

新疆兵团某城市工业园区挥发性有机物污染特征及环境影响

江宜霖, 黄晓宇, 徐 盖, 杨 帆*

新疆生产建设兵团生态环境第一监测站, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2025年12月24日; 录用日期: 2026年2月4日; 发布日期: 2026年2月12日

摘要

本研究系统评估了新疆兵团某典型工业园区大气VOCs的污染特征、环境效应及健康风险。结果显示, TVOCs年均浓度为 $(103.6 \pm 92.6) \mu\text{g}/\text{m}^3$, 夏季最高, OVOCs为全年主导组分(占43.5%)。VOCs年均OFP为 $3.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 主要贡献物种为丙烯和丙酮等; 年均SOA FP为 $0.056 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 苯和甲苯贡献占比达81.0%。苯、甲苯和正己烷为O₃与PM_{2.5}协同控制的关键前体物。健康风险评价表明, VOCs非致癌风险较低, 但萘、苯等存在潜在致癌风险, 应作为优先管控物种。研究可为园区VOCs协同控制和重点物种管控提供科学依据。

关键词

VOCs, 臭氧生成潜势, 二次有机气溶胶生成潜势, 污染特征, 健康风险

Characteristics and Environmental Impacts of Volatile Organic Compound Pollution in an Industrial Park of a City in the Xinjiang Production and Construction Corps

Yilin Jiang, Xiaoyu Huang, Gai Xu, Fan Yang*

First Environmental Monitoring Station of Xinjiang Production and Construction Corps, Urumqi Xinjiang

Received: December 24, 2025; accepted: February 4, 2026; published: February 12, 2026

*通讯作者。

Abstract

This study systematically assessed the pollution characteristics, environmental effects, and health risks of atmospheric VOCs in a typical industrial park in Xinjiang. The results show that the annual average concentration of TVOCs was $(103.6 \pm 92.6) \mu\text{g}/\text{m}^3$, with the highest levels in summer. OVOCs were the dominant components throughout the year (accounting for 43.5%). The annual average OFP of VOCs was $3.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$, with propylene and acetone being the major contributing species; the annual average SOAfp was $0.056 \mu\text{g}/\text{m}^3$, with benzene and toluene contributing up to 81.0%. Benzene, toluene, and n-hexane were identified as key precursors for the coordinated control of O₃ and PM_{2.5}. Health risk assessment indicated a low non-carcinogenic risk from VOCs, but potential carcinogenic risks were identified for species such as naphthalene and benzene, which should be prioritized for control. This research provides a scientific basis for the coordinated control of VOCs and targeted management of key species in industrial parks.

Keywords

Volatile Organic Compounds (VOCs), Ozone Formation Potential (OFP), Secondary Organic Aerosol Formation Potential (SOAfp), Pollution Characteristics, Health Risk

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

挥发性有机物(Volatile Organic Compounds, VOCs)，是指在常温常压下容易挥发的有机化学物质的总称[1]。作为大气中一类重要的气态污染物，不仅对人体健康具有直接或潜在的影响，而且作为臭氧(O₃)和二次有机气溶胶(Secondary Organic Aerosols, SOA)的重要前体物，对区域大气的复合型污染具有重要贡献[2]-[4]。随着我国工业化与城市化进程的加快，工业源已成为人为 VOCs 排放的主要来源之一，据文献报道其贡献高达 46% [5]。尤其是在工业园区，源项较为集中，VOCs 的排放强度高、组分复杂，对局部大气环境和周边居民健康构成潜在威胁[4] [6] [7]。鉴于此，学者们广泛开展了对京津冀、长三角、珠三角等经济发达地区的工业源 VOCs 污染特征、来源解析及环境影响的研究[8]-[10]。然而，对于西部地区，尤其是新疆这类典型干旱半干旱气候条件下的工业园区 VOCs 污染研究相对薄弱。新疆作为“丝绸之路经济带”的核心区，近年来其工业化进程速度不断加快，如伊犁河谷、乌昌石城市群等区域的工业园区规模不断扩大，大气污染问题也随之显现，尤其臭氧和颗粒物污染交错发生，开展与之紧密相关的 VOCs 污染研究至关重要[4] [11] [12]。据相关研究表明，工业园区的 VOCs 组成具有明显的行业特征和季节变化规律。例如，化工园区以含氧挥发性有机物(OVOCs)和烷烃为主，而石化园区则烷烃、烯烃和芳香烃占比较高；VOCs 的臭氧生成潜势(OFP)和二次有机气溶胶生成潜势(SOAfp)也因物种活性和环境条件差异而不同[13]-[16]。此外，工业园区 VOCs 对人体健康的非致癌和致癌风险方面，尤其需要关注苯、1,3-丁二烯、氯代烃等物种[17]-[19]。因此，本研究以新疆某典型工业园区为研究对象，基于 2024 年不同月份大气 VOCs 监测数据，系统分析其浓度水平、组成特征、季节变化规律、臭氧与 SOA 生成潜势，评估其对环境空气质量及人体健康的潜在影响，以期为该区域 VOCs 与臭氧协同控制及人群健康保护提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域概况与采样点布设

本研究选取新疆生产建设兵团某市的典型工业园区作为研究对象。该园区位于城市主导风向的上风向，聚集了有色金属加工、煤电、煤化工、新材料等多种产业，是重要的煤电煤化工基地。园区地处内陆干旱半干旱气候区，冬季寒冷漫长，夏季炎热干燥，大气边界层高度及气象条件季节差异显著，对污染物的扩散与转化具有重要影响。

在研究区域内，根据企业分布类型、主导风向及园区功能分区，共选择 7 家企业，布设了 10 个环境空气采样点，以期全面反映园区 VOCs 的整体污染水平及空间分布特征。

2.2. 监测时间与数据来源

监测时间为 2024 年 3 月至 2025 年 2 月，覆盖春(3~5 月)、夏(6~8 月)、秋(9~11 月)、冬(12~2 月)四个季节。采用 3.2 升规格苏玛罐和 ENTECH 积分采样器组合方式采样，每点位每次采样时间 24 小时，采样频率为每月 0~3 次，合计 24 次。共获得有效样品 225 个，分析了包括 4 种烷烃、2 种烯烃、9 种芳香烃、36 种卤代烃、10 种 OVOCs(含醛酮类)及乙炔等在内的 65 种 VOCs 物种。

