

直接空气捕碳 (DAC) 的成本评估预测及其影响因素

周爱国¹, 余晓洁², 贺红旭³, 夏菡佑², 孙雨萌³, 刘牧心², 梁 希^{2,4}

(1. 中国石油天然气集团公司科学技术协会, 北京 100007; 2. 广东南方碳捕集与封存产业中心, 广东广州 510530; 3. 中国石油天然气集团公司油气行业气候倡议组织(OGCI)工作秘书处, 北京 100007; 4. 伦敦大学学院, 伦敦 WC1E 6BT)

摘要: 直接空气捕碳技术能够从大气中直接捕获二氧化碳, 是人类应对气候变化的重要手段。为了定量评估和预测中国 DAC 技术的成本, 采用自上而下的工程经济分析方法构建了 DAC 成本分析及预测模型, 并选取基于液体吸收工艺 (L-DAC) 和固体吸附工艺 (S-DAC) 的 DAC 技术, 对不同规模情景、技术路径、能源类型下的 DAC 成本进行了研究。结果表明: 未来的部署规模是影响 DAC 成本的关键因素。到 2060 年时, 若中国 DAC 的 CO₂ 捕集规模仅为 0.3 亿 t/a, 则 L-DAC 和 S-DAC 的 CO₂ 去除成本将分别达到 1 037 ~ 1 838 元/t 和 869 ~ 922 元/t; 若部署规模达到 3 亿 t/a, 碳去除成本将分别降至 729 ~ 1 237 元/t 和 543 ~ 580 元/t; 若部署规模达到 6 亿 t/a, 碳去除成本将进一步降至 655 ~ 1 102 元/t 和 472 ~ 505 元/t。能源相关的碳排放会降低 DAC 从空气中去除 CO₂ 的效率, 造成 DAC 碳去除成本上升。其中, 当使用核电、光伏、风电和水电等非化石能源供能时, DAC 碳去除成本在捕集成本的基础上略微增加; 当使用电网或外购热供能时, DAC 碳去除成本的增加较为明显。到 2060 年, 使用光伏供能比其他供能方式更具成本优势。基于上述研究成果, 建议尽早实施 DAC 技术的规模化示范工程, 稳步扩大 DAC 应用规模, 通过规模效应、工程优化降低 DAC 成本; 建议 DAC 工厂因地制宜选择非化石能源供能, 以降低碳去除成本。

关键词: 直接空气捕碳; 成本; 成本预测模型; DAC

中图分类号: TK91 文献标志码: A 文章编号: 1006-4772(2024)10-0186-13

Assessment and prediction of cost for direct air capture (DAC) and its influencing factors

ZHOU Aiguo¹, YU Xiaojie², HE Hongxu³, XIA Changyou², SUN Yumeng³, LIU Muxin², LIANG Xi^{2,4}

(1. China National Petroleum Corporation Science and Technology Association, Beijing 100007, China; 2. Guangdong Southern Carbon Capture and Storage Industry Centre, Guangzhou 510530, China; 3. China National Petroleum Corporation's Oil and Gas Climate Initiative (OGCI) Working Secretariat, Beijing 100007, China; 4. University College London, London WC1E 6BT, United Kingdom)

Abstract: Direct air capture (DAC) technology, which captures carbon dioxide directly from the atmosphere, is a crucial tool in combating climate change. To quantitatively assess and predict the cost of DAC technology in China, this paper employs a top-down engineering economic analysis approach to develop a DAC cost analysis and prediction model. The study examines two types of DAC technologies: liquid absorption DAC (L-DAC) and solid adsorption DAC (S-DAC). The costs of DAC under different scenarios of deployment scale, technological pathways, and energy types are investigated. The results indicate that the future deployment scale is a key factor influencing DAC costs. By 2060, if the DAC deployment in China is limited to 30 million tons of CO₂ per year, the cost of carbon removal for L-DAC and S-DAC will range from 1 037 to 1 838 yuan/t and 869 to 922 yuan/t, respectively. If the deployment scale reaches 300 million tons of CO₂ per year, the costs will decrease to 729-1 237 yuan/t and 543-580 yuan/t, respectively. With a deployment scale of 600 million tons of CO₂ per year, the costs will further drop to 655-1 102 yuan/t and 472-505 yuan/t, respectively. Energy-related carbon emissions reduce the efficiency of CO₂ removal from the air by DAC, leading to an increase in the carbon removal cost. When using non-fossil energy sources such as nuclear, photovoltaic, wind, and hydro power, the DAC carbon removal cost slightly increases over the

收稿日期: 2024-04-28; 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS24042801

作者简介: 周爱国(1963—), 男, 江西彭泽人, 教授级高级工程师。E-mail: zhouag@cncp.com.cn

通讯作者: 夏菡佑(1990—), 男, 浙江温州人, 研究总监。E-mail: Changyou.Xia@gdcccus.org

引用格式: 周爱国, 余晓洁, 贺红旭, 等. 直接空气捕碳(DAC)的成本评估预测及其影响因素 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30(10): 186-198.

ZHOU Aiguo, YU Xiaojie, HE Hongxu, et al. Assessment and prediction of cost for direct air capture (DAC) and its influencing factors [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(10): 186-198.



capture cost; however, when using grid electricity or purchased heat, the increase is more significant. By 2060, photovoltaic energy supply presents a more cost-effective option compared to other energy sources. Based on these findings, it is recommended to implement large-scale DAC demonstration projects as soon as possible and gradually expand the application scale of DAC to reduce costs through economies of scale and engineering optimization. It is also advised that DAC plants select non-fossil energy sources according to local conditions to reduce carbon removal costs.

Key words: direct air capture; cost; cost prediction model; DAC

0 引言

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第6次评估报告(AR6)指出,根据各国截至2021年10月公布的自主贡献目标,2030年全球温室气体排放量可能使21世纪全球温升超 1.5°C ,并难以控制在 2°C 内^[1]。面对全球气候变暖的严峻挑战,仅依靠降低温室气体排放无法实现各国设定的净零排放目标;因此,还需采取积极主动的措施,从大气中去除二氧化碳(Carbon Dioxide Removal, CDR)^[2-3]。

直接空气捕碳(Direct Air Capture, DAC)是一种能够从空气中直接分离并捕获二氧化碳的CDR技术。DAC技术的优势在于土地占用较少、部署方式灵活多样,有助于减少对诸如生物质能碳捕集与封存(Bioenergy with Carbon Capture and Storage, BECCS)和生态碳汇等高度依赖生态资源的CDR技术的需求^[4]。同时,DAC技术对生物多样性、水资源和粮食安全的影响相对较小,因此具备在未来实现大规模商业化应用的潜力^[5-6]。

为实现碳中和目标,据预测,中国到2060年需要通过直接空气捕碳与封存(Direct Air Carbon Capture and Storage, DACCS)技术去除2亿~3亿t难以通过常规手段减排的 CO_2 ^[7]。考虑到所需的减排规模,中国应特别重视DAC技术的研发投入、技术储备和示范应用。值得关注的是,在2021年11月于格拉斯哥举行的联合国气候变化大会上,中美两国签署了《中美关于在21世纪20年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言》,承诺在DAC技术的部署和应用方面展开合作^[8]。此外,我国在2022年由科技部等联合发布的《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030年)》中,明确将DAC列为前沿和颠覆性低碳技术之一^[9]。由此可见,DAC等关键CDR技术已成为中国实现碳中和目标的关键技术之一^[10]。

由于空气中 CO_2 的体积分数极低,仅为0.04%,且分压比典型燃煤烟气中的 CO_2 低300倍,导致从空气中捕集 CO_2 的成本非常高。目前关于DAC成本的研究中,成本概念可分为捕集成本和碳去除成本2类。捕集成本指的是在DAC项目整个周期

内,捕获每单位 CO_2 所需的经济投入;而碳去除成本则是在扣除项目运行过程中额外产生的 CO_2 排放后,从空气中净捕获每单位 CO_2 的成本。

现有研究数据显示,目前DAC技术的 CO_2 捕集成本在250~600美元/t^[11]。其中,基于液体吸收工艺的DAC技术(Liquid DAC, L-DAC)捕集成本普遍高于340美元/t。而基于固体吸附工艺的DAC技术(Solid DAC, S-DAC)捕集成本则普遍超过540美元/t。值得注意的是,利用DAC从空气中实现碳去除的成本更高,为200~700美元/t^[12]。部分商业公司已经公布了其已建成项目的成本数据,例如Climeworks公司所报告的DAC成本为500~600美元/t^[13-14],而Carbon Engineering公司的成本则在94~232美元/t^[15]。此外,有研究表明,当DAC规模达到100万t/a时,L-DAC的捕集成本在303~444美元/t^[16],碳去除成本在610~780美元/t^[17-18];相同规模下,S-DAC的捕集成本则在86~229美元/t,碳去除成本在124~407美元/t^[19-20]。

