

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).202011014

马铃薯机械化收获关键技术与装备研究进展*

张兆国, 李彦彬, 王海翼, 张振东, 刘贤存
(昆明理工大学 现代农业工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 中国马铃薯种植面积大、范围广, 人工收获劳动强度大、成本高, 机械化收获是马铃薯产业发展的必然方向, 也是马铃薯全程机械化生产的关键技术环节。马铃薯机械化收获主要包括除秧、挖掘、分离、筛选和输送等关键技术。本文分析国内外马铃薯机械化收获技术的发展现状和特点, 总结马铃薯机械化收获的关键技术; 对国内外马铃薯收获装备的研究现状进行综述, 归纳介绍目前国内外马铃薯收获装备代表机型的性能参数, 指出低损、高效和智能化大型联合马铃薯收获技术与装备是中国马铃薯机械化收获的核心发展方向, 同时也需要加强丘陵山区中小型马铃薯机械化收获技术与装备的研究。

关键词: 农业机械化; 马铃薯; 收获机

中图分类号: S 225.7 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X (2021) 06-1092-12

Research Progress on Key Technology and Equipment of Potato Mechanized Harvest

ZHANG Zhaoguo, LI Yanbin, WANG Haiyi, ZHANG Zhendong, LIU Xiancun
(College of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: In China, potato planting area is large and the scope is wide, and artificial harvest has high labor intensity and high cost. Mechanized harvest is the inevitable direction of potato industry development, and also the key technical link in the whole mechanized potato production. The mechanized potato harvest mainly includes the key technologies such as seedling removal, excavation, separation, screening and transportation. In this paper, the development status and characteristics of potato mechanization harvesting technology at home and abroad were analyzed, and the key technologies in potato mechanization harvesting were summarized. The research status of potato harvesting equipment at home and abroad was summarized and the performance parameters of representative models of potato harvesting equipment at home and abroad were introduced. It is pointed out that low loss, high efficiency and intelligent large-scale combined potato harvesting technology and equipment are the core development direction of potato mechanized harvesting technology and equipment in hilly areas.

Keywords: agricultural mechanization; potato; harvester

马铃薯, 又名洋芋、土豆、香山芋等, 原产于南美洲安第斯山脉, 现已成为全世界必不可少

的粮菜兼用作物^[1-5]。2015年, 农业部提出马铃薯主粮化战略, 马铃薯成为中国第四大主粮作物。

收稿日期: 2020-11-11

修回日期: 2021-05-27

网络首发时间: 2021-11-22 18:27:38

*基金项目: 云南省重大科技专项(2018ZC001-3); 云南省院士(专家)工作站项目(202105AF150030)。
作者简介: 张兆国(1966—), 男, 山东单县人, 博士, 教授, 主要从事农业机械装备设计制造研究。

E-mail: zzg@kust.edu.cn

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20211122.1300.007.html>



2016年,农业部发布《关于推进马铃薯产业开发的指导意见》,将马铃薯主粮化战略和全程机械化提升到国家高度^[6-7]。根据《2020中国农村统计年鉴》,2019年中国马铃薯收获机保有量为8.3万台,马铃薯种植总面积超 $4.67 \times 10^6 \text{ hm}^2$,全国总产量约9000万t,种植面积和产量均占全球的1/4,是全球马铃薯第一生产大国,但马铃薯单位面积产量却低于世界平均水平^[8-10]。

长期以来,受马铃薯种植地理地域差异大、种植模式多样以及技术难题等因素限制,现阶段国内马铃薯收获主要以人工挖掘或分段收获为主,人工劳动强度大,马铃薯联合收获技术与装备较国外发展差距大。随着新型农业经营合作社的发展、农村劳动力结构变化以及劳动力成本的增加,马铃薯种植开始向集约化和产业化方向发展,普及马铃薯机械化收获具有重要意义^[11-15]。

本研究综述了国内外典型马铃薯机械化收获关键技术及装备的研究现状,根据马铃薯收获装备发展阶段、技术先进程度以及收获环节的差异,将现阶段马铃薯收获装备概括为4种类型,并分类阐述目前国内外马铃薯收获装备的代表公司、代表机型以及技术特点。通过研究分析与归纳,对中国马铃薯收获机械的研究与发展趋势作出展望。

1 马铃薯机械化收获关键技术

伤薯率、破皮率和明薯率是衡量马铃薯收获机作业效果的关键指标。马铃薯收获机在挖掘、输送分离、卸料和收集过程中,因马铃薯碰撞、摩擦和挤压而产生破皮和损伤,影响马铃薯收获质量。高新技术的应用提高了马铃薯收获质量,改善了收获作业环境。总结国内外马铃薯收获装备的技术特点,主要包括以下关键机构和技术:挖掘技术、自动对垄深度控制技术、薯土分离输送技术、秧蔓分离技术、自适应高度集薯技术、履带或轮式车辆底盘以及动力匹配相关技术和人机交互技术等^[16-18]。

1.1 挖掘技术

挖掘技术主要是指挖掘铲挖掘减阻技术,挖掘铲分为固定式挖掘铲、驱动式挖掘铲和组合式挖掘铲3类。固定式挖掘铲结构简单,使用较广泛,包括平面铲、曲面铲和槽形铲等,一般通过调节机器尾部的限深轮来调节挖掘铲的入土角

度。驱动式挖掘铲是指在动力驱动下防缠绕装置作旋转或往复运动,包括转盘式和振动式挖掘铲,其中振动式挖掘铲的相关研究和应用较广泛^[16,19-21]。青岛洪珠4U-83型、青岛璞盛4U-85型和德州鸿友4UX-83型等均为基于振动挖掘技术的马铃薯收获机,该机型特点为挖掘铲两侧装有防缠绕装置,可缓解挖掘铲两侧的壅土和缠草问题。组合式挖掘铲一般由挖掘铲、限深装置、切草圆盘和防缠绕装置等组成,多应用于大型马铃薯分段收获机和马铃薯联合收获机,如德国GRIMME VARITRON 270和荷兰Ploeger Oxbo AR-BX等机型。

