

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.8

第40卷 第8期

目次

2016年京津冀地区红色预警时段PM _{2.5} 污染特征与浓度控制效果	张冲, 郎建奎, 程水源, 王晓琦 (3397)
北京地区秋冬季大气污染特征及成因分析	徐冉, 张恒德, 杨孝文, 程水源, 张天航, 江琪 (3405)
合肥市PM _{2.5} 和PM ₁₀ 中元素组成特征及重污染成因分析	刘可可, 张红, 刘桂建 (3415)
濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析	陈楚, 王体健, 李源昊, 马红磊, 陈璞琰, 王德羿, 张元勋, 乔琦, 李光明, 王文红 (3421)
关中地区细颗粒物碳组分特征及来源解析	康宝荣, 刘立忠, 刘煥武, 李养养, 艾双双, 曹宁, 雷颖 (3431)
长春季细颗粒物中有机气溶胶组成特征及来源	吴瑕, 曹芳, 翟晓瑶, 范美益, 张世春, 章炎麟 (3438)
中国城市扩张及空间特征变化对PM _{2.5} 污染的影响	王桂林, 张炜 (3447)
不同湿法脱硫工艺对燃煤电厂PM _{2.5} 排放的影响	邓建国, 马子珍, 李振, 段雷, 蒋靖坤 (3457)
浙江省合成革行业挥发性有机物污染特征及排放系数	徐佳琦, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 姚轶 (3463)
生活垃圾填埋场细菌气溶胶粒径分布及种群特征	马嘉伟, 杨凯雄, 柴风光, 王莹, 郭雪松, 李琳 (3470)
青岛近海生物气溶胶中总微生物的分布特征	官静, 祁建华, 李鸿涛 (3477)
广州饮用水水源地多环芳烃分布、来源及人体健康风险评价	宋玉梅, 王畅, 刘爽, 潘佳钊, 郭鹏然 (3489)
截污调水后滇池表层沉积物中16种PAHs的分布特征	胡昕怡, 高冰丽, 陈坦, 王洪涛, 金军, 饶竹, 朱雪芹, 王雪郡, 魏抱楷, 战楠, 刘彦廷, 戚敏 (3501)
黄河三角洲石油开采区盐渍化农田土壤多环芳烃的分布特征与源解析	邱慧, 刘月仙, 解小凡, 张萌, 王伟 (3509)
风场对太湖梅梁湾水华及营养盐空间分布的影响	余茂蕾, 洪国喜, 朱广伟, 权秋梅, 许海, 朱梦圆, 丁文浩, 李未, 吴挺峰 (3519)
向家坝水库营养盐时空分布特征及滞留效应	王耀耀, 吕林鹏, 纪道斌, 方海涛, 朱晓声, 张庆文, 霍静, 何金艳 (3530)
外源输入对底泥疏浚新生表层磷恢复及迁移的影响	李鑫, 耿雪, 王洪伟, 龚琬晴, 文帅龙, 钟继承, 李大鹏 (3539)
新疆喀什三角洲地下水SO ₄ ²⁻ 化学特征及来源	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (3550)
黄土区洛川塬地下水化学特征及影响因素分析	李洲, 李晨曦, 华琨, 李志 (3559)
北京市河流秋季浮游动物群落特征分析	王海邻, 刘玉飞, 任玉芬, 贺玉晓, 王思琪, 张红星, 王效科, 李紫鑫 (3568)
三峡水库干流底栖硅藻群落组成及其与环境因子的关系	刘黎, 贺新宇, 付君珂, 杨燕君, 米文梅, 施军琼, 吴忠兴 (3577)
渭河流域水体细菌群落的环境响应及生态功能预测	万甜, 何梦夏, 任杰辉, 闫幸幸, 程文 (3588)
汾河下游水体nirS型反硝化细菌群落组成与无机氮关系	汪银龙, 冯民权, 董向前 (3596)
饮用水快速砂滤池优势微生物群落的代谢功能解析	胡万超, 赵琛, 王巧娟, 刘锐平, 柏耀辉 (3604)
基于污水厂污泥资源化利用的粗放型绿色屋顶水质控制效果	彭航宇, 李田, 齐悦, 何云鹏, 黄楚玉, 张卓然 (3612)
植被对绿色屋顶径流量和水质影响	章孙逊, 张守红, 张英, 吴思婷 (3618)
光催化/活性炭/纳滤组合工艺处理二级出水及对膜污染的控制	范科文, 李星, 杨艳玲, 周志伟 (3626)
多种材料对水中氨氮的吸附特性	焦巨龙, 杨苏文, 谢宇, 金位栋, 闫玉红, 徐彬 (3633)
不同氨氮浓度对4株常见藻株生长及酶活性的影响	常婷, 许智慧, 程鹏飞, 徐继林, 周成旭 (3642)
3种基质材料对高浓度养殖废水处理效果及降解过程	刘铭羽, 夏梦华, 李远航, 陈坤, 赵聪芳, 李希, 李裕元, 吴金水 (3650)
铝污泥酸化提取液改性沸石的除磷特性及机制	韩芸, 胡玉洁, 连洁, 杨思哲, 齐泽宁 (3660)
缺氧MBBR耦合部分厌氧氨氧化强化城市生活污水深度脱氮	杨岚, 彭永臻, 李健伟, 高锐涛, 王茗, 李夕耀 (3668)
连续流系统中好氧段及沉淀段对污泥及其缺氧段脱氮能力的影响	薛欢婷, 袁林江, 刘小博, 孙恒锐 (3675)
FeS自养反硝化与厌氧氨氧化的耦合脱氮机制	马景德, 潘建新, 李泽敏, 王一显, 吴海珍, 韦朝海 (3683)
ANAMMOX体系中氨与硫酸盐的同步转化条件	董石语, 毕贞, 张文静, 黄勇 (3691)
全国城市污水处理厂中微生物群落的溯源分析	张冰, 吴林蔚, 文湘华 (3699)
不同溶解氧浓度下硝化工艺中微生物种群结构对比	刘文如, 顾广发, 宋小康, 杨殿海 (3706)
异养硝化细菌Acinetobacter junii NP1的同步脱氮除磷特性及动力学分析	杨奎, 陈宁, 任勇翔, 崔坤, 汪旭晖, 肖倩, 郭淋凯 (3713)
Type 0092丝状菌污泥微膨胀在短程硝化中的实现	高春娣, 安冉, 韩徽, 张娜, 任浩, 赵楠, 焦二龙, 彭永臻 (3722)
高盐高碱环境下硝化反硝化过程及N ₂ O产生特征	代伟, 赵剑强, 丁家志, 刘双 (3730)
生物炭对盐碱土壤氨挥发的影响	王一宇, 王圣森, 戴九兰 (3738)
两种土壤增效剂对稻田氨挥发排放的影响	周玉玲, 侯朋福, 李刚华, 王绍华, 杨林章, 薛利红, 丁艳锋 (3746)
承德市滦河流域土壤重金属地球化学基线厘定及其累积特征	孙厚云, 卫晓峰, 甘凤伟, 王恒, 何泽新, 贾凤超, 张竞 (3753)
厦门某旱地土壤垂直剖面中重金属迁移规律及来源解析	张炜华, 于瑞莲, 杨玉杰, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (3764)
宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析	张军, 董洁, 梁青芳, 杨宁宁, 耿雅妮 (3774)
铁铈氧化物对土壤As(V)和P的稳定化效果	林龙勇, 阎秀兰, 杨硕 (3785)
铁锰氧化物在不同水分条件下对土壤As的稳定化作用	周海燕, 邓一荣, 林龙勇, 曹梦华, 钟立荣 (3792)
生物质炭对双季稻水稻土微生物生物量碳、氮及可溶性有机碳氮的影响	刘杰云, 邱虎森, 汤宏, 沈健林, 吴金水 (3799)
有机物料对紫色土微生物量碳、氮及氮素供应的影响	汪月, 张名豪, 赵秀兰 (3808)
土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响	罗晓虹, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 高明 (3816)
宁南山区退耕还林还草对土壤氮素组成及其转化酶活的影响	高涵, 肖礼, 牛丹, 倪银霞, 黄懿梅 (3825)
不同浸提剂条件下生物炭吸附性有机物的浸出规律	何品晶, 张昊昊, 仇俊杰, 邵立明, 吕凡 (3833)
基于成组生物毒性测试的PM _{2.5} 毒性	江晓栋, 薛银刚, 魏永, 许霞, 刘菲, 薛柯, 施昕澜, 顾铭 (3840)
《环境科学》征订启事 (3587)	
《环境科学》征稿简则 (3595)	
信息 (3611, 3705, 3745)	

濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及来源解析

陈楚¹, 王体健^{1*}, 李源昊², 马红磊², 陈璞珑¹, 王德羿¹, 张元勋³, 乔琦⁴, 李光明², 王文红²

 (1. 南京大学大气科学学院, 南京 210023; 2. 濮阳市环境监测站, 濮阳 457000; 3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 4. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 濮阳市作为京津冀周边地区大气污染传输通道城市之一, 秋冬季重污染天气频发, 空气污染问题严峻. 为了研究濮阳市秋冬季大气细颗粒物污染特征及其主要来源, 于 2017 年 10 月 15 日至 2018 年 1 月 13 日在濮阳市 3 个国控点对 PM_{2.5} 进行了手工膜采样与化学组分分析, 并结合 PMF 受体模型, 开展了细颗粒物来源解析研究. 结果表明, 濮阳市 2017 年秋冬季 PM_{2.5} 平均质量浓度为 94.16 μg·m⁻³, 濮水河管理处的污染状况最严重, 进入采暖季后 3 站点均表现为重度及严重污染事件频发, 轻度污染发生频率降低, 重污染发生时 NO₂ 与 CO 浓度升高明显. PM_{2.5} 中的主要组分为水溶性离子 (52.33%)、碳质组分 (25.32%) 和地壳元素 (0.08%), NO₃⁻ 的含量高而 SO₄²⁻ 的浓度水平较低. 重污染发生时, PM_{2.5} 中水溶性离子、OC、EC 和 K 浓度都出现了明显的升高, 而地壳元素浓度降低. 采样期间濮阳市的硫氮转化率水平较高, 大气氧化性较强, 硫氮转化促进了重污染的发生. 濮阳市 2017 年 NO_x、CO 和 VOCs 排放量较高, 来源解析结果表明, 濮阳市秋冬季 PM_{2.5} 主要来源分别为二次无机盐 (37%)、工业源 (16%)、二次有机气溶胶 SOA (14%)、生物质燃烧源 (12%)、移动源 (9%)、燃煤源 (7%) 和扬尘源 (4%). 可见, 二次转化在濮阳重污染的形成过程中起到重要作用, 要减轻大气细颗粒物污染, 需要重点控制工业源、生物质燃烧、移动源和民用散煤燃烧的排放.

