

全球

碳捕集与封存

现状

2020

CCS.

VITAL TO ACHIEVE

NET-ZERO





前言

- 1.0 前言
- 2.0 碳捕集与封存需求
- 3.0 全球碳捕集与封存现状2020
 - 3.1 全球碳捕集与封存设施进展与趋势
 - 3.2 政策与监管
 - 3.3 全球封存概览
- 4.0 区域现状一览
 - 4.1 美洲
 - 4.2 欧洲
 - 4.3 亚太
 - 4.4 海合会
- 5.0 技术及应用
 - 5.1 工业
 - 5.2 氢
 - 5.3 天然气
 - 5.4 电力行业的碳捕集与封存
 - 5.5 负排放技术
 - 5.6 碳捕集与封存创新
- 6.0 附录
- 7.0 参考文献

关于我们

全球碳捕集与封存研究院（以下简称研究院）是一家国际智库，其宗旨在于加速部署碳捕集与封存（CCS）这一应对气候变化的关键技术。

研究院团队由超过30位专业人士组成，他们与我们的会员共事或代表我们的会员。我们尽可能以最快最经济的方式，促进CCS的应用。我们分享专业技术，加强能力建设，献言献策，提供支持，让CCS在温室气体减排中发挥应有的作用。

我们的会员背景多样，包括政府、跨国集团、私营企业、研究机构以及非政府组织。他们均致力于发展CCS，使其成为实现净零排放未来不可或缺的一部分。

研究院总部位于澳大利亚墨尔本，在华盛顿特区、布鲁塞尔、北京、伦敦以及东京设有代表办公室。

关于本报告

CCS是实现全球气候目标的关键减排技术。《全球碳捕集与封存现状2020》记录了过去12个月以来CCS所取得重要成绩，全球所处的现状以及CCS所面临的的重大机遇与挑战。

我们希望本报告能对各国政府、政策制定者、学者、媒体评论员以及无数关心气候的人有所帮助。

编写团队

本报告编写和分析团队：本报告主要编写人为布拉德·佩吉、古洛伦·图兰和亚历克斯·泽潘提斯，其他成员包括Jamie Burrows、Chris Consoli、Jeff Erikson、Ian Havercroft、David Kearns、Harry Liu、Dominic Rassool、Eve Tamme、Alex Townsend以及Tony Zhang。

缩写

BECCS 生物质能结合碳捕集与封存
CCS 碳捕集与封存
CCUS 碳捕集、利用与封存
COP 缔约方大会
DAC 直接空气捕集
DACCS 直接空气捕集与碳封存
EC 欧洲委员会
EOR 提高原油采收率
ESG 环境、社会和公司治理
EU 欧盟
FEED 前端工程设计
GHG 温室气体
Gt 十亿吨
GW 千兆瓦
IPCC 政府间气候变化专门委员会
LCFS 低碳燃料标准
MMV 监测、测量与核查
Mt 百万公吨
MW 兆瓦
NDC 国家自主贡献
R&D 研发
SDS 可持续发展情景
SMR 蒸汽甲烷重整
SOE 国有企业
TWH 太瓦时
UNFCCC 联合国气候变化框架公约
UK 英国
US 美国
USDOE 美国能源部

布拉德·佩吉

CEO
全球碳捕集与封存研究院



突如其来的新冠大流行席卷全球，使得今年注定是极具挑战、令人难忘的一年。疫情之下，人员伤亡惨重，而经济影响则需要数十年才能消除。这是一个对健康、社会和经济造成了巨大破坏的典型黑天鹅事件。世界仍在为抗疫而努力，并且由于尚无疫苗可用，如何生活在一个疫情已成为现实的世界中，对政府、企业和社区而言，已构成迫在眉睫的重大挑战。

正如许多人所观察到的那样，政府需要制定和实施经济刺激计划，以使本国摆脱衰退并使人们重返工作岗位，因此我们拥有一个极其难逢的机会来改变路线并以气候友好和环境可持续的方式重新发展全球经济。现在，一个拥抱和加速能源转型的契机近在眼前，可以通过提供新的、清洁的能源，创造清洁产业的就业，来维系各国经济未来数十年的发展。

有证据表明，私营部门和公共部门都逐渐走上了选择气候友好型政策和投资的道路。越来越多的国家已经承诺在本世纪中叶实现净零排放。除了国家政府的承诺外，大型跨国能源公司面对艰难的商业环境，仍然纷纷在2020年承诺，将在本世纪中叶实现碳中和。对于一些企业来说，这还包括范围3的排放，即客户消费（通常为燃烧）其公司产品所造成的排放。值得注意的是，一些政府在其应对疫情的财政计划中纳入了更高的减排目标，CCS技术屡被提及。对此我们表示欢迎，因为此举十分必要。长期以来人们已然认识到，要想在本世纪中叶实现净零排放并把升温幅度严格控制在两度以内，就需要迅速部署所有可用的减排技术，提前淘汰一些排放密集型设施，并利用CCS等技术改造某些设施。还有一点不容忽视，那就是几乎可以肯定碳预算必然会超支，这一点很遗憾，因此需要大规模移除二氧化碳（CDR）。

今年《全球碳捕集与封存现状》报告中的相关发现也与上述发展变化保持一致。正如我们过去两年所报告的，全球运行中和开发中的CCS设施再次呈现增长态势。今年继续保持上升势头。有些行业的脱碳难度很高，但其所制造的产品对世界各地人民的日常生活具有不可或缺的意义。CCS在众多行业和工艺中得以应用，并能助力上述行业移除排放物，该技术的灵活性由此可见一斑。

CCS活跃度的持续上升和对新设施投资的增加令人振奋和鼓舞，但是还有很多工作要做。

《IPCC全球升温1.5度特别报告》中言及CCS的作用，即本世纪将需要捕集和封存350至1200吉吨二氧化碳。目前，每年的捕集封存量约为4000万吨二氧化碳。到2050年，这一数字须至少增加100倍才能实现IPCC中提出的情景。显然，必须通过出台更多政策，加大私营部门的投入，从而大幅增加资本投资，才能建设足以实现上述捕集封存量的设施。

正如今年的报告所阐述的，在CCS价值链的每个环节中，都取得了实质性进展。新型、高效、低成本的捕集技术得到广泛应用，正在改变CCS价值链中最重要的组成部分，即成本的前景。CCS枢纽的支持者继续朝着理想变为现实的方向迈进。在这一领域值得注意的是阿尔伯塔省碳干线的运行。CDR技术对投资和项目活动的增加也起着重要作用。美国、英国、欧盟和澳大利亚等国家和地区纷纷出台利好政策，催生出众多处于积极研究和开发阶段的项目。

尤为重要的是，金融界和ESG领域的参与度和关注度不断提高。受到重视的投资机会越来越多。考虑到许多企业都需要过渡到净零世界，ESG顾问就得着眼考虑可以实现必要转变的技术。

虽然未来的道路充满挑战，但CCS将发展地越来越好，并能为本世纪中叶实现净零排放做出重要且不可或缺贡献。

虽然未来的道路充满挑战，但CCS将发展地越来越好，并能为本世纪中叶实现净零排放做出重要且不可或缺贡献。

尼古拉斯·斯特恩勋爵

伦敦政治经济学院经济学与政府管理专业IG Patel教授
格兰瑟姆研究院院长



在这一年中，不可预见的挑战与动荡相互交织，气候变化的威胁从未远离，减少排放和稳定全球气温的迫切需求有增无减，亟待采取相关行动。新冠疫情蔓延全球，造成了许多悲剧和巨大破坏。但很多人认为，一个足以引起根本性变革的时刻也随之到来。这一刻可能成为应对气候变化的转折点。这是历史上我们终于意识到所处环境有多脆弱、多危险、多不公的一刻。这一刻可以推动加强减排承诺，让我们不但能走上一条复苏之路，更能走上一条变革之路，实现一种崭新、可持续、更具吸引力的增长和发展方式。

要想抓住机会稳住全球气温，就要稳住大气中温室气体浓度，即实现净零排放。排放量越低，就能越快实现净零排放，也就能将气温稳定在越低的水平。我们已然认识到，必须将目标定在1.5度——气温若再高一点，就会威胁到我们的生活方式。而一高再高的话，后果难以想象。

近年来，气候变化无论在话语上，还是行动中，都纷纷以净零排放为关键目标。随之而来的，是对碳捕集利用与封存（CCUS）的需求。CCUS将成为一项重要的减排技术，这一点早已为人所知；现在必须加快步伐，在众多经济部门中部署该技术。可再生能源和CCUS等低碳技术为2050年前实现温室气体净零排放指明一条可行的途径。即便几年前被认为“难以”脱碳的行业，现在也能实现这一目标，如钢铁、水泥、航空和长途运输等。

与此同时，我们对气候变化的认识和理解不断加深，因此也愈发清楚其进展之快，危害之广。尤为重要的是，现在我们已经明白必须在本世纪中叶实现净零排放，也明白必须采取什么样的行动才能实现这一目标。然而，尽管我们已经具备深入的了解，但国际社会在减排上仍然行动缓慢。

正因如此，必须立即采取行动。我们必须避免新冠危机后重返“旧常态”。我们正在见证新冠大流行造成的危害，也已经见识了世界各地过去十年因复苏乏力和缺乏公正等因素造成的脆弱社会结构所带来的危险。而在所有这些危险之上，是对气候变化的不作为。

我们正走在一条令人忧惧的道路上，必须改变线路，并迅速采取行动应对气候变化。我们已经制定了强有力的应对措施，既有政策上的，也有技术上的，只要我们下定决心，就能迅速落地实施，为实现净零目标做出重大贡献。现在，必须马上实现规模化。

通过应用我们已知的，加上在过程中所学到的，我们可以铺设一条对世代繁荣至关重要的零碳经济之路。

通过应用我们已知的，加上在过程中所学到的，我们可以铺设一条对世代繁荣至关重要的零碳经济之路。

尼古拉斯·斯特恩勋爵
伦敦政治经济学院经济学与政府管理专业IG Patel教授
格兰瑟姆研究院院长

杰德·哈米斯特

极地探险者



- 最年轻的抵达北极的滑雪者（14岁）
 - 最年轻的跋涉550公里横跨格陵兰岛冰盖的女性（15岁）
 - 最年轻的从南极洲海岸抵达南极点的滑雪者（16岁）
 - 史上仅有的三位以全新路线抵达南极点的女性之一
 - 2016年及2018年澳大利亚地理学会年度青年探险者奖项获得者
 - 因极地探险荣获澳大利亚勋章（18岁）
- 杰德的所有探险均在无补给和辅助的情况下独立完成。

当前全世界正在与一场大流行病作斗争。与此同时，另一场更大的挑战也在不断改变我们所知的生活。

在2020年，气候变化虽然很容易被遗忘，但从未远离。除此以外，还有排放量攀升的问题亟待解决，《巴黎协定》和净零排放目标也迫切需要实现。

气候变化的影响已经愈发明显。去年夏天，我的祖国澳大利亚遭受了史无前例的毁灭性大火。在今年这一年中，大堡礁珊瑚的白化速度前所未见。

直面挑战并做出必要响应，是刻不容缓的事情。我们必须重新审视全球变暖，应将其视为创新的催化剂，从而实现增长和为所有人创造一个更加繁荣和可持续的未来。

近来，世界各地的组织和国家纷纷做出净零承诺，表态迎战，让人看到希望；但光有承诺还不够，还要有能带来切实变化的实际行动。

年仅19岁的我并非全球变暖问题的专家，也不知如何召集全球领导人行动起来，共同抗击人类已知的最大威胁。

但我很可能是同代人中唯一有幸亲身体世界三大极地的人——我曾滑雪抵达北极和南极，并横跨格陵兰岛冰盖。用时80天，总计跋涉大约1300公里。

极地探险的经历让我深刻认识到全球变暖这一无可辩驳的事实。我亲眼目睹了全球变暖正给我们美丽但又脆弱的家园所带来的影响。

上述探险经历永远地改变了我。现在，我已与地球家园之间建立起牢固的情感纽带，尽全力保护地球，我责无旁贷。

为减少排放，在2050年前实现净零排放目标，应让一切可用的解决方案都为我们所用，因此我们需要碳捕集与封存技术。

毫无疑问，我们有科学，有知识，也有解决方案使人类自身免受气候变化带来的灾难性后果。

现在，我们需要的是立即采取大规模的行动。

为减少排放，在2050年前实现净零排放目标，应让一切可用的解决方案都为我们所用，因此我们需要碳捕集与封存技术。



碳捕集与封存需求

- 1.0 前言
- 2.0 碳捕集与封存需求**
- 3.0 全球碳捕集与封存现状2020
 - 3.1 全球碳捕集与封存设施进展与趋势
 - 3.2 政策与监管
 - 3.3 全球封存概览
- 4.0 区域现状一览
 - 4.1 美洲
 - 4.2 欧洲
 - 4.3 亚太
 - 4.4 海合会
- 5.0 技术及应用
 - 5.1 工业
 - 5.2 氢
 - 5.3 天然气
 - 5.4 电力行业的碳捕集与封存
 - 5.5 负排放技术
 - 5.6 碳捕集与封存创新
- 6.0 附录
- 7.0 参考文献

2.0 碳捕集与封存需求

CCS将在应对气候变化的过程中带来巨大改变。该技术能够从源头上避免二氧化碳排放，并能通过二氧化碳移除技术大规模地减少大气中已有的二氧化碳，这使其成为解决方案中不可或缺的重要组成部分。

为避免气候变化带来的最差后果，《IPCC全球升温1.5度特别报告》¹专门强调了在本世纪中叶实现净零排放的重要性。该报告提出将全球升温控制在1.5度的四种情景——所有情景都需要移除二氧化碳才能得以实现，其中三种情景涉及大量运用CCS技术（见图1）。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。

CCS投资可在以下四个主要方面为实现具有成本效益的净零排放提供助力：

- **在减排难度较大的行业实现深度脱碳**
由于其工艺特性和高温热处理要求，水泥、钢铁和化工行业排放大量二氧化碳，且属于最难脱碳的行业。能源转型委员会和国际能源署（IEA）等数家机构所发布的多份报告都得出一致结论，即如果不采用CCS，这些行业几乎不可能实现净零排放，且无论如何也逃不过成本升高的结局。对于减排难度较大的行业来说，CCS是最成熟、成本效益最好的选择。

- **实现低碳氢的规模化生产**
在那些难以减排部门的脱碳过程中，氢将有很大可能发挥重要作用。同时，氢也可能成为住宅供暖和灵活发电重要的能源来源。煤或天然气结合CCS技术是成本最低廉的低碳制氢方式。对于无法为电解制氢提供大量可负担可再生电力的地区和化石燃料价格较低的地区而言，该方案仍是成本最低的选择。为了使难以减排的行业实现脱碳和净零排放，全球的氢产量必须实现大幅增长，从现在的年产量7000万吨增至本世纪中叶的年产量4.25亿——6.50亿吨。
- **提供可调度的低碳电力**
电力行业脱碳对实现净零排放至关重要。运用CCS技术的发电厂能提供可调度的低碳电力，以及电网稳定服务，如设备惯性、频率控制和电压控制等。太阳能光伏发电或风力发电则无法提供电网稳定服务。将CCS技术与可再生能源结合，有助于使未来的低碳电网更具韧性和可靠性。
- **实现负排放**
难以减排部门的剩余排放量需要通过其他方式抵消。CCS为二氧化碳移除技术方案奠定了基础，其中包括生物质能结合碳捕集与封存和直接空气捕集结合碳封存。虽然移除二氧化碳不是万灵药，但如果一年一年过去却不见二氧化碳排放量显著减少，就必须采用这个方案。

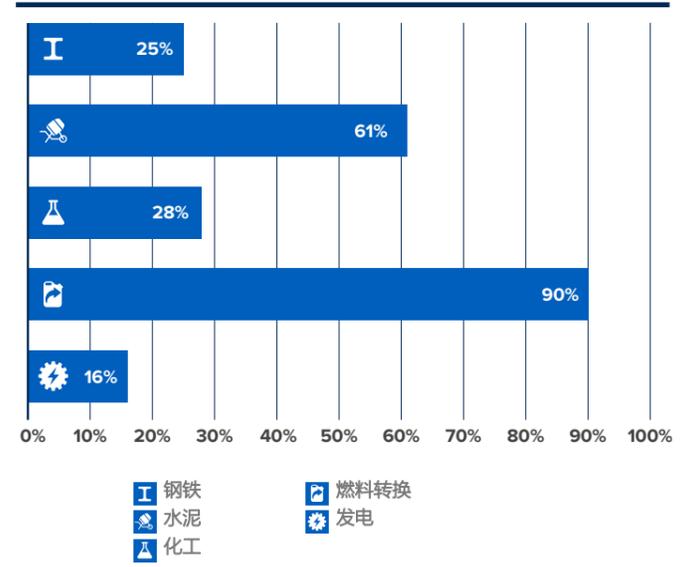


图3 IEA可持续发展情景中到2070年CCUS对不同行业中减少二氧化碳排放量所作的贡献

燃料转换包括精炼、生物燃料、商用氢和制氨等产业

IEA可持续发展情景²对未来进行了一番畅想，届时联合国设定的与能源相关的排放、能源获取和空气质量方面的可持续发展目标全部得以实现，利用CCS技术捕集的二氧化碳总量从现在的每年约4000万吨增至2050年的约5.6吉吨，增幅超过一倍（图2）。CCS贡献巨大，分别为钢铁、水泥、化工、燃料转换和发电部门的减排量贡献16%至90%不等（图3）。CCS用途多样，具有战略重要性，对净零排放未来的意义不言而喻。

除了在减少二氧化碳排放方面起到重要作用之外，针对CCS的投资还将带来以下几项经济效益：

- 创造和保住高价值工作岗位
- 通过新兴净零行业和创新支持经济增长
- 实现基础设施再利用和递延停产成本

还有一点非常关键，CCS有助于“公正转型”³。实现公正转型的一项主要挑战在于，高排放行业的工作岗位流失可能集中在某地，而低碳行业创造的工作岗位则在出现在另一个地方。就算不考虑上述地理上的阻碍，大规模失业后很快涌现大量就业机会的情况也很少见。CCS技术既能保证现有工业持续为当地经济做出贡献，又能同时促进净零目标的实现，从而为公正转型提供助力。

留给我们实现净零排放并将升温幅度控制在1.5度的时间已经所剩无几。尽管新冠危机导致能源需求量和排放量减少，且降幅前所未见，但长远来看，CCS的整体格局并没有改变。为抓住实现净零排放的最大胜算，必须迅速在不同行业推广部署CCS。时机已到，必须加快对CCS的投资。

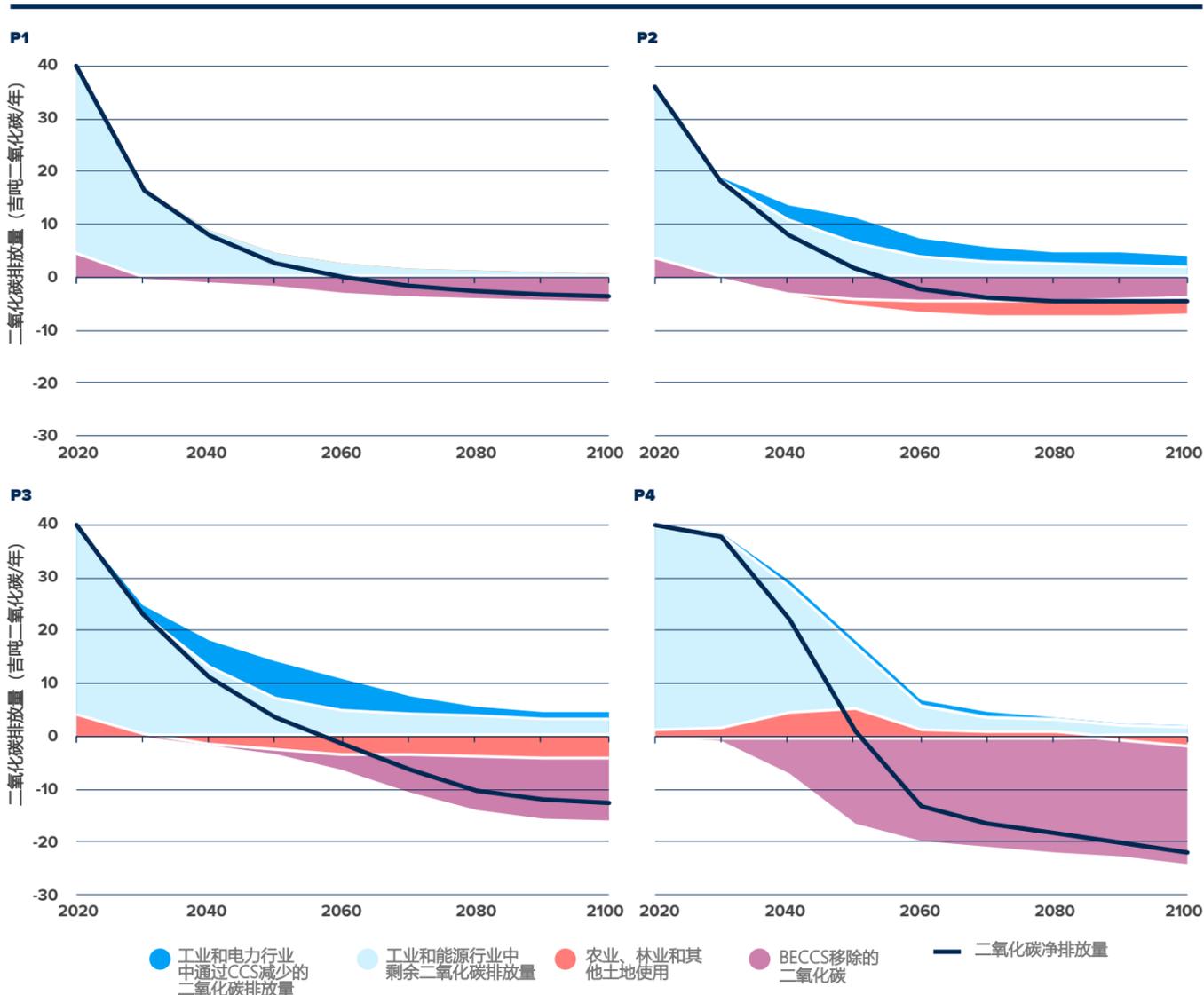


图1 《IPCC全球升温1.5度特别报告》中的路径示意图

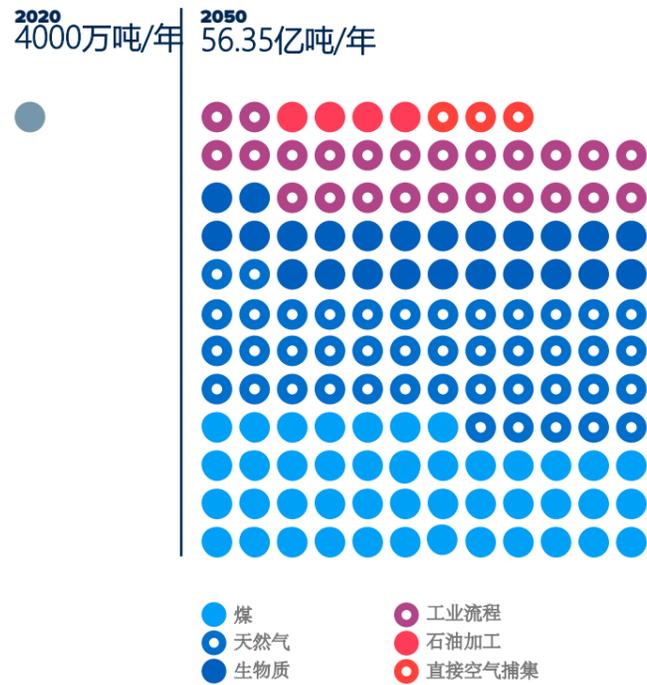


图2 IEA可持续发展情景中2020年和2050年按能源类型和行业部门分类的二氧化碳捕集量

包括2050年将捕集用于使用的二氧化碳（3.69亿吨/年）和捕集用于封存的二氧化碳（52.66亿吨/年）

全球碳捕集与封存现状 2020

- 1.0 前言
- 2.0 碳捕集与封存需求
- 3.0 全球碳捕集与封存现状2020
 - 3.1 全球碳捕集与封存设施进展与趋势
 - 3.2 政策与监管
 - 3.3 全球封存概览
- 4.0 区域现状一览
 - 4.1 美洲
 - 4.2 欧洲
 - 4.3 亚太
 - 4.4 海合会
- 5.0 技术及应用
 - 5.1 工业
 - 5.2 氢
 - 5.3 天然气
 - 5.4 电力行业的碳捕集与封存
 - 5.5 负排放技术
 - 5.6 碳捕集与封存创新
- 6.0 附录
- 7.0 参考文献

3.1 全球碳捕集与封存设施进展与趋势

不断成熟的CCS行业需要更新的分类体系

全球碳捕集与封存研究院在2020年更新了分类体系，以更好地反映CCS行业的发展状况。在发布《全球碳捕集与封存现状2020》报告之前，研究院曾基于二氧化碳捕集能力将CCS设施分为两类：

1. 大规模CCS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；
- 二氧化碳运输基础设施和封存枢纽项目，运输或封存能力不低于40万吨/年。

2. 试点和示范设施：

- 从工业碳源或发电站捕集二氧化碳且不符合大规模CCS设施标准的设施。

研究院一开始引入二氧化碳捕集设施分类体系是为了鼓励开发规模足以展示CCS商业价值的设施，该规模应大到可以应用商业部署的经验教训，但又不至于有重大的扩大规模的风险。因此，当时“最高”级别的CCS设施被称为“大规模”设施，且据此设定了相应的标准。

过去一年间，上述分类体系发挥的用处减弱。考虑到较小规模的捕集设施也具有商业可行性，CCS枢纽现在能汇集多个较小规模二氧化碳排放源，继而在运输和封存方面实现规模经济，因此年捕集能力不再是对设施进行分类的最佳标准。如同其他行业一样，示范新技术依然重要，但现在的主要目标是部署商业上可用的成熟CCS技术，以实现雄心勃勃的气候目标。

新的CCS设施分类体系

从《全球碳捕集与封存现状2020》报告开始，CCS设施将被重新划分为如下几类：

1. 商业CCS设施：

- 作为当前商业运行的一部分，捕集二氧化碳并进行永久封存；
- 封存工作可由第三方或捕集设施的所有者承担；
- 一般来说，其经济寿命与所捕集二氧化碳的来源设施相类似；
- 运行必须产生商业回报及/或满足监管要求。

2. 试点和示范设施：

- 为测试、开发或展示CCS技术或流程而捕集二氧化碳；
- 捕集的二氧化碳可能会被永久封存，也可能不会；
- 与大型商业设施相比，寿命一般较短，取决于完成测试和开发过程或实现示范里程碑所需的时间；
- 其运行期内预计不会产生商业回报。

研究院分类体系的影响

新的分类体系带来了如下变化：

- 6个设施以前被列为试点和示范项目的设施，现在被归为商业设施。
- 挪威的Brevik Norcem和Fortum Oslo Varme现在是两个单独的商业CCS设施，它们曾被归为一个大型设施，是挪威全链项目的一部分。
- 美国西方石油公司和White Energy在Plainview和Hereford乙醇厂的EOR设施现被归为两个独立的商业CCS设施(曾被归为一个设施)。
- 六个以前归类为大规模CCS设施的二氧化碳运输和封存项目将被单列在我们的CO2RE数据库中预计2021年新增的“枢纽”部分。在不过在此之前，这些枢纽将被称为“二氧化碳封存”设施，与CCS设施区分开来。

本报告中提及的所有新建设施，或拟建的CCS设施，都仅指我们数据库中新增的设施，而非被重新分类的现有设施。

2020年拟建设施增长情况

图4显示了过去十年间拟建的商业性CCS设施的发展情况。2011年至2017年间，设施总能力逐年下降，原因之一可能是全球金融危机后，公共和私营部门注重短期复苏。然而，在过去的三年里，却出现了强劲的增长。

推动CCS增长的一个重要因素来自各方广泛认识到实现温室气体净零排放的紧迫性。其表现之一是2015年的《巴黎协定》确立了将全球升温幅度控制在2摄氏度以下的明确目标。这一宏大目标随后被进一步调整为将升温幅度控制在1.5摄氏度以内。这使各国政府、私营部门和民间团体重新关注减排问题。各国政府颁布了更强有力的气候政策，股东们对公司施加了更大的压力，要求它们减少范围1、范围2和范围3的排放。约50个国家、州/省或城市以及数百家企业现已承诺到本世纪中叶实现净零排放。

