

基于走航监测技术的新吴区VOCs污染特征分析

华 青

无锡市生态环境监控中心新吴分中心, 江苏 无锡

收稿日期: 2025年7月3日; 录用日期: 2025年8月2日; 发布日期: 2025年8月12日

摘 要

以无锡市新吴区为研究对象, 采用走航监测技术对区域内挥发性有机物(VOCs)进行高时空分辨率监测, 结合地理信息系统(GIS), 分析了VOCs的时空分布特征、主要组分及臭氧生成潜势。结果表明, 新吴区整体VOCs均值浓度 $28.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。从VOCs组分上看, 芳香烃和卤代烃占比较高分别为29%和26%。各区域峰值差异显著, 高新A区峰值($22392.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)远超其他区域。从整体上分析, 春季VOCs浓度均值最高。主要由于春季气温回升, 大气扩散条件差, 新吴区是工业集中区, 涉及VOCs排放的行业(如电子、化工、汽车制造等)在春季生产恢复而提高排放量。结合各街道VOCs组分的质量浓度发现, 部分组分浓度较大且出现频率较高, 如甲苯、二甲苯。机动车尾气、工业溶剂挥发都含有大量苯系物, 应重点关注对苯系物排放控制。新吴区OFP前十位VOCs关键活性物种分别为二甲苯/乙苯、甲苯、丁烯、戊烯、三甲苯、丁烷/丙酮、1,3-丁二烯、二乙基苯、己烯/甲基环戊烷、甲基环己烷。初步判定新吴区大气中的VOCs来源于工业溶剂的挥发。之后应主要涉及溶剂使用、涂料使用等工艺的企业针对性管控。研究结果为区域VOCs精细化管控提供了科学依据, 对制定精准的污染管控策略具有重要指导意义。

关键词

走航监测, 新吴区, VOCs, 污染分布, 污染特征

VOCs Pollution in Xinwu District Based on Navigation Monitoring Technology Characteristic Analysis

Qing Hua

Xinwu Branch of Wuxi Ecological Environment Monitoring Center, Wuxi Jiangsu

Received: Jul. 3rd, 2025; accepted: Aug. 2nd, 2025; published: Aug. 12th, 2025

文章引用: 华青. 基于走航监测技术的新吴区 VOCs 污染特征分析[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(8): 1053-1061.
DOI: 10.12677/aep.2025.158118

Abstract

Taking the Xinwu District of Wuxi City as the research object, we used mobile monitoring technology to conduct high spatial and temporal resolution monitoring of volatile organic compounds (VOCs) in the region. By combining this with geographic information systems (GIS), we analyzed the spatial and temporal distribution characteristics of VOCs, their main components, and ozone generation potential. The results show that the overall average concentration of VOCs in Xinwu District is $28.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In terms of VOC components, aromatic hydrocarbons and halogenated hydrocarbons accounted for relatively high proportions, at 29% and 26%, respectively. There are significant differences in peak values among different areas, with the peak in the High-tech A area ($22,392.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$) far exceeding those in other areas. Overall analysis shows that the average concentration of VOCs is highest in spring. This is mainly due to the rising temperatures and poor atmospheric diffusion conditions in spring. Xincheng District is an industrial concentration area, where industries related to VOC emissions (such as electronics, chemicals, automobile manufacturing, etc.) resume production and increase emissions in spring. Analyzing the mass concentrations of VOC components from various streets reveals that some components have higher concentrations and occurrence frequencies, such as toluene and xylene. Vehicle exhaust and industrial solvent volatilization contain a large amount of benzene series substances, and emphasis should be placed on controlling emissions of benzene series substances. The top ten key active VOC species in Xinhua District are xylene/ethylbenzene, toluene, butene, pentene, trimethylbenzene, butane/acetone, 1,3-butadiene, diethylbenzene, hexene/methylcyclopentane, and methylcyclohexane. It is preliminarily determined that the VOCs in the atmosphere of Xinhua District originate from the volatilization of industrial solvents. Subsequent measures should primarily involve targeted management of enterprises related to solvent and coatings usage. The research results provide a scientific basis for the fine management of regional VOCs and serve as important guidance for formulating precise pollution control strategies.

