许楚婉,何 松,罗 津,等.生物质能碳捕集技术负排放潜力评价研究进展及展望 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):4080-4090.
Xu C W, He S, Luo J, et al. Research progress and prospect on the evaluation of negative emissions potential of bioenergy with carbon capture and storage technology [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):4080-4090.

生物质能碳捕集技术负排放潜力评价研究进展及展望

许楚婉[1,2],何 松[3],罗 津[1],郑雅文[3,4],陈 颖[1],曾雪兰[3],田志鹏[1,2],王珺瑶[1,2*] (1.广东工业大学材料与能源学院,广东 广州 510006；2.广东工业大学,智慧能源研究中心,广东 广州 510006；3.广东工业大学,环境生态工程研究院,广东 广州 510006；4.深圳市燃气集团股份有限公司,广东 深圳 518000)

摘要：基于生物质转化技术类型,系统梳理了生物质物质能碳捕集(BECCS)技术方案.在此基础上,基于生命周期评价(LCA)框架,理清了 BECCS 生命周期评价关键过程,并对不同BECCS技术方案的负排放潜力和环境影响进行研究综述.结果表明,基于生物质直燃和气化发电以及生物质气化制氢技术的 BECCS 技术方案具有较强的负排放潜力,然而由于技术类型、技术参数以及假设条件等方面的差异,既有研究中同一类型技术方案的负排放潜力具有较大的分布区间.此外,虽然 BECCS 技术的水耗、能耗等环境影响已受到关注,但对于 BECCS 的综合环境影响仍未形成共性结论.目前,针对 BECCS 的负排放潜力及生命周期环境影响评价仍处于起步阶段,缺乏标准化的评价框架及全链条可靠数据的支撑,针对不同的 BECCS 技术方案尚未形成一致性的评价结论,亟需开展相关研究工作以支撑碳中和路径的宏观规划.

关键词：生物质能；碳捕集；负排放；生命周期评价；环境影响；碳中和
中图分类号：X382.1 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)07-4080-11

Research progress and prospect on the evaluation of negative emissions potential of bioenergy with carbon capture and storage technology.

XU Chu-wan[1,2], HE Song[3], LUO Jin[1], ZHENG Ya-wen[3,4], CHEN Ying[1], ZENG Xue-lan[3], TIAN Zhi-peng[1,2], WANG Jun-yao[1,2*] (1.School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China；2.Smart Energy Research Center, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China；3.Institute of Environmental Ecology Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China；4.Shenzhen Gas Group Co., Ltd., Shenzhen 518000, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：4080~4090

Abstract：This study systematically reviews bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) technology pathways based on various biomass conversion technologies. Using the Life Cycle Assessment (LCA) framework, it identifies the key processes in the BECCS life cycle and provides a comprehensive review of the negative emissions potential and environmental impacts of different BECCS technology pathways. The results indicate that BECCS pathways based on biomass direct combustion, gasification power generation, and biomass gasification for hydrogen production exhibit strong negative emissions potential. However, due to differences in technology types, technical parameters, and assumptions, the negative emissions potential of the same type of technology in existing studies varies significantly. Moreover, while the water consumption, energy consumption, and other environmental impacts of BECCS have gained attention, there is still no consensus on its comprehensive environmental impacts. At present, the evaluation of the negative emissions potential and life cycle environmental impacts of BECCS is still in its early stages, lacking standardized assessment frameworks and reliable full-chain data. Furthermore, no consistent conclusions have been formed for evaluating different BECCS technology pathways. It is imperative to conduct further research to support macro-level planning for carbon neutrality pathways.

Key words：bioenergy；carbon capture and storage；negative emissions；life cycle assessment；environmental impact；carbon neutrality

气候变化是人类社会共同面临的严峻挑战[1],生物质碳捕集与封存(BECCS)作为一项重要的气候变化应对技术,在减缓气候变化中发挥重要作用[2].BECCS 是指将生物质转化利用过程中产生的 CO_2 进行捕集和封存,从而实现 CO_2 与大气长期隔离的负排放技术[3].

近年来,在国家近零排放承诺推动下,全球层面 BECCS 项目的部署持续推进.根据全球碳捕集研究

收稿日期：2024-12-06
基金项目：国家自然科学基金青年基金资助项目(72104257);广东省自然科学基金面上项目(2024A1515012661,2023A1515240056);广州市基础与应用基础研究专项(2024A04J3828)
* 责任作者, 副教授, wangjy@gdut.edu.cn

(Global CCS Institute)统计[4],截止2023年11月,全球共有 79 个 BECCS 项目,主要包括基于生物质燃料(包括乙醇和生物天然气等)转化的 BECCS 项目和基于发电供热(直接燃烧或气化发电)的 BECCS 项目,或基于其它转化(废弃物和残渣、制氢和纸浆及造纸行业)的 BECCS 项目,分别位于美国、欧洲和加拿大等 7 个地区,其中位于美国伊利诺伊州的 ADM 谷物乙醇厂 BECCS 项目[5]、堪萨斯州的 Bonanza 和 Arkalon 乙醇厂 BECCS 项目[6-9]等 5 个项目已进入运行阶段.伊利诺伊州的ADM谷物乙醇厂大型工业碳捕获和封存项目,年捕集量达到 1Mt/a,是目前大规模碳捕集项目中第一个 BECCS 项目,代表着 BECCS 技术已进入大规模商业化阶.根据中国 CO_2 捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023)[10],预计到 2060 年可通过 CCUS 技术实现 10 亿 t/a 的 CO_2 减排量,在 2060 年之前,BECCS、DAC 技术预计减少 5~8 亿 t/a 的 CO_2.

Wang 等[11]综述BECCS技术路径的生命周期评价研究,指出方法学差异导致评估结果波动较大,建议建立标准化指南并拓展评估维度;Dachary 等[12]通过分析 35 项研究发现现有 LCA 数据存在透明性不足问题,强调需提升新型系统研究深度和数据质量;Salas 等[13]研究证实 BECCS 在能源工业领域具有负碳潜力,但指出 LCA 方法需统一规范,并应加强经济社会效益的综合评估.

尽管实现温控目标的减排路径对 BECCS 的依赖程度不断提高,且 BECCS 的技术可行性已得到验证,但BECCS的大规模部署仍存在诸多挑战,面临碳移除效率和成本、资源和能源消耗、负排放环境影响等多方面因素的不确定性[14].此外,相较于其它负排放技术,BECCS技术具有技术链条长,技术方案多样的特点,涉及不同的生物质类型、生物质转换利用方式以及碳捕集技术类型,增加系统评估的复杂性.目前,BECCS系统的碳移除核算尚未形成标准化框架,针对各类 BECCS 系统的碳移除潜力及负外部特性仍未形成共性结论.基于此,本研究基于全生命周期理论框架,在理清 BECCS 技术体系的基础上,系统梳理和分析 BECCS 技术链条生命周期碳移除核算的基本单元及关键影响因素,并展望该领域未来的发展方向.

