



环境科学研究

Research of Environmental Sciences

北京市典型功能区环境空气VOCs污染特征及来源对比分析

李云凤 汤济霖 董铭浩 周峰 齐京明 高锐 胡义 张心钰 王亚飞 李红

Comparative Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Ambient VOCs Across Typical Functional Districts of Beijing

LI Yunfeng, TANG Jilin, DONG Minghao, ZHOU Feng, QI Jingming, GAO Rui, HU Yi, ZHANG Xinyu, WANG Yafei, LI Hong

在线阅读 View online: <https://www.hjkxyj.org.cn/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2025.03.15>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三亚市大气VOCs污染特征、臭氧生成潜势及来源解析

Pollution Characterization, Ozone Formation Potential and Source Apportionment of Ambient VOCs in Sanya, China

环境科学研究. 2021, 34(8): 1812-1824. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.05.06>

长三角典型城市臭氧污染特征及VOCs来源解析

Analysis of Variation Characteristics and Source of Atmospheric Ozone Pollution in the Yangtze River Delta Region

环境科学研究. 2024, 37(7): 1500-1512. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2024.05.09>

汾渭平原非采暖期和采暖期大气挥发性有机物的污染特征、来源解析及对SOA的生成潜势：以运城市为例

Pollution Characteristics, Source Analysis and SOA Formation Potential of Volatile Organic Compounds in Atmosphere during Non-Heating and Heating Periods in Fenwei Plain: A Case Study of Yuncheng

环境科学研究. 2024, 37(4): 708-718. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2023.12.09>

杭州湾北岸36种挥发性有机物污染特征及来源解析

Pollution Characteristics and Source Analysis of 36 Volatile Organic Compounds on the North Coast of Hangzhou Bay

环境科学研究. 2020, 33(3): 536-546. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2019.05.26>

黄河三角洲地区大气复合污染特征、成因与VOCs来源解析

Characteristics and Formation of Complex Air Pollution and Sources of VOCs in the Yellow River Delta Region

环境科学研究. 2024, 37(3): 439-454. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2024.01.27>

北京市城区春季大气挥发性有机物污染特征

Pollution Characterizations of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Spring of Beijing Urban Area

环境科学研究. 2020, 33(3): 526-535. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2019.12.15>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

北京市典型功能区环境空气 VOCs 污染特征及来源对比分析

李云凤¹, 汤济霖¹, 董铭浩¹, 周峰², 齐京明², 高锐³, 胡义⁴, 张心钰⁴, 王亚飞^{1*}, 李红^{3*}

1. 北京石油化工学院机械工程学院环境工程系, 北京 102617
2. 北京市大兴区生态环境局, 北京 102600
3. 中国环境科学研究院, 环境基准标准与风险管控全国重点实验室, 北京 100012
4. 北京市污染源管理事务中心, 北京 100089

摘要: 较为全面地掌握北京市不同功能区挥发性有机物 (VOCs) 的污染状况、明晰其污染特征及来源差异, 可以为臭氧 (O₃) 污染精准防控提供科学支撑。本文基于 2019 年 8 月北京市京津冀协同发展生态示范区[大兴区, 北京石油化工学院 (BIPT)] 和中心城区[朝阳区, 中国环境科学研究院 (CRAES)] 2 个典型站点的 VOCs、常规空气污染物和气象参数在线数据, 对北京市 2 个典型功能区的 VOCs 污染特征及主要来源进行对比分析。结果表明: ①观测期间北京市 2 个站点出现多次 O₃ 污染, BIPT 站点的 VOCs 体积分数 ($11.1 \times 10^{-9} \pm 3.9 \times 10^{-9}$) 低于 CRAES 站点 ($17.3 \times 10^{-9} \pm 4.2 \times 10^{-9}$), VOCs 体积分数总体呈南低北高的分布特征。2 个站点的 VOCs 体积分数中均为烷烃占比 (62%~65%) 最高, BIPT 站点的芳香烃体积分数明显高于 CRAES 站点。②O₃ 污染天 09:00 之后的 O₃ 体积分数高于非 O₃ 污染天, 滞后于温度变化 (07:00) 2 h, 而 VOCs 体积分数日变化在 O₃ 污染天和非 O₃ 污染天无明显差异。③BIPT 站点 VOCs 的臭氧生成潜势和 OH 自由基消耗速率更强, 影响 O₃ 生成的活性 VOCs 物种主要为异戊二烯、丙烯、邻二甲苯和 1,2,4-三甲苯等, 而 CRAES 站点以异戊二烯、乙烯、丙烯和邻二甲苯等活性物种为主。④综合正交矩阵因子来源解析、臭氧生成潜势和相对增量反应性分析表明, 2 个站点的 VOCs 主要来源不同, 除汽车尾气源外, 溶剂使用源、油气挥发源和柴油车尾气源、溶剂使用源分别是 BIPT 和 CRAES 站点 VOCs 的主要来源, 溶剂使用源和柴油车尾气源分别是影响 BIPT 和 CRAES 站点 O₃ 生成的主要来源。研究显示, 北京市不同功能区 VOCs 污染特征与来源有所不同, 为有效控制 O₃ 污染, 应采取差异化 VOCs 管控措施, 大兴区 BIPT 站点应优先控制溶剂使用源和汽油车尾气源, 而朝阳区 CRAES 站点应以控制柴油车尾气源和溶剂使用源为主。

关键词: 挥发性有机物 (VOCs); 臭氧 (O₃) 污染; 污染特征; 来源解析

中图分类号: X51

文章编号: 1001-6929(2025)05-1000-11

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2025.03.15

Comparative Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Ambient VOCs Across Typical Functional Districts of Beijing

LI Yunfeng¹, TANG Jilin¹, DONG Minghao¹, ZHOU Feng², QI Jingming², GAO Rui³, HU Yi⁴, ZHANG Xinyu⁴, WANG Yafei^{1*}, LI Hong^{3*}

1. Department of Environmental Engineering, School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China
2. Beijing Daxing District Ecological Environment Bureau, Beijing 102600, China
3. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

收稿日期: 2024-10-31 修订日期: 2025-02-27

作者简介: 李云凤 (1990-), 女, 黑龙江哈尔滨人, 讲师, 博士, 主要从事大气复合污染成因研究, liyunfeng@bipt.edu.cn

* 责任作者: ①王亚飞 (1984-), 男, 河北保定人, 副教授, 博士, 主要从事区域大气污染源解析研究, wangyafei@bipt.edu.cn; ②李红 (1969-), 女, 湖北洪湖人, 研究员, 博士, 博导, 主要从事大气复合污染成因研究, lihong@craes.org.cn

基金项目: 北京石油化工学院交叉科研探索项目 (No.BIPTCSF-018); 国家自然科学基金项目 (No.52470114)

Supported by Cross-Disciplinary Science Foundation from Beijing Institute of Petrochemical Technology, China (No.BIPTCSF-018); National Natural Science Foundation of China (No.52470114)

4. Beijing Municipal Pollution Source Management Center, Beijing 100089, China

Abstract: A comprehensive understanding of the characteristics and sources of volatile organic compounds (VOCs) in different functional districts of Beijing can provide scientific support for the precise prevention and control of ozone (O_3) pollution. Based on the online data of VOCs, conventional atmospheric pollutants and meteorological parameters from two typical sites in the Beijing-Tianjin-Hebei coordinated development ecological demonstration zone (Daxing District, Beijing Institute of Petrochemical Technology (BIPT)) and the central urban area (Chaoyang District, China Research Academy of Environmental Sciences (CRAES)) in August 2019, a comparative analysis was conducted to characterize the concentrations of VOCs and their main sources in two typical functional districts of Beijing. The results showed that: (1) During the observation period, both sites experienced multiple O_3 pollution episodes. The VOCs mixing ratio at the BIPT site ($11.1 \times 10^{-9} \pm 3.9 \times 10^{-9}$) was lower than that at the CRAES site ($17.3 \times 10^{-9} \pm 4.2 \times 10^{-9}$), showing a distribution characteristic of lower in the south and high in the north. The proportion of alkanes in the VOCs mixing ratios of the two sites was the highest (62%-65%), with the average mixing ratio of aromatics at the BIPT site was significantly higher than that at the CRAES site. (2) After 09:00 on O_3 polluted days, the O_3 mixing ratio was higher than that on non- O_3 polluted days, lagging the temperature change (07:00) by 2 hours. However, there was no significant difference in the daily variation of VOCs mixing ratios between O_3 polluted days and non- O_3 polluted days. (3) The ozone generation potentials and OH radical loss rates of VOCs at the BIPT site were stronger than those at the CRAES site. The active VOCs species affecting O_3 generation at the BIPT site were mainly isoprene, propylene, *o*-xylene and 1,2,4-trimethylbenzene, while the main active species at the CRAES site were isoprene, ethylene, propylene and *o*-xylene. (4) A comprehensive analysis using the positive matrix factorization method, ozone generation potential, and relative incremental reactivity revealed that the main sources of VOCs at the two sites were different. In addition to gasoline exhaust, solvent usage, fuel volatilization, and diesel exhaust, solvent usage was the primary source of VOCs at the BIPT and CRAES sites, respectively. Solvent usage and diesel exhaust were the main sources affecting O_3 production at the BIPT and CRAES sites, respectively. This study suggests that solvent usage and gasoline exhaust should be prioritized for control at the BIPT site in Daxing District, while the CRAES site in Chaoyang District should focus on diesel exhaust and solvent usage.

