Current situation and development trend of comprehensive utilization of carbon dioxide

Guoquan Lu

Chenzhou Zhongzhou Ecological Environment Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410205, China

Abstract

Carbon dioxide, as an important carbon source, is widely distributed in the atmosphere, water bodies, and lithosphere. However, due to its high stability, it poses significant challenges for development and utilization. This paper analyzes the physical and chemical properties of carbon dioxide based on its molecular structure and thermodynamic characteristics, examining its role in the natural carbon cycle. It systematically evaluates the potential for resource utilization in industrial and agricultural sectors. Building on this foundation, the paper focuses on a new model of carbon dioxide reduction and sequestration centered around cold emission technology, comparing mainstream technical pathways and relevant standards for carbon dioxide resource utilization internationally. Carbon dioxide capture and resource utilization offer multiple benefits: they can significantly reduce mitigation costs and bring about synergistic effects in climate, environment, and economy. This approach is a crucial pathway to achieving peak carbon emissions and carbon neutrality goals.

Keywords

carbon dioxide utilization; cold emission technology; carbon neutrality; climate synergy; technical route

二氧化碳的综合利用现状及发展趋势

卢国全

郴州中洲生态环境科技有限公司，中国 · 湖南 长沙 410205

摘　要

二氧化碳作为重要的碳源物质，在大气、水体、岩石圈中广泛分布，但因其稳定性高，开发利用难度大。本文基于二氧化碳分子结构、热力学特性等，分析了其物理化学性质与自然界碳循环规律，对其在工农业领域的资源化潜力进行了系统评估。在此基础上，重点阐述了以冷排放技术为核心的二氧化碳减排增汇利用新模式，对比分析了国际上二氧化碳资源化利用的主流技术路径与相关标准规范。二氧化碳捕集与资源化利用可一举多得，不仅可显著降低减排成本，还可带来气候、环境、经济等多方面协同效益，是实现碳达峰、碳中和目标的重要路径选择。

关键词

二氧化碳利用；冷排放技术；碳中和；气候协同；技术路线

1 引言

化石能源的大规模利用在推动工业化进程的同时，也引发了以二氧化碳排放为主的温室气体增量问题，导致气候变化、海平面上升等一系列全球性环境危机。减缓和适应气候变化，控制大气二氧化碳浓度已成为国际社会的广泛共识。传统的二氧化碳减排主要通过提高能效、发展可再生能源、优化能源结构等途径实现，但成本高、见效慢，难以支撑全球变暖控制目标的实现。二氧化碳捕集与资源化利用可一举多得，不仅可显著降低减排成本，还可带来气候、环境、经济等多方面协同效益，是实现碳达峰、碳中和目标的重要路径选择。

【作者简介】卢国全（1971–），男，中国湖南长沙人，博士，外籍院士，从事应对气候变化研究。

2 二氧化碳物化特性与资源化潜力评估

2.1 分子特性与沉降规律分析

二氧化碳是一种无色、无味的弱酸性气体，化学性质稳定。常温下，二氧化碳以气态形式稳定存在，分子量为 44.01，比空气重 52.8%，在标准状况下 1m³CO_2 质量为 1.96kg。由于密度较大，工业排放及燃烧产生的 CO_2 在局部区域内呈现明显的快速沉降特征，据估算，其中 90% 以上会通过与周边介质的物理化学作用而实现快速固碳，如图 1 所示。CO_2 在一定条件下易溶于水，生成碳酸，使水体呈弱酸性；与金属氧化物反应可生成相应碳酸盐；能与氨等多种有机物发生化学反应。上述物理化学特性奠定了 CO_2 资源化利用的分子结构基础。

2.2 热力学效率与气候影响

在常规燃烧过程中，CO_2 并非导致气候异常的主因，真正的元凶是伴生的热污染排放 [1]。以燃煤电厂为例，其烟

气携带的显热与潜热可使近区域大气温度升高，进而引发区域小气候变化。依据热力学第二定律，热量会自发地从高温物体传递到低温物体。燃煤产生 1kg CO_2 所携带的热量，可使约 1600 万 m^3 空气温度升高 1℃，引发连锁的气候环境效应。而目前燃煤电厂对烟气显热的回收利用率普遍不足 40%，亟需开发适用于常温低品位余热回收的新技术。

