中国环境与发展国际合作委员会

基于CCS的人为二氧化碳移除技术

项目讨论文件 2024

作者：郑琦，国际可持续发展研究院

致谢

作者衷心感谢以下专家对本文的议题给出的宝贵建议和对文章初稿提出的意见：

艾弗森　国合会特别顾问
柴麒敏　中国国家应对气候变化战略研究和国际合作中心
费　达　治理与可持续发展研究所
Sabine Fuss　墨卡托全球公域与气候变化研究所
黄　晶　中国 21 世纪议程管理中心
Injy Johnstone　牛津大学
梁　希　伦敦大学学院
Olivier Bois von Kursk　国际可持续发展研究所
吕学都　腾讯碳中和研究院
冉　泽　美国环保协会北京代表处
Felix Schenuit　德国国际与安全事务研究所
斯蒂芬·史密斯　牛津大学
魏仲加　国合会外方首席顾问
张九天　北京师范大学

作者还要感谢以下专家分享了他们对二氧化碳移除的真知灼见：

Noah Deich　美国能源部
Jos Delbeke　欧洲大学研究所
Susanne Dröge　德国联邦环境署
Oliver Geden　德国国际与安全事务研究所（SWP）
Veronika Elgart　瑞士联邦环境办公室
Glen Peters　国际气候与环境研究中心（CICERO）
张建宇　“一带一路”绿色发展国际研究院
张　贤　中国 21 世纪议程管理中心

此外，还要感谢国合会秘书处的庞骁在这项工作中提供的协助。

** 本讨论文件由作者以个人身份起草。本讨论稿中表达的观点和意见仅代表作者本人，不代表其所在组织和国合会的观点和意见。*

摘要

要实现中国 2060 年碳中和的目标，除了快速减排和传统的基于土地的人为二氧化碳移除（CDR）手段外，可能还需要新型的 CDR，如生物能源碳捕集与封存（BECCS）、直接空气碳捕集与封存（DACCS）等技术。对这些技术的推动在一些国家和自愿碳市场取得了显著进展。然而，这些技术的可推广性以及潜在风险方面仍存在不确定性，与其他可持续发展目标之间的权衡关系也尚不明朗。中国有能力在现有知识的基础上，结合本国国情进一步丰富各类 CDR 手段，同时确保减排工作不受影响。需要对 CDR 备选方案的效果和影响进行全面评估，为政策决策提供依据。要建立专门的研究、开发、示范支持能力以及健全的测量、报告和验证系统，这些对于加速推广和引入私人投资至关重要。

1. 导言[1]

1.1 CDR 是实现《巴黎协定》目标的必要条件

政府间气候变化专门委员会（IPCC）最新报告 (Babiker 等人 , 2022 年) 明确指出，在符合《巴黎协定》气温目标的所有情景中，除了快速和大幅减排之外，还必须进行人为二氧化碳移除（CDR）。目前气候行动不足，全球变暖几乎不可避免地会暂时超过 1.5°C 的阈值，然后在本世纪下半叶通过持续的净负排放再降回至这一水平以下（即所谓的气候过冲）（Reisinger 和 Geden，2023 年）。CDR 可在这些减缓途径中发挥多重作用：在短期内进一步减少净碳排放，抵消难减排部门的剩余排放以达到净零排放，并最终实现净负排放，将升温幅度控制回落至 1.5°C 之下 (Babiker 等人 , 2022 年)。

近年来，CDR 得到的政治支持与日俱增。联合国秘书长明确呼吁支持开发 CDR：“我还鼓励科学家和工程师们紧急关注二氧化碳的移除和封存，安全、可持续地处理最难清洁的重工业所产生的最终排放。我敦促各国政府给予他们支持。但我要明确一点：这些技术并非灵丹妙药；它们不能替代大幅减排，也不能成为推迟逐步淘汰化石燃料的借口。”（联合国，2024 年）。

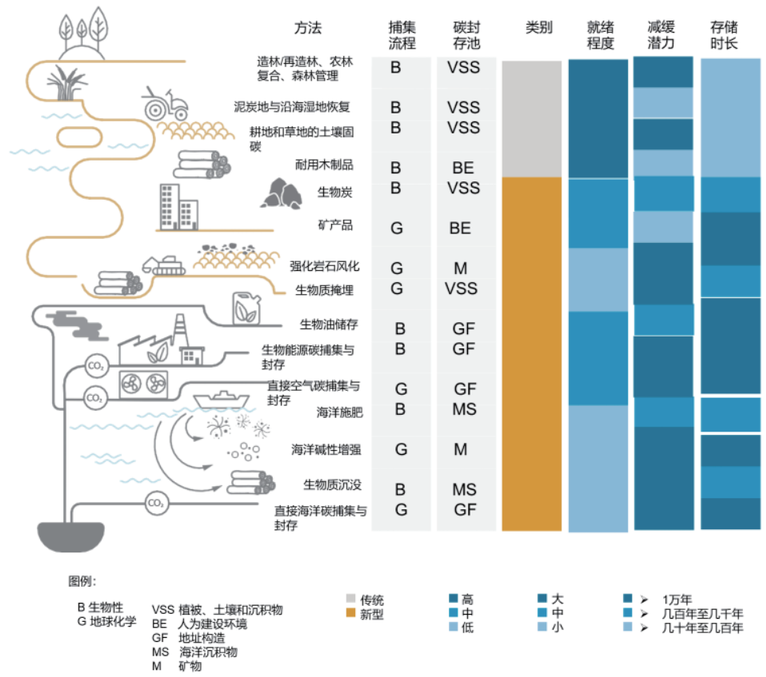

图 1. 各类 CDR 方法及其特点

来源：Smith 等人，2024 年。

[1] 除另有说明外，所有货币均为美元

1.2 定义

CDR 是指人类有意识地从大气中移除二氧化碳并将其持久地储存在地质、陆地或海洋储层或产品中的活动（Babiker 等人，2022 年）。CDR 措施的种类相当丰富，包括造林和再造林等传统方法，以及所谓的新型 CDR 方法，如生物能源碳捕集与封存 (BECCS)、直接空气碳捕集与封存 (DACCS)、生物炭、强化风化、海洋 CDR 等 (Geden 等人 , 2024 年)。近年来，两种基于 CCS 的 CDR 技术，BECCS 和 DACCS，越来越受到政策制定者和投资者的关注，因为它们的碳封存具有高持久性的特点。

