



中国碳移除技术应用现状与未来发展潜力探析

吴昊然^{1,2}, 曹小敏^{3,4}, 李琦^{3,4}, 蔡博峰^{1,2}

1. 天津大学管理与经济学部, 天津 30072; 2. 生态环境部环境规划院, 碳达峰碳中和研究中心, 北京 10043;
3. 岩土力学与工程国家重点实验室 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 4. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 碳移除 (carbon dioxide removal, CDR) 技术是实现“双碳目标”和 CO₂ 负排放的重要手段之一, 目前正处于发展阶段。本研究阐述了 CDR 与二氧化碳捕集与封存 (carbon capture and storage, CCS) 技术的差异, 以及 CDR 技术的类型和当前研究热点, 并评估了各种 CDR 技术的移除潜力。结果表明: 从长期来看, CDR 技术更具可持续性, 与 CCS 技术可以互为补充, 在不同情境下发挥作用; 当前 CDR 技术研究主要集中在增加陆地碳汇和人为捕集大气中的 CO₂, 而对增加海洋碳汇的研究相对较少。根据对 9 项主流 CDR 技术在不同情境下的碳移除潜力、成本与碳价的关系分析发现: 1) 森林碳汇是我国碳移除的主要推手, 碳价在前期普遍低于碳移除单位成本, 这也使得直接空气捕集 (direct air capture, DAC) 和增强岩石风化技术在前期碳移除潜力较小; 2) 碳移除总成本都存在由正值逐渐变为负值的趋势, DAC 技术随着应用时间推移, 总成本逐渐降低, BECCS 和增强岩石风化技术自应用开始就能带来一定收益; 3) 各项技术中单位碳移除成本最小的是草地碳汇, 最高的为秸秆还田技术。

关键词 碳移除; 负排放; 碳汇; CCS; 直接空气捕集

化石能源燃烧导致温室气体大量排放, 加剧全球温室效应, 引发了一系列环境问题, 诸如海平面上升、极端天气问题频发和海洋酸化等。2019 年, 大气中的 CO₂ 浓度已经达到了 410 mg·L⁻¹, 相较于 1750 年 (第一次工业革命通常被认为是从 1750 年左右开始的) 增加了 47%^[1]。为了应对严峻的气候变化问题, 习近平主席提出中国力争在 2030 年前实现“碳达峰”, 在 2060 年前实现“碳中和”。

开发清洁高效能源, 减少化石燃料的使用是实现碳减排最有效的途径, 然而, 这需要相当长的时间和技术积累。当前经济社会的发展仍然无法摆脱对化石能源的依赖。二氧化碳捕集与封存 (carbon capture and storage, CCS) 技术作为一种定点捕集大型工业排放源的碳减排技术, 已经发展得较为成熟。自 1996 年首个 CO₂ 咸水层封存项目挪威北海 Sleipner 实施以来, 全球已经开展了超过 300 个 CCUS 项目^[2]。但是, 要实现将全球气温升幅控制在 1.5 °C 或远低于 2 °C, 需要在本世纪末全球净零或净 CO₂ 排放^[3]。要实现这一目标, 碳移除 (carbon dioxide removal, CDR) 技术作为一种采取人为手段来减少大气中的 CO₂ 含量的负排放方法是不可避免的。另外, 对于难以脱碳的行业和企业, 利用 CDR 技术抵消碳排放是一种首要的碳中和技术选择。

目前, CDR 技术还不成熟, 其应用潜力也尚不可知。本研究旨在研究 CDR 技术的发展现状以及在应对气候变化和实现“碳中和”目标方面的潜力。首先, 我们将明确定义并区分 CDR 和 CCS 技术。其次, 将探讨 CDR 技术类型, 并对每种技术进行阐述, 同时通过文献综述识别当前 CDR 技术的研究热点。随后, 将对 CDR 技术进行潜力评估和成本核算。最后, 将对 CDR 技术进行综合评价, 提出 CDR 技术在我国未来的发展潜力。

收稿日期: 2024-03-15 录用日期: 2024-04-07

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2022YFE0115800); 湖北省自然科学基金创新群体 (2021CFA030); 山西省重点研发计划资助项目 (202102090301009)

第一作者: 吴昊然 (2000—), 男, 博士研究生, haoranwu2000@163.com 通信作者: 李琦 (1972—), 男, 博士, 研究员, qli@whrsm.ac.cn

1 CDR 和 CCS 技术的差异

根据 IPCC 第五次评估报告 (AR5) 中对 CDR 和 CCS 技术的定义：其中，CDR 技术是指通过增加自然碳汇或利用化工方法直接从大气中去除 CO₂，并将其永久封存在陆地、海洋或地下的一系列技术；而 CCS 技术则是指将来自工业和大型排放源的 CO₂ 通过分离、捕集、压缩并运输到封存场地，然后将其永久密封存储在地下储层中，从而实现与大气永久隔离的技术^[4]。这 2 种技术方法在源汇、方法、目标、机理、规模和时间效应上都存在明显差异，如表 1 所示。

表 1 CDR 和 CCS 技术差异对比
Table 1 Comparison of CDR and CCS technologies

对比条目	CDR	CCS
碳源	大气	燃煤电厂、钢铁厂和化工厂等大型排放源
碳汇	陆地、海洋或地下	咸水层、枯竭油气藏、煤层
方法	增加自然碳汇或人为捕集	大型排放源定点捕集
目标	减少大气中的CO ₂	减少CO ₂ 排放到大气中
机理	物理、化学和生物过程	构造封存、溶解封存、残余封存和矿化封存
规模	相对较小	相对较大且固定
时间效应	长期	短期