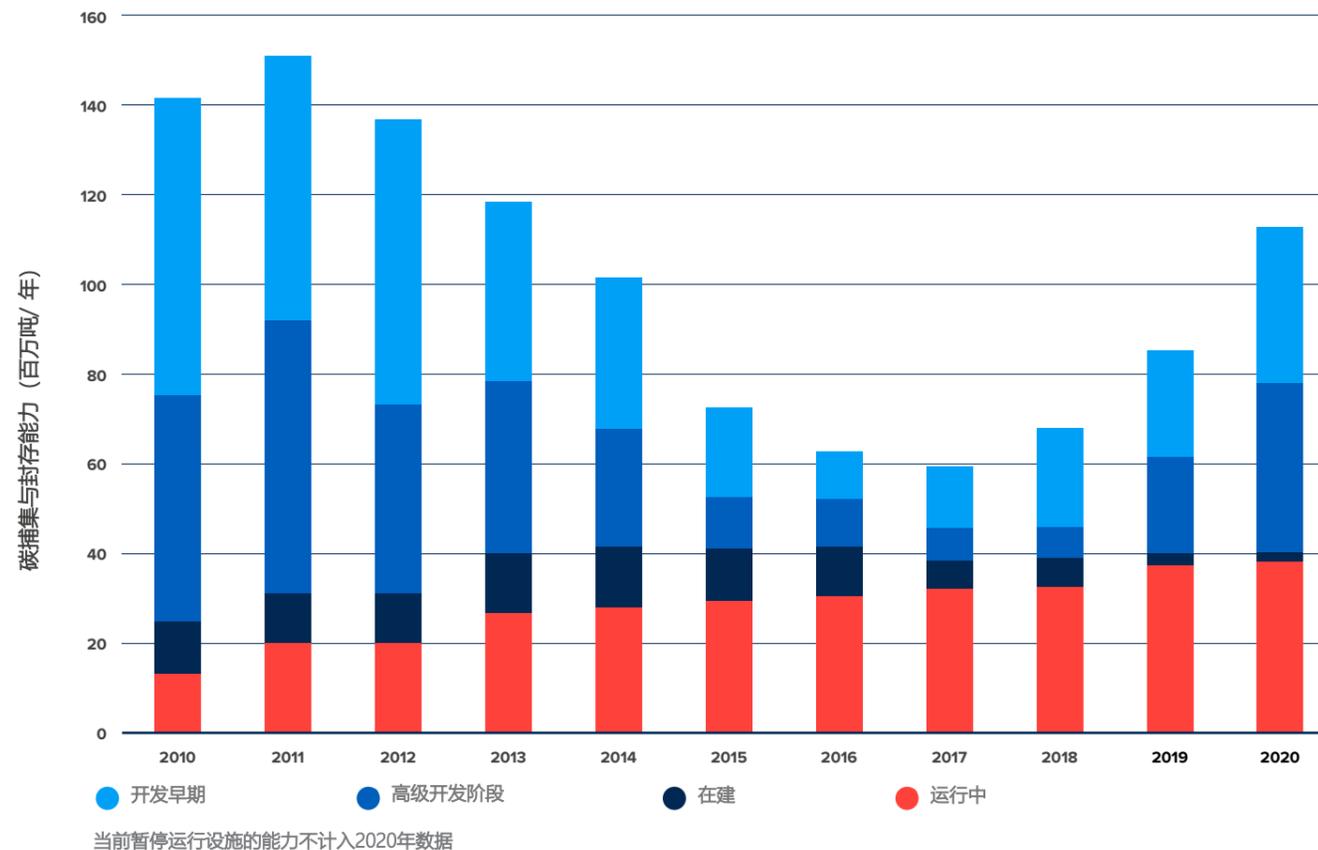
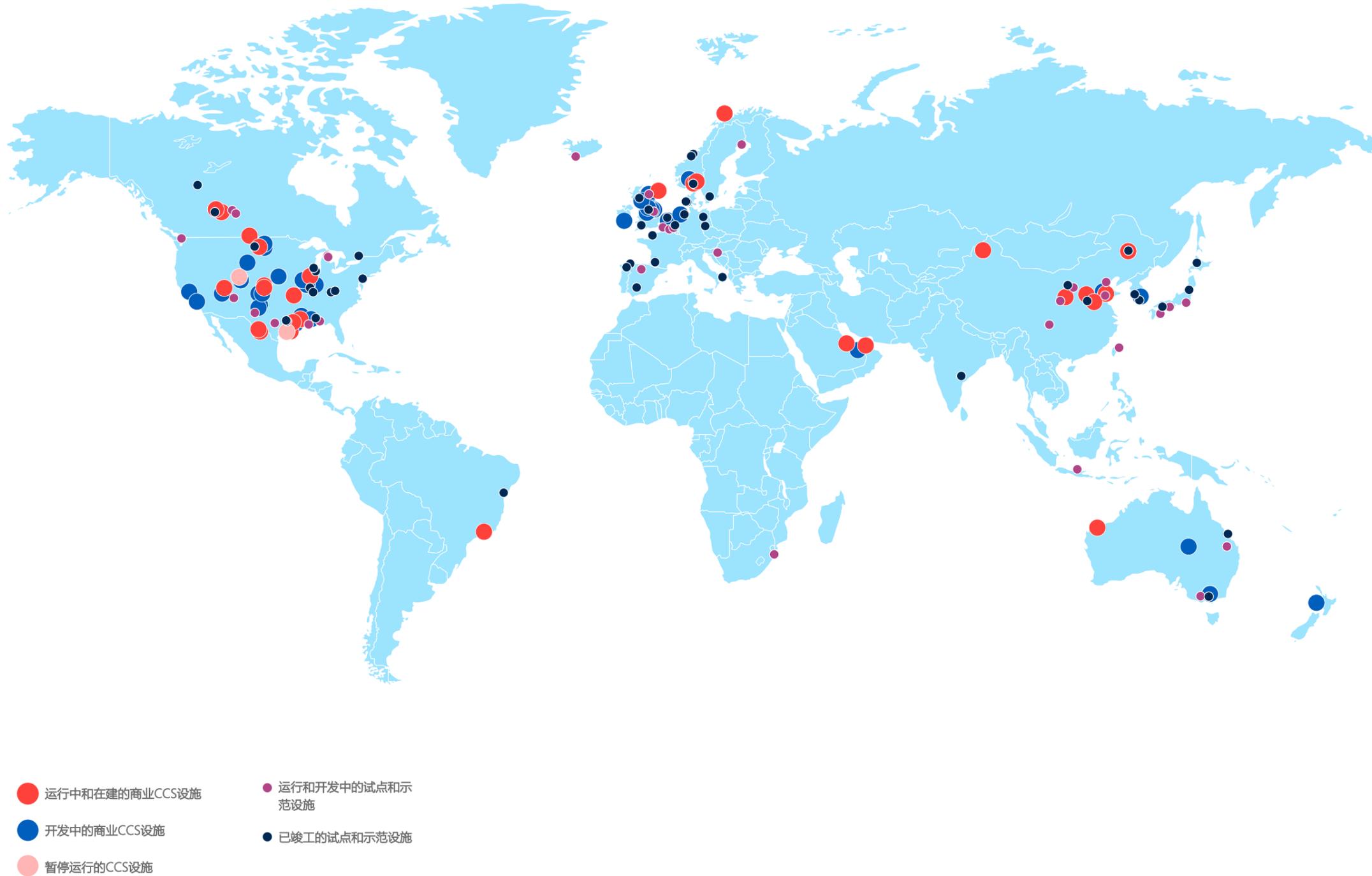


图4 2010到2020年间拟建的商业CCS设施：CCS设施能力^d

资本正在缓慢地从高排放资产类别流向低排放资产类别。环境、社会和公司治理投资基金和绿色债券的兴起，以及与煤炭相关投资所获债务融资的减少，都证明了这一点。对于钢铁、化肥、水泥和运输等难以减排的部门，减排需求变得更加紧迫，一味拖延的情况越来越少。

这些全球宏观趋势促使人们更深入地分析如何实现净零排放，并将风险和成本降至最低。不难得出结论，最佳方式就是使用包括CCS在内的最广泛的技术组合。如果不部署CCS，净零排放几乎无法实现。

推动CCS增长的一个重要因素来自各方广泛认识到实现温室气体净零排放的紧迫性。



- 运行中和在建的商业CCS设施
- 开发中的商业CCS设施
- 暂停运行的CCS设施
- 运行和开发中的试点和示范设施
- 已竣工的试点和示范设施

图5 全球不同发展阶段的CCS设施示意图[®]

自《全球碳捕集与封存现状2019》报告发布以来，全世界又新启动了17个商业设施。美国再次领先全球。在2020年启动的17个设施中，12个都位于美国。美国的成功极具说服力。从中可以看出，当新出台的政策表明投资该领域具有商业价值时，相关项目就会不断涌现。其他设施分布在英国（2个）、澳大利亚和新西兰。

如今总计有65个商业CCS设施ⁱⁱⁱ：

- 26个正在运行
- 2个已暂停运行，一个是因为经济不景气，另一个是因为火灾；
- 3个在建项目
- 13个处于高级开发阶段，已进入前端工程设计阶段
- 21个处于开发早期

目前运行中的CCS设施每年可捕集和永久封存约4000万吨二氧化碳。另有34个试点和示范规模的CCS设施正在运行或开发中，还有8个CCS技术测试中心。

拟建的商业CCS项目最近有三大进展值得一提。

- **美国提高税收优惠**
 - 2020年新增的17个设施中，12个在美国，主要是由于2018年签署生效的45Q提高了税收优惠，美国国税局在2020年对此发布了更详细的指导。
 - 一些美国设施也将受益于加州低碳燃油标准（LCFS），按照该标准，2020年碳信用交易的价格高达212美元/吨。
- **枢纽和集群**
 - 枢纽和集群通过规模经济效应大大降低了二氧化碳封存的单位成本，其产生的商业协同效应也降低了投资风险。
 - 美国大多数新增的商业设施都有机会使用CarbonSAFE 二氧化碳封存枢纽。这一开发中的枢纽得到了美国能源部^{iv}的支持。
 - 英国的2个新商业设施都与亨伯零碳集群有关，亨伯的目标是成为英国第一个净零产业集群。
- **氢气：未来的燃料**
 - 煤炭气化，或CCS技术结合天然气重整，是生产商规模清洁氢气成本最低廉的方式。占领清洁氢气供应的市场份额是推动早期CCS项目研究增长的一个重要因素，这些项目包括新西兰的波瓦凯制氢项目、澳大利亚的氢能供应链项目（试点工厂正在建设中的）和亨伯Saltend制氢项目（英国正在开发的许多大型氢项目之一）。

3.0 全球碳捕集与封存现状2020
3.1 全球碳捕集与封存设施进展与趋势

新开发的CCS设施示例

在过去的一年里，CCS在全球范围内取得了长足的进步，值得在此一提的新增CCS设施数量众多（完整清单请参见我们的全球CCS设施数据库CO2RE）。以下仅列举数个新设施，用以体现CCS在2020年的广泛应用和推广情况：

- Drax BECCS项目已经在英国启动。Drax原为燃煤发电站，现已改造为燃烧生物质的发电站。引入CCS系统将进一步减少其二氧化碳足迹。Drax项目准备利用四个发电机组中的一个每年捕集400万吨二氧化碳。捕集后的二氧化碳计划于2027年开始封存到北海油田中。该项目最终将在2035年前后将所有四个生物能源发电机组上部署CCS设施，形成一个更大的项目。
- Enchant能源公司正在为其位于美国新墨西哥州的圣胡安燃煤发电站开发一个CCS项目。通过燃烧后捕集技术每年捕集量高达600万吨二氧化碳，用于提高二叠纪盆地的石油采收率。
- 澳大利亚桑托斯能源公司宣布，已开始对一个CCS项目进行前端工程设计研究，研究内容为从蒙巴天然气厂的天然气处理过程中捕集二氧化碳。该项目将每年捕集170万吨二氧化碳并注入一个附近的油气田进行地质封存。桑托斯声称减排成本低于每吨30澳元（22美元）⁵。
- 拉法基霍尔希姆公司正对其位于美国科罗拉多州的一家水泥厂进行碳捕集可行性研究。该研究项目是与Svante公司、西方石油低碳投资公司和道达尔公司的合作项目，一旦建成，每年将捕集72万吨二氧化碳。捕集的二氧化碳将用于提高原油采收率，该项目将获得45Q税收抵免，并将成为Svante公司基于吸附的捕集技术最大规模的应用。
- ZEROS项目涉及开发两座位于美国德克萨斯州的创新型氧气助燃垃圾焚烧发电厂，年捕集目标为150万吨二氧化碳。该项目通过氧气助燃可确保烟气中较高二氧化碳浓度，与传统垃圾焚烧发电厂相比，更经济高效。
- 8 Rivers Capital的波瓦凯项目位于新西兰塔拉纳基地区，是一个集合制氢、生产化肥和发电的工业综合体。该项目将使用天然气为原料，并将部署CCS（年捕集量约为100万吨），实现近零排放。波瓦凯项目将用到一个天然气处理设施集合三个流程：
 1. NET电力公司的Allam循环发电流程
 2. 8 Rivers Capital的8RH₂ 制氢技术
 3. 成熟的商业氨合成和合成氮肥生产工艺技术

该项目正在推进相关研究，计划在2025年前后尽快开始运行。

图6根据所在行业绘了所有运行中、在建或处于高级开发阶段的商业化设施，以及实际或预计开始的运行年份。

运行设施里程碑

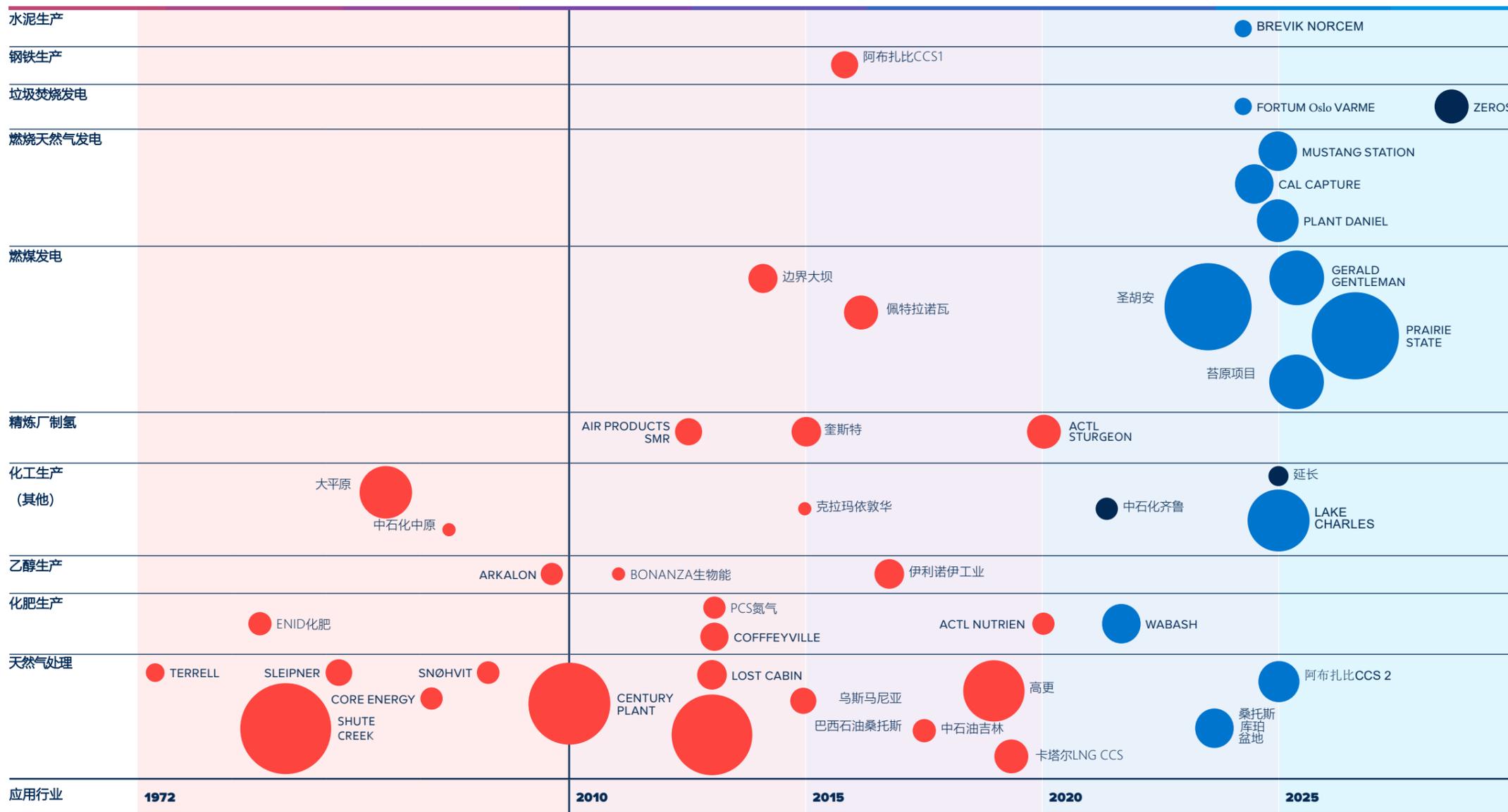
以下为过去一年中所实现的部分最重要的行业里程碑：

阿尔伯特塔干线于2020年3月开始运行。作为加拿大一项关键的工业基础设施，该干线的二氧化碳运输能力为1460万吨，这些二氧化碳被输送到阿尔伯特省中部用于提高原油采收率⁶。该项目是世界上容量最大的二氧化碳运输基础设施，其开发极具前瞻性。该干线最主要的二氧化碳捕集设施为Sturgeon炼油厂和Nutrien化肥厂，这两座商业CCS设施每年合计提供160万吨二氧化碳。该干线剩余的大量运输能力可服务于阿尔伯特省工业设施未来所捕集的二氧化碳。

位于西澳大利亚巴罗岛的高更二氧化碳注入设施自2019年8月进行调试后，一直都在封存二氧化碳。雪佛龙已对其数列二氧化碳压缩系统逐步进行了调试，从而提高了二氧化碳注入能力。今年2月该公司宣布达成封存100万吨二氧化碳的里程碑⁷。高更是世界上最大的专用于地质封存的项目，封存能力高达每年400万吨二氧化碳。Air Products蒸汽甲烷重整设施从位于德克萨斯州亚瑟港的Valero Energy 精炼厂的两个蒸汽甲烷重整装置中捕集二氧化碳。该设施每天生产500吨清洁氢气。据美国能源部公布2020年4月发布的消息，该设施累计二氧化碳捕集和封存量超过600万吨。

奎斯特CCS设施从位于加拿大阿尔伯塔省的Scotford Upgrader油砂提质加工厂的三个蒸汽甲烷重整器中捕集二氧化碳。该设施每天生产900吨清洁氢气。2020年7月，该设施实现了将500万吨二氧化碳安全永久地封存在专用地质封存点的里程碑。

巴西石油公司桑托斯盆地盐下油田CCS设施使用膜法捕集从近海天然气处理厂捕集二氧化碳并将其重新注入萨潘霍省卢拉油田和拉帕油田用于提高原油采收率。考虑到膜的尺寸和重量优势，这种方式最适合海上应用。巴西石油的这个项目是全球最大的膜法捕集项目。该项目的捕集能力最近从每年300万吨增至460万吨⁸。



本图表仅对每座设施涉及的最主要工业类型进行了标注。

- 运行中
- 在建
- 处于高级开发阶段

圆圈面积与设施捕集能力成正比。



图6 各种电力和工业应用中的商业CCS设施包括运行中、在建和处于高级开发阶段的设施。圆圈面积与该CCS设施当前的捕集能力成正比。

枢纽和集群：CCS网络的灵活性逐步增强

和大多数行业一样，CCS也会受益于规模经济。提高压缩、脱水、管道和封存规模可以大幅降低二氧化碳的单位成本。

CCS早期开发项目采用点对点模式，这种模式适合大型封存点与单个大型排放源（如发电站或天然气处理厂）之间距离合理的情况。

来自设施集群的二氧化碳流在枢纽进行汇集、压缩、脱水和运输。由此可以实现显著的规模经济，尤其可以降低压缩厂（能耗高达约50兆瓦）和管道（容量高达约10-15兆吨/年）的资本成本。这种拥有多家CCS服务客户和供应商的工业生态系统也有助于降低风险。图7显示了2019—2020年期间，处于运行或研究阶段的CCS枢纽和集群。

枢纽还能帮助碳捕集设施和封存资源更好地匹配碳源/碳汇。枢纽也可以更为灵活地进行压缩作业，和单个碳源的压缩厂相比，枢纽能够更大幅度地减低压缩能力（降低二氧化碳流）。

北极光项目（见图8）是最先进的处于开发阶段的枢纽之一。项目地点在北海，是一个挪威的项目。该CCS枢纽所汇集的二氧化碳流主要来自垃圾发电厂和水泥厂（两者所提供的二氧化碳总量为80万吨/年）。该项目由挪威石油公司、壳牌公司和道达尔公司共同开发。北极光项目将在碳源厂对二氧化碳进行压缩和液化，然后通过专用的二氧化碳运输船将其运至封存点⁹。该项目计划于2024年进行调试投运。

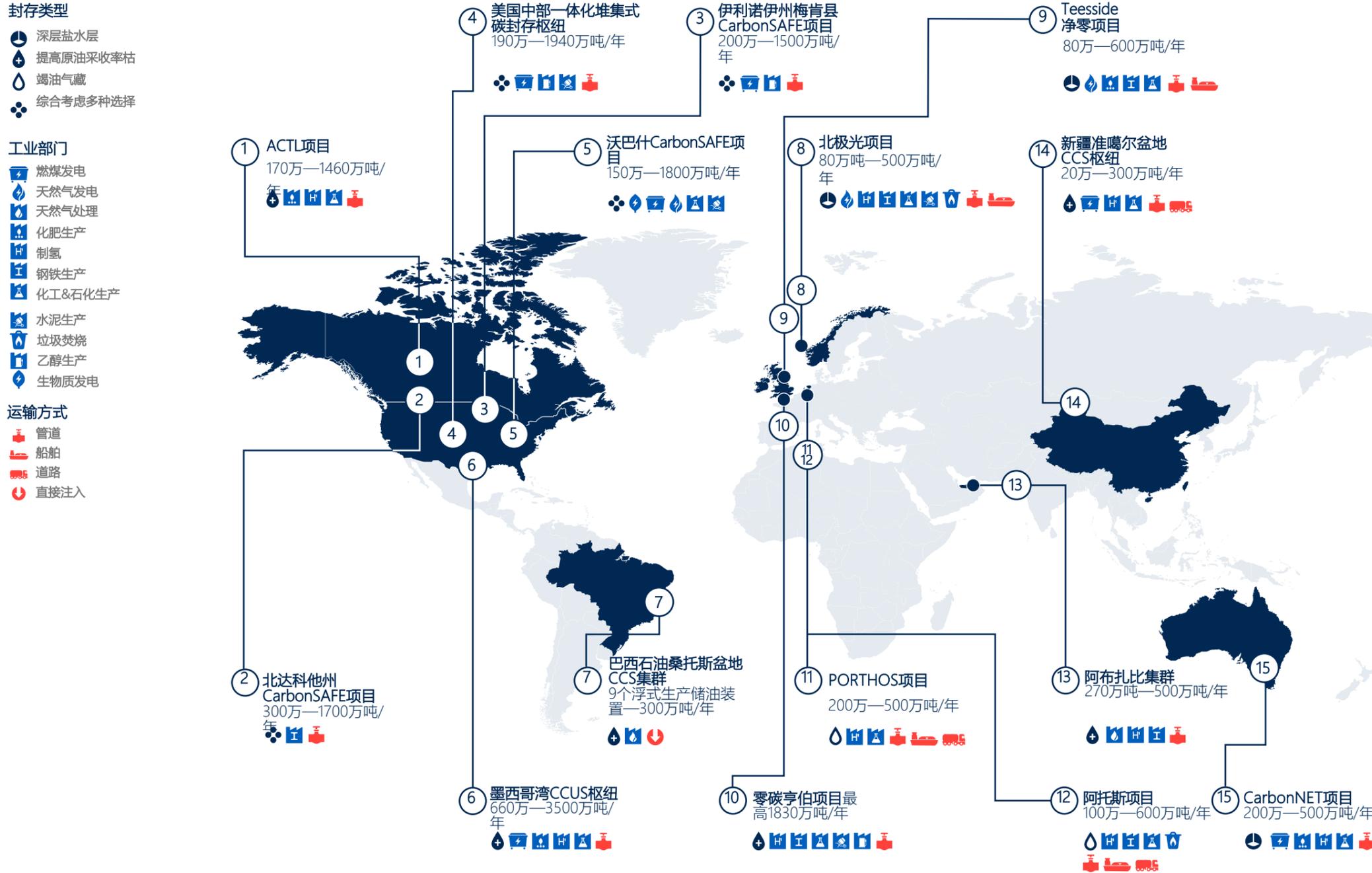


图7 处于运行或开发阶段的枢纽和集群⁹

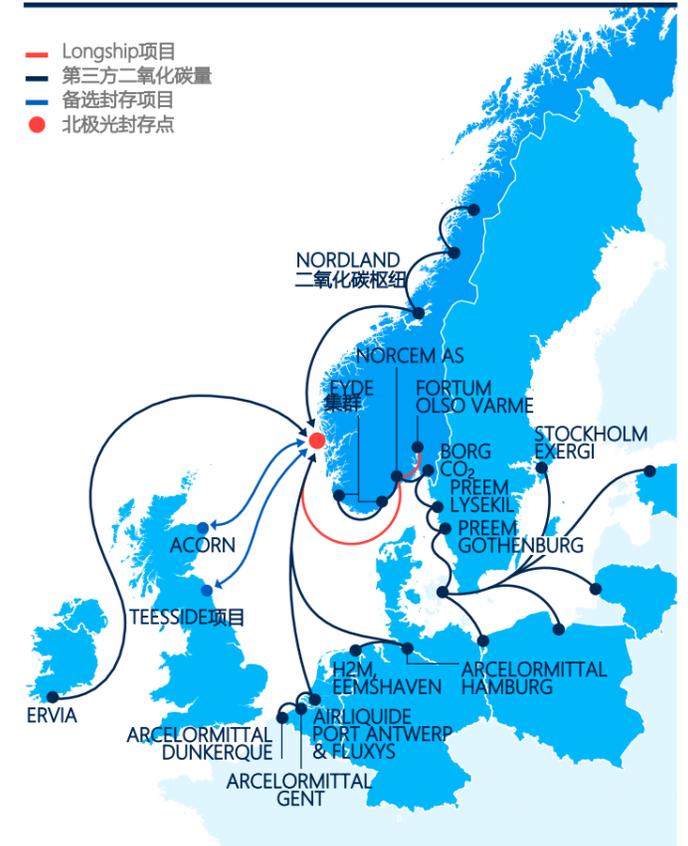


图8 北极光项目——潜在碳源⁹

新冠疫情造成的影响

虽然CCS的开发和部署工作在2020年都展现出良好势头，但新冠疫情造成的经济衰退也同样波及到了该行业。这场新冠大流行严重影响全球经济，各行各业产量大幅萎缩。这其中包括全球石油行业，石油需求和价格双双急剧下跌。

位于美国德克萨斯州的Petra Nova CCS设施自2017年初开始调试以来，已经成功地从NRG公司的WA Parish发电厂捕集二氧化碳。该设施的商业模式是基于使用二氧化碳提高原油采收率，油价下跌所带来的严重影响导致该设施的碳捕集业务于2020年3月暂停。NRG公司表示经济状况有所改善后将重启该项目。

3.2 政策与监管



*在建

图9 大规模设施所依赖的主要政策和项目特征

3.2.1 政策进展

关于必须捕集和封存多少二氧化碳才能实现净零排放，相关估计结果跨度很大。《全球升温1.5度特别报告》¹对90种情景进行了评估，几乎所有情景都需要CCS技术才能将全球升温幅度控制在1.5度以内：

- 90%的情景都要求全球二氧化碳年封存量到2050年达到3.6吉吨或更高
- 所有情景都要求2050年永久封存的二氧化碳平均质量达到10吉吨

CCS目前在全球的装机容量约为4000万吨/年。到2050年必须增加超过一百倍才能实现净零排放。早就应该加大政策力度以刺激加快CCS投资。当前商业化的CCS设施就提供了很好的例子，有助于了解对投资具有鼓励作用的不同政策和项目特征（见图9）。

大规模基础设施都是资本密集型项目。CCS的设计和建成本通常高达数亿美元甚至数十亿美元。政府通过直接拨款提供大量资金支持私营部门股权投资，是最有可能获得企业投资的项目。国有企业也对CCS设施进行了投资。

全球大部分流动资金都在私营部门手中，因此挑战在于如何吸引银行和机构投资者对CCS项目进行投资。CCS涉及到的大多数风险都是一般性风险，可以在具体的项目过程中进行应对和缓解，但也存在其他私营部门认为难以承受的高风险。相关风险来自以下几类市场失灵的情况：

碳价过低导致的收入风险

虽然出售二氧化碳用于提高原油采收率为某些CCS项目带来了收入，但只有加大气候政策力度才能实现大规模部署。在大多数辖区，捕集、运输和封存二氧化碳所消耗的成本高于当前定价。根据《巴黎协定》，为有效减少排放，预计到2020年碳价应定位在每吨二氧化碳40-80美元，到2030年这一定价则应达到50—100美元¹⁰。虽然目前碳价仅为40美元/吨，商业激励力度较弱，但通过现有许多低成本CCS项目，也可捕集、利用和封存多达4.5亿吨二氧化碳¹¹。

障碍	潜在应对政策示例
碳价过低	通过例如碳税、税收抵免、碳排放交易、CCS义务、排放绩效标准或政府采购标准，引入二氧化碳减排定价机制，从而激励针对捕集设施的投资，并将部分利好传导给运输和封存提供方。
CCS价值链中的相互依赖风险	提供资金支持，以促进共享式运输和封存网络的发展，重点支持可以实现规模经济以降低单位成本及利用多种排放源以减小资产搁浅风险的综合枢纽和集群。运输和封存基础设施最初可归政府所有。随着越来越多的排放企业入网，相互依赖风险将随之降低。届时政府可选择将基础设施出售给私营部门获利。
长期责任	必须通过法律和监管框架限制私人投资者可能承担的任何长期封存责任风险敞口。可以通过在完成封存一定时间后将上述责任转移给国家来实现。相关辖区可规定运营方在完成封存后必须继续监控现场的最低年限。另一种管理该风险的方法是引入风险上限机制，即私营部门运营方将对不超过上限的风险负责，而政府将对超过上限的所有其他额外风险负责。上限值可由封存项目中公私股本之间的关系决定，私人股本越高，则上限值越高。