BECCS 是 " 结合了生物质在生长过程中对大气中碳的自然隔离和对该生物质转化为能源时所排放的二氧化碳进行捕获和地质封存。如果在整个 BECCS 价值链中，捕获并永久封存的二氧化碳多于排放量，则该系统可做到从大气中净移除二氧化碳 " (Fajardy, 2022 年)。在大多数与 “远低于” 2°C 目标相匹配的综合评估模型情景中，BECCS 占据了主导地位。DACCS 指从大气中捕获空气中的二氧化碳并将其储存在地下的化学过程 (Babiker 等人 , 2022 年)。自 IPCC 第六次评估报告发布以来，最新的一些情景开始包括 DACCS 和其他新型 CDR 方法 (Gidden 等人 , 2024 年)。BECCS 和 DACCS 目前仍处于起步阶段，仅占当前移除总量的很小一部分（不到 0.1%）（Pongratz 等人，2024 年）。

方框 1. 区分 CDR、CCS 和 CCU

必须明确区分 CDR、碳捕集与封存（CCS）、碳捕集与利用（CCU）三者的差异。将 CCS 应用于将化石燃料排放点源的二氧化碳进行地质封存，是不能降低大气中二氧化碳浓度的。然而，如果是捕获大气中的二氧化碳，则在 CCS 基础之上可以发展出两种 CDR 方法，即 BECCS 和 DACCS。CCU 与 CCS 不同的是，捕集的二氧化碳随后将用于生产其他产品，如合成燃料、化学品和建筑材料。大多数 CCU 产品最终将被燃烧，从而将二氧化碳重新释放到大气中。CCU 最多也只能延迟排放的时间，具体取决于产品的寿命和工艺链的碳足迹（Schenuit 等人，2023 年）。捕获的 CO_2 有一种用途是提高石油采收率，这引起了严重关切，因为这种做法给石油和天然气行业的继续运营提供了合法性（Grubert 和 Talati，2024 年）。

1.3 中国可利用现有知识丰富其 CDR 组合

中国要在 2060 年实现碳中和目标，就需要较大规模的 CDR 来补偿难减排行业的排放（He 等，2022 年）。值得注意的是，CDR 对中国来说并非新生事物。早在几十年前，中国就启动了国家级的造林 / 再造林计划，以应对荒漠化等其他环境挑战，这些计划的定位后来调整为应对气候变化的重点行动。中国为林业部门制定了激励政策和监管框架，例如将其纳入国家自主贡献（NDC）(联合国气候变化框架公约》，2021 年）和自愿碳排放交易系统 (Schenuit 等人，2024 年）。目前，中国的传统 CDR 量（近 4 亿吨二氧化碳 / 年）(Pongratz 等人 , 2024) 为全球最高。此外，中国也在探索基于海洋的 CDR，例如通过《海洋负碳排放倡议》所做的工作 (ONCE, 2024 年)。蓝碳作为实现更新目标的一项新措施，也出现在中国的 NDC 中。

所有 CDR 举措都是风险和收益并存，尤其是在大规模部署的情况下。再造林 / 植树造林可为生态系统服务和生计带来共同效益，但也有风险，如对农业用地和水资源的竞争、碳储存的持久性比地质储存短、储存能力饱和以及自然和人为干扰导致的逆转等（联合国环境署，2023 年）。作为世界上最大的碳排放国，中国既要加快绿色转型，又要确保实现发展和能源安全目标，面临着巨大挑战。因此，必须扩大 CDR 组合，以满足规模要求，并尽量减少风险和权衡。尽管中国已对新型 CDR 进行了大量研究（见第 2 章），但对于其在中国脱碳途径中的具体贡献，目前还没有官方信息和达成学术共识。

1.4 本讨论文件的范围和目的

本文将重点讨论 BECCS 和 DACCS 这两种新型 CDR 方法，原因有二：1) 国际上已经取得了重要进展；2) 近年来，CCS 和 CCU 在中国受到的关注与日俱增。CDR 与 CCS 和 CCU 之间的混淆会产生问题，有必要加以澄清，特别是从政策角度看尤为重要。本讨论文件将在现有研究分析的基础上，简要介绍 BECCS 和 DACCS 的最新政策发展，并提出在中国推广这些技术的一些关键挑战和机遇。

2. 政策、研发与示范和市场活动的发展情况

2.1 政府支持快速增长，主要在发达经济体

各国的政策工具各不相同，包括税收抵免、公共采购和监管性措施等，以及研究、开发及示范（RD&D）投资。下文概述了一些值得关注的发展。

美国：在美国实现净零排放的长期战略中（美国国务院，2021 年），目标是到 2050 年达到每年约 10 亿吨二氧化碳 CDR 的水平。为支持这一目标，美国采取了一系列财政和公共采购措施，特别是通过美国税法的 45Q 条款增加了《通胀削减法案》对 DACCS 的支持，并通过《基础设施投资和就业法》为新型 CDR 提供了大量的资金流（世界资源研究所，2022 年）。《基础设施投资与就业法》中包括 35 亿美元用于创建四个区域性直接空气捕集中心（美国能源部，2023 年），1.15 亿美元用于 DAC 技术奖大赛，21 亿美元用于二氧化碳运输，25 亿美元用于碳封存验证和测试（美国能源部，2021 年）。

