doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.18.018

香蕉生产关键技术与智能装备研究进展

杨　洲[1,2]　蒋寅龙[1]　段洁利[1]　金莫辉[1]　付　函[1]　徐　兴[1]
（1.华南农业大学工程学院，广州 510642；2.广东海洋大学机械工程学院，湛江 524088）

摘要：香蕉作为热带亚热带地区重要果粮兼用作物，在我国热带地区产业经济中占据核心地位。随着农业智能生产装备与人工智能等新兴技术的不断发展，推进香蕉全程机械化与智能化生产对提升产业竞争力具有重要现实意义。回顾农业装备与技术在香蕉生产领域的应用和研究进展，围绕香蕉生长特点与复杂种植环境，本文分别从蕉园信息感知、栽培管理、采收运送及采后处理 4 个关键环节出发，梳理了香蕉果穗和假茎的视觉感知与识别定位、病虫害防控与养分管控、高效低损的采运一体化装备，香蕉落梳的关键技术与智能生产装备。当前我国香蕉生产已在部分环节实现机械化，平地蕉园农机农艺配套栽培模式已初见成效，但仍面临复杂环境适应性与智能化程度不足等问题。围绕香蕉智能生产装备发展与智慧蕉园建设需求，提出应聚焦枯萎病早期诊断与防控、水肥药智能施用、采运一体化及智慧蕉园集成建设等薄弱环节，突破关键核心技术，推动香蕉生产朝着全程机械化、自动化、精细化和智能化转变。

关键词：香蕉；栽培管理；采收运送；采后处理；智能生产装备
中图分类号：S24　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)18-0205-16　　**OSID**：

Research Progress of Key Technologies and Intelligent Equipment for Banana Production

Yang Zhou[1,2]　Jiang Yinlong[1]　Duan Jieli[1]　Jin Mohui[1]　Fu Han[1]　Xu Xing[1]
(1. *College of Engineering*, *South China Agricultural University*, *Guangzhou* 510642, *China*
2. *School of Mechanical Engineering*, *Guangdong Ocean University*, *Zhanjiang* 524088, *China*)

Abstract: Bananas, as an important fruit and grain dual-purpose crop in tropical and subtropical regions, occupies a core role in the industrial economy of China's tropical regions. With the continuous development of emerging technologies such as agricultural intelligent equipment and artificial intelligence, it is of great practical significance to promote the full mechanization and intelligent production of bananas to enhance industrial competitiveness. The application and research progress of agricultural equipment and technology in the field of banana production were reviewed. Focusing on the growth characteristics and complex planting environment of banana, it systematically reviewed the research progress of key technologies and intelligent equipment in the four major links of banana orchards information perception, cultivation management, harvesting and transportation, and post-harvest processing. In terms of information perception of banana plantations, the identification and location techniques of banana plants, stalks and pseudo-stems based on different algorithms were discussed. In terms of cultivation management, the research and application of intelligent monitoring technology and equipment for disease prevention and nutrient management were summarized. In terms of harvesting and transportation, the high-efficiency and low-damage integration picking-support-transportation technology were elaborated, and the application scenarios and advantages of different transportation system such as vehicle, cableway and UAV were compared. In terms of post-harvest processing, the technical breakthroughs and existing bottleneck problems of banana de-handing were discussed. At present, banana production in China has only been mechanized in some links, the practical application performance of agricultural machinery-agronomy matching cultivation techniques of flatland banana orchard in improving yield and optimizing

收稿日期：2026－03－27　修回日期：2026－04－25
基金项目：国家现代农业产业技术体系项目(CARS－31)和广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目(2024CXTD09)
作者简介：杨洲(1972—)，男，教授，博士生导师，主要从事水果生产机械化与信息化研究，E-mail：yangzhou@scau.edu.cn
通信作者：徐兴(1978—)，男，副教授，主要从事智能农业装备与信息处理研究，E-mail：xuxing@scau.edu.cn

operation efficiency achieved initial results. Problems such as insufficient adaptability to complex environments and low intelligent were still prominent, which restricted the high-quality development of the industry. Around the development of banana intelligent production technology and equipment and the needs of intelligent banana orchard construction, it was proposed that it should focus on the weak links such as conquering early diagnosis and prevention of *Fusarium wilt*, upgrading the integrated water, fertilizer and pesticide intelligent control platform, developing low-damage integrated harvesting and transportation equipment, and integrated construction of intelligent banana orchard. So as to break through the key core technologies and promote the transformation of banana production towards full mechanization, automation, refinement and intelligence.

Key words: banana; cultivation management; harvesting and transportation; post-harvest treatment; intelligent production equipment

0 引言

香蕉是一种主要生长在热带亚热带地区重要果粮兼用作物,在全球农产品贸易中仅次于小麦、玉米和大豆。全世界范围内超过 130 个国家/地区种植香蕉,我国香蕉产业发展水平居世界前列,种植面积居世界第 6 位,产量居第 2 位。香蕉已成为我国热带地区单一作物一产产值最大产业,约占热作总产值的 1/5。我国香蕉种植主要分布在华南、西南 6 省区,形成滇南-滇西南、桂南-桂西南-粤西、海南-雷州半岛、珠三角-粤东-闽南 4 大优势区。自 2009 年以来,我国香蕉产业进入稳定发展阶段,香蕉产业逐步实现了规模化、集约化生产和标准化管理,但蕉园生产机械化与智能化水平仍有较大提升空间[1]。

香蕉园与结构化环境相比,具有极高的复杂性和随机性,主要体现为种植地形的复杂性和蕉株的非规则分布。一方面,香蕉作为多年生草本作物,主要通过头茬蕉留吸芽方式继续生长为二茬蕉并依此类推,由于吸芽生长方位的不确定性,致使蕉园随着种植年份推移愈发呈现非规则分布,这种非规则分布体现为蕉株空间位置和生长方向的随机性以及株间距的不均匀性。另一方面,受制于地形的影响,香蕉园地形起伏与凹陷、坡度变化、植被相互覆盖与遮挡的环境复杂性,导致山地蕉园作业条件差、劳动强度大、安全隐患多、工作效率低等问题愈发明显。这种复杂的非结构化作业环境为蕉园生产关键技术与智能生产装备的研发应用增加了难度。

为促进香蕉产业发展,我国自 2008 年成立了国家香蕉产业技术体系,2017 年成立了香蕉生产机械化研究室,着重开展香蕉生产机械化研究,到 2020 年我国香蕉产业已实现一定程度的机械化配套生产[2-3]。“十四五”期间,我国香蕉生产开始朝着全面机械化和关键环节智能化方向发展,集成了有机/无机水肥一体化、无人机飞防与吊运、索(轨)道采运等绿色轻简化关键技术[4]。当前在香蕉运送、肥药施用等关键环节基本实现机械化,索轨运送装备基本实现蕉园全覆盖,智能肥药施用装备逐步投入产业应用,并集成了平地蕉园农机农艺配套栽培技术模式;初步实现了蕉园病虫害、营养胁迫遥感监测,蕉园果穗、假茎智能感知与识别定位,并开发了智能采摘装备。目前我国香蕉生产关键技术与装备的研究和推广应用居于世界前列。

本文通过分析香蕉生长特点与种植环境,从蕉园信息感知、香蕉栽培管理、采收运送、采后处理 4 个方面系统总结香蕉生产关键技术与装备的研究进展,并阐述平地蕉园农机农艺配套栽培技术模式。梳理现有香蕉生产装备及相关技术的优势与不足,展望未来技术发展趋势,以期为香蕉生产关键技术与智能生产装备的技术创新与产业发展、蕉园生产机器人与智慧蕉园建设提供参考。

1 蕉园信息感知关键技术

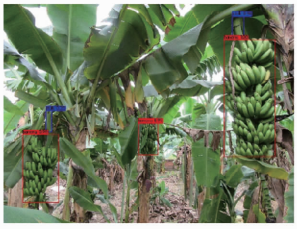
1.1 果穗识别与定位

果穗识别对花果管理、采收等环节意义重大,图 1 为果穗识别与定位典型结果。其中,蕉穗、花序轴、花蕾的识别定位(图 1a)为香蕉智能断蕾作业提供支持;果轴、蕉穗、蕉穗托接点的识别定位(图 1b、1c)为香蕉智能采收与托接运送提供技术支撑。

在香蕉果穗识别方面,致力于使用传统机器学习和深度学习模型检测果轴、蕉穗、托接点、花序轴、花蕾等。Fu 等[5]最早使用传统机器学习方法,提出使用支持向量机,结合香蕉局部二元模式特征和定向梯度特征直方图检测蕉穗,基于自然环境中颜色和纹理特征,使用机器学习算法实现蕉穗检测,平均单尺度检测率为 89.63%,平均执行时间为 1.325 s。此后,使用深度学习方法,利用单目 RGB 相机和 YOLO v4 神经网络算法提取香蕉果实的深层特征,实现了对不同尺寸香蕉的精准检测,平均执行时间为 0.171 s,mAP 为 99.95%[6]。Baglat 等[7]分析了 YOLO 系列模型(YOLO v1 到 YOLO 12n)蕉穗识别



(a) 蕉穗、花蕾、花序轴、断蕾点



(b) 蕉穗和果轴



(c) 蕉穗和托接点



(d) 套袋蕉穗、果轴和切割点

图 1　香蕉果穗识别与定位

Fig. 1　Identification and positioning of banana bunches

性能，结果表明 YOLO 12n 在检测精度和计算效率之间表现出最佳的权衡，mAP 达 93%，检测时间为 5.1 ms。针对蕉园复杂场景，Fu 等[8]使用深度学习 YOLO v4 网络对自然环境中蕉穗和果轴进行识别，在不同光照和遮挡场景下表现出优异的可靠性和泛化能力，如图 1b 所示，蕉穗和果轴检测 AP 分别为 99.55% 和 87.82%，蕉穗识别模型 mAP 为 93.69%，平均执行时间为 44.96 ms。并在此基础上通过分析香蕉特征和网络结构，提出一种轻量化的 YOLO－Banana 检测模型，模型参数量从 2.44×10^8 减少到 1.37×10^8，识别时间从 44.96 ms 缩短到 35.33 ms[9]。

