

# 蒸汽爆破对木质纤维素高值化利用的研究进展

武威<sup>1, 2</sup> 马秋刚<sup>2</sup> 朱选<sup>1</sup> 王健<sup>1</sup>

(1. 广东海大集团股份有限公司, 广州 511400; 2. 中国农业大学动物科学技术学院 动物营养学国家重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 木质纤维素生物质是一种量大面广且廉价易得的可再生资源, 已逐步实现由生物质向生物燃料、饲料原料和其他附加值产品的开发及应用, 这样的高值转化与综合利用成为“走绿色发展道路、构建绿色生产体系”的重要部分。然而, 木质纤维素的天然抗降解屏障及其独特的理化性质, 纤维素-半纤维素-木质素三大组分的刚性网络一直是高效转化的瓶颈所在, 合理有效的预处理技术则是资源化进程的关键步骤。本文落脚于木质纤维素生物质的基本组成和结构特性分析, 在总结物理法、化学法、生物法等传统预处理方法优劣势的基础上, 着重阐述了蒸汽爆破的发展历程、加工类型、适用范围、工作原理、反应阶段、技术特点、影响因素、主要参数和可能的副产物效应等, 以及在生物质的纤维改性、结构变化、溶解特性、低聚糖制备、活性成分提取与反刍饲料化利用层面的研究进展。此外, 还指出蒸汽爆破辅以真菌、细菌为主的微生物发酵, 以及糖酶外源添加的后处理流程的发展趋势。最后, 归纳了蒸汽爆破在未来商业化、工业化和规模化生产推广中可能面临的困难和挑战, 分析提出相应的突破点和解决策略。并就蒸汽爆破技术对常见副产物类型饲料原料的降解效果, 及其在单胃动物日粮中的合理应用进行展望, 以期为该技术对生物质资源的开发、增值、饲料化应用的诸多潜能提供新思路和技术指导。

**关键词:** 木质纤维素生物质; 预处理; 蒸汽爆破; 后处理流程; 抗降解屏障; 纤维改性; 饲料化

DOI: 10.13560/j.cnki.biotech.bull.1985.2023-1154

## Research Progress in the High-value Utilization of Lignocellulose Biomass by Steam Explosion

WU Wei<sup>1, 2</sup> MA Qiu-gang<sup>2</sup> ZHU Xuan<sup>1</sup> WANG Jian<sup>1</sup>

(1. Guangdong HAID Group Co., Ltd., Guangzhou 511400; 2. State Key Laboratory of Animal Nutrition, College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193)

**Abstract:** Lignocellulose biomass is a renewable resource with a large quantity, wide coverage, and low cost. It has gradually been developed and applied from biomass to biofuels, feedstuffs, and other value-added products. Such high-value transformation and comprehensive utilization have become important parts of “taking the path of green development and building a green production system”. However, the natural anti-degradation barrier and unique physicochemical properties of lignocellulose, as well as the rigid network of the three major components of cellulose, hemicellulose, and lignin, have been the long-term bottleneck of efficient conversion. The reasonable and effective pretreatment techniques are the key steps in the resource recovery process. This paper focuses on the analysis of basic composition and structural characteristics of lignocellulose biomass. On the basis of summarizing the advantages and disadvantages of traditional pretreatment methods such as physical, chemical, and biological methods, it emphasizes the development history, processing types, scope of application, working principle, reaction stages, technical characteristics, main parameters, and possible by-product effects of steam explosion. In addition, it involves research progress in the fiber modification, structural changes, dissolution characteristics, oligosaccharide preparation, active ingredient extraction, and ruminant feed utilization of biomass. It is also pointed out that the new trend in the post-treatment process after steam explosion assisted by microbial fermentation dominated by fungi and bacteria, as well as the exogenous addition of carbohydrase. Finally, the difficulties and

收稿日期: 2023-12-08

基金项目: 广州市番禺区产业人才政策项目创新领军团队 (2021-R01-4)

作者简介: 武威, 男, 博士, 工程师, 研究方向: 动物营养与饲料科学 (家禽营养); E-mail: wuw10105@haid.com.cn

通讯作者: 王健, 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 动物健康营养; E-mail: wangj24@haid.com.cn

challenges faced by steam explosion in future commercialization, industrialization, and large-scale production promotion are summarized. The corresponding breakthrough points and solution strategies are analyzed and proposed. The degradation effects of steam explosion technology on common by-product types of feed raw materials, as well as its reasonable application in the diet of monogastric animals, are discussed. It is aimed to provide new ideas and technical guidance for the potential development, value-added, and feed application of biomass resources using this means.

**Key words:** lignocellulose biomass; pretreatment; steam explosion; post-treatment flow; anti-degradation barrier; fiber modification; feed conversion

木质纤维素生物质 (lignocellulosic biomass, LB) 作为一种独特的可再生碳中和资源, 用于生产天然绿色燃料和增值化工产品, 主要由纤维素、半纤维素和木质素三部分组成, 具体可划分为能量经济作物、农业副产物、林木及其加工副产物、工业与果蔬废弃物等不同的来源类型。据报道全球每年 LB 产量约  $1.3 \times 10^{10}$  t, 规模庞大, 不同国家或地区主导的资源类型也有所差异。我国以小麦秸秆、稻草和棉秆居多, 欧洲燕麦秸秆的产量占全球总量的 64%, 而玉米秸秆则是美国首要的农业副产物, 东南亚以稻壳和稻草为主, 巴西以甘蔗渣为主, 加拿大以油菜秸秆为主, 大麦秸秆是俄罗斯产出 LB 的主要来源<sup>[1]</sup>。然而, 它们绝大多数会被直接焚烧或填埋以当作有机肥料归田, 往往未能得到充分利用, 这样不仅造成了巨大的资源浪费, 还会引发众多环境污染问题。因此, LB 资源高值化利用对于使其成为可持续发展的潜在原料和石油化工的有效替代品具有重大的社会及经济意义。

为实现 LB 资源利用率的最大化和产物高值化, 近年来生物精炼工艺的整合以及全链条式的“梯级加工流程”逐步受到广泛关注<sup>[2-3]</sup>, 而合理有效的预处理技术是提高 LB 降解率的第一步。但由于植物本身致密的细胞壁结构, 以及 LB 纤维素、半纤维素和木质素的复杂关联和理化性质, 限制了基质底物的可及性与溶解性, 所以亟需适宜的预处理手段来打破这种天然抗性<sup>[4]</sup>。现阶段常用的方法有机械粉碎、挤压揉搓、微波处理、超声波处理、水热法、酸碱化学法、酶法、微生物发酵和蒸汽爆破等。其中, 蒸汽爆破 (steam explosion, SE) 技术是一种典型的物理-化学预处理方式, 能够强力破坏纤维束之间的相互连接, 打破 LB 固有的抗降解屏障, 在提高原料利用效率的同时获得一定的增值产物, 具有

作用时间短、高效耗能低、反应无污染及适应工业化等优点, 成为 LB 资源转化最具发展前景的预处理技术<sup>[5-6]</sup>。

综上, 本文从预处理的 LB 底物性质和复杂的结构特性出发, 结合蒸汽爆破工作原理、技术特点、关键影响因素、工艺流程中 LB 理化性质的改变、产物高效增值等进行全方位阐述, 探讨其在纤维改性、低聚糖制备、活性成分提取、饲料化利用及后处理流程联用等方面的具体影响和效果体现, 并对 SE 技术在生产推广层面所迎接的挑战和可能的突破点进行展望, 以期对 SE 对 LB 资源的开发、增值及其饲料化应用的潜能提供新思路与技术指导。

## 1 木质纤维素生物质的结构特性及理化性质

LB 资源化利用的主要难点是其对酶水解的顽固性, 这是由本身的异质多尺度结构及其关键限制因子所致。具体而言, LB 是由纤维素、半纤维素和木质素组成的非均相复合物, 三者之间通过特有的连接方式及紧密的作用力相互关联, 由此导致天然生物质中纤维素的酶促消化率偏低。此外, LB 中某些特定组分基于自我保护机制可竞争性吸附于外源性降解酶从而阻碍酶解进程。

其一, 纤维素线性链有序排列成紧密堆积的耐解聚结构, 其聚合度的改变通常伴有结晶度和孔隙率等结构参数的变化。其二, 半纤维素则是含多取代基团的多支链聚合物, 能与纤维素微管束通过氢键结合形成空间网络, 为植物细胞壁提供充足的结构骨架 (图 1-A)。作为木质素和纤维束之间的“桥梁纽带”, 以疏水和共价相互作用使得整个纤维素-半纤维素-木质素网络呈现更强的刚性<sup>[7]</sup>。半纤维素也通过乙酰基干扰酶识别来限制纤维素的可及性, 增加纤维素链的直径或改变其疏水性, 以阻碍纤维素与酶催化结构域之间形成实质性结合<sup>[8]</sup>。其