关于DAC未来成本的预测,学界和业界存在不同的看法。美国能源部针对DAC技术设定了较为乐观的发展目标,即在2050年实现每年10亿t的 CO_2 捕集规模,并将成本控制在100美元/t以内^[21]。部分研究也表明,随着技术的进步和规模化应用,未来的DAC去除成本有望下降至100~200美元/t^[22]。IPCC第6次评估报告认为,未来DACCS的成本可能会下降至100~300美元/t^[1]。然而,也有一些更为审慎的预测,认为到2050年DAC的捕集成本可能降至100~600美元/t,但要实现这一成本水平的难度较大,需要制定强有力的政策予以支持^[23]。

综上所述,现有文献对DAC成本的估算和预测呈现出较大的差异性。目前,众多公开资料中所引用的DAC成本数据,大多源自技术开发公司所提供的信息,这些数据往往缺乏独立的第3方验证及详尽的阐释,且时常出现捕集成本与碳去除成本界限模糊的问题。另一方面,学术研究在探讨DAC成本时,其技术路径与边界条件的设定亦不尽相同,这无疑增加了DAC成本分析的不确定性。考虑到DAC技术当前仍处于发展的初级阶段,此

类不确定性在某种程度上是难以规避的。然而，在特定的模型假定框架下，基于不同的技术路径与情景所进行的经济性分析，依然能够在一定程度上揭示 DAC 技术成本的相对水平及其变化趋势，从而具有一定的参考价值。当前，我国对 DAC 技术的研究和应用尚处于起步阶段，因此，深入开展 DAC 成本研究以辅助项目和投资决策的制定显得尤为迫切。

为了填补我国在 DAC 成本研究领域的空白，得出清晰合理的成本分析结果，笔者采用自上而下的工程经济分析方法，构建了 DAC 技术的成本分析和预测模型。借助此模型，计算了不同 DAC 技术在首个工厂中的捕集成本和碳去除成本，并对我国未来在不同情景下的 DAC 成本进行了预测。重点探究了部署规模和供能方式对 DAC 成本的影响，以期由政府、企业和投资者开发 DAC 项目、建设 DAC 工厂提供有益的参考依据。

1 模型构建及相关基准

1.1 DAC 技术成熟度

技术就绪指数 (Technology Readiness Level, TRL)，也称为技术成熟度，是衡量技术发展成熟程度的指标。笔者采用国际能源署 (IEA) 开发的技术 TRL 量表 (表 1)，对 DAC 技术的成熟度进行评估。该量表在美国航空航天局 (NASA) 开发的 TRL 1~9 级的基础上^[24]，额外增设了 2 个成熟度级别 (TRL 10 和 TRL 11)，更适合能源和气候领域的技术评估^[12]。

DAC 技术捕获空气中的二氧化碳主要包括吸附和解吸两大环节。在吸附阶段，空气通过风扇引入至空气接触器，使 CO₂ 与接触器内的捕集材料相结合^[25]。在解吸阶段，通过改变温度、湿度、压力等条件，将 CO₂ 从捕集材料中释放。根据工艺路线的差异，DAC 技术可归纳为 4 种主要类型：液体吸收 DAC、固体吸附 DAC、膜分离 DAC 以及电化学分离 DAC。

在液体吸收 DAC 技术领域，加拿大 Carbon Engineering 公司研发的基于 KOH-Ca(OH)₂ 溶液的 DAC 技术 (L-DAC) 已通过原型机验证，并完成了小规模示范部署，其工艺流程如图 1 所示。预计 2024 年投入运营的 CO₂ 捕集规模为 50 万~100 万 t/a 的美国 DAC1 项目即采用该技术^[26]。因此，基于 KOH-Ca(OH)₂ 溶液的 DAC 技术目前处于 TRL 6~7 级成熟度。碱性氢氧化物溶液、胺溶液以及氨基酸盐溶液等液体吸收 DAC 技术，目前仍处于实验室研发阶段^[27]，TRL 评级为 1~3 级。

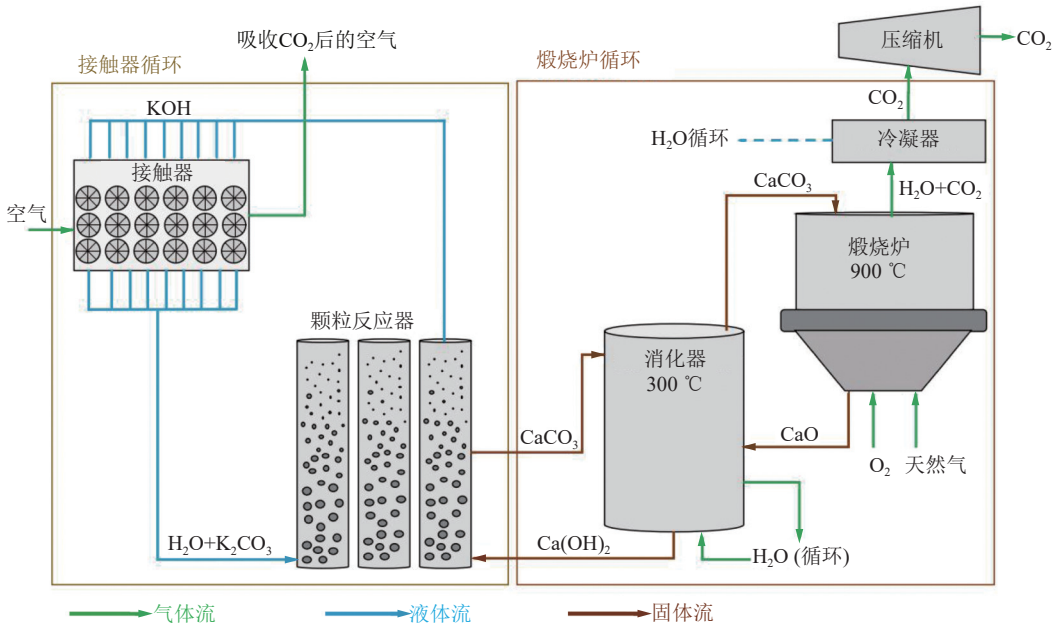
表 1 IEA 的 TRL 评价量表

Table 1 TRL evaluation table from IEA

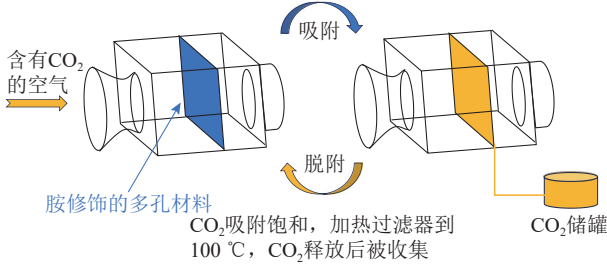
TRL 级别	描述
1	技术基本原理已定义
2	技术解决方案的概念和应用已确定
3	通过实验验证了技术的核心功能，但尚未开发出原型机
4	在实验室条件下原型机得到验证
5	在特定的应用场景下，原型机通过验证
6	在特定的应用场景下，原型机通过一定规模的验证
7	技术解决方案在既定的条件下稳定运行
8	商业示范项目已完成部署
9	技术解决方案已具备商业可行性，但仍需持续改进以保持市场竞争力
10	技术解决方案已具备商业竞争力，但尚需进一步的系统集成工作
11	实现可预测的增长

在固体吸附 DAC 技术领域，Climeworks 公司于 2017 年在瑞士投运了世界上第 1 个采用固态胺吸附技术 (S-DAC) 的 DAC 工厂，CO₂ 捕集规模为 900 t/a，工厂的建设成本为 300 万~400 万欧元^[28-29]，其工艺流程如图 2 所示。随后，2021 年，Climeworks 进一步扩大规模，在冰岛投运了规模为 4 000 t/a 的 Orca 工厂，且目前正在建设规模为 3.6 万 t/a 的 Mammoth 工厂。鉴于其实际应用与规模化进展，固态胺吸附 DAC 技术的 TRL 已达到 7~8 级。此外，值得一提的是，2022 年挪威已投入运营首个基于沸石技术的 DAC 工厂，并计划到 2025 年通过 Removr 项目将规模扩大到 2 000 t/a^[30]，该技术 TRL 评级为 5 级。另一方面，Origen 公司研发了基于石灰石的 DAC 技术，并设计了专有工艺、窑炉和接触器，目前正在致力于利用该技术推进大规模项目开发^[31]，其技术成熟度目前处于 TRL 4 级。与此同时，基于碱/碱土金属基吸附剂、金属有机框架 (Metal Organic Framework, MOF) 类吸附剂、负载胺基吸附剂、变湿吸附剂等固体吸附 DAC 技术仍处于实验室研究阶段^[32]，目前 TRL 为 1~3 级。