蕉穗果轴与切割点定位是链接蕉园信息感知与智能作业的关键环节。在蕉穗视觉感知定位方面，Chen 等[10]提出自适应立体匹配策略开展了低对比度和复杂背景蕉园下香蕉果轴三维感知研究，为多视觉系统在复杂农业采摘任务的应用提供了参考。陈天赐[11]通过三维视觉感知生成果轴三维点云，经点云滤波和主成分分析，获得香蕉果轴特征方向向量和切割中心点，试验成功率达 92%。面对香蕉智能采摘机器人的作业需求，研究人员开发了一系列基于深度学习的轻量化的果穗识别与定位模型，并部署在边缘设备上。例如 Zheng 等[12]开发了一种高效低复杂性的香蕉检测网络 Slim－Banana，在边缘设备上实现香蕉识别和定位，mAP 达到 98.0%，推理时间约为 0.114 s。Zhou 等[13]提出一种基于深度相机和深度学习算法的自然环境中蕉穗和果轴识别定位方法。段洁利等[14]采用改进 YOLO v5 蕉穗识别及果轴底部托接点定位，如图 1c 所示，平均精度 AP 分别提升 0.17、21.26 个百分点，实现香蕉采收作业的精准托接。Nguyen 等[15]针对套袋蕉穗的识别采收，如图 1d 所示，提出了一种轻量级优化的深度学习模型 Banana－DL，部署在嵌入式系统，实现了田间复杂环境下套袋香蕉果穗和果柄切割点的识别定位，精确率、召回率、mAP 分别达到 96.3%、90% 和 94.5%。Wang 等[16]提出了轻量化 YOLO－BRFB 模型在边缘设备上进行实时高效的蕉穗检测和定位，系统沿 X、Y、Z 轴平均定位误差分别为 12.33、11.11、16.33 mm，为智能采摘提供了有效解决方案。

近年来越来越多的研究者发表了在香蕉果穗识别与定位方面的研究进展，这些研究主要集中于蕉穗、果轴、切割点的识别与定位。然而基于蕉穗智能感知与识别定位的智能采收还罕见，未来在果穗识别定位方面的研究重点应聚焦于开发轻量级的识别定位系统，并部署到农业机器人实现智能采摘作业。

1.2　假茎识别与定位

香蕉作为一年生草本作物，香蕉假茎的识别定位与表型参数提取可以量化地提供生长基本信息，并指导肥料、农药和其他投入需求的决策，同时用于蕉园作业装备避障导航与作业路径规划。

在香蕉假茎识别方法研究方面，Cai 等[17]提出了一种改进 YOLO v7－FM 算法实现了对香蕉假茎的视觉检测，每幅含有香蕉假茎的图像平均推理时间为 8.0 ms，AP 为 81.45%，但未能实现对假茎表型参数的测量。王伟[18]基于双目视觉 RGB 图像，实现了香蕉假茎的快速识别与假茎茎高茎宽检测，假茎识别率达到 94.81%，茎高茎宽检测相对误差分别为 3.1% 和 1.2%。为提高假茎表型参数提取精度，Jiang 等[19]通过多传感器融合采集假茎点云和图像数据，首次提出基于椭圆模型拟合香蕉假茎获取表型参数，田间试验结果表明拟合得到香蕉假茎表型参数准确可靠。Song 等[20]最早开展香蕉假茎三维重构与表型参数提取研究，使用粒子群优化算法对 RGB－D 相机获得的深度图像进行圆拟合，试验结果表明，假茎直径平均相对测量误差为 2.34%。实现了利用视觉、激光雷达等检测技术对香蕉假茎的精准识别和表型参数提取。

香蕉假茎的识别定位对农业机器人在蕉园路径规划与避障导航至关重要。张振乾等[21]基于双目视觉获取蕉园点云信息，采用改进的 K－means 算

法分离香蕉假茎与道路并提取导航路径,聚类成功率达 93%,路径提取的横向平均偏差和航向平均偏差分别为 14.27 cm 和 4.83°,在一定程度上能适应香蕉园内机动车道与非机动车道 2 种不同路径。Xu 等[22]将空间-深度协同推理策略与多尺度特征增强相结合,开发了一种部署在嵌入式设备上轻量级识别定位和计数模型 YOLO v8n - MDSD,mAP 达 89.32%,在香蕉假茎和叶片识别定位方面表现出色的准确性和鲁棒性,并通过检测香蕉茎叶点线特征,构建了蕉园精准定位地图[23]。Yang 等[24]开发了一种基于手持式移动 LiDAR - IMU 融合激光扫描系统,精准识别并提取假茎表型参数,定位香蕉假茎空间位置信息,为蕉园农业机器人路径规划与导航避障提供技术支撑。李晨阳等[25]在长度为 24.43 m 香蕉园内开展了低帧率的激光雷达 SLAM 建图精度测试,建图精度达 99.1%,平均绝对误差为 0.07 m,满足蕉园环境下高精度建图需求。

香蕉假茎识别定位与表型参数提取方面。李修华等[26]提出了一种基于多标定球的田间植株点云自动配准方法,基于 Kinect V3 深度传感器实现复杂田间环境下香蕉植株三维重建,平均轴向误差和点位误差分别为 5.8 ~ 17.4 mm、13.1 ~ 28.9 mm,实现了田间复杂环境下香蕉植株表型参数的提取;并针对无人机高空航拍蕉园图像,研究密集目标高效识别方法,提出了一种“裁-识-拼”策略,构建了基于 Faster R - CNN 的蕉园单一类型密集目标生物密度智能识别方法,香蕉苗平均计数准确率达到 99.4%[27]。彭程等[28]开发了香蕉点云处理和表型参数提取算法,通过点云配准,提取了香蕉吸芽的株高、茎粗和叶面积参数,基于 Kinect V2 取得了最优的点云重建效果和表型参数获取精度。Miao 等[29]基于地面激光雷达(TLS)获取 3D 点云数据,实现了香蕉植物点云的单株识别定位与表型参数测量。Ma 等[30]利用深度学习方法对地面激光雷达获得的蕉园 3D 点云进行个体分割和表型参数测量,识别定位和分割计数精度达 97.73%,优于文献[29]的 97.32%。香蕉假茎识别定位与表型参数精准提取对蕉园状态监测与智能栽培管理提供重要依据。

2 香蕉栽培管理关键技术与装备

2.1 病虫害防控技术与装备

农药喷施是当前农业生产病虫害防控的主要技术手段。农药的高效润湿沉积与精量使用是香蕉产业绿色发展的关键。香蕉作为大型草本阔叶作物,蕉叶大且叶面农药承载能力有限,随着宽窄行种植模式的推广,蕉园宽行密植,冠层郁闭。当前蕉园农药喷施装备主要通过强制气流扰动冠层优化雾滴输运通道等手段提升冠层内部及蕉叶正反面雾滴沉积性能。为实现蕉叶表面农药雾滴的高效润湿沉积,主要通过添加表面活性剂改善药液特性、调整喷雾参数提升雾滴润湿铺展性能。此外,蕉园病虫草害精准识别与诊断成为精准防控的主要依据。总的来说,目前蕉园病虫害防控技术与装备的研究主要集中蕉园施药装备、蕉叶农药润湿调控、蕉园病害识别 3 个方面。

2.1.1 农药喷施技术与装备

蕉园农药喷施技术与装备相较柑橘、荔枝、苹果等林果业研究起步较晚,蕉园喷雾作业目前主要以无人机喷雾为主,地面风送喷雾为辅,研究人员也在探索空-地联合喷雾作业。蕉园地面喷雾方面,Jiang 等[31]探索了地面风送喷雾在大型阔叶作物香蕉冠层叶面上沉积特性,获得最佳喷雾作业参数组合并从叶面润湿性、风载荷持续激励下蕉叶振动特性等方面解析了叶片正反面沉积性能差异。向军[32]研制了适用于香蕉园作业的智能仿形变量喷雾机,如图 2a 所示,喷雾机风速、喷量、风送角度与喷雾角度可调可控,对不同株高香蕉冠层喷雾试验结果表明,合适的喷雾角度参数组合,可有效消除蕉叶正反面雾滴覆盖率差异。



(a) 地面风送喷雾机 (b) 植保无人机 (c) 空-地联合喷雾

图 2 蕉园喷雾装备

Fig. 2 Banana orchard spraying equipment

蕉园无人机喷雾方面,Yang 等[33]针对蕉园冠层特性,研制了一种专用于蕉园无人机喷雾作业的双雾化离心喷头。Yu 等[34]开展了不同飞行高度和雾滴粒径对香蕉冠层液滴沉积分布特征的影响(图 2b),得到飞行高度 4 m,液滴粒径 100 μm 为香蕉冠层渗透力和叶片正反面液滴沉积性能的最佳作业参数组合。同步开展了空-地联合喷雾研究(图 2c),比较了植保无人机和地面风送喷雾机在香蕉冠层液滴沉积分布和漂移性能,地面风送喷雾尽管对提升蕉叶反面雾滴沉积率表现出更大的优势,但在蕉叶正面和雾滴漂移距离上表现为劣势。

Wang 等[35]使用激光雷达 3D 点云重建定量评估了香蕉冠层孔隙率，并开展了无人机喷雾雾滴沉积性能研究，基于 BP 神经网络模型分析了孔隙率与液滴沉积之间的关系，与文献[34]研究结果一致，确定了飞行高度 4 m 为无人机喷雾系统最佳作业高度，为蕉园喷雾作业提供了坚实可靠的指导。

