doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.09.001

# 热区主要作物收获技术与装备研究进展

杨然兵[1,2]　张　涛[1,2]　张　健[1,2]　王　涛[1,2]　潘永菲[2,3]　吕丹阳[2,3]　刘建宇[1]

(1.海南大学机电工程学院,海口 570228;2.农业农村部热带高效农业智能装备重点实验室,儋州 571737;
3.海南大学信息与通信工程学院,海口 570228)

**摘要**:热带作物是全球农业生产和农产品贸易的重要组成部分,其种植区域广泛、作业环境复杂,收获装备机械化率低,已成为制约热区农业发展的关键因素。以橡胶、木薯、甘薯、咖啡等热区主要经济作物以及椰子等热带水果为研究对象,通过系统梳理与对比分析,阐述其分布特征与产业规模,总结并分析不同作物的收获模式特点、装备结构及关键作业技术研究进展。针对热区作物多分布于高温高湿、土壤黏重的丘陵山区,且成熟期不一等特点,分析热区作物机械化收获面临基础理论薄弱、丘陵山区适用小型装备不足、机械化作业条件受限以及产业配套不完善等问题,提出加强作业机理研究、推进农机农艺融合与规模化种植、发展轻简化及精准化收获装备以及完善产业链与组织体系等发展方向。

**关键词**:热区作物;收获装备;橡胶;木薯;甘薯;咖啡

**中图分类号**:S255.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)09-0001-15　　**OSID**:

# Research Progress on Harvesting Technology and Equipment for Major Crops in Tropical Regions

YANG Ranbing[1,2]　ZHANG Tao[1,2]　ZHANG Jian[1,2]　WANG Tao[1,2]　PAN Yongfei[2,3]　LÜ Danyang[2,3]　LIU Jianyu[1]

(1. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou* 570228, *China*
2. *Key Laboratory of Tropical High-efficiency Agricultural Intelligent Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Danzhou* 571737, *China*
3. *School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou* 570228, *China*)

**Abstract**: Tropical crops constitute a significant component of global agricultural production and trade. However, their wide distribution, complex operating environments, and low level of harvesting mechanization have become critical constraints on agricultural development in tropical regions. Focusing on major tropical economic crops, including rubber, cassava, sweet potato, and coffee, as well as tropical fruits such as coconut, their distribution characteristics and industrial scale were systematically reviewed and comparatively analyzed. It further summarized the harvesting patterns, structural features of harvesting equipment, and recent advances in key operational technologies for different crops. Given that tropical crops were typically cultivated under high-temperature and high-humidity conditions, in heavy and cohesive soils, predominantly across hilly and mountainous terrains, and often exhibited dispersed maturity periods, mechanized harvesting in tropical regions faced multiple challenges. These included insufficient fundamental theoretical research, a shortage of small-scale machinery suitable for hilly and mountainous areas, restricted operational conditions for mechanized applications, and incomplete industrial support systems. Accordingly, future development should prioritize strengthening research on harvesting mechanisms, promoting the integration of agricultural machinery with agronomic practices alongside scale-oriented cultivation, advancing lightweight and precision-oriented harvesting equipment, and improving the industrial chain and organizational systems.

**Key words**: tropical region crops; harvesting equipment; rubber; cassava; sweet potato; coffee

收稿日期:2026-02-05　修回日期:2026-02-13

**基金项目**:国家自然科学基金项目(52265029)

**作者简介**:杨然兵(1979—),男,教授,博士,主要从事土中作物及种子繁育装备研究,E-mail:yangranbing@163.com

## 0 引言

据联合国粮农组织(FAO)的统计,全球适宜种植热带作物的土地面积为 $5\times10^9$ hm$^2$,主要分布在亚洲、南美洲、非洲和大洋洲赤道附近地区。热区是热带作物的重要区域[1],得益于全年高温、多雨及光照资源丰富等自然条件,可实现一年多季种植与高复种指数,相关产业链直接带动超 10 亿人口就业[2]。从产业属性和产品用途角度来看,主要热带作物可分为两大类:以获取经济收益为目的的热带经济作物[3],主要包括天然橡胶、甘蔗、木薯、甘薯和咖啡等[4];国际上大规模流通和贸易的热带水果作物[5],主要包括香蕉、菠萝、芒果、椰子和荔枝等[6-7]。

热带作物主要分布于丘陵山区,地形起伏大、地块细碎分散且降雨集中,高温高湿的条件下土壤承载能力低,作业环境不稳定。上述特征在为热带作物生长提供有利条件的同时,也增加了机械化作业的难度,制约热区机械化发展。尤其是收获环节仍需要大量人工、劳动强度大,属于劳动密集型作业环节[8]。因此,围绕复杂作业环境下热带作物收获装备的研究与创新尤为关键。

本文聚焦于热区主要经济作物和热带水果作物的收获技术与装备研究进展,系统梳理典型收获装备的结构形式与作业原理,归纳技术特点与适用条件,分析现有装备存在的主要问题,并提出相应的发展方向与改进建议,为推进热区主要作物收获机械化装备的发展与应用提供参考。

## 1 热区主要作物分布与规模

根据联合国粮农组织 FAO 数据统计显示[9],天然橡胶生产主要分布在南北纬 15°以内[10],种植区域遍及亚洲和非洲[11]。2024 年全球天然橡胶种植面积约为 $1.3\times10^7$ hm$^2$,总产量约为 $1.4\times10^7$ t,其中泰国是世界最大的天然橡胶生产国和出口国。甘薯广泛分布于南北纬 40°以内,种植区域遍及亚洲、美洲和非洲等[12]。2024 年全球甘薯种植面积约为 $7.2\times10^6$ hm$^2$,总产量约为 $9.1\times10^7$ t,其中中国种植面积产量位居世界第一。木薯主要分布在南北纬 30°以内,广泛种植于非洲、亚洲和美洲等地区[13]。2024 年全球木薯种植面积约为 $3.3\times10^7$ hm$^2$,总产量为 $3.4\times10^8$ t,其中,泰国木薯出口量位居世界第一。咖啡是世界第一大饮料,广泛种植在非洲、亚洲和美洲的 80 多个国家和地区[14]。2024 年全球咖啡种植面积约为 $1.2\times10^7$ hm$^2$,总产量约为 $1.1\times10^7$ t,其中巴西是世界上咖啡种植面积、咖啡生豆产量和出口量排名第一的国家。世界上菠萝种植广泛分布在南北回归线之间,目前约有 80 多个国家和地区生产菠萝[15]。2024 年全球菠萝种植面积约 $1.1\times10^6$ hm$^2$,总产量约为 $2.9\times10^7$ t,其中哥斯达黎加产量位居世界第一。荔枝的原产地位于中国南方亚热带地区和越南北部[16],北纬 23°~27°之间[17],其中中国种植面积和产量位居世界第一。香蕉主要分布在南北纬 30°之间的热带、亚热带地区[18]。2024 年全球香蕉种植面积约为 $5.8\times10^6$ hm$^2$,总产量约为 $1.3\times10^8$ t,印度种植面积和产量位居世界第一。柑橘生产集中分布于南北纬 20°~30°之间[19],2024 年全球柑橘种植面积约为 $3.9\times10^8$ hm$^2$,总产量约为 $5.1\times10^7$ t,巴西是全球最大的柑橘类水果生产国之一。芒果生产分布于全球南北纬 28°~30°的亚洲、美洲和非洲地区[20]。2024 年全球芒果种植面积约为 $6.3\times10^6$ hm$^2$,总产量约为 $6.2\times10^7$ t,其中印度种植面积和产量位居第一。椰子主要集中在赤道两侧 20°以内的热带滨海地区[21]。2024 年全球椰子种植面积约为 $1.1\times10^7$ hm$^2$,总产量约为 $6.5\times10^7$ t,印度尼西亚、泰国和越南是世界上出口椰子最多的国家,其出口量占世界总出口量的 74.8%。

## 2 热区主要经济作物收获技术与装备

### 2.1 橡胶割胶收获技术与装备

#### 2.1.1 橡胶割胶工艺

橡胶割胶作业具有作业周期长、作业频次高且切割精度要求严格等特点,其割胶深度和切口角度直接影响乳胶产量、树皮再生能力及橡胶树的寿命。割胶过程中,通常在形成层上方 1.2~2.0 mm 处[22],以适当角度切开乳管形成导流通道[23];每次割胶在垂直方向所消耗的树皮厚度称为树皮消耗量,其合理范围一般为 1.4~2.1 mm[24],割胶局部视图如图 1 所示[25]。

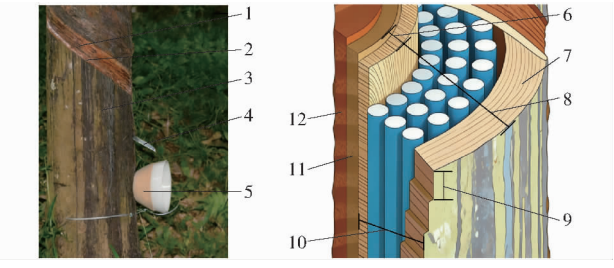



图 1 橡胶树树干局部视图

Fig. 1 Close-up view of rubber tree trunk

1. 切割面 2. 乳管 3. 未割面 4. 导胶舌 5. 乳胶碗 6. 割胶深度 7. 出胶面 8. 切削深度 9. 树皮消耗量 10. 树皮 11. 形成层 12. 木质层

#### 2.1.2 橡胶割胶收获技术与装备

目前割胶装备可分为便携式割胶机、固定式割

胶机和移动割胶机器人。

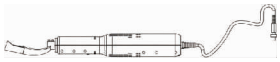
**2.1.2.1　便携式割胶机**

便携式割胶机以电机或机械驱动替代传统人工手动切割，通过导向器、调节旋钮等机械限位结构限定割胶深度与树皮消耗量，实现毫米级精准控制，按切割形式可分为往复式和旋切式两种。相关研究表明[26]，与传统割胶刀相比，便携式割胶机可使劳动强度降低 50% 以上，割胶深度和树皮消耗厚度实现毫米级精准控制，割胶技术难度降低 50% 以上，割胶效率提高 10% 以上。便携式割胶机主要通过机械结构来限定割胶深度和割胶厚度[27]。ZHANG 等[26]采用对称刀片结构，可正反两面割胶。实验结果表明，除个别数据外，每次割胶的剥皮量差异小于 0.2 mm，且各组平均剥皮量也小于 0.2 mm。刀体在割胶线上没有挤出痕迹，有利于胶料排出。印度 AMRITA 大学[28]设计的割胶机主要由振动动力装置和割胶刀刃组成，刀刃背面安装有机械导向结构。曹建华等[29]在便携式割胶机前部设有对称刀片和限位导向器，实现割胶深度和树皮消耗量的精确控制。WANG 等[30]设计了一款带有垂直刀片以及可调节导向装置的便携式割胶机，已成功推广到多个国家。

