

碳捕获、利用和封存 (CCUS) 技术发展现状及应用展望

王静 (博士, 上海伊世特科技管理有限公司)
龚宇阳 (博士, 上海伊世特科技管理有限公司)
宋维宁 (博士, 山西清洁碳经济研究院)
阳平坚* (博士, 中国环境科学研究院)

摘要: 我国是世界二氧化碳最大排放国, 排放量占比全球接近 30%, 也是世界最大的高碳化石能源消费国, 煤炭占比全球消费总量 50% 以上。为了保障国家能源安全和社会稳定发展, 中国比世界上任何一个国家都更需要 CCUS 技术的快速突破。本文总结了 CCUS 技术中碳捕获、运输、利用与封存各环节的发展概况, 阐述了全球和我国现阶段 CCUS 技术应用现状及挑战, 提出了高附加值碳基材料、化工利用、人工生物合成等 7 个方面的 CO₂ 转化利用路径展望, 并进行了转化利用的经济学分析。基于此, 笔者认为在当前的技术水平下, 仅靠 CCS 技术都很难达成化石能源活动的碳中和目标, 主要原因在于经济上难以平衡。因此需要尽快转变思路, 将 CO₂ 视为一种基础工业原料, 加快 CO₂ 资源化利用布局, 开发高附加值的碳基新材料, 形成具有商业价值的新型碳经济, 以促进 CCUS 产业化落地与可持续发展。最后, 结合中国未来在能源领域的领先性和电网的灵活度的实际需要, 提出了加快我国 CCUS 技术布局和应用的政策建议。

关键词: CCS; CCUS; 碳中和; 碳基材料; 碳经济

联系方式: 阳平坚 (责任作者), yang.pingjian@craes.org.cn, 010-84912984; 王静, jwang@esdchina.com.cn; 龚宇阳, gong@esdchina.com.cn; 宋维宁 (共同责任作者), waynesong@cccex.net。

1 背景

二氧化碳捕获和封存技术 (Carbon Capture and Storage, CCS), 是指把 CO₂ 从工业或相关能源的源分离出来, 输送到一个封存地点, 并长期与大气隔绝的过程。为应对日益严峻的全球气候变化形势, 《巴黎协定》提出将全球平均气温较前工业化时期的上升幅度控制在 2°C 以内, 并努力限制在 1.5°C 以内。国际能源署 (IEA) 在《能源技术展望报告 2017》中指出, 要在本世纪末实现升温幅度控制在 2°C 的气候目标, CCS 技术需贡献 14% 的 CO₂ 减排量, 如果考虑更低的升温幅度, 2060 年能源行业的需要达到净零排放, 本世纪末升温幅度 1.75°C, CCS 技术则需要贡献 32% 的 CO₂ 减排量 [1]。政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 在《全球升 1.5 温度特别报告》中专门强调了在本世纪中叶实现 CO₂ 净零排放的重要性, 提出除碳是实现净零排放以及补偿超过 1.5°C 所需的净负排放的必要措施, 在有限超过或未超过 1.5°C 的大多数情景下 (有限超过 1.5°C 指升温幅度在回降之前曾超过 1.5°C), 都涉及到 CCS 技术的大量运用, 唯一无需运用 CCS 的情景则要求人类行为发生最根本的转变 [2]。因此 CCS 技术对于实现全球气候目标具有重要意义。

CCS 是 CO₂ 深度减排的重要途径, 但不同方式的捕获和封存潜力、实施难度和社会经济效益差别很大。随着 CCS 技术的发展以及认识的不断深化, 我国于 2006 年在北京香山会议首次提出 CO₂ 捕获、利用与封存技术 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS), 引入了 CO₂ 资源化利用技术。CCUS 技术把捕获的 CO₂ 提纯后, 投入新的生产过程进行循环再利用, 将 CO₂ 资源化, 不仅可以实现碳减排, 还能产生经济效益, 所以更具有现实操作性。经过多年的发展, CCUS 技术已在全球范围内得到接受与使用。

2020 年 9 月, 中国在联合国大会上向世界宣布了 2030 年前实现

碳达峰和 2060 年前实现碳中和的目标。要达成该目标，未来气候经济下的能源系统在高效稳定、灵活便捷的基础上，还需满足绿色低碳的要求，这就要求必须改变现有以煤炭为主的高碳能源和电力结构，转向清洁能源为主的多元化、低碳能源结构^[3]。目前我国能源消费结构中，化石能源在一次能源消费中比重高达 85%，煤电仍是保障我国电力安全和电力供应的主力，发电量所占比重高达 60.8%，使得我国 CO₂ 排放水平居高不下。即使 2030 年实现碳达峰目标，非化石能源占一次能源消费比重将达到 25%左右，非化石能源电力比例达到 50%，仍有超过半数的能源生产需要依赖化石能源。如果单纯依赖传统路径，如节能减排、提高能效等已达世界先进水平的技术方式，无法有效地实现现有的温室气体减排目标，其脱碳过程需要 CCUS 技术的配合才能够实现。因此 CCUS 技术是我国应对气候变化必不可少的技术手段，具有特殊的战略意义。

2 CCUS 技术简介

CCUS 技术系统由 CO₂ 的捕获、CO₂ 的运输以及捕获的 CO₂ 再利用或者安全封存等过程构成。

2.1 碳捕获技术

2.1.1 碳捕获方式

CO₂ 的排放主要来自于发电和工业过程中化石燃料的使用。对于电力行业，根据碳捕集与燃烧过程的先后顺序，传统碳捕获方式主要包括燃烧前捕获、富氧燃烧和燃烧后捕获等。煤化工、天然气处理、钢铁、水泥等行业中 CO₂ 的工业分离过程属于燃烧前捕获方式。各种碳捕获方式的技术路线如图 1 所示。

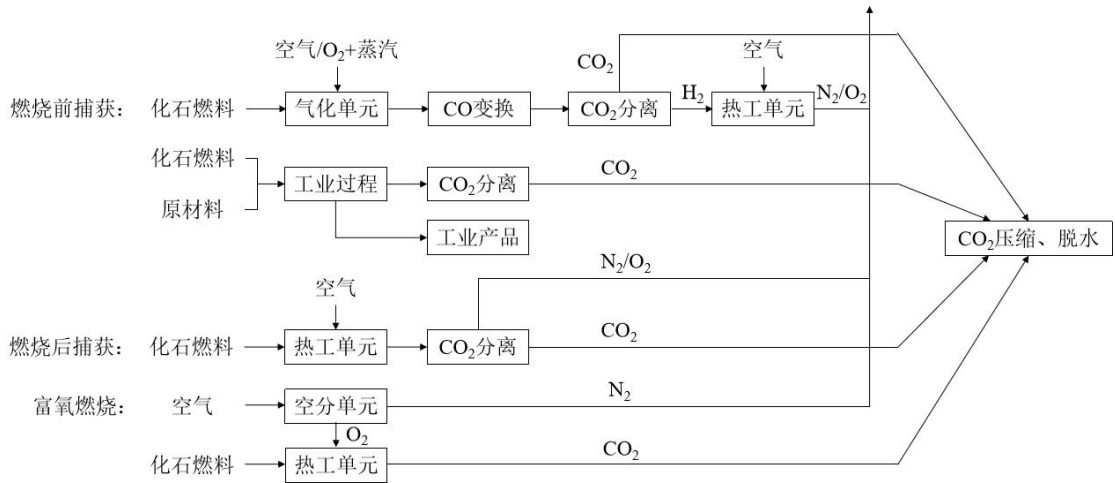


图 1 不同碳捕获方式的技术路线

燃烧前捕获是利用煤气化和重整反应，在燃烧前将燃料中的含碳组分分离出来，转化为以 H_2 、 CO 和 CO_2 为主的水煤气，然后利用相应的分离技术将 CO_2 从中分离，剩余 H_2 作为清洁燃料使用。该技术捕获的 CO_2 浓度较高，分离难度低，相应能耗和成本也会降低，但投资成本高，可靠性有待提高。目前此技术只局限于以煤气化为核心的整体煤气化联合循环电站（Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC）^[4,5]。富氧燃烧^[6]则是指通过分离空气制取纯氧，以纯氧作为氧化剂进入燃烧系统，同时辅以烟气循环的燃烧技术，可视为燃烧中捕获技术。该技术捕获的 CO_2 浓度可达 90% 以上，只需简单冷凝便可实现 CO_2 的完全分离，因此 CO_2 捕获能耗和成本相对较低，但额外增加制氧系统的能耗，提高了系统的总投资。燃烧后捕获是指直接从燃烧后烟气中分离 CO_2 ，虽然投资较少，但烟气中 CO_2 分压较低，使得 CO_2 捕获能耗和成本较高^[7]。由于燃烧后捕获技术不改变原有燃烧方式，仅需要在现有燃烧系统后增设 CO_2 捕集装置，对原有系统变动较少，是当前应用较为广泛且成熟的技术。

在传统碳捕获技术的基础上，也发展出一些仍处于研究和完善当中的捕集 CO_2 的系统。如煤气化过程直接影响后续流程中 CO_2 富集程度与捕集能耗，有研究开发了煤炭碳氢组分分级转化的碳捕集动力

系统，分离前 CO₂ 浓度能到达 50%左右，为实现 CO₂ 低能耗捕集提供了可能 [8]。化学链技术借助载氧体将传统的化学转化过程解耦为两个或多个反应过程，可作为富氧燃烧和煤气化的供氧单元技术，实现 CO₂ 低耗捕集的同时抑制 NO_x 产生 [9]。

2.1.2 捕获后分离技术

如前所述，采用燃烧前和燃烧后捕获技术，后续需进行 CO₂ 的分离。目前混合气体中的 CO₂ 分离技术包括物理法和化学法。

2.1.2.1 物理法

根据 CO₂ 分离原理的不同，物理法可分为溶剂吸收法、吸附法、膜分离法以及低温精馏法等，各方法的基本特点如表 1 所示。其中溶剂吸收法和变压吸附法已实现工业化应用，也应用于我国 CCUS 示范项目中。