尽管膜分离 DAC 技术被视为一种可行的从空气中捕集 CO₂ 的方法，但在实际应用中，膜技术需要应对大气中 CO₂ 体积分数较低的问题。由于环境压力下 CO₂ 的选择性捕获效率不高，要想实现高效的 CO₂ 分离，就必须对大量的环境空气进行压缩，而此过程的成本高昂^[34]，因此该技术目前的 TRL 仅为 2~3 级。

图1 KOH- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液 DAC 技术流程示意Fig. 1 Diagram of the KOH- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solution DAC technology

空气中的 CO_2 被吸入过滤器中,
通过化学键结合在过滤器上

图2 固态胺 DAC 技术流程示意^[33]Fig. 2 Diagram of the solid amine DAC technology^[33]

电化学分离 DAC 技术利用电化学电池从空气中捕集 CO_2 。当固体电极处于负电荷状态时吸附 CO_2 ，而在施加正电荷时则会释放 CO_2 。此技术利用电荷变化，而非温度或压力的变化，来实现 CO_2 的吸附和解吸过程，因此也被称作电摆动吸附 DAC。从理论上讲，由于电池具有可堆叠性，因此该技术占用的空间相对较小，并且无需如 L-DAC 技术那般依赖额外设备进行调节或泵送，显示出巨大的规模化应用潜力。尽管 E-DAC 在能耗方面相较于传统分离技术有所降低，但在容量和动力学方面，尚未能超越依赖温度和压力变化的传统技术^[35]。E-DAC 技术由麻省理工学院率先研发，目前 Verdox 公司正在对其进行更深入的研究。实验室规模的测试表明，在低体积分数 CO_2 条件下（0.6% ~ 10.0%）下，E-DAC 技术捕集效率能达到约 90%，因此其 TRL 为 4 级。除 Verdox 外，Mission Zero 和 Holy Grail 公司也在积极研发 E-DAC 技术，后者已筹集了 270 万美元的种子资金以推动技术

研发。

此外，多家研究机构正在对 DAC 的替代技术进行基础研究和技术开发，这些技术的 TRL 普遍处于 1 ~ 3 级。例如，美国橡树岭国家实验室正在探索在 15 ~ 120 °C 条件下使用特定溶剂从空气中分离 CO_2 的技术^[36-37]；亚利桑那州立大学的负碳排放中心正在设计依赖自然风进行空气循环的“机械树”原型^[38]；Captura 公司正在美国洛杉矶港测试从海水中捕集 CO_2 的系统^[39]。

1.2 DAC 技术的能量需求

鉴于大气中 CO_2 的体积分数仅为 420×10^{-6} （0.04%），直接从空气中捕获 CO_2 是一个能耗相对较高的过程。理论上，从空气中捕获每吨 CO_2 所需的最小能量约为 0.5 GJ^[40]。但实际情况是，目前 DAC 技术捕获每吨 CO_2 需要消耗（4 ~ 10）GJ 的能量^[1]。

无论是 L-DAC 还是 S-DAC 系统，其运行均依赖于电力和热力的持续供应。电力主要用于驱动风扇、泵、压缩机等设备，而热力主要用于吸收剂、吸附剂的再生过程^[20]，其中热力通常占 DAC 总能量需求的 80% 以上。

在 L-DAC 系统中，需要达到 800 ~ 900 °C 的高温以进行煅烧反应分解碳酸钙，而在 S-DAC 系统中，吸附剂的再生温度在 100 °C 左右^[12]。因此，L-DAC 系统需要高品质的热源（如天然气燃烧）才能满足其捕集材料再生的温度需求，而 S-DAC 系统吸附剂的再生温度低，除化石燃料外，太阳能、地热、工业余热及核能热也是可替代的能源选择^[20,41-43]。

此外, DAC 系统还可以通过电加热的方式满足其温度需求。直接电阻加热的温度可达到 2 000 ℃, 而间接旋转煅烧炉加热则可以达到 1 200 ℃, 这 2 种方法都是为 L-DAC 和 S-DAC 系统供热的可行途径^[44]。由于电力比工业废热、核能热等更易获取, 因此电加热方式为 DAC 系统提供了更大的部署灵活性。在此基础上, 使用可再生能源电力为 DAC 供电供热, 不仅可有效降低 DAC 本身的碳足迹, 还能提高 DAC 碳去除效率和减排能力。

1.3 DAC 成本分析和预测模型

对于处于初级研发阶段 (TRL1 ~ 8) 的技术, 其开发与示范过程中的成本通常会呈现持续上升的趋势。在技术首次实现工厂级应用, 即“首个工厂” (First-Of-A-Kind, 简称 FOAK) 成功落地运营之后, 随着更多工厂的部署, 成本曲线将趋于下降。FOAK 工厂特指在行业内率先实现技术规模化应用的项目或设施, 具备通过运营收入覆盖成本的潜力, 或能在合理的补贴和政策支持下实现商业化运营。与实验室或小规模试验设施相比, FOAK 工厂更注重在商业化扩展前验证技术的实用性和经济效益。

对于特定的 DAC 技术, FOAK 工厂的捕集成本 ($C_{\text{DAC-capture}}$) 由单位资本成本 ($C_{\text{u-capital}}$)、单位固定运营成本 ($C_{\text{u-fix-ope}}$) 和单位可变运营成本 ($C_{\text{u-var-ope}}$) 三部分组成 (式 (1))。在此基础上, 扣除相关设备运行过程中产生的额外碳排放, 可以计算出碳去除成本 ($C_{\text{DAC-removal}}$)。假设 DAC 工厂建设过程产生的碳排放为 0, 仅考虑运行过程中能源使用的碳排放, 则对于特定 DAC 技术, FOAK 工厂从空气中去除 CO_2 的成本 (元/t) 计算方法如式 (2) 所示。

$$C_{\text{DAC-capture}} = C_{\text{u-capital}} + C_{\text{u-fix-ope}} + C_{\text{u-var-ope}} \quad (1)$$

$$C_{\text{DAC-removal}} = \frac{C_{\text{DAC-capture}}}{1 - \sum d_{\text{energy}} f_{\text{energy}}} \quad (2)$$

其中, d_{energy} 为工厂每捕集 1 t CO_2 的能源需求; f_{energy} 为对应能源的碳排放因子。

在不考虑工程建设期间产生的融资费用及利息的前提下, $C_{\text{u-capital}}$ 的计算方法如式 (3) ~ (7) 所示。其中, $C_{\text{t-capital}}$ 为 DAC 工厂的总资本成本, 元; $f_{\text{r-capital}}$ 为资本回收系数; S 为 DAC 工厂的 CO_2 捕集规模, t/a; i 为贴现率; N 为 DAC 工厂的设计寿命, a。 $C_{\text{t-capital}}$ 包括工厂的建设成本 (C_{plant}) 和建设完成后启动投产所需的启动成本 (C_{start}) 两部分。由于 DAC 技术成熟度低, 工厂在建设过程中可能会面临工艺调整或操作改变等未曾预见的问题,

因此建设成本不仅需要考工程、采购和施工 (EPC) 成本 (C_{epc}), 还需考虑应对潜在问题所需的额外应急成本 ($C_{\text{contingency}}$)。而 EPC 成本可进一步细分为设备购买安装成本 ($C_{\text{equipment}}$) 和其他 EPC 成本 ($C_{\text{additional}}$)。由于部分成本数据获取困难, 模型中的部分成本采用成本比例系数 (r) 进行成本推算。

$$C_{\text{u-capital}} = \frac{C_{\text{t-capital}} f_{\text{r-capital}}}{S} \quad (3)$$

$$f_{\text{r-capital}} = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (4)$$

$$C_{\text{t-capital}} = C_{\text{plant}} + C_{\text{start}} = C_{\text{plant}} (1 + r_1) \quad (5)$$

$$C_{\text{plant}} = C_{\text{epc}} + C_{\text{contingency}} = C_{\text{epc}} (1 + r_2) \quad (6)$$

$$C_{\text{epc}} = C_{\text{equipment}} + C_{\text{additional}} = C_{\text{equipment}} (1 + r_3) \quad (7)$$

其中, r_1 为启动成本占工厂建设成本的比例; r_2 为额外应急成本占 EPC 成本的比例; r_3 为其他 EPC 成本占设备购买安装成本的比例。

$C_{\text{u-fix-ope}}$ 的计算方法如式 (8) ~ (10) 所示。

$$C_{\text{u-fix-ope}} = \frac{C_{\text{labour}} + C_{\text{maintenance}}}{S} \quad (8)$$

$$C_{\text{labour}} = C_{\text{direct-labour}} + C_{\text{indirect-labour}} = C_{\text{direct-labour}} (1 + r_4) \quad (9)$$

$$C_{\text{maintenance}} = C_{\text{plant}} r_5 \quad (10)$$

其中, C_{labour} 为总劳动力成本; $C_{\text{maintenance}}$ 为年维护成本; C_{labour} 包含技术操作工等直接劳动力成本 ($C_{\text{direct-labour}}$) 和管理人员等间接劳动力成本 ($C_{\text{indirect-labour}}$); r_4 为间接劳动力成本占直接劳动力成本的比例; r_5 为维护成本占工厂建设成本的比例。

