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.10
第41卷 第10期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第10期
2020年10月15日

目 次

青岛春节期间大气污染特征及烟花燃放一、二次贡献分析 …… 方天歌, 姚小红, 孟赫, 陈春强(4345)
基于在线观测的天津市 $PM_{2.5}$ 污染特征及来源解析 …… 肖致美, 徐虹, 李立伟, 李鹏, 元洁, 唐邈, 杨宁, 郑乃源, 陈魁(4355)
2017~2018年北京大气 $PM_{2.5}$ 中水溶性无机离子特征 …… 李欢, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思(4364)
北京南部城区 $PM_{2.5}$ 中碳质组分特征 …… 董贵明, 唐贵谦, 张军科, 刘琴, 闫广轩, 程萌田, 高文康, 王迎红, 王跃思(4374)
成都市冬季3次灰霾污染过程特征及成因分析 …… 冯小琼, 陈军辉, 尹寒梅, 徐雪梅, 熊文朋, 梅林德, 钱骏, 刘政(4382)
南京北郊黑碳气溶胶分布特征及来源 …… 谢锋, 林煜棋, 宋文怀, 鲍孟盈, 章炎麟(4392)
2019年10~12月京津冀及周边"2+26"城市重污染减排效果评估 …… 朱媛媛, 高愈霄, 汪巍, 鲁宁, 许荣, 刘冰, 李健军(4402)
保定市大气污染变化趋势及特征 …… 苟银寅, 张凯, 李金娟, 吕文丽, 竹双, 黎洁, 何珊珊, 郑悦, 支敏康(4413)
郑州市VOCs组分排放清单及其臭氧生成潜势 …… 卢轩, 张瑞芹, 韩跃钢(4426)
郑州市少数民族运动会期间 O_3 及VOCs污染特征的演变和评估 …… 赵金帅, 于世杰, 王楠, 马双良, 王维思, 尹沙沙, 李一丹, 张栋, 张瑞芹(4436)
我国木器涂料及汽车涂料中挥发性有机物特征 …… 柯云婷, 孙宇航, 成海荣, 刘锐源, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启(4446)
典型脱硫工艺对燃煤锅炉烟气颗粒物的影响 …… 张进生, 吴建会, 吕瑞鹤, 宋丹林, 黄凤霞, 张裕芬, 冯银厂(4455)
不同居民燃煤炉具大气污染物排放差异性及减排分析 …… 张熠晨, 薛陈利, 刘杰, 钟连红, 薛亦峰(4462)
天津市2017年移动源高时空分辨率排放清单 …… 刘庚, 孙世达, 孙露娜, 金嘉欣, 房键旭, 宋鹏飞, 王婷, 吴琳, 毛洪钧(4470)
四川省基于第二次污染源普查数据的人为源大气污染源排放清单及特征 …… 徐晨曦, 陈军辉, 李媛, 何敏, 冯小琼, 韩丽, 刘政, 钱骏(4482)
抗大气复合污染的城市森林植物初步筛选 …… 李品, 卫妍妍, 冯兆忠(4495)
宝鸡市绿植叶片重金属空间分布及污染特征 …… 张军, 梁青芳, 高煜(4504)
潮汕地区入海河流及水生生物中PPCPs分布特征及风险评估 …… 秀措, 王尘辰, 吕永龙, 陆轶峰, 王聪, 张梦, 曹祥会(4514)
泉州山美水库及入库河流沉积物中多溴二苯醚的时空分异和降解分析 …… 韩文亮, 刘豫, 冯凯文(4525)
长江上游典型山地农业小流域浅层地下水硝态氮时空变异特征及影响因素 …… 江南, 周明华, 李红, 李子阳, 章熙峰, 朱波(4539)
沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征 …… 王宏, 徐娅玲, 张奇, 林超文, 翟丽梅, 刘海涛, 蒲波(4547)
基于DPeRS模型的海河流域面源污染潜在风险评估 …… 冯爱萍, 王雪蕾, 徐逸, 黄莉, 吴传庆, 王昌佐, 王洪亮(4555)
降水空间异质性对非点源关键源区识别面积变化的影响 …… 高晓曦, 左德鹏, 马广文, 徐宗学, 胡小红, 李佩君(4564)
硅藻群落指示的近50年来大理西湖湖泊生态系统演变规律 …… 张晨雪, 徐敏, 董一凡, 王荣, 方凤满(4572)
海陆交互带土壤及河流沉积物中镉含量及形态分布特征 …… 王芳婷, 陈植华, 包科, 赵信文, 孟宪萌, 黄长生(4581)
内蒙古河套灌区排水干沟微塑料赋存特征及质量估算 …… 王志超, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 杨建林, 秦一鸣, 李河(4590)
透水/不透水格局特征对汇水单元径流污染的影响 …… 姜智绘, 廖云杰, 谢文霞, 李佳, 房志达, 赵洪涛, 李叙勇(4599)
铁铜双金属有机骨架MIL-101(Fe,Cu)活化双氧水降解染料性能 …… 梁贺, 刘锐平, 安晓强, 刘会娟(4607)
纳米 $Cu^0@Fe_3O_4$ 活化PMS降解对-硝基苯酚的协同反应机制 …… 石清清, 蒲生彦, 杨犀(4615)
紫外活化过硫酸盐降解水中三氯蔗糖动力学和机制 …… 余韵, 陆金鑫, 吕贞, 彭明国, 徐彬焜, 杜尔登, 郑璐(4626)
污水生物处理工艺低温下微生物种群结构 …… 尚越飞, 王申, 宗倪, 杜海洲, 张鑫, 齐嵘, 杨敏(4636)
不同DN与PN-ANAMMOX耦合工艺处理中晚期垃圾渗滤液的微生物群落分析 …… 陆明羽, 李祥, 黄勇, 殷记强, 方文烨(4644)
全程自养颗粒污泥快速启动及混合营养型脱氮性能分析 …… 齐泽坤, 王建芳, 钱飞跃, 刘雨馨, 乔伟, 李小蝶(4653)
不同低碳氮比废水中好氧颗粒污泥的长期运行稳定性 …… 袁强军, 张宏星, 陈芳媛(4661)
潮土细菌及真菌群落对化肥减量配施有机肥和秸秆的响应 …… 吴宪, 王蕊, 胡菏, 修伟明, 李刚, 赵建宁, 杨殿林, 王丽丽, 王欣奕(4669)
不同轮作模式下作物根际土壤养分及真菌群落组成特征 …… 孙倩, 吴宏亮, 陈阜, 康建宏(4682)
酒糟生物炭短期施用对贵州黄壤氮素有效性及细菌群落结构多样性的影响 …… 张萌, 刘彦伶, 魏全全, 苟久兰(4690)
稻油不同轮作模式对农田甲烷和氧化亚氮排放的影响 …… 陈友德, 赵杨, 高杜娟, 罗先富, 崔婷, 童中权, 吴家梅(4701)
解淀粉芽孢杆菌生物有机肥防控土壤氨挥发 …… 杨亚红, 薛莉霞, 孙波, 张宝, 庄绪亮, 庄国强, 白志辉(4711)
外源磷对镉胁迫下水稻生长及镉累积转运的影响 …… 霍洋, 仇银燕, 周航, 胡雨丹, 邓鹏辉, 魏宾纭, 辜娇峰, 刘俊, 廖柏寒(4719)
水稻不同生育期As胁迫下As累积关键生育期 …… 邓鹏辉, 蔡雅琴, 周航, 刘雅, 杨文俊, 辜娇峰, 廖柏寒(4726)
铅锌矿区玉米中重金属污染特征及健康风险评价 …… 周艳, 万金忠, 李群, 黄剑波, 张胜田, 龙涛, 邓绍坡(4733)
浙江省台州市电子垃圾拆解地多溴联苯醚浓度水平分布特征和迁移趋势 …… 魏抱楷, 柳晨, 王英, 金军(4740)
重庆市酉阳县南部农田土壤重金属污染评估及来源解析 …… 王锐, 邓海, 严明书, 何忠庠, 周皎, 梁绍标, 曾琴琴(4749)
重庆市畜禽粪便及菜田土壤中四环素类抗生素生态风险评价 …… 彭秋, 王卫中, 徐卫红(4757)
《环境科学》征订启事(4435) 《环境科学》征稿简则(4445) 信息(4606, 4625, 4732)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第10期 2020年10月
Vol.41, No.10 Oct., 2020

郑州市少数民族运动会期间 O_3及 VOCs 污染特征的演变和评估

赵金帅[1], 于世杰[1], 王楠[2], 马双良[2], 王维思[2], 尹沙沙[1], 李一丹[1], 张栋[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 450000)

摘要: 基于近地面观测的常规污染六参数、气象数据和在线 VOCs 数据,以臭氧及其前体物 VOCs 为研究重点,评估了民运会期间采取的污染管控措施对郑州市空气质量的影响. 结果表明, 2019 年民运会管控期间污染物六参数相较上年同期均呈现降低趋势,其中 $PM_{2.5}$和 PM_{10}浓度分别降低了 16.2% 和 25.1%,但是臭氧日最大 8 h 浓度均值的降幅仅为 3.7%,且臭氧为首要污染物的天数超过 90%. 就臭氧前体物 VOCs 而言,民运会期间 PAMS 浓度(26.21×10^{-9})低于历史同期; 利用 PMF 模型解析出 6 个因子,依次为机动车尾气(28%)、LPG(21%)、燃烧(16%)、工业(15%)、溶剂(15%)和植物排放(5%); 空气保障期间,对燃烧源和工业源的管控较为明显.

