基于质谱技术的加油站大气 VOCs 排放特征污染分析

潘海贤[1]，罗振荣[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】为了解广东省加油站大气挥发性有机物（VOCs）污染特征，于 2020 年 12 月至 2021 年 4 月采用在线单光子电离质谱仪（SPI-MS）对省内 81 座加油站开展走航监测。结果表明，不同品牌加油站的 VOCs 浓度存在差异。私营加油站的污染水平最高，社会加油站的污染水平最低。各品牌加油站总 VOCs 平均浓度为 82~177 μg/m³。VOCs 组分主要包括含氧含氮烃、烷烃、卤代烃、有机硫、烯烃和芳香烃。其中，芳香烃（30.0%~37.4%）与烷烃（21.0%~27.3%）为主，两者合计占比最高为中海油（60.6%）。共列出 54 种特征污染物，甲苯、二甲苯/乙苯、壬烷、三甲苯、甲基环己烷和戊烯为各品牌的共同前六特征污染物。加油站大气 VOCs 排放特征分析有助于控制加油站的大气 VOCs 污染。

【关键词】广东省；加油站；挥发性有机物（VOCs）；走航监测；质谱
【基金项目】百色学院高层次人才科研启动金（3RD022500096）
【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.20260004

Characteristic pollution analysis of atmospheric VOCs emission at gas stations based on mass spectrometry

Haixian Pan[1], Zhenrong Luo[2], Peitao Wang[2], 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**】To investigate the pollution characteristics of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) at gas stations in Guangdong Province, online single-photon ionization mass spectrometry (SPI-MS) was employed to conduct on-road monitoring of 81 gas stations in the province from December 2020 to April 2021. The results showed differences in VOCs concentrations among gas stations of different brands. Private gas stations had the highest pollution levels, while independent gas stations had the lowest. The average concentrations of total VOCs ranged from 82 to 177 μg/m³ in each brand gas station. The VOCs components mainly include oxygenated/nitrogenated hydrocarbons, alkanes, halogenated hydrocarbons, organic sulfur compounds, olefins, and aromatic hydrocarbons. Among them, aromatic hydrocarbons (30.0%-37.4%) and alkanes (21.0%-27.3%) are the main components, and the highest proportion of the two is China National Offshore Oil Corporation (60.6%). A total of 54 characteristic pollutants were listed. Toluene, xylene/ethylbenzene, nonane, trimethylbenzene, methylcyclohexane and pentene were the common top six characteristic pollutants of each brand. The analysis of atmospheric VOCs emission characteristics at gas stations is helpful to control atmospheric VOCs pollution at gas stations.

【**Keywords**】Guangdong province; Gas station; Volatile organic compounds (VOCs); On-road monitoring; Mass spectrometry

引言

对来自石化行业的挥发性有机物（VOCs）的研究关注日益增多。研究表明，人体长期暴露于 VOCs 环境中存在健康风险。Tunsaringkarn 等[1]对曼谷 49 名加油站工人的职业暴露调查显示，工人最常报告的症状依次为头痛(61%)、疲倦(29%)及喉咙刺激(11%)，且疲

作者简介：潘海贤，女，本科，环境监测；
*通讯作者：马理

劳与苯及甲苯暴露显著相关($p<0.05$)。此外，暴露于苯三十年者的终生癌症风险估计为 1.75×10^{-4}，远高于常规可接受水平 10^{-6}。Xie D 等[2]在对海南省石化行业的 VOCs 研究中发现，二甲苯、丁烷和丙烯等烷烃和烯烃是主要的光化学反应物。而 Jia C R 等[3]则通过对美国大孟菲斯地区加油站空气中的 VOCs 的研究，指出 VOCs 浓度与现场车辆的数量以及环境参数的关联不显著，汽油蒸发使顾客暴露于芳香族化合物的风险极低，仅占总暴露量的 2%，可以推断这种程度的 VOCs 暴露带来的健康风险很小。毕申雨等[4]的研究指出城市区域加油站空气中的 VOCs，烷烃（70%-72%），尤其是异戊烷（20%-24%）占主导地位。Heidari 等[5]通过对伊朗马什哈德不同类型加油站的 VOCs 的研究发现，VOCs 浓度很大程度取决于加油站的燃料品牌和类型，说明需要对加油站进行必要的市场监管。黄玉虎等[6]的研究发现，VOCs 排放量的减少能通过在加卸油和罐压控制措施基础上在线监控来实现。目前我国在各地已开始实施更严格的加油站 VOCs 管控措施，深圳市在 2024 年底，率先完成全市 271 座加油站三次油气回收治理全覆盖，实现 VOCs 减排约 320 吨[7]。广东省加油站数量众多，亟需基于本地实测数据的排放特征研究，为政策制定提供科学依据。正是基于此，本文开展了对加油站的 VOCs 特征研究。

