

碳捕集利用与封存技术：零碳之路的“最后一公里”

环保行业 2022 年策略报告之三

分析师：张锦

执业证书编号：S0890521080001

电话：021-20321304

邮箱：zhangjin@cnhbstock.com

研究助理：曾文婉

电话：021-20321380

邮箱：zengwenwan@cnhbstock.com

销售服务电话：

021-20515355

相关研究报告

◎ 投资要点：

◆**碳捕集利用与封存技术（Carbon Capture, Utilization and Storage，以下简称 CCUS）**是指将 CO₂ 从工业过程、能源利用或大气中分离出来，直接加以利用或注入地层以实现 CO₂ 永久减排的一系列技术的总和。CCUS 技术起源于上世纪 70 年代对于 CO₂ 的驱油利用，从全球视角下大致历经三个阶段，现已进入商业化初期快速增长阶段。CCUS 目前在全球 25 个国家均有部署，美国和欧盟处于领先地位。

◆**CCUS 作为碳减排技术之一，主要优点是减排潜力大、可促进煤等化石能源的清洁利用。**随着时间推移，CCUS 技术对于中国实现碳中和目标的作用将逐渐凸显。CCUS 技术对于中国实现碳中和目标具有重要意义，体现在以下五个方面：1) 化石能源实现低碳化利用的唯一技术途径是 CCUS；2) CCUS 可弥补一些传统碳减排手段带来的负面作用，例如助力电力行业保持灵活性；3) 当前技术情形下，钢铁、水泥等行业净零排放离不开 CCUS 技术；4) 负碳技术是部分工业过程以及难减排行业的重要减排路径之一；5) CCUS 是制备低碳氢气的有效途径。

◆**中国的 CCUS 各技术环节均取得了显著进展，但目前大部分技术仍处于工业示范及以下水平，少部分技术已经具备商业化应用潜力。**分环节来看，我国碳捕集、碳运输技术发展相对较快，但碳利用、碳封存技术发展相对较慢；与国外比较来看，大部分技术发展阶段已与国外持平。**2050 年中国 CCUS 市场规模或将超过 3300 亿元。**根据《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图(2019)》的规划，随着成本降低、技术进步、政策激励，CCUS 技术在 2025 年产值规模超过 200 亿元/年，到 2050 年超过 3300 亿元/年，按保守情形估计 2025-2050 年平均年增长率为 11.87%。

◆**尽管当前 CCUS 技术尚未大规模进行商业化，但鉴于未来发展空间较大，值得关注较早布局相关技术的企业，尤其是碳捕集技术和碳利用技术或设备的提供者。**根据国外情况，碳捕集、碳利用相关技术设备是当前创投资金关注重点，主要原因在于碳捕集技术成本占整个 CCUS 项目成本的一半以上，而碳利用技术附带经济效益（尤其是 CO₂ 的生物利用中单吨 CO₂ 的经济效益最高），这两项技术的革新将极大提高 CCUS 项目的经济性。此外，随着全国碳市场逐渐成熟，可关注受益于碳市场的相关标的。CCUS 技术作为减排技术，未来有可能被纳入 CCER 等碳减排市场，因此相关企业或将通过 CCER 获取额外收益。

◆**风险提示：CCUS 政策推进力度不及预期，碳交易市场建设进度不及预期，CCUS 技术进展不及预期，CCUS 投资不及预期，CCUS 技术存在安全事故与环境风险，原油价格下跌风险，碳价下跌风险。**

内容目录

1. CCUS 是实现减排目标的关键一环	4
1.1. 什么是 CCUS 技术	4
1.2. CCUS 已进入商业化初期阶段，美国与欧盟发展领先	5
1.3. CCUS 对于全球及中国碳中和目标的实现具有重要意义	7
2. 中国 CCUS 技术概况：尚处于研发与示范阶段	13
2.1. 碳捕集技术：成本占比最高，燃烧后捕集技术较为成熟	14
2.2. 碳运输技术：中国已具备大规模管道运输设计能力	18
2.3. 碳利用技术：是 CCUS 技术创新突破的难点	19
2.4. 碳封存技术：我国碳封存潜力较大，陆上咸水层封存已完成项目示范	22
2.5. CCUS 技术小结：中国近几年取得了显著技术进展，但目前仍处于研发与示范阶段	23
3. CCUS 未来发展展望：2050 年中国市场规模或将超过 3300 亿元	26
4. 投资建议	27
5. 风险提示	27

图表目录

图 1: CCUS 示意图	4
图 2: BECCS 示意图	5
图 3: DACCS 示意图	5
图 4: 全球 CCUS 发展历程	6
图 5: 2010-2021 年全球商用 CCUS 设施数量变化情况 (截止 2021 年 11 月)	6
图 6: 全球 CCUS 项目主要分布在美国和欧盟 (截止 2021 年 11 月)	7
图 7: 全球 CCUS 在不同行业的应用 (2020 年, 按捕集能力计算比例)	9
图 8: 中国 CCUS 在不同行业的应用 (2021 年, 按项目数量计算比例)	9
图 9: 全球主要机构评估的 CCUS 贡献	10
图 10: CCUS 技术在 IEA 可持续发展情景中的减排贡献 (%)	10
图 11: CCUS 技术在 IRENA1.5°C 升温情景中的减排贡献 (%)	10
图 12: IEA 对不同行业 CCUS 减排贡献的估算	11
图 13: 2°C 目标导向推荐情景全部温室气体排放部门构成	11
图 14: 1.5°C 目标导向推荐情景全部温室气体排放部门构成	11
图 15: 中国 CCUS 技术的减排贡献 (需求)	12
图 16: 不同制氢技术的全球平均平准化成本 (美元/千克)	13
图 17: CCUS 技术流程及分类示意	14
图 18: 按第一种分类方法对不同技术路线进行梳理	16
图 19: 全球范围内不同行业的碳捕集成本比较 (2019)	16
图 20: 大部分中国 CCUS 项目均使用燃烧后或燃烧前捕集技术	17
图 21: 海底管道运输与船舶运输经济性的比较	19
图 22: 中国 CCUS 项目中捕获的 70% 以上的 CO ₂ 均进行了利用	22
图 23: 我国地质利用的 CCUS 项目分布情况	22
图 24: CCUS 技术类型及发展阶段 (中国 vs 国外)	25

表 1: 美国 45Q 税务抵免政策的二氧化碳补贴价格(美元/吨 CO ₂)	7
--	---

表 2: 中国 CCUS 相关政策	7
表 3: CCUS 技术与其他减排技术比较	8
表 4: 行业实施 CCUS 减排的大致	12
表 5: 部分行业 CCUS 技术的减排贡献 (需求)	12
表 6: 我国 CCUS 碳源基本情况	15
表 7: 按不同方法对碳捕集技术进行分类	15
表 8: 按第一种分类方法对不同技术进行比较	17
表 9: 不同类型碳运输技术比较	18
表 10: 根据工程技术手段的不同对碳利用技术进行分类	20
表 11: 根据工程技术手段的不同对碳利用技术进行分类	21
表 12: 主要国家及地区 CCUS 地质封存潜力与 CO ₂ 排放	23
表 13: 不同封存类型的比较	23
表 14: 我国 CCUS 未来发展路径	26
表 15: 相关标的梳理	27

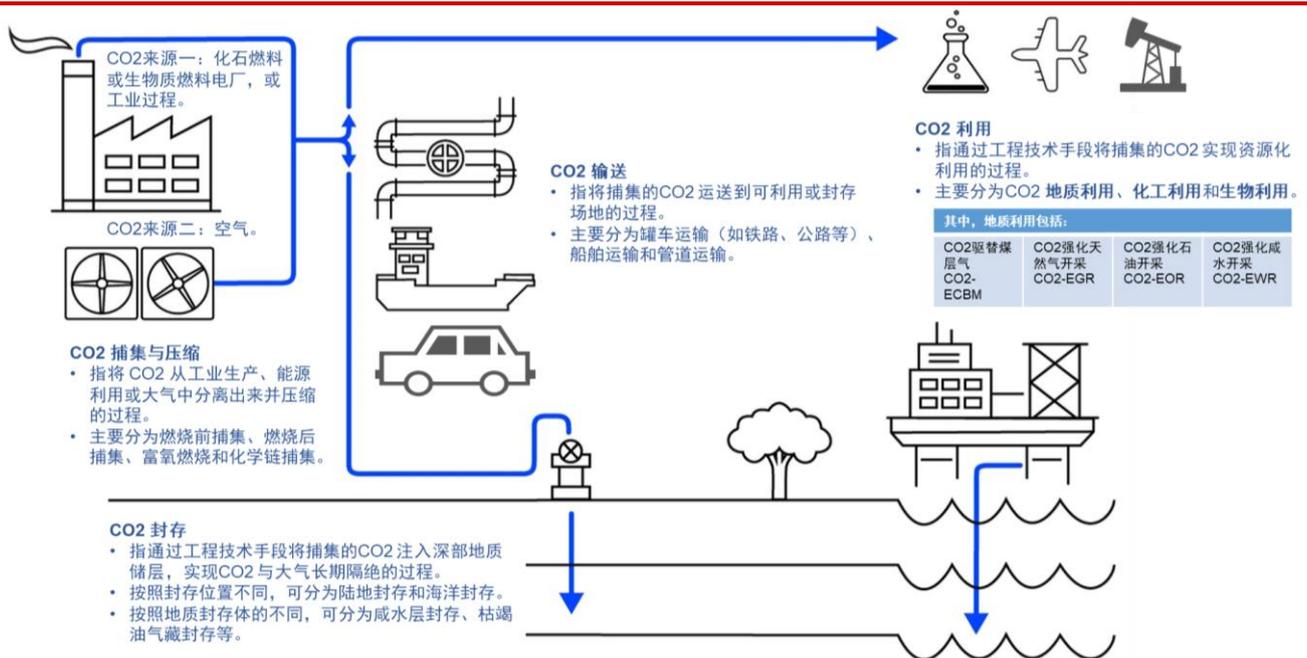
1. CCUS 是实现减排目标的关键一环

1.1. 什么是 CCUS 技术

为落实《巴黎协定》和表明中国对全球气候治理的决心，习近平主席在第 75 届联合国大会宣布，中国力争在 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和。碳中和意味着最终排放到大气中的二氧化碳为零，即处于“碳吸收”等于“碳排放”的平衡状态。其中，“碳吸收”中一项较为直接且有效的技术是碳捕集利用与封存技术（Carbon Capture, Utilization and Storage，以下简称 CCUS）。

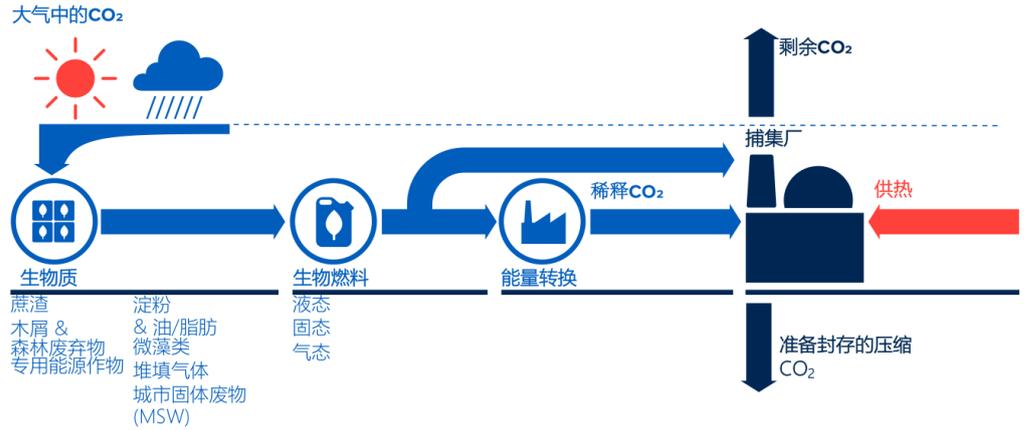
广义 CCUS 技术是指将 CO₂ 从工业过程、能源利用或大气中分离出来，直接加以利用或注入地层以实现 CO₂ 永久减排的一系列技术的总和。CCUS 的过程可分为四个环节：CO₂ 捕集与压缩、CO₂ 运输、CO₂ 利用和 CO₂ 封存。按不同环节的组合关系，CCUS 产业模式可以分为多种，包括 CS（碳捕集与封存）、CU（碳捕集与利用）、CUS（碳捕集、封存与利用）、CTS（碳捕集、运输与封存）、CTUS（碳捕集、运输、封存与利用）。根据减排效应的不同，可将 CCUS 分为减排技术——传统 CCUS 技术以及负碳技术——生物质能碳捕集与封存（Bioenergy with Carbon Capture and Storage，以下简称 BECCS）和直接空气碳捕集与封存（Direct Air Carbon Capture and Storage，以下简称 DACCS）。其中，尽管传统 CCUS 技术可以减少化石燃料燃烧等过程中的 CO₂ 的排放，但从全生命周期的角度来看，排放量依旧是大于零的，而后者——负碳技术则指完全从大气中去除二氧化碳的过程，从全生命周期的角度来看排放量为负，因此它对于碳中和（净零排放）具有重要意义。具体来说，BECCS 指二氧化碳经由植被（生物质的一种）的光合作用从大气中提取出来后，通过燃烧生物质进行发电并从燃烧产物中对其进行回收，最后将其封存于地下，简单来说 BECCS 即配备 CCUS 技术的生物质发电站，通过改变二氧化碳来源（碳源）的能源类型使得发电厂不仅不会排放 CO₂ 还会从空气中吸收 CO₂ 封存于地下；而 DACCS 则指直接从空气中捕获二氧化碳并封存，由于其碳源最为普遍，因此相比传统 CCUS 和 BECCS，DACCS 工厂位置的设置更为灵活。