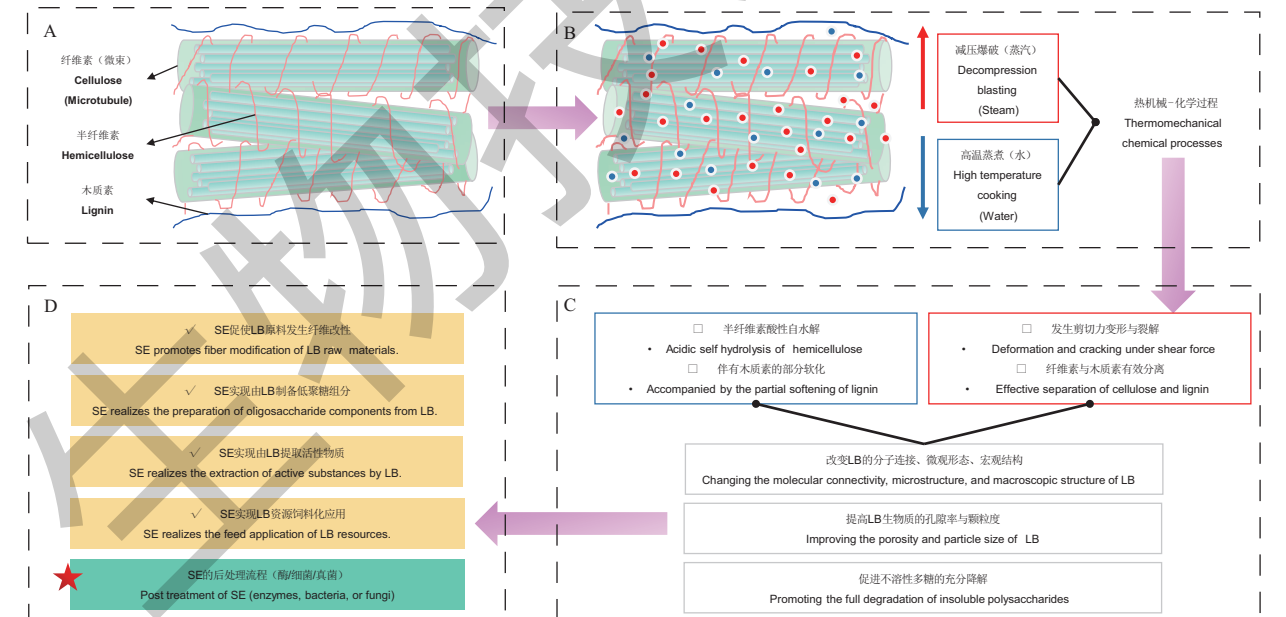
三，木质素的存在则赋予细胞壁进一步的结构支撑与非渗透性，基于氢键、甲氧基和多环结构等，它可以在酶水解过程中不可逆地吸附纤维素酶和其他酶<sup>[9-14]</sup>，而木质素的去除通常会破坏木质素-碳水化合物基质，减少酶的非生产性吸附位点<sup>[15]</sup>。所以，影响LB顽固性的结构和理化因素相互关联性强，难以割裂开来，综合反映了木质纤维素原料的复杂性。纤维素的结晶度、可接触的面积、木质素对纤维素的外围保护、生物颗粒的异质性以及半纤维素对纤维素的包覆联合等均有助于LB对水解作用的强抗性，这是多种预处理技术手段所需克服的关键难点。

2 基于 LB 常见的预处理技术及主要特点

鉴于LB极强的抗降解屏障性能，使得各组分的分离难度较大，这一直是制约其高值化利用的瓶颈所在。近年来，国内外众多学者团队和能源机构为攻克这一难题进行了大量实验室研究、中试验证乃至扩大化生产的尝试<sup>[16]</sup>。有效的预处理则是促进

LB资源化的第一步，通过改变木质纤维素的微观结构、宏观结构和化学组成<sup>[17]</sup>，使其后续易于被转化和利用，而传统的处理方法主要包括物理法、化学法、生物法以及多类型手段的联合应用<sup>[18-19]</sup>。

其中，物理处理法能减小原料本身的粒径，一定程度上降低纤维素及LB整体的聚合度<sup>[20]</sup>，操作简便、糖化明显，但是过程能耗大且不能完全去除木质素和半纤维素组分。而化学法中酸、碱处理能较好地弥补上述不足，显著分离出半纤维素和木质素组分，但其使用浓度过高时反而导致葡萄糖和木糖单元继续降解生成糠醛和羟甲基糠醛等发酵抑制物<sup>[21-22]</sup>，成本高且污染残留严重。现阶段生物法常通过细菌、真菌、放线菌及复合菌系来产生多种纤维降解酶与木质素氧化酶，可溶出、水解半纤维和减少纤维素的结晶度，并有效脱离木质素<sup>[23]</sup>。其反应体系条件温和、选择特异性强，过程副产物少。但是，目前探究到有效适用的微生物种类偏少，而构建筛选高效降解复合菌系复杂，转化周期长。上述预处理手段虽能促使LB内部解聚与转化，但同



A：LB 中各主要组分之间的复杂关联示意图；B：SE 预处理的主要阶段及作用示意图；C：SE 过程发生的组分变化及作用效果；D：SE 对 LB 的增值化利用及其后处理流程的新趋向

A: Schematic diagram of complex correlations among major components in LB. B: Schematic diagram of the main stages and mechanisms of SE preprocessing. C: The changes in components and their performance during the SE process. D: The manifestation of SE in the value-added utilization of LB and the new trend of supporting post-processing

图 1 蒸汽爆破预处理对木质纤维素生物质的作用效果及高值化应用

Fig. 1 Effects and high-value application of steam explosion pretreatment on lignocellulosic biomass

样体现出较为明显的不足从而限制其在生产研发中的应用。所以,两种或多种预处理方法的组合联用成为未来关注和探讨的重点。

在众多预处理技术的有效尝试和改进创新中,蒸汽爆破主要利用蒸汽瞬间释放原理实现原料内部结构变化,强力打破分子间连接与作用力,增加 LB 底物的可及性<sup>[24]</sup>。该方法既解决原料中活性物质提取率偏低的问题,也适用于高效化、工业化生产,是实现 LB 资源化利用最有前景的预处理技术之一。同样,在最新一项围绕青稞麸皮预处理的报道中,分析了蒸汽爆破的不同辅助类型(超声处理、柠檬酸、氢氧化钠和纤维素酶)对底物纤维组分性能的影响发现,各种联用手段在组织结构变化、可溶性糖的产率、生物质基础的热稳定性、持水性及吸附能力等方面表现出差异化优势<sup>[25]</sup>。

### 3 蒸汽爆破预处理技术

蒸汽爆破是一种重要的水热预处理方法,将 LB 原料置于高温、高压的密闭环境,过热饱和水蒸气(160–260℃)在一定压力(0.69–4.80 MPa)作用下强制进入基质底物,浸满植物细胞间隙。经充分保温、保压过后,瞬间将压力降至大气压水平,释放的过热液体迅速汽化并对外做功,体积急速膨胀,由此细胞破裂形成多孔结构<sup>[18]</sup>。在 SE 过程中,蒸汽本身的热量、瞬时减压产生的内部剪切力以及糖苷键的自动水解等均对 LB 复杂结构的分解发挥不可替代的作用。

SE 技术始于 1926 年,最初由 Mason 团队尝试通过 Masonite 工艺流程生产制造纤维板和其他产品;1978 年,该技术被首次应用于处理、生产反刍动物饲料<sup>[4, 26]</sup>。早期 SE 技术通常是指热喷式和螺杆挤压式蒸汽爆破<sup>[6]</sup>,随着应用领域的不断扩展,该技术也被迭代和完善,瞬间弹射蒸汽爆破技术应运而生。基于该技术配套设计了完整的设备体系(蒸汽产生器、爆体、活塞阀门驱动系统及接收仓),爆破时间可有效缩短至 8.75 ms<sup>[6]</sup>,相比传统意义上的蒸汽热喷放,处理时间更短、爆出效率更高、出料温度低、物料一致性更好。

此外,用于处理 LB 的几种常用反应器类型包括有分批、半连续和连续反应器;其中,前两种类

型通常被称作间歇式反应器。在间歇式反应器中,SE 预处理涉及在高压和高温下加热生物质,随后 LB 受到剧烈机械破坏排放到收集罐中,通常满足实验室规模的操作条件。而开发连续反应器便于调整预处理参数,主要以更高的容量运行,从而在使用更少能量的同时更为有效和准确地控制预处理流程,其通常用于大规模生物物质的 SE 预处理<sup>[5, 27]</sup>。

#### 3.1 蒸汽爆破预处理的反应过程及作用原理

SE 技术可以使蒸汽分子渗入到植物细胞壁组织,经过蒸汽瞬时释放将内能转化为机械能,作用于 LB 细胞层间,达到分解原料内各组分的目的(图 1-B)。该技术主要划分为高温蒸煮和瞬时减压爆炸两个阶段<sup>[5, 28–29]</sup>:(1) LB 原料在高温、高压水蒸汽的作用下发生热化学反应,蒸汽进入组织内部,降低其连接强度和黏度,有利于后续的机械性分离。此时,半纤维素在自身乙酰基和其他酸衍生的乙酸作用下发生酸性自水解,降解产出木糖单糖和低聚糖,并伴有木质素的部分软化,进而破坏纤维束之间的相互连接<sup>[30–31]</sup>。(2) 由于瞬间释压,LB 原料中液体和水蒸汽同时发生绝热膨胀,该过程主要由热能转化为机械能做功,迅速膨胀的气体以冲击波形式作用于已软化的基质底物,使其发生剪切力变形与破裂,对 LB 进行充分的物理和化学修饰,并释放出增值产物。而且,根据两阶段内水、热传递规律,也可以将 SE 细分为气体置换、气体穿透、气体蒸煮和气体爆炸四个步骤<sup>[32]</sup>。由此,经 SE 处理后 LB 半纤维素多数降解为可溶性单糖和低聚糖,木质素和半纤维素之间的酯键断裂,同时 LB 致密的结晶结构被强力破碎,细胞壁组织则撕裂为基础性的束状纤维素,最终实现纤维素、半纤维素和木质素的分离、转化。

#### 3.2 蒸汽爆破预处理的影响因素及反应优化

影响 SE 处理效果的因素总体上可分为内因(LB 物料本身)和外因(设备条件参数)。前者一般是指 LB 不同的种类来源、组织成分、含水量、其他可能的酸碱预处理、粉碎程度、初始形态和流动性等。例如,5 种不同的作物秸秆在相同 SE(210℃、2.5 MPa)预处理条件下保压 2 min,再经 500℃热解 2 h,导致作物秸秆中半纤维素和纤维素的含量分别