表 1 不同物理方法的基本特点

方法名称	基本原理	类型	应用行业	优势	不足
吸收法	基于亨利定律，CO ₂ 在吸收剂中的溶解度会随压力或温度改变。	N-甲基吡咯烷酮法、聚乙二醇二甲醚法、低温甲醇法、碳酸丙烯酯法	排放 CO ₂ 浓度较高的行业，如 IGCC 电站、天然气处理、煤化工等	选择性强、吸收量大、操作简单	吸收或再生能耗和成本较高，致使运行成本偏高
吸附法	利用沸石、分子筛等固体吸附剂对 CO ₂ 进行选择性吸附，改变温度、压力等实现 CO ₂ 解吸	变温吸附法、变压吸附法、真空吸附法	合成氨、制氢、天然气处理等	工艺流程简单、能耗低、成本可控	吸附剂容量有限、选择性低 [10]
膜分离法	利用膜材料对不同气体渗透速率的差异	无机膜、有机聚合物膜、混合基质膜 [11]	制氢、天然气处理等	工艺简单、能耗低、投资小	CO ₂ 纯度较低、膜材料持久性较差
低温蒸	经压缩和冷	-	排放 CO ₂ 浓度	简单易	CO ₂ 回收

方法名称	基本原理	类型	应用行业	优势	不足
馏法	却, 将 CO ₂ 液化或固化, 以蒸馏方式分离 CO ₂		较高的行业, 如 IGCC 电站、油田伴生气中 CO ₂ 的回收等 [12]	行, 避免了化学或物理吸收剂的使用	率低、成本较高

2.1.2.2 化学法

根据 CO₂ 分离原理的不同, 化学法可分为溶剂吸收法、吸附法、膜吸收法、电化学法以及水合物法等, 各方法的基本特点如表 2 所示。其中化学吸收法技术成熟, 是应用最为广泛的 CO₂ 捕集技术, 已成功应用于化肥、水泥以及发电等行业。目前较为成熟的化学吸收法工艺多基于乙醇胺类水溶液, 如乙醇胺 (MEA) 法、二乙醇胺 (DEA) 法、N-甲基二乙醇胺 (MDEA) 法等, 近几年新发展的化学吸收法包括离子液体、相变溶液、酶吸收法以及高温熔盐碳捕集法等。

表 2 不同化学方法的基本特点

方法名称	基本原理	类型	应用	优势	不足
吸收法	CO ₂ 与吸收剂发生化学反应, 形成不稳定的盐类, 经加热, 重新释放出 CO ₂	氨水溶液吸收法、热钾碱法、有机胺吸收法、锂盐吸收法	排放 CO ₂ 浓度较低的行业, 如常规燃煤电厂、天然气处理等	工艺成熟、选择性好、吸收效率高	吸收剂再生热耗较高、吸收剂损失较大、操作成本高、设备投资较大 [13]
吸附法	以固体材料吸附或化学反应来分离与回收混合气中的 CO ₂ 组分	金属氧化物吸附剂、类水滑石类固体吸附剂、氨基吸附剂以及金属-有机骨架材料 (MOFs)	制氢、天然气处理等	工艺流程简单、CO ₂ 选择吸附性较好、去除效率较高	性能受吸-解吸次数、温度等因素影响较大 [14]
膜吸收法	膜接触器与化学吸收相结合实现对 CO ₂ 的选择性分离。	膜接触器: 中空纤维膜接触器; 吸收液: 采用普通化学吸	制氢、天然气处理等	装置简单、接触面积较大、选择性较高	膜材料持久性较差 [15]

方法名称	基本原理	类型	应用	优势	不足
		收过程所采用的吸收液			
电化学法	利用电化学系统将 CO ₂ 捕获并进行分离	熔融盐电化学系统等 ^[16]	-	电化学技术基础广泛、分离费用较低	对于熔融盐来说,高温腐蚀性较强,电极材料的选择不易 ^[17]
水合物法	水和 CO ₂ 在一定温度和压力下形成 CO ₂ 水合物	-	燃煤烟气	工艺流程相对简单、能耗降低、分离效果好、理论上无原料损失 ^[18]	水合物容易腐蚀装置,对设备选材要求较高

2.1.2.3 直接空气碳捕集技术 (DAC)

根据美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的最新报告称, 2021 年 5 月份夏威夷莫纳罗亚监测站的主要人为 CO₂ 测量值平均为 419ppm, 超过了人类有监测以来空气中 CO₂ 含量的最大值^[19]。即使全世界在 2060 年达到了碳中和, 大气中的 CO₂ 浓度仍然处于临界状态, 原因在于工业革命以来已经排放到大气中的 CO₂ 超过万亿吨, 如果仅仅经过自然过程, 大气中的 CO₂ 需要几百年, 甚至上千年的时间才能返回工业革命前的水平。为了减缓气候变化不利影响, 需要大气中 CO₂ 的浓度从 419ppm 尽快降到 350ppm, 回到 1990 年之前的浓度^[2]。按照目前大气中 CO₂ 浓度的水平, 人类需要从大气中去除 5000 多亿吨 CO₂, 才能降到 350ppm。那就必须从现在开始开发从空气和海洋中去除 CO₂, 并永久转化、固化和封存的突破性清洁技术。

1999 年, Lackner 教授第一次提出了从空气中去除 CO₂ 技术 (Direct Air Capture, DAC)^[20]。最近 20 年来, DAC 技术已经从不

可能到了经济上已经初具实际应用的可能。由于大气 CO₂ 浓度稀薄，DAC 捕获、浓缩 CO₂ 的能耗要高得多，目前 DAC 一般采用物理吸附或化学吸附的形式，关键是高效低成本的吸附材料的开发和利用。吸附剂包括液态和固态两种形式，由于固体吸附剂具有较好的动力学性能，避免溶剂损失，能够减少热耗，因此比较普遍使用的是固体吸附剂^[21]。各吸附剂的基本特点如表 3 所示。

对于液体吸附剂，虽然传统碱溶液对 CO₂ 的吸附量大、吸附速率快，但吸附剂再生过程能耗过大，近来有研究开发了一种水相胍溶液，捕集空气中的 CO₂，反应生成微小的碳酸盐晶体，易于从溶液中分离；当该晶体加热到 80~120℃ 时，即可释放出 CO₂，同时再生胍吸附剂，可重复利用。该技术吸附剂再生过程耗能较低，可显著降低碳捕集过程的成本^[22]。对于固体吸附剂，根据 CO₂ 吸附原理的不同，可分为物理吸附剂、化学吸附剂和湿法再生吸附剂等，美国哥伦比亚大学陈曦教授团队采用世界领先的湿法再生吸附剂，一种包含离子交换或纳米孔材料和碳酸根离子的节能系统，仅需湿度循环即可从空气中大规模高效低成本捕集二氧化碳，不需要升温进行解吸，能耗成本为复合胺溶液法的 50%^[21]。这可能成为碳捕集技术的重大突破。

表 3 吸附剂的基本特点

种类	基本原理	类型	优势	不足
液体吸附剂	CO ₂ 与液吸附剂发生化学反应，形成不稳定的盐类，经加热，重新释放出 CO ₂	碱性溶液	原料成本相对低廉，吸附选择性较好	再生过程中耗能较高
		水性胍吸附剂	解吸、再生过程中耗能较低、CO ₂ 选择性好	吸收速率较慢
固体	物理吸	依靠范德华力等	活性炭、沸	再生耗能
				吸附热低、

种类		基本原理	类型	优势	不足
吸附剂	物理吸附剂	较弱的物理相互作用吸附 CO ₂ , 改变压力实现 CO ₂ 解吸	石、MOFs、氮化硼纳米片或纳米管、HOFs	较低	CO ₂ 的吸附能力较差、容易受到水蒸气的影响
	化学吸附剂	依靠 CO ₂ 与吸附剂之间的化学键作用发生化学吸附, 经加热, 重新释放出 CO ₂	胺改性吸附剂等	吸附能力和选择性较好	再生能耗高
	湿法再生吸附剂	通过改变环境水汽压力, 在干燥态对 CO ₂ 进行吸附, 湿润态对 CO ₂ 进行脱附。	离子交换树脂	能耗降低、系统简化、操作灵活	CO ₂ 的解吸浓度较低、消耗大量水资源、水洁净度要求高、对天气敏感

除上述吸附剂以外, 有研究开发出电振荡吸附剂, 由于醌分子的荷电状态对 CO₂ 的化学亲和力完全不同, 以醌作为固体电极, 通过电压的小变化来改变电极本身的电荷来激活和停用醌, 实现 CO₂ 的吸附和解吸 [23]。

不同于 CCUS 技术针对工业固定源排放的 CO₂ 进行捕集处置, DAC 可对小型化石燃料燃烧装置以及交通工具等分布源排放的 CO₂ 进行捕集处理, 并有效降低大气中 CO₂ 浓度。有研究测算 1000 次循环条件下, DAC 吸附剂成本仅为 1 美元/kg, 商业化 MOFs 成本高昂, 考虑 100000 次循环条件下, 高达 90 美元/kg, 随着吸附剂和技术工艺的发展完善, DAC 成本会不断下降, 将在助力碳减排和实现碳中和方面具有巨大的应用潜力。

目前多孔氢键有机骨架材料 (Hydrogen-bonded Organic Frameworks, HOFs) 的研究取得了较大的进展, 具有超高稳定性的 HOFs 相继被开发出来, 在 CO₂ 吸附方面显示出极大地优势, 与 H₂、N₂ 吸附相比, 具有较好的 CO₂ 选择性, 如图 2 所示 [24]。

