

立足多维碳源 擘画非粮蓝图

2023非粮生物质开发关键技术与产业结构解读



June 2023

Copyright @DeepTech 2023
All rights reserved.



立足多维碳源 擘画非粮蓝图

2023非粮生物质开发关键技术与产业结构解读

03	导语
04	Chapter 1 非粮生物质产业浪潮已至 碳源迭代, 引领生物产业大规模商业化
12	Chapter 2 非粮生物质开发技术突破方向 串联生物制造产业上下游的关键环节
30	Chapter 3 非粮生物质推动产业发展与结构变革 降本、扩张、提速、聚集, 带来产业升级新范式
40	展望
41	版权说明

导语

“双碳”目标引领着广泛而深刻的变革，构建更加绿色可持续的生产制造模式成为未来发展的必然趋势，随着全球生物技术和产业升级的加速推进，生物制造成为实现这一转变的重要推动力。

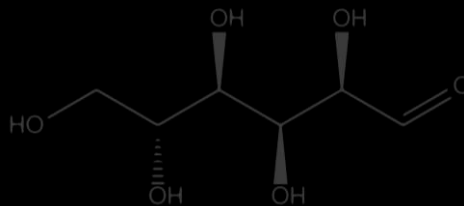
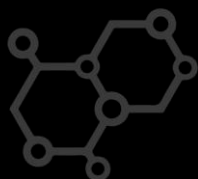
2023年1月，工信部等六部门印发《加快非粮生物基材料创新发展三年行动方案》，提出到2025年，非粮生物基材料产业基本形成自主创新能力强、产品体系不断丰富、绿色循环低碳的创新发展生态，非粮生物质原料利用和应用技术基本成熟，部分非粮生物基产品竞争力与化石基产品相当，高质量、可持续的供给和消费体系初步建立。

以非粮生物质为原料通过发酵的手段生产生物基材料，既是对秸秆等生物质高附加值的利用，也有力支撑“双碳”战略目标的实现。当前，生物基材料已形成一定市场规模、产业链已初步形成，但非粮生物质的开发尚未实现大规模技术突破，产业升级迭代潜力巨大。非粮生物质的开发有望成为生物基材料降本增效的关键环节，基于非粮碳源、通过发酵或催化实现生物基产品对石化基产品的替代和升级，成为提升生物基产品市场竞争力的重要途径。

非粮生物质 主要包括木薯等淀粉类经济作物、木质纤维素（如农作物秸秆、林业废弃物、薪炭林）等不是以粮食作为原材料的生物质资源。中国年产各类非粮生物质资源超过35亿吨，其中农业废弃物9.6亿吨、林业废弃物3.5亿吨，产量巨大且性质稳定，理论上是生物质资源利用中避免粮食消耗的最佳替代品。

以木质纤维素为代表的非粮生物质是地球最为丰富的一种可再生资源，被认为是可持续能源和绿色化学工业的重要来源之一。非粮生物质开发作为串联生物制造产业上下游的关键环节，向上促进农业废弃利用、边际土地开发、农业育种；向下推动生物制造降本增效，助力生物基材料能源规模扩张。

本报告聚焦**非粮生物质开发关键技术**，重点关注非粮生物质高效糖化、非粮生物质综合利用、酶与工业菌种开发，以及由非粮生物质利用带来的产业结构变革。



Chapter 1

非粮生物质产业浪潮已至

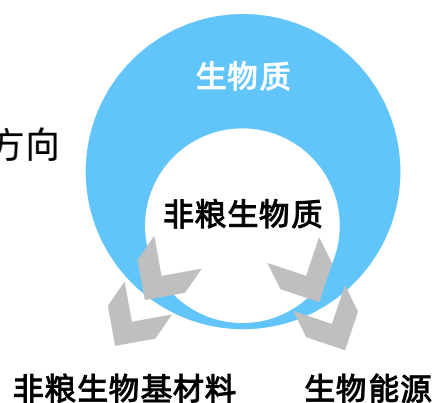


生物质资源高效开发产业潜力巨大

- 生物质开发助力碳中和
- 横跨20年, 全球生物质产业政策支持全面展开

碳源迭代, 非粮生物质引领大规模商业应用

- 边际土地利用与秸秆开发, 助力粮食安全
- 全球非粮生物质开发模式
- 生物基材料成为非粮生物质产业应用的潮流方向



生物质资源高效开发产业潜力巨大

生物质资源是全球最大的可再生资源, 占可再生资源的55%, 占全球供应的6%以上, 从2010年到2021年, 现代生物质资源的使用平均每年增长7%, 且呈上升趋势。据国际能源署 (IEA) 预测, 2021至2030年国际生物质利用规模将以每年10%的速度增长, 到2030年50%的生物质资源的供应来自不需要土地使用的废物和残留物。

当前中国生物质能总资源量达到37.95亿吨, 开发潜力为4.6亿吨标准煤, 生物质资源产生量呈不断上升趋势, 到2030年中国生物质总资源量将达到37.95亿吨, 到2060年我国生物质资源量将达到53.46亿吨。当前中国生物质资源真正转化为能源利用的不足0.6亿吨标准煤。中国生物质产值已达到10万亿规模, 未来全球生物经济的规模预计可以达到30万亿美元, 未来生物质产业发展潜力巨大。

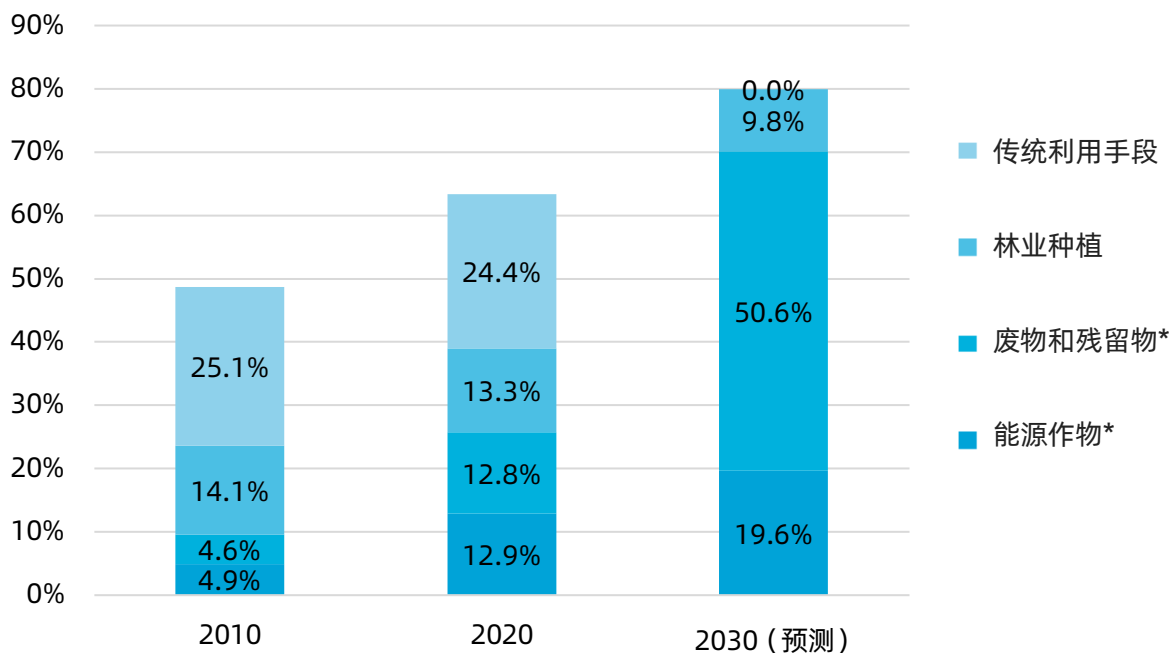


图1 | 全球生物质资源供应 (数据来源: 国际能源署)

*能源作物: 包括常规能源作物、粮食能源作物和短周期木本作物

*废物和残留物: 包括农业残留物、食品加工、工业和城市废物流、林业和木材加工残留物

生物质开发助力碳中和

2017年国际能源署（IEA）将生物资源描述为“最重要的可再生能源”。2021年9月，中共中央、国务院印发的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》提出合理利用生物质能。2022年6月国家发展改革委、国家能源局等部门联合印发《“十四五”可再生能源发展规划》，提出稳步推进生物质能多元化开发。

据估计，全球植物每年光合作用产生的干物质高达1500-2000亿吨，是地球上唯一可超大规模再生的实物性资源。中国每年产生的农业作物秸秆有7亿多吨，相当于3.5亿吨标准煤，森林采伐加工剩余物1000多万吨，蔗渣400多万吨，但每年用于工业过程或燃烧的纤维素资源仅占2%左右，绝大部分还未被利用。到2030年中国利用生物资源将减碳超9亿吨，到2060年将减碳超20亿吨。

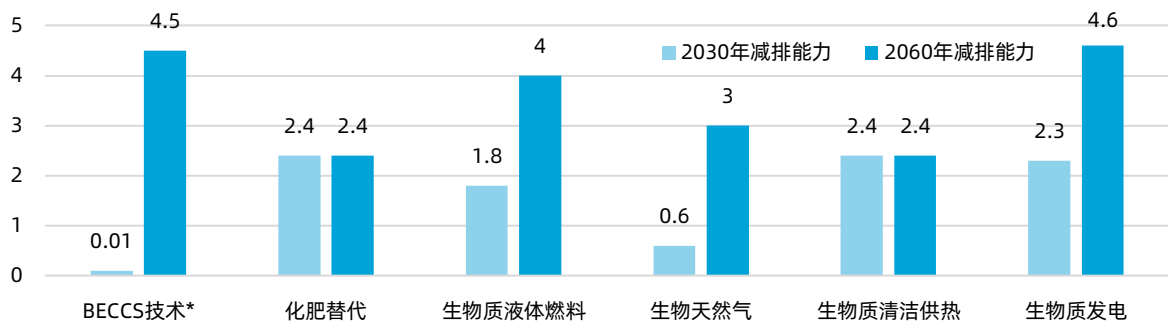


图2 | 生物质各碳减排路径下碳减排量（单位：亿吨；数据来源：BEIPA）

生物质开发在减少化石资源使用、实现碳减排中发挥重要作用的途径主要涵盖能源、产品和过程三个方面：

- 能源** 能源替代是最简单的生物质利用方式，如生物乙醇和生物柴油替代化石燃料；
- 产品** 生物基化学品每1吨生产，可减少约300吨煤碳使用、近800千克二氧化碳排放；
- 过程** 在工业过程中每使用1千克酶制剂，相比化学法可减排100千克二氧化碳。

非粮生物基开发贯穿能源、产品、过程三大方面，堪称生物质资源利用中“尚未被完全开发的宝藏”。

*BECCS技术即生物能源与碳捕获和储存技术

横跨20年, 全球生物质产业政策支持全面展开

由于生物制造技术在资源节约和碳减排中的重要作用, 世界主要国家均积极推进生物制造技术的发展和运用, 生物制造已经得到全球范围内各界的广泛重视与支持。

地区	时间	概述
欧盟&英国	2021年	英国《工业生物技术报告: 标准和法规的战略路线图》确定生物燃料、精细和特种化学品、塑料和纺织品等领域发展路线图
	2020年	欧盟《战略创新与研究议程 (SIRA 2030)》报告, 提出“2050年建立循环生物社会”的愿景
	2012年	欧洲生物经济战略启动, 旨在解决可再生生物资源的生产及其转化为重要产品和生物能源的问题
美国	2023年	计划于5年内生产超过20种商业上可行的生物产品; 20年内大规模取代当今90%以上的塑料和其他商业聚合物
	2022年	启动《国家生物技术和生物制造计划》, 斥资1.78亿美元用于生物能源研究, 以推进可持续技术突破和改善碳储存
	2012年	提出“国家生物经济蓝图”中将发展生物基产品作为发展生物经济的主要内容之一
	2000年	颁布《生物质研发法案》为生物能源研发提供统一基准, 要求采用财政和金融等手段鼓励生物能源研发
中国	2023年	《加快非粮生物基材料创新发展三年行动方案》引导大宗农作物秸秆及剩余物等非粮生物质的生物基材料产业创新发展
	2022年	《“十四五”生物经济发展规划》提出生物基材料替代传统化学原料、生物工艺替代传统化学工艺等进展明显目标
	2012年	国务院发布《生物产业发展规划》, 推进生物基材料生物聚合、化学聚合等技术的发展与应用
	2001年	国民经济和社会发展第十个五年计划纲要, 提出深入加强沼气等新节能技术, 以加强农村能源综合建设