减少 47%–95% 和 5%–16%<sup>[33]</sup>。即在相同爆破条件下 SE 对 LB 细胞壁组织的破坏程度因物料种类不同而存在较大差异，同一类秸秆、不同的收集部位 SE 处理效果也有所差别<sup>[34]</sup>。LB 组织细胞内水分含量居多，因此物料含水量与粉碎形态也是影响爆破效果的重要内因。已有研究指出，不同水分含量的黑豆壳经 SE（1.0 MPa、80 s）处理后，底物中可溶性纤维的产量从 10.20% 提高至 17.49%<sup>[35]</sup>。在适宜的 SE 处理条件下，随着玉米秸秆和甘蔗渣水分含量的增加，物料 LB 降解得率、比表面积、蒸汽渗透效率与可溶性纤维提取率同样呈现出规律变化<sup>[36]</sup>。另外，基于玉米、小麦等农作物副产物进行的 SE 预处理，通常会结合水、稀酸（硫酸）、稀碱（氢氧化钠）溶液或氧化剂（氧化钙）的预浸处理，以此增强 LB 降解分离效果并有效获得部分低聚糖<sup>[37–38]</sup>。早期关于酸浸蒸汽爆破工艺特点的报道称，相应处理后玉米芯残渣中纤维素的最大转化率高达 85.3%，是单一稀酸处理效果的 1.6 倍<sup>[39]</sup>。

影响 SE 反应体系的关键设备参数主要包括蒸汽压强、回火温度、保压时间和爆破时间。以上参数均需根据预处理的目的合理优化、调整，因为它们会直接决定所得生物质的最终性能。先前多以爆裂因子  $\log R_0$  表示 SE 的爆破强度，表明爆破温度与维压时间的互作关系<sup>[40]</sup>。然而该因子并未完整体现第二阶段瞬时炸裂的具体特点，工艺上则引入有效爆破功率和爆破功率密度来补充描述该阶段的绝热膨胀做功<sup>[41]</sup>。分析可知，爆破效果主要受温度和蒸汽压强的影响，且两者呈正相关关系。但当压强与温度过高时，极易导致可溶性纤维、戊糖和己糖组分过度降解形成甲酸、乙酸及糠醛等副产物，木质素重排形成更难降解的缩合亚结构<sup>[42]</sup>。一般而言，当 SE 处于低温、低压条件下保持较长的保压时间效果较好，在高温、高压状态下保压时间则要控制在适配的合理范围。

由上，SE 可显著促进半纤维素增溶，极大地破坏了纤维素–半纤维素–木质素交联的抗降解屏障（图 1-C）。但是传统方法就关键参数而言仍存在一定的局限性，现阶段生产应用层面并未具备理想成熟的 SE 反应体系。这提示，一方面可根据 LB 底物类型及复杂程度逐步优化适配的工艺参数，减

少中间副产物的形成；另一方面需考虑在 SE 前期增设相对成熟的预浸处理，或 SE 预处理辅以生物法的前处理流程，以实现 SE 工艺流程精准化控制，把握好底物多组分的分离程度，在提高纤维利用率的同时，为获得符合预期效益的增值产物提供有利的技术支持。

## 4 蒸汽爆破对 LB 的作用效果及高值化应用

LB 天然的生物顽固性，大幅降低了其本身的转化效率和利用率。通过 SE 预处理，环绕纤维素的半纤维素和木质素发生了巨大变化：半纤维素的自水解，木质素的重排、再定位，纤维素晶型的改变从而改善了纤维素的可及性和释放，有效实现组分分离<sup>[43–44]</sup>。SE 通过改变 LB 的分子连接、微观形态、宏观结构及化学组成，以及提高生物质的孔隙率与颗粒度，有利于酶和底物的接触作用，促进不溶性多糖的充分降解，使其更易于后续地转化与高值化应用（图 1-D）。

### 4.1 蒸汽爆破对 LB 微观形态和分子结构的影响

SE 处理两阶段中强烈的瞬时热能与其他作用力相结合，可以破坏纤维素–半纤维素–木质素之间的紧密连接，将 LB 原料撕裂为细小纤维，细胞壁表面产生明显的裂缝和微孔，增加其本身的比表面积。通常采用扫描电镜、X-射线衍射、傅里叶变换红外光谱技术对 SE 处理后的 LB 纤维结构特性和表面形态进行分析。

有研究指出，经 SE 预处理玉米秸秆细胞壁表面粗糙、变形、孔隙变大，整体结晶度下降，羟基吸收峰显著升高<sup>[45–46]</sup>。SE 处理后麦麸的表观形态同样发生改变，苦荞麸皮呈现出多层蓬松结构，部分甚至呈现类似蜂巢状的多孔特征<sup>[47]</sup>。小麦麸皮的长条细杆状纤维发生卷曲、断裂，进而膨化为絮状结构，且表面呈现有多处凹陷小孔，颗粒度降低<sup>[48]</sup>，SE 处理后豆皮表面呈现出类似变化<sup>[49]</sup>。此外，近年来更多的研究团队对甘薯渣<sup>[50]</sup>、甘蔗渣<sup>[51]</sup>、刺梨渣<sup>[52]</sup>、黑小麦麸皮<sup>[53]</sup>等 LB 原料进行蒸汽爆破预处理的尝试探究，相关报道中说明了基质原料在理化性质层面的诸多变化，结果相似。

基于分子连接层面，SE 处理后 LB 纤维素和半纤维素中羟基的拉伸振动峰值强度降低，半纤维素

中羰基的特征峰值降低，表明 SE 处理可导致大量半纤维素的降解，显著降低半纤维素对纤维素酶解的抑制效应<sup>[54]</sup>。另外，半纤维素和木质素之间的  $\beta$ -O-4 酯键及其他酸不稳定的化学键发生断裂，木质素的聚合度降低，纤维素也由结晶态转变为非结晶态，因而 LB 完整的交联 - 抗降解屏障结构被彻底改变。

由上，LB 原料在 SE 的作用下，其内在微观结构发生明显改变。这主要是由于在 SE 高温、高压过程中，LB 基质纤维间隙浸润的自由水经瞬时泄压迅速汽化，发生急剧绝热膨胀，产生强大的剪切力，从而在基质表面形成众多不规则的孔洞，同时三大组分之间的化学键断裂，原有的致密结构被破坏，LB 整体变得疏松、易降解。

4.2 蒸汽爆破在LB纤维改性上的应用

植物细胞壁中纤维组分按溶解度的不同可以分为水溶性纤维和不溶性纤维，水溶性纤维在调节机体代谢功能、肠道健康等方面发挥更为重要的益生作用<sup>[55]</sup>。然而，天然来源的 LB 原料中主要化学成分包括纤维素（35%–50%）、半纤维素（20%–35%）和木质素（15%–20%），且多以不溶性纤维为主<sup>[56]</sup>，因此亟需借助预处理手段对其进行适宜的纤维改性，增加可溶性纤维的含量，以提高 LB 资源化利用的程度<sup>[57–58]</sup>。基于前述蒸汽爆破的技术原理及关键流程，SE 预处理可降低 LB 原料中不溶性纤维含量，高效破坏生物质细胞壁的致密结构，使难溶解的纤

维素、半纤维素等大分子物质内部发生糖苷键的断裂，进而形成更小片段的低聚糖或还原糖溶出，转变为高值化的可溶性纤维。最新一项研究指出，经 SE 预处理改性的苦荞麸皮可溶性纤维组分，能通过激活肝脏磷脂酰肌醇 3 激酶 / 蛋白激酶 B / 叉头转录因子 O1 以及 G 蛋白偶联受体 43 / 磷酸腺苷活化蛋白激酶信号通路，并调节肠道微生物群 - 短链脂肪酸 - G 蛋白偶联受体 43 / 血清胰高血糖素样肽 -1 的信号轴来改善 II 型糖尿病<sup>[59]</sup>。此外，基于 SE 预处理可溶性纤维的理化性质和功能特性均得到改善，它可能转变为一种优化的功能性成分。经蒸汽爆破（1.2 MPa、120 s、物料水分 13%）处理后，茯苓皮渣的可溶性纤维总量从 5.24% 提高至 23.86%，表现出更好的酶抑制作用，增强了本身的持水性、保油性、水溶胀性、对胆固醇、葡萄糖等营养物质的吸附和抗氧化能力<sup>[60]</sup>（表 1）。

4.3 蒸汽爆破实现由LB制备低聚糖

LB 原料中半纤维素组分具有热不稳定性，在 SE 水热条件的作用下，此类难溶大分子聚合物内部的糖苷键断裂乃至发生酸性自水解，形成短链的低聚糖及单糖等小分子的水溶性糖溶出<sup>[67–68]</sup>。低聚木糖（xylo-oligosaccharides, XOS）是一种由 LB 原料所产出的新兴增值化合物，因其独特的益生元性质已被广泛应用于食品、药品和其他领域<sup>[69]</sup>。XOS 是半纤维素主要成分木聚糖的水解产物，近年来已通过

