

E方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.1
第41卷 第1期

目次

近20年来中国PM_{2.5}污染演变的时空过程 时燕, 刘瑞梅, 罗毅, 杨昆 (1)

2007~2016年上海颗粒物浓度特征与气候背景异同分析 郑庆锋, 史军, 谈建国, 段玉森, 林燕芬, 徐卫忠 (14)

夏季大气PM_{2.5}中元素特征及源解析:以华中地区平顶山-随州-武汉为例 刘威杰, 石明明, 程敏, 黎荧, 朱戈昊, 邢新丽, 孔少飞, 张家泉, 祁士华 (23)

呼包鄂地区冬季、夏季PM_{2.5}污染特征 李伊明, 刘佳媛, 史国良, 皇甫延琦, 张昕, 杨奕, 冯银厂 (31)

2019年元旦前后石家庄市重污染过程PM_{2.5}污染特征及来源解析 周静博, 段菁春, 王建国, 杨鹏, 刘煥武, 李梅, 靳伟 (39)

基于模型模拟的成都市PM_{2.5}污染来源解析 许艳玲, 易爱华, 薛文博 (50)

北京市PM_{2.5}中砷污染特征 石绍萱, 杨艳蓉, 秦娟娟, 周雪明, 段菁春, 谭吉华, 陈荣志 (57)

夏秋季宁波市气态元素汞(GEM)污染特征及潜在源区贡献分析 易辉, 林佳梅, 蔡秋亮, 王克强, 陈进生, 佟磊, 李建荣, 肖航 (65)

安阳市大气PM_{2.5}中水溶性离子季节特征及来源解析 孙有昌, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (75)

新乡市夏冬季节PM_{2.5}稳定碳同位素特征分析 闫广轩, 宋鑫, 张靖雯, 张朴真, 王力鹏, 张佳羽, 杨争, 曹治国, 樊静, 王跃思, 刘子锐 (82)

基于颗粒物化学组分粒径分布特征的源解析方法构建与评估 梁永莉, 田瑛泽, 刘童, 冯银厂 (90)

超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征 王润芳, 马大卫, 姜少毅, 朱仁斌, 何军, 张本耀 (98)

京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨 余益军, 孟晓艳, 王振, 周崑, 于红霞 (106)

安阳市近地面臭氧污染特征及气象影响因素分析 杨健, 尹沙沙, 于世杰, 王丽娟, 张瑞芹, 郝建尤, 苏方成, 齐艳杰 (115)

长江三角洲2017年机动车IVOCs排放清单构建及其对SOA的生成影响 王倩, 黄凌, 王杨君, 殷司佳, 张琪, 易鑫, 李莉 (125)

华东典型城市非道路移动机械排气烟度 鲁君, 胡馨遥, 杨强, 唐伟, 夏阳, 井宝莉, 陈昫, 黄成 (133)

国内外储油库VOCs排放现状与标准分析 胡玮, 任碧琪, 黄玉虎, 秦建平, 卞吉玮, 吴清柱 (139)

四乙基愈创木酚液相·OH氧化SOA产率及特征分析:初始浓度的影响 庄雨, 陈彦彤, 李旭东, 马帅帅, 赵竹子, 叶招莲, 盖鑫磊 (146)

乌鞘岭南、北坡降水稳定同位素特征及水汽来源对比 徐秀婷, 贾文雄, 朱国锋, 马兴刚, 张昱, 袁瑞丰, 张志远, 石阳 (155)

长江源多年冻土区地下水氢氧稳定同位素特征及其影响因素 汪少勇, 何晓波, 丁永建, 常福宣, 吴锦奎, 胡召富, 王利辉, 杨贵森, 邓明珊 (166)

巴尔喀什湖流域水化学和同位素空间分布及环境特征 沈贝贝, 吴敬禄, 吉力力·阿不都外力, A. S. Saparov, Gulnura Isanova (173)

城市湖泊水环境整治对改善水质的影响:以蠡湖近30年水质变化为例 田伟, 杨周生, 邵克强, 潘辉, 胡洋, 白承荣, 姜星宇, 高光, 汤祥明 (183)

典型药物及个人护理品在黄东海海域水体中的检测、分布规律及其风险评估 陈贤, 张彩杰, 杨桂朋, 张婧, 刘梦 (194)

长江南京段水源水中有机磷酸酯的污染特征与风险评估 李栋, 张圣虎, 张芹, 王博, 卜元卿, 赵欣, 李辉, 宋宁慧, 郭瑞昕 (205)

雄安新区-白洋淀冬季冰封期水体溶解性有机物的空间分布、光谱特征及来源解析 周石磊, 孙悦, 张艺冉, 蒋永丰, 尹璐, 黄廷林, 李再兴, 罗晓, 战江, 王函 (213)

白洋淀表层沉积物元素的空间特征、风险评价及来源分析 汪敬忠, 刘卓, 魏浩, 吴玉会, 占水娥, 朱迟, 张益森 (224)

松花江表层沉积物PAEs分布特征及生态风险评估 王欢, 杨永哲, 王海燕, 董伟羊, 闫国凯, 常洋, 李泽文, 赵远哲, 凌宇 (232)

鄱阳湖湖口-长江段沉积物中微塑料与重金属污染物的赋存关系 李文华, 简敏菲, 刘淑丽, 江玉梅, 邓艳彬, 朱琳 (242)

臭氧对生物活性炭中微生物及出水消毒副产物的影响 刘宝明, 王夕希, 张晓夏, 顾艳芳, 李雨平, 阮文权, 缪恒锋, 潘杨 (253)

兰州市西固区儿童饮用水重金属暴露及健康风险精细化评估 陈月芳, 孙善伟, 段小丽, 许锦荣, 王娟, 康艺瑾, 梁为纲, 曹素珍 (262)

镁铁层状双金属氢氧化物对磷酸盐的吸附作用及对内源磷释放的控制效果及机制 吴俊麟, 林建伟, 詹艳慧, 程永前, 柏晓云, 辛慧敏, 常明玥 (273)

一硫代磷酸盐在介质上的吸附特征及机制 廖丹雪, 单慧媚, 彭三曦, 潘敖然, 黄健, 陈辉, 赵超然 (284)

酸碱复合改性海泡石亚结构特征及其对Cd(II)吸附性能 谢厦, 徐应明, 闫翠侠, 罗文文, 孙约兵 (293)

脱氮菌剂在低溶解氧黑臭水体中氮代谢特征 赵志瑞, 刘硕, 李铎, 李海萍, 李方红, 张佳瑶, 白志辉 (304)

宏基因组方法分析医药化工废水厂中抗生素耐药菌及抗性基因 陈红玲, 张兴桃, 王晴, 姚沛琳 (313)

淀粉废水处理系统中活性污泥的微生物群落结构及多样性分析 赵婷婷, 乔凯, 王蕾, 张伟, 竺建荣, 唐一, 胡滨, 王香莲, 杨静, 景在涛 (321)

基于SBR-ABR实现PN-SAD耦合工艺的运行与优化调控 陈重军, 张敏, 姜滢, 郭萌蕾, 谢嘉玮, 谢军祥, 沈耀良 (330)

基于间歇饥饿的SNAD工艺运行 李冬, 刘志诚, 徐贵达, 王玉颖, 张杰 (337)

反硝化-高效部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺处理老龄垃圾渗滤液 陈小珍, 汪晓军, Karasuta Chayangkun, 周松伟, 钟中, 陈振国, 陈晓坤 (345)

硝化微颗粒污泥快速培养及其亚硝化功能快速实现 刘文如, 宋家俊, 王建芳, 沈耀良 (353)

高频曝停下曝时间对亚硝化颗粒污泥性能的影响 张杰, 劳会妹, 李冬, 魏子清 (360)

中国东北沈抚地区土壤中PBDEs的残留、来源及风险评估 向鑫鑫, 鲁垠涛, 阮起扬, 赖德, 孙绍斌, 姚宏, 张战胜 (368)

