

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2025032503

CSTR:32061.14.hjhx.2025032503

王艺, 张翔龙, 汪庭宇, 等. 推动绿色转型: 木质纤维素生物质增值的未来展望与挑战[J]. 环境化学, 2026, 45(1): 1-19.

WANG Yi, ZHANG Xianglong, WANG Tingyu, et al. Driving the green transition: Future prospects and challenges for adding value to lignocellulosic biomass[J]. Environmental Chemistry, 2026, 45 (1): 1-19.

推动绿色转型: 木质纤维素生物质增值的未来展望与挑战*

王 艺^{1,2,3} 张翔龙² 汪庭宇² 杨 晨² 郭晋君¹ 任 旭² 彭 鑫²
黄 进² 赵孝芹⁴** 郝吉明³** 马 强^{1,2,3}**

(1. 陕西省痕量污染物环境监测与预警重点实验室, 西安, 710000; 2. 成都大学四川省城市固体废弃物能源与建材转化利用技术工程研究中心, 四川, 610106; 3. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京, 100084; 4. 南充市高坪生态环境局, 南充, 637100)

摘 要 木质纤维素生物质的增值是实现可持续发展和循环经济的关键路径之一. 本综述总结了近年来木质纤维素生物质增值领域的主要技术进展和研究成果, 包括生物炼制优化、合成生物学、增材制造和电化学转化等创新技术. 通过分析其生命周期评估, 进一步探讨了该技术在温室气体减排、水资源利用、土壤健康、生物多样性保护和社会经济影响方面的可持续性表现. 此外, 文章提出了技术商业化的主要挑战, 如木质素高值化利用、工艺整合及规模放大, 并强调了多尺度建模和政策支持对推动技术发展的重要性. 展望未来, 随着人工智能、物联网和闭环设计理念的融合, 木质纤维素生物质增值技术有望在 2050 年实现广泛应用, 为全球能源格局转型、资源保护和气候变化应对做出显著贡献. 本综述为推动这一领域的发展提供了战略性视角, 提出了实现工业化和可持续性目标的关键方向.

关键词 木质纤维素生物质, 生物炼制, 分馏, 催化转化.

中图分类号 X-1; O6 文献标识码 A

Driving the green transition: Future prospects and challenges for adding value to lignocellulosic biomass

WANG Yi^{1,2,3} ZHANG Xianglong² WANG Tingyu² YANG Chen² GUO Jinjun¹
REN Xu² PENG Xin² HUANG Jin² ZHAO Xiaoqin⁴**
HAO Jiming³** MA Qiang^{1,2,3}**

(1. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Environmental Monitoring and Early Warning of Trace Pollutants, Xi'an, 710000, China; 2. Sichuan Provincial Engineering Research Center for Conversion and Utilization of Municipal Solid Waste Energy and Building Materials, Chengdu University, Sichuan, 610106, China; 3. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 4. Gaoping Ecological Environment Bureau, Nanchong City, Nanchong, 637100, China)

Abstract The value-added of lignocellulosic biomass is one of the key paths to achieve sustainable development and circular economy. This review summarizes the major technological advances and

2025 年 3 月 25 日收稿(Received: March 25, 2025).

* 陕西省环境介质痕量污染物监测预警重点实验室开放基金(SHJKFJJ202311), 成都大学师德师风建设示范项目和四川省城市固体废物能源与建材转化利用技术工程研究中心开放基金(GF2024ZC03)资助.

Supported by the Shaanxi Province Environmental Medium Trace Pollutants Monitoring and Early Warning Key Laboratory Open Fund (SHJKFJJ202311), the Chengdu University Teacher Ethics and Style Construction Demonstration Project, and the Sichuan Province Urban Solid Waste Energy and Building Materials Conversion and Utilization Technology Engineering Research Center Open Fund (GF2024ZC03).

** 通信联系人 **Corresponding author**, E-mail: 15802863045@163.com; hjm-tsu@foxmail.com; maqiang@cdu.edu.cn

research results in the field of value-added lignocellulosic biomass in recent years, including innovative technologies such as biorefinery optimization, synthetic biology, additive manufacturing, and electrochemical conversion. By analyzing its life cycle assessment, the sustainability performance of the technology in terms of greenhouse gas reduction, water use, soil health, biodiversity conservation and socio-economic impacts are further explored. In addition, key challenges to technology commercialization, such as high-value utilization of lignin, process integration, and scale-up, are outlined, and the importance of multi-scale modeling and policy support to drive technology development is highlighted. Looking ahead, with the integration of artificial intelligence, the Internet of Things and closed-loop design concepts, lignocellulosic biomass value-added technology is expected to be widely used by 2050, making significant contributions to the transformation of the global energy landscape, resource conservation and climate change response. This review provides a strategic perspective for driving development in this area and suggests key directions for achieving industrialization and sustainability goals.

Keywords lignocellulosic biomass, bio-refining, fractionation, catalytic conversion.

环境问题日益严重、化石资源日益枯竭的当下,木质纤维素生物质的增值已被视为实现可持续发展的一种极具前景的途径^[1]。木质纤维素生物质主要由纤维素、半纤维素和木质素组成,是地球上最丰富的可再生有机资源^[2]。这种广泛存在于农业残留物、林业废弃物和专用能源作物中的资源,作为生产能源、化学品和材料的原料,展现出巨大的潜力^[3]。过去几十年间,木质纤维素生物质增值的研究经历了深刻的变革,从一个小众研究领域发展为循环生物经济的核心主题^[4]。这一转变受到应对气候变化、能源安全及可持续资源管理等全球性挑战的迫切需求所推动。增值过程旨在将低价值生物质转化为高价值产品,最大限度地提升资源利用效率,同时将环境影响降至最低^[5]。

然而,木质纤维素生物质的复杂性带来了显著的挑战^[6]。其稳定性源于成分复杂的结构,这需要创新的方法来实现高效分馏与转化。在化学、材料科学、生物技术和工程等领域的前沿技术推动下,这一领域近年来取得了显著进展。

跨学科的协同努力促进了新型分馏策略的开发,例如深共晶溶剂和离子液体的应用,这些方法为传统技术提供了更高效且环保的替代方案^[7]。同时,催化科学的进步开辟了将生物质组分转化为高价值平台化学品与材料的新途径^[8]。此外,酶工程和合成生物学等生物技术手段进一步丰富了生物质加工工具,使得转化过程更具选择性和效率^[9]。经过处理的木质纤维素生物质在多领域的应用潜力广泛^[10]。例如,纳米纤维素和木质素基复合材料等先进材料正逐步在建筑和电子等行业中得到应用^[11],而从生物质中提取的生物燃料和生化物质也被视为化石燃料的可行替代品^[12]。此外,从木质纤维素中提取的生物活性化合物为营养保健和制药领域开辟了新机遇。尽管取得了这些可喜的进展,将实验室规模的发现转化为工业规模的应用仍面临诸多挑战。技术经济性、工艺集成及环境影响评估是必须解决的关键问题,以确保生物质增值技术的商业可行性与可持续性^[13]。

本综述旨在全面概述木质纤维素生物质增值技术的现状与未来前景。通过整合化学、生物技术与工程领域的洞见,我们的目标包括:系统梳理生物质分馏与转化策略的最新进展;分析木质纤维素生物质衍生高价值产品的开发与潜在应用;探讨这些技术在工业化应用中的挑战与机遇;评估生物质增值过程中涉及的环境与可持续性问题的;确定研究中的关键空白并指明未来的发展方向。通过这一跨学科的视角,我们希望提供对木质纤维素生物质增值的全面理解,凸显其在应对资源和环境挑战中的潜力,同时为迈向更加可持续的未来奠定基础^[14]。

1 技术进展: 从分馏到转化的创新路径(Technological progress: An innovative path from fractionation to transformation)

1.1 分离技术的突破

将木质纤维素生物质高效分馏成其主要成分——纤维素、半纤维素和木质素等是增值过程中至关重要的第一步^[15]。本节在最近的案例研究和研究成果的支持下,对传统和新兴的分馏策略进行了深

入研究. 如表 1 所示, 传统技术在工业化规模中占据主导地位, 但其依赖高温高压与硫化物的问题促使新兴技术(如深共晶溶剂)向绿色化与选择性方向发展. 例如, 碱法分离法通过碱回收系统实现闭环生产, 而深共晶溶剂工艺则通过可调设计减少化学污染.

表 1 木质纤维素生物质传统分离技术与新兴分离技术比较

方法 Method	原理 Principle	效率 Efficiency	环境影响 Environmental impact	工业可行性 Industrial feasibility	关键优势 Key advantages	主要挑战 Major challenges	参考文献 References
蒸汽爆炸	高压蒸汽接着快速减压	中度(纤维素回收率50%—75%)	中等(高能耗)	高	工艺简单, 化学品用量低	抑制剂的形成	[16]
稀酸水解	用稀酸在高温下处理	高(80%—95%半纤维素去除率)	高(腐蚀性化学品, 需要中和)	高	有效去除半纤维素	设备腐蚀, 糖降解	[17]
碱法分离	在中等温度下用碱处理	高(70%—90%脱木质素)	中等(需碱回收系统)	中等	木质素去除效果好, 抑制剂形成量低	化学成本高, 化学回收面临挑战	[18]
深共晶溶剂 (DES)	使用共晶混合物进行选择性的分馏	高(80%—95%脱木质素)	低(可生物降解溶剂)	低—中等	低波动性, 性能可调	溶剂成本、黏度问题	[19]
离子液体(ILs)	离子溶剂在生物质溶解中的应用	非常高(90%—100%分馏)	中等(取决于IL的可回收性)	低	选择性高, 操作温度适中	黏度高, 有潜在毒性, 成本高	[20]
超临界流体	使用高于临界点的流体	中高(70%—90%分馏)	低(使用CO ₂ 时)	中等	环保, 易溶剂回收	压力要求高, 设备成本低	[21]
γ-戊内酯 (GVL)	采用生物质原料合成的GVL溶剂进行选择性分馏	高(85%—95%分馏)	低—中等(生物基溶剂)	低—中等	组分分离选择性优异	溶剂回收能耗高	[22]

1.1.1 传统方法概述

传统分馏方法长期以来一直是木质纤维素生物质加工的核心手段. 这些方法技术成熟, 已被广泛应用于各种类型的生物质处理. 然而, 其局限性, 如能耗较高、环境影响显著以及抑制剂生成, 限制了工业化推广的可持续性. 近年来, 研究者们通过结合创新技术或优化工艺参数, 致力于提高传统方法的效率和环境友好性, 为木质纤维素生物物质的高效利用奠定了基础^[23].