关键词:民族运动会(NTGEM); 空气质量; 臭氧(O_3); 挥发性有机物(VOCs); 源解析
中图分类号: X51 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)10-4436-10 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202002151

Evolution and Evaluation of O_3 and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period

ZHAO Jin-shuai[1], YU Shi-jie[1], WANG Nan[2], MA Shuang-liang[2], WANG Wei-si[2], YIN Sha-sha[1], LI Yi-dan[1], ZHANG Dong[1], ZHANG Rui-qin[1]*
(1. Research Institute of Environmental Science, College of Chemistry, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Environmental Monitoring Center of Henan Province, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: During the National Traditional Games of Ethnic Minorities (NTGEM) 2019, air quality in Zhengzhou was analyzed to evaluate the impact of pollution prevention and control measures on Zhengzhou. Ground-observed meteorological and pollutant data as well as the chemical compositions of volatile organic compounds (VOCs) were investigated. The results showed that the six parameters of pollutants in the safeguard period in 2019 indicated a downward trend as compared with that during the same time in 2018, and the average concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} were decreased by 16.2% and 25.1%, respectively. However, the average concentration of O_3 was only reduced by 3.7%. The daily proportions of primary pollutants of O_3 increased to 90% during the NTGEM, and the ozone pollution was severe in this period. Meanwhile, the concentration of total volatile organic compounds (TVOCs) in the safeguard period was 26.21×10^{-9}, which was significantly lower than that during the historical period. Six emission sources of the VOCs were identified using PMF model, including vehicle exhaust (28%), LPG evaporation (21%), combustion source (16%), industrial emissions (15%), solvent utilization (15%), and biogenic VOCs (5%). During the NTGEM period, the control of combustion sources and industrial sources was evident.

Key words: National Traditional Games of Ethnic Minorities (NTGEM); air quality; O_3; volatile organic compounds (VOCs); source apportionment

2019 年 9 月 8 ~ 16 日,第十一届少数民族运动会(民运会)在我国河南省郑州市举办. 该城市作为全国重要的交通枢纽,区内路网密集,汽车保有量大,且人口稠密,大气污染物排放强度较大; 加之温度较高,辐射强度较大,因此每年 9 月该区域近地面臭氧浓度较高. 为保障民运会期间空气质量,实现臭氧污染削峰减频,郑州市政府颁布了《臭氧污染天气强化管控实施方案》. 借鉴国内外大型活动空气保障的成功经验,以挥发性有机物和氮氧化物为减排重点,实施精准管控,主要包括:全市工业企业涉 VOCs 排放工序停产或错峰生产; 全市渣土车停止运输及工地内非道路移动机械停止使用; 全市油罐车在白天暂停装卸油; 禁止露天喷漆作业; 严控餐饮油烟污染,严禁垃圾露天焚烧等.

近年来,我国很多城市都有因重大活动空气保障而采取的临时管控,这些举措不仅保障活动的顺利进行,同时也为科研工作者提供大气污染控制效果的实验机会. Wang 等[1]的研究发现,奥运会时期北京地区 NO_x、O_3 和 SO_2 浓度相较奥运会前分别下降了 21%、23% 和 61%. 赵辉等[2]的研究发现 2016 年杭州 G20 峰会期间与去年同期相比, $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2、NO_2 和 CO 浓度降幅显著,而臭氧浓度

收稿日期: 2020-02-22; **修订日期**: 2020-04-16
基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212403)
作者简介: 赵金帅(1989 ~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气环境污染与防治,E-mail: zhaojinshuaia@163.com
* 通信作者,E-mail:rqzhang@zzu.edu.cn

则上升了 20%；类似的现象在 2014 年北京 APEC 会议期间也发现[3]. 除了对常规 6 个参数的统计分析外，空气保障期间及前后 VOCs 污染特征及来源解析对比也是研究热点. Li 等[4]对 2014 年 APEC 会议 VOCs 的减排评估表明，在京津冀各城市协同减排下，北京市 VOCs 下降显著，其中机动车尾气、溶剂使用和生物质燃烧的削减率均超过 50%. 2017 年金砖会议期间，厦门市 VOCs 体积分数为 $(9.39 \pm 3.35) \times 10^{-9}$，研究结果表明，通过对溶剂使用和机动车源的管控，VOCs 浓度降低显著，且对潜在的 O_3 和 SOA 产量也有显著的削减效果[5]. 上述研究结果表明，重大活动的临时管控措施，对改善空气质量和降低 VOCs 浓度效果显著.

本文以臭氧及其前体物 VOCs 为研究重点，基于河南省国控空气站观测资料，结合气象数据，对民运会及历史同期臭氧及其它污染物的污染特征进行分析，同时利用近 3 年在线 VOCs 数据，探讨了民运会及历史同期 VOCs 污染特征及来源解析差异. 本研究有助于了解减排措施对郑州市空气质量的影响，评估郑州地区空气污染物来源以及减排效果，以期为持续改善郑州空气质量提供科学的技术支持.

1　材料与方法

1.1　数据来源

2019 年 8 月 25 日至 9 月 20 日民运会保障期及 2017～2018 年历史同期的 6 个污染物数据（包括 $PM_{2.5}$、PM_{10}、NO_2、SO_2、CO 和 O_3）来自于郑州市 9 个国控空气质量监测站点和河南省其他 63 个国控空气质量监测站点，各项指标含义详见《环境空气质量标准》（GB 3095-2012）. 常规气象数据时段与污染物六参数时段相同，来自于国家基准站郑州市气象局逐小时数据，包括风向（wind direction，WD）、风速（wind speed，WS）、温度（temperature，T）和相对湿度（relative humidity，RH）.

在线 VOCs 观测站点在河南省监测中心楼顶，位于郑州市金水区，周边主要为居民区和商业区（图 1）. 大气 VOCs 观测由德国 AMA 公司的 GC5000 大气挥发性有机物在线监测仪进行实时连续监测，采样频率为 1 h，共可以监测 57 种 PAMS 物质（包括烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃）. 质量控制与保证见文献[6]. 采样时段为民运会保障期及 2017～2018 年的历史同期.

1.2　分析方法

本研究首先采用基于数学统计的方法，依据标准[7, 8]，对郑州市近地面臭氧污染特征和气象要素进行统计分析. 其中，基于 9 个国控点数据，统计郑州市民运会期和历史同期污染物浓度水平、超标情况及首要污染物占比，评估民运会期减排效果；同时利用河南省 72 个国控站污染物数据，采用 ArcGIS 软件，识别研究时段内不同年份间污染物的空间变化情况及分布差异，进而评估郑州市不同区域内污染物的减排情况.

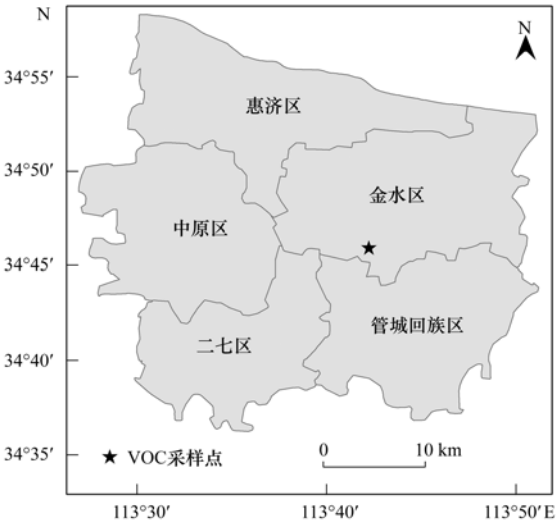

图 1　VOCs 采样点位置示意

Fig. 1　Location of VOCs monitoring sites

其次，利用获取的气象数据，采用数学统计方法，分析不同年份气象水平差异，解释污染物年际变化规律. 同时利用后向轨迹模型，识别不同年份气团变化规律.

最后基于获取的在线 VOCs 数据，采用数学统计的方法，对民运会期间 VOCs 污染特征进行分析，同时与 2017～2018 年同期的 VOCs 进行对比研究；同时，结合 PMF 模型，识别了管控期间 VOCs 来源解析及各年份间的差异.

