

丘陵山地甘蔗分步式机收质量及其经济效益分析

艾 静^{1,2}, 李 宝^{3*}, 王禹童^{1,2}, 易湘艳³, 刀静梅^{1,2}, 赵 勇^{1,2}, 李红军³,
杨绍聪³, 邓 军^{1,2**}, 张跃彬^{1,2**}

1. 热带作物生物育种全国重点实验室/云南省农业科学院甘蔗研究所, 云南开远 661699; 2. 云南省甘蔗遗传改良重点实验室, 云南开远 661699; 3. 耿马傣族佤族自治县地方产业发展服务中心, 云南耿马 677507

摘 要: 针对我国丘陵蔗区因地形破碎与窄行密植导致甘蔗收获机械化受限的产业瓶颈, 本研究旨在系统解析分步式机收模式对生产效率、原料质量及蔗农收益的影响, 以明确其在丘陵蔗区的应用潜力与推广策略。以云南耿马蔗区为研究区域, 基于 2023/2024、2024/2025 榨季云南耿马蔗区实例, 采用多元数据融合分析(自然生长含杂质溯源试验, 分步式机收含杂质溯源、成本监测), 系统比较“联合机收”“传统人工”“委托加工”和“毛蔗交售”4种收获模式的经济效益。采用方差分析等统计方法, 解析甘蔗生育进程与主栽品种对原料含杂率的影响机制。结果表明: 经济效益上, 与“传统人工”模式(蔗农净收益 318.00 元/t)相比, 分步式机收的“委托加工”模式使蔗农净收益提升至 365.00 元/t, 增幅达 14.80%, 且收获成本降低 42.06%, 该收益接近“联合机收”模式, 且有效规避了后者对宿根蔗的损伤。原料质量控制上, 品种遗传差异对含杂率无显著影响, 而收获时间是主导因素。随着收获期从 12 月推至次年 4 月, 人工砍收下的甘蔗净蔗得率从 75.76%显著提升至 84.90%; 而分步式机收的含杂率也从 6.42%显著降至 4.52%, 选择在 1 月份之后甘蔗充分成熟的窗口期作业, 可有效控制原料杂质。本研究还发现, 糖厂的商业扣杂标准与田间实测含杂率存在“评价错位”, 表现出显著的品种间差异, 可能影响新技术的公平推广。分步式机收是适应我国丘陵山地特点, 兼顾经济效益与生态可持续性的优选收获模式, 其推广策略应优先聚焦于建立基于生育进程的作业时间表, 而非为现有品种开发差异化的收获系统。该模式为丘陵蔗区机械化提供可量化、可推广的解决方案, 对增强我国糖业竞争力与保障糖业安全具有重要实践价值和战略意义。

关键词: 甘蔗; 丘陵山区; 分步式机收; 经济效益; 商业品种

中图分类号: S225.5.3 文献标志码: A

Analysis of Feasibility and Economic Benefits of Separate Mechanical Harvesting for Sugarcane

AI Jing^{1,2}, LI Bao^{3*}, WANG Yutong^{1,2}, YI Xiangyan³, DAO Jingmei^{1,2}, ZHAO Yong^{1,2}, LI Hongjun³,
YANG Shaocong³, DENG Jun^{1,2**}, ZHANG Yuebin^{1,2**}

1. State Key Laboratory of Tropical Crop Breeding / Sugarcane Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kaiyuan, Yunnan 661699, China; 2. Key Laboratory of Sugarcane Biology and Genetic Breeding, Kaiyuan, Yunnan 661699, China; 3. Local Industrial Development Service Center of Gengma Dai and Wa Autonomous County, Gengma, Yunnan 677507, China

Abstract: The primary bottleneck restricting sugarcane harvesting mechanization in China's hilly regions is fragmented terrain combined with narrow-row, high-density planting. This study was aimed to systematically analyze the effects of a two-step mechanical harvesting model on production efficiency, raw material quality, and farmer's income, thereby

收稿日期 2025-10-10; 接受日期 2025-11-21

基金项目 云南省农业农村厅农业关键核心技术攻关项目(No. 2025HXJSGG0104); 热带作物生物育种全国重点实验室自主课题项目(No. SKLTCB-YAAS-2025-04); 高层次科技人才及创新团队选拔专项(No. 202205AD160014)。

作者简介 艾 静(1995—), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 甘蔗栽培生理、生化; *同等贡献作者: 李 宝(1979—), 男, 学士, 农艺师, 研究方向: 甘蔗生产技术示范推广。**通信作者(Corresponding author): 邓 军(DENG Jun), E-mail: dj@yaas.org.cn; 张跃彬(ZHANG Yuebin), E-mail: ynzbyb@sohu.com。

clarifying its application potential and promotion strategies in these regions. During the 2023/2024 and 2024/2025 harvesting seasons in Gengma, field experiments and cost-benefit analyses were conducted to compare four harvesting models, Combine Harvesting, Traditional Manual, Commissioned Processing, and Raw Cane Sale. Statistical methods, including ANOVA, were employed to analyze the effects of sugarcane growth stages and major cultivars on the impurity rate of raw materials. The Commissioned Processing model increased farmer's net income to 365.00 yuan/t over the Traditional Manual model (farmer's net income 318.00 yuan/t), an increase of 14.80%, while reducing harvesting costs 42.06%. The income was comparable to the Combine Harvesting model but effectively avoided the severe damage to sugarcane ratoons caused by the latter. Regarding raw material quality, genetic differences among cultivars had no significant effect on the impurity rate, whereas harvest time was the dominant factor. As the harvest period was extended from December to the following April, the net cane rate under Traditional Manual model significantly increased from 75.76% to 84.90%. Correspondingly, the impurity rate of two-step mechanized harvesting decreased from 6.42% to 4.52%, indicating that scheduling operations within the full maturity window after January effectively controls raw material impurities. The study also revealed a misalignment between the commercial impurity deduction standards of sugar mills and field-measured impurity rates. This discrepancy, characterized by significant inter-varietal differences, could hinder the fair promotion of this new technology. The two-step mechanical harvesting model is an optimal choice for China's hilly regions, balancing economic benefits with ecological sustainability. Its promotion strategy should prioritize establishing a precise operational timetable based on sugarcane growth stages rather than developing differentiated harvesting systems for existing cultivars. This model would provide a quantifiable and scalable solution for mechanization in hilly sugarcane areas, holding significant practical value and strategic importance for enhancing the competitiveness of national sugar industry and ensuring sugar security.

