

# 木质纤维素材料综合利用生物技术研究进展

张子晨<sup>1,2</sup>, 宋元达<sup>1</sup>

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255000;

2. 吉首大学师范学院, 湖南 吉首 416000)

**摘要:** 木质纤维素生物质资源来源广、储量大、价格低廉、环保、可再生, 在绿色循环经济的加速发展下, 该类资源有望替代石油成为“工业的血液”。除了有利于能源、化工、材料、制造业等产业摆脱过度依赖石油的产业模式, 实现新旧动能转换的优势外, 木质纤维素资源的最大优势在于其天然化学物质组成的生物安全特性。目前木质纤维素的应用以纤维素工业为主体, 受分离技术、加工工艺、原料成本等方面的制约, 离成熟的大规模工业应用还有一定距离。生物技术在木质纤维素原料化过程中的运用较少, 机理研究不够深入, 处于基础研究阶段的木质纤维素生物利用技术还较多。概述了木质纤维素生物质资源开发的生物途径、利用模式和主要技术, 从高值化生物精炼的角度阐述了生物转化在木质纤维素综合利用、深加工及高附加值产品开发领域的研究进展, 探讨了木质纤维素基化学品、材料在新能源之外的其他领域如食品、药品、新材料制造等方面的应用可能性及高值化应用潜力, 为木质纤维素资源的全面开发提供参考。

**关键词:** 木质纤维素; 生物质资源; 高附加值产物; 生物转化

中图分类号: S39

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X(2021)01-0150-10

## Research Progress in Biotechnology for Comprehensive Utilization of Lignocellulosic Materials

ZHANG Zichen<sup>1,2</sup>, SONG Yuanda<sup>1</sup>

(1. School of Agriculture Engineering and Food Sciences, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Normal College, Jishou University, Jishou 416000, China)

**Abstract:** Lignocellulosic biomass is a kind of environmentally-friendly and renewable resource, generally characterized by wide sources, huge reserves and low cost. Lignocellulose resource is expected to replace mineral oil as the next “blood of industry” with the accelerated development of green circular economy. The efficient utilization of lignocellulose is conducive to weaning the industrial (energy, chemical industry, material etc.) and manufacturing production off over-dependence on oil, and speeding up the conversion of old and new kinetic energy. Different from traditional resources, lignocellulosic biomass is more advanced in biosafety with its natural chemical compositions. At present, with cellulose industries as its main subject, the application of lignocellulose is restricted by separation technique, processing technology and high cost of raw materials, therefore, there is some gap in large-scale industrial application. The use of biotechnology for lignocellulosic utilization is still in the initial stage, most of them are basically based in the lab for further mechanism researches. This article overviews the biological pathway, utilization pattern, and main technologies

收稿日期: 2020-09-02

基金项目: 国家自然科学基金(31670064); 山东省泰山产业领军人才项目(tscy20160101)

作者简介: 张子晨(1988—), 女, 在读博士生, 研究方向为秸秆生物转化及高值化利用, E-mail: 295631919@qq.com

通信作者: 宋元达(1964—), 男, 博士, 教授, 研究方向为功能性脂质生物合成及产油微生物、能源微生物, E-mail: ysong@sdut.cn

of lignocellulosic biomass exploitation, reviews the research progress of bioconversion in comprehensive utilization, deep-processing and high value product development of lignocellulose from the perspective of high value-added biological refinery, and discusses the application possibility and high-value application potential of lignocellulose-based chemicals and materials in other fields other than new energy sources such as food, pharmaceuticals and new materials manufacturing, which will provide references for the full-scale development of the lignocellulose.

**Key words:** lignocellulose; biomass resources; highvalue-added product; bioconversion

木质纤维素类生物质是继煤炭、石油、天然气等化石能源之后最重要的可应用能源之一，被认为世界第四大能源。随着开采型不可再生资源的日趋枯竭，木质纤维素类生物质原料的资源优势愈发显现。目前木质纤维素资源的开发已被纳入多个国家的经济发展计划，美国、欧盟等已对农林废弃物高值化利用进行大规模战略性技术开发。早期的木质纤维素利用技术以粮食为原料，为避免对世界粮食安全造成威胁，目前主要对非粮木质纤维素生物质资源进行开发。非粮木质纤维素资源不占用粮食和耕地（能源作物除外），资源分布广泛，主要来源有森林次生资源及林业废弃物（木料、树枝、树叶等）、农业废弃物（秸秆、种皮等）、能源作物（柳枝稷、黄杨树）和纤维素废弃物（如制造业、农业废弃物等）<sup>[1]</sup>。这类资源既是能源，也是物质资源，既可以提供木质纤维素材料，还可以通过制备通用的碳基单体化学品获取一系列产物，原料大部分物质组成都可转化为不同形式的各类化学品<sup>[2]</sup>。区别于工业用途为主的石化产品，木质纤维素制备的一些生物油、有机酸、糖类、多元醇等可用于食品、药品用途。非粮木质纤维素资源的综合利用对于防止全球变暖、促进循环型社会的建立、低碳经济、带动新兴能源产业的可持续长远发展，以及解决粮食问题都具有极为重要的战略意义。

生物安全、环境安全的工程菌为木质纤维素来源的可发酵糖的可持续生产提供了一种可行的环保应用途径，可用于发酵木质纤维素生产高附加值的生物制品<sup>[3-4]</sup>。食品工程菌株还有助于填补非粮生物质资源生产食材领域的研究空白。木质纤维素基化学品的制备涵盖了生物发酵合成技术、分离提纯技术、“三废”处理技术、生物质裂解技术、催化技术以及生物基材料制备技术等多种技术，目前生物技术在生物基化学品的应用较为局限，未来在生物安全性要求较高的产品领域，木质纤维素的生物利用技术将有较大的发展

空间。木质纤维素生物质资源来源多样，原材料的区域特征明显，资源分布不均匀，在实际应用中，有望通过生物技术将有限的生物质原料转化为具有更高附加值的产品，开发新的精细化木质纤维素资源利用模式，形成与农业生产、生态保护相配套的区域经济。

## 1 木质纤维素的生物利用途径与技术

### 1.1 木质纤维素的直接生物利用

**1.1.1 肥料化** 废弃的植物纤维经生物降解成为土壤营养，可转化为粮食、果蔬生产力。秸秆类生物质不妥善存放或处理会造成环境污染，占用耕地、影响连作，甚至传播病害，导致减产。利用自然界广泛分布的细菌、放线菌、真菌等微生物的相互协同作用，可促进难利用的木质纤维素向稳定的腐殖质及可燃气体转化，既能避免产生不必要的成本（收集、运输、预处理、加工），还能得到无害化的肥料<sup>[5]</sup>。经沼化的沼渣和沼液的腐殖酸含量高，氮、磷、钾和微量元素齐全，是高效的有机肥料，沼液还可以用于浸种、防治农作物和果树害虫，具有多种用途。利用复合菌剂进行沤肥和堆肥的生物技术操作要求不高，是可持续发展下最宜推广的木质纤维素区域利用方式，这类技术通常对木质纤维素原料本身具有较强的包容性，适用于难以规模工业利用的木质纤维素类型（如木材边角料、椰糠、笋壳、果皮等），可广泛用于农村、乡镇的农林经济及农林产品加工产业，也逐步适用于城市木材、纸制品、纺织品的回收处理<sup>[6]</sup>。随着我国垃圾分类在各城市、农村的示范及试点推行，生物发酵肥料化技术、生物降解技术已经开始替代填埋及焚化等传统垃圾处理方式，被用于园林垃圾、厨余垃圾、纸制品垃圾处理上，最终能以土壤营养的方式进入自然界的碳循环。