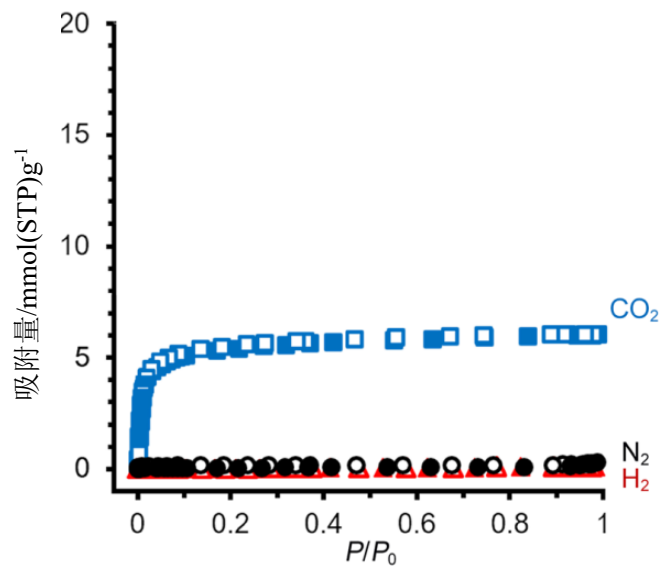


图 2 HOFs 材料对 CO₂ 的吸附作用 (Hisaki I, 2020)

国内最新的进展是山西清洁碳研究院正在进行固体吸附 HOF 材料的产业化开发。它是一种有机框架晶体材料，其最大特点是，在常压 25°C 下，能够从空气中直接捕集 CO₂，它具有永久的孔隙，孔道尺寸为 6.8 Å×4.5Å，对 CO₂ 吸附的选择性高，吨吸附剂能够吸附 113kg CO₂。当前最大的问题在于成本过于昂贵，未来大幅度降低吸附剂的成本是工业化生产的关键¹。

2.2 碳运输技术

CO₂ 运输是 CCUS 技术系统的中间环节，可选的运输方式有管道运输和各种交通工具运输，如罐车和船舶运输，适用于不同场景。如管道运输适用于大规模、长距离运输 CO₂；公路罐车适用于小容量、短距离运输，铁路罐车适用于大容量、长距离运输；船舶运输运量大，运输距离超远，适合于近海碳封存运输。各种运输方式的基本特点如表 4 所示。鉴于不同运输方式的优缺点，需从运输容量、运输距离、运输成本、市场因素以及运输沿线交通布局等方面综合考虑，以确定 CCUS 运输方案。

¹ 为本文作者在山西大同正在开展的项目的研究成果。

表 4 CCUS 运输方式比较

运输方式	优势	不足
管道运输	运输成本低、CO ₂ 运量大、距离远、安全性高、规模效应明显	建设造价较高、管道腐蚀、CO ₂ 泄露
罐车运输	灵活、适应强，投资较低	供应间断、蒸发泄露、运输成本高
船舶运输	运输方向灵活、运量大、运输距离超远、长距离运输成本较低	运输间断、蒸发泄露、投资较高

2.3 碳利用与封存技术

2.3.1 CO₂ 资源化利用技术简介

目前，CO₂ 的资源化利用方式主要有物理利用、化工利用、生物利用和矿化利用。CO₂ 的物理利用主要包括食品、制冷、发泡材料等行业，只是延迟了 CO₂ 的释放时间，最终还是要排入大气，这里不再详述。

2.3.1.1 化工利用

CO₂ 的化工利用是指以 CO₂ 为原料，与其他物质发生化学转化，产出附加值较高的化工产品，这是真正消耗 CO₂ 的过程。下面从无机产品和有机产品两方面进行说明。

(1) 无机产品

在传统化学工业中，CO₂ 大量用于生产纯碱、小苏打、白炭黑、硼砂以及各种金属碳酸盐等大宗无机化工产品，这些无机化工产品大多主要用作基本化工原料。另外合成尿素和水杨酸是最典型的 CO₂ 资源化利用，其中尿素生产是最大规模的利用；有研究采用浓氨水喷淋烟气吸收 CO₂ 并生产碳酸氢铵肥料，同时实现 CO₂ 的捕获和利用 [25]。

(2) 有机产品

在有机化工利用方面，各种有机化工产品的开发研究也十分迅速，主要聚焦在能源、燃料以及大分子聚合物等高附加值含碳化学品。以 CO₂ 为原料合成的有机产品可以分为以下几个方面：

(a) 合成气: CO_2 与甲烷在催化剂作用下重整制备合成气, 其中 H_2/CO 比值为 1, 更适合费托合成与烯烃生产等用途。目前研究主要集中在催化剂的选择上, 以提高 CO_2 的转化率和目标产物的选择性。

(b) 低碳烃: CO_2 与 H_2 在催化剂的作用下可制取低碳烃, 主要挑战在于催化剂的选择。有研究建立串联式催化剂体系, 在接近工业生产反应条件下, 低碳烯烃的选择性可达到 80%~90%^[26]。美国碳科学公司 (CSI) 研究甲烷与 CO_2 的干法重整, 设计催化剂体系, 使其转化为汽油和其他易用燃料, 转化率可达 92%^[27]。

(c) 各种含氧有机化合物单体: 以 H_2 与 CO_2 为原料, 在一定温度、压力下, 通过不同催化剂作用, 可合成不同的醇类、醚类以及有机酸等。另外 CO_2 与环氧烷烃反应可合成碳酸乙烯酯和碳酸丙烯酯 (锂电池电解液主要成分), 碳酸乙烯酯可与甲醇反应可得到碳酸二甲酯 (DMC), 与 H_2 反应制成乙二醇、甲醇等高附加值化工产品。此类技术较为成熟, 均已实现了较大规模的化学利用^[28]。

(d) 高分子聚合物: 在特定催化剂存在下, CO_2 与环氧化物共聚合成高分子量聚碳酸酯, 脂肪族聚碳酸酯具有资源循环利用和环境保护的双重优势, 我国脂肪族聚碳酸酯的生产和应用取得了较大进展。另外以 CO_2 为原材料制成聚氨酯的技术条件也基本成熟, 已有工业示范装置^[29]。

2.3.1.2 电化学利用

近年来出现的熔盐电解转化 CO_2 为碳基材料被认为是一种新的绿色 CO_2 利用途径。在 $450^\circ\text{C}\sim 800^\circ\text{C}$ 的熔盐体系下, 通过调控 CO_2 反应途径和采用不同电极材料和催化剂, 能够将 CO_2 电化学转化为高附加价值的碳纳米材料, 实现碳纳米管、石墨烯及 S 掺杂碳的制备^[30,31]。2020 年底, 世界首套从煤电厂烟气捕集 CO_2 , 并转化为碳

纳米管的百吨级工业化系统由山西清洁碳研究院在山西大同大唐云冈热电厂建成并运行 [32]。

2.3.1.3 生物利用

生态系统中植物的光合作用是吸收 CO_2 的主要手段，因此利用植物吸收 CO_2 是最直接的一种手段，并具有固有的有效性和可持续性。由于微藻生长季周期短、光合效率高，目前研究主要集中在微藻固碳和 CO_2 气肥使用上 [33,34]。目前微藻固碳技术主要以微藻固定 CO_2 转化为液体燃料和化学品，生物肥料、食品和饲料添加剂等； CO_2 气肥技术是将来自能源和工业生产过程中捕集的 CO_2 调节到一定浓度注入温室，来提升作物光合作用速率，以提高作物产量。我国拥有世界最大面积的种植大棚， CO_2 气肥技术应用前景比较乐观。

此外，受天然生物固碳的启发，解析天然生物固碳酶的催化作用机理，创建全新的人工固碳酶和固碳途径，实现高效的人工生物固碳。如重组固氮酶催化 CO_2 甲烷化、催化 CO_2 还原为 CO 和甲酸，以及甲酸脱氢酶在辅因子 NADH 作用下催化 CO_2 还原并转化为甲酸 [35,36]。

在常温常压下，将太阳能、电催化与生物固碳技术相结合，建立一个微生物电合成 (MES) 系统，培养混合微生物在阴极表面形成生物膜，包括孢子菌和梭状芽孢杆菌这两种生物电化学产乙酸菌，通过生物电化学提供电子，还原 CO_2 为乙酸等产物 [37]。

2.3.1.4 CO_2 矿化利用技术简介

CO_2 矿化封存技术主要是指模仿自然界 CO_2 矿物吸收过程，利用天然硅酸盐矿石或固体废渣中的碱性氧化物，如 CaO 、 MgO 等将 CO_2 化学吸收转化成稳定的无机碳酸盐的过程。而 CO_2 矿化利用是指利用富含钙、镁的大宗固体废弃物（如炼钢废渣、水泥窑灰、粉煤灰、磷石膏等）矿化 CO_2 联产化工产品，在实现 CO_2 减排的同时得到具有一定价值的无机化工产物，以废治废、提高 CO_2 和固体废弃物资源化

利用的经济性，是一种非常有前景的大规模固定 CO₂ 利用路线。目前已开发出基于氯化物的 CO₂ 矿物碳酸化反应技术、湿法矿物碳酸法技术、干法碳酸法技术以及生物碳酸法技术等。我国在钢渣、磷石膏矿化利用技术方面取得重要进展 [38]。

2.3.2 CO₂ 地质封存利用技术简介

传统 CO₂ 地质封存是指利用地下适合的地质体进行 CO₂ 深部封存，封存介质包括深部不可采煤层、深部咸水层和枯竭油气藏等。CO₂ 地质封存利用是指将 CO₂ 注入上述地质体内，利用地下矿物或地质条件生产或强化有利用价值的产品，同时将 CO₂ 封存，对地表生态环境影响很小，具有较高的安全性和可行性。目前 CO₂ 地质封存利用技术可见表 5。

表 5 二氧化碳地质封存利用技术的基本情况

名称	地质体	利用类型	利用潜力
CO ₂ 强化石油开采技术 (CO ₂ -EOR)	枯竭的油气藏	提高石油的采收率	提高原油采收率 7%~15%，延长油井生产寿命 15~20 年。技术成熟，泄漏的可能性很小
CO ₂ 驱替煤层气技术 (CO ₂ -ECBM)	深部不可采煤层	强化煤层气开采	可存储量可达 12Gt [39]，但 CO ₂ 注入能力低，经验较缺乏，CO ₂ 和煤基质之间的反应仍需要研究
CO ₂ 强化天然气开采技术 (CO ₂ -EGR)	枯竭的天然气藏	提高天然气的采收率	可存储量可达 34.5Gt [40]，但仍需对 CO ₂ 气田的各种力学以及相关问题进行研究
CO ₂ 增强页岩气开采技术	页岩	提高页岩气采收率	超临界 CO ₂ 作为压裂液，具有强吸附性、强流动性等特点，且不含水、无残留，但仍存在储层性质、气体注入、产出时间等不确定因素
CO ₂ 增强地热系统技术 (CO ₂ -EGS)	地热系统	开采地热资源	不会产生明显的矿物溶解和沉淀问题，能耗低，但仍需对 CO ₂ 地球化学过程等问题进行研究
CO ₂ 铀矿地浸开采技术	铀矿	开采铀	流程短、对环境影响小、已实现大规模工业应用
CO ₂ 强化深部咸	深部咸水	高附加值液体	CO ₂ 封存量达 144Gt [41]，在

