

马铃薯机械化收获技术与装备研究进展

王虎存, 赵武云^{*}, 孙伟, 张华, 刘小龙, 李辉

(甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070)

摘要: 中国马铃薯种植面积、总产量均居世界首位, 机械化收获是马铃薯机械化生产中关键环节。目前, 国内马铃薯机械化收获率较低, 马铃薯收获装备是农机领域的短板弱项。该文分析了当前中国马铃薯机械化收获的发展现状、特点及制约因素, 重点阐述了国内外马铃薯杀秧、减阻降耗挖掘、防堵限深控制、自动对垄作业、高效分离、低损收获、多功能行走底盘、人机交互等关键技术研究进展, 分析对比中国与欧美、日韩等国家在马铃薯机械化收获装备上的差异, 指出国内马铃薯机械化收获技术上的不足。针对国内马铃薯种植范围广、种植模式多样、丘陵山区小块地种植面积占比大的特点, 提出分段收获和联合收获是国内马铃薯机械化收获的趋势, 并对低损高效分离装置、卡脖子技术突破、农机农艺深度融合及政策导向进行展望, 以期为中国马铃薯机械化收获技术进一步发展与研究提供借鉴。

关键词: 农业机械; 收获; 马铃薯; 机械化; 杀秧; 挖掘; 减阻降耗; 薯土分离

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303056

中图分类号: S225.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2023)-14-0001-22

王虎存, 赵武云, 孙伟, 等. 马铃薯机械化收获技术与装备研究进展[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 1-22.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303056 <http://www.tcsae.org>

WANG Hucun, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Research progress on the technology and equipment for potato mechanized harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(14): 1-22. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202303056 <http://www.tcsae.org>

0 引言

近年来, 随着中国马铃薯主粮化战略推动, 加之马铃薯耐高寒耐贫瘠的生长特点, 在全国各地广泛种植。根据中国统计年鉴及相关文献, 2021 年, 全国马铃薯总种植面积 463.5 万 hm^2 , 总产量超 9 000 万 t, 种植面积和总产量居全球第一^[1-6]。当前, 国内马铃薯主要以人工收获或机械挖掘人工捡拾的半机械化收获模式为主, 根据 2021 年全国农业机械化发展统计公报及相关文献, 国内马铃薯耕种收综合机械化率为 50.76%, 其中马铃薯机械化收获率不足 32%^[2,7-8]。马铃薯人工收获、半机械化收获劳动强度大、用工成本高, 且收获季短, 末期易造成霜冻损伤, 制约了国内马铃薯产业发展, 解决马铃薯机械化收获技术短板是当前亟需解决的难题^[9-12]。

马铃薯机械化收获技术是集杀秧、挖掘、分离、收集、提升装运为一体的联合收获技术或者杀秧、挖掘、分离、捡拾、收集、装运的分段式机械收获作业技术^[13]。20 世纪 90 年代, 德国、美国、意大利、波兰等发达国家已实现了马铃薯一体化联合收获, 但受限于整机尺寸大、鲜薯收获损伤大、价格高昂等因素制约, 无法满足国内马铃薯机械化收获要求。国内马铃薯机械化收获技术研究

起步晚, 但发展进步快, 针对国内丘陵山区马铃薯小块地种植和个体农户小规模种植模式, 近年来, 自主研发了多款适于分段收获的马铃薯杀秧机、轻筒型挖掘机械、薯块捡拾机械等装备, 尤其在高速仿垄杀秧、减阻挖掘、低损分离、低位缓冲条铺等关键技术研究方面不断突破, 逐渐接近国际同行业先进水平。随着国内马铃薯收获装备研发能力不断进步, 制造业水平不断提升, 中国马铃薯联合收获装备研发已经向中高端方向迈进。

本文针对国内马铃薯种植分布特点、各主产区机械化收获现状进行概述, 并以国内外典型马铃薯机械化收获关键技术及整机装备进行重点阐述。结合国内马铃薯机械化收获技术要求及面临的相关问题, 以低损高效收获为目标, 展望马铃薯机械化收获技术的未来方向, 以期为中国马铃薯机械化收获技术进一步发展和研究提供理论参考。

1 马铃薯产业现状

1.1 马铃薯种植分布与规模

全球马铃薯产业主要分布在亚洲、欧洲、美洲和非洲等地, 遍及 130 多个国家。据国际马铃薯中心数据统计, 近年来, 全球马铃薯种植面积已超过 2 000 万 hm^2 , 总产量约 3.5 亿 t^[14-16], 2021 年, 中国马铃薯总产量占全球约 23%, 居世界第一^[17]。

中国马铃薯种植范围广, 除香港、澳门以外, 其他地区均有种植。受国内区域性自然条件和不同栽培制度影响, 国内的马铃薯种植区域基本划分为北方一作区、西南混作区、中原二作区、南方冬作区^[18-20]。北方一作区包括黑龙江、吉林两省及辽宁北部, 延伸到河北北部、

收稿日期: 2023-03-09 修订日期: 2023-05-17

基金项目: 甘肃省科技重大专项 (22ZD6NA046); 甘肃省高等学校产业支撑计划 (2022CYZC-42); 2022 年度甘肃省优秀研究生“创新之星”项目 (2022CXZX-640)

作者简介: 王虎存, 博士生, 研究方向为北方旱作农机装备技术研究。Email: wanghc@st.gsau.edu.cn

^{*}通信作者: 赵武云, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为北方旱区作物生产装备研究。Email: zhaowuy@gsau.edu.cn

山西北部、内蒙古全部以及西北地区的陕西北部、宁夏、甘肃全部、青海东部和新疆的天山以北地区, 约占全国马铃薯种植面积的 50%。西南混作区包括四川、贵州、云南、西藏、重庆以及湖南和湖北的部分地区, 约占全国马铃薯种植面积的 38%。中原二作区包括辽宁、河北、山西、陕西四省的南部, 湖北、湖南二省的东部, 河南、山东、江苏、浙江、安徽和江西省, 约占全国马铃薯种植面积的 7%。南方冬作区包括广东、福建、广西、海南和台湾省等, 约占全国马铃薯种植面积的 5%^[18-19]。

1.2 不同区域农机农艺相融合的机械化程度

马铃薯在中国分布范围广, 由于南北方向、东西地域在地形、气候、土壤、经济性政策等方向均有明显的差异, 因此, 马铃薯栽培因地制宜, 并出现了多种栽培模式。

北方一作区和中原二作区以丘陵、平原为主, 伴有部分山区, 地势较平缓, 大型农场、企业发展速度快, 机械化播种率达 95%^[18], 种植模式比较规范, 主要以大垄双行和大垄单行为主, 多数地区采用地膜覆盖和膜下滴灌模式, 其种-收农机农艺融合度较高。北方一作区, 耕整收综合机械化率约 60%, 中原二作区规模化种植较少, 良田多用于水稻、小麦、玉米等大宗作物, 马铃薯种植多以小块地、边角地为主, 机械化收获率略低。

西南混作区地处中国盆地、丘陵山区, 田块小、种植分散、土壤黏重、配套机具保有量小, 主要以传统的人工种植为主, 种植模式多样, 且部分兼套作模式, 机械化收获率不足 5%^[12,18]。南方冬作区马铃薯以丘陵山区及冬闲稻田垄作、畦作为主, 田小路窄, 土壤黏重, 种植模式多样, 其机械化耕整播收率不足 3%^[18]。

2 马铃薯机械化收获关键技术

2.1 马铃薯机械化杀秧技术

杀秧是马铃薯收获前的准备工作, 前期杀秧能够促使马铃薯表皮木质化, 减少挖掘时机器对马铃薯表皮损伤, 且可解决秧蔓缠绕、壅堵、难分离等问题^[21]。马铃薯杀秧有人工收割、化学杀秧和机械化杀秧。目前普遍以机械杀秧为主, 通过机器将地表秧蔓切割或者粉碎铺放到垄沟。根据马铃薯收获方式的不同, 机械化杀秧方式分为两种, 一种是分段收获, 在挖掘前拖拉机先挂接杀秧机单独杀秧作业, 另一种是马铃薯联合收获机前端自带杀秧单元, 杀秧、挖掘同时进行。

国外马铃薯杀秧机械研究起步早, 技术先进。如德国 GRIMME 公司生产的 KS75-2、KSA75-2、KS3600、KS-4500 等马铃薯杀秧机; 德国 ROPA 公司生产的 KS-475、

KS490 马铃薯杀秧机; 荷兰 APH 生产的 2 LKB-190、4 LKB-310、6 LKB-550、8 LKB-610 等; 比利时 AVR 公司生产的 Rafale 系列马铃薯杀秧机。以上机具技术特点基本大同小异, 以德国 GRIMME KS 系列马铃薯杀秧机为例, KS3600 作业幅宽 3 600 mm, 适用于 850/900 mm 垄距模式, 一次完成 4 行作业; 刀轴安装 92 片不同长度甩刀, 按双螺旋线对称分布, 拟合垄形特点, 转速可达 1 300 r/min, 拥有强大的吸力, 有效粉碎倒伏秧蔓, 且刀轴受力均匀, 运行平稳; 采用双侧驱动系统, 主轴两侧安装有单向离合器, 可防止反转损坏机构; 上颚板排草口设计导流板, 切碎的秧蔓被均匀铺撒到垄沟; 两组限深轮通过丝杠螺母机构无极调整留茬高度, 整机质量约 1 150 kg, 前置或后置于 51.5 kW 以上的拖拉机高速行驶作业^[22]。其他 GRIMME KS 系列马铃薯杀秧机具体参数如表 1 所示。

表 1 Grimme KS 系列马铃薯杀秧机基本参数

型号 Series	适应行距 Suitable sow spacing/cm	行数 Row number	甩刀数量 Number of hammer pieces	抛秧形式 Vine throwing form	配套动力 Power requirements/ kW
75-2	75/90	2	46	均匀地撒到垄沟	35
75A-2	75/90	2	82	传输带向左/右抛出	35
4500	75	6	116	均匀地撒到垄沟	65

国内马铃薯杀秧机发展起步较晚, 近年来, 国内农业高校、科研院所、农机企业对此进行了大量突破性研究^[23-26]。马铃薯机械化杀秧的关键技术是甩刀杀秧辊的设计, 包括甩刀形状、排列方式、杀秧轴转速、主轴动平衡、传动系统等。冯斌等设计了甩刀式马铃薯杀秧机, 提出 Y 型甩刀交错排列方式, 以提高马铃薯杀秧效率^[24]。吕金庆等对甩刀结构进行优化, 根据垄上、垄侧、垄沟的垄形特点实现仿垄形作业, 达到最佳的切割效果, 甩刀采用双螺旋线排列, 提高了杀秧质量和作业稳定性, 通过试验分析得出最佳的杀秧辊转速、杀秧机前进速度, 为马铃薯杀秧机提供了参考依据^[25-26]。国内马铃薯杀秧机主要针对大垄双行和大垄单行栽培模式为主, 如中机美诺研制的 1802、1804, 山东希森天成 4JM-180、4JM-360B 等机型适用于大垄单行模式, 青岛洪珠、宁津奥华等生产的 1JH-110 型适用于大垄双行模式。以上机型均采用仿垄形刀辊, 甩刀按照双螺旋线对称分布, 加装防反转超越离合器装置, 抛秧方式采用导流板向垄沟铺放形式。国内马铃薯杀秧机已基本满足当前产业需求, 达到了国际先进水平, 代表机型及具体参数如表 2 所示。

表 2 国内马铃薯杀秧机代表机型基本技术参数

Table 2 Basic technical parameters of domestic typical potato vine cutter

品牌/型号 Brand/Model	技术特点 Technical characteristics
美诺/1804MENOBLE/1804	后置悬挂式, 配套动力 66.2~88.3 kW, 拖拉机输出转速 760 r·min ⁻¹ , 适用于大垄单行栽培模式, 行距 80/90 cm, 一次作业 4 行, 双侧带传动形式, 通过限位轮和拖拉机三点悬挂调节留茬高度, 工作效率 1~1.5 hm ² ·h ⁻¹ 。
希森/4JM-360B XISEN/4JM-360B	后置悬挂式, 配套动力 73.6~132.4 kW, 拖拉机输出转速 760 r·min ⁻¹ , 适用于大垄单行栽培模式, 行距 90 cm, 一次作业 4 行, 双侧带传动, 5 种刀片组合仿垄型刀辊, 通过限位轮和拖拉机三点悬挂调节留茬高度, 工作效率 1.4~2.5 hm ² ·h ⁻¹ 。
洪珠/1JH-110 HONGZHU/1JH-110	后置悬挂式, 配套动力 18.4~33.1 kW, 工作幅宽 1 000 mm, 刀辊工作转速 2 000 r·min ⁻¹ , 适用于大垄双行栽培模式, 一次作业 1 垄 2 行, 单侧带传动形式, 多种甩刀排列仿垄型刀辊, 转速高, 吸力大, 工作效率 0.26~0.33 hm ² ·h ⁻¹ 。

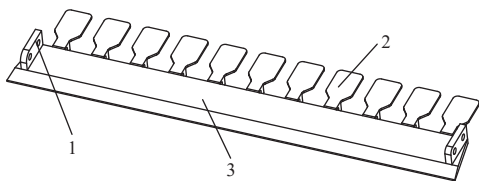
2.2 挖掘装置及关键技术

挖掘装置是将马铃薯茎体薯-土-秧等混合物顺利掘起并输送到分离装置的关键部件，主要由挖掘铲、防堵装置和限深装置组成。

2.2.1 挖掘铲

挖掘铲是挖掘过程中的主要触土部件，减小挖掘阻力，可以有效降低机组油耗，提高碎土性能，直接影响薯土分离效果，因此，挖掘铲减阻碎土技术一直是行业关键技术之一^[27-30]。目前，应用较广的挖掘铲有固定式和激振式，其中固定式挖掘铲主要有整体式平面铲、分体式平面组合铲、分体式仿生铲^[31-34]、振动挖掘铲。在材料选择上，国内大多采用 65Mn 及合金化硼钢，具有较高的耐磨性和良好的耐疲劳性能，且刃口敏感性小。

(1) 整体式平面铲。结构简单，制造成本低，便于安装，在国内小型薯类收获机中应用较普遍，例如青岛洪珠 4U-90、4U-120、4U-130 等，希森天成 4UX-80、4UX-100、4UX-120 等。如图 1 所示，该挖掘铲入土角度小于 24°，铲面宽度一般小于 200 mm，在挖掘铲后端与分离装置的过渡间隙安装分石栅，防止石块等坚硬物体卡滞分离装置。



1. 机架连接点 2. 分石栅 3. 挖掘铲
1. Frame fixing point 2. Stone screening grid 3. Digging shovel

图 1 整体式平面铲结构图

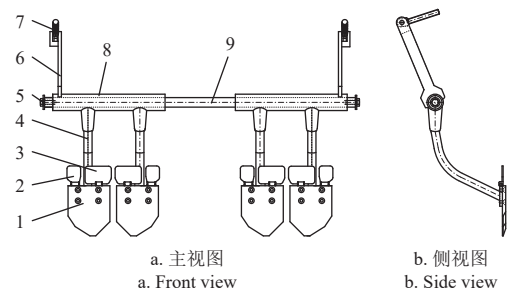
Fig.1 Structure diagram of integrated flat shovel

(2) 分体式平面组合铲。具有一定的减阻碎土效果，且能调节入土角度，以适应不同类型的土壤。为使挖掘铲有良好的入土性能，且避免铲身过长，分体式平面组合铲入土角度一般在 30°~42°^[35]。

如图 2 所示，平面铲独立安装在角度可调的悬臂托架上，可以由多种不同的平面铲组合而成，铲子前端一般加工成尖角斜刃，具有良好的滑切性能，可适当减小挖掘阻力。铲子之间留有滑草间隙，保证杂草、残秧顺利通过，不缠挂、不堵塞。此类挖掘铲应用比较广泛，例如德国 GRIMME 公司、比利时 AVR 公司、德国 ROPA 公司等生产的大型马铃薯联合收获机，中国农业大学设计的 MZPH-820 型单行马铃薯收获机、东北农业大学设计的 4U2A 型双行马铃薯挖掘机和甘肃农业大学设计的 4U-1 000 型大垄双行马铃薯收获机等^[36-38]。