Keywords

Aerial Monitoring, Xinwu District, VOCs, Pollution Distribution, Pollution Characteristics

Copyright © 2025 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(VOCs)不仅是臭氧(O_3)和细颗粒物($\text{PM}_{2.5}$)的重要前体物,还会对人体呼吸系统、神经系统造成直接危害。其来源复杂且具有强反应活性[1]-[3]。随着我国工业化和城市化的快速发展,工业源、交通源和居民生活源排放的 VOCs 已成为区域大气复合污染的关键诱因[4]。新吴区作为无锡市工业核心区,集聚电子制造、化工、机械等产业, VOCs 排放强度高,亟需精准识别污染热点。然而传统固定监测手段有时空分辨率低、覆盖范围有限等问题,难以精准捕捉 VOCs 污染动态变化,需要引入高精度、高灵活性的新型监测技术[5]-[8]。

走航监测技术凭借高时空分辨率和移动追踪优势,成为区域污染溯源的有效手段[9] [10]。该技术是通过搭载快速响应传感器的移动监测平台,实时采集并分析大气中的 VOCs 组分和浓度,通过利用地理信息系统(GIS)和 GPS 定位技术制订计划,绘制污染物的时空分布图[11]。目前,走航监测已在珠三角、

京津冀等地区的工业园区污染研究中取得显著成果，但针对长三角典型工业城区如新吴区的系统性研究较为缺乏。

本研究以无锡市新吴区为对象，通过走航监测获取新吴区 VOCs 浓度分布数据，结合气象、地理及企业分布等信息，解析 VOCs 污染时空分布特征，为区域大气污染防治提供技术支撑，为同类工业城区的污染治理提供方法借鉴。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域

新吴区位于长三角核心工业带，是集电子制造、化工生产、汽车制造等高 VOCs 排放产业于一体的高新技术产业聚集区。研究区域范围覆盖全区 6 个街道的五大工业园区，重点监测区域包括工业集中区、交通干道、居民生活区三类功能区。研究时段采用 2024 年 1 月~2024 年 12 月，对新吴区大气环境中的 VOCs 进行连续监测。

2.2. 走航监测方案

走航监测技术采用车载式快速监测设备，在行进过程中对大气中的 VOCs 进行连续自动监测[12]。本研究采用的监测设备为 SPI-MS2000，理论上可同时监测三百多种 VOCs 气体，自建图谱库已经通过验证物质有 112 种。其原理是通过采样系统将大气中的 VOCs 采集到仪器中，经过气相色谱分离后，再由质谱仪进行检测和分析，从而确定 VOCs 的种类和浓度[13]-[16]。

新吴走航车监测主要针对新吴区辖区进行走航，包括 6 个街道(旺庄街道、硕放街道、江溪街道、新安街道、梅村街道、鸿山街道)及 2 个高新区(高新 A、高新 B)，见图 1。走航监测区域主要为各街道及高新区的工业企业聚集区。研究期间监测的 VOCs 物种见表 1。

