

石油化工行业中挥发性有机物的检测技术及对人体健康危害

沈晓燕, 李欣, 胡紫薇

中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司川西北气矿, 四川 江油 621700

DOI:10.61369/EAE.2025050005

摘 要 : 挥发性有机物 (Volatile Organic Compounds, VOCs) 作为一类广泛存在于环境中的有机污染物, 其来源复杂、种类繁多, 不仅对大气、水体、土壤等生态环境造成严重破坏, 还会通过呼吸、皮肤接触等途径危害人体健康。论文系统梳理了当前 VOCs 检测领域的主流技术, 主要分为实验室离线检测技术、现场快速检测技术及在线连续监测技术, 结合海南瑞达检测有限公司实际应用场景分析各类方法的使用情况; 从检测限制、准确性、时效性、操作复杂度等维度, 对比不同检测技术的优势与局限性; 讨论 VOCs 在环境中的迁移转化规律及其对大气环境、水体与土壤生态系统的影响, 并简单阐述典型 VOCs 对人体呼吸系统、神经系统、生殖系统及遗传物质的危害。

关 键 词 : 挥发性有机物; VOCs 检测技术; 环境影响; 人体健康; 污染防控

Detection Technologies for Volatile Organic Compounds in the Petrochemical Industry and Their Hazards to Human Health

Shen Xiaoyan, Li Xin, Hu Ziwei

Northwest Sichuan Gas Field, Southwest Oil and Gas Field Company, PetroChina, Jiangyou, Sichuan 621700

Abstract : Volatile Organic Compounds (VOCs), as a class of organic pollutants widely present in the environment, have complex sources and a wide variety of types. They not only cause severe damage to ecological environments such as the atmosphere, water bodies, and soil but also pose hazards to human health through pathways such as inhalation and skin contact. This paper systematically reviews the mainstream technologies in the current field of VOCs detection, which are primarily categorized into laboratory offline detection technologies, on-site rapid detection technologies, and online continuous monitoring technologies. It analyzes the application of various methods in practical scenarios, drawing on the experiences of Hainan Ruida Detection Co., Ltd. The advantages and limitations of different detection technologies are compared from dimensions such as detection limits, accuracy, timeliness, and operational complexity. Additionally, the paper discusses the migration and transformation patterns of VOCs in the environment and their impacts on the atmospheric environment, water bodies, and soil ecosystems, while briefly elaborating on the hazards of typical VOCs to the human respiratory system, nervous system, reproductive system, and genetic material.

Keywords : volatile organic compounds; VOCs detection technologies; environmental impact; human health; pollution prevention and control

一、绪论

(一) 挥发性有机物的定义与分类

挥发性有机物 (VOCs) 通常指在标准大气压下, 沸点介于 50°C - 260°C 之间, 常温下饱和蒸气压大于 133.32 Pa, 能够以气态形式存在于空气中的一类有机化合物的总称。根据化学结构差异, VOCs 可分为烷烃类、烯烃类、芳香烃类、卤代烃类、醛酮类、酯类及其他含氧化合物等。

从来源角度, VOCs 可分为自然来源与人为来源。自然来源主要包括植物释放、火山喷发、森林火灾等, 排放量相对稳定且分散; 人为来源则是当前环境中 VOCs 污染的主要来源, 其中涵盖

工业生产、交通运输、日常生活及农业活动等, 具有排放集中、成分复杂、毒性差异大等特点。

(二) 研究 VOCs 检测技术及环境与健康影响的意义

随着工业化与城市化进程的加快, 人为源 VOCs 排放量持续增加, 已成为我国大气污染防治的重点对象。VOCs 是大气中臭氧和二次有机气溶胶的关键前体物, 其与氮氧化物在光照条件下发生复杂的光化学反应, 加剧区域光化学烟雾污染与细颗粒物污染, 破坏生态系统平衡; 而准确、高效的检测技术是掌握 VOCs 污染特征、评估环境风险、制定防控政策的前提。因此, 系统性的分析各类 VOCs 检测技术的应用现状与优劣, 明确其适用范围, 对提升 VOCs 污染监测水平具有重要实践意义。

