碳捕集与封存全球现状

2019

聚焦气候变化

GLOBAL CCS INSTITUTE

实现气候变化目标
刻不容缓
碳捕集与封存
至关重要

1.0 前言

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。

研究院团队由近40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。

《碳捕集与封存全球现状2019》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、 **Guloren Turan** 和 **Alex Zapantis**，其他成员包括 **Lee Beck**、**Chris Consoli**、**Ian Havercroft**、**Harry Liu**、**Patricia Loria**、**Annya Schneider**、 **Eve Tamme**、**Alex Townsend**、**Lucy Temple-Smith**、**Dominic Rassool**以及 **Tony Zhang**。

本研究院其他员工也为本报告做出了贡献，他们是 **Jamie Burrows**、**Jeff Erikson**、 **Bruno Gerritts**、**Carla Judge** 、 **David Kearns** 、 马 湘 山 、 **Rob Mitchel** 、 **Hiroshi Nambo** 以及 **Nabeela Raji**。

缩写

BECCS 生物质能结合**CCS**
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
ETS 排放交易体系
EU ETS 欧盟排放交易体系
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
Mtpa 百万吨每年
MW 兆瓦
NDC 国家自主贡献
OECD 经济合作与发展组织
R&D 研发
SDS 可持续发展情景
SMR 蒸汽甲烷转化
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
US DOE 美国能源部

目录

1.0 前言
1.1 关于全球碳捕集与封存研究院
1.2 关于本报告
1.3 缩写
1.4 **CEO**寄语

2.0 迎接气候挑战: 需要**CCS**

3.0 碳捕集与封存全球现状
3.1 全球CCS设施更新
3.2 撬动加速部署的政策杠杆
3.3 全球二氧化碳封存一览
3.4 法律和监管一览

4.0 区域现状一览
4.1 国际气候政策一览
4.2 美洲
4.3 欧洲
4.4 中东和中亚
4.5 亚太

5.0 **CCS**的发展：技术及应用
5.1 天然气
5.2 氢
5.3 电力行业的CCS
5.4 生物质能结合**CCS (BECCS)**
5.5 直接空气捕集 **(DAC)**
5.6 CO_2的利用
5.7 **CCS**的创新
5.8 向净零碳未来的产业转型

6.0 附件

7.0 参考文献

布拉德·佩吉

CEO
全球碳捕集与封存研究院

这世界仿佛还需要更多证据证明气候变化的影响已经近在眼前且不断恶化。2019年所见证的灾难事件前所未有，超出天气变化的范围，绝非可以拿极端气候事件时不时总会发生做借口。火灾的规模和影响骇人听闻，很多情况下比过去更严重、更广泛，并给一些迥然不同如美国、法国、希腊、葡萄牙和澳大利亚这样的国家造成严重破坏。其他地区也遭遇极端风暴灾害事件，如日本橄榄球世界杯期间的台风海贝斯、印度延长的季风、巴哈马群岛飓风多里安以及中国的台风利奇马等等均造成严重生命财产损失。此外，包括重要粮食产区在内的世界许多其他地方干旱不断加剧。

气候科学在很多年前就已经解释的清楚明白。如今，由于温室气体排放未见缓解，其影响已向我们扑面而来。

要实现2015年具有历史意义的COP21巴黎协定达成的必要目标，留给我们的时间已所剩不多。我们近期已经做出高度可信的分析，得出本世纪中叶实现净零排放的过程中达到2度和1.5度目标的选项和路线。IPCC1.5度特别报告明确指出，所有技术，尤其是CCS的广泛应用，对于2030年前后实现净零排放必不可少。

IPCC提出的4条路线均要求立即采取前所未有的行动。要做到不是不可能，但所需要的政策必须能动用巨额资本并能使全球能源体系产生翻天覆地的转变。要做到的确不容易，但不是不能。有许多分析深入、结论可靠的报告都反复强调同一主题，那就是要赢得这场较量，就必须动用一切技术手段。我们再也不能让技术与偏见混战，让其削弱我们迅速减排的能力。

在这一背景下，我们在2019年看到能源转型中出现许多鼓舞人心的新发展。规划中CCS设施连续两年实现增长。CCS被广泛应用于排放源之后，其灵活性、适用性以及越发积极的经济性逐渐突显出来。正如本报告所揭示的，很多国家都表现出政策意向和政策制定的积极态度，尤其是美国、英国、挪威以及荷兰这些领军者，他们将更多项目并入我们的全球综合数据库。CCS在欧洲的计划和政策中也处于前沿，同时日本继续在这一领域大步向前，成绩斐然。值得注意的是，中国对CCS的重视热度不减，已经新成立了一个专业委员会来为政府的CCS政策和行动提供更广泛的建议和支持。

2019年另一值得庆贺的是位于西澳大利亚的世界最大地质封存设施高更项目注入启动。该项目将逐步提升产量直至二氧化碳年捕集和封存量达到340万-400万吨。这一项目将澳大利亚纳入CCS设施全球版图中，而这一切要归功于雪佛龙领导下的包括壳牌和美孚在内的合作伙伴所展现出的决心和毅力。

氢能作为脱碳竞赛中的关键新能源也在2019年处在领先位置。在欧洲、澳大利亚、日本、韩国以及越来越多的国家，氢能所获得的政策支持为数十年来所罕见。这一次最大的不同在于，对于一种零排放能源强度的燃料需求紧迫，且在这期间氢气生产和运输技术实现了巨大进步。本报告稍后还会指出，生产清洁氢能的技术中，最可靠、最经济并能实现规模化的就是蒸汽甲烷转化技术或煤炭气化技术，两种技术都用CCS。清洁氢能的潜在市场巨大。日本—澳大利亚合资煤炭气化试点项目证明，对生产设施的早期投资预示着这是一个欣欣向荣的产业，同时英国和欧洲也有计划。

可能过去一年中最令人信服的发展变化就是CCS已经成为一种能为许多依赖化石能源的社会带来真正意义的能源转型正义的突出技术。要应对化石能源开采、处理和利用带来的排放，甚至发展以氢能等新能源为基础的新能源经济，都必须依靠CCS的部署。一旦CCS得以部署，在这样一个碳排放受限的世界里，许多前景堪忧的社区可能会在这一巨大转型中变成积极的一份子。

但我们还有很多工作要做。达到巴黎气候目标所需要的能实现规模化部署的清洁能源技术并不多。虽然CCS方兴未艾，但去年CCS仍然无法赶上排放量上升的速度。此时此刻，需要凝聚更强大的政策支持，聚集更多的资本，为过去两年CCS所取得积极进展添砖加瓦。

尼古拉斯·斯特恩勋爵

IG Patel经济与政府系教授，伦敦政治经济学院
格兰瑟姆研究院院长

山火、干旱、海平面上升等等气候变化的影响已经开始肆虐全球。虽然情况已经非常严峻， 但我们仍熟视无睹。如不能成功缓解气候变化，将带来巨大危险。为了子孙后代， 我们必须应对这一全球性的紧迫问题。短期内减排的速度越快，我们防止气候变化最严重冲击的胜算就越大。

因此，我们要转变应对这一全球挑战的思维方式。转向新型可持续发展经济并加大创新领域的投资，一样会实现强有力的社会经济回报。全球经济和气候委员会已经指出，通过采取大胆的气候行动，可在2030年之前每年实现高达数万亿美元的经济回报，并能创造超过6000万个优质就业机会。

我们要抓住一切减排机会，同时大力改变我们的工作、生活和消费方式。提升生活和消费效率是第一步，还要大力提升可再生能源和清洁能源。不过我们不能忘记，我们还需要实现经济的碳中和转型，并广泛部署一系列措施和技术解决方案来加速清洁能源转型。

根据IPCC全球变暖1.5 摄氏度报告，我们现在手中就握有一个重要机遇，那就是碳捕集、利用与封存这一将要发挥重要作用的技术。该技术的应用面相当广泛多元；从实现负排放的直接空气捕集到通过改善工业和发电行业现有基础设施防止基础设施排放锁定，碳捕集、利用与封存将是实现净零排放目标的重要工具。

同许多减缓措施一样，碳捕集、利用与封存技术所亟需的，正是有效的行动和政策，以加速其在多个经济部门的广泛部署，尤其是那些脱碳困难的部门。

作为一个社会，为了子孙后代，缓解气候变化，我们责无旁贷。投入减缓和创新无疑将带来巨大回报与价值，同时通过采取持续不断的行动，将提升我们应对气候变化的能力。虽然时间不多，但我们拥有一种不同于往昔的发展模式。21世纪将要书写的历史将是可持续的、包容的增长史。

“根据IPCC全球变暖1.5摄氏度报告，碳捕集、利用与封存将发挥重要作用”

IG Patel经济与政府系教授

尼古拉斯·斯特恩勋爵

伦敦政治经济学院
格兰瑟姆研究院院长

杰德 • 哈米斯特

极地探险者 澳大利亚勋章获得者

我们都是人类的一份子。

将我们分隔开来的，从来都是我们自己制造的鸿沟，比如宗教信仰、地图上的边境线、种族、金钱以及性别等观念。

拯救地球应对全球变暖这场辩论的着眼点错了。

地球不需要拯救 – 在我们让自己和所有其他生命从这个星球上消亡之后，地球自会恢复 – 因此这不过是人类生或死、存或亡的问题.

但是... 万一呢？万一我们可以聚焦这一人类的巨大威胁，明白为何要万众一心，而非让彼此对立呢？

如果我们可以做出这一改变，我们就能学会团结一致，尊重我们共同的家园，并最终拯救地球上所有生命的未来，包括我们自己。

我年仅18岁，还算不得全球变暖的专家，但我可能是这个星球上我这一代人唯一有幸对地球三大主要极地具有直接经验的人。在80天的时间里，我的旅程跨越1300公里。

现在，我感觉同地球有着深刻的情感联结，我觉得我有责任参与保护这些无比美丽又脆弱的环境。

我在极地探险的所见所闻已经向我证明，全球变暖是不争的事实。

因此我呼吁政商领袖，停止争论，加大行动力度。重要的不仅仅是选择最佳技术的事情，而是要支持所有可靠的、能将全球升温控制在2摄氏度以下（如果尚有可能）的技术和想法，包括碳捕集与封存。

我这一代将注定要面对气候变暖这一巨大威胁，并承受今天的领导人所作出的政治决定。请给我们一个还能取得一个积极成果的平台。

我有信心，我们这一代有技术，有热情，有凝聚力，可以作出有意义的改变，但我们是否还有机会作此一战，则取决于当今世界领导人。

请给我们这个机会。

“重要的是要支持所有可靠的技术和观点，包括碳捕集与封存”

杰德 • 哈米斯特
极地探险者 澳大利亚勋章获得者

比尔·盖茨

我常听到一种说法。低成本太阳能和风能加上能源储存的新型突破技术意味着这些能源足以上网提供零碳电力。然而，由于这个世界必须在消除碳排放和经济增长之间做平衡，我们还应考虑什么解决方案是最平价的。近期一个MIT研究人员的研究发现，通过支持可再生能源并以包括CCS在内的清洁能源方案为辅助，可使零碳电力的价格比仅仅使用可再生能源低62%。

另外一个获取零碳电力的方法就是碳捕集、利用和封存技术。这个技术将电厂排出的二氧化碳污染物分离并永久封存起来，防止其进入大气。对于某些可再生能源潜力不足或退出和替换现有发电厂费用太高的地方而言，这个技术尤为重要。

“另一个获取零碳电力的方法就是碳捕集、利用和封存技术。”

比尔·盖茨
GatesNotes.com,
2019年5月14日

2.0
应对气候挑战: 需要CCS

1.0 前言
1.1 关于全球碳捕集与封存研究院
1.2 关于本报告
1.3 缩写
1.4 CEO 寄语

2.0 应对气候挑战: 需要CCS

3.0 碳捕集与封存全球现状
3.1 全球CCS设施更新
3.2 撬动加速部署的政策杠杆
3.3 全球二氧化碳封存一览
3.4 法律和监管一览

4.0 区域现状一览
4.1 国际气候政策一览
4.2 美洲
4.3 欧洲
4.4 中东和中亚
4.5 亚太

5.0 CCS的发展: 技术及应用
5.1 天然气
5.2 氢
5.3 电力行业的CCS
5.4 生物质能结合CCS(BECCS)
5.5 直接空气捕集(DAC)
5.6 CO_2的利用
5.7 CCS的创新
5.8 向净零碳未来的产业转型

6.0 附件

7.0 参考文献

CCS 对于实现气候目标至关重要

尽管缓解气候变化迫在眉睫，过去20年可再生能源占比提升迅速，但是控制排放的进程一直缓慢。约80%的一次能源供给来自化石能源，这与50年前相比没有任何改变。全球能源相关的二氧化碳排放量再次呈现上升趋势，尽管暂时稳住了几年，但在2018年又升高1.7%[1]。政府的承诺并没能弥合当前排放量和全球剩余碳排放预算之间的差距。

政府间气候变化专门委员会（IPCC）和国际能源署（IEA）的分析结论一致，认为CCS是达成气候目标低成本路径的关键组成部分。IPCC第五次年度评估报告（AR5）认为，如果将CCS排除在减排技术组合之外，将导致成本翻倍，而且这比将任何其他技术排除在外的成本都要高。

全球变暖1.5°C特别报告[2] (IPCC SR15) 再一次证明CCS 在避免气候变化危险后果中所能发挥的重大作用。该报告强调，单靠减排是不够的。若要将全球升温幅度在工业化前水平基础上控制在1.5°C 之内，全世界必须在2050年之前实现净零排放。大部分模型推演出的情景都显示，实现这一目标需要大力部署负排放技术。BECCS 是其中现有不多的几个可以达到必要规模的技术之一。

正如IPCC SR15报告所指出的，可以搭建减排模型，在不使用CCS技术的背景下将全球升温幅度控制在1.5°C内，但有必要在短期内大幅度降低能源需求。考虑到人口和收入的增长，有必要大力推行社会和行为变革。然而目前的经验告诉我们，激进的改革挑战极大，成功的可能性极低。

CCS已经得到证实，对其认识也很深入

CCS可防止二氧化碳（CO_2）被排入大气。该技术包含捕集大规模工业工厂排放的CO_2，将其压缩后运输到谨慎挑选的安全地点，注入地下岩层，永久封存。

CCS技术已经证实，我们对这个技术的认识也很深入。自20世纪30年代起，碳捕集设备已经在工业环境中商用，主要用于净化天然气、氢气和其他气体。CO_2首次在商业规模运作中进行地下注入是在1972年。目前已有超过2.6亿吨源自人类活动（人为源）的CO_2排放物被捕集和封存。全球目前运行中或在建项目的年捕集和封存量大约为4000万吨。

CCS可减少全球经济关键工业部门的排放，例如钢铁、水泥和化工生产。与用于发电或生物燃料生产的生物能联合起来之后，CCS是少有的能实现负排放规模足以将升温幅度限制在1.5°C的技术。该技术可应用于煤电和气电，有助于提供低排放发电量，对占比越来越高的间歇性可再生能源形成补充；也可应用生产低碳的氢，以用于燃料、供热和运输。

立即采取行动的必要性和利好

IEA《2019世界能源展望》阐述了实现可持续发展情景（SDS）应采取的必要措施，即在这样一个未来，联合国对排放、能源获取和空气质量等能源相关可持续发展目标都得以实现。在这个情景下，有66%的可能性在不依靠大规模负排放的基础上将全球升温幅度控制在1.8度。

如图1所示，在这样一个情景下：

- 到2050年，碳捕集、利用和封存 (CCUS)[1]在累计减排量中占比9%
- 从2019年到2050年之间，CO_2捕集和永久封存年平均量为15亿吨
- 2050年CO_2 捕集和永久封存量达到每年28亿吨
- CO_2捕集量基本由电力部门和工业部门平分，其中工业部门包括钢铁、水泥、精炼以及上游油气开采。

CCS的部署速度还不够快，不足以支撑其以最低成本在实现减排目标中发挥作用。IEA的“追踪清洁能源”进展指数对可持续发展情景下实现低于2°C目标所需的39种关键技术提供了现状速报，其中只有7种技术被评估为“上正轨”。重要的是，电力、工业以及工业转型中的CCS均被评估为“脱离正轨”。

要实现SDS所提出的水平，规模设施数量需要增长100倍，即从现在到2040年，从目前运行的19座设施增加到超过2000座。

要平稳迅速实现这一技术的规模化，就要立即采取行动。政府的角色至关重要，要为CCS提供一个清晰、稳定、有力的政策框架。

好消息是，除有助于减排之外，CCS还能带来众多利好。该技术可以让那些就业高度依赖排放强度大的企业的社区，实现向新型低排放产业的公平转型，从而保护那里的人们免受经济和社会影响，不必承受关停当地产业的后果。此外，CCS:

- 支持高薪就业岗位;
- 一旦与灵活的化石能源发电厂整合，就可提供可靠、随时可调配的发电量，从而降低供电的整体成本;
- 可利用现有本该退役的基础设施，延迟关停成本;
- 可创造知识的溢出效应，支持创新型经济的增长。

要实现1.5°C温控目标，留给我们的时间所剩无几。广泛应用CCS是实现这些目标的关键。我们现在就要开始规模化部署。

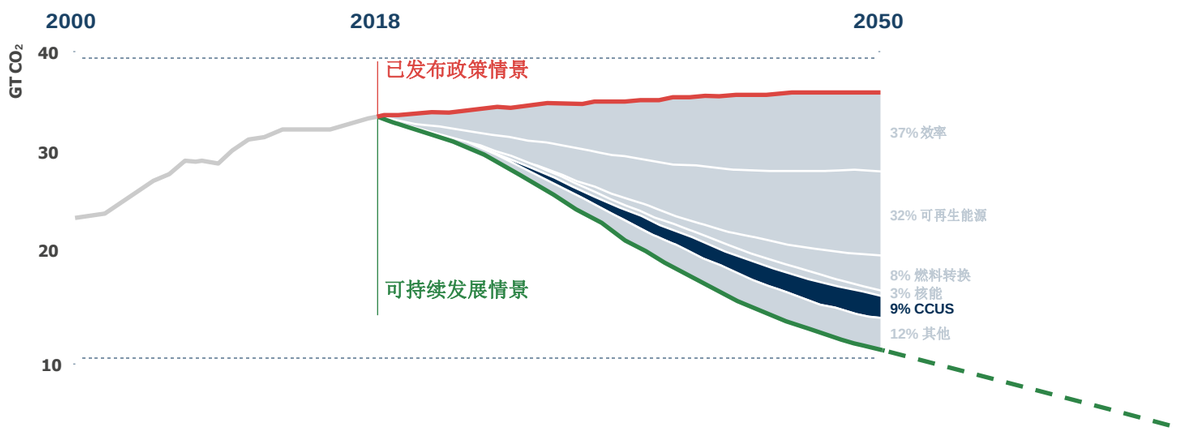


图1 IEA可持续发展情景(SDS)[3]中的减排
注: CCUS (碳捕集、利用和封存)

萨利 • 本森教授

普雷科特能源研究所联合主任
全球气候与能源项目主任
能源工程系教授
普雷科特能源研究所高级研究员
斯坦福大学

朝理想迈进 完成不可能之可能

在我十几岁时，在我的家乡北加州，大规模山火差不多每十年一次，在人们的惊愕中，数千栋房屋在大火中烧毁，还有更多的人无家可归。如今，大火每年发生。就在此时此刻，往北一百公里以外，77,000公顷的土地正淹没在熊熊大火中，整个加州被笼罩在浓烟之下。那些曾经难得一见的极端事件，例如山火、洪水、干旱、极端高温天气以及飓风，如今发生的越来越频繁，造成巨大的社会和个人损失。气候变化再也不是一个遥远的、抽象的、不需要我们担心的东西。我现在可谓忧心忡忡。

在过去20间，碳捕集与封存的作用已经从“锦上添花”变为“必不可少”。现在，CCUS是不可或缺的。我们现在需要的CCUS是十亿吨*规模的。我们的碳预算用的太快了，以至于在不久的将来我们极有可能要从大气中捕集二氧化碳。然而，这是一个效率远远低于从点排放源直接捕集二氧化碳的方法。因此，为什么不在我们还可以停止排放的时候，加大力度扩大点排放源的CCUS呢？

当然，无法加大力度的原因有很多。排在首位的就是缺少行动力和投资吸引力。可能更重要的是，面前的现实和我们的雄心壮志之间的差距，即从现在CCUS每年增长10%到2040前实现每年十亿吨。如果增速可以达到每年20%并一直保持到2040年，没错，到那时达到每年十亿吨完全没有问题。就让我们行动起来吧。

*每年捕集和封存十亿吨 CO_2

“过去二十年间，碳捕集和封存的作用从‘锦上添花’变为‘必不可少’。如今，CCUS是不可或缺的。”

萨利 • 本森教授
普雷科特能源研究所联合主任
全球气候与能源项目主任
能源工程系教授
普雷科特能源研究所高级研究员
斯坦福大学

3.0
碳捕集与封存全球现状

1.0 前言
1.1 关于全球碳捕集与封存研究院
1.2 关于本报告
1.3 缩写
1.4 CEO 寄语

2.0 应对气候挑战: 需要CCS

3.0 碳捕集与封存全球现状
3.1 全球CCS设施更新
3.2 撬动加速部署的政策杠杆
3.3 全球二氧化碳封存一览
3.4 法律和监管一览

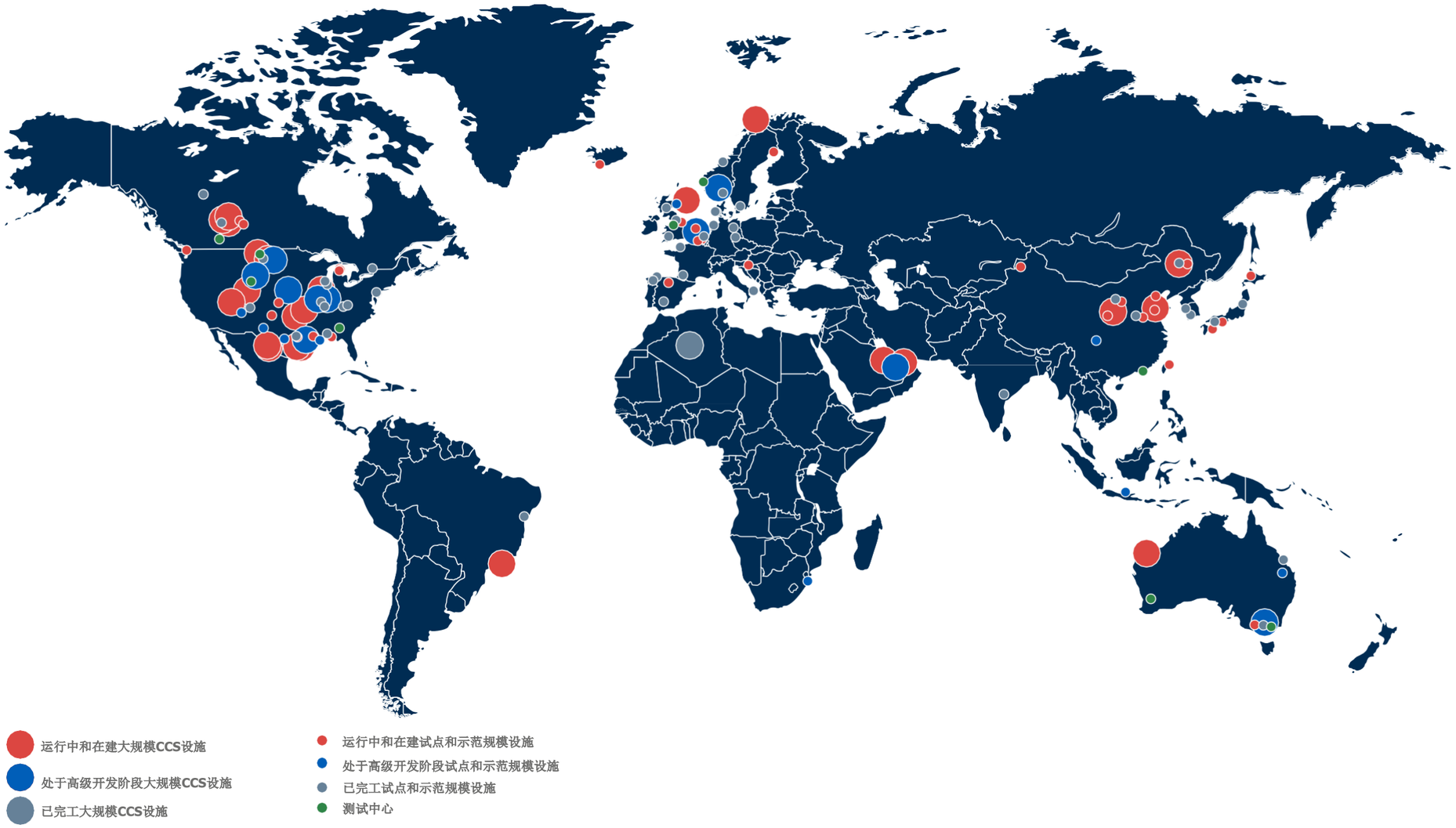
4.0 区域现状一览
4.1 国际气候政策一览
4.2 美洲
4.3 欧洲
4.4 中东和中亚
4.5 亚太

5.0 CCS的发展: 技术及应用
5.1 天然气
5.2 氢
5.3 电力行业的CCS
5.4 生物质能结合CCS (BECCS)
5.5 直接空气捕集(DAC)
5.6 CO_2的利用
5.7 CCS的创新
5.8 向净零碳未来的产业转型

6.0 附件

7.0 参考文献

3.1 全球CCS设施更新



大规模 = 年封存能力>400,000吨

图 2 当前全球CCS设施分布 [ii]

过去一年全球CCS的发展和部署都在提速。这里的世界地图显示CCS在全球的分布不断扩大。2019年，大规模CCS设施增加到51座[4]。

其中:

- 19座运行中
- 4座在建
- 10座使用专门前端工程设计（FEED）进入高级开发阶段
- 18座处于早期开发阶段

现在，运行中和在建项目的年二氧化碳捕集和永久封存能力达到4000万吨。这一数字预计在接下来的12-18个月内还会上升约100万吨。此外，还有39个试点和示范规模设施（运行中或即将试运）以及9个CCS技术测试中心。

2019年CCS的显著进展

2019年，超过2500万吨来自电力和工业部门的二氧化碳通过利用CCS被永久封存。
两座新设施投运，其他设施累计二氧化碳封存量实现重大里程碑:

- **西澳大利亚巴罗岛高更天然气处理厂二氧化碳注入于2019年8月启动。**这将是全球最大专用二氧化碳地质封存设施，预计满负荷生产时年封存量将达到400万吨[5]。
- **Alberta Carbon Trunk Line (ACTL)**是一个长达240公里的 CO_2管线，预计2020年上线，将会为加拿大阿尔伯塔省工业部门提供CO_2输送服务。North West Redwater Partnership公司Sturgeon 精炼厂和Agrium化肥厂将联手通过该管线为阿尔伯塔省中部EOR作业每年提供约160万吨CO_2。
- **1亿吨** – 美国怀俄明州的Shute Creek 天然气处理厂年二氧化碳捕集能力达700万吨，已经累计从天然气处理作业中捕集超1亿吨CO_2用于EOR[6]。
- **3800万吨** – 美国北达科他州大平原合成燃料（Great Plains Synfuels）工厂通过煤炭（褐煤）气化工艺捕集CO_2，生产的合成气（氢和一氧化碳混合气体）可供能源使用和化学品生产。自2000年投产以来，该工厂已经为加拿大Weyburn和 Midale 油田EOR作业交付约3800万吨CO_2[7]。
- **2200万吨** – 在挪威大陆架上，Sleipner和Snøhvit CO_2 封存设施已累计捕集和封存2200万吨CO_2[8]。Sleipner是全球第一座专门用于CO_2地质封存的大规模设施，自1996年以来主要用于封存天然气处理产生的 CO_2。
- **1000万吨** – 位于巴西海上的巴西国家石油桑托斯盆地（Petrobras Santos Basin）CO_2-EOR设施实现天然气处理行业CO_2捕集和注入量达1000万吨的里程碑[9]。Petrobras仍在不断扩大浮式生产储存卸货装置 (FPSO) 的产能，目标在2025年前实现CO_2累计注入量超过4000万吨。

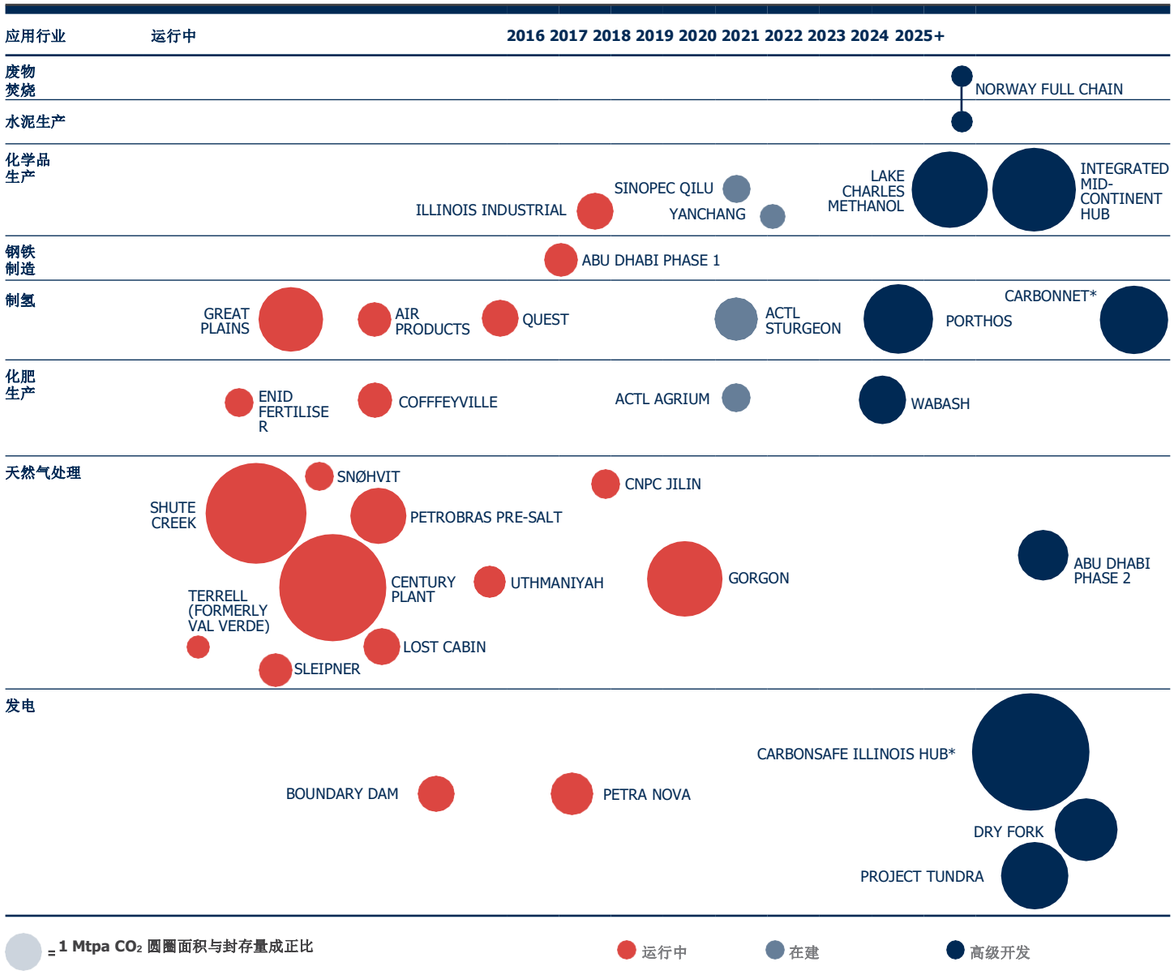


图3 运行中、在建和高级开发阶段的电力和工业大规模CCS设施

*圆圈大小与设施捕集能力成正比。设施所处行业用一级行业类别表示。

- **500万吨** – Air Products位于美国亚瑟港的碳捕集厂通过将蒸汽甲烷转化（SMR）与CCS挂钩，已经减少了500万吨二氧化碳排放入大气。该厂自2013年投入运行[10]。
- **400万吨** – 加拿大Quest CCS设施自2015年底投运以来一直在捕集制氢SMR工艺产生的二氧化碳。壳牌（加拿大）宣布，根据进度已经提前捕集并安全封存了400万吨二氧化碳[11]。
- **300万吨** – Boundary Dam（边界大坝） CCS 2014年底投运，是发电行业第一座大规模CCS设施，用于加拿大萨省Boundary Dam 3号机组。该设施在2019年二氧化碳捕集量超过300万吨大关[12]。