国内威马农机、宁波汉浦工具有限公司、浙江三锋实业股份有限公司以及广东农垦热带作物科学研究所等单位已开展了相关产品的研究应用，如表 1 所示。

**表 1　国内便携式割胶机结构和技术特点**

**Tab. 1　Structure and technical features of domestic portable rubber tapping machines**

| 企业名称/型号 | 切割型式 | 结构与实物图 | 技术特点 |
|---|---|---|---|
| 威马农机股份有限公司/ ETK11 型便携式割胶机 | 往复式 |  | 机身 350 g，适配多种割胶方式 |
| 宁波汉浦工具有限公司/ 4GXJ－2 型便携式割胶机 | 往复式 |  | 机身 370 g，装备前端有两个对称设计的刀片和限位导向器 |
| 海南海胶智造科技有限公司/ 电动割胶刀 | 往复式 |  | 机身 350 g，割胶深度可调，智能适配阻力 |
| 浙江三锋实业股份有限公司/ 8K101 型便携式割胶机 | 旋切式 |  | 机身 320 g，装备前支撑旋钮可调节切割厚度 |
| 广东农垦热带作物科学研究所/ 4CJX－303B 型便携式割胶机 | 旋切式 |  | 机身 450 g，限位导向器配合前后可调节的圆弧平台可实现限厚、限深 |

便携式割胶机在一定程度上降低了胶工劳动强度和操作技巧要求，但仍高度依赖人工，适用于中小规模胶园和劳动力紧缺地区。同时，单机价格相对较高，经济性优势尚不突出。

**2.1.2.2　固定式割胶机**

固定式割胶机普遍采用一机一树的作业模式。其工作原理是借助固定架与导轨系统安装于树干表面，形成稳定支撑结构，利用树干仿形切割技术，在行走电机与丝杆电机驱动下带动刀架完成圆周与垂向复合运动[31－32]，精准模拟人工割胶轨迹与切割深度。目前研究多集中在割胶精度和仿形控深方面。

ABHILASH 等[33]配备位置传感器定位初始切口，搭载高速直流电机驱动的端铣刀完成割胶。高可可等[34]提出一种先扫描后切割的控制方式实现精准切割，利用超声波传感器预先扫描树围，建立测量误差控制模型得到刀尖与树皮的距离，利用 PID 控制算法控制刀具进给量。现有固定式割胶机多为刚性固定，在切割不规则表面时，缺乏反馈机制，难以维持稳定进刀深度，张喜瑞等[35－36]通过引入仿形控深装置以及优化割胶运动机构和割胶执行机构等关键部件，实现割胶过程中稳定深度进刀。采用激光仿形感知橡胶树轮廓[37]，结合三轴运动控制与贴树割胶机构，实现割胶轨迹自动规划与多舵机协同的仿形自动割胶。也可通过激光测距实现橡胶树干已割面非接触仿形，由三坐标平台联动控制割刀沿空间曲线运动，但因树干弯曲造成的割胶设备偏心问题尚未解决。目前国内企业研发的典型固定式割胶机机械结构与特点如表 2 所示。

固定式割胶机主要依赖树皮表面仿形切割，难以充分匹配橡胶树生理特性，导致割胶产量明显偏低，仅为人工割胶的 40% ～50%[38]。此外，单台设备通常仅能对单棵橡胶树进行作业，大面积应用成本较高。螺旋线割胶虽可提升作业效率，但需要实现复杂的三维运动，增加了结构设计与控制难度，使

表 2 国内固定式割胶机结构和技术特点

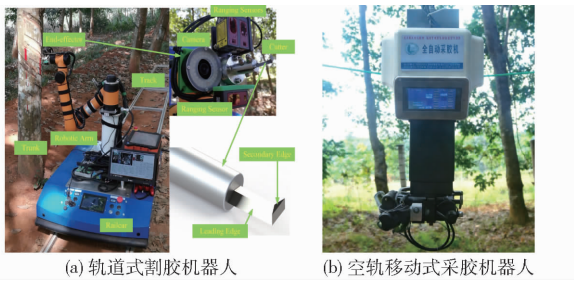
Tab. 2 Structural and technical features of domestic and international fixed rubber-tapping machines

| 企业名称 | 采胶方式 | 实物图 | 技术特点 |
|---|---|---|---|
| 宁波中创翰维科技有限公司 | 固定螺旋式 |  | 整机配置高集成无线通信与控制系统,可完成定时唤醒、自动割胶和状态数据回传,并通过联网管理实现远程监控与参数设定 |
| 海南海胶智造科技有限公司 | 固定螺旋式 |  | 通过沿橡胶树干表面自下而上运动实现自动割胶;结合移动终端与集中控制系统,实现割胶过程的远程监控与标准化作业 |
| 海南天然橡胶产业集团股份有限公司 | 固定螺旋式 |  | 整机由机械模块和通信模块组成,实现自动割胶,执行的结果数据传输到云端。为胶园提供数据监控、分析和远程控制的功能 |
| 中国热带农业科学院 | 固定针刺式 |  | 配备针刺采胶系统,集成刮皮、胶乳增产剂涂药、针刺钻孔采胶、胶乳收集功能,实现施药采收一体化 |

装备成本进一步上升,从而限制了其规模化推广。因此,有必要在割胶方式上开展创新研究,以在简化系统结构的同时降低成本,并提升作业适应性。

**2.1.2.3** 割胶机器人

割胶机器人经过近年来的功能优化与升级,装备的核心组成部分扩展至机械臂、底盘、激光雷达、储胶罐、扫描仪和切割器等,同时融入了二维码标识、云端系统等现代信息技术,实现了由云端系统控制的智能化割胶作业[39]。ZHOU 等[25]设计了一款轨道式割胶机器人,如图 2a 所示,通过红外技术定位目标橡胶树的割面,结合双目视觉技术实现采胶轨迹参数的初步感知。此外,开发了集成末端执行器实现采胶轨迹与作业的精准感知。在机械臂切割过程中,刀片冲击加速度的变化会导致切屑连续变化,从而影响切割的稳定性。有研究将惯性测量单元(IMU)与机械臂相结合[40],实现了刀片姿态和位置的实时感知。此外,还提出一种采用导向定位式螺旋轨道进行割胶的方法[41],利用螺旋轨道实现螺旋割胶路径,有利于乳胶的流动。然而,轨道式割胶机器人需在胶林前期完成专用轨道的规划与铺设,前期投入成本过大并且极大限制了应用场景。北京理工华汇智能科技有限公司[42]提出了一种基于视觉和激光雷达技术的自走式割胶机器人,利用摄像头扫描橡胶树上包含待割胶线的垂直和水平位置信息二维条形码标签。之后根据标签信息控制机械臂相对于割胶位置的运动,并利用深度摄像头提取橡胶树上刀痕的坐标,从而构建新的割胶切割路径。对于自走式割胶机器人,自动导航技术至关重要。为实现割胶机器人在橡胶林间的自主导航并采集橡胶林信息,激光雷达因其不仅可以通过高频率提供大量精确信息,还能满足精度和速度的要求等优点而得到了广泛运用。ZHANG 等[43]提出了一种基于低成本激光雷达和陀螺仪的森林导航与信息采集方法。在构建的几何特征图中,平均位置误差分别为 43.00、46.48、40.40 cm。NIE 等[41]提出一种基于树干中心图谱的森林三维激光雷达 SLAM 系统,利用树干构建稀疏稳定的树干图谱,实现高精度实时定位与割胶信息融合,且在无 IMU 条件下仍具低存储优势。ZHOU 等[44]融合激光雷达与视觉传感数据,构建自监督学习框架,实现森林环境中机器人可行驶地形的鲁棒识别,并在多场景下验证了良好的感知性能。中国热带农业科学院研发了一种空轨移动式针刺采胶机器人,如图 2b 所示,悬空轨道连接多棵橡胶树,轨道配行走机构,整机配备树围检测器、位置传感器、距离检测器协同采集数据,后台控制器



(a) 轨道式割胶机器人 (b) 空轨移动式采胶机器人

图 2 割胶机器人

Fig. 2 Rubber tapping robot

精准调控采胶器位置。但索道系统则需要重新构建林间空中运输结构且割胶稳定性需要进一步验证。

割胶机器人主要采用履带式、轨道式和索道式移动方式，但对传感系统以及胶林的前期建设投入大且作业稳定性不足。然而，其一机多树作业能力使其在橡胶割胶自动化领域仍具有显著发展潜力。

### 2.2　甘薯收获技术与装备

目前，国内外甘薯收获主要包括甘薯分段收获和甘薯联合收获两种模式。

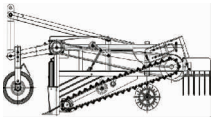
#### 2.2.1　甘薯分段收获

甘薯分段收获是指多种机具与人工相结合的收获方式，是我国当前较为常见的作业模式。其作业流程通常包括多个环节：首先由杀秧机清除地上蔓秧，其后由挖掘收获机完成甘薯挖掘及薯土分离作业，随后将甘薯铺放于地表，由人工进行清理、分级和集中收集[45]。

在分段收获过程中，甘薯在挖掘与分离阶段的输送行程较短，块根所受到的碰撞和冲击较小，因此伤薯率和表皮破损率相对较低，可用作商品薯[46]。然而，该模式作业流程较为分散，劳动强度大，难以满足现代甘薯生产对高效率、低成本收获的需求。同时，丘陵山区大型机械难以收获，不同地区之间机械协调调用困难[47]。国内外科研院所和学者研发了多种适用于复杂地形的中小型甘薯挖掘机。国内外企业研发的甘薯分段收获机结构形式及技术特点如表 3 所示。