表1 | 全球主要国家和地区生物质产业支持政策 (来源: 公开资料、DeepTech)

碳源迭代, 非粮生物质引领大规模商业应用

生物质资源利用根据原材料和利用方式的区别, 可以划分为三个代际技术迭代:

第一代开发技术 以粮食作物、糖类为原料, 是当前阶段主要的生物质开发手段。工业上广泛应用的发酵原料是淀粉, 淀粉主要存在于谷物籽粒和植物根茎, 基于粮食原料的生物基开发可能造成“与粮争地”。

第二代开发技术 以非粮生物质为原料, 主要包括木薯等淀粉类经济作物、木质纤维素(农作物秸秆、林业废弃物、薪炭林、木本油料林、灌木林)、有机生活垃圾、畜禽粪污、生活污水污泥等。中国年产农业废弃物9.6亿吨、林业废弃物3.5亿吨。

第三代开发技术 以生物细胞工厂利用大气中的二氧化碳来进行生物生产, 其发展落后于现有生物制造技术路线, 对生物固碳过程中涉及的各个步骤需要进行深入理解和优化, 当前仍处于早期阶段, 距离大规模产业应用尚有距离。

以非粮生物质为核心的产业, 通过不断迭代开发, 技术积累已基本完备, 将秸秆转化用于较高价值产品, 成为开启非粮生物质大规模商业应用的关键技术。在可持续发展的趋势下, 成为产业界越来越关注的领域。

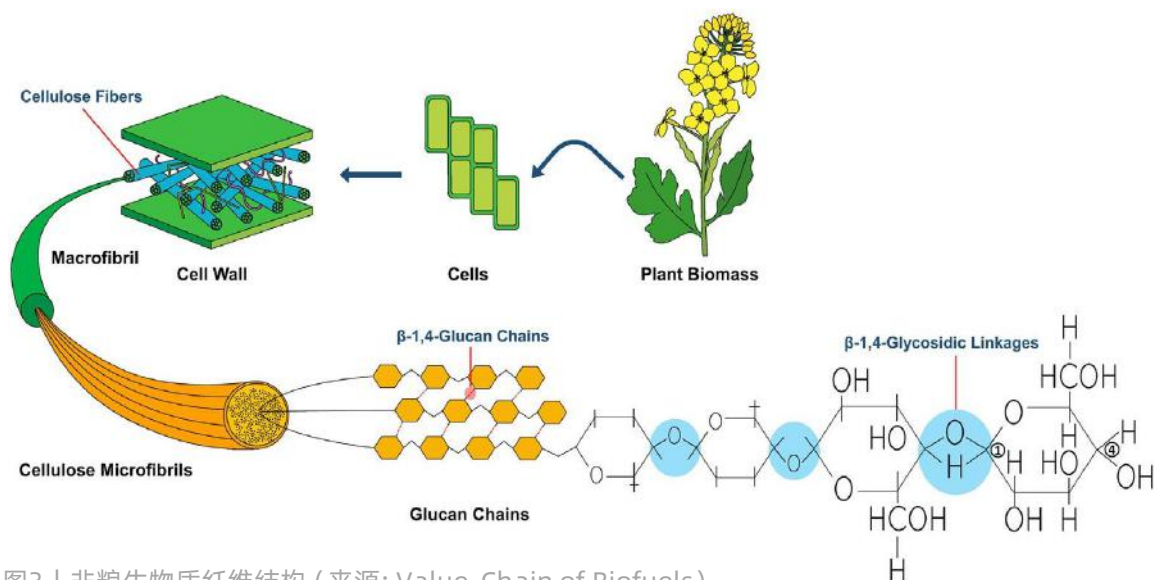


图3 | 非粮生物质纤维结构 (来源: Value-Chain of Biofuels)

边际土地利用与秸秆开发, 助力粮食安全

在中国的粮食安全战略下, 采取多种措施以确保粮食供应稳定, 满足人民对粮食的需求。中国是全球生物发酵第一大国, 当前各类生物发酵的原料仍以粮食为主, 发酵产品年产量近2000多万吨, 消耗粮食近5000万吨。中国生物基产品正向大宗产品渗透, 粮食势必无法大量规模用于生物制造产业。发展“不与民争粮”的生物质碳源平台, 是实现中国农业和生物制造业可持续发展的重要前提。

边际土地的开发和秸秆的充分利用可以作为替代方案, 促进生物发酵的可持续发展。

边际土地 是指那些不适合传统农作物生产的土地, 如荒山、沙漠边缘、盐碱地等。通过合理开发利用这些土地, 可以减少对肥沃农田的压力, 保护和提高主要农作物的产量和品质。利用边际土地种植木薯等非粮作物, 一方面为生物制造提供淀粉等原料, 另一方面有利于对边际土地的改良, 最终形成可用于粮食种植的耕地, 助力粮食安全。

开展盐碱地综合利用, 是一个战略问题, 必须摆上重要位置。要立足我国盐碱地多、开发潜力大的实际, 发挥科技创新的关键作用, 加大盐碱地改造提升力度, 加强适宜盐碱地作物品种开发推广, 有效拓展适宜作物播种面积, 积极发展深加工, 做好盐碱地特色农业这篇大文章。——2023年习总书记考察黄骅市旱碱地麦田



农作物秸秆 中国秸秆资源量巨大, 2022年秸秆综合利用市场规模为2065.4亿元, 同比上年增长6.41%。秸秆在传统农业生产中被视为副产品或废弃物, 农作物秸秆的价格仅是粮食的十分之一, 糖类物质含量与粮食籽粒相近 (粮食约70%, 秸秆约65%), 产量巨大且性质稳定, 同样是生物质资源利用中避免粮食消耗的最佳替代品之一。

全球非粮生物质开发模式

粗放利用

美国、加拿大将2/3左右的秸秆用于直接还田外, 另有1/5左右的秸秆被用做饲料。
德国沼气发电量已占全国发电总量的7.5%, 开发沼气、堆肥等以沼气为纽带的秸秆循环利用模式。

直接燃烧/发电

丹麦是世界上最早应用秸秆发电的国家之一, 1988年建成了世界第一座秸秆生物燃料发电厂。**德国**推广固体成型技术, 利用技术将秸秆压块, 其燃烧值大幅提高, 便于用户家庭取暖。**意大利**直接将秸秆资源经过处理成型生产出瓦楞状成型燃料。
美国建立了350余个生物质发电站。

发酵/生物能源

巴西利用甘蔗和农作物秸秆资源生产燃料乙醇, 该项技术位于处于世界先进水平。积极开展纤维素乙醇技术研发并初步实现试点生产和运营的国家还有**美国、加拿大、意大利、英国**等。



美国利用产能过剩的玉米生产生物乙醇, 通过财政补贴等形式提高农民收入, 改进能源安全, 但其他国家粮食作物结构情况难以效仿。

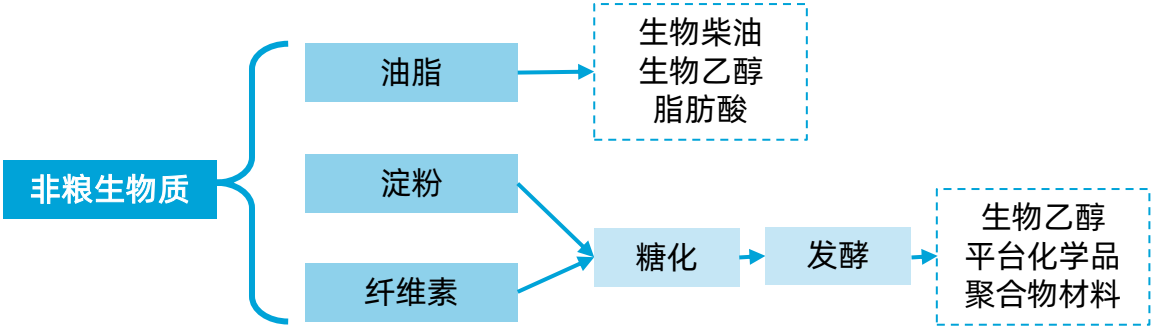


图4 | 非粮生物质高效开发途径 (来源: DeepTech)

生物基材料成为非粮生物质产业应用的潮流方向

中国生物基材料正处于科研开发走向产业化规模应用关键时期, 2021年中国生物基材料产量700万吨、产值超过1500亿元, 占化工行业总产值的2.3%, 并在塑料制品、纺织纤维、医药器械、涂料、农业物资、表面活性剂等方面得到广泛应用。

当前阶段生物基材料生产中培养基成本占60%以上, 生物基材料成本普遍高出同类石油基产品30%以上, 市场替代优势弱、推广应用难。

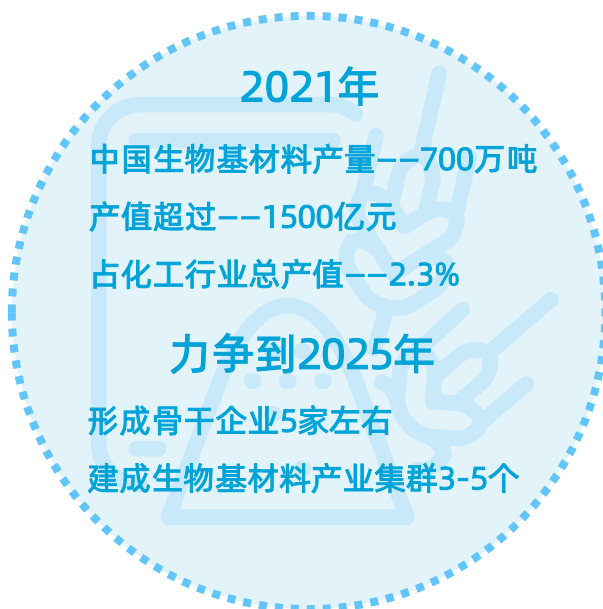
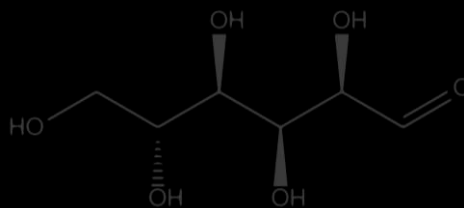
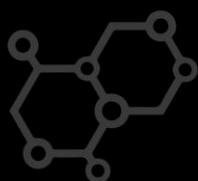


图5 | 中国生物基材料产业 (数据来源: 工信部)

以非粮生物质为原料, 在技术突破的基础上, 有望进一步降低生物基材料成本提升竞争力。同时, 非粮生物质标准化采收保存、工业菌种与酶蛋白功能元件制备、非粮生物质高效糖化等关键平台技术正处于攻关爬坡阶段, 将产生巨大的商业机会。

工业和信息化部:

中国生物基材料产业发展迅速, 构建了较为完整的产业技术体系, 产业规模不断扩大, 骨干企业逐步壮大, 重点产品应用渐广。但目前生物基材料主要还是基于**粮食原料**。由于我国人均耕地、粮食保有量与部分资源丰富国家相比差异很大, 虽然我国粮食连年丰收、供应充裕、市场稳定, 若是基于粮食原料发展生物基材料也难以继, 必然面临“与民争粮”“与畜争饲”等矛盾。因此, 我国发展生物基材料, 必须树立并贯彻“大食物观”, 实施“藏粮于技”战略, 将传统意义上“**非粮生物质**”转换为发展生物基材料的原料, 防范化解“与民争粮”“与畜争饲”等矛盾, 间接提高我国单位耕地“粮食”产出, 为端牢中国饭碗再贡献一份力量。



Chapter 2

非粮生物质开发技术突破方向



非粮生物质开发全产业链技术路线

- 源头: 边际土地开发是扩大生物碳源的有效途径
- 上游: 秸秆收储运规模化困难, 糖平台原料未来可期
- 中游: 4大技术难点突破助力产业大规模应用
 高效糖化 除抑制物 解碳阻遏 综合开发
- 下游: 非粮生物质赋能高效开发下游产品

相关研究学者

非粮生物质开发全产业链技术路线

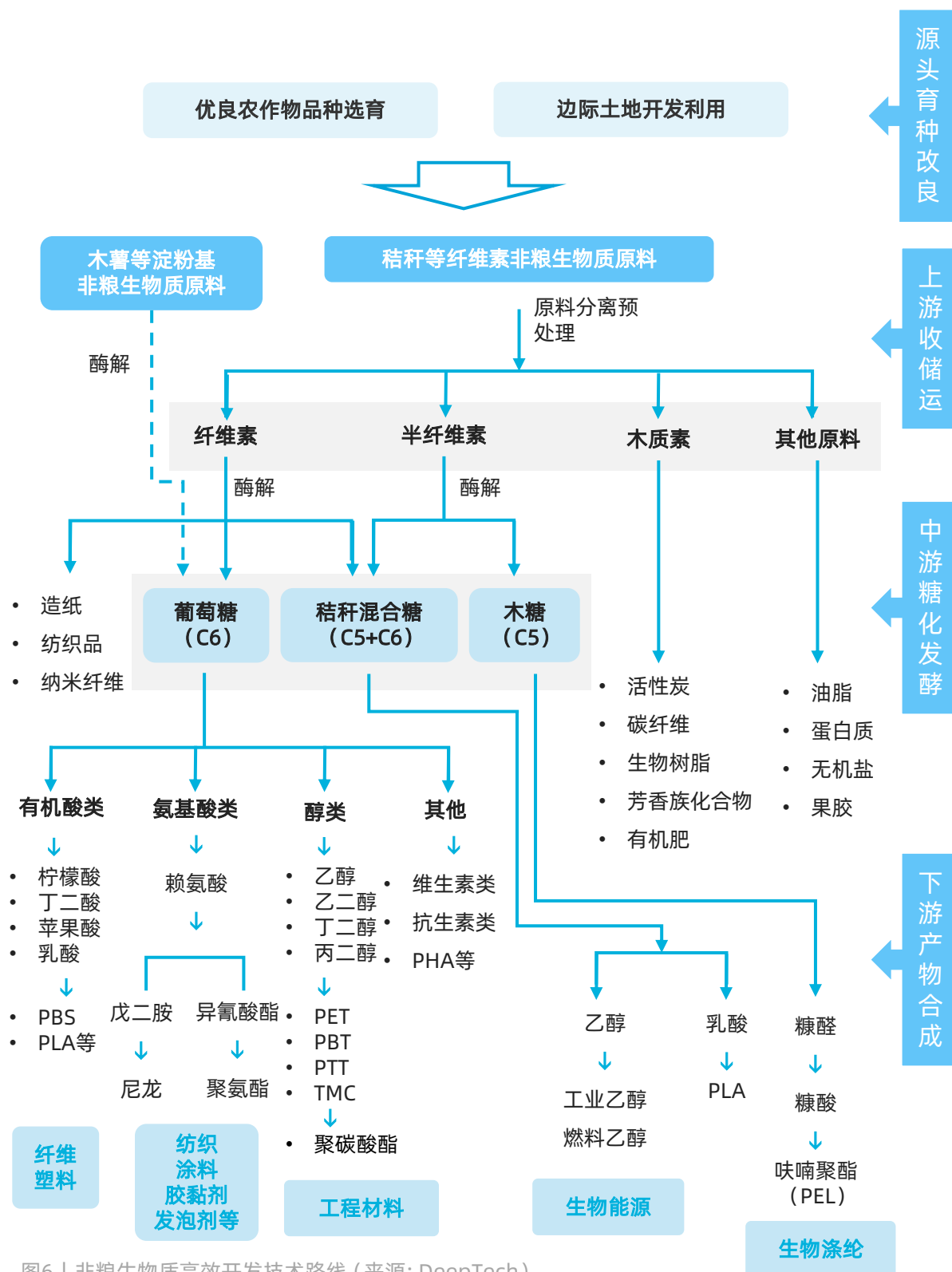


图6 | 非粮生物质高效开发技术路线 (来源: DeepTech)

非粮生物质开发全产业链技术路线

过去的生物制造中, 产业界更加偏好原料的易用性, 淀粉成为生物制造中理想的高分子糖, 玉米、小麦等淀粉含量较高的粮食作物成为优先选择, 为微生物提供碳源。随着生物制造产业由高附加值的小品类下沉至大宗市场, 原料的成本成为限制其规模的重要因素, 非粮生物质开发成为了重要的选择方案。

源头育种改良是解决生物质来源的重要手段, 开发适应边际土地的非粮糖源、淀粉等作物, 为生物制造提供稳定的高质量碳源。

上游秸秆收储运目的是有效管理和利用农作物秸秆资源, 包括将其从田间收集到集中储存, 并通过适当的运输手段将其运送到利用或加工的目的地。在实际操作中, 需要考虑到产量、收集和储存设施的可行性, 以及运输成本和效率等因素, 综合考虑选择合适的收储运方案。

源头育种改良

良种选育

- 耐盐碱
- 抗旱
- 高产新品种

边际土地利用

- 土壤改良
- 生物肥料施用

上游收储运

秸秆收运

- 分散模式
- 集中模式

秸秆储存

- 干储
- 湿储

中游糖化发酵

关键酶开发

生物质糖化

菌种开发

发酵技术

产物提取纯化

下游产物合成

化合物

- 中间化合物
- 平台化合物

产品

- 塑料/聚合物
- 溶剂
- 表面活性剂

图7 | 非粮生物质开发产业链 (来源: 公开资料、DeepTech)

中游糖化发酵日益凸显产业链关键环节价值, 上游供给充足但高值化利用不足, 下游产业链成熟但成本居高, 中游原料来源的复杂性会使技术的复杂度提升, 以技术手段解决痛点, 有助于打通上下游产业链。中游碳源的供给成为关键平台原料, 秸秆糖化的技术突破, 是大规模产业应用的关键。

生物基下游产业技术路线已基本建立, 而以非粮生物质为出发点的生物制造尚未形成规模, 与现有工艺技术进行耦合衔接亟待突破。

边际土地开发是扩大生物碳源的有效途径

随着生物制造产业的迅速发展,对大量碳源的需求日益增长,传统的粮食作物供应已经无法满足这一需求,实现可持续发展的根本途径之一是扩大供给,以满足不断提升的产业需求。

当前生物制造产业仍以淀粉为主,为了更好与现有生物制造产业衔接,开发边际土地种植淀粉类非粮作物,成为从源头扩充产能的重要手段。

自然食物生产开发,针对当地自然生态系统中的菌类、植物、动物产品等进行采集,食物资源密度较小。

盐碱土壤治理,通过洗盐过程减轻土壤盐分,配套微生物菌剂改良土壤、精准施肥、农业病虫害防控等。

抗逆农业育种,通过筛选和培育耐盐、耐旱的粮油作物、饲草与经济作物进行种植,在不增加工程和改良材料投入的前提下有效扩增盐碱地的农作物数量和种类。



盐碱地在中国的总面积为5.4亿亩,其中耕地中盐碱化面积达到1.3亿亩,占全国耕地面积6.62%,主要分布在北方地区以及长江以北沿海地带。主要包括两种类型:第一类是盐碱障碍耕地,主要种植作物有粮食作物、大豆、甜菜、牧草等,但产量效益均不稳定;第二类是尚未进行农业利用的盐碱地,生产开发潜力较大。

未来技术方向

CRISPR技术可以准确地编辑目标基因或调控序列,目前已被广泛用于小麦、水稻、烟草和拟南芥等多种植物,展现出强大的克服农业育种各项挑战的潜力。CRISPR技术在耐盐作物育种中的几个应用方向包括:关键基因的精确编辑、转录因子的调控、潜在基因功能验证和筛选、引入抗性相关基因等。

秸秆收储运规模化困难，糖平台原料未来可期

在边际土地利用和农作物育种外，非粮生物质的开发另一个重要领域是农作物秸秆的利用。尽管目前秸秆利用仍然面临一系列问题，但秸秆在糖含量和可获得性方面有着巨大的优势，具有开发的重要意义。若将中国半数被浪费的田间作物秸秆利用起来，可以生产约五千万吨以上的乙醇。

粮食糖含量



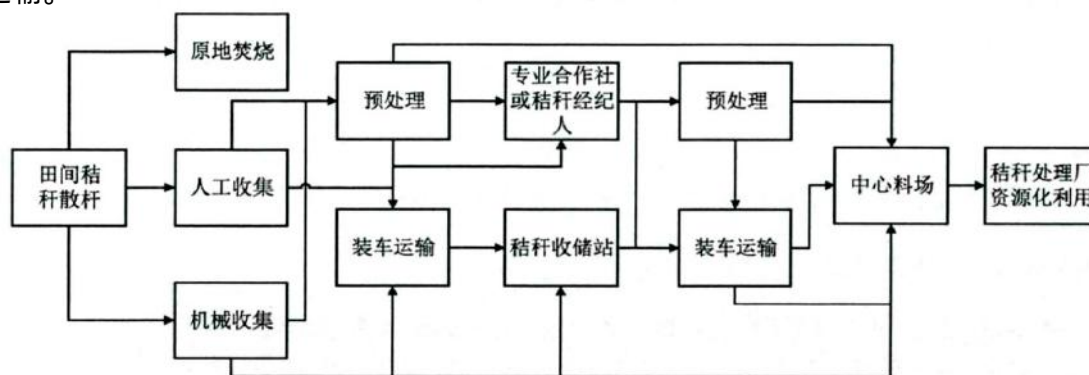
- 淀粉成分: 70%
α-糖苷键聚合
- 非淀粉成分: 30%
外壳、米糠、灰分

秸秆糖含量



- 纤维成分: 65%
β-糖苷键聚合
- 非纤维成分: 35%
木质素、灰分

目前国内秸秆收储运模式主要以分散性收集和集中性收集为主，产生差别的原因主要是由于地理位置以及当地的经济发展水平。秸秆收储运主要有三大环节：收集，储藏，运输。



农作物秸秆资源化：秸秆饲料、秸秆燃料、秸秆肥料、工业原料、食用菌基料等
预处理：打包、打捆、压缩或粉碎

图8 | 秸秆收储运系统流程（来源：河南农大）

未来技术方向

受限于秸秆密度低、易燃的特性，不适用于长距离运输，可预见未来秸秆处理不具备超大型集中工厂的条件，生产企业宜逐产地建厂，但秸秆处理产品——秸秆糖可以集中收储与运输，未来糖原料或将成为市场主要需求。