CCS投资势头正缓慢提速。上面图3显示的是未来五年及以后CCS的增长。

2019年进入高级开发[iii]阶段的设施总结如下：

阿布扎比阶段2 天然气处理厂

阿布扎比国家石油公司(ADNOC)正在开发其位于阿联酋的第二座CCUS设施。该设施将从其天然气处理厂捕集190万吨至230万吨CO_2用于EOR。阿布扎比阶段1 (Emirates Steel Industries阿联酋钢铁公司钢铁厂的CO_2捕集) 和阿布扎比阶段2的设施都将在同一气藏封存二氧化碳。

Wabash CO_2固存项目

Wabash Valley Resources LLC 公司准备通过改造位于美国印第安纳州的一座整体煤气化联合循环（IGCC）工厂，开发一座CO_2近零排放的氨厂。这一设施将捕集150万吨至175 万吨CO_2，并封存于Wabash CarbonSAFE CO_2 封存枢纽的专门地质封存点。

Tundra项目

Minnkota Power Cooperative 公司计划改造一座310万吨至360万吨的CO_2捕集厂用于捕集美国北达科他州Milton R. Young火电厂2号机组产生的二氧化碳，该装置发电量达455兆瓦。初期预备进行封存于专门地质封存点。北达科他州CarbonSAFE封存枢纽[iii]目前正在研究未来将该设施封存的二氧化碳用于EOR的可能性。

Dry Fork 综合商业 CCS

盆地电力公司（Basin Electric Power Cooperative）计划从美国怀俄明州385兆瓦Dry Fork火电站每年捕集 300万吨CO_2。

他们准备利用近期怀俄明 CarbonSAFE[13]正在研究临近地质封存地层进行封存。该公司还在考虑将EOR作为CO_2封存路径，利用附近CO_2管网和EOR作业。

CarbonSAFE Illinois 枢纽 – Macon County[iii]

基于对Archer Daniels Midland乙醇厂伊利诺伊工业CCS设施的研究成果，该项目准备在美国伊利诺伊州建设一个5000万吨以上的商业地质封存枢纽。邻近发电厂如Prairie State Generation（816兆瓦火电厂，1000万吨二氧化碳）已经开始全面FEED研究[14]，并且区域内乙醇厂也是潜在二氧化碳排放源。

一体式中部大陆堆叠式碳封存枢纽（Integrated mid – continent stacked carbon storage hub）

位于美国西南的内布拉斯加州将建设封存基础设施，收集来自本地区乙醇厂、发电厂和精炼厂排放的二氧化碳。二氧化碳排放量在190万-500万吨的乙醇厂可以利用该基础设施。内布拉斯加公共电力区（Nebraska Public Power District）Gerald Gentleman电站 (煤电) 是这一封存枢纽的另一潜在二氧化碳来源。该电站正在进行FEED研究，采用 Ion Engineering公司的无水ICE-21溶剂捕集技术对电站进行改造[15]。

虽然正在扩大CCS规划规模，但速度不够快

下方图4显示了过去十年CCS设施规划的发展。该图显示，2010-2017年间，规划设施持续下降，之后2018-2019逐年上升。对这样的发展趋势有很多解读，但很难对原因下定论。不过极有可能始于2007年中并贯穿2009年全年的全球金融危机是我们所观察到的下滑趋势的原因。伴随这一金融危机而来的，是全球市场的不确定性和经济下滑。这使得政府将注意力放在短期经济复苏，使私营部门将注意力放在如何活下来。应对气候变化的行动从优先事项清单上跌落，公共政策和私有资本也应声响应。由于CCS投资需要强有力的政策和大量资本，因此对CCS投资也随后撤回。如果2007-2009的数据显示项目规划达到一个峰值，那么这一推测还有些份量。然而，由于我院成立于2009年之后，所以之前的数据无法获得。

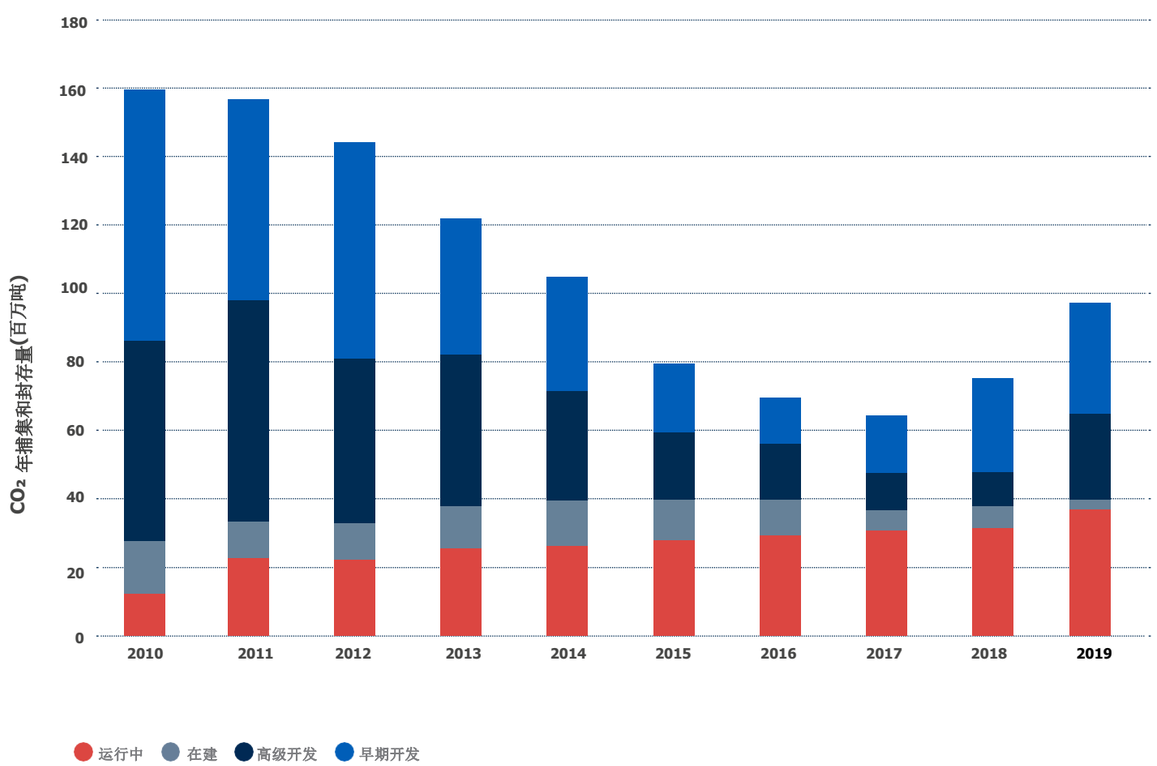


图4 2010-2019大规模CCS设施规划: CO_2捕集和封存能力

2017年以来，CCS 产业重启发展势头。今天运行中的大规模CCS设施数量是2010年的4倍。2018-2019年之间观察到的这一上升趋势可能有多重原因。2015年签署的巴黎协定建立了清晰的目标，将全球升温幅度控制在2度以内，并积极努力将其控制在1.5度。这一目标基本上获得了世界各国广泛支持。这一协定让各国政府、私营部门以及民间社会将注意力再次集中到减缓气候变化。因此，有政府提出更强而有力的气候政策（如对净零排放目标立法），股东对上市公司施加更大减排压力，资本迅速从高排放资产转移到低排放资产，诸如这样的例子不胜枚举。最终结果就是，政府为实现大幅减排以达成雄心勃勃的气候目标所作的分析越来越透彻，私营部门为防控气候政策风险制定战略的紧迫意识越来越强。对于这二者而言，CCS 逐渐成为解决办法的关键一环。除了这些驱动因素外，过去十年捕集成本大幅下降，巴黎协定之后四年，CCS 规划规模开始逐步扩充。

大规模CCS设施捕集能力在2017-2019之间从3120万吨上升到3920万吨。处于不同开发阶段的所有设施总捕集能力从2017年的37座设施6450万吨增加到2019年51座设施9750万吨。这其中有越来越多的设施，连同近期在美国、新西兰和卡塔尔[iv]宣布的且尚未加入CCS规划的设施，将有潜力在21世纪20年代掀起下一波全球CCS 投资浪潮。另外，具有重要意义的是，CCS更广泛的应用于新设施并得到深入研究。这些新项目并没有选择那些唾手可得的机会，比如天然气处理、肥料和乙醇生产，而是进入较少开发的产业，例如制氢和生物能源CCS 。

火力发电行业曾一度认为CCS的成本高昂，但通过使用第一代技术，二氧化碳捕集成本已经从100美元每吨二氧化碳降至大约45美元每吨。通过第一批CCS设施，我们边学边做，将进一步推动成本降低。

虽然近期CCS投资高走颇令人鼓舞，但是要实现气候目标，这还远远不够。如果现今所有CCS规划内的设施于2040年投运且再无新设施加入，二氧化碳捕集量仍不过是所需捕集量的二十分之一。因此亟需政府推出有力措施，激励私营部门对CCS投资。

CCS新浪潮: 枢纽和集群

以CCS 枢纽和集群为基础的“新浪潮”设施是2019年的亮点。这些设施已在2016年[16]加入到本研究院的数据库。许多高排放设施（发电和工业）都集中在同一区域，而“新浪潮”设施利用了这个优势。枢纽和集群通过规模化可大幅降低二氧化碳封存单位成本，形成商业合力，降低投资风险。他们可以在缓解气候变化中扮演极为重要的角色。

图5显示的是2019年取得显著进展的CCS枢纽和集群，他们的共性和特点总结如下。

枢纽和集群的关键特点:

- 多个二氧化碳工业点源链接到一个二氧化碳运输和封存网络。
- 可获得大规模地质封存资源，封存来自工业源头数十年的二氧化碳不成问题。
- 所有潜在枢纽和集群的研究都由政府支持[17]。
- 规模经济降低二氧化碳封存单位成本。
- 二氧化碳排放源和封存操作方可形成合力，减少交叉风险，支持商业可靠性。

关于这些枢纽和集群的更多信息:

- 巴西国家石油公司桑托斯盆地CCS网络是第一个运行的“CCS枢纽和集群”。它的设置独特，在巴西里约海上的桑托斯盆地布置了十艘FPSO。捕集的二氧化碳直接注入Lula, Sapinhoá 和Lapa两个油田，用于EOR。
- 在阿尔伯塔省政府4.85亿加元的资金支持下，ACTL将从阿尔伯塔的工业腹地（Industrial Heartland）运输1460万吨CO_2，以减少CO_2排放。这是对Sturgeon精炼厂和Agrium化肥厂CO_2运输的补充。
- 北极光（Northern Lights）是一座开放二氧化碳运输和封存枢纽，旨在为欧洲提供大规模二氧化碳封存容量[21]，将会超越挪威目前位于Norcem和Fortum两个捕集点的全链条 CCS 设施。
- 美国八座新设施中有六座属于美国能源部的碳封存保障设施企业计划 (CarbonSAFE) 。该计划致力于开发5000万吨以上的工业源二氧化碳地质封存设施。
- CarbonNet 是一个由澳大利亚联邦政府和维多利亚州政府支持的CO_2运输和封存枢纽。该枢纽将会为澳大利亚拉特罗布河谷（Latrobe Valley）的潜在捕集项目提供二氧化碳运输和封存服务。氢能供应链项目(HESC)目前正在建设一个煤炭气化制氢试点项目，并示范将氢通过海运运往日本。预计2025年将会敲定投资建设一座配备CCS的商业制氢工厂。如果该决定落实，该工厂可能成为CarbonNet CO_2枢纽的第一个客户。
- 位于英国的Net Zero Teesside是提兹谷（Tees Valley）一个CO_2运输和封存枢纽。
- 由共同利益项目（Projects of Common Interest）支持的其他CCS枢纽和集群包括Acorn Full Scale CCS、Ervia Cork、鹿特丹港CCUS骨干倡议(PORTHOS)以及阿姆斯特丹 IJmuiden-CO_2运输枢纽和海上封存 (ATHOS)。
- Net Zero Teesside、Northern Lights、PORTHOS、新疆准噶尔盆地CCUS枢纽以及墨西哥湾CCUS 枢纽已经入选为石油和天然气气候倡议（Oil and Gas Climate Initiative）CCS枢纽和集群大规模投资的先导项目[18]。

关于枢纽和集群的详情请见本报告第4.0章。

枢纽和集群通过规模化经济，可大幅降低二氧化碳封存单位成本，形成商业合力，降低投资风险。

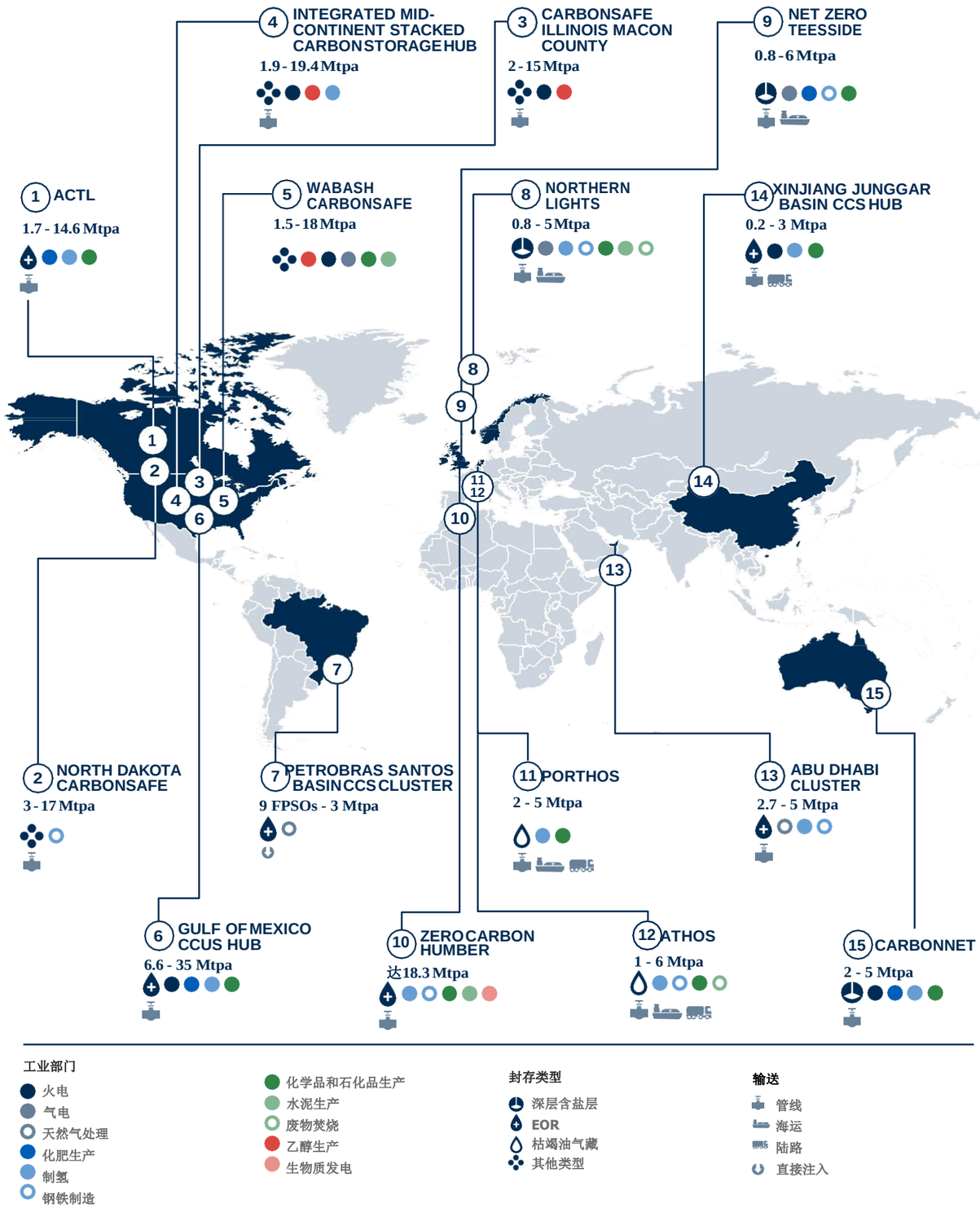


图5 2019年全球取得显著进展的CCUS枢纽和集群 （Mtpa=百万吨每年）

3.2 撬动加速部署的政策杠杆

为实现气候变化缓解目标，预计到2040年前需要部署2000多座大规模CCS设施以及数千亿美元的投资。今天，有19座大规模设施运行中，4座设施在建。图6显示各个项目的商业可行性都受到良好的商业条件和支持政策的支撑。该图证明，只要激励政策到位，私有部门就会投资CCS。

政策和项目特点	碳税	税收抵免或排放配额	拨款支持	政府或SOE拨款	法规要求	EOR	低成本捕集	低成本运输和封存	垂直整合
美国									
Terrell						○	●	●	
Enid Fertiliser						○	●	●	
Shute Creek					●	○	●	●	
Century Plant		●				○	●		
Air Products SMR		●	○			○			
Coffeyville									
Lost Cabin									
Illinois Industrial		●	○				●	●	●
Petra Nova		●	○			○			
Great Plains									
加拿大									
Boundary Dam			○	●	●	○		●	
Quest		●	○						●
ACTL Agrium			○				●		
ACTL Sturgeon			○			○	●		
巴西									
Petrobras Santos				●		○	●	●	●
挪威						○			
Sleipner	●			●			●	●	●
Snøhvit	●			●	●		●		●
阿联酋									
Abu Dhabi CCS				●		○		●	
沙特									
Uthmaniyah				●		○	●	●	●
中国									
中石油吉林				●		○	●	●	●
中石化齐鲁*				●		○	●	●	
延长*				●		○	●		
澳大利亚									
Gorgon			○		●		●	●	●

图6 推动大规模设施的条件*在建

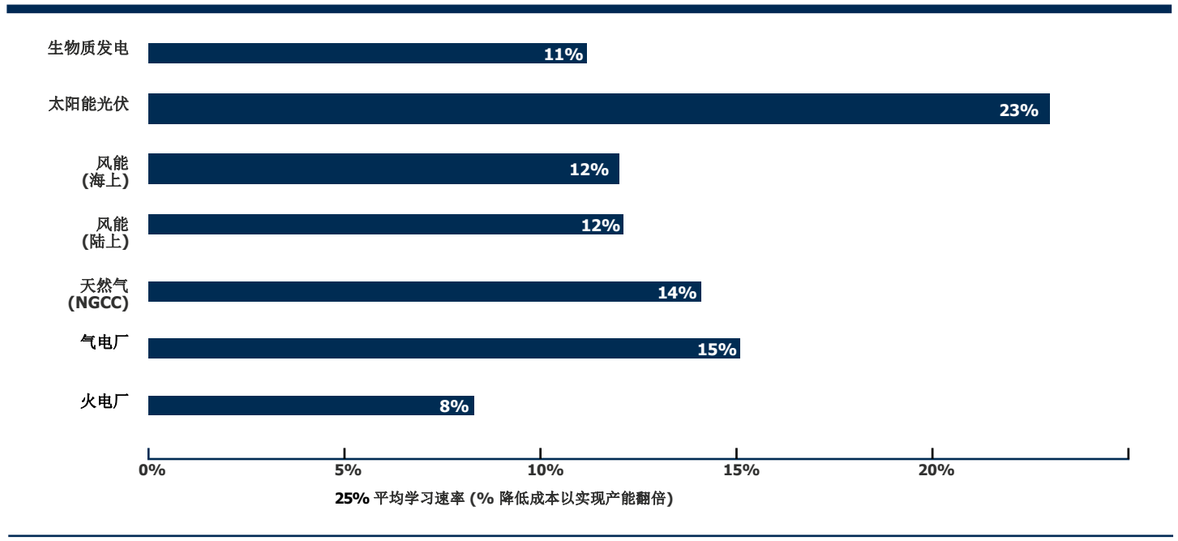


图7 不同发电技术的学习速率 (单一因子模型的平均值)[17]

同所有大规模基建项目一样，CCS设施的开发建设都是重资本的。这影响到项目的可行性，导致有价无市，无人问津。但是，随着新项目逐一上线，学习速率推动成本下降。例如，假设保守估计学习速率如图7所示为8%，随着设施数目从数十座到本世纪中叶增加到数千座，捕集二氧化碳的成本大约会减半。必须在早期给予投资者足够的激励，从而加速学习速率，吸引更多新项目。

有充分证据证明捕集成本已经下降。如下方图8，通过对使用成熟氨基捕集系统的燃煤CCS设施[vi]进行一系列可行性和FEED研究，得出成本预估。Boundary Dam（边界大坝）和Petra Nova是其中两个运行中的项目。Boundary Dam设施的捕集成本为100多美元每吨二氧化碳，三年后Petra Nova设施的成本将降到不到65美元每吨二氧化碳。近期最新研究显示，计划2024-2028投运的设施（使用成熟氨基捕集系统）捕集成本集中在大约每吨二氧化碳43美元。试点项目的新技术则可保证捕集成本控制在每吨二氧化碳33美元。

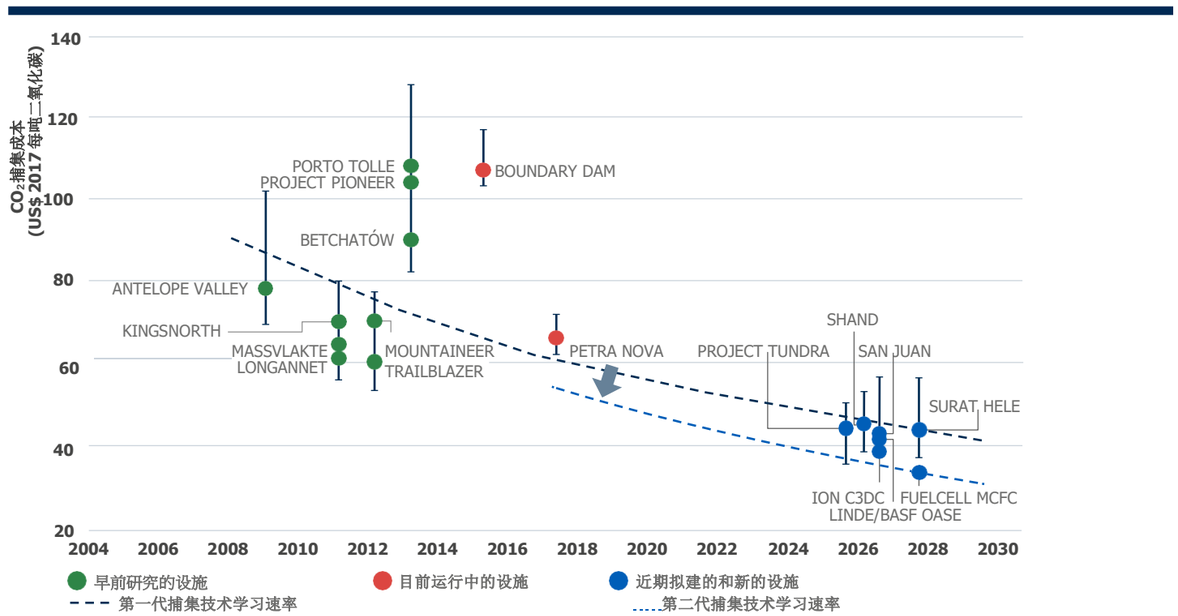


图8 火电厂大规模燃烧后捕集设施CO_2捕集平均成本，包括之前研究的设施[vii]

激励投资人最直接的方法就是给二氧化碳赋予实质价值。政策制定的选项很多，例如将税收抵免、碳税或直接监管作为审批的一项前提。如果碳价定在低位，那么认为CCS比其他气候变化缓解技术昂贵的错误观点就可以很快消除了。例如，IEA估计，通过部署现有的众多低成本CCS，可以以每吨二氧化碳40美元作为商业激励，实现全球4.5亿吨二氧化碳的捕集、利用和封存。这一价格处在碳价高级别委员会为推动彻底变革以实现巴黎协定目标所建议的2020年40美元-80美元这一价格区间的最低点[20, 21]。

对比成熟产业，开发商业CCS设施的经验相对不足。因此，潜在投资人和融资人会施加风险溢价，推高私募资本（债权和股权）成本，进而增加投资难度。事实上，很少有CCS项目能够通过银行借贷获取资金，因为对风险的普遍看法以及银行缺乏相关知识认为存在风险，使得这些项目很难符合贷款资格。但凡银行认为风险无法良好管控，银行就不愿意给CCS项目放贷或给项目开发方提供优惠利率。私营部门在管理技术、施工和作业表现等项目风险管控上具有优势，政府通过与私营部门合作，可以在风险分摊上发挥重要作用，进而促进私营部门投资。

强有力的政策框架可以解决市场无法降低风险的难题，例如跨链风险和长期债务风险。政府通过承担私营部门无法承担的风险，来消除投资风险。尽管私营部门对CCS投资受盈利驱动，但政府应主动提供公共产品。政府通过放弃CCS投资的财政回报，以此换来产业对排放目标的有效贡献和稳定的选区氛围。如此，开发共用运输和封存网络和构建坚实的法律监管框架可分别管理好跨链风险和债务风险。

图9(如下)显示的是政府政策和对CCS的信心随时间推移如何降低债务成本。初期CCS设施的开发都是处在高风险条件下，由于政策框架力度不够，运行中CCS设施较少，债务成本因此最高。

随着越来越多设施投运，政策框架逐渐加强，债务成本也随之下降。最终在产业进入成熟阶段后，低风险借贷利率也随之实现。

如需进一步详细了解政策制定者的政策优先事项和如何刺激CCS投资，请前往globalccsinstitute.com下载我们的 2019 思想领导力报告激励大规模CCS部署政策优先事项

ESG与董事的责任

一个公司对环境、社会和企业治理(ESG)等因素的态度，也越来越成为投资人、股东和广大公众的重要考量因素。对于一个企业核心活动ESG因素的检视和报告越来越多。尽管很多企业有更强的意愿去落实更可持续的做法，但这种开放态度更多是因为投资方的社会意识增强，股东的“意识觉醒”以及公众对环境、社会和治理问题表现越来越活跃。

近些年来，企业治理中“环境”因素的重要性越来越高，其中气候变化和碳风险暴露出两方面的考量变得越发紧迫。在二氧化碳足迹非常高的组织中，投资人和股东会获得更多详细信息，包括气候变化影响和碳风险，如何适应和解决温室气体排放的策略，新发现的能减少企业所受冲击的商业机遇等等。

对于可持续性和环境表现措施的报告，企业也从基本自愿发布转为认为必须发布。

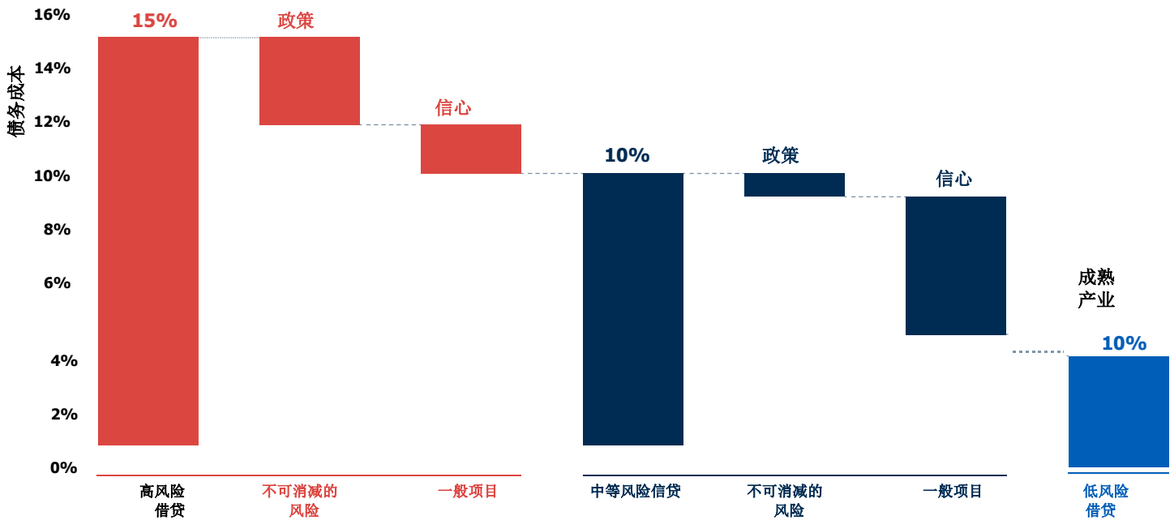


图 9 借贷利率变化示意图-政策去风险化和CCS设施部署速度提升

ESG披露和投资决策成为财务报告义务的重要部分。有些人提出，现在一个企业的ESG表现与其撬动资本的能力有清晰的关联，包括资本的成本。

经验显示，如果企业无法对环境表现和气候变化影响采取务实举措，可能会给企业带来直接或间接风险。撤销投资的趋势就是一个例子。股东和广大公众观点很明确，他们认为一些公司被视为投资风险高，或无法减少它们的碳足迹。

对于企业信誉的潜在伤害是一个重要考量因素，但对于无法达成气候变化缓解预期的机构来说影响更为重大。近年来，有股东通过决议要求企业保证调整他们的做法，以适应碳受限的未来。在有些案例中，股东们甚至对企业董事提起正式诉讼。

对于寻求回应公众和投资人对企业活动的看法和股东质疑的机构来说，采用低碳技术是一个重要的解决方案。

对于二氧化碳排放严重的企业而言，采用CCS正好证明他们对该问题进行了有效管理，这也是改善他们的形象的有力手段。越来越多的大企业都计划投资CCS技术，彰显他们将减排纳入长期风险管理策略的决心。

CCS将会在企业ESG承诺中发挥巨大作用。

气候相关的财务披露工作组 (TCFD) – 制定一个披露气候变化影响的普适办法

TCFD由金融稳定委员会（FSB）于2015年成立，旨在制定一个框架，帮助机构披露气候变化对机构运作的影响。FSB要求由TCFD做披露，以“促使投资决策基于充足信息”，并进而“使股东更清楚地了解金融部门中与碳相关的资产密度和金融体系对气候相关风险的暴露程度”。

2017年发布的建议可协助企业确定和披露关键财务信息，以帮助广大金融投资界人士了解气候相关的风险和机遇。建议主要集中在以下四个领域:

- 治理
- 战略
- 风险管理
- 指标与目标

TCFD的建议已经得到世界很多机构的采用。2019年5月，工作组主席Michael Bloomberg在一次报告中提到，有超过800家公有和私有机构对工作组和工作组的工作表示支持，其中包括多家管理资产超过118万亿美元的国际金融公司。

CCS大使

佐伊 • 奈特

董事总经理 & 主任, 汇丰银行可持续金融中心

为实现净零排放的宏伟目标，需要多元化的清洁技术。IPCC、英国气候变化委员会和 IEA 等重要机构一直在强调 CCS对减排的重大意义。

我们需要在2040年前将规模扩大到超过2000座设施，因此我们没有时间可浪费。尽管注入新低碳技术的资金在不断增加，但速度尚未达到预期。如果公共部门能像处于早期部署阶段的可再生能源那样对CCS产业释放出支持信号，那么将有助于提升CCS市场的发展速度。

“我们需要在2040年前将规模扩大到超过2000座设施，因此我们没有时间可浪费。”

