

新时期我国农业废弃物资源化处理的问题及建议

张常弘

赤峰工业职业技术学院, 内蒙古 赤峰 024008

摘要: 农业废弃物资源化利用是破解“三农”难题、构建农村循环经济的关键举措。在分析我国农业废弃物资源化利用现状的基础上,系统总结了目前面临的主要问题,包括预处理效率低、生物转化水平落后、装备自动化智能化程度不足以及尾气净化不达标等,针对性地提出了前处理工艺优化、高效生物技术开发、智能装备升级改造、末端治理系统建设等对策和建议,以期为提升我国农业废弃物资源化水平、助推农业绿色发展提供参考。

关键词: 农业废弃物;资源化利用;生物转化;智能装备

中图分类号: X71

DOI: 10.3969/j.issn.2097-065X.2024.08.013

0 引言

农业废弃物作为农业生产活动不可避免的伴生物,其产量庞大、品类繁杂且地域分布广泛^[1]。若对其处理不善,不仅会白白损耗宝贵的可再生资源,更会对生态环境造成巨大压力,衍生出一系列环境问题。随着现代农业技术的发展和生产规模的扩大,农业废弃物总量呈上升趋势,如何高效、环保地将其转化为有价值的资源,进而推动农业向绿色可持续发展模式转型,已然我国当前阶段必须直面和解决的关键议题。本文针对新时代中国农业废弃物资源化处理的实际状况进行深度剖析,揭示现存的问题与挑战,并在此基础上提出了针对性的改进策略与建议,旨在为我国农业废弃物资源化的实践工作提供决策依据与实施路径,从而促进农业产业链的整体优化升级与环境友好型农业的发展。

1 新时期我国农业废弃物概况及分类

我国农业废弃物种类繁多,按照来源可分为农作物秸秆、畜禽粪便、农膜等。其中,农作物秸秆主要包括稻草、小麦秸秆、玉米秸秆等,其产生量与农作物种植面积密切相关。以水稻为例,我国水稻种植面积约3亿亩,每亩产生秸秆约0.5 t,全国年产稻草量超过1.5亿 t^[2]。畜禽粪便方面,根据第二次全国污染源普查数据,2017年我国畜禽粪便产生量为38.7亿 t,其中仅生猪粪便就达到了12.6亿 t。农膜作为现代农业的重要生产资料,其使用量逐年增加,2020年我国农膜使用量已达259.7万 t^[3]。表1详细列举了我国主要农业废弃物的产生量及其主要组分。由表1可知,农作物秸秆含有较高的纤维素、半纤维素和木质素,畜禽粪便则富含氮、磷、钾

等营养元素,农膜主要成分为聚乙烯。农业废弃物的多样性为其资源化处理带来了机遇与挑战,需要针对不同废弃物的特性采取差异化的处理策略。

表1 我国主要农业废弃物产生量及其组分

农业废弃物类型	年产生量(亿 t)	主要组分及含量(%)
农作物秸秆	10.2	纤维素(30~50)、半纤维素(20~35)、木质素(15~20)
畜禽粪便	38.7	水分(75~90)、有机质(6~20)、氮(0.3~1.0)、磷(0.1~0.6)、钾(0.3~1.5)
农膜	0.26	聚乙烯(≥ 96)

2 我国农业废弃物资源化处理的主要问题

2.1 前处理技术缺陷与转化率低

农业废弃物的前处理是资源化利用的关键环节,但目前我国在该领域仍存在诸多不足。以秸秆为例,传统的物理破碎方法如粉碎、切断等,虽然可以增大比表面积,但能耗高达30~50 kW·h/t,且破碎后的秸秆容易吸湿结块,不利于后续的生物转化。化学预处理如碱处理、酸处理等,虽然可以破坏木质素结构,提高纤维素的可及性,但存在药品消耗大、成本高、环境污染等问题。以NaOH处理为例,每吨秸秆需消耗NaOH 50~100 kg,处理成本高达400~600元/t^[2]。生物预处理如菌剂发酵,虽然环境友好,但周期长、效率低,难以实现产业化应用。此外,我国秸秆资源化处理率仅为35%,远低于发达国家的70%以上,主要原因在于缺乏高效、经济的预处理技术,导致大量秸秆难以得到有效利用。