某焦化场地非均质包气带中多环芳烃(PAHs)来源及垂向分布特征 孟祥帅, 吴萌萌, 陈鸿汉, 岳希, 陶抒远 (377)

北京蔬菜地土壤中抗生素抗性基因与可移动元件的分布特征 张汝凤, 宋渊, 高浩泽, 程首涛, 孙艳梅, 王旭明 (385)

长期施肥和耕作下紫色土坡耕地土壤C、N、P和K化学计量特征 杜映妮, 李天阳, 何丙辉, 贺小容, 付适 (394)

亚热带稻田土壤碳氮磷生态化学计量学特征 宋佳龄, 盛浩, 周萍, 段良霞, 周清, 张杨珠 (403)

宛山荡农田土壤氮迁移过程反硝化与厌氧氨氧化 陈志浩, 覃云斌, 丁帮璟, 胡伏优, 陈伟, 李正魁 (412)

秸秆炭还田对滴灌棉田土壤微生物代谢功能及细菌群落组成的影响 王晶, 马丽娟, 刘泽华, 闵伟, 侯振安 (420)

基于PMF模型的九龙江流域农田土壤重金属来源解析 黄华斌, 林承奇, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 陈枫桦 (430)

塔里木盆地东南缘绿洲区土壤砷空间分布及农作物砷富集特征 陈云飞, 周金龙, 曾妍妍, 王松涛, 杜江岩, 孙英, 顾思博 (438)

广西典型碳酸盐岩区农田土壤-作物系统重金属生物有效性及迁移富集特征 马宏宏, 彭敏, 刘飞, 郭飞, 唐世琪, 刘秀金, 周亚龙, 杨柯, 李括, 杨峥, 成杭新 (449)

不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响 张静静, 朱爽阁, 朱利楠, 柳海涛, 杨金康, 化党领 (460)

不同钝化剂对鸡粪堆肥重金属钝化效果及其腐熟度指标的影响 栾润宇, 高珊, 徐应明, 纪文凝, 闫翠侠, 孙约兵 (469)

黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应 周俊杰, 陈志飞, 杨全, 赖帅彬, 王智, 徐炳成 (479)

炉渣与生物炭施加对福州平原水稻田温室气体排放的后续影响 蓝兴福, 王晓彤, 周雅心, 金强, 许旭萍, 王维奇 (489)

《环境科学》征订启事(89) 《环境科学》征稿简则(97) 信息(303, 329, 344)

呼包鄂地区冬季、夏季 PM_{2.5} 污染特征

李伊明¹, 刘佳媛², 史国良¹, 皇甫延琦¹, 张昕^{3*}, 杨奕³, 冯银厂¹

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071; 2. 中国环境科学研究院大气环境科学研究所, 北京 100012; 3. 中国环境科学研究院国家环境保护生态工业重点实验室, 北京 100012)

摘要: 基于 PMF 模型源解析结果分析了呼包鄂地区冬季、夏季主要污染源及污染特征. 物质重构结果表明, 有机物(19.9%~44.6%)、地壳物质(9.7%~46.2%) 在呼包鄂地区受体 PM_{2.5} 中占有较大比重. 源解析结果表明, 冬季各类源对 PM_{2.5} 的分担率大小依次为: 二次源(26.7%) > 燃煤源(26.1%) > 机动车源(19.1%) > 扬尘源(18.1%), 夏季则为二次源(26.7%) > 扬尘源(22.3%) > 燃煤源(16.6%) > 机动车源(15.1%) > SOC(8.7%), 可以看出二次源在呼包鄂地区冬季和夏季均为首要贡献源类, 冬季燃煤源、夏季扬尘源对呼包鄂地区的影响较大. 分析冬季、夏季典型污染过程, 对应于源解析结果, 冬季主要污染源为二次源、燃煤源, 夏季为二次源.

关键词: 呼包鄂地区; 污染特征; 正定矩阵因子分解模型(PMF); 重污染过程; PM_{2.5}

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0031-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201904207

PM_{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China

LI Yi-ming¹, LIU Jia-yuan², SHI Guo-liang¹, HUANGFU Yan-qi¹, ZHANG Xin^{3*}, YANG Yi³, FENG Yin-chang¹

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Institute of Atmospheric Environmental Science, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Based on the source apportionment by positive matrix factorization (PMF) model, we analyze the main sources and characteristics of aerosol fine particulate matter (PM_{2.5}) during winter and summer in the Hohhot-Baotou-Ordos region, China. We found that organic (19.9%~44.6%) and crustal compositions (9.7%~46.2%) accounted for a large proportion of aerosol PM_{2.5} according to the results of mass closure. The results of source apportionment showed that the contribution of sources rank as: secondary inorganic aerosol (26.7%) > coal (26.1%) > motor vehicle (19.1%) > dust (18.1%) during winter, and as: secondary inorganic aerosol (26.7%) > dust (22.3%) > coal (16.6%) > vehicle exhaust (15.1%) > SOC (8.7%) during summer. Findings suggest that the contribution of sources with secondary inorganic aerosol were the largest sources both in winter and summer, and that the Hohhot-Baotou-Ordos region was also affected by coal during the winter and dust during the summer. Corresponding to the source apportionment, analysis of typical heavy pollution episodes in winter and summer showed that the pollution sources during the winter were mainly secondary inorganic aerosol and coal, whereas they were mainly secondary inorganic aerosol during the summer.

Key words: Hohhot-Baotou-Ordos region; pollution characteristics; positive matrix factor (PMF); heavy pollution episodes; PM_{2.5}

近年来,随着我国经济的迅速发展,环境污染问题日益突出^[1-3],以高浓度颗粒物和臭氧^[4,5]为代表的综合性污染是我国城镇地区所面临的重要大气环境问题之一. 大气传输造成的区域大气复合污染问题,^[6,7]突显了研究城市群大气环境质量改善的重要性.《清洁空气计划》(2013年)中明确指出“摸清区域性大气复合污染的成分、成因、主要来源及影响因子;开展重点区域大气污染物相互影响及输送机制研究,及城市间的源排放相互影响研究”.因此,开展区域大气环境质量改善研究已经成为国家中长期科技发展和环境保护“十二五”乃至更长时期规划的重要内容和优先领域.

目前,我国对于京津冀、长三角区域、珠三角

区域大气环境质量改善研究较多. 欧阳正午等^[8]基于四川盆地和京津冀地区 2014~2017 年的气象和污染物浓度数据,定量评估了两区域空气质量实际改善程度;Fu 等^[9]分析了华北平原雾、霾频发的原因;Cheung 等^[10]研究了长三角地区 O₃ 的污染水平以及成因,并分析了发生频率. 然而对于西北部一些城市群的大气环境质量问题,还有待进一步研究. 呼包鄂地区位于全国“两横三纵”城市化战略布局中,为全国重要的能源、煤化工基地、农畜产品加工基

收稿日期: 2019-04-22; 修订日期: 2019-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41775149); 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 李伊明(1995~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气污染防治, E-mail: yimingli@mail.nankai.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zhangxin@cras.org.cn

地和稀土新材料产业基地,也是北方地区重要的冶金和装备制造业基地^[11].随着经济的发展,该区域大气环境问题日益突出.呼包鄂地区冬季取暖时燃煤量大幅增加,导致大气污染物排放量急剧上升;夏季光化学反应强烈,臭氧浓度上升明显^[12],该区域大气污染问题有一定的地域性和特征性,研究其大气污染特征具有重要意义.

本研究主要选取夏季、冬季两个典型污染季节,对采集的受体组分进行分析,分别纳入正定矩阵因子分解模型(PMF)模型进行源解析,找出主要的源类,并选取两个典型污染过程对呼包鄂地区的大气污染过程进行详细的分析,以期为研究我国西北部城市群——呼包鄂地区冬夏大气污染特征提供科学的信息.