Keywords: sugarcane; rugged topography; multi-stage harvesting; cost-benefit analysis; commercial cultivars

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.01.013

甘蔗 (*Saccharum* spp.) 作为全球重要的糖料作物和生物质能源的原料^[1], 其生产机械化水平直接关系国家食糖稳定供给安全及农业现代化进程^[2]。中国作为世界第三大甘蔗生产国^[3], 在推进农业机械化进程中面临严峻挑战。近年来, 全国甘蔗种植面积呈现恢复性增长态势^[2, 4-5], 2024/2025 榨季全国甘蔗种植面积达 148.00 万 hm^2 , 较前三榨季 (2021/2022、2022/2023 和 2023/2024) 平均种植面积增长 4.2%^[4], 但产业发展仍受制于关键环节机械化水平的不均衡, 且问题愈发突出。

当前, 我国甘蔗生产机械化呈现明显的结构性矛盾, 虽然主产区机械化耕作率已达 95%, 但关键环节的机械化率呈现显著失衡, 种植环节机种率为 37.37%, 而收获环节机械化率仅为 12.03%^[6], 成为制约糖业转型升级的主要瓶颈。这种结构性失衡主要源于我国特殊的甘蔗种植地理条件 (全国 80% 的甘蔗种植区分布在丘陵山区^[7]), 这些地区的地形破碎化与坡度异质性特征显著, 加上传统的窄行密植 (行距 1.0~1.2 m) 模式^[8], 给机械化收获带来三重技术瓶颈。首先, 丘陵山区复杂的地形条件, 导致传统联合收获机械作业效率较平原地区下降 52%~68%^[8-10]; 其次, 重型机械作业造成的宿根蔗蔸损伤, 使甘蔗宿根栽培年限缩短 1.2~1.8 a^[2, 11]; 第三, 机械收获含杂率普遍

高于人工收获 3.5%~5.8%^[12], 直接影响糖厂收购效益, 形成“农户-糖厂”双向利益损失链。这些技术瓶颈相互关联、彼此制约, 共同阻碍了丘陵蔗区机械化收获的推广应用。

为突破这一产业困境, 分步式机收模式通过创新性地采用工序拆解, 结合多种装备协同并通过资源整合的技术路径, 将传统的一次性联合收获分解为砍倒、集堆、剥叶等独立工序, 实现了对复杂地形的适应性作业^[13]。该模式在云南、广西等试点地区展现出显著优势: 提升了丘陵山地作业覆盖率, 降低甘蔗宿根损伤率^[14], 且通过“收获-蔗叶离田”一体化作业^[13], 能有效解决蔗叶收集困难与禁止焚烧蔗叶的矛盾, 并提升甘蔗资源化利用水平; 此外, 分步式机收在截断剥叶环节的甘蔗损耗率较人工处理高 3.1%, 但显著低于联合收获机 13.5%~15.8% 的损耗区间^[9]。

然而, 分步式机收模式的推广应用仍面临两大科学问题亟待解决。一方面, 机械经济性量化评估体系缺失, 导致装备适配性与全周期成本之间缺乏科学的关联模型; 另一方面, 农艺特性与机械参数的匹配机制不明确, 主栽品种特性 (如抗压强度) 与机械参数 (如喂入速率) 缺乏系统的耦合关系。这些问题制约了分步式机收模式的标准化和规模化应用。因此, 通过对丘陵山地主

栽甘蔗品种的机械化收获含杂率进行量化评估,可为糖厂、蔗农以及相关科研人员在评估分步式机收下的甘蔗含杂率提供参考依据。

为此,本研究基于 2023/2024、2024/2025 榨季,通过甘蔗原料杂质溯源试验,连续跟踪调查和分析丘陵山区甘蔗分步式机收的可行性与经济效益。研究重点围绕机械作业参数优化、品种适应性评价和经济性分析 3 个维度展开,旨在构建科学的分步式机收评价体系和利益分配机制,为推动我国丘陵蔗区机械化收获提供理论依据和技术支撑。以上结果将为分步收获模式提供主栽品种评价标准及利益分配算法,驱动丘陵山地蔗区机械化收获发展,为我国甘蔗生产机械化的可持续发展提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 材料

研究以云南省临沧市耿马傣族佤族自治县(以下简称“耿马县”)为试验调研区域。耿马县地处我国西南边陲,地处横断山脉南延段,属典型滇西南丘陵山地蔗区,具有区域代表性。蔗糖产业是耿马县“一县一业”特色产业,耿马县甘蔗种植面积连续 5 a 稳定在 2.5 万 hm^2 以上,2024/2025 榨季,入榨甘蔗原料 235.46 万 t。2020/2021、2021/2022、2022/2023、2023/2024、

2024/2025 榨季耿马县甘蔗产量分别占云南省甘蔗入榨量的 13.60%、13.33%、12.45%、12.91%和 13.04%,是国家糖料蔗核心基地和生产保护区之一(表 1)。研究聚焦该区域主栽甘蔗品种:云蔗 081609、粤糖 93-159、桂柳 05-136 和云蔗 0551。

表 1 耿马县糖料蔗产量

Tab. 1 Sugarcane production 10 000 t

产区 Production region	2020/ 2021	2021/ 2022	2022/ 2023	2023/ 2024	2024/ 2025
云南	1696.40	1555.31	1514.59	1544.94	1806.30
耿马县	230.68	207.29	188.53	199.46	235.46

1.2 方法

试验采用对照设计,设置 2 类处理,分别: T_1 ,分步式机收(含杂率测定)。该处理将甘蔗收获过程中的砍倒、集纳、剥叶等环节拆分为多个阶段,以机械化或半机械化的方式分步完成。具体作业流程主要包括 2 种形式:一是采用剥叶机^[15]在田间直接剥叶,随后进行机械割铺^[13](或堆放)并整杆转运至糖厂;二是先通过机械割铺或人工砍倒,再利用装载机集中搬运至剥叶站进行统一处理,最终将甘蔗运送至糖厂压榨(图 1)。本研究重点关注第二种分步式机械收获方式,并于 2023/2024 榨季在云南耿马县丘陵山区糖料蔗主产区,对该方式的实际效果开展持续跟踪调查与



图 1 甘蔗分步式机械收获模块解析

Fig. 1 Analysis of two-step mechanical harvesting module of sugarcane

数据采集，系统评估其含杂率表现。T₂，全程人工砍收（含杂率测定）。该处理采用传统人工砍收方式，全程依赖人工完成砍伐、剥叶和集堆等作业，并同步进行含杂率测定。试验涵盖了不同品种在不同收获月份下的含杂情况，以全面评估 2 种收获方式的杂质含量特征及影响因素。

1.2.1 分步式机收含杂率测定 样品采集：选择规范操作的分步式机收剥叶站，在 2023/2024 榨季甘蔗成熟期（11 月一次年 4 月），每月 15 日前后 3 d 进行采样。采用分层随机抽样法，选取 5 个机械化剥叶站，每站连续抽取 3 批次样本（单批次 100~150 kg），每批次重复测定 3 次，取平均值。杂质分离：现场称量原始样本总质量（W_{total}），人工分拣杂质（包括：未剥离叶片、叶鞘、根系泥土及异物），使用精度±0.1 kg 的电子秤称量净蔗质量（W_{clean}）。

机械收获含杂率 = $\frac{W_{total} - W_{clean}}{W_{total}} \times 100\%$

1.2.2 人工砍收含杂率测定 田间设计：在相同品种地块设置 5 个 30 m×30 m 对照小区（与 T₁ 处理区土壤类型、坡度、肥力条件一致），每个小区用对角线法选取 6 个采样点（间隔 5 m），每点连续砍收 10 株甘蔗（单小区样本量≥60 株）。组分分离：称量毛蔗质量（W_{raw}）后，人工剥离叶片（W_{leaf}）、叶梢（W_{sheath}）及净蔗（W_{clean}）。

