

甘薯全程机械化技术路径与智能装备： 关键环节进展、瓶颈与趋势

申海洋^{1,2} 王公仆^{1,3} 严伟^{1,3} 薛广玉^{1,3} 张万枝⁴ 周国民² 胡良龙^{1,3}

(1. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081;

3. 农业农村部现代农业装备重点实验室, 南京 210014; 4. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018)

摘要: 在甘薯产业由粗放生产向现代化、智能化转型背景下,构建覆盖育苗、起垄、移栽与田间管理、收获及产后衔接的全程机械化体系,是缓解劳动力约束、降低生产成本并提升作业质量的关键途径。本文系统梳理国内外甘薯机械化作业模式与技术路径,总结关键装备的发展现状与适配特征,比较不同国家机具配置与工艺链协同的差异;并归纳智能化与信息化赋能甘薯机械化的关键技术方向与发展趋势。我国甘薯机械化总体呈现“前端环节基础较好、中后端短板突出、区域适配不足”结构性失衡,瓶颈主要集中在农机农艺关键参数与标准体系不健全、丘陵山区与小地块场景成套装备供给不足,以及复杂工况下关键部件工况适应性与可靠性偏低等方面。面向高质量与规模化需求,提出以轻简化与成套化为基础、以智能化闭环与信息化协同为牵引的系统集成路径,推动甘薯机械化由单环节优化向全链条稳定提质升级,为粮食安全、绿色生产与智能农机产业发展提供支撑。

关键词: 甘薯; 全程机械化; 作业模式; 技术路径; 智能农机

中图分类号: S225.7⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)14-0102-18

OSID:



Full-process Mechanization Pathways and Smart Equipment for Sweet Potato: Progress, Bottlenecks and Trends

Shen Haiyang^{1,2} Wang Gongpu^{1,3} Yan Wei^{1,3} Xue Guangyu^{1,3} Zhang Wanzhi⁴ Zhou Guomin² Hu Lianglong^{1,3}

(1. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China

2. Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China

3. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China

4. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: Against the backdrop of the sweet potato industry's transition from extensive production to modern, intelligent agriculture, establishing a full-process mechanization system covering seedling production, ridge forming, transplanting and field management, harvesting, and postharvest integration was a key approach to easing labor constraints, reducing production costs, and improving operational quality. The mechanized operating modes and technological pathways for sweet potato production worldwide were systematically reviewed, the development status and adaptability of key machinery and equipment were summarized, the cross-country differences in implement configuration and process-chain coordination were compared, and the major directions and trends in smart and information-enabled technologies that empowered sweet potato mechanization were synthesized. Overall, sweet potato mechanization in China exhibited a structural imbalance characterized by relatively strong upstream operations but pronounced weaknesses in mid- and downstream stages and insufficient regional suitability. Key bottlenecks included incomplete machinery-agronomy parameterization and standard systems, inadequate provision of integrated equipment sets for hilly and small-plot conditions, and limited

收稿日期: 2026-01-14 修回日期: 2026-02-08

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD2301000)、国家甘薯产业技术体系项目(CARS-10)、2025年南京市博士后科研项目、中国农业科学院基本科研业务费专项(S202412)、江西省农机装备研发制造推广应用一体化试点项目(YCTY202410)、国家重大农业科技项目和山东省薯类产业技术体系农业机械岗位专家项目(SDAIT-16-10)

作者简介: 申海洋(1993—),男,博士后,主要从事农业智能装备技术研究,E-mail: shenhaiyang@caas.cn

通信作者: 胡良龙(1973—),男,研究员,主要从事电动农机与丘陵装备研究,E-mail: hulianglong@caas.cn

adaptability and reliability of critical components under complex operating conditions. To meet the needs of high-quality and large-scale production, a system-integration pathway grounded in lightweight and integrated equipment systems and driven by closed-loop intelligent control and information-enabled coordination was proposed, thereby promoting a shift from single-operation optimization to stable, quality-enhancing upgrading across the entire production chain and providing support for food security, green production, and the development of the intelligent agricultural machinery industry.

Key words: sweet potato; full-process mechanization; operating mode; technological pathway; intelligent agricultural machinery

0 引言

甘薯作为兼具食用、饲用和工业加工等多重功能的块根作物,在全球粮食安全、营养改善和乡村经济发展中具有重要地位^[1-3]。依托耐贫瘠、抗逆性强等生物学特性,甘薯在非洲、亚洲和拉丁美洲广泛种植,是许多发展中国家应对气候变化和粮食短缺的重要作物^[1-5]。联合国粮农组织统计显示,2023 年全球甘薯种植面积约 $7.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$,总产量接近 $9.3 \times 10^7 \text{ t}$,其中中国种植面积达 $2.32 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、产量约 $5.16 \times 10^7 \text{ t}$,分别占全球约 30.93% 和 55.48%,长期位居世界首位^[6]。

甘薯生产过程包括育苗、耕整地与起垄、剪苗与秧蔓处理、移栽、田间管理以及收获等多个环节^[7-8]。各环节作业质量与作业效率共同决定块根膨大和商品品质^[9]。与小麦、水稻、玉米等主要粮食作物相比,甘薯全程机械化发展具有显著的“前端高、中段弱、末端难”特征:耕整地与起垄环节已基本实现机械化,但移栽与收获环节受秧苗柔软、块根浅生且易损伤以及丘陵山地、小田块普遍存在等因素制约,机械化水平明显偏低^[10-12]。移栽作业需要实现连续取苗、定量送苗与稳定覆土,对整机结构匹配和运动协调性要求较高^[9-11];收获环节则需在复杂土壤条件下兼顾挖掘深度控制、薯土分离和块根防损,作业机理明显区别于籽粒作物和直立根茎作物^[12-15]。

在劳动力成本上升、规模化经营加快推进以及国家“全程机械化+综合农事服务”持续实施的背景下,国内外针对甘薯全程机械化开展了大量技术与装备研究与示范应用^[7-8,10-13]。栽植前端以“苗源更标准、作业更省工”为主线,工厂化育苗逐步提高种苗一致性,苗带供苗自动移栽与“旋耕起垄-覆膜(或膜上)栽植”复式作业减少进地次数并提升栽植深度、株距等关键质量指标的稳定性^[9]。秧蔓与茎尖利用环节围绕“能收、好转运、少缠绕”开展改进,双辊式薯蔓回收机与多用途菜用薯尖收获机推动薯尖菜用和秧蔓饲用的机械化利用,同时降低人工拣拾与搬运强度^[14]。收获后端聚焦“少伤薯、少

漏挖、少带土”,牵引式与自走式甘薯联合收获机及其输送分离部件通过离散元仿真与田间试验反复校核,收净率与破损率等指标得到持续改进^[15-16]。美国、日本等甘薯主产国在工厂化育苗、半自动/自动移栽、小型自走式联合收获以及秧蔓饲料化利用等方面积累了较成熟的机具体系与作业组织方式,可为中国按区域条件与经营规模分层构建全程机械化技术路线提供直接参考^[9,14]。基于上述进展,本文从全程作业链出发梳理技术路径与装备演进,辨别关键短板,并提出面向不同地区与经营主体的系统集成建议。

1 甘薯机械化作业模式

甘薯全程机械化的技术路径主要体现在宜机化种植、起垄移栽与收获环节的作业模式上。作业模式由起垄形式、栽插行数、垄体结构及工序集成方式共同决定,是育苗、移栽、田管和收获机械配置的基础^[17-21]。

1.1 甘薯宜机化种植模式

甘薯机械化种植以垄作为核心,围绕“起垄行数-垄体宽度-垄上栽插行数”组合形成 6 种典型模式(图 1):①在丘陵山区和小田块区域(黏重土壤),单行起垄单垄栽插模式配套小型机具,适应性强但作业幅宽有限。②在地块规整、规模化程度较高的平原区域(砂质土壤),大垄双行或宽垄单行双行栽插模式通过在宽垄上布置双行薯尖,并与起垄-施肥-覆膜-移栽联合作业机配套,以提高土地利用率和作业效率。③在中等规模经营中,双行起垄单行栽插与双行起垄双行栽插模式通过一次成垄、多行栽插实现机具与栽培农艺的协调。④在规模化商品薯生产条件下,三行起垄双行栽插模式预留通行垄,便于机械对行作业^[18]。这些模式构成不同区域甘薯机械化栽培的基本类型,为移栽、田管与收获装备的配套衔接提供了农艺基础^[17-18]。

1.2 甘薯机械化起垄移栽模式

甘薯机械化起垄移栽是衔接种植模式与田间管理的关键环节,其技术路径依据工序集成度与作业流程可分为 3 种典型模式(图 2):①旋耕起垄移栽

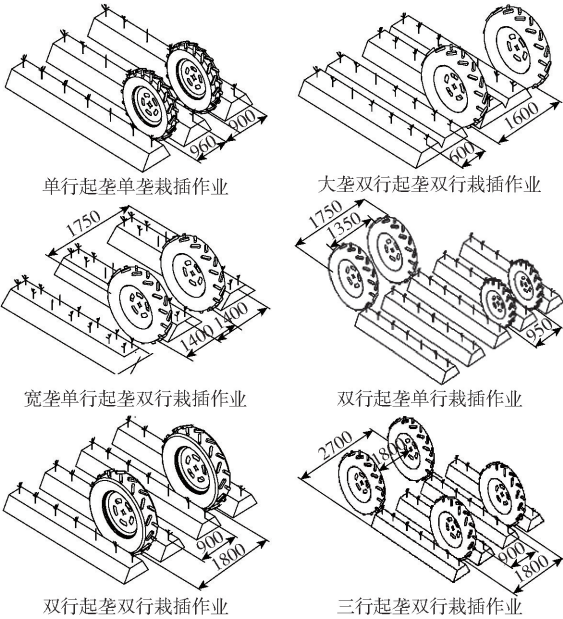


图 1 甘薯机械化种植模式

Fig. 1 Mechanized planting model of sweet potato

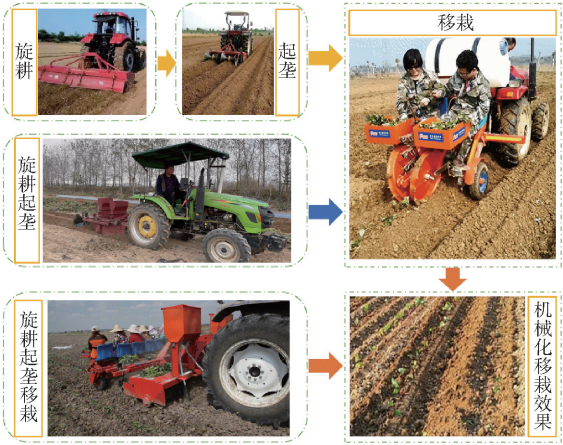


图 2 甘薯机械化起垄移栽模式

Fig. 2 Mechanized ridge formation and transplanting model for sweet potatoes

一体化模式,通过复式作业机具一次性完成旋耕至栽插全过程,具有作业连续、效率高、保墒性好等优势,是平原规模化产区的主流方式。②旋耕-起垄-移栽分段作业模式,将工艺流程分为 3 个可灵活调序的独立环节,适应丘陵山地及中小田块地形与农时差异,对机具配套的兼容性更强。③旋耕起垄后适时移栽模式,在起垄后根据土壤墒情、气候等条件择机移栽,有利于维持垄体结构、避免板结,多用于规模化生产中农艺调控^[19]。模式选择受地形条件、田块规模、种植农艺及机具类型共同影响,在平原地区以一体化模式为主、分段模式为辅,丘陵山区则侧重分段或适时移栽模式以兼顾适应性与通过性,从而为田间管理与收获作业提供有效的农艺基础。