**表 3　国内外甘薯分段收获机结构和技术特点**

**Tab. 3　Structural and technical features of sweet potato segment harvesters at home and abroad**

| 企业名称/型号 | 实物图 | 技术特点 |
|---|---|---|
| 德国 GRIMME 公司/WH200 型薯类分段收获机 |  | 牵引式，配套功率 50 kW，作业幅宽 900 mm，可将收获作物铺放于机器后方中间或侧方，可实现 2 + 2 加强收获模式，适用于不同土壤条件下的马铃薯机械化收获初段作业，适用于平原地区多种土壤条件收获 |
| 日本松山株式会社/P－501D 型薯类分段收获机 |  | 牵引式，配套功率 5 kW，作业幅宽 500 mm，作业深度 100 mm，挖掘与薯土分离装置采用振动式结构形式，通过振动挖掘铲与筛分机构协同作用，实现薯块挖出与土壤分离，适用于小垄单行薯类作物收获 |
| 日本松山株式会社/D－551A(H)型薯类分段收获机 |  | 牵引式，配套功率 9.6 kW，作业幅宽 550 mm。输送带倾角可调节，挖掘铲前端配置树脂防护板，可降低土壤附着度，适用于土壤黏重地区，对伤薯率要求严格的鲜食甘薯收获 |
| 农业农村部南京农业机械化研究所/4GS－1500 型甘薯宽幅分段收获机 |  | 牵引式，配套功率 58.8 kW，作业幅宽 1 500 mm，作业深度 300 mm，采用双级升运链式结构，前级侧重分离、后级侧重输送，并配置了破土防缠绕装置。适用于平原坝区或丘陵缓坡等大田块沙壤或沙浆黑土地双行收获作业 |
| 山东省农业机械科学研究院/4UGS2 型双行甘薯分段收获机 |  | 牵引式，配套功率 88 kW，作业幅宽 1 640 mm，作业深度 300 mm。该机具配置了自动对行系统和挖掘深度自动控制系统，适用于黏重土壤条件下的甘薯收获 |
| 徐州龙华农业机械科技发展有限公司/4U－1 型甘薯分段收获机 |  | 牵引式，配套功率 30 kW，作业幅宽 900 mm，挖掘深度 150 ~ 300 mm，生产率 0.20 ~ 0.33 $hm^2$/h，适用于丘陵山区单垄单行收获作业 |
| 南通富来威农业装备有限公司/4UG－2 型甘薯分段收获机 |  | 牵引式，配套功率 58.8 kW，作业幅宽 1 500 mm，采用段式升运角和震动式输送，倾斜立式破垄刀，并配备放蔓缠绕装置，挖掘深度可调 |
| 青岛洪珠农业机械有限公司/动刀薯类分段收获机 |  | 牵引式，配套功率 36.8 kW，作业幅宽 900 mm，作业深度 150 ~ 350 mm，配备活动铲，可有效防止堵土；配置切草盘，能高效切除杂草并改善入土与分离工况。对泥泞田块适应性强，适用于湿黏土壤环境下作业 |

甘薯分段收获机是丘陵山区及中小规模收获作业的主要装备，多数以较简洁的机械结构为核心，进一步结合机电液控制技术。为改善挖掘与分离效果，并降低收获过程中的机械损伤，这类机具通常在挖掘铲、输送链及关键接触部件表面包覆树脂、橡胶等柔性或耐磨材料。一方面，可增强对黏重土壤的

适应性,提高挖掘与去土效率;另一方面,能够有效缓冲甘薯与机具之间的刚性碰撞,减少表皮擦伤和破损,从而降低收获损失率。

### 2.2.2 甘薯联合收获

甘薯联合收获是在一次作业中完成挖掘、输送、除杂、分选和装袋等工作[48]。

欧美等发达国家甘薯种植以规模化经营为主,收获装备多为大型联合收获机,自动化程度高,通常以牵引式为主;中国、日本等甘薯种植地块分散,以自走式为主。国内外企业研发的典型甘薯联合收获机结构形式及技术特点如表 4 所示。

**表 4 国内外甘薯联合收获机结构和技术特点**

**Tab. 4 Structural and technical features of domestic and international sweet potato combine harvesters**

| 企业名称/型号 | 机型 | 实物图 | 技术特点 |
|---|---|---|---|
| 英国 Standen 公司/TSP1900 型甘薯联合收获机 | 大型 |  | 牵引式,配套功率 147 kW,作业幅宽 1 200 mm,双行联合收获作业模式,采用开放式管状底盘、VariStep 可调筛网与 OMEGA 柔性分离系统,实现低损伤挖掘与高效土薯分离、整机全液压驱动,挖掘深度与作业速度可调,并具备在线分级与双侧卸料功能,适用于宽行距标准化种植甘薯收获 |
| 英国 Lockwood 公司/674 Big Sweet 型甘薯收获机 | 大型 |  | 牵引式,配套功率 224 kW,整机质量 11 000 kg,作业幅宽 990 mm,可实现 4 行同步收获。整机采用 100% 液压驱动系统并结合 CAN 总线控制,可根据土壤条件和作业负荷进行无级调节,机具采用低滚动、柔性输送结构及宽作业臂设计,并配置自动深度控制与转向回中功能,分离清选环节采用气流清选系统风机辅助并配合加长机架结构 |
| 加拿大 Willsie 公司/674 甘薯收获机 | 大型 |  | 牵引式,配套功率 220 kW,两行收获作业模式。机具可选配拖拉机链条速度控制系统、PTO 泵及独立机油冷却器,实现输送与作业速度的精细化调节,通过液压三点式振动筛、液压振动臂及挖掘链条限位滚轮等配置,可进一步优化薯土分离效果并降低机械损伤 |
| 日本松山株式会社/GZA651 型甘薯联合收获机 | 中小型 |  | 履带自走式,作业幅宽为 660 mm,前置升降式装箱平台高度可在 660 ~ 1 550 mm 范围内无级调节,采用静液压无级变速(HST)传动系统,作业速度可调,配备两级输送与分选机构,实现薯土分离与有序收集。适应泥泞及不平整地块下甘薯收获 |
| 东洋农机株式会社(TOYONOKI)/TPH179 型甘薯联合收获机 | 中小型 |  | 履带自走式,发动机功率 40.5 kW,作业幅宽 850 mm,采用 HST 无级变速系统,适应复杂地形作业。挖掘系统采用多铲挖掘与橡胶滚筒组合,挖掘深度可自动保持。薯土分离及茎叶处理通过橡胶滚筒与输送装置完成。整机配置两级分级滚筒,实现在线分级,并可通过输送带卸料,适用于复杂地形中小规模种植区,需在线分级甘薯收获 |
| 希森天成/4UZ-100 型甘薯联合收获机 | 中小型 |  | 履带自走式,发动机功率 25.8 kW,工作幅宽 1 000 mm,整机行走系统和输送网筛均采用液压无级调速,全车采用全液压驱动,挖掘深度可调,挖掘装置支持液压折叠升降,并配备人工捡拾平台,适用于丘陵山区作业 |
| 农业农村部南京农业机械化研究所/4UZL-1 型甘薯联合收获机 | 中小型 |  | 履带自走式,发动机功率 65 kW,作业幅宽 550 mm,挖掘深度小于 300 mm(可调),适应垄距 90 mm,单垄单行联合作业模式。配置挖掘输送机构、薯秧分离机构、弧栅式薯块交接输送机构、刮板链输送机构及后输送带等关键部件。具有输送连续性好、薯块损失率和伤薯率低等技术优势,适用于沙壤作业 |
| 禹城亚泰和海南大学联合研发/4UZL-1000 型甘薯联合收获机 | 中小型 |  | 履带自走式,发动机功率 52 kW,作业幅宽 1 000 mm,挖掘深度 150 mm,单垄作业模式,整机采用两段式薯土分离作业方案,前段采用直杆式升降链实现防跌落功能,后段设置双重缓冲清选平台。整机以液压传动为主,可实现输送与分离参数调节,适用于中等规模单垄种植区,需低损伤收获场景 |
| 农业农村部南京农业机械化研究所/单垄单行型甘薯联合收获机 | 中小型 |  | 履带自走式,发动机功率 88 kW,作业幅宽 1 180 mm,适应垄距 900 mm,适用于单垄单行作业模式。装置集挖掘输送、杆条升运、摘辊分离于一体,通过双层杆条输送与反向旋转摘辊实现薯块与薯秧高效分离,兼具防缠绕结构。采用液压调节输送倾角与转速,实现高摘净率、低损伤率,田间试验表明摘净率可达 98%,损伤率低于 3% |

国外甘薯联合收获设备正向多功能化、信息化和智能化方向发展。相比之下，中国、日本等受小地块及丘陵山区地形条件限制的国家，主要发展中小型自走式联合收获机，机具结构紧凑、机械化集成度高，多采用履带式底盘和电液一体化控制方式，操作便捷、地形适应性强，通过多级输送分离、柔性防损结构及低损耗收集技术，在降低甘薯机械损伤方面取得一定成效。但对于收获机械的研究大多是集中在机械结构设计上，在智能化与自动化方面——如自动调速、故障检测、壅土报警、含杂率监测等技术与国外相比仍较为欠缺。这导致现有装备难以在复杂多变的田间作业环境实现无人驾驶、实时故障诊断及含杂率在线监测等功能。

### 2.3　木薯收获技术与装备

木薯收获和甘薯收获模式相同，主要包括分段收获和联合收获两种模式[49]。

#### 2.3.1　木薯作业原理

根据作业不同原理，木薯收获装备主要分为挖掘式、挖掘-升运链式和挖掘-夹持链拔起式 3 种类型[50-51]。

##### 2.3.1.1　木薯挖掘式收获原理

木薯挖掘式收获以松土和整体抬升块根为主要作业方式。作业过程中，挖掘铲从田垄两侧切入木薯块茎下方，在拖拉机动力输出轴及曲柄滑块机构的驱动下产生往复运动，松动根部土壤，使木薯块茎整体上移，随后由人工完成拔取作业[52]，适用于沙质土壤作业。该方式机械结构简单、制造成本较低。

