

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

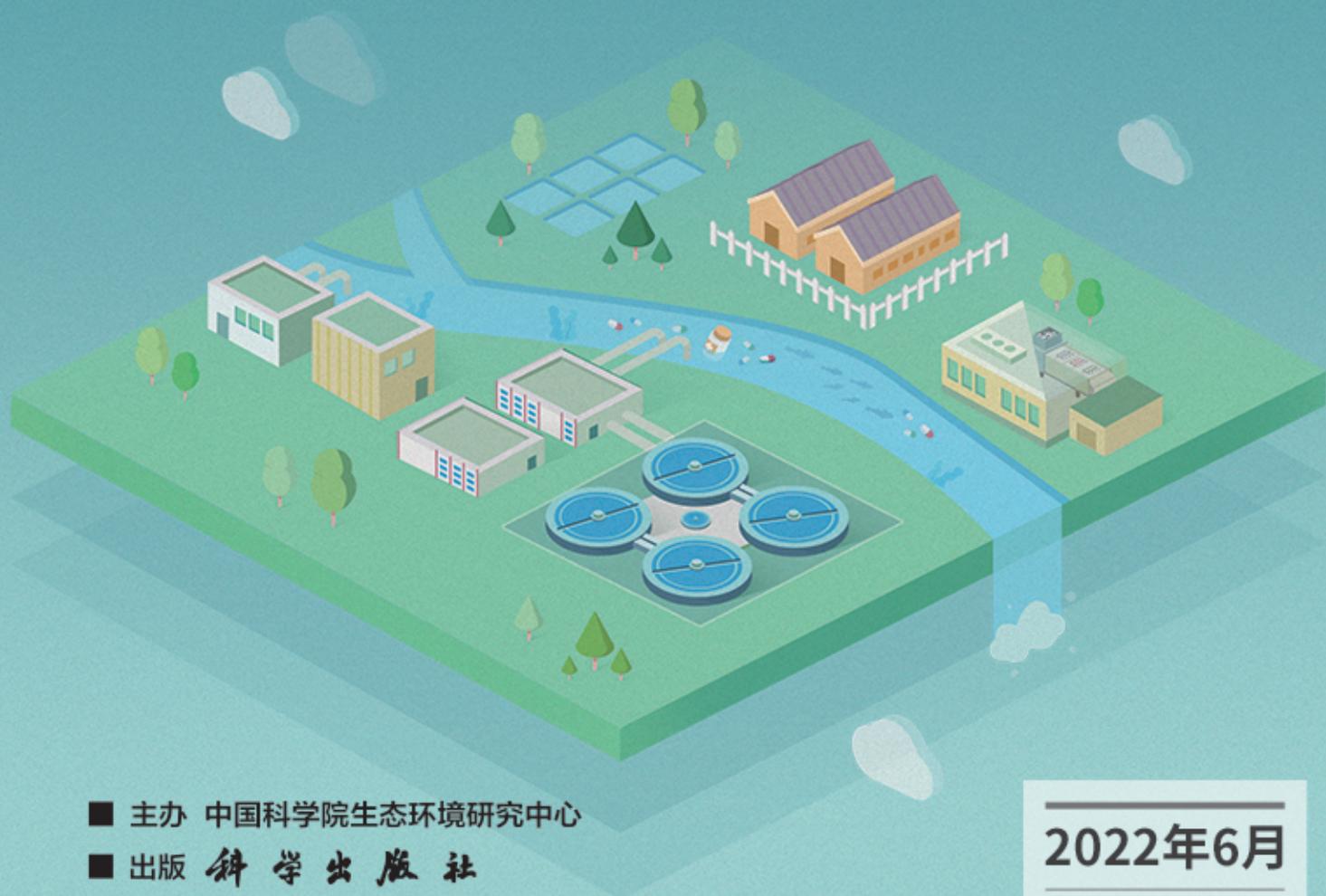
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价

武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年6月

第43卷 第6期

Vol.43 No.6

目次

COVID-19 管控期间气象条件变化对京津冀 PM<sub>2.5</sub> 浓度影响 ..... 邱雨露, 陈磊, 朱佳, 马志强, 李梓铭, 郭恒, 唐颖潇 (2831)

新冠疫情管控措施对郑州市 PM<sub>2.5</sub> 浓度、粒径分布、组分和来源的影响 ..... 黄兵, 王申博, 和兵, 薛若雨, 高更宇, 张瑞芹 (2840)

COVID-19 管控期间苏州市 PM<sub>2.5</sub> 中金属元素浓度变化及来源解析 ..... 缪青, 杨倩, 吴也正, 魏恒, 周民锋, 张晓华, 邹强 (2851)

2015 ~ 2019 年南京北郊碳质气溶胶组成变化 ..... 谢添, 曹芳, 章炎麟, 林煜棋, 范美益, 宋文怀, 鲍孟盈, 项妍琨, 赵祝钰, 杨笑影, 谢锋, 张煜炯, 俞浩然, 张子金, 邢佳莉 (2858)

基于受体和化学传输的综合模型解析重庆 PM<sub>2.5</sub> 来源 ..... 彭超, 李振亮, 曹云擎, 蒲茜, 方维凯, 王晓宸, 汪凌韬 (2867)

保定市冬季 PM<sub>2.5</sub> 的氧化潜势特征及其影响来源分析 ..... 吴继炎, 杨池, 张春燕, 范美益, 吴爱坪, 章炎麟 (2878)

南京江北新区 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性有机氮的污染特征及其来源 ..... 关璐, 丁铨, 张毓秀, 胡建林, 于兴娜 (2888)

广西十万大山背景点 PM<sub>2.5</sub> 中非极性有机气溶胶组成及来源解析 ..... 邢佳莉, 曹芳, 王谦, 张煜炯, 章炎麟 (2895)

大气多环芳烃区域迁移转化模型比较与关键影响因素: 以京津冀地区为例 ..... 张馨露, 刘世杰, 韩美丽, 苏超, 张志鹏, 马琳琳, 李洋, 程苗苗 (2906)

基于过程分析的京津冀区域典型城市臭氧成因 ..... 唐颖潇, 姚青, 蔡子颖, 丁净, 樊文雁, 杨旭, 韩素芹 (2917)

天津市 PM<sub>2.5</sub>-O<sub>3</sub> 复合污染特征及气象影响分析 ..... 肖致美, 李源, 孔君, 李鹏, 蔡子颖, 高璟, 徐虹, 戴运峰, 邓小文 (2928)

2016 ~ 2020 年山东省空气质量时空分布特征及影响因素分析 ..... 周梦鸽, 杨依, 孙媛, 张凤英, 李永华 (2937)

河南省臭氧污染趋势特征及敏感性变化 ..... 晏洋洋, 尹沙沙, 何秦, 秦凯, 张瑞芹 (2947)

热带气旋对珠三角秋季臭氧污染的影响 ..... 赵伟, 吕梦瑶, 卢清, 高博, 梁小明, 刘明, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳 (2957)

武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源 ..... 苏维峰, 孔少飞, 郑煌, 陈楠, 祝波, 全继宏, 祁士华 (2966)

运城市区夏季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 ..... 温肖宇, 赵文婷, 罗淑贞, 张强, 王姝涛, 马俊杰, 刘新罡 (2979)

我国地表水新烟碱类杀虫剂对水生生物安全的威胁 ..... 范丹丹, 刘红玲, 杨柳燕 (2987)

长江中游典型饮用水水源中药物的时空分布及风险评价 ..... 武俊梅, 魏琳, 彭晶倩, 何鹏, 施鸿媛, 汤冬梅, 吴振斌 (2996)

内蒙古东北部地区地下-地表饮用水源多环芳烃污染特征与风险 ..... 张坤峰, 昌盛, 付青, 樊月婷, 王思璐, 孙兴滨, 王山军 (3005)

不同尺度土地利用方式对地表水环境质量的影响及驱动机制 ..... 宋静雯, 张学霞, 姜东旸, 赵丞豪, 李鹏飞 (3016)

高原湖泊周边浅层地下水: 氮素时空分布及驱动因素 ..... 李桂芳, 杨恒, 叶远行, 陈清飞, 崔景阳, 陈安强, 张丹 (3027)

青海湖沉积物重金属分布及其潜在生态风险分析 ..... 张雅然, 车霏霏, 付正辉, 许野, 李薇 (3037)

东江湖表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评价 ..... 赵晓亮, 李响, 卢洪斌, 卢少勇, 王涛, 张森霖, 国晓春, 张静, 弥启欣, 刘晓贺, 宋书峰 (3048)

湖泊沉积物有机磷释放动力学特征及水质风险 ..... 刘哲哲, 倪兆奎, 刘思儒, 李晓秀, 王圣瑞 (3058)

长三角一体化示范区青浦区水体表层沉积物有机质分布特征、来源解析及污染评价 ..... 张智博, 段艳平, 涂耀仁, 罗鹏程, 高峻 (3066)

香溪河流域微塑料的分布特征及其迁移规律分析 ..... 陈圣盛, 李卫明, 张坤, 熊伟唯, 张续同, 刘子健 (3077)

城市水体微塑料垂向分布下附着细菌群落结构和功能响应 ..... 陈玉芳, 闫振华, 张燕, 赵海洲 (3088)

2015 ~ 2020 年洪泽湖浮游植物群落结构及其环境影响因子 ..... 屈宁, 邓建明, 张祯, 蔡永久, 龚志军, 李明 (3097)

嘉兴南湖不同湖区浮游植物群落结构特征与环境因子关系 ..... 王雅雯, 李迎鹤, 张博, 郭云艳, 陈俊伊, 韩松 (3106)

近 20 年来广东省农业面源污染负荷时空变化与来源分析 ..... 葛小君, 黄斌, 袁再健, 王栋栋, 王泉泉, 陈佳村, 谢真越 (3118)

长江上游平原丘陵区农业非点源污染输出特征和驱动机制 ..... 谭少军, 刘洋, 朱小婕, 刘荷, 邵景安, 邓华 (3128)

高分辨率数据驱动的流域非点源污染输出风险评估方法 ..... 顾晶晶, 冶涛涛, 董甲平, 蒋钟钟, 曹引, 赵红莉 (3140)

不同面源强度影响下城市河流溶解性有机质光谱特征变化 ..... 陈旭东, 高良敏 (3149)

生态沟渠-生物滞留池组合控制农村径流污染 ..... 石雷, 杨小丽, 吴青宇, 王亦铭, 徐佳莹 (3160)

不同水力扰动强度对老化 PSMPs 在泥水两相间迁移的影响 ..... 吴香香, 艾萍, 李大鹏 (3168)

北京市中心城区屋面径流污染特征及来源分析 ..... 席玥, 郭婧, 陶蕾, 田颖, 陈吉吉, 吴悦, 徐苏士, 荆红卫, 刘保献 (3177)

不同植被绿色屋顶径流水质年际变化特征 ..... 章孙逊, 张守红, 葛德, 闫婧, 杨航, 王任重远, 魏良怡, 张成玉 (3187)

可见光促有机物诱导铁还原的多相类芬顿体系强化效能与机制 ..... 曹丝雨, 许路, 付权超, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3195)

4 种典型抗生素在反硝化体系中的去除特性 ..... 唐佳, 陈茜, 覃牧川, 唐溪, 唐崇俭 (3204)

农业废弃物基生物炭对水溶液中镉的吸附效果与机制 ..... 龚沛云, 孙丽娟, 宋科, 孙雅菲, 秦秦, 周斌, 薛永 (3211)

腐殖酸-重金属对 ANAMMOX 菌脱氮性能的影响及其动力学分析 ..... 李芸, 崔楠, 熊星星, 黄志远, 李泽兵, 王东亮, 李朝明, 许丹, 李军 (3221)

2000 ~ 2020 年西南地区植被 NDVI 对气候变化和人类活动响应特征 ..... 徐勇, 黄雯婷, 窦世卿, 郭振东, 李欣怡, 郑志威, 靖娟利 (3230)

黄河三角洲湿地不同植被类型下土壤营养元素空间分布及其生态化学计量学特征 ..... 孙德斌, 栗云召, 于君宝, 杨继松, 杜朝红, 孙丹丹, 凌越, 马元庆, 周迪, 王雪宏, 赵佳怡 (3241)

青藏高原东北部地区表层土壤中全氟化合物的分布特征及来源解析 ..... 温祥洁, 陈朝辉, 徐维新, 吴小娟, 郝云庆, 刘伟, 印红玲, 方淑红 (3253)

西南典型“退耕还林”区土地利用/覆被变化对土壤中硒及重金属含量的影响 ..... 刘永林, 刘属灵, 吴梅, 田兴鑫, 刘双燕 (3262)

贵州普定喀斯特关键带土壤重金属形态特征及风险评价 ..... 张倩, 韩贵琳 (3269)

南丹盆地东部山区土壤锆分布特征及其影响因素分析 ..... 董秋瑶, 赖书雅, 宋超, 温皓天, 严明疆, 杨振京 (3278)

神农架川金丝猴栖息地重金属污染特征及风险评价 ..... 严佳莉, 于紫玲, 余辉亮, 向明灯, 王传华 (3288)