与劳动力成本和年维护成本不同, 可变运营成本受项目产量或活动水平的影响明显。 $C_{\text{u-var-ope}}$ 的计算方法如式 (11)、(12) 所示, 该成本涵盖了电能、热能、水和化学品的单位消耗成本 (C_{resource}), 每项成本由捕集 1 t CO_2 的资源消耗量 (d_{resource}) 和对应单价 (p_{resource}) 共同决定。

$$C_{\text{u-var-ope}} = C_{\text{electricity}} + C_{\text{heat}} + C_{\text{water}} + C_{\text{chemicals}} \quad (11)$$

$$C_{\text{resource}} = \sum d_{\text{resource}} p_{\text{resource}} \quad (12)$$

在 FOAK 工厂建成后, 随着工厂数量的增加, DAC 技术的应用规模将逐渐扩大。在此过程中, 受益于技术创新、边学边做和规模经济等因素, 建设相同规模工厂的成本将呈现降低趋势。这种成本下降的动态过程可以通过学习率和学习曲线进行预测, 具体如式 (13)、(14) 所示。

$$L_{\text{index}} = -\frac{\ln(1 - L_{\text{rate}})}{\ln 2} \quad (13)$$

$$C_b = C_a x^{-L_{\text{index}}} \quad (14)$$

其中, L_{rate} 为学习率; L_{index} 为学习指数; C_b 为规模扩大后的平准化资本成本或运营成本; C_a 为 FOAK 工厂的单位资本成本或运营成本; x 为未来规模与 FOAK 工厂规模的比率。

1.4 参数的选取与设置

本文选取了 2 种具有代表性的 DAC 技术进行成本分析, 分别是基于 KOH-Ca(OH)₂ 溶液的液体吸收 DAC (L-DAC) 和基于固态胺的固体吸附 DAC (S-DAC)。这 2 种技术在 DAC 领域中具有较强的代表性和相对较高的成熟度。

在考量 DAC 技术的经济性时, FOAK 工厂的规模成为决定成本降低起点的关键因素, 对未来成本走势的分析与预测具有至关重要的作用^[45]。L-DAC 技术目前处于 TRL 6~7 级, 尚未完成商业示范项目的部署。在设备方面, 尽管空气接触器是模块化组件, 但由于煅烧炉和消化器等属于体积较大的单体设备, 导致工厂只有达到一定规模时, 才能确保运营的经济性。KEITH 等的研究表明, 单个工厂的 CO₂ 捕集最小规模要求为 10 万 t/a, 且规模达到 100 万 t/a 时才具有显著的成本优势^[15]。因此, 本文将 L-DAC 的 FOAK 工厂规模设置为 100 万 t/a。

S-DAC 技术目前处于 TRL 7~8 级, 多个项目已实现商业化运营。该技术模块化程度高, 吸附和解吸过程均在空气接触器中完成, 每个空气接触器单元的 CO₂ 捕集能力为 50~83 t/a^[46-47], 每 6 个接触器单元可安装在 1 个长约 12 m 的集装箱内。Climeworks 于 2017 年投入运营的规模为 900 t/a 的 DAC 工厂, 其吸附解吸装置仅包含 18 个接触器单元。接触器单元可以规模化生产, 并易于进行设计和制造的快速改进。在扩大生产规模时, 仅需增加接触器单元的数量。与 Orca 工厂 (4 000 t/a) 相比, Mammoth 工厂 (36 000 t/a) 的单位资本成本和运营维护成本显著降低^[47]。此外, Global Thermostat 的 DAC 技术亦采用模块化的固体胺吸附装置, 其集装箱模块的运行规模为 1 000~4 000 t/a^[48]。由于模块化程度高, S-DAC 在构建 FOAK 工厂时对规模的要求远低于 L-DAC 技术。因此, 本文将 S-DAC 的 FOAK 工厂设置为 1 000 t/a。

其它参数设置见表 2, 其中 $C_{\text{equipment}}$ 或 C_{plant} 可通过现有数据换算得出, 电力价格 ($p_{\text{electricity}}$)、热力价格 (p_{heat}) 以及能耗的碳排放因子 (f_{energy}) 以 2025 年的数据为准。尽管不同国家和地区在劳动力成本、原材料成本、能源成本等方面可能存在差异, 但在设备成本、能源消耗等 DAC 成本的关键组成部分, 地区间的差异并不显著。欧盟和美国在

DAC 技术研发和实践方面拥有丰富经验, 由于目前中国尚未有规模化的 DAC 项目投入运营, 因此, 在预测中国首个 DAC 商业工厂的成本时, 部分参考借鉴了欧盟和美国 DAC 项目的数据。

在 DAC 成本分析模型中, 固定运营成本与资本成本高度相关, 因此设定二者具有相同的学习率。而可变运营成本与资本成本无关, 因此需要单独设定其学习率。此外, 能耗降低的比例与可变运营成本的学习率相同。参考现有研究, 最终将 L-DAC 和 S-DAC 的固定运营成本学习率分别设置为 10% 和 14%, 可变运营成本的学习率均设置为 10%^[23]。

为了探究不同发展规模路径下中国 DAC 成本的变化趋势, 本文以 2025 年为基期, 构建了 3 类规模情景, 见表 3。其中, 基准情景参考《中国碳捕集与封存示范和推广路线图》中 DAC 规模的最低值设置。表示中国缓慢部署 DAC 的情景, 预计到 2060 年 DAC 规模仅达到 3 000 万 t/a^[54]。碳中和情景则依据现有研究中 2060 年碳中和目标实现时 DAC 的规模需求^[55], 表示中国履行碳中和承诺所需的 DAC 部署情景。强化发展情景的规模是碳中和情景的 2 倍, 表示在更强有力的政策支持力度下 DAC 超前部署的情景。同一情景下, L-DAC 和 S-DAC 的规模各占 50%。

为了探究能源系统对 DAC 成本的影响, 对不同供能方式下的 DAC 成本进行了系统性分析。各能源的价格用其成本表示, 见表 4。其中非化石能源 (核电、光伏、水电、风电) 为纯电力系统, 不仅为 DAC 系统供电, 同时以电加热的方式供热。对于 S-DAC 系统设置公共能源 (电网供电, 外购蒸汽供热) 的情景作为对照, 表示化石能源在能源供应中占较高比例。对于 L-DAC 系统, 由于中低温的外购蒸汽无法满足其 800~900 °C 的温度需求, 而超高温的蒸汽一般用于蒸汽轮机、超级临界发电, 若进行传输会有大量损耗, 因此其公共能源情景仅考虑电网供能。发电方式的度电成本数据来源于现有的研究^[56], 外购热力成本数据通过以下方式估算得到: 2025 年外购热力的成本为 60 元/GJ (0.216 元/kWh)^[57], 以电网价格同样的上升幅度 (16%), 预计到 2060 年外购热力的成本将达到 70 元/GJ (0.252 元/kWh)。

随着中国发电技术的不断进步和电力结构的持续优化, 未来各种发电方式及电网的碳排放因子预计将呈现显著下降趋势。据相关研究预测, 到 2060 年, 全网全生命周期碳排放因子相较于 2021 年, 将可能实现 70%~85% 的显著下降^[58]。非

表2 关键参数取值

Table 2 Key parameter values

参数	KOH-Ca(OH) ₂ 溶液DAC技术		固态胺DAC技术	
	取值	说明	取值	说明
S	100 万 t/a		1 000 t/a	
N	25 a		20 a	
i	7%		7%	
C _{equipment}	570 084万元	根据文献研究数据折现估算 [*]		
C _{plant}			3 395万元	根据Climeworks公布数据折现估算 ^{**}
C _{direct-labour}	2 800万元	直接劳动力280人 ^{***}	100万元	直接劳动力10人 ^{***}
r ₁	7.85%	文献[23, 49]	7.85%	
r ₂	30%	文献[50]	20%	
r ₃	15%	文献[23]	15%	
r ₄	30%	文献[49]	30%	
r ₅	2.5%	文献[49]	2.5%	
d _{electricity}	366 kWh/t	文献[15]	250 kWh/t	文献[51]
d _{heat}	1 458 kWh/t	文献[15]	1 750 kWh/t	文献[51]
d _{water}	4.7 m ³ /t	文献[15]	0	文献[52]
d _{chemicals}	KOH:1.94 kg/t, Ca(OH) ₂ :2.56 kg/t	估算得到 ^{****}	固态胺:7.5 kg/t	文献[53]
p _{water}	4元/m ³	按当前价格取值	4元/m ³	按当前价格取值
p _{chemicals}	KOH: 6元/kg, Ca(OH) ₂ : 0.5元/kg	按当前价格取值	30元/kg	按当前价格取值

