

二氧化碳的捕集和封存： 通往电力与工业净零排放之路

概要

对于任何使用化石燃料或以任何其他方式排放碳的经济体来说，碳捕集和封存 (CCS) 都是实现净零排放的关键。首要任务就是提高效率和减少排放。

然而，对于重工业等难以脱碳的领域，CCS 可能是抵御碳排放的最后一道防线。全球工业规模均已证实 CCS 是一种可靠、安全、可审核的方法，碳的储存时间可达至少一万年^{1,2}。

思路

- 研究表明，为了实现净零排放，对于大多数路径而言，CCS 都十分重要^{3,4}。
- CCS 是电力和工业领域实现脱碳的一种成熟的技术选择。
- 随着 CCS 不断发展所需部署经验的积累，多个捕集点的集群通过共用管道或运输将 CO₂ 输送到共享的存储区域，是一种共享和降低单位成本的方法。目前，正在建设规划这类 CCS 项目。
- 新型捕集技术的研究有望在未来降低成本，但这种新方法可能还需要几十年才能实现商业化。
- 与工业中的 CCS 一样，直接空气碳捕集和封存 (DACCS) 等二氧化碳去除技术，包括负排放技术，有助于在本世纪中叶实现净零排放的广泛共识目标。
- 个别国家或团体可以实行 CCS 补贴或对碳征税，鼓励进行碳捕集和封存。然而，为了可靠地储存足够的碳以平衡提取，可能需要碳供应商负责封存工作⁵。

1. CCS 的大势所趋 - 实现目标

在政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 审查的大多数实现净零世界的预测路径中, CCS 均发挥着重要作用。

CO₂ 是主要的人为或人为来源的温室气体 (GHG), 产生来源包括化石燃料的使用、生物质燃烧、农业以及扩散的工业和家庭来源。通过提高能源效率以及使用可再生能源或核能替代化石燃料, 便可以减少 CO₂ 的排放。然而, 为了实现净零排放, 任何多余的排放均需予以捕集并进行安全封存。

在政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 审查的大多数实现净零世界的预测路径中, CCS 均发挥着重要作用, 在这个世界中, 与工业化前的基准相比, 全球平均升温幅度保持在 1.5°C 以内³。能源供应脱碳速度极快的国家则属于例外。在国际能源署 (International Energy Agency, IEA) 可持续发展情景中, 提出要在 2070 年之前, 将能源领域的全球 CO₂ 净排放量降至零, 到 2050 年, CCS 每年减少约 56 亿公吨二氧化碳 (GtCO₂/yr), 或者达到目前每年 4000 万公吨 (MtCO₂/yr) 水平的 140 倍⁶。

定义

IPCC 对 **CCS** 给出的定义是“一种将来自工业和能源相关来源的相对纯净的 CO₂ 流进行分离 (捕集)、调节、压缩并运输到封存地点, 实现其与大气长期隔离的过程”³。

IPCC 对**碳捕集和使用 (CCU)** 给出的定义是“捕集 CO₂, 将其作为化学原料试剂生产新产品”的过程。但这一过程很少能实现 CO₂ 的长期封存。例如, CO₂ 已用于燃料、化学品和塑料的生产。

CO₂ - EOR 是指通过提高采收率 (EOR) 捕集 CO₂ 用于生产增量石油的过程。

IEA 表示, 如果不使用 CCS 技术, “几乎不可能”实现零碳排放, 英国气候变化委员会 (Climate Change Committee) 表示: “CCS 是大势所趋, 而非一种选择”^{3, 4}。

CCS 是储存四种主要途径排放物的领先技术选择:

i. 供电

CCS 可用于减少煤炭、天然气、城市垃圾或生物质发电厂的 CO₂ 排放, 并提供低碳电力。

ii. 提供“蓝”氢

CCS 可用于通过在燃烧前进行捕集的方法, 从天然气、生物质或煤中制取氢而实现脱碳。以这种方式制取出来的就是所谓的“蓝氢”, 这种氢是一种用于工业、交通、储存和供热的通用低碳能源。

iii. 脱碳工业

CCS 可以从炼油、水泥、钢铁、造纸、玻璃和农业化肥等行业捕集 CO₂, 而这些行业的排放量在全球人为 CO₂ 排放量中的占比几乎达到了 20%^{6, 7}。石油和天然气行业的 GHG 排放量 (UNFCCC 范围 1 和范围 2) 约占全球总量的 10%, 就发展 CCS 作为显著减少碳足迹的一系列措施中的一环而言, 处于有利地位⁸。

iv. 负排放技术 (NET)

NET 是一种从大气中去除 CO₂ 的技术。具体包括利用化学过程从空气中捕集 CO₂ 的直接空气碳捕集和封存 (DACCS), 以及从生物质燃烧或发酵中捕集 CO₂ 的生物能源与碳捕集和封存 (BECCS)。NET 属于更广泛的二氧化碳去除 (CDR) 活动中的一部分, IPCC 对此给出的定义为“将 CO₂ 从大气中去除, 并将其持久地封存在地质、陆地或海洋储层或产品中的人类活动”。CDR 以及更广泛的 GGR (温室气体去除) 还包括恢复森林和泥炭地等基于自然的解决方案。(参见简报 9: 气候变化与土地)。