首先，CDR 技术方法可以分为 2 类 (图 1)，一类是通过增加陆地或海洋碳汇，主要包括植树造林、土壤固碳、增强风化、海洋碱化、海洋施肥和蓝碳等技术，将 CO₂ 吸收并储存在生物体、土壤或海洋中；另一类是基于化工方法的人为从大气中捕集 CO₂，主要有生物质能与碳捕集封存 (bioenergy with carbon capture and storage, BECCS) 和直接空气捕集 (direct air capture, DAC) 技术，分离后的 CO₂ 用于商业用途或地质封存。相比之下，CCS 技术更加专注于捕集大型工业排放源的 CO₂，如燃煤电厂、钢铁厂和化工厂等。捕集并分离后的 CO₂ 经过压缩和输送后封存在咸水层、枯竭油气藏和煤层等地下储层中。从作用机理上看，CDR 技术包括物理、化学和生物过程。而 CCS 封存机理包括构造封存、溶解封存、残余封存和矿化封存。可以看出，CDR 侧重于自然过程和生态系统的恢复，通过人为手段减少大气中的 CO₂ 含量；而 CCS 更注重大型排放源的 CO₂ 控制和封存，进而减少排放到大气中的 CO₂。

此外，CDR 项目规模相对较小，选址也更加灵活，可以根据实际需求进行部署。但是发挥效益的时间比较长，成本更高，并且大多数 CDR 技术面临着土地占用的问题。而 CCS 项目以固定的大型排放源为目标，选址受到工业布局和地质条件的限制，因此规模和布局也相对较为固定。但是 CCS 发挥碳减排效益的时间更快，能够迅速减少大气中的温室气体浓度，是短期内实现碳减排的有力途径。可以看出，在减少碳排放方面，CCS 技术更容易实施且可以更快产生效果。然而 CDR 技术从长期来看可能更具灵活性和可持续性，并且对于难以实施减排的行业来说可能是更为可行的选择。综合考虑，CCS 和 CDR 技术可以在不同的情境中相互补充，以实现全面的碳减排目标。

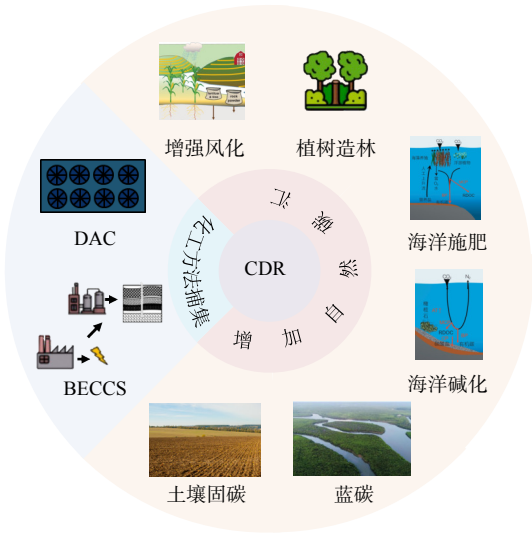


图 1 CDR 技术类型^[5-8]
Fig. 1 Types of CDR technology

2 CDR 技术类型

2.1 基于增加自然碳汇的 CDR 技术

1) 植树造林。植树造林是一种利用植物的光合作用从大气中吸收 CO_2 ，并将其固定在生物量和土壤中的 CDR 技术方法，通过在未造林的土地上种植树木，或在砍伐后的土地上再次种植树木，实现碳移除^[5]。目前来说，植树造林是唯一被广泛应用的 CDR 技术^[6]。森林固碳的本质是植物光合作用吸收的 CO_2 量超过生态系统呼吸作用所释放出的 CO_2 量。然而，需要考虑的是，当森林生长达到成熟期后，碳汇在增长到峰值后会逐渐减弱，碳汇达到饱和，森林的碳移除潜力也会受到限制^[8]。另外，受“碳减排”措施的影响，大气中 CO_2 浓度随之下降，也会削弱植物的碳吸收^[9]。因此，根据“碳减排”战略部署，合理布局造林的时间与规模，改善森林管理，对于更好地发挥森林碳汇作用具有重要意义。考虑到种植林需要占用大量土地空间以及植物的生长周期，种植薪材林可能提供一种有竞争力的选择，并带来额外的经济效益。

2) 土壤固碳和生物炭。土壤固碳是指通过合理的土地管理和利用方法，如免耕耕作、覆盖作物、混作种植、优化放牧和土壤恢复等来增加土壤中有机质的储量，从而移除大气中的 CO_2 ^[10]。土壤中有有机质的积累还能促进土壤微生物活动，进而维持土壤生态系统的稳定、改善土壤质量以及提高作物产量。

生物炭是一种由生物质在无氧或低氧条件下热解产生的富碳的木炭，将其添加到土壤中能够将生物质储存的碳永久隔离，而不是释放到大气中。生物炭的应用不需要占用额外的土地，该技术的另一个显著优点是能够改善土壤结构、提高土壤有机质含量和持水性能，进而有效提升土壤肥力和作物生产力^[11]，这也促进了土壤的 CO_2 吸收能力，并有利于减少化学肥料的使用。

3) 增强风化。增强风化通过将基性或超基性岩石磨成粉末施加到土壤中，加速硅酸盐矿物的自然地球化学风化速率，吸收大气中的 CO_2 并实现碳移除。事实上，在漫长的地质时间尺度上，硅酸盐矿物风化在大气碳循环中占据了重要作用，全球每年陆地硅酸盐矿物风化能够吸收 380~553 Mt CO_2 ^[12]。这是因为硅酸盐矿物中含有丰富的钙、镁和铁元素，能够与 CO_2 反应生成稳定的碳酸盐矿物，从而实现永久的碳固定^[13]。相比于硅酸盐矿物的自然风化过程，粉末状岩石具有更大的比表面积和更快的反应速率，能够促进二价阳离子的释放和岩石的自然碳化过程，进而增强对大气中 CO_2 的吸收。此外，将岩石粉末施用于农田中还可以释放对植物生长有益的营养物质，如硅、钙、镁、钾和磷等，起到土壤改良剂的作用，改善土壤质量，缓解土壤酸化；与植物根系、真菌菌丝和有机酸的作用也能提高硅酸盐矿物的风化速率^[7,14]。将硅酸盐矿物粉末施加到森林中也有助于改善森林土壤酸化，部分离子的释出能够帮助改善树木的健康情况^[15]。