蒸汽爆炸通过高压蒸汽处理生物质并快速减压进行分馏. 该方法以工艺简单、适用范围广和化学品用量低为优势, 且仅需水蒸气, 避免化学污染. 一项研究表明, 将蒸汽爆炸与球磨相结合, 可从玉米秸秆中实现 85% 的纤维素回收率和 70% 的木质素去除, 比单独使用蒸汽爆炸提升了 15%^[24]. 尽管如此, 该方法存在抑制性化合物生成和高温导致部分半纤维素降解等问题, 需要进一步优化.

稀酸水解利用稀酸(如 H₂SO₄ 或 HCl)在高温下对生物质进行处理, 是一种对半纤维素去除非常高效且能与酶解工艺兼容的方法. 例如, 通过两阶段稀酸水解处理蔗渣, 可实现 92% 的半纤维素去除率, 同时保留 88% 的纤维素^[25]. 该方法为后续酶解提供了理想的前处理, 但由于化学品的腐蚀性, 其设备易受损坏, 并可能生成对后续反应有抑制作用的副产物.

碱法分离采用 NaOH 或 Ca(OH)₂ 在中温条件下处理生物质, 是一种去除木质素效果显著的技术, 有木质素高效去除和纤维素保留率高等优点. 最近研究表明, 低温(60℃)NaOH 预处理结合超声波处理稻秆, 可实现 80% 的脱木质素率, 同时将能耗降低 40%^[26]. 尽管该方法抑制剂生成量少且木质素去除率高, 但化学品成本高, 且化学回收仍存在技术难题.

Organosolv 过程利用有机溶剂(如乙醇、丙酮)在酸性催化剂作用下分离生物质组分. 桉树木材的甘油有机溶剂工艺实现了 92% 的木质素脱除和 88% 的半纤维素去除, 同时获得了高纯度木质素, 适用于高级材料的生产^[27]. 尽管该方法在分离效率和产品质量上具有明显优势, 但高溶剂成本及溶剂回收的复杂性, 以及潜在的安全隐患, 如溶剂易燃性, 纤维素结晶度升高, 限制了其广泛应用.

1.1.2 新兴技术

近年来, 新兴分馏技术在提高效率、增强选择性和降低环境影响方面展现出巨大潜力. 这些技术采用先进的化学和工程手段, 为木质纤维素生物物质的分馏和利用提供了更多可能性, 同时推动了分馏过程的绿色化和工业化应用.

深共晶溶剂由两种或多种组分混合形成, 其熔点远低于单一组分, 具备可生物降解性和低挥发性.

基于氯化胆碱/乳酸的 DES 在麦草分馏中实现了 83% 的脱木质素和 78% 的半纤维素去除, 纤维素保留率高达 95%^[28]. 此外, 一种由尿素和葡萄糖醛酸合成的生物基 DES 以最小的纤维素损失实现了 88% 的玉米秸秆脱木质素^[29]. 尽管 DES 具有调节性强的特点, 但其粘度问题和溶剂与生物质结合的潜力仍是关键挑战.

离子液体是一种完全由离子组成且在常温或接近常温下呈液态的盐类化合物. 生物基 Protic IL 用于桉树分馏, 可实现 95% 的木质素脱除和 90% 的半纤维素去除^[30]. 此外, CO₂ 可切换离子液体通过降低溶剂回收成本, 使得与传统 IL 相比成本下降 60%^[31]. 然而, ILs 的高粘度、潜在毒性及成本问题仍是限制其工业化应用的主要因素.

超临界流体利用高于临界点的流体特性实现高效分馏. 超临界二氧化碳结合乙醇辅助分馏蔗渣, 实现了 93% 的木质素去除和 85% 的半纤维素提取^[32]. 此外, 玉米秸秆的超临界水处理可实现 92% 的纤维素回收率^[33]. 尽管该方法环保、易于溶剂回收, 但高压条件和设备成本限制了其进一步推广.

γ -戊内酯作为一种生物质基溶剂, 凭借其高效选择性及绿色特性成为研究热点. 研究表明, 基于 GVL 的硬木分馏体系可同步实现木质素脱除率 95% 与半纤维素提取率 92%, 所得纤维素纯度显著提升, 能够直接用于纳米纤维素的高效制备^[22]. 然而, GVL 的高溶剂成本及回收过程中高能耗限制了其大规模应用.

1.1.3 混合工艺与强化策略

混合工艺与强化策略通过结合不同方法或采用新兴技术, 显著提升了分馏效率. 例如, 微波辅助 DES 分馏稻秆, 在保持高分馏效率的同时将处理时间缩短了 70%^[34]. 超声波强化的有机溶剂分馏在传统工艺的一半时间内实现了 90% 的木质素去除^[35]. 此外, 双螺杆挤出机结合原位碱处理, 实现了玉米秸秆 85% 的木质素脱除和 80% 的半纤维素去除^[36].

1.2 催化转化工艺

1.2.1 木质素的高值化路径

表 2 系统梳理了木质纤维素生物质衍生的关键化学品及其产率与应用领域, 揭示了生物炼制技术在平台分子与高值化产品开发中的核心潜力. 催化将木质纤维素生物质组分转化为高价值产品是生物质增值的关键步骤. 本节深入探讨了最先进的催化过程、最新进展以及该领域持续存在的挑战. 木质素是一种复杂的芳香族聚合物, 代表了可再生芳香族化合物的潜在来源. 其结构的非均质性和顽固性对选择性转化提出了重大挑战.

表 2 木质纤维素生物质衍生的关键化学品: 产量和应用

Table 2 Key chemicals derived from lignocellulosic biomass: yield and application

化学品 Chemical	产率(生物量的wt%) Yield (wt% of Biomass)	关键应用 Key Applications	参考文献 References
5—Hydroxymethylfurfural (羟甲基糠醛)	10%—20%	聚合物前体、燃料、溶剂	[37]
糠醛	8%—15%	树脂, 香料化合物, 药品	[38]
乙酰丙酸	5%—15%	增塑剂、药品、燃料添加剂	[39]
乳酸	40%—60%(来自纤维素)	可生物降解塑料、食品添加剂、化妆品	[40]
琥珀酸	30%—45%(来自葡萄糖)	可生物降解聚合物、增塑剂、食品工业	[41]
乙醇	20%—30%	燃料、化工、饮料	[42]
木糖醇	5%—15%(来自半纤维素)	甜味剂, 牙科护理产品, 药品	[43]
对二甲苯	5%—10%(来自纤维素)	聚酯生产, 溶剂	[44]
香兰素	1%—5%(木质素)	调味料、香料、药品	[45]
醋酸	2%—5%	食品工业, 化工合成, 溶剂	[46]

氢解作用: 氢解作用的原理就是利用氢和金属催化剂裂解木质素中的 C—O—C 键和 C—C 键. 该过程涉及醚键的氢化, 主要是 β -O-4 键, 然后是 C—O 键的裂解. 其催化剂的选择对产物分布有显著影响. 例如, 一项使用活性炭负载的双金属 Ni—Mo 催化剂的研究在相对温和的条件下(200℃, 30 bar

H₂)从桦木木质素中获得了 63% 的酚类单体收率^[47], 此外研究人员还开发了一种 Ru/Nb₂O₅ 催化剂, 在 250℃ 和 30 bar H₂ 条件下, 雪松木木质素的 4-丙基愈木酚收率为 50%, 铌离子载体在抑制芳香环的不良氢化方面起着至关重要的作用^[48]. 但是其催化剂因结焦而失活, 氢消耗高, 难以控制产物选择性限制了其大规模应用.

氧化解聚: 氧化解聚的原理是利用氧化剂和催化剂选择性地裂解木质素键. 该过程涉及形成活性氧, 裂解木质素中的 C—C 和 C—O 键. 该过程可以调整为产生芳香单体或羧酸. 例如, 钒基多金属氧酸盐催化剂在好氧条件下从软木木质素中产生芳香醛和酸的产率为 40%^[49]; 含铜多孔有机聚合物催化剂使用过氧化氢作为氧化剂, 从碱性木质素中获得了 36% 的酚类单体产率, 催化剂在 5 个循环中具有优异的可回收性^[50]. 但是其控制导致开环产物的过度氧化.

光催化解聚: 光催化解聚的原理是利用光能和光催化剂裂解木质素键. 光催化剂在光照射下产生反应性物质(如空穴、羟基自由基), 然后攻击木质素键. 该过程可以在温和的条件下进行, 并具有独特的选择性. 例如, 用铂纳米颗粒修饰的二氧化钛基光催化剂在模拟阳光下从木质纤维素中获得了 15% 的愈创木酚型单体产率, 展示了太阳能驱动木质素增值的潜力^[51]. 其中因为低量子效率, 放大反应器中的光穿透问题导致其不能大规模运用.

1.2.2 木质素单体催化提质

加氢脱氧: 加氢脱氧的原理就是从木质素衍生单体中除去氧, 生成碳氢化合物. HDO 反应包括加氢、脱水、C—O 键裂解等一系列反应. 该过程通常需要具有金属和酸位点的双功能催化剂. 例如, 分级 Ni—Mo 碳化合金催化剂在 300℃ 下实现愈创木酚对环己烷 97% 的 HDO, 在连续运行^[52], 其中研究人员还开发了一种 Ru/ZrO₂ 催化剂, 该催化剂在 200℃ 和 20 bar H₂ 下实现了 100% 的丁香酚转化为丙基环己烷, 选择性为 94%, 展示了低温 HDO 的潜力^[53]. 但是其高氢消耗, 潜在的过度氢化导致芳香性丧失, 催化剂被水中毒的问题仍是关键挑战.

选择性功能化: 选择性功能化的原理就是将木质素单体改性生产高价值化学品. 包括烷基化、酰化和氧化在内的各种反应可用于将特定官能团引入木质素衍生的芳烃上. 例如, 钨基催化剂体系使木质素衍生的酚类与醇类选择性 α -烷基化, 产生收率高达 92% 的潜在聚合物前体^[54]. 但是其成本问题是限制其工业化应用的主要因素.

1.2.3 纤维素和半纤维素转化

纤维素和半纤维素是多糖, 通过各种催化途径为燃料和平台化学物质提供途径.

酶解: 酶解的原理就是利用纤维素酶和半纤维素酶将多糖分解成可发酵的糖. 其中酶解涉及 3 种主要类型的纤维素酶: 内切葡聚糖酶、外切葡聚糖酶和 β -葡萄糖苷酶, 它们协同作用来分解纤维素. 例如一种新型的序贯性内切葡聚糖酶, 通过定向进化设计, 证明了与野生型酶相比, 预处理玉米秸秆的葡萄糖产量增加了 40%^[55]. 其中研究人员还开发了一种结合不同物种的纤维素结合和催化结构域的嵌合纤维素酶, 与亲本酶相比, 晶体纤维素的水解率提高了 2.3 倍^[56]. 但是酶成本, 对生物质水解物中抑制剂的敏感性, 反应速度慢是限制其工业化应用的主要因素.