挖掘铲的技术要求为挖掘深度稳定、减少壅土以及减阻降耗^[22]。樊昱^[23]基于离散元法揭示了马铃薯挖掘铲与土壤—块茎—根系团聚体的耦合作用机理,并通过野猪拱嘴特征曲线的提取,运用仿生和逆向工程技术建立了马铃薯仿生挖掘铲,起到了较好的减阻效果。石林榕等^[24-25]通过对蝼蛄前足胫节爪趾第1趾外轮廓的提取,设计了马铃薯仿生挖掘铲,并基于离散元法进行仿生铲片挖掘土壤数值模拟过程,验证了仿生铲片的减阻效果。

1.2 自动对垄深度控制技术

自动对垄深度控制技术包括自动对垄技术和挖掘深度自动控制技术。自动对垄技术能够使收获机自动适应垄的地形变化,防止挖掘铲因偏离薯垄而损伤薯块。如图1a所示:机械探杆落入垄沟,搭载传感器探测轨迹信息,通过集成液压电控技术调整机器对垄作业,一般应用于牵引式马铃薯联合收获机。挖掘深度自动控制技术集成液压与智能测控,是指根据作业地形起伏变化自动控制挖掘铲的挖掘深度,避免因入土深度太浅造成薯块损伤和漏收。图1b为德国GRIMME公司TerraControl深度控制技术,主要由液压和测控集成的垄顶压力调节器调节挖掘铲深度。

1.3 薯土分离输送技术

薯土分离输送技术主要包括联合式薯土分离输送技术和分段式薯土分离输送技术。

联合式薯土分离输送技术常见于中大型马铃薯联合收获机,各类联合收获机薯土分离输送技术的结构大同小异,一般包括3级及以上输送分离筛和立式环形或垂直环绕式提升装置。一级和二级筛一般为输送分离筛,起薯土分离和破碎土



a) 自动对垄技术
automatic ridge alignment technology



b) TerraControl 深度控制
TerraControl depth control

注: 图片来源 <https://www.grimme.com/cn>。

Note: Figures derived from <https://www.grimme.com/cn>.

图 1 自动对垄深度控制技术

Fig. 1 Automatic ridge depth control technology

袋的作用; 三级及以上输送筛完成对马铃薯转运输送和筛选。提升输送装置的作用是将底层马铃薯提升到上层输送分离筛, 实现进一步分选分级或人工分离除杂, 同时马铃薯分层逆向输送减小了机器轴距, 缩小了机器体积。

分段式薯土分离输送技术一般只有 1~2 级输送分离筛, 部分机型具有集条铺放装置、低位缓冲铺放装置或低位侧铺装置等, 多用于牵引式马铃薯分段收获机, 代表机型有: 中机美诺 1700 型、希森天成 4UQ-165 型、青岛洪珠 4U-170B 型和德沃 4UMF-180 型等。吕金庆等^[26]对东北粘重土壤下马铃薯挖掘分离输送装置进行改进设计, 并通过输送分离装置及薯土混合物的理论分析, 确定影响最佳薯土分离效果的主要因素。魏忠彩等^[27-29]通过设置振动分离段和波浪分离段, 运用“振动输送分离+双重缓冲减速+低位铺放减损”的薯土分离工艺改进了一种马铃薯收获机。

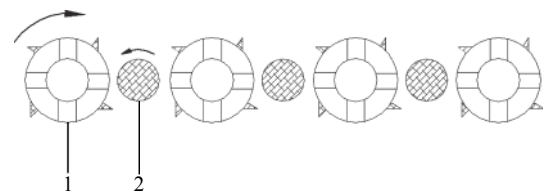
1.4 秧蔓分离技术

秧蔓分离技术包括秧蔓打击技术、对辊交错除秧技术和弹性梳杆摘辊式薯秧分离技术 3 种。

秧蔓打击技术主要由旋转杆条和接触销等组成, 这种方法效果较差, 伤薯率较高, 目前很少采用。

对辊交错除秧技术主要由螺纹去秧辊和光辊等组成(图 2), 一般用于大型联合收获机, 其工作原理为: 螺纹去秧辊表面一般包覆螺旋纹状橡胶柔性材料, 作业时螺旋去秧辊和光辊相互逆向交错旋转, 螺纹去秧辊输送并下拉秧蔓, 在光辊

和螺纹去秧辊的挤压下去除秧蔓^[30]。英国 Standen 公司的 T 和 QM 系列机型以及 ScanStone 公司 Windrower 型收获机均采用了对辊交错除秧技术。



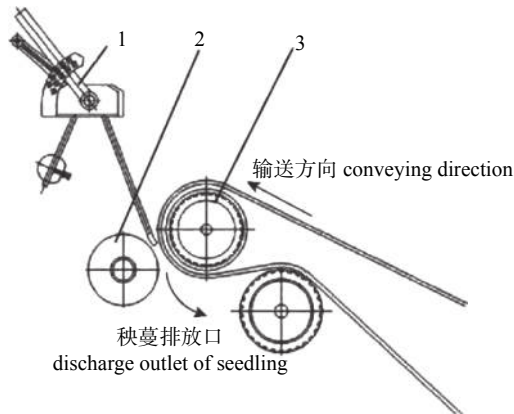
注: 1. 螺纹去秧辊; 2. 逆转光辊。

Note: 1. screw seedling removing roller; 2. reversing light roller.

图 2 对辊交错除秧结构

Fig. 2 Double roller staggered seedling removing structure

弹性梳杆摘辊式薯秧分离技术目前应用最为广泛, 一般由一级分离输送装置、摘秧辊和弹性挡秧秆机构等组成(图 3), 多用于牵引式收获机。其工作原理为: 薯土、薯秧和杂草等到达一级分离输送装置的尾端后, 薯块通过弹性挡秧秆间隙落至二级分离输送装置上, 薯秧及杂草等在挡秧秆机构的阻拦下送入摘秧辊与一级分离输送装置间的缝隙中, 由于一级分离输送装置和摘薯辊的转向相反, 薯秧及杂草被拽出掉落, 薯秧未脱落薯块则因摘薯辊和一级分离输送装置间隙的限制以及薯块运动惯性力的作用而被强制摘下后进入二级分离输送装置^[31-32]。希森天成 4UQ-165、甘肃农业大学 4UFD-1400 型马铃薯联合收获机和吕金庆等^[31]研制的马铃薯收获机均使用该技术。



注: 1. 弹性挡秧杆机构; 2. 摘秧辊; 3. 一级分离输送装置。

Note: 1. elastic seedling retaining mechanism; 2. seedling picking roller
3. primary separation conveyor.