2.1.2　蕉叶表面雾滴润湿沉积性能

农药雾滴在靶标上有效沉积对病虫害防治效果具有显著一致性[36]，蕉叶表面润湿性直接影响喷雾沉积性能，为改善药液在香蕉叶表面的润湿性，近年来，Jiang 等[37-38]解析了蕉叶正反面微观形貌、微观结构、化学成分与润湿性能间的关系，在纳米尺度上建立了蕉叶表面润湿模型，并揭示了蕉叶正反面从 Wenzel 状态到 Cassie-Baxter 状态的双面各异润湿性转变及其潜在机理。段洁利等[39]对不同生长期蕉叶表面润湿行为展开研究，揭示了蕉叶表面年龄依赖性的梯度润湿行为，并基于成熟蕉叶表面微观结构，在微-纳双重尺度上构建了蕉叶表面润湿模型阐述潜在机理。Jiang 等[40-43]表征了蕉叶不同生长阶段表面自由能与临界表面张力，开展了表面活性剂调控农药液滴在蕉叶表面的动态润湿行为研究，解析了香蕉叶片表面液滴润湿调控机制并建立动态润湿模型；并结合香蕉叶片微观特性与农药雾滴理化特性，建立了雾滴撞击叶片的扩散模型，解析了农药雾滴撞击行为动态演变规律，定量映射了液滴沉积性能与喷雾作业参数之间的关系，为蕉叶表面喷雾液滴润湿沉积性能调控提供了科学指导。

2.1.3　蕉园病虫害精准检测

精准检测与识别香蕉病虫是病虫害防控的关键[44]。在香蕉病害识别与分类方面，Elinisa 等[45]开发了一种用于香蕉病害早期检测的图像分割深度学习模型，实现香蕉枯萎病、黑斑病等病害分类。史红栩等[46]基于深度学习实现了对 7 种常见香蕉病害的诊断，并开发了快速在线远程诊断系统，可为病害防治方法的决策提供重要支撑。蒋权等[47]基于空地多视角 RGB 影像协同实现香蕉病害监测，但这些手段难以满足大面积蕉园病情诊断与防控需求。无人机遥感通过多光谱相机等可实现对香蕉长势和病虫草害、营养胁迫的检测识别和分割[48-49]。例如 Calou 等[50]通过无人机获得高空 RGB 图像监测并评估香蕉黄叶斑病，确定了 SVM 算法在量化叶斑病方面的优异性。Thai 等[51]提出了基于无人机的轻量级香蕉黑叶斑病检测模型 EF-CenterNet，部署在边缘设备上实现了快速检测。Ugarte 等[52]利用高光谱成像技术结合开发的偏最小二乘惩罚逻辑回归（PLS-PLR）模型实现香蕉叶片黑斑病准确率 98% 的预测。Retkute 等[53-54]基于高分辨率遥感数据和机器学习方法实现了香蕉束顶病和枯萎病的病害检测，对开发香蕉病害早期监测和预警系统提供巨大的潜力。Zhang 等[55]基于无人机多光谱图像开展了香蕉枯萎病监测研究，有监督和无监督方法监测总体准确率均达 95% 以上，通过综合评价不同指标的分类结果，推荐无监督法用于感染后期监测，在感染早期使用监督法，以达到略高的准确率。Ye 等[56-57]开展了基于无人机遥感的香蕉枯萎病识别研究，结果表明基于无人机的红边带遥感影像非常适合香蕉枯萎病识别，总体精确率提高近 3 个百分点，当图像空间分辨率高于 2 m 时，可提升对枯萎病的识别精度。

枯萎病作为香蕉的“癌症”，尽管无人机遥感等技术能大规模监测香蕉枯萎病害和严重程度[58]，但枯萎病成灾后的防治始终面临重大挑战。因此，如何实现香蕉枯萎病在潜伏期（无症状阶段）的精准检测与早期识别成为香蕉枯萎病防治的重要技术保障。Li 等[59]测试了香蕉枯萎病潜伏期和发病期可见/近红外光谱，光谱信息能够敏感地捕获香蕉枯萎病在潜伏期的生理特征变化，为香蕉枯萎病的早期监测提供了支撑。未来将主要聚焦融合叶片-冠层多尺度高光谱数据实现香蕉枯萎病早期诊断机理与方法研究，通过无人机高光谱遥感进行香蕉枯萎病的早期监测将成为香蕉枯萎病综合防控的重要手段和方法。

2.2　蕉园营养管控技术与装备

水肥施用是当前农业生产营养管控的主要技术手段，水肥的精准施用与精准灌溉是保障稳产增产的核心。香蕉生长过程需多次施肥，施肥位置不当、过量施肥等不仅影响香蕉正常生长发育，且极易造成环境污染，因此开发蕉园精准施肥装备同样是香蕉产业绿色发展的重点工作。目前蕉园营养管控主要聚焦水肥施用装备、蕉园养分胁迫与营养监测 2 个方面。

2.2.1　蕉园水肥施用技术与装备

蕉园水肥施用技术与装备主要包括地面变量施肥机具和水肥一体化技术 2 个方面。针对地面变量施肥机具，杨洲等[60]设计了一种蕉园自走式压穴施肥机，建立了施肥量变异系数的多元回归方程，实现了变深、变位和变量施肥作业。为满足蕉园精准变量施肥需求，宋帅帅等[61]建立了香蕉根系与假茎的动态生物量模型，通过检测假茎表型参数反演根系生长分布特征，提出正态施肥模式并基于此设计了香蕉园立式螺旋输送变量排肥器，指导精准对靶变量施肥作业，如图 3a 所示，田间试验结果表明，排肥

量平均合格率达 95.33%。杨洲等[62]系统分析了不同生长期香蕉根系分布特征,建立了 1 个主施肥区与 2 个次施肥区的施肥决策,并设计了一种新型的 3 级排肥盘式变量排肥器,如图 3b 所示,田间试验结果表明变量施肥可显著提高蕉园施肥质量,幼苗期、生殖体发育期和果实生长期 3 个时期香蕉植株长势均优于人工穴施肥。段洁利等[63]在此基础上了设计一种排肥量可调式蕉园开沟施肥覆土一体机,通过超声波传感器检测假茎自动对靶,完成条开沟非连续性正态分布施肥,施肥量和施肥位置变异系数均小于 4%,实现蕉园精量对靶施肥。



(a) 立式螺旋变量施肥机 (b) 排肥盘式变量施肥机

图 3 蕉园施肥装备

Fig. 3 Banana orchard fertilization equipment

水肥一体化技术因具有省水、省肥、增产等优势,无需开沟、施肥、培土、浇水等复杂环节,且有利于实现标准化、自动化、规模化和集约化作业,目前在平地蕉园广泛应用。水肥一体化技术核心是对土壤墒情的监测,Coelho 等[64]研究了香蕉根系分布、根系吸水分布和土壤水分动态,根据最大根系活动区域,确定了滴灌系统土壤含水率传感器的最佳布设位置。Panigrahi 等[65]基于土壤湿度传感器建立香蕉自动滴灌调度系统,与人工堵管相比,显著降低用水量,单位水产量提高 40%。Salimath 等[66]利用物联网和传感器技术,建立了蕉园无线传感器网络和自动灌溉施肥系统,实现精准灌溉和施肥,显著降低了水和肥料消耗量,相较人工作业模式,收益成本比显著提升至 1.61。国家香蕉产业技术体系在广西崇左 113.33 hm^2示范蕉园水溶性肥料智能水肥一体化浇灌生产,相较传统浇灌模式增产 10% ~ 12%[67]。但水肥一体化设备存在受地形限制严重、对肥料可溶性要求高等问题,难以适应山地蕉园的推广应用,主要应用于平地蕉园。

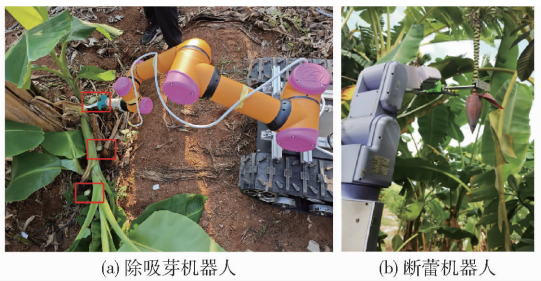
2.2.2 蕉园养分胁迫与营养监测

随着光谱、遥感等技术发展,蕉园水肥精准施用的核心聚焦蕉叶冠层养分缺陷的监测和营养缺乏症判断。陈家政等[68]研究了香蕉植株缺氮蕉叶 RGB 与多光谱图像识别效果,结果表明多光谱图像识别效果始终优于 RGB,为蕉园缺氮监测提供技术支撑。对大面积蕉园的养分胁迫与营养检测,Dlamini 等[69]利用 Sentinel-2 遥感影像数据和非参数方法表征香蕉等叶片养分特征,估计了氮、磷、钾等 9 种叶面生化元素浓度的季节性变化规律。Aeberli 等[70]使用多时态多光谱无人机图像检测香蕉植株,并讨论了不同物候、形态和生长特征对检测质量的影响。张海洋等[71]对广西 71 块香蕉田块时间序列 Sentinel-2 遥感影像数据分析,建立了基于 BSO-SVR 的香蕉遥感时序估产模型,实现香蕉田块产量的精准预估。An 等[72]基于 RGB-NIR 图像构建香蕉冠层叶绿素值估计模型,建立叶绿素 SPAD 值可视化分布图谱,为蕉园营养动态监测和生长评价提供依据。Kong 等[73]利用无人机高光谱图像对不同生长阶段香蕉植株进行叶绿素含量监测,提出了香蕉叶绿素含量反演图像特征组合方法,预测准确率显著提高,实现了更准确地诊断香蕉冠层营养状况。Chore 等[74]采用增量学习方法和多频可见光方法对香蕉叶面成像分析进行养分缺陷检测,氮、磷、钾等元素的检测准确率均达到 95% 以上,为精准施肥提供决策。

2.3 蕉园花芽管护技术与装备

2.3.1 香蕉除吸芽技术与装备

香蕉除吸芽正经历着从半机械化辅助作业到机械化、智能化除吸芽的发展。金莫辉等[75]发明了一种切钻两用实时切换的电动手持式香蕉除芽器,在此基础上,Xu 等[76]基于红外激光传感器,设计了一种切钻一体化的半自动香蕉除吸芽机,实现对母株假茎和钻头深度的检测,能有效完成香蕉除吸芽任务,且避免损伤母株假茎。吴广[77]以 AUBO-i5 型六自由度机械臂作为执行主体,以 Intel RealSense D435 型深度相机实现视觉感知,以电动剪切装置作为末端执行器,如图 4a 所示,设计了一台基于视觉感知的履带式香蕉除吸芽机器人,试验结果表明剪切成功率达 83.3%,单次作业平均耗时 16.8 s,所研发的除吸芽机器人系统较好地满足装置实际除芽需求。



