

引用格式: 张柠涛, 王茹洁, 汪黎东. 碳中和背景下直接空气捕碳 (DAC) 的技术发展和经济性评估 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 15-25. ZHANG Ningtao, WANG Rujie, WANG Lidong. Technology development and economic assessment of direct air capture (DAC) in the context of carbon neutrality [J]. Southern energy construction, 2024, 11(5): 15-25. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.5.02](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.5.02).

碳中和背景下直接空气捕碳 (DAC) 的技术发展和经济性评估

张柠涛^{1,2}, 王茹洁^{1,2}, 汪黎东^{2,✉}

(1. 华北电力大学 环境科学与工程系, 河北省燃煤电站烟气多污染物协同控制重点实验室, 河北 保定 071003;
2. 华北电力大学 环境科学与工程学院, 北京 102206)

摘要: [目的]旨在探讨面向碳中和背景下直接空气捕碳 (Direct Air Capture, DAC) 技术的发展现状、应用案例及其经济性评估, 以期为我国实现碳减排目标提供参考。[方法]文章综述了 DAC 技术的工作原理、类型、运用案例, 并分析了其在国内外的的发展情况。通过比较不同研究中的成本数据, 评估了 DAC 技术的经济性, 并讨论了当前面临的挑战与可能的解决措施。[结果]研究发现, DAC 技术能有效从空气中捕集 CO₂, 具有布置灵活、可与可再生能源结合等优点。但其商业化应用仍受到高成本、高能耗和大规模部署的技术挑战的限制。国内外的案例分析揭示 DAC 技术在实际应用中的效率和成本问题亟待解决, 同时也显示了通过技术改进和政策支持可能实现的优化潜力。[结论]尽管存在挑战, DAC 技术仍是实现碳中和目标的潜在储备技术, 尤其对中国等面临严峻碳减排压力的国家具有重要意义。需要集中研究力量开发更高效、低成本的吸收/吸附剂, 改进系统设计, 降低能源消耗, 并积极探索与可再生能源的结合使用。政府的政策支持和社会的广泛认可也是实现 DAC 技术商业化的关键因素。通过这些措施可以推动 DAC 技术的发展和应用, 助力实现碳减排和环境保护的双重目标。

关键词: 直接空气捕碳; 碳中和; 碳捕集和封存; 可再生能源; 二氧化碳; 负碳排放技术

中图分类号: TK01; X511

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)05-0015-11

DOI: [10.16516/j.ceec.2024.5.02](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.5.02)

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Technology Development and Economic Assessment of Direct Air Capture (DAC) in the Context of Carbon Neutrality

ZHANG Ningtao^{1,2}, WANG Rujie^{1,2}, WANG Lidong^{2,✉}

(1. Hebei Key Lab of Power Plant Flue Gas Multi-Pollutants Control, Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: [Introduction] This paper aims to explore the development status, application cases, and economic evaluation of direct air capture (DAC) technology in the context of carbon neutrality, thus providing references for achieving carbon emission reduction targets in China. [Method] This paper reviewed the working principles, types, and application cases of DAC technology and analyzed its development status both at home and abroad. By comparing cost data from different studies, it assessed the economy of DAC technology and discussed current challenges and potential solutions. [Result] The study finds that DAC technology effectively captures CO₂ from the air and offers advantages such as flexibility in deployment and compatibility with renewable energy. However, its commercialization is

收稿日期: 2024-08-27 修回日期: 2024-08-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“新型功能化离子液体吸收剂/电解质构建及 CO₂ 原位还原机理”(22178096); 北京自然科学基金资助项目“基于胺基富液的 CO₂ 原位还原过程中高效电子传输路径的构建”(2232029)

still constrained by high costs, high energy consumption, and technical challenges related to large-scale deployment. Case analysis at home and abroad reveal the urgent need to address the efficiency and cost issues in practical applications, while also showing potential for optimization through technological improvements and policy support. **[Conclusion]** Despite the existing challenges, DAC technology remains a potential reserve technology for achieving carbon neutrality goals, especially for countries facing severe carbon reduction pressures like China. Research efforts should focus on developing more efficient and low-cost absorbents and adsorbents, improving system design, reducing energy consumption, and exploring combination with renewable energy sources. Government policy support and broad social acceptance are also key factors for the commercialization of DAC technology. These measures can drive the development and application of DAC technology, contributing to both carbon emission reduction and environmental protection goals.

Key words: direct air capture(DAC); carbon neutrality; carbon capture and storage; renewable energy sources; carbon dioxide; negative carbon emission technologies

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

由于人为二氧化碳 (CO₂) 排放的增加, 大气中 CO₂ 浓度的上升导致了地球全球变暖的加剧^[1]。全球气候变化问题已成为国际社会关注的焦点, 而碳达峰、碳中和则成为应对气候变化的必然选择^[2]。

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)指出, 为了避免一系列气候变化的负面影响, 必须实现《巴黎协定》中设定的全球温升不超过 1.5 °C 的目标^[3]。在第 75 届联合国大会上, 习近平主席宣布了中国重大战略决策: 力争于 2030 年达到 CO₂ 排放峰值, 并于 2060 年实现碳中和^[4]。

因此, CO₂ 去除 (Carbon Dioxide Removal, CDR) 技术, 也被称之为负排放技术 (Negative Emissions Technologies, NETs), 即通过人类有意的努力以实现环境协议规定的 CO₂ 水平, 并将 CO₂ 浓度稳定在 0.035% ~ 0.044% 净减少的措施, 越来越迫切地被需要^[5]。负排放技术被定义为人类有意从大气中去除 CO₂ 排放的努力^[6], 包括以下内容: 造林和再造林 (Afforestation and Reforestation, AR)、土壤碳固存 (Soil Carbon Sequestration, SCS)、生物炭 (Biochar, BC)、具有碳捕获和储存的生物能源 (Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS)、直接空气捕碳 (Direct Air Capture, DAC)、增强风化 (Enhanced Weathering, EW) 和海洋碱化以及海洋施肥 (Ocean Fertilization, OF)。在这些解决方案中, 直接空气捕集 (DAC) 技术由于作为有望实现 CO₂ 负排放的碳捕集技术, 引发广泛关注^[7]。

DAC 技术通过捕集装置直接从空气中移除 CO₂,

被捕获的 CO₂ 可被永久转化或封存, 从而实现碳移除^[8]。与传统火电厂或工业碳捕集装置相比, DAC 无须考虑 NO_x 和 SO_x 等气体杂质的影响, 装置的规模较小且可实现模块化建设, 其选址不受排放源位置及类型的限制, 因而具有较强的灵活性, 更易于广泛部署。

此外, DAC 装置可与低碳能源, 如太阳能、工业余热、地热利用等相结合, 如就近部署可再生能源和 CO₂ 封存或利用场地, 能够最大限度实现碳移除, 降低 CO₂ 的运输成本。DAC 捕集的 CO₂ 可作为碳源, 通过生物转化 (微藻、气体肥料)、化学转化 (合成甲醇、汽油等)、能源开发及矿化等方式实现资源化利用。