**1.1.2 饲料化** 以秸秆为主原料的节粮型畜牧业可有效下调饲料中粮食用量的比例、缓解人畜争

粮矛盾。废弃植物纤维资源可发酵生产蛋白饲料,实现农业废弃物的无害化、减量化和资源化,其中一些类型(如:益生菌发酵饲料、无抗饲料、中草药饲料)对禽畜有提高免疫、育肥、促产仔等附加功能<sup>[7]</sup>。经微生物处理的植物纤维蛋白质含量显著提高,含多种高活性酶类、氨基酸和微量元素,营养成分全面,适口性改善,消化率高,为天然木质纤维素资源中非食用组成的可食转化提供了新途径。饲料用的菌种有较好的生物安全性,秸秆发酵后体积缩小,便于储运,而且营养效价大幅增加。西北农林科技大学使用平菇、金顶侧耳等高营养价值的食用菌制备秸秆蛋白饲料,可同时获取食用菌、多糖及蛋白质饲料多种产物<sup>[8]</sup>。益生菌、酿造菌、食药菌的应用为秸秆的可食转化打开了思路,在该基础上可进一步发展食品领域的秸秆可食化生物转化技术。

**1.1.3 生物修复再生** 经油印、防腐剂、塑化剂等化学品处理过的木材、织物、纸制品受重金属污染严重,既不能循环利用也不能随意掩埋弃置,占用大量土地及仓储资源。目前该类废弃物有望通过生物修复技术而得到经济有效的无害化处理及再生。真菌修复(Mycoremediation)技术是强效的脱毒、修复、再生手段,利用真菌(白腐菌、褐腐菌为主的木腐真菌)降解污染物及废弃物,富集有害金属,可实现污染环境的修复及材料的再生。随着真菌修复技术的发展,部分经无害化及再生的木质纤维素能再循环利用<sup>[9]</sup>。我国废旧木材再利用率较低,每年有千万吨级的废旧木材无法有效回收和再利用,生物修复再生技术利于我国大量难利用的木质纤维素材料及制品经济有效地回收<sup>[10]</sup>。

**1.1.4 一步式生物转化** 木质纤维素的一步式生物转化技术(Consolidated Bioprocessing, CBP)通过构建重组菌株或共发酵菌群将纤维素酶生产、水解和同步糖化发酵等过程组合一步完成。使用的微生物/微生物群既能产生纤维素酶,又能对C5糖和C6糖同步酶解、糖化和共发酵<sup>[11]</sup>。目前木质纤维素生产生物乙醇CBP技术较为成熟,其他代谢物类型也有CBP开发潜力,已有构建的工程菌用于L-乳酸、木糖醇等产物的CBP研究。一些产油酵母具有菊粉酶酶活,有一步发酵菊粉产油脂的潜力,如圆红冬孢酵母(*Rhodospiridium toruloides*)、酵母皮状丝孢酵

母(*Trichosporon cutaneu*)<sup>[12-13]</sup>。溶芳烃鞘氨醇单胞菌(*Novosphingobium aromaticivorans*)具有特殊的芳香烃降解途径,可将木质素降解转化为生物塑料单体,用于生物聚合材料的一步式生物转化<sup>[14]</sup>。韩小龙<sup>[15]</sup>构建了草酸青霉工程菌株,可利用麸皮、脱木素木糖渣和豆饼粉等原料进行纤维素酶和葡萄糖酸钠的CBP生产。

## 1.2 木质纤维素的多级生物利用

**1.2.1 木质纤维素到糖** 降解木质纤维素相关的生物酶类可分为碳水化合物活性酶(CAZymes)和氧化还原酶(Oxidoreductases),这些酶类可将木质纤维素聚合物水解得到单糖<sup>[16-17]</sup>。水解糖种类繁多,有葡萄糖、甘露糖、半乳糖等己糖,木糖、阿拉伯糖等戊糖,而木质纤维素水解糖以葡萄糖的含量最高,其次是木糖,其他糖较少。微生物需要相应的糖代谢途径和较高的利用率才能对水解自木质纤维素的混糖进行利用,微生物普遍优先利用葡萄糖,耗尽糖代谢途径再切换糖利用途径。真菌中的木糖代谢路径主要为木糖还原酶/木糖醇脱氢酶(XR/XDH)路径,而原核生物主要为木糖异构酶(XI)路径<sup>[18]</sup>。真菌和细菌体内L-阿拉伯糖代谢酶类不同,最终都进入戊糖磷酸途径<sup>[19]</sup>。木质纤维素生物利用的关键技术是糖的水解技术,工业上主要采用化学水解或生物酶水解法,由于主流化学法预处理技术的局限性,目前水解获取可发酵糖的工艺中,通常伴随呋喃类、有机酸类、酚类副产物,对糖的可发酵性产生较大影响,且存在协同和叠加效应。这类副产物在生物的自然降解过程几乎不产生,一些微生物有较好的抑制物耐受性和降解、转化能力,可将毒性较大的抑制物转化为相对低毒的类型,基因工程改造技术也可提高生物的毒物耐受性<sup>[20]</sup>。真菌的木质素降解酶类如漆酶、锰过氧化物酶、木质素过氧化物酶、多功能过氧化物酶,及木质素降解相关的细胞色素P450与多环芳香烃(PAHs)代谢、联苯代谢、阿魏酸代谢、苯甲酸代谢、二噁英代谢、酚代谢、醚酯代谢等毒物代谢途径相关<sup>[21]</sup>。在细菌光明芽孢杆菌(*Bacillus ligniniphilus* L1)中木质素代谢与龙胆酸途径、苯甲酸盐途径、 $\beta$ -酮己二酸途径相关<sup>[22]</sup>。这些代谢研究利于开发木质纤维素水解糖产物及后续利用生物预处理技术。