表1 针对难以缓解风险的应对政策

相互依赖风险或跨链风险

CCS设施可能仅涉及一个碳源、一个碳汇和一条管道。这类分散型的业务模式成本较高，且存在相互依赖的风险。例如，如果仅有的工业碳源关停，管道和封存运营方就将失去客户，又没了收入。

无限的长期封存责任风险

虽然精心挑选出来的封存资源出现泄漏的风险越来越小，但也并非零风险。如果是无限责任，那么只要有泄漏发生，无论何时，封存运营方都必须负责。私营部门投资者很难接受这种永久无限责任，尤其是在像CCS这类新兴的、经验尚且有限的行业。

投资者不太可能为存在这些风险的项目慷慨出资。因为一旦出手，就是相当高的资金成本。为实现净零排放，政府必须实施风险缓解和风险管理的政策框架，将风险配置给最有能力以最低成本管理风险的组织。表1对潜在的应对政策进行了总结。

各国政府将选择最适合其国情的政策框架，只要具有商业可行性，私营部门就会投资CCS。像所有技术一样，CCS也遵循学习曲线，即CCS项目的开发成本会随着部署的增多而下降。这反过来降低了开发成本，让较小规模的排放企业也可以参与投资项目。与此同时，通过在部署过程中不断学习也可以降低风险，这将吸引更多包括机构投资者在内的出资方参与投资。

佐伊·奈特

汇丰银行可持续金融中心



如果没有深度脱碳解决方案，电力和工业领域现有和拟建基础设施的碳排放，会消耗温控1.5度¹⁵碳排放额度的95%。国际能源署估计，为实现《巴黎协定》目标，需为CCUS部署投资约9.7万亿美元¹⁶。

重工业尤其在加大力度采取措施，在能源使用中实现脱碳，并捕集与设施运行有关的排放。有了监管政策的支持，CCS作为一种多用途技术，能够帮助这些行业切实开展所需的减排。CCS不仅能使资金流向与净零目标相符，而且国际气候机构（如IPCC）也认为，如果不应用CCS，可能就无法实现低碳转型。现在，无论工业、金融业还是其他领域，都需要进行创新并推动可持续解决方案，而CCS将成为助力工具。

现在，无论工业、金融业还是其他领域，都需要进行创新并推动可持续解决方案，而CCS将成为助力工具。

3.2.2 国际气候政策

虽然新冠大流行的影响拖慢国际气候政策的进程，但应对疫情推出的巨额经济复苏计划将气候变化作为投资决策的重点。因此，应抓住这一特殊机遇，加大对包括CCS在内的气候行动的投资。

《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）下一届缔约方会议（COP26）已推迟一年，将于2021年11月举行。COP26将重点讨论以下议题：

1. 追求更具雄心的全球气候目标
2. 最终确定《巴黎协定》规则手册——关于第6条国家间合作的实施细则
3. 使《巴黎协定》的执行工作有序开展起来

更新后的“国家自主贡献”（NDC）将于2020年底正式发布，预计将聚焦各国应对气候变化的承诺，并展示全球目标所取得的进展。除了关于“目标递增机制”的讨论和关于第6条的谈判之外，全球进程正切换至实现《巴黎协定》目标的执行模式。

CCS技术在《巴黎协定》中发挥着双重作用：减少排放和实现碳移除。第6条允许各国共同合作实现目标，包括利用国际碳市场交易减排量和碳移除量，这两者都可以通过CCS项目实现。COP26将最终确定第6条的实施规则，进而为上述合作提供明确指导和更多选择。鉴于COP26主席国英国在拟建CCS项目方面的引领地位，该国完全可以借此强调CCS的作用。

迄今为止，已有11个国家（巴林、中国、埃及、伊朗、伊拉克、马拉维、蒙古、挪威、沙特阿拉伯、南非和阿联酋）将CCS纳入NDC。由于当前NDC的时间框架相对较短（到2030年甚至2025年为止），更多的国家可能很快会在针对2035年及以后的下一轮NDC更新中强调CCS的作用。

在到2050年及以后的进程中，关于CCS在UNFCCC下的长期温室气体低排放发展战略（LEDS）中所扮演作用的认识明显提高。截至2020年11月，在欧盟和下述国家提交的19项战略中，有15项包含了CCS，这些国家为加拿大、捷克、芬兰、法国、德国、日本、墨西哥、葡萄牙、南非、新加坡、斯洛伐克、乌克兰、英国和美国。LEDS还包括更多负排放解决方案的CCS，包括BECCS和DACCS。一旦实现净零排放，各国将需要开始实现净负排放，因此二氧化碳移除技术只会变得更为重要。

IPCC即将发表第六次评估报告，相关的科学工作也受到了新冠疫情的影响。本研究院积极参与了涉及缓解气候变化的第三工作组报告的专家审查过程。该报告将包括CCS在全球脱碳工作中所发挥作用的最新信息，并将在COP26后通过。

随着人们对实现净零目标的认识越发清晰实际，对BECCS和DACCS等二氧化碳移除技术的兴趣也大大增加。在减少温室气体排放和用移除量抵消剩余排放量方面，世界各国的潜力有强有弱。因此，需要共同努力，以合作方式抵消排放量，而《巴黎协定》第6条的框架可以在未来几十年促进上述合作。

3.2.3 法律和监管进展

在过去的一年里，只有少数国家采取措施制定专门针对CCS的立法或改进其监管框架。尽管如此，国际和国家两个层面的重要进展将最终清除跨境转移长期以来所面临的法规和监管障碍。

《伦敦议定书》推动二氧化碳跨境转移

2006年对《伦敦议定书》的修正，使二氧化碳能够封存在海底地质构造中，此修正案是国际社会承认CCS在缓解气候变化方面潜在作用的重要一步。然而，这并未消除所有障碍。那些试图出口二氧化碳进行封存或在境内开展封存的国家的国家也看的很明白，显然这么做仍是被禁止的。

一项允许二氧化碳跨境转移封存的《伦敦议定书》修正案于2009年10月被提出，但对该提案通过国内立法的缔约方数量不足。僵局一直持续到2019年10月。

在2019年10月的《伦敦议定书》缔约方会议上，该问题再次被提出。荷兰和挪威政府联合提交了一份决议提案。根据该提案，缔约方将允许“临时适用”2009年修正案，“在不违背国际承诺的情况下，同意进行以地质封存为目的的跨境二氧化碳运输”。各方正式就此达成一致。

现在，如果相关国家希望出口或接收二氧化碳进行封存，那就可以这样操作，但必须向国际海事组织提供临时适用声明并告知相关协定或安排。基本上缔约方在2009年修正案生效之前就将执行相关条款。

消除澳大利亚项目的障碍

澳大利亚联邦和维多利亚州政府制定了世界上最早的专门针对CCS的立法。联邦和维州的海上法案及其相应的条例对现有的石油制度进行了修正，引入了专门的CCS模式来规范联邦和维州水域内的管道运输、注入和封存活动。

然而，维多利亚州CarbonNet项目发现这种监管模式面临的一项特殊挑战。在该项目中，一个拟议的封存构造跨越了维多利亚州的沿海水域和联邦水域。解决这一问题对该项目获得相关许可，特别是对其首选的Pelican封存地点至关重要。

目前这个问题现已得到解决。对于跨联邦和州/领地沿海水域的封存地点，联邦已通过相关立法，允许授予和管理单一温室气体封存点所有权证。根据新规定，新的封存点将纳入联邦海上管理体系并视为联邦水域。尽管修正案适用于整个澳大利亚，但对CarbonNet项目的影响最为直接，且无疑有助于项目推进。

发布关于美国税收激励措施的指导

美国国税局于今年5月发布了拟议财政部法规，就捕集和封存二氧化碳的纳税人根据45Q税收规定如何申请税收优惠提供了信息，回答了亟待澄清的问题。此前，国税局2月份发布了2020-12号通知和2020-12号收入程序。本研究院发布的《美国二氧化碳封存45Q税收优惠：更新报告》¹³包括了2月份发布的内容。《更新报告》提供了关于碳捕集设施“开始建设”的定义等重要细节，以及关于合伙结构和相关收入程序的指导。

指导意见和拟议的条例包含大量技术细节，关键信息如下：

- 谁可以申请45Q税收优惠
- 安全地质封存的要求
- 一氧化碳的利用
- 税收优惠的收回

除此之外，拟议法规还解决了很多由投资者和项目开发方发现的问题。该法规意在正式发布后开始执行。不过，如果纳税人可以做到严格遵守落实上述规定，可以选择自¹⁴2018年2月9日起及之后的纳税年度¹⁴中适用并援引此拟议法规。

本报告第4.1节提供了更详细的概述。

紧迫性

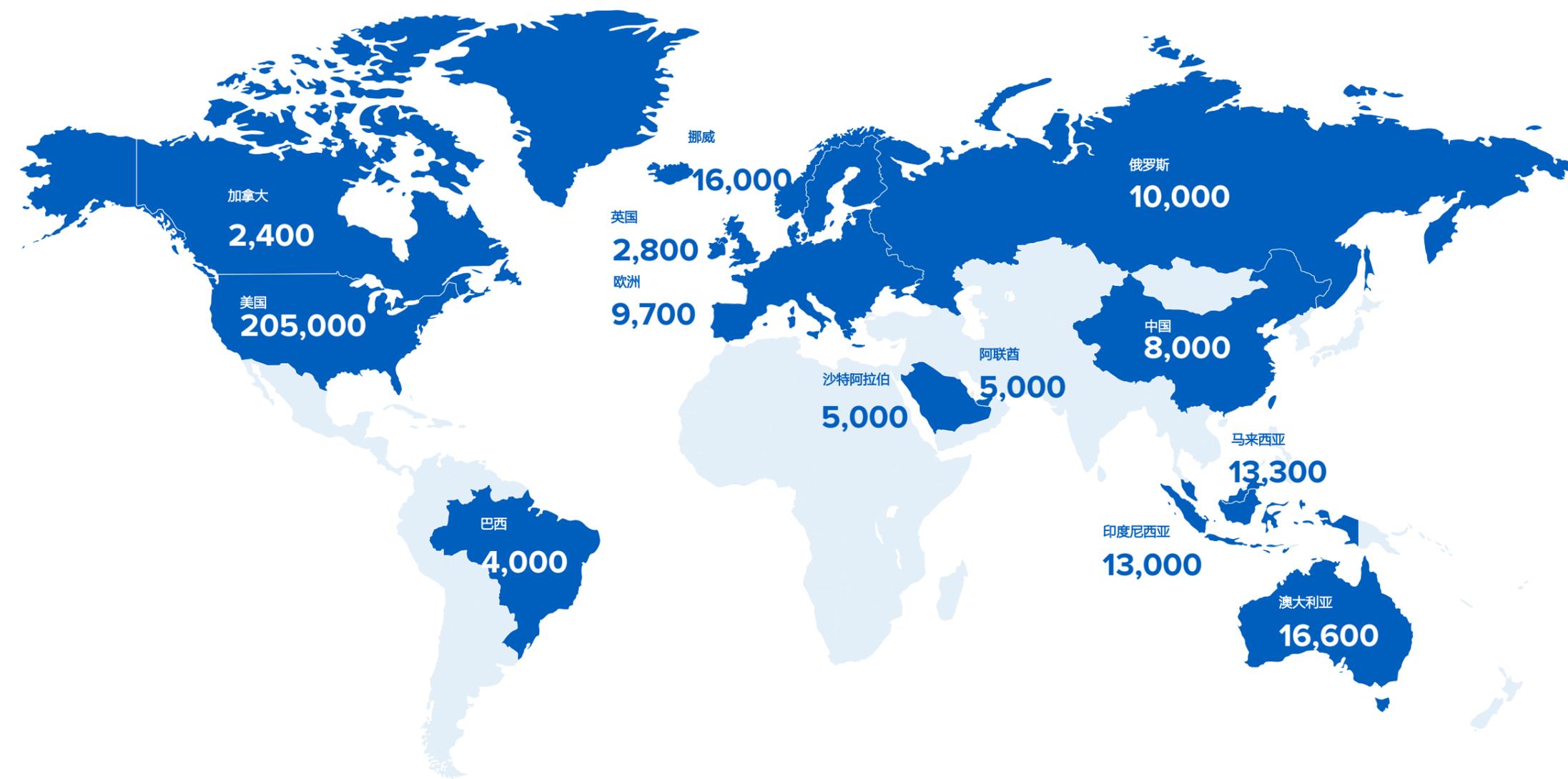
过往项目经验充分表明，CCS运营所适用法规和监管制度的确定性和实用性非常重要。如前所述，即使是在已经制定专门的CCS框架的辖区，法律体系互不关联的问题如果没有及时得以解决，还是会给CCS部署造成相当大的不确定性和严重阻碍。

对于国家层面做出的气候承诺，尤其是呼吁使用CCS技术的净零政策，许多国家必须完善相关法规和监管制度，另一些国家则需要建立相关制度。政府一旦做出承诺，相关工作就必须有所进展，还要满足监管方和项目各方的需求。

许多政府的经历都证明制定专门的CCS立法是一件耗费大量时间和人力物力的事，需要反复审查，广泛征求意见。对于那些对CCS技术有政策雄心但尚未开始研究法规和监管对策的国家来说，是时候行动起来了。

3.3 全球封存概览

地质封存二氧化碳与数百万年来地层圈闭石油、天然气（包括天然生成的二氧化碳）及其他碳氢化合物所利用的自然的力量和过程完全相同。



盐水层的地质封存资源是本图中所示油气田封存资源的数百倍

图10 主要油气田的封存资源 (数百万吨)^k

CCS技术的最后一步，也是最关键的一步，是将二氧化碳永久封存在多孔岩层中。地质封存二氧化碳与数百万年来地层圈闭石油、天然气（包括天然生成的二氧化碳）及其他碳氢化合物所利用的自然力量和过程完全相同。任何地质构造，只要足够大、足够深（深度超过800米）、孔隙度和渗透性足够高，且被其他不可渗透的岩层覆盖以阻止二氧化碳逸出，都是潜在的封存点。

油气田

许多CCS项目将二氧化碳封存在油田和气田中，这不仅是因为油气田在过去的数百万年间已经证明了其有能力封存二氧化碳（和其他液体），更是因为经过长达一个世纪的勘探作业，石油和天然气行业对油气田了解颇深。确定地质构造特征的方法通常是收集地震数据，并分析地球物理数据和从油气井中提取的岩心。通过勘探，可以估计岩层的物理结构，确定最佳的潜在二氧化碳封存点，并深入了解流体在封存岩层中的流动情况。这方面的确定性很高，理由如下：

- 石油或天然气的生产率可以有效反映出二氧化碳注入同一构造的速度；
- 通过石油或天然气的总产量，可以初步有效估计该构造中可封存的二氧化碳总量。

不管是在何种情景下，全球可用地质封存资源总量都远超让CCS充分发挥作用并支持实现净零排放所需的地质封存资源。根据最新的国家和国际报告，且考虑到地层中现有或已开采的石油或天然气的质量（油气开采将释放出封存空间），以及二氧化碳与石油和天然气的密度差异，图10对主要油气田的封存资源进行了汇总。

盐水层

虽然油气田能够满足全球二氧化碳封存的要求，但其地理分布相对受限。在许多情况下，二氧化碳排放源与最近的油田或气田之间距离很远，增加了运输成本。与油气田类似但含有劣质水而非碳氢化合物的岩层则分布得更为广泛。这种盐水层很常见，且具有巨大的二氧化碳封存能力——高达几万亿吨二氧化碳，而油气田仅有几千亿吨。关于这方面的更多信息，请查看美国能源部的美国2015年碳封存分布图鉴¹⁷和英国皇家财产局的英国二氧化碳封存场址¹⁸。

遗憾的是，由于盐水层没有经济价值或经济价值较低，鲜有投资研究其封存潜力。这个例子再次表明，二氧化碳外部市场失灵会导致对有益于社会的投资不足。各国政府迫切需要制定方案，用评估石油天然气构造的方式评估盐水层。由政府列明并描述该国所有二氧化碳封存资源是最理想的，这样可提供充分的数据支持CCS商业投资决定。

二氧化碳封存的商业化

二氧化碳封存资源商业化的两个主要例子来自挪威的北极光项目和澳大利亚的CarbonNET项目。为便于未来用户支付二氧化碳运输和封存费用，这两个项目都涉及发现和评估地质封存资源的工作。

美国石油工程师协会（SPE）开发了一套有商业价值的地质封存资源分类系统，被称为封存资源管理系统（SRMS）。该系统的开发是基于SPE广泛用于石油天然气储量和资源分类的石油资源管理系统（PRMS）。SRMS提出了标准化的定义来描述封存资源评估的成熟度和不确定性或确定性。正如PRMS为油气资源相关的投资决策提供支持一样，该系统可以支持与CCS商业设施相关的投资决策。

全球二氧化碳封存资源目录

油气行业气候倡议组织（OGCI）正为SRMS的全球首次应用提供资助；全球二氧化碳封存资源目录。该目录由Pale Blue Dot能源公司和全球碳捕集与封存研究院利用公开的数据和研究成果编制而成。迄今为止，Pale Blue Dot能源已经对位于13个国家80个盆地中的500个地点进行了评估。在未来五年内，将对世界上所有主要的封存盆地进行评估。该项目已经确定了超过12万亿吨的潜在二氧化碳封存资源（SRMS中使用的术语为“未发现”）。其中，只有4000亿吨封存资源有足够的收集和分析做支撑，可被归类为“已发现的资源”，这再次表明迫切需要出台国家计划。

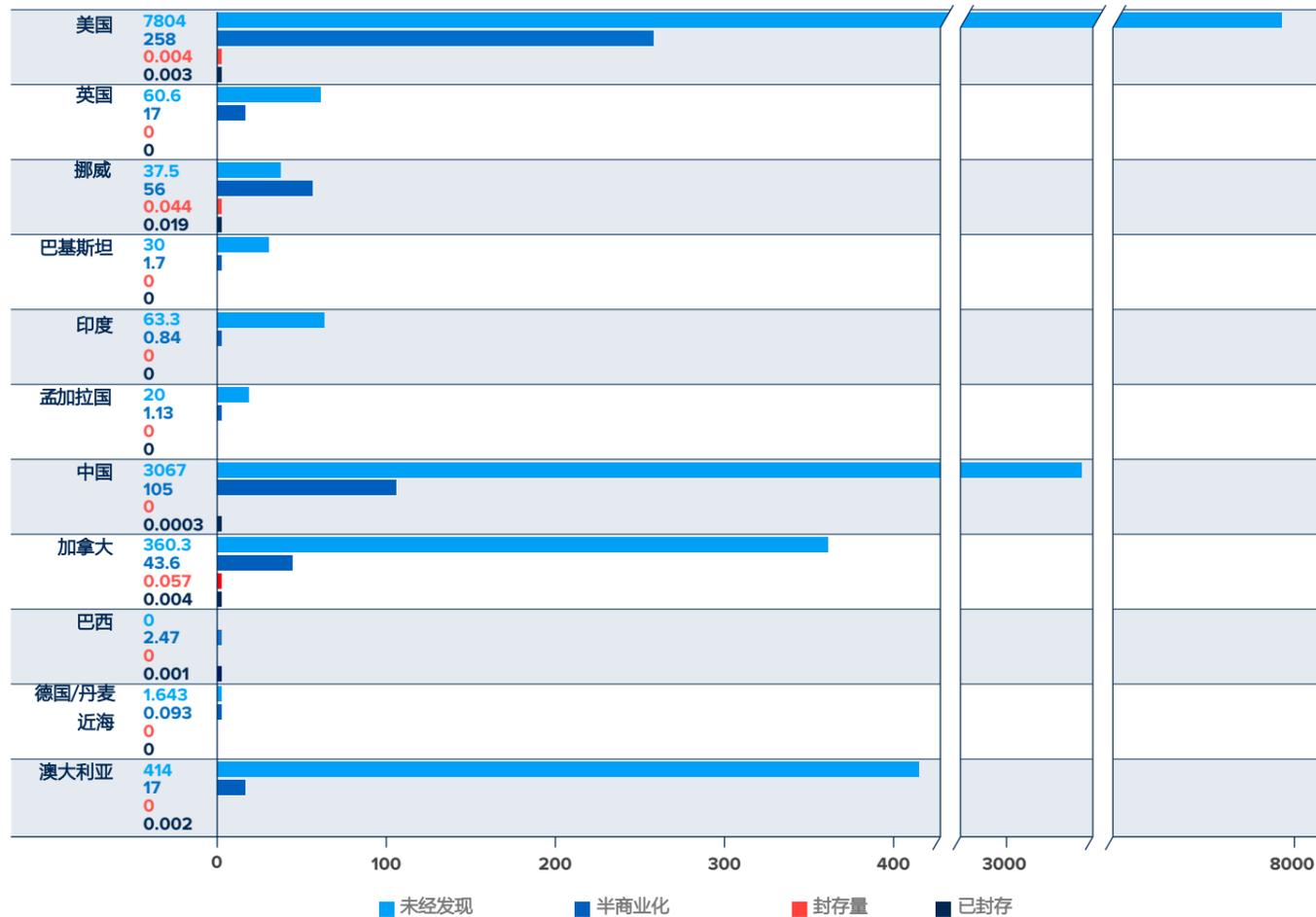


图11 全球封存资源评估 (吉吨二氧化碳)^m

尼亚尔·麦克道威尔教授

伦敦帝国理工学院



2020年渐入尾声，一项关于行为变化能在多大程度上减少人为二氧化碳排放的诱导实验也临近结束。当然，我指的是新冠大流行所带来的影响。在2020年初，与工业活动和航空旅行相关的二氧化碳排放显著减少。这类减排虽然重要，但还远远不足以为缓解气候变化做出实质性贡献。与我而言，结论很清楚——仅仅改变行为是不够的；还需要通过技术干预才能让全球经济实现脱碳。除此之外，面对疫情所带来的经济损失，“更好的重建”（Build Back Better）乃当务之急，这一点清晰明了，同时经济复苏必须是绿色的复苏。

同样至关重要，绿色转型——无论是观念上还是实际行动上——应是一种渐进式的复苏。由此而论，创造高质量的就业机会和保护社区最为重要，同时应密切关注自动化的颠覆力。最后，我们必须认识到，不存在“置之四海而皆准”的转型模式。想要实现这些目标，就得考虑到不同的国家和地区各自的优势。有鉴于此，CCS可以发挥独特的重要作用，助力供热供电、交通和工业服务行业实现脱碳，同时在经济的各个层面创造和保持就业机会。

CCS可以发挥独特的重要作用，助力供热供电、交通和工业服务的行业实现脱碳，同时在经济的各个层面创造和保持就业机会。

法提赫·比罗尔博士

国际能源署署长



.....国际能源署已经认识到，如不部署CCUS，几乎不可能实现净零排放。

尽管新冠疫情造成了重大损失，但我愈发乐观地认为，实现清洁能源的未来指日可待。这在很大程度上是因为越来越多的政府和企业开始支持包括CCUS在内的清洁能源技术。仅2020年一年内，挪威就为CCUS投入了近40亿美元，其中包括挪威有史以来最大的气候投资——Longship项目。

这是一个好消息，因为国际能源署已经认识到，如不部署CCUS，几乎不可能实现净零排放。该技术可为全球能源系统做出贡献，其战略作用主要体现在四个方面：（一）应对全球规模庞大且相对年轻的能源资产的排放；（二）减少来自重工业的最具挑战性的排放；（三）扩大低碳氢的规模；（四）从大气中移除碳，以消除无法避免或消除的排放。

因此，我们必须加强全球合作，利用近来的良好势头，再接再厉将CCUS技术打造为清洁能源的成功模板。国际能源署将致力于对上述努力做出应有贡献。

区域现状一览

- 1.0 前言
- 2.0 碳捕集与封存需求
- 3.0 全球碳捕集与封存现状2020
 - 3.1 全球碳捕集与封存设施进展与趋势
 - 3.2 政策与监管
 - 3.3 全球封存概览
- 4.0 区域现状一览**
 - 4.1 美洲
 - 4.2 欧洲
 - 4.3 亚太
 - 4.4 海合会
- 5.0 技术与应用
 - 5.1 工业
 - 5.2 氢
 - 5.3 天然气
 - 5.4 电力行业的碳捕集与封存
 - 5.5 负排放技术
 - 5.6 碳捕集与封存创新
- 6.0 附录
- 7.0 参考文献

4.1 美洲

美洲的CCS设施

2020年，在全球碳捕集与封存研究院的CCS设施数据库中美洲地区新增了12个商业项目。

目前该区域有38座运行中或处于不同开发阶段的商业设施，占全球项目总数的一半。

CCS的多种用途2020年在美国充分得以展现，水泥制造、燃煤和燃气发电、垃圾焚烧发电、乙醇生产和化工生产等行业纷纷宣布部署CCS项目。

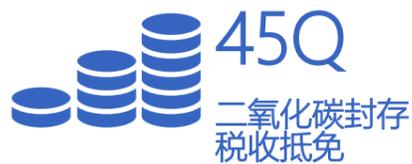


二氧化碳捕集
该区域内商业化运行的CCS设施年碳捕集能力超过3000万吨



美国的关键政策

新项目主要是受到45Q税收抵免和加州低碳燃料标准 (LCFS) 的激励。



从2020年开始，CCS进入能源和气候政策主流讨论，获得民主党和共和党两党支持。

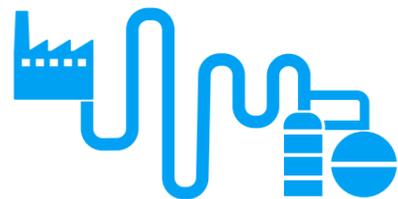


来自美国能源部的支持是项目数量不断增加的另一个原因，其在2020年拨付或承诺拨付超过2.7亿美元给共同出资协议。

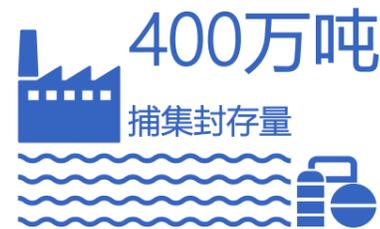


运行里程碑

美洲在2020年达成了数个重大的CCS运行里程碑



加拿大阿尔伯塔碳干线 (ACTL) 上线运行



位于萨斯喀彻温省的边界大坝3号机组的CCS设施捕集和封存超过400万吨二氧化碳。



壳牌奎斯特 (Quest) 设施在五年多的运行期内捕集和封存超过500万吨二氧化碳。



位于巴西近海的巴西石油桑托斯盆地 CCS设施捕集和封存超过1400万吨二氧化碳。

2020年，CCS在整个美洲依然保持强劲势头。即使面对新冠疫情造成的经济影响和油价的大幅下跌，政府和企业对包括CCS在内的的气候变化行动显示出更强的决心。具体反映在涌现出越来越多处于开发阶段的CCS项目，以及各公司纷纷宣布大幅降低二氧化碳排放的目标，包括净零排放目标。

CCS设施

加拿大阿尔伯塔碳干线 (ACTL) 的启动是众多里程碑中的一个。作为公私合营的典范，该项目极富远见，昭示着低碳工业未来发展的一个方向 (见案例研究)。

随着在过去一年间水泥制造、燃煤和燃气发电、垃圾焚烧发电、乙醇生产和化工生产等行业纷纷宣布部署CCS项目，该技术的多种用途充分得以展现。2020年，研究所的项目数据库中仅美国一国就新增了12个正在开发中的大型设施，这些设施主要是受到45Q税收抵免和加州低碳燃料标准 (LCFS) 的激励。该地区目前有38个开发中、在建或运行中的商业设施，占全球总数一半以上 (下表2为正在开发中的商业设施汇总)。

油价波动令人担忧，为应对这种波动风险，越来越多的项目选择进行堆集封存或双重封存——同时利用盐水层进行专用地质封存和用于提高石油采收率。45Q税收抵免和LCFS让二氧化碳减排体现出货币价值，从而推动了上述趋势。

来自美国能源部的支持是项目数量不断增加的另一个原因。在2020财年，国会拨款2.178亿美元用于碳捕集、封存和利用。这一拨款加上之前财年的相关资金让美国能源部可以拨付或承诺拨付超过2.7亿美元给共同出资协议：用于前端工程和设计 (FEED) 研究，研究从工业和天然气碳源中捕集二氧化碳的技术、直接空气捕集、二氧化碳利用和地质封存等。

案例研究：阿尔伯塔碳干线上线运行

关于ACTL的设想始于十多年前，旨在为阿尔伯塔省打造出低碳经济的支柱基础设施。该干线于2020年6月全面投入运行。该系统从位于红水河西北的Sturgeon精炼厂和Nutrien红水河化肥厂捕集工业二氧化碳排放。所捕集的二氧化碳经压缩后，通过一条240公里长的管道注入阿尔伯塔省南部的油气藏，用于提高原油采收率然后被永久封存。

该管道每年可输送高达1460万吨的二氧化碳，远远超过目前每年160万吨的捕集量，为连接更多的二氧化碳排放源预留了容量。

该项目的总建设成本约为9亿加元，阿尔伯塔省提供4.95亿加元，加拿大政府提供6300万加元。除政府拨款外，激励措施还有提高该项目商业可行性的减排抵税和提高原油采收率的收入。