2.3. VOCs 组分分析方法与质控措施

VOCs 样品进行低温浓缩后，进入安捷伦气相色谱 - 质谱联用仪(GC-MS，安捷伦，7890B-5977A)分析。分析方法参照《环境空气挥发性有机物的测定罐采样/气相色谱 - 质谱法》(HJ 759-2023) [20]。采样前，使用经认证的 PAMS 和 TO-15 标准气体对 GC-MS 系统进行多点校准(2, 5, 10, 15, 20, 40 ppbv)，所有目标化合物的校准曲线相关系数(R)均大于等于 0.990。每批次样品分析前，使用 20 ppbv 标准气体进行单点校准，均满足分析标准中各组分浓度与理论值的偏差在±30% 以内的质控要求。现场空白样品(高纯氮气)的检测结果均低于方法检出限。样品的总离子流图均经人工核对，确保定性定量的准确性。

OVOCs 采用苏玛罐采样测定的方法具有一定的局限性。OVOCs 通常具有较大极性且化学性质较为活泼，易吸附在罐体内壁或与罐内其他化学物质发生反应。相比于极性较弱的烷烃、芳烃等 VOCs，OVOCs 在罐中的储存稳定性较差。尤其是低分子量醛类，可能在短时间内出现明显的浓度下降，导致测定结果偏低。分析过程中，OVOCs 测定标准样品校准点 20 ppbv，回收率范围在 82.7%~109%。

2.4. OFP、SOAFP 计算方法

臭氧生成潜势(OFP)采用最大增量反应活性法(MIR)计算[21]，公式如下：

$$OFP_i = VOCs_i \times MIR_i \quad (1)$$

式中， OFP_i 为物种 i 的臭氧生成潜势($\mu\text{g}/\text{m}^3$)； $VOCs_i$ 为监测的 VOCs 物种 i 的浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)； MIR_i 为其最大增量反应活性系数，取值参照 Carter 更新的 MIR 标尺[22]。

二次有机气溶胶生成潜势(SOAFP)采用气溶胶生成系数法(FAC) [23] [24] 估算，公式如下：

$$SOAFP_i = VOC_{i0} \times FAC_i \quad (2)$$

$$VOCs_t = VOC_{i0} \times (1 - F_{VOCri}) \quad (3)$$

式中， $SOAFP_i$ 为物种 i 的二次有机气溶胶生成潜势($\mu\text{g}/\text{m}^3$)； VOC_{i0} 为物种 i 的初始浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)； FAC_i 为物种 i 生成 SOA 的生成系数(%)； $VOCs_t$ 为某物种的实测浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)； F_{VOCri} 物种 i 参与反应的质量浓度百分比(%)。其中， FAC_i 和 F_{VOCri} 的取值，参照 Grosjean 等及后续相关研究的实验数据[23]-[25]。

2.5. 健康风险评估模型(HI、LCR)

采用美国 EPA 推荐的吸入途径健康风险评估模型[26]。非致癌风险和致癌风险，分别用危害指数(HI)和终生致癌风险(LCR)评价[26]。

$$HI = \frac{C_{VOC_s} \times ET \times EF \times ED}{365 \times AT_{nca} \times 24} \times \frac{1}{Rfc} \quad (4)$$

$$LCR = \frac{C_{VOC_s} \times ET \times EF \times ED}{365 \times AT_{ca} \times 24} \times IUR \quad (5)$$

式中， C_{VOC_s} 为物种的浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)； ET 为暴露时间，取值为 8 h·d-1 [27]； EF 为暴露频率，取值为 260 d·a-1 [28]； ED 为暴露持续时长，取值为 30 a [28]； AT_{nca} 和 AT_{ca} 为非致癌作用和致癌作用的时间，取值分别为 25 a 和 70 a [29]； Rfc 为参考浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$)； IUR 为单位吸入风险($\mu\text{g}/\text{m}^3$)。其中， Rfc 和 IUR 的取值采用美国 EPA 的参考值[30] [31]。