3.3
全球二氧化碳封存一览

从全球范围的估算来看，有大量封存资源可满足实现气变目标的最高要求。

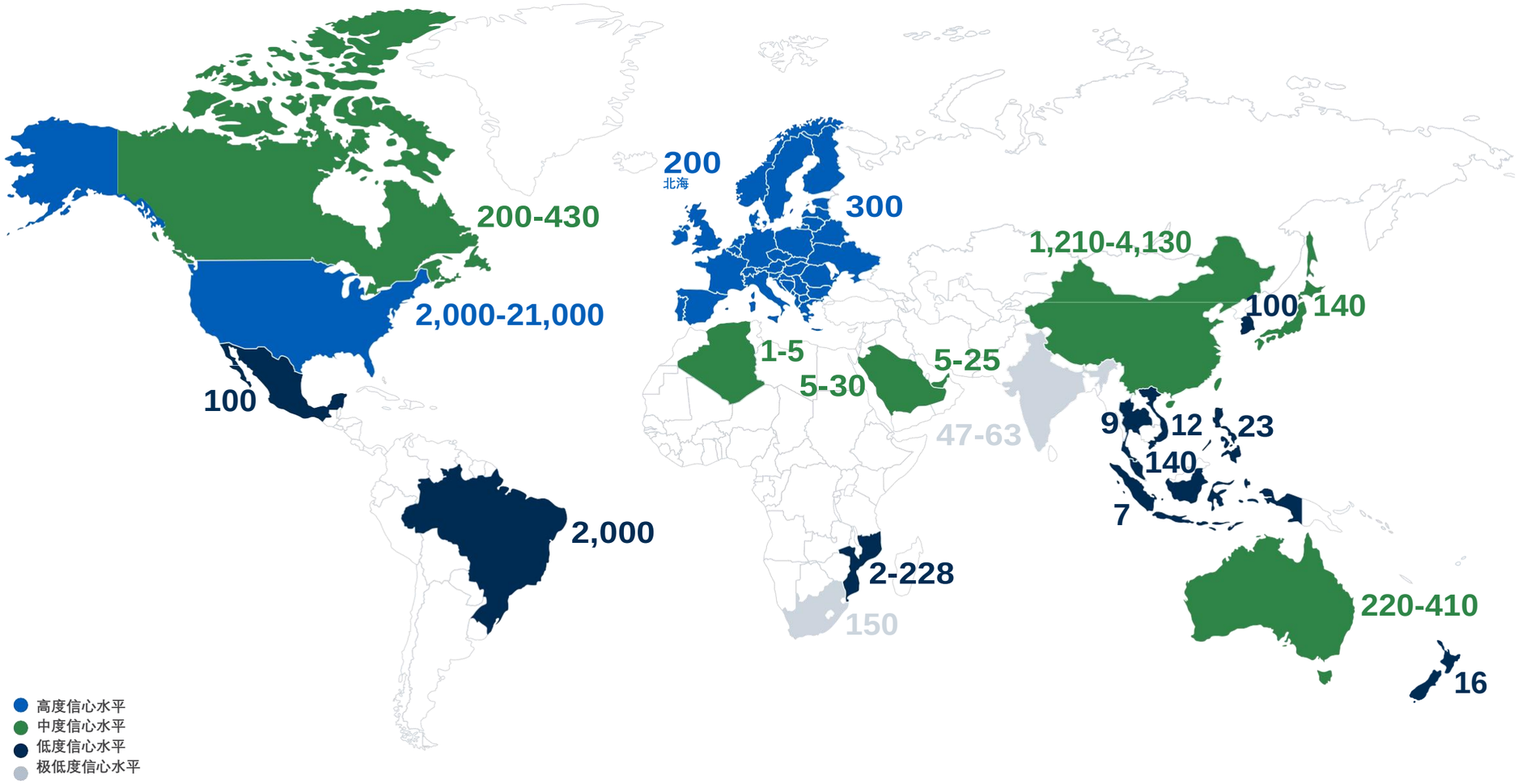


图 10 全球封存资源预估（十亿吨）[22]

亟需关注十亿吨级 CO_2封存

IPCC提出的气候路径模型预计到2100年要累计封存12000亿吨CO_2[23]才能实现气候目标。对于全球现有巨大的CO_2封存资源能否实现这一情景，目前存在高度信心。IEA的预测认为到2060年前必须每年封存23亿吨[24]。也就是说，CCS部署速度必须是上世纪石油产业发展速度的两倍以上[25]。

要实现每年数十亿吨CO_2封存量，全世界需要定性、评估和开发数千座封存点。IEA温室气体研发项目 (IEAGHG)[26] 估计到2050年每年大约要开发30-60座 封存点。加上负排放封存，这一数字将在2050–2100年之间翻倍。好消息是，从油气行业发展历史来看，只要商业上可行，就可以实现。根据IEAGHG:

- 在开发高峰期(2000-2010)每年有350个油气田被开发。
- 自1940以来，商业气藏的发现速度等于CO_2封存资源必须达到的开发速度。
- 用于开发CO_2封存点的钻机(用于钻勘探井和CO_2灌注井) 数量仅占钻机总数的20%。

在认识到CCS对于实现减排目标的重要性之后，不少国家已经落实计划寻找CO_2封存点:

- 美国正在确认可以封存5000万吨以上二氧化碳封存点。
- 挪威和英国都将要完成北海二氧化碳封存地层的重要公共数据库。
- 欧盟国家正在绘制封存岩层图册。
- 澳大利亚正在对全国各地封存点通过地震分析和岩心分析进行评估。
- 日本即将完成一轮海上钻井，对CO_2封存岩层进行测试。

监测对于满足社会期望至关重要

监测、测量和核查 (MMV) 对确保二氧化碳封存达到操作、法规要求以及公众期望发挥的作用非常关键。二氧化碳封存采用MMV 技术，并吸取油气行业和地下水行业的经验。MMV 项目的重点在于追踪封存岩层周围的二氧化碳、压力场和周边地质情况。地下水和地上监测在大多数MMV 项目中也很常见。

地震成像是确保烟羽保持预期行为的常用方法。通过反复3D地震成像，在一定条件下，可追踪烟羽穿过封存岩层。无源地震测量和井下地震测量得到越来越广泛的应用，以实现碳足迹最小化，降低部署成本，实现长期监测。

压力监测是最早使用的井下技术之一。通过监测岩层压力，操作员可确认二氧化碳的封堵。任何压力的微小改变都显示各项条件的改变。而且，监测周边岩层压力可以迅速探测出二氧化碳是否漏出封存岩层。除压力监测外，还有一系列地球化学测试，例如示踪物。地球物理测井工具也得到应用。总体来说，这些井下工具可以提供高分辨率一致性，并对二氧化碳进行核实。

地下监测的主要原因是为了满足社会期望。在一个具备典型特点的合适的封存点，二氧化碳泄露到达地表的可能性极低。因此，井下监测主要关注井口（遗留井或作业井）周围，因为井口是封存岩层和地表之间唯一的直接通道。地球化学分析测量土壤或地表水中二氧化碳水平上升。在海上，也采用地球化学采样，同时还用气泡探测系统和声纳来确认潜在泄露。取样自动化正在降低成本和监测的实际碳足迹。

在二氧化碳封存的第一波作业浪潮中，基于风险评估的MMV项目向监管者和利益相关者证明，二氧化碳封存是可预测的，是永久的。在很多情况下，作业方为证明一致性和核实二氧化碳使用的工具数量在逐渐减少。MMV的成本在不断降低，社区能理解二氧化碳封存的低风险性，同时工具和技术也变得越发精密。

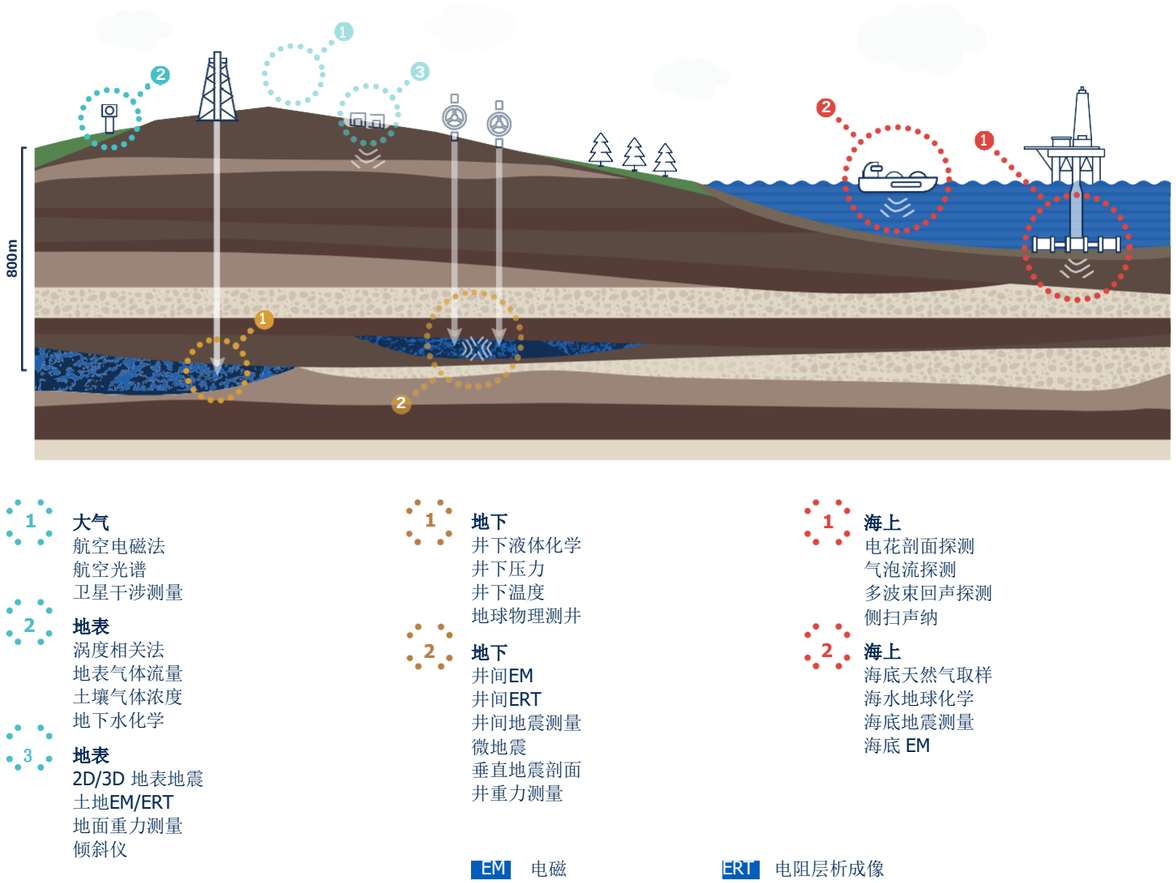


图11 选择CO_2封存设施现有监测技术图解

EOR 生产永久封存二氧化碳

迄今为止，超过2.6亿吨人类产生的二氧化碳被注入地下永久封存——大部分是通过EOR。这种增产方式在全球是一种标准的、成熟的、惯常使用的操作方式。必须强调的是，EOR并非适合所有油田。但是，如果二氧化碳适合于EOR，则流程如下:

1. 二氧化碳被注入油田岩层，在岩层中二氧化碳作为一种溶剂使石油膨胀，并将石油从岩石孔隙中驱出。
2. 一部分二氧化碳形成烟羽穿过岩层，即自由二氧化碳。随着与岩石接触增多，二氧化碳融入周围盐水中。有些被牢牢圈禁在孔隙中，即剩余捕集。同样的捕集机制发生在专用封存过程中。
3. 石油、盐水及其他液体形成混合物将剩余二氧化碳带至地表。随后二氧化碳从这些液体中被分离出来，经压缩与新的二氧化碳一起再次注入油田中，形成一种闭环，仅有微量无组织排放。

一个CO_2-EOR设施操作成本最高之出就是二氧化碳，所以几乎每一个分子都要被重新注入。二氧化碳的高昂成本意味着要在地面和油气藏中监测气体，确保二氧化碳被完全利用。最终，所有注入油藏用于EOR的二氧化碳都会被那些原来存有石油和其他液体的孔隙所捕集。

通过EOR永久封存二氧化碳可减少排放。根据IEA的估算，传统EOR作业期间，整个生命周期都有排放缓解，这包括使用产出的石油所产生的排放[27]。
如果政策激励到位，产业将以这种方式封存更多二氧化碳，超出优化中的流程的要求。

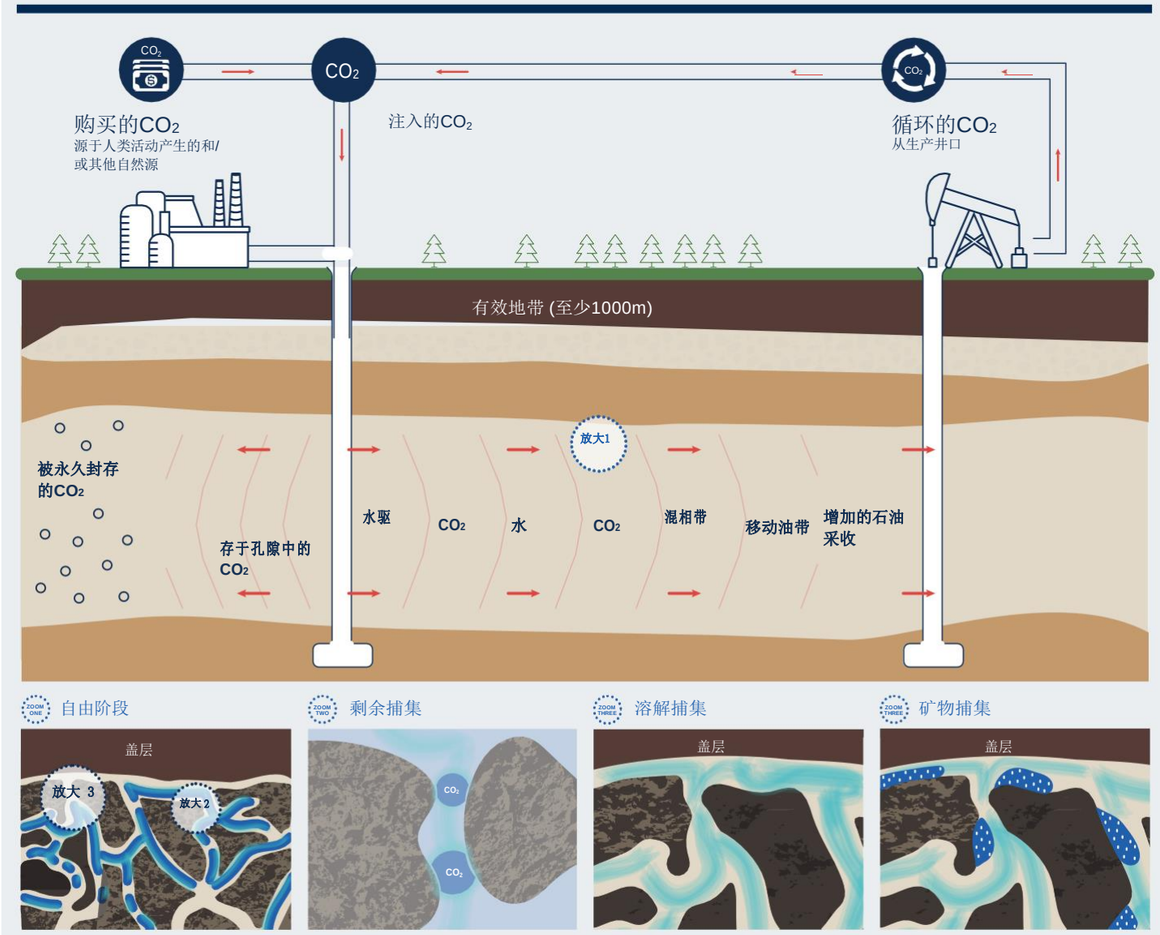


图12 CO_2 EOR和CO_2捕集机制原理

德比卡・那加布山

项目主任
脱碳化石能源
清洁空气工作组

美国国会通过45Q税收抵免这一里程碑式的CCUS政策之后，不到两年时间，就有很多项目启动开发。同一时期，出现了一个有趣的现象，各州和各发电企业竞相为自己制定零碳电力目标。

加州和纽约等州承诺实现零碳电力系统。美国供电比例占40%的电力企业承诺二氧化碳减排80-100%。

CCUS不仅对于实现上述目标将发挥重要作用，同时也有助于实现包括工业排放脱碳和充分利用零碳燃料等更大胆的目标。这影响着联邦政府和州政府落实更多CCUS促进政策。

首先，我们需要捕集技术价格更低，开发时间更短。这需要联邦经费来支持那些能带来巨大转变的技术的研发。

第二，我们需要金融上的激励，来促进CCUS商业部署。这可以使更多技术供应商提供标准化原件，减少定制设计需求，同时会出现更多熟悉CCUS并随时可以为项目融资的银行。

“如果我们能实现上述四类CCUS政策目标，那么我们至少还有机会实现本世纪中叶的气候目标。这才是当务之急。”

第三，我们要扩大CO_2管网和封存点，以便CO_2捕集项目可以轻松接入，这很像自助洗衣店连入现有供水和污水管线。

最后，采购授权、排放上限和能源标准等更广泛的气候政策必须涵盖CCUS,以促进更大规模的部署。

如果我们能实现上述四类CCUS政策目标，那么我们至少还有机会实现本世纪中叶的气候目标。这才是当务之急。

德比卡·那加布山
项目主任
脱碳化石能源
清洁空气工作组

迈克尔・杰拉德教授

Andrew Sabin 法学院专业实践教授, 哥伦比亚大学

IPCC的报告对比了全球平均升温1.5度和2.0度的世界，其中传达的信息很清楚，如果要避免气候变化最糟糕的影响，需要从大气中清除大量二氧化碳。另有近期的一些报告也得出相似结论。不过，清除二氧化碳只是一方面，我们还必须对其利用或封存。

因此，碳封存是应对气候危机的关键一环。虽然最理想的方法是减排并且要尽一切可能实现减排，然而仅仅如此还不够。此外，水泥和钢铁等大规模企业二氧化碳排放强度很高；在新的技术手段被开发和广泛应用之前，有必要对这些企业排放的二氧化碳进行捕集和再利用或封存。

碳捕集带来很多方面的挑战，包括技术、金融、法律和物流等等；如果要大规模推进，必须克服所有这些挑战。

3.4 法律和监管一览

政策制定者和项目倡导者都一致同意，务实清晰的立法和强有力的全球监管框架是CCS发挥其潜能的必要条件。美国加州《低碳燃料标准》（LCFS）（见4.2 区域状况一览：美洲）下的《CCS方案》（CCS Protocol）为制定一种可以解决作业者和广大公众关切的监管模式奠定了基础。不过总体而言，进展依然缓慢。许多地区甚至都没有对法律框架开展自我审查，而在一些已有体系中，进展甚至受到限制。这一切给那些寻求对CCS进行投资的人持续带来不确定性。

近几个月来，最值得关注的法律监管方面的进展是一项提案，该提案有助于解决在国际海洋协定中发现的一个关键障碍。《伦敦议定书》第6条对缔约方倾倒入海洋环境的垃圾出口进行治理。该议定书在无意中造成的一个后果就是，禁止了用于地质封存的CO_2的跨境运输。《伦敦议定书》缔约方于2009年通过了一份修订案以解决这一问题。但是，三分之二议定书缔约方必须通过国内立法使其生效。截至目前，只有挪威、英国、荷兰、芬兰、爱沙尼亚和伊朗已在国内立法通过。在10月初的《伦敦公约》大会上，《伦敦议定书》缔约方达成一致，允许对海床以下地质岩层的地质封存暂时实施《伦敦议定书》第6条的2009年修订案。

此决议不会形成一个先例，而只对那些选择暂时受修订案约束的缔约方有约束力。如果缔约方接受这一权宜之计，就可以提供更多法律条件支持运输二氧化碳用于CCS缓解排放。我们分析了第6条范围内潜在“热点”地区，如图13所示。“热点”代表跨境封存可能性高的地方，因为如果一个国家封存潜力有限，那么邻近地区可以代为封存该国的二氧化碳。如图13所示，全球各地通过航运跨境运输二氧化碳的机会很多，尤其在欧洲和亚洲。

根据欧洲立法，目前有些二氧化碳的运输方式仍然存在不确定性。欧盟排放交易体系(EU ETS) 已经通过修订案，将CO_2捕集、管线运输和CO_2地质封存涵盖在其活动范围内。对于被覆盖的装置而言，成功捕集并随后经管线运输进行地质封存的CO_2无需从应有的排放配额中扣除，并且还能享受EU ETS碳价优惠。然后该指令的适用范围狭窄，仅适用于通过管线输送的CO_2，而那些计划通过船只或卡车等其他方式运输CO_2的设施仍需要为这些排放支付成本。因此目前这个立法对那些想要通过不同方式（如火车和驳船）运输CO_2的设施来说造成了监管上的障碍。

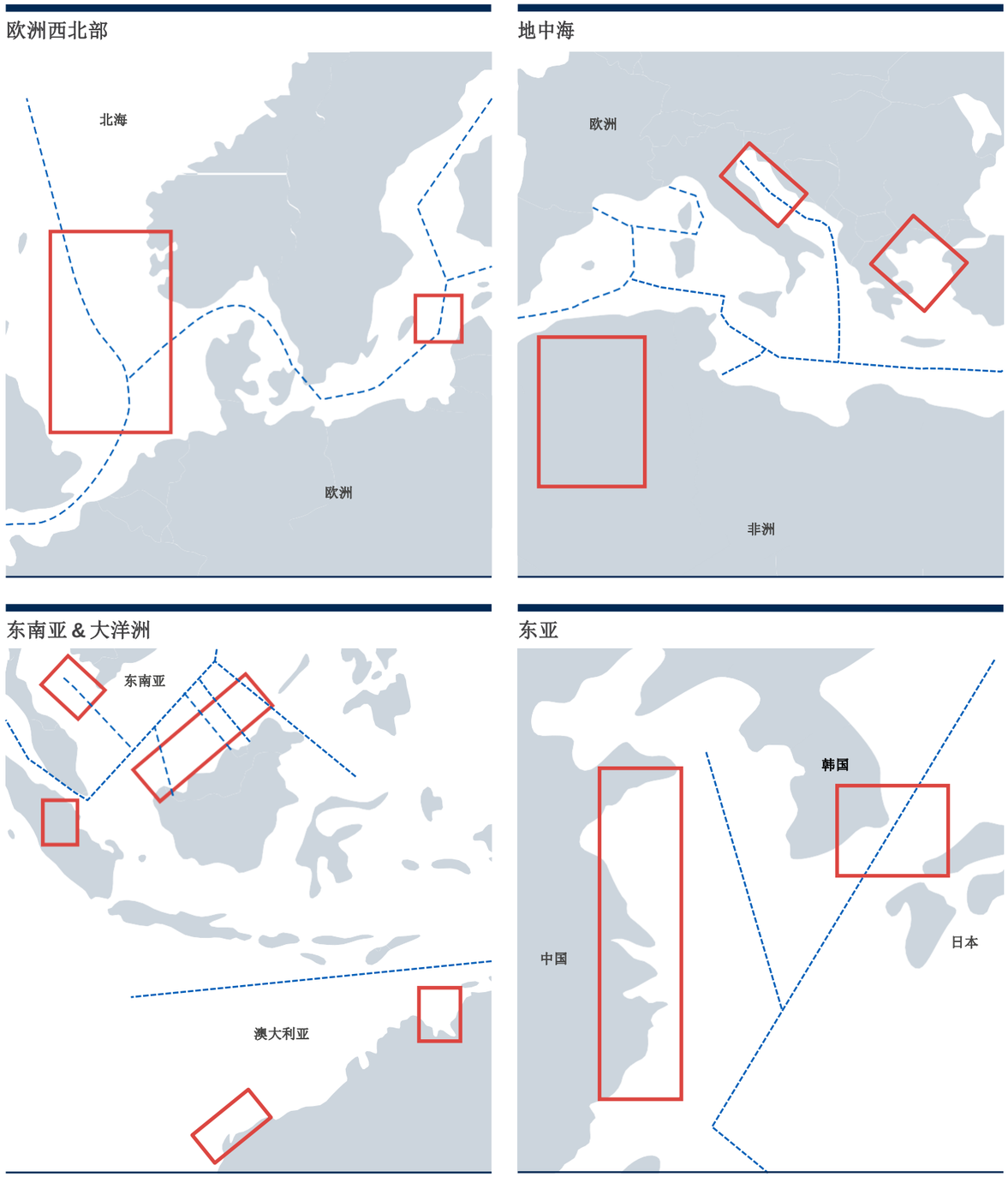
是否应对赔偿责任采取一种新方法?

赔偿责任常常被政策制定者、监管者和项目倡导者指出是CCS广泛部署的一个潜在阻碍。尽管近年来通过了各种针对CCS的详细框架，但赔偿责任仍然是一个全球议题。我们的《思想领导力报告》对这一问题进行了深入研究，我们对政策和立法进行分析，并采访了多位政策制定者、监管者、律师、项目倡导者以及保险业代表。报告《*经验与认知：针对CCS赔偿责任采取商业化手段*》得出结论认为，必须做出努力，消除认为赔偿责任会终止这一技术发展的普遍看法，增强公众和私营部门信心，让他们相信风险是可管控的。更加商业化的做法最终会让焦点从担忧转移到发现成功的做法和模式，进而消除广泛部署的其他障碍。

对于更加商业化的方式而言，以下举措很关键:

- 明确赔偿责任一词的真正含义是什么。尽管在CCS项目整个生命周期中都适用赔偿责任，但如果每个环节单独考虑，影响又各不相同。
- 研究解决温室气体排放/气候赔偿责任的选项，因为这对作业者和监管者都一样提出了独特挑战。
- 考虑政府和私营部门在分摊和管控风险以及最终的赔偿责任中所发挥的作用。目前的经验显示，有一些做法可以降低各方承受的影响并可支持项目部署。
- 加强与保险业的沟通。如果保险公司即将开发新产品协助作业者管理潜在赔偿责任，则有必要保持及时的、定期的沟通。
- 保证项目倡导者和监管者的密切有效对话。经验证明，交流沟通有助于双方明确立法的切实要求，或发现实际落实中模糊不清之处。

如需下载我们的报告《经验与认知：针对CCS赔偿责任采取商业化手段》，请访问以下网站：globalccsinstitute.com



潜在封存地点。这些区域为典型的适于二氧化碳封存的地点且位于海上或靠近海岸等理想位置。

象征性的标出领土边界

注：确定的封存地点并非完整油气藏，因此不代表实际封存油气藏

图13 热点地带：跨境封存可能性高的地点

4.0
区域现状一览

1.0 前言
1.1 关于全球碳捕集与封存研究院
1.2 关于本报告
1.3 缩写
1.4 CEO 寄语

2.0 应对气候挑战: 需要CCS

3.0 碳捕集与封存全球现状
3.1 全球CCS设施更新
3.2 撬动加速部署的政策杠杆
3.3 全球二氧化碳封存一览
3.4 法律和监管一览

4.0 区域现状一览
4.1 国际气候政策一览
4.2 美洲
4.3 欧洲
4.4 中东和中亚
4.5 亚太

5.0 CCS的发展: 技术及应用
5.1 天然气
5.2 氢
5.3 电力行业的CCS
5.4 生物质能结合CCS (BECCS)
5.5 直接空气捕集(DAC)
5.6 CO_2的利用
5.7 CCS的创新
5.8 向净零碳未来的产业转型

6.0 附件

7.0 参考文献

4.1
多国气候政策一览

IPCC SR15报告和近期一系列分析研究中都强调了CCS 在气候变化缓解中发挥的作用。目前有许多国际上的机制都蓄势待发，希冀对CCS 的广泛全球部署产生重大影响。这包括巴黎协定、绿色气候基金（GCF）和国际航空业的碳抵消体系等机制提出的捐款和协作性的方法。

根据巴黎协定，国家自主贡献（NDC）是各国强调使用CCS技术承诺的主要机会。截至目前，十个国家（巴林、中国、伊朗、伊拉克、马拉维、挪威、沙特阿拉伯、南非以及阿联酋）已做出承诺。CCS对大约50-60个国家近期发展具有相当重要的意义[28]，这些国家已准备好在接下来数十年使用该技术。其中有些国家之前对CCS表现出浓厚兴趣，但没有将其纳入NDC中。本研究院预期在下一周期有更多国家可以做到这一点。

巴黎协定缔约方受邀在2020年前向联合国气候变化框架公约（UNFCCC）提交长期温室气体排放发展战略。截至2019年8月，所搜集的13项策略中，有10项都包括CCS[29]。随着提交的策略越来越多，对于CCS在各国家和区域的长期减排计划中的地位，本研究院将获得一个更为清晰的图景。

巴黎协定第6条给各国提供了另一个支持广泛部署CCS的选项。目前就各国如何协作采取联合行动实现他们的目标，正进行谈判中。随着对CCS技术的关注越来越多，这一方法有可能帮助在发展中国家建设CCS项目。

UNFCCC认为技术转让是实现气候变化缓解和适应的关键机制。其技术执行委员针对未来4年制定的工作计划包括“新兴技术的作用”。该技术机制将致力于提升发展中国家的技术获取，而且IEA已经得出结论，最大规模的CCS部署必须在非OECD国家[30]开展。GCF在第一次正式充资的战略计划中，将CCS列为可以彻底转变能源和工业的技术之一。充资进程可谓取得开门红，十几个国家宣布将认捐金额翻倍，因此第一次正式充资总额已经超过上次2014年的认捐大会。

对于发展中国家的新建CCS项目而言，GCF是一个极佳的资金来源，因为它允许项目开发方以更低的、更可以承受的利率获得大量资金。

国际民用航空组织近期正在制定国际航空碳抵消和减排计划（CORSIA）。该计划旨在将国际航空二氧化碳排放稳定在2020年水平。规则手册尚在撰写中，但航空公司需要通过从其他部门购买国际信用额抵消他们自己的排放，或者自己采取措施。CCS业界将会紧密关注该行业，因为航空公司可能会从CCS项目购买，甚至开发自己的减排项目。

碳捕集、利用与封存(CCUS)受到日本G20峰会各国元首的认可

六月对于CCUS技术来说是一个政治氛围很好的月份。第一件喜讯便是轻井泽町G20可持续发展的能源转型和全球环境部长级会议公报中首次提到CCUS技术。

此后，在日本大阪举办的G20领导人峰会上，CCUS技术为能源转型提供的机遇得到了认可。CCUS以及氢能被纳入峰会联合声明中，这也是前所未有。

《声明》认可“所有能源和技术在能源结构中的作用以及各国实现清洁能源体系的不同国家路径”。声明指出，所有20 国元首:

... 认可进一步发展创新、清洁和高效的技术为能源转型带来的机遇，包括发展氢能和基于各国国情发展碳捕集、利用与封存（CCUS），并注意到‘碳循环’和‘排放价值’等相关工作。

缔约方重申将“发布、更新或维持我们的NDC，并将2020年前全球需要做处的努力纳入考量”，同时强调“要根据巴黎协定向发展中国家提供缓解和适应两方面的金融资源”。

本研究院期待在2020年利雅得G20峰会前看到更多进展。

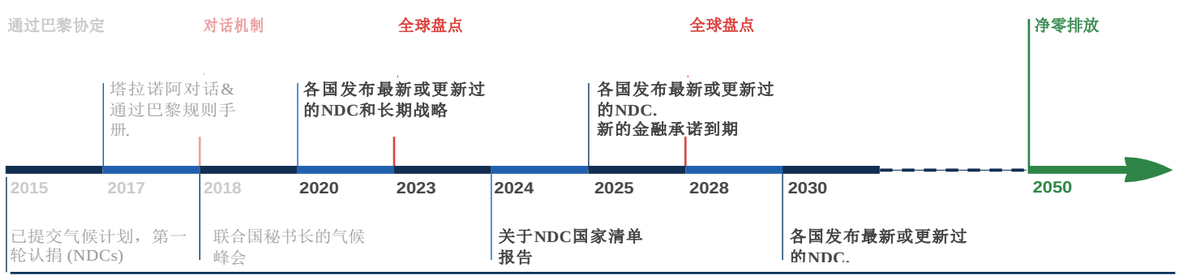


图 14 巴黎协定雄心机制[31]

法蒂赫 • 毕罗尔博士

国际能源署署长

IEA历来重视CCUS对于实现全球气候目标的关键作用。去年，全球能源需求增速达近十年新高，其中化石能源占增量的70%，同时导致能源相关的二氧化碳排放达到历史新高。事实上，30多年来，化石能源在全球能源结构中的占比一直维持在81%的水平不变。CCUS是一个连接当今能源体系现实状况与越发紧迫的减排需求之间的必要桥梁。它不仅能避免现有发电和工业设施排放的锁定，还能为碳清除或负排放奠定坚实基础。然而到目前为止，CCUS还有大部分潜力仍未释放出来。

伯特兰·皮卡德

太阳动力基金会主席

上世纪六十年代我在瑞士阿尔卑斯山度假时，当地村民都开车把垃圾倒在一座小溪流淌的山谷里。垃圾日夜焚烧，可怕的气味蔓延。但这一切在当时完全合法。为什么今天他们不再这么干了呢？因为今天禁止这么做。

人们不再往山谷倾倒垃圾，垃圾处置收费都是由垃圾回收、能源回收循环利用等新型产业带来的，这些产业既创造就业也创收。

那为什么企业还能随心所欲向大气排放呢？为什么不能采取不同的应对方法呢？

今天，我们必须扭转市场失灵。给碳定价，就能对捕集、减少或消除有害排放形成激励。这么做不是征收一种新税，而只是在修正一种长久存在的不公，同时在本世纪为市场打开环保大门。

> **“CCUS 是一个连接当今能源体系现实状况与越发紧迫的减排需求之间的必要桥梁。”**
>
> **法蒂赫 • 毕罗尔博士**
> 国际能源署署长

4.2 美洲

位于美洲的 CCS设施

全球19座大规模运行中 CCS设施有13座在本地区。

CO_2捕集

这些设施合计年二氧化碳捕集量为**2990万吨。**

CO_2 29.9 Mtpa

新一波设施浪潮

2019年，全球碳捕集与封存研究院在我们的数据库中添加了8座新建大规模设施。

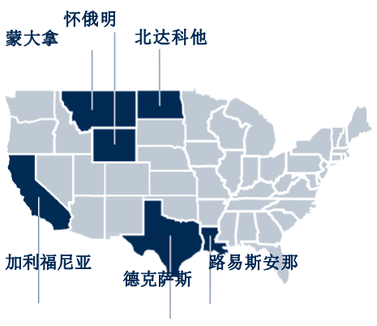
8 座 新建设施

推进CCS

在这一地区，CCS部署受到来自多方面的支持，**包括强有力的政策框架，充足的地质封存资源，来自各种背景的利益相关方的支持，以及私营部门丰富的专业知识。**

活跃州

在美国积极推动CCS 激励措施和进程的州有:**加利福尼亚、蒙大拿、德克萨斯、北达科他和怀俄明。**



美国的排放情况和CCS改变其状况的潜力...