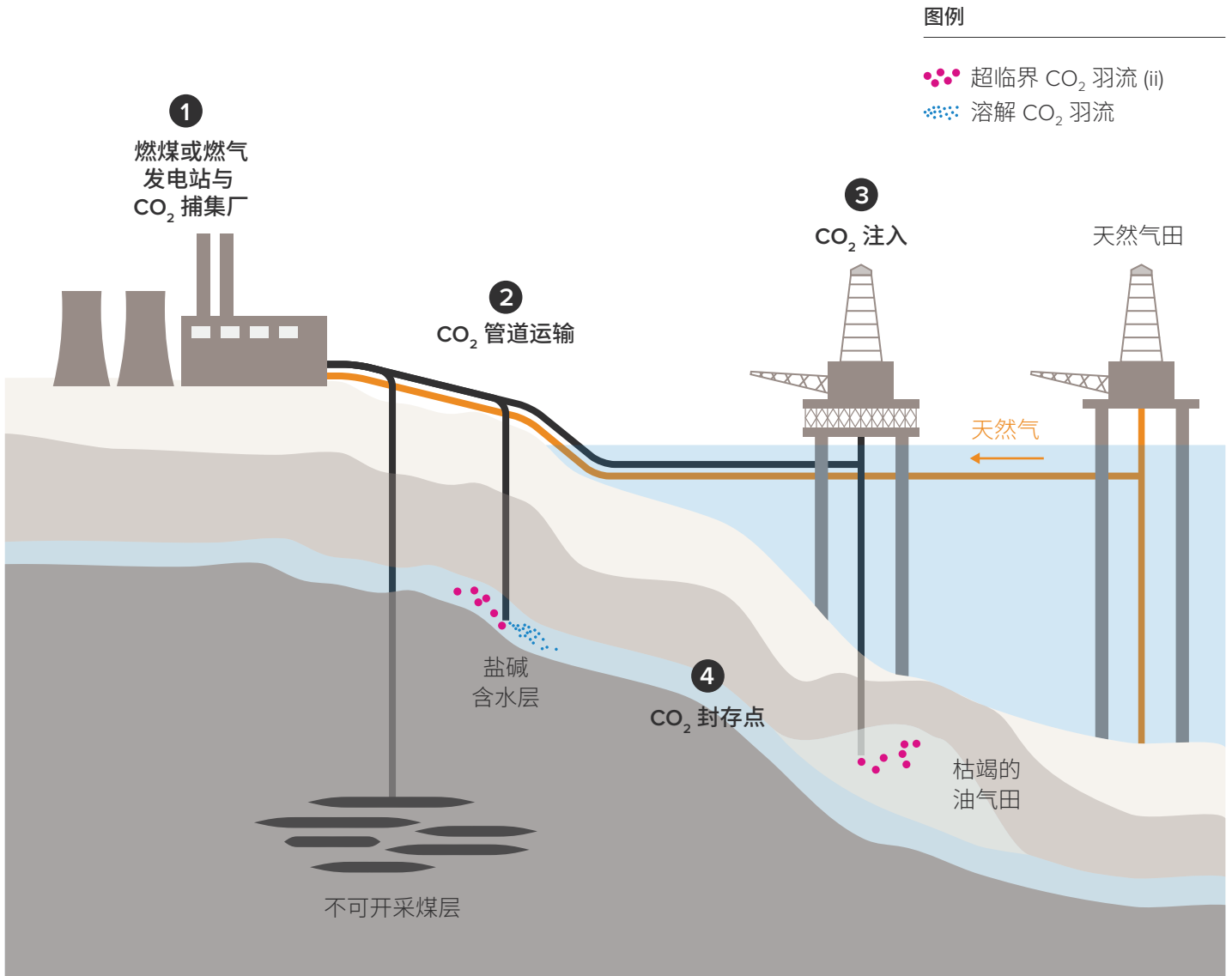
2.CCS 的科学和技术 – 工作原理

CCS 并非单一的技术或活动，而是集捕集、运输和封存于一体的一系列环节的组合，可以通过多种方式进行结合（图 1）。大多数 CO₂ 捕集系统的设计目的均为从一个点源捕集大约

85-95% 的 CO₂。要达到 99%-100% 的捕集率，通常需要更大型的设备和多个流程步骤，因此也会增加成本，例如，燃气发电站估计将增加 10% 的成本⁶。

图 1

碳捕集、运输与封存概述 (i)⁹。



i. 图标并非按真实比例绘制。CO₂ 埋藏在距离海岸线 50-300 公里处深度为 1-5 公里的地下。

ii. 超临界 CO₂ 是 CO₂ 在地下深处压力下的自然流体状态。

2.1 捕集

电力、工业和氢的 CCS 可采用四种主要技术路线：

- i. **燃烧后捕集** – 使用化学溶剂、固体吸附剂或膜将 CO₂ 从烟道气或废气流中分离出来，允许废气通过，而捕集气流中的 CO₂。
- ii. **燃烧前捕集** – 将天然气或煤等燃料转化为合成气体（氢气、一氧化碳和 CO₂），然后通过水煤气转换反应生成氢气和 CO₂ 的混合物。CO₂ 通过溶剂、微孔固体、膜或其他方法从氢中分离出来。由此制取出的“蓝”氢可以用于生产氨、加热和发电等其他工艺。
- iii. **富氧燃烧** – 燃料在纯氧（和回收的 CO₂ 保证火焰温度可控）环境中燃烧，使 CO₂ 能轻松地燃料气体中分离出来，同时对水进行冷却、冷凝，然后移除。
- iv. **工业过程排放的分离** – 排放产生于天然气加工或乙醇生产等原料或过程化学，并使用上述一种或多种过程或特定行业技术进行捕集。捕集 CO₂ 属于核心过程中的内容，因此通常比其他方法更加经济。

2.2 运输

采用专用管道将 CO₂ 从捕集点输送到封存点通常是最经济的方式，即在超过 1000psi 的压力下将 CO₂ 作为高密度流体进行输送。自 1972 年以来，北美已经在陆地上运行了数千公里 (km) 的 CO₂ 管道，而自 1996 年以来，在北海和巴伦支海使用 CCS 进行海上天然气生产作业的海底作业长达数百公里^{3, 10}。在工业位于海岸线或河流上的地域，可以使用油轮将 CO₂ 的来源连接到共用的封存中心^{11, 12}。

