

负碳排放技术研究现状及进展

翁小涵, 韩涛, 冯玮, 徐冬

(国家能源集团 新能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 负碳排放技术是一种符合净零目标且旨在减少大气中二氧化碳浓度的创新途径, 是我国碳中和和技术体系的重要组成部分。负碳排放方案是一个多元复杂的体系, 其中, 直接空气碳捕集与封存 (DACCS) 和生物质能耦合碳捕集与封存 (BECCS) 是两类与地质封存紧密结合以实现永久减排的关键技术手段。这两类技术都依赖成熟的地质封存技术, 将捕集的 CO₂ 安全封存于地下防止其再次回到大气中, 确保永久性减排。本文对快速发展的 DACCS 和 BECCS 技术的最新研究进展与应用情况进行了详述。在 DACCS 方面, 主要介绍了直接空气捕集 (DAC) 中的液体吸收和固体吸附两大类技术相关的关键材料及工艺技术研究现状, 分析了现有 DAC 技术的应用情况和经济性, 归纳了国内外主要在运行规划中的 DAC 示范项目, 展望了未来 DAC 技术研究的重点方向以及 DAC 技术更大规模化应用的可行性。在 BECCS 方面, 介绍了 BECCS 技术链条的主要构成以及基本工艺流程。着重分析了各 BECCS 技术路径的发展现状, 包括与燃料产品紧密相关的生物质热化学转化和生物质生物转化技术, 以及常用于发电的生物质燃烧技术等。探讨了在不同生物质能利用场景下部署 BECCS 技术的可行性, 汇总了现有 BECCS 技术的应用情况以及国内外主要的 BECCS 示范项目, 结合绿色甲醇的生产分析了技术的经济性。结合我国生物质资源的实际情况, 展望了 BECCS 技术未来的发展方向。

关键词: 负碳排放技术; 直接空气捕集; 生物质能耦合碳捕集与封存; 二氧化碳捕集与封存

中图分类号: TQ53; TK114 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4772(2024)10-0160-16

Current status and progress of negative carbon emission technologies

WENG Xiaohan, HAN Tao, FENG Wei, XU Dong

(New Energy Technology Research Institute, China Energy, Beijing 102209, China)

Abstract: Negative carbon emission technology is an innovative approach aligned with net-zero goals, aimed at reducing atmospheric CO₂ concentrations, and is a crucial component of China's carbon-neutral technology system. Negative carbon emission solutions constitute a multifaceted and complex system, among which Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS) and Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS) are key technologies closely integrated with geological storage to achieve permanent emission reductions. Both of these technologies rely on mature geological storage techniques to securely sequester captured CO₂ underground, preventing its re-entry into the atmosphere and ensuring permanent reductions. This paper details the latest research progress and application status of the rapidly developing DACCS and BECCS technologies. Regarding DACCS, it primarily introduces the two major technologies in DAC—liquid absorption and solid adsorption—focusing on key materials and process technologies. It also analyzes the current application and economic feasibility of DAC technology, summarizes major operational and planned DAC demonstration projects both domestically and internationally, and forecasts the key research directions for DAC in the future, as well as the feasibility of large-scale DAC deployment. In terms of BECCS, the paper outlines the main components of the BECCS technology chain and its basic process flow. It emphasizes the development status of various BECCS technology pathways, including biomass thermochemical conversion and biomass biochemical conversion technologies closely related to fuel products, as well as biomass combustion technology commonly used for power generation. The paper explores the feasibility of deploying BECCS in different biomass energy utilization scenarios, summarizes the current application status of BECCS technology, and lists major BECCS demonstration projects both domestically and abroad. Additionally, it

收稿日期: 2024-05-12; 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.CCUS24051201

作者简介: 翁小涵(1995—), 女, 重庆人, 工程师, 博士。E-mail: 20093037@ceic.com

通讯作者: 徐冬(1982—), 男, 辽宁人, 高级工程师, 博士。E-mail: dong.xu@chnenergy.com.cn

引用格式: 翁小涵, 韩涛, 冯玮, 等. 负碳排放技术研究现状及进展 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30(10): 160-175.

WENG Xiaohan, HAN Tao, FENG Wei, et al. Current status and progress of negative carbon emission technologies [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(10): 160-175.



analyzes the economic viability of the technology in connection with the production of green methanol. Based on the actual situation of China's biomass resources, the paper also provides an outlook on the future development of BECCS technology.

Key words: negative carbon technologies; direct air capture; bio-energy with carbon capture and storage; CCUS

0 引言

随着全球厄尔尼诺现象不断加剧、气候变暖问题日益凸显,为推动人类可持续发展,温室气体的排放得到更多的重视。目前大气中主要温室气体的浓度持续上升,其中,CO₂浓度从1960年的约310×10⁻⁶升高至当前的约420×10⁻⁶^[1],同时当前全球每年CO₂排放量超过350亿t^[2]。2011—2020年是全球有记录以来最温暖的10a,全球平均温度比1850—1900年的平均水平高(1.10±0.12)℃^[3]。据国际政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估,如果全球温度继续以当前速率上升,2030—2052年全球的升温可能会达到1.5℃^[4]。为实现《巴黎协定》到21世纪末将因温室气体浓度升高而引发的升温值控制在低于2℃,并尽可能将其限制在1.5℃以内的目标^[4],直接减少所有能源生产和消费机构的排放是目前实现净零排放的主要途径。有学者提出为阻止全球进一步变暖需要先将CO₂排放降至零^[5]。但现实情况是不可能将所有CO₂排放量都降至绝对零,一些难以减少的CO₂排放需要通过永久清除来抵消,即二氧化碳去除(Carbon Dioxide Removal, CDR),也称为负碳排放技术(Negative Emissions Technologies, NETs)^[6]。IPCC在2015年的报告中提到,国际社会已经达到一个需要迅速部署负碳技术的阶段。

负碳排放的技术方案涵盖了从自然生态系统到传统工业过程的多个领域,包含了植树造林和重新造林、泥炭地和沿海湿地恢复、增强矿物风化、海洋施肥与碱化等多种主要基于自然环境的方案,以及直接空气碳捕集与封存(DACCS)和生物质能耦合碳捕集与封存(BECCS)这样主要基于技术和地质封存的方案^[7]。

直接空气捕集(DAC)因捕集的CO₂直接来源于大气可以理解为净零技术,而生物质的利用过程中可能产生的CO₂与生物质原料在生长过程吸收的CO₂相当,所以生物质能也是全生命周期分析意义上的零碳排放能源^[8],当结合CCS/CCUS技术对CO₂进行捕集和封存,在扣除相关过程中额外排放的CO₂之后,就实现了负碳排放效应^[9]。

IPCC第六次评估报告将DACCS和BECCS确定为存储持久性最高的CDR技术选项^[10]。预计到2050年,全球使用CCUS技术捕集的CO₂能够达到

约150亿t,其中使用BECCS和DACCS捕集和储存的CO₂约3.5亿~16亿t。预计到2030年和2050年分别需要用DAC技术实现超过8500万和9.8亿t的CO₂捕集量^[11]。BECCS技术预计将在2030年开始全球大规模应用,分别在2050年和2070年实现抵消7%(10亿tCO₂)和30%(27亿tCO₂)的全球能源系统碳排放^[12]。据预测,BECCS技术预计将从2035年后开始在我国大规模的应用,到2040年和2060年,该技术将分别完成0.8~1亿和3亿~6亿t的CO₂减排^[13]。

全球各国目前已经颁布了一些支持负碳技术发展的相关政策。美国的45Q中有针对DAC和BECCS中用于封存的CO₂的税收抵免政策。据《美国两党基础设施法》,联邦政府将提供35亿美元补贴支持美国在未来10a内建立4个DAC中心以及相关的运输和仓储基础设施。加拿大也在联邦预算中设定了与投资DAC相关的税收抵政策,同时制定了将DAC作为温室气体排放抵消信用系统中一部分的相关政策。欧盟一直通过各种研究和创新计划支持DAC,并在2021年底提出建议到2030年通过各种CDR解决方案每年从大气中移除5MtCO₂并永久储存。英国政府提出到2050年需要采用DAC和BECC技术移除约80MtCO₂^[14],同时在英国启动了投入超过3000万英镑的氢气BECCS创新计划。另外,丹麦NECCS基金提供了3.5亿欧元的补贴支持BECCS的发展^[15]。我国2022年发布的《第四次气候变化国家评估报告》也明确CCUS技术包含BECCS和DAC等负排放技术。

本文梳理了当前DAC技术中的关键材料和工艺以及BECCS多种技术路径中与不同生物质利用方式耦合的碳捕集技术的研究现状和最新进展,分析了DACCS技术和BECCS技术相关示范项目现状以及未来实现大规模工业化应用过程中可能面临的问题,指出了DACCS和BECCS技术中具有潜力的重点研究方向,为未来的大规模部署DACCS和BECCS技术提供参考。

1 直接空气捕集与封存

1.1 直接空气捕集概述

直接空气碳捕集(DAC)技术自1999年由Lackner等人提出以来^[16]经过多年的研究和辩论^[17],目前越来越多的学者加入DAC技术的材料和工艺

相关研究,与DAC相关的学术文章数量在过去5~6a呈指数增长^[18],也有一些初创公司尝试将DAC技术从实验室规模推广到示范规模和商业应用^[19]。

DAC技术依赖于化学/物理过程,通常涉及3个主要步骤,如图1:①吸附/吸收,使用吸附剂/吸收剂捕集空气中的CO₂,同时允许其他气体通过。②解吸,从富含CO₂的吸附剂/吸收剂中分离CO₂。③纯化CO₂并进行储存。因此,DAC的工艺一般也由捕集空气中的CO₂(常先使用引风机等将空气引入捕集装置,再通过吸附/吸收材料捕集CO₂)、吸附剂/吸收剂的再生(常通过变温、变压、变湿等方法)和CO₂储存(主要通过压缩机等设备将收集的CO₂送入储罐)3个模块组成^[17]。

