

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.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)
华北地区大气细颗粒物(PM _{2.5})年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽 (2995)
郑州市民运会期间大气PM _{2.5} 改善效果评估	王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)
成都夏冬季PM _{2.5} 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)
郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面O ₃ 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程NO _x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾珺杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨 (3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)
海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)
分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾克宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe ⁰ /WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)
一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)
生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)
城镇河流CO ₂ 及CH ₄ 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土N ₂ O排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)
不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)
锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)
叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)
《环境科学》征订启事 (3011)	《环境科学》征稿简则 (3084)
信息 (3174, 3185, 3391)	

郑州市民运会期间大气 PM_{2.5} 改善效果评估

王申博¹, 娄亚敏², 徐艺斐³, 袁明浩³, 苏方成¹, 张瑞芹^{1*}

(1. 郑州大学化学学院, 环境科学研究院, 郑州 450001; 2. 河南省环境监测中心, 郑州 450046; 3. 郑州市环境保护监测中心站, 郑州 450000)

摘要: 利用 2019 年 8 月 5 日至 9 月 30 日大气污染物和颗粒物组分在线数据, 评估郑州市少数民族运动会空气质量管控效果。根据政府管控措施的实施时间, 将研究时期分为管控前(8 月 5~24 日)、管控中(8 月 25 日至 9 月 18 日)和解除管控后(9 月 19~30 日)。相较管控前, 管控中 PM_{2.5} 平均浓度增加 2.3 μg·m⁻³, 解除管控后 PM_{2.5} 的浓度增加了 11.7 μg·m⁻³, 解除管控后 PM_{2.5} 浓度增幅高于管控中, 表明管控措施对颗粒物有显著的减排效果。从颗粒物组分来看, 研究期间郑州市主要组分依次是有机物、硝酸根、铵根、硫酸根和地壳元素。相比于管控前, 管控期间 PM_{2.5} 组分中有机物和硝酸根占比分别上升 3.9% 和 0.9%, 硫酸根、铵根和地壳元素的占比下降了 1.1%、1.9% 和 2.2%。利用正定矩阵因子分解法解析颗粒物来源, 结果表明二次硫酸、二次硝酸、二次有机气溶胶、机动车源、工艺过程源、扬尘和燃煤是 PM_{2.5} 主要来源。管控对一次源中的扬尘、燃煤和工业效果显著, 贡献比分别下降 8.3%、8.2% 和 8.1%; 机动车贡献上升 3.8%; 二次有机气溶胶和二次硝酸占比上升。结果表明郑州市此次管控对二次前体物氮氧化物和 VOCs 的减排效果弱于对一次污染物的管控。

关键词: PM_{2.5}; 减排效果; 正定矩阵因子分解法(PMF); 化学组分; 民族运动会; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3004-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911045

Evaluation of the Reduction in PM_{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou

WANG Shen-bo¹, LOU Ya-min², XU Yi-fei³, YUAN Ming-hao³, SU Fang-cheng¹, ZHANG Rui-qin^{1*}

(1. College of Chemistry, Research Institute of Environmental Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Environmental Protection Monitoring Center, Zhengzhou 450046, China; 3. Zhengzhou Environmental Protection Monitoring Center Station, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: To evaluate the effect of the implementation of emission reduction measures and the improvement in air quality during the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou, a series of online instruments were used to continuously observe air pollutants and components of PM_{2.5} from August 5 to September 30, 2019. Three cases, including before emission reduction (August 5-24), during emission reduction (August 25 to September 18), and after emission reduction (September 19-30), were classified by the implementation of control measures. The results show that the growing concentration of PM_{2.5} after the cancellation of emission abatement measures (11.7 μg·m⁻³) was greater than that during the emission reduction (2.3 μg·m⁻³) compared to the PM_{2.5} concentration before emission reduction. This thus indicates that the control measures have a significant effect on reducing particulate matter. The main components of PM_{2.5} were organic matter, nitrate, ammonium, sulfate, and crustal elements. Compared to the proportion of components in PM_{2.5} before and during the control periods, organic matter and nitrate increased by 3.9% and 0.9%, respectively, while sulfate, ammonium, and crustal elements decreased by 1.1%, 1.9%, and 2.2%, respectively. The results of source appointment by positive matrix factorization show that secondary sulfate, secondary nitrate, secondary organic aerosols, vehicular emissions, industrial emissions, dust, and coal combustion are the main sources of PM_{2.5}. Emission abatement measures reduced the contributions of primary sources such as dust, coal combustion, and industry by 8.3%, 8.2%, and 8.1%, respectively. In contrast, the contributions of secondary organic and nitrate aerosols increased during the control periods, which suggested that the control measures implemented in Zhengzhou had a weaker emission reduction effect on nitrogen oxide and volatile organic compounds than on primary sources of PM_{2.5}.

