

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期  
Vol.42 No.8

目 次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案 ..... 严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)

天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源 ..... 王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)

重庆市主城区 O<sub>3</sub> 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)

汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性 ..... 陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)

2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析 ..... 毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)

北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估 ..... 党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)

郑州市 PM<sub>2.5</sub> 组分、来源及其演变特征 ..... 赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)

上海市 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应 ..... 程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)

粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析 ..... 段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)

河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征 ..... 高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)

广州地区室内灰尘中典型邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险 ..... 刘晓途, 彭长风, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)

天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价 ..... 武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)

河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征 ..... 杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)

重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征 ..... 周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)

城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征 ..... 俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)

白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征 ..... 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)

夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化 ..... 宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)

洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素 ..... 陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)

农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响 ..... 罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)

沱江流域总氮面源污染负荷时空演变 ..... 肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)

微塑料对海水抗生素抗性基因的影响 ..... 周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)

磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用 ..... 王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)

潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果 ..... 程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)

三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价 ..... 黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锟, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素 ..... 李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)

淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析 ..... 李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)

DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制 ..... 丁翔, 李志武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)

市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性 ..... 王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)

亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响 ..... 王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)

A<sup>2</sup>/O 与倒置 A<sup>2</sup>/O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析 ..... 李金成, 郭雅妮, 齐蝶, 杨敏 (3866)

厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析 ..... 闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)

活性污泥微生物群落结构与与环境因素响应关系分析 ..... 马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)

汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析 ..... 朱宇恩, 文瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)

基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析 ..... 管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)

典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价 ..... 唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)

大气 CO<sub>2</sub> 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)

椰糠生物炭对热区双季稻田 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放的影响 ..... 王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)

不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)

物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应 ..... 杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)

米利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析 ..... 秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)

黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应 ..... 林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)

秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响 ..... 靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)

镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响 ..... 陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)

岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征 ..... 周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)

锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制 ..... 刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)

不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响 ..... 王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)

4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制 ..... 丁园, 教师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)

叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响 ..... 张雅荟, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)

镉对不同生长期籽粒菟植物螯合肽的影响 ..... 刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)

中国造纸业物质代谢演化特征 ..... 刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)

《环境科学》征订启事(3651) 《环境科学》征稿简则(3718) 信息(3836, 3885, 3893)

# 天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源

王文美<sup>1</sup>, 高璟赟<sup>2\*</sup>, 肖致美<sup>2</sup>, 李源<sup>2</sup>, 毕温凯<sup>2</sup>, 李立伟<sup>2</sup>, 杨宁<sup>2</sup>, 徐虹<sup>2</sup>, 孔君<sup>2</sup>

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津市生态环境监测中心, 天津 300191)

**摘要:** 为深入了解挥发性有机物(VOCs)对臭氧(O<sub>3</sub>)污染的影响,基于2019年夏季天津市O<sub>3</sub>和VOCs高时间分辨率在线监测数据,对不同O<sub>3</sub>浓度级别VOCs污染特征及来源进行分析。结果表明,2019年夏季天津市O<sub>3</sub>浓度为优、良、轻度污染和中度污染时,VOCs浓度分别为32.94、38.10、42.41和47.12 μg·m<sup>-3</sup>。VOCs组分中烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃浓度占比分别为61.72%~63.36%、14.96%~15.51%、2.73%~4.13%和18.53%~19.10%,其中烷烃在O<sub>3</sub>浓度为良和轻度污染时占比略高,烯烃和炔烃在O<sub>3</sub>浓度为优时占比最高,芳香烃在O<sub>3</sub>浓度为中度污染时占比最高。浓度较高的VOCs物种主要为丙烷、乙烷、乙烯、甲苯、正丁烷、异戊烷、间/对-二甲苯、丙烯、乙炔、正己烷、异丁烷、苯、正戊烷、异戊二烯和1,2,3-三甲苯,其中异戊烷、正戊烷、苯、乙烯、丙烯、正丁烷和异丁烷浓度贡献随O<sub>3</sub>浓度级别上升逐步增加,异戊二烯和1,2,3-三甲苯浓度贡献在轻中度污染时明显升高。烯烃和芳香烃对臭氧生成潜势(OFP)贡献较高,随着O<sub>3</sub>浓度级别上升,烯烃对OFP贡献下降,芳香烃贡献上升。乙烯、丙烯、间/对-二甲苯、1,2,3-三甲苯、甲苯、异戊二烯、反-2-丁烯和顺-2-戊烯是影响臭氧生成的关键物种,其中1,2,3-三甲苯、异戊二烯、丙烯和乙烯对OFP的贡献比例在O<sub>3</sub>为轻中度污染时明显增加。源解析结果显示,机动车排放源、溶剂使用源、LPG/汽油挥发源、燃烧源、石化工业排放源、天然源和其他工艺过程源是天津市夏季VOCs主要来源,随着O<sub>3</sub>浓度级别上升,机动车排放源、LPG/汽油挥发源、石化工业排放源和天然源贡献逐渐增加,燃烧源和其他工艺过程源贡献总体下降,溶剂使用源贡献在轻中度污染时有所下降。

**关键词:** 臭氧(O<sub>3</sub>); 浓度级别; 挥发性有机物(VOCs); 污染特征; 来源解析

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3585-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101129

## Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin

WANG Wen-mei<sup>1</sup>, GAO Jing-yun<sup>2\*</sup>, XIAO Zhi-mei<sup>2</sup>, LI Yuan<sup>2</sup>, BI Wen-kai<sup>2</sup>, LI Li-wei<sup>2</sup>, YANG Ning<sup>2</sup>, XU Hong<sup>2</sup>, KONG Jun<sup>2</sup>

(1. School of Environmental Science & Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. Tianjin Eco-Environmental Monitoring Center, Tianjin 300191, China)

**Abstract:** To further study the effect of volatile organic compounds (VOCs) on ozone pollution, the characteristics and sources of VOCs at different ozone (O<sub>3</sub>) concentration levels were analyzed, using high-resolution online monitoring data obtained from Tianjin in the summer of 2019. Results showed that VOCs concentrations were 32.94, 38.10, 42.41, and 47.12 μg·m<sup>-3</sup>, when the O<sub>3</sub> concentration levels were categorized as excellent, good, light pollution, and moderate pollution, respectively. VOCs were composed of alkanes, alkenes, alkynes and aromatics, which accounted for 61.72% - 63.36%, 14.96% - 15.51%, 2.73% - 4.13%, and 18.53% - 19.10%, respectively, of VOCs concentrations at different O<sub>3</sub> concentration levels. Among them, the proportion of alkanes was slightly higher when O<sub>3</sub> concentration was categorized as good or light pollution, alkenes and alkynes accounted for the highest proportion when O<sub>3</sub> concentration was excellent, and the proportion of aromatics was highest during periods of moderate pollution. The main VOCs species were propane, ethane, ethylene, toluene, *n*-butane, isopentane, *m/p*-xylene, propylene, acetylene, *n*-hexane, isobutene, benzene, *n*-pentane, isoprene, and 1,2,3-trimethylbenzene. The concentration percentage of isopentane, *n*-pentane, benzene, ethylene, propylene, *n*-butane, and isobutane increased gradually as O<sub>3</sub> concentration increased. Significant increases in isoprene and 1,2,3-trimethylbenzene were observed during periods of light and moderate pollution. Alkenes and aromatics had higher ozone formation potential (OFP), and the contribution of alkenes to OFP declined as the O<sub>3</sub> level rose, whereas that of aromatics increased. Ethylene, propylene, *m/p*-xylene, 1,2,3-trimethylbenzene, toluene, isoprene, *trans*-2-butene, and *cis*-2-pentene were the key species for O<sub>3</sub> generation, and the contribution ratio of 1,2,3-trimethylbenzene, isoprene, propylene, and ethylene to OFP increased significantly during light or moderate O<sub>3</sub> pollution. Positive matrix factorization was applied to estimate the source contributions of VOCs. Automobile exhaust, solvent usage, liquefied petroleum gas (LPG)/gasoline evaporation, combustion, petrochemical industrial emissions, natural sources, and other industrial emissions were identified as major sources of VOCs in summer. As O<sub>3</sub> concentration level rose, the contribution percentage of automobile exhaust, LPG/gasoline evaporation, petrochemical industrial emissions, and natural sources increased gradually, whereas the contribution of combustion and other industrial emissions decreased overall. The contribution of solvent usage was lower when O<sub>3</sub> levels indicated light or moderate pollution than when it was good.