1 实验部分

1.1 加油站的选取

2020 年 12 月-2021 年 4 月，选取位于国控站点主导风向区域，且距离居民区较近的加油站作为 VOCs 走航监测地点，共选取了广州、深圳、珠海、佛山、东莞、惠州、中山、肇庆、江门、汕头、潮州、揭阳、湛江、茂名、阳江、韶关和清远 17 个城市的 81 座加油站。根据加油站品牌，将加油站划分为六类 81 座，包括中国石化（36 座）、中国石油（17 座）、中油碧辟（15 座）、中海油（4 座）、社会加油站（5 座）、私营加油站（4 座）。

1.2 VOCs 走航监测

VOCs 走航监测使用在线单光子电离质谱仪（SPI-MS 2000，广州禾信仪器股份有限公司）[8]。在 VOCs 走航监测前，按照严格的质量校准程序对 SPI-MS 进行了校正，以确保仪器的精准性。需指出的是，SPI-MS 为软电离技术，对质荷比相同的化合物无法通过质谱单独区分，相关信号的组分归属需结合现场组成特征进行归类，例如丁烷与丙酮质荷比相同（m/z=58），因加油站轻烃（尤其 C_4烷烃）为主要来源，故该信号近似归并为烷烃类处理。走航监测加油站大气 VOCs 时，车速小于 30 km/h，SPI-MS 2000 的采集速率设为 1 谱/5 s，依据标准物（TO-14、PAMS 和有机硫标准气体）和外标校正曲线，对走航监测到的 VOCs 组分和污染物进行定性定量分析，检出限为 0.1~1.2 μg/m³，外标校正曲线相关系数 R^2大于 0.99。考虑到加油站作业规律及现场走航条件，每座加油站走航监测 1 天，覆盖早高峰（09：00-11：00）、午间平峰（11：00-14：00）、晚高峰（17：00-19：00）及夜间低谷（19：00-21：00）四个时段，以捕捉不同加油活动强度下的 VOCs 排放特征；每座加油站走航有效数据量不少于 2000 条。根据实时气象，规划走航监测路线，自加油站往下风向进行走航监测。

2 结果与讨论

2.1 VOCs 浓度分析

如图 1 所示，81 座加油站的 VOCs 浓度差异显著。私营加油站的 VOCs 污染水平波动最大且偏高，须线按 1.5 倍四分位距（1.5×IQR）延伸，须线范围内总 VOCs 浓度范围为 12~335 μg/m³，中位数 101 μg/m³，均值 177 μg/m³。社会加油站的各项指标最低（中位数 60 μg/m³、均值 82 μg/m³、最大值 156 μg/m³），显示其污染相对较轻，其它加油站的指标介于两者之间（中位数 71~88 μg/m³、均值 97~135 μg/m³、最大值 167~263 μg/m³）。各加油站周边 VOCs 浓度有明显差异，与 Heidari 等[5]对伊朗马什哈德不同类型加油站的研究结果相似。

