

橡胶树固定式自动割胶机割胶生产应用初报

张强皓^{1,2}, 高小俊², 何海宁², 刘忠亮², 亚华金^{1,2}, 施晓玲^{1,2},
穆洪军^{1,2}, 黎小清^{1,2}, 李明谦^{1,2*}, 杨耀文^{2*}

(1. 云南省天然橡胶可持续利用研究重点实验室, 云南景洪 666100;
2. 云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100)

[摘要]为应对人工割胶成本高、胶工紧缺等问题,以机械化割胶等采胶方式替代人工割胶成为必然发展趋势。该研究选择现有相对成熟的3款固定式割胶机,参考割胶技术规程,开展为期8个月的割胶机割胶性能验证试验。结果表明:3款固定式割胶机的设计各有优势,而在实际应用中两款能较好完成割胶动作,且从全年总产量来看,鲜胶产量可达人工割胶的68.87%~71.15%,而通过不断调试后,产量在后期的11—12月已能达到人工割胶水平。参照割胶技术规程检查,割胶质量技术综合评分上,固定式割胶机较人工割胶差,其在割胶深度、耗皮、时间、伤口率等方面的功能还有待进一步研发改进。总的来看,固定式割胶机具备替代人工割胶的潜力。该研究同时总结了固定式割胶机在实际割胶过程中可能发生的问题,并指出研究与改进的方向,可为固定式割胶机的研究和制造提供参考,以提升割胶机的整体适用性,加快橡胶树割胶机的实际生产应用进程。

[关键词]橡胶树;割胶;自动化;机械性能;效果评价

中图分类号:S794.108;S776 文献标识码:A 文章编号:1672-450X(2026)01-0100-08

Preliminary Report on Production Application of Fixed Rubber Tapping Machines for Rubber Trees

ZHANG Qianghao^{1,2}, GAO Xiaojun², HE Haining², LIU Zhongliang², YA Huajin^{1,2}, SHI Xiaoling^{1,2},
MU Hongjun^{1,2}, LI Xiaoqing^{1,2}, LI Mingqian^{1,2*}, YANG Yaowen^{2*}

1. Yunnan Key Laboratory of Sustainable Utilization Research on Rubber Tree, Jinghong 666100, China;

2. Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong 666100, China

Abstract: Given issues such as high costs of manual rubber tapping and a shortage of tappers, rubber harvesting methods like mechanized tapping have become an inevitable trend to replace manual tapping. In this study, 3 relatively mature fixed rubber tapping machines were selected, and 8-month performance verification tests on their tapping performance were conducted with reference to the technical regulations for rubber tapping. The results showed that each of the 3 fixed rubber tapping machines has its own advantages in design; in practical application, two of them can well accomplish tapping operations. In terms of total annual output, the fresh latex yield reached 68.87%~71.15% of that from manual tapping, and after continuous debugging, the yield in the later period (November—December) achieved the level of manual tapping. Inspection against the technical regulations for rubber tapping indicated that, in the comprehensive technical score for tapping quality, fixed rubber tapping machines were inferior to manual tapping. Their performance in aspects such as tapping depth, bark consumption, time efficiency, and wound rate still requires further research and improvement. Overall, fixed

收稿日期:2025-08-09

基金项目:2023年中央财政天然橡胶良种良法项目-自动化机械化割胶技术集成熟化基地建设(646);云南天然橡胶产业集团江城有限公司李明谦专家基层科研工作站(云人社通[2022]17号);国家天然橡胶产业技术体系西双版纳综合试验站(CARS-33-YN1);云南省热带作物科技创新体系建设专项资金项目(RF2025)

作者简介:张强皓(1994—),男,助理研究员,硕士,主要从事橡胶树割胶生理研究。E-mail:zqh21149@163.com

*通信作者:李明谦(1975—),男,研究员,主要从事橡胶树割胶与生理研究。E-mail:xsbnmq2@126.com

杨耀文(1988—),男,农艺师,主要从事橡胶试验基地管理。E-mail:767224154@qq.com

rubber tapping machines have the potential to replace manual tapping. This study also summarized the possible problems in the actual tapping process of fixed rubber tapping machines and pointed out directions for research and improvement, which can provide references for the research and manufacturing of such machines. This is expected to enhance their overall applicability and accelerate the process of their practical production application in rubber tree tapping.