电力行业在美国温室气体排放中占28%。2019年,本研究院在数据库中增加了三座电厂改造项目。投运后，将捕集**1030万吨 CO_2**。

10.30Mtpa CO_2
新增煤电改造捕集能力

工业部门占全美排放量

22%

其中包括乙醇和氨的生产以及天然气处理。虽然CO_2 捕集处于成本区间的低端，却是CCS的理想目标。

CH4

水泥和钢铁生产意味着更多机遇

美国关键政策

内部收益法**45Q税收抵免政策设立CO_2封存税收抵免。**

多个CCS支持性法案在2019年被引入包括USE IT法案。

加州LCFS是一个基于碳信用额的交易体系 适用于降低加州市场中燃料排放强度的 **CCS项目。**

CO_2 封存 税收抵免

区域发展状况

清洁能源部长会2019年在加拿大举行。加拿大投资2500万美元到直接空气捕获(DAC)。

$2500万 已投入

巴西封存>每年300万吨 CO_2。利益相关方关注推进 CCS在煤炭、天然气厂和乙醇行业的利用。

>3 Mtpa CO_2

世行 CCS信托基金**在墨西哥投资两座试点项目，**预计**2020年初**启动。

全世界有13座运行中的大规模CCS设施[32]在美洲。该地区的进展得益于强有力的政策框架，丰富的地质封存资源，来自各种背景的利益相关方的支持，以及私营部门丰富的专业知识。值得注意的是，美国议会持续积极推动相关技术。在这种大环境下，产业投资信心加强，CCS项目持续推出，进一步稳固该地区在全球的地位。

这一年实现了很多里程碑:

- 位于加拿大的壳牌公司 Quest设施突破400万吨CO_2捕集量。
- 8座位于美洲的新设施被加入本研究院的大规模CCS设施数据库，累计有10座处于不同开发阶段的项目。还有很多项目处在规划阶段，一些将于未来几年看到进展。
- 西方石油公司（Occidental Petroleum and Carbon Engineering）宣布第一个大规模直接空气捕集碳封存(DACCS) 项目。该项目产能每年100万吨，直接受益于美国联邦政府45Q 税收抵免政策和加州LCFS《CCS方案》的政策激励。
- 油气行业气候倡议(OGCI）透露将投资美国届时最大的专属地质封存项目—Wabash Valley Resources公司运营的制氨设施，可每年封存150万吨二氧化碳。

美国

内部收益法45Q联邦税收抵免为CO_2封存设立税收抵免。议会在2018年进一步扩展和提升，如果项目2024年前开工，则通过EOR永久封存的二氧化碳每吨可抵税35美元，而地质封存的二氧化碳每吨可抵税50美元。尽管被视为全球针对CCS 最先进的激励政策，但由于45Q尚未正式落实，哪些项目符合抵税资格仍然模糊不清。内部收益工作组受命落实工作，已经于2019年年中搜集了来自利益相关方的意见，预计最晚将于2020年年初制定一份指南。利益相关方正在寻求延长开工截至日期。

IPCC全球变暖1.5°C 报告促使立法者转变口径，推动气候讨论转向一个广受争议的解决办法。在美国通过45Q 抵税政策之后，2019年又引入一些法案。使用创新技术利用大量排放法案（USE IT）作为许多CCS 倡导者的优先事项，将为CO_2基础设施的许可流程和要求提供明确的解释。

其他法案则关于如何应对气电厂和工业设施排放以及如何优化激励机制和研发项目。

加州的LCFS是一个基于信用额的交易机制，旨在2030年前将本州交通燃料强度降低20%。自2019年1月起，该机制又将一个CCS修订案包含进来。最近平均交易价格在每吨二氧化碳194美元。信用额度适用于降低加州市场内燃料排放强度的CCS项目。世界各地的DACCS项目都在涵盖范围内，反应出事实上大气二氧化碳浓度已经是个跨国挑战。

在美国州一级的举措不胜枚举。在加州－向来被视为气候政策的标杆－通过零碳电力命令和2050年前实现碳中和的目标后，各州纷纷效仿。有六个州[33]目前在电力市场设定了100%无碳能源目标。蒙大拿、路易斯安那、德克萨斯和北达科他等州为CCS提供激励政策，而其他州如怀俄明则致力于大力推进CCS。

美国是全球推进CCS的领导者，将一如既往再接再厉。美国拥有绝佳机遇向世人证明CCS可以广泛电力和工业:

1. 电力行业约占全美温室气体排放的28%[34]。到2050年前，约一半的新增发电量将来自未经改良的化石能源火力发电厂[35]。这些资产预计运转寿命还有30多年的时间，极有可能到本世纪中叶锁定CO_2排放。天然气电厂处于早期阶段，正在不断增长。退役中的核电厂能提供超过60%[36]零碳电力，但仅有可能部分被零碳资源所替代。一份关于45Q抵税政策的分析指出，该政策可以激励煤电厂和气电厂改造，到2030年前可捕集4900万吨[37]二氧化碳。美国的CCS解决方案将为许多国家提供范本。在2019年，本研究院在我们的研究院数据库中(CO2RE.CO)添加了四座发电厂改造项目。
2. 美国工业部门占全美排放总量的22%。其中一部分排放源于乙醇生产、制氨或天然气处理，在这些部门CO_2捕集处于成本区间[38]的低端。这些设施是低成本CCS商业化和技术优化的理想目标。水泥和钢铁制造也是CO_2高排放源，不过也意味着更多机遇。

CO_2封存/利用类型	符合资质碳捕集厂的最小捕集量 按捕集量(千吨CO_2/年)			作业年获得的相关税收抵免水平 (USD/tCO_2)									
	电厂	其他工业设施	直接空气捕集	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	未来
专属地质封存	500	100	100	28	31	34	36	39	42	45	47	50	
EOR封存	500	100	100	17	19	22	24	26	28	31	33	35	指数关联
其他利用流程*	25	25	25	17	19	22	24	26	28	31	33	35	

*每个 CO_2源不能超过50万吨CO_2/年。税收抵免仅适用于证明可降低总体排放的那部分转化的 CO_2。

图15 45Q 税收抵免[39]

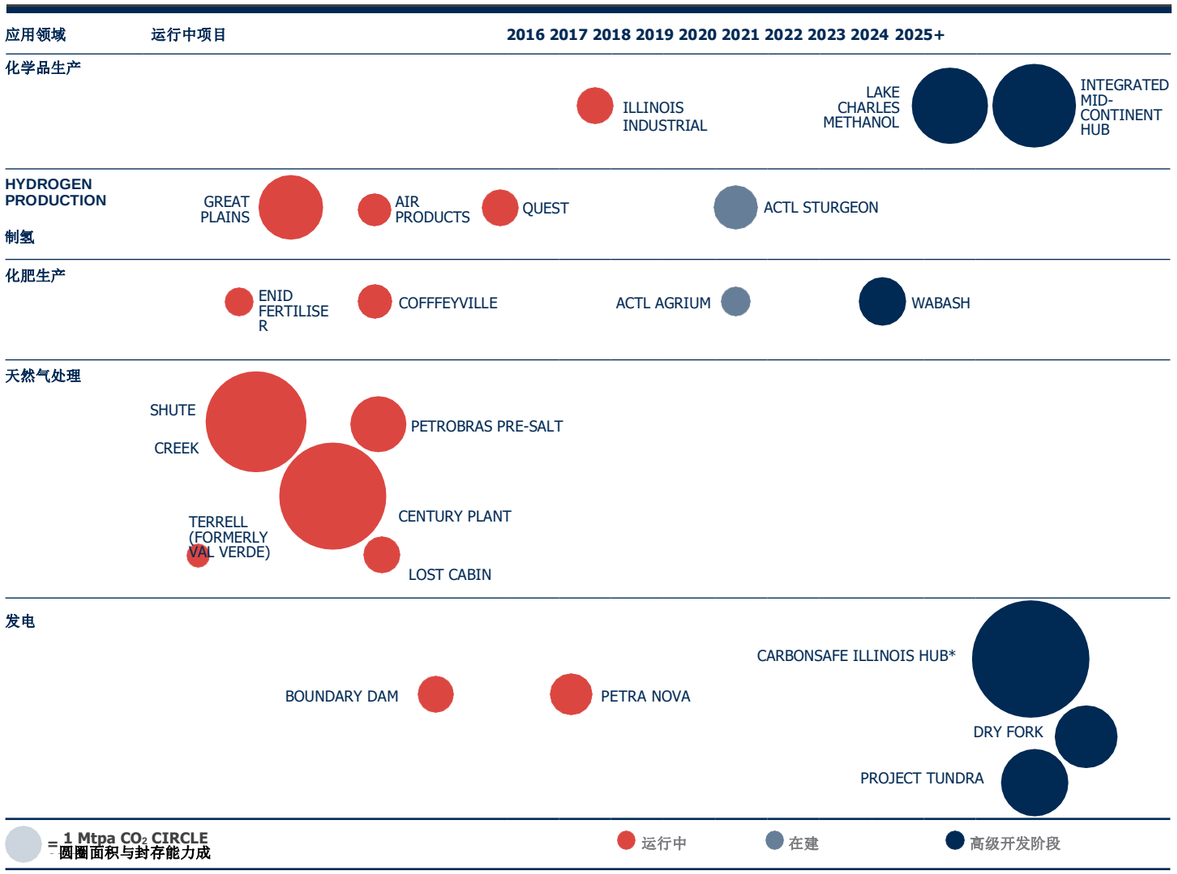


图 16 CCS设施的应用: 美洲

*圆圈面积与设施捕集能力成正比。表示设施的主要产业类型。

加拿大、中美和南美

整个美洲对于加速CCS部署的关注度仍然很高:

- 加拿大政府与BHP、西方石油公司以及雪佛龙通过加拿大战略创新基金，共同投资2500万美元到加拿大直接空气捕集(DAC)公司Carbon Engineering。
- 在巴西，巴西国家石油桑托斯盆地盐下油田CCS自2013起一直在分离天然气处理过程中产生的CO_2，目前每年封存300万吨。捕集的CO_2被直接注入Lula、Sapinhoá 和Lapa油田，用于提高采收率。利益相关方非常希望加速CCS利用，主要用于煤电和气电厂以及乙醇生产。
- 世行CCS信托基金在墨西哥投资的两座CCS试点项目正在稳步推进，即CO_2捕集试点项目 (CCPP)和CO_2 EOR和封存试点项目(CESP)。大部分规划和开工前详细探查工作已经结束，这些项目预计2020年初启动。

工业、交通和能源政策在全面气候行动之下有可能融合，推动政府倡议和政策创新支持CCS。现在必须集中精力让这些政策落地。

上图: 美国Petra Nova碳捕集项目
右图: 加拿大Quest 设施
图片来源：壳牌

	直接空气捕集项目	油气生产设施中的CCS项目	精炼设施中的CCS项目	所有其他 CCS项目 (如乙醇厂中的CCS项目)
CCS项目地点	全球任何地点	任何地点，只要在加州销售交通运输用燃料	任何地点，只要在加州销售交通运输用燃料	任何地点，只要在加州销售交通运输用燃料
封存点	陆地盐水层或枯竭油气藏或用于CO_2 EOR的油气藏			
信用配额方法	以项目为基础	根据创新原油供应，以项目为基础	根据精炼厂投资信用项目，以项目为基础	以项目为基础或燃料路径
现有项目符合资质的最早日期	任何时间	2010	2016	任何时间
要求	项目必须满足CCS 修订案规定的要求			
其他限制	无	必须实现最低 CI 或减排	无	无

图17 根据加州低碳燃料标准有资格获得信用配额的不同类型 CCS项目[40]

CCS大使

牛顿·B.·琼斯

国际锅炉制造商协会主席

“通过基于实际情况将可再生能源和自然资源进行整合，CCUS是唯一可以真正缓解气候变化的解决方案。”

CCUS是解答气候变化的全球答案。通过基于实际情况将可再生能源和自然资源进行整合，CCUS是唯一可以真正缓解气候变化的解决方案。CCUS可以提供可靠能源生产，同时保障和创造就业，促进经济增长，维持社会稳定。

虽然CCUS终于获得有限的关注，但我们所触及的主流关注尚不足以吸引立法机构的大力支持来确保政府政策和激励措施到位并能推进产业对CCUS加速投资。

现在亟需让可行的CCUS项目运转起来。国际锅炉制造商协会将全力以赴，集体发声，倡导发展CCUS，因为它是通往清洁能源未来的桥梁，也是保护我们的生活方式和我们的星球的正确解决方案。

4.3 欧洲

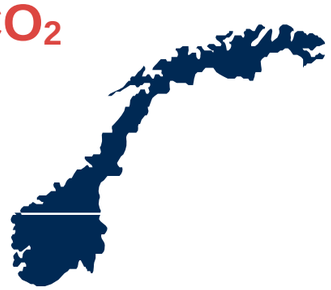
欧洲CCS设施

挪威两座大规模CCS设施运行中，**年CO_2**捕集和封存量达**170万吨。**

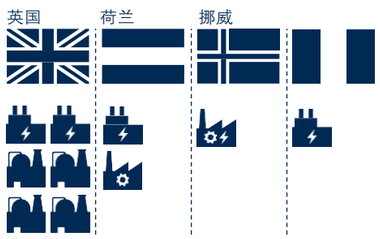
10 座大规模CCS设施，分别处于不同开发阶段 (英国6座，荷兰2座，挪威1座，爱尔兰1座) 一旦投运，这些设施将捕集2080万吨CO_2。

水泥、发电、垃圾发电和制氢行业中运行中或开发中的CCS设施。

1.7 Mtpa CO_2



20.8 Mtpa CO_2



封存

欧洲有3000亿吨CO_2的地质封存空间*

300Gt

政策

CCS 是欧盟委员会2050气候中和欧洲愿景的七大基石之一。

2050

CCS的贡献到**2050年前每年在5200万吨-6.06亿吨二氧化碳**之间，足以证明CCS能够支持欧洲实现气候中和经济的路径。

52 $MtCO_2$

606 $MtCO_2$

融资

欧洲创新基金；**欧洲最大的CCS基金 – 有望到位100亿欧元****

EU可持续投资分类可为推进CCS发挥重要作用。

€10B

枢纽和集群

大部分欧洲的CCS设施都规划成枢纽和集群

工业设施集群而不是单一来源捕集二氧化碳，**用二氧化碳运输的共享基础设施和封存网络，降低整个CCS价值链的单位成本。**

*高信心
**基于2020-2030ETS配额拍卖数达4.5亿，碳价为€22欧元

2018年11月，欧洲委员会发布了2050年气候中和欧洲的愿景：一个清洁的地球–关于繁荣、现代、充满竞争力和碳中和经济的欧洲战略远景[41]。CCS是这一战略的七大基石之一，在所有提出的情景中，CCS的贡献到2050年前每年在5200万吨-6.06亿吨二氧化碳之间，足以证明CCS能够支持欧洲实现气候中和经济的路径。该战略的各个场景主要依靠CCS实现工业脱碳，通过BECCS实现负排放和低碳制氢。

关于欧洲2050年目标的讨论已经从是否要'实现转向如何实现。这一转变再次激发对CCS这一气候解决方案所必须的减排技术的关注。欧盟的长期战略应该在接下来几个月通过，随后将在2020年初根据巴黎气候协定要求提交UNFCCC。

欧盟成员国根据能源联盟监管治理条例编写2021-2031国家能源和气候计划(NECP)草案。各国综合检视了本国能源和气候目标，打破两者之间的隔阂。尽管许多国家的NECP都反映了CCS，但是通常对这些技术的部署方式和规模没有详细措施。2019年年底应该提交NECP最终版并应反映所有进行中和/或计划中的项目活动，同时应该重点指出具有强大减排潜力的CCS的应用领域。

欧盟排放交易体系（EU ETS）于2018年完成最新审查，加强了市场稳定储备这一减少排放配额盈余的机制，加快了减排步伐。从2021年起，排放配额总数将以每年2.2％的速度下降，而目前为1.74％。这次审查进一步稳定了碳价。碳价基本在2019年全年都在25欧元上下波动。在2018年修订版中添加了另一个要素，即设立100亿欧元的创新基金。目前该基金进展顺利，已有几个CCS项目将准备借助该基金的资源。

除了气候和能源政策外，欧洲可持续金融这一有助于引导资金流入更广泛CCS部署的领域也取得重大进展。欧盟理事会、欧洲议会和欧共体目前正在就欧盟可持续投资分类[42]进行谈判，这将为金融体系各方创造一种通用语言，引导公共和私人资本转向可持续投资。欧盟分类法[43]的技术报告对可以为缓解气候变化做出重要贡献的活动制定了技术筛选标准。CCS在诸多地方都被重点强调。如果该技术标准和政治谈判的结果沿着现有路径推进的话，可持续投资分类法将推动整个欧盟乃至全球范围内对CCS的机构型投资。

挪威、英国和荷兰早就是CCS的坚定支持者。也有越来越多的国家对CCS技术表现出浓厚兴趣。最重要的是，由于德国总理默克尔在2019年5月确认必须在本世纪中叶之前实现气候中和，CCS成为整个德国的热点话题。目前正处在开发阶段的三个 CCS 设施 – 英国 Teesside 净零项目、荷兰鹿特丹港（PORTHOS）以及ATHOS（比利时/荷兰）–未来项目扩建后，都将德国视为CO_2来源[44]。

创新基金

创新基金是欧洲最大的 CCS基金。它为能源密集型行业的创新低碳技术和工艺、CCUS，可再生能源和储能项目提供资金。2020年至2030年间，如果碳价达22欧元，ETS配额拍卖数达4.5亿，届时预计可筹措100亿欧元的资金。

创新基金的经费可以与其他资金来源结合使用，例如“地平线欧洲”或“连接欧洲基金”等欧洲的基金以及国家计划或私人资本。

40%的经费将会基于前期设定的里程碑在项目准备阶段支付。

剩余60%与创新挂钩，以减排核实结果为基础，支付可以持续长达10年的时间。创新基金简明灵活，协调各方合力，管理精简，这都是吸取NER300计划经验教训的成果。

第一轮提案申请将于2020年开启，之后将定期开放申请。一些计划中的CCS设施已经准备递交提案。

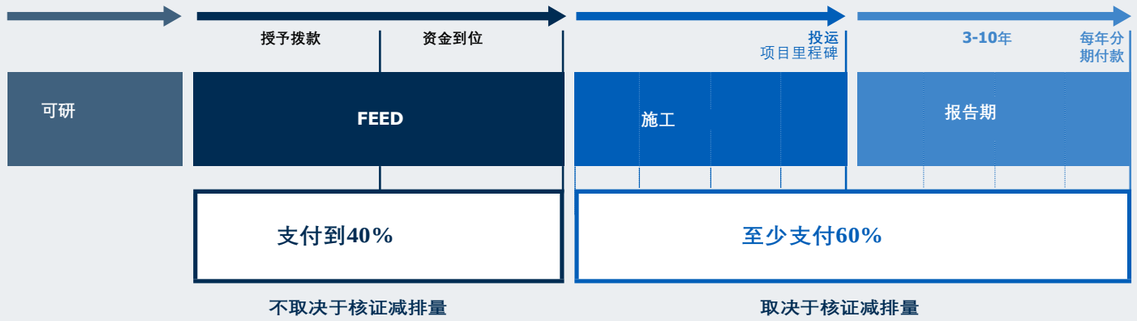


图18 基于里程碑付款[45]

除挪威的两座运行中项目之外，挪威的全面项目和荷兰的PORTHOS是正在开发的最先进的欧洲CCS项目。预计两个项目都将在2020-21年达成最终投资决定并在2023-24年投运。它们提供开放的运输和封存基础设施，并在去年与有兴趣使用该共享基础设施的本地区排放企业进行了接触。第三方二氧化碳封存也是一个越来越具有吸引力的商业机会。

其他分处于不同开发阶段的欧洲项目有:

- ATHOS项目- 一个由Gasunie、Energie Beheer Nederland B.V. (EBN)、阿姆斯特丹港以及 Tata Steel组成的联合项目- 于十月完成了在北海运河区域的可行性研究，证明CCUS网络的技术可行性，能帮助该区域的企业在2030年前每年减排750万吨二氧化碳。
- 英国的Teesside集群获得了OGCI气候投资的支持。配备CCS的商业规模燃气发电厂有望成为该集群的锚定项目，现命名为净零Teesside （Net Zero Teesside）。
- 英国最大的3.8GW发电厂Drax[46]进行了C-Capture的无胺捕集技术的试点测试。
  通过捕集生物质燃烧产生的排放，这一重要的项目可以实现大规模负排放。英国电力公司Drax、挪威石油公司艾基挪（Equinor）和英国国家电网公司（National Grid Ventures）于2019年5月宣布计划在恒伯（Humber）工业区周边开发一个净零CCS和制氢集群，称为零碳恒伯（Zero Carbon Humber）。

欧洲现有的和正在开发的项目都依赖于海上二氧化碳封存，从而避免了公众对陆上封存的抵制。一些项目计划重新利用油气基础设施，改善项目的经济性并利用已知地质资源。例如，爱尔兰的艾尔维亚·科克（Ervia Cork）CCS项目预计将利用金塞尔（Kinsale）地区枯竭的海上气田和基础设施来封存由两个联合循环燃气轮机和附近工业产生的二氧化碳。

对于希望对交通、工业工艺和家庭供暖等关键行业进行脱碳的欧洲国家来说，氢能在这些国家的战略中发挥着越来越重要的作用。不少CCS项目通过天然气的蒸汽甲烷重整来制氢，同时吸收和封存相关的二氧化碳。苏格兰圣弗格斯（St Fergus）天然气码头的Acorn CCS和氢气项目是一项引人注目的计划。英国约有35%的天然气从这里登陆运输，这里是将氢气引入国家管网为天然气脱碳的理想地点[47]。

挪威Sleipner油田无人机 2019,
图片来源：Equinor.

欧洲的枢纽和集群[48]

过去的十年中，欧洲CCS项目的规划方式发生了很大变化。过去聚焦的是建立全链解决方案，即一个排放源从运输管道到封存点都自己建设。现在，大多数项目都被规划成枢纽和集群。

从工业设施集群而不是单一来源捕集二氧化碳，利用二氧化碳运输的共享基础设施和封存网络，将降低整个CCS价值链的单位成本。
对第三方二氧化碳运输提供开放的网络，可以强化规模经济。混合使用包括管道和轮船以及火车和卡车等运输工具，可以灵活进入工业集群周围的各种二氧化碳源。几个主要工业区正在计划开发CCS集群:

- 荷兰 – 鹿特丹港 和阿姆斯特丹港
- 比利时 – 安特卫普港（Port of Antwerp）
- 英国 – 恒伯和 Teesside

德国鲁尔（Ruhr）工业区有望从荷兰边境开发的CCS项目中受益。

ALIGN-CCUS项目由多个合作伙伴投资，旨在[49]推动到2025年将六个欧洲工业区转变为经济强劲的低碳中心。该项目将为通过CCUS发展低排放产业群规划蓝图，并评估二氧化碳集群发展的商业模式，包括公私伙伴关系（PPP）。

未来几年，要消除欧盟排放交易体系下非管道二氧化碳输送的监管障碍，使欧洲充分受益于枢纽和集群提供的规模经济效应（更多信息，请参见第3.4节）。

荷兰鹿特丹港
图片来源：鹿特丹港务局

挪威继续推动欧洲的CCS雄心壮志

挪威是全球CCS发展的领先国家，在过去20年中地质封存的二氧化碳超过2000万吨。Sleipner和Snøhvit两个项目是世界上第一批CO_2海上封存项目，并且是欧洲唯一运行中的大规模CCS设施。

一个规划中的大规模CCS项目将涉及在多个工业设施中捕集CO_2，然后将其运输并封存。该设施由挪威国家石油公司与壳牌和道达尔合作共同运营，与其他项目不同，该项目将使用船运为整个西北欧的大规模来源封存二氧化碳。该项目的运输和封存环节- Northern Lights –为开放基础设施。

挪威初期的二氧化碳来源-Fortum的奥斯陆瓦尔梅（Oslo Varme）废料发电厂和海德堡水泥公司（Heidelberg Cement）在布雷维克（Brevik）的Norcem水泥厂–进行了FEED研究和现场测试。钻探活动即将开始，以研究挪威大陆架中Johansen地层二氧化碳封存的适用性和封存能力。

基于其在CCS方面的经验，挪威政府希望借助该项目推动CCS在欧洲更广泛部署。海洋运输的使用意味着整个西欧都可以通过北极光项目来封存和运输二氧化碳。

挪威政府于九月联合欧盟委员会在奥斯陆召开了CCS高级别会议。在会议期间，挪威国家石油公司代表北极光项目合作伙伴与以下各方签订了CCUS价值链开发协议：

- Air Liquide
- ArcelorMittal
- Ervia
- Fortum Oyj
- HeidelbergCement AG
- Preem
- Stockholm Exergi

协议各方将就CO_2处理和运输至北极光展开合作。

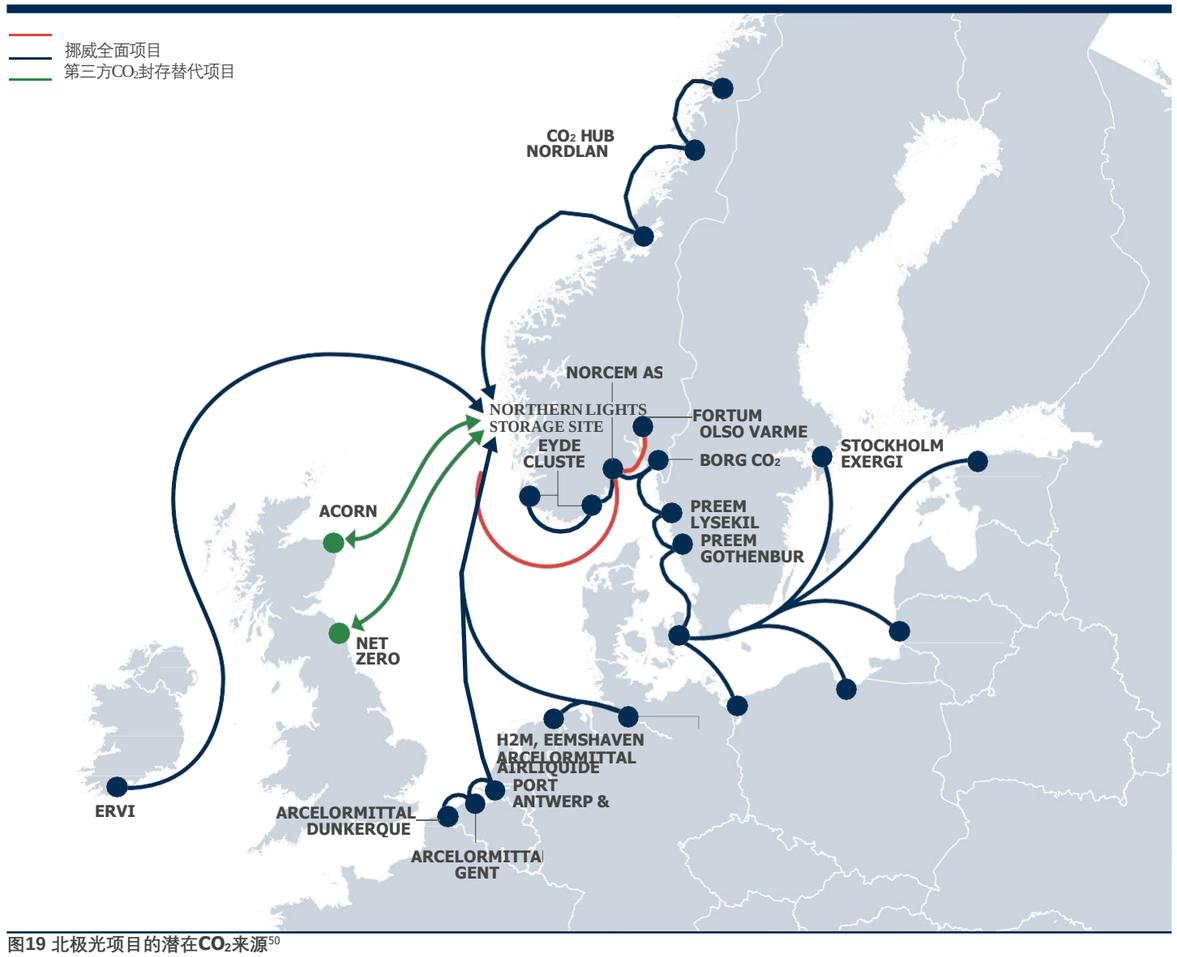


图19 北极光项目的潜在CO_2来源[50]

英国的CCS发展

2018年11月，英国政府发布《英国碳捕集、利用与封存部署路径：一项行动计划》。今年，根据英国气候变化委员建议，英国通过2050年实现净零排放目标的立法。“净零排放”报告高度强调CCS的价值，气候变化委员会在该报告中认为该技术为“必要技术”，而非“选项之一”。

英国正在努力实现概念行动计划设定的目标，并有望实现2025年前后开始部署英国第一座CCUS设施的愿望:

- 3月，CCUS顾问小组成立，该小组吸纳来自工业、金融和法律领域的专家，审议英国在CCUS方面所面临的挑战该小组的工作以一份报告收官，即《英国CCUS发展的投资框架》。
- 政府在7月做了一次意见征集，调查了适合CCUS的商业模式。所提出的商业模式使用不同的机制，支持电力、工业和制氢等行业的碳捕集，并联合考虑运输和封存。
- 由于英国的许多石油和天然气资产经济寿命已接近尽头，因此第二次意见征集着眼于重新利用其基础设施的可能性。改造基础设施可以延迟退役，同时大幅降低运输和封存成本，这是一些已经备案的英国CCUS项目将采用的选项。

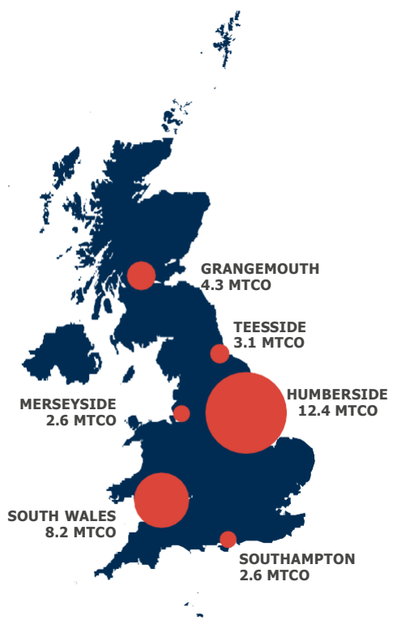


图20英国工业排放枢纽和集群

在波兰举行的2018年联合国气候变化大会（COP24）上，英国政府分享了其领先世界的宏大计划，即到2040年开发出第一个“净零碳排放”产业集群。在高达1.7亿英镑的支持下，这一声明一经发出，立即激发英国集群发展。制氢是一个共同特征:

- Teesside净零计划在英格兰东北部开发一个工业集群。该集群是OGCI CCUS先驱计划（CCUS KickStarter）支持的五个全球CCUS枢纽之一。该集群计划每年从一个气电厂和其他工业来源捕集高达600万吨二氧化碳，并有望在2030年前全面投入运营。
- 零碳恒伯项目是一个设立在英格兰恒伯地区的零碳产业集群合作项目。BECCS项目的试点测试正在英国最大的电站Drax进行，并且计划在周边地区建设制氢和CCS网络。图21为该项目的预期时间表，预计最终每年将减少逾1000万吨二氧化碳[51]。
- Acorn项目计划在苏格兰圣弗格斯（St Fergus）建立一座大型氢气和CCS枢纽。英国35%的天然气在这里登陆，是将氢气直接引入管网的最佳地点。该项目在2018年底取得重大进展，获得英国石油和天然气管理局(英国独立监督机构和近海二氧化碳封存许可证颁发机构）的第一份二氧化碳评估和封存许可证。

在这些重大项目开发的同时，英国的一些极具创新精神的公司还在继续开发CCUS新技术，两个成功的例子是:

- C-Capture开发了非胺基捕集技术，当前正在Drax测试。
- 凭借其专利技术CDRMax，Carbon Clean Solutions（清洁碳解决方案）被选为印度全球最大的水泥基碳捕集项目。

苏格兰即将举办COP26，接下来的一年英国必将在 CCUS方面取得长足进展。

英国圣弗格斯.
图片来源: 北海中游伙伴(NSMP).