水开采技术 (CO ₂ -EWR)		矿产资源或开 采深部水资源	封存 CO ₂ 的同时, 可缓解地 层压力、水资源危机
---------------------------------	--	------------------	---

在 CO₂ 地质封存利用技术中, CO₂-EOR 技术成熟, 已有几十年的应用历史, 是目前唯一达到了商业化利用水平, 同时实现 CO₂ 封存和经济收益的有效办法。正常情况下, 在 CO₂ 强化采油及封存过程中, CO₂ 发生大量泄漏的可能性很小, 不会对油田及周边环境产生负面影响。

2.3.3 碳深海封存技术

除了上述 CO₂ 地质封存利用和矿化封存利用技术外, 还包括 CO₂ 深海封存技术。海洋是全球最大的 CO₂ 贮库, 在全球碳循环中扮演了重要角色, 目前海洋封存 CO₂ 主要包括四种形式: 一是将压缩的 CO₂ 气体直接注入深海 1500m 以下, 以气态、液态或者固态的形式封存在海洋水柱之下, 其中固态 CO₂ 的封存效率最高^[42]; 二是将 CO₂ 注入到海床巨厚的沉积层中, 封存在沉积层的孔隙水之下; 三是利用 CO₂ 置换强化开采海底天然气水合物; 四是利用海洋生态系统吸收和存储 CO₂。从长远角度看, 有研究认为由于洋流的影响, 注入深海的液态 CO₂ 会导致海水酸化, 危及海洋生态系统的平衡^[43]。目前虽然深海封存理论上潜力巨大, 但仍处于理论研究和模拟阶段, 不仅封存成本很高, 在技术可行性和对海洋生物的影响上还需要更进一步的研究。

3 CCUS 技术的应用现状及挑战

3.1 CCUS 技术的应用现状

一个完整的 CCUS 系统包含了捕获、运输、利用与封存三个环节, 每个环节又有多种技术选择, 不同的技术其成熟度也不尽相同。现阶段 CCUS 技术系统各环节的进展现状如表 6 所示。

表 6 CCUS 全链中各环节发展现状

技术环节		可选技术	研究阶段	示范阶段	特定条件下经济可行	商业应用	
CO ₂ 捕获		燃烧前捕获			√		
		富氧燃烧		√			
		燃烧后捕获				√	
		化学链燃烧	√				
		煤炭分级气化技术	√				
CO ₂ 运输		管道				√	
		罐车				√	
		船舶				√	
CO ₂ 利用与封存	资源化利用	物理利用				√	
		化工利用				√	
		生物利用		√			
	地质封存利用	CO ₂ 强化石油开采技术					√
		驱替煤层气技术		√			
		强化天然气开采技术	√				
		增强页岩气开采技术	√				
		增强地热系统	√				
		铀矿地浸开采					√
		强化深部咸水开采			√		
	地质封存	深部不可采煤层			√		
		深部咸水层			√		
		枯竭油气藏			√		
		深海封存	√				
	矿化封存	√					

3.1.1 国际上 CCUS 技术的应用

近年来，全球范围内 CCUS 工业示范项目数目逐步增多、规模逐步扩大，发展势头良好。根据 Global CCS Institute 发布的报告《Global Status of CCS 2020》^[44]，截至 2020 年底，全球有 28 个处于运行阶段的大规模 CCUS 项目²，其中有 14 个分布在美国，4 个分布在加拿

² 大规模 CCUS 设施：能够从工业碳源中捕集二氧化碳的设施，捕集能力不低于 40 万吨/年；能够从发电站捕集二氧化碳的设施，捕集能力不低于 80 万吨/年。

大，3 个分布在中国，2 个分布在挪威，巴西、沙特阿拉伯、阿拉伯联合酋长国、卡塔尔、澳大利亚各有 1 个项目，装机容量约为 4000 万吨/年，具体信息如表 7 所示。此外，全球有 37 个大规模 CCUS 项目处于在建或开发阶段。

从表中可以看出，已投运的大型 CCUS 工业示范项目中，26 个项目的碳捕集类型为工业分离，集中在天然气处理、化工生产、炼油以及制氢等行业，仅有 2 个项目为电力行业的燃烧后捕集类型。对于工业分离过程来说，工艺过程中可能包含有 CO₂ 脱除工序，可以减少额外投入，降低捕集成本，有利于 CCUS 的开展。在 37 个在建或开发阶段的大规模 CCUS 项目中，燃烧后捕集项目增加到了 13 个，并包括 1 个富氧燃烧项目。在碳封存利用类型中，22 个项目中捕集到的 CO₂ 用于驱油，其余项目则是直接地质封存，CO₂-EOR 已是成熟的 CO₂ 封存利用方式。

不得不提到的是美国 Petra Nova Carbon Capture 项目，该项目是世界最大的 CCUS 项目，建设耗资超过 10 亿美元，年捕集 140 万吨 CO₂，并输送到 100 公里外的老油田 West Ranch(1938 年)进行驱油。项目投资方在 2017 年 1 月投运前曾作过测算，为了维持其正常运行，石油价格必须保持在 75 美元/桶才能达到利润平衡点。而过去的五年，石油价格基本都在 75 美元以下，由于经济性原因，该项目已于 2021 年 1 月 29 日停运。该案例警示我们，今后 CCUS 项目的实施必须以经济上可持续为前提条件。

表 7 全球范围内处于运行状态的 CCUS 设施

设施名称	状态	国家	投运时间	行业	最大捕集能力 (Mt/a)	捕集类型	封存类型
Terrell Natural Gas Processing Plant (formerly Val Verde Natural Gas Plants)	运行中	美国	1972	天然气处理	0.4	工业分离	EOR

设施名称	状态	国家	投运时间	行业	最大捕集能力 (Mt/a)	捕集类型	封存类型
Enid Fertilizer	运行中	美国	1982	化肥生产	0.2	工业分离	EOR
Shute Creek Gas Processing Plant	运行中	美国	1986	天然气处理	7	工业分离	EOR
Sleipner CO ₂ Storage	运行中	挪威	1996	天然气处理		工业分离	专用地质封存
Great Plains Synfuels Plant and Weyburn-Midale	运行中	美国	2000	合成天然气	3	工业分离	EOR
Core Energy CO ₂ -EOR	运行中	美国	2003	天然气处理	0.35	工业分离	EOR
中石化中原油田碳捕集与封存项目	运行中	中国	2006	化工生产	0.12	工业分离	EOR
Snhvit CO ₂ Storage	运行中	挪威	2008	天然气处理	0.7	工业分离	专用地质封存
Arkalon CO ₂ Compression Facility	运行中	美国	2009	乙醇生产	0.29	工业分离	EOR
Century Plant	运行中	美国	2010	天然气处理	5	工业分离	EOR 和地质封存
Bonanza BioEnergy CCUS EOR	运行中	美国	2012	乙醇生产	0.1	工业分离	EOR
PCS Nitrogen	运行中	美国	2013	化肥生产	0.3	工业分离	EOR
Petrobras Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCS	运行中	巴西	2013	天然气处理	4.6	工业分离	EOR
Lost Cabin Gas Plant	暂停运行	美国	2013	天然气处理	0.9	工业分离	EOR
Coffeyville Gasification Plant	运行中	美国	2013	化肥生产	1	工业分离	EOR
Air Products Steam Methane Reformer	运行中	美国	2013	制氢	1	工业分离	EOR
Boundary Dam Carbon Capture and Storage	运行中	加拿大	2014	发电	1	燃烧后捕集	EOR
Uthmaniyah CO ₂ -EOR Demonstration	运行中	沙特阿拉伯	2015	天然气处理	0.8	工业分离	EOR

设施名称	状态	国家	投运时间	行业	最大捕集能力 (Mt/a)	捕集类型	封存类型
Quest	运行中	加拿大	2015	制氢油砂升级	1.2	工业分离	专用地质封存
克拉玛依敦化石油 CCUS EOR	运行中	中国	2015	化工生产甲醇	0.1	工业分离	EOR
Abu Dhabi CCS (Phase 1 being Emirates Steel Industries)	运行中	阿联酋	2016	钢铁制造	0.8	工业分离	EOR
Petra Nova Carbon Capture	停止运行	美国	2017	发电	1.4	燃烧后捕集	EOR
Illinois Industrial Carbon Capture and Storage	运行中	美国	2017	乙醇生产-乙醇厂	1.00	工业分离	专用地质封存
中石油吉林油田 CO ₂ EOR	运行中	中国	2018	天然气处理	0.6	工业分离	EOR
Gorgon Carbon Dioxide Injection	运行中	澳大利亚	2019	天然气处理	4	工业分离	专用地质封存
Qatar LNG CCS	运行中	卡塔尔	2019	天然气处理	1	工业分离	专用地质封存
Alberta Carbon Trunk Line (ACTL) with Nutrien CO ₂ Stream	运行中	加拿大	2020	化肥生产	0.3	工业分离	EOR
Alberta Carbon Trunk Line (ACTL) with North West Redwater Partnership's Sturgeon Refinery CO ₂ Stream	运行中	加拿大	2020	石油精炼	1.4	工业分离	EOR

3.1.2 中国 CCUS 技术的应用

在相关政策推动下，我国 CCUS 技术已取得长足进步，根据《中国二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)报告(2019)》^[45]，截至 2019 年 8 月，国内共开展了 9 个纯捕集示范项目、12 个地质利用与封存项目，其中包含 10 个全流程示范项目。除此之外，国内还开展了数十个化工、生物利用项目。部分项目信息如下表 8 所示。