1　BECCS 技术体系

1.1　BECCS 总体技术链条

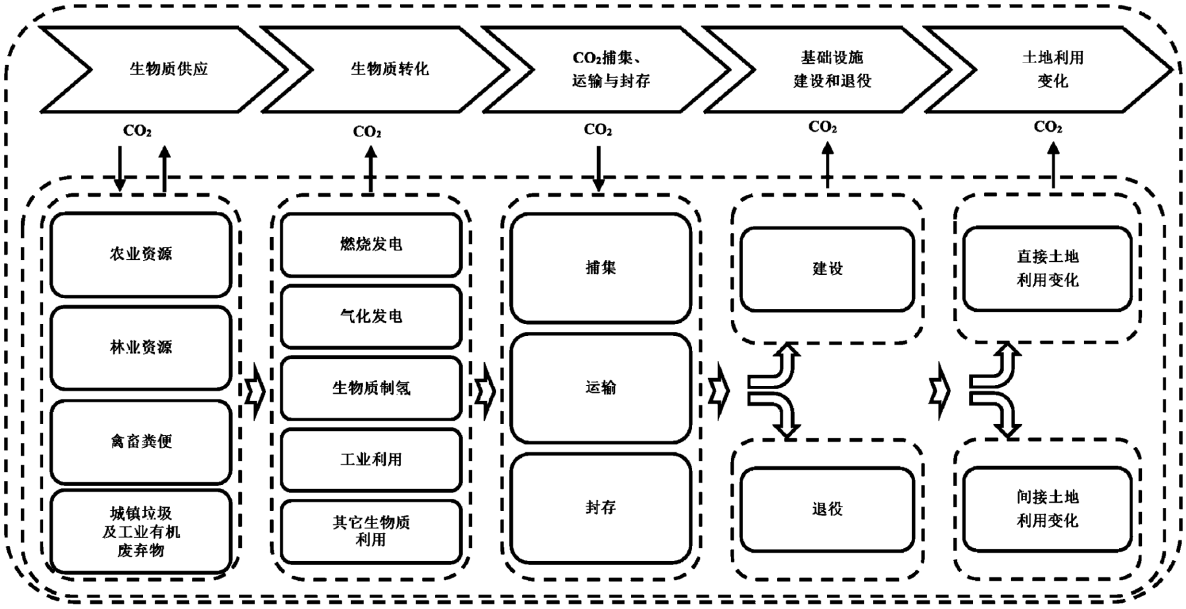


图 1　BECCS 总体技术链条

Fig.1　BECCS overall technology chain

一个完整的 BECCS 技术链条应包含生物质原料供应,生物质的转化,CO_2 的捕集、运输和利用转化以及生物质产品的利用[11].如图 1 所示,生物质供应环节包含生物质的生产、收集、运输和储存环节,由于生物质类型多样,生物质能供应链可能涉及多种过程.可与碳捕集集成的生物质转化技术主要包

括,直接燃烧、气化、热解、液化和化学转化等.然而,不同生物质转化途径在能源转换效率、生物产品类型以及可匹配的碳捕集方法上都具有显著差异,进一步增加了 BECCS 碳移除核算情景的复杂性.

1.2 基于生物质转化的 BECCS 技术分类

在 BECCS 技术链条中,生物质的转化利用方式决定了 BECCS 系统的整体能源转换利用效率、系统产品种类(如电和热,氢气,生物燃料以及生物炭等)以及所使用的碳捕集工艺(如燃烧前、燃烧后、富氧燃烧、化学链等),进而最终影响 BECCS 全链条的碳移除潜力.从既有文献来看,针对 BECCS 生命周期碳移除及环境影响的分析集中于生物质直接燃烧发电、生物质气化发电、生物质制氢领域,部分研究涉及生物质热解、发酵、填埋气发电和供热以及生物质在钢铁和水泥等工业领域的应用.本章节对 BECCS 中涉及的典型生物质转化技术进行系统梳理.

生物质直燃发电是将生物质燃料进行简单预处理后再在锅炉内直接燃烧发电的技术,是生物质利用最直接、最常用的方式,技术成熟度(TRL)较高,约为 8~9[2],已进入商业化阶段.完整的流程如图 2 所示,生物质经过预处理燃烧之后驱动汽轮机发电,再对烟气进行冷却和净化,最后实现碳捕集.生物质直接发电电厂多与目前较成熟的化学吸收法燃烧后碳捕集工艺耦合实现脱碳,也有部分研究探索了富氧燃烧、化学链以及膜分类等分离技术与生物质电厂的耦合情景[15].此外,可将生物质与煤炭进行直接或者间接掺混后进行燃烧发电,根据生物质种类及与煤炭耦合方式的不同,生物质的掺混比例由 5%~50%以上不等[16],称为生物质耦合发电技术.

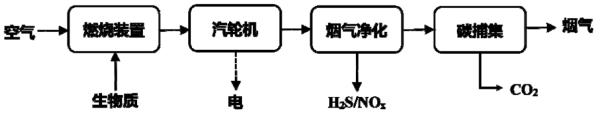


图 2 基于生物质直接燃烧发电的 BECCS 技术流程

Fig.2 The BECCS technology process based on direct biomass combustion for power generation

目前,基于生物质气化发电的 BECCS 技术以生物质整体气化联合发电(BIGCC)系统为主.BIGCC 是指生物质在高温作用下,热解气化为 CO、CH_4 和 H_2 等可燃性气体后燃气轮机做功的发电技术[17].与传统直燃发电系统相比,生物质气化发电技术具有发电设备紧凑、污染少的优点,但整体 TRL 约为 6~7[2],仍处于技术开发极端.如图 3 所示,生物质气化发电在气化合成气阶段采用燃烧前碳捕集工艺,煤经过高压气化过程产生合成气,经余热锅炉回收高温显热后送入水煤气变换单元,变换后的合成气可运用 Selexol 物理吸收法、变压吸附等方法实现 CO_2 与 H_2 的分离;也可采用化学吸收法的燃烧后碳捕集工艺,在燃烧排放的烟气中应用 MEA 溶液或物理吸附法将 CO_2 分离[18].

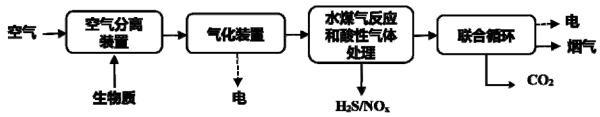


图 3 基于生物质气化发电的 BECCS 技术流程

Fig.3 The BECCS technology process based on biomass gasification for power generation

生物质制氢有气化和重整两种主要方法[11,19].气化制氢是一种将碳氢化合物(如煤、生物质等)在高温和有限氧环境中转化为富含氢气的合成气的过程[20].重整制氢是一种将生物质通过热解在催化剂的作用下进行化学反应,生成 H_2 和 CO 或 CO_2 的过程[21].目前气化和重整已经得到广泛的部署和应用,整体 TRL 已经达到 9[22].基于生物质制氢的 BECCS 技术流程图如图 4 所示,目前有较多学者研究利用生物质制氢并结合 CCS 碳捕集技术的可行性,Salkuyeh 等研究了流化床蒸汽气化和夹带流气化两种系统,在富氧燃烧后采用了胺基吸收技术[23].除传统气化和重整制氢技术外,利用光解、发酵等方式的生物法制氢技术也受到关注[24].Antonini 等[25]探索了生物甲烷采用蒸汽甲烷重整和自热重整之一转化为合成气,后经过水煤气反应使用真空变压吸附进行燃烧前捕集.