1.3　后向轨迹分析

后向轨迹使用混合型单粒子拉格朗日综合轨迹（HYSPLIT）模式进行轨迹模拟[9]. 气象数据使用美国国家环境预报中心（NCEP）提供的全球数据同化系统（GDAS）数据库中的相关资料，计算气团 72 h 后向轨迹，计算时间为民运会管控期及 2017～2018 年同期，间隔为 6 h（00：00、06：00、12：00 和 18：00），轨迹模拟起始高度设置为 500 m（地面高度），能够准确反映边界层平均流场特征.

1.4　正定矩阵因子分析

正定矩阵分解法（PMF）最早由芬兰赫尔辛基大学的 Paatero 教授提出并开发的，它是一种基于目标源的化学成分来识别和定量样品来源的数学模型[10]，如今被广泛应用于大气颗粒物和挥发性有机物的研究中. 本研究应用 PMF 5.0 进行计算，其基本原理是将受体矩阵分解成因子贡献矩阵和因子源

谱矩阵的乘积和残差矩阵：

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

$$Q = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \left[\frac{X_{ij} - \sum_{k=1}^{p} g_{ik} f_{kj}^2}{u_{ij}} \right] \quad (2)$$

式中，X_{ij}为第 i 个受体样品中第 j 个组分的浓度，g_{ik}为第 i 个样中第 k 个来源的贡献，f_{kj}为第 k 个来源中第 j 个组分占比，e_{ij}表示残差，Q 表示实际值与解析结果之间的差值.

在源解析前，根据美国 EPA PMF5.0 指导手册提供的方法[11]，将平均值在最低检出限以下的 VOCs 物种剔除，浓度低于检出限的物种替换为方法检出限的一半[12]，根据物种浓度和最低检出限计算不确定度，如果物种浓度低于检出限，用公式(3)计算，大于检出限，用公式(4)计算. 其公式如下：

$$\text{Unc} = \frac{5}{6} \times \text{MDL} \quad (3)$$

$$\text{Unc} = [(\text{Error Fraction} \times \text{concentration})^2 + (0.5 \times \text{MDL})^2]^{1/2} \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 民运会保障期间臭氧及其它污染物特征

第十一届民运会于2019年9月8~16日在郑州市举行，河南省分区分时段采取了污染管控措施(8月25日至9月18日，共计25 d). 通过对民运会期间郑州市污染物浓度特征分析发现：管控期间6个污染物参数相较于上年同期均呈现降低趋势(如表1). 民运会管控期间与去年同期相比，SO_2 和 NO_2 浓度消减率分别为45.5%和31.3%，PM_{10}和 $PM_{2.5}$浓度削减率分别为25.1%和16.2%，CO 削减率为10.3%，但 O_3 日最大8 h均值浓度的消减率仅为3.7%，在6个参数中改善幅度较小. 只有科学合理地对 NO_x 和 VOCs 进行协同减排，才能有效抑制臭氧污染.

从污染等级看(如图2)，整个管控期间郑州市空气质量为优的天数为7 d，远高于同期水平，轻度和中度污染的天数仍然达到10 d和2 d. 其中，首要污染物以 O_3 为主(17 d)，其次是 PM_{10}(2 d)，$PM_{2.5}$未成为该时段内当日首要污染物(如图3). 可以看出，相较同期，2019年颗粒物为首要污染物的天数显著下降，而 O_3 污染则日益凸显，如遇不利的气象条件，仍易发生 O_3 污染. 通过管控措施的执行，有效预防和缓解了细颗粒物污染，但由于 O_3 的生成与前体物之间具有显著的非线性关系，不合理的减排可能对臭氧管控产生负效应，需对臭氧前体物进行科学协同管控[13,14].

图4展示了民运会管控期间与历史同期河南省

图2 民运会管控期间及历史同期污染等级分布

Fig. 2 Distribution of pollution levels during the control period of the NTGEM and historic period

表1 民运会管控期间污染物浓度及去年同期削减率1)

Table 1 Variation of pollutant concentrations and reducing rate during the control period of the NTGEM and the same period in last year

项目	$PM_{2.5}$	PM_{10}	SO_2	CO	NO_2	O_3-8h
2019年	28.2	58.8	7.0	0.8	31.4	141.9
2018年	33.7	78.6	12.8	0.9	46.2	147.3
同比削减率/%	16.2	25.1	45.5	10.3	32.1	3.7

1) CO 单位为mg·m^{-3}，其余浓度单位为μg·m^{-3}

O_3、NO_2 和 CO 的空间分布特征. 结果表明，2018年9月相较2017同期，CO 浓度在全省范围内呈现显著降低趋势，推测与污染源超净排放的完成有关；郑州市民运会期间 CO 浓度相较去年同期略有降低，整体处于较低浓度水平；NO_2 浓度的高值往往出现于郑州市，在民运会期间，相比周边城市，郑州市浓度降幅显著，说明管控期间对工业企业及移动污染源的管控较有成效. 需要指出的是，臭氧污染仍未得到有效抑制，其中2019年郑州市周边城市臭氧浓度显著降低，而郑州臭氧浓度未出现显著降低. 在民运会减排的背景下，尤其是市区 NO_2 浓度显著降低的前提下，民运会管控期间臭氧污染依旧严峻；郑州市臭氧污染严峻，可能是由于氮氧化物的减排导致滴定效应减弱进而使得臭氧得到累积造成

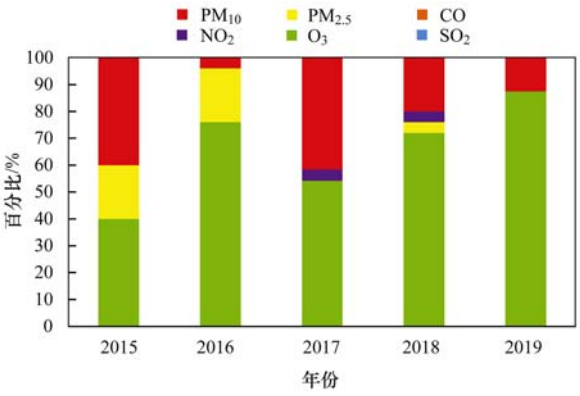

图 3　民运会管控期间及历史同期首要污染物构成

Fig. 3　Composition of primary pollutant during the control period of the NTGEM and historic period

的[15]. 科学合理地对臭氧前体物(NO_x 和 VOCs)进行协同减排,才能有效降低臭氧浓度,缓解光化学污染.

2.2　气象条件对空气质量的影响

为探讨郑州民运会管控期间的气象条件,将2019 年民运会管控期间郑州市日均气象要素与近 4 年同期对比(如表 2). 降水、气温、相对湿度、气压和风速等气象条件是影响大气污染浓度重要的外因,通过计算发现,除降水量外,其余气象要素的平均水平与历史同期没有较大差异. 而民运会期间降水量较同期偏少,当降水较多时,有助于空气中污染物的沉降,因此较少的降水不利于大气污染物的清除[16]. 民运会管控期间气象条件较为不利,但减排