收稿日期: 2021-01-16; 修订日期: 2021-02-04

基金项目: 天津市科技计划项目(18ZXSZSF00160)

作者简介: 王文美(1983~),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为大气污染与防治,E-mail: wwm\_eia@126.com

\* 通信作者,E-mail: Aileen\_jing@126.com

**Key words:** ozone ( $O_3$ ); concentration levels; volatile organic compounds (VOCs); pollution characterization; source apportionment

随着大气污染防治行动计划和打赢蓝天保卫战三年行动计划深入实施,我国  $PM_{2.5}$  浓度逐年改善,但臭氧( $O_3$ )污染逐渐显现,并呈现污染程度加重、影响范围扩大和污染季节延长的演变态势,已成为制约下一步空气质量改善的重要因子<sup>[1]</sup>. 挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是  $O_3$  生成的关键前体物<sup>[2,3]</sup>,有研究表明  $PM_{2.5}$  浓度下降促使  $O_3$  生成对 VOCs 减排更为敏感<sup>[4]</sup>,因此深入开展 VOCs 相关研究,指导 VOCs 科学合理减排对于改善  $O_3$  污染现状、实现  $O_3$  和  $PM_{2.5}$  污染协同控制具有重要意义.

目前,我国已开展了大量 VOCs 相关研究,研究区域大多集中在长三角<sup>[5~11]</sup>、珠三角<sup>[12~16]</sup>、京津冀<sup>[17~20]</sup>及周边地区<sup>[21,22]</sup>以及成渝地区<sup>[23~25]</sup>等经济发达和人口密集的城市群,研究内容主要为季节性或某次污染过程 VOCs 污染特征、化学反应活性、来源解析以及环境健康风险评估等,对不同  $O_3$  浓度级别下 VOCs 污染特征及来源变化鲜见报道.

天津地处京津冀城市群聚集区,是中国北方重要的工业和港口城市,石油、化工和装备制造等产业发达,拥有国家级石油化工基地,机动车保有量高、港口吞吐量大,是京津冀区域  $O_3$  污染较重的城市之一<sup>[26]</sup>. 关于天津市  $O_3$  污染研究主要集中在  $O_3$  和 VOCs 污染特征分析<sup>[27~34]</sup>,缺少 VOCs 与  $O_3$  关联性分析. 2015 年以来,天津市每年夏季实施臭氧污染防治专项行动,从强化石化、化工、火电、钢铁和建材等行业 VOCs 排放管控、工业涂装等重点行业低(无) VOCs 原辅材料替代、科学制定使用有机溶剂作业计划和加强移动源污染管控等方面推动 VOCs 减排,但  $O_3$  污染依然呈现上升趋势,选取天津作为研究城市开展 VOCs 与  $O_3$  关联分析具有一定代表性. 本研究基于 2019 年夏季天津城区 VOCs 高时间分辨率观测数据,对不同  $O_3$  浓度级别下 VOCs 污染特征、光化学反应活性及来源进行分析,以期为天津市夏季  $O_3$  污染精准防控和 VOCs 科学减排提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 监测地点

观测点位于天津市南开区天津市生态环境监测中心 4 楼顶(39°05'N, 117°09'E),为天津市生态环境监测中心超级观测站,采样器距离地面高度约 15m,周边主要为文教住宅区,无明显工业污染源排放,北侧临近复康路主干道可能带来一定交通源影

响. 监测点位分布见图 1.

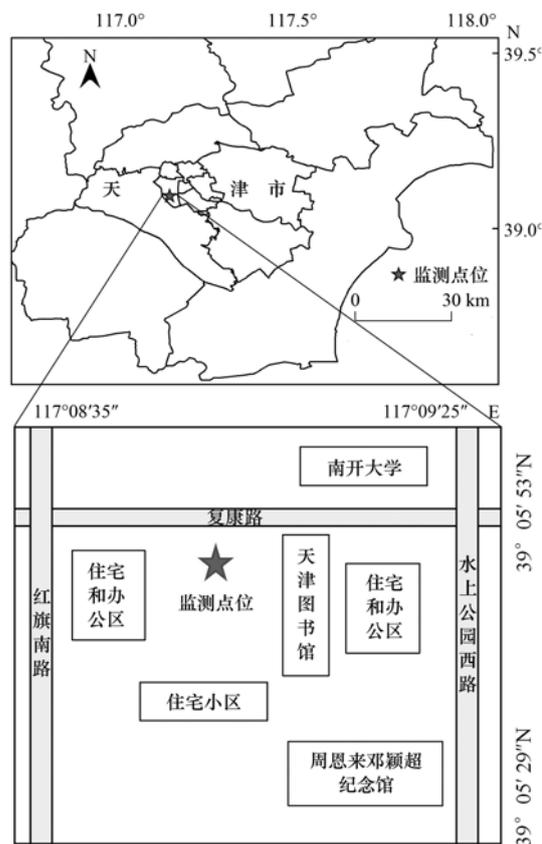


图 1 监测点位分布示意

Fig. 1 Location of the sampling station

### 1.2 监测仪器及分析方法

采用美国热电公司 Thermo 49i 紫外光度法臭氧分析仪监测  $O_3$ ,时间分辨率为 1 h,质量控制按照《环境空气气态污染物( $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $O_3$  和 CO)连续自动监测系统运行和质控技术规范》(HJ 818-2018)要求进行. 采用美国 PerkinElmer Clarus 公司在线气相色谱分析系统监测 VOCs,该系统由自动采样浓缩仪、热脱附仪、50 m × 0.32 mm 硫酸钠脱氧化铝色谱柱、50 m × 0.22 mm × 1 μm 甲基硅烷色谱柱以及双 FID 检测器组成,分别分析 C2 ~ C6 低沸点组分和 C6 ~ C12 高沸点组分,可监测 56 种光化学评估监测网(PAMS)挥发性有机化合物,包括 29 种烷烃、10 种烯烃、16 种芳香烃以及乙炔,时间分辨率为 1 h. 每日 00:00 ~ 01:00 采用摩尔分数为  $2 \times 10^{-9}$  的 Linde Gas North America LLC 标准气体自动进行单点质控检查,定期开展设备维护和校准,符合《环境空气挥发性有机物气相色谱连续监测系统技术要求及监测方法》(HJ 1010-2018)及文献[35]相关质控要求,保证监测数据准确性和有效性. 监测

时间为 2019 年 6 月 1 日至 8 月 31 日,去除仪器故障或维护等造成的数据缺失,共获得 VOCs 有效监测数据 1816 组(有效数据率为 82.2%)。气象观测数据来自中国气象局天津大气边界层观测站(台站编号为 54517)。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 臭氧生成潜势(OFP)

采用最大增量反应活性(maximum incremental reactivity, MIR)法估算 VOCs 的臭氧生成潜势(ozone formation potentials, OFP)<sup>[36,37]</sup>,计算公式如式(1):

$$\text{OFP}_i = \rho(\text{VOCs}_i) \times \text{MIR}_i \quad (1)$$

式中,  $\text{OFP}_i$  为 VOCs 物种  $i$  的  $\text{O}_3$  生成潜势量,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\rho(\text{VOCs}_i)$  为物种  $i$  的实测浓度,  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $\text{MIR}_i$  代表在不同 VOC/ $\text{NO}_x$  比值下 VOCs 物种单位浓度增加最大可产生的  $\text{O}_3$  浓度<sup>[37]</sup>,  $\mu\text{g}\cdot\mu\text{g}^{-1}$ , 以  $\text{O}_3/\text{VOCs}$  计。OFP 可以衡量不同 VOCs 物种对臭氧生成的相对贡献<sup>[25]</sup>, OFP 越大表明对  $\text{O}_3$  生成的相对贡献越大。

#### 1.3.2 正交矩阵因子分解(PMF)模型

利用 EPA PMF5.0 开展 VOCs 来源解析, PMF 基本原理是利用权重计算样本中各化学组分的误差,通过最小二乘法确定主要污染源及其贡献率,通过迭代最小化算法对  $Q$  求解,并要求  $Q$  值尽可能小。具体表达式如式(2)和式(3),不确定度计算参考文献[38,39]:

$$\mathbf{x}_{ij} = \sum_{k=1}^p \mathbf{g}_{ik} \mathbf{f}_{kj} + \mathbf{e}_{ij} \quad (2)$$

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[ \frac{\mathbf{x}_{ij} - \sum_{k=1}^p \mathbf{g}_{ik} \mathbf{f}_{kj}}{u_{ij}} \right]^2 \quad (3)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, p; j = 1, 2, \dots, m)$$