图 1：CCUS 示意图



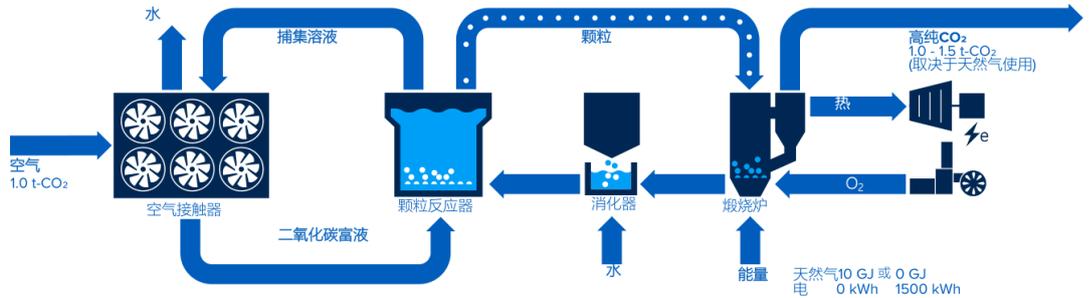
资料来源：国际能源署（IEA），华宝证券研究创新部

图 2: BECCS 示意图



资料来源：全球碳捕集与封存研究院，华宝证券研究创新部

图 3: DACCS 示意图



资料来源：全球碳捕集与封存研究院，华宝证券研究创新部

1.2. CCUS 已进入商业化初期阶段，美国与欧盟发展领先

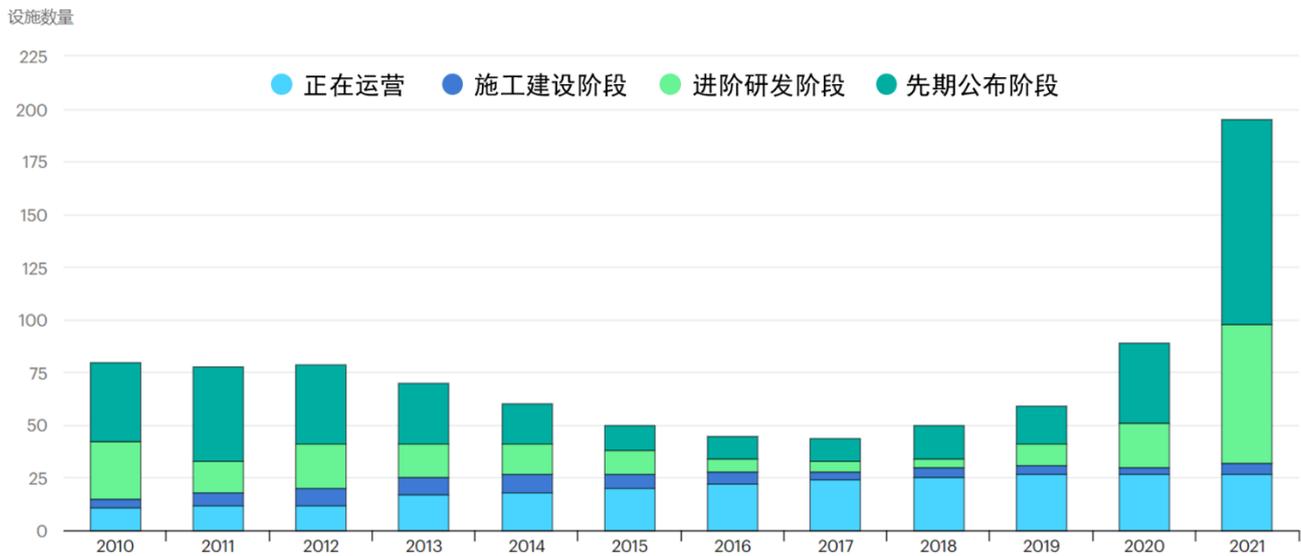
CCUS 技术起源于上世纪 70 年代对于 CO₂ 的驱油利用，从全球视角下大致历经三个阶段，现已进入商业化初期快速增长阶段。美国是应用二氧化碳驱油研究试验最早、最广泛的国家，从 1970 年开始，美国就把二氧化碳注入油田作为提高石油采收率(EOR)的一种技术手段，其在利用 CO₂ 驱油的同时累计封存 CO₂ 约十亿吨。CCUS 技术在历经近十年的低迷徘徊后，在 2018 年左右迎来新一轮的发展与增长，据全球碳捕集与封存研究院数据，2020 年全球碳捕集能力为 4000 万吨/年。今年随着应对气候变化的压力骤增，全球 CCUS 项目部署行动有所加快，根据国际能源署 (IEA)，2021 年以来 (截止 2021 年 11 月)，已公布的 CCUS 设施建设计划超过了 100 个，而全球管道工程项目的推进将有望让 CO₂ 运输能力翻两番。我国 CCUS 研究起步较晚，但在 2006 年左右中国学术界和工业界根据国情，明确了中国碳捕集与封存技术要走 CO₂ 资源化利用之路，第一次提出了“CCS+U” (即 CCUS) 的概念。目前中国 CCUS 技术仍处于研发与示范阶段，主要应用在煤电减排和驱油/气方面。根据中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)，中国处于正常工作状态的示范性商业性设施 CCUS 项目共计 21 个，其中超一半是 CCUS-EOR 或 CCUS-ECBM 项目，且超过 30% 的项目碳源来自煤电厂，中国当前碳捕集能力已达到 300 万吨/年。

图 4：全球 CCUS 发展历程



资料来源：全球碳捕集与封存研究院，彭博新能源财经，华宝证券研究创新部

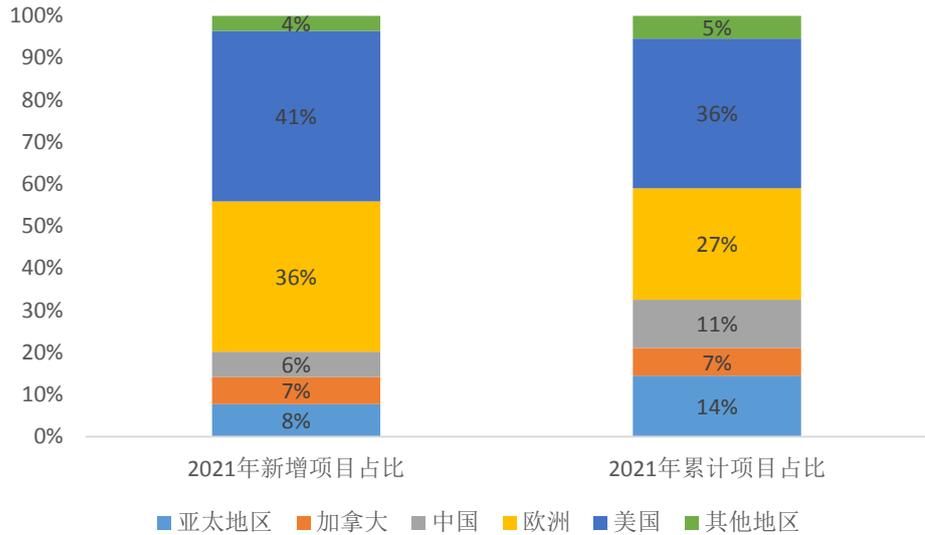
图 5：2010-2021 年全球商用 CCUS 设施数量变化情况（截止 2021 年 11 月）



资料来源：IEA，华宝证券研究创新部

CCUS 目前在全球 25 个国家均有部署，美国和欧盟处于领先地位。2021 年美国 and 欧盟新增 CCUS 项目数约占全球今年新增项目数量的四分之三，累计项目数约占全球累计项目数量的 63%，主要原因在于美国、欧盟对于 CCUS 技术的政策支持力度较强，例如美国联邦政府的 45Q 税收抵免(Tax credit)和加州政府的低碳燃料标准(California Low Carbon Fuel Standard)政策、欧盟的欧洲创新基金等，能有效降低项目成本，刺激 CCUS 项目快速部署。目前中国针对 CCUS 技术的具体的政策支持主要体现在拓宽融资渠道等方面。

图 6: 全球 CCUS 项目主要分布在美国和欧盟 (截止 2021 年 11 月)



资料来源: 全球碳捕集与封存研究院, IEA, 华宝证券研究创新部

表 1: 美国 45Q 税务抵免政策的二氧化碳补贴价格(美元/吨 CO₂)

年份	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
地质封存	25.7	28.74	31.77	34.81	37.85	40.89	43.92	46.96	50
EOR/CCU	15.29	17.76	20.22	22.68	25.15	27.61	30.07	32.54	35

资料来源: 《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)》, 华宝证券研究创新部整理

表 2: 中国 CCUS 相关政策

年份	部门	政策内容	影响
2007	工信部、发改委、财政部	中国应对气候变化科技专项行动	CCUS 被列为核心技术
2013	发改委	关于推动碳捕集、利用和封存试验示范的通知	CCUS 示范性项目工作开启
2013	环境保护部办公厅	关于加强碳捕集、利用和封存试验示范项目环境保护工作的通知	对 CCUS 工作进行环境影响评价
2016	国务院	十三五国家科技创新规划	大力发展 CCUS 相关科技与技术
2020	央行、发改委、证监会	CCUS 被纳入绿色债券目录	拓宽融资渠道
2021	人大会议	《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》提出, 要“开展碳捕集利用与封存重大项目示范”	大力发展 CCUS 相关科技与技术
2021	国务院	关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见	加速 CCUS 项目落地
2021	发改委	《关于请报送二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)项目有关情况的通知》	CCUS 项目梳理和收集
2021	央行	碳减排支持工具对碳减排技术的支持, 其中包括 CCUS 技术	拓宽融资渠道

资料来源: 中国政府网, 华宝证券研究创新部整理

1.3. CCUS 对于全球及中国碳中和目标的实现具有重要意义

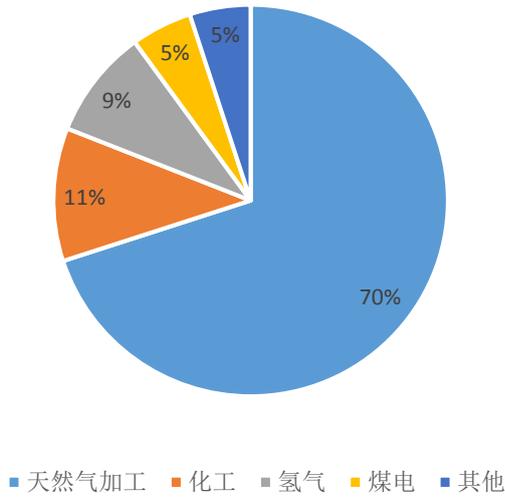
CCUS 作为碳减排技术之一,主要优点是减排潜力大、可促进煤等化石能源的清洁利用,较符合我国国情。从行业上看,CCUS 可应用于电力、能源(例如天然气开采、制氢)以及减排难度较大的制造业(例如水泥、化工、钢铁)等行业的减排,且针对无法通过传统 CCUS 技术减排的交通运输业、建筑业等,也可选择采用 BECCS、DACCS 等负碳技术进行减排。当前,在全球范围内 70%的 CCUS 的碳源主要来自于天然气加工(通常开采出的天然气中含有一定成分的 CO₂,需要去除后得到净化的天然气以供出售)。CCUS 目前在中国应用程度尚浅且项目规模较小,因此按不同行业的 CCUS 项目数量进行分析,目前超过 30%的项目用于煤电减排。但与其他减排技术相比,CCUS 技术存在一定环境风险,例如碳泄漏问题,可能会对周边环境和居民生活带来负面影响;此外,从全生命周期的角度去分析传统 CCUS 技术时,其减排效果不一定是最佳的,例如其捕集、运输、利用或封存的环节中会消耗一定能源(增加碳排放)。