当 $HI > 1$ 时认为存在非致癌风险；当 $LCR > 1 \times 10^{-6}$ 时认为存在潜在致癌风险。

3. 结果与讨论

3.1. VOCs 浓度水平与季节变化特征

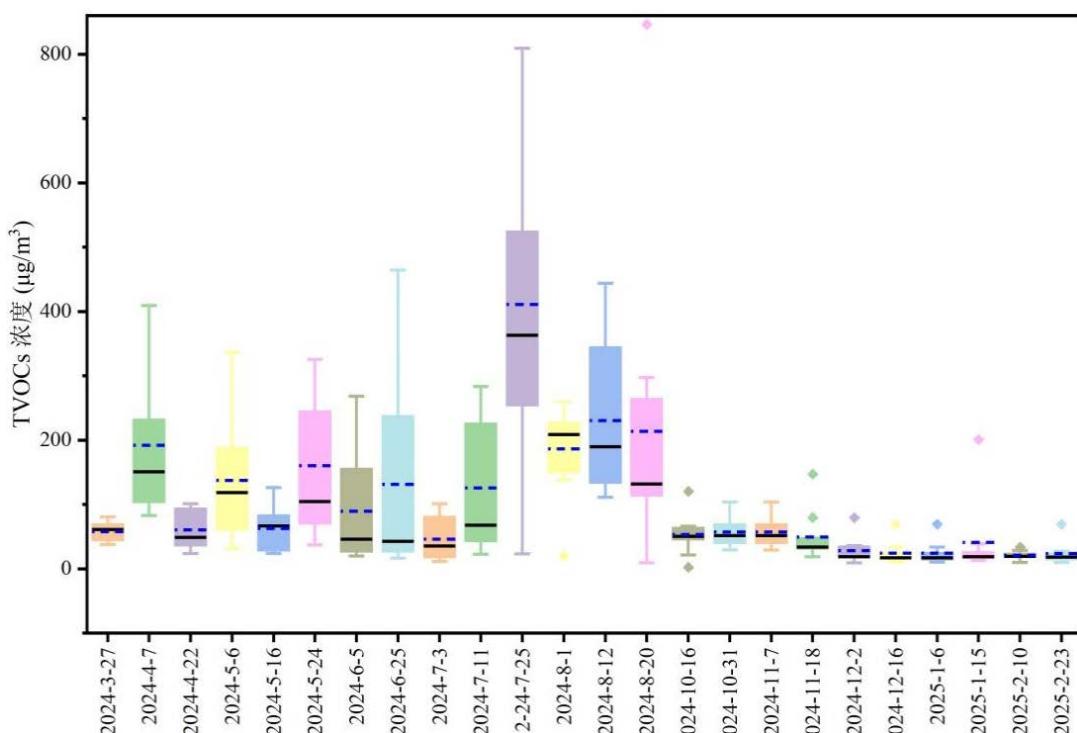


Figure 1. Trend chart of daily average concentration of TVOCs in ambient air of an industrial park in a city of Xinjiang production and construction corps in 2024

图 1. 2024 年度新疆兵团某市工业园区环境空气中 TVOCs 日平均浓度变化趋势图

由图 1 可知，在 2024 年度观测期间，工业园区环境空气中 TVOCs 的年均浓度为 $(103.6 \pm 92.6) \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，浓度范围在 $2.3 \sim 846.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间。TVOCs 浓度呈现显著的季节差异，表现为：夏季($179.3 \pm 112.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$)> 春季($111.9 \pm 58.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)> 秋季($54.2 \pm 3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)> 冬季($27.2 \pm 7.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)这可能是温度主导的挥发效应。

例如，夏季高温极大地促进了原料、溶剂的无组织挥发与光化学反应，成为浓度峰值期；春季随温度回升，加之大风天气较多，排放增强使其浓度次之；而在温度较低、日照减弱的秋、冬两季，VOCs 的挥发被有效抑制，排放源强大幅减弱，致使浓度降至最低水平。图 2~图 5 分别展示了工业园区风玫瑰图，以及气温、湿度和风速与 TVOCs 的关系。由图 2 可知，该工业园区以西风和西北风为主。图 3 显示了 TVOCs 浓度与温度呈现显著的正相关关系($r = 0.62, P = 0.0013$)。图 4 显示 TVOCs 浓度与风速尽管呈现正相关关系，但不显著($r = 0.23, P = 0.287$)。图 5 显示 TVOCs 浓度与相对湿度呈现负相关关系，但不显著($r = -0.40, P = 0.053$)。气象参数分析进一步验证了上述假设，工业园区 TVOCs 浓度呈现显著的季节差异是由温度主导的挥发效应。以上分析表明，对于该工业园区，由温度控制的排放源强变化可能是比大气扩散条件更为关键的因素。

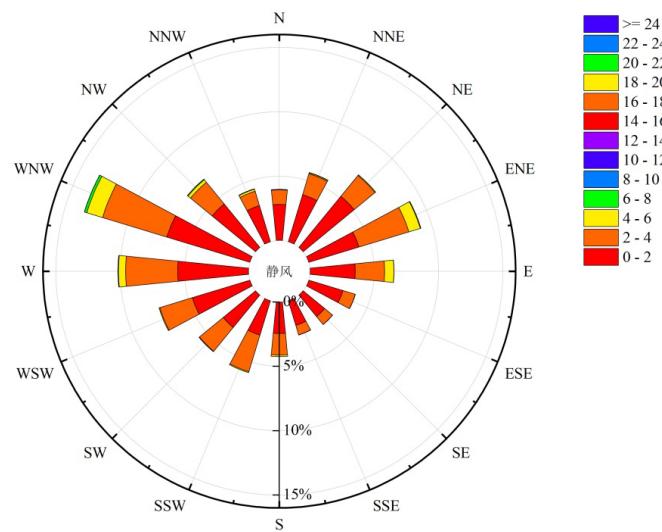


Figure 2. Wind rose diagram of an industrial park in a City of Xinjiang production and construction corps in 2024
图 2. 2024 年度新疆兵团某市工业园区的风玫瑰图

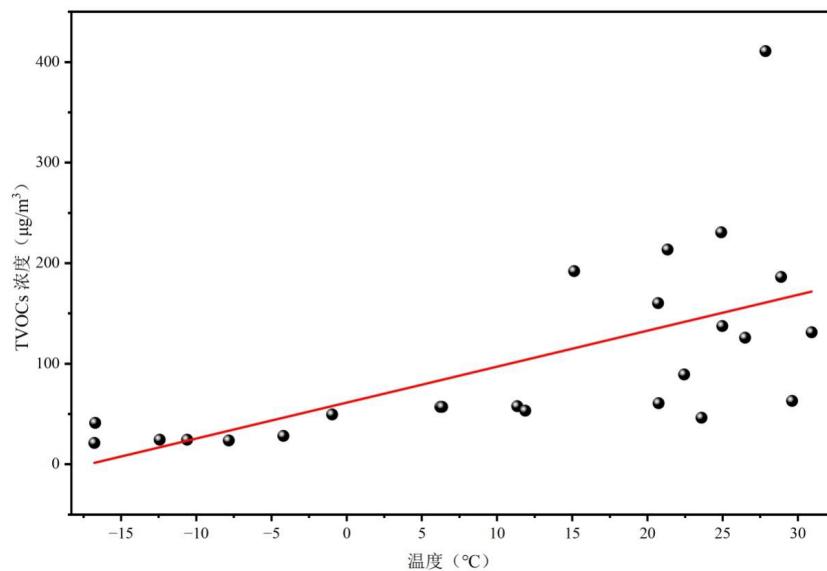


Figure 3. Correlation analysis between daily average TVOCs concentration and daily average temperature in an industrial park of a city of Xinjiang production and construction corps in 2024
图 3. 2024 年度新疆兵团某市工业园区的日平均 TVOCs 浓度与日平均温度的相关分析