关键词: 细颗粒物; 来源解析; 受体模型; 重污染; 秋冬季

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)08-3421-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901119

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China

CHEN Chu¹, WANG Ti-jian^{1*}, LI Yuan-hao², MA Hong-lei², CHEN Pu-long¹, WANG De-yi¹, ZHANG Yuan-xun³, QIAO Qi⁴, LI Guang-ming², WANG Wen-hong²

(1. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. Puyang Environmental Monitoring Station, Puyang 457000, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: As one of the air pollution transmission channels around the Beijing-Tianjin-Hebei region, Puyang frequently suffer from severe air pollution in autumn and winter. In order to study the characteristics and main sources of fine particulate matter during these periods, manual membrane sampling of PM_{2.5} was conducted at three national control sites from October 15, 2017, to January 13, 2018. Chemical composition analysis was conducted and, combined with a PMF receptor model, source analysis of the fine particles was also undertaken. The results show that the average mass concentration of PM_{2.5} in Puyang was 94.16 μg·m⁻³ in the autumn and winter of 2017, and Pushuihe station was the most polluted site. During the heating season, the three control stations all recorded the frequent occurrence of severe and serious pollution events, while the frequency of mild pollution events decreased. When heavy pollution events occurred, the concentrations of NO₂ and CO increased significantly. The main components of PM_{2.5} were water-soluble ions (52.33%), OCEC (25.32%), and crustal elements (0.08%). The concentrations of NO₃⁻ were high while the concentrations of SO₄²⁻ were low. When heavy pollution occurred, the concentrations of water-soluble ions, OC, EC, and K in PM_{2.5} increased significantly, while the concentrations of crustal elements decreased. During the sampling period, the conversion ratios of sulfur and nitrogen in Puyang were high and atmospheric oxidation was strong. The transformation of sulfur and nitrogen promoted the occurrence of heavy pollution. Emissions of NO_x, CO, and VOCs were higher in Puyang in 2017, and the source apportionment results showed that the main sources of PM_{2.5} in autumn and winter were secondary inorganic salts (37%), industrial sources (16%), secondary organic aerosol (SOA, 14%), biomass combustion (12%), mobile sources (9%), coal burning (7%), and dust (4%). Secondary transformation played an important role in the development of heavy pollution events in Puyang. It is necessary to focus on the control of emissions from industrial sources, biomass combustion, moving source, and civil coal combustion.

Key words: fine particulate matter; source apportionment; receptor model; heavy pollution; autumn and winter

改革开放后的三十多年来, 随着我国经济的飞速发展, 空气污染问题也日趋严重. 2013 年以来, 随着“大气十条”等防治措施的制定和实施^[1], 我国各项大气污染物的排放量已经显著下降^[2], 空气质量开始有所改善, 但是 PM_{2.5} (空气动力学直径

收稿日期: 2019-01-14; 修订日期: 2019-03-20

基金项目: 大气重污染成因与治理攻关项目 (DQGG0304, DQGG0107); 国家自然科学基金项目 (91544230, 41575145)

作者简介: 陈楚 (1995 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染来源解析, E-mail: mg1728036@mail.nju.edu.cn

* 通信作者, E-mail: tjwang@nju.edu.cn

$\leq 2.5 \mu\text{m}$ 的大气颗粒物)仍然是大多数城市的首要空气污染物。这些高浓度的细颗粒物对空气质量、公众健康^[3, 4]以及辐射强迫、气候变化^[5]都会产生很大的影响。

濮阳市是京津冀及周边地区大气污染传输通道“2+26”城市之一,且本身为石油化工型城市,重污染天气频发,大气污染状况严重。监测结果表明,濮阳市2017年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度为 $69.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,是我国《环境空气质量标准(GB 3095-2012)》^[6]二级年均值标准 $35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的1.99倍,2017年重污染天数为28 d,8 d达到严重污染,大气细颗粒物污染问题严峻。因此,了解濮阳市 $\text{PM}_{2.5}$ 的化学组分特征及其主要来源,尤其是弄清楚重污染过程的成因,有针对性地进行治理与防控,对于改善当地的空气质量乃至整个京津冀地区的污染状况都有重要的意义。

目前我国在京津冀地区关于大气污染问题已经开展了一系列的研究。其污染特点主要表现为二次污染严重,二次组分对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献达到60%~80%,爆发性污染频发,污染物浓度可以在2~3 h内增加几倍,污染呈现区域性蔓延且持续时间很长。有研究认为京津冀地区重污染问题的根本原因在于大量水泥钢铁厂的超标排放以及不断增长的机动车保有量,且当地地形不利于污染物的扩散^[7, 8]。Zhao等^[9]的研究发现石家庄市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染为煤烟型污染,天津市是以机动车和燃煤排放为主,而北京市的大气污染问题则主要是因为机动车量的剧增。然而,关于濮阳市的大气颗粒物污染问题还鲜见报道。

受体模型法是国内外颗粒物来源解析研究中最常用的手段^[10],其中PMF(正定矩阵因子分解)模型不需要给定污染源谱,适用性更广,且其解析出的结果正定,提取的污染源信息更为客观,此外,PMF模型还可以给出各类污染源贡献的时间变化趋势^[11]。因此,本文使用PMF模型对濮阳市的大气细颗粒物进行来源解析。

本文基于2017年10月15日至2018年1月13日在濮阳市3个国控站点大气 $\text{PM}_{2.5}$ 进行手工膜采样和化学组分分析得到的数据,探究了濮阳市秋冬季及重污染发生时 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度与组分特征,利用PMF模型对 $\text{PM}_{2.5}$ 的来源进行了解析,并结合濮阳市2017年大气污染物排放清单进行了综合分析,为治理濮阳市的大气污染提供科学依据,对改善濮阳市的空气质量及整个京津冀地区的污染状况都具有重大的意义和应用价值。

1 材料与方法

1.1 $\text{PM}_{2.5}$ 样品收集

在濮阳市选取了3个国控点作为大气细颗粒物样品采集点,分别为市环境保护局(115.03°E , 35.76°N)、华龙区(115.06°E , 35.76°N)和濮水河管理处(115.00°E , 35.77°N)。市环境保护局位于城市中心繁华地带,周边餐饮源集中,站点位于胜利中路与金堤中路交叉口附近,往东500 m为京开大道,东北方向1 km处为濮阳市汽车站。华龙区周边车流量大,同时有煤散户存在,周边餐饮业油烟、散煤燃烧、喷漆喷涂、家具制造、汽修和小作坊等排放的污染物对 $\text{PM}_{2.5}$ 二次转化均会产生影响。濮水河管理处西边分布有较集中的化工园区,北面为城中村,城中村中散煤燃烧及生物质燃烧现象频发。

受体样品的采样周期为2017年秋冬季,时间为2017年10月15日至2018年1月13日,每天连续采样23 h(10:00~次日09:00),如遇重污染将每日采样时间分为两段,每段11 h,第1段采样时间从上午10:00开始至晚上21:00结束,第2段采样时间从22:00开始至第二天早上09:00结束。华龙区站点采用的是武汉天虹生产的TH-16a型四通道大气颗粒物智能采样器,使用其中两个通道进行采样,市环境保护局和濮水河管理处采用的是德国康姆德润达PNS16T-31(2017)型一体式自动换膜采样器,每个点位布设两台,所有仪器设定流量都是 $16.7 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,切割粒径为 $2.5 \mu\text{m}$ 。每站点每个采样周期各采集1张石英膜和1张特氟龙膜,采样期间每10 d采集一次空白膜,共获得有效滤膜样品273个。

1.2 样品分析

颗粒物浓度采用重量法进行测定,同时对颗粒物中化学组分进行分析,分析项目包括24种无机元素,9种水溶性离子和碳质组分。具体分析方法和所用仪器见表1。

使用美国Sunset Laboratory公司生产的热光法OCEC分析仪分析OC、EC的浓度。滤膜使用的是高纯石英滤膜,石英滤膜在采样前于马弗炉中 550°C 下烘烤5.5 h,滤膜于采样前后分别放置于恒温恒湿的超净室[$T = (20 \pm 1)^\circ\text{C}$, $\text{RH} = (40 \pm 5)\%$]中平衡至少24 h,并用万分之一天平称量。采集的空白样品在 $\pm 0.3 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 范围内,样品的加标回收率为95%~105%,空白样品的加标回收率为95%~105%,平行样品的相对偏差 $< 5\%$ 。