注: *为美元年通货膨胀率为3%,与人民币间的汇率为7;欧元年通货膨胀率为2%,与人民币间的汇率为7.6;**为假设规模为900 t/a时,建设成本为350万欧元,换算至1 000 t/a规模下;***为假设直接劳动力每人的年平均成本为10万元;****为假设KOH和Ca(OH)₂每天完成1个循环,寿命为2 a,实际捕集效率为90%,且不考虑循环损失。

表3 不同情景下的 DAC 规模路径

Table 3 DAC scale pathways in different scenarios

年份	DAC的CO ₂ 捕集规模/(t·a ⁻¹)		
	情景1-基准情景	情景2-碳中和情景	情景3-强化情景
2025	10 ²	10 ³	2×10 ³
2030	10 ³	10 ⁵	2×10 ⁵
2035	10 ⁴	10 ⁶	2×10 ⁶
2040	10 ⁵	1.5×10 ⁷	3×10 ⁷
2050	10 ⁶	10 ⁸	2×10 ⁸
2060	3×10 ⁷	3×10 ⁸	6×10 ⁸

化石能源发电的碳排放因子参考现有研究中碳排放因子范围取值^[59],2025年取最大值,2060年取最小值。2025年电网和外购热力的碳排放因子参考政府发布的文件取值^[60-61],并假设到2060年碳排放因子相较于2025年下降80%,各能源的碳排放因子变化

表4 中国未来各发电方式的度电成本及外购热力成本

Table 4 Future electricity costs and purchased thermal costs in China

年份	成本 元/kWh					
	光伏	风电	核电	水电	电网	外购热力
2025	0.358	0.379	0.375	0.292	0.625	0.216
2030	0.352	0.370	0.362	0.302	0.662	0.221
2035	0.325	0.364	0.354	0.316	0.681	0.226
2040	0.306	0.361	0.350	0.333	0.693	0.231
2050	0.278	0.350	0.350	0.363	0.696	0.241
2 060	0.263	0.340	0.357	0.369	0.725	0.252

见表5。

2 结果与讨论

2.1 DAC 成本分析结果

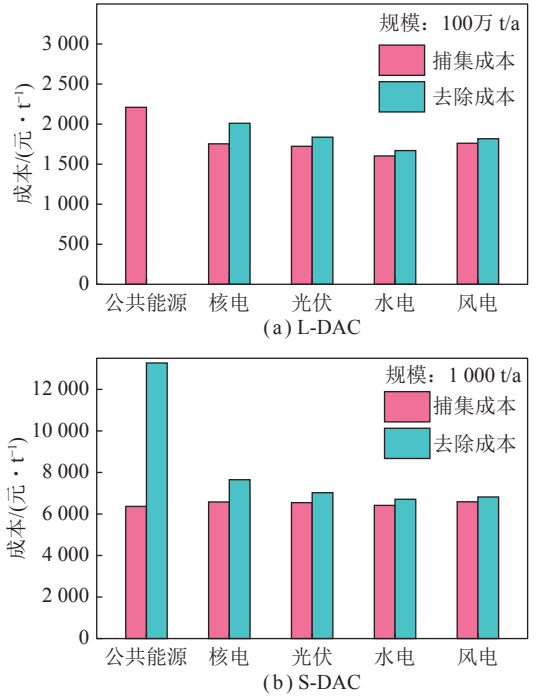
如图3所示,对于CO₂捕集能力为100万t/a的L-DAC项目,其各种供能方式下的捕集成本在

表5 不同发电方式和热能的碳排放因子

发电方式	碳排放因子	
	2025	2060
光伏	34.0	8.5
风电	17	7
核电	70	9
水电	22	17
电网	570	114
外购热力	216	43

1 723 ~ 2 210 元/间 (图 3(a)); 相对地, 捕集能力为 1 000 t/a 的 S-DAC 项目, 在各种供能方式下的捕集成本在 6 364 ~ 6 588 元/t 间 (图 3(b))。尽管不同供能方式导致的碳捕集成本差异并不显著, 但考虑能源碳排放后, 碳去除成本差距明显。在当前电网的碳排放水平下, 若使用公共能源供能, L-DAC 运行产生的排放量将高于捕集量, 无法实现 CO₂ 的净去除, S-DAC 的碳去除成本相较于捕集成本将增加了 1 倍以上, 达到 13 273 元/t。核电、光伏、风电和水电等供能方式的碳去除成本相较于捕集成本的增加量少, 且核电供能时成本略高, 水电供能时成本略低。在设定的 FOAK 规模下, L-DAC 与 S-DAC 非化石能源供能时的碳去除成本分别为 1 670 ~ 2 010、6 709 ~ 7 651 元/t。

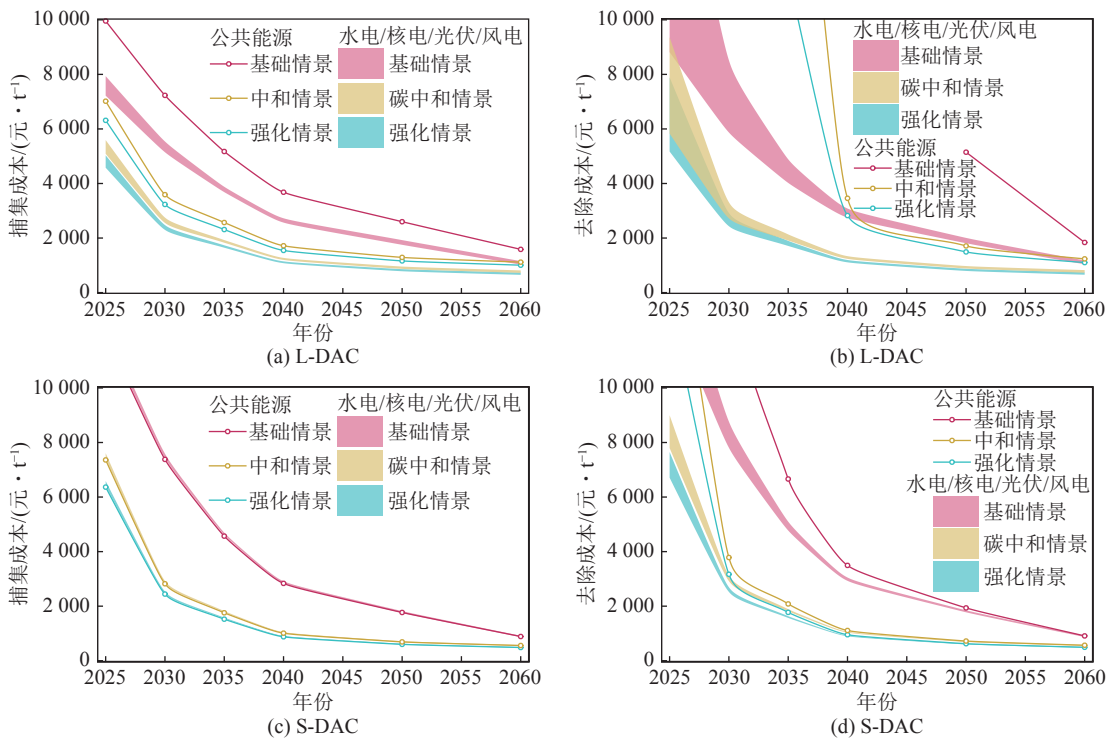
考虑能源价格和碳排放量的变化后, 不同情景下中国未来 DAC 成本的预测结果如图 4 所示。基础情景下, 2 种 DAC 技术的捕集成本和碳去除成本均明显高于碳中和情景, 而强化情景下 DAC 的成本则略低于碳中和情景。在碳中和情景下, 2060 年中国 DAC 的 CO₂ 捕集规模达到 3 亿 t/a 时, L-DAC 和 S-DAC 的碳去除成本将分别达到 729 ~ 1 237 和 543 ~ 580 元/t。在基础情景下, 即未来部署规模缩小 10 倍时, 2 种技术的碳去除成本为 1 037 ~ 1 838 和 869 ~ 922 元/t, 分别增加 42.3% ~ 48.6% 和 59.3% ~ 60.5%。在强化情景下, 即规模相较于碳中和情景扩大 2 倍时, 2 种技术的碳去除成本将分别降低至 655 ~ 1 102 和 472 ~ 505 元/t, 成本下降 10.1% ~ 11.0% 和 13.0% ~ 13.2%。在同一种情景下, 若不考虑能源碳排放 (图 4(a)、(c)), 不同供能方式之间的捕集成本差异相对较小; 考虑能源排放后 (图 4(b)、(d)), 不仅公共能源供能与非化石能源供能的碳去除成本差距较大 (图中线条与条带的距离增大), 而且不同非化石能源供能的碳去除

图3 FOAK 工厂在不同供能方式下的 CO₂ 捕集成本和碳去除成本Fig. 3 CO₂ capture and removal costs for the FOAK plant under different energy supply methods