叶占比 = $\frac{W_{leaf}}{W_{raw}} \times 100\%$

梢占比 = $\frac{W_{sheath}}{W_{raw}} \times 100\%$

净蔗得率 = $\frac{W_{clean}}{W_{raw}} \times 100\%$

1.3 数据处理

采用 WPS Office 软件进行数据的初步整理，相关统计分析在 R（版本 4.4.3）环境中完成。采用方差分析（ANOVA）检验组间总体差异，其模型适用性（如残差的正态性与方差齐性）通过了必要的诊断。对于 ANOVA 中呈现显著差异的指标，进一步使用 agricolae 程序包中的 LSD.test() 函数，在 P<0.05 水平下进行最小显著性差异法（LSD）多重比较。针对甘蔗主栽品种与不同收获月份间的具体差异，则利用 agricolae 包中的 duncan.test() 函数执行 Duncan’s 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同月份甘蔗农艺性状动态特征

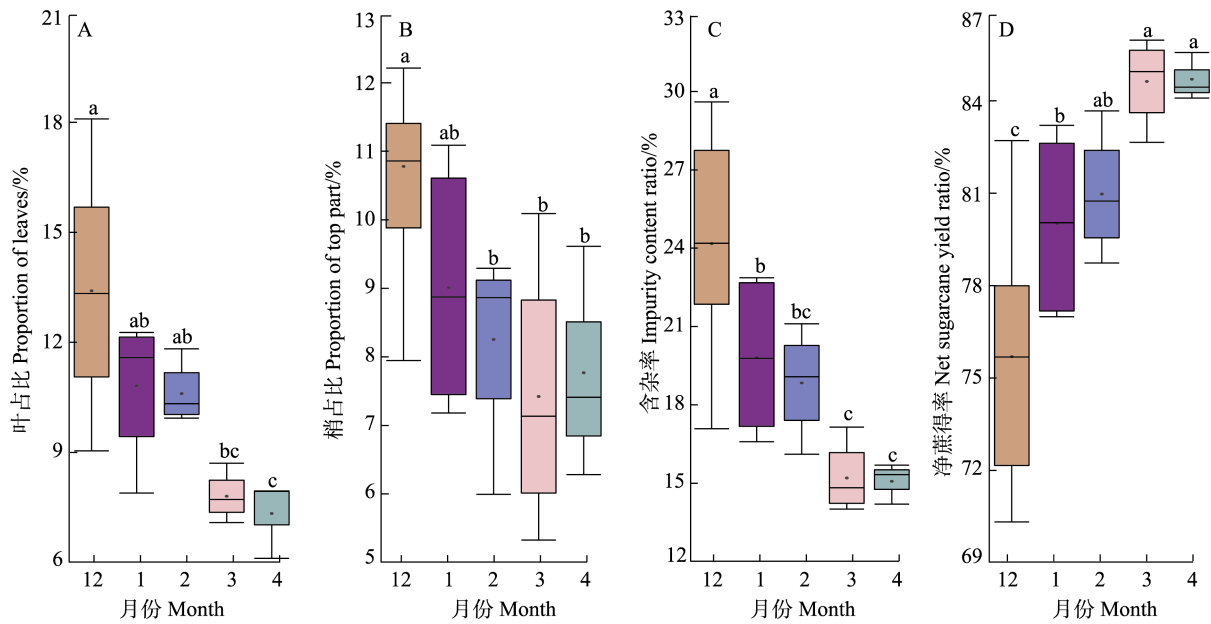
在甘蔗收获期，对甘蔗进行人工砍收，结果表明，甘蔗单株净质量并未表现出明显差异（表 2），但随着甘蔗生长期延长，净蔗得率逐渐上升（图 2）。甘蔗杂质组分分解特征分析表明，甘蔗含杂率占比由 12 月的 24.24% 降至 4 月的 15.10%，即随着生长期延长，成熟度增加，含杂率逐渐降低。净蔗得率从 12 月的 (75.76±4.37)% 显著上升至 4 月的 (84.90±0.79)%（P<0.05），月均增长率为 1.83%。由此可见，在整个收获期，随着生长期延长，净甘蔗质量显著增加，甘蔗含杂率逐渐下降，3 月为拐点，净蔗得率为 (84.83±1.46)%，含杂率为 (15.23±1.39)%。另外，在整个成熟期，平均净蔗得率占比为 81.35%，甘蔗平均总杂质占比为 18.65%（其中叶占比 10.00%，梢占比 8.65%）。甘蔗叶、梢占比也随着生长期延长显著下降，即甘蔗叶占比降幅显著，由 12 月的 13.44% 降至 7.02%（P<0.05）；甘蔗梢占比降幅由 12 月的 10.80% 降至 4 月的 7.77%（图 2）。

表 2 成熟期人工砍收甘蔗调查表
Tab. 2 Questionnaire of hand-harvested sugarcane at maturity stage

月份 Month	毛蔗质量 Raw mass/kg	净蔗质量 Clean mass/kg	株数 Number	叶质量 Leaf mass/kg	梢质量 Sheath mass/kg
2023 年 12 月	1596.05	1210.80	790	213.95	171.30
2024 年 01 月	1214.67	973.28	555	132.73	108.66
2024 年 02 月	764.50	621.70	361	80.40	62.40
2024 年 03 月	717.85	608.60	346	56.00	53.65

2.2 人工收获下不同甘蔗主栽品种农艺性状特征

对云蔗 081609、粤糖 93-159、桂柳 05-136 和云蔗 0551 的成熟期人工砍收数据进行方差分析，结果表明，在人工收获下，蔗叶、蔗梢及含杂率无显著品种主效应，4 个品种的蔗叶占比、梢占比、含杂率和净蔗得率方面也并未表现出显著差异。在成熟期，不同品种的净蔗得率为 79.30%~80.13%；叶、梢总占比 19.87%~20.70%，其中叶占比为 9.29%~11.94%，梢占比为 8.75%~10.58%（图 3）。具体来看，云南当前主栽的甘蔗品种中，叶、梢总占比排序为桂柳 05-136（19.87%）< 云蔗 081609（20.14%）< 粤糖 93-159（20.40%）< 云蔗 0551（20.70%）。然而，随着