式中,  $\mathbf{x}_{ij}$  为  $i \times j$  矩阵,  $i$  为样品数,  $j$  为 VOCs 种类数目,再将  $\mathbf{x}$  分解为矩阵  $\mathbf{g}$  和矩阵  $\mathbf{f}$ , 其中  $\mathbf{g}$  为  $i \times k$  的源贡献矩阵,  $\mathbf{f}$  为  $k \times j$  的源成分谱矩阵,  $p$  为主要的污染源数目,  $u_{ij}$  为  $\mathbf{x}_{ij}$  的标准偏差,  $\mathbf{e}$  为残差矩阵。PMF 模型在求解过程中的数学约束是使实际  $Q$  接近理论  $Q$ 。

## 2 结果与讨论

2019 年夏季(6 月 1 日~8 月 31 日),天津市  $\text{O}_3$  日最大 8 h 平均浓度范围为 40~264  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 第 95 百分位数浓度为 243  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 超过《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)  $\text{O}_3$  二级浓度限值(160  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )0.52 倍; VOCs 日均浓度范围为 18.07~77.52  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 平均浓度 42.02  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。VOCs 是近

地面  $\text{O}_3$  生成的重要前体物,为更好地了解 VOCs 对  $\text{O}_3$  污染的影响,依据《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(HJ 633-2012),将监测时段内  $\text{O}_3$  日最大 8 h 平均浓度按照不同级别进行统计:一级优( $\text{O}_3 \leq 100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )7 d、二级良( $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} < \text{O}_3 \leq 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )29 d、三级轻度污染( $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} < \text{O}_3 \leq 215 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )24 d 和四级中度污染( $215 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} < \text{O}_3 \leq 265 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )21 d,分别对不同  $\text{O}_3$  浓度级别下气象要素特征、VOCs 污染特征及主要污染源进行分析。

### 2.1 气象要素特征

2019 年夏季,天津市平均气温 27.7℃,气温变化在 19.3~39.0℃之间;平均相对湿度 59.3%,相对湿度变化范围 10%~100%;风向以西南风和东南风为主导,平均风速 1.60  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。不同  $\text{O}_3$  浓度级别气象参数统计结果表明(表 1),  $\text{O}_3$  浓度水平总体与气温呈正相关,与相对湿度呈反相关。气温越高,太阳辐射越强,光化学反应强度越大,近地面生成的  $\text{O}_3$  浓度越高;高相对湿度有利于  $\text{O}_3$  干沉降作用发生,同时紫外辐射在水汽作用下因为消光机制发生衰减,所以  $\text{O}_3$  污染往往伴随着低湿条件<sup>[40]</sup>。从气压和风速来看,  $\text{O}_3$  浓度达到中度污染时,近地面气压明显降低,有利于污染物累积聚集;风速在  $\text{O}_3$  浓度为良至中度污染时变化不大,与  $\text{O}_3$  浓度无明显相关性,可能与不同风向影响有关。

表 1 不同  $\text{O}_3$  浓度级别的气象参数

气象条件	$\text{O}_3$ 浓度级别			
	一级优	二级良	三级轻度污染	四级中度污染
平均气温/℃	25.6	26.6	28.2	30.3
日最高气温/℃	28.5	30.2	32.7	35.4
相对湿度/%	64.8	61.5	58.8	55.6
气压/hPa	1 003.7	1 004.7	1 004.3	1 002.3
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	1.8	1.6	1.5	1.6

不同  $\text{O}_3$  浓度级别的主导风向情况如图 2 所示。一级优主导风向为北风和西北风,风速多大于 2  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;二级良风向分布相对均匀,主要为东北风、偏西风和东南风,其中东北风和东南风风力总体大于偏西风;三级轻度污染主导风向为东南风和西南风,四级中度污染主导风向为西南风和偏南风。同时,随着  $\text{O}_3$  浓度级别上升,静风频率逐渐增加。天津市在西南风和偏南风影响时  $\text{O}_3$  污染相对较重,可能与西南或偏南气流影响时气温较高,大气扩散条件相对稳定,光化学反应较强有关。

### 2.2 VOCs 浓度特征

#### 2.2.1 浓度组成特征

不同浓度级别  $\text{O}_3$  日最大 8 h 平均浓度、VOCs

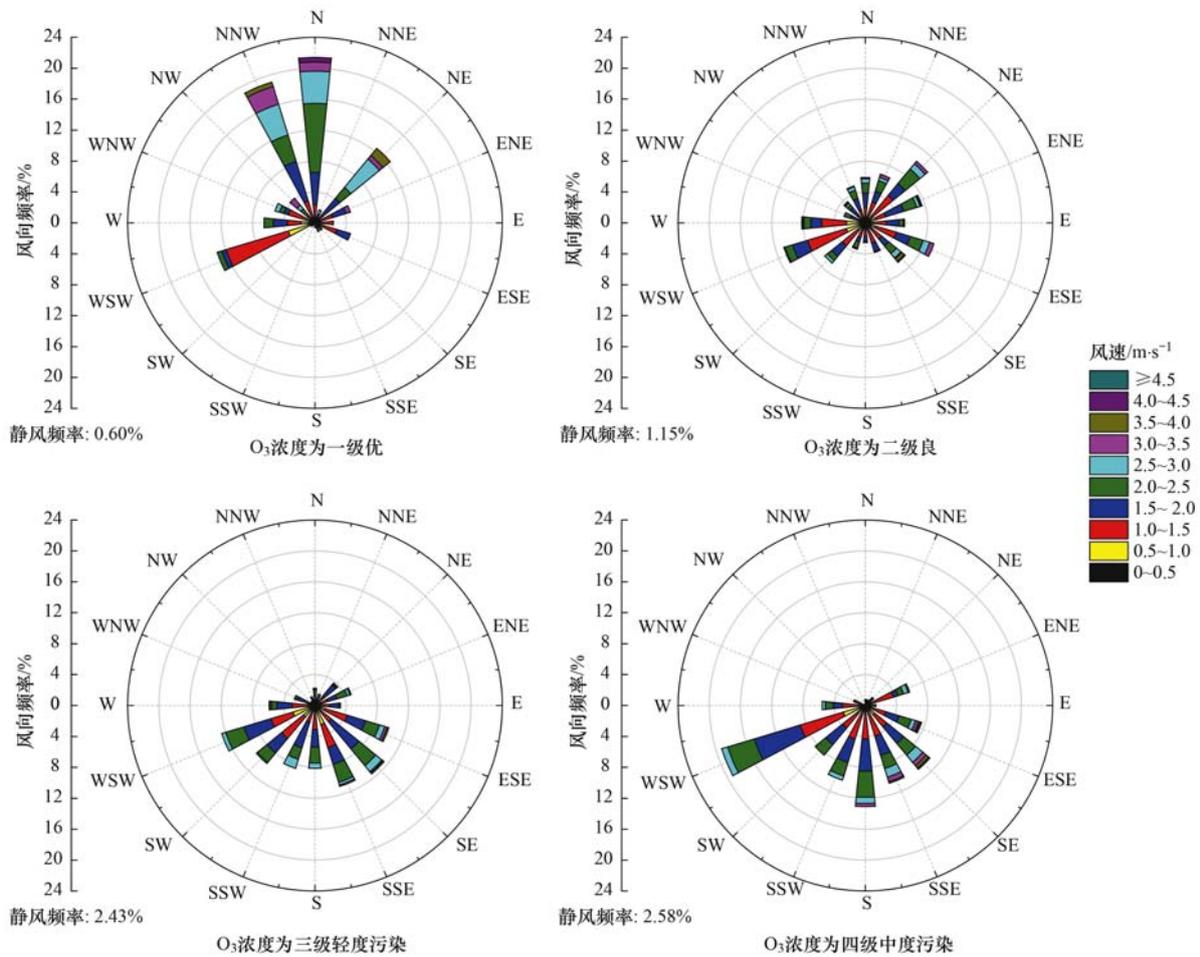


图 2 不同 O<sub>3</sub> 浓度级别风玫瑰图

Fig. 2 Wind rose for different O<sub>3</sub> concentration levels

浓度及其组成情况见图 3 和图 4。一级优至四级中度污染的 O<sub>3</sub> 日最大 8 h 平均浓度均值分别为 79、133、188 和 237 μg·m<sup>-3</sup>, VOCs 浓度均值分别为 32.94、38.10、42.41 和 47.12 μg·m<sup>-3</sup>, 随着 O<sub>3</sub> 浓度上升, VOCs 浓度呈现逐步上升趋势。从 VOCs 浓度组成看, 各级别均为烷烃浓度最高, 在 VOCs 中占比 61.72%~63.36%; 芳香烃和烯烃浓度次之, 占比分别为 18.53%~19.10% 和 14.96%~15.51%, 炔烃浓度最低, 占比 2.73%~4.13%, 说明不同 O<sub>3</sub> 浓度级别下 VOCs 来源构成基本一致。

