

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM_{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析 徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)

北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析 尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)

北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析 廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)

青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比 孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)

太原市城乡居民区采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价 黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)

西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价 范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)

超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征 胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)

合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析 姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)

郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响 董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳侯, 张瑞芹 (2179)

2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析 钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)

天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征 张喆, 丁建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法 杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)

太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化 李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)

松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析 丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)

会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价 朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)

京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素 程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)

次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响 罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)

碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋 任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)

冰封状态下达里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异 李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)

城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析:以京津冀北运河为例 邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰若, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)

太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素 赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)

三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系 陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)

铁硫改性生物炭去除水中的磷 桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)

钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析 罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)

BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附 王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)

Ag₃PO₄/g-C₃N₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能 高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)

可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A 张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)

铁钛共掺杂氧化铝诱发表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物 张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)

硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制 屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)

电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制 曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)

缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制 李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)

反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响 吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)

基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺 薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)

活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响 马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)

6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制 凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)

中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素 李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)

不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征 刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)

青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析:以祁连山和藏东南地区为例 何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)

基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价 胡梦瑶, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)

长期施用化肥和有有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)

川南山区土壤与农作物重金属特征及成因 韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)

宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价 杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)

重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性 鹿发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾亮, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)

典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响 张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱挥华, 朱奇宏 (2512)

油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响 蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)

土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响 徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)

渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落 程森, 路平, 冯启言 (2541)

3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响 李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)

污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨 陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)

《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)

郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响

董喆¹, 袁明浩², 苏方成¹, 张剑飞¹, 孙佳宾¹, 张瑞芹^{3*}

(1. 郑州大学化学学院, 郑州 450001; 2. 郑州市环境保护监测中心站, 郑州 450007; 3. 郑州大学生态与环境学院, 郑州 450001)

摘要: 为研究郑州市细颗粒物($PM_{2.5}$)时空分布差异及秋冬季管控措施影响,于2017年秋季至2018年冬季选取5个点位采集 $PM_{2.5}$ 样品并进行组分分析,利用正定矩阵因子分解模型(PMF)解析 $PM_{2.5}$ 污染来源,评估郑州市秋冬季管控效果,并基于源解析结果为下一阶段秋冬季管控提供支撑.郑州市 $PM_{2.5}$ 浓度冬季>秋季>春季>夏季,郑州大学(ZZU) $PM_{2.5}$ 浓度最高[(83.1±44.7) $\mu g \cdot m^{-3}$],高出平均浓度[(76.5±46.1) $\mu g \cdot m^{-3}$]的8.7%. SO_4^{2-} 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 在9种水溶性离子中平均占比高达22.5%、43.6%和23.4%,受燃煤影响 Cl^- 两年冬季占比高于其他季节(6.7%和6.6%).秋冬季二次有机碳(SOC)污染严重,浓度占有机碳的一半以上,2018年市监测站(JCZ)和ZZU点位SOC/OC比2017年有所下降,但其他3个点位大幅度升高,说明这些地区不同的排放基础应对管控措施的表现不尽相同.重构结果表明硫酸盐占比在夏季最高(25.0%),硝酸盐两年秋季占比较高(23.1%和25.1%),地壳物质春季占比最高(18.2%),二次有机气溶胶(SOA)冬季最高(14.1%和20.5%);JCZ和航空港(HKG)点位SOA贡献较大(16.9%和16.4%),ZZU点位受到一次有机气溶胶和地壳物质影响较大(14.3%和12.1%).PMF结果表明二次无机盐(37.5%)、SOA(15.4%)、交通源(14.9%)、工艺过程源(4.8%)、燃煤源(16.0%)、扬尘源(6.5%)和生物质燃烧源(2.8%)是郑州市 $PM_{2.5}$ 的主要污染源,SOA和燃煤源在冬季贡献最大,扬尘源和生物质燃烧源在春季和秋季贡献较大;市区点位JCZ、ZZU和临近机场的HKG受到交通源的影响高于其他点位,非市区点位新密和HKG受到生物质燃烧源的影响较大.对比两年秋冬季,2018年秋冬季SOA、交通源和工艺过程源的贡献有所升高,而二次无机盐、燃煤源和生物质燃烧源有所下降,冬季扬尘源也有所下降.结果表明秋冬季管控措施对一次源中的扬尘、燃煤和工业效果显著,同时SOA前体物挥发性有机物是进一步减排管控的方向.

关键词: $PM_{2.5}$; 正定矩阵因子分解法(PMF); 组分特征; 来源解析; 空气质量管控; 两年秋冬季对比

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2179-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009208

Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou

DONG Zhe¹, YUAN Ming-hao², SU Fang-cheng¹, ZHANG Jian-fei¹, SUN Jia-bin¹, ZHANG Rui-qin^{3*}

(1. College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Environmental Protection Monitoring Center Station, Zhengzhou 450007, China; 3. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To study the spatiotemporal variations in fine particulate matter ($PM_{2.5}$) and the impact of air quality management in autumn and winter in Zhengzhou, five sites were selected to collect $PM_{2.5}$ samples from the autumn of 2017 to the winter of 2018, and the characteristics of the chemical components were analyzed. The positive matrix factorization (PMF) model was also applied to identify the sources of $PM_{2.5}$, and the effect of air quality control was evaluated to provide support for air quality control in autumn and winter in the next stage. The $PM_{2.5}$ concentrations in the four seasons in Zhengzhou were ranked as winter > autumn > spring > summer. The $PM_{2.5}$ concentration at Zhengzhou University (ZZU) was the highest (8.7% higher than the average concentration), and the $PM_{2.5}$ concentrations at the other sites were slightly lower than the average concentration. The concentration of water-soluble ions (WSIs) was low in spring and summer and high in autumn and winter. The average proportions of SO_4^{2-} , NO_3^- , and NH_4^+ in the nine WSIs were as high as 22.5%, 43.6%, and 23.4%, respectively. The proportion of Cl^- in winter was higher than that in the other seasons owing to coal combustion (6.7% and 6.6% in 2017 and 2018, respectively). Owing to wind and sand, the proportions of Ca^{2+} and Mg^{2+} in spring were the highest (4.4% and 0.4%, respectively), and those at the Jiancezhai (JCZ) and ZZU sites were higher than those at the other sites. K^+ , as a marker of biomass burning, had a higher proportion in spring, autumn, and winter. The proportion of K^+ in the spring of 2018 was 1.9%, those in the autumn and winter of 2017 were 1.6% and 2.1%, respectively, and those in the autumn and winter of 2018 were 1.3% and 1.8%, respectively. JCZ, Hangkonggang (HKG), and Xinmi (XM) had higher proportions of NO_3^- , and the proportions of SO_4^{2-} were lower. Secondary organic carbon (SOC) pollution was serious in autumn and winter, and the concentration accounted for more than half of the organic carbon (OC). In 2018, the SOC/OC at the JCZ and ZZU sites decreased compared with that in 2017, but that at the other three sites increased significantly, thereby indicating that different air pollutant emissions in these regions had different performances in response to control policies. The chemical composition reconstruction results showed that the proportion of sulfate was highest in summer (25.0%), the contribution of nitrate was higher in autumn (23.1% and

收稿日期: 2020-09-21; 修订日期: 2020-11-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212400)

作者简介: 董喆(1995~),女,博士研究生,主要研究方向为大气污染与防治, E-mail: dongzhe_9922@163.com

* 通信作者, E-mail: rqzhang@zhu.edu.cn

25.1% for 2017 and 2018, respectively) and winter (20.6% and 23.0% for 2017 and 2018, respectively), the proportion of crustal material was higher in spring (18.2%), and the contribution of secondary organic aerosol (SOA) was the highest in winter (14.1% and 20.5% for 2017 and 2018, respectively). SOA had higher contributions at the JCZ and HKG sites (16.9% and 16.4%, respectively), and ZZU was affected more by primary organic aerosol (14.3%) and crustal materials (12.1%). The PMF results showed that secondary inorganic salts (37.5%), SOA (15.4%), traffic (14.9%), industry (4.8%), coal combustion (16.0%), fugitive dust (6.5%), and biomass burning (2.8%) were the main pollution sources of $PM_{2.5}$ in Zhengzhou. SOA and coal combustion contributed more in winter and fugitive dust contributed more in spring, followed by autumn. Biomass burning contributed more in spring and autumn. The urban sites JCZ and ZZU and the characteristic site HKG near the airport were more affected by traffic sources (16.9%, 16.2%, and 16.0%, respectively) than the other sites. The impact of biomass burning on the non-urban sites XM and HKG was slightly larger (both 2.7%), and the contribution of coal combustion to the suburban site XM was higher (16.8%). Owing to the construction around ZZU, the loading of fugitive dust at ZZU was higher than that at other sites. Comparing the results of the two-year autumn and winter, the contribution of SOA, traffic, and industry increased in the autumn and winter of 2018, whereas the contribution of secondary inorganic salts, coal combustion, and biomass burning decreased and the contribution of fugitive dust in winter also decreased. The results showed that the control strategies in autumn and winter had significant effects on the primary sources, including fugitive dust, coal combustion, and industry, and SOA precursor volatile organic compounds should be targeted for further pollution control.