欧洲联盟：《欧洲气候法》规定，到 2050 年实现气候中和的目标以及 2050 年后实现净负排放的承诺具有法律约束力（欧盟委员会，2021 年）。2024 年 2 月，欧盟委员会宣布了其关于 2040 年中期气候目标的建议（欧盟委员会，2024 年），并发布了《工业碳管理战略》（欧盟委员会，2024 年），这使得 CDR 成为欧盟脱碳努力的重要组成部分。到 2050 年，欧盟需要年减排约 4 亿吨二氧化碳，以平衡难减排部门的剩余排放量。《工业碳管理战略》还列出了 BECCS 和 DACCS 的潜在政策选项和支持机制（包括借助于欧盟排放交易体系），以及二氧化碳运输和基础设施的额外投资需求。

挪威：挪威没有设立净零目标。《气候变化法》（挪威气候与环境部，2021 年）规定的 2050 年减排目标是在 1990 年的排放水平基础上减少 90%–95%。挪威的石油和天然气行业是经济支柱型产业，在对该行业征收二氧化碳税进行论证的过程中，CCS 得到了发展（全球碳捕集与封存研究院，2023 年）。如今，CCS 被认为是帮助挪威实现国内减排目标和封存进口二氧化碳的关键 。BECCS 和 DACCS 均获得了政府对 CCS 所提供的支持。例如，挪威气候环境部旗下的国营公司 Enova 向 Removr 管理的 DACCS 项目提供了第一笔约 350 万美元（3630 万挪威克朗）的拨款。作为政府支持的 Longship CCS 项目的一部分，Northern Lights 公司与丹麦 Ørsted 公司签署了一项协议，每年从一个 BECCS 项目中储存 43 万吨二氧化碳（LN，2023 年）。另外还有两个 BECCS 项目是 Norcem 工厂和 Hafslund Oslo Celsio 项目。挪威环境署提出了一系列 CDR 的激励手段，包括反向二氧化碳税、货币奖励以及将 CDR 信用额纳入自愿碳市场等（挪威环境署，2023 年）。

英国：英国于 2021 年发布了《净零排放战略》，目标是到 2030 年每年工程性移除量达到 5 百万吨二氧化碳，到 2050 年每年达到 7500–8100 万吨二氧化碳（英国，2021 年）。英国致力于使用一套市场工具来激励温室气体移除工作。2023 年，政府宣布计划通过 " 差价合约 "（Contract for Difference）来支持工程性移除（英国，2023 年）。2024 年政府启动了一项咨询，就将温室气体移除纳入英国排放交易计划征求意见（英国能源安全与净零部，2024 年）。

中国：中国已将以基于 CCS 的 CDR（负排放技术）列为重点研究领域（国家发展和改革委员会，2021 年）。中美双边对话的议题之中也包含了 DACCS（世界资源研究所，2024 年）。然而，目前尚未进行全面评估。一些研究表明，基于 CCS 的 CDR 有可能在实现中国碳中和目标方面发挥关键作用（Chen 等人，2023 年；Fuhrman 等人，2021 年；Chai 等人，2020 年）。Deng 等人（2024 年）认为，生物炭的潜力可以满足中国对人为碳移除的需求。中央政府正在通过研发和示范推动 CCU 和 CCS 的发展。然而，这些项目并非 CDR 项目，因为它们多与化石二氧化碳源相关，所捕集的二氧化碳将被重新注入，用于提高石油采收率 (Schenuit 等人，2024 年）。

2.2 监测、报告和核查对于推广新型 CDR 至关重要

健全的监测、报告和核查（MRV）系统对于支持新型 CDR 的推广至关重要，因为它们可以帮助政府和私营部门做出监管和投资决策。因此，开发 MRV 体系是将新型 CDR 纳入气候政策和市场的第一步。目前，除了 BECCS 和生物炭之外，还没有针对新型 CDR 措施的指南，相关的 MRV 规范主要是在自愿市场上发展起来并应用的 (Schulte 等人，2024 年）。

在《联合国气候变化框架公约》层面上，目前正在努力为人为碳移除制定健全的核算规则，包括为新型方法提供更多指导。这一点至关重要，因为这关系到有可能在《巴黎协定》第 6.4 条下进行国际碳交易。另一个相关机制是第 6.2 条，它允许各国进行碳减排和人为碳移除信用额度的交易。据预计，IPCC 国家温室气体清单专题组（TFI）将在 2027 年前编制一份关于 CDR 和 CCUS 的方法学报告，为将新型 CDR 纳入国家温室气体清单提供指引（IPCC，2024 年）。

欧盟正在着手建立欧盟级别的 CDR 认证框架，并将为不同的 CDR 方法量身定制认证方式（欧盟委员会，2024 年）。2024 年 5 月，欧盟委员会通过了新的气候报告模板，允许成员国报告 BECCS 和 DACCS 的数量（欧盟委员会，2024）。与欧盟相比，美国政府采取了不同的方法，优先考虑的是为新型 CDR 创造出市场，当然同时在 MRV 领域也在做一些努力 (Schulte 等人，2024 年）。

关于自愿碳市场，Schulte 等人（2024 年）描述了 MRV 现有的规范和技术，并得出结论认为，尽管在直接空气捕获和生物质相关领域中尚存在知识缺口，但 BECCS 和 DACCS 的 MRV 都已取得了进步。

2.3 研发和示范投资

通常而言，一项新型技术从首次商业部署到广泛运用需要 20 年左右时间。因此，DACCS 和 BECCS 要于 2050 年达到 10 亿吨级的水平，则在其诞生阶段投入充足的研发示范投资对于降低其成本至关重要并刻不容缓（联合国环境署，2023 年）。