从不同 O<sub>3</sub> 浓度级别各类 VOCs 浓度变化情况看, 烷烃、烯烃和芳香烃浓度均随 O<sub>3</sub> 浓度级别上升而升高, 炔烃则在中度污染和优时浓度较高, 良和轻度污染时略有下降。从各组分在 VOCs 中占比情况看, 烷烃在不同 O<sub>3</sub> 浓度级别下占比基本相当, 仅在良和轻度污染时相对略高, 可能与烷烃化学性质较为稳定有关; 烯烃和炔烃在优时占比最高, 可能与 O<sub>3</sub> 浓度为优时, 气象条件不利于烯烃和炔烃化学反应有关; 芳香烃在中度污染时占比最高, 与 O<sub>3</sub> 浓度为中度污染时气温较高, 芳香烃作为有机溶剂的主

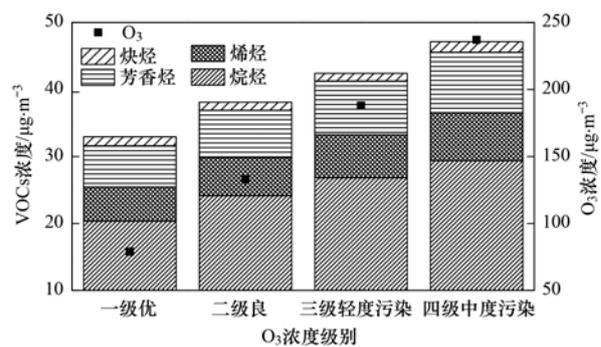


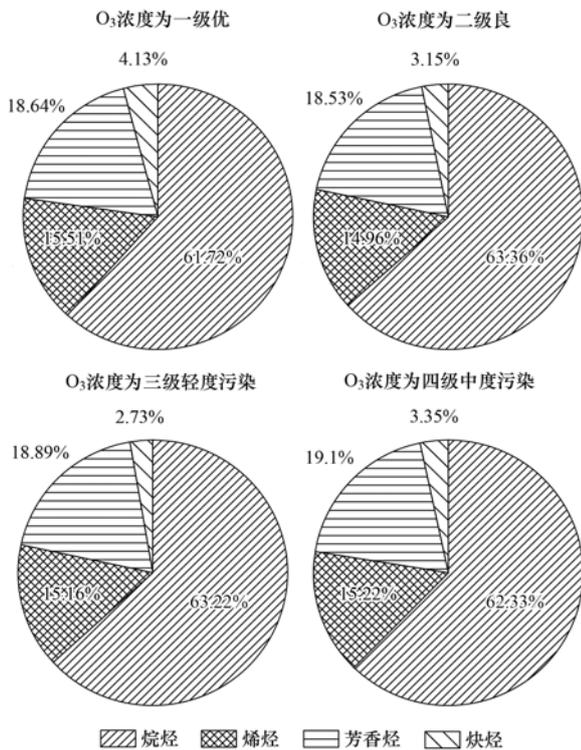
图 3 不同 O<sub>3</sub> 浓度级别下 O<sub>3</sub> 及 VOCs 浓度

Fig. 3 Concentrations of O<sub>3</sub> and VOCs at different O<sub>3</sub> concentration levels

要成分, 随气温升高挥发性增强有关。

### 2.2.2 主要组分特征

不同 O<sub>3</sub> 浓度级别下浓度较高的前 15 种 VOCs 组分见表 2。从中可知, 丙烷、乙烷、乙烯、甲苯、正丁烷、异戊烷、间/对-二甲苯、丙烯、乙炔、正己烷、异丁烷、苯和正戊烷是各级别下浓度普遍较高的 13 种 VOCs 组分, 累计占 VOCs 总浓度的 72.89%~73.67%。

图4 不同 O<sub>3</sub> 浓度级别下 VOCs 浓度组成占比Fig. 4 Percentage of VOCs concentration composition at different O<sub>3</sub> concentration levels

从 13 种组分各等级浓度变化情况看,除乙炔外其余组分均随 O<sub>3</sub> 级别上升浓度不断升高;从对 VOCs 浓度贡献看,异戊烷、正戊烷、苯、乙烯、丙烯、正丁烷和异丁烷浓度贡献基本随 O<sub>3</sub> 级别上升逐渐增加,其余组分呈波动下降趋势.同时,在 O<sub>3</sub> 浓度达到轻、中度污染时,异戊二烯和 1,2,3-三甲苯浓度及其贡献占比明显上升,也进入到浓度较高的 15 种组分之列.

异戊烷和正戊烷一般被认为是汽油挥发的标识组分<sup>[2]</sup>,正丁烷和异丁烷是液化石油气(LPG)的主要成分<sup>[41,42]</sup>,异戊二烯主要来自天然源排放<sup>[43]</sup>,这些组分浓度贡献上升主要与气温升高导致挥发性增强或利于植物排放有关.苯、乙烯和丙烯是重要的化工原料,浓度贡献上升说明石油化工类工业排放对天津市 O<sub>3</sub> 污染影响较大.而甲苯、间/对-二甲苯和正己烷等有机溶剂类组分浓度贡献下降则可能与天津市夏季实施臭氧污染防控专项行动,高温强日照时段禁止开展使用有机溶剂作业行为有关.

苯/甲苯(B/T)比值可初步指示 VOCs 污染源,当 B/T(质量比)接近 0.5 时主要为机动车排放影响<sup>[41,44,45]</sup>,B/T > 1 时主要受燃煤影响<sup>[41,46]</sup>.2019 年夏季天津市不同 O<sub>3</sub> 浓度级别 B/T 比值为 0.33 ~

表2 不同 O<sub>3</sub> 浓度级别浓度较高的前 15 种 VOCs 组分<sup>1)</sup>Table 2 Top 15 VOCs components with the highest concentration at different O<sub>3</sub> concentration levels

一级优	浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	贡献 /%	二级良	浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	贡献 /%	三级轻度污染	浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	贡献 /%	四级中度污染	浓度 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	贡献 /%
丙烷	5.94	18.03	丙烷	7.11	18.66	丙烷	7.54	17.79	丙烷	7.88	16.72
乙烷	4.91	14.91	乙烷	5.64	14.81	乙烷	6.32	14.90	乙烷	7.01	14.88
甲苯	1.99	6.04	乙烯	2.08	5.47	乙烯	2.27	5.36	乙烯	2.67	5.67
乙烷	1.67	5.08	甲苯	1.89	4.96	甲苯	2.22	5.23	正丁烷	2.48	5.26
正丁烷	1.56	4.73	正丁烷	1.81	4.76	正丁烷	2.21	5.22	甲苯	2.25	4.78
间/对-二甲苯	1.51	4.60	间/对-二甲苯	1.70	4.45	异戊烷	1.82	4.29	异戊烷	2.07	4.39
乙炔	1.36	4.13	异戊烷	1.46	3.85	间/对-二甲苯	1.63	3.84	间/对-二甲苯	1.74	3.70
异戊烷	1.19	3.63	乙炔	1.20	3.14	丙烯	1.52	3.59	乙炔	1.58	3.36
正己烷	0.98	2.97	丙烯	1.18	3.10	异丁烷	1.25	2.95	丙烯	1.56	3.30
丙烯	0.91	2.76	正己烷	1.16	3.03	正己烷	1.24	2.93	正己烷	1.37	2.90
异丁烷	0.90	2.72	异丁烷	1.07	2.81	乙炔	1.16	2.73	异丁烷	1.33	2.83
反-2-丁烯	0.82	2.50	苯	0.91	2.40	苯	1.04	2.44	1,2,3-三甲苯	1.26	2.67
苯	0.65	1.99	正戊烷	0.79	2.07	正戊烷	1.02	2.40	苯	1.24	2.63
甲基环戊烷	0.61	1.86	甲基环戊烷	0.73	1.91	1,2,3-三甲苯	1.01	2.39	正戊烷	1.16	2.46
正戊烷	0.59	1.80	异戊二烯	0.67	1.75	异戊二烯	0.88	2.08	异戊二烯	1.15	2.45

