

引用格式: 梁希, 余晓洁, 夏菖佑, 等. 二氧化碳利用路径气候效益与经济可行性评估 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 1-14. LIANG Xi, YU Xiaojie, XIA Changyou, et al. Assessment of the climate benefits and economic feasibility of carbon dioxide utilization pathways [J]. Southern energy construction, 2024, 11(5): 1-14. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.01.

## 二氧化碳利用路径气候效益与经济可行性评估

梁希<sup>1,2</sup>, 余晓洁<sup>1,✉</sup>, 夏菖佑<sup>1</sup>, 刘牧心<sup>1</sup>, 高志豪<sup>1</sup>

(1. 广东南方碳捕集与封存产业中心, 广东广州 510530;

2. 伦敦大学学院, 英国伦敦 WC1E 6BT)

**摘要:** [目的] 碳利用技术可以将 CO<sub>2</sub> 转化为燃料、化学品和建材等有价值产品, 是一种减缓气候变化、促进资源循环利用的创新科技手段。气候效益和经济性评估是目前碳利用技术分析的难点, 也是其技术发展和推广的关键。[方法] 文章从背景分析、基准线选择、边界划分及指标计算等角度, 综合构建了一个用于量化分析碳利用减排效益和经济性的方法学。并利用该方法学对 4 种典型 CO<sub>2</sub> 利用技术的单位减排量、平准化减排成本和单位减排收益等关键指标进行了分析。[结果] 研究表明: CO<sub>2</sub> 强化石油开采 (CO<sub>2</sub>-EOR) 的单位减排量为 1.62~5.85 t CO<sub>2</sub>/t 油。当桶油价格在 390 元左右时, 不同注采比条件下 CO<sub>2</sub>-EOR 的单位减排收益为 2~1152 元/t CO<sub>2</sub>。CO<sub>2</sub> 加绿氢制甲醇的单位减排量为 4.89 t CO<sub>2</sub>/t 甲醇, 单位减排收益为负值, 即仍需 18~833 元/t CO<sub>2</sub> 的补贴或同等碳价格水平的支持才能实现减排的盈亏平衡。CO<sub>2</sub> 钢渣固碳技术用于生产建筑材料的单位减排量为 0.94 t CO<sub>2</sub>/t 钢渣微粉, 单位减排收益为 36~164 元/t CO<sub>2</sub>; CO<sub>2</sub> 养殖微藻用于生产生物柴油的单位减排量为 0.36 t CO<sub>2</sub>/t 微藻粉, 其单位减排收益可达 3 万~9 万元/t CO<sub>2</sub>。除文章重点研究的指标外, 实际的项目决策还需考虑技术稳定性、市场环境和资源条件等因素对经济性的影响。[结论] 不同碳利用技术在不同情景下的减排效果和适用性各异, 为确保发挥其积极减排作用, 需完善制度建设, 推动其融入碳市场, 并评估其实际气候影响, 以支持具备气候效益的技术。

**关键词:** 碳利用; CCU (碳捕捉、利用); 减排效益; 经济性; 方法学

中图分类号: TK01; X511; F426.61

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)05-0001-14

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.5.01

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



论文二维码

## Assessment of the Climate Benefits and Economic Feasibility of Carbon Dioxide Utilization Pathways

LIANG Xi<sup>1,2</sup>, YU Xiaojie<sup>1,✉</sup>, XIA Changyou<sup>1</sup>, LIU Muxin<sup>1</sup>, GAO Zhihao<sup>1</sup>

(1. Guangdong Southern Carbon Capture and Storage Industry Centre, Guangzhou 510530, Guangdong, China;

2. University College London, London WC1E 6BT, United Kingdom)

**Abstract:** [Introduction] Carbon utilization technologies, which convert CO<sub>2</sub> into valuable products such as fuels, chemicals, and building materials, represent an innovative approach to mitigating climate change and promoting resource recycling. The analysis of climate benefits and economic viability is a significant challenge in current research on carbon utilization technologies and is key to their development and implementation. [Method] This study developed a methodology for quantifying the emission abatement benefits and economic viability of carbon utilization technologies, based on background analysis, baseline selection, boundary definition, and indicator calculation. Using this methodology, key indicators such as emission abatement per unit, levelized cost of emission abatement, and abatement benefit per unit for four typical CO<sub>2</sub> utilization technologies were analyzed. [Result] The study shows that CO<sub>2</sub> enhanced oil recovery (CO<sub>2</sub>-EOR) achieves a unit emission abatement of 1.62~5.85 t CO<sub>2</sub>/t oil. When the price per barrel of oil is around 390 yuan, the abatement benefit for CO<sub>2</sub>-EOR varies from 2 to 1152 yuan/t CO<sub>2</sub> under different injection-production ratios. The CO<sub>2</sub> and

收稿日期: 2024-09-06 修回日期: 2024-09-18

基金项目: 宁夏回族自治区发展和改革委员会科技项目“宁夏二氧化碳产业发展路径研究”(GDCCUS2022041901)

green hydrogen-based methanol production achieves a unit emission abatement of 4.89 t CO<sub>2</sub>/t methanol, with a negative abatement benefit, requiring subsidies or equivalent carbon pricing support of 18 to 833 yuan/t CO<sub>2</sub> to break even on abatement. The carbon capture and utilization of steel slag for building material production yields a unit emission abatement of 0.94 t CO<sub>2</sub>/t steel slag powder, with an abatement benefit of 36 to 164 yuan/t CO<sub>2</sub>. The microalgae cultivation for biodiesel production achieves a unit emission abatement of 0.36 t CO<sub>2</sub>/t algae powder, and the abatement benefit can reach 30,000 to 90,000 yuan/t CO<sub>2</sub>. Beyond the key indicators emphasized in this paper, actual project decisions must also consider the impact of technological stability, market environment, and resource conditions on economic feasibility. [Conclusion] The carbon abatement effectiveness and applicability of different carbon utilization technologies vary across different scenarios. To ensure their positive contribution to emission abatement, it is necessary to improve institutional frameworks, facilitate the integration of these technologies into carbon markets, and assess their actual climate impact, thereby supporting technologies that provide genuine climate benefits.

**Key words:** carbon utilization; CCU (Carbon Capture, Utilization); abatement benefits; economic feasibility; methodology

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

全球气候变化已成为人类社会共同面对的重大挑战,尤其对于正在处于快速发展阶段的国家来说,如何在经济增长与环境保护之间找到平衡点,成为了一项尤为艰巨的任务。在此背景下,中国将积极应对气候变化作为实现自身可持续发展的内在要求及推动构建人类命运共同体的责任担当,努力处理好高质量发展和高水平保护的关系,并将积极稳妥推进碳达峰碳中和作为美丽中国建设的一项重点任务。在这一背景下,碳捕集、利用与封存(CCUS)技术凭借其巨大的减排潜力,受到广泛关注<sup>[1]</sup>。CCUS不仅是全球范围内应对气候变化、实现碳中和的关键技术路径,更是中国推进能源绿色低碳转型、发展新质生产力及实现可持续发展的重要手段<sup>[2-3]</sup>。

根据 CO<sub>2</sub> 捕集后处置方式的不同,CCUS 技术通常可分为 CO<sub>2</sub> 捕集与利用(CCU)、CO<sub>2</sub> 捕集与封存(CCS)两大路径。CO<sub>2</sub> 利用是指通过化学、物理或生物途径将源自工业排放、大气捕获以及生物质燃烧后回收的 CO<sub>2</sub>, 转化为燃料、化学品、建材等具有经济价值的产品,或用于提高矿产资源采收率、农业增产等领域<sup>[4-5]</sup>。CO<sub>2</sub> 封存则是借助工程手段将捕集的 CO<sub>2</sub> 注入于地质体中,通过一系列的岩石物理束缚、溶解和矿化作用将其永久隔离于大气环境<sup>[6]</sup>。尽管 CCS 被视为未来化石能源系统和工业部门实现大规模减排的关键技术选择<sup>[7]</sup>,但由于碳市场、碳税、能源强度控制等各类直接和间接碳排放约束机制的碳价格水平不高,地质封存资源的地域分布不

均衡,封存监测与核算体系尚待完善,在多数区域开展 CCS 项目仍未能实现经济收益。相较而言,CO<sub>2</sub> 利用在减排的同时可以将资本投入转化为经济机会,因而被部分决策者认为在现阶段比封存更具经济可行性。有研究指出,随着中国“双碳”工作的推进,CO<sub>2</sub> 利用技术有望成为当前保障能源安全、减少碳排放、推动低碳产业发展的重要技术路径<sup>[8-9]</sup>。

根据国际能源署(IEA)于 2019 年发布的统计数据,全球每年约有 2.3 亿 t CO<sub>2</sub> 被使用,主要用于尿素制造(约 1.3 亿 t)和强化石油开采(约 0.8 亿 t)<sup>[10]</sup>。随着各国减排承诺目标的提出,更多 CO<sub>2</sub> 利用路径得到关注。例如,英国开展的一项相关研究预测表明,到 2030 年,该国 CO<sub>2</sub> 合成甲醇、甲烷、聚合物以及用于混凝土养护和新型水泥生产的市场规模将达到 11.3 万 ~ 62.4 万 t CO<sub>2</sub>/a<sup>[11]</sup>。在欧盟,研究表明,CO<sub>2</sub> 合成甲醇、微藻养殖以及合成生物燃料等路径具有较大的应用潜力<sup>[12]</sup>。美国的相关研究则强调通过直接空气捕集、海洋捕集或生物质捕集,发展合成可再生燃料和化学品的 CO<sub>2</sub> 利用技术<sup>[13]</sup>。日本在其发布的《绿色增长战略》中,也提出推广 CO<sub>2</sub> 养护混凝土、CO<sub>2</sub> 生物转化合成燃料以及 CO<sub>2</sub> 合成塑料等技术<sup>[14]</sup>。中国则在“双碳”目标的引领下,积极推动 CCUS 技术的发展,并强调 CO<sub>2</sub> 利用技术的产业化<sup>[15-16]</sup>。然而,目前 CO<sub>2</sub> 利用技术的真实气候效益和经济可行性尚未明确,影响了技术选择和推广。