4) 海洋碱化。海洋碱化是指将碱性矿物，包括硅酸盐和碳酸盐矿物粉末播撒到海洋中，以提高海洋的 pH 值，增加海洋的碳汇容量。由于大气中 CO_2 水平升高，已经造成了过量的 CO_2 溶解于海洋中，导致海洋酸化问题，严重威胁着海洋生态系统安全，尤其是对钙化生物(如珊瑚，贝类和浮游有孔虫等)的生长产生了负面影响。施加碱性矿物粉末能够在一定程度上可以缓解由海洋酸化引起的生态问题。相对而言，硅酸盐矿物具有更强的 CO_2 吸收能力，并且其溶解释放的硅元素可以促进硅藻的生长^[16]。美国的 Vesta 公司在北海海滩执行了首个海洋碱化场地试验，该试验投入的橄榄石一定程度上使得海水碱性增强。然而，考虑到橄榄石缓慢溶解速率的限制，以及在大规模应用时可能存在的重金属污染问题，海洋碱化技术具有一定的不确定性^[17]。

5) 海洋施肥。海洋施肥通过向海洋中添加氮、磷和铁等营养物质，提高海洋物种的生物量和生长速度，从而增强海洋系统的 CO_2 吸收能力^[18]。死去的藻类和浮游生物通常会下沉，最终形成沉积物，将封存的碳带到海底。自 1993~2005 年，科学家们在太平洋进行了 13 次中尺度规模的海洋施肥试验，结果证实了铁的添加能够提高浮游植物的生物量并促进其生长，但同时，浮游植物的群落结构也发生了改变^[19]，并且浮游植物的生长还受到多因素例如光照和温度的共同作用^[20]。此外，在人为将营养物质添加到海洋的过程中是否会对其他海洋生物造成负面影响，以及潜在的藻类富营养化问题都需要进一步考虑。

6) 蓝碳。蓝碳是指利用海洋活动和海洋生物将 CO_2 从大气中移除并固定在海洋中的过程。典型的蓝碳生态系统包括沿海的红树林、滨海盐沼和海草床等。据估计，这些生态系统的 CO_2 吸收量最高占海洋碳汇的 71%^[21]，是地球上最密集的碳汇之一。通过保护和恢复这些蓝碳生态系统，可以显著提高海洋的碳汇能力。“广东湛江红树林造林项目”是我国实施的第一个蓝碳碳汇项目。根据预测，该项目种植的 380 hm² 红树

林在 2015—2055 年期间，平均每年可抵消 4 000 t CO₂ 排放量^[22]。除了增加碳汇外，滨海生态系统的恢复与开发在保护海岸线与生物多样性、净化水质和促进社会经济发展方面也有着积极影响。

2.2 基于化工方法的 CDR 技术

1) BECCS。生物质能是太阳能以化学能的形式储存在生物体中的一种能源形式，主要包括薪材、农作物秸秆、农林废弃物和畜禽粪便等 CO₂ 中性的可再生能源，以及工业废弃物和生活垃圾等可以产生生物质能的资源^[23]。生物质能的利用方式多种多样。其中，生物质燃烧是一种常见的利用方式，通过将生物质燃烧释放出的热能转化为电能或热能。此外，生物质还可以通过气化、液化和发酵等方法转化为生物质燃料，如生物气、生物柴油和生物乙醇。这些生物质燃料可以替代传统的化石燃料，减少对有限油气资源的依赖，并降低温室气体的排放。将生物质燃烧或转化过程中释放的 CO₂ 进行捕集，并加以利用或封存在地质储层中的技术称为 BECCS。由于生物质能利用过程中释放的 CO₂ 与生物体生长过程中通过光合作用吸收的 CO₂ 数量平衡^[24]，因此，通过捕集生物质燃烧或转化过程中释放的 CO₂，不仅不会排放 CO₂，还可以实现 CO₂ 负排放。BECCS 作为一种集能源高效利用与负排放一体的技术，在应对全球气候变化问题上具有广阔的应用前景，表 2 列举了全球已经部署的典型 BECCS 项目。

表 2 全球典型的 BECCS 项目分布^[24]
Table 2 Global distribution of representative BECCS projects^[24]

项目名称	国家	生物质源	捕集规模/(Mt·a ⁻¹)	运营状态	碳封存方式
伊利诺伊州工业CCS项目	美国	乙醇工厂	1	运营中	咸水层封存
Arkalon工厂项目	美国	乙醇工厂	0.29	运营中	CO ₂ 驱油
Bonanza CCS项目	美国	乙醇工厂	0.1	运营中	CO ₂ 驱油
赫斯基能源公司CO ₂ 注入项目	加拿大	乙醇工厂	0.09	运营中	CO ₂ 驱油
Kremeslud工厂项目	挪威	城市固体废物	0.315	运营中	地质封存
ARV Duiven电厂项目	荷兰	城市固体废物	0.05	运营中	地质封存
Mikawa电厂项目	日本	生物质电厂	0.3	运营中	离岸封存
Drax电厂项目	英国	生物质电厂	5	建设中	地质封存
Norwegian全流程CCS项目	挪威	城市固体废物	0.8	建设中	地质封存

2) DAC。DAC 是指直接从大气中捕集 CO₂，随后将分离后的 CO₂ 加以利用或永久封存的技术。DAC 工艺流程主要包括 CO₂ 捕集、CO₂ 吸收和吸附剂/吸收剂再生 3 个关键模块。首先，利用工业级风扇从大气中捕集 CO₂。由于大气中 CO₂ 浓度低，这一步骤通常需要消耗大量的能源，因此研发低能耗的捕集装置是 DAC 技术的一个重要挑战。其次，通过固体吸附剂或液体吸收剂将 CO₂ 从大气中分离。吸附/吸收材料的再生处理是指脱除 CO₂ 后，材料的再次利用。开发高效、低成本的吸收剂或吸附剂是降低 DAC 技术成本的关键。瑞士公司 Climeworks 运营着目前世界上最大的 DAC 工厂 Orca，每年从大气中捕集 4 000 t CO₂，并用于商用及冰岛 CarbFix 的玄武岩矿化封存项目中。表 3 列举了全球商业应用的 DAC 项目。

表 3 全球商业应用的 DAC 项目分布^[25]
Table 3 Distribution of DAC projects for global business applications^[25]