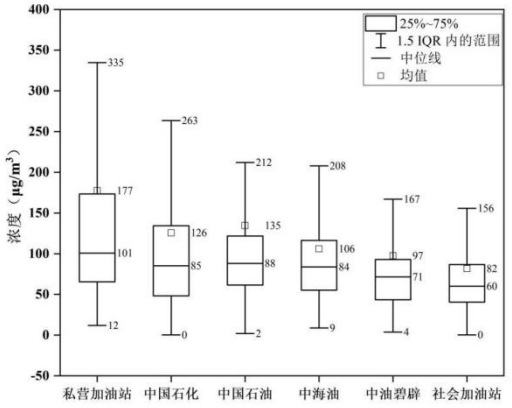


图 1　各品牌加油站 VOCs 浓度

注：箱体为中位数与四分位距区间，须线按 1.5×IQR 延伸，须线上下限是去除异常值的最大值和最小值（按 Origin 默认百分位法计算）。

各品牌加油站的油气回收分为卸油油气回收系统、加油油气回收系统和油气排放处理装置[9]。各品牌加油站卸油和加油油气回收装置的安装率均为 100%。私营加油站未安装油气排放处理装置，其余品牌油气排放处理装置安装率为 6.7%~25.0%。各品牌加油站油气排

放处理装置安装率差异较大，私营加油站缺乏油气排放处理装置，VOCs 排放浓度最高。已有研究证实，埋地油罐压力控制装置等油气回收技术，能够削减油罐及附属设施的无组织排放[10]。因此，加强私营加油站油气回收装置的建设，特别是油气排放处理装置的推广，有助于控制 VOCs 排放。

2.2 VOCs 组分分析

我国炼油企业在生产油品过程中，所需的原辅材料种类众多，涉及的工艺流程不同，从而油气挥发产生的挥发性有机物的组分也会有所差异。走航监测到各品牌加油站大气中有 6 种 VOCs 组分，包括含氧含氮烃、烷烃、卤代烃、有机硫、烯烃、芳香烃，54 种 VOCs 特征污染物（表 1）。

如图 2 所示，各加油站的 VOCs 组分中，以芳香烃（30.0~37.4%）和烷烃（21.0~27.3%）为主。其中，中海油加油站两类组分合计占比最高（60.6%，芳香烃 37.4%＋烷烃 23.2%）；私营加油站紧随其后（59.6%，芳香烃 32.3%＋烷烃 27.3%）。芳香烃含苯、甲苯、二甲苯等，苯类物质具有极强的致癌性（如苯），是监管部门重点控制对象。烷烃主要来源于汽油的轻质部分的挥发，且易于参与光化学反应生成臭氧[11]。其它四类 VOCs 组分占比相对较小，烯烃占比 10.0~17.2%，是臭氧生成的重要前体物之一。含氧含氮烃包括醇类、酮类等氧化物，以及胺类氮化物，占比 7.1~12.0%，可能来自含氧化合物添加剂，极性强，溶解度高，部分物质可形成酸雨或参与光化学反应。卤代烃占比 8.1~15.0%，卤代烃通常为添加剂残留，部分卤代烃，如氟氯烃（CFCs）对臭氧层具有潜在破坏作用。有机硫占比最小为 4.0~8.1%，能导致金属腐蚀和产生异味[10]。总之，VOCs 组分差异可能与油品来源、添加剂及油气回收装置运维水平等因素有关。中海油的芳香烃含量高，提示其油品中芳香烃含量可能也更高。芳香烃含量高会加剧 VOCs 排放风险，需重点关注其对周边居民的潜在健康风险，私营加油站的 VOCs 中烷烃比例偏高，反映了其油气回收系统效率较低。



图 2　各品牌加油站 VOCs 组分占比

表 1　VOCs 组分及其组分组成的污染物

组分	特征污染物	数量/种
含氧含氮烃	正丙醇、二甲基甲酰胺、甲酸乙酯、乙酸乙酯、苯胺、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	14
烷烃	丁烷/丙酮、戊烷/异戊烷、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、正十二烷、正十三烷	11
卤代烃	1,1-二氯乙烯、1,3-二氯丙烯、氯苯、氯化苄、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	11
有机硫	甲硫醇、甲硫醚/乙硫醇、二硫化碳/丙硫醇、乙硫醚/丁硫醇、二甲基二硫醚、己硫醇	6
烯烃	1,3-丁二烯、丁烯、异戊二烯、戊烯、环己烯、己烯/甲基环戊烷	6
芳香烃	苯、甲苯、苯乙烯、二甲苯/乙苯、三甲苯、二乙基苯	6
	合计	54