(3) 分体式仿生铲。土壤动物长期生活地下，具有能有效降低挖掘阻力、土壤黏附和运动磨损的身体结构，为农机触土部件减阻、减黏和表面耐磨特性设计提供了天然范本和优化依据^[39-43]。马铃薯挖掘铲作为典型的农机触土部件之一，至今存在作业阻力大、易粘土、磨损

严重的现象，为解决以上农机触土部件共性问题，国内外科学者、专家团队作了大量的研究工作，为仿生挖掘铲研究提供了参考依据^[44-47]。石林榕等基于对蝼蛄爪趾轮廓设计了马铃薯仿生挖掘铲^[48-49]；包健伦以家兔门齿为仿生原型，设计了仿生自磨锐马铃薯挖掘铲^[50]；YU 等对鼯鼠脚趾进行研究，设计了一种马铃薯仿生挖掘铲^[31,33]；LI 等在穿山甲鳞片的启发下，通过对马铃薯挖掘铲表面进行仿生处理，设计了一种减阻抗粘附仿生挖掘铲^[32]；张兆国等采集野猪头三维模型的点云数据，确定仿生铲的结构曲线，设计了一种仿生挖掘铲^[46,51]。表 3 是以上具体仿生结构及参数特点。



1. 平面铲 2. 分石栅 3. 分石栅 II 4. 悬臂托架 5. 轴端定位螺丝 6. 角度调节杆 7. 角度调节丝杆 8. 挖掘装置主梁 9. 铰接轴
1. Flat shovel 2. Stone screening grid I 3. Stone screening grid II 4. Cantilever bracket 5. Shaft end limit screw 6. Angle adjusting lever 7. Angle adjusting screw 8. Main beam of shovel frame 9. Articulated shaft

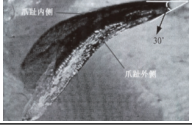

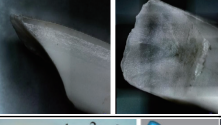

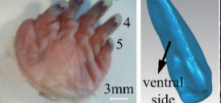

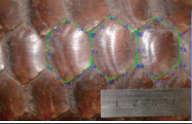

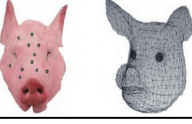
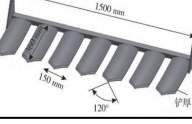
图 2 分体式平面组合铲结构图

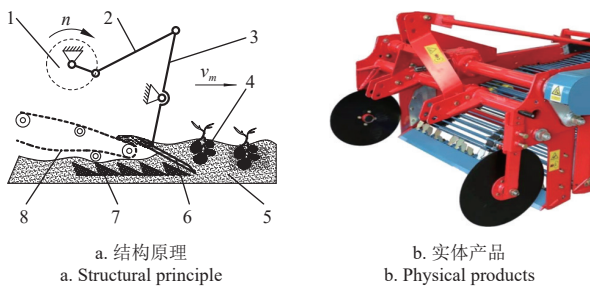
Fig.2 Structural diagram of split flat combination shovel

(4) 振动挖掘铲。振动挖掘是农机触土作业常用的减阻方法，振动挖掘能显著降低挖掘阻力，当激振频率与土壤的自振频率相同或接近时，挖掘阻力最小，能量消耗最少^[52-57]。振动冲击对土堡破碎效果显著，土壤与农作物的分离效果会更好^[58-60]。国外多为大型联合收获装备，对马铃薯振动铲类挖掘机研究较少。BAYBOB-OEV 等针对当地丘陵山区马铃薯种植特点设计了一种小型铲筛联合振动式马铃薯挖掘机^[61]。意大利 Spedo 公司针对丘陵山区马铃薯收获，生产了 Model-CPP-M 薯类收获机，采用曲柄摇杆铲筛一体激振作业，通过挂接在手扶拖拉机上使用，适于山区小地块作业。国内激振式挖掘铲研究较多，常见的一般为铲筛激振式挖掘机，如吕金庆等设计的 4U1Z 型振动式马铃薯挖掘机^[62]。刘潇等设计的振动式马铃薯挖掘装置^[63]。张华等研制的振铲式马铃薯挖掘机^[64-65]。这些小型激振式马铃薯挖掘机多用于西北、西南等丘陵山区小块地、山坡地。对于中小型马铃薯动刀挖掘机，典型的如青岛洪珠 4U-90D 和 4U-160D、青岛鸿雷 4UX-120、4UX-140 等，这些机型采用曲柄摇杆机构，将固定式条形铲改为活动铲，以高频低幅激振挖掘，有效减少了挖掘阻力，并且具有明显的碎土效果，提高了分离筛分离效果，对拖拉机马力要求低，适于粘重型土壤区域使用，如部分东北地区、大部分西南及南方地区。振动铲式薯类收获机如图 3 所示。

表3 典型的仿生实例及参数特点

Table 3 Typical specific bionic examples and parameter characteristics

名称 Name	仿生原型 Bionic prototype	结构示意图 Structure diagrams	性能特点 Performance characteristics
马铃薯曲面仿生铲 Potato bionic curved shovel			仿蜈蚣爪趾轮廓设计仿生曲面铲片, 较普通铲片水平阻力减小 11.36%, 垂直向受力减小了 17.65%; 对土壤颗粒间黏结力的破碎率为 62.76%, 较普通铲片曲率变化大, 有利于碎土和排土 ^[44-45] 。
仿生自磨锐马铃薯铲 Bionic self-sharpening potato digging shovel			仿家兔下门齿外形结构, 与普通平铲相比, 油耗降低 8.80%, 自磨锐效果提升 8.33%, 减阻效果提升 12.82% ^[46] 。
马铃薯曲面仿生铲 Potato bionic curved shovel			仿鼯鼠的手指制成曲面仿生挖掘铲, 与平面铲相比, 牵引力和油耗分别下降 13.33% 和 9.18%。更容易对土壤造成破碎 ^[29,31] 。
表面仿生处理挖掘铲 Surface bionic treatment digging shovel			将普通挖掘铲表面设计成穿山甲鳞片状, 减阻性能优于普通挖掘铲, 土槽试验阻力减少 22.26% ^[30] 。
三七仿生挖掘铲 Pseudo-ginseng bionic shovel			采集野猪头三维模型的点云数据确定仿生铲的结构曲线, 仿生挖掘铲的仿真试验减阻率为 19.15%; 土槽试验减阻率为 24.29% ^[42,47] 。

a. 结构原理
a. Structural principleb. 实体产品
b. Physical products

1. 偏心轴承 2. 连杆 3. 往复式铲架 4. 马铃薯 5. 垄体 6. 挖掘铲 7. 挖掘铲运动轨迹 8. 升运链

1. Eccentric bearing 2. Connecting rod 3. Reciprocating shovel frame 4. Potato 5. Ridge 6. Digging shovel 7. Moving track of digging shovel 8. Lifting chain

注: n 为偏心轴承转速, $r \cdot \text{min}^{-1}$; v_m 为机具前进速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。
Note: n is the rotational speed of the eccentric bearing, $r \cdot \text{min}^{-1}$; v_m is the forward speed of the equipment, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图3 振动铲式薯类收获机

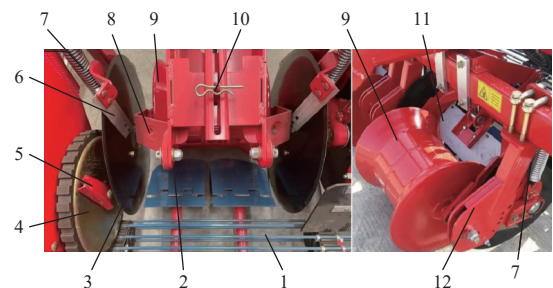
Fig.3 Vibrating shovel potato harvester

2.2.2 防堵限深技术

马铃薯收获机作业时, 垄沟内碎秧、杂草、残膜等易造成机具前端堵塞, 导致机具故障或卡滞, 造成伤薯、误工等。挖掘过程中, 稳定挖掘深度尤为重要, 挖浅易造成伤薯, 挖深易造成分离不佳。因此在马铃薯挖掘机前端安装防堵限深装置必不可少。一般地, 轻筒型马铃薯挖掘机防堵装置分为立辊旋转式、切秧盘式、往复运动甩刀式等, 限深控制以拖拉机三点悬挂配合后置式限深轮进行。中大型马铃薯收获机其防堵限深装置按结构特点及控制原理分为机械式和自适应两种类型。

(1) 机械式防堵限深装置。如图4所示, 中大型马铃薯挖掘机防堵装置主要由切秧盘、仿垄形限深辊、压草轮、输送分离筛前端等组成。作业时, 切秧盘、压草轮及分离筛前端相互配合, 及时将缠挂的碎秧、杂草以

切压、拉拽的形式清除。压草轮和切秧盘均安装弹簧仿形预紧机构和自动清洁装置。限深装置包括仿垄形限深辊、自动清洁装置、仿形预紧装置, 具有稳定挖掘深度、控制掘土量, 防止机器跑偏、轻微松碎、错动垄面土壤, 有助于提高薯土分离效果。切秧盘、仿垄形限深辊高度依靠手动调整, 仿形预紧装置采用机械式弹簧预紧机构。代表性机具具有 GRI>MME WH200、中机美诺 1600 系列、1700 系列、1710 系列, 青岛洪珠 4U-170 系列、希森天成 4U-165 系列、4U-170 系列等。



1. 升运链 2. 挖掘铲 3. 切秧盘 4. 压草轮 5. 压草轮自动清洁装置 6. 切秧盘自动清洁装置 7. 切秧盘弹簧仿形机构 8. 限深辊架 9. 仿垄形限深辊 10. 限深辊弹簧仿形机构 11. 限深辊自动清洁装置 12. 切秧盘架

1. Lifting chain 2. Digging shovel 3. Vine cutting disc 4. Straw roller 5. Automatic cleaning device of straw roller 6. Automatic cleaning device for vine cutting disc 7. Spring floating device of vine cutting disc 8. Depth limiting roller frame 9. Ridge shaped depth limiting roller 10. Depth limiting roller spring floating device 11. Automatic cleaning device for depth limiting roller 12. Vine cutting disc frame

图4 限深防堵装置

Fig.4 Depth limit and anti-blocking device

(2) 自适应防堵限深装置。自适应防堵限深技术在以上机械式结构上融合机、电、液、仪一体化智能技术。切秧盘选配液压驱动式, 转速既可以通过终端控制手动调节, 也可以选择与行走速度相互匹配的自适应模式,

机具挖掘入口发生堵塞时, 圆盘能够自动加速旋转, 以快速清除缠挂的秧膜, 如德国 ROPA 公司 Keiler 系列马铃薯联合收获机。限深装置采用自动垄面减压、挖掘深度自适应控制技术, 如德国 GRIMME 公司研发的 TerraControl 电子液压深度控制装置, 集成了可调节垄压自适应系统^[4]。传感器自动探测垄面压力信息, 通过集成液压与智能测控技术, 保持恒定的垄压浮动作业, 防止垄体被压实, 操控终端能实现 0~100% 的垄压无极调节, 以适应不同的土壤条件。该技术增强了机具对复杂作业工况的适应性, 防堵限深效果更加显著, 操作更便捷。

国内在防堵限深技术上也有突破, 例如魏忠彩等研制的基于多段分离工艺的马铃薯联合收获机, 采用自适应限深技术和机电液控制技术, 限深轮能够在起伏不平的垄面自动仿形, 带动液压缸活塞杆在缸体内伸缩, 使得限深轮与土壤之间的作用力保持不变^[66-67]。

2.2.3 自动对行挖掘技术

马铃薯机械化收获集成技术越来越高, 机具尺寸也随之增大, 田间掉头和对行作业依靠手动操作难度增大, 为了减小地头压伤或作业错行、漏挖等问题, 出现了自动对行挖掘技术^[68-72]。

国外对马铃薯、甜菜、胡萝卜、洋葱等根茎作物自动对行挖掘系统的研究起步较早^[69-71]。欧美等发达国家自动对行技术已产品化, 提高了作业精度, 减少了收获损失, 有效降低了驾驶员作业强度。如德国 GRIMME 公司生产的侧牵引式 EVO 系列、SE 系列等根茎类联合收获机, 在前进方向最右侧限深辊前端安装非接触式角度传感器, 实时监测限深辊相对于行进方向的倾斜角来判断限深轮位置, 控制器根据传感器信号向牵引杆发出转向控制信号, 对应的液压执行单元给出校正措施。荷兰 PLOEGER OXBO AR-4BX、GRIMME VARITRON 系列等自走式马铃薯收获机, 采用垄沟滑撬与角度传感器相互配合的形式, 实时感触并自动控制前进方向, 实现自动对行。

国内自动对行技术研究起步较晚, 随着智能农业装备的发展, 目前已取得初步成果。李涛等利用角度传感器、垄侧弧形探测板、PID 控制算法、电磁液压技术相结合设计了根茎类作物自动对行系统, 并加载到 4UGS2 型双行甘薯收获机上得到了预期的试验效果^[72-73]。杨然兵等在 2011 年中国农业工程学会学术年会上提出根茎作物对行收获技术, 并且运用到花生收获机上作了初步试验^[74]。王申莹等对土下作物自动对行收获机构进行软件仿真、台架试验, 最终研制了牵引式甜菜联合收获机自动对行系统^[75-77]。国内根茎作物自动对行收获技术还处于试验改进阶段, 正向产品化方向不断迈进。

2.3 马铃薯低损高效分离输送技术

马铃薯分离输送技术在国内均均是制约马铃薯机械化发展的关键因素, 含杂率、损伤率、可靠性均是考核马铃薯分输送装置的关键指标。当前普遍使用的分离输送装置主要有杆条升运链、振动式栅条分离筛、摆动分

离筛、滚筒筛、输送带分离网筛、刷辊式分离筛、气吸式分离筛、刷辊-输送带式分离筛等, 其中一部分作为辅助分离或输送机构。

2.3.1 中小型马铃薯挖掘机低损高效分离技术

对于分段收获的中小型马铃薯挖掘机, 当前应用较广的是杆条升运链和振动式栅条分离筛。杆条升运链组成包括杆条、固定杆条的橡胶带或滚子链、支撑轮、导向轮、振动轮、驱动轮等。振动式栅条分离筛用于微型挖掘机, 与手扶拖拉机配套使用, 结构简单, 广泛用于西北、西南等山区小块地作业。

国外马铃薯机械化技术高, 多以大田作业为主, 中小型马铃薯挖掘机较少, 德国 GRIMME 公司生产的 WH200 系列、WR200 系列, 采用杆条升运链分离输送装置, 橡胶带耐磨损、耐老化性能好, 杆条选用优质钢材, 具有良好的强度和耐磨性, 为避免马铃薯损伤采用硫化胶杆, 表面柔软且耐磨。如 WR200 高配置马铃薯挖掘机的一级分离筛摇摆振动器采用电控液压驱动装置, 旋转振动器振幅调节采用电液推杆, 两种振动机构的频率和振幅均可以通过驾驶终端面板无极调节, 分离筛倾角可通过电控液压缸调整地轮高低调节倾角变化。整个分离输送装置核心参数调节便利, 机具适应性增强, 保证了稳定可靠的薯土分离效果。