项目名称	国家	执行公司	捕集方式	捕集规模/(Mt·a ⁻¹)	效率	运营状态
Orca DAC项目	冰岛	Climeworks	胺吸附剂	0.004	90%	运营中
Mammoth DAC项目	冰岛	Climeworks	胺吸附剂	0.036	90%	建设中
STRATOS DAC项目	美国	Carbon Engineering、1PointFive	碱性溶液吸收剂	0.5	99%	建设中
Colorado DAC项目	美国	Global Thermostat	胺吸附剂	1	97%	建设中

3.2 情景设置

本研究以 2020 年 CDR 技术发展情况为基准期，设定了基准和强化 2 种情景，旨在分析在不同推广强度下我国 CDR 技术的移除潜力及移除成本。不同情境下的技术特征参数见表 5。此外，CDR 技术潜力不仅受到技术发展和进步的影响，市场因素也同样值得考虑，因此本研究引入碳价因素。参考国际能源署 (international energy agency, IEA) 发布的碳价预测结果^[33]，在基准和强化情景下设置了不同的碳价 (2020 年不变价)，结果见表 6。基准情景以 2020 年 CDR 技术发展为基础，各项技术的发展目标基于 2020 年的情况提出，不考虑新的 CDR 技术创新和政策干预，碳交易市场缓慢发展，碳价较低。而强化情景则根据现有规划或发展趋势，提高了各项 CDR 技术规模增长率，考虑到技术进步，各项技术的成本下降速率更快，碳交易市场更加灵活，碳交易价格偏高。以此深入分析在更高移除要求下各项 CDR 技术的移除潜力及成本情况。

3.3 减排潜力及成本核算方法

为了更准确地评估中国碳移除技术的潜力和成本情况，本研究采用了 CAEP 模型^[34]中关注的关键行业/领域碳达峰路径研究方法。在全面考虑我国碳移除行业的发展需求和技术特点的基础上，我们进行了宏观预测，以评估碳移除行业在规模、潜力和成本方面的发展变化。同时，结合以技术特征为核心的 CNTD 数据库平台 (中国碳中和技术平台, China carbon neutrality technology database, <http://cntd.cityghg.com/>) 对未来我国碳移除技术的单位碳移除成本变化进行了分析，覆盖时间范围为 2020~2060 年。通过构建不同的发展情景，我们综合研判了在不同情境下碳移除行业实现碳达峰目标的路径。

1) 计算碳移除潜力。当单位碳移除价格高于碳价时，由于发展受阻，则计碳移除潜力为 0。此外，森林、湿地等自然碳汇受到国家扶持和自然资源约束，因此不在该条件考虑范围内，计算各项 CDR 技术碳移除潜力及总碳移除潜力方程如式 (1)~式 (2) 所示。

$$TEP_{jt} = \begin{cases} TS_{jt} \times UEP_j, & \text{if } UAC_{jt} < CP_t \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

$$TEP_t = \sum_j TEP_{jt} \quad (2)$$

式中：TEP_{jt}为技术 j 在第 t 年的总移除潜力；TS_{jt}为技术 j 在第 t 年的技术规模；UEP_j为技术 j 的单位技术移除潜力，单位技术移除潜力通过文献调研计算得到，单位移除量及信息来源见表 7；CP_t为第 t 年的碳价，当技术 j 在第 t 年的单位碳移除成本高于 t 年碳价时，该项技术则不发挥碳移除作用。

2) 计算碳移除成本。

$$TAC_{jt} = UIC_{jt} \times TS_{jt} - TEP_{jt} \times CP_t \quad (3)$$

式中：TAC_{jt}为技术 j 在第 t 年的碳移除成本；UIC_{jt}为技术 j 在第 t 年的单位投资成本，各项技

表 5 CDR 技术参数情景设置

Table 5 Parameter scenario setting of CDR technologies

情景参数	基准CDR情景	强化CDR情景
技术成本下降率	0.5%	1%
其他技术规模年增长率	0.5%	1%

表 6 基准情景和强化情景下碳价设置^[34]

Table 6 Carbon pricing under baseline and enhanced scenarios

年份	基准情景下碳价/(元·t ⁻¹)	强化情景下碳价/(元·t ⁻¹)
2025	180.42	310.5
2030	281.33	621
2035	328.92	862.5
2040	515.10	1 104
2045	618.88	1 242
2050	756.26	1 380
2055	982.28	1 665.2
2060	1 345.24	1 878.11

表 7 CDR 技术单位移除量及来源

Table 7 Unit reduction amount and sources of CDR technologies

CDR技术	单位移除量	单位	参考文献
BECCS	165	t CO ₂ -eq·Gwa ⁻¹	[35]
DAC	0.99	t CO ₂ -eq·t ⁻¹	[3]
秸秆还田	0.66	t CO ₂ -eq·t ⁻¹	[36]
海水养殖藻类碳汇	0.21	t CO ₂ -eq·t ⁻¹	[37]
海水养殖贝类碳汇	0.38	t CO ₂ -eq·t ⁻¹	[37]
增强风化	167	t CO ₂ -eq·hm ⁻² ·a	[30]
草地碳汇	6.9	t CO ₂ -eq·hm ⁻² ·a	[38]
滨海湿地恢复与蓝碳管理	818	t CO ₂ -eq·hm ⁻² ·a	[39]
森林碳汇	1.83	t CO ₂ -eq·m ⁻³	[40]

术的单位投资成本数据来于公开发表的报告及文献^[30,31-40]。

计算单位碳移除成本计算公式如式(4)。

$$UAC_{j,t} = \frac{TAC_{j,t}}{TEP_{j,t}} \quad (4)$$

得到总碳移除成本和总碳移除潜力之后,平均单位碳移除成本计算公式如式(5)。

$$AUAC_t = \frac{TAC_t}{TEP_t} \quad (5)$$

3.4 移除潜力及成本分析

1) 移除潜力及成本分析。图3所示为两种情境下碳移除总成本变化,两种情境下总成本都存在“先正-后负”的趋势,成本由正值逐渐变为负值,即碳移除带来的收益逐渐高于投资碳移除技术的成本。2020年,各项CDR技术的碳移除成本总和为 1.29×10^{12} 元,其中秸秆还田技术的总成本占比最高,成本高达 8.50×10^{11} 元,远高于海水养殖贝藻类碳汇。

