2.5}$ was analyzed using the positive matrix factorization (PMF) model. The results showed that during the implementation of the APPCAP, the proportion of sulfate (SO_4^{2-}) in $PM_{2.5}$ decreased, whereas the proportions of nitrate (NO_3^-) and ammonium (NH_4^+) increased significantly together, from 25.58% in 2014 to 37.15% in 2017. The concentrations of carbon components (OC and EC) decreased in the early stage of the APPCAP; however, the decreasing trend slowed down in the later stage. In particular, the proportion of organic carbon (OC) increased, especially for the secondary organic carbon (SOC). The acidity of the $PM_{2.5}$ decreased significantly, with the molar equivalent ratio of cations and anions increasing from 0.83 in 2014 to 1.13 in 2017. The contributions of coal combustion and the metallurgical and petrochemical industry to the $PM_{2.5}$ generally showed a downward trend, whereas the contribution of vehicle emissions increased rapidly, from 8.78% in 2014 to 13.92% in 2017. The contribution of general fugitive dust fluctuated greatly, but that of soil fugitive dust showed an upward trend. This study suggested that the direct $PM_{2.5}$ emissions, such as those from coal combustion and industries, were effectively controlled during the implementation of the APPCAP; however, the contribution of secondary aerosols became increasingly prominent, which indicates that future policies of $PM_{2.5}$ pollution control should focus on emission reduction of the precursors such as NO_x, NH_3, and VOCs. In addition, the effects of increasing alkalization of the $PM_{2.5}$ and enhanced oxidizability of the atmosphere on the $PM_{2.5}$ pollution also require further attention.

Key words: fine particulate matter; source apportionment; acidity of fine particles; enrichment factor; Air Pollution Prevention and Control Action Plan (APPCAP)

大气细颗粒物($PM_{2.5}$)是影响我国城市环境空气质量的主要污染物. 其化学组分一般包括水溶性离子(WSI)、有机碳(OC)、元素碳(EC)和金属元素等[1]. 有研究表明,硫酸根(SO_4^{2-})、硝酸根(NO_3^-)、铵根(NH_4^+)和含碳组分(OC 和 EC)是 $PM_{2.5}$ 的主要组分[2]. $PM_{2.5}$ 的来源复杂,包括各种人为活动和自然过程的直接排放(一次来源)和多种气态前体物在物理化学过程中的转化(二次来源). 由于人为活动和自然环境的变化,$PM_{2.5}$ 的化学组成和来源也随之改变. 深入研究它们的变化特征对于进一步认识 $PM_{2.5}$ 的污染成因,评估当前控制措施的有效性,调整和优化未来的污染防控对策等均具有

收稿日期: 2022-04-06; **修订日期**: 2022-04-28
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0208504)
作者简介: 陈培林(1996~), 男,博士研究生, 主要研究方向为大气复合污染特征及来源解析,E-mail:2296272892@qq.com
* 通信作者,E-mail:wangqg@nju.edu.cn

重要意义.

2013 年,为应对严重的 $PM_{2.5}$ 污染问题[3],国务院发布了“大气污染防治行动计划”(“大气十条”),从产业结构调整、能源清洁利用、机动车污染防治、企业污染控制和环境监管能力等多个方面提出了具体的要求和措施,并针对不同区域提出了 2017 年 $PM_{2.5}$ 环境浓度的下降目标[4]. 从 2013 ~ 2017 年,全国 74 个重点城市 $PM_{2.5}$ 的年平均浓度下降了 35.0%,其中京冀津、长三角和珠三角地区分别下降 39.6%、34.3% 和 27.7%[3,5],超额完成了“大气十条”的预期目标.

在 $PM_{2.5}$ 总体浓度水平快速下降的同时,其化学组成和来源也必然随之发生显著变化. 针对“大气十条”实施期间 $PM_{2.5}$ 的长期变化特征,王跃思等[6]基于 CARE-China 观测网的大气颗粒物化学成分数据,结合环境空气质量常规监测数据,研究了 2013 ~2017 年间全国重点区域(主要包括京津冀、珠三角、成渝地区和汾渭平原)化学组分演变特征,结果表明,有机物(OM)、EC、SO_4^{2-}、NO_3^- 和 NH_4^+ 等浓度总体呈下降趋势,秋冬季重污染期间,SO_4^{2-} 和 OM 质量浓度下降明显. Yang 等[7]在北京连续采集了 2013 ~2017 年间冬季 $PM_{2.5}$ 样本,并利用二维硅指纹法研究了 $PM_{2.5}$ 一次和二次来源的年际演变,结果发现燃煤和工业排放和二次气溶胶对冬季 $PM_{2.5}$ 的贡献显著减少,机动车排放则呈上升态势. 除此之外,还有一些研究者针对“大气十条”实施期间个别年份的 $PM_{2.5}$ 组分和来源特征进行了分析,如 Gao 等[2]研究了 2014 年京津冀地区 4 个典型城市(北京、天津、廊坊和保定)$PM_{2.5}$ 的组分和来源特征,揭示了 $PM_{2.5}$ 的浓度和其主要化学组分在京津冀地区表现出空间相似性,机动车排放、燃烧源、土壤扬尘和建筑粉尘是 4 个典型城市 $PM_{2.5}$ 的主要来源. Ming 等[8]研究了 2013 年和 2014 年长三角 4 个城市(上海、南京、杭州和宁波)$PM_{2.5}$ 浓度和组分的季节变化,并评估了污染日和非污染日空气中痕量金属的生物有效性. Zou 等[9]则针对珠三角典型城市东莞市,研究了 2013 和 2014 年 $PM_{2.5}$ 的组分和来源特征,结果发现有机物是该市 $PM_{2.5}$ 最主要的组分,机动车排放、二次硫酸盐、生物质燃烧和二次有机气溶胶(SOA)为主要来源.

总体来说,当前对于“大气十条”实施期间我国城市 $PM_{2.5}$ 化学组分和来源长期变化特征的研究还很不充分,现有相关研究主要集中在京津冀地区,针对长三角地区典型城市的相关研究明显缺乏. 南京是长三角地区的重要城市,“大气十条”实施后,空气质量显著改善,$\rho(PM_{2.5})$ 年平均值从 2013 年的 77 $\mu g \cdot m^{-3}$[10] 下降到 2020 年的 31 $\mu g \cdot m^{-3}$[11]. 本文主要基于 2013 ~2017 年南京市草场门环境空气质量国控监测站的 $PM_{2.5}$ 化学组分监测数据,研究 $PM_{2.5}$ 化学组成和来源的变化特征,并探讨“大气十条”相关政策措施的影响和有效性,以期为未来更好地制定 $PM_{2.5}$ 的污染防治政策和措施提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 $PM_{2.5}$ 样品采集和化学组分分析

本研究的 $PM_{2.5}$ 采样点位于南京市鼓楼区草场门环境空气质量监测国控站,具体位置如图 1 所示. 该站点位于南京市主城区中部,人口集中,周边 5 km 内主要为居民生活和交通设施用地,没有工业污染源,可以较好地代表城市中心区的典型特征.

图 1 南京主城区 $PM_{2.5}$ 采样点示意

Fig. 1 Location of the $PM_{2.5}$ sampling site in the urban area of Nanjing

从 2011 ~2017 年,草场门监测站开展了 $PM_{2.5}$ 样品采集和组分分析. 选择各季节的典型月份开展采样,每个季节至少采集 15 个有效样品,每个样品的采样时间为 22 h(从 10:00 至第 2 d 08:00). 使用美国热电(RP-2300)四通道采样器[12]进行采样,同时安装两张特氟龙滤膜和两张石英滤膜. 特氟龙滤膜用于分析金属元素和水溶性离子,石英滤膜用于分析碳组分. 采样前,将石英滤膜置于马弗炉中高温灼烧 5 h,以去除滤膜中的有机杂质的影响. 冷却后置于恒温恒湿箱中平衡至少 24 h. 水溶性离子采用离子色谱法进行分析,OC 和 EC 使用美国沙漠研究所开发的 DRI Model 2001 热光碳分析仪进行测定,金属元素采用美国 Agilent7500cx 电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定. 上述样品采集和化学分析的流程和质量控制方法参照有关技术标准[13~16]和文献[17]进行.