我国 CO₂ 捕集示范项目主要在火电、煤化工、天然气处理以及甲醇、水泥、化肥生产等行业，包括燃烧前捕集、燃烧后捕集和富氧燃烧捕集。目前已建成数套 10 万吨级以上的 CO₂ 捕集示范装置，其中最大的捕集能力可以达到为 80 万吨/年。火电行业包括 9 个燃煤电厂碳捕集示范项目，其中包括 6 个常规电厂燃烧后捕获项目、2 个 IGCC 电厂燃烧前捕获项目以及 1 个富氧燃烧项目，碳分离技术均采用化学吸收法，以醇胺吸收法为主。CO₂ 排放浓度较高的煤化工示范项目则采取物理吸收法，以低温甲醇法和变压吸附法为主。天然气处理过程中伴生气分离亦是采用化学吸收法，以 MEA 作为吸收剂。

我国 CCUS 示范项目的运输环节以罐车运输为主，仅有中石油吉林油田 CCS-EOR 示范项目铺设了 20 公里的管道，输送 CO₂ 至采油区进行驱油作业。目前我国罐车运输和内陆船舶运输已经成熟，管道运输正在建立健全相关标准体系和安全控制技术体系。

在火电行业，除了胜利燃煤电厂的就近用于胜利油田提高石油采收率之外，其余项目捕获的 CO₂ 主要用于工业利用或食品应用。煤化工、天然气处理、化工生产等工业分离过程则以 CO₂-EOR 为主，用于提高石油采收率。我国地质利用和封存项目类型主要包括 CO₂-EOR、CO₂-ECBM、咸水层封存以及地浸采铀等，其中 CO₂-EOR 已实现商业化，地浸采铀也已经大规模工业利用。从整体上看，CO₂ 利用方面以地质封存利用为主，化工利用和生物利用的 CO₂ 利用量较少。

表 8 目前中国正在运营的 CCUS 示范项目

项目名称	地点	捕集工业类型	捕集技术	运输	封存利用	规模 (万吨/年)	投运年份	运行状态
国家能源集团鄂尔多斯咸水层封存项目	鄂尔多斯	煤制油	燃烧前 (物理分离)	罐车	咸水层	10	2011	暂停 ¹
延长石油陕北煤化工 5 万吨/年 CO ₂ 捕集与示范	榆林	煤制气	燃烧前 (物理分离)	罐车	EOR	5	2013	运行中
中国核工业集团有限公司通辽地浸采铀	通辽	-	-	罐车	EUL	-	-	-
中石油吉林油田 CCS-EOR 示范项目	松原	天然气处理	燃烧前 (伴生气分离)	管道	EOR	80	2008	运行中
华能高碑店电厂	北京	燃煤电厂	燃烧后 (化学吸收)	-	NA	0.3	2008	运行中
华能绿色煤电 IGCC 电厂捕集、利用和封存项目	天津	燃煤电厂	燃烧前 (化学吸收)	罐车	放空	10	2015	运行中
国电集团天津北塘热电厂 CCUS 项目	天津	燃煤电厂	燃烧后 (化学吸收)	罐车	食品应用	2	2012	运行中
连云港清洁煤能源动力系统研究设施	连云港	燃煤电厂	燃烧前	无	放空	3	2011	运行中
华能上海石洞口捕集示范项目	上海	燃煤电厂	燃烧后 (化学吸收)	-	工业利用与食品	12	2009	间歇式运行
中石化胜利油田 EOR 项目	东营	燃煤电厂	燃烧后 (化学吸收)	罐车	EOR	4	2010	运行中
中石化中原油田 CO ₂ -EOR 项目	濮阳	化肥厂	燃烧前 (化学吸收)	罐车	EOR	50	2015	运行中

项目名称	地点	捕集工业类型	捕集技术	运输	封存利用	规模 (万吨/年)	投运 年份	运行状态
中电投重庆双槐电厂碳捕集示范项目	重庆	燃煤电厂	燃烧后 (化学吸收)		焊接保护 气、电厂发 电机氢冷置 换	1	2010	运行中
中联煤驱煤层气项目	沁水			罐车	ECBM		2004	运行中
华中科技大学 35 兆瓦富氧燃烧 示范项目	武汉	燃煤电厂	富氧燃烧		工业应用	10	2014	间歇式运 行
中联煤驱煤层气项目	柳林				ECBM		2012	运行中
克拉玛依敦华石油-新疆油田 EOR 项目	克拉玛依	甲醇厂	燃烧前 (化学吸收)		EOR	10	2015	运行中
长庆油田 EOR 项目	榆林	甲醇厂	燃烧前		EOR	5	2017	运行中
大庆油田 EOR 示范项目	大庆	天然气处 理	燃烧前 (伴生气分 离)	罐车+管 道	EOR	20	2003	运行中
海螺集团芜湖白马山水泥厂 5 万 吨级 CO ₂ 捕集与纯化示范项目	芜湖	水泥厂	燃烧前 (化学吸收)		食品应用	5	2018	运行中
华润电力海丰碳捕集测试平台	海丰	燃煤电厂	燃烧后			2	2019	运行中
中石油华东油气田 CCUS 全流程 示范项目	东台	化工厂	燃烧前	槽车槽 船	EOR	10	2005	运行中
山西清洁碳研究院烟气 CO ₂ 捕集 及转化碳纳米管示范项目	大同	燃煤电厂	燃烧后	就地转 化	碳纳米管	0.1	2020	运行中

注：1：于 2015 年停止注入，监测中；

2：2015 年捕集装置完成，利用与封存装置延期。

3.2 CCUS 技术的挑战

目前 CCUS 技术总体还处于研发和示范的初级阶段，面临着经济、市场、技术、环境和政策等方面的困难和问题，要实现规模化发展还存在很多阻力和挑战。

3.2.1 经济方面

CCUS 技术的重要贡献就在于其无可替代的减排除碳能力，但成本却过于高昂。首先 CCUS 项目投资成本巨大，投资额在数千万元甚至上亿的规模，如华润集团海丰超临界燃煤电厂燃烧后捕集示范项目投资成本为 8531 万元，华能上海石洞口第二电厂碳捕获项目投资成本约为 1 亿元；其次安装碳捕集装置，将产生额外的运行维护成本，每吨 CO₂ 将额外增加 140~600 元，如华能集团上海石洞口发电厂，安装燃烧后捕集装置后，电价增长将近一半，从 0.26 元/kWh 增至 0.5 元/kWh^[46]；最后对于碳利用和封存来说，捕集的 CO₂ 价格过高，如 CO₂-EOR 外购 CO₂，价格在 650 元/吨左右^[45]，对采油公司来说，价格很不划算。就目前国内运行的 CCUS 示范项目，在如此巨大的成本压力下，企业收益率只能维持在 2% 甚至以下。如果无法实现减排收益，将会严重影响着企业开展 CCUS 示范项目的积极性。

3.2.2 技术方面

CCUS 技术是捕集、运输、利用与封存等各项技术的高度集成，需要有序、平衡地推进各环节发展。首先 CCUS 捕集环节的引入，将增加额外的能量消耗，在现有的技术水平下，一次能耗将增加 10%~20% 甚至更多^[46]，效率损失很大。其次由于 CO₂ 具有化学惰性和热稳定性，如要有效转化与利用 CO₂，必须重新投入大量能量，使得 CO₂ 资源化利用受到了一定限制，需要寻找合适的催化剂体系。再次地质利用封存环节的地质勘查存在不确定性的风险，CO₂ 地质封存的信息支持不够，企业无法对地层结构、储存潜力、封存风险和检测方案等问

题做全面评估，增加了企业经营风险。最后在碳中和目标下，CCUS 技术需完成 175~315 亿吨 CO₂ 累计减排任务，但目前我国 CCUS 示范工程捕获 CO₂ 能力大多在万吨到十几万吨之间，缺少大规模的、可复制的经济效益明显的全流程集成示范项目。因此研发低成本、低能耗的 CCUS 技术，进行大规模全流程 CCUS 集成示范将推进 CCUS 技术的部署和推广。

3.2.3 市场方面

CCUS 产业发展需要持久和大量的资金投入^[45]，但基于 CCUS 高昂的减排成本以及技术的不确定性，企业往往不愿意独自承担投入 CCUS 研发和示范的风险。再加上全国碳市场处于起步阶段，没有形成规模化的 CO₂ 需求市场，碳税政策不明确，无法从经济上合理衡量该部分减排能力，因此致使 CCUS 项目商业化发展的基础较弱，许多企业和潜在的投资者对其望而却步。我国 CCUS 项目资金主要源于国家科技计划、央企自筹款、国际合作项目资金，都没能撬动金融机构参与，呈现出资金来源少、总量小、渠道窄的特征，存在巨大的投资缺口，因此需重构 CCUS 项目的投融资机制。另一方面，CCUS 产业链几乎囊括了能源生产和消费的各个环节，如电力、钢铁、水泥、石油、化工等行业，目前 CCUS 全流程示范项目较少，缺乏跨行业、跨部门的合作模式，CO₂ 捕获项目与利用、封存项目存在对接不畅的问题，因此在现有的市场环境和政策框架下，如何合理解决利益链条之上的多个企业间的合作和利益分配问题，将直接影响 CCUS 的发展进程。

3.2.3 环境方面

由于 CO₂ 本身的属性，在 CCUS 技术各环节中，如发生 CO₂ 泄漏，将会对生态环境产生影响。在现有技术水平下，一般捕集、运输环节环境风险较小，主要环境风险来自于 CO₂ 地质封存利用。从地质

时间尺度来看,由于复杂的难以预见和不可控制的地质运动(如地震)以及 CO₂ 对地层的腐蚀性而导致 CO₂ 泄露并外逸至地表,形成灾难性的窒息区域和陡然剧增的温室效应,引发泄漏区附近土壤、地下水以及大气等一系列环境问题,并对动植物及人类健康产生致命威胁。这也严重制约着政府和公众对 CCUS 的认知和接受程度。