学界当前对 CO<sub>2</sub> 利用技术的气候效益问题存在分歧。部分研究认为,CO<sub>2</sub> 利用技术通过将 CO<sub>2</sub> 固定在原料或产品中,延缓其重新回归大气的过程,从

而减少整体碳排放量<sup>[17]</sup>。相反,也有研究指出,应从CO<sub>2</sub>利用过程是否能够替代化石碳源的角度来评估其减排效益,而非仅关注技术本身的CO<sub>2</sub>的固定量和固定时间<sup>[18]</sup>。从能源转型的角度考虑,有研究强调,在碳循环经济中,CO<sub>2</sub>利用路径的气候效益还应考虑其对化石燃料的替代带来的可再生能源的使用<sup>[19-20]</sup>。此外,一些CO<sub>2</sub>利用路径可能由于过高的能源消耗,导致整个过程的碳排放不降反升。因此,针对碳利用路径所带来的气候效益,进行详尽而细致的评估与分析尤为重要。在此基础之上,建立一套科学、合理且系统化的碳利用技术气候效益评估方法,具有至关重要的意义。

对于具有气候效益的CO<sub>2</sub>利用技术,其商业应用的前景在很大程度上取决于其经济可行性。当前,许多CO<sub>2</sub>利用技术仍处于实验室或示范阶段,尚未实现商业化。影响其经济性的主要因素包括技术成熟度、原料成本、能耗水平、产品市场需求以及政策激励等。鉴于此,有必要针对不同的CO<sub>2</sub>利用技术开展详细的技术经济分析,以评估其商业化应用的潜力和可行性。

综上所述,CO<sub>2</sub>利用作为一种应对气候变化的路径正逐步受到重视。然而,其真实的减排效益和经济性存在较大不确定性,需进一步深入研究和评估。文章将构建一个适用于不同碳利用技术减排效益和经济性分析的方法学。然后,利用此方法学,基于相关假设对部分碳利用技术进行分析。

## 1 CO<sub>2</sub> 利用技术进展

根据CO<sub>2</sub>应用方式的差异,CO<sub>2</sub>利用路径可分为地质利用、化工利用、生物利用、矿化利用。基于已有研究成果及专家调研实证,总结各类路径的技术发展阶段和应用情况如图1所示<sup>[21-22]</sup>。地质利用中,CO<sub>2</sub>强化石油开采(Enhanced Oil Recovery, CO<sub>2</sub>-EOR)是当前最为成熟和广泛应用的路径,而CO<sub>2</sub>强化天然气开采<sup>[23-24]</sup>、煤层气开采仍处于基础研究和中试阶段<sup>[25-26]</sup>。此外,尽管CO<sub>2</sub>地浸采铀技术已经成熟,但由于适用资源有限,该技术在减排层面尚未得到关注<sup>[27-28]</sup>。在化工利用方面,各种技术的发展阶段差异显著。CO<sub>2</sub>制甲醇技术已经达到工业示范阶段,而CO<sub>2</sub>制汽油、航空煤油和CO等技术仍处于中试或基础研究阶段。矿化利用中,用碱性固废,如钢渣、

电石渣、磷石膏,吸收CO<sub>2</sub>制备建材或高值碳酸盐产品,以及CO<sub>2</sub>养护混凝土等均处于中试或工业示范阶段<sup>[29-30]</sup>。生物利用路径则主要集中在微藻转化和CO<sub>2</sub>气肥使用技术上,其中CO<sub>2</sub>微藻养殖是最受关注的技术,已实现商业化应用<sup>[31-32]</sup>。

由于CO<sub>2</sub>利用技术种类多样、技术成熟度差异显著,且同类技术在减排效益和经济性方面存在一定的相似性,文章将选取CO<sub>2</sub>强化开采石油、CO<sub>2</sub>加氢制甲醇、CO<sub>2</sub>钢渣固碳和CO<sub>2</sub>养殖微藻4种具有代表性的技术进行深入讨论和分析。

### 1.1 CO<sub>2</sub> 强化石油开采

CO<sub>2</sub>强化石油开采(CO<sub>2</sub>-EOR)是目前主要的CO<sub>2</sub>地质利用方式。CO<sub>2</sub>注入地层后,在高温高压条件下与原油混合,降低原油的黏度,增加原油流动性,从而提升采收率,同时实现部分CO<sub>2</sub>的封存<sup>[5]</sup>。CO<sub>2</sub>驱油技术可分为混相驱和非混相驱2种模式。混相驱指的是在CO<sub>2</sub>萃取和原油气化的过程中,CO<sub>2</sub>与原油之间的界面张力逐渐降低,直至趋于零,从而形成完全混相。非混相驱则是在驱油过程中,油气界面始终存在,注入的CO<sub>2</sub>通过物理压驱,促使原油向两侧生产井运移。非混相驱的系统压力和采收率通常低于混相驱<sup>[33-34]</sup>。与水驱相比,CO<sub>2</sub>的黏度更小、萃取能力更强<sup>[35]</sup>。传统的水驱技术可以将油藏的原油采收率提升到20%~40%<sup>[36]</sup>,而CO<sub>2</sub>驱油技术则能够在水驱的基础上进一步将采收率提升5%~15%<sup>[5]</sup>。然而,尽管CO<sub>2</sub>驱油技术已取得了显著进展,特别是在高渗透油藏中表现良好,但在低渗透油藏中的驱油率仍然较低<sup>[37]</sup>。

经过近70年发展,CO<sub>2</sub>-EOR已成为石油行业中较为成熟的技术,尤其在美国、加拿大等发达国家,已形成了较为完善的一体化全流程工业体系。这不仅推动了CO<sub>2</sub>-EOR技术在全球范围内的商业化应用,也为中国的CO<sub>2</sub>-EOR技术发展和应用提供了宝贵的经验借鉴。目前,中国已有超过30个CO<sub>2</sub>-EOR项目,胜利油田已建成百万t级CO<sub>2</sub>驱油项目,为该技术的推广和应用提供了重要示范作用<sup>[21]</sup>。借鉴国外CO<sub>2</sub>-EOR产业发展的成功经验,并结合中国在“双碳”目标背景下的政策支持,国内CO<sub>2</sub>-EOR产业正在进入快速规模化发展阶段。

### 1.2 CO<sub>2</sub> 加氢制甲醇

甲醇(CH<sub>3</sub>OH)是全球使用最广泛的基础化学品



图 1 不同 CO<sub>2</sub> 利用技术的发展阶段<sup>[21-22]</sup>Fig. 1 The development stages of different CO<sub>2</sub> utilization technologies<sup>[21-22]</sup>

之一,广泛应用于合成甲醛、乙烯和丙烯等化工产品的生产中,还可以作为燃料单独使用,或与汽油、柴油混合使用。目前,常规的甲醇生产主要通过煤气化或天然气重整工艺实现,即首先通过煤或天然气生产合成气(主要成分为CO和H<sub>2</sub>),然后在催化剂的作用下,合成气中的CO与H<sub>2</sub>发生反应生成甲醇。此外,当反应气中含有CO<sub>2</sub>时,CO<sub>2</sub>也可与H<sub>2</sub>反应生成甲醇,同时会伴随逆水煤气变换(RWGS)反应的发生<sup>[38]</sup>。

将CO<sub>2</sub>为还原为甲醇的技术手段多样,包括加氢、电催化和光催化等路径,CO<sub>2</sub>加氢制甲醇是其中成熟度相对更高的路径。该技术通过将捕集的CO<sub>2</sub>

和可再生H<sub>2</sub>作为原料,在铜基或其他金属氧化物催化剂的作用下,将CO<sub>2</sub>还原生成甲醇<sup>[39-40]</sup>。CO<sub>2</sub>合成甲醇的研究可以追溯到20世纪80年代初期,国外一些公司尝试利用石油炼化废气中的CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>进行加氢反应,成功生成以甲醇为主的含碳化合物<sup>[41]</sup>。随后,德国鲁奇公司、日本三井公司、日本关西电力公司也相继开展CO<sub>2</sub>加氢制甲醇研发和部署<sup>[42]</sup>。2012年,冰岛碳循环国际公司(CRI)建成了全球首个CO<sub>2</sub>合成甲醇的商业化工厂,每年生成甲醇4000t,利用CO<sub>2</sub>约5600t,成为全球CO<sub>2</sub>化学利用的典范<sup>[10]</sup>。中国在这一领域的技术发展也取得了显著进展。2019年,兰州新区与大连化学物理研究所等单位联合,利

用大规模太阳能发电产生的  $H_2$  与  $CO_2$  反应,成功建成“液态阳光甲醇”合成工业示范项目,年产 1440 t 可再生绿色甲醇<sup>[43]</sup>。2020年,中国科学院上海高等科学研究所与中国成达工程有限公司合作,在海洋石油富岛公司建成了一套  $CO_2$  加氢制甲醇装置,甲醇年产规模达 5000 t<sup>[42]</sup>。

作为基础化学品,甲醇市场的增长潜力巨大。2023年,全球甲醇总产能约为 1.8 亿 t,主要增长来源于中国的煤制甲醇生产<sup>[44]</sup>。预计到 2025年,全球甲醇产能将达到 2.1 亿 t,到 2050年可能增至 5 亿 t<sup>[45]</sup>。

### 1.3 钢渣固碳

钢渣是炼钢过程中的副产品,通常含有 40%~60% 的氧化钙(CaO)、3%~10% 的氧化镁(MgO)、2%~8% 的金属铁(Fe)和 1%~8% 的氧化锰(MnO)。现有的钢渣固碳技术主要分为 2 大类:直接碳酸化固碳和间接碳酸化固碳。直接碳酸化固碳又分为气-固碳酸化和气-液碳酸化 2 种路径。气-固碳酸化是指钢渣直接与气态  $CO_2$  反应,而气-液碳酸化是  $CO_2$  先溶解于水,然后与钢渣中的成分发生反应。间接碳酸化则是通过介质(如酸、碱或铵盐)将钢渣中的  $Ca^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  离子浸出,再通入  $CO_2$  与其反应,生成碳酸盐沉淀<sup>[46]</sup>。