因此, DAC 技术的研发对于我国实现“碳达峰”和“碳中和”目标具有重要意义^[9-10]。这一技术不仅能够有效减少大气中的 CO₂ 浓度, 还为我国在应对气候变化、改善空气质量以及实现长期环境可持续性方面提供了潜在的技术支持^[11]。通过发展和应用 DAC 技术, 我国能够更好地控制和削减温室气体排放, 助力国家在全球气候治理中发挥积极作用, 实现碳减排和环境保护的双重目标。

1 DAC 技术概述

DAC 技术于 1999 年由美国亚利桑那大学的拉克内 (Lackner) 首次提出^[12], 指通过工程系统直接从空气中捕集 CO₂ 后从环境空气中去除 CO₂ 的技术。

1.1 DAC 技术的原理

DAC 系统原理如图 1 所示^[13], CO₂ 在大气中与吸收剂或吸附剂发生反应后被有效捕获。随后, 经

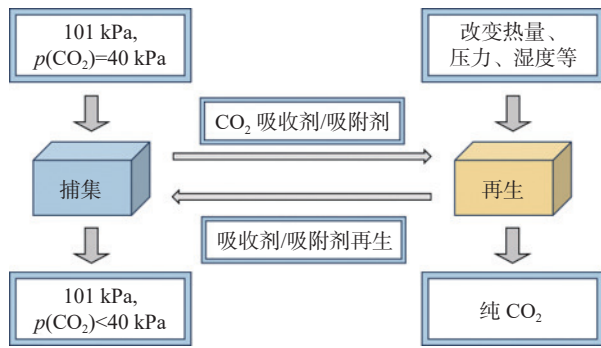


图 1 DAC 技术系统机理

Fig. 1 System mechanism of DAC technology

过反应的捕获剂通过改变热量、压力、湿度等方法实现再生,以便重新投入捕集循环。同时,被捕获的 CO_2 可以进行储存或进一步利用。

以胍类吸附剂为例^[14],水基 2,6-吡啶双亚氨基胍 (PyBIG) 从周围空气中捕获 CO_2 ,并将其结合成碳酸盐晶体,在 $80 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$ 下加热碳酸盐晶体来释放 CO_2 ,从而定量地再生。

相较于通常应用于固定排放源的 CO_2 捕集, DAC 技术在布置上不受时间和地点限制,展现出更高的灵活性^[15]。它能够有效处理来自成千上万个小型化石能源设施以及数亿分散排放源的 CO_2 ,展现出广阔的应用前景。

1.2 DAC 技术类型

当前,捕集 CO_2 的工艺有很多,主要采用 2 种技术手段从大气中移除 CO_2 : (1) 利用液体吸收的直接空气捕碳 (L-DAC); (2) 使用固体吸附的直接空气捕碳 (S-DAC)^[16]。

1.2.1 液体 DAC

L-DAC 具有技术成熟、吸收速率高、再生温度较低、溶剂损失少的优点。图 2 为液体 DAC 的工艺流程图。液体 DAC 技术主要包括碱性氢氧化物溶液 DAC 技术、胺溶液 DAC 技术、氨基酸盐溶液/BIGs DAC 技术和碱度浓度变化 DAC 技术等^[17]。

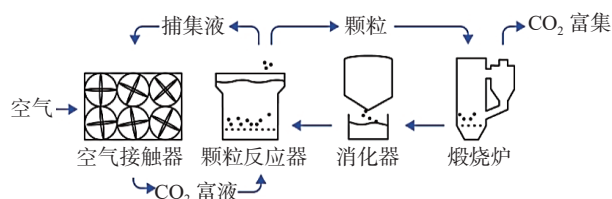
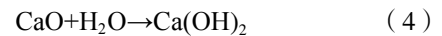
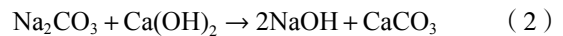


图 2 液体 DAC 工艺流程

Fig. 2 Process flow of liquid DAC

Zeman^[18] 和 Keith^[19] 最早在 2004 年就提出利用氢氧化钠 (NaOH) 溶液和氢氧化钾 (KOH) 溶液从空气中直接提取 CO_2 。

首先,大气中的 CO_2 与碱性氢氧化物 (如 NaOH 溶液) 发生反应,转化为可溶性的 Na_2CO_3 盐溶液,其次,通过与氢氧化钙 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 作用,不仅实现了碱性氢氧化物的循环利用,还生成了碳酸钙 (CaCO_3)。随后,将 CaCO_3 煅烧后释放出纯净的 CO_2 ,同时 CaO 被水化生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,实现循环再生。相关反应式如下:



但是, NaOH 的使用过程中,物料和能量的损失较为显著,这极大地增加了 DAC 工艺的成本。为此,很多研究者不断改进工艺。Ahmoudkhani 等^[20] 使用三钛酸钠 ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{TiO}_2$) 来替代 NaOH,能够将释放 CO_2 的解吸阶段所需的温度降低超过 50 K,能耗和传统石灰法对比减少了 50%。除 $\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{TiO}_2$ 之外,还有三氧化二铁 (Fe_2O_3)^[21] 和硼酸钠 (NaBO_2)^[22] 替代 NaOH。但是这些工艺易产生液滴散布到空气中,对环境造成污染。Stolaroff 等^[23] 对接触器进行优化,雾化效果更好,空气与碱性吸收液的接触面积更大。但是仍需要 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右的高温,且能耗较高。

相较于氢氧化物溶液,胺液体较为常用,同时在捕集 CO_2 时再生温度较低, $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右就可再生,具有节能的优势。然而,吸收 CO_2 后生成的氨基甲酸盐在热再生过程中分解较慢,这限制了吸收循环的速度和效率,同时胺溶液易挥发且有毒。

Seipp 等^[24] 用水基 2,6-吡啶双亚氨基胍 (PyBIG) 从周围空气中捕获 CO_2 ,并将其结合成结晶的四水合碳酸盐 ($\text{PyBIGH}_2(\text{CO}_3)(\text{H}_2\text{O})_4$)。 CO_2 可以通过在 $80 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$ 相对温和的温度下加热碳酸盐晶体来释放,从而定量地再生 PyBIG。Camper 等^[25] 对 KOH 技术和氨基酸盐溶液/BIGs 技术进行了比较,发现 m-BBIG 和 PyBIG 的再生温度范围分别为 $60 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $80 \sim 120 \text{ }^\circ\text{C}$,远低于 KOH 的 $900 \text{ }^\circ\text{C}$ 。在能耗上, m-BBIG 和 PyBIG 的再生所需能量分别为 8.2 GJ/t 和

6.5 GJ/t, 而 KOH 则为 6.3 GJ/t, 能耗仍然较高。

1.2.2 固体 DAC

S-DAC 通过使用固体吸附剂实现对 CO_2 的捕集, 涵盖了碱土金属基材料、金属有机框架 (MOFs)、胺基负载型吸附剂以及变湿吸附剂等类型^[26]。该技术展现出的优势包括吸附效率较高、再生稳定性较好、技术成熟、吸附速率快、再生温度低。