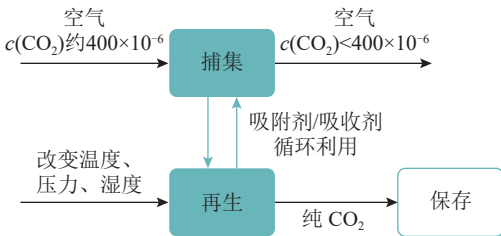


图1 DAC基本工艺流程示意^[20]

Fig.1 A schematic view of DAC^[20]

针对发电厂、炼油厂等大型固定点源通常采用传统的CCUS技术捕集CO₂,而针对分布源CO₂的捕集,DAC是一个更好的技术选择。DAC装置占地面积较小,一个每年1百万t CO₂捕集量的DAC工厂占地仅约0.2 km²^[21]。另外DAC选址灵活,可以位于任何分散碳源、方便CO₂运输、存在CO₂存储或利用的设施附近^[11]。

1.2 直接空气捕集技术研究进展

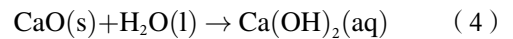
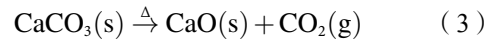
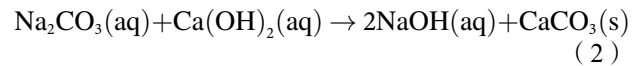
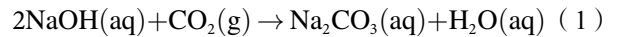
1.2.1 材料与工艺

DAC技术主要的3个关键研究点包括:①研发具有高选择性、高吸附容量、稳定性好、机械性能好(固体吸附剂)、装载便利(固体吸附剂)、抗污染性、易于再生、低成本等特性^[22]的吸附/吸收材料;②研究适用于不同吸附/吸收材料的高效低能耗解吸再生工艺;③研究材料和工艺对应的DAC装置设备的设计、放大与应用^[23]。

目前有多种材料和工艺方案被尝试用于DAC中(表1),其中液体吸收和固体吸附是材料及相关技术开发的主流研究方向^[36]。CO₂吸附/吸收材料通常被调制为碱性以实现CO₂这种酸性气体的吸收。在吸收形式中,CO₂渗透并均匀分散在吸收剂中。在吸附形式中,吸附剂表面通过弱范德华力(物理吸附)或化学键(化学吸附)与CO₂黏附。

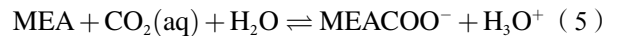
1) 液体吸收。早期,研究人员使用Ca(OH)₂

溶液来吸收空气中的CO₂形成碳酸钙,而后在高温下煅烧CaCO₃以释放被吸收的CO₂并生成CaO,最后通过再生Ca(OH)₂来实现循环^[37]。2004年左右,ZEMAN^[38]等在此基础上提出了四步反应过程,利用NaOH溶液与大气中的CO₂反应生成可水溶的Na₂CO₃,随后Na₂CO₃盐与Ca(OH)₂反应并生成沉淀,然后通过苛化反应实现NaOH再生并生成CaCO₃,最后将CaCO₃加热至900℃以上煅烧释放出CO₂,生成的CaO被水合以完成这个过程。相关的化学反应式如下:



Ca(OH)₂和NaOH都与CO₂有很强的结合能力,同时Na₂CO₃水溶性高避免了直接沉淀以及工艺放大后的结垢问题。NaOH也可以替换为价格更昂贵的KOH,以实现更低的再生能量^[22]。

胺溶液是燃烧后碳捕集过程中最常用的一类吸收剂^[39],可以在100℃左右再生,这个温度远低于CaCO₃煅烧所需的温度。相较于碱性氢氧化物溶液,醇胺溶液对CO₂的吸收速率较低^[40],但在再生过程中消耗的低品位热更少^[26]。以常用的乙醇胺(MEA)为例,CO₂与MEA溶液中的氢氧根离子可以发生如下反应^[41]:



利用胺液吸收剂捕集CO₂的DAC工艺基本与传统燃烧后胺液捕集CO₂一致,因此也同样存在的胺液氧化降解^[42]、有毒胺降解化合物的排放、高再生能量等问题^[43]。

BRETHOME等^[27]提出了一种与胺溶液DAC技术相比吸收速率更高、溶剂毒性与挥发性更低的氨基酸盐溶液/BIGs技术。利用水相吡啶双(联氨胍)PyBIG吸附剂,通过与CO₂反应形成水溶解度极低且可以直接通过过滤从溶液中分离的结晶碳酸盐,再生温度在80~120℃。这种基于结晶的DAC方法需要的能量少,技术成本较低^[44]。

还有学者提出了基于碱度浓度变化(Alkalinity Concentration Swing, ACS)的DAC方法^[28]。碱性溶液吸收CO₂之后被浓缩,碳酸氢根离子分解为水溶液中的CO₂和CO₃²⁻,溶液中碱度增加,CO₂分压升高,此时将系统压力降低到低于CO₂的分压便可以实现CO₂脱附。最后将浓缩的溶液稀释到原始的

表1 不同种类直接空气捕集吸附/吸收材料对比^[17, 24]Table 1 Comparison of different types of adsorption/absorption materials for DAC^[17, 24]

分类	吸收/吸附剂	举例	材料设备	优势	劣势	
液体吸收	碱性氢氧化物溶液 ^[25]	KOH Ca(OH) ₂	空气接触器、颗粒反应器、煅烧炉、生石灰消化器等	技术成熟度高 吸收速率高	再生能耗高 水分损失多	
	胺溶液 ^[26]	MEA	空气接触器、热交换器、气提塔等	吸收速率较高	胺液挥发 再生效率较低	
	氨基酸盐溶液PyBIG ^[27]	Na ₂ CO ₃ PyBIG	空气接触器、结晶单元、气提单元等	吸收速率高 再生能耗低 溶剂蒸发损失与热降解损失也较低	再生能耗较高 BIGs种类直接影响捕集效果	
	碱度浓度变化 ^[28]	稀碱性水溶液	K ⁺ 、膜、电极、水等	吸收速率较高 再生温度与能耗较低	用水量大 捕集效果受溶液浓缩技术影响	
固体吸附	碱(土)金属 纯碱(土)金属的氧化物或氢氧化物 ^[29-31]	CaO Ca(OH) ₂ NaOH	流化床反应器等	吸附效率较高 再生稳定性较好	再生能耗较高	
	负载型碱(土)金属 ^[32]	γ-Al ₂ O ₃ /K ₂ CO ₃	—	—	—	
	固态胺吸附剂 ^[34]	第1类 物理浸渍法	通常以SiO ₂ 、Al ₂ O ₃ 、分子筛为载体	空气接触器、控制	制备方法简单 吸附容量较高	吸附效果受温度、湿度及吸附/脱附循环次数影响较大
		第2类 化学嫁接法	通常以SiO ₂ 为载体嫁接氨基硅烷	阀、真空泵以及冷热供应系统等	耐热性及寿命高于第1类吸附剂	吸附容量低于第1类吸附剂降低
第3类 原位聚合		分子筛表面原位化学键合乙烯亚胺	—	吸附速率快 再生温度低	吸附能力及稳定性都优于前两类吸附剂	
分子筛及金属有机框架	负载胺基	—	鼓风机、吸附室、真空泵等	比表面积高 孔隙率高 结构可调 适合较低温度下应用	遇水结构易塌陷 水对捕集效果影响较大 原材料成本较高	
	调整孔径及活性点分布	—	—	—	—	
变湿吸附剂 ^[33]	物理复合型/化学嫁接型季铵吸附剂	—	换热器等	吸附与解吸速率高 再生温度与能耗较低	吸附容量低 需要洁净充足的水源	
其他	光诱导摆动吸附 ^[34]	多孔材料内嵌入光反应因子, 光响应型吸附剂	—	—	再生能耗较低 需材料内嵌入光反应因子	
	微生物 MI-DAC ^[35]	浮游植物硝酸盐同化结合CO ₂ 溶解	—	—	再生能耗较低 适应含水环境 微生物特性决定了捕集效果	
	膜分离膜吸收法	基于膜从空气中有效分离出CO ₂	膜材料	多级/多段分离系统	占地面积较小 设置操作容易 受限于膜材料的渗透性、选择性	

碱度以实现循环。

2) 固体吸附。固体吸附剂主要包括碱(土)金属基吸附剂、金属有机框架(Metal-Organic Frameworks, MOFs)类吸附剂、负载胺基吸附剂、变湿吸附剂等。固体吸附剂有热容量较低、吸

附容量高、易操作、能耗较低、维护成本相对较低等优势。

对不同碱(土)金属吸附剂对比研究发现^[29-31], 钙基吸附剂在DAC应用中有更好的适应性。其他碱(土)金属吸附剂虽然所需能耗较少, 但难在

DAC 中实际应用,例如钠基吸附剂的吸附速率及转化率偏低^[29], $Mg(OH)_2$ 与 MgO 的吸附速率低^[30], $LiOH$ 与 $Zn(OH)_2$ 再生困难^[45-46], $AgOH$ 吸附速率高、再生能耗低,但原料成本高^[31]。在多孔基质(氧化铝、活性炭、分子筛等)中浸渍碱(土)金属的氧化物或氢氧化物生成的复合固体吸附剂,也称为负载型碱(土)金属吸附剂^[47-49]。这种吸附剂吸附效率高且再生稳定性好,也被用于 DAC 中。例如将一定比例的 K_2CO_3 负载于 $\gamma-Al_2O_3$, 通过 Al_2O_3 表面纳米分散的 $KAlCO_3(OH)_2$ 以及 $KHCO_3$ 共同作用吸附 CO_2 。实验表明,该材料能在 $250 \sim 300^\circ C$ 下再生,并且能够在连续 80 次的吸附与解吸循环后仍能保持良好的吸附性能,但较高的再生温度和再生能耗在一定程度上限制了其实际应用^[42]。

