

# 工业源 VOCs 排放清单研究综述

胡晓

福建师范大学环境与资源学院, 福建 福州 350117

DOI: 10.61369/VDE.2025280042

**摘要 :** 当前, 我国大气污染防治已进入深度治理的关键阶段。挥发性有机物 (VOCs) 作为臭氧 (O<sub>3</sub>) 和二次有机气溶胶 (SOA) 生成的关键前体物, 其精细化管控已成为“十五五”期间大气污染防治的核心任务。针对当前重污染天气应急管控在响应时效、措施量化及物种动态表征等方面存在的技术瓶颈, 亟需开展工业源全过程 VOCs 排放及物种研究, 以支撑 NO<sub>x</sub> 和 VOCs 的协同减排与 O<sub>3</sub> 污染的有效控制。

**关键词 :** VOCs; 工业源; 排放清单; 源成分谱

## A Review of Research on Industrial Source VOCs Emission Inventories

Hu Xiao

College of Environment and Resources, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350117

**Abstract :** Currently, China's air pollution prevention and control has entered a critical stage of deep treatment. As key precursors of ozone (O<sub>3</sub>) and secondary organic aerosol (SOA), the refined control of volatile organic compounds (VOCs) has become a core task during the 15th Five-Year Plan period. In response to the technical bottlenecks in existing emergency control measures for heavy pollution weather, particularly regarding response timeliness, measure quantification, and dynamic characterization of species, it is urgent to conduct research on the whole-process VOCs emissions from industrial sources and species response measures. This research is essential to support the coordinated emission reduction of NO<sub>x</sub> and VOCs and to achieve effective control of O<sub>3</sub> pollution.

**Keywords :** VOCs; industrial sources; emission inventory; source composition spectrum

## 引言

当前, 我国大气污染防治已进入以细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 与臭氧 (O<sub>3</sub>) 协同控制为核心的深度治理阶段, 国家在“十五五”期间明确将“以 PM<sub>2.5</sub> 浓度持续下降为主线, 大力推动氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 和挥发性有机物 (VOCs) 减排, 协同控制 O<sub>3</sub> 污染”确立为核心战略。VOC 是常温常压下沸点为 50°C - 260°C 的空气污染物, 是 O<sub>3</sub> 和二次有机气溶胶 (SOA) 共同的关键前体物<sup>[1]</sup>, 我国 O<sub>3</sub> 污染的高值区主要集中在华北平原、长三角、珠三角以及成渝地区。基于排放清单与源解析的研究指出, 工业过程与溶剂使用源对成渝地区 VOCs 总量的贡献率超过 50%, 是区域臭氧生成潜势 (OFP) 的最大贡献者<sup>[2]</sup>。

近年来, 伴随经济的快速增长与工业化进程的推进, 人为源 VOCs 的绝对排放量经历了显著的演变。宏观尺度的评估显示, 中国 VOCs 的总排放量呈现出长期持续增长的趋势, 其总量从 20 世纪 90 年代初的不足 1000 万吨, 迅速攀升至近年来的近 3000 万吨, 其中工业部门与溶剂使用的持续扩张是驱动这一增长的核心动力。不仅如此, 部分特征 VOCs 物种自身兼具致癌、致畸等直接生物毒性, 其复杂的混合暴露模式与多种不可逆的健康风险密切相关<sup>[3]</sup>。面对如此严峻的大气复合污染防治形势, 传统的粗放式总量控制策略已无法满足现代环境管理的诉求, 精准治污、科学治污逐渐成为核心指导思想。生态环境部近年来发布的《重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南》, 正式确立了以环保绩效分级为基础的差异化管控制度。该制度依据企业的大气污染防治装备水平与末端治理技术, 将企业划分为不同等级, 并在重污染预警期间实施差异化的应急减排措施。这种顶层制度设计旨在彻底打破传统环境管理中“一刀切”的宏观管控模式, 强力推动环境管理体系向微观层面、精细化与科学化方向深度转型。

然而, 随着管控模式从宏观的区域限产向微观的具体涉 VOCs 工序调控转变, 现有的大气污染物排放清单技术体系在支撑高频次应急管控方面, 逐渐显现出显著的理论滞后性与技术方法学缺口。为了全面应对这一挑战, 必须深入剖析当前清单核算体系的内在局限, 并重构基于动态响应与精细化映射的科学评估框架。