对应对 CCUS 可能带来的环境影响,我国出台了《二氧化碳捕集、利用与封存环境评估技术指南(试行)》,明确相应的全流程环境风险评估流程。但鉴于 CCUS 行业本身的特点,目前仍存在定量评价难度大、危险物质临界量标准缺乏、地质基础数据的获得难度较大等困难。因此需要针对 CCUS 项目在环境监测、风险防控的过程中考虑全流程、全阶段来制定切实有效的方案。

3.2.5 政策方面

自 2006 年起,我国陆续发布了 20 多项涉及 CCUS 的国家政策,确定了 CCUS 在应对气候变化领域的重要地位,并积极推动 CCUS 技术的推广和示范项目的建设,但尚未建立 CCUS 的专项法律法规和标准体系。法律法规的不完善对企业意味着多重风险,直接阻碍了企业参与 CCUS 项目的积极性,如 CCUS 大规模实施所涉及的利益者众多,需要建立一个能表达和协调相关利益者诉求的法律和政策框架体系以及该体系下的有效运行机制;缺少有效的政策激励,没有具体的财税支持,是目前企业开展 CCUS 研究和示范项目的主要障碍;示范项目的选址、建设、运营和地质利用与封存场地关闭及关闭后的环境风险评估、监控等方面同样缺乏相关的法律法规和标准。因此尽快出台明确的政府政策与建立专项法律法规和标准对于 CCUS 项目的大规模实施非常重要。

4 CCUS 技术应用展望

CCUS 各技术环节紧密相连,相辅相成,前端的碳捕获环节为利

用与封存环节提供 CO₂，中间运输环节提供 CO₂ 运输保障，后端 CO₂ 利用将 CO₂ 变废为宝，形成具有商业价值的下游相关产业链，创建庞大的 CO₂ 需求市场，实现 CO₂ 固定和经济收益的双赢，反过来也会促进碳捕获项目的发展。

当前国内开展的碳捕集项目绝大多数为工业化集中捕集，燃烧前、燃烧后、富氧燃烧技术均有示范项目；而 CO₂ 利用封存项目则以 CO₂-EOR 为主，资源化利用项目很少。CO₂-EOR 是一项石油工业已经应用了几十年的成熟技术，目前在中国乃至全球的 CCUS 项目中都占据主导地位，但其收益严重依赖于石油价格，经济上可持续性较差。而在 CO₂ 资源化利用方面，有文献报道，每年在工业上被利用并转化为化学品的 CO₂ 只有 110 万吨，其中 90% 转化为尿素、无机碳酸盐等，极少转化为其他高附加值的化学品。目前绝大部分 CO₂ 资源化利用产业尚未实现商业化应用，未能建立相关的产业链集群。尽管碳捕集项目成本高昂、能耗过高，但其与碳利用阶段的脱节问题让其难以产生经济效益，成为制约碳捕集项目发展的根本原因。因此在研发低成本、低能耗碳捕集技术的同时，加快 CO₂ 资源化利用布局，才能加快 CCUS 项目落地发展、规模化推广。

4.1 CO₂ 利用行业发展趋势

4.1.1 高附加值碳基新材料利用

CO₂ 转化制造高附加值的碳基新材料（碳纳米管和石墨烯等）将成为煤电厂等碳中和的有效路径的一部分。它将为整体碳中和提供可持续的经济基础。碳纳米材料已经在锂电池导电浆料和导电塑料等产品方面实现了广泛应用，还能够用于太阳能导电银浆、防腐涂料和导热硅脂等应用。目前，该技术已成功应用于工业示范项目，经济效益显著^[28]。由于高新材料需求有限，数十亿吨计的 CO₂ 还需另寻出路。绿色化学研究的重要方向之一是将 CO₂ 与生物质、煤、石油、天然气

视为五大工业基础原材料，用于生产上万种日常所需的终端产品。

4.1.2 化工利用

将 CO₂ 纳入工业体系，与生物质材料、煤、石油和天然气一起，作为工业的五大基础原材料，构建全新的 CO₂ 经济产业链，不仅用于生产甲醇、烯烃等基础化工品，还涉及各种中间体以及上万种终端产品（如图 3 所示）。如山西清洁碳研究院提纯工业烟气中的 CO₂，不仅将其转化为碳酸酯、乙二醇、甲醇燃料等化工产品，还利用超临界 CO₂ 制造轻质材料，用于飞机汽车内饰件、包装材料等节能环保产品。随着技术进步和成本降低，CO₂ 资源化利用逐渐推广，化工行业有望加速绿色化。

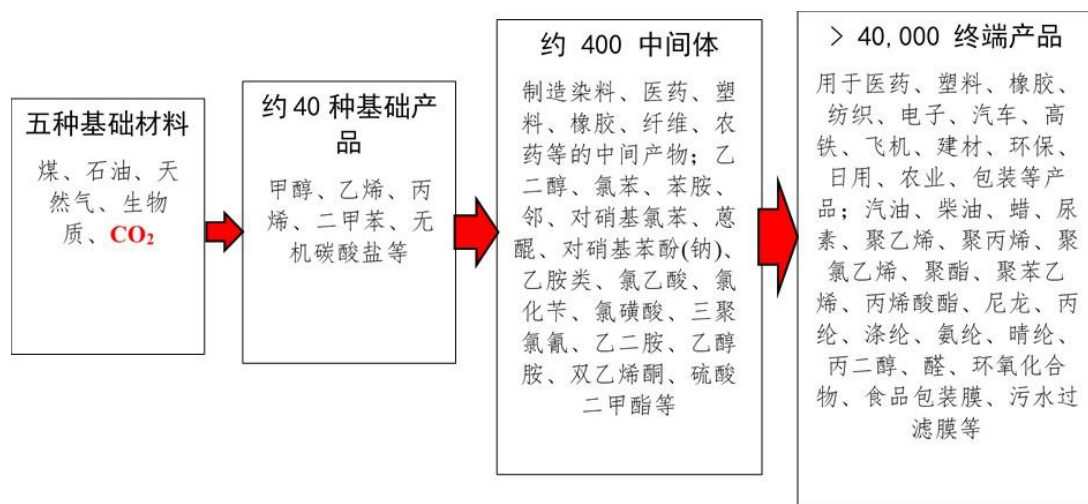


图 3 以 CO₂ 基础原材料的中间和终端产品

4.1.3 富碳农业

利用 CO₂ 气肥技术，增加种植大棚空气中的 CO₂ 浓度，以提高农作物的产量和生产效率。有研究认为 CO₂ 浓度达到 1000ppm 时，可以缩短作物的生长周期，明显提高作物产量，如黄瓜、番茄、青椒等产品，增产率达到 40%~80%。我国拥有世界最大面积的种植大棚，通过 CO₂ 气肥技术发展富碳农业，可以为富农经济做出重要贡献。

4.1.4 油气行业

现阶段以煤炭为主的化石能源在能源结构中的高比例短时间内难以改变，在油气行业合理利用 CO₂-EOR 技术，在封存 CO₂、缓解环境压力的同时，可以有效保障国家的能源开采效率以及化石能源的供应。当前 CO₂-EOR 主要应用案例集中在美国、加拿大和欧洲，尤其是美国近年来页岩油气的开采中应用广泛。我国由于缺油少气的现实条件，CO₂-EOR 应用案例不多。

4.1.5 建筑行业

CO₂ 矿化利用技术永久安全，固碳潜力巨大。在建筑行业利用 CO₂ 矿化养护混凝土，当 CO₂ 与水泥中的 Ca²⁺和 Mg²⁺反应生成 CaCO₃ 和 MgCO₃ 颗粒，被永久固化到混凝土中的同时，还可以缩短混凝土初凝时间、提高抗压强度以及减少水泥用量。我国年商品混凝土年产量超 20 亿立方米/年，每立方米混凝土可吸收 16 千克 CO₂，该技术固碳量可达数亿吨/年，应用前景广阔。

4.1.6 环保行业

固碳减污协同处置，实现 CO₂ 利用与环保产业协同发展。如推进工业固废矿化 CO₂ 联产化工产品的进展，如粉煤灰、冶炼废渣和建材废渣的总量分别达 5.5 亿吨、4.0 亿吨和 0.5 亿吨，实际固碳比可分别达到 3%~29%、16%~29%和 10%~25%，可实现 CO₂ 的大幅度减排以及固废的资源化利用。国内在钢渣强化碳酸化多联产技术、磷石膏加压碳酸化联产硫酸铵技术方面取得重要进展，已进入工业中试和工程示范阶段。

4.1.7 人工生物合成

微藻光合速率高、生长速率快、抗逆性强，利用微藻固碳可以同时实现废水处理、CO₂ 固定以及生物燃料合成，并得到食品、饲料、肥料等高附加值产品，使得经济效益和环境效应最大化。微藻固碳可

在常温常压下实施，目前研究主要集中在高效固碳藻种选育、基因工程改造等方面，提高固碳速率，甚至可实现藻油品质“定制化”。内蒙古已建成年固定万吨 CO₂ 的微藻养殖基地，据了解占地面积达到 4000 亩左右，面积过大，可考虑我国广阔的盐碱荒地等非耕地或者海水养殖。

4.2 CO₂ 转化利用综合路径分析

如何在 CCUS 技术利用环节中合理选择 CO₂ 转化利用路径，不仅可以完全转化碳捕获过程中捕集的 CO₂，还可以产生相当比例的经济收益，这是 CCUS 技术成功实施、实现碳中和目标的关键。笔者依据多年 CCUS 技术研究和示范经验，提出了 CCUS 技术中 CO₂ 转化利用金字塔模型，如图 4 所示。以 CO₂ 驱油、矿化等作为金字塔的底部，虽然产品经济价值不是很高，但却有广阔的应用前景，需求量巨大，能实现大量的 CO₂ 消纳；CO₂ 化学和生物转化位于金字塔的中部，产品不仅具有较高的附加值，也具有较大的应用市场，需求量较大；碳纳米材料等新材料产业作为金字塔的顶端，产品价值很高，具有最高附加值，只是与其他转化利用路径相比，需求量比较小。在 CCUS 项目具体实施过程中，应依 CO₂ 转化利用金字塔模型为基础，根据碳捕获环节中捕集的 CO₂ 特征，优化组合 CO₂ 转化利用路径，合理分配各路径比例，建立既能满足足量的 CO₂ 捕集利用封存，又具有经济可持续性的碳中和路径。下面以煤电行业 CO₂ 转化利用路径为例进行说明。