为满足国内各区域复杂土壤条件的薯土分离效果及低损伤收获要求, 国内学者作了大量研究^[78-83]。吕金庆等针对东北黏重土壤收获条件下直杆对土薯输送能力不佳、薯块来回滚落擦伤的问题, 研究设计了一种直-弯-弯-直配置形式的杆条升运链^[37,83], 并研究分析了马铃薯分离输送过程中块茎伤薯机理, 对杆条升运链线速度、倾角、跌落高度等主要参数进行了优化^[84-86]。魏忠彩等针对现有马铃薯收获机薯土分离效果不理想、伤薯率和破皮率较高等问题, 研究了高频低幅振动分离、双重缓冲减速分离、两级波浪形分离输送、薯秧分离及侧输出、低位铺放等多种薯土分离工艺, 研制了多种低损高效分离马铃薯收获机^[87-91]。冯斌等针对西北旱作区马铃薯收获机械分离损伤率高的问题, 结合动力学分析块茎损伤因素, 并结合台架进行碰撞试验, 探明损伤机理, 研制了多种适合西北地区的低损型马铃薯挖掘机, 如全膜覆土垄播马铃薯挖掘机、小型振筛式马铃薯挖掘机等^[92-94]。张兆国等针对云南山地粘重土壤条件下马铃薯机械化收获分离效果差、明薯率低、伤薯率和破皮率较高等问题, 采用多级分离振动、多重缓冲和低位侧铺的方式, 设计了多级分离缓冲马铃薯收获机, 并通过试验得出二三级分离筛、侧铺放分离筛的最佳线速度、倾角、振动强度等主要参数^[12]。WU 等针对南方冬作区稻草覆盖马铃薯收获阶段土壤水分大、黏度大、分离效果差的问题, 研制了一种集剪切、松碎、抛抛、清洗和输送功能的马铃薯分离装置^[95-96]。近年来, 国内中小型马铃薯挖掘机发展速度较快, 以中机美诺、青岛洪珠、希森天成、黑龙江德沃为代表的国产品牌, 在中小型马铃薯分离输送、低损收获技术上已经接近国际水平, 但大多以纯机械模

式为主, 面对国内复杂多样的土壤条件, 补齐分离输送装置核心参数调整、电控液压技术等方面短板, 增强机具适应性, 具有重要的意义^[97-98]。

2.3.2 马铃薯联合收获机械低损高效分离技术

根据国家标准, 马铃薯联合收获机伤薯率不大于 2%, 破皮率不大于 3%, 含杂率不大于 4%^[99]。马铃薯机械损伤主要发生于分离输送环节, 含杂率高低主要取决于分离机构分离效果, 因此, 低损高效分离技术是马铃薯联合收获机械的核心技术, 研究基于低损伤条件下薯土、薯秧、薯膜、薯石等分离技术具有重要意义。

(1) 薯土分离技术

马铃薯薯土分离装置工作时承受负荷大, 其单位宽度喂入量达 100~150 kg/(s·m)。对于马铃薯联合收获机械, 薯土分离过程伴随整个输送轨迹的始终。当前, 典型的薯土分离技术主要包括前端两级以上升运链、刺猬筛组合分离单元、辊轴分离机、自动分拣清洁装置等。

1) 两级及以上升运链。前端两级及以上升运链是马铃薯联合收获机械最主要的薯土分离装置。目前, 欧美等发达国家对于薯土分离装置多采用液压系统独立驱动。如德国 GRIMME 侧牵引式马铃薯联合收获机普遍

应用 VarioDrive 无极变速驱动系统, 一、二级升运链线速度、振动频率均可无极调节, 必要时可以反转排除堵塞, 振幅支撑轮高度由电液推杆控制, 无极调节振幅大小, 升运链下方安装自动清泥及土块破碎装置, 不易粘堵。较为先进的马铃薯联合收获机的薯土分离装置具有自动甩泥清洁功能, 如德国 GRIMME Turbo Clean 具有高速甩泥功能, 当薯土分离装置粘附的土壤较多时, 可以一键启动高速甩泥功能, 通过离心原理将粘土甩掉, 保证分离单元持续高效工作。此外, 对升运链安装打滑监控装置, 根据压力传感器实时监测输出速度、过载、打滑等情况, 系统会自动加速并向终端发送警告信息。

2) 刺猬筛组合分离单元。在国外马铃薯联合收获机应用比较普遍, 对前端两级升运链无法分离的土块、石块及残秧进行再分离, 且有效清洁薯块表面粘土, 德国 GRIMME 公司、ROPA 公司、比利时 AVR 公司等均有应用。其基本结构由刺猬筛与橡胶辊、旋转指状棒、排刷、分拣排辊等组合而成, 根据功能不同有多种配置模式, 例如: 刺猬筛+橡胶辊模式、刺猬筛+旋转指状棒模式、刺猬筛+排刷模式或者大倾角后置刺猬筛等, 具体技术特点及应用机型如表 4 所示。

表 4 国外刺猬筛组合分离单元结构及技术特点

Table 4 Structure and technical characteristics of foreign hedgehog screen combination separation unit

序号 No.	组合模式 Combined mode	技术特点 Technical characteristics	应用机型 Supporting model
1	刺猬筛+橡胶辊	一般位于前端两级升运链之后, 具有定向输送、二次分离、清洁马铃薯表面粘土等功能, 一般地, 平滑辊和螺旋线辊配合使用, 螺旋线辊位于下方, 可以更有效地破碎土块、分离残秧, 且对马铃薯具有更高的输送效率。此外, 刺猬筛线速度、橡胶辊转速、橡胶辊与筛面间隙、筛面倾斜度等参数均可液压无极调节, 增强土壤条件适应性。	德国 GRIMME EVO 系列, ROPA keiler 系列
2	刺猬筛+指状棒+橡胶辊	一般位于人工分拣平台之前, 在刺猬筛上方安装旋转指状棒机构, 运转方向与刺猬筛输送方向交错分布, 主要用于土块多, 石头少的土壤条件, 可以将未分离的土块、石头自动分拣出来, 并配合橡胶辊定向输送到排杂输送链, 刺猬筛线速度、旋转指状棒线速度均可液压无极调节, 当遇到斜坡作业时, 可以自动调平。	GRIMME SE、EVO 等系列, VENTOR4150
3	刺猬筛+排刷+橡胶辊	可以根据实际土壤条件进行选配, 主要用于石头较多的土壤条件, 可以将未分离石头自动分拣出来, 并配合橡胶平滑辊定向输送到排杂输送链, 在刺猬筛上方安装 3~5 组旋转排刷, 核心参数可液压无极调节, 具有自动调平功能。	
4	后置刺猬筛+橡胶辊	一般用于联合收获机最后端, 刺猬筛下端可以选装 1~2 根橡胶辊, 一方面降低马铃薯跌落高度, 另一方面可以继续将未分离土块、杂秧排出机外。大倾角刺猬筛分离原理, 即运用马铃薯、土块、残秧在刺猬筛的不同摩擦性能, 将土块和残秧分离出去, 必要时可以反转排除堵塞等故障。	GRIMME VARITRON470, GT170、AVR puma 系列, Lynx

3) 辊轴分离机。能够适应多种复杂的土壤环境, 对残秧等杂物也能有效分离, 一般位于升运链之后, 国外马铃薯及甜菜等根茎类作物联合收获机被广泛应用, 其结构形式有横向高低分布型、纵向分布型、纵横交错型。

螺旋线橡胶辊组由螺旋线橡胶辊和平滑辊交替分布, 高低错落, 有助于破碎土壤并向后输送, 且转向相反, 可以将土块和残秧向下拉拽, 适用于粘重型土壤条件分离。纵向型橡胶辊组适用于较轻型土壤条件, 由转向相反的螺旋线橡胶辊组成, 倾斜向下安装, 便于马铃薯向后滚落输送, 有些为延长薯土混合物分离时间和避免马铃薯滚落速度过快导致伤薯, 在纵向辊组上方安装多排柔性垂帘。纵横交错型即是以上两者的组合, 薯土分离效果更加明显。国外对橡胶辊组分离单元应用较广, 且结合机电液一体化技术, 其转速、间隙、纵向分布辊倾角均可通过控制终端无极调节。例如, 德国 GRIMME 公司生产的提升臂式、自走式马铃薯联合收获机使用的 Mul-

tiSep 多功能分离器就是典型的高低橡胶分离辊组^[100-101]。比利时 AVR 马铃薯联合收获机的 CR 清洁单元、Ploeger 公司生产的 AR-3BX、AR-4BX 马铃薯联合收获机的 PSHS 清洁单元等。

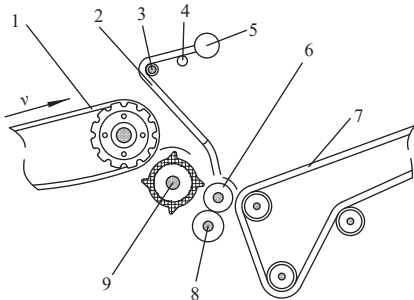
4) 自动分拣清洁装置。大部分马铃薯联合收获机械, 都设计有人工拣选输送平台, 用于分拣未分离土块、石块、残秧等, 可缓解人工分拣压力和辅助清洁马铃薯表皮粘土。自动分拣清洁装置安装于拣选平台前端或者中间位置, 常用的有片状辊轴筛和星形拨指辊轴筛。德国 GRIMME 公司生产的 SE 系列马铃薯联合收获机自动分拣清洁装置, 将柔性橡胶片按照一定间距包铸成片状橡胶辊轴, 再将辊轴等轴距或非等轴距安装到人工拣选平台, 并使其同向转动, 既有良好的输送作用, 也能分拣土块、杂秧及清洁马铃薯表皮粘土。通过控制终端可调节辊轴转速, 必要时可反转排除故障。美国 Double L 公司生产的 7340、973 等马铃薯联合收获机侧向提升输送

机构中采用的除杂清洁单元，选用星形拨指辊轴筛，该星形拨指轮选用一种聚氨酯材料，既有耐磨损、弹性好、不易粘土、不易伤薯等优良特性，且能满足良好的输送分离效果。

(2) 薯秧、薯膜分离技术

马铃薯联合收获过程中，残秧、残地膜分离也是必不可少的。一般地，薯秧、薯膜分离技术有简易型重力球档杆配除杂辊装置、粗秧网分离装置、气流清选装置等^[102]。

1) 重力球档杆配除杂辊装置。一般在一、二级升运链末端均安装有简易型除秧装置，如图 5 所示，主要由重力球挡杆、除杂辊、光辊构成。除杂辊表面硫化成螺旋线状包胶层，转向、转速和升运链主动轴一致，光辊转向与除杂辊相反，工作时，残秧等杂物在重力球挡杆的阻挠下，被除杂辊与光辊对转间隙中分离出去。

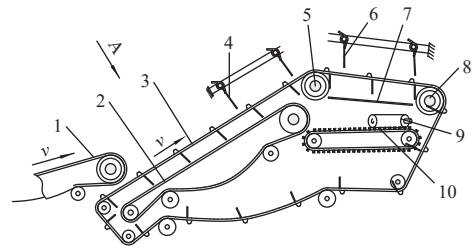


1. 升运链 2. 挡杆 3. 铰接轴 4. 限位杆 5. 重力球 6. 光辊 7. 后升运链 8. 光辊 II 9. 除杂辊
1. Lifting chain 2. Bars 3. Articulated shaft 4. Limit lever 5. Gravity ball 6. Smooth roll I 7. Rear lifting chain 8. Smooth roll II 9. Impurity removal roller
注： v 为分离筛线速度， $m \cdot s^{-1}$ 。
Note: v is line speed of the separation screen, $m \cdot s^{-1}$ 。

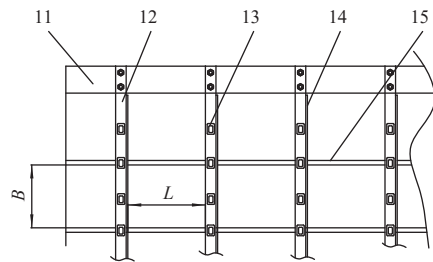
图 5 简易型分秧装置
Fig.5 Simple device for separating vines

2) 粗秧网分离装置。用于残秧、残膜、杂草等分离，如图 6 所示，该装置由一级升运链、二级升运链、粗秧网、刺猬筛组合分离单元、扭簧挡薯板、挡秧板等组成。粗秧网环绕在二级升运链及刺猬筛分离单元外围，工作时，粗秧网运行方向、线速度和二级升运链完全一致。一级升运链将薯、土、秧、膜等混合物抛送到粗秧网上，薯块透过大筛眼跌落到二级升运链上，在粗秧网橡胶刮板辅助下提升到刺猬筛分离平台，粗大的茎秧、地膜、杂草等无法透过筛眼被强制输送到后方抛向机外，其中粗秧网方孔长和宽约为 150~280 mm。粗秧网横向杆条硫化处理且有柔性钉齿，便于拖拽残秧、地膜、杂草向上提升输送。当二级升运链角度平缓，则无需安装刮板。该除秧方法目前被国内外普遍应用，如青岛洪珠、丹阳荣嘉等制造的牵引式马铃薯联合收获机，德国 GRIMME、比利时 AVR Spirit 等牵引式马铃薯联合收获机。

3) 气流清选技术。该技术不仅运用于谷物联合收获机，马铃薯联合收获机也运用较广。美国 Double L 7340、973 系列，SPUDNIK 公司的 6621 AirSep、6631 AirSep 系列牵引式马铃薯联合收获机在靠近机器尾部安装鼓风机装置，将气流引入升运链与机尾输送筛抛落点，对正在下落的马铃薯和残秧输送强大的气流，将残秧等轻质杂物吹出机外。



a. 粗秧网主视图结构
a. Main view structure of separated vine net



b. 粗秧网A向局部视图
b. Partial view of separated vine net in direction A

1. 一级升运链 2. 二级升运链 3. 分秧网 4. 扭簧挡薯板 5. 驱动轮 6. 扭簧刮秧板 7. 挡秧板 8. 驱动轮 9. 清泥辊 10. 刺猬筛 11. 橡胶带 12. 杆条 13. 杆条钉齿 14. 橡胶刮板 15. 纵向柔性胶条
1. Primary lifting chain 2. Secondary lifting chain 3. Vines separating net 4. Torsion spring baffle 5. Driving wheel 6. Torsion spring baffle 7. Vine baffle 8. Driving wheel 9. Mud cleaning roller 10. Hedgehog sieve 11. Rubber belt 12. Rod 13. Rod spike tooth 14. Rubber baffle 15. Longitudinal rubber strip
注： L 为分秧网孔长，mm； B 为秧网孔宽，mm。
Note: L is the length of vines separating hole, mm; B is the width of vines separating hole, mm.