Key words: rubber trees; tapping; automation; mechanical performance; effect evaluation

天然橡胶是重要的战略物资,其优异的综合性能使其广泛应用于工业生产、国防装备、医疗卫生及日常生活等领域^[1]。目前我国橡胶树种植面积超 112 万 hm^2 ,主要通过人工割胶来获取天然橡胶。据统计,人工割胶的生产成本占总成本的 70% 以上^[2],且劳动强度高、工作环境差、技术要求高,工作时间为凌晨。加之近年来天然橡胶价格低迷,从业者收入急剧下降,导致胶工严重流失和橡胶种植园弃管弃割^[3]。这些种种因素严重阻碍了我国天然橡胶产业的健康发展。橡胶产业割胶环节急需研制一种机械化、智能化的割胶装备代替人工割胶,降低生产成本,推动行业从劳动密集型转向技术密集型发展,以保障我国天然橡胶产业可持续健康发展^[4-5]。

探索自动化割胶技术对天然橡胶产业意义重大。借助现有的先进工业技术,通过合理系统设计并优化自动化割胶效果,既能提高天然橡胶产量,又能降低对胶工的技术依赖^[6]。目前,割胶装备主要的研究方向有电动割胶刀、移动式割胶机(一机多树)和固定式割胶机(一机一树)^[7]。电动割胶刀主要从操作简易度、便携性及舒适度等方面进行了优化^[8],并以电机为动力源,降低一定的割胶技术难度,具有耗皮厚度与进刀深度易调节等优势^[9],但仍需割胶工携带割胶,未能达到替代人工割胶的效果。移动式割胶机则需克服更多的问题,如需具备自动检测切割位置、切割轨迹重复性,以及割胶精度控制等^[10]。张伟民等^[11]采用视觉加激光雷达的组合控制自走式割胶机的移动,并根据三维激光雷达的扫描情况来控制机器的移动及割胶动作。张喜瑞等^[7]设计了一种螺旋运动式的自动割胶装置,以提高自走式割胶机的割面平滑度和控制割胶深度。但目前来看,自走式割胶机还处于概念样机的研发阶段。

固定式割胶机常使用固定架和导轨将割胶设

备固定在树干上,相对于移动式割胶机,可忽略林间复杂的环境及精确识别割胶部位,以实现快速割胶。许振昆等^[12]发明了一种割胶机,主要由导轨、刀头、动力系统和芯片程序控制系统等部分组成,可完全替代人工,但其采用固定深度割胶,无法控制割胶精度。张春龙等^[13]针对固定式割胶机研发了一种激光式测距割胶平台,采用不同路径激光采点测距,实现了割胶刀按激光测定的曲线路径运动,但因实际树干有弯曲的现象,会导致设备安装偏朝一侧。高可可等^[14]利用超声波传感器来扫描树围,通过建立模型得到刀尖与树皮的距离,最后使用 PID 控制算法来控制割胶深度和提高精度,进一步提高割胶效率。总的来看,目前对固定式割胶机主要采用短期内多次割胶来验证其相关功能和性能^[9],并未系统、长期地观测其在实际生产中的表现。本试验选取市售的 3 款固定式割胶机,通过实际生产使用以评估其割胶综合性能,反馈实际割胶过程中可能发生的问题,以期促进割胶机的研制,解决“用工荒”的问题,保障天然橡胶产业的可持续发展。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验地位于云南省热带作物科学研究所江南橡胶试验队(22° 2' 2"N, 100° 46' 53"E),海拔 610 ~ 630 m,属热带季风气候,年均温 20 ~ 27 °C,冬无严寒,干湿季分明,年降雨 1 200 ~ 1 700 mm。

1.2 试验设计

割胶试验橡胶树品种为云研 77-4,割龄 3 a,总面积 3.44 hm^2 ,均采用 S/2 d3(即 1/2 割线,3 d 1 刀)割制。试验设置固定式割胶机作业区和人工割胶对比区(表 1)。2024 年 2—4 月完成固定式割胶机安装,5 月 20 日完成 3 款固定式割胶机的安装调试工作,并正式开始割胶,至 12 月 10 日停

止割胶。4个处理统一由1名割胶工人负责机械割胶试验基地的生产管理,包括人工割胶、机械割胶操作及产量收集等工作,以减少人为操作误差。试验期间进行日常维护,保证机器正常运

转,包括但不限于割胶深度调节、电池更换,维修离线机、故障机和清理割面胶线等。每个处理设3次重复,采用随机区组设计,根据地形共划分12个小区。

表1 割胶试验处理

处理	割胶用具	割胶株数	性能参数
CK	常规胶刀	100×3	
H	4DG-DH3型固定式割胶机	100×3	20 W 直流电机, 适配 7.4 V, 4 800 mAh 锂电池, 整机质量 2 040 g, 可连续作业≥8 h, IP33。
N	ZCHW-2Pro型固定式割胶机	100×3	12 W 直流电机, 适配 7.4 V, 4 000 mAh 锂电池, 整机质量 2 155 g, 可连续作业≥2.5 h, IP33。
J	4GZD-1型固定式割胶机	100×3	14.4 W 直流电机, 适配 3.7 V, 5 000 mAh 锂电池, 整机质量 2 270 g, 可连续作业≥5 h, IP33。