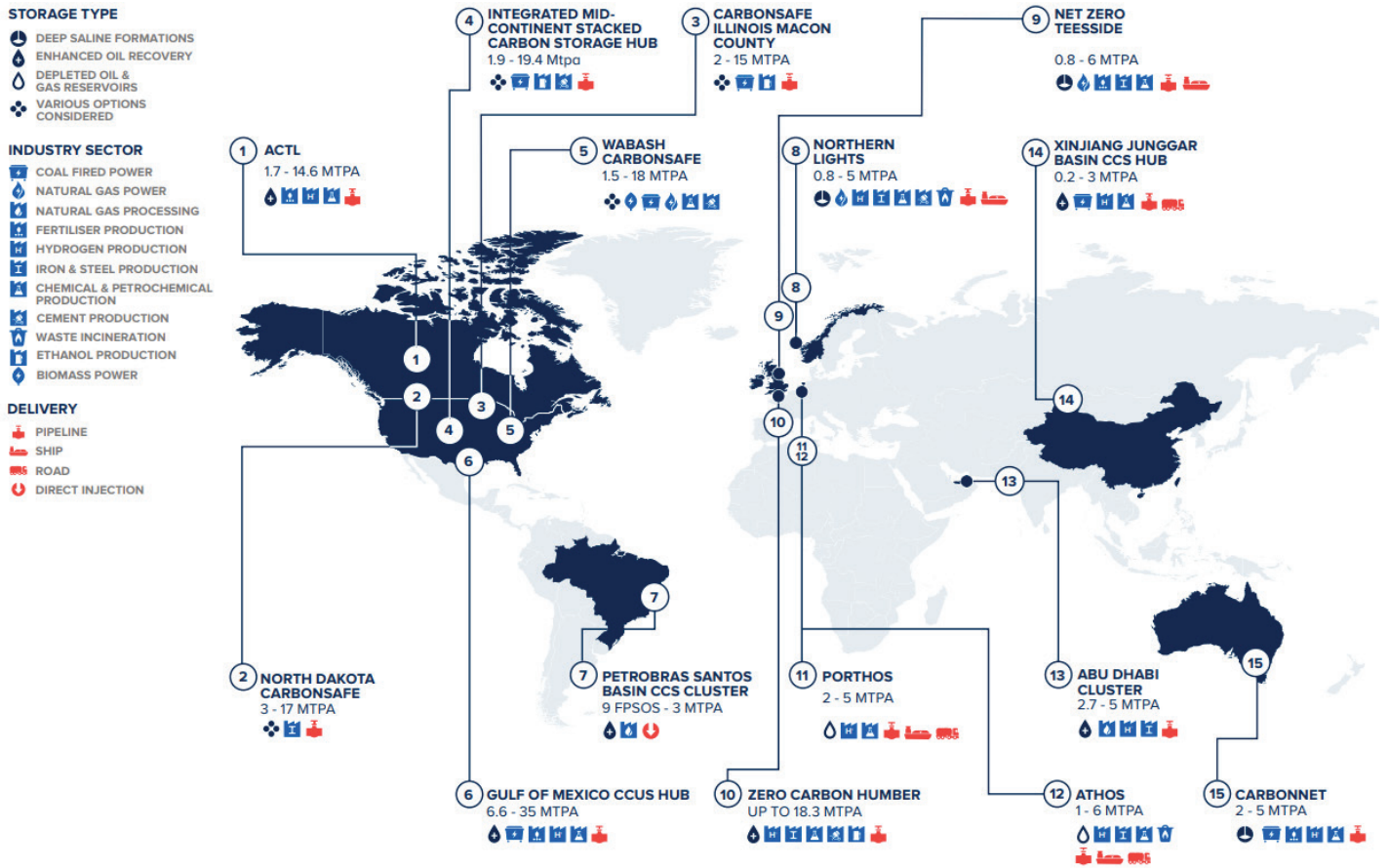
2.3 封存

CO₂ 需要永久地封存在精心挑选的地下多孔岩层中，而且地下多孔岩层需要满足一定的孔隙度、渗透性和安全性。主要目标是枯竭的气田和油田，或盐碱含水层——含有不可饮用盐水的多孔砂岩地层。储存深度一般在 1 到 5 公里之间¹。注入 CO₂ 后发生泄漏的风险非常小，研究表明 98% 的 CO₂ 可以实现封存 1 万年^{1, 13}。通常需要对封存地点监测大约 20 年，以充分证明可以实现永久封存¹⁴。通过商业 EOR（提高采收率）利用 CO₂ 时，会将大部分 CO₂ 封存起来，但这一过程通常会由于增加燃料产量而产生“新的” CO₂。然而，如果需要为减缓气候变化而加强 CO₂ 的封存，则可以注入更多的 CO₂ 安全封存在一些油气储层中，从而抵消石油生命周期产生的排放，进而实现安全的净封存¹⁵。

2.4 世界范围内的工业运营示例

图 2

正在运行或正在开发的 CCS 发电厂集群¹⁶。



目前全球捕集和封存容量约为 40MtCO₂/yr。

捕集项目：

目前已在主要行业的工业规模设施证明了 CCS 的有效性（图 2）¹⁷。截至 2020 年底，已有 26 个处于运行阶段的 CCS 项目；3 个正在建设中；13 个已进入后期研发阶段，进行到了前端工程设计；另外还有 21 个处于早期研发阶段。目前全球捕集和封存容量约为 40MtCO₂/yr¹⁷。出售用于 EOR 的容量约为 30MtCO₂/yr，封存在地质环境中以减缓气候变化的容量约为 10MtCO₂/yr。到 2030 年，容量预计将增长到 120MtCO₂/yr¹⁷。