# 区域VOCs控制与O<sub>3</sub>/PM<sub>2.5</sub>协同控制方法：从静态到动态

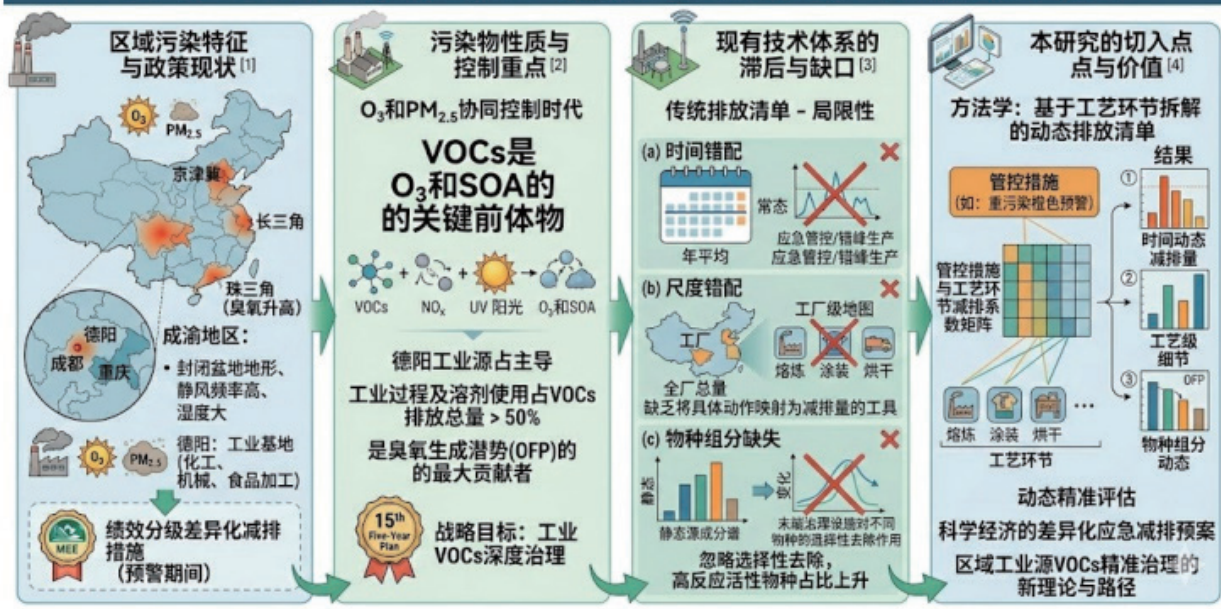


图1 工业源 VOCs 排放清单研究路径

## 一、工业 VOCs 排放清单研究方法进展

工业源 VOCs 排放清单作为识别污染来源与评估减排效果的核心工具，其构建方法学随着大气污染防治策略由“总量控制”向“精细化管控”的转型而不断演进。国际上，欧美等发达国家已建立起较为成熟的清单体系。美国环保署（EPA，2020）通过构建国家排放清单（NEI）并配套 SPECIATE 组分库，实现了排放清单与空气质量模型（如 CMAQ）的深度耦合，有效支撑了 O<sub>3</sub> 与 SOA 的生成潜势分析。国内方面，自2014年《大气挥发性有机物源排放清单编制技术指南》发布以来，相关研究显著提升了数据基础。Wei 等（2008）<sup>[4]</sup>率先建立了中国早期人为源 VOCs 排放清单，揭示了工业过程排放的长期增长趋势；随后，Zheng 等（2009）<sup>[5]</sup>在珠江三角洲地区构建了高时空分辨率的区域排放清单框架，为区域尺度精细化管控奠定了方法学基础。近年来，Li 等（2017）<sup>[6]</sup>进一步完善了中国多尺度排放清单模型（MEIC），实现了从宏观估算向基于工艺过程和组分特征核算的转变。尽管当前主流的排放因子法在适用尺度与溯源性方面具有优势，且部分研究如 Sha 等（2021）<sup>[7]</sup>已开始聚焦于重点工业行业的 VOCs 源谱特征与 OFP，但总体而言，现有体系仍侧重于常规年份的静态核算，主要服务于中长期减排规划。

现有清单体系虽然能够准确表征常态下的排放强度分布与重点排放源，却难以定量评估特定管控措施下的动态减排效果及具体环节的响应特征。这种局限性主要体现在两个维度：首先是时间响应的滞后性，传统清单多基于年度平均活动水平编制，如 Wu 等（2016）<sup>[8]</sup>指出的，常规时间分配系数忽略了生产负荷波动与非连续性排放特征，无法捕捉重污染天气应急期间停产、限产等指令引发的排放量实时变化；其次是工艺表征的宏观性，核算方法常将企业视为整体排放单元，缺乏对动静密封点泄漏（LDAR

相关）、废水处理逸散等具体工艺节点的精细化刻画，导致管控措施的减排效益难以在微观层面得到量化。因此，本研究致力于构建具备动态响应能力的精细化清单核算框架，通过将工业源排放解构为关键工艺节点，并结合实时工况数据，填补现有研究在应急管控评估方面的空白。

## 二、工业 VOCs 物种特征及物种清单研究进展

源成分谱作为表征污染物化学组成特征的基础数据，决定了排放清单在 OFP 与 SOA 模拟中的准确性。由于 VOCs 物种繁多且化学反应活性差异显著，建立基于最大增量反应活性（MIR）的物种清单已成为提升大气氧化性控制效率的关键。国际上，美国环保署（EPA，2020）建立了标准化的 SPECIATE 数据库，确立了将排放总量按化学物种分配的方法体系，并持续更新以涵盖中间挥发性有机物（IVOCs）等关键前体物。国内研究则经历了从引用国外数据库向构建本土化实测谱库的转变。Mo 等（2016）<sup>[9]</sup>通过对中国典型工业行业的大规模现场实测，构建了涵盖石化、表面涂装及包装印刷等重点行业的本土化源谱，揭示了芳香烃和含氧挥发性有机物（OVOCs）在特定工艺中的主导地位；Sha 等（2021）<sup>[10]</sup>进一步在珠三角地区开展了高分辨率组分特征研究，识别出甲苯、间/对二甲苯等高反应活性物种为区域 O<sub>3</sub> 生成的关键贡献因子。上述研究表明，基于本土化实测数据的源谱构建已成为量化 VOCs 环境效应、制定分级控制策略的必要前提。

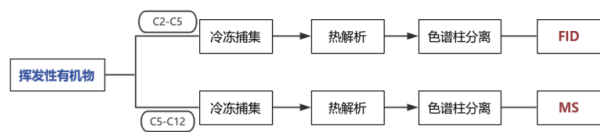


图2 苏码罐 VOCs GC/MS-FID 分析路径

尽管本土化源谱显著提升了清单的化学表征精度，但现有研究在源谱与管控措施的耦合机制方面仍存在不足。目前，主流清单编制方法通常假设同一行业或工艺在不同时期维持恒定的物种组成，忽略了末端治理技术对排放组分的重塑作用。Zou 等 (2019) 的研究指出<sup>[11]</sup>，蓄热式热氧化 (RTO)、活性炭吸附等治理设施对不同 VOCs 组分具有显著的去效率差异，导致经过处理后的排放尾气组分特征与原始产生环节存在本质区别。若在评估管控措施效果时沿用单一的原始源谱，将无法准确反映治理后高反应活性物种的残留情况，进而导致对 O<sub>3</sub> 削减潜力的误判。因此，现有研究亟需突破静态源谱的应用限制，建立基于治理技术路线的动态成分谱更新机制，以准确量化管控措施下 VOCs 组分及环境效应的实时演变特征。

### 三、工业 VOCs 管控策略研究进展

随着大气污染防治进入攻坚期，中国工业源 VOCs 管控策略正经历从粗放式总量控制向精细化差异化减排的深刻转型。生态环境部发布的重污染天气重点行业应急减排措施制定技术指南确立了绩效分级制度，改变了以往统一关停的应急模式，要求依据企业治污水平实施分级差异化管控，并推进针对具体生产线与产排污环节的精细化措施。Pusede 等 (2015)<sup>[12]</sup> 指出，美国依托清洁空气法和国家环境空气质量标准，侧重于通过能源结构调整与更严格的机动车排放标准来长期控制 O<sub>3</sub> 前体物，极少采用临时性工业停产措施；欧盟则通过工业排放指令强化最佳可行技术的应用。这种差异表明，西方国家缺乏应对高强度污染过程的应急机制，而中国虽然建立了管控的政策框架，但其科学性仍受限于管理精细化要求与技

术粗放化现状之间的矛盾，即虽然政策要求落实到具体环节，但缺乏能够支撑环节级减排量精准核算的方法学体系。

当前针对管控效果的评估主要沿用传统的情景分析法或基于年度清单的折算方法，这在应对应急响应时存在显著的时空尺度差异。Li 等 (2019)<sup>[13]</sup> 指出，传统情景分析通常基于年度平均活动水平和气象条件设定减排比例，忽略了工业生产非连续性的动态特征以及重污染天气下的极端气象影响。更为关键的挑战在于管控措施与核算单元的不匹配：应急管控通常作用于具体的微观工艺环节，如停止某一涉 VOCs 工序或加大特定 RTO 风量，而现有的排放核算体系多以整个工厂甚至区域为基本单元。此外，由于 O<sub>3</sub> 生成的非线性特征，简单的总量削减若不考虑物种活性差异，甚至可能因 VOCs 与 NOx 比例失调导致 O<sub>3</sub> 浓度反弹 (Tan et al., 2018)<sup>[14]</sup>。因此，构建一套能够将管控措施映射到具体工艺环节、并实时量化其对排放总量及物种组分影响的动态核算体系，是突破当前减排量化困境的迫切需求。

### 四、结论与展望

展望未来，随着物联网传感器、质子转移反应飞行时间质谱等高频率精细化监测装备的规模化部署，以及卫星遥感数据的多源异构融合，排放清单的编制范式将从事后静态核算向全天候实时数字孪生方向演进。将具备高时空分辨率的动态清单与三维大气化学传输模型及人工智能同化算法深度耦合，系统解析复杂气象与地形约束下大气氧化性的时空演变规律，将为我国在统筹经济高质量发展与环境约束的前提下，最终实现 PM<sub>2.5</sub> 与 O<sub>3</sub> 协同控制、减污降碳与绿色发展的深度融合提供坚实的底层技术支撑。

### 参考文献

- [1] Wang P, Qiao X, Zhang H. Modeling PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> with aerosol feedbacks using WRF/Chem over the Sichuan Basin, southwestern China[J]. *Chemosphere*, 2020, 254: 126735.
- [2] Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, et al. MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP[J]. *Atmospheric Chemistry*, 2017, 17(2): 935-963.
- [3] Ren T, Zhou E, Cheng T, et al. Association between volatile organic compound co-exposure and the prevalence of rheumatoid arthritis: a nationwide cross-sectional study[J]. *Frontiers in Public Health*, 2025, 13: 1694503.
- [4] Wei W, Wang S, Chatani S, et al. Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(20): 4976-4988.
- [5] Zheng J, Shao M, Che W, et al. Speciated VOC emission inventory and spatial patterns of ozone formation potential in the Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Science*, 2009, 43(22): 8580-8586.
- [6] Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, et al. MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP[J]. *Atmospheric Chemistry*, 2017, 17(2): 935-963.
- [7] Sha Q E, Zhu M, Huang H, et al. A newly integrated dataset of volatile organic compounds (VOCs) source profiles and implications for the future development of VOCs profiles in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 793(2): 148348.
- [8] Wu R, Bo Y, Li J, et al. Method to establish the emission inventory of anthropogenic volatile organic compounds in China and its application in the period 2008 - 2012[J]. *Atmospheric environment*, 2016, 127: 244-254.
- [9] Mo Z, Shao M, Lu S, et al. Process-specific emission characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from petrochemical facilities in the Yangtze River Delta, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 533(NOV.15): 422-431.
- [10] Sha Q E, Zhu M, Huang H, et al. A newly integrated dataset of volatile organic compounds (VOCs) source profiles and implications for the future development of VOCs profiles in China[J]. *Science of The Total Environment*, 2021, 793: 148348.
- [11] 邹文君, 修光利, 鲍仙华, et al. 汽车零部件涂装过程 VOCs 排放特征与案例分析 [J]. *环境科学研究*, 2019, 32(8): 1358-1364.
- [12] Pusede S, Gentner D, Wooldridge P, et al. On the temperature dependence of organic reactivity, nitrogen oxides, ozone production, and the impact of emission controls in San Joaquin Valley, California[J]. *Atmospheric Chemistry*, 2014, 14(7): 3373-3395.
- [13] Li M, Zhang Q, Zheng B, et al. Persistent growth of anthropogenic non-methane volatile organic compound (NMVOC) emissions in China during 1990-2017: Drivers, speciation and ozone formation potential[J]. *Atmospheric Chemistry*, 2019, 19(13): 8897-8913.
- [14] Tan Z, Lu K, Dong H, et al. Explicit diagnosis of the local ozone production rate and the ozone-NOx-VOC sensitivities[J]. *科学通报: 英文版*, 2018, 63(16): 1067-1076.