石灰海泡石钝化后两种轮作模式对重度镉污染农田土壤的利用及修复 ..... 许璐, 周春海, 刘梅, 孔辉, 李元, 黄志红 (3299)

水稻磷盈亏对镉吸收转运的影响 ..... 谭文韬, 霍洋, 周航, 仇银燕, 曾鹏, 辜娇峰, 廖柏寒 (3308)

改良剂调控下水稻镉累积和土壤溶解性有机质光谱特征的响应 ..... 罗会龙, 陈娟, 张云慧, 袁贝, 杨宾, 张昊, 杜平 (3315)

土壤真菌群落对五台山亚高山草甸退化的响应 ..... 罗正明, 赫磊, 刘晋仙, 胡砚秋, 周妍英, 郑庆荣, 柴宝峰 (3328)

小麦与不同作物多样化轮作对土壤真菌群落的影响 ..... 靳海洋, 岳俊芹, 闫雅倩, 张德奇, 杨程, 张素瑜, 李向东, 邵运辉, 方保停, 王汉芳, 秦峰 (3338)

重庆农田土壤有机碳稳定性同位素空间分布特征 ..... 廖宇琴, 龙娟, 木志坚, 文首鑫, 李翠莲, 杨志敏, 赵秀兰 (3348)

长江三角洲 2018 年土壤 NO 排放特征 ..... 廖加强, 薛金, 王文锦, 朱永慧, 朱安生, 黄凌, 王杨君, 李莉 (3357)

基于多源数据的城市扩张中热环境演变及响应 ..... 梁建设, 白永平, 杨雪菡, 高祖桥, 李玲蔚, 张春悦, 王倩 (3365)

《环境科学》征订启事 (3004) 《环境科学》征稿简则 (3047) 信息 (3252, 3298, 3327)

# 武汉市夏季大气挥发性有机物实时组成及来源

苏维峰<sup>1</sup>, 孔少飞<sup>1,2\*</sup>, 郑煌<sup>1,2</sup>, 陈楠<sup>2,3</sup>, 祝波<sup>2,3</sup>, 全继宏<sup>2,3</sup>, 祁士华<sup>1,2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430078; 2. 湖北省大气复合污染研究中心, 武汉 430072; 3. 湖北省生态环境监测中心站, 武汉 430072)

**摘要:** 利用在线监测仪器获取了武汉市 2019 年 6~7 月环境大气中 102 种挥发性有机物(VOCs)小时浓度数据. 观测期间  $\rho(\text{VOCs})$  范围为  $24.9 \sim 254 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均值为  $(67.7 \pm 32.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 依据臭氧浓度标准, 将观测期间划分为清洁日和污染日, 对比分析清洁日和污染日气象条件、VOCs 浓度、组成、臭氧生成潜势和来源差异. 污染日  $\text{NO}_x$ 、CO 和 VOCs 的平均值分别超出清洁日 34.9%、25.0% 和 27.8%. 污染日烷烃、烯烃、芳香烃和含氧 VOCs 分别比清洁日高 40.7%、39.5%、26.9% 和 21.5%. 污染日总臭氧生成潜势为  $(102 \pm 69.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 超出清洁日 33.5%. 污染日液化石油气燃烧、工业排放、机动车排放、天然源和溶剂使用的平均贡献率分别比清洁日低 3.4%、2.5%、0.2%、1.3% 和 1.4%, 油气挥发源平均贡献率比清洁日高 8.8%. 机动车排放源和油气挥发源的日变化均呈现早晚高、午后低的特征, 与早晚高峰排放有关; LPG 燃烧的日变化与餐饮油烟排放变化一致. 浓度权重轨迹表明武汉市污染日 VOCs 来源主要为本地排放和东北方向传输.  $\text{O}_3$  污染日, 油气挥发源和 LPG 燃烧源应作为武汉市夏季  $\text{O}_3$  污染防控的重点.

**关键词:** 挥发性有机物(VOCs); 实时源解析; 日变化; 臭氧生成潜势(OFP); 浓度权重轨迹(CWT)

**中图分类号:** X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)06-2966-13 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202109027

## Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan

SU Wei-feng<sup>1</sup>, KONG Shao-fei<sup>1,2\*</sup>, ZHENG Huang<sup>1,2</sup>, CHEN Nan<sup>2,3</sup>, ZHU Bo<sup>2,3</sup>, QUAN Ji-hong<sup>2,3</sup>, QI Shi-hua<sup>1,2</sup>

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China; 2. Research Centre for Complex Air Pollution of Hubei Province, Wuhan 430072, China; 3. Eco-Environmental Monitoring Centre of Hubei Province, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** The hourly concentrations of 102 volatile organic compounds (VOCs) in Wuhan from June to July in 2019 were obtained using an online monitoring instrument. The  $\rho(\text{VOCs})$  varied from  $24.9$  to  $254 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , with a mean value of  $(67.7 \pm 32.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . According to the air quality standard of ozone, the observation period was divided into clean and polluted episodes of  $\text{O}_3$ . The differences in meteorological parameters, VOC concentrations, compositions, sources, and ozone formation potential (OFP) between clean and polluted episodes were analyzed and compared. The average mass concentrations of  $\text{NO}_x$ , CO, and VOCs in polluted periods exceeded those of clean periods by 34.9%, 25.0%, and 27.8%, respectively. The mass concentrations of alkanes, alkenes, aromatic hydrocarbons, and oxygenated volatile organic compounds in polluted periods were higher than those in clean periods by 40.7%, 39.5%, 26.9%, and 21.5%, respectively. The average OFP in polluted periods [ $(102 \pm 69.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ] exceeded that of clean periods by 33.5%. The average contribution rates of LPG combustion, industrial sources, vehicle emissions, natural sources, and solvent usage to VOCs were 3.4%, 2.5%, 0.2%, 1.3%, and 1.4% lower than those of the clean periods, respectively, whereas the gasoline evaporation increased by 8.8% in polluted periods. The contributions of vehicle emissions and gasoline evaporation exhibited higher values in the morning and evening, with lower values in the afternoon, which may have been related to peak vehicles emissions. The contribution of LPG combustion peaked along with the cooking time. The concentration weighted trajectory showed that the main sources of VOCs in polluted periods were from local emissions and surrounding regions in the northeastern direction of Wuhan. In polluted periods, gasoline evaporation and LPG combustion should be emphasized for preventing  $\text{O}_3$  pollution in the summer in Wuhan.

**Key words:** volatile organic compounds(VOCs); real-time source apportionment; diurnal variation; ozone formation potential(OFP); concentration weighted trajectory (CWT)

大气挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是影响臭氧(ozone,  $\text{O}_3$ )和二次有机气溶胶生成的重要物质<sup>[1~4]</sup>, 与氮氧化物(nitrogen oxides,  $\text{NO}_x$ )和一氧化碳等在有光照的条件下发生反应, 生成  $\text{O}_3$ . 中国的一些特大城市和城市群, 如北京<sup>[5,6]</sup>、长三角<sup>[7,8]</sup>和珠三角<sup>[9]</sup>等地区, 夏秋季  $\text{O}_3$  浓度超标频繁, 成为当前制约空气质量改善的关键因素.

准确识别 VOCs 的来源对于制定减排措施至关重要. 正定矩阵因子分解(positive matrix factorization, PMF)模型被广泛应用于 VOCs 来源解析研究<sup>[10~15]</sup>. 城市地区 VOCs 来源包括机动车排放、油气挥发、溶剂使用和煤炭燃烧等<sup>[10~12]</sup>. Wang

等<sup>[10]</sup>的研究发现, 北京冬季大气 VOCs 来源中, 煤炭燃烧贡献为 26%~39%, 机动车排放贡献为 31%~45%. An 等<sup>[11]</sup>的研究表明, 长三角地区的 VOCs 来源中, 工业排放占较大比例, 达到 45%~63%. Cai 等<sup>[12]</sup>的研究发现工业源对上海大气 VOCs 的贡献为 36%. 前人也采用 PMF 模型识别各类源对臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)的贡献, 发现油气挥发源是北京 OFP 的最大贡献源, 占到

收稿日期: 2021-09-03; 修订日期: 2021-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830965, 42077202); 武汉市一策驻点跟踪研究项目(DQGG202102)

作者简介: 苏维峰(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为挥发性有机物来源解析, E-mail: 2682824991@qq.com

\* 通信作者, E-mail: kongshaofei@cug.edu.cn

55%<sup>[16]</sup>; 机动车排放是武汉 OFP 最大贡献源 (27.8%)<sup>[17]</sup>. 利用各个源贡献的时间序列, 结合浓度权重轨迹 (concentration weighted trajectory, CWT) 分析法, 可以确定每个源的潜在源区. 如 Liu 等<sup>[18]</sup> 的研究利用 CWT 模型探讨分析上海清洁日和污染日 VOCs 的潜在源区分布, 发现污染日 VOCs 主要来源于当地排放.

O<sub>3</sub> 污染时刻 VOCs 的组成和来源, 是当前科学研究和大气环境管理关注的热点. 林理量等<sup>[19]</sup> 的研究发现深圳 O<sub>3</sub> 污染期间, 芳香烃浓度上升 76.9%, 含氧 VOCs 浓度上升 52.2%. 清晨低的风速和边界层高度, 容易导致机动车尾气和汽油挥发源排放 VOCs 的积累; 随着温度升高, 溶剂源和汽油源组分挥发加快; 在午后强辐射作用下, 发生光化学反应, 造成 O<sub>3</sub> 污染. 张敬巧等<sup>[20]</sup> 通过对廊坊开发区夏季 O<sub>3</sub> 污染过程中 VOCs 的研究发现, 污染日 VOCs 浓度高出清洁日 69.6%, 污染日溶剂使用源和植物源贡献较清洁日高出 13.1% 和 1.2%. 王文美等<sup>[21]</sup> 研究了天津市夏季不同 O<sub>3</sub> 浓度级别下 VOCs 组成, 表明 O<sub>3</sub> 浓度为优时, 烯烃和炔烃占比较高; O<sub>3</sub> 浓度为良和轻度污染时, 烷烃占比略高; O<sub>3</sub> 浓度为中度污染时, 芳香烃占比最高. 武汉是我国中部地区唯一的特大城市, 也是重要的交通枢纽, 近年来 O<sub>3</sub> 污染问题凸显. 解析 O<sub>3</sub> 前体物 VOCs 来源成为当前亟需关注的问题. 前人在该区域的研究, 多关注某一段时间或者某次污染过程中 VOCs 的组分和来源<sup>[15,17,22]</sup>, 对于 O<sub>3</sub> 污染日与清洁日 VOCs 的组成与来源的对比研究较少, 哪些因素和源区影响对 O<sub>3</sub> 污染起到关键作用有待深入研究.

本文以在线监测的 2019 年 6~7 月 VOCs、CO、NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub> 和气象参数的小时浓度数据为基础, 分析武汉市夏季 O<sub>3</sub> 污染日与清洁日气象条件和 VOCs 组成差异; 计算 O<sub>3</sub> 污染日与清洁日 VOCs 组分的 OFP 值和主要贡献组分; 采用 PMF 模型开展 VOCs 源解析和气团轨迹分析, 识别各个源污染日和清洁日的日变化及潜在源区差异, 以期 O<sub>3</sub> 污染防控提供科学依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 监测点位与设备

本研究观测点位于湖北省生态环境监测中心站楼顶, 如图 1 所示. 观测点周边主要为居民生活区和商业区<sup>[17]</sup>.

VOCs 浓度监测利用武汉天虹仪表有限公司开发的大气挥发性有机物在线监测仪 (TH-300B). 该监测仪采用超低温在线预浓缩与气相色谱-质谱/氢

火焰检测器 (GC-MS/FID) 联用监测技术. 环境空气经采集后进入浓缩系统, 在毛细管捕集柱中被冷冻捕集, 然后快速加热解析, 再进入分析系统. 待分析组分由色谱柱分离后被 FID 和 MS 检测, 其中 FID 检测器检测 C<sub>2</sub>~C<sub>5</sub> 的碳氢化合物, MS 检测器检测 C<sub>5</sub>~C<sub>12</sub> 的碳氢化合物、卤代烃以及含氮挥发性有机物. 该仪器每天 24 h 自动运行, 时间分辨率为 1 h, 样品采集时间为 5 min<sup>[22]</sup>.

O<sub>3</sub> 通过 Thermo 49i 臭氧分析仪测定, CO 由 Thermo 48i 红外吸收法 CO 分析仪测定, NO<sub>x</sub> 则由 Thermo 42i 化学发光法 NO-NO<sub>x</sub> 分析仪完成测定<sup>[25]</sup>. 气象参数如温度、相对湿度、风向、风速和气压等采用德国 LUFFT 生产的 WS600-UMB 微型气象站监测.