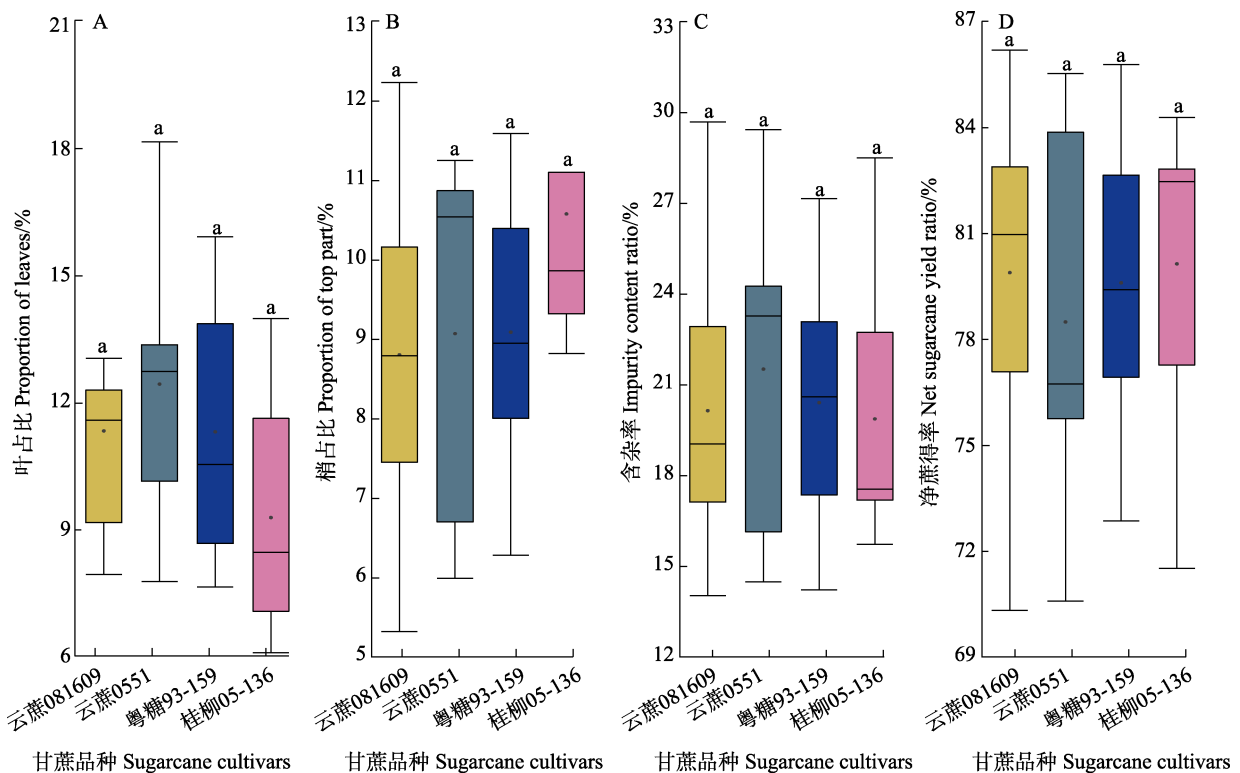


不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 2 不同月份甘蔗叶占比 (A)、梢占比 (B)、含杂率 (C) 及净蔗得率 (D)

Fig. 2 Proportion of leaves in sugarcane (A), proportion of top part in sugarcane (B), impurity content ratio (C), and net sugarcane yield ratio (D) in different months



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 3 收获期不同甘蔗主栽品种蔗叶占比 (A)、梢占比 (B)、含杂率 (C) 及净蔗得率 (D)

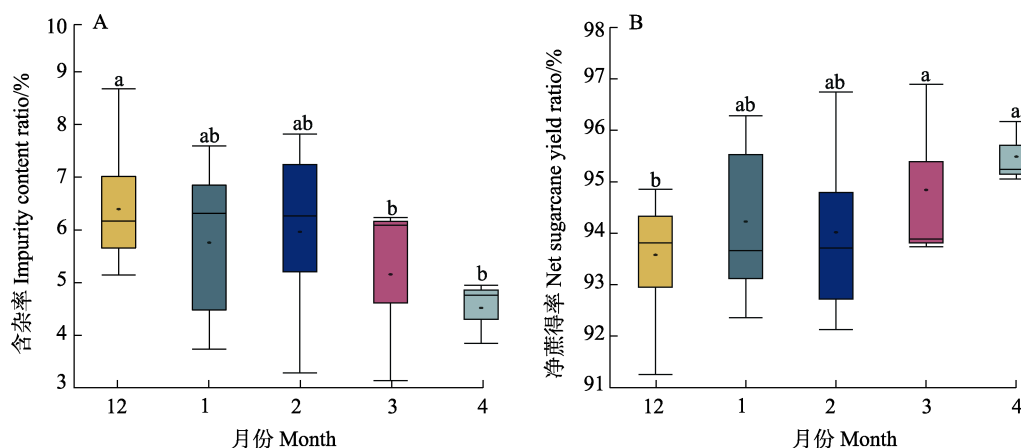
Fig. 3 Proportion of sugarcane leaves (A), proportion of top part of sugarcane (B), impurity content ratio (C), and net sugarcane yield rate (D) among different main sugarcane cultivars during the harvest period

甘蔗收获期的延长, 蔗叶和蔗梢的占比显著下降, 但品种遗传差异对甘蔗人工收获的含杂率、净蔗

得率及叶梢组分无显著影响, 说明品种差异并非 是决定这些指标的主要因素。

2.3 分步式机收下不同月份净蔗得率及含杂率

基于 2023/2024 榨季对分步式机收剥叶站跟踪监测,分步式机收含杂率呈现显著时序特征(图 4)。成熟期在剥叶站集中机械剥叶后,分步式机收平均含杂率为 5.57%,其中 12 月的含杂率最高(6.42%),而次年 4 月的含杂率最低(4.52%)(图 4A)。12 月机收的净蔗得率最低(93.58%),而随着生长期的延长,分步式机收的净蔗得率增加,至次年 4 月达到最高(95.48%)(图 4B)。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

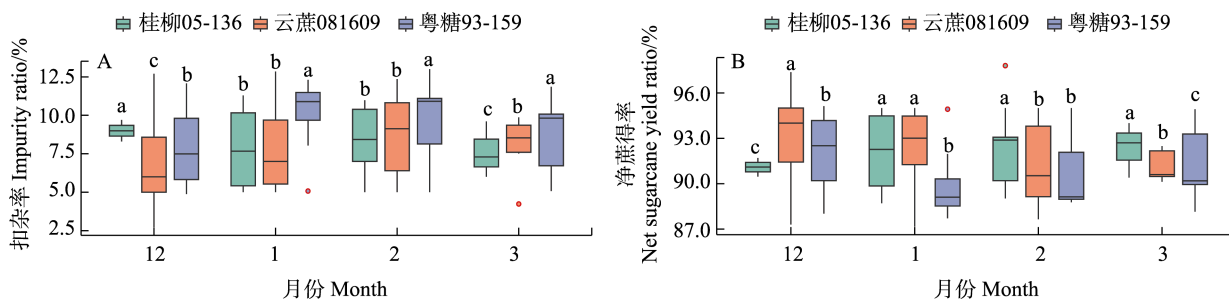
图 4 不同月份分步式机械收获含杂率 (A) 和净蔗得率 (B)

Fig. 4 Impurity content ratio (A) and net sugarcane yield ratio (B) by two-step mechanical harvesting among different months

2.4 糖厂对分步式机收下不同甘蔗主栽品种的扣杂及净蔗得率

在 2024/2025 榨季,跟踪 3 个甘蔗主栽品种在分步式甘蔗机收集中剥叶站经分步式机收剥叶处理后进入糖厂的扣杂及净蔗得率。结果表明,糖厂对不同品种在不同收获月份分步式机收扣杂及净蔗得率有显著差异(图 5),品种差异显著影响糖厂对机收甘蔗扣杂比例。糖厂对分步式机收

成熟期甘蔗的分步式机收含杂率受砍收时期显著影响,随着生长期的延长和甘蔗脱叶性及成熟度的加深,机收含杂率下降。目前,耿马县蔗区的糖厂在收购集中剥叶站的分步式机收的甘蔗时,会扣除 5.00% 的含杂率,这一参数还获得蔗农、剥叶站和糖厂三方的共同认可。分步式机收的高效率提高了甘蔗砍收速度,有效缩短了榨季,降低了工厂运营成本,确保了下一个榨季甘蔗的生长周期,从而有效保障了下一个榨季的甘蔗产量。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$).

