

全球碳管理发展态势与技术前沿进展

姚悦^{1,2}, 吕昊东^{2,3}, 彭雪婷², 张贤², 王颖¹

(1. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092; 2. 中国21世纪议程管理中心, 北京 100038; 3. 清华大学环境学院, 北京 100084)

摘要: 碳管理 (Carbon Management) 技术是实现《巴黎协定》温控目标的重要支柱与实现中国碳中和目标技术组合的关键构成部分。当前, 随着全球负排放需求增多, 碳管理在主动管理现有工厂设施、难减排部门及大气遗留的二氧化碳排放方面将发挥不可或缺的作用, 然而目前关于碳管理领域的科学认识与前沿进展还存在一些模糊与不足。围绕碳管理的内涵与外延、技术细分、全球前沿进展、中美发展态势对比及问题与建议方面进行了深入的分析。研究总结了碳管理的定义及意义、技术体系与碳循环模式; 对自然碳管理、主动碳管理、碳捕集利用与封存 (CCUS) 与碳移除 (CDR) 技术进行了细分讨论; 从科学共识、技术发展与国际合作 3 个方面归纳了当前全球碳管理前沿进展; 对比了中国和美国碳管理领域在减排需求、技术跟踪、支持政策和市场投资领域的发展态势; 最后从科技研发、政策激励、基础设施与多双边合作 4 个方面提出了相应的措施建议。研究系统梳理了全球碳管理发展态势与技术前沿进展, 为推进我国碳管理战略性技术体系的超前部署和能源系统有序平稳转型下的碳中和目标实现提供参考。

关键词: 碳管理; 气候变化; 碳移除; CCUS; 技术体系

中图分类号: TK01; X-1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4772(2024)10-0032-09

Development trends and technological frontiers of global carbon management

YAO Yue^{1,2}, LYU Haodong^{2,3}, PENG Xueting², ZHANG Xian², WANG Ying¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. The Administrative Center for China's Agenda 21, Beijing 100038, China; 3. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Carbon management technology is an important pillar for achieving the temperature control targets of the Paris Agreement and a key component of China's technology portfolio for achieving its carbon neutrality goals. Currently, as the demand for negative emissions increases globally, Carbon management will play an indispensable role in proactively managing carbon dioxide emissions from existing plants and facilities, hard-to-reduce sectors, and atmospheric legacy, but there are still some ambiguities and deficiencies in the current scientific understanding and cutting-edge advances in the field of carbon management. This paper provides an in-depth analysis of the connotation and extension of carbon management, technological segmentation, global cutting-edge progress, comparison of development trends between China and the United States, and issues and recommendations. The study summarizes the definition and significance of carbon management, technology system and carbon cycle model; discusses the breakdown of natural carbon management, active carbon management, carbon capture, utilization and sequestration (CCUS) and carbon removal (CDR) technologies; summarizes the current progress of global carbon management frontiers in terms of scientific consensus, technological development and international cooperation; and compares the development of carbon management in China and the United States in terms of emission reduction demand, technological tracking, support policies, and market investment. Finally, the study proposes corresponding measures in terms of scientific and technological research and development, policy incentives, infrastructure, and bilateral and multilateral cooperation. This research systematizes the global carbon management development and technological frontiers, provides reference for the advanced

收稿日期: 2024-04-24; 责任编辑: 李雅楠 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS24042401

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42406235); 国家节能中心资助项目(2032302400002)

作者简介: 姚悦(1992-), 女, 山东泰安人, 助理研究员, 博士。E-mail: missstaru@foxmail.com

通讯作者: 王颖(1983-), 女, 山东青岛人, 教授, 博士。E-mail: yingwang@tongji.edu.cn

引用格式: 姚悦, 吕昊东, 彭雪婷, 等. 全球碳管理发展态势与技术前沿进展 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30(10): 32-40.

YAO Yue, LYU Haodong, PENG Xueting, et al. Development trends and technological frontiers of global carbon management [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(10): 32-40.



deployment of China's carbon management strategic technology system and the achievement of carbon neutrality goals under the orderly and stable transformation of the energy system.

Key words: carbon management; climate change; CDR; CCUS; technology system

0 引言

随着气候变化不利影响日益显现,管理“碳流”的重要性持续上升^[1-2]。碳是地球上相对丰富的元素,它存在于地壳、海洋和大气中,是所有生命的基础,陆地、海洋、大气和生物群内部和之间的碳流动构成了全球碳循环^[3]。工业革命以来的人类活动,特别是化石燃料燃烧和森林砍伐,改变了这一循环进程,显著提高了大气中二氧化碳(CO₂)的体积分数^[4]。当前,全球应对气候变化行动需求紧迫,经济社会深度减排需求显著增强,要求加速构建零碳能源系统、重塑零碳工艺流程、建立负碳技术体系。除了利用清洁能源取代化石燃料等方式从源头端减少温室气体排放外,利用人工或自然方式在碳排放过程端或者末端管理大气中的碳含量对实现《巴黎协定》温控目标和平衡大气碳收支的重要性日益增加^[5-6]。