4大技术难点制约非粮生物质大规模应用

当前非粮生物质的工业应用大多局限于生产乙醇等低值产品，难以形成较高的利润空间，普遍难以实现商业化运作。由于非粮生物质中农作物秸秆及农业剩余物中含有大量的纤维素，在原料预处理、糖化和发酵效率等方面难度更大，如何实现高效、低成本的综合开发成为非粮生物质产业化应用的关键问题之一。

秸秆与其他木质纤维素（如木材等）类似，其中约65%为纤维素成分，同时还含有半纤维素和木质素。**纤维素**是组成植物细胞壁的主要成分，由几百至几千个 β -1,4糖苷键连接的葡萄糖单元组成，是自然界中最丰富的有机聚合物，蕴藏着植物界50%以上的碳。**半纤维素**是由戊糖（木糖、阿拉伯糖等）和己糖（葡萄糖、甘露糖）组成的异质多聚体，其中木聚糖为主要组成部分。**木质素**是一种天然的酚类高分子化合物，通过共价键与半纤维素连接，含有丰富的芳环结构、脂肪族和芳香族羟基以及醌基等活性基团。

① 秸秆高效糖化困难

大多数发酵用菌株因缺乏相应地纤维素、半纤维素、木质素水解酶，几乎无法直接利用此类多糖合成产物，因此需要通过预处理降解多糖，以释放可发酵糖类（木糖、葡萄糖、阿拉伯糖和甘露糖等）。高分子量和复杂的大分子结构使非粮生物质中纤维素的降解分离和低成本处理及综合利用成为制约生物质能源利用的关键，需要通过许多转化方法进行糖化。同时，当使用纤维素酶降解木质纤维素时，分解出的纤维二糖、葡萄糖等会对酶解产生较强的反馈抑制作用，更有效和更具成本效益的酶的开发进展缓慢。

② 微生物生长抑制物

在非粮生物质预处理过程中除产生微生物可利用的碳源外，还会产生多种抑制微生物生长的有机抑制物如弱酸、醛和酚等。若采用酸/碱预处理，残留的无机离子也会对微生物生长产生抑制作用。

4大技术难点制约非粮生物质大规模应用

③ 碳代谢阻遏

目前工业生产菌株大多基于粮食原料开发, 依赖于葡萄糖或淀粉, 若对木糖等五碳糖的利用不佳, 会出现碳代谢阻遏现象, 即葡萄糖被优先利用, 直到葡萄糖耗尽才开始利用其他糖, 使得部分糖在发酵结束时未被利用, 从而降低发酵效率。此外, 不同来源的秸秆成分差别巨大, 故而水解液中糖的组成也千差万别, 对工业菌株的开发造成一定困难。

④ 高效综合开发

副产物即在生产过程中伴随目标产物产生的物质, 副产物的产生会降低整体底物利用率, 甚至产生抑制物。以发酵法生产乳酸为例, 利用葡萄糖为原料生产乳酸, 可以完全转化, 无副产物; 利用木糖等五碳糖作为底物, 将产生乙酸或乙醇等副产物, 此时乳酸最大得率仅为60%, 不仅降低生产效率还会增加下游分离纯化成本。

面对非粮生物质开发问题, 学术界与产业界均在积极寻找解决方案, 如为了缓解抑制物对微生物的毒害作用, 探索与了预处理液脱毒、改变发酵工艺或筛选出具有耐抑制物能力的生产菌株等方案。通过非粮生物质的降解分离和低成本处理及综合利用开发, 很大程度上将会打造全新的利用生物质资源的供应链, 具有广阔的市场价值和应用前景。

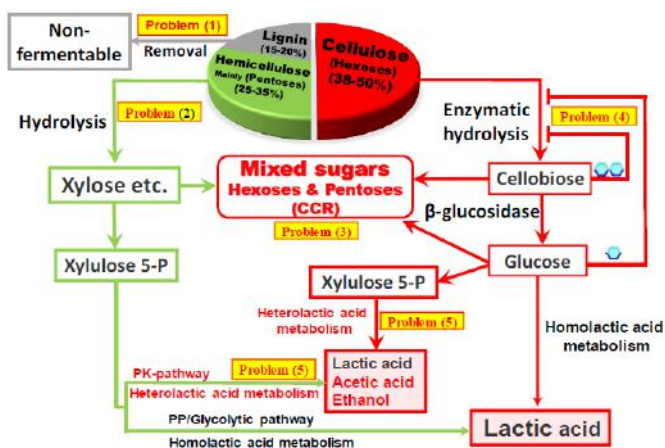


图9 | 非粮生物质利用存在的问题——乳酸为例
(来源: *Journal of Biotechnology*)

1 高效糖化: 多重策略预处理成为技术突破方向

利用生物质发酵的先决条件是高浓度的可发酵糖。纤维素作为植物细胞壁的主要成分,自然界中具有支撑作用,故结构紧密难以降解。高效糖化成为大规模非粮生物质利用的关键问题。当前基本的预处理方法主要有三类:物理法、化学法和酶解法。

物理法主要通过粉碎减小生物质颗粒尺寸,常见的物理法大致可分为机械破碎和高能辐射两大类,包括研磨、热解和蒸汽爆破等,有效减少颗粒尺寸以及降低木质纤维素的聚合度,从而增加纤维素酶的附着表面积。**化学法**主要用于降解或分离木质纤维素结构,常见的化学法有酸法、碱法、有机溶剂等,酸法通过溶解纤维素外包裹的半纤维素结构,打开木质纤维素的结构,降低一定的结晶度,来增加纤维素的可及性。碱法可对木质素有明显溶解作用。但会面临化学试剂消耗高、高污染、高耗能的问题。

生物法预处理因其能耗低、环境条件温和而被认为是一种环保的木质素降解方法,降解机制主要是基于微生物释放的分泌物,包括木聚糖酶、果胶酶、甘露聚糖酶、木质素过氧化物酶、锰过氧化物酶和阿魏酸酯酶等,这些分泌物使纤维多糖原料基质更容易降解。然后通过洗涤消除部分抑制作用,为后续酶解提供了性能良好的底物。

未来技术方向

任何单一方法都无法使原料完全降解,有学者尝试联合使用多种预处理方法*,增强对生物质结构的破坏,提高预处理和酶解效率、缩短转化时间,从而有效地促进糖的生成。联合使用汽爆预处理、周期性仿生蠕动、分批补料补酶的方案。汽爆去除了部分半纤维素、增加了纤维素的相对含量、减少了酶活性抑制物的产生;周期性仿生蠕动提高传质效率,缩短液化时间;通过分批补料补酶,减少酶的添加量。

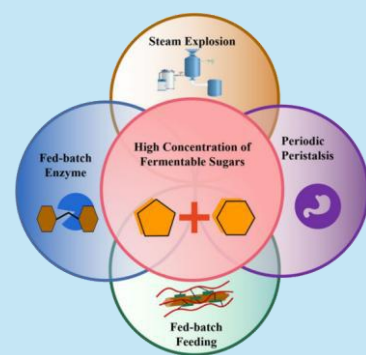


图10 | 秸秆酶解多重增强策略
(来源: Applied Biochemistry and Biotechnology)

*参考资料: 10.1007/s12010-022-03969-7

1 高效糖化: 纤维素酶水解活性成为研究核心

酶解是实现木质纤维素原料水解糖化的最主要的一步, 酶解的效率决定木质纤维素糖化效率, 如何提高酶解的效率成为了木质纤维素生物质资源利用的关键。

纤维素酶主要由内切葡聚糖酶、外切葡聚糖酶以及 β -葡萄糖苷酶三种酶组成, 使纤维素降解为纤维二糖和葡萄糖; 一些辅助性的酶, 如葡萄糖醛酸酶、乙酰酯酶、木聚糖酶、 β -木糖苷酶、半乳甘露聚糖酶和葡萄糖甘露聚糖酶也可催化降解半纤维素。在众多水解方法中, 酶解法的反应条件温和、副产物少、无环境污染。

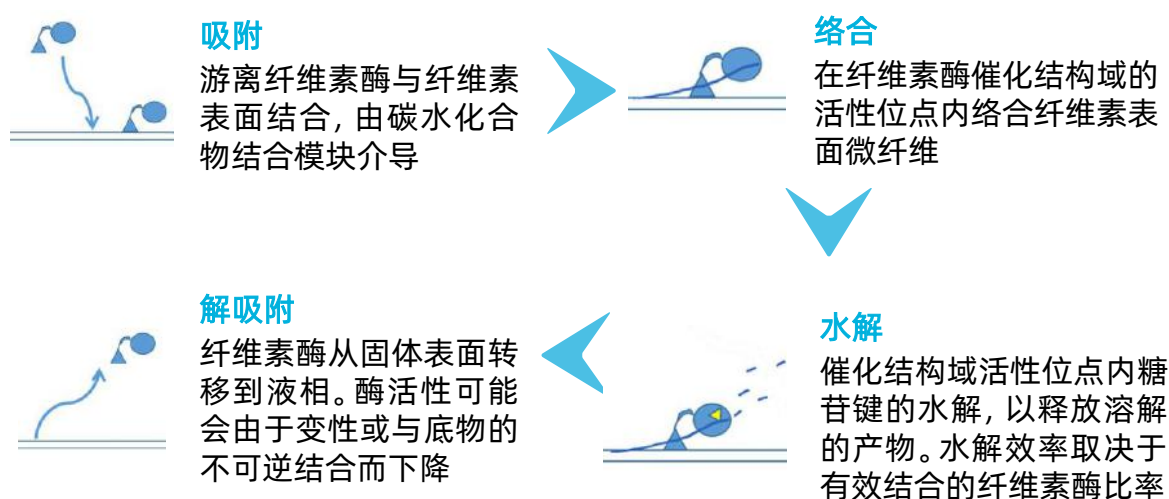


图11 | 纤维素酶水解纤维素过程 (来源: DeepTech、*Biotechnology and bioengineering*)

纤维素酶水解影响因素

- 底物浓度:** 提升底物浓度增加反应速率和产率, 但底物浓度过高会引起底物抑制;
- 底物结构特征:** 受预处理影响较大, 包括纤维素结晶度、纤维素聚合度;
- 木质素脱除率:** 木质素与纤维素酶结合导致纤维素酶无效吸附, 抑制水解;
- 水解产物浓度:** 葡萄糖、木糖等对酶活性有糖反馈抑制作用;
- 水解反应条件:** 如温度、pH值等, 影响酶分子结构和酶动力模型;
- 综合成本:** 随酶使用量的提高催化效率提升减缓, 需综合投入产出比计算用酶量。

高效糖化：纤维素酶改造是提升酶解效率的更优方案

提升酶的催化效率可以通过三方面实现，其一，提升纤维素酶与底物的有效结合与催化；其二，提高酶产量，利用突变筛选、合成生物学手段提升纤维素酶菌株产量；其三，利用蛋白组学对酶蛋白进行改造，提高单位酶活。

纤维素的有效水解涉及多个反应步骤，鉴于只有有效吸附的纤维素酶才能催化纤维素中糖苷键的水解并形成产物。建立水解过程中可被催化位点相对于纤维素剩余量的动态关系，成功把握纤维素水解的结束时间点，建立纤维素水解动力学模型，是提高酶解效率和酶利用率的关键。

为降低纤维素酶的无效吸附，加入非催化助剂可减少木质素表面的纤维素酶结合位点，进而减少纤维素酶活的损失，因此添加助剂（如表面活性剂、蛋白质或氨基酸）来提高纤维素酶水解转化率受到研究者广泛关注。



商业 纤维素酶制剂经过近20余年的发展，酶制剂公司（如诺维信、杜邦杰能科）已大幅减少纤维素酶生产成本，使之接近酶的最低理论生产成本，达到每千克大约10-20美元，但纤维素酶的用酶成本仍然在秸秆糖化产业中排名首位。

