



中国水泥行业 CCUS 技术应用展望及 企业实践案例





关于落基山研究所 (RMI)

落基山研究所 (Rocky Mountain Institute, RMI) 成立于 1982 年，是一家立足市场、独立运作的专业智库，致力于通过经济可行的市场化解决方案推动全球能源转型，构建繁荣、韧性、清洁的低碳未来。落基山研究所与企业、政策制定者、科研机构、创业者及跨领域伙伴广泛协作，推动战略性投资，以扩大清洁能源解决方案的规模化部署、减少能源浪费、并提升可负担清洁能源的可及性，在保障能源安全和经济效益的同时，携手共创可持续的美好愿景。目前，落基山研究所的研究和实践已覆盖全球 50 余个国家和地区。



关于中国建筑材料联合会

中国建筑材料联合会是我国建材行业唯一的全国性、综合性权威社团组织，被民政部授予“全国先进社会组织”和“AAAAA级全国性社会团体”称号。现有会员1500多家，由建筑材料行业制造、研发、流通、教育、规划、标准、检测、认证、展贸、传媒以及建筑、建设等各个领域企事业单位组成。在中央社会工作部领导下，中国建筑材料联合会以“服务会员、服务行业、服务国家、服务社会”为己任，搭建政府与行业、企业之间的桥梁和纽带，以“宜业尚品、造福人类”为目标，助力行业、企业实现生态化、数字化、智能化、国际化、现代化，实现绿色低碳、安全高质量发展。

作者与鸣谢

作者

RMI

郭凯迪

李婷

李威

潘韵竹

王萌

其他作者

中国建筑材料联合会

沈玉露

李月梅

张瀚文

李敏

作者按姓名拼音顺序排列。

联系方式

李威, wli@rmi.org

郭凯迪, kaidi.guo@rmi.org

引用建议

落基山研究所, 中国建筑材料联合会, 中国水泥行业 CCUS 技术应用展望及企业实践案例, 2026,

<https://rmi.org.cn/insights/china-ccus-outlook-and-case-studies/>

RMI 重视合作, 旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此, 我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

除特别注明, 本报告中所有图片均来自 iStock。

鸣谢

本报告作者特别感谢以下专家对报告撰写提供的洞见与建议:

代中元 中国建材装备集团有限公司
姜雨生 金隅冀东水泥集团股份有限公司
路舒童 落基山研究所
彭学平 天津水泥工业设计研究院有限公司
王新春 建筑材料工业技术情报研究所
杨晓亮 全球碳捕集与封存研究院有限公司

特别感谢汇丰中国和北京市企业家环保基金会对本报告的支持。

目录

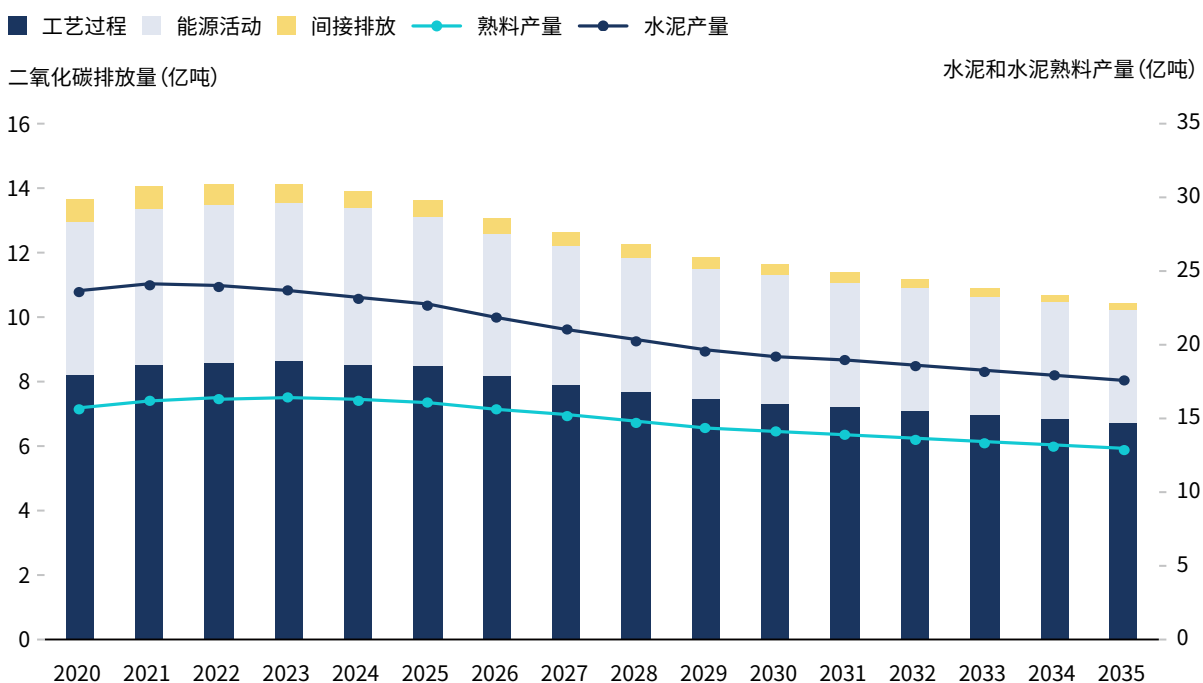
1、水泥行业深度减排视角下的碳捕集利用与封存技术.....	5
2、中国水泥行业 CCUS 技术应用现状与案例	8
2.1 中国水泥行业 CCUS 技术应用概况.....	8
2.2 金隅北水环保科技发展有限公司 CCUS 示范项目.....	10
2.3 青州中联水泥有限公司全氧燃烧碳捕集示范项目	11
3、CCUS 的经济性和投融资分析	13
3.1 水泥行业应用 CCUS 的成本分析	13
3.2 水泥行业 CCUS 投融资分析	15
4、中国水泥行业 CCUS 技术应用展望	18
参考文献	21

1、水泥行业深度减排视角下的碳捕集利用与封存技术

水泥工业是全球人为二氧化碳（CO₂）排放的主要源头之一。根据国际能源署与全球碳计划的数据，该行业 2019 年度 CO₂ 排放量约在 24 亿吨¹，约占全球人为 CO₂ 总排放量的 5.69%²。尽管 2025 年由于全球建筑活动放缓，行业总排放量略有波动，但其排放总量仍处于工业体系的高位。

自 1985 年以来，中国一直是全球最大的水泥生产和消费国。2014 年中国水泥产量达到了历史性高点约 24.8 亿吨³，占全球总产量的近 60%，其后至 2022 年主要稳定在 22–24 亿吨水平⁴。2023 年以来水泥产量进入下降通道，2025 年仅为 16.93 亿吨，低于 2010 年水平。目前中国水泥产量约占世界总产量的 45% 左右，仍在全球生产版图中占有重要地位。同时水泥行业也是中国二氧化碳排放的重点行业之一。2020 年，中国水泥行业二氧化碳排放总量约为 13.7 亿吨，水泥熟料直接排放约 13 亿吨，其中工艺过程约 8.3 亿吨，能源活动排放约 4.7 亿吨⁴（图表 1）。