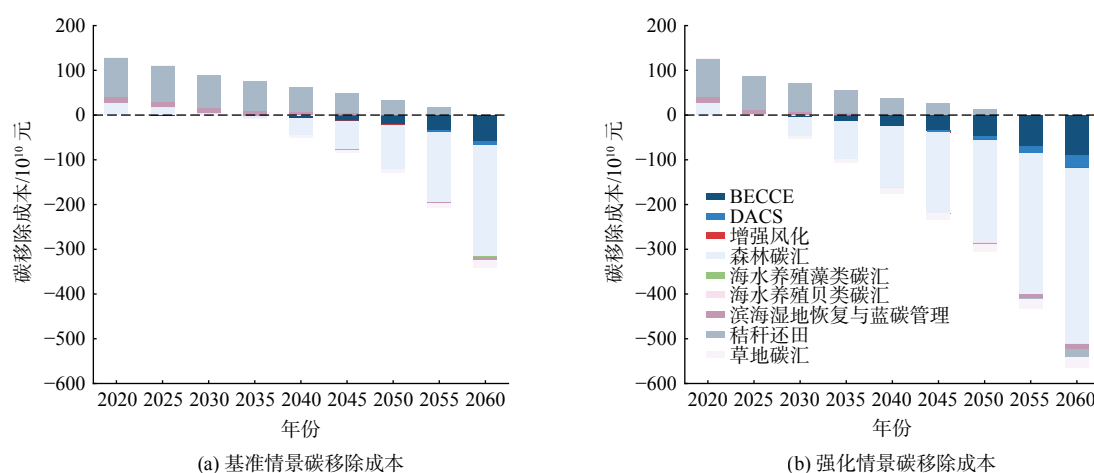


图3 2020~2060年不同情景下CDR技术总碳移除成本

Fig. 3 The total carbon emission reduction cost of CDR technologies under different scenarios from 2020 to 2060

基准情景下,总碳移除成本自2045年开始逐渐“转投入为收益”,到2060年碳移除累计带来收益 3.41×10^{12} 元,是2020年成本数值的1.6倍,其中BECCS技术由于其单位碳移除成本远低于碳价,并且总碳移除量较高,自应用开始成本就一直为负,2060年由碳移除获得的收益有 5.77×10^{11} 元。DAC技术自2045年开始广泛应用后,2050年其碳移除成本为 2.64×10^{11} 元,2055年开始转成本为收益,2060年碳移除带来收益 9.65×10^{10} 元。在强化情景下,总碳移除成本自2035年开始总收益就大于0,在2060各项技术的收益为 5.65×10^{12} 元,较基准情景提升了65.6%。其中增强风化技术自应用开始,就能够带来收益,BECCS技术在2060年碳移除收益为 8.99×10^{11} 元,DAC技术转成本为收益的时间节点提前至2040年,2060年其碳移除收益为 2.80×10^{11} 元,较基准情景提升了190%。

2) 单位移除成本。2020~2060年各项CDR技术的单位移除成本如图4所示。2020年,9项技术的平均单位碳移除成本为867.33元·t⁻¹,远高于我国平均碳价58元·t⁻¹,其中单位碳移除成本最小的是草地碳汇,为128.99元,最高的是秸秆还田技术3142元·t⁻¹。基准情景下,平均单位碳移除成本逐渐下降,2045年为144.17元·t⁻¹,即碳移除能够带来收益144元·t⁻¹,2060年这一指标升至1084.76元·t⁻¹,秸秆还田、滨海湿地碳汇和海水养殖贝藻类技术单位碳移除成本高于平均单位碳减排成本。到2060年,秸秆还田技术单位收益仍是最低的,为-47.15元·t⁻¹,而BECCS技术的单位碳移除成本是最小的,即收益最大的,在2060年单位碳移除收益为1282.68元·t⁻¹。DAC技术单位碳移除在2060年提升至787.98元·t⁻¹,其他技术的单位碳移除收益均高于500元·t⁻¹。在强化情景下,平均单位碳移除成本从2035年开始转变为收益,到2060年平均单位碳移除收益为1622.21元。其中,BECCS技术仍是成本下降最快的技术,到2060年单位收益为

1 817.1 元；森林碳汇位居第二，单位碳移除收益为 1 743.67 元。此外，秸秆还田技术发展更加迅速，单位碳移除收益为 612.31 元。

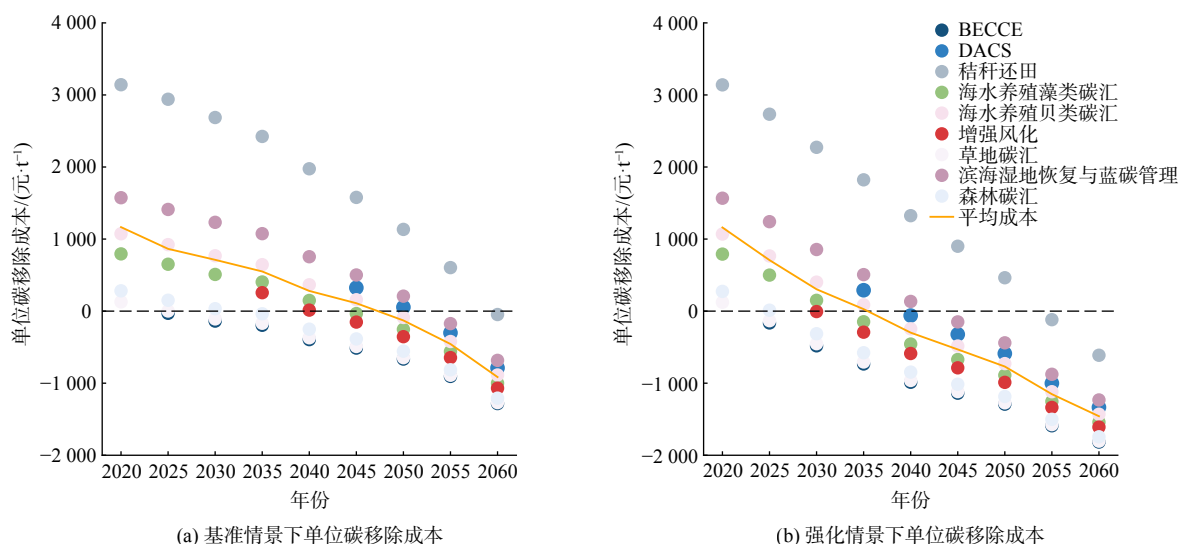


图 4 2020~2060 年不同情景下 CDR 技术单位移除成本

Fig. 4 The unit carbon emission reduction cost of CDR technologies under different scenarios from 2020 to 2060