1.3 甘薯机械化去蔓收获模式

甘薯收获作业普遍由秧蔓处理和薯块收获 2 部

分构成,收获流程主要分为分段收获模式和联合收获模式(图 3)。秧蔓处理可分为秧蔓收集利用(割蔓后集中收回,作为饲料或有机物料)和秧蔓粉碎还田(碎秧后均匀抛撒于垄面或行间),为挖掘作业提供清垄条件^[20]。在此基础上,分段收获模式采用挖掘犁、挖掘铲或带式挖掘机具将薯土混合物翻出地表,由人工完成拣拾与分选,适用于丘陵山地和小规模种植区域,是人工向机械化收获过渡的主要形式。联合收获模式则在同一平台上集成秧蔓切断或粉碎、块根挖掘、输送分离及集薯分拣等工序,收获产品可在机上直接完成初步分拣与装箱,更适用于地块规整、规模化和商品化程度较高的生产体系^[21]。



图 3 甘薯机械化收获模式

Fig. 3 Mechanized harvesting model of sweet potato

通过不断优化甘薯机械化种植、移栽与收获模式,能够有效提高农业生产的机械化程度,提升作业效率,并在不同的作物需求和地形条件下灵活选择最合适的作业模式,从而推动甘薯产业向更高效、低成本的方向发展。

2 甘薯全程机械化装备与技术路径

甘薯全程机械化覆盖育苗供苗、耕整地起垄、移栽、田间管理、秧蔓处理与块根收获等关键环节,其装备成熟度、作业可靠性与系统配套性共同决定劳动生产率、成本结构以及减损控伤水平^[22]。受蔓生匍匐生长、块根地下非定向膨大与高垄栽培等生物学特性及农艺模式约束,全球甘薯生产在机械化推进过程普遍呈现结构性不均衡,耕整地环节相对成熟,而移栽与秧蔓利用薄弱,收获阶段挖掘-分离-输送机理复杂且区域适配性不足^[22-26]。中国甘薯综合机械化水平稳步提升,但提升主要由前端贡献,移栽自动化、秧蔓资源化利用与低损伤联合收获装备等仍是全链条提质增效的短板^[27-28]。

甘薯全程机械化可推广性受区域生产条件对作业过程的系统性约束影响,且南方多阴雨、北方干旱和西北砂质土壤等不同地形的适应性差异。在南方多阴雨区,频繁降水和较高的土壤含水率导致田面

承载力波动,影响作业可进入性,成垄与移栽质量易受塌垄影响,收获期则可能出现黏附加剧现象;在北方干旱区,土体硬化和块土比例上升增加旋耕起垄与挖掘阻力,薯块冲击与表皮损伤风险上升,作业参数依赖限深与分离强度的匹配;在西北砂质土区,垄体稳定性较弱,筛分与输送过程漏失风险突出,需协调成垄强度与分离方式。在此基础上,如图 4 所示,将关键环节装备组织归纳为 3 条典型技术路径:

- ①微小型路径面向丘陵山区与小地块,强调轻量化与通过性,通常需较高人工补充保证作业连续。
- ②中型路径面向中小规模经营,突出模块化配套与分段组织,在效率、成本与适应性之间取得平衡。
- ③大型路径面向平原规模化产区,依托较大功率平台实现连续高效作业与质量一致性,对田块连片度与作业服务组织要求更高。3 条路径为各作业环节装备与关键机构分析提供了统一的技术框架。



图 4 甘薯机械化技术路径

Fig. 4 Mechanized harvesting model of sweet potato

2.1 育苗机械化装备与技术

甘薯育苗是全程机械化作业链起点,苗源质量与供苗方式将通过“供苗-移栽-栽植质量”逐级传导,直接影响移栽作业的株距均匀性、栽植深度稳定性与成活率。传统“块根催芽-露地苗床育苗-人工剪苗/供苗”方式劳动投入大,且苗长、节位与含水状况波动明显,难以满足规模化机械移栽对苗源整齐度与稳定供苗的要求^[25,29]。因此,育苗机械化的关键应聚焦苗床整地与成床质量稳定、灌溉与水分管理配套、取苗与供苗作业节本增效,并与移栽机的供苗方式相匹配。

国内育苗机械化目前总体处于“苗床作业机械化相对成熟、供苗环节机械化起步”阶段。主产区已普遍应用拖拉机配套旋耕-起畦(起垄)联合作业装备,实现碎土、整平与床体几何一致性控制,为均匀出苗提供基础(图 5a)^[26,30]。设施端以大棚/温室(图 5b)配套喷灌、微喷或滴灌并叠加环境监测与阈值控制为主,可提高出苗率与苗齐度、降低气候波动影响^[29]。但剪苗、集苗与标准化供苗仍以人工为主;穴盘/基质化与苗带化育苗用于自动供苗的研究与示范虽已启动,但整体仍处于起步阶段^[31-32]。

国外育苗体系体现 2 条路径:一类依托工厂化育苗推动过程标准化并服务自动移栽;另一类更强

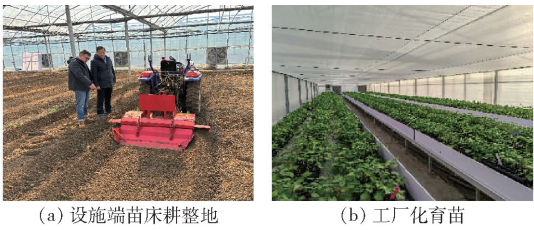


图 5 甘薯育苗机械化技术

Fig. 5 Mechanized technology for sweet potato seedling cultivation

调健康种苗认证与检疫制度保障苗源安全,但剪苗与供苗的高自动化并未实现^[30,33]。国内外甘薯育苗模式与装备见表 1,中国下阶段应以机械移栽需求为牵引,优先推进苗体工程指标与供苗接口标准统一,带动剪苗与低成本供苗装备由示范走向规模应用。

在作业衔接上,苗源一致性提升后,移栽环节的约束更集中于“姿态轨迹-对行基准-垄膜边界”匹配,因此需依托起垄环节形成稳定几何基准,并在移栽环节实现与供苗接口相适配的栽插组织。

2.2 起垄机械化装备与技术

高垄栽培通过改善根区通气排水、增温保墒,提供稳定的结薯空间,是甘薯高产与商品薯形成的关键环节。起垄质量主要通过 3 类指标表征:①垄形

表 1 国内外甘薯育苗模式与装备

模式	区域/国家	典型技术路径	主要技术优势	主要局限性与挑战
露地苗床 + 人工供苗	中国中西部、东南亚小农区	微耕机/小型拖拉机整地;人工摆放种薯与覆盖;简易灌溉	投入低、适应性强	劳动投入大;苗齐度受气候影响明显;病虫害风险较高
设施苗床 + 整地机械化	中国主产区基地	旋耕-起垄联合作业机;大棚/温室;喷灌/微喷/滴灌;配套管理	成床质量稳定;出苗率与苗齐度提高	自动摆薯与取苗环节机械化不足;剪苗与集苗耗时
工厂化穴盘育苗	日本/韩国/荷兰	工厂化育苗线;标准穴盘与基质;潮汐灌溉苗床;计算机控制环境	标准化程度高;苗株整齐;便于组织化供苗	投入成本高;取苗、喂入与移栽机构适配仍需优化
苗带化育苗(研发/示范)	中国(科研与试验示范)	可降解苗带(纸质/无纺布等);卷盘化供苗;渗灌/喷灌	有利于连续供苗与栽插	仍在示范阶段;苗带成本与降解周期需验证
大型露地/温室育苗	美国/澳大利亚等	大型起垄整床;喷灌系统;半自动剪苗与苗捆供应	适配大农场组织化生产	剪苗与供苗机械化提升相对缓慢

几何参数(如垄高、垄顶宽/垄底宽、垄距),影响结薯层空间和移栽、收获的对行边界。②垄体紧实度及均匀性(如容重),影响垄体抗塌陷能力和水分养分运移。③行距一致性与直线度,直接影响铺膜、滴灌带布设及移栽与收获的通过性。研究表明,垄形波动与紧实度不均会增加苗期差异,并在收获期导致漏挖、碰伤和堵塞风险。因此,起垄目标是保持垄形参数稳定、行距一致、对行可靠,为后续作业提供统一基准。起垄不仅影响结薯空间与水热条件,还为移栽对行、田间通行和收获限深提供几何基准^[34-36]。在不同区域条件下,成垄质量对后续作业的影响显著,在南方多阴雨区,过高含水率易引发土体涂抹和垄体弱化,降低移栽对行精度;北方干旱区土体硬化增加功耗,影响垄面质量与中耕通行;西北砂质土区垄体松散,需强化成垄稳定性并优化覆土策略。

国内起垄装备处于成熟应用阶段。成垄原理主要有 2 类:①旋耕碎土-抛土成垄/刮板整形,特点是碎土与成垄同步、效率高,适用于土壤较疏松工况。②犁铧开沟分土-镇压整形,通过镇压辊提高垄体紧实度与稳定性,适用于对垄形保持要求较高的工况(图 6)。围绕农艺配套需求,已形成较多起垄-覆膜复合作业机(图 7)与起垄-施肥/施药复合作业机(图 8),实现成垄、铺膜压膜、覆土以及条带施肥、施药等工序同机完成,减少进地次数并提升作业效率^[33-37]。面向垄内投入药和肥,部分机具采用垄内开沟器与施肥、施药器组合,实现条带位置与深度控制,其效果依赖开沟器和覆土整形部件与作业速度等参数^[34-37]。

国外起垄机械主要沿 2 条路线发展。欧美规模化生产区以多行垄作为主,强调幅宽效率与断面一致性控制,并将起垄与铺膜、滴灌带铺设、条带施肥等作为成套单元集成(图 9);日韩等精细化经营区域以小型(自走/悬挂式)旋耕起垄一体机为代表,