**1.2.2 糖到糖平台(Suger Platform)化学品及小**

**分子生物制品** 生物精炼生产的单体化学品及通用产物是后续精细化工、医药、食品、新材料等领域的最基础原料。糖化学平台是当前两大生物精炼平台之一,涉及淀粉、蔗糖、葡萄糖、果糖、木糖、阿拉伯糖、乳糖等生物质糖及系列化学品的制备,先将几种典型的木质纤维素水解糖转化为平台化学品( Building block chemicals ),再将这些材料二次转化为其他化学物质或衍生物族。美国国家能源部可再生能源实验室根据生物精炼途径和石油精炼模型、应用潜能等条件筛选出了 1,4- 二酸(琥珀酸、富马酸和苹果酸)、2,5- 呋喃二甲酸、3- 羟基丙酸、天冬氨酸、葡萄糖二酸、谷氨酸、衣康酸、乙酰丙酸、3- 羟基丁内酯、甘油、山梨醇和木糖醇/阿拉伯糖醇 12 类,主要是木质纤维素来源的糖、淀粉制成的 C3~C6 的有机酸、酯化物及糖醇等易于转化的多基团化学单体,具有转变成有用分子新家族的潜力<sup>[23]</sup>。单体化学品实际应用价值较高,获取相对容易,制备通用中间单体在复杂物料转化为工业原料的方法中应用最为广泛,用于原石油化工产业中各种通用单体的制造<sup>[24]</sup>。区别于石油化工过程,通过生物化学途径产生的小分子化学品生物安全性较好,部分酿造菌产生的氨基酸、糖醇、有机酸还可用于食品及原料药<sup>[25]</sup>。微生物在碳源为混糖的情况下对糖的利用有先后,在这种顺序利用模式下的糖代谢产物转化率低,生物工程改造技术可改善菌的糖摄取能力及混合糖利用效率<sup>[26]</sup>。Dien 等<sup>[27]</sup>将大肠杆菌的五碳糖(木糖和阿拉伯糖)利用途径导入运动发酵单胞菌(*Zymomonas mobilis*)中,使重组菌能利用以木糖为主糖的木屑水解液生产乙醇。Cao 等<sup>[28]</sup>通过木糖脱氢酶和木聚糖酶的共表达,使重组大肠杆菌将木糖有效地转化为 1,2,4- 丁三醇。Shen 等<sup>[29]</sup>通过敲除酿酒酵母中编码 D-核酮糖-5-磷酸-3-差向异构酶的基因,实现了木糖和葡萄糖的同时利用。产 PHB 模式菌罗氏真养菌(*Ralstonia eutropha* H16)表达了大肠杆菌来源的阿拉伯糖代谢酶、高亲和力阿拉伯糖转运蛋白和阿拉伯糖代谢酶系后,可以利用 L-阿拉伯糖生长和发酵生产<sup>[30]</sup>。一些微生物还存在低聚糖、二糖等水解糖类的直接代谢及利用途径,人为构建混糖利用工程菌株也是木质纤维素生物转化的趋势。

目前生物精炼的生物乙醇和乳酸生产工艺相对较成熟,其中,生物乙醇经催化脱水可得到聚合单体生物乙烯,与现有石化产业对接。乙烯具有广泛的衍生物和下游产业,是石化产业最基础、核心的原料<sup>[31]</sup>。生物精炼产生的生物乙烯可以衍生生物基聚乙烯(BioPE)、生物基聚对苯二甲酸乙二醇酯(BioPET)等一系列的可塑乙烯基单体。

**1.2.3 糖到生物大分子** 木质纤维素来源的可发酵糖在一些微生物的代谢途径中可参与复杂化合物的合成,从而形成独特的附加价值,因其产物类型更具开放性而备受关注。但这种生物转化通常比糖的小分子化更难发生。

(1) 微生物油脂:产油微生物在特定的营养条件下可在胞内累积大量单细胞油脂(SCO)。乙酰-CoA 为脂肪酸合成提供二碳单位,经过多轮加成反应形成长链脂肪酸(LCFAs),每轮加成反应通过缩合、还原、脱水、再还原 4 个步骤延长碳链 2 个碳,经过 7 轮循环生成软脂酸(16:0),再经类似的碳链延长步骤合成更长链的脂肪酸,最终通过二羟丙酮磷酸途径形成甘油三酯(TAGs)<sup>[32]</sup>。链长超过 22 碳的超长链脂肪酸及不饱和脂肪酸的形成需要特异性酶催化,只有少数具有合成途径的微生物可合成,因此稀有而昂贵,可用于食品药品工业。一些藻类可通过光合作用合成并累积大量的超长链多不饱和脂肪酸,是商业化生产超长链脂肪酸的理想菌株<sup>[33]</sup>。微生物合成的长链脂肪酸可转酯化形成与石化柴油性质基本相符的酯类化合物,或脱羧、脱酸形成长链烷烃<sup>[34-35]</sup>。一些具有更高经济价值及特殊用途的脂质,如亚麻酸(GLA)、花生四烯酸(ARA)、二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)等功能脂质可用于医药、食品、孕婴保健品等领域,微生物类可可脂(CBLs)可以替代食品工业中昂贵的可可脂<sup>[36]</sup>。

微生物油脂生产成本较高,油脂底物利用谱较宽、抑制物耐受较好的产脂微生物可利用木质纤维素水解糖进行较低成本的油脂生产。Dai 等<sup>[37]</sup>研究的粘红酵母(*Rhodotorula glutinis*)能利用杨树叶片水解液替代葡萄糖碳源产油脂。Zhao 等<sup>[38]</sup>研究的胶红酵母(*Rhodotorula mucilaginosa*)能转化菊芋水解液生产微生物油脂。生物脱毒、遗传工程及代谢工程构建等生物技术被用于木质

纤维素发酵产 SCO 工艺。经白腐菌脱毒的玉米秸秆稀酸水解液培养的发酵性丝孢酵母产脂能力提高<sup>[39]</sup>。Steen 等<sup>[40]</sup>将粪梭菌 (*Clostridium stercorarium*) 来源的木聚糖内切酶基因和椭圆形拟杆菌 (*Bacteroides ovatus*) 来源的木聚糖酶基因导入大肠杆菌,使大肠杆菌能直接利用木聚糖产脂肪酸乙酯。受上游预处理及水解工艺的限制,利用木质纤维素产微生物油脂产品还局限于工业用途的普通油脂,其他具有更高附加价值的油脂种类的研究离应用还有一段距离。

(2) 微生物多糖:微生物多糖在医药业、食品、保健品、新材料等领域具有广泛用途。由于混合碳源有助于生物多糖的产生,利用木质纤维素水解糖类进行多糖的生物合成相对容易。微生物多糖的聚合过程的核心是核苷酸糖单元顺序延伸、翻转、聚合,合成途径差异与菌种及核苷酸糖来源有关。细菌胞外多糖研究较多,异型多糖比同型多糖的核苷酸糖合成复杂,碳源为葡萄糖时,通常以  $\alpha$ -磷酸葡萄糖变位酶途径和磷酸甘露糖变位酶途径合成,也可以通过磷酸葡萄糖异构酶途径合成,部分产物还能进入糖酵解途径为多糖合成提供能量;当碳源复杂时,涉及以葡萄糖激酶、 $\alpha$ -磷酸葡萄糖变位酶、UDP-葡萄糖焦磷酸化酶、UDP-半乳糖-4-差向异构酶、磷酸葡萄糖异构酶为关键酶的合成<sup>[41-43]</sup>。真菌多糖的合成研究相对较少,差异也较大,集中于少数价值较高的食药真菌,如香菇、灵芝,兼具木质纤维素降解能力和多糖合成能力的食药真菌是天然的高附加值产物细胞转化工厂。