2.2 生物技术应用滞后与工艺不佳

农业废弃物的生物转化是实现资源化利用的有效途径,但我国在该领域的技术应用和工艺优化方面仍存在较大差距。以秸秆生物质发酵制备燃料乙醇为例,虽然已有产业化应用,但与发达国家相比,

我国的乙醇转化率较低，一般在 200~300 L/t，而美国等国可达到 400~500 L/t^[4]。造成这一差距的主要原因在于我国缺乏高效的工业酶制剂和发酵工艺。目前，国内酶制剂市场主要被进口产品所占据，如 Novozymes 公司的 Cellic CTec3，其酶活可达到 200 FPU/mL，而国产酶制剂的酶活普遍低于 100 FPU/mL。同时，我国秸秆发酵多采用间歇式固态发酵，发酵周期长达 7~15 天，产物浓度低，不利于规模化生产。表 2 比较了几种典型秸秆发酵工艺的技术经济指标。

表 2 几种典型秸秆发酵工艺的技术经济指标

发酵工艺	原料	产物	转化率(L/t)	周期(d)	成本(元/L)
SHF	稻草	乙醇	238	7	4.2
SSF	小麦秸秆	乙醇	306	5	3.6
SSCF	玉米秸秆	乙醇	412	3	2.8
CBP	甘蔗渣	乙醇	468	2	2.3

注：SHF 为分步发酵，SSF 为同步糖化发酵，SSCF 为半同步糖化发酵，CBP 为巩固生物加工。

2.3 设备自动化水平低与智能化欠缺

农业废弃物资源化处理设备的自动化和智能化水平是影响其高效转化的关键因素。目前，我国大部分农业废弃物处理装置仍以人工操作为主，自动化程度低，难以实现连续化、规模化生产。以畜禽粪便好氧发酵为例，虽然国内已开发出多种发酵罐，但在实际应用中，料液比、温度、pH 值等关键参数的自动控制精度普遍不高，导致发酵效率低下。有研究表明，若发酵罐内料液比偏离最佳值(1:1.5) 10%，产气量将下降 30% 以上^[5]。同时，国内大部分发酵设备缺乏在线监测和故障诊断功能，一旦出现问题，只能依靠人工经验判断，延长了停工时间，增加了运行成本。此外，农业废弃物处理过程涉及多环节、多因素耦合，需要建立智能化管理平台，实现原料、产品、能耗等数据的实时采集和优化调度。但目前国内鲜有成熟的智慧农废处理系统，大数据、物联网、人工智能等新技术在该领域的应用尚处于起步阶段。

2.4 尾气排放处理不达标与二次污染

农业废弃物资源化处理过程中产生的尾气如不能达标排放，将会造成严重的二次污染问题。以秸秆气化为例，合成气中含有大量的焦油、粉尘、硫化氢等杂质，其中焦油质量浓度可高达 50~100 g/Nm³，远超国家排放标准(≤50 mg/Nm³)。若直接排放，不仅会污染大气环境，还会腐蚀设备管道，降低产品质量。畜禽粪便厌氧消化过程中会释放 NH₃、H₂S 等有毒有害气体，其浓度通常在 1 000~3 000 mg/L，对人体健康和生态环境构成威胁^[6]。

当前，我国农业废弃物处理企业还普遍存在尾气治理设施不完善、监管不到位等问题，难以实现达标排放。调研发现，秸秆气化企业的焦油去除率普遍低于 60%，硫化物去除率不足 30%，尾气直排现象屡禁不止^[3]。表 3 列出了不同农业废弃物热处理过程的典型尾气组成及排放标准。