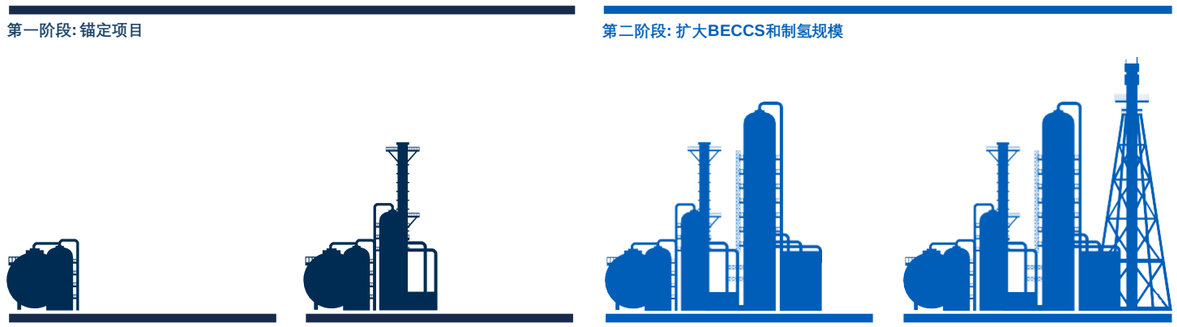


图21 零碳恒伯项目时间表

CCS 大使

阿拉德 • 卡斯特林

鹿特丹港口CEO

“到2030年, 预计每年封存200万-500万吨CO_2。”

鹿特丹正在开展一个独特的CCS项目。该项目的概念是基于一条长达30公里贯穿鹿特丹港口和工业区的管道。

该管道可作为各工业项目直接接入的基础设施。以处置在其设施中捕集的二氧化碳。这些二氧化碳将被输送到离岸20-25公里外北海海下枯竭气田。到2030年，预计每年将封存200万-500万吨二氧化碳。

目前计划在2020年与鹿特丹的一些行业达成最终协议。与此同时，荷兰政府正在制定一项补贴方案，以帮助消除欧盟排放交易体系和CCS之间的成本差异。该体系计划于2023年底投入运行，此后，还将连接鹿特丹外的二氧化碳源，例如荷兰、安特卫普或德国鲁尔地区。

鹿特丹的这个CCS项目将服务于两个主要目标。首先，将大大减少CO_2排放；其次，由于企业可以接入CCS基础设施，鹿特丹的投资氛围将得到极大改善。

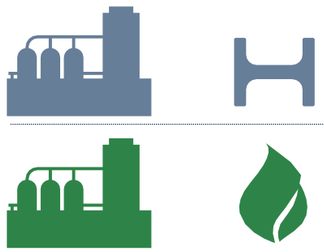
4.4
中东和中亚

一览

每年捕集**160万吨**CO_2

该地区有广泛可获取的地下封存潜力，高达**50-300亿吨***

2座大规模CCS设施运行中: **1座在钢铁厂，1座在天然气处理厂**



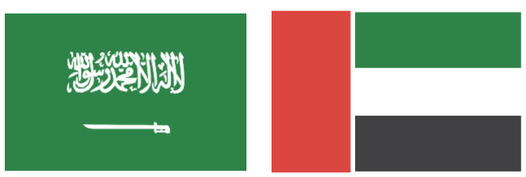
氢能机遇

在中东使用CCS从天然气中实现低碳制氢的成本估计仅为**USD1.50/kg**

1.5美元/公斤

政策与CCS进展

沙特阿拉伯和阿联酋是Mission Innovation和清洁能源部长级会议成员。

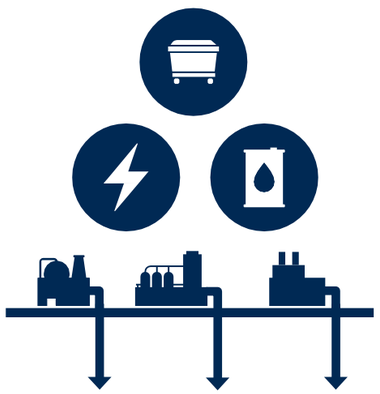


两国均承诺在**清洁能源研发方面将公共投资增加一倍**，并且将参加**清洁能源部长级会议的CCUS倡议**。

中亚

由于人口不断增长，生活水平不断提高，城市化进程加快，能源需求正快速增长，而不断增长的能源需求主要通过化石燃料储备来满足。

实现该地区能源系统的脱碳将是实现全球气候目标的关键。**CCS能发挥重要作用。**



*中等信心水平

中东

在工业部门增长，发电需求上升，石化工业增长的推动下，中东的天然气需求预计将继续增长[52]。该地区各国越来越意识到，需要实现石油和天然气生产脱碳，同时必须向新能源经济转移。CCS在中东可以发挥重要作用，可以支持能源需求，推动向清洁能源的过渡。中东拥有广阔而可及的地下CO_2封存潜力[53]，具有成本竞争力的天然气资源[54]和产能过剩的制氢设施，因此中东有潜力成为CCS开发和部署的枢纽。该地区还可以利用其地理位置、天然气资源和岩层孔隙空间来发展清洁的氢气出口产业。在中东，使用CCS从天然气中清洁制氢的成本估计为1.55美元/千克H_2[55]。

沙特阿拉伯和阿联酋（UAE）在该地区的努力中发挥领导作用，各自主管由国有企业支持和运营大规模CCS设施。阿布扎比从钢铁生产中捕集二氧化碳。沙特阿拉伯的乌斯曼尼亚从天然气处理中捕集二氧化碳。两者都提供二氧化碳以提高石油采收率。

阿布扎比国家石油公司（ADNOC）最近宣布，将加大力度，争取到2023年将排放量减少10%。CCS将发挥作用[56]。在接下来的十年中，ADNOC的目标是将CCS的部署规模扩大六倍，到2030年将捕集500万吨二氧化碳，主要从HabshanBab工厂或Shah工厂的排放中捕集二氧化碳[57]。

2019年10月，卡塔尔这个全球第二大LNG[58]出口国宣布计划在2025[59]之前从LNG设施中捕集和封存500万吨二氧化碳。卡塔尔石油公司宣布在工业中心Ras Laffan的一座设施的年封存潜力将达210万吨，这可能成为中东和北非地区最大的CCS设施[60]，捕集的二氧化碳将用于提高采收率。

沙特阿拉伯和阿联酋是Mission Innovation和清洁能源部长级会议成员。两国均承诺在清洁能源研发方面将公共投资增加一倍，并且将参加清洁能源部长级会议的CCUS倡议。

.

中亚

在中亚，由于人口不断增长，生活水平不断提高，城市化进程加快，能源需求正快速增长，而不断增长的能源需求主要通过丰富而廉价的化石燃料储备来满足。对于哈萨克斯坦和土库曼斯坦等许多国家而言，能源生产是经济的核心，这些国家高度依赖化石燃料。作为世界上一些能源强度最高的经济体的所在地，实现该地区能源系统的脱碳将是实现全球气候目标的关键。

对于该地区的几个国家，CCS可以在支持能源脱碳方面发挥作用。例如，在哈萨克斯坦，煤炭、石油和天然气占该国一次能源供应量的98%[61]。鉴于其大量的煤炭储量和对采矿的高度依赖，该国非常关注CCS。自然资源公司欧亚资源集团（ERG）目前正在探索如何使用CCS减少其化石燃料发电厂的排放。初步研究的重点是看是否可以改造一座燃煤电厂并实现每年200万吨的捕集量。如果成功，ERG将建设和运营一个试点捕集工厂。

在接下来的十年中，阿布扎比国家石油公司的目标是将CCS的部署规模扩大六倍，到2030年将捕集500万吨二氧化碳。

4.5 亚太

排放状况

由于高度依赖化石燃料，亚太地区占全球二氧化碳排放总量的一半以上。

以中国和印度为首，亚太地区经济体还生产了世界一半以上排放量最高的产品， 例如钢铁和水泥。

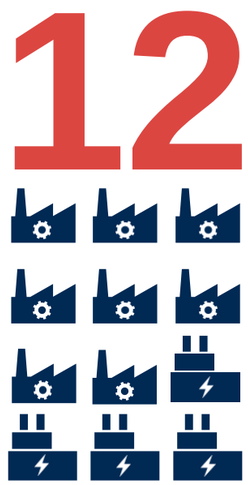
2017年，亚太地区占全球煤炭消费总量的72%。

有3520亿瓦的燃煤电厂正在建设中或正在规划中。

352 GW

CCS

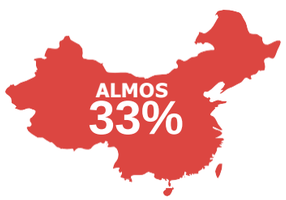
该地区共有12座大规模设施分别处于运行中阶段或其他不同开发阶段。



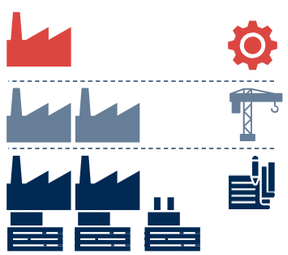
中国

中国的CO_2排放量占全球总量的三分之一。

中国在整个亚太地区是CCS的先驱。



有一座大规模设施运行中，两座设施施工中，五座设施在早期开发阶段。



澳大利亚

2019年开启世界第19座大规模CCS项目，开创澳大利亚本土先例。

一旦全面投运，高更将是世界最大的专门用于地质封存的设施。

世界第19座大规模 CCS项目

3.4-4 Mtpa

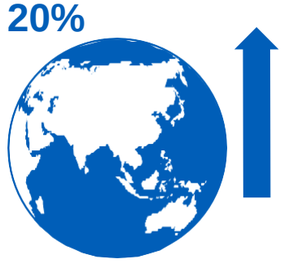
印度

2018年, 印度的排放增长了**4.8%**。

IEA预估，到2060年，印度将占全球工业CO_2排放捕集和封存的20%。

2018
4.8%

2060
20%



日本

5座试点和示范CCS设施。

政策: 有远大目标成为领先全球的零排放氢能社会并视CCS为实现这一宏大目标的必要手段。

亚太地区占全球二氧化碳排放总量的一半以上。这种巨大的排放是由于该地区的经济体高度依赖化石燃料发电以实现快速经济增长和发展。许多国家，特别是东南亚国家，化石燃料电站建设年代较晚，经济周期还有数十年，并且还有更多电厂在规划中。有3520亿瓦的燃煤电厂正在建设中或正在规划中。

2017年，亚太地区占全球煤炭消费总量的72%[62]，其中中国占了将近一半，随后是东南亚、韩国和日本。印度尼西亚、孟加拉、菲律宾和越南的煤炭发电量不断增长，进一步推高了需求预测。

工业和民用煤改气，尤其是在中国，增加了液化天然气需求[63]。 预计到2024年[64]，天然气在全球能源消费总量的占比将接近60%。以中国和印度为首，亚太地区经济体还生产了世界一半以上排放量最高的产品，例如钢铁[65]和水泥[66]。

除了上述挑战外，低碳政策机制的发展乏善可陈，缺乏法律和监管制度激励CCS投资，这一切可能会导致人们认为CCS技术的空间很小。随着空气污染加重，CCS的部署却不能很快完成。不过令人鼓舞的是，在过去一年中，亚太地区有12个大规模设施处于运行中或不同的发展阶段[67]，不断加强该地区作为世界上最活跃的CCS区域之一的实力。

中国

中国在亚太地区是CCS领域的领先国家，一座大规模设施运行中，两座设施施工中，五座设施在早期开发阶段。中国的二氧化碳排放量占全球总量的三分之一，因此亟需减排。

在2018年国务院机构改革之后，中国政府致力于在总体环境管理方面采取更加协调一致的方法，将减排与空气污染物控制相结合，以刺激新的行业和就业机会。新成立的国家CCUS专业委员会将在相关行业标准和政策制定方面为政府提供直接支持和建议，努力加强CCS方面的国际合作。

2019年5月，中国发布了最新的CCUS路线图，阐明了CCUS的战略地位，并提出了通过可负担、可行的和可靠的CCUS技术实现低碳转型的中长期目标和优先事项。

本研究院预测，这些减排和发展低碳技术的重要政策承诺将推动CCS的部署。

印度

2018年，印度的排放量增长了4.8%，同时能源需求急剧增加，煤炭需求增长了5%[68]。印度煤电厂规模世界第三[69]，平均电厂使用年限为16年[70]，并且基础设施需求不断增长，推高了对钢铁和水泥等能源密集型材料的需求，而印度正是这些材料的全球第二大生产国。重要的是，在其清洁技术情景中，国际能源署估计，到2060年，印度将占全球工业CO_2排放捕集和封存的20%[71]。CCS可以支撑该地区有意义的能源转型，通过快速脱碳，实现清洁和可持续的经济发展。

印度达米亚水泥公司（Dalmia Cement）一直致力于在2040年前实现负排放，并将CCU视为实现这一目标所需的解决方案之一。在2019年9月，该公司宣布在泰米尔纳德邦建设每年50万吨大规模碳捕集设施的计划，与Carbon Clean Solutions合作并由其提供技术。 达米亚正在寻找来自碳捕集工厂的多种利用渠道。

日本

日本经济产业省（METI）和环境省（MOE）不断推动日本全面的CCS计划。该计划解决CCS整个价值链，从开发到捕集技术的示范，到研究有效监管模式，探索商业部署的政策选择，识别和定性封存油气藏和CO_2运输方案，再到了解CCS商业模式，覆盖了多个维度。6月，日本政府向UNFCCC提交了《巴黎协定》下的长期战略。该战略确定让CCS同其他减排技术一起为发电和工业流程（包括清洁制氢）实现深度减排，并且日本政府打算与私营部门和其他政府合作，采取一系列旨在减少CCS部署障碍的举措。

氢能供应链项目（HESC）是日本政府与私营部门和其他政府合作进行CCS商业化的一个重要例子。该项目由川崎重工（KHI）、日本电力开发公司（J-Power）、岩谷集团（Iwatani Corporation）、丸红集团（Marubeni Corporation）、住友集团（Sumitomo Corporation）和AGL合作开发，由日本、澳大利亚和维多利亚州政府支持，将示范在维多利亚州拉特罗布河谷(Latrobe Valley)示范煤炭制氢并从澳大利亚到日本的船舶运输。气化单元的建设于2019年11月开工，预计氢气投产在2021年。如果该试点成功，则可能在2020年年终做出投资决策，在拉特罗布河谷投资建造一座商业规模的CCS清洁氢气生产设施，以向日本供氢。

日本大崎CoolGen设施

2019年日本CCS的其他发展情况更新:

- 在日本经济产业省的持续支持下，CCS Co. Ltd的苫小牧CCS工厂仍然是亚洲第一座全周期CCS制氢厂。在2019年，它达到了30万吨二氧化碳的捕集里程碑，并继续对封存进行密集监控。
- 东芝位于福冈县的49MW Mikawa电厂仍在建设中，用于生物质（和煤炭）碳捕集， 预计2020年初完工。
- 2019年8月，在广岛县大崎CoolGen工厂建立了新的二氧化碳捕集工厂。日本电力开发公司（JPOWER）和日本中涂电力公司（Chugoku Electric Power Company）的166 MW吹氧整体煤气化联合循环（IGCC）设施将从2019年底开始分离并捕集二氧化碳。固体氧化物燃料电池将构成第三阶段。
- 东芝位于佐贺市垃圾焚烧厂的碳捕集和利用系统继续运行，使用捕集的二氧化碳进行藻类培植。

澳大利亚

如果澳大利亚要以最低成本为全球减排目标做出贡献，CCS必不可少。CCS可以帮助依赖化石燃料的高能耗行业脱碳，从而使许多依靠采矿实现经济和社会可持续性的社区实现公平公正的过度转型。澳大利亚拥有完善的法律和法规体系，能够很好地接受CCS。此外该国具有超过4000亿吨的地质封存量，具有中等至高度的信心水平。

在2019年:

- 高更于8月开始，是世界第十九座大规模CCS项目，也是澳大利亚的第一个大规模项目。到完全投入运行时，该天然气处理设施中注入二氧化碳的年封存量将约为340万吨-400万吨。这将是世界上最大的专用地质封存设施。
- 拉特罗布山谷的氢能供应链（HESC）试点项目继续保持势头。试点褐煤气化厂于2019年底开始施工，该厂将用于生产氢气。
- 维多利亚州的CarbonNet项目仍在考虑建设商业规模的CCS运输和CO_2封存网络的可能性，该项目包括实地调查活动，例如地球物理和岩土勘测。
- CO2CRC的深入研究仍在进行中，第三阶段的项目工作在奥特维国家CCS研究中心启动。

IEA在《2018年澳大利亚能源政策概览》中指出：“澳大利亚完全有能力实验尖端技术，包括集中太阳能、电池储能以及碳捕集与封存。”[72] IEA敦促英联邦和各国政府加大对技术研发和商业化的支持力度，包括通过澳大利亚可再生能源署（ARENA）和清洁能源金融公司（CEFC）。

为了充分利用CCS所提供的机会，在制定支持性政策时，澳大利亚需要专注并扩大范围，还要解决CCS部署在州和联邦一级面临的法律法规障碍。

新西兰的CCS发展: 波瓦凯（Pouakai）项目

波瓦凯项目是一个集合清洁发电、清洁制氢、氨和合成氮肥生产的复合基地，目前正在新西兰的塔拉纳基（Taranaki）地区施工建设中。该项目采用新技术，利用碳的完全捕集来提升发电和制氢的经济效益。该项目还可以生产足够的尿素，以满足整个新西兰农业部门以及更广泛的需求。

该项目由美国基础设施技术公司8Rivers所有，由Pouakai NZ Limited Partnership（“ Pouakai LP”）开发，预计将于2024年上线。一旦投入运营，该设施每天将生产约600吨零排放氢气。该项目在一台天然气供料设备中将使用三种处理技术:

- NET Power的阿拉姆循环（Allam Cycle）发电技术(见64页)
- 8Rivers的8RH2制氢技术。
- 氨合成和合成氮肥生产装置列消耗内部产生的原料，全部共用一个空气分离装置。

8Rivers自2008年以来一直在开发Allam Cycle技术，包括通过NET Power从Exelon、McDermott、西方石油公司以及NP筹集开发资金。在德克萨斯州休斯顿附近的拉波特（La Porte），有一家成功的50MW示范工厂。结合8RH2技术，该工厂有望减少氨和合成氮肥生产中的原料（氢、电和氮）投入成本。

波瓦凯项目的生产效率将比全球领先的肥料厂还要高约25%，同时可实现高效的基本负荷和峰值发电。

饭田祐二

局长
日本经济产业省(METI)
产业技术环境局

日本政府在2019年6月的一次内阁会议上批准了《巴黎协定下的长期战略》。该战略的长期愿景是到2050年将温室气体排放量减少80%，将“脱碳社会”确定为 最终目标，并希望在本世纪下半叶尽早实现。在这一长期愿景下，CCS被视为一项有助于未来大幅减少温室气体排放的技术。

迄今为止，日本一直致力于在北海道苫小牧市进行大规模的示范试验，研发CO_2分离和安全管理技术，对合适的封存地点进行研究，以期在2020年前后实现CCS技术的实际应用。苫小牧市的示范项目吸引全球关注，截至2019年9月，累计二氧化碳注入量为28万吨，与当地利益相关者的协调取得了良好进展。

同时，为了实现CCS在日本未来社会的实施，还需要进一步降低CCS成本，保障CO_2远程运输并确保有足够的合适封存点，确保CCS的社会认可度。此外，还需要努力在政府与私营部门之间适当划分职责，确保分离、捕集、运输和封存等全链条的经济性和安全性。

《巴黎协定下的长期战略》结合其他国家所做的努力，促进“研发、示范、标准化和强化规则制定方面的国际合作”。迄今为止，日本参加了CEM CCUS计划和IEA CCUS峰会，并一直在积极推动进一步部署CCUS，同时与美国、印度尼西亚和沙特阿拉伯等国家开展双边合作，支持日本企业的海外业务。日本寻求开展更多的多边和双边合作。

CCS是一项有能力实现大幅减排的技术。实现CCS的实际利用和商业化对于日本乃至整个世界都是非常重要的。我想在此向全球碳捕集和封存研究院致敬，感谢研究院为促进CCS的全球部署所做的工作。

“CCS是一项有能力实现大幅减排的技术。实现CCS的实际利用和商业化对于日本乃至整个世界都是非常重要的。”

石井正一

社长
日本CCS调查株式会社

自2012年以来，在日本政府的领导下，在岩仓市长带领的苫小牧市民的热烈支持下，日本苫小牧CCS示范项目稳步取得了许多成果。

苫小牧CCS示范项目起着重要的作用。首先要实现从陆上到水下海底油藏累计注入量30万吨的全链条（包括捕集、注入和封存）CCS示范系统的目标，并进一步解决2020年后日本在CCS技术实际使用方面所面临的挑战。

回顾我们实现这一目标的轨迹，我们在2017年11月达到了10万吨，在2018年8月达到了20万吨，并即将在2019年底之前实现我们的目标。

尽管发生了重大地震和灾害，我们位于大城市附近的苫小牧项目在安全运行方面取得的成就证明CCS是一项能抵御全球变暖的安全可靠的缓解技术。此外，除了进行CCS技术的示范，我们一直在积极地提升CCS在当地社区的接受度，并与当地社区一起应对全球变暖。

我们在日本为应对全球变暖所做的努力在国际上受到了高度评价，并且我们广泛促进了将二氧化碳近海海底封存。特别值得注意的是，我们与全球碳捕集与封存研究院建立了深厚的合作关系。研究院在国际舞台上积极宣传我们所取得的成就。研究所对我们的信任，鼓励我们再接再厉，为全球CCS的发展做出我们的贡献，对此我们深表感谢。

正如IPCCSR15报告中指出的那样，我们生活的地球正在遭受全球变暖的严重后果。近年来，由于海水温度上升，日本遭受暴雨和超强台风带来的严重破坏，许多人开始亲眼目睹全球环境极端变化的影响。

我们认为，推广CCS应对全球变暖是我们的责任，并将继续积极参与国际活动。

为此，我们将在日本政府的指导下，与当地社区和国际社会合作，努力提高我们的技术能力，并在日本和国外大规模部署CCS。在将有效利用二氧化碳作为CCUS下一步工作目标的同时，我们将继续开展国际活动，使苫小牧CCS示范项目近海海下封存二氧化碳的突破性成果在日本和其他国家都能得到共享和有效利用，以此为缓解气候变暖贡献绵薄力量。

5.0
CCS的发展: 技术及应用

1.0 前言
1.1 关于全球碳捕集与封存研究院
1.2 关于本报告
1.3 缩写
1.4 CEO 寄语

2.0 应对气候挑战: 需要CCS

3.0 碳捕集与封存全球现状
3.1 全球CCS设施更新
3.2 撬动加速部署的政策杠杆
3.3 全球二氧化碳封存一览
3.4 法律和监管一览

4.0 区域现状一览
4.1 国际气候政策一览
4.2 美洲
4.3 欧洲
4.4 中东和中亚
4.5 亚太

5.0 CCS的发展: 技术及应用
5.1 天然气
5.2 氢
5.3 电力行业的CCS
5.4 生物质能结合CCS(BECCS)
5.5 直接空气捕集(DAC)
5.6 CO_2的利用
5.7 CCS的创新
5.8 向净零碳未来的产业转型

6.0 附件

7.0 参考文献

5.1 天然气

电力和工业脱碳，开启能源转型

2018年天然气需求增长达到自2010年以来最快增速，几乎占全球新增能源需求的一半[73]。预计到2024年，该行业将以每年约1.6％的速度增长，这在很大程度上是因为天然气被认为能改善非经合组织国家恶化的空气质量，可以替代欧洲退役的煤电和核电站，并能削弱美国煤炭的地位[74]。IEA的可持续发展场景[75]预计，天然气需求将在2025年前后至2040年之间稳定在略低于这个预测水平。虽然天然气发电产生的二氧化碳排放量是煤炭的一半，但即便是最高效的联合循环气电厂，二氧化碳排放量也高达350千克/兆瓦时（MWh），因此它不被视为低排放技术。 天然气生产和处理也产生大量的二氧化碳排放。

如果要在本世界中叶实现净零排放目标，就必须清楚天然气价值链中所有的温室气体排放。通过应用CCS，可以消除来自油气作业的非直接二氧化碳排放超过7亿吨[76]每年，相当于德国2016年[77]一年的排放量。在天然气处理设施应用CCS的成本大约在20-25美元/吨二氧化碳[78]。这不仅是成本最低的CCS应用方式之一，而且已经应用于19座运行中大规模CCS设施[80]中的10座，每年合计捕集量达2500万吨[79]。

尽管如此，全球大约有1.5亿吨[81]纯净二氧化碳被排放。CCS可以发挥作用，铺设一条可持续路径，让天然气成为未来的优选燃料之一。

液化天然气贸易预计到2024年[82]将增长25%。SDS预计到2040[83]年之前还会增长15%。天然气通常含有二氧化碳，在液化之前，需剥离并将其含量降至0.0005%。

管道气通常二氧化碳含量不到0.5%。这样做是为了遵守当地规定，保护设备。天然气在这些处理设备中已经被脱碳。

- 高更CCS项目是根据项目批准的条件而建立的，气田二氧化碳含量达14％[84]，必须在液化之前将其分离。该设施于2019年8月开始二氧化碳封存，预计将封存80％的储层二氧化碳（或340万-400万吨每年），从而使该设施的总排放量减少40％。以最大捕集量运行时，它将是世界上最大的专用地质封存项目。
- 挪威Snøhvit液化天然气工厂的CCS项目自2008年以来一直运行中，在海床下枯竭天然气田中每年的封存量约为70万吨。

CCS天然气发电和其他低排放可调度电力技术对于越来越广泛使用的间歇性可再生能源来说，是一个重要的补充，有助于保障系统的可靠性和韧性。研究证明，在脱碳场景[85]下，如果一个电网具备坚实的的低碳发电基础，可以降低能源转型成本，提升能源安全。
全球天然气厂的平均寿命仅为19年[86]，还有超过1300亿瓦特[87]的未脱碳产能在建设中，极有可能锁定排放长达数十年。CCS是实现气候目标必不可少的一环。

天然气生产和使用领域有很多机遇可以让CCS技术提供低成本排放缓解方案。这是一个不断增长的市场。

阿拉姆循环带来的机遇

NetPower正在开发一种新的基于燃气的发电技术，该技术有望使碳捕集发电成本与常规天然气联合循环发电成本持平。该技术利用了阿拉姆循环。在常规的天然气联合循环发电机中，来自在空气中燃烧的甲烷产生燃烧气体，驱动涡轮，涡轮继而驱动发电机发电。然后，来自涡轮机的废气穿过热交换器将水加热，产生蒸汽，蒸汽驱动连接到发电机的第二涡轮机，产生更多动力。烟道气主要由氮气（来自空气）、二氧化碳和水组成。从传统燃气发电机的烟道气中捕集二氧化碳需要安装和运行捕集装置，将仅占约10％的二氧化碳与其他气体（大部分为氮气）分离。这增加了成本，减少了发电量。在常规的燃气发电机中，运行二氧化碳捕集装置所需的功率可能会使发电机的整体效率降低10到15个百分点。

阿拉姆循环在氧气和二氧化碳中燃烧气体，仅在燃烧气体中产生二氧化碳和水，然后驱动涡轮机和发电机。高温废气通过热交换器，冷凝除水，剩余的纯二氧化碳被重新压缩，被高压排出与甲烷燃烧连续添加的量相等的量，准备运输和地质封存。剩余的二氧化碳在热交换器中重新加热，并循环到燃烧单元和涡轮中。

尽管空气分离装置需要大量能量来为燃烧室生产氧气，但与传统的联合循环电厂相比，阿拉姆循环的效率优势产生了同等的整体效率（接近60％）。但是，就二氧化碳的捕集而言，阿拉姆循环对比常规燃气发电系统具有显著优势，因为它不需要额外的设备或动力就可以将二氧化碳从烟道气中分离出来并直接进行地质封存。因此，没有附加负载，没有效率损失，也没有减少发电量。

5.2 氢

聚焦制氢

氢气在2019年重新站在聚光灯下，作为一种多用途的清洁燃料，可以实现净零未来，使用时不产生温室气体排放。出台用氢制氢战略和扶持政策的地区、国家和城市覆盖范围之广，彰显全球对氢燃料实现经济脱碳的潜力的认可[88]。仅在2018年，欧盟和18个国家政府就氢能做出郑重宣布，到2019年年中，全球已有50项激励措施支持氢能使用[89]。氢气有望在工业流程、运输、家庭供暖以及发电等领域的脱碳中发挥重要作用（见下图23）。

清洁氢气的需求有望出现强劲增长。根据澳大利亚联邦政府和州政府编制的关于制定国家氢战略的简报，预计到2050[90]，需求将从现今的7000万吨[91]每年，超过5.3亿吨每年。

目前，全球氢气产量的98％来自未经缓解的化石燃料，其中约四分之三[92]来自天然气。来自天然气生产的二氧化碳排放量约为每年8.3亿吨[93]，相当于英国2018年[94]的年排放量。要实现气候目标，必须通过零排放或极低排放路径生产氢。欧盟委员会[95]和几个国家已经直接将CCS确定为实现这一目标的主要考虑因素[96]。澳大利亚、新西兰、日本、中国、美国和荷兰纷纷在各自的氢政策中强调CCS的重要性（详见附录6.3）。

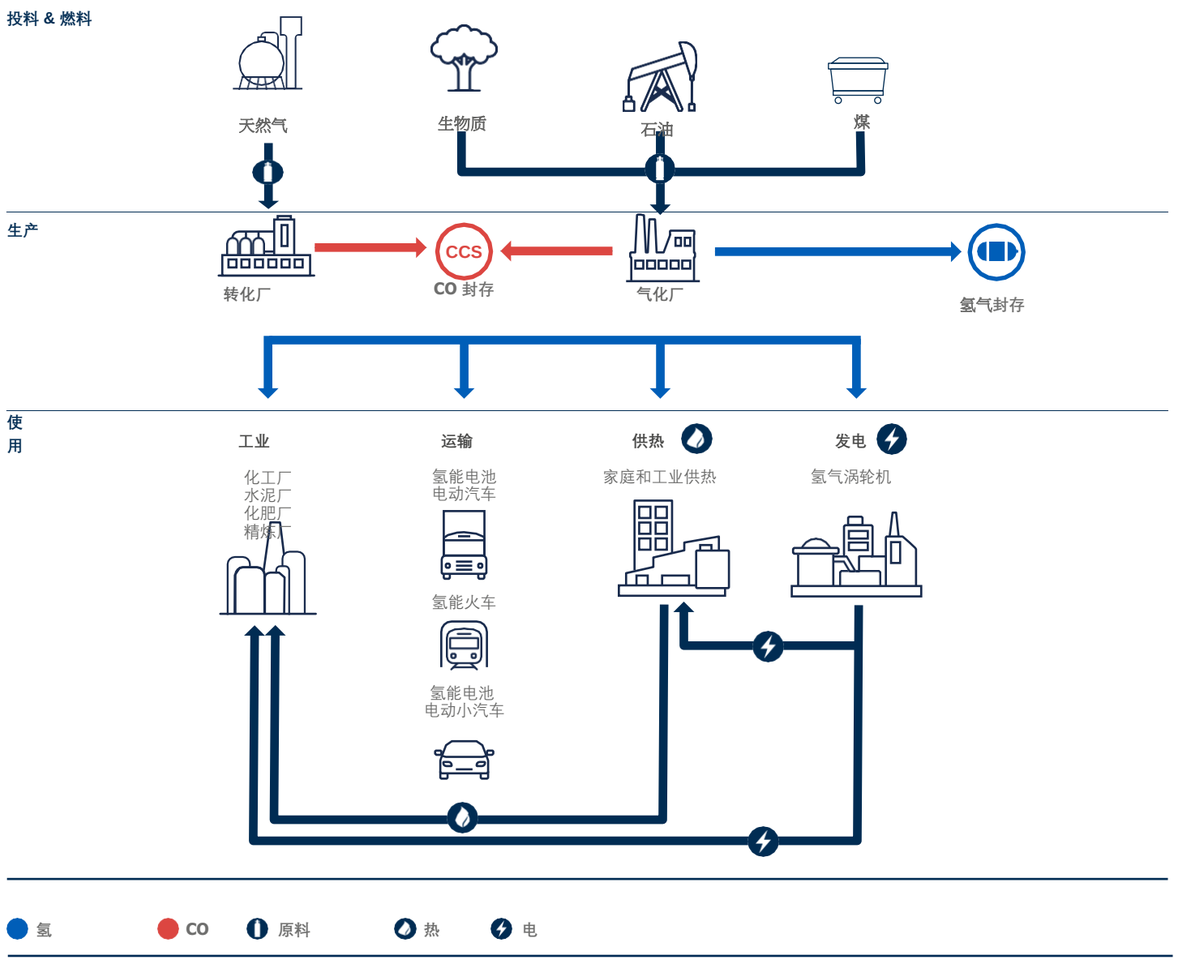


图22 制氢和用氢

CCS 制氢

低碳制氢的主要技术有三种:

- 使用CCS进行气体重整（主要来自蒸汽甲烷重整）;
- CCS煤气化; 以及
- 由可再生能源驱动的电解.