1 材料与方 法

1.1 样品采集与分析

本研究根据监测数据需求,充分反映呼包鄂地区空气质量状况,综合考虑点位设置的代表性、经济性、可达性,通过模型模拟和实地踏勘,最终确定呼和浩特市选择小召站点、包头市选择包百大楼站点、鄂尔多斯市选择杭锦旗站点,具体点位分布如图1所示.采样时间分为2个时间段:其中冬季为2015年12月20日~2016年1月20日,夏季为2016年7月20日~2016年8月2日.各点位采样周期为 $23\text{h}\cdot\text{d}^{-1}$,采样时段定为当日10:00至次日09:00,共采集约44 d.各点位平行采集聚丙烯滤膜和石英滤膜,采样结束共获得聚丙烯滤膜和石英滤膜共360个(90 mm),最后获得有效数据的滤膜350个,有效率为97.2%.



图1 采样点位空间分布示意

Fig. 1 Spatial distribution of sampling sites

颗粒物质量由聚丙烯滤膜和石英滤膜采样前后的质量差获得,称重使用十万分之一电子天平(型号CP225D, Germany),最终所用质量为二者的均值.碳组分和水溶性离子(OC 、 EC 、 Cl^- 、 NO_3^- 、

SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 Na^+ 和 K^+ 等)质量浓度通过石英滤膜分析得到.元素(Na 、 Mg 、 Al 、 Si 、 K 、 Ca 、 Ti 、 V 、 Co 、 Cr 、 Mn 、 Fe 、 Ni 、 Cu 、 Cd 、 Zn 、 Hg 和 Pb 等)质量浓度通过聚丙烯滤膜分析得到.离子测定依据《环境空气颗粒物中水溶性阳离子的测定离子色谱法》(HJ 800 2016).元素测定参照《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》(HJ 657-2013).呼包鄂地区大气环境质量数据主要来源于呼和浩特、包头、鄂尔多斯的大气自动监测站数据,监测指标主要为 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO 和 O_3 .

1.2 受体 $\text{PM}_{2.5}$ 物质重构

物质重构是通过测定的化学组分间接计算得到颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)中的主要组成物质及占比(质量分数).此外,将重构之后的浓度之和与称重法得到的颗粒物浓度进行比较,可对分析结果的可靠性进行检验(物质浓度之和<颗粒物质量浓度).

颗粒物的物质重构主要包括:有机物(OM)、元素碳(EC)、地壳类物质(矿物尘)、微量元素和二次物质(硫酸盐以及硝酸盐).其中, SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Cl^- 、 EC 和微量元素由测定值确定,其他物质则在测定浓度值的基础上进行折算得到.通常有机物的含量由 $\text{OM} = k \times \text{OC}$ 计算出,转化系数 k 一般在1.2~2.4之间^[13],根据呼包鄂地区的实际情况,选定1.6为其 OC 的转化系数;地壳类物质以 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 和 CaO 等地壳中最主要化合物的相应元素进行一定换算得到^[14];硫酸盐和硝酸盐的来源主要受到气态前体物的影响, EC 受燃烧源一次排放影响较大,一般以直接测定的结果作为物质重构结果^[15].

计算公式为:

$$[\text{OM}] = 1.6 \times [\text{OC}]$$

$$[\text{地壳类物质}] = [1.89\text{Al}] + [2.14\text{Si}] +$$

$$[1.4\text{Ca}] + [1.43\text{Fe}] + [1.67\text{Ti}] + [1.2\text{K}]$$

$$[\text{硫酸盐}] = [\text{SO}_4^{2-}]$$

$$[\text{硝酸盐}] = [\text{NO}_3^-]$$

$$[\text{铵盐}] = [\text{NH}_4^+]$$

$$[\text{氯离子}] = [\text{Cl}^-]$$

1.3 正定矩阵因子分解模型(PMF)

正定矩阵因子分解模型(PMF)由Paatero等在1993年提出^[16],此后,PMF受体模型经过不断地改进,现已广泛应用于国内外源解析工作^[17~20].PMF模型的基本思路是利用权重计算出颗粒物中各化学组分的误差,然后通过最小二乘法确定出颗粒物的主要污染源及其贡献率.不需要知道源数量和源成分谱信

息,适用于分析长时间序列样品. 基本原理如下^[21-23]:

$$E = X_{nm} - \sum_{j=1}^p G_{np} F_{pm} \quad (1)$$

式中, E 为残差矩阵; X_{nm} 表示 n 个样品中的 m 个化学成分; p 是解析出来的源的数目; G 是源贡献矩阵; F 是源成分谱矩阵.

当解析结果满足“目标函数” $Q(E)$ 的值最小时,即得最终的 G 矩阵和 F 矩阵:

$$Q(E) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (E_{ij}/\sigma_{ij})^2 \quad (2)$$

式中, σ_{ij} 是第 j 个样品中第 i 个化学成分的标准偏

差/不确定性.

2 结果与讨论

2.1 观测期间组分变化特征

冬季呼包鄂监测期间各点位 PM_{2.5} 日均浓度呈现波动下降趋势(如图 2),夏季呼和浩特和鄂尔多斯点位的 PM_{2.5} 浓度呈现上下波动不稳定趋势,夏季和冬季 PM_{2.5} 在各点位的变化较为一致,表明呼和浩特、包头和鄂尔多斯可能受到相似污染源排放的影响. 冬季时,呼和浩特 PM_{2.5} 平均浓度最高(95.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),夏季则为鄂尔多斯(36.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$).

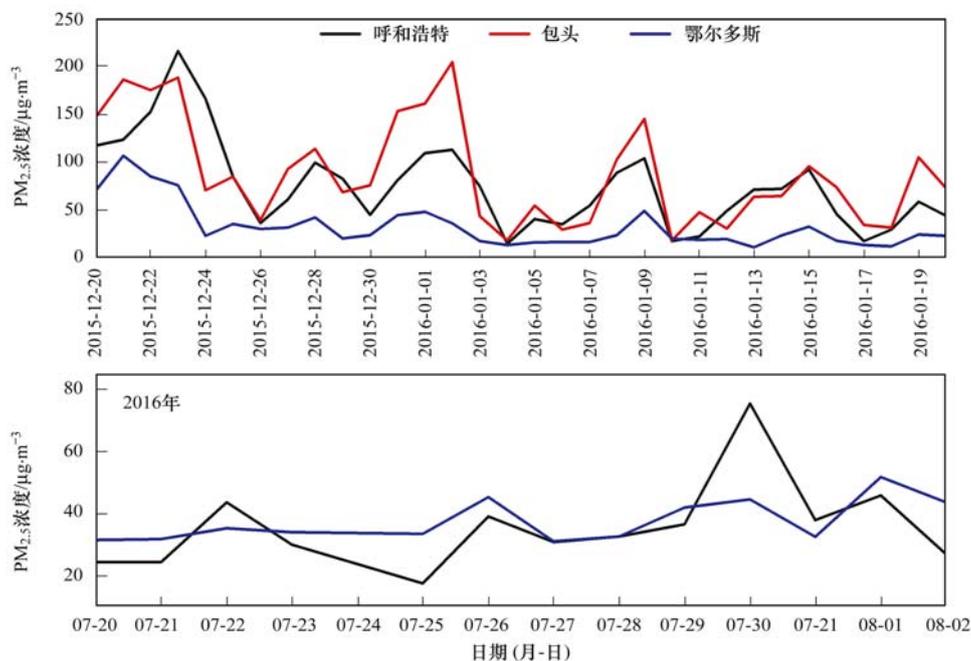


图 2 冬季、夏季颗粒物浓度时间序列

Fig. 2 Time series of PM_{2.5} concentrations during winter and summer

呼包鄂地区三点位冬季与夏季 PM_{2.5} 中主要化学组分的质量浓度及所占质量分数如图 3 所示. OC、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 在整个呼包鄂地区冬季的颗粒物中占有较大的比例,其中呼和浩特与鄂尔多斯 OC 占比最高,分别为 29.8% 和 24.3%;包头则为 SO₄²⁻ 占有相对较高的比例. SO₄²⁻、OC 和 EC 是煤烟尘的标识组分,SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 是二次源的标识组分^[24-27],由此可推测呼包鄂地区冬季受到煤烟尘和二次源的影响较大. 夏季呼包鄂地区的颗粒物中占比较大的则为 SO₄²⁻、Si 和 NO₃⁻,分别为 29.8%、27.7% 和 25.4%. 地壳元素 Si 的占比与冬季相比出现了明显的增高, Si 是土壤风沙尘的标识组分^[21],由此推测呼包鄂夏季受到的二次源和扬尘的影响较大.

