



优化碳捕获、利用和封存技术，实现宏伟的可持续发展目标

作者：艾斯本技术有限公司行业营销高级总监 Ron Beck
艾斯本技术有限公司产品营销经理 Aurore Plougoulen
艾斯本技术有限公司产品营销经理 Gerardo Munoz



执行摘要

实现未来零碳排放的比赛已经拉开序幕。全球油气、石化和化工公司纷纷宣布了宏伟的碳减排、塑料再利用及节水目标。同时，在投资者、金融市场和社会的持续压力之下，大型能源、化工、采矿、钢铁、水泥和电力公司实现零碳排放已是迫在眉睫。美国证券交易委员会（SEC）提议的披露规则要求美国上市公司公开气候变化风险，《欧洲绿色协议》对减排做出严格规定，投资界和环保游说人士要求企业提供可审计的报告，凡此种种进一步加强了人们对碳减排的关注。

随着化工和能源生产商不断开发和优化实现全球碳减排目标（到 2030 年，实现碳排放降低 45%；到 2050 年，实现净零排放）的策略，大部分企业仍未找到正确的解决方案，难以在规定的期限内达到承诺的碳减排水平。碳捕获和封存技术（CCS），以及碳捕获与利用技术（CCU）是现阶段帮助企业切实实现这些目标的关键路径。

为遵循行业规划，达到联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）、国际能源机构（IEA）等组织对确定的减排路径的期待，我们必须优先考虑和实现以下几点，以确保 CCS 和 CCU 技术（包括直接空气捕获技术）成为可行且高效的替代技术：

- **持续推动技术创新与技术发展，提升能效**
- **有效扩大经济效益，推动技术更广泛的使用**
- **加快执行速度**
- **对地下封存技术抱有十足的信心**

对于上述四个方面，数字技术都是至关重要的推手。目前，已经有不少创新助力实现减排目标的成功案例，包括系统风险建模技术，它能筛选出最实际、最经济的方案，帮助我们实现碳减排、碳捕获和再利用等目标。

AspenTech® 过程模拟软件已成功帮助多家企业减排。这款软件对碳捕获、使用和封存技术 (CCUS) 更为重要，它能帮助组织改进碳捕获和封存技术。在寻求地下封存的有效解决方案时，行业领导者正在使用地下地球物理和地质建模软件快速确定最佳储层，以实现长期、可靠的碳封存。数字网格化管理软件也是一个有效的解决方案，能够优化分布式能源的使用。

分开来看，这些数字解决方案只能影响 CCS 和 CCU 项目；可一旦将它们整合起来，就能创造无限可能。如果将过程模拟、地下地球物理和地质建模、人

工智能驱动的混合建模、过程优化软件和数字网格化管理技术的重大突破结合在一起，不论是产生的经济效益，还是满足行业碳减排要求的速度，都将超乎想象。

沙特阿美、金德尔摩根、壳牌康索夫、福陆等行业巨头已经开始使用这些数字技术解决方案，提升 CCUS 项目的创新能力和经济效益。



碳工程有限公司

作为直接空气捕获 (DAC) 的领先创新者，碳工程公司在创新、拓展 DAC 过程和开发 Air to Fuels™ 二氧化碳利用过程 (氢气与二氧化碳相结合) 方面一直使用 AspenTech 的并行工程解决方案。

碳工程公司借助 Aspen Plus 对过程进行建模，从技术可行性和绩效角度优化了过程设计。正如美国西方石油公司 (Oxy) 在最近的投资者演示会上所说，目前，碳工程公司正在与其合作，计划在 2035 年前落实 70 个基于这些设计的 DAC 设施。

碳捕获：挑战与机遇并存

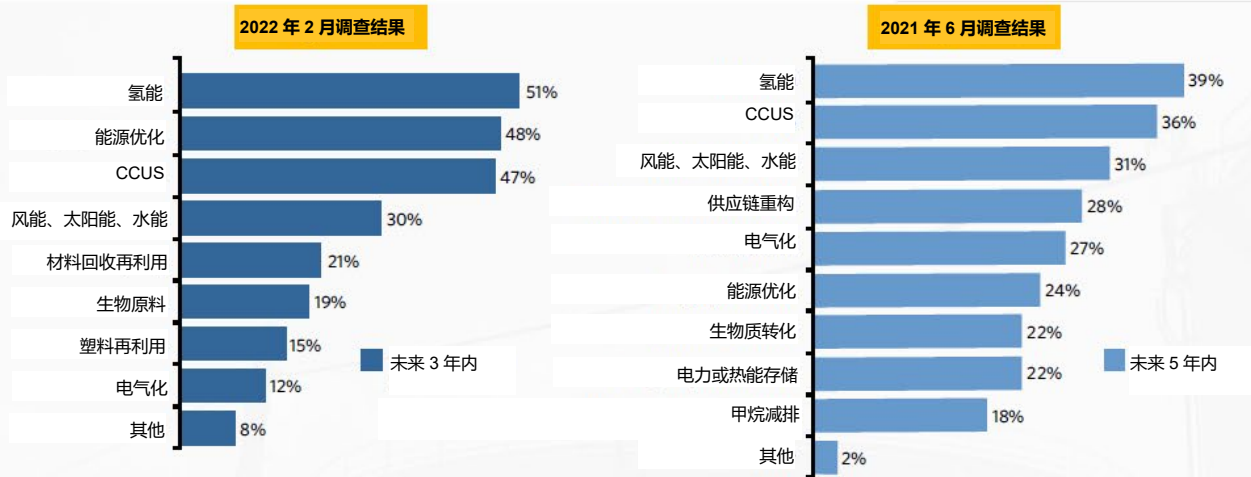
据 AspenTech 最近开展的两次调查发现，与能源效率及氢能经济一样，碳捕获和封存也已成为一个重要的可持续投资领域。2021 年 6 月针对全球数个领域 300 多家企业的调查发现，36%的企业计划未来 5 年内投资碳捕获、使用和封存技术 (CCUS)。2022 年 2 月对上游、炼油、化工企业和采矿等企业的调查发现，在被问及未来 3-5 年最主要的可持续投资领域时，选择碳捕获的企业比例已升至 47%。这一结果与 IPCC 2022 年的观点一致：碳捕获（从工业排放中捕获）和 DAC 是二氧化碳除碳 (CDR) 的两大技术路径。