目前正在运行的项目已涵盖大范围的应用领域。

天然气处理使用成熟的 CO₂ 分离技术。运行项目包括 Shute Creek (7MtCO₂/yr)、美国的 Century Plant (5MtCO₂/yr) 以及澳大利亚的 Gorgon (4MtCO₂/yr)¹⁷。

采用 CCS 技术的燃煤发电使用胺溶剂进行燃烧后捕集 CO₂ 提高采收率 (EOR)，目前已在两家电厂安全有效运行：2014 年开始运行的加拿大萨斯喀彻温省 Boundary Dam 发电厂¹⁷；2017 年开始运行的德克萨斯州的 Petra Nova。由于低油价对项目 EOR 的影响，Petra Nova 已在 2020 年暂停运营¹⁸。

采用 CCS 技术的燃气发电尚未大规模实施，但美国的一家天然气联合循环电厂已在商业上使用了不采用永久封存的小规模 CO₂ 捕集技术。六家能源公司组成的财团提出在英格兰东北部提赛德设立一个“清洁天然气”项目，而亨伯地区也已经开始计划两个类似的天然气-电力-CCS 项目^{19,20}。

工业 CCS 有很多应用，包括：

- 加拿大阿尔伯塔省的 QUEST 项目，“蓝”氢生产使用胺溶剂捕集 1MtCO₂/yr，纯度达到了 99.5%²¹。德克萨斯州的 Port Arthur 炼油厂采用变压吸附法分离 CO₂，生成 99% 纯度的氢气²²。
- 水泥生产约占全球 CO₂ 排放的 8%，为了实现脱碳水泥生产，欧盟低排放强度石灰和水泥行业研究合作组织 (EU Low Emissions Intensity Lime and Cement Industry-research Collaboration, LEILAC) 已在比利时 Lixhe 运营了一家示范工厂，同时目前正在德国汉诺威设计一家规模更大的工厂²³。
- 挪威的 Longship CCS 项目包括一家捕集 CO₂ 的 Brevik 水泥厂以及一家位于奥斯陆峡湾的废物转化为能源的设施，以液体的形式将其运输到海岸上的陆岸终端，然后通过管道输送到北海的海底进行封存^{24, 25}。
- 位于阿布扎比的阿联酋钢铁工业公司 (Emirates Steel Industries) 建立了首家采用 CCS 技术的钢铁厂，将甲烷转化为氢气/一氧化碳合成气，用于直接还原铁矿石^{26, 27}。

封存项目：

目前大部分捕集的 CO₂ 均通过提高采收率 (EOR) 的方式进行封存，但同时也有部分进行地质封存，同时实施监测，保证其满足气候目的的高性能标准²⁸。例如，在北海 Sleipner 和 Snøhvit 项目中，封存在盐碱含水层中的容量为 1.7MtCO₂/yr，而在 Quest 项目中封存在陆上含水层中的容量为 1MtCO₂/yr¹¹。全球已确定的潜在 CO₂ 封存资源超过 12,000Gt，评估结果为值得投资的资源达到了 400Gt。

通过技术可以确定详细的监控封存地点，从而确保达到安全标准并符合当地法规。例如，延时地震反射测量可以确定已封存 CO₂ 的安全性和行为，在含有 20MtCO₂ 的 Sleipner 封存点，可以探测到地表下 1 公里处 1 米厚的 CO₂ 层^{29,30}。

3. 研发与部署重点工作

与许多技术一样，部署工作的首要障碍便在于成本。IPCC 估计，通过 CCS 避免排放的成本（以 2015 年的价格计算），最经济的气体处理和生物乙醇生产成本可至 \$20/tCO₂，化石燃料发电的成本可至 \$60–140/tCO₂，成本最高的水泥应用成本近 \$190/tCO₂³。相比之下，2020 年定价所涵盖的 22% 的全球排放中，CO₂ 的平均价格仅为 \$2/tCO₂³¹，尽管在欧盟排放交易系统中，价格已经达到了 \$50/tCO₂³²。业内估计，如果采用低成本的 CCS 技术，商业激励成本仅为 \$40/tCO₂，可捕集、使用和封存 450MtCO₂¹⁷。

经济方面的挑战说明了为什么目前大多数项目都是向石油公司出售 CO₂ 进行 EOR 的天然气加工和生物乙醇业务。为了实现地质捕集、运输和封存的可行性，需要降低资本和运营成本，同时许多市场的碳价格需要提升，或者需要确立封存义务。

许多 CCS 技术均已得到验证，研究表明，进一步部署是加快进展的主要关键⁵。

3.1 部署重点工作

部署的几个方面预计将降低成本并带动新的项目。

分享学习是一种经过验证可以提高学习速度和降低行业成本的方法。例如，壳牌 (Shell) 估计 QUEST 项目现在的建造成本将比最初降低 30%³³。全球 CCS 研究所 (Global CCS Institute, GCCSI) 报告称，大约三年后，加拿大 Boundary Dam 设施的二氧化碳捕集成本将从超过 \$100/tCO₂ 下降到美国 Petra Nova 设施的 \$65/tCO₂ 以下¹⁷。GCCSI 估计，若学习率（容量每翻一倍成本的下降幅度）达到 8%，CCS 的成本有望在本世纪中叶实现减半¹⁷。