每种技术都有其自身的优势，并将在全球能源转型中发挥作用[97]。通过气体重整和CCS煤气化低碳制氢的优势集中在技术的成熟度，规模和商业可行性上。

成熟度

通过CCS的气体重整和煤气化生产低碳氢已经有二十多年。例如，美国北达科他州的大平原合成燃料厂于2000年开始运行，每天从褐煤[98]中产生约1300吨氢（以富氢合成气的形式）。使用CCS从煤或天然气中生产的氢气是成本最低的清洁氢气，其消耗的电能不到电解所需的十分之一。在可再生电力相对稀缺的地方，使用可再生电力代替电网中未缓解的化石发电可能比使用可再生电力在电解槽中产生氢气的减排量要多。

全球共有5个配备CCS的低碳制氢设施运行中，总产能150万吨[99]。另有3个正在建设中。另外三个正在高级开发阶段（见下图24）。

规模

为了使氢能对全球温室气体排放量的减少做出有意义的贡献，需要大量生产氢，以取代目前大部分的化石燃料需求。目前，采用CCS扩大低碳制氢的规模要比扩大电解的使用面临的挑战少得多。带有CCS的商业规模制氢设施每天可生产约1000吨氢气。煤炭、甲烷和用于封存二氧化碳的孔隙空间充足。当大规模生产时，用CCS制成的低碳氢是目前成本最低的来源。

相比之下，使用可再生能源进行电解制氢的产量仅占如今每年生产的7000万吨[101]专用氢的0.7%[100]。如果到2050年氢需求量每年达到5.30亿吨，那么电解制氢需要可再生能源或核能发电的电量约为25,000太拉瓦时（TWh）[vii]。这大约是2017年[102, viii]所有可再生能源和核能发电总量的2.8倍。为制氢和低排放电力创造足够的可再生能源是极具挑战性的。

商业可行性

价格将是决定氢在减排中是否发挥重要作用的关键决定因素。经证明，使用CCS气体重整和气化技术生产的低碳氢气可以在商业规模上运行，并且现在就可以部署。使用CCS煤或甲烷的制氢成本为1.70-2.40美元/千克[103]，而电解制氢的成本为7.45美元[ix]。CCS制氢成本低了三分之二。

现在需要采取行动，确保氢能以达到减排目标所需的规模在全球能源转型中发挥作用。要通过CCS扩大低碳制氢，需要政府的资金拨款或激励政策[104, viii]，需要给碳赋值，需要建立创造需求的市场机制。

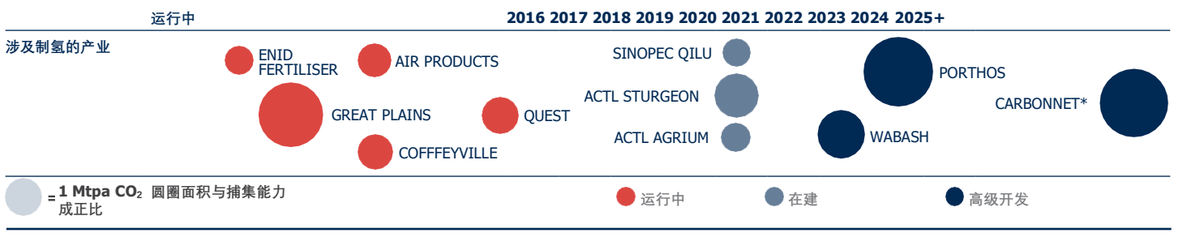


图23 涉及通过CCS制氢的产业 – 全球设施规划

*仅显示设施所处主要行业。圆圈面接与捕集能力成正比

蒸汽甲烷重整 (SMR)

今天制氢工艺大都是通过一种叫做蒸汽甲烷重整（SMR）的化学过程来完成的。SMR将甲烷与蒸汽混合，加入催化剂，在一种叫甲烷重整器的化学反应器中加热混合物。化学反应产生氢气（H_2）和一氧化碳（CO）:

$$CH_4 + H_2O \rightarrow 3H_2 + CO$$

重整器输出的蒸汽（称为合成气），送入称为水气转换反应器的第二个反应器中，产生更多氢气，并将部分CO转化为二氧化碳（CO_2）:

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$$

从转换气出来的蒸汽，经氢气净化器，分离出高纯度氢。剩余的气体（未反应的甲烷，CO和CO_2）用作重整炉中加热的燃料，以提供额外的热量并破坏一氧化碳。

SMR工艺产生高纯度氢气。它通过化学反应和燃烧燃料加热重整器来生成二氧化碳。

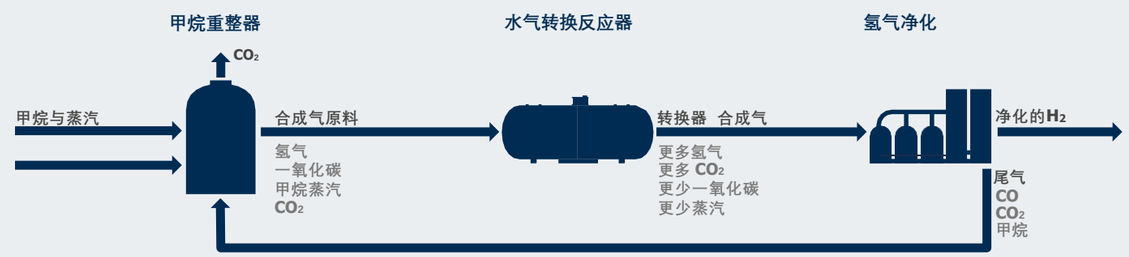


图24 蒸汽甲烷重整

氢能与CCS: 促进澳大利亚拉特罗布河谷能源转型正义

主要依靠生产或使用化石燃料的地区，关闭能源密集型设施的决定通常会破坏经济和扰乱社会。在这些地方发展清洁制氢行业，可以保护和创造熟练的高价值就业，为当地百姓和社区带来公正的能源转型。

澳大利亚维多利亚州拉特罗布河谷现有的褐煤发电设施将在未来几十年内随着其经济寿命的临近而关闭。它们将不会被替换。当这些发电机关闭并且不再需要其供应链时，拉特罗布河谷当地经济将遭受重创。

但是，拉特罗布河谷拥有CCS制氢所需的煤炭和天然气原料，并且毗邻具有数个潜在封存点的世界级CO_2封存油气田。

这些现有资源可能会吸引投资用于建设低排放行业枢纽。为支撑这一枢纽而建设的二氧化碳运输和封存基础设施，也可被附近的高排放行业排放源（如朗福德天然气厂）使用。

重新培训当地劳动力的要求也不高。一个成功的清洁制氢行业所利用的技能目前都是精炼和化工行业中使用的技能。一个全新的清洁制氢业的足迹也很小，主要局限在现有工业设施和矿山。

拉特罗布河谷这样的地区具备使用煤和天然气通过CCS低碳制氢所需要的一切必要前提条件，这样一个产业将会实现实质性减排，为当地社区创造经济机会，避免其遭受经济衰退。

5.3 电力行业中的CCS

大多数规划中和进行中的CCS项目都在容易获得高浓度CO_2且捕集成本相对较低的工业部门中。但是，为了在实现《巴黎协定》目标的同时实现可持续的经济增长并提高生活水平，所有部门，尤其是电力部门都需要大幅减排。目前只有两个大规模CCS设施在运行[x]。

可再生能源的快速部署减少了化石燃料所需的可调度电量，但是风能和太阳能发电的性质可能给大多数非间歇性发电的能源系统带来挑战[105]。大量间歇能量甚至可能会大大增加整个系统的成本[106]。具备CCS的煤电站和气电站可提供发达经济体所需的可调度的低排放电力，并且无需采取其他措施即可确保电网的弹性和供电可靠性。随着间歇性可再生能源发电在电网中的渗透率增加，还需要在输电、储能、需求侧管理和人为惯性方面进行额外投资。成本最低的低排放电网将需要可调度的低排放发电机以及间歇性可再生发电能力。

根据IEA的数据及其可持续发展场景SDS[107]，现有的和在建的能源设施约占排放“预算”的95%。煤电站约占全球能源相关排放总量的三分之一。为了在低碳世界中继续运营，资产所有者需要对改造方案进行经济和技术可行性评估。在发展中国家，特别是在亚洲，煤电厂的平均寿命为11年[108]，经济寿命达数十年，必须进行CCS改造以减少排放。

根据IEA的SDS，预计到2030年[109]将从电力部门捕集并封存3.5亿吨CO_2。由于大规模CCS电力项目的交付期很长——在6-10年的范围内——电力部门必须现在要采取实质性措施在10到20年内实现这些目标。

加拿大Boundary Dam
图片来源： SaskPower.

5.4 生物质能结合CCS (BECCS)

生物质能结合CCS（BECCS）是一类很有前途的技术。可持续生物质的生产被认为是可再生能源，因此将其燃烧或发酵与CCS技术整合在一起可实现负排放。生物能源可为车辆提供燃料（作为生物乙醇），并通过生物质燃烧发电，取代化石燃料作为热能来源。它被认为是少数可实现规模化的二氧化碳去除方法之一。BECCS是IPCC场景的一个亮点，可将全球变暖限制在1.5度以内[110]。

尽管潜力巨大，但在大规模部署BECCS之前仍存在一些严重障碍:

- 不同类型的土地和生物质对生产力和资源要求差异很大。每年每清除一吨二氧化碳，生长中的森林残留物会占地1-1.7公顷，而专门种植的能源作物大约占地0.1-0.4公顷[111]。
- 专为BECCS生产农作物可能涉及土地清理，这可能会减少甚至逆转其碳清除潜力[112]。
- BECCS的大规模部署可能与可用于植树造林或粮食生产的土地形成竞争或重叠，从而导致生态系统发生重大变化[113]。
- 按所需规模生产生物质需要大量水和肥料。

除IEA之外，一些著名机组织机构（英国皇家学会、斯坦福大学、伦敦帝国学院等）仍致力于发展BECCS，并将其视为应对气候变化的一项必不可少的技术。许多私营部门公司也将BECCS视为一种脱碳、规避碳价或合规的手段。2013年7月，英国的Drax电站将其六台锅炉中的第一台改为使用生物质进行燃烧。他们的决定是为了响应英国政府在2025年之前淘汰电力行业中的煤炭这一最后期限。Drax于2018年启动了CCS试点项目，目前每天捕集1吨二氧化碳。如果成功，该试点将为英国实现负排放铺平道路。

BECCS的另一个主要用途是通过发酵生产生物乙醇。生物乙醇生产能产生相对纯净的气态CO_2，这为低成本捕集提供了机会，并使BECCS设施成为开发成本相对较低的项目。这在发展中国家尤为重要，因为发展中国家约占全球乙醇产量的35%[114]。

本研究院将BECCS的部署视为对CCS的可靠且重要的补充，只要它使用可持续的生物质即可。但是，不能将其作为CCS的唯一形式，而应是一套解决方案中的一个选项。

魏宁教授

研究员
中国科学院岩土力学研究所

中国的机遇

目前，中国每年的二氧化碳总排放量约为100亿吨。煤炭发电、现代煤炭转化、水泥和钢铁行业等四个主要行业占排放总量的三分之二以上。预计，通过利用中国庞大的封存资源，碳捕集和地质封存技术将显着改善可用于这四个行业减排的选项范围和成本。

此外，可以采用二氧化碳地质封存和利用技术来提高碳氢化合物、地下水、地热和其他资源的采收率，以抵消二氧化碳封存的高昂成本。

在这些选择中，CO_2-EOR和天然气（EGR）采收、地下水（EWR）和煤层气（ECBM）的采收潜力最大。而且，CO_2-EOR和CO_2-EWR具有足够的技术成熟度（TRL），并且能以相对较低成本部署当今的大规模工业规模设施。

理论上中国的CO_2封存总量可达到25000亿吨（概率为50%），变量很大，包括资源可用性、合适地点的空间分布、TRL以及各种CO_2地质封存和利用方案的相应成本范围。

按资源潜力递减的顺序，理论上可用的CO_2封存资源包括：EWR深层盐水层（2,471 $GtCO_2$）；ECBM煤层气（114 $GtCO_2$）；EOR油田（4.76 $GtCO_2$）；和EGR气田（4.02 $GtCO_2$）。EOR、EGR和EWR按减排成本递增的顺序，是三种成本最高的技术。

系统的源库匹配结果表明，中国的CCUS和专用地质封存的有效年度缓解潜力可以达到35亿吨。在当前技术-经济条件下，上述四个主要行业的减排总水平成本不到60美元/吨CO_2。具有高度发展前景的地区包括中国北方、东北地区和西北地区。

“理论上中国的CO_2封存总量可达到25000亿吨”

海伦·德·康尼克

副教授
拉德堡德大学环境科学系
IPCC关于全球升温1.5°C的特别报告第4章
协调主要作者

“如果要将全球升温幅度控制在1.5°C，我们需要在十年内将全球现在的二氧化碳排放量减半，到2050年，必须达到二氧化碳净零排放。每一吨和每一年都很重要。CCS的技术和成本发展要快于可再生电力。因此，CCS只有在可以保证快速实施和环境绩效的情况下才有用。如果CCS能够实现工业系统转型，并使我们脱离当前的碳锁定，那么CCS就能在其中发挥作用。如果能够做到这一点，我们就应该继续下去。”

5.5 直接空气捕集 (DAC)

直接空气捕集（DAC）是一种模块化技术，可以使用结合或粘附到CO_2上的化学物质直接从大气中捕集CO_2。然后可以将CO_2封存或重新利用，例如制造建筑骨料、塑料和合成燃料。

有两种很有前景的DAC技术:

- 大规模基础设施DAC，使用含有氢氧化物的水溶液从空气中捕集CO_2。它需要高温（高于800°C）进行再生，通常通过燃烧天然气来供热.
- 一种基于胺材料的模块化技术，胺材料与多孔固体载体相结合。该工艺在85°-120°C的温度下运行，所需的热能要少得多。通过批量生产，将来有可能降低成本。

与其他形式的负排放（清除二氧化碳，即树木）相比，DAC设施几乎不需要土地。但是，对于其需要大量水和能源从大气中捕集低浓度的CO_2，确实存在担忧。最新模型估计，如果DAC是唯一到2050年可避免全球平均升温1.5℃的二氧化碳去除方法，则其耗能将约占当前全球能源消耗的一半[115]。

- 瑞士一家采用模块化DAC技术的公司Climeworks估计其捕集成本为每封存一吨二氧化碳耗资500-700美元。依靠个人和企业的支持，该公司愿意以比欧盟ETS等市场上更高的价格购买减排证书。Climeworks的目标是将封存成本降低至每吨CO_2约100美元[116]，这样便可以进入更大的市场并提高技术水平。
- Oxy Low Carbon Ventures和Carbon Engineering Ltd最近在美国宣布开发全球最大的DAC工厂。这两家公司正在研究设施的工程和设计，该设施每年将从大气中捕集约100万吨二氧化碳。捕集的二氧化碳将用于提高采收率，并永久性地封存在Permian Basin中。

  EOR的预计收入可确保这个大规模DAC项目的商业可行性。此外，该项目将符合45Q税收抵免资格和LCFS CCS协议的条件（见第4.3节）。
- 美国的Global Thermostat已建立了两个试验设施，每个设施每年可清除3,000-4,000吨二氧化碳[117]。
  它们使用捕集的二氧化碳生产合成燃料。

  DAC的成本可能会降低其大规模部署的吸引力。
  不过目前正在取得进展，并且极有可能在应对气候变化做出贡献。

5.6 CO_2利用

在接下来的几十年中，二氧化碳的地质封存将为实现气候目标做大量工作。但是，碳利用也扮演着重要角色。为了说明这一点，Mac Dowell等人估计到2050[118]年，每年将可利用多达7亿吨二氧化碳。IPCC估计，到本世纪中叶，为了控制全球升温幅度在1.5摄氏度，必须使用CCS封存的二氧化碳量达到每年50亿吨至100亿吨[119]。

碳的利用将扩大对测试和优化捕集技术的投资。对于建设运输管道不实际或在经济上不可行的地方，可用于永久封存二氧化碳。

CCUS是将捕集的二氧化碳循环利用的过程。碳利用作为一项应对气候变化的积极武器，其有效性取决于它被如何利用。它可以被EOR中的天然CO_2所“替代”，或用作原料生产有价值的东西。最近，有很多人对于将二氧化碳转化为其他形式或物质表现出浓厚的兴趣和投资意向。一般而言，二氧化碳的利用可减少排放:

- 与其被排放到大气中，被利用的二氧化碳可被永久封存(EOR) 或结合在产品中（例如混凝土）。
- 与其被排放到大气中，被利用的二氧化碳所生产的产品可替代来源于化石燃料的产品（例如取代柴油的合成液体燃料）。
- 与其被排放到大气中，可用于置换从自然源中产生的二氧化碳（例如温室园艺）。

CO_2 ‘替代品’

荷兰废物回收和废物发电的公司AVR正在其Duiven工厂开始建设大规模的二氧化碳捕集系统。曾经是工业副产品的纯二氧化碳流将由液化空气集团运送到荷兰的温室园艺区。类似的项目正在日本佐贺市进行。两个项目都将通过添加额外的CO_2来促进植物生长，同时避免使用天然CO_2或天然气进行培植。

CO_2 改造

其他公司开发了将二氧化碳永久封存在建筑材料和化学产品中的技术:

- CarbonCure、Blue Planet和Solidia Technologies在全球范围内正在开展各种规模的混凝土和骨料项目，其中许多项目在北美,

  BluePlanet把来自加利福尼亚最大的发电厂Moss Landing的废气注入海水，以此种方式收集二氧化碳。大约90％的二氧化碳被去除之后与水中的矿物质结合形成石灰石。
- Lanzatech利用工业设施的排放来生产化学产品和燃料，并且在全球范围内有多个项目。.
- Cemvita Factory使用CO_2作为中间化学品和聚合物可持续生产的原料。

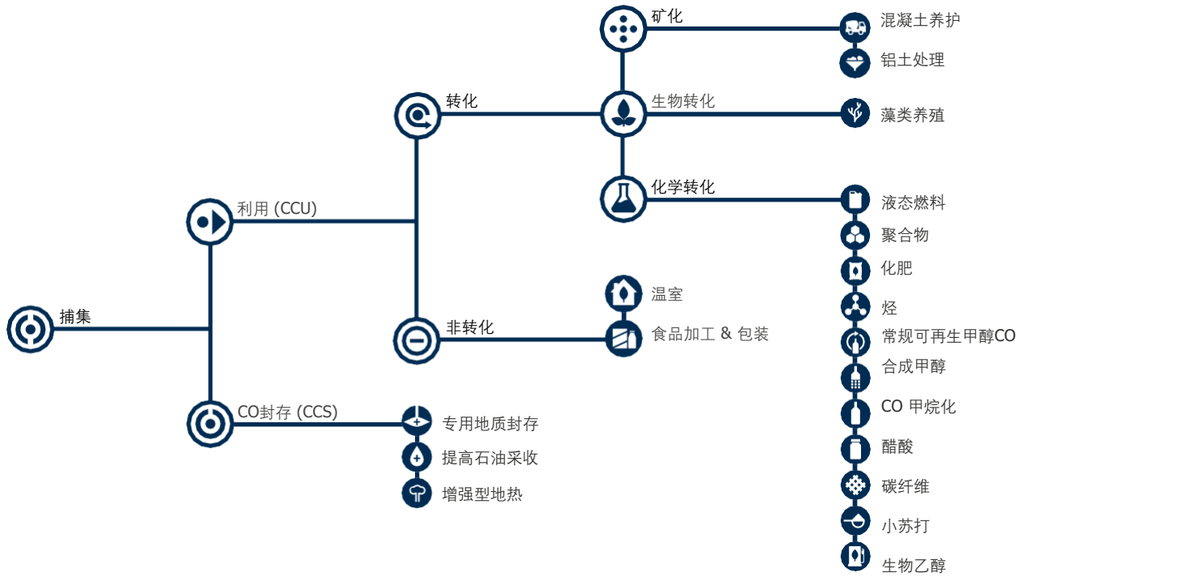


图25 利用和封存路径

碳利用的部分吸引力在于，企业可以摒弃碳的一次性利用，使其成为一种参与循环经济的方式。

对于希望减少环境足迹的公司而言，致力于循环经济可能是一项关键策略。它吸引了许多大规模消费者品牌，他们本质上了解其未来的营销策略需要涵盖应对气候变化的策略。消费者品牌开始将碳视为其产品中化学品聚合物和其他材料的可行原料，供应链主管正在与碳利用公司合作。鉴于他们强大的营销能力，这些公司有潜力推动消费者转向低碳商品，从而全面支持CCU。

在二氧化碳利用技术大规模推行之前，有一些重大但相对容易克服的挑战需要去面对:

- 政策和法规环境需要提供更多的支持;
- 必须适当考虑全生命周期的温室气体排放，包括能源输入，以确定净减排量;
- 需要不断降低成本。

但是，必须强调的是，虽然通过利用二氧化碳来减少排放非常有价值，但是它们对减排的贡献却是有限的。

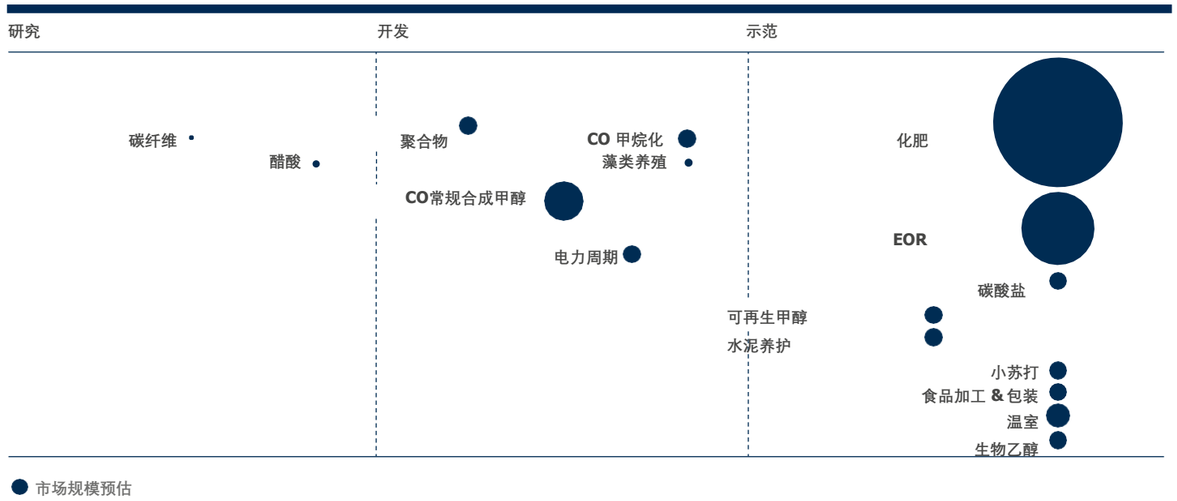


图26 当前规模化碳利用的技术成熟度和市场规模

5.7 CCS创新

通过化学吸收（胺类，始于1930[120]年）、物理吸收、吸附或膜分离或基于低温蒸馏的分离过程，90年来二氧化碳捕集一直是工业工艺流程的重要组成部分。在天然气加工和尿素化肥生产中，CO_2分离是生产过程的固有环节，因此捕集成本非常低[121]。在制氢、钢铁和水泥生产等其他行业以及在废物发电的过程中，二氧化碳的捕集已从商业规模上得到证明，但尚未得到广泛应用。

在电力领域，最近只有两个商业设施采用了二氧化碳捕集且这两个商业设施都是燃煤发电机组。一座是自2015年投运的Boundary Dam（边界大坝），一座是自2017年[122]以来投运的Petra Nova。捕集存在额外成本，缺乏政策支撑投资合理性，这是CCS在发电行业大规模部署中所面临的主要障碍。但是，通过积累项目经验，在降低捕集成本和优化性能方面取得了良好的进展。下一代以降低成本为目的的捕集技术也应运而生。

项目经验

商品和服务供应商竞相降低成本，提高产品效能，以获取更高市场份额。 随着市场的增长，规模经济和边做边积累经验的方式促进了成本下降。创新的存在和保护有时间期限，知识泄漏将不可避免地扩散到整个行业中。需求会一直增加，直到市场饱和为止。最终结果就是常见的技术成本逐渐降低的趋势。 在强有力的、持续的政策支持推动下，这正是本世纪可再生能源技术经历的发展规律。

Boundary Dam[123]和Petra Nova向世人展示了成本创新的过程，即便没有强大的竞争市场。改变设计、施工和运营可以降低未来碳捕集设施的成本:

- SaskPower在2015年的报告称，基于从Boundary Dam获得的项目经验，他们可以将CCS新发电项目的成本削减多达30%。他们对SaskPower Shand电厂进行CCS可行性研究的依据是资本成本降低67%，捕集成本为平均每吨二氧化碳45美元（初步可行性水平+ 40 / -25%）[124]。
  Shand电厂的成本要远远低于他们同类首座设施。
- 2018年，NRG Energy表示，根据他们的经验，下一次二氧化碳捕集改造工程的成本至少可降低20%，进而使捕集成本平均水平达到每吨二氧化碳47美元[125]。

宝贵的项目经验正在为大规模捕集工厂[126, xi]带来真正的进步。图28（右）显示，从Boundary DamCCS 设施，到Petra Nova碳捕集设施，再到拟建的Shand CCS设施，电力行业的碳捕集成本逐步降低。预计同类首批工厂在设计和建造方面将具有较高财务风险和成本，但会为后续CCS工厂降低成本提供宝贵的知识和经验。

学习到的经验

- 对以前的大规模捕集装置进行模块化，已降低了设计和建造的价格。车间预制提高了可靠性和质保质控，前端成本降低了，同时必要时可增加捕集装置，灵活性更高。
- 通过开发再生能耗低和抗降解性高的高级溶剂，运营费用减少了——
  - 用于煤燃烧烟气的胺再生能耗已显著降低，之前高级胺能耗从5.5 GJ / t CO_2降到3.0 GJ / t CO_2，在最新的增强型溶剂技术中已降至2.5 GJ / t CO_2以下;
  - 高抗降解性意味着降低了捕集溶剂补偿的需求。
- 使用中间冷却、稀蒸汽再压缩、分流和汽提塔中间加热优化工艺，可以进一步降低成本。
- 热集成以及所需的蒸汽/冷却水量也会影响运营成本。现在，在新一代碳捕集工厂中，找到正确的蒸汽供应方法，最大化额定和部分负载下的蒸汽提取效率，回收用于工厂蒸汽循环的废热，都是非常重要的。

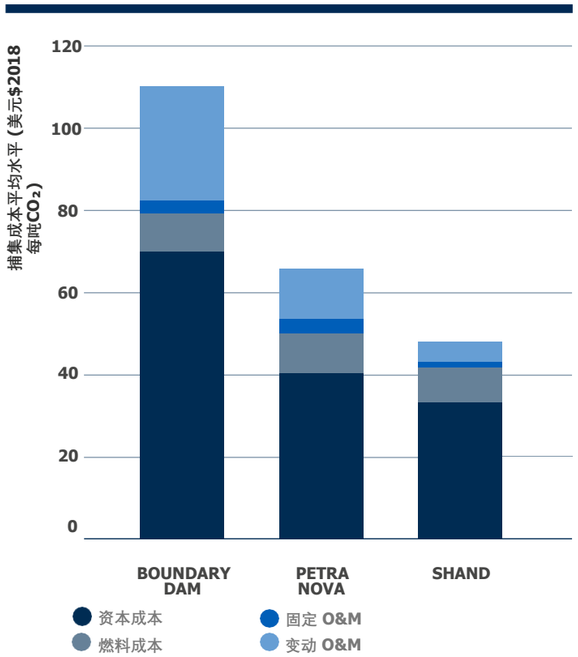


图 27 捕集成本平均水平 (LCOC)分解图 - BOUNDARY DAM、PETRA NOVA 和 SHAND[127, xiii]

同类第一个工厂预计将面临更高的财务风险和设计建造成本，但是将为后续CCS工厂降低成本提供知识和经验。

GCCSI的分析基于8%的折现率，30年的项目寿命，2.5年的施工期，85%的容量系数。成本数据已标准化为2017年的值。预期准确度区间：Boundary Dam和Petra Nova：-10%至+ 15%，Shand：-25%至+ 40%。

