



夏金楠, 接敬一, 苏婷, 等. 玉米芯木糖渣资源化利用技术现状分析[J]. 黑龙江农业科学, 2025(4):93-99.

玉米芯木糖渣资源化利用技术现状分析

夏金楠¹, 接敬一¹, 苏婷¹, 俞佳秀¹, 陈琢¹, 毕少杰^{1,2}, 王彦杰^{1,2}

(1. 黑龙江八一农垦大学 生命科学技术学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 黑龙江省寒区环境微生物与农业废弃物资源化利用重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: 为了提升木质纤维资源废弃物的综合利用效率并缓解环境压力, 系统分析了玉米芯木糖渣的资源化利用潜力及其技术路径。随着我国木糖产业的快速发展, 玉米芯木糖渣的生成量增加, 传统处理方式对环境造成潜在危害。玉米芯木糖渣主要成分为纤维素、半纤维素和木质素, 具有高纤维素含量和良好的物理特性, 使其在生物能源、材料及肥料等领域应用广泛。同时系统分析了玉米芯木糖渣的化学成分、功能特性及其资源化利用技术现状, 包括生物发酵、能源化利用、材料化利用、肥料化利用及基质化利用等多个方向。尽管存在成分复杂性和酶制剂成本高等技术挑战, 但通过技术创新和工艺优化, 木糖渣资源化利用具有广阔的应用前景。未来, 随着政策支持与市场需求的不断增长, 有望推动该领域的技术创新与发展, 为农业可持续发展和生态环境保护提供新的解决方案。

关键词: 玉米芯; 木糖渣; 堆肥; 发酵; 资源化利用

近年来, 玉米作为我国主要粮食作物种植面积逐年扩大。国家统计局数据显示, 自 2021 年以来, 我国玉米年产量已超过 2.73 亿 t, 副产物玉米芯约 4 500 万 t^[1]。玉米芯作为重要的工业原料, 主要用于生产木糖、木糖醇和糠醛等产品, 推动了我国木糖产业的快速发展。然而, 在这一过程中, 每生产 1 t 木糖就会产生约 5 t 的木糖渣, 其中含有大量难溶的木质素^[2]。传统处理方式, 如垃圾填埋和燃烧, 不仅浪费资源, 还对环境造成潜在危害。

随着全球资源短缺和环境问题日益严重, 如何高效利用农林废弃物资源已成为生物质研究领域的一个重要课题。玉米芯木糖渣作为木糖生产过程中的主要副产物, 具有产量大、可再生性强、成本低等特点, 是一种极具开发潜力的生物质资源^[3-4]。据统计, 我国每年产生的木糖渣总量已超过 1 000 万 t^[5], 若能得到有效利用, 不仅能够缓解环境压力, 还可以创造显著的经济效益和社会效益。

从化学成分来看, 玉米芯木糖渣主要包含纤维素、半纤维素和木质素等组分, 其中纤维素含量高达 40%~50%, 具有较高的资源化利用价值^[5]。然而, 木质素与纤维素、半纤维素之间形成的复杂交联结构, 使得木糖渣在资源化利用过程

中面临诸多技术挑战^[6]。目前, 国内外学者围绕木糖渣的资源化利用已开展了大量研究工作, 主要包括生物发酵、能源化利用、材料化利用、肥料化利用等多个方向。

在生物发酵领域, 木糖渣可作为底物用于生产纤维素酶、乙醇、L-乳酸等高附加值产品^[7-8]; 在能源化利用方面, 通过热解、气化等技术可将木糖渣转化为生物炭、合成气等可再生能源^[9]; 在材料化利用中, 木糖渣可用于制备吸附材料等功能材料^[10-11]; 在肥料化利用方面, 经过堆肥处理的木糖渣可作为优质有机肥料和土壤改良剂^[12]; 此外, 木糖渣还可作为食用菌栽培基质^[13], 在农业生产中发挥重要作用。

尽管木糖渣资源化利用技术取得了显著进展, 但仍面临诸多挑战: 首先, 木糖渣成分复杂, 木质素的存在限制了酶解效率, 亟需开发高效的预处理技术; 其次, 酶解和发酵过程中的酶制剂成本较高, 制约了其规模化应用; 再次, 不同利用途径间的技术协同性有待加强, 需要开发多联产工艺以提高资源利用效率。未来, 随着国家对生物质资源利用的重视程度不断提高, 以及相关技术的持续创新, 木糖渣资源化利用将迎来更广阔的发展空间。本文旨在系统梳理玉米芯木糖渣的成分组成与功能特性, 深入分析其资源化利用技术现