随着石油天然气、石油化工、发电等行业的企业承诺在碳捕获及封存技术领域投入大量资源，捕获和封存的碳亦有机会成为可替代物质，全新的“碳管理”行业商机正迅速显现。首次使用“碳管理”一词的是上游油气公司**西方石油公司 (Oxy)** 的总裁兼首席执行官 Vicki Hollub，她提到 Oxy 正在转型成为一家“碳管理”公司。



在未来 3-5 年预计启动的可持续项目中，CCUS 排名前三

问题：你预计未来 3-5 年内，有哪些主要的可持续项目会启动？



来源：AspenTech 可持续性全球调查，2022 年 2 月和 2021 年 6 月



Oxy 认为碳封存技术将成为未来的主要盈利点，并且公开宣布计划在 2025 年前建设和运营 3 个碳封存中心，在 2035 年前，使用专有的 DAC 和二氧化碳碳工程技术建成 70 个用于净化燃料的 DACCS 设施。⁴ 冰岛的 Orca DAC 项目亦说明了这一发展趋势，该项目尝试通过社交媒体众筹资金，目前已吸引微软的投资。

近日，IPCC 发布了名为《气候变化 2022：减缓气候变化》的报告，不出所料，碳捕获成为该报告的高频词汇。下图为 IPCC 预计的全球碳减排战略的影响时间线（图 2）。

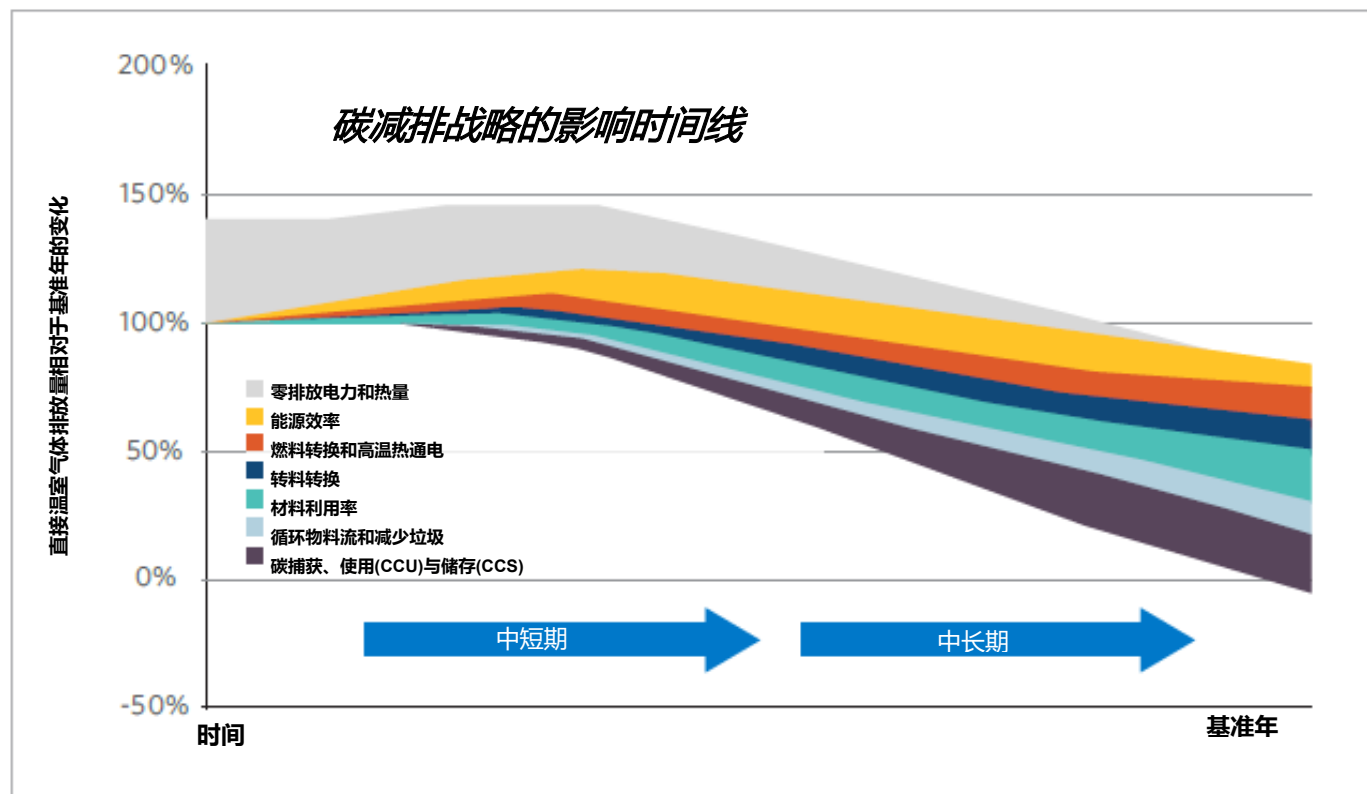


图 2：全球碳减排策略的影响时间线，CCU 和 CCS 为标紫部分（来源：IPCC 2022 年报告）

为实现图 2 中碳减排的影响时间线，我们必须继续推进碳捕获技术的发展，加快推进相关项目。

如下图所示，2030 年推进中的碳捕获项目数明显低于实现净零排放所需的项目数（图 3）。为了弥补这一差距，我们需做出重大改变，加快碳捕获解决方案的设计、开发和执行。