除了上述 3 种场景外,生物质还可以引入工业应用,如钢铁、水泥或化学材料生产[11].对于炼钢工艺,特别是在炼钢过程中,生物质既可用作原材料替代品,也可用作燃料替代品.如图 5 所示,Yang 等[26]利用生物质代替传统的化石燃料在钢铁制造中作为还原剂,在还原过程中生成的 CO_2 通过燃烧后化学吸收技术从废气中提取;Schakel 等[27]将燃料、石灰石和其他化学品混合以制备水泥原料,原料进入窑炉后产生烟气,而后耦合钙循环系统,捕集烟气中

的 CO_2,而后生成的 Ca 进行循环利用.在钢铁、化工和水泥等高能耗行业中,利用生物质可以减少传统燃料的使用,单 BECCS 技术在工业应用中的 TRL 因具体应用领域和技术路径而异.

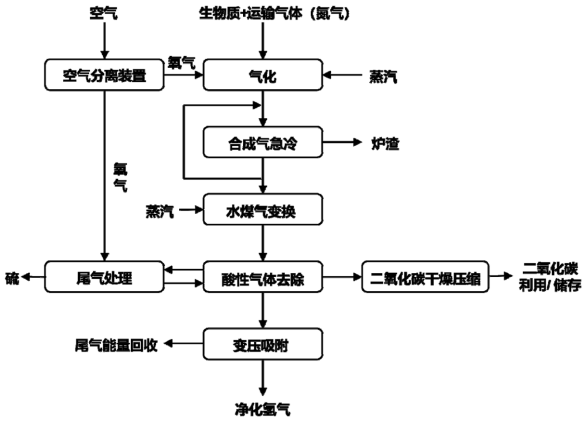


图 4　基于生物质制氢的 BECCS 技术流程

Fig.4　The BECCS technology process based on hydrogen production from biomass

其他生物质利用如填埋气和燃烧、厌氧消化、水热处理等,其中,填埋气和燃烧[28]、厌氧消化[29]技术较为成熟,已达到商业化水平,TRL 为 9.水热处理[30]现在仍在小规模示范中,TRL 为 7.根据文献调研,Pour 等[31]的研究表明,结合燃烧技术可通过乙醇胺(MEA)燃烧后碳捕集装置有效捕集 CO_2;Melara 等[32]则通过厌氧消化技术研究了有机废弃物的处理,利用微生物在密闭反应器中分解废弃物,生成沼气和消化液,同时通过 MEA 溶液捕集产生的 CO_2;Cheng 等[33-34]探索了水热处理与基于化学吸收(胺基溶剂)的燃烧后碳捕集系统的耦合,利用高温高压水热反应将有机废弃物转化为能源或生物炭,随后对生成的 CO_2 进行捕集和封存.

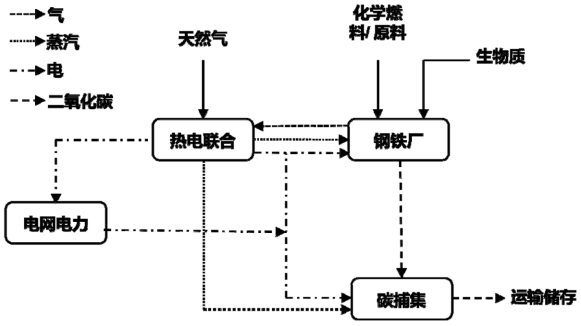


图 5　基于生物质工业应用的 BECCS 技术流程

Fig.5　The BECCS technology process based on biomass industrial applications

2　基于生命周期评价的 BECCS 负排放潜力评价框架

2.1　LCA 基本框架及方法概述

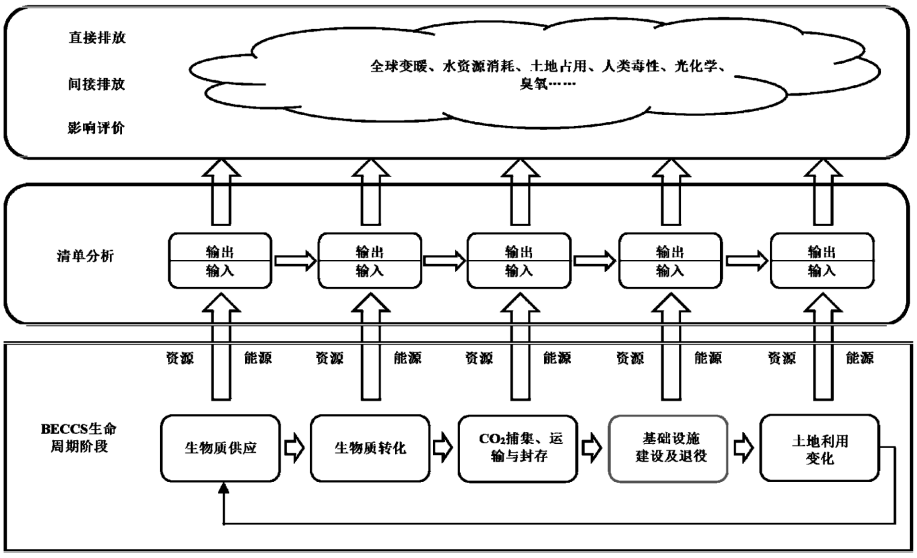


图 6　LCA 的基本框架

Fig.6　Basic framework of LCA

LCA 是一种标准化、可量化的综合环境影响评价工具,已成为识别产品、技术流程或服务综合环境影响和改进方向的重要决策工具[35].作为一种系统性的评价工具,LCA 的特点在于能够全面量化和评

估研究对象从“摇篮到坟墓”,即在整个生命周期过程所造成的各类环境影响,进而为 BECCS 的可持续发展提供依据.根据 ISO14040 的定义,LCA 的实施由 4 个基本步骤组成,包括目标与范围定义、清单分析、影响评价和结果解释.如图 6 所示,基于生命周期的思想,可将 BECCS 系统的生命周期划分为生物质供应,生物质能转化,CO_2 捕集、运输与封存,基础设施建设及退役以及土地利用变化等五个关键过程.其中,生物质供应包括生物质的种植培养、收集、运输、储存和预处理等环节;生物能转化利用主要指生物质通过燃烧、气化、热解等过程转化为相应的能源或产品;CCS 主要指对生物质转化利用过程中释放出的 CO_2 进行捕集、压缩、运输并封存的过程;基础设施建设及退役主要包括厂房、生产设备和 CO_2 运输管道等基础设施的建设及退役,以及相应的废弃物处理过程;而土地利用变化则是指由于生物质利用引起的土地利用变化,包括直接土地利用变化(DLUC)和间接土地利用变化(ILUC).

2.2 BECCS 生命周期关键过程

区别于传统 CCS 技术,BECCS 通过将碳捕集与生物质利用两项碳减排技术耦合,实现从大气中移除已经存在的 CO_2,而非减少 CO_2 的排放,具有负排放效应.因此,BECCS 生命周期关键过程涉及多个阶段和复杂的工艺链条,且过程之间相互依赖.特别的,需要关注到生物质供应、生物质转化阶段的碳排放和土地利用变化,而其它 CCS 技术基本是以 CO_2 捕集为核心,其关键过程主要集中在捕集技术效率和运输封存的环境影响.