将胺基作为吸附 CO_2 的活性组分负载于固体多孔载体材料上形成的固态胺吸附剂是一类极具潜力的 DAC 固体吸附剂。目前研究较多的载体材料有 MOFs、二氧化硅、活性炭、碳纳米管、硅胶等,负载的胺基材料有聚乙烯亚胺 (PEI)、四乙烯五胺 (TEPA)、五乙烯六胺 (PEHA) 等。固态胺吸附剂主要的制备方法分为 3 类^[24]: 第 1 类吸附剂基于物理浸渍法,氨基与载体通过物理吸附作用结合; 第 2 类吸附剂化学嫁接法是将氨基与载体通过化学键结合; 第 3 类吸附剂基于原位聚合法,将胺单体接枝于载体材料,合成过程相对复杂^[19]。另外,将第 1 类与第 2 类吸附剂相结合得到新型的固态胺吸附剂,具有氨基硅烷接枝的二氧化硅表面以及由氨基硅烷包围的氨基聚合物组成的浸渍层^[50],对 CO_2 有良好的吸附性。

MOFs 材料是以金属原子或原子簇为中心,与各种有机配体通过不同的方式组合成的结构。MOFs 材料结构组成多变,成本不确定性高,短时间内难实现规模生产。研究发现有数百种具有非常高的气体容量的 MOF 结构(图 2),其中部分能够以高容量、高选择性吸附空气中的 CO_2 。目前主要有两种方式来提高 MOFs 材料对 CO_2 的吸附能力:一种是通过负载胺类化合物提高吸附表面与 CO_2 分子的亲和能力,另一种则是通过调整孔径以及活性位点的分布来构建特殊的几何通道^[51]。

固态胺吸附剂的再生工艺条件相对丰富可选,通常包括 4 种不同类型(表 2),即变压吸附 (Pressure Swing Adsorption, PSA); 变温吸附 (Temperature Swing Adsorption, TSA); 真空吸附 (Vacuum Swing Adsorption, VSA); 电化学转化 (Electrochemical Swing Adsorption, ESA),或上述技术的组合,如变温-真空吸附再生 (TVSA)^[31-32]。

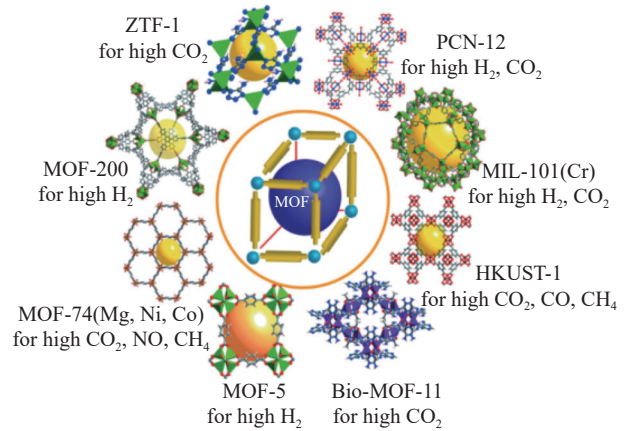


图 2 具有较高储气容量的 MOFs 结构^[51-52]

Fig. 2 Structure of MOFs with higher gas storage capacity^[51-52]

表 2 直接空气捕集固态胺吸附剂主要再生工艺特点^[51]

Table 2 Main regeneration process characteristics of solid amine adsorbents for DAC^[51]

工艺	特点
变压吸附 PSA	可在室温下应用 进料气体加热,效果好 能耗大,产品纯度和效率低
变温吸附 TSA	成本低,产品纯度高 能耗高,需要高度热稳定的吸附剂 除了反复加热和冷却外,还须具有 多个温度驱动因素
真空吸附 VSA	能耗高,但可在室温下使用 需要简单的功能组件和真空压缩机 形成的水凝结物会降低效率
电化学转化 ESA	再生速率快、不依赖热能或机械能 装置紧凑灵活,有助于独立调节 气体和热运动速率 基于可再生能源驱动的电化学可以更环保 需要进一步开发,但具有优异的加热效率

PSA 技术通过压缩或超低真空捕集空气中的 CO_2 ^[53-54],但不可避免的会有大量能量消耗在压缩 N_2 、 O_2 等非目标气体上^[24]。TSA 技术设计相对简单,但可能需要使用惰性气体来控制胺的氧化降解问题。TSA 的一个衍生方法是蒸汽 (Steam) 辅助变温真空吸附 (S-TVSA),而后从产品气中凝结出水得到高纯度 CO_2 ^[23,47]。然而,这个过程可能因为胺的溶出导致吸附剂失活^[48]。TSA 也可以与真空结合以增强脱附率,并在低于 $100^\circ C$ 的温度产生蒸汽,但蒸汽溶出胺的问题仍然存在^[49]。变温真空 (TVSA) 工艺已经得到了一些研究验证^[27,55],例如固态胺吸附材料 AEAPDMS-NFC,在 $70 \sim 95^\circ C$ 和 $3\ 000 \sim 150\ 000\ Pa$ 真空下脱附可获得纯度大于 97% 的 CO_2 ^[56]。除传统的固定床反应器外,有学者开发

了一种浅径向流固定床吸附反应器与移动床解吸反应器相结合的方案。这种方案操作简单、吸附和解吸步骤可以在同一容器中进行^[57], 有潜力应用于DAC的工艺放大。ESA技术以电作为能量来源, 再生速率快、不依赖热能或机械能, 具有较强的应用潜力, 但目前处于概念及实验室验证阶段。

LACKNER^[16]和WANG等^[58]提出了基于季铵基离子交换树脂的变湿吸附法(Moisture Swing Adsorption, MSA), 例如在聚丙烯平板上分散季铵阴离子交换树脂。空气中的相对湿度对CO₂吸附和水蒸气共吸附有强烈影响^[49]。MSA-DAC技术工艺简单、能耗低, 用水的消耗取代了变温的热量输入或变压的机械能, 利用水的蒸发自由能驱动CO₂解吸^[57], 这与传统CO₂与H₂O的竞争吸附机制不同, 消除了与水共吸附相关的能量损失。

除了液体吸收和固体吸附外, 也有学者提出了一些新兴技术包括光诱导摆动吸附^[33]、微生物MI-DAC^[34]以及结合膜分离/膜吸收法^[59]的DAC。

1.3 直接空气捕集技术应用及经济性

DAC是能源密集型技术, 捕集大气仅约0.04%的CO₂对捕集材料性能和能量需求都很高^[21]。有大规模应用潜力的DAC技术需要满足一些基本条件: 第一是捕集必须在环境条件下进行, 避免因加压、冷却或加热大量空气产生的高额成本; 第二是捕集CO₂的能量必须来自可再生能源, 以确保在捕集过程中不释放更多CO₂^[22]。总体来说, 使用固体吸附剂的DAC系统比使用液体吸收剂的DAC系统所需的能量低^[21, 60-61]。

过去五年全球对DAC技术的研发投入不断增加, 相关公司数量也明显增多, 表3展示了部分DAC公司及示范项目情况。截至目前, 在欧洲、北美、日本等国家地区目前至少有130个DAC项目处于设计或开发阶段, 有近30座DAC小规模试验示范设施投入运营。这些已经建成或在规划中的DAC示范项目, 除了采用比较主流的碱性溶液和固体吸附材料结合变温变压再生工艺的DAC技术, 也有一些尝试采用变湿或电化学相关的DAC技术。对DAC技术需求的快速增长, 促进了全球对于百万吨级DAC示范工程的筹备与建设。但总体而言, DAC还处于技术发展的早期阶段, 没有整体进入大规模工业应用阶段。

Carbon Engineering (CE)公司采用以KOH和Ca(OH)₂溶液为核心^[25]的DAC工艺。空气接触器中KOH溶液吸收空气中的CO₂并生成K₂CO₃溶液, K₂CO₃溶液进入颗粒反应器与Ca(OH)₂反应后生成CaCO₃固体和KOH溶液。之后, CaCO₃固体

进入煅烧炉再生成高浓度CO₂和CaO固体。整个工艺过程中所需能量来自于外部提供的可再生电力或天然气燃烧^[44]。目前CE公布的从DAC捕集CO₂的平均成本为94~232美元/t^[45]。该公司预计到2035年部署1亿tDAC产能。Global Thermostat公司主要采用固体吸附和TSA工艺捕集CO₂, 并于2022年开始在科罗拉多州投运一处CO₂捕集规模约1000t/a的示范项目。瑞士Climeworks公司主要采用的DAC工艺基于由胺改性的多孔颗粒吸附材料, 脱附时加热的能量主要来自于地热和工业废热。Climeworks于2021年在冰岛投运了全球第一个也是最大的DACCS工厂, 每年可捕集约4000tCO₂并永久储存在地下。Climeworks也在尝试更大规模的DAC项目, 预计能够实现36000t/aCO₂捕集量的Mammoth项目正在建设调试阶段。目前已经建成的DAC设施捕集每吨CO₂的成本在100~1000美元/t, 随着技术的进步捕集成本会很有可能下降到100美元/t以下甚至75美元/t以下^[11]。