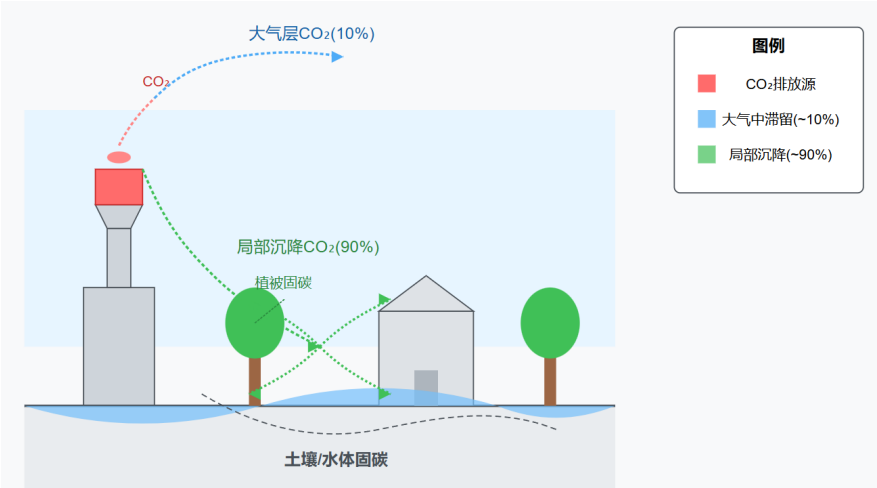

图 1 二氧化碳排放的沉降分布特征

2.3 工业应用价值图谱

CO_2 广泛应用于工农业生产中，在石化、冶金、电子、食品、医疗等行业有广阔用途，具有显著的经济价值。在石油开采领域，CO_2 驱油技术可提高原油采收率 6%~12%，与水驱油、聚合物驱油等方式相比具有明显的增产优势，驱油用 CO_2 需求量巨大；在电子工业中，CO_2 可用作半导体清洗剂，其化学惰性可确保芯片表面无残留；在食品加工业中，CO_2 的致密性可用于碳酸饮料制造及食品杀菌保鲜 [2]。

2.4 碳循环自然法则验证

在自然界碳循环过程中，CO_2 既是不可或缺的物质基础，也是联结大气圈、水圈、岩石圈和生物圈的纽带。通过生物固碳、化学风化、沉积埋藏等过程，碳在各圈层间不断迁移转化，维系着地球生态系统的动态平衡。工业革命以来，化石燃料的大量使用加速了碳循环进程。工业革命前大气 CO_2 浓度约为 280ppm，植被、土壤碳库与大气碳库基本达到平衡。而目前大气 CO_2 浓度已升至 420ppm，远高于工业化前水平。

3 冷排放技术驱动的碳中和技术革命

3.1 绝氧热解 – 悬浮燃烧系统

冷排放技术以固废（如垃圾、污泥、农林废弃物等）为原料，通过绝氧热解将其转化为可燃气、焦油等清洁燃料，再采用富氧燃烧技术实现燃料的充分燃尽。在此基础上，采用全热回收系统可使烟气温度降至接近环境温度，从而最大限度消减热污染排放。与传统固废焚烧技术相比，冷排放系统的显热利用率可提高 30 个百分点以上，NOx、二噁英等污染物排放量降低 90% 以上 [3]。此外，在稳燃富氧条件下，CO_2 体积分数可超过 30%，为其经济性捕集创造了有利条件。冷排放技术的工艺流程如图 2 所示。