Keywords: volatile organic compounds (VOCs); ozone (O_3) pollution; pollution characteristics; source apportionment

自2012年发布《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)和2013年实施《大气污染防治行动计划》以来,我国城市地区颗粒物(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$)污染已得到有效控制, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 年均浓度均呈明显下降趋势^[1-2]。相比之下,近年来环境空气臭氧(O_3)污染态势日益凸显^[3], O_3 已成为影响我国夏、秋季城市地区空气质量的主要污染物。作为 O_3 的重要前体物,研究VOCs的污染特征、来源及其对 O_3 生成的影响对于精准控制 O_3 污染至关重要。

环境空气VOCs有多种来源,可分为人为源和生物源。在城市地区,人为源的排放量占主导地位^[4]。VOCs观测结果表明,不同地区VOCs人为来源存在明显差异^[5-8]。例如,溶剂使用和机动车尾气是上海市2017年夏季VOCs的主要来源^[5],机动车尾气是武汉市2019年夏季VOCs的主要来源^[7],而广州市2021年夏季VOCs的主要来源则是工业排放^[8]。除排放源的多样性外,不同种类的VOCs在生成 O_3 方面也表现出不同的潜势。Shan等^[9]对京津冀地区和汾渭平原13个城市数据分析表明,芳香烃或含氧VOCs对总VOCs的 O_3 生成潜势(OFP)贡献率最大,甲醛、乙醛、二甲苯和甲苯是影响 O_3 生成的高活性VOCs物种。

为有效控制北京市 O_3 污染,众多研究学者已针对北京市VOCs污染展开诸多研究。2005年,Song等^[10]在北京大学站点观测到31种VOCs的体积分数为 43.4×10^{-9} ,正交矩阵因子分析(PMF)解析得到汽油相关(尾气和蒸发)排放源和石油化工是VOCs的主要来源。Wang等^[11]基于北京大学站点夏季VOCs数据分析发现,2004—2013年VOCs体积分数降低了37%,且机动车尾气和汽油蒸发的相对贡献下降了66%。Li等^[12]利用PMF解析2016—2017年中国科学院生态环境研究中心站点VOCs数据,得到机动车尾气和溶剂使用是VOCs主要来源。Liu等^[13]在北京师范大学站点发现2016—2020年VOCs整体呈下降趋势,工业排放是主要来源。Li等^[14]研究表明,2020年机动车尾气是中国环境科学研究院站点VOCs的主要来源,而溶剂使用和油气蒸发是车公庄站点VOCs的主要来源。这说明北京市不同站点VOCs主要来源存在差异,为做好本地VOCs减排,应采取区域差异化控制策略。总的来说,已有研究多集中于北京市单一站点VOCs分析,然而由于人类活动、产业布局等差异,北京市南北发展不平衡,VOCs的排放特征和来源有所不同。因此针对北京市不同功能区展开研究,可以更为全面地了解不同区域

VOCs 的污染特征和来源差异,以提高 VOCs 减排措施的针对性和 O₃ 污染控制的有效性。

考虑到近年来北京夏季 O₃ 污染频发,该研究以 2019 年 8 月 1—29 日为研究时段,聚焦于北京市不同功能区 VOCs 的污染特征及来源的对比分析,旨在揭示不同区域 VOCs 的分布差异、主要来源,评估不同 VOCs 源对 O₃ 生成的潜在影响,以期了解北京市 VOCs 污染的空间分布特征和制定针对性的 O₃ 污染控制策略提供科学依据。

1 研究方法

1.1 观测站点

观测站点分别位于北京市南部京津冀协同发展生态示范区的北京石油化工学院 (BIPT, 39.73°N、116.33°E) 以及位于中心城区朝阳区的中国环境科学研究院 (CRAES, 40.04°N、116.42°E)。BIPT 站点位于北京市大兴区,为郊区,与城市中心相距较远,其周边道路较为宽阔,建筑物分布相对稀疏,城市密度较低,站点的东南方向 800 m 为黄村公园,西侧紧邻地铁 4 号线,距离京开高速公路 1.5 km,黄村铁路集散中心 2.5 km,正北方向 3.4 km 为南五环路,西南方向 7.7 km 为北京大兴生物医药基地。CRAES 站点位于北京市朝阳区,位置更接近北京市中心,所在区域道路网络更为密集,城市建筑林立,城市密度更高,站点西侧紧邻地铁 5 号线,站点西南方向 2 km 为奥林匹克森林公园,正南方向 2 km 为北五环路。2 个站点所属不同区,可以用来研究北京市不同功能区 VOCs 污染特征及来源分析。

1.2 仪器设备

1.2.1 VOCs 采样与分析

BIPT 站点 VOCs 利用中国科学院生态环境研究中心自主研发的气相色谱-氢火焰离子检测器 (GC-FID) 系统进行采集并定量分析,详细 VOCs 采样及分析方法参考文献 [15]。该系统共分析 57 种 PAMS (Photochemical Assessment Monitoring Stations) 物质,采用 Linde SPECTRA Environmental Gases 公司生产的标气进行校准。在观测前绘制最新标准曲线进行校准,线性相关性 (R^2) 均超过 0.99,每种化合物的相对标准偏差 (RSD) 结果小于 5%,方法检出限 (MDL) 范围为 0.01×10^{-9} ~ 0.06×10^{-9} 。每周使用体积分数为 2×10^{-9} 的标准气体对标准曲线进行验证,确保分析组分结果与初始体积分数值相对标准偏差小于 20%。

CRAES 站点环境空气 VOCs 主要利用法国 Chromatotec 公司的 Airmo VOCs 在线监测分析仪进行测定,详细 VOCs 采样及分析方法参考文献 [16]。

该设备可分析的 VOCs 包括 84 种化合物,该研究选取了其中 57 种 PAMS 物种进行对比。仪器检出限最低为 10^{-12} ,每日 00:00 自动进行内标校准,每 2 个月重新绘制标准曲线校准, R^2 均在 0.9 以上,RSD 在 10% 以内。

1.2.2 其他仪器

BIPT 和 CRAES 站点的 O₃ 体积分数、NO_x (NO 和 NO₂) 体积分数、CO 体积分数和 PM_{2.5} 浓度均采用赛默飞公司生产的商用分析仪 (型号分别为 49i、42i、48i 和 5030i/5018i) 测量。每年定期利用 O₃ 校准仪对 O₃ 分析仪进行校准。NO₂ 和 CO 气体分析仪主要由商业化的 NO 和 CO 标准钢瓶气进行多点校正,每个点标定持续时间至少为 15 min,每月对仪器进行校准。颗粒物分析仪定期清洗切割头,检查纸带并更换滤膜,每月对仪器进行检漏和流量校准。因仪器故障,CRAES 站点的 CO 数据来源于奥体中心站点。BIPT 和 CRAES 站点的气象参数 (温度、相对湿度、风速和风向) 均由荷兰 Vaisala 公司生产自动气象站 (型号分别为 WXT530 和 MAWS301) 测定。

1.3 正交矩阵因子分析法

该研究利用正交矩阵因子分析法 (PMF) 进行 VOCs 来源解析,PMF 具体计算公式参考文献 [17-18]。VOCs 物种选择遵循以下准则:除去数据缺失超过 25% 或低于 MDL 的 VOCs 物种;避免选择在大气中迅速分解为其他化合物的高活性 VOCs 物种,异戊二烯除外;剔除体积分数低且不作为污染源关键指示物的 VOCs 物种。最终选择 29 种 VOCs 物种用于 PMF 源解析。考虑到 2 个站点在同一个城市,该研究设定 2 个站点 VOCs 受体源成分谱一致,并将 2 个站点的 VOCs 数据合并进行 PMF 分析,所得受体源成分谱由 2 个站点共同贡献,不区分相应的贡献率,而 PMF 源解析可以给出 2 个站点中不同源的贡献率。