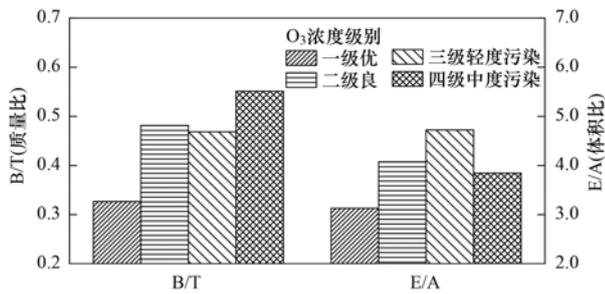
1)一级优、二级良、三级轻度污染和四级中度污染表示 O<sub>3</sub> 浓度级别,下同

0.55,总体随 O<sub>3</sub> 浓度级别上升呈现升高趋势(图 5).说明天津市 VOCs 主要受机动车排放影响,当 O<sub>3</sub> 浓度达到二级良及以上级别时,机动车排放贡献明显增加.乙烷/乙炔(E/A)比值可表征 VOCs 气团的光化学龄,E/A(体积比) > 0.47 表明大气存在老化现象<sup>[47]</sup>.各 O<sub>3</sub> 浓度级别 E/A 比值范围在 3.13 ~ 4.72 之间,VOCs 气团存在明显老化现象,轻度污染

时最为突出,中度污染反而有所下降,可能与利于 O<sub>3</sub> 生成的高温强辐射条件加速了 VOCs 消耗有关.

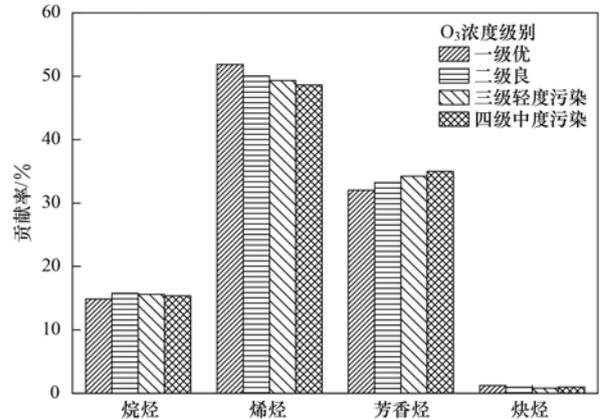
### 2.3 臭氧生成潜势分析

利用最大增量反应活性法估算不同 O<sub>3</sub> 浓度级别下 VOCs 臭氧生成潜势,一级优至四级中度污染时 OFP 值依次为 104.61、118.82、134.67 和 150.75  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 烯烃对 OFP 贡献最高,为

图5 不同 O<sub>3</sub> 浓度级别下 B/T 和 E/A 比值Fig. 5 Ratios of B/T and E/A at different O<sub>3</sub> concentration levels

48.62%~51.85%；芳香烃贡献次之，为32.03%~35.01%；烷烃贡献为14.89%~15.77%，炔烃贡献仅为0.82%~1.23%。虽然烷烃化合物在天津市大气VOCs中浓度占比最高，但由于化学活性较低，对OFP贡献较小；烯烃化合物浓度占比明显低于烷烃，但其所含的碳碳双键化学反应活性强，对OFP贡献最大；芳香烃化合物化学反应活性也相对较强，对OFP贡献仅次于烯烃。从不同级别下各类VOCs臭氧生成潜势贡献变化来看，随着O<sub>3</sub>浓度级别上升，烯烃对OFP贡献比例逐渐下降，芳香烃对OFP贡献比例逐渐上升，烷烃和炔烃变化与浓度贡献占比一致。由此可见，烯烃和芳香烃是天津市夏季O<sub>3</sub>生成的主要贡献者，虽然轻中度污染时芳香烃对OFP贡献上升使得烯烃相对贡献有所下降，但夏季烯烃和芳香烃排放管控均不容忽视。

表3列举了不同O<sub>3</sub>浓度级别下对OFP贡献较大的前10种VOCs组分，总贡献占比达73.42%~

图6 不同 O<sub>3</sub> 浓度级别下 VOCs 化合物 OFP 贡献率Fig. 6 OFP contribution percentages of VOCs at different O<sub>3</sub> concentration levels

74.92%。对OFP贡献较高的组分主要是C<sub>2</sub>~C<sub>5</sub>的烯烃和C<sub>6</sub>~C<sub>9</sub>的芳香烃，如乙烯、丙烯、间/对-二甲苯、1,2,3-三甲苯、甲苯、异戊二烯、反-2-丁烯、顺-2-戊烯、邻-二甲苯、正丁烯和1-乙基-3-甲基苯等。随着O<sub>3</sub>级别上升，这些组分的OFP总体呈现逐步升高趋势，其中1,2,3-三甲苯、异戊二烯、丙烯和乙烯这4种组分贡献占比明显上升，四级中度污染时OFP贡献分别较一级优上升118.3%、46.32%、18.87%和10.79%，其余组分OFP贡献均不同程度下降。由于异戊二烯和1,2,3-三甲苯与天然源排放有关，丙烯和乙烯主要来自石化工业源排放，说明天然源和石化工业源对天津市夏季臭氧污染贡献较为突出，在有利于臭氧生成的气象条件下应进一步加强石化工业源排放管控。

表3 不同 O<sub>3</sub> 浓度级别 OFP 贡献较高的前 10 种 VOCs 组分Table 3 Top 10 VOCs components with the highest OFP at different O<sub>3</sub> concentration levels

一级优	OFP / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	贡献 /%	二级良	OFP / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	贡献 /%	三级轻度污染	OFP / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	贡献 /%	四级中度污染	OFP / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	贡献 /%
乙烯	14.86	14.20	乙烯	18.51	15.58	乙烯	20.18	14.98	乙烯	23.72	15.74
反-2-丁烯	12.50	11.95	丙烯	13.64	11.48	丙烯	17.59	13.06	丙烯	18.01	11.95
间/对-二甲苯	11.75	11.23	间/对-二甲苯	13.16	11.08	间/对-二甲苯	12.63	9.38	1,2,3-三甲苯	15.00	9.95
丙烯	10.51	10.05	反-2-丁烯	8.08	6.80	1,2,3-三甲苯	12.09	8.97	间/对-二甲苯	13.52	8.97
甲苯	7.82	7.48	1,2,3-三甲苯	7.87	6.63	异戊二烯	9.25	6.87	异戊二烯	12.10	8.03
异戊二烯	5.74	5.49	甲苯	7.43	6.25	甲苯	8.72	6.48	甲苯	8.86	5.88
1,2,3-三甲苯	4.77	4.56	异戊二烯	6.98	5.87	反-2-丁烯	5.40	4.01	1-乙基-3-甲基苯	5.88	3.90
顺-2-戊烯	4.71	4.50	顺-2-戊烯	4.70	3.96	顺-2-戊烯	5.12	3.80	顺-2-戊烯	5.12	3.40
邻-二甲苯	2.98	2.85	邻-二甲苯	3.48	2.93	1-乙基-3-甲基苯	4.61	3.42	反-2-丁烯	4.81	3.19
丙烷	2.73	2.61	正丁烯	3.37	2.84	正丁烯	3.78	2.81	邻-二甲苯	3.66	2.43

## 2.4 VOCs 来源解析

利用PMF模型对2019年夏季天津市大气VOCs来源进行解析，综合考虑组分浓度水平、示踪作用以及实际污染源排放情况，最终选择25种样本缺失少、浓度水平高且示踪意义明确的组分进行模型计算。经多次运行分析使Q值收敛且趋向最小，选取7个因子

时计算结果较为稳定， $Q(\text{ture})/Q(\text{robust})$ 值为1.03，组分观测值与模拟值拟合相关性 $R^2 > 0.90$ ，能够较好地解释原始数据所包含的源信息。

结合模型解析得到的因子谱图(图7)，因子1中低碳烷烃贡献率较高且含有少量苯系物，低碳类烷烃化合物是机动车尾气排放的主要组分<sup>[48]</sup>，芳香

烃类组分比例较高也是我国油品的主要特点<sup>[49]</sup>,故判定因子 1 为机动车排放源. 因子 2 中邻-二甲苯、间/对-二甲苯、甲苯、乙苯以及戊烷、己烷类有机溶剂成分载荷较高,判定为溶剂使用源. 因子 3 的乙炔占比较高,乙炔是燃烧源的重要示踪物<sup>[50]</sup>,故因子 3 代表燃烧源. 因子 4 乙烯和丙烯贡献较大,二者是石油化工行业的重要基础化工原料和产品,判定因

子 4 为石化工业源. 因子 5 丁烷和戊烷贡献较高,其中丁烷是液化石油气(LPG)的主要成分<sup>[41,42]</sup>,戊烷是汽油挥发的重要示踪物<sup>[2]</sup>,故因子 5 代表 LPG 和汽油挥发源. 异戊二烯是天然源排放的标志物种<sup>[43]</sup>,几乎全部存在于因子 6 中,故因子 6 判定为天然源. 因子 7 中载荷较高的为反-2-丁烯和顺-2-戊烯,可能受其他工艺过程源影响.