小核菌可以利用木质纤维素为原料生产价值很高的硬葡聚糖<sup>[44]</sup>。硬葡聚糖具有抗病毒活性,是适宜制备缓释片和眼用制剂的医用辅料,由于在极端环境下也能表现出良好的增粘、抗剪切和高温稳定性,因此可应用于医药、食品、农业、工业,甚至石油开采领域。

低聚壳聚糖是天然安全的食品添加剂、保鲜剂、抗菌材料,生物相容性和生物可降解性好。真菌细胞壁中的壳聚糖理化性质优于虾蟹壳来源的壳聚糖,生产污染少,菌种丰富,米根霉、黑曲霉等常见食品工业菌种都可以利用木质纤维素产真菌壳聚糖,灵芝子实体、孢子制备的壳聚糖还适用于生物医学材料及护肤品<sup>[45-47]</sup>。

细菌纤维素是安全的膳食纤维、食品原料、

添加剂,还是优秀的生物医用原料,可用于人工血管、组织工程支架、皮肤修复材料。植物的水解液及水果皮渣汁常用于细菌纤维素、纳米级细菌纤维材料生产的原料<sup>[48]</sup>。

多糖食用膜也是人体安全的保鲜、抗菌材料及食品药品助剂,其中普鲁兰多糖是最具应用前景的微生物多糖之一,可以用于基因递送、靶向药治疗、医学成像等医药领域<sup>[49]</sup>。蔗渣、果皮、油饼等农林废弃物及果品加工废料广泛用于普鲁兰多糖等多糖食用膜材料的底物研究<sup>[50]</sup>。

(3) 其他大分子:聚羟基烷酸酯 (PHAs) 是细菌胞内产生的一类聚酯,是石油基塑料理想的替代品,高纯度的聚  $\beta$ -羟基丁酸酯还可制作成可吸收医用缝合及抗菌外敷材料,利用可再生替代碳源可以降低 PHAs 的生产成本<sup>[51]</sup>。乳酸-羟基乙酸共聚物 (PLGA) 是乳酸和羟基乙酸两种单体熔融聚合的共聚物,本不是天然生物产物,Choi 等<sup>[52]</sup>改造的大肠杆菌能同时利用葡萄糖和木糖一步合成 PLGA,让本身能够利用葡萄糖产乳酸的大肠杆菌还能利用木糖生产羟基乙酸,经丙酰-CoA 转移酶、PHA 合成酶催化产生 PLGA。Nduko 等<sup>[53]</sup>在具有合成聚羟基丁酸乳酸酯 P (LA-co-3hb) 合成能力的大肠杆菌上过表达了有助于木糖摄取的半乳糖转运,提高了利用木糖合成的共聚物产量和共聚物的乳酸含量。

## 2 高附加值的木质纤维素生物转化产品

### 2.1 代石油化学品及再生材料

木质纤维素与化石资源元素组成相近,其来源的化学品可替代石油基化学品,目前纤维素基化学品已经实现与石化产业的无缝衔接。甲基纤维素、乙基纤维素、羧甲基纤维素、羟乙基纤维素等纤维素衍生品在食品添加、生物医学、精细化工等方面工业应用成熟。木质纤维素原料制备的再生纤维、生物聚合物、纳米材料、水凝胶等已用于农业、工业、纺织业、建筑业,还可用作可食材料、仿生材料、医用可吸收材料,未来在功能上可替代和超越石油基化学品,满足基本工业需要,降低环保成本<sup>[54]</sup>。我国是石油基塑料最大的生产国和塑料消耗大国,木质纤维素为原料生产的可降解的聚乳酸、聚己内酯、聚羟基烷酸酯等生物塑料融合了天然纤维和化学纤维两者的优点,能替代大多数合成塑料,机械加工性能

及材料通用性能不亚于传统塑料,在食用安全性及热稳定性上远优于传统塑料,也符合绿色循环经济需求<sup>[55]</sup>。随着环保意识的加强及消费形态的改变,大众对原料可再生、材料可食用、废弃可降解的环保再生材料的接受度和市场需求逐渐增加。逐渐完善木质纤维素物质流生物利用体系,将有助于通过物质循环实现整个产业链及其生物基系列化学品的附加价值<sup>[56]</sup>。

## 2.2 生物酶制剂

木质纤维素降解微生物产生的纤维素酶、半纤维素酶、木质素降解酶类用途广泛,通过酶工程菌选育、定向改造,高品质的酶制剂越来越有应用优势。纤维素酶食品安全性好,在天然植物和中草药有效成分的提取及食品加工领域扮演着无可替代的角色,可以用于天然药物的筛选,多糖、黄酮、生物碱、萜类、蛋白质及肽类、油类、有机酸类的制备<sup>[57]</sup>。在食品工业中,纤维素酶和半纤维素酶广泛用于果蔬饮料、酿造工艺的澄清和稳定环节,能改善风味和提高产量;还可从麦麸、坚果壳、果皮等非食用植物纤维中获得水溶性膳食纤维,用于生产富含膳食纤维的功能饮料或食品,借助植物纤维本身的难降解特性生产低醇饮料。木质素降解酶中的漆酶在食品添加、食品工业废水处理领域均有应用,常用于酿酒、蛋白饮料、果汁加工过程中多酚类物质的脱除,使产品贮藏稳定性大为提高,是理想食品稳定剂和胶凝剂。漆酶可改善烘焙食品面团理化性质和稳定性,还可用于降低巧克力、茶类食品的苦味,改善适口性<sup>[58]</sup>。这类酶的固定化酶技术、无载体交联酶聚集技术、细胞微生物反应器得到了较好发展,还可以制备灵敏的生物传感器用于食品检验、食品工业废水的评价和检测。

## 2.3 新型饲料

饲料本身是木质纤维素传统利用途径之一,是对木质纤维素物质资源的直接利用,废弃物饲料化研究、功能性饲料开发、无抗饲料开发、以饲料化对策控制入侵植物蔓延的新原料开发,具有很好的研究价值及应用潜力,可以通过多样化木质纤维素资源的有效利用来降低成本、提高产物价值。益生菌的发酵可降低饲用动物的疾病风险,减少药物和抗生素的使用,提高吸收转化效率,增强畜牧产品性能、品质、肠道消化酶活性和免疫功能<sup>[59]</sup>。菠萝皮、甘蔗尾等密集型农业

