DOI: 10.12398/j.issn.2096-7217.2025.04.003

油莎豆高效低损机械收获技术研究现状与趋势

赵越云[1,2]，王鹏[2]，杜新武[1,2]，金鑫[1,2*]，肖利强[1,2]，王淑嵩[2]

(1. 河南科技大学农业装备工程学院，河南洛阳，471000；2. 龙门实验室农机装备产业研究院，河南洛阳，471000)

摘要：油莎豆是一种集粮、油、牧、饲于一体的新兴绿色经济作物，抗旱节水，高产稳产，可在生态保护、农民增收、产业扶贫等领域发挥重要作用。尽管油莎豆具有诸多优势，其产业发展却面临着一个关键瓶颈——收获难题。由于缺乏先进的适用收获装备，油莎豆的种植规模增长缓慢，机械化收获水平较低，这已成为制约整个产业链高质量发展的主要障碍。这一问题不仅影响了油莎豆的经济效益，也限制了其在农业现代化进程中的应用。本研究从近年来国内外学者发表的有关油莎豆收获技术领域的研究出发，针对油莎豆种植特点及联合收获作业要求，分析了收获装备挖掘技术、输运技术和筛分技术等方面的研究进展和存在问题，例如，作业效率低下、损失率较高以及适应性较差等，这些问题的存在严重影响了油莎豆的机械化收获效果。此外，从结构设计、优化改进及适用性的角度出发，提炼了油莎豆收获关键环节的技术瓶颈和突破方向，包括挖掘装置的高效性和低损性，输运系统的稳定性和可靠性，筛分技术的清洁度和效率等。这些技术发展方向能够为进一步优化改进现有收获技术和创制新型收获装备提供借鉴，推动机械化收获在油莎豆生产中的广泛应用。这不仅有助于扩大油莎豆的种植规模，还能提高农民的生产效率和收入水平，为产业扶贫提供新的经济增长点。

关键词：油莎豆；收获装备；低损挖掘；高效输运；筛分清选

中图分类号：S23 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-7217(2025)04-0024-16

赵越云，王鹏，杜新武，金鑫，肖利强，王淑嵩. 油莎豆高效低损机械收获技术研究现状与趋势[J]. 智能化农业装备学报(中英文)，2025，6(4)：24－39

ZHAO Yueyun, WANG Peng, DU Xinwu, JIN Xin, XIAO Liqiang, WANG Shusong. Research status and trend of high-efficiency and low-damage mechanical harvesting technology for *Cyperus esculentus* [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2025, 6(4): 24－39

0 引言

油莎豆(*Cyperus esculentus*)是莎草科莎草属多年生草本植物，原产非洲和地中海沿岸，是《“十四五”全国种植业发展规划》重点推荐种植的特色油料作物之一[1]。油莎豆富含多种营养成分，包括22.14%～44.92%油脂、3.28%～8.45%蛋白、23.21%～48.12%淀粉、8.26%～15.47%纤维和1.60%～2.60%灰分，在预防和治疗心血管疾病、促进肠道健康、抗炎抑菌、抗氧化、降糖和降血压方面均可发挥一定作用[2-4]。油莎豆性喜温暖、阳光、湿润气候，耐温、耐盐碱、耐旱、耐瘠，适合在疏松的土壤或砂土上成长，目前在我国西北、华北、东北等地均有种植。截至2024年，我国油莎豆种植面积约20 khm^2，产量可达10 500～12 000 kg/hm^2，种植净收入可达31 500元/hm^2[5-7]。

油莎豆属于浅根系植物，大部分根系与块茎在地下30 cm以内，块茎与根系相连处极细、韧性低、易断裂。地上部分叶片完整光滑呈光束状，颜色为绿色，叶片长度为30～100 cm[8-10]。油莎豆全育期为120 d左右，北方春播时间一般为4月中下旬，9月下旬或10月初即可收获；南方可提前1个月种植，稍延缓收获[11]。成熟后的油莎豆地上叶片变黄，地下块茎变硬且呈现橘黄色。油莎豆对收获期的要求较为严格，过早或过晚都会对块茎品质产生不利影响。

目前油莎豆的收获方式主要以人工为主，收获时用手或短耙将植株连根拔起，后用短棒轻轻敲打，使较大的土块脱落，而后通过铁筛筛除黏土。人工收获方式费时费力，且在黏性较大的土壤中易出现块茎滞留在土中的现象，收获效率低[8]。因此，研制推广油莎豆收获机械是油莎豆规模化推广种植的关键。本研究将系统分析油莎豆的种植农艺、收获作业模式及其机械化关键技术，通过总结油莎豆收获机械化技术成果、发

收稿日期：2025-08-07 修回日期：2025-09-09

基金项目：河南省重大科技专项项目(龙门实验室拨投结合项目0000200024)；河南省重点研发专项(241112220200)