二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)及二氧化碳移除(CDR)的技术组合,通常被称为碳管理(Carbon Management)^[7-8]。碳管理技术兼顾碳减排、碳移除、碳再利用、碳回收,构建了碳循环闭环模式,是未来中国实现碳中和目标与全球2℃温控目标的重要手段之一^[9-13]。然而,目前关于碳管理领域的科学认识与前沿进展还存在一些模糊与不足,笔者围绕碳管理内涵与外延、碳管理技术细分、全球碳管理前沿进展、中美碳管理发展态势认识及我国碳管理发展有关措施建议等方面进行了系统的总结梳理及探讨。

1 碳管理内涵

美国能源部(USDOE)于2020年率先提出碳管理的概念,《2020年能源法案》(EA 2020)将USDOE化石能源办公室(Office of Fossil Energy)正式更名为化石能源和碳管理办公室(Office of Fossil Energy and Carbon Management),把化石能源与碳管理放在了同样重要的位置,为后续碳管理的发展奠定了基调^[14]。随着科学认识进步及应用场景拓展,碳管理的内涵也不断演变。

1.1 碳管理定义及意义

碳管理的具体定义可以分为狭义与广义2种,狭义定义是CCUS技术和CDR技术的组合,广义定义是温室气体捕集(Capture)、移除(Remove)、运

输(Transport)、封存(Store)和利用(Use)所必须的技术、应用和基础设施的组合,还需要制定强有力的核算框架,以准确衡量、跟踪和区分不同活动的气候影响^[11]。2者的区别主要在于前者针对的“碳”特指CO₂气体,后者泛指温室气体;后者在前者的技术体系上进行了进一步的细分与延伸。

碳管理的提出旨在影响碳循环模式,以停止并最终扭转碳排放上升趋势,减少进入大气碳库的CO₂流量,并消除大气中存续的CO₂^[11]。同时,碳管理在减少现有工业设施和发电厂的碳排放以及平衡难减排部门的碳排放方面将发挥重要作用,该技术不仅是化石能源近零排放的唯一选择,也是钢铁、水泥等难减排行业深度脱碳的可行技术方案^[12]。碳管理强调在碳排放过程端或者末端管理大气中的碳含量,将过去对大气污染物的被动治理扭转对空气中遗留碳排放的主动管理,因此,不论是化石燃料还是可再生能源均可以与碳管理技术衔接,实现优势互补,有助于在全球平稳有序安全的能源系统转型的条件下实现气候变化减缓目标。

值得关注的是,美国能源部提出的碳管理、碳中和管理(Carbon Neutrality Management)、碳资产管理(Carbon Asset Management)、碳排放管理(Carbon Emission Management)等术语有着不同的概念,其中后3者在中文中也简称“碳管理”,这些概念既有交集也有区别,因此极易混淆。碳中和管理是指为CO₂或温室气体排放量实现正负抵消,达到净零排放所采取的管理和行动措施。碳管理技术体系属于碳中和技术体系的组成部分之一。碳资产管理主要是从企业和碳市场的角度,建立碳排放核算机制,对碳价格、碳配额等碳资产进行管理,与交易。碳排放管理主要包括碳排放的监测、报告和核查3个环节的管理。

1.2 碳管理技术体系

碳管理技术体系主要包含6个组成部分(图1)^[7],分别是CO₂的捕集、运输、利用、储存、移除及核算技术。碳捕集主要是指从发电厂、工业设施等大型点源处捕集CO₂排放的技术,例如从燃煤发电厂、水泥厂、钢铁厂等高碳排放工厂捕集烟气中的CO₂。碳运输是将捕集或移除的CO₂通过管道或者其他交通工具运输至可封存或利用的位置,通过源汇匹配优化配置路线,将运输基础设施的需求与成本降至最低。碳利用是将CO₂作为原料或工质,获

取高值产品,同时具有减排效益,例如CO₂可以为水泥、碳纳米管生产提供原材料,制备低碳燃料等。碳储存是在长时间尺度上从碳循环中移除CO₂的技术和实践,可以通过地质封存或基于自然生物成因的碳汇方式来实现,其中地质封存主要包含咸水层封存与CO₂驱油(EOR,既属于储存技术又属于利用技术)技术,自然生物成因的储存主要包括树木、土壤等吸收并长期储存CO₂的方式。碳移除则是从环境空气中移除CO₂的技术和策略,可以通过直接空气捕集与封存(DACCS)、森林管理、生物质碳去除与封存(BiCRS)等工程、自然或者混合方式实现。二氧化碳核算指通过建立稳健的碳核算机制以准确衡量、跟踪和区分不同活动的气候影响。

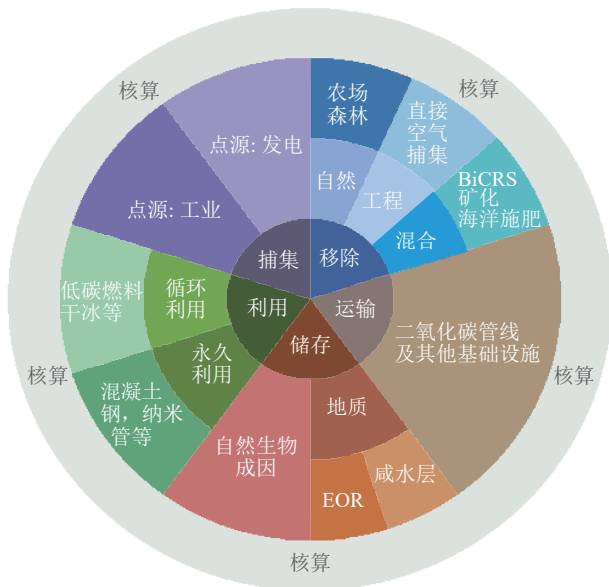


图1 碳管理技术体系框架(修改自碳管理议程^[7])