图 1 采样点地理位置示意

Fig. 1 Geographical location of the sampling site

### 1.2 质量控制与质量保证

为保证监测数据质量, 对仪器进行内标校准, 4 种内标化合物为: 溴氯甲烷、1,4-二氟苯、氯苯-D5 和 4-溴苯, 校准物质含量范围为  $0.3 \times 10^{-9}$  ~  $25 \times 10^{-9}$ , 共有 6 个含量梯度, 相关性系数在 0.99 以上; 同时, 每天 00:00 对 VOCs 分析结果进行质控: 通入体积分数为  $4 \times 10^{-9}$  的 PAMS 标气, 包括 29 种烷烃、10 种烯烃、1 种炔烃和 17 种芳香烃, 进行 VOCs 单点含量校准, 对每天的数据进行峰窗漂移校准. 观测期间, 每月利用 TO15 (Linde) 和 PAMS 标准气体至少开展一次多点标定和空白实验<sup>[20]</sup>. 多点校准的相关系数在 0.99 以上, 各个组分的检出限见表 1.

观测期间由于设备维护等原因, 剔除 206 组数据, 共获得了 1257 组有效数据. 每组数据共计定量监测出 102 种 VOCs 组分, 其中包括 29 种烷烃、12 种烯烃、1 种炔烃、16 种芳香烃、31 种卤代烃、12 种含氧 VOCs 和乙腈.

观测期间, 温度、相对湿度、风向、风速、气压、O<sub>3</sub>、CO 和 NO<sub>x</sub> 等同步观测参数数据均来自于湖北省

表1 检测的102种VOCs组分/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ Table 1 Detected 102 VOCs species/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 

序号	VOCs 物种	检出限	序号	VOCs 物种	检出限	序号	VOCs 物种	检出限
1	乙烷	0.10	35	顺-2-丁烯	0.08	69	1,1,2,2-四氯乙烷	0.49
2	丙烷	0.03	36	异丁烯	0.10	70	1,3-二氯苯	0.48
3	异丁烷	0.10	37	1,3-丁二烯	0.06	71	1,4-二氯苯	0.41
4	正丁烷	0.11	38	1-戊烯	0.05	72	四氯化碳	0.08
5	环戊烷	0.18	39	反-2-戊烯	0.03	73	苜基氯	0.20
6	异戊烷	0.05	40	异戊二烯	0.07	74	邻-二氯苯	0.53
7	正戊烷	0.06	41	顺-2-戊烯	0.04	75	苯	0.14
8	2,2-二甲基丁烷	0.06	42	1-己烯	0.11	76	甲苯	0.46
9	2,3-二甲基丁烷	0.51	43	苯乙烯	0.47	77	乙基苯	0.38
10	2-甲基戊烷	0.28	44	氟利昂 114	0.17	78	间/对-二甲苯	0.46
11	3-甲基戊烷	0.11	45	氯甲烷	0.04	79	邻-二甲苯	0.41
12	正己烷	0.10	46	氯乙烯	0.03	80	异丙基苯	0.38
13	2,4-二甲基戊烷	0.13	47	溴甲烷	0.05	81	丙基苯	0.51
14	甲基环戊烷	0.07	48	氯乙烷	0.07	82	3-乙基甲苯	0.48
15	2-甲基己烷	0.12	49	氟利昂 11	0.15	83	4-甲基苯	0.65
16	2,3-二甲基戊烷	0.09	50	1,1-二氯乙烯	0.07	84	1,3,5-三甲苯	0.47
17	环己烷	0.04	51	氟利昂 113	0.11	85	2-乙基甲苯	0.48
18	3-甲基己烷	0.09	52	碘甲烷	0.08	86	1,2,4-三甲苯	0.46
19	2,2,4-三甲基戊烷	0.10	53	二氯甲烷	0.11	87	1,2,3-三甲苯	0.39
20	庚烷	0.12	54	1,1-二氯乙烷	0.07	88	1,3-二乙基苯	0.41
21	甲基环己烷	0.12	55	顺-1,2-二氯乙烯	0.23	89	1,4-二乙基苯	0.37
22	2,3,4-三甲基戊烷	0.12	56	三氯甲烷	0.05	90	丙烯醛	0.13
23	2-甲基庚烷	0.13	57	1,1,1-三氯乙烷	0.05	91	丙醛	0.08
24	3-甲基庚烷	0.11	58	1,2-二氯乙烷	0.16	92	丙酮	0.08
25	正辛烷	0.24	59	三氯乙烯	0.56	93	甲基叔丁基醚	0.15
26	正壬烷	0.61	60	1,2-二氯丙烷	0.16	94	2-甲基丙烯醛	0.13
27	癸烷	0.64	61	二氯溴甲烷	0.18	95	丁醛	0.14
28	十一烷	0.53	62	顺-1,3-二氯-1-丙烯	0.49	96	丁烯酮	0.14
29	十二烷	0.58	63	反-1,3-二氯丙烯	0.39	97	2-丁酮(MEK)	0.09
30	乙炔	0.06	64	1,1,2-三氯乙烷	0.24	98	2-戊酮	0.35
31	乙烯	0.07	65	四氯乙烯	0.74	99	戊醛	0.22
32	丙烯	0.07	66	1,2-二溴乙烷	0.68	100	3-戊酮	0.33
33	反-2-丁烯	0.03	67	氯苯	0.58	101	正己醛	0.30
34	1-丁烯	0.04	68	溴仿	0.68	102	乙腈	0.18

生态环境监测中心站,各监测仪器定期校准,每月至少清洗一次采样管路,以确保监测数据的有效性。

### 1.3 正定矩阵因子分解模型

PMF模型常用于VOCs源解析<sup>[17]</sup>。PMF是一种受体模型,其基本原理是将受体矩阵 $X$ 分解成源成分谱矩阵 $F$ 、贡献率矩阵 $G$ 和残差矩阵 $E$ ,公式如下:

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

式中, $x_{ij}$ 为样品 $i$ 中物种 $j$ 的浓度; $g_{ik}$ 为样品 $i$ 中第 $k$ 个源的贡献; $f_{kj}$ 为第 $k$ 个源中物种 $j$ 的百分占比; $e_{ij}$ 为样品 $i$ 中物种 $j$ 的残差; $p$ 为来源数量。

PMF模型主要是为了计算目标函数 $Q$ 的最小值, $Q$ 的计算公式如下:

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

式中, $n$ 为样品数量; $m$ 为物种数量; $u_{ij}$ 为样品 $i$ 中物种 $j$ 的不确定度.通过反复计算,将 $Q$ 值最小对应的解确定为最优解。

### 1.4 臭氧生成潜势

本研究中,采用基于最大反应活性增量(maximum incremental reactivity, MIR)计算臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP),定义为VOCs组分的浓度与MIR的乘积,计算公式为<sup>[23]</sup>:

$$\text{OFP}_i = \text{MIR}_i \times [\text{VOC}_i] \quad (3)$$

式中, $\text{OFP}_i$ 为组分 $i$ 的臭氧生成潜势( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ); $\text{MIR}_i$ 为组分 $i$ 的最大增量反应活性( $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ),本研究采用Carter<sup>[23]</sup>研究中的系数;  $[\text{VOC}_i]$ 为组分 $i$ 的浓度( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。

### 1.5 浓度权重轨迹分析

浓度权重轨迹(concentration weighted trajectory, CWT)可以给出污染源在特定区域内的浓度分布,

是一种网格化识别源区的计算方法<sup>[18,24]</sup>. 本研究采用 CWT 模型, 计算得到 VOCs 各个污染源的浓度空间分布, 计算公式如下:

$$c_{ij} = \frac{\sum_{l=1}^M C_l \tau_{ijl}}{\sum_{l=1}^M \tau_{ijl}} \quad (4)$$

式中,  $c_{ij}$  为每个网格  $(i, j)$  的平均权重浓度;  $l$  为气团轨迹;  $M$  为气团轨迹总数;  $C_l$  为轨迹  $l$  经过网格  $(i, j)$  时对应的要素值;  $\tau_{ijl}$  为轨迹  $l$  在网格  $(i, j)$  上停留时间.

当每个网格内部气流滞留时间较短(即  $\tau_{ij}$  值较小), CWT 就会产生较大的误差<sup>[24]</sup>. 引入经验权重函数  $W(\tau_{ij})$  进行区间化赋权和降误差处理,  $W(\tau_{ij})$  计算公式如下:

$$W(\tau_{ij}) = \begin{cases} 1.0, & 120 < \tau_{ij} \\ 0.8, & 40 < \tau_{ij} \leq 120 \\ 0.4, & 20 < \tau_{ij} \leq 40 \\ 0.2, & \tau_{ij} \leq 20 \end{cases} \quad (5)$$

以离观测点最远的轨迹距离为准, CWT 的计算范围为  $111.1^\circ\text{N} \sim 120.2^\circ\text{N}$ ,  $25.9^\circ\text{E} \sim 37.2^\circ\text{E}$ , 每个网格分辨率  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ . CWT 计算高度为 50 m, 输入的污染物浓度数据为 PMF 解析结果, 所采用的气象场资料为美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)提供的全球资料同化系统(global data assimilation system,

GDAS), 水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ .

## 2 结果与讨论

### 2.1 VOCs 浓度及组成

观测期间,  $\rho$  (VOCs) 范围为  $24.9 \sim 254 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 平均值为  $(67.7 \pm 32.2) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . 其中  $\rho$  (烷烃) 为  $(26.3 \pm 18.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 质量分数为 38.8%;  $\rho$  (含氧 VOCs) 为  $(10.6 \pm 5.4) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 质量分数为 15.6%. 在 VOCs 组分浓度前 10 位中,  $\rho$  (丙烷) 最高, 为  $(7.0 \pm 5.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 质量分数为 10.3%, 其余组分为: 丙酮(7.0%)、二氯甲烷(6.4%)、异戊烷(5.0%)、正丁烷(4.6%)、乙烷(4.5%)、甲苯(3.9%)、1,2-二氯乙烷(3.3%)、异丁烷(3.0%) 和乙烯(2.8%). 在前 10 位 VOCs 组分中, 丙烷和乙烷为 LPG 燃烧的示踪物<sup>[11,26]</sup>, 异戊烷为油气挥发的示踪物<sup>[27]</sup>. 初步推测武汉市夏季 VOCs 来源与 LPG 燃烧源和油气挥发源相关.

表 2 为武汉与国内其它城市夏季 VOCs 组成对比. 武汉夏季 VOCs 组分的质量分数最高为烷烃, 与南京<sup>[29]</sup>、成都<sup>[30]</sup> 和德州<sup>[31]</sup> 一致, 上海<sup>[28]</sup> 以含氧 VOCs 为主. 当只考虑烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃时, 主要组分为烷烃和芳香烃, 与北京<sup>[32]</sup>、太原<sup>[34]</sup> 和佛山<sup>[35]</sup> 一致, 衡水<sup>[33]</sup> 主要 VOCs 组分为烷烃和烯烃.

表 2 武汉与国内其它城市夏季 VOCs 组成对比<sup>1)</sup>/%

Table 2 Comparison of VOCs components between Wuhan and other cities of China/%

城市	VOCs 物种数	烷烃	烯烃	炔烃	芳香烃	卤代烃	含氧 VOCs	其他	文献
上海	103	24.0	9.4	2.2	9.7	18.1	35.0	1.4	[28]
南京	101	38.6	9.9	2.9	9.3	14.8	22.9	1.2	[29]
成都	61	44.4	14.0	12.9	11.9	16.7	—	—	[30]
德州	58	40.3	11.2	5.9	13.6	29.1	—	—	[31]
北京	59	49.2	9.8	2.8	38.3	—	—	—	[32]
衡水	56	43.4	42.4	1.5	12.8	—	—	—	[33]
太原	56	48.3	10.2	2.9	38.7	—	—	—	[34]
佛山	56	34.0	19.2	2.8	44.0	—	—	—	[35]
武汉	102	38.8(65.3)	5.9(9.9)	1.9(3.2)	12.9(21.6)	24.2	15.7	0.6	本研究