与此同时，分析 VOCs 在环境中的迁移转化路径及其对生态系统和人体健康的影响机制，能够为污染源头管控、环境质量标准制定及健康风险预警提供科学依据。

二、挥发性有机物检测技术及实际应用情况

（一）现场快速检测技术

现场快速检测技术旨在缩短检测周期，实现 VOCs 的实时分析，核心优势是无需将样品送至实验室，可在现场直接获取检测结果，适用于应急监测、初步筛查与大范围污染普查。

1. 便携式气相色谱（PGC）技术

便携式气相色谱是实验室 GC 的小型化版本，体积通常为数十至数百立方米，重量 5–20kg，可通过电池或外接电源供电，具备现场采样、分离、检测一体化功能。PGC 采用微型色谱柱与小型化检测器，分析时间通常为 5–30 分钟，检测限可达 0.1–1mg/m³。

2. 光离子化检测器（PID）技术

光离子化检测器利用紫外灯产生的高能紫外光使 VOCs 分子电离，形成的离子在电场作用下产生电流信号，信号强度与 VOCs 浓度呈线性关系，从而实现定量分析。PID 传感器体积小，响应时间短，检测范围宽，可直接手持或安装于便携式仪器中，成本相对较低。

3. 火焰离子化检测器（FID）技术

火焰离子化检测器是 VOCs 检测的常用技术，核心原理是碳氢类 VOCs 在氢火焰中燃烧裂解，产生的离子在电场中形成电流，电流强度与 VOCs 含量成正比，以此实现定量分析。

FID 优势显著：对碳氢类 VOCs 检测限达 ppb 级，灵敏度高；线性范围宽至 10⁷，适配高低浓度场景；响应速度快，操作维护简便，稳定性强，长期运行成本低。

4. 传感器阵列技术

传感器阵列技术由多个对不同 VOCs 具有交叉响应的传感器组成，通过不同传感器对目标 VOCs 的响应信号差异，形成“指纹图谱”，结合模式识别算法实现 VOCs 的定性半定量分析。

三、挥发性有机物检测技术优劣对比

为明确不同 VOCs 检测技术的适用范围，本节从检测限、准确性、分析时间、成本、操作复杂度、基体适应性及适用场景等维度，对实验室离线检测技术、现场快速检测技术与在线连续监测技术进行全面对比。

（一）核心性能指标对比

1. 检测限制

现场快速检测技术中，PID 检测限为 0.1–1mg/m³，传感器阵列技术为 0.1–10mg/m³，仅适用于中高浓度 VOCs 的初步筛查；PGC 与便携式 FTIR 检测限可达 0.1–1mg/m³，可满足应急监测与现场定量分析需求，但低于实验室技术。

2. 准确性

现场快速检测技术准确性较低：PID 与传感器阵列技术仅能实现半定量，且无法区分 VOCs 种类；PGC 定性准确性依赖保留时间，RSD5%–15%，但分离能力有限；便携式 FTIR 通过谱库匹配定性，RSD10%–20%，受光谱重叠影响较大。

3. 分析时间

现场快速检测技术分析时间最短：PID 与传感器阵列技术响应时间 1–30 秒，可实时获取结果；PGC 与便携式 FTIR 分析时间 5–30 分钟，可现场完成检测。

4. 成本

便携式 FTIR>PGC>便携式 PID>传感器阵列 >FID。

5. 操作复杂度

现场快速检测技术操作简单，PID、FID 与传感器阵列仪器无需专业培训即可操作，PGC 与便携式 FTIR 需简单培训。

其中海南瑞达检测有限公司所使用的谱育 3100 在 LDAR 检测中的优点突出：整机轻便只有 3.7kg，现场操作灵活；采用 PID+FID 双检，几乎能测所有 VOCs；防爆设计，安全可靠；搭配数字化平台，数据管理高效。

表 1 挥发性有机物（VOCs）检测技术优劣对比表

检测技术类别	具体方法	检测限	准确性（RSD）	分析时间	购置成本（万元）	年运行成本（万元）	操作复杂度	基体适应性	适用场景
现场快速检测	PID	0.1–1mg/m ³	10%–30%	1–30 秒	1–5	0.1–1	低	空气（低湿度）	污染源初步筛查、室内空气快速评估、职业卫生现场预警
	传感器阵列	0.1–10mg/m ³	15%–30%	1–30 秒	0.5–3	0.1–0.8	低	空气（简单基体）	大范围污染普查、特定场所浓度预警
	PGC	0.1–1mg/m ³	5%–15%	5–30 分钟	10–50	1–5	中	空气、废气	工业园区巡查、应急监测初步定量、室内空气现场检测
	便携式 FTIR	0.1–5mg/m ³	10%–20%	1–5 分钟	20–50	1–5	中	空气、废气	污染源无组织排放监测、应急事件污染物种类识别
	FID	0.1–10ppm	5%–10%	10–30 秒	0.3–1	1–5	低	空气、废气	污染源排放实时监控、城市空气质量周期性监测