图 6 单垄、双垄起垄机具

Fig. 6 Ridge-forming machinery for single ridge and twin ridge



图 7 起垄-覆膜复式作业机

Fig. 7 Ridge-forming and film-mulching combined operation machine



图 8 起垄-施肥/施药复式作业机

Fig. 8 Ridge forming and fertilizing/spraying combined operation machine



图 9 欧美大型起垄机械作业机具

Fig. 9 Large European and American ridge-forming machinery and equipment

突出小田块与设施边界条件下机动性及复合作业能

力(图 10)。在作业质量评价方面,国外研究多将垄形一致性、条带布设偏移与深度误差作为关键指标,



图 10 日本小起垄机械作业机具

Fig. 10 Japanese small ridging machinery

并与出苗整齐度、养分利用效率等农艺响应进行关联分析^[36-38]。

综上,起垄环节优化重点应由“机型多样”转向“参数范围明确与质量可检验”。面向移栽对行与收获限深的共同需求,结合区域土壤与栽培模式,明确并推广垄高、垄距、垄顶宽/膜面宽等关键参数;围绕垄形稳定、紧实度均匀与直线度,建立可检测、可对标的作业质量指标与测试方法;推进起垄与后续机具的成套配置与参数匹配,降低跨机具、跨地块条件下失配风险(表 2)。

表 2 国内外典型起垄装备

Tab. 2 Typical ridging equipment in China and abroad

类型	成垄机理	关注指标	主要优势	主要局限
旋耕/刮板抛土起垄机	旋耕碎土 + 抛土聚垄/刮板成垄	断面几何稳定、垄距一致;对行直线度	成垄效率高、适配性广	黏重/湿黏与石砾地块稳定性受限
犁铧分土 + 镇压整形起垄机	犁铧开沟分土 + 镇压辊(或罩)整形	紧实度均匀与可调;断面抗塌陷	垄体稳型、利于后续对行	牵引阻力与参数匹配要求较高
起垄-覆膜一体机	成垄 + 铺膜压膜 + 覆土	垄顶平整与膜边覆土一致;膜-垄同轴	单次进地多工序,节本增效	结构复杂,对动力/液压输出要求提高
起垄-施肥/施药复式机	成垄 + 条带(或分层)施用 + 覆土整饰	肥/药条带位置与深度一致;垄芯(弧面)定位	农机农艺深度耦合,提升投入品效率	对地况敏感,需工况自适应与参数优化
国外多行床作起垄覆膜机	床作整形 + 铺膜 + 覆土(可集成滴灌)	幅宽效率、断面一致性;成套接口标准化	规模化效率高、成套集成度高	依赖规整田块与规模经营,投资较高
国外双行起垄机具	双垄成型 + 整形	小田块机动性;对行与断面可控	灵活、适合精细化经营	幅宽与效率受限

2.3 薯尖(茎尖)采收机械化装备与技术

薯尖采收面向标准化种苗供给与茎尖商品化生产。作业对象含水率高、易挤压损伤且冠层遮挡明显,机械化关键在于稳定完成“扶持集拢-定高切割-低落差输送-集料装载”连续作业,与叶菜收获机在机构组成上相近。往复式割刀实现剪切,扶持/拨禾装置完成植株姿态整理,带式输送与集料装置实现连续转运。因此,基于叶菜收获平台进行构型与参数匹配,是形成薯尖专用机具的主要技术路线之一^[39-40]。

国内装备总体沿“平台复用-部件专用-闭环控制”演进,以轻简化电驱或小型自走底盘为载体,集成往复式双动割刀、扶持拨禾与带式输送-集料单元,形成可移植的茎尖采收构型^[41-42](图 11)。为抑制留茬波动并降低挤压损伤,关键在于割台离地高度与行走-拨禾-输送的协同控制,通过位移/高度传感与增量式控制策略,可将割台对地高度误差控制在较窄区间,从而提高留茬一致性与完整率^[43-44]。

国外专用装备供给相对有限,但通用叶菜机具已形成可对标的范式。SLIDE TW 型叶菜收获机典型工艺链为“扶持集拢/对行-切割-夹持输送带有

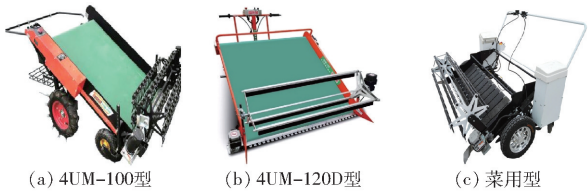


图 11 国内甘薯薯尖收获机

Fig. 11 Domestic sweet potato vine tip harvester

序转运-作业平台人工整束/装箱”(图 12),优势在于连续作业能力强、输送有序化程度高、单位时间处理量大^[45]。TC110E 型步行式叶菜收获机则依托可调高度底盘与气力集料实现低接触切割与集料(图 13),在轻质茎尖物料条件下,气力输送易产生逸散与漏失,应通过气流整形与集料腔体结构的协



图 12 SLIDE TW 型叶菜收获机

Fig. 12 SLIDE TW type vegetable harvester



图 13 TC110E 型叶菜收获机
Fig. 13 TC110E walk-behind leaf harvester

表 3 国内外典型薯尖与茎尖收获装备

Tab. 3 Typical potato tip and stem tip harvesting equipment in China and abroad				
类型	代表机具	关键作业链	关键参数	适用性与局限
平台移植型(国内)	电动/轻型茎尖采收平台	往复式割刀-扶持拨禾-带式输送-集料	割台对地高度控制;行走-拨禾-输送速度匹配,抑制留茬波动与挤压损伤	通用性强;对缠绕与集料节拍敏感
专用型(国内)	菜用甘薯茎尖收获机	往复式切割-低落差输送-箱/袋集料	高度、速度与割刀参数组合标定;输送过程与落差控制	受形态与含水率影响较大;集料更换制约连续作业
高通量有序输送型(国外)	SLIDE TW 型叶菜收获机	扶持对行-切割-夹持有序输送-整理装箱	强调有序输送与节拍稳定;对直立性与整齐度要求高	效率高但投入大;薯尖需针对缠绕与形态差异改装
小型步行型(国外)	步行式叶菜收获机	切割-集拢-输送/集料	低扰动切割;集料装置防飘散/漏失	机动性好但通量有限,组织节拍受人工影响明显

2.4 移栽机械化装备与技术

甘薯移栽在全流程中处于关键位置,输入端受育苗供苗对象及接口形态的约束,作业边界受垄形几何和直线度提供的对行基准约束,输出端通过行间可通行性影响田间管理效率,并间接影响收获阶段的限深稳定性和作业有效性。目前,移栽自动化水平仍较低,主要受“裸苗形态离散-取苗与定向不稳定-栽插姿态与对行一致性耦合”制约。裸苗通常具有柔嫩茎秆、长度和粗细差异大、叶片繁多和根系缠绕等特点,使得链夹式、挠盘式等机构在较高速度下容易出现分苗失败、夹持偏转和损伤,从而形成以人工喂苗为主的半自动作业模式^[47-49]。

国外技术路线以“降低取苗难度、保障姿态一致性”为主线,形成 2 类较成熟方案:①牵引式半自动移栽机,通过机具完成开沟、覆土与镇压,人工投苗承担“分苗-定向”关键环节,以组织层面换取稳定性^[19,49-53]。②小型自走/步行式专用或通用移栽平台,通过苗盒/苗带预整理与夹持输送机构实现斜插或膜上栽插,并强化割台/夹持高度调节以适配覆膜床作^[29],典型国外移栽机如图 14 所示。上述路线共同特征是把不确定的裸苗供给转化为可整理的供苗方式,以降低栽植环节的随机性。

国内装备总体呈“复式作业成套化、覆膜与姿态专用化、供苗标准化探索”3 条并行路线。一方面,旋耕-起垄-开沟-栽插-覆土-镇压等多工序联合作业机在露地体系具备应用基础,优势在于起垄与

同设计进行抑制^[46]。
综上所述,该环节主要约束已从“有无机具”转向“作业稳定性与适配性”,如表 3 所示。农艺条件(直立性、密度、留茬高度范围)必须与机具割台高度调节范围及扶持集拢能力匹配;装备侧应以留茬高度波动、完整率、缠绕堵塞发生率作为核心指标,围绕割台高度、行走-拨禾-输送速度匹配进行参数标定;作业时需保证行距与田间通行条件一致,并匹配集料更换与转运,降低跨地块条件下性能波动。



图 14 国外移栽机
Fig. 14 Foreign transplanters

栽插边界同步形成,便于保证行距与对行基准(图 15a)^[29,54-56]。另一方面,针对覆膜栽培与多节浅埋需求,膜上移栽、横向移栽与电动自走式移栽机等专用机型通过“膜面开孔/开缝-定高夹持-轨迹约束”提高姿态可控性(图 15b~15d)^[57-61]。同时,面向“自动取苗”瓶颈,苗带/苗盘供苗方案通过将秧苗预固定于连续载体,使取苗由随机抓取转为节



图 15 国内移栽机
Fig. 15 Chinese transplanters

拍切取或顶出,为自动化移栽提供工程路径(图 15e、15f)^[62-63]。

综上,移栽环节提升重点应由“机型增多”转向“垄型与姿态参数固化、作业质量可评价”。结合区域栽培模式,明确垄距、垄顶宽/膜面宽与目标栽插姿态的参数范围,并与栽植器轨迹边界对应;建立以取苗成功率、姿态偏差、损伤率、漏栽率

为核心的质量指标体系,对机具与作业参数评价;以苗源预整理提高供苗一致性,减轻取苗与定向环节的不确定性,从而提升跨地块、跨品种适用性,国内外典型甘薯移栽装备见表 4。移栽完成后,系统约束由“栽插一致性”转向“通行稳定性”,并在田间管理环节体现为对垄体结构与行间可通行性的要求。

表 4 国内外典型甘薯移栽装备
Tab. 4 Typical sweet potato transplanting equipment in China and abroad

类型	代表机具/方案	供苗与栽植方式	关键技术要点	适用性与主要约束
国外半自动牵引式	美国 Mechanical 公司半自动链夹式甘薯移栽机	人工投苗+机具开沟覆土镇压	以组织替代自动取苗,强调深度/株距一致	仍依赖人工与熟练度
国外小型自走/步行式	日本小型专用/通用移栽机	苗盒/苗带预整理+夹持/输送斜插(多为覆膜)	高度调节、轨迹约束、膜面开孔协同	幅宽有限、设备成本高、对预整理要求高
国内复式作业型	旋耕起垄复式移栽机	人工喂苗+栽植器栽插(与起垄同步)	多工序耦合、对行边界同步固化	自动取苗未解决,受喂苗节拍约束
国内覆膜专用型	膜上移栽机	膜面开孔+夹持/栽植	膜面边界约束、定高栽插	对垄膜一致性与苗长区间敏感
国内自动化探索型	苗带/苗盘自动移栽样机	苗带连续供苗+切取/顶出+节拍栽植	通过载体“结构化供苗”,收敛取苗自由度	苗带成本、耐久与田间可靠性待验证
国内姿态专用型	横向移栽机	人工喂苗+横向浅埋	多节浅埋、姿态可控	结构复杂、速度上限受限