1.3 试验方法

选取产胶能力正常、大小一致的橡胶树开展试验,并于每天2:00同时开割,天亮停止排胶后统一收胶称重,记录为鲜胶产量^[15]。使用DH925A型微波胶乳干含仪(北京大华无线电器厂制造)测量胶乳总固形物含量(TSC,%)。参照王岳坤等^[16]方法计算,干胶产量(kg)=鲜胶产量×TSC×0.9,株产(kg)=干胶产量/株数,株次产(g)=株产×1 000/刀次。

参照《橡胶树割胶技术规程》^[17]进行割胶质量技术检查,测量割胶深度和耗皮量,检查伤口个数,统计割胶时间,并对割面整齐度、树木状况和割胶操作质量等进行评估。

1.4 数据处理与分析

使用Microsoft Excel 2016对试验数据进行统计,SPSS 20.0软件进行均值和误差值(SEM)计算,GraphPad Prism 8软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 割胶机安装及使用情况

4个处理的装置如图1(a—d)所示。图1a为传统人工割胶,需胶工每天凌晨到林地开展割胶作业。H处理(图1b)加装了研制的接胶槽,以减少胶乳外流损失;N处理(1c)除加装了研制的防雨蓬,以减少雨季雨水冲胶的损失,还加装了翻胶碗的装置,用于割胶前将胶碗里的雨水树枝等杂物倒出(后期使用中因不便于生产被取下停

用,有待改进)。J处理(图1d)供电采用太阳能,虽然减少了野外电池供电问题,但在林地中使用还是有一定局限性,此外加装了研制胶舌(图1h),替代传统的胶舌。总的来看,各机型各有优缺点。在实际作业中,除了N处理,都加装了防雨帽和防雨帘等防雨设施(图1e—h),以减少雨季的产量损失。

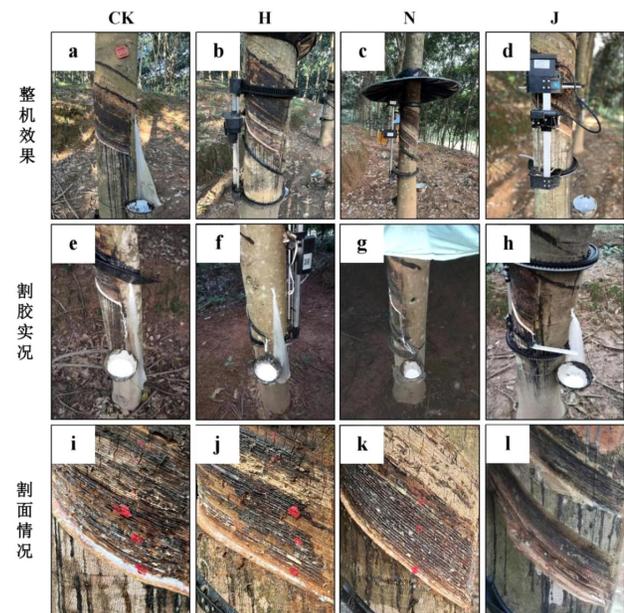


图1 固定式割胶机林地割胶情况

割胶一年后的割面情况如图1 i—l所示。人工割胶(CK)耗皮较少,割面整体较好,伤口较少;H处理下刀较深,易出现大小伤口,N处理下刀相对较浅,大伤口较少,两个处理的耗皮相比

CK较多;J处理因后期维护调试不佳等问题,常发生割到一半停止,乃至缺少刀次的现象,此外若割胶深度把控不到位,易出现大伤口。从割胶剖面总体质量来看,固定式割胶机普遍出现下刀处无法割入,前水线处下刀不够深,后水线处收刀不够齐的现象,并且收刀后有胶线粘连在刀头上,需要人工专门清理刀头胶屑以保证下一刀割胶,这是短期试验不易发现的问题^[9,14]。

2.2 割胶技术质量检查

2.2.1 割胶深度

割胶深度是评价割胶技术质量优劣的重要指标。生产中针对不同品种和割龄需控制割胶深度在适宜范围内(1.2~1.8 mm)^[17],割深容易伤树,割浅则难以获得产量。固定式割胶机的割胶深度需根据树皮厚度进行人工调节,H和N处理割胶平均深度基本控制在2.22~2.65 mm(表2),多于人工,J处理的较浅,达到3.12 mm,且出现切割重复性较差的现象。实际来看,固定式割胶机的刀片行径轨迹和切割深度需逐一进行调整,一经固定就难于调节,而由于树干为非标准圆柱形,剖面有凹凸起伏,导致其割胶不能保持合适的深度,常出现下刀浅、行刀伤、收刀深及胶线粘连等现象。对此,高可可等^[14]研究利用超声波传感器测距,并使用PID控制算法来提高固定式割胶机割胶精度,但这可能会提高整机制造成本,而不利于推广。