收稿日期: 2025-01-13

基金项目: 黑龙江八一农垦大学创新创业项目(202410223021); 黑龙江八一农垦大学学成、引进人才科研启动计划(XYB202022)。

第一作者: 夏金楠(2003-), 女, 本科生, 专业方向为生物技术。E-mail: 460225444@qq.com。

通信作者: 毕少杰(1990-), 男, 博士, 副教授, 硕导, 从事农业废弃物资源化利用研究。E-mail: bishaojie1990@163.com。

状,探讨未来发展方向,为推进木糖渣的高效利用提供理论基础和技术参考。

1 玉米芯木糖渣的成分组成与功能特性

1.1 成分组成

玉米芯木糖渣是以玉米芯等农林废弃物为原料,通过酸水解提取木糖后所产生的固体残留物,具有复杂的化学成分和独特的理化性质。

1.1.1 主要化学成分 玉米芯木糖渣的主要化学成分包括纤维素、半纤维素和木质素,其含量因原料来源、提取工艺等因素而有所差异。根据现有研究,其纤维素含量一般在40%~50%之间,以结晶态为主,具有较高的热稳定性;半纤维素含量约为20%~30%,主要由木聚糖组成;木质素含量在15%~25%之间,作为天然高分子屏障,限制了纤维素酶与底物的接触,是影响资源化利用的主要障碍因素^[6,14-16]。

不同学者对玉米芯木糖渣的化学成分进行了深入研究。赵哲卫^[5]分析发现,木糖渣中纤维素、半纤维素和木质素的含量分别为45.2%、22.8%和17.5%。张焕^[14]的研究则表明,经过酸水解处理后,木糖渣的纤维素含量可达48.3%,半纤维素含量降低至18.6%,木质素含量保持在19.2%。吕江涛^[15]的研究进一步证实,木糖渣的化学成分会因预处理方法的不同而发生变化,例如,处理前纤维素含量为50%,木质素含量为30%,经过氢氧化钠预处理后,木质素提取率最高可达到93.2%。

1.1.2 有机成分 除主要化学成分外,玉米芯木糖渣还含有多种有机成分,包括(1)可溶性碳水化合物:含量约为3%~5%,主要为未完全水解的阿拉伯糖和葡萄糖^[5];(2)粗蛋白:含量较低,一般在1%~2%之间^[14];(3)粗纤维:含量约为15%~20%,主要包括不溶性多糖^[15];(4)多缩戊糖:含量约为5%~8%,主要为木糖残基^[15]。

1.1.3 无机成分 玉米芯木糖渣中的无机成分主要包括(1)矿物质:含量约为2%~3%,主要有硅、钙、镁等元素^[14];(2)氮、磷、钾:含量较低,分别为0.3%~0.5%、0.1%~0.2%和0.2%~0.4%^[5]。

1.1.4 其他成分 (1)酸性残留物:由于酸水解工艺的影响,木糖渣中常含有少量酸性残留物,pH在2~4之间^[14];(2)水分:新鲜木糖渣的水分含量可达60%~70%^[15]。

1.2 功能特性

1.2.1 物理特性 玉米芯木糖渣的物理特性对

其资源化利用具有重要影响。首先,由于其酸性特征(pH2~4),在使用前需要进行中和处理。其次,木糖渣具有较高的持水率(可达80%以上),这可能导致堆肥或发酵过程中通气性差。在颗粒形态上,木糖渣质地细碎、粒径分布不均,表面多孔隙结构有利于吸附和微生物附着,但也易导致致密堆积,需通过物理预处理(如粉碎、筛分)来改善流动性^[14]。

热重分析结果显示,木糖渣在200℃以下主要为水分挥发,而在300~500℃时,纤维素和半纤维素开始分解,木质素则在更高温度下缓慢分解^[15]。

1.2.2 结构与功能特性 未经预处理的木糖渣纤维素结晶度较高(约72.5%),通过化学或物理预处理(如氢氧化钠处理、超声波破碎)可以显著降低结晶度(至40%以下),提升酶解效率^[15]。其中,物理处理具有绿色无污染的优点,但对温度和压强要求较高;化学预处理虽然效果显著,但成本较高且可能产生二次污染^[16-17]。

木糖渣的疏水基团赋予其良好的吸附能力,可用于吸附重金属离子和有机污染物,改性后吸附容量可提升3~5倍。其碳含量高(约45%~50%),经热解可转化为生物炭,比表面积可达800 m²·g⁻¹以上,适用于超级电容器或锂硫电池电极材料。当玉米芯木糖渣作为一种生物质废弃物转化为生物炭用于超级电容器,不仅实现了废弃物资源化利用,而且降低了对传统电极材料的依赖,符合可持续性发展的要求^[18]。