Key words: $PM_{2.5}$; positive matrix factorization (PMF); chemical composition; source apportionment; air quality control; comparison of two-year autumn and winter

大气污染问题由来已久,不仅影响气候,而且对人体健康有很大的危害,所以大气污染问题成为目前备受重视的环境问题之一^[1].近年来随着国家对大气污染的重视程度增加,针对大气污染的管控力度逐年增加,大气污染问题得到一定的改善,其中引起大气污染的主要污染物细颗粒物($PM_{2.5}$)浓度有所下降,但降幅逐渐减缓,针对 $PM_{2.5}$ 的管控难度也随之增加^[2],且秋冬季重污染依然频发^[3],因此对 $PM_{2.5}$ 的污染特征以及管控措施的效果进行研究是十分必要的.国内外关于 $PM_{2.5}$ 组分特征和来源解析的研究众多,在1993年Chow等^[4]发表了关于 $PM_{2.5}$ 组分的研究,中国也早在1988年就已对 $PM_{2.5}$ 浓度进行观测,并对其中的水溶性离子和主要元素浓度进行了分析^[5],随着大气环境问题的日益凸显, $PM_{2.5}$ 组分分析以及颗粒物来源解析等研究逐步展开,Chan等^[6]在1999年检测了布里斯班市 $PM_{2.5}$ 的组分浓度并解析了其污染来源,He等^[7]于2001年研究了北京市大气 $PM_{2.5}$ 及其组分特征,揭示了北京市碳组分、铵、硝酸盐和硫酸盐的贡献较高,随后针对颗粒物的来源解析研究越来越多,其中应用较为广泛的模型包括正定矩阵因子分解模型(positive matrix factorization, PMF)^[8-12]和化学质量平衡模型(chemical mass balance, CMB)^[13-17],这些研究大多集中在发达国家以及中国京津冀、长三角和沿海地区,在我国中原城市研究不多,尤其是多点位、长时间尺度、并结合空气污染控制措施的实施评估大气污染管控效果的研究更为稀少.

郑州市作为河南省的省会和中原城市群核心城市,近年来经济社会快速发展,大气环境问题随之而来,空气质量水平在全国74座主要城市内居于末尾,详尽的大气污染分析和精准的管控迫在眉睫.近

几年来郑州市积极响应国家治理大气污染的号召,出台了多种应对 $PM_{2.5}$ 污染防治的政策措施,尤其是面对污染严重的秋冬季,郑州市出台一系列政策措施^[18-22],包括强化扬尘污染治理、工业企业“一厂一策”实施停限产和实施机动车限行等政策深化移动污染源减排、加强社会生活源排放治理等,深化治理措施、强化执法检查 and 加速空气质量改善.这些政策的实施对于改善空气质量和降低大气污染对于公众健康的危害具有十分重要的意义,评估大气污染管理控制措施对大气污染的影响至关重要,能够在掌握管控措施实施之后 $PM_{2.5}$ 变化情况的同时,找准进一步管控的方向.因此,本研究设立5个采样点于2017年秋季至2018年冬季(其中包括两年秋冬季)采集 $PM_{2.5}$ 样品,分析 $PM_{2.5}$ 时空分布特征,利用PMF模型将污染来源进行定量解析,评估近两年管控措施对郑州市秋冬季 $PM_{2.5}$ 污染的影响,从而确定更准确的管控方向.

1 材料与方法

1.1 $PM_{2.5}$ 样品采集

本研究根据郑州市的具体情况,设置5个采样点,中心城区3个点位(市监测站-JCZ、郑大新区-ZZU和供水公司-GSGS),特色区域1个点(航空港区-HKG),县市边界1个点(新密市-XM),分布示意图1.市监测站为综合区,市中心地带,人口密集,车流量较大,周边无工业及农业生产;郑大新区位于高新技术开发区,采样点位在学校内,周围无大型工业及农业生产,临近西四环,车流量较大,附近有电厂;供水公司位于高新技术开发区,采样点位在郑州市高新区供水节水办公室,周边有中国人民解放军信息工程大学,食品厂及制药厂等;航空港区

点位,属于对外交通运输区。郑州市航空港区是全国首个国家级航空港经济实验区,与机场高速距离 3.6 km(高速东),是集航空、高铁、城际铁路、地铁和高速公路于一体的综合枢纽,是以郑州新郑国际机场附近的新郑综合保税区为核心的航空经济体和航空都市区,为郑州市的特色;新密为都市区能源、建材原材料循环经济示范区,涵盖多家大型企业,整体功能定位为工业区。

5 个点位代表郑州市整体情况,于 2017 年秋季至 2018 年冬季期间选取典型月份采集 $PM_{2.5}$ 样品,所使用的采样器为武汉市天虹仪表有限责任公司的四通道采样器 (TH-16A),每天采集一次样品,采样时间为每日 10:00 至次日 09:00,采样时长 23 h,每组样品包含 2 个直径为 47 mm 的石英膜样品和 2 个直径为 47 mm 的 Teflon 膜样品,得到有效样品

1 196 组,具体采样时间见表 1。

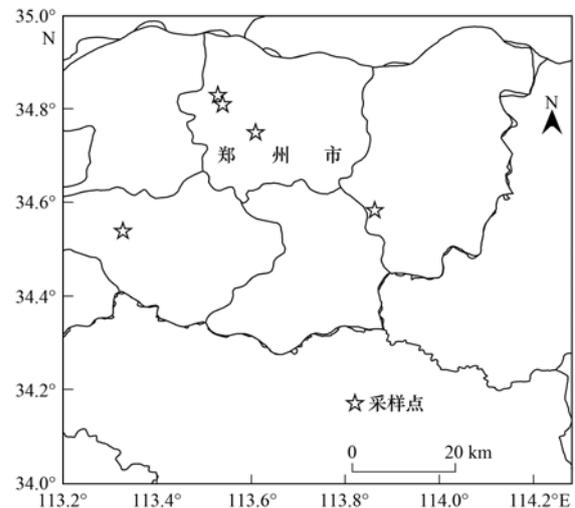


图 1 采样点位分布示意

Fig. 1 Location of the sampling sites

表 1 采样信息

Table 1 Information of sampling

时间	日期(月-日)					天数/d	有效样品/组	样品有效率
	市监测站	郑州大学	供水公司	新密	航空港			
2017 年秋季	10-15 ~ 11-30	10-14 ~ 11-30	—	—	—	95	66	0.69
2017 年冬季	12-01 ~ 01-31	12-01 ~ 01-31	01-01 ~ 02-28	01-01 ~ 02-28	01-01 ~ 02-28	321	275	0.86
2018 年春季	04-01 ~ 04-30	04-01 ~ 04-30	03-01 ~ 03-31, 05-01 ~ 05-31	03-01 ~ 03-31, 05-01 ~ 05-31	05-01 ~ 05-31	215	191	0.89
2018 年夏季	07-01 ~ 07-31	07-01 ~ 07-24	07-01 ~ 07-31	07-01 ~ 07-31	07-01 ~ 07-31	148	122	0.82
2018 年秋季	10-01 ~ 11-30	10-09 ~ 11-30	10-01 ~ 11-30	10-01 ~ 11-30	10-01 ~ 11-30	297	269	0.91
2018 年冬季	12-01 ~ 01-31	12-01 ~ 01-31	12-01 ~ 01-31	12-01 ~ 01-31	12-01 ~ 01-31	310	273	0.88