表2 固定式割胶机的割胶深度比较 单位: mm

处理	下刀深度	行刀深度	收刀深度	平均深度
CK	1.74±0.15 ^b	1.70±0.24 ^b	1.89±0.05 ^b	1.78±0.12 ^c
H	2.79±0.59 ^a	2.09±0.19 ^a	1.79±0.43 ^b	2.22±0.06 ^b
N	2.88±0.17 ^a	2.56±0.14 ^a	2.52±0.29 ^a	2.65±0.08 ^{ab}
J	3.37±0.76 ^a	3.29±1.17 ^a	2.69±0.40 ^a	3.12±0.74 ^a

注:表中同列不同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同。

2.2.2 割胶耗皮量

生产上单刀割胶耗皮量一般需控制在1.5~2.0 mm,以既能产胶又能节约树皮,保障胶树的经济寿命。固定式割胶机割胶时在螺旋轨道驱动刀头螺旋上升切割树皮,螺旋杆上的丝距为1.3~1.5 mm,能准确整齐地切皮成条,理论上割胶耗皮控制应优于人工,但是因丝距固定而不能根据树

况调整适宜的厚度,相比人工刀割,机械化割胶在实际割胶时,难以根据树况来调控割胶深浅厚薄。

从试验数据(表3)来看,人工割胶(CK)单刀耗皮量为1.65 mm,全年耗皮量90.67 mm,符合割胶技术要求^[17]。因剖面有胶线(残留粘附在剖面上的干胶)存在,导致固定式割胶机单次割胶无法作正常全部切割,常出现滑刀或空刀现象,为此H和N处理制造商设置程序作业为2刀连割,第一刀主要切掉胶线,第二刀再割胶。从结果数据上可以看出,H处理平均单刀耗皮量为2.33 mm,为CK的1.40倍,全年耗皮量达125.87 mm,为CK的1.39倍;N处理平均单刀耗皮量为2.41 mm,为CK的1.46倍,全年耗皮量达130.27 mm,为CK的1.44倍:这样看来反而耗皮、耗能。

表3 固定式割胶机的割胶耗皮量

处理	总刀次	单刀耗皮量/mm	总耗皮量/mm
CK	55	1.65±0.06 ^b	90.67±3.06 ^b
H	54	2.33±0.18 ^{ab}	125.87±8.35 ^a
N	54	2.41±0.15 ^{ab}	130.27±7.09 ^a
J	24	2.60±0.97 ^a	62.30±18.54 ^c

J处理平均单刀耗皮量为2.60 mm,为CK处理的1.58倍,但仅割胶24刀次,表现最差。生产试验中J处理机器存在故障率高、耗皮控制调节不力、割胶刀次少和耗皮量大等问题,后期有待进一步改进或应用调整。

2.2.3 割胶时间

从作业时间(表4)上来看,固定式割胶机能在三四分钟内同时启动割完多株橡胶树,不必像人工一样一株一株割胶费时费力,但存在单株割胶时间较长的问题,行刀速度慢在一定程度上会压迫切割面、堵塞乳管而不利于排胶^[18],且割线平滑度不及人工,有待进一步调整。此外,胶林地形复杂,信号基站的选址建设及大规模信号发射的稳定性也可能影响割胶机的响应。

表4 固定式割胶机的单株割胶时间

处理	全步骤时间/s	割胶时间/s
CK	35	15
H	221	100
N	203	82
J	154	74

2.2.4 割胶伤口率

从伤口率(表5)来看,机器割胶伤口率达16%~42%,远高于人工割胶的8%,且固定式割胶机以特伤(伤口面积0.4 cm×1.0 cm)为主。这可能是由于其采用固定式刀头,割胶深度需逐个调节,加之橡胶树树干又为不规则体,生产中为追求产量,导致普遍存在深割伤树的问题。

表5 固定式割胶机的割胶伤口率

处理	特伤数	大伤数	小伤数	伤口率/%
CK	3	1	4	8
H	36	2	4	42
N	21	2	2	25
J	13	3	0	16

2.2.5 割胶质量技术评价

通过对3款固定式割胶机实际生产使用观测,依照《橡胶树割胶技术规程》对割胶技术质量评分,结果见表6。H和N处理表现较好,但得分

表6 固定式割胶机的割胶技术质量检查得分统计

指标	分值										百分化
	割胶深度	耗皮量	割面均匀	割面倾斜	下刀	收刀	伤口	割胶速度	切片均匀	总分	
满分	26	24	22	14	7	7	10	10	7	127	100.00
CK	23	23	20	14	6	7	8	8	6	115	90.55
H	20	22	17	12	5	6	0	4	7	93	73.23
N	16	22	20	12	6	6	2	4	6	94	74.02
J	16	21	13	7	3	3	4	4	4	75	59.06