1.2.3 生物降解特性 由于木糖渣复杂的结构,其自然降解速率较慢,需要借助微生物或酶解处理来加速降解^[19]。酸性环境会抑制多数微生物活性,因此需选择耐酸菌株或调节pH以优化发酵条件^[20]。此外,纤维素酶对木糖渣的水解效率受到木质素屏障的限制,通过优化酶系配比或采用分段糖化工艺,可以显著提高糖的转化率。经过预处理后的玉米芯生物质,其纤维素结晶度的变化对后续的酶解效率有显著影响。结晶度的降低有助于提高酶解效率,但要避免过度降解导致糖类流失^[21]。

木糖渣的化学成分、物理结构及功能特性为其资源化利用提供了技术基础。其高纤维素含量和良好的吸附性能使其在生物能源和功能材料开发中具有广阔的前景。然而,其酸性、高结晶度和木质素屏障等特性也造成了木糖渣资源化利用的技术瓶颈。

2 玉米芯木糖渣的资源化利用

玉米芯木糖渣富含纤维素(约 40%~50%)、半纤维素(约 20%~30%)和木质素(约 15%~25%),具有较高的资源化潜力。现阶段木糖渣资源化利用技术主要包括生物发酵技术、能源化利用、材料化利用、肥料化利用和基质化利用等。

2.1 生物发酵技术

2.1.1 发酵产纤维素酶 利用长梗木霉等菌株对木糖渣进行固体发酵,可生产纤维素酶,同时发酵残渣可作为有机肥料,用于农作物生长。通过纤维素酶将木糖渣中的纤维素和半纤维素水解为可发酵糖,进而用于生产乙醇、乳酸等化学品。固态发酵技术因其低成本、高底物利用率和环境友好性,已成为木糖渣转化的重要研究方向,尤其在纤维素酶生产领域展现出明显潜力。通过合理选择微生物菌株、优化培养基与发酵条件,以及创新工艺流程,研究者在提高酶活性和产量方面取得了一系列进展。研究表明^[22],里氏木霉作为一种高效的纤维素酶生产菌株,在木糖渣的固态发酵中表现出优异的性能。赵哲卫^[5]通过系统研究证实,以木糖渣为底物的固态发酵过程中,里氏木霉能够有效利用其中的纤维素成分进行产酶。通过优化培养基配方,包括调整木糖渣与麸皮的比例、添加适宜的无机盐和微量元素,使纤维素酶的活性和产量得到显著提升。通过高产菌株筛选、基因工程改造和复合菌种协同作用,可以显著提升纤维素酶的生产效率^[23]。此外,营养强化、物理化学参数调控及酶活促进剂的应用也为酶解效率的提升提供了有效的策略。适量添加氮源(如硫酸铵)、磷源(如磷酸二氢钾)和微量元素(如 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等),能够显著促进微生物的生长和酶的分泌。同时,添加表面活性剂等酶活促进剂,可有效降低酶与底物间的抑制作用,提高酶解效率^[24]。分段发酵与补料策略的实施、残渣循环利用的探索,以及双酶共固定化技术的应用,进一步推动了固态发酵技术在规模化生产中的可行性,实现了资源的高效利用。吴绵斌等^[19]的研究表明,黑曲霉和产朊假丝酵母在固态发酵中表现出良好的协同效应。在优化条件下(培养温度 32℃,料层厚度 10 cm),纤维素降解率达到 67.7%,真蛋白增加量达 6.22%,干基中蛋白质含量从 3.56% 显著提升至 20.02%。尽管如此,木质素的残留以及酶系协同性不足仍然是当前技术应用中的主要挑战。未来的研究应聚焦于开发高效的预处