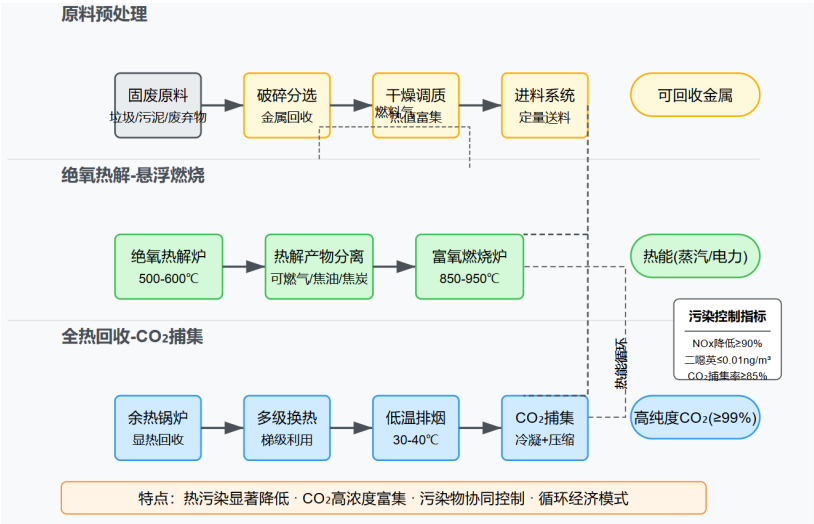

图 2 冷排放技术工艺流程示意图

3.2 常温捕集工艺突破

与传统化学吸收法相比，冷排放烟气的温度与环境温度接近，CO_2 分压高，为其物理吸收分离创造了有利条件。冷排放技术采用“低温冷凝 + 多级压缩”的 CO_2 捕集新工艺，综合成本不足 150 元 /tCO_2，远低于传统 MEA 吸收法的 400~600 元 /t 水平，可满足不同领域的用 CO_2 需求。采用该工艺，CO_2 捕集率可达 85% 以上，产品纯度超 99%，电耗低于 200kWh/tCO_2。与此同时，冷排放还可显著提高污染物的协同脱除效率，SOx、NOx、PM 的去除率均在 95% 以上。常温捕集是冷排放技术的核心环节，具有广阔的市场应用前景。

3.3 碳 – 能 – 肥三联产系统

冷排放技术的固有优势是热电 -CO_2- 灰渣三联产，可因地制宜打造多场景应用。其中，CO_2 与灰渣可用于构建碳—能—肥循环系统，实现温室气体减排、农业增产、土壤培肥的多赢格局。以 1000t/d 生活垃圾处理项目为例，每年可捕集 CO_2 约 13.2 万 t，配套建设智能玻璃温室 12.6 公顷，可新增蔬菜产量 3000t、鲜花 168 万枝，农产品总产值超 3000 万元；所产生的 1.8 万 t 焚烧灰渣经提取重金属或提质制粒后可替代化肥，每年可减施氮肥 360t，节约成本 540 万元。CO_2 与灰渣在农业领域的应用，不仅符合减污降碳的政策导向，也为垃圾处理企业拓展了新的利润增长点 [4]。

3.4 气候协同效益量化

从碳循环角度看，冷排放技术可显著降低垃圾焚烧过程碳排放强度。传统焚烧每处理 1t 垃圾约排放 1.2tCO_2，采用冷排放工艺后，在 30 年全生命周期内每吨垃圾的碳排放可降至 -0.65t，实现了碳源向碳汇的逆转。与此同时，热污染的大幅削减能够有效抑制局地气候异常。试点项目区的地表、近地表及边界层的温度分布监测表明，冷排放助力区域大气环境质量改善，雾霾、暴雨等极端天气事件的发生频次明显下降。

4 全球碳利用技术发展对比

4.1 国际主流技术路线

当前，发达国家普遍重视 CO_2 减排与资源化利用，已形成了以化学吸收法、膜分离法、矿化碳封存为主体的 CO_2 利用产业格局。在捕集方面，以美国、加拿大、日本为代表的国家重点发展了以醇胺类、离子液体为吸收剂的化学吸收技术，研发了多种新型分子筛与陶瓷膜材料，但能耗及成本问题尚待解决；在利用方面，CO_2 驱油、煤层 CO_2 封存、CO_2 制甲醇等多种技术路线已进入工程化示范阶段，但受制于场地条件及 CO_2 来源，推广应用难度较大。