不同工艺下,吸收  $CO_2$  后的钢渣可以有多种利用方式。直接气-固碳酸化或气-液碳酸化后的钢渣可以直接应用于路基建设和骨料制作。而对于通过间接碳酸化技术从钢渣中浸取出的  $Ca^{2+}$ ,在去除杂质离子后,可以生成高附加值的轻质碳酸钙,这种产品在食品、水泥、造纸、粘合剂、制药等领域具有广泛的市场应用<sup>[47]</sup>。

自 2010 年以来,全球范围内陆续涌现出多个工业化钢渣固碳项目。在中国,包钢集团和瀋矿科技于 2023 年建成投运了一个钢渣  $CO_2$  工业化处理示范项目,年处理 10 万 t 钢渣和 2 万 t  $CO_2$ ,同时生产 4 万 t 高纯碳酸钙和 7 万 t 含铁料<sup>[48]</sup>。同年,京韵泰博新投运了一套万 t 级的  $CO_2$  直接利用示范工厂,利用捕集的  $CO_2$  和钢渣、炉渣、电石渣等固废生产低碳建材<sup>[49]</sup>。

### 1.4 $CO_2$ 养殖微藻

微藻是一类光合利用度高、捕碳效率强的自养微生物,同时富含蛋白质、脂类等高价值的营养成分和化工原料,在食品、医药、农业、化工和能源领域

有重要应用价值<sup>[32]</sup>。微藻的应用途径广泛多样,主要包括以下几种:(1)由于生长快、油脂含量高,微藻是生物能源的优质原料,被用于生产第三代生物燃料,如生物柴油、生物乙醇、生物甲烷和生物氢等;(2)微藻含有丰富的氨基酸,适合作为水产养殖、家禽和牲畜的饲料蛋白和营养补充剂;(3)微藻生物质中富含的不饱和脂肪酸、色素等生物活性物质,具有较高的商业价值,可以提取开发为营养素、抗氧化剂、抗炎剂、免疫调节剂和维生素前体等高附加值产品<sup>[50]</sup>。

微藻固碳的发展可以分为 2 个阶段。1991—2008 年,研究者们揭示了微藻的碳浓缩机制(CCM),证明了微藻固碳的理论可行性。2009 年后,研究逐步转向微藻固碳的产业化应用,重点探索如何通过增强微藻的光合作用和碳供应优化,提升  $CO_2$  的固定效率,以实现微藻固碳的大规模应用<sup>[51]</sup>。目前,中国正在积极开展  $CO_2$  养殖微藻的工程示范。2021 年,广东深圳华润海丰电厂依托其 CCUS 测试平台,建成了国内首个立柱式微藻光合反应器减排工程示范<sup>[52]</sup>。2023 年,广东省能源集团利用生物质锅炉尾部烟气在湛江开发建设了一个 2000  $m^2$  的微藻养殖基地<sup>[53]</sup>。

## 2 $CO_2$ 利用技术的经济性分析方法

由于  $CO_2$  利用路径的多样性、复杂性,以及相关政策与市场环境的不确定性,对其减排效益与经济性的深入分析需从多个维度进行。鉴于不同技术对减缓气候变化的影响会因空间和时间的改变而发生变化,因此相关评估需要放在能源转型背景和特定情景下进行,以便确定评估基准线。在构建具体评估方法时,还需要明确评估边界。此外,建立科学的减排量评估指标体系也是有效评价的关键。基于上述考量,本文提出了一种用于评估  $CO_2$  利用技术减排效益与经济可行性的系统性分析方法,具体如下:

1)确定评估背景与基准线:在碳达峰和产业低碳转型背景下, $CO_2$  利用技术为生产特定原材料及产品提供了一种替代传统化石燃料与能源的新途径,从而在一定程度上减少了化石资源的使用。因此,本评估方法仅考虑工业排放源作为  $CO_2$  来源的情景。其中,减排量的计算考虑碳利用路径相对于基准线路径的替代减排。基准线作为评估  $CO_2$  利用技术减

排效果的参照基准,代表了未采取该技术措施时的碳排放水平。基准线的选择应综合考量在当前背景下使用化石原料、市场规模较大、且生产同类产品的技术。在本文的评估背景下,暂不考虑未来基准线发生变化的情景。

2) 确定评估边界:对于特定的碳利用技术及其对应的基准线,减排量与经济性的计算需涵盖主要原料的生产加工排放、原料转化为产品的过程排放,以及产品使用后释放的排放。在碳利用技术中,CO<sub>2</sub>作为原料在其捕集、分离与压缩过程将产生额外排放。在原料转化为产品的利用过程,除电力、热力及工艺排放外,CO<sub>2</sub>被消耗并固定在产品中,这部分实际固定的CO<sub>2</sub>量应从总排放中扣除(图2)。本文聚焦直接使用CO<sub>2</sub>生产初级产品过程中的减排效益和经济性分析,后续高附加值产品的生产过程不是本文研究的重点。本文也建议不应该把CO<sub>2</sub>转为中间产品后进一步生产高附加值产品过程的经济效益纳入到CO<sub>2</sub>利用技术评估中,在此过程中CO<sub>2</sub>利用的经济可行性可能会被高估。

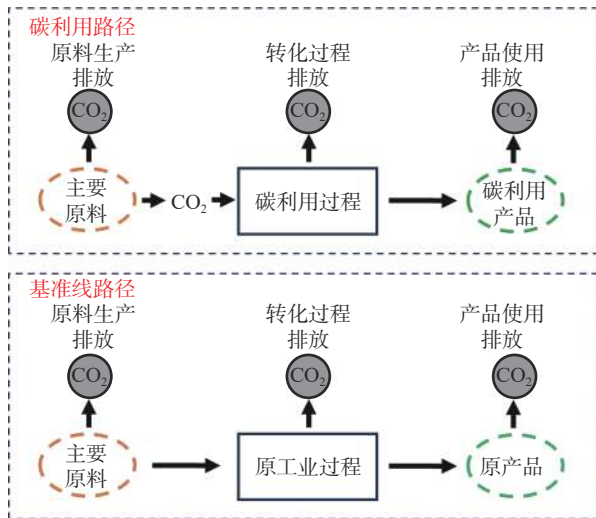


图 2 CO<sub>2</sub> 利用技术的减排量计算边界和基准线<sup>[54]</sup>

Fig. 2 The calculation boundary and baseline for emission abatements in CO<sub>2</sub> utilization technologies<sup>[54]</sup>

3) 确定评估指标:在不同CO<sub>2</sub>利用技术中,CO<sub>2</sub>被利用后重新释放到大气之前的时间跨度可分为周、月、年和长期(例如超过50 a或100 a),其带来的真实减排效益存在差异<sup>[11]</sup>。因此,本研究采用单位产品减排量(与基准线相比)、实际永久净减排量、技术整体减排潜力3个指标来评估CO<sub>2</sub>利用技术的减

排效益,具体计算方法如公式(1)~公式(4)所示:

$$E_B = E_{BM} + E_{BP} + E_{BR} \quad (1)$$

$$E_U = E_{UM} + E_{UP} + E_{UR} - U_{CO_2} \quad (2)$$

$$E_A = E_B - E_U \quad (3)$$

$$E_P = E_A \cdot E_S \quad (4)$$

式中:

$E_B$ 、 $E_U$ ——分别为基准线情景和CO<sub>2</sub>利用情景下,单位产品的碳排放量(t CO<sub>2</sub>/单位产品),当 $E_U$ 为负值时, $E_U$ 的绝对值即为CO<sub>2</sub>利用路径的实际永久净减排量;

$E_{BM}$ 、 $E_{UM}$ ——分别为两种路径下原料的生产加工排放;

$E_{BP}$ 、 $E_{UP}$ ——分别为两种路径下原料转化为产品的过程排放,包括电力、热力及工艺排放;

$E_{BR}$ 、 $E_{UR}$ ——分别为两种路径下产品使用后重新释放的排放,在产品相同时二者相等;

$U_{CO_2}$ ——碳利用路径下CO<sub>2</sub>的消耗量;

$E_A$ ——某种碳利用路径的单位减排量(t CO<sub>2</sub>/单位产品);

$E_P$ ——技术整体的减排潜力(t CO<sub>2</sub>/a);

$E_S$ ——未来的技术规模(单位产品/a)。

经济性则通过平准化减排成本、单位减排量收益和产品毛利率3个指标来衡量,计算如公式(5)~公式(9)所示:

$$C_A = \frac{\text{Capex} \cdot \text{crf} + \text{Opex}}{S \cdot E_A} \quad (5)$$

$$\text{crf} = \frac{i \cdot (1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (6)$$

$$P_A = \frac{P - E_A \cdot C_A}{E_A} \quad (7)$$

$$\text{GPM} = \frac{P - E_A \cdot C_A}{P} \quad (8)$$

$$\text{Capex}_b = \text{Capex}_a \left( \frac{S_b}{S_a} \right)^f \quad (9)$$

式中:

$C_A$ ——某种CO<sub>2</sub>利用技术的平准化减排成本(元/t CO<sub>2</sub>);

$S$ ——CO<sub>2</sub>利用工厂或设施的生产规模(单位产品/a);

$\text{Capex}$ ——对应规模下的资本投资(元);

$\text{Opex}$ ——运营维护成本(元/a);



crf ——资本回收系数;  
*i* ——贴现率;  
*N* ——工厂或设施的设计寿命(a);  
*P* ——CO<sub>2</sub> 利用产品的市场价格(元/单位产品);  
*P<sub>A</sub>* ——单位减排收益(元/t CO<sub>2</sub>);  
 GPM ——单位产品的毛利率(%).