2.5 田间管理机械化装备与技术

甘薯田间管理主要包括中耕除草与培土、水肥管理以及病虫害防控。机械化程度受 3 类工程条件约束:高垄垄沟通行与轮距/离地间隙匹配,冠层封闭导致株间作业干扰,以及根区投入品条带施用对位置与深度的要求。该环节可借鉴行作作物通用平台,但要稳定传递“作业质量-群体整齐度-后续通行性”,需围绕垄体断面、入土边界与喷施沉积/漂移等关键参数进行适配与固化(图 16~18)^[64-65]。田间管理在提升投入品效率的同时,应维持垄体结构与行间可通行性,以保证收获阶段限深稳定、物料流连续与有效作业率。



图 16 甘薯中耕培土除草机

Fig. 16 Sweet potato intertillage ridging weeder

国内路径以“通用平台改型+关键部件组合”为主,中耕培土除草通过窄轮距(或跨垄)与松土铲/翼铲-除草铲-培土器的模块化配置,实现垄沟通行与覆土边界稳定。作业质量对土壤含水率、入土深度与作业速度敏感,参数偏离易出现垄侧塌陷、伤苗或培土不足,从而影响后续通行与田间一致



图 17 传感-处方-执行闭环水肥调控架构示意
Fig. 17 Schematic of sensor - prescription - execution closed-loop water and fertilizer regulation architecture



图 18 田间管理机器人
Fig. 18 Field management robot

性^[66]。水肥方面,滴灌带与施肥装置、垄间追肥机等硬件覆盖较充分,但处方生成规则、分区供给精度与“传感-决策-执行”闭环标定流程仍相对薄弱,变量灌溉/变量施肥以示范应用为主^[67]。植保方面形成地面喷施与无人机喷施并行格局,无人机在冠层封闭期具有通行优势^[66-69]。国外发展更强调株间精准作业与作业过程数字化管理。对行间管理,基于视觉/光谱作物行识

别与自动对行技术可支撑机械除草、靶向喷施与作业质量监测在高地隙平台上集成,提高株间作业精度并降低非靶标扰动^[70-72]。对水肥管理,以土壤墒情、气象与作物生长信息为输入,形成分区供给方案,并通过作业记录与产量/长势反馈对参数进行校核,突出“施用位置与剂量的可控、可核

查”^[73-74]。植保则将监测、处方与变量施药组织成规范化作业流程,并以漂移测试与作业规范约束外逸风险,实现剂量匹配与环境风险控制的工程化管理^[75-76]。总体差异已由“是否具备机具”转向“作业指标、参数控制与作业记录”系统化水平(表5)。

表 5 甘薯田间管理关键环节国内外机械化路径与装备

作业环节	国内主流路径与装备	国外先进路径与装备	关键差异
中耕除草与培土	通用中耕机改型;窄轮距或跨垄;松土铲-除草铲-培土器组合	视觉/光谱识别驱动作物行定位;自动对行+机械除草/靶向喷施集成平台	国内以“通过性与作业完成”为主;国外强化“行识别-对行控制-株间精细作业-质量监测”闭环
水肥调控	滴灌带+施肥装置、追肥机;分区与变量控制多处示范	传感器/模型驱动处方;分区供给与执行回传校正成熟	国内短板主要在处方生成与执行精度、闭环标定流程;国外强调可执行与可验证
病虫害绿色防控	地面喷施与无人机并行;以覆盖完成为主	监测-处方-变量施药链条;漂移与剂量匹配标准化约束	核心从“覆盖”转向“有效沉积-漂移约束-剂量匹配”,国外在标准与闭环方面更系统

2.6 收获机械化装备与技术

甘薯收获由秧蔓清理、块根挖掘、薯土/杂分离及输送集料等环节构成。受块根表皮脆弱、入土深度不一、秧蔓缠绕及黏附性土壤影响,损伤、漏挖及含杂相互制约。影响作业质量的关键因素包括:对行与限深稳定性决定挖掘部件与块根的接触概率,分离清选单元的激励强度及卸料落差影响损伤与含杂程度,物料流连续性与转运协调性决定堵塞发生及作业率^[77-79]。收获阶段损伤与漏挖受前序环节塑造的作业边界约束影响:行距与对行基准改变块根相对位置,垄体稳定性与通行条件影响限深控制,秧蔓清理质量决定缠绕与堵塞。区域土壤与含水率条件对收获的损伤与遗漏贡献显著差异,砂质土因颗粒磨蚀与表皮脆弱性使损伤敏感,黏重土在高含水率下易产生附土与堵塞,干旱硬土条件下冲击损伤增强,需优化参数匹配与缓冲控制^[78-80]。收获技术路线可概括为秧蔓处理、分段收获与联合收获3类。

2.6.1 秧蔓处理

秧蔓处理旨在尽量降低垄体扰动与触薯风险的前提下实现秧蔓快速清理,为挖掘与分离环节提供稳定的作业边界,并减少缠绕堵塞风险^[80-81]。国内装备已形成步行式小型粉碎还田、悬挂式单/双垄碎蔓还田以及自走式藤蔓回收等类型(图19)。典型

作业过程为拢蔓/挑蔓-切断-粉碎-抛撒或集料,主要控制参数集中于刀辊线速度、离地间隙、前进速度以及导向与防缠绕结构的匹配^[82-87]。国外多垄粉碎与收集机具在作业量与可靠性方面表现突出,但在垄作贴地漏割控制、匍匐缠绕形态适配以及地头转运组织方面仍受到作业条件与配套体系的制约(图20)^[88-90]。秧蔓处理装备类型及技术要点见表6。



图 19 国内秧蔓处理机型

Fig. 19 Seedling vine processing model in China



图 20 国外秧蔓处理机型

Fig. 20 Seedling vine processing model in abroad

表 6 甘薯秧蔓处理装备类型与技术要点

类型	关键作业链	关键参数/要点	适用性与局限
步行式粉碎还田	拢蔓-切断-粉碎-抛撒	离地间隙与导向;低速稳定	机动性强;效率受幅宽与人工随行限制
悬挂式粉碎还田	挑蔓-切断-粉碎-抛撒	刀辊与前进速度匹配;防缠绕结构	幅宽大;对功率与地头条件要求较高
藤蔓回收/青贮	捡拾-切碎-集箱捆	转运节拍与容积匹配;堵塞控制	资源化价值明确;连续作业受物流组织约束
多垄粉碎/收集	切割-粉碎-收集/抛撒	高通量下防缠绕与落料均匀性	效率高;贴地漏割与匍匐缠绕适配仍需改进

2.6.2 分段收获

分段收获通常采用“秧蔓处理-挖掘起薯-人工/半机械拣拾”作业流程,通过较低的机具集成度获得较强的地块与土壤适应性,在丘陵缓坡、小地块及劳动力相对充足地区仍具应用基础^[91-92]。国内常见机型包括挖掘犁、栅条/振动式挖掘机、升运链式挖掘机等(图 21、22),形成从“简易起薯”到“挖掘-初步清土”的不同配置层级。分段收获作业质量主要受 3 类因素控制:挖掘部件的入土角、作业深度与限深稳定性影响触薯与漏挖风险;栅条或升运链的线速度、振动强度及过渡落差共同影响清土效果;土壤含水率与黏附性影响夹土、堵塞与清土难度^[93-94]。小型牵引或手扶配套挖掘机可降低劳动强度,但受幅宽、对行与限深稳定性限制,作业质量对工况波动更敏感。甘薯分段收获装备类型与技术

要点见表 7。



图 21 挖掘犁
Fig. 21 Excavating plows



图 22 甘薯分段式收获机
Fig. 22 Sweet potato sectional harvester

表 7 甘薯分段收获装备类型与技术要点
Tab.7 Types of sweet potato segmental harvesting equipment and technical key points

类型	分离机理	适用条件	优势	主要局限
挖掘犁(简易)	仅挖掘抛出	小规模、土壤较松	结构简单、成本最低	依赖人工捡拾、含土高
栅条/振动挖掘机	振动激励+栅条分离	砂壤土/轻黏土	抖土减负、效率较高	黏重土易粘附堵塞
升运链式挖掘机	提升+抖落+分离	中等规模、田块较规整	物流连续、减轻人工强度	线速度与落差不当易损伤
手扶牵引挖掘机	简化挖掘+有限分离	坡地/小田块	可进入性好、投资低	作业稳定性与效率受限

2.6.3 联合收获

联合收获以单机一次完成挖掘-分离清选-集料/装箱(部分含分级),主要面向规模化与商品化经营,评价指标通常包括破皮/伤薯率、遗漏率、含杂率与有效作业率^[95-96]。欧美牵引式 1~2 行联合收获机(如 Standen、Lockwood 体系)多采用多级杆条升运链配合强制振动/清洁辊实现分离清选,并配置对行与限深调节,适用于标准行距与较规整田块(图 23a、23b))^[97-98];日系小型自走机型侧重机动性与地头通过性,常以“两级挖掘输送+分拣输送”组织作业,但清土与分离能力受结构尺度与功率储备限制(图 23c)^[99]。国内机型呈现轻简型、鲜食低损型与淀粉加工型并行,轻简型成本约束更强且常需人工辅助(图 24a),鲜食型通过柔性接触与低落差卸薯降低伤薯(图 24b),加工型以更高通量、多仓集料与运输衔接提升连续作业能力



图 24 国内甘薯联合收获机
Fig. 24 Sweet potato combined harvester in China

(图 24c)^[100-103];综上所述,作业质量提升依赖限深与对行稳定、分离强度分级配置以及输送/卸料落差控制,并通过前进速度、链速与振动参数匹配形成稳定的作业参数范围。甘薯联合收获装备类型与技术要点见表 8。

3 智能化与信息化赋能甘薯机械化的关键技术与发展趋势

甘薯全程机械化涵盖育苗、起垄、薯尖采收、移栽、田间管理与收获等环节,作业质量受垄形一致性、对行精度、苗源差异性、土壤黏附性与秧蔓缠绕等因素共同影响。近年来,多源传感、自动控制、导航定位与作业数据分析加速融合,使关键环节从“可完成作业”进一步向“质量可量化、参数可调、结果可追溯”提升,并在起垄、移栽与收获等对参数敏感环节体现出稳定的质量增益^[103-105]。



图 23 国外甘薯联合收获机
Fig. 23 Sweet potato combined harvester in abroad

表 8 甘薯联合收获装备类型与技术要点

Tab.8 Types and technical points of sweet potato combined harvesting equipment					
类型	代表机型/方案	核心工艺单元	适用条件	优势	主要局限
牵引式高效联合收获 (欧美)	Standen/Lockwood 等	挖掘铲 + 多级升运链 + 清洁辊 + 装箱/装车	大田块、标准 行距	吞吐量高、质量稳定、自 动化配置成熟	投入高、对田块与道路 配套要求高
小型自走式联合收获 (日系)	1 ~ 2 行自走	挖掘 + 简化分离 + 人 工/半自动分拣	小田块、边界 复杂	机动性强、可进入性好	分离清选能力受结构约 束
国内自走轻简型联合 收获	轻简自走	挖掘 + 简易分离 + 人工 辅助捡拾	中小经营、推 广型	成本低、维护简化	自动化程度有限、连续 性受人工约束
国内商品型低损伤联 合收获	商品薯专用	两段式柔性分离 + 低落 差卸薯 + 集料箱	鲜食基地、品 牌化	损伤/破皮控制能力强	对整地与垄形一致性敏 感
国内加工型联合收获	淀粉加工用	强化碎土清土 + 多仓/ 袋集料 + 高效物流	加工原料基地	连续作业与装运匹配好	对作业组织与运输系统 依赖高