在同一工业集群中**共享基础设施**可以共用多个捕集地点用于收集 CO₂ 的管道或船舶，从而降低成本。例如，在英国，政府已表态要拨出超过 10 亿英镑（约 13.5 亿美元）用于建立一系列使用 CCS 的集群³⁴。这是到 2050 年实现净零目标预计需要封存 170MtCO₂/yr 所需进行的工作内容。这一增长速度与北海的石油和天然气开发速度相当，但低于北海的石油和天然气开发，北海钻探了 15,000 个钻孔，铺设了 45,000 公里的管道^{35, 36}。

全球知识共享对于实现飞速发展而言也至关重要。诸多项目均由政府提供支持，所以，开发商可能需要发布尽可能详细的设计和性能数据。

为了降低捕集成本和改进系统设计，需要**加速重复构建**。CCS 链的所有组件，以及几种捕集技术，均已处于高技术准备级别（7-9 级），故而均已准备好进行试点或示范规模部署³⁷。

许多 CCS 技术均已得到验证，研究表明，进一步部署是加快进展的主要关键。

3.2 新型捕集技术

除了已经部署的现有技术的发展，还有一些新技术的发展，可以在中长期内逐步提高成本效益，例如提高捕集效率至 99%，降低 CCS 设备的能源需求，或者降低安装成本。

熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC) 利用天然气等燃料来源中的氢和烟道气中的 CO₂ 产生电、热和水。捕集到的 CO₂ 以高浓度排出燃料电池，很容易便可进行分离。

先进的燃烧循环：钙循环和化学循环等技术需要载氧物质在两个反应器中循环，通过与供电过程更好地结合，可提高 CO₂ 捕集过程的基本效率。

新型超临界 CO₂ (sCO₂) 萃取技术 利用的是处于或高于临界温度和压力的 CO₂，效率更高，资本成本更低，CO₂ 捕集率更高，潜在优势十分明显。一项关注度十分瞩目的 sCO₂ 工艺名为 Allam-Fetvedt 循环，这种技术打造出了一种新型的发电站。现行的联产循环燃气轮机 (CCGT) 装置上安装的是 CCS 装置，而这种技术不同之处在于，在捕集或回收之前，燃气轮机在与氧气的单一操作中燃烧气体，纯 CO₂ 作为工作的内部流体。德克萨斯州的一家 Allam-Fetvedt 循环示范厂报告实现了 59% 的净效率，与传统的燃气发电厂相似³⁸。

3.3 封存研究工作重点

自 1972 年以来，向地质封存库注入 CO₂ 的工作一直在安全进行。未来的挑战是以数十亿吨而非数百万吨的吨位进行封存。这就需要改进监测工作，包括地下探测和井眼传感器的使用。更强大的计算机模型可以追踪 CO₂ 的运动并确保其留存在地下。

专栏 1

Acorn 项目 – 示范 CCS、DACCS 与氢联产。

苏格兰计划中的 Acorn 中心获得了英国首个海上 CO₂ 封存许可证，开展了 CCS、DACCS 和“蓝”氢生产的示范工作。第一阶段将从阿伯丁郡的 St Fergus 天然气终端捕集约 340,000t/yr 的 CO₂。捕集的 CO₂ 将通过管道输送到离岸约 100 公里的砂岩储层中³⁹。第二阶段，一家新工厂将从 St Fergus 的天然气中制取“蓝”氢，储存 CO₂，并将氢气输送到国家天然气传输系统，最初水平为 2%，然后上升到 20%，从而降低碳水平。海上储

层也有可能额外接收工业站点等其他来源的 CO₂，通过 Peterhead 港口运输 CO₂；碳工程公司 (Carbon Engineering) 的 DACCS 可以封存 CO₂，在 Pale Blue Dot Energy 开发的 St Fergus 附近一家拟建设施中共用同一管道和海底储层⁴⁰。这一项目属于英国工业脱碳挑战 (UK Industrial Decarbonisation Challenge) 中的一项内容，目前 UKRI 已对此项目投入了 3100 万英镑⁴¹。

3.4 负排放技术 (NET)

人们正在研究从大气中捕集 CO₂ 的技术，即负排放技术，以备未来部署，因为可能需要以此抵消难以减少的排放，以及一些历史排放。北美和欧洲的一些小规模项目正在进行直接空气碳捕集和封存 (DACCS) 的试验工作，这项技术通常采用化学工艺进行。据估计，成本在 \$200 到 \$600/tCO₂ 之间⁴²。可能降低成本的因素包括通过使用直接位于封存地点上方的小型模块化化工厂，快速建造和连续学习，从而改进流程。

其他正处于研究阶段的负排放技术包括碳捕集和使用 (CCU)，采用锁定部分 CO₂ 的方式，用于制造木材、稻草和软木等建筑材料，以及砖块等工程产品。生物炭是一种生命周期很长的稳定产品，可将热解或在低氧条件下燃烧生物质产生的碳封存在土壤中。

采用 CCS 技术的生物能源 (BECCS) 涉及到作物或树木在生长过程中吸收 CO₂，然后在捕集 CO₂ 的同时燃烧获得电力或燃料，因此在实现负排放的气候模型中占有重要地位。然而，土地清理和收获庄稼的过程中会释放碳，因此，这种技术的实际碳足迹饱受争议⁴³。一些专家认为 BECCS 可以进行可持续应用，例如使用甘蔗、可耕种谷物秸秆或稻壳⁴⁴。

传统 CCS 的缺点包括依赖大规模工业设施捕集纯 CO₂。相比之下，多种 NET 技术均可使用位于封存地点附近的小型模块化设备来处理低纯度 CO₂。如果可以将 NET 的未来成本保持在 CCS 最昂贵应用的成本之下，NET 便可以用于抵消难以减少的排放。例如，如果成本为 \$120 t/CO₂ 的 CCS 可以减少水泥工厂 60% 的排放，但其余的成本为 \$300 t/CO₂，则运营商可以改为从 NET 提供的空气中购买 CO₂ 捕集。这样一来，可能需要对 CO₂ 的捕集设定一个全球价格上限。