3) 移除潜力。图 5 所示为 2020—2060 年我国各项 CDR 技术的碳移除潜力预测结果。在 2020 年，共有 6 项 CDR 技术协同发挥作用，合计碳移除量达到 14.88×10^8 t，其中森林经营碳汇成绩斐然，累计移除 10.05×10^8 t。根据最新发布的《中华人民共和国气候变化第四次国家信息通报》^[41]和《中华人民共和国气候变化第三次两年更新报告》^[32]发布的温室气体清单信息，2018 年我国林地、草地和湿地分别碳移除 9.66×10^8 、 1.02×10^8 和 8.64×10^7 t，本研究计算 2020 年碳移除量结果与通报数据体量和趋势基本吻合，因此，研究结果准确性较高。除了森林经营碳汇外，滨海湿地恢复与蓝碳管理和草地碳汇在 2020 年分别移除 8.59×10^7 和 1.21×10^8 t，碳移除量较大。此外，海水养殖贝藻类在 2020 年实现碳移除量 6.17×10^6 t。在两类 CDR 技术类型中，基于增强自然碳汇的 CDR 技术总移除潜力明显高于基于化工方法的 CDR 技术。由于在我国尚未进行大规模应用，BECCS、DAC 与增强岩石风化技术在 2020 年的技术规模和移除量均为零。基于化工方法的 CDR 技术中，生物炭还田技术总计移除 2.71×10^8 t。

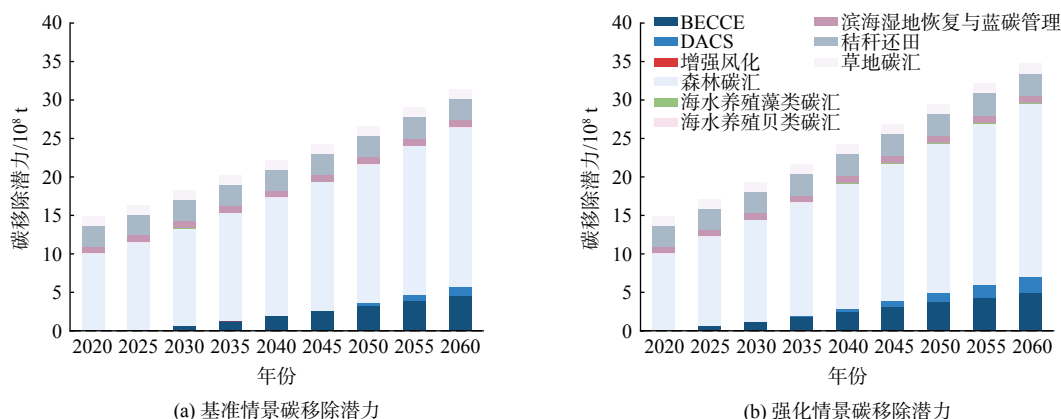


图 5 2020~2060 年不同情景下 CDR 技术碳移除潜力

Fig. 5 The potential for reducing carbon emissions of CDR technologies under different scenarios from 2020 to 2060

在基准情景下，碳价在前期普遍低于单位碳移除成本，总碳移除量逐渐增加，到 2060 年碳移除潜力达到 31.43×10^8 t，其中森林碳汇碳移除潜力为 20.67×10^8 t，草地碳汇与滨海湿地碳汇在 2060 年碳移除潜力分

别为 1.26×10^8 t 和 8.94×10^7 t。增强岩石风化技术受碳价格影响, 2030 年单位碳移除成本高于碳价, 因此从 2035 年开始发挥作用。秸秆还田技术到 2060 年碳移除潜力为 2.82×10^8 t, 较 2020 年水平增长了 4%。DAC 技术应用前期由于单位减排成本远高于碳价, 因此碳减排潜力自 2045 年开始计算, 到 2060 年碳移除潜力达到 1.23×10^8 t, 远超过海水养殖贝藻类碳汇。此外 BECCS 技术由于单位碳移除成本较低, 并在当前以有了一定的应用基础, 到 2060 年碳移除潜力仅次于森林碳汇, 每年碳移除潜力为 4.49×10^8 t。而在强化情景下, 在 2060 年 9 项 CDR 技术的总碳移除潜力达 34.81×10^8 t, 其中森林碳汇碳移除潜力为 22.52×10^8 t。由于碳市场发展较为迅速, 碳价增长较快, 其中增强岩石风化技术碳移除潜力从 2030 年开始计算, DAC 技术自 2035 年开始碳移除潜力逐步提升, 较基准情景分别提前了 5 年和 15 年, 这也说明碳交易市场也在改变着 CDR 技术的发展, 并对技术的碳移除潜力有较大影响。BECCS 技术 2060 年碳移除潜力较基准情景提升了 10%。