从 2011 ~2017 年共采集了 408 个有效样本. 其

中 2011 年采集了 8 月和 11 月有效样本共 36 个；2012 年采集了 1、3 和 8 月样本共 50 个；2013 年采集了 8 月样本共 24 个；2014 年采集了 1、4、8 和 10 月样本共 74 个；2015 年采集了 1、4 和 8 月样本共 60 个；2016 年采集了 1、4、8 和 11 月样本共 81 个；2017 年采集了 2、5、8 和 11 月样本共 83 个. 由于受到监测条件等因素的限制，未能完全针对各年 4 个季节的典型月份开展 $PM_{2.5}$ 的采样和分析. 考虑到监测数据的代表性，本研究主要基于 2014、2016 和 2017 这 3 个年份的资料开展分析. 这 3 个年份的资料具有较高的完整性和可比性，也能够较好地反映“大气十条”实施期间（2013 ~ 2017 年）的变化特征. 为了反映有关特征的季节变化，本研究采用 2016 和 2017 年的平均值，这样既能有足够的样本量，也可避免年份跨度过长带来的不确定性. 另外，本研究中还采用了草场门国控站 $PM_{2.5}$、SO_2 和 NO_2 等常规污染物浓度的自动监测结果.

1.2　$PM_{2.5}$ 化学组分质量重构和 SOC 的估算

为了深入分析 $PM_{2.5}$ 的组成特征，同时可以和 $PM_{2.5}$ 质量浓度自动监测结果进行直接对比，本研究基于 $PM_{2.5}$ 化学组分监测结果，对 $PM_{2.5}$ 的总体质量浓度进行重构. 由于目前尚不能对颗粒有机物（OM）、微量金属氧化物（TEO）和部分土壤矿物质（CM）进行直接（或准确）测量，本研究按以下方法进行近似计算：

OM 的质量通过有机碳（OC）来估算，公式如下：

$$OM = 1.68 \times OC \tag{1}$$

式中 1.68 为 OM 和 OC 的质量比值，依据 Xing 等[18]对中国 14 个城市的气溶胶中 OM 和 OC 的质量比值的研究结果.

TEO 的估算采用以下公式[19]：

$$TEO = 1.3 \times [0.5 \times (Sr + Ba + Mn + Co + Rb + Ni + V) + 1.0 \times (Cu + Zn + Mo + Cd + Sn + Sb + Tl + Pb + As + Se + Ge + Cs + Ga)] \tag{2}$$

CM 的估算参考 Zhang 等[19]提出的方法：

$$CM = Al/0.07 \tag{3}$$

式中，0.07 为土壤尘中铝元素的平均占比.

另外，采用 EC 示踪法[20]将 OC 区分为一次有机碳（POC）和二次有机碳（SOC），计算公式如下：

$$POC = EC \times (OC/EC)_{min} \tag{4}$$

$$SOC = OC - SOC \tag{5}$$

式中，$(OC/EC)_{min}$ 为采样期间 OC/EC 的最小值. Ho 等[21]的研究指出，$(OC/EC)_{min}$ 将受到气象因素和污染源分布的影响，因此本研究选取不同季节对应的 $(OC/EC)_{min}$ 计算 SOC.

1.3　富集因子法

富集因子（EF）通常作为区分金属元素人为来源和自然来源相对重要性的一个重要指标，可用于表征化学元素的人为污染程度[22]. EF 的计算公式如下：

$$EF = (c_i/c_r)_{smple}/(C_i/C_r)_{crust} \tag{6}$$

式中，$(c_i/c_r)_{smple}$ 为样品中目标元素浓度相对于参考元素浓度的比值，而 $(C_i/C_r)_{crust}$ 为地壳中目标元素含量相对于参考元素含量的比值[23]. 由于 Al 在地壳中的含量丰富，并且在人为源中具有较好的稳定性[24]，本研究选取 Al 作为参考元素. 背景含量则参考廖启林等[25]的研究成果. 若目标元素的 EF 小于 1，则表明其主要来自土壤；若 EF 大于 10，则表明其主要来自人为活动；若 EF 在 1 ~ 10 之间，则表明总体上受到自然源和人为源的共同影响.

1.4　颗粒物酸度、SOR 和 NOR 的计算方法

颗粒物的酸度是影响颗粒物异相反应、吸湿性增长、毒性和酸雨中和过程的关键参数. 本研究采用阳离子当量（CE）和阴离子当量（AE）的量比来确定气溶胶的酸度[26]，计算公式如下：

$$CE = \frac{NH_4^+}{18} + \frac{K^+}{39} + \frac{Na^+}{23} + \frac{Ca^{2+}}{20} + \frac{Mg^{2+}}{12} \tag{7}$$

$$AE = \frac{SO_4^{2-}}{48} + \frac{NO_3^-}{62} + \frac{Cl^-}{35.5} \tag{8}$$

CE/AE 越大则表明颗粒物的酸性越弱.

本研究采用 SOR 和 NOR 分别表征 SO_2 和 NO_x 向硫酸盐和硝酸盐的转化速率，计算公式如下[27]：

$$SOR = SO_4^{2-}/(SO_4^{2-} + SO_2) \tag{9}$$

$$NOR = NO_3^-/(NO_3^- + NO_2) \tag{10}$$

1.5　正定矩阵因子分解法

正定矩阵因子分解法（positive matrix factorization，PMF）[28, 29]已广泛用于环境 $PM_{2.5}$ 来源解析[30,31]. 在该模型中，n 个样本和 m 个物种的浓度数据构成一个 $n \times m$ 的矩阵 $\boldsymbol{x}$. 第 i 个样品中第 j 个物种的观测浓度 $\boldsymbol{x}_{ij}$ 可用以下公式表示：

$$\boldsymbol{x}_{ij} = \sum_{k=1}^{p} \boldsymbol{g}_{ik} \times \boldsymbol{f}_{kj} + \boldsymbol{e}_{ij} \tag{11}$$

式中，p 为因子的数量；k 表示第 k 个因子；$\boldsymbol{g}_{ik}$ 为第 i 个样本中第 k 个因子的贡献；$\boldsymbol{f}_{kj}$ 为第 k 个因子中第 j 个组分质量浓度占比；$\boldsymbol{e}_{ij}$ 为第 i 个样品中物种 j 的测量浓度和其分析值之间的残差. 模型的求解目标是计算出源谱矩阵 $\boldsymbol{f}$ 和贡献矩阵 $\boldsymbol{g}$. $\boldsymbol{g}_{ik}$ 和 $\boldsymbol{f}_{kj}$ 的解是通过最小化目标函数 Q 得出的，其定义如下：

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \left[\frac{\boldsymbol{x}_{ij} - \sum_{k=1}^{p} \boldsymbol{g}_{ik} \times \boldsymbol{f}_{kj}}{\boldsymbol{u}_{ij}} \right] \tag{12}$$

式中，u_{ij}为第 i 个样本中第 j 个样本的不确定性，它是 PMF 的重要输入，计算方式如下[32].

当物种浓度小于或等于检出限时：

$$u_{ij} = (5/6) \times \mathrm{MDL} \quad (13)$$

当物种浓度大于检出限时：

$$u_{ij} = \sqrt{(\mathrm{EF} \times x_{ij})^2 + (0.5 \times \mathrm{MDL})^2} \quad (14)$$

式中，MDL 为各 $PM_{2.5}$ 组分的检出限，EF 为误差系数，本研究参考相关研究取 0.1[33].

2 结果与讨论

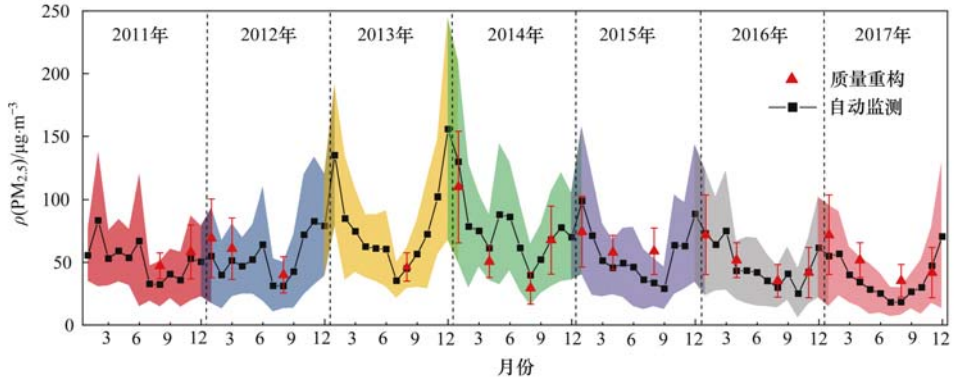
2.1 基于 $PM_{2.5}$ 化学组分的质量重构结果及其与在线监测结果的对比