对呼包鄂三地进行物质重构,结果表明(表 1): 冬季采样期间呼和浩特市受体 PM_{2.5} 中占比最高的是 OM(44.6%),其次是硫酸盐(15.2%)、硝酸盐

(11.9%)、EC(9.9%)、地壳类物质(9.7%)、铵盐(6.6%)和氯离子(2.1%). 包头则是地壳类物质(32.7%) > OM(22.3%) > 硫酸盐(16.8%) > 硝酸盐(9.6%) > 铵盐(7.6%) > EC(6.0%) > 氯离子(5.0%),同时期鄂尔多斯市受体 PM_{2.5} 中占比最高的是 OM(35.0%),其次是地壳类物质(30.7%)、硫酸盐(10.3%)、硝酸盐(9.2%)、EC(7.8%)、铵盐(4.9%)和氯离子(2.1%). 由此可知,呼和浩特市受体中占比较大的为有机物;包头市为地壳类物质;鄂尔多斯市受体中有机物和地壳类物质均占较大比重. 夏季采样期间,呼和浩特 PM_{2.5} 中占比最高的是地壳类物质(28.5%),其次是有机物和硫酸盐,分别占 26.1% 和 23.5%,硝酸盐、铵盐、EC、氯离子占比分别为 8.4%、7.5%、4.5% 和 1.5%. 包头市夏季 PM_{2.5} 中占比最高的则仍为地壳类物质(35.7%),其次是有机物(25.8%)、硫酸盐

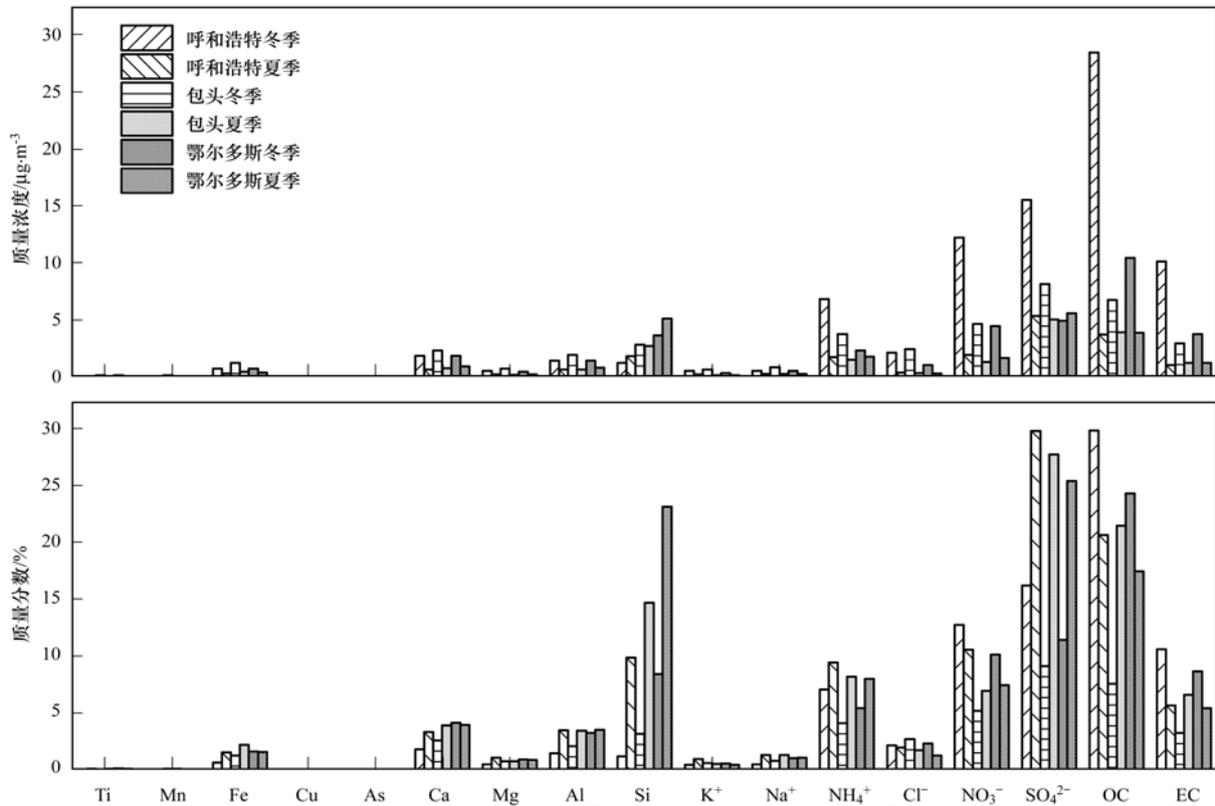


图3 冬季、夏季呼包鄂三地 PM_{2.5} 中各组分质量浓度和所占质量分数

Fig. 3 Mass concentration and percentage of PM_{2.5} components during winter and summer in the Hohhot, Baotou and Ordos region

表1 呼包鄂三市冬季、夏季 PM_{2.5} 物质重构结果/%

Table 1 Results of PM_{2.5} material reconstruction during winter and summer in the Hohhot, Baotou and Ordos region/%

| 季节 | 城市 | 地壳物质 | 硫酸盐 | 硝酸盐 | EC | OM | 铵盐 | 氯离子 |
|----|------|------|------|------|-----|------|-----|-----|
| 冬季 | 呼和浩特 | 9.7 | 15.2 | 11.9 | 9.9 | 44.6 | 6.6 | 2.1 |
| | 包头 | 32.7 | 16.8 | 9.6 | 6.0 | 22.3 | 7.6 | 5.0 |
| | 鄂尔多斯 | 30.7 | 10.3 | 9.2 | 7.8 | 35.0 | 4.9 | 2.1 |
| 夏季 | 呼和浩特 | 28.5 | 23.5 | 8.4 | 4.5 | 26.1 | 7.5 | 1.5 |
| | 包头 | 35.7 | 20.8 | 5.2 | 5.0 | 25.8 | 6.2 | 1.3 |
| | 鄂尔多斯 | 46.2 | 18.1 | 5.3 | 3.9 | 19.9 | 5.7 | 0.9 |