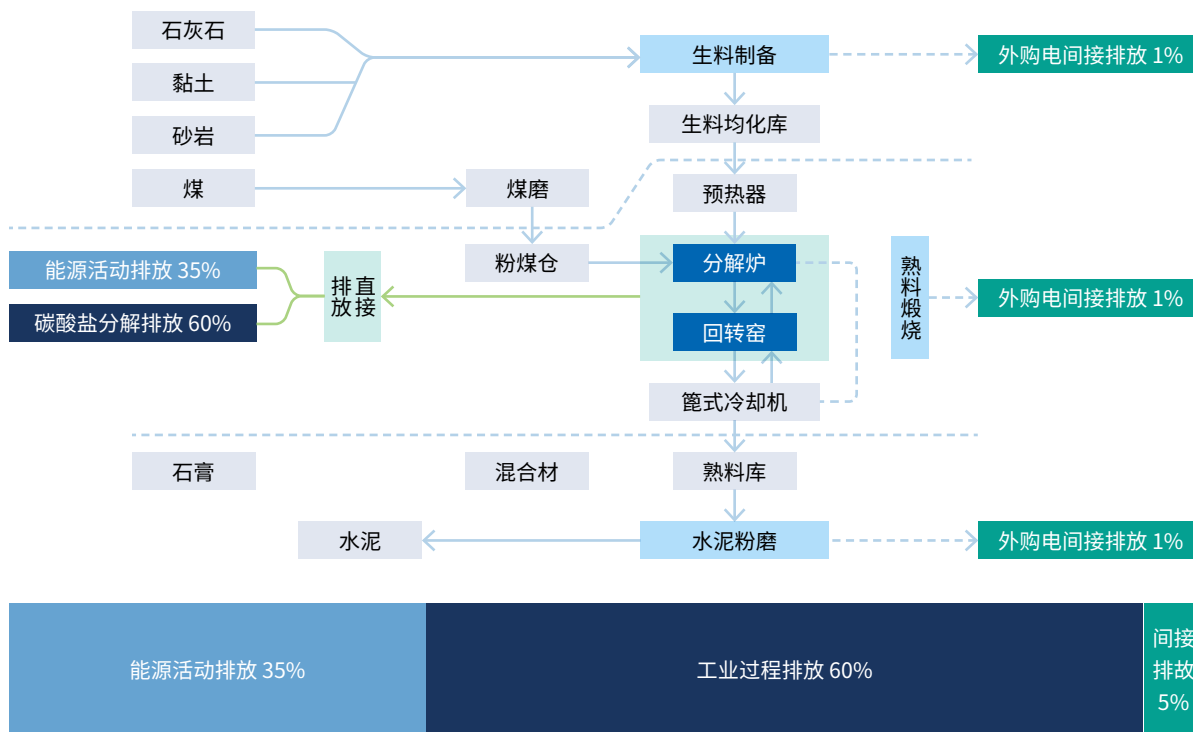
图表 1 2020–2035 年中国水泥产量与行业二氧化碳排放情况（含预测）



来源：中国水泥协会、中国建筑材料科学研究总院有限公司与生态环境部环境规划院

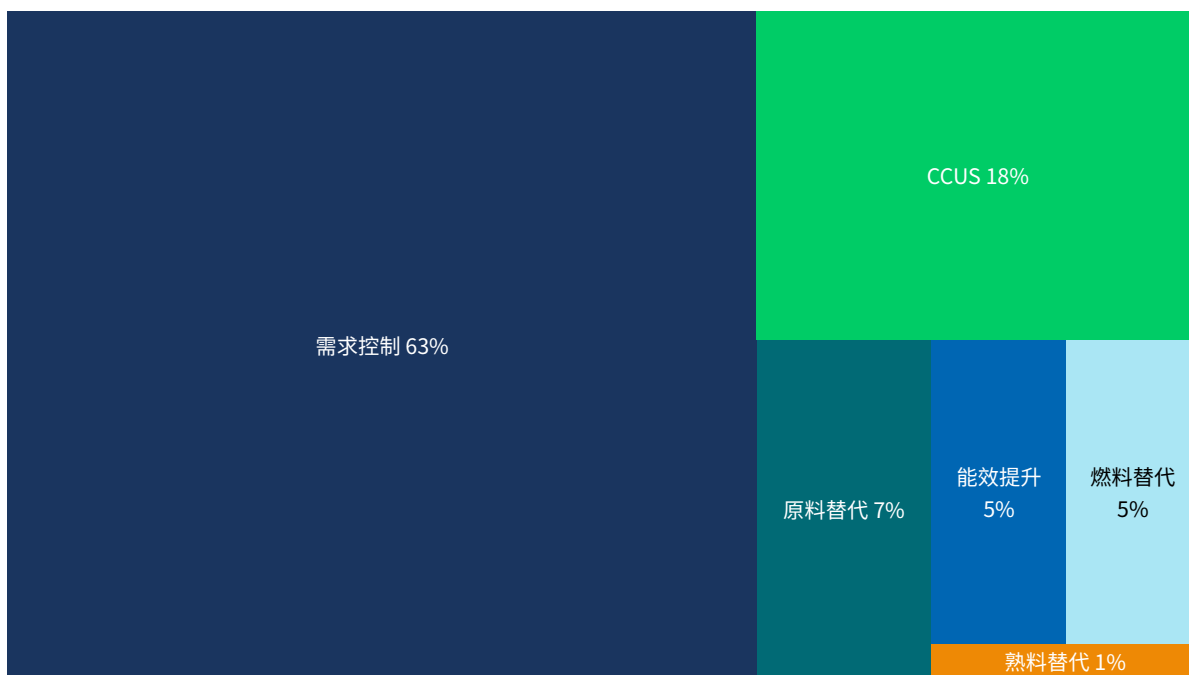
水泥行业因熟料生产中石灰石热分解固有的化学特性，被工业脱碳中视为最具挑战性的行业之一。由于水泥行业约 60% 的排放源于工业过程排放——在无法大规模改变水泥生产工艺的前提下，即使完全采用可再生能源可解决约 35% 的排放，结构性的工艺排放底线依然存在（图表 2）。因此，在水泥的深度减排路径中，除了燃料替代、能效提升、降低熟料系数外，碳捕集利用与封存技术（后简称为“CCUS”，并以“CCS”代称碳捕集与封存，“CCU”代称碳捕集与利用）被视为处理剩余 CO₂ 排放的必需手段。据 RMI 估算，对中国水泥行业而言，在 2060 年实现碳中和的情景下，CCUS 技术对水泥行业碳中和的贡献率约为 18%（图表 3）⁵。

图表 2 水泥行业二氧化碳主要排放环节（2020 年）



来源：RMI 与中国水泥协会

图表 3 中国水泥行业碳中和情景下不同减排措施的潜力占比



来源：RMI 分析

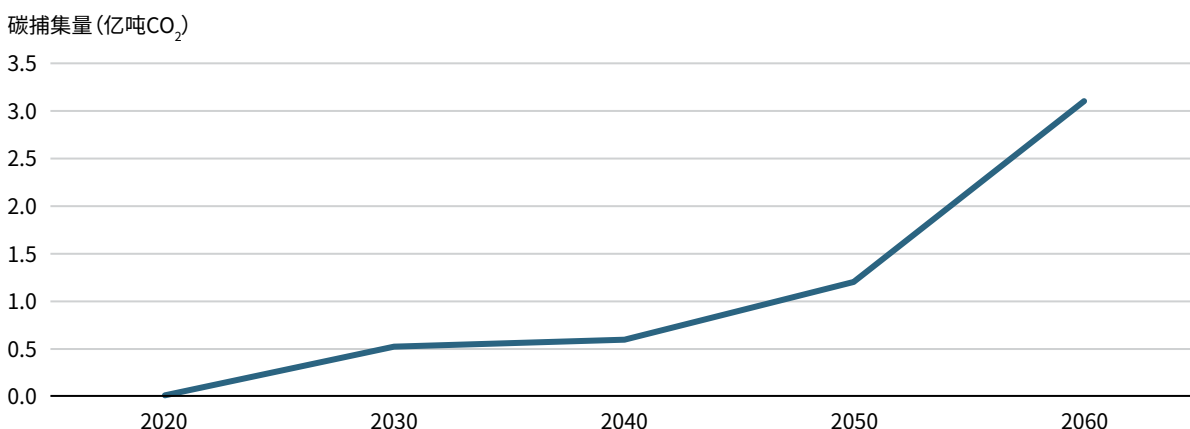
当前全球水泥 CCUS 技术已从试点阶段进入商业集成阶段。在欧盟碳排放交易体系碳价格压力的驱动下，欧洲龙头企业依托专业分工和共享基础设施形成了碳捕集与封存的价值链。海德堡 (Heidelberg) 在挪威布雷维克 (Brevik) 的碳捕集项目作为全球水泥行业首个工业化规模的 CCS 项目，每年捕获约 40 万吨二氧化碳，并支撑其碳捕集水泥 evoZero 的供应⁶。北美地区在美国 45Q 税收抵免政策的推动下，一系列聚焦地质封存的项目正在中西部和墨西哥湾等区域加速推进，例如 CEMEX 公司斥资约 500 万美元位于新布朗费尔斯 (New Braunfels) 的水泥厂进行碳捕集的可行性研究⁷。截至 2024 年，全球共有 50 个商业 CCS 项目正在运营，另有 44 个正在建设中，还有 500 多个处于开发阶段⁸。展望长期发展，IEA 在 NZE 情境下提出，2030 年全球 CCUS 能力需实现约 16.7 亿吨，2050 年需进一步增加到约 76 亿吨⁹。

中国水泥和建材行业也充分意识到 CCUS 技术的战略意义，已经从试点项目阶段进入政策与标准推广阶段。

- 在行业顶层规划层面，由工业和信息化部等四部门联合发布的《建材行业碳达峰实施方案》明确提出要加大对碳捕集、矿化利用、封存等技术的研发力度，并支持开展全流程、集成化、规模化的示范项目建设。
- 2026 年 1 月，生态环境部办公厅印发《关于做好 2026 年全国碳排放权交易市场有关工作的通知》，正式将水泥行业纳入全国碳排放权交易市场管理。由碳市场带动的碳成本显性化将直接增强水泥企业应用 CCUS 技术实现深度减排的经济动机。
- 2026 年 1 月，国家市场监督管理总局批准发布了 12 项 CCUS 国家标准，覆盖了二氧化碳捕集、输送、封存等全链条关键环节。《二氧化碳捕集、运输和地质封存词汇共性术语》(GB/T 47872—2025) 等基础性标准系统建立了关键术语和温室气体减排量的核算边界、流程与方法。《二氧化碳捕集、运输和地质封存》(GB/T 46878—2025) 等标准明确了封存场地筛选、封存量评价、注入作业方案设计等要求。
- 地方性政策的支持力度也在同步增强。在安徽、浙江、山东等水泥产能集中省份，政府通过设立绿色低碳转型专项资金，对水泥行业 CCS 示范工程给予直接补贴或贷款贴息。2026 年 3 月，北京市经济和信息化局等四部门联合印发《北京市关于推动碳捕集利用与封存产业培育壮大的若干措施》，明确鼓励北京市 CCUS 企业在京津冀区域水泥等重点行业建设大规模、全流程示范应用工程。