为了全面了解 $PM_{2.5}$ 整体组分构成特征，同时验证 $PM_{2.5}$ 化学组分监测结果的可靠性，本研究采用 1.2 节所述方法，基于 $PM_{2.5}$ 化学组分监测结果对其质量浓度进行了重构. 图 2 给出了 2011～2017 年间重构的 $PM_{2.5}$ 浓度月平均值及其与自动监测结果的对比，可以看出，两者的时间分布特征基本一致. 统计分析结果表明，两种方法得到的日均浓度相关系数为 0.85. 在相同时间内，化学重构和自动监测得到总体的 $\rho(PM_{2.5})$ 平均值分别为 51.99 μg·m^{-3} 和 50.54 μg·m^{-3}，相对误差平均值为 26.17%；对春、夏、秋和冬季这 4 个季节来说，化学重构的 $\rho(PM_{2.5})$ 平均值分别为 52.40、38.64、52.57 和 71.94 μg·m^{-3}，自动监测的 $\rho(PM_{2.5})$ 平均值分别为 42.03、34.00、52.80 和 81.27 μg·m^{-3}，两者的相对误差分别为 30.80%、28.44%、22.71% 和 21.65%. 由此可见，化学重构浓度和自动监测结果基本一致. 另外，就采样时间段选择的代表性而言，自动监测春、夏、秋和冬季完整季节的 $\rho(PM_{2.5})$ 平均值分别为 54.63、40.61、53.46 和 79.87 μg·m^{-3}，对应季节典型时间段内的 $\rho(PM_{2.5})$ 平均值分别为 52.40、38.64、52.57 和 71.94 μg·m^{-3}，两者基本吻合. 这也在一定程度上反映了本研究的采样时间选取和 $PM_{2.5}$ 化学组分监测结果具有较强的代表性和可靠性.

另外，从图 2 还可以看到，$\rho(PM_{2.5})$ 在 2013 年达到最高（年平均值为 78.70 μg·m^{-3}），此后逐年快速下降，平均幅度约为每年 10.10 μg·m^{-3}，2017 年的 $\rho(PM_{2.5})$ 为 38.30 μg·m^{-3}. 这表明“大气十条”的实施对南京市 $PM_{2.5}$ 污染控制起到了重要作用，但仍未达到《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）二级标准[34]. 从季节变化看，$PM_{2.5}$ 浓度冬季最高，春季和秋季次之，夏季最低. 2013 年之后，冬季和春季的浓度下降显著，夏季和秋季的降幅略小，这可能是由于“大气十条”实施期间对冬季和春季 $PM_{2.5}$ 污染高发期进行了重点管控. 值得注意的是，2014 年夏季（“青奥会”期间）$PM_{2.5}$ 浓度略高于 2013 年同期水平，在严格的临时管控措施下，$PM_{2.5}$ 浓度不降反升可能是由于不利的天气条件所致[35]. 此外，Ji 等[36]的研究发现，“大气十条”实施后期，相对有利的气象条件对于空气质量的改善也具有一定的贡献.

2.2 $PM_{2.5}$ 化学组分的变化特征

表 1 给出了“大气十条”实施期间 3 个典型年份（2014、2016 和 2017 年）$PM_{2.5}$ 主要化学组分的年均浓度和占比、特征比值、SOR 和 NOR 的变化情况. 结果显示，“大气十条”实施后，尽管绝大多数组分的浓度均呈现不同程度的下降趋势，但占比的变化却有很大差别. 对 SNA 来说，总体浓度水平相对稳定，但在 $PM_{2.5}$ 中的总体占比明显上升. SO_4^{2-} 浓度有明显下降，特别是 2017 年较此前降幅达到 25% 以上，这可能与“大气十条”实施期间大力加强燃煤总量控制、改善煤质和提高脱硫效率等措施有关[37]. NO_3^- 和 NH_4^+ 的浓度水平总体稳定，但占比均有明显上升，其中，NO_3^- 已成为 $PM_{2.5}$ 的最



黑色方块和阴影分别表示自动监测浓度的平均值与标准差，红色三角和线段表示质量重构浓度的平均值和标准差

图 2 $PM_{2.5}$ 重构浓度和自动监测结果的比较

Fig. 2 Comparison between reconstructed results and automatic measurements of $PM_{2.5}$ concentrations

大贡献者. 上述 SNA 的变化特征可能是多种因素共同作用的结果,首先,由于机动车保有量的持续快速增加,NO_x 的排放量和环境浓度并未得到有效控制,从而导致 NO_3^- 的上升; 其次,SO_4^{2-} 的下降减弱了其对 NH_4^+ 的竞争,促进了 NH_4NO_3 的生成; 另外,从表 1 中 SOR 和 NOR 的变化趋势可看出, SOR 总体表现出下降趋势,而 NOR 则有明显的上升趋势,这表明近年来大气氧化能力的增强[38]更有利于了 NO_3^- 的形成. 值得注意的是,NH_4^+ 在 $PM_{2.5}$ 的组成中具有越来越重要的地位,大力加强 NH_3 的减排也是未来二次颗粒物污染控制的一个重要方向.

碳组分的浓度水平在“大气十条”早期(2014 ~ 2016 年)大幅下降,但后期(2016 ~ 2017 年)的下降趋势明显变缓. 值得注意的是,从 2014 ~ 2017 年, OC 和 EC 的降幅分别为 37. 89% 和 59. 31%,前者明显小于后者. 特别是后期,OC 在 $PM_{2.5}$ 中的占比不降反升. SOC 也同样表现出这种趋势,在后期,占比的上升幅度接近 20%. 以上结果表明,随着 $PM_{2.5}$ 浓度的总体下降,有机气溶胶(特别是 SOA)的影响相对更加突出. 另外,2014 年,为举办南京“青奥会”,大气污染控制措施空前严格,多数污染物得到了有效控制[39],但对 OC 和 SOC 来说,无论是浓度水平还是占比,均明显高于其它年份,这反映了有机气溶胶来源和形成过程的复杂性,给未来 $PM_{2.5}$ 的控制带来更大的压力和挑战.

在水溶性离子中,除 SNA 外,一些离子浓度的变化也十分明显. 如,Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 是建筑扬尘和风尘的标志性离子[40, 41],其浓度和占比的下降表明南京近年来对扬尘污染的防治取得了显著效果. K^+ 主要来源于生物质燃烧[42],其浓度减少与南京市 2014 年开始全面禁烧秸秆有关. Cl^- 主要来源于工业燃煤排放[43],由于“大气十条”期间南京市严格控制燃煤总量,2014 ~ 2017 年,Cl^- 浓度降幅达 65. 15%,占比也下降了 49. 50%.

有研究表明,NO_3^-/SO_4^{2-} 可用于确定移动源和燃煤源的贡献率,NO_3^-/SO_4^{2-} 小于 1 表明燃煤源占主导,大于 1 则表明移动源排放占主导[44]; OC/EC 可用于确定碳气溶胶的来源和转化过程[45],当 OC/EC 大于 2 时,则明显产生了 SOC[46, 47]. 表 1 显示, NO_3^-/SO_4^{2-} 均大于 1,且在“大气十条”后期明显上升,表明燃煤污染得到了有效控制,而移动源排放贡献显著增加,南京的 $PM_{2.5}$ 污染已从传统的燃煤污染为主转变机动车污染为主. OC/EC 均大于 2,而且在“大气十条”实施期间持续上升,这进一步表明 SOA 污染出现了明显的加重趋势.

表 1　南京市“大气十条”实施期间 $PM_{2.5}$ 中主要组分浓度与占比、特征物种比值和 S-N 氧化率的变化特征

Table 1　Concentrations and proportions of $PM_{2.5}$ components, and typical ratios and S-N oxidation rates in Nanjing during the implementation of the APPCAP

项目	因子	2014 年		2016 年		2017 年	
		浓度/μg·m^{-3}	占比/%	浓度/μg·m^{-3}	占比/%	浓度/μg·m^{-3}	占比/%
主要组分	NO_3^-	10.95	16.57	10.67	18.14	11.15	24.30
	SO_4^{2-}	9.97	15.08	10.41	17.70	7.50	16.35
	NH_4^+	5.96	9.01	6.70	11.40	5.90	12.85
	Cl^-	1.98	2.99	0.81	1.37	0.69	1.51
	K^+	0.71	1.08	0.40	0.68	0.52	1.12
	Ca^{2+}	0.52	0.79	0.44	0.74	0.40	0.87
	Na^+	0.53	0.80	0.36	0.61	0.34	0.73
	Mg^{2+}	0.32	0.48	0.14	0.23	0.07	0.14
	OC	11.65	17.61	7.85	13.35	7.24	15.77
	POC	5.63	8.52	5.06	8.60	4.57	9.96
	SOC	6.01	9.09	2.79	4.75	2.61	5.68
	EC	4.65	7.03	2.53	4.31	1.89	4.12
特征比值	OC/EC	2.72		3.27		4.08	
	NO_3^-/SO_4^{2-}	1.01		1.05		1.70	
S-N 氧化率/%	SOR	32.17		33.57		26.28	
	NOR	13.16		18.17		17.76	