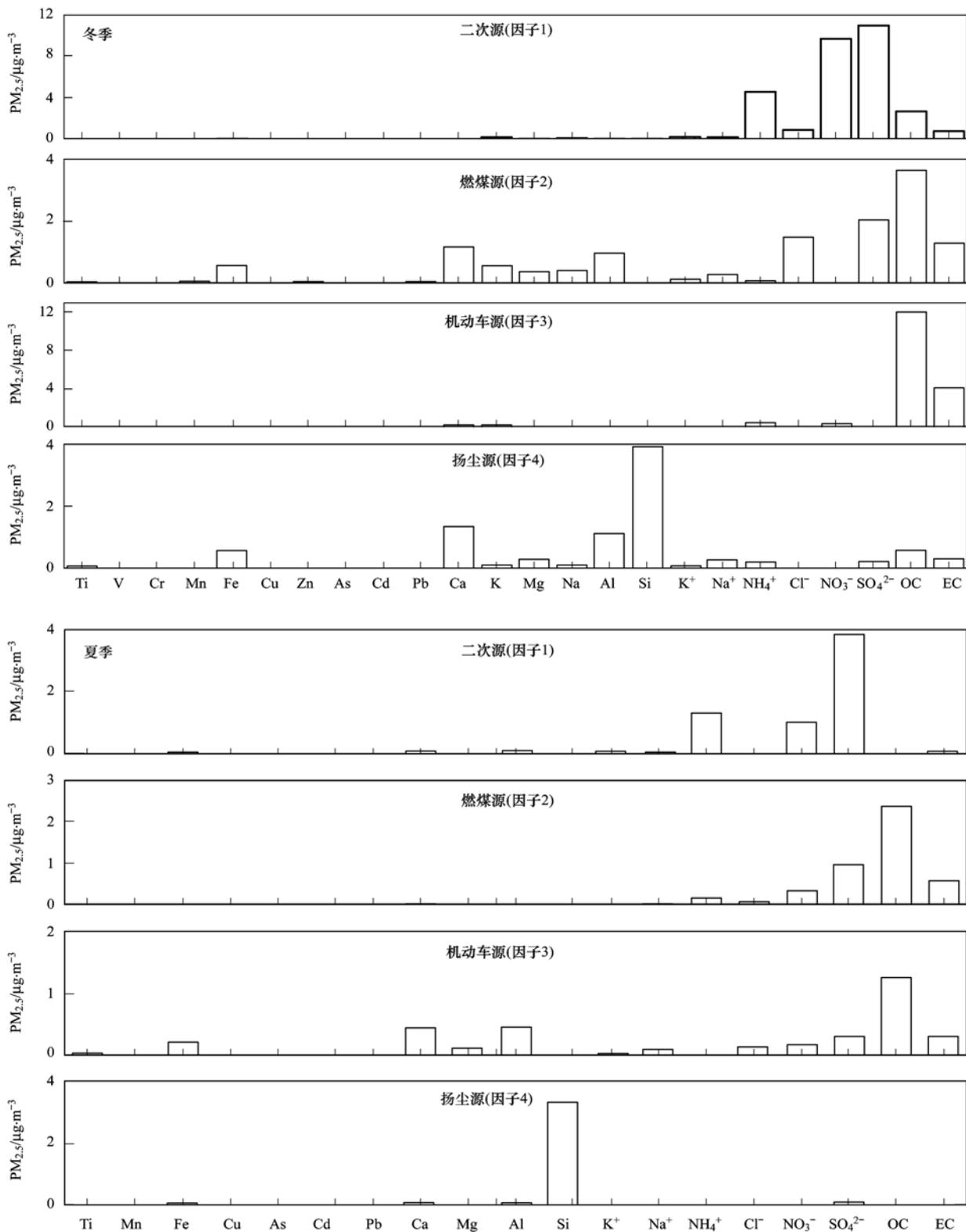
(20.8%)、铵盐(6.2%)、硝酸盐(5.2%)和EC(5.0%),氯离子占比最低为1.3%。鄂尔多斯夏季PM_{2.5}中占比较高的是地壳类物质和有机物,分别为46.2%和19.9%,其次是硫酸盐(18.1%)、铵盐(5.7%)和硝酸盐(5.3%),EC和氯离子占比较低,分别为3.9%和0.9%。综合呼和浩特、包头和鄂尔多斯这三个城市冬夏两季物质重构结果可知,呼包鄂地区冬季受体中有机物和地壳类物质占有较大比重,硫酸盐和硝酸盐总占比大于16%,夏季地壳物质在三地均占有最大比重,分别为28.5%、35.7%和46.2%,OM、硫酸盐和硝酸盐也占有较大比重,这与冬夏两季PM_{2.5}中主要化学组分分析结果一致,即冬夏两季均受二次源影响,此外,冬季受煤烟尘、夏季受扬尘的影响也较为显著。

2.2 呼包鄂地区 PM_{2.5} 源解析结果

呼包鄂地区在区域上具有共性,污染类型三地

趋于一致,但是在不同季节,主要污染源呈现出季节变化性。为进一步了解呼包鄂城市群的污染源共性特征,分别将呼包鄂地区各监测点位的冬季(2015年12月20日~2016年1月20日)与夏季(2016年7月20日~2016年8月2日)PM_{2.5}受体数据分别纳入PMF模型,得到呼包鄂地区的综合源解析结果。

分析因子谱(图4),共识别出四大源类:二次源、燃煤源、机动车和扬尘。因子1中SO₄²⁻和NO₃⁻的载荷较高,SO₄²⁻和NO₃⁻主要通过二次生成,可作为二次源类的识别物质^[24~27],因此因子1识别为二次源;因子2与因子3均含有较多的OC与EC,区别于因子3,因子2中SO₄²⁻也占有一定的比重,通常燃煤源与机动车源中含有较多的OC与EC,而燃煤源中也会有一定比例的SO₄²⁻,因此因子2与因子3可分别识别为燃煤源和机动车源^[27];因子4中

图4 呼包鄂地区 PM_{2.5} 源解析因子成分谱Fig. 4 Factor profiles of PM_{2.5} in the Hohhot-Baotou-Ordos region

主要包括地壳元素 Si、Al 和 Ca 等,因此该因子识别为扬尘源^[24]。

呼包鄂地区冬季 PM_{2.5} 的来源解析结果显示,呼包鄂地区以二次源与燃煤源贡献为主,可达 53% 左右(表 2),自然源(以扬尘为主)贡献相对较低,不

高于 20%,这可能是由于冬季多静稳的天气,大气扩散能力差,有利于二次源的生成与累积^[28,29];另一方面,呼包鄂地区大面积采暖,使得煤烟尘的贡献较为突出^[9]。

将呼包鄂地区夏季观测期(2016 年 7 月 20 日

~2016年8月2日)PM_{2.5}受体数据纳入PMF模型计算.从受体的角度考虑,依据“OC/EC最小比值法”^[30]计算出夏季各排放源及SOA的贡献值与分担率.最终模型提取出5个因子,依据上述对呼包鄂地区污染源成分谱的分析研究,将因子分别识别为扬尘、机动车、燃煤尘、二次硫酸盐和二次硝酸盐.对呼包鄂地区夏季PM_{2.5}的源解析结果进行分析,二次源仍占有最高的比重(26.7%);其次扬尘源的占比相比于冬季明显升高,达到22.3%.

表2 呼包鄂地区冬季、夏季PM_{2.5}源解析源贡献/%
Table 2 Contributions of sources to PM_{2.5} during winter and summer in the Hohhot-Baotou-Ordos region/%

| 污染源 | 冬季 | 夏季 |
|------|------|------|
| 二次源 | 26.7 | 26.7 |
| 燃煤源 | 26.1 | 16.6 |
| 机动车源 | 19.1 | 15.1 |
| 扬尘源 | 18.1 | 22.3 |
| SOA | — | 8.7 |
| 其他 | 10.0 | 10.6 |

对比冬季、夏季污染源贡献结果可知,呼包鄂地区冬季大气污染主要来源是二次源与燃煤源,夏季则主要是二次源与扬尘源.

对比2016年前后其他地区研究结果,冬季时,呼包鄂地区污染源与北京^[31]有明显的区别,北京冬季时二次源的分担率仅有12.95%,低于呼包鄂地区的26.7%,机动车源与扬尘源要略高于呼包鄂地区,燃煤源两地分担率大致相等.夏季北京二次源的分担率达到了50.29%,这要远远高于呼包鄂地区,但呼包鄂地区的燃煤源和扬尘源要明显大于北京地区.由此可以判断,北京冬季典型的污染源为燃煤源,夏季典型的污染源为二次源;而呼包鄂地区冬季则为二次源与燃煤源,夏季为二次源与扬尘源.与长三角地区某沿海城市^[32]相比,呼包鄂地区燃煤源分担率在冬季(10.2%)和夏季(10.9%)均高于该城市,机动车源分担率(24.7%和18.2%)则与该城市相反,扬尘源在冬季(22.1%)和夏季(24.6%)对呼包鄂地区的影响也低于长三角地区该沿海城市,二次源未在该城市中解析出,但有该区域典型的污染源为工业生产源.相比于珠三角地区^[33],呼包鄂地区二次源对PM_{2.5}的分担率相对较小,机动车贡献量相当,但是扬尘的分担率要远远大于珠三角地区(2.4%),因此,珠三角地区典型的污染源为二次源,占比达到44.3%.