表 1 化学组分分析及所用仪器

Table 1 Methods of chemical composition analysis and the instruments used

分析项目	分析方法	所用仪器
OC、EC	热光法-improve a. Optics/Det. Mode;Refl./FID	OCEC 分析仪 Sunset Laboratory
水溶性离子	离子色谱法	共万通 882, 戴安 ICS-90
Li、Be、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sn、Sb、Ba、Tl、P	高压消解法前处理	ICP-MS(agilent7700x)
Na、Mg、Al、K、Ca、Fe、Ti	高压消解法前处理	ICP-OES(PE 8300)
Si	碱溶法前处理	ICP-OES(PE 8300)

使用美国戴安 ICS-90 和瑞士共万通 882 两台离子色谱仪对颗粒物中的水溶性离子进行检测。检测前取滤膜样品剪碎放入 50 mL 离心管中, 滴加几滴酒精来增加溶解性, 加入 10 mL 一级水, 滴加酒精后再加入 10 mL 一级水, 然后加盖后用封口膜密封, 超声 40 min, 用滤膜过滤后放入冰箱(-4℃) 冷藏保存待测试。样品测试过程制备空白样品、平行样品、加标样品 3 种质控设置来确保测试的准确。

空白样品为方法空白, 除无滤膜样品外, 其他按前处理要求操作, 每次前处理设置两个空白样品实验。平行样品取等份(45 mm 膜为 1/4, 90 mm 膜为 1/8)滤膜样品制备, 数量为样品总量的 10%, 测试结束后计算相对标准偏差 RSD, $RSD \leq 20\%$ 。加标样品取等份滤膜样品制备, 数量为样品总量的 5%, 前处理时在滤膜样品滴加 1 mL 配置好的标液(各组分均为 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 混标)后, 一级水定容至 20 mL, 加标量为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。测试结束后计算加标回收率, 回收率控制在 80% ~ 120%。除质控样品外, 样品测试过程中配置与曲线中间点等浓度标液(QC)对曲线校准, 每测试 20 个样品需进行 QC 测试, 当 QC 测试值与实际值误差 $\geq 10\%$ 时, 重新配置标液, 重建曲线, 并对前 20 个样品复测。

依据文献[12]的测试方法, 根据实际情况进行元素分析测试。通过高压消解法前处理, 用美国安捷伦科技有限公司生产的 ICP-MS(agilent7700x)测定 Li、Be、V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、As、Cd、Sn、Sb、Ba、Tl 和 Pb 等 16 种元素(参考标准 HJ 657-2013)。用 ICP-OES(PE 8300)测定 Na、Mg、Al、K、Ca、Fe 和 Ti 等 7 种元素(参考标准: HJ 777-2015)。通过碱溶法前处理, 用 ICP-OES(PE 8300)测定 Si 元素(参考标准: HJ 777-2015)。为确保测试的准确, 对于每批次测试样品(约 30 ~ 60 个)采用双空白, 10% 平行样品, 10% 加标样品进行分析。

1.3 硫、氮转化率

SO_4^{2-} 和 NO_3^- 是由 SO_2 和 NO_2 等一次前体物在大气中经过复杂的气相、液相和非均相反应生成的, 硫转化率(F_s)和氮转化率(F_n)可以反映大气

中 SO_2 和 NO_2 转化为二次气溶胶的程度, 其计算公式为:

$$F_s = \frac{[\text{SO}_4^{2-}]}{([\text{SO}_4^{2-}] + [\text{SO}_2])} \quad (1)$$

$$F_n = \frac{[\text{NO}_3^-]}{([\text{NO}_3^-] + [\text{NO}_2])} \quad (2)$$

式中, $[\text{SO}_4^{2-}]$ 为颗粒态 SO_4^{2-} 的浓度($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$), $[\text{SO}_2]$ 为气态 SO_2 的浓度($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$), $[\text{NO}_3^-]$ 为颗粒态 NO_3^- 的浓度($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$), $[\text{NO}_2]$ 为气态 NO_2 的浓度($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$)^[13-15]。

1.4 正定矩阵因子分解模型

正定矩阵因子分解模型(positive matrix factorization, PMF)^[10, 11, 16-18]是由 US EPA(美国国家环保署)推荐使用的来源解析方法, 它将受体点处采样得到的含有多个时间、不同组分的数据矩阵分解为源贡献矩阵和源成分谱矩阵, 然后依据源谱的信息来决定分解出的各个源的类型。本文使用的 PMF 模型版本为 EPA PMF5.0, 其基本公式为:

$$X = G \times F + E \quad (3)$$

式中, X 表示受体点处采集到样品的各组分浓度矩阵, G 表示源贡献的矩阵, F 表示源成分谱矩阵, E 表示残差。根据解析出的各因子特征对 F 中的每一个因子主观判断其源类, G 表示了各个源的相对贡献, E 表示模型计算的不确定性。

2 结果与讨论

2.1 $\text{PM}_{2.5}$ 时空变化特征

本次秋冬季采样过程中濮阳市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度为 18.28 ~ 280.95 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均浓度为 94.16 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 是我国《环境空气质量标准(GB 3095-2012)》^[6] 二级年均值标准 35 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的 2.69 倍。污染状况高于同年春季 60.67 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、夏季 36.58 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 与 2016 年秋冬季 114.27 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 相比污染状况有所缓解。本研究期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与北京市 2014 年年均值 87.74 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 相近^[19], 比泰安市 2015 年冬季 68.95 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 严重^[20], 远高于广州市 2013 年年均值 56 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ^[21], 但是低于附近的新

乡市(2016年秋季城市站 $164.17 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、郊区站 $144.75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[22]及徐州市(2015年冬季 $165 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[23]. 其中市环境保护局、华龙区和濮水河管理处这3个站点日均浓度分别为92.78、93.68和 $96.01 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 污染状况表现为濮水河管理处最为严重, 华龙区与市环境保护局污染状况接近, 主要是由于濮水河管理处站点西边分布有濮阳市最大的化工园区, 污染源集中且排放量大.

濮阳市2017年于11月15日开始集中供暖, 进入采暖季后, 燃煤量激增, 污染物排放量增大, 重污染天气频发, 空气质量恶化. 本次研究于供暖日前共采集到88个样本, 供暖日后共采集到166个样本. 3个站点采暖前后空气质量变化情况如表2所示, 统计结果表明, 濮阳市采暖季开始前 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $86.80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 供暖开始后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值为 $98.08 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 增长约1.13倍, 其中濮水河管理处供暖后 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增长1.16倍, 涨幅最

大, 可能是由于濮水河管理处北面分布有城中村, 进入采暖季以来民用散煤燃烧及生物质燃烧现象增多, 且冬季多刮北风, 使得该采样点受到上风向污染源的影响. 依据环境空气质量标准^[6], 将 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值数为0~75的称为优良, 将 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值数75~115的称为轻度污染, 将 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值数115~150的称为中度污染, 将 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值150~250的称为重度污染, 将 $\text{PM}_{2.5}$ 日均值数250~500的称为严重污染. 本次研究期间, 进入采暖季后3个站点均表现为重度及严重污染事件频发, 轻度污染发生频率降低, 说明集中供暖对极端污染事件的发生有促进作用. 其中市环境保护局站点供暖后优良频率增多, 可能由于市环境保护局站点位于主城区, 受郊区燃煤电厂及城中村散煤燃烧影响较小. 濮水河管理处比起其他两站点采暖季后中度污染频率也有很大提升, 由此可见濮水河管理处受采暖污染影响更大.

表2 3个站点采暖前后空气质量变化情况¹⁾

Table 2 Changes in air quality before and after the heating season at three monitoring stations

项目	市环境保护局		华龙区		濮水河管理处	
	采暖前	采暖后	采暖前	采暖后	采暖前	采暖后
$\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	88.61	94.93	85.14	98.46	86.66	100.85
优良天数/d	12(38.71%)	29(48.33%)	13(46.43%)	20(40.00%)	11(37.93%)	22(39.29%)
轻度污染天数/d	9(29.03%)	13(21.67%)	8(28.57%)	14(28.00%)	10(34.48%)	15(26.79%)
中度污染天数/d	8(25.81%)	8(13.33%)	6(21.43%)	9(18.00%)	6(20.69%)	10(38.46%)
重度污染天数/d	2(0.06%)	10(16.67%)	1(0.04%)	6(12.00%)	2(0.07%)	8(14.29%)
严重污染天数/d	0(0.00%)	0(0.00%)	0(0.00%)	1(0.02%)	0(0.00%)	1(0.02%)
总样本天数/d	31	60	28	50	29	56

1) 括号中数值为对应天数发生频率

定义 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值大于 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 即发生污染, 大于 $150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 即为重度污染事件, 由此在本研究期间可提取两次重度污染事件, 分别为2017年11月30日至12月3日(重污染一)和2017年12月25日至12月30日(重污染二). 两次重度污染事件的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值分别为市环境保护局 $150.03 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $166.24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 华龙区 $167.04 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $142.80 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、濮水河管理处 $164.36 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

和 $167.33 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 浓度约为秋冬季平均值的1.7倍, 污染程度严重. 分析两次重污染事件对应的气象要素与气态污染物浓度, 并与采样期间未发生污染事件时($\text{PM}_{2.5}$ 浓度值小于 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的情况作对比, 结果见表3. 可见, 当发生重污染事件时, 相对湿度、空气质量指数AQI、 SO_2 浓度、 NO_2 浓度和CO浓度都较高, 而风速和 O_3 浓度较低, 说明这些要素是形成重污染事件的重要因素, 排放到大气中