如图 3 所示, 当吸附剂达到 CO_2 吸附饱和状态后, 可以通过加热 (40 ~ 120 °C) 或采用真空解吸的方法来恢复其吸附能力, 并释放出高浓度的 CO_2 。技术的关键环节在于吸附材料的选取、解吸技术的优化以及核心设备的设计。特别是, 固态胺类吸附剂能与 CO_2 反应生成氨基甲酸盐, 而在水蒸气存在的条件下, 能够形成碳酸氢铵。这一过程不仅提高了 CO_2 的捕集效率, 也为吸附剂的循环使用提供了有效途径。

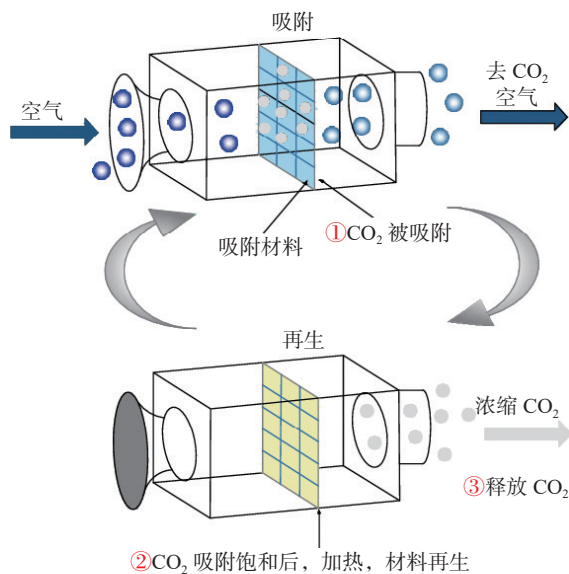


图 3 固体 DAC 工艺流程

Fig. 3 Process flow of solid DAC

Zhao 等^[27] 用 $\text{Mg}0.55\text{Al-O}$ 来提高 TEPA 的吸附容量和吸附速率, 研究 TEPA 负载量对 CO_2 吸附的影响。当 TEPA 的负载量达到 67% 时, 可以获得最佳的饱和吸附容量, 达到 3.0 mmol/g。邢华斌教授团队^[28] 等则使用具有超微孔结构的 ZU-16-Co 材料来改性, 常温常压下对 CO_2 的吸附能力达到了 1.05 mmol/g, 这主要是因为 ZU-16-Co 具有较小的孔径、较强的分子间作用力以及较大的孔容。由于 H_2O 与 CO_2 之间的竞争吸附导致 MOFs 材料吸附性能降低, 因此开发新型 MOFs 材料以提高其在潮湿环境下的稳定性是十分必要的。Bhatt 等^[29] 研究新型 MOF 材料对 CO_2 的吸附能力及其湿度稳定性。开发了一种新材料 NbOffIVE-1-Ni, 该材料的 CO_2 吸附量可达到 1.3 mmol/g。Wang 等^[30] 用介孔聚合物接枝季铵官能团, Na_2CO_3 溶液进行改性, 制备出具有超高动力学性能的吸附剂。该材料的 CO_2 吸附量为 0.86 mmol/g。具体可见表 1。

1.2.3 变湿吸附工艺

基于 L-DAC 和 S-DAC 的 DAC 技术已经发展得较为成熟。与此同时, 研究者也在探讨将新技术与 DAC 工艺结合的研究, 以期优化 DAC 再生能耗较高的问题。

变湿吸附技术 (Moisture Swing Adsorption, MSA) 首先由 Lackner 教授提出, 基于一种含有四甲基铵 ($(\text{CH}_3)_4\text{N}^+$) 的离子型聚合物作为吸附材料。该技术主要使用水的蒸发自由能来为 CO_2 的再生提供动力。此过程中, 季铵盐阳离子 (R) 通过共价键与吸附剂的基质骨架相连, 确保了化学稳定性和吸附效率。其关键优势在于, 吸附剂的界面对 CO_2 具有较高的结合能, 同时这种结合能受到界面水的可控影响。通过调整周围环境的湿度, 可以直接控制吸附剂对 CO_2 的结合力, 从而实现 CO_2 的吸附和解吸。

该技术的核心原理可以概括为 3 个基本步骤:

表 1 固体 DAC 技术对比

Tab. 1 Comparison of solid DAC technologies

研究	材料	CO_2 吸附容量 / (mmol·g ⁻¹)	研究内容
Zhao 等 ^[27]	$\text{Mg}0.55\text{Al-O}$	3.0	研究 TEPA 负载量对 CO_2 吸附的影响
邢华斌教授团队 ^[28]	ZU-16-Co	1.05	研究超微孔 MOF 在大气条件下的 CO_2 吸附
Bhatt 等 ^[29]	NbOffIVE-1-Ni	1.3	研究新型 MOF 材料对 CO_2 的吸附能力及其湿度稳定性
Wang 等 ^[30]	介孔聚合物接枝季铵官能团, Na_2CO_3 溶液进行改性	0.86	制备具有超高动力学性能的吸附剂

1) 在干燥环境中, 吸附剂的碱性基团会捕集 CO₂。

2) 当吸附剂处于高湿度环境时, CO₂ 会被逐步释放。

3) 释放的 CO₂ 可以被直接利用或输送到埋存地进行储存。此外, 吸附剂通过干燥再生来恢复其 CO₂ 吸附能力。

Wang 团队^[31] 采用商业 I-200 型阴离子交换树脂膜作为主体材料, 通过 Na₂CO₃ 溶液进行离子改性, 以提高其对超低浓度 CO₂ 的吸附能力。其原理如图 4 所示, 研究发现, 该材料在约 0.044% 的 CO₂ 中的吸附容量高达 0.86 mmol/g。此外, 团队还应用改良的缩核模型来探究温度和湿度变化对吸附动力学的具体影响。

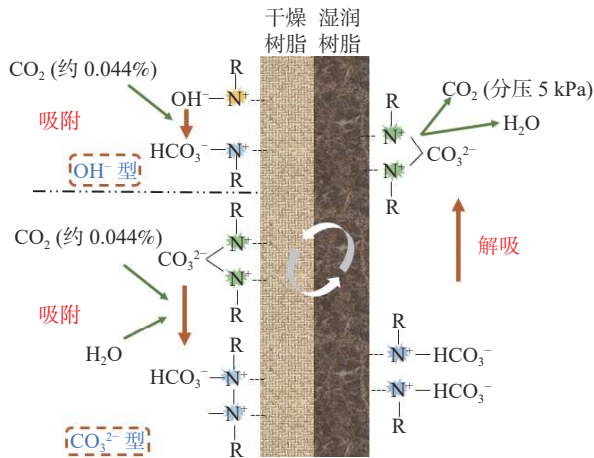


图 4 变湿吸附原理示意图^[31]

Fig. 4 Principle of moisture swing adsorption^[31]