综合分析呼包鄂地区源解析结果,可以得出,对于呼包鄂地区,二次源在冬季、夏季中占比均为最大,冬季与夏季的区别在于,冬季燃煤源占较大比重而夏季时扬尘源占比较大.与北京、长三角以及珠三

角地区相比,各地不同季节典型的污染源不同,呼包鄂地区典型的污染源为二次源、扬尘源与燃煤源.

2.3 典型污染时段分析

组分分析以及源解析结果显示,呼包鄂城市群大气污染具有区域性,但冬季与夏季污染类型存在明显的差异.为进一步分析冬季、夏季不同的污染过程及主要影响因素,两个季节各选取一个典型污染过程进行分析.其中冬季选取2015年12月20~26日,夏季选取2016年7月27日~8月2日.

对于冬季典型污染过程,以呼和浩特为例,如图5所示,重污染形成初期SO₂浓度快速下降并且SO₂/NO₂比值有同步下降趋势,通常SO₂主要来源于燃煤,NO₂主要来自于燃煤和机动车尾气,SO₂/NO₂的比值反映移动源和固定源对污染贡献的情况,比值越小则移动源的贡献越大^[34],这说明在此期间移动源机动车源的影响较为明显.随着污染加剧,当颗粒物PM_{2.5}浓度达到最高值时,SO₂/NO₂比值攀升至最高,说明此时固定源燃煤源对呼和浩特的影响大于移动源机动车源;O₃浓度也达到最大值,O₃的浓度可以表征大气的氧化能力^[35],因此可推测该时期内二次源会有明显的升高.因此呼和浩特可能受二次源、燃煤源影响显著.这也与利用上述PMF模型计算获得的源解析结果较为一致.

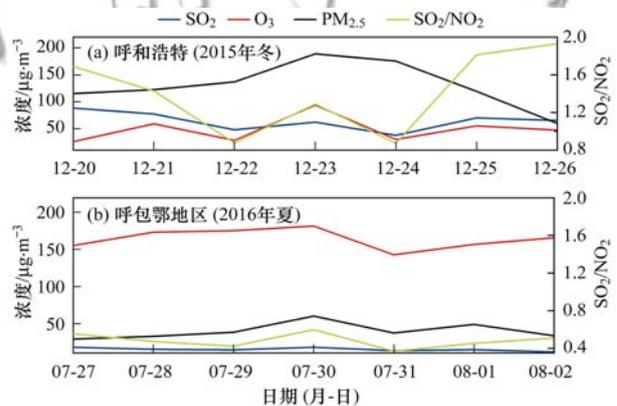


图5 冬季呼和浩特、夏季呼包鄂地区典型污染期间常规污染物
Fig. 5 Pollutants during a typical pollution episode in winter and summer in the Hohhot and Hohhot-Baotou-Ordos regions

夏季监测期间SO₂/NO₂比值整体低于冬季,因此夏季受移动源机动车源影响更大.随着污染加剧,SO₂/NO₂比值也有同步上升趋势,不同于冬季污染时期SO₂/NO₂比值变化明显,夏季污染时期与清洁时期SO₂/NO₂比值变化幅度较小,说明固定源机动车源不是导致夏季污染发生的直接原因.对于所选取的污染时段,7月27日开始,颗粒物PM_{2.5}浓度出现了逐渐上升的趋势,并在7月30日达到该污染时段的峰值(60.0 µg·m⁻³),对于该时期内O₃的浓度变化,与颗粒物PM_{2.5}浓度变化有较好的同步趋势.

7月30日,呼和浩特、包头和鄂尔多斯 O₃ 浓度分别达到 178、203 和 164 μg·m⁻³,这远远高于冬季重污染时刻,说明夏季光化学反应比较活跃^[36],可推测二次产物的贡献会较为显著.综合 PMF 模型解析结果,两者有较好的一致性.

综合以上分析,呼包鄂地区冬季、夏季重污染期间受二次源影响显著,其中夏季二次源贡献大的原因是夏季温度高、光照强烈,光化学反应活跃;冬季重污染的发生是二次源、固定源共同作用的结果.

3 结论

(1)呼包鄂地区冬季颗粒物中 OC、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 占比较大,而夏季则为 SO₄²⁻、Si 和 NO₃⁻;物质重构结果与组分分析结果一致,有机物、地壳物质、硫酸盐以及硝酸盐占有较大比重.

(2)PMF 模型源解析结果表明,研究期间,二次源在呼包鄂地区冬季、夏季均占有最大的比重,同时,冬季燃煤源、夏季扬尘源的影响也较为显著;与我国其他地区相比,呼包鄂地区典型的污染源为二次源、扬尘源与燃煤源.

(3)通过分析冬夏两季典型污染过程,发现二次源与固定源是导致冬季重污染发生的主导因素,夏季活跃的光化学反应是二次源贡献较大的主要原因.

参考文献:

- [1] Wu Z J, Wang Y, Tan T Y, *et al.* Aerosol liquid water driven by anthropogenic inorganic salts: Implying its key role in haze formation over the North China Plain[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, **5**(3): 160-166.
- [2] Liu Z R, Hu B, Wang L L, *et al.* Seasonal and diurnal variation in particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) at an urban site of Beijing: analyses from a 9-year study[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(1): 627-642.
- [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] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al.* Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **575**: 1582-1596.
- [5] Deng T, Wang T J, Wang S Q, *et al.* Impact of typhoon periphery on high ozone and high aerosol pollution in the Pearl River Delta region[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **668**: 617-630.
- [6] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀区域 PM_{2.5} 污染相互输送特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(12): 4897-4904.
Wang Y L, Xue W B, Lei Y, *et al.* Regional transport matrix study of PM_{2.5} in Jingjinji Region, 2015 [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(12): 4897-4904.
- [7] 郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 等. 郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(9): 3856-3867.
Guo M M, Jiang N, Wang S B, *et al.* Analysis of air pollution characteristics and meteorological conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017 [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(9): 3856-3867.
- [8] 欧阳正午, 廖婷婷, 陈科艺, 等. 2014—2017 年四川盆地与京津冀地区冬季空气停滞特征及大气质量改善评估对比分析[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(7): 2353-2361.
Ouyang Z W, Liao T T, Chen K Y, *et al.* Comparative analysis of winter air stagnation characteristics and air quality improvement assessment in Sichuan Basin and Beijing-Tianjin-Hebei Region from 2014 to 2017 [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(7): 2353-2361.
- [9] Fu G Q, Xu W Y, Yang R F, *et al.* The distribution and trends of fog and haze in the North China Plain over the past 30 years [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(21): 11949-11958.
- [10] Cheung V T F, Wang T. Observational study of ozone pollution at a rural site in the Yangtze Delta of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(29): 4947-4958.
- [11] 崔新蕾, 赵燕霞. 资源型城市群经济联系网络特征及演化研究——以呼包鄂城市群为例[J]. *资源与产业*, 2018, **20**(5): 1-8.
Cui X L, Zhao Y X. A case study on HBO (Huhhot, Baotou, Ordos) city group: economic connection network features and evolution of resource-based cities [J]. *Resources & Industries*, 2018, **20**(5): 1-8.
- [12] 周海军, 樊庆云, 卢振国, 等. 包头市大气臭氧污染特征分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2019, **31**(1): 19-23.
Zhou H J, Fan Q Y, Lu Z G, *et al.* Characteristics of ozone pollution in the atmosphere of Baotou [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2019, **31**(1): 19-23.
- [13] Vecchi R, Chiari M, D'Alessandro A, *et al.* A mass closure and PMF source apportionment study on the sub-micron sized aerosol fraction at urban sites in Italy [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(9): 2240-2253.
- [14] Tian S L, Pan Y P, Liu Z R, *et al.* Size-resolved aerosol chemical analysis of extreme haze pollution events during early 2013 in urban Beijing, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, **279**: 452-460.
- [15] Zappoli S, Andracchio A, Fuzzi S, *et al.* Inorganic, organic and macromolecular components of fine aerosol in different areas of Europe in relation to their water solubility [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(17): 2733-2743.
- [16] 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.
- [17] 施双双, 王红磊, 朱彬, 等. 冬季临安大气本底站气溶胶来源解析及其粒径分布特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(10): 4024-4033.
Shi S S, Wang H L, Zhu B, *et al.* Source apportionment and size distribution of aerosols at Lin'an atmosphere regional background station during winter [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(10): 4024-4033.
- [18] Chen W T, Shao M, Lu S H, *et al.* Understanding primary and secondary sources of ambient carbonyl compounds in Beijing using the PMF model [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **14**(6): 3047-3062.
- [19] Nguyen Q T, Skov H, Sorensen L L, *et al.* Source apportionment