4 结论与政策建议

本研究首先对 CDR 与 CCUS 技术进行了详细说明, 以清晰区分这两类技术在我国减碳路径上的作用和差异。随后, 介绍了 CDR 技术类型, 并对 9 项具体的主流 CDR 技术进行了全面分析, 并通过计算单项技术的移除成本及移除潜力, 探讨了碳移除行业中最具移除潜力的技术。此外, 本研究还设置了两种情境, 以分析在不同的技术水平、技术规模和碳市场发展下, CDR 技术的潜力与成本的变化。得出以下结论。1) 在 2020 年, 碳移除量达到 14.88×10^8 t, 其中森林经营碳汇是我国碳移除的主要推手。由于碳价在前期普遍低于碳移除单位成本, 加之技术壁垒较高, 使得 DAC 和增强岩石风化技术在前期没有大规模应用, 碳移除潜力较小。2) 两种情境下总成本都存在“先正-后负”的趋势, 成本由正值逐渐变为负值, 即 CDR 技术带来的收益逐渐高于投资成本, 其中 BECCS 和增强岩石风化技术自应用开始就能带来一定收益, DAC 技术总成本先经历上升, 然后转成本为收益。3) 2020 年, 平均单位碳移除成本为 $867.33 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, 远高于我国平均碳价 $58 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, 其中单位碳移除成本最小的是草地碳汇, 为 128.99 元, 最高的是秸秆还田技术, 为 $3142 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$, BECCS 技术是各项技术中单位碳移除成本最小的, 并且在后期能够带来颇多收益。值得注意的是, 本研究尚存在不足之处: 本研究通过情景预测了不同发展状况下我国 CDR 技术未来的碳移除潜力和成本, 但 CDR 技术规模的预测主要通过外生参数来约束, 未来研究可结合其他研究对不同 CDR 技术规模的预测进行综合分析; 在不同情境下, CDR 技术成本设置了不同的成本下降率, 未来可通过获取其他历史数据, 应用学习曲线对未来 CDR 成本进行动态预测, 以更好地反映技术学习成本下降的规律。

基于上述分析, 提出以下碳移除行业的相关政策建议, 并根据研究结论给出了 CDR 技术的发展建议如图 6 所示。1) 针对当前我国移除潜力最大的森林经营碳汇, 需要持续推进国土绿化行动, 全面保护天然林, 扩大退耕还林规模。同时, 由于前期我国碳价较低, BECCS 和 DAC 技术经济优势较弱, 因此尽早推广 BECCS、DAC 和增强岩石风化技术。2) 从碳移除总成本来看, 基于化工方法的 CDR 技术总成本普遍高于

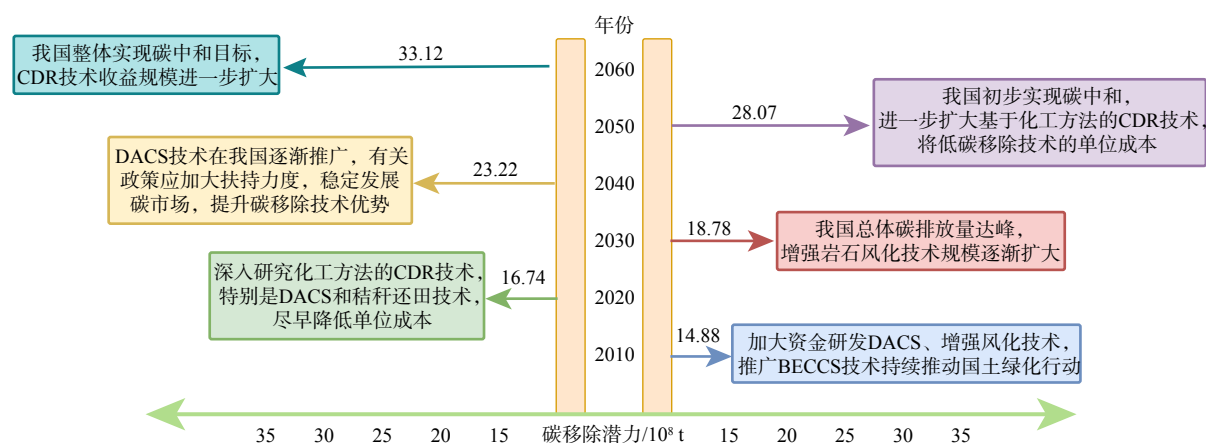


图6 2020~2060年CDR技术发展路径

Fig. 6 CDR technology development path from 2020 to 2060

基于增强自然碳汇的 CDR 技术,未来需投入更多资金,深入研究化工方法的 CDR 技术,特别是降低秸秆还田和 DAC 技术的成本。3) 当前我国 DAC 以及增强岩石风化等技术并不成熟,没有展开大规模的应用,未来这些技术是至关重要的,需要尽快开展相关的应用研究。

