

基于质谱技术分析广州重点企业大气挥发性有机化合物排放特征及来源

陈海冰¹, 陈 诚², 王沛涛², 马 理^{1*}

¹ 广西城市水环境重点实验室, 百色学院化学与环境工程学院 广西百色

² 广州禾信仪器股份有限公司 广东广州

【摘要】针对广州某区域的化工及橡胶/塑料制品企业大气挥发性有机化合物 (VOCs) 排放特征缺乏定量数据的现状, 使用吸附浓缩气相色谱仪 (AC-GCMS), 于 2021 年 6 月和 7 月期间离线监测了该区域 7 家重点工业企业的有组织排口的 VOCs。监测结果显示, 化工产品行业的主要排放特征污染物为 2-丁酮、乙酸乙酯和甲苯; 橡胶/塑料制品行业的主要排放污染物为间/对二甲苯、2-丁酮和乙酸乙酯, 反映了两大类工业活动在 VOCs 排放特征上的显著差异。本研究通过精准识别行业特征污染物, 为实现清洁生产提供了量化依据, 凸显了基于质谱技术的源解析在工业排放治理中的重要价值。

【关键词】 质谱; 挥发性有机物 (VOCs); 特征污染物; 排放

【基金项目】 百色学院高层次人才科研启动金 (3RD012500310)

【收稿日期】 2026 年 5 月 6 日

【出刊日期】 2026 年 6 月 8 日

【DOI】 10.12208/j.jccr.20260002

Analysis of atmospheric VOC emission characteristics and sources of key enterprises in Guangzhou based on mass spectrometry technology

Haibing Chen¹, Cheng Chen², Peitao Wang², Li Ma^{1*}

¹ Guangxi Key Laboratory of Urban Water Environment, College of Chemistry and Environmental Engineering, Baise University, Baise, Guangxi

² Guangzhou Hexin Analytical Instrument Company Limited, Guangzhou, Guangdong

【Abstract】 In view of the lack of quantitative data on volatile organic compounds (VOCs) emission characteristics of chemical and rubber/plastic products enterprises in a certain region of Guangzhou, an adsorption concentrated gas phase mass spectrometer (AC-GCMS) was employed to offline monitor the VOCs from the organized emission stacks in seven key industrial enterprises in the region during June and July 2021. The monitoring results showed that the main pollutants in the chemical products industry were 2-butanone, ethyl acetate and toluene. The main emission characteristics of VOCs in the rubber/plastic products industry were m/p-xylene, 2-butanone and ethyl acetate, reflecting the significant differences in VOCs emission between the two types of industries activities. This study provides a quantitative basis for the realization of cleaner production by accurately identifying industry characteristic pollutants, highlighting the important value of source analysis based on mass spectrometry technology in industrial emission control.

【Keywords】 Mass spectrometry; Volatile organic compounds (VOCs); Characteristic pollutants; Emissions

引言

挥发性有机化合物 (VOCs) 因对光化学烟雾的形成、臭氧生成潜势 (OFP) 的提升, 以及人体健康的潜在危害而受到广泛关注^[1-4]。某些 VOCs 比如氟利昂, 能使臭氧层受到破坏, 导致臭氧减少、紫外线增加, 造成人体真皮层损伤、引起眼睛结膜炎症等危害^[5]。此外,

VOCs 对形成臭氧和细颗粒物 PM_{2.5} 起重要作用, 而 PM_{2.5} 和臭氧是空气监测的重要指标, 大气复合污染已成为中国城市主要的空气污染形式^[6,7]。人为来源的 VOCs 主要来自工业生产、交通、燃烧和日常生活活动。随着工业化和城市化的加速, 工业 VOCs 的排放已成为环保领域面临的严重问题^[8]。2020 年, 郭雪琪等^[9]通

第一作者简介: 陈海冰, 女, 本科, 环境监测;