(a) 除吸芽机器人 (b) 断蕾机器人

图 4 蕉园管护装备

Fig. 4 Banana orchard management equipment

2.3.2 香蕉断蕾技术与装备

针对香蕉断蕾作业需求,杨洲等[78]设计了一种基于视觉识别的仿生机构香蕉断蕾机构,并开发了

香蕉断蕾机器人，可实现自动化香蕉断蕾作业。针对智能化香蕉断蕾技术与装备开发，吴烽云等[79]通过深度学习实现了花蕾和花序轴的多特征目标快速检测，结合卷积神经网络 Deeplab V3 + 模型和经典图像处理算法检测断蕾期梳数[80]，融合边缘图像处理算法与几何计算，提取花序轴信息和生长方向，定位断蕾切割点坐标[81-82]。集成了视觉断蕾机器人软硬件系统，设计了香蕉断蕾机器人，如图 4b 所示，试验结果表明断蕾定位成功率为 92.59%，剪切成功率为 85.19%，单次断蕾平均时间为 16.58 s，可有效实现断蕾作业[83]。

3　采收运送关键技术与装备

香蕉采收和运送是目前蕉园生产过程劳动强度最大的 2 个环节。传统香蕉采收运送方式一方面劳动强度大、采收效率低，另一方面采收运送过程造成的机械损伤会严重降低香蕉品质。因此，香蕉机械化采收和运送装备，尤其是低损采运装备的研发与应用，对促进香蕉产业高质量发展意义重大。

3.1　香蕉采摘关键技术与装备

香蕉采摘装备的研究最早起步于澳大利亚等发达国家，我国对香蕉采收装置领域的研究虽起步相对较晚，但近年已呈现快速发展的态势[84]。目前香蕉机械化采摘装备的研究主要聚焦夹持-切割-托接关键部件设计和智能化采摘装备集成应用研究。

3.1.1　夹持-切割-托接关键部件

由于香蕉果柄粗、果穗重的特征，与其他热带水果采摘作业相比，果柄夹持、切割与柔性托接成为香蕉采摘的一项重大挑战。目前香蕉采摘夹持方式主要有果轴夹持和蕉穗夹持 2 种。如图 5a 所示，果轴夹持通过夹持爪抓取果轴，调节夹持张合度确保夹持爪具备承载蕉穗重量的能力，避免蕉穗滑落损伤。果轴夹持方式存在重要的问题是夹持力控制，随着技术发展，香蕉采摘夹持部件也逐渐由机械驱动向液压驱动、气压驱动和电驱动夹持方向发展，确保夹持稳定性。段洁利等[85]通过气压驱动夹持爪夹持果柄，并开展了夹持爪不同钉刺排布下夹持稳定性研究，解析了果轴夹持应力应变情况（图 5b），得到了最优夹持方式。蕉穗夹持如图 5i 所示，通过调节夹持爪张合程度固定蕉穗，蕉穗夹持方式突出问题是夹持爪与蕉穗接触不可避免地会对蕉穗造成机械损伤，且夹持越紧损伤越大[86]。

香蕉采摘切割方式主要有圆盘刀切割（图 5c）和链锯切割（图 5d）2 种。圆盘刀通过高速旋转切割果柄，但存在 2 个突出问题，一是果轴大量的纤维被切割后极易缠绕在圆盘刀锯齿上，二是切割过程

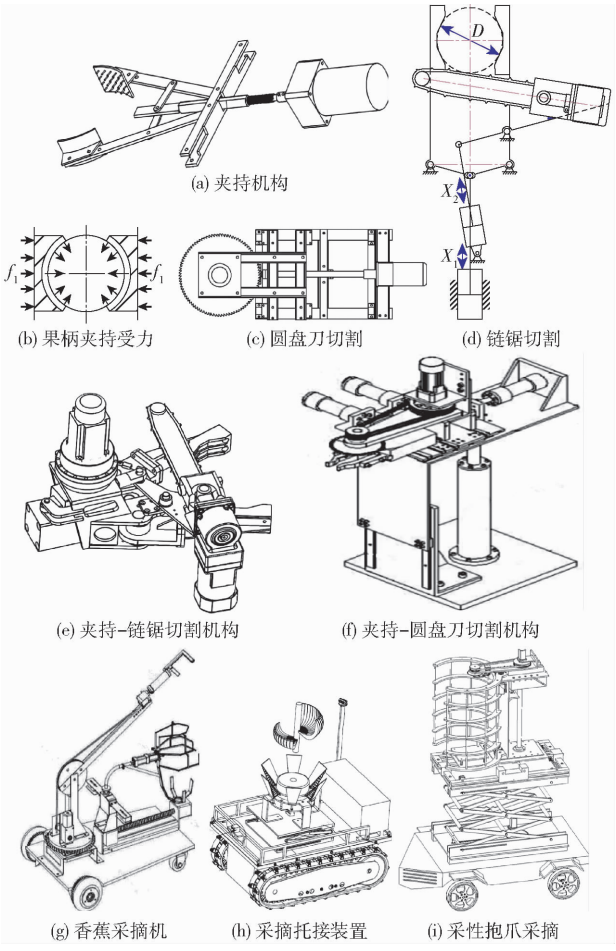


图 5　香蕉夹持-切割-托接机构

Fig. 5　Banana clamping - cutting - supporting mechanism

粗大的果轴易在切口处夹持住刀具，易产生切口撕裂等消极影响，进而影响切割效果。链锯在香蕉果轴切割过程能有效避免圆盘刀切割带来的问题，并且比圆盘刀切割范围更大，可满足不同生长姿态蕉穗的切割。在相同采摘设备上，易文峰[87]用链锯切割装置替换了王玉[88]使用的圆盘刀切割装置，试验结果表明链锯切割有更高的切割效率和更好的切口质量。香蕉采摘末端执行器也逐步发展为夹持-切割一体化执行机构，如图 5e、5f 所示，一次性识别定位即可驱动完成采摘任务，进而提升采摘效率。

作为大质量串型水果，香蕉采摘时，安装在行走机构上的机械臂向外向上伸展，机械臂承载蕉穗时巨大的转矩极易造成机械臂损毁和采摘装备倾覆。因此，香蕉采摘除了要考虑夹持稳定性，还必须考虑采摘装备整机稳定性，尤其是抗倾覆性能。如图 5g、5h 所示，香蕉采摘机器人既要具有稳定的行走和托接机构，又要具备大负载机械臂系统和采摘托接装置。

3.1.2　香蕉智能采摘装备

机械臂作业路径规划与精准控制是香蕉智能采摘面临的难题[89]。为实现末端执行器对果轴的精

准切割,在果轴识别与定位的基础上,将果轴二维图像分割结果转换为三维空间位姿信息,通过手眼标定最终转换到机器人坐标系,进而实现采摘机构与视觉联合定位,并驱动机械臂采收行为智能规划,开展智能采摘作业。陈天赐[11]开发的香蕉智能采收机,如图 6a 所示,采摘机械臂结合双目视觉感知与视觉伺服控制,采摘作业成功率达 96.67%,较单目视觉感知和开环控制方式成功率显著提升。



图 6 香蕉智能采摘装备

Fig. 6 Intelligent banana picking equipment

仲恺农业工程学院朱立学教授团队设计了香蕉智能采摘机器人,如图 6b 所示,采摘过程包括果柄识别定位,视觉伺服控制末端执行器对准果柄,末端执行器夹持切割果柄,取出果穗放置到田间转运小车。研究团队重点突破了香蕉采摘机器人逆运动学求解,以引导香蕉采摘机器人末端执行器准确到达切割点[90-91]。此香蕉智能采摘装备集成了检测、定位、通信和执行模块,蕉园田间采摘过程如图 6c 所示,结果表明该采摘装备可实现蕉穗自主连续采摘作业,检测平均精度均值为 99.23%,定位精度小于 6 mm,采摘成功率为 91.69%,完成识别到收获平均时间为 33.28 s。研究结果为香蕉采摘机器人的未来应用奠定了基础[92],然而这种采摘系统面临着 1 个问题,承载式的运送方式在田间转运环节会不可避免地对蕉穗造成机械损伤,因此,如何实现香蕉的低损高效运送是香蕉采摘后必须要思考的问题。

3.2 蕉园运送关键技术与装备

运送是香蕉采后的第 1 个流程,也是极易造成蕉穗机械损伤的工序,在蕉穗运送过程除提高运送效率外,还需尽可能降低机械损伤。在蕉园运送方面,如图 7 所示,目前主流运送方式主要包括田间转运车运送和索轨运送 2 类,近年来随着无人机技术的发展,无人机吊运正在快速发展。其中田间转运车运送多用于田间转运和平地蕉园,索轨运送和无人机吊运多用于山地蕉园。



图 7 蕉园运送装备

Fig. 7 Banana orchard transportation equipment

3.2.1 田间转运车运送

田间转运车是香蕉田间转运的主要运送方式,主要作用是将采摘的蕉穗运送至索道。尽管大多数香蕉采摘机器人兼具“采摘-托接-运送”一体化功能,可实现蕉穗田间转运[93],但存在效率低等问题,因此田间转运装备是蕉园运送系统不可或缺的一环。与香蕉采摘装备类似,蕉园车载式运送装备同样需要有较高的稳定性和通过性。研究人员先后设计了轮式、履带式运蕉车,并设计了蕉穗悬挂系统和运动控制系统,分析表明履带式运蕉车更具稳定性,是田间运蕉车行走机构的首选。传统车载式田间转运装备通常蕉穗呈承载式放置,如图 7a 所示,这类香蕉田间转运车转运过程的颠簸和挤压极易造成蕉穗机械损伤。Li 等[94]研制了升降可调和果轴底部自动固定系统的蕉穗转运车,如图 7c 所示,可适应不同尺寸蕉穗运送,并在此基础上设计了滑轨多点悬挂转运车[4],如图 7d 所示,有效提升了作业效率并抑制了运送过程蕉穗摆动碰撞和擦伤,且更易于平稳过渡挂接到索道运送系统。