1.4 臭氧生成潜势

OFP 是指 VOCs 物种在理想状态下生成 O₃ 的潜势,该研究采用最大增量反应活性系数 (MIR) 来计算不同 VOCs 物种的 O₃ 生成潜势,具体计算公式参考文献 [19]。

1.5 OH 自由基消耗速率

大气中的 VOCs 可以与 OH 自由基反应生成过氧自由基 RO₂,是 O₃ 生成的关键步骤,该研究利用 OH 自由基消耗速率 (L_{OH}) 估算不同 VOCs 物种对 O₃ 潜在生成的能力,具体计算公式参考文献 [20]。

1.6 相对增量反应性

相对增量反应性 (RIR) 为前体物体积分数变化

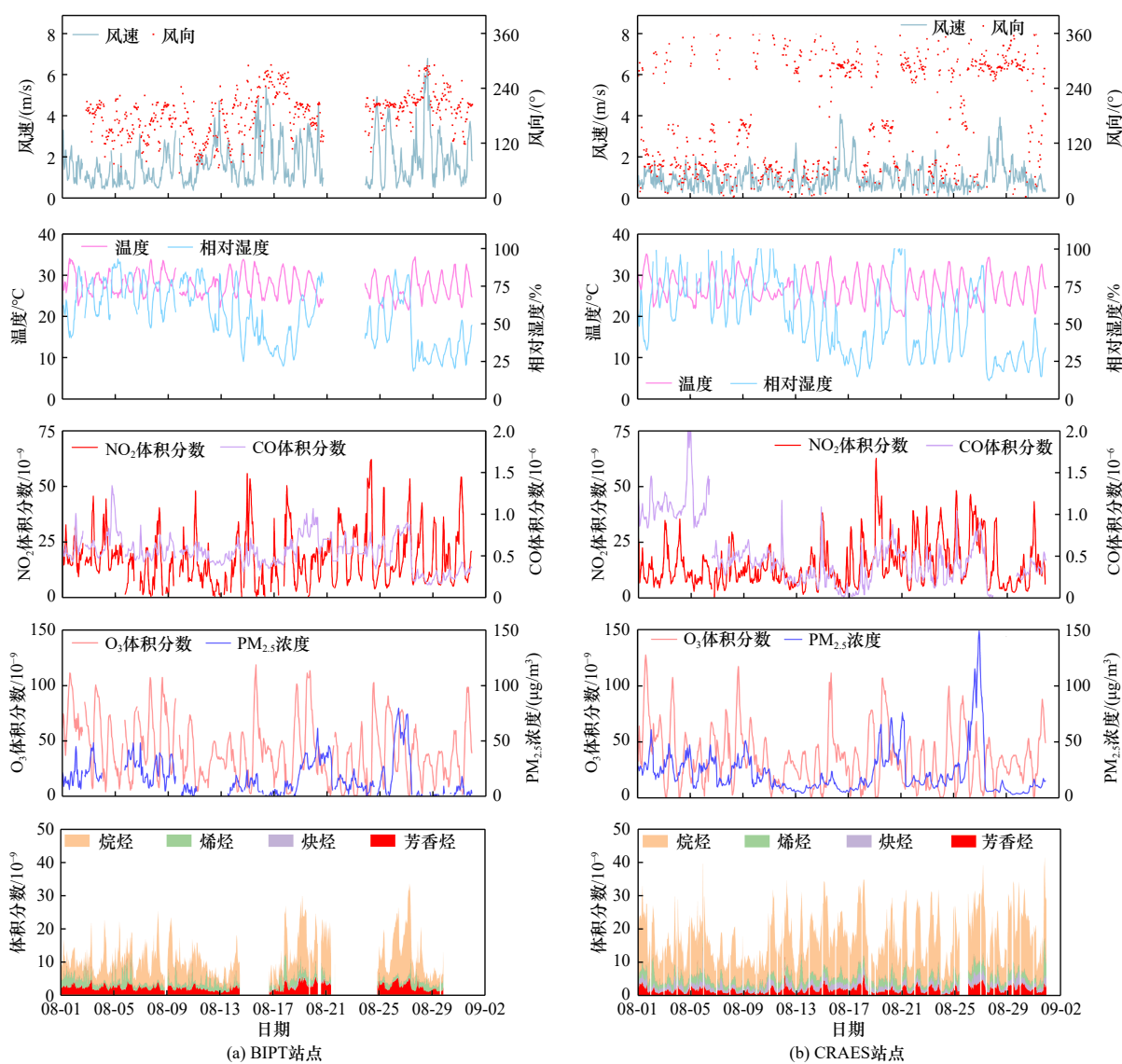
的百分比与所引起的 O₃ 体积分数变化百分比的比值,具体计算公式参考文献 [21]。RIR 值为正值时,表明削减该前体物有利于降低局地 O₃ 体积分数;RIR 值为负时,表明削减该前体会升高局地 O₃ 体积分数。该研究通过基于观测的模型 (OBM) 模拟 O₃ 生成,模型采用 MCM v3.3.1 化学机制,利用 NO 体积分数、NO₂ 体积分数、SO₂ 体积分数、CO 体积分数、VOCs 体积分数、温度、相对湿度、大气压等观测数据对模型进行约束,数据文件统一处理为 1 h 分辨率。模型开始运行时间为北京时间 00:00,每次模拟过程需提前运行 5 d 以使未进行约束的物质体积分数达到

稳定。

2 结果与讨论

2.1 环境空气质量概况

由图 1 可见,观测期间平均温度为 27 °C,最高温度在 34~35 °C 之间。2 个站点整体平均风速均低于 2 m/s, BIPT 站点风速略大于 CRAES 站点,最高可达 6.5 m/s。BIPT 站点主导风向为南风, CRAES 站点主导风向为北风。观测期间,2 个站点 NO₂ 体积分数和 CO 体积分数日均值均未出现超标现象, PM_{2.5} 污染出现较少,仅 CRAES 站点在 8 月 26 日 PM_{2.5} 浓度日均值出现超过 GB 3095—2012《环境空气质量标准》



注: 缺失数据段为仪器维护所致。

图 1 2019 年 8 月 1—29 日北京市 BIPT 和 CRAES 站点 VOCs 体积分数、O₃ 体积分数、PM_{2.5} 浓度、NO₂ 体积分数、CO 体积分数以及气象参数时间序列

Fig.1 Time series of VOCs mixing ratios, O₃ mixing ratios, PM_{2.5} concentrations, NO₂ mixing ratios, CO mixing ratios and meteorological parameters at BIPT and CRAES sites of Beijing from August 1st to 29th, 2019

二级标准限值 ($75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 的现象。根据 GB 3095—2012 O_3 日最大 8 h 平均浓度 (MDA8 O_3) 二级标准限值 [$160 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 在标况条件 (0°C , 101.325 kPa) 下为 75×10^{-9}], 该研究将 MDA8 O_3 浓度大于 75×10^{-9} 的日子定义为 O_3 污染天, 观测期间共有 11 个 O_3 污染天,

18 个非 O_3 污染天。观测期间 BIPT 站点的温度、相对湿度、 NO_2 体积分数和 O_3 体积分数均高于 CRAES 站点, CO 体积分数相差较小, 而 BIPT 站点的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、 NO 体积分数和 VOCs 体积分数则较低 (见表 1)。

表 1 2019 年 8 月 1—29 日北京市 BIPT 和 CRAES 站点观测期间、 O_3 污染天和非 O_3 污染天的空气污染物和气象参数日均值
Table 1 Daily average values of atmospheric pollutants and meteorological parameters during the observation period, O_3 polluted days and non- O_3 polluted days at BIPT and CRAES sites of Beijing from August 1st to 29th, 2019