*通讯作者: 马理

过对珠三角某工业区进行实地调研和 VOCs 走航监测, 识别了加油站及空调企业的 VOCs 排放来源。并得出走航监测方法是目前掌握区域 VOCs 污染现状及分布特征的有效技术手段。2021 年, 孟洁等^[10]发现橡胶制品行业前 20 项优先控制 VOCs 污染物包括苯乙烯、甲基环己烷、三甲胺、甲基异丁酮、对二甲苯和乙醛等。2022 年, 华林香^[11]通过统计厦门市 108 家塑料制品行业 VOCs 治理措施, 分析目前厦门市塑料制品行业 VOCs 末端治理存在的问题, 从而提出了减少塑料制品行业 VOCs 排放的措施和建议。2023 年, 戴燕等^[12]选择广东省内 5 家典型塑料制品生产企业, 基于气相色谱-质谱技术, 获得塑料制品行业 VOCs 排放化学谱和排放因子, 且分析了 VOCs 排放特征和对环境的影响。2024 年, He L 等^[13]采用扩展综合空气质量模型 (CAMx), 研究了长江三角洲区域的 142 个化工园区 VOCs 对 O₃-PM_{2.5} 化合物污染的影响。结果表明, VOC 排放对区域 O₃ 和二次有机气溶胶 (SOA) 的贡献显著, 分别占人为源的 17.1% 和 18.2%。

当前工业 VOC 的污染防控和治理成为国内外污染控制的重点, 工业 VOC 的排放源往往分布在各行业领域当中^[14,15]。在此背景下, 如何快速、准确地识别和区分各类工业源的排放特征物, 已成为实现工业清洁生产和精准治理的关键。广州作为重要的工业基地, 其化工产品行业、以及橡胶与塑料制品行业一直是 VOCs 管控的重点领域, 其排放水平和组成受特定生产工艺的影响。本文利用 AC-GCMS, 监测广州某区域的 7 个重点企业的大气 VOCs, 通过分析 VOCs 污染特征物, 旨在揭示其排放的行业特征性及工艺影响, 为行业清洁生产和精准治理提供科学依据。

1 实验部分

1.1 样品采集

2021 年 6 月和 7 月, 选取广州某区域的化工产品行业 (4 家) 和橡胶与塑料制品行业企业 (3 家), 对企业的有组织排口用气袋采样和苏玛罐采样, 采样遵循行业标准^[16,17], 表 1 为 7 家重点企业有组织排口采样信息。

表 1 7 家重点企业有组织排口采样信息

行业	企业	采样位置	采样数量
化工产品行业	企业 I	甲类车间排口	1
	企业 J	热熔胶车间排口	1
	企业 K	生产车间、实验室排口	2
	企业 L	S21 车间排口	1
橡胶与塑料制品行业	企业 Q	炼胶车间、固化车间、上漆车间排口	3
	企业 R	修补工序车间、骨架、发泡车间、EA 车间排口	3
	企业 S	电线电缆车间、塑料颗粒车间排口	2

1.2 仪器部分

使用吸附浓缩气相质谱仪 (AC-GCMS, 广州禾信仪器股份有限公司) 对采集的企业有组织排口的 VOCs 样品进行分析。分析质谱数据, 计算 VOCs 组分浓度, 以及 VOCs 组分占比。该仪器对苯的检出限为 5 pptv (parts per trillion by volume, 体积分数为 5×10^{-12}), 对应采样流量 50 mL/min、捕集温度 -160°C 条件下的 60 分钟分析周期。90% 以上组分线性系数大于 0.99, RSD $\leq 10\%$, 解吸温度在 100~250°C 之间调整, 采用双通道采样。

2 重点行业 VOCs 监测

2.1 化工产品行业 VOCs 排放特征

质谱检测和分析企业的有组织排口采集的 VOCs 样品, 计算得到的各 VOCs 组分浓度, 再根据浓度情

况选取各企业排放量较多的 VOCs 组分, 得到表 2 的化工产品企业离线监测有组织排放 VOCs 主要组分浓度。从表 2 可以看出, 4 个企业有组织排放的 VOCs 经处理后, 均有排放口总浓度超过了 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的排放限值。随后, 计算 VOCs 组分占比, 得到表 3 化工产品企业离线监测有组织排放 VOCs 主要组分及占比。

化工产品行业的排污节点包括各种工艺化学反应、储罐有机废气逸散、污水 (集输、储存、处理)、泵、阀门等密封点泄漏等。该行业的主要污染物种类有酮类、酯类、卤代烃、苯系物等。从表 2 和表 3 可以看出, 化工产品行业呈现出高浓度且差异显著的排放特征。有组织排放的 VOCs 中占比较大的物质是 2-丁酮、甲苯和乙酸乙酯, 占比分别为 1.7%~41.5%、0.5%~34.1% 和 0.9%~54.0%。具体来看, 企业 I 的 2-丁酮和