专栏 2

增强土地风化作用。

增强风化作用的一种形式涉及到对一种已有百年历史的耕作技术进行增强，即在农田上散布玄武岩等细粒岩尘。这一过程会加速化学反应，去除大气中的 CO₂，将其转化为碳酸盐和重碳酸盐离子，然后流入海洋，增加碱度，或者在陆地上沉淀为石灰石等碳酸盐矿物。这种方法还可以提高作物产量，加强害虫防护，提高土壤肥力⁴⁵。岩石风化的小规模田间试验估计 CO₂ 捕集范围为 110–220g/m₂，捕集效率约为 60%。例

如，在澳大利亚、巴西和美国等国，是在开采黄金、钻石或镍时产生的废料中生产出的玄武岩。尽管采矿可能会带来一些社会和政治挑战，却能产生足够的材料，满足每年 0.7-1.2 GtCO₂ 封存的需求。0.5–2.0 GtCO₂/yr 的去除成本约为 \$80–180/tCO₂⁴⁶。预粉碎的废岩尘对于加快化学反应速度非常重要，因为粉碎所需的高碳能量可以显著降低捕集的净碳量。增强风化作用的潜力仍有待进一步研究和论证。

4. 实现 CCS 所需的行动 – 如何实现增长

CCS 的三大基本且相互关联的难题不断显露出来：成本；封存安全；监管框架。

CCS 的三大基本且相互关联的难题不断显露出来：成本；封存安全；监管框架。这三大问题的解决需要结合科学证据、技术创新和政策制定。政策框架有助于降低成本，推动部署工作，并为运营商提供演示安全封存的机会。

一种政策选择是重点关注新型技术的研究，使其在效率和成本上均得到显著提高。然而，虽然上述新方法值得支持，但迄今为止的技术创新和转让速度表明，这种转型方案至少要到 2040 年才能大规模推行。

有证据表明，取得进展的首要任务是扩大部署现有技术的部署范围，通过边实践边学习来降低成本。广泛应用 CCS 技术不仅能大幅减少 GHG 的排放，还能带来诸多好处，从而有助于获得公众支持，包括高价值的就业机会和更加清洁的空气质量。

CCS 可以应用于多种策略来实现净零目标。这种技术可以显著减少发生过程排放或者以某种形式继续使用化石燃料的工业所产生的排放，例如天然气发电厂或水泥制造业的碳排放。它可以将氢等能量载体进行脱碳，从而运

用于多种应用，而且可以通过重新捕集空气中排放的 CO₂ 形成一种“循环碳经济”。这种技术还可以作为向更清洁的工业过程的过渡，比如用氢代替煤制铁，对此，政策制定者希望能避免将化石燃料长期锁定在系统中。

CCS 离不开经济政策的激励，对于需要在被零碳能源选项取代之前得到回报的投资而言，更为如此。最初，可以通过补贴、基于技术的性能标准和通过排放交易或税收进行碳定价予以经济激励。但也需要额外的激励措施，确保启动 CO₂ 封存工作。特别是，市场增长可以依靠政府规定来实现，规定任何持续的 CO₂ 生产均需要与其封存达到平衡⁴⁷。

解决 CCS 资本与运营成本的一种方法是推行“碳回收义务”(Carbon Take Back Obligation)，要求化石燃料的生产国和进口国对其所销售产品的生产、提炼、运输和使用过程中产生的越来越多的 CO₂ 进行封存⁴⁷。封存的比例将增加到 100% 甚至更多，进而确保任何正在进行的排放都能与可靠且长期封存在地下的碳达到数量上的平衡。

5. 总结

要实现发电、氢生产、排放密集型工业和其他难以减排的活动完全脱碳，需要采用 CCS 技术，特别是在中短期内投入使用。目前的 CCS 项目建设速度过慢，无法达到到 2050 年实现净零排放目标所需的容量⁵。政府必须在财政上支持和强制要求采取 CO₂ 封存行动。目前，

由部署主导的 CCS 方法是加快降低成本和扩大技术规模的最佳途径。政策制定固然重要，但在这十年中做好落实工作也同样至关重要。IPCC 的预测曾指出，如果不采用 CCS，则可能无法实现《巴黎协定》的目标。

本简报只是探讨科学技术在全球实现净零排放和适应气候变化中作用的系列简报中的一篇。世界各国都在制定各自在 2050 年之前实现净零的路线图，该系列简报旨在就科学所能有助于理解和采取行动的 12 个方面，为各国决策者献计献策。

要观看完整系列内容，请访问 royalsociety.org/climate-science-solutions

要查看简报编著人，请访问 royalsociety.org/climate-solutions-contributors

本文中的文本根据《创作共用署名许可协议》(Creative Commons Attribution License) 条款授权使用，该协议允许在注明原作者和出处来源的前提下，进行无限制使用。许可协议访问网址：creativecommons.org/licenses/by/4.0。图片不在本许可授权范围内。