采样前空白石英滤膜需用铝箔包裹在 450℃ 温度下灼烧 4 h 后放置在恒温恒湿(温度: 20℃; 相对湿度: 50%)的超净室内平衡 48 h 至恒重,使用高精度天平(瑞士 Mettler Toledo XS205)称重。收集的样品平衡并称量后保存于 -18℃ 的冰箱冷藏。

1.2 化学组分分析

$PM_{2.5}$ 样品中的有机碳 (OC) 和元素碳 (EC) 采用美国 Sunset Lab Inc Model 的碳分析仪进行测定; 水溶性无机离子 (Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 F^- 、 Cl^- 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-}) 的分析使用美国戴安公司的 ICS-900 型(阴离子)离子色谱仪和 ICS-90 型(阳离子)离子色谱仪; 使用德国布鲁克公司生产的 S8 TIGER 型波长散射 X 射线荧光光谱仪分析样品中无机元素 (Fe、Na、Mg、Al、Si、P、S、Cl、K、Ca、Ti、V、Ni、Cu、Zn、Cr、Mn、Co、Ga、As、Se、Sr、Sn、Sb、Ba 和 Pb)。测试方法以及质量保证和质量控制参照文献[23,24]。

1.3 分析方法

1.3.1 组分重构

颗粒物组分一次有机碳 (POC) 和二次有机碳 (SOC) 用 OC/EC 最小比值计算^[25], 公式如下:

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

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

组分重构中一次有机气溶胶 (POA) 用 $1.4 \times POC$ 计算, 二次有机气溶胶 (SOA) 用 $1.4 \times SOC$ 计算;

地壳元素 (crustal matter, CM) 计算公式如下:

$$CM = 2.20 \times [Al] + 2.49 \times [Si] +$$

$$1.63 \times [Ca] + 2.42 \times [Fe]$$

1.3.2 PMF 来源解析

PMF 受体模型法根据长时间序列的受体化学组分数据集进行源解析, 提取的因子是数学意义的指标, 需要通过源类特征的化学组成信息进一步识别实际的颗粒物源类, 其首先利用权重计算出颗粒物化学组分中的不确定度, 然后用最小二乘法来确定颗粒物的主要污染源并计算源贡献率。具体模型原理及不确定度的确定详见文献[26,27]。

2 结果与讨论

2.1 $PM_{2.5}$ 及化学组分时空分布

采样期间郑州市 $PM_{2.5}$ 浓度如图 2 所示, 2017 年秋季、冬季 $PM_{2.5}$ 浓度分别为 (81.4 ± 35.1)

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $(87.4 \pm 58.8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,2018年春夏秋冬PM_{2.5}浓度分别为 (61.7 ± 27.7) 、 (42.4 ± 16.8) 、 (71.3 ± 35.9) 和 $(94.8 \pm 49.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,冬季PM_{2.5}污染最严重,全年呈现冬季>秋季>春季>夏季的季节变化规律.2018年冬季较2017年冬季PM_{2.5}有所升高,市区点位JCZ和ZZU的PM_{2.5}浓度较前一年下降了5.7%和13.8%,其余3个点位(GSGS、XM和HKG)PM_{2.5}浓度有所升高,升高了22.8%、39.2%和9.7%.PM_{2.5}浓度高低不仅与排放量相关,气象条件也是一大影响因素,边界层

高度降低时气象条件不利于污染物扩散,低矮源排放的污染物累积,致使PM_{2.5}浓度升高^[28].不同点位之间各个季节浓度分布略有差异,2017年秋季JCZ点位PM_{2.5}浓度高于ZZU点位,2017年冬至2018年秋季,ZZU点位在5个点位中呈现最高的PM_{2.5}浓度,但2018年冬季该站点PM_{2.5}浓度在5个点位中最低,整体来看平均浓度 $[(78.7 \pm 44.7) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 高出5个点位平均浓度 $[(76.5 \pm 46.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 的8.7%,其余站点PM_{2.5}浓度稍低于平均浓度.

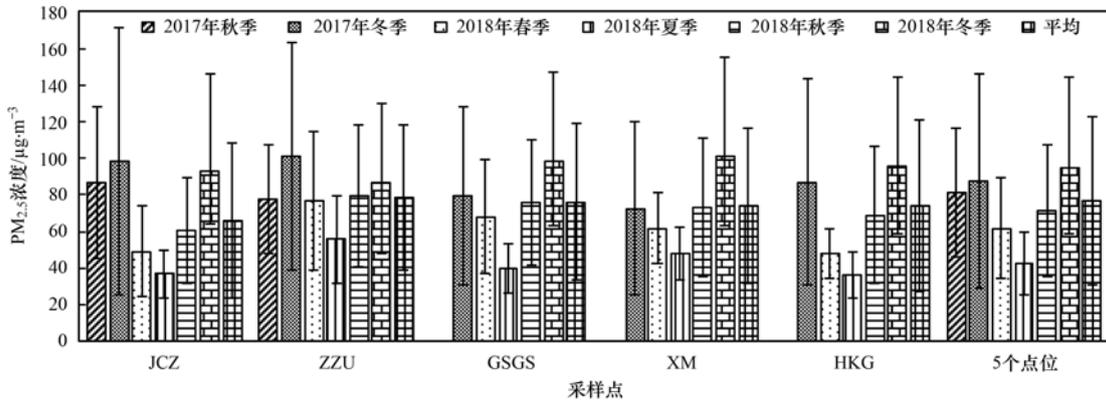


图2 PM_{2.5}时空分布

Fig. 2 Spatiotemporal distribution of PM_{2.5}

郑州市PM_{2.5}中贡献较高的水溶性离子为SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺,在9种水溶性离子中平均占比达到22.5%、43.6%和23.4%,其余离子贡献较小,其中Ca²⁺和Cl⁻占比略高于其他离子,平均占比为2.3%和5.1%(图3).SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺贡献与气态前体物SO₂、NO₂和NH₃,及其在颗粒物中的二次转化密切相关,因此较高的SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺表明郑州地区较多的SO₂、NO₂和NH₃一次排放及大量的二次转化.不同点位离子组分分布存在差异,JCZ、HKG和XM点位NO₃⁻占比较高,分别占9种

水溶性离子总浓度的44.6%、44.7%和44.1%,这与这3个点位较大的交通排放量及二次转化量相关;HKG点位SO₄²⁻的占比(21.8%)较其他点位稍低,除了二次转化的影响以外,SO₄²⁻与燃煤排放密切相关,可见与其他点位相比,HKG可能受到燃煤源影响较小;JCZ和ZZU点位较高的Ca²⁺和Mg²⁺占比(JCZ:3.4%和0.3%;ZZU:3.1%和0.3%),表明颗粒物受到扬尘影响较大;而HKG、ZZU和XM点位K⁺占比较高(2.3%、2.0%和1.8%),HKG点位地理位置远离市中心,XM为县区点位,

