

农作物秸秆废弃物预处理技术研究进展

李岩 刘明源 马永刚 沙赞颖

泰州职业技术学院, 江苏 泰州 225300

摘要: 农作物秸秆废弃物作为农业生产的副产物, 其合理利用对于环境保护和资源循环利用具有重要意义。预处理技术作为秸秆资源化利用的关键环节, 近年来取得了显著进展。本文综述了秸秆预处理技术的分类、研究现状及发展趋势, 重点探讨了物理、化学、生物及联合预处理技术的优缺点及应用前景, 旨在为秸秆废弃物的高效利用提供理论支持和技术参考。

关键词: 农作物秸秆; 废弃物预处理; 资源化利用; 技术进展

DOI: 10.63887/fns.2025.1.2.14

1 概述

农作物秸秆作为农作物收获后遗留的产物, 其纤维素含量颇高, 常见的秸秆类型包括玉米秸秆、小麦秸秆、水稻秸秆以及棉花秸秆等[1]。作为重要的生物质原料, 对农作物秸秆资源进行合理且高效的利用, 这一举措不仅与国民经济的可持续发展紧密相连, 更对我国的战略转型有着不容忽视的重要意义。农作物秸秆是天然高分子化合物, 主要由纤维素、半纤维素和木质素构成, 还含少量灰分与抽提物。纤维素经纤维素酶催化水解成葡萄糖, 再经发酵可制乳酸、乙醇等生物基产品; 半纤维素在半纤维素酶作用下转化为单糖及低聚糖, 进而合成木糖醇、有机酸等工业原料; 木质素经化学方法能制备草酸、抗氧化剂等。因此, 对农作物秸秆组分进行定向转化与综合利用, 对缓解资源短缺和改善生态环境意义重大。

在秸秆资源化利用领域, 欧美等农业发达国家主要采用秸秆直接还田、过腹还田(通过牲畜养殖转化为厩肥还田)等循环利用模式。经过长期实践, 这些国家建立了“秸秆直接还田—厩肥—化肥”协同的“三合制”施肥体系, 其中秸秆还田与厩肥在施肥结构中的占比达 2/3, 化肥仅占 1/3。而在我国, 当前施肥

结构仍以化肥投入为主导, 与发达国家形成显著差异。在欧美国家秸秆资源利用体系里, 约 2/3 秸秆直接还田补充土壤有机质, 近 1/5 作饲料后以厩肥还田, 约 13% 用于能源化或原料化利用。如美国, 年秸秆产量 4.5 亿吨, 占有有机废弃物 70.4%, 秸秆还田量占年产量 68%^[2]。英国秸秆还田率常年维持在 73% 上下, 主要用于增加土壤有机质。韩国凭借家庭式畜牧养殖模式, 达成稻麦秸秆全量化利用, 近 20% 直接还田循环利用, 80% 用作畜禽养殖饲料。日本年秸秆产量稳定于 2150 万吨左右, 超 2/3 直接还田以提升耕地肥力, 约 1/5 用于牛饲料与养殖垫料, 水稻秸秆还田率超 68%。不仅如此, 部分国家将秸秆用于发电、制取燃气、产油、生成乙醇等, 构建多元综合利用体系。

国内利用秸秆的模式可分为还田利用和新型循环利用两种, 其中后者发展迅速, 多用于秸秆沼气集中供气、秸秆热解气化、秸秆固体成型燃烧和秸秆液化等方面。依据 2020 年 6 月 9 日国家生态环境部、国家统计局与农业农村部联合发布的《第二次全国污染源普查公报》^[3], 2017 年我国种植业秸秆产出 8.05 亿吨, 可回收资源化 6.74 亿吨, 实际综合利用 5.85 亿吨, 综合利用率达 86.8%。其中, 能源化利用占 8.3%, 利用量 5607.8 万吨。截至 2

022 年, 秸秆综合利用能力提升工程建成众多示范县与基地, 全国秸秆综合利用率多年稳定在 86% 以上, 形成特色技术模式与产业体系。除上述市场需求外, 国家财政对于秸秆利用也有较大投入, 从 2016 年到 2022 年, 共计投入中央财政资金 140.5 亿元, 支持全国各地重点县整体推进秸秆利用。与此同时, 环境方面也带来了新的问题, 要推动秸秆综合利用, 促进农业农村绿色发展。

2 农作物秸秆的预处理技术

农作物秸秆的木质纤维素复合结构由纤维素、半纤维素和木质素构成, 结构复杂。半纤维素多呈无定形缠绕在纤维素微纤丝表面, 木质素通过酯键和醚键与半纤维素交联, 在纤维素结晶区周围形成致密屏障。这种结构影响纤维素酶解还原糖得率, 要提高得率, 需打破半纤维素和木质素形成的屏障。预处理工艺可破坏秸秆抗降解结构, 通过增加酶对底物可及性、减少非特异性吸附、降低结晶度, 提升酶解效率和还原糖产量。秸秆生物转化利用前, 要用预处理技术消除抗性。常见预处理技术有物理、化学、生物及物理化学联合法。