理-发酵耦合工艺、智能化发酵工艺的应用,以及全组分利用策略^[25]。

2.1.2 发酵产乙醇 乙醇发酵技术是一种利用微生物将玉米芯木糖渣中的糖分转化为乙醇的生物转化过程。该技术首先需要对玉米芯木糖渣进行预处理,以破坏其细胞壁结构,提高可发酵糖的释放效率。预处理后,采用酶解或酸解的方法将多糖转化为单糖,然后加入特定的酵母菌进行发酵。在适宜的温度和 pH 条件下,酵母菌能够高效地将释放的单糖转化为乙醇和二氧化碳。因生物乙醇具有良好的清洁性、高效率 and 可再生性等优点,所以将木糖渣作为生物能源的主要研究目标。研究表明,通过优化发酵条件、选择适宜的酵母菌株以及提高原料的糖化率,可以显著提高乙醇的产量和发酵效率。此外,玉米芯木糖渣作为生物质原料,其丰富的纤维素和木糖成分为乙醇生产提供了良好的基础,能够有效实现资源的循环利用。李秋园等^[20]在 pH5.0、温度 32~34℃ 的培养条件下,将 10% 酶解液与木糖渣反应 36 h 后,按酒精体积分数推算出 398 t 木糖渣可生产 1 t 的成品酒精。周天^[26]在 NaOH 预处理的条件下脱除了木糖渣中的木质素,随后在 140℃、15% 酶解液的条件反应 1.5 h,最终得到乙醇 16.3 g·L⁻¹,并提高了乙醇的质量。然而,乙醇发酵过程中仍然面临着酵母耐受性、发酵时间和成本等挑战,因此,未来的研究应集中于改进发酵工艺、开发耐高糖和耐高乙醇的酵母菌株,以及提高整个生产流程的经济性,以推动该技术的工业化应用和可持续发展。

2.1.3 发酵产 L-乳酸 目前,针对木糖渣发酵生产 L-乳酸的技术研究已引起广泛关注。凝结芽孢杆菌 ZX25 因其耐高温(50~55℃)及广谱底物利用特性,成为木糖渣酶解液发酵生产 L-乳酸的理想菌株。孙甜甜^[27]通过系统优化发酵条件(pH6.0、温度 50℃、CaCO₃ 作为中和剂),实现了 L-乳酸产率达 90% 以上,且光学纯度高达 99%,充分证明了该技术的可行性和有效性。这一研究为木糖渣的高值化利用提供了重要理论依据。为进一步提升发酵效率,研究者开发了分段发酵策略,即在发酵初期采用好氧条件促进菌体生长,随后转为厌氧条件以加速乳酸积累。实验表明,该策略可使菌体密度提高约 30%,乳酸积累速率提升 25%。此外,添加微量氮源(如豆饼粉)也被证实能够显著增强菌株代谢活性,使发酵

周期缩短 15%~20%，同时乳酸产量提高 10%~15%^[5]。从经济性角度来看，得益于木糖渣来源广泛、价格低廉，利用木糖渣发酵生产 L-乳酸的原料成本较传统玉米淀粉降低 30%~40%，展现出显著的竞争优势^[28]，同时为木糖渣的资源化利用提供了新的途径。

2.2 能源化利用

玉米芯木糖渣作为富含纤维素和半纤维素的生物质资源，可通过热解、厌氧消化等技术转化为高附加值的生物质能源，如生物炭和沼气等，在发电、及化学品生产等领域具有广阔的应用前景。这些技术不仅实现了废弃物的资源化利用，还为可再生能源的开发提供了可行途径。

2.2.1 热解技术 热解过程在无氧条件下将玉米芯木糖渣加热至 300~700℃，从而分解为固体、液体和气体产品。热解技术能够高效地将木糖渣转化为具有高附加值的能源产品。其中，生物炭因其优异的电化学性能和土壤改良潜力而备受关注。生物炭的电化学性能主要取决于其比表面积、孔隙结构和表面化学性质。比表面积越大、孔隙结构越发达，生物炭在超级电容器中的电容性能通常越优异。万圆^[29]以木糖渣为原料，通过优化热解温度和活化试剂(KOH)的用量，制备了具有发达孔隙结构的生物炭。结果表明，随着温度从 650℃ 升高至 850℃，KOH 对木糖渣生物炭的造孔能力显著增强，制备的生物炭比表面积提高 2.3 倍，总孔体积提高 2.5 倍。此外，生物炭在碱性电解液中展现出优异的电容特性，在 0.5 A·g⁻¹ 的充放电条件下，其比电容值达到 221 F·g⁻¹，是商业活性炭的 1.24 倍。这一研究证实了玉米芯木糖渣生物炭在替代高成本商业活性炭作为储能材料方面具有巨大潜力，为木糖渣的高值化利用提供了重要依据。

2.2.2 沼气生产 玉米芯木糖渣的厌氧发酵技术是一种高效、环保的生物质能源转化方法，通过厌氧微生物在缺氧环境中的代谢作用，将玉米芯木糖渣转化为沼气能源。该技术不仅实现了废弃物的资源化利用，还在减少温室气体排放和促进可持续发展方面具有显著优势。厌氧发酵技术主要包括原料预处理、厌氧消化和沼气收集三个关键步骤。首先，通过粉碎和预处理(如酶解、化学处理等)破坏玉米芯木糖渣的复杂木质纤维素结构，提高其可降解性。随后，将预处理后的原料置于厌氧发酵罐中，在适宜的温度(通常为 35~