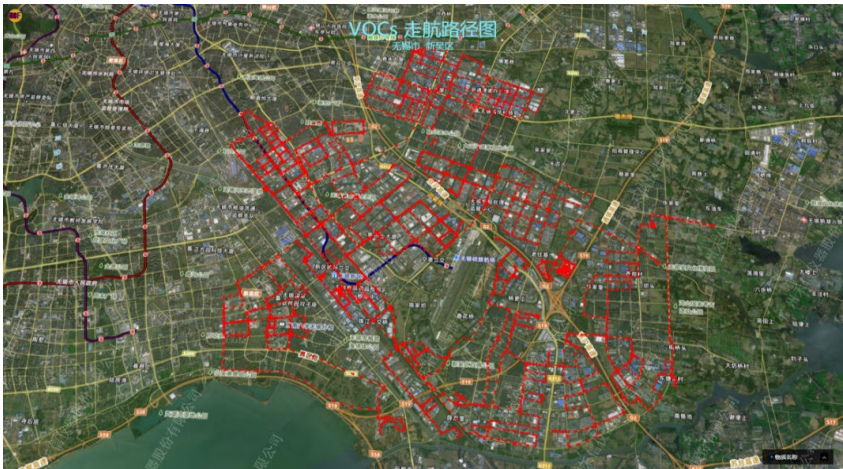


Figure 1. Navigation path map of Xinwu District
图 1. 新吴区走航路径图

Table 1. VOCs species monitored during the study
表 1. 研究期间监测的 VOCs 物种

VOCs 种类	监测物种
烷烃(15 种)	丁烷、氯乙烷、戊烷/异戊烷、正己烷、正己烷、二甲基丁烷、甲基环己烷、正庚烷、正辛烷、壬烷、正癸烷、十一烷、1,1,2,2-四氯乙烷、正十二烷、正十三
烯烃(6 种)	1,3-丁二烯、丁烯、异戊二烯、戊烯、环己烯、己烯

续表

有机硫(6 种)	甲硫醇、甲硫醚/乙硫醇、丙硫醇、乙硫醚/丁硫醇、二甲基二硫醚、己硫醇
含氧含氮烃(14 种)	正丙醇、二甲基甲酰胺、甲酸乙酯、乙酸乙酯、苯、三乙胺、乙酸正丙酯、二亚乙基三胺、乙酸正丁酯、二甲苯酚、苯甲酸甲酯、磷酸三甲酯、二乙基苯胺、正癸醇
芳香烃(6 种)	苯、甲苯、苯乙烯、二甲苯/乙苯、三甲苯、二乙基苯
卤代烃(10 种)	1,1-二氯乙烯、1,3-二氯丙烯、氯苯、三氯乙烯、二氯苯、四氯乙烯、二溴甲烷、1,2,4-三氯苯、1,2-二溴乙烷、六氯-1,3-丁二烯

2.3. 走航监测数据质量保证

2.3.1. 仪器线性检验

对 SPI-MS 通入不同比例的标气浓度，仪器线性测试浓度范围应该介于所选择量程的 0%和 90%之间，至少使用 5 个不同浓度点进行测试(包括零点)，如可选择以下几个浓度点(x): 0、5 ppb、10 ppb、20 ppb、40 ppb，每个浓度点连续重复检测 n 次，分别记录每次测试对应的响应值(y)并求出每个浓度水平下算术平均值，进行线性回归：

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

式中：

- R ——线性相关系数，当 $|R|$ 值越接近 1 时，说明线性关系越显著；
- x_i ——第 i 个浓度水平值；
- $\bar{x}$ ——各浓度水平算术平均值；
- y_i ——第 i 个浓度水平测试响应值；
- $\bar{y}$ ——第 i 个浓度水平多次重复测试算术平均值；
- $n \geq 4$ ，这里连续重复测定 10 次固 $n = 10$ ；
- 应达指标：80%标气相关系数 $R^2 \geq 0.99$

2.3.2. 方法检出限

美国 EPA SW-846 中规定方法检出限：向 SPIMS2000 质谱仪持续通入一定浓度标准气体(主要考察 TO-14、PAMS 及有机硫等)，取连续 7 组检测数据计算方法检出限： $MDL = S \times t(n - 1, 0.99)$ 。其中： S 为平行测定的标准偏差， $t(n - 1, 0.99)$ 为置信度为 99%，自由度为 $n - 1$ 时的 t 值， n 为重复分析的样品数。

应达指标：苯标气检出限要求达到 5 ppb 以下。

2.3.3. 精密度测试

仪器稳定后，通入某一浓度 VOC 标准气体，连续测量 10 次，质谱响应值，按公式计算相对标准偏差 RSDn：

$$RSD_{10} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{(n-1) \times \frac{1}{\bar{X}}}} \times 100\% \text{ , (其中, } n = 10)$$