由于给定规模下的资本投资数据通常较难获取,其取值可利用公式(9)从不同规模下的数据中转化获得,其中比例因子*f*的取值通常在0.6~0.9的范围之内,*S<sub>a</sub>*和*S<sub>b</sub>*分别为a设施和b设施的规模<sup>[20]</sup>。

### 3 参数的选取与设置

在减排效益和经济性分析过程中,本文对部分情景和参数进行了设定,相关考虑逻辑和内容包括:(1)CO<sub>2</sub>-EOR和CO<sub>2</sub>钢渣固碳技术可能存在长期固碳效果。而对于CO<sub>2</sub>合成甲醇及CO<sub>2</sub>养殖微藻技术,其产品固定的CO<sub>2</sub>在较短时间内再次释放至大气中,因此可能无法实现长期的碳固定效果;(2)中国现阶段碳捕集应用较多的化工和电力行业的捕集成本分别为105~250元/t CO<sub>2</sub>、200~600元/t CO<sub>2</sub><sup>[21]</sup>,据此假设碳利用技术CO<sub>2</sub>成本约为200元/t CO<sub>2</sub>;(3)考虑到技术种类和成熟度差异,不同CO<sub>2</sub>利用工厂和设施的规模设定是基于相关产能预测研究进行的;(4)CO<sub>2</sub>利用工厂或设施的寿命设置为20 a,资本回收系数为10%<sup>[55]</sup>,资本投资的比例因子取0.8。此外,鉴于CO<sub>2</sub>利用产品价格的不确定性和市场波动,毛利率的计算中考虑了产品价格上下浮动20%;(5)本文所用数据主要来源于相关研究论文、报告及市场分析。

对于CO<sub>2</sub>强化开采石油,本研究选择水驱方式作为CO<sub>2</sub>驱油的基准线。对于CO<sub>2</sub>驱油项目,捕集的CO<sub>2</sub>是其消耗的主要原料,假设捕集1 t CO<sub>2</sub>的二

次排放量占捕集量的10%左右。参考已有研究估算,驱油过程排放为0.25 t CO<sub>2</sub>/t油,原油使用的排放约为3 t CO<sub>2</sub>/t油<sup>[56]</sup>。基准线下原料生产、工艺过程及原油使用的排放与CO<sub>2</sub>驱油基本相同。在CO<sub>2</sub>驱油项目中,虽然每次注入后仅有部分CO<sub>2</sub>能够长期封存于地层中,但通过井口气的循环回注技术,大部分CO<sub>2</sub>将被封存在油藏中。因此,设定在油藏注入CO<sub>2</sub>驱油时的CO<sub>2</sub>封存比例为90%。由于油田的渗透性差异以及注入方式的不同,不同油田开展CO<sub>2</sub>驱油时,其减排量与成本会有所差异。参考已有研究,基于中国4个典型的CO<sub>2</sub>驱油项目的数据,计算得到相关评估参数如表1所示<sup>[57]</sup>。目前,国际原油价格约为60美元/bbl(1 bbl=0.137 t),预计到2030年后,中国的CO<sub>2</sub>-EOR产业年增油规模将达到1000万t级<sup>[58]</sup>。

对于CO<sub>2</sub>加氢制甲醇,本研究选择煤制甲醇作为基准线。理论上,CO<sub>2</sub>加氢生产1 t甲醇需要消耗约0.199 t H<sub>2</sub>和1.46 t CO<sub>2</sub><sup>[59]</sup>,其中绿氢的单位排放因子为0.68 t CO<sub>2</sub>/t H<sub>2</sub><sup>[60]</sup>,CO<sub>2</sub>加氢的过程排放量约为0.6 t CO<sub>2</sub>/t甲醇<sup>[30]</sup>。相比之下,煤制甲醇的原料及过程排放约为4.31 t CO<sub>2</sub>/t甲醇<sup>[60]</sup>。而甲醇使用后的排放约为1.38 t CO<sub>2</sub>/t甲醇<sup>[61]</sup>。由于H<sub>2</sub>价格对CO<sub>2</sub>加氢制甲醇的成本具有显著影响,因此本文将绿氢价格分为3种情景:与煤制氢平价(10元/kg)、与天然气制氢平价(15元/kg),以及当前价格水平(25元/kg)<sup>[62]</sup>。资本成本和其他运营成本则依据现有研究进行估算,相关评估参数见表2<sup>[59]</sup>。目前,甲醇的市场价格约为2500元/t。预计到2030年后,CO<sub>2</sub>加氢制甲醇的年产规模有望达到1000万~1500万t<sup>[30]</sup>。

对于CO<sub>2</sub>钢渣固碳技术,本文以钢渣固碳后用于生产建筑材料为例进行分析,其主要产品为钢渣微粉<sup>[30]</sup>。由于钢渣微粉可作为混凝土掺合料,替代水泥熟料,因此选择水泥熟料生产作为基准线。规

表1 典型CO<sub>2</sub>-EOR项目计算参数

Tab. 1 Calculation parameters for typical CO<sub>2</sub>-EOR projects

驱油规模/ (万t油·a <sup>-1</sup> )	注气方案	基准线	注采比/ [t CO <sub>2</sub> ·(t油) <sup>-1</sup> ]	碳利用排放/ [t CO <sub>2</sub> ·(t油) <sup>-1</sup> ]	基准线排放/ [t CO <sub>2</sub> ·(t油) <sup>-1</sup> ]	总资本投资/ 亿元	CO <sub>2</sub> 成本/ [元·(t油) <sup>-1</sup> ]	其他运营成本/ [元·(t油) <sup>-1</sup> ]
50	水气交替	水驱	4.7	-0.51	3.72	17.0	940	648
50	连续注气	水驱	6.5	-1.95	3.9	19.2	1 300	517
50	水气交替	水驱	1.8	1.81	3.43	23.3	360	643
50	连续注气半年后 水气交替	水驱	2.5	1.25	3.5	35.6	500	651

表 2 CO<sub>2</sub> 加氢制甲醇项目计算参数Tab. 2 Calculation parameters for CO<sub>2</sub> hydrogenation to methanol projects

项目规模/ (万t甲醇·a <sup>-1</sup> )	基准线	碳利用排放/ [t CO <sub>2</sub> ·(t甲醇) <sup>-1</sup> ]	基准线排放/ [t CO <sub>2</sub> ·(t甲醇) <sup>-1</sup> ]	总投资/亿元	绿氢价格/ [元·(kg H <sub>2</sub> ) <sup>-1</sup> ]	绿氢成本/ [元·(t甲醇) <sup>-1</sup> ]	CO <sub>2</sub> 成本/ [元·(t甲醇) <sup>-1</sup> ]	其他运营成本/ [元·(t甲醇) <sup>-1</sup> ]
50	煤制甲醇	0.8	5.69	19.5	10	1 990	292	350
50	煤制甲醇	0.8	5.69	19.5	15	2 985	292	350
50	煤制甲醇	0.8	5.69	19.5	25	4 975	292	350

模为 5 万 t 钢渣/a 的 CO<sub>2</sub> 矿化利用项目, 预计可产出 4 万 t 用于替代水泥熟料的钢渣微粉, 以及 1.5 万 t 用作干混砂的渣料。每吨钢渣可吸收 0.25 t CO<sub>2</sub><sup>[63]</sup>, 若以钢渣微粉作为主要产品估算, 每吨钢渣微粉生产需要约 0.31 t CO<sub>2</sub>。该路径下的原料排放量估算为 0.03 t CO<sub>2</sub>/t 钢渣微粉, 生产过程排放约为 0.15 t CO<sub>2</sub>/t 钢渣微粉, 产品使用过程中无排放。因此, 该路径的总排放量( $E_U$ )为 -0.13 t CO<sub>2</sub>/t 钢渣微粉。相比之下, 以石灰石为主要原料生产硅酸盐水泥熟料的排放约为 0.81 t CO<sub>2</sub>/t 水泥熟料<sup>[64]</sup>。根据已有研究, 年固碳规模为 12 万 t CO<sub>2</sub> 的钢渣项目, 其资本投资约为 2 亿元, 据此估算, 年产 10 万 t 钢渣微粉的项目资本成本约为 0.67 亿元<sup>[65]</sup>。按 20 元/t 钢渣计算, 其生产 1 t 钢渣微粉的钢渣成本约为 25 元。其他混合材料的成本按 40 元/t 钢渣微粉计算, 钢渣微粉的价格参照水泥熟料价格, 约为 300 元/t<sup>[66]</sup>。计算参数汇总如表 3 所示。预计在 2035 年前, CO<sub>2</sub> 钢渣固碳技术的产能有望达到 100 万 ~ 150 万 t/a<sup>[30]</sup>。

密闭式光生物反应器可利用工业源排放的 CO<sub>2</sub> 进行微藻养殖。碳是藻细胞的主要成分, 约占其干质量的 50%, 每生产 1 t 微藻粉可固定约 1.83 t CO<sub>2</sub>。若将微藻粉用于生产生物柴油, 则基准线设定为普通柴油的生产过程。研究表明, 每生产 42.2 t 微藻可获得约 8.8 t 生物柴油, 其生产过程的排放量为 19.4 t

CO<sub>2</sub><sup>[67]</sup>。假设微藻中固定的碳在生物柴油使用后重新释放, 则每生产 1 t 微藻粉可转化为约 0.21 t 生物柴油, 对应的排放量为 0.44 t CO<sub>2</sub>。相比之下, 每 0.21 t 普通柴油的排放量( $E_B$ )约为 0.8 t CO<sub>2</sub><sup>[68]</sup>。在经济性方面, 山西安泰恩懿项目的数据显示, 年产 130 t 微藻粉的投资约为 4000 万元<sup>[69]</sup>。另有研究表明, 对于密闭式光生物反应器项目, 其生产成本约为 3500 美元/t 微藻粉, 其中年运营成本约为年资本投资的 2 倍<sup>[70]</sup>。根据此数据估算, 年产 10 万 t 微藻粉的项目, 其资本投资和运营成本详见表 4。按照当前市场价格, 保守估计干重微藻粉的价格约为 5 万元/t。预计在 2035 年前, CO<sub>2</sub> 微藻养殖的规模有望达到 60 万 ~ 100 万 t/a<sup>[30]</sup>。