3.2.2　索轨运送

山地蕉园主要依地形铺设的索道或轨道运送，针对山地果园运送，华南农业大学杨洲教授团队依据不同水果特征、果园地形、山地坡度和作业方式研发了承载式与吊挂式 2 类共 6 种运送模式。承载类有单向牵引双轨运送和双向牵引双轨运送，吊挂类有钢索牵引吊挂运送、电动滑车吊挂运送、循环链式索道运送和悬挂式循环链轨运送。由于香蕉的易损性，承载式轨道运送模式（图 7e）较少运用到香蕉运送。吊挂式索道运送系统通过悬挂输送（图 7f），能显著减小运送过程挤压碰撞对香蕉造成的机械损伤，孙立红等[95]对索道运输和人工运输的香蕉果品损伤率进行了试验，试验结果表明索道运输优果率比人工运输提高 29.1%，是实现山地蕉园运输的一种有效方式。

尽管索道运送凸显了独特的优异性，但依旧存在风致振动、横向运动共振等问题，李君等[96]建立了蕉园电动滑车式索道运送系统的多运动质量串联式蕉穗运送系统动力学解析模型，分析了风载荷持续激励下链索横向振动特性，通过预测振动频率特性抑制链索系统共振，并建立了链索运送装备运动传感系统，实现运动信息采集与数据处理。针对大坡度、大行程、大负载的蕉穗索道运送可能存在的制动失效、关键部件损坏及脱轨等问题，李伟等[97]采用极点配置法设计反馈控制矩阵实现蕉穗运送系统纵向摇摆控制。此外还设计了一种悬挂式循环链轨运送系统（图 7g），轴承作为运送系统最易损部件，段洁利等[98]构建了一维端对端轻量化 CNN 山地索道轴承故障诊断模型，实现了山地蕉园链轨运送系统远程故障监测。

随着无人机技术的发展，无人机被应用于香蕉吊运（图 7b），伴随着不受地形控制的优势被迅速推广[99]。段洁利等[100]针对当前无人机吊运面临的抓取难问题，研制了一种自主吊运装置实现山地蕉无人机自主抓取和卸载作业，平均吊运成功率达 83.33%，显著提高了运送效率和优果率。当前蕉园运送关键技术与装备，正在逐步完善形成“索轨 + 无人机 + 智能转运车”空地一体化的运送体系。

4　采后处理关键技术与装备

香蕉采后处理中，落梳是打通香蕉从农产品到商品的最后一环。然而，在香蕉生产的整个环节，机械化落梳关键技术与装备发展最晚。目前香蕉落梳方法与装备的研究主要以华南农业大学为主。朱正波[101]率先研发了轴向插切式香蕉落梳装置，在刀具设计中首次提出刀具变径的机械化落梳理念，通过冲击变径插切落梳机构、运移机构，整体较为完整实现了机械化落梳。许泽宇[102]参数化设计了具有广泛适用性且高精确度的可展圆弧仿形机构，试制了周向往复振动式香蕉落梳装置，首次应用沿香蕉果轴周向方向的振动式切割方法，以产生滑切效果，从而提高切割性能。至此香蕉落梳形成了轴向插切式与周向往复振动式 2 种作业模式，且均以刀具变径适应不同果轴尺寸的落梳作业需求。

针对轴向插切式落梳方法，杨洲等[103]将主动变径改进为被动自适应仿形，借鉴万向节与柔性虎克铰链的工作原理，设计了一种基于恒力机构的自适应仿形落梳装置，能够实现刀具在环抱果轴过程自适应变径落梳功能。在此基础上，为改善径向自适应机构的仿形效果，进一步引入并设计可展机构，提升了自适应仿形落梳作业的流畅性、果轴自适应仿形包络以及切口质量[104]。

针对周向往复振动式落梳方法，赵镭[105]基于许泽宇[102]开发的香蕉振动切割仿形落梳装置，构建了使用图像处理算法检测并求解果柄内弧和外弧形态特征的视觉感知系统，基于香蕉果柄形态特征的落梳位置定位模型，首次开展香蕉智能落梳系统探索。同时通过多种成像技术，明晰了果柄维管组织系统的形态、结构和微观形貌特征，重构了香蕉果穗所有位置果柄维管组织系统形态的三维模型，揭示了果穗不同位置果柄外部和内部形态变化规律，结合力学试验，系统地揭示了果柄膨胀区作为香蕉落梳区域的科学依据[106]。

在香蕉智能落梳方面，He 等[107]提出一种基于改进 DeepLab v3 + 的香蕉果柄分割方法，平均像素精度均值 mAP 为 91.41%，在保持模型轻量化和速度的同时，提高了香蕉冠分割精度，为香蕉落梳设备的控制与决策提供了有力技术支持。Zhao 等[108]基于香蕉果柄形态学特征和可解释机器学习预测了香蕉落梳区域空间位置，为视觉引导的自动落梳系统提供了量化标准，然而上述这些智能检测尚未部署到落梳装备上。澳大利亚 ARM Hub 公司联合 Hort Innovation 公司与澳洲香蕉种植者委员（ABGC）提出了 3 种自动香蕉落梳方案[109]：①使用 2 个机械臂和 1 个智能感知系统实现落梳，并通过机械臂将切落的果梳放在专门的传输设备上移走。②香蕉夹持悬浮在水池中，当果梳被切落后随水流移走。③蕉穗倾斜在水池上方，利用高压水枪落梳，并掉落水中随水流移走。然而这些方案并未开展试验研究，可行性有待进一步研究。

经过十余年的探索和研究，虽然成功设计并开发了多款落梳装备，并在一定程度上取得了成效，但是，这些装置受限于加工精度和加工工艺影响，以及

复杂多变的蕉穗特征,依旧普遍存在落梳成功率不稳定和切口质量偏低等问题,为落梳环节的机械化和智能化装备设计带来了极大挑战。截至目前,全球范围内尚未有能够投入实际生产的商业化代替或辅助人工落梳装备,相关研究大多仍停留在实验室阶段。未来,香蕉落梳装备或将朝着工厂化的工业机械臂智能化落梳作业方向[110]和田间便携式省力化落梳装备方向发展[111]。

5 农机农艺配套栽培技术

农机农艺配套栽培技术是香蕉高质、低损、绿色发展的必然选择。农艺上一是建成适宜蕉园耕种管收运机械化作业需求的宽窄行乃至超宽窄行种植模式,郭标等[112]试验结果表明,香蕉宽窄行种植模式有效改善了蕉园通风透光性,促进植株生长,蕉穗倒向宽行率达 90%,更适宜机械化采摘作业,与常规种植模式相比缩短收获期 10 ~ 20 d,产量提升约 8.6%,香蕉宽窄行种植模式目前已经大面积推广;二是建立香蕉枯萎病综合防控技术,国家香蕉产业技术体系创建了以抗病品种为核心、土壤病原检测为指导、土壤调理为基础、生物菌肥为补充、免耕少耕栽培为配套的“五位一体”香蕉枯萎病综合防控体系,实现香蕉枯萎病的可防可控[113]。

国家香蕉产业技术体系经过近 20 年的技术研发,已研发了蕉园水肥一体化轻简高效施用、无人机飞防、机械化采收、花蕾注射防蓟马、机械化施药、秸秆还田等技术与装备,集成了平地蕉园农机与农艺配套栽培技术模式,如图 8 所示,以宜机化建园、有机/无机水肥一体轻简高效施用、无人机飞防与机械化采收、“五位一体”枯萎病防控 4 项核心技术加花蕾注射防蓟马、机械化施药、茎秆还田 3 项配套技术组成。农机与农艺配套栽培技术模式下建园 3 年实现平均增产 30%,商品果率达 97% 以上,优质果率提高 22%,省工 55%,节本增效 35%。



图 8 平地蕉园农机农艺配套栽培技术

Fig. 8 Cultivation techniques of agricultural machinery and agronomy in flatland banana orchard

6 总结与展望

香蕉产业作为我国热带地区的重要产业,当前香蕉生产机械化与智能化雏形已初步形成,但距离全程机械化、智能化仍有较大提升空间。仍存在复杂地形适应性差、枯萎病早期精准诊断困难、水肥药智能管控集成度低、采运低损高效装备不足等短板。为促进热带经济作物全程机械化水平,推动香蕉生产装备向高效、低损、智能、通用方向稳步发展,围绕蕉园生产机器人与智慧蕉园建设,未来应重点突破以下关键技术与装备。

(1)香蕉枯萎病早期诊断与综合防控

枯萎病被视为香蕉的“癌症”,作为经典土传病,枯萎病的早期诊断及源头防控是未来需要长期攻克的内容。一是研发枯萎病早期智能诊断技术,建立多源遥感融合监测模型,实现大面积爆发前早期预警与精准防控;二是创新香蕉茎叶疫病灭活与资源化再利用装备,减少枯萎病病菌传播源;三是研制蕉园土壤消毒技术与装备,重点突破绿色物理防控技术,有效切断枯萎病的传播路径。通过技术集成与系统整合,构建香蕉枯萎病可防可控的早期诊断与综合防控模式,实现从风险预警、源头治理到传播阻断的全链条防控。

(2)蕉园水肥药智能管控技术与装备

香蕉产业面临水肥药施用装备智能化程度低等严峻挑战,未来一是攻克无人机飞防与空地协同施

药技术，研发多机型智能作业管控系统，解决复杂果园病虫草害防控难题；二是突破 N、P、K 养分遥感智能监测技术，开发轻小型高光谱传感器及快速诊断模型，实现田块级养分精准诊断；三是升级水肥一体化智能装备，结合养分监测数据动态调控灌溉施肥。通过三大技术系统集成，构建“感知-决策-执行”一体化智能管控平台，实现从多维监测、精准分析到变量作业的全流程闭环管理。

（3）高效低损采运一体化技术与装备

针对香蕉采运环节自动化装备短缺、作业效率低、损伤率高等问题，未来一是攻克大负载香蕉整串自动采收技术，突破视觉识别定位、机械臂作业、低损采摘等核心难点，研制香蕉“采摘-托接-运送”一体化智能化采收装备；二是开发智能转运车与索轨式高效低损运送技术，配套研制田间智能转运车及悬挂式索轨运送装备，提升运送效率并降低果实损伤；三是研发具备自动抓取功能的无人机吊运装备，构建“索轨 + 无人机 + 智能转运车”协同运送体系。实现田间精准采收与多元运送协同衔接的高效低损采运模式。

