中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(5):240-247
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2026008

机械采收对油茶花果特性的影响

盛宇[1,3],贺磊盈[2],刘林秀[3],汤晶宇[4],洪友君[5],滕建华[5],杜小强[2*],庄期寅[5*],姚小华[1*]
(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所/林木遗传育种全国重点实验室,浙江 杭州,311400;
2. 浙江理工大学,浙江 杭州,310018;
3. 信阳师范大学茶学与食品学院 河南省油茶生物学与高值化利用国际联合实验室,河南 信阳,464000;
4. 国家林草局哈尔滨林业机械研究所,黑龙江 哈尔滨,150086;
5. 浙江省金华市东方红林场,浙江 金华,321025)

摘要:采收机械化是油茶产业发展的迫切需求。油茶花果同期的生物学特性和山地丘陵等立地的复杂性,对油茶机械化采收提出了挑战。为评价轻简油茶采收机械的适配性,比较了手持梳刷式和振动式机械与人工采收对油茶树体损伤及来年生长物候和油脂性状的影响。结果显示,采收方式显著影响油茶树体叶片和花苞脱落。应用机械采收导致的油茶平均花苞脱落率和叶片脱落率分别较人工采收高21%~31%和16%~21%;人工采收时,单位千克采果量的花苞、叶片、枝条综合脱落量较机械采收降低62%~78%。不同油茶品种的机械采收落叶敏感性存在差异。梳刷式和振动式机械采收导致的CL53和CL4叶片脱落率均略高于人工采收,但差异不明显。相比之下,CL18中梳刷式和振动式机械采收的叶片脱落率分别为11.1%和9.4%,均显著高于人工采收(6.5%)。总体来说,在树体损伤控制方面,振动式机械表现优于梳刷式机械。机械采收和人工采收方式对油茶来年含油率、脂肪酸组分和生物物候期的影响差别不大。油茶机械采收应与人工采收和油茶树体结构管理相结合。

关键词:油茶;机械采收;树体损伤;花果特性
中图分类号:S565.9;S794.4　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1007-9084(2026)05-0240-08

Effects of mechanical harvesting on *Camellia oleifera* flower and fruit characteristics

SHENG Yu[1,3], HE Lei-ying[2], LIU Lin-xiu[3], TANG Jing-yu[4], HONG You-jun[5], TENG Jian-hua[5], DU Xiao-qiang[2*], ZHUANG Qi-yin[5*], YAO Xiao-hua[1*]
(1. *State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou* 311400, *China*; 2. *Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *China*; 3. *Henan International Joint Laboratory of Tea-oil tree Biology and High-Value Utilization, College of Tea and Food Science, Xinyang Normal University, Xinyang* 464000, *China*; 4. *Harbin Research Institute of Forestry Machinery, National Forestry and Grassland Administration, Harbin* 150086, *China*; 5. *Dongfanghong Forest Farm, Jinhua* 321025, *China*)

Abstract: Harvesting mechanization has become an urgent need in the development of *Camellia oleifera* industry. Mechanized harvesting for *C. oleifera* encounters multiple challenges, including synchronous growth of flower buds and fruits, and complex terrain of cultivation areas. To assess the suitability of mini harvesting equipments, this study compared the effects of handheld comb-type and vibrating harvesters with manual harvesting on tree damage, subsequent growth phenology, and oil quality of *C. oleifera*. Results indicated that the harvesting method significantly affected the abscission of leaves and floral buds. Mechanical harvesting increased average floral bud and leaf abscission rates by 21% - 31% and 16% - 21%, respectively, compared to manual harvesting. In contrast, manual harvesting reduced the abscission of flower buds, leaves, and branches per kilogram of fruit yield by 62% - 78% rel-