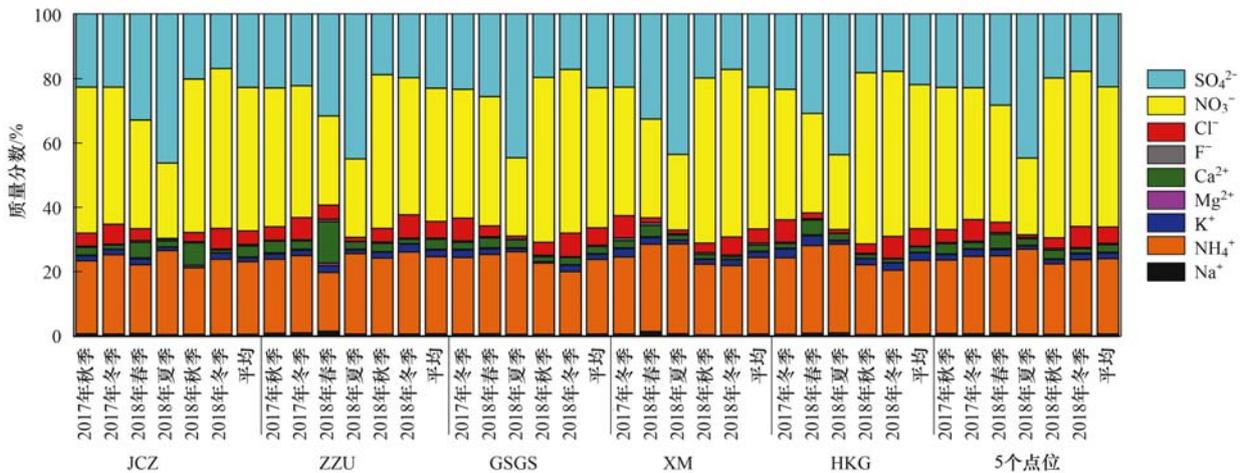


图3 PM_{2.5}中水溶性离子时空分布

Fig. 3 Spatiotemporal distribution of water-soluble ions in PM_{2.5}

ZZU 位于郑州市西四环,3 个点位距离市中心较远,可能受到周边农村地区生物质燃烧的传输影响略大于其他市区点位。

除了存在空间差异,郑州市 $PM_{2.5}$ 中的离子组分还具有明显的季节分布特征,整体浓度呈现春夏低,秋冬高的季节变化规律。 NH_4^+ 占比夏季(26.4%)略高于其他季节, SO_4^{2-} 贡献夏季高(44.6%),春季其次(28.2%),秋冬季较低(2017 年:22.7%、22.8%; 2018 年:19.8%、17.6%),其原因在于春季和夏季紫外线强,温度高,大气条件易于发生光化学反应,形成二次污染物;而硝酸根恰恰相反,秋冬季占比高(2017 年:44.1%、41.0%; 2018 年:50.0%、48.2%),春季其次,夏季最低,除了受到秋冬季不利的气象条件影响以外,还可能由于秋冬季机动车排放量增加、以及周围区域的传输影响,另外硝酸盐热力学稳定性差,夏季温度高会导致硝酸盐易分解,并且各个季节氧化性和氧化条件不同,也是硝酸盐冬夏差异的原因^[29]; Cl^- 作为燃煤源的标志物质,冬季占比明显高于其他季节(6.7%和 6.6%),这主要由于冬季集中供暖燃煤量大幅增加,导致污染物排放增加; Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 春季最高(4.4%和 0.4%),春季多风沙,颗粒物受到扬尘影响较大,因此扬尘源标志物质 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 在春季占比增加;而 K^+ 作为生物质燃烧的标志物质,在春季和秋冬季占比较高,2018 年春季 K^+ 在 9 种离子中的占比为 1.9%,2017 年和 2018 年秋季占比分别为 1.6%和 1.3%,冬季占比为 2.1%和 1.8%。

OC 和 EC 是 $PM_{2.5}$ 中重要的碳组分,其中 OC 主要来自于燃烧源的一次排放和有机气体的二次转化^[30],EC 主要来自于燃料的不完全燃烧^[31],其分布特征如图 4 所示。OC 浓度显示出冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季的趋势,并且 2018 年冬季 OC 平均浓度 ($21.1 \mu g \cdot m^{-3}$) 明显高于 2017 年冬季 (16.1

$\mu g \cdot m^{-3}$); EC5 个点位的平均结果来看,夏季最低 ($0.94 \mu g \cdot m^{-3}$),其他季节 EC 浓度较高,2018 年呈现春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季的趋势,2017 年秋冬季 EC 平均浓度 ($1.7 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $1.8 \mu g \cdot m^{-3}$) 均高于 2018 年秋冬季 ($1.3 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $1.2 \mu g \cdot m^{-3}$),从各点位的结果来看,除了 XM 点位其余站点也都呈现夏季 EC 平均浓度最低的规律,另外各站点春季均表现出较高的 EC 浓度水平,EC 主要来源于一次排放,又是生物质燃烧源的标志物质,春季浓度高可能是受到生物质燃烧的影响有所增加。OC 分为 SOC 和 POC^[32],其中 SOC 占有很大比例,尤其是在秋冬季(50%~83%),秋冬季气态前体物挥发性有机物(VOCs)、 SO_2 和 NO_x 等排放量大,混合层高度低不利于污染物扩散,因此二次有机碳污染较为严重。从点位分布来看,ZZU 点位 OC 受到 SOC 的贡献略低于其他点位,但 SOC/OC 平均结果也已达 0.51,其他点位 SOC 污染更为严重,SOC/OC 平均结果分别为 0.64(JCZ)、0.61(GSGS)、0.53(XM)和 0.66(HKG)。对比两年冬季结果,发现 2018 年 JCZ 和 ZZU 点位 SOC/OC 比 2017 年有所下降,但其他 3 个点位大幅度升高,并且 2018 年冬季这 3 个点位 SOC/OC 比值高达 0.76(GSGS)、0.79(XM)和 0.83(HKG),表明大量的前体物二次转化和严重的 SOC 污染。另外,利用 OC 和 EC 之间的相关性可以判断 OC 和 EC 的同源性^[33],本研究计算了 OC 和 EC 的相关性,如图 5 和表 2 所示,除了 2017 年秋冬季 OC、EC 具有弱相关以外,其余时间以及各个点位 OC 和 EC 之间相关性均较差,这就表明 OC 和 EC 之间的同源性较差,结合 SOC 在 OC 中的占比来看,SOC 有很高的贡献,而 EC 较为稳定,来自一次排放,所以 OC、EC 较差的同源性,一方面由于 OC 受到 SOC 的影响较大,另一方面可能 OC 和 EC 受到的一次排放源的影响也存在差异性^[34]。

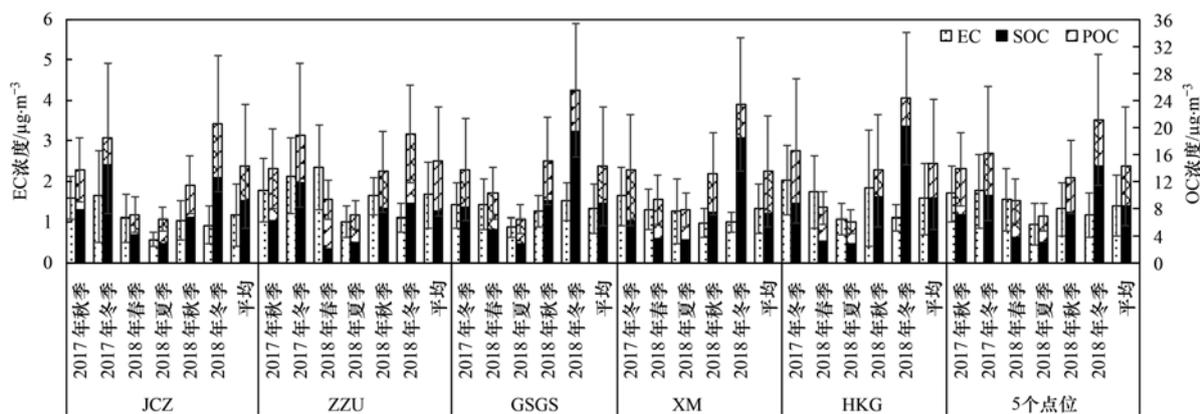
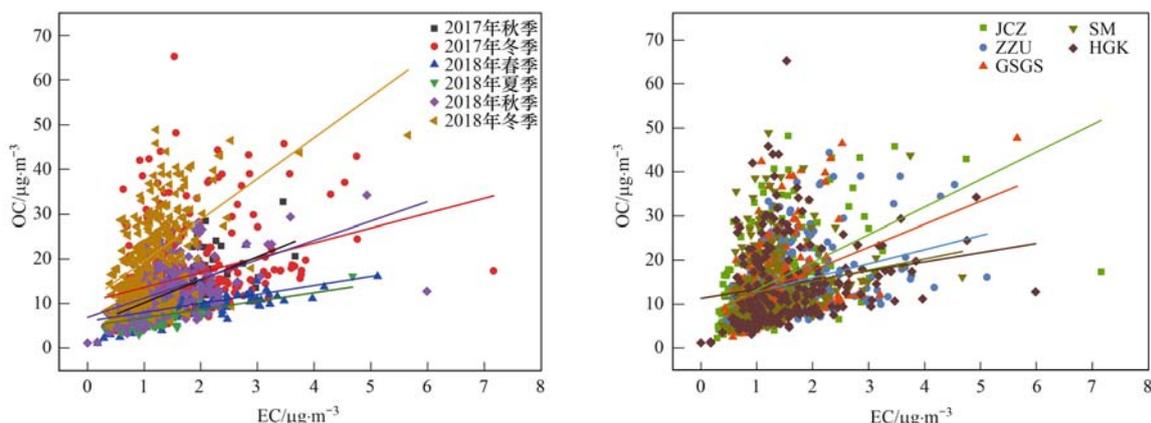