图 6 分秧网结构图

Fig.6 Structure diagram of vines separating net

(3) 联合收获低损保护技术

根据国家标准，马铃薯联合收获机械伤薯率应低于 2%，破皮率应低于 3%^[99]。在分离输送过程中，马铃薯通过路径复杂且长，是导致机械损伤的关键因素。目前，马铃薯收获机械降低损伤的技术包括分离输送装置柔性处理与多重缓冲挡帘设计、可视化智能监控、低位集装卸料等。

1) 分离装置柔性处理。一般地，联合收获机二级以上杆条升运链、辊轴分离机、清洁装置等多采用柔性包胶处理，对薯块起到缓冲保护作用，使用的硫化橡胶材料具有良好的耐磨损、耐老化等性能。对分离输送单元倾角较大、易跌落损伤位点设计多重缓冲柔性挡帘，对马铃薯进行减速保护。

2) 欧美发达国家主要采取机电液一体化技术，对整个分离输送过程进行可视化监测、终端参数调整、多位缓冲等技术手段来降低马铃薯机械损伤。德国 GRIMME 公司 Visual Protect: CAN-Bus 可视化保护监控系统，在马铃薯联合收获机上安装多个视频监控，通过驾驶终端对马铃薯整个分离过程进行监控，遇到堵塞等分离故障，终端系统会发出报警并能及时进行处理，避免了持续伤薯情况发生，也降低了机器损坏的风险。

3) 低位集装卸料技术。国外大型联合收获机在料斗集装过程中采用了自动辅助提升装置和自动填充优化装置，在滚动底板料斗的物料填充过程中，输送平台末端装有光学传感器或超声传感器，自动识别料斗中马铃薯填充高度，始终保持低位填充状态，降低马铃薯跌落损

伤,其中超声传感器用于不同外皮颜色的马铃薯识别。自动填充装置的作用是当料斗中马铃薯小范围堆升至最高位时,料斗滚动底板将自动向前拉动,直到填满整个料斗。

装车卸料过程中,为避免马铃薯跌落高度过高导致损伤,国外马铃薯联合收获机均采用了卸料口下探技术,通过液压调整卸料口下探高度,始终保持低位卸料。部分收获机在卸料口装有柔性缓冲条带,减缓马铃薯下落速度,避免高速碰撞损伤。此外,装车提升臂能够实现转速自动匹配,并在卸料口顶端安装视频监控,随时观察车厢马铃薯集装情况。

2.4 多功能底盘行走系统

根据马铃薯联合收获机类型,底盘行走系统一般分为自走式和牵引式两种。自走式底盘行走系统有轮式底盘、履带底盘、履带和轮式复合型底盘等。牵引式底盘行走系统主要以轮式底盘为主,分为驱动轮式和从动轮式两种。

近年来,国内学者针对丘陵山区复杂地形,对农用底盘技术研究较多^[103-108],但针对马铃薯联合收获机底盘研究较少。青岛洪珠、黑龙江德沃、绥化心语机械、农业农村部南京农机化研究所、甘肃农业大学等企业、科研团队研制了多种适于丘陵山区的马铃薯联合收获机,部分机械采用静液压传动履带底盘,实现了无级变速行走,但可靠性仍有待提高^[109-113]。

国外马铃薯联合收获机械底盘采用机电液一体化技术,具有坡地自动调平、后轮自动回正、自动驾驶等多项功能,采用液压控制的对行伸缩式轮轴,便于窄路面行走,且避免行距不匹配,薯块压伤等问题,采用静液压独轮驱动技术,具有很好的防滑作用,能适应潮湿等复杂作业工况^[114]。

2.5 智能化技术

智能农机装备是融合土壤、植物、农机和农艺等知识信息,集成机械、电子、信息、控制等多领域的高新技术,是智慧农业的先进生产力^[115-120]。马铃薯收获装备智能化可大幅提高工作效率和收获质量、降低生产成本,尤其在马铃薯挖掘、分离、输送、集装等环节降低机械损伤率及含杂率、监测机具工作状态、自适应调整参数以及驾驶舒适性等方面具有重要的意义。国内马铃薯机械化收获还未完全普及,智能化处于起步阶段,与欧美、日韩等发达国家仍有较大的差距。目前已使用的智能化技术有以下几方面:

(1) 挖掘装置智能化。包括收获机前端自动对行挖掘技术及自动垄上减压深度控制技术。采用传感器与电磁液压控制技术实现限深辊垄上自动定心、垄面恒定压力、恒定挖掘深度下自动对行作业。

(2) 分离输送装置智能化。包括功率自平衡、智能分拣、过载保护监控、低位填充等,对于功率自平衡功能,如 GRIMME SE、EVO 等系列马铃薯联合收获机,采用自带液压系统实现分离装置全液压驱动,并配置

负载敏感比例控制系统,根据具体收获条件自动调整转速,判断各分离输送部件相应负载率并作出反应,始终保持分离装置平稳运行。马铃薯收获机械智能分拣系统以刺猬筛配指状棒分离装置、刺猬筛配副排及柔性片状辊轴筛等为主,均采用机电液相结合,辅助分离土块、石头等杂物,此外,基于机器视觉的马铃薯智能分拣系统正处于研究推广阶段并逐步成熟^[121-126],其中过载保护监控、低位集装卸料智能化技术已在本文具体关键技术明晰。

(3) 智能视图系统。采用多组影像设备及传感器对机外环境以及各运行单元进行监控,能够对机器运行状态实时监控并具有自动报警、自动切换故障画面等功能,视屏画面可变焦、慢放、通过 WIFI 实时传输,使工作人员实时监控机具工作状态,如 GRIMME 4150、AVR Puma 4 等机型。

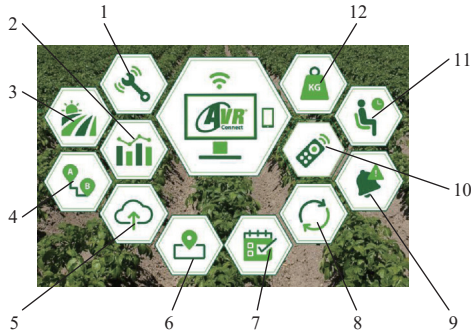
(4) 振动检测与自动测产。振动检测指使用带有三周加速度传感器的碰撞检测记录仪,跟随马铃薯运动路径进行跟踪监测,并以蓝牙或 USB 输出马铃薯振动、碰撞等数据,针对具体检测结果修正相应工作参数,达到降低损伤的目的^[88-89]。自动测产指收获机加载一种称量系统,包括质量传感器、坡度传感器、精密 GPS 接收器及数据存储处理软件等^[127],能够记录田间产量差异及特定区域产量,分区域生成产量地图,并借助农场管理信息系统生成肥料、农药、灌溉、种子等应用地图,如 GRIMME 公司的质量映射系统、AVR Puma 4 采用的产量测量系统。

(5) 地面仿形位姿调整。为满足丘陵山地马铃薯收获要求,国内外马铃薯联合收获机械大多采用自适应电磁液压调平底盘结构,能够在有限的斜坡条件下进行正常收获作业,例如 GRIMME 4150、SE、EVO 系列、AVR Puma 4 等高配收获机型,对各级分离装置、分拣清洁装置、集装箱体等均能通过电磁液压控制技术 & 传感器识别功能自适应调节倾角变化。

(6) 人机交互技术。指人与计算机相结合,充分利用计算机数据存储、处理、传输等方面的优势,以简单的人机对话完成信息交换和分配任务,是集机电液仪等技术于一体并搭载基于 PDA/GPS/GPRS/GIS 等技术的驾驶室终端人机交互操作系统^[128-131]。

德国 GRIMME 公司、比利时 AVR 公司采用的 ISOBUS 农用机械串行控制和数据通信标准总线技术,通过 CCI 多点触控操作终实时监测并控制各单元工作状态。此外,还配套了 SmartView 智能视图监测辅助系统、农业路由器 agrirouter、质量映射等数据平台。

比利时 AVR 公司还采用了 Connect 智能农业平台,结合 WatchItGrow 平台采集外部田间地理信息和作物生长信息,实时记录收获机收获时间、燃油消耗、产量等重要参数,能够对机器进行远程诊断、参数调整、可视化监测、实时场内位置及路线规划、远程报警、优化安全地理围栏等功能,如图 7 所示。



1. 远程诊断 2. 数据统计 3. 田间管理 4. 实时位置及路线 5. 数据交换 6. 地理围栏 7. 维护计划优化 8. 远程软件更新 9. 故障报警 10. 远程概述及历史记录 11. 等待时间记录及优化 12. 产量测量
1. Remote diagnosis 2. Data statistics 3. Field management 4. Realtime position & route 5. Data exchange 6. Geofencing 7. Optimize maintenance planning 8. Remote software update 9. Remote alarms 10. Remote overview & history 11. Register waiting times to optimize 12. Integrated yield measurement

图 7 AVR connect 智能平台
Fig.7 AVR connect intelligent system

3 国内外马铃薯收获装备

3.1 中小型马铃薯挖掘机

国内马铃薯除新疆、内蒙、东北等部分区域有规模化种植外，其他多分布于丘陵山区，地块小，且多以个体农户及小规模种植为主。

国内生产企业及科研团队针对我国马铃薯种植特点，重点以挖掘、分离、铺放、人工捡拾的分段收获模式为主，研制了多种中小型马铃薯挖掘机，目前已经作为国内主流马铃薯收获装备。典型的中小型马铃薯挖掘机及其特点如表 5 所示。

3.2 马铃薯捡拾装备

国内马铃薯主要以挖掘、条铺为主，人工捡拾劳动强度大，成本高，且收获季节用工荒严重。在马铃薯联合收获技术还未取得产品化阶段前，研究马铃薯机械化捡拾装备具有重要意义^[135-140]。

表 5 典型中小型马铃薯挖掘机结构及技术特点

Table 5 Structure and technical characteristics of some typical medium and small potato diggers




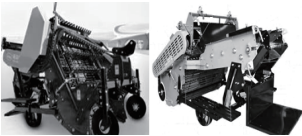
名称/型号 Name/model	结构示意图 Structure diagram	技术特点 Technical characteristics
4UIZ 型振动式马铃薯挖掘机 4UIZ Vibratory potato digger		运用偏心振动原理，使铲、筛激振作业，适用于西南地区小地块区域及小区育种等马铃薯收获，采用偏牵引结构，用于小垄单垄挖掘作业，配套动力 14.7~18.4 kW，作业幅宽 480 mm，挖掘深度 100~200 mm，适应行距 750~900 mm ^[62] 。
残膜回收型马铃薯挖掘机 Potato digger with residual film recovery		采用分体式仿生挖掘铲、杆条升运链分离装置和卷轴式残膜回收机构，作业幅宽 1 000 mm，配套动力 22.1~29.4 kW，挖掘深度为 80~300 mm，挖掘铲入土角度可调，卷膜幅宽 1 000 mm，生产率为 0.15~0.27 hm ² ·h ⁻¹ ，适用于西北旱区大垄双行覆膜栽培马铃薯挖掘作业，并附带残膜捡拾功能 ^[35] 。
拨辊推送式马铃薯收获机 Poking roller shoving type potato harvester		分离装置由 5 个橡胶拨辊组成，每个拨辊由 3 齿橡胶拨辊间隔构成，橡胶拨辊半径 230 mm，且相邻拨辊拨齿交错排列。配套动力为 8.8~14.7 kW 的小型拖拉机，作业幅宽 800 mm，单垄作业，作业速度 0.8~1.2 m·s ⁻¹ ，作业深度 120~240 mm ^[132] 。
粘重土壤下马铃薯挖掘机 Potato digger in clayey soil		采用小型拖拉机悬挂作业，由两级大节距杆条升运链组成薯土分离机构，一级升运链前端安装有拨指轮式碎土辊，对土块提前破碎，一级升运链与二级升运链过渡处安装螺旋线橡胶茎干分离辊，促进薯秧分离，该机具适于黏重土壤下单垄作业 ^[96] 。
多级分离缓冲马铃薯收获机 Multi-stage separation buffer potato harvester		采用拖拉机悬挂作业，多级分离振动、多重缓冲和低位侧铺，整机配套动力为 36.7~51.5 kW，作业幅宽为 900 mm，适应垄宽小于 800 mm，单垄作业模式，生产率约 0.18~0.32 hm ² ·h ⁻¹ ，适于西南黏土条件下马铃薯机械化收获 ^[12,133] 。
动铲薯类收获机 Vibration shovel potato harvester		采用偏心轮机构振动挖掘条形铲减少阻力，碎土效果明显，防止堵土，通过性好，配套动力 25.7~44.2 kW，该系列马铃薯挖掘机作业幅宽 0.9~1.6 m，一次作业 1~2 垄，适于大垄双行和大垄单行等种植模式收获 ^[134] 。
低位铺放双重缓冲马铃薯收获机 Potato harvester using double cushions for low laying separation technology		为降低马铃薯碰撞损伤问题，采用低位铺放形式，并且安装多重缓冲装置降低马铃薯跌落速度。整机配套动力 92~118 kW，一次收获两垄，适应垄宽小于 700 mm，挖掘深度 150~300 mm，属中型马铃薯挖掘机 ^[87,90] 。
4U2A 型双行马铃薯挖掘机 4U2A double-row potato digger		该机具采用悬挂式，配套动力为 88 kW 以上轮式拖拉机，薯土分离装置采用直弯杆升运链，避免薯块往复滚动擦伤。作业幅宽 1 650 mm，一次作业两垄，作业深度 0~300 mm，纯工作生产率 0.4~0.8 hm ² ·h ⁻¹ ^[37] 。
1600B 马铃薯收获机 1600B potato harvester		采用组合挖掘机构，保证挖掘深度一致，浮动圆盘刀设计，更有效切断杂草，减少挖掘阻力，独立液压驱动的镇压装置，可将收获后的垄面压实压平，马铃薯置于压实表面，明薯率进一步提高，工作幅宽 1 600 mm，一次作业两垄，作业垄距 800~900 mm。
4U-1600 型集堆式马铃薯挖掘机 4U-1600 stacking potato digger		采用半悬挂牵引式挂接方式，两级杆条升运链薯土分离装置，附带液压自卸薯块集装箱，配套动力 58.8~88.2 kW，作业幅宽 1 600 mm，一次作业 2 行，适用于大垄双行模式 ^[11] 。

目前,国内马铃薯捡拾机械研究单位较多,如中机美诺、勇猛机械、亨锐科技等企业研究设计了自走式马铃薯捡拾机,正处于试验推广阶段。甘肃洮河拖拉机制

造有限公司、黑龙江省农业机械工程科学研究院等研制了小型牵引式马铃薯捡拾装备。典型的马铃薯捡拾机结构及技术特点如表6所示。

表6 典型的马铃薯捡拾机结构及技术特点

Table 6 Structure and technical characteristics of typical potato pickers

名称/型号 Name/model	结构示意图 Structure diagram	技术特点 Technical characteristics
4UZ-P160A 自走式马铃薯捡拾机 4UZ-P160A self-propelled potato pickup machine		采用静液压四轮驱动底盘,可无级变速,捡拾系统采用防缠绕切碎圆盘+可调捡拾铲刀+双导流辊结构,降低铲前壅土及转动部件缠绕。分离筛液压驱动,速度可调,杆条包胶处理。采用间隙可调拉秧棍+梳理爪,有效去除杂草茎蔓;硫化杆带分离筛+抖动轮,有效分离土壤,且降低了分离过程中机械损伤。配置人工拣选平台,进一步去除残秧和土块等,卸料装置采用液压控制,吨包自动卸至地面。整机长×宽×高:7 980×2 580×3 190 (mm),作业幅宽 1 600 mm,轴距 2.51 m ^[137] 。
4UJ-150 型马铃薯捡拾机 4UJ-150 potato picking machine		采用拖拉机牵引作业,配套动力 29.4~44.1 kW,整机长×宽×高:4 510×1 565×2 165 (mm),作业幅宽 1 500 mm。适于西北丘陵山区马铃薯捡拾,整机由圆形栅条盘喂入机构、一级杆条升运链薯土分离装置、大倾角栅条提升机构、液压自卸式收集箱等组成。
4UJD-110 型马铃薯捡拾分级机 4UJD-110 potato picking and sizing machine		拖拉机牵引作业,作业幅宽 1 100 mm,一级杆条升运链采用双层夹持输送模式,二级升运链采用大角度刮板输送形式,后端配置有栅条分级装袋机构,一次作业完成薯块捡拾、薯土分离、分级装袋等作业工序。
4UJ-1400 型马铃薯捡拾机 4UJ-1400 potato picking machine		拖拉机悬挂作业,配套动力 51.5 kW 以上,作业幅宽 1 400 mm,采用小角度带栅格捡拾挖掘铲,配合切秧圆盘,避免作业时壅堵。使用大角度升运链与柔性夹持链相结合的输送装置,应用梳理齿和夹持棍组合机构,清除残秧。后方设计人工拣选平台,辅助分离石头、土块等,薯袋自卸托盘通过液压升降机构来控制 ^[140] 。

3.3 中小型马铃薯联合收获机械

为提高丘陵区马铃薯机械化收获水平,降低收获期生产成本,解决收获期限短、收获季用工荒严重等问题,国内外对中小型马铃薯联合收获机械均作了大量研究,且设计了多种适于丘陵山区收获作业的中小型马铃薯联合收获机械。如意大利 SPEDO-Junior、日本 TOYONOKI、SANEI、德国 GRIMME 等,大多采用机

电液一体化,技术水平高,可靠性高、操作方便。国内马铃薯联合收获机械化水平较低,农业农村部南京农业机械化研究所、甘肃农业大学、昆明理工大学、重庆市农科院、青岛洪珠、中机美诺、希森天成、绥化心语机械等单位研发的中小型马铃薯联合收获机械,正处于试验改进阶段。当前国内外典型的中小型马铃薯联合收获机械结构及特点如表7所示。

表7 国内外典型的中小型马铃薯联合收获机械结构及技术特点

Table 7 Structure and technical characteristics of typical small and medium sized potato combine harvesting machinery at home and abroad