收稿日期:2026-01-12
基金项目:中国林科院院基金项目(CAFYBB2022XA003-2)
作者简介:盛宇(1990-),男,助理研究员,博士,研究方向为经济林学,E-mail:shengyu2000@foxmail.com
* 通讯作者:庄期寅(1968-),男,工程师,学士,研究方向为经济林学,E-mail:jhzqyin@sina.com;
杜小强(1978-),男,教授,博士,研究方向为农林收获装备与机器人,E-mail:xqiangdu@zstu.edu.cn;
姚小华(1962-),男,研究员,博士,研究方向为经济林学,E-mail:yaoxh168@163.com

ative to mechanical methods. Varietal differences were observed in sensitivity to leaf abscission during mechanical harvesting. Varieties from Changlin seires as CL53 and CL4 showed only slightly higher leaf abscission rates under mechanized harvesting compared to manual harvesting. CL18 exhibited significantly higher leaf abscission rates of 11.1% and 9.4% using comb-type and vibrating harvesting, respectively, than that of 6.5% with manual harvesting. Overall, the vibrating harvester outperformed the comb-type in terms of tree damage. Mechanical and manual harvesting showed relatively similar effects on oil content, fatty acid composition, and growth phenology in the following year. It recommended that mechanical harvesting should be integrated with manual methods and optimized tree structure management for better development.

Key words: *Camellia oleifera*; mechanical harvesting; tree damage; flower and fruit characteristics

油茶是我国特色木本油料树种,其种籽富含油脂,具有理想的脂肪酸组成和维生素E、甾醇、角鲨烯等活性物质[1-4],营养价值高[5],是世界卫生组织和联合国粮农组织推荐的健康食用油[3,4]。油茶副产物综合利用价值高[6-8],且适应性强,可利用荒山荒地造林,释放耕地潜力,兼具生态、经济、社会效益,对保障粮油安全、助力乡村振兴具有重要意义。至"十四五"末,我国油茶种植面积已达到7500万亩[9],但80%的油茶位于丘陵山区,基础设施薄弱,经营粗放[10,11]。随着种植区劳动力减少,劳动力短缺问题日益突出。推进采收机械化、提升生产效益,已成为油茶产业发展的迫切需求。

机械采收已在柑橘、苹果、葡萄、油橄榄和咖啡等大宗经济林木中得到了较多研究和应用[12]。机械应用显著提高了采收效率,但也带来树体与果实的损伤问题。对于鲜食水果,采收碰撞导致品相下降,需要将此类果实转向加工用途[12]。针对不同树形与果实特性,通过采收机械参数与结构调整(频率、振幅、作用时间),可以一定程度优化采收效果。研究表明,采用缓冲材料、优化收集面设计(如倾斜角)等措施,可有效降低甜樱桃和鲜食苹果的损伤[13,14],配备缓冲装置的多层振动接果系统已能实现约85%的苹果商品果率[15]。

机械采收的另一关键挑战在于避免过度损伤树体,如折断枝条、损伤树干或叶片大量脱落。相较于鲜果,油茶机械采收不需要考虑果皮损伤,但其"花果同期"的特性,使得花苞保护成为关键制约因素。近年来,针对油茶花果的分布、生物力学特性及树体振动响应的研究不断深入[16-19],推动了振动式[20],梳刷式、履带式[21,22],轮式[10],胶辊旋转式[11]、扭梳式[23]等多种采收机具的研发。据报道,现有机械的采净率可达90%以上,花苞脱落率通常5%~13%[11,19]。此外,光谱和视觉识别等辅助油茶果实采收的AI技术也取得进步[24]。但是,受限于油茶品种、树形和立地复杂性,现有机械的适配性仍然有待提升。采收时机械外力引发的树体响应(如生长、开花、结实影响)尚不明确[11]。

基于上述进展和存在的问题,本研究聚焦于油茶花果特性与轻简便携式机械的适配性,分析轻简便携式采摘装备对油茶树体花、枝、叶的损伤,以及机械采收对树体后续生长及果实经济性状的影响,评价机械采果后油茶树体的可持续发展性,为油茶机械采收技术的优化与应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试油茶品种为"长林"系列油茶良种,包括长林53号(CL53)、长林4号(CL4)、长林40号(CL40)(2024年因CL40处于小年,结果量少,以长林18号(CL18)替代)。试验油茶林为2010-2011年造林,株行距2 m×3 m,常规管理。试验植株生长健壮,开花结实正常,施肥、除草措施一致。试验分别于2023年和2024年在浙江省金华市东方红国家油茶良种基地(29°01′ N, 119°29′ E)进行。

