

生物质发酵工艺的发展与优化综述

赵亚男, 陈华梅, 罗政, 苑亚鹏, 李兴盛*

(新疆理工学院, 新疆新技术与储能技术重点实验室, 新疆阿克苏 843100)

摘要:基于近年来关于生物质发酵产品的科研成果,系统综述了利用生物质发酵制备乙醇、有机酸、抗生素及其废渣资源化利用的研究进展与工艺优化策略。研究聚焦于从水果、粮食作物、纤维素、海产品、生活废弃物等生物质发酵中筛选优良菌种,通过特性菌种、单菌种及混菌发酵提升产物的高效稳定生产。通过对发酵工艺中的温度、糖度、pH等参数优化总结探究其定向调控意义,发酵过程中目标产物积累与有机物质转化的规律为品质提升提供了理论依据。废渣资源化方面,发酵产生的酒糟、菌渣等富含粗蛋白和有机质,综述其后期物理压榨、烘干或高温好氧堆肥等过程,实现废渣的减量化与资源化。发酵工艺的持续优化与废渣资源化利用协同推进,不仅提高发酵产物的生产效率与品质,并且为构建绿色、低碳、循环的生物制造体系提供了重要的理论支撑与实践路径。

关键词:生物质;发酵;工艺;产物;废渣资源化

中图分类号:TS201

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S2-0023-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.005

A review on the development and optimization of biomass fermentation processes

ZHAO Ya-nan, CHEN Hua-mei, LUO Zheng, YUAN Ya-peng, LI Xing-sheng*

(Xinjiang Key Laboratory of New Energy and Energy Storage Technology, Xinjiang Institute of Technology, Aksu 843100, China)

Abstract:Based on the recent research achievements in biomass fermentation products, this paper systematically reviews the research progress and process optimization strategies for the production of ethanol, organic acids, antibiotics, and the resource utilization of waste from biomass fermentation. The research focuses on screening excellent strains from biomass fermentation sources such as fruits, cereal crops, cellulose, seafood, and household waste, and enhancing the efficient and stable production of products through characteristic strains, single strains, and mixed fermentation. The optimization of parameters such as temperature, sugar content, and pH in the fermentation process is summarized to explore their directional regulatory significance. The accumulation of target products and the transformation of organic substances during the fermentation process provide a theoretical basis for quality improvement. In terms of waste resource utilization, the fermentation byproducts such as distillers' grains and microbial residues are rich in crude protein and organic matter. The subsequent processes such as physical pressing, drying, or high-temperature aerobic composting are summarized to achieve the reduction and resource utilization of waste. The continuous optimization of the fermentation process and the utilization of waste resources promote both the production efficiency and quality of fermentation products, and provide important theoretical support and practical paths for the construction of a green, low-carbon, and circular biotechnology manufacturing system.

Key words:biomass; fermentation; process; product; waste residue resource utilization

生物质发酵作为生物制造与食品工业的核心技术,在推动资源高效利用与绿色生产方面发挥着重要作用^[1]。近年来,围绕生物质发酵制备高附加值产品及其副产物资源化的研究不断深入,形成了从原料预处理、菌种筛选到工艺调控的完整技术链条^[2]。利用水果、粮食作物、纤维素、海产品及生活废弃物等多种生物质资源,通过菌株的筛选以及单菌种与混菌发酵策略的工艺优化,可显著提升乙醇、有机酸、抗生素等目标产物的生产效率与稳定性。在废渣资源化方面,发酵副产物(酒糟、菌渣等)富含粗蛋白和有机质,经物理压榨、烘干或高

温好氧堆肥等处理后,可有效转化为有机肥和饲料,实现废物的减量化与高值化利用。与此同时,发酵过程中温度、糖度、pH等关键参数的定向调控,极大地影响着产物积累与有机物质转化规律^[3],综述中对发酵工艺的总结为产品质量提升奠定理论基础。

1 生物质发酵制备乙醇

生物质乙醇作为可再生清洁能源,因辛烷值高、环境友好、发动机兼容性的良好等特性已成为替代化石燃料的方向之一,因此,通过微生物发酵将生物

收稿日期:2026-03-26;修回日期:2026-06-11

基金项目:新疆理工学院大学生创新创业项目(XJ202513558037);新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2025D01C91)