（4）智慧蕉园集成与发展

智慧蕉园建设是一项融合现代信息技术的系统性农业工程，核心在于构建蕉园多维度智能管控体系。随着蕉园机械化技术和智能装备的发展，如图 9 所示。

通过逐步部署多平台传感网络（气象站、遥感无人机、地面智能装备），实现地空协同的信息感知，精准获取蕉园环境（气象、土壤墒情等）、冠层信息（营养、病害胁迫等）及表型参数（假茎、冠层、果穗、吸芽等）等多源异构数据；集成蕉园全生长周期数据，开发智能化作业装备，构建香蕉栽培种植智能模型，依据模型决策在时空维度上精准执行按需施药、施肥、断蕾、采摘、运送及采后处理等作业。通过信息感知、智能决策与精准执行的深度集成，推动蕉园生产由机械化向自动化、精细化与智能化作业发展。

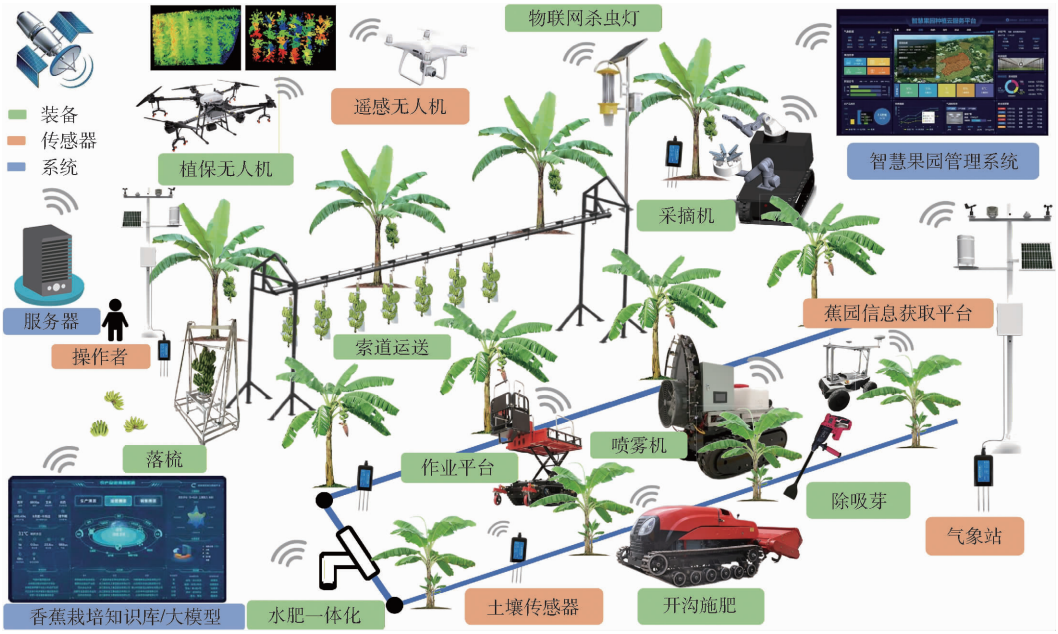


图 9　智慧蕉园系统

Fig. 9　Smart banana orchard system

参　考　文　献

[1] 谢江辉. 新中国果树科学研究 70 年——香蕉[J]. 果树学报，2019，36(10)：1429 - 1440.
Xie Jianghui. Fruit scientific research in new China in the past 70 years: banana[J]. Journal of Fruit Science, 2019, 36(10): 1429 - 1440. (in Chinese)

[2] 王芳，谢江辉. 我国香蕉产业“十三五”回顾与“十四五”展望[J]. 中国热带农业，2022(3)：15 - 22.
Wang Fang, Xie Jianghui. Review of Chinese banana industry during the 13th five-year plan period and outlook of this industry during the 14th five-year plan period[J]. China Tropical Agriculture, 2022(3): 15 - 22. (in Chinese)

[3] 李君，杨洲，汪刘一，等. 香蕉生产机械化研究与应用[J]. 安徽农业科学，2011，39(3)：1836 - 1838.
Li Jun, Yang Zhou, Wang Liuyi, et al. Research and application for mechanization of banana production[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2011, 39(3): 1836 - 1838. (in Chinese)

[4] 王臻. 为香蕉产业高质量发展提供“中国智慧”[N]. 农民日报，2025 - 09 - 16(7).

[5] Fu L, Duan J, Zou X, et al. Banana detection based on color and texture features in the natural environment[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019,167:105057.

[6] Fu L, Duan J, Zou X, et al. Fast and accurate detection of banana fruits in complex background orchards[J]. IEEE Access, 2020,8:196835 - 196846.

[7] Baglat P, Hayat A, Mostafa S S, et al. Comparative analysis and evaluation of YOLO generations for banana bunch detection [J]. Smart Agricultural Technology, 2025,12: 101100.

[8] Fu L, Wu F, Zou X, et al. Fast detection of banana bunches and stalks in the natural environment based on deep learning[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022,194:106800.

[9] Fu L, Yang Z, Wu F, et al. YOLO - Banana: a lightweight neural network for rapid detection of banana bunches and stalks in the natural environment[J]. Agronomy, 2022,12(2):391.

[10] Chen M, Tang Y, Zou X, et al. Three-dimensional perception of orchard banana central stock enhanced by adaptive multi-vision technology[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020,174:105508.

[11] 陈天赐. 基于深度学习的香蕉采摘机器人视觉感知与控制系统研究[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2022.
Chen Tianci. Research on visual perception and control system of banana picking robot based on deep learning [D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2022. (in Chinese)

[12] Zheng Z, Chen L, Wei L, et al. An efficient and lightweight banana detection and localization system based on deep CNNs for agricultural robots[J]. Smart Agricultural Technology, 2024,9:100550.

[13] Zhou L, Yang Z, Deng F, et al. Banana bunch weight estimation and stalk central point localization in banana orchards based on RGB - D images[J]. Agronomy, 2024,14(6):1123.

[14] 段洁利, 王昭锐, 邹湘军, 等. 采用改进 YOLO v5 的蕉穗识别及其底部果轴定位[J]. 农业工程学报, 2022,38(19): 122 - 130.
Duan Jieli, Wang Zhaorui, Zou Xiangjun, et al. Recognition of bananas to locate bottom fruit axis using improved YOLO v5 [J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(19):122 - 130. (in Chinese)

[15] Nguyen D T, Do P B L, Nguyen D D K, et al. A lightweight and optimized deep learning model for detecting banana bunches and stalks in autonomous harvesting vehicles[J]. Smart Agricultural Technology, 2025,11: 101051.

[16] Wang S, Wei L, Zhang D, et al. Real-time and resource-efficient banana bunch detection and localization with YOLO - BRFB on edge devices[J]. Frontiers in Plant Science, 2025,16:1650012.

[17] Cai L, Liang J, Xu X, et al. Banana pseudostem visual detection method based on improved YOLO v7 detection algorithm [J]. Agronomy, 2023,13(4):999.

[18] 王伟. 双目视觉自动检测香蕉植株假茎茎高茎宽[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
Wang Wei. Automatic detection of the height and width of banana pseudo-stem based on binocular vision[D]. Nanning: Guangxi University, 2020. (in Chinese)

[19] Jiang Y, Duan J, Xu X, et al. Measurement of the banana pseudo-stem phenotypic parameters based on ellipse model[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022,15(3):195 - 202.

[20] Song S, Duan J, Yang Z, et al. A three-dimensional reconstruction algorithm for extracting parameters of the banana pseudo-stem[J]. Optik, 2019,185:486 - 496.

[21] 张振乾, 李世超, 李晨阳, 等. 基于双目视觉的香蕉园巡检机器人导航路径提取方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21):9 - 15.
Zhang Zhenqian, Li Shichao, Li Chenyang, et al. Navigation path detection method for a banana orchard inspection robot based on binocular vision[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(21):9 - 15. (in Chinese)

[22] Xu X, Liu G, Luo Z, et al. A robust and high-accuracy banana plant leaf detection and counting method for edge devices in complex banana orchard environments[J]. Agronomy, 2025,15:2195.

[23] Xu X, Liang J, Li J, et al. Stereo visual-inertial localization algorithm for orchard robots based on point-line features[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024,224:109202.

[24] Yang Z, Jiang Q, Duan J, et al. A method for measuring banana pseudo-stem phenotypic parameters based on handheld mobile LiDAR and IMU fusion[J]. Frontiers in Plant Science, 2024,15:1369501.

[25] 李晨阳, 彭程, 张振乾, 等. 融合里程计信息的农业机器人定位与地图构建方法[J]. 农业工程学报, 2021,37(21): 16 - 23.
Li Chenyang, Peng Cheng, Zhang Zhenqian, et al. Positioning and map construction for agricultural robots integrating odometer information[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(21):16 - 23. (in Chinese)

[26] 李修华, 魏鹏, 何嘉西, 等. 基于 Kinect V3 深度传感器的田间植株点云配准方法[J]. 农业工程学报, 2021,37(21): 45 - 52.
Li Xiuhua, Wei Peng, He Jiaxi, et al. Field plant point cloud registration method based on Kinect V3 depth sensors[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(21):45 - 52. (in Chinese)

[27] 李修华, 李倩, 张瀚文, 等. 基于 Faster R - CNN 的作物生物密度智能识别方法[J]. 生物工程学报, 2025,41(10): 3828 - 3839.

Li Xiuhua, Li Qian, Zhang Hanwen, et al. An intelligent recognition method for crop density based on Faster R - CNN[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2025,41(10): 3828 - 3839. (in Chinese)

[28] 彭程, 苗艳龙, 汪刘洋, 等. 基于三维点云的田间香蕉吸芽形态参数获取[J]. 农业工程学报, 2022,38(增刊 1):193 - 200.
Peng Cheng, Miao Yanlong, Wang Liuyang, et al. Morphological parameters extraction of banana sucker in the field based on three-dimensional point cloud[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(S1):193 - 200. (in Chinese)

[29] Miao Y, Wang L, Peng C, et al. Banana plant counting and morphological parameters measurement based on terrestrial laser scanning[J]. Plant Methods, 2022,18(1):66.