综合生物处理: 综合生物处理的原理就是将酶生产、水解和发酵整合在一个步骤中. 工程微生物在单个反应器中产生纤维素酶, 水解生物质, 并将产生的糖发酵成所需的产物. 例如, 一种热梭状芽胞杆菌的基因工程菌株实现了纤维素直接转化为异丁醇, 产量为 0.6 g·g⁻¹ 纤维素, 代表了强化生物加工的重大进步^[57]. 其中研究人员还开发了一种由纤维素水解梭状芽胞杆菌和溶剂源性贝氏梭状芽胞杆菌组成的合成微生物联合体, 用于将纤维素直接转化为丁醇, 滴度达到 3.73 g·L⁻¹^[58]. 但是设计健壮的微生物, 平衡多种代谢途径仍然是关键挑战.

催化转化为平台化学品: 催化转化为平台化学品的原理就是将纤维素或半纤维素直接转化为有价值的化学中间体. 通常涉及一系列反应, 包括水解、异构化和选择性 C—C 键裂解或重排. 例如双功能 Ru/H—USY 沸石催化剂展示了纤维素一锅转化为己醇的收率为 83%, 开辟了用于聚合物生产的生物基多元醇的途径^[59], 其中研究人员还开发了一种将纤维素转化为乙二醇的一锅工艺, 使用碳化钨催化剂和 Ru/C 加氢催化剂, 在相对温和的条件下(245℃, 60 bar H₂), 产率达到 61%^[60]. 但是其催化剂在水环境中的稳定性, 在复杂反应网络中的选择性控制仍然是关键挑战.

呋喃化合物生产: 呋喃化合物生产的原理就是将糖脱水生产糠醛和 5—羟甲基糠醛(HMF). 该过程通常包括葡萄糖异构化成果糖, 然后是三重脱水. Brønsted 和 Lewis 酸催化起着至关重要的作用. 例如一种使用磺化碳催化剂的新型双相体系从果糖中获得了 93% 的 HMF 收率, 并且在 5 个循环中具有良好的可重复使用性^[61], 其中研究人员还开发了一种含锡的 β 沸石催化剂, 该催化剂在水-DMSO 溶剂体系中直接从葡萄糖中获得 70% 的 HMF 产率, 证明了在单一催化剂中有效的异构化和脱水^[62]. 其存在的挑战是最小化副反应, 从水介质中高效提取产品, 催化剂在酸性环境中的稳定性.

2 高价值产品 and 应用(High—value products and applications)

将木质纤维素生物质转化为高价值产品是可持续生物炼制发展的关键驱动力. 本节探讨了可从木质纤维素生物质中提取的各种材料、化学品和燃料, 重点介绍了最近的进展、潜在的应用和仍然存在的挑战.

2.1 先进材料开发

木质纤维素生物质的多样性和丰富性使其成为先进材料开发的重要原料来源. 其中, 纳米纤维素及木质素基材料因其独特的物理、化学性能和可持续性在各种高价值应用中展现了巨大潜力.

2.1.1 纳米纤维素及其衍生物

纤维素纳米晶体(CNCs): CNCs 通常通过酸水解纤维素纤维制备, 去除无定形区域后形成高纵横比的纳米材料, 具备卓越的机械性能(杨氏模量~140 GPa)和液晶性能. 研究表明, CNC 增强的聚乙烯醇纳米复合材料在仅 5% wt 负载下, 抗拉强度提升了 300%, 显示出极高的应用潜力^[63]. 此外, CNC 作为模板可用于合成分层介孔二氧化硅, 催化和药物输送性能显著提升^[64]. 然而, CNC 在疏水基质中的分散性及湿度敏感性仍是规模化应用的挑战.

纤维素纳米原纤维(CNFs): CNFs 通过机械纤颤并结合酶或化学预处理生产, 表现出优异的成膜能力及高强度韧性. 一项研究开发了透明 CNF 薄膜, 其热膨胀系数低于玻璃, 为柔性电子提供了新方向^[65]. 此外, 基于 TEMPO 氧化的 CNFs 制备的气凝胶展现了卓越的吸油能力, 为环境修复提供了创新解决方案^[66]. 但其高能耗的生产工艺和干燥过程中尺寸保持问题亟待解决.

2.1.2 木质素基聚合物及复合材料

木质素基热塑性塑料: 木质素可作为聚合物合成中的大单体或共混组分, 用于开发高性能、可再生的热塑性材料. 例如, 将木质素与 ϵ -己内酯接枝合成的热塑性弹性体, 生物基含量高达 85%, 机械性能可调^[67]. 此外, 动态共价键的引入使木质素基热固性材料具备自愈特性和可回收性^[68]. 然而, 木质素的颜色、热稳定性和结构可变性仍限制了其更广泛的应用.

木质素衍生的碳纤维: 木质素通过热转化工艺可制备高性能碳纤维, 是聚丙烯腈基纤维的可持续替代品. 硬木木质素的凝胶纺丝工艺已实现抗拉强度达 1.04 GPa, 接近商用纤维性能^[69]. 但目前仍面临生产成本低、纤维性能一致性差等问题.

2.2 生物燃料和生物化学

木质纤维素生物质为先进生物燃料和平台化学品的开发提供了可再生资源. 通过整合催化和生物技术, 该领域的研究不断突破技术和经济的瓶颈.

2.2.1 纤维素乙醇与生物基碳氢化合物

纤维素乙醇: 纤维素乙醇通过酶解后发酵生产, 是最成熟的生物燃料之一. 利用玉米秸秆的商业工厂实现了每干吨 270 L 乙醇的产量, 生命周期温室气体排放较汽油低 126%^[70]. 尽管技术逐渐成熟, 酶成本及物流仍是关键挑战.

生物基碳氢化合物: 生物基碳氢化合物可通过催化升级平台分子或直接转化生物质生产. 例如, 一种多功能催化剂工艺将乙醇转化为 C3—C7 级汽油类碳氢化合物, 碳收率达 76%^[71]. 该燃料特别适用于航空和重型运输, 但其经济性仍依赖于催化剂的优化.

5-羟甲基糠醛(HMF): HMF 由己糖脱水制备, 可进一步转化为 FDCA 等重要化合物. 通过固体酸催化剂的连续流工艺, 果糖的 HMF 产率达 90%, 显示了工业化潜力^[72]. 然而, 副反应和水介质中产品分离问题需要进一步解决.

生物基有机酸: 乳酸、琥珀酸等有机酸可通过代谢工程微生物生产. 例如, 大肠杆菌在木质纤维素水解液中的琥珀酸产率达 $0.96\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 糖^[73]. 这些酸广泛用于可降解聚合物、食品和药品, 但与石化途径相比, 其成本竞争力仍需提升.

2.2.2 生物活性成分

从木质纤维素生物质中提取的生物活性成分在食品、化妆品和保健品领域展现了应用潜力.

木质素衍生抗氧化剂: 利用木质素中的酚类结构可生产高效抗氧化剂. 一项研究通过温和有机溶剂和膜分馏法生产的抗氧化木质素低聚物, 其活性优于商业添加剂 BHT^[74]. 尽管潜力巨大, 产品标准化和监管批准仍需加强.

低聚木糖 (XOS): XOS 通过控制水解半纤维素制备, 是重要的益生元成分. 结合蒸汽爆炸和酶解的工艺从玉米芯中获得了 69% 的 XOS 产率^[75]. XOS 广泛用于功能食品和动物饲料, 但控制低聚物链长和规模化生产仍是难点.

2.3 市场竞争力和商业化潜力

木质纤维素生物质相关产品的市场潜力正在快速增长, 到 2025 年全球市场预计达到 875 亿美元, 年均增长率为 10.5%^[76]. 纳米纤维素和木质素基碳纤维等先进材料的独特性能在高价值应用中具有溢价优势. 而政策支持和消费者对可持续产品的需求为生物燃料和平台化学品提供了坚实的市场基础.

根据技术成熟度和市场需求, 以下产品被认为最具商业化潜力: 纳米纤维素包装: 卓越的阻隔性能和可降解性使其成为塑料替代品的最佳选择. 木质素基碳纤维: 在汽车和航空领域具有重要的减重和环保意义. 生物基航空燃料: 在航空业碳减排压力下需求旺盛. FDCA 及 PEF: FDCA 作为 PET 替代品, 具有优越性能和环保潜力. 低聚木糖: 益生元市场需求的快速增长为 XOS 提供了巨大市场空间. 通过持续优化工艺、扩大生产规模, 并结合支持性政策, 这些产品将推动生物基经济向更加可持续的未来迈进. 现代生物炼制厂正逐步从单一产品生产转向循环经济模式如图 1 所示.

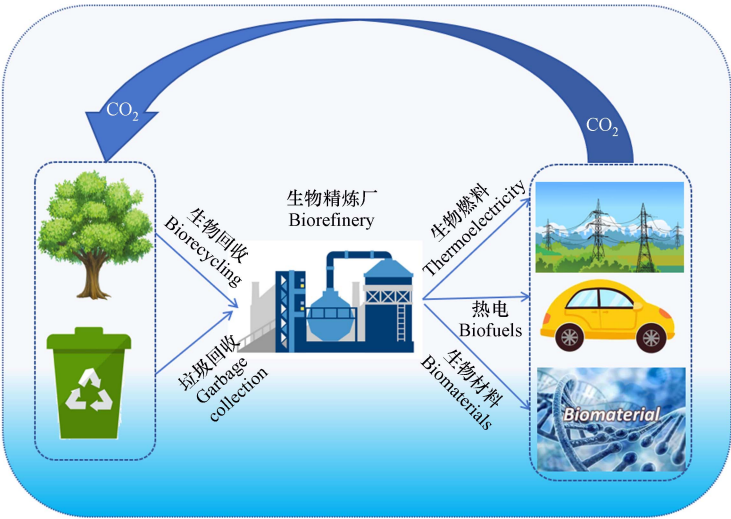


图 1 生物炼制厂循环经济模型

Fig.1 Circular economy model for a biorefinery

3 生物技术与工程的整合(Integration of biotechnology and engineering)

木质纤维素生物质的有效增值需要一种协同的方法, 将生物技术的进步与创新的工程解决方案相结合. 本节探讨了这些领域交叉点的前沿发展及其对生物质加工的影响.

3.1 生物质加工的酶工程

酶工程通过优化酶的性能, 为木质纤维素生物质加工提供了更加高效和特异的催化工具. 近年来, 增强型酶和设计师酶的开发, 为生物质转化的效率提升和工业应用的可能性奠定了基础.