图 3 弹性梳杆摘辊式薯秧分离技术

Fig. 3 Technology of separating potato seedling with elastic comb and roller

1.5 集薯技术

集薯技术包括自适应高度集薯箱技术和自动提升臂输送装车集薯技术。

为减小马铃薯损伤, 自适应集薯装箱技术可自动调节马铃薯自由下落高度, 减少马铃薯在分离完全进入料仓时因下落高度过大而造成薯块与箱体碰撞损伤, 一般通过控制薯箱高度或控制输薯器高度来控制马铃薯的下落高度。德国 GRIMME VARITRON 系列、比利时 AVR Puma 和 AVR Spirit 系列、比利时 Dewulf-R3060 型以及荷兰 Ploeger AR 系列等机型均采用自适应高度集薯箱技术。

自动提升臂输送装车集薯技术一般在提升臂末端安装有超声波传感器等测距传感器, 最终通过调节液压油缸来改变提升臂末端的倾斜角度和提升臂与运输车之间的落薯距离, 提升臂输送器的速度可以根据薯量进行调整^[30]。德国 GRIMME GT 系列、美国 Double L7340 型和 973 型、美国 Lock wood-672 和 472Air 型、英国 Standen-T 和 Standen-QM 系列、中机美诺 1710B、希森天成 4ULZ-170 以及青岛洪珠 4U-90LH 等机型均采用提升臂输送装车集薯技术^[33]。

1.6 人机交互技术

人机交互是指人与计算机之间使用某种对话语言、以一定的交互方式完成确定任务的人与计算机之间的信息交换过程。融合机、电、液、仪技术并搭载基于 PDA/GPS/GPRS/GIS 等技术的驾

驶室终端人机交互操作系统, 可利用微机终端随时监测收获情况并进行设置和调整, 实时监控机器行走状态、挖掘状态、输送分离状态、除杂效果和料斗容量等^[33-35]。如德国 GRIMME 公司 ErgoDrive 和 SmartView 人机交互系统以及比利时 AVR 公司 Connect 平台等。

2 国内外马铃薯收获装备

马铃薯收获机经历了由小到大、由低级半机械化到高级自动化的发展历程。欧美国家马铃薯机械化收获起步较早、发展较快、技术水平较高, 20 世纪 80—90 年代逐渐形成大型联合机械收获或用“挖掘机+捡拾机”进行分段收获的全面机械化^[36-38]。国外马铃薯收获装备主要由企业研发并注重专利保护, 故可供参考的外文文献有限。现阶段欧美国家马铃薯收获装备公司逐步兼并融合, 促进了马铃薯收获装备与技术的迅速发展。如德国 GRIMME 公司 2013 年收购丹麦 ASA-LIFT 和美国 SPUDNIK 公司; 荷兰 Ploeger 公司 2011 年收购美国 Oxbo 公司, 成立荷兰 Ploeger Oxbo 集团。

国内马铃薯收获机的研发和生产主要集中于企业、高校和科研院所, 专注薯类全程机械化且具有一定规模的企业屈指可数, 以中机美诺、希森天成、青岛洪珠和黑龙江德沃等企业最具代表性, 目前处于提升臂式马铃薯联合收获机研发生产阶段, 初步探索马铃薯联合收获。马铃薯收获装备的研发主要集中于东北农业大学、中国农业大学、青岛农业大学、内蒙古农业大学、甘肃农业大学、河南科技大学、昆明理工大学以及农业农村部南京农业机械化研究所等高校和科研院所, 目前主要集中于分段收获机除秧、挖掘和分离输送等关键部件的基础理论研究, 初步探索联合收获机的研发试制, 仍未实现全面机械化收获, 特别是西南丘陵山区, 机械化收获水平较低, 整体与国外先进技术装备差距较为明显^[39-40]。

马铃薯机械化收获包括除秧、挖掘、分离、筛选、分级、提升卸料和收集等基本过程。根据收获环节的不同, 大体可将马铃薯收获机分为分段收获和联合收获两类。马铃薯收获装备根据技术分类, 较为冗杂且不具代表性。本研究根据马铃薯收获装备的发展阶段、技术先进程度以及收

环节的差异, 将其分为自走式联合收获机、牵引式联合收获机、牵引式收获机以及小型牵引式挖掘机 4 种类型。

2.1 自走式马铃薯联合收获装备

自走式马铃薯联合收获机是马铃薯收获装备中最先进的机型, 搭载轮式或履带动力底盘, 体积相对庞大, 一般具有驾驶室、除秧装置、挖掘装置、输送分离装置、除杂装置、筛选分级装置、储薯料斗和输送提升装置等, 高度集成机械、液压、光电传感、电控和气流气压等先进技术^[33-35]。

德国、比利时、美国 and 荷兰等国生产的自走式联合收获机最为典型。德国被誉为“欧洲粮仓”, 拥有全球最大的马铃薯设备生产商 GRIMME 公司, 典型机型有 VARITRON 系列和 VENTOR 系列。如图 4a 所示: VARITRON 270 配套动力最低 265 kW, 搭载 7 t 储薯料斗, 人机交互相关技术广泛应用, 可实现马铃薯收获实时监控, 在挖掘深度控制、输送链流量控制以及料

斗储量等环节实现可视化智能操作。比利时 AVR 公司生产的 Puma 系列自走式马铃薯联合收获机, 以 Puma 4 双行自走式马铃薯联合收获机为例, 搭载 350 kW 沃尔沃发动机, 配备 8 t 可卸料斗, 前置除秧装置, 挖掘深度实现液压自适应调节; 比利时 Dewulf 公司生产的 R3000 系列和 Kwatro Xtreme 型自走式马铃薯收获机, 其 Kwatro Xtreme 型搭载斯堪尼亚 372 kW 发动机, 配备 17.5 m³ 料斗, 可实现 60° 后轮转向偏差, 极大减小转弯半径^[10]。美国 AFE 公司 Lenco 系列自走式马铃薯收获机 (图 4b) 搭载 335 kW 约翰迪尔发动机, 无储薯料斗, 作业时与运输车同时作业, 大口径风机增强了土壤和杂物空气分离效果, 采用四轮驱动转向。荷兰 Ploeger Oxbo 公司 AR 系列自走式马铃薯收获机, 型号有 AR-W 和 AR-BX 等, 以 AR-4BX 型收获机为例, 其搭载斯堪尼亚 DC13 发动机, 配套动力 200~380 kW, 配备 14 t 可卸料斗^[18,41]。



a) VARITRON 270



b) Lenco

注: a) 来源于 <https://www.grimme.com/cn>; b) 来源于 <http://lenco-harvesters.com/>。

Note: a) from <https://www.grimme.com/cn>; b) from <http://lenco-harvesters.com/>。