用于 CDR 尤其是新型 CDR 研发示范的公共资金不断增加，特别是通过 " 国际创新使命计划 "（Mission Innovation）下的 CDR Launchpad 计划（到 2025 年为 CDR 示范和试点项目提供 1 亿美元资金）（国际创新使命计划，2023 年）和美国联邦政府资助的“直接空气捕集区域中心”项目（5 年 35 亿美元）。

Nemet 等人（2024 年）观察到，近年来对 CDR 初创企业的私人投资大幅增长，从 2013 年 3 家初创企业获得 400 万美元投资，到 2022 年有 131 家初创企业获得 15 亿美元投资。总体而言，更多的投资投向了新型 CDR 领域的初创企业，尤其是 DACCS 和生物炭。然而，与 2023 年 1.8 万亿美元的清洁能源投资总额（国际能源署，2024 年）相比，对 CDR 的投资水平仍然较低。根据 Nemet 等人的调查（2024 年），这些初创企业面临的挑战包括如何获得资金支持、自愿市场的不确定性以及 MRV 相关科学的不确定性等。

中国没有专门针对 BECCS 和 DACCS 的专项公共研发示范资金，不过腾讯的“碳寻计划（Carbon X Program）”支持包括 DACCS 在内的低碳技术的研究和早期商业化。政府需要在新型 CDR 方案的研发投入方面迎头赶上，并刺激更多的私人资金投入。此外，与其他国家或地区（如英国、欧盟）合作，并加入 CDR Launchpad 也是有益的，因为中国已经是“国际创新使命计划”的成员。

2.4 自愿市场的角色

自愿市场在创造需求和为萌芽初期的产业提供资金方面发挥着重要作用。据数据平台 CDR.fyi 报告（《2023 年回顾报告》），新型 CDR 的购买量自 2020 年起每年增长五倍以上。2023 年，CDR 购买量增至 450 万吨二氧化碳，主要集中在 BECCS（63%）和 DACCS（20%）。然而，这仅占 2023 年自愿碳市场总量（1.108 亿吨二氧化碳）的 4%。从碳信用额角度来看，减排项目占绝对主导地位（森林趋势组织的“生态系统市场”平台，2024 年）。目前，新型 CDR 信用额的数量加权平均价格明显高于传统 CDR：2023 年，造林 / 再造林的价格为 16 美元 / 吨二氧化碳，而 DACCS 和 BECCS 的价格分别为 715 美元和 300 美元。

CDR.fyi 进行的一项调查（2024 年）显示，购买方主要来自金融和信息技术部门，其动机是帮助加快 CDR 行业的规模发展。一个突出的例子是微软公司，该公司计划在 2030 年拥有每年超过 5 百万吨二氧化碳的 CDR 组合（微软，2023 年）。在撰写本报告时，该公司已购买了超过 800 万吨的新型 CDR，占所有新型 CDR 的 75%（CDRfyi，2024 年）。

Fuss 等人（2024 年）认为，自愿市场可能无法为 CDR 的推广提供足够的资金，在推动未来需求方面，强制市场可能会发挥关键作用。不过，在短期内，前者可以让新型 CDR 在实践中得到尝试，并制定必要的 MRV 规范。长期来看，自愿市场仍然可以作为 CDR 的一个小众市场，用于鼓励创新和实验，对气候变化减缓努力形成补充。

3. 中国发展 BECCS 和 DACCS 的主要挑战和机遇

要在本世纪中叶部署十亿吨级的新型 CDR，需要在下一个十年大幅提高这些技术的使用水平（联合国环境署，2023 年）。其中的一些关键挑战和机遇与中国也息息相关。

3.1 经济和技术可行性

- DACCS 虽然在技术上是可行的，但由于大气中的二氧化碳浓度相对较低，这意味着需要投入大量可再生能源和其他相关成本，因此高成本是一项重大挑战。由于迄今为止的实际经验有限，成本估算存在很大的不确定性。据美国国家学院 (2019) 估计，基于固体吸附剂和基于液体溶剂的 DACCS 净移除二氧化碳 的平均成本分别为 89–877 美元 / 吨二氧化碳和 156–506 美元 / 吨二氧化碳；而其他 CDR 措施的成本为：土壤固碳 45–100 美元 / 吨二氧化碳，造林 / 再造林 0–240 美元 / 吨二氧化碳，生物炭 10–345 美元，BECCS 15–400 美元 / 吨二氧化碳 (Babiker 等人，2022 年）。据最新的一些研究预测，到 2050 年，DACCS 的成本将从目前的水平大幅下降，但仍然会远高于美国政府制定的 100 美元 / 吨二氧化碳的长期 CDR 政策目标（Shayegh 等人，2021 年；Sievert 等人，2024 年）。

- BECCS 与 DACCS 不同之处是，能产生市场化的能源产品（如电力、液体燃料和氢等），除了从大气中移除二氧化碳之外，还可产生收入 (Fajardy, 2022 年)。目前，一些 BECCS 应用在技术上已经成熟并实现了商业化（例如，生物乙醇生产，煤电厂、纸浆和造纸厂 、水泥厂和炼钢高炉中的生物质联合燃烧等），一些应用仍处于原型或示范阶段（例如，生物质用于合成气化、窑炉中的二氧化碳捕集和高炉废气等）（国际能源署，2024 年）。

- BECCS 和 DACCS 的实施取决于 CCS 基础设施的存在。据估计，全球地质封存潜力似乎足以满足封存需求。美国、欧盟和中国在其排放源附近均拥有巨大的贮存潜力，可以降低成本（国际能源署，2021 年），只是还需要更多的投资来开发充足的二氧化碳运输和封存基础设施（国