作者简介:赵亚男(1992-),男,硕士,讲师,研究方向为多功能材料制备与应用,zyn211985@163.com;李兴盛(1987-),男,博士,副教授,研究方向为多功能材料制备与应用,通讯联系人,2024041@xjit.edu.cn。

质中的可发酵性糖转化为乙醇的技术备受关注(图1)。目前,生物质原料主要分为3类:粮食作物(如玉米、小麦、甘蔗)技术成熟,但存在“与人争粮、与粮争地”的伦理争议;木质纤维素类生物质(玉米秸秆、小麦秸秆、甘蔗渣、稻壳、木屑、竹笋外皮等^[4])原料来源广泛、成本低廉,但其主要成分(纤

维素、半纤维素和木质素)形成的致密抗降解屏障是高效转化过程的主要障碍^[5];水生生物质(小球藻、衣藻、栅藻、大型海藻),微藻具有光合效率高、生长周期短、单位面积产量大等优势,细胞内富含淀粉和纤维素,且木质素含量低,更易水解,被视为极具潜力的未来原料^[6]。

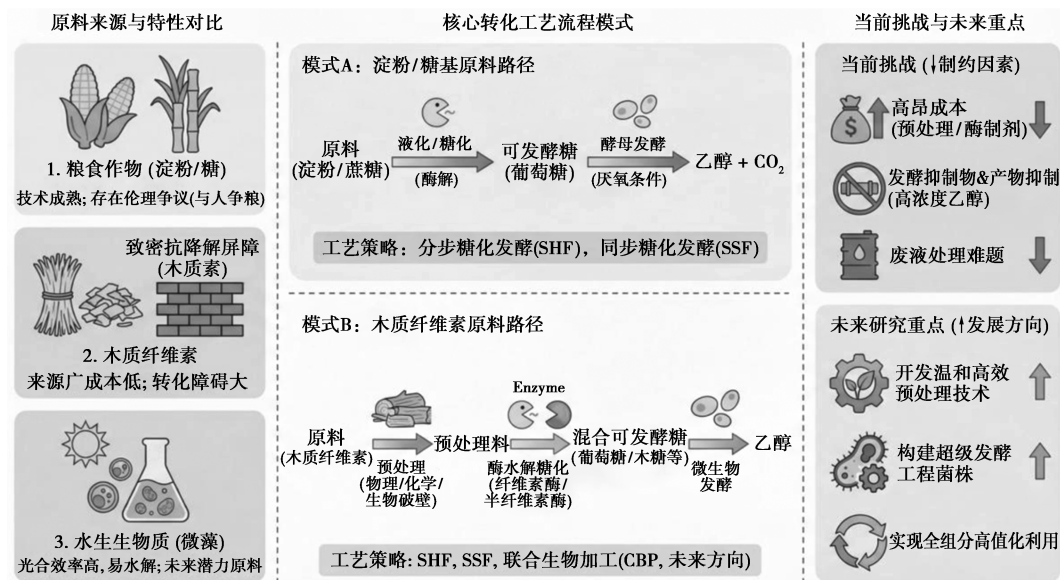


图1 生物质发酵制备乙醇流程示意图

制备乙醇的发酵工艺根据原料和流程可分为淀粉和糖基原料与木质纤维素原料2种模式。淀粉和糖基原料的乙醇转化核心在于将原料中的淀粉或蔗糖高效转化为可发酵性糖。处理方法主要包括液化、糖化、酵母发酵3个步骤^[7]。对于糖基原料(如甘蔗汁、甜菜汁、糖类),无需液化和糖化,仅需简单稀释和调节pH后即可直接作为发酵底物。发酵过程菌种主要有酿酒酵母、运动发酵单胞菌、克鲁维酵母、基因工程改造菌4种。以酿酒酵母菌为代表,在厌氧条件下,酵母菌将葡萄糖分解为丙酮酸,丙酮酸在丙酮酸脱羧酶的催化下脱羧生成乙醛,最后在乙醇脱氢酶的作用下还原为乙醇和二氧化碳。为提高原料利用率,研究人员开发了多种工艺整合策略:传统的分步糖化发酵将糖化和发酵分离,允许2个步骤在各自最适条件(糖化温度55~60℃,发酵温度30~35℃)下独立运行,运行稳定;同步糖化发酵将糖化和发酵合并于同一反应器,能够有效解除高浓度葡萄糖对糖化酶的反馈抑制,缩短生产周期,简化操作流程。