- of particles at Station Nord, North East Greenland during 2008-2010 using COPREM and PMF analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(1): 35-49.
- [20] Tian Y Z, Wu J H, Shi G L, *et al.* Long-term variation of the levels, compositions and sources of size-resolved particulate matter in a megacity in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **463-464**: 462-468.
- [21] 彭杏, 丁净, 史国良, 等. 呼和浩特市源成分谱特征研究 [J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(9): 57-61.
Peng X, Ding J, Shi G L, *et al.* Study on the characteristics of source profiles in Hohhot [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2016, **38**(9): 57-61.
- [22] Amato F, Hopke P K. Source apportionment of the ambient PM_{2.5} across St. Louis using constrained positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **46**: 329-337.
- [23] Norris G, Duvall R. EPA positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R]. Washington; U. S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development, 2014. 1-10.
- [24] Tao J, Zhang L M, Cao J J, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} at urban and suburban areas of the Pearl River Delta region, south China-With emphasis on ship emissions [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 1559-1570.
- [25] Kuo C P, Liao H T, Chou C C K, *et al.* Source apportionment of particulate matter and selected volatile organic compounds with multiple time resolution data [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **472**: 880-887.
- [26] Tian Y Z, Shi G L, Han, S Q, *et al.* Vertical characteristics of levels and potential sources of water-soluble ions in PM₁₀ in a Chinese megacity [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **447**: 1-9.
- [27] Pant P, Harrison R M. Critical review of receptor modelling for particulate matter: a case study of India [J]. *Atmospheric Environment*, 2012, **49**: 1-12.
- [28] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 218-222.
- [29] Cheng Y F, Zheng G J, Wei C, *et al.* Reactive nitrogen chemistry in aerosol water as a source of sulfate during haze events in China [J]. *Science Advances*, 2016, **2**(12): e1601530.
- [30] 朱坦, 冯银厂. 大气颗粒物来源解析: 原理、技术及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2012. 15.
- [31] 刘童, 王晓军, 陈倩, 等. 烟台市环境受体 PM_{2.5} 四季污染特征与来源解析 [J]. *环境科学*, 2019, **40**(3): 1082-1090.
Liu T, Wang X J, Chen Q, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of ambient PM_{2.5} during four seasons in Yantai city [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(3): 1082-1090.
- [32] 张霖琳, 王超, 朱红霞, 等. 北京混合功能区夏冬季细颗粒物组分特征及来源比较 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 36-41.
Zhang L L, Wang C, Zhu H X, *et al.* Characterization and source apportionment of PM_{2.5} in mixed function area during summer and winter, Beijing [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 36-41.
- [33] 张夏夏. 基于长时段多站点组分监测的珠三角颗粒物来源解析研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [34] Wang Y, Zhuang G S, Zhang X Y, *et al.* The ion chemistry, seasonal cycle, and sources of PM_{2.5} and TSP aerosol in Shanghai [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(16): 2935-2952.
- [35] 胡建林, 张远航. 长江三角洲地区臭氧生成过程分析 [J]. *环境科学研究*, 2005, **18**(2): 13-18.
Hu J L, Zhang Y H. Process analysis of ozone formation in the Yangtze River Delta [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18**(2): 13-18.
- [36] Wang X F, Zhang Y P, Chen H, *et al.* Particulate nitrate formation in a highly polluted urban area: a case study by single-particle mass spectrometry in Shanghai [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(9): 3061-3066.