Fig. 1 Carbon management technology system framework (Modified from Carbon Management Agenda^[7])

1.3 碳循环 4R 模式

有别于常规的从源头端进行CO₂减排的措施,如能效提升、可再生能源替代等方法,碳管理强调通过人工或自然方式从过程端或者末端管理排放源处和大气中的碳含量,即从线性地单向减少碳排放(Reduce)转向兼顾碳再利用(Reuse)、碳回收(Recycle)、碳移除(Remove)的闭环模式^[10]。碳减排技术与碳管理技术共同构建了碳循环4R模式(图2),重塑人类碳循环模式过程。碳循环4R模式平衡了碳基温室气体所需的供应,使供应与市场需求保持一致,技术则是实现4R模式的推动者,每个“R”对应了不同类别的技术^[9,15]。

2 碳管理技术细分

碳管理技术体系涉及技术种类众多,其技术细



图2 碳循环4R模式(修改自循环碳经济^[9,15])

Fig. 2 Carbon cycle 4R Mode (Modified from Circular Carbon Economy^[9,15])

分方式根据碳管理技术是基于自然属性还是人工属性分为自然碳管理与主动碳管理技术,亦可以根据技术功能类型分为CCUS技术和CDR技术。不同的细分技术在适用场景、技术特征等方面各具特点。

2.1 自然碳管理与主动碳管理技术

美国信息技术与创新基金会将碳管理技术分为2类:自然碳管理技术和主动碳管理技术(图3)^[16]。其中,自然碳管理技术旨在增加自然碳汇中以半永久状态储存的CO₂,主要包含基于生物作用的碳管理技术,例如植树造林和再造林、土壤和农业封存、生物炭和海洋施肥。然而仅仅依靠自然碳管理技术不足以阻止大气中CO₂的上升,因为自然碳管理的进程通常十分缓慢,并且自然碳汇也并非永久性的。例如,森林需要数年时间成长,必须种大量新树苗并使其成熟,才能封存大规模的碳排放,而野火则会重新释放森林中捕集的CO₂。

相比之下,主动碳管理技术则应用工程或人工技术来捕集工厂和发电厂等点源排放的CO₂,或者将CO₂直接从大气中去除,然后将其利用在产品中或封存于地下深部。典型的细分技术包括CCS和直接空气捕集(DAC),CCS可减少碳排放点源的排放污染物进入大气,从而减少碳的流动,相比之下,DAC则直接捕集和减少了大气中的碳储量^[17]。与森林、草原和土壤碳汇等自然碳管理方式相比,地下地质人工碳汇技术重新释放碳的可能性要更小^[18]。主动碳管理技术与自然碳管理技术相比具有土地占用面积小、资源利用消耗少等优势,从而避免了与城市发展和农业需求的竞争;此外,主动碳管理的开发和部署速度比种植森林和保护森林直至其成熟等方式更快^[19],更有利于高效管理CO₂排放。

值得注意的是,该分类方式还包括混合碳管理技术(图3)。例如,生物质热解是在缺氧环境中

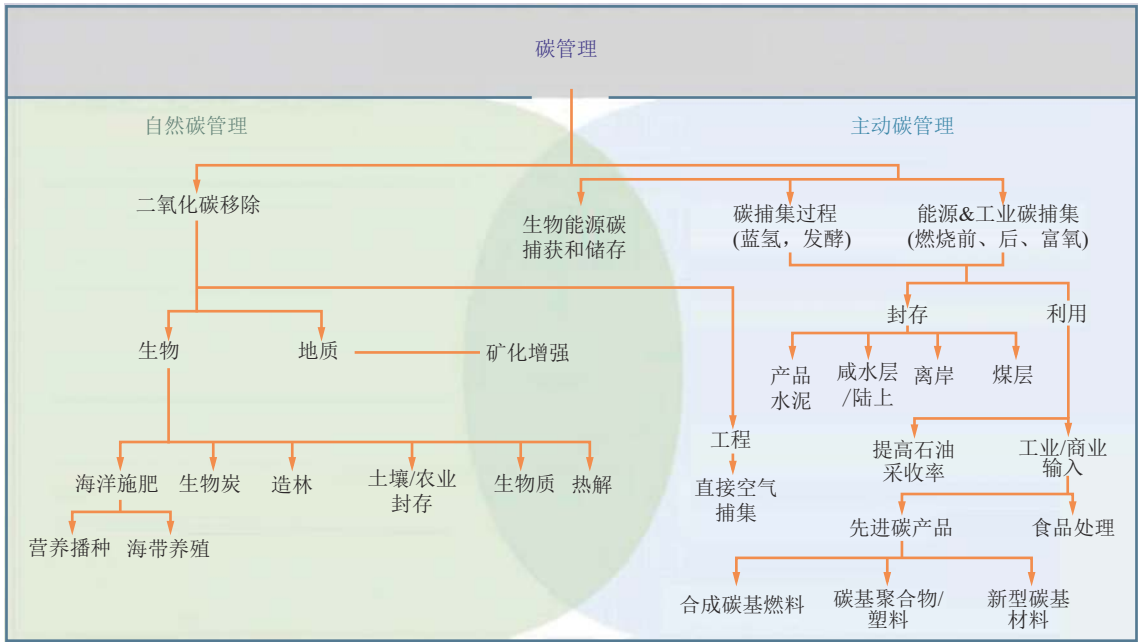


图3 自然碳管理与主动碳管理技术(修改自美国信息技术与创新基金会^[16])