4.2 中国冷排放技术优势

与国外 CO_2 利用技术相比，我国自主研发的冷排放技术在系统集成、成本效益等方面优势明显。热解耦合富氧燃烧工艺可将固废“变废为能”，极大拓宽了可利用的 CO_2 来源；常温捕集工艺可使 CO_2 捕集成本降至 150 元 /t 以下，为规模化利用奠定了坚实基础；碳—能—肥三联产系统实现了多场景就地应用，打通了碳转化利用的“最后一公里”。目前，国内已有 10 余套百吨级冷排放示范项目建成投运，为技术模式的产业化推广积累了宝贵经验。未来随着碳捕集利用与封存技术纳入国家重点研发计划，冷排放有望成为实施 CCUS 的优选技术之一。

表 1 冷排放技术与传统技术对比

对比项目	冷排放技术	传统固废焚烧 /CCS 技术	优势分析
CO_2 捕集成本	≤150 元 / 吨	400~600 元 / 吨（MEA 吸收法）	成本降低约 70%
CO_2 捕集率	≥85%	60%~75%	提高约 15~25 个百分点
CO_2 产品纯度	≥99%	90%~95%	产品品质提升
电耗	≤200kWh/tCO_2	≥330kWh/tCO_2	能耗降低约 40%
显热利用率	提高 30 个百分点以上	普遍不足 40%	热效率显著提升
NOx 排放降低	≥90%	-	污染物协同治理效果显著
二噁英排放浓度	≤0.01ngTEQ/m³	国标限值的约 1/40	超低排放
排烟温度	30~35℃	80~120℃	接近环境温度，热污染最小化
污染物协同脱除率	SOx、NOx、PM 均 ≥95%	70%~85%	环境效益显著
应用场景限制	受限小，适应性强	受地质条件限制大	应用范围更广

4.3 标准体系代际差异

完善的标准规范是 CO_2 利用产业健康发展的重要保障。发达国家已初步构建了涵盖 CO_2 捕集、运输、利用、封存全流程的标准体系，形成了 ISO 27912、ISO 27916 等一系列国际标准，为不同技术路线的工程应用提供了依据。相比之下，我国 CO_2 利用领域现行标准偏重局部技术环节，缺乏系统性、配套性，与 CCUS 产业发展的阶段性特征不相适应。以冷排放技术为例，尽管已处于工程示范阶段，但尚缺乏成套工艺的强制性国家 / 行业标准，主要执行清洁生产、大气污染物排放等现有标准，难以充分发挥其减排提效、多联产优势。未来应加快构建源头减排、过程控制、末端利用一体化的 CO_2 利用标准规范，引领产业高质量发展。

4.4 商业模式的颠覆性

与传统 CCS 模式相比，基于冷排放的 CCUS 产业链更

加紧凑，成本更低，受地质场地限制小，更有利于实现减排与产业增值的有机统一[5]。一是“CO_2 捕集 + 化工利用”“CO_2 捕集 + 油气驱采”等异地利用模式，有利于促进专业化分工，通过市场化机制实现碳资源的优化配置；二是“CO_2 捕集 + 农业利用”“CO_2 捕集 + 建材利用”等就地利用模式，可通过碳汇开发、碳资产经营等方式，实现减排与产值倍增。

5 碳中和背景下的发展趋势

5.1 政策驱动路径

党的二十大报告将碳达峰碳中和纳入中国式现代化的战略部署，标志着“双碳”工作进入法治化、制度化的新阶段。国务院发布的《2030 年前碳达峰行动方案》明确提出要求严格控制钢铁、建材、化工等高耗能高排放项目，大力推进 CCUS 示范工程，力争到 2030 年实现 750 万吨的年利用量。在此背景下，CO_2 作为关键的碳资源，亟须完善顶层设计，强化要素保障，推动相关减排技术与产业政策进一步完善，形成全产业链协同治理新格局。产业界应准确把握碳达峰、碳中和重大机遇，坚持创新驱动与开放合作相结合，加快构建政产学研用一体化的 CO_2 资源化利用新生态，推动形成引领全球的中国方案。