BECCS 系统的生物质能源依据其来源,主要有农业资源,包括能源作物、农作物秸秆和农业加工业废弃物;林业资源主要包括森林在生长和生产过程中提供的生物质能,如树叶和木屑、锯末、果壳等;城市固废,如居民生活垃圾、建筑垃圾等[36].生物质来源的差异导致各类生物质在供应阶段造成的环境影响也具有较大差异.以能源作物玉米为例,其供应过程包括土地准备、种植、除草、施肥、收割、粉碎、干燥、造粒、包装等过程,涉及的主要投入包括种子、肥料、除草剂、杀虫剂以及各类机械运输设备消耗的柴油和电力,主要排放为柴油燃烧的污染物以及农业活动中使用的氮基肥料和除草剂等有机化合物的释放[37].而木屑、锯末、果壳以及城市垃圾等固废生物质能,则多数情况下无需考虑生物质的生产过程.

生物质能转化利用是 BECCS 生命周期碳排放的主要来源,在这一阶段,生物质资源通过燃烧、气化、热解等技术被转化为电能、热能、氢以及生物炭等生物质产品,而生物质中未被固定的碳元素则以 CO_2 的形式排放[38].不同类型的生物质利用方式其能量转化效率具有较大差异,这一因素也是影响 BECCS 系统单位产品温室气体减排量的关键.既有针对 BECCS 系统的 LCA 研究中[11],耦合燃烧后碳捕集技术的生物质直燃发电耦合的效率区间约为 27%~31%;耦合燃烧前碳捕集的 BIGCC 电厂的效率区间为 30%~35%;耦合碳捕集的生物质气化制氢技术的效率区间则为 56%~77%.然而,Fajardy 等[39]则指出了针对于 BECCS 系统的能量转化效率的悖论,即 BECCS 系统的能量转化效率越低往往意味着更多的碳移除量.这主要是由于效率越低,生产单位功能单位(FU)的产品就需要消耗更多的生物质,进而被捕集的生物质源 CO_2 就更多.

生物质转化利用过程在集成碳捕集装置后,被直接排放的生物源 CO_2 可被不同程度的捕获,并通过运输封存实现与大气的长期隔离,达到碳移除的目的.碳捕集(CCS)阶段产生的环境影响,主要来自于 CO_2 捕集过程消耗的再生热能以及吸收剂/吸附剂的消耗、CO_2 运输和封存过程的功耗以及 CO_2 在运输和封存阶段的泄露.碳捕集过程是 CCS 链条中能耗最大,技术类型最复杂的环节,因此 CO_2 捕集环节所采用的技术工艺类型、CO_2 捕集效率、CO_2 捕集能耗等因素都会直接影响 BECCS 系统的碳移除效率.以基于 MEA 的化学吸收法碳捕集技术为例,在 90%捕集率下,其碳捕集能耗约为 3.4GJ/t CO_2,压缩能耗约为 80~120kWhe/t CO_2[40],会给电厂造成 10%~12%的能效损失[41].

基础设施建设及退役阶段,即 BECCS 生命周期的上下游阶段,主要包括生物质在供应和转化利用各阶段所使用的设备和厂房、CO_2 捕集设备、CO_2 运输管道等基础设施的建设及退役[11,18].该阶段造成的环境影响,主要来自于建设阶段所需混凝土、金属、电力等能源和材料的消耗,以及退役阶段的能源消耗和垃圾处理.退役阶段金属等材料的循环利用,往往能够显著降低该阶段的环境影响.此外,CCS 的

集群化可将不同排放源的 CO_2 埋存到同一地点,实现 CO_2 运输管道、封存场地和基础设施的共享,有效降低基础设施建设阶段的环境影响和资源消耗.

生物质能的利用往往伴随着土地利用的改变,Fajardy 等[39]指出在 BECSS 碳移除核算中,由于土地利用变化造成的温室气体排放不可忽略,例如,草地类型的土地利用变化造成的边际碳排放可低至 6kg/hm^2,而泥潭森林的影响可高达 3052000kg/hm^2[42].土地利用变化分为 DLUC 和 ILUC,其中 DLUC 通常指土地利用在改变前后的直接碳储量变化,而 ILUC 则是由于生物质的种植而造成的其他区域土地利用方式改变,进而造成的碳储量变化[43].在核算土地利用变化造成的碳排放核算时,首先要明确计算碳排放的土地利用类型(如草地、森林、农业用地等),获取土地利用变化的历史数据并收集相关生物质的碳含量数据,进而核算其影响.

3　BECCS 生命周期负排放潜力与环境影响

3.1　BECCS 生命周期负排放潜力分析

图 7 归纳了基于不同生物质转化类型的 BECCS 系统的负排放潜力,其中生物质直燃发电和气化发电系统的 FU 为单位 kWh 发电量,生物质制氢系统的 FU 为单位质量(kg)的氢气.如图 7(a)所示,既有研究中多数基于生物质直燃发电的 BECCS 系统,包括凝气式电厂、供热式电厂以及采用富氧燃烧和超临界 CO_2 发电技术的系统,均能够实现负碳排放,负排放区间为−2180~−479g/kWh,均值约为−1200g/kWh.仅有两个案例碳排放为正值,其中一例采用污泥等城市废弃物为生物质原料,这类生物质含水量较高[33],生物质预处理阶段消耗了大量能量;另一案例则未采用传统封存技术对 CO_2 进行隔离,而是将捕获的 CO_2 用于藻类养殖,导致 CO_2 的储存效率较低[44].如图 7(b)既有 LCA 研究中基于生物质气化发电的 BECCS 系统也表现出较强的负排放潜力,负排放区间为−1200~600g/kWh,仅有一个案例的全球变暖潜能值(GWP)为正值[33],该案例同样使用了固废垃圾作为生物质原料,故在预处理阶段可能消耗了大量的能量.如图 7(c)所示,既有研究多采用传统生物质气化制氢工艺,表现出较为显著负排放潜力,当采用生物质流化床或气化床气化技术时,系统的负排放区间为−200~−10g/kWh;Antonini 等[45]和 Sarkar 等[46]分别探索了利用生物甲烷的厌氧消化和生物产酸发酵生物法制氢的负排放潜力,负排放潜力分别为 −86g/MJ 和 −1.203kg/kg. 此外,Schakel 等[27]、Zhang 等[47]等人探索了生物质在水泥以及制冷剂等工业领域的负排放潜力,关于生物质炼钢的研究较多,如图 7(d)所示,Tanzer 等[48]及 Tanzer 等[49]评估了在高炉炼铁过程中,产生的排放范围为−0.5~0.1t/t;Yang 等[26]探索在高炉和铁电弧炉炼铁过程中,排放区间为−0.63~0.1t/t.然而,对于生物质其它利用方面研究的相对较少,不同类型的生物质转化技术的负排放潜值差别很大.