按照 RMI 与中国水泥协会的分析，到 2050 年，随着技术进步与规模化发展，水泥行业的碳捕集成本 (吨 CO₂) 将下降 40% 左右，到 2060 年预计达到每年 3.1 亿吨的捕集量 (图表 4)。近期 (现在 -2030 年) 是早期 CCUS 项目开发和示范阶段，实现约 5% 的水泥碳排放使用 CCUS 捕集；中期 (2030-2040 年) 是 CCUS 技术进一步成熟、降本与早期商业化阶段，预计能捕集约 10% 的水泥碳排放；远期 (2040 之后) CCUS 体现出较强经济性，水泥行业将能捕集 30% 以上的 CO₂，在 2050-2060 的快速商业化推广后，水泥行业产生的 90% 的 CO₂ 可以被捕集，推动行业的净排放接近于零。

图表 4 中国水泥行业碳捕集量



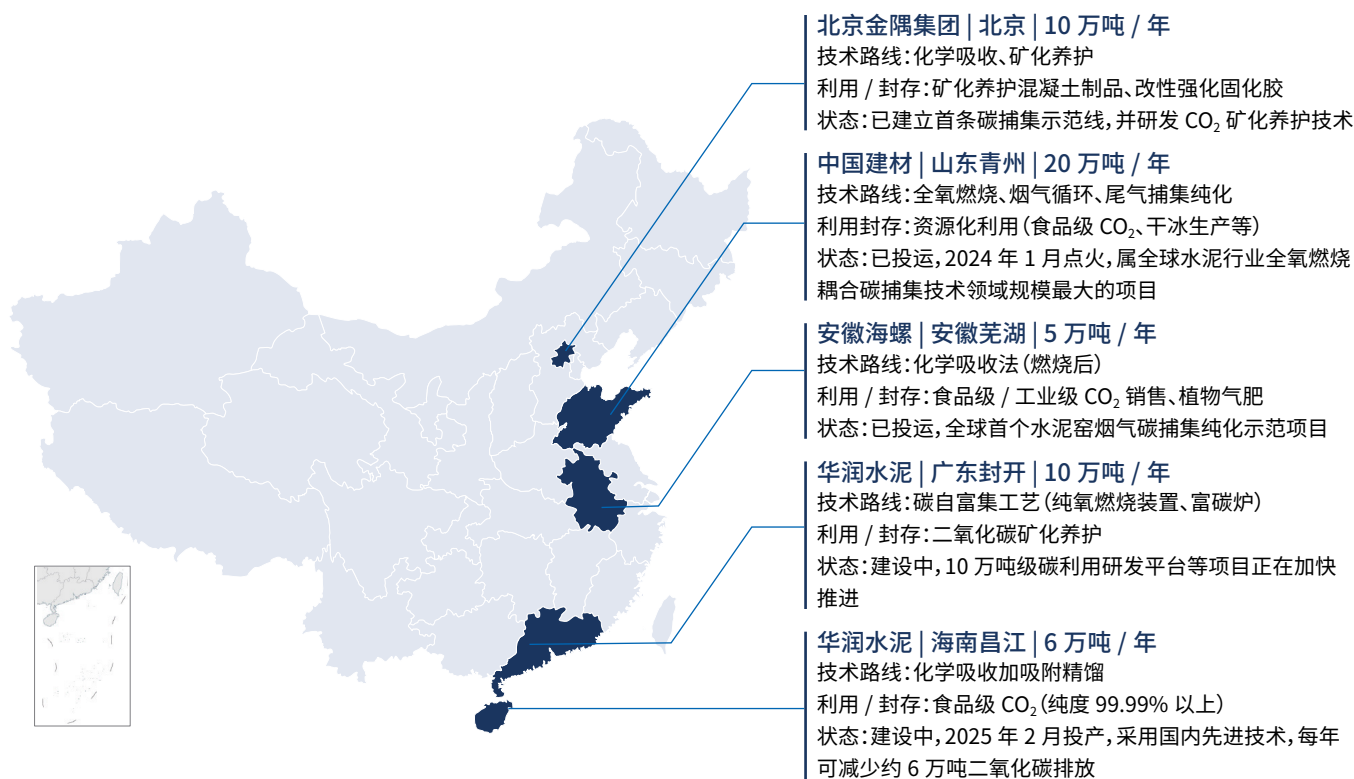
来源：RMI 分析

2、中国水泥行业 CCUS 技术应用现状与案例

2.1 中国水泥行业 CCUS 技术应用概况

中国水泥行业 CCUS 发展进入了示范项目和早期商业化投产阶段。目前水泥行业在运营中的碳捕集设备共有 5 条，年捕集能力合计约 51 万吨（图表 5）。中国建材在山东青州的项目采用全氧燃烧耦合低能耗碳捕集技术，年捕集能力达 20 万吨二氧化碳，用于提高石油采收率、焊接及生态农业等领域¹⁰。安徽海螺在白龙山工厂利用化学吸收技术每年捕集 5 万吨二氧化碳，应用于焊接、食品保鲜、干冰生产、激光、医药、植物气肥等领域¹¹。华润水泥在广东封开每年捕集 10 万吨二氧化碳，用于生产建筑用碳酸化合成骨料¹²。

图表 5 中国大陆水泥 CCUS 项目分布图



来源: RMI 根据公开资料制图

在技术层面, 中国水泥行业的碳捕集技术涵盖从商业应用到基础研究的多阶段技术体系。目前, 燃烧前捕集和液体化学吸收技术是商业应用阶段的主流, 其中液体化学吸收技术因适用性高且技术成熟, 成为终端治理的重要方案, 但需进一步解决捕集能耗和成本高的难题; 而燃烧前捕集虽已进入商业应用, 但受限于无法捕集过程排放, 应用场景有限 (图表 6)。整体来看, 中国水泥行业碳捕集技术在部分领域已与国际同步, 但在高适用性、低能耗技术的规模化应用上仍有提升空间。

