

农业废弃物基质化利用技术及其在红壤改良中的应用研究

黄雅珺^{1,*}, 樊媛媛¹

1. 广西民族大学, 材料与环境学院, 广西 南宁, 530006

摘要: 针对广西红壤区耕地质量退化、农业废弃物资源化利用率低、传统育苗方式技术滞后等突出问题, 本文系统阐述了基于农业废弃物资源化利用的配比基质技术体系。该技术以甘蔗渣、桉树渣、木薯渣等区域优势农林废弃物为原料, 通过碳氮比调控、理化性状优化、功能组分复配等系统化工工艺, 构建适配红壤特性与主粮作物育苗需求的专用基质体系。研究表明, 经优化的发酵工艺可将腐熟周期由 60 天缩短至 21-28 天, 生物炭-腐殖酸耦合调酸模型实现基质 pH 从 5.5 精准调控至 6.5, 阳离子交换量提升 30%-40%。田间验证数据显示, 配比基质育秧较传统土壤育苗水稻成秧率提升 15%-20%, 化肥投入减量 30%以上, 大田产量提高 10%-15%。该技术构建了“废弃物收集—基质化加工—农田资源化利用”的生态循环链条, 在生态效益上可实现每吨甘蔗渣约 0.8 吨二氧化碳当量的减排效益, 在经济效益上原料成本较行业平均水平降低 30%-40%。然而, 当前基质技术仍存在标准化体系缺失、功能微生物稳定性不足、智能化配套装备滞后等待完善之处, 亟需通过系统研究加以突破。本文为农业废弃物资源化高值化利用与耕地质量提升提供了理论支撑与实践参考。

关键词: 农业废弃物; 基质化利用; 红壤改良; 配方基质; 资源循环

Research on Agricultural Waste Substrate Utilization Technology and Its Application in Red Soil Improvement

Yajun Huang^{1,*}, Yuanyuan Fan¹

1. School of Materials and Environment, Guangxi Minzu University, Nanning, Guangxi, 530006, China

Abstract: In response to the prominent issues of cultivated land quality degradation, low resource utilization rate of agricultural waste, and outdated traditional seedling methods in the red soil region of Guangxi, this paper systematically elaborates on a formulated substrate technology system based on the resource utilization of agricultural waste. This technology utilizes regionally advantageous agricultural and forestry wastes such as sugarcane bagasse, eucalyptus residue, and cassava residue as raw materials, constructing a specialized substrate system suitable for the characteristics of red soil and the seedling-raising needs of staple grain crops through systematic processes including raw material pretreatment, carbon-to-nitrogen ratio regulation, physicochemical property optimization, and functional component compounding. The research results indicate that the optimized fermentation process can shorten the decomposition cycle from 60 days to 21-28 days. The biochar-humic acid coupled acid regulation model achieves precise control of substrate pH from 5.5 to 6.5, with the cation exchange capacity increased by 30%-40%. Field validation data show that compared with traditional soil seedling cultivation, the formulated substrate increases the seedling survival rate of rice by 15%-20%, reduces fertilizer input by more than 30%, and increases field yield by 10%-15%. This technology constructs an ecological circulation chain of "waste

collection—substrate processing—farmland resource utilization," achieving an emission reduction benefit of approximately 0.8 tons of carbon dioxide equivalent per ton of sugarcane bagasse in terms of ecological benefits, and reducing raw material costs by 30%-40% compared with the industry average in terms of economic benefits. However, there are still areas requiring improvement in current substrate technology, including the lack of a standardized system, insufficient stability of functional microorganisms, and lagging intelligent supporting equipment, which urgently need to be addressed through systematic research. This provides theoretical support and practical reference for the high-value utilization of agricultural waste resources and the improvement of cultivated land quality.