图 5 不同月份的不同甘蔗品种分步式机械收获扣杂率 (A) 和净蔗得率 (B)

Fig. 5 Impurity ratio (A) and net sugarcane yield ratio (B) in different sugarcane varieties by two-step mechanical harvesting among different months

分步式机收机收剥叶扣杂比例的关键因素之一。

2.5 不同甘蔗收获模式的经济效益比较

为了清晰地比较不同甘蔗收获模式的经济效益,本研究以云南耿马县蔗区为例,将收获方式归纳为 4 种典型模式进行分析。这 4 种模式分别为:(1)“联合机收”模式。全程采用大型联合收割机完成砍收作业。(2)“传统人工”模式。全程人工砍收、剥叶,将净蔗交售至糖厂。(3)“委托加工”模式。蔗农人工砍收毛料甘蔗,委托集中剥叶站进行剥叶处理并代为交售。(4)“毛蔗交售”模式。蔗农人工砍收毛料甘蔗后,直接将其出售给集中剥叶站。以甘蔗基准收购价 470 元/t 测算,4 种模式在成本与蔗农收益方面表现出明显差异(图 6)。从蔗农收益来看,“联合机收”模式的每吨净收益最高(370.00 元/t)。然而,其对宿根生长有影响,据胡朝晖^[13]调查,次年出苗率降低 51.70%,导致其在丘陵蔗区的可持续性备受挑战。与之相对,“传统人工”模式的收益(318.00 元/t)虽尚可,但其砍收成本(152.00 元/t)在所有模式中最高,经济效益低下。作为分步式机收的两种核心形式,“委托加工”模式和“毛蔗交售”模式则提供了更优的平衡。其中,“委托加工”模式的蔗农净收益(365.00 元/t)接近“联合机收”模式收益,且有效规避了机械进

蔗地对宿根蔗根的碾压,有利于延长宿根年限。而“毛蔗交售”模式虽然每吨净收益相对较低(257.1 元/t),但该模式将蔗农从繁重的剥叶、运输环节中彻底解放出来,用工最少,劳动成本最低。综合对比,“传统人工”模式的砍收成本是“毛蔗交售”模式的 3.54 倍,凸显了传统收获方式的劣势。因此,以“委托加工”和“毛蔗交售”为代表的分步式机收模式,通过灵活解耦收获工序,为蔗农提供了兼顾高收益、宿根保护和劳动力解放的有效途径,是推动产业降本增效的关键举措。

2.6 分步式机收集中剥叶站经营商收益分析

甘蔗分步式机收的关键是实现蔗农、集中剥叶站、制糖企业的共赢,促进甘蔗产业节本增效。集中剥叶站的稳定高效运行是甘蔗分步式机收的关键,收益是剥叶站持续经营的重点。实际调研中,剥叶站日进站 133 t 毛甘蔗,剥叶处理后糖厂实际过磅为 100 t,需要配备 3 名工作人员,前端喂料 1 人、剥叶操作 1 人、后端出料 1 人,人均工资 200 元/人。剥叶站装机容量 100 kW,电费 1.2 元/(kW·h),平均加工每吨甘蔗需要支出运营电费 12 元,设备维保费用 15 元/t,蔗梢收益为 200 元/t(图 7)^[16]。分步式机收集中剥叶站现行 2 种经营模式,一是代加工毛料甘蔗模式,蔗农将甘蔗

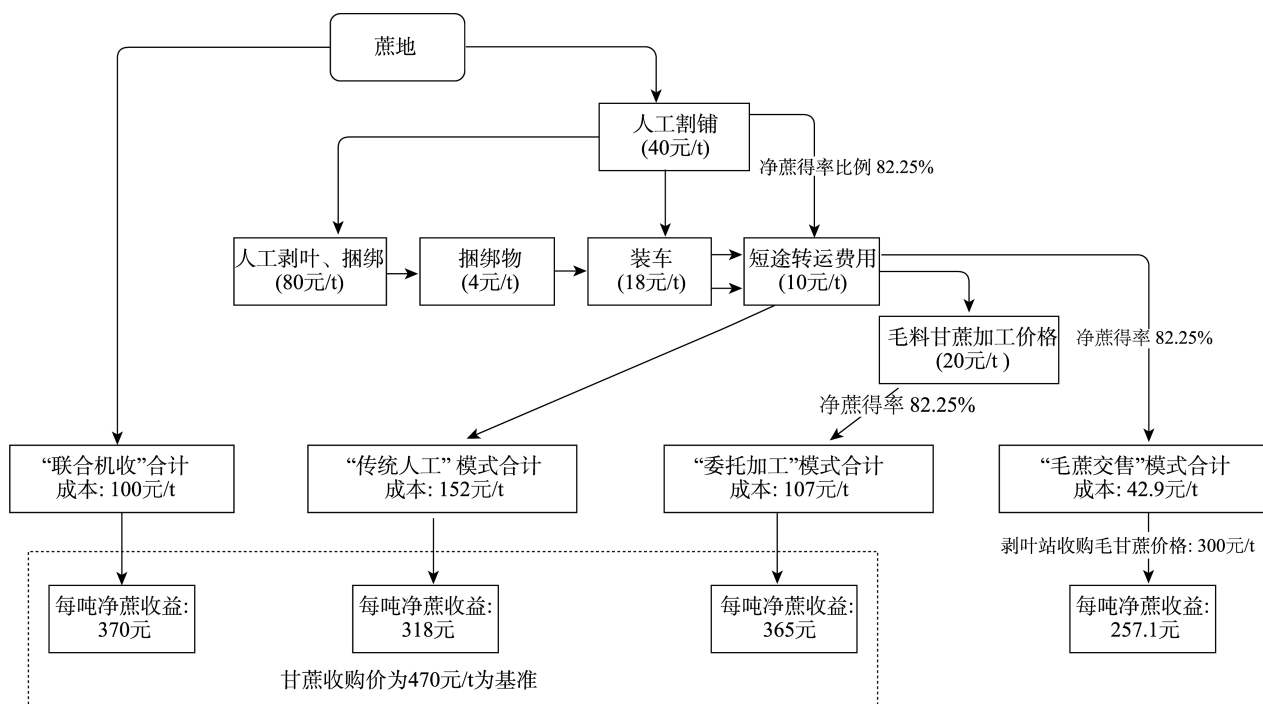


图 6 不同甘蔗收获方式下的收获成本与收益计算分析

Fig. 6 Calculation and analysis of costs and benefits of different sugarcane harvesting methods