对于木质纤维素原料,工艺流程则更为复杂,主要包括预处理、糖化和发酵3个核心步骤。发酵前期通常存在预处理过程,旨在破坏原始材料的抗降

解屏障,常见方法包括物理法(机械粉碎、蒸气爆破)、化学法(稀酸、稀碱、有机溶剂)、生物法(白腐菌等微生物降解)。糖化过程是将原材料水解为可发酵性单糖(葡萄糖、木糖、阿拉伯糖等),可采用酸水解或酶水解(纤维素酶、半纤维素酶)。发酵则是利用微生物将糖转化为乙醇。此外,研究人员开发了多种工艺整合策略:分步糖化发酵允许糖化和发酵在各自最优条件下独立进行;同步糖化发酵将酶解糖化与乙醇发酵合并于同一反应器,减少产物的抑制,且流程简化;联合生物加工则是利用单一或混合微生物菌群,同时完成纤维素酶生产、糖化和发酵,是最具成本潜力的未来技术^[8]。

综上所述,实用性发酵表明:淀粉和糖基>纤维素(果实>秸秆);原料方面成功开发了针对木质纤维素和微藻的高效转化技术;工艺优化方面利用响应面法、神经网络等工具优化预处理和发酵参数,显著提高了转化率;菌种改良方面通过合成生物学和基因编辑技术的应用构建工程菌株^[9]。然而,木质纤维素的高昂预处理费用和纤维素酶的高成本占生产总成本的很大比例;水解液中多种糖类的共发酵效率以及多种发酵抑制物的存在仍然制约乙醇产率;高浓度乙醇的产物抑制和发酵废液的处理也是

工业化放大必须面对的难题。因此,未来研究需聚焦于开发更温和高效的预处理技术、降低酶制剂成本、构建更强的超级发酵菌株,并实现全组分的高值化利用。

2 生物质发酵制备有机酸

发酵法生产有机酸(乙酸、己酸、乳酸、琥珀酸等)的生物质原料来源广泛,主要可分为糖质原料、木质纤维素原料以及特种生物质 3 大类。糖质原料如水果、玉米、木薯等,可直接或经简单糖化后作为发酵底物,工艺最为成熟^[10]。木质纤维素类生物质则涵盖秸秆类、甘蔗渣、稻壳等农林废弃物,以及玉米芯、茶梗等副产物,通常需经过前期预处理。此外,特种生物质如甲壳类废弃物(虾壳、蟹壳)富含甲壳素,可通过催化氧化定向制备乳酸和乙酸^[11];豆渣等食品加工副产物则可通过厌氧酸化与碳链增长耦合制备己酸等中链脂肪酸;黄水(酿酒副产物)因富含乙醇和乳酸,也是生产己酸的优质原料^[12]。藻类水生生物质因木质素含量低、细胞结构易被破坏,被视为极具潜力的未来原料。

有机酸的发酵工艺根据产物类型和原料特性呈现多元化特征。①乳酸、乙酸等小分子有机酸,可采用水热催化氧化法,通过氧化剂(如 H_2O_2) 在无碱条件下将甲壳素等生物质转化为目标产物。② C_4 类化合物(如琥珀酸),则采用两阶段发酵工艺,主要包括木质纤维素转化为可发酵糖,接种放线杆菌等进行厌氧发酵。③中链脂肪酸(如己酸)采用碳链延长技术,以乳酸或乙醇为电子供体,在厌氧膜生物反应器中进行连续发酵促进短链脂肪酸向中链脂肪酸转化。发酵过程中所用菌种主要包括产琥珀酸放线杆菌用于琥珀酸生产,凝结芽孢杆菌等嗜热菌用于乳酸发酵,梭菌属用于碳链延长产己酸,以及经基因改造的解酯酵母用于三乙酸内酯等聚酮类化合物的合成。

