

# Thinking on Methods for Controlling Volatile Organic Compounds in the Atmosphere

Li chuan Song

Heilongjiang Jingzhen Technology Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang, 150023, China

## Abstract

Volatile Organic Compounds (VOCs), as key precursors of composite atmospheric pollution, their emissions can trigger ozone pollution and the formation of PM2.5, posing a serious threat to the ecological environment and human health. Based on the complexity and diversity of VOCs emission sources, this paper systematically sorts out three major core control technologies: source reduction, process control, and end treatment. It focuses on analyzing the current application status and limitations of low-VOCs raw material and auxiliary material substitution, as well as the combined technology of closed collection and efficient treatment. In combination with China's "14th Five-Year Plan" requirements for atmospheric pollution prevention and control, it proposes that we need to break through the problems existing in current governance, such as "emphasizing end treatment and neglecting source control" and "emphasizing investment and neglecting operation and maintenance", through a synergistic path of "precise source tracing - classified control - technological integration - policy guarantee", providing technical reference and practical direction for regional deep governance of VOCs and continuous improvement of air quality.

## Keywords

Volatile Organic Compounds (VOCs); Atmospheric Pollution Control; Source Reduction; End-of-Pipe Treatment; Synergistic Management

# 大气中挥发性有机物治理方法思考

宋立川

黑龙江璟臻科技有限公司, 中国 · 黑龙江 哈尔滨 150023

## 摘要

挥发性有机物 (VOCs) 作为大气复合型污染的关键前体物, 其排放会诱发臭氧污染与 PM2.5 生成, 对生态环境与人体健康构成严重威胁。本文基于 VOCs 排放源的复杂性与多样性, 系统梳理了源头减量、过程控制、末端治理三大类核心治理技术, 重点分析了低 VOCs 原辅材料替代、密闭收集-高效处理联用技术的应用现状与局限性。结合我国“十四五”大气污染防治规划要求, 提出需通过“精准溯源-分类管控-技术融合-政策保障”的协同路径, 破解当前治理中存在的“重末端、轻源头”“重投资、轻运维”等问题, 为区域 VOCs 深度治理与空气质量持续改善提供技术参考与实践方向。

## 关键词

挥发性有机物 (VOCs); 大气污染治理; 源头减量; 末端治理; 协同管控

## 1 引言

随着中国工业化与城市化进程的加速, 大气环境问题从传统煤烟型污染向“煤烟+臭氧+PM2.5”复合型污染转变, 挥发性有机物 (VOCs) 在此过程中扮演着“双重角色”——既是臭氧 (O<sub>3</sub>) 光化学反应的核心前体物, 也是二次细颗粒物 (PM2.5) 的重要组成部分。据《2024 中国生态环境状况公报》显示, 我国重点区域臭氧浓度仍呈波动上升趋势, 部分城市 VOCs 排放强度超过环境承载阈值, 成为制约空气质量达标的关键瓶颈。

VOCs 的排放源具有“点多、面广、组分杂”的特点,

涵盖石油化工、涂装、印刷、家具制造、医药化工等 30 余 个重点行业, 且存在大量无组织排放环节, 治理难度显著高 于传统大气污染物。近年来, 我国先后出台《挥发性有机物 治理攻坚方案》《重点行业挥发性有机物综合治理方案》等 政策文件, 推动 VOCs 治理从“被动应对”向“主动防控” 转型, 但实践中仍面临技术选择盲目、治理设施运行效率低、 区域协同管控不足等问题。

## 2 大气中挥发性有机物的排放特征与治理难点

### 2.1 VOCs 的排放源分类与组分特征

VOCs 的排放源可分为自然源与人为源, 其中人为源 是大气污染治理的核心对象。按排放方式与行业属性, 人为源可进一步划分为固定源与移动源: 固定源以工业排放为主, 占人为总排放量的 60% 以上, 其中石油炼制、化学

【作者简介】宋立川 (1980-), 男, 中国河北石家庄人, 本科, 工程师, 从事环境保护研究。

原料及化学品制造、涂装、印刷等行业贡献了75%的工业 VOCs 排放；移动源则包括机动车尾气、非道路移动机械（如工程机械、船舶）排放，其排放组分以烯烃、烷烃为主，反应活性显著高于固定源。