甲苯排放量最大, 需重点治理; 企业 J 虽然总体排放最低, 但是排放的醋酸乙酯占比高达 46.4%, 其他企业未检出; 企业 K 排放的甲基丙烯酸甲酯(22.5%, 35.9%) 和苯乙烯(32.9%, 33.7%) 占比高, 其他企业未检出。企业 L 乙酸乙酯排放浓度异常高, 占比 54.0%。各企

业 VOCs 排放的浓度级数及组分构成差异大, 主要是因为企业使用的涉 VOCs 原辅材料存在较大差异, 但污染物物质整体符合行业 VOCs 排放特征物质^[18]。建议该行业的企业在原料使用上尽量选择毒性小、不挥发或不易挥发的溶剂, 加强源头控制。

表 2 化工产品企业有组织排放 VOCs 主要组分浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

组分	企业 I	企业 J	企业 K		企业 L
	排口 1	排口 1	排口 1	排口 2	排口 1
丙酮	55262.0	295.6	1722.2	2595.2	1940.5
2-丁酮	114098.1	159.2	0	1764.8	60454.7
甲苯	93752.9	0	63433.7	27820.9	746.4
间/对二甲苯	1374.7	0	861.1	0	1194.2
乙酸乙酯	2474.4	435.8	0	1038.1	80606.3
二氯甲烷	1099.7	0	2583.3	1453.3	298.5
萘	1099.7	0	0	0	746.4
邻二甲苯	549.9	0	0	0	447.8
三氯一氟甲烷	549.9	117.5	0	0	298.5
醋酸乙酯	0	1758.3	0	0	0
甲基丙烯酸甲酯	0	0	103043.9	23357.1	0
苯乙烯	0	0	94433.0	34983.7	0
乙苯	0	0	8036.8	2180.0	0
其他	4673.9	1023.2	12916.4	8616.2	2537.6
总 VOCs 浓度	274935.1	3789.5	287030.3	103809.2	149270.9

表 3 化工产品企业有组织排放 VOCs 主要组分及占比 (%)

组分	企业 I	企业 J	企业 K		企业 L
	排口 1	排口 1	排口 1	排口 2	排口 1
丙酮	20.1	7.8	0.6	2.5	1.3
2-丁酮	41.5	4.2	0	1.7	40.5
甲苯	34.1	0	22.1	26.8	0.5
间/对二甲苯	0.5	0	0.3	0	0.8
乙酸乙酯	0.9	11.5	0	1.0	54.0
二氯甲烷	0.4	0	0.9	1.4	0.2
萘	0.4	0	0	0	0.5
邻二甲苯	0.2	0	0	0	0.3
三氯一氟甲烷	0.2	3.1	0	0	0.2
醋酸乙酯	0	46.4	0	0	0
甲基丙烯酸甲酯	0	0	35.9	22.5	0
苯乙烯	0	0	32.9	33.7	0
乙苯	0	0	2.8	2.1	0
其他	1.7	27.0	4.5	8.3	1.7

2.2 橡胶与塑料制品行业 VOCs 排放特征

对企业有组织排口采集样品分析,得到各 VOCs 组分浓度,再根据浓度情况选取各企业排放量较多的 VOCs 组分,得到表 4 橡胶与塑料制品企业离线监测有组织排放 VOCs 主要组分浓度。企业 Q 和企业 S 有组织排放的 VOCs 经处理后总浓度均有排放口总浓度超过了 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的排放限值,企业 R 达标排放。计算企业各 VOCs 组分占比情况,得到表 5 橡胶与塑料制品企业离线监测有组织排放 VOCs 主要组分及占比。

橡胶与塑料制品行业主要涉 VOCs 的工艺环节为注塑、融溶、硫化、涂胶等。产生 VOCs 的原料主要为树脂和溶剂。该行业排放的 VOCs 种类主要是苯系物^[9]。从表 4 可知,企业 S 的排放量最大,且排口间差别大;企业 Q 排放总量居中,但其排口 1 的甲基丙烯酸甲酯浓度远高于其他污染物;企业 R 排放量极低,整体控制良好。由表 5 可知,行业各企业的主要 VOCs 污染物为间/对二甲苯,占比 0.6%~52.6%;乙酸乙酯占比