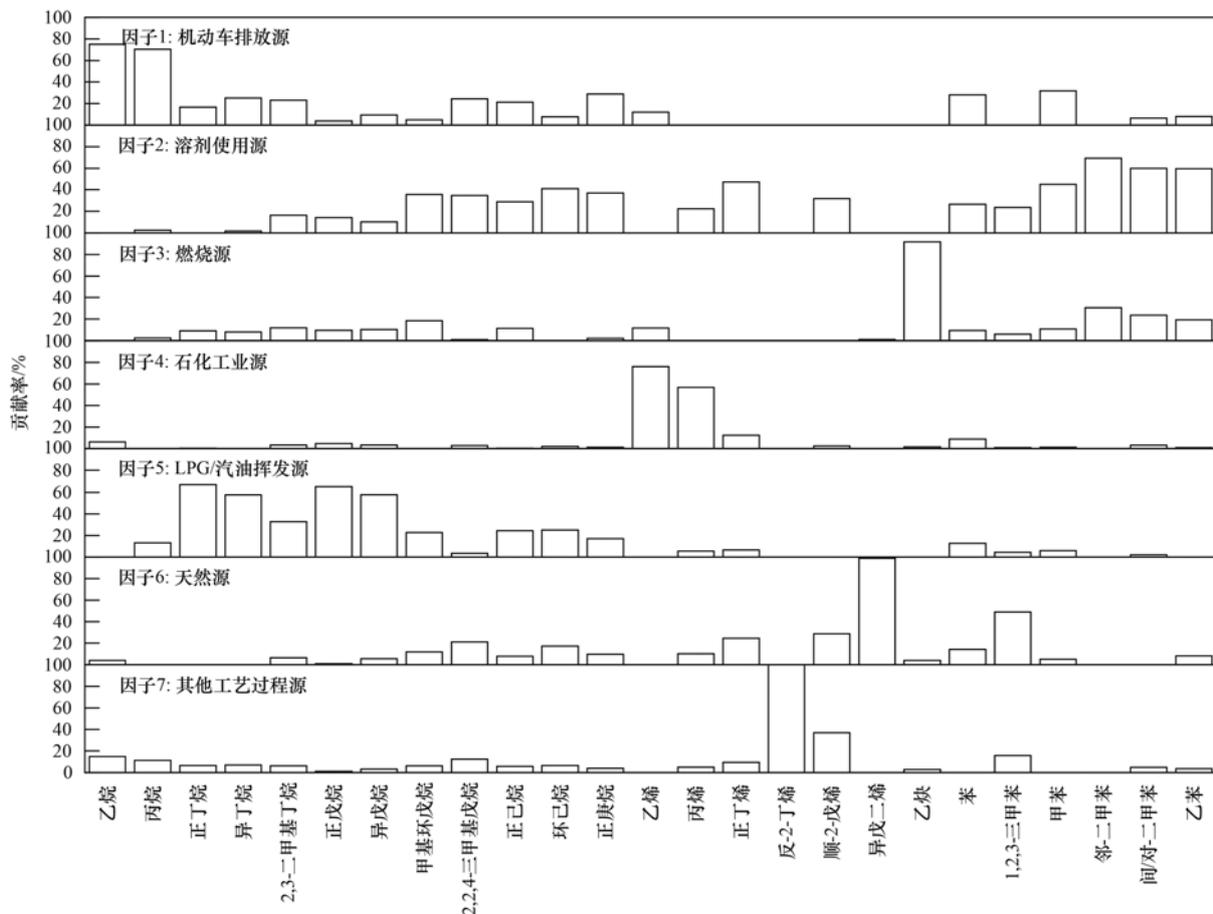


图 7 2019 年夏季 VOCs 来源因子谱图

Fig. 7 Factor profiles of VOC sources during the summer of 2019

对比不同  $O_3$  浓度级别下 VOCs 污染来源相对贡献(图 8),  $O_3$  浓度为一级优时各源类对 VOCs 浓度贡献由高到低依次为:机动车排放源(28.38%)、其他工艺过程源(18.31%)、溶剂使用源(15.44%)、LPG/汽油挥发源(12.77%)、燃烧源(12.66%)、石化工业排放源(7.27%)和天然源(5.17%)。与一级优相比,二级良时机动车排放源、溶剂使用源、LPG/汽油挥发源、石化工业排放源和天然源贡献有所上升,贡献率分别为 32.75%、16.26%、14.14%、8.27%和 6.11%,燃烧源贡献略有下降,为 11.69%;其他工艺过程源贡献明显下降,仅为 10.78%。 $O_3$  浓度为三级轻度污染和四级中度污染时,VOCs 来源仍以机动车排放源贡献最高,贡献率均为 33.50%;其次分别为 LPG/汽油挥发源

(17.52%和 17.43%)、溶剂使用源(15.72%和 13.10%)、燃烧源(9.12%和 11.75%)、石化工业排放源(8.87%和 9.09%)、天然源(7.81%和 9.07%)和其他工艺过程源(7.46%和 6.06%)。

不同  $O_3$  浓度级别下各源类对 VOCs 贡献表明,各级别均以机动车排放源贡献最高,说明机动车尾气是夏季天津城区 VOCs 排放的主要来源.同时,机动车排放源、LPG/汽油挥发源、石化工业排放源和天然源贡献率总体随  $O_3$  浓度级别上升而逐渐增加,与一级优相比,中度污染时天然源贡献升幅最高,达 75.44%,其次是 LPG/汽油挥发源、石化工业排放源和机动车排放源,升幅分别为 36.49%、25.03%和 18.04%,这与  $O_3$  污染伴随气温升高使 VOCs 组分挥发性增强及天然源排放增加有关.人为源中石化工

业源排放的乙烯、丙烯等臭氧生成潜势较高的烯烃类物质偏多,夏季臭氧污染防控需重点加以关注. 溶剂使用源贡献率先升后降,  $O_3$  浓度为二级良时贡献率最高,四级中度污染时贡献率最低,平均较二级良下降 19.43%,说明轻中度污染状况下有机溶剂作业管控措施取得了一定效果. 燃烧源贡献率从一级优至三级轻度污染逐渐下降,四级中度污染又有所回升,可能与西南方向上游地区燃烧源传输影响有关. 其他工艺过程源贡献率随着  $O_3$  污染加重明显下降,与工业排放相对稳定,其他源类贡献上升导致其相对贡献下降有关.

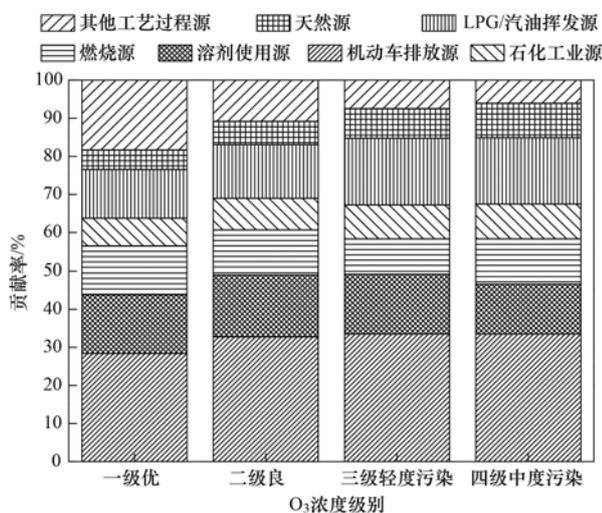


图8 不同  $O_3$  浓度级别下各源类对 VOCs 的平均贡献率

Fig. 8 Source contribution percentages at different  $O_3$  concentration levels

### 3 结论

(1)2019 年夏季,天津市  $O_3$  日最大 8 h 平均浓度范围为  $40 \sim 264 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,第 95 百分位数浓度为  $243 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; VOCs 日均浓度范围为  $18.07 \sim 77.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,平均浓度为  $42.02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .  $O_3$  浓度为一级优至四级中度污染时,其浓度均值分别为 79、133、188 和  $237 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,VOCs 浓度均值分别为 32.94、38.10、42.41 和  $47.12 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,VOCs 浓度随  $O_3$  浓度上升呈逐步升高趋势.