第一作者：赵越云，男，1986年生，河南兰考人，中级工程师；研究方向为农业机械装备设计。E-mail：zhaoyueyun@126.com

*通信作者：金鑫，男，1986年生，河南信阳人，博士，教授；研究方向为成套智能农机装备设计与研发。E-mail：jx.771@163.com

展经验与存在问题，以促进中国油莎豆收获机械化行业科技进步和产业发展。

1　油莎豆种植及收获模式

黄淮流域的油莎豆种植区收获时间是每年的9月下旬到11月初，通常不超过两个月，收获季较短。成熟后的油莎豆植株，地上部分的豆草一般能长到80～100 cm，而地下部分为根茎与豆块，最深能生长到地下25 cm。由于地上茎叶较高，在沿河流域气候条件下易出现倒伏现象，影响根茎部分的收获作业。因此，在收获块茎前，需先收割油莎豆草，豆草可作为牧草或粉碎后用于饲料。油莎豆块茎深埋地下，其根系发达，每株拥有50～70条根须形成团状抱土，可结400颗豆块形成丛状生长。由于油莎豆块茎与植株间的根须较细、连接力小、易断裂，收获过程中根果易分离，常出现落果情况。

油莎豆的种植方式受产地气候、灌溉条件、土壤特性等多方面因素的影响。根据油莎豆各个主产区的种植规范，表1给出了不同主产区油莎豆种植的行距、株距、覆土深度等参数。

常规条件下，沙壤土中种植油莎豆不需要起垄，轻壤土需要起垄。垄上种植的行距为20～65 cm，株距为10～42 cm，平播种植可采用宽窄行距种植和均匀行距种植两种方式。油莎豆种植的常规覆土深度为3～5 cm。不同种植区的收获方式相似，均为收割并清理茎叶后采收块茎。

表1　油莎豆主产区气候、土壤特性及种植、收获方式[12-17]

Table 1　The climate, soil characteristics, planting and harvesting methods of *Cyperus esculentus* in the main producing areas

地区	气候	土壤特性	种植	收获
吉林	温带大陆性季风气候、中温带大陆性季风气候	沙土或者沙壤土	垄上播种，60～65 cm均匀行距种植，株距10～13 cm。覆土深度3～5 cm	机械或人工收割地上茎叶并打捆清理出田块后，进行地下茎豆收获。收获机作业深度需达到40 cm，块茎采收率达到90%，一次性完成挖掘、泥土分离、茎叶分离、块茎输送
黑龙江	温带大陆性季风气候	砂质壤土	垄上播种，行距45 cm，株距17～19 cm或行距30 cm，株距23～25 cm。覆土深度3～5 cm	
河南	温带季风气候	砂质土壤	垄上播种，行距20 cm，株距33～42 cm。覆土深度4～5 cm	
新疆维吾尔自治区	温带大陆性干旱气候	中等肥力的沙壤土	宽行距40 cm，窄行距20 cm，株距12～15 cm，覆土深度3～4 cm	
河北	温带季风气候	沙壤土或轻壤土	沙壤土不需要起垄，平播行距35 cm，株距15 cm；轻壤土需要起垄，行距15 cm，株距20 cm。覆土深度4～5 cm	
内蒙古自治区	温带大陆性季风气候、温带半干旱大陆性季风气候	有灌溉条件的砂质土壤	宽窄行种植，宽行距35～50 cm，窄行距25～30 cm，株距为15 cm。覆土深度5～8 cm	

目前，国内油莎豆的收获方式有人工收获和机械收获。大部分种植区仍主要采用人工方式，收获人员利用耙、犁等工具将油莎豆从土中翻出，通过工具拉扯或敲打根茎使豆、茎分离，然后放入筛网中进行豆、土、草的筛分清选。某些地区，例如新疆喀什、吉林松原等地，采用“机械＋人工”的收获方式，先用旋耕机将油莎豆块茎从土中翻出，然后人工将豆、土、草混合物料运送至筛分装置，从而实现油莎豆的收获。这两种收获方式都存在作业效率低、筛分不彻底、损失率和破损率高等问题，无法满足规模化种植的收获要求。

2　油莎豆收获技术现状

尽管市场上还没有太多成熟的油莎豆收获装备，但国内部分高校、企业和科研院所的科研团队早在2015年就已经开始油莎豆收获技术的研究工作。根据国内油莎豆主产区的种植农艺及收获要求，油莎豆全流程收获技术包括根土挖掘、物料输运、分离清选等关键技术。鉴于收获技术需实现的功能特征，油莎豆收获装备通常由挖掘装置、输运装置、筛分装置、动力系统和传动系统5个功能结构组成[18]，如表2所示。