四、挥发性有机物对环境的影响

（一）VOCs 在环境中的迁移与转化

VOCs 进入环境后，会在大气、水体、土壤等介质中发生迁移

与转化，其过程受自身理化性质与环境条件影响显著。

1. 大气中的迁移与转化

大气是 VOCs 最主要的存在介质，自然源与人为源排放的 VOCs 通过大气扩散实现长距离迁移，迁移范围取决于 VOCs 的大

气寿命。

大气中 VOCs 的转化以光化学反应为主：在阳光照射下，VOCs 与氮氧化物、臭氧等发生系列反应，生成臭氧、二次有机气溶胶、醛酮类等二次污染物。

2. 水体中的迁移与转化

水体中 VOCs 主要来源于大气沉降、工业废水排放、农业面源污染及土壤渗透。VOCs 在水中的溶解度差异显著，溶解度高的 VOCs 易在水体中扩散，溶解度低的 VOCs 则易挥发至大气或吸附于悬浮颗粒物表面。

3. 土壤中的迁移与转化

土壤中 VOCs 主要来源于工业废渣填埋、农药施用、油气泄漏及大气沉降。VOCs 在土壤中的迁移受土壤质地影响：砂质土壤孔隙大，透气性好，VOCs 易向下渗透至地下水或挥发至大气；黏质土壤孔隙小，吸附能力强，VOCs 易被土壤颗粒吸附，迁移速度慢。

（二）对大气环境的影响

1. 加剧臭氧污染

臭氧是夏季大气污染的主要污染物之一，其浓度升高会对人体健康与生态系统造成严重危害。VOCs 是臭氧生成的关键前体物，尤其在 NO_x 浓度较高的区域，VOCs 浓度的增加会显著促进臭氧生成。

2. 破坏臭氧层

含氯、溴的 VOCs 是臭氧层破坏的主要物质。这类 VOCs 在对流层中性质稳定，可长期迁移至平流层，在紫外线照射下分解产生氯自由基或溴自由基，通过链式反应催化臭氧分解。

（三）对水体与土壤生态系统的影响

1. 对水体生态系统的危害

（1）影响水生生物生长繁殖：高浓度 VOCs 会导致鱼类、藻类等水生生物急性中毒，出现呼吸困难、游动异常甚至死亡；低浓度长期暴露会干扰生物内分泌系统，影响繁殖能力。

（2）破坏水体食物链：VOCs 在水体中可通过食物链富集，浓度沿食物链逐级升高。

（3）影响水体自净能力：高浓度 VOCs 会抑制水体中微生物的活性，降低其对有机物的降解能力，导致水体自净能力下降，加剧水质恶化。

2. 对土壤生态系统的危害

（1）损害土壤微生物群落：土壤中的 VOCs 会抑制微生物的生长与代谢，导致微生物多样性下降。

（2）影响植物生长发育：VOCs 可通过植物根系吸收或叶片呼吸进入植物体内，干扰生理过程。

（3）导致土壤质量退化：长期高浓度 VOCs 污染会破坏土壤结构，降低土壤通气性与保水性，导致土壤肥力下降。

五、挥发性有机物对人体健康的影响

（一）VOCs 的人体暴露途径

人体接触 VOCs 的途径主要包括呼吸暴露、皮肤接触暴露与

消化道暴露，其中呼吸暴露是最主要的途径。

1. 呼吸暴露

室内与室外空气中的 VOCs 通过人体呼吸进入呼吸道，进而扩散至肺部并进入血液循环。不同场景下，呼吸暴露的 VOCs 浓度差异显著：

（1）室外环境：城市道路、工业园区周边空气中 VOCs 浓度较高；农村与偏远地区浓度较低；

（2）室内环境：由于建筑装饰材料、家具、日用品的挥发，室内空气中 VOCs 浓度往往高于室外。

（3）职业环境：石油化工、涂装、印刷、制鞋等行业工人长期暴露于高浓度 VOCs 环境中。

2. 皮肤接触暴露

皮肤直接接触含 VOCs 的物质时，VOCs 可通过皮肤角质层渗透进入人体。脂溶性强的 VOCs 皮肤渗透能力强，而水溶性强的 VOCs 渗透能力较弱。例如，制鞋工人在使用含苯胶水时，皮肤直接接触胶水，苯通过皮肤吸收量可达呼吸吸收量的 10%–20%；家庭主妇使用含甲醛的清洁剂时，皮肤接触也会导致甲醛吸收。