成本差异也变得更为明显 (图中条带变宽)。这种差距在 2040 年前尤为明显, 具体表现为公共能源供能时碳去除成本显著高于水电、核电、光伏、风电等供能方式, 随着时间推移这种成本差距逐渐缩小。以碳中和情景为例, 在 2040 年前使用公共能源供能时, L-DAC 和 S-DAC 碳去除成本比非化石能源供能时分别高 2 120 ~ 2 220 和 42 ~ 76 元/t。到 2060 年, 这一差距在 L-DAC 中缩小至 411 ~ 508 元/t, 而 S-DAC 在采用公共能源供能时的碳去除成本甚至可以低于部分非化石能源供能方式。

如图 5 所示, 在不同供能方式下, 碳去除成本的差异主要来源于能源产生的额外碳排放, 表现为单位捕集量的能源碳排放量与碳去除成本呈现出相似的范围和趋势变化。在碳中和情景下, 使用公共能源供能时, 相比 S-DAC 技术, L-DAC 技术单位捕集量的碳排放量更高, 与其他供能方式差距更明显, 碳去除成本差距也更明显。2040 年前使用公共能源供能时, L-DAC 单位捕集量的能源 CO₂ 排放超过 0.253 t, 导致其碳去除成本较高; 而到 2060 年, 公共能源的 CO₂ 排放强度降低至 0.1 t 以下, 其碳去除成本依然明显高于其他供能方式。

如图 6 所示, 在公共能源供能时, 2030—2060 年间, L-DAC 的能源成本占比最高, 其主要原因在于电网电比其他电力价格更高, 导致纯电力驱动的



注:带点的线条表示供能方式为电网结合外购热的成本;填充的条带表示水电、核电、光伏、风电4种供能方式的成本范围。

图4 3种情景下中国未来的DAC成本预测

Fig. 4 Cost prediction of DAC in China in the future under three scenarios

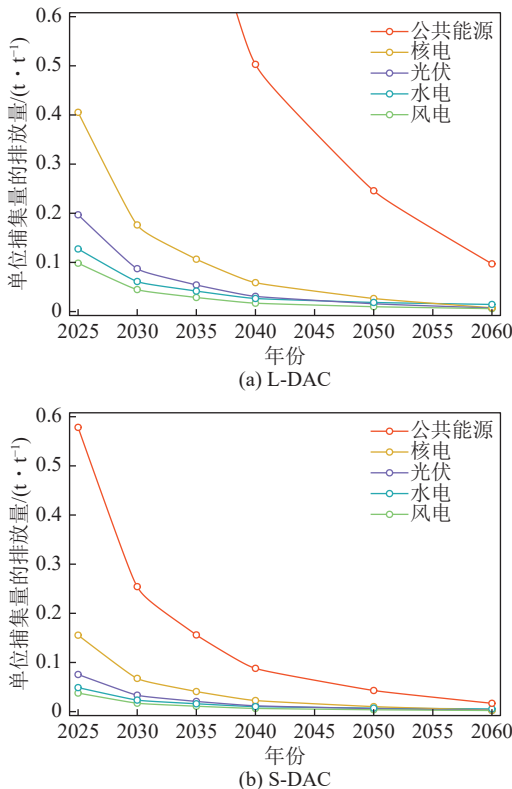


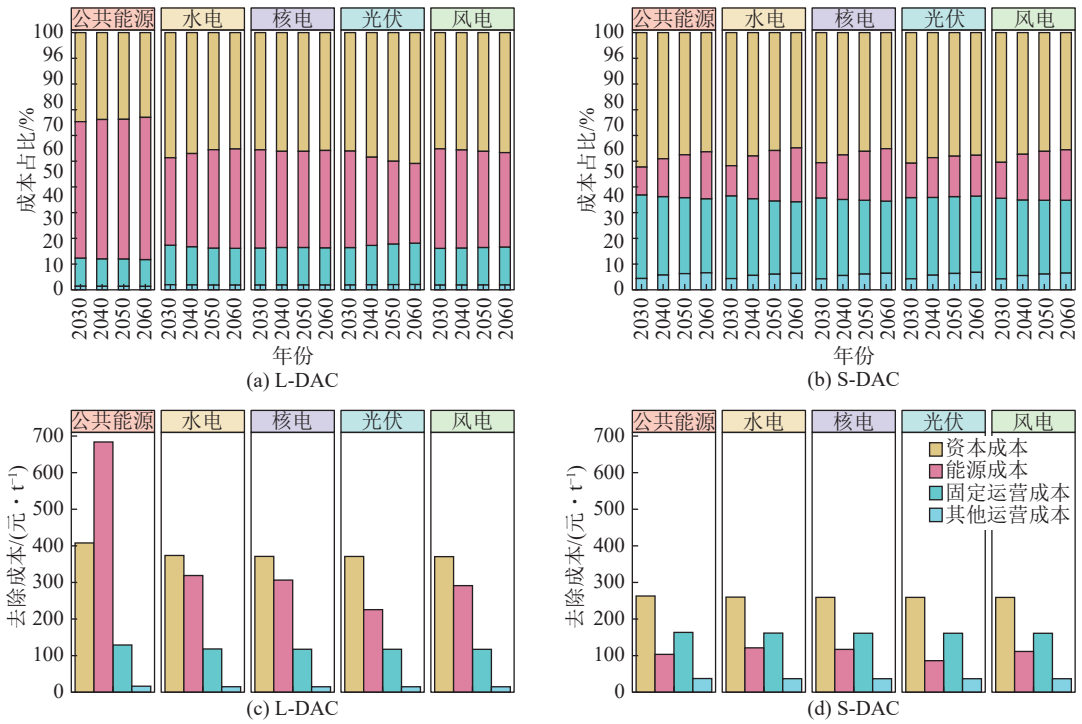
图5 碳中和情景下DAC技术单位捕集量的CO₂排放量
Fig. 5 CO₂ emissions per unit capture of DAC technology in the Carbon-Neutral Scenario

固定运营成本和其他运营成本, 2030—2060年光伏供能时资本成本占比略微升高, 能源成本占比略微下降(图6(a))。到2060年, L-DAC光伏供能时的能源成本最低, 最具成本优势, 风电次之(图6(c))。S-DAC成本占比由高到低依次为资本成本、固定运营成本、能源成本和其他运营成本, 2030—2060年资本成本和固定运营成本占比的均值略微下降, 能源成本和其他运营成本占比的均值略微上升(图6(b))。到2060年, S-DAC光伏供能时的能源成本最低, 最具成本优势; 公共能源供能次之, 但与风电差距较小(图6(d))。

2.2 研究的局限性与未来展望

考虑到研究数据的可得性以及与现实情况的契合度, 本研究依据当前L-DAC与S-DAC工厂的实际部署情况, 将2种技术FOAK工厂的CO₂捕集规模分别设置为100万和1000 t/a。其中L-DAC的FOAK工厂规模较大, 可能导致针对小规模项目(低于10万t/a)的成本预测结果存在较大不确定性。尽管本文选取的固体和液体DAC技术的成熟度为TRL 6~8级, 是当前最具代表性的技术^[62], 但新液体吸收剂、固体吸附剂、设备系统的开发设计仍在持续进行中, 预计未来将有更多的DAC技术逐渐成熟。例如, 通过化学接枝功能化铵基团于介孔材料上制备的固体DAC吸附剂, 展现出优异的

L-DAC系统能源成本更高。在非化石能源供能时, L-DAC成本由高到低依次为资本成本、能源成本、



注: (a)、(b) 为不同能源类型在 2030—2060 年的成本占比; (c)、(d) 为 2060 年的碳去除成本。

图 6 碳中和情景下 2 种 DAC 技术成本构成

Fig. 6 Cost composition of the two DAC technologies in the Carbon-Neutral Scenario

吸附动力学特性,可能拥有较好的应用前景^[63]。因此,随着技术的发展变化以及数据的不断丰富,需要定期设置不同的技术组合情景,对 DAC 成本进行动态评估和预测,以得出更具现实意义和前瞻性的结论。

本研究重点关注了不同情景下中国 DAC 的成本下降情况。然而,鉴于经济发展水平、政策支持力度、原材料和能源价格等多重因素差异,不同国家和地区的 DAC 成本可能存在显著差异。美国国家科学、工程和医学院的研究显示,在美国,当规模达到 100 万 t/a 时,对于采用光伏结合氢供能的 L-DAC 设施,其捕集成本为 317~501 美元/t,碳去除成本为 320~506 美元/t;对于使用光伏供能的纯电动 S-DAC 设施,捕集成本为 88~228 美元/t,碳去除成本为 89~256 美元/t^[20]。FASIHI 等的研究表明,在摩洛哥,混合光伏风力电池系统供电的 S-DAC 系统的捕集成本为 133~222 欧元/t^[49]。YOUNG 等的研究表明,对于规模为 100 万 t/a 的 DAC 设施,当使用地热发电结合热泵供能时,中国、阿曼、美国和巴西的 DAC 去除成本相对较低,而澳大利亚、英国和德国的 DAC 去除成本相对较高。因此,后续研究中有必要结合不同国家的实际条件研究 DAC 成本变化的差异,以期得出更具针对性和实用性的结论^[23]。