应达指标：重复性 $\leq 10.0\%$

2.4. 臭氧生成潜势

臭氧生成潜势(ozone formation potential, OFP)是综合衡量 VOCs 物种反应活性对 O₃ 生成的关键活性物种[17]。本文臭氧生成潜势计算公式如下：

$$OFP = [VOC]_i \times MIR \quad (1)$$

式中,[VOC]_i 为某个 VOC 物种的浓度,MIR 为该 VOC 物种的最大增量反应活性,本文中 MIR 使用 Carter [18]的研究结果。

3. 结果与讨论

3.1. 新吴区 VOCs 时空分布特征

此次走航监测共持续 111 天,采集 243124 组数据。新吴区整体 VOCs 均值浓度 28.9 μg/m³。从 VOCs 组分上看,卤代烃占比最高,浓度占比为 29.0%,其次是芳香烃,浓度占比为 26.0%,含氧含氮烃占比最低,仅为 1.2%,如图 2 所示。芳香烃和烯烃是臭氧生成的关键前体物,占比合计为 35.0%,可能加剧区域光化学污染。相关研究发现,受不同排放源的影响,不同城市和地区环境空气 VOCs 组成特征不同[19]-[22]。

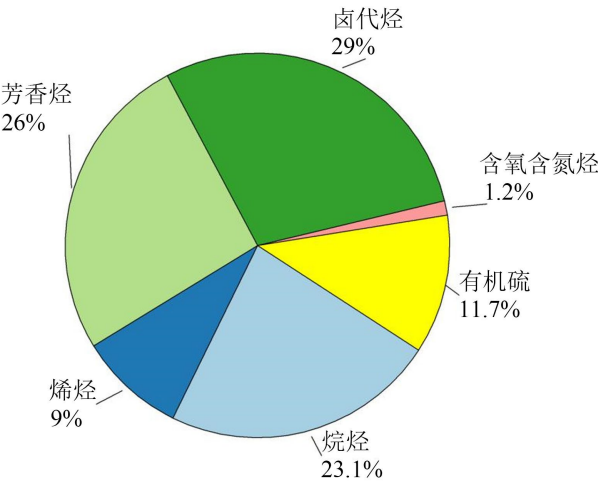


Figure 2. Component structure of VOCs in Xinwu District
图 2. 新吴区 VOCs 组分结构

图 3 中显示了新吴区七个区域 VOCs 污染的峰值、中位值及均值特征。各区域峰值差异显著,高新 A 区峰值(22392.6 μg/m³)远超其他区域,极端排放时间在 3 月 22 日 15:09 左右。区域中位值介于 19.8 μg/m³~21.8 μg/m³,差异小于 10%,表明日常 VOCs 浓度分布相对稳定且水平接近。鸿山街道均值最高为 40.1 μg/m³,可能反映持续污染源影响。卤代烃在江溪街道(35.1%)和高新 B 区(36.4%)占比显著高于其他区域,结合当地电子产业密集的特点,推测工业溶剂使用是主要来源。此外,旺庄街道烷烃(30.2%)与芳香烃(31.8%)合计占比超过 60%,可能与交通干道车流量大有关。

新吴区 2024 年 VOCs 浓度箱型图见图 4,春季整体浓度在 16.7~30.2 μg/m³之间,峰值浓度为 22392.5 μg/m³,均值浓度为 30.2 μg/m³;夏季月整体浓度在 13.8~24.0 μg/m³之间,峰值浓度为 1691.8 μg/m³,均值浓度为 25.9 μg/m³;秋季整体浓度在 16.0~26.5 μg/m³之间,峰值浓度为 2901.7 μg/m³,均值浓度为 23.4 μg/m³;冬季整体浓度在 16.2~28.0 μg/m³之间,峰值浓度为 962.8 μg/m³,均值浓度为 29.3 μg/m³。从整体上分析,春季 VOCs 浓度均值最高。主要由于春季气温回升,大气扩散条件差,新吴区是工业集中区,