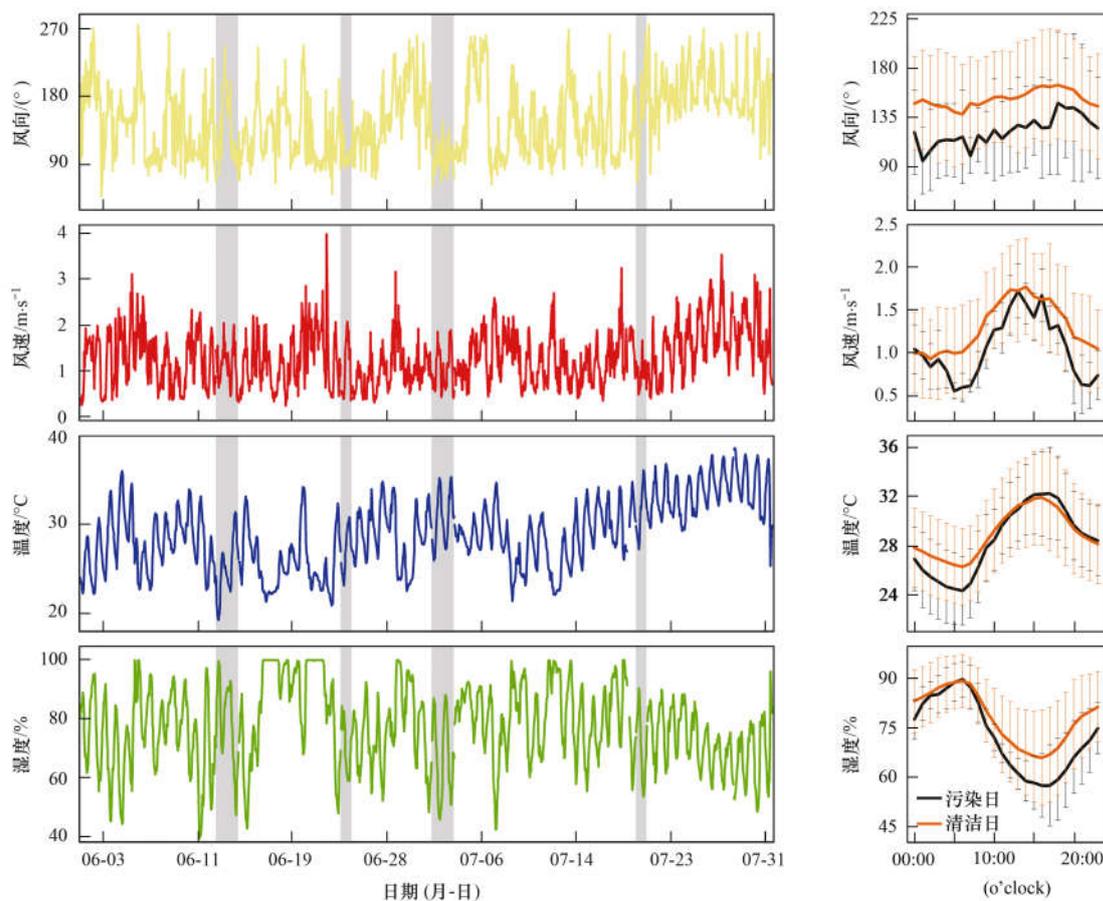
1) 括号中为只考虑烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃时各组分质量分数; “—”表示未检测

### 2.2 清洁日与污染日 $\text{O}_3$ 与气象参数及前体物关系

图 2 为观测期间气象参数时间序列及日变化. 整个观测期间, 观测点位主导风向为东风, 风速为  $(1.3 \pm 0.6) \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 温度在  $19.4 \sim 38.5^\circ\text{C}$  之间, 平均值为  $28.9^\circ\text{C}$ , 湿度为  $(77.4 \pm 13.9)\%$ . 依据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)  $\text{O}_3$  日最大 8 h 平均值二级标准 ( $160 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 定义超过该值的天为污染日, 其余天定义为清洁日. 观测期间,  $\text{O}_3$  污染天数共 6 d, 超标率为 9.8%.  $\text{O}_3$  污染日和清洁日气象参数及环境空气污染物的统计如表 3 所示. 相比于清洁

日, 污染日温度、湿度和风速略低. 污染日  $\text{NO}_x$ 、CO 和 VOCs 浓度分别超出清洁日 34.9%、25.0% 和 27.8%.

$\text{O}_3$  污染发生时通常伴随着低湿条件, 这是由于高湿度条件有利于  $\text{O}_3$  的沉降清除; 并且紫外辐射在水汽作用下, 会因为水汽的消光作用而发生衰减<sup>[25]</sup>. 温度越高, 太阳辐射越强, 光化学反应越强烈, 近地面  $\text{O}_3$  浓度越高<sup>[19,21]</sup>. 本研究中,  $\text{O}_3$  浓度总体与温度呈正相关 ( $R = 0.48$ ,  $P < 0.01$ ), 与风速呈正相关 ( $R = 0.38$ ,  $P < 0.01$ ), 与湿度呈负相关 ( $R =$



阴影部分为 O<sub>3</sub> 污染天; 误差棒为标准差

图 2 气象参数时间序列及日变化

Fig. 2 Time series and diurnal variations of meteorological parameters

(0.72,  $P < 0.01$ ). 污染日与清洁日相比, 湿度低 5.5%, 风速低  $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 温度无明显差别 (表 3). 由此可见, 低风速和低湿度可能是导致武汉夏季 O<sub>3</sub> 污染的主要气象因素.

表 3 清洁日与污染日气象参数和空气污染物浓度对比

Table 3 Comparison of meteorological parameters and air pollutants during clean and polluted days

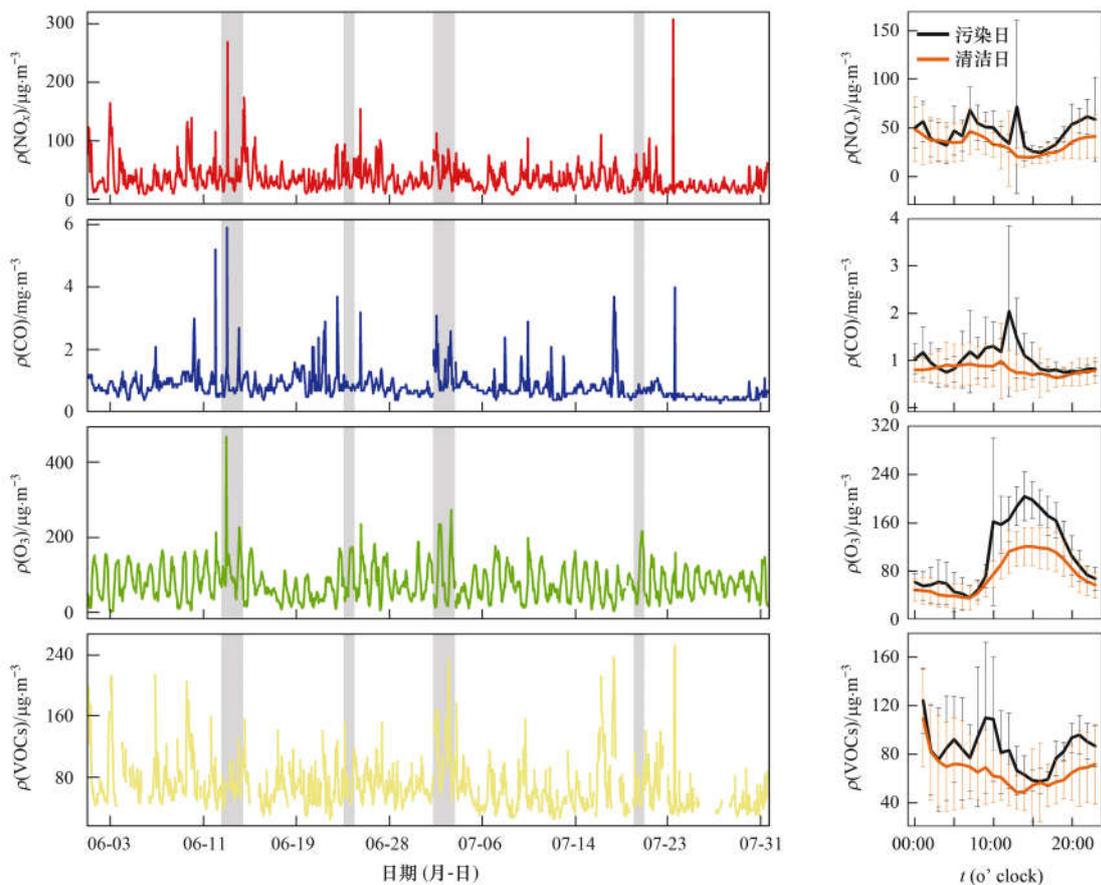
参数	污染日	清洁日
温度/°C	$28.4 \pm 4.0$	$29.0 \pm 3.9$
湿度/%	$72.5 \pm 13.5$	$77.9 \pm 13.8$
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$1.1 \pm 0.5$	$1.3 \pm 0.6$
气压/hPa	$998.8 \pm 1.7$	$997.3 \pm 2.5$
$\rho(\text{NO}_x)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$45.2 \pm 28.7$	$33.5 \pm 22.0$
$\rho(\text{CO})/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	$1.0 \pm 0.6$	$0.8 \pm 0.4$
$\rho(\text{O}_3)/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$108.4 \pm 69.9$	$75.0 \pm 40.7$
$\rho(\text{VOCs})/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$84.1 \pm 35.9$	$65.8 \pm 31.1$

图 3 为 O<sub>3</sub> 及其前体物浓度的时间序列及日变化. 在 6 月 13 日、6 月 14 日、7 月 2 日和 7 月 3 日等污染日, O<sub>3</sub> 前体物的浓度水平整体高于污染过程前后, 进一步表明 O<sub>3</sub> 污染与前体物浓度的升高有关<sup>[17-19]</sup>. 从中可知, 污染日和清洁日相比, NO<sub>x</sub>、CO 和 O<sub>3</sub> 的昼夜变化趋势一致, 但是污染日 3 种污染物

浓度分别是清洁日的 1.4、1.3 和 1.5 倍. VOCs 的昼夜变化趋势在清洁日和污染日存在显著差异: 污染日 VOCs 浓度在 09:00 出现峰值, 而清洁日不存在早上 09:00 的峰值. 污染日随着 VOCs、NO<sub>x</sub> 和 CO 浓度的降低, O<sub>3</sub> 从 08:00 开始增加, 至 14:00 达到峰值  $203 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 此时 VOCs、NO<sub>x</sub> 和 CO 浓度降至  $62.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $30.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $1.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 此时温度为  $31.7^\circ\text{C}$ , 接近峰值, 湿度为 58.8%, 接近谷值, 风速降至  $1.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 此为典型的臭氧生成的光化学烟雾中大气成分日变化特征<sup>[9,15]</sup>. 因而对于武汉夏季 O<sub>3</sub> 污染日, 对于前体物的控制显得尤为重要.

### 2.3 清洁日与污染日 VOCs 化学组成

图 4 为清洁日与污染日 VOCs 前 10 组分及各类别浓度对比. 清洁天,  $\rho(\text{VOCs})$  范围为  $24.9 \sim 254 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均值为  $(65.8 \pm 31.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 其中  $\rho(\text{烷烃})$  为  $(25.2 \pm 17.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\rho(\text{烯烃})$  为  $(3.9 \pm 4.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\rho(\text{芳香烃})$  为  $(10.8 \pm 6.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,  $\rho(\text{含氧 VOCs})$  为  $(10.4 \pm 5.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . O<sub>3</sub> 污染日,  $\rho(\text{VOCs})$  范围为  $37.7 \sim 235 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均值为  $(84.1 \pm 35.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .  $\rho(\text{烷烃})$  为  $(35.4 \pm 19.9)$



阴影部分为  $O_3$  污染天; 误差棒为标准差

图3  $O_3$  及其前体物时间序列及日变化

Fig. 3 Time series and diurnal variations of ozone and its precursors

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 较清洁日增加 40.5%;  $\rho$ (烯烃) 为  $(5.4 \pm 5.1) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 较清洁日增加 38.5%;  $\rho$ (芳香烃) 为  $(10.8 \pm 4.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 较清洁日增加 16.7%;  $\rho$ (含氧 VOCs) 为  $(12.6 \pm 4.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 较清洁日增加 21.2%. 在污染日,  $O_3$  浓度升高主要是由于高活性的烯烃、芳香烃和含氧 VOCs 浓度明显增加, 促进了光化学反应<sup>[19]</sup>. VOCs 组分浓度前 10 位中,  $C_2 \sim C_5$  类的烷烃共有 5 种, 占 VOCs 的质量分数为 29.6%, 其中  $\rho$ (异戊烷) 为  $5.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 较清洁日增加 74.2%, 为增加量最大的组分, 与污染日油气挥发源的贡献增加最大有关<sup>[27]</sup>.

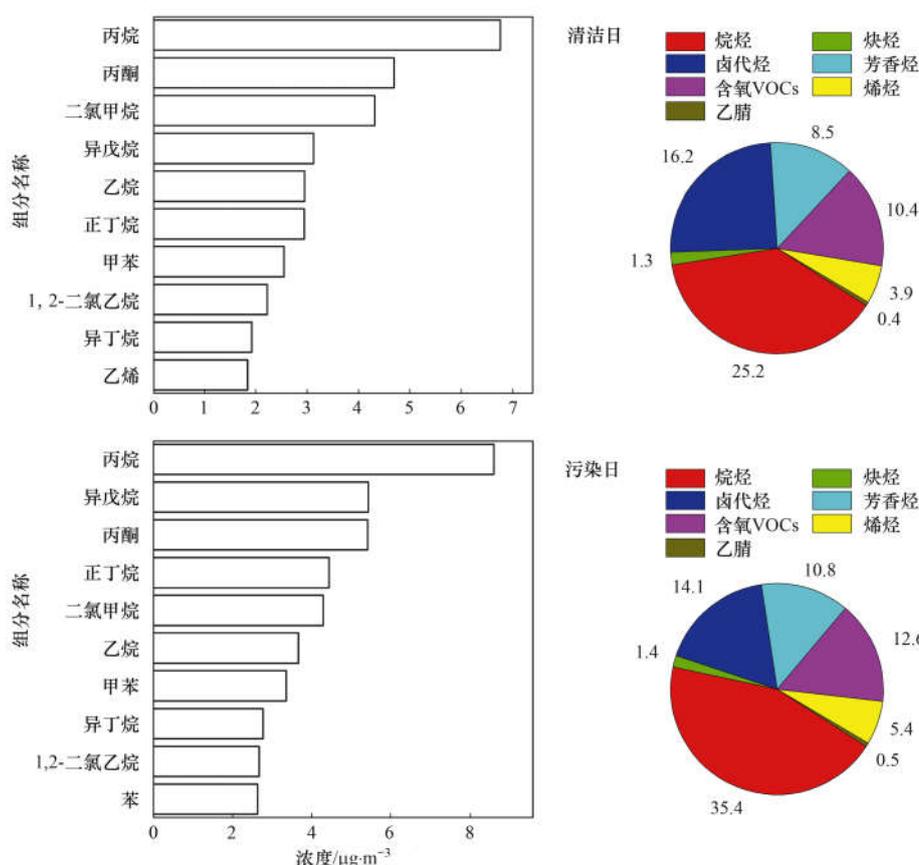
#### 2.4 清洁日与污染日臭氧生成潜势

在本研究参与 OFP 计算的 VOCs 组分共有 51 种, 包括 29 种烷烃、11 种烯烃、1 种炔烃和 10 种芳香烃.