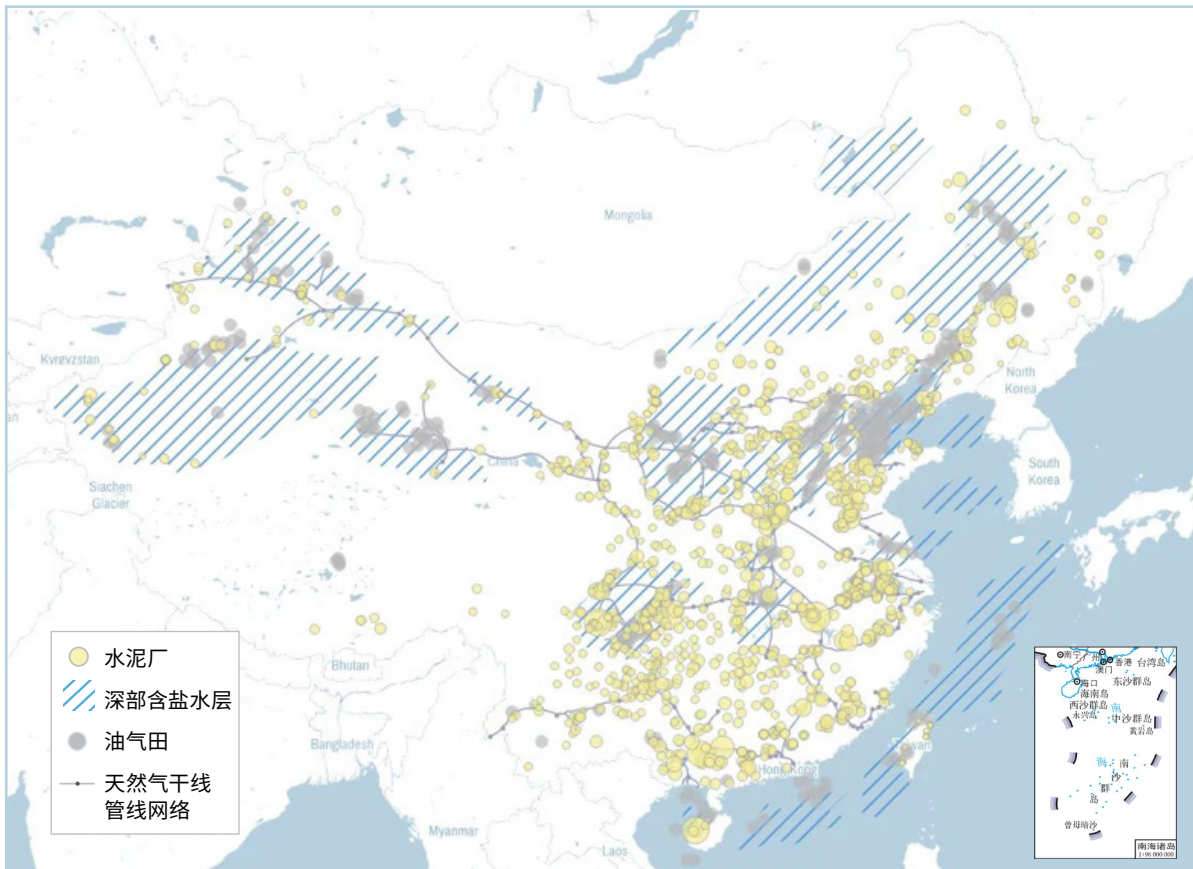
图表 6 应用于水泥行业的主要碳捕集技术对比

技术	适用性	节能评级	成本评级	优点	缺点	技术发展阶段
燃烧前捕集	4			捕集化石燃料燃烧的碳排放	无法捕集碳酸钙分解的碳排放	商业应用
化学链燃烧技术	4			捕集化石燃料燃烧的碳排放	无法捕集碳酸钙分解碳排放	中试阶段
液体化学吸收技术	8	7	10	技术成熟；装置成本低	解吸塔能耗高；运行成本高；蒸汽成本高	商业应用
分体式钙循环技术	9	8	9	失活吸收剂可作为水泥熟料生产原料；余热发电率高；电力成本为负值	反应器成本高；反应器设计难度高；解吸反应器能耗高；装置成本高	中试阶段
集成式钙循环技术	10	8	9	失活吸收剂可作为水泥熟料生产原料；装置成本低；余热发电率高；电力成本低	反应器设计难度高；解吸反应器能耗高；装置成本高	中试阶段
膜分离技术	8	10	7	占地面积小；总能耗低	气体分离膜需定期更换；辅助设备能耗高；装置成本高；电力消耗成本高；固定运行成本高；	工业示范
离子液体碳捕获技术	6			吸收剂损耗小	技术不成熟	基础研究
富氧燃烧技术	8	10	10	能耗低；装置成本较低	装置改造多	工业示范
第二代富氧燃烧技术	8	9	9	能耗低；成本低		中试阶段
物理吸收法	6			装置简单	能耗高	工业示范
吸附法	6			装置简单	能耗高；运行成本高	工业示范
LEILAC技术	9	9	9	为可持续能源在水泥熟料生产领域的应用提供了可能；成本低；能耗低；可用可持续能源替代；能耗成本低	反应器设计难度高；仅针对分解炉内的碳捕集，需与其他技术结合使用；现阶段捕集率低	中试阶段

来源：RMI 与中国水泥协会

在碳封存资源禀赋层面，中国主要拥有三类优势封存与利用资源，即深部盐水层、油气田及可改造的天然气管网。适宜 CO₂ 封存的盆地主要为鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、南海盆地、四川盆地、东海盆地及珠江口盆地；而水泥工业等高排放行业则集中于安徽、四川、山东等省份，空间分布呈现分散特征（图表 7）。具体而言，西北及青藏地区水泥生产线分布较少，且封存资源丰富，适宜开展 CO₂ 的有效地质封存；渤海湾盆地与鄂尔多斯盆地油气田聚集，可逐步推广 CO₂-EOR 技术以提升封存量；南方地区拥有丰富的深部含盐水层（多为海上）及海上油气田资源，除四川盆地可满足部分内陆封存需求外，未来南方沿海地区应重点依托海上深部含盐水层及油气田开展 CO₂ 封存。

图表 7 中国主要区域水泥厂分布及其与碳封存地及可利用设施



来源：RMI 与中国水泥协会

2.2 金隅北水环保科技发展有限公司 CCUS 示范项目

2.2.1 项目概况与实施路线

金隅北水环保科技发展有限公司隶属于金隅冀东水泥集团，是集水泥生产与城市危废协同处置于一体的综合性环保企业。为响应北京市及国家“双碳”战略，公司于 2022 年启动了 CCUS 示范项目。该项目旨在攻克水泥窑协同处置危废时复杂烟气的二氧化碳捕集技术难题，打造具备行业迁移价值的示范平台。项目分步实施，首先依托厂内已有的小型实验装置（年产 1500 吨）进行技术验证，后建成万吨级工业示范线，为后续在集团内乃至行业内推广技术路径、对接碳市场机制奠定基础。

2.2.2 技术路径与工艺流程

项目核心技术路线为燃烧后化学吸收法。针对危废处置产生的复杂烟气（含氮氧化物、硫氧化物、重金属及有机物），工艺着重强化预处理环节，采用了除尘、脱硫等装置先行净化。在吸收阶段，通过研发新型吸收剂和采用贫富液换热等节能设计，优化能耗。在提纯环节，对精馏工艺进行重点攻关，确保液态二氧化碳纯度达到 99.99% 以上。同时，项目创新性地配置了尾气回收系统，将液态二氧化碳制取干冰的转化效率从行业平均的 36% 大幅提升至约 80%，显著减少了资源损失。系统整体捕集能耗约为 265 千瓦时 / 吨二氧化碳。

2.2.3 经济性与政策支持

项目总投资约 2-3 亿元人民币，获得了包括 1.25 亿元绿色贷款在内的金融支持，并得到国家发改委和北京市政府提供的约 3000 万元专项补贴。在运营成本上，主要依赖水泥窑余热作为热源以降低能耗。目前，液体二氧化碳产品成本约 500 元 / 吨，干冰成本约 900 元 / 吨，产品市场售价基本覆盖运营成本。项目经济性高度依赖于产能规模，随着未来产能提升，单位成本有进一步下降空间。

2.2.4 减排成效与未来规划

该示范项目具备年捕集、利用约 10 万吨二氧化碳的能力，约占该厂水泥窑总排放量的七分之一。捕集的二氧化碳主要用于生产食品级液体二氧化碳、干冰，并积极探索在农业肥料、蔬菜碳源等领域的应用。目前，项目暂无二期扩建计划，主要制约因素在于厂区用地限制以及北京地区缺乏地质封存条件，导致二氧化碳的规模化消纳路径仍需进一步开拓。

2.2.5 存在的问题与挑战

项目面临的核心挑战在于商业模式的可持续性。首先，北京地区缺乏油田等大规模地质封存场地，使项目长期局限于成本敏感、市场容量有限的化工和食品级利用场景。其次，复杂烟气的预处理虽具技术示范价值，但也增加了系统投资与运营成本。最后，当前碳市场机制尚不完善，项目产生的减排效益未能有效转化为碳资产收益，影响了项目的整体投资回报。

2.3 青州中联水泥有限公司全氧燃烧碳捕集示范项目

2.3.1 项目概况与实施路线

青州中联水泥有限公司是中国建材集团旗下企业，依托其 6000 吨 / 日水泥熟料生产线，建设了水泥行业国内规模最大、全球首套全氧燃烧耦合低能耗碳捕集示范工程。项目于 2021 年启动，被列为行业“揭榜挂帅”重大科技攻关项目，旨在突破传统碳捕集能耗及成本高的瓶颈。项目技术路线清晰，经历了 2022 年的技术设计及中试验证、2023 年开工建设，于 2024 年建成投产并进入试运行，同年通过专家评定，结论为达到国际领先水平，实现了从技术攻关到工程示范的快速落地。

2.3.2 技术路径与工艺流程

项目采用“全氧燃烧耦合低能耗碳捕集”这一国际前沿的技术路径。其核心创新在于，以高浓度氧气完全替代空气作为水泥窑的助燃气体，从根本上消除了氮气的稀释效应，使预热器出口烟气中的二氧化碳干基浓度从常规的 20-30% 大幅提升至 80% 以上。高浓度烟气为后续采用低能耗的物理吸附法（变压吸附提浓、变温吸附净化与低温精馏液化组合工艺）创造了有利条件。该技术成功攻克了全氧环境下火焰温度高、炉膛易烧损及生料高效分解等工程难题，最终将预热器出口烟气温度历史性降低至 200℃ 以下，单位液态二氧化碳产品的综合捕集能耗降至约 1.60 吉焦 / 吨，较传统化学吸收法降低 40% 以上。

2.3.3 经济性与政策支持

项目总投资约 2.83 亿元，凭借其技术创新性，入选国家级绿色低碳先进技术示范项目清单，获世界水泥协会 (WCA) 气候行动技术与工程奖。其直接生产成本较常规方法降低 20% 以上，初步实现了“技术可行”与“商业可持续”的平衡。捕集的二氧化碳被提纯至 99.95% 以上，产品线涵盖工业级、食品级二氧化碳及干冰，已成功销往化工、焊接、食品饮料等多个市场领域。