表3 重污染天及非污染天气象数据与气态污染物浓度¹⁾

Table 3 Meteorological data and concentrations of gaseous pollutants on heavily polluted days and non-polluted days

项目	重污染一	重污染二	非污染天
温度/℃	0.3~11.8(4.8)	0.1~11.5(4.0)	-4.6~24.3(7.5)
相对湿度/%	45~87(63.3)	27~88(57.2)	16~100(42.5)
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.2~4.3(1.6)	0.2~3.4(1.5)	0.2~5.2(1.9)
大气压/hPa	1 012.6~1 027.5(1 020.5)	1 014.7~1 024.7(1 020.0)	1 005.1~1 032.5(1 020.9)
AQI	147~315(209)	89~308(219)	51~153(78)
$\text{SO}_2/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	15~28(21.3)	22~42(30.0)	11~34(20.5)
$\text{NO}_2/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	28~67(48.5)	53~97(79.2)	24~68(45.5)
$\text{CO}/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	1.418~2.688(1.8)	1.453~3.455(2.7)	0.527~1.997(1.2)
$\text{O}_3/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	45~85(66.3)	11~36(21.5)	14~139(65.5)

1) 括号中数值为平均值

高浓度的一次气态污染物在小风的不利扩散条件下累积,较高的相对湿度促进了颗粒物表面非均相反应的发生,使得更多的一次气态污染物向二次污染物转化,空气质量进一步恶化.此外,濮阳市尤其表现为 NO_2 与 CO 浓度在重污染发生时升高明显, SO_2 浓度升高相对不大, NO_2 主要来自于化石燃料的燃烧过程,如汽车尾气及工业炉窑的燃烧, CO 则主要来自于燃料燃烧.

2.2 $\text{PM}_{2.5}$ 组分时空变化特征

如表4所示,本次采样 $\text{PM}_{2.5}$ 中的主要组分为水溶性离子(52.33%)、碳质组分(25.32%)和地壳元素(0.08%).3站点间表现为水溶性离子华龙区($53.81\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,57.45%)>市环境保护局($48.90\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,52.70%)>濮水河管理处($44.96\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,46.83%);碳质组分华龙区($25.40\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,27.10%)>濮水河管理处($23.96\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,24.96%)>市环境保护局($22.16\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,23.88%);地壳元素华龙区($8.57\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,0.09%)>濮水河管理处($7.18\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,0.07%)>市环境保护局($6.51\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,0.07%).华龙区站点水溶性离子、碳质组分及地壳元素浓度都相对较高,可能是由于华龙区站点附近污染源多且复杂,车流量大且同时存在餐饮源、煤散户燃烧及喷漆喷涂作业,汽车尾气排放的 NO_x 、碳质组分,煤散户燃烧排放的 SO_2 、烟尘,喷漆喷涂排放的VOCs等污染物在大气中发生了复杂的化学反应,对 $\text{PM}_{2.5}$ 的二次转化起到了促进作用.

濮阳市3站点 $\text{PM}_{2.5}$ 中离子组分的平均质量浓

度为 NO_3^- $22.26\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 NH_4^+ $10.66\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 SO_4^{2-} $10.02\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 Cl^- $3.40\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 K^+ $1.33\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.离子组分浓度特征与附近的新乡市秋季情况类似(NO_3^- $22.05\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 NH_4^+ $9.98\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 SO_4^{2-} $13.41\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 Cl^- $2.19\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 K^+ $0.65\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[22],与泰安市冬季情况相比(NO_3^- $5.51\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 NH_4^+ $10.70\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 SO_4^{2-} $20.85\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 Cl^- $4.90\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[20]组分特征表现为 NO_3^- 的含量很高,而 SO_4^{2-} 的浓度水平较低,主要是因为濮阳市内无高铁站且火车班次也较少,交通运输主要依靠重型柴油车,尾气排放量很大.此外,2017年濮阳市内尚无大型燃煤电厂, SO_2 多来自于民用散煤的燃烧,体量不大,所以 SO_4^{2-} 浓度水平不算很高. $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 的比值通常用来指示移动源与固定燃烧源之间的相对贡献^[24,25],该值大小顺序为:华龙区站点(2.27)>濮水河管理处(2.24)>市环境保护局(2.16),华龙区站点受移动源影响更大.

OC/EC的比值通常可以用来判定有机气溶胶的污染程度,本文采用“最小OC/EC比值法”估算二次有机气溶胶(SOA)的浓度^[26],该方法假设非燃烧源贡献的一次有机碳可以忽略^[27],则一次有机碳(POC)为观测期间环境OC与EC最小观测比值^[28]乘以EC的浓度值,依此得到采样期间各站点SOA浓度如表4所示.濮阳市是我国重要的石油化工基地,濮水河管理处附近化工园区集中,石油化工产业会排放出大量的挥发性有机物VOCs,导致濮水河管理处二次有机气溶胶污染程度较重.

表4 秋冬季3站点 $\text{PM}_{2.5}$ 主要组分浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 4 Concentrations of main components in $\text{PM}_{2.5}$ at three sites in autumn and winter/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$						
项目	市环境保护局		华龙区		濮水河管理处	
	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值
NH_4^+	11.15	35.56	10.87	35.81	9.97	35.32
NO_3^-	22.01	70.58	24.48	75.92	20.28	72.45
SO_4^{2-}	10.18	37.92	10.80	31.98	9.07	39.20
Na^+	0.25	1.57	0.33	1.05	0.29	6.36
Cl^-	3.21	9.58	3.69	9.92	3.29	12.26
K^+	1.25	2.75	1.49	3.32	1.24	2.98
OC	15.81	47.34	17.89	58.57	16.85	46.52
EC	6.35	17.16	7.51	21.00	7.11	23.17
K	1.14	2.34	1.36	3.56	1.21	2.64
Ca	1.62	9.56	2.37	36.58	1.41	3.42
Si	1.32	5.04	2.03	7.99	1.93	20.10
Fe	0.52	1.37	0.94	3.02	0.52	1.78
Cu	0.02	0.08	0.02	0.10	0.02	0.06
Zn	0.20	0.92	0.25	2.20	0.15	0.52
SOA	10.97	72.10	11.77	58.36	13.59	41.71

濮阳市秋冬季采样期间 $\text{PM}_{2.5}$ 组分平均浓度与两次重污染过程期间组分浓度的变化如图1所示.

水溶性离子浓度在两次重污染过程期间均出现了明显的上升,是秋冬季平均水平的1.2~1.9倍,可见

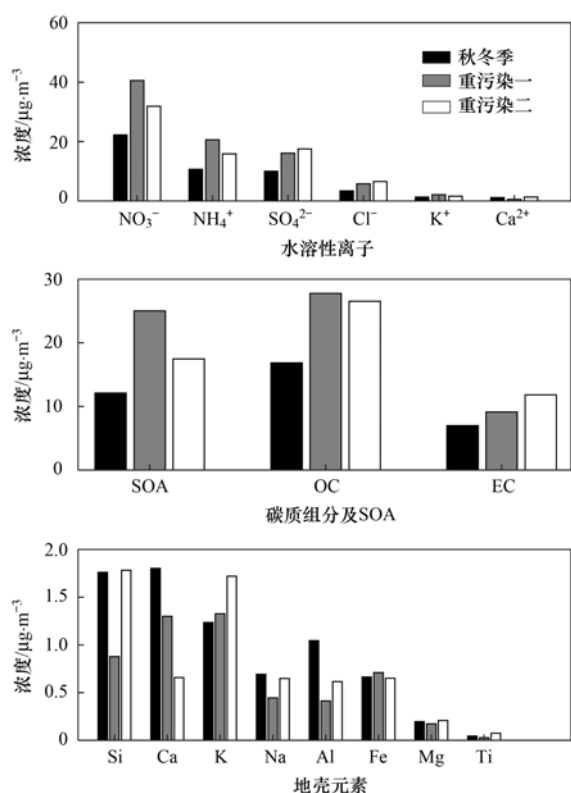


图1 秋冬季与重污染过程 $\text{PM}_{2.5}$ 主要组分浓度

Fig. 1 Concentrations of the main components in $\text{PM}_{2.5}$ during autumn and winter and during heavy pollution events