株产以CK处理最高(2.23 kg),其次是N处理1.66 kg,H处理1.55 kg,J处理0.16 kg(图2B)。株次产变化情况与株产相似,以CK处理最高(40.61 g),其次是N处理31.18 g,H处理28.58 g,J处理6.26 g(图2C)。总的来看,固定式割胶机各处理的株次产量都低于人工对照,H和N处理的株次产为CK的70%~77%,J处理的株次产量仅为CK的15%。J处理产量数据严重偏离,主要是因割胶减刀较多(实际割胶24刀),以及受深度和长度等不到位影响。

总固形物含量(TSC)则刚好相反,以CK处理最低(34.6%),其次是H处理35.0%,N处理36.4%,J处理36.4%(图2D)。这可能是固定式割胶机单株割胶速度慢,刀片与切割面摩擦大,阻塞胶乳从乳管排出,导致胶乳浓稠而排胶不

较人工割胶(CK)低,主要原因是割胶深度不到位、耗皮量较高、伤口较多及速度较慢;J处理整体表现较差。综合来看,4个处理的割胶质量技术评价为:CK>N>H>J。

2.3 全年胶乳产量比较

试验采用3 d 1刀割制,因天气干旱和季风性落叶病导致间断停割,相比正常年份减刀20%~30%,实际割胶共54刀次。全年鲜胶和干胶产量情况如下:鲜胶产量以CK处理最高,为1 928.92 kg;H处理鲜胶产量为1 328.38 kg,达CK的68.87%;N处理鲜胶产量为1 372.43 kg,达CK的71.15%;J处理鲜胶产量为128.54 kg,仅为CK的6.66%(图2A)。干胶产量以CK处理最高,为670.03 kg;H处理干胶产量为465.53 kg,达CK的69.48%;N处理干胶产量为499.46 kg,达CK的74.54%;J处理干胶产量为46.75 kg,仅为CK的6.98%(图2A)。

畅^[18]。

2.4 胶乳产量和TSC的月变化

胶乳产量是割胶生产中的重要指标。从图3(A—B)可以看出,5月开始割胶后,CK、H和N处理的鲜胶产量和干胶产量都呈逐渐上升的趋势,8月之后增幅变大,到11月时产量达到最大,且11月和12月时,H和N处理的鲜胶产量与人工割胶持平。11月份,N处理的干胶产量超过人工割胶。12月,因当月10日停止割胶,当月割胶刀次较少,鲜胶和干胶合计产量下降。

CK、H和N处理的株次产在5—7月变化幅度不大,7月后都呈增长趋势,到11月时达最大,且3个处理间差距较小(图3C)。CK、H和N处理的TSC值整体处于下降趋势(图3D),表明三者的排胶障碍都在减少,利于橡胶树排胶、产量增加。