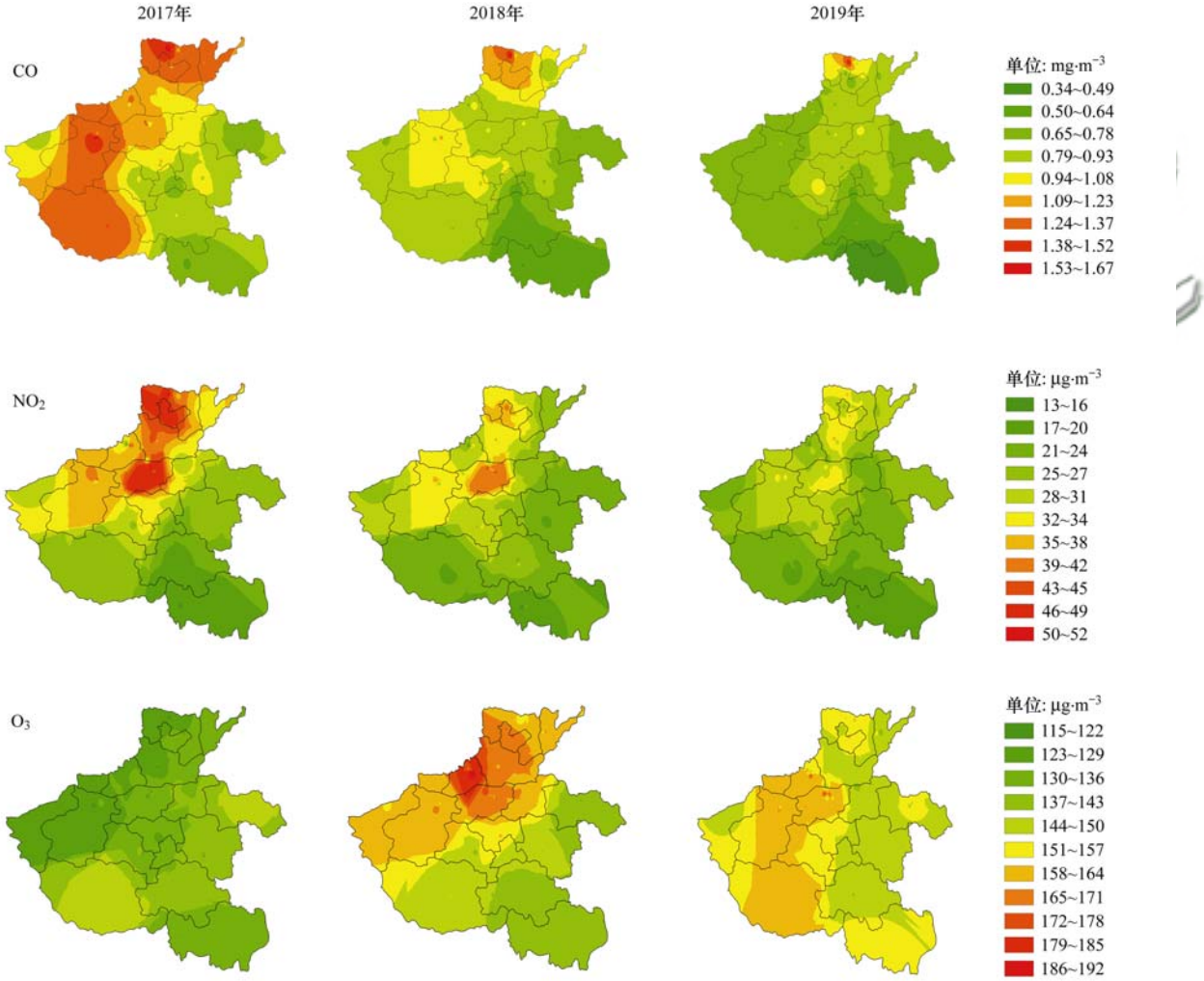

图 4　民运会管控期间及历史同期河南省大气污染物浓度空间分布

Fig. 4　Spatial variations in the concentrations of air pollutants in Henan during the control period of the NTGEM and historic period

表 2　2016 ~ 2019 年郑州市历史同期气象因素变化

Table 2　Variation of meteorological factors during historic period from 2016 to 2019 in Zhengzhou

年份	降水量 /mm	温度 /℃	最高温度 /℃	相对湿度 /%	露点温度 /℃	气压 /hPa	能见度 /m	风速 /m·s⁻¹
2016	352. 6	26. 9 ±3. 3	30. 7 ±2. 8	55. 3 ±16. 6	—	998. 1 ±5. 0	—	1. 4 ±0. 8
2017	116. 2	23. 2 ±2. 1	27. 6 ±3. 4	79. 1 ±9. 7	18. 8 ±1. 5	1 000. 5 ±3. 0	10. 2 ±4. 4	1. 5 ±0. 4
2018	44. 3	25. 2 ±3. 1	29. 2 ±3. 9	62. 1 ±15. 7	16. 5 ±4. 0	999. 0 ±5. 0	16. 1 ±6. 8	1. 8 ±0. 5
2019	39. 8	24. 2 ±3. 3	28. 3 ±4. 6	64. 7 ±14. 4	16. 2 ±2. 0	999. 9 ±4. 4	14. 1 ±7. 0	1. 7 ±0. 4

措施仍有效提升了郑州市空气质量.

气象条件通常会影响地表附近空气污染物的浓度,这使得很难评估排放控制中污染物的减少量,气象条件的变化通常导致区域空气污染物的传播和循环,许多研究表明区域性传播对空气质量有重要影响. 因此对研究时段内郑州市的气团后向轨迹进行聚类分析(如图 5),以揭示不同年份大气传送通道的差异. 民运会及历史同期的轨迹都被聚类为 4 类,其中均受到偏东方向气团传输的影响较高(32%、39% 和 48%)且主导轨迹上有污染较重区域时,通常对空气质量影响较为明显. 需要指出的是,民运会期间,郑州市地区受偏东北方向传输气团的影响较大,高于历史同期,此类气团经过京津冀地区容易携带污染物或前体物,并对郑州地区空气造成污染.

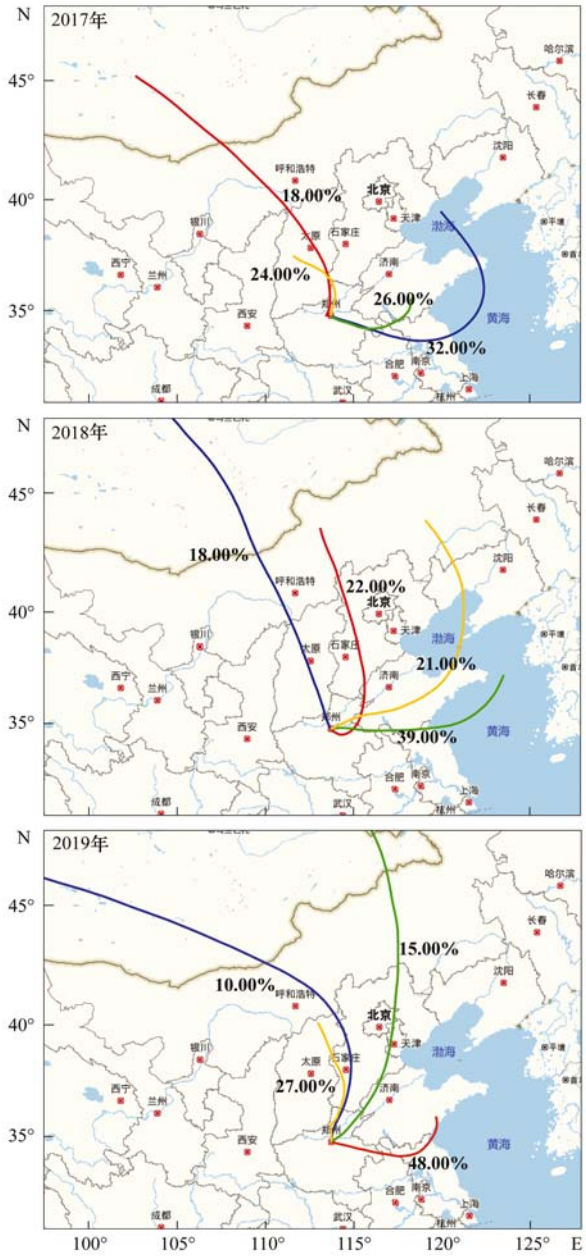

图 5 2017 ~ 2019 年历史同期郑州市地区地面(500 m)大气输送通道

Fig. 5 Pollutant transport channels (500 m) during historic period from 2017 to 2019 in Zhengzhou

2.3 臭氧前体物 VOCs 浓度特征及来源解析

2.3.1 VOCs 污染特征

图 6 展示了郑州市民运会管控期及同期 VOCs 浓度及组分占比情况. 结果表明, 2017 ~ 2019 年观测期间内 TVOC 浓度呈降低趋势,分别为 33.68×10^{-9}、32.53×10^{-9} 和 26.21×10^{-9},说明民运会管控取得一定成效. 从组分占比上来看,烯烃和炔烃占比显著降低; 烷烃和芳香烃虽占比呈上升趋势,但浓度略微降低,改善幅度较小. 表 3 统计了观测期间内各年份排名前 20 的物质,结果表明,C2、C3 烃类(乙烷、乙烯、乙炔、丙烷、丙烯)、C4 ~ C6 烷烃和苯系物含量较高,推测该站点受机动车和 LPG 影响较大[17,18]. 对比不同年份的结果发现,民运会期间乙炔和乙烷浓度显著低于同期, LPG 源和燃烧源的减排可能是主要原因; 此外苯系物和 C2、C3 烯烃的浓度相较同期也略有降低,可能归功于工业的管控[19].