废弃物营养丰富,通过菌种发酵后可以解决易腐败变质的贮藏问题,还可以增加适口性,并减少对口腔、消化道刺激造成的健康问题<sup>[60]</sup>。现代化养殖技术对于生物安全性、品质增产、药物残留等有高标准,利用闲置或难利用的木质纤维素资源生产蛋白饲料、无抗生素饲料、节粮型饲料,以及具有育肥育繁等效果的功能饲料,可以实现农业、畜牧业及区域经济的共同发展。

## 2.4 食品、药品级生物制品

微生物细胞生产蛋白质、药物、食品等精细产品已经有多年的工业化历史,但以非粮木质纤维素为原料发酵生产的食品、药品级生物制品极少,是非粮木质纤维素应用较空白的领域。半纤维素来源的木聚糖、木糖制备的多糖硫酸酯,由于具有抗病毒、增强免疫力、抗凝血、抗氧化、抗肿瘤等活性,较早被用于生物医药领域,被德国拜耳应用于抗艾滋病药物<sup>[61]</sup>。食药菌能直接利用木质纤维素,用于农产品附加值较低,但用于药物开发潜力较好,是开发高值生物产品的资源库,通过活性成分筛选、药化分析、提取工艺的优化,可工业化应用于食品、药品、保健品、化妆品。香菇多糖、姬松茸多酚、灵芝三萜、虫草素、麦角甾醇等天然产物已被研究证明具有广泛的药理学作用,包括抗肿瘤、抗炎症反应、抗氧化作用、保肝、降血脂、免疫调节、神经保护等作用。在化妆品行业,冬虫夏草、灵芝、银耳、灰树花的活性提取物已用于抗氧化、美白、抗敏、消炎功能的药妆产品<sup>[62]</sup>。筛选、构建具有混糖发酵途径的工程菌是将木质纤维素广泛应用于食品、药品、化妆品、保健品等高附加值产品领域的重要过程。目前木质纤维素衍生糖的获得依赖于能源化学工艺,基于生物安全性的考虑,非食用生物质的食药化过程需要开发出能与下游技术相衔接配套的上游工艺以解决关键技术问题。

## 3 展望

农作物秸秆是非粮木质纤维素生物质资源中最稳定的一部分,是最便捷获得的大宗资源。随着生物质利用技术的发展,秸秆需求量剧增,非粮木质纤维素生物质资源的利用需达到农业生态与木质纤维素工业可持续发展平衡。目前工业的重点是将木质纤维素中的多糖转化为产品,导致了资源的不完全利用,未被完全利用的材料构成

了未被充分利用的物质流,生物途径可以通过降解和转化消耗零散的物质流,将这些未被充分利用的资源转化为有价值的产品,为当前还不成熟的木质纤维素工业排放提供了一种低能耗和低成本环保方案。

微生物碳源利用的多样性为生物质多资源开发提供了保障,在纤维素和半纤维素到单体糖的生物转化方面具有优势。现阶段生物转化技术的应用有限,如何在生物精炼中高效、环保、全面地利用木质纤维素材料仍是研究人员面临的挑战。目前木质素是木质纤维素降解利用上最难处理的,即使植物转基因技术已用于解决植物木质素回收的问题,但木质素依然是木质纤维素降解利用领域的最大壁垒<sup>[63-64]</sup>。微生物的原料利用能力与定向转化效率需要解决关键技术问题,但这些木质纤维素利用难题并不妨碍木质纤维素生物代谢、转化过程以及相应生物酶产品在能源、材料、食品、医药等高附加值产品领域的利用,其将发挥越来越重要的作用。

#### 参考文献 (References) :

- [1] CHEN H, LIU J, CHANG X, CHEN D, XUE Y, LIU P, LIN H, HAN S. A review on the pretreatment of lignocellulose for high-value chemicals [J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 160:196-206. DOI:10.1016/j.fuproc.2016.12.007.
- [2] XUE Y, CHEN H, ZHAO W, YANG C, MA P, HAN S. A review on the operating conditions of producing bio-oil from hydrothermal liquefaction of biomass [J]. *International Journal of Energy Research*, 2016, 40 (7) :865-877. DOI:10.1002/er.3473.
- [3] XU Y P, DUAN P G, WANG F. Hydrothermal processing of macroalgae for producing crude bio-oil [J]. *Fuel Processing Technology*, 2015, 130:268-274. DOI:10.1016/j.fuproc.2014.10.028.
- [4] PARISUTHAM V, KIM T H, LEE S K. Feasibilities of consolidated bioprocessing microbes: From pretreatment to biofuel production [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 161:431-440. DOI:10.1016/j.biortech.2014.03.114.
- [5] MONLAU F, SAMBUSITI C, FICARA E, ABOULKAS A, BARAKAT A, CARRÈRE H. New opportunities for agricultural digestate valorization: current situation and perspectives [J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8 (9) :2600-2621. DOI:10.1039/c5ee01633a.
- [6] GAME B, DEOKAR C, NAVALE A. Composting of organic wastes using newly developed cellulolytic microbial consortium [J]. *International Journal of Agriculture, Environment and Biotechnology*, 2016, 9(4) :525-534. DOI:10.5958/2230-732X.2016.00069.3.
- [7] 谢婉馨,李顺祥,冯露雅,秦源,罗小芳.无抗饲料添加剂的研究进展[J].*生物化工*, 2020, 6 (3) :164-169.
- XIE W X, LI S X, FENG L Y, QIN Y, LUO X F. Research progress of antibiotics-free feed additive [J]. *Biological Chemical Engineering*, 2020, 6 (3) :164-169.
- [8] 张婷婷.金顶侧耳菌菇多糖提取与菌渣蛋白饲料加工工艺的研究[D].杨凌:西北农林科技大学, 2010.
- ZHANG T T. The study of mushroom polysaccharide extraction and mushroom residue protein [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010.
- [9] VARA S. Mycoremediation of Lignocelluloses. [M]// *Biotechnology: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications*. Information Resources Management Association (USA). 2019: 1086-1108. DOI:10.4018/978-1-5225-8903-7.ch042.
- [10] 池颖.中国废旧木材资源与再生纤维利用概况[J].*林产工业*, 2020, 57 (3) :65-67. DOI:10.19531/j.issn1001-5299.202003014
- CHI Y. Overview of waste wood resources and recycled fiber utilization in China [J]. *China Forest Products Industry*, 2020, 57 (3) :65-67. DOI:10.19531/j.issn1001-5299.202003014.
- [11] LYND L R, VAN ZYL W H, MCBRIDE J E, LASER M. Consolidated bioprocessing of cellulosic biomass: an update [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2005, 16 (5) :577-583. DOI:10.1016/j.copbio.2005.08.009.
- [12] WANG Z P, FU W J, XU H M, CHI Z M. Direct conversion of inulin into cell lipid by an inulinase-producing yeast *Rhodospiridium toruloides* 2F5 [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 161:131-136. DOI:10.1016/j.biortech.2014.03.038.
- [13] WANG Y, LIU W, BAO J. Repeated batch fermentation with water recycling and cell separation for microbial lipid production [J]. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2012, 6 (4) :453-460. DOI:10.1007/s11705-012-1210-8.
- [14] PEREZ J M, KONTUR W S, ALHERECH M, COPLIEN J, KARLEN S D, STAHL S S, DONOHUE T J, NOGUERA D R. Funneling aromatic products of chemically depolymerized lignin into 2-pyrone-4-6-dicarboxylic acid with *Novosphingobium aromaticivorans* [J]. *Green Chemistry*, 2019, 21 (2). DOI:10.1039/C8GC03504K.
- [15] 韩小龙.纤维素酶补料发酵工艺及木糖渣生产葡萄糖酸钠的研究[D].济南:山东大学, 2017.
- HAN X L. Cellulase fed-batch fermentation and sodium gluconate production from corncob residue [D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [16] TERRAPON N, LOMBARD V, DRULA E, COUTINHO P M, HENRISSAT B. The CAZy Database/the Carbohydrate-Active Enzyme (CAZy) Database: Principles and Usage Guidelines [M]//AOKI-KINOSHITA K F. *A Practical Guide to Using Glycomics Databases*. Springer Japan, 2017:117-131. DOI:10.1007/978-4-431-56454-6\_6.
- [17] FLOUDAS D, BINDER M, RILEY R, BARRY K, BLANCHETTE R A, HENRISSAT B, MARTÍNEZ A T, OTILLAR R, SPATAFORA J W, YADAV J S, AERTS A, BENOIT I, BOYD A, CARLSON A, COPELAND A, COUTINHO P M, DE VRIES R P, FERREIRA P,