发酵法生产有机酸的优势在于原料可再生及循环经济理念,木质纤维素原料和农业废弃物作为原料不仅解决了废弃物处理问题,同时降低了原料成本。工艺整合策略与乙醇发酵类似,分步糖化发酵、同步糖化发酵都提高了转化效率,两阶段发酵和补料分批发酵缓解底物抑制和产物反馈抑制。此外,基因工程技术构建了可共发酵五碳糖和六碳糖、耐受高浓度有机酸的工程菌株,拓展了可利用碳源范围。然而,有机酸的制备面临诸多挑战:预处理过程成本高昂、副产物抑制(糠醛、酚类)及有机酸对微

生物的生长抑制作用限制了产物浓度的进一步提高;发酵液中目标产物浓度较低,导致下游分离纯化能耗高、成本占比大;混菌体系中产甲烷菌与产酸菌的底物竞争以及丙烯酸途径等副反应会导致碳流分流,降低目标产物得率。因此,未来研究需聚焦于开发更温和高效的预处理技术、构建耐受性更强的超级发酵菌株、开发低能耗的原位产物分离技术,并实现生物质全组分的高值化利用^[13-14]。

3 生物质发酵制备抗生素

抗生素的工业化生产始于微生物发酵技术,生物质发酵制备抗生素仍是抗生素生产的主要方式之一。抗生素的发酵生产是利用微生物将生物质原料中的碳源、氮源等营养物质转化为次级代谢产物。生物质原料主要分为 3 类:农产品及其加工副产物(玉米粮食类、豆粕类、麦麸类等),材料中富含淀粉、蛋白质和生长因子,是传统发酵培养基的基础;纤维素类生物质(玉米秸秆、稻草),主要为抗生素合成提供碳骨架,具有利用农林废弃物生产高价值抗生素的潜力;其他专用组分(豆粕、棉籽粕、芝麻粕、鱼粉等),不仅作为碳源或消泡剂,特定成分也被作为新型氮源以优化发酵效能。生物质原料的多样性与可选择性,是抗生素发酵工业规模化生产的基础。

制备抗生素的发酵工艺根据菌种特点和产物类型而设计,发酵过程通常需控制温度、pH、溶氧等工艺参数,大致分为菌种活化、种子扩大培养和发酵生产 3 个阶段。发酵方式可分为固体发酵和液体发酵,其中液体发酵自动化程度高、产量稳定、可工业化^[15]。为提升目标产物的产量和纯度,主要采用以下工艺:分批补料发酵技术,间歇或连续地补加碳源、氮源、前驱体,解除底物抑制并延长产物合成期;现代工艺常与基因工程和代谢工程结合,除去副产物生物合成途径的关键基因,目标抗生素比例显著提高;增强菌株的代谢流和产物耐受性,从而提升发酵效率^[16]。

抗生素的发酵生产涉及多种微生物,主要是放线菌(67%),例如链霉菌(生产金霉素、多抗菌素)、绛红色小单孢菌(生产庆大霉素)、维吉尼亚链霉菌(生产维吉尼亚霉素)、荒漠拟孢囊菌(生产奥利万星中间体)等。其生物合成机理属于次级代谢,在菌体生长进入稳定期后进行。抗生素的发酵合成涉及由聚酮合酶(PKS)或非核糖体肽合成酶(NRPS)等大型酶系催化的多步反应,通过前体聚合、糖基

化、甲基化、氯化等修饰,最终形成结构复杂的抗生素分子。未来发酵工艺发展主要体现在2方面:一是菌种选育从随机诱变走向理性设计,逐渐从紫外与化学诱变发展为结合抗性筛选、基因编辑技术、代谢工程改造。二是工艺的集成与优化,高通量筛选技术、响应面法等优化培养基组分。然而,当前技术成本依然巨大,培养基中有机氮源和下游分离纯化成本较高;发酵过程中菌渣被列为危险固体废弃物,无害化处理和资源化利用仍具有挑战性;细菌耐药性问题日益严峻,高产菌株的研发需求越来越高。