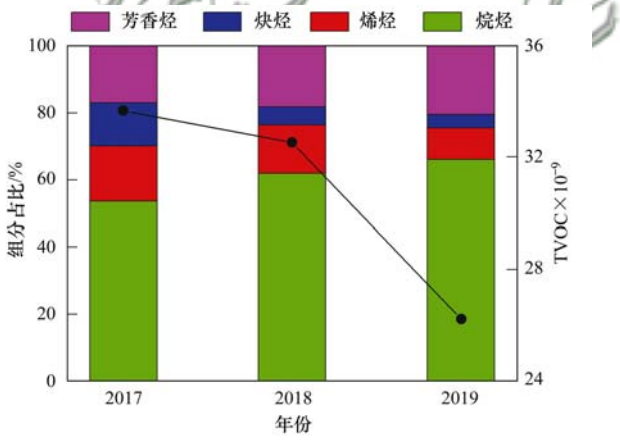

图 6 民运会管控期间及历史同期 VOCs 各组分浓度变化

Fig. 6 Mixing ratios of VOCs groups during the control period of the NTGEM and historic period

民运会期间 TVOC 以及烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃浓度的日变化如图 7 所示,可以看出,TVOC 体积分数表现出明显的双峰特征,上午 06:00 ~ 08:00 有一个高峰,最高体积分数达 31.94×10^{-9},晚上 22:00出现一个体积分数为 26.74×10^{-9}的小高峰. 从 VOCs 组分来看,烷烃与 TVOC 相似,也表现出明显的双峰特征,芳香烃变化趋势和烷烃是类似的,推断烷烃和芳香烃受机动车影响较为显著; 而烯烃变化趋势与 TVOC 是不同的,推测与日间生物源(异戊二烯)排放有关. C3 ~ C6 的烷烃主要与机动车排放有关,此外,燃料蒸发(汽油和柴油)还排放出大量的烷烃. 采样点位于市区,早交通高峰导致在 06:00

表 3　民运会管控期间及历史同期 VOCs 排名前 20 物质的比较

Table 3　Comparisons of the top twenty VOCs species during the control period of the NTGEM and the historic period

2017 年	体积分数 ×10^{-9}	2018 年	体积分数 ×10^{-9}	2019 年	体积分数 ×10^{-9}
乙烷	6. 19	乙烷	5. 56	乙烷	4. 26
乙炔	4. 34	异戊烷	3. 68	丙烷	3. 2
丙烷	3. 3	丙烷	3. 34	正丁烷	2. 11
乙烯	2. 79	正戊烷	1. 88	正戊烷	2. 08
正丁烷	2. 61	正丁烷	1. 84	异戊烷	1. 61
甲苯	1. 95	异戊二烯	1. 74	甲苯	1. 54
异戊烷	1. 42	乙炔	1. 73	异丁烷	1. 13
间/对-二甲苯	1. 05	乙烯	1. 61	乙炔	1. 06
苯	0. 87	甲苯	1. 5	间/对-二甲苯	1. 04
异丁烷	0. 83	间/对-二甲苯	1. 1	苯	1. 04
丙烯	0. 79	苯	0. 94	乙烯	0. 84
异戊二烯	0. 78	异丁烷	0. 86	3-甲基戊烷	0. 65
乙基苯	0. 59	乙基苯	0. 73	乙基苯	0. 59
正戊烷	0. 58	环戊烷	0. 58	丙烯	0. 48
正己烷	0. 42	丙烯	0. 48	异戊二烯	0. 37
邻-二甲苯	0. 39	对-二乙基苯	0. 41	环戊烷	0. 37
环戊烷	0. 3	正己烷	0. 37	邻-二甲苯	0. 33
正辛烷	0. 3	间-乙基甲苯	0. 36	正丙苯	0. 21
3-甲基戊烷	0. 26	邻-二甲苯	0. 35	苯乙烯	0. 2
苯乙烯	0. 24	3-甲基戊烷	0. 34	正庚烷	0. 17

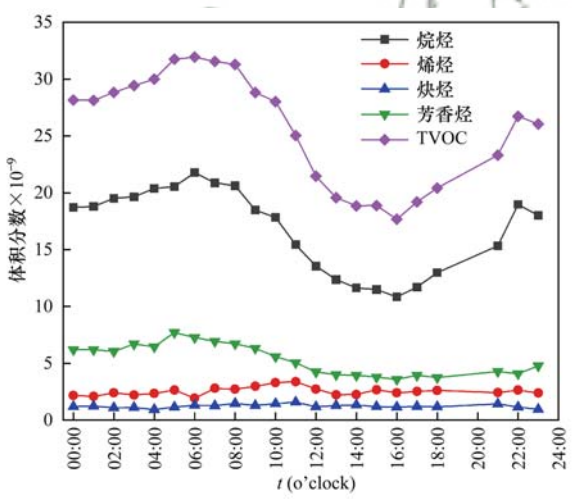

图 7　民运会期间 VOCs 体积分数日变化

Fig. 7　Diurnal variation of VOCs mixing ratios during the NTGEM period of 2019

~08:00 期间 TVOC 浓度达到高峰,之后,随着太阳辐射逐渐增强、环境温度升高和大气边界层高度升高,光化学反应和空气对流促进了 VOCs 的消耗和稀释,因此,TVOC 的浓度逐渐下降,在下午 16:00 左右达到最低,之后,随着光照逐渐减弱,TVOC 浓度逐渐上升,到交通晚高峰时段机动车排放了大量污染物,同时,由于晚上的温度相对白天较低,限制了蒸发排放,导致 TVOC 浓度在晚上 22:00 出现一个小高峰. 值得注意的是,TVOC 浓度整体上夜间高于白天,这是因为 VOCs 在白天主要与·OH反应而消耗,在夜间主要与 NO_3 自由基发生沉降反应而消耗,然而,NO_3 自由基的反应速率远低于·OH的反应速率,另外白天大气边界层高度较高,稀释作用较强,因此 TVOC 的浓度通常表现出夜大于昼的变化特征.

郑州市民运会管控期及同期 OFP 及组分占比情况如图 8 所示. 结果表明,观测期间内,郑州市近 3 年的 OFP 分别为 290. 0、307. 4 和 222. 5 μg·m^{-3},民运会管控期间 OFP 显著低于同期. 从 OFP 组分占比来看,烯烃占比呈现逐年降低的趋势,尤其是 2019 年民运会管控期间,烯烃的 OFP 降低显著. 需要指出的是,观测期间内,芳香烃的 OFP 贡献占比最高,民运会管控期间该组分的 OFP 占比甚至超过 50%,因此郑州市 VOCs 管控重点要放在活性组分芳香烃源的减排上. 从 OFP 贡献前 10 的物质上看(见表 4),不同年份优势物种较为一致,间/对-二甲苯、

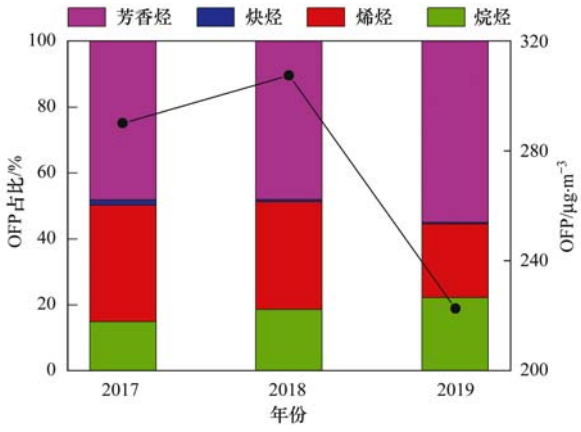

图 8　民运会管控期间及历史同期 VOCs 物种对 OFP 的贡献百分比

Fig. 8　Contribution of VOCs to OFP during the control period of the NTGEM and historic period

表 4 民运会管控期间与历史同期 VOCs 物种对 OFP 贡献排名前十的物质/μg·m^{-3}

Table 4 Top ten species contributed by VOCs to OFP in Zhengzhou during the control period of the NTGEM and historic period/μg·m^{-3}

2017 年	OFP	2018 年	OFP	2019 年	OFP
间/对-二甲苯	48.37	异戊二烯	56.18	间/对-二甲苯	48.08
甲苯	32.24	间/对-二甲苯	50.97	甲苯	25.46
乙烯	31.43	甲苯	24.83	异戊二烯	12.03
异戊二烯	25.05	乙烯	18.19	邻-二甲苯	11.85
丙烯	17.39	异戊烷	17.13	丙烯	10.54
邻-二甲苯	14.23	间-乙基甲苯	14.17	乙烯	9.49
乙基苯	8.54	邻-二甲苯	12.54	正戊烷	8.8
正丁烷	7.78	对-二乙基苯	10.93	乙基苯	8.43
异戊烷	6.64	丙烯	10.53	异戊烷	7.49
顺式-2-丁烯	6.4	乙基苯	10.44	正丁烷	6.3

邻-二甲苯、甲苯和 C4、C5 烷烃对 OFP 贡献较大,通过对机动车源的控制,可有效降低臭氧生成潜势[16]. 此外乙烯和丙烯的 OFP 贡献占比也较大,这些物质是工业排放的示踪物,通过对工业源的减排,也可有效缓解郑州市臭氧污染程度[20].

2.3.2 来源解析

利用正交矩阵因子模型(PMF)对 2017 ~ 2019 年 8 月 25 ~ 9 月 20 日郑州市 VOCs 进行来源解析. 选定 31 种具有代表性的 VOCs 物种,经过解析得到 6 个主要污染源(图 9).