3.1 关键环节在线感知与作业参数闭环调控

智能化在甘薯生产中优先应用对象集中在质量指标敏感且作业参数可在线调节的作业环节。育苗阶段已通过温湿度、光照与基质含水率监测实现灌溉与环境调控;起垄阶段基于北斗高程、测距与姿态信息开展垄高、垄距偏差监测,并与限深仿形及成垄部件联动以提高断面一致性(图 25);移栽阶段围绕取苗-定向-入土轨迹-株距过程,引入视觉识别与力/转矩反馈约束夹持力与释放时序,降低伤苗与漏栽;收获阶段在挖掘深度、升运链速、振动参数与卸薯落差等关键参数之间协同调节,以适应土壤类型与含水率变化,兼顾低损伤、低含杂与低堵塞,并通过后端集薯高度自适应装置抑制卸薯冲击与损伤。各环节的感知信息、调控参数与作业质量指标按可测-可调-可验收的逻辑归纳(表 9)^[106-108]。



图 25 北斗辅助自动导航在起垄作业中应用示例
Fig.25 Application example of BeiDou-assisted auto-guidance in ridging operation

表 9 甘薯全程机械化关键环节感知信息与调控参数

Tab.9 Perception inputs and control parameters for key links of sweet potato mechanization				
环节	主要感知信息	典型传感器	调控参数	作业质量指标
育苗	温湿度、光照、基质含水率	温湿度/光照/水分探头	通风、补光、灌溉	出苗率、苗齐度、壮苗
起垄	垄高/垄距偏差、姿态	北斗、激光测距	限深/仿形、成垄部件参数	垄高变异系数、垄距偏差、
薯尖采收	冠层高度/密度、载荷	视觉、位移/载荷	割台高度、刀具转速	切割一致性、漏割率
移栽	苗长/姿态、供苗状态	视觉/深度学习、力/转矩	夹持位置/夹持力、释放时序、栽植轨迹	栽植合格率、株距变异系数、伤苗率/漏栽率
田间管理	作物行/杂草、土壤水肥	多光谱/视觉、土壤墒情	中耕深度、变量施肥处方	防效、减药率、水肥利用率
收获	块根分布深度、土壤阻力、振动冲击、附土/损伤	位移/牵引力/加速度、视觉	挖掘深度、链速/振幅、落差	破皮/损伤率、遗漏率、含杂率

3.2 数据采集、过程监测与参数优化决策

智能化的核心在于实现作业过程数据化、质量指标化与参数处方化。机载控制器与导航终端可自动采集位移、速度、幅宽、重叠率、能耗、载荷谱与振动冲击等过程数据,并与地块、土壤、品种及农艺投入信息关联,在 FMIS 平台上形成作业质量验收与

成本核算依据;结合载荷与振动特征还可开展预测性维护,降低关键季节停机风险;在参数优化层面,利用历史作业数据拟合环境条件参数组合质量指标的响应关系,可为起垄断面一致性、移栽质量、收获分离强度与落差控制等提供处方图,并将处方图回传至作业终端形成闭环(表 10)^[109-111]。

表 10 甘薯机械化作业关键数据类型及其决策应用

Tab. 10 Key data types and their decision-making applications for sweet potato mechanized operations

数据类型	主要来源	典型指标	主要用途
作业过程	机载控制器/导航	轨迹、速度、幅宽、覆盖率、重叠率	质量验收、效率评估、路径优化
动力与负载	动力总成/牵引	功率、油耗/电耗、牵引阻力、载荷谱	能耗核算、参数匹配、维护决策
作业质量	传感/视觉	垄高偏差、栽植合格率、破损率、含杂率	在线调参、稳定性评价
土壤与作物	传感/遥感/巡检	墒情、养分、冠层指数、杂草密度	变量管理、作业窗口识别
产量与品质	收获/产后线	商品率、规格分布、损伤等级	品种与模式评价、收获策略优化

3.3 收获-转运-分级加工一体化智能化路径

全程机械化的智能化效益,最终需要在收获—地头转运—分级加工环节形成可核验的质量闭环。前端育苗、起垄、移栽与田间管理所固化的垄形边界,决定了收获环节对行、限深及分离强度等参数的可控区间,因此,收获端宜以自动导航与多源传感为基础,将对行、挖掘深度、分离强度、输送速度与卸薯落差等关键作业参数进行联动调控,以稳定约束破皮/损伤、遗漏与含杂等作业质量指标(图 26)。收获后品质保持不仅受机内流程影响,地头转运是二次损伤的敏感环节,应通过低振动输送、短距离自主搬运与载荷状态监测,降低碰撞与挤压风险,并实现作业数据与转运数据的关联记录(图 27)^[112-114]。综上所述,甘薯机械化后段智能化应以跨环节质量指标体系与数据接口标准化为核心,实现质量形成-质量保持-质量分级利用的闭环验证,从而为规模化与品质化生产提供可重复、可对标的技术支撑。



图 26 德国 Schmiede 公司智能化甘薯收获机

Fig. 26 Intelligent sweet potato harvester from Germany’s Schmiede company



图 27 智能化协同作业

Fig. 27 Intelligent collaborative operation

4 中国甘薯全程机械化发展挑战与未来趋势

4.1 主要挑战与制约因素

尽管甘薯机械化技术持续进步,但在中国等发展中国家,其推广仍面临多重制约。

(1)地形与田块条件限制。甘薯产区多位于丘陵山区与坡耕地,田块细碎、田间道路与地头空间不足等生产条件并非装备缺陷本身,但会通过限制通行边界与回转条件、抬升转场与掉头等非作业时间占比,显著降低单位时间有效作业能力,从而表现为机械化作业受限。坡度与微地形起伏进一步加剧机具姿态波动与对行偏差,削弱限深一致性,提升漏挖、堵塞与作业中断风险;土壤类型差异对上述约束具有放大作用,沙壤土作业阻力与黏附相对较低,而黏重土或山地土壤在含水率偏高时入土阻力与黏附增强、清土难度上升,导致损伤与含杂风险同步增加。类似问题在美国、日本等小田块区域亦需依靠小型化与专用化机具缓释,但中国地形与地块格局更为复杂,区域化适配与配套组织要求更高。

(2)种植模式与标准化不足。甘薯种植模式多样,南方地区普遍存在间作套种,栽培方式(如垄作、平畦、覆膜等)与种植密度差异显著,导致机械难以通用。农艺不统一使得“一机多用”设计困难,机具作业效率与效果受限。相比之下,机械化水平高的国家普遍推行标准化种植(如固定垄距、规范密度与适宜品种),农机农艺融合度高。中国亟需推动品种、行距、栽培模式的规范化,为机械化奠定基础。

(3)装备适配性与可靠性不足。甘薯表皮薄、薯形多样,机械挖掘与输送易导致损伤或断裂,降低商品率。现有装备在降低损伤率方面仍需优化,需开发可调节挖掘机构与柔性夹持装置,以适应不同土质与薯形。此外,对丘陵山区小型机具动力不足、通过性差,大型机具在黏重土壤中功耗高、磨损快,整体可靠性与适应性亟待提升。国内多数新型机具尚处于试验阶段,区域适应性验证不足,影响农户使用信心。

(4) 经济与社会因素制约。农户经营规模小、购机能力有限,甘薯专用机械投入意愿低。同时,农机制造业长期聚焦粮食作物,甘薯机具研发投入不足,产品种类少、可靠性低、服务体系薄弱。尽管全国已有约 20 万家农机服务组织,但针对甘薯的专业化服务仍显不足,尤其在丘陵山区,“有机难用、有地无机”矛盾突出。需通过政策扶持与新型主体培育,破解机械化“最后一公里”难题。

4.2 未来发展趋势与展望

为应对上述挑战,甘薯机械化将向智能化、标准化与社会化服务协同方向演进,重点聚焦以下领域:

(1) 丘陵山区适用机具研发。围绕坡地与小块作业的通行、安全与稳定作业需求,优先发展轻量化、自走化与履带化机具,并以模块化配置实现起垄、栽植、施肥等环节的柔性组合,提高机具年利用率与跨地块适配能力。在推广路径上,可与国家推动的大马力高端智能与丘陵山区适用小型机具协同发展的布局对接,形成试验验证-示范应用-规模扩散的递进机制,并和农机购置与应用补贴的机具目录、试点示范项目联动,降低首台套使用门槛与试用风险。

(2) 智能化作业系统构建。以北斗定位导航、作业状态感知与参数自适应调节为主线,推进移栽对行、收获限深、输送分离强度等关键参数的在线调节与一致性控制,减少对熟练劳动力的依赖并提升作业质量稳定性。应用层面应优先落在可量化、可核验的场景,如对行偏差、限深误差、作业漏失与伤薯率等指标在线监测与作业记录,实现质量追溯与跨区域作业的参数复用。

(3) 农机农艺融合与标准化推进。以适宜机收品种性状(块根集中、表皮耐磨、薯形相对规整)与关键农艺参数(垄距、垄形、膜面尺度、栽插姿态与密度)为抓手,形成可推广的区域主推参数区间与配套规程;同时将农田宜机化改造作为前提性条件,通过田块整治、田间道路与地头空间改善,降低作业转运与掉头时间占比,提升可持续作业能力与跨环节配套效率。

(4) 社会化服务体系完善。面向农户规模偏小、专用机具投资回收期长的现实约束,机械化扩展更可能以“购买作业服务”而非“自购机具”为主要

增量来源。已有农户调查显示,收获与整地等环节的服务需求最为迫切,但有效需求水平受土地细碎化与高标准农田建设等条件显著影响,提示服务供给需要与地块条件改善、作业质量承诺与价格机制同步推进。政策上可通过购机补贴与作业补助组合设计,引导合作社与服务组织配置甘薯专用机具并开展跨区作业托管;同时以培训与标准化作业规范提高服务可得性与可复制性,降低小规模-低意愿-低供给的循环。

综上,甘薯机械化发展需以“小机具、大体系,智能化、全流程”为路径,通过技术创新、政策引导与服务协同,逐步提升机械化率,为实现甘薯产业节本增效与可持续发展提供支撑。

5 总结与展望

甘薯全程机械化是目前农业机械化进程亟待突破的关键环节。综合分析全球发展态势可见,美国、日本等发达国家凭借规模化种植与先进装备技术,已全面实现甘薯生产机械化,建立高效成熟的作业体系;而以中国为代表的主要种植区,甘薯机械化仍处于初步发展阶段,整体机械化率偏低。近年来,中国在甘薯育苗移栽、联合收获等关键环节装备研发取得显著进展,涌现出一批具备自主知识产权的创新机型。然而,受丘陵山区地形复杂、种植模式多样、农艺标准化程度低以及机具区域适应性不足等多重因素制约,甘薯机械化推广仍面临严峻挑战。

为推动甘薯生产从以人畜力为主向全面机械化转型,需从技术研发与推广应用 2 方面协同推进:一方面,应重点加强适应不同生态区域的小型化、智能化专用机具研发与推广,着力提升机械作业效率与作业质量;另一方面,应积极推进农机农艺深度融合,推动生产标准化体系建设,并完善覆盖主产区的社会化服务体系,为机械化推广应用创造有利条件。未来,在政策引导、科技支撑与产业协同的多元驱动下,甘薯全程机械化将进入加速发展期,机械化水平有望持续提升,逐步迈向全面、高效、智能发展新阶段。甘薯机械化的全面实现,将有效降低生产成本、提升产业效益,为保障粮食安全与推进农业现代化提供重要支撑。

参 考 文 献

[1] Mohammad K A. A comprehensive review of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.): revisiting the associated health benefits[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 115: 512 - 529.