MSA 的整个过程无需升高系统温度, 吸附剂的再生通过界面水蒸气的自然调节作用, 因此可以利用较低品质的能源完成再生, 实现能量的有效利用。还提高了系统的整体可持续性和经济效益。

DAC 技术对比如表 2 所示。

2 DAC 技术的运用与案例分析

2.1 国外 DAC 项目工业化案例分析

全球仅有少数几家工厂实施了直接空气捕碳 (DAC) 技术的工业示范, 其中哈佛教授参与的 Carbon Engineering (CE) 公司是唯一一家商业化捕集 CO₂ 的公司^[32]。图 5 所示为 CE 的工艺流程图, 用碱性氢氧化溶液吸收 CO₂ 生成碳酸盐, 具有吸收效率快的优点,

表 2 DAC 技术对比

Tab. 2 Comparison DAC technologies

分类	原理	优点	缺点	技术发展建议方向
液体 DAC 技术	CO ₂ 与碱性氢氧化物反应生成碳酸盐	技术成熟、吸收速率高、溶剂损失少	设备和运营成本较高, 能耗和维护难度大	研究可以充分发挥捕集材料性能的空气接触器
固体 DAC 技术	低温下固体吸附剂捕获 CO ₂	吸附效率较高、再生稳定性较好、技术成熟、吸附速率快、再生温度低	成本较高, 长期稳定性差, 吸附剂的回收和再生过程复杂	多种载体或有效成分的复合研究
变湿吸附工艺	变湿吸附剂在湿度发生变化时对 CO ₂ 吸附	吸附脱附动力学速率快, 再生能耗低	捕获后 CO ₂ 浓度较低, 水分消耗大	开发出安全、可规模化量产的整体型功能化材料

但是再生温度高达 800 °C, 同时还伴随着挥发和设备腐蚀。据估计, 使用氢氧化钠 (NaOH) 作为吸收剂捕集成本 94 \$/t CO₂ ~ 232 \$/t CO₂。

Climeworks 公司^[33] 在冰岛建立了全球最大的直接空气捕碳 (DAC) 工厂 Orca 项目, 年捕集能力为 4 000 t CO₂, 并计划扩展到 10⁷ t。该公司还开发了创新的变温真空变压吸附 (TVSA) 系统, 利用胺基固体吸附剂, 并在低温真空条件下进行再生。如图 6 所示 Climeworks 于 2014 年启动了首个试点工厂, 并于 2017 年实现了首个工业规模 DAC 工厂, 年捕集 900 t CO₂。2020 年启动的 Orca 项目是首个商业化 DAC 项目, 预计 2024 年将推出 Mammoth 项目, 年捕集能力提升至 3.6×10⁴ t CO₂。其新型颗粒吸附床结构设计旨在减少气流压力损失, 并提高气体与吸附剂的质量传递效率。捕集的 CO₂ 被用于温室、食品工业或地质封存。

Global Thermostat^[34-36] 自 2010 创办以来, 现已建立了两个 DAC 试验工厂, 并且在不断扩大规模。该公司计划在智利建设一个年捕集 2 000 t CO₂ 的 DAC 工厂。工艺流程为一个多孔基材和附着的吸附剂, 通过轨道移动捕获空气中的 CO₂, 并在密封箱内通过汽提过程再生。具有成本低效率高的特点。公司还改进了多孔整料床的连续回路技术, 使成本更加低廉。此外, Global Thermostat 开发了结构稳定的整料基材, 具有两个主表面和大孔涂层, 由粘结的介孔颗粒形成的涂层可降低 CO₂ 解吸所需的能量。

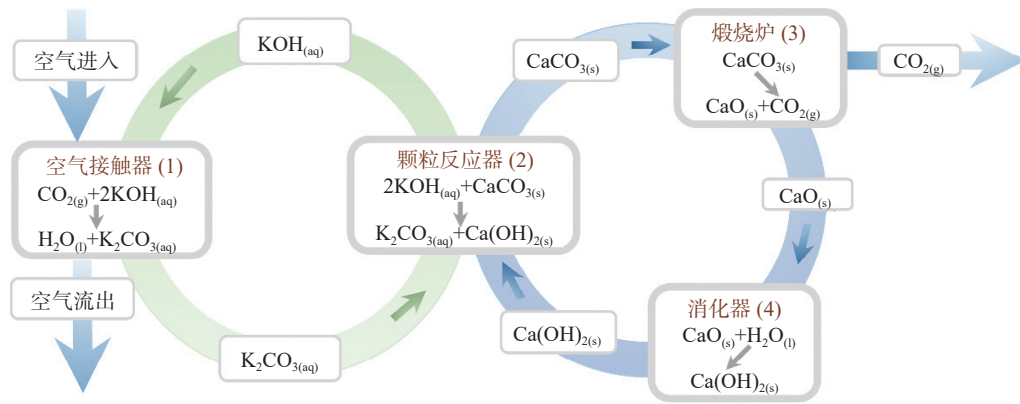
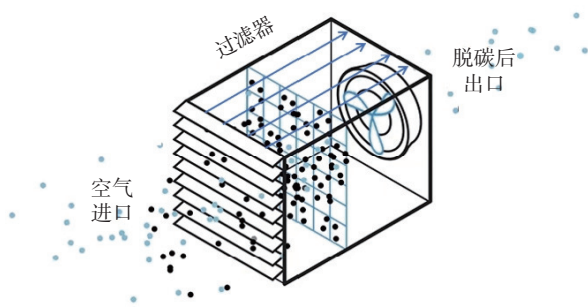


图 5 CE 工艺流程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of CE process flow

图 6 Climeworks 空气中直接捕集 CO₂ 示意图Fig. 6 Schematic diagram of Climeworks direct air capture of CO₂

2.2 国内 DAC 技术案例分析

中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司使用可再生能源驱动的多孔液体吸收剂捕集 CO₂^[37], 并将其转化为甲醇和甲酸, 解决了可再生能源弃电问题, 同时实现了碳减排和 CO₂ 资源化利用。目前, 该公司已建立了千克级催化剂示范线, 并优化了千吨级工艺流程。此外, 华能提出了捕碳调峰装置^[38], 通过可再生能源发电的过剩电力捕集 CO₂, 并利用 CO₂ 进行相变储能, 以补充发电不足。

邓帅教授的研究小组^[39]进行了创新, 设计出一种双极膜电渗析 CO₂ 捕集系统, 能有效提升捕集效率和 CO₂ 纯度。该系统通过将 KHCO₃ 溶液分配到吸收区和解吸区, 利用 OH⁻ 和 H⁺ 反应实现 CO₂ 捕集和释放。空气中的 CO₂ 与 OH⁻ 反应生成 HCO₃⁻, 然后 KHCO₃ 溶液转移至解吸区与 H⁺ 反应生成 CO₂ 和 K⁺。生成的 CO₂ 被捕集, K⁺ 通过阳离子交换膜回到吸收区, 完成循环。王涛等人^[40]设计了一种节能的 CO₂ 直接空气捕集系统, 包括空气输送、分配和 CO₂ 吸附装置, 后者配有喷淋系统。解吸液通过价态离