Fig. 3 Natural carbon management and active carbon management technologies (modified from Information Technology & Innovation Foundation^[16])

使用高温和高压处理生物质,通过人工干预将生物质基于自然光合作用捕集的 CO_2 转化为富含碳的焦油状物质,并进一步利用或封存在地下。矿化增强方式将某些矿物的天然碳固存能力与人类干预和工程相结合,通过加工和粉碎活性矿物达到碳储存的目的。

2.2 碳捕集利用与封存(CCUS)

CCUS (Carbon capture, utilization and storage) 技术体系涵盖 CO_2 捕集、运输、利用以及封存4种技术大类。其中,捕集是指将 CO_2 从工业生产、能源利用或大气中分离出来的过程,主要分为燃烧前捕集、燃烧后捕集、富氧燃烧和化学链捕集;运输是指将捕集的 CO_2 运送到可利用或封存场地的过程,根据运输方式的不同分为管道、船舶与罐车运输;利用是指通过工程技术手段将捕集的 CO_2 实现资源化利用的过程,可分为地质、化工与生物利用;封存是指通过工程技术手段将捕集的 CO_2 注入深部地质储层,实现 CO_2 与大气长期隔绝的过程,根据封存场景可进一步分为陆上封存与海上封存^[1]。CCUS又可具体拆解为CCU (Carbon capture and utilization)与CCS (Carbon capture and storage)技术^[20-21]。CCUS技术在构建零碳能源系统、助推低碳工业过程与提供负碳解决方案上发挥了不可替代的作用。CCUS技术在《巴黎协定》阿联酋共识的首次全球盘点(Global Stocktake)中占有重要地位,是缔约方采取行动和加速零排放和低排放技术清单的一部分,目前已经有越来越多的国家将

CCUS纳入气候缓解行动计划的一部分^[22]。虽然全球许多地区正在加速CCUS的部署,但整体部署率还远低于将全球变暖限制在 $1.5 \sim 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 的模拟路径,需要更多的政策工具、公众支持和技术创新等有利条件来扩大CCUS的规模化部署^[23]。

2.3 碳移除(CDR)技术

根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的报告,CDR是指从大气中去除并持久储存 CO_2 于地质、陆地、海洋或产品中的人为活动,CDR包括现有和潜在的基于生物、地球化学和化学过程的人为增强碳汇方式,但不包括非人类活动直接引起的自然 CO_2 吸收^[2]。根据定义,若一种技术、实践或方法要算作CDR,必须是从大气中直接或间接地捕集 CO_2 (原则1)并持久储存(原则2)的人工干预措施(原则3)(图4)^[8]。CDR是实现 CO_2 和温室气体净零排放所必不可少的技术,在短期时间尺度上,CDR可以降低近期内 CO_2 的净排放;中期时间内,CDR可以抵消减排行业的剩余碳排放以实现净零排放;长期角度,如果 CO_2 清除量超过排放量,CDR可以在较长时期内实现负排放。

CDR实施措施选项有很多种(表1),并且这些CDR措施还在不断更新迭代^[2]。实施CDR技术需要考虑方法、部署规模、部署时间、可持续性和可行性等影响因素。不同的CDR方法在去除过程、碳储存的时间尺度、技术成熟度、缓解潜力、技术成本、协同效益、不利副作用和治理要求等方面各不相同,实施策略需要权衡这些差异^[24]。例

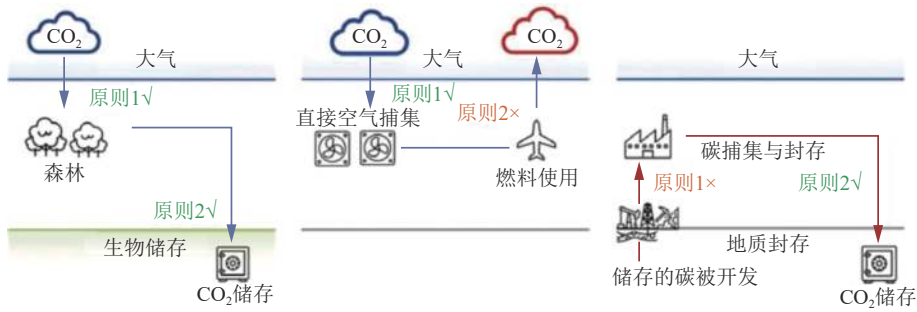


图4 CDR技术的原则 (修改自文献 [8])

Fig. 4 Principles of CDR Technology (Modified from Reference [8])

表1 碳移除技术对比 (修改自 IPCC 报告 [2])

Table 1 Comparison of Carbon Dioxide Removal Technologies (Modified from IPCC report [2])