发布日期：2021 年 6 月 DES7639_5 © The Royal Society

参考文献

1. Alcalde J *et al.* 2018 Estimating geological CO₂ storage security to deliver on climate mitigation. *Nature Commun.* **9**, 2201. (doi: 10.1038/s41467-018-04423-1)
2. Holloway S, Pearce J, Hards V, Ohsumi T, Gale J. 2007 Natural emissions of CO₂ from the geosphere and their bearing on the geological storage of carbon dioxide. *Energy* **32**, 1194–1201. (doi:10.1016/j.energy.2006.09.001)
3. IPCC. 2018 Global Warming of 1.5°C. 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, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. 参见 <https://www.ipcc.ch/sr15/> (访问日期 2020 年 12 月 12 日)。
4. Climate Change Committee. 2020 Reducing UK emissions: Progress Report to Parliament. 参见 <https://www.theccc.org.uk/publication/reducing-uk-emissions-2020-progress-report-to-parliament/> (访问日期 2020 年 12 月 12 日)。
5. Haszeldine RS, Flude S, Johnson G, Scott V. 2018 Negative emissions technologies and carbon capture and storage to achieve the Paris Agreement commitments. *Phil. Trans. R. Soc. A.* **376**, 20160447. (doi:10.1098/rsta.2016.0447)
6. International Energy Agency. 2020 CCUS in the transition to net-zero emissions. 参见 <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions/ccus-in-the-transition-to-net-zero-emissions> (访问日期 2020 年 12 月 15 日)。
7. Global CCS Institute. Capturing carbon dioxide (CO₂). 参见 <https://www.globalccsinstitute.com/about/what-is-ccs/capture/> (访问日期 2020 年 12 月 15 日)。
8. McKinsey & Company. 2020 How oil and gas companies can decarbonize. 参见 <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/the-future-is-now-how-oil-and-gas-companies-can-decarbonize> (访问日期 2020 年 12 月 15 日)。
9. Scottish Carbon Capture & Storage. CCS Education Centre. 参见 <https://www.sccs.org.uk/> (访问日期 2020 年 12 月 15 日)。
10. European Commission. 2019 The potential for CCS and CCU in Europe. 参见 https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/iogp_-_report_-_ccs_ccu.pdf (访问日期 2020 年 12 月 15 日)。
11. Northern Lights. 2021 What it takes to ship CO₂. 参见 <https://northernlightsccs.com/news/what-it-takes-to-ship-co2/> (访问日期 2021 年 3 月 15 日)。
12. Neele F *et al.* 2017 CO₂ Transport by Ship: The Way Forward in Europe. *Energy Procedia* **114**, 6824–6834. (doi:10.1016/j.egypro.2017.03.1813)
13. National Energy Technology Laboratory. Carbon Storage FAQs. 参见 <https://www.netl.doe.gov/coal/carbon-storage/faqs/carbon-storage-faqs> (访问日期 2021 年 1 月 15 日)。
14. Climate Action. 2011 Implementation of Directive 2009/31/EC on the Geological Storage of Carbon Dioxide. 参见 https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/lowcarbon/ccs/implementation/docs/gd3_en.pdf (访问日期 2021 年 1 月 18 日)。
15. Stewart RJ, Johnson G, Heinemann N, Wilkinson M, Haszeldine RS. 2018 Low carbon oil production: Enhanced oil recovery with CO₂ from North Sea residual oil zones. *International Journal of Greenhouse Gas Control* **75**, 235–242. (doi:10.1016/j.ijggc.2018.06.009)
16. Global CCS Institute. 2020 Global Status of CCS 2020. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2021/03/Global-Status-of-CCS-Report-English.pdf> (访问日期 2021 年 1 月 18 日)。
17. SaskPower. Boundary Dam Carbon Capture Project. 参见 <https://www.saskpower.com/Our-Power-Future/Infrastructure-Projects/Carbon-Capture-and-Storage/Boundary-Dam-Carbon-Capture-Project> (访问日期 2021 年 3 月 15 日)。
18. NRG. Petra Nova: Carbon Capture and the future of coal power. 参见 <https://www.nrg.com/case-studies/petra-nova.html> (访问日期 2021 年 1 月 18 日)。
19. Net Zero Teesside. The UK's first decarbonised industrial cluster. 参见 <https://www.netzeroteesside.co.uk/> (访问日期 2021 年 3 月 15 日)。
20. SSE. 2021 Plans for first-of-a-kind hydrogen and CCS projects. 参见 <https://www.sse.com/news-and-views/2021/04/plans-for-first-of-a-kind-hydrogen-and-ccs-projects/> (访问日期 2021 年 4 月 16 日)。
21. Alberta Government. Quest Carbon Capture and Storage project annual report 2019. 参见 <https://open.alberta.ca/publications/quest-carbon-capture-and-storage-project-annual-report-2019> (访问日期 2021 年 3 月 15 日)。
22. Air Productions. Carbon Capture. 参见 <https://www.airproducts.co.uk/company/innovation/carbon-capture/#/> (访问日期 2021 年 1 月 18 日)。
23. Low Emissions Intensity Lime & Cement. FAQs – Frequently Asked Questions. 参见 <https://www.project-leilac.eu/faq> (访问日期 2021 年 3 月 15 日)。
24. Northern Lights. 2021 What we do. 参见 <https://northernlightsccs.com/en/about> (访问日期 2021 年 3 月 15 日)。
25. CCS Norway. The Longship CCS Project. 参见 <https://ccsnorway.com/the-project/> (访问日期 2021 年 3 月 15 日)。
26. Global CCS Institute. 2017 CCS: a necessary technology for decarbonising the steel sector. 参见 <https://www.globalccsinstitute.com/news-media/insights/ccs-a-necessary-technology-for-decarbonising-the-steel-sector/#:~:text=The%20Abu%20Dhabi%20CCS%20Project%20%2D%20also%20called%20Emirates%20Steel%20Industries,produced%20by%20the%20DRI%20reactor> (访问日期 2021 年 3 月 15 日)。
27. Abu Dhabi Carbon Capture Company. 2017 Case Study: Al Reyadah CCUS Project. 参见 <https://www.cslforum.org/cslf/sites/default/files/documents/AbuDhabi2017/AbuDhabi17-TW-Sakaria-Session2.pdf> (访问日期 2021 年 3 月 15 日)。
28. Jenkins C. 2020 The State of the Art in Monitoring and Verification: an update five years on. *International Journal of Greenhouse Gas Control* **100**, 103118. (doi: 10.1016/j.ijggc.2020.103118)
29. Pevzner, R *et al.* 2017 4D surface seismic tracks small supercritical CO₂ injection into the subsurface: CO₂CRC Otway Project. *International Journal of Greenhouse Gas Control* **63**, 150-157.(doi: 10.1016/j.ijggc.2017.05.008)
30. Chadwick RA, Marchant BP & Williams GA. 2014 CO₂ storage monitoring: leakage detection and measurement in subsurface volumes from 3D seismic data at Sleipner. *Energy Procedia* **63**, 4224-4239. (doi: 10.1016/j.egypro.2014.11.458)
31. World Bank Group. 2020 State and Trends of Carbon Pricing 2020. 参见 <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/33809/9781464815867.pdf?sequence=4&isAllowed=y> (访问日期 2021 年 2 月 8 日)。
32. Ember. Daily EU ETS carbon market price (Euros). 参见 <https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/> (访问日期 2021 年 3 月 15 日)。
33. Hydrocarbon Engineering. 2019 Shell's Quest CCS facility reaches CO₂ capture milestone. 参见 <https://www.hydrocarbonengineering.com/the-environment/24052019/shells-quest-ccs-facility-reaches-co2-capture-milestone/> (访问日期 2021 年 3 月 15 日)。