表 2 油莎豆收获机结构组成

Table 2 Structure composition of *Cyperus esculentus* harvester

结构	组成	功能	特点
挖掘装置	割台、挖掘刀、铲刀、减振器	用于挖掘、碎土,使油莎豆从土中翻出	根据油莎豆种植模式和生长特性,确定挖掘深度、割幅宽度。在不破坏作物的前提下,对挖掘刀的形状和质量进行合理化设计
输运装置	输运链、提升装置	通过提升、旋转或平移等方式将物料运送至筛分装置或收集设备中	由于其承上启下的功能特性,输运装置的运送方式和速度需要与挖掘装置和筛分装置相匹配
筛分装置	滚筒筛、振动筛等	利用振动、滚动、搅拌等方式,将油莎豆、杂草、土等进行有效分离、筛选	考虑到豆、草、土混合物料的复杂性,需设置多级、多方式筛分系统
动力系统	发动机或电动机	为收获装备各功能部件提供相应动力	自带动力系统(自走式),依靠拖拉机动力装置(牵引式)
传动系统	传动轴、传动带和传动链	动力系统与各功能部件间的动力传输	通过传递和改变转速和转矩,将动力传递到各功能部件

2.1 油莎豆收获机低损挖掘技术

从油莎豆的生长特性可知,其根系发达,根茎与豆体间连接力较小,在机械化收获时存在挖掘阻力大、漏果率高、收获混合物中含土量多等现象。在收获挖掘过程中,需将地下 30 cm 的土进行破碎,然后把油莎豆翻出土壤。现有的挖掘技术大多是由根茎类中药材、花生或薯类等收获机演变而来,通过高转速旋耕刀削切土壤,并结合刀身设计结构,实现对土壤的挖、刨、抛等过程。旋耕刀具的转动方式、转速及刀身结构对挖掘质量,例如,挖掘深度、效率、碎土效果及块茎损伤率等,具有明显影响。油莎豆的挖掘技术直接决定着收获装备后端输运及筛分环节的质量和效率,是整个收获流程中的关键环节。

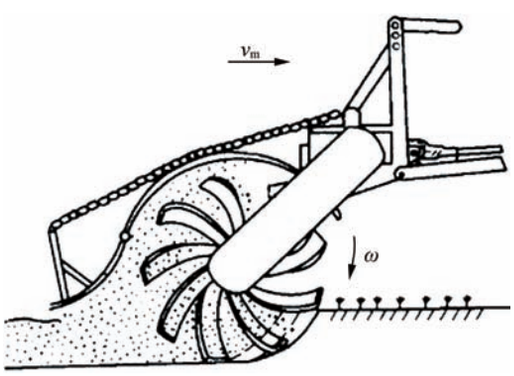


图 1 挖掘装置旋耕刀工作原理

Figure 1 Working principle of rotary blade of digging device

旋耕刀是油莎豆收获机挖掘装置的关键触土部件,其刀片的结构设计及布置方式与收获机挖掘质量、功率消耗有直接关系[19-22]。旋耕刀主要是由具有侧切刃的侧切面、过渡刃的过渡面和正切刃的正切面组成[23]。刀体在动力驱动下旋转的同时,随收获机直线前进,以铣削原理切削土壤,切下的土壤向后抛出,与挡土板撞击后进一步破碎,再经铲土刀前推作用,将豆、土草混合物料送至输运装置,如图 1 所示[24]。

油莎豆收获机挖掘装置的工作过程是两种运动的组合,即旋耕刀绕轴心的圆周运动与挖掘组件向前的直线运动,这两种运动的结合使旋耕刀做摆线运动,其运动轨迹如图 2 所示[25]。

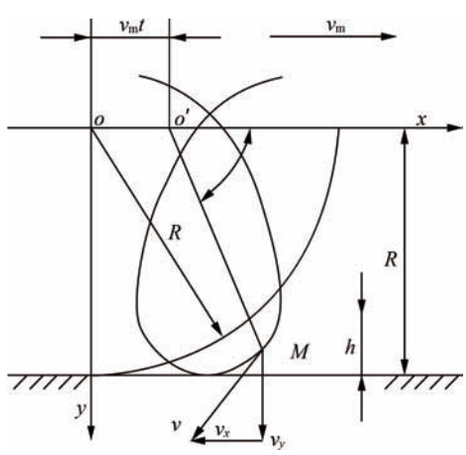


图 2 旋耕刀运动轨迹

Figure 2 The trajectory of rotary blade

由图 2 可知,刀体上任一点 M 的运动轨迹方程为:

$$\begin{cases} x = v_m t + R\cos\omega t \\ y = R\sin\omega t \end{cases} \tag{1}$$

式中:x——M 点的横向位移,m;

y——M 点的纵向位移,m;

v_m——挖掘组件前进速度,m/s;

ω——旋耕刀转速,r/min;