Sturgeon精炼厂鸟瞰图。图片来源：阿尔伯塔碳干线。

设施	来源工业	封存方式	财务动机
Wabash	化肥生产	地质封存	45Q, LCFS
Lake Charles Methanol	甲醇生产	EOR, 地质封存	EOR, 45Q
Dry Fork	燃煤发电	EOR, 地质封存	EOR, 45Q
Tundra	燃煤发电	EOR, 地质封存	EOR, 45Q
San Juan Generating	燃煤发电	EOR, 地质封存	EOR, 45Q
Gerald Gentleman	燃煤发电	评估中	45Q
Cal Capture	天然气发电	EOR	EOR, 45Q, LCFS
Velocys Bayou Fuels	生物质发电	地质封存	45Q, LCFS
Clean Energy Systems	生物质发电	评估中	45Q, LCFS
伊利诺伊清洁燃料	垃圾焚烧发电	地质封存	45Q, LCFS
ZEROS	垃圾焚烧发电	EOR	45Q
CarbonSafe伊利诺伊州封存枢纽	多来源	EOR, 地质封存	EOR, 45Q
Mid-Continent封存枢纽	多来源	EOR, 地质封存	EOR, 45Q
ECO2S封存枢纽	多来源	地质封存	45Q

表2 美国开发中的CCS设施和封存枢纽

2020年实现了以下重大运行里程碑：

- 壳牌的奎斯特设施从加拿大阿尔伯特省斯科特福德精炼厂的制氢装置中捕集二氧化碳，五年来二氧化碳封存量超过500万吨；
- 位于加拿大萨斯喀彻温省的边界大坝3号机组设施目前已捕集并封存超过360万吨二氧化碳；
- 位于巴西近海的巴西石油公司桑托斯盆地CCS设施，自投产以来，其二氧化碳封存量已悄然突破1400万吨。

不过美洲地区的CCS设施也遭遇了一些挫折：

- 2018年底，美国怀俄明州Lost Cabin天然气厂发生火灾，导致该厂CCS设施暂时关闭。预计将于2020年底恢复运行，继续以每年约70万吨的速度捕集和封存二氧化碳；
- 德克萨斯州休斯顿附近的WA Parish电厂8号机组附属的CCS设施Petra Nova于2017年开始运行，因项目如期交付且成本低于预算而获得高度评价。该设施在2020年再次受到关注，原因却不像2017年那么令人欣喜。新冠大流行造成全球经济陷入停滞，且同时发生的价格战将油价推至历史最低点，Petra Nova于2020年初“暂停”运行，其运行方NRG表示，将在经济状况改善后恢复二氧化碳捕集工作。
- 在关于CCS的对话中，直接空气捕集和碳利用越来越获得认可。人们日益认识到，这两种方法都是气候变化解决方案的重要组成部分，因此投资意向和政策支持都不断增强。加拿大油砂创新联盟（COSIA）和美国的NRG能源公司赞助了Carbon XPRIZE比赛，这一为期四年的突破性循环碳技术开发比赛将于2020年结束，并于2021年初宣布获奖者。

美国的政策行动

从2020年开始，CCS进入能源和气候政策主流讨论，获得民主党和共和党两党支持。这些支持来自：

- 参议院两党气候核心小组；
- 众议院民主党人起草的《气候变化特别报告》将CCS作为一项关键技术列入其中²⁰；
- 两党都对许多加强45Q立法的法案给予支持（见下文）。

当前许多州都欣然接受CCS。加利福尼亚等有影响力的州承诺加快电力脱碳工作，CCS将成为稳定可靠的电网的重要组成部分。有几个州已经承诺实现净零排放——最近做出承诺的是美国二氧化碳排放量排名第五的路易斯安那州，该州拥有庞大的工业。净零排放计划将需要大规模应用CCS。

45Q

如上所述，期待已久的45Q税收优惠条例于8月最终确定。虽然确立优惠额度的立法（最终确定为封存在盐水层中的二氧化碳每吨50美元，用于提高原油采收率的二氧化碳每吨35美元）于2018年2月通过，但美国国税局敲定细节所花的时间远超预期。最终的立法指导使此税收优惠政策变得清楚、明确，为许多CCS项目开发方和投资者提供了完成初步阶段向后推进所需的条件。

CCS支持者普遍对美国国税局所作决定的结果感到满意，但他们也正在寻求改变。考虑到法规最终出台时有所延迟，CCS支持者当前最希望延长建设的截止期限。鉴于新冠疫情对经济和潜在开发者和投资者的影响，税收抵免交易市场规模缩小，所以CCS支持者当前的另一优先事项是寻求用直接支付替代税收抵免。



阿尔伯特省省长杰森·肯尼先生于2020年7月在壳牌奎斯特CCS设施表彰其安全捕集和封存500万吨排放量的成就。图片来源：阿尔伯特省政府克里斯·施瓦兹先生。

美国的其他政策进展

经济复苏

有一项建议是将CCS的资金纳入国会已经通过或正在审议的各种经济复苏计划中。迄今为止，国会尚未直接给CCS拨付过资金。

加州低碳燃料标准（LCFS）

LCFS继续为CCS部署提供重要激励。今年前8个月，LCFS中的碳信用交易价格约为每吨200美元。虽然资格要求很严格，但许多新宣布的项目都希望通过LCFS碳信用交易提高其成本效益²¹。

州级主导

继北达科他州之后，怀俄明州也获得了美国环保署的批准，开始对专门用于地质封存的二氧化碳注入承担主要责任（“州级主导”）。获得州级主导资格，反映出该州有较为完善的体系以确保合规。州级主导可以简化监管审批程序。路易斯安那州拥有较为完善的二氧化碳注入制度和承担二氧化碳封存长期责任的机制，该州也申请了州级主导。

监测、报告和核查（MRV）

今年4月，美国国税局税务监察局报告称，以前根据原45Q法规申请的税收优惠中，接近9亿美元不符合适用的MRV要求。这同时引起了CCS支持者和怀疑者的关注，并引发新45Q法规保留更严格标准的呼声。这些呼吁已被采纳。

加拿大的政策行动

联邦层面

加拿大的主要气候变化政策是《清洁增长和气候变化泛加拿大框架》，其主要目标是到2030年使全加的二氧化碳排放量在2005年的水平上减少30%。在该框架下还有几项具体政策，为其实现目标提供了相关机制，其中对CCS部署影响最大的两项政策是：

1. 清洁燃料标准---此政策提出到2030年将年碳排放量减少3000万吨的目标。该标准对固体、液体和气体燃料的生命周期碳强度提出了越来越严格的要求，并为可交易的碳信用提供了一个市场机制，以推动二氧化碳减排效率的提升。企业可以通过三种方式履行义务：减少化石燃料在整个生命周期内的排放（如EOR），销售低碳强度燃料，或转向更清洁的能源²²。
2. 《温室气体污染定价法》（GGPPA）---此法案对运输和供暖燃料燃烧产生的碳排放强制征税。2019年的税收标准是每吨20加元，之后每年上涨10加元，直到2022年达到50加元。该法案还对碳排放大户实行基于排放量的定价制度，规定其必须为高于其所在行业全国平均水平的碳排放量付费。只要符合联邦最低要求，各省可决定是否实施碳污染定价或碳交易制度。

省级层面

加拿大的CCS活动大多集中在两个省：萨斯喀彻温省和阿尔伯特省。这两个省都各自制定了新的CCS条例，与联邦层面于2020年生效的《温室气体污染定价法》相当：

- 萨斯喀彻温省是加拿大唯一没有签署《清洁增长和气候变化泛加拿大框架》的省份。省政府和联邦政府签订了燃煤发电等效协议。协议于2020年1月1日生效。协议内容是到2030年，萨斯喀彻温省至少40%的发电量必须来自不排放温室气体的能源，基本上就是淘汰所有无CCS的燃煤发电。
- 阿尔伯特省通过了《技术创新与减排实施法》（TIER），该法于2020年1月1日生效。该法为碳排放大户制定了二氧化碳排放基准，并规定超过既定基准的每吨排放价格为30加元。超额完成减排目标的设施可将其碳排放绩效积分卖给其他受监管的设施。CCS（包括EOR）带来的二氧化碳减排量符合TIER的要求。
- 9月，阿尔伯特省政府启动了8000万加元的工业能效和碳捕集利用与封存拨款方案，此方案是其经济复苏计划的一部分。一旦申请成功，省政府将提供高达75%的项目费用，最高可达2000万加元。

牛顿·B·琼斯

国际锅炉制造商协会主席



国际锅炉制造商协会长期以来一直倡导碳捕集利用与封存，认为这是能够真正减少二氧化碳排放，保护就业，维持经济和社会稳定的最佳解决方案。

CCUS让继续推动科学和公共事业进步及保住我们的生计成为可能。科学证明，如果追求100%的可再生能源，缓解气候变化100%无法实现，更不用说扭转目前的变暖趋势。事实上，（具有讽刺意味的是）可再生能源本身的建设和维护也依赖于化石燃料。只有依赖于化石燃料、核电和其他可靠来源产生的基本负荷供电，才能保证能源可靠性。

此外，倡导“唯可再生能源至上论”具有误导性 and 欺骗性，将从根本上扰乱依赖化石燃料的重要商品的生产，包括拯救生命的医疗材料和药品，更不用说与化石燃料直接和间接有关的工作机会，以及化石燃料行业为世界各地的社区所作的备受依赖的经济贡献。

在政府推行激励措施，投资于可再生能源时，我们必须积极消除投资障碍，并启动加快CCUS改造和新建项目的措施，这将反过来推动持续创新，提高成本效益。

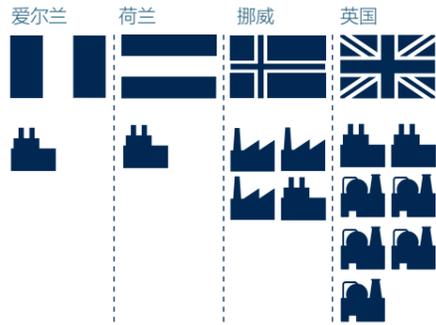
简单明了地说，CCUS就是答案。它不仅仅是一个真正具有环境影响力的解决方案。为实现《巴黎协定》设定的气候目标，需要扩大CCUS的规模。工业和发电站要进行CCUS改造，新建CCUS项目，此过程会创造高收入的就业机会，这可以说是与重工业相关的最理想的绿色就业机会。地球和人类社会的存续都有赖于此。

简单明了地说，CCUS就是答案。

4.2 欧洲

欧洲的CCS设施

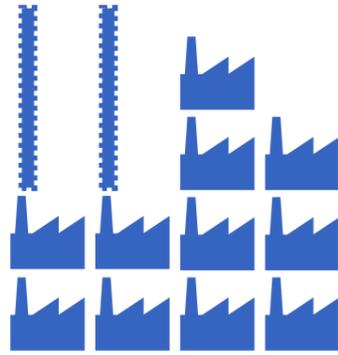
全欧洲有13个运行中或处于不同开发阶段的**商业CCS设施**（1个位于爱尔兰，1个位于荷兰，4个位于挪威，7个位于英国）。



2020年，欧洲涌现出许多新项目，其中几个还出现在通常不会与CCS联系起来的国家和地区，如**意大利、丹麦、瑞典和威尔士**等。



超过11个商业项目计划在2030年前投入运行。



政策制定

新出台的《欧洲绿色新政》和《气候法》将把气候中立的政治承诺转变为法律义务，催生了相关支持CCS的欧盟政策。



2020年，欧盟投入100亿欧元的创新基金开始接收项目申请；预计该基金将成为整个欧盟CCS项目规划、建设和运行的主要资金来源。



得益于全球最重要的一项CCS政策的出台，现在二氧化碳可以实现跨境运输。



适用《伦敦议定书》2009年修正案的解决方案于2019年底达成一致。（因此）北极光项目可以接收二氧化碳的国际运输，该项目已经成为整个欧洲工业实现脱碳不可或缺的一部分。



英国CCUS部署路径行动计划继续取得稳步进展，未来十年将提供8亿英镑资金，在英国至少两个地点建立CCUS集群。



随着今年欧盟引入立法，到2050年实现气候中和，并计划制定雄心勃勃的2030年目标，对CCS设施的需求也越来越迫切。令人欣慰的是，这方面的进展十分良好。不管是欧洲的政治家、工业战略家还是对情况愈发了解的公众都意识到，CCS不仅对兑现气候承诺十分必要，还可以保护工业和就业。

CCS设施

这一年对欧洲的气候目标至关重要。欧洲期待已久的下一座CCS设施有望尽快开始运行。2009年《伦敦议定书》修正案解决方案最终达成，意味着二氧化碳将可以进行跨境运输。挪威政府和包括挪威国家石油公司、壳牌、道达尔、海德堡水泥和Fortum Oslo Varme在内的项目支持者现已承诺将推进Longship项目。作为Longship的运输和封存设施，北极光项目将成为该地区工业脱碳不可或缺的组成部分。

鹿特丹的波托斯项目计划于2021年做出最终投资决定，并于2021年开始运行。和Longship项目一样，波托斯项目也希望实现更大范围的碳捕集。二氧化碳多港联运共同利益项目（CO₂ TransPorts Project of Common Interest）正在研究开展基础设施建设，从而与附近其他港口实现连接，其中包括通过已经建立的安特卫普@C项目连接根特、泰尔讷曾、弗利辛恩和安特卫普等港口。另外还有超过10个欧洲项目计划在2030年前投入运行。一些重要的产业集群正日臻成熟，其中部分还具备国际规模。港口开始在CCS部署中发挥重要作用。通过Teesside净零项目，备受期待的天然气发电行业中的CCS应用也取得了进展（见案例研究，第43页）。

鉴于排放者对脱碳愈发重视，由挪威国家石油公司、Drax和英国国家电网投资公司所创立的英国零碳亨伯集群又迎来新的合作伙伴，包括英国联合港口公司、Centrica封存公司、Phillips 66、PX集团、SSE热电公司、Saltend热电联产公司、VPI-Immingham公司和Uniper公司等。为利用该地区所规划的CCS基础设施，挪威国家石油公司还宣布了一个大型制氢项目“为亨伯Saltend供氢”（Hydrogen to Humber Saltend），向Saltend化工厂输送氢气。该项目在初期将使用一台600兆瓦的自动热重整器生产清洁氢——这可能成为世界上同类工厂中规模最大的一家。



Saltend化工厂。图片来源：亨伯零碳项目。

10月底，英国石油、意大利埃尼、挪威国家石油、英国国家电网、壳牌和道达尔宣布建立北方持久伙伴关系合作项目，由英国石油担任作业者。该合作项目将在英国北海开发海上运输和封存基础设施，为净零排放和亨伯零碳工业集群服务。所用封存资源为北海南部Endurance盐土层，该盐土层是英国规模最大、信息最完整的二氧化碳封存资源。该项目已向英国政府的工业脱碳挑战基金提交资金申请。

苏格兰Acorn项目提供可规模化的二氧化碳运输和封存解决方案，通过利用附近的石油和天然气基础设施，有望实现快速增长，从而实现资本成本最小化。为实现苏格兰和英国政府气候目标，该项目将提供关键的CCS和制氢设施。该项目已取得二氧化碳封存许可，可以从2024年开始处理苏格兰的二氧化碳排放。

由Gasunie、EBN、阿姆斯特丹港和塔塔钢铁公司牵头开发的阿姆斯特丹项目在荷兰北海运河工业区开发运输和封存网络。塔塔钢铁的Ijmuiden工厂是一个主要碳源。该工厂从高炉生产气体中分离二氧化碳。二氧化碳将被封存在近海枯竭的北海油气田或专用地质封存资源，还有部分二氧化碳用于温室园艺。继2020年初的可行性研究之后，该项目研究了潜在的封存选项，征求工业排放者对该网络的意见，收到了许多回应，推动了项目进展。

欧洲还涌现出其他新项目，其中几个还出现在通常不会与CCS联系起来的国家。今年6月，意大利总理朱塞佩·孔特在为后疫情时代制定政策的“规划振兴”大会新闻发布会上，提到该国计划在北部拉文纳港的埃尼公司设施中建设世界上最大的二氧化碳捕集和封存中心。捕集封存中心将从运行中的发电厂和工厂中捕集排放物，并封存在近海枯竭气藏中。至此，除北海地区以外，欧洲又添一座运行的CCS设施。



Kop van de Beer，鹿特丹港。拍摄：Danny Cornelissen。图片来源：鹿特丹港务局。

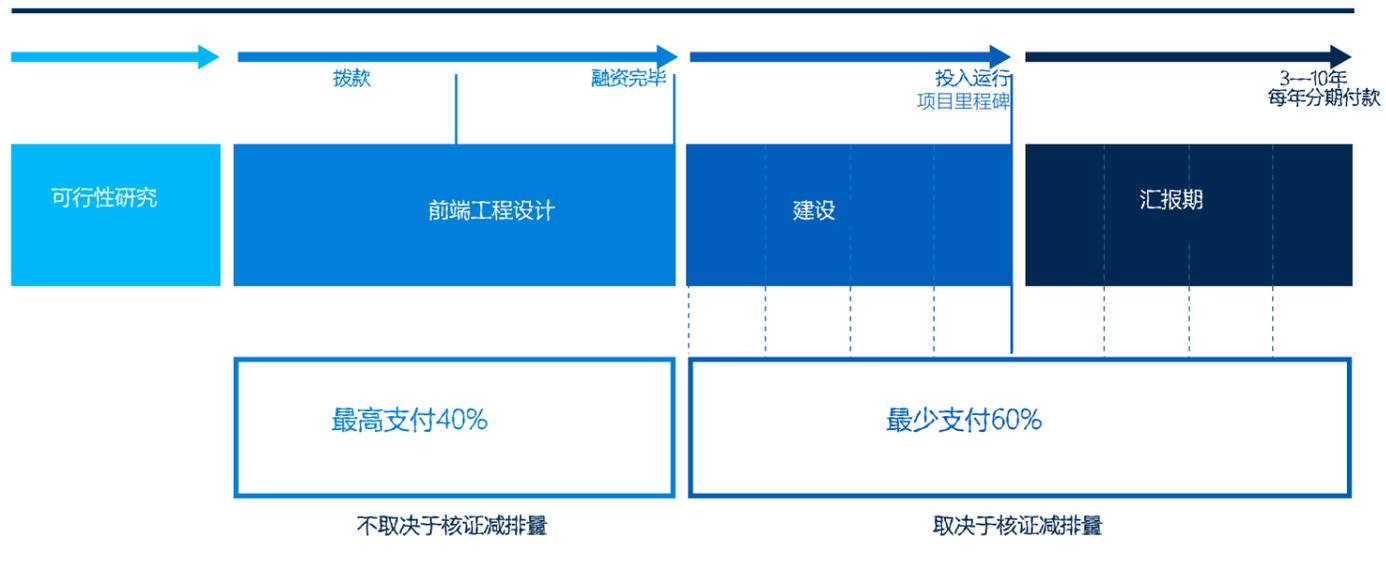


图12 基于里程碑的资金拨付进度¹⁾

气候变化理事会在3月份的一份报告将CCS视为一种重要的脱碳工具。丹麦能源技术开发和示范项目承诺拨款英力士、马士基钻井、Wintershall Dea和GEUS公司组成的联合项目，支持英力士Nini油田二氧化碳封存项目。Greensand项目计划对油气基础设施和船只进行再利用，以便运输二氧化碳。与此同时，哥本哈根的Amager Bakke垃圾焚烧发电厂也在制定二氧化碳捕集计划。

瑞典CinfraCap项目准备为开放CCS基础设施制定提案。该项目准备制定二氧化碳运输战略，从瑞典西部的多个工业设施捕集二氧化碳，经哥德堡港口运输并封存存在挪威的北极光项目。项目合作伙伴包括哥德堡能源、北欧能源、Preem、St1、Renova和哥德堡港务局。

英国研究和创新基金为部署路径行动计划提供第一阶段资金，已有六个集群获得拨款，其中包括南威尔士工业集群（SWIC）。威尔士建立净零集群的计划蓄势待发。南威尔士工业集群覆盖炼油、造纸、化工、液化天然气进口、钢铁和水泥等行业的工业排放企业。该项目力求通过英国政府工业脱碳挑战基金后续几轮拨款获取更多资金。

欧盟政策行动

相关项目有序推进的同时，整个欧洲也相应出台了一系列重大政策。《欧洲绿色新政》和《气候法》史无前例地将气候中和的政治承诺转变为法律义务，催生出更多支持CCS的欧盟政策。

2020年7月，欧盟投入100亿欧元的创新基金开始接收项目申请；这是全球规模最大的低碳技术推广项目。预计该基金将成为整个欧盟CCS项目规划、建设和运行的主要资金来源。

《欧盟2030年气候目标计划》预计将很快敲定。该计划将明确欧盟2030年温室气体减排目标，并将当前的气候政策工具同上述减排目标相统一。预计2021年将对《欧盟排放交易体系和成果共享法规》提出相应的修订建议。这些变化将对CCS产生重要影响。

对《泛欧能源网络》法规（TEN-E）的评估正在进行中，预计将在2020年底提出修订建议。这将决定二氧化碳的非管道运输和封存能否满足“共同利益项目”的标准。

欧盟碳移除认证框架预计将于2023年出台。这可能会激励整个区域BECCS和大规模DAC的发展。

5月底，欧盟委员会公布了一项重大复苏计划草案《下一代欧盟》²³。“投资欧洲”计划将进一步加强，将纳入一项新的战略投资工具。该草案的绿色技术部分涵盖清洁氢能和CCS。

此外，还有一项扩大公正转型基金规模的提议。排放交易体系涵盖的设施，只要位于成员国公正转型计划所覆盖的区域，就能利用大幅减排（包括部署CCS）获得支持。

阿拉德·卡斯特林

鹿特丹港务局CEO



有序推进鹿特丹波尔多斯项目

我们对波尔多斯项目设立的目标是在2021年底之前做出最终投资决定，并于2024年初投入运行。该项目将在15年内每年处理250万吨二氧化碳。许可程序现已启动。与客户签订合同的工作正在进行中，相关技术准备也在有序开展。荷兰和欧洲主管部门提供的资金支持将完成波尔多斯项目以及Air Liquide、Air Products、埃克森美孚和壳牌这四家捕集二氧化碳的公司的商业论证。随后波尔多斯项目将把二氧化碳输送到北海枯竭气田中进行封存。

在项目的第一阶段，波尔多斯将主要利用一个封存能力达3750万吨的气田。在接下来的项目阶段，我们的目标是连接更多鹿特丹港内外的碳源，以及其他封存场址。由于欧洲已宣布更严格的减排目标，这将进一步提高CCS技术作为未来应对气候变化重要工具的地位。因此，我坚信，在完成第一阶段后，波尔多斯项目将很快开启后面几个阶段。

由于欧洲已宣布更严格的减排目标，这将进一步提高CCS技术作为未来应对气候变化重要工具的地位。



欧洲各国采取的政策行动

国家层面的政策制定有了重大发展变化，特别是在欧洲率先部署的国家，如挪威、荷兰和英国。

挪威的Longship项目获得广泛政治支持。挪威政府3月份宣布的刺激计划中提及CCS的经济意义。其中承诺不仅要加快推进Longship项目，还要支持对Bergen、Trondheim和Stavanger等垃圾发电厂进行碳捕集评估。

荷兰于2020年底启动可持续能源转型补贴计划（SDE++），将有助于避免二氧化碳排放的各种技术提供50亿欧元的资金支持。CCS也符合条件，同时该国也就CCS的利用在规则中作出了具体规定。

英国CCS部署路径行动计划继续取得稳步进展。CCUS理事会联合新成立的CCUS专家组继续就英国部署所需措施进行分析并提供指导。在3月份的预算案中，英国财政大臣里希·苏纳克宣布英国将斥资至少8亿英镑，在十年内至少在英国的两个地点建立CCS集群。

随后出版的预算案¹⁶指出，消费者补贴将用于建设英国第一座私人募资建设的CCS燃气电站。

2020年对支持CCS的商业模式广泛征求意见后，英国政府8月公布了一份商业模式报告。该报告概述了通过经济监管来运行运输和封存基础设施的建议。由于认识到火力发电的灵活性，英国政府可能会建立一个电力CCS机制，包括可用性付费模式和可变付费模式。预计工业CCS的支持模式将随着时间的推移而变化，初期主要以前期资本支持和工业差价合同为主。关于商业模式的工作仍在继续。

欧洲其他国家正在研究如何紧跟该地区CCS先驱的方法。尤其值得注意的是，德国总理默克尔提出CCS是实现气候中和目标的必要条件。德国是二氧化碳排放密集型产业的集中地，也是欧洲排放量最高的国家，因此CCS可能会在德国的脱碳进程中发挥极为重要的作用。

COP26计划于2021年11月在英国举行，届时CCS在气候战略中将占据越来越重要的地位。2021年即将成为欧洲和英国CCS发展的又一个重要年份。



上图: Norcem Brevik 水泥厂，属于北极光CCS项目的一部分。图片来源: Norcem
下图: 胜科能源英国生物质能发电站，位于Teesside的Wilton International工业区。图片来源: 胜科能源英国

NET ZERO TEESSIDE – 与当地工业界的合作项目

Net Zero Teesside位于英国东北部一个重要工业区。该地区的排放量占英国工业排放总量的6%。该项目预计在2030年之前投运。该项目的核心在于最先进的结合CCS的联合循环燃气轮机发电站（可能是世界上第一个）。仅英国一个国家的联合循环燃气轮机排放量就超过4500万吨，占比超过12%，因此，该项目的重要性不言而喻。

发电站产生的二氧化碳，以及生物质能、制氢和碳密集型产业的各种集群所产生的二氧化碳，将通过共同管网输送到北海进行永久地质封存。

2019年9月，油气行业气候倡议组织（OGCI）全球CCUS KickStarter计划将Net Zero Teesside纳入其支持的五个战略枢纽。该计划旨在向CCS技术释放大规模投资。英国石油公司、ENI、Equinor、壳牌和道达尔将共同开发该项目，由英国石油公司担任作业者。该项目的主要利好包括：

- 每年可捕集多达1000万吨二氧化碳-相当于英国300多万户家庭一年的能源消耗量。
- 利用CCS提供灵活的燃气发电，通过降低系统总成本，在2050年之前实现电力系统净零排放，进而使英国消费者从中受益。

- 保住Tees Valley地区能源密集型制造业35-70%的工作岗位。
- 在建设过程中，间接带来7.5亿英镑的总增加值，此外每年间接创造13500个工作岗位。
- 提供容量高达1000兆吨以上的封存站点。

今年，CF Fertilisers、BOC和Sembcorp Utilities等地方工业排放企业签订了谅解备忘录。此外，与其他企业的沟通对话仍在继续。英国的研究和创新基金已经到位，用于第一阶段的部署和脱碳路线图。规划好的发电站已经完成概念设计、布局 and 建筑布置，目前正在环境影响评估。

与当地利益相关者的意见征已经开展了两轮，最近一次从2020年7月到9月中旬。随后，为获得必要的审批，将向商业、能源和工业战略大臣提交“开发许可令”申请。希望该项目能尽快为英国这一最重要的工业区的再开发做出贡献。



Net Zero Teesside到2030年将成为世界首座零碳工业枢纽 图片来源: BP 和OGCI

4.3 亚太

亚太CCS设施

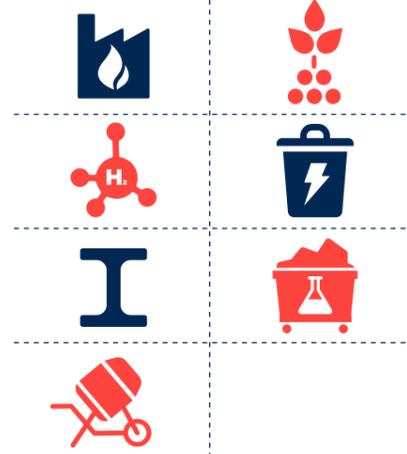
亚太地区有10座商业CCS设施，分别处于运营中或不同开发阶段。

该地区的CCS试点项目涵盖多种形式，包括天然气处理、化肥、制氢、垃圾焚烧、钢铁、煤变化学品以及水泥。

将CCS战略纳入国家长期气候变化承诺的国家有：



有多座商用项目在2020年已经进入设计阶段或早期开发阶段。



新加坡
马来西亚
中国
澳大利亚

合作

CCS领域的合作已经成为2020年该地区的重要主题。其中包括：

- 政府间的区域合作（双边和多边合作）
- 企业间的供应链合作



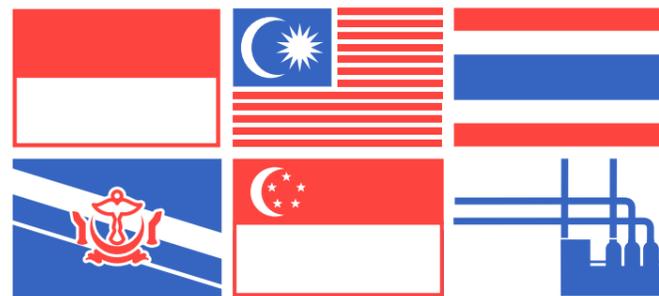
政府合作



企业合作

东南亚

东南亚正成为一个新兴的CCUS关键枢纽：印度尼西亚、新加坡、马来西亚、泰国、越南、文莱。



中国

在中国，CCS金融在2020年的气候金融探讨中一直都是重点。



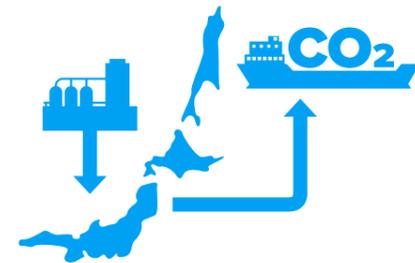
澳大利亚

澳大利亚有多个新项目在2020年进入项目开发周期的不同阶段。



日本

日本一直在该地区大力支持和推广CCUS。日本开发CCS技术不仅供国内使用，还着力将其打造成为出口产业。



亚太地区——CCS部署的新兴动力来源

对于整个亚太地区（APAC）的CCS发展来说，过去的一年既令人鼓舞，又充满挑战。尽管政府和企业将焦点转向应对疫情和油气价格下跌，但该地区CCS项目和政策的制定都表现出强大的韧性。