第 1 个因子中贡献率高的污染物以 C3 ~ C6 烷烃(正丁烷、异丁烷、正戊烷、环戊烷、异戊烷、2,2-二甲基丁烷、3-甲基戊烷)和一定的芳香烃(苯、甲苯)为主,这些碳氢化合物是机动车尾气排放的示踪物质[21]. 正戊烷和异戊烷来自未完全燃烧的汽油,异戊烷是典型的汽油挥发示踪剂;正丁烷及异丁烷来自汽油挥发. 所以,因子 1 确定为机动车尾气排放源[15,16].

因子 2 中乙烷、乙烯、丙烷、丙烯、正丁烷和异丁烷等 VOCs 贡献率较高,这些物质是液化石油气燃料消耗的示踪剂[19,22],并且乙烷同乙炔和异丁烷均未有明显相关性(这二者是燃烧的重要标志物),液化石油气是郑州市的家庭烹饪燃料,此外液化石油气车辆在郑州市也有一定的使用. 因此,因子 2 可以

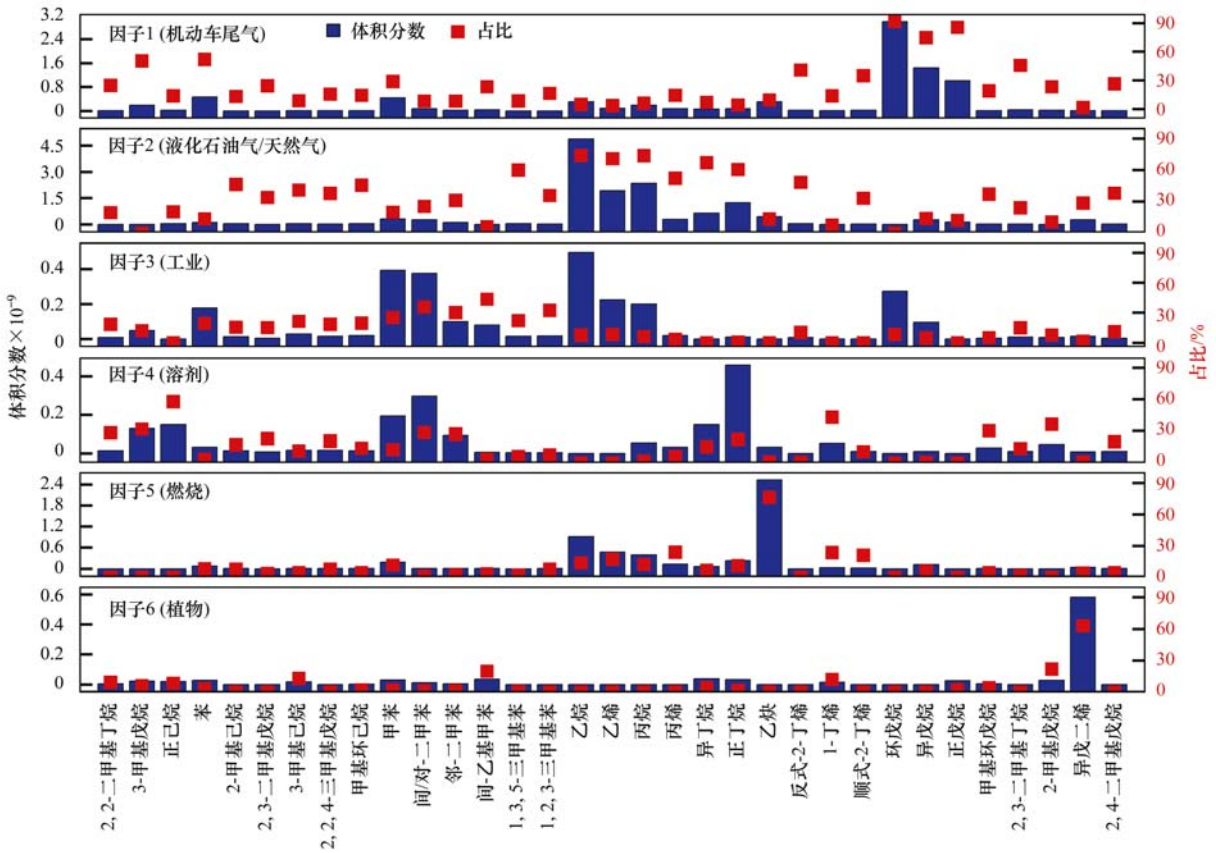

图 9 各因子中 VOCs 物种浓度及对各因子的贡献

Fig. 9 Concentrations and contributions of VOCs species for each factor

确定为为天然气/LPG 源[17,23].

第 3 个因子主要物种苯、甲苯、乙苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯、间-乙基甲苯和 1,2,3-三甲基苯等芳香烃,BTEX 是从工业相关来源释放出来的,是工业工艺过程典型排放物[24,25]. 此外还含有 C2、C3 的烯烃(乙烯和丙烯)等,有研究指出这两种物质主要来自于工业排放[19,26]. 因此,因子 3 被识别为工业过程排放源.

因子 4 贡献率较高的物种主要是正己烷和苯系物(甲苯、乙苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯). 其中正己烷是溶剂使用源排放的特征物种[27],甲苯、乙苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯是有机溶剂的主要成分[28,29],并且甲苯是制鞋、家具、粘合剂和印刷等行业的一种重要溶剂[20,30,31]. 此外,因子 4 中苯贡献率较低,由于苯的毒性较大,很少用作溶剂[32]. 因此,因子 4 可认为是溶剂使用源.

因子 5 的特征污染物以乙炔为主,贡献率分别为 76%,这是典型的燃烧排放物种. 该因子内还包括一些低碳物质(乙烷、乙烯、丙烯和丙烷)、苯和甲苯. 燃烧源的确定主要是由乙烯和乙炔的高权重和一定的苯系物影响决定[20,22]. 故将其定义为生物质和燃煤燃烧源.

因子 6 中异戊二烯含量较高,占比高达 63%,其余物质在该因子中含量较低,有研究表明[23,33,34],异戊二烯是天然源的示踪物,因此定义为植物排放.

VOCs 源解析结果如图 10 所示. 机动车为该地区监测期间最大贡献源,且呈现逐年增长的趋势,到 2019 年民运会期间贡献率为 28%,这可能与郑州市逐年增长的汽车保有量有关; 此外,管控期间并未对民用汽车采取管控措施,导致机动车成为民运会管控期间 VOCs 最主要的来源. 民运会管控期间,

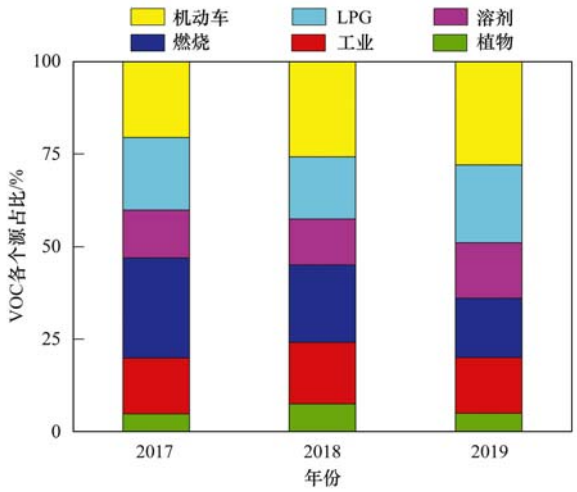

图 10　民运会管控期间及历史同期 VOCs 来源组成百分比

Fig. 10　Contribution of various emission sources to VOCs during the control period of the NTGEM and historic period

LPG 贡献率(21%)仅次于机动车尾气源,采样点周围密集的居民区可能是该源的潜在来源. 需要指出的是,管控期间燃烧源(16%)和工业源(15%)较历史同期呈现降低趋势,说明政府采取的管控措施取得一定成效; 而溶剂使用源的占比反而略有上升(15%),需加强对该源的监管力度.

3　结论

(1)2019 年 8 月 25 日至 9 月 20 日民运会空气质量保障期间,郑州市 $PM_{2.5}$、PM_{10}、SO_2 和 NO_2 浓度分别 28.2、58.8、4.2 和 31.4 $\mu g \cdot m^{-3}$,相较去年同期分别降低 16.2%、25.1%、45.5% 和 31.3%; 臭氧最大 8 h 均值相较上年仅降低 3.7%,且以臭氧为首要污染物的天数超过九成. 在减排的大背景下,空气质量得到改善,但臭氧污染依旧严峻.

(2)民运会期间 PAMS 为 26.21×10^{-9},低于历史同期(2017 年为 33.68×10^{-9}, 2018 年为 32.53×10^{-9}),说明民运会管控取得一定成效; OFP 仅为 222.5 $\mu g \cdot m^{-3}$,同样低于历史同期水平. 民运会管控期间,芳香烃的 OFP 贡献占比最高(超过 50%),因此郑州市 VOCs 管控重点要放在活性组分芳香烃源的减排上,可有效降低臭氧生成潜势.