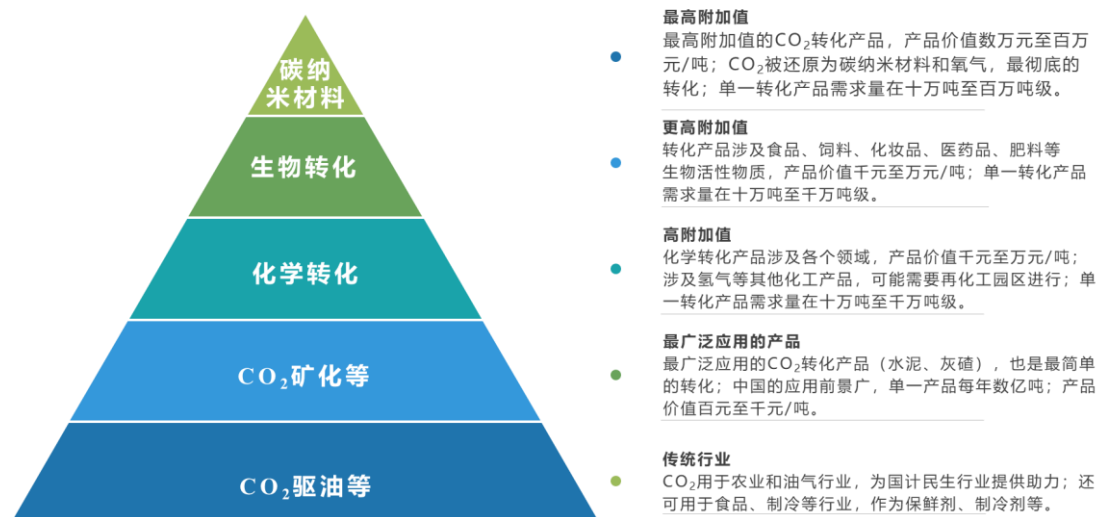


图 4 CO₂ 转化利用金字塔模型

如果一座煤电站要实现碳中和，就必须捕集其排放的所有 CO₂，而不是一部分，同时经济上必须满足最低平衡点，否则将不具备可持续性。当前煤电站经济平衡点的捕集成本约为 380 元/吨 CO₂，在此基础上，必须有一部分 CO₂ 能够实现高附加值转化，并结合一部分中低附加值的利用，以实现大量 CO₂ 消纳。

这里将煤电站所捕集的 CO₂ 利用路径分为碳纳米材料、化学转化、生物转化、混凝土矿化、农业气肥、干冰以及液态 CO₂ 其他利用，从 CO₂ 转化利用比例、产值比例、利润比例、能耗比例以及投资比例进行评价，如图 4 所示。其中碳纳米材料虽然 CO₂ 转化利用比例较低，仅为 4%，但却具有最高的利润比例，达到 60%左右，化学与生物转化 CO₂ 转化利用比例均在 20%，也具有较高的利润比例。但与此同时，上述三种利用均需要较大的投资，投资比例均超过 25%。混凝土矿化、农业气肥、干冰以及液态 CO₂ 利用虽然利润比例较低，但投资比例也很低，同时也实现了较高的 CO₂ 转化利用比例。据测算，在上述组合下，煤电站 CCUS 技术达到了捕集 CO₂ 的完全转化利用，同时能取得高额的碳基产品收益，走出了一条具有经济效益的可持续碳中和路径。

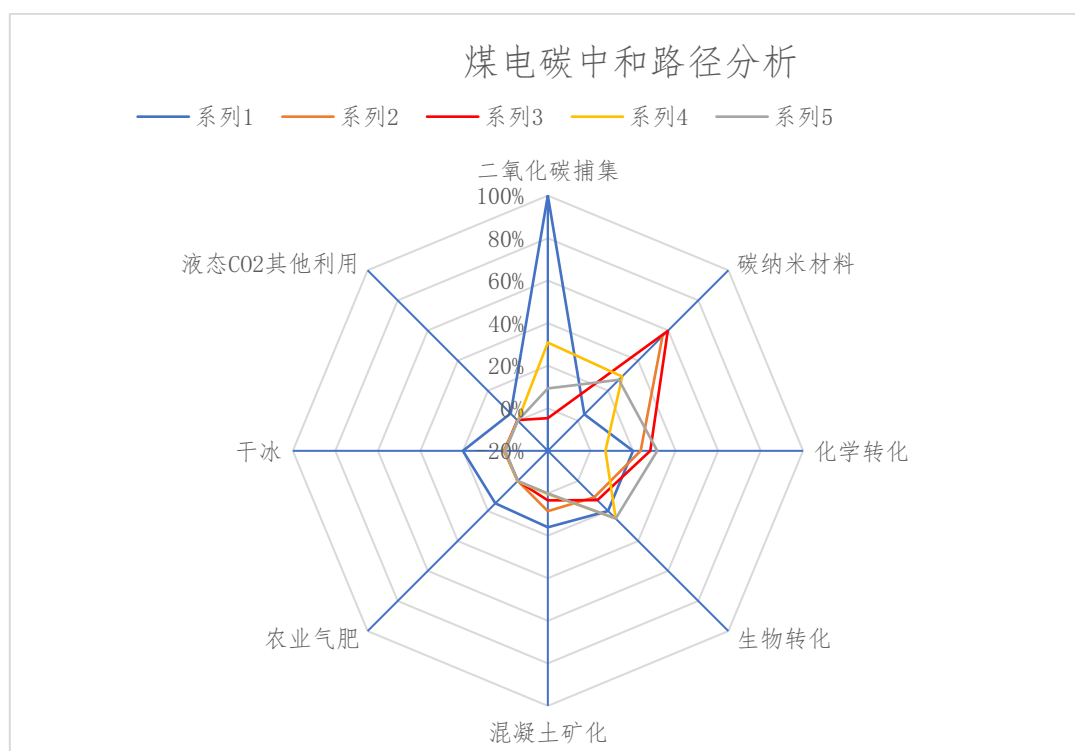


图 3 煤电行业 CO₂ 转化利用路径评价

5 结论及建议

CCUS 是一项实现碳中和必不可少的最具潜力的 CO₂ 减排措施，其对经济社会高质量发展具有无可替代的意义。一是 CCUS 与可再生能源结合有助于提高电网韧性和可靠性；二是能创造和保住高价值工作岗位；三是通过净零行业和创新支持经济增长；四是实现基础设施再利用和递延停产成本；五是有助于“公正转型”，避免高排放行业和地区大规模失业。据 IEA 测算，要实现联合国设定的 2050 年可持续发展排放目标，CCUS 捕集的 CO₂ 需从 2020 年的约 4000 万吨/年增至 2050 年的至少 56 亿吨/年。

本文总结了 CCUS 捕获、运输与利用、封存各环节技术发展现状，阐述了我国现阶段 CCUS 示范项目发展情况。在此基础上，笔者认为在当前的技术水平下，仅靠碳捕集技术都很难达到化石能源活动的碳中和目标，主要原因在于经济上难以平衡。因此，我们提出应该加快

CO₂资源化利用布局，增加高附加值的碳转化技术，形成具有商业价值的新兴碳经济，以促进 CCUS 项目落地发展。最后还结合实际案例，对煤电厂的 CO₂ 资源化利用场景进行了量化分析。

CO₂ 利用行业布局应考虑当地自然条件、产业分布以及基础设施配置，并基于技术的区域局限性，进行适当的源汇匹配。对于煤化工、天然气处理、炼油厂捕获的 CO₂ 最佳利用封存方式为就近利用管道或罐车送至油气田或深部咸水层进行地质封存利用；产业园区可引入 CCUS 技术创新企业，依据园区 CO₂ 排放特点，开展资源化利用，如钢铁行业可依据联合企业优势，开展钢铁-化工 CO₂ 耦合联产技术。另外在利用封存条件好，同时又有较多排放源的区域，如长三角、环渤海、珠三角等地区，应开展 CCUS 集群建设，设施集群的 CO₂ 流在枢纽进行汇集、压缩、脱水和运输，管网和封存基础设施的复用共用，可以降低成本、提升规模效应。

当前主要发达国家已经加大对 CCUS 技术的投资和布局。美国 2018 年颁布的《45Q 法案》规定，任何 2024 年之前开始建设的新的化石燃料发电厂或产生 CO₂ 的工厂，其碳捕获设备投入使用之后将获得最高 12 年的税收抵免。生产者将 CO₂ 进行利用，如将 CO₂ 转化为燃料、化学品或水泥等产品或通过驱油技术（EOR）将 CO₂ 储存在地质中，每吨可获得高达 35 美元（238 元人民币）的税收抵免。将 CO₂ 永久封存在地下，每吨可获得高达 50 美元（340 元人民币）的税收抵免。受此激励，2020 年全球新增 17 个 CCUS 项目的 12 个在美国（全球共 65 个，美国 38 个）。拜登政府上台后第一时间延续了特朗普政府期间通过的《45Q 法案》。据 IEA 评估，45Q 政策将帮助美国实现电力部门排放量 2/3 以上的减排。加拿大颁布了与美国类似的支持政策。欧盟宣布到 2025 年所有化石燃料电厂实现 CCUS 改造，并于 2020 年成立 100 亿欧元基金，英国亦提供 8 亿英镑，用于支持 CCUS。

中国煤炭消费量占全球消费总量一半以上，占国内能源消费总量比例高达 58%，为了保障国家能源安全和社会稳定发展，中国比世界上任何一个国家都更需要 CCUS 技术的快速突破。为了保持中国未来在能源领域的领先性和电网的灵活度，我们提出如下 CCUS 发展建议。