3. 消化道暴露

消化道暴露主要通过饮用被 VOCs 污染的水、食用被 VOCs 污染的食物及吸入 VOCs 后通过唾液吞咽进入消化道。例如，长期饮用含三氯甲烷的饮用水，会导致三氯甲烷通过消化道进入人体；食用受农药 VOCs 污染的蔬菜，也会造成消化道暴露。

（二）对人体各系统的危害

1. 呼吸系统危害

VOCs 对呼吸系统的危害最为直接，短期高浓度暴露会刺激呼吸道黏膜，引发急性炎症；长期低浓度暴露则可能导致慢性呼吸道疾病，甚至诱发肺癌。

（1）急性危害：甲醛、乙醛、丙烯醛等醛酮类 VOCs 具有强烈刺激性，浓度超过 $1\text{mg}/\text{m}^3$ 时，会引起鼻腔、咽喉黏膜充血、水肿，导致打喷嚏、咳嗽、咽痛等症状；浓度超过 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 时，可诱发急性支气管炎、肺水肿。

（2）慢性危害：长期暴露于低浓度 VOCs 会损伤呼吸道黏膜，降低肺功能，增加慢性阻塞性肺疾病、哮喘的发病风险。

（3）致癌风险：国际癌症研究机构已将甲醛、苯、氯乙烯等 VOCs 列为 I 类致癌物。

2. 神经系统危害

VOCs 易通过血脑屏障进入中枢神经系统，干扰神经递质合成与传递，导致神经功能损伤，表现为头痛、头晕、记忆力下降等症状，严重时可导致神经退行性疾病。

（1）急性神经毒性：高浓度 VOCs 会迅速抑制中枢神经系统，导致头晕、头痛、意识模糊、共济失调等症状。；

（2）慢性神经毒性：长期低浓度暴露于 VOCs 会导致慢性神经损伤，表现为记忆力减退、注意力不集中、情绪波动、肢体麻木等。

3. 遗传物质损伤与致癌性

部分 VOCs 具有遗传毒性，可直接损伤 DNA，导致基因突

变、染色体畸变，进而诱发癌症。

(1) DNA 损伤机制：苯在体内代谢生成苯醌、氢醌等活性中间产物，这些物质可与 DNA 结合形成加合物，导致 DNA 链断裂、碱基缺失或突变；

(2) 致癌性表现：除前文提及的白血病、肺癌、鼻咽癌外，不同 VOCs 还可诱发特定癌症。

六、结论与展望

VOCs 检测技术日趋多元化，但需按需选择，现场快速检测技术以时效性优势，在应急监测、初步筛查中不可或缺；

VOCs 对环境的危害具有多介质、多维度特征：VOCs 在大气中通过光化学反应加剧臭氧污染与 PM_{2.5} 污染，破坏臭氧层；在水体与土壤中通过迁移转化导致生态系统退化，影响水生生物与植物生长，降低土壤质量。VOCs 的跨介质污染进一步扩大了其环境危害范围，需从全生命周期角度开展污染防控。

VOCs 对人体健康的危害广泛且严重：VOCs 通过呼吸、皮肤接触、消化道等途径进入人体，对呼吸系统、神经系统、生殖内分泌系统造成损伤，部分 VOCs 具有明确致癌性。儿童、老年人、孕妇等敏感人群对 VOCs 更为易感，健康风险更高，需重点关注。

参考文献

-
- [1] 中华人民共和国环境保护部. GB 37822-2019 挥发性有机物无组织排放控制标准 [S]. 北京：中国环境科学出版社，2019.
- [2] 李红，王铁宇，吕永龙. 挥发性有机物的环境健康效应研究进展 [J]. 环境科学学报，2020，40 (5): 1579-1596.