图 2 和图 3 表明，我们必须推进碳捕获和数字化应用的突破性创新。数字科技是提升碳捕获的经济性和加快碳捕获商业化的重要促进因素。

艾斯本 2022 年 2 月公布的调查报告指出，经济可行性是落实可持续项目的最

大挑战之一（图 4）。

加强经济可行性

我们可以从端到端（从碳捕获利用的能源到化工物质的碳利用，或者通过地质构造或化学反应进行碳封存）和风险的角度评估 CCS 和 CCU 技术。由于技术经济情况相当复杂，数字端到端优化和风险分析应运而生。

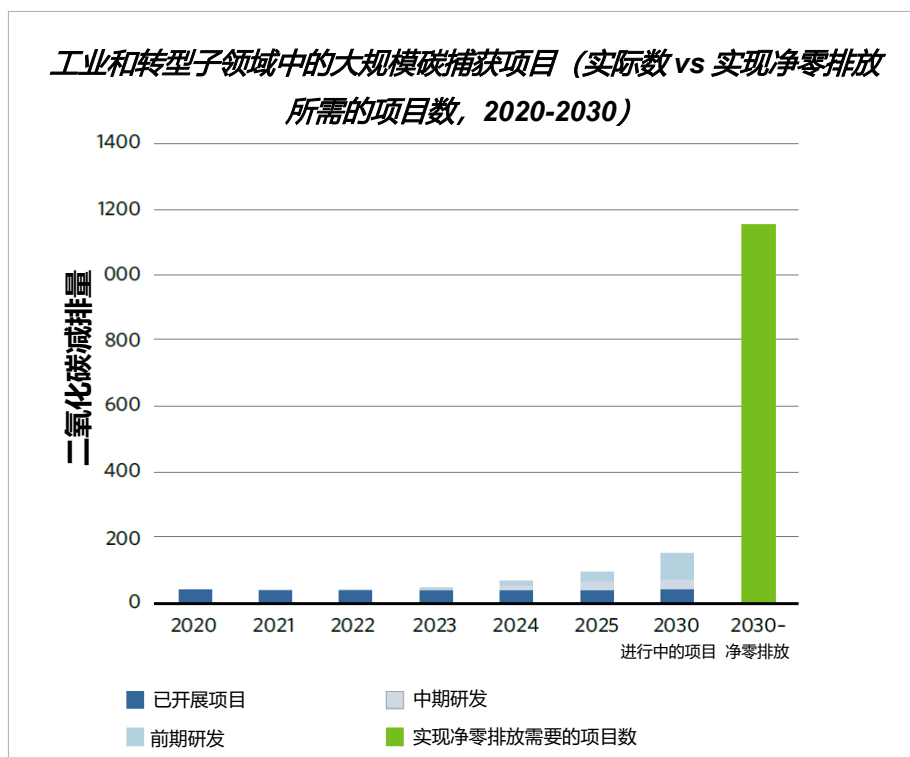


图 3. 2030 年实际开展的碳捕获项目数 VS 实现净零排放所需的项目数（来源：IEA）

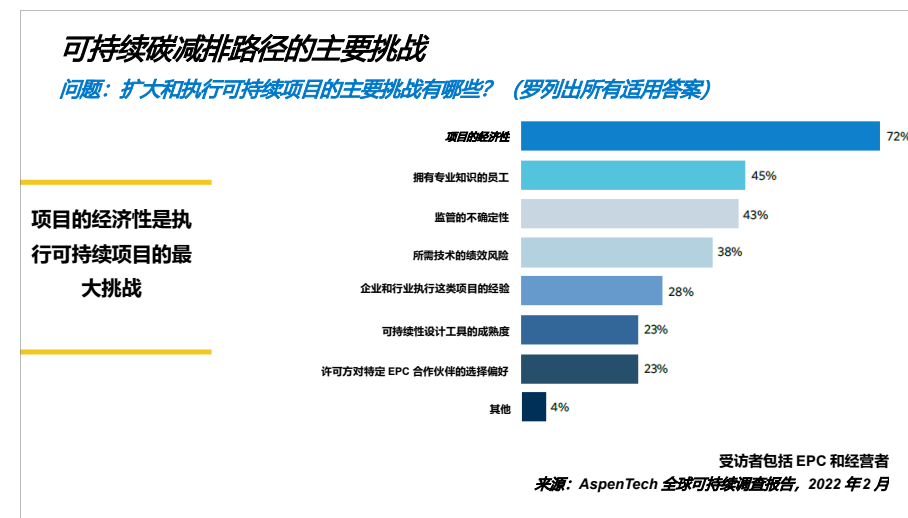


图 4. 扩大和执行可持续项目的主要挑战（来源：AspenTech 可持续调查报告，2022 年 2 月）

过去几年里，碳捕获的基本经济学算法发生了翻天覆地的变化。在整个碳减排过程中，每捕获和储存 1 吨二氧化碳的价格约为 75 美元（根据最新征收的碳税计算，有的区域甚至更高），碳捕获项目因此极具吸引力。DAC 项目的碳抵消价格更高，如果需采用更安全的封存技术进行长久封存，要价可能更高。微软和 Stripe 等公司支付的碳抵消费用约为 100-200 美元/公吨二氧化碳，进一步增强了这类项目的经济可行性。