2.1 物理法

物理预处理方法在农作物秸秆资源化利用中颇为常用, 涵盖机械破碎、超声处理和微波处理等。机械破碎法借助碾磨、剪切减小秸秆粒径, 大幅增加比表面积, 降低纤维素结晶度, 破坏半纤维素与木质素交联结构, 是普遍采用的预处理手段。此过程以物理能量输入改变秸秆微观结构, 使纤维素有序性降低、半纤维素与木质素键断裂, 提升酶解底物可及性, 因结晶度降低与水溶性成分增加正相关, 能提高还原糖得率^[1]。然而, 机械破碎法仅依靠物理作用改变秸秆颗粒大小, 无法对纤维素分子晶型结构和原料化学组成进行改性, 所以提升酶解效率的作用有限。超声波是频率在 2×10^4 Hz 至 1×10^9 Hz 之间的机械振动波, 具备高

效、绿色、无二次污染等优势。在秸秆预处理时, 其空化效应能在纤维微结构中产生应力集中, 使微晶层错位, 增大物料比表面积, 扩展纤维素无定形区, 降低晶体结构有序性。研究显示, 该技术可破坏纤维素氢键, 降低其规整度与结晶度, 利于后续酶解。

尽管超声波预处理能在一定程度上解构纤维素结构, 但对其微细结构的改性效果有限。处理时半纤维素降解或使物料比表面积减小, 不利于后续纤维素酶解的底物可及性。微波是波长 1 mm–100 cm 的电磁波, 用于秸秆预处理时, 有耗时短、操作简、环保且糖化效率提升明显等优势。它通过介电损耗让纤维素生热, 降低结晶度, 提高酶解率。不过, 单一微波预处理的高温会使秸秆中功能性组分热降解, 限制工业化应用。在后续需围绕降低热损伤、提高组分利用率优化该技术。

2.2 化学法

在生物质转化领域, 化学预处理技术是高效利用农作物秸秆的关键, 主要有酸处理、碱处理、有机溶剂处理和臭氧氧化处理等方法。酸处理采用低成本催化体系与简单中和工艺, 在半纤维素水解制还原糖方面优势明显^[4]。然而, 处理时半纤维素降解产生的五碳糖易脱水生成糠醛类衍生物, 抑制后续生物转化过程。碱预处理是提高秸秆转化效率的核心技术, 通过木质素降解破坏木质纤维素结构, 降低纤维素结晶度。氨水、氢氧化钠等典型工艺能有效脱除木质素, 增强纤维素酶水解活性。但实际应用中需高耐腐蚀设备, 且废液处理成本高, 给工程和环保带来压力。臭氧氧化等氧化预处理技术利用强氧化性气体选择性破坏木质素结构, 改善纤维素酶解性能。但能耗高、氧化剂成本大, 大规模产业化面临经济难题。有机溶剂预处理利用单一或混合溶剂脱除木质素, 提升酶解效率。但存在溶剂回收繁琐、半纤维素损耗大的问题, 不利于秸秆全组分综合利用目标的达成。

2.3 生物法

生物预处理技术利用微生物（如真菌）分泌的胞外酶系（如木质素过氧化物酶等），降解秸秆木质纤维素里木质素的苯丙烷结构和半纤维素糖苷键，破除纤维素表面包裹结构。白腐菌等真菌因木质纤维素降解能力强，是该技术核心菌种。此方法反应条件温和、底物专一、低能耗且环保。不过，生物法工程化应用挑战有：微生物降解周期长，对环境参数要求高，规模化处理效率低，多处于实验室研究；而且存在高效降解木质素的微生物少，天然菌株酶活力低等缺点。利用基因工程定向改造功能菌株，提升降解酶表达与环境适应力，是推动该技术实用化的重要路径。

2.4 物理化学

物理化学联合预处理技术包含蒸汽爆破、氨纤维爆破等工艺。蒸汽爆破是把秸秆置于高温高压（160-220℃、1.0-3.0 MPa）水蒸气中，短时热力作用后瞬时降压，破坏木质纤维素结构。它能使半纤维素部分水解溶出，降低纤维素结晶度，提高酶解底物可及性。但该技术半纤维素溶出率高、木质素脱除有限，还可能使纤维素局部降解，且设备投资和能耗大，限制大规模工业应用。氨纤维爆破（AFEX）预处理工艺和蒸汽爆破原理相仿，不同之处在于预处理前要用氨水浸润秸秆物料，利用碱液渗透破坏木质素与纤维素的醚键交联，有效脱除木质素、拆解纤维素结晶区。该工艺保留半纤维素，提高纤维素酶可及性，木质素脱除率达 30%-40%，优于蒸汽爆破。但氨水成本高、氨回收设备投资大且能耗高，限制其工业化应用。CO₂ 爆破预处理用碳酸化反应替代酸碱试剂，碳酸使半纤维素温和降解，无醛类、酚类抑制性副产物，为秸秆生物转化提供清洁预处理路径。