R——旋耕刀旋转半径,m;

t——运动时间,s。

尽管欧美等发达国家对根茎类作物的挖掘技术研究较早，但截至目前，国外并没有完全针对油莎豆收获相关的挖掘技术研究，大多农机厂商在进行油莎豆收获作业时，仍采用的是马铃薯联合收获机上的挖掘机构，或基于此进行部分改进。德国GRIMME公司将自走式马铃薯联合收获机的挖掘机构用于油莎豆收获装备中，其挖掘机构前端装设有切土切蔓装置，并将深度传感器及限深轮集成作为松土限深装置，实现了不同地面起伏下挖掘深度的一致性[26-27]。西班牙贝洛塔公司生产的油莎豆联合收获机是将常规的挖掘装置进行了结构改进，根据油莎豆收获时对土壤的切削方式及切深对触土部件结构参数进行优化，开发了一种楔形降阻破土挖掘刀，这种旋耕破土刀片不仅能够提高土壤的破碎率，同时可以降低工作阻力，减少作业能耗，但是刀轴容易发生茎秆缠绕现象，且挖出的油莎豆有明显破碎情况[28-29]。某些美国农场利用约翰迪尔生产的牵引式马铃薯联合收获机来进行油莎豆收获作业，该装备在挖掘结构的刀轴外侧增加了掘深调节装置，利用距离传感器，并结合地面起伏高度实时调节挖掘深度，增加了机具的适用性，但存在漏果率高的问题[30-31]。德国格立莫农业技术公司生产的EVO290马铃薯联合收获机采用振动式挖掘机构，可以根据土壤的物理特性，如含水率、密度、坚实度等自动调节振动频率，在一定程度上降低了挖掘阻力，实现了连续收获[32-34]，如图3所示。



图3　EVO290马铃薯联合收获机

Figure 3　EVO290 potato combine harvester

我国油莎豆引入时间较晚，大众接受度低，产业发展缓慢等因素，导致国内对油莎豆收获机的研究晚于发达国家。从20世纪70年代才开始油莎豆收获机的设计开发，经过几十年的技术创新与迭代，已经初步形成油莎豆收获挖掘的技术体系[35]。由于油莎豆种植模式及生长特性的影响，现有的挖掘技术仍存在收获挖掘阻力大、含土量高以及埋果率严重等问题。针对这些问题，近年来国内高校、企业、科研院所的研究人员重新对油莎豆收获装备的挖掘装置进行了梳理与技术改进，在一定程度上解决了油莎豆收获难题。

国内最早的油莎豆挖掘装置是西北植物研究所基于仿生原理开发的鸭掌形掘土机构，该装置破土性好、不易缠草，铲面设计为锥形曲面，减少了覆土多、易堵塞问题。但该装置作业时将豆、土、草整块团聚体刨出，碎土效果差、能耗高，对于后续油莎豆的清选分离影响较大。由于国内种植规模小，之后的很长一段时间都是靠人工进行收获，收获技术的发展也趋于停滞[36]。直到2015年，国家出台了相关政策使油莎豆产业发展迎来了转机，一些高校、院所的学者陆续开始了油莎豆收获相关技术的研发。

何晓宁等[37]针对油莎豆旋耕挖掘方式进行反旋运动学分析，建立了旋耕刀与油莎豆团聚体离散元模型，利用仿真试验确定了影响旋耕刀工作阻力和刀轴扭矩的结构参数和取值范围。结果表明，相较于目前常用的正旋旋耕方式，反旋作业方式的埋果率明显降低，土壤破碎率也显著提高。赵壮等[38]根据现有油莎豆收获机挖掘装置存在的问题，优化了油莎豆收获的反旋挖掘装置，着重分析了反旋刀片的结构参数对反旋抛送效率的影响规律。利用仿真和田间试验，获取并验证了反旋刀片的折弯角、工作幅宽及旋转半径等参数的最优值，如图4所示。吕严柳[39]基于Hertz-Mindlin接触模型构建了油莎豆—土壤—根茎的团聚体离散元模型，以减阻减损挖掘为目标，设计了“三角平面铲＋碎土刀”的组合式挖掘机构，并通过仿真试验确定了挖掘装置最优工作参数。田间试验表明，所设计的挖掘机构显著降低了伤豆率，并提高了碎土效果，如图5所示。