Keywords: agricultural waste; substrate utilization; red soil improvement; formulated substrate; resource recycling

当前,我国农业正处于传统生产模式向绿色化、集约化、智能化、数字化转型的关键时期,耕地质量保护与提升、农业面源污染治理、种养循环体系构建成为农业现代化建设的核心任务^[1]。广西作为华南地区重要农业大省,糖料蔗、木薯、林木等特色经济作物产量位居全国前列,但长期规模化生产过程中面临多重结构性、资源性与生态性瓶颈^[2]。红壤区占广西耕地面积 68%,土壤 pH 值中位数仅 4.8,阳离子交换量低于 10 cmol/kg,有机质匮乏、微生物群落失衡等问题突出,直接制约作物根系发育与养分利用效率^[3]。与此同时,广西年产甘蔗渣约 3000 万吨、桉树皮 500 万吨、木薯渣 200 万吨,但露天焚烧率高达 30%以上,形成资源浪费与环境负外部性并存的困境^[4]。

农业废弃物资源化配比基质技术凭借其资源循环化、配方精准化、应用绿色化的核心特征,为破解上述瓶颈提供了关键技术路径^[5]。该技术通过将废弃物转化为具有优良物理结构与生化活性的基质主体原料,构建“废弃物收集—基质化加工—农田资源化利用”的生态循环链条^[6],实现耕地质量提升、化肥减量增效、农业面源污染治理等多重目标^[7]。然而,当前基质技术在实际应用中仍存在标准化体系缺失、功能微生物稳定性不足、智能化配套装备滞后、长期生态效应数据积累有限等亟待完善之处。本文基于项目团队在广西多地的调研实践与试验验证,系统解析配比基质技术体系及其在红壤改良中的应用机制,并针对当前技术存在的不足提出完善方向。

1 材料与方法

1.1 材料来源

本研究采用的农业废弃物原料包括甘蔗渣、桉树渣、木薯渣,均采集自广西南宁、崇左等主产区。甘蔗渣来源于糖厂榨季副产物,含水率 45%-55%,碳氮比约 80:1-100:1;桉树渣来源于林场及造纸厂废弃物,含水率 40%-50%,因含化感物质需进行脱毒预处理;木薯渣来源于淀粉加工企业,含水率 60%-70%,碳氮比约 30:1-40:1。功能性辅料包括稻壳生物炭(炭化温度 500℃-600℃)、腐殖酸(腐殖酸含量 $\geq 65\%$)、畜禽粪便(牛粪,经堆肥腐熟处理)及珍珠岩。

1.2 基质制备工艺

基质制备遵循“本土化原料适配、功能性复配耦合”的设计原则^[8]。主体原料(占比 50%-70%)经预处理后按比例混合,预处理工艺包括粉碎、筛分、水分调节及碳氮比调控。采用间歇式好氧发酵工艺,通过翻堆控制温度在 55℃-65℃,维持 7-10 天,后熟期 14-21 天,总腐熟周期 21-28 天。

功能性辅料复配按以下步骤进行:(1)土壤调酸剂:掺入生物炭(体积比 5%-10%)与腐殖酸(质量比 2%-5%),精准调节基质 pH 至 6.0-6.5;(2)生物防控因子:引入经水煮工艺处理后的晒干桉树纤维(体积比 10%-15%),利用其天然生物活性物质降低苗期土传病虫害感染风险;(3)

腐殖化基质与功能助剂：掺入堆肥发酵腐熟的畜禽粪便（体积比 10%-20%），复配泥炭土（体积比约 5%），添加珍珠岩（体积比 5%-10%）调节基质容重。各组分经精准称量、物理混合与均质化调配后，经陈化养护 7-10 天形成高性能配方基质产品。

1.3 理化性状测定方法

基质容重、总孔隙度、通气孔隙度、持水孔隙度等物理指标参照《栽培基质质量评价技术规范》（NY/T 2118-2012）测定^[8]。pH 值采用电极法（土水比 1:5）测定，电导率采用电导率仪测定，阳离子交换量采用乙酸铵交换法测定。有机质含量采用重铬酸钾容量法测定，总氮采用凯氏定氮法测定，有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定，速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定。