2.3.4 减排成效与未来规划

该项目是全球单线规模最大的水泥全氧燃烧碳捕集工程，具备年产 20 万吨高纯度二氧化碳的能力。未来规划较为明确：一是技术层面，筹建研发中心，攻关二氧化碳矿化建材、绿色化学品合成等低成本资源化利用技术；二是产业层面，致力于将本项目打包成“技术 + 装备 + 运维”的一站式解决方案，向行业内外输出；三是生态层面，推动构建“CCUS 产业联盟”，联合上下游探索驱油、固碳等规模化消纳路径，并积极推动相关技术纳入国家碳市场方法学，形成政策与市场双轮驱动。

2.3.5 存在的问题与挑战

项目的主要挑战在于激烈的市场竞争与下游消纳瓶颈。山东省二氧化碳产能集中，市场竞争较强，价格承压。作为工业配套项目，其产能和成本在与大型煤化工副产二氧化碳的竞争中优势偏弱。同时，尽管规划了驱油、矿化等高端消纳路径，但当前实际市场需求（特别是油田驱油）增长有限且不稳定，短期内大规模、高价值消纳通道尚未完全打通，制约了项目的规模效应和盈利潜力。

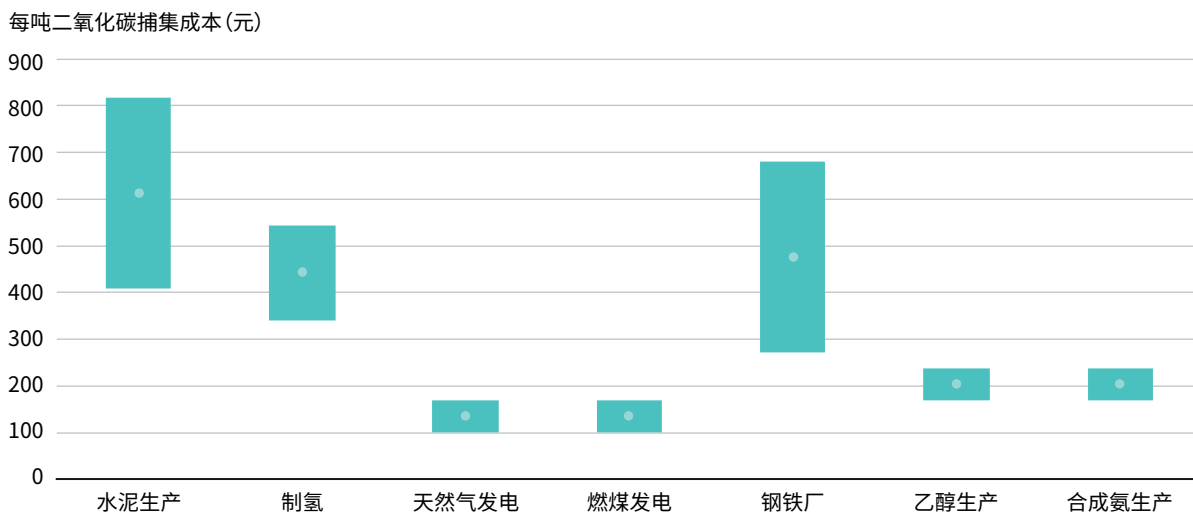
3、 CCUS 的经济性和投融资分析

3.1 水泥行业应用 CCUS 的成本分析

水泥行业企业应用 CCUS 技术的资金投入较为巨大。

- 从捕集技术的前期投资看，水泥厂的技术改造费用因路线差异巨大，通常在数千万至数亿元之间，尤其是处于早期阶段的创新型设备需要更高的研发与建设成本。
- 与其他行业相比，目前水泥行业碳捕集成本较高，吨 CO₂ 捕集成本浮动范围较大，在碳捕集应用行业中处于较高位（图表 8）¹³。水泥窑尾烟气中的 CO₂ 浓度通常约为 20%，明显低于部分高纯工业过程气流，如天然气处理的 96%–99%，或氨生产中 97%–99.95%¹³。因此，与这些高纯过程流相比，水泥行业 CO₂ 捕集通常仍面临较高的分离与系统集成成本；此外，窑系统漏风、杂质控制、可用蒸汽不足等因素也会进一步抬高工程化部署难度与运行成本。
- 随着技术迭代和产业规模扩大，水泥 CCUS 各环节成本将呈现阶梯式下降趋势。其中，富氧燃烧因其能显著提升烟气 CO₂ 浓度，从系统全生命周期来看，具有比传统技术更低的综合运行成本。虽然早期示范项目受限于空分系统及窑炉改造的高额资本投入，但其规避了传统燃烧后捕集中极高的蒸汽再生能耗成本。若充分计入蒸汽消耗，化学吸收法的现阶段直接运行成本普遍处于 300~350 元 / 吨 CO₂ 甚至更高水平。而燃烧后捕集作为水泥行业应用最广的技术，其技术成熟度在不断增强。未来，随着技术成熟与规模化效应，捕集成本有望在 2035 年降至 170–480 元 / 吨 CO₂，降幅达 30%–40%。
- CO₂ 运输成本并不只取决于运输方式本身，还受到运输规模、运输距离、源汇匹配条件以及是否建设共享管网等因素影响。总体而言，在大规模、连续稳定输送场景下，管道运输具有更明显的规模经济，单位运输成本通常低于罐车等分散运输方式；而在项目初期、运输规模较小或储存利用端尚未形成稳定需求时，罐车运输则具有投资门槛较低、部署灵活的优势。运输距离仍是影响 CCUS 经济性的关键变量，距离越长，管道建设、压缩、液化、装卸及中转等成本越容易抬升综合成本。一般而言，约 200 公里可视为源汇匹配和区域集群部署中较为合理的中短距离运输范围，但其经济性仍需结合运输规模和基础设施共享程度判断。因此，推动水泥企业与周边封存场地、利用端或工业园区形成近距离匹配，并通过集群化管网实现规模化输送，是降低 CCUS 综合成本的重要路径。据估计，2060 年，罐车和管道的运输成本将下降到 2025 年的大约一半。

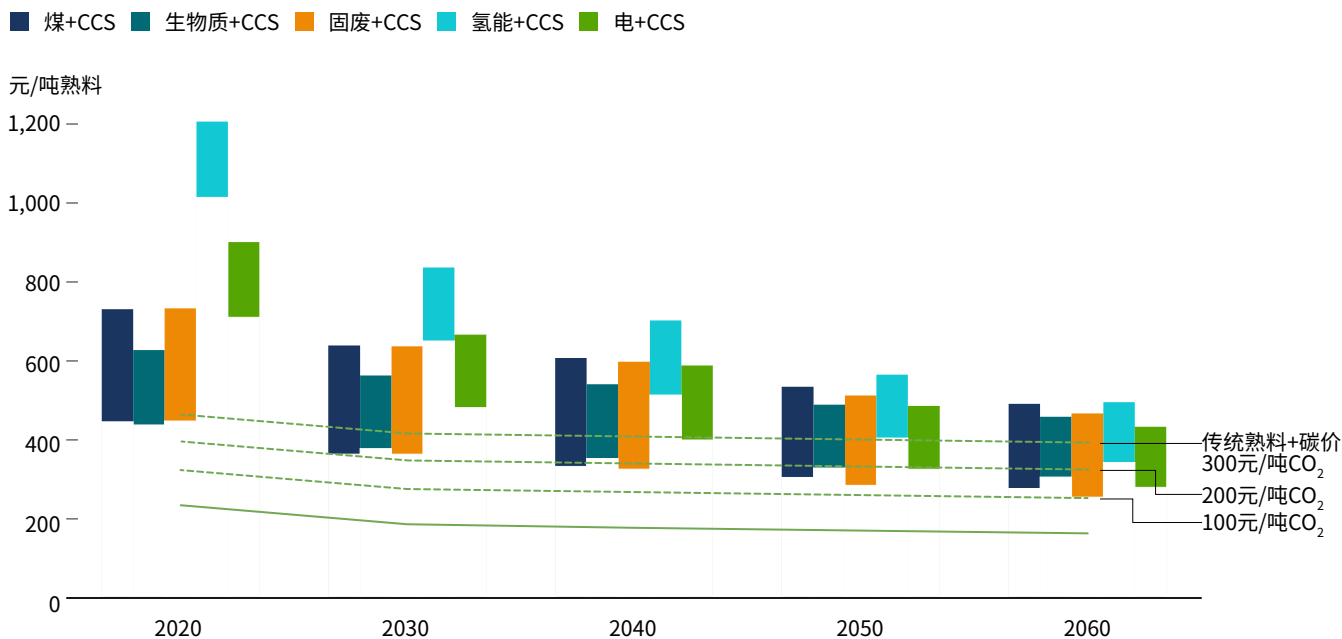
图表 8 不同行业的 CCUS 成本比较



来源：RMI 根据国际能源署（IEA）信息整理绘制

RMI 分析了由 CCS 技术生产净零碳水泥（熟料）的成本及溢价情况（图表 9）。围绕燃料和 CCS 技术的组合，RMI 预测了五种主要的净零碳水泥生产路径：煤+CCS、生物质+CCS、固废+CCS、氢能+CCS、电气化+CCS。其中，CCUS 成本对零碳水泥的最终成本影响巨大。目前，由于替代燃料及 CCUS 技术成本高昂，生产零碳水泥存在 90%-480% 的溢价。到 2050 年，由于替代燃料与 CCUS 规模化发展和成本下降，以及 CO₂ 就地利用的可能性，零碳水泥的溢价可以进一步下降。随着技术进步与规模化发展，吨 CO₂ 捕集封存成本将下降 40% 左右，这使得 2050 年的净零碳水泥熟料溢价也将持续降低。