蛋白质工程通过修饰酶的结构, 提高其活性、稳定性和特异性. 一项研究通过定向进化设计了一种 β -葡萄糖苷酶, 其耐离子液体性能提高了 3000 倍, 使离子液体预处理和糖化在单一反应器中得以实

现^[77]。此外,利用结构引导的蛋白质工程技术开发的嵌合纤维素酶,显著增强了热稳定性和活性,在玉米秸秆预处理后的葡萄糖释放量增加了 2.7 倍^[78]。研究表明,增强型酶能够减少酶用量,并提高其与工业预处理条件的相容性。然而,在平衡酶的多种性能并将实验室改进推广至工业应用时,仍存在挑战。

工能化纤维素通过模拟天然纤维素酶复合体的协同作用,创造人工酶系统以增强生物质的降解效率。含有 3 种互补酶的合成系统在小麦秸秆上的活性比游离酶提高了 1.6 倍^[79]。这种方法通过优化酶间协同作用,提高了对底物的靶向性。然而,其组装过程复杂,并需优化酶组分的化学计量以实现最佳效果。

3.2 合成生物学方法

合成生物学通过重新设计微生物和酶系统,为木质纤维素生物质转化开辟了新的可能性,特别是在生产非天然化合物和构建无细胞系统方面。

3.2.1 新产品代谢工程

代谢工程通过重新编程微生物代谢途径,将生物质衍生的糖转化为多样化的非天然化合物。一项研究通过工程化酿酒酵母实现了甲酯(重要的芳香化合物)以 $414 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的滴度生产^[80]。同时,工程大肠杆菌通过联合方法直接将纤维素转化为正丁醇,滴度达到 $30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[81]。尽管这些技术显著扩展了产品组合,但代谢负担和扩大至工业规模的复杂性仍需进一步克服。

3.2.2 无细胞合成生物学

无细胞系统利用细胞裂解物或纯化酶,在活细胞外进行高效的生物催化。一项由 27 种酶组成的无细胞系统将纤维素高效转化为异丁醇,产率达到 95%^[82]。此方法避免了细胞代谢的限制,允许使用有毒中间体。然而,酶的生产成本和系统稳定性仍是实现工业化应用的主要障碍。

3.3 工艺集成和强化

工艺集成和强化是提高木质纤维素生物质转化效率和经济性的关键方向,包括连续处理、膜辅助生物工艺以及微流控平台的开发。

3.3.1 连续处理系统

连续流处理通过集成预处理、酶解和发酵,实现了高效的生物质转化。一项研究展示了麦秸连续流生物炼制概念,乙醇生产率达 $4.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[83]。这种方法通过减少反应器体积和提高过程控制精度,显著提升了生产效率。然而,固体基质在连续系统中的处理及其长期稳定性仍是技术瓶颈。

3.3.2 膜辅助生物工艺

膜分离技术与生物转化的结合可实现原位产品回收,从而降低产物抑制的影响。例如,膜生物反应器系统通过连续去除乳酸,使糖的转化率达到 98%^[84]。尽管该方法提高了产品浓度,但膜污染及通量与选择性的平衡仍需优化。

3.3.3 微流控平台的工艺开发

微流控技术通过快速筛选和优化生物工艺,为加速酶鸡尾酒设计和工艺参数优化提供了平台。微流控液滴平台成功实现了纤维素酶鸡尾酒的高通量筛选,时间从数月缩短至数天^[85]。尽管其快速迭代能力显著,但将实验室规模的见解扩展到工业流程仍是重大挑战。

3.4 协同效应和瓶颈

3.4.1 协同效应

结合酶工程、工艺设计和合成生物学方法可以定制适合特定条件的催化剂和工艺。微流控筛选平台加速了改进生物催化剂和优化工艺条件的步伐,而设计师酶和无细胞系统则展示了系统整合的潜力。

3.4.2 瓶颈

规模化仍然是新生物技术的核心难题。从微流控或实验室装置中开发的有效方法在工业反应器中可能面临不可预见的问题。此外,多步骤工艺的集成常揭示意外的抑制效应或不兼容性,这需要多次迭代优化。

3.5 跨学科合作的关键领域

为了推动木质纤维素生物质增值技术的发展,我们建议重点关注以下领域:

多尺度建模与仿真:结合分子水平的酶—底物相互作用与宏观反应器设计参数,有助于优化生物

过程.

自适应过程控制: 开发实时调节工艺参数的控制系统, 以应对原料变异性和工艺波动. “智能”酶鸡尾酒: 设计能够根据底物特性自我调节组成的酶系统, 提高转化效率和工艺鲁棒性. 混合生物催化与化学催化: 探索生物与化学催化之间的协同作用, 将两者的优点相结合以实现新的高价值产品路线. 技术与生命周期评估: 开发快速评估工具以指导研究走向最有经济性和环境可持续性的方向.

生物技术与工程的结合为木质纤维素生物质转化提供了独特的优势. 通过整合不同学科的创新, 这一领域有望开发出更高效、经济且环境友好的生物炼制工艺. 未来, 重点应放在跨学科合作、工艺优化和技术商业化上, 以推动新一代生物炼制厂的开发和应用.

4 工业化应用的多维度评估(Multi—dimensional evaluation of industrial applications)

4.1 技术经济考虑

从实验室规模的发现到工业规模生产的过渡是实现木质纤维素生物质增值潜力的关键一步. 本节探讨了生物炼制工艺工业化和规模化的挑战、最近的成功和未来前景.

技术经济性是生物质增值工业化的核心关注点, 涉及资本支出(CAPEX)、运营支出(OPEX)和生产模式优化. 如表 3 所示, 当前商业化生物炼制厂的经济性受原料类型、工艺整合度与规模效应显著影响. 以巴西 Raizen 工厂为例, 其与甘蔗制糖业的深度协同使乙醇 OPEX 低至每升 0.53 美元, 而依赖小麦秸秆的 Beta Renewables 工厂因原料预处理能耗高, CAPEX 达 262 百万美元. 值得注意的是, 非乙醇生物炼制(如木糖醇生产)虽产能有限(每年 5.54 千吨), 但产品溢价可部分抵消高 OPEX(每升 1.04 美元), 凸显高值化转型的必要性. 然而, 原料季节性供应波动与设备腐蚀等问题仍制约长期经济性. 未来需通过多原料兼容技术、热集成优化及政策补贴(如碳信用机制), 系统性降低生物炼制成本, 推动其与化石基产业的公平竞争.

表 3 商业化规模木质纤维素生物精炼厂的技术经济参数
Table 3 Technical—economic parameters of a commercial—scale lignocellulosic biorefinery

生物炼制厂 Biorefinery	能力/(ML·a ⁻¹) Capacity	资本支出/(百万美元) Capital expenditure (in millions of US dollars)	运营成本/ (美元·L ⁻¹) Operating cost	主要产品 Main products	原料 Raw materials	参考文献 References
阿拉戈斯工厂	82	190	0.91	乙醇	甘蔗渣秸秆	[86]
Raizen	82	395	0.53	乙醇	甘蔗渣	[86]
CZLTA.UL	120	420	0.72	乙醇	甘蔗渣	[87]
Synata Bio	95	48.5	0.58	乙醇	木质纤维素	[88]
美国生物精炼厂	6.11*	50.5	1.04	寡木酮糖	软紫草	[89]
美国生物精炼厂	5.54*	50.5	1.04	木糖	软紫草	[89]
美国生物精炼厂	38.5*	50.5	1.04	超细纤维	软紫草	[89]

*注:非乙醇生物炼油厂的产能以千吨/年(kt·a⁻¹)为单位.

4.2 价值增值过程的生命周期评估

木质纤维素生物质的增值从根本上是由对化石资源的可持续替代品的需求驱动的. 本节深入研究了木质纤维素生物质增值的环境和可持续性方面, 强调其在应对气候变化、资源枯竭和生态系统退化等全球挑战方面的关键作用.

如表 4 所示, 生物基产品在全生命周期温室气体减排方面表现突出. 以对苯二甲酸为例, 其生物基生产的全球变暖潜势(0.5 kg CO₂eq·L⁻¹)较化石基(3.85 kg CO₂eq·L⁻¹)降低 87%, 凸显了生物炼制在高值化学品领域的脱碳潜力. 类似地, 生物基聚乙烯的减排率达 58%, 验证了其在包装与材料行业替代传统塑料的可行性. 然而, 1,4-丁二醇等个别产品的减排率偏低(26%), 表明其工艺能效与原料利用率亟待提升. 这些数据不仅量化了生物基技术的环境优势, 也为优先发展高减排潜力产品提供了科学依据. 未来研究需结合多维度指标(如水资源消耗、生物多样性影响), 构建更全面的可持续性评估框架, 以推动生物基经济向闭环系统演进.

表 4 环境影响比较:生物基与化石基产品

Table 4 Comparison of environmental impacts: bio—based vs. fossil—based products

产品 Product	生物基排放 Biobased emissions	化石基排放 Fossil—based emissions	减排率/% Emission reduction rate	主要环境指标 Main environmental indicators	参考文献 References
乙烯	1.57 kgCO ₂ eq·L ⁻¹	3.14 kgCO ₂ eq·L ⁻¹	50%	全球变暖潜势	[90]
PBAT	3.72 kgCO ₂ eq·L ⁻¹	5.89kgCO ₂ eq·L ⁻¹	37%	全球变暖潜势	[91]
1,4-丁二醇	0.41 kgCO ₂ eq·L ⁻¹	0.55kgCO ₂ eq·L ⁻¹	26%	全球变暖潜势	[91]
对苯二甲酸	0.5 kgCO ₂ eq·L ⁻¹	3.85 kgCO ₂ eq·L ⁻¹	87%	全球变暖潜势	[91]
己二酸	2.01 kgCO ₂ eq·L ⁻¹	6.28 kgCO ₂ eq·L ⁻¹	68%	全球变暖潜势	[91]
聚乙烯	0.75 kgCO ₂ eq·L ⁻¹	1.8 kgCO ₂ eq·L ⁻¹	58%	温室气体排放	[92]

生命周期评估(LCA)为木质纤维素生物质增值的环境效益和潜在影响提供了全面的量化工具. 在从摇篮到坟墓的评估中, 纤维素乙醇与化石燃料相比, 温室气体排放量可减少 60%—80%, 具体取决于农业实践和生物炼制配置^[93]. 生命周期评估研究表明, 木质素基碳纤维的累计能耗较传统聚丙烯腈基碳纤维降低 30%—50%, 这一优势主要源于其生物质原料提取与碳化工艺的协同优化^[94]. 研究表明, 原料生产、物流和副产品利用(如木质素用于发电)对整体环境效益具有显著影响, 而过程能源的优化在决定净环境效益中起到关键作用.

4.2.1 综合 LCA 研究

木质纤维素生物质的多产品体系为 LCA 分析带来了独特挑战, 特别是在环境影响分配上. 为应对这一问题, 研究者提出了创新方法, 综合考虑生物质利用的间接影响^[95]. 此外, 敏感性分析对技术改进和区域条件差异的考虑至关重要, 有助于识别影响的关键驱动因素并指导优化方向.