- FINDLEY K, FOSTER B, GASKELL J, GLOTZER D, GÓRECKI P, HEITMAN J, HESSE C, HORI C, IGARASHI K, JURGENS J A, KALLEN N, KERSTEN P, KOHLER A, KÜES U, ARUN KUMAR T K, KUO A, LABUTTI K, LARRONDO L F, LINDQUIST E, LING A, LOMBARD V, LUCAS S, LUNDELL T, MARTIN R, MCLAUGHLIN D J, MORGENSTERN I, MORIN E, MURAT C, NAGY L G, NOLAN M, OHM R A, PATYSHAKULIYEVA A, ROKAS A, RUIZ-DUEÑAS F J, SABAT G, SALAMOV A, SAMEJIMA M, SCHMUTZ J, SLOT J C, JOHN F S, STENLID J, SUN H, SUN S, SYED K, TSANG A, WIEBENGA A, YOUNG D, PISABARRO A, EASTWOOD D C, MARTIN F, CULLEN D, GRIGORIEV I V, HIBBETT D S. The paleozoic origin of enzymatic lignin decomposition reconstructed from 31 fungal genomes [J]. *Science*, 2012, 336 (6089):1715–1719. DOI:10.1126/science.1221748.
- [18] SIGNORI L, PASSOLUNGI S, RUOHONEN L, PORRO D, BANDUARDI P. Effect of oxygenation and temperature on glucose–xylose fermentation in *Kluyveromyces marxianus* CBS712 strain [J]. *Microbial Cell Factories*, 2014, 13 (1):51. DOI:10.1186/1475–2859–13–51.
- [19] WISSELINK H W, TOIRKENS M J, DEL ROSARIO FRANCO BERRIEM, WINKLER A A, VAN DIJKEN J P, PRONK J T, VAN MARIS A J A. Engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for efficient anaerobic alcoholic fermentation of L–arabinose [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73 (15):4881–4891. DOI:10.1128/AEM.00177–07.
- [20] ISHII J, YOSHIMURA K, HASUNUMA T, KONDO A. Reduction of furan derivatives by overexpressing NADH–dependent Adh1 improves ethanol fermentation using xylose as sole carbon source with *Saccharomyces cerevisiae* harboring XR–XDH pathway [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, 97 (6):2597–2607. DOI:10.1007/s00253–012–4376–6.
- [21] MALLINSON S J B, MACHOVINA M M, SILVEIRA R L, GARCIA-BORRÁS M, GALLUP N, JOHNSON C W, ALLEN M D, SKAF M S, CROWLEY M F, NEIDLE E L, HOUK K N, BECKHAM G T, DUBOIS J L, MCGEEHAN J E. A promiscuous cytochrome P450 aromatic O–demethylase for lignin bioconversion [J]. *Nature Communications*, 2018, 9 (1):2487. DOI:10.1038/s41467–018–04878–2.
- [22] ZHU D, ZHANG P, XIE C, Zhang W, SUN J, QIAN W, YANG B. Biodegradation of alkaline lignin by *Bacillus ligniniphilus* L1 [J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2017, 10 (1):44. DOI:10.1186/s13068–017–0735–y.
- [23] WERPY T, PETERSEN G, ADEN A, BOZEL J, HOLLADAY J, WHITE J, MANHEIM A, ELIOT D, LASURE L, JONES S, GERBER M, IBSEN K, LUMBERG L, KELLEY S. Top Value Added Chemicals from Biomass. Volume 1–Results of Screening for Potential Candidates from Sugars and Synthesis Gas [M]. Department of Energy, Washington DC, Pacific Northwest National Laboratory, 2004. DOI:10.2172/15008859.
- [24] ZACHAROPOULOU V, LEMONIDOU A A. Olefins from biomass intermediates: a review [J]. *Catalysts*, 2017, 8 (1):2. DOI:10.3390/catal8010002.
- [25] HOLM M S, SARAVANAMURUGAN S, TAARNING E. Conversion of sugars to lactic acid derivatives using heterogeneous zeotype catalysts [J]. *Science*, 2010, 328 (5978):602–605. DOI:10.1126/science.1183990.
- [26] SÀNCHEZ NOGUÉ V, KARHUMAA K. Xylose fermentation as a challenge for commercialization of lignocellulosic fuels and chemicals [J]. *Biotechnology Letters*, 2015, 37 (4):761–772. DOI:10.1007/s10529–014–1756–2.
- [27] DIEN B S, COTTA M A, JEFFRIES T W. Bacteria engineered for fuel ethanol production: current status [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, 63 (3):258–266. DOI:10.1007/s00253–003–1444–y.
- [28] CAO Y, NIU W, GUO J, XIAN M, LIU H. Biotechnological production of 1,2,4–butanetriol: An efficient process to synthesize energetic material precursor from renewable biomass [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5:18149–181583. DOI:10.1038/srep18149.
- [29] SHEN M H, SONG H, LI B Z, YUAN Y J. Deletion of D–ribulose–5–phosphate 3–epimerase (RPE1) induces simultaneous utilization of xylose and glucose in xylose–utilizing *Saccharomyces cerevisiae* [J]. *Biotechnology Letters*, 2015, 37 (5):1031–1036. DOI:10.1007/s10529–014–1759–z.
- [30] 卢雪梅, 刘桂明, 王宇, 丁久元, 翁维琦. 罗氏真养菌 W50 的 L–阿拉伯糖代谢途径工程改造 [J]. *微生物学报*, 2013, 53 (12):1267–1275. DOI:10.13343/j.cnki.wsxb.2013.12.001.
- LU X M, LIU G M, WANG Y, DING J Y, WENG W Q. Engineering of an L–arabinose metabolic pathway in *Ralstonia eutropha* W50 [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2013, 53 (12):1267–1275. DOI:10.13343/j.cnki.wsxb.2013.12.001.
- [31] RAMIS G, ROSSETTI I, TRIPODI A, COMPAGNONI M. Diluted bioethanol solutions for the production of hydrogen and ethylene [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2017, 57:1663–1668. DOI:10.3303/CET1757278.
- [32] 唐鑫. 产油真菌卷枝毛霉 WJ11 高产脂质的分子机制 [D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- TANG X. Molecular mechanism of high lipid–production in oleaginous fungus *Mucor circinelloides* WJ11 [D]. Wuxi: Jiangnan university, 2016.
- [33] 万静雅, 涂行浩, 魏芳, 江正兵, 徐淑玲, 吕昕, 董绪燕, 向极轩, QUEK S, 陈洪. 超长链脂肪酸的研究进展 [J]. *中国食物与营养*, 2019, 25 (8):5–11. DOI:10.19870/j.cnki.11–3716/ts.2019.08.001.
- WAN J Y, TU X H, WEI F, JIANG Z B, XU S L, LV X, DONG X Y, XIANG J Q, QUEK S, CHEN H. Research progress of very long–chain fatty acids [J]. *Food and Nutrition in China*, 2019, 25 (8):5–11. DOI:10.19870/j.cnki.11–3716/ts.2019.08.001.
- [34] VARDON D R, SHARMA B K, JARAMILLO H, KIM D, CHOE J K, CIESIELSKI P N, STRATHMANN T J. Hydrothermal catalytic processing of saturated and unsaturated fatty acids to hydrocarbons