[2] Laveriano-Santos E, López-Yerena A, Jaime-Rodríguez C, et al. Sweet potato is not simply an abundant food crop: a comprehensive review of its phytochemical constituents, biological activities, and the effects of processing[J]. Antioxidants, 2022, 11(9):1648.

- [3] François M T, Maryam A S M A, Ahmed M S A A, et al. Study on sweet potatoes in relation to nutritional profile against worst invasive plant (*Prosopis juliflora*) under arid climate of Fujairah[J]. Scientific Reports, 2025, 15:33564.
- [4] Guo Ke, Liu Shuai, Liu Xingxun, et al. Multi-scale structural and functional enhancement of starch in sweet potato anthocyanin biosynthesis-deficient mutant: insights into mechanisms and food applications [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 318(Part 1):144877.
- [5] Yang Jiali, Jiang Xia, Zhang Rong, et al. Carbohydrate profiling of six purple-fleshed sweetpotatoes at different harvest stages [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 145:107770.
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Database sweet potato[EB/OL]. [2025-10-15]. <https://www.fao.org/faostat/zh/#data/QCL>.
- [7] 王千翼. 甘薯横向水平移栽机的设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2023.
Wang Qianyi. Design and experiment of a lateral horizontal sweet potato transplanter[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [8] 胡良龙, 胡志超, 谢一芝, 等. 我国甘薯生产机械化技术路线研究[J]. 中国农机化, 2011,32(6):20-25.
Hu Lianglong, Hu Zhichao, Xie Yizhi, et al. Technical roadmap for mechanization of sweet potato production in China[J]. China Agricultural Mechanization, 2011,32(6):20-25. (in Chinese)
- [9] Yan Wei, Zhang Wenyi, Hu Minjuan, et al. Design and experiment of compound transplanter for sweet potato seedling belt[J]. Agriculture, 2024, 14(10):1738.
- [10] Li Hui, He Tengfei, Liu Hu, et al. Efficacy of a sweet potato transplanting machine on labor saving and yield performance [J]. Agriculture, 2022, 12(8):1184.
- [11] 马标, 胡良龙, 许良元, 等. 国内甘薯种植及其生产机械[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(1):42-46.
Ma Biao, Hu Lianglong, Xu Liangyuan, et al. Sweet potato planting and production machinery in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(1):42-46. (in Chinese)
- [12] Liu Hangjin, Shelly H G, Craig Y, et al. Predicting sweetpotato traits using machine learning: impact of environmental and agronomic factors on shape and size[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 225:109215.
- [13] 申海洋, 王公仆, 胡良龙, 等. 4UZL-1型甘薯联合收获机刮板链提升机构设计与台架试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(9):7-17,121.
Shen Haiyang, Wang Gongpu, Hu Lianglong, et al. Design and bench test of the scraper-chain lifting mechanism of 4UZL-1 sweet potato combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(9):7-17, 121. (in Chinese)
- [14] 沈公威, 王公仆, 胡良龙, 等. 甘薯菜用茎尖收获装置发展概况与展望[J]. 中国农机化学报,2019,40(3):26-32.
Shen Gongwei, Wang Gongpu, Hu Lianglong, et al. Development status and prospects of harvesting devices for vegetable sweet potato shoot tips[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(3):26-32. (in Chinese)
- [15] Shen Haiyang, Wang Bing, Wang Gongpu, et al. Research and optimization of the hand-over lifting mechanism of a sweet potato combine harvester based on EDEM[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(5):71-79.
- [16] Bao Guocheng, Wang Gongpu, Wang Bing, et al. Drop impact characteristics and damage mechanism of sweet potato tubers during harvest[J]. PLOS ONE, 2021, 16(8):e0255856.
- [17] 胡良龙, 田立佳, 计福来, 等. 甘薯生产机械化作业模式研究[J]. 中国农机化学报,2014,35(5):165-168.
Hu Lianglong, Tian Lijia, Ji Fulai, et al. Study on mechanized operation modes for sweet potato production[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(5):165-168. (in Chinese)
- [18] 王公仆, 胡良龙, 胡志超, 等. 甘薯机械移栽浇水作业模式简析[J]. 江苏农业科学,2018,46(8):212-215.
Wang Gongpu, Hu Lianglong, Hu Zhichao, et al. Brief analysis of an integrated mechanized operation mode of sweet potato transplanting and watering[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(8):212-215. (in Chinese)
- [19] 朱倩, 王公仆, 张万枝, 等. 甘薯种植机械化关键技术与装备研究进展[J]. 中国农机化学报,2025,46(7):36-42.
Zhu Qian, Wang Gongpu, Zhang Wanzhi, et al. Research progress on key technologies and equipment for mechanized sweet potato planting[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(7):36-42. (in Chinese)
- [20] 申海洋. 甘薯联合收获弧栅交接刮板链输送机机构研究与优化[D]. 北京:中国农业科学院,2021.
Shen Haiyang. Study and optimization of the arc-grate handover scraper-chain conveying mechanism for a sweet potato combine harvester[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021. (in Chinese)
- [21] Peng Jiwen, Wang Yemeng, Peng Baoliang, et al. Research status and prospects of sweet potato harvesters' conveying and separation mechanisms[J]. Sustainability, 2024, 16(24):10957.
- [22] 胡良龙, 田立佳, 计福来, 等. 国内甘薯生产收获机械化制因思索与探讨[J]. 中国农机化, 2011,32(3):16-18.
Hu Lianglong, Tian Lijia, Ji Fulai, et al. Constraints and considerations for mechanization of sweet potato harvesting in China [J]. China Agricultural Mechanization, 2011,32(3):16-18. (in Chinese)
- [23] 王欣, 李强, 曹清河, 等. 中国甘薯产业和种业发展现状与未来展望[J]. 中国农业科学, 2021, 54(3):483-492.
Wang Xin, Li Qiang, Cao Qinghe, et al. Current status and future prospects of China's sweet potato industry and seed sector [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3):483-492. (in Chinese)

- [24] 于晓旭, 赵匀, 陈宝成, 等. 移栽机械发展现状与展望[J]. 农业机械学报, 2014, 45(8): 44–53.
Yu Xiaoxu, Zhao Yun, Chen Baocheng, et al. Current status and prospects of transplanting machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 44–53. (in Chinese)
- [25] 王冰, 胡志超, 胡良龙, 等. 甘薯联合收获机的研究现状及发展[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(4): 11–16.
Wang Bing, Hu Zhichao, Hu Lianglong, et al. Research status and development of sweet potato combine harvesters[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(4): 11–16. (in Chinese)
- [26] 申海洋, 胡良龙, 王冰, 等. 薯类收获提升输送装置研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(5): 17–25.
Shen Haiyang, Hu Lianglong, Wang Bing, et al. Research status and prospects of lifting and conveying devices for tuber crop harvesters[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(5): 17–25. (in Chinese)
- [27] 胡良龙, 王冰, 王公仆, 等. 2ZGF-2型甘薯复式栽植机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 8–16.
Hu Lianglong, Wang Bing, Wang Gongpu, et al. Design and experiment of type 2ZGF-2 duplex sweet potato transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(10): 8–16. (in Chinese)
- [28] 吴旋, 申屠留芳, 刘涵, 等. 甘薯盘夹式移栽机设计与试验[J]. 农机化研究, 2022, 44(11): 107–112.
Wu Xuan, Shentu Liufang, Liu Han, et al. Design and experiment of a disc-clamp sweet potato transplanter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(11): 107–112. (in Chinese)
- [29] 严伟. 甘薯苗带式移栽关键技术与装备研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2024.
Yan Wei. Key technologies and equipment for seedling-belt transplanting of sweet potato[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2024. (in Chinese)
- [30] 王佳. 甘薯垄芯均匀施肥施药装备设计与试验优化[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022.
Wang Jia. Design and experimental optimization of equipment for uniform fertilization and pesticide application within sweet potato ridges[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022. (in Chinese)
- [31] Christopher A C, Jeffrey A D, Jorge A A, et al. Sweetpotato viruses: 15 years of progress on understanding and managing complex diseases[J]. Plant Disease, 2012, 96(2): 168–185.
- [32] Clark C A, Ferrin D M, Smith T P, et al. Compendium of sweetpotato diseases, pests, and disorders[M]. St. Paul: APS Press, 2013.
- [33] 高健, 张晓苏, 陈新予. 基于EDEM的甘薯起垄整形机镇压整形装置设计与试验[J]. 农业工程, 2024, 14(11): 95–99.
Gao Jian, Zhang Xiaosu, Chen Xinyu. Design and test of the compaction and shaping device of a sweet potato ridging and shaping machine based on EDEM[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(11): 95–99. (in Chinese)
- [34] 史宇亮, 陈新予, 陈明东, 等. 甘薯起垄整形机犁铧式开沟起垄装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 16–25.
Shi Yuliang, Chen Xinyu, Chen Mingdong, et al. Design and experiment on ploughshare furrowing ridging device of sweet potato ridging shaping machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 16–25. (in Chinese)
- [35] 胡金钊, 张文毅, 严伟, 等. 甘薯双垄垄芯弧形精准施肥施药机设计与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(12): 59–64.
Hu Jinzhao, Zhang Wenyi, Yan Wei, et al. Design and experiment of a double-ridge, ridge-core arc-type precision fertilization and pesticide application machine for sweet potato[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(12): 59–64. (in Chinese)
- [36] 胡金钊. 甘薯垄芯弧形施肥施药装备关键部件设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
Hu Jinzhao. Design and experiment of key components for ridge-core arc-type fertilization and pesticide application equipment for sweet potato[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020. (in Chinese)
- [37] 靳乐乐, 乔匀周, 董宝娣, 等. 起垄覆膜栽培技术的增产增效作用与发展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(9): 1364–1374.
Jin Lele, Qiao Yunzhou, Dong Baodi, et al. Crop yield increasing and efficiency improving effects and development of technology of ridge-furrow cultivation with plastic film mulching[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(9): 1364–1374. (in Chinese)
- [38] Nkebiwe P M, Weinmann M, Bar-Tal A, et al. Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: a review and meta-analysis[J]. Field Crops Research, 2016, 196: 389–401.
- [39] 徐少华, 秦广明, 沈丹波. 一种新型叶茎类蔬菜收获机的研制[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(1): 18–21.
Xu Shaohua, Qin Guangming, Shen Danbo. Development of a novel leafy-stem vegetable harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(1): 18–21. (in Chinese)
- [40] 沈公威, 王公仆, 胡良龙, 等. 甘薯茎尖收获机研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 46–55.
Shen Gongwei, Wang Gongpu, Hu Lianglong, et al. Development of a sweet potato shoot-tip harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 46–55. (in Chinese)
- [41] 吴稳, 胡良龙, 王公仆, 等. 电动叶菜多功能采收机切割机构设计与仿真优化[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(4): 7–16, 24.