34. HM Government. 2020 The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution. 参见 <https://www.gov.uk/government/news/pm-outlines-his-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution-for-250000-jobs> (访问日期 2021 年 3 月 15 日)。
35. Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (GEOMAR) Extensive gas leaks in the North Sea: Abandoned wells. 参见 <https://www.sciencedaily.com/releases/2020/07/200730113055.htm#:~:text=The%20positions%20of%20the%20boreholes,Sea%2C'%20adds%20Dr%20Haeckel> (访问日期 2021 年 2 月 18 日)。
36. Oil & Gas UK. 2013 Decommissioning of pipelines in the North Sea Region 2013. 参见 <https://oilandgasuk.co.uk/wp-content/uploads/2019/05/OGUK-Guidelines-on-Decommissioning-of-Pipelines-in-the-North-Sea-Region-Issue-1.pdf> (访问日期 2021 年 2 月 18 日)。
37. Bui M *et al.* 2018 Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy Environ. Sci.* **11**, 1062.(doi: 10.1039/C7EE02342A)
38. International Energy Agency. 2020 The role of CCUS in low-carbon power systems. 参见 <https://www.iea.org/reports/the-role-of-ccus-in-low-carbon-power-systems> (访问日期 2021 年 2 月 18 日)。
39. Pale Blue Dot. Acorn CCS & Acorn Hydrogen. 参见 <https://pale-blu.com/acorn/> (访问日期 2021 年 2 月 18 日)。
40. Pale Blue Dot. 2020 Pale Blue Dot Energy and Carbon Engineering create partnership to deploy Direct Air Capture in the UK. 参见 [https://pale-blu.com/2020/09/17/pale-blue-dot-energy-and-carbon-engineering-create-partnership-to-deploy-direct-air-capture-in-the-uk/#:~:text=News-,Pale%20Blue%20Dot%20Energy%20and%20Carbon%20Engineering%20create%20partnership%20to,Air%20Capture%20in%20the%20UK&text=Pale%20Blue%20Dot%20Energy%20are,2\)%20out%20of%20the%20atmosphere](https://pale-blu.com/2020/09/17/pale-blue-dot-energy-and-carbon-engineering-create-partnership-to-deploy-direct-air-capture-in-the-uk/#:~:text=News-,Pale%20Blue%20Dot%20Energy%20and%20Carbon%20Engineering%20create%20partnership%20to,Air%20Capture%20in%20the%20UK&text=Pale%20Blue%20Dot%20Energy%20are,2)%20out%20of%20the%20atmosphere) (访问日期 2021 年 2 月 18 日)。
41. UK Research and Innovation. 2021 UKRI awards £171m in UK decarbonisation to nine projects. 参见 <https://www.ukri.org/news/ukri-awards-171m-in-uk-decarbonisation-to-nine-projects/> (访问日期 2021 年 4 月 12 日)。
42. The Royal Society & Royal Academy of Engineering. 2018 Greenhouse gas removal. 参见 <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/greenhouse-gas-removal/> (访问日期 2021 年 1 月 20 日)。
43. Brack D & King R. 2020 Managing land-based CDR: BECCS, Forests and Carbon Sequestration. *Global Policy* **12**, 45-56. (doi: 10.1111/1758-5899.12827)
44. Department for Business, Energy & Industrial Strategy. 2020 The potential of bioenergy with carbon capture. 参见 <https://www.gov.uk/government/publications/the-potential-of-bioenergy-with-carbon-capture> (访问日期 2021 年 2 月 19 日)。
45. Beerling DJ *et al.* 2018 Farming with crops and rocks to address global climate, food and soil security. *Nature Plants* **4**, 138-147. (doi: 10.1038/s41477-018-0108-y)
46. Beerling DJ *et al.* 2020 Potential for large-scale CO₂ removal via enhanced rock weathering with croplands. *Nature* **583**, 242-248. (doi: 10.1038/s41586-020-2448-9)
47. Carbon Takeback. 参见 <https://carbontakeback.org/> (访问日期 2021 年 2 月 8 日)。