4.2.2 新兴影响类别

水足迹和生物多样性是 LCA 中关注的新领域. 研究表明, 通过废水回收和工艺优化, 可以显著减少纤维素乙醇生产的水足迹^[96]. 在生物多样性方面, 生物质种植可能带来积极或消极的影响, 具体取决于土地管理策略^[97]. 例如, 合理的多样化种植模式可以减少生态破坏, 而单一种植可能导致物种减少和生态系统服务下降.

4.3 与化石燃料替代品的比较

木质纤维素生物质产品与传统化石燃料相比在环境效益上表现出显著优势. 从油井到车轮的分析表明, 通过木质纤维素转化的燃料途径, 温室气体排放量可减少 60%—120%, 这一范围主要受到生物质碳固存、转化效率和对高碳化石燃料替代程度的影响^[98]. 生命周期评估表明, 生物基塑料(如聚乳酸、生物 PET)相较于石油基塑料碳足迹可降低 25%—75%, 其减排幅度与废弃阶段的处置方式(如堆填、回收或降解)直接相关^[94].

4.3.1 能源产品

能源产品的生命周期效益主要来源于生物质的碳固存以及高效的转化过程. 例如, 木质纤维素燃料替代煤或重油等高碳化石燃料时, 其温室气体减排效果尤为显著. 然而, 要实现这一潜力, 需要持续优化燃料转化的效率, 并在供应链中确保低碳运输模式.

4.3.2 材料和化学品

生物基材料的生命周期表现与其耐久性和功能性密切相关. 例如, 长寿命生物基产品不仅具有较低的碳足迹, 还能通过延长产品生命周期实现碳固存^[99]. 此外, 生物基材料的可回收性和生物降解性在寿命终止阶段对环境的影响至关重要. 发展化学回收技术以闭环利用生物基聚合物, 将进一步提升其环境效益.

4.3.3 系统级的影响

虽然直接土地利用变化对基于农业残留物的原料影响较小, 但大规模种植生物质作物可能带来间接土地利用变化. 一项全球模拟研究表明, 即使考虑间接影响, 木质纤维素作物种植仍能实现温室气体排放的净减少^[100]. 此外, 木质纤维素生物质产品的广泛采用可以显著减少对不可再生资源的依赖, 从

而提高资源的可持续性^[101].

4.4 循环经济潜力

循环经济概念通过促进资源的高效利用和材料的再生,成为木质纤维素生物质增值技术的核心方向.研究表明,级联利用生物质可显著提高资源效率,同时减少废物产生,为生物炼制的经济和环境效益带来多重提升^[102].

4.4.1 生物质的级联利用

通过级联利用,生物质的多次价值提取可最大限度地提高资源效率.例如,将麦秸依次用于生产生物乙醇、木质素基材料和能源,不仅实现了资源利用率提升 40%,还通过多种碳固存途径减少了温室气体排放^[102].这一方法对优化生物炼制的整体效益具有重要启示.

4.4.2 生命周期终止的考虑因素

生物基产品的可生物降解性虽然是显著优势,但其具体环境效益依赖于寿命终止方式.一项针对聚乳酸的研究表明,与垃圾填埋相比,工业堆肥或化学回收可提供更高的环境收益^[103].此外,新兴的化学回收技术,例如呋喃基聚酯的回收,不仅能显著降低能源使用,还能实现闭环物质流,创造真正的循环经济^[104].

4.4.3 生物炼制中的工业共生关系

通过工业共生,将生物炼制与其他行业设施整合,可以大幅提高资源效率并降低环境影响.例如,丹麦卡伦堡共生网络通过能源和材料交换,实现了能源使用和 CO₂ 排放的显著减少^[105].模型研究表明,在以生物炼制为中心的共生系统中,工业温室气体排放可减少 5%—10%,展示了工业合作对循环经济的潜力^[106].

木质纤维素生物质增值技术的生命周期评估表明,优化原料生产、物流、过程能源和副产品利用是提升其环境效益的关键.在与化石燃料的比较中,生物质产品在温室气体减排和资源可持续性方面表现出明显优势,而通过级联利用、生物基产品回收和工业共生进一步推动了其循环经济潜力.未来的研究应继续聚焦于多产品生物炼制的 LCA 方法改进,同时加强跨学科合作以推动从技术到市场的全面过渡.

4.5 分析:当前的可持续性指标及其局限性

表 5 总结了木质纤维素生物质增值的可持续性指标现状与局限,指出当前评估体系虽涵盖温室气体排放、水足迹、土地利用变化等核心指标,但仍面临间接影响量化困难、方法标准化不足、社会经济因素整合薄弱等挑战,亟需开发动态核算模型与多维度协同框架以提升评估的全面性与实践指导性.

表 5 木质纤维素生物质增值的可持续性指标:现状和局限性

Table 5 Sustainability indicators for lignocellulosic biomass value addition: status and limitations					
评估指标 Evaluation index	描述 Description	当前状态 Current status	限制 Constraints	需要改进的地方 Areas needing improvement	参考文献 References
温室气体排放	测量整个产品生命周期的温室气体排放总量	广泛使用,标准化方法可用	计算间接土地利用变化的挑战	整合动态碳核算模型	[107]
水足迹	评估总用水量和对水质的影响	越来越多的采用,方法仍在发展	难以解决当地水资源短缺问题	开展空间明确的水影响评估	[108]
土地利用变化	评估对土地利用模式的直接和间接影响	越来越重要,方法仍在开发中	估计间接影响的不确定性高	改进的全球土地利用动态建模	[109]
生物多样性的影响	评估对生态系统多样性和功能的影响	应用有限,指标仍在发展	量化不同生态系统影响的复杂性	标准化生物多样性影响因子的开发	[110]
能源投资回报率 (EROI)	衡量整个生产系统的能源效率	适用于生物能源系统	多产品生物精炼厂应用中的挑战	向复杂生物炼制系统的扩展	[111]
社会经济指标	评估就业创造、农村发展和社会影响	越来越多的认可,但往往是定性的	难以量化和比较社会影响	为生物精炼厂开发标准化的社会LCA方法	[112]
循环经济指标	评估材料循环度和资源效率	新兴领域,指标仍在开发中	不同行业间缺乏标准化	与现有LCA框架的集成	[113]
技术经济评估 (TEA)	评估经济可行性和市场竞争力	行之有效的方法	通常与环境和社会评估脱节	TEA与环境和社会LCA的整合	[114]

续表 5

评估指标 Evaluation index	描述 Description	当前状态 Current status	限制 Constraints	需要改进的地方 Areas needing improvement	参考文献 References
生态系统服务价值评估	量化受生物质生产影响的生态系统服务的价值	兴趣日益浓厚,方法仍在不断发展	多样化生态系统服务货币化的挑战	改进与生物物理模型的整合	[115]
生命周期可持续性评估(LCSA)	整合环境、经济和社会方面	以整体的方式出现	复杂性和数据强度	LCSA框架的标准化和简化	[116]

4.6 新兴的可持续性指标

在评估木质纤维素生物质增值的可持续性方面,传统的温室气体减排虽然是核心指标,但其他影响类别,如水资源利用、土壤健康和社会经济因素,也正在得到越来越多的关注.这些新兴指标的整合将提供更全面的可持续性评估框架.

4.6.1 温室气体排放

温室气体减排是评估木质纤维素生物质环境效益的关键指标,其优势在于能够直接与气候变化的减缓目标相关联.然而,该指标的应用面临生物碳核算可变性和间接土地利用变化评估的挑战.为了更准确地捕捉木质纤维素生物质系统中的动态碳流动,研究人员正致力于开发动态生命周期评估(LCA)方法^[117].这将更好地反映生物质碳循环的时间维度,为政策制定和技术优化提供更具洞察力的分析.

4.6.2 用水和水质

水资源利用是另一个重要的可持续性指标,通常通过水足迹(绿水、蓝水和灰水)和水压力指数来量化.然而,不同地区的水资源可用性和竞争性用途使核算变得复杂.同时,增加生物质种植可能对水质造成长期影响.最近的发展包括将空间上明确的水资源可用性数据纳入 LCA 框架,以更准确地评估水资源利用对环境的潜在影响^[118].

4.6.3 土壤健康与生物多样性

土壤健康和生物多样性是生物质系统可持续性评估中代表性不足的领域.新兴的土壤有机碳模型和基于物种丰富度及生态系统服务的生物多样性评估方法正逐步填补这一空白^[119].然而,未来需要在可持续性认证中标准化这些方法,以确保其在全球范围内的一致应用.

4.6.4 社会经济指标

真正的可持续性不仅限于环境层面,还包括社会和经济影响.创造就业、促进农村发展和保障粮食安全是重要的社会经济指标.然而,将这些因素与环境 LCA 有意义地结合起来仍然是一个挑战.针对这一问题,研究者已开发出特定于生物炼制系统的社会生命周期评估(S—LCA)框架,为量化这些影响提供了新的工具^[120].

木质纤维素生物质增值技术的推广不仅具有环境效益,还对区域社会经济结构产生深远影响.如图 2 所示,其核心贡献包括农业废弃物资源的高效利用、农村就业机会的创造以及生物基产业链的协同发展.例如,每百万升纤维素乙醇产能可提供直接就业岗位,间接带动物流、研发等关联产业发展.然而,原料供应的季节性波动、政策支持的碎片化以及消费者对生物基产品的接受度差异仍是阻碍技术广泛普及的关键因素.未来需通过政策协同(如碳定价与循环经济法规)、技术标准化以及公众教育,进一步提升木质纤维素生物质增值技术的社会经济综合效益.

4.7 意见:必要的政策和监管框架

为了实现木质纤维素生物质增值的全部环境和可持续性潜力,制定和实施有效的政策和监管框架是至关重要的.以下措施是推动这一领域发展的核心建议:

碳定价和激励:通过实施强有力的碳定价机制,将产品的全生命周期排放纳入考量.为负排放技术(如生物能源碳捕集与封存, BECCS)提供激励,将进一步推动木质纤维素生物炼制的环境效益.

可持续性认证:建立全面且国际公认的认证体系,涵盖木质纤维素生物质及其衍生产品的可持续性评估.这些认证需考虑间接影响,并能够适应新兴科学研究成果.

循环经济政策:促进生物质的级联利用和报废产品的回收,推动生物基材料的可持续设计和回收.此外,通过实施生产者责任延伸计划,激励企业开发更加环保的产品.



图 2 木质纤维素生物质增值的社会经济影响

Fig.2 Socio—economic impacts of lignocellulosic biomass value—added

研究与创新支持: 增加对先进可持续性评估方法的研究资金, 尤其是在生物多样性和生态系统服务领域. 支持开发开放获取的工具和数据库, 为全面评估生物炼制系统提供基础设施.