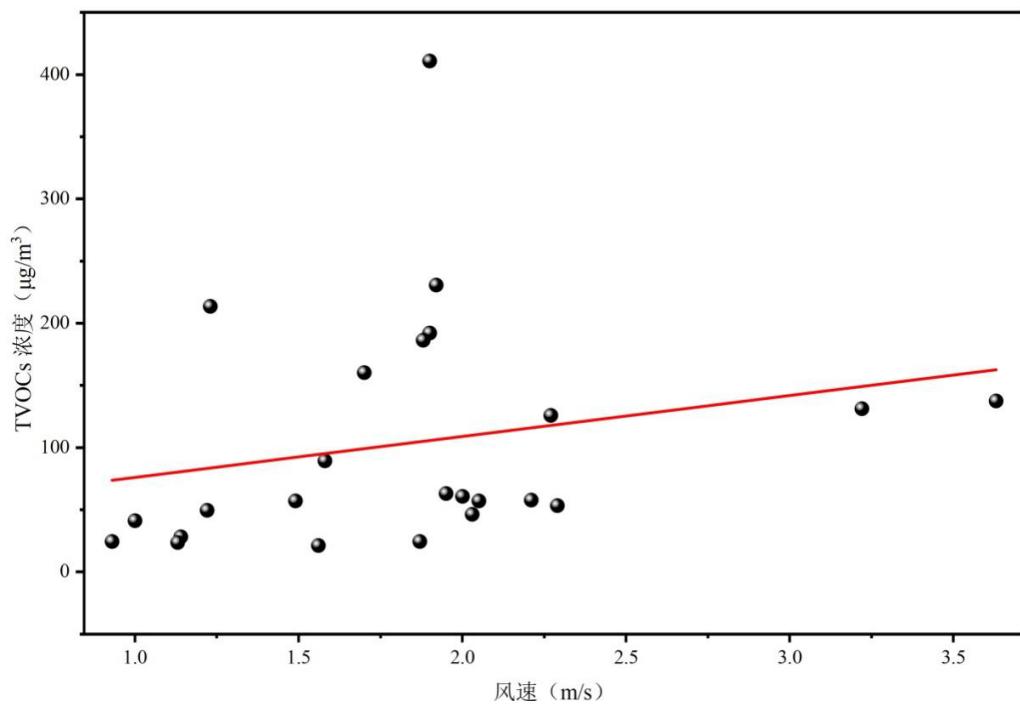


Figure 4. Correlation analysis between daily average TVOCs concentration and daily average wind speed in an industrial park of a city of Xinjiang production and construction corps in 2024

图 4. 2024 年度新疆兵团某市工业园区的日平均 TVOCs 浓度与日平均风速的相关分析

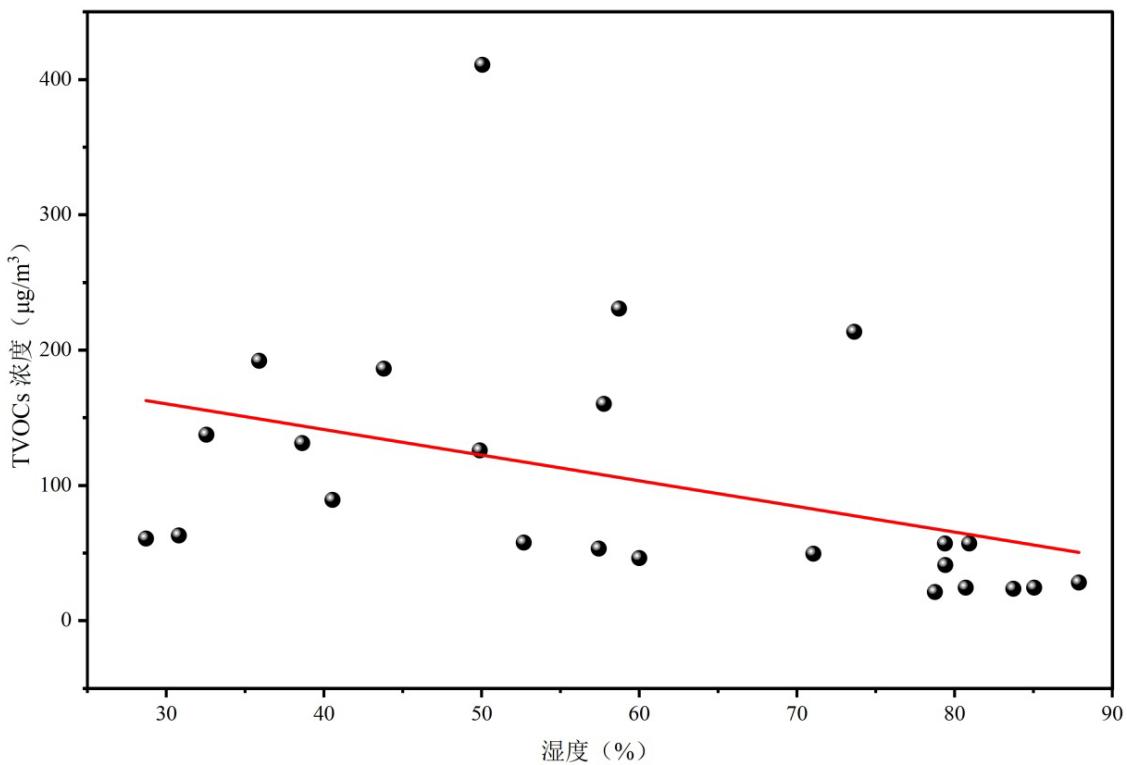


Figure 5. Correlation analysis between daily average TVOCs concentration and daily average relative humidity in an industrial park of a city of Xinjiang production and construction corps in 2024