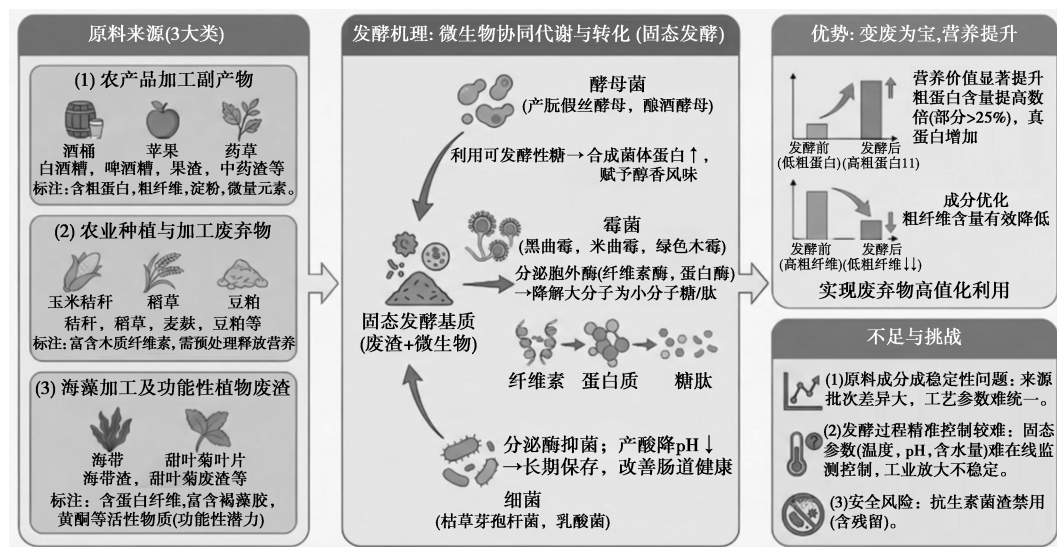
4 生物质废渣制备饲料

生物质发酵废渣制备饲料的原料来源极为广泛,根据来源和性质主要可分为3大类:农产品加工副产物(白酒糟、啤酒糟、黄酒糟等酒类副产物,马铃薯渣、果渣、中药渣等),原料通常含有丰富的粗蛋白、粗纤维、淀粉和多种微量元素^[17];农业种植与加工废弃物(玉米秸秆、稻草、麦麸、豆粕等),原料富含木质纤维素,质地粗硬,需要通过预处理释放出可被微生物利用的营养物质;海藻加工及功能性植物废渣(海带渣、甜叶菊废渣等),原料不仅含有蛋白质和纤维素,还富含褐藻胶、黄酮、绿原酸、甜菊糖苷等具有抗氧化或免疫调节功能的生物活性物质,为开发功能性发酵饲料提供了独特潜力^[18]。

发酵机理的核心是微生物的协同代谢与转化。

目前,废渣饲料制备的常见工艺是固态发酵,其投资少、能耗低、操作简便且能高值化利用废弃物而备受青睐。菌种使用情况可分为单一菌种发酵和多菌种混合发酵。发酵菌种包括:酵母菌(产朊假丝酵母、酿酒酵母)主要利用可发酵性糖大量繁殖,合成菌体蛋白,并赋予饲料醇香风味;霉菌(黑曲霉、米曲霉、绿色木霉)能分泌纤维素酶、半纤维素酶、蛋白酶等多种胞外酶将不易消化的物质转化为可被利用的小分子糖和肽;细菌(枯草芽孢杆菌、乳酸菌),枯草芽孢杆菌能分泌多种酶类抑制有害菌生长,乳酸菌通过产酸降低物料pH,实现饲料的长期保存并改善肠道健康。

利用生物质发酵废渣制备饲料优势十分突出,不仅实现了“变废为宝”,并且通过发酵处理,将废渣的营养价值得到显著提升。研究表明,白酒糟、马铃薯渣经混菌发酵后,粗蛋白含量可提高数倍甚至数十倍,同时粗纤维含量有效降低,部分发酵产品的粗蛋白含量可达25%以上,真蛋白含量也大幅增加。然而,该领域仍面临不足与挑战(图2)。原料成分与稳定性问题:不同来源、不同批次的废渣营养成分和含水量差异较大,发酵工艺参数难以统一。发酵过程的精准控制较难:固态发酵过程参数(温度、pH、含水量、溶氧)难以实时在线精确监测和控制,工业化放大的稳定性有待提高。安全风险:抗生素发酵产生的菌渣因含有微量抗生素残留,已被国家严格禁止用于饲料生产。