未来技术方向

为提升纤维素酶水解效率，有研究者对天然酶开展结构解析，通过一定的手段对纤维素酶进行修饰，改变纤维素酶的物理化学特性，减少其被无效吸附。还有研究学者以天然酶为模板，设计能够取代围绕天然酶活性位点的肽，再将这此肽类物质组装，提供高密度的活性位点，通过精确地组织高密度的活性位点，并调整其局部环境以调控催化活性。人工改造的酶还具有高稳定性的特征，能够解决天然酶不稳定的缺陷，如在高温下保持活性等。

除抑制物：原位脱毒成为绿色解决方案

在秸秆处理中往往除了生成木糖、葡萄糖、阿拉伯糖和甘露糖等可发酵糖外还会产生一些有抑制作用的化合物，这些抑制物主要分为呋喃衍生物、弱酸类、酚类。为了缓解抑制物对微生物的毒害作用，需要在预处理后对水解液进行脱毒处理，将其转变为高纯度且无抑制的可发酵糖。常用的脱抑制物的方法包括物理法、化学法和生物法。

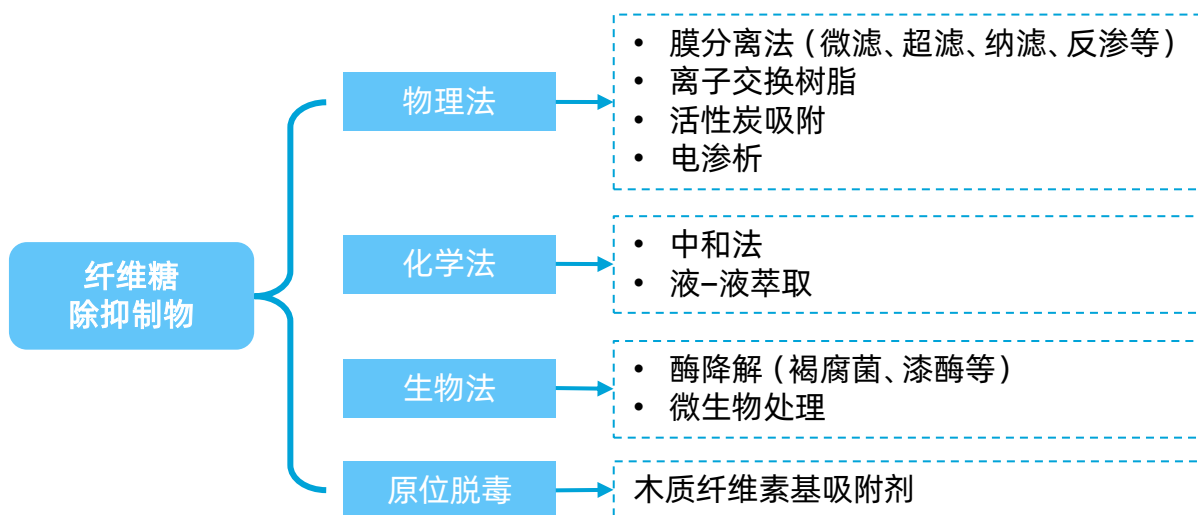


图12 | 常见预处理脱毒技术（来源：DeepTech）

未来技术方向

当前有研究利用酶解糖化后的残渣，生产高效廉价的木质纤维素基吸附剂，通过木质纤维素基吸附剂对发酵抑制物的高效吸附，实现不添加外源物质的除抑制物处理（原位脱毒），最终建立起自给自足的清洁生产体系，达到低能耗和环境友好，其效果不亚于商业活性炭。

也有技术路线将“除抑制物”这一环节舍弃，以实现更好大宗产品生产成本优势，与此替代的是预处理环节中尽可能多地分离杂质和抑制物。

解碳阻遏：混菌、多联、碳共利用是有效技术手段

木质纤维素水解液中除葡萄糖（C6）外还存在大量的木糖、阿拉伯糖等五碳糖（C5），然而许多生产用菌株在利用混合糖进行发酵时却无法利用其中的五碳糖。有些菌株虽可利用五碳糖但在代谢时存在**碳代谢阻遏作用**——即葡萄糖被优先利用，直到葡萄糖耗尽才开始利用其他糖，非同步的糖利用使得部分糖在发酵结束时未被利用从而降低发酵效率增加生产成本。为了解决这个问题，研究者们尝试多种方式解决碳代谢阻遏。

混菌发酵利用C5、C6

混菌发酵是指利用两种或两种以上的微生物混合共培养的发酵技术，包括直接共培养、间接共培养和共固定化混菌培养等。混菌发酵能够利用共培养微生物种间的协同代谢、诱导作用、基因转移及种间群体感应等，使发酵系统持续稳定地运行。混菌发酵能够结合不同菌株的优势，通过合理组合利用微生物之间的代谢关系，不仅可以避免多种微生物共同代谢产生较多的副产物，还能进一步提高产量。将功能性代谢途径整合到不同的宿主菌中，利用混菌技术共利用C5/C6可以避开复杂的微生物代谢调控过程。

秸秆多产品联产

采用多种方法对秸秆预处理后优先利用C5，以达到最终糖化液中降低C5的目的。首先采用预处理技术制取低聚木糖、木糖等化学原料，然后纤维素酶进一步水解得到葡萄糖液。该手段可以有效地破坏纤维素的结晶结构，提高酶水解过程的纤维素可及性，增加酶水解效率，提高碳水化合物保留率，进而提高酶水解过程生成的可发酵糖浓度。采用联产手段亦可在工程菌代谢改造某些无法循环的通路，使副产物高值化，但值得注意的是，多产品联产后的分离纯化也增加了产业化的成本，仍需下游进一步开发。

构建C5、C6共利用工程菌株

为实现在其他菌株中的糖分共利用，研究学者利用合成生物学策略，对菌株进行理性改造与设计，重构代谢途径，获得秸秆发酵能力较强的工程菌株；针对不同菌株或产物分离需要个性化设计发酵工艺条件的同时兼顾工艺功能区模块化、组合化，降低工艺设计成本。

4 综合开发: 策略晋升, CBP、CBS渐成主流方向

作为一项综合性的工程产业, 工业生产上往往追求“最优解”, 技术方案也经历不断迭代, 以追求更高的综合经济价值。在分步糖化发酵 (SHF) 技术之上, 不同研发阶段分别开发了同步糖化发酵 (SSF)、同步糖化共发酵 (SSCF)、统合生物加工 (CBP) 和整合生物糖化 (CBS) 等技术方案。

技术策略	技术解析
分步糖化发酵 (SHF)	先进行纤维素的水解, 后开展生产发酵, 两者在不同的反应器中进行, 且各反应均在其最适宜条件下执行
同步糖化发酵 (SSF)	纤维素的水解和生产发酵在同一反应器中进行
同步糖化共发酵 (SSCF)	纤维素的水解和生产发酵在同一反应器中进行, 且发酵菌种同步利用各种可发酵糖
统合生物加工 (CBP)	直接转化法, 目标产物各生产过程 (包括木质纤维素的预处理、水解、发酵等) 均在一个反应器中进行
整合生物糖化 (CBS)	将酶的生产与水解步骤有机整合, 以可发酵糖这一平台化合物作为目标产物

表2 | 非粮生物质综合开发技术策略 (来源: 公开资料、DeepTech)

采用SSF和SSCF工艺可以有效降低体系中的糖浓度, 避免酶解反馈抑制, 也可以减少酶制剂用量、缩短反应周期, 但由于酶解和发酵同时进行, 需要酶和菌种的反应条件接近, 进而需要开发嗜热和耐酸的发酵菌种, 同时用酶成本也相对较高。

未来技术方向

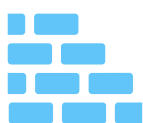
- CBP工艺化繁为简, 将纤维素酶的生产、木质纤维素底物酶解、最终产物发酵等多个过程使用一个或多个菌种同时完成, 是当前较好的解决方案之一。
- CBS的可发酵糖可以自由偶联下游产业开发, 更具有产业灵活性。有学者建立基于产纤维小体的热纤梭菌开发的糖化技术路线*, 已经建成百吨级秸秆糖化中试示范。

*参考资料: 10.1016/j.biortech.2021.125441



综合开发: 高效菌种开发, 建立技术壁垒

工业菌种是发酵产业的竞争焦点和关键, 被誉为产业的“芯片”。虽然中国氨基酸、有机酸、维生素等产品产量占全球总产量的60%–80%, 但菌种知识产权占比却低于5%, 自主菌种的生产水平距国际先进菌种仍存在一定差距。中国正在基于基因组数据提升菌种知识产权自主可控能力, 已规模化应用的菌种包括谷氨酸、赖氨酸、丙氨酸、丁二酸、乳酸等。



01 合成生物学技术

- 研发先进的基因编辑、基因表达调控技术
- 关键基因元件挖掘, 提升代谢调控能力
- 代谢途径设计重构, 理性设计人工生物体系



02 非模式菌种开发

- 诸多非模式菌株天然具有理想细胞工厂所需的优异特性
- 典型特征包括性能稳定、耐受极端环境条件等
- 筛选独特优势的潜力菌株, 如热纤梭菌、运动发酵单胞菌等



03 高通量自动化菌种筛选

- “BT+IT”的融合模式赋能工业菌种设计和创制
- 基因克隆、基因组编辑、编辑序列等自动化实现
- 流式细胞、液滴微流控、全基因组测序等高通量筛选技术



04 工业化菌种开发

- 开发适应工业化生产的高鲁棒性细胞
- 结合纤维水解糖糖现状, 开发耐抑制物、多糖同步利用的菌种
- 菌种底盘特性适配发酵罐生物反应器

图13 | 核心菌种突破的关键技术 (来源: DeepTech)

4 综合开发: 2个关键环节——基因调控与发酵优化

通过调整代谢通路中各种基因元件的表达, 以理性设计细胞网络为手段, 降低副产物, 减少抑制物, 提升生产效率, 构建“设计-构建-测试-学习”循环的工程方法, 打造高效细胞工厂。发酵过程微生物的生长状态尚未完全解析, 当前对发酵的工艺控制仍以经验为主, 需对发酵过程定向调控, 提升目标产量, 减少杂质产生。

聚焦核心菌种的基因水平调控、下游放大生产的发酵技术优化, 是高效综合开发必然面对的两个重要课题。

调控水平	操作手段	重要性
基因水平调控	转运蛋白基因优化	C5、C6被转运到胞内是被微生物代谢利用的前提, 决定了代谢通量和糖利用效率
	抑制基因敲除	敲除抑制基因、阻断分支代谢途径; 过表达合成基因编码的关键酶的活性决定了反应速率, 目的为提高产物产量和目标代谢途径碳通量
	过表达产物合成基因	
发酵技术优化	细胞固定化	将细胞固定于一定的结构域内, 将整个固定化体系放置于液态培养基中发酵, 提升微生物适应能力
	PH调整、副产物去除	混糖发酵时, C5代谢比C6代谢对培养液酸度更敏感, 低pH更容易抑制C5发酵
	补料方式优化	采用底物利用率及转化率高、便于自动化控制、能解除产物反馈抑制和分解代谢物阻遏作用的发酵方式, 如补料分批发酵

表3 | 综合开发优化关键环节 (来源: DeepTech)

非粮生物基材料

微生物在生物基材料和化学品高效合成方面取得了很大进展。包括小分子有机醇和有机酸、聚合物、塑料、生物基化学纤维、生物基橡胶、生物基涂料、生物基材料助剂、生物基复合材料及其各类生物基材料制得的制品。以下列举部分获得一定成果的下游产品：