Key words: PM_{2.5}; emission reduction effect; positive matrix factorization(PMF); chemical composition; the National Traditional Games of Ethnic Minorities; source appointment

近年来伴随着我国经济快速增长, 城市化进程加快和机动车保有量急剧增加, 灰霾天气频发。作为主要的元凶之一, 颗粒物(particular matter, PM)引起民众和学者越来越多的关注^[1~3]。有研究表明在我国暴露在可吸入颗粒物(PM_{2.5})中致死的危险系数排在饮食风险, 高血压和烟草之后的第四位^[4], 此外 PM 还可能通过改变云的特征, 温度, 降水和大气

气循环进而改变气候^[5~8]。

自 2012 年以来, 在我国政府和学者的不懈努力下, 全国年均 PM_{2.5} 质量浓度显著下降, 但是各地仍

收稿日期: 2019-11-06; 修订日期: 2020-01-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212403)

作者简介: 王申博(1993~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气污染研究与控制, E-mail: wangshenbo@gs.zzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: rqzhang@zzu.edu.cn

然频繁暴发重污染事件^[9~11]. 有研究表明,本地污染物的一次排放及二次颗粒物生成是导致 PM 浓度上升的主要原因,静稳天气和不利地形会加剧颗粒物的积累并导致重污染事件的发生,此外气团传输也可能导致空气质量急剧变化^[12,13]. 从颗粒物组分来看,在近几年我国严格的控煤降尘等措施影响下,PM_{2.5}中地壳元素、硫酸盐和一次有机物的占比逐年下降. 但是受我国机动车保有量增大,煤改气方案实施等的影响,颗粒物中的硝酸盐的占比显著上升. 此外,由于受对挥发性有机物管控效果较弱,颗粒物中二次有机物的占比居高不下^[8,13].

近年来,我国在举办重大活动时开展一系列临时管控措施以保障空气质量. 这些保障活动为污染管控和改善空气质量提供了最真实的情景模拟^[14~17]. 作为中部地区重要的中心城市,郑州市正面临着严峻的大气污染形势,近年来秋冬季频繁暴发了以颗粒物为首要污染物的重污染过程^[18,19]. 2019 年 9 月 8~16 日在郑州市开展了第十一届全国少数民族传统体育运动会(民运会),郑州市政府针对颗粒物和臭氧污染实施了严格的管控措施,包括工地停工、禁用非道路移动机械、电厂停产、重污染工业企业和挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)企业停产等. 为评估管控效果,本研究利用郑州大学综合观测平台的多种在线观测仪器,分析此次管控前后大气污染物浓度和颗粒物化学组分特征,并利用正定矩阵因子分解法(positive matrix factorization, PMF)进行颗粒物源解析,以期为学者研究郑州市大气污染及重污染管控提供更深入的理论基础.

1 材料与方法

1.1 采样时间和地点

本研究于 2019 年 8 月 5 日至 9 月 30 日进行连续观测,采样地点位于河南省郑州市郑州大学新校区(34°48' N; 113°31' E)资源与材料协同创新中心六楼楼顶(距离地面 20 m). 该采样点紧邻西四环和科学大道等城市主干道(图 1),此外,连霍高速和绕城高速分别位于采样点北方 3 km 和西方 7 km 处. 距离采样点 6 km 东有一座燃煤发电厂,3 km 南有一座燃气发电厂. 由于采样点位于城郊,周边有大量的农田及施工工地.

1.2 采样仪器

采用美国 Cooper Environment Services 公司的 Xact-625 型环境空气金属在线分析仪检测 PM_{2.5} 中元素浓度(Al、Si、K、Ca、V、Cr、Mn、Fe、Ni、Cu、Zn、Ga、As、Se、Cd、Sn、Ba 和 Pb). 使用美国赛默飞公司

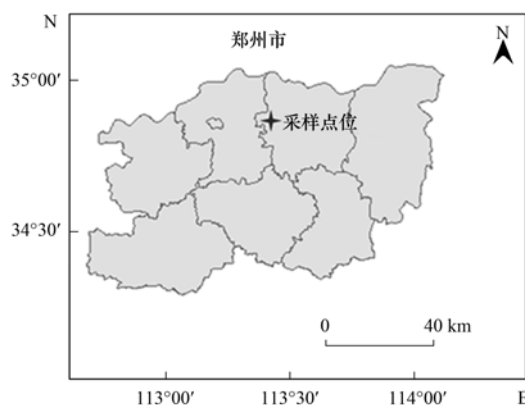


图 1 采样点位示意

Fig. 1 Locations of monitoring sites

的 URG-9000D 大气中气溶胶及气体组分在线离子色谱监测系统分析 PM_{2.5} 中的水溶性离子,如颗粒物中的 Na⁺、NH₄⁺、K⁺、Mg²⁺、Ca²⁺、F⁻、Cl⁻、NO₃⁻ 和 SO₄²⁻. 采用美国 Sunset Lab 公司 Model-4 型全自动半连续式分析仪对样品中的有机碳(organic carbon, OC)和元素碳(elemental carbon, EC)进行测定. 这些仪器的详细介绍分别见文献[19~21]. 使用美国热电公司系列仪器监测环境大气中臭氧(O₃)、二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)、一氧化碳(CO)、PM_{2.5} 和 PM₁₀. 使用武汉易谷自动气象站监测气象参数,包括温度、湿度、风速和风向等.