图表 9 CCS 叠加不同技术路径生产零碳水泥的成本



来源：RMI 与中国水泥协会

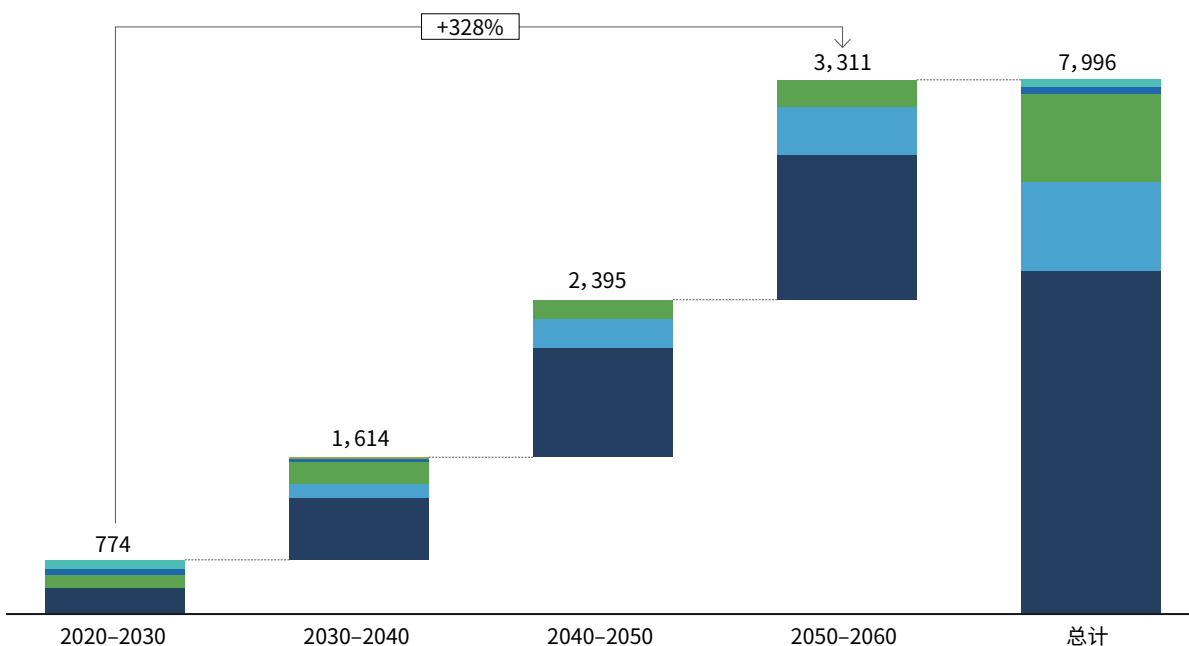
3.2 水泥行业 CCUS 投融资分析

据 RMI 预测，在迈向 2060 碳中和的进程中，中国水泥行业关键减排技术的总投资需求预计将达到约 7996 亿元；其中，CCUS 相关累计投资总额约为 5200 亿元，占全行业减排总投资比例高达 64%，CCS 技术投融资直接关系到水泥行业碳中和路线图的完成质量（图表 10）¹⁵。

具体来说，近期（现在 -2030）是 CCS 的试点与示范阶段，CCUS 技术在水泥行业主要处于早期探索与工业侧示范运行阶段。重点开展试点项目，验证技术可行性与捕集效率，预计近期将出现约 370 亿元的投资需求。中期（2030-2040）是市场化推广阶段，随着技术趋于成熟及碳交易体系的完善，CCUS 开始进入市场化推广期。技术应用范围扩大，投资规模随市场化进程进一步增加。所需投资额预计增长至约 950 亿元。远期（2040-2060）是范围普及阶段处于迈向碳中和的关键期，CCUS 成为水泥行业实现深度减排的核心支撑技术。碳捕集技术在全行业实现大范围普及，投资强度迅速提升，远期投资总额有望达到 3800 亿元以上。

图表 10 中国水泥行业碳中和关键技术投资预测（单位：亿元）

■ 熟料烧成节能技术 ■ 粉磨系统节能技术 ■ 水泥窑磨智能优化系统 ■ 固废燃料替代 ■ 氢能与电力替代 ■ 碳捕集



来源：RMI 分析

为评估当前中国市场环境下不同 CO₂ 消纳路径对 CCUS 项目可投资性的影响，RMI 以年捕集规模 20 万吨的 CCUS 项目为基准案例，构建了涵盖不同终端应用情景的财务测算模型。模型设置了五类典型情景，即工业级 CO₂ 驱油、绿醇原料、食品级 CO₂、矿化混凝土以及纯碳市场交易，分别对应三类核心商业模式：产品化利用、产业链协同利用与碳价值市场兑现。该情景设置既覆盖了当前国内 CCUS 项目中具有代表性的应用方向，也较好地反映了不同路径在收益结构上的差异性。

情景分析结果显示，不同终端应用情景的财务表现呈现明显分化，表明 CCUS 项目的经济可行性高度依赖于下游消纳场景（图表 11）。在当前假设条件下，食品级 CO₂ 与矿化混凝土两类情景在项目内部收益率（IRR）及投资回收期等核心财务指标上均显著优于其他路径；工业级 CO₂ 销售与绿醇原料情景居中，其收益特征更贴近大宗工业品及原料协同的商业模式；纯碳市场交易情景的整体财务表现最弱，反映出在当前碳价格水平下，单靠碳减排价值尚难以支撑 CCUS 项目形成具备投资吸引力的财务回报。

需指出的是，食品级 CO₂ 与矿化混凝土情景在模型中表现出更强的财务指标，并不意味着其在现实落地中的实施难度最低，而是源于当前设定下这两类路径下 CO₂ 单位售价相对更高。相较而言，工业级 CO₂ 路径的单位价值空间相对有限，且对运输半径、客户稳定性及区域市场条件具有更高依赖性，因此其实际可行性更易受到局部市场环境的约束。

图表 11 不同应用情景下财务情况对比

情景	项目IRR ⁱ	投资回收期(年)	平均DSCR ⁱⁱ	NPV转正年份 ⁱⁱⁱ
工业级CO ₂ _EOR	N/A	无法回收	0.96	N/A
工业级CO ₂ _绿醇	N/A	无法回收	1.32	N/A
食品级CO ₂	11.2%	8	4.99	13
矿化混凝土	7.9%	10	5.85	N/A
碳市场交易	N/A	无法回收	-1.06	N/A

来源：RMI 分析

敏感性分析进一步表明，CCUS 项目的财务表现对资本支出（CAPEX）、税收减免、绿色溢价及碳价变动均表现出较高敏感性（图表 12）。其中，资本支出的下降与企业所得税率优惠对财务指标改善的作用最为直接，而优惠贷款利率虽有助于优化股权回报水平，但难以从根本上改变不同路径间的项目优先级排序。上述结果揭示，CCUS 项目可投资性的改善更需要依赖于“技术进步导致的资本开支下降 + 下游绿色产品溢价提升 + 政策与金融支持增强”的组合效应，而非单一依托碳市场机制。根据《节能降碳中央预算内投资专项管理办法》，规模化碳捕集利用与封存（CCUS）项目已明确属于“低碳零碳负碳示范项目”支持范围，可获得核定总投资 20% 的中央预算内投资补助。这意味着，当前企业已有渠道申请 CCUS 项目补助，从而有效提升项目 IRR、缩短投资回收期，改善其经济可行性。

图表 12 不同优化条件下的 CCUS 项目 IRR 敏感性分析

情景	基准项目 IRR	CAPEX下降 10%	优惠贷款利率 2.6%	所得税 15%	碳价 120元/吨	绿色溢价 15%
工业级CO ₂ _EOR	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
工业级CO ₂ _绿醇	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
食品级CO ₂	11.2%	12.9%	11.2%	12.3%	11.2%	11.2%
矿化混凝土	7.9%	9.0%	7.9%	8.7%	7.9%	7.9%
纯碳市场交易	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