土地利用与生物多样性保护: 确保木质纤维素原料的生产不会与粮食生产竞争, 也不会导致森林砍伐. 制定可持续景观管理的指导方针, 以平衡生物质生产与生态保护的需求.

教育与公众参与: 通过公众教育项目提高对生物基产品及其环境影响的认识, 并鼓励企业和行供透明的可持续性报告, 以推动公众对生物基经济的接受和支持.

5 未来展望与结论(Future outlook and conclusions)

随着我们站在生物基革命的浪潮之巅, 木质纤维素生物质的增值已成为推动可持续发展和循环经济的重要驱动力. 本综述综合了这一领域的关键见解, 展望了未来的发展方向, 强调了科学和技术的前沿进展与紧迫的全球挑战之间的联系.

在技术进步和环境问题双重驱动下, 木质纤维素生物质增值的前景正迅速扩展. 人工智能和机器学习的整合正在重塑生物炼制的操作模式, 预计通过工艺优化和智能化控制, 可将效率提升 15%—25%^[121]. 未来的全自动化生物炼制厂或将具备实时适应原料变化 and 市场需求的能力. 与此同时, 合成生物学为生物质加工开辟了新的可能性. 例如, 对杨树的基因工程改造使酶解过程中糖释放量增加了 40%, 标志着“智能”能源作物的潜力^[122]. 这些作物的可编程成分可针对特定生物炼制需求量身定制, 为未来的定向增值技术铺平道路.

增材制造技术也在推动生物基材料的前沿应用. 例如, 纳米纤维素基生物墨水在组织工程中的应用展示了现场增材制造的可能性, 未来生物炼制厂或将直接生产定制化的生物基产品^[123]. 此外, 电化木质素解聚技术的突破性进展(80% 单体产率)不仅提升了木质素的高值化潜力, 还为可再生能源的化学储能开辟了新方向^[124].

尽管取得了显著进展, 木质纤维素生物质增值的商业化仍面临诸多挑战. 顽强的生物质组分(如结晶纤维素和木质素)的高效转化仍是技术瓶颈, 而成功开发超越能源用途的木质素增值技术, 可能将生物炼制的经济效益提升 30%—50%^[125]. 此外, 多尺度建模的集成(从量子化学到技术经济评估)将大幅加速工艺开发, 并降低规模化运行的风险.

社会经济评估表明,规模化生物炼制设施的投运可有效激活乡村经济活力,研究测算显示,每百万升生物乙醇生产规模约能形成 10—20 人的本地就业增量^[88]。更广泛地看,木质纤维素生物炼制到 2050 年可能使石油进口减少 20%—30%,重塑全球能源格局和贸易平衡^[126]。与此同时,生物基产品在化学和材料市场的占比有望达到 25%—30%,推动行业向绿色转型^[127]。更重要的是,木质纤维素生物质增值技术可能在全球二氧化碳减排中贡献 10%—20%,在应对气候变化中发挥重要作用^[128]。

展望未来,几个关键主题浮现。生物炼制厂内部的整合以及与更广泛工业生态系统的结合将进一步增强效率和灵活性。一刀切的解决方案可能被特定区域原料和市场需求优化的定制化模式所取代。数字化技术将成为核心驱动力,人工智能、物联网和大数据分析将显著优化运营和供应链管理。同时,从生物质生产到产品生命周期终止的循环设计理念将成为重点,推动更可持续的闭环经济发展。

实现这一愿景需要多方协同努力。科学研究需进一步深入理解生物质抗性机制,并开发创新催化系统;工程创新应聚焦工艺强化、模块化设计和柔性制造技术;政策支持则需通过内部化环境成本和提供长期激励推动向生物经济的转型;而公众的认知和参与将是促进生物基产品接受和推广的重要基础。

总之,木质纤维素生物质增值为全球社会迈向可持续发展提供了切实可行的路径。尽管挑战依然存在,其在减缓气候变化、保护资源和促进经济发展的潜力是不可忽视的。我们正处于一个重新定义人与自然关系、以闭环思维实现可持续繁荣的时代转折点。通过共同努力,木质纤维素生物质增值技术将在为子孙后代构建一个更美好、更可持续的世界中扮演关键角色。

参考文献 (References)

- [1] SINGHVI M S, GOKHALE D V. Lignocellulosic biomass: Hurdles and challenges in its valorization[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2019, 103(23/24): 9305-9320.
- [2] OKOLIE J A, NANDA S, DALAI A K, et al. Chemistry and specialty industrial applications of lignocellulosic biomass[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2021, 12(5): 2145-2169.
- [3] BRODA M, YELLE D J, SERWAŃSKA K. Bioethanol production from lignocellulosic biomass-challenges and solutions[J]. *Molecules*, 2022, 27(24): 8717.
- [4] QASIM U, SIRVIÖ J A, SUOPAJÄRVI T, et al. A multifunctional biogenic films and coatings from synergistic aqueous dispersion of wood-derived suberin and cellulose nanofibers[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 338: 122218.
- [5] WANG L Y, WU R J, WANG Q B, et al. Evolution of self-assembled lignin nanostructure into dendritic fiber in aqueous biphasic photocurable resin for DLP-printing[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(29): 2315679.
- [6] JOGI R, SAMIKANNU A, MÄKI-ARVELA P, et al. Liquefaction of lignocellulosic biomass into phenolic monomers and dimers over multifunctional Pd/NbOPO₄ catalyst[J]. *Renewable Energy*, 2024, 233: 121148.
- [7] ZHANG Y C, NI S Z, WU R J, et al. Green fractionation approaches for isolation of biopolymers and the critical technical challenges[J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 177: 114451.
- [8] WANG S Y, CHENG A H, LIU F H, et al. Catalytic conversion network for lignocellulosic biomass valorization: A panoramic view[J]. *Industrial Chemistry & Materials*, 2023, 1(2): 188-206.
- [9] MADHAVAN A, ARUN K B, BINOD P, et al. Design of novel enzyme biocatalysts for industrial bioprocess: Harnessing the power of protein engineering, high throughput screening and synthetic biology[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 325: 124617.
- [10] ROY S, DIKSHIT P K, SHERPA K C, et al. Recent nanobiotechnological advancements in lignocellulosic biomass valorization: A review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 297: 113422.
- [11] LIANG S J, XU W Y, HU L Q, et al. Aqueous processable one-dimensional polypyrrole nanostructured by lignocellulose nanofibril: A conductive interfacing biomaterial[J]. *Biomacromolecules*, 2023, 24(8): 3819-3834.
- [12] OSMAN A I, MEHTA N, ELGARAHY A M, et al. Conversion of biomass to biofuels and life cycle assessment: A review[J]. *Environmental Chemistry Letters*, 2021, 19(6): 4075-4118.
- [13] AHMED I, ZIA M A, AFZAL H, et al. Socio-economic and environmental impacts of biomass valorisation: A strategic drive for sustainable bioeconomy[J]. *Sustainability*, 2021, 13(8): 4200.
- [14] YUE X, LIN J X, SUOPAJÄRVI T, et al. Conversion of highly polymerized lignin into monophenolic products *via* pyrolysis: A comparative study of acidic and alkaline depolymerization pretreatments using deep eutectic solvents[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 478: 147368.
- [15] XU J Y, LI D C, DAI P L, et al. Biomass fractionation and lignin fractionation towards lignin valorization[J]. *ChemSusChem*, 2020,

- 13(17): 4284-4295.
- [16] YU Y, WU J, REN X Y, et al. Steam explosion of lignocellulosic biomass for multiple advanced bioenergy processes: A review[J]. [Renewable and Sustainable Energy Reviews](#), 2022, 154: 111871.
- [17] PADJAJARAN U, HARAHA B M. Degradation techniques of hemicellulose fraction from biomass feedstock for optimum xylose production: A review[J]. [Jurnal Keteknik Pertanian Tropis Dan Biosistem](#), 2020, 8(2): 107-124.
- [18] XU L, ZHANG S J, ZHONG C, et al. Alkali-based pretreatment-facilitated lignin valorization: A review[J]. [Industrial & Engineering Chemistry Research](#), 2020, 59(39): 16923-16938.
- [19] QASIM U, SUOPAJÄRVI T, SIRVIÖ J A, et al. Pickering emulsions and hydrophobized films of amphiphilic cellulose nanofibers synthesized in deep eutectic solvent[J]. [Biomacromolecules](#), 2023, 24(9): 4113-4122.
- [20] ZHU X Y, PENG D C, CHEN H X, et al. Opportunities of ionic liquids for lignin utilization from biorefinery[J]. [ChemistrySelect](#), 2018, 3(27): 7945-7962.
- [21] MANJARE S D, DHINGRA K. Supercritical fluids in separation and purification: A review[J]. [Materials Science for Energy Technologies](#), 2019, 2(3): 463-484.
- [22] RAJ T, CHANDRASEKHAR K, BANU R, et al. Synthesis of γ -valerolactone (GVL) and their applications for lignocellulosic deconstruction for sustainable green biorefineries[J]. [Fuel](#), 2021, 303: 121333.
- [23] GALBE M, WALLBERG O. Pretreatment for biorefineries: A review of common methods for efficient utilisation of lignocellulosic materials[J]. [Biotechnology for Biofuels](#), 2019, 12: 294.
- [24] SITOTAW Y W, HABTU N G, GEBREYOHANNES A Y, et al. Ball milling as an important pretreatment technique in lignocellulose biorefineries: A review[J]. [Biomass Conversion and Biorefinery](#), 2023, 13(17): 15593-15616.
- [25] HANS M, PELLEGRINI V O A, FILGUEIRAS J G, et al. Optimization of dilute acid pretreatment for enhanced release of fermentable sugars from sugarcane bagasse and validation by biophysical characterization[J]. [BioEnergy Research](#), 2023, 16(1): 416-434.
- [26] MANKAR A R, PANDEY A, MODAK A, et al. Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances[J]. [Bioresource Technology](#), 2021, 334: 125235.
- [27] FERREIRA J A, TAHERZADEH M J. Improving the economy of lignocellulose-based biorefineries with organosolv pretreatment[J]. [Bioresource Technology](#), 2020, 299: 122695.
- [28] ABERA MEKURIAW T, ZEGALE TIZAZU B. Deep eutectic solvents for lignin isolation[M]//Advanced Lignin Technologies. London: IntechOpen, 2024
- [29] WANG Y, ZHANG W J, YANG J Y, et al. Efficient fractionation of woody biomass hemicelluloses using cholinium amino acids-based deep eutectic solvents and their aqueous mixtures[J]. [Bioresource Technology](#), 2022, 354: 127139.
- [30] OVEJERO-PÉREZ A, RIGUAL V, DOMÍNGUEZ J C, et al. Acidic depolymerization vs ionic liquid solubilization in lignin extraction from *Eucalyptus* wood using the protic ionic liquid 1-methylimidazolium chloride[J]. [International Journal of Biological Macromolecules](#), 2020, 157: 461-469.
- [31] SCHUUR B, BROUWER T, SPRAKEL L M J. Recent developments in solvent-based fluid separations[J]. [Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering](#), 2021, 12: 573-591.
- [32] ESCOBAR E L N, SUOTA M J, RAMOS L P, et al. Combination of green solvents for efficient sugarcane bagasse fractionation[J]. [Biomass and Bioenergy](#), 2022, 161: 106482.
- [33] ESCOBAR E L N, Da SILVA T A, PIRICH C L, et al. Supercritical fluids: A promising technique for biomass pretreatment and fractionation[J]. [Frontiers in Bioengineering and Biotechnology](#), 2020, 8: 252.
- [34] SI C L, XU J Y, DAI L, et al. Novel and efficient lignin fractionation processes for tailing lignin-based materials[M]//Emerging Technologies for Biorefineries, Biofuels, and Value-Added Commodities. Cham: Springer International Publishing, 2021: 363-387.
- [35] ZENG F Y, WANG S S, LIANG J R, et al. High-efficiency separation of hemicellulose from bamboo by one-step freeze-thaw-assisted alkali treatment[J]. [Bioresource Technology](#), 2022, 361: 127735.
- [36] GALLEGO-GARCÍA M, MORENO A D, MANZANARES P, et al. Recent advances on physical technologies for the pretreatment of food waste and lignocellulosic residues[J]. [Bioresource Technology](#), 2023, 369: 128397.
- [37] MEHTA J, METRE A V, BHAKHAR M S, et al. Biomass-derived 5-hydroxymethylfurfural (HMF) and 2, 5-dimethylfuran (DMF) synthesis as promising alternative fuel: A prospective review[J]. [Materials Today: Proceedings](#), 2022, 62: 6978-6984.
- [38] KHEMTHONG P, YIMSUKANAN C, NARKKUN T, et al. Advances in catalytic production of value-added biochemicals and biofuels via furfural platform derived lignocellulosic biomass[J]. [Biomass and Bioenergy](#), 2021, 148: 106033.
- [39] NELSON APPATURI J, ANDAS J, MA Y K, et al. Recent advances in heterogeneous catalysts for the synthesis of alkyl levulinate biofuel additives from renewable levulinic acid: A comprehensive review[J]. [Fuel](#), 2022, 323: 124362.
- [40] SWETHA T A, ANANTHI V, BORA A, et al. A review on biodegradable polylactic acid (PLA) production from fermentative food waste - Its applications and degradation[J]. [International Journal of Biological Macromolecules](#), 2023, 234: 123703.