涉及 VOCs 排放的行业(如电子、化工、汽车制造等)在春季生产恢复而提高排放量[23]。

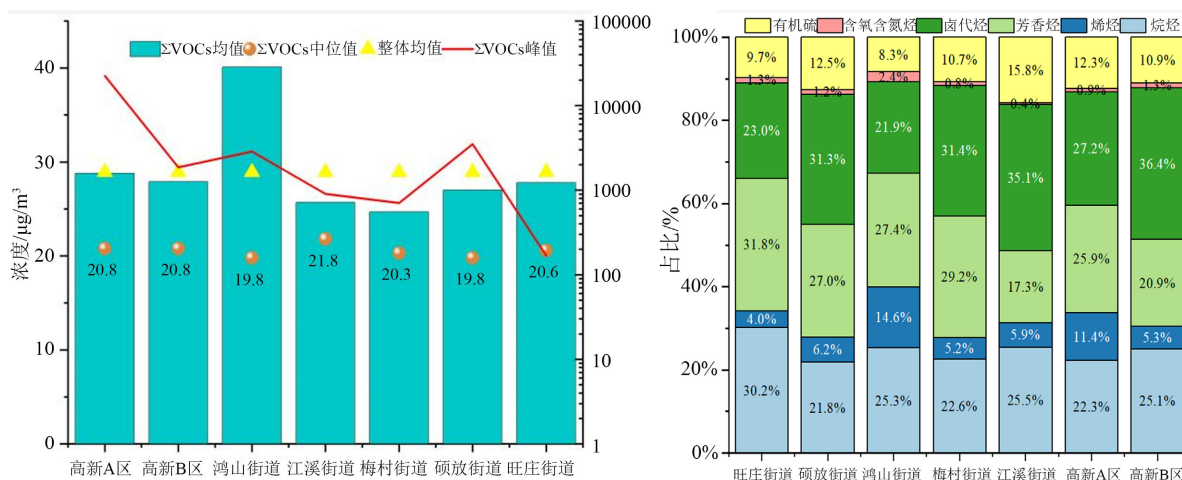


Figure 3. VOCs concentration and component structure in each region of Xinwu District
图 3. 新吴区各区域 VOCs 浓度及组分结构

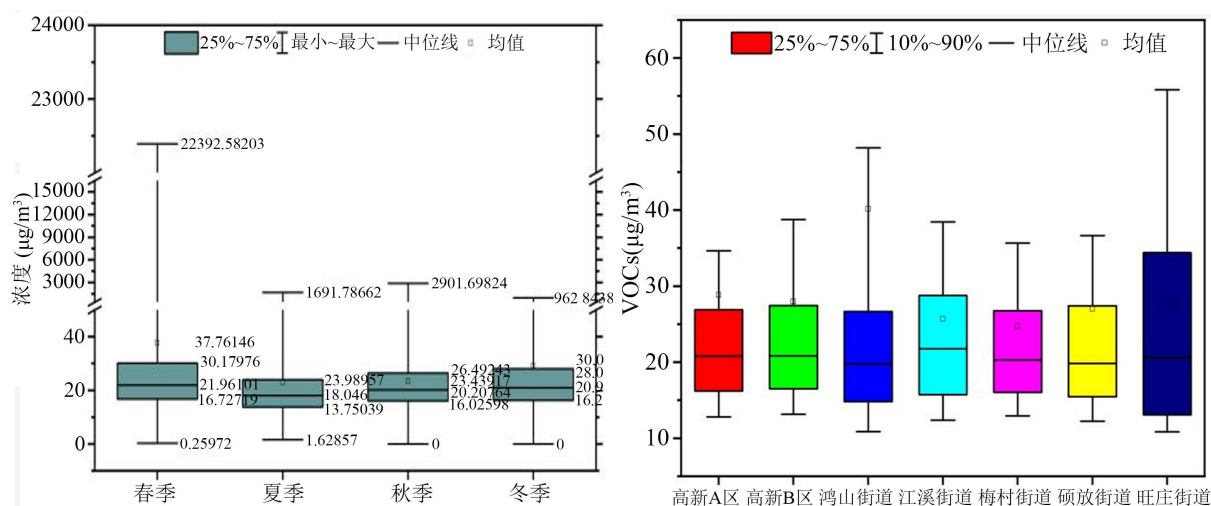


Figure 4. Seasonal box plot of VOCs concentration in Xinwu District in 2024
图 4. 2024 年新吴区 VOCs 浓度箱线图