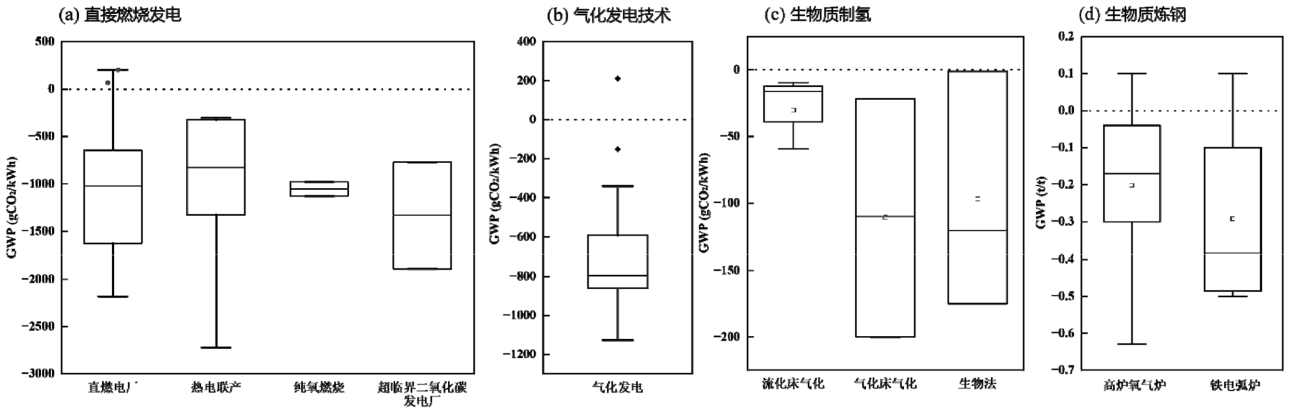


图 7　BECCS 技术的 GWP

Fig.7　GWP for BECCS technologies

3.2　BECCS 生命周期关键过程碳排放

如表 1 所示,由于不同研究者对阶段的划分标准及技术参数缺乏一致性,不同研究中各个生命周期阶段的占比差异显著.在生物质直接燃烧发电中,由于

需要大量生物质以产生足够电力且热效率较低,生物质供应阶段占比较高,转化阶段的碳排放也较高.生物质气化的转化阶段占比较高,但因其能量效率较高(约 35%~45%),碳排放较低.同时,由于气化过程中 CO 浓度较高,捕集、运输和封存环节的能耗和环境负担增加.相比之下,生物质制氢因转化效率较高,生物质供应阶段的碳排放较少,但高能耗的转化阶段导致碳排放增加.总体上,生物质供应、生物质转化以及 CO_2 捕集与封存过程均对生命周期的温室气体排放有显著贡献,基础设施建设及退役阶段的贡献较少.

表 1 BECCS 生命周期各阶段碳排放数据

Table 1 BECCS life cycle stages carbon emissions data

原料	转化类型	碳捕集技术	生物质供应	生物质转化	CO_2 捕集、运输和封存	基础设施建设及退役	捕集率(%)	单位	来源
云杉木片	生物质气化	燃烧前	23.8	2.8	21.4	-	49	g/kWh	[50]
	生物质气化	燃烧后	26.4	3	31.6	-		g/kWh	
柳树	生物质直接燃烧发电	燃烧后	5107.3	5739.9	2586.9	684.4	60	MT CO_2-eq/a	[51]
木材	生物质直接燃烧发电	燃烧后	11	1127.5	31.8	-	-	kg/MWh	[52]
木材	生物质直接燃烧发电	燃烧后	75	32.3	26.1	13.4	90	g/kWh	[53]
秸秆	生物质制氢	燃烧前	305	3840	2120	-	80	kg eq CO_2/h	[54]

3.3 BECCS 环境影响分析

除负排放潜力外,BECCS 技术在生命周期各阶段造成的各类负外部影响也是决定其可行性的关键因素,生物质供应的可持续性、土地利用变化、能源效率、水资源消耗等方面备受关注.既有研究对各类 BECCS 系统的环境影响进行了初步探索,但总体上尚未形成有规律性的共识.

尽管针对于生物质直燃发电的 BECCS 的研究较多,但多数 LCA 多关注 BECCS 系统在水资源消耗、能源需求和土地利用方面的影响.近年来,一些研究将环境影响范围进行了扩展,Yang 等[50]评估了包括 GWP 在内的 10 类环境影响类别,指出相比如燃煤电厂,生物质电厂在非生物耗竭潜力值(ADP)和酸化潜力值(AP)方面表现更佳,然而在富营养化潜力值(EP)、人体毒性潜力值(HTP)、水生生态毒性潜力值(FAETP)、海洋水生生态毒性潜力值(MAETP)、陆地生态毒性潜力值(TETP)、光化学臭氧产生潜力值(POCP)和臭氧消耗潜力值(ODP)等方面的影响均高于燃煤电厂;Wu 等[51]指出水耗(WU)的问题,采用 CCS 的生物质燃烧电厂蓝水(地表水和地下水,如河流、湖泊、蓄水池和地下含水层中的水)耗水量是采用 CCS 的燃煤电厂的 56~58 倍.

针对生物质气化发电的环境影响研究,目前主要聚焦在 GWP,AP 和土地竞争(LC)等方面.Schakel 等[52]评估了包括 GWP,AP 等 18 个环境影响类别,并且表明所有的其他环境类别影响增加了 20% ~ 200%;Zang 等[18]从 GWP、HTP 和 ODP 等方面评估了 BIGCC-CCS 系统对环境的影响,结果显示除 GWP 外,生物质整体气化联合循环-碳捕集与封存系统(BIGCC-CCS)系统的排放量高于没有 CCS 的生物质整体气化联合循环系统,但 BIGCC-CCS 的 AP、GWP、HTP 和 ODP 低于欧盟 27 国混合电网.

在生物质制氢方面,Susmozas 等[53]的研究得出生物质气化制氢在累计不可再生能源需求、ODP 方面优于传统的制氢,还评估 POCP、AP 和 EP 的环境影响;根据 Wu 等[54]的气化制氢研究,EP、TETP 和人类健康(HH)的影响方面比电网产生的氢气具有优势,但在 ODP、雾霾(Smog)、AP 和化石燃料消耗(FD)方面可能会产生更大的影响;关于生物法制氢,Sarkar 等[46]发现与现有的制氢技术相比,通过产酸发酵和利用 CO_2 培养微藻产生的生物氢对呼吸性有机物和不可再生能源和矿物提取的影响较小,但是在其他一些类别,例如电离辐射和土地占用,会显示出不同程度的增加.

在工业应用方面,Schakel 等[27]在水泥生产调查了 6 种环境影响,发现使用 100%生物质的燃烧后钙循环水泥厂在水资源枯竭潜力(WDP)、化石燃料枯竭潜力(FFDP)、EP 和 HTP 方面上表现更好.Zhang

等[47]评估了使用生物质蒸汽和 CCS 生产 HFC-134a 制冷剂的GWP之外的4种环境影响,结果表明,与燃煤蒸汽系统相比,生物质蒸汽系统在这些影响类别中具有显著的环境效益.

在其它转换过程方面,Fozer 等[55]研究了水热气化联合 CCGT 的 10 多个环境影响类别;结果表明,由于呼吸性无机物的高排放,与 HH 相关的环境损害占总环境损害的41.0%.资源类占比31.2%,其次是气候变化类 19.5%和生态系统质量类 7.3%;Cheng 等[56]一些研究已经评估了 BECCS 技术的 GWP 和能源投资(EROI),例如通过缓慢热解封存生物炭,其 EROI 值在 1.9~3.6 之间,GWP 值在−470~−470kg CO_2eq/t.