图 4 $PM_{2.5}$ 中碳组分时空分布

Fig. 4 Spatiotemporal distribution of carbonaceous components in $PM_{2.5}$

图 5 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 之间线性关系Fig. 5 Linear relationship between OC and EC in $PM_{2.5}$ 表 2 $PM_{2.5}$ 中 OC 和 EC 的相关性Table 2 Correlation between OC and EC in $PM_{2.5}$

项目	2017 年		2018 年				点位				
	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	JCZ	ZZU	GSGS	XM	HKG
R^2	0.43	0.09	0.23	0.21	0.28	0.27	0.27	0.10	0.13	0.03	0.04

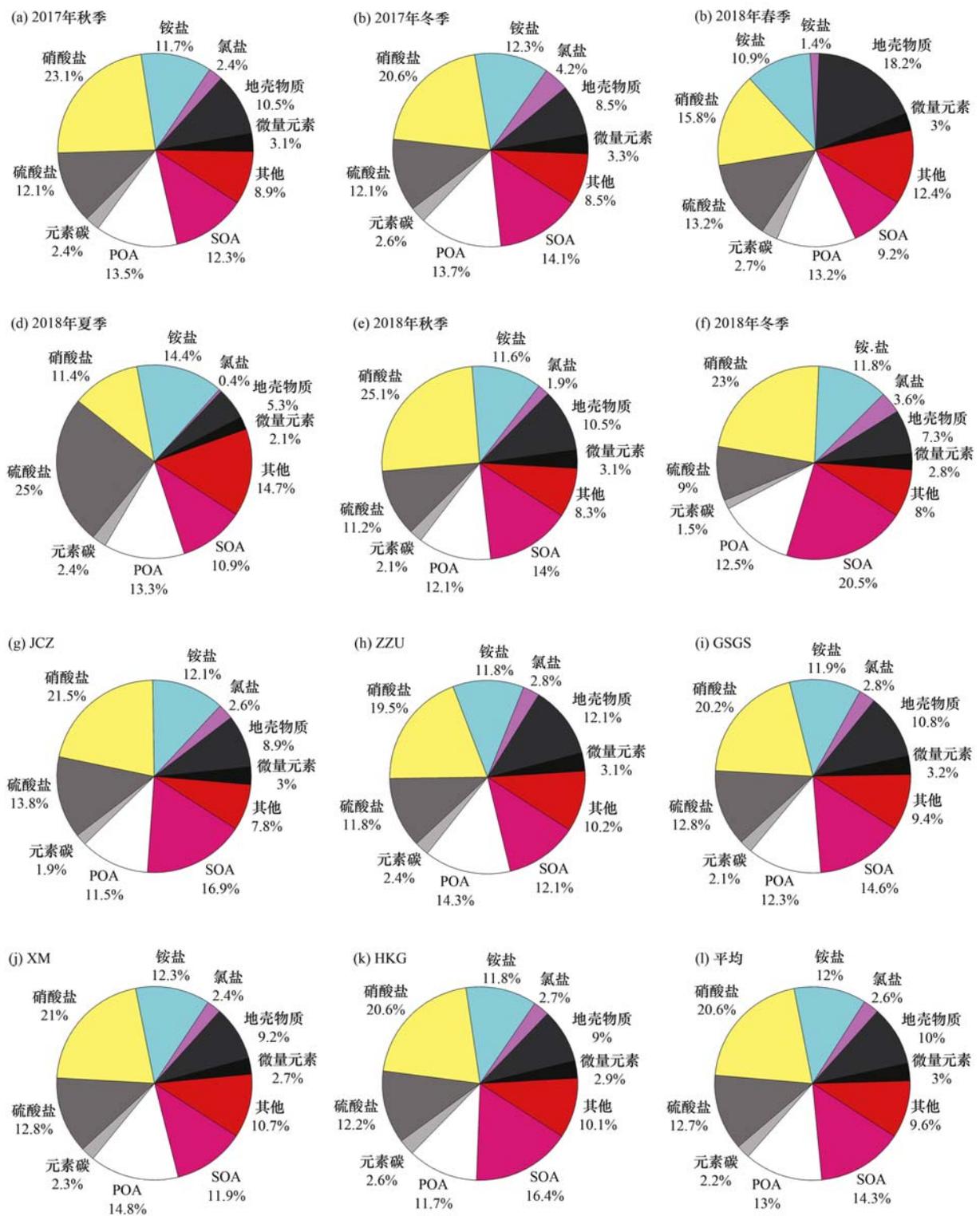
2.2 组分重构及来源解析

2017 年秋季至 2018 年冬季郑州市各站点及各季节 $PM_{2.5}$ 组分重构结果如图 6 所示,硫酸盐占比在夏季最高(25.0%),夏季温度高,紫外线照射强,二次反应剧烈,导致二次污染物生成增加,而硝酸盐受热易分解,因此在秋冬季占比较高,两年秋、冬季硝酸盐占比分别为 23.1%、20.6% (2017 年) 和 25.1%、23.0% (2018 年),但这也与前体物 NO_x 排放、气象条件和周围区域传输相关;春季地壳物质占比较高(18.2%),这与春季多风沙,扬尘较多的事实相符;冬季 SOA 占比最高,两年冬季 SOA 占比分别达到 14.1% 和 20.5%,与冬季供暖燃煤使用量增加相关;POA 占比四季分布较为均匀相差不大;2018 年冬季 EC 占比(1.5%)略低于其他季节.从各点位结果来看,JCZ 和 HKG 点位 SOA 贡献较大(16.9% 和 16.4%),JCZ 点位位于市中心,HKG 点位临近新郑机场,是重要的交通枢纽,2 个点位均有较大的交通流量,SOA 主要前体物为 VOCs、 SO_2 和 NO_x ,而交通污染源会排放大量的 VOCs 和 NO_x ,参与大气反应因此产生较多的 SOA;ZZU 点位受到 POA(14.3%)和地壳物质(12.1%)影响较大,ZZU 位于西四环,采样期间附近有高架施工,因此受到建筑扬尘影响较大,导致地壳物质占比高于其他点位;其他组分在各站点 $PM_{2.5}$ 中的贡献相差不大.