性质	CDR措施											
	造林与再造林	森林管理	复合农林	农牧土壤固碳	生物炭	生物质能碳捕集与封存	直接空气捕集与封存	增强风化	泥炭地和湿地恢复	蓝碳管理	海洋碱化	海洋施肥
地球系统	陆地	陆地	陆地	陆地	陆地	陆地	陆地	陆地	陆地	海洋	海洋	海洋
主要作用过程	生物	生物	生物	生物	生物	生物	化学	地球化学	生物	生物	地球化学	生物
储存介质	陆地植被、建筑物、土壤			土壤、沉积物	土壤、生物炭	地质储层	矿物	水生生物、土壤、沉积物	矿物	海洋沉积物	添加铁、氮、磷等营养物质、增强海洋上升流	
主要实施措施	非林地上栽植, 砍伐后再造林	森林资源经营管理, 减少扰动	农、林、牧复合经营	免耕耕作、秸秆还田	生物质裂解为生物炭、土壤改良	生物质燃烧释放能量与CO ₂ 并捕集封存	利用固体吸附剂或液体溶剂从空气中捕集CO ₂ 并封存	播撒研磨岩石加速自然风化	再湿润、植被恢复	滨海岸生态系统恢复与管理	海洋添加碱性矿物增汇	
储存时间尺度	几十年~几个世纪	几十年~几个世纪	几十年~几个世纪	几十年~几个世纪	几个世纪到几千年	一万多年	一万多年	一万多年	几十年~几个世纪	几十年~几个世纪	一万多年	几个世纪~几千年
成本/(\$·t ⁻¹)	0~240	—	—	-45~100	10~345	50~200	100~300	50~200	—	—	40~260	50~500
技术成熟度	8~9	8~9	8~9	8~9	6~7	5~6	6	3~4	8~9	2~3	1~2	1~2
潜力/(Gt·a ⁻¹)	0.5~10	0.1~2.1	0.3~9.4	0.6~9.3	0.3~6.6	0.5~11	5~40	2~4	0.5~2.1	<1	1~200	1~3

如, 实施造林与再造林、森林管理和复合农林措施在提高当地就业率、改善生物多样性以及增强土壤恢复力等方面具有有益的协同效益, 但也存在森林与农田的土地资源竞争、农业生产力受限等可能的

不利影响。大多数基于植被、土壤或沉积物储存的CDR方案更容易实施, 成本更低, 并具有生物多样性或粮食安全的共同利益, 但这些方法储存碳的时间更短、更脆弱。例如, 滨海蓝碳管理可以通过保

护与恢复红树林、海草、盐沼有效提升生态系统适应能力与资源生产力,促进蓝碳固存,然而这种固碳方式全球范围内发挥最大效益需要几年~几十年的时间来实现,并且一旦海岸蓝碳生态系统遭受破坏,可能将大部分碳释放回大气^[25]。相比之下,基于地质封存的CDR技术,例如生物质能碳捕集与封存(BECCS)和DACCS,虽然目前成本更昂贵,但碳储存在地下地层中的时间更长,封存的安全性与稳定性更高。

3 全球碳管理前沿进展

碳管理是实现《巴黎协定》温控目标的重要支柱,全球碳管理技术发展迅速,已成为国际合作热点领域。

3.1 全球共识不断凝聚

在科学认识方面,全球共识不断凝聚,碳管理被认为是实现全球1.5℃温控目标的重要支柱。2023年3月,联合国政府间气候变化专门委员会再次重申了碳管理技术在不久的将来实现净零排放方面的重要意义和互补作用^[2]。2023年5月,七国集团(G7)峰会宣布将碳捕集和移除技术视为优先事项,并明确提出了扩大CO₂封存能力、运输基础设施以及发展区域碳捕集中心的紧迫性,截至2023年7月,已有27个国家和地区在其提交的国家自主贡献文件中提到碳捕集与封存。2023年9月,二十国集团(G20)峰会首次宣布将致力于并鼓励通过现有目标和政策将全球可再生能源装机容量增加3倍,并在2030年前根据各国国情,在其他零排放和低排放技术方面表现出类似的雄心,包括碳避免和CDR技术^[26]。2023年12月,在第28届联合国气候变化大会上(COP28),碳管理被认为是保持1.5℃路径可及性的关键支柱,缔约方会议主席和国际能源署(IEA)也明确了碳管理作为全球实现净零排放的4大支柱之一的关键作用^[27]。

3.2 碳管理技术进展迅速

在技术发展方面,全球碳管理技术进展迅速,呈现规模化产业化发展趋势。全球项目数量已连续6a保持增长,全球项目涵盖行业更加广泛,集群化发展特征更加显著。根据全球碳捕集与封存研究院(GCCSI)的统计,截至2023年7月,全球各阶段商业项目达392个,年总捕集规模达到3.61亿tCO₂,其中已投运项目41个,年总捕集规模达4900万tCO₂^[12]。同时,以DAC主导的前沿CDR技术取得突破,全球运行中的DAC设施年捕集能力约为4000tCO₂,已开始部署百万吨级示范项目。目前美国已公开宣布100余个碳管理项目,并