1.2 试验设计

1.2.1 机械采收对油茶树体损伤评价 2023年采收试验:采用手持振动式机械和人工采收方式进行试验,以全株采净为标准。

2024年采收试验:采用手持振动式机械、手持梳刷式机械和人工采收方式进行试验,适度采净,即目标结果枝机械采打3~5 s后停止,允许枝上遗留少量果实。

其中,手持振动式机械激振频率6~10 Hz,振幅30 mm;手持梳刷式机械梳刷面宽35 cm,梳刷指长度25 cm,运动夹角36°~37°。试验在国家油茶种质圃进行,受种质资源植株数量的限制,设定了差异化的样本量:手持梳刷式机械、手持振动式机械和人工采收试验植株数分别为5株、10株和10株。每

试验植株中部树冠随机标记10个三级或四级花果枝,采收前统计标记枝条上的花苞数、叶片数;采收时,试验植株下附设8 m×8 m收集布收集脱落的果实、花苞、叶片和枝条,并在采收结束后称重测量,然后统计采后标记枝条上花苞数、叶片数。

1.2.2 机械采收对油茶物候期影响评价 采用直接观察法,分别于2025年3-4月和2025年11-12月对机械采收和人工采收试验株油茶的春梢抽梢期(萌芽期、展叶期、抽梢期)和开花期(始花期(<25%的花朵开放)、盛花期(25%~75%的花朵开放)、末花期(>75%的花朵开放))发育物候进行调查,评价机械采收对油茶次年生长发育的影响。

1.2.3 机械采收对油茶油脂性状影响评价 在果实成熟期,于试验植株东西南北方位树冠中部随机选取样枝,采收全部果实,随机抽取30个果实,密封贮藏并于2日内完成果实性状的测定。

种仁含油率测定:参照国家标准GB/T 14488.1执行,使用索氏E-800萃取仪(BUCHI)提取油脂。具体步骤参考所述:剥取种子,105℃烘箱中烘至恒重,去除种皮。种仁磨碎、充分烘干,置于干燥的规格、质量一致的滤纸包中(烘干的样品盒和滤纸包总重,记为W1);样品盒、滤纸包和烘干样品的总重,记为W2;随后,将装有样品的滤纸包置于沸程30℃~60℃的石油醚中,连续抽提6小时;待石油醚完全挥发后,将滤纸包(含样品残渣)与样品盒一同置于105℃烘箱中烘至恒重,冷却后称重,记为W3。每组样品设置三组重复。含油率计算如下:含油率=(W2-W1)/(W2-W3)×100%。

脂肪酸组分测定:在国家林业和草原局经济林产品质量检验检测中心(杭州),使用气相色谱仪(YLSZJ-SB-201)检测。

1.3 数据处理

采用Excel 2016对实验数据进行整理,并用SPSS 22.0进行数据分析,用GraphPad Pism 9.5进行作图。

2 结果与分析

2.1 机械采收对油茶树体的影响

为评估机械采收对油茶树体的损伤程度,在不同年份、不同品种中进行了机械采收和人工采收试验(图1)。其中,在2023年,比较分析了振动式机械和人工采收方式下油茶叶片、花苞的损伤情况。试验结果表明,在不同品种中,人工采收对油茶叶片、花苞的损伤率均明显低于机械采收(图2)。

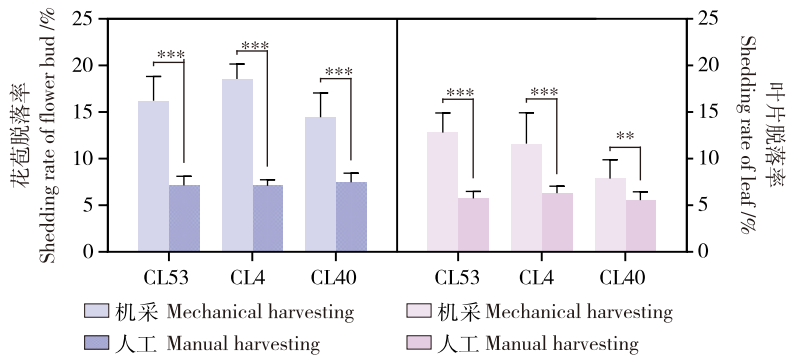
2.2 不同机械采收方式对油茶树体的影响

为评估不同机械采收方式对油茶树体的损伤程度,在2024年应用梳刷式、振动式2种机械设备,同时以人工采收为对照,比较了采收过程中油茶叶片和花苞脱落情况。结果显示,采收方式显著影响油茶树体叶片和花苞脱落(图3)。所有品种中,梳刷式、振动式导致的油茶平均花苞脱落率分别为14.0%和12.7%,平均叶片脱落率分别为9.2%和8.8%,均显著高于人工采收(花苞脱落率9.7%,叶片脱落率7.3%)(P<0.05)。应用机械采收导致的油茶平均花苞脱落率和叶片脱落率分别较人工采收高21%~31%和16%~21%。其中,梳刷式机械采