5 生物质废渣制备有机肥

生物质发酵废渣的原料来源极为广泛,涵盖了

农业生产和工业加工的多种废弃物。主要可分为以下几种:农作物秸秆(秸秆类、甘蔗渣和油茶果壳等),作为主要碳源富含纤维素和半纤维素;菌糠类

(黑木耳、杏鲍菇废弃培养基),材料已部分降解,更易腐熟;畜禽粪便(鸡粪、牛粪)和生活副产物(沼渣、药渣、厨余垃圾),物料含有丰富的氮源和其他营养元素。

生物质制备有机肥的发酵工艺主要利用好氧发酵原理,流程包括原料预处理、堆肥发酵和后熟腐化 3 个阶段^[19]。在预处理阶段,需要对原料进行粉碎、调节碳氮比(通常优化在 25~30:1)、初始含水率(一般控制在 60%左右)。主发酵阶段,采用条垛式、槽式及立体罐式反应器进行,通过强制通风或机械翻堆确保氧气供应,堆体温度为 55~70℃且维持数天,整个发酵过程通常保持 15~30 d,结束后需进行陈化处理,使有机肥性质稳定,种子发芽指数达到 80%以上。

发酵废渣转化为有机肥的生物化学过程大致为 2 步,微生物首先通过代谢活动(好氧条件)将原料中的有机碳部分转化为二氧化碳和水;其次,通过缩合和聚合反应,形成结构复杂且稳定的腐殖质(胡敏酸和富里酸)。过程中需要多种细菌群落共同参与^[20],厚壁菌门、变形菌门是优势菌,芽孢杆菌属、假单胞菌属等特定菌属能够高效分泌纤维素酶、蛋白酶等胞外酶,将复杂的大分子有机物(纤维素、半纤维素、蛋白质)分解为小分子糖、氨基酸和有机酸。堆肥高温期,嗜热微生物成为主导,木质纤维素进一步降解。真菌群落则以子囊菌门为主,其中木霉属、曲霉属等在木质素和纤维素的降解中发挥关键作用。

利用生物质发酵废渣制备有机肥在工艺优化上,通过精准调控碳氮比、含水率、通风供氧及结合动态反应器技术将传统堆肥发酵时间从 60 d 以上缩短至 7~15 d,显著提升了效率。在功能强化上,通过定向添加功能微生物(芽孢杆菌、木霉菌、哈茨木霉),开发出兼具促生和抗病功能的生物有机肥。施用有机肥可显著改善土壤理化性质,降低土壤容重、增加孔隙度、提高有机质和养分含量,并优化微生物群落结构。然而,仍面临一些挑战。首先,发酵原料的批次不稳定性(如成分、含水率波动)和发酵过程中环境参数的细微差异,都可能导致最终产品质量不均。其次,前处理(如粉碎)和后处理(如烘干、造粒)的设备成本与能耗较高,限制了其在中小规模农户中的普及。再次,长期施用需警惕有机肥中可能残留的重金属(如猪粪中的铜、锌)和抗生素风险,对其安全性和标准化生产提出了更高要求。最后,如何通过更精细的微生物组学调控和工艺创

新,进一步提升发酵效率并开发出针对特定作物的专用功能型有机肥,仍是未来研究的重点方向。

6 结论及展望

生物质发酵制备乙醇、有机酸、抗生素的技术体系已形成从传统粮食原料到木质纤维素、水生物质、生活垃圾等多路径发展格局,生物质发酵后的残渣可进行饲料、有机肥的制备,并进行工业化生产。工艺模式亦由分步糖化发酵向同步糖化发酵、联合生物加工等集成化方向持续演进。发酵菌种也由单一菌种向混合菌种发酵、基因编辑超级菌,且逐步走向理性设计的发展方向;根据研究显示,淀粉与糖基类型原料工艺已趋于成熟,木质纤维素类生物质因原料广泛、不与粮争地的优势,成为当前研究的重点;藻类等水生生物质则凭借特殊结构、营养含量丰富、生长周期短的优势在功能性发酵饲料中展现出巨大的应用潜力。在工艺优化中响应面法、神经网络、系统调控发酵条件等建模工具的引入显著提升发酵过程效率;混合菌发酵、合成生物学与基因编辑技术的应用则推动了工程菌株在底物利用效率、抑制物耐受性及产物浓度阈值等方面的性能突破。