CONTENTS

| | | |
|--|---|---------|
| Spatiotemporal Variations of PM _{2.5} Pollution Evolution in China in Recent 20 Years | SHI Yan, LIU Rui-mei, LUO Yi, <i>et al.</i> | (1) |
| Characteristics of Aerosol Particulate Concentrations and Their Climate Background in Shanghai During 2007-2016 | ZHENG Qing-feng, SHI Jun, TAN Jian-guo, <i>et al.</i> | (14) |
| Characteristics and Sources of Elements in PM _{2.5} During Summer for Three Typical Cities in Pingdingshan-Suizhou-Wuhan, Central China | LIU Wei-jie, SHI Ming-ming, CHENG Cheng, <i>et al.</i> | (23) |
| PM _{2.5} Pollution Characteristics During Winter and Summer in the Hohhot-Baotou-Ordos Region, China | LI Yi-ming, LIU Jia-yuan, SHI Guo-liang, <i>et al.</i> | (31) |
| Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Heavy Pollution in Shijiazhuang City Around New Year's Day 2019 | ZHOU Jing-bo, DUAN Jing-chun, WANG Jian-guo, <i>et al.</i> | (39) |
| Modeling Studies of Source Contributions to PM _{2.5} in Chengdu, China | XU Yan-ling, YI Ai-hua, XUE Wen-bo | (50) |
| Chemical Characteristics of Arsenic in PM _{2.5} in Beijing | SHI Shao-xuan, YANG Yan-rong, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> | (57) |
| Pollution Characteristics and Potential Source Contributions of Gaseous Elemental Mercury (GEM) During Summer and Autumn in Ningbo City | YI Hui, LIN Jia-mei, CAI Qiu-liang, <i>et al.</i> | (65) |
| Seasonal Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} of Anyang City | SUN You-chang, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> | (75) |
| Analysis of Stable Carbon Isotope Characteristics of PM _{2.5} in Summer and Winter Season in Xixiang City | YAN Guang-xuan, SONG Xin, ZHANG Jing-wen, <i>et al.</i> | (82) |
| Construction and Evaluation on Size Resolved Source Apportionment Methods Based on Particle Size Distribution of Chemical Species | LIANG Yong-li, TIAN Ying-ze, LIU Tong, <i>et al.</i> | (90) |
| Fine Particulate Emission Characteristics of an Ultra-Low Emission Coal-Fired Power Plant | WANG Run-fang, MA Da-wei, JIANG Shao-yi, <i>et al.</i> | (98) |
| Driving Factors of the Significant Increase in Surface Ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, China, During 2013-2018 | YU Yi-jun, MENG Xiao-yan, WANG Zhen, <i>et al.</i> | (106) |
| Characteristic of Surface Ozone and Meteorological Parameters Analysis in Anyang City | YANG Jian, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> | (115) |
| Emission Inventory of Intermediate Volatility Organic Compounds from Vehicles in the Yangtze River Delta in 2017 and the Impact on the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols | WANG Qian, HUANG Ling, WANG Yang-jun, <i>et al.</i> | (125) |
| Exhaust Smoke of Non-Road Vehicles in Typical Cities of Eastern China | LU Jun, HU Qing-yao, YANG Qiang, <i>et al.</i> | (133) |
| Emission Status and Standards of Volatile Organic Compounds from Chinese and Foreign Bulk Petroleum Terminals | HU Wei, REN Bi-qi, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> | (139) |
| Secondary Organic Aerosol Mass Yield and Characteristics from 4-ethylguaiaicol Aqueous ·OH Oxidation: Effects of Initial Concentration | ZHUANG Yu, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, <i>et al.</i> | (146) |
| Stable Isotope Characteristics and Vapor Source of Precipitation in the South and North Slopes of Wushaoling Mountain | XU Xiu-ting, JIA Wen-xiong, ZHU Guo-feng, <i>et al.</i> | (155) |
| Characteristics and Influencing Factors of Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes in Groundwater in the Permafrost Region of the Source Region of the Yangtze River | WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, DING Yong-jian, <i>et al.</i> | (166) |
| Hydrochemical and Isotopic Characteristics of the Lake Balkhash Catchment, Kazakhstan | SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, JILILI Abuduwalli, <i>et al.</i> | (173) |
| Effect of a Comprehensive Improvement Project on Water Quality in Urban Lakes: A Case Study of Water Quality Variation in Lihu Lake Over the Past 30 Years | TIAN Wei, YANG Zhou-sheng, SHAO Ke-qiang, <i>et al.</i> | (183) |
| Detection Method, Distribution, and Risk Assessment of Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Yellow Sea and the East China Sea | CHEN Xian, ZHANG Cai-jie, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> | (194) |
| Occurrence and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Source Water of the Nanjing Section of the Yangtze River | LI Dong, ZHANG Sheng-hu, ZHANG Qin, <i>et al.</i> | (205) |
| Spatial Distribution, Spectral Characteristics, and Sources Analysis of Dissolved Organic Matter from Baiyangdian Lake in Xiong'an New District During the Winter Freezing Period | ZHOU Shi-lei, SUN Yue, ZHANG Yi-ran, <i>et al.</i> | (213) |
| Spatial Characteristics, Risk Assessment, and Source Analysis of Elements in Surface Sediments from the Baiyangdian Lake | WANG Jing-zhong, LIU Zhou, WEI Hao, <i>et al.</i> | (224) |
| Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters in Surface Sediments of the Songhua River | WANG Huan, YANG Yong-zhe, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> | (232) |
| Occurrence Relationship Between Microplastics and Heavy Metals Pollutants in the Estuarine Sediments of Poyang Lake and the Yangtze River | LI Wen-hua, JIAN Min-fei, LIU Shu-li, <i>et al.</i> | (242) |
| Effect of Ozonation on Microorganism in the Biological Activated Carbon and Disinfection By-Products in the Effluent | LIU Bao-ming, WANG Xi-xi, ZHANG Xiao-xia, <i>et al.</i> | (253) |
| Refined Assessment of Exposure and Health Risks of Heavy Metals in Water for the Children in Xigu District, Lanzhou | CHEN Yue-fang, SUN Shan-wei, DUAN Xiao-li, <i>et al.</i> | (262) |
| Adsorption of Phosphate on Mg/Fe Layered Double Hydroxides (Mg/Fe-LDH) and Use of Mg/Fe-LDH as an Amendment for Controlling Phosphorus Release from Sediments | WU Jun-lin, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> | (273) |
| Characteristics and Mechanism of Monothioarsenate Adsorption on Sand, Sediment, and Goethite | LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, PENG San-xi, <i>et al.</i> | (284) |
| Substructure Characteristics of Combined Acid-Base Modified Sepiolite and Its Adsorption for Cd(II) | XIE Sha, XU Ying-ming, YAN Cui-xia, <i>et al.</i> | (293) |
| Characteristics of Nitrogen Metabolism by Denitrifying Bacterial Agents in Low Dissolved Oxygen Black Odor Water | ZHAO Zhi-rui, LIU Shuo, LI Duo, <i>et al.</i> | (304) |
| Metagenomic Analysis of Antibiotic Resistant Bacteria and Resistance Genes in a Pharmaceutical and Chemical Wastewater Treatment Plant | CHEN Hong-ling, ZHANG Xing-tao, WANG Qing, <i>et al.</i> | (313) |
| Measurements of Bacterial Community and Biodiversity from Activated Sludge for a Wastewater Treatment Containing Starch | ZHAO Ting-ting, QIAO Kai, WANG Lei, <i>et al.</i> | (321) |
| Process Control and Operation Optimization of PN-SAD Coupling Process Based on SBR-ABR | CHEN Chong-jun, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> | (330) |
| Effects of Intermittent Starvation on the Operation of the SNAD Process | LI Dong, LIU Zhi-cheng, XU Gui-da, <i>et al.</i> | (337) |
| Nitrogen Removal from Mature Landfill Leachate via Denitrification-Partial Nitrification-ANAMMOX Based on a Zeolite Biological Aerated Filter | CHEN Xiao-zhen, WANG Xiao-jun, Karasuta Chayangkun, <i>et al.</i> | (345) |
| Rapid Achievement of Nitrifying Micro-granular Sludge and Its Nitrification Function | LIU Wen-ru, SONG Jia-jun, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> | (353) |
| Effect of On/Off Aeration Time Ratio Under High Frequency On/Off Aeration on Performance of Nitrosated Granular Sludge | ZHANG Jie, LAO Hui-mei, LI Dong, <i>et al.</i> | (360) |
| Occurrence, Distribution, Source, and Health Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in Surface Soil from the Shen-Fu Region, Northeast China | XIANG Xin-xin, LU Yin-tao, RUAN Qi-yang, <i>et al.</i> | (368) |
| Vertical Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Heterogeneous Unsaturated Zone Under a Coking Plant | MENG Xiang-shuai, WU Meng-meng, CHEN Hong-han, <i>et al.</i> | (377) |
| Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Mobile Genetic Elements in Beijing Vegetable Base Soils | ZHANG Ru-feng, SONG Yuan, GAO Hao-ze, <i>et al.</i> | (385) |
| Stoichiometric Characteristics of Purple Sloping Cropland Under Long-term Fertilization and Cultivation | DU Ying-ni, LI Tian-yang, HE Bing-hui, <i>et al.</i> | (394) |
| Ecological Stoichiometry of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Subtropical Paddy Soils | SONG Jia-ling, SHENG Hao, ZHOU Ping, <i>et al.</i> | (403) |
| Denitrification and Anaerobic Ammonium Oxidation in Soil Nitrogen Migration Process in a Farmland of Wanshandang Lake | CHEN Zhi-hao, QIN Yun-bin, DING Bang-jing, <i>et al.</i> | (412) |
| Effects of Straw Biochar on Soil Microbial Metabolism and Bacterial Community Composition in Drip-irrigated Cotton Field | WANG Jing, MA Li-juan, LONG Ze-hua, <i>et al.</i> | (420) |
| Source Appointment of Heavy Metals in Agricultural Soils of the Julong River Basin Based on Positive Matrix Factorization | HUANG Hua-bin, LIN Cheng-ni, HU Gong-qi, <i>et al.</i> | (430) |
| Spatial Distribution of Soil Arsenic and Arsenic Enrichment in Crops in the Oasis Region of the Southeastern Tarim Basin | CHEN Yun-fei, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> | (438) |
| Bioavailability, Translocation, and Accumulation Characteristic of Heavy Metals in a Soil-Crop System from a Typical Carbonate Rock Area in Guangxi, China | MA Hong-hong, PENG Min, LIU Fei, <i>et al.</i> | (449) |
| Effects of Different Amendments on Fractions and Uptake by Winter Wheat in Slightly Alkaline Soil Contaminated by Cadmium and Nickel | ZHANG Jing-jing, ZHU Shuang-ge, ZHU Li-nan, <i>et al.</i> | (460) |
| Effect of Different Passivating Agents on the Stabilization of Heavy Metals in Chicken Manure Compost and Its Maturity Evaluating Indexes | LUAN Run-yu, GAO Shan, XU Ying-ming, <i>et al.</i> | (469) |
| Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region | ZHOU Jun-jie, CHEN Zhi-fei, YANG Quan, <i>et al.</i> | (479) |
| Subsequent Effects of Slag and Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Paddy Fields in the Fuzhou Plain | LAN Xing-fu, WANG Xiao-tong, ZHOU Ya-xin, <i>et al.</i> | (489) |