##### 2.3.1.2　木薯挖掘-升运链式收获原理

挖掘-升运链式收获在挖掘松土的基础上引入振动输送分离环节。作业时，挖掘铲切入土层并随整机前进，将木薯及其周围土壤整体挖起，薯土混合物沿铲面向后输送并进入振动输送链系统。在输送链抖动轮作用下实现薯土分离，木薯块根在输送链末端掉落[53]。但在黏重土壤条件下易出现分离效果不佳、块根碰撞频率增加导致损伤率升高等问题。

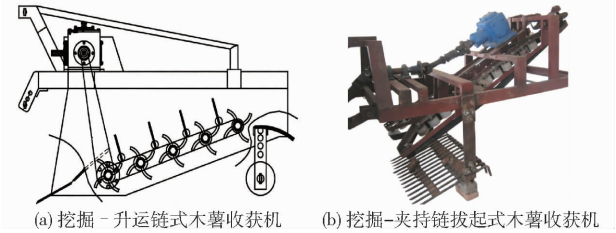
##### 2.3.1.3　木薯挖掘-夹持链拔起式收获原理

挖掘-夹持链拔起式收获通过挖掘与夹持输送相结合实现块根整体拔起。作业过程中，挖掘铲从木薯块茎下方切入并抬升块根，随后由夹持输送机构夹持木薯茎秆，随着夹持机构向上运动，将木薯块茎从土中拔出并向后输送至切薯装置。切薯装置中的切薯刀在电机驱动下旋转，将块茎切割并铺放于地面但根块损失小，适应多种土壤[54]。但对木薯对行性和直立性要求较高[55]。

#### 2.3.2　木薯分段收获

分段收获是采用茎秆粉碎机或人工砍除木薯茎秆后，利用木薯收获机进行作业，薯块由人工完成捡拾。木薯广泛种植于热带丘陵山区，高度差显著，复杂的地形条件对农机具的通过性、稳定性和作业适应性提出了较高要求。

中国热带农业科学院农业机械研究所研发了一款 4UMG-140 型挖掘-升运链式木薯收获机[56]，如图 3a 所示，整机由挖掘装置、五级拨辊输送装置及可调式限深装置等组成，采用拨辊进行薯土分离，经过田间试验表明，其明薯率为 95.2%、损失率为 7.6%。后续研发 4UML-130 型振动链式木薯收获机[57]，适用于宽窄双行起垄种植模式，经过田间试验表明，明薯率 95.8%，损失率 5.4%。有研究表明[58]，采用 T 字形铲刀可增强土壤扰动与破碎效果，从而改善挖掘阻力分布，有利于块根整体抬升。郑贤等[59]设计了一款往复式双夹持装置木薯收获机，采用液压缸夹持，通过减压阀来调节夹持力大小，双夹持装置交替工作。但夹持机构的工作速度需要和拖拉机前进速度高度匹配，对于茎秆的对中性要求较高。廖宇兰等[53]研发了一款挖掘-夹持链拔起式木薯收获机，如图 3b 所示，采用栅条结构挖掘铲，夹持输送机构通过弹性调节夹持间隙，但田间试验效果需要进一步验证。针对挖掘-升运链式木薯收获机在前进过程中无法自动调整其相对于茎秆的位置，导致夹持茎秆时偏离中心距离过大，造成收获损失较大的问题，YANG 等[60]提出了一种基于 YOLO v4 的田间茎秆实时检测方法，可为木薯收获机的自动调整装置提供感知和决策依据。杨望等[61]针对挖拔式木薯收获机中土薯抖动分离效果不稳定以及参数难以优化的问题，以弹簧式土薯抖动分离装置为研究对象，系统分析其土薯分离机理及关键结构参数对分离性能的影响。



(a) 挖掘-升运链式木薯收获机　(b) 挖掘-夹持链拔起式木薯收获机

图 3　木薯分段式收获机

Fig. 3　Cassava segment harvesters

巴西作为木薯起源地，其木薯生产机械的发展相对领先。国内外企业研发的木薯分段收获机结构形式及技术特点如表 5 所示。

不同作业原理的木薯收获装备在结构复杂度、作业效率及适应性方面存在显著差异。挖掘式收获结构简单、成本较低，但依赖人工拔取，机械化程度有限；挖掘-升运链式通过引入振动输送实现薯土分

表 5 国内外木薯分段收获机结构和技术特点

Tab. 5 Structural and technical features of cassava segment harvesters at home and abroad

| 企业名称/型号 | 挖掘原理 | 实物图 | 技术特点 |
|---|---|---|---|
| 巴西 Planticenter 公司/P－900 型木薯收获机 | 挖掘式 |  | 牵引式，配套功率 59 kW，作业幅宽 800 ~ 1 000 mm，整机质量 340 kg，可一次性完成两行木薯收获，配备土壤切割盘与深度控制轮等，土壤扰动小，适用于沙质土壤，中小规模地块的木薯收获 |
| 巴西 IKEDA 公司/SMDP2LM 型木薯收获机 | 挖掘式 |  | 牵引式，配套功率 63 kW，工作幅宽 900 ~ 1 100 mm，整机质量 770 kg，挖掘深度 200 ~ 400 mm，采用门框式结构，使整机受力更稳定 |
| 广西双高农机有限公司/4UML－140 型木薯收获机 | 挖掘式 |  | 牵引式，配套功率 120 kW，作业幅宽 1 400 mm，整机质量 300 kg，一次可完成双行木薯收获，适用于黏重土壤，中小规模地块的木薯收获 |
| 南宁中热农业机械有限公司/MSU1600 型木薯收获机 | 挖掘－升运链式 |  | 牵引式，配套功率 66 kW，作业幅宽 1 600 mm，整机质量 1 460 kg，一次可完成双行木薯收获 |
| 广西双高农机有限公司/4UML－130 型木薯收获机 | 挖掘－升运链式 |  | 牵引式，配套功率 110 kW，作业幅宽 1 300 mm，整机质量 1 300 kg，可实现双行木薯收获，具有较宽工作幅宽与高明薯率 |
| 青岛洪珠农业机械有限公司/4U－160 型木薯收获机 | 挖掘－升运链式 |  | 牵引式，配套功率 75.2 kW，作业幅宽 1 600 mm，挖掘深度 200 ~ 250 mm，整机质量 1 208 kg，一次可完成双行木薯收获，能够根据地形和土壤条件调节挖掘深度与升运链速度，适用于多种土壤条件，需动态调整作业参数的场景 |

离，适用于平整地块和中等黏重土壤，但在复杂工况下易导致损伤率升高；挖掘-夹持链拔起式能够实现块根整体拔起并连续输送，作业效率较高、适应性较强，但对种植行距一致性和茎秆直立性要求较高。分段收获仅能将整个收割过程的人工消耗降低 50%。此外，作业过程中，对驾驶人员的要求较高，需要将轮胎与垄沟对齐，并精确控制收获机的挖掘深度。因此，后续可将研究重点放在自动对行、收获机挖掘深度自动控制等技术，以降低拖拉机驾驶员的操作难度。

### 2.3.3 木薯联合收获

目前，国内外针对木薯联合收获装备的研究相对较少，大多数相关装备仍处于试验或示范应用阶段。少数企业和科研机构开展了相关研究与装备研制工作。杨怡等[62]设计了一款木薯挖掘-夹持链拔起式联合收获装备，采用履带自走地盘、单行收获作业模式，可一次完成挖掘、夹持输送、薯茎分离及去土收集等工序。但尚未进行田间试验，收获效果需要进一步验证。中国热带农业科学院设计了 4UMZ－1400 型木薯联合收获机[63]，采用振动减阻碎土技术、链排振动筛分离技术及后置集中收集与液压自卸技术。经过田间试验表明，损失率 6.8%，含杂率 9.7%。总体指标相对偏高，需要进一步对关键部件进行优化。国外企业研发的木薯联合收获机结构形式及技术特点如表 6 所示。

表 6 国外木薯联合收获机结构和技术特点

Tab. 6 Structural and technical features of cassava combine harvesters at abroad

| 企业名称/型号 | 挖掘原理 | 实物图 | 技术特点 |
|---|---|---|---|
| 巴西 MIAC 公司/Maniva2LR 型木薯联合收获机 | 挖掘-夹持链拔起式 |  | 牵引式，整机长×宽×高为 7 500 mm×2 150 mm×2 900 mm，配套功率 55 kW，整机质量为 4 800 kg。采用液压驱动，设有薯茎自动分离装置，可在夹持输送过程中自动分切木薯，分切后的木薯块根通过传送带输送至机器后方装袋。作业效率为 0.4 $hm^2$/h，适用于双行木薯收获作业 |
| 巴西 HENNIPMAN 公司/WHCM－4000 型木薯联合收获机 | 挖掘-升运链式 |  | 牵引式，整机长×宽×高为 9 700 mm×2 400 mm×3 500 mm，配套功率 103 kW，作业幅宽 1 800 mm，一次可完成两行木薯收获作业，工作时由液压系统控制木薯挖掘和薯土分离部件，并配置侧向 Big Bag 收集系统，可在作业过程中实现收获物的连续装袋，无需停车即可释放收集袋 |

综合来看，大部分木薯联合收获机是纯机械设计，如挖掘铲、低损耗分离装置和输送机等，虽然技术有所改进，但核心参数的调整较为困难，对不同地形和土壤条件的适应性不高。未来木薯联合收获技术的发展有赖于传感感知、液压与电控技术的深度融合，以实现作业参数的实时调节和整机作业性能的稳定提升。