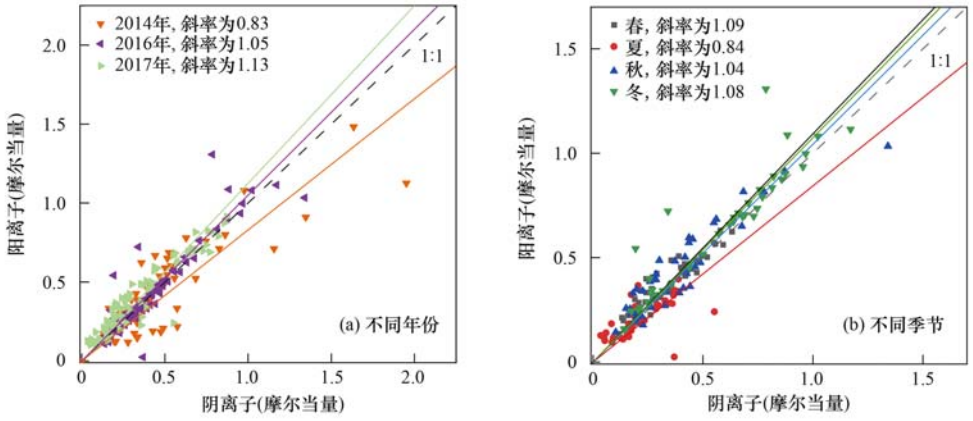
另外,本研究还发现,$PM_{2.5}$ 的组分特征具有明显的季节变化. 其中比较突出的现象是 NO_3^- 和 NH_4^+ 在 $PM_{2.5}$ 中的占比均为冬季最高(分别为 27. 91% 和 14. 94%),夏季最低(分别为 9. 12% 和 8. 99%); 而 SO_4^{2-} 的占比则夏季最高(24. 31%), 秋季最低(12. 05%),这可能是有关前体物的转化过程和硫酸盐和硝酸盐的分解过程共同作用的结果. 总体来说,夏季的高温更有利于 SO_2 转化为 SO_4^{2-},同时也更有利于 NH_4NO_3 的分解,而秋冬季的效果则相反. 另外,SNA 总体占比在冬季最高

(占 59.74%),说明冬季二次颗粒物污染更加严重.

2.3 $PM_{2.5}$酸度变化特征

图 3(a)为"大气十条"实施期间 3 个典型年份(2014、2016 和 2017 年)$PM_{2.5}$水溶性阴阳离子摩尔当量比值(CE/AE)的散点图. 3 个年份 CE/AE 平均值为 0.98,不同年份 CE/AE 具有明显的差异性,2014、2016 和 2017 年的 CE/AE 分别为 0.83、1.05 和 1.13,这表明"大气十条"实施以来,南京市 $PM_{2.5}$ 的酸性持续减弱. 这可能是由于"大气十条"实施以来,南京市大气管控措施显著加强,特别是火电和钢铁行业开展"超低排放"治理,使得 SO_2 和 NO_x 等酸性气体的排放量显著下降,因而 $PM_{2.5}$ 中的 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 二次生成量也相应降低,同时 NH_4^+ 的影响更加显著,从而导致 $PM_{2.5}$ 有碱性化趋势.

图 3(b)为不同季节 $PM_{2.5}$ 中水溶性 CE/AE 散点图. 可以看出,春、夏、秋和冬季 CE/AE 分别为 1.09、0.84、1.04 和 1.08. 这表明夏季 $PM_{2.5}$ 酸性最强,春季酸性最弱. 春季沙尘天气多发,扬尘中大量的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 可能是 $PM_{2.5}$ 酸性减弱的原因. 另外,秋冬两季气温较低,导致更多的 NH_3 进入颗粒相减弱了 $PM_{2.5}$ 的酸性,而夏季则恰好相反. 有研究表明颗粒物碱性化趋势加强会大大提高二次气溶胶的形成[48],因而通过各污染物的协同控制,减缓 $PM_{2.5}$ 碱性化可能有助于减轻秋冬季较为严峻的二次污染.



和点对应颜色的线为线性拟合线,黑色虚线为 1:1

图 3 南京市"大气十条"实施期间不同年份和不同季节的 $PM_{2.5}$ 中水溶性阴阳离子摩尔当量比值散点图

Fig. 3 Scatter diagram of molar equivalent of water-soluble anions and cations in $PM_{2.5}$ in different years and different seasons in Nanjing during the implementation of the APPCAP

2.4 金属元素的富集特征

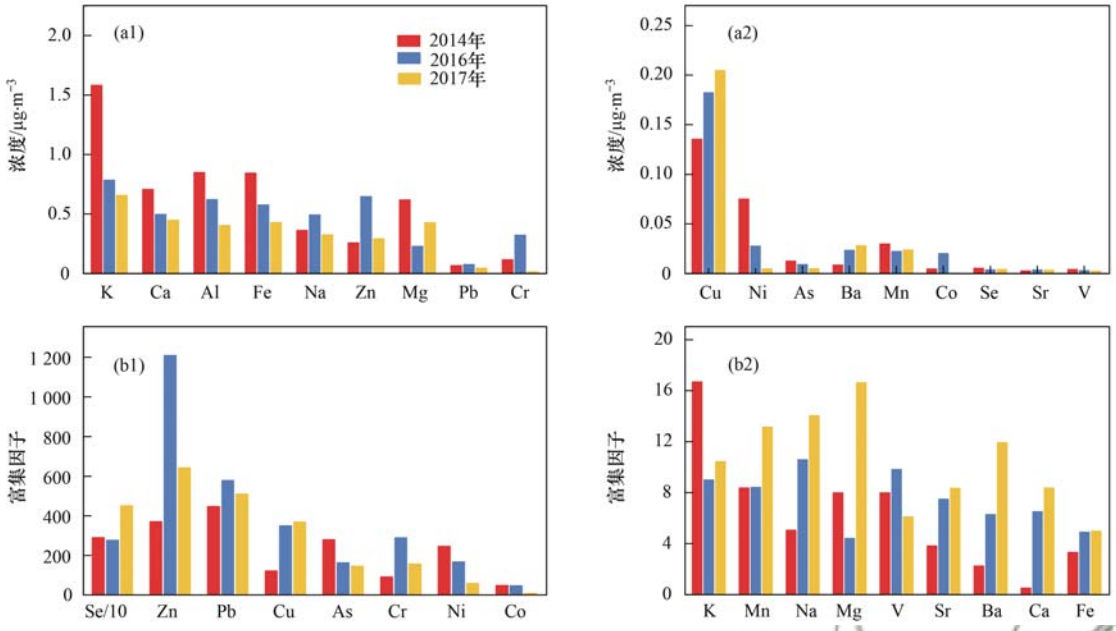
金属元素在 $PM_{2.5}$ 中虽然占比较小,但相对稳定,可作为示踪剂为金属元素的来源解析提供依据. 图 4 展示了"大气十条"实施期间 3 个典型年份(2014、2016 和 2017 年)南京市 $PM_{2.5}$ 中浓度较高的 18 种金属元素浓度和其 EF 的变化情况. 从图 4(a)可见,地壳元素(Al、Ca、Fe 和 Mn)[49]总体浓度从 2014~2017 年有明显下降,其降幅为 16.35%,这表明南京市土壤扬尘的治理取得了显著效果. K 可以反映生物质燃烧的贡献[50],其浓度下降表明南京的秸秆燃烧也得到了有效控制. V、Pb 和 As 主要反映了石油工业和燃煤贡献[51,52],3 种元素的浓度明显下降,表明南京市燃煤和清洁油品控制有成效.

南京市 $PM_{2.5}$ 中不同元素的 EF 差异显著,如图 4(b)所示,EF 大于 10 的元素主要有 Se、Zn、Pb、Cu、As、Cr、Ni、Co 和 K,其中 Se 最高,2017 年达到 2241,表明其受到了强烈的人为影响. Pb 和 As 主要来源于燃煤[24],其 EF 在 2016 年后有所减小,表明燃煤的影响减弱. Cu、Zn 和 Ba 主要来源于机动车刹车片的磨损等[53],其 EF 总体上升,表明道路移动源对 $PM_{2.5}$ 贡献有增大趋势. Ni 和 V 主要来源于重油燃烧[24],其 EF 总体下降,表明该类人为源的影响逐渐减弱. Ca 和 Mg 的富集度呈现一定程度的上升趋势,表明建筑扬尘的影响有所增强.