1.7%~39.6%,2-丁酮占比为 1.3%~61.9%。企业 Q 排放的乙酸乙酯仅为 1.7%,与企业 R 和企业 S 相比占比少得多(6.8%~39.6%,25.8%~29.4%)。相反,企业 Q 排放的甲基丙烯酸甲酯(45.7%)和间/对二甲苯(3.6%~52.6%)较多;企业 R 和企业 S 排放的甲基丙烯酸甲酯(2.2%,3.1%)和间/对二甲苯(0.0%~0.9%,2.8%~4.0%)较少,主要是因为企业 Q 从事橡胶制品,企业 R 和企业 S 从事的是塑料制品,原料和工序有较大的不同。企业 R 和企业 S 的主要以 2-丁酮(10.7%~61.9%)为主、乙酸乙酯污染物占比较大(10.7%~61.9%),原因是 2-丁酮、乙酸乙酯等酮类酯类物质在各行行业中用途广泛,并具有较强的挥发性。该行业橡胶制品类炼胶、橡胶硫化、人造革生产、表面喷涂等挥发的废气量较大,塑料制品类企业各种有机溶剂的挥发和生产过程中排放的有机废气较多。建议企业避免使用 VOCs 含量高的溶剂产品;在废气治理方面应加强废气收集效率,并设置有效治理设施实现达标排放。

表 4 橡胶与塑料制品企业有组织排放 VOCs 主要组分浓度 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

组分	企业 Q			企业 R			企业 S	
	排口 1	排口 2	排口 3	排口 1	排口 2	排口 3	排口 1	排口 2
2-丁酮	651.1	438.1	228.7	114.1	101.0	11.3	14274.9	3441.6
丙酮	0	576.4	492.5	4.8	8.0	20.4	2595.4	959.9
乙酸乙酯	0	392.0	0	59.7	78.7	7.2	19076.5	6040.4
间/对二甲苯	1181.5	830.1	9252.3	1.1	1.8	0	1816.8	936.5
甲苯	506.4	438.1	281.4	0	0	0	4022.9	1732.5
1, 2, 4-三氯苯	1278.0	668.7	0	0.4	0.4	0	0	0
邻二甲苯	0	0	3465.2	0.7	1.8	3.3	0	0
二氯二氟甲烷	675.2	0	140.7	0	0	0	843.5	0
苯乙烯	2531.9	2006.0	0	0	0	0	7267.2	2622.2
甲基丙烯酸甲酯	0	10537.0	0	0	0	0	2011.5	515.1
萘	2097.8	899.2	0	0	0	0	0	0
苯甲醛	1929.0	484.2	0	0	0	0	0	0
丙烯	0	0	0	1.7	3.8	13.1	0	0
乙醛	0	0	0	0.4	0.8	27.5	0	0
其他	13262.2	5787.3	3729.1	1.5	2.6	23.2	12977.2	7164.2
总 VOCs 浓度	24113.1	23057.0	17589.9	184.4	198.8	106.0	64886.0	23412.5

表 5 橡胶与塑料制品企业有组织排放 VOCs 主要组分及占比 (%)

组分	企业 Q			企业 R			企业 S	
	排口 1	排口 2	排口 3	排口 1	排口 2	排口 3	排口 1	排口 2
2-丁酮	2.7	1.9	1.3	61.9	50.8	10.7	22.0	14.7
丙酮	0	2.5	2.8	2.6	4.0	19.2	4.0	4.1
乙酸乙酯	0	1.7	0	32.4	39.6	6.8	29.4	25.8
间/对二甲苯	4.9	3.6	52.6	0.6	0.9	0	2.8	4.0
甲苯	2.1	1.9	1.6	0	0	0	6.2	7.4
1, 2, 4-三氯苯	5.3	2.9	0	0.2	0.2	0	0	0
邻二甲苯	0	0	19.7	0.4	0.9	3.1	0	0
二氯二氟甲烷	2.8	0	0.8	0	0	0	1.3	0
苯乙烯	10.5	8.7	0	0	0	0	11.2	11.2
甲基丙烯酸甲酯	0	45.7	0	0	0	0	3.1	2.2
萘	8.7	3.9	0	0	0	0	0	0
苯甲醛	8.0	2.1	0	0	0	0	0	0
丙烯	0	0	0	0.9	1.9	12.4	0	0
乙醛	0	0	0	0.2	0.4	25.9	0	0
其他	55.0	25.1	21.2	0.8	1.3	21.9	20.0	30.6