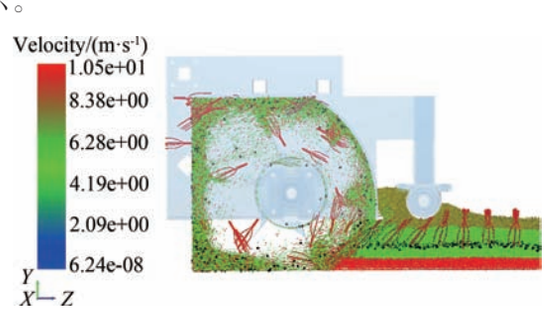


图4　反旋抛送装置仿真试验

Figure 4　Simulation test of reverse rotation throwing device

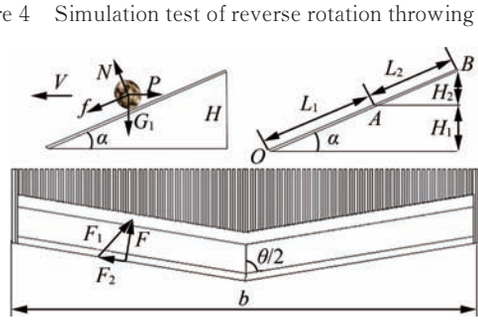


图5　挖掘铲受力分析及结构参数

Figure 5　Force analysis and structural parameters of the excavator shovel

国内一些学者针对作业性能和能耗等问题,对挖掘装置中的旋耕刀结构进行优化设计。丁为民等[40]在考虑动态滑切角与静态滑切角的基础上,推导了正切刃动态滑切角方程,并从滑切角的参数特征中解释正、侧切刃滑切角和动、静态滑切角间的内在关系。孔令德等[41]研制了刀面为弯曲面的斜置旋耕刀,将土壤的破坏形式由正置旋耕时的单纯受压变为受压撕裂,并有效地降低了旋耕功耗。熊平原等[42-43]基于离散元方法建立旋耕刀—土壤相互作用仿真模型,并进行旋耕扭矩仿真试验与掘土试验,试验发现水平阻力的最大值大于侧向和垂直方向阻力的最大值,其中水平阻力是功率消耗的主要因素。通过对刀具折弯角和幅宽以及作业速度等参数进行最优参数组合,实现了碎土率和耕深稳定性的双重提升。

此外,国内的农机企业也在油莎豆收获挖掘领域开展了技术创新。早在2015年新乡市地隆药业有限公司生产了一款自走式油莎豆联合收获机,其挖掘装置为一种组合式正旋机构,由旋耕破土刀片、刀轴、固定式挖掘铲、压土辊组成。收获过程中利用旋耕碎土装置进行油莎豆团聚体所在土层的破碎,同时部分油莎豆块茎会脱离团聚体,利用安装的固定式入土装置将破碎后的油莎豆团聚体运送至后端输运装置,有效解决收获过程中土壤堵塞、挖掘阻力大等问题。但该装置作业过程中存在埋果率和损伤率高的情况,并且刀轴易发生草茎缠绕,降低收获效率。吉林松原市雨为农业机械制造有限公司开发的油莎豆收获挖掘装置由旋耕破土刀片、刀轴以及倾斜安装的导土板组成,收获作业时,油莎豆团聚体被破碎并抛送,下端安装的导土板将破碎后的豆、土、草混合物过渡到后端输运装置,如图6所示。尽管该公司生产的挖掘装置具有降低挖掘阻力、提高破碎率等优点,但仍存在埋果率高、豆体破损率高等问题。



图6 雨为农业机械制造有限公司油莎豆收获机

Figure 6 The *Cyperus esculentus* harvester of Yuwei Agricultural Machinery Manufacturing Co., Ltd.

现有的油莎豆收获挖掘技术仍是以其他根茎类作物的挖掘方式进行修正匹配,目前的研究也主要集中在挖掘方式和结构设计优化等方面,对旋耕挖掘的机理研究较少,旋耕刀与土壤、豆体及根茎等的相互作用机理研究更为少见。另外,实际田间作业环节中油莎豆团聚体所处的环境复杂,挖掘过程的影响因素众多(土质,砂石,根茎缠绕等),油莎豆团聚体在挖掘过程中与机具之间存在复杂的动力学关系,豆、土、草团聚体的破碎机理仍不明确。如何构建挖掘耦合模型,实现油莎豆团聚体的高效挖掘和低损分离是后续开展新型挖掘技术研究的核心。

2.2 油莎豆收获机输运技术

输运系统是油莎豆联合收获机中挖掘装置和筛分装置间的桥梁,其输送率和通畅性直接影响收获装备的作业效率。油莎豆根系发达,通常以簇状形态生长,收获时,前端挖掘装置会形成含大量土壤的豆、土、草团聚体,在往后端筛分装置输运过程中容易出现油莎豆块茎回落、土壤堵塞等问题。考虑到油莎豆的收获特性,适用性好的输运装置应具备结构简单,喂入量均匀,输运平稳,有碎土筛分能力等特点,同时输运装置的设计结构应具有较好的过渡作用,能够使豆、土、草团聚体高效、顺畅地输送至后端清选分离装置。目前,国内外联合收获机的输运技术主要分为链板式输运、带板式输运和轮转式输运[44]。现有的油莎豆联合收获机上使用的输运技术也是源于这3种方式。