图 5. 2024 年度新疆兵团某市工业园区的日平均 TVOCs 浓度与日平均相对湿度的相关分析

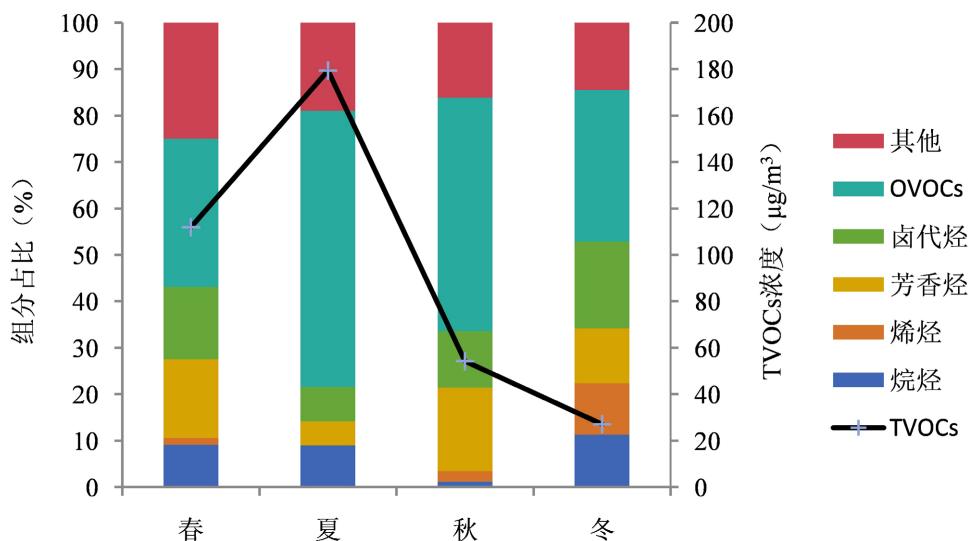


Figure 6. Trend chart of average TVOCs concentration and composition changes in ambient air across different seasons in an industrial park of a city of Xinjiang production and construction corps in 2024

图 6. 2024 年度新疆兵团某市工业园区不同季节环境空气中 TVOCs 平均浓度及组分的变化趋势图

由图 6 可知, 从组分构成来看, OVOCs 是全年最主要的组分, 年均占比达 43.5%, 其次为卤代烃(13.5%)、芳香烃(13.0%)、烷烃(7.6%)和烯烃(3.7%)。季节变化上, OVOCs 不同季节占比均较高, 夏(59.4%)、秋(50.3%)两季明显高于春(31.8%)、冬(32.6%)季节; 烷烃春(9.1%)、夏(9.0%)、冬(11.3%)季节占比较高; 冬季烯烃占比最高(11.1%); 芳香烃和卤代烃均在春(17.0%)、秋(17.9%)、冬(13.0%)季节占比较高。以上分析表明, OVOCs 是该园区 VOCs 污染的重要组分。值得注意的是, OVOCs 具有复杂的来源特征, 既可来源于人为活动的一次直接排放, 也可通过大气中烷烃、烯烃及芳香烃等前体物的光化学氧化反应二次生成。

与其他工业园区相比(表 1), 该工业园区 TVOCs 年平均浓度与其他工业园区相差不大, 但该工业园区组分构成与其他工业园区相比差别较大, 但该工业园区 VOCs 的组分构成基本上与陕北某煤化工园区 VOCs 的主要组分基本一致[19]。

Table 1. VOCs concentration levels in the industrial park compared with other urban industrial parks
表 1. 工业园区与其他城市工业园区 VOCs 浓度水平

年份	TVOCS 浓度/μg/m ³	烷烃 占比/%	烯烃 占比/%	芳香烃 占比/%	卤代烃 占比/%	OVOCs 占比/%	文献
2022	148.3	26.6	3.1	8.2	16.0	45.0	[29]
/	89.3	42.3	6.8	28.1	4.2	18.6	[32]
2020	110.1	33.3	3.7	29.6	21.5	/	[33]
2020	95.8	35.1	4.8	23.4	23.6	/	[33]
2022	34.5	61.05	16.42	17.02	/	/	[34]
2024	103.6	7.6	3.7	13.0	13.5	43.5	本研究

3.2. VOCs 臭氧生成潜势分析

园区 VOCs 的年均 OFP 为 $3.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由图 7 可知, 关键活性物种识别显示, 丙烯、丙酮、正己烷、

乙酸乙烯酯、甲苯、氯乙烯、苯、四氢呋喃、甲基叔丁基醚和丙烯醛是对 OFP 贡献排名前 10 的物种。这些物种共同构成了园区 OFP 的主要来源，其中丙烯、丙酮等组分的贡献尤为突出，这些物种也被认为是化工行业的特征物种[13]。这些物种一定程度上揭示了该工业园区作为煤电煤化工基地的特征，与化工相关的排放源应为后续管控的重点。

苯与甲苯(B/T)比值被用于初步判断环境中 VOCs 的来源，一般认为：当 $B/T < 0.2$ 时，主要受溶剂使用源的影响；当 B/T 在 0.5 左右时，机动车排放影响较大；当 $B/T > 1$ 时，燃烧源贡献较大，特别是 B/T 在 1.5~2.2 的范围内；当 B/T 为 2.5 时，生物质燃烧影响较大[35]。甲苯的大气寿命短，易被 OH 自由基氧化，苯的大气寿命长，更稳定，空气团经过长距离传输或长时间滞留，甲苯被消耗，致使 B/T 升高。该工业园区 B/T 均值为 4.6，明显偏高，单纯老化通常难以达到，表明该工业园区除受到本地排放的影响外，还存在叠加老化气团的影响。