#### 4 分析结果

基于本文构建的方法学, 对 CO<sub>2</sub> 强化开采石油、CO<sub>2</sub> 加氢制甲醇、CO<sub>2</sub> 钢渣固碳和 CO<sub>2</sub> 养殖微藻 4 种典型 CO<sub>2</sub> 利用技术的减排效益及经济性分析结果如表 5 所示。其中, 净永久减排量( $-E_U$ )为正值表示该利用技术全生命周期内能够实现永久净减排, 若为负值则表示仅产生净排放; 单位减排收益( $P_A$ )或毛利率(GPM)为正值时, 意味着相较于基准线路径, CO<sub>2</sub> 利用路径在实现减排的同时能够获得经济收益, 若为负值, 则表明该路径无法直接带来收益,

表 3 CO<sub>2</sub> 钢渣固碳项目计算参数Tab. 3 Calculation parameters for CO<sub>2</sub> steel slag carbonation project

规模/ (万t钢渣微粉·a <sup>-1</sup> )	基准线	碳利用排放/ [t CO <sub>2</sub> ·(t钢渣微粉) <sup>-1</sup> ]	基准线排放/ [t CO <sub>2</sub> ·(t水泥熟料) <sup>-1</sup> ]	总投资/亿元	钢渣成本/ [元·(t钢渣微粉) <sup>-1</sup> ]	CO <sub>2</sub> 成本/ [元·(t钢渣微粉) <sup>-1</sup> ]	其他运营成本/ [元·(t钢渣微粉) <sup>-1</sup> ]
10	水泥熟料生产	-0.13	0.81	0.67	25	62	40

表 4 CO<sub>2</sub> 养殖微藻项目计算参数Tab. 4 Calculation parameters for CO<sub>2</sub> microalgae cultivation project

规模/ (万t微藻粉·a <sup>-1</sup> )	基准线	类型	用途	碳利用排放/ [t CO <sub>2</sub> ·(t微藻粉) <sup>-1</sup> ]	基准线排放/ [t CO <sub>2</sub> ·(t微藻粉) <sup>-1</sup> ]	总投资/亿元	运营成本/ [元·(t微藻粉) <sup>-1</sup> ]
10	普通柴油生产	密闭板式光生物反应器	生物柴油生产	0.44	0.8	81.45	19 135



表5 典型碳利用路径减排效益和经济性分析结果

Tab. 5 Analysis results of emission abatement benefits and economic viability for typical CO<sub>2</sub> utilization technologies

碳利用技术	单位产品	基准线	项目规模/ (万t单位 产品·a <sup>-1</sup> )	单位减排量/ (t CO <sub>2</sub> ·单位 产品 <sup>-1</sup> )	净永久减 排量/(t CO <sub>2</sub> ·单位 产品 <sup>-1</sup> )	2030—		单位减排 成本/[元· (t CO <sub>2</sub> ) <sup>-1</sup> ]	单位减排收 益/[元· (t CO <sub>2</sub> ) <sup>-1</sup> ]	毛利率/%	说明
						2030—2035年 产业规模/(万t 单位产品·a <sup>-1</sup> )	2035年减 排潜力/ (万 t CO <sub>2</sub> ·a <sup>-1</sup> )				
CO <sub>2</sub> 强化石油开采	1 t原油	水驱	50	4.23	+0.51	1000	4230	470	[69, 338]	[13, 42]	水气交替注入, 注采比4.7
CO <sub>2</sub> 强化石油开采	1 t原油	水驱	50	5.85	+1.95	1000	5850	388	[2, 196]	[0, 34]	连续注入, 注采比6.5
CO <sub>2</sub> 强化石油开采	1 t原油	水驱	50	1.62	-1.81	1000	1620	957	[449, 1152]	[32, 55]	水气交替注入, 注采比1.8
CO <sub>2</sub> 强化石油开采	1 t原油	水驱	50	2.25	-1.25	1000	2250	883	[129, 635]	[13, 42]	连续注气半年后水气交替, 注采比2.5
CO <sub>2</sub> 加绿氢制甲醇	1 t甲醇	煤制甲醇	50	4.89	-0.8	1000	4890	632	[-223, -18]	[-55, -3]	绿氢价格10元/kg
CO <sub>2</sub> 加绿氢制甲醇	1 t甲醇	煤制甲醇	50	4.89	-0.8	1000	4890	835	[-426, -222]	[-104, -36]	绿氢价格15元/kg
CO <sub>2</sub> 加绿氢制甲醇	1 t甲醇	煤制甲醇	50	4.89	-0.8	1000	4890	1242	[-833, -629]	[-204, -103]	绿氢价格25元/kg
CO <sub>2</sub> 钢渣固碳	1 t钢渣 微粉	水泥熟料 生产	10	0.94	+0.13	100	94	219	[36, 164]	[14, 43]	生产建筑材料
CO <sub>2</sub> 养殖微藻(用于产生生物柴油)	1 t干重 微藻粉	普通柴油 生产	10	0.36	-0.44	100	36	8万	[3万, 9万]	[28, 52]	密闭板式光生物反应器

需要额外的支持才能实现盈亏平衡。

在注采比为 4.7~6.5 t CO<sub>2</sub>/t 油的条件下, CO<sub>2</sub>-EOR 技术能够实现每吨油 0.51~1.95 t CO<sub>2</sub> 的永久净减排。到 2030—2035 年, 其减排潜力预计达到 1 620 万~5 850 万 t CO<sub>2</sub>/a。经济性分析表明, 该技术的单位减排成本在 388~957 元/t CO<sub>2</sub>, 减排收益为 2~1152 元/t CO<sub>2</sub>, 毛利率为 0~55%。尽管低注采比和高原油价格条件下, CO<sub>2</sub>-EOR 技术具备一定经济效益, 但若注采比较高或原油价格较低, 经济收益将显著降低。

相比传统煤制甲醇工艺, CO<sub>2</sub> 加绿氢制甲醇技术的减排效益明显, 单位减排量达到 4.89 t CO<sub>2</sub>/t 甲醇。到 2030—2035 年, 预计其减排潜力为 4 890 万 t CO<sub>2</sub>/a。然而, 该技术的经济性高度依赖于绿氢价格。当绿氢价格处于 10~25 元/kg 时, 单位减排成本为 632~1242 元/t CO<sub>2</sub>, 且减排收益为负, 需依赖 18~833 元/t CO<sub>2</sub> 的政策补贴或同等碳价格水平支持才能实现盈亏平衡。因此, 尽管减排效益显著, 但整体经济性不足。

与传统水泥生产工艺相比, CO<sub>2</sub> 钢渣固碳技术具备较好的减排效益。其单位减排量为 0.94 t CO<sub>2</sub>/t 钢渣微粉, 净永久减排量为 0.13 t CO<sub>2</sub>/t 钢渣微粉。到 2030—2035 年, 减排潜力预计可达到 94 万 t CO<sub>2</sub>/a。在经济性方面, 该路径的单位减排成本为 219 元/t CO<sub>2</sub>, 单位减排收益为 36~164 元/t CO<sub>2</sub>, 产品毛利率为 14%~43%, 表明该技术在减排 CO<sub>2</sub> 的同时具备一定的经济优势。

CO<sub>2</sub> 养殖微藻用于产生生物柴油的减排效益有限, 单位减排量为 0.36 t CO<sub>2</sub>/t 微藻粉。然而, 由于微藻粉的生产成本较高, 单位减排成本高达 8 万元/t CO<sub>2</sub>, 而单位减排收益为 3 万~9 万元/t CO<sub>2</sub>, 产品毛利率在 28%~52%。尽管该技术具备一定的减排潜力, 但由于生产成本低, 因而其大规模推广受到一定限制<sup>[32]</sup>。

## 5 讨论

CO<sub>2</sub> 利用技术的平准化减排成本或减排收益并非固定不变的经济可行性指标, 实际项目决策时仍

需考虑技术稳定性、市场环境和资源条件等因素的影响。例如, CO<sub>2</sub>-EOR 技术在低渗油藏中的注采比更高, 其单位产品减排量相对更大, 但减排收益相对较低, 因此实际项目开发需要在减排和获取收益之间找到平衡。在甲醇行业, 由于得到国际标准(如国际可持续发展与碳认证, ISCC)认证的可持续或绿色甲醇在出售时可能产生溢价, 因此 CO<sub>2</sub> 加氢制甲醇技术在认证前后的绿色溢价也是影响其经济性的重要因素。而 CO<sub>2</sub> 钢渣固碳和养殖微藻技术可能还需考虑对土地和水资源的需求问题。

CO<sub>2</sub> 利用技术减排的基准线会随着减排背景的变化而改变。当 CO<sub>2</sub> 来源为电力、钢铁、水泥等化石原料工业源捕集时, 从替代减排或避免减排的角度, 碳利用技术可以有效减少 2030 年“碳达峰”前后一段时间内的排放。当临近 2060 年“碳中和”时, 除少数涉及 CO<sub>2</sub> 封存或将其转化为建筑材料的技术外, 大多数使用工业源 CO<sub>2</sub> 的碳利用技术(如合成燃料和化学品)在 CCU 全生命周期内仍会产生净排放, 从而无法与净零排放的实际需求相兼容<sup>[71]</sup>。届时, 为了实现净零排放, 从工业源捕集的 CO<sub>2</sub> 或许将主要被用于封存, 而合成燃料和化学品等碳利用技术所需的 CO<sub>2</sub> 或许将主要来源于大气环境, 如基于可再生能源的直接空气碳捕集和生物质能碳捕集。然而, 受特定国家、部门或公司的温室气体减排目标的影响, 这种转变发生的年份无法准确估计。因此, 未来在对碳利用项目进行大规模投资决策时, 需要详细评估技术的短期经济效益、长期减排效果以及从附近获取低成本空气源 CO<sub>2</sub> 的能力, 从而尽可能避免因减排需求环境发生变化带来的资产搁浅<sup>[72]</sup>。