而J处理因试验期间有效割胶刀次较少(实际割胶24刀),导致9月后TSC出现异常增加的情况,所以整个割胶期的产量和株次产都处于较低水

平。这些数据表明,通过不断地对自动割胶机进行割胶调试后,其胶乳产量能达到近人工割胶的水平。

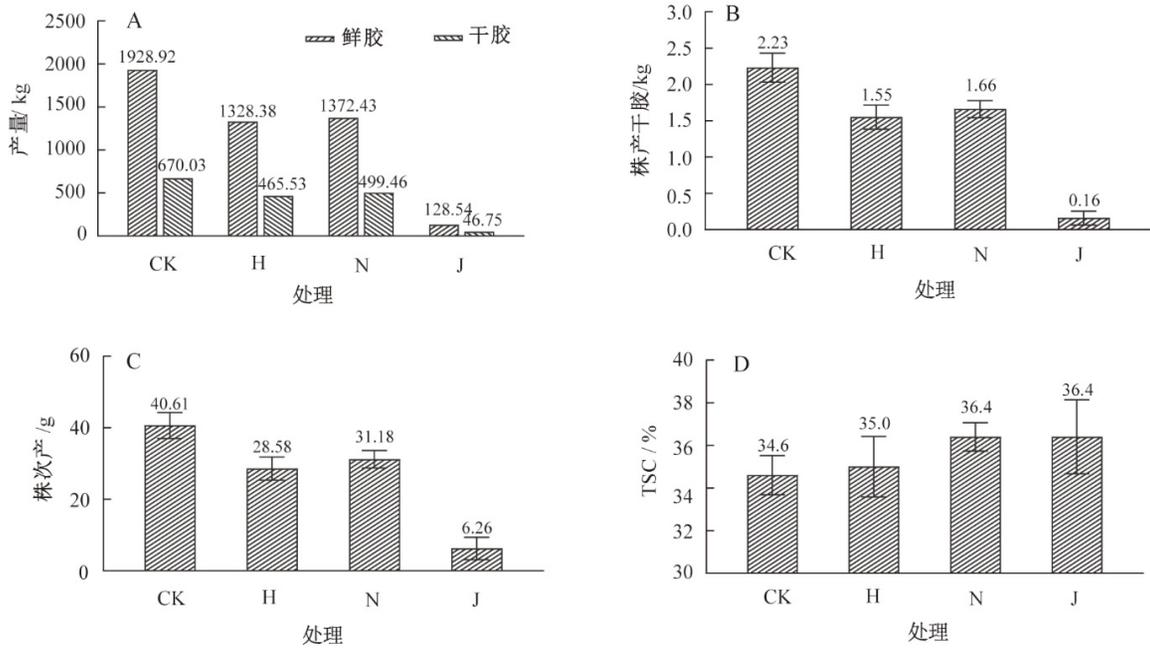


图2 固定式割胶机割胶全年胶乳产量和TSC比较

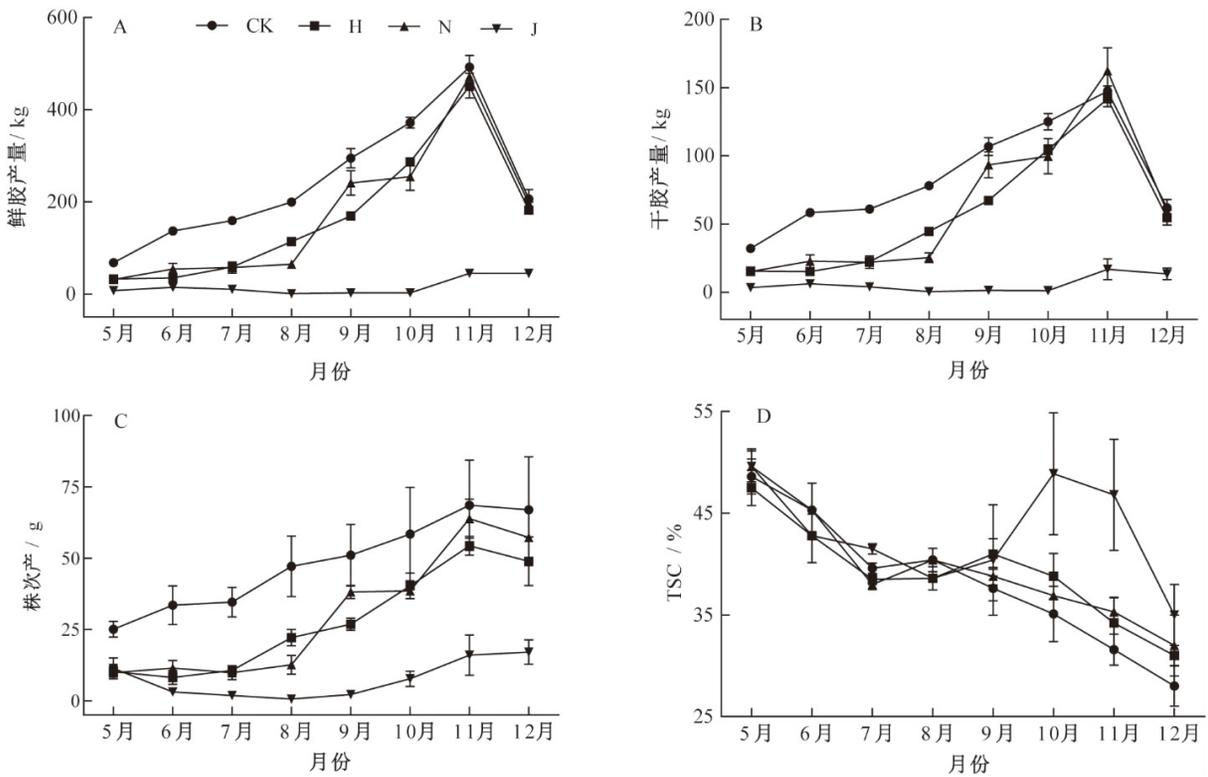


图3 固定式割胶机割胶生产的胶乳产量和TSC月变化

3 讨论

天然橡胶产业为我国重要的战略资源领域,长期面临人工割胶成本高、劳动力流失等瓶颈问题,机械化割胶已成为产业升级的必然方向^[4-5]。本研究通过8个月的田间试验,系统评估了3款市售固定式割胶机在实际生产中的效果,结果显示其虽具备替代人工的潜力,但在产量稳定性、割胶质量及实用性等方面仍存在改进空间,结合现有技术瓶颈与产业需求剖析如下。