(2)从 VOCs 浓度水平和组成占比看,烷烃最高,芳香烃和烯烃次之,炔烃最低. 烷烃、烯烃和芳香烃均随  $O_3$  级别上升浓度增加,但烷烃占比在  $O_3$  浓度为良和轻度污染时相对略高,烯烃和炔烃占比在优时最高,芳香烃占比在中度污染时最高.

(3)丙烷、乙烷、乙烯、甲苯、正丁烷、异戊烷、间/对-二甲苯、丙烯、乙炔、正己烷、异丁烷、苯和正戊烷是各  $O_3$  浓度级别下普遍较高的 VOCs 组分. 其中,异戊烷、正戊烷、苯、乙烯、丙烯、正丁烷和异丁烷

浓度贡献随  $O_3$  级别上升逐步增加,异戊二烯和 1,2,3-三甲苯浓度贡献在轻中度污染时上升明显.

(4)烯烃和芳香烃是对臭氧生成贡献较高的两类 VOCs 化合物,随着  $O_3$  浓度级别上升,烯烃对 OFP 贡献比例下降,芳香烃对 OFP 贡献比例上升. 乙烯、丙烯、间/对-二甲苯、1,2,3-三甲苯、甲苯、异戊二烯、反-2-丁烯和顺-2-戊烯是影响臭氧生成的关键物种,  $O_3$  达到轻中度污染时 1,2,3-三甲苯、异戊二烯、丙烯和乙烯对 OFP 贡献占比明显增加.

(5)PMF 来源解析表明,机动车排放源、溶剂使用源、LPG/汽油挥发源、燃烧源、石化工业排放源、天然源和其他工艺过程源是天津市夏季 VOCs 的主要来源. 随着  $O_3$  浓度级别上升,机动车排放源、LPG/汽油挥发源、石化工业排放源和天然源贡献逐渐增加,溶剂使用源贡献在轻中度污染时逐渐下降,燃烧源和其他工艺过程源贡献总体呈下降趋势. 其中,石化工业源排放的  $C_2 \sim C_3$  烯烃类物质和溶剂使用源排放的  $C_6 \sim C_9$  芳香烃类物质偏多,臭氧生成潜势较高,夏季臭氧污染防控应重点加以关注.

### 参考文献:

- [1] 李红,彭良,毕方,等. 我国  $PM_{2.5}$  与臭氧污染协同控制策略研究[J]. 环境科学研究, 2019, 32(10): 1763-1778.  
Li H, Peng L, Bi F, et al. Strategy of coordinated control of  $PM_{2.5}$  and ozone in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(10): 1763-1778.
- [2] Tsai W Y, Chan L Y, Blake D R, et al. Vehicular fuel composition and atmospheric emissions in south China: Hong Kong, Macau, Guangzhou, and Zhuhai [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, 6(11): 3281-3288.
- [3] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, et al. Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. Science of the Total Environment, 2017, 575: 1582-1596.
- [4] Xu W Y, Kuang Y, Bian Y X, et al. Current challenges in visibility improvement in southern China [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2020, 7(6): 395-401.
- [5] Huang C, Chen C H, Li L, et al. The study of emission inventory on anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2011, 11(1): 951-983.
- [6] 王红丽,高雅琴,景盛翱,等. 基于走航监测的长三角工业园区周边大气挥发性有机物污染特征[J]. 环境科学, 2021, 42(3): 1298-1305.  
Wang H L, Gao Y Q, Jing S A, et al. Characterization of volatile organic compounds (VOCs) using mobile monitoring around the industrial parks in the Yangtze River delta region of China [J]. Environmental Science, 2021, 42(3): 1298-1305.
- [7] 王红丽. 上海市光化学污染期间挥发性有机物的组成特征及其对臭氧生成的影响研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(6): 1603-1611.  
Wang H L. Characterization of volatile organic compounds (VOCs) and the impact on ozone formation during the photochemical smog episode in Shanghai, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(6): 1603-1611.

- [ 8 ] 王倩. 2019 年 5 月上海复合污染过程中挥发性有机物的污染特征及来源[J]. 环境科学, 2020, **41**(6): 2555-2564.  
Wang Q. Chemical characteristics and sources of volatile organic compounds in Shanghai during an ozone and particulate pollution episode in May 2019 [J]. Environmental Science, 2020, **41**(6): 2555-2564.
- [ 9 ] 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 等. 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[J]. 环境科学, 2020, **41**(7): 3076-3084.  
Jing S A, Ye X H, Gao Y Q, *et al.* Characteristics and reactivity of VOCs in Hangzhou during a typical photochemical pollution episode [J]. Environmental Science, 2020, **41**(7): 3076-3084.
- [ 10 ] 林旭, 陈超, 叶辉, 等. 杭州秋季大气 VOCs 变化特征及化学反应活性研究[J]. 中国环境监测, 2020, **36**(2): 196-204.  
Lin X, Chen C, Ye H, *et al.* Variation characteristics and chemical reactivity of VOCs in different functional zones of Hangzhou in autumn [J]. Environmental Monitoring in China, 2020, **36**(2): 196-204.
- [ 11 ] 乔月珍, 陈凤, 赵秋月, 等. 2015 年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性[J]. 环境科学, 2019, **40**(5): 2062-2068.  
Qiao Y Z, Chen F, Zhao Q Y, *et al.* Composition and atmospheric reactivity of ambient volatile organic compounds (VOCs) in the urban area of Nanjing, China [J]. Environmental Science, 2019, **40**(5): 2062-2068.
- [ 12 ] Zhang Y L, Wang X M, Zhang Z, *et al.* Sources of C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> alkenes, the most important ozone nonmethane hydrocarbon precursors in the Pearl River Delta region [J]. Science of the Total Environment, 2015, **502**: 236-245.
- [ 13 ] 邹宇, 邓雪娇, 王伯光, 等. 广州番禺大气成分站挥发性有机物的污染特征[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(5): 808-813.  
Zou Y, Deng X J, Wang B G, *et al.* Pollution characteristics of volatile organic compounds in Panyu Composition Station [J]. China Environmental Science, 2013, **33**(5): 808-813.
- [ 14 ] 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 等. 广州番禺大气成分站复合污染过程 VOCs 对 O<sub>3</sub> 与 SOA 的生成潜势[J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2246-2255.  
Zou Y, Deng X J, Li F, *et al.* Effect of VOCs on O<sub>3</sub> and SOA formation potential during the combined pollution process in Guangzhou Panyu atmospheric composition station [J]. Environmental Science, 2017, **38**(6): 2246-2255.
- [ 15 ] 宋锴, 俞颖, 陆思华, 等. 珠海市秋季大气挥发性有机物变化趋势和大气化学反应活性[J]. 环境科学学报, 2020, **40**(7): 2323-2332.  
Song K, Yu Y, Lu S H, *et al.* Variation and reactivity of ambient volatile organic compounds (VOCs) in autumn of Zhuhai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40**(7): 2323-2332.
- [ 16 ] 王伯光, 张远航, 邵敏. 珠江三角洲大气环境 VOCs 的时空分布特征[J]. 环境科学, 2004, **25**(S1): 7-15.  
Wang B G, Zhang Y H, Shao M. Special and temporal distribution character of VOCs in the ambient air of Pearl River Delta region [J]. Environmental Science, 2004, **25**(S1): 7-15.
- [ 17 ] 刘奇琛, 黄婧, 郭新彪. 北京市大气挥发性有机物 (VOCs) 的污染特征及来源[J]. 生态毒理学学报, 2017, **12**(3): 49-61.  
Liu Q C, Huang J, Guo X B. Pollution characteristics and sources of ambient volatile organic compounds (VOCs) in Beijing [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2017, **12**(3): 49-61.
- [ 18 ] 孙杰, 王跃思, 吴方堃, 等. 唐山市和北京市夏秋季节大气 VOCs 组成及浓度变化[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1438-1443.  
Sun J, Wang Y S, Wu F K, *et al.* Concentration and change of VOCs in summer and autumn in Tangshan [J]. Environmental Science, 2010, **31**(7): 1438-1443.
- [ 19 ] 丁洁然, 景长勇. 唐山夏季大气 VOCs 污染特征及臭氧生成潜势[J]. 环境工程, 2016, **34**(6): 130-135.  
Ding J R, Jing C Y. Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in summer in Tangshan [J]. Environmental Engineering, 2016, **34**(6): 130-135.
- [ 20 ] 王雨, 王丽涛, 杨光, 等. 邯郸市秋季大气挥发性有机物污染特征[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(7): 1134-1142.  
Wang Y, Wang L T, Yang G, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds in autumn in Handan city, China [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(7): 1134-1142.
- [ 21 ] 高素莲, 闫学军, 刘光辉, 等. 济南市夏季臭氧重污染时段 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(9): 1839-1846.  
Gao S L, Yan X J, Liu G H, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in serious ozone pollution period of summer in Jinan [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29**(9): 1839-1846.
- [ 22 ] 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.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] 印红玲, 袁桦蔚, 叶芝祥, 等. 成都市大气中挥发性有机物的时空分布特征及臭氧生成潜势研究[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(2): 386-393.  
Yin H L, Yuan H W, Ye Z X, *et al.* Temporal and spatial distribution of VOCs and their OFP in the atmosphere of Chengdu [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(2): 386-393.
- [ 25 ] Deng Y Y, Li J, Li Y Q, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds, NO<sub>2</sub>, and effects on ozone formation at a site with high ozone level in Chengdu [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, **75**: 334-345.
- [ 26 ] 中国环境监测总站. 2018-2019 年全国城市空气质量报告 [EB/OL]. <http://www.cnemc.cn/jcbg/kqzlkbg>, 2019-12-17.
- [ 27 ] 关玉春, 肖致美, 陈魁, 等. 天津市臭氧污染特征与影响因素分析[J]. 中国环境监测, 2017, **33**(4): 40-49.  
Guan Y C, Xiao Z M, Chen K, *et al.* Characteristics of ozone pollution and its influencing factors in Tianjin [J]. Environmental Monitoring in China, 2017, **33**(4): 40-49.
- [ 28 ] 李源, 孔君, 徐虹, 等. 天津市臭氧污染特征及来源解析研究[J]. 环境污染与防治, 2019, **41**(6): 647-651.  
Li Y, Kong J, Xu H, *et al.* Analysis of ozone pollution characteristic in Tianjin and its source apportionment [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, **41**(6): 647-651.
- [ 29 ] 高璟贇, 肖致美, 徐虹, 等. 2019 年天津市挥发性有机物污