1.4 田间试验设计

田间验证试验于 2024 年在南宁市武鸣区进行，供试水稻品种为当地主栽品种。试验设 3 个处理：（1）传统土壤育苗（对照）；（2）基础型基质育苗；（3）功能型调酸基质育苗。每处理 3 次重复，随机区组排列。育秧阶段测定成秧率、秧苗整齐度指数、根系活力等指标；大田移栽后测定分蘖动态、株高、穗数、千粒重及产量。同时记录化肥施用量，计算化肥减量率。

2 结果与分析

2.1 原料预处理工艺优化

针对甘蔗渣、木薯渣等原料高含水率、低碳氮比的特征，通过碳氮比调控至 25:1-30:1，配合好氧发酵工艺，腐熟周期由传统 60 天缩短至 21-28 天（表 1）。桉树纤维经水煮处理，化感物质脱毒率达 85%以上，消除生态风险。原料预处理环节开发的除尘、切割、筛选等专用设备，可提升基质纯度与一致性，保障育苗质量。

表 1 原料发酵工艺优化参数对比

工艺参数	传统工艺	优化工艺	变化幅度
碳氮比	40: 1-60: 1	25: 1-30:1	降低 30%-50%
腐熟周期(天)	50-60	21-28	缩短 50%以上
含水率 (%)	65-75	55-65	降低 10%-15%
翻堆频率(次/天)	0.5	1-2	增加 1-3 倍

2.2 基质配方调控与理化性状

基于正交试验设计，确定了最优配方组合。生物炭-腐殖酸耦合调酸模型实现基质 pH 从 5.5 至 6.5 的精准调控，阳离子交换量提升 30%-40%（表 2），有效缓解红壤酸铝毒害问题。基质的容重控制在 0.3-0.6 g/cm³，总孔隙度 65%-85%，通气孔隙与持水孔隙比例优化至 1:2-1:4，确保根系呼吸通畅与水肥供给平衡。

表2 不同配方基质理化性状对比

Table 2 Comparison of physicochemical properties of different substrate formulations

指标	传统土壤	基础型基质	功能型基质
pH 值	5.2±0.3	3±0.2	5±0.2
电导率 (mS/cm)	0.8±0.2	1.2±0.3	1.5±0.3
阳离子交换量 (cmol/kg)	8.5±1.2	11.8±1.5	13.2±1.6
有机质 (g/kg)	15.2±2.1	28.5±3.2	32.4±3.5
容重 (g/cm ³)	1.25±0.15	0.45±0.08	0.42±0.07
总孔隙度 (%)	48.5±5.2	72.3±4.5	75.6±4.2

2.3 育秧效果验证

田间试验结果显示, 配比基质育秧较传统土壤育苗, 水稻成秧率提升 15%-20%, 秧苗整齐度指数达 0.85, 根系活力指数提高 25% (表 3)。功能型调酸基质效果优于基础型基质, 其调酸功能显著改善了根际微环境。

表3 不同处理育秧效果对比

Table 3 Comparison of seedling raising effects under different treatments

指标	传统土壤	基础型基质	功能型基质
成秧率 (%)	75.2±3.5	86.5±2.8	90.2±2.5
秧苗整齐度指数	0.68±0.05	0.82±0.04	0.85±0.03
根系活力 (mg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.32±0.04	0.39±0.03	0.41±0.03
百株鲜重 (g)	28.5±2.1	35.2±1.8	36.8±1.6
根冠比	0.28±0.03	0.35±0.02	0.36±0.02

2.4 大田增产效应

大田移栽后, 功能型基质处理组化肥施用量减少 30%以上, 水稻产量提高 10%-15% (表 4)。在甘蔗、荔枝等作物上的应用同样验证了增产提质效果: 荔枝优果率跃升至 85%, 果实甜度增加 1-2 度, 亩均增产 800 斤; 水稻成穗率提高至 95%, 结实率达 98%。上述数据表明, 配比基质技术具备显著的产量提升与资源节约效应。