表 3: CCUS 技术与其他减排技术比较

项目	CCUS	能效技术	核电	太阳能发电	风电	水电
技术成熟度	相对不成熟	相对成熟	相对成熟	相对成熟	相对成熟	相对成熟
成本	高	提高化石燃料转换和使用效率成本较高	基建投入大,总发电成本低	较高,但在不断下降中,有望与火电持平	不断下降中,有望与火电持平	基建投入大,发电成本低
安全性	可能因 CO ₂ 泄露导致安全隐患	安全可靠	核废料、反应堆放射性物质存在泄露危险,潜在危害大	安全可靠	安全可靠	安全可靠,极端事件发生几率小
稳定性	高	高	高	相对低	相对低	较高
对生态环境影响	大规模工程施工可能对生态环境造成影响,CO ₂ 泄露的环境影响大	小	如发生泄露,对环境的影响巨大	较小	较小	大水电对流域生态环境的影响大,小水电生态影响相对较小
优势	减排潜力大,促进煤的清洁利用,符合我国国情,CO ₂ 的工业利用	不会对现有产业进行大规模改造,不额外增加环境负担,总体较经济	核燃料储量大,储存运输方便,总体成本低、发电总成本稳定	太阳能资源丰富、清洁、可再生	风资源丰富清洁、可再生,基建周期短,装机规模灵活	水资源丰富清洁、可再生,发电效率高,发电启动快
问题	发电成本不稳定,捕集、封存、监测环境存在技术挑战,CO ₂ 泄露带来安全隐患	效率提高越来越难,取决于技术突破,存在温室效应	核废料处理要求高,存在泄露风险,投资成本大,放射性物质安全隐患大	能流密度低,能源利用率低,多晶硅的生产过程耗能大,并网存在挑战	风电不稳定、不可控,并网存在挑战,占用大片土地	受季节和旱涝灾害影响,部分不均蓄水淹没大量土地、居民搬迁成本高,社会影响大

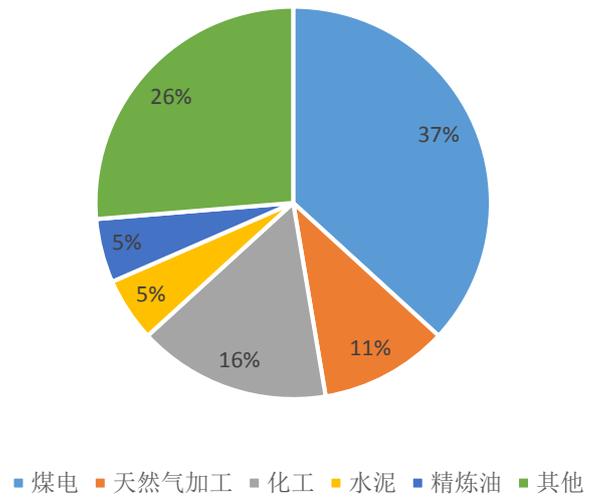
资料来源:中国知网《中国 CCUS 技术发展趋势分析》,华宝证券研究创新部整理

图 7: 全球 CCUS 在不同行业的应用 (2020 年, 按捕集能力计算比例)



资料来源: Rystad Energy forecasts, 华宝证券研究创新部

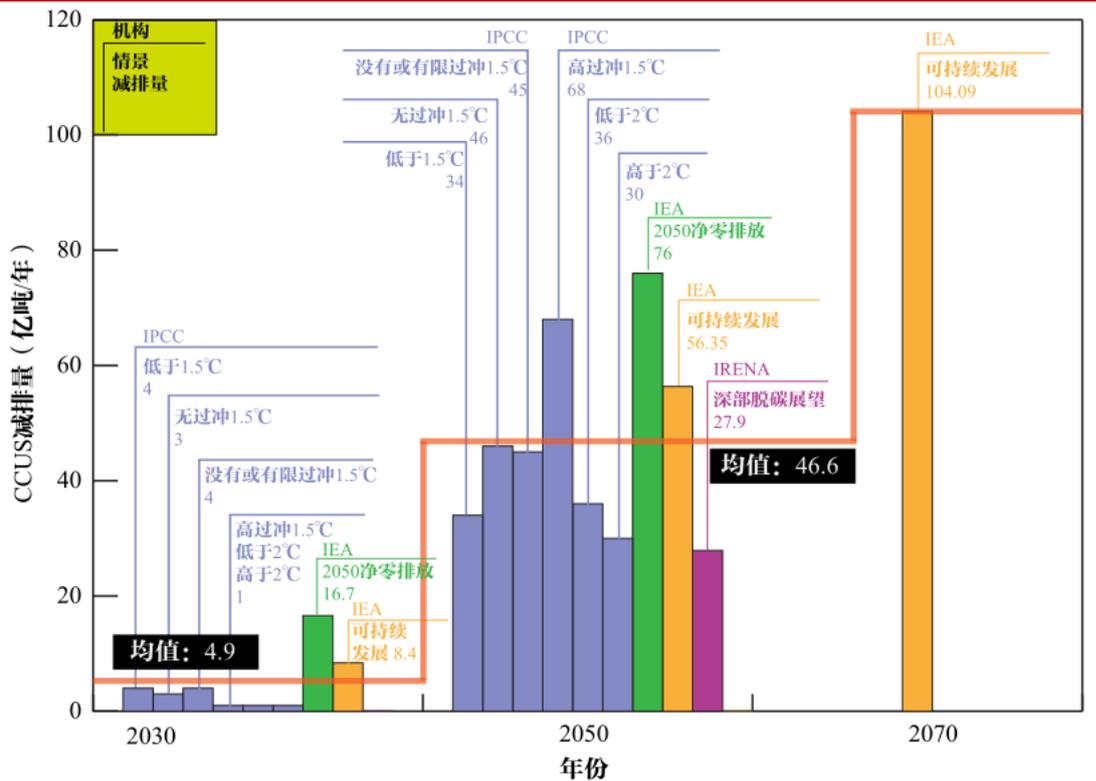
图 8: 中国 CCUS 在不同行业的应用 (2021 年, 按项目数量计算比例)



资料来源: 全球碳捕集与封存研究院, 华宝证券研究创新部

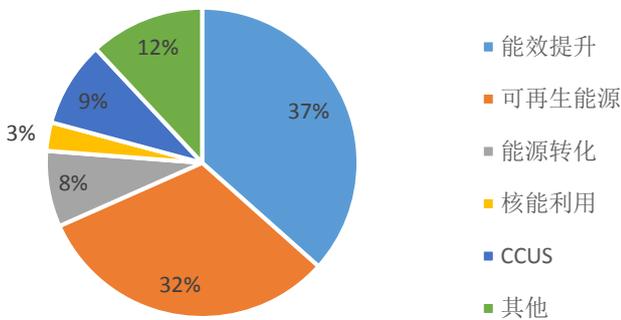
在全球应对气候变化路径中, **CCUS 地位不可替代**。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC)、国际能源署 (IEA)、国际可再生能源机构 (IRENA) 在不同减排路径下对 CCUS 的减排贡献进行了预测, 在各模拟情景下 CCUS 技术都是实现本世纪升温控制、实现近零排放目标的关键途径之一。由于各组织对于减排情景的设定各有不同, 因此预测的结果存在一定差别: 2030 年, CCUS 贡献的减排量在 1-16.7 亿吨/年, 平均为 4.9 亿吨/年; 2050 年, CCUS 贡献的减排量为 27.9-76 亿吨/年, 平均为 46.6 亿吨/年。从贡献比例上看, 在 IEA 发布的可持续发展情景中, 全球将于 2070 年实现净零排放, CCUS 在 2050 年对当年减排量的贡献比例为 9%, 在 2070 年对累计碳减排的贡献占比达 15%; 在国际可再生能源机构 (IRENA) 发布的深度脱碳情景中, 2050 年 CCUS (不包含 BECCS) 将贡献 6% 的年减排量, 约 22.14 亿吨/年左右。

图 9：全球主要机构评估的 CCUS 贡献



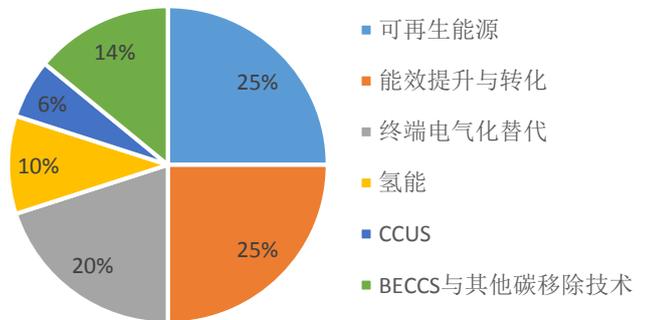
资料来源：《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)》，华宝证券研究创新部

图 10：CCUS 技术在 IEA 可持续发展情景中的减排贡献 (%)



资料来源：IEA，华宝证券研究创新部

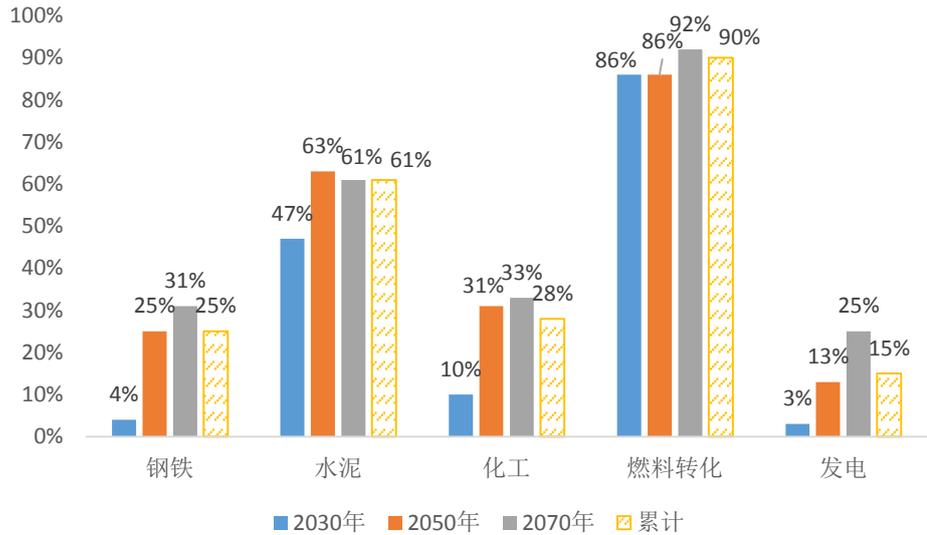
图 11：CCUS 技术在 IRENA 1.5°C 升温情景中的减排贡献 (%)



资料来源：IRENA，华宝证券研究创新部

在现有技术情形下，在部分行业减排路径中 **CCUS 是不可跳过的关键一环**。根据 IEA 在可持续发展情景下对各行业 CCUS 减排贡献的测算，钢铁、水泥、化工、燃料转化、发电行业等在 2020-2070 年的过程中将会利用 CCUS 技术实现累计 25%、61%、28%、90%、15% 的减排量。贡献比例不同主要是由于不同行业使用 CCUS 的技术成本（排放源浓度不同所导致）、替代技术的可行性与相对成本等存在差异。

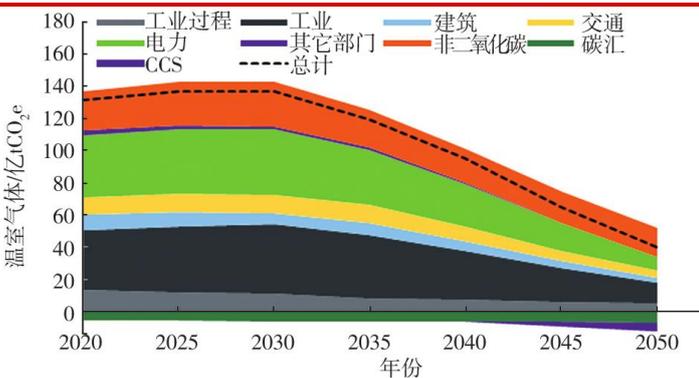
图 12: IEA 对不同行业 CCUS 减排贡献的估算



资料来源: 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021), 华宝证券研究创新部

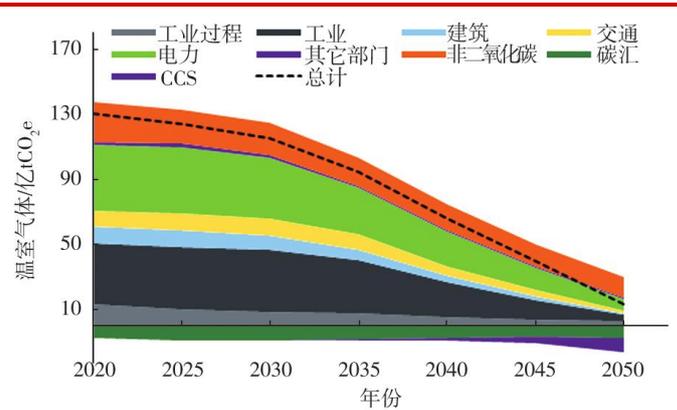
随着时间推移, CCUS 技术对于中国实现碳中和目标的作用将逐渐凸显。根据清华大学研究, CCUS 对于碳中和目标(尤其是 2040 年之后)的实现起到一定作用。同时根据《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)》, 不同研究机构对中国碳中和目标下不同行业的 CCUS 减排贡献(需求)进行了测算: 2030 年 0.2-4.08 亿吨, 2050 年 6-14.5 亿吨, 2060 年 10-18.2 亿吨。整体来看 2035 年之后, 减排贡献(需求)有较大幅度增长; 除了负碳技术外, 煤电与水泥行业的使用 CCUS 减排的需求占比较大, 预计在 2060 年分别占比 24%、14%左右。