从组分来看，不同行业 VOCs 排放特征差异显著：石油化工行业以苯、甲苯、二甲苯等芳香烃为主，涂装行业以酯类、醇类、酮类等溶剂型组分居多，印刷行业则以乙酸乙酯、异丙醇等挥发性溶剂为主要排放物。<sup>[1]</sup>这种组分多样性导致单一治理技术难以覆盖所有场景，需根据行业特性选择针对性治理方案。

## 2.2 VOCs 治理的核心难点

当前 VOCs 治理面临三大核心挑战：一是无组织排放管控难，大量中小企业存在原辅材料储存不规范、生产过程敞口操作等问题，无组织排放量占比超过 30%，且收集效率普遍低于 60%；二是技术适配性不足，部分企业盲目选择“高端”末端治理设施（如 RTO 蓄热式焚烧炉），但未配套高效预处理系统，导致设施运行不稳定、处理效率骤降；三是区域协同性差，VOCs 具有流动性强、扩散范围广的特点，单一城市或区域的治理措施难以应对跨区域传输问题，需建立联防联控机制。<sup>[2]</sup>

## 3 大气中挥发性有机物治理的核心技术路径

VOCs 治理需遵循“源头减量优先、过程控制为辅、末端治理保障”的原则，结合行业排放特征与技术成熟度，选择经济高效的治理方案。以下从三大技术方向展开分析，并结合典型案例与数据说明技术应用效果。

### 3.1 源头减量技术：从根源降低 VOCs 排放

源头减量是 VOCs 治理的根本性措施，通过替代高 VOCs 原辅材料、优化生产工艺，可直接减少排放总量，降低后续治理压力。目前应用最广泛的技术包括低 VOCs 涂料替代、无溶剂胶粘剂使用、工艺革新等。

以家具制造行业为例，传统油性涂料的 VOCs 含量普遍超过 600g/L，而水性涂料 VOCs 含量可控制在 100g/L 以下，替代后 VOCs 排放量可减少 80% 以上。据广东省家具行业协会统计，2023 年该省规模以上家具企业水性涂料使用率已达 55%，较 2019 年提升 30 个百分点，行业 VOCs 排放总量下降 42%。此外，在印刷行业，柔性版印刷工艺采用水性油墨替代溶剂型油墨，VOCs 排放浓度可从 800mg/m<sup>3</sup> 降至 100mg/m<sup>3</sup> 以下，且印刷品质量与生产效率未受影响。

源头减量技术的核心优势在于“治未病”，可避免末端治理设施的高额投资与运行成本，但也存在技术壁垒与成本压力——低 VOCs 原辅材料价格通常比传统材料高 10%-30%，部分中小企业难以承受短期成本增长。<sup>[3]</sup>

### 3.2 过程控制技术：减少生产环节的 VOCs 逸散

过程控制通过优化生产设备与操作流程，减少 VOCs 在储存、输送、反应等环节的无组织逸散，是连接源头与末

端的关键环节。核心技术包括密闭式生产设备、负压收集系统、泄漏检测与修复（LDAR）技术等。

泄漏检测与修复（LDAR）技术是石化行业过程控制的核心手段，通过定期检测管道、阀门、法兰等易泄漏组件，及时修复泄漏点，可减少 30%-50% 的无组织排放。我国《石油炼制工业污染物排放标准》明确要求石化企业需全面开展 LDAR 工作，截至 2024 年，全国重点石化企业 LDAR 覆盖率已达 100%，平均泄漏率从 2019 年的 5.2% 降至 1.8%。

在涂装行业，密闭式喷涂房与负压收集系统的组合应用可将 VOCs 收集效率从传统开放式喷涂的 40% 提升至 90% 以上。某汽车制造企业通过改造喷涂车间，采用“密闭喷房 + 侧吸式收集”技术，配合风速自动控制系统，VOCs 收集效率提升至 92%，后续末端治理设施的处理负荷降低 35%，运行成本下降 28%。