4　BECCS 生命周期负排放潜力核算关键要素

4.1　系统边界

BECCS 技术链条包含了生物质供应和转换,CO_2 捕集、运输和封存以及主要过程对应的上下游和由于生物质种植而造成的土地利用等多个阶段,各阶段中又会包含了复杂的单元过程,导致既有研究在系统边界的划分上存在一定的差异性.借鉴生物质能温室气体排放核算方法标准[57],生物质供应和转换阶段由于基础设施建设和设备制造等过程造成的温室气体排放占比较小,可以不纳入核算边界.然而,在未形成CCS集群之前,CCS基础设施建设造成的间接碳排放以及在其生命周期内的CO_2泄露量是否需要被核算,仍需进一步讨论.此外,极少有研究将土地利用变化纳入生命周期核算边界,而这一因素可能会对 BECCS 的碳移除核算结果造成较大影响.

4.2　功能单位和分配方法

BECCS 系统往往涉及多种功能,因此涉及到功能单位的选取以及对多种产品/供能的环境影响分配.以使用固体垃圾废弃物发电的 BECCS 系统为例,该系统涉及的功能包括对垃圾的处理、发电以及实现的碳移除量.特别的,这三类功能在物理性质上具有较大差异,因此难以使用传统基于质量、能量的分配方法[57].既有研究往往站在能源系统的视角,以发电量作为主要功能,分摊全部的环境影响或效益.然而,如若站在废弃物利用或者碳移除的视角,如对比研究不同垃圾处理方法或对比研究不用碳移除技术的环境影响,上述处理方法将难以满足系统分析和对比研究需要.因此,在实际应用中,因根据研究目标和背景,选取合适的功能单位,亦可选取多个功能单位和应用多种分配方法进行核算,降低由于分配方法不同造成的分析结果的不确定性.

4.3　土地利用变化

BECCS 的负排放潜力与土地利用变化带来的碳排放密切相关,特别是当大量的土地被转用与能源作物种植时,直接土地利用变化与间接土地利用变化(如森林砍伐、土地碳储量的变化)可能抵消 BECCS 带来的碳移除效应[58].一般地,BECCS 的负排放核算需要综合考虑土地利用变化产生的正排放,以及生物质生长过程在吸收的CO_2和CCS带来的净负排放[59],确保 BECCS 在实现负排放目标中的可行性,同时也是生物质种植和土地管理的基础.虽然BECCS在理论上可以提供大规模的负排放潜力,但实际操作过程中存在许多挑战,合理的土地管理和适当的土地转化是减少土地利用变化量的前提[60].

4.4　生物质排放因子

生物质源碳的全球变暖潜值(GWP_{bio})是决定 BECCS 系统负排放潜力的关键要素之一.既有研究和 LCA 模拟软件中多默认生物质源碳排放的 GWP_{bio} 为零,并未考虑生物质生长固碳所需时间与生物质转化过程排碳时间之间的差异性,而基于生物质碳中心的假设往往会高估 BECCS 系统的负排放潜力.基于此,研究人员根据生物作物的轮换周期,开发了针对生物质的 GWP_{bio}.例如,Francesco Cherubini 等[61]提出了一种估算生物质燃烧 CO_2 排放对气候影响的方法,其结果如图 8 所示,显示了三种最常见的时间范围(20a、100a 和 500a),一年生作物和短轮伐期物种的轮伐期通常很短(1~5a),此时 GWP_{bio} 值较低,因为这种生物质燃烧释放的 CO_2 在大气中的平均寿命很短,对全球变暖的贡献有限,当轮伐期变长,受到气候影响 GWP_{bio} 随之增加;但生物质燃烧产生的 CO_2 是立即释放到大气中的,而植物重新吸收 CO_2 需要一定时间,在这期间,这部分 CO_2 仍会对气候产生影响,所以要改进碳核算的方法,更加准确地评估生物质碳捕集的生命周期影响.

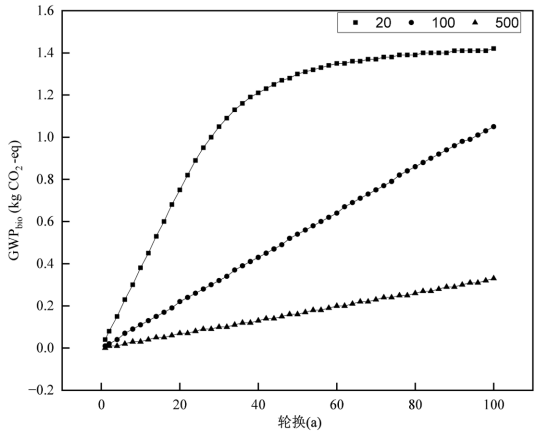


图 8 三个不同的时间范围计算的 GWP_{bio} 指数[61]

Fig.8 GWP_{Bio} indices calculated for three different time frames

5 挑战与展望

5.1 针对新型 BECCS 技术的负排放潜力评价

目前,针对 BECCS 的生命周期评价研究局限于技术成熟度较高的生物质直燃发电、气化发电以及制氢技术.近年来,生物质热解、液化以及在工业领域的应用也得到了迅速发展.在技术发展前期对其进行生命周期评价,有利于识别新兴技术的环境负外部性,进而从环境维度为该类技术的发展提供方向和优化路径.然而,在技术发展早期进行生命周期评价时,由于缺乏规模化放大数据,往往只能依据实验室级别的实验结果或仿真模拟数据进行分析,可能会给研究结果带来较大误差.因此,对于新型的 BECCS 技术,如何基于有限的实验数据,结合仿真模拟平台以及机器学习等方法和工具,填补数据的空缺并做出合理的数据处理和假设仍有待研究.

5.2 针对 BECCS 技术的多维度资源环境影响评估

BECCS 技术在其生命周期过程中涉及到较长的产业链条,因此不可避免的会造成其碳移除成本在不同的生命周期阶段以及不同的环境影响类别中发生转移,单一的碳移除效率评价指标已难以满足对技术可行性的评估要求.虽然部分研究针对各类 BECCS 技术的环境影响进行了初步分析,但回顾不同研究者的研究结果,即使对于技术成熟度较高的生物质直燃发电碳捕集技术,也尚未形成一致性的结论,即 BECCS 技术实现负排放的环境成本仍不清晰,难以指导 BECCS 的大规模部署.现阶段,亟需将多维度环境影响纳入评价 BECCS 技术可行性的指标体系,建立各类 BECCS 技术的环境风险清单,并在不同尺度下开展分析.

5.3 BECCS 生命周期评价的标准化框架

BECCS 涉及的产业链较长,且不同项目在生物质种类、生物质转换利用方式以及碳捕集方法上都可能存在较大差异,因此对其进行 LCA 分析时往往存在较多的参数选择和条件假设.不同的研究者在对 BECCS 系统进行分析时,由于其研究目标、研究领域的不同,在功能单位的选取、系统边界的确定以及清单数据完整性方面都存在一定的差异,导致研究结果缺乏一致性,不同研究之间难以横向比较,获得的结论缺乏科学性.因此,因此亟需引导研究者在相对标准化的框架下对各类 BECCS 展开负排放潜力的分析,并开展充分的不确定性和敏感性分析,以获得具有普适性的研究结果而不仅仅局限于案例分析.