图 13: 2°C 目标导向推荐情景全部温室气体排放部门构成



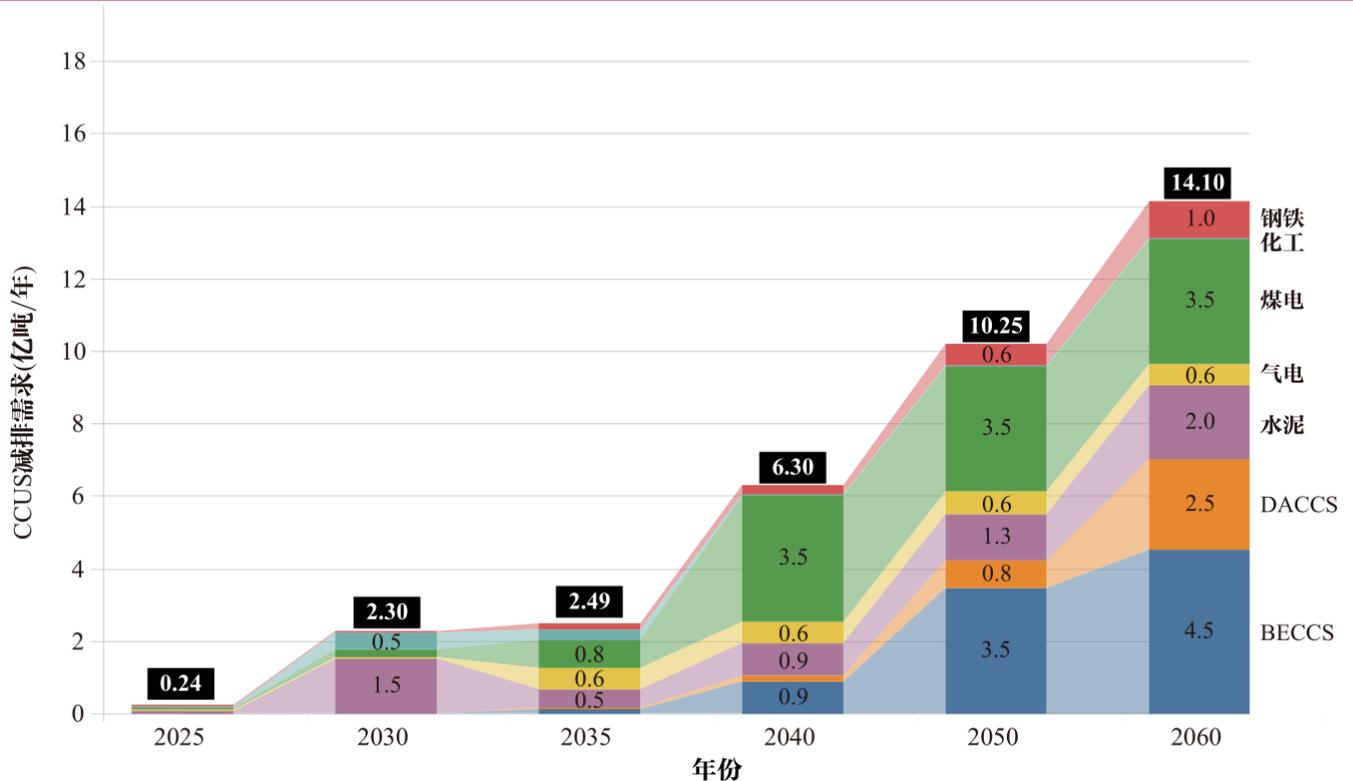
资料来源: 中国知网《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》, 华宝证券研究创新部

图 14: 1.5°C 目标导向推荐情景全部温室气体排放部门构成



资料来源: 中国知网《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》, 华宝证券研究创新部

图 15：中国 CCUS 技术的减排贡献（需求）



资料来源：《中国二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）年度报告（2021）》，华宝证券研究创新部

表 5：部分行业 CCUS 技术的减排贡献（需求）

行业	CCUS 减排贡献（需求）
火电	火电+CCUS 是当前中国 CCUS 示范的重点，碳中和目标下保持电力系统灵活性的主要技术手段。有 <u>4.3 亿-16.4 亿吨</u> 二氧化碳需通过 CCUS 技术减排才能实现电力系统的净零排放。燃煤电厂加装 CCUS 可捕获 <u>90%</u> 的碳排放量，使其变成一种低碳的发电技术。
钢铁	预计 2030 年减排需求为 0.02 亿吨-0.05 亿吨/年，2060 年减排需求为 0.9 亿吨-1.1 亿吨/年。钢铁行业的二氧化碳除了进行利用与封存外，还可以直接用于炼钢过程。充分利用这些技术，能够减排 <u>5%-10%</u> 。
水泥	预计 2030 年的减排需求为 0.1 亿吨-1.52 亿吨/年，2060 年减排需求为 1.9 亿吨-2.1 亿吨/年。水泥行业石灰石分解产生的二氧化碳约占总排放量的 <u>60%</u> ，因此 CCUS 是水泥行业脱碳的必要手段。
石化与化工	预计 2030 年的减排需求约为 5000 万吨，到 2040 年逐渐降低至 0。这是由于石化和化工行业（排放源 CO2 浓度可高达 70%）本身也是 CO2 的主要利用领域。该行业捕集能耗低、投资成本与运行维护成本低，因此可为早期 CCUS 示范提供低成本的机会。

资料来源：《中国二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）年度报告（2021）》，创业邦研究中心，华宝证券研究创新部整理

CCUS 技术对于中国实现碳中和目标具有重要意义，体现在以下五个方面：

1) 化石能源实现低碳化利用的唯一技术途径是 **CCUS**。在碳中和目标背景下，未来能源结构应围绕“高比例可再生能源+核能/化石能源”布局清洁低碳的现代能源体系。2020 年，煤炭在中国能源消费占比中高达 57%，预计到 2050 年该比例可能降至 10%-15%。煤炭产生的碳排放实现零排放的唯一技术途径将是 CCUS。

2) **CCUS 可弥补一些传统碳减排手段带来的负面作用，例如助力电力行业保持灵活性。**作为碳排放最高的行业，电力系统首当其冲提高可再生能源发电比例，而受其在供需端的不稳定性影响，利用“火电+CCUS”的技术途径，可在实现碳减排的同时，提供稳定清洁的低

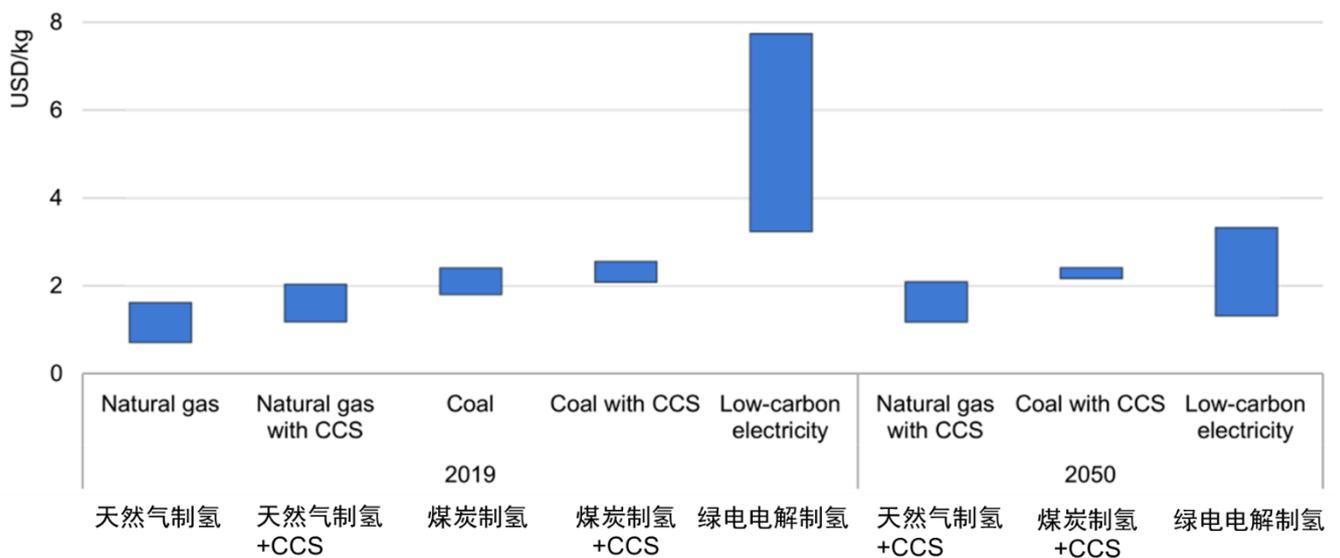
碳电力。

3) 当前技术情形下，钢铁、水泥等行业净零排放离不开 CCUS 技术。根据 IEA 发布的 2020 年钢铁行业技术路线图预测，到 2050 年钢铁行业采取常规减排方案，剩余 34% 碳排放量，进一步利用氢直接还原铁 (DRI) 技术仍剩余 8% 以上的碳排放量。水泥行业采取常规减排方案，仍剩余 48% 碳排放量。CCUS 将成为钢铁、水泥等难减排行业实现零排放的必要技术之一。

4) 负碳技术是部分工业过程以及难减排行业的重要减排路径之一。根据《中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021)》预计，到 2060 年，中国仍有数亿吨非 CO2 温室气体和部分电力、工业、航空业排放的 CO2 无法实现减排，BECCS 及 DACCS 可助力该部分碳排放的减排，是实现碳中和目标的重要减排路径之一。尽管生态碳汇等方式也可实现大气中二氧化碳的部分去除，但在减排可验证性以及减排效果的持久性方面，BECCS 与 DACCS 更有优势。

5) CCUS 是制备低碳氢气的有效途径。氢气作为类似电力的二次能源，当前主要通过以煤炭或天然气为原料进行制备，若其制备方式是低碳的，则终端在使用时不会带来额外的碳排放。因此，通过 CCUS 技术+天然气制氢或煤制氢的方式可以支持低碳制氢生产规模快速扩大，以满足交通、工业、建筑的能源需求。同时相比使用绿电电解制氢，叠加 CCUS 技术的制氢方式成本更低。

图 16: 不同制氢技术的全球平均平准化成本 (美元/千克)