推出“负碳攻关计划”,旨在10a内使DAC的成本降低到100\$/tCO₂,从而实现到2050年从大气中清除数十亿吨CO₂。

3.3 国际合作热点议题

在国际合作方面,碳管理已成为多双边合作热点,“碳管理挑战”伙伴关系不断扩大。随着应对气候变化多边治理体系不断完善,碳管理被纳入联合国框架、清洁能源部长级会议(CEM)等机制的重点合作领域。其中,“碳管理挑战”于2023年发起,并在COP28正式启动,旨在推动到2030年实现10亿t级规模的碳管理,进一步提升全球碳管理行动力度。目前,已有19个国家参与(美国、澳大利亚、加拿大、埃及、欧盟、日本、沙特阿拉伯、阿联酋、挪威、丹麦、巴西、瑞典、冰岛、印度尼西亚、肯尼亚、莫桑比克、荷兰、罗马尼亚、塞内加尔)^[13]。在国际双边合作方面,中美两国于2023年11月发表关于加强合作应对气候危机的阳光之乡声明,提出两国到2030年争取各自推进至少5个工业和能源等领域CCUS大规模合作项目,为中美两国在碳管理规模化产业化发展的双边合作提供了良好契机^[28]。

4 中美碳管理发展态势对比

目前,中国与美国的碳管理技术面临着不同的减排目标与发展阶段,两国不断完善碳管理支持政策与财政激励,碳管理技术在行业部署、发展水平与支持政策侧重点均存在差异。

4.1 碳管理技术需求

从总量上看,中美实现碳中和目标的减排需求巨大。根据不同研究机构预测,2060年我国实现碳中和目标CCUS等碳管理技术减排贡献量需达到每年21.1亿~25.3亿tCO₂,其中BECCS和DACCS预计将贡献5亿~8亿t的CO₂移除量,而美国实现2050年碳中和目标的减排贡献为每年4亿~18亿tCO₂^[11]。从结构上看,中美两国的经济和能源结构存在差异,两国CCUS等碳管理技术的行业覆盖面存在区别。中国煤电、化工及钢铁需求量大,已成为发展CCUS技术的优先产业,近年来逐步向玻璃、生物质等行业拓展;美国主要集中在电力、水泥等领域,逐渐呈现明显的产业化和商业化趋势^[1]。此外,中美两国拥有丰富的咸水层和油气储层,我国地质封存潜力为1.21万亿~4.13万亿t,美国为2万亿~21万亿t,为CO₂永久封存提供了巨大的机会。

4.2 碳管理技术发展

目前我国仍处于CO₂达峰期,对CCUS和

CDR等碳管理技术的定位短期内仍以推进示范为主,同时正在超前部署相关技术研发以实现2035年后的规模化应用。二氧化碳物理/化学吸附、常压富氧燃烧、矿化利用等技术大多处于工业示范和商业应用阶段。DAC技术研究增长迅速,浙江、上海、山西等地方“双碳”实施方案中,明确提出加强DAC技术研发,同时,相关能源企业开始关注DAC技术与样机开发。截止到2023年9月,我国已投运项目超过50个,具备年总捕集能力约493.2万t CO₂,建设和规划中的CCUS项目预计在2030年全部建成后将提供超过700万t的CO₂捕集量^[1]。相较我国2050年实现电力部门碳中和,美国力争2030年推动碳管理技术规模化应用,并在2035年实现电力部门碳中和。当前阶段,美国在化学吸附、强化采油和CDR等技术领域已开展商业部署,运行中、建设和规划中的CCUS商业设施共有69个,具备年总捕集能力约2392万t CO₂,呈现出集群化产业化趋势^[29]。

4.3 碳管理支持政策

中美两国始终锚定战略规划,强调前瞻性全局性谋划布局,然而,2国支持政策关注焦点各有不同,我国倾向于通过鼓励性政策开展技术创新与技术储备,美国则大多通过金融政策激励技术研发与商业化部署。近年来,中共中央和国务院已发布70余项碳管理相关的政策文件,涉及规划、标准、路线图、技术目录等,包括《科技支撑碳达峰碳中和实施方案(2022—2030)》、碳达峰碳中和“1+N”政策体系等。我国还持续发布《中国CCUS技术发展路线图》和《中国CCUS年度报告》,明确CCUS等碳管理技术的重要性,并提出未来发展路径规划方案^[30]。美国发布的《商业化路线图:碳管理》强调了碳管理技术的战略地位和规划布局,《CO₂移除研究战略》从成熟度、成本、减排潜力和减排规模提出了未来开展CDR研究的科学战略^[31]。2021年美国启动的《基础设施投资和就业法案》(IIJA),为碳管理价值链上的高潜力项目提供约120亿美元的资金,包含CCS、直接空气捕集等技术研究和输送管道等基础设施建设,并提供5亿美元用于工业排放示范项目,涉及碳管理技术的应用,力争到2050年实现从大气中去除数十亿吨CO₂。2022年8月,美国总统拜登签署《通胀削减法案》(IRA),进一步提供58亿美元以支持先进工业脱碳部署,包括工业领域的碳管理项目,其中IRA下的45Q税收抵免政策将地质永久储存的税收抵免额度提高至85\$/t CO₂(表2)^[32]。相比之下,我国目前主要以鼓励CCUS和CDR技术研发创新