澳大利亚和东南亚都是重要的碳氢燃料生产国。东亚国家作为能源消耗大国聚集大量制造业。尽管在亚太地区只有两座运行中的商用CCS设施，但有多个新的商用项目已经进入设计阶段或早期开发阶段。试点项目涉及的行业有天然气处理、化肥、制氢、垃圾焚烧、钢铁、煤变化学品以及水泥等。CCS项目广泛用于多个行业，反映出该地区能源和制造业的优势与多元化。

该地区各国政府纷纷在国家规划和政策制定中凸显CCS支持本国实现气候变化承诺的作用。

最新进展包括：

- 新加坡于2020年4月发布低排放发展战略，其中认可了CCS在实现该国气候目标中²⁴所具备的巨大潜力。
- 马来西亚准备审议建立高二氧化碳气田开发监管框架。
- 日本将CCS纳入2020年1月发布的《环境创新战略》²⁵。
- 中国承诺2060年实现碳中和。中国目前正在编制第十四个五年计划²⁶ – CCS很有可能被纳入行动建议中。
- 澳大利亚政府也发布了多份政策文件，形成建设政策支持机制的积极势头。

政府之间的区域协作(双边和多边)、企业之间的供应链协作，是2020年整个亚太地区的一个重要主题。澳大利亚和新加坡、澳大利亚和日本、日本和印度尼西亚、澳大利亚和中国、澳大利亚和马来西亚，都有产学研合作安排。日本通过联合信用抵消机制(JCM)支持印度尼西亚的CCS项目(见第49页)。东南亚的合作有助于该地区更好地了解其封存潜力。由开发银行资助的东亚、南亚和东南亚的技术援助项目为该区域带来了更广泛的专门知识。

此外，整个区域逐步达成共识，认为CCS监管框架能提供长期稳定的法律监管。目前，很少有国家或地区制定专门针对CCS的法律或适用于整个CCS项目生命周期的法律，而澳大利亚是唯一一个拥有完整CCS监管框架的亚太国家。对于东南亚来说，如果有一个总体的区域监管方法，则有利于为域内各国制定针对CCS的国家监管框架奠定统一的基础。

澳大利亚：政策制定进行中

政策

2月，澳大利亚政府公布了审查低成本减排额外来源的专家小组报告²⁷。在答复中，澳大利亚政府同意根据减排基金²⁷就CCS的整体方案制定征求产业意见。这种做法可以让CCS项目运营商通过竞争获得政府资金，按每吨二氧化碳减排量支付。正式意见征求于7月开始，将征求对减排基金CCS-CCUS方法范围界定文件的意见。

5月，澳大利亚政府发布了《投资路线图讨论文件：加速推进低排放技术的框架》，其中讨论了CCS在氢气生产和其他应用中的部署路径²⁸。

澳大利亚政府随后于9月宣布了一系列措施，旨在“.....在整个经济领域推行新技术，降低成本，创造就业机会，提高可靠性和减少排放”²⁹。这些措施包括：

- 5000万澳元的CCUS发展基金
- 7020万澳元建设氢气出口中心
- 向澳大利亚可再生能源署和清洁能源金融公司再拨款16.2亿美元，并扩大其工作范围并支持包括CCS在内的更广泛的技术。要落实上述措施，需要澳大利亚议会通过立法修正案。

紧随上述政策发布之后，澳大利亚政府发布了《低排放技术声明》(简称《声明》)，这是澳大利亚技术投资路线图的第一个里程碑³⁰。该声明优先考虑“有潜力为澳大利亚带来最佳经济效益和减排成果的低排放技术”，目的是“将政府投资集中在新技术和新兴技术上³⁰”。《声明》概述了五项优先技术和经济延伸目标，以使新技术与现有技术一样具有成本效益，其中CCS的延伸目标是将二氧化碳压缩、运输和封存的成本控制在每吨20澳元以下。

《声明》提及的其他优先技术包括每公斤2澳元以下的清洁氢气生产、长时间储能、低排放铝等低碳材料以及土壤碳测量。

政府将在《声明》发布后开始采取11项关键行动，包括在COP26之前完成澳大利亚《长期减排战略》的编制工作。

法律法规

澳大利亚在联邦和几个州的管辖范围内都制定有CCS监管框架。2020年5月，澳大利亚对《2006年近海石油和温室气体封存法案》(联邦进行了修订，这样二氧化碳封存能够跨越联邦和州/领地辖区之间的三海里边界。该法案统一并简化了二氧化碳跨境注入管理。

项目

很多新项目已经取得进展:

- 桑托斯启动库珀盆地项目FEED (详情见下方案例分析)
- 碳运输和封存公司 (CTSCO) 目前正在做一个 12万吨/年的全链条CCS示范项目。该项目计划捕集火力发电站排放的二氧化碳并将其封存在苏拉特盆地。
- Bridgeport Energy公司计划在苏拉特盆地开启一个100万吨/年的CO₂-EOR项目。
- 利益相关方正在研究澳大利亚北部和西北部的CCS枢纽。维多利亚州CarbonNet项目已完成评估钻井,目前正在就商业化选项向行业利益相关方征集意见。

东南亚: 新兴CCS枢纽

东南亚为全球增长速度最快的地区。该地区能源需求自2000年以来增长超过80%, 燃料(石油、煤炭和天然气)占其能源供给量的70%³¹。部署CCS可为该地区提供可靠、清洁、低碳的电力, 同时对大型石油、天然气和制造行业企业脱碳。

令人鼓舞的是, 在天然气处理和石化行业, 大型CCS项目有一些低成本的机会, 可以先行一步。由于该地区各国之间经济发展水平存在差异, 排放组合各不相同, 因此该地区采取了多种CCS方法。然而, 建立区域性的枢纽, 可促进区域合作, 实现经济规模化, 进而降低成本。

新加坡

新加坡从技术和国际协作的角度, 在2020年4月发布的长期《低排放发展战略》²⁴中, 肯定了CCUS在实现长期脱碳目标方面的战略作用。新加坡的地理条件并不适合地下封存, 还有很多技术和非技术问题需要解决, 才能实现跨境二氧化碳运输和封存。产业利益相关方已经开始在新加坡境外展开调查, 开展二氧化碳封存的选址。因此, 国际合作至关重要。新加坡和澳大利亚在2020年3月23日³²签署MOU, 两国在一份联合声明中承诺, 将促进低排放解决方案方面的合作, 包括CCS。

印度尼西亚

印度尼西亚是石油天然气生产大国。为维持并增加产量, 需要获得越来越多的高二氧化碳气田。这需要对油藏二氧化碳减排做出战略考量和规划, 从而能确保项目在一个低碳未来中具备可持续性和商业可靠性。印度尼西亚已经开展了各种国际支持的研究和示范项目, 且印度尼西亚油气监管机构也在探讨CO₂-EOR 和提高气田采收率 (EGR)。

2020年9月, 日本政府宣布将在中爪哇省甘地气田支持一个示范项目。该项目将由J-Power和JANUS联合PT Pertamina及其他几家当地公司共同开发。合作方将为该CCS 示范项目制定一份详细计划。该项目将把天然气处理中捕集的二氧化碳经由一条4公里的管线输送到附近井口注入地下, 并提高采气率。合作各方目前正对该项目应用JCM的可行性进行调研。(详见日本部分)

CCS/CCUS印度尼西亚卓越中心汇集国际专家意见, 起草了一份关于碳捕集和封存的总统规章草案, 并已提交印尼政府³³。

马来西亚

在高二氧化碳气田开发中应用CCS已然是马来西亚CCS发展的重中之重。作为一家国有石油天然气公司和上游监管者³⁴, 马来西亚国家石油公司一直在排放限制方面制定监管方案, 并对高二氧化碳气田规划CCS项目。

马来西亚国家石油公司正在对二氧化碳封存进行一项区域盆地测绘研究, 并准备在沙捞越附近建设一座大型海上项目。预计最终投资决定将在2022年作出。

中国: CCS部署, 蓄势待发

在中国的气候融资探讨中, CCS融资历来都是焦点。中国央行会同国家发展和改革委员会、中国证券监督管理委员会于2020年7月8日发布《绿色债券支持项目目录 (2020年版)》³⁵。CCS被首次纳入其中, 进一步拓展了项目融资渠道。

案例分析 桑托斯 库珀盆地CCS 项目

桑托斯已经启动库珀盆地CCS项目的前端工程设计(FEED)。蒙巴天然气处理厂每年产生的约170万吨二氧化碳将被压缩、脱水, 然后经由一条50公里的管线运输到附近的枯竭储层进行封存。该项目准备在许可方面与南澳大利亚州监管机构展开合作, 可谓对该州CCS监管的一次前所未有的考验。



图片来源 Santos Ltd.

金红光 教授

中国科学院院士
中国环境科学学会CCUS专业委员会主任委员



全球能源和工业体系正面临重大变革以满足控制温室气体排放等可持续发展要求, 在迈向碳中和的道路上, 我们需要多元化的技术组合来实现这一目标。这其中, CCUS技术具有独特的作用和意义。在化石能源的低碳利用方面, CCUS可以大规模减排的作用已经被证实, 对生物质能源, CCUS可以实现负排放的效果, 甚至在氢能等未来能源生产方面, CCUS也将发挥重要的减排作用。我们相信, CCUS不仅对二氧化碳减排具有重要意义, 同时对于构建具有韧性的多能互补的未来能源体系也至关重要。

国家能源集团在陕西省启动年捕集15万吨CCS示范项目。该项目将测试新型先进碳捕集溶剂和吸附材料。中国此前曾支持发电、天然气处理、水泥、化肥、煤炭化工行业的示范项目。

值得注意的是, CCS的部署在中国面临一些困难和阻力。项目进展受新冠大流行和低油价影响。2020年9月, 中国提出2060年实现碳中和的目标, 且目前正在制定第十四个五年计划²⁴。CCS极有可能被纳入十四五计划建议行动中。

日本: 区域协作的引擎

在清洁能源、项目融资、能力发展和技术转移的国际合作中, 日本一直发挥推动作用。日本新任首相菅义伟十月宣布, 通过使用可再生能源和氢能, 加速CCUS等关键技术的研发, 日本将在2050年实现碳中和。

清洁氢气生产 & 供应链

日本不仅是氢利用技术开发(例如燃料电池电动汽车开发)的领导者, 而且还推动国际合作, 利用CCS和供应链发展清洁氢生产。日本政府支持多个清洁氢生产和供应链项目, 包括澳大利亚的氢能供应链 (HESC) 项目、文莱的高级氢能链协会 (AHEAD) 的技术开发项目以及沙特阿拉伯的项目。

- HESC项目将如期完成澳大利亚维多利亚州拉特罗布山谷的煤气化和天然气精炼设施的建设和调试。在日本, 神户液态氢的储存和卸载终端已经完成³⁶。
- 2020年4月, AHEAD开始运营世界上第一条跨国氢气供应链。这包括天然气制氢并将其转化为甲基环己烷 (MCH)。然后, MCH运至日本进行脱氢释放氢气³⁷。2020年5月, MCH再生氢气被供应到Mizue热电厂的燃气轮机进行发电³⁸。
- 2020年9月, 世界上第一批40吨无碳氨(即使用结合碳捕集与封存的化石燃料产生的氢气所生产的蓝色氨) 驶离沙特阿拉伯前往日本, 将用于发电站燃烧发电³⁹。

政策/战略

日本政府一月在综合创新战略会议上发布突破性的《环境创新战略》, 其中对CCS的角色做出如下定义:

- 以CCS/碳循环为目标的低成本二氧化碳分离和回收
- 将二氧化碳转化为燃料以及其他碳循环技术
- 消除大气中的二氧化碳

我们相信, CCUS不仅对二氧化碳减排具有重要意义, 同时对于构建具有韧性的多能互补的未来能源体系也至关重要。

中島俊朗

社长
日本 CCS 调查株式会社 (JCCS)



要达成可持续发展目标 (SDGs) 并建设零碳社会, 需要的不仅仅是节能和扩展可再生能源, 还需要部署 CCS 来捕集和封存经济活动的碳排放。除此以外, 还要在全社会落实 CCU 和碳循环, 把二氧化碳作为一种资源来使用。

为响应国家大力发展 CCS 的政策, JCCS 在北海道苫小牧市展开 CCS 示范项目。该项目于 2019 年 11 月实现二氧化碳累计注入量 30 万吨的目标, 证明 CCS 是一种安全可靠的技术。

利用该项目衍生的技术和知识, JCCS 将继续着力解决有关 CCS 部署的问题, 并为日本政府针对全球暖化提出的典型应对措施做出贡献。这些措施包括 CCS、CCU 和碳循环。此外, JCCS 还将继续发挥作用, 让国际社会了解上述努力。



为响应国家大力发展 CCS 的政策, JCCS 在北海道苫小牧市展开 CCS 示范项目。该项目于 2019 年 11 月实现二氧化碳累计注入量 30 万吨的目标, 证明 CCS 是一种安全可靠的技术。

山下隆一

局长
日本经济产业省 (METI)
产业技术环境局



IEA 预测, 到 2060 年, CCS 预计将占累计二氧化碳减排量的 14%。日本内阁于 2019 年 6 月批准了《巴黎协定下的长期战略》, 并制定了长期目标, 计划于 2050 年减少 80% 的温室气体排放。在这个长期目标下, CCS 被视为一项有助于在未来显着减少温室气体排放的技术。为实现《巴黎协定》长期战略设定的目标, 日本政府于今年 1 月制定了“渐进式环境创新战略”, 旨在发展可降低大气中二氧化碳累积水平 (Beyond Zero) 的技术, 并确保全社会落实该技术。在欧盟和英国, 由于农业、交通运输和工业等均属于难以减排的领域, CCS 等二氧化碳减排技术也被视为实现碳中和的关键所在。

为实现 CCS 技术的实际利用, 日本一直致力在北海道苫小牧市建成一座大型示范项目, 开展二氧化碳分离回收技术以及安全控制技术的研发, 并对适合的封存点展开研究。苫小牧示范项目受到全球瞩目。2019 年 11 月累计二氧化碳注入量已达 30 万吨。在当地利益相关方成功合作之下, 该项目稳步推进。在广岛, 大崎上岛町集成煤气化燃料电池联合循环示范项目已经落成。二氧化碳分离回收设施于 2019 年完工。全面示范项目自该财年投入运行。由于上述努力所取得的成果, 日本致力于证实 CCS 技术可靠性, 降低技术成本, 稳步实现 CCS 的实际应用。

纵观其他国家的努力, 尤其是亚洲, 经济持续增长, 化石能源有望继续使用。因此, CCS 对于同时实现经济增长和脱碳至关重要。为给 CCS 在亚洲的发展奠定坚实基础, 日本将推动亚洲 CCUS 网络的相关活动, 为分享技术、经验和知识创造机会。

CCUS 是一种可以实现二氧化碳大幅减排的技术, 是应对全球暖化一种措施。促进该技术的实际应用和商业化不仅对于日本和全球来说非常重要, 从产业战略未来的角度来说也非常重要。我想对全球碳捕集与封存研究院促进 CCS 全球部署表达我的尊敬之情。

国内项目

MIKAWA 项目

Mikawa 项目是日本第一座商业规模示范项目, 也是该国第一座 BECCS 项目。该项目包括利用 CCS 将一座火电厂转化为生物质发电设施。碳捕集环境影响评估已经做完, 调试已于 2020 年中开始。该项目将每天捕集生物质锅炉排放的约 500 吨二氧化碳。

新 CCS 研究项目

新能源和工业技术发展组织 (NEDO) 挑选了一批业内企业组成研究团队, 对北海道苫小牧市精炼厂的循环二氧化碳展开研究。该研究团队还将调查使用捕集二氧化碳生产甲醇的情况。氢气的来源主要来自精炼厂或现有苫小牧 CCS 设施内的水电解设施。将 CCU 设施与 CCS 设施结合以后, 有望共用一系列碳捕集装置, 进一步加强两座设施之间的互操作性。

国际合作: 技术转让与金融支持

日本一直在与域内多个国家就 CCS 展开合作。两个全新的重要合作计划如下:

高二氧化碳气田开发联合研究计划

日本石油天然气与金属矿产资源机构 (JOGMEC)、马来西亚国家石油公司以及日本 JX 石油天然气勘探公司达成协议, 就结合 CCS 的高二氧化碳气田开发联合研究。该项目将深入研究天然气制氢以及氢气出口日本的可能性。JX 和 JOGMEC 将合作开发新能源价值链。

印度尼西亚联合信用抵消机制 (JCM) 研究

在印度尼西亚的介绍部分 (甘地项目) 已经提到, 日本和印度尼西亚成立合作伙伴项目, 研究 JCM 在大型 CCS 示范项目的应用。在实施日本先进低碳技术以后, 该项目将对温室气体减排成果进行量化。

印度: 加速追赶阶段

能力发展以及利益相关方的参与向来都是关键主题。开发银行和国际清洁能源计划资助的技术协助项目, 让越来越多的人理解 CCS 及其在脱碳中扮演的角色。

印度钢铁和水泥行业目前正积极将 CCS 纳入减排雄心之中。印度瑞来斯实业公司已宣布将一项 CCS 技术开发项目纳入其净零承诺之中⁴⁰。

2020 年 9 月, 六家印度企业就 2050 年实现净零排放发布“行业宣言”。这六家企业将探索包括碳固存在在内的多种脱碳方式⁴¹。

印度科技部已设立二氧化碳封存国家研究计划, 并于八月呼吁各界就支持 CCS 研究、开发、试点和示范项目建言献策^{42,43}。这也属于加速 CCS 技术计划 (ACT) 的一部分, 且为此印度已承诺斥资 100 万欧元, 为印度的参与者提供支持。被选中的项目伙伴方必须至少来自三个 ACT 国家且项目按计划能在 2021 年 9 月开工⁴⁴。

联合信用抵消机制 (JCM)

JCM 是一个基于项目的双边信用抵消机制, 由日本政府成立并执行^{45,46}。JCM 对日本通过低碳技术、产品、系统、服务以及基建部署实现的温室气体减排或消除贡献量进行合理量化评估。此外, JCM 还在发展中国家实施缓解行动, 从而为实现日本的减排目标作出贡献。

JCM 主要有三大目标⁴⁷:

1. 促进业内领先低碳技术、产品、系统、服务以及基建的部署, 实施缓解行动, 为发展中国家可持续发展作出贡献。
2. 对日本温室气体减排或消除贡献量进行合理量化评估, 并利用上述成绩实现日本的减排目标。
3. 通过促进全球温室气体减排或消除行动, 为 UNFCCC 最终目标作出贡献。

截至目前, JCM 已经与 17 个国家建立联系, 包括印度尼西亚、越南、老挝、缅甸、泰国、柬埔寨、菲律宾、蒙古、孟加拉国、沙特阿拉伯、马尔代夫、埃塞俄比亚、肯尼亚、哥斯达黎加、帕劳、墨西哥和智利⁴⁶。



上图: 苫小牧 CCS 示范设施 图片来源: Japan CCS Co., Ltd
下图: Mikawa 发电厂 图片来源: 东芝能源系统和解决方案公司

4.4 海合会 (GCC) 国家

CCS概况

该地区有近四分之三的二氧化碳排放量来自两个国家，即沙特阿拉伯和阿拉伯联合酋长国（阿联酋）



中东地区人口数量不到全球人口的1%，但每年生产的石油占全球石油产量的25%。



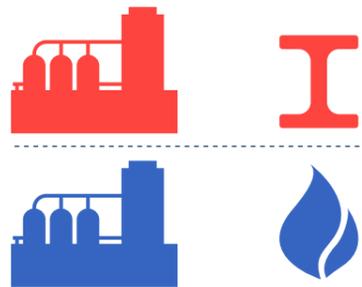
目前CCS活跃于三个中东国家，即阿联酋、沙特阿拉伯和卡塔尔



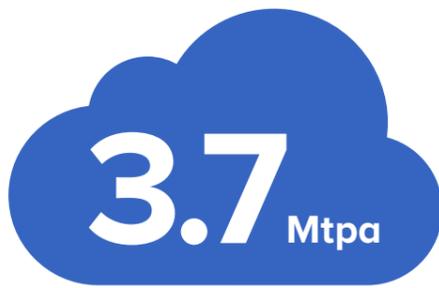
该地区具有广阔的、可获得的地下封存潜力，高达5-30吉吨*



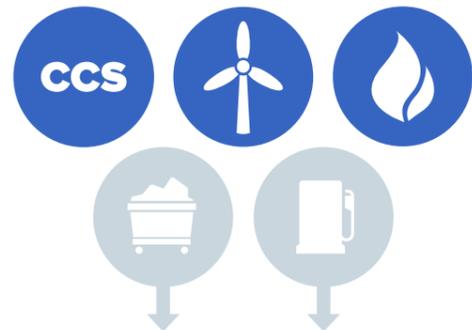
有三座商业CCS设施运行中：2座在天然气处理厂内，1座在钢铁厂内。



二氧化碳捕集量达每年370万吨

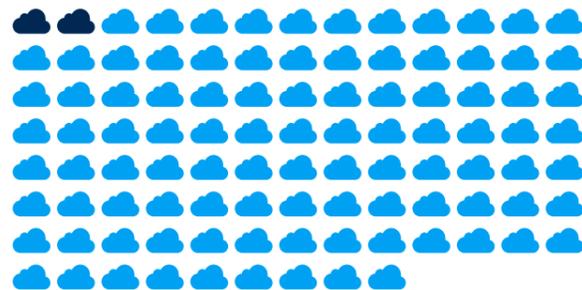


CCS同可再生能源、替代石油煤炭的天然气以及提高能效一起构成关键国家低碳计划强有力的组成部分。



有关本地区CCS项目的其他数据预测包括二氧化碳捕集量将从2019年400万吨/年，到2040上升至1亿吨/年。*

从2019年2 Mtpa 到2040年100 Mtpa



*中等信心 ** 基于2019年6月委托Qamar Energy的评估结果

尽管过去一年因油气价格下跌，经济遭遇挑战，但沙特阿拉伯、科威特、阿联酋、卡塔尔、巴林以及阿曼等海合会国家已跃升为全球CCS中短期重要行动者。虽然人口不到全球百分之一，但这些国家石油年产量约占全球石油年产量四分之一⁴⁸。鉴于多家机构纷纷预测石油天然气需求因近零排放将有所下降，产业多元化和脱碳获得越来越多的重视，所有海合会国家都为此制定了令人信服的战略目标。

政策

对气候行动的投入在不断加强。CCS同可再生能源、替代石油煤炭的天然气以及提高能效一起构成国家低碳计划强有力的组成部分^{49,50,51}。CCS在该地区发展起来的循环经济这一概念中发挥强有力的核心作用（见下方介绍）。推动CCS项目的另外一个驱动力，源自于让二氧化碳取代天然气来提升石油采收率的巨大需求⁵²。

中东地区近四分之三的二氧化碳排放来自两个国家：沙特阿拉伯和阿联酋⁴⁸。两国都是“创新使命”成员，积极参与清洁能源部长级CCS计划。两国还发布了雄心勃勃的国家战略力求实现经济多元化和去碳化^{50,53}，并向UNFCCC提交了明确定义CCS地位的国家自主贡献^{54,55}。沙特王国国家石油公司准备进一步降低作业碳排放，以实现其全球最低石油生产碳足迹的承诺并为此不断改善提升^{56,57}。

项目

目前CCS主要活跃于三个国家——阿联酋、沙特阿拉伯和卡塔尔：

- 阿布扎比阿联酋钢厂是ADNOC Al Reyadah项目一期，年捕集量约为80万吨。
- 第二期已经开始，计划从2025年开始，每年再从Shah天然气处理厂捕集230万吨二氧化碳用于提升采收率。
- ADNOC的目标是到2030年前将作业排放强度降低25%，其中包括与Al Reyadah三期同步发展，每年从Habshan和Bab天然气处理设施再捕集200万吨二氧化碳。
- 沙特阿美乌斯马尼亚油田（属于加瓦尔油田）每年采油使用哈维亚天然气凝析液工厂捕集的80万吨二氧化碳⁵⁶。
- 沙特基础工业公司（简称SABIC）位于朱拜勒的乙烯工厂CCS设施每年捕集量约为50万吨，用于甲醇和尿素生产。
- 卡塔尔燃料添加剂公司的甲醇工厂每年捕集量为20万吨
- 卡塔尔天然气公司宣布计划2019年底在拉斯拉凡天然气液化厂添加CCS设施⁵⁷——初期捕集量为每年210万吨，预计2025年会升至每年500万吨。



上图：卡塔尔天然气公司拉斯拉凡液化天然气工厂。图片来源：卡塔尔天然气公司

下图：沙特阿拉伯哈维亚天然气厂。图片来源：沙特阿美

中东地区发电温室气体排放量是石油天然气等工业活动排放量的两倍多，但这个特点常常被忽视⁵⁸。鉴于脱碳规划设计使用天然气、风能和太阳能替代煤炭和石油，因此与世界其他地区相比，CCS可以在该地区发电行业发挥更大作用。

与该地区的排放量和雄心壮志相比，实际CCS开发力度还比较有限。尽管如此，能源和工业行业已经展开大量研究工作。针对CCS项目的一些数据预估提出二氧化碳捕集量将从2019年200万吨/年上升至2040年超过1亿吨/年⁵⁹。这样的增长趋势将会为全球CCS部署的速度和成本产生巨大影响。

今后几年，CCS将在中东地区实现前所未有的发展，尤其是阿联酋和沙特阿拉伯。该地区可能会跃升为全球CCS的一个关键热点。鉴于该地区对低碳制氢的关注度不断上升，地下封存潜力巨大⁵⁹，天然气资源丰富且产能充沛，中东可以利用其不断积累的CCS专业技术和地理优势，发展清洁氢出口产业。该地区与CCS相关的巨大潜力，值得密切关注。

亚当·西敏斯基

沙特阿拉伯国王阿卜杜拉石油研究中心 (KAPSARC) 主席
CSIS 能源安全与气候变化项目高级顾问



尽管可再生能源的部署和能效提升广受欢迎，但燃料极有可能在未来的能源结构中发挥重大作用，因此我们还需要大力开展碳捕集和封存基础设施建设。循环碳经济 (CCE) 聚焦 CCS、直接空气捕集等管控碳排放的所有机会及其最终效果，为实现气候挑战搭建了一个切实可行的框架。

海合会地区具有充沛的碳封存能力，因而可以在扩展全球 CCS 规模中发挥战略性的作用。该地区除了具有丰富的油气资源，其理想的地理位置也非常适合开发工业碳封存集群和生产蓝色氢。该地区无与伦比的太阳能资源和强大的封存潜力，为不断成熟的 DAC 技术创造了机遇。

海合会地区具有充沛的碳封存能力，因而可以在扩展全球 CCS 规模中发挥战略性的作用。

莱拉·贝纳里

首席经济学家
阿拉伯石油投资公司 (APICORP)



.....政策届和能源届也达成明确一致，认为 CCUS 是实现减排和气候目标的关键技术。

近几年，我们看到气候意识不断加强，尤其是最近对本世纪中叶实现净零排放的迫切需要有增无减。此外，我还从金融角度观察到，气候行动和减排承诺的落实所受到的重视与日俱增。

近些年来，不仅公众对气候变化的理解不断加深加强，政策届和能源届也达成明确一致，认为 CCUS 是实现减排和气候目标的关键技术。

至于 CCUS 的融资，我们必须大步向前创建投资激励机制，并证明 CCUS 的商业可行性。我们必须不断吸取之前将现有技术规模化的经验，并将这些经验迅速应用于 CCUS，从而尽快使 CCUS 的部署达到必须的水平。

循环碳经济

循环经济这一概念是指通过资源持续使用的最大化来消除浪费的一种系统性的措施。针对具体应用，又衍生出许多概念。

沙特阿拉伯国王阿卜杜拉石油研究中心 (简称 KAPSARC) 目前正在开发循环碳经济模型，将该国气候政策计划⁶⁰做情景化模拟。该模型主要基于四个 R，即：

- 降低 (Reduce)
- 再利用 (Reuse)
- 循环 (Recycle)
- 清除 (Remove)

上述框架认可、重视所有二氧化碳缓解方式。“清除”指的是 CCS、DAC 以及优良土地管理等可以安全清除、隔离并封存二氧化碳的办法。

KAPSARC 对以下概念做了一个新的区分：

- ‘活碳’ (植物或土壤)
- ‘逃逸碳’ (如甲烷和二氧化碳气体)
- ‘持久碳’ (如锁定在塑料制品中的碳)

上述四个 R，每一个都能在应对这三类碳中达到最佳效果。‘清除’在缓解措施中位列最后，仅在其他三种方式效果不够显著时才会使用。尽管如此，‘清除’，尤其是 CCS，同其他缓解措施一道，被认为是实现净零排放的关键之所在。

沙特阿拉伯王国正在大力推广循环碳经济 (CCE) 这一框架，以推动实施一种全面的气候缓解“综合性”措施。KAPSARC 组织编制的《CCE 指南》^{vii} 就不同技术和方法如何实现净零排放做出阐述。该指南于 2020 年 8 月发布，分为非生物可再生能源、核能、碳的再利用、生物能源、碳捕集与封存、氢能以及实行政策等章节。每一个章节均由相应领域的著名机构执笔撰写，包括国际能源署、国际可再生能源署、国际原子能机构、全球碳捕集与封存研究院以及经济合作与发展组织。本报告获得 2020 年 G20 国家能源部长联合声明认可。声明中指出，循环碳经济提供了一种“全面、综合、包容且实际的碳排放管理方法，可依据各国优先事项和国情进行应用。”