针对纤维素的高昂处理费用、副反应降低产率及菌渣废弃物污染等瓶颈问题,未来,该领域的发展应着力于以下几个方向:开发温和、低毒、低能耗的预处理技术,从源头降低抗降解屏障破除的成本与副产物生成;通过酶系协同优化与酶回收策略降低糖化成本,结合过程工程强化实现高效水解;依托生物学与代谢工程,构建高抑制物耐受性及高效碳代谢流调控能力的超级工业菌株。综合而言,生物质发酵工艺的持续优化需在多技术深度融合、全流程系统集成及全生命周期经济-环境效益协同评估的框架下实现突破,真正推动生物质产物在可再生能源体系中的规模化应用。

参考文献

- [1] 陈桂飞,刘艳秋.猕猴桃苹果梨复合果酒发酵特性的研究[J].中国酿造,2020,39(3):198-201.
- [2] 张翔,孙玉霞,张将,等.五种苹果品种对苹果发酵酒香气组成及感官质量的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(16):203-208.
- [3] 田丹,刘旻昊,邓红,等.冷破碎红富士苹果浆发酵低度苹果酒工艺优化[J].食品工业科技,2021,42(6):166-173,180.
- [4] 毕凡星.竹笋外皮生物转化燃料乙醇的工艺研究[D].南昌:南昌大学,2025.
- [5] 刘登.细胞表面显示技术在纤维素乙醇制备中的应用及挑战[J].现代化工,2024,44(8):75-79,85.

(下转第 33 页)

- flat-flame burner reactor[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(3): 2705–2713.
- [12] Deng L, Zhang T, Che D. Effect of water washing on fuel properties, pyrolysis and combustion characteristics, and ash fusibility of biomass[J]. Fuel Processing Technology, 2013, 106: 712–720.
- [13] Oladejo J, Adegbite S, Gao X, *et al.* Catalytic and non-catalytic synergistic effects and their individual contributions to improved combustion performance of coal/biomass blends[J]. Applied Energy, 2018, 211: 334–345.
- [14] Zhou C, Liu G, Xu Z, *et al.* The retention mechanism, transformation behavior and environmental implication of trace element during co-combustion coal gangue with soybean stalk[J]. Fuel, 2017, 189: 32–38.
- [15] Lee B H, Sh L, Lee D G, *et al.* Effect of torrefaction and ashless process on combustion and NO_x emission behaviors of woody and herbaceous biomass[J]. Biomass and Bioenergy, 2021, 151: 106133.
- [16] Jenkins B M, Williams R B, Bakker R R, *et al.* Combustion of leached rice straw for power generation[C]. Proceedings of the Fourth Biomass Conference of the Americas, 1996: 1357–1363.
- [17] Jenkins B M, Bakker R R, Wei J B. On the properties of washed straw[J]. Biomass and Bioenergy, 1996, 10(4): 177–200.
- [18] Carrillo M A, Staggenborg S A, Pineda J A. Washing sorghum biomass with water to improve its quality for combustion[J]. Fuel, 2014, 116: 427–431.
- [19] 安娜, 马金荣, 李显, 等. 生物质水洗脱灰及其废液的资源化利用研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(12): 3083–3090.
- [20] Li Q, Yang Z, Kong H, *et al.* Synergistic effects of initial moisture content and particle size on drying rate and heat production during bio-drying of sludge after electro-dewatering[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 11(1): 278–289.
- [21] Chanpet M, Rakmak N, Matan N, *et al.* Effect of air velocity, temperature, and relative humidity on drying kinetics of rubberwood[J]. Heliyon, 2020, 6(10): e05151.
- [22] Howell A, Beagle E, Belmont E. Torrefaction of healthy and beetle kill pine and co-combustion with sub-bituminous coal[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2018, 140(4): 042002.
- [23] Liu Z, Hu W, Jiang Z, *et al.* Investigating combustion behaviors of bamboo, torrefied bamboo, coal and their respective blends by thermogravimetric analysis[J]. Renewable Energy, 2016, 87: 346–352.
- [24] Daba B J, Hallegiorgis S M. Co-firing pellet of torrefied corncob and khat stem mixture with coal on combustion efficiency and parametric optimization[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2023, 148(9): 3861–3873.
- [25] Myllymaa T, Holmberg H, Ahtila P. Techno-economic evaluation of biomass drying in moving beds: The effect of drying kinetics on drying costs[J]. Drying Technology, 2018, 37(10): 1201–1214.
- [26] Prakotmak P, Rattanamechaikul C, Junka N. Modeling of multi-phase heat transfer and transport behaviors of paddy in rotary drum drying by CFD-DEM[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2025, 73: 106551.
- [27] Prachayawarakorn S, Raikham C, Soponronnarit S. Effects of ripening stage and steaming time on quality attributes of fat free banana snack obtained from drying process including fluidized bed puffing[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(2): 946–955.
- [28] Liu Y, Bi D, Zhang C, *et al.* Analysis of exergy and carbon emission of torrefied biomass gasification coupled with coal-fired power generation system based on heat recovery[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2026, 193: 107392.
- [29] Akinyemi O S, Jiang L, Buchireddy P R, *et al.* Investigation of effect of biomass torrefaction temperature on volatile energy recovery through combustion[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2018, 140(11): 112003. ■