$PM_{2.5}$ 来源解析使用 PMF 模型来完成,通过对 5~8 个因子的尝试,最终选择了 6 个因子,其 $Q(\text{Robust})/Q(\text{expect}) = 9.2$,BS 误差分析得到的因

子匹配率除因子 4 为 86% 以外,其余因子的因子匹配率均为 90%;DISP 误差诊断显示未发生因子交换现象,即 swaps 为 0,同时 BS-DISP 运行结果也无因子交换;旋转运行分析中 F-peak = 0 的结果最佳.得到的因子谱图如图 7 所示,根据标志元素确定因子指示的污染来源,其中 NH_4^+ 、 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 指示二次无机盐污染源;EC、K 和 Ba 是生物质燃烧的重要标志物质^[35];Fe、Mg、Ca、Al、Si 和 Ti 是扬尘源的标志物质^[36, 37];Cr 和 Ni 等主要来自于钢铁、铸造等工业排放^[38],同时 Ni 和 V 也与燃油电厂和蒸汽锅炉相关,另外 Sr 和 Sb 也与工业锅炉排放相关,均是工艺过程源主要的标志元素^[9, 39];OC、 Cl^- 和 As 指示燃煤源^[40],同时煤炭燃烧的飞灰中含有大量的 Pb^[41];OC、EC、Cu、Zn、Cr 和 Mn 均为交通源重要的指示物质^[42~45].

郑州市 $PM_{2.5}$ 的 PMF 受体模型源解析结果时空分布特征如图 8 所示,与组分重构结果基本一致,各点位和各季节二次无机盐贡献均为最大(35.4%~40.8%),表明郑州市二次污染严重.5 个点位主要贡献源并无差别,但源贡献率略有差异,JCZ 和 XM 点位二次无机盐贡献高于其他点位,对 $PM_{2.5}$ 贡献均达到 38.6%;JCZ、HKG 和 ZZU 交通源贡献较大,贡献率分别为 16.9%、16.2% 和 16.0%,JCZ 在市中心,ZZU 点位临近西四环快速路和绕城高速,和 JCZ 点位同属于市区点位,HKG 位于新郑机场,是重要的交通枢纽,3 个点位交通流量都很大,因此交通污染源贡献较高;ZZU、GSGS 和 XM 工艺过程源贡献

图6 PM_{2.5}组分重构结果Fig. 6 Chemical component reconstruction of PM_{2.5}

(5.7%、5.5%和5.3%)高于其他2个点位(JCZ: 3.1%和HKG:5.0%),与工艺过程排放源差异相关;XM和HKG均不是市区点位,其生物质燃烧源的贡献(均为2.7%)稍高于其他点位;燃煤源也是XM点位稍高(16.8%),可能与郊区散煤燃烧管制不到位相关;ZZU点位采样期间恰逢周边施工,扬尘源贡献在5个点位中最大(10.4%),其次是

GSGS(8.3%)和HKG点位(6.2%)。

各个季节源解析结果显示,SOA、燃煤源在冬季贡献最大,两年冬季分别贡献14.1%、20.5%(SOA)和19.3%、18.9%(燃煤),冬季集中供暖,燃煤量大大增加,因此污染物排放增加,贡献高于其他季节,另外煤炭燃烧会排放大量的SOA主要前体物VOCs和SO₂,造成冬季SOA占比增加;扬尘源在春