站点	时段	O_3 体积分数	$\text{PM}_{2.5}$ 浓度/ $(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	NO_2 体积分数	NO 体积分数	CO 体积分数
BIPT	观测期间	$65.5 \times 10^{-9} \pm 23.7 \times 10^{-9}$	19.7 ± 16.7	$17.3 \times 10^{-9} \pm 5.0 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9} \pm 7.77 \times 10^{-9}$	$0.5 \times 10^{-6} \pm 0.2 \times 10^{-6}$
	O_3 污染天	$91.0 \times 10^{-9} \pm 9.1 \times 10^{-9}$	21.4 ± 11.8	$18.4 \times 10^{-9} \pm 5.5 \times 10^{-9}$	$3.5 \times 10^{-9} \pm 7.5 \times 10^{-9}$	$0.6 \times 10^{-6} \pm 0.1 \times 10^{-6}$
	非 O_3 污染天	$49.0 \times 10^{-9} \pm 12.7 \times 10^{-9}$	18.7 ± 19.2	$16.6 \times 10^{-9} \pm 4.8 \times 10^{-9}$	$1.4 \times 10^{-9} \pm 4.7 \times 10^{-9}$	$0.5 \times 10^{-6} \pm 0.2 \times 10^{-6}$
CRAES	观测期间	$57.5 \times 10^{-9} \pm 23.3 \times 10^{-9}$	26.3 ± 19.8	$15.1 \times 10^{-9} \pm 5.8 \times 10^{-9}$	$5.1 \times 10^{-9} \pm 7.2 \times 10^{-9}$	$0.5 \times 10^{-6} \pm 0.3 \times 10^{-6}$
	O_3 污染天	$92.2 \times 10^{-9} \pm 11.0 \times 10^{-9}$	31.3 ± 10.0	$18.2 \times 10^{-9} \pm 5.2 \times 10^{-9}$	$5.5 \times 10^{-9} \pm 6.8 \times 10^{-9}$	$0.6 \times 10^{-6} \pm 0.3 \times 10^{-6}$
	非 O_3 污染天	$46.9 \times 10^{-9} \pm 13.5 \times 10^{-9}$	24.8 ± 21.8	$14.2 \times 10^{-9} \pm 5.8 \times 10^{-9}$	$4.7 \times 10^{-9} \pm 7.3 \times 10^{-9}$	$0.5 \times 10^{-6} \pm 0.3 \times 10^{-6}$

站点	时段	VOCs 体积分数	相对湿度/%	温度/ $^\circ\text{C}$	风速/(m/s)
BIPT	观测期间	$11.11 \times 10^{-9} \pm 3.90 \times 10^{-9}$	55.8 ± 16.7	27.4 ± 1.3	1.5 ± 0.6
	O_3 污染天	$11.30 \times 10^{-9} \pm 3.41 \times 10^{-9}$	55.5 ± 11.5	28.0 ± 1.2	1.6 ± 0.5
	非 O_3 污染天	$11.00 \times 10^{-9} \pm 4.23 \times 10^{-9}$	56.0 ± 19.6	26.9 ± 1.3	1.4 ± 0.6
CRAES	观测期间	$17.26 \times 10^{-9} \pm 4.23 \times 10^{-9}$	53.5 ± 19.4	26.9 ± 1.5	0.6 ± 0.4
	O_3 污染天	$16.16 \times 10^{-9} \pm 4.48 \times 10^{-9}$	54.0 ± 10.0	28.2 ± 2.6	0.4 ± 0.2
	非 O_3 污染天	$17.58 \times 10^{-9} \pm 4.20 \times 10^{-9}$	53.3 ± 21.5	26.6 ± 1.3	0.8 ± 0.4

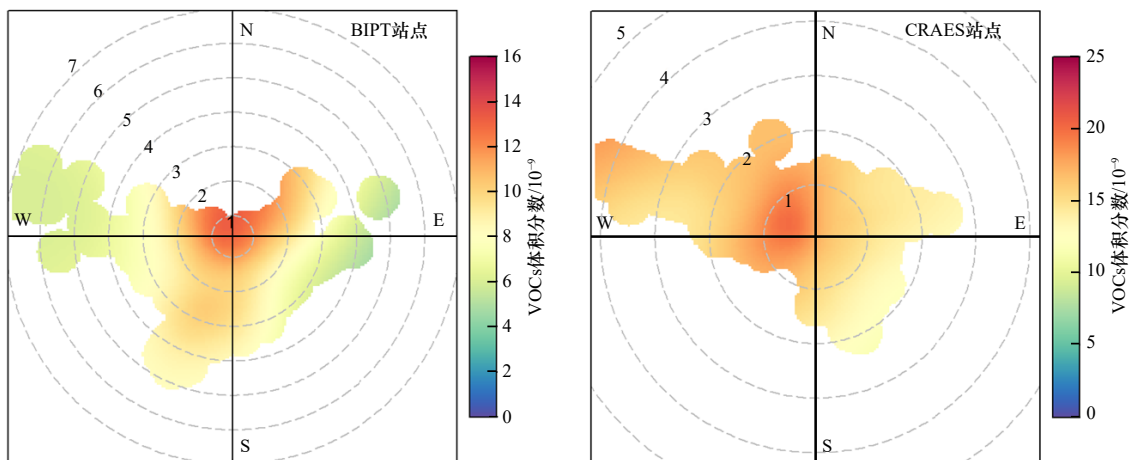
注: 数值为日均值±标准偏差。

2.2 VOCs 污染特征

2.2.1 空间分布特征

观测期间, BIPT 站点的 VOCs 体积分数为 $11.1 \times 10^{-9} \pm 3.9 \times 10^{-9}$, 低于 CRAES 站点 ($17.3 \times 10^{-9} \pm 4.2 \times 10^{-9}$), VOCs 体积分数在 O_3 污染天和非 O_3 污染天差异均不明显 (见表 1), 2 个站点的 VOCs 体积分数呈明显的南低北高的分布特征。2 个站点风速较

小时更容易出现 VOCs 高值, 其中, BIPT 站点的 VOCs 高值受多个方向影响, 北风条件下 VOCs 体积分数更高, 而 CRAES 站点的 VOCs 高值主要受西风影响 (见图 2)。对比分析该研究 2 个站点与北京市其他站点以及国内其他城市夏季 VOCs 水平 (见表 2) 发现, 笔者研究中 VOCs 体积分数与北京市之前研究结果^[22-23] 相比有所下降, 与北京生态环境保护科学研



注: 圈中数值代表风速, 单位为 m/s。

图 2 2019 年 8 月 1—29 日北京市 BIPT 和 CRAES 站点 VOCs 体积分数与风速风向的关系

Fig.2 Relationship between VOCs mixing ratios with wind speed and wind direction at BIPT and CRAES sites in Beijing from August 1st to 29th, 2019

究院站点^[24]、2017 年 7 月郑州站点^[25]和 2018 年 7 月西安站点^[26]结果相近,高于 2019 年 8 月武汉都市圈^[7],但低于 2019 年夏季的洛阳市^[27]。比较结果表明,近年来北京市 VOCs 管控成效明显,但体积分数仍处于国内中等水平,还需要进一步加强对 VOCs 的管控。

表 2 该研究与国内其他研究中 VOCs 体积分数比较

Table 2 Comparison of VOCs mixing ratios in this study with those in other studies in China

时间	研究区域	VOCs 体积分数/ 10^{-9}	数据来源
2019年8月	北京市(BIPT站点)	11.1	该研究
2019年8月	北京市(CRAES站点)	17.3	该研究
2015年8月	北京市	26.17	文献[22]
2016年7月	北京市	26.1	文献[23]
2019年6—7月	北京市	15.24	文献[24]
2017年7月	郑州市	16.0	文献[25]
2018年7月	西安市	19.0	文献[26]
2019年8月	武汉市	8.8	文献[7]
2019年7—8月	洛阳市	20.9	文献[27]

观测期间, BIPT 站点中各类别的 VOCs 占比呈烷烃 (62.06%)>芳香烃 (20.42%)>烯烃 (16.54%)>炔烃 (0.98%) 的特征, 而 CRAES 站点呈烷烃 (65.22%)>烯烃 (16.94%)>芳香烃 (9.94%)>炔烃 (7.90%) 的特征。2 个站点占比最高的均为烷烃, 这与其他研究结果^[25,28-30]类似, 主要是因为 2 个站点均处于交通流量较大的地区, 烷烃是汽车尾气主要成分, 且化学活性较低, 在大气中能够相对较长时间存在。BIPT 站点芳香烃体积分数 (2.3×10^{-9}) 明显高于 CRAES 站点 (1.7×10^{-9})。BIPT 站点附近 2 km 以内有多家汽修企

业, 研究^[31-32]表明, 芳香烃是汽修喷涂工序的特征污染物, 且在距离站点 9.22 km 处为生物医药基地, 这可能也是造成芳香烃高的原因之一。2 个站点体积分数排名前 5 位的 VOCs 物种不同, CRAES 站点依次为乙烷、丙烷、正丁烷、乙炔和乙烯, 而 BIPT 站点依次为丙烷、丙烯、正丁烷、异戊烷和甲苯。