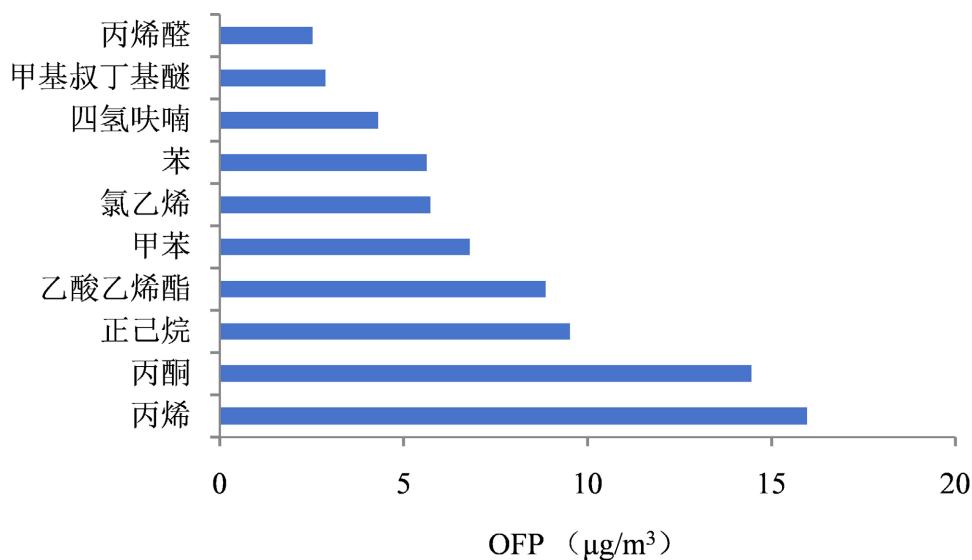


Figure 7. Top 10 VOCs species contributing to OFP
图 7. 对 OFP 贡献排名前 10 的 VOCs 物种

3.3. 二次有机气溶胶生成潜势分析

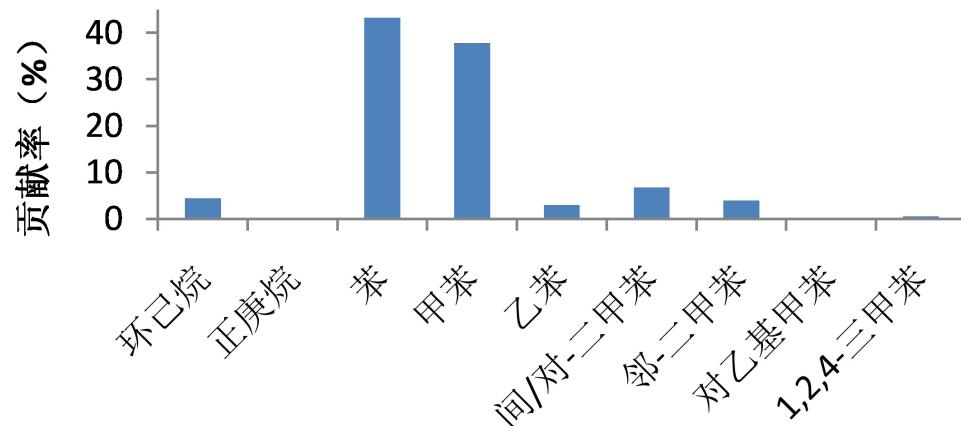


Figure 8. Top 9 VOCs species contributing to SOAAPP
图 8. 对 SOAAPP 贡献排名前 9 的 VOCs 物种

对二次有机气溶胶生成有贡献的 VOCs 主要包括 25 种非芳香烃类和芳香烃类物质。通过气溶胶生成系数法估算可知, 园区年均 SOAFP 为 $0.056 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由图 8 可知, 苯和甲苯是 SOAFP 的绝对主导贡献者, 占比高达 81.0%, 这与国内多数工业园区研究结论一致[36]。

关键前体物识别表明, 苯、甲苯、间/对 - 二甲苯、邻 - 二甲苯、环己烷和乙苯是 SOAFP 贡献最大的 6 个物种, 累计贡献超过 99%。这些物种是典型的化工原料、溶剂和燃料组分[37]。苯、甲苯和正己烷同时是 OFP 和 SOAFP 的关键前体物, 表明对烷烃和苯系物的排放控制是实现 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 协同治理的关键抓手。