表 1 蒸汽爆破预处理过程中 LB 原料纤维组分的变化情况

| LB 原料类型                   | 蒸汽爆破参数                     | 纤维改性表现                                                                  | 参考文献      |
|---------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| LB substrate type         | Steam explosion parameter  | Performance of fiber modification                                       | Reference |
| 麦麸 Wheat bran             | 0.8 MPa, 3 min             | SE 处理后麦麸中可溶性纤维总量由 18.88% 提高到 40.32%，纤维表面崩解                              | [ 61 ]    |
| 麦麸 Wheat bran             | 不同压力梯度, 3 min              | 可溶性戊聚糖含量及可消化碳水化合物与可溶性蛋白的比值随蒸汽压力增大呈现先增后减的趋势，在 1.5 MPa 达到峰值，约为未汽爆处理的 12 倍 | [ 62 ]    |
| 高粱 Sorghum                | 0.5、1.0、1.5、2.0 MPa, 5 min | SE 预处理提高了高粱中还原糖产量，2.0 MPa 条件下其含量提高了 19 倍以上                              | [ 63 ]    |
| 豆渣 Okara                  | 1.5 MPa, 30 s              | 可溶性纤维含量增加到 36.28%，提高了 26 倍；随着 SE 强度的增加，低分子量多糖的比例增加                      | [ 64 ]    |
| 小麦秸秆 Wheat straw          | 170℃, 0.79 MPa, 5 min      | 纤维素保留率 91.3%，半纤维素脱除率达 83.4%，水解液糖得率为 80.1%                               | [ 65 ]    |
| 青稞麸皮 Highland barley bran | 1.5 MPa, 90 s              | SE 预处理后，不溶性纤维总量降低了接近 4%，同时可溶性纤维的产率从 3.54% 提高到 6.96%                     | [ 24 ]    |
| 小麦麦胚 Wheat germ           | 0.4、0.6、0.8、1.0 MPa, 5 min | 可溶性多糖的平均提取得率达 18.72%，其表面结构呈片状不规则破碎结构                                    | [ 66 ]    |

对 SE 工艺条件的逐步摸索以及不同 LB 底物的选择试用，评估发现以下几种富含木聚糖的农业副产物能够有效回收聚合度为 2-10 个木糖单元的低聚糖产物。此外，最新一项研究指出，通过 SE 预处理和高

效表达的壳聚糖酶 Csn-But 联用，实现了单一聚合度壳寡糖的绿色制备，这也为蒸汽爆破基于新的 LB 原料类型来分离制备益生元组分提供很好的指导思路<sup>[70]</sup>(表 2)。

表 2 蒸汽爆破预处理对 LB 原料中低聚糖产出情况的影响

| Table 2 Effects of steam explosion pretreatment on the oligosaccharide production in LB raw materials |                  |                                                      |                        |                                                  |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------------|-----------|
| LB 原料类型                                                                                               | SE 参数设置          | 预处理联用                                                | 研究阶段 (规模)              | 转化产出情况                                           | 参考文献      |
| Substrate type                                                                                        | Parameters of SE | Preprocessing combination                            | Research stage (scale) | Conversion and output situation                  | Reference |
| 甘蔗渣                                                                                                   | 190℃, 5 min ; 其他 | SO <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 辅助催化 | 实验室研究                  | 以 XOS 的形式回收约 40% 的木聚糖,                           | [ 71 ]    |
| Bagasse                                                                                               | 22 种优化条件         |                                                      | Laboratory study       | 且水解产物在聚合度上具有多样性                                  |           |
| 甘蔗渣                                                                                                   | 自动水解体系 (控制       | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 辅助催化 + 后续酶解           | 中试工厂                   | 单独 SE 处理后木糖量为 15 g/L, 低                          |           |
| Bagasse                                                                                               | 面板参数; 未写明)       |                                                      | Pilot-plant            | 聚木糖和纤维低聚糖量达 60 g/L; 辅助催化后低聚糖含量反而显著降低 (14 g/L)    |           |
| 大麦秸秆                                                                                                  | 180℃, 30 min     | 内切型木聚糖酶与多种脱                                          | 中试工厂                   | 在该综合工艺中, 折算为从 100 g 秸                            | [ 73 ]    |
| Barley straw                                                                                          |                  | 支酶的组合                                                | Pilot-plant            | 秆中获得 13.0 g XOS (聚合度为 2-6)、12.6 g 乙醇和 16.6 g 木质素 |           |
| 芒属植物                                                                                                  | 200℃, 15 bar,    | SE 后辅以内切木聚糖酶                                         | 中试工厂                   | SE 预处理后整体 XOS 产率高达 52%,                          | [ 74 ]    |
| Miscanthus specie                                                                                     | 10 min           |                                                      | Pilot-plant            | 再经酶解 4 h 后, 其中约 74%-90% 的 XOS 基本转化为木二糖           |           |

4.4 蒸汽爆破实现由LB提取活性物质

SE 预处理可以促使 LB 原料细胞壁形成多孔结构，由刚性有序转变为疏松解聚的状态，增加其比表面积以及其他预处理手段的可及性，便于游离型酚类物质的溶出<sup>[75]</sup>。鉴于瞬间爆破产生巨大的冲击力，酚类化合物与 LB 多糖糖苷键之间的氢键以及其他共价键连接遭到破坏，不溶性结合酚得以释放。常见的游离态酚酸包括有对香豆酸、香草酸、丁香酸、绿原酸和阿魏酸，其中阿魏酸在总酚类物质中的占比高达 80%-90% 左右，亦是被最早开发的多酚化合物之一，作为一种优良的自由基清除剂，表现出较强的抗氧化活性，已证明在食品与健康领域具备诸多有益功效<sup>[76]</sup>。

SE 预处理可以使 LB 细胞壁形成诸多裂缝和微孔结构，从而促进油脂的溶出和扩散，明显提高植物油脂的提取率，以充分发挥不饱和脂肪酸的功能特性。例如，在 2.0 MPa、30 s 的 SE 条件下，相应亚麻籽油提取率为未汽爆样品的 1.17 倍，亚麻酸的质量分数由 77.41% 增加至 81.28%<sup>[77]</sup>。通过漆树果实的 SE 预处理流程形成了盐肤木果油、黄酮等一系列产品，这也为自然界中多经济型野生植物资源的

开发提供一定参考<sup>[78]</sup>(表 3)。

4.5 蒸汽爆破实现LB资源饲料化应用

秸秆是农作物副产物中丰富的木质纤维素生物质之一，年产量巨大但资源浪费严重，而且因其适口性较差和粉碎程度偏低，饲料化利用率不足综合利用率的 18%。SE 是一种高效预处理农作物秸秆的新技术，通过改变秸秆的纤维组成、理化结构以及多糖转化，能显著改善秸秆本身的营养价值，利于瘤胃微生物在秸秆上的附着与代谢，提高瘤胃内秸秆的消化率(表 4)，从而促进秸秆资源饲料化推广，对解决现阶段粗饲料资源短缺和低效转化的问题具有重要意义。

2021 年 11 月 17 日，由中国农业科学院北京畜牧兽医研究所主持的团体标准《玉米秸秆蒸汽爆破饲料制作技术规范》(T/TDSTIA 024-2021)在全国团体标准信息平台顺利发布，为引领秸秆饲料化高效利用提供了重要标准。该标准对玉米秸秆蒸汽爆破处理过程中涉及的术语和定义、玉米秸秆原料选择、蒸汽爆破处理、干燥处理、玉米秸秆蒸汽爆破饲料质量要求、检测方法、质量控制、储存和运输进行了详细规定。

表 3 蒸汽爆破预处理对 LB 原料中酚类物质释放的主要影响

| LB 原料类型                        | SE 条件                 | 酚类变化                                        | 功能活性表现                                             | 参考文献      |
|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|-----------|
| Substrate type                 | SE conditions         | Changes in phenolic substances              | Performance of functional activities               | Reference |
| 苦荞麸皮<br>Tartary buckwheat bran | 1.5 MPa, 60 s         | SE 促进了结合型焦没食子酸、原儿茶酸和咖啡酸的释放, 其含量几乎增加了两倍      | 结合酚提取物的体外氧自由基吸收能力提高 270%, 游离酚提取物的体外细胞抗氧化活性提高了 215% | [ 79 ]    |
| 红豆<br>Adzuki                   | 0.25–1.0 MPa, 30、90 s | SE 有助于多酚的释放, 游离多酚中原儿茶素、儿茶素和表儿茶素含量增加         | 酚类化合物的产率和抗氧化能力在 0.75 MPa 压强、保压 90 s 时达到最高          | [ 80 ]    |
| 绿豆<br>Mung bean                | 0.25–1.0 MPa, 30、90 s | SE 增加了原儿茶酸、对香豆酸、阿魏酸、儿茶素和表儿茶素的含量, 但咖啡酸含量有所下降 | 与未处理的样品相比, SE 也提高了游离酚和酯化酚的抗氧化活性                    | [ 81 ]    |

表 4 蒸汽爆破预处理对秸秆饲料化利用的影响

| LB 底物类型                                       | SE 及辅助处理                       | 饲料化转化效果                                                                                                  | 参考文献      |
|-----------------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Substrate type                                | SE and auxiliary processing    | Feed conversion effects                                                                                  | Reference |
| 玉米秸秆<br>Corn stover                           | 0.8、1.0、1.25 MPa<br>秸秆水分梯度范围   | SE 处理后中性洗涤纤维、酸性洗涤纤维和木质素含量显著下降; 秸秆的相对饲喂价值、干物质自由采食量、可消化干物质、总可消化养分提高                                        | [ 82 ]    |
| 干黄玉米秸秆<br>Corn stover                         | 1.8 MPa, 200 s; 接种乳酸菌微贮        | 相较对照而言, 经预处理的微贮饲料的品质显著提高, 其中粗蛋白质含量为 10.85%, 奶牛瘤胃干物质消失率最高可达 77.36%                                        | [ 83 ]    |
| 玉米秸秆<br>Corn stover                           | 1.5 MPa, 180 s; 纤维素酶 / 乳酸菌辅助青贮 | SE 与后续青贮处理具有协同效应; 半纤维素在 SE 处理 (70%) 或青贮贮存 (20%–40%) 过程中部分降解; 纤维素活性增加 2 倍左右, 秸秆有效降解率由 39.25% 显著提高至 54.07% | [ 84 ]    |
| 玉米棒等 5 种<br>Five types<br>including corn cobs | 1.5 MPa, 90 s 等 5 种参数条件        | 玉米棒、稻草、花生壳、小米秆和甘蔗尖这五种副产物的理化结构和瘤胃发酵特性, 均可通过 SE 处理来改善; 其干物质消化率提高约 11.38%–14.74%, 有效能量增加约 42.13%            | [ 85 ]    |
| 玉米秸秆<br>Corn stover                           | 1.6 MPa, 115 s 等 9 种参数条件       | SE 处理能加快瘤胃微生物对秸秆的黏附, 促进生物被膜形成, 以提高秸秆纤维素的瘤胃降解率                                                            | [ 86 ]    |