2.2.2 时间分布特征

观测期间 2 个站点 O_3 体积分数、温度和代表性 VOCs 物种体积分数的日变化情况如图 3 所示。由图 3 可见: O_3 体积分数与温度呈一致的日变化特征, 最高值均出现在 15:00; 后半夜 (00:00 之后) 温度与 O_3 体积分数在污染天和非 O_3 污染天相差不大; 07:00—23:00 O_3 污染天的温度一直高于非 O_3 污染天, 然而 O_3 体积分数变化滞后温度变化 2 h。09:00 之后污染天 O_3 体积分数开始高于非 O_3 污染天, 这可能是因为 O_3 生成是一个复杂的光化学反应过程, 温度升高为光化学反应提供了能量条件, 但仍需要前体物在阳光照射下发生一系列反应, 当温度继续升高, 光化学反应速率会加快, 导致污染天 O_3 生成积累更快, 因此出现滞后现象。为有效预防高温天气 O_3 污染的出现, 09:00 之前加强前体物排放控制可能是一个有效措施。丙烷体积分数的日变化呈夜间逐渐升高而日间下降的趋势, 一般在 07:00 出现峰值, 之后由于边界层升高以及光化学反应的发生使得丙烷体积分数下降, 在 14:00—17:00 之间达到最低值。从下午持续至傍晚, 光化学反应逐渐减弱, 同时混合层高度开始降低, 并且在晚高峰时期机动车尾气排放增加, 进而导致 VOCs 体积分数出现反弹。此外, 2 个站点均

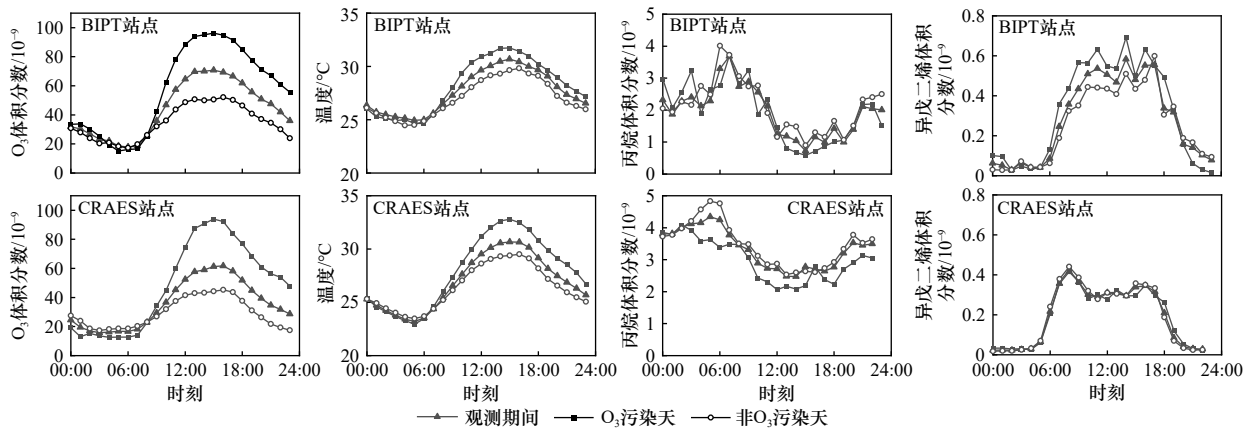


图 3 2019 年 8 月 1—29 日北京市 BIPT 和 CRAES 站点在观测期间、 O_3 污染天和非 O_3 污染天的 O_3 体积分数、温度以及代表性 VOCs 物种体积分数的日变化特征

Fig.3 Diurnal variations of O_3 , temperature and representative VOCs mixing ratios at the BIPT and CRAES sites during the observation period in August 2019, O_3 polluted days and non- O_3 polluted days in Beijing from August 1st to 29th, 2019

在五环路之外,北京市规定 00:00—06:00 载货汽车可以驶入通行,故在夜间通行的货运机动车也会导致污染物在夜间排放增大。相反,异戊二烯体积分数呈明显的白天高于夜间的日变化特征,这是因为异戊二烯主要由植物源排放,白天光照和温度有利于异戊二烯的释放。

2.3 活性 VOCs 物种识别

为探究对 O₃ 生成有主要贡献的 VOCs 物种,该研究计算了 O₃ 污染天 BIPT 和 CRAES 站点 VOCs 的 OFP 和 L_{OH}。BIPT 站点总 VOCs 的 OFP 和 L_{OH} 均大于 CRAES 站点, BIPT 站点和 CRAES 站点的 OFP 分别为 61.67×10⁻⁹ 和 44.83×10⁻⁹, L_{OH} 分别为 3.34 和 2.22 s⁻¹, 表明 BIPT 站点的 VOCs 物种活性更高。2 个站点 VOCs 中对 OFP 贡献率最高的均为芳香烃,其在 BIPT 站点贡献率达 46%,明显高于 CRAES 站点 (36%),其次为烯烃、烷烃和炔烃。2 个站点中烯烃对 L_{OH} 贡献率均占主导地位,在 BIPT 站点其他 VOCs 贡献率依次为芳香烃>烷烃>炔烃,而在 CRAES 站点为烷烃>芳香烃>炔烃,这说明芳香烃在 BIPT 站点

O₃ 生成中的重要性。综合 OFP 和 L_{OH}(见 图 4) 来看, 2 个站点均以烯烃和芳香烃为主,其中, BIPT 站点的活性 VOCs 物种主要为丙烯、邻二甲苯、1-己烯、邻乙基甲苯、反-2-丁烯和正丁烯, CRAES 站点的活性 VOCs 物种主要为乙烯、邻二甲苯、甲苯、1-己烯、丙烯、顺-2-丁烯和丙烷。这与北京市另一核心区(西城区站点)结果稍有不同,其活性 VOCs 物种为正己醛、乙烯、间/对-二甲苯和甲苯^[24]。通过对 BIPT 和 CRAES 站点 VOCs 物种的 RIR 值(见 图 4) 分析发现, 2 个站点异戊二烯的 RIR 值均最高,说明植物源可能是 O₃ 生成的重要来源,北京市在制定 O₃ 管控策略时需要考虑植物源的影响。除异戊二烯外, BIPT 站点应以丙烯、邻二甲苯和 1,2,4-三甲苯等 VOCs 物种为优先控制物种,而 CRAES 站点应以乙烯、丙烯和邻二甲苯等 VOCs 物种为优先控制物种。

2.4 VOCs 来源解析

为研究 2 个站点的 VOCs 来源,利用 PMF 模型开展 VOCs 来源解析。由 图 5 可见,因子 1 中丙烷、异丁烷、正丁烷、异戊烷、正戊烷等 C₂~C₅ 烷烃和苯