3.2. VOCs 高值点位物种分析

由于化工园区 VOCs 异常组分主要与园区内相关行业的原辅材料类型及产品类型有关, 所以可以根据这些组分溯源到相关行业。根据 VOC 异常点位关键物种及周边污染源分布特点, 识别可能的污染源, 见图 5 和表 2。异常点位 VOC 分布中芳香烃和烯烃占比最大, 这两类 VOC 是臭氧生成的关键前体物。其中高新 A 区、鸿山街道峰值很高, 分别为 $1070.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1937.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在高新 A 区发现的特征污染物戊烯、丁烯、甲苯、二甲苯、三氯乙烷, 相关污染物可能来源于加油站、有机化工企业生产过程中的有机试剂逸散。在鸿山街道发现的特征污染物戊烯、丁烯、正庚烷, 相关污染物可能来源于表面涂装、机械制造等相关企业。VOCs 走航相关监测显示, 南京江北工业园区重点区域涉及的特征物质为正辛烷(或 2-甲基庚烷)、氯苯(或 1,2-二氯乙烷)、苯、壬烷、二甲苯(或乙基甲苯)、三氯苯等[24]。贵阳工业园区涉及的特征物质为苯系物、戊烷、3-甲基戊烷、2-甲基己烷和庚烷[25]。由于各区涉及的企业行业众多、原材

料种类多样、工艺复杂，因此各地区 VOCs 特征物质差异较大[26][27]。结合各街道 VOCs 组分的质量浓度发现，部分组分浓度较大且出现频率较高，如甲苯、二甲苯。机动车尾气、工业溶剂挥发都含有大量苯系物，应重点关注对苯系物排放控制。

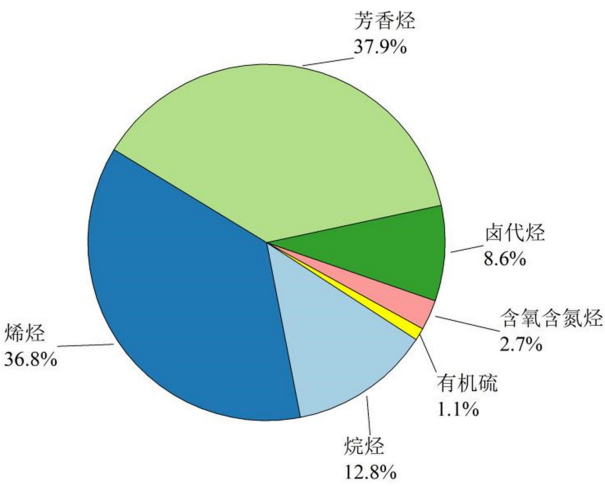


Figure 5. Proportion of VOCs in abnormal points
图 5. 异常点位 VOC 分布占比

Table 2. Identification of key species sources for abnormal point locations
表 2. 异常点位关键物种来源识别

点位	VOC 浓度峰值(μg/m³)	VOCs 关键物种
高新 A 区	1070.7	戊烯、丁烯、甲苯、二甲苯、三氯乙烷
高新 B 区	787.8	己烯、甲苯，1,1-二氯乙烯、二甲苯
硕放街道	694.6	二甲苯
鸿山街道	1937.1	戊烯、丁烯、正庚烷

3.3. 臭氧生成潜势评估

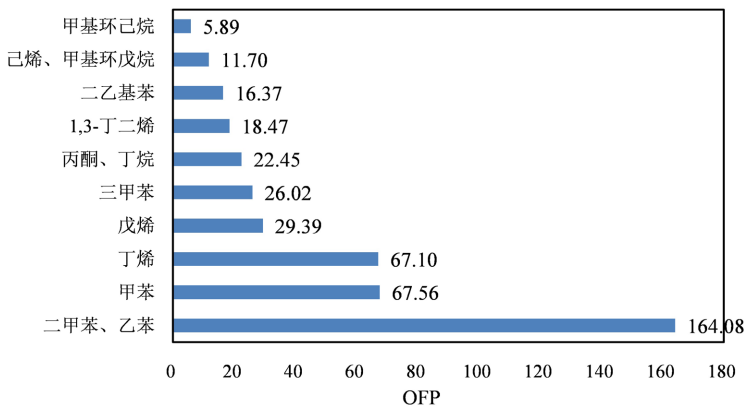


Figure 6. Top ten VOC components OFP rankings in Xinwu District in 2024
图 6. 2024 年新吴区 VOCs 组分 OFP 排名前十物种