观测期间, VOCs 的 OFP 为  $(78.9 \pm 58.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 其中烯烃的 OFP 为  $(30.5 \pm 33.2) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 贡献率为 38.6%; 芳香烃的 OFP 为  $(24.6 \pm 19.0) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 贡献率为 31.1%; 烷烃的 OFP 为  $(23.3 \pm 18.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 贡献率为 29.5%; 炔烃的 OFP 为  $(0.7 \pm 0.3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 贡献率为

0.8%. 芳香烃和烯烃是主要的 OFP 贡献物种, 且芳香烃 OFP 贡献率比烷烃高出 1.6%, 烯烃 OFP 贡献率比烷烃高出 9.1%. 而在 VOCs 物种质量分数中, 烷烃质量分数高出芳香烃 25.9%, 高出烯烃 32.8%, 但是由于烷烃的反应活性弱于烯烃和芳香烃<sup>[23]</sup>, 导致烷烃的 OFP 贡献率低于烯烃和芳香烃, 这与武汉冬季<sup>[17]</sup>、石家庄<sup>[36]</sup> 和成都<sup>[37]</sup> 结果一致.

图 5 为清洁日和污染日对 OFP 贡献前 10 位组分与各类别数值对比. 清洁天, VOCs 的 OFP 为  $(76.2 \pm 53.4) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 污染天 VOCs 的 OFP 为  $(102 \pm 69.6) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 超出清洁天 33.5%, 各组分贡献的 OFP 差异在 0.1% ~ 3.2%. 污染天 VOCs 组分浓度最高的前 10 组分中, 丙烷、异戊烷、正丁烷、乙烷和异丁烷等 5 种  $C_2 \sim C_5$  类烷烃占 VOCs 浓度的质量分数为 29.6%, 其 OFP 贡献率为 20.1%. 污染天对 OFP 贡献最高的前 10 组分中, 甲苯和乙苯可从机动车排放源中检测到<sup>[27]</sup>, 正丁烷和丙烷常作为 LPG 燃烧源的示踪物<sup>[11]</sup>, 异戊烷是油气挥发源的示踪物<sup>[27]</sup>, 这些排放源是武汉市夏季防控  $O_3$  污染的重点源类.



饼状图旁数字为 VOCs 各类别浓度, 单位:  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

图4 清洁日与污染日 VOCs 前10组分及各类别浓度

Fig. 4 Concentrations of the top ten components and categories of VOCs during the clean and polluted periods

## 2.5 VOCs 源解析

### 2.5.1 PMF 因子识别

本研究中,选取数据监测完整以及具有标识性的32种组分(14种烷烃、5种烯烃、1种炔烃及12种芳香烃)输入PMF模型.由 $Q_{\text{true}}/Q_{\text{exp}}$ 接近于1.0为判断标准,选择模拟结果较好的6个因子作为解析结果.VOCs观测值与模拟值之间的相关系数为0.89( $P < 0.01$ ).各个因子的组成如图6所示.

因子1中,主要贡献组分为芳香烃.其中1,3-二乙基苯贡献率为96.2%,1,4-二乙基苯贡献率为93.5%.除了甲苯和乙苯外,其它芳香烃的贡献率均在30%以上.芳香烃主要产生于涂料、清洗剂和油漆等溶剂<sup>[38-40]</sup>.因此将因子1命名为溶剂使用源.

因子2中,乙烷贡献率为61.8%,丙烷贡献率为33.8%,乙烯的贡献率为30.0%,异丁烷贡献率为28.6%,正丁烷贡献率为27.3%,同时乙炔的贡献率也较高,为57.2%.丙烷、异丁烷和正丁烷等物质是LPG燃烧的重要标志物<sup>[11,26]</sup>,且考虑到LPG燃烧不完全时会产生乙炔<sup>[12,41]</sup>.因此将因子2命名为LPG燃烧源.

因子3中,异戊二烯贡献率高达96.6%,其它组分贡献率均低于25%.异戊二烯一般是由自然中的

植物排放产生<sup>[42]</sup>.因此将因子3命名为天然源.

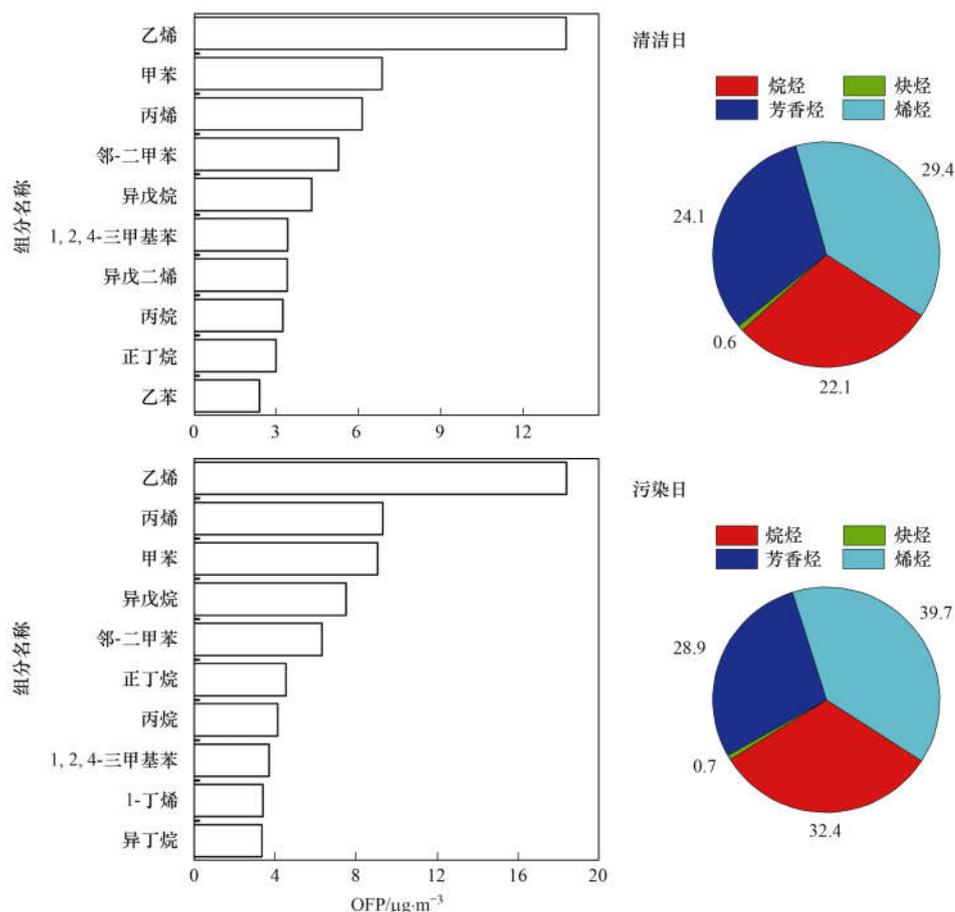
因子4中,乙烯贡献率为40.0%,1-丁烯贡献率为46.8%,同时甲苯、乙苯和苯乙烯贡献率为35.1%、33.3%和33.6%.苯乙烯是焦化排放的特征组分,乙烯、1-丁烯、甲苯和乙苯等与各类工业排放相关<sup>[19,43]</sup>.因此将因子4命名为工业源.

因子5中,异丁烷贡献率为39.2%,正丁烷贡献率为43.4%,异戊烷贡献率为67.0%,正戊烷贡献率为65.7%.异丁烷、正丁烷、异戊烷和正戊烷等物质是油气挥发源的标志物<sup>[27]</sup>.可以将因子5命名为油气挥发源.

因子6中主要物种为 $C_5$ 以上的长链烷烃及甲苯和乙苯等芳香烃. $C_5$ 以上的长链烷烃常作为机动车排放标志组分<sup>[44]</sup>,甲苯和乙苯等芳香烃也能从一些机动车尾气中检测到<sup>[27]</sup>.因此将因子6命名为机动车排放源.

### 2.5.2 清洁日与污染日 VOCs 来源贡献对比

观测期间清洁日与污染日各排放源对VOCs的贡献量和贡献率如图7所示.本研究中,溶剂使用源贡献率为5.0%,低于珠三角地区(19.5%)<sup>[45]</sup>和中国香港地区(58.0%)<sup>[46]</sup>.清洁日(5.2%)略高于污染日(3.9%)的贡献率.LPG燃烧源贡献率



饼状图旁数字为 VOCs 各类别的 OFP 数值,单位:  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

图5 清洁日与污染日对 OFP 贡献前 10 组分及各类别数值

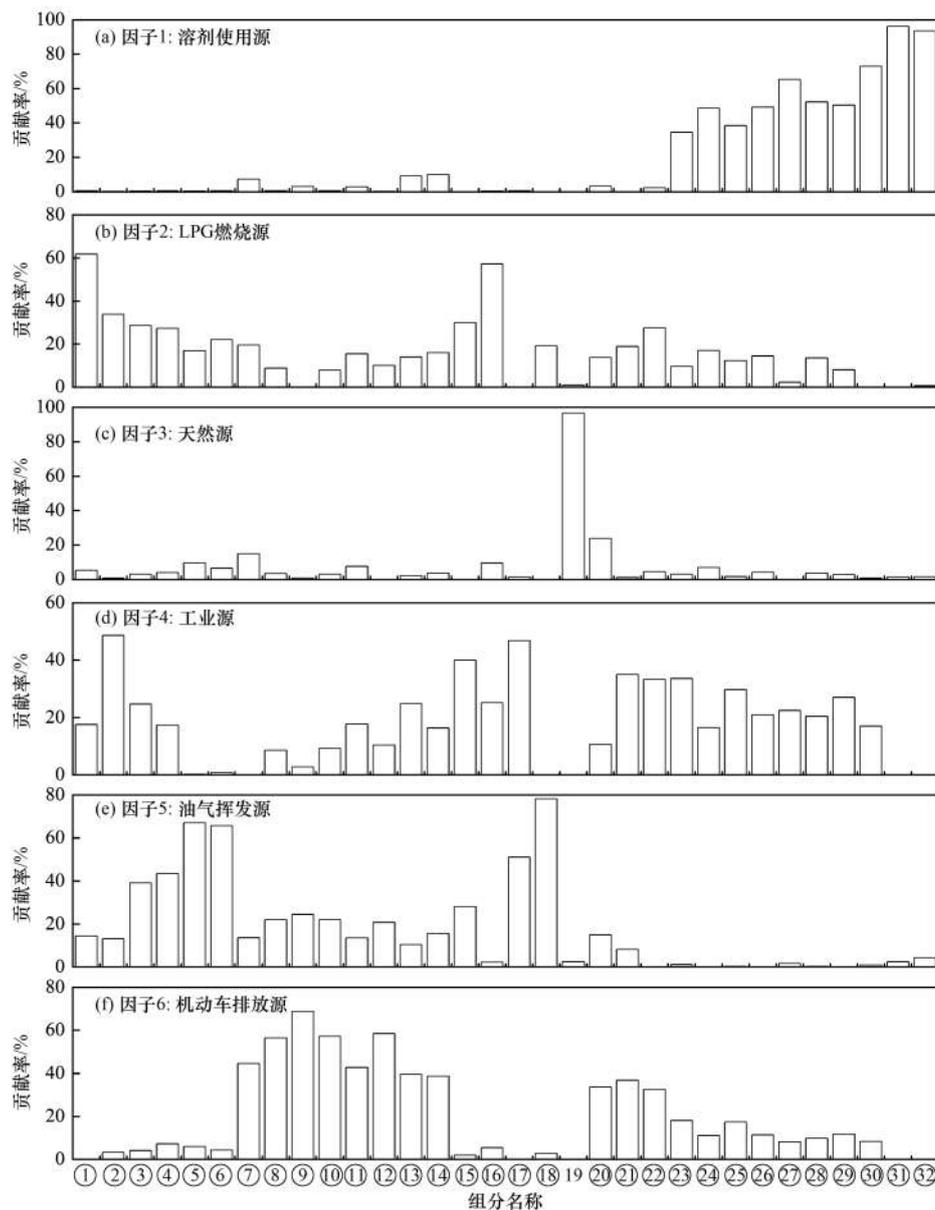
Fig. 5 VOCs species ranking the top ten contributions and the values of different VOCs groups to OFP during the clean and polluted periods

(29.0%) 高于珠三角地区 (8% ~ 16%)<sup>[45]</sup>, 低于中国香港地区 (32.6%)<sup>[46]</sup>. 相比于清洁日, 污染日 LPG 源贡献率低 3.4%. 清洁日天然源贡献率超出污染日 1.3%. 工业源贡献率为 25.5%, 污染日的贡献率比清洁日低 2.5%. 油气挥发源在整个观测期间的贡献率为 25.7%, 高于武汉市冬季的贡献率 (14.2%)<sup>[17]</sup>, 与夏季温度较高, 油气易挥发有关. 油气挥发源在清洁日的贡献率为 24.6%, 在污染日的贡献率为 33.4%, 是污染日最主要的 VOCs 来源. 机动车排放源在清洁日 (10.1%)、污染日 (9.9%) 和整个观测期间 (10.0%) 的贡献率相当, 低于武汉市冬季的贡献率 (22.5%)<sup>[17]</sup>.