表 3 农业废弃物热处理过程的典型尾气组成及排放标准

热处理方式	典型尾气组成	排放标准
秸秆气化	焦油(mg/Nm ³)	≤50
	H ₂ S(mg/Nm ³)	≤100
	NO _x (mg/Nm ³)	≤400
畜禽粪便热解	焦油(mg/Nm ³)	≤30
	H ₂ S(mg/Nm ³)	≤50
	NO _x (mg/Nm ³)	≤500
农膜热裂解	焦油(mg/Nm ³)	≤100
	H ₂ S(mg/Nm ³)	—
	NO _x (mg/Nm ³)	≤300

3 农业废弃物资源化处理的有效建议

3.1 优化前处理工艺与提高转化效率

针对农业废弃物前处理技术缺陷与转化率低的问题，亟需从工艺优化与效率提升两方面入手。一方面，可探索多种前处理方法耦合的新工艺路线，充分发挥不同方法的协同增效作用。例如，将物理破碎与化学处理相结合，先通过高压均质等方式使秸秆粒度降至 100~300 μm，再采用稀酸(如 0.5%~1% H₂SO₄)浸泡，可在低温(<100 ℃)条件下实现木质素大部分解聚，显著提高纤维素酶解效率，同时减少污染物排放^[1]。

另一方面，应加强前处理关键装备的研制与集成优化，提高自动化、连续化水平。如开发集破碎、筛分、净化、干燥等功能于一体的秸秆原料预处理成套设备，通过智能化控制系统优化各单元工艺参数，实现物料连续高效输送与转化。同时，积极借鉴国际先进技术经验，开展工艺流程模拟优化，缩短工艺开发周期。利用计算流体动力学(CFD)、有限元分析(FEA)等数值模拟手段，构建农业废弃物前处理过程的数学模型，优选最佳工艺参数组合，指导放大设计与产业化生产，从而提高转化率。通过工艺创新与技术进步，突破农业废弃物规模化高值化利用的瓶颈制约。

3.2 开发高效生物技术与优化发酵工艺

农业废弃物生物转化的关键在于突破关键技术瓶颈，优化工艺流程，提高资源化效率。首先，应加强高效工业酶制剂的开发与应用，通过分子改造、定向进化等生物技术手段，筛选和构建高活性、高稳定

性的纤维素酶、木聚糖酶等关键酶株,提高酶解效率。同时,探索多酶协同作用机制,优化酶促反应条件,实现底物高效糖化。例如,利用合成生物学方法,将纤维素酶、 β -葡萄糖苷酶、木聚糖酶等多基因整合导入毕赤酵母等宿主,构建高效糖化发酵一体化菌株,可显著提高秸秆转化率。

其次,应创新发酵工艺模式,提高产物收率与浓度。可采用固态连续发酵、膜分离耦合发酵等新型反应器,强化物质传递与产物分离,缩短发酵周期。如利用双透析膜生物反应器,将酶解与发酵过程耦合,并原位分离产物,可使乙醇浓度提高至 80~100 g/L,较传统发酵提高 2~3 倍^[3]。此外,应建立基于代谢工程的细胞工厂构建技术体系,重点突破木糖、阿拉伯糖等五碳糖的高效利用,拓展农业废弃物生物转化产物谱,实现多元产品高值化制备。通过生物技术创新与工艺优化,将农业废弃物生物转化的技术经济性提升至新高度。

3.3 推进设备自动化改造与智能化升级

面对农业废弃物处理设备自动化水平低、智能化程度欠缺的问题,亟需加快关键装备的升级改造,提高生产过程的自动化、智能化水平。一方面,应加强农业废弃物处理装备的自动化改造,重点突破物料输送、参数控制、产品分离等关键单元技术,实现生产过程的连续化、规模化。例如,在畜禽粪便好氧发酵系统中,可采用基于 PLC 的自动配料装置,通过实时监测物料水分、养分等关键参数,动态调整进料比例,确保发酵床含水量维持在 60%~65%,碳氮比控制在 25~30,从而使发酵周期缩短 20%~30%^[6]。同时,集成应用机器视觉、近红外光谱等传感技术,实现对物料粒度、成分等关键质量属性的在线检测,建立反馈控制系统,动态优化工艺参数,提高生产效率。