通过数字技术实现端到端的优化

毋庸置疑，数字化在确保 CCS 和 CCU 技术的快速规模化和利用方面发挥着核心作用。尤其是过程建模与优化、地下特性描述与建模两大技术领域，有助于组织机构快速筛选项目、对比多种备选方案、设计最有效且最经济的解决方案，达到碳减排的要求。

确定最佳除碳方法

在 CCS 和 CCU 技术发展的初级阶段，项目负责人往往会评估长期影响、风险和总体经济性，评价整个生命周期的碳捕获，能源的生产和储存是否便于碳捕获设施的运转，碳运输，向地质层注入并封存碳，或者将碳转化为可使用的产品。鉴于目前的过程建模和系统级风险建模能力，可观察影响系统的流程、能力、效益、技术风险和外部随机因素。

The image features a large blue rectangular area on the right side of the page. At the top of this area is the Fluor logo in white, bold, sans-serif font. Below the logo, there is a yellow rectangular box containing the word "Fluor" in white. Underneath that, there is a block of white text. The background of the entire right side is a faded, grayscale image of an industrial facility with tall towers and complex piping. The overall layout is clean and professional, emphasizing the company's expertise in carbon capture technology.

FLUOR®

Fluor

Econamine FG PlusSM 是 Fluor 公司经商业验证的碳捕获技术，Fluor 拥有 30 个许可工厂和 30 年运营经验。Aspen Plus 在该技术⁹的开发、商业化和持续缔造成功方面发挥了核心作用。

大部分可用于碳捕获的可再生能源都具有非连续性或季节性。电能和氢能储存设施是确保 CCUS 系统成功运转的关键。Aspen Fidelis™ 等系统级风险建模器有助于评估这些储存需求，同时考虑降低成本，提高预期除碳成效。

此外，碳价值链也衍生出许多新的商业模式，有的企业从排放气体中提取点源碳，并以此作为服务项目。随着碳捕获和储存技术的迅速发展，行业领先企业开始同步优化这两大领域的技术：

- **可行性。**地球物理解释和储层建模有助于有效分析现有的所有数据，并快速筛选容量合适的地下储层和含水层。

- **资金。**模拟和经济建模工具能加快设计优化和技术筛选，匹配过程系统和目标储存量。
- **执行。**地下特性描述和井下工程技术有助于注水井规划和钻井。借助降阶建模和 AI 技术，可同步优化过程和地下建模，实现最安全、最有效的执行计划。
- **碳储存。**地球物理解释、储层建模和模拟是将监控数据可视化和支持决策的基础，有助于确保注入目标储层的二氧化碳储存



CarbonCapture 有限公司

CarbonCapture 由技术创业者比尔·格罗斯创立，他还是创业孵化机构“创意实验室” (IdeaLab) 的创始人，战绩累累，成功完成了 45 项 IPO 和并购交易。目前，CarbonCapture 计划将太阳能和碳捕获整合到同一个系统，并使用 AspenTech 的行业 AI 及精密的建模软件进行创新和优化。IdeaLab 正在多个领域同步创新，包括使用 AI 技术优化太阳能电池阵的能效，使用沸石优化碳捕获过程，最大化碳捕获量。IdeaLab 相信，先进的数字技术是实现碳捕获规模化和经济性重大突破的关键。

我们再来仔细看看企业可加以利用的部分行之有效的具体碳减排方法，以及数字创新如何加快取得碳减排成效，使曾经遥不可及的减排目标变得更具可行性。

点源碳捕获

数字技术已广泛运用于碳捕获中，旨在优化捕获系统的设计和运营。**挪威蒙特斯塔德碳捕集技术测试中心 (TCM)** 是全球最大的碳捕获测试和创新中心。目前，该中心创建了一个一体化数据收集和建模平台，以便从溶剂的层面了解碳捕获系统的绩效（参见第 12 页图 8）。这一平台从溶剂降解与回收、减排备选方案、过程温度的控制、选择排放环节实施除碳等角度提供了相关信息。现阶段，TCM 正在检测将相同模型用于碳捕获系统操作员培训的使用情况。鉴于碳捕获系统的规模和速度，我们亟需类似的虚拟数字孪生培训应用。

目前，我们开展了大量相关工作，旨在提升这些碳捕获过程中碳剥离、溶剂和催化剂再生的效率。Aspen Plus®和 Aspen HYSYS®等过程建模解决方案被广泛用于快速筛选和评估创新观点（图 5）。凭借基于速率的建模方式及其他功能，我们将能够准确了解这些系统的运作方式及改善方法。结合早期成本评估，目前的建模解决方案能评估不同化学和物理溶剂、吸附剂、膜电解方法及柱状几何的优缺点。深入理解软件中可安装工业设备的溶剂化学、热力学极限和物质传递极限，能帮助企业开发和部署更好的溶剂系统，减少碳捕获耗能及资金成本。

此外，持续创新、减少碳捕获过程中的“绿色处罚”，使得过程安排更有效率，

人们不仅研发了新的溶剂，还找到了延长溶剂有效期的方法。在此背景下，**壳牌康索夫、Delta CleanTech** 等公司借助新开发的软件功能，推动溶剂和吸附剂创新。