1.3 分析方法

1.3.1 组分重构

颗粒物的组分主要包括地壳元素(crustal matter, CM),有机物(organic matter, OM),EC 和二次无机离子. 其中 CM 和 OM 的重构方法主要利用以下公式:

$$\text{CM} = 2.2 \times [\text{Al}] + 2.49 \times [\text{Si}] + 1.63 \times [\text{Ca}] + 2.42 \times [\text{Fe}] \quad (1)$$

$$\text{OM} = 1.6 \times [\text{OC}] \quad (2)$$

式中,[Al]、[Si]、[Ca]、[Fe]和[OC]分别代表了这些组分在 PM_{2.5} 的质量浓度(μg·m⁻³).

1.3.2 PMF 源解析

受体模型法是从受体出发,根据源和受体颗粒物的化学、物理特征等信息,利用数学方法定量解析各污染源类对环境空气中颗粒物的贡献. 受体模型可以不用依赖详细的源清单和气象数据,就可以很好地定量污染源类别,识别开放源的贡献. 在污染源清单没有研究清楚之前,使用受体模型,可以不考虑过程的影响,从颗粒物污染特征反推污染源贡献. PMF 模型的输入文件是颗粒物的化学组分及化学组分的不确定度,利用权重分析计算各化学组分的误差,通过最小二乘法迭代计算和误差估算最终可以得出颗粒物的主要污染源及其贡献率^[22]. 其主要

公式如下:

$$X = GF + E \quad (3)$$

即样品矩阵 X 为 $n \times m$ 矩阵, n 是样品数, m 是化学组分数目, 将 X 分解成源贡献矩阵 G 和源谱矩阵 F . G 是 $n \times p$ 的排放源源贡献矩阵, F 是 $p \times m$ 的污染源成分谱矩阵, E 是残差矩阵, 表示 X 与 GF 之间存在的差异, p 是因子数(污染源个数), 定义: $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m; k = 1, \dots, p$, 则:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} + e_{ij} \quad (4)$$

$$e_{ij} = x_{ij} - \hat{x}_{ij} = x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} \quad (5)$$

Q 定义为残差与观测值不确定度比值的平方:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{e_{ij}}{u_{ij}} \right]^2 \quad (6)$$

式中, e_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个化学成分的残差; u_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个化学成分的不确定度, 是基于采样误差, 检出限, 缺失值和异常值用来权重观测值的准确性. PMF 是一个多元因子分析工具, 在运行过程中通过多次运行程序寻找 Q 的最小值, 对分解矩阵中的元素做非负约束处理, 使分析结果更加明确, 并且可以利用数据的标准偏差对分析结果进行优化. PMF 模型法要求样品的数量较多, 运行样品的化学组分也较多, 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对颗粒物源类进行识别^[22]. 本研究过程中, 为了保证 PMF 解析准确性, 将低于方法检出限的组分浓度用 $1/2$ 检出限代替. 对 PMF 模型设置不同因子个数, 多次运行, 观察 Q 值变化、观测值与模拟值相关性、因子谱特征变化, 最终确定合理和稳定的结果.

2 结果与讨论

2.1 空气质量条件分析

根据民运会的规定, 8月25日至9月18日为会期保障阶段, 期间郑州市采取了一系列管控措施,

包括工业企业中涉 VOCs 行业分两批次停产, 其余工业行业按照郑州市重污染天气应急预案^[23]中规定的橙色应急预案执行, 主要道路实施限行和尾号限行, 建筑工地停止施工, 生物质燃烧源禁止燃烧, 汽修行业停止营业等. 因此本研究中将采样时段分为管控前(8月5~24日)、管控中(8月25日至9月18日)和解除管控后(9月19~30日).

从管控前中后空气质量 6 参数浓度(表 1)和增长比例可以看出, 管控中 NO_2 和 O_3 -8h 的浓度相比管控前轻微下降, 而 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 CO 和 SO_2 的浓度上升, 其中 SO_2 的增幅最明显. 郑州市 8~9 月处于夏秋交替时期, 温度降低、光强下降、光照时间变短、降雨减少和边界层下降等因素可能导致污染物逐步上升. 表 1 中气象因子表明管控中和管控后相比管控前均呈现风速减小, 气温和湿度下降的趋势, 因此气象条件的不利也可能是导致管控中比管控前污染物浓度增加的重要原因. 解除管控后所有污染物相比管控前和管控中均明显上升, 并且对比管控后和管控前污染物浓度可以看出, 解除管控后污染物浓度增幅均比管控中增幅大, 其中 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的浓度相比管控中上升 34% 和 50%, 一次气态污染物 SO_2 、 NO_2 和 CO 相比管控期间上升了 29%、55% 和 24%, 同时 O_3 浓度也上升了 25%. 对比管控中 2018 年同期污染物浓度来看, 相较于上年同期均呈现降低趋势(如表 1). 其中 SO_2 和 NO_2 浓度消减率分别为 45% 和 31%, PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度削减率分别为 25% 和 17%, CO 削减率为 11%, O_3 日最大 8 h 均值浓度的消减率仅为 4%, 在 6 参数中改善幅度较小. 这些结果表明管控期间对污染物的减排效果显著, 有效遏制了污染物浓度的增加.