未来,风电、光伏及储能的成本逐渐下降,有

望展现比煤电耦合 CCUS 更强的成本竞争力^[64]。考虑到可再生能源时空分布不均,在保证电力系统整体稳定性和可靠性的前提下,未来电网仍需要保留一定比例结合了 CCUS 的化石燃料电源^[65],从而使电网的平准化度电成本比单独的可再生能源电力更高。因此,当外购热价格较高时,在可再生能源丰富地区部署纯电力驱动的 DAC 系统成本更低。陆上风电、光伏发电将是我国发展最快的电源类型,预计到 2060 年二者装机容量占比之和达到约 60%,发电量占比之和达到约 45%^[66],届时中国光伏电力的销售价格将可能低至 0.11~0.17 元/kWh,相比之下煤电的销售价格将达到 2.5 元/kWh 左右^[67]。因此,未来光伏电力为 DAC 供能的成本优势可能比本文预估的更加显著。

可再生能源电力的成本优势可能会推动电力驱动的 DAC 技术的快速发展。高温液体 DAC 技术可使用基于可再生能源电力的电煅烧炉代替传统煅烧炉,以降低能源成本。然而,目前适用于液体 DAC 技术的电煅烧炉容量有限,因此需开发工业规模的电煅烧技术。固体 DAC 系统所需温度完全在商用工业热泵的温度范围内,故可利用工业热泵将废热或环境中的热量传递到高温热汇的设备为 S-DAC 系统供热,从而进一步降低工业能耗和碳排放。尽管使用热泵会使 DAC 的电力需求增加 20% 以上,但由于热泵的高性能系数(300%~400%),

与使用电阻加热的方法相比,将显著降低电力消耗^[17]。电化学吸附 DAC 技术只需要输入电能,能量损失小,较适合与间歇性可再生能源相结合,进一步研究和优化材料的耐久性和成本是向商业化规模迈进的必要条件^[35]。

3 结论和建议

1) 在 FOAK 工厂中,在不同供能方式下的捕集成本差距并不显著。然而,当考虑能源碳排放后,碳去除成本差距明显。当核电、光伏、风电和水电等非化石能源供能时,碳去除成本较低;当公共能源供能时,S-DAC 的碳去除成本较高,相较于捕集成本增加了 1 倍以上。

2) 未来 DAC 的部署规模是影响 DAC 成本的关键因素。在基础情景下,2 种 DAC 技术的碳去除成本最高,且明显高于碳中和情景,而强化情景下的 DAC 成本则略低于碳中和情景。在碳中和情景下,预计 2060 年 L-DAC 和 S-DAC 的 CO₂ 去除成本分别达到 729~1 237 和 543~580 元/t。

3) 供能方式对碳去除成本的影响在不同时期和不同 DAC 技术中表现出差异性。在 2040 年前,L-DAC 和 S-DAC 使用公共能源供能时的碳去除成本均高于非化石能源供能,但 L-DAC 的差距更明显。在 2040—2060 年间,不同供能方式的碳去除成本差距逐渐缩小,甚至在公共能源供能时,S-DAC 的碳去除成本可以低于部分非化石能源供能。碳去除成本的差异及其动态变化,主要归因于能源产生的额外碳排放的变化。

4) 非化石能源供能时,L-DAC 成本占比由高到低依次为资本成本、能源成本、固定运营成本和其他运营成本,S-DAC 为资本成本、固定运营成本、能源成本和其他运营成本。预计到 2060 年,使用光伏供能比其他供能方式更具成本优势。

基于以上分析,鉴于 DAC 部署规模对去除成本的影响显著,建议尽早实施 DAC 技术的规模化示范工程,稳步扩大 DAC 应用规模,通过规模效应、工程优化降低 DAC 成本。此外,能源使用过程中产生的额外排放对 DAC 成本的影响不容忽视。因此,在建设和运营 DAC 工厂时,应结合当地实际情况,灵活选择非化石能源作为供能方式,而光伏能源在未来 DAC 大规模部署时,有望成为成本最优的供能选择。

参考文献 (References):

[1] IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of working group III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R].

Cambridge, UK and New York, NY, USA: IPCC, 2022.

- [2] FIELD C B, MACH K J. Rightsizing carbon dioxide removal[J]. *Science*, 2017, 356(6339): 706–707.
- [3] HONEGGER M, MICHAELOWA A, ROY J. Potential implications of carbon dioxide removal for the sustainable development goals[J]. *Climate Policy*, 2021, 21(5): 678–698.
- [4] AKIMOTO K, SANO F, ODA J, et al. Climate change mitigation measures for global net-zero emissions and the roles of CO₂ capture and utilization and direct air capture[J]. *Energy and Climate Change*, 2021, 2: 100057.
- [5] SMITH P, DAVIS S J, CREUTZIG F, et al. Biophysical and economic limits to negative CO₂ emissions[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6: 42–50.
- [6] FUHRMAN J, MCJEON H, PATEL P, et al. Food–energy–water implications of negative emissions technologies in a +1.5 °C future[J]. *Nature Climate Change*, 2020, 10(10): 920–927.
- [7] 蔡博峰, 李琦, 张贤. 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021): 中国 CCUS 路径研究 [R] 北京: 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国 21 世纪议程管理中心, 2021.
- [8] 邱丽芳. 中美关于在 21 世纪 20 年代强化气候行动的格拉斯哥联合宣言 [N/OL]. (2021–11–11) [2024–04–22]. http://www.news.cn/2021-11/11/c_1128054672.htm.
- [9] 科技部. 科技部等九部门关于印发《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030 年)》的通知: 国科发社〔2022〕157 号 [N/OL]. (2022–06–24) [2024–04–22]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-08/18/content_5705865.htm.
- [10] 张贤, 李凯, 马乔, 等. 碳中和目标下 CCUS 技术发展定位与展望 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(9): 29–33.
- ZHANG Xian, LI Kai, MA Qiao, et al. Orientation and prospect of CCUS development under carbon neutrality target[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(9): 29–33.
- [11] BREYER C, FASIHI M, AGHAHOSEINI A. Carbon dioxide direct air capture for effective climate change mitigation based on renewable electricity: A new type of energy system sector coupling[J]. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2020, 25(1): 43–65.
- [12] IEA. Direct Air Capture: A key technology for net zero [R]. Paris: International Energy Agency, 2022.
- [13] GERTNER J. The tiny Swiss company that thinks it can help stop climate change [N/OL]. *New York Times*, (2019–02–12) [2024–04–22]. <https://www.nytimes.com/2019/02/12/magazine/climeworks-business-climate-change.html>.
- [14] HOOK L. World's biggest 'direct air capture' plant starts pulling in CO₂ [N/OL]. *Financial Times*, (2021–09–08) [2024–04–22]. <https://www.ft.com/content/8a942e30-0428-4567-8a6c-dc704ba3460a>.
- [15] KEITH D W, HOLMES G, ST ANGELO D, et al. A process for capturing CO₂ from the atmosphere[J]. *Joule*, 2018, 2(8): 1573–1594.
- [16] ZEMAN F. Reducing the cost of Ca-based direct air capture of CO₂[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(19): 11730–11735.