- [41] THAKUR S, CHAUDHARY J, SINGH P, et al. Synthesis of bio-based monomers and polymers using microbes for a sustainable bioeconomy[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 344: 126156.
- [42] PATEL A, SHAH A R. Integrated lignocellulosic biorefinery: Gateway for production of second generation ethanol and value added products[J]. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 2021, 6(2): 108-128.
- [43] SILVA T P, de ASSIS G C, SANTANA N B, et al. Conversion of lignocellulosic biomass to xylitol and its applications[M]//*Valorization of Biomass to Bioproducts*. Amsterdam: Elsevier, 2023: 1-26.
- [44] DUTTA S, BHAT N S. Catalytic synthesis of renewable p-xylene from biomass-derived 2, 5-dimethylfuran: A mini review[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2023, 13(1): 541-554.
- [45] D'ARRIGO P, ROSSATO L A M, STRINI A, et al. From waste to value: Recent insights into producing vanillin from lignin[J]. *Molecules*, 2024, 29(2): 442.
- [46] CHEN Y J, YANG Y, LIU X, et al. Sustainable production of formic acid and acetic acid from biomass[J]. *Molecular Catalysis*, 2023, 545: 113199.
- [47] CHEN M Q, SHI J J, WANG Y S, et al. Conversion of Kraft lignin to phenol monomers and liquid fuel over trimetallic catalyst W-Ni-Mo/sepiolite under supercritical ethanol[J]. *Fuel*, 2021, 303: 121332.
- [48] TU R, LV W, SUN Y, et al. Ru-RuO₂-Nb₂O₅/H β zeolite catalyst for high-active hydrogenation of lignin derivatives at room temperature[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 453: 139718.
- [49] ZHANG D H, FU P S. Polyoxometalate as an effective catalyst for catalytic lignin into value-added molecules[J]. *ChemCatChem*, 2024, 16(1): e202301204.
- [50] ZHANG C F, SHEN X J, JIN Y C, et al. Catalytic strategies and mechanism analysis orbiting the center of critical intermediates in lignin depolymerization[J]. *Chemical Reviews*, 2023, 123(8): 4510-4601.
- [51] KATRE S, BAGHMARE P, GIRI A S. Photocatalytic nanomaterials and their implications towards biomass conversion for renewable chemical and fuel production[J]. *Nanoscale Advances*, 2024, 6(21): 5258-5284.
- [52] CHEN X, GUAN W X, TSANG C W, et al. Lignin valorizations with Ni catalysts for renewable chemicals and fuels productions[J]. *Catalysts*, 2019, 9(6): 488.
- [53] SHU R, LI R, LIN B, et al. High dispersed Ru/SiO₂-ZrO₂ catalyst prepared by polyol reduction method and its catalytic applications in the hydrodeoxygenation of phenolic compounds and pyrolysis lignin-oil [J]. *Fuel*, 2020, 265: 116962.
- [54] VALDEBENITO G, DINAMARCA C F, PARRA-MELIPAN S, et al. Synthesis of sustainable chemicals and fuels from biomass derivatives using homogeneous ruthenium catalysts[J]. *Molecular Catalysis*, 2024, 563: 114214.
- [55] SATAPATHY A, YADAV J K. Innovative protein and enzyme engineering processes for the production of biomass hydrolyzing enzymes[M]//*Biomass, Biofuels, Biochemicals*. Amsterdam: Elsevier, 2022: 395-418.
- [56] MONICA P, RANJAN R, KAPOOR M. Lignocellulose-degrading chimeras: Emerging perspectives for catalytic aspects, stability, and industrial applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 199: 114425.
- [57] SEO H, SINGH P, WYMAN C E, et al. Rewiring metabolism of *Clostridium thermocellum* for consolidated bioprocessing of lignocellulosic biomass poplar to produce short-chain esters[J]. *Bioresource Technology*, 2023, 384: 129263.
- [58] RAJAGOPALAN G, KRISHNAN C. Production of cellulosic butanol by clostridial fermentation: A superior alternative renewable liquid fuel[M]//*Biofuels and Bioenergy*. Amsterdam: Elsevier, 2022: 263-289.
- [59] YUAN Z Q, DAI W, ZHANG S H, et al. Heterogeneous strategies for selective conversion of lignocellulosic polysaccharides[J]. *Cellulose*, 2022, 29(6): 3059-3077.
- [60] LI Y, ZHANG Y C, LI Z Y, et al. Reaction pathways and selectivity in the chemo-catalytic conversion of cellulose and its derivatives to ethylene glycol: A review[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2024, 66: 310-331.
- [61] NAHAVANDI M, KASANNENI T, YUAN Z S, et al. Efficient conversion of glucose into 5-hydroxymethylfurfural using a sulfonated carbon-based solid acid catalyst: An experimental and numerical study[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2019: 9b00250.
- [62] TEMPELMAN C H L, OOZEERALLY R, DEGIRMENCI V. Heterogeneous catalysts for the conversion of glucose into 5-hydroxymethyl furfural[J]. *Catalysts*, 2021, 11(7): 861.
- [63] YADAV M, BEHERA K, CHANG Y H, et al. Cellulose nanocrystal reinforced chitosan based UV barrier composite films for sustainable packaging[J]. *Polymers*, 2020, 12(1): 202.
- [64] EL HAJAM M, KANDRI N I, ZEROUALE A, et al. Lignocellulosic nanocrystals from sawmill waste as biotemplates for free-surfactant synthesis of photocatalytically active porous silica[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(17): 19547-19560.
- [65] PAKHARENKO V, SAMENI J, KONAR S, et al. Cellulose nanofiber thin-films as transparent and durable flexible substrates for electronic devices[J]. *Materials & Design*, 2021, 197: 109274.
- [66] TANG Z W, LIN X X, CHEN Y L, et al. Preparation of mussel-inspired polydopamine-functionalized TEMPO-oxidized cellulose nanofiber-based composite aerogel as reusable adsorbent for water treatment[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 206: 117735.