### 2.4　咖啡采摘技术与装备

采摘成本占整个咖啡生产成本的 60% 以上[64]。咖啡采摘装备分为便携式采摘装备和自动式采摘装备。

#### 2.4.1　咖啡便携式采摘

咖啡便携式采摘装备核心原理是将振动作用于果柄，使果柄在特定频率和振幅下产生强制振动。随着咖啡果实随果柄发生摆动，当果实随果柄摆动所产生的惯性力或离心力超过果实与果柄之间的结合力时，果实从果柄上脱落，从而实现采摘。因此合适的振动频率、振幅以及确定最佳振动位置可以提高采摘效率[65-67]。SANTOS 等[68]分析了咖啡果实的脱落强度，以此作为收获设备振动和作业速度调节的指标，之后发现通过增加咖啡采摘机振动和咖啡果成熟指数可以提高收获效率[69]，并指出在振动大于 15 Hz 时，收获效率显著提高。TINOCO 等[70]通过模态分析识别咖啡果实-果柄系统的固有频率和振动模态，利用提出的理论模型模拟了果实-果柄系统的真实拓扑结构，从而获得成熟咖啡采摘的理想频率范围。咖啡花果期长、开花与结果批次分散，同一植株上果实成熟度极不一致，这一固有特性使得采收时采青率偏高，不利于咖啡饮品的品质。为解决该问题，有研究提出通过调整运行速度和作业顺序，优先采摘植株上部果实以降低青果比例[71]。在此基础上，FURRIEL 等[72]提出了基于声学诱导振动与声压场控制原理，构建并验证了一种用于非接触式选择性采摘的原型系统，但采摘率过低。MORENO 等[73]设计了一种电机带动三齿叶片搅拌器的采摘装置，该装置较轻，便于携带，采熟率达到 70% 以上，采青率达到 4.5% 左右。但采摘效率很低，甚至不及人工的作业速度。SNOECK 等[74]设计一种气动采摘辅助装置，采摘机利用气动带动指排作用于枝条将咖啡果实振落，但要求操作者需要有很高的操作水平，其指排很容易伤害咖啡枝条。

我国咖啡 95% 以上种植在云南丘陵地区[75]，因此国内研究人员研发的小浆果类作物多以振动便携式采摘机为主[76-78]。邓祥丰等[79]设计一款小型可变幅振动式采摘机，以曲柄滑块往复运动形成激振力，在最佳参数下的平均脱果率为 91.26%。也有学者设计可调节振频式采摘机[80]，通过参数优化得到当振频为 64 Hz、倾角为 40°、振动时间为 1.5 s 时，采净率为 96.63%、采熟率为 92.34%、枝条损伤率为 4.71%，但为动力来源气动式，需要额外配备气缸。于英杰等[81]设计了一种振动梳式小粒咖啡采收装置，通过果树-机械动力学建模与多体动力学仿真（ADAMS）对关键参数进行优化，结果表明在频率 26 Hz、梳齿间距 32 mm、偏心块夹角 22.5°时，采净率达 91.35%、损伤率为 4.15%。该便携式采摘装置整机质量偏大，不利于采摘人员长期作业。国内外企业研发的咖啡便携式采摘机结构形式及技术特点如表 7 所示。

**表 7　国内外咖啡便携式采摘装备结构和技术特点**

**Tab.7　Structure and technical features of portable coffee harvesting equipment at home and abroad**

| 企业名称/型号 | 实物图 | 技术特点 |
|---|---|---|
| 巴西 Brudden 公司/DSC-18 型咖啡便携式采摘机 |  | 机身质量 5.8 kg，采用手持式内燃机驱动的高频振动脱果方式，DCM 系列咖啡采摘装置可更换不同的采摘头以适应不同咖啡树品种和果实成熟度采摘，适用于山地及中小规模咖啡园作业 |
| 武汉艾克美农业科技有限公司/咖啡便携式采摘机 |  | 机身质量 2 kg，工作时将咖啡枝条卡入相向旋转的辊子中，通过振动枝条产生的激振力将咖啡果实击落 |
| 武汉艾克美农业科技有限公司/AM-GM01 型咖啡便携式采摘机 |  | 工作时两个反向旋转的夹持装置，在特殊传感器的控制下与树枝接触并启动，将咖啡果实扒落。但夹持力的控制精度有限，容易造成枝条损失 |
| 上海诺虎实业有限公司/长杆拍打式咖啡便携式采摘机 |  | 机身质量 2 kg，作业时利用拍打头振动的方式将咖啡果实击落，适用于丘陵山地咖啡园采摘 |

咖啡便携式采摘装备结构相对简单、机动性强，适用于丘陵山区及中小规模咖啡园作业，在降低劳动强度方面具有明显优势。然而，该类装备普遍存在选择性采摘能力有限、采摘效率偏低以及对操作

者依赖性较强等问题。未来研究可围绕轻量化结构设计、振动参数精细调控以及成熟度识别辅助采摘等方向展开,以提升作业效率并降低对咖啡品质的影响。

### 2.4.2 咖啡自动式采摘

咖啡自动式采摘设备的工作原理是将具有许多细棒分布的振动器直接深入植株丛中,采用往复式、旋转式或混合式的振动方式击打或梳刷植株枝条,使咖啡果实脱落[82],脱落果实由机体下部的接果装置和输送系统集中回收,从而实现连续化采摘作业。

咖啡自动采摘装备多用在巴西、哥伦比亚等地势平坦的咖啡产区。仍以非选择性采摘为主,果实成熟度区分能力有限,振动作用下存在一定枝叶损伤风险。国外企业研发的咖啡联合收获机结构形式与技术特点如表 8 所示。

**表 8 国外咖啡联合收获机结构和技术特点**

**Tab. 8 Structure and technical features of coffee combine harvesters at abroad**

| 企业名称/型号 | 实物图 | 技术特点 |
|---|---|---|
| 美国 CASE 公司/Coffee Express 200 Multi 型咖啡采摘机 |  | 自走式,发动机动力 55 kW,采用液电一体化控制,配备:双滚筒式振动脱果机构,滚筒间距与振动强度可实时调节;配套水平与垂直输送装置、双级风选除杂结构及大容量果实储箱。整机采用低重心结构与自动调平系统,结合独立悬挂与多传感器姿态监测;同时集成多摄像头监控、人机交互显示终端及故障检测功能 |
| 巴西 JACTO 公司/K3500 型咖啡采摘机 |  | 自走式,发动机功率 132 kW,采用液电一体化控制,配备:robust 振动脱果机构及可调振动参数;设有低位可调收集板与摄像对准系统;集成双级清选与 2 000 L 大容量咖啡储箱以及可在收获过程中同步卸料技术;配置紧凑转向系统、坡地稳定性设计以及驾驶室监控显示与智能辅助调整功能 |
| 美国 OXBO 公司/9240 + 型咖啡采摘机 |  | 自走式,发动机功率 54 kW,集成液电一体化控制,配备:Dynarotor 振动摇动系统及可调振动参数、低矮前置提升机构与宽幅捕捉通道、3 000 L 大容量回收箱与双向交叉输送系统;下部叶片扰动器、可拆卸枝条清理器与双级上部清选风机组合,人机交互监控显示及多摄像头视野系统 |

咖啡自动式采摘装备适用于规模化、标准化种植条件,可显著提高单位面积采摘效率,但其在复杂地形条件下的适应能力和选择性采摘水平仍然有限。工作时存在损伤枝条和采摘未成熟果实的不足。未来,自走式咖啡收获机的发展重点聚焦于振动参数精细化调控、果实成熟度智能识别、低损伤采摘机理优化以及底盘与作业系统的地形自适应能力提升,以实现高效率与高品质采收的协同发展。

## 3 热区主要水果收获技术与装备

热带水果作物中的香蕉、柑橘、芒果、菠萝、荔枝等,文献[8]对其收获装备做了详细描述,本文不再重复叙述。下面对椰子采摘技术与装备研究成果加以总结归纳。

椰子采摘属于典型高空作业,椰子采摘装备按机械化程度可分为人工采摘和椰子采摘机器人。主流采摘方式是依赖传统人力:椰农手持末端装配刀具的长杆,在地面远距离将椰子砍下;由经过专业训练的作业人员攀爬上树,将椰子茎秆切断完成采收[83]。

目前椰子采摘机器人多停留在攀爬机构的设计上,机器人必须克服自身重量并适应树干的不规则形态实现稳定攀爬,同时保证一定的续航稳定性。ZHENG 等[84]设计一款椰子采摘机器人,如图 4a 所示,该机器人由嵌入式遥控系统控制,爬升功能采用三角形夹持机构,与树干保持三点接触,集成了攀爬和采摘功能。经过田间试验测试了基本功能,可成功攀爬高达 13.42 m 的椰子树,平均攀爬时间为 152.3 s,平均采摘时间为 222.1 s。该装备没有配备视觉系统,田间试验还需人工远程控制。此外,该机械臂的负载能力有限,只能完成椰子茎的切割,而无法实现椰子的抓取和回收。MEGALINGAM 等[85]采用四轮驱动的圆形结构,配备可全方位移动的四轮组件,以及圆形切割的末端执行器。该机器人能够成功攀爬高达 15.2 m,平均攀爬时间为 180 ~ 240 s。DUBEY 等[86]将攀爬机构分别设计为通过连杆连接的上下两部分,如图 4b 所示,在攀爬过程中,通过电机驱动丝杆夹紧树干,通过上下两部分来实现交替夹紧树木完成攀爬,整体采用铝型材,因此成本较低。但只能进行竖直攀爬,不可进行旋转动作,且负载能力较低。PARVATHI 等[87]开发了一种四自由度椰子采摘机械臂,末端配备切割器,质量 11.5 kg,能够实现 180°切割。然而,该机械臂未集成到攀爬器中。WIBOWO 等[88]研发了一款椰子收获装置,

这款椰子采摘机具有 3 个主动轮，通过电机进行驱动，驱动轮之间的距离可以通过弹簧进行调节来适应不同直径的树干，并设置导轨，使驱动轮中心沿导轨运动。该装置配备了一个最大采摘距离为 1 m 的机械臂，机械臂末端安装圆锯，通过圆锯切割椰茎。该机构操控方便，但只能进行直线爬升，无法越过爬升路径上的障碍，并且采摘角度有限。



(a) 三角形夹持机构　　(b) 连杆连接攀爬机构

图 4　椰子采摘机器人

Fig. 4　Coconut harvesting robots

椰子采摘机器人受高大树体、高空作业及结构复杂度限制，难以推广。机器人重量与采摘持续性相互制约：为保证稳定性和抓取能力需较重结构，但过重降低续航和机动性。未来需在轻量化、结构设计、动力高效化与作业持续性之间平衡，以提升实用性和推广性。