图1 试验所用手持振动式和梳刷式油茶采收机械

Fig. 1 Handheld vibratory and comb-type harvesting machines used on *C. oleifera*



注:**,***分别表示差异显著性水平$P<0.01$和$P<0.001$

Note: **, *** represent the level of significance at p-values at 0.01 and 0.001, respectively

图2 2023年机械和人工采收试验叶片脱落率与花苞脱落率比较

Fig. 2 Comparison of leaf abscission rate and bud drop rate between manual harvesting and mechanical harvesting methods (2023)

收对花苞损伤最大,在CL4中花苞脱落率最高,达到15.1%;相比之下,在CL18中梳刷式机械采收的花苞脱落率最低,达到13.1%。不同品种之间,振动式机械采收导致的花苞脱落率,CL53最低,为11.7%;CL4最高,为13.7%。

品种间的机械采收落叶敏感性存在差异。CL53和CL4中,梳刷式和振动式机械采收导致的叶片脱落率均略高于人工采收,但差异不明显。相比之下,试验三个品种中,CL18梳刷式和振动式机械采收导致的叶片脱落率最高,分别为11.1%和9.4%,不同机械方式间差异不显著,但均显著高于人工采收的6.5%。

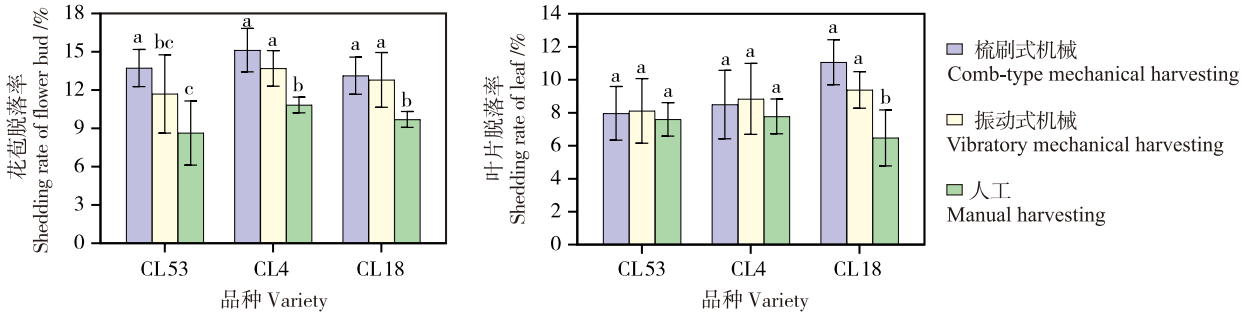
进一步地,为了评价人工采收和不同机械采收方式下油茶损伤情况,统计了单位千克采果量的花苞、叶片、枝条脱落数目和重量(图4)。与上述叶片和花苞脱落等树体损伤结果一致,不同采收方式对单位千克采果量的花苞、叶片、枝条脱落的影响有着显著差异。

总体来说,在不同品种(CL53、CL4、CL18)中,人工采收时单位千克采果量的脱落的油茶花苞、叶片、枝条量均最小,明显低于梳刷式和振动式机械。表明在果实采收的树体损伤控制层面,人工采收显著优于机械方式,其单位千克采果量的花苞、叶片、枝条综合脱落量较机械采收平均降低62%~78%。机械采收中,振动式机械采收整体表现优于梳刷式机械,但存在品种特异性。除了在CL53中梳刷式机械采收的单位千克采果量枝条损伤量略低于振动式机械外,CL4和CL18品种中梳刷式机械采收时单位kg采果量的脱落的花苞、叶片、枝条量均最大。

2.3 振动式机械采收方式对油茶油脂性状和生长物候的影响

总体来说,在树体损伤控制方面,振动式机械采收表现优于梳刷式机械。因此,对振动式机械和人工采收方式下油茶试验株次年的油脂性状和生长物候进行了比较。

不同采收方式下油茶籽脂肪酸成分分析结果见表1。不同油茶品种的脂肪酸组成成分基本一致,相对稳定。不同品种之间脂肪酸含量存在显著差异,CL4和CL40的脂肪酸含量比CL53高出3~5个百分点。相同品种,不同采收方式之间差别较小。