3.1 产量表现与调深控耗机制

本研究中,H和N处理固定式割胶机全年鲜胶产量分别为人工割胶(CK)的68.87%和71.15%,干胶产量的69.48%和74.54%,且后期(11—12月)经调试后产量接近人工水平,表明固定式割胶机通过优化参数可实现与人工割胶相当的产出效率。这一结果与高可可等^[14]提出的“通过算法优化可提升割胶精度与产量”的结论一致,验证了机械化割胶在产量层面的可行性。然而,试验也观测到J处理割胶机产量仅为CK的6.66%,其主要原因在于割胶深度失控(平均3.12 mm)、有效刀次不足(仅24刀)及胶线粘连导致的排胶障碍。这提示割胶深度的精准调控与刀次稳定性是保障产量的关键。相较于人工割胶可通过经验动态调整深度(1.70~1.89 mm),当前固定式割胶机依赖人工预设深度,难以适应树干不规则性(如弯曲、凹凸)^[13],致出现“割深伤树”或“割浅低产”的矛盾。此外,H和N处理的机器虽通过“两刀连割”解决了胶线残留问题,但也额外增加了耗皮量(2.33~2.41 mm/刀),可能会影响到橡胶树的长期产胶潜力^[17],需进一步通过智能算法(如PID控制^[14])实现“一刀精准切割”。

3.2 割胶质量与树体保护的平衡

割胶质量直接关系到橡胶树的健康与经济寿命。本研究参照《橡胶树割胶技术规程》的评估显示,固定式割胶机在深度控制、耗皮量及伤口率等核心指标上均劣于人工。具体表现为以下三方面:(1)割深超标。H和N处理平均割深达2.22~2.65 mm,远超1.2~1.8 mm的适宜范围,导致特伤率高达21%~36%,显著高于CK处理(3%)。这与许振昆等^[12]提出的“固定深度割胶易伤树”的结论一致,反映出当前机型对树干形

态的适应性不足。(2)耗皮量过高。H和N处理全年耗皮量达125.87~130.27 mm,为CK的1.39~1.44倍。尽管螺旋轨道设计实现了切片均匀性,但丝距固定,无法根据树皮厚度动态调整,可能加速树体树皮消耗。(3)操作缺陷。剖面普遍存在“下刀浅、收刀不齐”及胶线粘连现象,需人工清理刀头,未能完全实现“替代人工”的核心目标。这与张春龙等^[13]观察到的“树干弯曲导致设备安装偏移”问题相呼应,提示机械结构与树体形态的匹配性仍需优化。上述问题的根源在于固定式割胶机对复杂田间环境的适应性不足。相较于实验室条件下的短期试验^[9],长期生产中树干不规则性、环境湿度变化等因素均会放大机械误差,需结合激光测距^[13]或超声波扫描^[14]技术,构建实时动态的割胶轨迹修正模型。

3.3 技术瓶颈与实用性限制

本研究发现,固定式割胶机在实际应用中暴露的技术缺陷显著制约了其推广价值。(1)智能化程度不足。割胶深度、行径轨迹需人工逐树调节,未能实现基于树皮厚度或树体形态的自适应控制。对比高可可等^[14]的PID算法优化研究,当前机型在精度与成本间的平衡仍需突破,例如通过低成本传感器与轻量化算法结合,降低田间调试门槛。(2)可靠性与环境适应性差。J处理割胶机采用的太阳能供电在林地中因遮挡导致续航不足,H和N处理割胶机的防雨设施在雨季仍存在电路板短路风险,反映出设备在电源设计、密封性等工程化细节上的欠缺。此外,胶线粘连、刀片卡顿等故障需高频人工维护,反而增加了管理成本。(3)经济性考量。一树一机的固定模式虽简化了定位难度,但初期设备投入与后期维护成本较高,且单株割胶时间(1~2 min)长于人工(15 s),在规模化应用中可能丧失效率优势。这与移动式割胶机“一机多树”的设计理念形成对比^[7,10],提示未来可探索“固定-移动”结合的混合模式。

3.4 与现有研究的关联与突破

本研究结果进一步验证了固定式割胶机的技术局限性。例如,许振昆等^[12]的固定深度割胶设计导致精度不足,张春龙等^[13]的激光测距平台因树干弯曲产生安装偏差,这些问题在本研究的观