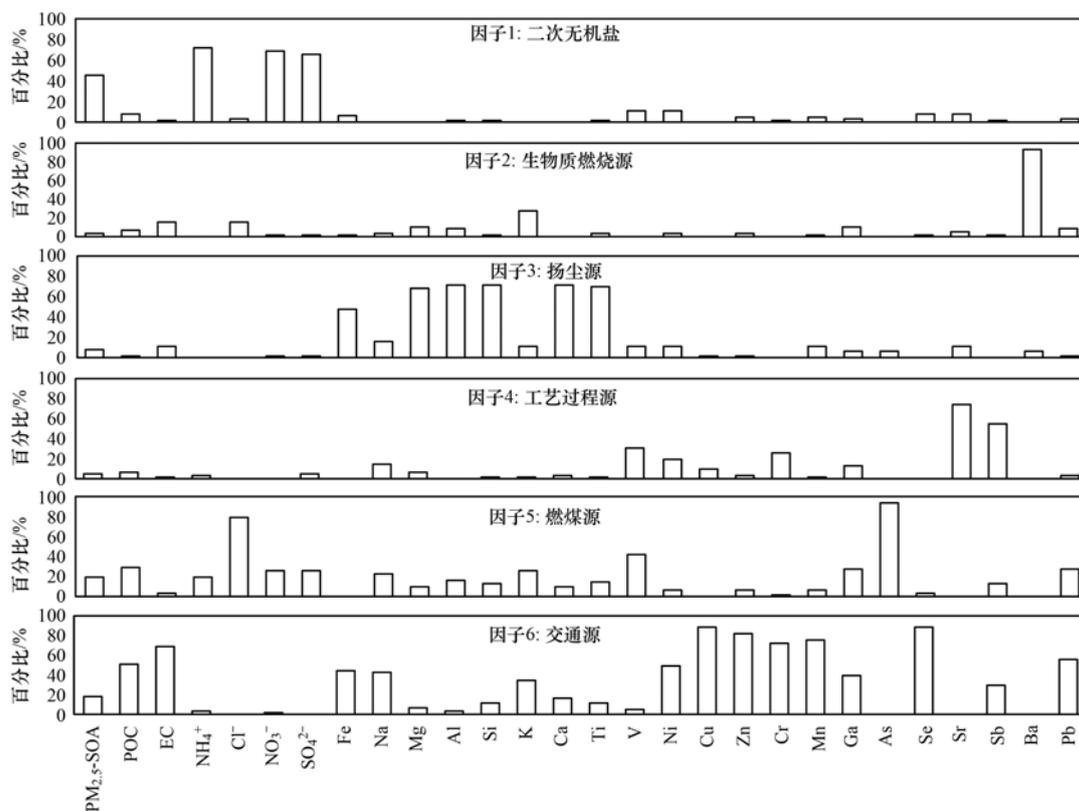


图7 $PM_{2.5}$ 的PMF源解析因子谱

Fig. 7 Source factors of $PM_{2.5}$ identified by PMF model

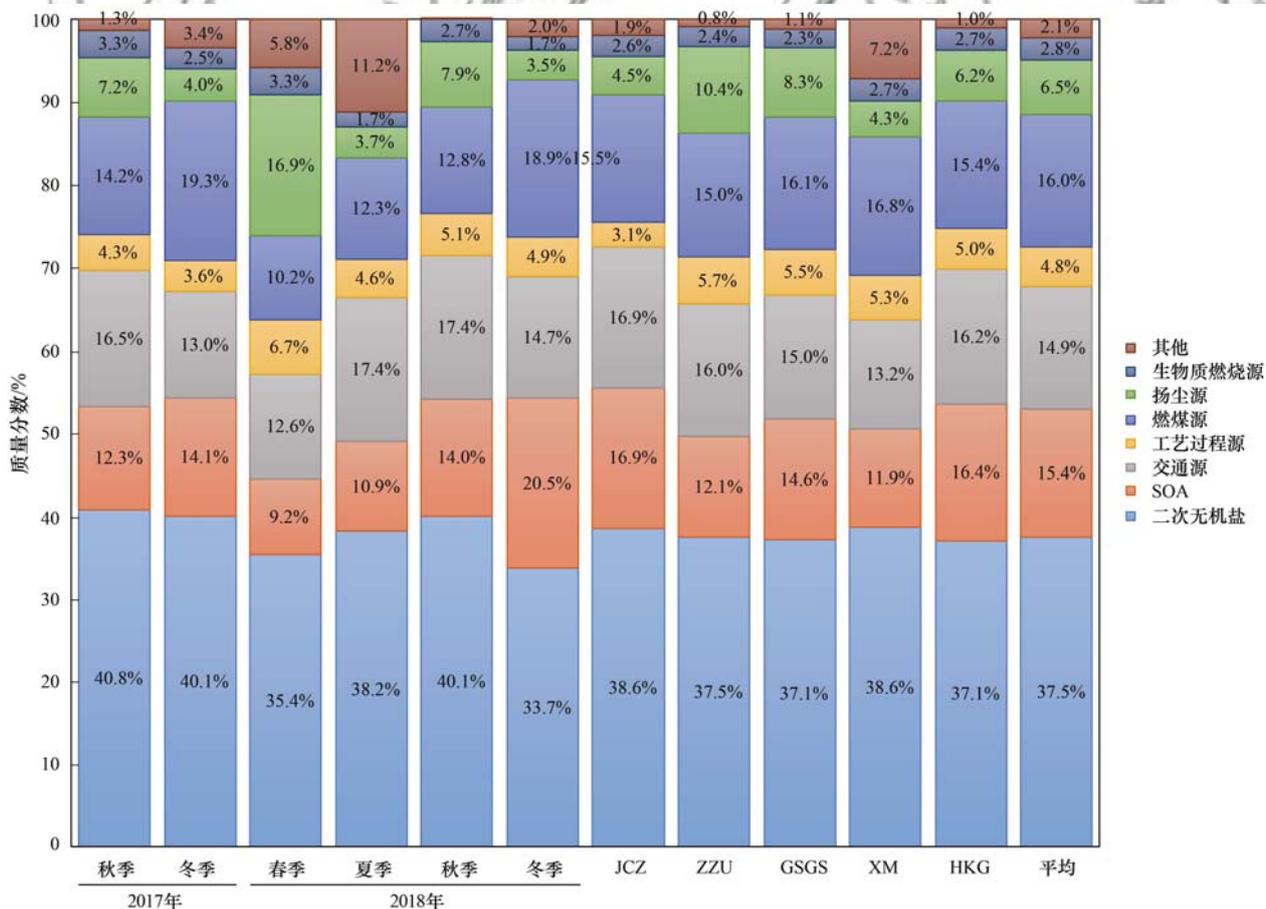


图8 郑州市 $PM_{2.5}$ 源解析结果

Fig. 8 Source contributions of $PM_{2.5}$ in Zhengzhou

季贡献最大,高达 16.9%,秋季次之(两年秋季分别贡献 7.2% 和 7.9%); 生物质燃烧源在春季和秋季贡献较大,分别贡献了 3.3% (2017 年秋季)、3.3% (2018 年春季)和 2.7% (2018 年秋季),虽然露天焚烧已经被禁止,但作物秸秆仍会被用作炉灶、民用取暖和生物质发电厂的燃料,因此在春季和秋季作物成熟期,生物质燃烧源占比略有增加。

两年秋冬季对比显示,2018 年秋冬季 SOA、交通源和工艺过程源的贡献有所升高,秋季分别升高了 1.7%、0.9% 和 0.8%,冬季分别升高了 6.4%、1.7% 和 1.3%。这可能是由于机动车保有量持续增加,在一定程度上抵消了限行政策的减排收益,同时由于两年秋冬季扩散条件不同,污染源贡献上的差异也可能在一定程度上受到气象及传输的影响; SOA 的增加可能是由于前体物 VOCs 的排放量及二次转化有所增加,由此可见对于 VOCs 的减排,需在排放总量控制的前提下考虑更为合理的减排路径; 2018 年工艺过程源贡献率的轻微上升,可能是由于 2017 年采样期间郑州市政府对工业企业采取了更为严格的“一刀切”措施,而 2018 年管控力度有所放缓。而燃煤源和生物质燃烧源有所下降,冬季扬尘源也有所下降,表明郑州市采取的“控煤降尘”、“散乱污”整治、生物质锅炉替代等措施和对民用生物质燃烧和生物质露天燃烧的管控具有一定的成效; 另外二次无机盐占比也有所下降,秋、冬季分别下降了 0.7% 和 6.4%,表明针对二次无机盐前体物的减排初见成效。

3 结论

(1) 郑州市秋冬季 $PM_{2.5}$ 污染较为严重,2018 年冬季 JCZ 和 ZZU 点位 $PM_{2.5}$ 浓度较前一年下降了 5.7% 和 13.8%,其余 3 个点位(GSGS、XM 和 HKG) $PM_{2.5}$ 浓度有所升高,升高了 22.8%、39.2% 和 9.7%。冬季 NO_3^- 和 SOC 污染明显并逐渐加重,尤其是 GSGS、XM 和 HKG 点位,应加强前体物 NO_x 和 VOCs 的管控。

(2) 重构结果表明: 硫酸盐占比在夏季最高(25.0%),硝酸盐在秋冬季占比较高,地壳物质春季占比较高(18.2%),SOA 冬季占比最高(14.1% 和 20.5%); JCZ 和 HKG 点位交通量大,SOA 贡献多(16.9% 和 16.4%),ZZU 点位由于附近施工,受到 POA 和地壳物质的影响大(14.3% 和 12.1%)。

(3) 源解析结果表明二次无机盐、SOA、交通源、工艺过程源、燃煤源、扬尘源和生物质燃烧源是郑州市 $PM_{2.5}$ 的主要污染源。SOA、燃煤源在两年冬季负载率分别达到 14.1%、20.5% (SOA) 和 19.3%、

18.9% (燃煤),扬尘源在春季贡献最大(16.9%); 市区点位 JCZ、ZZU 和临近机场的特色点位 HKG 交通源负载(16.9%、16.2% 和 16.0%) 高于其他点位,非市区点位 XM 和 HKG 受到生物质燃烧源的影响略大(均为 2.7%)。

(4) 两年秋冬季对比,2018 年秋冬季燃煤源、生物质燃烧源和二次无机盐占比有所下降,冬季扬尘源也有所下降,表明“控煤降尘”、“散乱污”整治、生物质锅炉替代等措施和对民用生物质燃烧和生物质露天燃烧的管控具有一定的成效。SOA、交通源和工艺过程源的贡献有所升高,因此在 SNA 关键前体物硫氧化物和氮氧化物合理减排路径的前提下,SOA 前体物 VOCs 是进一步减排管控的主要方向。

参考文献:

- [1] 何涛, 彭燕, 李璐, 等. 长三角一次局地污染过程分析[J]. 环保科技, 2017, 23(2): 42-46, 10.
He T, Peng Y, Li L, et al. Analysis of a local air pollution event in Yangtze River Delta [J]. Environmental Protection and Technology, 2017, 23(2): 42-46, 10.
- [2] 刁刘丽, 李森, 刘保双, 等. 驻马店市市区采暖季 $PM_{2.5}$ 时间和空间来源解析研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(1): 74-91.
Diao L L, Li S, Liu B S, et al. Study on temporal and spatial source apportionment during the heating period in Zhumadian [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, 34(1): 74-91.
- [3] Wang S B, Yin S S, Zhang R Q, et al. Insight into the formation of secondary inorganic aerosol based on high-time-resolution data during haze episodes and snowfall periods in Zhengzhou, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 47-56.
- [4] Chow J C, Watson J G, Lowenthal D H, et al. PM_{10} and $PM_{2.5}$ compositions in California's san joaquin valley [J]. Aerosol Science and Technology, 1993, 18(2): 105-128.
- [5] 王玮, 汤大钢, 刘红杰, 等. 中国 $PM_{2.5}$ 污染状况和污染特征的研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(1): 1-5.
Wang W, Tang D G, Liu H J, et al. Research on current pollution status and pollution characteristics of $PM_{2.5}$ in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(1): 1-5.
- [6] Chan Y C, Simpson R W, McTainsh G H, et al. Source apportionment of $PM_{2.5}$ and PM_{10} aerosols in Brisbane (Australia) by receptor modelling [J]. Atmospheric Environment, 1999, 33(19): 3251-3268.
- [7] He K B, Yang F M, Ma Y L, et al. The characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(29): 4959-4970.
- [8] Polissar A V, Hopke P K, Poirot R L. Atmospheric aerosol over vermont: chemical composition and sources [J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(23): 4604-4621.
- [9] Lee J H, Yoshida Y, Turpin B J, et al. Identification of sources contributing to Mid-Atlantic regional aerosol [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2002, 52(10): 1186-1205.
- [10] 宋宇, 唐孝炎, 方晨, 等. 北京市大气细粒子的来源分析 [J]. 环境科学, 2002, 23(6): 11-16.
Song Y, Tang X Y, Fang C, et al. Source apportionment on fine particles in Beijing [J]. Environmental Science, 2002, 23(6):