图 4 自走式马铃薯联合收获机代表机型

Fig. 4 Representative model of self propelled potato combine harvester

与欧美国家相比, 亚洲国家研发的机型体积相对较小, 主要使用中型自走式马铃薯联合收获机, 其中以日本和韩国最为典型, 如日本东洋农机株式会社 TPH-179 型、松山株式会社 GZA651 型和小乔工业株式会社 HS700D-K 型等。东洋农机株式会社 TPH-179 型联合收获机 (图 5a) 采用履带行走底盘, 配套动力 40.5 kW, 单垄收获, 搭载分拣平台可同时容纳 5 人作业, 输送分离装置采取“升运链+立式环形”的多级分离方式^[30]; 韩国新兴实业 SHI-1500 型自走式双行马铃薯联合收获机 (图 5b) 采用轮式行走底盘, 搭载人工分

拣作业平台, 分离输送筛上方安装刮板式橡胶刷, 加强薯土分离效果, 同时起到提升马铃薯的作用, 防止因分离输送筛倾角过大导致马铃薯回流。马铃薯经人工分拣后, 进入悬挂于机器后方的储薯料斗或直接将马铃薯装袋。

国内对自走式马铃薯联合收获机的研究成果较少, 以农业农村部南京农业机械化研究所绿色耕作与土下果实收获机械化创新团队研发的 4UZL-1 型自走式薯类联合收获机 (图 6a) 最具代表性。该机具采用履带底盘, 配套动力 65 kW, 单垄收获, 作业效率 0.16~0.32 hm²/h, 主要包括



注: a) 来源于 <http://www.toyonoki.co.jp/>; b) 来源于 <http://www.sh-ind.co.kr/>。
 Note: a) from <http://www.toyonoki.co.jp/>; b) from <http://www.sh-ind.co.kr/>。

图 5 亚洲自走式马铃薯联合收获机代表机型

Fig. 5 Representative models of Asian self propelled potato combine harvester



注: a) 来源于 <http://nnj.caas.cn/xwdt/yw/261885.htm>; b) 来源于 <http://www.xinyujixie.net/>。
 Note: a) from <http://nnj.caas.cn/xwdt/yw/261885.htm>; b) from <http://www.xinyujixie.net/>。

图 6 国内自走式马铃薯联合收获机代表机型

Fig. 6 Representative models of domestic self-propelled potato combined harvester

挖掘输送机构、限深机构、薯秧分离机构、刮板链输送机构和弧栅交接机构等关键部件,可一次完成挖掘、分离输送、除秧、清选和集薯等联合作业^[42-43]。图 6b 为黑龙江心语机械公司研发的自走式马铃薯联合收获机 XINYU,采用履带底盘,搭载储薯料斗,为“多级分离+立式环形提升装置”的分离输送机构。

2.2 牵引式马铃薯联合收获装备

牵引式马铃薯联合收获机是马铃薯收获装备发展的第 3 阶段,可分为料斗牵引式和提升臂牵引式马铃薯联合收获机 2 种。一般需提前进行除秧作业,部分机型可同时挂接除秧装置。

2.2.1 料斗牵引式马铃薯联合收获机

料斗牵引式马铃薯联合收获机大多体型庞大,其研发主要以美国、德国和白俄罗斯等国家为主,与自走式马铃薯联合收获机的主要区别在于是否搭载动力底盘,作业机组长度可达 10~18 m。

德国 ROPA 公司原为德国甜菜收获装备巨头,2012 年 ROPA 公司收购法国 WM,将 WM 公司马铃薯收获技术与 ROPA 甜菜收获技术相结合。以代表机型 ROPA Keiler-2 (图 7a) 为例,其搭载独立液压驱动系统,各部件运行速度与拖拉机动力输出轴转速无关,使得分离输送装置、提升装置和集薯输送装置等独立调节,保持最佳转速,降低了马铃薯伤薯率;整机长×宽×高约 11.8 m×3 m×3.99 m,配套动力最低 60 kW,双行收获,搭载 8 t 可卸缓冲料斗。白俄罗斯 Gomselmash 公司 PALESSE-PT25 型牵引式马铃薯联合收获机,配套动力最低 70 kW,收获行距 70~90 cm,搭载 8.4 m³ 料斗。加拿大 Allan 公司 EB10 系列机型一次通过可收获 2~6 行,如 EB10-6 型马铃薯收获机 (图 7b) 可同时收获 6 行,搭载 2 台 30 kW 除杂风机,宽幅收获依然保持较好的薯土分离和除杂能力。意大利 IMAC 公司 Modello-7580 型联



a) ROPA Keiler-2

b) Allan EB10-6

注: a) 来源于 <https://www.ropa-maschinenbau.de/>; b) 来源于 <https://www.allanequipment.com/>。

Note: a) from <https://www.ropa-maschinenbau.de/>; b) from <https://www.allanequipment.com/>。

图 7 料斗牵引式马铃薯联合收获机代表机型

Fig. 7 Representative models of hopper traction combined potato harvester

合收获机长×宽×高约 7.7 m×2.85 m×3.1 m, 配套功率 55 kW, 单行收获, 整机质量 5.5 t^[44]。美国 Double L 公司 973 和 7340 型以及美国 Lock wood 公司 673 和 674 等系列机型均为牵引式马铃薯联合收获机; 德国 GRIMME 公司 SE 系列、SV 系列及 EVO 系列牵引式马铃薯联合收获机为适应不同类型的地块, 其分离单元可根据收获实际情况进行匹配安装。