CCE 框架的制定工作仍在进行中。沙特阿美与哥伦比亚大学全球能源政策中心和全球碳捕集与封存研究院正在围绕 CCE 框架合作进一步展开学术研究，对四个 R 的减排效果逐一进行量化。

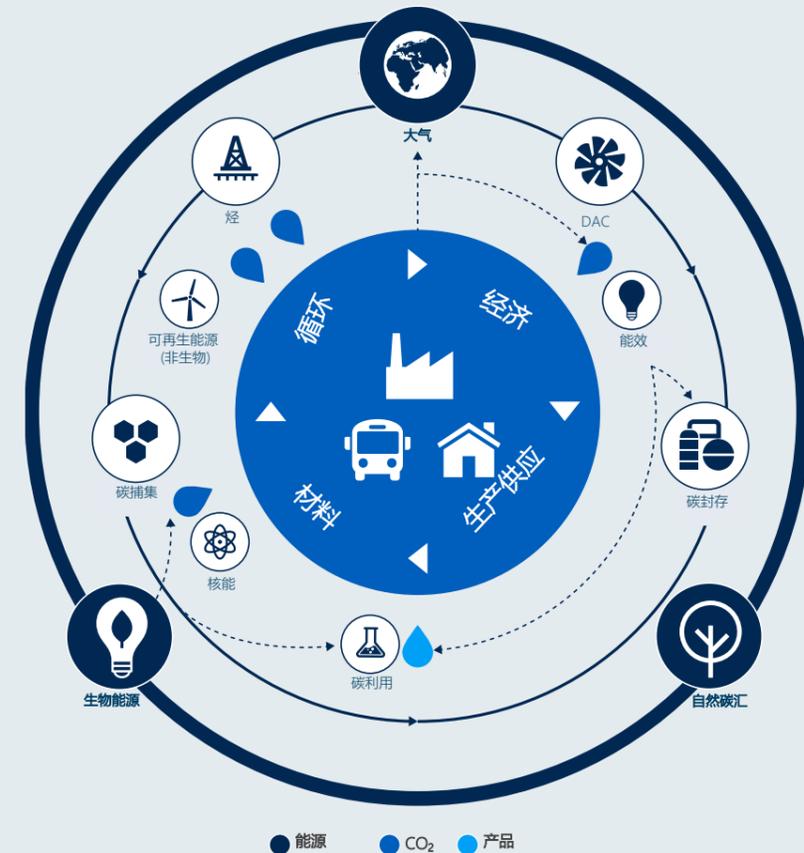


图 13 通过完成循环碳经济闭环来实现气候目标。

CCS 开发： 技术及应用

- 1.0 前言
- 2.0 碳捕集与封存需求
- 3.0 全球碳捕集与封存现状2020
 - 3.1 全球碳捕集与封存设施进展与趋势
 - 3.2 政策与监管
 - 3.3 全球封存概览
- 4.0 区域现状一览
 - 4.1 美洲
 - 4.2 欧洲
 - 4.3 亚太
 - 4.4 海合会
- 5.0 技术及应用
 - 5.1 工业
 - 5.2 氢
 - 5.3 天然气
 - 5.4 电力行业的碳捕集与封存
 - 5.5 负排放技术
 - 5.6 碳捕集与封存创新
- 6.0 附录
- 7.0 参考文献

5.1 工业

工业二氧化碳排放量每年高达80亿吨，其中水泥、钢铁、化工等行业占70%。如果加上间接排放，工业排放在全球人类活动引起的二氧化碳排放总量¹⁵中占比接近40%。到本世纪中叶，新增二十亿人口的衣食住行和娱乐将推高对工业产品的需求。随着生活不断富裕起来，尤其是在发展中经济体，有数亿人终于有经济能力享受商品和服务。

根据目前各国提交的国家自主贡献（NDC）中限制排放和提升能效的承诺，IEA估计到2060年直接工业二氧化碳排放量将从80亿吨/年上升至100亿吨/年。但是，要实现符合《巴黎协定》的气候成果，上述排放量应在2060年¹⁵前降至47亿吨才行。

每年约有19亿吨工业二氧化碳排放都是生产工艺中化学反应的副产品。这些“工艺排放”即便使用可行的生产技术也无法避免。例如，水泥生产中65%的排放都在碳酸钙（石灰石）转化成氧化钙（生石灰）的过程中产生。虽然这一化学反映产生二氧化碳，但却是水泥制造不可或缺的。其他二氧化碳排放量较高的工业工艺流程还有天然气处理，钢铁、氨/尿素和生物燃料的生产，以及化学制品、塑料和纤维的各种化工工艺流程。

要削减排放，必须采取多种手段，包括转换燃料，提升能效，以及部署现有最佳技术和未来创新技术。在很多情况下，缓解排放的唯一可行办法就是在生产后使用CCS清除二氧化碳。

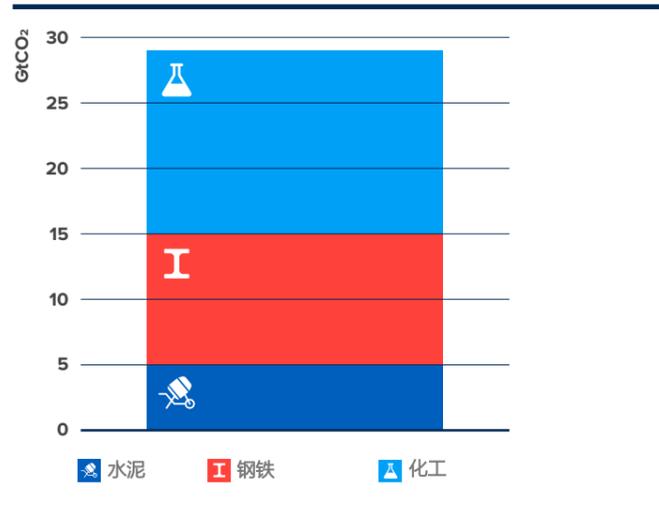


图15 2017-2060 CCS对水泥、钢铁和化工行业的减排贡献量ⁱⁱⁱ

据IEA估计，要实现符合《巴黎协定》的气候成果，CCS必须在2017年-2060年之间帮助水泥、钢铁和化工行业削减290亿吨二氧化碳排放量。因为很多化工生产工艺产生的二氧化碳流几近纯净，捕集成本很低，所以CCS尤其适合应用于化工行业，可在2060年前实现140亿吨减排量。

水泥

传统水泥制造涉及将碳酸盐原材料（通常为石灰石碳酸钙）在回转窑内高温加热。高温“煅烧”产生氧化钙和二氧化碳。另外，燃料燃烧（通常为煤或天然气）产生热量推动上述转化反应也会产生二氧化碳。碳酸盐是硅酸盐水泥（Portland cement）的关键成分。硅酸盐水泥被广泛应用于全球的建筑行业中。

即便采用生物源或其他低碳燃料供热，水泥煅烧反应还是约有50%的排放⁶¹。这些排放对于生产氧化钙的化学反应至关重要。水泥行业占全球二氧化碳排放量⁶²的8%，其中煅烧约占4%。尽管已经有水泥的替代产品，但部署速度缓慢。因此解决水泥行业排放问题对于实现净零世界至关重要。

水泥窑烟道气是实施CCS的良好对象。烟道气的二氧化碳浓度一般为14-33%⁶¹，比传统燃煤排放的二氧化碳浓度高。此外，由于其二氧化碳纯度高，捕集的能源强度更低。否则，就需要加大处理力度，来清除水泥粉尘等污染物。

NORCEM CCS项目

海德堡水泥挪威分公司六月份同Aker Solutions公司签署协议，从位于挪威的Brevik水泥厂捕集二氧化碳⁶⁴。水泥厂将采用专利捕集溶剂捕集来自水泥窑的烟道气。

海德堡还在开发一种氧气助燃水泥窑。窑炉使用纯氧来替代空气，消除了烟道气中的氮，将二氧化碳浓度提升至70%以上⁶⁴。二氧化碳浓度更高，可提高下游捕集能效，显著降低烟道气量，有助于大幅削减资本成本。

LEILAC项目 - (低排放强度石灰和水泥)

2020年初，澳大利亚Calix公司与LEILAC项目签署一系列协议，测试其专利水泥煅烧反应炉技术。这意味着，第一阶段试点工厂的规模会扩大四倍。这标志着水泥技术的一项重大进步，也为降低该行业排放指明一条道路。

传统水泥和石灰制造用的回转窑炉内，助燃空气用作高温燃烧燃料。这一过程剩余的氮与煅烧产生的二氧化碳相混合。氮降低了二氧化碳纯度，升高了碳捕集的能耗和成本。

Calix的技术将煅烧产生的二氧化碳与热源相分离。生料流入内部反应管，由单独的燃烧加热器或电加热器从外部对其进行加热。煅烧产生的二氧化碳始终与用于燃烧供热的空气或氮相分离。因此，Calix煅烧炉出来的二氧化碳始终是干燥的，马上就可用于捕集，并且几近纯净。图16展示了反应炉的工作方式。

Calix反应炉可以使用可再生电力或生物燃料提供低排放供热，从而将工厂总排放量将至近零水平。另外一个优势是Calix煅烧炉可以并入常规水泥厂，而其余部分可以保持原样不变。因此，Calix是改造世界各地水泥厂的一个理想选项。

钢铁

钢铁行业大约产生了全球7%的二氧化碳排放量⁶⁵。通过钢铁循环利用、能效项目以及一些用氢替代化石燃料的初步措施，已经做了大量的工作来减少排放。仍有一大部分温室气体排放可以通过使用CCS来实现减排。

位于阿布扎比阿联酋钢厂自2016年以来一直在用溶剂捕集法进行碳捕集和封存。二氧化碳的产生源自直接还原铁装置（DRI，即将铁矿石转化为用于炼钢的铁元素）中用作还原剂的煤炭或天然气。该钢厂每年大约捕集80万吨二氧化碳，通过管线运输用于EOR。

其他项目也在研究改变炼钢基本工艺以促进二氧化碳减排。塔塔钢铁公司的Hisarna工艺是一项新技术。该技术不仅能提升能效，降低炼钢的排放强度，还能提高二氧化碳浓度，更利于捕集。



Calix 位于比利时的LEILAC示范项目先进的煅烧反应炉。图片来源：Calix

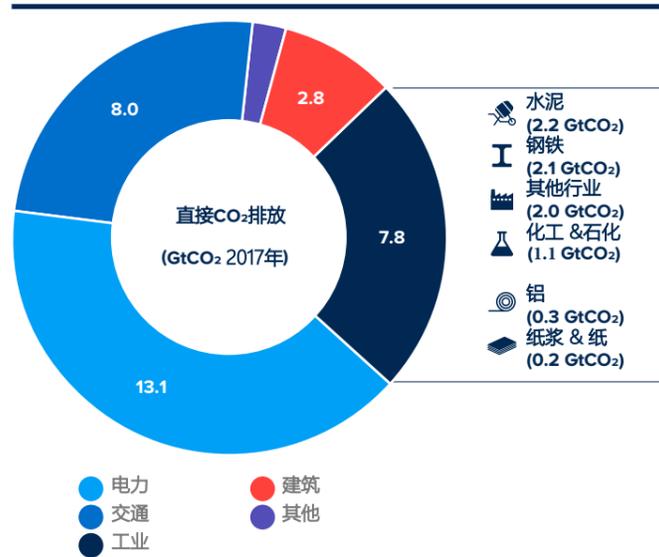


图14 全球各行业直接二氧化碳排放量ⁱⁱⁱ

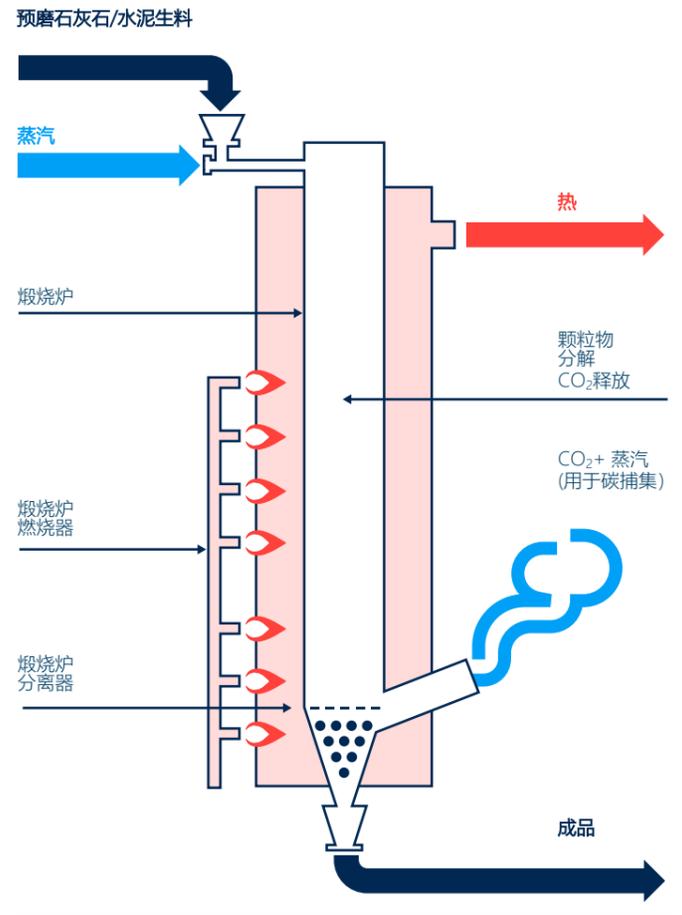


图16 CALIX 先进煅烧反应炉- 详图
来源：Calix (提供)

孙轶颀博士

中国环境科学学会气候投融资专业委员会常务委员



中国致力于2030年前实现二氧化碳排放达峰，2060年前实现碳中和。碳捕集与封存（CCS）被广泛认为是助力实现上述气候雄心的可规模化解决方案。对于依赖化石燃料能源的工业部门来说，他们可以良好管控面临的气候风险。一旦CCS技术做到商业推广，这些部门将具有CCS部署的融资优势和监管部门的支持。稳定且不断增长的投资，将促进CCS技术不断进步。行业领先的石油和钢铁企业已经抓住机遇采取行动，投入CCS开发。中国有利的政策、先进的技术、强有力的投资为CCS的部署创造了有利条件。CCS在中国的前景一片光明。

中国有利的政策、先进的技术、强有力的投资为CCS的部署创造了有利条件。CCS在中国的前景一片光明。

5.2 氢气

近年来，氢能已经成为全球能源趋势讨论中热度最高的一种发展趋势。氢与电力相似，是一种必须从一次能源或二次能源中才能生产出来的能源载体。

氢能和电力有时被认为是双生子。与电力一样，使用氢能的温室气体排放为零，制氢产生的终端用户排放也为零。因此，要谨慎开发这一二十一世纪商品的供应链。

尽管目前使用有限，但氢气的经济性和低排放等特点使其具有巨大潜力。由于使用电池对于长途重型交通工具（如卡车、客车）而言并不实际，因此氢气将在替换碳氢燃料方面发挥重要作用。氢气还有助于解决高温工业供热脱碳这一巨大挑战，目前主要来自天然气和煤炭。氢气还可以作为储电介质，部分还可用作传统天然气供应的补充。

天然气生产和市场

2020年，高纯氢气产量达到7000万吨，氢气总产量（含合成气）达1.2亿吨⁶⁶。绝大部分都用于石油精炼和化工生产。

当前，98%的氢气生产都来自煤炭气化和天然气蒸汽甲烷重整（SMR）。这两种工艺如不使用减排技术，都会产生大量二氧化碳排放。正因如此，两种工艺都非常适合使用CCS这种经济的减排方式。还有一小部分（占0.3%）二氧化碳由可再生能源供电的水电解产生。

图17 显示目前氢气生产的比例：

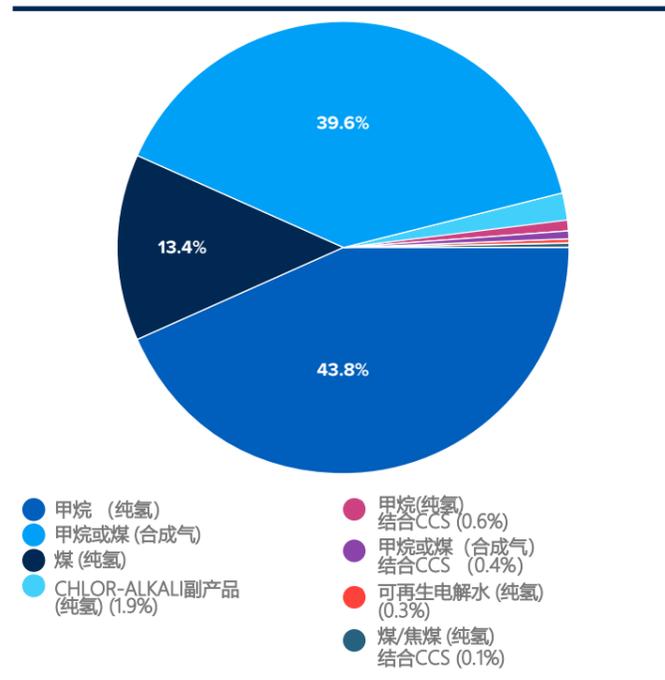


图17 全球不同来源和工艺的制氢比例⁶⁷

所有成本以美元每千克氢气计算	利用其他方式消减的 可再生能源供给		蒸汽甲烷重整结合CCS	煤炭气化结合CCS
	专用	可再生		
CSIRO 2018	\$7.70	\$18.20	\$1.80	\$2.00
IEA 2019	\$3.75	-	\$2.00	\$2.00
IRENA 2019	\$4.10	-	\$2.50	\$2.00
氢能委员会2020	\$6.00	-	\$2.10	\$2.00
四家报告的成本简单平均数	\$5.40	\$18.20	\$2.10	\$2.00

表3 不同低排放路径制氢成本一览⁶⁸

低排放制氢

现有的制氢路线主要有三种：

- 天然气重整
- 煤炭或焦煤气化
- 水电解（即分解水）

表3汇总了多家知名机构^{67,68,69,70}的制氢成本估算。这些估算值仅供参考，应谨慎对待。各个报告采用的成本估算基础（产能因素和燃料成本）不同，且在某些情况下，报告给出的是成本范围。例如，表中引用的IEA数据是世界各地的一个成本均值。

配备CCS的煤炭气化和SMR技术路线比使用可再生能源电解水的成本低得多。IRENA估计，到2050年⁷⁰，可再生能源制氢应该会比SMR制氢或CCS煤气化更有竞争力。由于2050年实现净零排放压力巨大，且现有难以脱碳的天然气和煤炭制氢设施规模巨大，要想实现大规模低碳制氢，必须进行深度改造，部署新型CCS工厂。

制氢的一个关键低排放路线是SMR结合CCS。目前，全球只有四座工业规模的CCS SMR制氢设施，每年低碳氢产量约为80万吨⁷¹。其中一座此类CCS SMR设施是Air Products公司位于德克萨斯州亚瑟港的制氢厂，这是一座有两列SMR装置的设施，使用真空变压吸附法⁷²捕集来自重整装置的二氧化碳。该工厂年捕集能力达100万吨，主要用于EOR作业。

CCS 煤气化是大规模制氢的成熟低排放技术。现有三座设施从煤炭、焦炭或沥青质（类似于焦炭）中生产氢气，合计总捕集能力达每年60万吨。世界上最大的清洁氢工厂是美国北达科塔州的Great Plains Synfuel工厂，每天通过褐煤气化产生1300吨氢气。这座成熟的设施自1988年起开始生产氢气，并从2000年开始捕集二氧化碳进行封存。每年大约有300万吨二氧化碳被运送至加拿大萨斯喀彻温省用于EOR。



Air Products亚瑟港德克萨斯制氢厂。图片来源：Air Products and Chemicals, Inc.

亚瑟港和Great Plains Synfuel的运行证明利用CCS大规模生产低排放氢气的经济技术可行性已经得到证实。

低排放氢气的需求有增无减

要推动氢气为全球温室气体减排做出有意义的贡献，必须大量生产氢气来替代大部分目前难以减排的化石能源。到2050年，低排放氢气的年需求量可上升至5.3亿吨，年二氧化碳减排量可高达60亿吨⁷³。不过，要获得减排带来的益处，制氢就必须使用近零排放工艺。目前，仅有不到0.7%的氢气来自可再生能源（电解）和结合CCS的化石燃料工厂¹⁵。

CCS制氢

蒸汽甲烷重整 (SMR) 是一项成熟的技术。甲烷和蒸汽在高温下发生反应产生氢气，随后水-煤气变换反应器将一氧化碳和蒸汽进一步转换成氢气。下方图18展示了SMR制氢厂的常规工艺流程。

可以从SMR工厂的三个位置捕集二氧化碳：

- 转换后的高温合成气 (1)
- 低压尾气(2)
- 用于加热SMR装置的燃料燃烧烟气(3)

亚瑟港的设施从转换后的合成气中捕集二氧化碳 (1)，利用高纯度和高压力的二氧化碳来降低捕集成本。

一般而言，SMR有约四成的二氧化碳排放来自烟气 (3)。由于这部分二氧化碳浓度和压力都很低，所以捕集成本高昂。这个问题可以用传统的燃烧后技术来解决。

煤气化反应制氢是在气化反应器中实现的。反应器使煤在高温下与有限的氧气发生“热解反应”产生一氧化碳和氢气。在转换反应器将一氧化碳转换为二氧化碳之后，进一步对其处理并与氢气分离，产生高纯度二氧化碳。

气化炉在高压下运作，因此高压二氧化碳具备明显优势。由于气化炉已经提供了大部分压力，就可以降低操作下游压缩设备的成本。

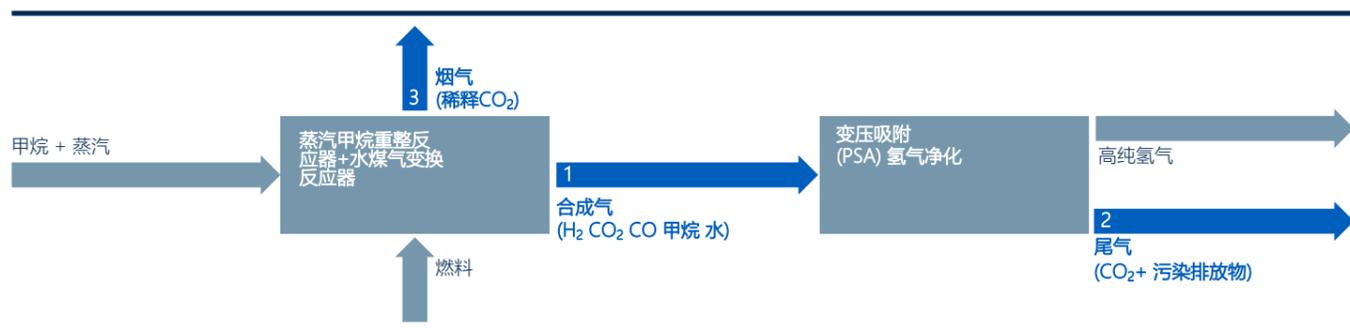


图18 基于SMR的制氢厂工作流程图

使用可再生电力制氢的减排机会成本

大部分可再生能源都用于发电。这种电力可以直接用于取代电网中的化石燃料发电。如果改用可再生电力，那么在水电解制氢的过程中则存在减排机会成本，因为可再生电力制氢可能无法替代化石燃料发电产生的排放。

图19的分析了在电网中直接使用可再生电力（替代化石燃料发电）可实现的减排和使用可再生能源的电解氢替代天然气燃烧⁷⁶可实现的减排。

在电网中使用可再生能源替代化石燃料发电，可实现的减排量是使用可再生能源生产绿色氢然后替代天然气燃烧实现的减排量的三到八倍。最为高效且强大的一种路径就是结合CCS通过天然气或煤制氢，而将可再生能源留给电网供电。

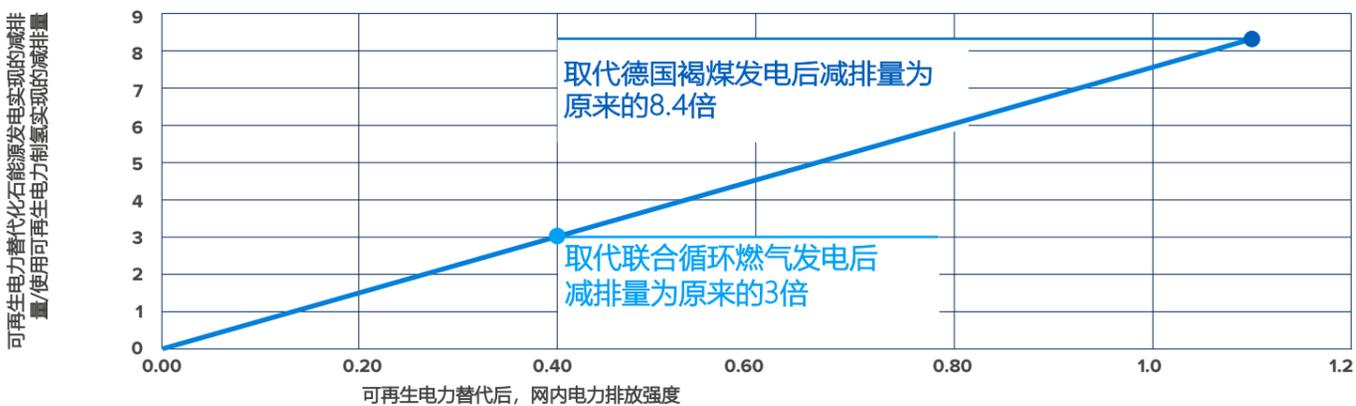


图19 可再生电力取代化石燃料发电实现的减排量远高于使用可再生电力制氢产生的减排量
假设氢气替代天然气燃烧

5.3 天然气

全球天然气市场在今年遭受了有史以来最大的一次冲击。新冠疫情严重抑制全球需求，预计天然气需求增长将下降4%⁷⁴。不过与2020年⁷⁵相比，到2025年需求应该会有所恢复并将上升约14%。此后随着亚洲一次能源需求的增长和欧美天然气在不同程度上替代煤炭，天然气需求还会继续上升。

煤炭替换成天然气，将使用点的碳排放量降低一半，但是天然气开采和处理排放量巨大，一方面来自处理设施的能源使用，一方面来自天然气的开采方式。刚开采出来的天然气一般含有二氧化碳，有时含量很高。因此二氧化碳必须在天然气出售之前清除，惯常做法是排放到大气中。全球各地的天然气处理厂每年大约向大气排放1.5亿吨高纯度二氧化碳⁷⁶。

由于此类二氧化碳纯度高，压缩和封存前只需要脱水即可。因此这类二氧化碳的捕集成本低，每吨约20-25美元/吨⁷⁷。对于处理厂和二氧化碳注入点距离很近（不到50公里）且封存点在陆上的地方来说，压缩、运输和封存的成本预计在15-20美元/吨^x。

如果没有CCS，天然气生产造成的二氧化碳排放量将随着不断上升的天然气需求持续增长。除此以外，还可能从二氧化碳含量高的常规储层开采天然气的趋势，由此导致天然气开采排放强度上升。CCS是缓解上述排放的唯一办法。

澳大利亚可作为研究天然气开采和处理排放上升以及CCS发挥减排作用的良好案例。澳大利亚的液化天然气 (LNG) 出口量从2014年的2390万吨上升至2015年的7710万吨，导致澳大利亚油气行业逃逸排放量翻倍（由1740万吨上升至3370万吨），如图20⁷⁸所示。

澳大利亚雪佛龙高更LNG工厂的CCS设施于2019年8月投运。如图20所示，CCS设施对排放的影响在2019年12月这一季度清晰可见。在澳大利亚温室气体清单季度更新报告中，澳大利亚政府指出，排放减少是因为：

“.....天然气总产量于2019年12月这一季度下降5.4%。.....该季度高更项目二氧化碳地下注入量的上升也减少了逃逸排放量。”⁷⁹

高更CCS设施每年的二氧化碳注入能力为340万-400万吨，是澳大利亚天然气行业的一个重点减排项目。该项目是全球最大的运营中CCS设施⁸⁰。要实现净零排放，全球天然气生产需要大量像高更这样的项目。