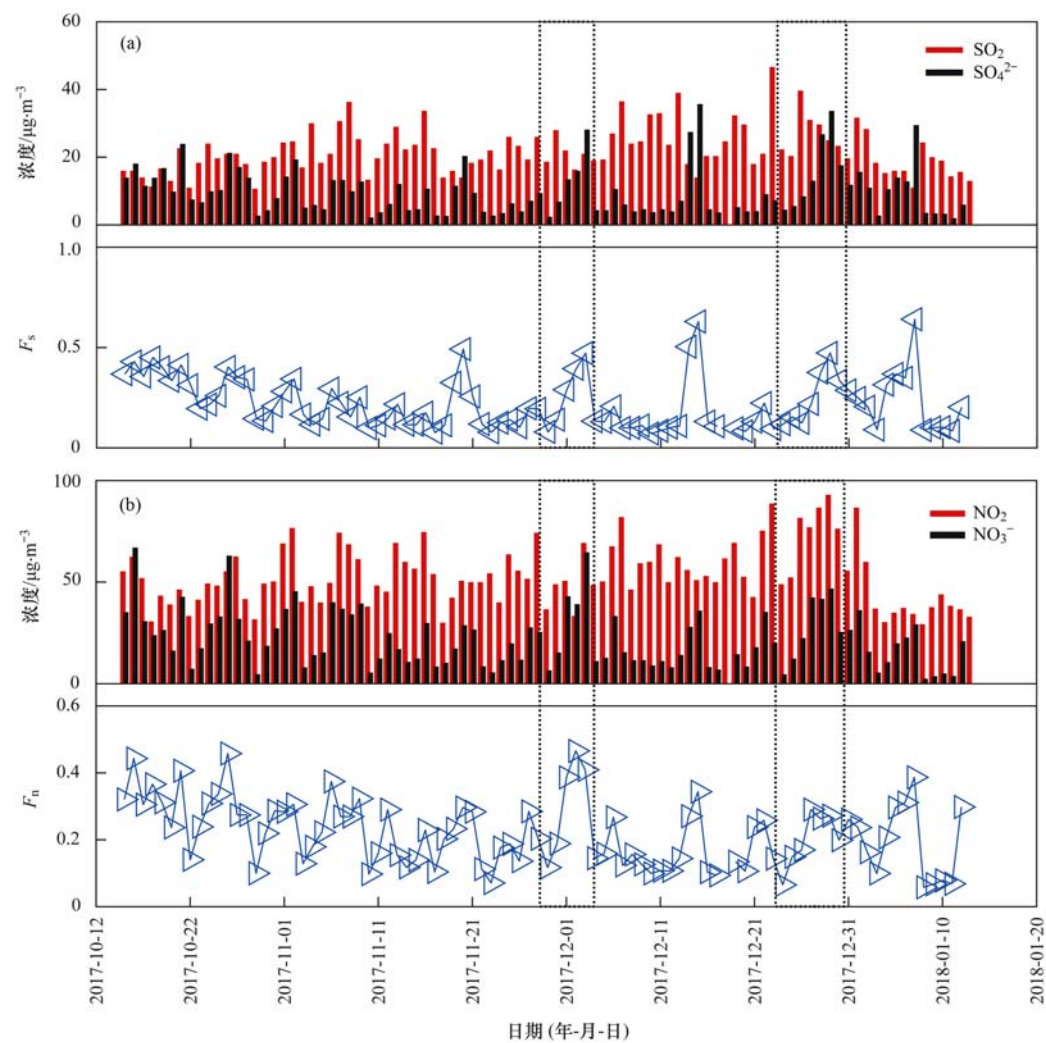
二次转化在重污染形成过程中起到了重要的作用, 其中 NO_3^- 在重污染发生时的累积效应相对更为明显, 且贡献率更大, 这点与北京类似^[29]. SOA 及 OC、EC 的浓度也在重污染过程中显著升高, 升高程度是秋冬季平均水平的 1.3 ~ 2.1 倍, 可能是由于重污染过程期间气象条件的不利影响导致污染物的累积效应显著, 二次反应发生. 此外, K 浓度在两次重污染过程中均出现了显著的上升, K、OC 和 EC 是生物质燃烧的重要指示因子^[26, 30], 城中村的生物质燃烧问题也是加重污染的一大可能因素. 相比之下, Si、Ca、Na、Al、Fe、Mg 和 Ti 等地壳元素在重污染过程中浓度基本与秋冬季平均水平持平甚至出现了下降, 原因可能是重污染过程通常伴随着较低的风速, 地面扬尘较少被扬起, 所以贡献较小. 两次过程对比来看, 重污染一 NO_3^- 及 OC 的浓度升高更为显著, 可能更多受到移动源排放的影响, 重污染二 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 EC 的浓度升高更为显著, 受到民用散煤燃烧的影响更大.

图2显示了采样期间 SO_2 和 SO_4^{2-} 浓度、 NO_2 和 NO_3^- 浓度及 F_s 和 F_n 的变化趋势. 整个采样期间的硫转化率 F_s 的平均值为 0.22 (0.07 ~ 0.64), 高于北京 (0.07)^[31]、上海 (0.12)^[32]、太原 (0.07)^[13] 的冬季平均值, 低于广州的冬季平均值

(0.24)^[14], 而采样期间 SO_4^{2-} 的浓度水平 ($10.02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 均低于北京 ($20.96 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[31]、上海 ($12.79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[32]、太原 ($12.79 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[13] 和广州 ($10.47 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)^[14], SO_4^{2-} 来源于大气中 SO_2 和 $\cdot\text{OH}$ 的氧化反应、液相中的金属催化和 $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3$ 氧化反应以及非均相反应^[13, 33], 说明濮阳市大气本底的 SO_2 浓度不高, 但是大气的氧化性较强. 氮转化率 F_n 的平均值为 0.22 (0.06 ~ 0.47), 远高于北京 (0.05)^[31]、上海 (0.07)^[32]、太原 (0.06)^[13] 和广州 (0.10)^[14] 的冬季平均值, 且 NO_3^- 的浓度水平 ($22.26 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 也远高于上述 4 个城市, NO_3^- 的生成在日间主要依赖于气相中 $\cdot\text{OH}$ 的氧化, 而在夜间则是以 N_2O_5 的非均相反应为主导, 濮阳市 NO_2 排放水平较高, 在较强的大气氧化性与较高的相对湿度的共同作用下转化生成较高浓度的 NO_3^- . 可以发现, 采样期间重污染过程的发生都伴随着较高的硫氮转化率, 其中重污染一的 F_s 达到 0.32, F_n 达到 0.36, 重污染二的 F_s 为 0.28, F_n 为 0.22, 说明硫氮转化形成二次气溶胶在重污染过程的发生中起到重要的作用, 重污染一中 SO_2 和 NO_2 二次转化形成 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的作用要强于重污染二, 且重污染一的氮转化作用强于硫转化作用, 重污染二的硫转化作用要强于氮转化作用. 有研究表明, 冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度对硫氮转化有明显的促进作用^[11], 说明重污染下高浓度的颗粒物会进一步促进硫氮转化, 这种反馈作用加剧了濮阳冬季重污染的程度.

2.3 排放清单与 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析

河南省环保厅发布的濮阳市 2017 年大气污染物排放清单显示 (表 5), 濮阳市 2017 年排放的 SO_2 、 NO_x 、CO、VOCs、BC 和 OC 分别为 31 476、33 724、499 307、54 387、5 380 和 12 276 t, NO_x 的排放量比 SO_2 多出约 2 000 t, CO 与 VOCs 的排放量均较大. SO_2 的主要排放源为化石燃料固定燃烧源, 主要指电力供热、工业锅炉与民用燃烧等过程, 其中又以民用燃烧的排放量最大, 需要加大对民用散煤燃烧的管控以降低 SO_2 的排放量. NO_x 的首要排放源为移动源, 其次为化石燃料固定燃烧源与生物质燃烧源, 排放大量 NO_x 的主要为道路移动源与化石燃料固定燃烧源中的工业锅炉. 濮阳市的生物质燃烧源可分为工业生物质锅炉、生物质炉灶和生物质开放燃烧, 其中生物质炉灶的各项污染物排放量最大. CO 主要来自于化石燃料固定燃烧源与生物质燃烧的排放, 其中又以民用燃烧与生物质炉灶排放的 CO 量最大. VOCs 的首要排放源为工艺过程源, 其次为生物质燃烧排放与化石燃料固定燃烧源排放, 濮阳市的主要工艺过程源为石油化工.



图内黑色虚线框标注重污染一和重污染二

图2 SO₂、SO₄²⁻、NO₂、NO₃⁻、F_s和F_n的变化趋势

Fig. 2 Temporal variations of SO₂, SO₄²⁻, NO₂, NO₃⁻, F_s, and F_n

表5 濮阳市2017年大气污染物排放量/t

Table 5 Emissions of atmospheric pollutants in Puyang in 2017/t

一级源分类	SO ₂	NO _x	CO	VOCs	NH ₃	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	BC	OC
化石燃料固定燃烧源	25 479	10 847	247 520	10 294	1 043	22 157	18 446	13 511	1 579	7 889
工艺过程源	3 743	1 366	15 317	18 542	4 289	20 735	9 940	4 950	188	147
移动源	564	17 362	60 936	8 038	303	1 165	1 165	1 115	659	171
溶剂使用源	0	0	0	2 159	0	0	0	0	0	0
农业源	0	0	0	0	39 700	0	0	0	0	0
扬尘源	0	0	0	0	0	382 141	74 545	18 058	0	0
生物质燃烧源	1 691	4 148	175 534	14 775	1 559	12 611	12 342	11 497	2 951	3 955
储存运输源	0	0	0	377	0	0	0	0	0	0
废弃物处理源	0	0	0	60	174	0	0	0	0	0
餐饮	0	0	0	144	0	0	205	164	3	115
合计	31 476	33 724	499 307	54 387	47 070	438 809	116 643	49 296	5 380	12 276

可见，为缓解濮阳市的空气污染问题，可以有针对性地加大对石油化工行业排放、城区内道路移动源排放、生物质炉灶排放以及民用燃烧排放的管控，从源头上减少NO_x、VOCs和CO的排放量。

利用PMF模型对采样期间的3站点PM_{2.5}做源

解析，通过“OC/EC最小比值法”计算得到二次有机气溶胶SOA的占比，为了减少二次有机碳SOC对PMF模型计算的影响^[34]，将SOA和SOC分别从PM_{2.5}和OC中剔除，把其余的PM_{2.5}组分代入PMF模型进行计算，得到濮阳市3站点秋冬季源解析结果，