过程控制技术的关键在于“精准管控”，需结合企业生产工艺特点设计个性化方案，避免“一刀切”式改造。例如，医药化工行业的间歇式反应过程需重点控制进料、出料环节的逸散，而连续生产的石化装置则需聚焦设备泄漏的常态化监测。

### 3.3 末端治理技术：高效去除已排放的 VOCs

末端治理技术是 VOCs 排放达标的最后保障，根据 VOCs 组分、浓度、风量等参数，可分为销毁型与回收型两大类，具体技术选择需遵循“经济适配、效率稳定”的原则。

#### 3.3.1 销毁型末端治理技术

销毁型技术通过氧化、分解等方式将 VOCs 转化为 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O，适用于浓度低、组分复杂、无回收价值的 VOCs 废气，主要包括催化燃烧（CO）、蓄热式焚烧（RTO）、低温等离子体、光催化氧化等。

- 催化燃烧（CO）：适用于浓度较高（> 2000mg/m<sup>3</sup>）、风量较小（< 5000m<sup>3</sup>/h）的 VOCs 废气，反应温度较低（250-400℃），无二次污染。某涂装企业采用“活性炭吸附 + 催化燃烧”联用技术，处理喷涂废气，VOCs 去除率达 98%，且活性炭可循环使用，年减少危废产生量 30 吨。<sup>[4]</sup>

- 蓄热式焚烧（RTO）：适用于风量较大（> 10000m<sup>3</sup>/h）、浓度中等（500-3000mg/m<sup>3</sup>）的 VOCs 废气，处理效率可达 95% 以上，且热回收效率超过 90%，运行成本较低。某石化企业采用两室 RTO 处理化工装置废气，VOCs 入口浓度为 800-1200mg/m<sup>3</sup>，出口浓度稳定低于 30mg/m<sup>3</sup>，满足国家标准要求，且余热可用于厂区供暖，年节约能耗成本 120 万元。<sup>[4]</sup>

#### 3.3.2 回收型末端治理技术

回收型技术通过吸附、吸收、冷凝等方式将 VOCs 分离回收，适用于浓度高（> 5000mg/m<sup>3</sup>）、组分单一、有回收价值的 VOCs 废气，如石油化工行业的苯、甲苯，印刷行业的乙酸乙酯等。

某包装印刷企业采用“活性炭吸附-蒸汽脱附-冷凝回收”技术处理印刷废气，VOCs 入口浓度为 6000-8000mg/m<sup>3</sup>，

回收的乙酸乙酯纯度达99.5%，可重新用于生产，年回收溶剂150吨，创造经济价值80万元，同时VOCs排放浓度降至50mg/m<sup>3</sup>以下。

### 3.3.3 末端治理技术的选择与局限性

不同末端治理技术的适用场景存在显著差异，盲目选

择易导致“治理无效”或“成本过高”。例如，低温等离子体技术对低浓度、易降解的VOCs（如烷烃）处理效率较高，但对高浓度、难降解的芳香烃处理效率不足60%；光催化氧化技术受催化剂寿命影响，需定期更换，长期运行成本较高。

表1 常见VOCs末端治理技术的适用场景与技术参数对比

治理技术	适用VOCs浓度 (mg/m <sup>3</sup> )	适用风量 (m <sup>3</sup> /h)	处理效率 (%)	运行成本 (元/m <sup>3</sup> )	核心优势	主要局限
蓄热式焚烧(RTO)	500-3000	>10000	95-99	0.8-1.5	效率高、热回收好	投资高、不适用于低浓度
催化燃烧(CO)	2000-10000	<5000	95-98	1.2-2.0	温度低、无二次污染	催化剂易中毒
活性炭吸附回收	>5000	<8000	90-95	0.6-1.2	可回收资源、经济性好	吸附剂需再生
低温等离子体	<1000	5000-20000	60-80	0.3-0.8	投资低、占地小	效率不稳定、易产生NOx

## 4 大气中挥发性有机物治理的协同优化策略

当前VOCs治理已从“单一技术应用”向“全链条协同管控”转型，需结合技术创新、政策保障、监管强化，构建“源头-过程-末端-管理”一体化的治理体系，破解实践中的痛点问题。