来源：RMI 分析

- i 项目内部收益率（Internal Rate of Return, IRR）是指使项目计算期内各年净现金流现值累计为零的折现率。该指标反映项目所能够承受的最高资金成本，是衡量项目盈利能力的关键相对指标。
- ii 偿债备付率（Debt Service Coverage Ratio, DSCR）是指项目可用于还本付息的资金与当期应还本付息金额的比值。该指标用于衡量项目短期偿债能力。
- iii NPV 转正年份是指从项目投资开始至累计净现值（NPV）首次由负值转为正值所经历的年份数。该指标反映了在考虑资金时间价值后，项目实现真正盈利所需的时间。

结合基准情景与敏感性分析可知，未来具备潜力的 CCUS 商业模式应建立在复合收益结构基础之上，即同时涵盖产品销售收益、低碳溢价、减排价值及政策支持等多重收益来源。对政策制定者而言，支持重点应聚焦于降低初始投资成本、完善减排价值的确权与交易机制，以及培育低碳产品市场；对企业而言，项目布局应优先选择具备稳定消纳能力、价格承受能力及绿色支付意愿的终端场景。

以上分析还揭示了若干需要水泥企业重点关注的关键假设与现实约束：

1. 捕集设施运行率将大幅影响 CCS 项目的投资回报：上述模型测算基于年捕集 20 万吨产能满负荷运行的假设，即假定捕集设施全年连续运转。但在实际生产中，受错峰生产、市场需求波动、环保限产等因素影响，水泥熟料生产线的实际产能利用率往往仅 60% 左右⁷，且存在阶段性停产。捕集设施的运行时间与水泥窑高度耦合，一旦前端窑线运行不足，CO₂ 产量将随之大幅下降。在年实际捕集量远低于设计规模的情况下，单位捕集成本将被显著推高，直接削弱 CCUS 项目的可投资性。

2. CO₂ 下游消纳市场容量有限，规模化推广面临饱和风险：模型假设捕集后的 CO₂ 能够实现 100% 销售，但现实市场存在明确容量约束。以食品级 CO₂ 为例，2022 年，中国国内年需求量约为 75 万吨，且高度集中于碳酸饮料、食品保鲜和干冰制造等细分领域⁸。若水泥行业广泛部署碳捕集设施并集中供应食品级产品，仅少数头部示范项目即可触及市场容量上限，将引发供需失衡、价格下行。工业级 CO₂ 虽应用面更广，但作为大宗工业气体同样面临区域性市场容量有限的问题。因此，企业需审慎评估目标市场容量与潜在竞争格局，避免陷入“有产能、无销路”的困境。

3. 不同利用路径的减碳价值存在差异，碳资产价值分化明显：CO₂ 的减碳价值并非由其来源决定，而取决于其最终滞留时间与封存形态。食品级 CO₂ 与工业级利用仅实现“短期周转”或“延迟排放”——CO₂ 在数天至数月内即回归大气，未被永久移除。相比之下，地质封存 (CCS) 与矿化利用路径更具“永久性”。政府间气候委员会 (IPCC) 界定，唯有人为活动移除大气中的 CO₂，并将其持久地储存在地质、陆地或海洋池库或产品中，方可认定为“永久性移除”。国际共识正聚焦于“碳汇”属性：唯有通过地质封存或转化为长寿命建筑材料（如矿化混凝土）的路径，方能获得“长期”或“永久”减排的认定。

4. 水泥企业缺乏完整的 CO₂ 价值链，集群化发展是可行方向：当前水泥企业普遍缺乏从捕集、提纯、运输到下游利用或封存的全链条能力。在碳利用与封存环节，单家企业独立建设配套基础设施将面临高昂的投资门槛与运营成本。较优的解决思路是与其他产业形成区域化集群，通过共建共享 CO₂ 管网、运输设施、封存场地或综合利用装置，实现投资分摊、风险共担与规模经济。依托工业园区或碳枢纽模式，水泥企业可将捕集的 CO₂ 就近供给化工、建材、食品加工等需求方，或接入区域运输管网统一封存，从而提升整体项目的经济可行性与落地效率。

4、中国水泥行业 CCUS 技术应用展望

尽管 CCUS 被视作水泥行业实现碳中和的关键兜底技术，其减排潜力约占水泥行业技术减排手段中的一半，但其定位应明确为中长期部署的战略性技术。中短期（2040 年前），水泥行业应优先推广能效更优、成本更低的替代燃料与熟料替代技术，以显著降低现有排放水平，同时同步推进 CCUS 关键技术攻关与国家级产业链布局。中长期看，依托我国丰富的封存资源与技术储备，CCUS 将逐步实现规模化部署，其碳捕集比例预计从 2030 年的 5% 提升至 2060 年的 90%。

从技术层面而言，水泥行业碳捕集与封存（CCS）的应用应遵循“分期部署、先示范后推广”的总体路径，通过整合政府、企业、高校及研究机构的研发资源，重点支持适用于水泥行业的碳捕集、利用与封存（CCUS）技术研发与示范，推动其实际落地（图表 13）。在具体时间节点上，至 2030 年，应在现有中试及工业示范项目基础上掌握相关技术的设计建造能力，实现先进碳捕集技术的商业级应用并形成产业化能力，以降低二氧化碳捕集成本与系统能耗；届时第二代全氧燃烧碳捕集技术进入中试或工业示范阶段。至 2040 年，部分成熟的碳捕集技术将实现大规模工业应用。

在当前技术路线评价中，较适合水泥行业部署的 CCS 技术各有特点：LEILAC 技术能耗和运行成本较低，未来可耦合电力、太阳能等可持续能源作为供能来源，发展潜力较大，主要技术突破点是理论碳捕集率偏低；全氧燃烧技术突出优势为低能耗与低成本，在其基础上发展的第二代全氧燃烧技术取消了烟气循环，可作为独立运行的 CCS 装置应用于水泥熟料生产；集成式钙循环技术是唯一将碳捕集过程与水泥熟料生产工艺进行优化整合的技术路线，在水泥窑中的适用性较强，但其节能评级问题仍较突出，有待进一步技术突破。

图表 13 水泥行业 CCS 技术短期优先进行动表

技术名称	2025	2030	2035	2050
液体化学吸收技术	MEA吸收剂工艺开发和中试试验；新型吸收剂研究和试验；10万吨以上规模中试试验	新型吸收剂工艺开发和中试试验；MEA吸收剂工业示范和商业化应用；30万吨以上规模示范	新型吸收剂工业示范和商业化应用；MEA吸收剂大规模商业化应用；百万吨级工业示范	商业化应用：技术能耗降低、经济成本可接受；行业内逐步推广
钙循环技术	工艺开发	工艺开发和中试试验；10万吨以上规模中试试验	工业示范级应用；30万吨以上规模示范	商业化应用：能耗降低，装备成熟，经济成本可接受；百万吨级工业示范
膜分离技术	膜材料工艺开发	开发和中试试验；新型膜材料的研究和试验；5万吨以上规模中试试验	工艺开发；新型膜材料的工艺开发；10万吨以上规模示范	工业示范级应用；中试试验；30万吨以上规模示范

接下页

接上页

技术名称	2025	2030	2035	2050
全氧燃烧技术	工业级示范；第二代全氧燃烧技术工艺开发	低能耗制氧技术与全氧燃烧技术的工业级示范；第二代全氧燃烧技术工艺开发和中试试验；10万吨以上第二代全氧燃烧技术的中试试验	商业化应用；第二代全氧燃烧技术工艺开发和中试试验；30万吨以上规模第二代全氧燃烧技术示范	商业化应用：成本可接受；50万吨以上规模第二代全氧燃烧技术示范
LEILAC技术	可行性和工艺开发	工艺开发和中试试验；5万吨以上中试试验	工艺开发和中试试验；10万吨以上中试试验	工业级示范；30万吨以上中试试验

来源：中国建筑材料科学研究总院有限公司

在政策层面，首先应加大对适用于水泥行业的 CCUS 技术研发与示范应用的支持力度，将其纳入后续水泥行业碳中和科技计划与产业发展规划，提供长期政策保障与财政补贴，并配套多方面、多类型、全行业的激励措施，包括推动企业开展工业示范项目的财政激励政策、拓宽公共资金来源、鼓励企业及社会资本投入，同时加快制定碳捕集与封存相关标准，规范产业链健康发展。针对水泥厂空间分布分散与封存资源错位的挑战，应从产业规划与工业集群耦合的角度构建 CCUS 全产业链。建议在基础资源条件优越的地区率先布局工业示范项目，建设大规模 CCUS 示范集群，通过共建共享压缩与管道网络，降低单个企业的基建压力。同时，规划建设高压 CO₂ 长输管道，以降低从内陆排放源到沿海或盆地封存点的运输成本。此外，应引导各地因地制宜推进 CCS 项目的区域差异化发展：西北及青藏地区依托丰富的地质资源开展深部封存；渤海湾与鄂尔多斯推广 CO₂ 驱油技术，利用增油收益补偿捕集成本；东南沿海地区则利用海上深部咸水层实施规模化封存。