- [17] MCQUEEN N, GOMES K V, MCCORMICK C, et al. A review of direct air capture (DAC): Scaling up commercial technologies and innovating for the future[J]. *Progress in Energy*, 2021, 3(3): 032001.
- [18] 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 [R]. Maryland: American Physical Society, 2011.
- [19] 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[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, 56(3): 750–764.
- [20] SCIENCES N A O, EARTH D O, STUDIES L, et al. Negative emissions technologies and reliable sequestration: A research agenda[M]. Washington DC: National Academies Press, 2019.
- [21] DOE. Secretary granholm launches carbon negative earthshots to remove gigatons of carbon pollution from the air by 2050 [N/OL]. US Department of Energy, (2021–11–05) [2024–04–22]. <https://www.energy.gov/articles/secretary-granholm-launches-carbon-negative-earthshots-remove-gigatons-carbon-pollution>.
- [22] MACKLER S, BOPP S, DEAN K, et al. Investing in climate innovation: The environmental case for direct air capture of carbon dioxide [R]. Washington D. C: Bipartisan Policy Center, 2020.
- [23] YOUNG J, MCQUEEN N, CHARALAMBOUS C, et al. The cost of direct air capture and storage can be reduced *via* strategic deployment but is unlikely to fall below stated cost targets[J]. *One Earth*, 2023, 6(7): 899–917.
- [24] NASA. Technology Readiness Assessment Best Practices Guide [DB/OL]. (2020–06–30) [2024–04–22]. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205003605/downloads/%20SP-20205003605%20TRA%20BP%20Guide%20FINAL.pdf>.
- [25] WIEGNER J F, GRIMM A, WEIMANN L, et al. Optimal design and operation of solid sorbent direct air capture processes at varying ambient conditions[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022, 61(34): 12649–12667.
- [26] IEA. CCUS around the world in 2021 [DB/OL]. (2021–04–01) [2024–04–22]<https://www.iea.org/reports/ccus-around-the-world-in-2021/dac-1>.
- [27] 王焕君, 刘牛, 郑焯方, 等. 直接空气捕碳材料研究进展 [J]. *发电技术*, 2022, 43(4): 533–543.
WANG Huanjun, LIU Niu, ZHENG Zhaofang, et al. Research progress of materials for direct capture of CO₂ from ambient air[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(4): 533–543.
- [28] CLIMEWORKS. Climeworks' first industrial-scale direct air capture plant in Hinwil [EB/OL]. (2015–10–21) [2024–04–22]. <https://climeworks.com/news/climeworks-builds-first-commercial-scale-direct-air-capture-plant>.
- [29] CLIMEWORKS. Climeworks makes history with world's first commercial direct air capture plant [EB/OL]. (2017–05–31) [2024–04–22]. <https://climeworks.com/press-release/today-climeworks-is-unveiling-its-proudest-achievement>.
- [30] REMOVR. Scaling carbon removal to reverse global warming [EB/OL]. [2024–05–22]. <https://www.removr.com/>.
- [31] ORIGEN. Direct Air Capture (DAC) [EB/OL]. [2024–05–22]. <https://www.origencarbon.com/technology>.
- [32] 王涛, 董昊, 侯成龙, 等. 直接空气捕集 CO₂ 吸附剂综述 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2022, 56(3): 462–475.
WANG Tao, DONG Hao, HOU Chenglong, et al. Review of CO₂ direct air capture adsorbents[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2022, 56(3): 462–475.
- [33] 张杰, 郭伟, 张博, 等. 空气中直接捕集 CO₂ 技术研究进展 [J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(2): 57–68.
ZHANG Jie, GUO Wei, ZHANG Bo, et al. Research progress on direct capture of CO₂ from air[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(2): 57–68.
- [34] FUJIKAWA S, SELANCHYN R, KUNITAKE T. A new strategy for membrane-based direct air capture[J]. *Polymer Journal*, 2021, 53: 111–119.
- [35] WILCOX J. An electro-swing approach[J]. *Nature Energy*, 2020, 5(2): 121–122.
- [36] CUSTELCEAN R, GARRABRANT K A, AGULLO P, et al. Direct air capture of CO₂ with aqueous peptides and crystalline guanidines[J]. *Cell Reports Physical Science*, 2021, 2(4): 100385.
- [37] BRETHOMÉ 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: 553–559.
- [38] OZKAN M. Direct air capture of CO₂: a response to meet the global climate targets[J]. *MRS Energy & Sustainability*, 2021, 8(2): 51–56.
- [39] CAPTURA. Captura's 100-ton carbon removal system to be installed at AltaSea at the Port of Los Angeles [EB/OL]. (2023–05–04)[2024–05–22]<https://capturacorp.com/capturas-100ton-carbon-removal-system-to-be-installed-at-altasea-at-the-port-of-los-angeles/>.
- [40] WILCOX J. Carbon capture [M]. Springer New York Dordrecht Heidelberg London: Springer Science & Business Media, 2012.
- [41] TEMMERMAN G D, ROCHETTE F D. The CDR series: Direct air capture (DAC) [R]. Paris: Zenon Research, 2023.
- [42] BAKER S E, STOLAROFF J K, PERIDAS G, et al. Getting to neutral: Options for negative carbon emissions in California [R]. United States: Lawrence Livermore National Lab. (LLNL), 2020.
- [43] MCQUEEN N, PSARRAS P, PILORGE H, et al. Cost analysis of direct air capture and sequestration coupled to low-carbon thermal energy in the United States[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(12): 7542–7551.
- [44] MCQUEEN N, DESMOND M J, SOCOLOW R H, et al. Natural gas vs. electricity for solvent-based direct air capture[J]. *Frontiers in Climate*, 2021, 2: 618644.
- [45] HANNA R, ABDULLA A, XU Y Y, et al. Emergency deployment of direct air capture as a response to the climate crisis[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 368.
- [46] BEUTTNER C, CHARLES L, WURZBACHER J. The role of direct air capture in mitigation of anthropogenic greenhouse gas emissions[J]. *Frontiers in Climate*, 2019, 1: 10.
- [47] ALLSUP M. Climeworks, again, launches world's largest DAC

- plant — this time with improvements [N/OL]. Latitude Media, (2024-05-08) [2024-05-22]. <https://www.latitudemedia.com/news/climeworks-again-launches-worlds-largest-dac-plant-this-time-with-improvements>.
- [48] CHICHILNISKY G. Carbon negative power plants and their impact on environment [EB/OL]. (2018-10-23) [2024-05-22]. <https://chichilnisky.com/wp-content/uploads/2018/10/Carbon-Negative-Power-Plants-And-Their-Impact-On-Environment-1.pdf>.
- [49] SANTOS S, COLLODI G, AZZARO G, et al. Techno-economic evaluation of SMR based standalone (Merchant) plant with CCS [R]. Gloucestershire: IEAGHG, 2017.
- [50] CHRISTENSEN P, DYSERT L R, BATES J, et al. Cost Estimate Classification system-as applied in engineering, procurement, and construction for the process industries[J]. AACE International Recommended Practices, 2005, 18: 1-9.
- [51] INGVARSDÓTTIR A. Comparison of direct air capture technology to point source CO₂ capture in Iceland [D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2020.
- [52] LEBLING K, LESLIE-BOLE H, BYRUM Z, et al. 6 things to know about direct air capture [R]. Washington DC : World Resources Institute, 2022.
- [53] 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: 203-213.
- [54] ADB. Road map update for carbon capture, utilization, and storage demonstration and deployment in the People's Republic of China [R]. Mandaluyong: Asian Development Bank, 2022.
- [55] LIU G Z, CAI B F, LI Q, et al. China's pathways of CO₂ capture, utilization and storage under carbon neutrality vision 2060[J]. *Carbon Management*, 2022, 13(1): 435-449.
- [56] 孙启星, 张超, 李成仁, 等. “碳达峰、碳中和”目标下的电力系统成本及价格水平预测 [J]. *中国电力*, 2023, 56(1): 9-16.
SUN Qixing, ZHANG Chao, LI Chengren, et al. Prediction of power system cost and price level under the goal of “carbon peak and carbon neutralization” [J]. *Electric Power*, 2023, 56(1): 9-16.
- [57] 朱妍. 煤价涨了, 企业供热成本严重倒挂, 热价到底能不能跟着调? [N/OL]. *中国能源报*, (2023-02-06) [2023-05-22]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_21816837.
- [58] 田佩宁, 梁肖, 官雨捷, 等. 中国电网全生命周期碳排放及发电结构转型路径规划研究 [J]. *气候变化研究进展*, 2024, 20(1): 97-106.
- TIAN Peining, LIANG Xiao, GUAN Yujie, et al. Whole life cycle carbon emission and power generation structure transformation pathway planning of China's power[J]. *Climate Change Research*, 2024, 20(1): 97-106.
- [59] JACOBSON M Z. 100% clean, renewable energy and storage for everything [M]. New York: Cambridge University Press, 2020.
- [60] 上海市生态环境局. 上海市生态环境局关于调整本市温室气体排放核算指南相关排放因子数值的通知: 沪环气〔2022〕34号 [N/OL]. (2022-02-14) [2023-05-22]. <https://sthj.sh.gov.cn/hbzhzywpt2025/20220214/ec12e83686d2441b979fb1ec838bcb7.html>.
- [61] 生态环境部办公厅. 关于做好 2023—2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知: 环办气候函〔2023〕43号 [N/OL]. (2023-02-07) [2023-05-22]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202302/t20230207_1015569.html.
- [62] 彭雪婷, 吕昊东, 张贤. IPCC AR6 报告解读: 全球碳捕集利用与封存(CCUS)技术发展评估 [J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(5): 580-590.
- PENG Xueting, LYU Haodong, ZHANG Xian. Interpretation of IPCC AR6 report on carbon capture, utilization and storage(CCUS) technology development[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(5): 580-590.
- [63] 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: 21429.
- [64] FAN J L, LI Z Z, LI K, et al. Modelling plant-level abatement costs and effects of incentive policies for coal-fired power generation retrofitted with CCUS[J]. *Energy Policy*, 2022, 165: 112959.
- [65] FAN J L, LI Z Z, HUANG X, et al. A net-zero emissions strategy for China's power sector using carbon-capture utilization and storage[J]. *Nature Communications*, 2023, 14: 5972.
- [66] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望-2020[M]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
- [67] LU X, CHEN S, NIELSEN C P, et al. Combined solar power and storage as cost-competitive and grid-compatible supply for China's future carbon-neutral electricity system[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2021, 118(42): e2103471118.