我国DAC技术目前主要处于实验室验证阶段。浙江大学采用变湿再生工艺开发了一套空气处理量10000m³/h, 再生量30kg/dCO₂的小型DAC样机, 捕集的CO₂主要用于温室气肥^[36]。中国石油DAC团队建造了采用S-TVSA循环工艺的DAC小试样机, 每年能从空气中捕集1.1tCO₂, 该团队还计划基于S-TVSA循环建设百吨级的DAC工业化示范装置^[61]。表4展示了我国已建成和目前处于规划建设阶段的DAC项目。2024年7月, 中国能建集团联合上海交通大学共同研发建成了600t/aCO₂直接空气捕集装置——碳捕块CarbonBox, 是我国首台工业级DAC工程装备。另外, 华能集团提出预计2024年建成一套大型DAC工业示范装置^[24, 62]。

未来DAC技术研究可重点关注以下方面:

1) 材料方面: 开发成本低、高性能且循环稳定性好的DAC吸附/吸收剂, 尤其是复合吸附剂的研究可以进行包含多种载体或有效成分的复合研究。

2) 工艺方面: 优化成功实现商业应用的碱性氢氧化物溶液DAC与固态胺吸附剂技术, 缩减成本, 减少再生能耗, 为DAC的后续规模化与商业化应用奠定基础。

3) 装置优化方面: 设计开发适用于DAC结构简单、易于操作且低成本的配套优化装置, 例如可充分发挥捕集材料性能的空气接触器, 可以实现捕集材料快速装/卸载的反应器等。

4) 规模化与商业化: 进一步研究多种真实气候环境下的DAC工作情况, 尤其是在极端温度、极端潮湿或干燥、空气质量差的环境中对DAC装置

表3 国际主要直接空气捕集公司及示范项目^[18,51]Table 3 Major international direct air capture companies and demonstration projects^[18,51]

研究机构	技术	吸收/吸附剂	再生方式	捕集成本(以CO ₂ 计)/(美元·t ⁻¹)	能耗(kWh·t ⁻¹)	应用规模	地点
Carbon Engineering	碱性溶液	KOH Ca(OH) ₂	高温煅烧	94~232	1824	350 t/a中试项目 1 500 t/a斯阔米什试验工厂 在建STRATOS商业工厂计划2025年实现 500 000 t/a(计划扩大到1 000 000 t/a)	加拿大
Global Thermostat	固体吸附剂	负载胺多孔材料	TVSA 低温蒸汽(85~100℃脱附)	300	1 320~1 670	科罗拉多州1 000 CO ₂ t/a示范工厂 2座在建商业工厂(4 000 t/a)	美国
Climeworks	固体吸附剂	胺功能化的 纳米材料	TVSA(100℃)	600~800; 100(2030年)	1 700~2 300	欧洲14家中试和商业工厂(200 t/a) 苏黎世在运试验工厂(900 t/a) 冰岛在运商业工厂(4 000 t/a) 冰岛在建Mammoth项目(预计2024年 实现36 000 t/a)	瑞士
Carbon Capture	固体	沸石	TVSA	—	—	Bison项目5百万 t/a(预计2030年)	美国
Infinitree	固体吸附剂	离子交换吸附剂	变湿	—	—	纽约在运中试工厂(100 t/a)	美国
Hydrocell/Solet air Power	固体	胺功能化的聚苯乙烯球形颗粒	TVSA	—	—	20 t	芬兰
Skytree	固体	苯基胺基离子交换树脂颗粒	TSA	—	—	10 Mt(累积到2030年)	荷兰
Carbon Collect	固体	胺功能化聚合物	MVTSA(IVSA和MVSA可行)	100(目标)	—	33 t	爱尔兰
Greenlyte Carbon Technologies	液体	PEG/聚醇 /K ₂ CO ₃ /Na ₂ CO ₃ /氨基酸等	电化学	—	—	100 t/a	德国
Verdox	固体	醌类物质与多孔碳 纳米管支架	ESA	50~100	—	—	美国
TerraFixing	固体	沸石	TVSA	40	—	—	加拿大
Noya	固体	可能含 MgO/Al ₂ O ₃ /K ₂ CO ₃ / 活性炭/单乙胺等	TVSA	<100	—	~1 t	美国
Heirloom	碳矿化	石灰石Ca(OH) ₂	TSA	50(目标)	—	—	美国
Sustaera	固体	基体负载碳酸钠	TSA	175(目前) ≤100(目标)	—	300 t(2023年) 3 000 t(2024年)	美国
Mission Zero Technologies	液体	聚乙烯亚胺	电化学	—	—	第1家工厂每年50 t 再部署两家工厂各捕集 250 t/a(2024年)	英国
Octavia Carbon	—	—	可能是TSA	300~500	—	1 000 t(2024年)	肯尼亚
Carbon Removal	可能是碱性 溶液/	—	—	—	—	Kollsnes项目预计实现50万 t/a(2026年)	挪威
Removr & Greencap Solutions	固体	沸石	—	—	—	已成功进行4次试点 预计实现每年捕集300 t(2024年)	挪威

表4 国内规划的DAC项目

Table 4 DAC projects planned in China

装置规模	项目类型	承担单位	状态
600吨级 DAC样机	DAC关键技术 及其产业化研究	中国能源建设股份 有限公司、上海 交通大学	已建成
百吨级DAC样机	DAC技术研究	中国石油	规划在建
千标方每小时 样机	DAC示范研究	华能集团西安热工院	规划在建
5 000吨级 DAC装置	DAC示范项目	陕西能源化工研究院	规划在建

进行长期运行试验^[32]。

DACCS和BECCS捕集的CO₂通过在枯竭油气田、陆上咸水层、海上咸水层封存、不能开采的煤层和深海等地进行永久地质封存实现负碳效应。具有较强封存潜力的CO₂强化采油技术(EOR),国外已进入了商业示范阶段,我国还处于工业示范阶段。相较于捕集技术更加注重于如何降低成本,封存过程更关注的是存储容量和基础设施的建设水平。不同地质类型对应的CO₂封存成本具有显著差异,我国CO₂封存成本(含监测成本)为50~300元/t,预计2050年可在当前基础上下降50%~65%。

2 生物质能耦合碳捕集与封存

2.1 生物质能耦合碳捕集与封存概述

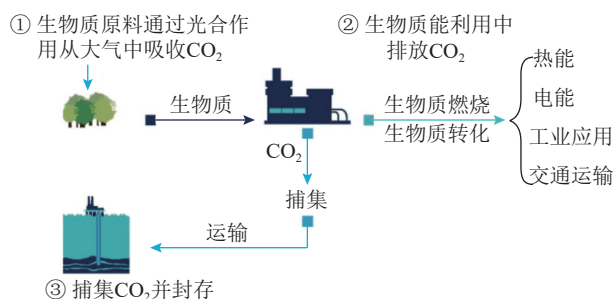
生物质能以生物质为载体,直接或间接地来源于植物的光合作用。全球对生物能的利用量从21世纪初开始大幅增加,主要集中在巴西对甘蔗渣的利用,欧洲对木材和城市固体废物的利用,以及中国对农作物残茬(如稻壳、秸秆等)的利用等。我国生物质资源丰富,目前年产量约为34.9亿t,预计2060年将达到53.5亿t^[63]。BECCS的含义是很丰富的,包括将原料直接转化为能源或化学产品,并移除过程中产生的碳,涉及多种行业、生物质原料种类和生物质利用技术方法^[63-64]。BECCS技术链条主要包括生物质的利用与转化和CO₂捕集与封存两个部分,其基本工艺流程如图3所示^[15]。

2.2 生物质能耦合碳捕集与封存技术研究进展

2.2.1 生物质的利用与转化

总的来说,生物质利用主要的方向(图4)是生物质热化学转化、生物质生物转化和生物质燃烧^[65-67]。

生物质热化学转化主要有液化、热解和气化^[65,68]。生物质液化技术是向装有生物质、催化剂、水或有

图3 BECCS基本工艺流程示意^[15]Fig. 3 A schematic view of bioenergy and carbon capture and storage (BECCS)^[15]

机物溶剂的反应器内通入H₂、CO或惰性气体,在适当的温度和压力条件下使生物质热分解,得到液态油或液体燃料。生物质热解一般是在缺氧或无氧条件下加热生物质,通过控制工艺类型和反应工况生成固体、液体和气体的三相产物,包括生物炭、生物油、可再生柴油、甲烷和氢气等。生物炭可单独或作为添加剂使用,用于改良土壤、改善或避免特定的环境污染;其他产物可以直接燃烧、气化或再升级为燃料^[69]。生物质气化是在700℃以上的高温下,使用氧化剂部分氧化生物质,产生CO、H₂或合成气。合成气可直接燃烧用于供热或发电,也可通过催化过程转化为液体燃料如合成绿色甲醇,还可将氢气分离出来燃烧或燃料电池^[69]。生物质生物转化是利用微生物对生物质原料进行厌氧消化或发酵等处理,用于将生物质转化为沼气^[67]或生物乙醇^[65]等。生物质转化过程中以及在对生物质转化生成的气体/液体燃料的利用过程中都可能产生CO₂,需要结合合适的碳捕集技术进行碳减排。

生物质燃烧常用于发电,主要包含生物质直燃发电、生物质气化发电、燃煤耦合生物质发电^[65]。生物质直燃发电技术与传统燃煤发电技术原理类似,只是将传统燃煤替换为生物质直接燃烧,这是一种相对成熟的技术,但也存在原料需要预处理、锅炉性能不佳、设备运行稳定性不佳和成本高等问题^[70]。同时生物质单独燃烧时,通常具有能量密度低、灰熔点低、易结渣、发电效益有限等特点^[71]。生物质气化发电是在气化炉中将生物质气化成可燃气体后再驱动内燃机或者燃气轮机进行发电。除了专用的生物质电站外,燃煤耦合生物质发电也是一种能降低煤耗、节能减排、成本相对较低的选择^[67],该技术可细分为生物质与燃煤混合燃烧发电^[72]、生物质气化耦合燃煤发电和生物质热解混燃发电^[67]。生物质与燃煤可采取直接混燃^[72]、间接混燃和并联混燃的方式发电,还可以将由生物质转化来的燃气与煤混合燃烧,将燃烧后的蒸汽注入汽轮发电机实