际能源署 , 2024 年)。经过几十年的发展后，CCS 被认为基本没有达到预期目标 (Mahjour 和 Faroughi, 2023 年)，这也给能否及时建设足够的 CCS 基础设施增加了不确定性。中国近年来在发展 CCU/CCS 方面的努力帮助降低了整体捕集成本和捕集能耗 (Yang, 2023 年)，然而二氧化碳地质封存的政策和监管框架方面尚存在差距 (Yang 和 Li, 2024 年)，可能会阻碍基于 CCS 的 CDR 的推广。

3.2 可持续性障碍

● BECCS 的应用主要受限于可持续生物质原料的可获得性，这引发了对农业用地、水资源的竞争以及土地转换造成的生物多样性损失的担忧。生物质的生产（如使用化肥）、加工、运输和 CCS 阶段可能会产生额外的温室气体排放，因此对 BECCS 价值链进行生命周期评估，确定其气候影响，就变得至关重要（Fajardy，2022 年；Bloomer 等人，2022 年）。

● 大规模部署 DACCS 需要大量吸附剂材料和大量能源投入，可能会占到当今全球能源产量的四分之一到三分之一 (Gidden 等人，2024 年）。要实现一个 DACCS 设施的整体负碳排放，必须使用可再生能源，因此会增加对相关原材料的需求。DACCS 设施选址的要求是要能获得脱碳电力。此外，对土地和水的需求也是制约其在中国大规模发展的重要因素。要从空气中过滤 1 吨二氧化碳，Climeworks 的固体吸附剂系统每年需要 1000 千瓦时的能源、36 千克的材料、3m3 的水和 11,000 m2 的空间 (Madhu 等人，2021 年）。

● 为了评估这些技术在中国的可扩展性，有必要考虑能源、土地、水和原材料等可持续发展因素，对大规模部署进行全面评估。

3.3 社会和政治障碍

● 道德风险。对 CDR 的主要担忧之一是，它有可能拖延减排努力，并为化石燃料行业的运营提供持续的社会许可，此即所谓的道德风险或减排妨碍。一个例子是西方石油公司（Occidental Petroleum）收购了一家依赖于天然气工艺的 DACCS 公司，Carbon Engineering（西方石油公司，2023 年），并计划使用 DACCS 来抵消该行业的二氧化碳排放，并生产 " 净零石油 "（西方石油公司，2022 年)。目前已有一些解决方案的建议来降低这种风险，例如分别设定减排和人为碳移除的目标，或在纳入 CDR 信用额时收紧排放交易体系的限额（Hoglund 等人，2023 年；McLaren 等人，2019 年）。

● 缺乏健全的 MRV 制度。有效、健全的 MRV 制度可确保市场的诚信度并建立信任（见第 2.4 章），对扩大 CDR 至关重要。它们需要解决额外性、持久性和充足性问题（Grubert 和 Talati，2024 年）。与森林项目相比，BECCS 和 DACCS 更容易证明额外性，因为 " 一切照常 " 的情景 " 根本就不会从大气中移除二氧化碳 "。但是证明额外性需要进行生命周期分析，以纳入额外的排放量（如额外的能源投入、运输和土地干扰、肥料使用等）。不同的 CDR 方法具有不同的封存持久性，这关系到将是否以及如何将 CDR 与强制碳市场联系起来，因为就气候影响和成本而言并非所有 CDR 信用额都可与二氧化碳配额互换 (Burke 等人 , 2023 年)。充足性问题的产生源自于大规模移除和排放对气候影响的不对称性，也就是要补偿 1 吨二氧化碳的排放，就可能要在后期阶段移除超过 1 吨的二氧化碳 (Chimuka 等人，2023 年）。中国主要决策部门于 2024 年发布了关于强化碳标准计量体系建设行动方案，包括推动 CCS–CDR 技术标准公关，为建立全面的 MRV 努力迈出了关键一步 (发改委 , 2024)。

● 缺乏有针对性的政策支持和创新。DACCS 和 BECCS 的技术发展主要由私营部门的倡议和通过自愿市场实现的净零或净负承诺所推动。目前，少数政府已开始明确 CDR 在国内气候政策中的作用 (Schenuit 等人，2024 年）。国家一级的净零排放战略和计划需要明确 CDR 的预期作用，包括 DACCS 和 BECCS。为了降低成本和投资风险，需要更多有针对性的政策支持，如税收抵免、拨款、贷款和贷款担保、研发和示范资金支持以及健全的碳定价机制 (国际能源署，2024 年）。

3.4 优势与机遇

● 如第 1.3 章所述，现有的传统 CDR 监管和激励政策框架为中国扩大 CDR 技术范围奠定了基础。中国还有其他优势：在过去 20 年间，中国是 CDR 研究出版物的最大贡献者（30%），主要集中在生物炭和土壤固碳领域的研究。在专利方面，中国非常重视传统的 CDR，但最近包括 BECCS 在内的几种 CDR 方法的专利数量也在不断增加。中国的 CDR 专利份额与其在全球气候变化减缓专利中的份额相同。此外，中国在推动绿色技术创新和降低成本方面也有许多值得学习之处 (Minx 等人，2024 年）。

● 中国当前正在扩大强制市场、重新开放自愿市场，这为开发和测试新型 CDR 措施的 MRV 以及支持研发和示范提供了机会。这也将使中国能够积极参与《联合国气候变化框架公约》第 6 条下的讨论，使国家标准与国际标准接轨。

● “十五五”规划和即将出台的新 NDC 为中国提供了机遇，可将新型 CDR 纳入总体绿色转型战略和国家低碳技术研究计划之中。

4. 结论

● 在 “十五五”规划中，中国可考虑在实现国家双碳目标的总体战略背景下制定一个 CDR 路线图。在更新后的 NDC 中，中国也可考虑明确其在“十五五”之后发展 CDR 组合的意图，在快速减排的基础之上进一步实现净零排放和之后实现负排放。