环境中的 VOCs 组分不同，对空气中的 O₃ 生成的贡献也不同。因此识别对大气中 O₃ 生成贡献率较

高的物种,对区域精准制定减排措施具有重要意义[28][29]。新吴区 OFP 前十位的 VOCs 关键活性物种见图 6。新吴区 OFP 前十位 VOCs 关键活性物种分别为二甲苯/乙苯、甲苯、丁烯、戊烯、三甲苯、丁烷/丙酮、1,3-丁二烯、二乙基苯、己烯/甲基环戊烷、甲基环己烷。其中二甲苯、甲苯占比分别达到了 38.2% 和 15.7%。由此可见,二甲苯、乙苯对新吴区环境空气中的 O_3 的生成的影响较大。芳香烃占比较大这与天津郊区[30]的研究结果一致。初步判定新吴区大气中的 VOCs 来源于工业溶剂的挥发。之后应主要涉及溶剂使用、涂料使用等工艺的企业针对性管控。

4. 结论

(1) 本研究在 2024 年对新吴区六个街道进行走航监测。走航监测期间,新吴区整体 VOCs 均值浓度 $28.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。从 VOCs 组分上看,卤代烃占比最高,浓度占比为 29.0%,其次是芳香烃,浓度占比为 26.0%,含氧含氮烃占比最低,仅为 1.2%。

(2) 各区域峰值差异显著,高新 A 区峰值($22392.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)远超其他区域,极端排放时间在 3 月 22 日 15:09 左右。春季整体浓度在 $16.7\sim 30.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,峰值浓度为 $22392.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$,均值浓度为 $30.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$;夏季月整体浓度在 $13.8\sim 24.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,峰值浓度为 $1691.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$,均值浓度为 $25.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$;秋季整体浓度在 $16.0\sim 26.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,峰值浓度为 $2901.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$,均值浓度为 $23.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$;冬季整体浓度在 $16.2\sim 28.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,峰值浓度为 $962.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$,均值浓度为 $29.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

(3) 异常点位 VOC 分布中芳香烃和烯烃占比最大,这两类 VOC 是臭氧生成的关键前体物。其中高新 A 区、鸿山街道峰值很高,分别为 $1070.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1937.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在高新 A 区发现的特征污染物戊烯、丁烯、甲苯、二甲苯、三氯乙烷,相关污染物可能来源于加油站、有机化工企业生产过程中的有机试剂逸散。在鸿山街道发现的特征污染物戊烯、丁烯、正庚烷,相关污染物可能来源于表面涂装、机械制造等相关企业。

(4) 新吴区 OFP 前十位 VOCs 关键活性物种分别为二甲苯/乙苯、甲苯、丁烯、戊烯、三甲苯、丁烷/丙酮、1,3-丁二烯、二乙基苯、己烯/甲基环戊烷、甲基环己烷。其中二甲苯、甲苯占比分别达到了 38.2% 和 15.7%。

参考文献

- [1] 张翼翔,贾岳清,姚志泉,等.我国东部某港口城市夏季大气挥发性有机物(VOCs)污染特征及来源解析[J].环境化学,2025,1-13.
- [2] 张冰洁,王云宇.常州市某区域 VOCs 污染特征研究以及基于观测的选点优化[J].广东化工,2025,52(4): 111-114.
- [3] 王炳西,崔阳,郭利利,等.太原市夏季 O_3 污染过程 VOCs 污染特征研究[J].山西化工,2025,45(2): 267-270.
- [4] 南艺婷,张鑫,龚安保,等.山东省食用植物油加工行业 VOCs 排放特征、环境影响及其健康风险评估[J].山东大学学报(工学版),2025,55(1): 125-137.
- [5] 崔旺南,丁峰,王鸣,等.“三年行动计划”前后南京秋冬季挥发性有机物污染特征和来源[J].环境科学学报,2025,45(5): 1-12.
- [6] 董静,李顺姬,党小庆,等.关中地区典型行业 VOCs 排放源成分谱及环境影响[J].中国环境科学,2025,45(2): 619-628.
- [7] 李海兵,赵刘杰,于浩,等.乌海市及周边地区 VOCs 走航监测技术应用及污染特征分析[J].环境科学研究,2025,38(3): 579-589.
- [8] 王锋,邹凯旋,张嘉杰,等.2024 年深圳市工业园区大气污染物 GC-MS 走航监测分析[J].广东化工,2025,52(1): 138-140+137.
- [9] 赵孜苗,李大伟,周振球,等.基于走航监测的制药企业技改评估[J].仪器仪表与分析监测,2024(4): 34-38.
- [10] 周昊昱,蒋晶,龚孝铨,等.永州市中心城区夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析[J].能源与环境,2024(4): 101-