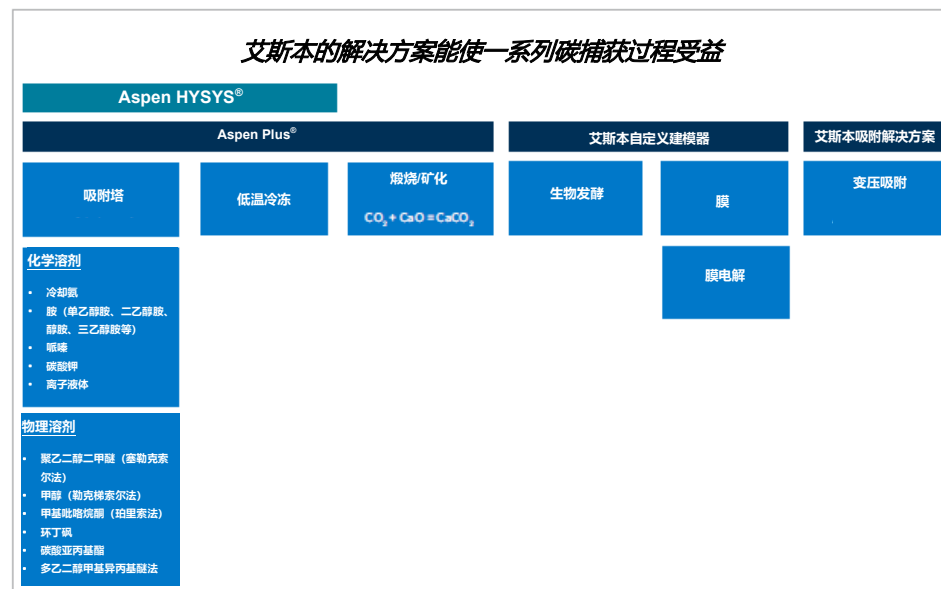


图 5. 使用数字软件解决方案建模的典型碳捕获过程（来源：AspenTech）

另一个可行的方法就是使用高效的固体吸附剂。碳捕获技术创新公司 **Svante** 一直高效使用 Aspen Adsorption™ 等软件解决方案，目前正在使用纳米级固体吸附剂从水泥、钢和铝等难度较大的过程中捕获二氧化碳。他们凭借数字模型和优先买卖权可快速测试材料和过程，从而达到最佳效果（参见下一页图 6）。

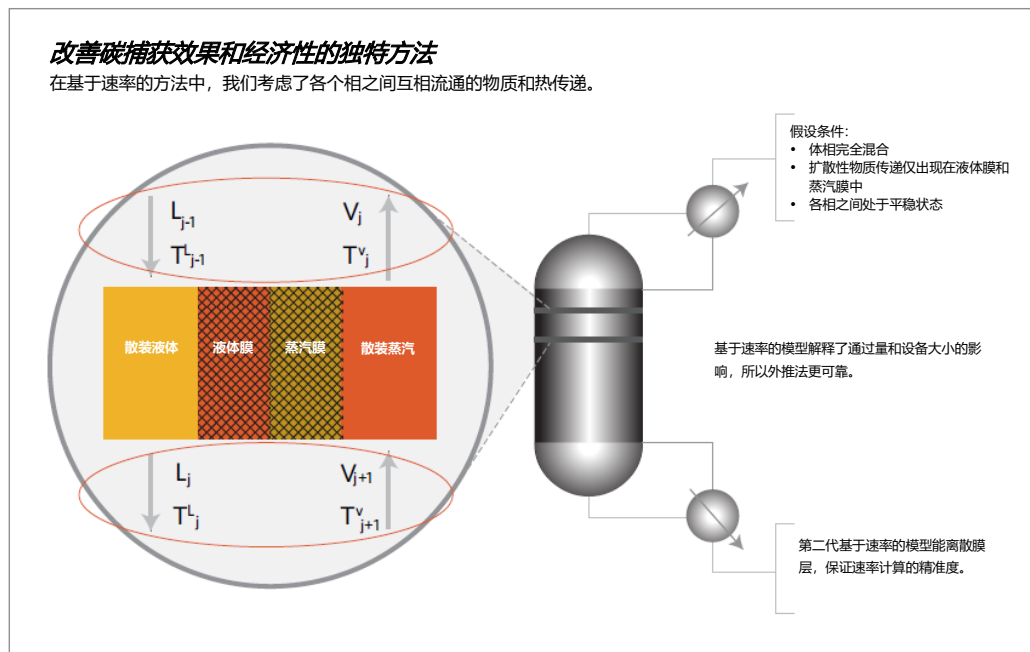


图 6. 基于速率的蒸馏建模，能改善碳捕获绩效和经济性（来源：AspenTech）

直接空气捕获 (DAC)

在全球向零碳能源转型的背景下，点源碳捕获是实现零碳排放承诺的关键。不过，DAC 技术作为一种新兴的长期解决方案，能降低空气中不断上升的二氧化碳浓度。DAC 可帮助钢铁、水泥和农业等脱碳进度缓慢的行业企业减少碳排放。

DAC 技术已经出现重大突破。能耗是最大的经济挑战。**Heliogen** 的 CEO 兼 **CarbonCapture 有限公司** 的创始人比尔·格罗斯是著名的 DAC 技术创新者，他将太阳能的突破性效率与全新的 DAC 概念结合在一起——利用过程建模软件将太阳能与 DAC 技术紧密联系起来，从而提升整体经济性。



由于直接空气捕获技术以更低浓度的溶剂去除空气中的二氧化碳，这些过程需要沸石、液体和固体溶剂等更有效的去除剂。并行工程建模软件能帮助比尔·格罗斯及其他创新者评估上千个过程变更，并模拟 DAC 技术规模化，以便了解如何在资金和运营成本之间做出取舍。

将二氧化碳运输到目标储层

为实现大规模碳捕获和储存，三大要素至关重要：支持碳捕获的可再生能源、碳捕获工厂和目标地理储层。由于碳捕获与碳储存可能不在同一地点，我们需要大力发展通过管道运输捕获的二氧化碳，或者从点源或捕获工厂运输二氧化碳至目标储层。普林斯顿大学高草甸环境研究所在最近公布的《净零美国》报