参 考 文 献

- [1] IPCC. Climate change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Geneva, Switzerland: Cambridge University Press, 2023.
- [2] 李琦, 刘桂臻, 李小春, 等. 多维度视角下 CO₂ 捕集利用与封存技术的代际演变与预设[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 157-166.
- [3] IPCC. Climate change 2022: Mitigation of climate change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.
- [4] IPCC. Climate change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Geneva, Switzerland: Cambridge University Press, 2014.
- [5] 焦念志. 研发海洋“负排放”技术支撑国家“碳中和”需求[J]. 中国科学院院刊, 2021, 36(2): 179-187.
- [6] 程伟, 罗勇, 曹龙, 等. 二氧化碳移除技术研究进展与评述[J]. 气候变化研究进展, 2023, 19(5): 672-682.
- [7] BROBERG D, NORMILE C, STARK A K. Uncertainty drives carbon ambition, even as deployment potential still at some remove[J]. *Chem*, 2021, 7(11): 2854-2856.
- [8] CHIQUIER S, PATRIZIO P, BUI M, et al. A comparative analysis of the efficiency, timing, and permanence of CO₂ removal pathways[J]. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15(10): 4389-4403.
- [9] 徐浩, 岳超, 朴世龙. 科学规划植树造林把握森林碳汇对“碳中和”战略的服务窗口期[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(12): 3010-3014.
- [10] TERLOUW T, BAUER C, ROSA L, et al. Life cycle assessment of carbon dioxide removal technologies: A critical review[J]. *Energy & Environmental Science*, 2021, 14(4): 1701-1721.
- [11] WOOLF D, LEHMANN J, LEE D R. Optimal bioenergy power generation for climate change mitigation with or without carbon sequestration[J]. *Nature Communications*, 2016, 7(1): 13160.
- [12] SONG Z L, LIU H Y, STRÖMBERG C A E, et al. Contribution of forests to the carbon sink via biologically-mediated silicate weathering: A case study of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 1-8.
- [13] CAO X M, LI Q, XU L, et al. A review of in-situ carbon mineralization in basalt[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2024, 16(4): 1467-1485.
- [14] ANDREWS M G, TAYLOR L L. Combating climate change through enhanced weathering of agricultural soils[J]. *Elements*, 2019, 15(4): 253-258.
- [15] 高伟斌, 陈畅, 王浩贤. 增强硅酸盐岩风化——“碳中和”之新路径[J]. 地球科学进展, 2023, 38(2): 137-150.
- [16] 郭雪飞, 张敏吉, 周微, 等. 海洋碱性矿物增汇技术发展方向研究[J]. 海洋开发与管理, 2023, 40(9): 30-36.
- [17] TOLLEFSON J. Start-ups are adding antacids to the ocean to slow global warming[J]. Will it work[J]? *Nature*, 2023, 618(7967): 902-904.
- [18] BUESSELER K O, BOYD P W. Will Ocean Fertilization Work[J]? *Science*, 2003, 300(5616): 67-68.
- [19] 穆景利, 韩建波, 霍传林, 等. 海洋铁施肥研究进展[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(2): 282-286.
- [20] 孙涵晟, 孙旭梅, 王鑫威, 等. 铁施肥促进海洋浮游植物和生物碳泵的不确定性[J]. 微生物学报, 2022, 62(12): 4592-4605.
- [21] NELLEMAN C, CORCORAN E, DUARTE C, et al. Blue carbon governance for carbon neutrality in China: Policy evaluation and perspectives[J]. *Heliyon*, 2009, 9(10): e20782.
- [22] 吴逸然. 基于碳中和背景下蓝碳经济发展研究——以湛江红树林造林项目为例[J]. 科技与金融, 2022(3): 57-62.
- [23] 刘刚, 沈儒. 中国生物质能源的定量评价及其地理分布[J]. 自然资源学报, 2007, 22(1): 9-19.
- [24] 蒋剑春. 生物质能源应用研究现状与发展前景[J]. *林产化学与工业*, 2002, 22(2): 75-80.
- [25] AN K J, LI K, YANG C M, et al. A comprehensive review on regeneration strategies for direct air capture[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2023, 76: 102587.
- [26] 樊静丽, 李佳, 晏水平, 等. 我国生物质能-碳捕集与封存技术应用潜力分析[J]. 热力发电, 2021, 50(1): 7-17.
- [27] 生态环境部环境规划院, 中国科学院武汉岩土力学研究所, 中国 21 世纪议程管理中心. 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2021)——中国 CCUS 路径研究[R]. 北京: 生态环境部, 2021.
- [28] 农业农村部. 全国农作物秸秆综合利用情况报告[R]. 北京: 农业农村部, 2022.
- [29] 农业农村部渔业渔政管理局. 2020 年中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
- [30] ZHANG S, BAI X, ZHAO C, et al. Global CO₂ consumption by silicate rock chemical weathering: Its past and future[J]. *Earth's Future*, 2021, 9(5): e2020EF001938.
- [31] 国家林业和草原局. 中国林业和草原统计年鉴 2020[M]. 北京: 中国林业出版社, 2020.
- [32] 中华人民共和国生态环境部. 气候变化第三次两年更新报告[R]. 北京: 生态环境部, 2023.
- [33] IEA. Net Zero by 2050[R]. Paris, 2021.
- [34] 蔡博峰, 吕晨, 董金池, 等. 重点行业/领域碳达峰路径研究方法[J]. 环境科学研究, 2022, 35(02): 320-328.
- [35] YANG B, WEI Y-M, LIU L-C, et al. Life cycle cost assessment of biomass co-firing power plants with CO₂ capture and storage considering multiple incentives[J]. *Energy Economics*, 2021, 96: 105173.
- [36] 陈键. 秸秆生物质转化为生物炭还田的固碳效益及其经济性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [37] 于佐安, 谢玺, 朱守维, 等. 辽宁省海水养殖贝藻类碳汇能力评估[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(3): 382-386.
- [38] 闫晔. 草原碳汇定价研究[D]. 内蒙古: 内蒙古农业大学, 2014.
- [39] GATTUSO J P, WILLIAMSON P, DUARTE C M, et al. The potential for ocean-based climate action: Negative emissions technologies and beyond[J].

Frontiers in Climate, 2021, 2: 575716.

[40] 程毅明. 不同类型 CCER 林业碳汇项目碳汇供给成本及其敏感性分析[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2020.

[41] 中华人民共和国生态环境部. 中华人民共和国气候变化第四次国家信息通报[R]. 北京: 生态环境部, 2023.

(责任编辑: 金曙光)

Analysis on the application status and future development potential of carbon removal technology in China

WU Haoran^{1,2}, CAO Xiaomin^{3,4}, LI Qi^{3,4,*}, CAI Bofeng^{1,2}

1. College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Center for Carbon Neutrality, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100043, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

*Corresponding author, E-mail: qli@whrsm.ac.cn

Abstract Carbon dioxide removal (CDR) technology is one of the essential means to achieve the “dual carbon goals” and negative CO₂ emissions, which is currently in the development stage. This study aimed to elaborate the distinctions between CDR and carbon capture and storage (CCS) technologies, as well as the types and current research hotspots of CDR technology, and evaluated the emission reduction potential of various CDR technologies. The findings showed that, in the long run, CDR technology was more sustainable and could complement CCS technology, playing different roles in different scenarios. Research on CDR technology primarily focuses on increasing terrestrial carbon sinks and artificially capturing CO₂ from the atmosphere, while research on increasing ocean carbon sinks was relatively limited. Based on the analysis of the CDR potential, cost and carbon price of nine major CDR technologies in different scenarios, it was found that: 1) Forest carbon sequestration was the main driver of carbon removal in China, and the carbon price was generally lower than the unit cost of carbon removal in the early stage, which also made the potential of direct air capture (DAC) and enhanced rock weathering technologies in the early stage of carbon removal small. 2) The total cost of carbon removal gradually changed from positive to negative, and the total cost of DAC technology gradually decreases with the application time, and enhanced rock weathering technology can bring certain benefits from the beginning of application. 3) Among the technologies, the grassland carbon sink had the smallest unit carbon removal cost, and the straw returning technology had the highest value.

Keywords carbon dioxide removal; negative emissions; carbon sink; CCS; direct air capture