3.4. 健康风险评估

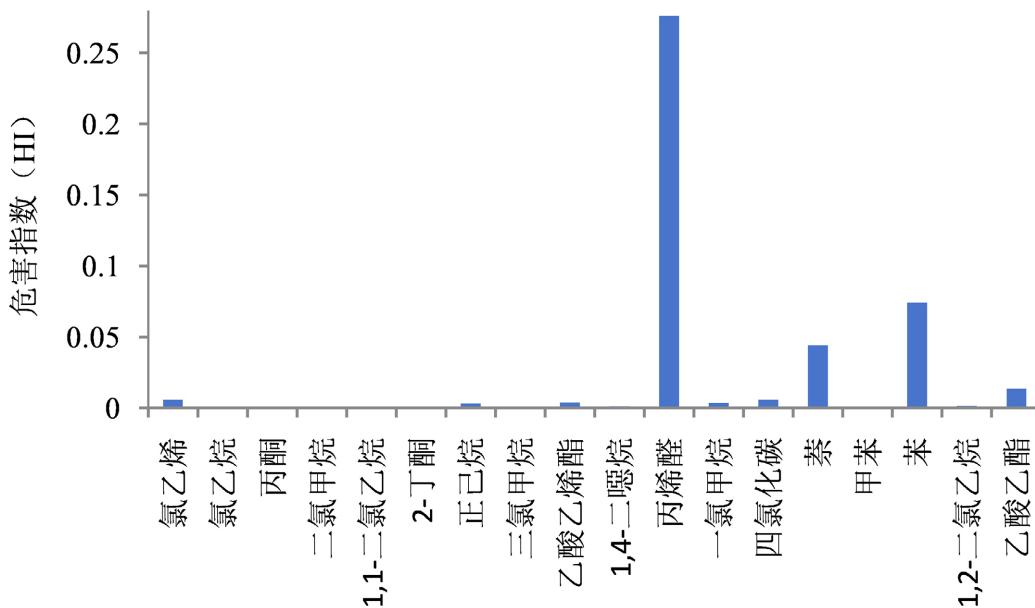


Figure 9. Hazard index of different VOCs species
图 9. 不同 VOCs 物种危害指数

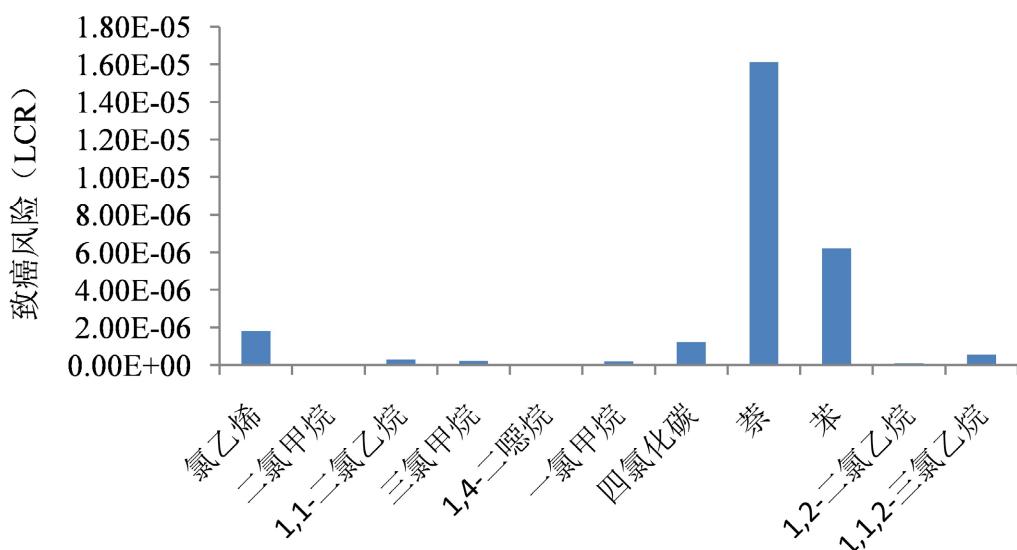


Figure 10. Carcinogenic risk of different VOCs species
图 10. 不同 VOCs 物种致癌风险

本研究监测的 VOCs 物种中, 年均浓度较高的丙酮、正己烷、氯乙烷等 19 个 VOCs 物种属于美国环保署(EPA)公布的有毒有害空气污染物, 其中氯乙烯、一氯甲烷、苯等 11 个物种属于致癌类物质, 具体见图 9 和图 10。

由图 9 可知, 18 个有毒有害的物种的 HI 值范围为 $1.17 \times 10^{-5} \sim 0.28$, 均小于 HI 的可接受风险水平($HI < 1$), 说明在工业园区工作的人员通过吸入这些大气中的 VOCs 而引起非致癌的慢性健康的风险较低。从单个物种来看, 丙烯醛、苯、萘等化工特征物种的 HI 较高, 分别为 0.28、0.074 和 0.044。

由图 10 可知, 11 个致癌物种的 LCR 值范围为 $1.27 \times 10^{-9} \sim 1.61 \times 10^{-5}$, 这些物种中萘、苯、氯乙烯和四氯化碳超过了 EPA 提出的可接受风险水平($LCR < 1 \times 10^{-6}$), 低于 EPA 提出的容许风险水平($LCR < 1 \times 10^{-4}$), 表明观测期内该工业园区环境空气中 VOCs 存在潜在的致癌风险。从污染物对人体健康风险角度来看, 萘、苯、氯乙烯和四氯化碳等物种应作为该工业园区的优先管控目标。

4. 结论

本研究系统分析了新疆生产建设兵团某典型工业园区环境中 VOCs 的污染特征, 估算 VOCs 组分对臭氧生成潜势(OFP)和二次有机气溶胶生成潜势(SOAFP)的贡献, 并评估其主要物种对人体的健康风险影响, 具体结论如下:

(1) 工业园区环境空气中 TVOCs 的浓度范围为 $2.3 \sim 846.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 年均浓度为 $(103.6 \pm 92.6) \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。TVOCs 浓度的季节变化特征显著, 按浓度高低依次为: 夏季、春季、秋季、冬季。从组分构成看, OVOCs 是全年主导组分(年均占 43.5%), 其占比夏秋显著高于冬春, 且整体组成与同类园区基本一致。

(2) 园区 VOCs 的年均 OFP 为 $3.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。丙烯、丙酮、正己烷、乙酸乙烯酯、甲苯、氯乙烯、苯、四氢呋喃、甲基叔丁基醚和丙烯醛是对 OFP 贡献排名前 10 的物种。其中丙烯、丙酮等组分的贡献尤为突出。

(3) 园区年均 SOAFP 为 $0.056 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。苯和甲苯是园区二次有机气溶胶生成潜势(SOAFP)的绝对主导贡献者, 两者占比高达 81.0%。关键前体物分析进一步表明, 苯、甲苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯、环己烷和乙苯六类物种的累计贡献超过 99%, 它们均是典型的化工原料与溶剂组分。值得注意的是, 苯、甲苯和正己烷同时是臭氧生成潜势(OFP)与 SOAFP 的关键前体物, 因此控制其排放将成为实现臭氧与 PM_{2.5} 协同治理的关键环节。

(4) 工业园区内 18 个有毒有害的 VOCs 物种的 HI 值, 均小于 HI 的可接受风险水平($HI < 1$), 表明由 VOCs 引起非致癌慢性健康的风险较低。11 个致癌物种的 LCR 值中萘、苯、氯乙烯和四氯化碳超过了 EPA 提出的可接受风险水平($LCR < 1 \times 10^{-6}$), 低于 EPA 提出的容许风险水平($LCR < 1 \times 10^{-4}$), 表明观测期内该工业园区环境空气中 VOCs 存在潜在的致癌风险。从健康角度考虑, 萘、苯、氯乙烯和四氯化碳等物种应作为该工业园区的优先管控目标。

参考文献

- [1] 章许云, 吴剑, 张亚一, 等. 典型工业园区环境大气挥发性有机物污染特征及环境影响和健康风险评估[J]. 大气科学学报, 2025, 48(5): 763-776.
- [2] Liu, S., Xing, J., Zhang, H., Ding, D., Zhang, F., Zhao, B., et al. (2019) Climate-Driven Trends of Biogenic Volatile Organic Compound Emissions and Their Impacts on Summertime Ozone and Secondary Organic Aerosol in China in the 2050s. *Atmospheric Environment*, **218**, Article 117020. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117020>
- [3] Mazzatorta, A., Pokorski, M., Sartucci, F., Domenici, L. and Di Giulio, C. (2015) Volatile Organic Compounds (VOCs) Fingerprint of Alzheimer's Disease. *Respiratory Physiology & Neurobiology*, **209**, 81-84. <https://doi.org/10.1016/j.resp.2014.10.001>
- [4] 邓婉月, 范宾倩, 任重远, 等. 伊犁河谷核心区工业园区挥发性有机物污染特征及环境影响[J]. 北京大学学报