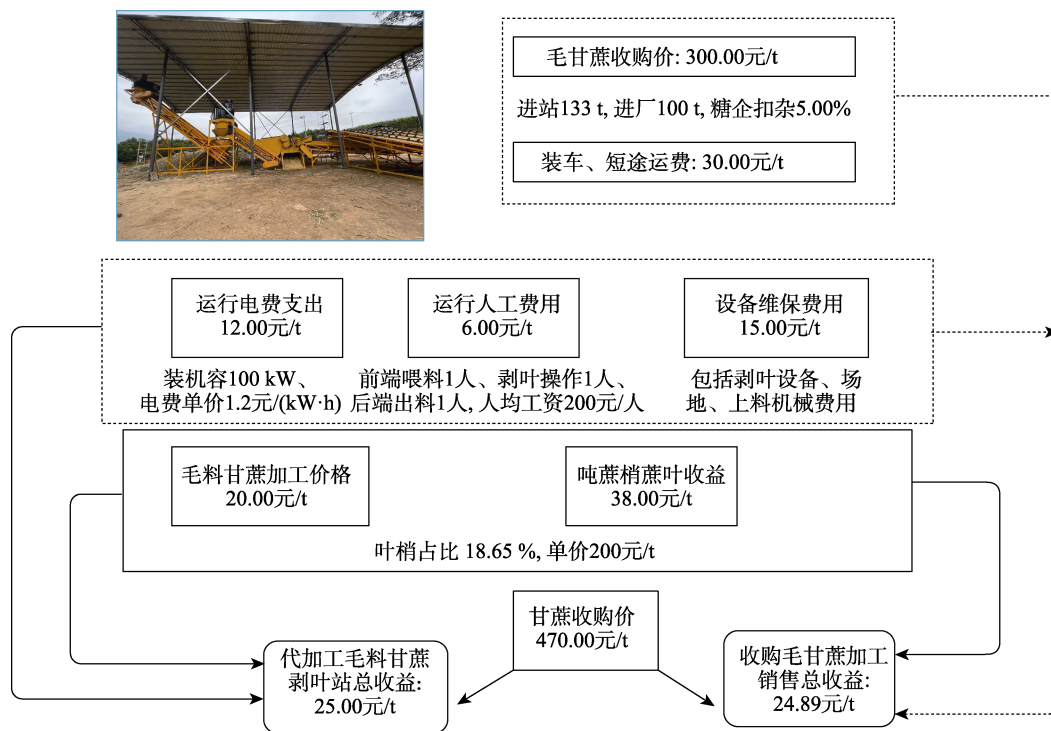


图7 剥叶站不同经营模式的收益

Fig. 7 Revenues of different business models of leaf-stripping stations

砍倒，集中堆放后，由剥叶站服务商为蔗农提供短途运输和集中剥叶除杂服务；二是剥叶站运营商向蔗农收购毛甘蔗，集中剥叶处理后销售净甘蔗至糖厂（图7）。2种加工方式下，剥叶站运营商均能获得收益。按照剥叶站每天加工100 t净甘蔗测算，代加工毛料甘蔗模式每日收益为2500.00元，剥叶站运营商向蔗农收购毛甘蔗加工销售的模式每日收益为2489.00元，按照每榨季剥叶站运营100 d测算，2种经营模式下剥叶站年收益为250 000.00元和248 900.00元。

3 讨论

3.1 分步式机收对丘陵山地甘蔗生产的影响

分步式机收通过标准化处理流程和资源化利用，显著提升了甘蔗生产效率与产业附加值。2022/2023榨季，甘蔗分步式机收在云南蔗区开始试运行^[17]，分步式机收通过“工序解耦-装备协同”策略，将砍倒、集纳、剥叶等环节拆分^[13]，解决了甘蔗联合机械收获在窄行密植种植模式（行距1.0~1.2 m）和丘陵山区地形破碎化条件下的作业限制^[14]。分步式机收方式对地形和地块的适应性较强，能够更好地发挥机械化收获的优势，满足我国甘蔗种植户规模小、土地碎片化以及以

丘陵山区为主的种植现实^[11]。通过人工或小型机械进行割铺（堆）机砍倒后，甘蔗被集中转运至处理点进行进一步处理，避免了联合收割机进田碾压蔗桩的问题，从而保障了次年甘蔗的有效茎数^[18]。这种方式不仅能够延长甘蔗宿根年限，还能有效保障甘蔗产量^[17]。分步式机收经营模式多样、灵活性高，蔗农可根据地块及自身劳动力情况拆分工序，可选择全流程机械化或部分工序人工砍收，分步式机收剥叶站服务商采取分段的收费方式，同时也有部分蔗农将蔗田中毛甘蔗一次性销售给剥叶站省去砍、运、结算等流程，剥叶站剥叶除杂后运至糖厂结算。甘蔗分步式机收的经营方式多样，一方面大幅节省劳力、提高甘蔗砍收的工作效率，另一方面各砍收环节操作更灵活，按实际机械砍收工序收费，收费方式多样。分步式机收将砍收、剥叶、运输分开处理，不同步骤在不同的区域完成，相对联合收割机减少对蔗地的碾压^[13]，并通过轻简化割铺集运，规避机械进田过渡碾压，从而保障宿根有效茎基数，为延长宿根年限提供技术路径。得益于分步式机收可以灵活进行工序拆分，即可开展分段式收费，针对砍收中重劳力及工序复杂的环节使用机械开展，不仅提高了工作效率，大幅节省劳动力，还为蔗农实现

利益最大化提供了保障^[14], 灵活实现节本增收。集中剥叶实现了甘蔗资源化利用增效, 蔗叶经集中处理转化为饲料、肥料、生物质燃料等^[19], 调查区域耿马县实现每吨蔗叶可增收 38 元, 同时减少露天焚烧污染, 减少甘蔗产业碳排放。

3.2 分步式机收对丘陵山地甘蔗质量的影响

分步式机收对甘蔗质量的影响呈现出多重因素交织的复杂性^[13, 20], 其中, 农艺性状与收获时机是决定原料质量的核心。该模式虽提升了作业灵活性, 但其切段式作业增加了甘蔗伤流截面, 若收获后堆放时间过长, 易加剧水分蒸发与微生物侵染, 对原料品质构成潜在威胁^[21-22]。本研究的核心发现是, 在分步式机收模式下, 甘蔗的含杂率主要受生育进程调控, 而非品种基因型。研究表明, 随着甘蔗进入成熟期, 其含杂率呈现显著的时序性下降, 仅从含杂率方面考虑, 云南耿马县蔗区在每年 1 月后进入最佳机收窗口期。这一结果凸显了精准选择收获期对于控制杂质的关键作用, 同时也反映了机收适宜期存在区域特异性, 与广西蔗区 11—12 月的结论有所不同^[23]。然而, 品种差异的影响机制更为复杂。一方面, 尽管本研究中参试品种 (均为高大茎重型) 的机收实测含杂率无显著差异, 这与其他研究发现的品种形态影响剥叶效果的结论^[12]有所不同; 但另一方面, 糖厂在实际收购中, 其扣杂标准却表现出显著的品种间差异。这表明糖厂的扣杂标准与田间实测含杂率不完全等同, 可能还受到品种的脱叶难易度、感官形态等商业性状的综合影响。综合来看, 对于耿马县蔗区当前主栽品种而言, 生育期是影响机收质量最主要且可控的变量。因此, 优化分步式机收效益的关键策略应聚焦于根据甘蔗生育进程制定精准的作业时间表, 而非为不同品种开发差异化的收获系统。这为简化机械化推广策略、实现区域节本增效提供了科学依据。