### 4.1 技术融合：突破单一技术瓶颈

单一治理技术难以应对复杂的VOCs排放场景，技术融合是提升治理效率的关键方向。例如，“吸附浓缩+催化燃烧”联用技术，通过吸附单元将低浓度VOCs浓缩为高浓度废气，再进入催化燃烧单元处理，既解决了低浓度废气治理效率低的问题，又降低了催化燃烧的运行成本。某电子元件企业采用该联用技术，处理VOCs浓度为200-500mg/m<sup>3</sup>的焊接废气，处理效率从单一催化燃烧的75%提升至96%，运行成本下降40%。

### 4.2 政策保障：完善激励与约束机制

政策是推动VOCs治理的重要驱动力，需从“强制管控”向“激励引导”转变。一方面，应强化排放标准的刚性约束，针对不同行业制定差异化的排放限值，推动企业开展深度治理；另一方面，需加大政策支持力度，例如对采用低VOCs原辅材料的企业给予税收减免，对高效治理设施的投资给予补贴，降低企业治理成本。

江苏省出台的《挥发性有机物治理以奖代补政策》规定，对使用水性涂料且VOCs排放浓度低于50mg/m<sup>3</sup>的涂装企业，按治理设施投资的20%给予补贴，单家企业最高补贴500万元。该政策实施后，全省涂装行业低VOCs涂料使用率从38%提升至65%，VOCs排放总量下降32%，政策引导效果显著。

### 4.3 区域协同：破解跨区域传输问题

VOCs的流动性决定了治理需打破行政区域限制，建立区域联防联控机制。例如，京津冀及周边地区建立了VOCs治理协同工作组，统一制定治理技术指南，开展跨区域联合执法，共享监测数据，实现“统一标准、统一监测、统一执法”。2023年，该区域臭氧浓度同比下降6.8%，PM2.5中

VOCs衍生组分占比下降8.2%，区域协同治理成效凸显。

此外，需推动区域内产业结构优化，将高VOCs排放企业向环境承载能力强的区域转移，同时加强区域间的技术交流与资源共享，避免“低端产能转移”导致的污染转嫁问题。

## 5 结语

大气中挥发性有机物的治理是一项长期且复杂的系统工程，需跳出“重末端、轻源头”“重投资、轻运维”的传统思维，从全链条视角构建“源头减量-过程控制-末端治理-政策保障”的协同治理体系。当前，我国VOCs治理技术已从“引进吸收”向“自主创新”转型，低VOCs原辅材料替代、高效联用治理技术、智慧监测系统等不断涌现，但仍面临技术适配性不足、区域协同性差、中小企业治理能力薄弱等问题。

未来，VOCs治理需聚焦三大方向：一是加强技术创新，研发适应复杂组分的高效治理技术，降低治理成本；二是完善政策体系，建立“谁减排、谁受益”的激励机制，推动企业主动治理；三是强化区域协同，构建跨区域联防联控网络，破解传输污染问题。只有将技术创新、政策引导与监管强化有机结合，才能实现VOCs排放总量持续下降，为我国空气质量持续改善与“双碳”目标的实现提供坚实保障。

随着“十四五”大气污染防治规划的深入推进，VOCs治理将进入“精准化、差异化、协同化”的新阶段，需政府、企业、科研机构协力，推动治理从“达标排放”向“深度减排”转型，最终实现经济效益、环境效益与社会效益的统一。

## 参考文献

- [1] 游昌盛.大气中挥发性有机物监测与治理研究[J].皮革制作与环保科技,2024,5(16):84-86.
- [2] 金旭来,江华亮,吴振华.环境空气中VOCs污染的机理分析[J].皮革制作与环保科技,2024,5(17):147-149.
- [3] 何仁可,吴柳彦,张玲玲,等.大气环境中易挥发性有机物(VOCs)排放源清单研究[J].山东化工,2024,53(08):260-262.
- [4] 敖华玲.大气中挥发性有机物监测与治理分析[J].皮革制作与环保科技,2023,4(24):68-70.