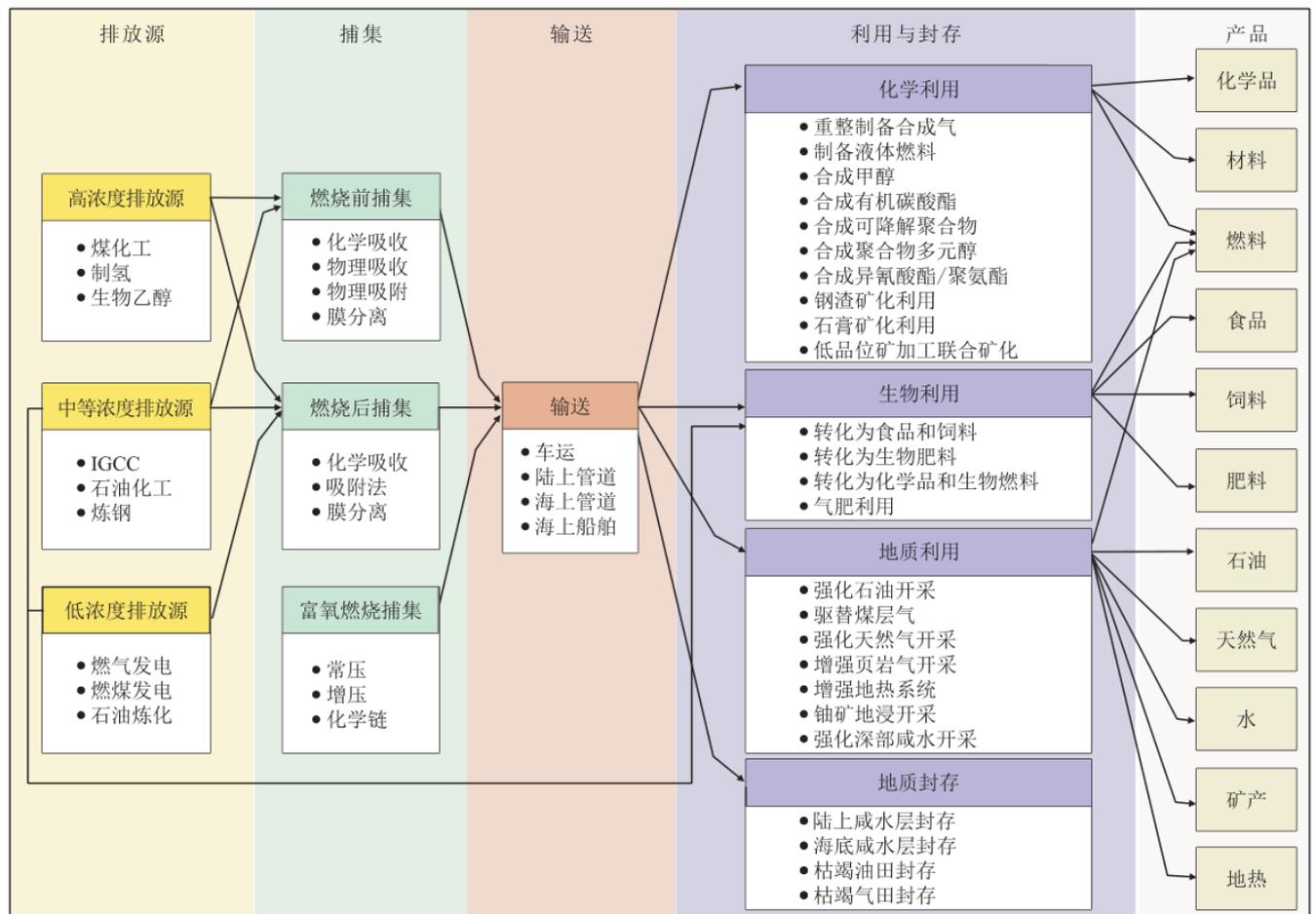


资料来源: IEA, 华宝证券研究创新部

2. 中国 CCUS 技术概况: 尚处于研发与示范阶段

CCUS 技术流程与产业流程均较为复杂，需要多技术与多行业协同合作。从 CCUS 技术流程，可将 CCUS 技术分解为碳捕集技术、碳运输技术、碳利用技术、碳封存技术等。从产业流程，CCUS 依次涉及能源、钢铁、水泥、交通、化工、地质勘探、环保、农业、食品业等众多行业，产业流程较为复杂。

图 17: CCUS 技术流程及分类示意



资料来源：中国知网《CCUS 全球进展与中国对策建议》，华宝证券研究创新部

注：高浓度排放源主要指 50%以上 CO₂ 浓度的烟气；中浓度排放源主要指 15%-50%左右 CO₂ 浓度的烟气；低浓度排放源主要指 15%以下 CO₂ 浓度的烟气。

2.1. 碳捕集技术：成本占比最高，燃烧后捕集技术较为成熟

碳捕集技术是发展 CCUS 技术中最为关键的部分，是 CCUS 整个流程中成本和能耗的最大来源。碳捕集技术主要指从排放源捕获 CO₂ 并将捕获而得的 CO₂ 进行（分离后）收集并压缩的过程，充足且优质的高纯度二氧化碳的收集是保障 CCUS 技术继续进行下去的关键。从流程上，可进一步将碳捕集技术分为碳捕获及分离技术、CO₂ 压缩技术（CO₂ 运输的需要）。此次主要探讨碳捕获及分离技术（以下统称为“碳捕集技术”）。

碳捕集技术中所捕获的二氧化碳主要来自于发电和工业过程中化石燃料或碳酸盐等的使用，以及部分能源采掘过程 CO₂ 的逸散。从总排放规模上看，我国排放量占比较大的碳源主要来自热电厂、水泥、钢铁、煤化工等行业，但其中前三者均属于低浓度排放源，仅煤化工属于高浓度排放源；由于不同行业碳源浓度、杂质组分的不同，所使用的捕获技术是有差异的，当前从高浓度排放源进行捕获面临的技术挑战较少，相对成熟。此外在单企业排放规模上，热电厂、水泥、钢铁、煤化工单一碳源排放规模均较大。在分布上看，热电厂、水泥、钢铁、煤化工行业企业主要分布于经济发达的东部地区，与中国人口、经济发展状况分布类似。

表 6：我国 CCUS 碳源基本情况

碳源行业	排放量占比 (%)	单企业排放量规模 (t/年)	碳源浓度特点	碳源分布
热电厂	32%	10	低浓度排放源	东南沿海、华北及东北地区
水泥	22%	1-30	低浓度排放源	东南沿海一带经济发达地区和西南地区，在西北和东北地区分布较少
钢铁	21%	1-30	低浓度排放源	华东、华南地区
煤化工	17%	1-30	高浓度排放源	产煤大省山西、陕西一带，以及新疆
合成氨	3%	小于 5	高浓度排放源	华东、华南一带，新疆地区也有少量合成氨企业
电石	1%	小于 5	中浓度排放源	新疆和东北地区
石油炼化	2%	小于 5	低浓度排放源	东北地区等
聚乙烯	2%	小于 5	中浓度排放源	华北地区，在东北和新疆有少量的该类企业

资料来源：中国石油勘探开发研究院，华宝证券研究创新部整理

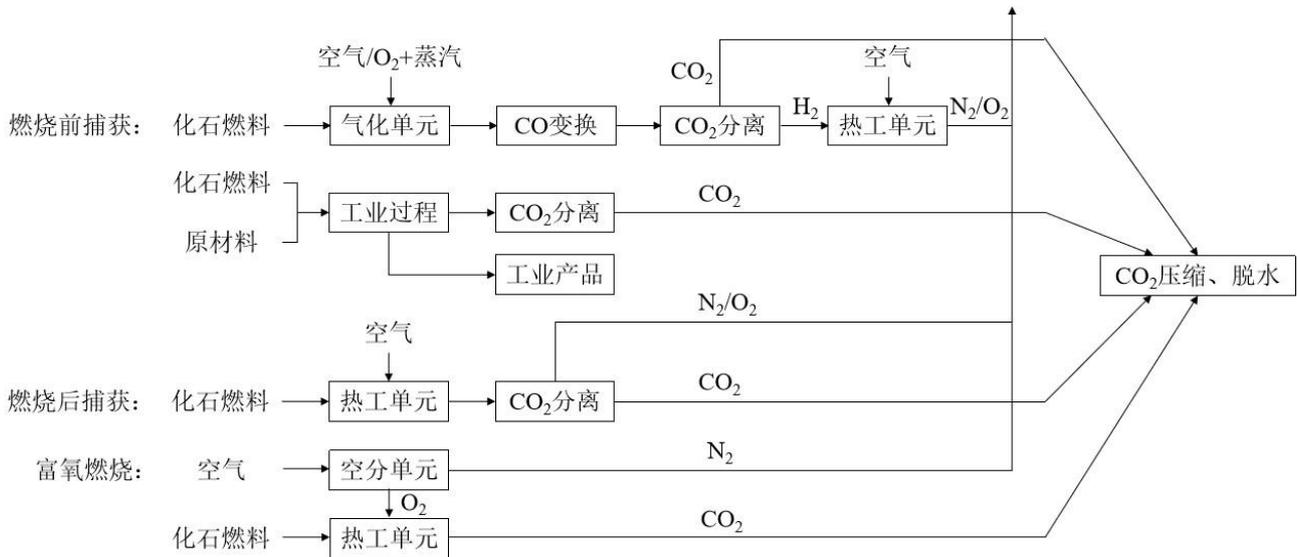
按不同角度可对碳捕集技术进行分类。根据碳捕获与燃烧过程的先后顺序，可将碳捕集技术分为燃烧前捕获、富氧燃烧和燃烧后捕获等，使用哪种技术与碳排放源高度相关。另外，根据分离过程进行分类，可将碳捕集技术分为化学吸收法、物理吸收法、吸附法、膜分离法和化学链法。根据技术先进程度，可将碳捕集技术分为第一代技术、第二代技术等。

表 7：按不同方法对碳捕集技术进行分类

分类	技术描述
第一种分类方法：按碳捕获与燃烧过程的先后顺序进行分类	
燃烧前捕获	指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并转化为以 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 等可作为清洁燃料使用。
富氧燃烧	则是指通过分离空气制取纯氧，以纯氧（而非空气）作为氧化剂进入燃烧系统，同时辅以烟气循环的燃烧技术，使废气中二氧化碳浓度增加，可视为燃烧中捕获技术。
燃烧后捕获	指直接从燃烧后烟气中分离 CO ₂ 。
第二种分类方法：按分离过程进行分类	
化学吸收法	利用二氧化碳的酸性气体的性质与弱碱性物质发生化学反应。
物理吸收法	物理吸收法是指采用水、甲醇等作为吸收剂，利用二氧化碳在这些溶剂中的溶解度随压力而变化的原理来吸收的方法。
化学/物理吸附法	一种利用固态吸附剂（活性炭、天然沸石、分子筛、活性氧化铝和硅胶等）对原料气中的二氧化碳进行有选择性的可逆吸附来分离回收二氧化碳。
膜分离法	利用某些聚合材料如醋酸纤维、聚酰亚胺、聚砜等制成的薄膜，利用其对不同气体的不同渗透率来分离。
化学链分离法	一种新型的燃烧技术，通过借助于氧载体的作用，可以实现 CO ₂ 的内在分离和避免 NO _x 污染物的产生，同时能实现更高的能量利用效率。
第三种分类方法：按技术先进程度进行分类	
第一代技术	第一代捕集技术指现阶段已能进行大规模示范的技术，如胺基吸收剂（燃烧后捕集），物理溶剂如聚乙二醇二甲醚法、低温甲醇法等（燃烧前捕集），富氧燃烧（常压）。
第二代技术	第二代捕集技术指技术成熟后能耗和成本可比成熟后的第一代技术降低 30% 以上的新技术。如新型膜分离技术、新型吸收技术、新型吸附技术、增压富氧燃烧技术、化学链燃烧技术等。

资料来源：《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图（2019 版）》，《中国二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）年度报告（2021）》，中国知网，华宝证券研究创新部

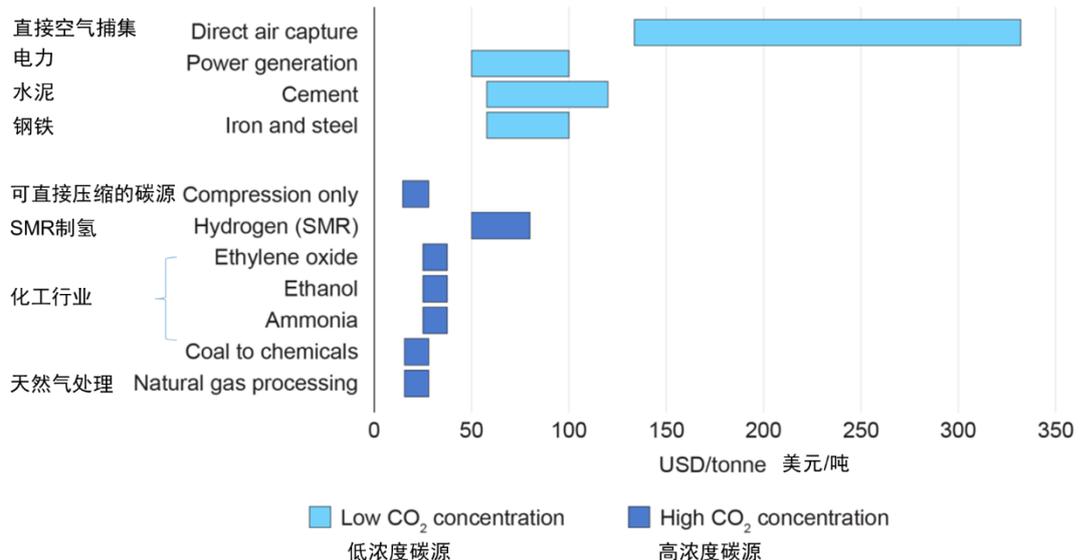
图 18: 按第一种分类方法对不同技术路线进行梳理



资料来源：中国知网《碳捕获、利用与封存（CCUS）技术发展现状及应用展望》，华宝证券研究创新部

成本上看，排放源的 CO2 浓度是影响成本的主要因素，浓度越高，捕获成本越低。例如高浓度点源（乙醇、氨和天然气加工过程中的排放）产生的 CO2 甚至无需进行吸收处理，直接通过脱水和压缩设备实现碳捕集，相比较之下，低浓度点源（发电厂、水泥厂等），必须先经过化学或物理等分离手段，才能最终将 CO2 进行捕获，流程更长故成本较高。但当前中国高浓度点源排放的二氧化碳总量占比很小，因此后续需要对低浓度点源排放持续进行政策激励才能实现 CCUS 技术更好的经济可持续性。