异酸 广泛应用于树脂、丙烯塑料、丙烯乳胶和超吸水剂的工业生产；

戊二酸 是一种重要的C5二羧酸，可用于生产尼龙；

1,3-丙二醇 一种重要的化学物质，广泛应用于纺织、树脂和制药等领域，尤其是作为聚合物聚对苯二甲酸三甲醇酯（PTT）的合成单体；

1,4-丁二醇 广泛应用于医药、化工、纺织、造纸、汽车及日用化学品等领域；

芳香化合物 广泛应用于食品、化工、医药和饲料等领域，如麦角酸、苯乙烯、苯二甲酸、香草醛；

生物医用化学品 主要用于保健品、药物和化妆品，如N-乙酰葡萄糖胺、肝素等单糖和多糖成分。

生物能源

生物质化学转化 将生物质转化成高品位、便于储存、易运输的固、液及气态燃料，如生物柴油生物降解率为传统柴油的两倍。

液体燃料 将非粮生物质发酵为甲醇、乙醇、甲烷、氢气等能源产物。

生物制氢 主要利用光合细菌或厌氧细菌，通过光合作用或化能合成作用将非粮生物质分解产生氢气。

生物肥料/饲料

肥料 开发副产物有机肥料改善土壤结构、提高土壤肥力、调节土壤酸碱度，从而降低盐碱地的盐分含量、改良土壤质量，提高农产品的品质和产量。

饲料 发酵单细胞蛋白饲料（DDGS）蛋白质、B族维生素及氨基酸含量均较高。

相关研究学者

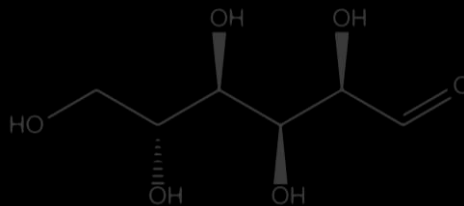
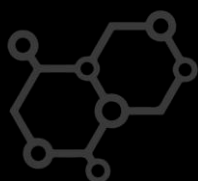
部分学者*	所在机构	研究领域
陈洪章	中科院过程所	木质纤维素汽爆拆解分离和高固酶解发酵乙醇/丁醇等研究工作, 在汽爆炼制、固态发酵过程强化等取得了开创性成果
崔球	中科院 青岛能源所	低值生物质(如木质纤维素)的生物降解利用、微生物萜脂类产品的工业生物技术制造、过程工艺优化及装备的设计制造
段盛文	中国农业科学院麻类研究所	植物纤维绿色提取, 纤维改性与生物转化, 以及植物纤维功能产品创制等
李昌志	中科院 大连化物所	围绕木质素定向解聚和高值化利用开展了系统性的创新研究, 设计了系列以目标产物为导向的芳醚键选择活化策略, 实现定向解聚和去官能化制备能源化学品
李福利	中科院 青岛能源所	工业微生物技术, 生物质水解酶作用机制研究, 能源化学品及其衍生物的合成生物技术研究
李强	华中农业大学	木质素合成、改性与高值化应用, 涵盖制浆造纸、生物能源、农业废弃物及其他固体废弃物利用等领域
廖强	重庆大学	传热传质强化、多相流动和热质传输、相变换热及界面现象、微生物能源转化、固体废弃物能源化利用、电子元件散热、微尺度传输等方面研究
刘德华	清华大学	生物质综合利用的生物炼制技术, 侧重于微生物发酵、酶催化转化及产品纯化工艺优化、设备研发及过程集成
那海宁	中科院 宁波材料所	生物质转化利用技术与应用, 天然来源的多糖类生物质降解、改性及加工, 实现生物质向实用性绿色环保可再生生物基材料、能源、食品及其原材料的转化及应用
祁峰	福建师范大学	微生物代谢工程、生物能源、食品微生物与发酵技术, 生物能源领域关注木质纤维素的综合利用

*按首字母顺序排序。如果您也是该领域研究学者, 欢迎与我们联系交流

相关研究学者

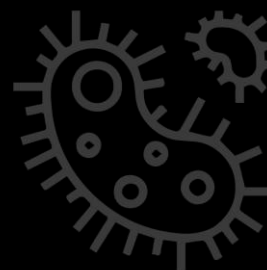
部分学者*	所在机构	研究领域
齐向辉	江苏大学	合成生物学的基础与应用研究, 功能性糖醇与高附加值化学品的微生物合成与制造
任俊莉	华南理工大学	生物质基化学品、能源和材料的研究, 在木质纤维清洁高效预处理、半纤维素构效关系建立及其多途径转化
孙润仓	大连工业大学	木质纤维生物质三大组分清洁高效分离及转化为新材料、新能源和化学品
王岚	中科院过程所	生物质炼制工程应用基础研究, 发明了生物质分级炼制及高固酶解发酵过程强化系列新方法, 并在固态发酵工程化方面取得了突破性进展
许凤	北京林业大学	农林生物质资源高值化利用应用基础研究, 包括农林生物质细胞壁超微结构解译、主要组分分离、结构鉴定以及生物基化学品与功能材料转化研究
许建和	华东理工大学	生物催化与生物化工研究, 酶分子工程及合成生物技术研究, 新酶元件设计改造及构效机制研究, 多酶级联与合成生物系统构建
杨世辉	湖北大学	以非模式工业微生物运动发酵单胞菌为底盘细胞, 推动以木质纤维素等非粮废弃生物质为原料厌氧发酵生产大宗醇酸平台化合物的产业化进程
张军	中科院化学所	发现了对纤维素材料有最强溶解能力的离子液体, 经过十余年技术攻关成功实现了产业化。可以对低品质生物质材料实现高效溶解、清洁加工, 产品可以广泛应用于锂电池、绿色包装、日化、水性涂料、生物医药等多个行业
张以恒	中科院天工所	体外多酶分子机器(体外生物制造)率先实现工业化。从纤维素生产人工合成淀粉、利用糖裂解水生产氢能、高能糖燃料电池、多酶肌醇合成、健康糖的新制造
赵建	山东大学	木质纤维素的生物降解和生物转化。优良菌株的分子生物学改造; 酶的发酵生产及其应用; 木质纤维素不同组分的高效分离和转化利用技术

*按首字母顺序排序。如果您也是该领域研究学者, 欢迎与我们联系交流



Chapter 3

非粮生物质推动产业发展与结构变革



非粮生物质推动产业发展

- 降本——提升生物制造的核心竞争力
- 扩张——助力生物制造打破规模壁垒
- 提速——合成生物学正在加速重构生物制造产业
- 聚集——中国正在形成非粮生物质开发分布式聚集区

非粮生物质推动产业结构变革

- 非粮生物质综合开发产业模型
- 中国非粮生物质开发的部分企业图谱
- 非粮生物质开发产业未来趋势
- 新入局参与者的创新契机

降本——非粮生物质开发提升生物制造的核心竞争力

在生产过程中培养基总成本占有较大比重,按垂直领域的不同成本可达38%-72%,有机碳源通常是发酵成本中的主要组成。在成熟的发酵产业链中,各参与企业的竞争,实质上是对工艺、成本、稳定性和规模的控制,提升整个生物反应效率,降低成本,才能真正实施于大规模生产。

以原料成本计算,1吨生物发酵产品的玉米消耗量普遍在3吨以上,粮食来源淀粉糖原料成本高(玉米价格为2800-3200元/吨),以酿酒酵母生产燃料乙醇为例,乙醇生产原料成本即8400-9600元/吨,导致综合成本约1.1-1.2万元/吨,除去菌体蛋白饲料带来的收益(约4000元/吨),最后乙醇的成本约7000-8000元/吨,处于基本不盈利甚至亏损的状态。从投入产出的经济角度看,仅有维生素E、维生素C、PHA、尼龙等高价产品才有盈利能力。秸秆糖的开发在中试规模已可以实现成本2400元/吨左右,较淀粉糖降低22%-31%,估算秸秆糖生产燃料乙醇成本为5000-6200元/吨。

成熟的淀粉糖产业市场已处于平稳期,开发技术手段已难以推动淀粉糖成本持续下降,受限于作物种植影响,淀粉糖的价格波动将更大。秸秆的高效开发利用仍处上升阶段,且已经实现成本的大幅度下降,当上下游产业被激活,成本方面未来仍有大幅度下降的空间。

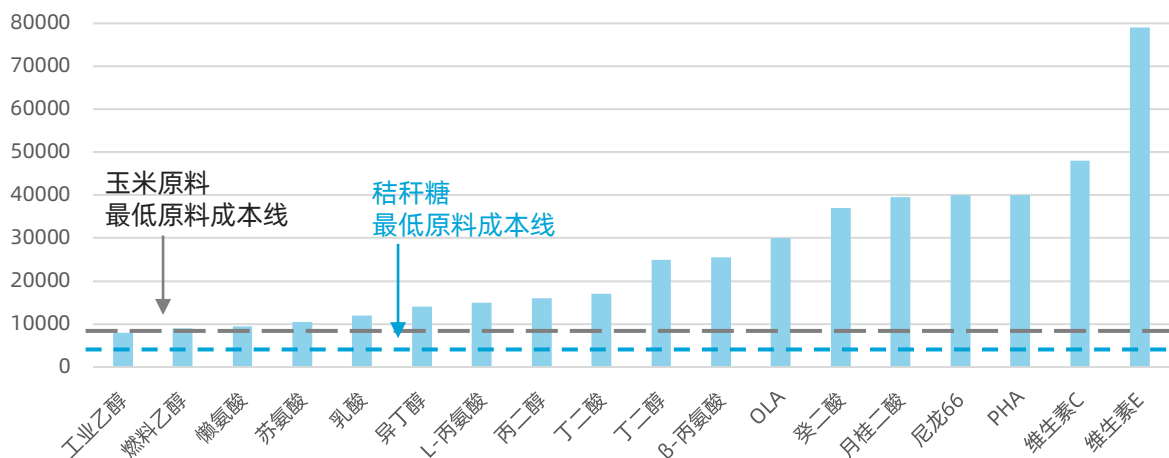


图14 | 生物制造生产化学品单价与原料成本比较, 单位: 元/吨 (来源: 华安证券、DeepTech)

扩张——非粮生物质助力生物制造打破规模壁垒

根据经合组织预测，2030年全球至少20%化工品被生物质产品替代，对应市场空间8000亿美元，未来全球生物经济的规模预计可以达到30万亿美元。

生物产业正由“小而美”走向“大而全”。经过多年发展，已形成在医药、饲料、食品添加剂等领域的长足发展，市场年需求在万吨至十万吨级。随着生物制造产业技术逐渐成熟，加之一系列政策推动，未来生物基能源、塑料、纤维、橡胶、涂料、复合材料、助剂等能源和材料领域都将有极大发展，未来产业容量可达到千万吨级。