- 染特征及来源[J]. 环境科学, 2021, **42**(1): 55-64.
- Gao J Y, Xiao Z M, Xu H, *et al.* Characterization and source apportionment of atmospheric VOCs in Tianjin in 2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 55-64.
- [30] 高璟贇, 唐邈, 陈魁, 等. 天津市不同功能区大气挥发性有机物污染特征及来源分析[J]. 环境污染与防治, 2016, **38**(5): 43-47.
- Gao J Y, Tang M, Chen K, *et al.* Pollution characteristics and source analysis of atmospheric volatile organic compounds in different function areas, Tianjin [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, **38**(5): 43-47.
- [31] 董海燕, 朱玲, 边玮璐, 等. 天津市滨海新区夏季挥发性有机物的污染特征分析[J]. 环境污染与防治, 2016, **38**(5): 77-81.
- Dong H Y, Zhu L, Bian W L, *et al.* Pollution characteristics of volatile organic compounds in the summer of Binhai New Area, Tianjin [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, **38**(5): 77-81.
- [32] 翟增秀, 邹克华, 李伟芳, 等. 天津中心城区环境空气挥发性有机物污染特征分析[J]. 环境科学, 2013, **34**(12): 4513-4518.
- Zhai Z X, Zou K H, Li W F, *et al.* Pollution characterization of volatile organic compounds in ambient air of Tianjin downtown [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4513-4518.
- [33] 张新民, 柴发合, 岳婷婷, 等. 天津武清大气挥发性有机物光化学污染特征及来源[J]. 环境科学研究, 2012, **25**(10): 1085-1091.
- Zhang X M, Chai F H, Yue T T, *et al.* Photochemical characteristics and sources of volatile organic compounds in Wuqing, Tianjin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, **25**(10): 1085-1091.
- [34] 韩萌, 卢学强, 冉靓, 等. 天津市城区夏季 VOCs 来源解析[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(10): 76-80.
- Han M, Lu X Q, Ran L, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds in Urban Tianjin in the summer [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(10): 76-80.
- [35] 中国环境监测总站. 国家环境空气质量监测网环境空气挥发性有机物连续自动监测质量控制技术规范(试行)[EB/OL]. [http://www.cnemc.cn/gzdt/wjtz/202001/t20200101\\_756415.shtml](http://www.cnemc.cn/gzdt/wjtz/202001/t20200101_756415.shtml), 2020-01-01.
- [36] Zeinali M, McConnell L L, Hapeman C J, *et al.* Volatile organic compounds in pesticide formulations: methods to estimate ozone formation potential [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(14): 2404-2412.
- [37] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [38] Norris G, Duvall R, Brown S, *et al.* EPA positive matrix factorization (PMF) 5.0 fundamentals and user guide [R]. Washington, DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2014.
- [39] 蒋美青, 陆克定, 苏榕, 等. 我国典型城市群 O<sub>3</sub> 污染成因和关键 VOCs 活性解析[J]. 科学通报, 2018, **63**(12): 1130-1141.
- Jiang M Q, Lu K D, Su R, *et al.* Ozone formation and key VOCs in typical Chinese city clusters [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, **63**(12): 1130-1141.
- [40] 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 source apportionment of air pollution in spring in Zhengzhou [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2577-2585.
- [41] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [42] 张玉欣, 安俊琳, 王俊秀, 等. 南京工业区挥发性有机物来源解析及其对臭氧贡献评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 502-510.
- Zhang Y X, An J L, Wang J X, *et al.* Source analysis of volatile organic compounds in the Nanjing industrial area and evaluation of their contribution to ozone [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 502-510.
- [43] 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.
- [44] Perry R, Gee I L. Vehicle emissions in relation to fuel composition [J]. *Science of the Total Environment*, 1995, **169**(1-3): 149-156.
- [45] 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.
- [46] dos Santos C Y M, de Almeida Azevedo D, de Aquino Neto F R. Atmospheric distribution of organic compounds from urban areas near a coal-fired power station [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(9): 1247-1257.
- [47] 盛涛, 陈筱佳, 高松, 等. VOCs 比值法的应用研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, **41**(12): 122-130.
- Sheng T, Chen X J, Gao S, *et al.* Progress in the research of application of VOCs ratio method [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(12): 122-130.
- [48] 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.
- [49] Jorquera H, Rappenglück B. Receptor modeling of ambient VOC at Santiago, Chile [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(25): 4243-4263.
- [50] 邹巧莉, 孙鑫, 田旭东, 等. 嘉善夏季典型时段大气 VOCs 的臭氧生成潜势及来源解析[J]. 中国环境监测, 2017, **33**(4): 91-98.
- Zou Q L, Sun X, Tian X D, *et al.* Ozone formation potential and sources apportionment of atmospheric VOCs during typical periods in summer of Jiashan [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(4): 91-98.

## CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai .....	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin .....	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing .....	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry .....	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei .....	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu .....	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM <sub>2.5</sub> and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou .....	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM <sub>2.5</sub> in Shanghai .....	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area .....	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-ni, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019 .....	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou .....	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin .....	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks .....	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu .....	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies .....	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake .....	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed .....	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake .....	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir .....	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin .....	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater .....	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater .....	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes .....	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area .....	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt .....	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems .....	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles .....	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent .....	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System .....	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A <sup>2</sup> /O Sewage Treatment Processes in Winter .....	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX .....	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors .....	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River .....	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model .....	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area .....	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO <sub>2</sub> on N <sub>2</sub> O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields .....	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas .....	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N <sub>2</sub> O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan .....	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings .....	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings .....	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone .....	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation .....	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure .....	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields .....	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site .....	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil .....	WANG Can, ZHANG Yu-hang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil .....	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice .....	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods .....	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry .....	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)