3.3 分步式机收对农民种蔗和剥叶站运行效益影响

分步式机收模式的推广, 深刻影响着蔗农与集中剥叶站两大利益联结方的经济效益, 并对产业链协同提出了新的要求。基于耿马县蔗区实例, 从蔗农收益分析, 甘蔗分步式机收相对于全程人工砍收的成本降低 42.06%, 其中“委托加工”要比“毛蔗交售”的方式获得更多的收益。有研究表明, 品种差异会造成甘蔗脱叶性差异^[24], 机械

剥叶容易造成甘蔗叶片剥除不干净的现象, 糖厂对集中剥叶的不同甘蔗品种的扣杂标准也因而难以权衡。此外, 集中剥叶站的操作人员操作水平参差不齐, 在甘蔗剥叶喂料中, 抓放不均匀, 造成剥叶除杂机难以均匀地除去甘蔗杂质, 造成剥叶效果差, 集中剥叶的甘蔗含杂率高^[17]。集中剥叶站生产线投产成本高^[13], 稳定的甘蔗进站剥叶量是维持其正常运营的关键, 现阶段集中剥叶站稳步增长的趋势, 需警惕供过于求, 造成剥叶站闲置的问题。针对以上问题, 需要多方协作, 共同为蔗糖产业长效稳定发展保驾护航。需满足糖厂优先入榨集中剥叶站砍收的甘蔗, 合理分配每日入榨不同砍收方式下砍收的甘蔗, 以保障入榨甘蔗的品质, 确保原料质量。剥叶机制造商及相关科技人员, 不断改进剥叶设备的工作效果, 有效降低集中剥叶后甘蔗含杂率。选育、选种脱叶性好的甘蔗, 同时在蔗区合理布置不同成熟期品种, 避免甘蔗品种单一造成成熟期一致带来入榨拥堵问题。政府、企业、剥叶站经营商需对剥叶站从业人员进行专业培训, 避免因操作不规范造成甘蔗剥叶效果差含杂高的现象, 合理扣除集中剥叶站剥叶甘蔗的含杂率, 合理规划剥叶站数量, 并加强监管, 保障蔗农、剥叶站经营商及糖企三方利益。

4 结论

本研究表明分步式机械化收获模式在经济上可行、技术上可控, 是破解当前产业困境的现实选择, 这为丘陵山地甘蔗产业的转型升级提供了关键数据支持与决策依据。分步式机械收获其灵活的模式使得砍倒、集纳、剥叶等一体化工作流程可以拆分, 分别采用机械化或半机械化的作业模式完成不同环节, 与传统人工砍收相比, 在降低劳动力依赖、提升收获效率方面优势明显, 展现出显著的节本增效潜力, 是推动丘陵山地蔗区可持续发展的关键技术路径。本次调查表明, 决定机收质量的关键不在于“收什么品种”, 而在于“什么时候收”。通过选择在 1 月后甘蔗充分成熟的窗口期作业, 可有效控制原料杂质, 保障工业生产质量。甘蔗的含杂率与生育进程高度相关, 而非品种本身。基于耿马蔗区调查数据, 我们认为丘陵山地甘蔗机械化的优化策略应优先聚焦于建立基于生育进程的作业表, 而非为现有品种开发差异化的收获系统。未来研究应着重于:

(1)将研究范围扩大至更多生态蔗区及不同农艺性状的甘蔗品种,以验证普适性;(2)深化“农机-农艺-产业”协同机制研究,构建科学统一的分步式机收质量评价标准;探索实施“两刀法”割铺,即甘蔗基部切割和正一叶下方30~40 cm处去梢;(3)开展长期定位试验,评估分步式机收对土壤健康及宿根蔗萌发与生长的持续性影响。

参考文献

- [1] 周一帆, 杨林生, 孟博, 战健, 邓燕. 中国甘蔗主产区产量差及影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2021, 54(11): 2377-2388.
ZHOU Y F, YANG L S, MENG B, ZHAN J, DENG Y. Analysis of yield gaps and limiting factors in China's main sugarcane production areas[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(11): 2377-2388. (in Chinese)
- [2] 甘蔗专业组. 甘蔗生产全程机械化发展报告[Z]. 2023 农作物生产全程机械化发展报告汇编. 北京: 农业农村部农作物生产全程机械化专家指导组, 2023: 141-178.
Sugarcane Professional Group. Development report on whole-process mechanization for sugarcane production[Z]. Compilation of development reports on Whole-Process Mechanization of Crop Production 2023. Beijing: Crop Whole-Process Mechanization Expert Guidance Group, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, 2023: 141-178. (in Chinese)
- [3] 王学清, 张静. 中国甘蔗产业支持政策及相关发展思路[J]. 农业展望, 2018, 14(1): 43-48, 53.
WANG X Q, ZHANG J. Support policy and relevant development ideas of China's sugarcane industry[J]. Agricultural Outlook, 2018, 14(1): 43-48, 53. (in Chinese)
- [4] 邓军, 武晋宇, 张跃彬, 杨绍林, 王禹童, 艾静, 白林, 王智能. 云南蔗糖产业“十四五”成效与“十五五”发展对策[J]. 甘蔗糖业, 2025, 54(3): 110-117.
DENG J, WU J Y, ZHANG Y B, YANG S L, WANG Y T, AI J, BAI L, WNAG Z N. The “14th Five-year Plan” achievement and “15th Five-year Plan” development strategies of the sugarcane industry in Yunnan[J]. Sugarcane and Canesugar, 2025, 54(3): 110-117. (in Chinese)
- [5] 刘晓雪, 王京, 周靖昀. 2001—2020 年我国甘蔗成本收益动态演变与原因探究[J]. 甘蔗糖业, 2023, 52(3): 55-70.
LIU X X, WANG J, ZHOU J Y. Research on the dynamic evolution and reasons of sugarcane cost benefit in China from 2001 to 2020[J]. Sugarcane and Canesugar, 2023, 52(3): 55-70. (in Chinese)
- [6] 区颖刚. 我国甘蔗主产区机械化收获情况调研[J]. 农机质量与监督, 2024(2): 10-12.
OU Y G. Investigation on mechanized harvesting in major sugarcane producing areas of China[J]. Agricultural Machinery Quality & Supervision, 2024(2): 10-12. (in Chinese)
- [7] 郭家文. 云南甘蔗主产区土壤养分状况研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2011.
GUO J W. Research on soil nutrient status in the main sugarcane production areas of Yunnan province[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2011. (in Chinese)
- [8] 罗俊, 张华, 郭伟, 杨颖颖, 李文萍, 林兆里. 不同行距与群体密度对甘蔗生长的影响[J]. 热带作物学报, 2012, 33(1): 50-54.
LUO J, ZHANG H, GUO W, YANG Y Y, LI W P, LIN Z L. Effect of line-width and planting density to sugarcane varieties[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012, 33(1): 50-54. (in Chinese)
- [9] 胡朝晖. 浅析我国甘蔗生产全程机械化的困境与前景[J]. 甘蔗糖业, 2020(3): 7-13.
HU Z H. Difficulties and prospects of sugarcane production mechanization in China[J]. Sugarcane and Canesugar, 2020(3): 7-13. (in Chinese)
- [10] 陆盼. 广西甘蔗机械化收获发展现状调查及影响因素研究[D]. 南宁: 广西大学, 2021.
LU P. Investigation on the development status of sugarcane mechanized harvest in Guangxi and influencing factors[D]. Nanning: Guangxi University, 2021. (in Chinese)
- [11] 廖平伟, 张华, 罗俊, 郭伟, 黄志宏. 我国甘蔗机械化收获现状的研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(3): 26-29.
LIAO P W, ZHANG H, LUO J, GUO W, HUANG Z H. Study on the status of sugarcane harvest mechanization in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(3): 26-29. (in Chinese)
- [12] 张华, 林兆里, 罗俊, 苏俊波. 不同甘蔗品种的机械化收获损失研究[J]. 热带作物学报, 2012, 33(9): 1590-1592.
ZHANG H, LIN Z L, LUO J, SU J B. Lost caused by mechanical harvesting to sugarcane varieties[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2012, 33(9): 1590-1592. (in Chinese)
- [13] 胡朝晖, 尹以龙, 张天富, 李加群, 韦喜, 闫青云. 甘蔗分步式机收的可行性与经济效益分析[J]. 中国糖料, 2023, 45(4): 70-80.
HU Z H, YIN Y L, ZHANG T F, LI J Q, WEI X, YAN Q Y. Feasibility and economic benefit analysis of step by step machine harvesting of sugarcane[J]. Sugar Crops of China, 2023, 45(4): 70-80. (in Chinese)
- [14] 杨梅, 李新臣, 杨光琴, 晏祥玉, 杨洪岂, 陈寿宏, 郭兆建, 龙琪, 张念滇, 康宁, 赵红梅, 屈再乐, 杨荣芬, 尹以龙, 张永港. 甘蔗宽膜双沟覆盖高产栽培技术的开发与应用[J]. 中国糖料, 2020, 42(2): 38-41.
YANG M, LI X C, YANG G Q, YAN X Y, YANG H Q,