链板式输运装置主要由驱动装置、链条和刮板组成。工作时,驱动装置带动链条和板齿运动,将物料从一端输送到另一端。刮板的设计能够确保物料在输送过程中不会滑落,同时链条的强度也保证了输送的稳定性和效率,如图7所示[45-46]。带板式输运与链板式相似,这两种输运技术具有结构简单、维护方便、输送能力强、适应性强等优点。轮转式输运装置是一种利用旋转部件(如滚筒、螺旋器等)来实现物料输送的设备。物料通过进料口进入输送装置后,被旋转部件带动并沿着预定路径移动。该装置包括转动叶片、滚筒、转动轴等,通常应用于封闭或半封闭式空间及小喂入量场景,具有结构简单、输送稳定的特点[47]。考虑到油莎豆收获时需运送的豆、土、草团聚物质量较大,轮转式输运方式并不适用。

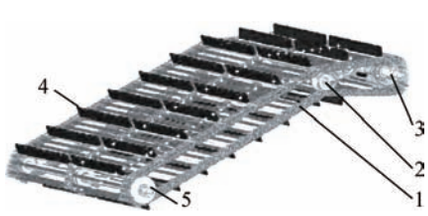


图7 链板式输运装置

Figure 7 Chain plate transportation device

1. 栅杆刮板式分离输送带 2. 主动轮 3. 从动轮 4. 支撑轮 5. 杆带组合

国外主流的联合收获机多采用链板式和带板式这两种结构,约翰迪尔W80型自走式联合收获机采用链

板式输运装置，其利用智能传感技术实时监测机器行走速度和喂入量，可实现自动调整输运装置作业角度和速度，该装置能够适应不同作物的收获要求。由于在收获机上加入了智能化模块，装置结构较为复杂，生产成本较高[48-50]。意大利的Flli Spedo Junior型牵引式马铃薯联合收获机采用带板式输运装置，实际应用过程中可保证作物输送的连续性和稳定性，有效地降低了作物堆积现象，但由于其结构简单，当收获油莎豆等小型颗粒状作物时，存在漏果率高和作物堵塞等问题，如图8所示[51-52]。比利时Dewulf公司生产的自走式四行马铃薯联合收获机采用轮转式输运机构，并在机构上增加可频控的振动系统，该系统能够根据土质状态及碎土效果实时调整振动频率，解决了大喂入量下的堵塞问题[53-54]。目前，国外针对作物输运装置的研究大多集中在主粮作物，例如，玉米、小麦、马铃薯等，其应用于油莎豆收获机的输运技术主要源于马铃薯收获机，由于生物特性差别明显，作业时存在漏果率高、喂入量大引起的效率低等问题。



图8　Flli Spedo Junior型牵引式马铃薯联合收获机

Figure 8　Flli Spedo Junior tractor-mounted potato harvesting machine

国内油莎豆联合收获装备上的输运装置大多是由根茎类收获机的输运技术改进而来。针对油莎豆收获时含土量较多的特点，现有收获装备主要采用刮板式输送和链片式输送等方式。一些高校、科研院所根据油莎豆的生物特性和生长方式对输运装置中的传动方式、设计结构及作业参数进行优化改进。赵壮等[55]基于油莎豆团聚体特性设计了一种油莎豆联合收获机中间输送装置，并对其输送速度、安装位置以及安装倾角进行分析与设计，通过试验确定了输送刮板的最优结构参数组合，显著降低了输送装置的漏果率和损伤率，如图9所示。吕严柳[39]在考虑豆、土、草混合物喂入量大的前提下，对杆条式升运链进行改进设计，在链板上增加筛孔并安装数组振动筛片，形成组合式升运筛，实现在输运作业时直接筛分掉部分土壤。这种方式不仅减少了堵塞问题，还能减轻后端清选筛分装置的工作强度，如图10所示。何晓宁等[56]针对油莎豆与土壤分离不彻底，漏土率低，伤果率高等问题，开发了一种合页筛片式升运装置，通过筛片折弯部分增大筛孔面积，对团聚体提供与链筛运动方向相同的推力，使合页式升运装置提高漏土效率且有效避免了回带现象，如图11所示。

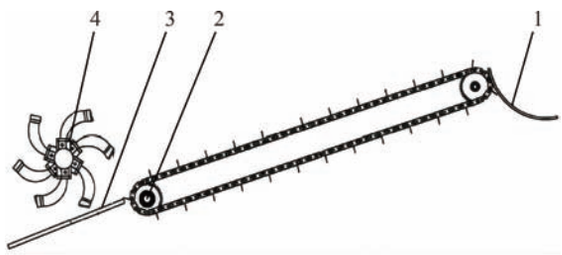


图9　油莎豆输送装置整体结构

Figure 9　The overall structure of the cyperus esculentus conveying device

1. 导流板　2. 输送装置　3. 固定挖掘装置　4. 旋耕挖掘装置

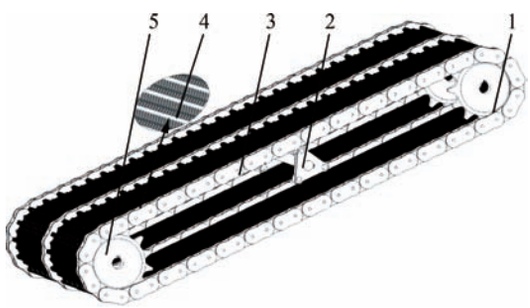
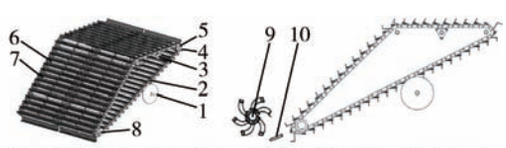