● 可通过生态环境部、科技部和国家自然科学基金委员会的专项资金，将 CDR 备选方案的跨学科综合评估（可行性和效果、社会环境影响等）纳入国家绿色技术研究计划之中。

● 中国可将新型 CDR 纳入相关双边（如与欧盟和英国）和多边合作机制（如气候行动部长级会议）。作为 " 国际创新使命计划 " 的成员，中国可考虑加入其“CDR 使命计划”。

参考文献

(1) Babiker, M., G. Berndes, K. Blok, B. Cohen, A. Cowie, O. Geden, V. Ginzburg, A. Leip, P. Smith, M. Sugiyama, F. Yamba.(2022):

(2) 跨部门视角 . IPCC, 2022: 气候变化 2022：缓解气候变化 . 政府间气候变化专门委员会第六次评估报告中第三工作组贡献的内容 [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija,G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. 剑桥大学出版社，英国剑桥和美国纽约

(3) doi:10.1017/9781009157926.014

(4) Bloomer, L., Sun X., Dreyfus, G., Ferris, T., Zaelke, D., Schiff, C. (2022). “呼吁停止以气候缓解为名焚烧树木”

(5)《佛蒙特州环境法期刊》，94–123 页

(6) Burke, J 和 Schenuit, F. (2023) “人为二氧化碳移除永久性的决定因素：政策措施类型一览”.CO2RE – 温室气体移除中心

(7) CDR. fyi. 《趋向正规？ – CDR.fyi 2023 年回顾报告》. https://www.cdr.fyi/blog/2023–year–in–review. 最后访问日期：2024 年 7 月 23 日

(8) CDR.fyi.(2024).《2024 + 市场前景总结报告》.https://www.cdr.fyi/blog/2024–market–outlook–summary–report

(9) Chai.Q., Fu.S., Wen,X.(2020). “ “一带一路 " 国家实施 NDC 的模型及低于 2° C 的情景”.《生态系统健康与可持续性》。6.1766998.10.1080/20964129.2020.1766998.

(10) Chen 等人，（2023）.《CCUS 在中国的进展 –– 现状报告》https://www.globalccsinstitute.com/wp–content/uploads/2023/03/CCUS–Progress–in–China.pdf

(11) Chimuka, V. R., Nzotungicimpaye, C.–M., and Zickfeld, K. (2023).“量化二氧化碳负排放下的陆地碳循环反馈”，《生物地球科学》，20, 2283–2299, https://doi.org/10.5194/bg–20–2283–2023

(12) UNFCCC NDC 数据库 .(2021). https://unfccc.int/NDCREG?field_document_ca_target_id=143

(13) 中国国家改革和发展委员会 (2021).《2030 年前碳达峰行动方案》https://en.ndrc.gov.cn/policies/202110/t20211027_1301020.html

(14) Deng, X., Teng, F., Chen, M. et al.(2024). “探索中国利用生物炭负排放实现碳中和目标的潜力”

(15)《自然 – 通讯》15, 1085. https://doi.org/10.1038/s41467–024–45314–y

(16) 英国能源安全和零净部（2024 年）. “将温室气体移除纳入英国排放交易体系 ”

(17) https://www.gov.uk/government/consultations/integrating–greenhouse–gas–removals–in–the–uk–emissions–trading–scheme

(18) 美国能源部（2021 ）.《基础设施投资与就业法案》

(19) https://www.energy.gov/sites/default/files/2021–12/FECM%20Infrastructure%20Factsheet.pdf

(20) 美国能源部（2023 ）. 直接空气捕集区域中心 https://www.energy.gov/oced/DACHubs. 最后访问日期：2024 年 7 月 14 日

(21) 美国国务院和总统行政办公室（2021）.《美国长期战略：到 2050 年实现温室气体净零排放的路径》https://www.whitehouse.gov/wp–content/uploads/2021/10/US–Long–Term–Strategy.pdf。

(22) 欧盟委员会 (2021).《欧洲气候法》。https://eur–lex.europa.eu/legal–content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:32021R1119。最后访问日期：2024 年 7 月 14 日

(23) 欧盟委员会 (2024).“气候行动：理事会和议会同意建立欧盟人为碳移除认证框架”。https://www.consilium.europa.eu/en/press/press–releases/2024/02/20/climate–action–council–and–parliament–agree–to–establish–an–eu–carbon–removals–certification–framework/. 最后访问日期：2024 年 7 月 14 日

(24) 欧盟委员会 (2024). 通过：成员国气候报告新模板 . https://climate.ec.europa.eu/news–your–voice/news/adopted–new–templates–member–states–climate–reporting–2024–05–07_en。最后访问日期：2024 年 7 月 14 日

(25) 欧盟委员会 (2024).“欧洲 2040 年气候目标和到 2050 年实现气候中和的途径，建设可持续、公正和繁荣的社会”.https://eur–lex.europa.eu/legal–content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52024DC0063. 最后访问日期：2024 年 7 月 14 日

(26) 欧盟委员会 (2024). 工业碳管理 https://eur–lex.europa.eu/legal–content/EN/TXT/?uri=COM%3A2024%3A62%3AFIN&qid=1707312980822 最后访问日期：2024 年 7 月 14 日

(27) Fajardy, M. (2022).“生物能源碳捕集与封存（BECCS ）”. 见 B. e. al,《温室气体移除技术》（第 80–114 页). 英国皇家化学学会。

(28) 森林趋势组织 – 生态系统市场 (2024).《2024 年自愿碳市场状况》华盛顿特区：森林趋势组织 https://www.forest–trends.org/publications/state–of–the–voluntary–carbon–market–2024/

(29) Fuhrman, J. 等人 (2021).“负排放在实现中国 2060 年碳中和目标中的作用”，《牛津气候变化公开出版物》，第 1 卷第 1 期，kgab004, https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgab004

(30) Fuss,S.,Johnstone,I.Höglund, R., Walsh, N. (2024).“自愿碳市场”，《2024 年人为二氧化碳移除状况 – 第 2 版》(Smith, S.M. 等人编著).http://www.stateofcdr.org, doi:10.17605/OSF.IO/MG3CY(2024).