(3)民运会期间,郑州市 VOCs 主要来源依次为:机动车尾气(28%)、LPG(21%)、燃烧(16%)、工业(15%)、溶剂(15%)和植物排放(5%); 相较历史同期,燃烧源和工业的浓度降幅显著.

参考文献:

[1] Wang Y, Hao J, McElroy M B, *et al*. Ozone air quality during the 2008 Beijing Olympics: effectiveness of emission restrictions [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, **9**(14): 5237-5251.

[2] 赵辉, 郑有飞, 魏莉, 等. G20 峰会期间杭州及周边地区空气质量的演变与评估[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(6): 2016-2024.
Zhao H, Zheng Y F, Wei L, *et al*. Evolution and evaluation of air quality in Hangzhou and its surrounding area during the G20 summit[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(6): 2016-2024.

[3] 王占山, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年 APEC 会议期间北京市空气质量分析[J]. 环境科学学报, 2016, **36**(2): 675-683.
Wang Z S, Li Y T, Zhang D W, *et al*. Analysis on air quality in Beijing during the 2014 APEC conference[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, **36**(2): 675-683.

[4] Li K, Li J L, Wang W G, *et al*. Evaluating the effectiveness of joint emission control policies on the reduction of ambient VOCs: implications from observation during the 2014 APEC summit in suburban Beijing[J]. Atmospheric Environment, 2017, **164**: 117-127.

[5] 庄壹, 成春雷, 翁翔, 等. 减排管控期厦门市大气中挥发性有机物浓度变化特征及来源分析[J]. 分析化学, 2019, **47**(6): 890-898.

Zhuang Y, Cheng C L, Weng X, *et al*. Characteristics and source apportionment of atmospheric volatile organic compounds during emission control period in Xiamen[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2019, **47**(6): 890-898.

[6] 任义君, 马双良, 王思维, 等. 郑州市春季大气污染过程 VOCs 特征、臭氧生成潜势及源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(6):2577-2585.
Ren Y J, Ma S L, Wang S W, *et al*. Ambient VOCs characteristics, ozone formation potential and sources apportionment of air pollution in spring of Zhengzhou [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6):2577-2585.

[7] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].

[8] HJ 633-2012, 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[S].

[9] Blanchard C L, Lurmann F W, Roth P M, *et al*. The use of ambient data to corroborate analyses of ozone control strategies [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(3): 369-381.

[10] Al-Dabbous A N, Kumar P. Source apportionment of airborne nanoparticles in a Middle Eastern city using positive matrix factorization[J]. Environmental Science: Processes & Impacts, 2015, **17**(4): 802-812.

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

[12] Ramadan Z, Song X H, Hopke P K. Identification of sources of Phoenix aerosol by positive matrix factorization[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, **50**(8): 1308-1320.

[13] He Z R, Wang X M, Ling Z H, *et al*. Contributions of different anthropogenic volatile organic compound sources to ozone formation at a receptor site in the Pearl River Delta region and its policy implications [J]. Atmospheric chemistry and Physics, 2019, **19**(13): 8801-8816.

[14] Li K W, Chen L H, Ying F, *et al*. Meteorological and chemical impacts on ozone formation: a case study in Hangzhou, China [J]. Atmospheric Research, 2017, **196**: 40-52.

[15] 于世杰, 尹沙沙, 张瑞芹, 等. 郑州市近地面臭氧污染特征及气象因素分析[J]. 中国环境监测, 2017, **33**(4): 140-149.
Yu S J, Yin S S, Zhang R Q, *et al*. Analysis on the characteristics of surface ozone pollution and meteorological factors in Zhengzhou[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, **33**(4): 140-149.

[16] Zhang H F, Hu J, Qi Y X, *et al*. Emission characterization, environmental impact, and control measure of $PM_{2.5}$ emitted from agricultural crop residue burning in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, **149**: 629-635.

[17] Li J, Xie S D, Zeng L M, *et al*. Characterization of ambient volatile organic compounds and their sources in Beijing, before, during, and after Asia-Pacific Economic Cooperation China 2014 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(14): 7945-7959.

[18] 司雷霆, 王浩, 李洋, 等. 太原市夏季大气 VOCs 污染特征及臭氧生成潜势[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(9): 3655-3662.
Si L T, Wang H, Li Y, *et al*. Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in summer in Taiyuan[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(9): 3655-3662.

[19] Liu B S, Liang D N, Yang J M, *et al*. Characterization and source apportionment of volatile organic compounds based on 1-year of observational data in Tianjin, China[J]. Environmental Pollution, 2016, **218**: 757-769.

[20] Wu F K, Yu Y, Sun J, *et al*. Characteristics, source apportionment and reactivity of ambient volatile organic compounds at Dinghu Mountain in Guangdong Province, China [J]. Science of the Total Environment, 2016, **548-549**: 347-359.

[21] 高爽, 张坤, 高松, 等. 上海城郊地区冬季霾污染事件反应性 VOCs 物种特征[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 855-866.
Gao S, Zhang K, Gao S, *et al*. Characteristics of reactive VOCs species during high haze-pollution events in suburban area of Shanghai in winter[J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 855-866.

[22] Zhu H L, Wang H L, Jing S G, *et al*. Characteristics and sources of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) along the mid-lower Yangtze River in China [J]. Atmospheric Environment, 2018, **190**: 232-240.

[23] 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 等. 晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2018, **39**(9): 4042-4050.
Yang F, Yan Y L, Ge Y F, *et al*. Characteristics and source apportionment of ambient volatile organic compounds in winter in Jincheng[J]. Environmental Science, 2018, **39**(9): 4042-4050.

[24] Guo H, Cheng H R, Ling Z H, *et al*. Which emission sources are responsible for the volatile organic compounds in the atmosphere of Pearl River Delta? [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **188**(1-3): 116-124.

[25] Zhang X F, Yin Y Y, Wen J H, *et al*. Characteristics, reactivity and source apportionment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in a typical tourist city[J]. Atmospheric Environment, 2019, **215**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116898.

[26] Xia L, Cai C J, Zhu B, *et al*. Source apportionment of VOCs in a suburb of Nanjing, China, in autumn and winter[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2014, **71**(3): 175-193.

[27] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国涂料应用过程挥发性有机物的排放计算及未来发展趋势预测[J]. 环境科学, 2009, **30**(10): 2809-2815.
Wei W, Wang S X, Hao J M. Estimation and forecast of volatile organic Compounds emitted from paint uses in China [J]. Environmental Science, 2009, **30**(10): 2809-2815.

[28] Brocco D, Fratarcangeli R, Lepore L, *et al*. Determination of aromatic hydrocarbons in urban air of rome[J]. Atmospheric Environment, 1997, **31**(4): 557-566.

[29] Guo H, Wang T, Louie P K K. Source apportionment of ambient non-methane hydrocarbons in Hong Kong: application of a principal component analysis/absolute principal component scores (PCA/APCS) receptor model [J]. Environmental Pollution, 2004, **129**(3): 489-498.

[30] 何坚, 陈华宣, 刘新霞, 等. 中山市工业企业使用的有机溶剂挥发性成分调查分析[J]. 华南预防医学, 2002, **28**(6): 26-27.
He J, Chen H X, Liu X X, *et al*. Survey an volatile component in organic solvent used in industry enterprises in Zhongshan[J]. South China Journal of Preventive Medicine, 2002, **28**(6): 26-27.

[31] Liu Y, Shao M, Fu L L, *et al*. Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: Part I[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(25): 6247-6260.

[32] 俞发荣, 李登楼, 谢明仁. 苯污染对人类健康影响研究进展[J]. 生态科学, 2016, **35**(2): 195-199.

Yu F R, Li D L, Xie M R. Research progress on effects of benzene pollution on human health[J]. Ecological Science, 2016, **35**(2): 195-199.

[33] Shao P, An J L, Xin J Y, *et al*. Source apportionment of VOCs and the contribution to photochemical ozone formation during summer in the typical industrial area in the Yangtze River Delta, China[J]. Atmospheric Research, 2016, **176-177**: 64-74.

[34] 张璘, 张祥志, 秦玮, 等. G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2718-2727.
Zhang L, Zhang X Z, Qin W, *et al*. VOCs characteristics and sources apportionment in Yixing city during the G20 summit[J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2718-2727.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www. hjkx. ac. cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等,科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目. 图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1,1. 1,1. 1. 1 的形式,左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者. 书名[M]. 出版地:出版社,年. 起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In):编者. 文集名[C]. 出版地:出版社(单位),年. 起页-止页.

学位论文:作者. 论文名[D]. 保存地:保存单位,年份.