3 结论与建议

3.1 结论

利用吸附浓缩气相质谱仪（AC-GCMS），离线监测广州某区域 7 家化工及橡胶/塑料制品企业的排放口。结果表明，化工产品行业的排放特征污染物是 2-丁酮、乙酸乙酯和甲苯；橡胶与塑料制品行业 VOCs 排放特征物是间/对二甲苯、2-丁酮和乙酸乙酯，表明不同行业的生产过程中的不同环节，VOCs 排放污染物各有其特征物。对该区域化工及橡胶/塑料制品行业的 VOCs 排放特征的定量解析，有助于对 VOCs 的精准治理。

3.2 建议

针对丁酮和甲苯等特征污染物，建议实施“源头控制—过程监控—末端治理”闭环治理体系。优先选用低毒、低挥发性的替代溶剂（如丙二醇甲醚醋酸酯、乳酸酯等），并在投产前进行产品性能与工艺适配性验证；对于难以替代的工序，应配置针对酮类、苯系物的高效处理设施（如活性炭吸附-氮气脱附冷凝回收或蓄热式氧化炉）。在全链条中，在关键排放口安装在线监测仪（如 PID 传感器或光离子化检测仪），构建连续监测与自动报警系统，通过实时获取 VOCs 浓度数据，并动态反馈给生产参数调控平台，从而确保废气排放始终处于合规范围内，达到稳定达标运行。

参考文献

[1] 张涵, 姜华, 高健, 等. PM_{2.5} 与臭氧污染形成机制及协同防控思路[J]. 环境科学研究, 2022, 35(3): 611-620.

[2] 周子航,邓也,谭钦文,吴柯颖,宋丹林,黄凤霞,周小玲.四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势[J].环境科学,2019,40(4):1613-1626

[3] 李艳卉. 沈阳某工业区大气 VOCs 的污染分析及健康风险评估[D]. 沈阳大学, 2022.

[4] Ma J, Li L. VOC emitted by biopharmaceutical industries: Source profiles, health risks, and secondary pollution[J]. Journal of Environmental Sciences, 2024, 135:570-584.

[5] 王罡. 工业污染源 VOCs 的危害及治理技术浅析[J]. 资源节约与环保, 2020(10): 70-71.

[6] Tao W, Likun X, Peter B, 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.

[7] Zhang H, Jiang H, Gao J, et al. Formation mechanism and management strategy of cooperative control of PM_{2.5} and O₃ [J]. JResearch of Environmental Sciences, 2022, 35(3): 611-620.

- [8] 仇金亮. 工业源 VOCs 污染治理存在的问题及对策建议分析[J]. 清洗世界, 2023, 39 (11): 111-114.
- [9] 郭雪琪, 余茂礼, 费蕾蕾, 等. VOCs 走航监测: 技术方法与案例应用[J]. 生态环境学报, 2020, 29(02): 311-318.
- [10] 孟洁, 肖咸德, 卢志强, 等. 橡胶制品行业优控物质分析及控制对策研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34:1079-1090.
- [11] 华林香. 厦门市塑料制品行业 VOCs 污染治理现状及展望[J]. 皮革制作与环保科技, 2022, 3(17): 89-91.
- [12] 戴燕, 王瑞文, 谭劲康, 等. 广东省典型塑料制品企业 VOCs 排放特征和环境影响[J]. 环境科学学报, 2023, 43(06): 155-163.
- [13] He L, Duan Y, Zhang Y, et al. Effects of VOC emissions from chemical industrial parks on regional O₃-PM_{2.5} compound pollution in the Yangtze River Delta[J]. Science of The Total Environment, 2024, 906:167503.
- [14] 陈明. 沈阳市工业污染源普查 VOC 排放量与大气源清单数据存在差异的原因分析[J]. 生态环境与保护, 2021, 4(2): 82-83.
- [15] 王肖丽, 余宇帆, 黄志炯, 等. 基于实地调研的广东省工业 VOC 排放清单改进研究[J]. 环境科学研究, 2026, 32(4).
- [16] HJ 732-2014, 固定污染源废气挥发性有机物的采样气袋法[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2014.
- [17] HJ 759-2015, 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:中国环境科学出版社, 2015.
- [18] 盛涛, 高宗江, 高松, 等. 上海市专项化学品制造行业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势研究[J]. 环境科学研究, 2019, 32(05): 830-838.
- [19] 林帼秀. 广东重点行业 VOCs 排放特征及污染控制探讨[J]. 资源节约与环保, 2021(02): 68-70.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS