

VOCs排放控制与综合利用的战略探索助力碳中和的新未来

巫丽霞¹, 储卫玲¹, 朱玉², 郭小忠², 张千峰^{1*}

¹安徽工业大学分子工程与应用化学研究中心, 安徽 马鞍山

²浙江圣效环保科技有限公司, 浙江 衢州

收稿日期: 2024年12月12日; 录用日期: 2025年1月13日; 发布日期: 2025年1月22日

摘要

随着全球气候变化的日益严峻, 碳中和已成为各国可持续发展的重要目标。挥发性有机化合物(VOCs)作为主要的污染物之一, 不仅对空气质量造成严重污染, 还对人类健康构成威胁, 同时也是温室气体排放的重要来源。VOCs排放控制与综合利用不仅是应对环境挑战的必然选择, 更是企业实现碳中和的重要路径, 其在实现碳中和的过程中扮演着关键角色也已然成为实现碳中和目标的重要战略。本文旨在探讨在碳中和的背景下, 控制VOCs排放及其综合利用的意义与实践作用。通过系统性探索与创新实践, 未来可望构建起低碳、环保的新型社会, 为可持续发展奠定基础。

关键词

VOCs, 碳中和, 排放控制, 综合利用, 战略探索

Strategic Exploration of VOCs Emission Control and Comprehensive Utilisation Fuels a New Carbon Neutral Future

Lixia Wu¹, Weiling Chu¹, Yu Zhu², Xiaozhong Guo², Qianfeng Zhang^{1*}

¹Institute of Molecular Engineering and Applied Chemistry, Anhui University of Technology, Ma'anshan Anhui

²Zhejiang Shengxiao Environmental Protection Technology Co., Quzhou Zhejiang

Received: Dec. 12th, 2024; accepted: Jan. 13th, 2025; published: Jan. 22nd, 2025

Abstract

With the increasing severity of global climate change, carbon neutrality has become an important

*通讯作者。

文章引用: 巫丽霞, 储卫玲, 朱玉, 郭小忠, 张千峰. VOCs 排放控制与综合利用的战略探索助力碳中和的新未来[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(1): 113-123. DOI: 10.12677/aep.2025.151015

goal for sustainable development in various countries. Volatile organic compounds (VOCs), as one of the major pollutants, not only cause serious pollution to air quality, but also pose a threat to human health, and are an important source of greenhouse gas emissions. VOCs emission control and comprehensive utilisation is not only an inevitable choice to meet the environmental challenges, but also an important path for enterprises to achieve carbon neutrality, and the key role it plays in achieving carbon neutrality has also become an important strategy to achieve the goal of carbon neutrality. This paper aims to explore the significance and practical role of controlling VOCs emissions and their comprehensive utilisation in the context of carbon neutrality. Through systematic exploration and innovative practice, it is expected that a new low-carbon and environmentally friendly society will be built in the future, laying the foundation for sustainable development.

Keywords

VOCs, Carbon Neutrality, Emission Control, Comprehensive Utilization, Strategy Exploration

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

如今人类面临一个全球性的问题——气候变暖，随着 CO₂ 排放量的增加，温室气体猛增，对人类乃至全球生命系统形成威胁。在此背景下全球以协约的方式对温室气体进行减排，我国由此提出碳达峰碳中和的目标。

碳中和，指通过减少温室气体排放和增加碳吸收[1]，使得人类活动所产生的二氧化碳(CO₂)等温室气体的排放量与通过各种形式(如植树造林、碳捕捉与封存技术等)吸收的量相抵消，达到净零排放的状态。我国致力于在 2060 年前实现碳中和。这一目标旨在通过减少温室气体排放和增加碳吸收，使得碳排放和碳吸收达到平衡。

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)，是一个群体，包含大量个体挥发性物种[2]。我国对挥发性有机物(VOCs)的定义主要指参与大气光化学反应的有机化合物，定义为常温下饱和蒸汽压 >70 Pa，常压下沸点在 260℃ 以下的有机化合物，或在 20℃ 条件下蒸汽压力 ≥10 Pa，具有挥发性的全部有机化合物[3]。

虽然 VOCs 本身不是温室气体(如二氧化碳、甲烷等)，但它们在大气中可以参与化学反应，生成臭氧等二次污染物[4] [5]，从而间接影响温室气体的浓度。臭氧是一种强效的温室气体，能够加剧全球变暖。并且 VOCs 对人体的危害包括眼睛、鼻子和喉咙刺激；头痛、失去协调性和恶心；对肝脏、肾脏和中枢神经系统的损害；有些有机物甚至会导致人类癌症。

在国际上，许多国家已经开展了 VOCs 的监测与治理研究，大量文献表明，VOCs 不仅直接影响空气质量，还能通过化学反应生成臭氧等二次污染物[6]，从而间接加剧全球变暖。又如各国迫切地需要对 VOC 进行检测和监控。研究人员一直致力于使用不同的方法检测各种应用的 VOCs，但绝大多数倾向于关注特定类别的纳米材料或者特定的传感技术[7] [8]，或者两者相结合的[9]。只有少数人强调他们的应用程序[10]。却未能对 VOC 来源、其结果及其传感在各个领域的应用提供完整的视角[11]。加上欧美地区虽然已实施严格的 VOCs 排放标准，并推广先进的废气处理技术却仍然存在一些问题，如技术成本高、公众认知不足以及政策执行力度不够等。

在国内，虽然近年对 VOCs 的研究逐渐加强，但整体水平仍较为滞后，技术研发和应用尚未达到有效控制排放的要求。部分地方政府对 VOCs 的管理措施不够完善、标准缺乏统一性。此外，科学家们对于 VOCs 的长期健康影响和生态系统的潜在风险仍未有充分认识。然而，目前的研究和实践仍面临挑战，例如[12][13]：源头替代不足；生产过程控制不严，无组织排放问题较突出；治理设施缺乏有效维护，末端治理稳定性不佳；法律法规与标准体系不完善；执法监管能力建设不足；企业全过程精细化管控问题突出。

因此，VOCs 排放控制与综合利用不仅是实现碳中和目标的重要组成部分，也是提升环境质量、保护公共健康的关键环节。通过推进对 VOCs 的排放控制和加大创新技术的研发与应用，能够显著减小其对环境的污染，同时为实现碳中和目标贡献力量。碳中和目标的实现需要社会各界的共同努力，全面推进绿色发展和生态文明建设，以应对气候变化带来的挑战，创造更加美好的未来。

本文章将围绕 VOCs 排放与综合利用对实现碳中和目标的相关性进行深入探讨，分析其重要意义、实践案例、实施路径及未来战略。

2. VOCs 排放控制与综合利用的意义

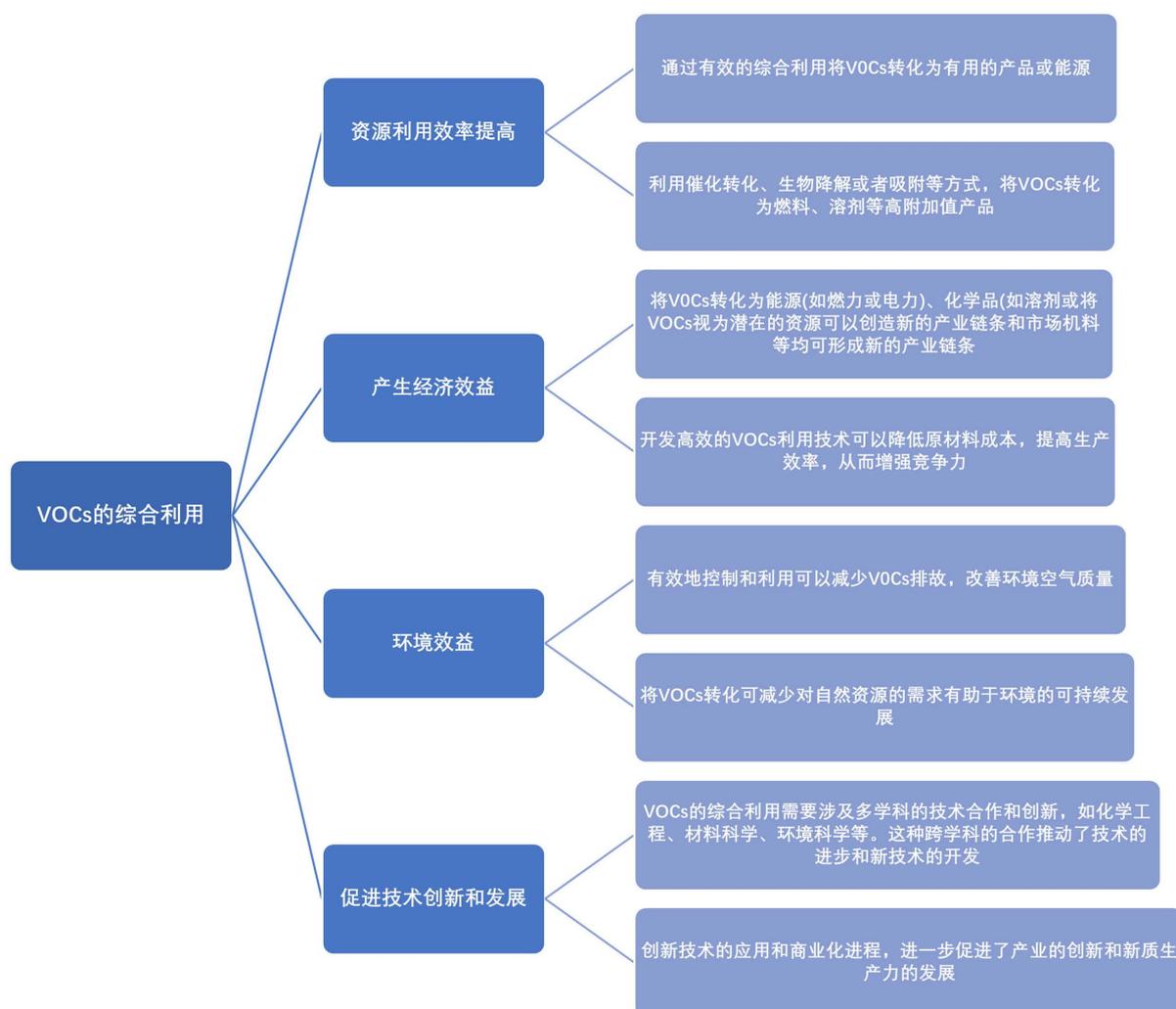


Figure 1. Effects of VOCs emission control and comprehensive treatment on new quality productivity

图 1. VOCs 排放控制和综合处理对新质生产力的影响

VOCs 的综合利用是通过多种技术手段,对 VOCs 进行回收、转化和再利用,既可以减少其对环境的污染,又可以充分利用其潜在的经济价值。VOCs 排放与综合利用的意义主要体现在环境保护、经济发展以及社会可持续性等多个方面。VOCs 是导致大气污染的直接因素也是温室气体形成的间接因素。其在光化学反应中因为产生臭氧和细颗粒物 $PM_{2.5}$ 而直接影响空气质量;作为臭氧的前体物则是间接成为温室气体导致气候变暖并且 VOCs 的部分衍生物同样具有温室气体效应。VOCs 的治理和综合利用于碳中和相关的意义是:

- 1) 保护环境。有效改善空气质量减缓温室效应且有助于维护生态平衡,促进生物多样性的保护。
- 2) 催生新技术和行业。如环保技术、清洁生产和循环经济等,推动绿色经济的发展;实施 VOCs 治理措施,从长远来看,可以通过提高资源利用效率、减少原材料浪费降低整体运营成本;企业通过积极参与 VOCs 治理和资源利用可以提升其社会形象,增强市场竞争力。
- 3) 促进社会可持续发展。降低因空气污染引发的健康问题。提高居民的生活质量,企业和政府能够展示其对社会和环境的责任,增强公众对可持续发展的信任和支持。

在碳中和背景下,VOCs 的排放控制和综合利用的意义可以总结为对新质生产力的促进作用,新质生产力是指在经济发展中,以资源效率、环境友好性和创新能力为核心的生产方式和生产力水平。它强调在满足社会需求的同时,最大程度地减少对自然生态的负面影响,实现经济与环境的协调发展。VOCs 的排放控制和综合利用对新质生产力的促进作用如图 1 所示。

3. 碳中和背景下, VOCs 的战略探索与实践路径

3.1. VOCs 综合治理的战略探索

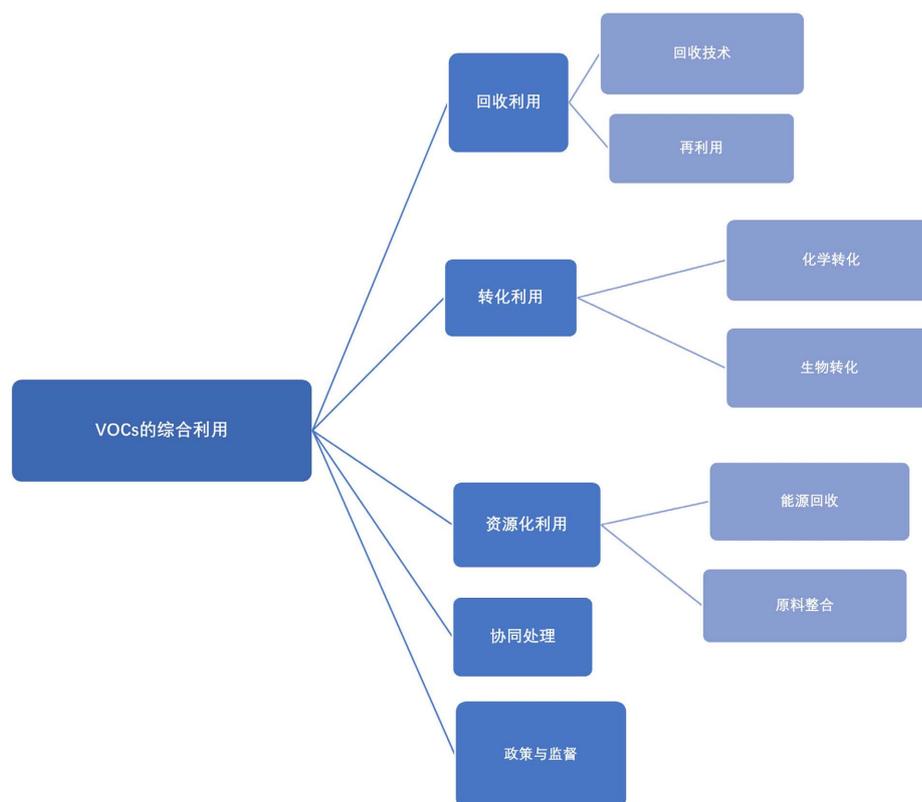


Figure 2. Comprehensive utilization of VOCs
图 2. VOCs 的综合利用

在碳中和背景下，要对 VOCs 进行排放控制和综合利用可以通过回收利用、转化利用、资源化利用、协同处理再加上政策与监督一体化来实现，如下图 2 所示。

VOCs 的回收利用主要是利用 VOCs 回收技术对 VOCs 进行回收：包括冷凝法、吸附、吸收、膜分离回收法等[14]。回收技术如表 1 所示。

Table 1. VOCs recovery technology
表 1. VOCs 回收技术

回收技术	原理	影响因素	适用的场合	优势	劣势
冷凝法	不同物质在不同温度时的不同饱和蒸汽压的性质[15]	温度和压力 VOCs 的性质 设备的设计	沸点较高、浓度较高和流量小的 VOCs 处理[16]	能够有效回收高浓度的 VOCs，易于操作和维护	能耗较高，尤其是低温操作时，不适用于低浓度 VOCs 的处理
吸附法	利用固体吸附剂通过物理或化学作用吸附气体中的 VOCs，再通过解吸过程将其释放	吸附剂的性质、选择、操作温度和压力 气体流速与浓度	处理大风量、低浓度且具有一定回收价值的 VOCs	工艺成熟、操作简单、能耗低、净化效率高等	吸附剂需要定期更换或再生，增加了运营成本，解吸过程可能消耗能量并导致二次污染
吸收法	通过液体溶剂将气体中的 VOCs 溶解或化学反应，从而实现分离和回收	溶剂的选择 温度与压力条件 接触时间和气液比	高浓度 VOCs 的气体流，易溶于液体的 VOCs	可同时去除多种气体污染物，吸收液可重复使用，提高经济效益	溶剂可能对环境有害，需要妥善处理，存在二次污染风险，需考虑溶剂的再生和处理
膜分离回收法	利用半透膜将气体中的 VOCs 与其他组分分开，通过选择性透过率实现分离	膜材料的性质 温度和压力条件 气体流速和浓度	低浓度 VOCs 的回收，需要高选择性的分离过程	能耗较低，且操作简便 分离效果稳定，且膜可重复使用	膜材料成本较高，可能限制应用，对某些特定 VOCs 的分离效率可能不足

VOCs 的转化利用分为化学转化和生物转化，主要包括如图 3、表 2 所示的技术：

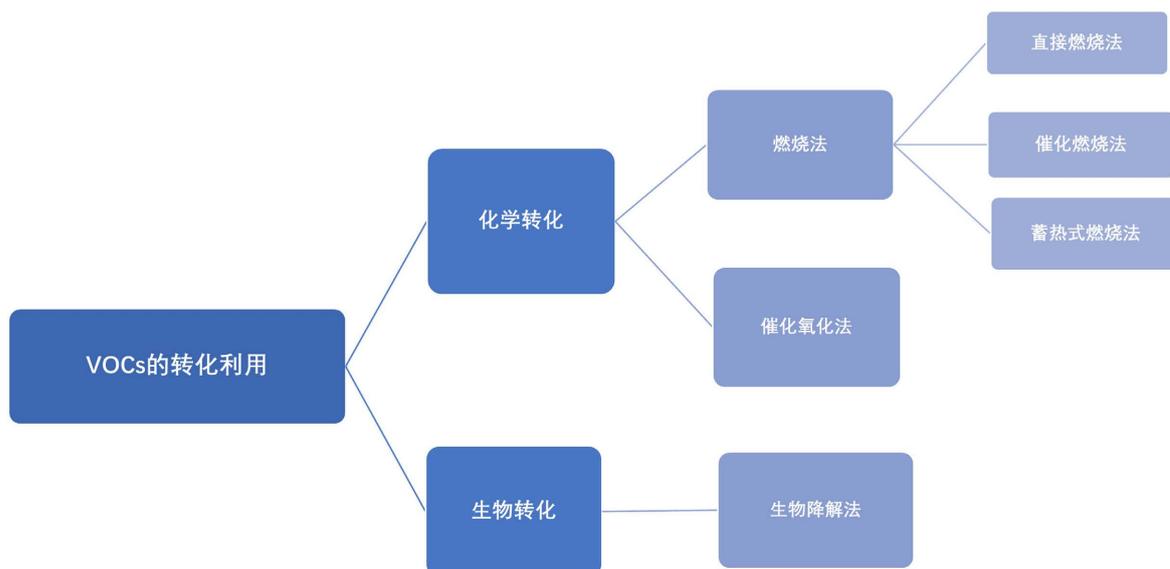


Figure 3. Conversion and utilization of VOCs
图 3. VOCs 的转化利用

Table 2. Conversion technology of VOCs
表 2. VOCs 的转化技术

转化技术	原理	影响因素	适用场合	优势	劣势
直接燃烧法	在高温下与氧气发生反应, 生成 CO ₂ 和 H ₂ O	温度、氧气浓度、VOCs 浓度、燃烧设备设计	高浓度有机废气处理、焚烧厂等	处理效率高, 适用于高浓度 VOCs, 能量回收可行	能耗大, 有二次污染(如 NO _x 、CO), 对设备材料要求高
催化燃烧法	借助催化剂在较低温度下促进 VOCs 氧化反应, 转化为无害物质	催化剂类型、温度、湿度、VOCs 种类和浓度	工业废气治理、汽车尾气净化等	能耗相对较低, 催化剂可以重复使用, 减少二次污染	催化剂易中毒, 需定期更换; 对某些 VOCs 的处理效果有限
蓄热式燃烧法	利用热蓄积装置存储燃烧产生的热量, 在需要时释放, 以提高热效率 ^[17]	热交换效率、蓄热材料性能、操作温度、VOCs 流量	有规律的排放工艺, 气体流量变化不大的工业环节	提高了能源利用率, 降低了运营成本	设备投资成本高, 反应启动时间长, 可能会有滞后性
催化氧化法	使用催化剂在相对低温下将 VOCs 氧化为无害的物质, 并进行去除	催化剂选择、温度、VOCs 浓度、反应时间	VOCs 浓度较低的情况下, 如涂料、印刷行业等	运行温度低, 能耗小, 对环境友好	对高浓度 VOCs 的处理能力有限, 催化剂使用寿命受限
生物降解法	利用微生物代谢活动, 将 VOCs 降解为简单的无害物质	微生物种类、环境条件(温度、pH、湿度)、VOCs 种类	适合处理恶臭气体中的 VOCs	无二次污染, 能耗低, 不需要大量化学药品	处理效率慢, 需长期运行; 对特定 VOCs 的适应性较差

相比于回收技术, 转化技术中多数技术将 VOCs 通过某种方式降解为 CO₂ 和水。所以使用转化方式 CO₂ 的排放量也会增加, 这与 CO₂ 排放峰值和碳中和的目标背道而驰, 相比之下回收技术是更可持续发展符合碳中和目标的 VOCs 治理措施且更经济有效, 故应减少销毁技术的使用转化方式后的气体集中降碳处理后再排空。

VOCs 的回收和转化统称为 VOCs 的资源化利用, 它是指通过物理、化学或生物等手段将 VOCs 转变为可再资源的资源或能源的过程。回收强调保留原有化学结构并将其再利用, 而转化则是通过化学反应创造新产品。二者结合能够有效降低 VOCs 对环境的影响, 并实现资源的循环利用。

协同处理是将 VOCs(挥发性有机化合物)的治理与其他污染物或废弃物的处理相结合, 通过共同处理实现更高的效率和经济效益。这种方法不仅可以降低处理成本, 还能提高资源回收率, 最终实现环境保护和资源再利用的双重目标。

当然在 VOCs 的综合治理中政策支持和监管机制起着至关重要的作用。它们不仅为企业提供了法律框架和激励措施, 还确保了环境保护和碳中和目标的实现。政策支持和监管机制是推动 VOCs 综合利用的基础。通过制定有效的政策法规、提供财务激励、强化监管、推广技术和鼓励公众参与, 可以有效地促进企业在 VOCs 治理方面的努力, 从而实现可持续发展的目标。我国一些政策如下表 3 所示。随着相关政策的不断完善与实施, VOCs 的综合利用将会更加顺利, 为改善环境质量和保护生态系统作出积极贡献。

当然除表 3 以外国家对 VOCs 的治理政策还有很多行业标准, 为我国实现对 VOCs 的治理保驾护航。

Table 3. Summary of my country's policies on VOCs control
表 3. 我国在 VOCs 治理方面的政策汇总

名称	内容	发布机构	颁发时间
《关于推进大气污染防治联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》	国家层面首次提出“开展挥发性有机物污染防治”较早的政策要求。	国务院办公厅	2010年5月
《重点区域大气污染防治“十二五”规划》	目的在于2015年全面开展VOCs污染防治的工作，建立区域大气污染防治联防联控机制，并显著提高区域大气环境管理能力。	环境保护部 国家发展和改革委员会 财政部	2012年9月
《挥发性有机物(VOCs)污染防治技术政策》	是我国第一个专门针对VOCs治理发布的政策。此政策提出了VOCs治理的总则和源头及过程的控制。	中华人民共和国生态环境部	2013年5月
《大气污染防治行动计划》	旨在推进VOCs污染治理。在典型行业实施综合整治。	国务院	2013年9月
《石化行业挥发性有机物综合整治方案》	面向以原油的生产性企业进行VOCs污染源进行排查；严格建设项目的环境准入；健全VOCs监督管理体系；对VOCs进行全过程污染控制；构建VOCs管理体系。	环境保护部	2014年12月
《“十三五”挥发性有机物污染防治工作方案》	改善环境空气质量为核心，以重点地区为主要着力点，以重点行业和重点污染物为主要控制对象，推进VOCs与NO _x 协同减排。	环境保护部 国家发展和改革委员会 财政部 交通运输部 国家质量监督检验检疫总局 国家能源局	2017年9月
《重点行业挥发性有机物综合治理方案》	此方案明确表示，VOCs已经成为我国大气管理中的薄弱环节。以石化，化工，工业涂装，包装印刷，油品储运等为对象，重点改造；对我国VOCs治理存在的问题进行分析总结，目标于2020年，完成“十三五”规划的VOCs排放量下降10%的目标任务。	生态环境部	2019年6月
《减污降碳协同增效实施方案》	指出要推进大气污染防治协同控制，优化治理技术路线，加大氮氧化物、挥发性有机物(VOCs)以及温室气体协同减排力度。	生态环境部、发展改革委、工业和信息化部、住房城乡建设部、交通运输部、农业农村部、能源局	2022年6月
《空气质量持续改善行动计划》	改善空气质量以降低细颗粒物(PM _{2.5})浓度为主线，大力推动氮氧化物和挥发性有机物(VOCs)减排。目标到2025年，氮氧化物和VOCs排放总量比2020年分别下降10%以上。	国务院	2023年11月
《关于进一步优化重污染天气应对机制的指导意见》	指出加强对挥发性有机物(VOCs)和氮氧化物(NO _x)排放源的日常监管。	生态环境部	2024年1月

3.2. VOCs 排放控制和综合利用的实践路径

在碳中和背景下，VOCs 的排放和综合利用的实践路径可以通过下图 4 方式进行。

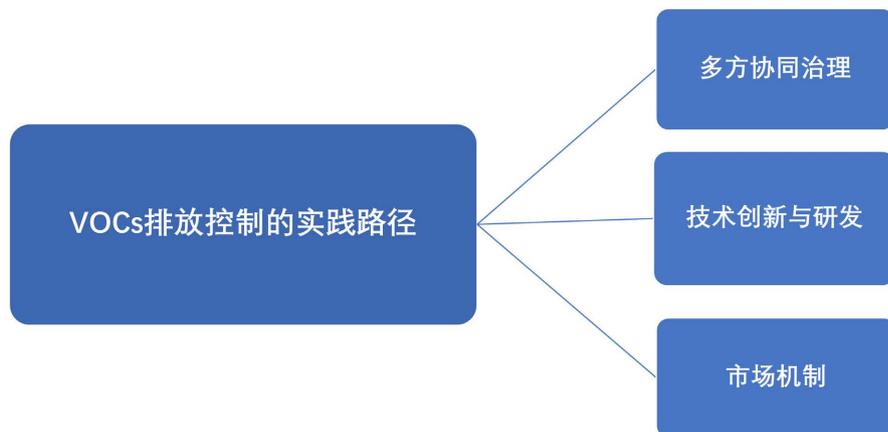


Figure 4. Practices and strategies for VOCs emissions and comprehensive utilization
图 4. VOCs 的排放和综合利用的实践和策略

多方的协同治理需要政府、企业和公众的共同参与，政府需要政策支持、资金投入、和信息平台共享；企业需要企业的责任与创新自主减排措施、跨行业合作、参与政策制定；公众需要培养环保意识多参与社区活动并对负面影响进行反馈。

为实现有效的 VOCs 处理与利用，必须加大对相关技术的研发投入，具体建议如下：

确定 VOCs 管理中的关键技术领域，例如高效催化剂、吸附材料、生物处理技术等，加大科研经费投入，推动突破性进展；设立专门的研究实验室及示范项目，进行前沿技术的验证与应用，以便快速将科研成果转化为实际应用；积极参与国际科研合作，学习借鉴国外先进技术与经验，推动国内 VOCs 治理技术的创新与升级。

建立合理的市场机制，将 VOCs 纳入碳交易体系，允许企业通过购买减排额度来平衡自身排放，激励更多企业参与减排；对积极减排或采用 VOCs 资源化技术的企业，给予财政补贴或税收减免，降低其运营成本，进一步激励绿色转型；鼓励金融机构设立绿色信贷项目，为实施 VOCs 减排和资源化利用的项目提供低利率贷款，降低融资成本；通过建立生态产品认证制度，给予符合低 VOCs 标准的产品市场优势，促进消费者选择环保产品，推动市场消费结构转变。

在 VOCs 治理过程中，只有充分发挥政府、企业和公众的协同作用，形成合力，同时加大技术创新与市场机制建设，才能实现高效的控制与利用，助力可持续发展目标的实现。通过共同努力，我们能够打造一个更加清洁、健康的环境。

3.3. VOCs 排放控制与综合利用的可行性分析

3.3.1. 经济可行性

从对 VOCs 进行排放控制和综合利用的市场潜力来看，一个是随着公众对 VOCs 治理和碳中和政策的了解和参与意识的提高，各界对环境保护的重视程度日益加深，会推动政府和企业对 VOCs 治理方面的投入；另一个是国家为了 VOCs 治理力度和碳中和的政策已推出一系列政策法规，鼓励企业进行 VOCs 排放控制和资源化利用。市场需求不断增长，尤其是在化工、涂料、汽车等行业；再一个是随着国际环保标准的提升，VOCs 治理市场不仅限于国内，出口机会也在增加。

从成本效益角度来看，对 VOCs 进行排放控制和综合利用初期投资确实较高，但是是一个长期回报的举措。比如通过合理排放避免因超标排放而产生的罚款；对 VOCs 进行回收分离也可以降低能耗且回收资源。

3.3.2. 技术可行性

VOCs 治理技术已发展成熟，各种技术方案在不同的行业中都有较高的适应性。选择合适的治理技术，需要考虑排放物的成分、浓度、行业特点及经济性。无论是源头控制还是末端治理，现有的技术方案均能满足大多数企业的需求，且技术的成熟度为实现 VOCs 的有效治理提供了坚实的基础。因此，从技术可行性角度来看，VOCs 的排放控制与综合利用完全具备可操作性。

3.3.3. 社会可行性

从社会可行性的角度来看，VOCs 治理的成功与否在很大程度上取决于公众的积极参与和各方利益相关者之间的紧密合作。通过提高公众环保意识，增强社会监督，并通过政府、企业、科研机构的协作，能够形成合力，推动 VOCs 治理措施的有效实施。这不仅有助于实现环境保护目标，也能推动绿色经济和可持续发展的实现。

4. VOCs 排放控制和综合利用的持续发展与未来展望

4.1. 持续发展建议

1) 加强政策监管和激励

制定法规标准，建立 VOCs 排放标准和综合利用要求，确保企业遵循环保法规；提供财政激励、设立专项资金或税收减免政策，鼓励企业投资于 VOCs 回收和利用技术；推行绿色信贷，引导金融机构为 VOCs 综合利用项目提供低利率贷款。

2) 推动技术研发和创新

政府应增加对 VOCs 处理及综合利用技术研发的资金投入，优先支持新型材料和技术的开发，建议使用回收法对 VOCs 进行回收，若为无回收价值地使用销毁技术时 VOCs 转变成 CO₂ 和水，CO₂ 会影响碳排放量，所以是否有技术可以对转化后的 VOCs 进行收集。

3) 建立技术攻关平台

搭建跨行业技术共享平台，汇聚行业内外的科研力量，集中攻克难题。

4) 支持示范项目

选择典型企业进行 VOCs 综合利用示范项目建设，推广成功经验。

4.2. VOCs 治理的未来发展方向

挥发性有机化合物(VOCs)的治理技术正在快速发展，随着环境保护意识的提高和科技的不断进步，未来的 VOCs 治理将呈现出以下几个重要趋势：

1) 绿色技术的普及

未来的 VOCs 治理将更多地依赖于绿色技术，包括无溶剂工艺、低挥发性产品和生物基材料等。这些技术不仅可以有效降低 VOCs 的排放，还能减少对环境的损害，符合可持续发展的要求。

2) 智能化与数字化

随着物联网(IoT)、大数据和人工智能(AI)技术的发展，VOCs 治理将逐渐实现智能化。通过实时监测和数据分析，可以精准识别 VOCs 来源、量化排放，及时调整治理措施，提高治理效率。此外，智能设备还能够自动优化生产流程，减少 VOCs 的生成。

3) 多元化治理技术

未来的 VOCs 治理将不再依赖单一技术，而是采用综合治理方案。例如，将吸附、催化氧化、生物降解等技术结合起来，形成协同效应，以更全面、高效地处理不同类型的 VOCs。这种多元化的方法能够适应多变的市场需求和法律法规的变化。

4) 源头控制与过程优化

目前对 VOCs 的治理大部分集中在末端处理上, 未来越来越多的研究将专注于源头控制和过程优化上, 即在产品设计和生产过程中就考虑到 VOCs 的产生。通过优化工艺、选择低 VOCs 原料等手段, 从源头上减少 VOCs 的生成, 实现环保与经济效益的双赢。

5) 回收与循环利用

对于已经产生的 VOCs, 未来的治理技术将更加注重其回收与循环利用。例如, 利用先进的分离技术和转化工艺将 VOCs 转化为其他有用的化学品, 实现资源的闭环利用。这不仅能减少废弃物, 还能创造新的经济价值。

5. 结论

挥发性有机化合物(VOCs)不仅是空气污染和温室气体排放的重要因素, 还深刻影响着人类健康与生态环境的可持续发展。尽管已有研究探讨了 VOCs 的控制与利用, 但我们提出了一种多维度综合治理的新框架, 将环境保护与经济发展的关系重新审视。在碳中和的背景下, 本研究强调通过资源化利用及政策监督一体化, 推动 VOCs 排放控制的革命性进展。

特别关注政府、企业、科研机构及公众之间的协同作用, 这与传统的单一主体治理模式截然不同。我们呼吁政府制定科学合理的政策, 强化法规执行, 并探索创新技术, 为企业绿色改造提供必要支持。同时, 科研机构需加大对 VOCs 治理技术的深入研究, 促进科技成果的快速转化。

更重要的是, 我们希望通过增强公众环保意识, 让普通民众也参与到这一进程中, 形成全民共治的良好局面。未来, 我们将继续探索更多创新措施与合作机会, 以实现持久的绿色发展和碳中和目标。让我们共同努力, 为子孙后代创造一个更加清洁、美好的地球, 开创低碳、绿色、可持续发展的新时代!

参考文献

- [1] 杜建锋, 张金兰, 韩叠. 污水处理碳中和运行技术研究进展[J]. 清洗世界, 2023, 39(8): 88-90.
- [2] 徐涛. 挥发性有机物污染综合控制与治理概述[J]. 清洗世界, 2023, 39(9): 153-156.
- [3] 黄成浩. 污染源废气挥发性有机物在线监测技术探讨[J]. 计量与测试技术, 2020, 47(11): 64-65+68.
- [4] Han, D., Gao, S., Fu, Q., Cheng, J., Chen, X., Xu, H., *et al.* (2018) Do Volatile Organic Compounds (VOCs) Emitted from Petrochemical Industries Affect Regional PM_{2.5}? *Atmospheric Research*, **209**, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.002>
- [5] Wang, H., Nie, L., Li, J., Wang, Y., Wang, G., Wang, J., *et al.* (2013) Characterization and Assessment of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emissions from Typical Industries. *Chinese Science Bulletin*, **58**, 724-730. <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5345-2>
- [6] Bhaskaran, A., Sharma, D., Roy, S. and Singh, S.A. (2023) Technological Solutions for Nox, Sox, and VOC Abatement: Recent Breakthroughs and Future Directions. *Environmental Science and Pollution Research*, **30**, 91501-91533. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28840-y>
- [7] Miah, M.R., Yang, M., Khandaker, S., Bashar, M.M., Alsukaibi, A.K.D., Hassan, H.M.A., *et al.* (2022) Polypyrrole-based Sensors for Volatile Organic Compounds (VOCs) Sensing and Capturing: A Comprehensive Review. *Sensors and Actuators A: Physical*, **347**, Article 113933. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113933>
- [8] Ravi Kumar, Y., Deshmukh, K., Kovářík, T. and Khadheer Pasha, S.K. (2022) A Systematic Review on 2D Materials for Volatile Organic Compound Sensing. *Coordination Chemistry Reviews*, **461**, Article 214502. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2022.214502>
- [9] Pathak, A.K. and Viphavakit, C. (2022) A Review on All-Optical Fiber-Based VOC Sensors: Heading Towards the Development of Promising Technology. *Sensors and Actuators A: Physical*, **338**, Article 113455. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2022.113455>
- [10] Shen, Y., Tissot, A. and Serre, C. (2022) Recent Progress on MOF-Based Optical Sensors for VOC Sensing. *Chemical Science*, **13**, 13978-14007. <https://doi.org/10.1039/d2sc04314a>

-
- [11] Khatib, M. and Haick, H. (2022) Sensors for Volatile Organic Compounds. *ACS Nano*, **16**, 7080-7115. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c10827>
- [12] 陈建华, 魏登科. 工业源 VOCs 治理现状、存在的问题及建议[J]. 化工管理, 2024(6): 67-70.
- [13] 徐海红, 赵晓宏, 董振龙, 等. 我国 VOCs 污染治理监管存在的问题及对策[J]. 环境影响评价, 2021, 43(2): 7-11.
- [14] 李援. 石化行业挥发性有机物污染治理技术探讨[J]. 炼油技术与工程, 2018, 48(7): 1-4.
- [15] 张轩, 郭斌, 孙嘉祺, 等. 光催化处理挥发性有机物研究进展[J]. 现代化工, 2020, 38(5): 20-23+25.
- [16] 张琰, 李好管. 挥发性有机物(VOCs)治理: 技术进展及政策探析[J]. 煤化工, 2022, 50(6): 1-10+15.
- [17] 许天啸, 王蕾. 工业挥发性有机物 VOCs 污染处理技术初探[J]. 绿色科技, 2016, 18(18): 74-75+78.