从污染物时间序列(图 2)中可以看出, 管控前和管控中污染物浓度均较低, 只在 8 月 19~29 日出现了一次轻微的颗粒物污染过程, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度峰值 $73 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 气态污染中 CO 有明显的上升, 最高达到

表 1 不同管控阶段和 2018 年同期污染物浓度和气象数据及增幅

污染物与气象	管控前 数值	管控中		管控后			2018 年管控中同期	
		数值	增幅 (中/前)/%	数值	增幅 (后/前)/%	增幅 (后/中)/%	数值	2019 增幅 /%
$\text{PM}_{2.5}/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	25.6 ± 8.3	27.9 ± 13.8	9	37.3 ± 7.0	46	34	33.5 ± 8.5	-17
$\text{PM}_{10}/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	56.1 ± 14.9	58.2 ± 22.0	4	87.2 ± 16.2	55	50	78.1 ± 16.2	-25
$\text{SO}_2/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	4.7 ± 3.0	7.0 ± 2.0	49	9.0 ± 3.0	92	29	12.8 ± 3.5	-45
$\text{CO}/\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.8 ± 0.1	0.8 ± 0.2	9	1.0 ± 0.2	35	24	0.9 ± 0.2	-11
$\text{NO}_2/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	32.7 ± 8.9	31.7 ± 7.4	-3	49.0 ± 17.2	50	55	45.9 ± 16.5	-31
$\text{O}_3\text{-8h}/\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	153.3 ± 35.7	140.6 ± 60.3	-8	175.5 ± 39.2	15	25	147.1 ± 38.2	-4
风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	1.4 ± 0.8	1.3 ± 0.7	-10	1.0 ± 0.6	-25	-17	1.8 ± 0.5	-28
气温/ $^{\circ}\text{C}$	28.1 ± 2.5	26.4 ± 3.4	-6	23.9 ± 3.7	-15	-10	25.2 ± 3.1	5
湿度/%	66.9 ± 13.7	60.0 ± 17.5	-10	57.1 ± 16.5	-15	-5	62.1 ± 15.7	-3

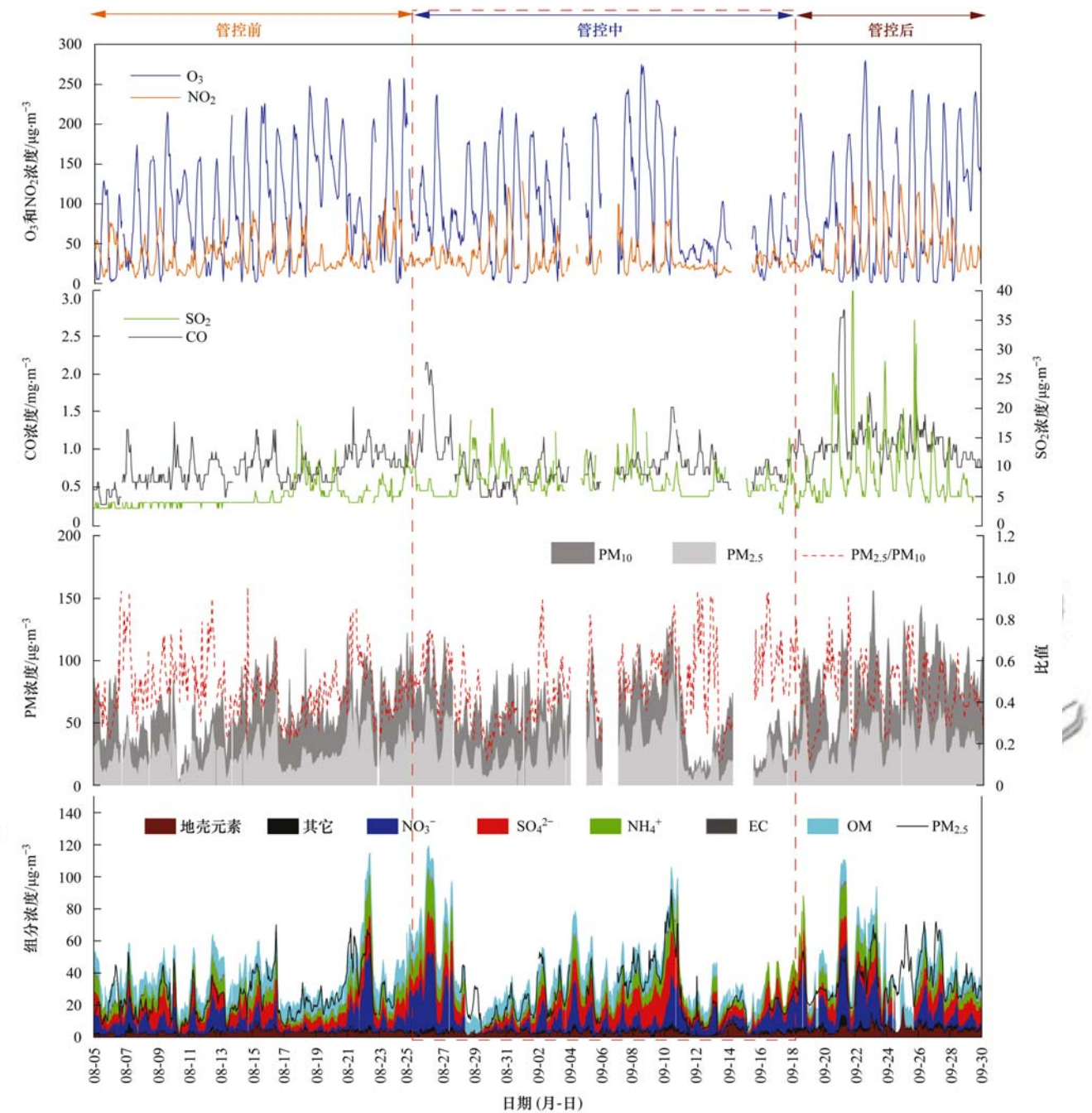


图2 观测期间污染物和颗粒物组分时间序列

Fig. 2 Time series of the concentrations of air pollutants and components of PM_{2.5}