亚洲牵引式马铃薯联合收获机以日本最具代表性, 如日本东洋农机株式会社 TPD-1H、THM、

TOP-1 和 TPH 系列等机型以及日本 SANEI 株式会社 SS 系列、MP-3000SP 和 EX-ZERO 等机型。东洋 TPH-55 型 (图 8a) 长×宽×高约 6.5 m×3 m×3.1 m, 结构紧凑, 配套动力最低 40.5 kW, 搭载 2.2 m³ 料斗, 整机质量 2.8 t, 适用于丘陵山区小地块马铃薯联合收获; 日本 SANEI 工业 EX-ZERO 机型 (图 8b) 长×宽×高约 6.5 m×3 m×3.1 m, 配套动力最低 50 kW, 搭载 3.2 t 料斗, 整机质量 5.8 t, 可实现自动田垄深度调节和对垄收获, 升运部件采用液压无级变速驱动。



a) TOYONOKI TPH-55



b) SANEI EX-ZERO

注: a) 来源于 <http://www.toyonoki.co.jp/>; b) 来源于 <http://www.sanei-ind.co.jp/>。

Note: a) from <http://www.toyonoki.co.jp/>; b) from <http://www.sanei-ind.co.jp/>。

图 8 日本部分代表机型

Fig. 8 Some representative models in Japan

国内自带料斗牵引式联合收获机正处于研发试制阶段, 以黑龙江德沃 4UML-180 型、青岛洪珠牵引式马铃薯联合收获机、黑龙江心语机械和绥化恒丰机械 4U-2-1710 等机型最具代表性。其中, 青岛洪珠牵引式马铃薯联合收获机 (图 9) 可实现挖掘、分离、提升、筛选和收集卸料等功能, 降低了劳动强度, 减少了人工作业成本, 采

用新型分秧机构和多模式清薯机构, 提高了薯秧、薯土分离效果, 集机电液一体化操控^[45]。

2.2.2 提升臂牵引式马铃薯联合收获机

提升臂牵引式马铃薯联合收获机以德国、英国、意大利和波兰等国机型最具代表性。显著特点为带有液压和机械传动的输送提升臂, 相比传统分段收获, 减少了人工捡拾工作量。德国



注: 图片来源于 <http://www.hznyjx.com/>。

Note: Figure from <http://www.hznyjx.com/>.

图 9 洪珠料斗牵引式马铃薯联合收获机

Fig. 9 Hongzhu hopper traction combined potato harvester

GRIMME 的 GT 系列机型, 搭载液压机械驱动输送提升臂、自动深度调节装置及垄脊减压装置, 其中, GT 300 型马铃薯联合收获机 (图 10a) 长×宽×高约 11 m×3.26 m×3.45 m, 拖拉机牵引功率



a) GRIMME GT 300



b) Standen-T2

注: a) 来源于 <https://www.grimme.com/cn/>; b) 来源于 <https://standen.co.uk/>。

Note: a) from <https://www.grimme.com/cn/>; b) from <https://standen.co.uk/>.

图 10 提升臂牵引式联合收获机代表机型

Fig. 10 Representative model of lifting arm type traction combine harvester

在提升臂牵引式马铃薯联合收获机发展过程中, 许多国家因地制宜, 为节省人工作业量, 研发出直接装箱牵引式联合收获机, 其显著特点为使用 2~3 级分离输送机构, 搭载人工分拣平台及薯箱, 结构较为简单, 适用于中小型地块马铃薯收获。代表机型有意大利 SPEDO-Junior、IMAC-Special、Carlotti-Green 系列和 EUROPA-K600 型、西班牙 Argiles 公司 HC-Arrastrada 型以及波兰 KRUKOWIAK 公司 PYRUS-II 型等。以意大利 SPEDO-Junior (图 11) 为例, 其长×宽×高约 5.7 m×2.2 m×1.6 m, 配套动力 45 kW, 整机质量 0.97 t, 单垄收获, 可搭载 2~4 人进行分拣除杂工作。

近年来, 国内研发出多款提升臂牵引式马铃薯联合收获机, 提升输送臂集成液压和机械技术, 可实现 2~3 级薯土分离和升运装车等功能, 如中机美诺 1710A/B 型、希森天成 4ULZ-170 型、

为 115 kW, 收获 3 行, 整机质量 9.5 t, 关键部件由机械传动、液压传动以及电控相结合。英国 Standen 公司生产的 Standen-T2 型牵引式马铃薯联合收获机 (图 10b) 长×宽×高约 10.75 m×3 m×3.85 m, 配套动力最低 134 kW, 整机质量 7.5 t, 使用 VariSep 可调式筛网和 OMEGA 槽纹滚筒分离系统, 提高了薯土分离质量, 可实现挖掘深度液压自动调节。英国 ScanStone 公司代表机型 Patriot-5 可实现深度感应调控和自动调平等功能。意大利 SPEDO-Senior 牵引式马铃薯联合收获机, 双垄收获, 长×宽×高约 10.75 m×2.80 m×3.35 m, 配套动力最低 80 kW, 整机质量 6.3 t。法国 WM-1650L 型、意大利 IMAC-Modello165 型以及波兰 KRUKOWIAK 公司的 SATURN 和 Z437 型等也属于提升臂牵引式马铃薯联合收获机^[41]。

青岛洪珠 4U-90LH 型、绥化恒丰机械 4U-2-1390 型以及禹城亚泰机械 4UQL 系列等机型, 特别是中机美诺 1710 系列的成功研发结束了国内没有马铃薯联合收获机的时代, 部分机型基本参数如



注: 图片来源于 <https://www.spedo.it/en/>。

Note: Figure from <https://www.spedo.it/en/>.