37℃)和 pH(6.5~7.5)条件下，利用厌氧细菌进行发酵。发酵过程中，微生物群落依次通过水解、酸化、乙酸化和甲烷化四个阶段，最终将有机物转化为沼气。

近年来，研究者通过优化预处理和发酵条件，显著提升了玉米芯木糖渣的沼气生产效率。李秋园^[30]的研究表明，经过纤维素酶预处理的木糖渣在为期 20 d 的厌氧发酵试验中，产气量达到未经预处理组的 2.34 倍。通过系统优化，确定了最佳预处理条件为酶用量 10 FPU·g⁻¹、温度 50℃、时间 24 h；最佳发酵条件为温度 37℃、时间 20 d、pH6.5。此外，韩晓云等^[31]通过构建复合菌剂对玉米芯进行降解，发现其纤维素降解率可达 55.63%，显著高于传统方法。这些研究为玉米芯木糖渣的高效沼气化利用提供了重要理论依据。

然而，该技术仍面临一些挑战，包括玉米芯木糖渣的复杂结构限制了微生物的降解效率^[19]；发酵过程中微生物群落的稳定性易受环境因素影响；规模化生产的经济性和工艺稳定性仍需进一步提升^[32]。因此，未来应加强对微生物的筛选与培养、发酵过程的优化，以及系统规模化运营等方面的深入研究，以提高该技术的应用潜力。

2.3 制备吸附材料

玉米芯木糖渣中的纤维素和木质素可用于制备吸附材料，从而实现污水中重金属离子的有效吸附。木糖渣被视为制备活性炭的优良原料，已有研究采用真空化学活化法及多种化学活化方法(如磷酸法和氯化锌法等)对其进行活化以制备活性炭。磷酸活化法因其低成本和较小的污染，成为当前制备活性炭的主要方法^[10]。例如，魏庆玲等^[33]以木糖渣为原料，采用氯化锌法进行活化，成功制备出具有高效吸附糠醛废水能力的活性炭，并探索了最佳制备条件，以实现最大的吸附性能。这一过程不仅降低了木糖的生产成本，还对环境保护起到了积极作用。此外，朱锦明^[34]以木糖渣为基础原料，分别用硫酸和 ZSM-5 型分子筛作为催化剂进行纤维素的转化，结果显示硫酸催化的最高纤维素转化率为 35.97%，而 ZSM-5 型分子筛催化的最高转化率为 27.61%，为化学工业的绿色发展提供了新的方向。兰刻勤等^[35]则采用由低分子量有机溶剂和无机盐组成的盐析萃取体系，从模拟液及木糖渣催化反应液中有效萃取和回收乙酰丙酸，结果表明在木糖渣反应液中，乙酰丙酸的回收率可达 80%。

2.4 肥料化利用

玉米芯木糖渣经过发酵或堆肥处理后,可作为有机肥料,用于改善土壤结构并提高土壤肥力。堆肥化技术通过将玉米芯木糖渣与其他有机废弃物(如农作物残渣、动物粪便等)混合,并创造适宜的氧气、温度和湿度条件,利用自然界中的微生物进行分解和转化,最终形成富含养分的堆肥。这一过程不仅改善了土壤结构,提高了土壤肥力,还有效减少了有机废弃物的体积。栗利娟^[12]研究发现,采用鸡粪与木糖渣按1:1比例混合,在发酵罐和混合条堆两步法进行堆肥化试验,首先进行纯鸡粪罐式堆肥,然后再混合木糖渣进行二次堆肥。虽然小型天然堆的温度相对较低且不易稳定,平均温度维持在 $62\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。但二次堆肥后温度在3d内可升高至 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。同时添加木糖渣后,较低的pH有助于稳定氨的存在,从而使电导率上升,表明木糖渣在固定氮元素方面发挥了作用,并提高了堆肥中的氮含量,微生物组成和功能得以转变,优良微生物得到了有效筛选,耐药微生物的存在减少,实现了畜禽废弃物的无害化、绿色化和资源化。

此外,木糖渣的分解过程中会释放出有机酸和其他生物活性物质,这些物质可以促进植物的营养吸收,提高光合作用的效率,进而增强植物的生长和产量。研究表明,施用玉米芯木糖渣的土壤中,作物的生长高度、叶片数和果实产量普遍高于未施用组^[5]。尽管现有研究已证实了玉米芯木糖渣对植物生长的积极作用,但仍需开展更多的系统性试验,探索其在不同植物品种、土壤类型和施用量条件下的具体效果,以全面评估其在农业可持续发展中的应用潜力。