本研究还发现南京市 $PM_{2.5}$ 中元素的 EF 也存在明显的季节变化. 其中,Se、Zn、Pb、Na、Mg、Ca、Fe、K 和 Mn 等元素总体上在秋冬两季明显高于春夏两季,这可能是因为秋冬两季更多受到燃煤、秸秆燃烧等污染源的影响. 与此不同的是,Cu、Cr、Ni、Co 和 Ba 的 EF 通常在春夏两季较高,而秋冬两季较低,这表明这些元素可能更多受到了工业过程(特别是石油化工)和交通等污染源的影响.

2.5 $PM_{2.5}$来源变化特征

为了定量研究"大气十条"实施期间南京市



(a)元素浓度,(b)元素富集因子

图 4　南京市“大气十条”实施期间主要金属元素浓度和富集因子的变化特征

Fig. 4　Concentrations and enrichment factors of major metallic elements in Nanjing during the implementation of the APPCAP

$PM_{2.5}$ 的来源和变化特征,基于 2014、2016 和 2017 年的 $PM_{2.5}$ 化学组分数据,采用 PMF5.0 对 $PM_{2.5}$ 进行了来源解析. PMF 共解析出 7 个因子,如图 5 所示. 7 个因子所代表的污染源类型和其对 $PM_{2.5}$ 的贡献率(按从大到小顺序)分别为:二次气溶胶(51.46%)、燃煤(12.25%)、机动车(10.85%)、建筑及道路扬尘(8.89%)、重油燃烧(7.21%)、冶金(5.15%)和土壤扬尘(4.18%). 二次气溶胶特征因子有 NO_3^-、SO_4^{2-} 和 NH_4^+[54];燃煤的特征因子为 Cl^-[55,56]机动车源的特征因子为 Ba、Cu 和 Zn[54,57];建筑及道路扬尘源的特征因子有 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}[58,59];重油燃烧的指征因子为 Ni 和 V[24];冶金为代表的工业源的指征因子为 Cr 和 Cu[60];土壤扬尘源的特征因子为 Al、Fe 和 Zn[60,61]. 值得注意的是,虽然传统意义上建筑及道路扬尘和土壤扬尘的示踪物非常相似,但本研究稳定地解析出了两个因子,以 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 为特征组分的因子 1 被定义为建筑及道路扬尘源,以地壳元素 Al、Fe 和 Zn 为特征组分的因子 7 被定义为土壤扬尘源.

表 2 给出了“大气十条”实施期间 3 个典型年份(2014、2016 和 2017 年)南京市 $PM_{2.5}$ 来源的变化特征. 可以看出,不同来源的贡献率有升有降. 其中,机动车源的上升趋势最为明显,从 2014 ~ 2017 年,上升幅度达 58.54%. 这表明,“大气十条”实施期间,工业污染源的治理取得了显著成效,然而,随着机动车数量的快速增加,其对 $PM_{2.5}$ 的贡献相对突出,至 2017 年已超过燃煤源的贡献,成为仅次于二次气溶胶的重要来源. 二次气溶胶贡献率最大,而且也呈见明显上升趋势,从 2014 年的 48.52% 上升到 2017 年的 52.39%. 这表明,加强二次来源的治理将是未来 $PM_{2.5}$ 污染控制的重点. 随着燃煤总量控制和燃煤电厂超低排放标准的实施,燃煤源的贡献率从 2014 年起呈下降趋势. 由于加强了对化工等行业的污染治理,重油燃烧对 $PM_{2.5}$ 的贡献也明显减弱. 2014 年,为举办“青奥会”,大力加强了对建筑及道路扬尘和钢铁行业的治理,因此,这些源在 2014 年的贡献较低,但随后出现反弹. 随着管控措施的加强,2016 年后开始大幅下降. “大气十条”期间,随着人为源排放的减少,土壤扬尘的占比呈现上升态势,进一步加强裸露土地的覆盖和绿化等措施,也是未来 $PM_{2.5}$ 污染控制的一个重要方向.

表 2　南京市“大气十条”实施期间不同年份 $PM_{2.5}$ 主要来源的贡献率/%

Table 2　Contributions of major $PM_{2.5}$ sources in different years during the implementation of the APPCAP/%

年份	燃煤	冶金	二次气溶胶	建筑及道路扬尘	重油燃烧	土壤扬尘	机动车
2014	14.63	5.81	48.52	8.12	10.51	3.64	8.78
2016	10.28	7.75	49.95	10.82	6.37	4.67	10.17
2017	11.40	4.24	52.39	7.79	5.41	4.8	13.92

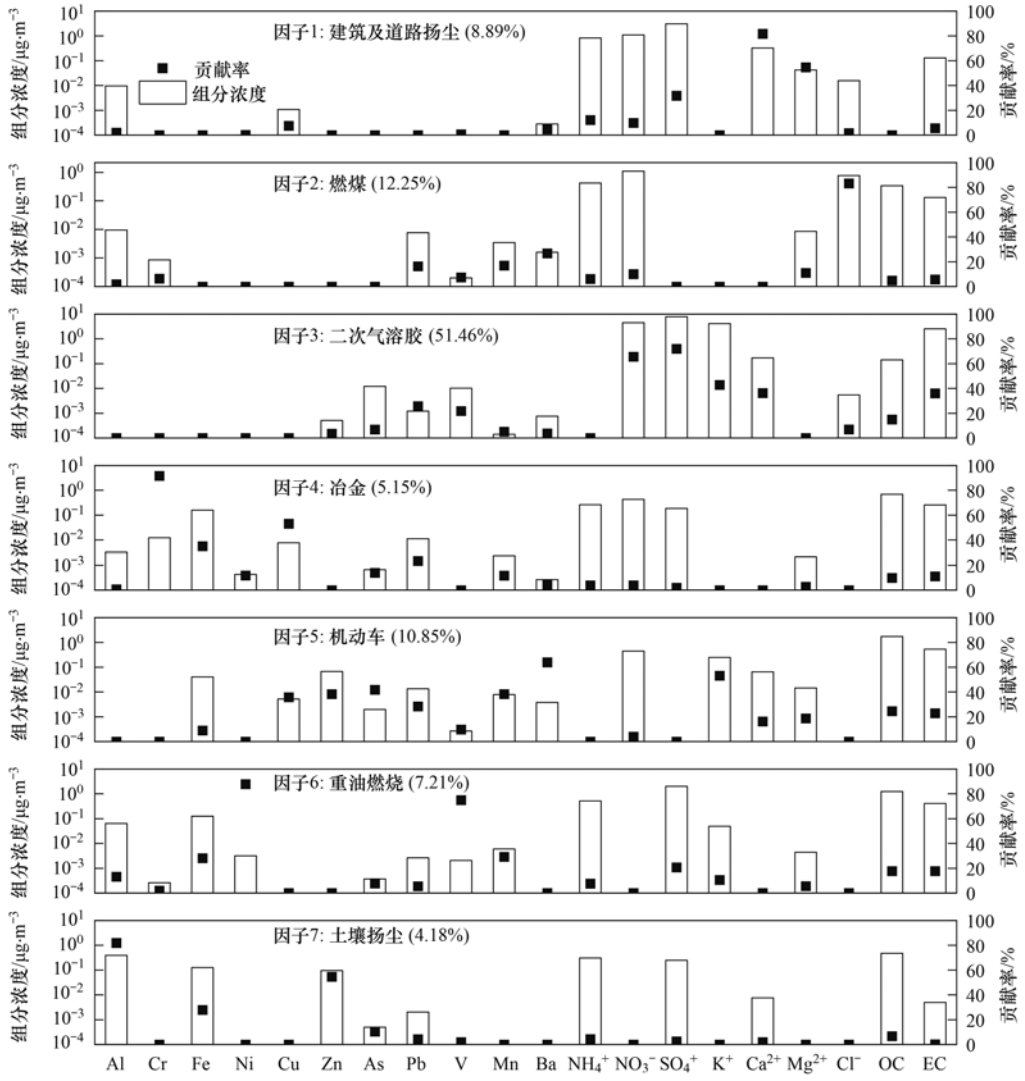


图5 南京市"大气十条"实施期间 $PM_{2.5}$ 的主要来源和贡献率

Fig. 5 Major sources of the $PM_{2.5}$ and their contributions during the implementation of the APPCAP

另外,本研究还表明南京 $PM_{2.5}$ 来源的贡献率存在不同程度的季节变化. 其中,最突出的特征是二次气溶胶在冬季贡献最大,夏季最低. 冬季不利的气象条件造成了颗粒物在近地面长时间滞留从而增加了二次气溶胶的形成,此外冬季颗粒物更高的碱性可能进一步促进了二次污染的生成[48]; 而夏季的高温和强辐射虽然一定程度上能促进二次组分的生成,但也大大增加了二次气溶胶向气相分配[62]. 燃煤源在秋冬季的贡献显著大于春夏两季,说明秋冬季采暖显著增加了煤的燃烧. 另外,扬尘源在春季贡献较大,可能是明显受到春季相对频繁的沙尘天气的影响.