- [67] PARIT M, JIANG Z H. Towards lignin derived thermoplastic polymers[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 165(Pt B): 3180-3197.
- [68] TIZ D B, VICENTE F A, KROFLIČ A, et al. Lignin-based covalent adaptable network Polymers—When bio-based thermosets meet recyclable by design[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(38): 13836-13867.
- [69] JIN Y H, LIN J X, CHENG Y, et al. Lignin-based high-performance fibers by textile spinning techniques[J]. *Materials*, 2021, 14(12): 3378.
- [70] LYND L R, BECKHAM G T, GUSS A M, et al. Toward low-cost biological and hybrid biological/catalytic conversion of cellulosic biomass to fuels[J]. *Energy & Environmental Science*, 2022, 15(3): 938-990.
- [71] LANFRANCHI A, DESMOND-LE QUÉMÉNER E, MAGDALENA J A, et al. Conversion of wine lees and waste activated sludge into caproate and heptanoate: Thermodynamic and microbiological insights[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 408: 131126.
- [72] ROSENFELD C, KONNERTH P J, SAILER-KRONLACHNER W, et al. Current situation of the challenging scale-up development of hydroxymethylfurfural production[J]. *ChemSusChem*, 2020, 13(14): 3544-3564.
- [73] ZHAO C H, ZHANG Y P, LI Y. Production of fuels and chemicals from renewable resources using engineered *Escherichia coli*[J]. *Biotechnology Advances*, 2019, 37(7): 107402.
- [74] LU X Y, GU X L, SHI Y J. A review on lignin antioxidants: Their sources, isolations, antioxidant activities and various applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 210: 716-741.
- [75] HAO X X, XU F, ZHANG J H. Effect of pretreatments on production of xylooligosaccharides and monosaccharides from corn cob by a two-step hydrolysis[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 285: 119217.
- [76] WOHLGEMUTH R. Bio-based resources, bioprocesses and bioproducts in value creation architectures for bioeconomy markets and beyond—What really matters[J]. *EFB Bioeconomy Journal*, 2021, 1: 100009.
- [77] MAGWAZA B, AMOBONYE A, PILLAI S. Microbial β -glucosidases: Recent advances and applications[J]. *Biochimie*, 2024, 225: 49-67.
- [78] CONTRERAS F, PRAMANIK S, ROZHKOVA A M, et al. Engineering robust cellulases for tailored lignocellulosic degradation cocktails[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(5): 1589.
- [79] VALENZUELA-ORTEGA M, FRENCH C E. Engineering of industrially important microorganisms for assimilation of cellulosic biomass: Towards consolidated bioprocessing[J]. *Biochemical Society Transactions*, 2019, 47(6): 1781-1794.
- [80] KUIVANEN J, KANNISTO M, MOJZITA D, et al. Engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for anthranilate and methyl anthranilate production[J]. *Microbial Cell Factories*, 2021, 20(1): 34.
- [81] RE A, MAZZOLI R. Current progress on engineering microbial strains and consortia for production of cellulosic butanol through consolidated bioprocessing[J]. *Microbial Biotechnology*, 2023, 16(2): 238-261.
- [82] LI Z Y, WAGHMARE P R, DIJKHUIZEN L, et al. Research advances on the consolidated bioprocessing of lignocellulosic biomass[J]. *Engineering Microbiology*, 2024, 4(2): 100139.
- [83] OLIVEIRA T C G, INTERLANDI M A, HANLON K E, et al. Integration of subcritical water and enzymatic hydrolysis to obtain fermentable sugars and second-generation ethanol from sugarcane straw[J]. *BioEnergy Research*, 2022, 15(2): 1071-1082.
- [84] OJO A O, de SMIDT O. Lactic acid: A comprehensive review of production to purification[J]. *Processes*, 2023, 11(3): 688.
- [85] NDOCHINWA O G, WANG Q Y, AMADI O C, et al. Current status and emerging frontiers in enzyme engineering: An industrial perspective[J]. *Heliyon*, 2024, 10(11): e32673.
- [86] CHEN X L, MOSIER N, LADISCH M. Valorization of lignin from aqueous-based lignocellulosic biorefineries[J]. *Trends in Biotechnology*, 2024, 42(11): 1348-1362.
- [87] RAJ T, CHANDRASEKHAR K, NARESH KUMAR A, et al. Recent advances in commercial biorefineries for lignocellulosic ethanol production: Current status, challenges and future perspectives[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 344: 126292.
- [88] SINGH N, SINGHANIA R R, NIGAM P S, et al. Global status of lignocellulosic biorefinery: Challenges and perspectives[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 344: 126415.
- [89] LAN K, XU Y L, KIM H, et al. Techno-economic analysis of producing xylo-oligosaccharides and cellulose microfibers from lignocellulosic biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 340: 125726.
- [90] ALONSO-FARIÑAS B, GALLEGOSCHMID A, HARO P, et al. Environmental assessment of thermo-chemical processes for bio-ethylene production in comparison with bio-chemical and fossil-based ethylene[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 202: 817-829.
- [91] LUO C K, ZHOU Y, CHEN Z T, et al. Comparative life cycle assessment of PBAT from fossil-based and second-generation generation bio-based feedstocks[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 954: 176421.
- [92] TSIROPOULOS I, FAAL A P C, LUNDQUIST L, et al. Life cycle impact assessment of bio-based plastics from sugarcane ethanol[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 90: 114-127.
- [93] DAS S, ANDERSON J E, de KLEINE R, et al. Comparative life cycle assessment of corn stover conversion by decentralized biomass

- pyrolysis-electrocatalytic hydrogenation *versus* ethanol fermentation[J]. *Sustainable Energy & Fuels*, 2023, 7(3): 797-811.
- [94] VURAL GURSEL I, MORETTI C, HAMELIN L, et al. Comparative cradle-to-grave life cycle assessment of bio-based and petrochemical PET bottles[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 793: 148642.
- [95] LIJÓ L, GONZÁLEZ-GARCÍA S, LOVARELLI D, et al. Life cycle assessment of renewable energy production from biomass[M]//Life Cycle Assessment of Energy Systems and Sustainable Energy Technologies. Cham: Springer International Publishing, 2018: 81-98.
- [96] YUAN H W, TAN L, KIDA K, et al. Potential for reduced water consumption in biorefining of lignocellulosic biomass to bioethanol and biogas[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2021, 131(5): 461-468.
- [97] de GRAAFF M A, HORNSLEIN N, THROOP H L, et al. Effects of agricultural intensification on soil biodiversity and implications for ecosystem functioning: A meta-analysis[M]//Advances in Agronomy. Amsterdam: Elsevier, 2019: 1-44.
- [98] LILONFE S, DAVIES B, ABDUL-MANAN A F N, et al. A review of techno-economic analyses and life cycle greenhouse gas emissions of biomass-to-hydrocarbon “drop-in” fuels[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, 47: 425-444.
- [99] RIESE J, FASEL H, PANNOK M, et al. Decentralized production concepts for bio-based polymers - implications for supply chains, costs, and the carbon footprint[J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2024, 46: 460-475.
- [100] PANICHELLI L, GNANSOUNOU E. Impact of agricultural-based biofuel production on greenhouse gas emissions from land-use change: Key modelling choices[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 42: 344-360.
- [101] YANG L, WANG X C, DAI M, et al. Shifting from fossil-based economy to bio-based economy: Status quo, challenges, and prospects[J]. *Energy*, 2021, 228: 120533.
- [102] INGRAO C, MATARAZZO A, GORJIAN S, et al. Wheat-straw derived bioethanol production: A review of Life Cycle Assessments[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 781: 146751.
- [103] MAGA D, HIEBEL M, THONEMANN N. Life cycle assessment of recycling options for polylactic acid[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 149: 86-96.
- [104] WOO D, KANG N, PARK H, et al. Biomass-derived closed-loop recyclable chemically crosslinked polymer composites for green soft electronics[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 488: 150818.
- [105] BAAS L. Planning and uncovering industrial symbiosis: Comparing the Rotterdam and östergötland regions[J]. *Business Strategy and the Environment*, 2011, 20(7): 428-440.
- [106] MALETTA E, DÍAZ - AMBRONA C H. Lignocellulosic crops as sustainable raw materials for bioenergy [J]. *Green Energy to Sustainability: Strategies for Global Industries*, 2020: 489-514.
- [107] ANSARI S A, SHAKEEL A, SAWARKAR R, et al. Additive facilitated co-composting of lignocellulosic biomass waste, approach towards minimizing greenhouse gas emissions: An up to date review[J]. *Environmental Research*, 2023, 224: 115529.
- [108] WANG D, HUBACEK K, SHAN Y L, et al. A review of water stress and water footprint accounting[J]. *Water*, 2021, 13(2): 201.
- [109] GOMES E, INÁCIO M, BOGDZEVIC K, et al. Future land-use changes and its impacts on terrestrial ecosystem services: A review[J]. *The Science of the Total Environment*, 2021, 781: 146716.
- [110] BRANQUINHO C, SERRANO H C, NUNES A, et al. Essential biodiversity change indicators for evaluating the effects of anthropocene in ecosystems at a global scale[M]//From Assessing to Conserving Biodiversity. Cham: Springer International Publishing, 2019: 137-163.
- [111] WANG C B, ZHANG L X, CHANG Y, et al. Energy return on investment (EROI) of biomass conversion systems in China: Meta-analysis focused on system boundary unification[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 137: 110652.
- [112] GONZÁLEZ-GARCÍA S, GULLÓN P, GULLÓN B. Bio-compounds production from agri-food wastes under a biorefinery approach: Exploring environmental and social sustainability[M]//Quantification of Sustainability Indicators in the Food Sector. Singapore: Springer Singapore, 2018: 25-53.
- [113] CORONA B, SHEN L, REIKE D, et al. Towards sustainable development through the circular economy: A review and critical assessment on current circularity metrics[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 151: 104498.
- [114] VELVIZHI G, GOSWAMI C, SHETTI N P, et al. Valorisation of lignocellulosic biomass to value-added products: Paving the pathway towards low-carbon footprint[J]. *Fuel*, 2022, 313: 122678.
- [115] LIU S L, DONG Y H, LIU H, et al. Review of valuation of forest ecosystem services and realization approaches in China[J]. *Land*, 2023, 12(5): 1102.
- [116] ARULNATHAN V, HEIDARI M D, DOYON M, et al. Economic indicators for life cycle sustainability assessment: Going beyond life cycle costing[J]. *Sustainability*, 2023, 15(1): 13.
- [117] VANCE C, SWEENEY J, MURPHY F. Space, time, and sustainability: The status and future of life cycle assessment frameworks for novel biorefinery systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 159: 112259.
- [118] MUTEL C, LIAO X, PATOULLARD L, et al. Overview and recommendations for regionalized life cycle impact assessment[J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24(5): 856-865.

-
- [119] SOLDATI C, de LUCA A I, IOFRIDA N, et al. Ecosystem services and biodiversity appraisals by means of life cycle tools: State-of-art in agri-food and forestry field[J]. *Agriculture & Food Security*, 2023, 12(1): 33.
- [120] CADENA E, ROCCA F, GUTIERREZ J A, et al. Social life cycle assessment methodology for evaluating production process design: Biorefinery case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 238: 117718.
- [121] ALHARITHI F S, ALZHRANI A A. Enhancing environmental sustainability with federated LSTM models for AI-driven optimization[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2024, 108: 640-653.
- [122] CHANOCA A, de VRIES L, BOERJAN W. Lignin engineering in forest trees[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 912.
- [123] ATHUKORALALAGE S S, BALU R, DUTTA N K, et al. 3D bioprinted nanocellulose-based hydrogels for tissue engineering applications: A brief review[J]. *Polymers*, 2019, 11(5): 898.
- [124] BIN ABU SOFIAN A D A, SUN X, GUPTA V K, et al. Advances, synergy, and perspectives of machine learning and biobased polymers for energy, fuels, and biochemicals for a sustainable future[J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38(3): 1593-1617.
- [125] USMANI Z, SHARMA M, AWASTHI A K, et al. Lignocellulosic biorefineries: The current state of challenges and strategies for efficient commercialization[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 148: 111258.
- [126] HASSAN S S, WILLIAMS G A, JAISWAL A K. Moving towards the second generation of lignocellulosic biorefineries in the EU: Drivers, challenges, and opportunities[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 101: 590-599.
- [127] NONG D, ESCOBAR N, BRITZ W, et al. Long-term impacts of bio-based innovation in the chemical sector: A dynamic global perspective[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 272: 122738.
- [128] GÜLEÇ F, PARTHIBAN A, UMENWEKE G C, et al. Progress in lignocellulosic biomass valorization for biofuels and value-added chemical production in the EU: A focus on thermochemical conversion processes[J]. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 2024, 18(3): 755-781.