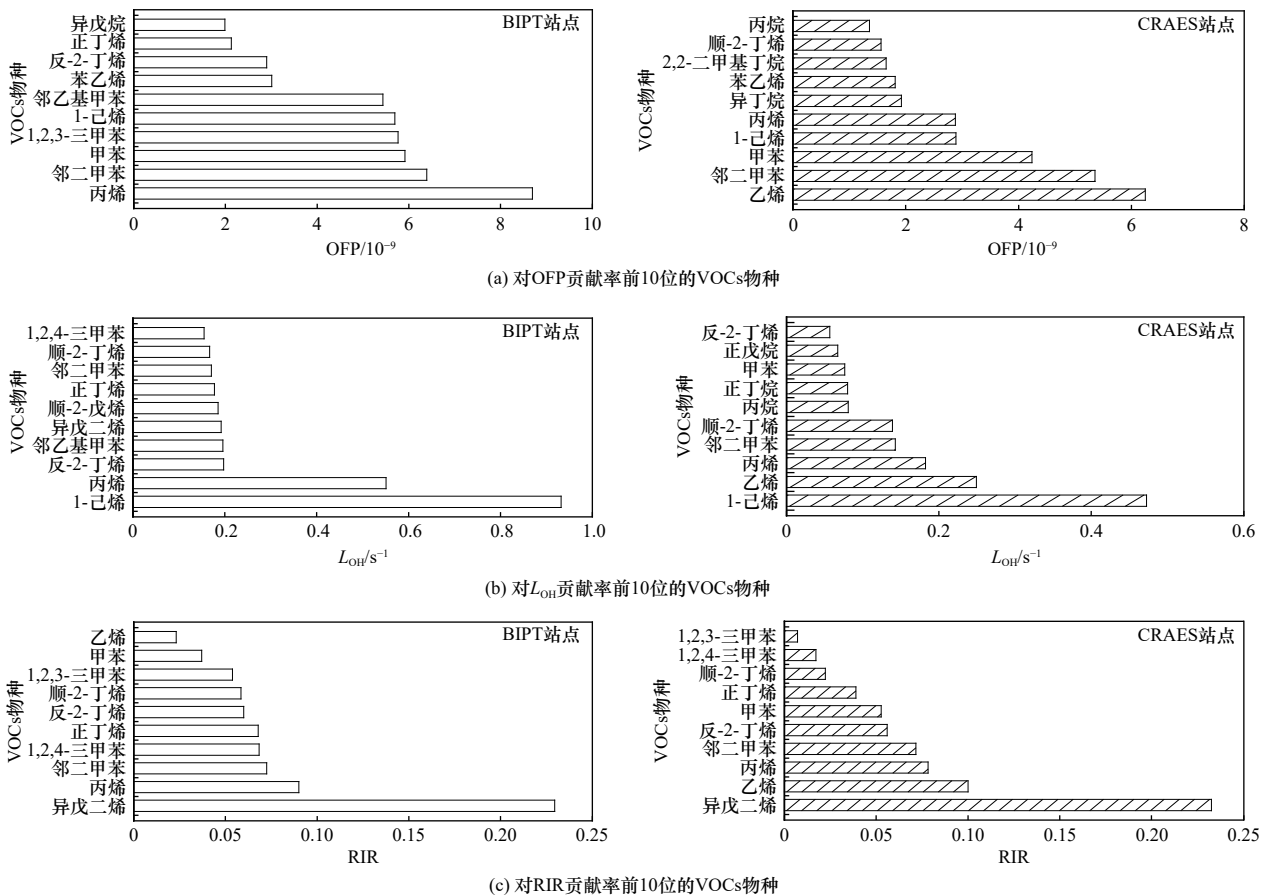


图 4 2019 年 8 月 1—29 日 O₃ 污染天北京市 BIPT 和 CRAES 站点对 OFP、L_{OH} 和 RIR 贡献前 10 位的 VOCs 物种

Fig.4 The top 10 VOCs species contributing to OFP, L_{OH} and RIR at the BIPT and CRAES sites on O₃ polluted days in Beijing from August 1st to 29th, 2019

系物有较高的贡献率。研究^[31-34]发现,这些物种与汽车尾气排放相关,因此因子1被认定为汽车尾气排放源。因子2中苯、甲苯、乙苯、正庚烷、C₂~C₅烷烃都有一定贡献,这些VOCs通常被认为来自汽油、柴油和LPG的蒸发排放^[33-35],因此该研究认为因子2为油气挥发源。因子3中异戊二烯贡献率最高,异戊二烯通常被认为是植物源的指示物^[36],所以因子3为植物源。因子4中大部分为芳香烃物种,溶剂使用(包括

油漆、涂料、合成香料和清洁剂)过程中常常释放芳香烃,涂装工艺中也会排放乙基甲苯、对二乙苯和邻二甲苯等苯系物^[37],因此推断因子4为溶剂使用源。因子5中贡献率较高的有苯、间/对-二甲苯、正庚烷、正辛烷等高碳数VOCs,常被作为柴油车尾气源的示踪物种^[33,38-39];此外,乙烯的贡献率也较高,研究^[40-42]发现其与柴油车尾气有关,因此因子5被判定为柴油车尾气源。

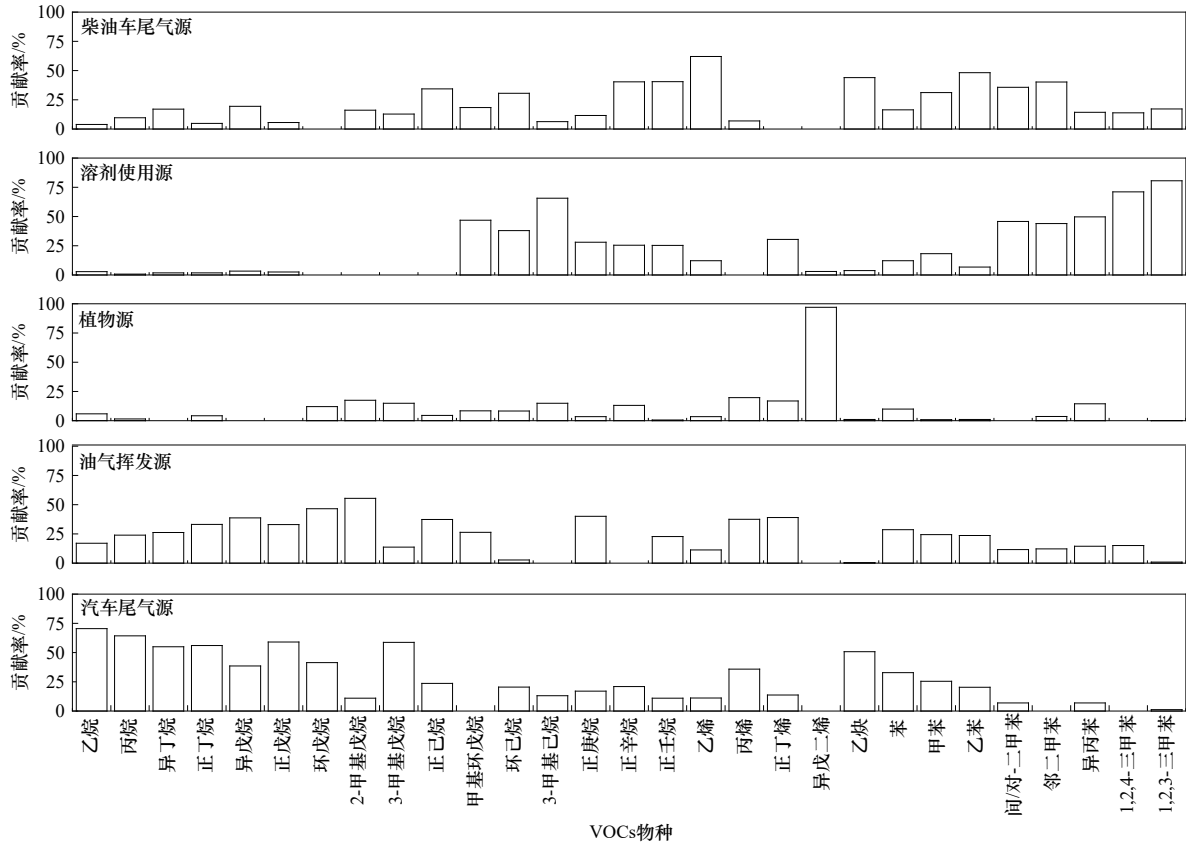


图5 2019年8月1—29日北京市BIPT和CRAES站点PMF源解析因子清单

Fig.5 Factor profiles of PMF source apportionment at the BIPT and CRAES sites in Beijing from August 1st to 29th, 2019

2个站点在O₃污染天和非O₃污染天各污染源对VOCs体积分数和OFP贡献率不完全相同。对于VOCs体积分数(见图6),汽车尾气源是对2个站点贡献率最高的污染源,对BIPT站点贡献率第2位的为溶剂使用源,而对于CRAES站点为柴油车尾气源。这与同年针对北京市另一核心区(海淀区)的研究结果^[13]不同。Liu等^[13]研究表明,工业排放和汽车尾气源是海淀区VOCs的主要来源。上述情况表明,北京市不同功能区VOCs主要来源存在差异。O₃污染天,BIPT站点的油气挥发源贡献率有所升高,而CRAES站点的柴油车尾气源贡献率略有上升。由于VOCs活性存在差异,为更好识别影响O₃生成的主要污染源,该研究计算了各个源对OFP的贡献率。影响

BIPT站点O₃生成的前3个主要污染源依次为溶剂使用源、植物源和汽车尾气源,影响CRAES站点O₃生成的前3个主要污染源依次为柴油车尾气源、溶剂使用源和植物源(见图6)。已有研究^[43-44]发现,O₃污染期间溶剂使用源或植物源对OFP贡献率会升高。在O₃污染天,除植物源外,溶剂使用源和汽车尾气源对BIPT站点的OFP贡献率较大,而溶剂使用源和柴油车尾气源对CRAES站点的OFP贡献率较大。进一步结合RIR分析(见图7)发现,O₃污染天2个站点植物源的RIR值均为最高。在人为源中,BIPT站点的溶剂使用源RIR值最高,其次为柴油车尾气源;而CRAES站点RIR值最高为柴油车尾气源,其次为溶剂使用源。