图10　组合式升运筛

Figure 10　Combined lifting sieve

1. 主动链轮　2. 振动轮　3. 升运链　4. 振动筛片　5. 从动链轮



(a) 油莎豆输送装置示意图　(b) 油莎豆升运装置侧视图

图11　油莎豆合页筛片式升运装置结构

Figure 11　Structure diagram of hinged sieve lifting device

1. 支撑轮　2. 传动链条　3. 振动轮　4. 传动轴　5. 传动链轮　6. 链筛片　7. 连接杆　8. 张紧轮　9. 旋耕挖掘装置　10. 挖掘铲

尽管一些学者并没有完全针对油莎豆收获时的输运技术进行分析，但其对于根茎类作物的收获技术研究仍具有参考价值。高波等[57]针对黏重土壤环境下的根茎类中药材收获根土分离不彻底等问题，设计了一种两级链条式输送分离装置，其采用两级输送＋主动振动碎土方式，通过对土垡筛面运动学分析和跌落碰撞仿真，确定了主动振动装置、碎土辊、分离筛等关键部件的最优结构参数和工作参数，实现了收净率、破皮率和损伤率等3项高质量收获指标，该输运结构可以被应用于黄淮地区油莎豆收获的装备借鉴。郑刚等[58]针对沙地鲜食甘薯机械化收获破皮率高的问题，设计了橡胶包裹的一体式输送分离装置。通过对输送速度、抖动装置振幅和挖掘深度的最优参数设计，明显降低了收获时作物的破皮率和损失率。彭正昶等[46]结合

国内西北干旱地区的马铃薯种植模式,设计了一种刮板输送装置,在保证最大输送率的同时,将装置倾斜角度调整至最大,缩短了整机长度,极大地提高了该收获机的工作效率及可靠性。此外,国内的一些农机制造企业通过调研用户需要,将传统的输运装置进行技术创新,以满足油莎豆收获的要求。例如,永清县伟佳机械加工厂将筛网面作为传统刮板式输运装置的刮板连接处,并利用链条进行传动,实现在输送油莎豆团聚体时将部分土壤直接筛除。尽管减小了后续清选环节的复杂性,但整机的收获效率也随之降低,该装置在应用过程中仍存在较多问题,没有得到推广。

目前,国内外油莎豆联合收获机中的输运技术仍主要从马铃薯、中草药等根茎类作物收获机上改进而来,并没有针对油莎豆收获的特定输运装置。现有技术在应用于油莎豆收获时存在适应性差、大喂入量时堵塞,漏果率高等问题,如何解决在大喂入量和低漏果率条件下的高效输运是亟须解决的关键问题。此外,考虑到输运装置作为油莎豆联合收获机中承上启下的关键部件,如何与前端挖掘装置及后端筛分装置的合理化匹配是另一个核心问题。

2.3 油莎豆收获机筛分技术

油莎豆收获机的筛分系统通常由分离装置和清选装置组成,其主要功能是分离装置将油莎豆与其他杂质分开,包括豆茎分离、豆土分离等,并去除多余的土壤、石块、草茎等物理杂质。通过机械振动或旋转筛网的方式,分离装置能够有效地将油莎豆从混合物中筛选出来。清选装置则是进一步精细筛选,确保收获成品的纯净度,通常利用气流或不同孔径筛网来实现高精度的筛选,清除较小的碎草、灰尘和其他非目标物质[59]。双重筛选机制不仅提高了油莎豆的纯度和质量,还减少了后续加工中的杂质问题,从而提升产品的市场价值和加工效率。

2.3.1 分离装置

根据分离装置的实际用途,其功能结构设计需结合收获作物的生长方式和生物特性。由于复杂的作业场景及收获要求,滚筒型分离装置被广泛应用于多种农作物的收获机械中,如图 12 所示。

该装置在工作时,其主要部件脱离滚筒做高速运动,作物、杂质等混合物料由喂料口进入,经螺旋喂入头进入脱粒滚筒,在滚筒、螺旋叶片及钉齿等部件的旋转搅拌作用下进行分离并轴向运动。混合物料通过滚筒内部各结构部件间的揉搓、冲击、拉扯、挤压等多种受力下进行分离,被分离出的杂质,例如,草茎、碎土等非目标物质经过筛孔、导板等结构排出滚筒,从而实现作物与其他杂质的快速高效分离[60-61]。目前常用的有横轴流式和纵轴流式脱粒滚筒,不同结构形式的脱分装置其作业性能和应用场景各不相同,为此,国内外学者开展了大量研究。