告中预计，到 2050 年，需建成 2.1 万千米的干线管道和 8.5 万千米的集输管网，用于运输 9.3 亿吨二氧化碳。这份报告预计除碳总量是目前美国产油量的 1.3 倍（图 7）。

普林斯顿大学的这份报告和图 7 表明，我们正在经历从连接特定二氧化碳捕获点和特定二氧化碳储存点的单个项目向多源供给、多储存库的网络转型。只有这样，碳市场才具有竞争性，实际成本和收益将以弹性方式计算。我们目前已经开发了数个处于不同阶段的 CCS 集群和枢纽²。除了陆基管道网络之外，北欧的 **Carbon Collectors** 等公司也在开发海上收集和船舶运输，使用本文提到的数字工具加快技术的商业化。

截至 2025 年需要的碳运输基础设施

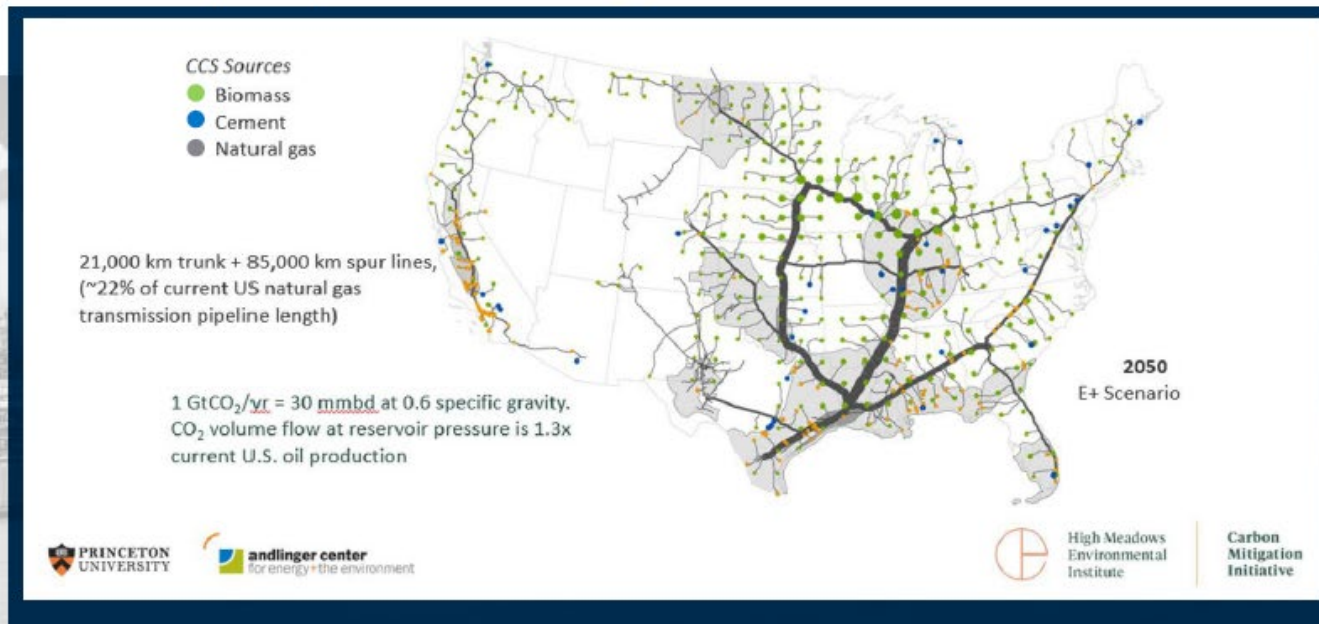


图 7. 所需的二氧化碳运输基础设施（来源：普林斯顿大学高草甸环境研究所）

前文提到基于各种数字工具的系统级建模可以帮助我们设计运输路线。通过采用相关技术，我们可将目标储层的位置和容量与碳捕集工厂的位置进行匹配，并优化运输网络，尽可能减少所需的基础设施并降低总成本。

地下储存和提高石油采收率

另一个值得关注的问题是，完成碳捕获后，如何储存或利用碳。二氧化碳捕获和储存的生命周期成本中，绝大部分被用于设计、钻探和将二氧化碳注入目标地质层。成功筛选理想的地下储层以储存二氧化碳，设计最佳钻井并注入二氧化碳，想要对储存的二氧化碳进行长期监测，很大程度上需依赖于地下工程软

件。举个例子，目前，一家领先的综合能源公司正通过艾斯本的地下科学与工程技术重新利用现有的勘探数据，快速重新表征和筛选枯竭的油气储层，从而确定是否适合封存二氧化碳。他们可以分析储层容量，判断是否适合作为长期的封存地点，分析现有井的可用性和钻探新注入井的策略。

将二氧化碳注入产油层以提高石油采收率 (EOR) 的项目最早实现了积极的经济效益。多家公司已有效开展了这类项目。**金德尔摩根**利用软件创新创建了一个集成式工作过程，以优化油井布置和产量，实现更高的产油量，同时将二氧化碳封存在储层中。



KINDERMORGAN
INC.