2.1 mg·m⁻³. 解除管控后, 颗粒物和气态污染物浓度持续上升, 同时臭氧浓度也保持在较高浓度, 出现了颗粒物和臭氧的复合型污染. 此外管控前、中和后期的 PM_{2.5}/PM₁₀ 的平均值分别是 0.43、0.46 和 0.45, 可以看出在管控期间和管控后受到细颗粒物的影响增大.

本研究期间 PM_{2.5} 与气态污染物的相关性表明 (表 2), 管控前和管控中 PM_{2.5} 与 CO 和 PM₁₀ 的相关性较高, 并且管控前相关性高于管控中. CO 主要来源于固定燃烧源、移动源和工业源, 其中民用燃烧源占比最高^[24]. PM₁₀ 主要受扬尘源的影响, 其中包括

道路扬尘和施工扬尘^[25]. 结合民运会管控措施, 可以推断出管控前 PM_{2.5} 受固定燃烧源、移动源、工业和扬尘的影响高于管控中. 解除管控后 PM_{2.5} 与 CO 和 PM₁₀ 的相关性降低, 但是与 SO₂ 和 NO₂ 的相关性增加, SO₂ 主要来自于工业锅炉, NO₂ 主要来源于工

表 2 不同管控阶段 PM_{2.5} 与其它污染物的皮尔逊相关性系数

Table 2 Pearson's correlation coefficients between PM _{2.5} and other air pollutants during the three cases					
时期	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO	PM ₁₀
管控前	0.002	0.332	-0.205	0.806	0.821
管控中	0.032	0.123	-0.120	0.698	0.814
管控后	0.460	0.424	-0.327	0.550	0.649

业和机动车,因此解除管控后 $\text{PM}_{2.5}$ 的升高可能主要受工业企业复工的影响。

2.2 颗粒物组分分析

由于研究期间郑州市发生多次降雨过程(8月5~10日、8月20~21日和9月10~17日),为避免降雨对颗粒物组分的影响,下文中分析组分和源解析的数据不包含降雨时段。从 $\text{PM}_{2.5}$ 组分可知(表3),研究期间郑州市主要组分依次是有机物、硝酸根、铵根、硫酸根和地壳元素。管控中和管控后各组分的浓度均高于管控前。从各组分在 $\text{PM}_{2.5}$ 中占比可以看出, $\text{PM}_{2.5}$ 主要来自于二次无机气溶胶(NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+),占比可达50%~60%,略高于郑州市冬季^[13]和全年^[20]结果。相比于管控前,管控期间

$\text{PM}_{2.5}$ 组分中 OM 和硝酸根占比分别上升了3.9%和0.9%,而硫酸根、铵根和 CM 的占比下降了1.1%、1.9%和2.2%;解除管控后 OM、EC 和 CM 的占比显著上升,硝酸根、铵根和硫酸根的占比下降。从气象条件分析来看,湿度是影响颗粒物二次生成的重要因素,高湿度有利于二次无机盐的异相生成^[13, 20]。可以看出湿度在3个时期值相差不大,排序为管控前>管控中>解除管控后,因此解除管控后二次无机盐占比下降可能受到湿度降低的影响。总的来看,管控期间对一次污染物的减排效果显著, $\text{PM}_{2.5}$ 主要由二次组分构成,尤其是二次无机盐中的硝酸盐。解除管控后污染物排放量增大,导致一次组分如 CM 和 EC 的占比显著上升。

表3 不同管控阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 组分浓度和在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的占比

Table 3 Concentrations of components of $\text{PM}_{2.5}$ and their percentages in $\text{PM}_{2.5}$ during the three cases						
组分	管控前		管控中		管控后	
	浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	占比/%	浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	占比/%	浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	占比/%
CM	3.2 ± 1.6	12.9	3.6 ± 1.6	10.7	6.2 ± 4.3	17.1
NO_3^-	5.5 ± 6.5	21.8	7.6 ± 8.4	22.7	7.2 ± 5.5	19.7
SO_4^{2-}	4.7 ± 2.2	18.5	5.8 ± 3.0	17.4	5.2 ± 1.3	14.4
NH_4^+	5.0 ± 3.1	20.0	6.1 ± 3.8	18.1	5.6 ± 2.4	15.4
EC	1.0 ± 0.1	4.0	1.5 ± 0.4	4.4	2.2 ± 1.1	6.0
OM	5.7 ± 1.6	22.8	8.9 ± 1.6	26.7	10.0 ± 3.5	27.5