图 19: 全球范围内不同行业的碳捕集成本比较（2019）



资料来源：IEA，华宝证券研究创新部

发展阶段上看，目前不同分类下的燃烧后捕集技术、化学吸收法以及第一代技术分别是同维度比较下发展最为成熟的。我国与发达国家在燃烧后捕集以及化学吸收法技术层面差距不大，当前我国燃烧后与燃烧前捕集的项目（包括间隔运行的项目）占比较多，制约碳捕集技术商业化利用的主要因素是能耗高或成本高。第二代、第三代仍处于研发阶段，但新型膜分离、增压富氧燃烧、化学链燃烧等具有代表性的第二代技术为推动未来低成本实现 CCUS

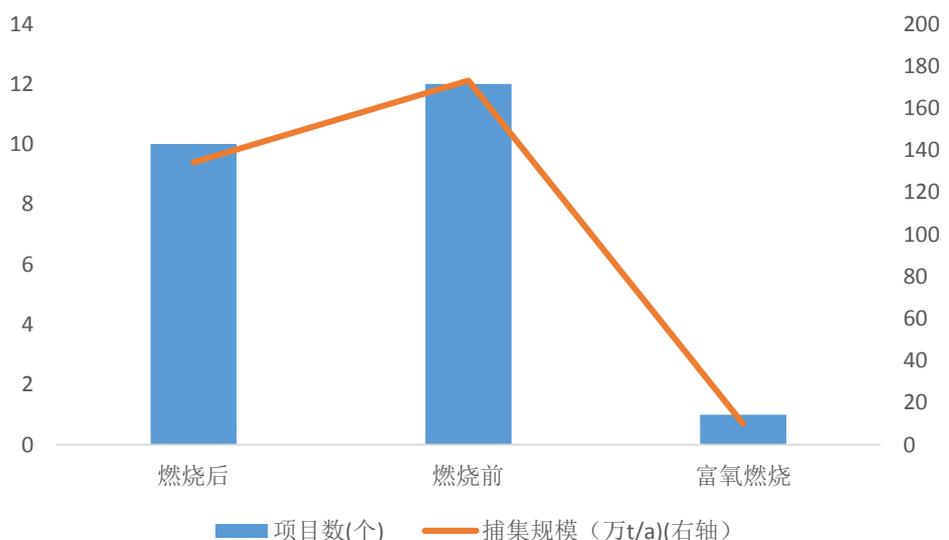
技术的部署具有重要意义。

表 8：按第一种分类方法对不同技术进行比较

技术类型	应用领域	成本(元/tCO ₂)	能耗(GJ/tCO ₂)	发电效率损失	国内发展阶段	其他
燃烧前捕获	整体煤气化联合循环电站(Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC)、多联产和工业分离	250-430	2.2	7-10%	较为成熟	该技术捕获的 <u>CO₂ 浓度较高</u> ，分离难度低，相应 <u>能耗和成本也会降低</u> ，但 <u>前期投资成本高</u> （发电机昂贵），可靠性有待提高。
富氧燃烧	新建燃煤电厂及部分改造后的燃煤电厂	300-400	-	8-12%	示范阶段	该技术捕获的 <u>CO₂ 浓度可达 90% 以上</u> ，只需简单冷凝便可实现 CO ₂ 的完全分离，因此 <u>CO₂ 捕获能耗和成本相对较低</u> ，但额外 <u>增加制氧系统</u> ， <u>提高了系统的总投资和能耗</u> 。
燃烧后捕获	传统电厂、水泥厂、钢铁厂等	300-450	3	10-13%	较为成熟	虽然投资较少，但烟气中 CO ₂ 分压较低，使得 <u>CO₂ 捕获能耗和成本较高</u> 。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 <u>当前应用较为广泛且成熟的技术</u> 。

资料来源：中国知网《碳捕获、利用与封存（CCUS）技术发展现状及应用展望》，华宝证券研究创新部整理

图 20：大部分中国 CCUS 项目均使用燃烧后或燃烧前捕集技术



资料来源：《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)》，华宝证券研究创新部

注：齐鲁石化-胜利油田 CCUS 项目已于 2021 年 12 月提前完成

2.2. 碳运输技术：中国已具备大规模管道运输设计能力

碳运输即将捕集的 CO₂ 运送到碳利用场所或封存场地的过程，与石油和天然气的运输类似。碳运输有三种方式，罐车运输、管道运输和船舶运输，罐车运输分为汽车与铁路两种方式，管道运输分为陆路管道和海底管道两种方式。

表 9：不同类型碳运输技术比较

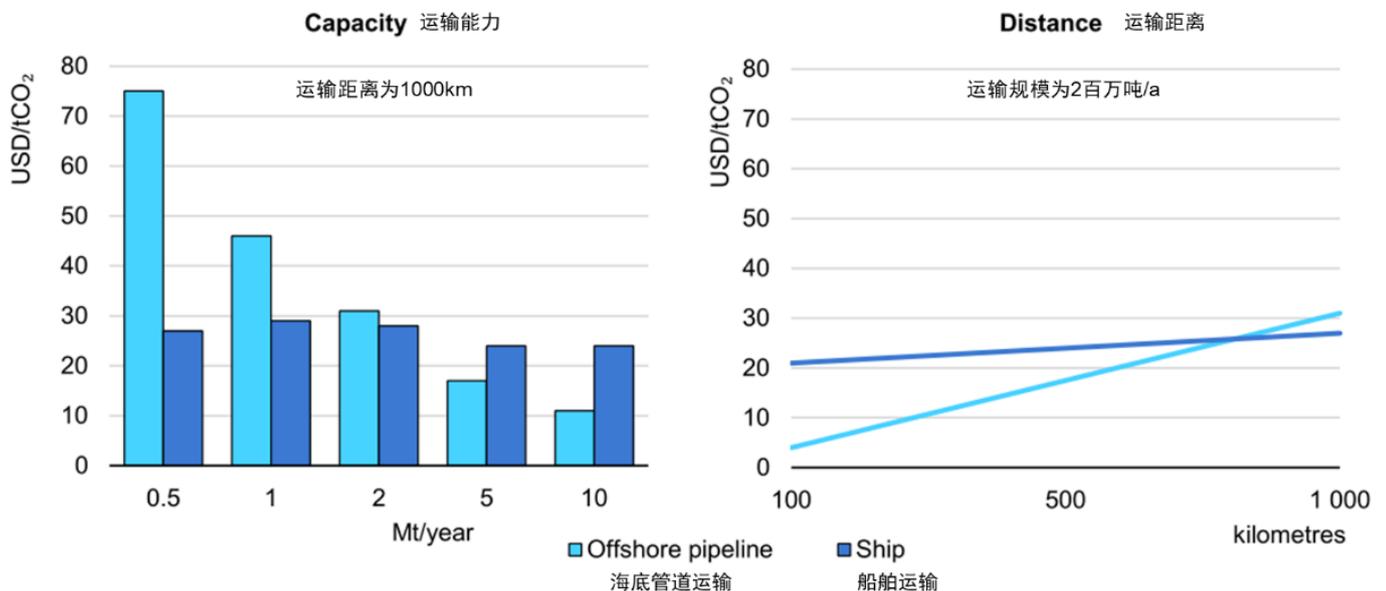
运输方式	优点	缺点	适用范围	技术阶段	成本	运输规模
管道运输	1) 连续性强，安全性高； 2) 运输量大，运行成本低； 3) 大多为地下管道，节约土地资源，不受天气影响； 4) CO ₂ 泄漏量极少，对环境污染小；	1) 灵活性差，只适用于固定地点之间的运输； 2) 管道不容易扩展，有时需船舶和槽车协助； 3) 初始投资大； 4) 运输前必须净化 CO ₂ ，以免杂质造成管道损坏； 5) 过程中需要控制压力和温度，防止因相变至运输瘫痪；	大规模、长距离，稳定的定向 CO ₂ 输送	陆地管道运输技术处于项目设计阶段，海底管道技术处于概念研究阶段	陆地管道小于 1.0 元/t·km； 海底管道成本比陆地高 40%-70%	可大于 10 万吨/年
船舶运输	1) 运输灵活便捷； 2) 适用于河网密集和近海 CO ₂ 捕集中心的初步开发； 3) 中小规模与远距离的 CO ₂ 运输成本低； 4) 离岸封存的重要选择；	1) 间歇性运输，连续性差； 2) 受地理限制，仅适用于内河与海洋运输； 3) 装载卸载与临时存储等中间环节多，导致交付成本增加； 4) 大规模近距离时，船舶运输经济性较差； 5) 要求低温液化甚至固态化运输； 6) 低温液态 CO ₂ 增加捕集与压缩能耗与成本；	大规模、长距离，适于海上封存	技术成熟（内陆船舶）	0.3-0.5 元/t·km	小于 10 万吨/年（内陆船舶）
公路罐车运输	1) 运输灵活，不受运输地点限制； 2) 不需要前期大量投入； 3) 适应性强，方便可靠； 4) 运输网络比较发达，机动性强； 5) 各个环节之间的衔接灵活，可动态调整；	1) 单次性运输量少，单位运输成本高； 2) 连续性差，对规模大小不敏感，不适用于 CCUS 等大规模的工业系统； 3) 远距离运输安全性差，对汽车运输安全要求高； 4) 存在保温和操作上的泄漏，CO ₂ 泄漏量较大，存在环境污染； 5) 易受不利天气和交通状况影响而中断； 6) 低温液态 CO ₂ 增加捕集与压缩能耗与成本；	量较小的 CO ₂ 运输	技术成熟	0.9-1.4 元/t·km	小于 10 万吨/年
铁路罐车运输	1) 比公路运输距离长，通行能力大，成本相对较低，接近官网的成本； 2) 捕集点和利用点靠近铁路时，可利用现有设施降低成本；	1) 运输不连续，运输成本比管道运输高； 2) 受现存铁路设施影响，地域限制大，需要罐车和船舶运输作为辅助； 3) 必要时需要铺设专用铁路，增加运输成本； 4) 沿线需要装卸、临时存储设备，增加运输费用； 5) 低温液态 CO ₂ 增加捕集与压缩能耗与成本；	大规模、长距离，在管道运输未建成时	技术成熟	0.9-1.4 元/t·km	可大于 10 万吨/年

缩能耗与成本；

资料来源：中国知网《CCUS 中 CO₂ 运输环节的技术及经济性分析》、中国知网《我国碳捕获、利用与封存(CCUS)技术的发展现状与展望》，IEA，《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)》，《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图（2019 版）》，华宝证券研究创新部

在大多数情况下，运输成本远低于 CCUS 项目总成本的四分之一，运输距离和二氧化碳流量是影响碳运输成本的主要因素。其中，运输成本随距离的增加呈幂函数增加，随流量增加呈幂函数递减。对于管道运输而言，还受到管道直径、管道材料类型、地理位置、系统计划寿命、是否是在闲置天然气管道基础上进行改造等因素影响。从单位运输成本上看，罐车运输成本最高，船舶运输（内陆船舶）成本最低；但相比海上船舶运输，海底管道运输单位成本随着运输规模增加而显著降低，在一定运输距离（650km）内更具有成本优势。

图 21：海底管道运输与船舶运输经济性的比较



资料来源：IEA，华宝证券研究创新部

从技术与项目实际情况上看，中国的罐车运输和船舶运输技术已达到商业应用阶段，中国已有的 CCUS 示范项目规模较小，70%以上均采用罐车输送，仅中石化华东油气田和丽水 36-1 气田的部分 CO₂ 通过船舶运输。陆地管道运输技术是最具应用潜力和规模经济性的技术，CO₂ 管道运输技术在北美已经使用了 30 多年，已建成超过 8000km 的管网，约占全球总长度的 85%，主要用于驱油。但管道运输技术在中国尚处于中试阶段，仅建成管道累计长度 70km。中国已有 3 个 CCUS 项目使用了陆地管道运输技术，均为借鉴油气管输经验的低压 CO₂ 运输工程，输送能力超过 100 万 t/年，例如中石油吉林油田 CCUS 项目，运输距离达 20km。目前中国已具备大规模管道设计能力，正在制定相关设计规范；但当前海底管道输送 CO₂ 的技术缺乏经验，在国内尚处于研究阶段。

2.3. 碳利用技术：是 CCUS 技术创新突破的难点

碳利用是指通过工程技术手段将捕集的 CO₂ 实现资源化利用的过程。根据工程技术手段

的不同，可分为地质利用、物理利用、化工利用、生物利用和矿化利用等；根据应用方式，可分为 CO₂ 直接利用和 CO₂ 转化利用。碳利用是 CCUS 技术创新突破的难点，尽管 CO₂ 很常见，但其不易活化的化学性质、复杂的反应路径和较低的产品选择性使其转化利用存在难题，目前各国都将突破高温、高压环境瓶颈、寻找合适的催化剂作为碳利用技术的突破重点。