5 蒸汽爆破的后处理流程及其可能的应用方向

SE 预处理对分离 LB 中纤维素、半纤维素和木质素起着至关重要的作用, 进而大幅提升部分酶或微生物 (细菌、真菌) 对各组分的可及性和有效活性<sup>[87]</sup>。因此, 在 SE 基础上尝试辅以传统生物法为主的后处理流程, 逐渐发展为研究应用的新趋势。具体而言, 可细分为以下 4 个方面:

其一, 在 SE 预处理的 LB 原料中直接单独、复配或者按照不同的组合顺序 (批次) 添加适宜的酶制剂实现生物质的再降解。通过在空气浴振荡器中补充使用纤维素酶 (底物干重的 7%), 对尿素 (4.87%) 与 SE (1.22 MPa、190℃、3 min) 联合预处理后的玉米秸秆进行酶糖化过程。产物中还原糖的含量显

著提高 116.42%, 纤维素、半纤维素和木质素降解率分别提高了 40.26%、45.89% 和 53.71%, 最大的糖醇转化率达 48.3%<sup>[88]</sup>。而将纤维素酶、半纤维素酶、漆酶与果胶酶按照一定的反应顺序与 SE 处理后的玉米秸秆混合培养, 上述纤维降解酶的作用顺序能够影响秸秆底物的降解效果及产物成分, 最佳的组合顺序为半纤维素酶 – 纤维素酶 – 果胶酶 – 漆酶, 相应的还原糖、总酚、半乳糖醛酸及木糖的释放量均显著高于其他处理<sup>[89]</sup>。另外, 优化酶混合物的组成是后处理流程中提高 LB 酶解效率、降低成本的有效途径。因此, Zhang 等<sup>[90]</sup>有针对性地制定了 SE 预处理条件下玉米芯高效水解的酶混合物的最佳配比 (纤维素酶: 半纤维素酶的比例为 1: 0.75)。同时, 明确了对纤维素酶类型的具体要求, 即内切型

葡聚糖酶和纤维二糖水解酶对 SE 处理后的玉米芯表现出协同酶解作用。也有报道称, 裂解多糖单加氧酶 R17L 与纤维素酶协同降解 SE 预处理的玉米秸秆碎片化程度最高, 进而为纤维素酶实现 LB 的高效转化提供了更多可操作的位点<sup>[91]</sup>。而且 SE 处理后再经海水预处理, 高活性的木聚糖酶(M137E/N269G\_XYL10)和纤维素酶的协同机制有助于蔗渣的低能降解<sup>[92]</sup>。

其二, 在 SE 预处理的 LB 原料中添加某些种类的真菌加以代谢、转化与下一步的利用。能够降解植物细胞壁的丝状真菌往往表达较为丰富的 LB 降解酶体系, 而且不同菌种的降解酶系及其偏好性有所差异。分别将黑曲霉(*Aspergillus niger* An 76)、疏棉状嗜热丝孢菌(*Thermomyces lanuginosus* SSBP)与 SE 处理的啤酒麦糟进行共培养, 利用功能组学分析可知, 黑曲霉分泌有 5 种  $\beta$ - 葡聚糖酶、10 种木聚糖酶和 13 种纤维素降解酶, 发酵的粗酶液可将麦糟的多糖组分降解为小分子寡糖和单糖; 而丝孢菌分泌量较高的包括有木聚糖主链降解酶、木糖苷酶、 $\beta$ -1,3- 葡聚糖酶和葡萄糖苷酶, 发酵后期发现大量 XOS 和  $\beta$ -1,3,1,4- 葡寡糖产物<sup>[93]</sup>。这在一定程度上证实了不同的丝状真菌对 LB 原料表现出酶解特异性, 后处理流程应用时需要结合多糖转化去向合理选择相应的真菌类型。为了优化后处理流程中酶的复合组成以提高 LB 的水解效率, 最新研究报道 SE 预处理的底物也能有效诱导哈茨木霉(*Trichoderma harzianum* EM0925)分泌产生完善的 LB 降解酶系(包括有内切葡聚糖酶、纤维二糖水解酶、木聚糖酶、 $\beta$ - 葡萄糖苷酶、阿拉伯呋喃糖苷酶和  $\beta$ - 木糖苷酶); 此外, 该混合酶在较低剂量(1.2 mg/g)即可进一步提高 SE 底物的水解效率<sup>[94]</sup>。这证明了 SE 预处理底物可以作为 *T. harzianum* 产生特定酶的诱导剂, 为构建高效的 LB 裂解酶混合物提供了一种新的思路和潜在的解决策略。但是, 基于 SE 预处理的玉米秸秆进行厌氧真菌(*Pecoromyces* sp. F1)和产甲烷菌(*Methanobrevibacter thaueri*)共培养流程, 72 h 累积甲烷产量并无显著变化[(32.2  $\pm$  1.74) mL vs (37.1  $\pm$  1.09) mL], 这可能与所选用的真菌种类及其对各纤维组分的代谢特异性有关<sup>[44]</sup>。具体而言, 厌氧真菌尤其对半纤维素表现出强大的降解能力,

而 SE 预处理过后玉米秸秆中的半纤维素多数会被分解为可溶性小分子糖(70%), 底物中半纤维素的大幅减少直接影响到厌氧真菌所分泌的纤维降解酶活性<sup>[95]</sup>。由此提示, 基于 SE 的真菌发酵后处理流程, 需要科学判断 SE 预处理的 LB 原料组分变化, 并根据增值化利用的需求目标灵活适配特有的反应条件与差异化的微生物种类。

其三, 在 SE 预处理的 LB 原料内添加某些种类的有益微生物或微生态制剂。例如, 为进一步提高青贮饲料的发酵品质以及秸秆资源的饲料化程度, 在玉米秸秆 SE 预处理的前提条件下, 探究了植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*)、乳酸片球菌(*Pediococcus acidilactici*)和凝结芽孢杆菌(*Bacillus coagulans*)三者混合培养的最优配比及最佳接种时间, 而且添加混合菌剂后, 相比于发酵前秸秆的粗蛋白含量显著提高了 56.91%<sup>[96]</sup>。已有研究指出, 白酒酒糟经适宜的 SE(压力 1.7 MPa、保压 15 min)预处理后, 筛选确定出由酿酒酵母、产朊假丝酵母、植物乳杆菌、木霉和黑曲霉为主的最佳组合, 由此发酵的爆破酒糟的粗纤维含量下降了 17.85%, 粗蛋白含量提高了 22.55%, 并伴有适量的短链脂肪酸, 为开发富含功能性成分的酒糟饲料具有一定的参考价值和指导意义<sup>[97]</sup>。水提-甘油协同 SE 对玉米秸秆进行综合预处理, LB 中纤维素的酶解效率和葡萄糖产量较单独 SE 预处理分别提高了 68.9% 和 69.8%; 再者利用巴氏梭菌(*Clostridium pasteurianum* CICC10391)对以上水解液进行厌氧发酵, 前期产出的葡萄糖可全部用于生产丁醇<sup>[98]</sup>。

其四, 对 SE 预处理的 LB 原料辅以菌-酶联用。为改善玉米秸秆的营养价值和饲用效果, 原料经 SE(压力 1.0 MPa、水分 60%-70%、10 min)预处理过后, 再分别添加不同类型的菌酶复合剂进行厌氧密封发酵, 含植物乳酸菌、丙酸菌杆菌和纤维素酶的复合处理中乙酸、丙酸、总挥发性脂肪酸含量分别提高 19.62%、5.59%、14.12%, 秸秆青贮品质显著改善, 其干物质损失率最低, 未出现发霉现象、无霉菌检出, 体外干物质消化率和中性洗涤纤维消化率分别提高了 0.47% 和 8.19%<sup>[99]</sup>。而 SE 预处理后的玉米秸秆通过纤维素酶-乳酸菌辅助原料的青贮, 纤维素的可及性明显增加(2.44 mg/g vs 4.33 mg/g), 半纤维素

在储存过程中再次降解(20%–40%),玉米秸秆的瘤胃有效降解率由39.25%提高至54.07%<sup>[84]</sup>。

已有研究表明,剧烈的SE处理程度会导致纤维素和部分可溶性糖的过度降解,木质素形成更为复杂的缩合亚结构,戊糖和己糖也进一步降解为甲酸、乙酸、糠醛及羟甲基糠醛等发酵抑制物<sup>[42, 100]</sup>。因此,后处理流程的联用效果,与前期SE预处理技术条件的合理调控和过程监测密不可分,以期更好地发挥SE-微生物发酵-酶处理的协同效应。

## 6 SE技术的局限性及其在应用层面的挑战

有效的预处理是实现LB分离解聚、精细转化与增值利用的第一步,SE技术集高温自水解和瞬时减压爆破于一体,被证明是一种高效、绿色、适于工业化推广的生物质预处理手段。但是,由于众多内外在因素的干扰或影响,SE技术在以下3个方面具有一定的局限性,这提示在后续的研究与应用层面可能需要尝试多种适配改进以克服多重困难。