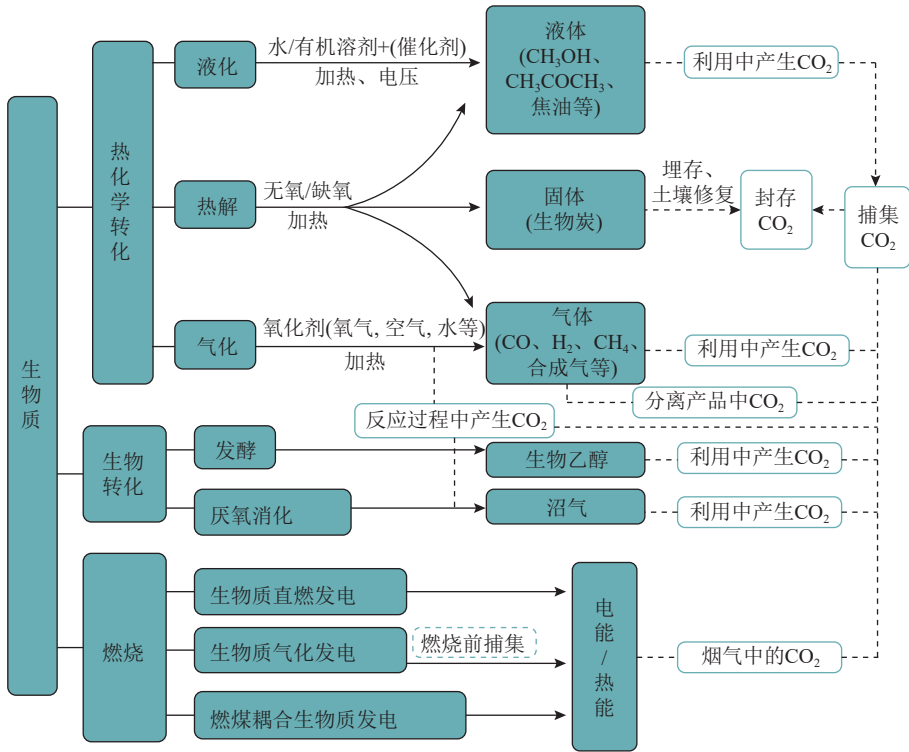


图4 基于生物质主要利用方式的BECCS技术路径示意

Fig. 4 A schematic view of BECCS technology pathway based on biomass utilization

现发电^[70]。生物质与煤的共气化存在协同效应，这种协同效应在一定程度上对整个气化过程有促进作用^[73]。生物质综合气化联合循环（IBGCC: Integrated biomass gasification combined cycle）也是一种先进的生物质气化发电技术，目前尚处在研发示范阶段。

2.2.2 与生物质能的耦合碳捕集与封存技术

CCS技术可以在合适阶段与以上提到的各项生物质能利用途径耦合，形成完整的BECCS技术路径（图4）。常见的与生物质能耦合的CCS技术选项（表5）包括燃烧前捕集、富氧燃烧和燃烧后捕集等^[75]。

燃烧前捕集在CO₂浓度较高（>20%）时优势明显^[75]，多用于捕集生物质转化利用过程中产生的CO₂，如与IBGCC^[76]过程耦合。以煤与生物质混合气化为核心，集成冷、热、电力、油品及化学品生产等工艺的煤与生物质共气化多联产技术耦合CCS技术更具减排潜力。

生物质发酵制生物乙醇是已经成熟商业化的技术^[77]，生产设施成本较低，在发酵制生物乙醇的过程中会产生近乎纯净的CO₂，可以直接压缩并储存，这样的捕集方式相对简单捕集成本也较低（10-35美元/t）。低温分离也适用于高浓度分离CO₂，但运行成本较高。

富氧燃烧利用空气分离装置产生的高纯度氧气

代替空气参与燃烧，有助于提高燃烧器的燃烧效率、降低硫氧化物和氮氧化物等有害气体排放、产生具有高浓度CO₂的烟气，利于后续CO₂的捕集、压缩纯化和封存。例如，煤—生物质流化床高效富氧混燃耦合CO₂地质封存技术便是一条有效的BECCS拓展途径^[78-79]。

燃烧后捕集在BECCS技术路线中主要用于捕集生物质电厂烟气流中的CO₂^[80]。与燃煤电厂的碳捕集情况相比，生物质电厂烟气成分更为复杂^[81]，不同类型的生物质在含水量、能量密度、燃烧效率和碳排放量方面差异很大^[82]。因此生物质电厂根据生物质原料类型、生物质燃烧过程以及产生的气体等因素会选择不同的碳捕集工艺。并且有必要烟气在进入碳捕集系统前，对烟气进行净化^[82]。目前我国使用化学吸收法捕集燃煤电厂烟气中CO₂的技术已经进入大规模示范阶段，这对进行生物质电厂烟气中的CO₂捕集有重要参考意义。学者们在通过模拟的方式对比常用的胺类吸收剂（MEA）在生物质电厂和燃煤电厂中捕集CO₂的应用情况^[81]。一般燃煤电厂的烟气中CO₂含量为12%~15%，而生物质电厂的烟气中CO₂含量约为4%~7%^[83]。如果使用现在相对成熟的吸收法捕集生物质电厂烟气中CO₂，同样也将面对更低CO₂含量带来的更高的技术要求和成本。其他碳捕集技术在用于生物质电厂烟气碳捕集时也各有优势，例如膜分离法占地面积小、不

表 5 BECCS 中不同碳捕集技术的优势和局限性^[74]Table 5 Advantage and limitations of different carbon capture techniques of BECCS^[74]

技术	优势	局限性	应用举例
燃烧前捕集	方便基于现有工厂改造 更适用于较高浓度的CO ₂	成本较高 需要合适的材料和操作环境来满足高温要求	生物质气化 IBGCC
直接压缩	技术简单	针对高低浓度CO ₂	乙醇生产厂
富氧燃烧	需要处理的气体量少, 设备较少 已有较成熟空气分离技术	空气分离装置会导致较大能量消耗 腐蚀问题	生物质电厂
燃烧后捕集	方便基于现有工厂改造方便 技术相对成熟	成本较高 低浓度CO ₂ 对捕集效率有影响	生物质电厂
吸收法	吸收效率高 适用于燃烧后捕集和天然气处理技术	吸收剂热稳定性、抗降解性等有待提高 再生能耗相对较高	生物质电厂
膜分离法	占地面积小、不含化学溶剂	需要合适的膜材料来实现气体分离	生物质电厂
吸附法	可逆过程、不含化学溶剂	再生能耗相对较高	生物质电厂
低温分离	适用于高浓度的CO ₂ 高选择性	使用温度范围较窄, 运行成本较高 需防止低温结冰导致的安全隐患	乙醇生产厂 生物质电厂

含化学溶剂、更加环境友好, 但目前仍受制于膜材料本身的选择性、渗透性以及烟气环境下的耐受性等; 吸附法能够覆盖了较宽的温度和压力范围, 可避免化学溶剂的使用, 但再生能耗相对较高。完成捕集后, CO₂ 被压缩并运输至地质封存点。

2.3 生物质能耦合碳捕集与封存技术应用及经济性

BECCS 在生物质的发电利用和非发电利用上都扮演着重要角色但整体部署却很缓慢。从生物质原料(木质纤维素、油料作物和油脂废料、糖类/淀粉作物、有机废物、藻类等)到生成最终能源产品的技术途径种类繁多, 各技术的成熟度也不尽相同^[64], 例如生物质燃烧、制生物炭、制生物柴油、制乙醇/甲烷等已达到商业应用水平, 而生物质气化、制氢、制液态烃等还处于基础研究或示范阶段^[64, 67]。可以与生物质能的耦合碳捕集技术中燃烧前捕集技术相对成熟, 化学吸收法处于工业示范和商业化应用阶段, 富氧燃烧等还处于中试及以下阶段^[8]。

目前国际社会对甲醇、甲烷等绿色燃料的需求越来越强, 也推动着 DAC 与 BECCS 技术的发展。合成绿色甲醇的一种主要工艺路线是在催化剂作用下, H₂ (利用可再生能源进行水的电解, 生成 H₂) 与 CO₂ (来自生物质能/直接空气捕集的 CO₂) 在合成反应器中反应生成甲醇, 后通过精馏等方法提纯甲醇, 得到高纯度的绿甲醇。在当前技术经济条件下, 合成绿色甲醇在成本上还远高于传统煤制甲醇或天然气制甲醇技术路线, 主要原因在于绿氢的成本过高, 并且占到了整个成本的 88%, 另外由于反应过程中放热剧烈, 会造成大量能量浪费^[84]。经过

测算, 通过生物质来源的 CO₂ 制绿色甲醇, 成本在 5 700 元以上, 通过直接空气捕集的 CO₂ 来制备绿色甲醇, 成本约 8 000 元^[85]。从长远来看, 随着绿电成本的降低, 电解技术、甲醇合成技术以及碳捕集技术的成熟, 未来绿色甲醇成本下降是必然趋势。目前绿色甲醇的主要研究方向是研发高效催化剂, 调节碳氢比, 改进合成工艺, 降低能耗, 提高转化效率和甲醇收率, 在节约原料采购成本的同时节省投资^[84]。

生物质液化转化过程中没有 CO₂ 产生, 产生的液体燃料可取代部分化石燃料, 减少了化石能源的直接使用。预计到 2030 年, 我国生物液体燃料年产量将达到 2 500 万 t, 将逐步应用于航运、海运^[86]。基于生物天然气的 BECCS 技术一方面通过在生物天然气生产过程中直接对沼气中 CO₂ 进行分离和储存实现固碳, 另一方面也通过取代传统天然气间接实现了 CO₂ 减排。2018 年, 我国生物天然气产量约 0.576 亿 m³^[67]。预计 2030 年, 我国生物天然气年产量将达到 30 亿 m³^[86]。