## 4　问题分析与发展展望

### 4.1　热区作物收获装备存在的问题

近年来，国内企业、高校以及科研院所不断努力，热区作物收获装备取得了显著的成果，但机械化收获率仍然较低，结合国内外热区作物收获装备生产实际情况，发展面临以下问题：

(1) 关键技术与基础理论薄弱

当前热区作物收获装备创新驱动不足，系统性和机理性研究薄弱，关键部件仍以结构优化和经验设计为主。针对高温高湿、高盐环境，高黏性与高比阻土壤条件，以及甘薯和木薯等热带作物大根系和深根系等生物学特性，农机作业机理与作用规律研究不充分，其收获作业过程涉及的土壤-作物-装备耦合关系尚缺乏深入研究。缺乏系统的基础理论与实验数据支撑，导致关键参数难以调控，装备对多作物、多工况和复杂作业环境的适应性较差，与发达国家仍存在明显差距。

(2) 丘陵山区作业的小型机具缺乏

热带作物多种植于丘陵旱坡或零散小地块，地形复杂，交通、水利等基础设施滞后，现有大型收获装备主要面向平原规模化果园，难以适应山地、小地块及高空作业需求。香蕉、椰子、芒果等高大果树的采摘仍高度依赖人工，丘陵地形与小规模果园限制了机械作业组织与运行，人工与机械成本优势难以转化，制约机械化推广与果园现代化发展。目前虽已有升降平台、高空伸缩抓取器及采摘机器人等装备，但商业化应用有限、成本较高，亟需研发轻便、低成本、高适应性的丘陵山区及高空作业收获机具。

(3) 科研投入不足、人才支撑薄弱

受经济发展水平和财政能力限制，多数热区国家在热带作物科技创新方面的资金投入明显不足，科研基础设施、试验条件和人才培养体系存在较大短板。全球热带作物领域科技人才总量不足、分布不均，高层次复合型研究和管理人才匮乏，发展中国家难以开展前沿性、系统性研究，发达国家与发展中国家之间的合作交流不够紧密，尚未形成高效的国际协同创新机制。

(4) 产业链与配套体系不完善

热区作物产业链上下游协同不足，采后分级、保鲜、贮运和加工等配套设施建设滞后，收获环节与产后处理、市场流通衔接不紧密。同时，产业结构相对单一，关键技术尚未完全突破，难以形成以机械化收获为核心的成套化、规模化生产模式，制约了热带作物产业的现代化发展。

### 4.2　发展展望

随着丘陵山区机械化发展政策的推进，并且随着农村劳动人口的流失，规模化种植的大趋势下，热区作物收获关键技术及装备将迎来新一轮发展机会，未来应从以下方面加以重点研究：

(1) 深入理论基础与作业机理研究

围绕热区土壤环境，以及热带作物大根系、深根系和宿根系等生物学特性，系统开展农机作业机理、作用规律与参数耦合机制研究，构建关键部件设计与调控的理论模型和试验数据库，为收获装备关键技术研发提供科学支撑。

(2) 农机和农艺相融合

热区农机收获装备的发展趋势将更加注重与种植模式和农业生产体系的深度融合。由于热带果树及其他经济作物的种植模式复杂多样，地块零散且规模普遍较小，这不仅增加了收获装备的研发和适配难度，也在一定程度上制约了农机制造业的规模化发展和产业化推广效率。为了提升机械化作业的可行性与经济性，应针对对行性要求较高的作物，如木薯、甘蔗及咖啡，制定系统化的种植规划和管理措施。在同一片种植区域内，建立规范统一的种植体系，包括合理的株行距设计以及地形整治等，以优化作业空间和提高农机作业效率。同时，通过种植布局优化、道路与水利配套设施改善，为机械化收获装备的高效作业和

推广应用提供制度支持和基础设施保障。

(3)发展差异化与精准化收获装备

针对丘陵山区、小地块及零散化种植等热区典型生产特点,应重点发展结构紧凑、质量轻、操作简便、维护成本低的小型化、轻简化收获装备,强化通过性、稳定性与作业安全性设计,逐步替代高强度人工收获作业。同时,针对部分热带作物花期和成熟期分散、果实成熟度差异显著的特点,应重点研发选择性采摘机器人装备,尽管采摘机器人技术已有一定进展,但目前尚未具备大规模应用和商业化推广的条件。机器人的性能仍以采摘成功率、作业效率及果实损伤率为主要评估指标。随着技术不断成熟,未来采摘机器人有望发展为具备多功能操作、多臂协同和多机协作能力的智能化集群作业系统,从而显著提升作业效率,并增强机器人在复杂果园环境中的适应性和灵活性。

(4)完善产业链与组织体系

在装备技术不断完善的基础上,应同步优化机械化作业组织模式,积极发展社会化服务、跨区作业和联合作业等方式,降低单户农民和经营主体的装备购置与使用成本,提高收获机械化的经济性和可推广性。同时,加大科研投入和高层次、复合型人才培养力度,完善科研平台和试验示范条件,推动国内外在技术研发、示范应用和人才交流等方面的协同创新。此外,应加强收获环节与采后分级、保鲜、贮运和加工等产业环节的协同布局,推进成套化技术与装备集成应用,促进热带作物产业向规模化、标准化和现代化方向发展。

## 参 考 文 献


[1] 李玉萍,李光辉,叶露,等. 中国热带作物产业发展现状及策略研究[J]. 热带农业科学,2024,44(5):105 - 114.
LI Yuping, LI Guanghui, YE Lu, et al. Research on the development status and strategies of tropical crop industry in China[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2024, 44(5): 105 - 114. (in Chinese)

[2] 张慧坚,曾小红,刘晓光,等. 国内外热带作物生产与科技发展研究综述[J]. 农学学报,2018,8(3):69 - 77.
ZHANG Huijian, ZENG Xiaohong, LIU Xiaoguang, et al. Development and research on tropical agricultural science and technology at home and abroad: a review[J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(3): 69 - 77. (in Chinese)

[3] PRIYADARSHAN P M, JAIN S M. Cash crops: an introduction[M]// Cash crops: genetic diversity, erosion, donservation and utilization. Cham: Springer International Publishing, 2021: 1 - 19.

[4] 刘东, 王凯丽, 黄艳,等. 世界主要热带作物产业发展现状与趋势[J]. 热带农业科学,2021,41(9):111 - 116.
LIU Dong, WANG Kaili, HUANG Yan, et al. Current status and trend of industrial development of major tropical crops in the world[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2021, 41(9): 111 - 116. (in Chinese)

[5] 王宇婷, 周新, 王喆,等. 热带水果生产与保鲜以及加工现状[J]. 热带农业科学,2023,43(10):80 - 88.
WANG Yuting, ZHOU Xin, WANG Zhe, et al. The current situation of tropical fruit planting, preservation, and processing [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2023, 43(10): 80 - 88. (in Chinese)

[6] 季超, 邓怡国, 燕波,等. 荔枝机械化收获关键技术研究进展[J]. 农业工程,2025,15(2):9 - 18.
JI Chao, DENG Yiguo, YAN Bo, et al. Research progress on key technologies for mechanized harvesting of litchi[J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(2): 9 - 18. (in Chinese)

[7] ALTENDORF S. The outlook of the global tropical fruit industry: current and future trends[C]// Proceedings of the International Symposium on Tropical Fruits (ISTF 2019). Kuala Lumpur: International Tropical Fruits Network, 2019.

[8] 陈天赐,张世昂,付根平,等. 热带水果采摘机器人研究进展综述[J]. 农业机械学报,2025,56(5):184 - 201.
CHEN Tianci, ZHANG Shiang, FU Genping, et al. Review of research progress on tropical fruit harvesting robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(5): 184 - 201. (in Chinese)

[9] 联合国粮食及农业组织. FAO official website[EB/OL]. [2026 - 02 - 11]. https://www.fao.org/home/zh.

[10] SELVALAKSHMI S, KALARIKKAL R K, YANG X. Predicting the habitat distribution of rubber plantations with topography, soil, land use, and climatic factors[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2020, 192(9): 598.

[11] 联合国粮食及农业组织. FAOSTAT: Data for natural rubber[EB/OL]. [2026 - 02 - 11]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL.

[12] 联合国粮食及农业组织. FAOSTAT: Data for sweet potato[EB/OL]. [2026 - 02 - 11]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL.

[13] 联合国粮食及农业组织. FAOSTAT: Data for cassava[EB/OL]. [2026 - 02 - 11]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL.

[14] 联合国粮食及农业组织. FAOSTAT: Data for coffee, green[EB/OL]. [2026 - 02 - 11]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL.

[15] 联合国粮食及农业组织. FAOSTAT: Data for pineapples[EB/OL]. [2026 - 02 - 11]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL.