总体而言,利用好氧堆肥技术生成有机肥料不仅有助于实现玉米芯木糖渣的资源化利用,减少环境污染,还能提升土壤的可持续生产能力,为农业的绿色发展提供支持。未来的研究仍需关注堆肥化与微生物应用过程中的优化与标准化,以确保肥料化产品的安全性和有效性。

2.5 基质化利用

玉米芯木糖渣作为食用菌的栽培基质,表现出良好的通透性和较强的持水能力,因而适合菌类的生长。此外,其低廉的成本使其成为一种理想的栽培原料^[13]。已有研究表明,利用木糖渣作为食用菌栽培基质进行规模化生产,能实现高产量和良好的经济收益^[36]。随着棉花栽培面积的

减少,过去用于食用菌栽培的主要原料棉籽壳价格逐年上涨,从而导致栽培成本增加、效益降低。为此,史秀丽等^[37]开始尝试用玉米芯木糖渣替代棉籽壳作为平菇和金针菇的栽培基质,并已取得成功,这一转变有效降低了食用菌的栽培成本,显著提高了经济效益。此外,赵淑芳等^[38]研究表明,使用玉米芯木糖渣作为平菇的栽培基质,与棉籽壳相比,成本降低了40%,而平菇产量却提升了10%以上。赵文慧等^[39]进一步探讨了玉米芯木糖渣的应用,研究中通过添加适当配比的辅料并采用双菌种方法进行固态发酵,结果表明发酵后产物的蛋白质含量增加了6.2%,且培养基中的蛋白含量提高了4.6倍,显示出木糖渣在蛋白饲料生产中的潜在应用价值。

3 总结与展望

玉米芯木糖渣作为一种富含纤维素、半纤维素和木质素的可再生生物质资源,具有显著的资源化利用潜力。本文系统梳理了木糖渣的化学成分、功能特性及其在生物发酵、能源化利用、材料化利用、肥料化利用和基质化利用等领域的技术现状,揭示了其在推动农业可持续发展和生态环境保护中的重要作用。

3.1 技术挑战与优化方向

尽管木糖渣的资源化利用技术已取得显著进展,但仍面临以下主要挑战:

(1)木糖渣中纤维素、半纤维素和木质素形成的复杂交联结构限制了酶解效率。特别是木质素作为天然屏障,阻碍了纤维素酶与底物的接触,降低了糖化效率。未来研究应着重开发高效的预处理技术,如低共熔溶剂预处理、酸碱耦合预处理等,以破坏木质素-纤维素复合结构,提升酶解效率。

(2)酶解和发酵过程中的酶制剂成本较高,成为限制木糖渣大规模应用的主要瓶颈。通过基因工程改造高效菌株、优化酶系配比,以及开发低成本酶制剂,可有效降低生产成本。

(3)单一利用途径难以实现木糖渣全组分的高效利用。未来的研究应聚焦于多联产工艺的开发,如“发酵-能源化”耦合工艺、“材料化-肥料化”协同利用技术等,以提高资源利用效率和经济效益。

(4)现有技术多处于实验室或中试阶段,规模化应用中仍存在工艺稳定性差、设备成本高等问题。通过优化工艺流程、开发智能化生产设备以

及建立标准化技术体系,可推动木糖渣资源化利用的工业化应用。

3.2 政策支持与市场前景

木糖渣资源化利用的发展潜力不仅取决于技术突破,还与政策支持和市场需求密切相关。随着国家对生物质资源利用和循环经济的重视,木糖渣资源化利用将获得更多的政策支持。例如,《“十四五”生物经济发展规划》明确提出要推动农林废弃物的高值化利用,为木糖渣资源化技术的研究与推广提供了政策保障。生物基材料、可再生能源和有机肥料的市场需求持续增长,为木糖渣资源化利用提供了广阔的市场空间。例如,生物乙醇、L-乳酸和生物炭等衍生品在能源、化工和农业领域的应用前景广阔,将进一步推动木糖渣资源化技术的商业化进程。木糖渣资源化利用不仅能够减少废弃物对环境的污染,还能通过替代化石资源降低温室气体排放,助力“双碳”目标的实现。其环境效益和社会效益将为其技术推广提供有力支撑。