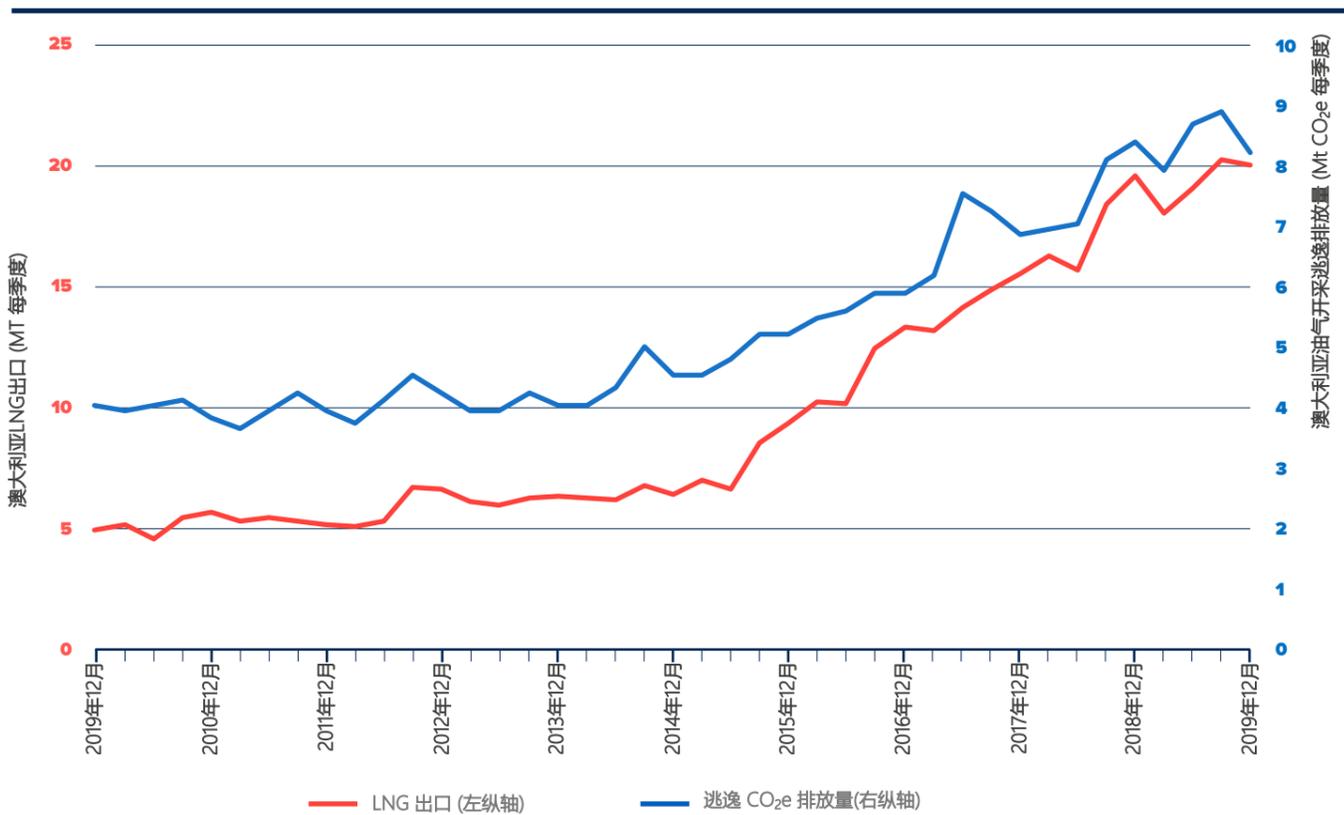


图20 澳大利亚LNG出口和澳大利亚油气开采逃逸排放量

5.4 电力行业的碳捕集与封存

电力行业迅速脱碳是实现净零排放的关键所在。发电产生的排放量占全球二氧化碳排放量的三分之一。电力行业已经是全球最大的二氧化碳排放来源。尽管如此，电力需求预计还会有大幅上升。

结合CCS的发电厂有助于保障未来低碳电网的韧性和可靠性。配备CCS的电厂具有相当的灵活性，可以提供可调度的低碳电力，并能提供惯性、频率控制和电压控制等电网稳定服务。非水电可再生能源是无法提供上述保障的。随着间歇性能源的部署不断加强，CCS对其形成了很好的补充。

对于全球现有化石能源发电厂的减排来说，CCS的作用至关重要。全球目前现有大约2000吉瓦的火电发电容量，预计到2030年还有500吉瓦的新增发电容量。目前，有超过200吉瓦的新增发电容量已经开工建设。虽然某些煤电厂和气电厂会提前退休，但亚洲的天然气电厂平均使用年限为19年，而煤电厂只有12年⁷⁵，剩余经济寿命长达数十年。如果进行CCS改造或提前退休的话，无论是现有的还是在建的煤电和气电站还会继续排放二氧化碳，且排放速度到2050年足以消耗IEA可持续发展情境（SDS）下95%的碳预算。这样的话，净零排放是不可能实现的。

用CCS来改造化石能源发电在某些情况下是一种经济的选择。对于中国、印度以及东南亚国家等高度依赖煤炭的经济体来说，可持续采用这种方式，在转向低碳经济的过程中，实现公平转型。

ALLAM-FETVEDT循环为实现低排放低成本CCS燃煤燃气发电提供一条前景光明的道路

Allam-Fetvedt循环是一种创新天然气（或合成气）发电技术，本身具有碳捕集能力，使用氧气作为助燃燃料，并使用二氧化碳作为工作流体介质。也就是说，该技术本身具备碳捕集、压缩、脱水以及消除氮氧化物和硫化物^{81,82}的能力。

该技术发电可捕集97%的二氧化碳，其平准化电力价格比今天的传统天然气联合循环⁸³要高出大约22%。到2050年，成本溢价预计会低于10%。

本质上，Allam-Fetvedt循环使用超临界（高压和高温）二氧化碳特种涡轮机，而不是传统发电厂中使用的蒸汽。

这种技术产生的二氧化碳可以直接进入管道运输，无需添加捕集设备。NET Power公司目前准备在天然气行业中将Allam-Fetvedt循环进行商用。与此同时，8 Rivers Capital则牵头几家行业企业组成联盟，在美国北达科他州和明尼苏达州将Allam-Fetvedt循环运用到煤/生物质/石油焦化气的合成气。除涡轮机和燃烧室外，几乎所有的Allam-Fetvedt循环工厂的部件都可以在市场上买到。东芝则为德克萨斯州天然气试点项目开发、制造并提供了混合涡轮机和燃烧室。

8 Rivers Capital计划使用Allam-Fetvedt循环及其制氢技术，以天然气作为原料发电和制氢。8 Rivers Capital即将完成新西兰波瓦凯⁸³综合发电、制氢和化肥生产的CCS工厂的工程研究。



NET Power德克萨斯州La Porte试点 图片来源：NET Power.

2013年，首台使用超临界二氧化碳作为工作流体介质的Allam-Fetvedt循环燃烧器完成了5兆瓦的测试。2018年3月，Net Power宣布成功启动其首创的Allam-Fetvedt燃气发电厂。该发电厂规模50兆瓦，位于德克萨斯州休斯顿。目前一座303兆瓦的Allam-Fetvedt循环商用天然气电厂正在设计中。2020年6月⁸⁴，McDermott宣布启动一座Allam-Fetvedt循环电力设施的预研工程设计，将来可能在英国多地部署。

结合CCS的生物能 (BECCS)

BECCS的原理是生物质的生长和使用以用作能源为目的。生物质通过光合作用形成或衍生，因此会吸收大气中的二氧化碳。然后生物质经加工变为燃料。燃料燃烧时，所生产的碳形成了所谓的“生物”二氧化碳。在大多数温室气体核算方案中，生物二氧化碳通常被算作净零排放。

因此，捕集封存的生物二氧化碳算作净减少的大气二氧化碳。下一页的图22演示了燃料加工和燃料使用中捕集二氧化碳的BECCS过程。

生物二氧化碳在燃料加工（例如生产生物乙醇的发酵过程所产生的二氧化碳）和燃料使用（如生物燃料直接燃烧所产生的二氧化碳）的过程中产生。乙醇发酵可产生浓度极高的二氧化碳。

全球大部分的BECCS设施都涉及从乙醇厂捕集发酵工艺产生的二氧化碳。这种二氧化碳纯度高，一般只需要脱水就可以进行压缩转运和封存。这使其成为一种捕集成本非常低廉的二氧化碳来源。

美国伊利诺伊州的工业CCS设施就是一个很好的例子，这是一座运行中的BECCS工厂。Decatur乙醇工厂大规模采用玉米制造乙醇，产生的二氧化碳作为一种副产品被压缩和封存在邻近的地质构造中。该设施的碳捕集和封存能力达每年100万吨。

5.5 负排放技术

全球对“净零”排放做出承诺的大趋势，也在经济和技术层面提出了一些重大挑战。

人类绝大多数工业、能源和农业系统向大气排放的温室气体都是净增加。即便像核能、水利发电、结合CCS的化石能源、风能和太阳能发电这样的低排放技术，在整个生命周期也是净正排放。因此，要实现净零排放，必须部署负排放技术以及低排放和零排放能源。负排放指的是从大气中完全清除二氧化碳的活动。两项关键的负排放技术包括BECCS和DACs。

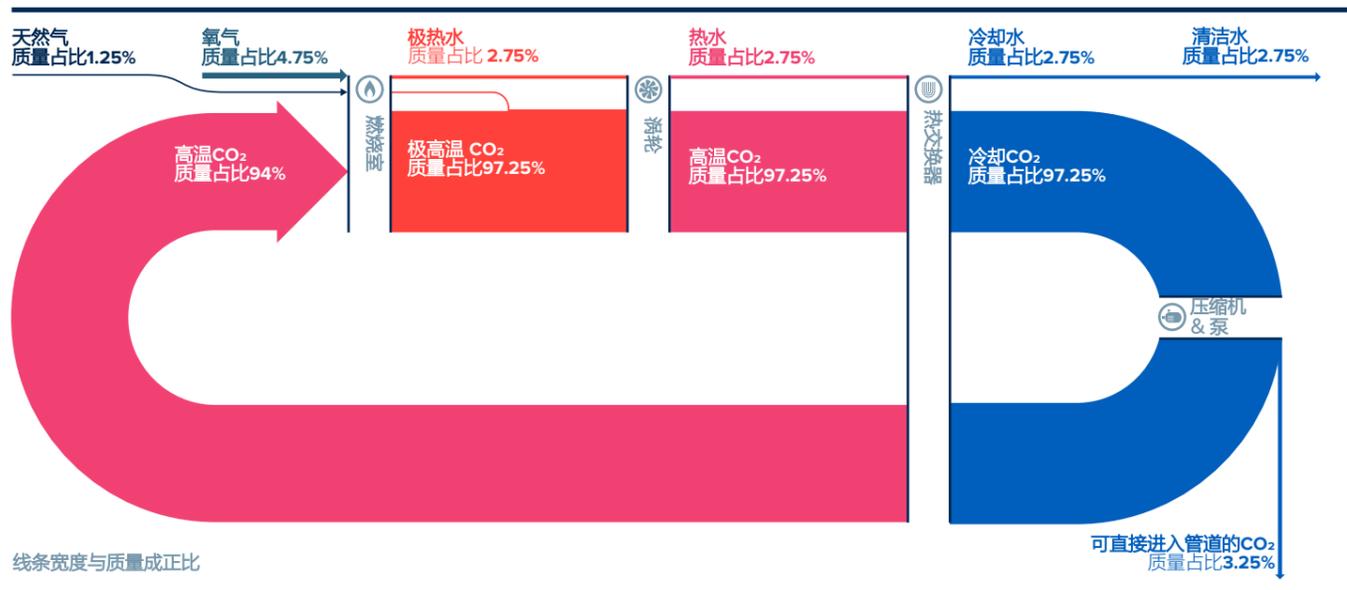


图21 ALLAM-FETVEDT循环工艺流程图 来源: 8 Rivers Capital (供图)

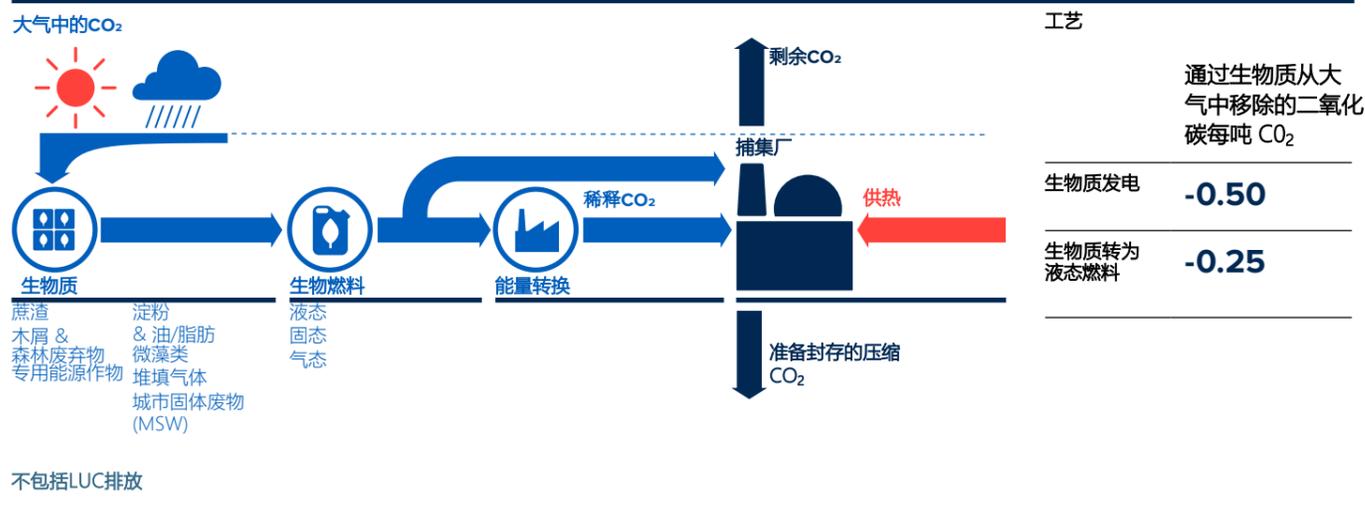


图 22 BECCS 工艺

垃圾焚烧发电厂是BECCS的另一个具有增长潜力的领域。垃圾焚烧发电厂使用分类好的城市固体废物作为热力发电燃料并为附近居民和企业提供低温供暖。用作燃料的大部分废物都具有生物质来源，包括纸张、纸板、木材、食物垃圾和庭院修整废物。如果垃圾焚烧发电厂捕集封存的二氧化碳可以超过化石源废物（如塑料）燃烧产生的二氧化碳，那么这个工厂从总体上来说就是负排放的。这样这个工厂就实现了大气温室气体的净减少，同时还供暖供电，解决了垃圾填埋空间有限的问题。

全球有数千家运营中的垃圾焚烧发电厂，大部分规模都不大，因此经济型小规模捕集工厂对于扩大CCS部署变得至关重要（详见5.6 CCS创新的模块化部分）。

荷兰正在Twence垃圾焚烧厂规划一个重要的CCS项目。该项目通过使用Aker的Just Catch模块化碳捕集设备，从烟气中捕集二氧化碳（如第5.6章节所示）。捕集工厂的年产能能为10万吨，预计于2021年投产⁸⁵。

结合碳封存的直接空气捕集 (DACCS)

有别于BECCS，DACCS设施从大气中直接捕集二氧化碳。这种捕集方式有几个关键优势：

- 捕集工厂可以与封存点放在一起，降低运输成本
- 捕集工厂可以放在风能充沛的地方，降低风力发电机运行成本
- 捕集工厂可以放在有可再生电力的地方。

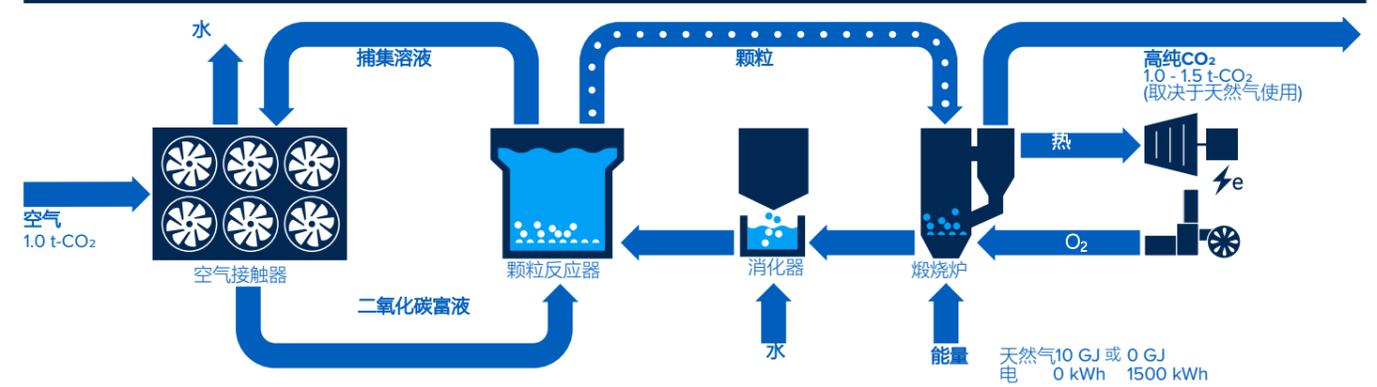
从大气捕集二氧化碳比从其他来源捕集二氧化碳更难，因为大气二氧化碳浓度稀薄，大约为400ppm，仅为一座气电站烟气中二氧化碳浓度的百分之一。相比二氧化碳浓度更高的排放源来说，从二氧化碳浓度如此之低的大气中浓缩二氧化碳所消耗的能源要高得多。



Twence 垃圾焚烧厂的二氧化碳捕集与利用试点 图片来源：Twence



碳工程公司的直接空气捕集工厂试点。图中为空气接触器和燃烧炉（左） 图片来源：Carbon Engineering Ltd.



加拿大碳工程公司 (Carbon Engineering) 直接空气捕集工艺展示了主要单元的作业，如空气接触器、颗粒反应器、消化器和燃烧炉。主要单元共同实现大气中二氧化碳的捕集、净化和压缩。

图23 CARBON ENGINEERING直接空气捕集和封存技术

加拿大碳工程公司 (Carbon Engineering) 开发了一种使用液态氢氧化钾溶剂吸收大气中二氧化碳的DAC技术。通过化学反应，二氧化碳被捕集并变为碳酸盐，提取出来形成颗粒状，然后煅烧（加热分离二氧化碳）释放出纯二氧化碳。整个工艺所需能源来自外部提供的可再生电力或者天然气燃烧。如果使用天然气，那么燃烧释放的二氧化碳在工艺流程中就被捕集封存，因此实现了负排放。这种工厂可以灵活使用电力或天然气运行。图23展示了碳工程公司的工艺流程工作原理⁸⁶。

碳工程公司称，工程设计分析结果显示⁸⁷，假设以每年100万吨的产能大规模部署，捕集成本（包括地质封存在内）可低至150美元/吨。

西方石油的子公司Oxy Low-Carbon Ventures近期宣布启动名为1PointFive的新公司，该公司计划建设商用规模的DAC工厂并使用碳工程公司的工艺⁸⁸。

瑞典的Climeworks和美国的Global Thermostat采用了不一样的DAC方法。他们的技术依靠专利固态吸收材料从空气中吸附二氧化碳。一旦吸附剂达到二氧化碳饱和，将对其加热实现二氧化碳解吸。这是变温吸附 (TSA) 工艺的一种形式。变温吸附在工业使用中有很长历史，但这是首次应用于DAC。这两家公司的变温吸附工艺也从大气中捕集大量的水，因此产生了清洁水这种有用的副产品。

Climeworks已经启动了几处捕集大气二氧化碳的小型商业设施：

- 为温室提供二氧化碳（替代基于化石燃料的二氧化碳）
- 用于地热发电站回注水的封存
- 用于将电力转化为零排放合成甲烷

Global Thermostat已经启动了一个年捕集量4000吨的示范工厂，并已经与埃克森美孚达成合作，进一步扩大工厂规模。



Carbon Engineering和1PointFive目前正在设计的世界最大DAC工厂建成全貌渲染图 图片来源：Carbon Engineering Ltd.

5.6 碳捕集与封存创新

模块化

与所有工业技术一样，CCS的单位成本在很大程度上受到规模经济的影响。也就是说，随着CCS设施捕集能力的上升，捕集成本随之下降。规模经济青睐那些大规模的部署，比如天然气处理厂这种每年有大量二氧化碳可供捕集的部门。但是，并不是所有部门都会产生这么多二氧化碳。

要推动CCS增长和扩张，就需要更多经济型的小规模碳捕集工厂，既可以小规模运行，又不会引发巨大损失。这就让模块化有了用武之地。模块化工厂是使用批量生产技术，采用标准化生产方式建造的工厂。一般情况下，模块化工厂在场外的专用设施中制造，然后以模块化组件分别交付（一般使用集装箱运送）。

模块化系统可以通过提升工厂制造规模的经济性来抵消运营规模经济性的下降。模块化碳捕集工厂可以通过以下方式进一步降低成本：

- 标准化工厂基础
- 标准化工厂设计，包括所有工程图纸
- 远程或自动化操作
- 模块化包装可以大大减少现场施工时间和成本。

全球大部分的排放源都是小型设施，例如纸浆和造纸厂、垃圾焚烧厂以及小型燃气发电站等。模块化工厂可以在这些小型工厂里以经济高效的方式部署碳捕集。

挪威公司Aker Carbon Capture的模块化产品Just Catch具备两种标准化碳捕集能力，一种为每年4万吨，另一种为每年10万吨。该系统以吸附剂为基础，采用该公司成熟捕集工厂采用的相同工艺和S26胺溶剂。该公司与荷兰Twence垃圾焚烧厂签订服务合同，第一套Just Catch系统计划于2021年下半年交付。

碳捕集工厂的模块化和集装箱化是CCS技术领域的发展趋势。三菱重工认为“模块化施工”的优势在于通过在场外集装箱预组装大部分设备来减少施工时间和成本⁸⁹。

小型捕集工厂一旦与CCS枢纽结合，就可发挥最大功效，因为可以将多个排放源的二氧化碳捕集起来进行压缩、运输和封存。小型二氧化碳排放源捕集更加经济实惠，进而可以扩大邻近捕集枢纽的规模，因此模块化可进一步促进CCS的发展。

金属有机框架材料

基于吸附剂的系统（即二氧化碳吸附在固体表面）在碳捕集和其他工业气体分离应用中已经使用多年。吸附剂固体一般被制成颗粒状，而吸附过程发生在安装有吸附床的容器中。

金属有机框架材料（MOF）是具有一定结构的晶体化合物，具有高度可调吸附性能。在开发改进基于吸附剂的碳捕集工艺方面，这是一种很有前景的技术。目前绝大部分MOF都是小规模或实验室⁹⁰生产，因此大规模制造用于工业部署将是下一个挑战。

碳捕集技术公司Svante（前身为Inventys）正在为其专利MOF吸附剂开发测试装置，之后将用于该公司的旋转式快速变温吸附工艺。该吸附剂将会用于Svante在加拿大里士满拉法基水泥厂的碳捕集和利用项目CO2MENT。

先进溶剂

基于溶剂的碳捕集系统是不断扩展的CCS行业的主力军。然而，传统的单乙醇胺（MEA）及相关化合物是用于去除天然气中的二氧化碳和硫化氢的。因此这种胺基溶剂存在以下问题：

- 降解是一个重要挑战。与氧气、烟气中的硫氧化物和氮氧化物的化学反应以及溶剂汽提塔中的热分解，导致胺分子发生化学分解。降解产生废物溶剂，必须做到安全处置，因此成本升高了。这也意味着必须不停购买新溶剂。
- MEA和类似溶剂擅长吸收烟气中的二氧化碳，但这个过程需要大量热能才能迫使二氧化碳从溶液中排出，以便溶剂重复使用。
- 使用MEA会给捕集工厂造成腐蚀的问题。

目前正在研发先进的溶剂来解决MEA溶剂部分或全部缺点：

- 英国公司Carbon Clean Solutions Ltd（CCSL）开发了一种名为APBS的专利溶剂，结合改进后的吸收工艺，所需的热量和功率比MEA系统减少了20%至40%。该公司的溶剂是一种结合高级胺、醇和哌嗪化合物的专利混合物。该公司的测试显示，与MEA⁹¹相比，溶剂降解明显减少。
- 日本三菱重工一直在开发用于燃煤发电和化学品生产（尿素）的碳捕集溶剂技术。三菱已将KS-1专利受阻胺溶剂在工业中进行商业部署。尽管KS-1早在1990年就开发出来，并非新产品，但在工业规模上的部署表明了碳捕集的进步。

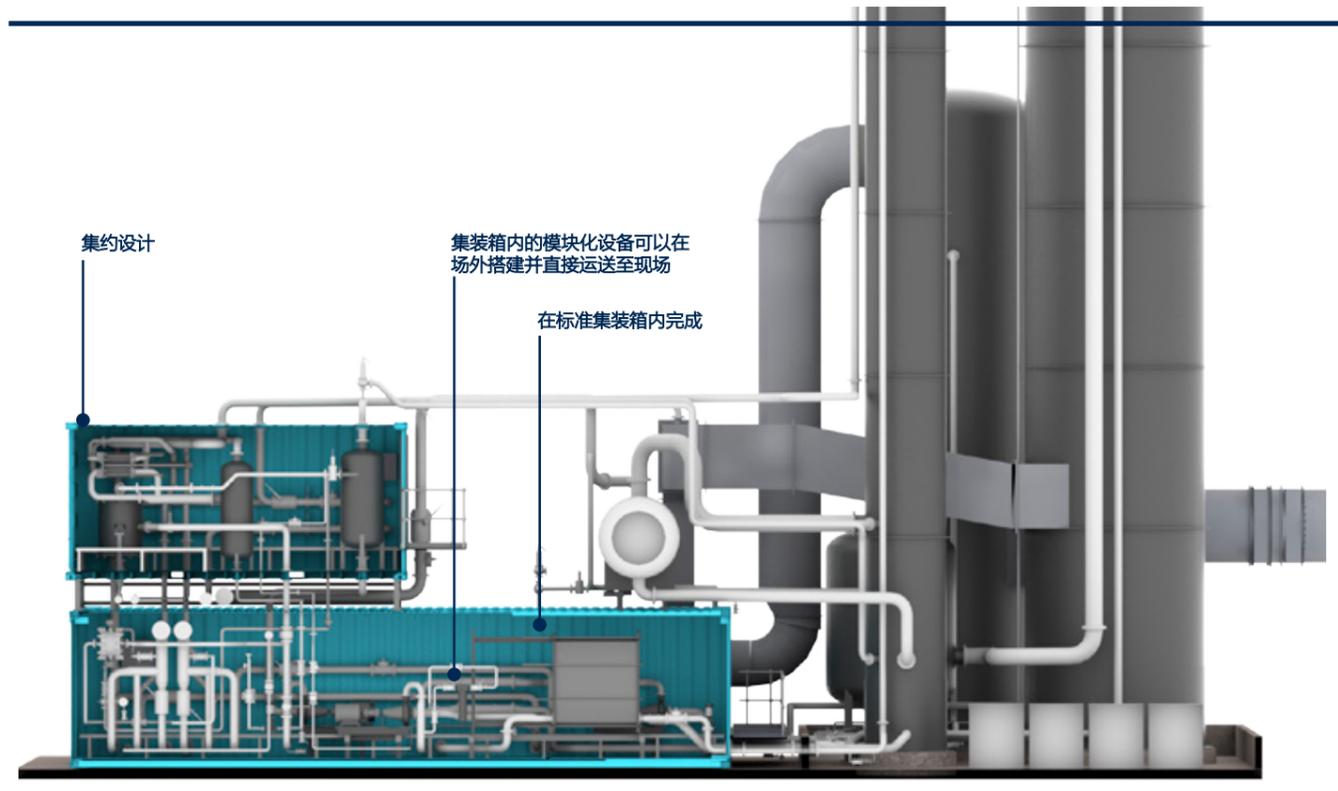


图24 AKER 'JUST CATCH' 模块化碳捕集系统 图片来源：Aker Solutions.