各个排放源贡献量的时间序列及日变化特征如图 8 所示. 污染日, LPG 燃烧源贡献量在 02:00 出现最小值 ( $5.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 随后开始增加, 在 12:00 达到最大 ( $15.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 增加 175%. 油气挥发源贡献量在 01:00 和 06:00 出现高值 ( $13.9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $16.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 在 09:00 出现峰值 ( $23.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 随后开始下降, 在 16:00 达到最小值 ( $5.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 减少 77.4%; 紧接着缓慢增加, 在 21:00 再次出现高值 ( $12.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 机动车排放源贡献

量变化与油气挥发源类似, 在 09:00 出现峰值 ( $5.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 随后大幅下降, 在 16:00 出现最小值 ( $1.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 减少 69.0%; 此后贡献量再次上升, 至 21:00 再次出现高值 ( $5.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 机动车排放源和油气挥发源污染日的日变化均呈现早晚高、午后低的特征, 一方面与居民出行高峰有关<sup>[17]</sup>, 另一方面是由于污染日早晚风速与温度较低, 边界层下降, 使得这些源排放的 VOCs 能够有效累积<sup>[19]</sup>. LPG 燃烧主要与餐饮油烟排放有关<sup>[13]</sup>, 相较于清洁日, 污染日其贡献量在 12:00 出现明显的峰值, 主要是污染日不利的气象条件和居民生活习惯所导致. 上述 3 类源在污染日均呈现午前贡献量快速上升, 午后快速下降, 说明在污染日的气象条件下, 3 类排放源的活性也会有所增强<sup>[19]</sup>. 值得注意的是, 天然源贡献量在污染日的白天较低, 可能与污染日阴天较多, 太阳光照较弱, 植物挥发减弱有关<sup>[20]</sup>.

通过图 7 中污染日和清洁日各个源贡献的差异可知, 油气挥发源作为武汉市夏季  $\text{O}_3$  污染日最主要的 VOCs 来源, 其贡献量相对于清洁日增加最大 (81.3%), 应作为最先控制的排放源; LPG 燃烧源虽然贡献率相对于清洁日有所下降, 但是其在污染日的



①乙烷, ②丙烷, ③异丁烷, ④正丁烷, ⑤异戊烷, ⑥正戊烷, ⑦2,4-二甲基戊烷, ⑧2-甲基己烷, ⑨2,3-二甲基戊烷, ⑩3-甲基己烷, ⑪2,2,4-三甲基戊烷, ⑫正庚烷, ⑬2,3,4-三甲基戊烷, ⑭3-甲基庚烷, ⑮乙烯, ⑯乙炔, ⑰1-丁烯, ⑱顺-2-丁烯, ⑲异戊二烯, ⑳1-己烯, ㉑甲苯, ㉒乙苯, ㉓苯乙烯, ㉔正丙基苯, ㉕3-乙基甲苯, ㉖4-乙基甲苯, ㉗1,3,5-三甲苯, ㉘2-乙基甲苯, ㉙1,2,4-三甲苯, ㉚1,2,3-三甲苯, ㉛1,3-二乙基苯, ㉜1,4-二乙基苯

图 6 PMF 各因子组分贡献率

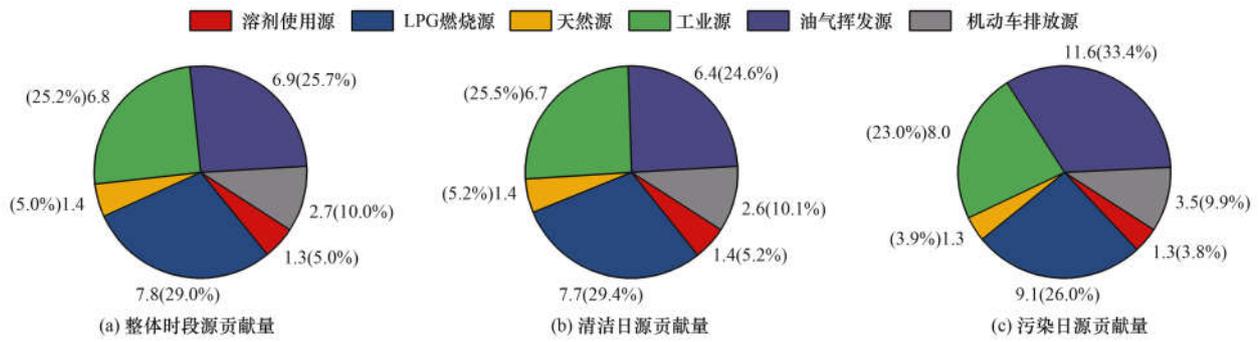
Fig. 6 Contributions of VOCs for each factor from PMF modeling

贡献也占较大比例(26.0%),也应作为防控重点。

### 2.5.3 清洁日与污染日 VOCs 来源潜在源区

图 9 为清洁日和污染日 VOCs 来源 CWT. 溶剂使用源清洁日集中于湖北武汉南部、咸宁东部、黄冈西部和江西九江西部等地区,污染日主要是武汉北部地区. 工业源清洁日分布于湖北武汉东部、黄冈、黄石和咸宁东部等地区,污染日来源于武汉东部与黄冈中部地区. 天然源地理分布取决于植被及其分布<sup>[47]</sup>,清洁日主要分布于湖南、湖北和江西交界的幕阜山脉,污染日则主要来源于湖北黄冈. LPG 燃烧源清洁日分布在湖北武汉、孝感、黄石、黄冈

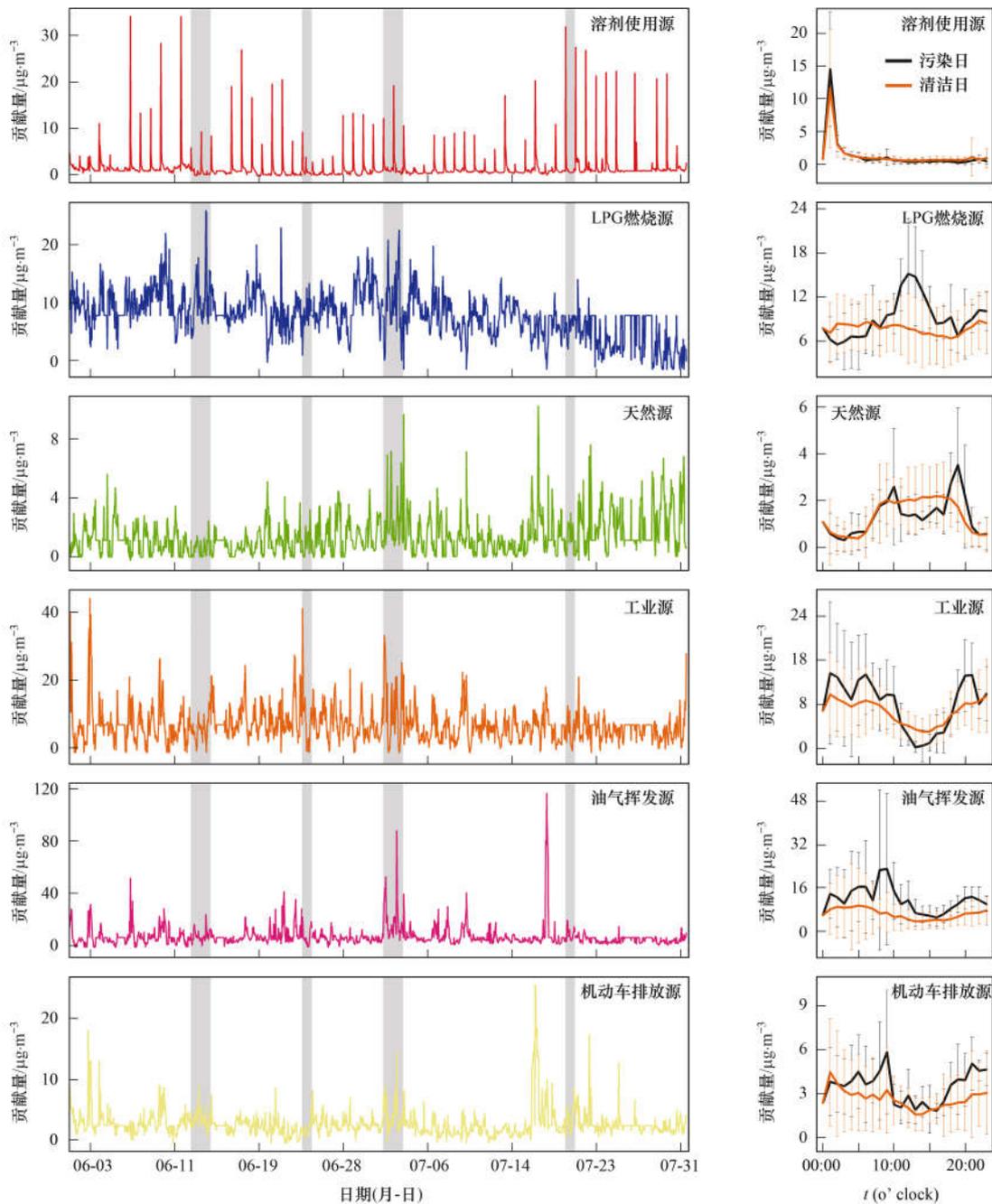
西部和仙桃,污染日来源于武汉东部地区. 机动车排放源清洁日主要分布于湖北咸宁和江西九江,污染日则主要集中于湖北武汉,并且分布在长江周围,反映沿江密集工业运输所产生的机动车尾气污染<sup>[48]</sup>. Tao 等<sup>[49]</sup>的研究发现,机动车 VOCs 的排放与社会经济因素(人口数和国民生产总值)具有较强的相关性( $R=0.91$ ,  $P<0.01$ ). 2018 年武汉人口数与国民生产总值均位于湖北省第一,同时文献<sup>[50]</sup>指出 2018 年武汉市机动车保有量超过 324 万辆,位居湖北省第一位. 清洁日,油气挥发源集中在湖北武汉东部、黄冈北部和安徽六安西南地区,污染日分布与



括号外为各排放源对应的贡献量,单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,括号内为各排放源对应的贡献率

图 7 整体时段、清洁日和污染日排放源对 VOCs 贡献量及贡献率

Fig. 7 Source contributions and percentages of VOCs during the whole, clean, and polluted periods