名称/型号 Name/model	结构示意图 Structure diagram	技术特点 Technical characteristics
GRIMME KT-75 马铃薯收获机 GRIME KT-75 potato harvester		拖拉机半悬挂牵引作业,作业幅宽 750 mm,一级分离筛宽度 750 mm,拣选平台宽度 400 mm。主要包括挖掘装置、直弯杆分离提升装置、横向人工拣选平台、液压自卸式托板等组成。整机分离输送装置采用全液压驱动,可通过流量控制阀无极调节运行速度,分离筛振动机构振幅通过液压缸电控调节,单垄作业,集装形式为吨包或箱体。
意大利 SPEDO SPRA-1/J 马铃薯收获机 Italian SPEDO SPRA-1/J potato harvester		拖拉机半悬挂牵引作业,主要由挖掘装置、带刮板升运链装置、人工拣选平台、液压自卸式托板等组成。作业幅宽 600 mm,拣选平台宽度 850 mm,分布 3 列路径,两侧分拣马铃薯,中间通道用于排杂。分离输送装置采用液压驱动,速度可调,单垄作业,集装形式为吨包或箱体。
东洋农机 TPH179 自走式马铃薯收获机 Toyo Agricultural Machinery TPH179 self-propelled potato harvester		整机长×宽×高:5 700×2 500×2 900 (mm),采用橡胶履带静液压无级变速底盘,行走速度:0~5.5 km·h ⁻¹ ,发动机功率 40.5 kW。轨距可通过液压缸调整,调整范围:2 170~2 670 mm,单垄作业,适应垄距 720~850 mm,具备自动对行和自动仿形限深功能。全车采用全液压驱动,分离输送机构速度、振动频率均可无极调节。采用立式环形输送机构,配置人工捡拾平台。料斗容量 700 kg,采用底板自动输送卸料形式 ^[4,8,12] 。
SANEI EX-ZERO 马铃薯联合收获机 SANEI EX-ZERO potato combine harvester		整机长×宽×高:6 700×2 500×3 150 (mm),一次作业 1 垄,通过 59 kW 以上拖拉机牵引作业,底盘能够自适应调节倾角,适应坡度高达 10%,通过传感器识别,能自动对垄作业,也能自适应垄面控制挖掘深度。分离输送装置采用液压驱动,可无极调速,大容量料斗能加高至 3.8 m ^[12] 。
韩国 SHI-1500 自走式马铃薯收获机 South Korea SHI-1500 self-propelled potato harvester		整机长×宽×高:5 600×2 100×3 100 (mm),属小型自走式马铃薯收获机,采用四轮驱动底盘,100 马力柴油发动机,额定转速 2 400 r·min ⁻¹ 。主要由整体式挖掘铲、杆条升运链、橡胶梳齿型刮板提升装置、人工拣选平台、吨包液压升降托板。作业幅宽 1.5 m,一次挖掘两垄,采用吨包集装方式 ^[12,133] 。

续表 7

名称/型号 Name/model	结构示意图 Structure diagram	技术特点 Technical characteristics
4UFD-1400 型马铃薯联合收获机 4UFD-1400 potato combine harvester		整机长×宽×高: 4 700×2000×2050 (mm), 拖拉机半悬挂牵引作业, 配套动力 44~58.8 kW, 作业幅宽 1 400 mm, 作业深度 0~300 mm (可调)。两级薯块分离装置, 一级茎秆分离, 薯块分级数 3 级, 一次作业完成挖掘、分离、分选、装袋等工序 ^[135-136] 。
遥控自走式马铃薯收获机 Remotely controlled self-propelled potato harvester		一种遥控自走式马铃薯收获机, 整机长×宽×高: 5 700×2000×1900 (mm), 作业幅宽为 1 100 mm, 适于大垄双行种植模式, 发动机动力 36.75 kW, 行走系统采用橡胶履带底盘, 配置人工拣选平台, 吨包集装形式, 整机尺寸小, 结构简单, 通过性能好, 适于西北旱区丘陵山地马铃薯收获作业 ^[141] 。
自走式马铃薯挖掘及残膜回收联合作业机 Self-propelled machine for combined potato harvesting and residual plastic		一种自走式马铃薯挖掘及残膜回收联合作业机, 整机长×宽×高: 6 050×2 150×2 500 (mm), 作业幅宽为 1 100 mm, 适于大垄双行种植模式, 发动机动力 77 kW, 行走系统采用橡胶履带底盘, 采用 HST 静液压传动, 能够无级变速行走, 分离输送装置采用全液压无极变速驱动, 遇到卡滞, 能够反转。配置人工拣选平台, 吨包集装形式, 适于西北旱区丘陵山地马铃薯收获作业 ^[142] 。
4UZL-1 型小型自走式薯类联合收获机 4UZL-1 small self-propelled potato combine harvester		该机具采用自走式履带底盘, 发动机动力: 55 kW, 整机长×宽×高: 5 300×1900×1900 (mm) 单垄收获, 作业幅宽 600 mm, 挖掘深度≤300 mm (可调), 作业效率 0.16~0.33 hm ² ·h ⁻¹ , 采用仿形镇压压深、浮动防缠绕切草、低损薯土分离、弹性摘辊式薯秧分离、可调式三段提升输送等关键技术, 可一次完成挖掘、输送、去土、去残秧、清选和集薯等收获工序 ^[111,143] 。
履带自走式分选型马铃薯收获机 Crawler self-propelled sorting type potato harvester		该机具采用自走式履带底盘, 发动机动力: 21 kW, 涡轮增压, 整机长×宽×高: 4 800×2 060×1 500 (mm) 单垄收获, 作业幅宽 1 000 mm, 挖掘深度≥200 mm (可调), 作业效率: 0.05~0.15 hm ² ·h ⁻¹ 。采用自动对行挖掘薯土分离人工辅助捡拾相结合的马铃薯机械化收获方案, 该机具主要由履带式底盘、自动对行挖掘装置、分离装置及分选装置等关键部件组成, 具有附着力大、高频低幅振动碎土、自动对行挖掘、人工辅助分选和液压驱动模式等技术优势 ^[2] 。
手扶自走式马铃薯收获机 Hand-held self-propelled potato harvester		手扶自走式马铃薯收获机, 整机包括履带底盘行走装置、车架、薯土输送分离装置、拨指碎土机构以及挖掘装置等, 整机长×宽×高: 3 100×800×1 200 (mm), 作业幅宽 600 mm, 适应垄宽小于 800 mm, 单垄收获模式, 其发动机功率 19 kW, 适于云南、重庆等丘陵山地作业 ^[4] 。
山地马铃薯联合收获机 Mountain potato combine harvester		该机具通过履带拖拉机悬挂作业, 配套动力 36.7~51.5 kW, 整机由偏心振动及斜机辅助装置、两级分离装置、清选除装置、清石除杂装置、立式环形分离装置、传动保护装置等组成, 整机长×宽×高: 3 100×800×1 200 (mm), 作业幅宽为 600 mm, 适应垄宽小于 800 mm, 单垄作业模式, 适于西南山区黏重土壤下马铃薯收获作业 ^[144] 。
4UL-170C 小型马铃薯联合收获机 4UL-170C small potato combine harvester		通过拖拉机牵引作业, 配套动力 73.5 kW, 整机长×宽×高 6 300×3 750×2 560 (mm), 作业幅宽 1 700 mm, 适应垄宽 800 mm, 一次可收获 2 垄, 作业效率达到 0.33 hm ² ·h ⁻¹ 以上, 采用等高线深轮进行马铃薯松土和开挖深度限制, 可与侧输出收获机联合使用, 实现 2+2 模式, 共收获 4 垄马铃薯。整机可实现马铃薯的挖掘、薯-土分离、薯-秧分离、集中装车输送等作业 ^[133,144] 。
1700 型马铃薯联合收获机 1700 potato combine harvester		通过拖拉机牵引作业, 配套动力 73.5~103 kW, 整机长×宽×高 6 300×3 800×2 600 (mm), 作业幅宽 1 700 mm, 适应垄距 800~900 mm, 一次可收获 2 垄, 作业效率达到 0.53 hm ² ·h ⁻¹ 以上。采用两级输送分离装置、强制振动、两级除秧装置、组合式挖掘机构等技术, 提升臂采用四级折叠, 运输更便利。一次作业实现马铃薯的挖掘、薯-土分离、薯-秧分离、升运装车等工序 ^[4,133,144] 。
4ULHZ-840 自走式薯类联合收获机 4ULHZ-840 self-propelled potato combine harvester		该机具采用自走式履带底盘, HST 静液压驱动, 无级变速, 发动机额定功率 88 kW, 额定转速 2 400 r·min ⁻¹ 。作业幅宽 900 mm, 适用于大垄双行作业模式, 整机包括一级杆条升运链、重力球配拉茎秆除秧装置、清杂输送分离器、循环提升装置、人工拣选平台、底板输送式集装料斗等组成 ^[12] 。
4ULZ-76 型马铃薯联合收获机 4ULZ-76 potato combine harvester		整机长×宽×高: 6 250×2 150×2 600 (mm), 采用自走式履带底盘, 发动机动力 74 kW, 工作幅宽 760 mm, 生产率为 0.13~0.27 hm ² ·h ⁻¹ , 挖掘深度范围 150~300 mm, 采用杆条升运链分离输送装置, 配置人工拣选平台, 可实现单垄马铃薯挖掘、薯土分离、升运输送、集箱装运一体化作业, 适用于丘陵山区及小地块马铃薯收获。
4U-95DH 型马铃薯联合收获机 4U-95DH potato combine harvester		整机长×宽×高: 3 000×2 410×2 400 (mm), 采用悬挂式作业, 配套动力 88.2~132.3 kW, 工作幅宽 950 mm。采用后置环形提升结构、人工拣选平台, 运用振动式挖掘铲, 减小拖拉机动力损耗, 适用于丘陵山区小地块作业, 转场灵活。
4U-165 LH 型马铃薯联合收获机 4U-165 LH potato combine harvester		整机长×宽×高: 7 810×3 310×3 000 (mm), 采用半悬挂牵引作业, 配套动力 80.9~95.6 kW, 作业幅宽 1 650 mm, 生产率 0.2~0.4 hm ² ·h ⁻¹ 。采用杆条升运链分离输送装置、循环提升装置、粗秧网装置, 配置人工拣选平台, 液压驱动底板输送链式料斗。

3.4 国内外大型马铃薯联合收获机

对于国内外大型马铃薯联合收获机械, 从结构特点来看, 有提升臂牵引式、自带料斗牵引式、自走式三种。其中提升臂牵引式有 GRIMME GT170、AVR

Lynx、Standen T3、Double L 7340、希森天成 4ULZ-170 等机型; 自带料斗侧牵引式有 GRIMME EVO、SE 系列、AVR Spirit 系列、ROPA Keiler 系列、青岛洪珠 4UQL-170DC、黑龙江德沃 4UML-180 等机型; 自走式有

GRIMME VARITRON 系列、VENTOR 4150、AVR Puma 系列、Ploeger AR-4BX、Dewulf Kwatro 等机型。典型的国外大型马铃薯联合收获机械结构及技术特点如表 8 所示。

表 8 典型的国外大型马铃薯联合收获机械结构及技术特点

Table 8 Structure and technical characteristics of typical foreign large-scale potato combine harvesters

名称/型号 Name/model	结构示意图 Structure diagram	技术特点 Technical characteristics
4ULZ-170		后置提升臂牵引式结构, 整机长×宽×高: 9 795×3 300×3 360 (mm), 配套动力 92 kW 以上, 作业幅宽 1 700 mm, 适应垄宽小于 700 mm, 纯工作生产率 $\geq 0.33 \text{ hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$, 该马铃薯联合收获机可实现马铃薯挖掘、薯土分离、薯秧分离、收集输送等作业, 一次作业两垄, 集薯类型为跟随装车形式, 分离输送动力通过液压马达驱动, 可以无极调节分离输送装置速度 ^[12,144] 。
4UQL-170DC		后置牵引式结构, 整机长×宽×高: 11 000×2 350×2 800 (mm), 配套动力: 88.2~132.3 kW, 作业幅宽: 1 700 mm, 适应垄宽 $\leq 700 \text{ mm}$, 纯工作生产率 $0.2 \sim 0.4 \text{ hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ 。采用阶梯式四级提升清选结构, 减小提升坡度, 增大筛土面积, 振动更轻柔, 减小伤薯率, 设计双级除秧耙装置, 提高除秧除草效果, 液压、机械复合驱动形式, 一次作业两垄, 集薯类型为即时装袋。
4UML-180		整机长×宽×高: 8 800×3 400×3 500 (mm), 拖拉机半悬挂牵引作业, 配套动力 80.9 kW 以上, 作业幅宽 1 600~1 800 mm, 适应垄距 800~900 mm, 一次作业 2 垄, 工作效率为 $0.1 \sim 0.2 \text{ hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ 。整机设计 5 级分离输送装置, 3 级分秧系统, 设计轻柔型循环提升系统, 配置人工拣选平台, 2.5 t 液压自卸式料斗, 配置机电液一体化智能操作系统, 操作更加简便 ^[144,145] 。
Standen T3		后置提升臂牵引式结构, 整机长×宽×高: 11 350×3 400×3 800 (mm), 配套动力在 147 kW 以上, 12 V 直流电源电气系统。挖掘幅宽 2.5 m, 适应垄距为 800~900 mm, 一次作业 3 垄, 跟随装车或者侧铺放两用。整机采用全液压驱动形式, 可以通过车内控制终端无极调节分离装置、提升装置等各部件工作参数。挖掘装置具有自动限深和自动垄压调节功能; 分离装置配置橡胶螺旋辊轴分离机且可逆转; 后轮底盘具有液压驱动、自动回正、可变轮距等功能 ^[12] 。
Double L 7340		前置提升臂牵引式结构, 整机长×宽×高 11 480×6 530×3 710 (mm), 配套动力 217 kW 以上, 一次作业 4 垄, 采用机械与液压复合传动, 运用鼓风机气流排杂和聚氨酯星形指轮辊轴分离技术, 降低薯块含杂率。利用传感器技术实时监测机具关键部件工作状态, 驾驶室安装可视化监控终端, 且能将工作数据及故障信息保存并通过蓝牙控件传输到外部电脑 ^[133] 。
ROPA Keiler II		自带料斗侧牵引式结构, 整机长×宽×高: 11 800×3 500×3 990 (mm), 配套动力为 66 kW 左右, 作业幅宽 1 600 mm, 适应垄距 750~900 mm, 一次作业 2 垄, 拥有 8 t 超大容量料斗。采用全液压驱动形式, 分离筛网和清洁单元工作参数可通过驾驶终端无极调节, 挖掘装置有自动对垄、垄上减压、液压调节挖掘深度等功能, 后轮底盘具有液压驱动、自动回正、可变轮距等功能 ^[144] 。
AVR Puma 3		轮式自走底盘结构, 静液压四轮驱动, 整机长×宽×高 15 450×3 500×4 000 (mm), 配套 345 kW 的 IV 沃尔沃发动机, 适应垄距 750 mm 或 900 mm, 一次作业 4 垄, 配置 8 t 液压输送底板超大容量料斗, 能够持续作业, 此外, 前端配置 4 行侧向输送杀秧机。整机采用全液压驱动形式, 各部件工作参数可以通过驾驶终端无极调节, 各工作环节进行全域影像监控和传感器监测, 发生故障能够及时报警处理。挖掘过程可以进行 ACC 全条件自动控制、辅助驾驶等功能。底盘具有自动回正、可变轮距等功能, 料斗填充采用传感器恒定低位填充技术, 卸料装置具有自适应调整高度及卸料速度等功能 ^[4,9] 。
Ploeger AR-4BX		轮履组合自走底盘结构, 静液压无极变速驱动, 配套 405 kW 的斯堪尼亚发动机, 履带选用 890 mm Class 橡胶履带及驱动轮、惰轮, 适应粘重潮湿等复杂作业工况下行走。一次作业 4 垄, 配置 14 t 液压输送底板超大容量料斗, 能够持续作业, 此外, 后端配置鼓风机气流清杂装置, 可将残秧及细碎土壤分离出去。具有自动对垄、深度感应控制等辅助驾驶功能, 也能视频全域监控机具工作状态, 可通过驾驶终端调整关键参数 ^[4,133] 。
GRIMME VENTOR 4 150		轮式自走底盘结构, 采用静液压独轮驱动, 配置梅赛德斯奔驰 390 kW 发动机, 一次作业 4 垄, 适应垄距 750 mm 或者 900 mm, 配置 15 t 自动卸料超大料斗, 挖掘装置配置 TerraFloat 液压支撑板限深控制系统, 安装 ISOBUS 操控终端-CCI 1 200、SmartView 智能视图显示器, 此外, 配置可视化保护监测功能、筛网和分离单元转速自动匹配功能, Turbo Clean 自动高速甩泥功能, 自动驾驶功能等智能化辅助作业系统 ^[144] 。