表 10：根据工程技术手段的不同对碳利用技术进行分类

分类	技术描述
地质利用	<p>将 CO₂ 注入地下，利用地下矿物或地质条件生产或强化有利用价值的产品，且相对于传统工艺可减少 CO₂ 排放的过程。包含 CO₂ 强化石油开采、CO₂ 驱替煤层气技术、CO₂ 强化天然气开采等。</p> <p>(1) <u>CO₂ 强化石油开采技术 (CO₂-EOR)</u>：将 CO₂ 注入油藏，利用其与石油的物理化学作用，以实现增产石油并封存 CO₂ 的工业工程。</p> <p>(2) <u>CO₂ 驱替煤层气技术 (CO₂-ECBM)</u>：将 CO₂ 或者含 CO₂ 的混合气体注入深部不可开采煤层中，以实现 CO₂ 长期封存同时强化煤层气开采的过程。</p> <p>(3) <u>CO₂ 强化天然气开采技术 (CO₂-EGR)</u>：注入 CO₂ 到即将枯竭的天然气气藏底部，将因自然衰竭而无法开采的残存天然气驱替出来从而提高采收率，同时将 CO₂ 封存于气藏地质结构中实现 CO₂ 减排的过程。</p>
化工利用	<p>以化学转化为主要特征，将 CO₂ 和共反应物转化成为目标产物，从而实现 CO₂ 的资源化利用。</p> <p>(1) <u>无机产品</u>：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。</p> <p>(2) <u>有机产品</u>：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，例如合成气 (CO₂ 与甲烷在催化剂作用下重整制备合成气)、各种含氧有机化合物单体 (醇类、醚类以及有机酸)、高分子聚合物。</p>
生物利用	<p>以生物转化为主要特征，通过植物光合作用等，将 CO₂ 用于生物质的合成，从而实现 CO₂ 资源化利用。</p> <p>(1) <u>微藻固碳</u>：以微藻固定 CO₂ 转化为液体燃料和化学品，生物肥料、食品和饲料添加剂等；</p> <p>(2) <u>CO₂ 气肥使用</u>：是将来自能源和工业生产过程中捕集的 CO₂ 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，CO₂ 气肥技术应用前景比较乐观。</p> <p>(3) <u>人工生物固碳</u>：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。如重组固氮酶催化 CO₂ 甲烷化、催化 CO₂ 还原为 CO 和甲酸，以及甲酸脱氢酶在辅因子 NADH 作用下催化 CO₂ 还原并转化为甲酸。</p>
物理利用	<p>主要包括食品、制冷、发泡材料等行业，仅延迟了 CO₂ 的释放时间，最终这类碳会排入大气。</p>
矿化利用	<p>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 CO₂ 联产化工产品，在实现 CO₂ 减排的同时得到具有一定价值的无机化工产物。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。</p>
电化学利用	<p>熔盐电解转化 CO₂ 为碳基材料，在 450°C-800°C 的熔盐体系下，通过调控 CO₂ 反应途径和采用不同电极材料和催化剂，能够将 CO₂ 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。</p>

资料来源：中国 21 世纪议程管理中心《全球 CCUS 及其重要技术知识产权分析》，中国知网《碳捕获、利用与封存 (CCUS) 技术发展现状及应用展望》，华宝证券研究创新部整理

当前全球每年 CO₂ 消费量约为 2.3 亿吨，主要用于化肥生产以及石油和天然气的开采。目前全球范围内最大 CO₂ 消费者是化肥行业，每年需要 1.25 亿吨 CO₂ 作为原料，其次是石

油和天然气行业，每年需要消耗 0.7-0.8 亿吨 CO₂，此外 CO₂ 的其他商业用途包括食品和饮料发展、冷却、水处理、气肥等。

随着碳技术的突破，CO₂ 的商业利用范围将有望进一步拓宽。许多 CO₂ 利用技术仍处于早期发展阶段，但未来有望商业化拓展，例如利用 CO₂ 合成燃料、合成高附加值化学产品、合成材料等。根据 IEA 测算，未来全球范围内仅合成高附加值化学产品、合成材料对 CO₂ 的需求可达 50 亿吨/年。我国在部分碳利用技术上已形成一定规模，尤其是地质利用方面，另外从经济效益上看，生物利用的单位效益最高。

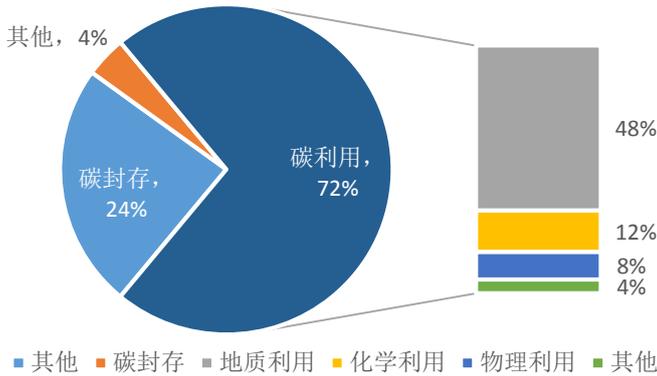
表 11：根据工程技术手段的不同对碳利用技术进行分类

技术名称	类型	利用 CO ₂ 规模 (万吨/年)	产值 (亿元/年)	发展阶段
CO ₂ 强化石油开采技术 (CO ₂ -EOR)	地质利用	约为 20	约为 1.6	示范项目
铀矿地浸开采技术	地质利用	-	超过 1	商业应用初期
合成能源燃料	化学利用	约为 10	约为 1	示范
合成高附加值化学品	化学利用	约为 10	约为 4	中试
合成材料	矿化利用	约为 5	约为 2	国外已早期商业化利用； 国内为中试阶段
转化为食品和饲料技术	生物利用	约为 0.1	约为 0.5	大规模商业化
转化为生物肥料技术	生物利用	约为 5	约为 5	研发或小规模示范
转化为化学品技术	生物利用	约为 1	约为 0.2	研发或小规模示范
气肥利用技术	生物利用	约为 1	约为 0.2	研发或小规模示范

资料来源：《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)》，华宝证券研究创新部整理

我国 70% 以上的 CCUS 项目捕获的 CO₂ 都进行了利用，其中 60% 以上均为地质利用。中国的 CCUS 地质利用项目主要集中在东部、北部、西北部以及西部地区的油田附近及中国近海地区，地质利用 CCUS 项目捕获的 CO₂ 规模在 180 万吨/年，当前已封存的 CO₂ 规模超过 580 万吨。我国在政策层面估计碳利用技术的发展，2016 年国家发改委、能源局在《能源技术革命创新行动计划（2016-2030）》中将二氧化碳利用列为重点攻关任务；2021 年 9 月，中国科学院宣布人工合成淀粉方面取得的重要进展，在国际上首次实现了二氧化碳到淀粉的从头合成，使淀粉生产从传统农业种植模式向工业车间生产模式转变在技术上成为可能。据中国石油学会石油工程专业委员会主任袁士义院士研究，我国约有 130 亿吨原油地质储量可使用 CO₂-EOR 增加 19.2 亿吨的可采储量（可提高采收率 15%），并封存约 47 亿-55 亿吨的 CO₂。

图 22: 中国 CCUS 项目中捕获的 70% 以上的 CO₂ 均进行了利用



资料来源:《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)》, 华宝证券研究创新部

图 23: 我国地质利用的 CCUS 项目分布情况



资料来源:《中国二氧化碳捕集、利用与封存(CCUS)报告(2019)》, 华宝证券研究创新部

但值得关注的是, 从全生命周期的角度上看, 不同碳利用技术的碳减排效益是不同的。在衡量碳利用技术的减碳效应时应使用全生命周期的视角去进行计量计算, 需要关注以下几点: 1) 在于在碳利用技术中是否是使用 CO₂ 替代了原有的高碳原料, 替代了多少; 2) 利用的 CO₂ 的来源是什么; 3) 在生产过程中的能耗情况; 4) 碳在最终产品中保留的量以及保留的时间, 永久保留比临时保留会带来更大的气候效益, 大部分碳利用技术产成品中的碳(除了合成建筑材料和 EOR) 最终依旧以 CO₂ 的形式被释放到大气中。

2.4. 碳封存技术: 我国碳封存潜力较大, 陆上咸水层封存已完成项目示范

碳封存技术指将捕集的 CO₂ 注入于特定地质构造中, 从而进行封存、实现与大气长期隔绝的技术过程。按照封存地质体及地理特点, 可将其分为陆上咸水层封存、海底咸水层封存、枯竭油气田封存等技术。其中, 陆上咸水层封存、海底咸水层封存均是利用海水中中和咸水层中丰富的钙、镁等离子和 CO₂ 生成固态物质而实现封存。

制约我国碳封存技术发展的因素不是碳封存潜力, 而是该技术在长期安全性和可靠性存在一定风险, 且对于企业来说选择合适的封存地点存在一定困难。当前, 全球陆上理论封存容量为 6-42 万亿吨, 海底理论封存容量为 2-13 万亿吨; 我国已完成了全国范围内 CO₂ 理论封存潜力评估, 陆上地质利用与封存技术的理论总容量为万亿 t 以上, 总理论地质封存潜力约为 1.21-4.13 万亿吨, 容量较高, 主要空间类型为深部咸水层。据麦肯锡研究, 陆上咸水层封存总容量是 CCUS 总需求量的 50-70 倍, 作为 CCUS 的最后选项, 长期潜力较大, 因此我国碳封存潜力不是限制碳封存技术发展的原因; 但关于高浓度 CO₂ 封存的法规和申报流程较为复杂, 且需考虑地质构造的稳定性(并不是所有已验证的具备封存容量的地质结构最终均可顺利实现封存, 仍需花费时间和成本进一步勘探和评估), 否则可能出现碳泄漏的问题。

表 12: 主要国家及地区 CCUS 地质封存潜力与 CO2 排放

国家地区	理论封存容量 (百亿吨)	2019 年排放量 (亿吨/年)
中国	121-413	98
亚洲 (除中国)	49-55	74
北美	230-2153	60
欧洲	50	41
澳大利亚	22-41	4

资料来源:《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)》, 华宝证券研究创新部整理

碳封存技术不产生附加经济效益, 且存在前期勘探成本和后期监测成本, 因此相对成本较高。基于当前技术水平并考虑关井后 20 年的监测费用, 陆上咸水层封存成本约为 60 元/tCO₂, 海底咸水层封存成本约为 300 元/tCO₂, 枯竭油气田封存成本约为 50 元/tCO₂, 以上成本均未考虑前期勘探成本。对于企业来说, 碳封存技术成本较高, 且不具备附带经济价值, 需要政策激励。

从技术发展阶段上看, 我国陆上咸水层已完成项目示范, 进展相对较快。我国陆上咸水层封存技术已完成了 10 万 t/年规模的示范, 即国家能源集团的鄂尔多斯 10 万吨/年的 CO₂ 咸水层封存项目, 此项目已于 2015 年完成 30 万吨注入目标、停止注入; 国家能源集团另一个项目国华锦界电厂 15 万吨/年燃烧后 CCUS 示范项目, 拟将捕集的 CO₂ 进行咸水层封存, 目前尚在建设中。此外, 其他碳封存技术已完成中试方案设计与论证。

表 13: 不同封存类型的比较

地质封存	国内发展阶段	成本 (元/t)	国内发展现状
陆上咸水层封存	示范	60	完成了 10 万 t/年规模的示范
海底咸水层封存	中试	300	中试方案设计与论证
枯竭油气田封存	中试	50	中试方案设计与论证

资料来源:《中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2021)》, 华宝证券研究创新部整理

2.5. CCUS 技术小结: 中国近几年取得了显著技术进展, 但目前仍处于研发与示范阶段

总的来说, 中国的 CCUS 各技术环节均取得了显著进展, 但目前大部分技术仍处于工业示范及以下水平, 少部分技术已经具备商业化应用潜力。分环节来看, 我国碳捕集、碳运输技术发展相对较快, 但碳利用、碳封存技术发展相对较慢。与国外比较来看, 大部分技术发展阶段已与国外持平。

碳捕集技术: 碳捕集技术是发展 CCUS 技术中最为关键的部分, 是 CCUS 整个流程中成本和能耗的最大来源。发展阶段上看, 目前不同分类下的燃烧后捕集技术、化学吸收法以及第一代技术分别是同维度比较下发展最为成熟的。大部分中国 CCUS 项目均使用燃烧后或燃烧前捕集技术。