图 11 SPEDO-Junior 装箱式联合收获机




Fig. 11 SPEDO-Junior box type combine harvester

表 1 所示。魏宏安等^[46-47]设计的 4UFD-1400 型马铃薯联合收获机适用于大、中地块马铃薯收获

作业，分离输送装置采用液压驱动，人工辅助装袋，降低了人工作业强度。

表 1 国内联合收获机代表机型基本技术参数

Tab. 1 Basic technical parameters of typical combine harvester in China

机型型号 model	外形结构 configuration	技术特点 technical features
中机美诺1710B Zhongji Meinuo 1710B		长×宽×高约5.0 m×3.3 m×3.4 m，最小牵引功率75 kW，收获行数2行，工作效率0.33~0.67 hm ² /h，整机质量4 t。 The length, width and height are about 5.0 m×3.3 m×3.4 m, the minimum traction power is 75 kW, the number of harvesting rows is two, the working efficiency is 0.33-0.67 hm ² /h, and the whole machine weight is 4 t.
希森天成4ULZ-170 Xisen Tiancheng 4ULZ-170		长×宽×高约9.8 m×3.3 m×3.4 m，最小牵引功率90 kW，收获行数2行，工作效率0.33~0.67 hm ² /h，整机质量5.96 t。 The length, width and height are about 9.8 m×3.3 m×3.4 m, the minimum traction power is 90 kW, the number of harvesting lines is two, the working efficiency is 0.33-0.67 hm ² /h, and the whole machine weight is 5.96 t.
青岛洪珠4U-90LH Qingdao Hongzhu 4U-90LH		长×宽×高约5.4 m×3.0 m×2.3 m，最小牵引功率95 kW，收获行数1行，工作效率0.1 hm ² /h，整机质量1.7 t。 The length, width and height are about 5.4 m×3.0 m×2.3 m, the minimum traction power is 95 kW, the number of harvesting lines is one, the working efficiency is 0.1 hm ² /h, and the whole machine weight is 1.7 t.

注：1710B图片来源于<http://www.menoble.com/>；4ULZ-170图片来源于<http://www.xs-tc.com/>；4U-90LH图片来源于<http://www.hznyjx.com/>。

Note: Figure of 1710B from <http://www.menoble.com/>; figure of 4ULZ-170 from <http://www.xs-tc.com/>; figure of 4U-90LH from <http://www.hznyjx.com/>.

2.3 牵引式马铃薯收获装备

牵引式马铃薯收获机是马铃薯收获装备发展的第 2 阶段，属于典型分段收获，开始广泛使用升运链进行薯土分离，出现配套马铃薯捡拾设备，但由于双机组联合作业，伤薯严重，成本较高，普及率很低；该阶段液压驱动的侧输出装置和液压仿形等新技术开始应用。代表机型有美国 Double L-6500 系列和 SPUDNIK-6140 型 (图 12a)、德国

GRIMME 公司 WH 200 系列和 WR 200 系列机型、英国 ScanStone 公司 Webber 和 Windrower 系列机型 (图 12b)、丹麦 ASA-LIFT 公司 WR 系列机型、意大利 SPEDO Model-CPP-BD 系列以及土耳其 DEMSAN-PS2 系列机型等。

现阶段国内牵引式马铃薯收获机发展已较为成熟。以中机美诺 1700 和 1600 系列、希森天成 4UQ-165 和 4UX-170 系列、德沃 4UMF-180 型以及



a) SPUDNIK-6140



b) ScanStone-Windrower

注：a) 来源于 <https://www.spudnik.com/>；b) 来源于 <http://scanstone.co.uk/>。

Note: a) from <https://www.spudnik.com/>; b) from <http://scanstone.co.uk/>.

图 12 牵引式马铃薯收获装备代表机型

Fig. 12 Representative model of traction potato harvesting equipment

青岛洪珠 4U-170B 等最具代表性。希森天成 4UQ-165 型马铃薯收获机配套动力为 73.5~132.3 kW, 行距可调, 可一次完成薯土和薯秧分离以及薯块集条铺放等作业; 青岛洪珠 4U-170B 型采用双升运链结构, 配套动力 89.5~104.4 kW, 可一次完成挖掘、切秧、分离和薯块条铺作业^[48-49]。河南豪丰机械和山东禹城亚泰机械等公司也有研发该机型。国内相关科研机构 and 高校研究牵引式马铃薯收获机较多, 主要集中在挖掘装置、分离输送装置和除秧装置等关键部件的基础理论研究。如魏忠彩等^[27-28]研制的缓冲筛式薯杂分离马铃薯收获机, 采用“2 级高频低幅振动分离+薯秧分离及侧输出+低位铺放”的薯土分离工艺; 张兆国等^[50]研制的多级分离缓冲马铃薯收获机采用多级分离振动、多重缓冲和低位侧铺的薯土分离方式。

2.4 小型牵引式马铃薯挖掘机

小型牵引式马铃薯挖掘机是马铃薯收获装备发展的初始阶段, 是在挖掘犁的基础上改进形成的, 一般只能进行简单的挖掘和分离工作, 大多为偏心轮机构振动筛式或连杆机构振动筛式, 少数使用升运链进行薯土分离, 配套动力小。以意大利 SPEDO Model-CPP-M 型为例(图 13), 其采用连杆机构振动筛式, 长×宽×高约 1.3 m×0.9 m×0.85 m, 配套动力 15 kW, 整机质量 115 kg, 单垄收获。意大利 IMAC-SPL 和 SPP 系列机型、波兰 AKPIL-BULWA 型以及土耳其 DEMSAN-PS1 系列和 Agromaster-OPS 系列机型等均属于典型的小型牵引式马铃薯挖掘机。

国内对小型马铃薯挖掘机研发生产较多, 特



注: 图片来源 <https://www.spedo.it/en/>。

Note: Figure derived from <https://www.spedo.it/en/>.

图 13 意大利 SPEDO Model-CPP-M 型马铃薯挖掘机

Fig. 13 Italian SPEDO Model-CPP-M potato digger

别是针对云、贵、川、渝等典型丘陵山地马铃薯种植区, 如中机美诺 1120 型、希森天成 4UX 系列、青岛洪珠 4U-83、德州鸿友 4UX-70 和青岛璞盛 4U-85 等机型。以青岛洪珠 4U-83 为例, 其采用升运链输送分离筛, 长×宽×高约 1.45 m×1.15 m×0.90 m, 配套动力 15~26 kW, 整机质量 230 kg, 挖掘深度 20~30 cm, 单垄收获。国内科研机构和高校研发代表机型为吕金庆等^[19]设计的 4U1Z 型马铃薯挖掘机, 采用偏心轮通过铰接臂与振动架的球铰链约束将动力传递给振动架, 实现振动架的振动分离, 并对挖掘铲和振动分离筛进行运动学分析。

3 发展分析与展望

国内马铃薯种植分布区域广泛、地理地域复杂、种植模式多样, 且以小农户小地块种植模式为主, 国外大型先进设备并不能很好地适用于国内马铃薯种植情况, 制约了马铃薯全程机械化发展。通过国内企业、科研院所以及高校的不懈努力, 中国马铃薯收获机械已经从被动仿制转入基础理论研究和产品创新研发阶段, 并取得初步成效, 适应不同种植区域、种植模式的马铃薯收获装备正逐步配套, 各研发单位在完善基础理论研究的基础上正在向智能化马铃薯联合收获技术研发迈进。随着马铃薯主粮化战略的稳步推进, 马铃薯收获装备将迎来新的发展机遇, 针对马铃薯机械化收获技术, 未来将会在以下方面取得长足的进展。