105.

- [11] 王璐, 张英磊, 范光宇, 等. 朝阳区典型汽修集群 VOCs 走航监测污染特征分析[J]. 广州化工, 2024, 52(14): 91-94+97.
- [12] 高韦韦, 肖勇, 史印忠, 等. 德阳市重点区域 VOCs 污染特征[J]. 绿色科技, 2024, 26(14): 133-139.
- [13] 许秋飞, 沈振萍, 严勇, 等. VOCs 走航与固定源监控联动的大气臭氧污染溯源分析与反演[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2024, 43(4): 456-460.
- [14] 夏子轩. 东北典型农业农村源 VOCs 排放及对臭氧污染的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2024.
- [15] 马欢欢, 李春晓, 江浩. 平阳县走航监测及 VOCs 污染特征分析[J]. 资源节约与环保, 2024(5): 76-80+85.
- [16] 王丽敏, 苗斌, 丛子翔, 等. 基于走航监测的威海市 VOCs 污染特征分析[J]. 中国环境监测, 2024, 40(4): 88-99.
- [17] 袁凰, 爻祉懿. 2019-2023 年杨浦区 VOCs 分布规律研究[J]. 绿色科技, 2024, 26(8): 160-164.
- [18] Carter, W.P. (2009) Updated Maximum Incremental Reactivity Scale and Hydrocarbon Bin Reactivities for Regulatory Applications. California Air Resources Board Contract.
- [19] 程梦婷, 李龙, 刘新宇, 等. 走航技术在石化企业 VOCs 排放监测中的应用[J]. 石油炼制与化工, 2024, 55(4): 85-90.
- [20] 杨勇. 广安市 VOCs 走航监测技术应用及污染特征分析研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(6): 74-76.
- [21] 赵嵩容, 严驰, 胡凯璐, 等. 大气环境溯源研究移动实验室监测体系构建研究[J]. 环境保护与循环经济, 2024, 44(3): 72-76.
- [22] 赵辉, 李强, 丁超, 等. 走航监测在大连市化工园区 VOCs 污染特征分析中的应用[J]. 干旱环境监测, 2023, 37(3): 120-125.
- [23] 纪元元. 北京市典型城区 PM_{2.5} 污染过程中挥发性有机物对二次有机气溶胶形成的贡献[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [24] 高家乐, 乐昊, 盖鑫磊. 南京江北化工园区挥发性有机物走航观测[J]. 环境工程, 2021, 39(1): 89-95+100.
- [25] 练川, 周江, 陈思琳, 等. 贵阳市某工业园区环境空气中 VOCs 的污染特征与健康风险评价[J]. 环境工程, 2018, 36(7): 161-164+154.
- [26] 王丹君. 基于走航监测的某医化园区 VOCs 排放特征研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 5(4): 196-198.
- [27] 沙拉·托合塔尔汗, 蔺尾燕, 藏晓芳, 等. 基于走航监测技术的 VOCs 污染分布及特征分析[J]. 资源节约与环保, 2023(12): 68-72.
- [28] 赵燕, 汪晴, 麦志远, 等. 基于走航监测的珠海市金湾区夏秋季大气 VOCs 污染特征[J]. 环境监控与预警, 2023, 15(5): 141-146.
- [29] 王灵剑. 基于走航监测的工业区 VOCs 污染特征分析[J]. 海峡科学, 2023(9): 41-45.
- [30] 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.