2.3 VOCs 前十特征污染物

各加油站的 VOCs 前六污染物相同，即甲苯、二甲苯/乙苯、壬烷、三甲苯、甲基环己烷、戊烯，分属于烷烃（壬烷、甲基环己烷），芳香烃（甲苯、三甲苯、

二甲苯/乙苯）和烯烃（戊烯）[11]。这反映了无论是国有巨头还是私营站点，其销售的汽油配方高度相似，通常源自于同一批原油的炼制工艺。而 VOCs 的前七到前十污染物存在细微差异（表 2）。虽然各品牌在主要污染物上表现出显著的共性，但气象条件（如风速、温度）和车流量等因素均会导致实际监测值的波动。针对性的治理策略应兼顾“源头控制”和“环境适应”两方面。

表 2　各品牌加油站 VOCs 浓度占比第 7 至第 10 的污染物

品牌名称	特征污染物
中国石化	丁烷/丙酮、己烯/甲基环戊烷、丁烯、1,1-二氯乙烯
中国石油	己烯/甲基环戊烷、丁烯、戊烷、异戊烷
中海油	1,1-二氯乙烯、正癸烷、甲硫醚/乙硫醇、四氯乙烯
中油碧辟	丁烷/丙酮、己烯/甲基环戊烷、丁烯、三氯乙烯
社会加油站	丁烷/丙酮、正己烷/二甲基丁烷、己硫醇、异戊二烯
私营加油站	丁烷/丙酮、己烯/甲基环戊烷、丁烯、二甲基甲酰胺

3 结论与建议

各品牌加油站总 VOCs 的平均浓度为 82～177 μg/m^3，主要包括含氧含氮烃、烷烃、卤代烃、有机硫、烯烃、芳香烃，其共同的前六特征污染物为甲苯、二甲苯/乙苯、壬烷、三甲苯、甲基环己烷和戊烯。此外，私营加油站 VOCs 排放浓度最高，建议安装油气排放处理装置。尽管各加油站均安装了卸油油气回收系统和加油油气回收系统，但各品牌加油站油气排放处理装置安装率差异较大，且其运行效率与加油站的性质（私营 vs 国有）存在一定关联性，进而影响了最终的 VOCs 浓度水平，因此需提升油气回收系统运行效率、加强差异化管理。

参考文献

[1] Tunsaringkarn T, Siriwong W, Rungsiyothin A, et al. Occupational exposure of gasoline station workers to BTEX compounds in Bangkok, Thailand[J]. The International Journal of Occupational and Environmental Medicine, 2012, 3(3): 117-125.

[2] Xie D H, Zhang X X, He Q Y, et al. Establishment of pollutant component spectrum of atmospheric emission sources in typical petrochemical enterprises in Hainan Province[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 233(5): 052018.

[3] Jia C, Fu X, Chauhan B, et al. Exposure to volatile organic compounds (VOCs) at gas stations: a probabilistic analysis[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2022, 15: 465-477.

[4] 毕申雨, 宋立来, 尹思涵, 等. 加油站及周边空气中 VOCs 物种构成与示踪特征[J]. 中国环境科学, 2024, 44(2): 620-628.

[5] Heidari E A, Sarkhosh M, Alidadi H, et al. Assessing VOC emissions from different gas stations: impacts, variations, and modeling fluctuations of air pollutants[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 16617.

[6] 黄玉虎, 胡玮, 李贝贝, 等. 北京城市副中心（通州区）加油站 VOCs 排放清单[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 618-625.

[7] 深圳市生态环境局. 深圳市在全省率先完成加油站三次油气回收治理[EB/OL]. (2025-04-01) [2026-05-11]. https://meeb.sz.gov.cn/xxgk/qt/gzdt/content/post_12101163.html.

[8] 麦泽彬. 在线 VOCs 质谱走航监测系统的研制及初步应用[D]. 广州: 暨南大学, 2019.

[9] 罗元, 刘杨, 周智, 等. 加油站三次油气回收装置设计与研究[J]. 机械管理开发, 2025, 40(3): 92-93.

[10] 王思宇, 黄玉虎, 胡玮, 等. 加油站油气处理装置作用及 VOCs 排放现状[J]. 环境科学研究, 2021, 34(2): 279-285.

[11] Zeng L, Yang B, Xiao S, et al. Species profiles, in-situ photochemistry and health risk of volatile organic compounds in the gasoline service station in China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 842: 156813.

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