目前全球共有约 20 个处于不同阶段的 BECCS 设施和示范项目(表 6), 主要分布在北美、欧洲和日本, 应用于生物乙醇生产、生物油生产、沼气生产、生物质气化、生物质发电、垃圾焚烧发电、水泥厂、纸浆和造纸等领域, 捕集的 CO₂ 全部用于提高石油采收率(EOR)、食品、饮料、制造或地质封存。多数 BECCS 项目分布在北美的乙醇生产行业。截至 2022 年, 美国有 192 家运营生物乙醇厂, 根据预测如果这些生物乙醇厂全部部署 BECCS 技

表6 BECCS设施和示范项目^[65-66, 83]Table 6 BECCS facilities and demonstration projects^[65-66, 83]

项目	行业类型	生物质原料	捕集方式	捕集规模/ (t · a ⁻¹)	规划投运年份	封存/利用途径	国家
IL-CCS伊利诺伊州工业碳捕集项目	乙醇生产	玉米	直接压缩	1 000 000	2017年	咸水层封存	美国
Arkalon 压缩设施	乙醇生产	—	—	290 000	2009年	EOR	美国
Bonanza 生物质-碳捕集项目	乙醇生产	谷物	直接压缩	100 000	2012年	EOR	美国
Charm工业二氧化碳移除项目	生物油生产	—	—	5 000	2020年	地质封存	美国
Famsworth 注入项目	乙醇/化肥生产	—	—	7 000 累计	注入程序已暂停, 监测工作仍在进行	EOR	美国
Husky 注入项目	乙醇生产	非使用品质的 谷物和玉米	直接压缩	90 000	2012年	EOR	加拿大
Schlumberger 联合多企业项目	合成气、电力	—	—	300 000	2025年	地质封存	美国
Occidental and White Energy项目	乙醇生产	玉米	—	700 000	2024年	EOR	美国
Summit Carbon Solutions项目	乙醇生产	—	—	1 900 000	2024年	地质封存	美国
Mikawa 电厂燃烧后捕集项目	生物质电厂	生物质+煤	燃烧后捕集	180 000	规划阶段	离岸封存	日本
Drax 电厂项目	生物质电厂	生物质+煤	燃烧后捕集	330	2027年	地质封存	英国
Norwegian Full-Chain 项目	垃圾发电 (>30%生物质) / 水泥 (50%~60% 生物质)	垃圾、固废	—	800 000	高级开发	地质封存	挪威
FS Lucas do Rio Verde项目	乙醇生产	—	—	400 000	早期开发	—	巴西
Stockholm Exergi项目	生物质发电 和供热	—	—	800 000	2027年	地质封存	瑞典
Air Liquide -卡尔格伦项目	乙醇生产	—	—	150 000	2015年	食品、饮料、 制造	美国
OCAP项目	炼油厂和乙醇	—	—	400 000	2011年	温室园艺	荷兰
Lantmannen氨基乙醇净化装置	乙醇生产	谷物	—	200 000	2015年	生产碳酸	瑞典
Calgren 可再生燃料二氧化碳回收厂	乙醇生产	—	—	150 000	2015年	可再生燃料 生产	美国
Alco生物燃料 (ABF) 生物炼油厂二氧化碳回收厂	乙醇生产	玉米	—	100 000	2016年	—	比利时
Cargill小麦加工二氧化碳净化厂	乙醇生产	谷物	—	100 000	2016年	食品、饮料	英国
Russel二氧化碳注入装置	乙醇生产	—	—	7 700	2003—2005年	—	美国
佐贺市城市垃圾焚烧厂	垃圾发电	垃圾	胺液吸收法	3 000	2016年	护肤品生产	日本
Saint-Felicien纸浆厂和温室碳捕获项目	纸浆和纸生产	—	酶促碳捕集工艺	11 000	2019年	温室蔬菜养殖	加拿大

术, 每年可以从大气中去除约 4 500 万 t CO₂。整体来说, BECCS 的成本低于 DACCS。有研究指出 BECCS 的部署对去除二氧化碳的意义远远大于发电的价值, 可以将电能理解为 BECCS 的副产品^[87]。

目前全球规模最大的 BECCS 项目是美国 IL-

CCS 伊利诺伊州工业碳捕集项目。利用鼓风机将玉米发酵生产乙醇过程中产生的高纯度湿 CO₂ 输送到带有冷却器和分离器的往复式压缩机中, 后使用脱水装置降低压缩后的 CO₂ 水含量, 最后将液态 CO₂ 运输并注入附近的砂岩盐水层封存。该项目于

2017年开始注入捕集的CO₂^[64],每年注入约100万t CO₂^[88],每吨CO₂成本约为28.35美元^[89],相较于其它CCS技术,成本偏低^[88]。

造纸和纸制品行业多以植物纤维和废纸为原料,具有显著的间接除去大气中CO₂的潜力。纸浆和造纸厂的烟气中CO₂浓度较高,并且有可用于捕集过程的热量,因此也很有部署BECCS的前景^[90]。Saint-Felicien纸浆厂采用了酶促法^[91]的碳捕集工艺(表6)。2013年我国造纸工业的碳排放量已高达1.59亿t,随着碳捕集技术的发展,在我国造纸行业部署BECCS技术也会是有效的减排方式。

Drax曾经是西欧规模最大、碳排放量最大的燃煤电厂,目前已经成为欧洲发电厂中的碳排放强度最低的项目之一。2018年Drax电厂6台660MW燃烧煤机组中的4台实现了纯烧生物质燃料(主要是木屑颗粒)。Drax已经在北约克郡塞尔比附近展示了世界上第一个BECCS示范项目,首次实现了从纯生物质原料电厂释放的烟气中捕集CO₂,该项目采用了由利兹大学C-Capture开发的专用吸收溶剂,在项目试运行的一天内捕集了1t CO₂。当前Drax电厂正在部署大规模的BECCS,预计到2027年Drax可能成为世界上第一个负碳发电站。

目前全球利用生物质燃烧发电或供热的BECCS工厂极少,煤炭和生物质与煤混燃技术相对成熟并在欧洲得到广泛使用,但很少有混燃发电厂配备了CCS系统^[92],很大程度上是由于与其他可再生电力来源(如风能和太阳能)相比,生物发电厂本身的发电成本很高^[90],并且配备CCS系统有可能导致电厂的发电效率降低约8%~15%^[92]。但随着生物质高效利用与碳捕集技术的发展与成熟,未来会有更多的电力和其他工业BECCS的项目进行建设和投入使用^[15]。

世界上最早的生物质能发电可追溯到20世纪70年代的丹麦。到80年代,欧美各国开始大力发展生物质能发电产业。我国生物能发电虽起步较晚但发展迅速^[65],截至2022年底,我国生物质发电装机容量累计达到4132万kW,连续第四年位列世界第一^[86]。预计到2060年,我国生物质发电装机将超过1.8亿kW^[93]。生物质发电厂都将有潜力通过安装CCS设备,实现负碳排放。目前我国尚未有BECCS示范项目建成,但已有一些研究机构 and 高校开展了BECCS相关理论研究和实验室规模的试验探索。我国内蒙古毛乌素生物电厂,利用种植的沙柳作燃料,并收集利用烟道中的CO₂来养殖藻类,实现了负排放的BECCS技术应用。

我国目前的电力供应仍然是以燃煤为主,“生

物质发电+CCS/CCUS”与“燃煤耦合生物质发电+CCS/CCUS”是电力行业发展BECCS技术的两条关键路线。一方面需要建造新的带有碳捕集系统的专用生物质电站,另一方面可以改造现有的纯燃煤发电厂为与生物质耦合的电厂,以更灵活的方式运行机组,并匹配碳捕集设施的改造。有研究表明,如果全国现役的燃煤发电机进行生物质耦合发电改造(以25%的掺烧比为例)能够实现的全生命周期下的碳减排量约为0.14~0.22 kg/(kW·h)。虽然燃煤电厂的BECCS改造会导致度电成本增加57.51%~93.38%,从全国来看,在华中地区进行燃煤电厂的BECCS改造经济性较好^[94]。分散式BECCS部署可以作为在短期内实现负排放的起点。

在考虑BECCS技术的大规模应用时,首先需要考虑生物质资源本身的可利用量、地理位置、供应链、采集运输。其次需要考虑生物质转化技术的成熟度以及过程中的能源和经济效率。此外,不同生物质能利用路线产生的不同浓度的二氧化碳对碳捕集技术路线的选择和捕集技术本身的成熟度、捕集设施的规模与成本也非常关键。最后,在确保生物质原料能稳定充足性供应的情况下,需要考虑到BECCS设施位置与CO₂地质封存地的匹配问题。

3 结 论

1) DACCS和BECCS是极具潜力的负排放技术,但目前大部分DACCS和BECCS技术仍然处于实验室或小型示范阶段并且成本昂贵。面对空气中低浓度的CO₂,DAC技术需要突破的难点更多在于高效低成本的捕集材料本身的研发和以及相应的工艺优化。另外DAC技术中涉及的电力和热能需求、成本、环境影响以及来自不同制度的政策支持等因素都需要得到良好的平衡,才能实现更大规模的部署。

2) BECCS技术主要还是以捕集生物质利用中产生的各种烟气中的CO₂、或伴随生物质转化成目标产品过程中产生的CO₂的为主,可以更多地参考已经实现大规模示范的燃煤电厂CCUS技术进行碳捕集,再结合实际的烟气或化学混合物的成分情况做出优化。