[16] 联合国粮食及农业组织. FAOSTAT: Data for litchi[EB/OL]. [2026 - 02 - 11]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/

QCL.
[17] MITRA S, PAN J. Litchi and longan production and trade in the world[C]// Proceedings of the VI International Symposium on Lychee, Longan and Other Sapindaceae Fruits, 2019:1 - 6.
[18] 联合国粮食及农业组织. FAOSTAT: Data for bananas[EB/OL]. [2026 - 02 - 11]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL.
[19] 联合国粮食及农业组织. FAOSTAT: Data for tangerine[EB/OL]. [2026 - 02 - 11]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL.
[20] 联合国粮食及农业组织. FAOSTAT: Data for mangoes[EB/OL]. [2026 - 02 - 11]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL.
[21] 联合国粮食及农业组织. FAOSTAT: Data for coconuts[EB/OL]. [2026 - 02 - 11]. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL.
[22] DENG X, GUO D, YANG S, et al. Jasmonate signalling in the regulation of rubber biosynthesis in laticifer cells of rubber tree, *Hevea brasiliensis*[J]. Journal of Experimental Botany, 2018, 69(15): 3559 - 3571.
[23] QI D, ZHOU J, XIE G, et al. Optimizing tapping-tree density of rubber (*Hevea brasiliensis*) plantations in South China[J]. Small-scale Forestry, 2016, 15(1): 61 - 72.
[24] ZHANG S, ZHANG C, ZHANG J, et al. Design and experiment of suspension-typed rubber tapping device[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2018, 27(4): 110 - 118.
[25] ZHOU H, ZHANG S, ZHANG J, et al. Design, development, and field evaluation of a rubber tapping robot[J]. Journal of Field Robotics, 2022, 39(1): 28 - 54.
[26] ZHANG C, SHENG X, ZHANG S, et al. Design and experiment of portable electric tapping machine [C]// Proceedings of the 2018 ASABE Annual International Meeting, 2018: 1.
[27] WANG L, CAO J, ZHENG Y, et al. The development and application of advanced design and manufacturing techniques on type 4GXJ - I of cordless brushless tapping knife [C]// Proceedings of the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019.
[28] SOUMYA S J, VISHNU R S, ARJUN R N, et al. Design and testing of a semi automatic rubber tree tapping machine (SART) [C]// Proceedings of the 2016 IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10 - HTC), 2016.
[29] 曹建华,张以山,王玲玲,等. 天然橡胶便携式采胶机械研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(8): 20 - 27.
CAO Jianhua, ZHANG Yishan, WANG Lingling, et al. Research on portable rubber tapping machinery for natural rubber[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(8): 20 - 27. (in Chinese)
[30] WANG L, HUANG C, LI T, et al. An optimization study on a novel mechanical rubber tree tapping mechanism and technology [J]. Forests, 2023, 14(12): 2421.
[31] 王业勤, 邓怡国, 陈沛民,等. 我国天然橡胶生产机械研究现状与发展思考[J]. 现代农业装备, 2023, 44(1): 20 - 23.
WANG Yeqin, DENG Yiguo, CHEN Peimin, et al. Research status and development thinking of natural rubber production machinery in China[J]. Modern Agricultural Equipment, 2023, 44(1): 20 - 23. (in Chinese)
[32] 温翔宇,洪苑妹,熊建明,等. 固定式天然橡胶自动割胶机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊 2): 128 - 135.
WEN Xiangyu, HONG Yuanmei, XIONG Jianming, et al. Design and experiment of fixed automatic natural rubber tapping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 128 - 135. (in Chinese)
[33] ABHILASH K, BABU V S, RAHMAN A N, et al. Investigative study on the feasibility of simultaneous movement along multiple axes for helical cut using RTM[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45: 3422 - 3425.
[34] 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.
GAO Keke, SUN Jianghong, GAO Feng, et al. Tapping error analysis and precision control of fixed tapping robot[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(2): 44 - 50. (in Chinese)
[35] 张喜瑞, 孙鹤鸣, 刘俊孝,等. 基于 ADAMS 的固定式仿形控深割胶机研制[J]. 农业工程学报, 2025, 41(22): 62 - 71.
ZHANG Xirui, SUN Heming, LIU Junxiao, et al. Development of a fixed-type profiling depth control rubber tapping machine using ADAMS[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(22): 62 - 71. (in Chinese)
[36] 张喜瑞,曹超,张丽娜,等. 仿形进阶式天然橡胶自动割胶机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 99 - 108.
ZHANG Xirui, CAO Chao, ZHANG Li'na, et al. Design and test of profiling progressive natural rubber automatic tapping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 99 - 108. (in Chinese)
[37] 张喜瑞,陈璿立,张志富,等. 基于激光仿形的三轴式自动割胶装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 254 - 266.
ZHANG Xirui, CHEN Xuanli, ZHANG Zhifu, et al. Design and test of three-axis automatic rubber tapping device based on laser profiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 254 - 266. (in Chinese)
[38] 曹建华, 粟鑫, 张以山,等. 天然橡胶机械化割胶研究现状与对策分析[J]. 中国热带农业, 2025(5): 25 - 34.
CAO Jianhua, SU Xin, ZHANG Yishan, et al. Research status and countermeasure analysis of mechanized rubber tapping in natural rubber[J]. China Tropical Agriculture, 2025(5): 25 - 34. (in Chinese)
[39] 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.
ZHANG Chunlong, LI Decheng, ZHANG Shunlu, et al. Design and test of three-coordinate linkage natural rubber tapping device based on laser ranging[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 121 - 127. (in Chinese)
[40] ZHOU H, GAO J, ZHANG F, et al. Evaluation of cutting stability of a natural-rubber-tapping robot[J]. Agriculture, 2023, 13(3): 583.
[41] NIE F, ZHANG W, WANG Y, et al. A forest 3-D LiDAR SLAM system for rubber-tapping robot based on trunk center atlas [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 27(5): 2623 - 2633.
[42] YANG H, SUN Z, LIU J, et al. The development of rubber tapping machimes in intelligent agriculture: a review[J]. Applied Sciences, 2022, 12(18): 9304.
[43] ZHANG C, YONG L, CHEN Y, et al. A rubber-tapping robot forest navigation and information collection system based on 2D LiDAR and a gyroscope[J]. Sensors, 2019, 19(9): 2136.
[44] ZHOU S, XI J, MCDANIEL M W, et al. Self-supervised learning to visually detect terrain surfaces for autonomous robots operating in forested terrain[J]. Journal of Field Robotics, 2012, 29(2): 277 - 297.
[45] 胡良龙, 王公仆, 凌小燕, 等. 甘薯收获期藤蔓茎秆的机械特性[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 45 - 49.
HU Lianglong, WANG Gongpu, LING Xiaoyan, et al. Mechanical properties of sweet potato vine and stalk during harvest[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 45 - 49. (in Chinese)
[46] 陈小冬. 自走式甘薯联合收获机薯茎分离特性研究与机构优化[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020.
CHEN Xiaodong. Study on potato-stem separation characteristics and mechanism optimization of self-propelled sweet potato combine harvester[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020. (in Chinese)
[47] 胡良龙, 计福来, 王冰, 等. 国内甘薯机械移栽技术发展动态[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3): 289 - 291, 317.
HU Lianglong, JI Fulai, WANG Bing, et al. Latest developments of sweet potato mechanical transplanting in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(3): 289 - 291, 317. (in Chinese)
[48] PENG J, WANG Y, PENG B, et al. Research status and prospects of sweet potato harvesters' conveying and separation mechanisms[J]. Sustainability, 2024, 16(24): 10957.
[49] 王之东, 周军平, 杨学军, 等. 木薯块根收获技术与机具研究进展[J]. 农业工程, 2019, 9(1): 1 - 8.
WANG Zhidong, ZHOU Junping, YANG Xuejun, et al. Research progress of cassava tuber harvesting technology and machine [J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(1): 1 - 8. (in Chinese)
[50] 杨怡, 廖宇兰, 郑侃, 等. 木薯田间机械化作业研究现状分析[J]. 广东农业科学, 2015, 42(8): 137 - 40.
YANG Yi, LIAO Yulan, ZHENG Kan, et al. Present situation analysis of cassava field mechanization[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(8): 137 - 140. (in Chinese)
[51] 李玲, 黄应强, 邓干然, 等. 4UMS - 1800 型木薯起薯收获机提升装置的设计[J]. 农机化研究, 2018, 40(9): 149 - 153.
LI Ling, HUANG Yingqiang, DENG Ganran, et al. The design of lifting device for 4UMS - 1800 cassava harvesting machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(9): 149 - 153. (in Chinese)
[52] CHALACHAI S, SONI P, CHAMSING A, et al. A critical review of mechanization in cassava harvesting in Thailand[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2013, 22(4): 81 - 93.
[53] 廖宇兰, 孙佑攀, 刘世豪, 等. 挖拔式木薯收获机的研制与样机试验(英文)[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 2): 29 - 35.
LIAO Yulan, SUN Youpan, LIU Shihao, et al. Development and prototype trial of digging-pulling style cassava harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(Supp. 2): 29 - 35.
[54] 郑贤, 陈科余, 杨望, 等. 木薯收获机块根拔起机构自适应控制算法研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(4): 12 - 20.
ZHENG Xian, CHEN Keyu, YANG Wang, et al. Fuzzy PID adaptive control algorithm of pulling-up mechanism on the cassava harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(4): 12 - 20. (in Chinese)
[55] 杨望, 杨坚, 郑晓婷, 等. 木薯块根收获机械与技术研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究, 2012, 34(12): 230 - 235.
YANG Wang, YANG Jian, ZHENG Xiaoting, et al. Current research and development trends of cassava root harvest machinery and technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(12): 230 - 235. (in Chinese)
[56] 李国杰, 邓干然, 郑爽, 等. 4UMG - 140 型拨辊式木薯收获机的设计与试验[J]. 现代农业装备, 2021, 42(2): 28 - 33.
LI Guojie, DENG Ganran, ZHANG Shuang, et al. Design and experiment of 4UMG - 140 poking roller type cassava harvester [J]. Modern Agricultural Equipment, 2021, 42(2): 28 - 33. (in Chinese)
[57] 李国杰, 邓干然, 吴洪珠, 等. 4UML - 130 型振动链式木薯收获机的设计与试验[J]. 现代农业装备, 2022, 43(1): 24 - 29, 54.
LI Guojie, DENG Ganran, WU Hongzhu, et al. Design and experiment of 4UML - 130 vibration chain cassava harvester[J]. Modern Agricultural Equipment, 2022, 43(1): 24 - 29, 54. (in Chinese)
[58] 莫清贵, 黄鸣安. 4UM - 160 型木薯收获机的研发应用[J]. 广西农业机械化, 2012(3): 20 - 22, 5.
MO Qinggui, HUANG Mingan. Research, development and application of 4UM - 160 cassava harvester[J]. Guangxi Agricultural Mechanization, 2012(3): 20 - 22, 5. (in Chinese)

[59] 郑贤，李滔滔，李丁，等. 往复式双夹持装置的木薯收获机的研制[J]. 农机化研究，2021，43(3)：119－122，127.
ZHENG Xian，LI Taotao，LI Ding，et al. Development of cassava harvester with reciprocating double clamping device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2021，43(3)：119－122，127.（in Chinese）

[60] YANG W，XI J，WANG Z，et al. Embedded field stalk detection algorithm for digging-pulling cassava harvester intelligent clamping and pulling device[J]. Agriculture，2023，13(11)：2144.