测中均表现为剖面不整齐、伤口率升高等现象。同时,本研究发现“胶线粘连”“两刀连割导致耗皮激增”等橡胶生产中特有的问题,补充了短期试验的不足^[9],为机型优化提供了关键依据。与移动式割胶机相比^[7,10],固定式割胶机虽规避了林间导航与定位的复杂性,但牺牲了灵活性。未来可整合两类机型的优势,例如将固定式的精准切割模块与移动式的自主移动技术结合,同时借鉴电动割胶刀在便携性上的优化经验^[8],提升设备的田间适用性。

3.5 产业需求导向的改进方向

基于本研究结果,固定式割胶机的优化需聚焦以下方向:(1)精准控制技术。开发基于多传感器融合(激光+超声波)的树干形态识别系统,结合自适应算法实时调整割胶深度与行径轨迹,将割胶深度控制在1.2~1.8 mm的最佳范围^[17]。(2)结构与材料创新。优化刀头设计,采用防粘涂层或自动清理装置以减少胶线粘连;改进固定架为柔性调节结构,适应树干弯曲特性,降低安装偏差。(3)工程化升级。提升设备密封性与防雨性能,解决雨季电路短路问题;开发高效储能电源,延长续航时间;简化安装流程,降低人工干预成本。(4)成本控制。通过模块化设计与批量生产降低制造成本,目标是使单台设备成本低于3年人工成本,满足中小胶园的推广需求。

4 结语

固定式割胶机作为当前机械化割胶中技术相对成熟的方案,其在本研究中展现的后期产量接近人工水平,展现出具备替代人工割胶的潜力,但生产中也出现割胶质量不达标、实用性不足等问题。这需通过跨学科协作解决,既要整合控制算法与传感器技术提升精度,也要结合田间实践优化工程设计。未来研究还需进一步开展树体健康观测,评估机械化割胶对橡胶树寿命与产胶潜力的影响,为推动天然橡胶产业向智能化、自动化转型提供科学依据。

参考文献:

[1] 张华林,贺军军,李文秀,等. 我国胶园林下经济发展现状

- 状及对策建议[J]. 南方农业,2019,13(21):61-62.
- [2] 曾霞,郑服丛,黄茂芳,等. 世界天然橡胶技术现状与展望[J]. 中国热带农业,2014(1):31-36.
- [3] 张良,胡祎,许能锐. 胶农割胶制度选择行为及其影响因素——基于海南与云南民营胶园调查[J]. 中国热带农业,2017(2):35-40.
- [4] 黄华,魏博,张迪,等. 割胶设备发展现状与趋势[J]. 农业工程,2018,8(6):16-20.
- [5] 吴明,魏小弟,校现周. 提高割胶劳动生产率的探讨[J]. 中国热带农业,2014(3):18-19.
- [6] ZHANG S, ZHANG C, ZHANG J, et al. Design and experiment of suspension -typed rubber tapping device[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2018, 27(3):110-118.
- [7] 张喜瑞,温振拓,张志富,等. 螺旋运动式自动割胶装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(3):169-179.
- [8] WANG LL, CAO JH, ZHENG Y, et al. The development and application of advanced design and manufacturing techniques on type 4GXJ-I of cordless brushless tapping knife[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 592(1):12143.
- [9] 黄敞,郑勇,王玲玲,等. 便携式电动胶刀割胶技术与切割试验[J]. 江苏农业科学,2019,47(23):260-263.
- [10] 周航,张顺路,翟毅豪,等. 天然橡胶割胶机器人视觉伺服控制方法与割胶试验[J]. 智慧农业(中英文),2020,2(4):56-64.
- [11] 张伟民,孙尧,王红兵,等. 一种割胶机器人:CN 110558196A[P]. 2019-12-13.
- [12] 许振昆,吴纪营,张兴明. 一种割胶机:CN 204907382U[P]. 2015-12-30.
- [13] 张春龙,李德程,张顺路,等. 基于激光测距的三坐标联动割胶装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(3):121-127.
- [14] 高可可,孙江宏,高锋,等. 固定式割胶机器人割胶误差分析与精度控制[J]. 农业工程学报,2021,37(2):44-50.
- [15] 黄德宝,秦云霞,唐朝荣. 橡胶树三个品系(热研8-79、热研7-33-97和PR107)胶乳生理参数的比较研究[J]. 热带亚热带植物学报,2010,18(2):170-175.
- [16] 王岳坤,阳江华,秦云霞. PR107两种割胶制度胶乳生理参数的季节变化[J]. 热带作物学报,2014,35(3):419-424.
- [17] 中华人民共和国农业农村部,农业农村部热带作物及制品标准化技术委员会. 橡胶树割胶技术规程:NY/T 1088—2020[S].
- [18] 肖再云,校现周. 巴西橡胶树胶乳生理诊断的研究与应用[J]. 热带农业科技,2009,32(2):46-50.