注:不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同

Note: Different lowercase letters indicate significant differences at 0.05 level. Same as below

图3 2024年人工采收和不同机械采收叶片脱落率与花苞脱落率比较

Fig. 3 Comparison of leaf abscission rate and bud drop rate between manual harvesting and mechanical harvesting methods (2024)

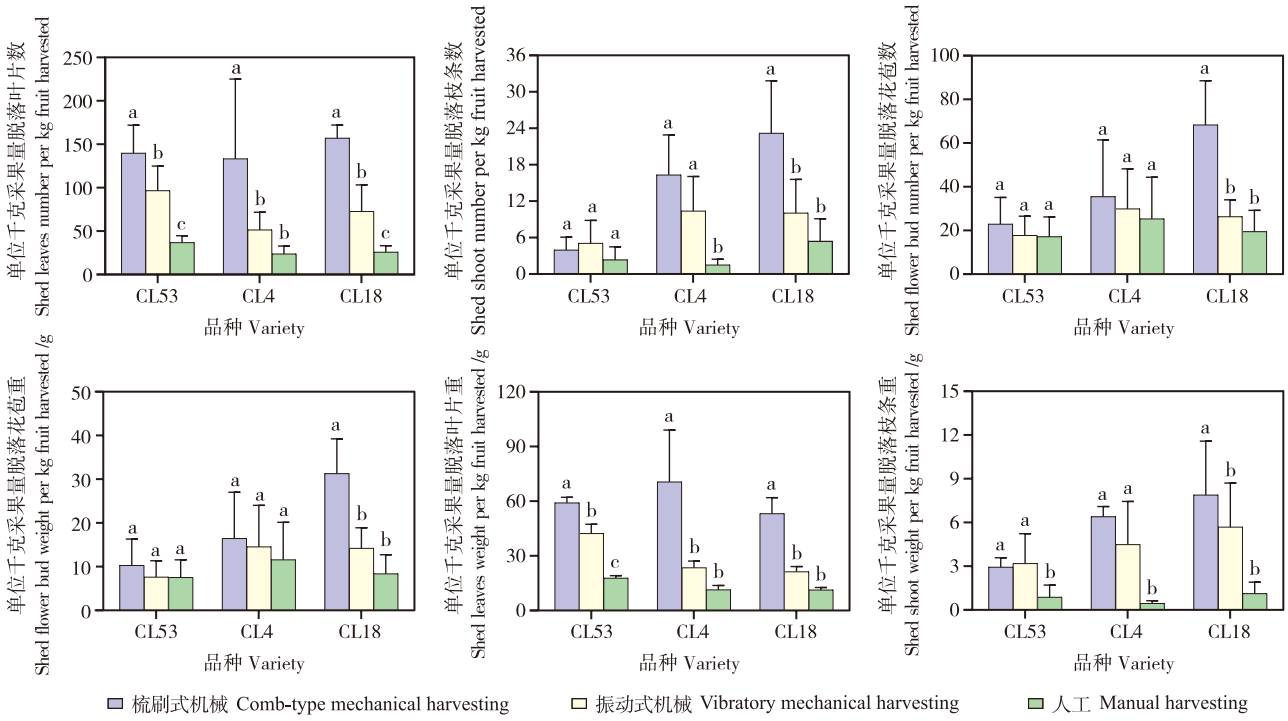


图4 2024年机械和人工采收试验单位千克采果重量的叶片脱落率与花苞脱落率比较

Fig. 4 Comparison of leaf abscission rate and bud drop rate per kg of harvested fruit in mechanical vs. manual harvesting trials (2024)

振动式机械采收的CL53、CL4、CL40油茶次年籽含油率分别为37.4%、42.4%和41.2%,相比之下,人工采收的这3个油茶品种次年籽含油率分别为35.5%、42.4%和40.2%。除了CL53中,振动式机械采收方式的含油率比人工采收方式的含油率高1.9个百分点外,CL4和CL40中,振动式机械采收方式和人工采收方式的含油率差别不大。脂肪酸成分的差异也体现在不同品种之间,但相同品种、不同采收方式之间差别较小。