[61] 杨望，张栩梓，杨坚，等. 木薯收获机土薯抖动分离装置性能仿真及试验[J]. 农业工程学报，2017，33(16)：18－25.
YANG Wang，ZHANG Xuzi，YANG Jian，et al. Simulation and test on performance of soil-cassava jitter separation device of cassava harvester[J]. Transactions of the CSAE，2017，33(16)：18－25.（in Chinese）

[62] 杨怡，廖宇兰，王涛，等. 自走式木薯收获机的设计[J]. 农机化研究，2016，38(4)：99－102，106.
YANG Yi，LIAO Yulan，WANG Tao，et al. Design of the self-propelled harvester for cassava[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2016，38(4)：99－102，106.（in Chinese）

[63] 李国杰，邓干然，吴洪珠，等. 4UMZ－1400 型后收集式木薯联合收获机设计与试验[J]. 中国农机化学报，2022，43(3)：1－8.
LI Guojie，DENG Ganran，WU Hongzhu，et al. Design and experiment of 4UMZ－1400 rear-collected type cassava combined harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2022，43(3)：1－8.（in Chinese）

[64] 张明达，王睿芳，李艺，等. 云南省小粒咖啡种植生态适宜性区划[J]. 中国生态农业学报(中英文)，2020，28(2)：168－178.
ZHANG Mingda，WANG Ruifang，LI Yi，et al. Ecological suitability zoning of *Coffea arabica* L. in Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture，2020，28(2)：168－178.（in Chinese）

[65] ZHOU S，YU Y，SU W，et al. Determining the vibration parameters for coffee harvesting through the vibration of fruit-bearing branches：field trials and validation[J]. Agriculture，2025，15(10)：1036.

[66] YU Y，CAO Y，LAI Q，et al. Design and operation parameters of vibrating harvester for *Coffea arabica* L.[J]. Agriculture，2023，13(3)：700.

[67] JÚNIOR L G F，DA SILVA F M，FERREIRA D D，et al. Dynamic behavior of coffee tree branches during mechanical harvest[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2020，173：105415.

[68] SANTOS F L，QUEIROZ D M，PINTO F D A D C，et al. Analysis of the coffee harvesting process using an electromagnetic shaker[J]. Acta Scientiarum. Agronomy，2010，32：373－378.

[69] ARAÚJO E SILVA FERRAZ G，DA SILVA F M，DE CARVALHO ALVES M，et al. Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee[J]. Precision Agriculture，2012，13(1)：76－89.

[70] TINOCO H A，OCAMPO D A，PE Ñ A F M，et al. Finite element modal analysis of the fruit-peduncle of *Coffea arabica* L. var. *Colombia* estimating its geometrical and mechanical properties[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2014，108：17－27.

[71] KAZAMA E H，DA SILVA R P，TAVARES T O，et al. Methodology for selective coffee harvesting in management zones of yield and maturation[J]. Precision Agriculture，2021，22(3)：711－733.

[72] FURRIEL G P，FURRIEL B C R S，COIMBRA A P，et al. Acoustics applied in the development of equipment for precision agriculture：coffee handling and harvesting[J]. Computers and Electronics in Agriculture，2022，198：106981.

[73] CÁRDENAS E L M，TASCÓN C E O，MEJÍA F Á. A portable device to assist in the harvest of coffee in Colombia[J]. Revista Facultad Nacional de AgronomíaMedellín，2015，68(1)：7471－7479.

[74] SNOECK J，BERNARD P，PECHEREAU M. La récolte mécanique du café a l'aide d'unfouetteur[J]. Café-Cacao-Thé，1976，20(4)：297－300.

[75] 杨玉筝，刘艺璇，郭先华，等. 云南咖啡种植产业空间分布及影响要素研究[J]. 生态科学，2025，44(5)：75－84.
YANG Yuzheng，LIU Yixuan，GUO Xianhua，et al. Research on spatial distribution and influencing factors of Yunnan coffee planting industry[J]. Ecological Science，2025，44(5)：75－84.（in Chinese）

[76] 王业成，袁威，陈海涛，等. 便携式小浆果采收器[J]. 农业机械学报，2011，42(增刊 1)：181－183，180.
WANG Yecheng，YUAN Wei，CHEN Haitao，et al. Handy harvester for berry[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2011，42(Supp. 1)：181－183，180.（in Chinese）

[77] 张文强，张明明，张俊雄，等. 振摇枸杞采收机设计与试验[J]. 农业机械学报，2018，49(7)：97－102.
ZHANG Wenqiang，ZHANG Mingming，ZHANG Junxiong，et al. Design and experiment of vibrating wolfberry harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(7)：97－102.（in Chinese）

[78] 杜小强，倪柯楠，武传宇. 基于外旋轮线轨迹的果品振动采收机构研究[J]. 农业机械学报，2016，47(3)：59－66.
DU Xiaoqiang，NI Ke'nan，WU Chuanyu. Vibratory harvesting mechanism for tree fruit based on epitrochoid[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(3)：59－66.（in Chinese）

[79] 邓祥丰，初众，郑何美，等. 可变幅振动式咖啡收获机设计与试验[J]. 包装与食品机械，2024，42(4)：67－73，79.
DENG Xiangfeng，CHU Zhong，ZHENG Hemei，et al. Design and test of variable amplitude vibrating coffee harvester[J]. Packaging and Food Machinery，2024，42(4)：67－73，79.（in Chinese）

（下转第 48 页）

36. (in Chinese)
[22] 周洵泽,严伟,王云霞,等. 甘薯机械化移栽分苗取苗技术研究现状及展望[J]. 中国农机化学报,2023,44(3):35 - 40.
ZHOU Xunze, YAN Wei, WANG Yunxia, et al. Research status and prospect of sweet potato mechanized transplanting technology[J]. Journal of China Agricultural Mechanization,2023,44(3):35 - 40. (in Chinese)
[23] 赵海,刘新鑫,潘志国,等. 甘薯种植农艺及机械化种植技术研究[J]. 中国农机化学报,2021,42(6):21 - 26.
ZHAO Hai, LIU Xinxin, PAN Zhiguo, et al. Agronomic characteristics and mechanized planting technology of sweet potato [J]. Journal of China Agricultural Mechanization,2021,42(6):21 - 26. (in Chinese)
[24] 董欣,杨波,徐允飞,等. 烟草钵苗移栽机成穴机构的运动学仿真分析[J]. 农机化研究,2017,39(3):37 - 41.
DONG Xin, YANG Bo, XU Yunfei, et al. Kinematic analysis and simulation of cavitation mechanism of tobacco seedling transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2017,39(3):37 - 41. (in Chinese)
[25] 赖庆辉,赵瑾汶,苏微,等. 基于 DEM - CFD 的气吸式三七种苗定向移栽装置研究[J]. 农业机械学报,2021,52(7):60 - 70.
LAI Qinghui, ZHAO Jinwen, SU Wei, et al. Design and test of air suction directional transplanting device for *Panax notoginseng* seedlings based on DEM - CFD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021, 52(7):60 - 70. (in Chinese)
[26] 徐亚雷,杨红光,潘志国,等. 甘薯裸苗斜插式栽植机构及电控系统研制[J]. 中国农机化学报,2024,45(6):53 - 57,71.
XU Yalei, YANG Hongguang, PAN Zhiguo, et al. Development of oblique-planting mechanism for sweet potato seedlings and its electric control system[J]. Journal of China Agricultural Mechanization,2024,45(6):53 - 57,71. (in Chinese)
[27] 王旭. "船底形"甘薯起垄覆膜移栽复式作业机设计与试验研究[D]. 泰安:山东农业大学,2022.
WANG Xu. Design and experimental study of "boat bottom-shaped" sweet potato ridging and film covering compound transplanter[D]. Taian:Shandong Agricultural University,2022. (in Chinese)

(上接第 15 页)

[80] 于英杰,李沛航,赖庆辉,等. 基于 DEM - MBD 耦合的咖啡采摘过程仿真与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 2):157 - 167.
YU Yingjie, LI Peihang, LAI Qinghui, et al. Simulation and experiment of coffea picking process based on DEM - MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp. 2):157 - 167. (in Chinese)
[81] 于英杰,王剑,赖庆辉,等. 手持振动梳刷式小粒咖啡采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(9):124 - 133.
YU Yingjie, WANG Jian, LAI Qinghui, et al. Design and experiment of hand-held vibrating comb-type *Coffea arabica* L. harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):124 - 133. (in Chinese)
[82] 散鋆龙,牛长河,乔圆圆,等. 林果机械化收获研究现状、进展与发展方向[J]. 新疆农业科学,2013,50(3):499 - 508.
SAN Yunlong, NIU Changhe, QIAO Yuanyuan, et al. Development of fruit mechanized harvest and its relevant research[J]. Xinjiang Agricultural Sciences,2013,50(3):499 - 508. (in Chinese)
[83] 杨永, 曾祥坤. 一种椰子抓取采摘机械手设计及其工作空间仿真分析[J]. 农机化研究,2015,37(5):132 - 135.
YANG Yong,ZENG Xiangkun. Design of the manipalator for picking coconut and simulation of its work space[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2015,37(5):132 - 135. (in Chinese)
[84] ZHENG H, FU Y, WANG Z, et al. Design and experiment of coconut picking robot with climbing[J]. Smart Agricultural Technology,2024,9:100617.
[85] MEGALINGAM R K, MANOHARAN S K, MOHANDAS S M, et al. Amaran: an unmanned robotic coconut tree climber and harvester[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2020,26(1):288 - 299.
[86] DUBEY A P, PATTNAIK S M, BANERJEE A, et al. Autonomous control and implementation of coconut tree climbing and harvesting robot[J]. Procedia Computer Science,2016,85:755 - 766.
[87] PARVATHI S, SELVI S T. Design and fabrication of a 4 Degree of Freedom (DOF) robot arm for coconut harvesting[C]// 2017 International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2). IEEE, 2017: 1 - 5.
[88] WIBOWO T S, SULISTIJONO I A, RISNUMAWAN A, et al. End-to-end coconut harvesting robot [C]//2016 International Electronics Symposium (IES). Denpasar: IEEE, 2016: 444 - 449.