(上接第 27 页)

- [6] 李谢昆, 周卫征, 郭颖, 等. 微藻生物质制备燃料乙醇关键技术研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2014, 34(5): 92–99.
- [7] Liu D, Su Z, Han Q, *et al.* Interactions of microbiota during solid-state cereal vinegar fermentation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2026, 169: 105536.
- [8] 杨欣娅. 酿酒酵母强化小麦秸秆厌氧发酵产甲烷效果及机理研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2025.
- [9] Li N Y, Gao Y P, Liu X W, *et al.* Enhancing cider vinegar quality through the synergistic Co-fermentation of Lactiplantibacillus plantarum and Acetobacter pasteurianus: A metabolomic and transcriptomic approach[J]. LWT-Food Science and Technology, 2026, 240: 119018.
- [10] Muhammed R M Y, Cavoski I, Apa A C, *et al.* Valorization of organic third-category fruits through vinegar fermentation: A laboratory-scale evaluation of apples, peaches, and clementines[J]. Foods, 2026, 15(2): 238.
- [11] 杜潇. 甲壳类废物催化/氧化制备小分子有机酸及其机理研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2025.
- [12] 陈星. 黄水厌氧发酵产己酸的工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2025.
- [13] 侯晓君. 响应面法优化茶梗稀碱预处理及其酶解液发酵产琥珀酸[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2025.
- [14] Ren F, Tan B. An acetic acid bacterium-Acetobacter indonesiensis SZAI and its role in fermented whole cereal volatile compounds and functional characteristics[J]. International Journal of Food Microbiology, 2026, 449: 111627.
- [15] 张江宁, 杨春, 张玲, 等. 红曲醋高产洛伐他汀低产桔青霉素的研究[J]. 中国调味品, 2019, 44(1): 85–88.
- [16] 周跃慧. 维吉尼亚链霉菌诱变育种及发酵工艺优化的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [17] 柴云雷, 王鹏, 张晟, 等. 梨废渣发酵生产菌体蛋白的研究[J]. 中国饲料, 2022, (11): 138–143, 147.
- [18] 熊霞霞, 肖昊, 刘帅, 等. 甜叶菊废渣在畜禽饲料中的综合应用及其作用机制研究进展[J]. 中国畜牧杂志, 2022, 58(6): 7–11.
- [19] 施英乔, 丁来保, 盘爱享, 等. 糠醛生产废水废渣的资源化利用研究进展[J]. 林产化学与工业, 2016, 36(3): 133–138.
- [20] Hernández B J E, Plaza A M, Verdín J, *et al.* Impact of yeast-yeast interactions among autochthonous agave strains on acetate and ethyl ester production during agave juice fermentation[J]. Food Research International, 2026, 230: 118588. ■