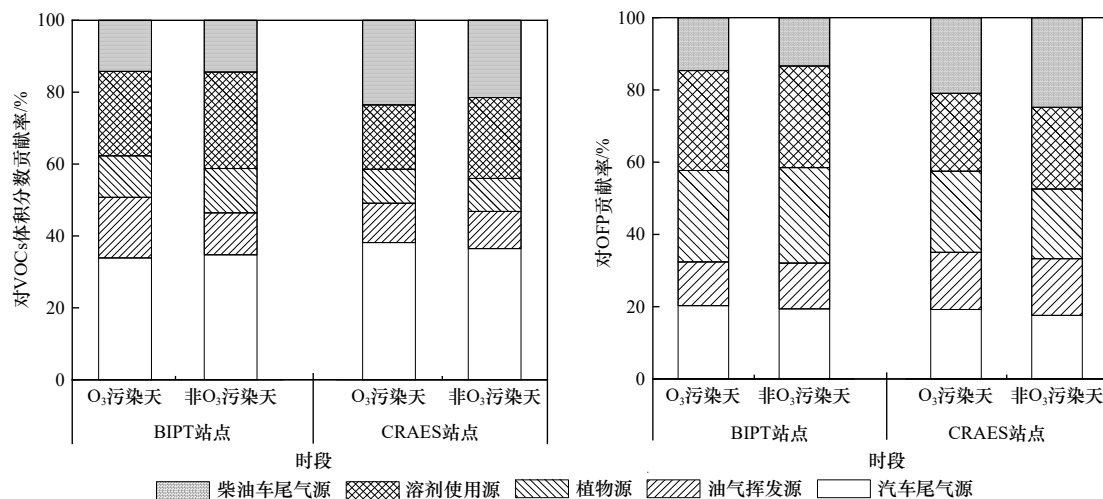


图 6 2019 年 8 月 1—29 日 O₃ 污染天和非 O₃ 污染天北京市 BIPT 和 CRAES 站点各污染源对 VOCs 体积分数和 OFP 的贡献率

Fig.6 The contribution of each source to VOCs mixing ratios and OFP during the observation period, O₃ polluted days and non-O₃ polluted days at the BIPT and CRAES sites in Beijing from August 1st to 29th, 2019

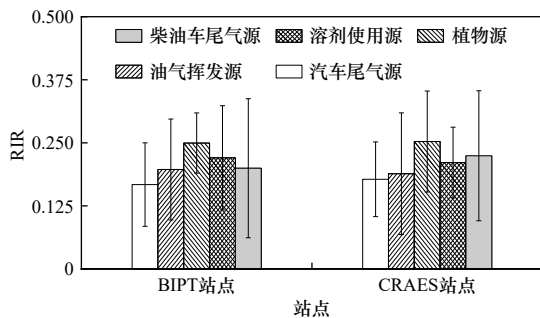


图 7 2019 年 8 月 1—29 日北京市 BIPT 和 CRAES 站点 VOCs 污染源在 O₃ 污染天的 RIR 平均值

Fig.7 The average RIR ratios of VOCs sources on O₃ polluted days at the BIPT and CRAES sites in Beijing from August 1st to 29th, 2019

结合 OFP 和 RIR 分析发现,植物源对 2 个站点 O₃ 生成的贡献率都不容忽视。而且异戊二烯作为植物源的特征物种,其大气活性较强^[45],因此该研究对植物源贡献率有一定的低估。溶剂使用源和机动车尾气源都是主要的人为贡献来源,但为有效控制 O₃ 污染,2 个站点需要实施差异化的 VOCs 污染源优先管控措施。BIPT 站点的应优先控制溶剂使用源和汽车尾气源,而管控柴油车尾气源和溶剂使用源是 CRAES 站点控制 O₃ 更有效的人为源控制措施。

3 结论

a) 2019 年 8 月北京市 BIPT 和 CRAES 2 个站点出现多次 O₃ 污染,BIPT 站点 VOCs 体积分数低于 CRAES

站点,呈南低北高分布特征。2 个站点烷烃体积分数占比均最高,其次分别为芳香烃(BIPT 站点)和烯烃(CRAES 站点),炔烃占比均最低。

b) 观测期间, O₃ 体积分数与温度总体呈一致的日变化特征, O₃ 污染天 09:00 之后 O₃ 体积分数开始高于非 O₃ 污染天,滞后于温度变化 (07:00) 2 h, VOCs 体积分数在 O₃ 污染天和非 O₃ 污染天无明显差异。为有效预防高温天气 O₃ 污染的出现, 09:00 之前加强前体物排放控制可能是一个有效的措施。

c) OFP 和 L_{OH} 分析表明,观测期间北京市 BIPT 站点 VOCs 活性更强。进一步结合 RIR 分析表明, BIPT 站点影响 O₃ 生成活性的 VOCs 物种以异戊二烯、丙烯、邻二甲苯和 1,2,4-三甲苯等为主,而 CRAES 站点以异戊二烯、乙烯、丙烯和邻二甲苯等为主。

d) PMF 来源解析表明,观测期间北京市 2 个站点 VOCs 主要来源不完全相同,除汽车尾气源外,溶剂使用源和油气挥发源是 BIPT 站点 VOCs 主要来源,柴油车尾气源和溶剂使用源是 CRAES 站点 VOCs 主要来源。结合 OFP 和 RIR 分析表明,为有效控制 O₃ 污染,在人为源 VOCs 管控方面,北京市大兴区 BIPT 站点应优先控制溶剂使用源和汽车尾气源,而朝阳区 CRAES 站点应优先管控柴油车尾气源和溶剂使用源。

参考文献 (References):

- [1] DING S,WEI Z W,HE J H,et al.Estimates of PM_{2.5} concentrations spatiotemporal evolution across China considering aerosol components in the context of the reform and opening-up[J].