- (自然科学版), 2025, 61(2): 253-263.
- [5] Sun, W., Shao, M., Granier, C., Liu, Y., Ye, C.S. and Zheng, J.Y. (2018) Long-Term Trends of Anthropogenic SO₂, NO_x, CO, and NMVOCs Emissions in China. *Earth's Future*, **6**, 1112-1133. <https://doi.org/10.1029/2018ef000822>
- [6] 李兵兵, 程龙, 张红, 等. 皖东北部大气挥发性有机物组分特征及来源解析[J]. 安徽农学通报, 2025, 31(13): 40-46.
- [7] 张华, 杨镇江, 苏红娟, 等. 短寿命气候强迫因子的自然源排放及气候反馈: IPCC AR6 解读[J] 大气科学学报, 2023, 46(4): 491-498.
- [8] 王晓琦, 程水源, 王瑞鹏. 京津冀区域人为源 VOCs 排放特征及管控策略[J]. 环境科学研究, 2023, 36(3): 460-468.
- [9] 卢云浪. 我国典型城市大气挥发性有机物来源量化及其对臭氧生成作用的评估[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2025.
- [10] 邹宇. 珠三角核心城市大气臭氧污染成因及前体物(VOCs)来源研究[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2024.
- [11] 李卓琼. 新疆乌昌石城市群臭氧污染特征及前体物减排情景模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [12] 刘夏莉. 乌鲁木齐大气颗粒物和臭氧污染变化特征与驱动因子研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2025.
- [13] 魏进, 史林林, 施晓雯, 等. 化工园区 VOCs 污染特征及其臭氧生成潜势研究[J]. 广东化工, 2025, 52(15): 122-125.
- [14] 祖彪. 鞍山市某化工园区 VOCs 组成特征及臭氧生成潜势分析[J]. 干旱环境监测, 2025, 39(1): 34-42.
- [15] 赖文杰, 胡炜杰, 邓丽萍, 等. 石化园区挥发性有机物排放状况及特征分析[J]. 当代化工, 2024, 53(10): 2449-2455.
- [16] 韩旭, 马苏甜, 万伟, 等. 典型石化园区 VOCs 排放特征及其风险评价[J]. 石油炼制与化工, 2024, 55(6): 122-129.
- [17] 康伟. 典型工业园区 VOCs 排放特征及环境影响和健康风险评估[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2023.
- [18] 方莉, 段希文, 别念兵. 石化企业 VOCs 排放特征及臭氧生成与健康风险评估[J]. 石油炼制与化工, 2025, 56(10): 131-139.
- [19] 周洁婷, 高敏, 徐红梅, 等. 陕北煤化工园区 VOCs 污染状况及其对居民健康风险的贡献[J]. 生态毒理学报, 2025, 20(2): 347-359.
- [20] 生态环境部. HJ 759-2023 环境空气挥发性有机物的测定 罐采样/气相色谱-质谱法[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2023.
- [21] Carter, W.P.L. (1994) Development of Ozone Reactivity Scales for Volatile Organic Compounds. *Air & Waste*, **44**, 881-899. <https://doi.org/10.1080/1073161x.1994.10467290>
- [22] Carter, W.P.L. (2010) Development of the SAPRC-07 Chemical Mechanism. *Atmospheric Environment*, **44**, 5324-5335. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.01.026>
- [23] Grosjean, D. (1992) In Situ Organic Aerosol Formation during a Smog Episode: Estimated Production and Chemical Functionality. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, **26**, 953-963. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(92\)90027-i](https://doi.org/10.1016/0960-1686(92)90027-i)
- [24] Grosjean, D. and Seinfeld, J.H. (1989) Parameterization of the Formation Potential of Secondary Organic Aerosols. *Atmospheric Environment* (1967), **23**, 1733-1747. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(89\)90058-9](https://doi.org/10.1016/0004-6981(89)90058-9)
- [25] Martín-Reviejo, M. and Wirtz, K. (2005) Is Benzene a Precursor for Secondary Organic Aerosol? *Environmental Science & Technology*, **39**, 1045-1054. <https://doi.org/10.1021/es049802a>
- [26] Office of Superfund Remediation and Technology Innovation (2009) Risk Assessment Guidance for Superfund Volume 1: Human Health Evaluation Manual (Part F, Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment). Environmental Protection Agency.
- [27] Wang, C., Wang, W., Deng, W., Zhang, S., Shao, S., Wen, M., et al. (2023) Distribution Characteristics, Air-Water Exchange, Ozone Formation Potential and Health Risk Assessments of VOCs Emitted from Typical Coking Wastewater Treatment Process. *Science of The Total Environment*, **862**, Article 160845. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160845>
- [28] Ren, Y., Guan, X., Peng, Y., Gong, A., Xie, H., Chen, S., et al. (2024) Characterization of VOC Emissions and Health Risk Assessment in the Plastic Manufacturing Industry. *Journal of Environmental Management*, **357**, Article 120730.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120730>

- [29] 薛兴钊, 邵哲, 陈妙, 等. 西安某工业园挥发性有机物污染特征及健康风险评估[J]. 环保科技, 2025, 31(5): 7-12.
- [30] U. S. EPA (United States Environmental Protection Agency) (2025) Risk Assessment for Carcinogenic Effects. <https://www.epa.gov/risk>
- [31] U. S. EPA (United States Environmental Protection Agency) (2025) IRIS Assessments. <https://www.epa.gov/iris>
- [32] 欧阳莘瑜. 工业园区 VOCs 组分特征与溯源分析研究[J]. 清洗世界, 2025, 41(11): 87-89.
- [33] 李巧萍, 吴凯露, 吕星安, 等. 东阳市工业园区大气污染物时空分布特征分析[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(12): 1689-1694+1698.
- [34] 关璐. 沈阳化工园区大气 VOCs 污染特征、健康风险评估及来源解析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2024.
- [35] 齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 等. 郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2022, 43(12): 5429-5441.
- [36] 李陵, 张丹, 胡伟, 等. 西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估[J]. 环境科学, 2022, 43(1): 102-112.
- [37] 刘静达, 安俊琳, 张玉欣, 等. 南京工业区夏冬季节二次有机气溶胶浓度估算及来源解析[J]. 环境科学, 2017, 38(5): 1733-1742.