对3 站点源解析结果取平均代表濮阳市的整体情况, 如图3 所示. 总的来说, 濮阳市秋冬季 $PM_{2.5}$ 中二次无机盐贡献最大, 分担率达到 37%, 其次为工业源, 分担率为 16%, 二次有机气溶胶 SOA 的分担率为 14%, 其他污染来源主要有生物质燃烧源(12%)、移动源(9%)、燃煤源(7%)和扬尘源(4%). 濮阳市二次污染较重, 可以占到总的污染来源的 51%, 符合京津冀区域的污染特征^[35]. 不同行业来源中工业源对 $PM_{2.5}$ 生成的贡献最大, 濮阳为传统的石油化工城市, 化工企业众多且很大一部分离市区较近, 大量的化工企业排放出的污染物质是濮阳空气质量恶化的重要诱因. 进入秋冬季以来濮阳市的生物质燃烧问题突出, 成为继工业源之外的另一大污染来源. 不同站点对比来看, 市环境保护局站点的生物质燃烧源及移动源排放问题相对更为严重, 分担率分别达到

15% 和 14%, 市环境保护局站点位于城区, 周边城市主干道多, 车流量大, 机动车尾气排放相对更多, 而生物质燃烧则多发于城中村. 华龙区站点周边污染源种类较多, 二次污染的贡献比例更大, 该站点燃煤源分担率相较于其他两站点也更高, 达到 9%, 主要是因为其周边存在散煤燃烧问题. 濮水河管理处由于受到西边大型化工园区的影响, 其特征表现为工业源分担率突出, 达到 24%.

基于3 站点采样期间源解析结果时间序列可以发现(图4), 重污染一(2017-11-30 ~ 2017-12-03)前期市环境保护局站点表现为移动源的贡献较高, 而华龙区和濮水河管理处则表现为生物质燃烧源的贡献较大, 由于一次排放污染物的逐步积累导致二次反应暴发, 后期二次无机盐的贡献显著增大. 在重污染二(2017-12-25 ~ 2017-12-30)中, 市环境保

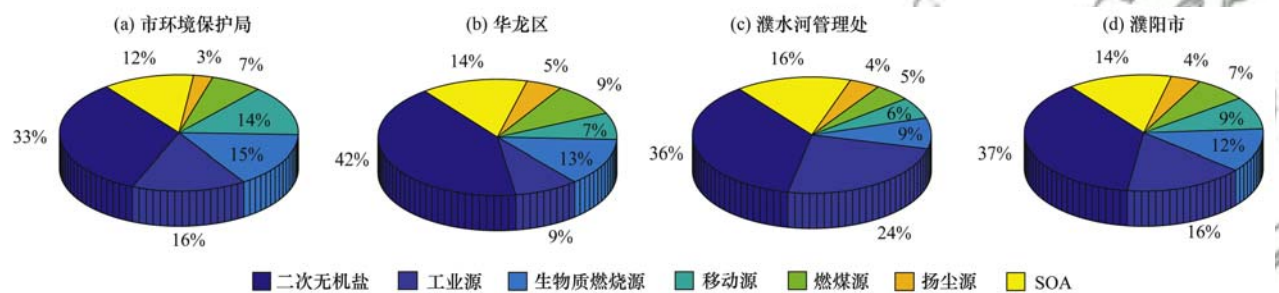


图3 濮阳市 2017 年秋冬季 PMF 源解析结果

Fig. 3 PMF source apportionment for Puyang during autumn and winter in 2017

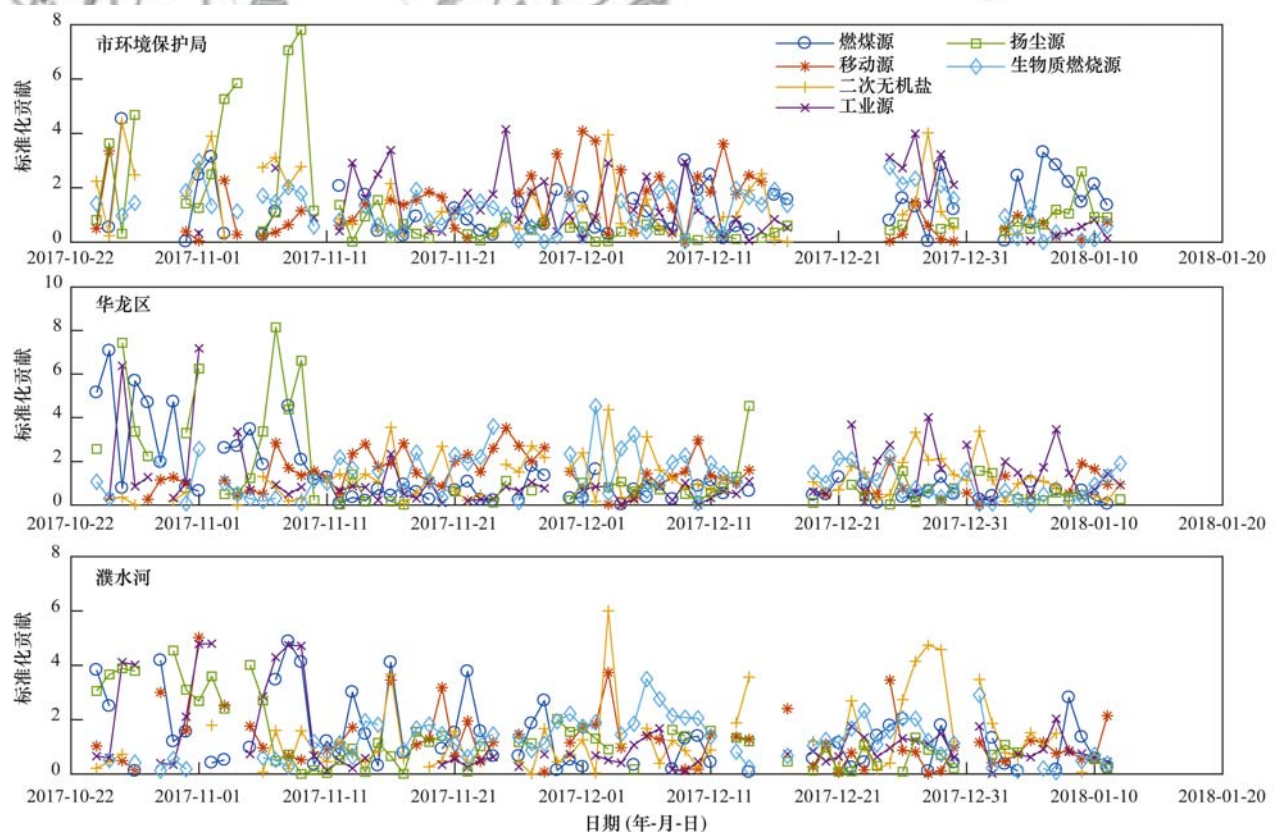


图4 2017 年濮阳市 3 站点秋冬季源解析结果时间序列

Fig. 4 Time series of source apportionment results at three sites during autumn and winter in 2017

护局站点工业源及生物质燃烧源在重污染暴发过程中起主导作用,二次反应的发生使得 12 月 28 日二次无机盐贡献极大,颗粒物浓度也逐渐达到最高,12 月 29、30 日二次污染物得到清除,以工业源贡献为主,而华龙区和濮水河管理处则是主要受到二次无机盐的影响。

3 结论

(1)濮阳市 2017 年秋冬季采样期间 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 $94.16 \mu g \cdot m^{-3}$,是我国环境空气质量二级标准的 2.69 倍,濮水河管理处的污染状况最为严重。进入采暖季后 3 站点均表现为重度及严重污染事件频发,轻度污染发生频率降低,集中供暖明显促进了极端污染事件的发生。濮水河管理处受采暖污染影响更大。濮阳市在重污染发生时 NO_2 与 CO 浓度升高明显, SO_2 浓度升高相对不大。

(2)本次采样 $PM_{2.5}$ 中的主要组分为水溶性离子(52.33%)、碳质组分(25.32%)和地壳元素(0.08%),离子组分中 NO_3^- 的含量很高,而 SO_4^{2-} 的浓度水平较低。华龙区受移动源影响大,濮水河管理处二次有机气溶胶污染更重。水溶性离子、SOA、OC、EC 及 K 在两次重污染过程中浓度均出现了明显的上升,可见二次转化及生物质燃烧在濮阳市重污染形成过程中起到了重要的作用。由于重污染过程通常伴随着小风或静风,地壳元素浓度在污染暴发时降低。

(3)整个采样期间濮阳市的硫氮转化率水平较高,大气的氧化性较强。硫氮转化形成二次气溶胶在重污染过程的发生中起到重要的作用,冬季硫氮转化与高浓度颗粒物间的反馈作用加剧了重污染的程度。

(4)濮阳市秋冬季 $PM_{2.5}$ 中二次无机盐贡献最大,分担率达到 37%,其次为工业源(16%)、二次有机气溶胶 SOA(14%)、生物质燃烧源(12%)、移动源(9%)、燃煤源(7%)和扬尘源(4%)。

(5)工业源排放及民用燃烧可能是导致濮阳市秋冬季大气污染的主要因素。为了减轻濮阳市大气细颗粒物污染,需要加强对石油化工行业、生物质燃烧、道路移动源以及民用散煤燃烧的管控以降低其排放量。

致谢:感谢中国环境科学研究院任岩军老师在濮阳市 2017 年大气污染物排放清单制作中的辛勤付出,感谢中国科学院大学梅笑冬博士课题组在手工膜采样化学成分分析工作中的贡献。

参考文献:

[1] 中华人民共和国环境保护部. 国务院大气污染防治十条措施

[EB/OL]. <https://baike. so. com/doc/7240001-7469173.html>, 2015-04-12.