- Wu Wen, Hu Lianglong, Wang Gongpu, et al. Design and simulation optimization of the cutting mechanism of an electric multifunction leafy-vegetable harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(4): 7–16, 24. (in Chinese)
- [42] 沈公威, 王公仆, 胡良龙, 等. 基于 ANSYS 的菜用甘薯茎尖切割有限元分析与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(4): 13–18.
- Shen Gongwei, Wang Gongpu, Hu Lianglong, et al. Finite element analysis and experiment of sweet potato shoot-tip cutting based on ANSYS[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(4): 13–18. (in Chinese)
- [43] Chen W, Wang G, Hu L, et al. PID-based design of automatic control system for a travel speed of the 4UM–120D electric leafy vegetable harvester[J]. Sustainability, 2022, 14(21): 14066.
- [44] Chen W, Wang G, Hu L, et al. Research on the control strategy of leafy vegetable harvester travel speed automatic control system[J]. AgriEngineering, 2022, 4(4): 801–825.
- [45] 赵大为, 高占文. 国内外甘薯茎叶处理收获机的发展研究[J]. 农业科技与装备, 2012(6): 19–20.
- Zhao Dawei, Gao Zhanwen. Development of sweet potato vine/leaves handling and harvesting machines at home and abroad [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2012(6): 19–20. (in Chinese)
- [46] 陈文明, 胡良龙, 袁建宁, 等. 国内蔬菜收获机自动控制技术研究现状及展望[J]. 智能化农业装备学报, 2021, 2(2): 57–63.
- Chen Wenming, Hu Lianglong, Yuan Jianning, et al. Research status and prospects of automatic control technologies for vegetable harvesters[J]. Journal of Intelligent Agricultural Equipment, 2021, 2(2): 57–63. (in Chinese)
- [47] 武广伟, 王瑞雪, 李鑫, 等. 国内外甘薯移栽技术装备研究现状及展望[J]. 农机化研究, 2024, 46(7): 1–8.
- Wu Guangwei, Wang Ruixue, Li Xin, et al. Research status and prospects of sweet potato transplanting technologies and equipment at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(7): 1–8. (in Chinese)
- [48] 张秀平, 徐志杰, 高清华. 国内外甘薯移栽机械研究现状及展望[J]. 农业工程, 2024, 14(9): 12–18.
- Zhang Xiuping, Xu Zhijie, Gao Qinghai. Research status and prospects of sweet potato transplanters at home and abroad[J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(9): 12–18. (in Chinese)
- [49] 严伟, 张文毅, 胡敏娟, 等. 国内外甘薯种植机械化研究现状及展望[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(2): 12–16.
- Yan Wei, Zhang Wenyi, Hu Minjuan, et al. Present situation of research and expectation on plant mechanization of sweet potato[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(2): 12–16. (in Chinese)
- [50] Okeke M, Mbah E, Madukwe M, et al. Adoption of improved sweet potato production technologies among small-scale farmers in South East, Nigeria[J]. Asian Journal of Agricultural Extension, Economics & Sociology, 2019, 37(4): 1–13.
- [51] 刘京蕊, 李小龙, 张莉, 等. 2CGF–2 型甘薯移栽机改装滴灌带后作业性能试验[J]. 农业工程, 2019, 9(6): 6–9.
- Liu Jingrui, Li Xiaolong, Zhang Li, et al. Performance test of 2CGF–2 sweet potato transplanter modified with drip tape[J]. Agricultural Engineering, 2019, 9(6): 6–9. (in Chinese)
- [52] Yan W, Hu M, Li K, et al. Design and experiment of horizontal transplanter for sweet potato seedlings[J]. Agriculture, 2022, 12: 675.
- [53] Yoo L N, Su C H. A comparative study on the policy of Korea and Japan for improving upland farming mechanization[J]. Journal of Korean Society of Rural Planning, 2018, 24(4): 89–97.
- [54] 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 experiment of a “boat-bottom-shaped” compound machine for sweet potato ridging, film mulching and transplanting[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [55] 吴彦强, 宫增民, 常广民, 等. 2ZLF–2 甘薯裸苗复式移栽机设计与试验[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(2): 54–57.
- Wu Yanqiang, Gong Zengmin, Chang Guangmin, et al. Design and experiment of 2ZLF–2 compound transplanter for bare-root sweet potato seedlings[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2021, 59(2): 54–57. (in Chinese)
- [56] Li L, Xu Y, Pan Z, et al. Design and experiment of sweet potato up-film transplanting device with a boat-bottom posture[J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1716.
- [57] 李慧, 何腾飞, 刘虎, 等. 丘陵山地甘薯膜上仿形扦插移栽机研制[J]. 农业工程学报, 2023, 39(16): 26–35.
- Li Hui, He Tengfei, Liu Hu, et al. Development of the profiling up-film transplanter for sweet potato in hilly and mountainous region[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(16): 26–35. (in Chinese)
- [58] 穆桂脂, 王千翼, 郑德慧, 等. 甘薯横向水平复式移栽机栽苗装置设计及试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 1–10.
- Mu Guizhi, Wang Qianyi, Zheng Dehui, et al. Design and experiment of the seedling-placing mechanism of a horizontal compound sweet potato transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(24): 1–10. (in Chinese)
- [59] Pan Zhiguo, Li Lin, Chen Dongquan, et al. Design and optimization of a boat-bottom-shaped transplanting device for sweet potato (*Ipomoea batatas*) with low seedling damage rate[J]. Applied Sciences, 2022, 12(6): 2817.
- [60] Sri M, Hwang S J, Nam J S. Experimental safety analysis for transplanting device of the 4-bar link type semi-automatic vegetable transplanter[J]. Agronomy, 2022, 12: 1890.

- [61] 张万枝,李登山,张婷婷,等.甘薯横向水平移栽机刮板式覆土装置设计与试验[J].农业机械学报,2026,57(1):203–214.
Zhang Wanzhi, Li Dengshan, Zhang Tingting, et al. Design and experiment of scraper soil covering device for horizontal transplanter of sweet potato[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(1): 203–214. (in Chinese)
- [62] 武广伟,安晓飞,颜丙新,等.基于预处理苗带甘薯裸苗自动移栽机设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(增刊1):99–109.
Wu Guangwei, An Xiaofei, Yan Bingxin, et al. Design and experiment of automatic transplanter for sweet potato naked seedlings based on pretreatment seedling belt[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 99–109. (in Chinese)
- [63] Liu Zhengduo, Lü Zhaoqin, Zheng Wenxiu, et al. Trajectory control of two-degree-of-freedom sweet potato transplanting robot arm[J]. IEEE Access, 2022(10): 26294–26306.
- [64] 刘京蕊.2TD–S2型中耕除草机作业性能试验[J].农业工程,2020,10(8):29–31.
Liu Jingrui. Performance test of 2TD–S2 intertillage weeder[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(8): 29–31. (in Chinese)
- [65] 何元文,姚俊豪,聂虎子,等.广东省甘薯生产全程机械化现状与思考[J].现代农业装备,2024,45(3):84–87,100.
He Yuanwen, Yao Junhao, Nie Huzi, et al. Current status and reflections on full-process mechanization of sweet potato production in Guangdong Province[J]. Modern Agricultural Equipment, 2024, 45(3): 84–87, 100. (in Chinese)
- [66] 吴堂信.甘薯绿色高质高效栽培技术探讨[J].种子科技,2023,41(13):81–83.
Wu Tangxin. Discussion on green, high-quality and high-efficiency cultivation techniques for sweet potato[J]. Seed Science & Technology, 2023, 41(13): 81–83. (in Chinese)
- [67] 卢鑫.新湖农场滴灌条件下甘薯生长发育规律及关键栽培技术研究[D].石河子:石河子大学,2014.
Lu Xin. Growth and development and key cultivation technologies of sweet potato under drip irrigation in Xinhu Farm[D]. Shihezi: Shihezi University, 2014. (in Chinese)
- [68] 李雪,徐陶,王伟,等.八旋翼植保无人机下洗气流对雾滴运动与分布特性的影响[J].农药学报,2023,25(3):689–699.
Li Xue, Xu Tao, Wang Wei, et al. Effects of downwash airflow from an octocopter plant protection UAV on droplet movement and distribution characteristics[J]. Journal of Pesticide Science, 2023, 25(3): 689–699. (in Chinese)
- [69] Liakos K, Busato P, Moshou D, et al. Machine learning in agriculture: a review[J]. Sensors, 2018, 18(8):2674.
- [70] Qin W C, Xue X Y, Zhang S C, et al. Droplet deposition and control effect of insecticides sprayed with an unmanned aerial vehicle against plant hoppers[J]. Crop Protection, 2016, 85: 79–88.
- [71] He X K. Improving severe pesticide application conditions in North China with unmanned aerial vehicle spraying[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2): 13–20.
- [72] Martin D E, Woldt W E, Latheef M A. Effect of application height and ground speed on spray pattern and droplet spectra from a remotely piloted aerial application system[J]. Drones, 2019, 3(4): 83.
- [73] Gebbers R, Adamchuk V I. Precision agriculture and food security[J]. Science, 2010, 327(5967): 828–831.
- [74] Zhang C, Kovacs J M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review[J]. Precision Agriculture, 2012, 13: 693–712.
- [75] Fountas S, Sørensen C G, Tsiropoulos Z, et al. Farm management information systems: current situation and future perspectives[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 115: 40–50.
- [76] He X K, Bonds J, Herbst A, et al. Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3): 18–30.
- [77] 吴腾,胡良龙,王公仆,等.我国甘薯秧蔓粉碎还田装备发展概况与趋势[J].农机化研究,2017,39(11):239–245,256.
Wu Teng, Hu Lianglong, Wang Gongpu, et al. Development status and trends of sweet potato vine chopping and returning-to-field equipment in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11): 239–245, 256. (in Chinese)
- [78] 代叶,李玲,郑爽,等.甘薯收获设备关键技术研究及展望[J].现代农业装备,2025,46(2):15–24.
Dai Ye, Li Ling, Zheng Shuang, et al. Key technologies for sweet potato harvesting equipment: research progress and prospects[J]. Modern Agricultural Equipment, 2025, 46(2): 15–24. (in Chinese)
- [79] 徐炜杰.基于农机农艺融合的甘薯全程机械化关键作业机具研制[J].南方农机,2025,56(增刊1):65–67.
Xu Weijie. Development of key operating machines for full-process sweet potato mechanization based on machinery-agronomy integration[J]. Southern Agricultural Machinery, 2025, 56(S1): 65–67. (in Chinese)
- [80] 鲍国丞.甘薯联合收获机高度自适应集薯装筐装置设计与优化[D].北京:中国农业科学院,2022.
Bao Guocheng. Design and optimization of a height-adaptive tuber collecting and boxing device for a sweet potato combine harvester[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2022. (in Chinese)
- [81] 吴腾.手扶式甘薯碎蔓还田机设计与优化[D].北京:中国农业科学院,2018.
Wu Teng. Design and optimization of a walk-behind sweet potato vine-chopping and returning machine[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. (in Chinese)