- CHEN S H, GUO Z J, LONG Q, ZHANG N D, KANG N, ZHAO H M, QU Z L, YANG R F, YIN Y L, ZHANG Y G. Demonstration effect of wide film mulching double furrow techniques in sugarcane[J]. *Sugar Crops of China*, 2020, 42(2): 38-41. (in Chinese)
- [15] 刁其朗. 新型高效剥叶机问世有望破解甘蔗分步机收难题[J]. *广西农业机械化*, 2022(3): 30.
- DIAO Q L. The emergence of a new type of high-efficiency leaf stripper is expected to solve the problem of sugarcane stepwise mechanical harvesting[J]. *Guangxi Agricultural Mechanization*, 2022(3): 30. (in Chinese)
- [16] 王智能, 杨柳, 杨婷, 应雄美, 郭家文, 尚试雄, 沈石妍. 不同菌剂发酵蔗梢饲料的品质差异研究[J]. *饲料研究*, 2021, 44(8): 98-101.
- WANG Z N, YANG L, YANG T, YING X M, GUO J W, SHANG S X, SHEN S Y. Study on quality difference of sugarcane tops fermented with different bacteria agents[J]. *Feed Research*, 2021, 44(8): 98-101. (in Chinese)
- [17] 胡朝晖. 我国糖料蔗生产形势及发展趋势分析[J]. *甘蔗糖业*, 2018(4): 58-66.
- HU Z H. Analysis on the production situation and development trend of sugarcane production in China[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2018(4): 58-66. (in Chinese)
- [18] 赵勇, 艾静, 王禹童, 张仲富, 杨洪岂, 李加群, 郭兆建, 刘海俊, 覃伟, 邓军, 张跃彬. 丘陵山地不同种植模式下甘蔗主栽品种生产的潜力[J]. *中国农业科学*, 2024, 57(19): 3743-3757.
- ZHAO Y, AI J, WANG Y T, ZHANG Z F, YANG H Q, LI J Q, GUO Z J, LIU H J, QIN W, DEMG J, ZHANG Y B. Research on the production potential of main sugarcane varieties under different planting modes in hilly and mountainous areas[J]. *Scientia Agricultural Sinica*, 2024, 57(19): 3743-3757. (in Chinese)
- [19] 刘宇锋, 谭裕模. 广西蔗叶资源化利用现状分析与对策探讨[J]. *广西农学报*, 2022, 37(5): 56-63.
- LIU Y F, TAN Y M. Analysis of current situation and study of strategies for sugarcane leaf resource utilization in Guangxi[J]. *Journal of Guangxi Agriculture*, 2022, 37(5): 56-63. (in Chinese)
- [20] 刘庆庭, 蒋姣丽, 夏明, 苏俊波, 梁生, 莫清贵, 吴传云, 黄晓斌, 刘晓雪. 以糖厂为主体的甘蔗机收推进模式[J]. *甘蔗糖业*, 2024, 53(3): 41-51.
- LIU Q T, JIANG J L, XIA M, SU J B, LIANG S, MO Q G, WU C Y, HUANG X B, LIU X X. Model of pushing ahead sugarcane mechanized harvesting with sugar mill as its main body[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2024, 53(3): 41-51. (in Chinese)
- [21] 肖威, 陆静平. 甘蔗机械化收获技术现状分析[J]. *中国农机化学报*, 2022, 43(2): 50-59.
- XIAO W, LU J P. Analysis of sugarcane mechanized harvesting technology[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2022, 43(2): 50-59. (in Chinese)
- [22] 杨瑶, 吴传云, 黄晓斌, 黄严, 刘庆庭, 区颖刚. 不同形式的糖料蔗入榨对比试验与甘蔗整秆机收方式探索[J]. *甘蔗糖业*, 2022, 51(2): 41-43.
- YANG Y, WU C Y, HUANG X B, HUANG Y, LIU Q T, OU Y G. Research on contrast tests of milling of different forms of sugarcane and harvesting methods of whole stalk harvester[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2022, 51(2): 40-43. (in Chinese)
- [23] 欧钊荣, 匡昭敏, 李莉, 莫坛捷. 广西甘蔗机收作业气候适宜度评价[J]. *甘蔗糖业*, 2025, 54(2): 53-61.
- OU Z R, KUANG Z M, LI L, MO Y J. Climate suitability assessment for mechanized harvesting of sugarcane in Guangxi[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2025, 54(2): 53-61. (in Chinese)
- [24] 欧克伟, 卢业飞, 农泽梅, 庞新华, 周全光, 吕平, 程琴, 朱鹏锦. 不同品种甘蔗脱叶性和机收含杂率的测定与比较分析[J]. *热带作物学报*, 2020, 40(12): 91-96.
- OU K W, LU Y F, NONG Z M, PANG X H, ZHOU Q G, LYU P, CHENG Q, ZHU P J. Comparative analysis and determination of defoliation and impurity rate of different varieties of sugarcane[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2012, 33(9): 91-96. (in Chinese)