金德尔摩根

作为北美最大的二氧化碳运输商和二氧化碳气驱强化采油 (EOR) 的实践者，金德尔摩根一直在使用 AspenTech 的地下科学与工程 (SSE) 集成地球科学软件，有效验证未来钻探位置并优化储层现场绩效，显著降低规划成本，管理二氧化碳的注入并最大化 EOR 的产量。

过程建模能优化碳捕获溶剂再生

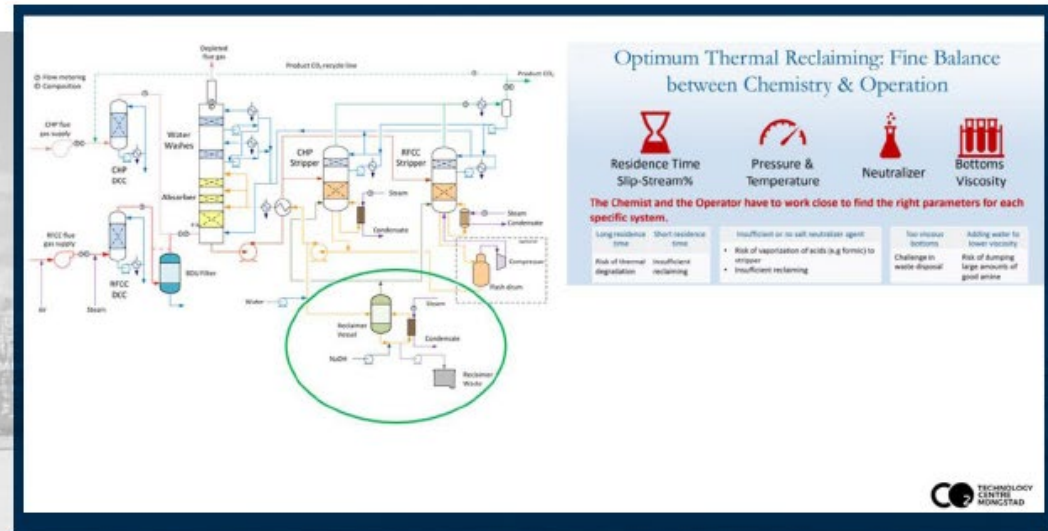
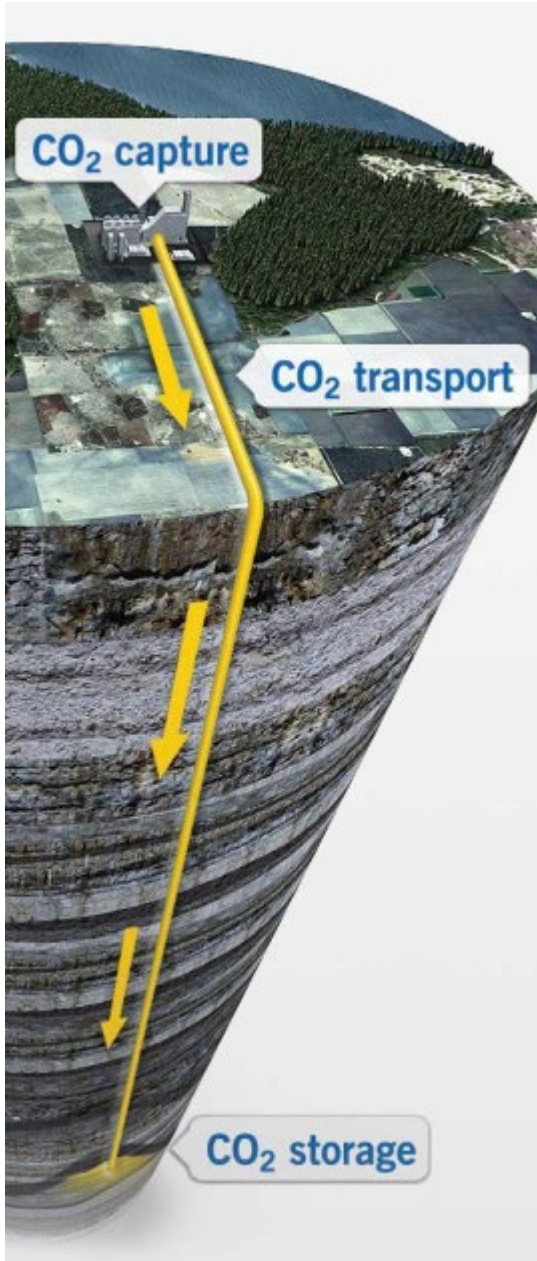


图 8. 溶剂回收能改善碳捕获方法。(来源：蒙斯塔德碳捕集技术测试中心在 2021 艾斯本技术优化全球峰会上的演讲)



当二氧化碳需要长期储存在地下时，效率将成为关键因素，无论是储存在盐碱含水层（二氧化碳可以溶解），还是储存在枯竭的储油层中，因为钻井和改造的成本极高。目标地层的详细特征很重要，同样，了解现有井的排列以及新井的最佳布置和钻井策略也很重要。

对封存碳进行长期监测

从长远来看，在碳管理系统运行期间和运行后阶段，数字技术对于实现碳储存资产的可靠性、透明度以及可审计记录至关重要。时间推移（4D）地震监测技术能对储层中二氧化碳羽流的增长情况进行成像，并有助于证明储层的封存能力和一致性。储存设备内部和周边区域的直接测量结果也很重要。井口和井下测量（例如：压力、温度、流体饱和度）可以避免压裂活动，并对意外压力或流体流出目标注入层段发出预警。





EniProgetti

NIProgetti 公司在全新碳捕获方法的前端设计中应用 AspenTech 的并行工程 ABE 解决方案，支持意大利埃尼集团的能源转型计划。该公司开发了不同的碳捕获过程概念，以便快速、便捷地实施创新和优化理念，设计跨团队的信息复制和共享。

此外，事实证明，微震监测有助于了解碳注入速率、陆上储层内外的压力分布和岩石应变之间的关系。目前，地下工程软件提供了分析和解释监测测量的工具，并通过 3D 模型校准对其进行整合，从而实现性能预测的实时更新。