(1)目前国内外诸多研究报道中SE过程所涉及的反应器体系和参数设置参差不齐,此类情况是客观存在的且难以实现统一标准化。那么,在借鉴已有数据结论的前提下,考虑基于不同的底物类型来选择合适的反应体系,充分判断LB的纤维组分情况与结构特性,以结合差异化的目标需求来逐步探究、优化各具特色的技术方案。此外,可通过改进原有反应器的设计和增强高温、高压的运行环境、缩短循环处理时间等,将某些潜在风险和不利影响降至最低。

(2)SE反应体系涉及4个明确的步骤,各阶段涵盖复杂的生物质热化学转化过程,LB各组分的分离程度、中间副产物以及最终有益的产物趋向难以明确,其中可能会导致半纤维素以及部分纤维素和木质素的降解,造成更多的干物质损失,另外抑制剂的形成亦限制了发酵过程的有效性。因此,这便需要结合更详细的优化验证和追踪监测以有效地产出或制备增值化的目标产物。

(3)SE过程产生蒸汽需要配套完善的反应单元/体系,在提供高温高压环节能耗较多,更为关键的挑战是下游产物进一步地提取和精制工艺,整体而言SE相较其他几类成熟的方法成本偏高。所以,

SE预处理的结果要考虑到对下游成本的影响以及能值投入和高值化产出之间的平衡。由这样的过程经济分析,能确定对整体流程经济效益影响最大的工艺参数,也有助于指导围绕LB的研究和开发工作。

## 7 总结与展望

SE技术以高效、安全、绿色、无污染等优点,在LB资源化利用的多个领域受到普遍关注。紧紧围绕LB原料固有的抗降解屏障特性,通过一定的热化学转化破坏纤维组分间的复杂交联,在提高LB纤维素利用率的同时,促进可溶性低聚糖与多种活性成分的释放,对植物纤维的高效分离和终产物的高值化应用具有显著的效果。但目前LB原料的饲料化应用研究相对受限,多集中于SE高效处理农作物秸秆,并在不影响反刍动物正常生产的情况下,代替饲料中的部分优质粗饲料,却鲜见针对猪、鸡等单胃动物日粮中常见的玉米、豆粕等谷物型副产物的SE预处理应用。这可能是在相应的饲料领域受LB底物组分、技术条件和生产成本等因素的综合影响起步较缓。

未来发展可考虑主要聚焦于以下方向:SE工艺条件必须适配于各种可变来源的LB结构组成与理化特性,做到具体问题具体分析,为预处理工作的科学开展提供技术保障;合理控制SE处理的强度和均匀度,规避半纤维素的过度水解以及木质素的结构重排;考虑尝试在SE处理前补充预浸步骤以最大程度地增加产物中纤维素的可及性和半纤维素水解的有效性;通过探寻多种预处理方法(酶或微生物发酵)联用的SE后处理流程,挖掘组合工艺在饲料化应用层面的新策略;并明确SE处理后LB底物的主要变化层面对营养价值的实质影响。此外,可尝试基于单胃动物日粮中谷物型饲料原料副产物的特性,拟通过SE技术缓解或克服其降解难、消化代谢率低以及对肠道的负面影响等抗营养作用,产出可溶性低聚糖和其他小分子活性物质,生产利于肠道健康的功能性饲料,以提高谷物副产物的经济附加值和动物的生产性能。

## 参考文献

- [1] Bajwa DS, Peterson T, Sharma N, et al. A review of densified solid biomass for energy production [J]. *Renew Sustain Energy Rev*,

- 2018, 96: 296-305.
- [2] Velvizhi G, Balakumar K, Shetti NP, et al. Integrated biorefinery processes for conversion of lignocellulosic biomass to value added materials: paving a path towards circular economy [J]. *Bioresour Technol*, 2022, 343: 126151.
- [3] Liu YR, Nie Y, Lu XM, et al. Cascade utilization of lignocellulosic biomass to high-value products [J]. *Green Chem*, 2019, 21 ( 13 ) : 3499-3535.
- [4] Mosier N, Wyman C, Dale B, et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass [J]. *Bioresour Technol*, 2005, 96 ( 6 ) : 673-686.
- [5] Hoang AT, Nguyen XP, Duong XQ, et al. Steam explosion as sustainable biomass pretreatment technique for biofuel production: characteristics and challenges [J]. *Bioresour Technol*, 2023, 385: 129398.
- [6] 陈晓思, 贺雅非, 王泽富, 等. 蒸汽爆破技术的应用现状与发展前景 [J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47 ( 7 ) : 322-328.
- Chen XS, He ZF, Wang ZF, et al. Application and development of steam explosion technology [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47 ( 7 ) : 322-328.
- [7] Harindintwali JD, Zhou JL, Yu XB. Lignocellulosic crop residue composting by cellulolytic nitrogen-fixing bacteria: a novel tool for environmental sustainability [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 715: 136912.
- [8] Zoghalmi A, Paës G. Lignocellulosic biomass: understanding recalcitrance and predicting hydrolysis [J]. *Front Chem*, 2019, 7: 874.
- [9] Zeng YN, Zhao S, Yang SH, et al. Lignin plays a negative role in the biochemical process for producing lignocellulosic biofuels [J]. *Curr Opin Biotechnol*, 2014, 27: 38-45.
- [10] Huang CX, Jiang X, Shen XJ, et al. Lignin-enzyme interaction: a roadblock for efficient enzymatic hydrolysis of lignocellulosics [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2022, 154: 111822.
- [11] Yang Q, Pan XJ. Correlation between lignin physicochemical properties and inhibition to enzymatic hydrolysis of cellulose [J]. *Biotechnol Bioeng*, 2016, 113 ( 6 ) : 1213-1224.
- [12] Yao L, Yoo CG, Meng XZ, et al. A structured understanding of cellobiohydrolase I binding to poplar lignin fractions after dilute acid pretreatment [J]. *Biotechnol Biofuels*, 2018, 11: 96.
- [13] Meng XZ, Pu YQ, Yoo CG, et al. An In-depth understanding of biomass recalcitrance using natural poplar variants as the feedstock [J]. *ChemSusChem*, 2017, 10 ( 1 ) : 139-150.
- [14] Herbaut M, Zoghalmi A, Habrant A, et al. Multimodal analysis of pretreated biomass species highlights generic markers of lignocellulose recalcitrance [J]. *Biotechnol Biofuels*, 2018, 11: 52.
- [15] Kruiyenskij J, Ferreira PJT, da Graça Videira Sousa Carvalho M, et al. Physical and chemical characteristics of pretreated slash pine sawdust influence its enzymatic hydrolysis [J]. *Ind Crops Prod*, 2019, 130: 528-536.
- [16] Vu HP, Nguyen LN, Vu MT, et al. A comprehensive review on the framework to valorise lignocellulosic biomass as biorefinery feedstocks [J]. *Sci Total Environ*, 2020, 743: 140630.
- [17] 翟旭航, 李霞, 元英进. 木质纤维素预处理及高值化技术研究进展 [J]. *生物技术通报*, 2021, 37 ( 3 ) : 162-174.
- Zhai XH, Li X, Yuan YJ. Research progress of lignocellulose pretreatment and valorization method [J]. *Biotechnol Bull*, 2021, 37 ( 3 ) : 162-174.
- [18] Yue PP, Hu YJ, Tian R, et al. Hydrothermal pretreatment for the production of oligosaccharides: a review [J]. *Bioresour Technol*, 2022, 343: 126075.
- [19] Gonçalves MCP, Romanelli JP, Cansian ABM, et al. A review on the production and recovery of sugars from lignocellulosics for use in the synthesis of bioproducts [J]. *Ind Crops Prod*, 2022, 186: 115213.
- [20] Lu X, Zheng ZC, Li H, et al. Optimization of ultrasonic-microwave assisted extraction of oligosaccharides from lotus (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) seeds [J]. *Ind Crops Prod*, 2017, 107: 546-557.
- [21] Lorenci Woiciechowski A, Dalmas Neto CJ, Porto de Souza Vandenberghe L, et al. Lignocellulosic biomass: acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance - Conventional processing and recent advances [J]. *Bioresour Technol*, 2020, 304: 122848.
- [22] Ho MC, Ong VZ, Wu TY. Potential use of alkaline hydrogen peroxide in lignocellulosic biomass pretreatment and valorization-A review [J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2019, 112: 75-86.
- [23] Sindhu R, Binod P, Pandey A. Biological pretreatment of lignocellulosic biomass—an overview [J]. *Bioresour Technol*, 2016, 199: 76-82.
- [24] 孙金渠, 焦文雅, 吴超, 等. 蒸汽爆破对膳食纤维的影响及应用研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2023, 44 ( 20 ) : 449-457.
- Sun JH, Jiao WY, Wu C, et al. Research progress in the effect of steam explosion on dietary fiber and its application [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2023, 44 ( 20 ) : 449-457.
- [25] Xi HH, Wang AX, Qin WY, et al. The structural and functional properties of dietary fibre extracts obtained from highland barley