(31) CDR.fyi (2024). 排行榜 .https://www.cdr.fyi/leaderboards

(32) 全球碳捕集与封存研究所 (2023).“洞察与评论”.https://www.globalccsinstitute.com/news–media/insights/ccs–commercial–and–regulatory–frameworks–enabling–ccs–progress–in–norway–and–europe/

(33) Geden,O., Smith,S., M.,Cowie,A.(2024).“第 1 章: 导言”,《2024 年人为二氧化碳移除状况 – 第 2 版》(Smith,S. M. 等人编著 ）。

(34) Gidden, M. J., Roe, S., Ganti, G., Gasser, T., Hasegawa, T., Lamb, W. F., Ochi, Y., Strefler, J., Vaughan, N. E. (2024).“第 8 章：符合巴黎协定要求的 CDR 情景”，《2024 年人为二氧化碳移除状况 – 第 2 版》.https://www.stateofcdr.org, doi:10.17605/OSF.IO/8XK7H (2024).

(35) Grubert, E., & Talati, S. (2023). 无约束的盈利性人为二氧化碳移除的扭曲效应以及早期治理干预的必要性 .《碳管理》, 15(1). https://doi.org/10.1080/17583004.2023.2292111

(36) He,J., Li,Z., Zhang,X., Wang,H., Dong,W., Du,E., Chang,S., Ou,X., Guo,S., Tian,Z., Gu,A., Teng,F., Hu,B., Yang,X., Chen,S., Yao,M., Yuan,Z., Zhou,L., Zhao,X., Li,Y., Zhang,D.(2021).“实现碳中和：中国长期低碳转型路径与战略研究”，《环境科学与生态技术》，第 9 卷，100134 期，ISSN 2666–4984.https://doi.org/10.1016/j.ese.2021.100134 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666498421000582

(37) Höglund, R., Mitchell–Larson, E., Delerce, S. (2023)。“如何避免人为碳移除导致减排延迟” https://carbongap.org/wp–content/uploads/2023/09/carbongap–policybrief–sep23_v2.pdf

(38) 国际能源署 (2021).“世界拥有巨大的二氧化碳排放能力：净零意味着我们需要它” https://www.iea.org/commentaries/the–world–has–vast–capacity–to–store–co2–net–zero–means–we–ll–need–it。

(39) 国际能源署 (2024).“直接空气捕获” https://www.iea.org/energy–system/carbon–capture–utilisation–and–storage/direct–air–capture#programmes

(40) 国际能源署 (2024).“跟踪生物能源碳捕集与封存”. https://www.iea.org/energy–system/carbon–capture–

utilisation–and–storage/bioenergy–with–carbon–capture–and–storage#tracking

(41) 国际能源署 (2024).“2024 世界能源投资报告”https://www.iea.org/reports/world–energy–investment–2024/overview–and–key–findings

(42) IPCC (2024).“IPCC 就第七个评估周期所需科学报告达成一致”。https://www.ipcc.ch/2024/01/19/ipcc–60–ar7–work–programme/。

(43) Madhu, K., Pauliuk,S., Dhathri, S., Creutzig, F. (2021).“通过比较生命周期评估来了解直接空气捕集技术的环境权衡和资源需求”.《自然能源》6.10.1038/s41560–021–00922–6

(44) Mahjour, S. K., & Faroughi, S. (2023).“碳捕集、运输和封存项目的风险和不确定性：全面回顾研究”。《气体科学与工程》，第 119 卷，A 部分

(45) Mclaren, D., Tyfield, D., Willis, R., Szerszynski, B., Markusson, N. (2019)。“超越 " 净零 "：分别设定减排和负排放目标的理由”。《气候科学最前沿》. 1.4.10.3389/fclim.2019.00004

(46) 微软 . 微软人为碳移除项目 . https://query.prod.cms.rt.microsoft.com/cms/api/am/binary/RW16V26

(47) Minx, J. C., Probst, B. S., L ü ck, S., M ü ller–Hansen, F., Toetzke, M., Diaz Anadon, L., Engelmann, T., Greene, J., Hoffmann, V. H., Nemet, G. F., Repke, T (2024)。“第 2 章: 研究与开发”《2024 年人为二氧化碳移除状况 – 第 2 版》doi:10.17605/OSF.IO/4FGHP (2024): https://www.stateofcdr.org

(48) 国际创新使命计划 (2021).《人为二氧化碳移除使命联合声明》.https://mission–innovation.net/wp–content/uploads/2021/11/Joint–Mission–Statement.pdf

(49) 国家发改委，市场监管总局和生态环境部（2024）。《进一步强化碳达峰碳中和标准计量体系建设行动方案 2024–2025》，https://zfxxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=20424。访问日期：2024 年 8 月 12 日

(50) 挪威气候与环境部（2021 ）.《气候变化法修正案》https://lovdata.no/dokument/LTI/lov/2021–06–18–129

(51) 美国国家科学、工程和医学研究院（NASEM）（2019 年）“直接空气捕集”. In E. M. 美国国家科学院，《负排放技术和可靠封存》（第 189–496 页）

(52) 挪威环境署 (2023)《工业人为碳移除潜力、成本和可能的政策工具》https://www.miljodirektoratet.no/aktuelt/fagmeldinger/2023/mars–2023/industrien–kan–fjerne– 二氧化碳 –med–virkemidler/ 最后访问日期：2024 年 7 月 14 日