在金融层面，多元金融工具的协同发力是弥合绿色溢价缺口的关键。商业银行可在传统信贷基础上，优先探索将贷款利率与企业脱碳绩效（如吨熟料碳强度）挂钩的可持续发展挂钩贷款；同时，可依据央行转型金融目录，向符合条件的 CCUS 项目提供低成本资金，以部分缓解项目开发者的融资压力。对于捕集设施及配套运输、矿化基础设施，混合融资模式（如商业债务搭配公共优惠资金或信用担保）具有显著适用性，能够在一定条件下降低项目整体风险收益比。金融机构还可考虑构建分层金融工具组合：针对国家超低排放改造目标，提供专项技改贷款；对创新型捕集技术，采用“私募股权+长期项目贷款”的组合方式，支持其跨越商业化门槛；同时探索风险补偿与保险机制（如减排效果达标保险），以增强项目在绩效不确定性下的可融资性。

在可持续商业模式层面，企业应注重绿色水泥价值链重塑。一是打造零碳水泥品牌，利用绿色溢价消化技术成本，将减排投入转化为市场竞争优势。二是融入区域性碳中和集群，通过共享运输与封存基础设施，实现资本与运营支出的分摊。三是探索碳资产金融化路径，以高持久性碳信用交易或税收抵免工具，将捕集的 CO₂ 从废弃物转化为可流动的金融资产，抵销设备运营成本。国际上一些相对成熟的模式表明，多元收入与创新资源配置可在早期通过外部支持回笼资金，降低前期投资与运营风险，缩短回本周期，最终推动 CCUS 在水泥行业的规模化应用。

专栏：水泥行业碳捕集与利用商业化模式的国际观察

水泥行业的碳捕集与封存技术正在经历从昂贵的实验性项目向可盈利的商业模式的转变，国际上一些水泥企业正探索从碳捕集技术可行性转向经济效益的实现。

绿色溢价模式：海德堡材料公司通过直接销售模式在碳捕集与封存商业化领域取得领先地位。其位于挪威的布雷维克碳捕集与封存工厂作为全球首个工业规模的水泥行业碳捕集设施，已于 2024 年底完成机械竣工并于 2025 年初全面投入运营。该公司推出名为“evoZero”的净零碳足迹水泥品牌，将碳捕集与封存技术转化为高附加值的品牌化科技产品，而非简单征收碳附加费的传统销售模式。2025 年至 2026 年间，得益于可持续产品带来的高利润率，叠加部分政府补贴和共享基础设施的支持，该公司报告了创纪录的盈利表现，其主要客户群体集中在斯堪的纳维亚和北欧地区，这些客户愿意支付显著溢价以达成企业净零目标并规避碳税。

政府补贴模式：豪瑞公司运用欧盟创新基金的资金支持来抵消资本支出，结合规避碳成本的双重优势实现投资回报。其在德国莱格多夫开展的 Carbon2Business 项目和波兰的 Go4ECOPlanet 项目获得了数亿欧元的资助，仅莱格多夫项目即获 1.1 亿欧元支持。通过采用富氧燃烧技术，该公司捕集二氧化碳并将其作为生产电子甲醇和塑料的原材料进行销售。这种模式不仅规避了欧洲超过每吨 80 至 100 欧元的碳税，还通过向化工企业销售捕集的二氧化碳创造了二次收入来源，将废弃物成功转化为产品。

税收抵免模式：美国的碳捕集与封存商业模式主要依托 45Q 税收抵免政策。海德堡材料公司位于印第安纳州的米切尔大型工厂升级项目正是这一模式的典型代表。根据美国相关法案对气候政策的扩展规定，美国政府为每吨捕集并封存的二氧化碳提供 85 美元的税收抵免。以该工厂每年捕集 200 万吨二氧化碳计算，可获得 1.7 亿美元的年度税收抵免。对于众多美国工厂而言，这项税收抵免的实际收益已超过碳捕集设备的运营成本，使碳捕集单元成为母公司税务部门的利润中心。

共享基础设施模式：瑞典斯拉特的 Cementa 工厂采用了成本分摊的集群化发展模式。作为海德堡材料公司的子公司，该工厂并未独立建设运输船舶和管道设施，而是加入了由壳牌、挪威国家石油公司和道达尔能源共同组建的 Northern Lights 合资企业。在这一模式中，Cementa 作为大型枢纽中的分支节点，仅需承担碳捕集的成本，而碳封存环节的大规模支出则由钢铁、垃圾发电等多个行业共同分担。这种规模化运营方式使每吨碳的处理成本降至足够低的水平，结合欧盟碳排放交易体系下的碳配额节约，最终实现项目的正向收益。

碳信用模式：CarbonCure Technologies 是一家加拿大碳利用技术公司，致力于为混凝土行业提供低碳转型解决方案。该公司开发的核心技术是在混凝土搅拌过程中注入捕集而来的二氧化碳，使其迅速矿化并永久封存于混凝土制品中。其盈利机制主要建立在碳信用的五五分成模式之上。该公司向混凝土生产商收取硬件设备与监测软件的订阅费用。由于其矿化过程具有永久性，且可通过物联网技术进行实时数据验证，因此所生成的碳信用属于高持久性碳移除。至 2026 年，此类碳信用在市场上的交易价格已达到每吨 100 至 200 美元以上，显著高于基于自然的传统碳抵消产品。CarbonCure 已向其合作伙伴分配超过 500 万美元的碳信用收益。以一家中型混凝土生产商为例，该模式每年可为其带来约 2.5 万至 5 万美元的碳信用分成收入，而 CarbonCure 则保留剩余 50% 作为纯利润。通过将数千个“碳储存”建筑工地的数据整合为机构级的碳资产组合，该公司成功将工业副产物转化为可规模化的金融产品，从而将气候解决方案转变为一项持续产生数百万美元收益的商业模式。

参考文献

1. International Energy Agency, A new era for CCUS, 2024, <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/a-new-era-for-ccus>
2. Global Carbon Project, The Global Carbon Budget: FAQs 2025. <https://globalcarbonbudget.org/gcb-2025/the-global-carbon-budget-faqs-2025/>
3. 中国建筑材料科学研究总院有限公司, 中国水泥行业碳中和路径研究, 2023, https://www.gfyj.com.cn/page204?article_id=306
4. 中国水泥协会、中国建筑材料科学研究总院有限公司、生态环境部环境规划院, 水泥行业碳排放现状与达峰路径, 2021, <https://www.hjkxyj.org.cn/article/doi/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.19>
5. 落基山研究所, 中国水泥协会, 加速工业深度脱碳: 中国水泥行业碳中和之路, 2022, <https://rmi.org.cn/insights/the-road-to-net-zero-decarbonization-in-chinas-cement-industry/>
6. Heidelberg Materials, World premiere at Heidelberg Materials: Opening of CCS facility in Norway marks new era of sustainable construction, 2025, <https://www.heidelbergmaterials.com/en/pr-2025-06-18>
7. U.S. Department of Energy, Gulf Coast and South-Central regional report, 2024, https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-11/GC%20Regional%20Report_10.29.24.pdf
8. Global CCS Institute, Global status of CCS 2024: Status of CCS globally, 2024, <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2024/10/Global-Status-Report-6-November.pdf>
9. International Energy Agency, Net Zero by 2050, 2021, <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
10. 中国联合水泥, 青州中联 CCUS 项目入选第二批绿色低碳先进技术示范项目清单, 2025, <https://www.cbmf.org/c/2025/04/30/22038.shtml>
11. 安徽日报, 海螺集团: “捕碳高手”点碳成金, 2023, https://www.chinaconch.com/wxzx/mtjj/202512/t20251224_46067.html
12. 百年建筑网, 封开县 2025 年做大绿色建材主导产业, 力争华润水泥完成产值 50 亿元以上, <https://www.100njz.com/a/25021316/751012C0070D130E.html>
13. International Energy Agency, Is carbon capture too expensive, 2021, <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>
14. Hughes, S., & Zoelle, A., Cost of capturing CO₂ from industrial sources (NETL Technical Report). National Energy Technology Laboratory, U.S. Department of Energy, 2026, https://netl.doe.gov/projects/files/CostofCapturingCO2fromIndustrialSources_071522.pdf
15. 李抒苒, 李威, 路舒童等, 金融驱动重工业行业低碳转型, 落基山研究所, 气候债券倡议组织, 2023, <https://rmi.org.cn/insights/transition-finance-report/>

落基山研究所，中国建筑材料联合会，中国水泥行业 CCUS 技术应用展望及企业实践案例，2026，<https://rmi.org.cn/insights/china-ccus-outlook-and-case-studies/>

RMI 重视合作，旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此，我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY-SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



除特别注明，本报告中所有图片均来自 iStock。



RMI Innovation Center
22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org

© 2026 年 6 月，落基山研究所版权所有。
Rocky Mountain Institute 和 RMI 是落基山研究所的注册商标。