报告:作者. 论文名[R]. 出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等. 编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:hjkx@ rcees. ac. cn;网址:www. hjkx. ac. cn

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 41 No. 10

Oct. 15, 2020

CONTENTS

Analysis of Pollution Characteristics and Primary, Secondary Contributions of Firework Burnings in Qingdao During the Spring Festival ····· FANG Tian-ge, YAO Xiao-hong, MENG He, *et al.* (4345)

Characterization and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ Based on the Online Observation in Tianjin ····· XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Li-wei, *et al.* (4355)

Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in $PM_{2.5}$ in Beijing During 2017-2018 ····· LI Huan, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, *et al.* (4364)

Characteristics of Carbonaceous Species in $PM_{2.5}$ in Southern Beijing ····· DONG Gui-ming, TANG Gui-qian, ZHANG Jun-ke, *et al.* (4374)

Characteristics and Formation Mechanism of Three Haze Pollution Processes in Chengdu in Winter ····· FENG Xiao-qiong, CHEN Jun-hui, YIN Han-mei, *et al.* (4382)

Distribution Characteristics and Source of Black Carbon Aerosols in the Northern Suburbs of Nanjing ····· XIE Feng, LIN Yu-chi, SONG Wen-huai, *et al.* (4392)

Assessment of Emergency Emission Reduction Effect During the Heavy Air Pollution Episodes in Beijing, Tianjin, Hebei, and Its Surrounding Area("2+26" Cities) from October to December 2019 ····· ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, WANG Wei, *et al.* (4402)

Variational Trend and Characteristics of Air Pollution in Baoding City ····· GOU Yin-yin, ZHANG Kai, LI Jin-juan, *et al.* (4413)

Emission Inventory of VOCs Components in Zhengzhou and Their Ozone Formation Potential ····· LU Xuan, ZHANG Rui-qin, HAN Luo-kai (4426)

Evolution and Evaluation of O_3 and VOCs in Zhengzhou During the National Traditional Games of Ethnic Minorities Period ····· ZHAO Jin-shuai, YU Shi-jie, WANG Nan, *et al.* (4436)

Characteristics of Volatile Organic Compounds in Wood Coatings and Automotive Coatings in China ····· KE Yun-ting, SUN Yu-hang, CHENG Hai-rong, *et al.* (4446)

Influence of Typical Desulfurization Process on Flue Gas Particulate Matter of Coal-fired Boilers ····· ZHANG Jin-sheng, WU Jian-hui, LÜ Rui-he, *et al.* (4455)

Investigation on the Emission Difference of Air Pollutants from Common Residential Coal Stoves and Suggestions for Emission Reduction ····· ZHANG Yi-chen, XUE Chen-li, LIU Jie, *et al.* (4462)

Mobile Source Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Tianjin in 2017 ····· LIU Geng, SUN Shi-da, SUN Lu-na, *et al.* (4470)

Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollution Sources Based on Second Pollution Source Census Data in Sichuan Province ····· XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, LI Yuan, *et al.* (4482)

Preliminary Screening for the Urban Forest Against Combined Air Pollution ····· LI Pin, WEI Yan-yan, FENG Zhao-zhong (4495)

Spatial Distribution and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Plant Leaves in Baoji City ····· ZHANG Jun, LIANG Qing-fang, GAO Yu (4504)

Distribution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Surface Water and Aquatic Organisms in Chaoshan Coastal Area along the South China Sea ····· XIU Cuo, WANG Chen-chen, LÜ Yong-long, *et al.* (4514)

Spatiotemporal Differentiation and Degradation Analysis of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments of Shanmei Reservoir and Its Inflowing River, Quanzhou, China ····· HAN Wen-liang, LIU Yu, FENG Kai-wen (4525)

Spatial-temporal Variations and the Regulators of Nitrate Status in Shallow Groundwater of the Typical Mountainous Agricultural Watershed in the Upper Reaches of the Yangtze River ····· JIANG Nan, ZHOU Ming-hua, LI Hong, *et al.* (4539)

Emission Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Typical Agricultural Small Watershed in Tuojiang River Basin ····· WANG Hong, XU Ya-ling, ZHANG Qi, *et al.* (4547)

Assessment of Potential Risk of Diffuse Pollution in Haihe River Basin Based Using DPeRS Model ····· FENG Ai-ping, WANG Xue-lei, XU Yi, *et al.* (4555)

Impact of Spatial Heterogeneity of Precipitation on the Area Change in Critical Source Area of Non-point Sources Pollution ····· GAO Xiao-xi, ZUO De-peng, MA Guang-wen, *et al.* (4564)

Sedimentary Diatom Records Reveal the Succession of Ecosystem in Lake Xihu, Dali over the Past 50 Years ····· ZHANG Chen-xue, XU Min, DONG Yi-fan, *et al.* (4572)

Content and Distribution of Cadmium in Soil and Fluvial Sediments in the Sea-Land Interaction Zone ····· WANG Fang-ting, CHEN Zhi-hua, BAO Ke, *et al.* (4581)

Occurrence Characteristics and Quality Estimation of Microplastics in Drainage Ditches in Hetao Irrigation District of Inner Mongolia ····· WANG Zhi-chao, YANG Fan, YANG Wen-huan, *et al.* (4590)

Influence of Pervious/Impervious Pattern on Runoff and Pollution in Parcel-based Catchment ····· JIANG Zhi-hui, LIAO Yun-jie, XIE Wen-xia, *et al.* (4599)

Activating Efficiency of Iron-copper Bimetallic Organic Framework MIL-101(Fe,Cu) Toward H_2O_2 for Degradation of Dyes ····· LIANG He, LIU Rui-ping, AN Xiao-qiang, *et al.* (4607)

Synergistic Reaction Mechanism of $Cu^0@Fe_3O_4$ Activated PMS for Degradation of *p*-nitrophenol ····· SHI Qing-qing, PU Sheng-yan, YANG Xi (4615)

Kinetics and Mechanism of Sucralose Degradation in Water Using UV-activated Persulfate Process ····· YU Yun, LU Jin-xin, LÜ Zhen, *et al.* (4626)

Microbial Community Structure for Sewage Wastewater Treatment Plants in Winter ····· SHANG Yue-fei, WANG Shen, ZONG Ni, *et al.* (4636)

Microbial Community Analysis of Different DN and PN-ANAMMOX Coupling Modes for Mature Landfill Leachate Treatment ····· LU Ming-yu, LI Xiang, HUANG Yong, *et al.* (4644)

Analysis of Rapid Start-up and Mixed Nutritional Nitrogen Removal Performance of Complete Autotrophic Granular Sludge ····· QI Ze-kun, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, *et al.* (4653)

Long-term Stability of Aerobic Granular Sludge Under Low Carbon to Nitrogen Ratio ····· YUAN Qiang-jun, ZHANG Hong-xing, CHEN Fang-yuan (4661)

Response of Bacterial and Fungal Communities to Chemical Fertilizer Reduction Combined with Organic Fertilizer and Straw in Fluvo-aquic Soil ····· WU Xian, WANG Rui, HU He, *et al.* (4669)

Characteristics of Soil Nutrients and Fungal Community Composition in Crop Rhizosphere Under Different Rotation Patterns ····· SUN Qian, WU Hong-liang, CHEN Fu, *et al.* (4682)

Effects of Short-term Application of Moutai-flavor Vinasse Biochar on Nitrogen Availability and Bacterial Community Structure Diversity in Yellow Soil of Guizhou Province ····· ZHANG Meng, LIU Yan-ling, WEI Quan-quan, *et al.* (4690)

Effects of Different Rotation Patterns of Oil-Rice on Methane and Nitrous Oxide Emissions in Rice Fields ····· CHEN You-de, ZHAO Yang, GAO Du-juan, *et al.* (4701)

Bacillus amyloliquefaciens Biofertilizer Mitigating Soil Ammonia Volatilization ····· YANG Ya-hong, XUE Li-xia, SUN Bo, *et al.* (4711)

Effects of Exogenous Phosphorus on Rice Growth and Cadmium Accumulation and Transportation Under Cadmium Stress ····· HUO Yang, QIU Yin-yan, ZHOU Hang, *et al.* (4719)

Key Stage of As Accumulation in Rice Under As Stress at Different Growth Stages ····· DENG Peng-hui, CAI Ya-qin, ZHOU Hang, *et al.* (4726)

Heavy Metal Contamination and Health Risk Assessment of Corn Grains from a Pb-Zn Mining Area ····· ZHOU Yan, WAN Jin-zhong, LI Qun, *et al.* (4733)

Polybrominated Diphenyl Ether in E-waste Dismantling Sites in Taizhou City, Zhejiang Province: Concentration, Distribution, and Migration Trend ····· WEI Bao-kai, LIU Chen, WANG Ying, *et al.* (4740)

Assessment and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils in Southern Youyang County, Chongqing ····· WANG Rui, DENG Hai, YAN Ming-shu, *et al.* (4749)

Ecological Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Livestock Manure and Vegetable Soil of Chongqing ····· PENG Qiu, WANG Wei-zhong, XU Wei-hong (4757)