目前, CO<sub>2</sub> 利用项目尚未纳入全国温室气体自愿减排交易市场。为确保碳利用技术能够有效促进减排, 未来需在标准制定、减排认证以及政策激励等多个关键领域做好制度建设。为了进一步促进碳利用项目融入碳市场, 需要重点解决以下问题: (1) 加快评估遴选和制定更多方法学, 以满足不同类型碳利用项目的减排效果量化核证需求; (2) 加快推进数据质量管理标准化、法制化、数智化, 确保温室气体排放量、减排量及相关数据的准确性和可靠性; (3) 政策制定者和实践者更应该关注 CO<sub>2</sub> 利用技术对温室气体减排和气候缓解的实际影响和贡献, 而非技术本身, 为有具备气候效益的 CO<sub>2</sub> 利用技术提供激

励和支持<sup>[73]</sup>。

## 6 结论

碳利用技术为利用 CO<sub>2</sub> 生产产品提供了一条新路径, 在一定程度上能够减少对化石燃料和化石能源的依赖。本文提出了一种用于 CO<sub>2</sub> 利用技术减排效益和经济性评估的方法, 并利用该方法选取 4 种典型 CO<sub>2</sub> 利用技术进行了分析, 得到以下结论:

1) 在方法学层面, 本文构建的方法学可以适用于不同类型碳利用技术。通过对单位减排量、实际永久净减排量、技术整体减排潜力、平准化减排成本、单位减排量收益和产品毛利率共 6 个指标的量化分析, 该方法学可以更直观、更科学地评估不同碳利用技术的减排效益和经济性。

2) 在具体技术分析结果层面, 不同碳利用技术在减排效益和经济性上存在显著差异。CO<sub>2</sub>-EOR 和钢渣固碳技术展示了较大的减排潜力和一定的经济效益, 特别是在特定条件下能够实现盈亏平衡甚至盈利。CO<sub>2</sub> 加绿氢制甲醇技术的经济性则高度依赖于绿氢的价格水平, 当前尚需较大的政策补贴或等同碳定价水平支持。而 CO<sub>2</sub> 养殖微藻技术虽然减排成本高, 但其经济收益使其在特定的应用场景中具有吸引力。

3) CO<sub>2</sub> 利用技术在不同情景下的减排效果和适用性可能存在差异。为确保该技术能够在减排中发挥积极作用, 未来需完善相关制度建设, 促进其融入碳市场, 并注重评估其对气候的实际影响和贡献, 为具备气候效益的技术提供支持。

本研究所引用的文献数据广泛, 存在一定的不确定性, 需通过更多的实际项目数据加以验证。此外, CO<sub>2</sub> 利用项目尚未被纳入全国温室气体自愿减排市场和配额抵扣体系, 其在碳排放总量和强度控制政策体系中的认可度仍有待进一步探讨。因此, 未来研究应着重于实证分析, 评估 CO<sub>2</sub> 利用技术在不同政策框架和项目条件下的可行性与潜在影响。

### 参考文献:

- [1] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 70-80. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2021.06.004.  
ZHANG X, LI Y, MA Q, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China [J]. Strategic study

- of CAE, 2021, 23(6): 70-80. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2021.06.004](https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2021.06.004).
- [2] 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. DOI: [10.12062/cpre.20210827](https://doi.org/10.12062/cpre.20210827).  
ZHANG X, LI K, MA Q, et al. Orientation and prospect of CCUS development under carbon neutrality target [J]. *China population, resources and environment*, 2021, 31(9): 29-33. DOI: [10.12062/cpre.20210827](https://doi.org/10.12062/cpre.20210827).
- [3] 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. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2022.140](https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2022.140).  
PENG X T, LÜ H D, ZHANG X. Interpretation of IPCC AR6 report on carbon capture, utilization and storage (CCUS) technology development [J]. *Climate change research*, 2022, 18(5): 580-590. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2022.140](https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2022.140).
- [4] SHAH B, SHAH M, SHAH V, et al. An anatomized study on the progress and prospects of CO<sub>2</sub> utilization technology [J]. *Case studies in chemical and environmental engineering*, 2023, 8: 100381. DOI: [10.1016/j.csee.2023.100381](https://doi.org/10.1016/j.csee.2023.100381).
- [5] FU L P, REN Z K, SI W Z, et al. Research progress on CO<sub>2</sub> capture and utilization technology [J]. *Journal of CO<sub>2</sub> utilization*, 2022, 66: 102260. DOI: [10.1016/j.jcou.2022.102260](https://doi.org/10.1016/j.jcou.2022.102260).
- [6] 罗海中, 吴大卫, 范永春, 等. 碳中和背景下 CCUS 技术发展及广东离岸封存潜力评估 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(6): 1-13. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.001).  
LUO H Z, WU D W, FAN Y C, et al. Development of CCUS technology in the context of carbon neutrality and assessment of the potential for offshore storage in Guangdong Province [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(6): 1-13. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.001](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.06.001).
- [7] 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 [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [8] 许海超, 龚硕锴. 二氧化碳利用技术现状及未来发展趋势 [J]. *广州化工*, 2022, 50(23): 38-40. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9677.2022.23.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9677.2022.23.010).  
XU H C, GONG S K. Current status and future developmental direction of carbon dioxide utilization [J]. *Guangzhou chemical industry*, 2022, 50(23): 38-40. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9677.2022.23.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9677.2022.23.010).
- [9] BASINI L E, FURESI F, BAUMGÄRTL M, et al. CO<sub>2</sub> capture and utilization (CCU) by integrating water electrolysis, electrified reverse water gas shift (E-RWGS) and methanol synthesis [J]. *Journal of cleaner production*, 2022, 377: 134280. DOI: [10.1016/j.jclepro.2022.134280](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134280).
- [10] IEA. Putting CO<sub>2</sub> to use: Creating value from emissions [R]. Paris: International Energy Agency, 2019.
- [11] ALBERICI S, NOOTHOUT P, MIR G U R, et al. Assessing the potential of CO<sub>2</sub> utilisation in the UK [R]. Utrecht: Ecofys, 2017.
- [12] CHAUVY R, DE WEIRELD G. CO<sub>2</sub> utilization technologies in Europe: a short review [J]. *Energy technology*, 2020, 8(12): 2000627. DOI: [10.1002/ente.202000627](https://doi.org/10.1002/ente.202000627).
- [13] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Carbon dioxide utilization markets and infrastructure: status and opportunities: a first report [R]. Washington: The National Academies Press, 2023.
- [14] 経済産業省. 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 [EB/OL]. (2021-06-18) [2024-09-06]. [https://www.meti.go.jp/policy/energy\\_enviro](https://www.meti.go.jp/policy/energy_enviro).
- [15] 中国 21 世纪议程管理中心. 中国二氧化碳利用技术评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.  
The Administrative Center for China's Agenda 21. Assessment report on carbon dioxide utilization technology in China [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [16] 蔡博峰, 李琦, 张贤, 等. 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, 2021.  
CAI B F, LI Q, ZHANG X, et al. China carbon dioxide capture utilization and storage (CCUS) annual report (2021) - a study of China's CCUS pathway [R]. Beijing: Chinese Academy of Environmental Planning, 2021.
- [17] CUÉLLAR-FRANCA R M, AZAPAGIC A. Carbon capture, storage and utilisation technologies: a critical analysis and comparison of their life cycle environmental impacts [J]. *Journal of CO<sub>2</sub> utilization*, 2015, 9: 82-102. DOI: [10.1016/j.jcou.2014.12.001](https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.12.001).
- [18] European Commission: Directorate-General for Research and Innovation. Novel carbon capture and utilisation technologies [M]. Belgium: Publications Office of the European Union, 2018.
- [19] LANZAFAME P, PERATHONER S, CENTI G, et al. Grand challenges for catalysis in the science and technology roadmap on catalysis for Europe: moving ahead for a sustainable future [J]. *Catalysis science & technology*, 2017, 7(22): 5182-5194. DOI: [10.1039/c7cy01067b](https://doi.org/10.1039/c7cy01067b).
- [20] CENTI G, PERATHONER S, SALLADINI A, et al. Economics of CO<sub>2</sub> utilization: a critical analysis [J]. *Frontiers in energy research*, 2020, 8: 567986. DOI: [10.3389/fenrg.2020.567986](https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.567986).
- [21] 张贤, 杨晓亮, 鲁玺, 等. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023) [R]. 北京: 中国 21 世纪议程管理中心, 2023.  
ZHANG X, YANG X L, LU X, et al. China carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) annual report (2023) [R]. Beijing: The Administrative Center for China's Agenda 21, 2023.
- [22] 广东南方碳捕集与封存产业中心. 宁夏二氧化碳产业发展路径研究报告 [R]. 广州: 广东南方碳捕集与封存产业中心, 2023.  
Guangdong Southern Carbon Capture and Storage Industry Center. Research report on the development path of carbon dioxide industry in Ningxia [R]. Guangzhou: Guangdong Southern Carbon Capture and Storage Industry Center, 2023.
- [23] WANG W D, WEN J Y, WANG C W, et al. Current status and development trends of CO<sub>2</sub> storage with enhanced natural gas recovery (CS-EGR) [J]. *Fuel*, 2023, 349: 128555. DOI: [10.1016/](https://doi.org/10.1016/)