3 结论

(1)"大气十条"实施期间,南京市 $PM_{2.5}$ 中 SO_4^{2-} 的占比总体呈下降趋势,然而,NO_3^- 和 NH_4^+ 的占比均呈现明显上升趋势. 这表明,燃煤污染(特别是 SO_2 排放)得到了有效控制,但针对 NO_x、NH_3 排放的管控尚需进一步加强.

(2)碳组分(OC、EC)的浓度在"大气十条"早期出现大幅下降,但后期的下降趋势明显变缓. 其中,OC(特别是 SOC)的占比不降反升. 这表明,"大气十条"实施后期,有机气溶胶(特别是 SOA)的影响更加突出,未来针对 $PM_{2.5}$ 有机组分的控制将面临更大的压力和挑战.

(3)"大气十条"实施期间,南京市 $PM_{2.5}$ 酸性逐渐减弱,CE/AE 从 2014 年的 0.83 上升到 2017 年的 1.13. 这可能与 SO_2 等酸性气体的大幅减排和 NH_4^+ 的影响更加显著相关.

(4)源解析结果表明:燃煤、冶金、石化等污染源排放对 $PM_{2.5}$ 的贡献率总体上呈下降趋势; 机动车的贡献率快速上升,到 2017 年已超过燃煤源,成为城市 $PM_{2.5}$ 的最主要来源; 扬尘的贡献有较大波动,其中,土壤扬尘的占比呈现上升态势,应进一步

加强裸土的覆盖和绿化等措施.

参考文献：

[1] Liang Z B, Zhao X F, Chen J Y, *et al*. Seasonal characteristics of chemical compositions and sources identification of $PM_{2.5}$ in Zhuhai, China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, **41**(2): 715-728.

[2] Gao J J, Wang K, Wang Y, *et al*. Temporal-spatial characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ as well as its associated chemical species in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. Environmental Pollution, 2018, **233**: 714-724.

[3] 中华人民共和国生态环境部. 2013 中国环境状况公报[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb, 2022-02-03.

[4] 国务院. 国务院关于印发大气污染防治行动计划的通知[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/zcwj/gwywj/201811/t20181129_676555.shtml, 2022-02-03.

[5] 中华人民共和国生态环境部. 2017 中国生态环境状况公报[EB/OL]. https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb, 2022-02-03.

[6] 王跃思, 李文杰, 高文康, 等. 2013～2017 年中国重点区域颗粒物质量浓度和化学成分变化趋势[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, **50**(4): 453-468.
Wang Y S, Li W J, Gao W K, *et al*. Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013-2017[J]. Science China Earth Sciences, 2019, **62**(12): 1857-1871.

[7] Yang X Z, Lu D W, Tan J H, *et al*. Two-dimensional silicon fingerprints reveal dramatic variations in the sources of particulate matter in Beijing during 2013-2017[J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(12): 7126-7135.

[8] Ming L L, Jin L, Li J, *et al*. $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Delta, China: chemical compositions, seasonal variations, and regional pollution events[J]. Environmental Pollution, 2017, **223**: 200-212.

[9] Zou B B, Huang X F, Zhang B, *et al*. Source apportionment of $PM_{2.5}$ pollution in an industrial city in southern China[J]. Atmospheric Pollution Research, 2017, **8**(6): 1193-1202.

[10] 2013年南京市环境状况公报[EB/OL]. https://news.bjx.com.cn/html/20140605/516134.shtml, 2022-03-02.

[11] 南京市生态环境局. 2020 年南京市环境状况公报[EB/OL]. http://hbj.nanjing.gov.cn/njshjbhj/202106/t20210607_2960623.html, 2022-03-02.

[12] Fang G C, Wu Y S, Lee J F, *et al*. Characteristics and source identification study of ambient suspended particulates and ionic pollutants in an area abutting a highway[J]. Powder Technology, 2008, **185**(3): 223-230.

[13] HJ 800-2016, 环境空气 颗粒物中水溶性阳离子(Li^+、Na^+、NH_4^+、K^+、Ca^{2+}、Mg^{2+})的测定 离子色谱法[S].

[14] HJ 799-2016, 环境空气 颗粒物中水溶性阴离子(F^-、Cl^-、Br^-、NO_2^-、NO_3^-、PO_4^{3-}、SO_3^{2-}、SO_4^{2-})的测定 离子色谱法[S].

[15] HJ 657-2013, 空气和废气 颗粒物中铅等金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法[S].

[16] HJ 656-2013, 环境空气颗粒物($PM_{2.5}$)手工监测方法(重量法)技术规范[S].

[17] 周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 等. 南京春季北郊地区大气 $PM_{2.5}$ 中主要化学组分及碳同位素特征[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4439-4445.
Zhou Y M, Han X, Wang J J, *et al*. Chemical constitution and carbon isotopic compositions of $PM_{2.5}$ in the northern suburb of Nanjing in Spring[J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4439-4445.

[18] Xing L, Fu T M, Cao J J, *et al*. Seasonal and spatial variability of the OM/OC mass ratios and high regional correlation between oxalic acid and zinc in Chinese urban organic aerosols[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(8): 4307-4318.

[19] Zhang R, Jing J, Tao J, *et al*. Chemical characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ in Beijing: seasonal perspective[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(14): 7053-7074.

[20] Castro L M, Pio C A, Harrison R M, *et al*. Carbonaceous aerosol in urban and rural European atmospheres: estimation of secondary organic carbon concentrations[J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(17): 2771-2781.

[21] Ho K F, Zhang R J, Lee S C, *et al*. Characteristics of carbonate carbon in $PM_{2.5}$ in a typical semi-arid area of Northeastern China[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(6): 1268-1274.

[22] Zoller W H, Gladney E S, Duce R A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the south pole[J]. Science, 1974, **183**(4121): 198-200.

[23] Liang X X, Huang T, Lin S Y, *et al*. Chemical composition and source apportionment of PM_1 and $PM_{2.5}$ in a national coal chemical industrial base of the Golden Energy Triangle, Northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2019, **659**: 188-199.

[24] Hsu C Y, Chiang H C, Lin S L, *et al*. Elemental characterization and source apportionment of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in the western coastal area of central Taiwan[J]. Science of the Total Environment, 2016, **541**: 1139-1150.

[25] 廖启林, 刘聪, 许艳, 等. 江苏省土壤元素地球化学基准值[J]. 中国地质, 2011, **38**(5): 1363-1378.
Liao Q L, Liu C, Xu Y, *et al*. Geochemical baseline values of elements in soil of Jiangsu Province[J]. Geology in China, 2011, **38**(5): 1363-1378.

[26] Zhou J B, Xing Z Y, Deng J J, *et al*. Characterizing and sourcing ambient $PM_{2.5}$ over key emission regions in China I: water-soluble ions and carbonaceous fractions[J]. Atmospheric Environment, 2016, **135**: 20-30.

[27] Doabi S A, Afyuni M, Karami M. Multivariate statistical analysis of heavy metals contamination in atmospheric dust of Kermanshah province, western Iran, during the spring and summer 2013[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2017, **180**: 61-70.

[28] Paatero P. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1997, **37**(1): 23-35.

[29] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values[J]. Environmetrics, 1994, **5**(2): 111-126.

[30] Zhu Y H, Huang L, Li J Y, *et al*. Sources of particulate matter in China: insights from source apportionment studies published in 1987-2017[J]. Environment International, 2018, **115**: 343-357.

[31] Taiwo A M, Harrison R M, Shi Z. A review of receptor modelling of industrially emitted particulate matter[J]. Atmospheric Environment, 2014, **97**: 109-120.

[32] Polissar A V, Hopke P K, Paatero P, *et al*. Atmospheric aerosol over Alaska: 2. Elemental composition and sources[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, **103**(D15): 19045-19057.

[33] Paatero P, Eberly S, Brown S G, *et al*. Methods for estimating uncertainty in factor analytic solutions[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2014, **7**(3): 781-797.

[34] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].

[35] Huang Q, Wang T J, Chen P L, *et al*. Impacts of emission reduction and meteorological conditions on air quality improvement during the 2014 Youth Olympic Games in Nanjing, China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(21): 13457-13471.

[36] Ji H B, Shao M, Wang Q G. Contribution of meteorological conditions to inter-annual variations in air quality during the past decade in eastern China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2020, **20**(10): 2249-2259.

[37] 南京市人民政府. 市政府关于印发南京市大气污染防治行动计划的通知[J]. 南京市人民政府公报, 2014, (4): 10-20.