5.2 技术融合方向

新一轮科技革命为 CO_2 减排与资源化利用带来新的突破口。未来应立足自主创新，聚焦产业“卡脖子”难题，重点突破高效捕集、长距离输送、精准利用等关键核心技术。在源头减排方面，大力发展富氧燃烧、化学链燃烧、超临界 CO_2 发电等新型燃烧技术，最大限度降低 CO_2 排放；在过程控制方面，发展膜法捕集、压缩液化等新型分离技术，实现 CO_2 的低成本规模化富集；在末端利用方面，创新 CO_2 矿化利用、生物转化等新工艺新方法，拓宽减排空间。同时，要加强部署负排放技术攻关，在可再生能源制氢、CO_2 直接空气捕集等领域抢占先机，构筑碳中和技术体系。数字化、智能化技术在 CO_2 监测、运输、利用等环节广泛应用，将极大提升碳资源配置效率。

5.3 市场规模预测

国内 CCUS 市场正在快速启动。自 2021 年“双碳”目标提出以来，各地纷纷出台 CCUS 产业支持政策，一大批项目蓄势待发。就技术路线而言，化工利用与油气驱采将成为短期重点，地质封存与矿化利用市场潜力巨大。以冷排放为代表的新技术新模式将强劲带动二氧化碳资源化应用。在当前能源电力、化工、建材等行业已建成投运的燃煤 / 燃气设施中，若 10% 采用冷排放改造，预计到 2025 年可形成近 700 万吨 CO_2 减排能力；若在新上钢铁、水泥项目中规模化应用，有望在 2060 年实现 10 亿吨 CO_2 的减排增汇。

5.4 碳博弈战略价值

CO_2 减排与资源化利用是各国参与全球气候治理博弈的制高点。发达国家纷纷将 CO_2 捕集利用与封存上升至国家战略，抢占产业发展先机。美国通过 45Q 税收抵免大幅降低了企业投资 CCUS 的成本风险，建立了全球规模最大的 CO_2 管道网络，形成了从 CO_2 源头到利用终端的完备产业链；欧盟正在大力推进北海 CO_2 地质封存，力争到 2030 年建成 1.5 亿吨 / 年的储存中心，并通过碳关税调节机制重塑全球贸易规则。对标国际领先水平，我国在 CCUS 领域虽已具备后发优势，但高端装备、关键材料等仍存短板。

6 结语

CO_2 规模化减排与资源化利用是实现碳中和目标的关键举措。本文在剖析传统 CO_2 利用途径的基础上，对冷排放技术的优化潜力、产业价值进行了系统阐述，展望了“双碳”背景下 CO_2 综合利用的发展路径。可以预见，伴随着能源结构调整、产业转型升级步伐的加快，CO_2 将从单一的减排对象转变为宝贵的资源财富，在实现碳达峰、碳中和目标进程中发挥不可替代的作用。这就要求从国家战略高度，加强政策扶持和规划引导，大力发展冷排放等颠覆性 CO_2 减排利用技术，破除部门藩篱和利益藩篱，推动建立健全 CO_2 捕集利用一体化、制度规范完善配套的 CCUS 产业体系，为助力美丽中国建设、推动全球气候治理贡献“中国智慧”。

参考文献

[1] 轩卫华,李进,冯俊.工业尾气中二氧化碳的综合利用进展与案例分析[J].再生资源与循环经济,2016,9(9):30-32.

[2] 刘辰,王中原,于方.二氧化碳的综合利用技术及应用状况概述[J].绿色科技,2013,15(5):225-227.

[3] 郑学栋.二氧化碳的综合利用现状及发展趋势[J].上海化工,2011,36(3):29-33.

[4] 朱益飞.提升二氧化碳综合利用率实现节能减排[J].变频器世界,2016(8):57-59.

[5] 刁保圣,顾欣,冯琰磊.大规模二氧化碳捕集及综合利用示范[J].锅炉技术,2021,52(6):76-80.