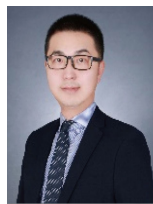
- [j.fuel.2023.128555](#).
- [24] LIU S Y, REN B, LI H Y, et al. CO<sub>2</sub> storage with enhanced gas recovery (CSEGR): a review of experimental and numerical studies [J]. *Petroleum science*, 2022, 19(2): 594-607. DOI: [10.1016/j.petsci.2021.12.009](#).
- [25] ZHANG C L, WANG E Y, LI B B, et al. Laboratory experiments of CO<sub>2</sub>-enhanced coalbed methane recovery considering CO<sub>2</sub> sequestration in a coal seam [J]. *Energy*, 2023, 262: 125473. DOI: [10.1016/j.energy.2022.125473](#).
- [26] TALAPATRA A. A study on the carbon dioxide injection into coal seam aiming at enhancing coal bed methane (ECBM) recovery [J]. *Journal of petroleum exploration and production technology*, 2020, 10(5): 1965-1981. DOI: [10.1007/s13202-020-00847-y](#).
- [27] QIU W J, YANG Y, SONG J, et al. What chemical reaction dominates the CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> in-situ uranium leaching? Insights from a three-dimensional multicomponent reactive transport model at the field scale [J]. *Applied geochemistry*, 2023, 148: 105522. DOI: [10.1016/j.apgeochem.2022.105522](#).
- [28] 刘世奇, 皇凡生, 杜瑞斌, 等. CO<sub>2</sub> 地质封存与利用示范工程进展及典型案例分析 [J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(2): 158-174. DOI: [10.3969/j.issn.1001-1986.2023.02.012](#).  
LIU S Q, HUANG F S, DU R B, et al. Progress and typical case analysis of demonstration projects of the geological sequestration and utilization of CO<sub>2</sub> [J]. *Coal geology & exploration*, 2023, 51(2): 158-174. DOI: [10.3969/j.issn.1001-1986.2023.02.012](#).
- [29] 郑旭帆, 黄艳, 徐冬, 等. 碱性固废 CO<sub>2</sub> 矿化利用技术工程应用进展 [J/OL]. *洁净煤技术*, 1-14. [2024-07-31] [2024-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.td.20240730.1432.011.html>.  
ZHENG X F, HUANG Y, XU D, et al. Progress in engineering application of alkaline solid waste CO<sub>2</sub> mineralization utilization technology [J/OL]. *Clean coal technology*, 1-14. [2024-07-31] [2024-08-06]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.td.20240730.1432.011.html>.
- [30] 黄晶, 陈其针, 仲平, 等. 中国碳捕集利用与封存技术评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2021.  
HUANG J, CHEN Q Z, ZHONG P, et al. National assesment report on development of carbon capture utilization and storage technology in China [M]. Beijing: Science Press, 2021.
- [31] 张丽, 马善恒. CO<sub>2</sub> 资源转化利用关键技术机理、现状及展望 [J]. *应用化工*, 2023, 52(6): 1874-1878. DOI: [10.3969/j.issn.1671-3206.2023.06.049](#).  
ZHANG L, MA S H. Mechanism, present situation and prospect of key technologies of CO<sub>2</sub> resource conversion and utilization [J]. *Applied chemical industry*, 2023, 52(6): 1874-1878. DOI: [10.3969/j.issn.1671-3206.2023.06.049](#).
- [32] 莫壮洪, 朱俊英, 李煦, 等. 微藻生物固定 CO<sub>2</sub> 耦合污染物减排技术应用及展望 [J]. *石油学报(石油加工)*, 2024, 40(5): 1430-1445. DOI: [10.369/j.issn.1001-8719.2024.05.026](#).  
MO Z H, ZHU J Y, LI X, et al. Application and prospect of the coupled technology of CO<sub>2</sub> fixation and pollutant emission reduction by microalgae [J]. *Acta petrolei sinica (petroleum processing section)*, 2024, 40(5): 1430-1445. DOI: [10.369/j.issn.1001-8719.2024.05.026](#).
- [33] CHEN X L, LI Y Q, TANG X, et al. Effect of gravity segregation on CO<sub>2</sub> flooding under various pressure conditions: application to CO<sub>2</sub> sequestration and oil production [J]. *Energy*, 2021, 226: 120294. DOI: [10.1016/j.energy.2021.120294](#).
- [34] 龙冕, 齐桂雪, 冯超林. 二氧化碳混相与非混相驱油技术研究进展 [J]. *中外能源*, 2018, 23(2): 18-26.  
LONG M, QI G X, FENG C L. Research progress of miscible and immiscible carbon dioxide flooding [J]. *Sino-global energy*, 2018, 23(2): 18-26.
- [35] 陈欢庆. CO<sub>2</sub> 驱油与埋存技术新进展 [J]. *油气地质与采收率*, 2023, 30(2): 18-26. DOI: [10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202208048](#).  
CHEN H Q. New progress of CO<sub>2</sub> flooding and storage technology [J]. *Petroleum geology and recovery efficiency*, 2023, 30(2): 18-26. DOI: [10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202208048](#).
- [36] ADU E, ZHANG Y D, LIU D H. Current situation of carbon dioxide capture, storage, and enhanced oil recovery in the oil and gas industry [J]. *The Canadian journal of chemical engineering*, 2019, 97(5): 1048-1076. DOI: [10.1002/cjce.23393](#).
- [37] HILL L B, LI X C, WEI N. CO<sub>2</sub>-EOR in China: a comparative review [J]. *International journal of greenhouse gas control*, 2020, 103: 103173. DOI: [10.1016/j.ijggc.2020.103173](#).
- [38] JIANG X, NIE X W, GUO X W, et al. Recent advances in carbon dioxide hydrogenation to methanol via heterogeneous catalysis [J]. *Chemical reviews*, 2020, 120(15): 7984-8034. DOI: [10.1021/acs.chemrev.9b00723](#).
- [39] KIM C, YOO C J, OH H S, et al. Review of carbon dioxide utilization technologies and their potential for industrial application [J]. *Journal of CO<sub>2</sub> utilization*, 2022, 65: 102239. DOI: [10.1016/j.jcou.2022.102239](#).
- [40] 叶知远, 饶娜, 夏菘佑, 等. CO<sub>2</sub> 加氢制甲醇催化剂与项目进展 [J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(8): 150-161. DOI: [10.13226/j.issn.1006-6772.23030103](#).  
YE Z Y, RAO N, XIA C Y, et al. Advances in catalysts and project progress for CO<sub>2</sub> hydrogenation to methanol [J]. *Clean coal technology*, 2024, 30(8): 150-161. DOI: [10.13226/j.issn.1006-6772.23030103](#).
- [41] 徐敏杰, 朱明辉, 陈天元, 等. CO<sub>2</sub> 高值化利用: CO<sub>2</sub> 加氢制甲醇催化剂研究进展 [J]. *化工进展*, 2021, 40(2): 565-576. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1401](#).  
XU M J, ZHU M H, CHEN T Y, et al. High value utilization of CO<sub>2</sub>: research progress of catalyst for hydrogenation of CO<sub>2</sub> to methanol [J]. *Chemical industry and engineering progress*, 2021, 40(2): 565-576. DOI: [10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1401](#).
- [42] 苏静, 张宗飞, 张大洲. 二氧化碳加氢制甲醇的技术进展及展望 [J]. *化肥设计*, 2022, 60(2): 6-9, 14. DOI: [10.3969/j.issn.1004-8901.2022.02.002](#).  
SU J, ZHANG Z F, ZHANG D Z. Technological progress and prospects of carbon dioxide hydrogenation to methanol [J]. *Chemical fertilizer design*, 2022, 60(2): 6-9, 14. DOI: [10.3969/j.issn.1004-8901.2022.02.002](#).