有机物是郑州市颗粒物中占比最高的组分。利用最小比值法计算不同时期的一次有机碳(primary organic carbon, POC)和二次有机碳(secondary organic carbon, SOC)的浓度见表4,结果表明研究期间郑州市 $\text{PM}_{2.5}$ 中有机物主要受 SOC 的贡献,达60%以上。管控中和管控后 EC、OC、POC 和 SOC 相比管控前的浓度均上升。但是从 POC 和 SOC 在 OC 中的比例来看,管控期间 POC 贡献相比管控前和管控后下降,而 SOC 的贡献增大。结果表明管控对 POC 减排有成效。SOC 的主要前体物之一是挥发性有机物^[26],因此民运会管控对点位周边挥发性有机物的管控效果可能较弱。同时 SOC 的生成也明显受气象条件的影响,管控期间温度下降影响半挥发性有机物的气粒分配,可能导致 SOC 的浓度增大^[26]。

表4 不同管控阶段碳组分浓度和占比

Table 4 Concentrations of carbonaceous components in $\text{PM}_{2.5}$ during the three cases			
碳组分	管控前	管控中	管控后
$\text{OC}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	3.6 ± 1.0	5.5 ± 1.9	6.2 ± 2.2
$\text{EC}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	1.0 ± 0.3	1.5 ± 0.4	2.2 ± 1.1
$\text{POC}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	1.1 ± 0.3	1.7 ± 0.8	2.5 ± 1.3
$\text{SOC}/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	2.4 ± 0.7	3.8 ± 1.5	3.7 ± 1.2
$\text{POC}/\text{OC}/\%$	32	31	41
$\text{SOC}/\text{OC}/\%$	68	69	59

2.3 来源解析

利用 PMF 模型对组分数据进行源解析,模式运行过程中选定5~7个因子,每次运行30次。将观测和预测结果相关性差的组分“Bed”,选择 $Q(\text{robust})$ 和 $Q(\text{true})$ 值最小的运行结果。最终确定了6个因子,其源谱特征见图3。Ca、K 和 Fe 指示扬尘源^[27]; NO_3^- 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^+ 指示二次硫酸和二次硝酸气溶胶; Se、POC 和 EC 指示燃煤源^[28]; Cr 和 Mn 可能来源于汽车刹车片和轮胎磨损^[29],并且机动车尾气是 OC 和 EC 重要贡献源^[28]; Mn 和 Zn 可能来源于工业冶金锻造^[29],因此用来指示工艺过程源。

源解析结果表明(表5),管控前郑州市 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来源是二次硫酸(32.0%)、二次硝酸(12.8%)、二次有机气溶胶(15.7%)、机动车源(11.7%)、工艺过程源(10.3%)、扬尘(8.7%)和燃煤(8.6%);管控中主要来源是二次硝酸(38.0%)、二次硫酸(21.1%)、二次有机气溶胶(18.3%)、机动车源(15.5%);解除管控后主要来源是二次硝酸(26.9%)、二次硫酸(23.2%)、二次有机气溶胶(16.4%)、机动车源(12.8%)、工业源(5.3%)。可以看出,管控期间对一次源中的扬尘、燃煤和工业管控效果显著,相比管控前贡献比分别下降8.3%、8.2%和8.1%。由于管控期间机动车减排力度较小,导致机动车源的贡献比上升3.8%。此外,二次