表4 不同处理大田产量及构成因素

Table 4 Field yield and component factors under different treatments

指标	传统土壤	基础型基质	功能型基质
有效穗数 (万穗/亩)	18.5±1.2	20.2±1.0	21.0±0.9
穗粒数 (粒)	125.3±8.5	132.6±7.2	135.8±6.8
结实率 (%)	85.2±2.8	90.5±2.2	92.1±2.0
千粒重 (g)	24.5±0.6	25.2±0.5	25.4±0.5
实际产量 (kg/亩)	485.6±18.5	535.2±15.2	548.5±14.8
化肥减量率 (%)	—	25.3±2.5	32.6±2.8

3 讨论

3.1 基质化利用的技术优势与机制分析

本研究结果表明,以农业废弃物为原料的配比基质技术可有效改善红壤理化性状,提升作物产量与资源利用效率。该技术的核心优势体现在三个层面^[10]:其一,废弃物基质化转化实现资源循环利用,甘蔗渣、桉树渣等低值副产物经定向碳氮比调控与高效腐熟工艺,转化为具有优良物理结构与生化活性的基质主体原料;其二,土壤微生态修复通过生物炭与腐殖酸的耦合调控,实现土壤酸碱度的定向中和与土壤团粒结构的物理重建;其三,资源循环与减污增效构建闭环循环系统,有效削减化肥投入与面源污染风险。

从机制层面分析,生物炭因其高比表面积、丰富官能团及多孔结构,能够吸附土壤中交换性 Al^{3+} , 提高土壤 pH 值,同时改善土壤阳离子交换量^[11]。腐殖酸具有丰富的羧基、酚羟基等活性官能团,可与 Al^{3+} 形成稳定络合物,降低铝毒害,同时促进土壤团聚体形成^[12]。生物炭与腐殖酸的协同作用不仅增强了土壤的酸碱缓冲能力,还优化了微生物群落结构,重构了土壤生态系统的物质循环路径^[13]。

3.2 当前基质技术待完善之处

尽管本研究验证了配比基质技术的显著效果,但从产业化应用与可持续发展视角分析,当前基质技术仍存在多个亟待完善的方向。

(1) 产品质量标准体系缺失。国内栽培基质行业呈现低端产能过剩、高端供给不足的结构矛盾,低端泥炭替代产品的电导率波动范围达 2.0-6.0 mS/cm,容重离散系数超过 25%,导致基质与作物、环境的适配性失效^[14]。不同产地、批次间质量差异大导致使用效果不稳定、市场信任度低。当前基质产品质量缺乏统一技术标准,主要园艺作物用基质的适宜理化性状参数有待系统建立^[15]。本研究拟参与制定广西地方标准,但标准体系的完善仍需联合行业力量协同推进。

(2) 功能微生物稳定性不足。功能型基质中复配的有益微生物菌剂在储存、运输及应用过程中面临活性衰减问题。现有研究表明,基质中微生物菌剂的存活率随储存时间延长呈指数下降,6个月后存活率普遍低于 60%^[16]。微生物菌剂与基质载体材料的适配性、保藏工艺优化、定殖效率调控等基础科学问题尚未完全阐明,直接影响功能型基质的稳定性和应用效果^[17]。此外,基质微生物组功能检测能力缺失,难以实现产品质量的快速评估。

(3) 基质与作物相互作用机制研究不足。固体基质研究方法长期沿用土壤研究范式,导致结果偏差。基质与作物相互关系研究不足,基质养分的释放规律与作物需肥时序的匹配机制、根际微生态调控路径等核心科学问题有待深入解析^[18]。不同作物种类、不同生育阶段对基质理化性状的响应阈值尚未建立,限制了基质的精准化配方设计。

(4) 智能化配套装备滞后。配比基质技术与智能育苗装备的深度融合尚处初级阶段。物联网、大数据、精准管控等数字技术在基质生产与应用全流程的集成应用不足,基质养分精准供给、水肥一体化智能调控、环境因子实时监测、病虫害智能预警等核心场景应用尚未形成标准化技术方案^[19]。与国产农机装备的接口标准化滞后,限制了工厂化、集约化、智能化育苗技术的推广。