6 结论

6.1 既有针对 BECCS 的负排放潜力评估主要针对生物质直燃发电、生物质气化发电以及生物质制氢等技术成熟度较高的 BECCS 技术,研究结果显示以上 3 类 BECCS 技术均能实现负排放,但由于缺乏一致性的系统参数及假设条件,其负排放潜力具有较大的分布区间.

6.2 总体上,针对 BECCS 的负排放潜力评价研究仍处于起步阶段,仍缺乏针对其它新兴生物质转换耦合碳捕集技术的评价以及对各类 BECCS 技术综合环境影响的评估,亟需建立针对 BECCS 负排放潜力评价的标准化研究框架,明确系统边界选择、功能单位及分配方法选择、土地利用变化以及生物质排放因子等关键要素的选择和确定方法,以获得针对 BECCS 技术的一致性评价结论,支撑 BECCS 在实现碳中和路径中的宏观规划.

参考文献:

[1] Priya A K, Muruganandam M, Rajamanickam S, et al. Impact of climate change and anthropogenic activities on aquatic ecosystem – A review [J]. Environmental Research, 2023,238.Doi:10.1016/j.envres.2023.117233.

[2] 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 J L, Li J, Yan S P, et al. Analysis of the application potential of biomass energy – carbon capture and storage technology in China [J].

Thermal Power Generation, 2021,50(1):7−17.

[3] Silveira B H M, Costa H K M, Santos E M. Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) in Brazil: A review [J]. Energies, 2023, 16(4):2021.Doi:10.3390/en16042021.

[4] Institute G C. The global status of ccs: 2023 [J]. 2023.

[5] McDonald S. Illinois industrial carbon capture & storage project: Eliminating CO_2 emissions from the production of bio fuels − A 'green' carbon process [R]. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy, 2017.

[6] Southwest regional partnership − Arkalon plant details [R]. Edinburgh, UK: The University of Edinburgh, 2016.

[7] Bonanza bioenergy plant details [R]. Edinburgh, UK: The University of Edinburgh, 2017.

[8] Red trail energy CCS [R]. Grand Forks, ND: University of North Dakota, 2022.

[9] Kitamura H, Iwasa K, Fujita K, et al. CO_2 capture project integrated with mikawa biomass power plant; proceedings of the proceedings of the 16th greenhouse gas control technologies conference (GHGT−16), Lyon, France, F, 2022 [C].

[10] 中国石油化工集团公司,国家能源局.中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023) [R]. 北京,中国:中国石油化工集团公司, 2023.
China Petrochemical Corporation, National Energy Administration. China carbon dioxide capture, utilization and storage (CCUS) annual report (2023) [R]. Beijing, China: China Petrochemical Corporation, 2023.

[11] Wang J Y, Zheng Y W, He S, et al. Can bioenergy with carbon capture and storage deliver negative emissions? A critical review of life cycle assessment [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,434.Doi:10.1016/j.jclepro.2023.139839.

[12] Duval−Dachary S, Beauchet S, Lorne D, et al. Life cycle assessment of bioenergy with carbon capture and storage systems: Critical review of life cycle inventories [J]. Renew Sust Energ Rev, 2023,183.Doi:10.1016/j.rser.2023.113415.

[13] Salas D A, Boero A J, Ramirez A D. Life cycle assessment of bioenergy with carbon capture and storage: A review [J]. Renew Sust. Energ. Rev., 2024,199.Doi:10.1016/j.rser.2024.114458.

[14] Jeswani H K, Saharudin D M, Azapagic A. Environmental sustainability of negative emissions technologies: A review [J]. Sustainable Production And Consumption, 2022,33:608−635.

[15] Li R. Study of China's biomass power generation technology [C]. Proceedings of The IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019,300(4):042045.

[16] 王光磊,孙立刚,赵传进,等.燃煤机组直燃耦合与气化耦合发电研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2025,31(1):14−41.
Wang G L, Sun L G, Zhao C J, etc. Research progress on direct combustion coupling and gasification coupling power generation of coal−fired units [J]. Clean Coal Technology, 2025,31(1):14−41.

[17] 李学琴,刘　鹏,吴幼青,等.生物质气化技术的发展现状及展望 [J]. 林产化学与工业, 2022,42(5):113−121.
Li X Q, Liu P, Wu Y Q, etc. Development status and prospect of biomass gasification technology [J]. Forestry Chemistry and Industry, 2022,42(5):113−121.

[18] Zang G Y, Zhang J N, Jia J X, et al. Life cycle assessment of power−generation systems based on biomass integrated gasification combined cycles [J]. Renewable Energy, 2020,149:336−346.

[19] Lepage T, Kammoun M, Schmetz Q, et al. Biomass−to−hydrogen: A review of main routes production, processes evaluation and techno−economical assessment [J]. Biomass & Bioenergy, 2021,144.Doi:10.1016/j.biombioe.2020.105920.

[20] Cao L C, Yu I K M, Xiong X N, et al. Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects [J]. Environmental Research, 2020,186.Doi:10.1016/j.envres.2020.109547.

[21] Zoppi G, Pipitone G, Pirone R, et al. Aqueous phase reforming process for the valorization of wastewater streams: Application to different industrial scenarios [J]. Catalysis Today, 2022,387:224−236.

[22] Lanjekar P R, Panwar N L. A review on hydrogen production from biomass and commercialization assessment through technology readiness levels (TRLs) [J]. Bioenergy Research, 2024,17(2):912−931.

[23] Salkuyeh Y K, Saville B A, MacLean H L. Techno−economic analysis and life cycle assessment of hydrogen production from different biomass gasification processes [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018,43(20):9514−9528.

[24] Akhlaghi N, Najafpour−Darzi G. A comprehensive review on biological hydrogen production [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020,45(43):22492−22512.

[25] Antonini C, Treyer K, Streb A, et al. Hydrogen production from natural gas and biomethane with carbon capture and storage − A techno−environmental analysis (vol 4, pg 2967, 2020) [J]. Sustainable Energy & Fuels, 2020,4(6):2947−2986.

[26] Yang F, Meerman H, Faaij A. Harmonized comparison of virgin steel production using biomass with carbon capture and storage for negative emissions [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2021,112.Doi:10.1016/j.ijggc.2021.103519.

[27] Schakel W, Hung C R, Tokheim L A, et al. Impact of fuel selection on the environmental performance of post−combustion calcium looping applied to a cement plant [J]. Applied Energy, 2018,210:75−87.

[28] Nanda S, Berruti F. Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review [J]. Environmental Chemistry Letters, 2021, 19(2):1433−1456.

[29] Meegoda J N, Li B, Patel K, et al. A review of the processes, parameters, and optimization of anaerobic digestion [J]. International Journal Of Environmental Research And Public Health, 2018,15(10): 2224.Doi:10.3390/ijerph15102224.

[30] Leng L J, Zhang W J, Leng S Q, et al. Bioenergy recovery from wastewater produced by hydrothermal processing biomass: Progress, challenges, and opportunities [J]. Science of The Total Environment, 2020,748.Doi:10.1016/j.scitotenv.2020.142383.

[31] Pour N, Webley P A, Cook P J. Potential for using municipal solid waste as a resource for bioenergy with carbon capture and storage (BECCS) [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2018, 68:1−15.