阴影部分为 O<sub>3</sub> 污染天; 误差棒为标准差

图 8 VOCs 来源时间序列及日变化

Fig. 8 Time series and diurnal variations of VOCs emission contributions

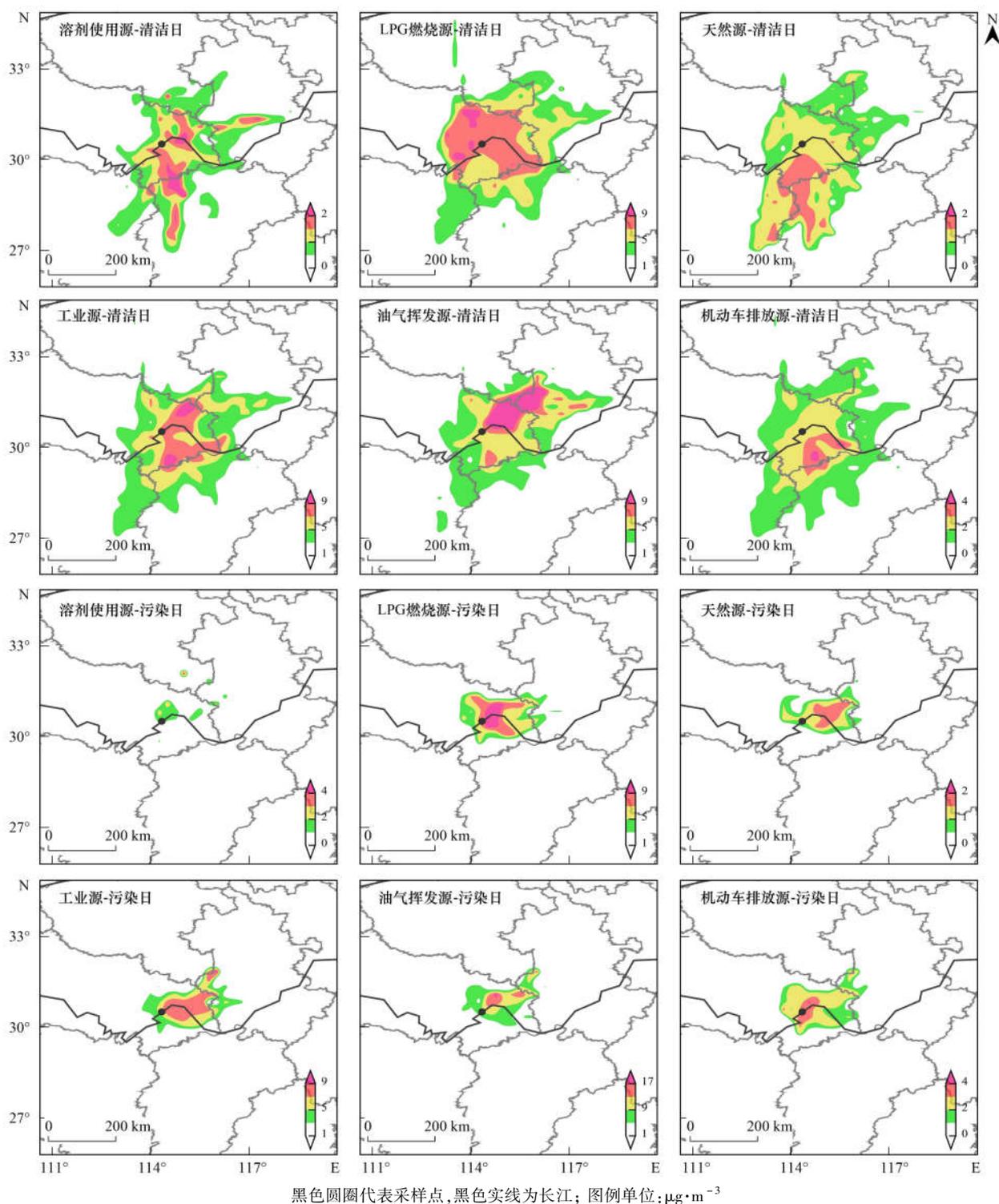


图9 清洁日与污染日各排放源 CWT

Fig. 9 CWT maps for each emission source during clean and polluted periods

机动车排放源类似,集中在武汉东部地区.

清洁日, $\text{O}_3$ 浓度与风速呈正相关( $R=0.41$ ,  $P<0.01$ ),与温度呈正相关( $R=0.53$ ,  $P<0.01$ ),与湿度呈负相关( $R=0.76$ ,  $P<0.01$ ),气象扩散条件良好<sup>[18]</sup>,区域传输较强.污染日 VOCs 来源除武汉东部地区外,还受到黄冈、黄石和鄂州影响,因此为防控武汉夏季  $\text{O}_3$  污染,需要与上述城市加强联防联控.

### 3 结论

(1) 观测期间,污染日  $\rho(\text{O}_3)$  为  $(108.4 \pm 69.9) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,超出清洁日 44.5%. 污染日平均温度比清洁日低  $0.5^\circ\text{C}$ ,湿度低 5.5%,风速低  $0.3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 低湿度和低风速可能是导致武汉夏季  $\text{O}_3$  污染的主要气象条件.

(2) 观测期间,  $\rho(\text{VOCs})$  平均值为  $(67.7 \pm$

32.2)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , OFP 平均值为  $(78.9 \pm 58.6)$   $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . VOCs 的主要组成物种为烷烃 (38.8%) 和含氧 VOCs (15.6%). 污染日  $\rho(\text{VOCs})$  平均值和 OFP 平均值分别为  $(84.1 \pm 35.9)$   $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $(102 \pm 69.6)$   $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 超出清洁日 27.8% 和 33.5%.

(3) 清洁日主要 VOCs 贡献源为 LPG 燃烧源 (29.4%)、工业源 (25.5%) 和油气挥发源 (24.6%); 污染日主要 VOCs 贡献源为油气挥发源 (33.4%) 和 LPG 燃烧源 (26.0%), 贡献量相较于清洁日分别增加 5.2 和 1.4  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 应作为武汉市夏季  $\text{O}_3$  污染防控的重点.

(4) 为有效预防夏季  $\text{O}_3$  污染, 武汉及武汉东部黄石、黄冈和鄂州的 LPG 燃烧源、油气挥发源需要加强协同防控.

#### 参考文献:

- [1] Guo H, Ling Z H, Cheung K, *et al.* Characterization of photochemical pollution at different elevations in mountainous areas in Hong Kong [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(8): 3881-3898.
- [2] Cheng H R, Guo H, Saunders S M, *et al.* Assessing photochemical ozone formation in the Pearl River Delta with a photochemical trajectory model [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(34): 4199-4208.
- [3] Camredon M, Aumont B, Lee-Taylor J, *et al.* The SOA/VOC/ $\text{NO}_x$  system: an explicit model of secondary organic aerosol formation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7**(21): 5599-5610.
- [4] Tsigaridis K, Lathière J, Kanakidou M, *et al.* Naturally driven variability in the global secondary organic aerosol over a decade [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2005, **5**(7): 1891-1904.
- [5] Yao Z L, Shen X B, Ye Y, *et al.* On-road emission characteristics of VOCs from diesel trucks in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **103**: 87-93.
- [6] Wei W, Cheng S Y, Li G H, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a petroleum refinery in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 358-366.
- [7] 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.
- [8] Xue L K, Wang T, Gao J, *et al.* Ground-level ozone in four Chinese cities: precursors, regional transport and heterogeneous processes [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(23): 13175-13188.
- [9] Ling Z H, Guo H, Cheng H R, *et al.* Sources of ambient volatile organic compounds and their contributions to photochemical ozone formation at a site in the Pearl River Delta, southern China [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2310-2319.
- [10] Wang M, Shao M, Lu S H, *et al.* Evidence of coal combustion contribution to ambient VOCs during winter in Beijing [J]. *Chinese Chemical Letters*, 2013, **24**(9): 829-832.
- [11] An J L, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in an industrial area of Nanjing, Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **97**: 206-214.
- [12] Cai C J, Geng F H, Tie X X, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(38): 5005-5014.
- [13] Lyu X P, Chen N, Guo H, *et al.* Ambient volatile organic compounds and their effect on ozone production in Wuhan, central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **541**: 200-209.
- [14] Abeleira A, Pollack I B, Sive B, *et al.* Source characterization of volatile organic compounds in the Colorado Northern Front Range Metropolitan Area during spring and summer 2015 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **122**(6): 3595-3613.
- [15] Zheng H, Kong S F, Xing X L, *et al.* Monitoring of volatile organic compounds (VOCs) from an oil and gas station in northwest China for 1 year [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(7): 4567-4595.
- [16] Yuan Z B, Lau A K H, Shao M, *et al.* Source analysis of volatile organic compounds by positive matrix factorization in urban and rural environments in Beijing [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D2), doi: 10.1029/2008JD011190.
- [17] Zheng H, Kong S F, Chen N, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds: implications to reactivity, ozone formation, and secondary organic aerosol potential [J]. *Atmospheric Research*, 2021, **249**, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105344.
- [18] Liu Y H, Wang H L, Jing S G, *et al.* Strong regional transport of volatile organic compounds (VOCs) during wintertime in Shanghai megacity of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **244**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117940.
- [19] 林理量, 程勇, 曹礼明, 等. 深圳臭氧污染日的 VOCs 组成与来源特征 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(8): 3484-3492.
- [19] Lin L L, Cheng Y, Cao L M, *et al.* The characterization and source apportionment of VOCs in Shenzhen during ozone polluted period [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(8): 3484-3492.
- [20] 张敬巧, 王宏亮, 方小云, 等. 廊坊开发区 8~9 月  $\text{O}_3$  污染过程 VOCs 污染特征及来源分析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(10): 4632-4640.
- [20] Zhang J Q, Wang H L, Fang X Y, *et al.* Characteristics and source of VOCs during  $\text{O}_3$  pollution between August to September, Langfang development zones [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(10): 4632-4640.
- [21] 王文美, 高璟赞, 肖致美, 等. 天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 3585-3594.
- [21] Wang W M, Gao J Y, Xiao Z M, *et al.* Characteristics and sources of VOCs at different ozone concentration levels in Tianjin [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 3585-3594.
- [22] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* Characteristics, source apportionment and contribution of VOCs to ozone formation in Wuhan, Central China [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **192**: 55-71.
- [23] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [24] Polissar A V, Hopke P K, Poirot R L. Atmospheric aerosol over Vermont: chemical composition and sources [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(23): 4604-4621.
- [25] 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.
- [25] Ren Y J, Ma S L, Wang S W, *et al.* Ambient VOCs

- characteristics, ozone formation potential, and source apportionment of air pollution in spring in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2577-2585.
- [26] 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.
- [27] Song Y, Shao M, Liu Y, *et al.* Source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(12): 4348-4353.
- [28] 金丹. 上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 132-139.
- Jin D. Role of atmospheric VOCs in ozone formation in summer in Shanghai suburb [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 132-139.
- [29] 张子金, 林煜棋, 张煜娴, 等. 南京毒性挥发性有机化合物夏冬季源解析及健康风险评估[J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5673-5686.
- Zhang Z J, Lin Y Q, Zhang Y X, *et al.* Source analysis and health risk assessment of toxic volatile organic compounds in Nanjing in summer and winter [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5673-5686.
- [30] Xiong C, Wang N, Zhou L, *et al.* Component characteristics and source apportionment of volatile organic compounds during summer and winter in downtown Chengdu, southwest China[J]. *Atmospheric Environment*, 2021, **258**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118485.
- [31] Zhu Y H, Yang L X, Chen J M, *et al.* Characteristics of ambient volatile organic compounds and the influence of biomass burning at a rural site in Northern China during summer 2013 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 156-165.
- [32] Zhang L H, Li H, Wu Z H, *et al.* Characteristics of atmospheric volatile organic compounds in urban area of Beijing: variations, photochemical reactivity and source apportionment[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2020, **95**: 190-200.
- [33] 杜桂敏, 张良, 王晓利, 等. 衡水夏季典型时段 VOCs 污染特征及 O<sub>3</sub> 污染过程分析[J]. *中国环境监测*, 2020, **36**(6): 72-79.
- Du G M, Zhang L, Wang X L, *et al.* Analysis of VOCs pollution characteristics and O<sub>3</sub> pollution process in the typical summer period of Hengshui [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, **36**(6): 72-79.
- [34] 温彦平, 闫雨龙, 李丽娟, 等. 太原市夏季挥发性有机物污染特征及来源分析[J]. *太原理工大学学报*, 2016, **47**(3): 331-336.
- Wen Y P, Yan Y L, Li L J, *et al.* Pollution characteristic and source analysis of volatile organic compounds in summer in Taiyuan[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2016, **47**(3): 331-336.
- [35] 周雪明, 项萍, 段菁春, 等. 佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4124-4132.
- Zhou X M, Xiang P, Duan J C, *et al.* Pollution characteristics of non-methane hydrocarbons during winter and summer in Foshan city[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4124-4132.
- [36] 王帅, 崔建升, 冯亚平, 等. 石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(12): 5325-5335.
- Wang S, Cui J S, Feng Y P, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs and O<sub>3</sub> in Shijiazhuang [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(12): 5325-5335.
- [37] 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 等. 成都市 2017 年夏季大气 VOCs 污染特征、臭氧生成潜势及来源分析[J]. *环境科学研究*, 2019, **32**(4): 619-626.
- Xu C X, Chen J H, Han L, *et al.* Analyses of pollution characteristics, ozone formation potential and sources of VOCs atmosphere in Chengdu city in summer 2017 [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, **32**(4): 619-626.
- [38] Simayi M, Shi Y Q, Xi Z Y, *et al.* Understanding the sources and spatiotemporal characteristics of VOCs in the Chengdu Plain, China, through measurement and emission inventory[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **714**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136692.
- [39] Mo Z W, Shao M, Lu S H. Compilation of a source profile database for hydrocarbon and OVOC emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **143**: 209-217.
- [40] Zhong Z M, Sha Q E, Zheng J Y, *et al.* Sector-based VOCs emission factors and source profiles for the surface coating industry in the Pearl River Delta region of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **583**: 19-28.
- [41] Hui L R, Liu X G, Tan Q W, *et al.* VOC characteristics, sources and contributions to SOA formation during haze events in Wuhan, Central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **650**: 2624-2639.
- [42] 王成辉, 陈军辉, 韩丽, 等. 成都市城区大气 VOCs 季节污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3951-3960.
- Wang C H, Chen J H, Han L, *et al.* Seasonal pollution characteristics and analysis of the sources of atmospheric VOCs in Chengdu urban area[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3951-3960.
- [43] 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 等. 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[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3066-3075.
- Niu Y Y, Liu Z C, Li R M, *et al.* Characteristics, source apportionment, and environmental impact of volatile organic compounds in summer in Yangquan [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3066-3075.
- [44] Li L Y, Xie S D, Zeng L M, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds and their role in ground-level ozone formation in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **113**: 247-254.
- [45] Liu Y, Shao M, Lu S H, *et al.* Source apportionment of ambient volatile organic compounds in the Pearl River Delta, China; part II[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6261-6274.
- [46] Ou J M, Guo H, Zheng J Y, *et al.* Concentrations and sources of non-methane hydrocarbons (NMHCs) from 2005 to 2013 in Hong Kong: a multi-year real-time data analysis [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **103**: 196-206.
- [47] 胡泳涛, 张远航, 谢绍东, 等. 区域高时空分辨率 VOC 天然源排放清单的建立[J]. *环境科学*, 2001, **22**(6): 1-6.
- Hu Y T, Zhang Y H, Xie S D, *et al.* Development of biogenic VOC emissions inventory with high temporal and spatial resolution [J]. *Environmental Science*, 2001, **22**(6): 1-6.
- [48] Wang F J, Zhang Z Y, Acciai C, *et al.* An integrated method for factor number selection of PMF model: case study on source apportionment of ambient volatile organic compounds in Wuhan [J]. *Atmosphere*, 2018, **9**(10), doi: 10.3390/atmos9100390.
- [49] Tao J, Qi L, Shi W Z. Estimation and analysis of emissions from on-road vehicles in Mainland China for the period 2011-2015 [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **191**: 500-512.
- [50] 武汉市统计局, 国家统计局武汉调查队. 武汉统计年鉴-2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.