5.8 工业向净零未来的转型

工业是现代社会的基础，是经济增长的重要来源，为世界各地的社区带来经济利益和就业机会。在创造财富的同时，工业使用全球约三分之一的能源，并产生全球近三分之一温室气体。为了将全球升温幅度控制在1.5°C，IPCC估计，到2050年，这些直接和间接排放量必须相对于2010年的水平下降75-90%[128]。在净零排放目标下，工业必须实现碳中和。工业将需要一系列缓解方案，包括：提高能效；通过可再生能源实现电气化；生产工艺，材料和原料的创新；以及CCS。

CCS对于工业脱碳至关重要。它可以提供清洁的增长机会，并有助于确保工业区和社区的公正和可持续转型。有充分的理由认为，如果没有CCS，根本不可能进行必要的工业深度脱碳。CCS对工业脱碳至关重要。它可以提供清洁的增长机会，并有助于确保工业区和社区的公正和可持续过渡。如今，绝大多数CCS项目都应用于工业中。

能源转型委员会指出，在没有CCS的情况下，在难以减排的行业中，净零排放“可能无法实现，而且成本一定会更高”。委员会认为CCS是化工、钢铁和制氢行业脱碳的最具成本效益的途径[129]。IEA估计，从2017年到2060年[130]，CCS可以为工业贡献280亿吨的二氧化碳减排量。IEA的清洁技术情景将CCS视为深度减排的第二重要手段，在化学行业占38%，水泥占17%，钢铁占15%[131]。CCS是目前水泥、钢铁和铁矿石生产行业深度脱碳的一个重要选项。

水泥

水泥行业占全球二氧化碳排放量的8%[132]。加热窑炉以煅烧石灰石，然后进行煅烧反应，几乎产生了来自熟料生产的所有排放。只要优化工程设计，就可以使用CCS捕集和封存这个过程产生的大约90%的二氧化碳。 这一切已经发生:

- LEILAC项目最近证明，直接分离（在加热过程中去除来自石灰石的CO_2）可捕集超过95%的CO_2工艺排放量[133]。
- Calix正在试验这种全新、高效且极具成本竞争力的直接分离技术。
- 挪威的Norcem项目属于北极光项目，旨在利用燃烧后技术从水泥厂捕集二氧化碳。

钢铁

钢铁生产依赖于煤炭作为原料和燃料。该行业每年产生的二氧化碳几乎与水泥行业相当[134]。但与水泥生产不同的是，该行业的排放出现在生产过程中的不同环节。二氧化碳必须在加热过程捕集，另外还原铁以制造钢时，必须从高炉中捕集二氧化碳。 最近的创新成果包括:

- 一个可以替代铁水生产和传统高炉的方案就是冶炼还原HIsarna工艺，一旦与CCS[135]一起部署，有可能捕集80%炼钢排放的CO_2;
- 启动“ 3D”项目（属于DMX™ Demonstration）——这是欧洲利益相关方组成的联合项目，在敦刻尔克（Dunkirk）进行ArcelorMittal工厂的二氧化碳捕集试点。

化工行业: 乙烯和氨

生产塑料等产品的化工行业是工业界第三大排放源[136]。CCS尚未在该领域以商业规模应用，不过存在一些可能性:

- 乙烯是制造塑料的基础，是由热解炉中“裂解”的各种碳氢化合物制成的。当燃料加热熔炉时会产生大部分的二氧化碳，这也叫蒸汽裂解。从熔炉废气中捕集二氧化碳已经是电力和钢铁行业中公认的CCS应用方式。
- 氨是肥料和炸药的基础成分，是农业和采矿业的重要原料。它源自煤炭或天然气，其生产过程排放氢和氮的混合物，以及大量的近乎纯净的CO_2。两个大规模CCS设施已经在压缩、运输和使用纯净CO_2（用于EOR）。

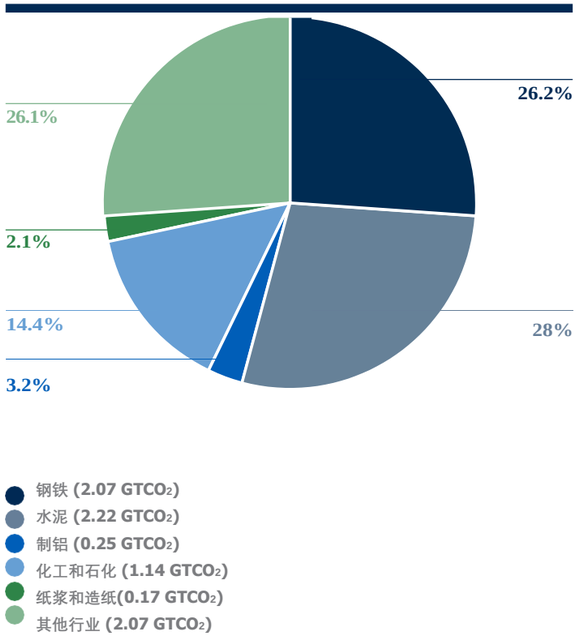


图28 2017[137]年各工业部门排放量（GT=10亿吨）

捕集技术创新

下一代捕集技术具有一些独特之处，通过材料创新、工艺创新和/或设备创新，可以减少资金和运营成本并提高捕集效果（见下图29）。

在CCS设施的工程设计研究中已经考虑了其中一些技术。例如:

- Ion Engineering公司非水ICE-21溶剂-被选入前端工程设计（FEED）研究，用于内布拉斯加公共电力区（Nebraska Public Power District）Gerald Gentleman电站改造。
- Membrane Technology and Research公司PolarisTM膜系统被选入盆地电力公司（Basin Electric）Dry Fork电站的FEED研究。
- 三菱重工新型KS-21TM溶剂被选入FEED研究，用于改造Prairie State Generating Company公司的能源园区。
- 林德-巴斯夫（LINDE-BASF）贫-富液吸收/再生循环技术-被选入南方公司（Southern Company）气电厂FEED研究。
- 德克萨斯大学(The University of Texas at Austin)哌嗪高级汽提塔（PZAS）工艺被选入Golden Spread Electric Cooperative电力集团[138]Mustang电站的FEED研究。

下一代技术正在帮助降低CCS开发成本并缩短部署时间。通过在设施操作和项目管理上边做边积累经验，行业不断改进提升。得益于此，这些新的技术发展将不断推进CCS的广泛部署。

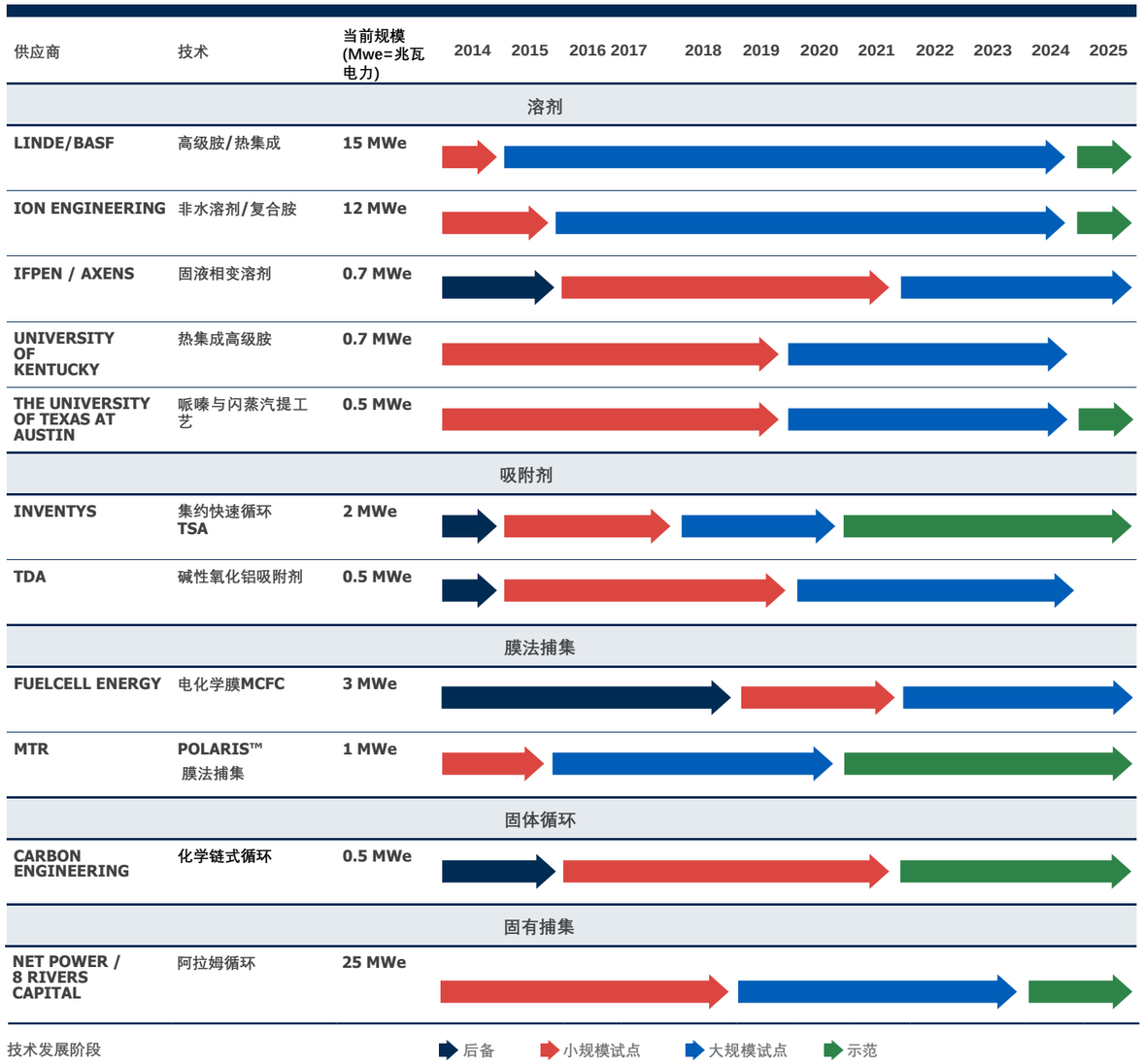


图29 入选的下一代捕集技术-0.5 MWe (10 T/D)及以上规模实际烟道气测试[139]

CO_2捕集率可以达到百分之百

从低浓度气流（例如电站烟气）中捕集二氧化碳的传统目标是90%。这一捕集率几乎已成为默认目标，但是，如下所述，技术上完全可以实现超过90%的高捕集率。尽管在技术上可行，但CCS第一批煤电厂改造项目中的两个项目均采用了90%这一捕集目标。

Boundary DamCCS改造自投入运营以来，由于维护和工艺改进需要停运，因而无法实现90%的总体捕集率。作为同类工厂中的第一家，遇到操作困难实属正常。但是，这些经验只需学习一次，Boundary Dam和SaskPower的运营商就可以将其所有运营数据共享出来。

PetraNova设施是CCS对煤电站的第二次改造，避免了类似的困难。PetraNova从相当于240兆瓦发电厂产生的烟道气中吸收90%的二氧化碳（每年约140万吨）。捕集装置的能力取决于对二氧化碳的需求。如果有足够的需求，Petra Nova完全能以90%甚至更高的捕集率处理发电厂产生的所有烟气。

CSIRO[140]和IEAGHG[141]在2019年进行的技术经济分析中，对比90%的捕集率，分析了化石燃料发电厂实现99%的二氧化碳捕集率的成本。不包括运输和封存，超超临界火电厂的成本上升了3%，天然气联合循环的成本上升了8%。

如下图30所示，使用CCS的排放量可以减少到:

- 煤电厂48克二氧化碳当量/千瓦时（直接排放量9克二氧化碳当量/千瓦时）;
- 气电厂89克二氧化碳当量/千瓦时（直接排放量4克二氧化碳当量/千瓦时）。

煤电厂或气电厂实现99%的直接CO_2捕集率不存在技术障碍。

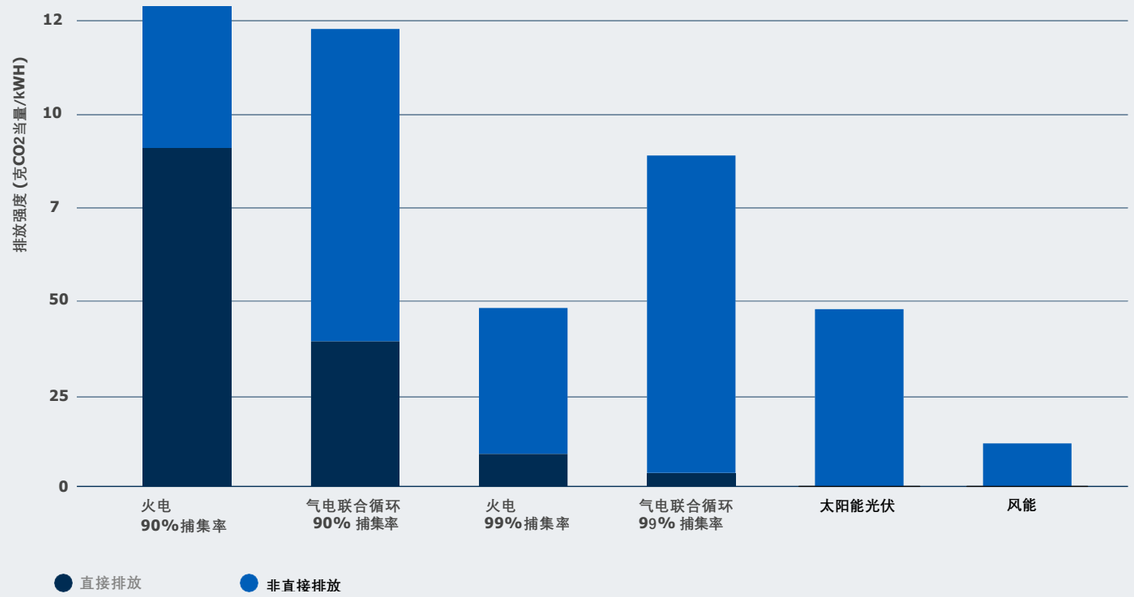


图30 二氧化碳捕集率为90%和99%的化石燃料发电厂的排放强度对比[142]
注：发电厂的直接排放是指现场发电产生的温室气体排放；电厂的间接排放包括供应链中的各种排放，例如 化石燃料的提取和运输，和/或使用的基础设施。

6.0
附件

1.0 前言
1.1 关于全球碳捕集与封存研究院
1.2 关于本报告
1.3 缩写
1.4 CEO寄语

2.0 应对气候挑战：需要CCS

3.0 碳捕集与封存全球现状
3.1 全球CCS设施更新
3.2 撬动加速部署的政策杠杆
3.3 全球二氧化碳封存一览
3.4 法律和监管一览

4.0 区域现状一览
4.1 国际气候政策一览
4.2 美洲
4.3 欧洲
4.4 中东和中亚
4.5 亚太

5.0 CCS的发展: 技术及应用
5.1 天然气
5.2 氢
5.3 电力行业的CCS
5.4 生物质能结合CCS（BECCS）
5.5 直接空气捕集(DAC)
5.6 CO_2的利用
5.7 CCS的创新
5.8 向净零碳未来的产业转型

6.0 附件

7.0 参考文献

6.1
大规模运行中CCS设施

编号	项目名称	状态	国家	投运时间	行业	捕集能力 (Mtpa)	捕集类型	封存类型
1	GORGON CARBON DIOXIDE INJECTION	运行中	澳大利亚	2019	天然气处理	3.4 - 4.0	工业分离	专用地质封存
2	吉林油田 CO_2-EOR	运行中	中国	2018	天然气处理	0.6	工业分离	EOR
3	ILLINOIS INDUSTRIAL CARBON CAPTURE AND STORAGE	运行中	美国	2017	乙醇生产	1	工业分离	专用地质封存
4	PETRA NOVA CARBON CAPTURE	运行中	美国	2017	发电	1.4	燃烧后捕集	EOR
5	ABU DHABI CCS (PHASE 1 BEING EMIRATES STEEL INDUSTRIES)	运行中	阿联酋	2016	钢铁制造	0.8	工业分离	EOR
6	QUEST	运行中	加拿大	2015	制氢用于炼油	1	工业分离	专用地质封存
7	UTHMANIYAH CO_2-EOR	运行中	沙特	2015	天然气处理	0.8	工业分离	EOR
8	BOUNDARY DAM CCS	运行中	加拿大	2014	发电	1	燃烧后捕集	EOR
9	PETROBRAS SANTOS BASIN PRE-SALT OIL	运行中	巴西	2013	天然气处理	3	工业分离	EOR
10	COFFEYVILLE GASIFICATION PLANT	运行中	美国	2013	化肥生产	1	工业分离	EOR
11	AIR PRODUCTS STEAM METHANE REFORMER	运行中	美国	2013	制氢用于炼油	1	工业分离	EOR
12	LOST CABIN GAS PLANT	运行中	美国	2013	天然气处理	0.9	工业分离	EOR
13	CENTURY PLANT	运行中	美国	2010	天然气处理	8.4	工业分离	EOR
14	SNØHVIT CO_2 STORAGE	运行中	挪威	2008	天然气处理	0.7	工业分离	专用地质封存
15	GREAT PLAINS SYNFUELS PLANT AND WEYBURN-MIDALE	运行中	美国	2000	合成天然气	3	工业分离	EOR
16	SLEIPNER CO_2 STORAGE	运行中	挪威	1996	天然气处理	1	工业分离	专用地质封存
17	SHUTE CREEK GAS PROCESSING	运行中	美国	1986	天然气处理	7	工业分离	EOR
18	ENID FERTILISER	运行中	美国	1982	化肥生产	0.7	工业分离	EOR
19	TERRELL NATURAL PROCESSING PLANT (FORMERLY VAL VERDE NATURAL GAS PLANTS)	运行中	美国	1972	天然气处理	0.4 - 0.5	工业分离	EOR

6.2
在建、高级开发和早期开发阶段的大规模CCS设施

编号	项目名称	状态	国家	投运时间	行业	捕集能力 (Mtpa)	捕集类型	封存类型
20	ALBERTA CARBON TRUNK LINE ("ACTL") WITH NORTH WEST REDWATER PARTNERSHIP'S STURGEON REFINERY CO_2 STREAM	在建	加拿大	2020	制氢用于炼油	1.2 - 1.4	工业分离	EOR
21	ALBERTA CARBON TRUNK LINE ("ACTL") WITH AGRIUM CO_2 STREAM	在建	加拿大	2020	化肥生产	0.3 - 0.6	工业分离	EOR
22	中石化齐鲁石化CCS	在建	中国	2020	化工生产	0.40	工业分离	EOR
23	延长联合碳捕集和封存示范项目	在建	中国	2020 - 2021	化工生产	0.41	工业分离	EOR
24	WABASH CO_2 SEQUESTRATION	高级开发	美国	2022	化肥生产	1.5-1.75	工业分离	专用地质封存
25	PORT OF ROTTERDAM CCUS BACKBONE INITIATIVE (PORTHOS)	高级开发	荷兰	2023	多行业	2.0 -5.0	多种类型	专用地质封存
26	NORWAY FULL CHAIN CCS	高级开发	挪威	2023-2024	水泥制造和废物发电	0.80	多种类型	专用地质封存
27	LAKE CHARLES METHANOL	高级开发	美国	2024	化工生产	4.20	工业分离	EOR
28	ABU DHABI CCS PHASE 2 - NATURAL GAS PROCESSING PLANT	高级开发	阿联酋	2025	天然气处理	1.9 - 2.3	工业分离	EOR
29	DRY FORK INTEGRATED COMMERCIAL CCS	高级开发	美国	2025	发电	3.00	燃烧后捕集	专用地质封存和EOR
30	CARBONSAFE ILLINOIS – MACON COUNTY	高级开发	美国	2025	发电和乙醇生产	2.0 - 5.0	燃烧后捕集和工业分离	专用地质封存和EOR
31	PROJECT TUNDRA	高级开发	美国	2025 - 2026	发电	3.1 - 3.6	燃烧后捕集	专用地质封存和EOR
32	INTEGRATED MID-CONTINENT STACKED CARBON STORAGE HUB	高级开发	美国	2025 - 2035	乙醇生产发电和/或炼油	1.90	多种类型	专用地质封存和EOR
33	CARBONNET	高级开发	澳大利亚	2020's	评估中	3.00	评估中	专用地质封存
34	OXY AND WHITE ENERGY ETHANOL EOR FACILITY	早期开发	美国	2021	乙醇生产	0.6-0.7	工业分离	EOR
35	中石化华东CCS	早期开发	中国	2021	化肥生产	0.50	工业分离	EOR
36	HYDROGEN 2 MAGNUM (H2M)	早期开发	荷兰	2024	发电	2.00	评估中	专用地质封存

编号	项目名称	状态	国家	投运时间	行业	捕集能力 (Mtpa)	捕集类型	封存类型
37	THE CLEAN GAS	早期开发	英国	2024-2025	发电	1.7 - 2.0	燃烧后捕集	专用地质封存
38	CALEDONIA CLEAN ENERGY	早期开发	英国	2025	发电	3.00	燃烧后捕集	专用地质封存
39	OXY AND CARBON ENGINEERING DIRECT AIR CAPTURE AND EOR	早期开发	美国	2025	N/A	1.0	直接空气捕集	EOR
40	SOUTH WEST HUB	早期开发	澳大利亚	2025	化肥生产和发电	2.50	工业分离	专用地质封存
41	HYNET NORTH	早期开发	英国	2025前后	制氢	2.00	工业分离	专用地质封存
42	PROJECT ECO2S: EARLY CO_2STORAGE COMPLEX IN KEMPER COUNTY	早期开发	美国	2026	评估中	3.00	评估中	专用地质封存
43	NORTHERN GAS NETWORK H21NORTH OF ENGLAND	早期开发	英国	2026 -2028	制氢	1.5 -20	工业分离	专用地质封存
44	ERVIA CORK CCS	早期开发	爱尔兰	2028	发电和制氢	2.50	评估中	专用地质封存
45	华润海丰联合碳捕集与封存示范项目	早期开发	中国	2020's	发电	1.00	燃烧后捕集	专用地质封存
46	华能绿色煤电IGCC项目(阶段 3)	早期开发	中国	2020's	发电	2.00	燃烧后捕集（气化）	评估中
47	KOREA-CCS 1 &	早期开发	韩国	2020's	发电	1.00	燃烧后捕集	专用地质封存
48	神华宁夏 CTL	早期开发	中国	2020's	煤转油 (CTL)	2.00	工业分离	评估中
49	中石化胜利CCS	早期开发	中国	2020's	发电	1.00	燃烧后捕集	专用地质封存
50	NET ZERO TEESSIDE	早期开发	英国	2020's	多行业	0.8 - 10	多种类型	专用地质封存
51	ACORN SCALABLE CCSDEVELOPMENT	早期开发	英国	2030前	多行业	3.0 - 4.0	评估中	专用地质封存

6.3 CCS氢能战略

国家	氢能战略中关于CCS的覆盖/详情/重要性
澳大利亚	国家氢能工作组在2019年底之前制定国家氢能战略的咨询过程中，已经在考虑使用化石燃料和CCS制氢。此外，氢能供应链（HESC）液化和装载设施的建设于2019年7月启动。HESC是这个项目得到来自澳大利亚和日本政府和行业合作伙伴的联手支持，将对拉特罗布河谷的褐煤转化为氢气并运往日本以及使用CarbonNet CCS项目运输和封存吉普斯兰盆地（Gippsland basin）附近排放物的可行性着力进行研究。
日本	作为2019年G20的主办国，日本利用这一重要平台突出强调氢能的重要性。这包括主办第一次氢能部长级会议，并在同月通过了一项碳中和战略，其中包括碳捕集和氢能两方面的创新目标。此外，还启动了日本H2机动计划，目标是到2021年[143]建设80个燃料补给站。
美国	美国在CCS制氢方面也取得显著进展，增加45Q税收抵免政策，鼓励CO_2和其他产品的转化，其中包括与氢结合的转化[144]。此外，对加州低碳燃料标准的修订使CCUS生效。这为SMR制氢企业通过碳捕集获得信用提供了一种途径，同时也激励氢燃料生产的推广，进而消除了氢能利用的一个障碍。
英国	在英国，预计大部分氢气生产将通过使用天然气CCS，且受氢能专门政策、审查和投资的驱动，因为氢气是一种低排放技术，可以使运输、供暖及工业[145]等行业实现脱碳。 例如，经过详细的经济和技术可行性研究后，H21 Leeds Citygate项目建议将英国利兹市百分之百转化为氢气，对现有天然气网络脱碳。该项目使用天然气蒸汽甲烷重整工艺制氢，产生的碳排放将被封存在北海之下。
欧洲	FCH JU于2019年2月发布欧洲氢能路线图[146]。FCH JU由代表欧洲委员会、欧洲氢能和欧洲氢能研究的成员组成。为了支持燃料电池和氢能技术的研究与开发，该研究报告的重点是2050年前实现大规模部署的途径。蒸汽甲烷重整制氢工艺被视为运输和工业部门脱碳的重要途径。该研究尤其建议将CCS作为大规模极低碳排放制氢的一个行之有效的方法。 欧洲委员会于2018年11月发布欧盟的“所有人的清洁地球”脱碳战略。该战略考虑了2050年前实现脱碳的几种途径。使用CCS天然气蒸汽重整制氢，用于运输、供暖和工业三个部门的储能、能源载体以及作为工业原料，被认为是这几个部门可能的脱碳策略。
荷兰	氢能路线图的大纲[147]由TKI New Gas (Top Sector Energy) 代表经济事务和气候政策部起草。该报告于2018年3月发布，探讨了在工业和运输部门使用氢气的脱碳路径。该报告建议探索使用CCS从天然气中制氢（蓝色氢）的方法，以加速氢的大规模应用。

7.0
参考文献

1.0 前言
1.1 关于全球碳捕集与封存研究院
1.2 关于本报告
1.3 缩写
1.4 CEO 寄语

2.0 应对气候挑战: 需要CCS

3.0 碳捕集与封存全球现状
3.1 全球CCS设施更新
3.2 撬动加速部署的政策杠杆
3.3 全球二氧化碳封存一览
3.4 法律和监管一览

4.0 区域现状一览
4.1 国际气候政策一览
4.2 美洲
4.3 欧洲
4.4 中东和中亚
4.5 亚太

5.0 CCS的发展: 技术及应用
5.1 天然气
5.2 氢
5.3 电力行业的CCS
5.4 生物质能结合CCS (BECCS)
5.5 直接空气捕集(DAC)
5.6 CO_2的利用
5.7 CCS的创新
5.8 向净零碳未来的产业转型

6.0 附件

7.0 参考文献

7.0 参考文献

1.0 前言

N/A

应对气候挑战: CCS的角色

1. 国际能源署（2019）, 全球能源和二氧化碳状态报告, 访问地址<https://www.International Energy Agency.org/geco/>

2. 政府间气候变化专门委员会（2018年）, 全球升温1.5°C在加强全球应对气候变化威胁的背景下, IPCC关于全球升温超过工业化前水平1.5°C的影响及相关全球温室气体排放途径的特别报告, 访问地址：<https://www.ipcc.ch/sr15/>

3. 国际能源署（2019年）, 《 2019年世界能源展望》, 查阅<www.International Energy Agency.org/ weo><www.International Energy Agency.org/ weo>

3.0 CCS现状
3.1 全球CCS设施更新

4. 全球碳捕集与封存研究院（2019a）, “CO_2RE数据库，设施报告”，访问地址 <https://CO2RE.co/FacilityData>

5. 全球碳捕集与封存研究院 (2018), 2018年全球CCS现状报告, 墨尔本, 澳大利亚, 访问地址 <https:// www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/>

6. 埃克森美孚（2019）, 2019年能源和碳摘要, 访问地址 <https://corporate.exxonmobil.com/-/media/ Global/Files/energyand-carbon-summary/Energy-and-carbon-summary.pdf>

7. 大平原盆地电力合作项目(2019), 大平原合成燃料厂, 访问地址 <https://basinelectric.com/ sites/CMS/files/files/pdf/Fact-Sheets-Media-Kit/DGC-fact-sheet-8-19.pdf>

8. Equinor (2018), Equinor – 气候变化 2018, 访问地址 <https://www.equinor.com/content/dam/statoil/documents/ sustainability-reports/CDP-Equinor-response-2018.pdf>

9. OGCI (2019), OGCI 2019 年度报告扩大旨在实现净零排放的行动, 访问地址<https:// oilandgasclimateinitiative.com/wp-content/uploads/2019/09/ OGCI-Annual-Report-2019.pdf>

10. Air Products (2019), Air Products 2019年可持续报告, 访问地址<http://www.airproducts.com/~/media/Files/ PDF/company/2019-Sustainability-Report.pdf>

11. 壳牌 (2019), ‘Quest 碳捕集与封存’, 2019年10月10日,访问地址 <https://www.shell.ca/en_ca/about-us/ projects-and-sites/quest-carbon-capture-and-storage-project. html>

12. Saskpower（2019）, “Boundary Dam碳捕集项目”,2019年10月15日, 访问地址<https://www.saskpower. com/Our-Power-Future/Infrastructure-Projects/Carbon- Capture-and-Storage/ Boundary-Dam-Carbon-Capture- Project>

13. 美国国家能源技术实验室（2019）, “ CarbonSAFE”,访问地址https://www.netl.doe.gov/coal/ carbon-storage/storage-infrastructure/carbonsafe>.

14. 美国能源部（2019年）,《 FOA 2058：煤电厂和气电厂碳捕集系统的前端工程设计（FEED）研究》,访问地址 <https:// www.energy.gov/fe/foa-2058-front-end-engineering-design- feed-studies-carboncapture- systems-coal-and-natural-gas>.

15. 美国能源部（2019年）,《 FOA 2058：煤炭和天然气电厂的碳捕集系统的前端工程设计（FEED）研究》,访问地址 <https:// www.energy.gov/fe/foa-2058-front-end-engineering-design- feed-studies-carboncapture- systems-coal-and-natural-gas>.

16. 全球碳捕集与封存研究院（2016年）, 《了解工业CCS枢纽和集群》访问地址https://www. globalccsinstitute.com/wpcontent/uploads/2019/08/ Understanding-Industrial-CCS-hubs-andclusters.pdf>.

17. Zapantis,A.,Townsend,A. 和Rassool,D.（2019年）,《鼓励大规模部署CCS的政策重点》,墨尔本全球碳捕集与封存研究院, 访问地址< https:// www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/04/ TL-Report-Policy-prorities-to-incentivise-the-large-scale-deployment-of-CCS-digital-final-2019-1.pdf>.

18. Northern Lights CCS（2019）, “Northern Lights 项目”, 访问地址<https://northernlightsccs.eu/>.

3.2 撬动加速部署的政策杠杆

19. 经合组织/国际能源署和联合国工业发展组织（2011年）,《工业应用中的碳捕集与封存技术路线图》, 访问地址 <https://www.unido.org/sites/ default/files/2011-09/CCS_Industry_Roadmap_WEB_1.pdf>

20. 碳定价领导者联盟（2017）, 碳价格高级别委员会的报告, 访问地址 <https://static1.squarespace.com/static/54ff9c5ce4b0a53decccfb4c/ t/59b7f2409f8dce5316811916/1505227332748/ CarbonPricing_FullReport.pdf>

21. 世界银行集团(2018), 《 2018年碳定价状况和趋势》, 世界银行集团, 华盛顿特区, 访问地址 <https://openknowledge.worldbank.org/ bitstream/handle/10986/29687/9781464812927. pdf?sequence=5&isAllowed=y>

3.3 全球二氧化碳封存一览

22. 封存地图数据来源:

亚行（2013年）,《东南亚碳捕集与封存的前景》。亚洲开发银行：马尼拉。

Aktouf, A. and Bentellis, A. (2016), ‘阿尔及利亚的二氧化碳封存评估和有效容量’, Springer Plus. Springer International Publishing, 5(1), pp. 1–24.

Carneiro， J. F.和Alberto， M.（2014）， “莫桑比克Rovuma沉积盆地CO_2封存潜力的初步评估”， Energy Procedia. Elsevier B.V.， 第63页，第5141–5152页

碳封存工作组（2010），“澳大利亚国家碳地图和基础设施计划”. 能源和旅游：堪培拉。第138页

Poulsen, N. et al. (2011), ‘CO2StoP 最终报告对欧洲CO_2封存潜力的评估.欧盟委员会合同编号ENER / C1 / 154-2011-SI2 . 611598’

国家能源技术实验室(2015), ‘碳封存图集-第五版”。美国能源部, 第114页.