一是密切跟踪全球 CCUS 先进技术，准确把握前沿技术方向，抓紧布局技术和装备研发。建议科技部、生态环境部、国家发改委等部委，通过多种方式储揽布局全球 CCUS 技术，发挥“集中力量办大事”的体制优势，借鉴高铁和光伏等产业的发展经验，依托国内巨大市场，集中开展科技战略攻关，迅速降低成本，争取在较短时间内实现突破和赶超。对于参与世界 CCUS 技术同台竞争的中国科研人员，要充分发挥好引领示范作用，确保人才和技术为我所用。

二是出台系列扶持政策，成立国家碳捕集利用基金，支持重点企业开展污染物和 CO₂ 协同减排示范工程。市场是最敏锐的，美国和加拿大的能源巨头已经先行一步，通过多种方式搜集布局全球 CCUS 技术，包括欧盟在内的发达国家纷纷出台扶持政策或斥巨资发展 CCUS。建议生态环境部借鉴火电环保电价等成功经验，联合国家发改委和财政部等部委，尽快将 CCUS 纳入政策支持范围，支持力度不低于美国；同时成立国家碳中和技术创新基金，专门用于支持减碳的颠覆性技术研发和项目建设。

三是鼓励有条件的地方抓住 CO₂ 资源化利用契机，打造新格局下高质量发展典范。碳纳米管、石墨烯、碳基芯片等，是世界各国争相占领的科技高地，也是当前我国主要的卡脖子技术领域。建议工信部牵头联合国家发改委和主要金融机构等，支持有条件的地方，如温室气体排放量大，有志发展芯片产业，却在传统硅基技术无优势的地方，抓住 CO₂ 资源化契机，另辟蹊径，走出一条科技战略支撑高质量发展

的新路子，在关键领域实现弯道超车。

四是发挥国有制经济优势，激励电力、钢铁、化工、建材、通信、电子等领域骨干国企担当 CCUS 突破先锋。2021 年 5 月 26 日，中央政治局常委、国务院副总理韩正在主持碳达峰碳中和工作领导小组第一次全体会议时强调，要发挥好国有企业特别是中央企业的引领作用，中央企业要带头压减落后产能、推广低碳零碳负碳技术。国有企业特别是央企，是国民经济的重要支柱，在关系国家安全和国民经济命脉的主要行业和关键领域占据支配地位，也承担着更多的服务国家战略目标和保障国家安全等方面的责任。建议国资委牵头，联合国家发改委、生态环境部等部委，制定合理的考核指标和措施，激励电力、钢铁、建材、石化、电子、通信等领域的国有骨干企业，整合上下游产业链，担当 CCUS 研发建设先锋，实现卡脖子技术突破、温室气体减排和自身高质量发展的多赢。

参考文献

- [1]IEA. Energy Technology Perspective 2017. 2017.
- [2]IPCC, An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse gas emission pathways, in the context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change. 2018. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- [3]张九天, 张璐. 面向碳中和目标的碳捕集利用与封存发展初步探讨 [J]. 热力发电, 2020, 49: 1-10.
- [4]桂霞, 王陈魏, 云志等. 燃烧前 CO₂ 捕集技术研究进展 [J]. 化工进展, 2014(7):1895-1901.
- [5]Padurean A, Cormos C C, Agachi P S. Pre-combustion carbon dioxide capture by gas-liquid absorption for Integrated Gasification Combined Cycle power plants [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2012, 7:1-11.
- [6]郑楚光, 赵永椿, 郭欣. 中国富氧燃烧技术研发进展 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(023): 3856-3864.
- [7]高建强, 王立坤, 程少伟等. 漏风对富氧煤粉燃烧锅炉烟气成分的影响 [J]. 热力发电, 2014, 000(010):70-73.
- [8]史晓斐, 杨思宇, 钱宇. 化学链技术在煤炭清洁高效利用中的研究进展 [J]. 化工学报, 2018, 69(12):4931-4946.
- [9]吴汉栋. 碳氢组分解耦的煤炭分级气化方法与系统集成 [D]. 中国科学院大学 (中国科学院工程热物理研究所), 2018.
- [10]费维扬, 艾宁, 陈健. 温室气体的捕集和分离技术面临的挑战与机遇 [J]. 化工进展, 2005, 24(1): 1~4.
- [11]Brunetti A, Scura F, Barbieri G, et al. Membrane technologies for CO₂ separation [J]. Journal of Membrane Science, 2010, 359(1-2):115-125.
- [12]IPCC. Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2005: 105-178.
- [13]邢奕, 王志强, 洪晨. 二氧化碳的分离工艺现状及进展 [C]// 第七届全国能源与热工学术年会论文集. 中国金属学会, 2013.
- [14]Ye Q, Jiang J, Wang C, et al. Adsorption of Low-Concentration Carbon Dioxide on Amine-Modified Carbon Nanotubes at Ambient Temperature [J]. Energy & Fuels, 2012, 26(4):2497-2504.
- [15]陈浩. 燃煤烟气中共存气态组份和细颗粒物对膜分离 CO₂ 的影响研究 [D]. 东南大学, 2014.
- [16]Renfrew S E, Starr D E, Strasser P, Electrochemical Approaches toward CO₂ Capture and Concentration [J]. ACS Catalysis, 2020, 10 (21), 13058-13074.
- [17]Winnick J, Toghiani H, Quattrone P D, Carbon dioxide concentration for manned

- spacecraft using a molten carbonate electrochemical cell [J]. *AIChE Journal*, 1982, 28(1):103-111.
- [18]鲁涛, 张郁, 李小森等. CO₂-N₂-TBAB 和 CO₂-N₂-THF 体系的水合物平衡生成条件 [J]. *过程工程学报*, 2009, 9(3): 541~544.
- [19]<https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2764/>Coronavirus-response- barely- slows- rising- carbon- dioxide.
- [20]Lackner K, Ziock H J, Grimes P. Carbon Dioxide Extraction from Air: Is It An Option?. Los Alamos National Laboratory, NM(US), 1999.
- [21]X Shi, H Xiao, H Azarabadi, J Song, X Wu, X Chen, and K S Lackner, Sorbents for the Direct Capture of CO₂ from Ambient Air, *Angew. Chem. Int. Ed.* 2020, 59, 2 – 25.
- [22]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, 55: 1-5.
- [23]Voskian S, Hatton T A, Faradaic electro-swing reactive adsorption for CO₂ capture [J]. *Energy and Environmental Science*, 2019, 12: 3530-3547.
- [24]Hisaki I. Hydrogen-bonded porous frameworks constructed by rigid π -conjugated molecules with carboxy groups [J]. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 2020, 96: 215-231..
- [25] 张娟利, 杨天华. 二氧化碳的资源化化工利用 [J]. *煤化工*, 2016, 3: 1-5.
- [26]Li Z, Wang J, Qu Y, et al. Highly Selective Conversion of Carbon Dioxide to Lower Olefins [J]. *ACS Catalysis*, 2017, 8544-8548.
- [27]章文. 碳科学公司开发出利用二氧化碳使甲烷重整的催化剂技术 [J]. *石油炼制与化工*, 2011, 42(3): 100.
- [28]宫超, 曾建平, 宋维宁等. 变废为宝破解温室气体难题. *制造强国研究*. 2018, 48.
- [29]Jiang S, Cheng H, Shi R, et al. Direct Synthesis of Polyurea Thermoplastics from CO₂ and Diamines [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(50): 47413-47421.
- [30]Weng W, Tang L Z, Xiao W. Capture and electro-splitting of CO₂ in molten salts. *J Energy Chem*, 2019, 28: 128-143.
- [31]Wu H, Li Z, Ji D, et al. One-pot synthesis of nanostructured carbon materials from carbon dioxide via electrolysis in molten carbonate salts [J]. *Carbon*, 2016, 106: 208-217.
- [32]世界首个煤电 CO₂ 捕集及资源化利用全产业链生产线进入试生产. 山西新闻网, 2021 年 1 月 25 日. <http://www.sxrb.com/GB/319356/319365/9676090.html>.
- [33]高坤山. 藻类固碳--理论. 进展与方法(精) [M]. 科学出版社, 2014.
- [34]Acien Fernandez F G, Gonzalea-Lopez C V, Fernandez-Sevilla J M, et

al. Conversion of CO₂ into biomass by microalgae: how realistic a contribution may it be to significant CO₂ removal? [J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2012, 96(3): 577-586.

[35] 梁珊, 宗敏华, 娄文勇. 酶法催化二氧化碳制备高附加值化学品研究进展 [J]. *化学学报*, 2019, 077(011):1099-1114.

[36] 江会锋, 刘玉万, 杨巧玉. 生物固碳途径研究进展 [J]. *微生物学杂志*, 2020, 040(002): 1-9.

[37] 周瑾洁, 王旭东, 孙亚琴, 等. 生物基化学品的微生物电合成研究进展 [J]. *化工进展*, 2016, 35(10):3005-3015.

[38] 叶云云, 廖海燕, 王鹏, 等. 我国燃煤发电 CCS/CCUS 技术发展方向及发展路线图研究 [J]. *中国工程科学*, 2018, 20(3):80-89.

[39] 刘延峰, 李小春, 白冰. 中国 CO₂ 煤层储存容量初步评价 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(016):2947-2952.

[40] 刘延峰, 李小春, 方志明等. 中国天然气田 CO₂ 储存容量初步评估 [J]. *岩土力学*, 2006, 27(12): 2278-2281.

[41] 李小春, 刘延峰, 白冰等. 中国深部咸水含水层 CO₂ 储存优先区域选择 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(5): 963-968.

[42] Dai Z X, Zhang Y, Stauffera P, et al. Injectivity Evaluation for Offshore CO₂ Sequestration in Marine Sediments [J]. *Energy Procedia*, 2017, 114: Pages 2921-2932.

[43] 孙玉景, 周立发, 李越. CO₂ 海洋封存的发展现状 [J]. *地质科技情报*, 2018, 4: 212-218.

[44] Global CCS Institute. *The Global Status of CCS Report 2020* [R]. 2020.

[45] 生态环境部环境规划院气候变化与环境政策研究中心. 《中国二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)报告(2019)》 [R]. 生态环境部, 2019.

[46] 刘强, 田川. 我国碳捕集、利用和封存的现状评估和发展建议 [J]. *气候战略研究简报*, 2017, 24(24): 1-14.