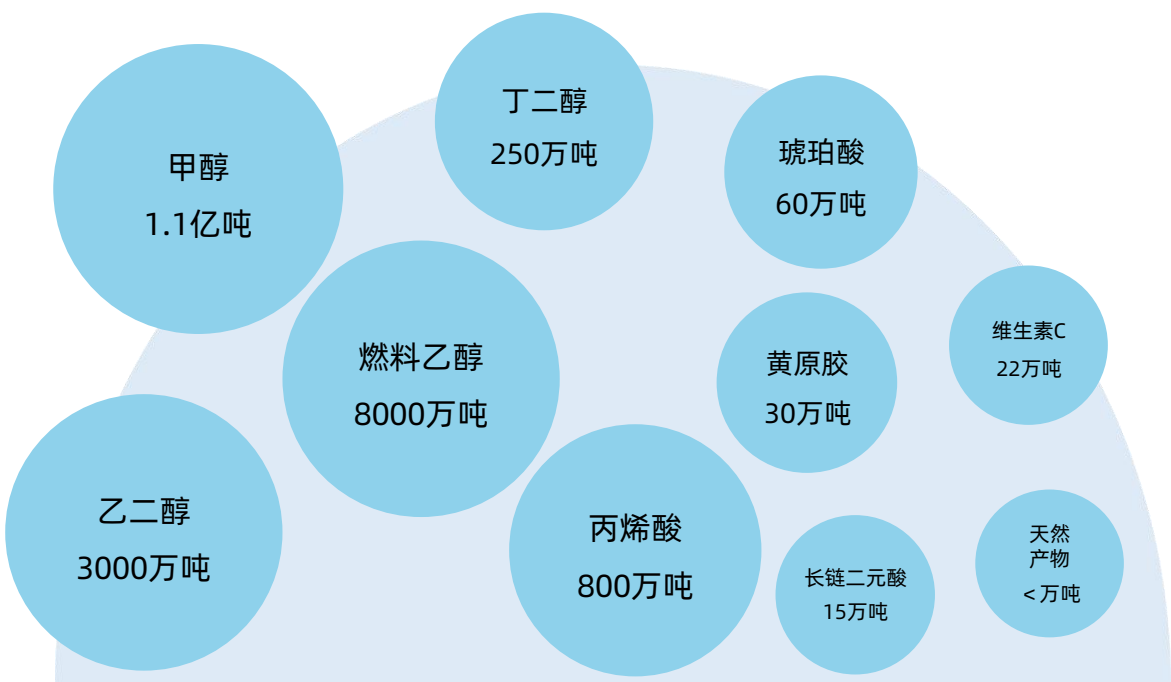


图15 | 生物制造横跨十万吨级到千万吨级全球年需求量规模潜力（来源：公开资料、DeepTech）

开展大规模生物制造的前提是原料的稳定供应，非粮生物质开发极大推进此产业进程。生物产业与传统化工正在由“错位竞争”到“直接竞争”。在市场的竞争格局中，传统化工巨头林立，已有成熟的供应链和生态，生物基产业需要打破现有壁垒，“新玩家”才能在竞争中脱颖而出，非粮生物质开发提供了重要的机会。

提速——合成生物学正在加速重构生物制造产业

以合成生物学为代表的生物制造新兴市场，利用工程原理对生物系统进行改造，以实现新的功能和特性，为非粮生物质开发提供了技术支持和创新途径，有望推动生物制造行业的发展，实现环境友好和可持续性目标。合成生物学已经成为未来生物经济的颠覆性力量之一。

2021年全球合成生物学融资近180亿美元，创历史新高；2022年中国合成生物学领域公开融资活动60余起公开融资事件，融资规模达近百亿人民币。

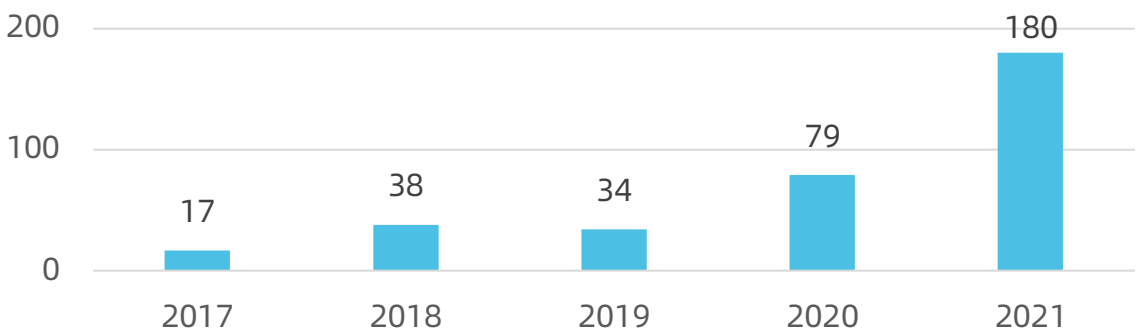


图16 | 2018-2021年合成生物学领域融资总额，单位：亿美元（来源：SynbioBeta及BCG）

与传统微生物发酵生产模式不同，合成生物创造全新的人工生物体系，实现原料向产物的高效、快速转化。从不同下游行业应用来看，工业化工产品为最主要的三大应用行业之一，预计到2026年全球市场规模将超过60亿美元。基于“非粮生物质+合成生物学”的全新生物制造范式，将助力突破原料资源瓶颈限制与生物制造生产过程“黑箱”解析，推动新型可持续发展的绿色工业化进程。

现有 (-2022)	短期 (2023-2030)	中期 (2030-2040)	长期 (2040-)
<ul style="list-style-type: none">天然产物生物农药生物肥料香精香料	<ul style="list-style-type: none">织物纤维/皮革染料氨基酸、有机酸等工业酶生物燃料	<ul style="list-style-type: none">新型生物材料生物聚合物	<ul style="list-style-type: none">生物太阳能电池生物电池生物储能

表4 | 生物制造在材料、化学品、能源领域爆发加速点预测（数据来源：麦肯锡、DeepTech）

聚集——中国正在形成非粮生物质开发分布式聚集区

产业集群是推动生物基材料产业转型升级、引领区域经济发展的重要载体。受限于秸秆等非粮生物质不适用于长距离运输的特点，可预见未来秸秆“收储运”处理宜逐产地建厂，依托丰富的非粮生物质原料，就地取材。工信部计划到2025年，形成5家左右具有核心竞争力、特色鲜明、发展优势突出的骨干企业，建成3-5个生物基材料产业集群。各地出台支持政策，未来将形成分布式非粮生物质综合利用格局，具有区域优势的技术创新、产品创新、市场创新高地也正在形成。

省/部委	年份	政策名称	相关内容
农业部	2022	关于做好2022年农作物秸秆综合利用工作的通知	2022年建设300个秸秆利用重点县（附名单）、600个秸秆综合利用展示基地，全国秸秆综合利用率保持在86%以上
黑龙江	2022	关于做好2022年度全省农作物秸秆综合利用工作的通知	全省秸秆综合利用率达到92%以上，还田率达到67%以上，提升秸秆综合利用水平，促进农业绿色发展
江苏	2022	关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的实施意见	推进农作物秸秆综合利用，到2025年，农作物秸秆综合利用率稳定达到95%以上
河南	2022	河南省促进生物经济发展实施方案	培育发展非粮生物质液体燃料多联产产品，探索开展纤维素乙醇、绿色生物炼制产业化示范；支持南阳加快研发与应用
山东	2022	关于做好2022年全省秸秆综合利用工作的通知	建设20个以上秸秆综合利用重点县、40个以上秸秆综合利用示范展示基地。全省秸秆综合利用率稳定在95%以上
新疆	2022	自治区农业农村减排固碳实施方案（2022-2030年）	以秸秆利用产业提质增效为重点，“秸秆还田和保护性耕作固碳”、“秸秆燃料化利用”、“秸秆饲料化利用”
山西	2021	2022年秸秆综合利用项目实施方案	打造15个秸秆综合利用重点县，推动60%以上秸秆实现产业化利用且能源化利用率达30%以上
内蒙古	2021	关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系具体措施的通知	推进农作物秸秆综合利用，以兴安盟、通辽市、赤峰市、巴彦淖尔市等玉米、向日葵、小麦、水稻等粮食主产区为重点
宁夏	2021	碳达峰碳中和科技支撑行动方案	研发应用农作物秸秆、瓜菜种植废弃物等资源化利用技术，以及葡萄、马铃薯等加工废弃物再利用技术

表5 | 部分生物质资源开发政策（来源：公开信息、DeepTech）

非粮生物质综合开发产业模型

在当前资源紧缺和环境压力日益加剧的背景下，非粮生物质的综合开发成为了解决粮食供给不足和生物发酵产业与粮食竞争的一种重要途径。在各非粮生物质综合利用的研究中，总结出了秸秆供需与供应链之间的配置，还能较准确合理的计算出开发综合成本，当秸秆转化厂位于产区中心时，生物质运输到适合大型转化厂的平均距离为30-42公里，生物质生产和运输的总能源效率最高，同时大气污染物排放量最小。

综合来看在非粮生物质开发中，通过边际土地开发种植经济作物或秸秆收储运体系，以产区为中心建厂，实现三素（纤维素、半纤维素、木质素）分离和可发酵糖平台的生产，偶联下游产业应用，同时利用副产物作为肥料和饲料，最终实现闭环利用。