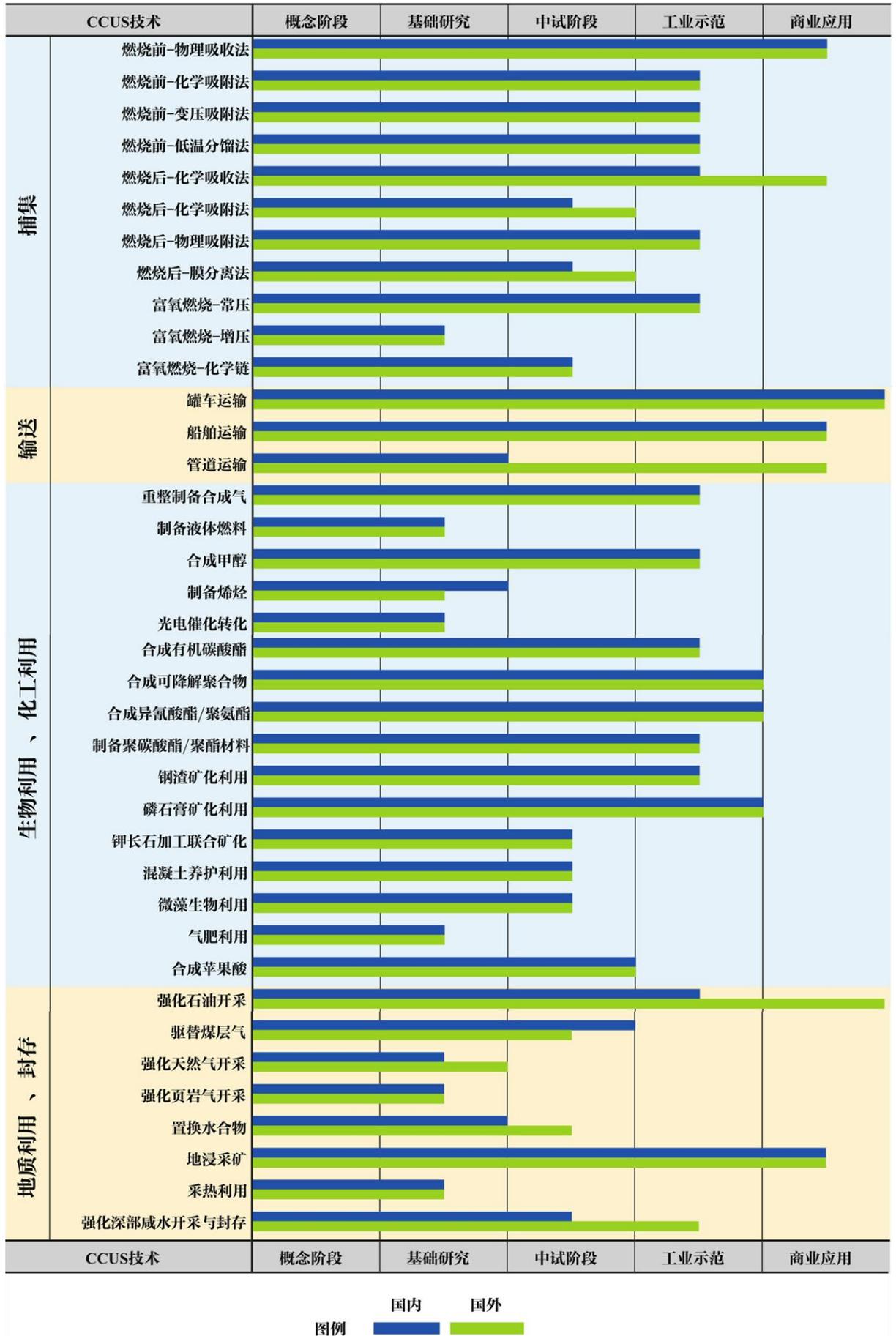
碳运输技术: 在大多数情况下, 运输成本远低于 CCUS 项目总成本的四分之一, 运输距离和二氧化碳流量是影响碳运输成本的主要因素。从技术与项目实际情况上看, 中国的罐车运输和船舶运输技术已达到商业应用阶段, 管道运输技术在中国尚处于中试阶段, 但已

具备大规模管道设计能力，海底管道运输技术仍处于研究阶段。

碳利用技术：碳利用技术可以给CCUS带来附加的经济效益，因此我国70%以上的CCUS项目捕获的二氧化碳都进行了利用，其中60%以上均为地质利用。目前我国在部分碳利用技术上形成一定规模，尤其是地质利用方面，从经济效益上看，生物利用单吨CO₂产出效益最高。但值得关注的是，在全生命周期的角度看不同碳利用技术的碳减排效益是不同的。

碳封存技术：碳封存潜力不是制约我国碳封存技术发展的原因，但该技术在长期安全性和可靠性存在一定风险，且对于企业来说选择合适的封存地点存在一定困难。该技术不产生附带经济效益，且存在前期勘探成本和后期监测成本，因此相对成本较高。从技术发展阶段上看，我国陆上咸水层已完成项目示范，进展相对较快。

图 24: CCUS 技术类型及发展阶段 (中国 vs 国外)



资料来源: 中国 21 世纪议程管理中心 (2021), 华宝证券研究创新部

3. CCUS 未来发展展望：2050 年中国市场规模或将超过 3300 亿元

全球范围内，CCUS 技术已进入新的早期商业化的发展阶段。首先，新的 CCUS 商业模式已经出现，CCUS 项目从专注开发大型独立设施的转向开发具有共享 CO₂ 运输和存储能力的工业集群基础设施（侧重运输和存储服务），新的商业模式可带来规模经济效益并将降低项目的商业风险。目前，全球有近 40 个工业集群正在开发中，其中一半在欧洲。其次，投资环境有所改善，除了美国、欧盟等地针对性的 CCUS 技术支持政策外，当前欧盟碳价的持续走高也将使得 CCUS 技术更快地具有相对经济性。最后，各国纷纷发布碳中和目标，使得 CCUS 技术成为未来净零排放的必须选择，在各国提交给《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC) 的长期低排放发展战略中，约有 80% 的国家认识到 CCUS 技术的作用，IEA 在 2050 零碳情景中预测在 2050 年 CCUS 技术下的碳捕集规模可达到 76 亿吨/年，相比 2020 年全球 4000 万吨/年的碳捕集规模将增长 190 倍。

部分公司对全球 CCUS 市场规模有进行预测，规模有望超过 2 万亿美元/年。三菱重工预测到 2050 年，全球碳捕集设备市场将成为 2.4 万亿欧元/年的市场。埃克森美孚预计，到 2040 年 CCUS 的潜在市场规模将达到 2 万亿美元/年，平均年增长率为 35%。

在 2050 年中国 CCUS 市场规模预计超过 3300 亿元/年，2020-2025 年平均年化增长率或将超过 100%。根据《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图(2019)》的规划，随着成本降低、技术进步、政策激励，CCUS 技术在 2025 年产值规模超过 200 亿元/年，到 2050 年超过 3300 亿元/年，按保守情形估计 2025-2050 年平均年增长率为 11.87%。根据彭博新能源财经数据，2020 年 CCUS 市场规模约为 30 亿元，而当前中国年均碳捕集能力为 300 万吨(占全球捕集规模的 7.5%)，预估 2020 年中国 CCUS 市场规模为 2.25 亿元，则可推算出 2020-2025 年 CCUS 市场规模年均增长率为 145.34%，且按保守情形估计 2020-2050 年 CCUS 市场规模年均增长率为 27.51%。

表 14：我国 CCUS 未来发展路径

	类别	单位	2025 年	2030 年	2035 年	2040 年	2050 年
发展目标	CO ₂ 利用封存量	万吨/年	900	>2000	>7000	>20000	>80000
	产值	亿元/年	200	>600	>1000	>1800	>3300
捕获	单体规模	万吨/年	100	100-300	300-500	300-500	300-500
	成本-高浓度 (>70%)	元/吨 CO ₂	100-180	90-130	70-80	50-70	30-50
	成本-高浓度 (<35%)	元/吨 CO ₂	230-310	190-280	160-220	100-180	80-150
输送	成本	元/吨·Km	0.8	0.7	0.6	0.55	0.45
地质利用	CO ₂ 利用量	万吨/年	300	>700	>1500	>3000	>5500
	产值	亿元/年	30	>60	>100	>200	>300
化工利用	CO ₂ 利用量	万吨/年	500	>1000	>2000	>4000	>6000
	产值	亿元/年	90	>200	>450	>1000	>1500
生物利用	CO ₂ 利用量	万吨/年	40	>150	>200	>300	>900
	产值	亿元/年	90	>300	>400	>600	>1500
地质封存	封存量	万吨/年	100	>300	>3000	>15000	>70000

存	成本	元/吨 CO2	50-60	40-50	35-40	30-35	25-30
---	----	---------	-------	-------	-------	-------	-------

资料来源：《中国碳捕集利用与封存技术发展路线图（2019版）》，华宝证券研究创新部整理

4. 投资建议

尽管当前 CCUS 技术尚未大规模进行商业化，但鉴于未来发展空间较大，值得关注较早布局相关技术的企业，尤其是碳捕集技术和碳利用技术或设备的提供者。根据国外情况，碳捕集、碳利用相关技术设备是当前创投资金关注重点，主要原因在于碳捕集技术成本占整个 CCUS 项目成本的一半以上，而碳利用技术附带经济效益（尤其是 CO2 的生物利用中单吨 CO2 的经济效益最高），这两项技术的革新将极大提高 CCUS 项目的经济性。国外相关案例包括：2021 年 3 月，淡马锡领投了 Svante 公司的 D 轮融资（7500 万美元规模），Svante 公司是一家加拿大固体吸附剂技术开发商，后续资金主要用于发展物理吸附的燃烧后碳捕集技术发展（成本较低），助力水泥行业减排；2021 年初，亚马逊的气候促进基金投资碳利用技术提供者 CarbonCure Technologies 公司，主要是矿化利用制备新型建筑材料，在提高建筑材料强度的同时可封存 CO2，该公司的技术还获得了 2021 年的 XPRIZE 碳去除专项奖（埃隆·马斯克创设）；同样在 2021 年，雪佛龙对美国圣何塞 Blue Planet Systems 公司进行了 C 轮融资且已宣布将持续投资该公司，Blue Planet Systems 是一家从事碳酸盐聚合物制造（碳利用）和碳捕集技术开发的初创公司，旨在降低工业运营中的碳强度。但由于碳利用技术碳减排效益的不确定性较强，因此需紧密跟踪对于碳利用技术全生命周期碳排放计量以及标准的政策情况。

随着全国碳市场逐渐成熟并结合碳价长期看涨的趋势，可关注受益于碳市场的相关标的。CCUS 技术作为减排技术，未来有可能被纳入 CCER 等碳减排市场。跟据中国石油勘探开发研究院，中石油在地质利用方面的 CCUS 碳减排量核算方法学取得重要突破，并于 2021 年 12 月 9 日已通过业内专家咨询审查，确定该方法学已经完成了主要核心内容研制。这表明未来进行 CCUS 项目运营的企业（例如石化企业）或将通过 CCER 来获取额外收益，当前投资 CCUS 项目的主要是大型国企。

表 15：相关标的梳理

领域	相关企业
碳捕集技术或设备	冰轮环境、远达环保、蓝晓科技、杭锅股份、昊华科技、杭氧股份、惠博普、冰山冷热、双良节能、华光环能、陕鼓动力、雪人股份
碳利用技术或设备	中国化学、凯美特气、万华化学、宝丰能源
CCUS 项目投资及运营	中石化、中石油、中海油、广汇能源、大唐发电、华能国际、中国神华
CCUS 项目 EPC 建设	石化油服、中国能建、中海油服

资料来源：公司公告，华宝证券研究创新部整理

5. 风险提示

CCUS 政策推进力度不及预期，碳交易市场建设进度不及预期，CCUS 技术进展不及预期，CCUS 投资不及预期，CCUS 技术存在安全事故与环境风险，原油价格下跌风险，碳价下跌风险。

风险提示及免责声明

- ★ 华宝证券股份有限公司具有证券投资咨询业务资格。
- ★ 市场有风险，投资须谨慎。
- ★ 本报告所载的信息均来源于已公开信息，但本公司对这些信息的准确性及完整性不作任何保证。
- ★ 本报告所载的任何建议、意见及推测仅反映本公司于本报告发布当日的独立判断。本公司不保证本报告所载的信息于本报告发布后不会发生任何更新，也不保证本公司做出的任何建议、意见及推测不会发生变化。
- ★ 在任何情况下，本报告所载的信息或所做出的任何建议、意见及推测并不构成所述证券买卖的出价或询价，也不构成对所述金融产品、产品发行或管理人作出任何形式的保证。在任何情况下，本公司不就本报告中的任何内容对任何投资做出任何形式的承诺或担保。投资者应自行决策，自担投资风险。
- ★ 本公司秉承公平原则对待投资者，但不排除本报告被他人非法转载、不当宣传、片面解读的可能，请投资者审慎识别、谨防上当受骗。
- ★ 本报告版权归本公司所有。未经本公司事先书面授权，任何组织或个人不得对本报告进行任何形式的发布、转载、复制。如合法引用、刊发，须注明本公司出处，且不得对本报告进行有悖原意的删节和修改。
- ★ 本报告对基金产品的研究分析不应被视为对所述基金产品的评价结果，本报告对所述基金产品的客观数据展示不应被视为对其排名打分的依据。任何个人或机构不得将我方基金产品研究成果作为基金产品评价结果予以公开宣传或不当引用。

适当性申明

- ★ 根据证券投资者适当性管理有关法规，该研究报告仅适合专业机构投资者及与我司签订咨询服务协议的普通投资者，若您为非专业投资者及未与我司签订咨询服务协议的投资者，请勿阅读、转载本报告。