- with glycerol for in situ hydrogen production [J]. *Green Chemistry*, 2014, 16 (3):1507–1520. DOI:10.1039/c3gc41798k.
- [35] POPOV S, KUMAR S. Rapid hydrothermal deoxygenation of oleic acid over activated carbon in a continuous flow process [J]. *Energy & fuels*, 2015, 29 (5):3377–3384. DOI:10.1021/acs.energyfuels.5b00308.
- [36] BERGENHOLM D, GOSSING M, WEI Y, SIEWERS V, NIELSEN J. Modulation of saturation and chain length of fatty acids in *Saccharomyces cerevisiae* for production of cocoa butter-like lipids [J]. *Biotechnology & Bioengineering*, 2018, 115 (4):932–942. DOI:10.1002/bit.26518.
- [37] DAI C, TAO J, XIE F, DAI Y, ZHAO M. Biodiesel generation from oleaginous yeast *Rhodotorula glutinis* with xylose assimilating capacity [J]. *African Journal of Biotechnology*, 2007, 6 (18):2130–2134. DOI:10.1016/j.ajbt.2007.04.016.
- [38] ZHAO C H, ZHANG T, LI M, CHI Z M. Single cell oil production from hydrolysates of inulin and extract of tubers of *Jerusalem artichoke* by *Rhodotorula mucilaginosa* TJY15a [J]. *Process Biochemistry*, 2010, 45 (7):1121–1126. DOI:10.1016/j.procbio.2010.04.002.
- [39] 冯冲, 王艳颖, 康静, 刘艳丽, 宋安东. 发酵性丝孢酵母产油脂中纤维质糖化液脱毒工艺对比及优化研究 [J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2011, 38 (3):87–91. DOI:10.13543/j.cnki.bhxbzr.2011.03.024.
- FENG C, WANG Y Y, KANG J, LIU Y L, SONG A D. Comparison of detoxification technology and optimization production of lipid by *Trichosporon fermentans* in fiber-derived saccharified liquid [J]. *Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science)*, 2011, 38 (3):87–91. DOI:10.13543/j.cnki.bhxbzr.2011.03.024.
- [40] STEEN E J, KANG Y, BOKINSKY G, HU Z, SCHIRMER A, MCCLURE A, DEL CARDAYRE S B, KEASLING J D. Microbial production of fatty-acid-derived fuels and chemicals from plant biomass [J]. *Nature*, 2010, 463 (7280):559–562. DOI:10.1038/nature08721.
- [41] 庞宁, 张佳琪, 齐进姜, 姜彬慧. 微生物胞外多糖及其生物合成途径研究现状 [J]. 微生物前沿, 2017, 6 (2):27–34. DOI:10.12677/amb.2017.62004.
- PANG N, ZHANG J Q, QI J J, JIANG B H. Research status of microbial exopolysaccharide and its metabolic pathway [J]. *Advances in Microbiology*, 2017, 6 (2):27–34. DOI:10.12677/amb.2017.62004.
- [42] UDDIN R, SAEED K, KHAN W, AZAM S S, WADOOD A. Metabolic pathway analysis approach: identification of novel therapeutic target against methicillin resistant *Staphylococcus aureus* [J]. *Gene*, 2015, 556 (2):213–226. DOI:10.1016/j.gene.2014.11.056.
- [43] DOBLER L, VILELA L F, ALMEIDA R V, NEVES B C. Rhamnolipids in perspective: Gene regulatory pathways, metabolic engineering, production and technological forecasting [J]. *New Biotechnology*, 2015, 33 (1):123–135. DOI:10.1016/j.nbt.2015.09.005.
- [44] VALDEZ A L, BABOT J D, SCHMID J, DELGADO O D, FARIÑA J I. Scleroglucan production by *Sclerotium rolfsii* ATCC 201126 from amylaceous and sugarcane molasses-based media: promising insights for sustainable and ecofriendly scaling-up [J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2019, 27 (12):2804–2818. DOI:10.1007/s10924-019-01546-4.
- [45] 李鑫, 顾夕梅. 米根霉利用玉米芯渣同步糖化发酵联产富马酸和真菌壳聚糖 [J]. 林业工程学报, 2017, 2 (6):97–102. DOI:10.13360/j.issn.2096-1359.2017.06.017.
- LI X, GU X M. Co-production of fumaric acid and fungal chitosan from corncob by simultaneous saccharification and fermentation with *Rhizopus oryzae* [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2017, 2 (6):97–102. DOI:10.13360/j.issn.2096-1359.2017.06.017.
- [46] TAYEL A A, IBRAHIM S I A, AL-SAMAN M A, MOUSSA S H. Production of fungal chitosan from date wastes and its application as a biopreservative for minced meat [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2014, 69:471–475. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2014.05.072.
- [47] 苏庆华. 真菌作为生物医学材料的应用——以灵芝子实体 SACCHACHITIN 为例的研发过程 [J]. 食药菌, 2014, 22 (1):9–13.
- SU Q H. Application of mushrooms on biomedical materials—R&D process of SACCHACHITIN [J]. *Edible and Medicinal Mushrooms*, 2014, 22 (1):9–13.
- [48] GÜZEL M, AKPINAR Ö. Production and characterization of bacterial cellulose from bitrus peels [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2019, 10 (8):2165–2175. DOI:10.1007/s12649-018-0241-x.
- [49] SINGH R S, KAUR N, RANA V, KENNEDY J F. Pullulan: A novel molecule for biomedical applications [J]. *Carbohydr Polymers*, 2017:102–121. DOI:10.1016/j.carbpol.2017.04.089.
- [50] SINGH R S, KAUR N, KENNEDY J F. Pullulan production from agro-industrial waste and its applications in food industry: A review [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2019, 217:46–57. DOI:10.1016/j.carbpol.2019.04.050.
- [51] WANG B, XIONG W, YU J, MANESS P C, MELDRUM D R. Unlocking the photobiological conversion of CO<sub>2</sub> to (R)-3-hydroxybutyrate in cyanobacteria [J]. *Green Chemistry*, 2018, 20:3772–3782. DOI:10.1039/C8GC01208C.
- [52] CHOI S Y, PARK S J, KIM W J, YANG J E, LEE H, SHIN J, LEE S Y. One-step fermentative production of poly (lactate-co-glycolate) from carbohydrates in *Escherichia coli* [J]. *Nature Biotechnology*, 2016, 34 (4):435–440. DOI:10.1038/nbt.3485.
- [53] NDUKO J M, MATSUMOTO K, OOI T, TAGUCHI S. Enhanced production of poly (lactate-co-3-hydroxybutyrate) from xylose in engineered *Escherichia coli* overexpressing a galactitol transporter [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, 98 (6):2453–2460. DOI:10.1007/s00253-013-5401-0.
- [54] MATHEWS S L, PAWLAK J, GRUNDEN A M. Bacterial biodegradation and bioconversion of industrial lignocellulosic streams [J]. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2015, 99:2939–2954. DOI:10.1007/s00253-015-6471-y.
- [55] LI Z J, QIAO K, SHI W, PEREIRA B, ZHANG H, OLSEN B D, STEPHANOPOULOS G. Biosynthesis of poly (glycolate-co-lactate-