[38] Feng T, Bei N F, Zhao S Y, *et al*. Nitrate debuts as a dominant contributor to particulate pollution in Beijing: roles of enhanced atmospheric oxidizing capacity and decreased sulfur dioxide emission[J]. Atmospheric Environment, 2021, **244**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117995.

[39] 李荔, 刘倩, 李冰, 等. 南京青奥会期间管控措施空气质量改善效果评估[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(2): 175-182.
Li L, Liu Q, Li B, *et al*. Assessment of air quality benefits from control measures during Nanjing Youth Olympic Games[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(2): 175-182.

[40] Zhang R, Cao J J, Tang Y R, *et al*. Elemental profiles and signatures of fugitive dusts from Chinese deserts[J]. Science of the Total Environment, 2014, **472**: 1121-1129.

[41] Wang B Q, Tang Z Z, Cai N N, *et al*. The characteristics and sources apportionment of water-soluble ions of $PM_{2.5}$ in suburb Tangshan, China[J]. Urban Climate, 2021, **35**, doi: 10.1016/j.uclim.2020.100742.

[42] Simoneit B R T. Biomass burning—a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion[J]. Applied Geochemistry, 2002, **17**(3): 129-162.

[43] 安欣欣, 曹阳, 王琴, 等. 北京城区 $PM_{2.5}$ 各组分污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2022, **43**(5): 2251-2261.
An X X, Cao Y, Wang Q, *et al*. Chemical characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ in urban area of Beijing[J]. Environmental Science, 2022, **43**(5): 2251-2261.

[44] Xu H M, Cao J J, Chow J C, *et al*. Inter-annual variability of wintertime $PM_{2.5}$ chemical composition in Xi'an, China: evidences of changing source emissions[J]. Science of the Total Environment, 2016, **545-546**: 546-555.

[45] Salameh D, Detournay A, Pey J, *et al*. $PM_{2.5}$ chemical composition in five European Mediterranean cities: a 1-year study[J]. Atmospheric Research, 2015, **155**: 102-117.

[46] Xu J Z, Zhang Q, Wang Z B, *et al*. Chemical composition and size distribution of summertime $PM_{2.5}$ at a high altitude remote location in the northeast of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau: insights into aerosol sources and processing in free troposphere[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(9): 5069-5081.

[47] Yu Y Y, Ding F, Mu Y F, *et al*. High time-resolved $PM_{2.5}$ composition and sources at an urban site in Yangtze River Delta, China after the implementation of the APPCAP[J]. Chemosphere, 2020, **261**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.127746.

[48] Hattori S, Iizuka Y, Alexander B, *et al*. Isotopic evidence for acidity-driven enhancement of sulfate formation after SO_2 emission control[J]. Science Advances, 2021, **7**(19), doi: 10.1126/sciadv.abd4610.

[49] Han Y J, Kim H W, Cho S H, *et al*. Metallic elements in $PM_{2.5}$ in different functional areas of Korea: concentrations and source identification[J]. Atmospheric Research, 2015, **153**: 416-428.

[50] Achad M, Caumo S, De Castro Vasconcellos P, *et al*. Chemical markers of biomass burning: determination of levoglucosan, and potassium in size-classified atmospheric aerosols collected in Buenos Aires, Argentina by different analytical techniques[J]. Microchemical Journal, 2018, **139**: 181-187.

[51] Pekney N J, Davidson C I, Zhou L M, *et al*. Application of PSCF and CPF to PMF-modeled sources of $PM_{2.5}$ in Pittsburgh[J]. Aerosol Science and Technology, 2006, **40**(10): 952-961.

[52] McKenzie E R, Money J E, Green P G, *et al*. Metals associated with stormwater-relevant brake and tire samples[J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(22): 5855-5860.

[53] Fan J, Shang Y, Zhang X J, *et al*. Joint pollution and source apportionment of $PM_{2.5}$ among three different urban environments in Sichuan Basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2020, **714**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136305

[54] Yu S Y, Liu W J, Xu Y S, *et al*. Characteristics and oxidative potential of atmospheric $PM_{2.5}$ in Beijing: source apportionment and seasonal variation[J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 277-287.

[55] 王苏蓉, 喻义勇, 王勤耕, 等. 基于 PMF 模式的南京市大气细颗粒物源解析[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(12): 3535-3542.
Wang S R, Yu Y Y, Wang Q G, *et al*. Source apportionment of $PM_{2.5}$ in Nanjing by PMF[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(12): 3535-3542.

[56] Zhang X Y, Zhao X, Ji G X, *et al*. Seasonal variations and source apportionment of water-soluble inorganic ions in $PM_{2.5}$ in Nanjing, a megacity in southeastern China[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2019, **76**(1): 73-88.

[57] Yao L, Yang L X, Yuan Q, *et al*. Sources apportionment of $PM_{2.5}$ in a background site in the North China Plain[J]. Science of the Total Environment, 2016, **541**: 590-598.

[58] Chen Y, Xie S D, Luo B, *et al*. Characteristics and sources of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ in the Sichuan Basin, China[J]. Atmosphere, 2019, **10**(2), doi: 10.3390/atmos10020078.

[59] Gao X M, Yang L X, Cheng S H, *et al*. Semi-continuous measurement of water-soluble ions in $PM_{2.5}$ in Jinan, China: temporal variations and source apportionments[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(33): 6048-6056.

[60] Qi L, Chen M D, Ge X L, *et al*. Seasonal variations and sources of 17 aerosol metal elements in suburban Nanjing, China[J]. Atmosphere, 2016, **7**(12), doi: 10.3390/atmos7120153.

[61] Wang Y A, Jia C H, Tao J, *et al*. Chemical characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ in a semi-arid and petrochemical-industrialized city, Northwest China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **573**: 1031-1040.

[62] Chow J C, Watson J G, Lu Z Q, *et al*. Descriptive analysis of $PM_{2.5}$ and PM_{10} at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX[J]. Atmospheric Environment, 1996, **30**(12): 2079-2112.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 44 No. 1

Jan. 15, 2023

CONTENTS

Evolution of $PM_{2.5}$ Chemical Composition and Sources in Nanjing During the Implementation of the APPCAP ····· CHEN Pei-lin, GUO Rong, WANG Qin-geng (1)

Differences in $PM_{2.5}$ Components Between Urban and Rural Sites During Heavy Haze Event in Northern Henan Province ····· WANG Shen-bo, WANG Ling-ling, FAN Xiang-ge, *et al.* (11)

Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Fine Particles in Langfang in Autumn and Winter ····· ZHU Shu-zhen, TONG Jie, BAO Feng, *et al.* (20)

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in $PM_{2.5}$ of Different Air Masses During Heating Season in Tianjin ····· LI Li-wei, DENG Xiao-wen, XIAO Zhi-mei, *et al.* (30)

Analysis of Critical Source of Potentially Harmful Elements in Urban Road Dust During Winter in Taiyuan Based on Multiple Attribute Decision Making Method ····· DENG Wen-bo, LIU Wen-juan (38)

Numerical Response Analysis of $PM_{2.5}$-O_3 Compound Pollution in Beijing ····· LIU Tian-qiang (48)

High-resolution Emission Inventory of Reactive Volatile Organic Compounds from Anthropogenic Sources in the Yangtze River Delta Region ····· TIAN Jun-jie, DING Xiang, AN Jing-yu, *et al.* (58)

Vertical Distribution Characteristics of Boundary Layer Volatile Organic Compounds in Autumn in the Mixed Industrial and Rural Areas over the Northern Suburb of Nanjing ····· WANG Tai, ZHU Bin, SHI Shuang-shuang, *et al.* (66)

Characterization of Ambient Volatile Organic Compounds, Source Apportionment, and the Ozone-NO_x-VOC Sensitivities in Liucheng County, Guangxi ····· WU Ying, MO Zhao-yu, WU Qin-qin, *et al.* (75)

Characteristics of Ozone Pollution and High-impact Meteorological Factors in Urban Cities: A Case of Suzhou ····· HE Yan, LIN Hui-juan, CAO Shu-ya, *et al.* (85)

Emission Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia in Quzhou County, North China Plain ····· KANG Jia-hui, MENG Fan-lei, LIU Xue-jun, *et al.* (94)

Application of WRF Optimal Parameterization Scheme for Different Air Quality Models ····· YANG Jing-chao, JIANG Xing-wen, BO Xin, *et al.* (104)

Distribution Characteristics and Health Effects of Bioaerosols in Spring over Xi'an City ····· WEI Jun-qiang, YANG Liu, SHEN Zhen-xing, *et al.* (118)

Distribution of Bacterial Concentration and Viability in Atmospheric Bioaerosols Under Different Weather Conditions in the Coastal Region of Qingdao ····· WEI Wen-shu, QI Jian-hua, CHANG Cheng (127)