(53) Nemet, G. F., Edwards, M. R., Greene, J., Dayathilake, L., Thomas, Z. H., Surana, K., Kennedy, K. M., Zaiser, A., Probst, B. S. (2024).“第 3 章：示范与推广”《2024 年人为二氧化碳移除状况 – 第 2 版》. doi:10.17605/OSF.IO/DPKSB: https://www.stateofcdr.org

(54) Northern Lights (2023).“Northern Lights 与 Ørsted 签订跨境运输和储存协议”.https://norlights.com/news/northern–lights–enters–into–cross–border–transport–and–storage–agreement–with–orsted/. 最后访问日期：2024 年 7 月 14 日

(55) 海洋负碳排放（ONCE）：https://once.xmu.edu.cn/about/History.htm. 最后访问日期：2024 年 7 月 12 日

(56) 西方石油公司（2022 年）.“西方石油公司与 SK Trading International 签署首份利用捕获的大气二氧化碳生产净零石油的协议”。新闻稿：https://www.oxy.com/news/news–releases/occidental–sk–trading–international–sign–first–agreement–for–net–zero–oil–created–from–captured–atmospheric–carbon–dioxide/. 最后访问日期：2024 年 7 月 14 日

(57) 西方石油公司（2023 年）. 西方石油公司签署协议收购直接空气捕集技术创新企业 Carbon Engineering. 新闻 稿：https://www.oxy.com/news/news–releases/occidental–enters–into–agreement–to–acquire–direct–air–capture–technology–innovator–carbon–engineering/。最后访问日期：2024 年 7 月 14 日

(58) Pongratz, J., Smith, S. M., Schwingshackl, C., Dayathilake, L., Gasser, T., Grassi, G., Pilli, R. (2024).“第 7 章：CDR 的现状”。《2024 年人为二氧化碳移除状况 – 第 2 版》（Smith,S.M. 等人编著）https://www.stateofcdr.org

(59) Reisinger, A., & Geden, O. (2023)。“暂时性过冲：起源、前景和漫漫前路”.Science Direcct, 6(12), 1631–1736.

(60) Schenuit, F., Boettcher, M., Geden, O. (2023).“碳管理”：雄心勃勃的气候政策所面临的机遇与风险”.https://www.swp–berlin.org/publications/products/comments/2023C29_CarbonManagement.pdf

(61) Schenuit, F., Buck, H., Geden, O., Hofbauer, V., Odeh, N., Schell, K., Sugiyama, M., Zheng, Q. (2024).“第 5 章：政策与治理”.《2024 年人为二氧化碳移除状况 – 第 2 版》。doi:10.17605/OSF.IO/4EGUH (2024): https://www.stateofcdr.org.

(62) Schenuit,F., Brutschin,E., Geden, O., Guo,F., Mohan,A., Fiorini,A., Saluja,S., Schaeffer, R., Riahi,K. (2024).“新兴经济体人为二氧化碳移除政策盘点：巴西、中国和印度的发展”，《气候政策》，DOI: 10.1080/14693062.2024.2353148

(63) Schulte, I., Burke, J., Arcusa, S., Mercer, L., Hondeborg, D. (2024)。“第 10 章：监测、报告和验证”，《2024 年人为二氧化碳移除状况 – 第 2 版》. doi:10.17605/OSF.IO/ADHP2 (2024)：https://www.stateofcdr.org

(64) Shayegh, S., Bosetti, V., Tavoni, M. (2021).“直接空气捕集技术的未来前景：专家意见调研的启示”.《气候最前沿》. 3. 630893.10.3389/fclim.2021.630893

(65) Sievert,K., Schmidt, T.S., Steffen, B. (2024)“从技术特征预测直接空气捕集的未来成本”.《Joule》.8.10.1016/j.joule.2024.02.005.

(66) Smith, S. M., Geden, O., Gidden, M. J., Lamb, W. F., Nemet, G. F., Minx, J. C., Buck, H., Burke, J., Cox, E., Edwards, M. R., Fuss, S., Johnstone, I., M ü ller–Hansen, F., Pongratz, J., Probst, B. S., Roe, S., Schenuit, F., Schulte, I., Vaughan、M ü ller–Hansen, F., Pongratz, J., Probst, B. S., Roe, S., Schenuit, F., Schulte, I., Vaughan, N. E. (eds.)《2024 年人为二氧化碳移除状况 – 第 2 版》 DOI 10.17605/osf.io/f85qj (2024)

(67) 英国政府（HMG）(2023).《温室气体移除：温室气体移除商业模式和电力 BECCS 商业模式的最新设计 》https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6581851efc07f3000d8d447d/ggr–power–beccs–business–models–december–2023.pdf

(68) 英国政府（HMG）(2021)《净零战略：变本加绿》.https://www.gov.uk/government/publications/net–zero–strategy. 最后访问日期：2024 年 7 月 14 日

(69) 联合国 (2024). 秘书长世界环境日致辞 https://www.un.org/sg/en/content/sg/statement/2024–06–05/secretary–generals–message–world–environment–day–scroll–down–for–french–version#:~:text=It%27s%20time%20to%20break%20free,and%20reverse%20deforestation%20by%202030. 最后访问日期：2024 年 7 月 12 日

(70) 联合国环境署 (2023)《2023 年排放缺口报告：纪录被破 –– 气温再创新高，但全世界减排（再次）不达标》.联合国环境规划署，内罗毕

(71) 世界资源研究所 (2022)《两党基础设施法和通胀削减法案中的人为碳移除》： https://www.wri.org/update/carbon–removal–BIL–IRA

(72) Yang, X (2023).“2023 年中国继续推进 CCUS”. 全球碳捕集与封存研究院：https://www.globalccsinstitute.com/news–media/insights/china–continues–to–advance–ccus–in–2023–learning–by–doing–after–launch–of–first–integrated–megaton–project–underscore–momentum/

(73) Yang, X., & Li, X (2024).《中国二氧化碳地质封存监管框架差距分析》https://www.globalccsinstitute.com/