- co-3-hydroxybutyrate) from glucose by metabolically engineered *Escherichia coli* [J]. *Metabolic Engineering*, 2016, 35:1-8. DOI:10.1016/j.ymben.2016.01.004.
- [56] SAMANTA A K, SENANI S, KOLTE A P, SRIDHAR M, SAMPATH K T, JAYAPAL N, DEVI A. Production and in vitro evaluation of xylooligosaccharides generated from corn cobs [J]. *Food & Bioprocess Processing*, 2012, 90 (3):466-474. DOI:10.1016/j.fbp.2011.11.001.
- [57] 王源. 酶工程技术在中药提取中的应用[J]. 山东中医杂志, 2015, 34 (8):614-617.  
WANG Y. Application of enzyme engineering technology in extraction of chinese medicine [J]. *Shandong Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2015, 34 (8):614-617.
- [58] 胡周月, 钱磊, 张志军, 张业尼. 漆酶在食品工业及其他领域上的应用进展[J]. 天津农学院学报, 2019, 26 (3):83-86. DOI:10.19640/j.cnki.jtau.2019.03.019.  
HU Z Y, QIAN L, ZHANG Z J, ZHANG Y N. Application progress of laccase in food industry and other fields [J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2019, 26 (3):83-86. DOI:10.19640/j.cnki.jtau.2019.03.019.
- [59] 阮栋, 刘建高, 陈伟, 王爽, 张亚男, 陈爱华, 夏伟光, 蒋守群, 卢立志, 郑春田. 发酵饲料对蛋鸭产蛋性能、蛋品质、肠道消化酶活性及免疫功能的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31 (12):5740-5749. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2019.12.040.  
RUAN D, LIU J G, CHEN W, WANG S, ZHANG Y N, CHEN A H, XIA W G, JIANG S Q, LU L Z, ZHENG C T. Effects of fermented feed on laying performance, egg quality, intestinal digestive enzyme activities and immune function of laying ducks [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31 (12):5740-5749. DOI:10.3969/j.issn.1006-267x.2019.12.040.
- [60] 俞文靓, 王超, 易显凤, 林波, 庞天德, 黄志朝等. 用体外发酵法评价亚热带几种常用反刍动物饲料的营养价值[J]. 中国畜牧兽医, 2019, 46 (12):3530-3537. DOI:10.16431/j.cnki.1671-7236.2019.12.009.  
YU W L, WANG C, YI X F, LIN B, PANG T D, HUANG Z C. Evaluation of nutritional value of various common ruminant feeds in subtropical by *in vitro* fermentation [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2019, 46 (12):3530-3537. DOI:10.16431/j.cnki.1671-7236.2019.12.009.
- [61] 张佳, 姬胜利, 王凤山. 木聚糖及多硫酸化木聚糖生物活性研究进展[J]. 中国生化药物杂志, 2011, 32 (2):162-164.  
ZHANG J, JI S L, WANG F S. Research advances in bioactivity of xylan and xylan polysulfate [J]. *Chinese Journal of Biochemical Pharmaceutics nimal Nutrition*, 2011, 32 (2):162-164.
- [62] 鲁飞飞, 方兆华. 食用菌的皮肤护理功效以及在化妆品中的应用[J]. 日用化学品科学, 2013, 36 (8):31-35. DOI:10.13222/j.cnki.dc.2013.08.010.  
LU F F, FANG Z H. Effects of edible mushrooms in skin care and application in cosmetics [J]. *Detergent & Cosmetics*, 2013, 36 (8):31-35. DOI:10.13222/j.cnki.dc.2013.08.010.
- [63] BIDDY M J. Adding Value to the Biorefinery with Lignin: An Engineer's Perspective [M] // *Lignin Valorization: Emerging Approaches*. RSC Energy and Environment Series. 2018:499-518. DOI:10.1039/9781788010351-00499.
- [64] SHUAI L, AMIRI M T, QUESTELL-SANTIAGO Y M, HÉROGUEL F, LI Y, KIM H, MEILAN R, CHAPPLE C, RALPH J, LUTERBACHER J S. Formaldehyde stabilization facilitates lignin monomer production during biomass depolymerization [J]. *Science*, 2016, 354 (6310):329-333. DOI:10.1126/science.aaf7810.

(责任编辑 崔建勋)