随着品种不同,普通油茶的春梢通常在每年3月中下旬至5月中旬期间抽梢生长。在机械采收与人工采收试验株的物候表现上,CL18的春季抽梢期与花期均早于CL53和CL4约1周到10天,CL4的物候则略晚于CL53(图5)。不同油茶品种间的生长物候存在差异,但在同一品种内,未观察到不同采收方式对抽梢与花期物候的明显影响。

3 讨论与结论

3.1 “适度采净”与“人机结合”是油茶机采的重要理念

机械采收是提升油茶产业效率和效益的重要手段。油茶“花果同期”,果实与花苞在空间上高度接近。机械采收对油茶花果系统的潜在影响需要重视。本研究结果显示,相比人工,机械采收显著

表1 两种采收方式下油茶油脂性状的比较

Table 1 Comparison of oil characteristics in *C. oleifera* under 2 harvesting methods

性状 Characteristics	振动式机械采收 Vibratory mechanical harvesting			人工采收 Manual harvesting		
	CL53	CL4	CL18	CL53	CL4	CL18
脂肪含量Oil content /%	37.4	42.4	41.2	35.5	42.4	40.2
棕榈酸含量Palmitic acid /%	7.59	8.74	7.98	7.36	8.73	7.91
棕榈烯酸含量Palmitoleic acid /%	0.101	0.0818	0.106	0.0946	0.0867	0.0956
硬脂酸含量Stearc acid /%	2.57	1.73	2.24	2.83	1.7	2.74
油酸含量Oleic acid /%	82.7	79.6	81.9	82.7	79.8	82.3
亚油酸含量Linoleic acid /%	6.24	8.9	7.02	6.14	8.79	6.21
α-亚麻酸α-linolenic acid /%	0.303	0.362	0.292	0.293	0.354	0.296
顺-11-二十碳烯酸含量Gondoic acid /%	0.528	0.567	0.47	0.554	0.559	0.488

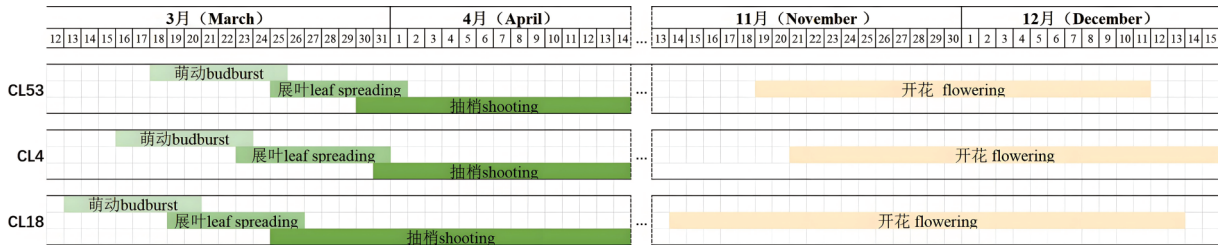


图5 机械和人工采果后不同油茶品种生长物候的比较

Fig. 5 Comparison of growth phenology of different *C. oleifera* varieties after mechanical and manual harvesting

增加了花苞、叶片和枝条损伤($P<0.05$)。但是,油茶树体花苞总量大,坐果率较低。应用机械采收时,适度的花苞脱落客观上发挥了“疏花”作用,有利于油茶坐果和产量提升。这与果树栽培中人工疏花疏果的生理效应具有一致性。

从动力学响应看,随着采收作业时间延长,果实与花苞脱落率往往也呈上升趋势,但二者响应模式存在差异。Wu等人[19]研究表明,振动时间为5 s时,油茶花蕾的最小脱落率为11%。当激发时间从5 s增至10 s时,果实脱落率提高了24%,花蕾脱落率增加了15%;振动时长由10 s增至15 s时,果实脱落率仅提高1%,花蕾脱落率却增加了28%。这与苹果和柑橘等果树的机械采收响应相似[15, 25]。这说明在达到一定振动阈值后,继续增加作业时间对果实采净率的贡献有限,却会大幅加剧对树体的负面影响。因此,在油茶机械采收作业中,单次持续3~5 s的采打,允许花果枝上遗留少量果实待人工采净,这种“机械为主、人工为辅”的方式是现阶段兼顾采收效率和树体长期生产力的优化策略。