和早期示范部署为主,相关技术研发主要以国家科技计划的形式推动,相关政策在激励机制和法律法规方面存在缺失,未来仍需立足国家整体规划加强财税与金融政策激励。

表2 美国45Q税收抵免政策

Table 2 United States 45Q Tax Credit Policy \$/t

类型	2018年45Q 税收抵免	2022年45Q 税收抵免: 工业&火电	2022年45Q 税收抵免: DAC
咸水层或其他地层 地质封存	50	85	180
碳利用项目将CO ₂ 转化 为有用的产品	35	60	130
CO ₂ 通过提高采收率 技术封存在油气田	35	60	130

4.4 碳管理投资

互联网巨头目前领跑CDR技术投资,美国微软公司已经向各类企业预定了313.5万t未来从空气中移除CO₂的额度,并承诺将在2030年实现“负排放”,并在2050年移除公司从1975年创办以来所有的历史碳排放。2023年,腾讯发起“碳寻计划”,推动前沿CCUS技术走向规模化应用,这是中国在CCUS领域首个由科技企业发起的资助计划,资金规模在亿元人民币级别。政府投资方面,2023年8月,拜登政府通过美国能源部宣布拨款12亿美元,用于推进2个商业规模的DAC设施的开发,这是世界上最大的工程CDR投资。

5 启示与建议

当前,全球应对气候变化行动力度不断加大,碳管理被作为多国应对气候变化的战略性技术,中国碳管理技术的发展目前还面临着一些问题。首先,碳管理技术研发应用与成熟度还较弱,尤其是针对新型主动碳管理技术如DACCS、BECCS的科学研究、开发和示范应用在国内开展还较少,大部分碳管理技术成熟度处于中试研发到工业化示范阶段,技术商业化与规模化运行不足。其次,碳管理领域的政府与企业激励相对缺乏,与欧美等发达国家国家层面的财政激励与企业层面商业资本激励相结合的方式相比,我国在碳管理领域还尚未有实质性的技术激励措施,企业的投资意愿与参与积极性受到了影响。同时,碳管理的规模化基础设施能力建设方面还不够完善。例如CO₂管道还未完全铺开建设,部分碳排放工厂与利用封存选址存在资源不

匹配的状况,CO₂地质封存场地需要长期监测保障安全运行等。最后,碳管理技术体系复杂,涉及的学科与专业交叉性较强,涵盖CO₂捕集、运输、利用、移除、封存和核算6个板块,对行业合作、技术集成与资源共享要求较高。

基于以上技术发展环境与现状,我国应保持战略定力,从技术研发、政策激励、基础设施、国际合作等方面统筹考虑,加速推进碳管理技术超前部署和发展,为此提出以下具体建议。

1) 注重碳管理技术跟踪和研发积累,加快构建碳管理战略性技术体系。我国应加强对碳管理技术的重视,将碳管理技术作为战略性技术并予以超前部署和重点支持。积极开展碳捕集、碳运输、碳利用、碳封存、碳移除与碳核算技术体系创新和研发工作。推动早期阶段新型主动碳管理技术的科学研究、开发和示范;进一步加强难减排行业的CCUS核心技术研发,提高技术成熟度,降低部署成本,加速实施大规模CCUS技术集成示范工程。

2) 从国家层面进行统筹谋划与顶层设计,制定双碳目标下完善的碳管理相关政策法规与财政激励。立足于当前我国能源结构和资源禀赋基本国情,制定碳管理行业规范、制度法规以及科学合理的建设、运营、监管、终止标准体系,确保碳管理解决方案的高效安全部署。增加对碳管理领域的投资与激励,制定相关技术创新、示范项目政策,通过技术推动、需求拉动及长期专项资金支持引领政府和社会资源向碳管理倾斜。

3) 完善碳管理基础设施规模化建设,有序推进大规模碳管理示范项目发展。引导开展跨行业、跨企业的碳管理技术示范合作,推动碳管理产业集群发展。碳管理技术对基础设施和运输系统的要求较高,需加强CO₂捕集、运输、利用、移除和封存基础设施建设,以满足大规模应用需求,加速实施大规模全链条CCUS技术集成示范工程。同时,需要注重与现有基础设施的结合,如油气管道、能源网络等,以实现资源共享和优化利用。

4) 深化碳管理多双边国际合作、知识共享和技术转移,带动低碳技术和产业发展。将碳管理作为国际合作契机。积极落实“中美阳光之乡声明”关于碳管理特别是CCUS技术领域合作共识,把碳管理发展成中美双边科技和外交合作的“绿色突破口”。深化中欧、中英、中澳等应对气候变化国际合作,带动低碳技术和产业发展,加强金砖国家及发展中国家阵营碳管理合作,推动共建“一带一路”绿色发展,缓解国际社会对我“减煤”和“去煤”以及加大近中期减排力度的压力。积极加入

“碳管理挑战”伙伴关系,融入全球创新网络,充分利用联合国系统、国际能源署等国际组织,以及清洁能源部长级会议(CEM)等多边机制开展务实合作。

参考文献(References):