[32] Melara A J, Singh U, Colosi L M. Is aquatic bioenergy with carbon capture and storage a sustainable negative emission technology? Insights from a spatially explicit environmental life−cycle assessment [J]. Energy Conversion And Management, 2020,224.Doi:10.1016/j.enconman.2020.113300.

[33] Cheng F, Small A A, Colosi L M. The levelized cost of negative CO_2 emissions from thermochemical conversion of biomass coupled with carbon capture and storage [J]. Energy Conversion And Management, 2021,237. Doi:10.1016/j.enconman.2021.114115.

[34] Cheng F W, Porter M D, Colosi L M. Is hydrothermal treatment coupled with carbon capture and storage an energy-producing negative emissions technology? [J]. Energy Conversion And Management, 2020,203.Doi:10.1016/j.enconman.2019.112252.

[35] 史 帆,李晶莹,张穗穗,等.生命周期评价在焦化领域中的应用及研究进展 [J]. 延安大学学报(自然科学版), 2023,42(2):1-7,15.
Shi F, Li J Y, Zhang S S, etc. Application and research progress of life cycle evaluation in the field of coking [J]. Journal of Yan'an University (Natural Science Edition), 2023,42(2):1-7,15.

[36] 贾意久,石雅丽.生物质能源利用研究进展 [J]. 科技导报, 2023, 41(16):55-75.
Jia Y J, Shi Y L. Research progress on biomass energy utilization [J]. Science and Technology Guide, 2023,41(16):55-75.

[37] Supasri T, Itsubo N, Gheewala S H, et al. Life cycle assessment of maize cultivation and biomass utilization in northern Thailand (vol 10, 3516, 2020) [J]. Scientific Reports, 2021,11(1):24393.

[38] 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 G P, Wang Y H. Application status and prospect of biomass transformation technology in China [J]. Anhui Agricultural Science, 2023,51(17):1-5,10.

[39] Fajardy M, Köberle A, Mac Dowell N, et al. BECCS deployment: a reality check [R]. London, UK: Grantham Institute, Imperial College London, 2019.

[40] Arfelli F, Tosi C, Ciacci L, et al. Life cycle assessment of a wood biomass gasification plant and implications for syngas and biochar utilization [J]. Energies, 2024,17(11):2599.Doi:10.3390/en17112599.

[41] 何俊南,王珺瑶,邓 帅,等.碳捕集能效分析研究进展:理论模型、评价工具和发展趋势 [J]. 化工进展, 2017,36(S1):406-415.
He J N, Wang J Y, Deng S, etc. Research progress in carbon capture energy efficiency analysis: Theoretical model, evaluation tools and development trends [J]. Chemical progress, 2017,36(S1):406-415.

[42] Fargione J, Hill J, Tilman D, et al. Land clearing and the biofuel carbon debt [J]. Science, 2008,319(5867):1235-1238.

[43] Tian H, Yang J, Xu R, et al. Global soil nitrous oxide emissions since the preindustrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere models: Magnitude, attribution, and uncertainty [J]. Global Change Biology, 2019,25(2):640-659.

[44] Pang M Y, Zhang L X, Liang S, et al. Trade-off between carbon reduction benefits and ecological costs of biomass-based power plants with carbon capture and storage (CCS) in China [J]. Journal of Cleaner Production, 2017,144:279-286.

[45] Antonini C, Treyer K, Streb A, et al. Hydrogen production from natural gas and biomethane with carbon capture and storage - A techno-environmental analysis [J]. Sustainable Energy & Fuels, 2020, 4(6):2967-2986.

[46] Sarkar O, Katakojwala R, Mohan S V. Low carbon hydrogen production from a waste-based biorefinery system and environmental sustainability assessment [J]. Green Chemistry, 2021,23(1):561-574.

[47] Zhang S S, Li J Y, Nie Y, et al. Life cycle assessment of HFC-134a production by calcium carbide acetylene route in China [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2022,42:236-244.

[48] Tanzer S E, Ramirez A. When are negative emissions negative emissions? [J]. Energy & Environmental Science, 2019,12(4):1210-1218.

[49] Tanzer S E, Blok K, Ramirez A. Can bioenergy with carbon capture and storage result in carbon negative steel? [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2020,100. Doi: 10.1016/j.ijggc.2020.103104.

[50] Yang B, Wei Y M, Hou Y B, et al. Life cycle environmental impact assessment of fuel mix-based biomass co-firing plants with CO_2 capture and storage [J]. Applied Energy, 2019,252.Doi:10.1016/j.apenergy.2019.113483.

[51] Wu Z, Zhai H. Consumptive life cycle water use of biomass-to-power plants with carbon capture and sequestration [J]. Applied Energy, 2021,303.Doi:10.1016/j.apenergy.2021.117702.

[52] Schakel W, Meerman H, Talaei A, et al. Comparative life cycle assessment of biomass co-firing plants with carbon capture and storage [J]. Applied Energy, 2014,131:441-467.

[53] Susmozas A, Iribarren D, Zapp P, et al. Life-cycle performance of hydrogen production via indirect biomass gasification with CO_2 capture [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016,41(42): 19484-19491.

[54] Wu N, Lan K, Yao Y. An integrated techno-economic and environmental assessment for carbon capture in hydrogen production by biomass gasification [J]. Resources Conservation And Recycling, 2023,188. Doi:10.1016/j.resconrec.2022.106693.

[55] Fozer D, Volanti M, Passarini F, et al. Bioenergy with carbon emissions capture and utilisation towards GHG neutrality: Power-to-Gas storage via hydrothermal gasification [J]. Applied Energy, 2020, 280.Doi:10.1016/j.apenergy.2020.115923.

[56] Cheng F, Luo H, Colosi L M. Slow pyrolysis as a platform for negative emissions technology: An integration of machine learning models, life cycle assessment, and economic analysis [J]. Energy Conversion And Management, 2020,223.Doi:10.1016/j.enconman.2020.113258.

[57] 付 萌,常世彦.适用于可持续认证的生物质能温室气体排放核算方法 [J]. 中国能源, 2020,38(11):51-59.
Fu M, Chang S Y. Biomass energy greenhouse gas emission accounting method for sustainable certification [J]. China Energy, 2020,38(11):51-59.

[58] Fajardy M, Mac Dowell N. Can BECCS deliver sustainable and resource efficient negative emissions? [J]. Energy & Environmental Science, 2017,10(6):1389-1426.

[59] Fajardy M, Chiquier S, Mac Dowell N. Investigating the BECCS resource nexus: delivering sustainable negative emissions [J]. Energy & Environmental Science, 2018,11(12):3408-3430.

[60] Gough C, Garcia-Freites S, Jones C, et al. Challenges to the use of BECCS as a keystone technology in pursuit of 1.5℃ [J]. Global Sustainability, 2018,1:e5. Doi: 10.1017/sus.2018.3.

[61] Cherubini F, Peters G P, Berntsen T, et al. CO_2 emissions from biomass combustion for bioenergy: atmospheric decay and contribution to global warming [J]. Global Change Biology Bioenergy, 2011,3(5):413-426.

作者简介：许楚婉(2000-),女,广东潮州人,广东工业大学硕士研究生,主要从事直接空气碳捕集的可持续性评估.2112302283@mail2.gdut.edu.cn.