3) DACCS和BECCS技术的成本偏高且估算结果的不确定性高,都需要建立统一的便于分析比较的经济性分析方法对各负碳技术进行系统完整的技术经济评价,为未来大规模商业化部署提供参考。当前负排放技术边际减排成本显著高于其他减排技术,有待进一步研发示范和建立有效商业模式以推动其下降。

参考文献 (References) :

- [1] Historical CO₂ Datasets[EB/OL]. (2024-05-11) [2024-05-12]. <https://www.co2.earth/historical-co2-datasets>.
- [2] IEA, CO₂ Emissions in 2022 [R]. Paris: International Energy Agency, 2023.
- [3] ORGANIZATION W M . The Global Climate 2011-2020: A decade of accelerating climate change [R]. Geneva: United Nations, 2023.
- [4] IPCC. Special Report on Global Warming of 1.5 °C [R]. Geneva: United Nations, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2018.
- [5] 4C Science Summary. The increase in CO₂-induced global warming will only stop when humans stop adding CO₂ to the atmosphere[EB/OL]. (2021-10-01)[2024-05-12]. <https://www.4c-carbon.eu>.
- [6] PETERS G. The role of Carbon Dioxide Removal (CDR) in achieving the Paris Agreement goals [R]. Geneva: United Nations, CCICED Expert workshop on Engineered Carbon Dioxide Removal (CDR). 2024.
- [7] MINX, J C, LAMB W F , CALLAGHAN M W, et al. Negative emissions: Part 1: Research landscape and synthesis [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(6): 063001.
- [8] 程序. 生物质独特的负碳排放作用是碳减排的利器 [J]. 科技导报, 2022, 40(7): 44-53.
CHENG Xu. Biomass's unique effect of carbon negative emission is a sharp weapon for carbon emission reduction[J]. Science and Technology Review, 2022, 40(7): 44-53.
- [9] 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]. 中国: 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.
- [10] IPCC. AR6 Synthesis Report [R]. Geneva: United Nations, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022.
- [11] IEA, Direct Air Capture-A key technology for net zero [R]. Paris: International Energy Agency, 2022.
- [12] IEA, Energy Technology Perspectives 2020 [R]. Paris: International Energy Agency, 2020.
- [13] 蔡博峰, 李琦, 张贤 等. 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]. 中国: 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. 2021.
- [14] Direct Air Capture[EB/OL]. (2024-04-25) [2024-5-12]. <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/direct-air-capture>.
- [15] Bioenergy with Carbon Capture and Storage[EB/OL]. (2024-04-25) [2024-5-12]. <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/bioenergy-with-carbon-capture-and-storage>.
- [16] LACKNER K S. Capture of carbon dioxide from ambient air[J]. The European Physical Journal Special Topics, 2009, 176(1): 93-106.
- [17] 张杰, 郭伟, 张博, 等. 空气中直接捕集 CO₂ 技术研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2021, 27(2): 57-68.
- [18] BARAHIMI V, HO M, CROISE E, et al. From Lab to Fab: Development and Deployment of Direct Air Capture of CO₂[J]. Energies, 2023, 16(17): 6385.
- [19] SANZ-PEREZ E S, MURDOCK C R, DIDAS S A, et al. Direct capture of CO₂ from ambient air[J]. Chemical Reviews, 2016, 116(19): 11840-11876.
- [20] SUTHERLAND B R. Pricing CO₂ direct air capture[J]. Joule, 2019, 3(7): 1569-1577.
- [21] OZKAN M, NAYAK S P, Ruiz A D , et al. Current status and pillars of direct air capture technologies [J]. iScience, 2022, 25(4): 103990.
- [22] SODIQ A, ABDULLATIF Y, AISSA B, et al. A review on progress made in direct air capture of CO₂[J]. Environmental Technology & Innovation, 2023, 29: 102991.
- [23] BOS M J, PIETERSEN S, BRILMAN D W F, et al. Production of high purity CO₂ from air using solid amine sorbents[J]. Chemical Engineering Science: X, 2019, 2: 100020.
- [24] 廖昌建, 张可伟, 王品, 等. 直接空气捕集二氧化碳技术研究进展 [J]. 化工进展, 2024, 43(4): 2031-2048.
LIAO Changjian, ZHANG Kewei, WANG Jing, et al. Progress on direct air capture of carbon dioxide[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2024, 43(4): 2031-2048.
- [25] KEITH DW, HOLMES G, STANGELO D, et al. A process for capturing CO₂ from the atmosphere[J]. Joule, 2018, 2(10): 2179.
- [26] BARZAGLI F, GIORGI C, MANI F, et al. Screening study of different amine-based solutions as sorbents for direct CO₂ capture from air[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2020, 8(37): 14013-14021.
- [27] BRETHOMÉ F M, WILLIAMS N J, SEIPP C A, et al. Direct air capture of CO₂ via aqueous-phase absorption and crystalline-phase release using concentrated solar power[J]. Nature Energy, 2018, 3: 553-559.
- [28] RINBERG A, BERGMAN A M, SCHRAG D P, et al. Alkalinity concentration swing for direct air capture of carbon dioxide[J]. ChemSusChem, 2021, 14(20): 4439-4453.
- [29] NIKULSHINAV, AYESA N, GALVEZME, et al. Feasibility of Na-based thermochemical cycles for the capture of CO₂ from air—thermodynamic and thermogravimetric analyses[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 140(1-3): 62-70.
- [30] STOLAROFF JK, LOWRY G V, KEITH D W. Using CaO-and MgO-rich industrial waste streams for carbon sequestration[J]. Energy Conversion and Management, 2005, 46(5): 687-699.
- [31] RANJAN M, HERZOG H J. Feasibility of air capture[J]. Energy Procedia, 2011, 4: 2869-2876.
- [32] VESELOVSKAYA JV, DEREVSCHIKOVVS, KARDASH T Y, et al. Direct CO₂ capture from ambient air using K₂CO₃/Al₂O₃ composite sorbent[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 17: 332-340.
- [33] WANG T, HOU C, GE K, et al. Spontaneous cooling absorption of CO₂ by a polymeric ionic liquid for direct air capture[J]. The

- Journal of Physical Chemistry Letters*, 2017, 8(17): 3986–3990.
- [34] QIAO Y T, BAILEY J J, HUANG Q, et al. Potential photo-switching sorbents for CO₂ capture—A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 158: 112079.
- [35] SU J, TENG H H, WAN X, et al. Direct air capture of CO₂ through carbonate alkalinity generated by phytoplankton nitrate assimilation[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, 20(1): 550.
- [36] 王涛, 董昊, 侯成龙, 等. 直接空气捕集 CO₂ 吸附剂综述 [J]. 浙江大学学报, 2022, 56(3): 462–475.
WANG Tao, DONG Hao, HOU Chenglong, et al. Review of CO₂ direct air capture adsorbents[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2022, 56(3): 462–475.
- [37] LACKNER K, ZIOCK H, PATRICK G. Carbon Dioxide Extraction from Air: Is It An Option? [R]. United States: US Department of Energy (US) 1999.
- [38] ZEMAN Frank and LACKNER Klaus. Capturing carbon dioxide directly from the atmosphere [J]. *World Resource Review*, 2004, 16.
- [39] ROCHELLE G T. Amine scrubbing for CO₂ capture[J]. *Science*, 2009, 325(5948): 1652–1654.
- [40] SOCOLOW R, DESMOND M, AINES R et. al. Direct air capture of CO₂ with chemicals [R]. US: American Physical Society, 2011.
- [41] SABATINO F, GRIMM A, GALLUCCI F, et al. A comparative energy and costs assessment and optimization for direct air Academy of Engineering, 2022. capture technologies[J]. *Joule*, 2021, 5(8): 2047–2076.
- [42] LEPAUMIER H, PICQ D, CARRETTE P L. New amines for CO₂ capture. II. oxidative degradation mechanisms[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, 48(20): 9068–9075.
- [43] VELTMAN K, SINGH B, HERTWICH E G. Human and environmental impact assessment of postcombustion CO₂ capture focusing on emissions from amine-based scrubbing solvents to air[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(4): 1496–1502.
- [44] SEIPP C A, WILLIAMS N J, KIDDER MK, et al. CO₂ capture from ambient air by crystallization with a guanidine sorbent[J]. *Angewandte Chemie*, 2017, 129(4): 1062–1065.
- [45] COLOMBO G V. Study of CO₂ Sorbents for Extravehicular Activity [R]. California, NASA CR114632, 1973.
- [46] CAMPBELL J S. Decomposition of Carbonates in Capture of Carbon Dioxide from Ambient Air [R]. Vancouver, The University of British Columbia, 2019.
- [47] LI W, CHOI S DRESE J, et al. Steam-stripping for regeneration of supported amine-based CO₂ adsorbents[J]. *ChemSusChem*, 2010, 3(8): 899–903.
- [48] CHAIKITTISILP W, KIM H J, JONES C W. Mesoporous alumina-supported amines as potential steam-stable adsorbents for capturing CO₂ from simulated flue gas and ambient air[J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25(11): 5528–5537.
- [49] WIJESIRI R P, KNOWLES G P, YEASMIN H, et al. Desorption process for capturing CO₂ from air with supported amine sorbent[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, 58(34): 15606–15618.
- [50] WILFONG W C, KAIL B W, JONES C W, et al. Spectroscopic investigation of the mechanisms responsible for the superior stability of hybrid class 1/class 2 CO₂ sorbents: a new class 4 category[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(20): 12780–12791.
- [51] CHOWDHURY S, KUMAR Y, SHRIVASTAVA S. et al. A review on the recent scientific and commercial progress on the direct air capture technology to manage atmospheric CO₂ concentrations and future perspectives[J]. *Energy & Fuels*, 2023, 37(15): 10733–10757.
- [52] DEY C, KUNDU T, BISWALBP, et al. Crystalline metal-organic frameworks(MOFs): synthesis, structure and function[J]. *Acta Crystallographica Section B Structural Science, Crystal Engineering and Materials*, 2014, 70(1): 3–10.
- [53] ELFVING J, BAJAMUNDIC, KAUPPINEN J, et al. Modelling of equilibrium working capacity of PSA, TSA and TVSA processes for CO₂ adsorption under direct air capture conditions[J]. *Journal of CO₂ Utilization*, 2017, 22: 270–277.
- [54] WURZBACHER JA. GEBALD C, STEINFELD A. Separation of CO₂ from air by temperature-vacuum swing adsorption using diamine-functionalized silica gel[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(9): 3584–3592.
- [55] WURZBACHER J A, GEBALD C, BRUNNER S, et al. Heat and mass transfer of temperature-vacuum swing desorption for CO₂ capture from air[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 283: 1329–1338.
- [56] GEBALD C, WURZBACHER JA, TINGAUT P, et al. Stability of amine-functionalized cellulose during temperature-vacuum-swing cycling for CO₂ capture from air[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(17): 10063–10070.
- [57] BOS M J, KROEZEV, SUTANTO S, et al. Evaluating regeneration options of solid amine sorbent for CO₂ removal[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(32): 11141–11153.
- [58] WANG T, LACKNER KS, WRIGHT A. Moisture swing sorbent e carbon dioxide capture from ambient air[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(15): 6670–6675.
- [59] FUJIKAWA S, ARIYOSHI M, SELYANCHYN R, et al. Ultrafast, selective CO₂ permeation by free-standing siloxane nanomembranes[J]. *Chemistry Letters*, 2019, 48(11): 1351–1354.
- [60] National Academies of Sciences, Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration A Research Agenda[M], Washington (DC): National Academies Press (US); 2018 Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK541443/>.
- [61] 周爱国, 郑家乐, 杨川箬, 等. 直接空气二氧化碳捕集技术工业化进展 [J]. *化工进展*, 2024, 43(6): 2928–2939.
ZHOU Aiguo, ZHENG Jiale, YANG Chuanruo, et al. Industrialization Progress of Direct Air Capture Technology[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, 43(6): 2928–2939.
- [62] 许世昌. 二氧化碳捕集与利用技术研究及工程示范 [R] 中国: 北京, 2021.
- [63] 中国产业发展促进会生物质能产业分会, 生态环境部环境工程评估中心等, 3060 零碳生物质能发展潜力蓝皮书 [R]. 中国,