- [2] Cai S Y, Wang Y J, Zhao B, *et al.* The impact of the "Air Pollution Prevention and Control Action Plan" on $PM_{2.5}$ concentrations in Jing-Jin-Ji region during 2012-2020 [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **580**: 197-209.
- [3] Pope III C A, Burnett R T, Thun M J, *et al.* Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution [J]. *Journal of the American Medical Association*, 2002, **287**(9): 1132-1141.
- [4] Baccarelli A A, Zheng Y N, Zhang X, *et al.* Air pollution exposure and lung function in highly exposed subjects in Beijing, China: a repeated-measure study [J]. *Particle and Fibre Toxicology*, 2014, **11**: 51.
- [5] Zhang H Y, Cheng S Y, Li J B, *et al.* Investigating the aerosol mass and chemical components characteristics and feedback effects on the meteorological factors in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **244**: 495-502.
- [6] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [7] Chen L, Guo B, Huang J S, *et al.* Assessing air-quality in Beijing-Tianjin-Hebei region: the method and mixed tales of $PM_{2.5}$ and O_3 [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **193**: 290-301.
- [8] 王跃思, 张军科, 王莉莉, 等. 京津冀区域大气霾污染研究意义、现状及展望[J]. *地球科学进展*, 2014, **29**(3): 388-396.
- Wang Y S, Zhang J K, Wang L L, *et al.* Researching significance, status and expectation of haze in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, **29**(3): 388-396.
- [9] Zhao P S, Dong F, He D, *et al.* Characteristics of concentrations and chemical compositions for $PM_{2.5}$ in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(9): 4631-4644.
- [10] 张延君, 郑玫, 蔡靖, 等. $PM_{2.5}$ 源解析方法的比较与评述 [J]. *科学通报*, 2015, **60**(2): 109-121.
- Zhang Y J, Zheng M, Cai J, *et al.* Comparison and overview of $PM_{2.5}$ source apportionment methods [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, **60**(2): 109-121.
- [11] 高健, 李慧, 史国良, 等. 颗粒物动态源解析方法综述与应用展望 [J]. *科学通报*, 2016, **61**(27): 3002-3021.
- Gao J, Li H, Shi G L, *et al.* Overview of the development and application of multi-time resolution source apportionment for particulate matters [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, **61**(27): 3002-3021.
- [12] 中国环境监测总站. 环境空气颗粒物来源解析监测方法指南(试行) [EB/OL]. (第二版). <http://www. doc88. com/p-3486726673384.html>, 2014-03-11.
- [13] 郭文帝, 王开扬, 郭晓方, 等. 太原市气溶胶中硫、氮转化特征 [J]. *环境化学*, 2016, **35**(1): 11-17.
- Guo W D, Wang K Y, Guo X F, *et al.* Characteristics of sulfur and nitrogen conversion in the aerosol, Taiyuan [J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(1): 11-17.
- [14] 廖碧婷, 吴兑, 常越, 等. 广州地区 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 与相关气体污染特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(6): 1551-1559.
- Liao B T, Wu D, Chang Y, *et al.* Characteristics of particulate SO_4^{2-} , NO_3^- , NH_4^+ and related gaseous pollutants in Guangzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(6): 1551-1559.

- [15] 张显, 田莎莎, 刘盈盈, 等. 沈阳市采暖期与非采暖期空气 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征及来源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1062-1070.
Zhang X, Tian S S, Liu Y Y, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in heating and non-heating periods in Shenyang[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1062-1070.
- [16] 陈璞珑, 王体健, 谢晓栋, 等. 基于数值模式的细颗粒物来源解析[J]. 科学通报, 2018, **63**(18): 1829-1838.
Chen P L, Wang T J, Xie X D, *et al.* Source apportionment of fine particles based on combined numerical model and receptor model[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, **63**(18): 1829-1838.
- [17] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al.* EPA Positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R]. EPA/600/R-14/108. Washington, DC; U. S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, 2014.
- [18] Paatero P, Tapper U. Analysis of different modes of factor analysis as least squares fit problems[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1993, **18**(2): 183-194.
- [19] 韩力慧, 张鹏, 张海亮, 等. 北京市大气细颗粒物污染与来源解析研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(11): 3203-3210.
Han L H, Zhang P, Zhang H L, *et al.* Pollution and source apportionment of atmospheric fine particles in Beijing[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(11): 3203-3210.
- [20] 杨佳美, 刘保双, 毕晓辉, 等. 泰安市环境受体 $\text{PM}_{2.5}$ 组分特征与来源解析[J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(9): 153-160.
Yang J M, Liu B S, Bi X H, *et al.* Chemical composition characteristics and source apportionment of ambient $\text{PM}_{2.5}$ in Tai'an[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **40**(9): 153-160.
- [21] 刘叶新, 陈伟华, 王雪梅, 等. 广州 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分特征及其与气象因子的关系[J]. 环境科学学报, 2018, **39**(4): 53-63.
Liu Y X, Chen W H, Wang X M, *et al.* Chemical composition of $\text{PM}_{2.5}$ and its relations with meteorological factors in Guangzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **39**(1): 53-63.
- [22] 闫广轩, 杨争, 席冬冬, 等. 新乡市秋季大气细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 中水溶性离子特征及其来源解析[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(2): 640-648.
Yan G X, Yang Z, Xi D D, *et al.* Characterization and source analysis of the water-soluble inorganic ions in $\text{PM}_{2.5}$ of Xinxiang during autumn[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(2): 640-648.
- [23] 范美益, 曹芳, 张园园, 等. 徐州市冬季大气细颗粒物水溶性无机离子污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(11): 4478-4485.
Fan M Y, Cao F, Zhang Y Y, *et al.* Characteristics and sources of water soluble inorganic ions in fine particulate matter during winter in Xuzhou[J]. Environmental Science, 2017, **38**(11): 4478-4485.
- [24] Qiu X H, Duan L, Gao J, *et al.* Chemical composition and source apportionment of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ in different functional areas of Lanzhou, China[J]. Journal of Environment Science, 2016, **40**: 75-83.
- [25] 林瑜, 叶芝祥, 杨怀金, 等. 成都市西南郊区春季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 的污染水平及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1629-1638.
Lin Y, Ye Z X, Yang H J, *et al.* Pollution level and source apportionment of atmospheric particles $\text{PM}_{2.5}$ in Southwest Suburb of Chengdu in spring[J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1629-1638.
- [26] 郑玫, 闫才青, 李小滢, 等. 二次有机气溶胶估算方法研究进展[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(3): 555-564.
Zheng M, Yan C Q, Li X Y, *et al.* A review of methods for quantifying secondary organic aerosol[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(3): 555-564.
- [27] Lim H J, Turpin B J. Origins of primary and secondary organic aerosol in Atlanta: results of time-resolved measurements during the Atlanta supersite experiment[J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(21): 4489-4496.
- [28] Na K, Sawant A A, Song C, *et al.* Primary and secondary carbonaceous species in the atmosphere of Western Riverside County, California[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(9): 1345-1355.
- [29] 丁萌萌, 周健楠, 刘保献, 等. 2015年北京城区大气 $\text{PM}_{2.5}$ 中 NH_4^+ 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 及前体气体的污染特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1307-1316.
Ding M M, Zhou J N, Liu B X, *et al.* Pollution characteristics of NH_4^+ , NO_3^- , SO_4^{2-} in $\text{PM}_{2.5}$ and their precursor gases during 2015 in an urban area of Beijing[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1307-1316.
- [30] 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 等. 长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(5): 1623-1632.
Tang X B, Huang C, Lou S R, *et al.* Emission factors and PM chemical composition study of biomass burning in the Yangtze River Delta Region[J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1623-1632.
- [31] Wang Y, Zhuang G S, Tang A H, *et al.* The ion chemistry and the source of $\text{PM}_{2.5}$ aerosol in Beijing [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(21): 3771-3784.
- [32] Wang Y, Zhuang G S, Zhang X Y, *et al.* The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of $\text{PM}_{2.5}$ and TSP aerosol in Shanghai [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(16): 2935-2952.
- [33] 王念飞, 陈阳, 郝庆菊, 等. 苏州市 $\text{PM}_{2.5}$ 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.
- [34] Argyropoulos G, Samara C, Diapouli E, *et al.* An iterative method for evaluating the inter-comparability between chemical mass balance and multivariate receptor models[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2016, **155**: 97-108.
- [35] 王彤, 华阳, 许庆成, 等. 京津冀郊区站点秋冬季大气 $\text{PM}_{2.5}$ 来源解析[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1035-1042.
Wang T, Hua Y, Xu Q C, *et al.* Source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ in suburban area of Beijing-Tianjin-Hebei region in autumn and winter[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1035-1042.