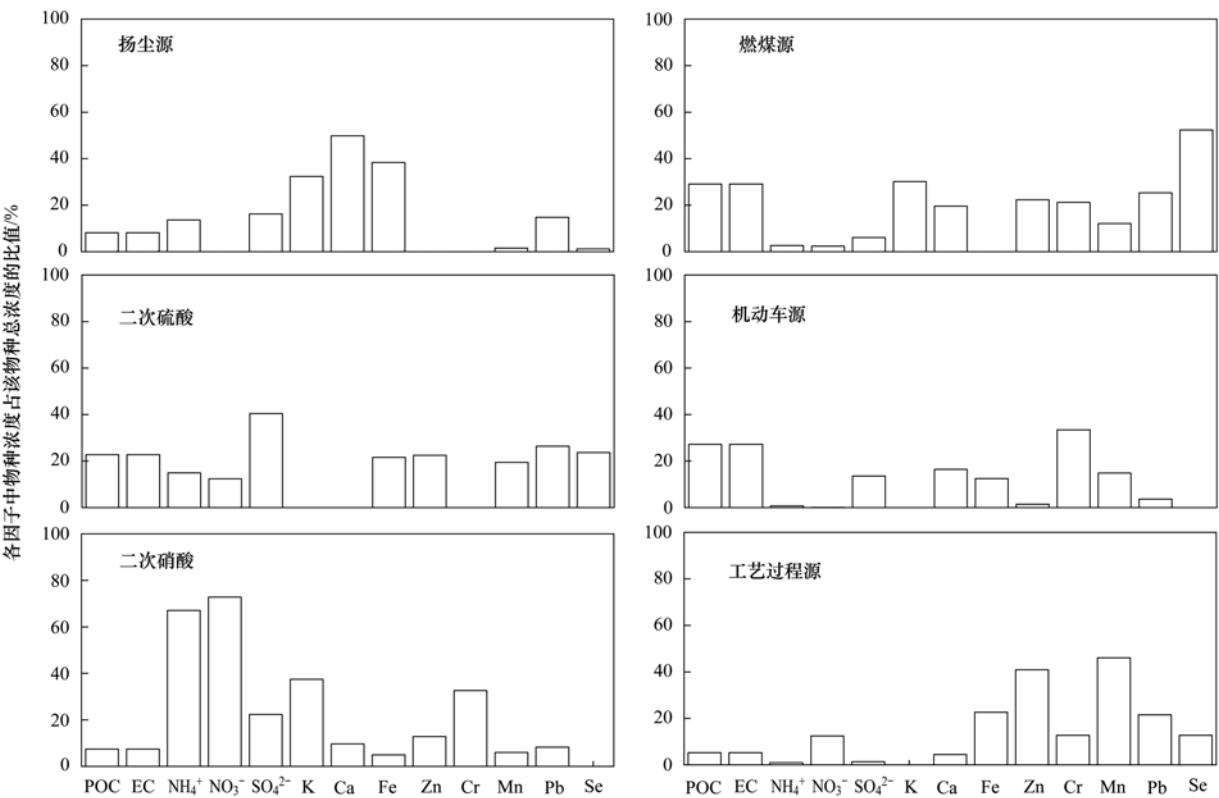


图3 PMF 源解析因子
Fig. 3 Factor profiles identified by the PMF model

表5 不同管控阶段 PM_{2.5} 源解析各源贡献浓度和占比

来源	管控前		管控中		管控后	
	贡献浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	贡献比/%	贡献浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	贡献比/%	贡献浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	贡献比/%
SOA	3.9	15.7	6.1	18.2	6.0	16.4
二次硝酸	8.0	12.8	7.0	38.0	8.5	26.9
二次硫酸	3.2	32.0	12.7	21.1	9.8	23.2
工艺过程源	2.6	10.4	0.8	2.3	1.9	5.3
机动车源	2.9	11.7	5.2	15.5	4.7	12.8
扬尘源	2.2	8.7	0.1	0.4	0.6	1.6
燃煤源	2.2	8.6	0.1	0.4	0.5	1.3
其它	0.3	0.1	1.3	4.0	4.6	12.5

生成的贡献显著增大,尤其是二次硝酸和 SOA 的贡献比分别上升了 25.2% 和 2.5%. 解除管控后,扬尘、燃煤和工艺过程源的贡献轻微增大. 总的来说,此次管控对颗粒物一次源的管控效果显著,但是对二次前体物如 NO_x 和 VOCs 的管控效果较弱.

3 结论

- (1)解除管控后 PM_{2.5} 的浓度相比于管控前增幅高于管控中,表明管控措施对颗粒物有显著的减排效果.
- (2)研究期间郑州市主要组分依次是有机物、硝酸根、铵根、硫酸根和地壳元素. 相比于管控前,管控期间 PM_{2.5} 组分中有机物和硝酸根占比分别上升,硫酸根、铵根和地壳元素的占比下降.

(3)源解析结果表明二次硫酸、二次硝酸、二次有机气溶胶、机动车源、工艺过程源、扬尘和燃煤是 PM_{2.5} 主要来源. 管控对一次源中的扬尘、燃煤和工业效果显著,贡献比分别下降 8.3%、8.2% 和 8.1%. 管控期间二次硫酸占比下降,机动车、二次有机气溶胶和二次硝酸占比上升. 总的来说郑州市此次管控对二次前体物氮氧化物和 VOCs 的减排效果较弱.

参考文献:

[1] Li M N, Zhang L L. Haze in China: current and future challenges[J]. Environmental Pollution, 2014, **189**: 85-86.
[2] 乔玉霜,王静,王建英. 城市大气可吸入颗粒物的研究进展[J]. 中国环境监测, 2011, **27**(2): 22-26.
Qiao Y S, Wang J, Wang J Y. Research progress of the inhalable particular in the urban air [J]. Environmental Monitoring in China, 2011, **27**(2): 22-26.