[30] Ma C, Wang J, Zeng T, et al. Banana individual segmentation and phenotypic parameter measurements using deep learning and terrestrial LiDAR[J]. IEEE Access, 2024,12: 50310 - 50320.

[31] Jiang Y, Yang Z, Xu X, et al. Wetting and deposition characteristics of air-assisted spray droplet on large broad-leaved crop canopy[J]. Frontiers in Plant Science, 2023,14:1079703.

[32] 向军. 果园智能仿形变量喷雾控制系统设计与试验[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.
Xiang Jun. Design and test of intelligent profiling spray control system in orchard[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[33] Yang Z, Yu J, Duan J, et al. Optimization-design and atomization-performance study of aerial dual-atomization centrifugal atomizer[J]. Agriculture, 2023,13(2):430.

[34] Yu J, Xu X, Duan J, et al. Effect of operational parameters on droplet deposition characteristics using an unmanned aerial vehicle for banana canopy[J]. Frontiers in Plant Science, 2025,15:1491397.

[35] Wang J, Gao Z, Wang S, et al. Quantitative assessment of banana canopy porosity based on a three-dimensional canopy model and its impact on spray droplet penetration within the canopy from unmanned aerial vehicle spraying systems[J]. Crop Protection, 2025,197:107360.

[36] 蒋寅龙. 靶标叶面雾滴润湿机理与风送喷雾沉积特性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2023.
Jiang Yinlong. Droplets wetting mechanism on target leaves and the deposition characteristics of air-assisted spray[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[37] Jiang Y, Duan J, Jiang T, et al. Microscale mechanism of microstructure, micromorphology and Janus wettability of the banana leaf surface[J]. Micron, 2021,146:103073.

[38] Jiang Y, Yang Z, Jiang T, et al. Banana leaf surface's Janus wettability transition from the Wenzel state to Cassie-Baxter state and the underlying mechanism[J]. Materials, 2022,15(3):917.

[39] 段洁利, 蒋婷婷, 蒋寅龙, 等. 香蕉叶表面特征及浸润性机理研究[J]. 华南农业大学学报, 2023,44(2):314 - 323.
Duan Jieli, Jiang Tingting, Jiang Yinlong, et al. Study on the surface characteristics and infiltration mechanism of banana leaf[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023,44(2):314 - 323. (in Chinese)

[40] Jiang Y, Yang Z, Xu X, et al. Regulation mechanism of droplets wetting on banana leaf surface and its dynamic contact angle wetting model[J]. Crop Protection, 2024,186:106920.

[41] Jiang T, Duan J, Zhang Z, et al. Performance matching of common pesticides in banana plantations on the surface of banana leaves at different growth stages[J]. Pest Management Science, 2023,79(12):5116 - 5129.

[42] Jiang T, Yang Z, Jiang Y, et al. Regulating the dynamic wetting behavior of pesticide on banana leaves at different growth stages with surfactants[J]. Pest Management Science, 2025,81(1):93 - 110.

[43] Jiang Y, Yang Z, Xu X, et al. Spreading model of single droplet impacting the banana leaf surface and computational fluid dynamics simulation analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024,223:109113.

[44] Selvaraj M G, Vergara A, Ruiz H, et al. AI-powered banana diseases and pest detection[J]. Plant Methods, 2019,15(1):92.

[45] Elinisa C A, Wamaina C, Vodacek A, et al. Image segmentation deep learning model for early detection of banana diseases[J]. Applied Artificial Intelligence, 2025,39(1):2440837.

[46] 史红栩, 李修华, 李民赞, 等. 基于深度学习的香蕉病害远程诊断系统[J]. 华南农业大学学报, 2020,41(6):92 - 99.
Shi Hongxu, Li Xiuhua, Li Minzan, et al. Remote diagnosis system of banana diseases based on deep learning[J]. Journal of South China Agricultural University, 2020,41(6):92 - 99. (in Chinese)

[47] 蒋权, 罗明涛, 黄梓琛, 等. 基于空地多视角 RGB 影像协同的病害香蕉植株监测[J]. 南方农业学报, 2023,54(10): 3114 - 3124.
Jiang Quan, Luo Mingtao, Huang Zichen, et al. Monitoring of diseased banana plants based on collaborative RGB images from air-ground multi-view[J]. Journal of Southern Agriculture, 2023,54(10):3114 - 3124. (in Chinese)

[48] Choosumron G S, Hataitara R, Sujipuli K, et al. Bananas diseases and insect infestations monitoring using multi-spectral camera RTK UAV images[J]. Spatial Information Research, 2023,31(4):371 - 380.

[49] Alabi T R, Adewopo J, Duke O P, et al. Banana mapping in heterogenous smallholder farming systems using high-resolution remote sensing imagery and machine learning models with implications for banana bunchy top disease surveillance[J]. Remote Sensing, 2022,14(20):5206.

[50] Calou V B C, Teixeira A D S, Moreira L C J, et al. The use of UAVs in monitoring yellow sigatoka in banana[J]. Biosystems Engineering, 2020,193:115 - 125.

[51] Thai H, Le K, Nguyen N L. EF－CenterNet: an efficient anchor-free model for UAV-based banana leaf disease detection[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025,231:109927.

[52] Ugarte F, Bayona A, Criollo B, et al. Early detection of black Sigatoka in banana leaves using hyperspectral images[J]. Applications in Plant Sciences, 2020,8(8):e11383.

[53] Retkute R, Gilligan C. Developing a spatio-temporal model for banana bunchy top disease: leveraging remote sensing and survey data[J]. Frontiers in Plant Science, 2025,16:1521620.

[54] Retkute R, Crew K S, Thomas J E, et al. Detection of banana diseases based on Landsat－8 data and machine learning[J]. Remote Sensing, 2025,17(13):2308.

[55] Zhang S, Li X, Ba Y, et al. Banana fusarium wilt disease detection by supervised and unsupervised methods from UAV-based multispectral imagery[J]. Remote Sensing, 2022,14(5):1231.

[56] Ye H, Huang W, Huang S, et al. Recognition of banana fusarium wilt based on UAV remote sensing[J]. Remote Sensing, 2020,12(6):938.

[57] Ye H, Huang W, Huang S, et al. Identification of banana fusarium wilt using supervised classification algorithms with UAV-based multi-spectral imagery[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020,13(3):136－142.

[58] Lin S, Ji T, Wang J, et al. BFWSD: a lightweight algorithm for banana fusarium wilt severity detection via UAV-based large-scale monitoring[J]. Smart Agricultural Technology, 2025,11:101047.

[59] Li C, Xiang D, Yang S, et al. *Fusarium* wilt of banana latency and onset detection based on visible/near infrared spectral technology[J]. Agronomy, 2024,14(12):2994.

[60] 杨洲, 张卓伟, 李君, 等. 蕉园自走式压穴施肥机设计与试验[J]. 农机化研究, 2019,41(7):171－177.
Yang Zhou, Zhang Zhuowei, Li Jun, et al. Design and experiment of self-propelled punching fertilizer applicator for banana plantation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019,41(7):171－177. (in Chinese)

[61] 宋帅帅, 段洁利, 邹湘军, 等. 基于香蕉根系分布形态的变量排肥器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2020,36(6):11－18.
Song Shuaishuai, Duan Jieli, Zou Xiangjun, et al. Parameter optimization and test of variable fertilizer apparatus based on root distribution pattern of bananas[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(6):11－18. (in Chinese)

[62] 杨洲, 欧治武, 孙健峰, 等. 基于香蕉根系分布特征的变量施肥机研制[J]. 农业工程学报, 2020,36(8):1－10.
Yang Zhou, Ou Zhiwu, Sun Jianfeng, et al. Development of variable rate fertilizer applicator based on distribution characteristics of banana roots[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(8):1－10. (in Chinese)

[63] 段洁利, 黄广生, 孙志全, 等. 香蕉假茎自动对靶精准施肥装置的设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2021,42(6):88－99.
Duan Jieli, Huang Guangsheng, Sun Zhiquan, et al. Design and experiment of precision fertilization device with automatic target for banana stalk[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021,42(6):88－99. (in Chinese)

[64] Coelho E, Silva A, Miranda J. Sensor placement for soil water monitoring in banana crop irrigated by drip irrigation systems[J]. Engenharia Agricola, 2010,30:608－618.

[65] Panigrahi P, Raychaudhuri S, Thakur A K, et al. Automatic drip irrigation scheduling effects on yield and water productivity of banana[J]. Scientia Horticulturae, 2019,257:108677.

[66] Salimath M, Kaliannan N, Prabhakar V, et al. IoT and sensor technologies: increased water and nutrient savings and profit in Banana cv. Grand Nain (AAA) production[J]. Scientia Horticulturae, 2025,341:113982.

[67] 倪福乐, 张艺楠, 冯斗. 智能水肥一体化在香蕉生产管理中存在的问题与对策研究[J]. 农村经济与科技, 2020,31(1):55－57.

[68] 陈家政, 朱立学, 张世昂, 等. RGB 与多光谱图片对香蕉缺氮叶片的识别效果对比研究[J]. 现代农业装备, 2021,42(4):21－28.
Chen Jiazheng, Zhu Lixue, Zhang Shiang, et al. Comparative study on the recognition effect of RGB and multispectral images on banana leaves with nitrogen deficiency[J]. Modern Agricultural Equipment, 2021,42(4): 21－28. (in Chinese)

[69] Dlamini M, Chirima G, Sibanda M, et al. Characterizing leaf nutrients of wetland plants and agricultural crops with nonparametric approach using Sentinel－2 imagery data[J]. Remote Sensing, 2021,13(21): 4249.

[70] Aeberli A, Johansen K, Robson A, et al. Detection of banana plants using multi-temporal multispectral UAV imagery[J]. Remote Sensing, 2021,13(11):2123.

[71] 张海洋, 张瑶, 李民赞, 等. 基于 BSO－SVR 的香蕉遥感时序估产模型研究[J]. 农业机械学报, 2021,52(增刊 1):98－107.
Zhang Haiyang, Zhang Yao, Li Minzan, et al. BSO－SVR-based remote sensing time-series yield estimation model for banana[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(S1):98－107. (in Chinese)

[72] An L, Tang W, Qiao L, et al. Estimation of chlorophyll distribution in banana canopy based on RGB－NIR image correction for uneven illumination[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022,202:107358.