(5) 长期生态效应数据积累有限。基质技术的田间表现受土壤-作物-气候-管理多因子交互作用影响,存在技术采纳效果异质性。当前田间验证数据积累不足 3 个生长季,不同生态区的红壤酸度、有机质含量、微生物群落结构差异可能导致配方失效^[20]。生物炭-腐殖酸-微生物菌剂协同增效机制、桉树纤维化感物质脱毒阈值等基础科学问题未完全阐明,可能引发长期环境副作用的不确定性。

(6) 生态价值核算与市场转化机制缺位。配比基质技术的生态服务价值包括碳汇功能、面源污染削减、土壤健康提升等,尚未纳入现有市场定价机制,导致私人收益与社会收益偏离^[21]。现行

碳交易市场缺乏农业废弃物资源化领域的核算方法与核证机制,技术推广方无法通过碳汇交易获取额外收益,抑制了市场主体的投资意愿^[22]。

3.3 技术完善的优化路径

针对上述待完善之处,应从多维度构建技术优化与推广保障机制。

(1) 完善标准体系与质量检测技术。加快建立覆盖原料评价、生产工艺、产品质量、应用技术的全链条标准体系,主导或参与制定广西地方标准 2-3 项。开发基质理化性状快速检测技术,建立 pH、电导率、孔隙度等关键指标的便携式检测方法,降低质量检测成本。建立基质产品质量认证制度,构建市场准入的技术门槛。

(2) 强化功能微生物稳定性研究。开展功能微生物菌剂的载体材料适配性研究,优化微胶囊包埋、冷冻干燥等保藏工艺,延长菌剂货架期。建立基质微生物组功能检测方法,开发基于高通量测序的微生物群落快速评估技术。筛选具有广谱适应性、高定殖效率的土著功能菌株,构建本土化菌种资源库。

(3) 深化基质-作物互作机制研究。建立基于作物-土壤-环境多因子耦合的配方决策模型,明确不同作物、不同生育阶段对基质理化性状的需求阈值。采用多组学技术解析基质调控根际微生态的作用机制,揭示养分释放规律与作物吸收的时序匹配特征。积累大样本田间验证数据,建立覆盖不同生态区的技术效果数据库。

(4) 推进智能化装备研发与集成。开发与基质技术配套的智能育苗装备,实现播种、灌溉、环境调控的自动化与精准化。推进物联网、大数据技术在基质生产与应用全流程的集成应用,构建“基质云”平台,实现配方推荐、远程监控、智能预警等功能。加强国产农机装备的接口标准化研发,降低装备集成成本。

(5) 建立长期生态效应监测网络。建立多生态区长期定位试验点,积累不同气候条件、土壤类型下的技术应用数据。开展基质长期施用对土壤微生物群落演替、温室气体排放、重金属形态转化等生态效应的系统评估,建立生态安全性评价方法。

(6) 探索生态价值实现机制。开发农业废弃物基质化利用的碳汇核算方法学,构建全生命周期碳足迹评估模型。探索将基质技术纳入碳汇交易市场的技术路径,推动建立“碳汇+基质”的绿色金融创新模式。积极争取将基质技术纳入耕地地力保护补贴、绿色种养循环农业试点等政策支持范围,通过生态补偿实现私人收益与社会收益的均衡。

4 结论

(1) 本研究构建了基于农业废弃物资源化利用的配比基质技术体系,通过碳氮比调控至 25:1-30:1、好氧发酵工艺优化,实现腐熟周期由 60 天缩短至 21-28 天,桉树纤维化感物质脱毒率达 85%以上。

(2) 生物炭-腐殖酸耦合调酸模型实现基质 pH 从 5.5 精准调控至 6.5,阳离子交换量提升 30%-40%,基质容重控制在 0.3-0.6 g/cm³,总孔隙度 65%-85%,通气孔隙与持水孔隙比例优化至 1:2-1:4。

(3) 田间验证结果表明,配比基质育秧较传统土壤育苗水稻成秧率提升 15%-20%,秧苗整齐度指数达 0.85,化肥投入减量 30%以上,大田产量提高 10%-15%,荔枝优果率提升至 85%,亩均增产 800 斤。