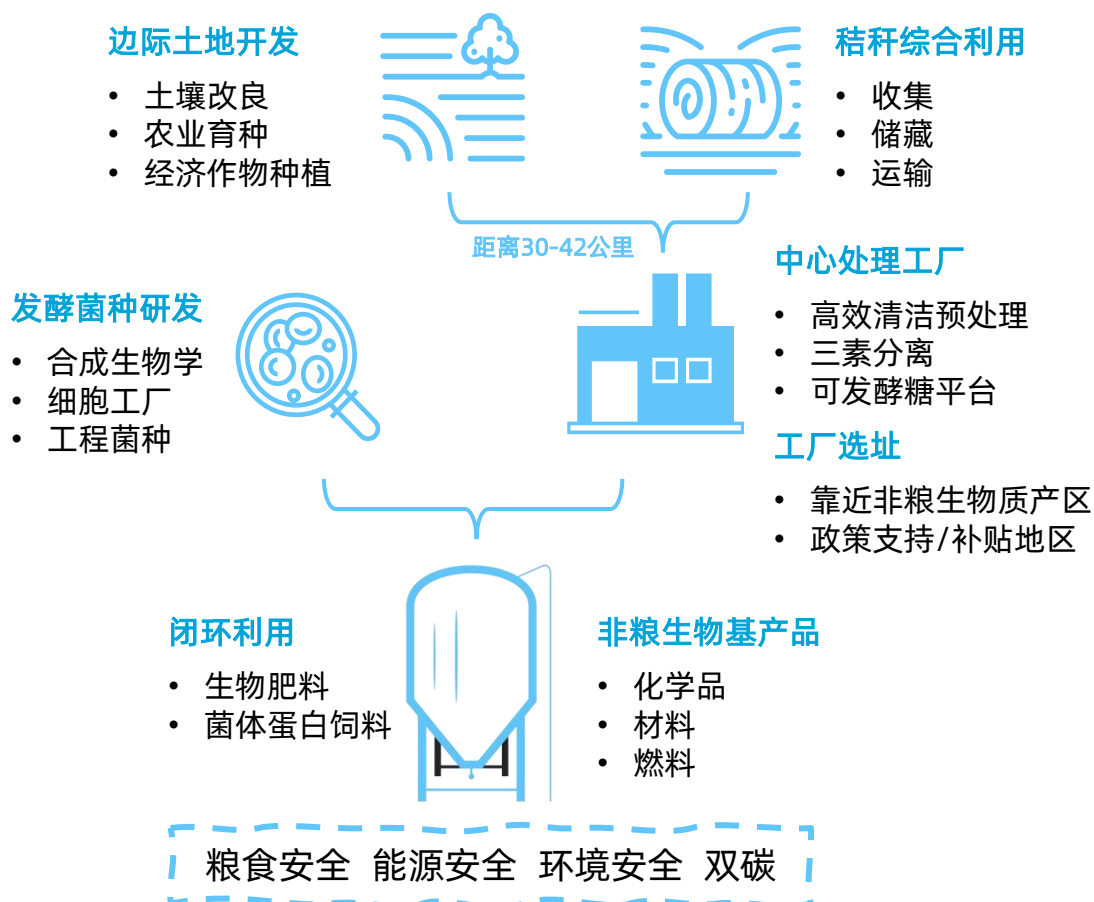


图17 | 非粮生物质综合开发产业模型（来源：DeepTech）

中国非粮生物质开发部分企业图谱

企业名称*	相关技术及产品布局	上市/融资
 中粮科技 中粮生物科技 COFCO BIOTECHNOLOGY <small>自然之道 智慧之选</small>	是目前国内规模最大、技术领先的玉米深加工企业之一。已攻克了秸秆转化糖的关键技术, 进一步加强秸秆生产聚乳酸技术的研发	已上市
 龙力生物 龍力 LONGLIVE	以玉米芯、玉米为原料, 生产功能糖、淀粉及淀粉糖等产品, 并循环利用玉米芯废渣生产燃料乙醇及木质素等高分子材料产品	已上市
 凯赛生物 CATHAY INDUSTRIAL BIOTECH	长链二元酸市场主导地位, 推进秸秆制乳酸技术研究, 正在开展秸秆处理和应用于乳酸生产的实验和万吨级示范线的建设	已上市
 圣泉集团 圣泉集团 SQ GROUP	生物质和化学新材料解决方案提供商, 投资年产10万吨生物基硬碳负极材料, 基础原材料为秸秆, 副产纤维素及纤维素制品、纳米纤维素、糠醛、乙酸、钾盐等产品	已上市
 丰原生物 BBKA BIOCHEMICAL	以玉米、木薯、农作物秸秆等为原料, 主要生产有机酸类、氨基酸类生化产品, 并重点发展生物材料(聚乳酸、生物基聚氨酯、生物基碳酸酯等三大材料平台)及其深加工产品	拟上市
 微构工场 微构工场 PhaBuilder	专注于嗜盐微生物的改造和工程化应用, 新一代菌株可利用废弃碳源, 生产多种PHA	A+轮
 德泓科技	聚焦非粮生物基可降解新材料、生物合成, 以秸秆等为原材料制备乳酸直至聚乳酸、聚乳酸下游应用的研究, 在建全球首条生产线	A轮
 聚维元创	以秸秆为原料开发普适性、高品质的葡萄糖碳源, 再经合成生物学途径, 合成目标产品, 以革新现有的石油基化学合成和粮食基生物合成路径	A轮

*按上市/融资情况排序, 截至2023.5.30, 信息来源公开资料

中国非粮生物质开发部分企业图谱

企业名称*	相关技术及产品布局	上市/融资
 一兮生物	以非粮的纤维素为碳源的饲用替代蛋白技术, 快速高效合成微生物蛋白, 可广泛应用于饲料等领域	pre-A+轮
 百福安生物 BIOFORANY	拥有合成生物学技术平台、工业酶基因挖掘与改造平台、化学技术平台以及酶基绿色工艺开发技术, 聚焦新分子的绿色生物合成	pre-A轮
 循原科技 XUNYUAN	利用全球领先的非粮生物质预处理技术, 实现秸秆及多种农业废弃物的高值化利用, 生产可发酵糖、可催化糖及原料级酶解木质素, 并布局生物基材料、生物基化学品、生物基能源等下游产品	天使轮
 格林微纳 GREEN MICRO & NANO	突破了秸秆等天然纤维素难以清洁、高效加工的世界性难题, 实现了纤维素微纳米功能材料的规模化工业制备, 产品多样且可控的微纳米结构可泛应用于绿色包装、新能源、日化、生物等重要市场领域	未披露
 清大智兴	聚焦生物基1,3-丙二醇的生物制造技术具有更广的底物利用谱, 可以有效地利用葡萄糖、木糖、蔗糖、纤维水解液等为原料生产	未披露
 睿嘉康 ZYMOBIO 武汉睿嘉康生物科技有限公司	开发完善系统与合成生物学技术, 利用非粮生物质高效生产C2-C5大宗醇与有机酸。服务于可再生能源及生物材料绿色生物制造	未披露
 依镁生物	以现代生物基因工程技术、微生物发酵工艺、利用玉米芯生产木糖醇、甘露醇的食品企业	未披露

*按上市/融资情况排序, 截至2023.5.30, 信息来源公开资料

非粮生物质开发产业未来趋势

利用微生物技术来提高发酵的经济效益, 开发新的发酵工艺, 甚至生产具有全新性能的新材料, 日益成为研发的主流。但除少数产品外, 规模并没有像过去预期的那样大, 部分原因是与现有的成本竞争力、规模化挑战和供应链约束有关, 以下是实现商业化和有效规模化的可行性未来路径。

降本增效是竞争关键因素

在成熟的石油化工产业背景下, 由于研发和原料等生产固定成本高, 生物基材料生产的创新应用现阶段仍比石油基产品更昂贵, 降低生产成本至商业上可竞争的水平是关键因素。非粮生物基的开发将重点解决成本问题, 与此同时, 需降低引入的其他成本(如预处理、纤维素酶等), 以达到整体的降本增效, 提升生物基产品竞争力。

与现有发酵过程耦合

非粮生物质的糖化产物——秸秆糖可以作为碳源原料引入发酵过程, 在对传统碳源的替代中, 发酵过程优化和改进是一项极其重要的工作, 开发与菌种适配的条件可控的工艺流程, 是秸秆糖大规模应用的重要环节。

非粮生物质糖化、直接发酵技术路线并行

非粮生物质糖化路径、非粮生物质直接发酵产品是并行的两个开发路线, 现阶段很难界定哪项技术更具备未来潜力。非粮生物质糖化路径更具灵活性, 能有效地与现有产业耦合衔接, 为下游产业强力赋能; 非粮生物质直接发酵生产可以规避当前非粮生物质开发中面临的实际问题, 但开发难度仍然较大。随着未来技术的发展, 将展现不同的生物制造“魅力”。

新入局参与者的创新契机

在生物制造即将大规模开展的新时代前夜，非粮生物质的深入开发带来了一系列契机，新入局参与者更宜寻求差异化竞争优势，以适应市场变化和产业升级的需求。

- **糖平台产品**：开发高性能可发酵糖，以满足不同行业和应用的需求；
- **菌种、酶改造与升级**：通过提供定制化的菌种、酶改造和升级服务，优化生产过程；
- **快速而灵活的生产线**：根据市场需求敏捷、高效调整，以最小成本完成产业验证。

创新农业育种技术与边际土地改良

农业育种是提高作物产量和抗逆性的关键领域，开发育种技术和工具，如基因编辑技术、遗传标记和高通量筛选方法等，加速作物品种改良的进程。开发新的土壤改良技术，如生物肥料、微生物制剂、土壤调理剂等，从而改善边际土地环境。

开发生物基材料和化学品生产的新途径

寻找更有效、更可持续的生产方式，非粮生物质成为越来越重要的原料之一。包括纺织业、化妆品、天然提取物、制药和化学品等市场，如新型塑料、纳米纤维素、蛋白质纤维等新技术仍处于早期阶段。通过挖掘适用于生物技术制造的新材料，具有新的功能和性能，将开辟全新的市场，如生物质基微纳米功能材料规模化制备，可广泛应用于以纸代塑、纸张轻量化、水性漆与涂料、新能源电池、日化用品及生物医用等各大重要市场领域。

非粮生物质向蛋白、淀粉转化的酶法新路径

非粮生物质制备微生物蛋白方面，经过生物安全菌种发酵，生产食品或饲料级别的微生物蛋白，为人类和动物供给蛋白质营养。开发新技术如酶法纤维素向淀粉转化，酶催化将糖苷键定向重排使纤维素转化为淀粉，该淀粉可被用于高端工业制造。

IT+BT在工业领域带来的范式变革

以数据驱动的生物制造新范式，已在生物医药领域展现出强劲的推动力，未来在非粮生物质开发的工业领域将广泛推动底层开发，包括菌种的基因组尺度代谢网络模型，高品质数据和新型数据挖掘和分析算法等，将显著促进改造靶点预测和指导代谢工程改造等领域。



人类的生产力和生产方式的变革, 对人类的历史进程有着如此重要的影响, 以至于直接推动了人类的三次工业革命——机械革命、电气革命和信息革命, 每次变革都带来了生产力的飞跃和社会、经济、政治等方面的深刻变革。在人类历史进程的第四次革命的酝酿中, 生物制造扮演了极其重要的角色。

历史上向来都是技术的进步推动产业变革, 从改变过去的利用方法中汲取经验, 不断走向新的未来。过去的几年, 生物制造也正如火如荼地影响着产业变革, 中国也正是认识到生物革命的重要地位, 2023年《加快非粮生物基材料创新发展三年行动方案》正式将非粮生物质开发摆在了核心地位, 助力生物经济的可持续发展, 其发展洪流大势所趋。

面向未来的3-5年, 生物制造在材料、化学品和能源领域的创新将对各行业产生巨大影响, 有望实现更高效、更可持续的生产方式。虽然生物制造仍面临诸多挑战, 但随着非粮生物质开发的技术进步和跨行业合作的深入, 市场份额将逐渐扩大。未来将出现更多具有变革性的生物制造产品 and 应用, 在成本、性能、产业规模和可持续性之间找到平衡, 并获得市场的认可和接受, 必将深刻改变人们的生产方式和日常生活。

最后向所有对本报告完成提供宝贵的建议和指导的学术与产业界专家表示衷心的感谢*: 中国科学院青岛生物能源与过程研究所崔球研究员、湖北大学杨世辉教授、聚维元创生物科技创始人兼CEO张天元博士。感谢DeepTech、红杉中国、水木络绎对本研究的支持。

*排名不分先后

About Us

DeepTech 成立于 2016 年, 是一家专注新兴科技的资源赋能与服务机构, 以科学、技术、人才为核心, 聚焦全球新兴科技要素的自由链接, 为产业、政府、高校、科研院所、资本等科技生态的关键角色提供服务, 通过科技数据与咨询、出版与影响力、科创资本实验室三大业务板块, 推动科学与技术的创新进程。

About the Report

以木质纤维素为代表的非粮生物质是地球最为丰富的一种可再生资源, 被认为是可持续能源和绿色化学工业的重要来源之一。非粮生物质开发作为串联生物制造产业上下游的关键环节, 向上促进农业废弃利用、边际土地开发、农业育种; 向下推动生物制造降本增效, 助力生物基材料能源规模扩张。本报告聚焦非粮生物质开发关键技术, 重点关注非粮生物质高效糖化、非粮生物质综合利用、酶与工业菌种开发, 以及由非粮生物质利用带来的产业结构变革。

Please use the following to reference the report

《2023非粮生物质开发关键技术与产业结构解读》, 2023. DeepTech 2023 Insights. China.

©DeepTech 2023

Disclaimer

本报告由 DeepTech 发布, 其版权归属北京演绎科技有限公司 (DeepTech), DeepTech 对此报告拥有唯一著作权和解释权。没有经过 DeepTech 的书面许可, 任何组织和个人不得以任何形式复制、传播等。任何未经授权使用本报告的相关商业行为, DeepTech 将依据中华人民共和国相关法律、法规追究其法律责任。

本报告所载数据和观点仅反映 DeepTech 于发出此报告日期当日的判断。DeepTech 对报告所载信息的准确性、完整性或可靠性做尽最大努力的追求, 但不作任何保证。在任何情况下, 本报告中的信息或表述均不构成任何投资等建议, 本公司对该报告的数据和观点不承担法律责任。不同时期, DeepTech 可能会发布其它与本报告所载资料、结论不一致的报告。同时 DeepTech 对本报告所载信息, 可在不发出通知的情形下做出修改, 读者应自行关注。

Find Out More

<https://www.deeptechchina.com>

<https://www.mitrchina.com>

Contact Us

songbingran@deeptechchina.com M: +86 18811152209

research@deeptechchina.com M: +86 18813083977

Office

北京市朝阳区亮马河大厦

上海市徐汇区淮海中路1325号

浙江省杭州市余杭区文一西路998号

广东省深圳市南山区云科技大厦7层

DEEPTech

DEEPTeCH

SEQUOIA CAPITAL
红杉中国 | CHINA

水木络绎

SCIENCE

×

TECHNOLOGY

×

TALENTS



相信科学的力量

IN SCIENCE WE TRUST