Spatiotemporal Distribution and Driving Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Inland Sediments of China ····· HUANG Zhu-liang, CAI Jia-wei, WANG Ru-wei (138)

Distributions of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in the Nearshore Area of the Yangtze River Estuary ····· XU Qiu-hong, LIU Shu-guang, LOU Sha, *et al.* (158)

Co-occurrence of Tetracycline Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in Plateau Wetlands Under the Influence of Human Activities ····· QIN Rong, YU Qing-guo, LIU Zhen-ya, *et al.* (169)

Occurrence and Health Risk Assessment of Multiple Pesticides in Drinking Water Sources of Southeast China ····· HE Shu, DONG Hui-yu, REN Nan-qi (180)

Spatiotemporal Distribution and Pollution Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Main Water Supply Reservoirs in Central Zhuhai City ····· WANG En-rui, ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, *et al.* (189)

Distribution Characteristics and Pollution Risk of Heavy Metals in River Sediment of Suzhou Water Network Area, China ····· ZHENG Min-hui, BAI Dong-rui, ZHANG Tao, *et al.* (198)

Distribution of Biodegradable Dissolved Organic Matter and Its Affecting Factors in a Typical Peri-urban Watershed in Yangtze River Delta ····· WU Wen-yu, MA Jing-sheng, YANG Lei, *et al.* (210)

Long-term Succession Patterns and Driving Factors of Water Quality in a Flood-pulse System Lake: A Case Study of Lake Luoma, Jiangsu Province ····· HUANG Xue-ying, GAO Ming-yuan, WANG Jin-dong, *et al.* (219)

Microplastic Pollution Status and Ecological Risk Evaluation in Weihe River ····· SHAN Ze-xuan, ZHANG Yan, ZHANG Cheng-qian, *et al.* (231)

Effects of Different Colored Polycarbonate Plastics on Growth and Community Structure of Periphytic Algae ····· WANG Meng-xue, YIN Si-cheng, WANG Zhen-fang, *et al.* (243)

Diversity Patterns and Influencing Factors of Epibiotic in *Vallisneria natans* and Planktonic Bacteria Communities ····· ZHANG Mei-ting, LIU Jin-xian, SU Jia-he, *et al.* (252)

Bacterial Community and Diversity of River Ecosystems on the Qinghai-Tibet Plateau Based on 16S rRNA Gene Sequencing ····· QU Wei-qing, ZHANG Bo-mei, HUANG Xue, *et al.* (262)

Spatial and Temporal Heterogeneity and Ecological Health Evaluation of Diatom Community Based on eDNA ····· JIANG Shan, ZHANG Yan, LI Fei-long, *et al.* (272)

Severity Differences and Mechanisms of Algal Blooms Among Sections in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir ····· LUO Xiao-jiao, ZHANG Xing, HUANG Wei, *et al.* (282)

Characteristics of Soil Erosion and Nitrogen Loss in Vegetable Field Under Natural Rainfall ····· NING Jia-li, HUANG Yan-hui, LI Gui-fang, *et al.* (293)

Effects of Green, Blue, and Blue-green Roofs on Runoff Quality ····· ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, YAN Jing, *et al.* (303)

Analysis of Spatiotemporal Variation Characteristics and Driving Forces of NPP in Shanxi Province from 2000 to 2020 Based on Geodetector ····· SHAO Jia-hao, LI Jing, YAN Xing-guang, *et al.* (312)

Spatio-temporal Variation in Vegetation Cover and Its Driving Mechanism Exploration in Southwest China from 2000 to 2020 ····· XU Yong, DAI Qiang-yu, HUANG Wen-ting, *et al.* (323)

Heavy Metal Content and Resistance Gene Abundance and Related Properties in the Surface Soil around Qinghai Lake ····· HU Shi-lei, QU Jian-li, ZHANG Li, *et al.* (336)

Soil Heavy Metal Content, Pollution, and Influencing Factors in Typical Farming Area of Sichuan Basin ····· LIU Shu-ling, WU Mei, LIU Zhi-yuan, *et al.* (347)

Risk Assessment and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils of Yellow River Irrigation Area of Ningxia ····· CHEN Lin, MA Kun, MA Jian-jun, *et al.* (356)

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in the Soil Around Copper Smelting Sites ····· PENG Chi, LIU Xu, ZHOU Zi-ruo, *et al.* (367)

Characteristics of Typical Soil Acidification and Effects of Heavy Metal Speciation and Availability in Southwest China ····· LING Yun, LIU Han-yi, ZHANG Xiao-ting, *et al.* (376)

Stabilization Characteristics of Exogenous Cd in Different Types of Soil ····· WANG Gang, YU Hai-ying, HUANG Hua-gang, *et al.* (387)

Threshold of Se-rich Soil Based on Available-Se and Influencing Factors of Available-Se ····· WANG Ying, MA Yan-bin, WANG Ze-jing (395)

Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop System Based on Soil Parent Material Zoning ····· CHEN Zi-wan, XU Jing, HOU Zhao-lei, *et al.* (405)

Characteristics and Planting Safety Assessment of As Content in Dryland Soil and Maize in Guizhou Province ····· HUANG Feng-yan, ZHOU Lang, SONG Bo, *et al.* (415)

Potential of Intercropping *Pennisetum purpureum* Schum with *Melia azedarach* L. and *Broussonetia papyrifera* for Phytoremediation of Heavy-metal Contaminated Soil around Mining Areas ····· WANG Xiao-hui, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, *et al.* (426)

Inactivation of Cd and As by an *Enterobacter* Isolated from Cd and As Contaminated Farmland Soil ····· YIN Xue-fei, LIU Yu-ling, WU De, *et al.* (436)

Mineralization Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Relationship with Organic Carbon Components in Artificial *Robinia pseudoacacia* Forest in Loess Hilly Region ····· ZHU Yu-fan, LIU Wei-chao, LI Jia-xin, *et al.* (444)

Accumulation, Migration, and Transformation of Soil Phosphorus in Facility Agriculture and Its Influencing Factors ····· FANG Bing, CHEN Lin, WANG Yang, *et al.* (452)

Optimizing Straw Management to Enhance Carbon and Nitrogen Efficiency and Economic Benefit of Wheat-Maize Double Cropping System ····· WANG Liang, QIAN Xin, GAO Ying-bo, *et al.* (463)

Effect of Deep Fertilization with Slow/Controlled Release Fertilizer on N Fate in Clayey Soil Wheat Field ····· HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YUAN Wen-sheng, *et al.* (473)

Structure and Function of Soil Fungal Community in Rotation Fallow Farmland in Alluvial Plain of Lower Yellow River ····· NAN Zhen-wu, LIU Zhu, MENG Wei-wei, *et al.* (482)

Response of Topsoil Fungal Community Structure to Soil Improvement Measures in Degraded Forest of Red Soil Region ····· GUAN Hong-zhi, HUANG Rong-zhen, WANG Jin-ping, *et al.* (494)

Temporal and Spatial Variations in Root-associated Fungi Associated with *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in the Semi-arid and Dry Sub-humid Desertified Regions of Northern China ····· ZHAO Pei-shan, GUO Mi-shan, GAO Guang-lei, *et al.* (502)

QMEC-based Analysis of the Soil Microbial Functional Potentials across Different Tibetan Plateau Glacier Forelands ····· ZHANG Jie-jie, Anders Priemé, CHEN Xian-ke, *et al.* (512)

Meta Analysis on Yield Effect of Biochar for Staple Crops in China ····· YU Bin-hang, JI Jian-mei, WANG Li-xue, *et al.* (520)

Effects of Biochar on Antibiotic Environmental Behaviors in Soil: A Meta-analysis ····· LI Jing-han, ZHANG Jian-qiang, XIA Li-qiong, *et al.* (531)

Properties of Biochars Prepared from Different Crop Straws and Leaching Behavior of Heavy Metals ····· LI Jia-kang, QIU Chun-sheng, ZHAO Jia-qi, *et al.* (540)

Spatial-temporal Evolution and Heterogeneity of Carbon Emissions at County-level in China ····· SONG Yuan-zhen, ZENG Jian, WANG Sen, *et al.* (549)

Spatiotemporal Dynamic Evolution and Gravity Center Migration of Carbon Emissions in the Main Urban Area of Chongqing over the Past 20 Years ····· XIANG Shu-jiang, YANG Chun-mei, XIE Yu-qi, *et al.* (560)

Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of Environment Emergency Incident in China from 1991 to 2018 ····· YU Guang-hui, WANG Fei-fan, LIU Xian-zhao, *et al.* (572)

Migration, Transformation, and Toxicity of Quaternary Ammonium Antimicrobial Agents in the Environment ····· ZHANG Li-lan, QIN Cun-li, QIAN Yao, *et al.* (583)