3.3 未来研究方向

为充分挖掘木糖渣的资源化潜力,未来的研究可从以下几个方面展开。开发绿色、低成本的预处理技术,如生物预处理、物理-化学耦合预处理等,以提高木糖渣的可降解性和资源化效率。通过基因工程和代谢工程手段,选育高效的纤维素酶生产菌株和耐酸、耐高温的发酵菌株,提升酶解和发酵效率。开发“发酵-能源化-材料化”一体化工艺,实现木糖渣全组分的高效利用,提高资源利用率和经济效益。结合人工智能、大数据等技术,优化生产工艺,开发智能化生产设备,推动木糖渣资源化利用技术的规模化应用。建立木糖渣资源化利用的技术标准和应用规范,加强技术推广与示范,推动其在农业、能源和材料等领域的广泛应用。

总之,玉米芯木糖渣作为一种重要的生物质资源,其资源化利用技术在推动可持续发展和生态环境保护中具有重要价值。通过技术创新、政策支持和市场驱动,木糖渣资源化利用将迎来更广阔的发展前景,为农业绿色发展和生态文明建设提供有力支撑。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 2002 中国发展报告[M]. 北京:中国统计出版社,2002.
- [2] PANG B, SUN Z H, WANG L, et al. Improved value and

carbon footprint by complete utilization of corncob lignocellulose [J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 419: 129565.

- [3] 郭宗伟. 基于低共熔溶剂的木质纤维素预处理和分离转化的研究[D]. 北京:北京林业大学,2021.
- [4] 李涛,何松,林晓莹,等. 农林废弃生物质资源精深加工技术进展[J]. 材料导报,2021,35(19):19001-19014.
- [5] 赵哲卫. 木糖渣资源化利用研究[D]. 郑州:郑州大学,2016.
- [6] MA C Y, SUN Q, ZUO C, et al. Efficient fractionation and targeted valorization of industrial xylose residue by synergistic and mild alkaline deep eutectic solvent-hydrogen peroxide pretreatment [J]. Fuel Processing Technology, 2023, 241: 107591.
- [7] SHASHKOV A S, POTEKHINA N V, TUL'SKAYA E M, et al. New lactate- and pyruvate-containing polysaccharide and rhamnomannan with xylose residues from the cell wall of *Rathayibacter oskolensis* VKM Ac-2121^T [J]. Carbohydrate Research, 2024, 540: 109145.
- [8] MA Z, ZHANG J Y, LIN Y C, et al. Alcoholysis of High-Solid xylose residue for methyl levulinate preparation and its kinetics [J]. Bioresource Technology, 2025, 419: 132063.
- [9] NARISSETTY V, COX R, BOMMAREDDY R, et al. Valorisation of xylose to renewable fuels and chemicals, an essential step in augmenting the commercial viability of lignocellulosic biorefineries [J]. Sustainable Energy & Fuels, 2021, 6(1): 29-65.
- [10] 侯敏,邓先伦,朱光真,等. 磷酸活化碱木糖渣制备高吸附性能活性炭[J]. 林产化学与工业,2015,35(5):129-134.
- [11] ZHOU H, MAO Y R, ZHENG Y, et al. Complete conversion of xylose-extracted corncob residues to bioplastic in a green and low carbon footprint way [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 471: 144572.
- [12] 栗利娟. 整合宏组学方法分析工农业有机固废堆肥的无害化过程[D]. 济南:山东大学,2019.
- [13] 曹德宾. 菌糠循环利用[J]. 农业知识,2020(9):50-51.
- [14] 张焕. 玉米芯木糖渣来源的木质素绿色化利用研究[D]. 无锡:江南大学,2024.
- [15] 吕江涛. 木糖渣高值转化木质素、功能寡糖和微晶纤维素 [D]. 重庆:重庆三峡学院,2024.
- [16] MA C Y, XU L H, SUN Q, et al. Ultrafast alkaline deep eutectic solvent pretreatment for enhancing enzymatic saccharification and lignin fractionation from industrial xylose residue [J]. Bioresource Technology, 2022, 352: 127065.
- [17] 侯昕彤,李再兴,姚宗路,等. 深度共熔溶剂预处理木质纤维素研究进展[J]. 科学通报,2022,67(23):2736-2748.
- [18] 宋晓琪,雷西萍,樊凯,等. 基于生物质衍生炭在超级电容器中的研究进展 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(3): 1328-1339.
- [19] 吴绵斌,刘黎黎,夏黎明. 双菌种固态发酵木糖渣生产饲料蛋白[J]. 粮食与饲料工业,2002(5):26-28.
- [20] 李秋园,胡彩静,刘建军,等. 利用木糖渣生产酒精的研究 [J]. 食品与发酵工业,2003,29(5):74-76.