(1) 高新技术进一步融合, 向智能化和自动化马铃薯联合收获技术方向发展。欧美发达国家的马铃薯联合收获装备已广泛采用机—电—液—气—光一体化技术、智能检测和自动控制技术等, 提高了作业效率和收获质量, 减轻了劳动强度, 降低了收获成本。同时人机交互远程控制软硬件的开发使用, 提供了良好的收获环境, 降低了收获机操作难度。在土地流转以及新型农业经营合作社发展的大趋势下, 为大中型马铃薯联合收获装备的使用创造了前提条件, 自动化和智能化是中国马铃薯收获装备的必然发展趋势。

(2) 求同存异, 双向驱动。国内马铃薯种植地理地域和农艺模式的多样性决定了在未来很长一段时间内, 中国将出现小型简易分段式马铃薯收获机与中大型先进马铃薯联合收获装备长期并

存的局面,以适应不同种植模式和地理地域差异的需求。因此,应同时投入研发力量,研发适合南方冬作区和西南一二季混作区的小型简易分段式马铃薯收获机,开展研发适合丘陵山区的小型马铃薯联合收获机。

(3) 分离输送装置是马铃薯收获装备的核心部件,直接关系到马铃薯收获的伤薯率、破皮率和明薯率等关键指标。马铃薯属于根茎类作物,收获作业环境恶劣,随马铃薯进入分离输送装置的除了土块还有石子、地膜和秧蔓等杂物。在非金属材料、热处理和表面处理等方面,特别是柔性包裹材料的应用,包括升运链杆条和分离除杂辊等,将先进的制造技术融入到分离输送装置以及整机的加工制造过程中,提高马铃薯收获装备的稳定性和可靠性。未来中国马铃薯机械化收获技术和装备的发展将以低损、高效和智能化大型马铃薯联合收获技术及装备为核心,同时也需要加强丘陵山区中小型马铃薯机械化收获技术与装备的研究。

[参考文献]

- [1] 汪炳良. 马铃薯生育特点与大棚的早熟栽培[J]. 新农村, 2019(10): 21. DOI: [10.3969/j.issn.1674-8409.2019.10.011](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-8409.2019.10.011).
- [2] KANG W Q, FAN M S, MA Z, et al. Luxury absorption of potassium by potato plants[J]. American Journal of Potato Research, 2014, 91(5): 575. DOI: [10.1007/s12230-014-9386-8](https://doi.org/10.1007/s12230-014-9386-8).
- [3] NOBUHISA K, TSUTOMU K, KEIICHI S, et al. Energy efficiency of potato production practices for bioethanol feedstock in northern Japan[J]. European Journal of Agronomy, 2013, 44(1): 6. DOI: [10.1016/j.eja.2012.07.001](https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.07.001).
- [4] 魏忠彩, 李学强, 张宇帆, 等. 马铃薯全程机械化生产技术与装备研究进展[J]. 农机化研究, 2017, 39(9): 1. DOI: [10.13427/j.cnki.njyi.2017.09.001](https://doi.org/10.13427/j.cnki.njyi.2017.09.001).
- [5] 赵胜雪, 刘崇林, 胡军, 等. 国内外马铃薯收获清选机械研究现状[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2019, 31(1): 78. DOI: [10.3969/j.issn.1002-2090.2019.01.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-2090.2019.01.014).
- [6] 梁小菊, 崔兆英. 对马铃薯作主粮的思考[J]. 现代农业科技, 2015(12): 115. DOI: [10.3969/j.issn.1007-5739.2015.12.069](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-5739.2015.12.069).
- [7] 刘崇林, 赵胜雪, 胡军, 等. 马铃薯机械发展趋势探讨[J]. 南方农机, 2019, 50(1): 31. DOI: [10.3969/j.issn.1672-3872.2019.01.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-3872.2019.01.021).
- [8] 李紫辉, 温信宇, 吕金庆, 等. 马铃薯种植机械化关键技术及装备研究进展分析与展望[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 1. DOI: [10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.001](https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.001).
- [9] 李娜, 周进, 崔中凯, 等. 山东省马铃薯生产全程机械化现状与对策建议[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(1): 198. DOI: [10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2019.01.36](https://doi.org/10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2019.01.36).
- [10] 窦青青, 孙永佳, 孙宜田, 等. 国内外马铃薯收获机械现状与发展[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(9): 206. DOI: [10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2019.09.35](https://doi.org/10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2019.09.35).
- [11] TARKALSON D D, KING B A, BJORNEBERG D L, et al. Evaluation of in-row plant spacing and planting configuration for three irrigated potato cultivars[J]. American Journal of Potato Research, 2011, 88(3): 210. DOI: [10.1007/s12230-010-9185-9](https://doi.org/10.1007/s12230-010-9185-9).
- [12] 魏忠彩, 李洪文, 孙传祝, 等. 基于多段分离工艺的马铃薯联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 129. DOI: [10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.014](https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.014).
- [13] 万恩超, 尚书旗, 王东伟, 等. 牵引式马铃薯联合收获机的设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(7): 80. DOI: [10.13427/j.cnki.njyi.2019.07.015](https://doi.org/10.13427/j.cnki.njyi.2019.07.015).
- [14] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J]. 农业工程学报, 2016, 32(1): 1. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.001](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2016.01.001).
- [15] 石林榕, 杨小平, 赵武云, 等. 抛扬式膜际覆土马铃薯播种联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 129. DOI: [10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.015](https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.015).
- [16] 杨红光, 胡志超, 王冰, 等. 马铃薯收获机械化技术研究进展[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(11): 27. DOI: [10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2019.11.05](https://doi.org/10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2019.11.05).
- [17] ZHOU K, JENSEN A L, BOCHTIS D D, et al. Simulation model for the sequential in-field machinery operations in a potato production system[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2015, 116(8): 176. DOI: [10.1016/j.compag.2015.06.018](https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.06.018).
- [18] 史明明, 魏宏安, 刘星, 等. 国内外马铃薯收获机械发展现状[J]. 农机化研究, 2013, 35(10): 213. DOI: [10.13427/j.cnki.njyi.2013.10.041](https://doi.org/10.13427/j.cnki.njyi.2013.10.041).
- [19] 吕金庆, 田忠恩, 吴金娥, 等. 4U1Z型振动式马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 39. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2015.12.006](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2015.12.006).
- [20] 王东伟, 王家胜, 尚书旗. 基于振动的土壤挖掘阻力与耗能特性试验研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1): 267. DOI: [10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.031](https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.031).
- [21] 石林榕, 孙伟, 赵武云, 等. 振动挖掘铲减阻数值模拟及参数优化[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(2): 181. DOI: [10.11841/j.issn.1007-4333.2014.02.27](https://doi.org/10.11841/j.issn.1007-4333.2014.02.27).
- [22] 崔刚, 马云海, 杨德秋, 等. 马铃薯挖掘铲仿生减阻技术研究概况[J]. 农业工程, 2019, 9(9): 19. DOI: [10.3969/j.issn.2095-1795.2019.09.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-1795.2019.09.006).
- [23] 樊昱. 基于离散元法的马铃薯挖掘机理研究及仿生铲设计[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.
- [24] 石林榕, 孙伟, 王蒂, 等. 马铃薯仿生挖掘铲片的设计与仿真[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(1): 268. DOI: [10.7606/j.issn.1000-7601.2014.01.045](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-7601.2014.01.045).
- [25] 石林榕, 赵武云, 孙伟, 等. 马铃薯仿生挖掘铲减阻性能研究[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(3): 286. DOI: [10.7606/j.issn.1000-7601.2018.03.42](https://doi.org/10.7606/j.issn.1000-7601.2018.03.42).
- [26] 吕金庆, 孙贺, 兑瀚, 等. 粘重土壤下马铃薯挖掘机分离输送装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 146. DOI: [10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.018](https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.018).
- [27] 魏忠彩, 李洪文, 苏国梁, 等. 缓冲筛式薯杂分离马铃薯收获机研制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 1. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2019.08.001](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2019.08.001).