3.5 国内外马铃薯收获装备特点

通过对比分析国内外马铃薯收获装备及技术特点, 国内马铃薯收获装备与欧美日韩等发达国家相比存在以下不同和不足之处:

1) 中小型低端产品为主。从整机结构分析, 欧美发达国家完全普及了马铃薯全程机械化生产, 种植模式规范、呈规模化大田作业, 目前研发使用的机型多以大型联合收获装备为主, 整机外形尺寸较大, 机械化、智能化水平高。日本、韩国等受丘陵山地限制, 主要发展中

小型分段收获和中小型联合收获为主, 但其生产的联合收获机械, 机械化集成度高、技术水平先进。国内马铃薯多以丘陵山地、小规模分散经营为主, 目前研发的机具多以轻筒中小型挖掘条铺机械为主, 低端产品多, 高新技术产品少, 联合收获机具大多处于研发阶段, 机具工作性能不稳定, 机械化、智能化水平低。

2) 关键部件技术水平低、适应性差。国内对马铃薯机械化收获关键技术研究较多, 但科研产出成果较少, 创新驱动不足, 重复性研究多, 系统性研究少、很多研

究课题还停留在低端技术，例如，对于国内马铃薯收获机械基础研究，如挖掘装置、低损分离装置、清洁分拣装置等研究，虽然性能有所提升，但核心技术参数调整困难，针对不同区域、不同土壤环境下适应性较差，与发达国家相比还有一定差距。

3) 制造工艺差，使用寿命短。目前，用于马铃薯收获机械常用的挖掘铲、切秧盘、升运链杆等材料及热处理工艺，直接影响其耐磨性、冲击韧性、减粘脱土性能。升运链橡胶带及柔性缓冲包胶工艺，直接影响其耐磨性、老化性能及柔韧性。主要传动等精密零件加工工艺粗糙，导致机具可靠性差、使用寿命短。

4) 智能化程度低。国内目前研究的马铃薯收获机械大多处于纯机械设计，当前，有部分科研院所、企业在个别关键部件取得了一定的智能化研究成果，但仍然没有产品化。国外马铃薯收获装备智能化技术已经实现了控制智能化、操作自动化、驾驶舒适化的想法。

5) 一机多用难，设备利用率低。德国 GRIMME 公司、比利时 AVR 公司生产的马铃薯联合收获机械，可以通过置换前端挖掘起收装置、改变分离输送装置参数，能够实现其他如甜菜、洋葱等根茎蔬菜的机械化收获，极大提高了设备利用率，而国内马铃薯收获机械，当前还难以适应不同土壤类型下马铃薯收获，一机多用更难。

4 马铃薯机械化收获面临的问题及发展建议

4.1 马铃薯机械化收获面临的问题

近年来，国内企业、高等院校及科研院所不断努力，马铃薯收获机械研发取得了显著的成果，但机械化收获率依旧较低，剖析国内外马铃薯机械化收获现状，结合国内马铃薯机械化生产实际情况，马铃薯机械化发展面临以下问题。

1) 各主产区机械化收获发展不平衡。目前，西南混作区和南方冬作区占总种植面积的 43% 左右，但西南混作区机械化收获率不足 5%，南方冬作区更低^[18]，这些区域马铃薯种植主要分布于丘陵山地，土壤潮湿、粘重，种植模式多样，国内针对丘陵山地潮湿、粘重土壤条件下的收获机械研究极少，整体呈现无机可用、无好机用的局面，与北方一作区相比，机械化收获差距较大。

2) 鲜食薯收获占比大，机械损伤要求高。近年来，鲜食薯收获占国内马铃薯总产量约 65% 以上^[146-148]，鲜食薯成熟期短，收获期表皮未完全木质化，易导致机械损伤，且为错峰或逆季节销售，贮藏时间较长，相比而言，欧美等发达国家马铃薯成熟期较长，薯块完全木质化，贮藏期短。因此，国内机械化收获质量要求较高，根据国家标准，轻筒型马铃薯挖掘机：破皮率不超过 2%、损伤率不超过 1.5%；联合收获机械：破皮率不超过 3%、损伤率不超过 2%^[99]，该标准要求对于国外高端收获机械也难以达到。

3) 薯土膜秧分离难度大，低损高净度复合分离装置缺乏。中国马铃薯覆膜种植面积广，尤其北方一作区和中原二作区等大部分种植区域，覆膜收获严重影响分离

装置薯土分离效果，且外加了薯膜分离及残膜回收等问题，根据国家标准，马铃薯联合收获机械：含杂率不超过 4%，目前国内研究的马铃薯联合收获机械，针对覆膜收获或黏重土壤条件下收获，大多存在分离效果不佳，收集的薯块含杂率较高。

4) 制造业基础薄弱，卡脖子技术多。国内马铃薯收获机械普遍存在可靠性低、使用寿命短、适应性差的问题，其主要原因在于国内制造业基础相对薄弱，加工工艺比较粗糙，同时存在很多相关领域内的卡脖子技术难以突破，对机具进一步优化造成严重阻碍。尤其在特殊材料应用、机电液仪集成控制、多功能通用底盘、传感器、图像识别等方向较为突出。

5) 重视程度不够，扶持力度不足。与大宗作物相比，很多地区对马铃薯产业不够重视，对机械化生产推广力度不足，用于马铃薯机械化收获装备研发投入相对较少。尤其西南等地区马铃薯综合机械化率低，政府对马铃薯专项资金投入少，对黏重土壤收获机械研发推进力度不足，各地农技推广部门对马铃薯种植技术、收获技术推广引导不够，农户对马铃薯机械化种收关注度不高。

4.2 马铃薯机械化收获发展建议

随着农机补短板及丘陵山区机械化发展政策的推进，马铃薯机械化收获关键技术及装备迎来新的发展契机，未来将会在以下方面取得长足进展。

1) 两种模式共同发展，补齐区域不平衡。针对国内丘陵山区小块地及个体小规模化马铃薯种植占比大的问题，马铃薯机械化收获将以分段收获和联合收获两个模式并存，既要不断优化适于丘陵山区的轻筒型马铃薯挖掘机、捡拾机、山地小型自走式联合收获机，又要加强对高端中型、大型马铃薯联合收获装备研发。重点提升西南混作区、南方冬作区马铃薯综合机械化水平，补齐当地无机可用、无好机用的技术短板，以规范种植模式为前提，做好种-收配套的机艺融合基础，其次，建立专项资金，鼓励国内科研团队加强对西南黏重土壤条件下马铃薯挖掘、薯土分离、伤薯机理等理论研究，从农机购置补贴政策宏观调控，吸引国内龙头企业发展适于西南地区黏重土壤条件下马铃薯全程机械化装备。

2) 低损高净度复合分离装置研发。分离装置作为马铃薯收获装备的核心关键部件，直接影响马铃薯损伤率及含杂率。优化薯土分离、薯秧分离、薯膜分离、薯石分离以及表面清洁等部件，从结构形式、新型防损材料、减速缓冲、控制调整等研究方向，降低马铃薯损伤及含杂率，提高分离效果。突破分离装置自动清洁、电控液压参数调整、自动转速匹配、过载保护等关键技术，提升其应对复杂工况的适应性、可靠性，保证不同土壤条件下的低损高净度分离。

3) 突破卡脖子技术，向智能化方向发展。国内农机制造业基础相比发达国家还有一定差距，尤其在挖掘装置和分离装置等特殊材料应用、机电液仪集成控制、多功能液压底盘技术、各种传感器技术、图像及信号采集、高光谱等领域均属短板弱项。因此，要打造高端智能型

马铃薯联合收获装备, 必须突破有关技术瓶颈, 建议由国家马铃薯机械化产业体系牵头, 从农机、液压、电气控制、信息技术、农学等领域相关科研院所、高等院校、高新技术企业选拔高层次人才, 成立多个卡脖子技术研发中心, 联合突破马铃薯收获装备智能化技术短板。

4) 农机-农艺深度融合。复杂多样的种植模式以及个体小规模化种植, 严重阻碍机械化收获效率和质量, 增加了配套机具研发难度, 且不利于农机制造业规模化、精细化发展。要提高中国马铃薯机械化收获率, 必须规范马铃薯种植模式, 促进土地流转以及高标准农田建设, 实现规模化大田种植。此外, 大多鲜食薯品种薯块脆且皮薄, 易造成机械损伤, 建议农学专家改良马铃薯品种, 促进收获期薯皮完全木栓化, 对于机械化收获降低损伤有事半功倍的意义。

5) 政府应加大扶持力度, 优化产业结构。根据马铃薯机械化收获相关需求提供精准扶持政策, 加大技术研发投入, 鼓励生产单位、龙头企业与科研院所联合, 优势互补, 提升创新驱动动力, 加紧产、学、研转化, 利用龙头企业品牌效应带动发展, 扩大产业规模。对小规模化种植群体, 加强农机、农技推广力度, 推动马铃薯收获宜机化改革, 此外, 完善农机、农技社会服务体系, 以专项资金和农机购置补贴双刃剑推动各地农机租赁服务体系发展、壮大, 为资金薄弱、抗风险能力差的小规模经营群体提供优质的农机租赁服务。

[参 考 文 献]

- [1] 李锁强. 中国农村统计年鉴 2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021: 108-199.
- [2] 魏忠彩, 王兴欢, 李学强, 等. 履带自走式分选型马铃薯收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(2): 95-106.
WEI Zhongcai, WANG Xinghuan, LI Xueqiang, et al. Design and experiment of crawler self-propelled sorting type potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 95-106. (in Chinese with English abstract)
- [3] 杨亚东, 杜娅婷, 杜歆仪, 等. 中国马铃薯农户种植意愿及其空间差异[J]. 中国农业资源与区划, 2022, 43(2): 220-230.
YANG Yadong, DU Yating, DU Xinyi, et al. Potato farmers' willingness to plant and its spatial difference in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2022, 43(2): 220-230. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李彦彬. 手扶自走式马铃薯收获机设计与试验 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2022.
LI Yanbin. Design and Experiment of Hand-held Self-propelled Potato Harvester[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [5] 王相友, 吕丹阳, 任加意, 等. 装袋型马铃薯联合收获机清选装置研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(Supp.): 8-17.
WANG Xiangyou, LYU Danyang, REN Jiayi, et al. Design and parameter optimization of the cleaning device for a bagged potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(Supp.): 8-17. (in Chinese with English abstract)
- [6] 吕金庆, 杨晓涵, 冯雪, 等. 马铃薯播种机播深调控装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 13-21.
LYU Jinqing, YANG Xiaohan, FENG Xue, et al. Design and experiment of sowing depth control device of potato planter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(12): 13-21. (in Chinese with English abstract)
- [7] 周建国. 丘陵山区马铃薯联合收获与初选分级关键技术研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
ZHOU Jianguo. Study on Key Technologies of Potato Joint Harvest and Primary Classification in Hilly Mountainous Areas[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022 (in Chinese with English abstract)
- [8] 王海翼, 张兆国, IBRAHIM Issa, 等. 丘陵山区小型马铃薯收获机设计与试验[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(4): 724-738.
WANG Haiyi, ZHANG Zhaoguo, IBRAHIM Issa, et al. Design and experiment of small-sized potato harvester suitable for hilly and mountainous areas[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(4): 724-738. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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): 206-210.
DOU Qingqing, SUN Yongjia, SUN Yitian, et al. Current situation and development of potato harvesting machinery at home and abroad[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(9): 206-210. (in Chinese with English abstract)
- [10] CHEN Q, HAN W, WANG G. Application research of covering soil over membrane technology of spring potato cultivation[J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(1): 1-4.
- [11] 杨小平, 魏宏安, 赵武云, 等. 4U1600 型集堆式马铃薯挖掘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 83-92.
YANG Xiaoping, WEI Hongan, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of 4U 1600 set of pile type potato digger[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 83-92. (in Chinese with English abstract)
- [12] 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): 96-109.
ZHANG Zhaoguo, WANG Haiyi, LI Yanbin, et al. Design and experiment of multi-stage separation buffer potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 96-109. (in Chinese with English abstract)

- [13] 沈振轩. 马铃薯全程机械化收获技术研究 with 示范项目总结报告[J]. 农家参谋, 2021(24): 72-73.
- [14] FAN J, LI Y, LUO W, et al. An experimental study of stem transported-posture adjustment mechanism in potato harvesting[J]. *Agronomy*, 2023, 13(1): 234.
- [15] SHKARUB N Z, LEONOV O A, BOGOLUBOVA D A. Ranking of quality indicators influencing the choice of potato harvester[J]. *Earth and Environmental Science*, 2022, 981(4): 042038.
- [16] JANG S H, MOON S P, KIM Y J, et al. Development of potato mass estimation system based on deep Learning[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(4): 2614.
- [17] LIN F. Study on the optimization of market competition of potato planting industry to agricultural products economic management based on intelligent system management[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2021, 40(4): 5935-5944.
- [18] 李紫辉, 温信宇, 吕金庆, 等. 马铃薯种植机械化关键技术与装备研究进展分析与展望[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(3): 1-16.
LI Zihui, WEN Xinyu, LYU Jinqing, et al. Analysis and prospect of research progress on key technologies and equipments of mechanization of potato planting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(3): 1-16. (in Chinese with English abstract)
- [19] 唐建昭, 柏会子, 郑艳东, 等. 未来升温情景下中国马铃薯产量和水分利用变化[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(7): 157-166.
TANG Jianzhao, BAI Hui zi, ZHENG Yandong, et al. Variations of potato yield and water use efficiency in China under future global warming scenarios[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(7): 157-166. (in Chinese with English abstract)
- [20] 白丽, 陈曦, 孙洁, 等. 产业融合视角下中国马铃薯加工业发展问题研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(8): 316-323.
BAI Li, CHEN Xi, SUN Jie, et al. Development of potato processing industry in China from perspective of industrial integration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(8): 316-323. (in Chinese with English abstract)
- [21] BOYDSTON R A, NAVARRE D A, COLLINS H P, et al. The effect of vine kill method on vine kill, tuber skinning injury, tuber yield and size distribution, and tuber nutrients and phytonutrients in two potato cultivars grown for early potato production[J]. *American Journal of Potato Research*, 2018, 95(1): 54-70.
- [22] 吕金庆, 尚琴琴, 杨颖, 等. 马铃薯杀秧机设计优化与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 106-114, 98.
LYU Jinqing, SHANG Qinqin, YANG Ying, et al. Design optimization and experiment on potato haulm cutter[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(5): 106-114, 98. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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.
- [24] 冯斌, 孙伟, 王蒂, 等. 甩刀式马铃薯杀秧机的设计与试验[J]. *干旱地区农业研究*, 2014, 32(4): 269-274.
FENG Bin, SUN Wei, WANG Di, et al. Design and experiment on flail potato vine cutting machine[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2014, 32(4): 269-274. (in Chinese with English abstract)
- [25] 吕金庆, 于晶, 李忠远. 马铃薯杀秧机关键部件的设计[J]. *马铃薯产业与绿色发展*, 2021(2021): 306-314.
- [26] 竹筱歆, 吕伊宁, 于晶, 等. 马铃薯全垄仿形式茎叶切碎刀辊设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(6): 140-150.
ZHU Xiaoxin, LYU Yining, YU Jing, et al. Design and experiment of potato full ridge imitation stem and leaf chopping knife roller[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(6): 140-150. (in Chinese with English abstract)
- [27] 贾晶霞, 张东兴, 桑永英, 等. 马铃薯挖掘铲计算机辅助分析与模拟试验研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 106-110.
JIA Jingxia, ZHANG Dongxing, SANG Yongying, et al. Computer aided analysis and simulation experiment research of potato digging blade[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(8): 106-110. (in Chinese with English abstract)
- [28] FAN Y, QIU L, ZHAO P, et al. EDEM-based modeling and test on soil-potato tuber-root aggregate [J]. *International Agricultural Engineering Journal*, 2020, 29(1): .
- [29] SHOUMAROVA M, ABDILLAYEV T, YUSUPOV S. Peculiarities of digging topinambur (*Jerusalem artichoke*) tubes on the irrigation lands of Uzbekistan[J]. *Earth and Environmental Science*, 2021, 868(1): 012041.
- [30] 吕金庆, 张航, 李紫辉, 等. 一种适用于壤土的马铃薯收获机挖掘铲: CN213694858U[P]. 2021-07-16.
- [31] YU J, MA Y, WANG S, et al. 3D finite element simulation and experimental validation of a mole rat's digit inspired biomimetic potato digging shovel[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(3): 1761.
- [32] LI J, JIANG X, MA Y, et al. Bionic design of a potato digging shovel with drag reduction based on the discrete element method (DEM) in clay soil[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(20): 7096.
- [33] YU J, XU Z, WANG S, et al. Characterization of the structure and wear resistance of ni65-based coatings via hvof flame spraying and its application to potato digging shovels[J]. *Coatings*, 2022, 12(6): 725.
- [34] AWUAH E, ZHOU J, LIANG Z, et al. Parametric analysis and numerical optimisation of jerusalem artichoke vibrating digging shovel using discrete element method[J]. *Soil and*