- [43] 王集杰, 韩哲, 陈思宇, 等. 太阳燃料甲醇合成 [J]. *化工进展*, 2022, 41(3): 1309-1317. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0244.  
WANG J J, HAN Z, CHEN S Y, et al. Liquid sunshine methanol [J]. *Chemical industry and engineering progress*, 2022, 41(3): 1309-1317. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2022-0244.
- [44] 李玲. 绿色甲醇要发展, 管输体系需跟上 [N/OL]. 中国能源报. (2024-08-12) [2024-09-01]. [http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2024-08/12/content\\_26075497.htm](http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2024-08/12/content_26075497.htm).  
LI L. For the Development of green methanol, the pipeline system must keep up [N/OL]. *China Energy News*. (2024-08-12). [2024-09-01]. [http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2024-08/12/content\\_26075497.htm](http://paper.people.com.cn/zgnyb/html/2024-08/12/content_26075497.htm).
- [45] IRENA. 创新前景: 可再生甲醇 [R]. 阿布扎比: IRENA, 2021.  
IRENA. Innovation outlook: renewable methanol [R]. Abu Dhabi: IRENA, 2021.
- [46] 谢元涛, 封孝信. 钢渣矿化固定二氧化碳研究现状及展望 [J]. *金属矿山*, 2023(11): 45-54. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202311004.  
XIE Y T, FENG X X. Research status and prospect of steel slag mineralization for carbon dioxide capture and sequestration [J]. *Metal mine*, 2023(11): 45-54. DOI: 10.19614/j.cnki.jsks.202311004.
- [47] 刘文昊, 陈庆彩, 徐腾飞. 双碳战略背景下的钢渣固碳技术研究进展 [J]. *环境工程*, 2024, 42(5): 172-182. DOI: 10.13205/j.hjgc.202405022.  
LIU W H, CHEN Q C, XU T F. Research progress of carbon sequestration technology of steel slag under the background of dual carbon strategy [J]. *Environmental engineering*, 2024, 42(5): 172-182. DOI: 10.13205/j.hjgc.202405022.
- [48] 张建芳, 田牧泽. 全球首台套固废与二氧化碳矿化综合利用项目在包钢实施 [N/OL]. 包头新闻网. (2021-08-02) [2024-09-01]. <https://www.baotounews.com.cn/p/752397.html>.  
ZHANG J F, TIAN M Z. The world's first comprehensive utilization project of solid waste and CO<sub>2</sub> mineralization implemented in Baogang [N/OL]. *Baotou News*. (2021-08-02) [2024-09-01]. <https://www.baotounews.com.cn/p/752397.html>.
- [49] 张兴刚. 全球首座万吨级二氧化碳直接利用工业实验示范工厂投产 [N/OL]. 中国化工报. (2023-07-18) [2024-09-19]. <https://www.ccin.com.cn/detail/38d422a8d08a0c39324d4178dfdc ced4>.  
ZHANG X G. The world's first 10,000-ton-scale CO<sub>2</sub> direct utilization industrial demonstration plant begins operation [N/OL]. *China Chemical Industry News*. (2023-07-18) [2024-09-19]. <https://www.ccin.com.cn/detail/38d422a8d08a0c39324d4178dfdc ced4>.
- [50] 莫壮洪, 朱俊英, 荣峻峰, 等. 微藻生物固碳技术在碳中和中的应用及潜在价值 [J]. *石油炼制与化工*, 2024, 55(1): 98-111. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2399.2024.01.023.  
MO Z H, ZHU J Y, RONG J F, et al. Application and potential value of microalgae bio-carbon fixation technology in carbon neutrality [J]. *Petroleum processing and petrochemicals*, 2024, 55(1): 98-111. DOI: 10.3969/j.issn.1005-2399.2024.01.023.
- [51] REN H Y, ZHOU D, LU J W, et al. Mapping the field of microalgae CO<sub>2</sub> sequestration: a bibliometric analysis [J]. *Environmental science and pollution research*, 2023, 30(32): 78030-78040. DOI: 10.1007/s11356-023-27850-0.
- [52] 陈昊. 海丰将建微藻固碳暨干冰转化项目 [N/OL]. 中国环境报. (2021-07-30) [2024-09-19]. [http://epaper.cenews.com.cn/html/2021-07/30/content\\_68379.htm](http://epaper.cenews.com.cn/html/2021-07/30/content_68379.htm).  
CHEN H. Haifeng to build microalgae carbon fixation and dry ice conversion project [N/OL]. *China Environmental News*. (2021-07-30) [2024-09-19]. [http://epaper.cenews.com.cn/html/2021-07/30/content\\_68379.htm](http://epaper.cenews.com.cn/html/2021-07/30/content_68379.htm).
- [53] 陈思亮. 国内首个“生物质电厂—微藻固碳—资源化利用”负碳经济新模式落地湛江 [N/OL]. 南方日报. (2024-01-31) [2024-09-19]. <https://static.nfapp.southcn.com/content/202401/31/c8561547.html>.  
CHEN S L. China's first "biomass power plant-microalgae carbon fixation-resource utilization" negative carbon economy model launched in Zhanjiang [N/OL]. *Nanfang Daily*. (2024-01-31) [2024-09-19]. <https://static.nfapp.southcn.com/content/202401/31/c8561547.html>.
- [54] ZIMMERMANN A, MÜLLER L J, MARXEN A, et al. Techno-economic assessment & life-cycle assessment guidelines for CO<sub>2</sub> utilization (Version 1.1) [R]. Ann Arbor: Global CO<sub>2</sub> Initiative, 2020.
- [55] LIU M, ZHANG Y, LAN H, et al. Assessing the cost reduction potential of CCUS cluster projects of coal-fired plants in Guangdong Province in China [J]. *Frontiers of earth science*, 2023, 17(3): 844-855. DOI: 10.1007/s11707-022-1030-1.
- [56] 汪芳, 廖广志, 苏春梅, 等. 二氧化碳捕集、驱油与封存项目碳减排量核算方法 [J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(4): 862-871. DOI: 10.11698/PED.20220771.  
WANG F, LIAO G Z, SU C M, et al. Carbon emission reduction accounting method for a CCUS-EOR project [J]. *Petroleum exploration and development*, 2023, 50(4): 862-871. DOI: 10.11698/PED.20220771.
- [57] 孟新. 中国 CCUS-EOR 项目经济效果及其提升手段研究 [J]. *油气地质与采收率*, 2023, 30(2): 181-186. DOI: 10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202204009.  
MENG X. Research on economic effect of China's CCUS-EOR projects and its improvement methods [J]. *Petroleum geology and recovery efficiency*, 2023, 30(2): 181-186. DOI: 10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.202204009.
- [58] 袁士义, 马德胜, 李军诗, 等. 二氧化碳捕集、驱油与埋存产业化进展及前景展望 [J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(4): 828-834. DOI: 10.11698/PED.20220212.
- [59] YUAN S Y, MA D S, LI J S, et al. Progress and prospects of carbon dioxide capture, EOR-utilization and storage industrialization [J]. *Petroleum exploration and development*, 2022, 49(4): 828-834. DOI: 10.11698/PED.20220212.
- [59] 林海周, 罗志斌, 裴爱国, 等. 二氧化碳与氢合成甲醇技术和产业化进展 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(2): 14-19. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.002.  
LIN H Z, LUO Z B, PEI A G, et al. Technology and

- industrialization progress on methanol synthesis from carbon dioxide and hydrogen [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(2): 14-19. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.002](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.002).
- [60] 陈馨. 典型制氢工艺生命周期碳排放对比研究 [J]. *当代石油石化*, 2023, 31(1): 19-25. DOI: [10.3969/j.issn.1009-6809.2023.01.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-6809.2023.01.005).
- CHEN X. Comparative study on life-cycle carbon emissions of typical hydrogen production processes [J]. *Petroleum & petrochemical today*, 2023, 31(1): 19-25. DOI: [10.3969/j.issn.1009-6809.2023.01.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-6809.2023.01.005).
- [61] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 温室气体排放核算与报告要求 第 5 部分: 钢铁生产企业: GB/T 32151.5—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Requirements of the greenhouse gas emission accounting and reporting—part 5: iron and steel production enterprise: GB/T 32151.5—2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [62] 川财证券研究所. 不同制氢工艺的成本对比——氢能行业深度研究报告 [R]. 成都: 川财证券有限责任公司, 2022.
- Chuancai Securities Research Institute. Cost comparison of different hydrogen production processes-in depth research report on the hydrogen energy industry [R]. Chengdu: Chuancai Securities Co., Ltd., 2022.
- [63] WANG X, LU X Y, TURVEY C C, et al. Evaluation of the carbon sequestration potential of steel slag in China based on theoretical and experimental labile Ca [J]. *Resources, conservation and recycling*, 2022, 186: 106590. DOI: [10.1016/j.resconrec.2022.106590](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106590).
- [64] 何捷, 崔敬轩, 聂卿, 等. 中国水泥行业碳中和路径研究 [R]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院有限公司, 2023.
- HE J, CUI J X, NIE Q, et al. A study on the carbon neutrality pathways of China's cement industry [R]. Beijing: China Building Materials Academy Co., Ltd., 2023.
- [65] HUIJGEN W J J, COMANS R N J, WITKAMP G J. Cost evaluation of CO<sub>2</sub> sequestration by aqueous mineral carbonation [J]. *Energy conversion and management*, 2007, 48(7): 1923-1935. DOI: [10.1016/j.enconman.2007.01.035](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.01.035).
- [66] 国海证券. 固碳打开新空间, 三方共赢助推广——仕净科技 (301030) 深度报告之二 [EB/OL]. (2023-06-29) [2024-09-06]. [https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3\\_AP202306301591930728\\_1.pdf](https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202306301591930728_1.pdf).
- Sealand Securities. Carbon fixation opens new space, tripartite win-win to help promotion - Shijing technology (301030) in-depth report No. 2 [EB/OL]. (2023-06-29) [2024-09-06]. [https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3\\_AP202306301591930728\\_1.pdf](https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202306301591930728_1.pdf).
- [67] 罗伟青, 王雪, 袁希钢. 微生物柴油生命周期的能量平衡与碳平衡分析 [J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2018, 58(3): 324-329. DOI: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2018.25.009](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2018.25.009).
- LUO Y Q, WANG X, YUAN X G. Energy and carbon balances in microalgae biodiesel [J]. *Journal of Tsinghua University (science and technology)*, 2018, 58(3): 324-329. DOI: [10.16511/j.cnki.qhdxxb.2018.25.009](https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2018.25.009).
- [68] 中国温室气体工作组. 中国产品全生命周期温室气体排放系数集 (2022) [R]. 北京: 中国环境出版集团, 2022.
- China Greenhouse Gas Working Group. China products carbon footprint factors database (2022) [R]. Beijing: China Environment Publishing Group, 2022.
- [69] 闫淑娟. “双碳”引路 向绿而行——安泰恩懿推出微藻养殖开创国内微藻减碳先河 [N]. 晋中晚报, 2022-08-24.
- YAN S J. "Double carbon" leads the way to green - An Tai Enyi launched microalgae culture to create a domestic microalgae carbon reduction pioneer [N]. *Jinzhong Evening News*, 2022-08-24.
- [70] IGHALO J O, DULTA K, KURNIAWAN S B, et al. Progress in microalgae application for CO<sub>2</sub> sequestration [J]. *Cleaner chemical engineering*, 2022, 3: 100044. DOI: [10.1016/j.clce.2022.100044](https://doi.org/10.1016/j.clce.2022.100044).
- [71] GIESEN C V D, KLEIJN R, KRAMER G J. Energy and climate impacts of producing synthetic hydrocarbon fuels from CO<sub>2</sub> [J]. *Environmental science & technology*, 2014, 48(12): 7111-7121. DOI: [10.1021/es500191g](https://doi.org/10.1021/es500191g).
- [72] KLEIJNE K D, HANSEN S V, DINTEREN L V, et al. Limits to Paris compatibility of CO<sub>2</sub> capture and utilization [J]. *One earth*, 2022, 5(2): 168-185. DOI: [10.1016/j.oneear.2022.01.006](https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.01.006).
- [73] HEPBURN C, ADLEN E, BEDDINGTON J, et al. The technological and economic prospects for CO<sub>2</sub> utilization and removal [J]. *Nature*, 2019(575): 87-97. DOI: [10.1038/s41586-019-1681-6](https://doi.org/10.1038/s41586-019-1681-6).

---

作者简介:



梁希

梁希 (第一作者)

1982-, 男, 伦敦大学学院 (UCL) 基建可持续转型教授、广东南方碳捕集与封存产业中心秘书长, 能源经济学博士, 主要从事气候投融资、CCUS 等相关研究工作 (e-mail) [xi.liang@ucl.ac.uk](mailto:xi.liang@ucl.ac.uk)。



余晓洁

余晓洁 (通信作者)

1996-, 男, 广东南方碳捕集与封存产业中心 CCUS 高级技术员, 水文地质硕士, 主要从事 CCUS 技术相关研究工作 (e-mail) [xiaojie.yu@gdcccus.org](mailto:xiaojie.yu@gdcccus.org)。

(编辑 赵琪)