- [82] 杨瑞. 双轴式甘薯打秧还田机设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2022.
Yang Rui. Design and experiment of a double-shaft sweet potato vine shredding and returning machine[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [83] 兰强. 甘薯藤蔓收获机的设计与研究[D]. 南昌:南昌大学,2024.
Lan Qiang. Design and study of a sweet potato vine harvester[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024. (in Chinese)
- [84] 吴腾, 胡良龙, 王公仆, 等. 步行式甘薯碎蔓还田机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 8–17.
Wu Teng, Hu Lianglong, Wang Gongpu, et al. Design and experiment of a walk-behind sweet potato vine-chopping and returning machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(16): 8–17. (in Chinese)
- [85] 李涛, 魏训成, 姜伟, 等. 甘薯秧蔓收获特性试验装置研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 166–175.
Li Tao, Wei Xuncheng, Jiang Wei, et al. Research on test device for harvesting characteristics of sweet potato vines[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 166–175. (in Chinese)
- [86] 崔中凯, 周进, 邸志峰, 等. 4UJ-1700 甘薯杀秧机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(6): 8–12.
Cui Zhongkai, Zhou Jin, Di Zhifeng, et al. Design and experiment of 4UJ-1700 sweet potato vine-killing machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(6): 8–12. (in Chinese)
- [87] 穆桂脂, 辛青青, 玄冠涛, 等. 甘薯秧蔓回收机仿垄切割粉碎抛送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 53–62.
Mu Guizhi, Xin Qingqing, Xuan Guantao, et al. Design and experiment of ridge-simulating cutting, crushing and throwing device for sweet potato vine recycler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 53–62. (in Chinese)
- [88] Mu G, Wang W, Zhang T, et al. Design and experiment with a double-roller sweet potato vine harvester[J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1559.
- [89] 周子涵, 尚书旗, 王东伟, 等. 甘薯秧蔓收获机专用割台设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(12): 26–32.
Zhou Zihan, Shang Shuqi, Wang Dongwei, et al. Design and test of special header for sweet potato vine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(12): 26–32. (in Chinese)
- [90] 吕皓玉. 甘薯秧蔓粉碎回收装置及控制系统设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2021.
Lü Haoyu. Design and experiment of a sweet potato vine chopping and recovery device and its control system[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [91] 杨然兵, 张建, 尚书旗, 等. 甘薯联合收获机二级输送分离装置的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(9): 2708–2722.
Yang Ranbing, Zhang Jian, Shang Shuqi, et al. Design and experiment of a secondary conveying and separation device for sweet potato combine harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(9): 2708–2722. (in Chinese)
- [92] 王二弦. 振动式甘薯收获机的设计与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2022.
Wang Erxian. Design and experiment of a vibrating sweet potato harvester[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [93] 山东金薯王农业机械制造有限公司. 收获犁[EB/OL]. [2025-12-30]. <http://www.jswnyjsx.com/lm8/>.
- [94] 欧镇海, 徐悠仁. 丘陵山区甘薯收获机设计方案的改进[J]. 木工机床, 2023(4): 26–29.
Ou Zhenhai, Xu Youren. Improvement of a sweet potato harvester design scheme for hilly and mountainous areas[J]. Woodworking Machinery, 2023(4): 26–29. (in Chinese)
- [95] 郑刚, 许鹏, 陈栋泉, 等. 沙地鲜食甘薯收获机输送分离装置设计与试验[J]. 中国农业科技导报(中英文), 2025, 27(6): 104–112.
Zheng Gang, Xu Peng, Chen Dongquan, et al. Design and experiment of a conveying and separation device for a sandy-soil fresh sweet potato harvester[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2025, 27(6): 104–112. (in Chinese)
- [96] 陈小冬, 胡志超, 王冰, 等. 单垄单行甘薯联合收获机薯秧分离机构设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 12–21.
Chen Xiaodong, Hu Zhichao, Wang Bing, et al. Design and parameter optimization of the vine-tuber separation mechanism for a single-ridge single-row sweet potato combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(14): 12–21. (in Chinese)
- [97] Standen Engineering Ltd. TSP 1900 sweet potato harvester[EB/OL]. [2025-12-30]. <https://pdf.agriexpo.cn/pdf-en/standen-engineering/tsp-1900-potato-harvester/181538-14692.html>
- [98] Lockwood Manufacturing Company. Sweet potato harvesters (674 series / 674 sweet potato harvester)[EB/OL]. [2025-12-30]. <https://lockwoodmfg.com/sweetpotato/>.
- [99] NIPLO MATSUYAMA Co., Ltd. Mini harvester GRA651: product information[EB/OL]. [2025-12-30]. <https://www.niplo.co.jp/products/komedt.php?id=24>

- [16] Tu S, Cai Y, Liang Y, et al. Tracking and monitoring of individual pig behavior based on YOLO v5 - Byte[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 221: 108997.
- [17] Chen P Y, Chang M C, Hsieh J W, et al. Parallel residual bi-fusion feature pyramid network for accurate single-shot object detection[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2021, 30:9099 - 9111.
- [18] Zhu X, Li X, Wang L, et al. Optimizing black cattle tracking in complex open ranch environments using YOLO v8 embedded multi-camera system[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 91553.
- [19] Tong L, Fang J, Wang X, et al. Research on cattle behavior recognition and multi-object tracking algorithm based on YOLO - BoT[J]. Animals (Basel), 2024, 14(20): 2993.
- [20] 张宏鸣, 汪润, 董佩杰, 等. 基于 DeepSORT 算法的肉牛多目标跟踪方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 248 - 256.
Zhang Hongming, Wang Run, Dong Peijie, et al. Beef cattle multi-target tracking based on DeepSORT algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 248 - 256. (in Chinese)
- [21] Zheng Z, Qin L. Pruned YOLO - Tracker: an efficient multi-cows basic behavior recognition and tracking technique[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213:108172.
- [22] 张稳, 张鑫哲, 傅生辉, 等. 数据驱动的生猪养殖环境分析预警系统设计与实现[J]. 中国农机化学报, 2026, 47(3): 1 - 9.
Zhang Wen, Zhang Xinzhe, Fu Shenghui, et al. Design and implementation of data-driven environment analysis and early warning system for pig breeding[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2026, 47(3): 1 - 9. (in Chinese)
- [23] 董力中, 孟祥宝, 潘明, 等. 基于姿态与时序特征的猪只行为识别方法[J]. 农业工程学报, 2022, 38(5): 148 - 157.
Dong Lizhong, Meng Xiangbao, Pan Ming, et al. Recognizing pig behavior on posture and temporal features using computer vision[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(5): 148 - 157. (in Chinese)
- [24] 陈虹余, 尹令, 杨明, 等. 视觉和传感器融合的多模态猪只行为识别[J]. 农业工程学报, 2025, 41(8): 194 - 203.
Chen Hongyu, Yin Ling, Yang Ming, et al. Multimodal recognition of pig behavior using vision and sensors[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(8): 194 - 203. (in Chinese)
-

(上接第 119 页)

- [100] 鲍国丞, 王公仆, 胡良龙, 等. 甘薯联合收获机高度自适应集薯装置设计与优化[J]. 农业工程学报, 2023, 39(2): 24 - 33.
Bao Guocheng, Wang Gongpu, Hu Lianglong, et al. Design and optimization of a height-adaptive sweet potato collecting device for a combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(2): 24 - 33. (in Chinese)
- [101] 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 stem-tuber separation characteristics and mechanism optimization of a self-propelled sweet potato combine harvester[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [102] Peng J, Shen H, Ding W, et al. Research and analysis of conveyor separation mechanism of light and simple sweet potato combine harvester based on EDEM discrete element method[J]. Computational Particle Mechanics, 2025, 12: 3421 - 3438.
- [103] Wolfert S, Ge L, Verdouw C, et al. Big data in smart farming: a review[J]. Agricultural Systems, 2017, 153: 69 - 80.
- [104] Fountas S, Carli G, Sørensen C G, et al. Farm management information systems: current situation and future perspectives [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 115: 40 - 50.
- [105] Kamilaris A, Prenafeta-Boldú F X. Deep learning in agriculture: a survey[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 147: 70 - 90.
- [106] Bechar A, Vigneault C. Agricultural robots for field operations: concepts and components[J]. Biosystems Engineering, 2016, 149: 94 - 111.
- [107] Bac C W, Van H E J, Hemming J, et al. Harvesting robots for high-value crops: state-of-the-art review and challenges ahead [J]. Journal of Field Robotics, 2014, 31(6): 888 - 911.
- [108] Tzounis A, Katsoulas N, Bartzanas T, et al. Internet of things in agriculture, recent advances and future challenges[J]. Biosystems Engineering, 2017, 164: 31 - 48.
- [109] Badia-Melis R, Mishra P, Ruiz-García L. Food traceability: new trends and recent advances[J]. Food Control, 2015, 57: 393 - 401.
- [110] Kumari L, Narsaiah K, Grewal M K, et al. Application of RFID in agri-food sector[J]. Trends in Food Science & Technology, 2015, 43: 144 - 161.
- [111] Carbajal M, Jones D, Williams C, et al. In-season yield forecasting using multitemporal remote sensing environmental observations and machine learning: applications for sweetpotato in North Carolina, USA[J]. European Journal of Agronomy, 2026, 172: 127818.
- [112] Lowenberg-Deboer J, Erickson B. Setting the record straight on precision agriculture adoption[J]. Agronomy Journal, 2019, 111(4): 1552 - 1569.
- [113] Shafi U, Mumtaz R, García-Nieto J, et al. Precision agriculture techniques and practices: from considerations to applications [J]. Sensors, 2019, 19: 3796.
- [114] Ahmed T, Wijewardane N K, Lu Y, et al. Advancing sweetpotato quality assessment with hyperspectral imaging and explainable artificial intelligence[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 220: 108855.