- [1] 张贤,杨晓亮,鲁玺,等.中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023)[R].北京:中国21世纪议程管理中心,全球碳捕集与封存研究院,清华大学,2023.
- [2] SHUKLA P R, SKEA J, REISINGER A. Climate change 2022: Mitigation of climate change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. UK. Cambridge University Press, 2022.
- [3] 周宏春,霍黎明,管永林,等.碳循环经济:内涵、实践及其对碳中和的深远影响[J].生态经济,2021,37(9):13-26.
ZHOU Hongchun, HUO Liming, GUAN Yonglin, et al. Carbon circular economy: Connotation, practice and its far-reaching impact on carbon neutrality[J]. Ecological Economy, 2021, 37(9): 13-26.
- [4] LIU Z, GUAN D B, WEI W, et al. Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China[J]. *Nature*, 2015, 7565: 335-338.
- [5] PALMER C. Mitigating climate change will depend on negative emissions technologies[J]. *Engineering*, 2019, 5(6): 982-984.
- [6] HEPBURN C, ADLEN E, BEDDINGTON J, et al. The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal[J]. *Nature*, 2019, 7781: 87-97.
- [7] MACKLER S, FISHMAN X, BROBERG D. A policy agenda for gigaton-scale carbon management[J]. *The Electricity Journal*, 2021, 34(7): 106999.
- [8] SMITH S M, GEDEN O, NEMET G, et al. The State of Carbon Dioxide Removal-1st edition[R]. England: University of Oxford, 2023.
- [9] LUOMI M, YILMAZ F, AL SHEHRI T, et al. The Circular Carbon Economy Index-Methodological Approach and Conceptual Frameworks[R]. Riyadh: King Abdullah Petroleum Studies and Research Center, 2021.
- [10] YILMAZ F, AL SHEHRI T, LUOMI M, et al. Enhancing the G20's Climate Change Policy Agenda with the Circular Carbon Economy Index[Z]. New Delhi: T20 Policy Brief, 2023.
- [11] FAHS R, JACOBSON R, GILBERT A, et al. Pathways to commercial liftoff: Carbon management: US Department of Energy[R]. Washington DC: US Department of Energy, 2023.
- [12] GCCSI. Global Status of CCS-Scaling up through 2030[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2023.
- [13] AMER N A. Six key COP28 outcomes for CCS[R]. Melbourne: Global CCS Institute, 2023.
- [14] USDOE. Office of Fossil Energy and Carbon Management[EB/OL]. (2024-12-30)[2024-04-19]. <https://www.energy.gov/fecm/office-fossil-energy-and-carbon-management>.
- [15] AL SAUD N, AL SHALAN M. The Circular Carbon Economy: A Global Blueprint for Carbon Circularity & the Deployment of a Saudi Circular Carbon Economy Program[R]. Riyadh: Aeon Collective, 2020.
- [16] KOESTER S, HART D M. Active Carbon Management: Critical Tools in the Climate Toolbox[R]. Washington DC: Information Technology and Innovation Foundation, 2022.

- [17] ERANS M, SANZ-PÉREZ E S, HANAK D P, et al. Direct air capture: process technology, techno-economic and socio-political challenges[J]. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15(4): 1360–1405.
- [18] ALCALDE J, FLUDE S, WILKINSON M, et al. Estimating geological CO₂ storage security to deliver on climate mitigation[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 2201.
- [19] QIU Y, LAMERS P, DAIQLOU V, et al. Environmental trade-offs of direct air capture technologies in climate change mitigation toward 2100[J]. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 3635.
- [20] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(6): 70–80.
- ZHANG Xian, LI Yang, MA Qiao, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China[J]. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 70–80.
- [21] MA J F, LI L, WANG H F, et al. Carbon capture and storage: history and the road ahead[J]. *Engineering*, 2022, 14: 33–43.
- [22] UNFCCC. Global Stocktake[EB/OL]. (2024–04–19)[2024–04–19]. <https://unfccc.int/topics/global-stocktake>.
- [23] IPCC. Summary for Policymakers. In: *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*[R]. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.
- [24] 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.
- CHENG Wei, LUO Yong, CAO Long, et al. Research progress and review on carbon dioxide removal technology[J]. *Climate Change Research*, 2023, 19(5): 672–682.
- [25] 焦念志, 刘纪化, 石拓, 等. 实施海洋负排放践行碳中和战略 [J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(4): 632–643.
- JIAO Nianzhi, LIU Jihua, SHI Tuo, et al. Deploying ocean negative carbon emissions to implement the carbon neutrality strategy[J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2021, 51(4): 632–643.
- [26] G20 New Delhi Leaders' Declaration[Z]. New Delhi: G20, 2023.
- [27] COP28 UAE. Carbon management: essential pillar to keep 1.5 °C alive[EB/OL]. (2023–12–05)[2024–04–20]. <https://www.cop28.com/en/schedule/carbon-management-essential-pillar-to-keep-1-5c-alive>.
- [28] 中华人民共和国生态环境部. 关于加强合作应对气候危机的阳光之乡声明 [EB/OL]. (2023–11–15)[2024–04–20]. https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202311/t20231115_1056452.shtml.
- [29] GCCSI. CO₂RE[EB/OL]. (2024–04–20)[2024–04–20]. <https://co2re.co/>.
- [30] 科学技术部社会发展科技司, 中国世纪议程管理中心. 中国碳捕集利用与封存技术发展路线图: 2019[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [31] NOAA. Strategy for NOAA Carbon Dioxide Removal (CDR) Research: A white paper documenting a potential NOAA CDR Science Strategy as an element of NOAA's Climate Interventions Portfolio[R]. Washington DC: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2023.
- [32] IRS. Inflation Reduction Act of 2022[EB/OL]. (2024–04–19)[2024–04–20]. <https://www.irs.gov/inflation-reduction-act-of-2022>.