子筛分装置分离 CO₂, 并送入再生装置, 同时酸碱摆动再生装置浓缩碱液和产生酸液, 酸液与 CO₂ 反应生成 CO₂ 气体, 实现 CO₂ 的高效捕集与能源节约。冯俊婷等人^[41]通过多种技术合成了含 CO₃²⁻ 的层状复合金属氢氧化物(LDHs), 并使用选择性刻蚀技术引入金属离子空位, 制备的催化剂能在光催化中促进 CO₃²⁻ 消耗并在空气中捕集 CO₂, 实现持续再生和有效转化。

2024 年 7 月 15 日, 中国能建上海成套公司与上海交通大学合作开发的“碳捕块 CarbonBox”成功验证, 该装置是亚洲最大的年 600 t 级 CO₂ 直接空气捕集(DAC)系统。它不仅拥有自主知识产权, 还能高效从空气或不同浓度的排放源中捕集 99% 高浓度的 CO₂, 年处理能力超 100 t。该系统的研发集中解决了 DAC 技术的高能耗和高成本问题, 通过创新设计和工艺优化, 实现了低能耗运行和系统可靠性。此外, “碳捕块 CarbonBox”支持绿色甲醇和绿色航空燃油等领域的应用, 满足国际 ISCC 认证标准, 有效克服了生物质碳源的供给不稳定性, 为绿色燃料合成提供稳定的碳源。此项技术的突破将推动中国在双碳目标实现和能源绿色转型方面迈出重要步伐, 同时填补了国内外在大规模 DAC 应用领域的空白。

此外, 我国其他大型工业项目仍处于建设规划阶段。中国石油^[42]正在规划建设以蒸汽辅助温度真空摆动吸附(S-TVSA)技术为主的百吨级的 DAC 样机。华能集团规划 2024 年建造出千标方每小时的 DAC 样机^[43]。通过这些样机的建设, 希望在未来能够实现更大规模的 CO₂ 捕集和利用, 助力国家在碳减排和能源转型方面的目标。

3 DAC 技术的经济性评估

对于 DAC 技术的经济性评估,需要从多个角度进行分析,包括建设与运营成本、长期可持续性以及潜在的市场影响。DAC 技术虽然在技术上已逐步成熟,但高昂的运营成本和能源消耗依然是限制其大规模商业化应用的主要障碍。

首先, DAC 系统的建设成本较高,包括设备购置和安装费用。根据国际能源署(IEA)^[44]的数据, DAC 技术的资本成本为 1 000 \$/t CO₂ ~ 1 500 \$/t CO₂, 而其运行成本主要由能源消耗决定,这在很大程度上取决于捕集设备的能效以及使用的能源类型。其次, DAC 的运行成本主要受能源价格的影响。如果

采用可再生能源,如太阳能或风能,虽然可以降低环境成本,但因可再生能源的成本和可获得性问题,可能会增加整体成本。此外,政府政策和碳定价也是影响 DAC 经济性的重要因素。例如,通过实施碳税或碳交易体系,可以提高 DAC 技术的市场竞争力。

美国物理学会 2011 年报告^[45]采用 KOH 吸收的空气捕集成本评估,捕集成本不低于 705 \$/t CO₂。Keith 等^[32]基于中试数据的 KOH 溶液吸收成本测算,每年的捕集成本在 97 \$/t CO₂ ~ 238 \$/t CO₂。Climeworks 公司^[46]是一家来自于瑞士的公司,根据 600 ~ 900 t CO₂/a 规模示范装置的成本报告,该公司预计年捕集成本可达 300 \$/t CO₂ ~ 600 \$/t CO₂。其他研究的具体成本如表 3 所示。

表 3 DAC 技术成本比较
Tab. 3 Cost comparison of DAC technologies

研究	方法/技术	成本范围/[·(t CO ₂) ⁻¹]	说明
美国物理学会 2011 年报告 ^[45]	KOH 吸收	不低于 705	采用 KOH 吸收的空气捕集成本评估
Keith 等 ^[32]	KOH 溶液吸收	97 ~ 238	基于中试数据的 KOH 溶液吸收成本测算
Kulkarni 等 ^[47]	蒸汽辅助再生 TVSA 流程	~ 108	采用天然气与低品位热实现的蒸汽辅助再生
Sinha 等 ^[48]	胺基 MOFs 吸附剂	63 ~ 200	投资成本波动大,受 MOFs 材料生产成本影响
Climeworks 公司 ^[46]	商业示范装置	300 ~ 600	根据 600 ~ 900 t CO ₂ /a 规模示范装置的成本报告
Lackner 等 ^[12]	变湿吸附	50 ~ 100	实验室研究的技术成本预测

在全球范围内,许多国家已将 DAC 技术推广至商业示范的层面, Azarabadi 等人^[49]提出了一种用于 DAC 系统的技术经济模型估算方法。DAC 设备捕获 CO₂ 的现值成本包括 3 部分:运营和维护成本 ($N_{O\&M}$), 吸附剂材料成本 (N_S), 以及工厂资本成本 (N_{BoP})。 $N_{O\&M}$ 涵盖吸附剂装载和卸载的能源、材料和维护费用。 N_S 包括吸附剂的购买费用 (I_S) 和安装费用 (I_S)。

$$NPV_0 = N_{rev} - (N_{O\&M} + N_{BoP} + N_S) \quad (5)$$

式中:

N_{rev} ——设备运行期间出售 CO₂ 所产生的收入的净现值;

$N_{O\&M}$ 、 N_{BoP} 和 N_S 是成本 ——目前的操作和维护、设备和吸附剂的平衡;

NPV_0 ——计算单个吸附剂寿命的净现值。

假设吸附剂的使用寿命 (t_{life}) 为一个周期,则总的收益为:

$$N_{rev} = \int_0^{t_{life}} n_{rev}(t) dt = \frac{PC_0\tau_{eff}}{t_{cycle}} (1 - e^{-t_{life}/\tau_{eff}}) \quad (6)$$

$$\frac{1}{\tau_{eff}} = \frac{1}{\tau_D} + \frac{1}{\tau_M} \quad (7)$$

式中:

P ——每单位质量 CO₂ 的市场价格;

C_0 ——每个周期捕获的 CO₂;

t_{cycle} ——吸附剂循环时间;

τ_D ——吸附剂性能下降的时间常数;

τ_M ——货币时间价值的时间常数;

τ_{eff} —— τ_D 与 τ_M 的组合常数。

该经济模型可用于优化 DAC 装置的吸附剂性能。而中国则仍处于工业示范实验阶段,与集中降低捕集成本相比,我国的封存技术发展更侧重于提升储存能力及构建相应的基础设施。根据地质类型的不同, CO₂ 的封存成本为 50 ~ 300 元/t, 预计到 2050 年, CO₂ 的封存成本将降低 50% ~ 65%。