- Tillage Research, 2022, 219: 105344.
- [35] 孙伟, 王虎存, 赵武云, 等. 残膜回收型全膜覆土垄播马铃薯挖掘机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 105-114.
SUN Wei, WANG Hucun, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of potato digger with waste film recollection for complete film mulching, soil covering and ridge sowing pattern[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 105-114. (in Chinese with English abstract)
- [36] 刘宝, 张东兴, 李晶. MZPH-820 型单行马铃薯收获机设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 81-86.
LIU Bao, ZHANG Dongxing, LI Jing. Design on MZPH-820 single-row potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 81-86. (in Chinese with English abstract)
- [37] 吕金庆, 田忠恩, 杨颖, 等. 4U2A 型双行马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 17-24.
LYU Jinqing, TIAN Zhongen, YANG Ying, et al. Design and experimental analysis of 4U2A type double-row potato digger[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(6): 17-24. (in Chinese with English abstract)
- [38] 李涛, 康璟, 孙伟, 等. 4U-1000 型马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(3): 151-155.
LI Tao, KANG Jing, SUN Wei, et al. Design and experiment on 4U-1000 potato harvester[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2013, 48(3): 151-155. (in Chinese with English abstract)
- [39] 贾洪雷, 王万鹏, 陈志, 等. 农业机械触土部件优化研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 1-13.
JIA Honglei, WANG Wanpeng, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural Machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- [40] 王莲冀, 廖劲杨, 胡红, 等. 农机触土部件减粘脱附技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(8): 214-221.
WANG Lianji, LIAO Jinyang, HU Hong, et al. Research status and prospect of adhesion reduction and desorption technology for agricultural machinery parts touching soil[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(8): 214-221. (in Chinese with English abstract)
- [41] ZHOU D, HOU P, XIN Y, et al. Resistance and consumption reduction mechanism of bionic vibration and verification of field subsoiling experiment[J]. Applied Sciences, 2021, 11(21): 10480.
- [42] 张琰, 乔超雄, 王天琪, 等. 蝼蛄前足爪趾三维几何构形的减阻机理[J]. 农业工程学报, 2021, 37(19): 309-315.
ZHANG Yan, QIAO Chaoxiong, WANG Tianqi, et al. Drag reduction mechanism of the 3D geometry of foreleg's claw toe of the mole cricket (*Gryllotalpa orientalis*)[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(19): 309-315. (in Chinese with English abstract)
- [43] 王少伟, 李善军, 张衍林, 等. 鼯鼠趾仿生及表面热处理提高齿形开沟刀减阻耐磨性能[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 10-20.
WANG Shaowei, LI Shanjun, ZHANG Yanlin, et al. Mole toe bionics and surface heat treatment improving resistance reduction and abrasion resistance performance of toothed ditching blade[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(12): 10-20. (in Chinese with English abstract)
- [44] JIA H, GUO M, ZHAO J, et al. Design and test of bionic wide-ridge soybean tilling-sowing machine[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(1): 42-51.
- [45] ZHAO J, LU Y, GUO M, et al. Design and experiment of bionic stubble breaking-deep loosening combined tillage machine[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(4): 123-134.
- [46] 张兆国, 薛浩田, 王一驰, 等. 基于离散元法的三七仿生挖掘铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 100-111.
ZHANG Zhaoguo, XUE Haotian, WANG Yichi, et al. Design and experiment of panax notoginseng bionic excavating shovel based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 100-111. (in Chinese with English abstract)
- [47] NIU J, LUO T, XIE J, et al. Simulation and experimental study on drag reduction and anti-adhesion of subsoiler with bionic surface[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2022, 15(4): 57-64.
- [48] 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): 286-291.
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Research on the drag reduction performance of potato bionic digging shovel[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(3): 286-291. (in Chinese with English abstract)
- [49] 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): 268-272.
SHI Linrong, SUN Wei, WANG Di, et al. Design and simulation research on the potato bionic digging shovel[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(1): 268-272. (in Chinese with English abstract)
- [50] 包健伦. 仿生自磨锐马铃薯挖掘铲的设计与试验[D]. 长春: 吉林大学, 2021.
BAO Jianlun. Design and Experiment of Bionic Self-sharpening for Potato Digging Shovel[D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [51] 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.
FAN Yu. Research on Potato Digging Mechanism Based on Discrete Element Method and Design of Bionic Shovel[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in

- Chinese with English abstract)
- [52] 张永华, 匡玉兰, 陈颖, 等. 液压激振式马铃薯收获机挖掘装置的设计[J]. 西南农业学报, 2013, 26(2): 783-788. ZHANG Yonghua, KUANG Yulan, CHEN Ying, et al. Design of hydraulic vibration potato harvester mining device[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26(2): 783-788. (in Chinese with English abstract)
- [53] 朱建新, 赵崇友, 邹湘伏. 液压挖掘机振动掘削土体参数在线辨识[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006(3): 537-541. ZHU Jianxin, ZHAO Chongyou, ZOU Xiangfu. Identification of soil parameters on vibratory excavation of hydraulic excavator[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006(3): 537-541. (in Chinese with English abstract)
- [54] 张建新, 王家胜, 赵国庆, 等. 振动式土壤切削挖掘阻力试验台设计[J]. 农机化研究, 2021, 43(9): 93-97. ZHANG Jianxin, WANG Jiasheng, ZHAO Guoqing, et al. Design for test-bed of vibration type soil digging resistance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(9): 93-97. (in Chinese with English abstract)
- [55] 朱建新, 胡火焰, 梅勇兵. 液压挖掘机铲斗振动掘削功率消耗研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(10): 1408-1412. ZHU Jianxin, HU Huoyan, MEI Yongbing. Power consumption study on bucket vibratory excavation of hydraulic excavator[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2008, 36(10): 1408-1412. (in Chinese with English abstract)
- [56] 王东伟, 王家胜. 基于超声振动的土壤切削挖掘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 85-92. WANG Dongwei, WANG Jiasheng. Design and test of soil cutting and digging device based on ultrasonic vibration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 85-92. (in Chinese with English abstract)
- [57] Qi J T, Li Y P, Meng H W, et al. Design and experiment of 4UM-2 potato harvester[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2017, 26(4): 166-174.
- [58] KANG W S, HALDERSON J L. A vibratory, two-row, potato digger[J]. Applied Engineering in Agriculture (USA), 1993(7): 683-687.
- [59] 武涛, 黄伟凤, 黄积佰, 等. 马铃薯振动挖掘试验台的设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(2): 44-50. WU Tao, HUANG Weifeng, HUANG Jibai, et al. Design and experiment of potato vibration digging test-bed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(2): 44-50. (in Chinese with English abstract)
- [60] 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): 267-272. WANG Dongwei, WANG Jiasheng, SHANG Shuqi. Experimental research on soil digging resistance and energy consumption based on vibration[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S1): 267-272. (in Chinese with English abstract)
- [61] BAYBOBOEV N G, MUXAMEDOV J M, GOYIPOV U G, et al. Design of small potato diggers[J]. Earth and Environmental Science, 2022, 1010(1): 012080.
- [62] 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): 39-47. LYU Jinqing, TIAN Zhong'en, WU Jin'e, et al. Design and experiment on 4U1Z vibrating potato digger[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(12): 39-47. (in Chinese with English abstract)
- [63] 刘潇, 何彬涛, 段爱国, 等. 振动式马铃薯挖掘装置关键部件设计[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(3): 6-12. LIU Xiao, HE Bintao, DUAN Aiguo, et al. Design of key components of vibrating potato excavator[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(3): 6-12. (in Chinese with English abstract)
- [64] 张华, 吴建民, 孙伟, 等. 4UM-640 型振动式马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(2): 264-268. ZHANG Hua, WU Jianmin, SUN Wei, et al. The design and experiment of 4UM—640 vibration potato digger[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(2): 264-268. (in Chinese with English abstract)
- [65] 杨红光, 杨然兵, 尚书旗, 等. 振动挖掘式马铃薯收获机设计与试验(英文)[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(8): 55-62. YANG Hongguang, YANG Ranbing, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of vibration digging type potato harvester[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(8): 55-62. (in Chinese with English abstract)
- [66] 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): 129-140,112. WEI Zhongcai, LI Hongwen, SUN Chuazhu, et al. Design and experiment of potato combined harvester based on multi-stage separation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 129-140,112. (in Chinese with English abstract)
- [67] 岳仁才. 马铃薯联合收获机垄上减压系统的研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2019. YUE Rencai. Research of Ridge Decompression System of Potato Combine Harvester[D]. ZiBo: Shandong University of Technology, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [68] GENG A, HU X, LIU J, et al. Development and testing of automatic row alignment system for corn harvesters[J]. Applied Sciences, 2022, 12(12): 6221.
- [69] RUANGURAI P, DAILEY M N, EKPANYAPONG M, et al. Optimal vision-based guidance row locating for autonomous agricultural machines[J]. Precision Agriculture, 2022, 23(4):

- 1205-1225.
- [70] LI H X, LI B, QIN S, et al. Automatic row alignment driving system and method for high stem crop harvester: US2022317688 (A1) [P]. 2022-10-6.
- [71] TILLET N D, HAGUE, MILES. Inter-row vision guidance for mechanical weed control in sugar beet[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, 33(3): 163-177.
- [72] 李涛, 周进, 徐文艺, 等. 4UGS2 型双行甘薯收获机的研制[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(11): 26-33.
LI Tao, ZHOU Jin, XU Wenyi, et al. Development of 4UGS2 type double-row sweet potato harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(11): 26-33. (in Chinese with English abstract)
- [73] 李涛, 周进, 徐文艺, 等. 根茎类作物收获机自动对行系统设计及试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 102-110.
LI Tao, ZHOU Jin, XU Wenyi, et al. Design and test of auto-follow row system employed in root and stem crops harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 102-110. (in Chinese with English abstract)
- [74] 杨然兵, 尚书旗, 王家胜, 等. 根茎类作物收获机械自动对行技术的研究 [C]// 中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集, 重庆, 2011: 138-142.
YANG Ranbing, SHANG Shuqi, WANG Jiasheng, et al. Research on auto-follow row technology employed in root-tuber crops Harvester[C]// Proceedings of the 2011 Annual Academic Conference of Chinese Society of Agricultural Engineering, Chongqing, 2011: 138-142.
- [75] 王申莹, 胡志超, 陈有庆, 等. 土下作物自动对行挖掘收获试验台研制[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(5): 29-37.
WANG Shenying, HU Zhichao, CHEN Youqing, et al. Development of the test bench for automatic alignment digging harvest of subterranean crops[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(5): 29-37. (in Chinese with English abstract)
- [76] WANG S, GAO X, YOU Z, et al. Experiment and parameter optimization of an automatic row following system for the traction beet combine harvester[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2023, 16(1): 145-152.
- [77] 吴惠昌, 胡志超, 彭宝良, 等. 牵引式甜菜联合收获机自动对行系统研制[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(12): 17-24.
WU Huichang, HU Zhichao, PENG Baoliang, et al. Development of auto-follow row system employed in pull-type beet combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(12): 17-24. (in Chinese with English abstract)
- [78] 杨然兵, 杨红光, 尚书旗, 等. 马铃薯联合收获机立式环形分离输送装置设计与试验 (英文) [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(3): 10-18.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of vertical circular separating and conveying device for potato combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(3): 10-18. (in English with Chinese abstract)
- [79] 吴建民, 李辉, 孙伟, 等. 拨指轮式马铃薯挖掘机试验[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(7): 173-177.
WU Jianmin, LI Hui, SUN Wei, et al. Experiment on poke finger wheel type potato digger[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(7): 173-177. (in Chinese with English abstract)
- [80] 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 sweet-potato-stalk separator for single row sweet potato combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(14): 12-21. (in Chinese with English abstract)
- [81] 杨望, 张栩梓, 杨坚, 等. 木薯收获机土薯抖动分离装置性能仿真及试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(16): 18-25.
YANG Wang, ZHANG Xuzi, YANG Jian, et al. Simulation and test on performance of soil-cassava jitter separation device of cassava harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(16): 18-25. (in Chinese with English abstract)
- [82] PING Z, RUGIN G, TIANCI J, et al. Collision simulation of potato tubers for mechanized harvesting[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2023, 46(3): e14278.
- [83] 吕金庆, 孙贺, 兑瀚, 等. 双行牵引式马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. *农机化研究*, 2019, 41(6): 98-103.
LYU Jinqing, SUN He, DUI Han, et al. Design and experiment analysis of two-row traction potato excavator[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(6): 98-103. (in Chinese with English abstract)
- [84] 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): 146-155.
LYU Jinqing, SUN He, DUI Han, et al. Design and experiment on conveyor separation device of potato digger under heavy soil condition[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(11): 146-155. (in Chinese with English abstract)
- [85] 兑瀚. 马铃薯收获机升运过程机械损伤分析与试验 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
DUI Han. Mechanical Damage Analysis and Experimental Research on Potato Harvester Elevator[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019 (in Chinese with English abstract)
- [86] 吕金庆, 杨晓涵, 吕伊宁, 等. 马铃薯挖掘机升运分离过程块茎损伤机理分析与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(1): 103-113.