## CONTENTS

Impacts of Changes in Meteorological Conditions During COVID-19 Lockdown on PM <sub>2.5</sub> Concentrations over the Jing-Jin-Ji Region .....	QIU Yu-lu, CHEN Lei, ZHU Jia, <i>et al.</i> (2831)
Influence of COVID-19 Prevention and Control Measures on PM <sub>2.5</sub> Concentration, Particle Size Distribution, Chemical Composition, and Source in Zhengzhou, China .....	HUANG Bing-yi, WANG Shen-bo, HE Bing, <i>et al.</i> (2840)
Concentration Variation and Source Analysis of Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> During COVID-19 Control in Suzhou .....	MIAO Qing, YANG Qian, WU Ye-zheng, <i>et al.</i> (2851)
Changes in Carbonaceous Aerosol in the Northern Suburbs of Nanjing from 2015 to 2019 .....	XIE Tian, CAO Fang, ZHANG Yan-lin, <i>et al.</i> (2858)
Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> Based on Hybrid Chemical Transport and Receptor Model in Chongqing .....	PENG Chao, LI Zhen-liang, CAO Yun-qing, <i>et al.</i> (2867)
Analysis on the Characteristics of Oxidation Potential and Influence Sources of PM <sub>2.5</sub> in Baoding City in Winter .....	WU Ji-yan, YANG Chi, ZAHNG Chun-yan, <i>et al.</i> (2878)
Pollution Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Nitrogen in PM <sub>2.5</sub> in Jiangbei New Area, Nanjing .....	GUAN Lu, DING Cheng, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2888)
Organic Aerosols and Source Analysis of Fine Particles in the Background of Shiwanda Mountain, Guangxi .....	XING Jia-li, CAO Fang, WANG Qian, <i>et al.</i> (2895)
Comparison of Regional Transport and Transformation Models of Atmospheric Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Research on Key Influencing Factors: Take the Beijing-Tianjin-Hebei Region as Example .....	ZHANG Xin-lu, LIU Shi-jie, HAN Mei-li, <i>et al.</i> (2906)
Exploring Formation of Ozone in Typical Cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region Using Process Analysis .....	TANG Ying-xiao, YAO Qing, CAI Zi-ying, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics and Meteorological Factors of PM <sub>2.5</sub> -O <sub>3</sub> Compound Pollution in Tianjin .....	XIAO Zhi-mei, LI Yuan, KONG Jun, <i>et al.</i> (2928)
Spatio-temporal Characteristics of Air Quality and Influencing Factors in Shandong Province from 2016 to 2020 .....	ZHOU Meng-ge, YANG Yi, SUN Yuan, <i>et al.</i> (2937)
Trend Changes in Ozone Pollution and Sensitivity Analysis of Ozone in Henan Province .....	YAN Yang-yang, YIN Sha-sha, HE Qin, <i>et al.</i> (2947)
Effects of Tropical Cyclones on Ozone Pollution in the Pearl River Delta in Autumn .....	ZHAO Wei, LÜ Meng-yao, LU Qing, <i>et al.</i> (2957)
Real-time Composition and Sources of VOCs in Summer in Wuhan .....	SU Wei-feng, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2966)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Summer in Yuncheng City .....	WEN Xiao-yu, ZHAO Wen-ting, LUO Shu-zhen, <i>et al.</i> (2979)
Neonicotinoid Insecticides Threaten Surface Waters at the National Scale in China .....	FAN Dan-dan, LIU Hong-ling, YANG Liu-yan (2987)
Spatiotemporal Distribution and Risk Assessment of Pharmaceuticals in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River .....	WU Jun-mei, WEI Lin, PENG Jing-qian, <i>et al.</i> (2996)
Pollution Characteristics and Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Underground and Surface Drinking Water Sources in Northeast Inner Mongolia .....	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, FU Qing, <i>et al.</i> (3005)
Impact of Land Use Types at Different Scales on Surface Water Environment Quality and Its Driving Mechanism .....	SONG Jing-wen, ZHANG Xue-xia, JIANG Dong-yang, <i>et al.</i> (3016)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Nitrogen and Its Driving Factors .....	LI Gui-fang, YANG Heng, YE Yuan-hang, <i>et al.</i> (3027)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Lake Qinghai .....	ZHANG Ya-ran, CHE Fei-fei, FU Zheng-hui, <i>et al.</i> (3037)
Analysis of Heavy Metal Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Surface Sediments in Dongjiang Lake .....	ZHAO Xiao-liang, LI Xiang, LU Hong-bin, <i>et al.</i> (3048)
Kinetic Release Characteristics of Organic Phosphorus of Sediment-water and Water Quality Risks .....	LIU Zhe-zhe, NI Zhao-kui, LIU Si-ru, <i>et al.</i> (3058)
Distribution Characteristics, Source Analysis, and Pollution Evaluation of Organic Matter in Surface Sediments of Qingpu District, Yangtze River Delta Integration Demonstration Area .....	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, TU Yao-ji, <i>et al.</i> (3066)
Distribution Characteristics of Microplastics and Their Migration Patterns in Xiangxi River Basin .....	CHEN Sheng-sheng, LI Wei-ming, ZHANG Kun, <i>et al.</i> (3077)
Community Structure and Microbial Function Responses of Biofilms Colonizing on Microplastics with Vertical Distribution in Urban Water .....	CHEN Yu-fang, YAN Zhen-hua, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (3088)
Community Structure of Phytoplankton and Environmental Impact Factors in Lake Hongze from 2015 to 2020 .....	QU Ning, DENG Jian-ming, ZHANG Zhen, <i>et al.</i> (3097)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Nanhu Lake in Jiaxing City .....	WANG Ya-wen, LI Ying-he, ZHANG Bo, <i>et al.</i> (3106)
Temporal and Spatial Variation Characteristics and Source Analysis of Agricultural Non-point Source Pollution Load in Guangdong During the Past 20 Years .....	GE Xiao-jun, HUANG Bin, YUAN Zai-jian, <i>et al.</i> (3118)
Output Characteristics and Driving Mechanism of Agricultural Non-point Source (AGNPS) Pollutant in Plain and Valley Region of Upper Yangtze River, China .....	TAN Shao-jun, LIU Yang, ZHU Xiao-jie, <i>et al.</i> (3128)
Risk Assessment Method of Non-point Source Pollution Output for Watershed Using High Resolution Data .....	GU Jing-jing, YE Yun-tao, DONG Jia-ping, <i>et al.</i> (3140)
Spectral Characteristics Change in Dissolved Organic Matter in Urban River Under the Influences of Different Intensities of Non-point Source Pollution .....	CHEN Xu-dong, GAO Liang-min (3149)
Combination of Ecological Ditch and Bioretention Pond to Control Rural Runoff Pollution .....	SHI Lei, YANG Xiao-li, WU Qing-yu, <i>et al.</i> (3160)
Influence of Different Hydraulic Disturbance Intensities on the Migration of Aged PSMPs Between Sediment and Water .....	WU Xiang-xiang, AI Ping, LI Da-peng (3168)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Rainfall Runoff from Roofs in the Central District of Beijing .....	XI Yue, GUO Jing, TAO Lei, TIAN Ying, <i>et al.</i> (3177)
Inter-annual Changes in Runoff Quality from Green Roofs with Different Vegetation .....	ZHANG Sun-xun, ZHANG Shou-hong, GE De, <i>et al.</i> (3187)
Effectivity of Multiphase Fenton-like System of Iron Reduction Induced by Bisphenol A Authigenic Photoelectron .....	CAO Si-yu, XU Lu, FU Quan-chao, <i>et al.</i> (3195)
Removal Characteristics of Four Typical Antibiotics in Denitrification System .....	TANG Jia, CHEN Xi, QIN Mu-chuan, <i>et al.</i> (3204)
Adsorption Capacity and Mechanism of Biochar Derived from Typical Agricultural Wastes for Cadmium in Aqueous Solutions .....	GONG Pei-yun, SUN Li-juan, SONG Ke, <i>et al.</i> (3211)
Effect of Humic Acid-Heavy Metals on the Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX Bacteria and Its Kinetic Analysis .....	LI Yun, CUI Nan, XIONG Xing-xing, <i>et al.</i> (3221)
Responding Mechanism of Vegetation Cover to Climate Change and Human Activities in Southwest China from 2000 to 2020 .....	XU Yong, HUANG Wen-ting, DOU Shi-qing, <i>et al.</i> (3230)
Spatial Distribution and Eco-stoichiometric Characteristics of Soil Nutrient Elements Under Different Vegetation Types in the Yellow River Delta Wetland .....	SUN De-bin, LI Yun-zhao, YU Jun-bao, <i>et al.</i> (3241)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Soils of the Northeast Tibetan Plateau .....	WEN Xiang-jie, CHEN Zhao-hui, XU Wei-xin, <i>et al.</i> (3253)
Effect of Land Use/Land Cover Change on the Concentration of Se and Heavy Metals in Soils from a "Return Cropland to Forest" Area, Southwest China .....	LIU Yong-lin, LIU Shu-ling, WU Mei, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Characteristics and Risk Assessment of Soil Heavy Metals from Puding Karst Critical Zone, Guizhou Province .....	ZHANG Qian, HAH Gui-lin (3269)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Germanium in Soil in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin .....	DONG Qiu-yao, LAI Shu-ya, SONG Chao, <i>et al.</i> (3278)
Heavy Metal Pollution Characteristics and Risk Assessment of Golden Snub-nosed Monkey ( <i>Rhinopithecus roxellana</i> ) Habitat in Shennongjia Mountains .....	YAN Jia-li, YU Zi-ling, YU Hui-liang, <i>et al.</i> (3288)
Utilization and Remediation of Heavily Cadmium-Contaminated Agricultural Soils by Two Crop Rotation Patterns After Lime and Sepiolite Passivation .....	XU Lu, ZHOU Chun-hai, LIU Mei, <i>et al.</i> (3299)
Effects of Phosphorus Sufficiency and Deficiency on Cadmium Uptake and Transportation by Rice .....	TAN Wen-tao, HUO Yang, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3308)
Responses of Cd Accumulation in Rice and Spectral Characteristics of Soil Dissolved Organic Matter Regulated by Soil Amendments .....	LUO Hui-long, CHEN Juan, ZHANG Yun-hui, <i>et al.</i> (3315)
Responses of Soil Fungal Communities to Subalpine Meadow Degradation in Mount Wutai .....	LUO Zheng-ming, HE Lei, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (3328)
Response of Soil Fungal Communities in Diversified Rotations of Wheat and Different Crops .....	JIN Hai-yang, YUE Jun-qin, YAN Ya-qian, <i>et al.</i> (3338)
Spatial Characterization of Stable Isotope Composition of Organic Carbon from Farmland Soils in Chongqing .....	LIAO Yu-qin, LONG Juan, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (3348)
Characteristics of Soil NO Emissions in the Yangtze River Delta Region for Year 2018 .....	LIAO Jia-qiang, XUE Jin, WANG Wen-jin, <i>et al.</i> (3357)
Thermal Environment Evolution and Response Mechanism of Urban Sprawl Based on Multi-source Data .....	LIANG Jian-she, BAI Yong-ping, YANG Xue-di, <i>et al.</i> (3365)