- bran through different steam explosion-assisted treatments [J]. Food Chem, 2023, 406: 135025.
- [26] Schultz TP, Templeton MC, Biermann CJ, et al. Steam explosion of mixed hardwood chips, rice hulls, corn stalks, and sugar cane bagasse [J]. J Agric Food Chem, 1984, 32 (5): 1166-1172.
- [27] Ruiz HA, Conrad M, Sun SN, et al. Engineering aspects of hydrothermal pretreatment: from batch to continuous operation, scale-up and pilot reactor under biorefinery concept [J]. Bioresour Technol, 2020, 299: 122685.
- [28] Moukagni EM, Ziegler-Devin I, Safou-Tchima R, et al. Steam explosion of *Aucoumea klaineana* sapwood: membrane separation of acetylated hemicelluloses [J]. Carbohydr Res, 2022, 519: 108622.
- [29] 何晓琴, 李苇舟, 李富华, 等. 蒸汽爆破预处理在农产品加工副产物综合利用中的应用 [J]. 食品与发酵工业, 2019, 45 (8): 252-257.
- He XQ, Li WZ, Li FH, et al. Application of steam-explosion pretreatment in utilizing agricultural by-products [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45 (8): 252-257.
- [30] Mougna Moukagni E, Ziegler-Devin I, Safou-Tchima R, et al. Extraction of acetylated glucuronoxylans and glucomannans from Okoume (*Aucoumea klaineana* Pierre) sapwood and heartwood by steam explosion [J]. Ind Crops Prod, 2021, 166: 113466.
- [31] Yu Y, Wu J, Ren XY, et al. Steam explosion of lignocellulosic biomass for multiple advanced bioenergy processes: a review [J]. Renew Sustain Energy Rev, 2022, 154: 111871.
- [32] Sui WJ, Chen HZ. Effects of water states on steam explosion of lignocellulosic biomass [J]. Bioresour Technol, 2016, 199: 155-163.
- [33] Chen XJ, Lin QM, Rizwan M, et al. Steam explosion of crop straws improves the characteristics of biochar as a soil amendment [J]. J Integr Agric, 2019, 18 (7): 1486-1495.
- [34] Mihiretu GT, Chimphango AF, Görgens JF. Steam explosion pretreatment of alkali-impregnated lignocelluloses for hemicelluloses extraction and improved digestibility [J]. Bioresour Technol, 2019, 294: 122121.
- [35] Shen M, Ge YF, Kang ZY, et al. Yield and physicochemical properties of soluble dietary fiber extracted from untreated and steam explosion-treated black soybean hull [J]. J Chem, 2019, 2019: 9736479.
- [36] Sui WJ, Chen HZ. Study on loading coefficient in steam explosion process of corn stalk [J]. Bioresour Technol, 2015, 179: 534-542.
- [37] 王凤芹, 尹双耀, 谢慧, 等. 前处理对玉米秸秆蒸汽爆破效果的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28 (12): 273-280.
- Wang FQ, Yin SY, Xie H, et al. Effects of pretreatments on steam exposition efficiency of corn stalk [J]. Trans Chin Soc Agric Eng, 2012, 28 (12): 273-280.
- [38] Xu JF, Han YT, Zhu WB, et al. Multivariable analysis of the effects of factors in the pretreatment and enzymolysis processes on saccharification efficiency [J]. Ind Crops Prod, 2019, 142: 111824.
- [39] Fan XG, Cheng G, Zhang HJ, et al. Effects of acid impregnated steam explosion process on xylose recovery and enzymatic conversion of cellulose in corn cob [J]. Carbohydr Polym, 2014, 114: 21-26.
- [40] Chum HL, Johnson DK, Black SK, et al. Pretreatment-Catalyst effects and the combined severity parameter [J]. Appl Biochem Biotechnol, 1990, 24 (1): 1-14.
- [41] Xie H, Li ZM, Wang ZM, et al. Instant catapult steam explosion: a rapid technique for detoxification of aflatoxin-contaminated biomass for sustainable utilization as animal feed [J]. J Clean Prod, 2020, 255: 120010.
- [42] Wood IP, Elliston A, Collins SRA, et al. Steam explosion of oilseed rape straw: establishing key determinants of saccharification efficiency [J]. Bioresour Technol, 2014, 162: 175-183.
- [43] Chandra RP, Arantes V, Saddler J. Steam pretreatment of agricultural residues facilitates hemicellulose recovery while enhancing enzyme accessibility to cellulose [J]. Bioresour Technol, 2015, 185: 302-307.
- [44] Shi QC, Li YQ, Li YF, et al. Effects of steam explosion on lignocellulosic degradation of, and methane production from, corn stover by a co-cultured anaerobic fungus and methanogen [J]. Bioresour Technol, 2019, 290: 121796.
- [45] 谢慧, 李志敏, 于政道, 等. 3种预处理对青贮玉米秸秆理化特性的比较研究 [J]. 河南农业大学学报, 2018, 52 (2): 238-243.
- Xie H, Li ZM, Yu ZD, et al. Comparative study on physical and chemical properties of silage corn straw by three pretreatment methods [J]. J Henan Agric Univ, 2018, 52 (2): 238-243.
- [46] Wang K, Nan XM, Tong JJ, et al. Steam explosion pretreatment changes ruminal fermentation *in vitro* of corn stover by shifting archaeal and bacterial community structure [J]. Front Microbiol, 2020, 11: 2027.
- [47] 何晓琴, 李苇舟, 夏晓霞, 等. 蒸汽爆破预处理的苦荞麸皮不溶性膳食纤维理化特性及结构研究 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46 (18): 47-53.
- He XQ, Li WZ, Xia XX, et al. Study on physicochemical properties

- and structure of insoluble dietary fiber from Tartary buckwheat bran pretreated by steam explosion [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46 (18): 47-53.
- [48] Kong F, Wang L, Chen HZ, et al. Improving storage property of wheat bran by steam explosion [J]. Int J Food Sci Technol, 2021, 56 (1): 287-292.
- [49] Chen YS, Shan SR, Cao DM, et al. Steam flash explosion pretreatment enhances soybean seed coat phenolic profiles and antioxidant activity [J]. Food Chem, 2020, 319: 126552.
- [50] 乔汉桢, 刘佳琪, 许雯雯, 等. 甘薯渣膳食纤维的制备及改性工艺研究进展 [J]. 饲料研究, 2019, 42 (7): 89-94.
- Qiao HZ, Liu JQ, Xu WW, et al. Preparation and modification of dietary fiber from sweet potato residues [J]. Feed Res, 2019, 42 (7): 89-94.
- [51] Hongrattanavichit I, Aht-Ong D. Nanofibrillation and characterization of sugarcane bagasse agro-waste using water-based steam explosion and high-pressure homogenization [J]. J Clean Prod, 2020, 277: 123471.
- [52] Zhai XY, Ao HP, Liu WH, et al. Physicochemical and structural properties of dietary fiber from *Rosa roxburghii* pomace by steam explosion [J]. J Food Sci Technol, 2022, 59 (6): 2381-2391.
- [53] 孙心怡. 蒸汽爆破预处理对黑小麦麦麸的品质改良及其应用研究 [D]. 邯郸: 河北工程大学, 2023.
- Sun XY. Study on the quality improvement of black wheat bran by steam explosion pretreatment and its application [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2023.
- [54] 田晓红, 谭斌, 翟小童, 等. 蒸汽爆破技术在全谷物食品加工中的应用 [J]. 中国粮油学报, 2022, 37 (5): 16-23.
- Tian XH, Tan B, Zhai XT, et al. Application of steam explosion technology in whole grain food processing [J]. J Chin Cereals Oils Assoc, 2022, 37 (5): 16-23.
- [55] Deehan EC, Yang C, Perez-Muñoz ME, et al. Precision microbiome modulation with discrete dietary fiber structures directs short-chain fatty acid production [J]. Cell Host Microbe, 2020, 27 (3): 389-404.e6.
- [56] Haghighi Mood S, Hossein Golfshan A, Tabatabaei M, et al. Lignocellulosic biomass to bioethanol, a comprehensive review with a focus on pretreatment [J]. Renew Sustain Energy Rev, 2013, 27: 77-93.
- [57] Ma C, Ni LY, Guo ZB, et al. Principle and application of steam explosion technology in modification of food fiber [J]. Foods, 2022, 11 (21): 3370.
- [58] Ma QW, Yu Y, Zhou ZK, et al. Effects of different treatments on composition, physicochemical and biological properties of soluble dietary fiber in buckwheat bran [J]. Food Biosci, 2023, 53: 102517.
- [59] He XQ, Li WZ, Chen YY, et al. Dietary fiber of Tartary buckwheat bran modified by steam explosion alleviates hyperglycemia and modulates gut microbiota in db/db mice [J]. Food Res Int, 2022, 157: 111386.
- [60] Wang TL, Xiao ZS, Li TG, et al. Improving the quality of soluble dietary fiber from *Poria cocos* peel residue following steam explosion [J]. Food Chem X, 2023, 19: 100829.
- [61] Ma JH, Yuan M, Liu Y, et al. Effects of steam explosion on yield and properties of soluble dietary fiber from wheat bran [J]. Food Sci Technol Res, 2021, 27 (1): 35-42.
- [62] 高珊, 祝梓淳, 徐学兵, 等. 蒸汽爆破对麦麸组分及微观形貌的影响 [J]. 食品研究与开发, 2021, 42 (20): 8-13.
- Gao S, Zhu ZC, Xu XB, et al. Effects of steam explosion treatment on the composition and microstructure of wheat bran [J]. Food Res Dev, 2021, 42 (20): 8-13.
- [63] Zhao GZ, Kuang GL, Wang YR, et al. Effect of steam explosion on physicochemical properties and fermentation characteristics of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) [J]. LWT, 2020, 129: 109579.
- [64] Li B, Yang W, Nie YY, et al. Effect of steam explosion on dietary fiber, polysaccharide, protein and physicochemical properties of okara [J]. Food Hydrocoll, 2019, 94: 48-56.
- [65] 钟禹, 李由, 吴越, 等. 低酸喷雾协同蒸汽爆破预处理对小麦秸秆结构及酶水解的影响 [J]. 中国造纸学报, 2022, 37 (4): 16-24.
- Zhong Y, Li Y, Wu Y, et al. Effects of low-acid spraying combined with steam explosion pretreatment on structure and enzyme hydrolysis of wheat straw [J]. Trans China Pulp Pap, 2022, 37 (4): 16-24.
- [66] 胡蕾, 叶鹏, 彭子木, 等. 蒸汽爆破麦胚多糖提取工艺优化及其理化性质研究 [J]. 食品工业科技, 2021, 42 (1): 149-155.
- Hu L, Ye P, Peng ZM, et al. Extraction process optimization and physicochemical properties of polysaccharide from wheat germ modified by steam explosion [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42 (1): 149-155.
- [67] Del Río PG, Gullón B, Wu J, et al. Current breakthroughs in the hardwood biorefineries: Hydrothermal processing for the co-production of xylooligosaccharides and bioethanol [J]. Bioresour Technol, 2022, 343: 126100.
- [68] Brenelli LB, Bhatia R, Djajadi DT, et al. Xylo-oligosaccharides, fermentable sugars, and bioenergy production from sugarcane straw