- [21] 柳静,王昌梅,赵兴玲,等.氯化胆碱类低共熔溶剂对木质纤维素分离及其利用的研究进展[J].中国农学通报,2023(33):156-164.
- [22] ZHANG Z, XING J, LI X Z, et al. Review of research progress on the production of cellulase from filamentous fungi[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 277: 134539.
- [23] MENG Q S, ABRAHAM B, HU J G, et al. Cutting-edge advances in strain and process engineering for boosting cellulase production in *Trichoderma reesei* [J]. Bioresource Technology, 2025, 419: 132015.
- [24] 赵文慧. 固态发酵生产纤维素酶及纤维原料酶法糖化的研究[D]. 杭州:浙江大学,2002.
- [25] 汤金婷,董玲玲,李志军,等. 木质纤维素酶解糖化发酵研究[J]. 酿酒科技,2009(3):125-128.
- [26] 周天. 木糖渣中的纤维素转化为生物乙醇和 HMF 的研究[D]. 北京:北京林业大学,2017.
- [27] 孙甜甜. 木糖渣酶水解及 L-乳酸发酵的研究[D]. 郑州:郑州大学,2011.
- [28] 王丽红. 木糖渣生物转化产乳酸的初步研究[J]. 唐山师范学院学报,2010,32(5):4-7.
- [29] 万圆. 以木糖渣为原料的生物炭制备及其电化学和吸附性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018.
- [30] 李秋园. 纤维素酶预处理对木糖渣沼气发酵性能的影响[J]. 中国沼气,2018,36(4):18-22.
- [31] 韩晓云,胡长林,许可,等. 玉米芯降解复合菌剂的构建及其发酵效果初探[J]. 中国农学通报,2022,38(20):20-28.
- [32] XU N, LIU S X, XIN F X, et al. Biomethane production from lignocellulose: biomass recalcitrance and its impacts on anaerobic digestion[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2019, 7: 191.
- [33] 魏庆玲,李洪,高鹏. 氯化锌活化木糖渣制活性炭及应用研究[J]. 广东化工,2015,42(22):34-35.
- [34] 朱锦明. 纤维素原料高温催化降解产乙酰丙酸的研究[J]. 宁夏农林科技,2012,53(5):108-109.
- [35] 兰刻勤,许曙光,周翠清,等. 盐析萃取模拟液和木糖渣反应液中的乙酰丙酸[J]. 化学研究与应用,2019,31(6):1155-1161.
- [36] 张书良,王萍,姜海波,等. 木糖渣栽培食用菌成特色产业[J]. 农业知识,2017(5):38-39.
- [37] 史秀丽,徐海娜. 木糖渣栽培平菇试验[J]. 食用菌,2005,27(3):25-26.
- [38] 赵淑芳,孙振福,高霞. 利用木糖渣栽培平菇新技术[J]. 西北园艺(蔬菜),2015(3):30-32.
- [39] 赵文慧,吴绵斌,刘黎黎,等. 双菌种固态发酵木糖渣生产饲料蛋白[J]. 饲料工业,2002,23(2):12-13.

Analysis of Current Status of Resource Utilization Technologies for Corncob Xylose Residue

XIA Jinnan¹, JIE Jingyi¹, SU Ting¹, YU Jiaxiu¹, CHEN Zhuo¹, BI Shaojie^{1,2}, WANG Yanjie^{1,2}

(1. College of Life Science and Biotechnology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Environmental Microbiology and Recycling of Agro-waste in Cold Region, Daqing 163319, China)

Abstract: In order to improve the comprehensive utilization efficiency of wood fiber resource waste and alleviate the environmental pressure, this study systematically analyzed the resource utilization potential of corncob xylose residue and its technical path. With the rapid development of China's xylose industry, the amount of corncob xylose residue has increased, and the traditional treatment method has caused potential harm to the environment. Corncob xylose residue is mainly composed of cellulose, hemicellulose and lignin, which has high cellulose content and good physical properties, making it widely used in bio-energy, materials and fertilizers. The chemical composition, functional characteristics and resource utilization technology of corncob xylose residue were systematically analyzed, including biological fermentation, energy utilization, material utilization, fertilizer utilization and substrate utilization. Despite the technical challenges of composition complexity and high enzyme preparation cost, the utilization of xylose residue resources has broad application prospects through technological innovation and process optimization. In the future, with the growth of policy support and market demand, it is expected to promote technological innovation and development in this field, and provide new solutions for sustainable agricultural development and ecological environmental protection.

Keywords: corncob; xylose residue; composting; fermentation; resource utilization