[73] Kong W, Ma L, Ye H, et al. Nondestructive estimation of leaf chlorophyll content in banana based on unmanned aerial vehicle hyperspectral images using image feature combination methods[J]. Frontiers in Plant Science, 2025,16:1536177.

[74] Chore A, Thankachan D. Nutrient defect detection in plant leaf imaging analysis using incremental learning approach with

multifrequency visible light approach[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2023,18(2):1369 - 1387.
[75] 金莫辉, 张家铭, 杨洲, 等. 一种切钻两用的电动手持式香蕉除芽器: 201811178299.4[P]. 2023 - 10 - 20.
[76] Xu X, Zhang Z, Yang Z, et al. Design of semi-automatic banana bud removal machine[J]. IFAC - PapersOnLine, 2018, 51(17):146 - 151.
[77] 吴广. 基于视觉感知的香蕉除吸芽机器人关键技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2025.
Wu Guang. Research on key technologies of banana sucker removing robot based on visual perception[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2025. (in Chinese)
[78] 杨洲, 吴烽云, 段洁利, 等. 一种视觉识别的香蕉断蕾方法、仿生香蕉断蕾机构、香蕉断蕾机器人及应用: 202011447922.9[P]. 2024 - 07 - 12.
[79] 吴烽云, 叶雅欣, 陈思宇, 等. 复杂环境下香蕉多目标特征快速识别研究[J]. 华南农业大学学报, 2022,43(2): 96 - 104.
Wu Fengyun, Ye Yaxin, Chen Siyu, et al. Research on fast recognition of banana multi-target features by visual robot in complex environment[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022,43(2):96 - 104. (in Chinese)
[80] Wu F, Yang Z, Mo X, et al. Detection and counting of banana bunches by integrating deep learning and classic image-processing algorithms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023,209:107827.
[81] Wu F, Duan J, Ai P, et al. Rachis detection and three-dimensional localization of cut off point for vision-based banana robot [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022,198:107079.
[82] Wu F, Duan J, Chen S, et al. Multi-target recognition of bananas and automatic positioning for the inflorescence axis cutting point[J]. Frontiers in Plant Science, 2021,12:705021.
[83] 吴烽云. 基于视觉感知的香蕉断蕾机器人关键技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2023.
Wu Fengyun. Research on key technologies of banana de-budding robot based on visual perception[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[84] 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)
[85] 段洁利, 易文峰, 王红军, 等. 香蕉串果夹持机构设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2021,42(2):116 - 123.
Duan Jieli, Yi Wenfeng, Wang Hongjun, et al. Design and test of banana skewer fruit holding mechanism[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021,42(2):116 - 123. (in Chinese)
[86] 孙金风, 周取明, 毛正午, 等. 一种具有柔性抱爪的自动香蕉采摘车: 202211310980.6[P]. 2023 - 01 - 13.
[87] 易文峰. 香蕉采收机的设计与试验研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2022.
Yi Wenfeng. Design and experimental research on banana harvesting machine[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[88] 王玉. 平地蕉园采收机关键技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
Wang Yu. Research on key technology of harvesting machine in flat banana plantation[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[89] Chen T, Zhang S, Chen J, et al. Development, integration, and field experiment optimization of an autonomous banana-picking robot[J]. Agriculture, 2024, 14(8):1389.
[90] 王红军, 邹伟锐, 谢启旋, 等. 基于机器视觉的香蕉果柄识别及采摘试验研究[J]. 自动化与信息工程, 2023,44(5): 14 - 21.
Wang Hongjun, Zou Weirui, Xie Qixuan, et al. Research on banana stem recognition and picking experiment based on machine vision[J]. Automation & Information Engineering, 2023,44(5):14 - 21. (in Chinese)
[91] Lin G, Huang P, Wang M, et al. An inverse kinematics solution for a series-parallel hybrid banana-harvesting robot based on deep reinforcement learning[J]. Agronomy, 2022,12(9):2157.
[92] 付根平, 朱立学, 张世昂, 等. 基于牛顿迭代法的香蕉采摘机器人逆运动学求解研究[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(12):200 - 209.
Fu Genping, Zhu Lixue, Zhang Shiang, et al. Research on solving inverse kinematics of banana picking robot based on Newton's iteration method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023,44(12):200 - 209. (in Chinese)
[93] 张日红, 欧炬基, 朱立学, 等. 香蕉采摘与吊运作业机器人运动与动力性能分析[J]. 农机化研究, 2024,46(2): 23 - 30.
Zhang Rihong, Ou Juji, Zhu Lixue, et al. Motion and dynamic performance analysis of banana picking and lifting robot[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024,46(2):23 - 30. (in Chinese)
[94] Li W, Yang Z, Xu X, et al. Design and experimental study of banana bunch transportation device with lifting mechanism and automatic bottom-fixing fruit shaft[J]. Agriculture, 2024,14(7):1161.
[95] 孙立红, 周昆华. 香蕉果实综合护理及采收包装的应用研究[J]. 云南农业科技, 2007(6):18 - 21.
[96] 李君, 杨洲, 陆华忠, 等. 香蕉园电动滑车式索道运送系统动力学研究[J]. 农业机械学报, 2013,44(1):211 - 216.
Li Jun, Yang Zhou, Lu Huazhong, et al. Dynamics of electric pulley conveying cableway system in banana plantation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(1):211 - 216. (in Chinese)
[97] 李伟, 杨洲, 李君, 等. 基于极点配置法的香蕉索道防摇控制器设计[J]. 农机化研究, 2014,36(5):119 - 123.

Li Wei, Yang Zhou, Li Jun, et al. The banana ropeway anti-sway controller design based on pole placement method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014,36(5):119 - 123. (in Chinese)

[98] 段洁利, 于世伟, 解明坤, 等. 基于一维轻量化 CNN 的山地索道轴承故障诊断[J]. 农业工程学报, 2023,39(14): 70 - 79.
Duan Jieli, Yu Shiwei, Xie Mingkun, et al. Fault diagnosis of mountain ropeway bearings based on one-dimensional lightweight CNN[J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(14):70 - 79. (in Chinese)

[99] 段洁利, 李伟希, 徐兴, 等. 山地果园无人机运送关键技术及其应用前景分析[J]. 中国农机装备, 2023(7):1 - 9.
Duan Jieli, Li Weixi, Xu Xing, et al. Analysis of key technology and application prospects of UAV transportation in mountain orchards[J]. China Agricultural Machinery Equipment, 2023(7):1 - 9. (in Chinese)

[100] 段洁利, 李伟希, 李伟钦, 等. 山地蕉无人机自主吊运装置研制[J]. 农业工程学报, 2024,40(15):1 - 10.
Duan Jieli, Li Weixi, Li Weiqin, et al. Development of UAV autonomous lifting and transportation equipment for mountain bananas[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(15):1 - 10. (in Chinese)

[101] 朱正波. 香蕉机械落梳关键技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
Zhu Zhengbo. Research on key technologies of banana crown-cutting mechanization[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[102] 许泽宇. 基于振动切割的香蕉仿形落梳机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
Xu Zeyu. Research on the mechanism of banana profiling cutting based on vibration cut[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[103] 杨洲, 郭杰, 金莫辉, 等. 基于恒力机构的香蕉落梳装置设计与自适应性分析[J]. 农业机械学报, 2019,50(6): 148 - 155.
Yang Zhou, Guo Jie, Jin Mohui, et al. Design and analysis of self-adaptability in banana crown-cutting device based on constant-force mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(6):148 - 155. (in Chinese)

[104] Guo J, Yang Z, Liu Y, et al. Development and field evaluation of a radial large-stroke adaptive end-effector for continuous robotic harvesting of banana fruits at different stalk diameters[J]. Journal of Field Robotics, 2025,42(6):2862 - 2907.

[105] 赵镭. 基于香蕉果柄形态特征的智能落梳关键技术研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2023.
Zhao Lei. Research on key technologies of intelligent de-handing banana based on morphological characteristics of banana crown[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[106] Zhao L, Huang C, Yang Z, et al. Characterization of banana crowns: microscopic observations and macroscopic cutting experiments[J]. Agriculture, 2024,14(10):1714.

[107] He J, Duan J, Yang Z, et al. Method for segmentation of banana crown based on improved DeepLabV3[J]. Agronomy, 2023,13(7):1838.

[108] Zhao L, Yang Z, Wang C, et al. Predicting de-handing point in bananas using crown morphology and interpretable machine learning[J]. Agronomy, 2025,15(8):1880.

[109] Arm Hub, Hort Innovation, Australian Banana Growers Council. Feasibility of automated banana de-handing in Australia [EB/OL]. (2022 - 02 - 22). https: // armhub. com. au/casestudies/feasibility-of-automated-banana-de-handing-in-australia/.

[110] 段洁利, 莫杏康, 黄朝炜, 等. 基于张合式刀具的香蕉落梳末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 376 - 385.
Duan Jieli, Mo Xingkang, Huang Chaowei, et al. Design and experiment of banana de-handing end effector based on opening-closing cutter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(12): 376 - 385. (in Chinese)

[111] 段洁利, 刘博成, 黄朝炜, 等. 基于往复插切的便携式香蕉落梳装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025,56(9): 377 - 384.
Duan Jieli, Liu Bocheng, Huang Chaowei, et al. Design and experiment of portable banana de-handing device based on reciprocating insertion-cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(9): 377 - 384. (in Chinese)

[112] 郭标, 邓英毅, 李峰, 等. 香蕉宽窄行种植及配套简易机械化的栽培技术[J]. 中国南方果树, 2020,49(6):79 - 82.

[113] 张妙宜, 周登博, 起登凤, 等. 香蕉枯萎病综合防控研究进展[J]. 中国科学:生命科学, 2024,54(10):1843 - 1852.
Zhang Miaoyi, Zhou Dengbo, Qi Dengfeng, et al. Research progress on the integrated control of *Fusarium* wilt disease in banana[J]. Scientia Sinica Vitae, 2024,54(10): 1843 - 1852. (in Chinese)