二氧化碳在材料、化学品和燃料领域的运用

那些没有通过 EOR 直接储存或利用碳的企业正在寻找替代方案，希望将捕获的二氧化碳转化为有价值的产品。**沙特阿美**已经验证了一种全新的过程，即在不影响产品质量的情况下，将二氧化碳回收到混凝土中，同时通过创新提高该方法在工业级应用中的经济性。**碳工程有限公司**开发了一种利用二氧化碳和绿色氢能获取低生命周期碳强度燃料的过程。**沙特基础工业公司 (SABIC)** 专注于在化学品和聚合物生产的原料中广泛利用二氧化碳，包括甲醇、丙烯酸、乙

二醇、芳烃和特殊等级的聚合物。

为加快新技术的发展和优化过程设计，推动商业化和规模化，数字化的实施至关重要。具有综合经济性、能源和排放分析的过程模拟软件，可有效评估概念设计和技术经济，有助于提升这些新过程的可行性和成本效益，降低能耗，减少碳足迹。此外，并行工程技术提供的平台在规划新工厂和设施时可以优化项目涉及的多个领域。

下一步计划

数字技术是快速提高碳捕获、直接空气碳捕获、碳储存和利用以及碳储存监测的经济性、规模化和高效率的关键因素。艾斯本绩效工程技术有助于设计和执行过程技术和项目。艾斯本生产优化技术提供了碳捕获工厂的运营规划、控制和优化。AspenTech 的地下科学与工程 (SSE) 技术在选择、表征和监测碳封存地质构造方面具有战略意义。最后, Aspen AIOT Hub™ 提供了数据组合和决策支持基础设施, 能以透明的方式报告和审计碳储存。除了这些工具之外, AspenTech 还制定了积极的创新计划, 进一步开发数字技术, 通过 CCUS 技术的设计、运行、优化和维护支持除碳和减排。

无论企业在碳捕获和净零碳排放之旅中处于哪个阶段, 与具有创新能力和专业知识的技术领导者合作都是至关重要的, 只有这样才能实现关键的可持续性目标, 同时推动卓越运营。AspenTech 希望利用 40 年的创新成果和丰富经验协助您开展未来的新项目。

参考文献:

- 1 全球升温 1.5°C,” (日内瓦: 政府间气候变化专门委员会, 2022 年), <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- 2 <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/08/Understanding-Industrial-CCS-hubs-and-clusters.pdf>
- 3 Matthew Campbell, 蒙斯塔德碳捕集技术测试中心在 2021 艾斯本技术优化全球峰会上的演讲
- 4 Oxy 投资者演讲, 2022 年 4 月
- 5 Paul Matthias, Fluor, 碳氢过程监测, 2021 年 10 月, 艾斯本 2008 年全球大会





您优化 CCUS 技术和加快可持续计划的合作伙伴

AspenTech 提供的以下数字软件解决方案已在全球 CCUS 活动中创造了巨大价值。

绩效工程

- **Aspen Plus 和 Aspen HYSYS** | 先进的化学过程模拟器, 包含基于速率精馏的碳捕获工艺和涵盖大多数二氧化碳吸收溶剂和吸附剂的物理性质数据库。特殊的子模型可以处理膜和其他创新方法。
- **Aspen Adsorption** | 处理吸附过程的专用过程模拟器。
- **Aspen Economics** | 成本估算软件与过程模拟相结合, 以评估可行性阶段到实施阶段的资本和运营成本。
- **Aspen Fidelis** | 全体系建模系统, 用于评估系统风险、不确定性和系统性能, 从而优化生产, 减少碳排放并降低成本。

地下科学与工程

- **EarthStudy 360** | 为地震深度成像和处理专家提供完整的数据, 提高地下速度模型、结构属性、介质属性和储层特征的准确度。
- **SeisEarth** | 全面的地震解释和可视化系统, 能帮助操作人员确定储层质量, 清晰描绘储层及其特性。
- **Geolog** | 地层评价和钻井数据岩石物理分析的行业标准。
- **RMS/SKUA-GOCAD** | 地质建模软件系统, 将多个渠道的信息整合到 3D 模型中, 并在整个工作流程中识别和传递与数据及解释相关的不确定因素。
- **Tempest** | 地下流动动态数值模拟, 利用 3D 技术对地质建模, 储层和流体动力学进行数值模拟。地质工程和模拟工具可用于理解 3D 流体动力学, 根据实际观测数据校准地质模型, 并预测储层及流体动态变化。
- **Sysdrill** | 钻井设计软件, 可准确进行井轨迹设计, 以保证安全、经济及高效钻井。
- **METTE** | 管网流动保证和生产优化解决方案, 高效的注入及流动效率计算、可进行最佳网络模拟和最佳管内流动模拟。

生产优化

- **Aspen DMC3** | 自适应过程控制软件, 提供基于模型的复杂控制, 可将过程单元的性能管理到线性或非线性控制设定点。有助于管理碳捕集汽提和溶剂回收塔系统。



关于艾斯本技术有限公司

艾斯本技术有限公司（纳斯达克代码：AZPN）是一家领先的全球软件服务提供商，致力于帮助面临全球双重挑战的行业以盈利和可持续的方式满足快速增长的人口对资源日益增长的需求。AspenTech 解决方案旨在应对优化资产设计、运营和维护生命周期等复杂环境。通过我们独特的深度领域专业知识和创新整合，资本密集型行业的客户可以以更安全、更环保、更长久和更快速的方式运营其资产，提高运营效益。

[aspentech.com](https://www.aspentech.com)

© 2022 艾斯本技术有限公司，版权所有。AT-07773