- LYU Jinqing, YANG Xiaohan, LYU Yining, et al. Analysis and experiment of potato damage in process of lifting and separating potato excavator[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(1): 103-113. (in Chinese with English abstract)
- [87] 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): 1-11.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SU Guoliang, et al. Development of potato harvester with buffer type potato-impurity separation sieve[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(8): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [88] WEI Z, LI H, MAO Y, et al. Experiment and analysis of potato-soil separation based on impact recording technology[J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2019, 12(5): 71-80.
- [89] WEI Z C, LI H W, SUN C Z, et al. Experiments and analysis of a conveying device for soil separation and clod-crushing for a potato harvester[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2019, 35(6): 987-996.
- [90] 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): 140-152.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SU Guoliang, et al. Design and experiment of potato harvester using double cushions for low laying separation technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 140-152. (in Chinese with English abstract)
- [91] 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): 42-52.
WEI Zhongcai, LI Hongwen, SUN Chuanzhu, et al. Improvement of potato harvester with two segment of vibration and wave separation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(12): 42-52. (in Chinese with English abstract)
- [92] 冯斌, 孙伟, 孙步功, 等. 收获期马铃薯块茎跌落冲击特性及损伤规律研究[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(24): 267-274.
FENG Bin, SUN Wei, SUN Bugong, et al. A study on dropping impact characteristics and damage regularity of potato tubers during harvest[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(24): 267-274. (in Chinese with English abstract)
- [93] 冯斌. 收获期马铃薯块茎物理特性及损伤机理研究 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2018.
FENG Bin. Study on physical characteristics and damage of potato tubers at harvesting stage[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [94] 冯斌, 孙伟, 石林榕, 等. 收获期马铃薯块茎碰撞恢复系数测定与影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 50-57.
FENG Bin, SUN Wei, SHI Linrong, et al. Determination of restitution coefficient of potato tubers collision in harvest and analysis of its influence factors[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(13): 50-57. (in Chinese with English abstract)
- [95] WU B, HUANG T, QIU X, et al. Design and experimental study of potato-soil separation device for sticky soils condition[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(22): 10959.
- [96] 陈学深, 陈涛, 武涛, 等. 覆草冬种马铃薯收获机稻草分离机构设计与试验[J]. *吉林大学学报 (工学版)*, 2020, 50(2): 749-757.
CHEN Xueshen, CHEN Tao, WU Tao, et al. Design and experiment on harvester for winter planting potato of straw coverage[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2020, 50(2): 749-757. (in Chinese with English abstract)
- [97] LOBACHEVSKY Y, DOROKHOV A, AKSENOV A, et al. Raman and fluorimetric scattering lidar facilitated to detect damaged potatoes by determination of spectra[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(11): 5391.
- [98] GUO Y, XIE S, DENG W, et al. Experiment and analysis on friction damage and energy loss characteristics of potatoes[J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(5): 3269.
- [99] 中华人民共和国农业部. NY-T 648-2015 马铃薯收获机质量评价技术规范 [S]. 北京: 中国农业出版社, 2015-05-01.
- [100] ANDY C. Grimme out to keep market lead with two-row trailed potato harvester[J]. *Farmers Guardian*, 2005, 07(15): 24.
- [101] DOMINIC K. Upgraded harvester has the gentle touch Grimme GZ 1700 range of potato harvesters[J]. *Arable Farming*, May 30, 1998, 05(30): 68.
- [102] 王鹏榕. 马铃薯收获机薯秧分离装置设计与试验 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2020.
WANG Pengrong. Analysis and Experiment of Potato Harvester Potato Stem Separation Equipment[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [103] 刘好, 张拓, 谢铤, 等. 小型农用履带底盘多体动力学建模及验证[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(7): 39-46.
LIU Yu, ZHANG Tuo, XIE Ni, et al. Multi-body dynamic modeling and verification of small agricultural crawler chassis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(7): 39-46. (in Chinese with English abstract)
- [104] 李翊宁, 郭康权, 陈文强, 等. 农用车柔性底盘姿态切换参数对切换精度与时间的影响及其优化[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(5): 51-61.
LI Yining, GUO Kangquan, CHEN Wenqiang, et al. Effects of attitude switching parameters on switching precision and time of flexible chassis of agricultural vehicles and its optimization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(5): 51-61. (in Chinese with English abstract)

- [105] 高巧明, 潘栋, 张星, 等. 全履带模块化无人农用动力底盘设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S2): 561-570. GAO Qiaoming, PAN Dong, ZHANG Xing, et al. Design and simulation of entire track modular unmanned agricultural power chassis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 561-570. (in Chinese with English abstract)
- [106] 金诚谦, 杨腾祥, 刘岗微, 等. 履带式联合收获机全向调平底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 393-402. JIN Chengqian, YANG Tengxiang, LIU Gangwei, et al. Design and test of posture controlled chassis for caterpillar combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 393-402. (in Chinese with English abstract)
- [107] 刘平义, 柯呈鹏, 柯婷, 等. 丘陵山区农用预检测主动调平底盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 371-378. LIU Pingyi, KE Chengpeng, KE Ting, et al. Design and experiment of pre-detection active leveling agricultural chassis for hilly area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 371-378. (in Chinese with English abstract)
- [108] 瞿济伟, 郭康权, 宋树杰, 等. 农用柔性底盘偏置轴转向机构联动耦合控制策略及试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 55-65. QU Jiwei, GUO Kangquan, SONG Shujie, et al. Coupling control strategy and test for off-centered shaft steering the mechanisms of agricultural flexible chassis[J]. Transactions of Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(23): 55-65. (in Chinese with English abstract)
- [109] 刘风顺. 履带自走式马铃薯收获机的底盘优化[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022. LIU Fengshun. Chassis Optimization of Crawler Self-propelled Potato Harvester[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [110] LI Y, HU Z, GU F, et al. DEM-MBD coupling simulation and analysis of the working process of soil and tuber separation of a potato combine harvester[J]. Agronomy, 2022, 12(8): 1734.
- [111] 陈军, 周建国, 陈清宇, 等. 一种履带式马铃薯联合收获机: CN114073190A[P]. 2022-02-22.
- [112] COLLINGS A. Standen pearson offers harvesters for all comers[J]. Farmers Weekly, 2009, 151(19): 55.
- [113] 宋树杰, 瞿济伟, 李翊宁, 等. 农用车底盘偏置转向轴驱动轮运动与动力特性试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 28-34. SONG Shujie, QU Jiwei, LI Yining, et al. Experiment on movement and dynamic property of driving wheel with offset steering shaft for agricultural vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(23): 28-34. (in Chinese with English abstract)
- [114] 张兆国, 李彦彬, 王海翼, 等. 马铃薯机械化收获关键技术装备研究进展[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(6): 1092-1103. ZHANG Zhaoguo, LI Yanlin, WANG Haiyi, et al. Research progress on key technology and equipment of potato mechanized harvest[J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2021, 36(6): 1092-1103. (in Chinese with English abstract)
- [115] 王红军, 熊俊涛, 黎邹邹, 等. 基于机器视觉图像特征参数的马铃薯质量和形状分级方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 272-277. WANG Hongjun, XIONG Juntao, LI Zouzou, et al. Potato grading method of weight and shape based on imaging characteristics parameters in machine vision system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(8): 272-277. (in Chinese with English abstract)
- [116] 陈学庚, 温浩军, 张伟荣, 等. 农业机械与信息技术融合发展现状与方向[J]. 智慧农业, 2020, 2(4): 1-16. CHEN Xuegeng, WEN Haojun, ZHANG Weirong, et al. Advances and progress of agricultural machinery and sensing technology fusion[J]. Smart Agriculture, 2020, 2(4): 1-16. (in Chinese with English abstract)
- [117] 欧阳安, 崔涛, 林立. 智能农机装备产业现状及发展建议[J]. 科技导报, 2022, 40(11): 55-66. OUYANG An, CUI Tao, LIN Li. Current situation and development suggestions of intelligent agricultural machinery equipment industry[J]. Science & Technology Review, 2022, 40(11): 55-66. (in Chinese with English abstract)
- [118] 张华光. 农机智能化发展瓶颈亟需突破[J]. 农机市场, 2022, 406(3): 27-28.
- [119] 胡小鹿, 夏晓东, 郑筱光. 我国智能农机发展和展望[J]. 中国农村科技, 2022, 327(8): 16-19.
- [120] 崔凯, 冯献. 面向农业 4.0 的智能农机装备应用逻辑、实践场景与推广建议[J]. 农业现代化研究, 2022, 43(4): 578-586. CUI Kai, FENG Xian. The application logic, practice scenarios, and promotion suggestions of intelligent agricultural machinery equipment towards agriculture 4.0[J]. Research of Agricultural Modernization, 2022, 43(4): 578-586. (in Chinese with English abstract)
- [121] 张兆国, 张振东, 李加念, 等. 采用改进 YoloV4 模型检测复杂环境下马铃薯[J]. 农业工程学报, 2021, 37(22): 170-178. ZHANG Zhaoguo, ZHANG Zhendong, LI Jianian, et al. Potato detection in complex environment based on improved YoloV4 model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(22): 170-178. (in Chinese with English abstract)
- [122] LOPEZ-JUAREZ I, RIOS-CABRERA R, HSIEH S J, et al. A hybrid non-invasive method for internal/external quality assessment of potatoes[J]. European Food Research and Technology, 2018, 244: 161-174.

- [123] KORCHAGIN S A, GATEULLIN S T, OSIPOV A V, et al. Development of an optimal algorithm for detecting damaged and diseased potato tubers moving along a conveyor belt using computer vision systems[J]. *Agronomy*, 2021, 11(10): 1980.
- [124] SI Y, SANKARAN S, KNOWLES N R, et al. Potato tuber length-width ratio assessment using image analysis[J]. *American Journal of Potato Research*, 2017, 94: 88-93.
- [125] 周竹, 黄懿, 李小昱, 等. 基于机器视觉的马铃薯自动分级方法[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(7): 178-183.
ZHOU Zhu, HUANG Yi, LI Xiaoyu, et al. Automatic detecting and grading method of potatoes based on machine vision[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(7): 178-183. (in Chinese with English abstract)
- [126] EIMASRY G, CUBERO S, MOLTO E, et al. In-line sorting of irregular potatoes by using automated computer-based machine vision system[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 112(1-2): 60-68.
- [127] LONGCHAMPS L, TISSEYRE B, TAYLOR J, et al. Yield sensing technologies for perennial and annual horticultural crops: A review[J]. *Precision Agriculture*, 2022, 23(6): 2407-2448.
- [128] 刘宏新, 李金龙, 郭丽峰, 等. 联合收获机知识组织与知识库系统研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(2): 381-393.
LIU Hongxin, LI Jinlong, GUO Lifeng, et al. Knowledge organization and knowledge base system of combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(2): 381-393. (in Chinese with English abstract)
- [129] 翟长远, 杨硕, 王秀, 等. 农机装备智能测控技术研究现状与展望[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(4): 1-20.
ZHAI Changyuan, YANG Shuo, WANG Xiu, et al. Status and prospect of intelligent measurement and control technology for agricultural equipment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(4): 1-20. (in Chinese with English abstract)
- [130] 董胜, 袁朝辉, 谷超, 等. 基于多学科技术融合的智能农机控制平台研究综述[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 1-11.
DONG Sheng, YUAN Zhaohui, GU Chao, et al. Research on intelligent agricultural machinery control platform based on multi-discipline technology integration[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(8): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [131] RODIAS E, BERRUTO R, BUSATO P, et al. Energy savings from optimised in-field route planning for agricultural machinery[J]. *Sustainability*, 2017, 9(11): 1956.
- [132] 杨然兵, 杨红光, 尚书旗, 等. 拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(7): 119-126.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(7): 119-126. (in Chinese with English abstract)
- [133] 杨曦. 丘陵山地马铃薯收获机的设计与试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
YANG Xi. Design and Experiment of Potato Harvester in Hilly and Mountainous Area[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [134] 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): 27-34.
YANG Hongguang, HU Zhichao, WANG Bing, et al. Research progress of harvesting mechanization technology of potato[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2019, 40(11): 27-34. (in Chinese with English abstract)
- [135] 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): 11-17.
WEI Hong'an, WANG Di, LIAN Wenxiang, et al. Development of 4UFD-1400 type potato combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(1): 11-17. (in Chinese with English abstract)
- [136] 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): 12-17.
WEI Hong'an, ZHANG Junlian, YANG Xiaoping, et al. Improved design and test of 4UFD-1400 type potato combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(3): 12-17. (in Chinese with English abstract)
- [137] 勇猛机械. 勇猛机械推出自走式马铃薯捡拾机, 最高优惠万 3 元[J]. *农业机械*, 2021(6): 31.
- [138] 王万虎. 基于离散元的马铃薯捡拾装置试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
WANG Wanhu. Potato Collecting Device Experimental Study Based on Discrete Element[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [139] 杜荣飞. 马铃薯捡拾装置的改进设计与试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
DU Rongfei. Advanced Design and Experimental Study of Potato Picking Device[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [140] 杨金砖, 李国民, 刘兴博, 等. 4UJ-1400 马铃薯捡拾机的研制[J]. *农机使用与维修*, 2019(2): 5-7.
- [141] JIA B, SUN W, ZHAO Z, et al. Design and field test of a remotely controlled self-propelled potato harvester with manual sorting platform[J]. *American Journal of Potato Research*, 2023(4): 1-17.
- [142] JU Y, SUN W, ZHAO Z, et al. Development and testing of a self-propelled machine for combined potato harvesting and residual plastic film retrieval[J]. *Machines*, 2023, 11(4): 432.
- [143] 小型自走式薯类联合收获机取得新突破[J]. *中国农机化学报*, 2020, 41(12): 237.
- [144] 王海翼. 山地自走式马铃薯联合收获机设计与试验[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.

- WANG Haiyi. Mountain Self-propelled Potato Combine Harvester Design and Experiment[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)
- [145] 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): 15-17.
- [146] 杨炳南, 张小燕, 赵凤敏, 等. 常见马铃薯品种特性分析及加工适宜性分类[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(1): 28-36.
- YANG Bingnan, ZHANG Xiaoyan, ZHAO Fengmin, et al. Characteristic analysis and processing suitability clustering of common potato cultivars[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 34(1): 28-36. (in Chinese with English abstract)
- [147] 张建华. 马铃薯块茎损伤评价技术研究及损伤变色性状的遗传分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- ZHANG Jianhua. Assessment Technology and Genetic Analysis for Tuber Browning in Potato (*Solanum tuberosum*)[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [148] 李文华, 吕典秋, 闵凡祥. 中国、荷兰和比利时马铃薯生产概况对比分析[J]. 中国马铃薯, 2018, 32(1): 54-60.
- LI Wenhua, LYU Dianqiu, MIN Fanxiang. Comparative analysis of potato among China, holland and belgium[J]. Chinese Potato Journal, 2018, 32(1): 54-60. (in Chinese with English abstract)

Research progress on the technology and equipment for potato mechanized harvesting

WANG Hucun, ZHAO Wuyun^{*}, SUN Wei, ZHANG Hua, LIU Xiaolong, LI Hui

(College of Electromechanical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Potato planting area and the total output have been ranked first in the world in recent years. Since the potato can serve as a growth crop under the soil, the harvest process is complex, large labor intensity, time consuming, and high labor costs. Potato harvest mode is still dominated by manual and semi-mechanized harvesting. Mechanized harvest is one of the key links in potato mechanized production. The low rate of mechanization harvest has been the short board for the potato harvest equipment in the field of agricultural machinery at present. The current situation has restricted the development of the Chinese potato industry. This review aims to summarize the planting characteristics, distribution, and mechanized harvest status of potatoes in the main production areas. At the same time, the key technologies of potato mechanization harvest were also reviewed at home and abroad. For example, the potato efficient ridge-like vine killing, potato digging device, potato low-loss and high-efficiency separation, multi-functional walking chassis, as well as human-computer interaction. The potato digging device was elaborated in the drag reduction and soil breaking, bionic digging, vibration digging, anti-blocking and depth limiting, as well as automatic ridge finding technology. The key technologies of potato low loss and high-efficiency separation were described in detail, including potato soil separation, potato vine separation, potato stone separation, flexible protection, and low position container. A summary was also provided for the structure and technical characteristics of typically small and medium-sized potato diggers, potato picking machines, as well as small-, medium-, and large-sized combined harvesting machines. A systematic analysis was made of the potato mechanization harvest. 1) It was difficult to complete the matching of machines and tools, particularly in various planting modes, complex terrain, and wide planting areas in the small plots in the hilly and mountainous areas. 2) There was a large proportion of small-scale planting areas, the high cost of purchasing harvesting equipment, and the weak ability of farmers to resist risks, leading to insufficient purchasing power for harvesting equipment. 3) Some potatoes in vegetable harvest accounted for a large proportion of China, with high requirements on the quality of the mechanized harvest. Farmers shared low trust in the harvesting equipment, and most of them used manual harvesting. 4) There was no perfect leasing service system for agricultural machinery, resulting in the low utilization rate of mechanized harvesting equipment. 5) The low separation effect and high impurity rate were found in the domestic combined harvesting machinery under the condition of large damage and sticky heavy soil. 6) Much attention can be expected to pay agricultural machinery research and development and support. Therefore, the mechanized potato harvest can be the trend of joint development in the step and combined harvest. In addition, the future directions prospected for the low loss and high-efficiency separation device, the breakthroughs in the weak technology, deep integration of agricultural machinery and agronomy in the agricultural machinery service system, together with the national policy support. The finding can also provide a strong reference for the development and research of mechanized potato harvesting technology in China.

Keywords: agricultural machinery; harvesting; potato; mechanization; killing vine; digging; drag reduction and consumption reduction; potato soil separation