3 新的预处理技术

3.1 氯化锌溶液预处理技术

在生物质转化领域，氯化锌溶液预处理技术优势独特，主要通过破坏纤维素分子内外氢键网络，改变其结晶结构、降低结晶度^[5]。同时，溶液中氯离子能溶解纤维素并促进降解，增加酶解时底物与酶的接触面积，提高可及性。与离子液体等新型溶剂体系相比，该技术环境友好、安全性达标、处理效率高、能耗低，且溶剂回收再生简便，工业化推广前景广阔。

3.2 酒石酸铁钠溶液预处理技术

酒石酸铁钠溶液（FeTNa，化学组成为 $[\text{Fe}(\text{III})(\text{C}_4\text{H}_3\text{O}_6)_3]\text{Na}_6$ ），该溶剂体系对纤维素具有高效溶解能力。在 FeTNa 溶液中，纤维素的溶解过程不受空气氧化作用影响，且在特定温度条件下，其结晶度可显著降低。基于上述特性，FeTNa 溶液被认为是一种兼具强溶解能力与低降解效应的纤维素溶剂，能够在破坏纤维素结晶结构的同时，最大限度避免分子链的降解损伤，为纤维素的高效转化提供了新型溶剂体系。

3.3 离子液体预处理技术

离子液体预处理技术作为近年来兴起的绿色化学工艺，近年来在相关领域引发广泛关注。这类在室温条件下呈现液态的熔融盐类物质，具备低挥发性、高化学稳定性、可循环利用以及对木质纤维素优异的溶解能力等显著优势，构成了理想的绿色溶剂体系。离子液体能够通过与纤维素分子形成氢键相互作用，有效破坏其内部的氢键网络结构，进而实现纤维素的高效溶解并降低其结晶程度，为后续的酶解反应创造有利条件^[7]。目前，该技术已在纤维素材料的加工处理以及生物基化学品的合成制备等领域得到实际应用。然而，合成工艺成本较高以及回收流程较为复杂等现实问题，成为制约其大规模工业化应用的主要瓶颈。

4. 秸秆预处理技术应用前景

秸秆预处理技术在农业废弃物资源化利用、生物质能源开发、生物基材料制备等领域具有广阔的应用前景。

农业废弃物资源化利用，预处理后的秸秆可作为有机肥料、饲料或土壤改良剂，提高土壤肥力，促进农业可持续发展。

生物质能源开发，预处理后的秸秆可通过发酵、气化或液化等技术转化为生物乙醇、生物天然气或生物柴油等清洁能源，缓解能源危机。

生物基材料制备，预处理后的秸秆可作为原料制备生物基塑料、生物基纤维等新型材料，替代传统石油基材料，减少环境污染。

5. 结论与展望

秸秆废弃物预处理技术是秸秆资源化利用的关键环节，近年来取得了显著进展。物理

预处理、化学预处理、生物预处理及联合预处理技术各具优缺点，应根据具体应用场景选择合适的预处理技术。未来，秸秆预处理技术的研究应聚焦于以下几个方面：

优化预处理工艺，通过实验研究和数值模拟，优化预处理工艺参数，提高预处理效果，降低处理成本。

开发新型预处理技术：结合纳米技术、等离子体技术等新兴技术，开发高效、环保的秸秆预处理新技术。

加强多学科交叉研究，结合材料科学、化学工程、环境科学等多学科知识，深入研究秸秆预处理机理，推动预处理技术的创新发展。

推动产业化应用：加强产学研合作，推动秸秆预处理技术的产业化应用，实现秸秆废弃物的高效利用，促进农业可持续发展。

参考文献

- [1] 王文君. 农作物秸秆生物质能利用技术研究进展[J]. 现代农业科技, 2025, (07): 105-107+121.
- [2] 赵龙飞. 耕层玉米根系构型遗传分析及其与氮效率性状的关系[D]. 中国农业大学, 2016.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 第二次全国污染源普查公报[EB/OL]. 2020.
- [4] 孟雪, 李慧欣, 伍卉. 农作物秸秆降解技术研究进展[J]. 南方农业, 2024, 18(23): 113-116.
- [5] 韩丽. 氯化锌改性小麦秸秆生物炭对 Cr(VI) 的吸附效果研究[D]. 山东农业大学, 2016.

基金项目：泰州市科技支撑计划（农业）项目（TN202320），泰州市职业教育联合会（泰州职业教育集团）-泰州职业技术学院联合科研项目（2024ATD05），2023 年江苏高校“青蓝工程”中青年学术带头人项目。