- [Journal of Environmental Management](#),2022,322:115983.
- [2] NIU Y W,LI X L,QI B,et al.Variation in the concentrations of atmospheric PM_{2.5} and its main chemical components in an Eastern China city (Hangzhou) since the release of the Air Pollution Prevention and Control Action Plan in 2013[J].*Air Quality,Atmosphere & Health*,2022,15(2):321-337.
- [3] YANG G F,LIU Y H,LI X N.Spatiotemporal distribution of ground-level ozone in China at a city level[J].*Scientific Reports*,2020,10(1):7229.
- [4] WU R R,XIE S D.Spatial distribution of secondary organic aerosol formation potential in China derived from speciated anthropogenic volatile organic compound emissions[J].*Environmental Science & Technology*,2018,52(15):8146-8156.
- [5] LIU Y H,WANG H L,JING S G,et al.Characteristics and sources of volatile organic compounds (VOCs) in Shanghai during summer:implications of regional transport[J].*Atmospheric Environment*,2019,215:116902.
- [6] GUAN Y N,LIU X J,ZHENG Z Y,et al.Summer O₃ pollution cycle characteristics and VOCs sources in a central city of Beijing-Tianjin-Hebei area,China[J].*Environmental Pollution*,2023,323:121293.
- [7] WANG R Y,WANG L L,XUE M,et al.New insight into formation mechanism,source and control strategy of severe O₃ pollution:the case from photochemical simulation in the Wuhan Metropolitan Area,Central China[J].*Atmospheric Research*,2023,284:106605.
- [8] ZOU Y,YAN X L,FLORES R M,et al.Source apportionment and ozone formation mechanism of VOCs considering photochemical loss in Guangzhou,China[J].*Science of the Total Environment*,2023,903:166191.
- [9] SHAN D Y,DU Z Y,ZHANG T,et al.Variations,sources,and effects on ozone formation of VOCs during ozone episodes in 13 cities in China[J].*Frontiers in Environmental Science*,2023,10:1084592.
- [10] 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.
- [11] WANG M,SHAO M,CHEN W,et al.Trends of non-methane hydrocarbons (NMHC) emissions in Beijing during 2002-2013[J].*Atmospheric Chemistry and Physics*,2015,15(3):1489-1502.
- [12] LI Q Q,SU G J,LI C Q,et al.An investigation into the role of VOCs in SOA and ozone production in Beijing,China[J].*Science of the Total Environment*,2020,720:137536.
- [13] LIU Y F,YIN S J,ZHANG S Q,et al.Drivers and impacts of decreasing concentrations of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) in Beijing during 2016-2020[J].*Science of the Total Environment*,2024,906:167847.
- [14] LI Y F,WU Z H,JI Y Y,et al.Comparison of the ozone formation mechanisms and VOCs apportionment in different ozone pollution episodes in urban Beijing in 2019 and 2020:insights for ozone pollution control strategies[J].*Science of the Total Environment*,2024,908:168332.
- [15] LIU C T,MU Y J,ZHANG C L,et al.Development of gas chromatography-flame ionization detection system with a single column and liquid nitrogen-free for measuring atmospheric C₂-C₁₂ hydrocarbons[J].*Journal of Chromatography A*,2016,1427:134-141.
- [16] 张利慧,毋振海,李斌,等.北京市城区春季大气挥发性有机物污染特征[J].*环境科学研究*,2020,33(3):526-535.
- ZHANG L H,WU Z H,LI B,et al.Pollution characterizations of atmospheric volatile organic compounds in spring of Beijing urban area[J].*Research of Environmental Sciences*,2020,33(3):526-535.
- [17] 佟胜睿,徐言勇,李方杰,等.北京市春节前和春节期间非甲烷烃污染特征及其来源解析[J].*环境科学研究*,2024,37(11):2453-2465.
- TONG S R,XU Y Y,LI F J,et al.Characterization of non-methane hydrocarbon pollution in Beijing before and during the spring festival and analysis of its sources[J].*Research of Environmental Sciences*,2024,37(11):2453-2465.
- [18] 韩翼昕,张玉洁,贺美,等.典型中部地区南阳市 VOCs 污染特征及对 O₃ 生成影响[J].*环境科学研究*,2023,36(12):2256-2268.
- HAN Y X,ZHANG Y J,HE M,et al.VOCs pollution characterization and its influence on O₃ pollution in a typical Central China City Nanyang[J].*Research of Environmental Sciences*,2023,36(12):2256-2268.
- [19] 王可鑫,张鑫,纪元元,等.煤化工产业园区挥发性有机物污染特征及其对大气复合污染的贡献[J].*环境科学研究*,2023,36(2):294-304.
- WANG K X,ZHANG X,JI Y Y,et al.Characterization of ambient VOCs in a coal chemical industry park and their contribution to complex air pollution[J].*Research of Environmental Sciences*,2023,36(2):294-304.
- [20] LI Y F,GAO R,XUE L K,et al.Ambient volatile organic compounds at Wudang Mountain in Central China:characteristics, sources and implications to ozone formation[J].*Atmospheric Research*,2021,250:105359.
- [21] 宋镇泽,薛爽,牛大伟,等.中原地区秋季大气甲醛污染特征及对臭氧生成的影响:以漯河市为例[J].*环境科学研究*,2024,37(6):1232-1242.
- SONG Z Z,XUE S,NIU D W,et al.Characteristics of atmospheric formaldehyde pollution in autumn in central plains and its impact on ozone generation:a case study of Luohe City[J].*Research of Environmental Sciences*,2024,37(6):1232-1242.
- [22] LI J,WU R R,LI Y Q,et al.Effects of rigorous emission controls on reducing ambient volatile organic compounds in Beijing,China[J].*Science of the Total Environment*,2016,557:531-541.
- [23] ZHANG C,LIU X G,ZHANG Y Y,et al.Characteristics,source apportionment and chemical conversions of VOCs based on a comprehensive summer observation experiment in Beijing[J].*Atmospheric Pollution Research*,2021,12(3):230-241.
- [24] 张蕊,孙雪松,王裕,等.北京市城区夏季大气 VOCs 变化特征及臭氧生成潜势[J].*环境科学*,2023,44(4):1954-1961.

- ZHANG R,SUN X S,WANG Y,et al.Variation characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in urban Beijing in summer[J].*Environmental Science*,2023,44(4):1954-1961.
- [25] LI B W,HO S S H,GONG S L,et al.Characterization of VOCs and their related atmospheric processes in a central Chinese city during severe ozone pollution periods[J].*Atmospheric Chemistry and Physics*,2019,19(1):617-638.
- [26] SUN J,SHEN Z X,ZHANG Y,et al.Urban VOC profiles,possible sources,and its role in ozone formation for a summer campaign over Xi'an,China[J].*Environmental Science and Pollution Research*,2019,26(27):27769-27782.
- [27] SUN J,SHEN Z X,WANG R N,et al.A comprehensive study on ozone pollution in a megacity in North China Plain during summertime:observations,source attributions and ozone sensitivity [J].*Environment International*,2021,146:106279.
- [28] LIU C T,MU Y J,ZHANG C L,et al.A comparison investigation of atmospheric NMHCs at two sampling sites of Beijing City and a rural area during summertime[J].*Science of the Total Environment*,2021,783:146867.
- [29] MU J S,ZHANG Y N,XIA Z Y,et al.Two-year online measurements of volatile organic compounds (VOCs) at four sites in a Chinese city:significant impact of petrochemical industry[J].*Science of the Total Environment*,2023,858(Pt 3):159951.
- [30] WU Y J,FAN X L,LIU Y,et al.Source apportionment of VOCs based on photochemical loss in summer at a suburban site in Beijing[J].*Atmospheric Environment*,2023,293:119459.
- [31] 孙成一,蒋宝,化晓卉,等.基于企业活动水平的北京市汽修行业 VOCs 排放特征 [J].*环境科学*,2024.doi:10.13227/j.hjcx.202404069.
- SUN C Y,JIANG B,HUA X H,et al.Study of volatile organic compounds emission character based on business operations of the vehicle repairing industry in Beijing [J].*Environmental Science*,2024.doi:10.13227/j.hjcx.202404069.
- [32] 王海林,杨涛,聂磊,等.汽修行业挥发性有机物排放与控制现状及对策 [J].*环境科学*,2021,42(12):5574-5584.
- WANG H L,YANG T,NIE L,et al.Volatile organic compounds in the vehicle repairing industry of China:emission,management, purification,and policy[J].*Environmental Science*,2021,42(12):5574-5584.
- [33] LIU Y,SHAO M,FU L L,et al.Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China:part I[J].*Atmospheric Environment*,2008,42(25):6247-6260.
- [34] ZHANG Y L,WANG X M,ZHANG Z,et al.Species profiles and normalized reactivity of volatile organic compounds from gasoline evaporation in China[J].*Atmospheric Environment*,2013,79:110-118.
- [35] WANG H L,JING S G,LOU S R,et al.Volatile organic compounds (VOCs) source profiles of on-road vehicle emissions in China[J].*Science of the Total Environment*,2017,607:253-261.
- [36] 李丛舒,刘永全,刘欢,等.天津工业区春夏季 VOCs 污染特征及精细化来源解析 [J].*环境工程技术学报*,2023,13(2):491-500.
- LI C S,LIU Y Q,LIU H,et al.Pollution characteristics and refined source apportionment for VOCs in Tianjin Industrial Area in spring and summer[J].*Journal of Environmental Engineering Technology*,2023,13(2):491-500.
- [37] CHOI E,CHOI K,YI S M.Non-methane hydrocarbons in the atmosphere of a Metropolitan City and a background site in South Korea:Sources and health risk potentials[J].*Atmospheric Environment*,2011,45(40):7563-7573.
- [38] BUZCU B,FRASER M P.Source identification and apportionment of volatile organic compounds in Houston,TX[J].*Atmospheric Environment*,2006,40(13):2385-2400.
- [39] 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.
- [40] DALLMANN T R,DeMARTINI S J,KIRCHSTETTER T W,et al. On-road measurement of gas and particle phase pollutant emission factors for individual heavy-duty diesel trucks[J].*Environmental Science & Technology*,2012,46(15):8511-8518.
- [41] WU R R,XIE S D.Spatial distribution of ozone formation in China derived from emissions of speciated volatile organic compounds [J].*Environmental Science & Technology*,2017,51(5):2574-2583.
- [42] NIU Z Z,KONG S F,ZHENG H,et al.Differences in compositions and effects of VOCs from vehicle emission detected using various methods[J].*Environmental Pollution*,2023,333:122077.
- [43] LIANG S Y,GAO S,WANG S,et al.Characteristics,sources of volatile organic compounds,and their contributions to secondary air pollution during different periods in Beijing,China[J].*Science of the Total Environment*,2023,858:159831.
- [44] 王振涛,龙腾飞,崔阳,等.晋中市夏季典型臭氧污染事件中 VOCs 化学特征与来源分析 [J].*环境科学学报*,2024,44(10):91-102.
- WANG Z T,LONG T F,CUI Y,et al.Characteristics and source analysis of VOCs components during a typical summer ozone pollution event in Jinzhong[J].*Acta Scientiae Circumstantiae*,2024,44(10):91-102.
- [45] ZHANG J Q,LIU Z,WU Y J,et al.The impacts of photochemical loss on the source apportionment of ambient volatile organic compounds:a case study in Northern China[J].*Atmospheric Environment*,2024,333:120671.

(责任编辑:刘 方)