- 2021.
- [64] STAFFORD W, LOTTER A, BRENT A. et al. Biofuels technology: a look forward [EB/OL]. (2017)[2024-05-12]. <http://hdl.handle.net/10419/163049>
- [65] 张国平,王永豪. 我国生物质转化技术应用现状及展望 [J]. 安徽农业科学, 2023, 51(17): 1-5, 10.
ZHANG Guoping, WANG Yonghao. Application status and prospect of biomass conversion technology in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2023.51(17): 1-5.10.
- [66] Bioenergy and Carbon Capture and Storage [R], US: Global CCS Institute, 2019.
- [67] 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.
FAN Jingli, LI Jia, YAN Shuiping, et al. Application potential analysis for bioenergy carbon capture and storage technology in China[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(1): 7-17.
- [68] GOYAL H B, SEAL D, SAXENA R C. Bio-fuels from thermochemical conversion of renewable resources: a review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(2): 504-517.
- [69] 刘华财, 吴创之, 谢建军, 等. 生物质气化技术及产业发展分析 [J]. 新能源进展, 2019, 7(1): 1-12.
LIU Huacai, WU Chuangzhi, XIE Jianjun, et al. Status and development of technology and applications of biomass gasification[J]. *Advances in New and Renewable Energy*, 2019, 7(1): 1-12.
- [70] 金安, 李建华, 高明, 等. 生物质发电技术研究与应用进展 [J]. *能源研究与利用*, 2022(5): 19-24.
JIN An, LI Jianhua, GAO Ming, et al. Research and application progress of biomass power generation technology[J]. *Energy Research & Utilization*, 2022(5): 19-24.
- [71] SAMI M, ANNAMALAI K, WOOLDRIDGE M. Co-firing of coal and biomass fuel blends[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2001, 27(2): 171-214.
- [72] 谭厚章, 杨富鑫, 王新宁, 等. 全链条大型燃煤机组直接耦合生物质发电降碳技术 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 44(2): 631-641.
TAN Houzhang, YANG Fuxin, WANG Xinning, et al. Whole-chain Biomass Direct Co-firing Technology for the Coal-fired Power Plant to Reduce CO₂ Emission[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2023, 44(2): 631-641.
- [73] 何清, 程晨, 龚岩, 等. 水热炭化生物质与煤共热解和共气化特性研究 [J]. 燃料化学学报, 2022, 50(6): 664-673.
HE Qing, CHENG Chen, GONG Yan, et al. Study on co-pyrolysis and co-gasification of hydrothermal carbonized biomass and coal[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2022, 50(6): 664-673.
- [74] GANESHAN P, VSV, GOWD S C, et al. Bioenergy with carbon capture, storage and utilization: potential technologies to mitigate climate change[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2023, 177: 106941.
- [75] GHAT K, ALNOUSS A, MCKAY G, et al. Biomass-based integrated gasification combined cycle with post-combustion CO₂ recovery by potassium carbonate: techno-economic and environmental analysis[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2020, 135: 106758.
- [76] KLEIN D, BAUER N, BODIRSKY B. et al. Bio-IGCC with CCS as a long-term mitigation option in a coupled energy-system and land-use model[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 2933-2940.
- [77] BELLO S, GALAN-MARTIN A, FEIJO G, et al. BECCS based on bioethanol from wood residues: Potential towards a carbon-negative transport and side-effects [J]. *Applied Energy* 2020, 279: 115884.
- [78] SAHU S G, CHAKRABORTY, SARKAR P. et al. Coal-biomass co-combustion An overview[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 39: 575-586.
- [79] 韩涛, 余学海, 卢权, 等. 富氧燃烧空分制氧技术研究与应用 [J]. 华北电力技术, 2015, 10: 63-62.
HAN Tao, YU Xuehai, LU Quan, et al. Research and application of oxygen production by air separation technology for oxygen-enriched combustion[J]. *North China Electric Power*, 2015, 10: 63-62.
- [80] MERSCH M, DEJAN R, MOUSTAFA N, et al. The role and value of BECCS in the USA [R]. US: Drax, 2024.
- [81] 胡长征, 王雅博, 刘圣春. MEA 溶液在生物质电厂和燃煤电厂捕集 CO₂ 中的应用 [J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(6): 78-85.
HU Changzheng, WANG Yabo, LIU Shengchun. Application of MEA solution in the CO₂ capture in biomass power plants and coal-fired power plants[J]. *Integrated intelligent energy*, 2022, 44(6): 78-85.
- [82] SINGH R, SHUKLAA. A review on methods of Hue gas cleaning from combustion of biomass[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29: 854-864.
- [83] GLUSHKOVD, NYASHINA G S, ANAND R, et al. Composition of gas produced from the direct combustion and pyrolysis of biomass[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 156: 43-56.
- [84] 张轩, 历一平. 绿色甲醇生产工艺技术经济分析 [J]. 现代化工, 2023, 43(3): 209-212.
ZHANG Xuan, LI Yiping. Technological economic analysis on green methanol production process[J]. *Modern Chemical Industry*, 2023, 43(3): 209-212.
- [85] 中国产业发展促进会生物质能产业分会. 绿色甲醇长远来看具备较强经济性, 调节碳氢比是当前技术要 [EB/OL]. (2024-04-07) [2024-05-12] <https://www.beipa.org.cn/newsinfo/6214319.html>.
- [86] 中能产业分会. 2023 中国生物质能产业发展年鉴 [R]. 北京: 中国产业发展促进会生物质能产业分会, 2023.
- [87] FAJARDY M, MORRIS J, GURGEL A, et al. The economics of bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) deployment in a 1.5°C or 2°C world[J]. *Global Environmental Change*, 2021, 68: 102262.
- [88] HOSSAIN T, BURLI P, PIN J, et al. Deployment of BECCUS value chains in the United States [R]. Paris: IEA Bioenergy, 2023.
- [89] MCKASKLE R, JONES R, VANCE A. Illinois Basin - Decatur Project: Process Design and Operation of Carbon Dioxide Surface Facilities [R] US: Illinois, 2019.
- [90] SAGUES W J, JAMEEL H, SANCHEZ D L, et al. Prospects for bioenergy with carbon capture & storage (BECCS) in the United

- States pulp and paper industry[J]. *Energy & Environmental Science*, 2020, 13(8): 2243–2261.
- [91] CO₂ capture unit starts up at Resolute's Saint-Félicien pulp mill. [EB/OL]. (2019-03-15) [2024-5-12]. <https://www.pulpandpaper-canada.com/co2-capture-unit-starts-up-at-resolutes-saint-felicien-pulp-mill-1100001622/>.
- [92] FAN J L, FU J Y, ZHANG X, et al. Co-firing plants with retrofitted carbon capture and storage for power-sector emissions mitigation[J]. *Nature Climate Change*, 2023, 13: 807–815.
- [93] 中国生物质能发电产业市场前景与投资战略规划分析报告[R]. 深圳: 前瞻产业研究院, 2022.
- [94] 袁家海, 王耀, 张为荣, 等. 中国燃煤电厂碳捕集与生物质掺烧碳捕集改造的经济性 [J]. *气候变化研究进展*, 2022, 18(6): 764–776.
- YUAN Jiahai, WANG Yao, ZHANG Weirong, et al. Economic analysis of carbon capture and bioenergy with carbon capture retrofitting of Chinese coal-fired power plants[J]. *Climate Change Research*, 2022, 18(6): 764–776.