Field, B. et al. (2009), 新西兰二氧化碳封存地点评估：第二阶段. 温室气体技术合作研究中心, 堪培拉, 澳大利亚堪培拉, CO2CRC出版号RPT09-1579. 第58页.

Hedriana, O. et al. (2017), ‘南苏门答腊和西爪哇盆地的CO_2-采收率和封存能力评估’, Energy Procedia. The Author(s), 114(（2016年11月）), 第4666-4678页.

国际能源署(2015), ‘通过提高采油率来封存二氧化碳，将EOR与CO_2封存（EOR +）相结合以获取利润’. 经合组织/国际能源机构：巴黎.

Holloway, S. et al. (2008), ‘印度次大陆二氧化碳封存潜力的区域评估’, 国际能源机构温室气体研发计划. 2008/2, 2008年5月.

Junin. R. et al. (2016), ‘对马来西亚潜在的沉积盆地进行二氧化碳封存评估. WEENTECH 能源学报2016 年8月16日至18日英国爱丁堡赫瑞瓦特大学 第3卷: 国际能源大会’.

Kim, A. et al. (2014), ‘国际能源大会’, 《地球科学杂志》, 第18（2）期, 第167–179页.

挪威石油局(2011), ‘二氧化碳封存图集-挪威海’ 挪威石油局：斯塔万格，第179页, 第60页.

Takahashi, T. et al. (2009), ‘日本对CO_2含水层封存潜力的估算’, Energy Procedia, 1(1), 第2631–2638页.

Secretaría de Energía (SENER), (2014), ‘墨西哥的CCUS技术路线图. Secretaría de Energía. p.33.

Viebahn, P., Vallentin, D. 和 Höller, S. (2014), ‘印度能源部门的碳捕集与封存（CCS）前景研究-综合评估’, Applied Energy. Elsevier Ltd, 117, 第62-75页.

Viljoen, J. H. A. et al., (2010), 《南非二氧化碳的地质封存技术报告》. 地球科学委员会. P. 240.

Wei, N. et al. (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》, 第11期, 第20-30页.

23. 政府间气候变化专门委员会(2018), 全球升温 1.5°C. 在加强全球应对气候变化威胁的背景下，IPCC关于全球升温超过工业化前水平1.5°C的影响及相关全球温室气体排放途径的特别报告, 访问地址<https://www.ipcc.ch/sr15/>.

24. 国际能源署(2017), 2017年能源技术展望,经合组织/国际能源机构, 巴黎, 访问地址 <https://www.International Energy Agency.org/etp/>.

25. Mac Dowell et al. (2017), ‘二氧化碳捕集和利用在缓解气候变化中的作用, 自然气候变化, vol. 7, 第243-249页.

26. 国际能源署温室气体研发计划, (2017), CCS行业扩展率–与行业同类的比较, 2014/TR6.

27. 国际能源署 (2015), 通过提高石油采收率来封存二氧化碳: 将EOR与CO_2封存（EOR）相结合以获取利润.

3.4 法律和监管一览

N/A

4.0 区域现状一览
4.1 国际气候政策一览

28. Zakkour, P., 和 Wolfgang, H., (2019), 后巴黎时代的CCS机制. KS--2018-DP52. Riyadh: KAPSARC. doi: https://doi.org/10.30573/KS--2019-DP52

29. UNFCCC (2019), 长期战略的沟通, 访问地址 <https://unfccc.int/process/the-paris- agreement/long-term-strategies>.

30. 国际能源署(2013), 技术路线图–碳捕集和封存, 访问地址 <http://www. International Energy Agency.org/publications/freepublications/ publication/technology-roadmap-carbon-capture-and-storage-2013.html>.

31. 时间轴的数据来源:

Droge, S. 和 Rattani, V (2019), “卡托维兹气候峰会之后，欧盟气候议程的基础”, SWP Comment 2019/C 09, February 2019, doi:10.18449/2019C09: https://www.swp-berlin.org/10.18449/2019C09/.

Fransen, T., E. Northrop, K. Mogelgaard, 和 K. Levin (2017) “到2020年增强NDC：实现《巴黎协定》的目标.”工作文件. 华盛顿特区. 世界资源研究所. 访问地址 <http://www.wri.org/publication/ NDC-enhancement-by-2020>.

4.2 美洲

32. 全球碳捕集与封存研究院(2019a), ‘CO2RE数据库，设施报’, 访问地址<https://CO2RE.co/FacilityData>.

33. 清洁空气工作组(2019), 情况说明书：国家和公共事业的气候变化目标转向减少碳排放技术, 访问地址 <https://www.catf.us/wp-content/uploads/2019/05/CES- June-30-2019.pdf>.

34. 美国环境保护局(2019), 美国温室气体排放和碳汇清单, 访问地址<https://www.epa.gov/ghg-emissions/ inventory-us-greenhousegas-emissions-and-sinks>.

35. 美国能源信息协会(2019), 美国新发电厂预计将主要为天然气联合循环和太阳能光伏发电, 访问地址 <https://www.eia.gov/todayinenergy/ detail.php?id=38612>.

36. Clemmer, S., Richardson, J., Sattler, S. 和 Lochbaum, D., (2018), 核电困境，利润下降，工厂关闭和碳排放上升的威胁, 有关科学家联合会2018, 访问地址 <https://www.ucsusa.org/sites/default/files/attach/2018/11/Nuclear-Power- Dilemma-full-report.pdf>.

37. Nagabhushan, D. 和 Thompson, J., (2019), 美国电力部门的碳捕集与封存-45Q联邦税收抵免的影响, 清洁空气特别工作组, 波士顿, 访问地址 <https://www.catf.us/wp-content/uploads/2019/02/CATF_CCS_United_States_Power_Sector.pdf>.

38. 国际能源署(2019), 市场报告系列：天然气, 访问地址 <https://webstore.International Energy Agency.org/market-report-series-gas-2019>.

39. 图15数据来源:

Bennet, S. 和 Stanley, T. (2018), 评论：美国预算法案可能有助于碳捕集回到正轨, 国际能源署, 巴黎, 访问地址: < https://www.iea.org/newsroom/news/2018/march/commentary-us-budget-bill-may-help-carbon-capture-get-back-on-track.html>.

40. Townsend A. 和Havercroft, I. (2019), LCFS和CCS协议：政策制定者和项目开发商概述, 全球碳捕集与封存研究院 2019, 墨尔本, 访问地址< https:// www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/05/ LCFS-and-CCS-Protocol_digital_version-2.pdf>.

4.3 欧洲

41. 欧洲委员会(2018), 欧洲对繁荣、现代、竞争和气候中和的经济的战略远景, 访问地址<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018DC0773>.

42. 欧洲委员会(2018), 关于建立促进可持续投资框架的欧洲议会和理事会条例的提案, 访问地址 <https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/initiative/1185/publication/238025/attachment/090166e5baea4e23_en>.

43. 欧盟可持续金融技术专家组(2019), 可持续的欧洲经济分类法技术报告, 访问地址<https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/business_economy_euro/banking_and_finance/documents/190618-sustainable-finance-teg-report-taxonomy_en.pdf>.

44. CEPS (2018), '鹿特丹港CCUS, Porthos项目', [演示文稿], 访问地址<http://www.ceps-ech.eu/sites/default/files/MDriessen_CEPS%20workshop%204%20december%202018.pdf>.

欧洲委员会(2019), 从制定第四个PCI清单的角度看跨境二氧化碳（CO_2）运输网络中的候选PCI项目, 访问地址 <https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/detailed_information_regarding_the_candidate_projects_in_co2_ network_0.pdf>

欧盟委员会(2017), Teesside 二氧化碳枢纽（英国、荷兰、比利时、德国进一步发展）跨境二氧化碳网络, 访问地址 <http://c.europa.eu/energy/maps/pci_fiches/pci_12_1_en_2017.pdf>.

45. 欧洲委员会(2019), 创新基金, 访问地址 <https://ec.europa.eu/clima/policies/ innovation-fund_en>.

46. Drax (2019), 现在正在首个BECCS试点项目中捕集二氧化碳, 访问地址, <https://www.drax.com/press_release/world-first-co2-beccs-ccus/>.

47. Pale Blue Dot (2019), Acorn CCS和氢项目, 访问地址 <https://pale-blu.com/acorn/>.

48. 全球碳捕集与封存研究院(2016), "CCS全球状况：特别报告，了解工业枢纽和产业集群", 访问地址 <https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/08/Understanding-Industrial-CCS-hubs-andclusters. Pdf>

49. Align CCUS (2019), '关于项目', 访问地址<http://www.alignccus.eu/about-project>.

50. 图19改编自:

Overa, S. (2019), 讲述挪威CCS的故事，北极光：欧洲二氧化碳的运输和封存项目, [视频网络研讨会], 2019年5月9日, 网址: < https://www.globalccsinstitute.com/resources/audio-and-visual-library/webinar-telling-the-norwegian-ccs-story-part-iii-northern-lights-a-european-co2-transport-and-storage-project/>.

51. 欧洲委员会(2019), 欧洲CCS和CCU的潜力,2019年6月5日至6日举行的欧洲天然气监管论坛第三十二次会议报告, 访问地址 <https://ec.europa.eu/info/sites/info/files/ iogp_-_report_-_ccs_ccu.pdf

4.4 中东和中亚

52. 欧洲委员会(2018), 石化产品的未来 迈向更可持续的塑料和肥料, 执行摘要, 访问地址 <https://webstore.International Energy Agency.org/download/summary/2310?fileName=English-Future-Petrochemicals-ES.pdf>

53. Consoli, C. (2018), CCS封存指标(CCS-SI), 全球碳捕集与封存研究院, 墨尔本, 访问地址<https://globalccsinstitute.com>

54. Jaganathan, J. (2018), '澳大利亚11月从卡塔尔手中夺冠，成世界最大LNG出口国，路透社, 12月10日[在线发布], 访问地址< Reuters https://www.reuters.com/article/us- australia-qatar-lng/australia-grabs-worlds-biggest-lng-exporter- crown-from-qatar-in-nov-idUSKBN1O907N>.

55. 国际能源署(2019), 氢的未来，抓住今天的机遇,国际能源署, 巴黎, 访问地址< https://www.International Energy Agency.org/hydrogen2019/>

56. Adnoc (2019), ADNOC加强其领导作用和对环境管理的承诺，巩固其作为最低温室气体排放企业的地位，访问地址<https://www. adnoc.ae/en/news-and-media/pressreleases/2019/adnoc- reinforces-leadership-role-and-commitment-to-environmental- stewardship>.

57. Saadi, D. (2018), 'Adnoc扩大碳捕集项目以减少排放并提升石油采收，国家报，11月28日 [在线发布], 访问地址 <https://www.thenational.ae/business/energy/adnoc-toexpand-carbon-capture-projects-to-reduce-emissions-and-boost-oil-recovery-1.796756>.

58. BP (2019), BP统计评论– 2019 2018年中东的能源市场, 访问地址, <https://www.bp.com/content/ dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy- economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-middle- east-insights.pdf>

59. Zawadzki, S. 和 Kravtsova, E. (2019), '卡塔尔开设二氧化碳封存工厂，目标是到2025年年产500万吨二氧化碳', 10月8日[在线发布] 访问地址, <https://www.nasdaq.com/articles/ qatar-opens-co2-storage-plant-targets-5-mln-t-a-year-by-2025-2019-10-08>.

60. Aljazeera (2019), '卡塔尔建立大规模二氧化碳封存工厂', 10月8日[在线发布] 访问地址, <https://www.aljazeera. com/news/2019/10/qatar-building-massive-co2-storage- plant-191008103148682.html>.

61. 国际能源机构(2019), 统计数据浏览器, 访问地址 <https://www.International Energy Agency.org/statistics/>.

4.5 亚太

62. Carbon Brief (2019), 绘制地图: 全球燃煤电厂, 访问地址 <https://www.carbonbrief.org/mapped-worlds- coal-power-plants>.

63. 国际能源署(2018), 2018年煤炭：到2023年的分析和预测, 国际能源署, 巴黎, 访问地址< https://webstore.International Energy Agency.org/market- report-series-coal-2018>.

64. 国际能源署(2019), 市场报告系列：天然气2019, 访问地址<https://webstore.International Energy Agency.org/market-report-series-gas-2019>.

65. 世界钢铁协会(2019), 2019年世界钢铁指数,访问地址 <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:96d7a585-e6b2-4d63-b943-4cd9ab621a91/World%2520Steel%2520in%2520Figures%25202019.pdf>.

66. 全球水泥(2017), 2017年至2018年全球水泥百强报告, 访问地址 <https://www.globalcement. com/magazine/articles/1054-global-cement-top-100-report-2017-2018>.

67. 全球碳捕集与封存研究院(2019a), 'CO2RE数据库，设施报告', 访问地址<https://CO2RE.co/FacilityData>.

68. 国际能源署(2019), 全球能源和二氧化碳状况报告, 访问地址<https://www.International Energy Agency.org/geco/>.

69. Carbon Brief (2019), 客座文章：新煤炭计划如何改变全球, 访问地址<https://www. carbonbrief.org/mapped-worlds-coal-powerplants>.

70. Carbon Brief (2019),), 客座文章：新煤炭计划如何改变全球, 访问地址 <https://www. carbonbrief.org/mapped-worlds-coal-powerplants>.

71. 国际能源署(2019), "通过CCUS改造产业", 国际能源署, 巴黎, 访问地址<www.International Energy Agency.org/publications/reports/TransformingIndustrythrough CCUS/>.

72. 国际能源署 (2018), "IEA国家能源政策, 澳大利亚 2018年回顾", 国际能源署, 巴黎, 访问地址 <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ EnergyPoliciesofIEACountriesAustralia2018Review.pdf>

5.0 CCS 发展: 技术及应用

5.1 天然气: 脱碳电力和工业，开启能源转型

73. 国际能源署(2019), 市场报告系列：天然气2019, 访问地址 <https://webstore.International Energy Agency.org/market-report-series-gas-2019>.

74. 国际能源署(2019), 市场报告系列：天然气2019, 访问地址 <https://webstore.International Energy Agency.org/market-report-series-gas-2019>.

75. 国际能源署 (2018), 2018年世界能源展望, International 国际能源署, 巴黎, 访问地址 <https://doi.org/10.1787/weo-2018-en>.

76. 国际能源署(2018), 2018年世界能源展望, 国际能源署, 巴黎, 访问地址 <https://doi.org/10.1787/weo-2018-en>.

77. 国际能源署(2019), 市场报告系列：天然气2019, 访问地址 <https://webstore.International Energy Agency.org/market-report-series-gas-2019>.

78. Irlam, L. (2017), 全球碳捕集与封存成本, 全球碳捕集与封存研究院, 访问地址 <https://www.globalccsinstitute.com/archive/hub/publications/201688/global-ccs-cost-updatev4.pdf>.

79. 国际能源署(2018), 2018年世界能源展望, 国际能源署, 巴黎, 访问地址<https://doi.org/10.1787/weo-2018-en>.

80. 全球碳捕集与封存研究院(2019a), 'CO2RE数据库，设施报告', 访问地址<https://CO2RE.co/FacilityData>.

81. 国际能源署(2018), 2018年世界能源展望, 国际能源署, 巴黎, 访问地址 <https://doi.org/10.1787/weo-2018-en>.

82. 国际能源署(2019), 市场报告系列：天然气2019, 访问 <https://webstore.International Energy Agency.org/market-report-series-gas-2019>.

83. 国际能源署(2018), 2018年世界能源展望, 国际能源署, 巴黎, 访问地址 <https://doi.org/10.1787/weo-2018-en>

84. 雪佛龙澳大利亚(2019), 情况说明书：高更二氧化碳注入项目, 访问地址 <https://australia.chevron. com/-/media/australia/publications/documents/gorgon-co2-injection-project.pdf>.

85. Sepulveda, N. A., Jenkins, J. D., de Sisternes, F. J., & Lester, R. K. (2018). 丰厚的低碳电力资源在电力行业深度脱碳中的作用. Joule, 2(11), 2403-2420.

86. 国际能源署(2019), 碳捕集、利用和封存, 访问地址 <https://www.International Energy Agency.org/topics/carbon-capture-and-storage/>.

87. 国际能源署(2018), 2018年世界能源展望, 国际能源署, 巴黎, 访问地址 <https://doi.org/10.1787/weo-2018-en>.

5.2 氢能

88. Kosturjak, A., Dey, T., Young, M.D., Whetton, S. (2019), 推进氢的发展：从19个促进全球氢发展的计划中吸取经验, 未来燃料CRC, 访问地址 <https://www.futurefuelscrc.com/blog/2019/07/new- report-shows-global-hydrogen-focus>.

89. 国际能源署(2019), 氢的未来，抓住今天的机遇, 国际能源署, 巴黎, 访问地址< https://www.International Energy Agency. org/hydrogen2019/>.

90. 澳大利亚联邦(2018), 为澳大利亚的未来发展氢,访问地址: <http://www.coagenergycouncil.gov.au>.

91. 国际能源署(2019), 氢的未来，抓住今天的机遇, 国际能源署, 巴黎, 访问地址< https://www.International Energy Agency. org/hydrogen2019/>.

92. 国际能源署(2019), 氢的未来，抓住今天的机遇, 国际能源署, 巴黎, 访问地址 < https://www.International Energy Agency. org/hydrogen2019/>.

93. 国际能源署(2019), 氢的未来，抓住今天的机遇, 国际能源署, 巴黎, 访问地址< https://www.International Energy Agency. org/hydrogen2019/>.

94. 全球碳捕集与封存研究院(2019b), ‘CO2RE数据库，设施报告’, 访问地址<https://CO2RE.co/ ClimateChange>.

95. 欧洲委员会(2018), 欧洲对繁荣、现代、竞争和气候中和的经济的战略远景, 访问地址<https://ec.europa. eu/clima/policies/strategies/2050_en>.

96. Kosturjak, A., Dey, T., Young, M.D., Whetton, S. (2019), 推进氢的发展：从19个促进全球氢发展的计划中吸取经验, 未来燃料CRC, 访问地址 <https://www.futurefuelscrc.com/blog/2019/07/new- report-shows-global-hydrogen-focus>.

97. 气候变化委员会 (2018), 低碳经济中的氢气, 访问地址 <https://www.theccc.org.uk/ wp-content/uploads/2018/11/Hydrogen-in-a-low-carbon-economy.pdf>.

98. NETL. (n.d.) (2019), 大平原合成燃料厂, 访问地址 <https://www.netl.doe.gov/research/Coal/energy-systems/ gasification/gasifipedia/great-plains>.

99. 全球碳捕集与封存研究院(2019a), ‘全球碳捕集与封存研究院<https://CO2RE.co/FacilityData>.

100. 国际能源署(2019), 氢的未来，抓住今天的机遇, 国际能源署, 巴黎, 访问地址< https://www.International Energy Agency. org/hydrogen2019/>.

101. 国际能源署(2019), 氢的未来，抓住今天的机遇, 国际能源署, 巴黎, 访问地址 < https://www.International Energy Agency. org/hydrogen2019/>.

102. 国际能源署(2018), 2018年世界能源展望, 国际能源署, 巴黎, 访问地址 <https://doi.org/10.1787/weo-2018-en>.

103. Bruce S, Temminghoff M, Hayward J, Schmidt E, Munnings C, Palfreyman D, Hartley P (2018), 国家氢能路线图. CSIRO, 澳大利亚.

104. Zapantis, A., Townsend, A. 和 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, 墨尔本, 访问地址 < https:// www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/04/ TL-Report-Policy-prorities-to-incentivise-the-large-scale-deployment-of-CCS-digital-final-2019-1.pdf>.

5.3 电力行业的CCS

105. oskow, P.L., (2019), 间歇性可再生能源发电的零售电力市场的挑战：美国经验, 牛津经济政策评论, vol 35.2, pp.291–331, 访问地址<https://doi.org/10.1093/ oxrep/grz001>.

106. Boston, A., Bongers, G., Byrom, S. (2018可再生能源和NEM：零排放的极限和进一步措施, Gamma Energy Technology P/L, 布里斯班, 澳大利亚, 访问地址< https://anlecrd.com.au/wp-content/uploads/2019/02/ Rpt-2-Final-web.pdf>.

107. 国际能源署(2018), 2018年世界能源展望, 国际能源署, 巴黎, 访问地址<https:// doi.org/10.1787/weo-2018-en>.

108. 国际能源署(2019), 确保低碳发电来源的投资, 访问地址<https://webstore.International Energy Agency.org/securing- investments-in-low-carbon-power-generation-sources>.

109. 国际能源署(2019), 追踪清洁能源进展，访问地址 <https://www.International Energy Agency.org/tcep/>.

5.4 生物质能结合CCS (BECCS)

110. 政府间气候变化专门委员会(2018), 全球升温1.5°C. 在加强全球应对气候变化威胁的背景下，IPCC关于全球升温超过工业化前水平1.5°C的影响及相关全球温室气体排放途径的特别报告, 访问地址<https://www.ipcc.ch/sr15/>.

111. 欧洲科学院科学顾问委员会(2018), 负排放技术：在实现《巴黎协定》目标方面发挥什么作用？, 访问地址 <https://www.easac.eu/>.

112. Wilshere, A. 和 Davies-Barnard, T., (2015), BECCS负排放的行星极限, 1104872 / AVOID 2 WPD.2a 报告 1, 访问地址 <http://avoid-net-uk.cc.ic.ac.uk/wp-content/uploads/delightful-downloads/2015/07/Planetary-limits-to-BECCS-negative-emissions-AVOID-2_WPD2a_ v1.1.pdf>.

113. 粮农组织 (2018), 粮食展望-全球粮食市场半年度报告–2018年11月. 罗马. 104 pp. 执照: CC BY-NC- SA 3.0IGO.

114. 可再生燃料协会(2019), 年度燃料乙醇生产, 访问地址, <https://ethanolrfa.org/statistics/ annual-ethanolproduction>.

5.5 直接空气捕集 (DAC)

115. Realmonte, G. et al. (2019), 多模式交叉评估直接空气捕集在深度减排路径中的作用. 自然通讯, 第10卷, 第3277页.

116. Climeworks (2019), Interview by the Global 全球碳捕集与封存研究院访谈[访谈] (2 9 2019).

117. GreenBiz (2019), 近看埃克森美孚与脱碳企业Global Thermostat的联手, 访问地址<https:// www.greenbiz.com/article/insideexxonmobils- hookup-carbon-removal-venture thermostat>. [Accessed 1 October 2019].

5.6 CO_2利用

118. Mac Dowell, N, Fennell, PS, Shah, N & Maitland, GC (2017), ‘二氧化碳捕集和利用在缓解气候变化中的作用’, 自然气候变化, vol. 7, p. 243,访问地址 <https://doi.org/10.1038/nclimate3231>.

119. 政府间气候变化专门委员会(2018), 全球升温1.5°C. 在加强全球应对气候变化威胁的背景下，IPCC关于全球升温超过工业化前水平1.5°C的影响及相关全球温室气体排放途径的特别报告, 访问地址<https://www.ipcc.ch/sr15/>.

5.7 CCS创新

120. Rochelle, GT (2009), ‘胺洗涤法二氧化碳捕集’, 科学, vol. 325, no. 5948, pp. 1652 LP – 1654, 访问地址 <http://science.sciencemag.org/content/325/5948/ 1652.abstract>.

121. 全球碳捕集与封存研究院(2017), 全球碳捕集与封存成本, 墨尔本, 澳大利亚, 访问地址<http://decarboni. se/sites/default/files/publications/201688/global-ccs-cost-updatev4.pdf>.

122. 全球碳捕集与封存研究院(2019a), ‘CO2RE数据库，设施报告’, 访问地址<https://CO2RE.co/FacilityData>.

123. 世界煤炭协会(2015), ‘SaskPower的碳捕集与封存案例’, 2019年10月1日, 访问地址 <https:// www.worldcoal.org/saskpowers-case-carbon-capture-and-storage>.

124. 国际CCS知识中心(2018a), Shand CCS可行性研究公共报告, 访问地址 <https://ccsknowledge.com/pub/documents/publications/.Shand CCS Feasibility Study Public Report_NOV2018.pdf>.

125. NRDC (2018), NRDC对EPA NSPS审查提案的评论, 访问地址 <https://www.nrdc.org/sites/default/ files/nrdc-comments-epa-nsps-review-proposal-20190318. pdf>.

126. 国际CCS知识中心(2018a), Shand CCS可行性研究公共报告, 访问地址 <https://ccsknowledge.com/pub/documents/publications/.Shand CCS Feasibility Study Public Report_NOV2018.pdf>.

127. 图27数据来源:

国际CCS知识中心(2018a), Shand CCS可行性研究公共报告, 访问地址 <https://ccsknowledge.com/pub/documents/publications/.Shand CCS Feasibility Study Public Report_NOV2018.pdf>.

Petra Nova Parish Holding LLC (2017), W.A. Parish 燃烧后二氧化碳捕集与封存项目-专题报告, 访问地址 <https://www.osti.gov/servlets/ purl/1344080>.

国际CCS知识中心(2018b), 基于Shand CCS可行性研究的第二代CCS决策者摘要, 访问地址<https:// ccsknowledge.com/pub/documents/publications/Summary for Decision Makers on Second Generation.pdf>.

Rubin, ES, Davison, JE 和 Herzog, HJ. (2015), ‘二氧化碳捕集与封存的成本’, 国际温室气体控制杂志, vol. 40, pp. 378–400, 访问地址 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583615001814>.

5.8. 向净零碳未来的产业转型

128. 政府间气候变化专门委员会(2018), 全球升温1.5°C. 在加强全球应对气候变化威胁的背景下，IPCC关于全球升温超过工业化前水平1.5°C的影响及相关全球温室气体排放途径的特别报告, 访问地址<https://www.ipcc.ch/sr15/>.

129. 能源转型委员会 (2018), 到20世纪中叶可能实现较难减排行业的零碳排放, 访问地址<http://www.energy-transitions.org/sites/default/files/ETC_MissionPossible_ FullReport.pdf>.

130. 国际能源署(2019), “通过CCUS改造工业”, 国际能源署, 巴黎, 访问地址<www.International Energy Agency.org/publications/ reports/TransformingIndustrythroughCCUS/>.

131. 国际能源署(2019), “通过CCUS改造工业”, 国际能源署, 巴黎, 访问地址 <www.International Energy Agency.org/publications/ reports/TransformingIndustrythroughCCUS/>.

132. Lehne, J., 和 Preston, F. (2018), 在低碳水泥和混凝土中实现混凝土变革创新, Chatham House, 伦敦, 访问地址 <https://reader.chathamhouse.org/ making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and- concrete>.

133. LEILAC (2019), 比利时的LEILAC项目成功演示二氧化碳分离方法, 访问地址, <https://www. project-leilac.eu/successful-co2-separation>.

134. 国际能源署(2019), “通过CCUS改造工业”, 国际能源署, 巴黎, 访问地址 <www.International Energy Agency.org/publications/ reports/TransformingIndustrythroughCCUS/>.

135. Tata Steel(2019), HIsarna, 全方位可持续发展, 访问地址, <https://www.tatasteeleurope.com/en/sustainability/ hisarna>.

136. 国际能源署(2019), “通过CCUS改造工业”, 国际能源署, 巴黎, 访问地址 <www.International Energy Agency.org/publications/ reports/TransformingIndustrythroughCCUS/>.

137. 图28数据来源:

国际能源署(2019), 追踪清洁能源进展, 访问地址 <https://www.International Energy Agency.org/tcep/>.

138. 全球碳捕集与封存研究院(2019b), ‘CO2RE数据库，设施报告’, 访问地址 <https://CO2RE.co/ ClimateChange>.

139. 图29数据来源:

NETL (2018), 碳捕集技术纲要 2018, 访问地址 <https://www.netl.doe.gov/sites/default/ files/netl-file/Carbon-Capture-Technology-Compendium-2018. pdf>.

全球碳捕集与封存研究院(2019b), ‘CO2RE数据库，设施报告’, 访问地址 <https://CO2RE.co/FacilityData>.

140. Feron, P, Cousins, A, Jiang, K, Zhai, R, Shwe Hla, S, Thiruvenkatachari, R & Burnard, K (2019), ‘实现化石燃料电站的零排放’, 国际温室气体控制杂志, vol. 87, pp. 188–202, 访问地址 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583618308934>.

141. 国际能源署温室气体研究与开发计划 (2019), 使用更高的捕集率或生物质，实现电站的CCS零排放 2019-02.

142. 图30数据来源:

国际能源署温室气体研究与开发计划 (2019), 使用更高的捕集率或生物质，实现电站的CCS零排放2019-02.

政府间气候变化专门委员会 (2014), 气候变化2014: 缓解气候变化：第三工作组对IPCC第五次评估报告的贡献, 剑桥大学出版社, 剑桥, 访问地址 <https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2014-mitigation-of-climate-change/81F2F8D8D234727D153EC10D428A2E6D>.

6.0 附件
6.3 CCS氢能战略

143. 国际能源署温室气体研究与开发计划 (2019), 氢的未来，抓住今天的机遇，国际能源署，巴黎，访问地址< https://www.International Energy Agency.org/hydrogen2019/>.

144. Kosturjak, A., Dey, T., Young, M.D., Whetton, S. (2019), 推进氢的发展：从19个促进全球氢发展的计划中吸取经验, 未来燃料 CRC, 访问地址 <https://www.futurefuelscrc.com/blog/2019/07/new- report-shows-global-hydrogen-focus>.

145. Kosturjak, A., Dey, T., Young, M.D., Whetton, S. (2019), 推进氢的发展：从19个促进全球氢发展的计划中吸取经验, 未来燃料 CRC, 访问地址 <https://www.futurefuelscrc.com/blog/2019/07/new- report-shows-global-hydrogen-focus>.

146. 燃料电池和H2联合发展计划(2019), 欧洲氢路线图：欧洲能源转型的可持续之路, 访问地址<https://www.fch.europa.eu>.

147. Gigler, J. and Weeda, M. (2018), 氢路线图纲要, TKI Nieuw Gas Top Sector Energy (2018), 访问地址 <https://www.topsectorenergie.nl/>

脚注

i. 包括彻底防止CO_2进入大气的CO_2利用方法（例如在水泥固化中），有助于减少排放。

ii. 截至2019年11月，来自全球碳捕集与封存研究院CO2RE数据库的数据（全球碳捕集与封存研究院2019a）。

iii. 项目生命周期中的高级开发阶段意味着通过前端工程设计（FEED）进行更详尽的调查。可能涉及以下步骤：选择要使用的特定技术，检查设计和整体设施成本，获得许可和批准或评估主要开发风险。 此阶段一旦完成，项目就可以准备进行最终投资决策（FID）。

iv. 二氧化碳地质封存研究由美国能源部资助。

v. 本研究院正在与项目开发商联系，并研究将拟议的CCS设施在2020年初纳入我们的CO2RE数据库。

vi. 请注意，浓度更高的二氧化碳流捕集成本明显较低，
诸如从天然气或煤生产生物燃料或制氢。

vii. GCCSI分析基于8％的折现率，30年的项目寿命，2.5年的建设时间，85％的容量系数。 燃油价格是基于项目可行性报告和FEED报告。 费用数据标准化为2017年的值。

viii. 假设每生产一千克氢气耗电50kWh。

ix. 截至2019年11月26日，从澳元转换为美元。

x. 据估计，2017年核能发电量为2637TWh，所有可再生能源的总发电量为6351TWh。

xi. 有关使用CCS的燃煤发电机（Boundary Dam和Petra Nova）的更多详细信息，见第71页。

xii. 全球碳捕集与封存研究院对公共项目和本研究院独家项目可行性的分析以及FEED报告、NETL 2018碳捕集技术纲要以及NETL 2019碳捕集、利用与封存和油气技术综合审查会议的报告。

xiii. 成本调整为（Rubin等人2015）使用的成本计量方法计算得出的2018年美元价值。烟气脱硫成本包含在Boundary Dam和Shand两个项目之中。

了解更多

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

请联系宣传和传播团队成员

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2019
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, 2019. 全球CCS现状: 2019. 澳大利亚.

本报告中的信息截止到2019年11月的最新信息。

GLOBAL CCS INSTITUTE