3.2 采收机械的改进与树体结构的培育需要协同优化

采收机械的机械特性与树体管理之间的适配性,直接影响采收效果与树体损伤。机械振动的能量传递受枝条物理特性影响。振动式机械更适用于枝条硬度适中、结构相对紧凑的结果枝,而纤细、柔软或下垂枝条不利于能量传递,易导致采净率下降(图6)。Wang等人[26]关于油茶花果枝振动响应模拟分析表明,在固定激振力幅值条件下,激振力频率为5~12 Hz时,油茶果枝末端采收惯性力幅值介于10~54.3 N,该值高于果实脱落所需力而低于花苞脱落所需力,从而满足“采果保蕾”。该研究还显示,油茶果实平均脱落力大于花芽[26]。这提示振动机采作业中相邻枝条间碰撞可能是花、枝、叶损伤的另一重要原因。梳刷式机械则通过梳齿直接作用于果实或果枝,其对疏密适中和树冠表层、果实暴露良好的枝条结构具有较好适应性;但在面对密集、交错枝条时,作业难度增加。为达到理想采净率,常需多角度反复作业,导致花叶刮落。无论是振动式还是梳刷式机械,其高效低损应用均离不开相适应的树体结构基础。但目前,油茶枝条的选择性修剪标准如最佳枝间距、长度、直径及其相应结果能力还不清楚,这将是后续油茶宜机化采收研究中重点关注的方向之一。未来油茶机械采收技术的发展,应注重“品种—树形—机械”三者的协同,一方面通过农艺措施培育宜机作业的标准化树冠,另一方面改进机械以增强对复杂树冠结构的适应性,从而兼顾采收效益与树体可持续性。



图6 对于纤长、柔性的结果枝振动式机械采净率低

Fig. 6 Low harvesting efficiency rate of vibrating machine applied for slender and flexible fruit-bearing branches

3.3 油茶机械采收具有良好的应用前景

油茶主要经济性状(如油脂含量、脂肪酸组分)和树体营养生长物候更多受品种特性控制,如CL53果实生理成熟度滞后于CL4和CL18,进而影响其种子油脂积累;CL18萌芽、展叶、抽梢等物候期均早于CL53和CL4。但同一品种中,机械采收与人工采收

对上述性状的影响没有明显差异。2024年CL40结实偏低,属自然结果小年现象,应与机械采收没有直接关联。

油茶机械采收面临的主要担忧之一,是花苞脱落等树体损伤影响来年产量。实际应用或模仿试验中,现有采收机械造成的花苞损伤率约5%~13%。由于油茶花量巨大,这一损失水平仍在可接受范围。其他树种的相关研究表明,合理实施的机械采收不会对树体造成长期的生理影响。在柑橘中,即使连续多年机械采收,管理得当情况下,树体水分利用、营养生长及产量未受显著影响。尽管振动式机采较人工会使柑橘叶和细枝损伤提高约10%,并导致表层须根裸露,但两者在茎水势、叶气体交换和叶片光系统效率方面均无显著差异[27,28]。因此,随着未来采收机械参数与树体结构适配性不断提升,机械采收降低用工成本和提升采收效率的优势将进一步凸显,其在油茶产业中将展现出广阔的应用前景。

参考文献:

[1] 国家林业局油茶产业发展办公室. 茶油营养与健康[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2016.

[2] Zhang F H, Li Z, Zhou J Q, et al. Comparative study on fruit development and oil synthesis in two cultivars of *Camellia oleifera*[J]. BMC Plant Biol, 2021, 21(1): 348. DOI:10.1186/s12870-021-03114-2.

[3] Wang X Q, Zeng Q M, Verardo V, et al. Fatty acid and sterol composition of tea seed oils: Their comparison by the "FancyTiles" approach[J]. Food Chem, 2017, 233: 302-310. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.04.110.

[4] 谭晓风. 油茶分子育种研究进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(1): 24. DOI:10.14067/j.cnki.1673-923x.2023.01.001.

[5] Lin P, Wang K L, Wang Y P, et al. The genome of oil-camellia and population genomics analysis provide insights into seed oil domestication [J]. Genome Biol, 2022, 23(1): 14. DOI:10.1186/s13059-021-02599-2.

[6] Quan W X, Wang A P, Gao C, et al. Applications of Chinese *Camellia oleifera* and its by-products: a review [J]. Front Chem, 2022, 10: 921246. DOI: 10.3389/fchem.2022.921246.

[7] 庄瑞林. 中国油茶[M]. 北京: 中国林业出版社, 2008.