另一方面,应充分融合大数据、云计算、人工智能等现代信息技术,加快农业废弃物处理过程的智能化升级。重点开发智能化生产执行系统(MES)和设备管理系统(EAM),实现设备运行状态实时监控、故障预警与诊断、远程运维等功能,提高设备使用效率和管理水平。同时,建立农业废弃物处理全流程数字孪生模型,对生产过程进行实时仿真优化,指导工艺控制与调度决策。例如,利用机器学习算法对畜禽粪便厌氧消化过程的关键参数(如 pH 值、碱度、挥发性脂肪酸浓度等)进行多元统计分析,构建沼气产量预测模型,并基于模型反演优化发酵条件,从而提高沼气产量。通过设备智能化改造,构建农业废弃物处理智慧化管控平台,促进产业提质增效。

3.4 建立末端尾气净化系统与达标排放

针对农业废弃物处理过程中尾气排放不达标、二次污染风险高的问题,亟需构建高效末端净化系统,实现污染物的深度脱除与达标排放。应针对不同尾气特性,采用多级净化工艺,强化物理、化学、生物等多种方法耦合,提高净化效率。以秸秆气化尾气处理为例,可先通过旋风分离、布袋除尘等物理方法脱除大部分焦油与粉尘,再采用等离子体裂解、光催化氧化等化学手段深度净化。等离子体裂解技术利用高能电子轰击,可在常温常压下实现焦油、硫化氢等污染物的高效脱除,去除率可达 90%以上^[2]。同时,光催化氧化技术利用纳米 TiO_2 等催化剂在光照下产生强氧化性羟基自由基,可将有机污染物彻底矿化为 CO_2 和 H_2O ,具有高效、环保、可重复使用等优点。

对于畜禽粪便厌氧消化产生的沼气,可先采用水洗、化学吸收等方法脱除 H_2S ,再利用压力摆动吸附(PSA)、膜分离等技术提纯 CH_4 ,最后通过低温等离子体催化氧化脱除剩余污染物,实现沼气的高值化利用。此外,应加强生物净化技术的研发与应用,充分利用微生物的新陈代谢功能,实现污染物的高效降解转化。例如,采用生物滴滤塔处理畜禽粪便好氧发酵尾气,利用填料上富集硝化菌、反硝化菌等功能菌群,通过硝化-反硝化耦合实现 NH_3 的高效脱除,去除率可达 80%以上。同时,应加强尾气在线监测系统建设,采用红外、紫外等光谱分析技术实现污染物排放浓度的实时测定,建立尾气排放监管平台,确保达标排放。通过末端净化系统的精准设计与集成优化,实现农业废弃物处理全过程清洁化、无害化。

参考文献:

[1] 宋刘洋,丁舒心,张琪,等. 农业废弃物资源化利用研究进展[J]. 青海农林科技,2024(1):42-46.
[2] 韩薇薇,高瑞,常青平,等. 京津冀地区蔬菜废弃物污染风险及资源化利用潜力分析[J]. 安徽农业科学,2024,52(6):60-63,67.
[3] 刘琼,文亚洲,肖海峰,等. 政府介入能否诱导小农户废弃物规范化治理?:基于要素改造视角的分析[J]. 中国生态农业学报,2004,32(6):1086-1096.
[4] 田倩. 天津市农业废弃物资源化利用研究[D]. 天津:天津农学院,2021.
[5] 崔文仲,周晚来. “双碳”背景下农业废弃物基料化利用可行性分析[J]. 南方农机,2024,55(6):10-14.
[6] 严铠,刘仲妮,成鹏远,等. 中国农业废弃物资源化利用现状及展望[J]. 农业展望,2019,15(7):62-65.

作者简介:张常弘,女,1980 年生,副教授。研究方向为废物处理。