- [28] 魏忠彩,李洪文,苏国梁,等.低位铺放双重缓冲马铃薯收获机设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(9):140. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.016.
- [29] 魏忠彩,李洪文,孙传祝,等.振动与波浪二级分离马铃薯收获机改进[J].农业工程学报,2018,34(12):42. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.12.006.
- [30] 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. DOI: 10.15889/j.issn.1002-1302.2018.04.003.
- [31] 吕金庆,王鹏榕,刘志峰,等.马铃薯收获机薯秧分离装置设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(6):100. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.011.
- [32] 孙广辉,魏宏安,李彦晶,等.4UFD-1400型马铃薯联合收获机薯秧分离装置设计[J].甘肃农业大学学报,2012,47(6):146. DOI: 10.3969/j.issn.1003-4315.2012.06.026.
- [33] 王公仆,蒋金琳,田艳清,等.马铃薯机械收获技术现状与发展趋势[J].中国农机化学报,2014,35(1):11. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5553.2014.01.003.
- [34] CANNEY T V, TIJSKENS E, RAMON H, et al. Development of a predictive tissue discoloration model based on electronic potato impacts[J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(1): 86. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2004.01.005.
- [35] YU P C, LI C Y, RAINS G, et al. Development of the berry impact recording device sensing system: hardware design and calibration[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2011, 79(2): 109. DOI: 10.1016/j.compag.2011.08.013.
- [36] 孙伟,刘小龙,张华,等.马铃薯施肥播种起垄全膜覆盖种行覆土一体机设计[J].农业工程学报,2017,33(20):14. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.20.002.
- [37] 王楠,邓宇,张明慧,等.马铃薯收获机主要结构与发展趋势[J].农机使用与维修,2015(4):16. DOI: 10.14031/j.cnki.njwx.2015.04.010.
- [38] 单爱军,刘俊杰,崔冰冰.马铃薯收获机现状与发展趋势[J].农机化研究,2006(4):19. DOI: 10.3969/j.issn.1003-188X.2006.04.008.
- [39] 杨金砖,李国民,郝磊,等.马铃薯捡拾机发展现状及主要功能结构研究[J].农机使用与维修,2019(3):15. DOI: 10.14031/j.cnki.njwx.2019.03.005.
- [40] 马生红.马铃薯机械化收获技术的发展现状[J].农业开发与装备,2018(4):50. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9205.2018.04.039.
- [41] 史明明,魏宏安,胡忠强,等.国内外马铃薯收获机械产品现状调查[J].农业机械,2013(7):100. DOI: 10.16167/j.cnki.1000-9868.2013.07.011.
- [42] 申海洋,王冰,胡良龙,等.4UZL-1型甘薯联合收获机薯块交接输送机构设计[J].农业工程学报,2020,36(17):9. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.17.002.
- [43] 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. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.14.002.
- [44] 刘剑君,邓明俐,贾世通,等.马铃薯收获机械现状与发展趋势[J].农学学报,2015,5(1):95. DOI: 10.11923/j.issn.2095-4050.2014-xb0356.
- [45] 杜木军,王晋,王伟刚,等.马铃薯联合收获机发展现状及趋势[J].农机使用与维修,2019(8):15. DOI: 10.14031/j.cnki.njwx.2019.08.005.
- [46] 魏宏安,王蒂,连文香,等.4UFD-1400型马铃薯联合收获机的研制[J].农业工程学报,2013,29(1):11. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.01.002.
- [47] 魏宏安,张俊莲,杨小平,等.4UFD-1400型马铃薯联合收获机改进设计与试验[J].农业工程学报,2014,30(3):12. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.03.002.
- [48] 赵庆亮.国内外马铃薯收获机械研究现状及发展展望[J].农业工程,2020,10(6):7. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1795.2020.06.003.
- [49] 胡彬生,骆赞磊,邱瑜,等.南方丘陵山区薯类生产机械化现状与发展思路——以江西省为例[J].现代农业装备,2020,41(2):69. DOI: 10.3969/j.issn.1673-2154.2020.02.013.
- [50] 张兆国,王海翼,李彦彬,等.多级分离缓冲马铃薯收获机设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(2):100. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.02.009.

责任编辑:何承刚