[8] Zhang J E, Liu J L, Wang J, et al. Advances in *Camellia oleifera* seed meal saponins: Extraction, analysis, bioactivity, and application [J]. Food Chem, 2025, 492: 145277. DOI:10.1016/j.foodchem.2025.145277.

[9] 王胜男. 加快油茶产业发展三年行动方案印发[Z]. 中国绿色时报. 2023-01-05.

[10] 彭语轩, 廖凯, 徐诗宇, 等. 丘陵山区轮式油茶果采收一体机研[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 31-38. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404037.

[11] 汤晶宇, 范志远, 向文博, 等. 油茶果采收技术装备研究现状与趋[J]. 林业工程学报, 2025, 10(5): 25-38. DOI: 10.13360/j.issn.2096-1359.202312026.

[12] Pu Y J, Wang S M, Yang F Z, et al. Recent progress and future prospects for mechanized harvesting of fruit crops with shaking systems[J]. Int J Agric Biol Eng, 2023, 16(1): 1-13. DOI:10.25165/j.ijabe.20231601.7954.

[13] Zhou J F, He L, Karkee M, et al. Effect of catching surface and tilt angle on bruise damage of sweet cherry due to mechanical impact[J]. Comput Electron Agric, 2016, 121: 282-289. DOI:10.1016/j.compag.2016.01.004.

[14] Belmin R, Casabianca F, Julhia L, et al. Multi-level management of harvest for fresh fruit: the case of Corsican clementine[J]. Agron Sustain Dev, 2021, 41(3): 41. DOI:10.1007/s13593-021-00686-z.

[15] He L, Zhang X, Ye Y X, et al. Effect of shaking location and duration on mechanical harvesting of fresh market apples[J]. Appl Eng Agric, 2019, 35(2): 175-183. DOI:10.13031/aea.12974.

[16] 陈开展. 油茶果树冠振动采摘装备的设计与研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.

[17] 丁达. 高效低损的树冠振动式油茶果采摘装置设计与试验[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2022.

[18] 伍德林,李超,曹成茂,等. 摇枝式油茶果采摘装置作业过程分析与试验[J]. 农业工程学报. 2020,36(10): 56-62. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.10.007.

[19] Wu D L, Zhao E L, Fang D, et al. Determination of vibration picking parameters of *Camellia oleifera* fruit based on acceleration and strain response of branches [J]. Agriculture, 2022, 12(8): 1222. DOI:10.3390/agriculture12081222.

[20] 高自成, 赵凯杰, 李立君, 等. 悬挂振动式油茶果采摘执行机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 9-17. DOI: CNKI:SUN:NYGU.0.2019-21-002.

[21] 杜小强, 韩鑫涛, 沈腾飞, 等. 基于5R并联机构的二自由度树冠振动装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 96-106. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2023.04.009.

[22] 杜小强, 宁晨, 杨振华, 等. 跨式油茶果收获机履带底盘行走液压系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 139-47. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2023.03.014.

[23] 伍德林, 袁嘉豪, 李超, 等. 扭梳式油茶果采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 21-33. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.002.

[24] 甄乾广, 何萌, 王金鹏, 等. 我国油茶果采摘设备研究进展[J]. 世界林业研究, 2023, 36(4): 101 - 106. DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2023.0054.y.

[25] Torregrosa A, Ortí E, Martín B, et al. Mechanical harvesting of oranges and mandarins in Spain[J]. Biosyst Eng, 2009, 104(1): 18-24. DOI:10.1016/j.biosystemseng.2009.06.005.

[26] Wang R Y, Fang D, Wu C, et al. Dynamic response of *Camellia oleifera* fruit-branch based on mathematical model and high-speed photography[J]. Biosyst Eng, 2024, 237: 232-241. DOI: 10.1016/j. biosystemseng.2023.12.010.

[27] Li K T, Syvertsen J P. Physiological effects of mechanical harvesting in citrus trees[J]. HortScience, 2004, 39(4): 885C-8885. DOI:10.21273/hortsci.39.4.885c.

[28] Li K T, Syvertsen J P. Mechanical harvesting has little effect on water status and leaf gas exchange in citrus trees[J]. J Am Soc Hortic Sci, 2005, 130(5): 661-666. DOI:10.21273/jashs.130.5.661.

(责任编辑:郭学兰)