- 11-16.
- [11] 李明燕, 杨文, 魏敏, 等. 典型沿海城市采暖期细颗粒物组分特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(4): 1550-1560.
Li M Y, Yang W, Wei M, *et al.* Characteristics and sources apportionment of fine particulate matter in a typical coastal city during the heating period[J]. Environmental Science, 2020, **41**(4): 1550-1560.
- [12] Chen C R, Zhang H X, Li H Y, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of ambient PM_{1.0} and PM_{2.5} in a polluted city in North China plain [J]. Atmospheric Environment, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117867.
- [13] Park S S, Bae M S, Kim Y J. Chemical composition and source apportionment of PM_{2.5} particles in the Sihwa area, Korea[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2001, **51**(3): 393-405.
- [14] 朱先磊, 张远航, 曾立民, 等. 北京市大气细颗粒物 PM_{2.5} 的来源研究[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(5): 1-5.
Zhu X L, Zhang Y H, Zeng L M, *et al.* Source identification of ambient PM_{2.5} in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2005, **18**(5): 1-5.
- [15] Zheng M, Salmon L G, Schauer J J, *et al.* Seasonal trends in PM_{2.5} source contributions in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(22): 3967-3976.
- [16] Tian S S, Liu Y Y, Wang J, *et al.* Chemical compositions and source analysis of PM_{2.5} during autumn and winter in a heavily polluted city in China[J]. Atmosphere, 2020, **11**(4), doi: 10.3390/atmos11040336.
- [17] Shen H Z, Yang T M, Lu C C, *et al.* Chemical fingerprint and source apportionment of PM_{2.5} in highly polluted events of southern Taiwan [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020, **27**(7): 6918-6935.
- [18] 郑州市人民政府. 郑州市重污染天气应急预案[Z]. 郑州: 郑州市人民政府, 2017. 1-48.
- [19] 郑州市人民政府. 郑州市 2017—2018 年秋冬季工业企业错峰生产实施方案[Z]. 郑州: 郑州市人民政府, 2017. 1-6.
- [20] 郑州市人民政府. 郑州市 2017 年工业企业采暖季大宗物料错峰运输实施方案[Z]. 郑州: 郑州市人民政府, 2017. 1-5.
- [21] 郑州市人民政府. 郑州市 2018—2019 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案[Z]. 郑州: 郑州市人民政府, 2018. 1-45.
- [22] 郑州市人民政府. 郑州市重污染天气应急预案[Z]. 郑州: 郑州市人民政府, 2018. 1-23.
- [23] Wang S B, Yan Q S, Yu F, *et al.* Distribution and source of chemical elements in size-resolved particles in Zhengzhou, China: Effects of regional transport[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2018, **18**(2): 371-385.
- [24] Jiang N, Dong Z, Xu Y Q, *et al.* Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} source profiles of fugitive dust in Zhengzhou, China[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2018, **18**(2): 314-329.
- [25] 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.
- [26] Li Q, Jiang N, Yu X, *et al.* Sources and spatial distribution of PM_{2.5}-bound polycyclic aromatic hydrocarbons in Zhengzhou in 2016[J]. Atmospheric Research, 2019, **216**: 65-75.
- [27] U. S. Environmental Protection Agency. EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R]. Washington, DC: US EPA Office of Research and Development, 2014.
- [28] 王颖, 梁依玲, 王丽霞. 气象条件对污染物浓度分布影响的研究[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, **9**(2): 69-74.
Wang Y, Liang Y L, Wang L X. Research on the impact of meteorological field on the spatial distribution of the pollutant concentration[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2015, **9**(2): 69-74.
- [29] Leung D M, Shi H R, Zhao B, *et al.* Wintertime particulate matter decrease buffered by unfavorable chemical processes despite emissions reductions in China[J]. Geophysical Research Letters, 2020, doi: 10.1029/2020GL087721.
- [30] 吕喆, 韩力慧, 程水源, 等. 北京城区冬夏季含碳气溶胶浓度特征及区域传输对灰霾形成影响[J]. 北京工业大学学报, 2018, **44**(3): 463-472.
Lü Z, Han L H, Cheng S Y, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosols and influence of regional transport on haze formation in winter and summer in urban of Beijing[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, **44**(3): 463-472.
- [31] 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 等. 西安市 PM_{2.5} 中碳质气溶胶污染特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1529-1536.
Mou Z, Chen Q C, Wang Y Q, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol pollution in PM_{2.5} in Xi'an [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1529-1536.
- [32] 周家茂, 曹军骥, 张仁健. 北京大气中 PM_{2.5} 及其碳组分季节变化特征与来源研究[A]. 见: 中国颗粒学会第六届学术年会暨海峡两岸颗粒技术研讨会论文集(下)[C]. 上海: 中国颗粒学会, 2008. 681-684.
- [33] Yang F, He K, Ye B, *et al.* One-year record of organic and elemental carbon in fine particles in downtown Beijing and Shanghai[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2005, **5**(6): 1449-1457.
- [34] 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.
- [35] 甘小凤, 曹军骥, 王启元, 等. 西安市秋季大气细粒子 (PM_{2.5}) 中化学元素的浓度特征和来源[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(19): 11692-11694, 11697.
Gan X F, Cao J J, Wang Q Y, *et al.* Concentration characteristics and sources of chemical elements in atmospheric fine particles (PM_{2.5}) in autumn in Xi'an City[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, **39**(19): 11692-11694, 11697.
- [36] Liu B S, Wu J H, Zhang J Y, *et al.* Characterization and source apportionment of PM_{2.5} based on error estimation from EPA PMF 5.0 model at a medium city in China [J]. Environmental Pollution, 2017, **222**: 10-22.
- [37] Tan J H, Zhang L M, Zhou X M, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Lanzhou, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **601-602**: 1743-1752.
- [38] 王化明, 张康, 张星. X 射线荧光光谱扩展基本参数法测定不锈钢中的多种成分[J]. 中国无机分析化学, 2017, **7**(4): 73-79.
Wang H M, Zhang K, Zhang X. Determination of various components in stainless steel with extended basic parameter method using XRF spectrometry[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2017, **7**(4): 73-79.
- [39] Zhang J Z, Zhou X H, Wang Z, *et al.* Trace elements in PM_{2.5} in Shandong Province: Source identification and health risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2018, **621**: 558-577.

- [40] Duan F K, He K B, Ma Y L, *et al.* Concentration and chemical characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing, China; 2001-2002 [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355**(1-3): 264-275.
- [41] 赵承美, 孙俊民, 邓寅生, 等. 燃煤飞灰中细颗粒物($PM_{2.5}$)的物理化学特性[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(2): 71-73, 80.
Zhao C M, Sun J M, Deng Y S, *et al.* Physiochemical characteristic of fine particle ($PM_{2.5}$) in fly ash from coal combustion[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(2): 71-73, 80.
- [42] 王露, 毕晓辉, 刘保双, 等. 菏泽市 $PM_{2.5}$ 源方向解析研究[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(12): 1849-1858.
Wang L, Bi X H, Liu B S, *et al.* Source directional apportionment of $PM_{2.5}$ in Heze City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(12): 1849-1858.
- [43] 王琴, 张大伟, 刘保献, 等. 基于 PMF 模型的北京市 $PM_{2.5}$ 来源的时空分布特征[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(10): 2917-2924.
Wang Q, Zhang D W, Liu B X, *et al.* Spatial and temporal variations of ambient $PM_{2.5}$ source contributions using positive matrix factorization[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(10): 2917-2924.
- [44] Yu L D, Wang G F, Zhang R J, *et al.* Characterization and source apportionment of $PM_{2.5}$ in an urban environment in Beijing [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, **13**(2): 574-583.
- [45] Dong Z, Jiang N, Duan S G, *et al.* Size distributions and size-segregated chemical profiles of particulate matter in a traffic tunnel of East-Central China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(6): 1873-1883.



CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Composites and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PNEG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)