此外, DAC 技术的长期可持续性和市场潜力也是评估其经济性的关键。随着全球对减少温室气体排放的需求增加, DAC 技术提供了一种潜在的解决方案。然而, 其经济性将依赖于技术进步、成本降低和市场需求的增加。

在国内, DAC 技术的发展正面临着商业模式不明确的挑战。现阶段, 碳捕集的流向仍以驱油及封存为主, 当前的碳汇市场价格体系下, 上述方式难以支撑起足够的经济效益。因此, 解决经济性问题的重点在于将视角拓宽至 CO₂ 的利用环节, 将碳捕集的成本通过其后续的高价值利用来有效对冲, 实现整体经济性的优化与提升。

综上所述, 尽管 DAC 技术具有减缓气候变化的潜力, 但其经济性受多种因素影响, 需要进一步的技术革新和政策支持以提高其在未来低碳经济中的可行性和竞争力。

4 存在问题及举措

4.1 现阶段存在问题

DAC 技术作为一种新兴的负排放技术, 被认为是应对全球气候变化和实现双碳目标(碳达峰与碳中和)的重要举措。虽然在理论和实验阶段 DAC 显示出了巨大的潜力, 但在实际应用中仍面临着多种挑战。包括技术成本、能源需求、规模化难题以及社会经济接受度等方面。针对这些问题, 各国都在积极探索相应的解决举措来推动 DAC 技术的发展和应用。

DAC 技术存在的问题。

1) 高昂的成本: 成本问题是 DAC 技术的主要障碍。目前, DAC 系统的建设和运营成本仍然较高, 主要由于所需的先进材料、复杂的工艺流程以及大量的能源需求。例如, 当前估算表明, CO₂ 的捕集成本可能高达 200 \$/t CO₂ ~ 600 \$/t CO₂, 远高于传统的碳捕集与储存(CCUS)技术。

2) 能源需求巨大: 能源消耗问题也不容忽视。DAC 过程中的高能源需求不仅增加了运行成本, 还可能带来额外的碳排放, 从而影响其净减排效益。提高能源效率和采用可再生能源是解决这一问题的关键策略。

3) 技术成熟度有限: 技术成熟度和应用规模问

题也是 DAC 面临的重要挑战。尽管 DAC 技术在实验室环境中已有一定进展, 但在商业化应用和大规模部署方面仍存在很多不确定性。目前仅有少数示范项目在运行, 还没有形成大规模的应用场景。

4) 社会经济接受度: DAC 技术的实施涉及到庞大的基础设施建设和运营调整, 这可能会影响当地社区的经济结构和生活方式。此外, 公众对新技术的接受程度和环保意识也直接影响 DAC 技术的推广速度和广泛性。

4.2 应对措施

1) 降低成本: 研究更有效率的材料和过程是降低 DAC 技术成本的关键。例如, 开发新型吸收剂或改良现有吸收剂的化学性质, 以提高其 CO₂ 捕获效率和循环使用率。同时, 通过优化系统设计和流程, 改进气体流动路径和减少能源消耗, 也有助于降低总体成本。此外使用太阳能、风能等可再生能源直接为 DAC 系统供能, 也是降低能源消耗的有效方法。可以显著减少系统的碳足迹, 提高其在双碳战略中的作用。

2) 增加政策支持: 政府可以通过制定优惠政策和提供财政补贴来降低企业的试点成本和商业风险。同时增加示范项目数量, 扩大试点规模, 积累实践经验, 并持续优化技术和运营模式。此外, 建立和完善碳定价机制, 如碳税或碳交易市场, 可以为 DAC 项目提供经济激励。政府与企业的合作可以加速技术验证和推广, 构建有利于技术发展的生态系统。

3) 公众教育和社会动员: 增强公众对气候变化和 DAC 技术的认识是推动技术接受和实施的关键。通过教育、工作坊和媒体宣传等方式, 提高公众对碳减排重要性的认识, 并激发社会各界对环保技术的支持和参与。

4) 跨国合作和技术共享: 鉴于气候变化是全球性问题, 国际合作对于资源共享、技术转移和经验交流至关重要。通过国际组织和多边机构的平台, 加强不同国家和地区在 DAC 技术研发和应用方面的合作。

尽管 DAC 技术面临多种挑战, 但其在应对碳中和的潜力不容忽视。通过持续的技术创新、政策支持、社会动员及国际合作, 可以逐步克服现阶段的困难, 推动 DAC 技术向更广泛的应用和商业化迈进。

5 结论

本文综合评估了DAC技术在实现碳中和目标中的应用前景和经济性。DAC技术提供了一种从大气中直接捕集CO₂的有效手段,展现了布置灵活性和与可再生能源结合的潜力。然而,高昂的成本、巨大的能源需求、技术成熟度不足和社会经济接受度问题限制了其发展。为克服这些问题,需采取降低成本、增加政策支持、提高公众意识和促进国际合作等措施。通过这些努力,DAC技术有望在碳减排和环境保护方面发挥重要作用,支持我国实现碳达峰、碳中和的目标。

参考文献:

- [1] 王林. 第28届联合国气候变化大会在迪拜开幕 [N]. 2023-12-04(01). DOI: 10.28693/n.cnki.nshca.2023.001934.
WANG L. The 28th United Nations climate change conference opens in Dubai [N]. 2023-12-04(01). DOI: 10.28693/n.cnki.nshca.2023.001934.
- [2] 蔡绍宽. 双碳目标的挑战与电力结构调整趋势展望 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.
CAI S K. Challenges and prospects for the trends of power structure adjustment under the goal of carbon peak and neutrality [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.
- [3] DJALANTE R. Key assessments from the IPCC special report on global warming of 1.5 °C and the implications for the Sendai framework for disaster risk reduction [J]. *Progress in disaster science*, 2019, 1: 100001. DOI: 10.1016/j.pdisas.2019.100001.
- [4] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径 [J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15. DOI: 10.12120/bjutsxb202103001.
HU A G. China's goal of achieving carbon peak by 2030 and its main approaches [J]. *Journal of Beijing University of Technology (social sciences edition)*, 2021, 21(3): 1-15. DOI: 10.12120/bjutsxb202103001.
- [5] 邢伟, 徐汝隆, 高贺同, 等. 专利视角下空气中直接捕集CO₂技术发展分析 [J]. 洁净煤技术, 2023, 29(4): 86-97. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.RM23041801.
XING W, XU R L, GAO H T, et al. Analysis of the development of direct capture of carbon dioxide in the air from patent perspective [J]. *Clean coal technology*, 2023, 29(4): 86-97. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.RM23041801.
- [6] STEVENSON R. Negative emissions technologies and reliable sequestration: a research agenda [J]. *Integrated environmental assessment and management*, 2021, 17(2): 488-489.
- [7] TIAN Y X, WANG R H, DENG S M, et al. Coupling direct atmospheric CO₂ capture with photocatalytic CO₂ reduction for highly efficient C₂H₆ production [J]. *Nano letters*, 2023, 23(23): 10914-10921. DOI: 10.1021/acs.nanolett.3c03167.
- [8] ZHU X C, XIE W W, WU J Y, et al. Recent advances in direct air capture by adsorption [J]. *Chemical society reviews*, 2022, 51(15): 6574-6651. DOI: 10.1039/D1CS00970B.
- [9] 曹成, 侯正猛, 熊鹰, 等. 云南省碳中和技术路线与行动方案 [J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 37-46. DOI: 10.15961/j.jsuese.202100919.
CAO C, HOU Z M, XIONG Y, et al. Technical routes and action plan for carbon neutral for Yunnan Province [J]. *Advanced engineering sciences*, 2022, 54(1): 37-46. DOI: 10.15961/j.jsuese.202100919.
- [10] 侯正猛, 熊鹰, 刘建华, 等. 河南省碳达峰与碳中和战略、技术路线和行动方案 [J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 23-36. DOI: 10.15961/j.jsuese.202100627.
HOU Z M, XIONG Y, LIU J H, et al. Strategy, technical route and action plan towards carbon peak and carbon neutrality in Henan Province [J]. *Advanced engineering sciences*, 2022, 54(1): 23-36. DOI: 10.15961/j.jsuese.202100627.
- [11] 陈彬, 谢和平, 刘涛, 等. 碳中和背景下先进制氢原理与技术研究进展 [J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 106-116. DOI: 10.15961/j.jsuese.202100686.
CHEN B, XIE H P, LIU T, et al. Principles and progress of advanced hydrogen production technologies in the context of carbon neutrality [J]. *Advanced engineering sciences*, 2022, 54(1): 106-116. DOI: 10.15961/j.jsuese.202100686.
- [12] LACKNER K S. Capture of carbon dioxide from ambient air [J]. *The European physical journal special topics*, 2009, 176(1): 93-106. DOI: 10.1140/epjst/e2009-01150-3.
- [13] SUTHERLAND B R. Pricing CO₂ direct air capture [J]. *Joule*, 2019, 3(7): 1571-1573. DOI: 10.1016/j.joule.2019.06.025.
- [14] BRETHOME F M, WILLIAMS N J, SEIPP C A, et al. Direct air capture of CO₂ via aqueous-phase absorption and crystalline-phase release using concentrated solar power [J]. *Nature energy*, 2018, 3(7): 553-559. DOI: 10.1038/s41560-018-0150-z.
- [15] LACKNER K S, BRENNAN S, MATTER J M, et al. The urgency of the development of CO₂ capture from ambient air [J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2012, 109(33): 13156-13162. DOI: 10.1073/pnas.1108765109.
- [16] 王涛, 董昊, 侯成龙, 等. 直接空气捕碳CO₂吸附剂综述 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(3): 462-475. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2022.03.005.
WANG T, DONG H, HOU C L, et al. Review of CO₂ direct air capture adsorbents [J]. *Journal of Zhejiang University (engineering science)*, 2022, 56(3): 462-475. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2022.03.005.
- [17] 廖昌建, 张可伟, 王晶, 等. 直接空气捕碳二氧化碳技术研究进展 [J]. 化工进展, 2024, 43(4): 2031-2048. DOI: 10.16085/j.issn.

- 1000-6613.2023-0606.
- LIAO C J, ZHANG K W, WANG J, et al. Progress on direct air capture of carbon dioxide [J]. *Chemical industry and engineering progress*, 2024, 43(4): 2031-2048. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2023-0606.
- [18] ZEMAN F. Energy and material balance of CO₂ capture from ambient air [J]. *Environmental science & technology*, 2007, 41(21): 7558-7563. DOI: 10.1021/es070874m.
- [19] KEITH D W, HA-DUONG M, STOLAROFF J K. Climate strategy with CO₂ capture from the air [J]. *Climatic change*, 2006, 74(1/3): 17-45. DOI: 10.1007/s10584-005-9026-x.
- [20] MAHMOUDKHANI M, HEIDEL K R, FERREIRA J C, et al. Low energy packed tower and caustic recovery for direct capture of CO₂ from air [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Washington, USA, November 16-20, 2008. 2009.
- [21] 王献红. 二氧化碳捕集和利用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- WANG X H. CO₂ capture and utilization [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016.
- [22] HODDENBAGH J M A, WILFING K, MILLER K, et al. Borate autocauticizing: a cost effective technology [C]//Paper Presented at the 2001 Intl. Chemical Recovery Conference, Whistler, Canada, June 11, 2001. 2002.
- [23] STOLAROFF J K, KEITH D W, LOWRY G V. Carbon dioxide capture from atmospheric air using sodium hydroxide spray [J]. *Environmental science & technology*, 2008, 42(8): 2728-2735. DOI: 10.1021/es702607w.
- [24] SEIPP C A, WILLIAMS N J, KIDDER M K, et al. CO₂ capture from ambient air by crystallization with a guanidine sorbent [J]. *Angewandte chemie international edition*, 2017, 56(4): 1042-1045. DOI: 10.1002/anie.201610916.
- [25] CAMPER D, BARA J E, GIN D L, et al. Room-temperature ionic liquid-amine solutions: tunable solvents for efficient and reversible capture of CO₂ [J]. *Industrial & engineering chemistry research*, 2008, 47(21): 8496-8498. DOI: 10.1021/ie801002m.
- [26] 翁小涵, 韩涛, 冯玮, 等. 负碳排放技术研究现状及进展 [J/OL]. 洁净煤技术, 2024: 1-19 (2024-07-30) [2024-08-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20240729.1729.010.html>.
- WENG X H, HAN T, FENG W, et al. Current status and progress of negative carbon emission technologies [J/OL]. *Clean coal technology*, 2024: 1-19 (2024-07-30) [2024-08-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20240729.1729.010.html>.
- [27] ZHAO M, XIAO J, GAO W, et al. Defect-rich Mg-Al MMO₂ supported TEPA with enhanced charge transfer for highly efficient and stable direct air capture [J]. *Journal of energy chemistry*, 2022, 68: 401-410. DOI: 10.1016/j.jechem.2021.12.031.
- [28] ZHANG Z Q, DING Q, CUI J Y, et al. High and selective capture of low-concentration CO₂ with an anion-functionalized ultramicroporous metal-organic framework [J]. *Science China materials*, 2021, 64(3): 691-697. DOI: 10.1007/s40843-020-1471-0.
- [29] BHATT P M, BELMABKHOUT Y, CADIAU A, et al. A fine-tuned fluorinated MOF addresses the needs for trace CO₂ removal and air capture using physisorption [J]. *Journal of the American chemical society*, 2016, 138(29): 9301-9307. DOI: 10.1021/jacs.6b05345.
- [30] WANG T, WANG X R, HOU C L, et al. Quaternary functionalized mesoporous adsorbents for ultra-high kinetics of CO₂ capture from air [J]. *Scientific reports*, 2020, 10(1): 21429. DOI: 10.1038/s41598-020-77477-1.
- [31] UNIVERSITY Z, CHINA H Z, UNIVERSITY A S, et al. Characterization of kinetic limitations to atmospheric CO₂ capture by solid sorbent [J]. *Greenhouse gases: science and technology*, 2015.
- [32] KEITH D W, HOLMES G, ANGELO D S, et al. A process for capturing CO₂ from the atmosphere [J]. *Joule*, 2018, 2(8): 1573-1594. DOI: 10.1016/j.joule.2018.05.006.
- [33] 克里斯托夫·格巴尔, 尼古拉斯·皮亚考斯基, 托拜厄斯·吕埃施, 等. 用于吸附气体分离过程的颗粒吸附床的低压降结构: CN105163830A [P]. 2018-01-09.
- CHRISTOPH GEBÄHR, NICOLAS PIAKOWSKI, TOBIAS LUEESCH, et al. Low-pressure drop structure of particle adsorbent bed for adsorption gas separation process: CN105163830A [P]. 2018-01-09.
- [34] 彼得·艾森伯格. 捕集和封存二氧化碳的系统和方法: CN103079671A [P]. 2013-05-01.
- EISENBERGER P. System and method for carbon dioxide capture and sequestration: CN103079671A [P]. 2013-05-01.
- [35] 彼得·艾森伯格. 用于二氧化碳捕集和储存的系统和方法: CN104380021B [P]. 2016-11-30.
- EISENBERGER P. System and method for carbon dioxide capture and sequestration: CN104380021B [P]. 2016-11-30.
- [36] 彼得·艾森伯格, 格雷谢拉·奇奇尔尼斯基. 从大气中除去二氧化碳和全球恒温器: CN106268183A [P]. 2017-01-04.
- EISENBERGER P, CHICHILNISKY G. Removing carbon dioxide from atmosphere and global thermostat: CN106268183A [P]. 2017-01-04.
- [37] 王焕君, 郭东方, 汪世清, 等. 一种利用二氧化碳和水合成甲醇的装置及方法: CN113511955A [P]. 2021-10-19.
- WANG H J, GUO D F, WANG S Q, et al. Device and method for synthesizing methanol by using carbon dioxide and water: CN113511955A [P]. 2021-10-19.
- [38] 王焕君, 郭东方, 刘蓉, 等. 一种捕碳调峰耦合装置及方法: CN113521967A [P]. 2021-10-22.
- WANG H J, GUO D F, LIU R, et al. Carbon capture peak regulation coupling device and method: CN113521967A [P]. 2021-10-22.
- [39] 邓帅, 孙鹏, 黄耀炜. 一种双极膜电渗析空气碳捕集系统:

- CN114307567A [P]. 2022-04-12.
- DENG S, SUN P, HUANG Y W. Bipolar membrane electro dialysis air carbon capture system: CN114307567A [P]. 2022-04-12.
- [40] 王涛, 刘卫山, 夏芝香, 等. 具有精准离子控制的直接空气捕碳二氧化碳节能系统和方法: CN114515494B [P]. 2022-11-25.
- WANG T, LIU W S, XIA Z X, et al. Direct air capture carbon dioxide energy saving system and method with precise ion control: CN114515494B [P]. 2022-11-25.
- [41] 冯俊婷, 李殿卿, 岳晓雪, 等. 一种 CO₂ 捕获转化耦合生物质氧化用光催化剂及其制备方法和应用: CN114471567B [P]. 2023-04-28.
- FENG J T, LI D Q, YUE X X, et al. Photocatalyst for CO₂ capture and conversion coupled biomass oxidation as well as preparation method and application of photocatalyst: CN114471567B [P]. 2023-04-28.
- [42] 周爱国, 郑家乐, 杨川箬, 等. 直接空气二氧化碳捕集技术工业化进展 [J]. 化工进展, 2024, 43(6): 2928-2939. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2023-2211.
- ZHOU A G, ZHENG J L, YANG C R, et al. Industrial progress in direct air CO₂ capture technology [J]. Chemical industry and engineering progress, 2024, 43(6): 2928-2939. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2023-2211.
- [43] 王焕君, 刘蓉, 郭东方, 等. 一种可再生能源驱动的二氧化碳加氢合成甲酸的系统及方法: CN113620798A [P]. 2021-11-09.
- WANG H J, LIU R, GUO D F, et al. Renewable energy driven system and method for synthesizing formic acid through carbon dioxide hydrogenation: CN113620798A [P]. 2021-11-09.
- [44] IEA bioenergy - update 74 [J]. Biomass and bioenergy, 2024, 184: 107023. DOI: 10.1016/j.biombioe.2023.107023.
- [45] SOCOLOW R, DESMOND M, AINES R, et al. Direct air capture of CO₂ with chemicals: a technology assessment for the APS panel on public affairs [J]. American physical society, 2011.
- [46] DEUTZ S, BARDOW A. Life-cycle assessment of an industrial direct air capture process based on temperature-vacuum swing adsorption [J]. Nature energy, 2021, 6(2): 203-213. DOI: 10.1038/s41560-020-00771-9.
- [47] KULKARNI A R, SHOLL D S. Analysis of equilibrium-based TSA processes for direct capture of CO₂ from air [J]. Industrial & engineering chemistry research, 2012, 51(25): 8631-8645. DOI: 10.1021/ie300691c.
- [48] SINHA A, DARUNTE L A, JONES C W, et al. Systems design and economic analysis of direct air capture of CO₂ through temperature vacuum swing adsorption using MIL-101(Cr)-PEI-800 and mmen-Mg₂(dobpdc) MOF adsorbents (vol 56, pg 750, 2017) [J]. Industrial & engineering chemistry research, 2020, 59(1): 503-505. DOI: 10.1021/acs.iecr.9b06779.
- [49] AZARABADI H, LACKNER K S. A sorbent-focused techno-economic analysis of direct air capture [J]. Applied energy, 2019, 250: 959-975.

作者简介:



张柠涛

张柠涛(第一作者)

2000-, 女, 硕士, 主要从事从空气中直接捕集二氧化碳(e-mail)zningtao@163.com。



汪黎东

汪黎东(通信作者)

1978-, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大气污染控制(e-mail)wld@ncepu.edu.cn。

项目名称 国家自然科学基金面上项目(22178096); 新型功能化离子液体吸收剂/电解质构建及 CO₂ 原位还原机理(2022/01—2025/12)

承担单位 华北电力大学

项目概述 本项目构筑碱金属螯合胺基离子液体吸收剂/电解质, 通过胺基介质吸收 CO₂ 过程将高度稳定的 CO₂ 自发转变成 RNHCOO⁻, 使 CO₂ 预活化, 再利用可再生能源将 RNHCOO⁻ 在阴极直接还原再生。

项目名称 北京市自然科学基金面上项目(2232029); 基于胺基富液的 CO₂ 原位还原过程中高效电子传输路径的构建(2023/01—2025/12)

承担单位 华北电力大学

项目概述 本项目探究胺基富液体系中电化学双电层的调控机制, 为原位还原构建高效电子传输路径; 组建“吸收活化-原位还原”电池组件, 明确产物分布规律及调控机制。

(编辑 赵琪)