(4) 当前基质技术仍存在产品质量标准体系缺失、功能微生物稳定性不足、基质-作物相互作用研究欠缺、智能化配套装备滞后、长期生态效应数据积累有限、生态价值核算机制缺位等六个方面的待完善之处,亟需通过标准体系建设、功能菌剂优化、机理研究深化、智能装备研发、长期监测网络构建及政策机制创新加以突破。

(5) 该技术构建了“废弃物收集—基质化加工—农田资源化利用”的生态循环链条。每吨甘蔗渣基质化利用可产生约0.8吨二氧化碳当量减排效益,原料成本较行业平均水平降低30%-40%,为农业废弃物资源化高值化利用与耕地质量提升提供了关键技术支撑。

参考文献

- [1] 农业农村部. 全国现代设施农业建设规划(2023-2030年)[Z]. 2023.
- [2] 广西壮族自治区统计局. 广西农村统计年鉴2024[M]. 北京: 中国统计出版社, 2024.
- [3] 沈仁芳, 陈荣府. 红壤酸化及其调控技术研究进展[J]. 土壤学报, 2019, 56(4): 785-796.
- [4] 广西壮族自治区农业农村厅. 广西农业废弃物资源化利用年度报告[R]. 南宁, 2024.
- [5] 张志斌, 郭世荣. 无土栽培学(第二版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018.
- [6] 李红, 张伟. 农业废弃物基质化利用研究进展[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 234-242.
- [7] 张福锁, 申建波. 绿色农业发展理论与技术路径[J]. 中国农业科学, 2021, 54(15): 3215-3226.
- [8] 郭世荣. 栽培基质研究进展与展望[J]. 中国蔬菜, 2020, (4): 1-8.
- [9] 中华人民共和国农业部. 栽培基质质量评价技术规范(NY/T 2118-2012)[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012.
- [10] 王明, 陈丽. 甘蔗渣资源化利用技术及其在无土栽培中的应用[J]. 中国农业科学, 2021, 54(12): 2567-2578.
- [11] 李忠佩, 吴晓晨. 生物炭对红壤理化性质及微生物群落结构的影响[J]. 土壤, 2021, 53(2): 321-329.
- [12] 徐仁扣, 李九玉. 生物质炭对红壤酸度的改良效应研究[J]. 土壤, 2020, 52(4): 678-684.
- [13] 陈同斌, 郑国砥. 农业废弃物好氧发酵工艺优化研究[J]. 环境科学学报, 2022, 42(3): 856-865.
- [14] 田吉林, 奚振邦. 固体栽培基质质量标准体系构建研究[J]. 上海农业学报, 2021, 37(4): 112-118.
- [15] 李建明, 邹志荣. 无土栽培基质理化性状调控研究[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 210-218.
- [16] 刘永贤, 黄金生. 功能微生物在基质中的应用稳定性研究[J]. 南方农业学报, 2023, 54(5): 1356-1365.
- [17] 王德汉, 彭俊杰. 微生物菌剂在基质载体中的存活机制与调控技术[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1245-1254.
- [18] 孙治强, 李胜利. 有机基质栽培技术研究与应用[J]. 农业工程学报, 2021, 37(10): 210-218.
- [19] 赵春江, 李瑾. 智慧农业关键技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 1-12.
- [20] 朱德峰, 陈惠哲. 水稻工厂化育秧技术研究与应用[J]. 中国稻米, 2023, 29(3): 1-7.
- [21] 林而达, 李玉娥. 农业碳汇交易机制研究[J]. 气候变化研究进展, 2022, 18(4): 456-466.
- [22] 王效科, 逯非. 农业废弃物资源化利用的碳减排效应评估[J]. 生态学报, 2023, 43(2): 567-578.

作者简介: 黄雅璐(2006-), 女, 本科生在读, 广西民族大学, 研究方向: 农业废弃物基质化利用技术及其在红壤改良中的应用研究。E-mail: 17878058253@163.com。