- using steam explosion pretreatment at pilot-scale [J]. *Bioresour Technol*, 2022, 357: 127093.
- [69] Amorim C, Silv rio SC, Prather KLJ, et al. From lignocellulosic residues to market: production and commercial potential of xylooligosaccharides [J]. *Biotechnol Adv*, 2019, 37 (7): 107397.
- [70] 郭超然, 赵红军, 苏海鹏, 等. 蒸汽爆破预处理联合壳聚糖酶制备壳三糖 [J]. *食品研究与开发*, 2023, 44 (14): 192-197.
- Guo CR, Zhao HJ, Su HP, et al. Chitotriose preparation by steam explosion pretreatment and chitosanase [J]. *Food Res Dev*, 2023, 44 (14): 192-197.
- [71] Carvalho AFA, Marcondes WF, de Oliva Neto P, et al. The potential of tailoring the conditions of steam explosion to produce xylooligosaccharides from sugarcane bagasse [J]. *Bioresour Technol*, 2018, 250: 221-229.
- [72] Silveira MHL, Chandel AK, Vanelli BA, et al. Production of hemicellulosic sugars from sugarcane bagasse via steam explosion employing industrially feasible conditions: pilot scale study [J]. *Bioresour Technol Rep*, 2018, 3: 138-146.
- [73] Álvarez C, González A, Ballesteros I, et al. Production of xylooligosaccharides, bioethanol, and lignin from structural components of barley straw pretreated with a steam explosion [J]. *Bioresour Technol*, 2021, 342: 125953.
- [74] Bhatia R, Winters A, Bryant DN, et al. Pilot-scale production of xylo-oligosaccharides and fermentable sugars from *Miscanthus* using steam explosion pretreatment [J]. *Bioresour Technol*, 2020, 296: 122285.
- [75] Hu L, Guo JM, Zhu XW, et al. Effect of steam explosion on nutritional composition and antioxidative activities of okra seed and its application in gluten-free cookies [J]. *Food Sci Nutr*, 2020, 8 (8): 4409-4421.
- [76] Ferri M, Happel A, Zanaroli G, et al. Advances in combined enzymatic extraction of ferulic acid from wheat bran [J]. *N Biotechnol*, 2020, 56: 38-45.
- [77] 易军鹏, 李冰, 张棋, 等. 蒸汽爆破处理对亚麻籽油脂脂肪酸组成的影响 [J]. *中国粮油学报*, 2017, 32 (9): 88-93.
- Yi JP, Li B, Zhang Q, et al. Effect of steam explosion treatment on fatty acid composition of flax seed oil [J]. *J Chin Cereals Oils Assoc*, 2017, 32 (9): 88-93.
- [78] Chen GZ, Chen HZ. Extraction and deglycosylation of flavonoids from sumac fruits using steam explosion [J]. *Food Chem*, 2011, 126 (4): 1934-1938.
- [79] Li WZ, Zhang XL, He XQ, et al. Effects of steam explosion pretreatment on the composition and biological activities of Tartary buckwheat bran phenolics [J]. *Food Funct*, 2020, 11 (5): 4648-4658.
- [80] Cheng AW, Hou CY, Sun JY, et al. Effect of steam explosion on phenolic compounds and antioxidant capacity in adzuki beans [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100 (12): 4495-4503.
- [81] Wan FC, Hou CY, Luo KY, et al. Steam explosion enhances phenolic profiles and antioxidant activity in mung beans [J]. *Food Sci Nutr*, 2022, 10 (4): 1039-1050.
- [82] 冉福, 焦婷, 雷赵民, 等. 不同蒸汽爆破条件对玉米秸秆饲用价值的影响 [J]. *草业科学*, 2020, 37 (10): 2133-2141.
- Ran F, Jiao T, Lei ZM, et al. Effect of different steam explosion conditions on the feeding value of corn straw [J]. *Pratacultural Sci*, 2020, 37 (10): 2133-2141.
- [83] 杨森, 段旭磊, 裴亚欣, 等. 瞬时弹射式蒸汽爆破对玉米秸秆微贮营养成分和牛瘤胃营养物质消失率的影响 [J]. *中国农业大学学报*, 2021, 26 (10): 108-117.
- Yang S, Duan XL, Pei YX, et al. Effect of ICSE on nutritional components of corn stover and rumen reduction rate in cow rumen [J]. *J China Agric Univ*, 2021, 26 (10): 108-117.
- [84] Nie DC, Yao LY, Xu XK, et al. Promoting corn stover degradation via sequential processing of steam explosion and cellulase/lactic acid bacteria-assisted ensilage [J]. *Bioresour Technol*, 2021, 337: 125392.
- [85] He LW, Huang YC, Shi L, et al. Steam explosion processing intensifies the nutritional values of most crop byproducts: morphological structure, carbohydrate-protein fractions, and rumen fermentation profile [J]. *Front Nutr*, 2022, 9: 979609.
- [86] Zhao SG, Li GD, Zheng N, et al. Steam explosion enhances digestibility and fermentation of corn stover by facilitating ruminal microbial colonization [J]. *Bioresour Technol*, 2018, 253: 244-251.
- [87] Singh SK. Biological treatment of plant biomass and factors affecting bioactivity [J]. *J Clean Prod*, 2021, 279: 123546.
- [88] Zhang HQ, Zhang R, Song YN, et al. Enhanced enzymatic saccharification and ethanol production of corn stover via pretreatment with urea and steam explosion [J]. *Bioresour Technol*, 2023, 376: 128856.
- [89] Mohamed Diaby. 不同纤维降解酶作用顺序对玉米秸秆降解的影响 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- Mohamed D. Effects of different cellulose degrading enzymes on corn stalk degradation [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [90] Zhang Y, Wang RN, Yang JS, et al. Enzymatic formulation strategies unlock highly-efficient saccharification of distinct

- pretreated corncobs [J]. Ind Crops Prod, 2022, 187: 115320.
- [91] Guo X, An YJ, Lu FP, et al. Optimization of synergistic degradation of steam exploded corn straw by lytic polysaccharide monoxygenase R17L and cellulase [J]. Ind Crops Prod, 2022, 182: 114924.
- [92] You S, Li J, Zhang F, et al. Loop engineering of a thermostable GH10 xylanase to improve low-temperature catalytic performance for better synergistic biomass-degrading abilities [J]. Bioresour Technol, 2021, 342: 125962.
- [93] 尚伟昊. 利用黑曲霉和疏棉状嗜热丝孢菌进行啤酒麦糟生物降解的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
- Shang WH. Study on biodegradation of beer spent grains by *Aspergillus Niger* and thermophilic hyphomycetes gossypii [D]. Jinan: Shandong University, 2022.
- [94] Zhang Y, Wang RN, Liu L, et al. Distinct lignocellulolytic enzymes produced by *Trichoderma harzianum* in response to different pretreated substrates [J]. Bioresour Technol, 2023, 378: 128990.
- [95] Cheng YF, Shi QC, Sun RL, et al. The biotechnological potential of anaerobic fungi on fiber degradation and methane production [J]. World J Microbiol Biotechnol, 2018, 34 (10): 155.
- [96] 田亚东. 秸秆饲料发酵菌剂生产工艺的优化研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2020.
- Tian YD. Study on optimization of production technology of straw feed fermentation agent [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2020.
- [97] 范恩帝, 冯敏雪, 李晨瑶, 等. 蒸汽爆破结合多种微生物改善酒糟饲料品质的研究 [J]. 农业生物技术学报, 2022, 30 (1): 194-206.
- Fan ED, Feng MX, Li CY, et al. Study on improving the quality of distiller's grains feed by steam explosion combined with various microorganisms [J]. J Agric Biotechnol, 2022, 30 (1): 194-206.
- [98] 李晓娟, 董红丽, 张宏森, 等. 玉米秸秆水提-甘油协同蒸汽爆破预处理及其丁醇发酵研究 [J]. 河南农业大学学报, 2023, 57 (6): 1035-1043.
- Li XJ, Dong HL, Zhang HS, et al. Water extraction coupled glycerol-assisted steam explosion pretreatment of corn stover and its butanol fermentation [J]. J Henan Agric Univ, 2023, 57 (6): 1035-1043.
- [99] 高雪梅. 不同添加剂处理的蒸汽爆破玉米秸秆品质评价及其组合效应研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021.
- Gao XM. Study on quality evaluation and combination effect of steam exploded corn straw treated by different additives [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.
- [100] Marques FP, Silva LMA, Lomonaco D, et al. Steam explosion pretreatment to obtain eco-friendly building blocks from oil palm mesocarp fiber [J]. Ind Crops Prod, 2020, 143: 111907.

(责任编辑 高洁)