CONTENTS

Characteristics of PM _{2.5} Pollution and the Efficiency of Concentration Control During a Red Alert in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016	ZHANG Chong, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (3397)
Concentration Characteristics of PM _{2.5} and the Causes of Heavy Air Pollution Events in Beijing During Autumn and Winter	XU Ran, ZHANG Heng-de, YANG Xiao-wen, <i>et al.</i> (3405)
Elemental Composition Characteristics of PM _{2.5} and PM ₁₀ , and Heavy Pollution Analysis in Hefei	LIU Ke-ke, ZHANG Hong, LIU Gui-jian (3415)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Fine Particulate Matter in Autumn and Winter in Puyang, China	CHEN Chu, WANG Ti-jian, LI Yuan-hao, <i>et al.</i> (3421)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Components in PM _{2.5} in the Guanzhong Area	KANG Bao-rong, LIU Li-zhong, LIU Huan-wu, <i>et al.</i> (3431)
Molecular Composition and Source Apportionment of Fine Organic Aerosols in Autumn in Changchun	WU Xia, CAO Fang, ZHAI Xiao-yao, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Urban Expansion and Changes in Urban Characteristics on PM _{2.5} Pollution in China	WANG Gui-lin, ZHANG Wei (3447)
Effect of a Wet Flue Gas Desulphurization System on the Emission of PM _{2.5} from Coal-Fired Power Plants	DENG Jian-guo, MA Zi-zhen, LI Zhen, <i>et al.</i> (3457)
Pollution Characteristics and Emission Coefficients for Volatile Organic Compounds from the Synthetic Leather Industry in Zhejiang Province	XU Jia-qí, WANG Zhe-míng, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3463)
Particle Size Distribution and Population Characteristics of Airborne Bacteria Emitted from a Sanitary Landfill Site	MA Jia-wei, YANG Kai-xiong, CHAI Feng-guang, <i>et al.</i> (3470)
Distribution of Total Microbes in Atmospheric Bioaerosols in the Coastal Region of Qingdao	GONG Jing, QI Jian-hua, LI Hong-tao (3477)
Distribution, Sources, and Health Risk Assessment of PAHs in Water Supply Source Regions of Guangzhou	SONG Yu-mei, WANG Chang, LIU Shang, <i>et al.</i> (3489)
Distribution of 16 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Dianchi Lake Surface Sediments After the Integrated Water Environment Control Project	HU Xin-yi, GAO Bing-li, CHEN Tan, <i>et al.</i> (3501)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Salinized Farmland Soil from the Oil Mining Area of the Yellow River Delta	QIU Hui, LIU Yue-xian, XIE Xiao-fan, <i>et al.</i> (3509)
Wind Field Influences on the Spatial Distribution of Cyanobacterial Blooms and Nutrients in Meiliang Bay of Lake Taihu, China	YU Mao-lei, HONG Guo-xi, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (3519)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and the Retention Effects of Nutrients in Xiangjiaba Reservoir	WANG Yao-yao, LÜ Lin-peng, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (3530)
Effects of Exogenous Inputs on Phosphorus Recovery and Transport in Newborn Surface Layers from Sediment Dredging	LI Xin, GENG Xue, WANG Hong-wei, <i>et al.</i> (3539)
Chemical Characteristics and Sources of Groundwater Sulfate in the Kashgar Delta, Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (3550)
Groundwater Chemistry Characteristics and the Analysis of Influence Factors in the Luochuan Loess Tablelands	LI Zhou, LI Chen-xi, HUA Kun, <i>et al.</i> (3559)
Analysis of River Zooplankton Community Characteristics in Autumn in Beijing	WANG Hai-lin, LIU Yu-fei, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (3568)
Benthic Diatom Communities in the Main Stream of Three Gorges Reservoir Area and Its Relationship with Environmental Factors	LIU Li, HE Xin-yu, FU Jun-ke, <i>et al.</i> (3577)
Environmental Response and Ecological Function Prediction of Aquatic Bacterial Communities in the Weihe River Basin	WAN Tian, HE Meng-xia, REN Jie-hui, <i>et al.</i> (3588)
Community Composition of <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria in the Waters of the Lower Reaches of the Fenne River and Its Relationship with Inorganic Nitrogen	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (3596)
Metabolic Functional Analysis of Dominant Microbial Communities in the Rapid Sand Filters for Drinking Water	HU Wan-chao, ZHAO Chen, WANG Qiao-juan, <i>et al.</i> (3604)
Control Measure Effects on the Effluent Quality from Extensive Green Roofs Based on Stabilized Sludge Recycling	PENG Hang-yu, LI Tian, QI Yue, <i>et al.</i> (3612)
Impacts of Vegetation on Quantity and Quality of Runoff from Green Roofs	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3618)
Organic Matter Removal and Membrane Fouling Control of Secondary Effluents Using a Combined Nanofiltration Process	FAN Ke-wen, LI Xing, YANG Yan-ling, <i>et al.</i> (3626)
Adsorption Properties of Ammonia Nitrogen in Aqueous Solution by Various Materials	JIAO Ju-long, YANG Su-wen, XIE Yu, <i>et al.</i> (3633)
Effects of Different Concentrations of Ammonia Nitrogen on the Growth and Enzyme Activity of Four Common Algae Strains	CHANG Ting, XU Zhi-hui, CHENG Peng-fei, <i>et al.</i> (3642)
Treatment of Highly Concentrated Swine Wastewater and Its Degradation Processes Using Three Matrix Materials	LIU Ming-yu, XIA Meng-hua, LI Yuan-hang, <i>et al.</i> (3650)
Phosphorus Removal Performance and Mechanism of Modified Zeolite Using Alum Sludge Acidified Extraction Liquid	HAN Yun, HU Yu-jie, LIAN Jie, <i>et al.</i> (3660)
Advanced Denitrification of Municipal Wastewater Achieved via Partial ANAMMOX in Anoxic MBBR	YANG Lan, PENG Yong-zhen, LI Jian-wei, <i>et al.</i> (3668)
Effect of an Aerobic Unit and a Sedimentation Unit on Sludge and Nitrogen Removal in an Anoxic Unit in a Continuous-flow System	XUE Huan-ting, YUAN Lin-jiang, LIU Xiao-bo, <i>et al.</i> (3675)
Performance and Mechanisms of Advanced Nitrogen Removal via FeS-driven Autotrophic Denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Jing-de, PAN Jian-xin, LI Ze-min, <i>et al.</i> (3683)
Simultaneous Conversion Conditions of Ammonia and Sulfate in ANAMMOX Systems	DONG Shi-yu, BI Zhen, ZHANG Wen-jing, <i>et al.</i> (3691)
Potential Source Environments for Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in China	ZHANG Bing, WU Lin-wei, WEN Xiang-hua (3699)
Comparison of the Microbial Community Structure in Nitrifying Processes Operating with Different Dissolved Oxygen Concentrations	LIU Wen-ru, GU Guang-fa, SONG Xiao-kang, <i>et al.</i> (3706)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Kinetics by the Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Acinetobacter junii</i> NP1	YANG Lei, CHEN Ning, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (3713)
Realization of Limited Filamentous Bulking with Type 0092 Filamentous Bacteria as the Dominant Filamentous Bacteria in Shortcut Nitrification	GAO Chun-di, AN Ran, HAN Hui, <i>et al.</i> (3722)
Nitrification, Denitrification, and N ₂ O Production Under Saline and Alkaline Conditions	DAI Wei, ZHAO Jian-qiang, DING Jia-zhi, <i>et al.</i> (3730)
Effect of Biochar on Ammonia Volatilization in Saline-Alkali Soil	WANG Yi-yu, WANG Sheng-sen, DAI Jiu-lan (3738)
Effect of Two Soil Synergists on Ammonia Volatilization in Paddy Fields	ZHOU Yu-ling, HOU Peng-fu, LI Gang-hua, <i>et al.</i> (3746)
Determination of Heavy Metal Geochemical Baseline Values and Its Accumulation in Soils of the Luanhe River Basin, Chengde	SUN Hou-yun, WEI Xiao-feng, GAN Feng-wei, <i>et al.</i> (3753)
Migration and Source Analysis of Heavy Metals in Vertical Soil Profiles of the Drylands of Xiamen City	ZHANG Wei-hua, YU Rui-lian, YANG Yu-jie, <i>et al.</i> (3764)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Influencing Factors in Baoji Urban Soils	ZHANG Jun, DONG Jie, LIANG Qing-fang, <i>et al.</i> (3774)
Stabilizing Effects of Fe-Ce Oxide on Soil As(V) and P	LIN Long-yong, YAN Xiu-lan, YANG Shuo (3785)
Stabilization of Arsenic-Contaminated Soils Using Fe-Mn Oxide Under Different Water Conditions	ZHOU Hai-yan, DENG Yi-rong, LIN Long-yong, <i>et al.</i> (3792)
Effects of Biochar Amendment on Soil Microbial Biomass Carbon, Nitrogen and Dissolved Organic Carbon, Nitrogen in Paddy Soils	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, TANG Hong, <i>et al.</i> (3799)
Effects of Organic Amendments on Microbial Biomass Carbon and Nitrogen Uptake by Corn Seedlings Grown in Two Purple Soils	WANG Yue, ZHANG Ming-hao, ZHAO Xiu-lan (3808)
Effects of Land Use Type on the Content and Stability of Organic Carbon in Soil Aggregates	LUO Xiao-hong, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (3816)
Effects of Converting Farmland into Forest and Grassland on Soil Nitrogen Component and Conversion Enzyme Activity in the Mountainous Area of Southern Ningxia	GAO Han, XIAO Li, NIU Dan, <i>et al.</i> (3825)
Leaching Behavior of Dissolved Organic Matter in Biochar with Different Extracting Agents	HE Pin-jing, ZHANG Hao-hao, QIU Jun-jie, <i>et al.</i> (3833)
Toxicity of PM _{2.5} Based on a Battery of Bioassays	JIANG Xiao-dong, XUE Yin-gang, WEI Yong, <i>et al.</i> (3840)