附录

- 1.0 前言
- 2.0 碳捕集与封存需求
- 3.0 全球碳捕集与封存现状2020
 - 3.1 全球碳捕集与封存设施进展与趋势
 - 3.2 政策与监管
 - 3.3 全球封存概览
- 4.0 区域现状一览
 - 4.1 美洲
 - 4.2 欧洲
 - 4.3 亚太
 - 4.4 海合会
- 5.0 技术及应用
 - 5.1 工业
 - 5.2 氢
 - 5.3 天然气
 - 5.4 电力行业的碳捕集与封存
 - 5.5 负排放技术
 - 5.6 碳捕集与封存创新
- 6.0 附录
- 7.0 参考文献

6.1 运行中商业设施

设施名称	状态	国家	投运时间	行业	最大捕集能力 (Mtpa)	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	0.40	工业分离	EOR
Enid Fertilizer	运行中	美国	1982	化肥生产	0.20	工业分离	EOR
Shute Creek Gas Processing Plant	运行中	美国	1986	天然气处理	7.00	工业分离	EOR
Sleipner CO₂ Storage	运行中	挪威	1996	天然气处理	1.00	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	3.00	工业分离	EOR
Core Energy CO₂-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
Snøhvit CO₂ Storage	运行中	挪威	2008	天然气处理	0.70	工业分离	专用地质封存
Arkalon CO₂ 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	5.00	工业分离	EOR和地质封存
Bonanza BioEnergy CCUS EOR	运行中	美国	2012	乙醇生产	0.10	工业分离	EOR
PCS Nitrogen	运行中	美国	2013	化肥生产	0.30	工业分离	EOR
Petrobras Santos Basin Pre-Salt Oil Field CCS	运行中	巴西	2013	天然气处理	4.60	工业分离	EOR
Lost Cabin Gas Plant	暂停运行	美国	2013	天然气处理	0.90	工业分离	EOR
Coffeyville Gasification Plant	运行中	美国	2013	化肥生产	1.00	工业分离	EOR
Air Products Steam Methane Reformer	运行中	美国	2013	制氢	1.00	工业分离	EOR
Boundary Dam Carbon Capture and Storage	运行中	加拿大	2014	发电	1.00	燃烧后捕集	EOR
Uthmaniyah CO₂-EOR Demonstration	运行中	沙特阿拉伯	2015	天然气处理	0.80	工业分离	EOR
Quest	运行中	加拿大	2015	制氢 油砂升级	1.20	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	0.10	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	0.80	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 (Mtpa)	捕集类型	封存类型
Petra Nova Carbon Capture	暂停运行	美国	2017	发电	1.40	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 CO₂ EOR	运行中	中国	2018	天然气处理	0.60	工业分离	EOR
Gorgon Carbon Dioxide Injection	运行中	澳大利亚	2019	天然气处理	4.00	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	1.00	工业分离	EOR
Alberta Carbon Trunk Line (ACTL) with Nutrien CO₂ Stream	运行中	加拿大	2020	化肥生产	0.30	工业分离	EOR
Alberta Carbon Trunk Line (ACTL) with North West Redwater Partnership's Sturgeon Refinery CO₂ Stream	运行中	加拿大	2020	石油精炼	1.40	工业分离	EOR

6.2 在建、高级开发和早期开发阶段商业CCS设施

项目名称	状态	国家	投运时间	行业	最大捕集能力 (Mtpa)	捕集类型	封存类型
延长联合碳捕集与封存示范项目	在建	中国	延迟至2020-2030	化工生产	0.41	工业分离	EOR
中石化胜利发电厂CCS	早期开发	中国	2020-2030	发电	1.00	燃烧后捕集	EOR
Acorn Scalable CCS Development	早期开发	英国	2020-2030	石油精炼	4.00	工业分离	专用地质封存
Korea-CCS 1 & 2	早期开发	韩国	2020-2030	火力发电	1.00	评估中	专用地质封存
中石化齐鲁石化CCS	在建	中国	2020-2021	化工生产	0.40	工业分离	EOR
Project Interseqt - Hereford Ethanol Plant	早期开发	美国	2021	乙醇生产	0.30	工业分离	专用地质封存
Project Interseqt - Plainview Ethanol Plant	早期开发	美国	2021	乙醇生产	0.33	工业分离	专用地质封存
Wabash CO ₂ Sequestration	高级开发	美国	2022	化肥生产	1.75	工业分离	专用地质封存
San Juan Generating Station Carbon Capture	高级开发	美国	2023	发电	6.00	燃烧后捕集	EOR
Santos Cooper Basin CCS Project	高级开发	澳大利亚	2023	天然气处理	1.70	工业分离	专用地质封存
Fortum Oslo Varme - Langskip	高级开发	挪威	2023-2024	垃圾焚烧	0.40	燃烧后捕集	专用地质封存
Brevik Norcem - Langskip	高级开发	挪威	2023-2024	水泥生产	0.40	工业分离	专用地质封存
Hydrogen 2 Magnum (H2M)	早期开发	荷兰	2024	发电	2.00	工业分离	专用地质封存
Project Pouakai Hydrogen Production with CCS	早期开发	新西兰	2024	制氢和发电	1.00	工业分离	评估中
Caledonia Clean Energy	早期开发	英国	2024	发电合并制氢，用于供热和运输	3.00	燃烧后捕集	专用地质封存
Cal Capture	高级开发	美国	2024	发电	1.40	燃烧后捕集	EOR
Velocys' Bayou Fuels Negative Emission Project	早期开发	美国	2024	化工生产	0.50	工业分离	专用地质封存
OXY and Carbon Engineering Direct Air Capture and EOR Facility	早期开发	美国	2025年前后	空气捕集	1.00	工业分离	EOR
LafargeHolcim Cement Carbon capture	早期开发	美国	2025年前后	水泥生产	0.72	工业分离	评估中
HyNet North West	早期开发	英国	2025年前后	制氢	1.50	工业分离	专用地质封存

设施名称	状态	国家	投运时间	行业	最大捕集能力 (Mtpa)	捕集类型	封存类型
Gerald Gentleman Station Carbon Capture	高级开发	美国	2025年前后	发电	3.80	燃烧后捕集	评估中
Mustang Station of Golden Spread Electric Cooperative Carbon Capture	高级开发	美国	2025年前后	发电	1.50	燃烧后捕集	评估中
Prairie State Generating Station Carbon Capture	高级开发	美国	2025年前后	发电	6.00	燃烧后捕集	专用地质封存
Plant Daniel Carbon Capture	高级开发	美国	2025年前后	发电	1.80	燃烧后捕集	专用地质封存
Lake Charles Methanol	高级开发	美国	2025	化工生产	4.00	工业分离	EOR
Dry Fork Integrated Commercial Carbon Capture and Storage (CCS)	早期开发	美国	2025	发电	3.00	燃烧后捕集	专用地质封存
The Clean Gas Project	早期开发	英国	2025	发电	6.00	燃烧后捕集	专用地质封存
Abu Dhabi CCS Phase 2: Natural gas processing plant	高级开发	阿联酋	2025	天然气处理	2.30	工业分离	EOR
Red Trail Energy BECCS Project	早期开发	美国	2025	乙醇生产	0.18	工业分离	专用地质封存
The Illinois Clean Fuels Project	早期开发	美国	2025	化工生产	2.70	工业分离	专用地质封存
Clean Energy Systems Carbon Negative Energy Plant - Central Valley	早期开发	美国	2025	发电	0.32	富氧燃烧捕集	评估中
Project Tundra	高级开发	美国	2025-2026	发电	3.60	燃烧后捕集	专用地质封存
Northern Gas Network H21 North of England	早期开发	英国	2026	制氢	1.50	工业分离	专用地质封存
Hydrogen to Humber Saltend	早期开发	英国	2026-2027	制氢	1.40	工业分离	专用地质封存
Drax BECCS Project	早期开发	英国	2027	发电	4.00	工业分离	评估中
Ervia Cork CCS	早期开发	爱尔兰	2028	发电和石油精炼	2.50	工业分离	专用地质封存
The ZEROS Project	在建	美国	2030年前	发电(垃圾燃烧)	1.50	氧气助燃捕集	EOR



参考文献

- 1.0 前言
- 2.0 碳捕集与封存需求
- 3.0 全球碳捕集与封存现状 2020
 - 3.1 全球碳捕集与封存设施进展与趋势
 - 3.2 政策与监管
 - 3.3 全球封存概览
- 4.0 区域现状一览
 - 4.1 美洲
 - 4.2 欧洲
 - 4.3 亚太
 - 4.4 海合会
- 5.0 技术及应用
 - 5.1 工业
 - 5.2 氢
 - 5.3 天然气
 - 5.4 电力行业的碳捕集与封存
 - 5.5 负排放技术
 - 5.6 碳捕集与封存创新
- 6.0 附录
- 7.0 参考文献

7.0 参考文献

- 政府间气候变化专门委员会(IPCC). (2018). 全球升温1.5°C. 关于全球升温高于工业化前水平1.5°C的影响以及相关的全球温室气体排放路径的IPCC特别报告, 背景是加强全球应对气候变化的威胁. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- 国际能源署. (2019a). 世界能源展望 2019. 旗舰报告. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- Townsend, A., Raji, N., & Zapantis, A. (2020). 碳捕集与封存(CCS) 的价值. 思想领袖, 23. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/publications-reports-research/the-value-of-carbon-capture-ccs/>
- 全球碳捕集与封存研究院. (2019). 全球碳捕集与封存现状报告 2019.
- 桑托斯. (2020). 桑托斯和BP就蒙巴萨碳捕集与封存项目订立非约束性协议. 桑托斯网站. <https://www.santos.com/news/santos-and-bp-enter-non-binding-agreement-on-moomba-carbon-capture-and-storage-project/>
- ACTL. (2020). ACTL 系统. <https://actl.ca/actl-project/about-actl/>
- Macdonald-Smith, A. (2020, February 15). 雪佛龙高更碳注入量达十万吨. 澳大利亚金融评论. <https://www.afr.com/policy/energy-and-climate/chevron-injects-one-millionth-tonne-of-carbon-at-gorgon-20200214-p540xv#:~:text=Chevron has passed a milestone,storage project to full capacity.>
- 全球碳捕集与封存研究院. (2020). CO2RE数据库 -设施报告. www.co2re.co
- Gassnova. (2020). CCS链条. <https://ccsnorway.com/full-scale-capture-transport-and-storage/>
- 碳定价领导联盟. (2017). 碳价格高级别委员会的报告.
- IEA/UNIDO. (2011). CCS纳入工业技术路线图.
- Tamme, E., & Scowcroft, J. (2020). CCS在巴黎协定及其第6条中的作用. 四月. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2020/05/Article-6-and-CCS-GCCSI-April-2020-final.pdf>
- Beck, L. (2020). 美国关于二氧化碳封存的45Q税收抵免: 更新.
- 美国国税局. (2020). 二氧化碳封存信用. <https://www.irs.gov/pub/irs-drop/reg-112339-19.pdf>
- 国际能源署. (2019b). 通过CCUS实现工业变革.
- 国际能源署. (2019c). 二氧化碳封存的作用.
- US DoE/NETL. (2015). 2015年美国碳封存分布图鉴.
- 英国皇家财产局. (2020). <http://www.CO2stored.co.uk/home/index>. 英国二氧化碳封存场址.
- 美国能源部 (2020), 资料来源: 美国能源部媒体声明, (2020). [线上] 链接: <https://www.energy.gov/fe/articles/us-department-energy-announces-nearly-15-million-carbon-dioxide-utilization-projects> [日期: 2020年1月7日]
- 美国能源部媒体声明, (2020). [线上] 链接: <https://www.energy.gov/articles/department-energy-provide-22-million-research-capturing-carbon-dioxide-air> [日期: 2020年3月30日]
- 美国能源部媒体声明, (2020). [线上] 链接: <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-announces-131-million-ccus-technologies> [日期: 2020年4月24日]
- 美国能源部媒体声明, (2020). [线上] 链接: <https://www.energy.gov/articles/doe-invests-17-million-advance-carbon-utilization-projects> [日期: 2020年6月16日]
- 美国能源部媒体声明, (2020). [线上] 链接: <https://www.energy.gov/fe/articles/foa-2057-project-selections> [日期: 2020年7月17日]
- 美国能源部媒体声明, (2020). [线上] 链接: <https://www.energy.gov/articles/department-energy-invests-72-million-carbon-capture-technologies> [日期: 2020年9月1日]
- 众议院气候危机特别委员会. (2020). 化解气候危机: 国会行动计划-建设清洁能源经济和一个健康、有弹性和公正的美国.
- 加州空气资源委员会. (2020). LCFS途径须征求公众意见. <https://www2.arb.ca.gov/resources/documents/lcfs-pathways-requiring-public-comments>
- Sahota, H. (2019). 清洁燃料标准详解. <https://taf.ca/clean-fuel-standard-explained/>
- 欧盟委员会. (2020). 欧洲的时刻: 修复并为下一代做好准备. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_940
- 新加坡国家气候变化秘书处, 战略小组, P. M. O. (2020). 探索新加坡的低碳和气候韧性未来. <https://www.nccs.gov.sg/docs/default-source/publications/nccsleds.pdf>
- NEDO. (2020). 环境创新战略概述. <https://www.nedo.go.jp/content/100904224.pdf>
- Pearl, H. (2020). 中国的碳中和能源承诺增加2021-25年的第十四个五年计划的影响力. 南华早报. <https://www.scmp.com/economy/china-economy/article/3102826/chinas-carbon-neutral-energy-pledge-adds-more-weight-14th>
- 澳大利亚政府. (2020a). 澳大利亚政府回应专家小组审查低成本减排其他方式的最终报告 (“国王审查”). <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2020-05/government-response-to-the-expert-panel-report-examining-additional-sources-of-low-cost-abatement.pdf>
- 澳大利亚政府. (2020b). 投资路线图讨论文件: 加速低排放技术框架. https://consult.industry.gov.au/climate-change/technology-investment-roadmap/supporting_documents/technologyinvestmentroadmapdiscussionpaper.pdf
- Morrison, S. (2020). 对新能源技术的投资.
- 澳大利亚政府. (2020c). 第一份低排放技术声明-2020. <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/September%202020/document/first-low-emissions-technology-statement-2020.pdf>
- 国际能源署. (2019d). 东南亚能源展望2019.
- 澳大利亚政府. (2020d). 澳大利亚和新加坡总理联合声明.
- Kadir, W. G. A. (2020). 印度尼西亚CCS/CCUS卓越中心: 过去、现在与未来. <https://ccs-coe.fttm.itb.ac.id/presentation/>
- 马来西亚石油管理公司(MPM). (2020). 关于我们: 马来西亚石油管理公司. <https://www.petronas.com/mpm/about-mpm/malaysia-petroleum-management>
- 中国人民银行. (2020). 绿色债券支持项目目录 (2020版) (征求意见稿). <http://www.pbc.gov.cn/tiaofasi/144941/144979/3941920/4052500/index.html>
- HESC. (2020). 不惧新冠疫情挑战, 施工仍在继续. <https://hydrogenenergysupplychain.com/construction-presses-on-despite-covid-19-challenges/>
- AHEAD. (2020). 成功地建立循环氢供应链. https://www.ahead.or.jp/en/pdf/20200424_ahead_press.pdf
- 千代田株式会社. (2020). 世界上第一个全球氢气供应链示范项目. <https://www.chiyodacorp.com/en/service/spera-hydrogen/>
- 彭博社. (2020). 沙特阿拉伯将全球第一批蓝氨发往日本. <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-09-27/saudi-arabia-sends-blue-ammonia-to-japan-in-world-first-shipment>
- 信实工业有限公司. (2020). 董事长声明, 2020年7月15日, 星期三, 2020 (首次公开募股后) 43 年度股东大会.
- 印度时报. (2020a). 联合国秘书长重新呼吁实现碳中和. http://timesofindia.indiatimes.com/articleshow/78310741.cms?utm_source=contentofinterest&utm_medium=text&utm_campaign=cppst.
- 印度政府. (2020). 征集有关二氧化碳封存研究的提案.
- 印度时报. (2020b). DST征集印度碳捕集、利用和封存领域的研究提案. <https://timesofindia.indiatimes.com/india/dst-invites-proposals-from-indians-for-research-in-area-of-carbon-capture-utilisation-and-storage/articleshow/77654625.cms>
- 加速CCS技术. (2020). ACT3 call. <http://www.act-ccs.eu/s/Slides-ACT-webinar-26-August-2020.pdf>
- 亚洲开发银行. (2016). 联合信用抵消机制: 新兴的双边信用抵消机制. <https://www.adb.org/sites/default/files/institutional-document/217631/joint-crediting-mechanism.pdf>
- 日本经济产业省. (METI). (2020). METI的温室气体减排合作: 联合信用抵消机制.
- 全球环境中心基金会. (2020). 联合信用抵消机制 (JCM) 概述. <https://gcec.jp/jcm/about/>
- Monica, C., Gabriel, O., Diego, G., Marilena, M., Edwin, S., Eleonora, L. V., Efsio, S., Fabio, M.-F., & Jos, O. (2019). 世界各国源自化石燃料的二氧化碳和温室气体排放量. 地球物理研究杂志: 大气(第105卷, 第D2期). <https://doi.org/10.2760/687800>
- 发展计划秘书长. (2008). 2008年7月发展规划总秘书处 (7月刊). www.planning.gov.qa
- 沙特阿拉伯政府. (2016). 沙特阿拉伯2030年愿景. 报告, 1-85. <https://vision2030.gov.sa/download/file/fid/417>
- 阿曼2040年愿景. (n.d.). 阿曼2040年愿景. <https://www.2040.om/en/#Oman2040>
- 烃加工. (2018). ADNOC将扩展碳捕集、利用和封存技术, 以提高采油率. <https://www.hydrocarbonprocessing.com/news/2018/02/adnoc-to-expand-carbon-capture-use-storage-technology-for-enhanced-oil-recovery>
- UN DESA. (2015). 不平等与《2030年可持续发展议程》. 发展问题(第4卷). <https://www.un.org/development/desa/dpad/publication/no-4-inequality-and-the-2030-agenda-for-sustainable-development/>
- Drew, K. S. (1985). 阿拉伯联合酋长国. (2015年10月发行).
- UNFCCC. (2015). 《联合国气候变化框架公约》沙特阿拉伯王国国家自主贡献. INDC(11月发行). <http://www4.unfccc.int/submissions/INDC/Published Documents/Saudi Arabia/1/KSA-INDCs English.pdf>
- 沙特阿美. (2000). 国际发行通函 (第19卷, 第1期).
- Paraskova, T. (2019). 卡塔尔构建中东地区最大碳捕集厂. OilPrice.Com. <https://oilprice.com/Latest-Energy-News/World-News/Qatar-Builds-The-Biggest-Carbon-Capture-Plant-In-The-Middle-East.html>
- 国际能源署. (2020a). 数据和统计. https://www.iea.org/data-and-statistics?country=WEOMI_DEAST&fuel=CO2emissions&indicator=CO2emissionsbyenergy
- Consoli, C. P. (2018). CCS 封存指标(CCS-SI). 全球碳捕集与封存研究院.

60. 沙特阿拉伯王国. (2020). G20轮值主席国-2020能源与气候沙特G20轮值主席国的总体主题2020年议程|主题和宗旨 沙特轮值主席国主题以三个目标为支柱 实现21世纪的所有机会.
61. Bosoaga, A., Masek, O., & Oakey, J. E. (2009). 水泥行业的二氧化碳捕集技术. *能源学报*, 1(1), 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.01.020>
62. Lehne, J., & Preston, F. (2018). 做出切实改变：低碳水泥和混凝土的创新. 查塔姆研究所报告, 1–122. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1015/3/032163>
63. Beumelburg, C. (2020). 海德堡水泥公司在挪威布雷维克迈出二氧化碳捕集与封存 (CCS) 的下一步. <https://www.heidelbergcement.com/en/pr-17-06-2020>
64. Beumelburg, C. (n.d.). 海德堡水泥公司致力于减少碳排放. <https://www.heidelbergcement.com/en/leilac-research-project>
65. 世界资源研究所. (2016). 世界-温室-气体-排放-2016 @ www.wri.org. <https://www.wri.org/resources/data-visualizations/world-greenhouse-gas-emissions-2016>
66. 国际能源署. (2020b). 氢气. <https://www.iea.org/reports/hydrogen>
67. Bruce, S., Temminghoff, M., Hayward, J., Schmidt, E., Munnings, C., Palfreyman, D., & Hartley, P. (2018). *国家氢能路线图*. https://www.csiro.au/~media/Do-Business/Files/Futures/18-00314_EN_NationalHydrogenRoadmap_WEB_180823.pdf?la=en&hash=36839EEC2DE1BC38DC738F5AAE7B40895F3E15F4
68. 国际氢能委员会. (2020). 氢气竞争力之路：成本角度. 一月, 88. www.hydrogencouncil.com.
69. 国际能源署. (2019e). G20的氢未来. 抓住今天的机会. IEA为日本G20编写的报告, 6月.
70. IRENA. (2019). 氢：一种可再生能源视角. 国际可再生能源署 (9月刊). www.irena.org
71. 全球碳捕集与封存研究院. (2020a). CO2RE 数据库. www.co2re.co
72. Preston, C. K. (2018). Air Products公司亚瑟港制氢厂的碳捕集项目. <http://documents.ieaghg.org/index.php/s/4hyafrmh2bobOs/download>
73. 国际氢能委员会. (2017). *扩大氢能规模：一个全球能源转型的可持续途径*. www.hydrogencouncil.com.%0Awww.hydrogencouncil.com
74. 国际能源署. (2020c). 天然气2020., p.3.
75. 国际能源署. (2020d). CCUS在低碳电力系统中的作用.
76. 国际能源署. (2018). *2018年世界能源展望*. 旗舰报告. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018/renewables#abstract>
77. Irlam, L. (2017). *全球碳捕集和封存成本*. 全球碳捕集与封存研究院.
78. 工业、科学、能源与资源部. (2020). 澳大利亚国家温室气体清单季度更新：2019年12月.
79. 工业、科学、能源与资源部. (2020). 澳大利亚国家温室气体清单季度更新：2019年12月, 第14页.
80. 全球碳捕集与封存研究院(2020b) CO2RE 数据库-设施报告. 链接: www.co2re.co (Accessed: 19 August 2020).
81. Allam, R., Martin, S., Forrest, B., Fetvedt, J., Lu, X., Freed, D., Brown, G. W., Sasaki, T., Itoh, M., & Manning, J. (2017). 阿拉姆循环示范: 利用全碳捕集的高效超临界二氧化碳发电过程的发展状况更新. *能源学报*, 114, 5948–5966. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1731>
82. Lu, X., Martin, S., McGroddy, M., Swanson, M., Stanislawski, J., & Laumb, J. D. (2017). 对直接燃烧的氧助燃阿拉姆循环发电系统的新型燃烧后除酸工艺进行测试(刊号50961, 页码 V009T38A032).
83. NET Power. (2019). NET Power 演示.
84. McDermott. (n.d.). McDermott批准Net Power英国项目预研工程设计.
85. Aker Solutions. (2019). Aker Solutions 荷兰Twence签署碳捕集合同. 网站. <https://www.akersolutions.com/news/news-archive/2019/aker-solutions-signs-carbon-capture-contract-with-twence-in-the-netherlands/>
86. Carbon Engineering. (2020). Carbon Engineering: 我们的技术. Website. <https://carbonengineering.com/our-technology/>
87. 清洁能源部长级CCUS倡议. (2020). 直接捕集空气中的二氧化碳：助力实现净零排放.
88. 1PointFive. (2020). 1PointFive网站. <https://www.1pointfive.com/>
89. Kamijo, T., Nagayasu, H., Yonekawa, T., Shimada, D., Tsujiuchi, T., & Nakayama, K. (2013). 碳捕集与封存示范试验-燃煤电厂 (与美国电力公司Southern Company合作). *三菱重工技术评论*, 50(1), 16–22. <http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e501/e501016.pdf>
90. Webley, P. A., & Danaci, D. (2020). 通过吸附过程捕集二氧化碳. M. Bui & N. Mac Dowell (编辑), 《碳捕集与封存》 (第106–167页). 皇家化学学会.
91. Bumb, P., Kumar, R., Khakharia, P., & Goetheer, E. (2014). TNO CO2捕集试验工厂示范先进的APBS溶剂. *能源学报*, 第63卷(2015年5月), 1657–1666. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.175>

脚注

- i. 目前每年高纯氢气产量为7000万吨。预计还将每年产生大约5000万吨的氢气与一氧化碳合成气。
- ii. 范围一、二和三的温室气体排放定义，取自澳大利亚政府清洁能源监管机构 <http://www.cleanenergyregulator.gov.au/NGER/About-the-National-Greenhouse-and-Energy-Reporting-scheme/Greenhouse-gases-and-energy>:
范围1排放：由设施的一项活动或一系列活动释放到大气中的排放，有时称为直接排放。
范围2排放：能源商品的间接消耗释放到大气中的排放，例如使用一家煤电厂生产的电力产生的“间接排放”。
范围3排放：除了范围2排放以外在更广泛的经济中产生的间接排放。这些排放是设施活动的结果，但来自该设施不拥有或控制的排放源。
- iii. 历史数据已经过调整，与新的设施分类系统保持一致。不包括两个完成操作并关闭的设施。
- iv. 政策文件, 2020年英国预算 链接: www.gov.uk
- v. 沙特阿美在2019年11月发布的IPO招股说明书强调了其低碳产品足迹是应对气候相关风险的关键缓解措施. 竞争排名在第83页.
- vi. 根据Qamar Energy的委托评估, 2019年6月.
- vii. 查阅链接: <https://www.cceguide.org/guide/>
- viii. 全球碳捕集与封存研究院对IEA数据的分析.
- ix. CO2e排放量为51.53 kg CO2e / GJ, 聚合物电解质膜 (PEM) 电转化为氢的效率 (71%)。
- x. 假设2Mtpa二氧化碳, 50公里, 250毫米的管线, 6%的资本成本, 压缩压强1巴-150巴, 电价为80美元/兆瓦时, 3美元/吨二氧化碳的封存和MMV, 资产寿命为30年.
- xi. 没有碳价.

图表

图1

- a. 全球碳捕集与封存研究院对IIASA (2018) 数据的分析: IIASA. (2018). IIASA主办的IAMC 1.5°C 情景探索. <https://data.ene.iiasa.ac.at/iamc-1.5c-explorer/#/workspaces>

图2

- b. 国际能源署. (2020). 能源技术愿景, 碳捕集、利用封存特别报告. <https://webstore.iea.org/download/direct/4191>

图3

- c. 国际能源署. (2020). 能源技术愿景, 碳捕集、利用封存特别报告. <https://webstore.iea.org/download/direct/4191>

图4

- d. 全球碳捕集与封存研究院. (2020). CO2RE 数据库 - 设施报告 链接: www.co2re.co

图5

- e. 全球碳捕集与封存研究院. (2020). CO2RE 数据库 - 设施报告 链接: www.co2re.co

图6

- f. 全球碳捕集与封存研究院. (2020). CO2RE 数据库 - 设施报告 链接: www.co2re.co

图7

- g. 全球碳捕集与封存研究院. (2020). CO2RE 数据库 - 设施报告 链接: www.co2re.co

图8 根据以下内容改编:

- h. Overa, S. (2019). 讲述挪威的CCS故事, 北极光: 欧洲二氧化碳运输和封存项目. [在线视频研讨会]. 2019年5月9日. <https://www.globalccsinstitute.com/resources/audio-and-visual-library/webinar-telling-the-norwegian-ccs-story-part-iii-northernlights-a-european-CO2-transport-and-storage-project/>.

图9

- i. Zapantis, A., Townsend, A. and Rassool, D. (2019). 鼓励大规模部署CCS的政策重点. 全球碳捕集与封存研究院. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/04/TL-Report-Policy-priorities-to-incentivise-the-large-scaledeployment-of-CCS-digital-final-2019-1.pdf>.

表1

- j. Zapantis, A., Townsend, A. and Rassool, D. (2019). 鼓励大规模部署CCS的政策重点. 全球碳捕集与封存研究院. <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/04/TL-Report-Policy-priorities-to-incentivise-the-large-scaledeployment-of-CCS-digital-final-2019-1.pdf>.

图10

- k. 碳封存特别工作组. (2010). National Carbon 澳大利亚国家碳规划和基础设施计划. 澳大利亚政府 (9月发布).
- CO₂ 封存. (2020). CO₂ 封存数据. <http://www.co2stored.co.uk>.
- 国际能源署. (2015). 通过提高采收率来封存二氧化碳, 将EOR与CO₂封存 (EOR+) 相结合来盈利.
- IEAGHG. (2009a). 枯竭气田中的二氧化碳封存 (刊发时间2009/01).
- IEAGHG. (2009b). 枯竭油田的二氧化碳封存. 2009/12. 《能源》.
- 挪威石油局. (2014). 氧气封存地图集-挪威大陆架.
- US DoE/NETL (2015) 碳封存图集.
- Vangkilde-Pedersen (编辑), EU GeoCapacity. (2009). 评估欧洲二氧化碳地质封存能力: WP2报告封存能力. 丹麦和格陵兰岛地质调查.
- Wei, N., Li, X., Fang, Z., Bai, B., Li, Q., Liu, S., & Jia, Y. (2015). 中国陆上碳地质利用的区域资源分布. 二氧化碳利用杂志, 11, 20–30. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2014.12.005>

表2

- l. 全球碳捕集与封存研究院(2020) CO₂RE 数据库- 设施报告链接: www.co2re.co

图11

- m. 石油和天然气气候倡议 (OGCI). (2020). 全球二氧化碳封存资源目录. <https://oilandgasclimateinitiative.com/CO2-storage-resource-catalogue/>

图12

- n. 欧盟委员会 (2019), 创新基金, 链接: [from <https://ec.europa.eu/clima/policies/innovation-fund_en>](https://ec.europa.eu/clima/policies/innovation-fund_en).

图13

- o. Williams, E. (2019). Data Insights Achieving Climate Goals by Closing the Loop in a Circular Carbon Economy. 阿卜杜拉国王石油研究中心 ("KAPSARC," 1–13.

图17

- p. 全球碳捕集与封存研究院 (2020) CO₂RE 数据库 - 设施报告链接: www.CO2re.co
- 国际能源署. (2019). G20的氢未来. 抓住今天的机会. IEA为日本G20编写的报告, 6月.

表3 (氢)

- q. 国际能源署. (2019). G20的氢未来. 抓住今天的机会. IEA为日本G20编写的报告, 6月.
- Bruce, S., Temminghoff, M., Hayward, J., Schmidt, E., Munnings, C., Palfreyman, D., & Hartley, P. (2018). 国家氢能路线图. https://www.csiro.au/~media/Do-Business/Files/Futures/18-00314_EN_NationalHydrogenRoadmap_WEB_180823.

图22

- r. Fajardy, M., Koberle, A., Mac Dowell, N., & Fantuzzi, A. (2019). BECCS 部署: 一次现实检验. 格兰瑟姆研究所, 28(28), 1–14.

图23

- s. Carbon Engineering. (2020). Carbon Engineering: 我们的技术. 网站: <https://carbonengineering.com/our-technology/>

了解更多信息

全球碳捕集与封存研究院为其会员提供知识和数据，建立网络，提供宣传服务，并提供与CCS相关的全面咨询服务。

如有任何问题

请联系媒体宣传团队成员
globalccsinstitute.com/contact

总部办公室

伊丽莎白大街360号16层
墨尔本 维多利亚州 3000
澳大利亚
电话 +61 (0)3 8620 7300

©全球碳捕集与封存研究院有限公司2020

除非另有说明，否则本出版物的版权已经过知识共享署名-非商业性使用-禁止演绎-4.0国际许可协议授权许可。

全球碳捕集与封存研究院已尽力确保本出版物中的信息准确性。但是，本研究院无法保证本出版物中的信息完全可靠、准确或完整。因此，在做出投资或商业决策时，不应仅依赖本出版物中的信息。

全球碳捕集与封存研究院对本出版物中提及的任何外部或第三方网站链接的持久性或准确性不承担任何责任，也不保证此类网站上的任何内容现在或将来仍然准确或适当。在允许的最大范围内，全球碳捕集与封存研究院及其员工和顾问对使用或依赖本出版物中的信息，包括基于本出版物中提供的信息做出的任何商业或投资决定，概不负责（包括疏忽）。

请按以下格式引用本报告:

全球碳捕集与封存研究院, 2020. 全球碳捕集与封存现状: 2020. 澳大利亚.

本报告中的信息截止到2020年11月的最新信息。

版面设计: Fluid
fluid.com.au