- [3] 朱广一. 大气可吸入颗粒物研究进展[J]. 环境保护科学, 2002, **28**(5): 3-5.
Zhu G Y. Study progress on inhalable particles in atmosphere [J]. Environmental Protection Science, 2002, **28**(5): 3-5.
- [4] Yang G H, Wang Y, Zeng Y X, *et al.* Rapid health transition in China, 1990-2010: findings from the Global Burden of Disease Study 2010[J]. The Lancet, 2013, **381**(9882): 1987-2015.
- [5] Fiore A M, Naik V, Leibensperger E M. Air quality and climate connections [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2015, **65**(6): 645-685.
- [6] Levoni C, Cervino M, Guzzi R, *et al.* Atmospheric aerosol optical properties: a database of radiative characteristics for different components and classes[J]. Applied Optics, 1997, **36**(30): 8031-8041.
- [7] Tian P, Wang G F, Zhang R J, *et al.* Impacts of aerosol chemical compositions on optical properties in urban Beijing, China[J]. Particuology, 2015, **18**: 155-164.
- [8] Fu H B, Chen J M. Formation, features and controlling strategies of severe haze-fog pollutions in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, **578**: 121-138.
- [9] 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 等. 聊城冬季一重污染过程 PM_{2.5} 污染特征及成因分析[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4026-4033.
Zhang J Q, Wu Y J, Zhang M, *et al.* PM_{2.5} pollution characterization and cause analysis of a winter heavy pollution event, Liaocheng City[J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4026-4033.
- [10] 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.
Mu 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.
- [11] 肖致美, 徐虹, 李鹏, 等. 京津冀区域重污染期间 PM_{2.5} 垂直分布及输送[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4303-4309.
Xiao Z M, Xu H, Li P, *et al.* Vertical distribution and transport of PM_{2.5} during heavy pollution events in the Jing-Jin-Ji region [J]. Environmental Science, 2019, **40**(10): 4303-4309.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 周静博, 李治国, 路娜, 等. 抗战胜利 70 周年大阅兵期间石家庄大气细颗粒物在线来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(8): 2855-2862.
Zhou J B, Li Z G, Lu N, *et al.* Online sources about atmospheric fine particles during the 70th anniversary of victory parade in Shijiazhuang [J]. Environmental Science, 2016, **37**(8): 2855-2862.
- [15] 吴其重, 王自发, 李丽娜, 等. 北京奥运会空气质量保障方案京津冀地区措施评估[J]. 气候与环境研究, 2010, **15**(5): 662-671.
Wu Q Z, Wang Z F, Li L N, *et al.* Assessment on the effectiveness of the air quality assurance program in Beijing-Tianjin-Hebei area during the Beijing Olympic Games period [J]. Climatic and Environmental Research, 2010, **15**(5): 662-671.
- [16] 王浩, 李轶, 高健, 等. APEC 会议期间石家庄市大气污染特征及空气质量保障措施效果评估[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(2): 164-174.
Wang H, Li Y, Gao J, *et al.* Characteristics of air pollution and evaluation of the effects of air quality assurance measures in Shijiazhuang city during the 2014 APEC Meeting [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(2): 164-174.
- [17] 张祥志, 丁爱军, 陈文泰, 等. 南京青奥会空气质量保障管控措施效果评估[J]. 中国环境监测, 2016, **32**(5): 40-44.
Zhang X Z, Ding A J, Chen W T, *et al.* Effect evaluation of air quality control measures during Nanjing Youth Olympic Games [J]. Environmental Monitoring in China, 2016, **32**(5): 40-44.
- [18] Wang S B, He B, Yuan M H, *et al.* Characterization of individual particles and meteorological conditions during the cold season in Zhengzhou using a single particle aerosol mass spectrometer [J]. Atmospheric Research, 2019, **219**: 13-23.
- [19] 王申博, 余雪, 赵庆炎, 等. 郑州市两次典型大气重污染过程成因分析[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(7): 2425-2431.
Wang S B, Yu X, Zhao Q Y, *et al.* Analysis of the formation of two typical atmospheric heavy pollution episodes in Zhengzhou, China [J]. China Environmental Science, 2018, **38**(7): 2425-2431.
- [20] 杨留明, 王申博, 郝祺, 等. 郑州市 PM_{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 2977-2984.
Yang L M, Wang S B, Hao Q, *et al.* Characteristics and source analysis of water-soluble ions in PM_{2.5} in Zhengzhou [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 2977-2984.
- [21] 安欣欣. 有机碳元素碳半连续分析仪的使用与维护[J]. 分析仪器, 2015, (2): 90-93.
An X X. Use and maintenance of semi-continuous OCEC carbon aerosol analyzer [J]. Analytical Instrumentation, 2015, (2): 90-93.
- [22] 王苏蓉, 喻义勇, 王勤耕, 等. 基于 PMF 模式的南京市大气细颗粒物源解析[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(12): 3535-3542.
Wang S R, Yu Y Y, Wang Q G, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in Nanjing by PMF [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(12): 3535-3542.
- [23] 郑州市人民政府. 郑州市重污染天气应急预案(2018 年修订) [EB/OL]. <http://public.zhengzhou.gov.cn/u/cms/public/201810/29165359n9ow.pdf>, 2018-10-23.
- [24] 王丽涛, 张强, 郝吉明, 等. 中国大陆 CO 人为源排放清单[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(12): 1580-1585.
Wang L T, Zhang Q, Hao J M, *et al.* Anthropogenic CO emission inventory of mainland China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, **25**(12): 1580-1585.
- [25] Wang S B, Yan Q S, Zhang R Q, *et al.* Size-fractionated particulate elements in an inland city of China: Deposition flux in human respiratory, health risks, source apportionment, and dry deposition [J]. Environmental Pollution, 2019, **247**: 515-523.
- [26] 王倩, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(2): 424-433.
Wang Q, Chen C H, Wang H L, *et al.* Forming potential of secondary organic aerosols and sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai, China [J]. Environmental Science, 2013, **34**(2): 424-433.
- [27] 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.
- [28] 张懿华, 王东方, 赵倩彪, 等. 上海城区 PM_{2.5} 中有机碳和元

素碳变化特征及来源分析[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3263-3270.

Zhang Y H, Wang D F, Zhao Q B, *et al.* Characteristics and sources of organic carbon and elemental carbon in PM_{2.5} in Shanghai urban area[J]. Environmental Science, 2014, **35**(9):

3263-3270.

[29] Pan Y P, Wang Y S, Sun Y, *et al.* Size-resolved aerosol trace elements at a rural mountainous site in Northern China: importance of regional transport [J]. Science of the Total Environment, 2013, **461-462**: 761-771.

欢迎订阅 2020 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE; Scopus; 化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA); Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA); Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS); Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjcx@rcees.ac.cn;网址:www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)