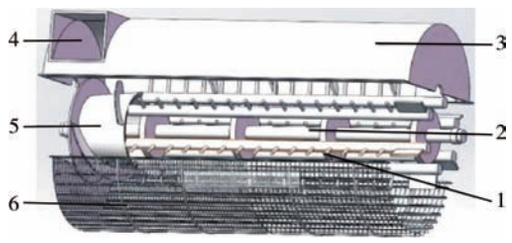


图 12 脱粒分离装置结构简图

Figure 12 The structure diagram of threshing separation device

1. 钉齿 2. 螺旋滚筒 3. 上盖板 4. 喂入口 5. 螺旋喂入头 6. 凹板筛

ALIZADEH 等[62]通过试验分析了脱粒滚筒转速和水稻含水率对其脱粒过程中籽粒破碎率的影响规律,发现随着转速增大,籽粒破碎率增加,高含水率水稻的破碎率较低。BRUCE 等[63]针对油菜籽收获期间成熟豆荚打开时存在大量种子损失等问题,建立了脱粒滚筒转速与豆荚打开率间的耦合数学模型,分析了随机冲击试验中滚筒转速与豆荚打开时间之间的相关性。OLAYE[64]搭建了轴流脱粒试验台,通过试验分析了钉齿脱粒筒对稻米品质的影响,发现随着滚筒转速和吞吐量的增加,脱粒效率、清粒效率和籽粒损失率增加,籽粒损失率降低,如图 13 所示。

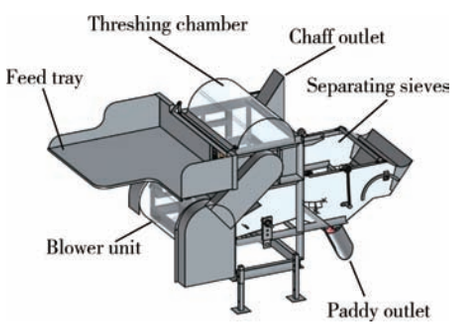


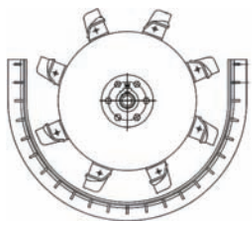
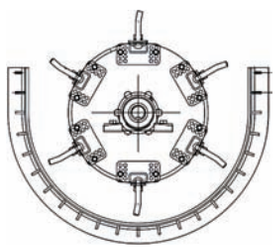
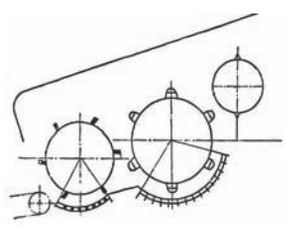
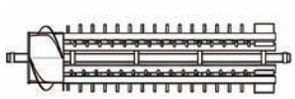
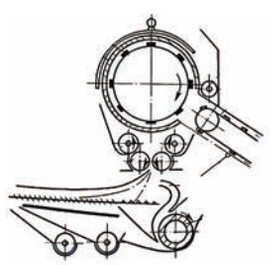
图 13 轴流脱粒试验台

Figure 13 Axial-flow threshing test bench

国内学者毛欣等[65]针对裸燕麦收获时存在分离装置功耗大,作业损失率高等问题,以轴流式钉齿脱粒滚筒为研究对象,利用正交试验分析了滚筒转速、喂入量、凹板栅条间距等因素对装置功耗、成品含杂率及损失率的影响规律,并设计了最优工作参数组合。陈霓等[66]从降低稻谷脱粒难度及损失率的角度出发,设计了半喂入式同轴差速脱粒滚筒,实现了收获阶段损失率、破碎率和含杂率等性能指标都达到较优水平。目前,针对滚筒类分离装置的理论分析与试验研究方面主要集中在小麦、油菜和谷物等作物的收获领域,这些技术能够为油莎豆分离装置的设计与开发提供理论基础。

表 3　常见的脱粒分离装置[67-73]

Table 3　Common threshing and separation equipment

序号	装置类型	工作原理	优缺点	结构简图
1	纹杆滚筒式	谷物在带有纹理的滚筒与凹板之间反复进行摩擦作用来实现脱粒的一种脱粒装置。	优点：脱粒效率高、低破损率，兼收多种作物； 缺点：易在滚筒中发生堵塞，导致脱粒效果效率较差。	
2	钉齿滚筒式	谷物受到滚筒上钉齿的 梳刷和打击作用来实现脱粒的一种脱粒装置。	优点：抓取和脱粒能力较强，可实现对湿度较大作物的脱粒工作； 缺点：分离能力较弱，含杂率较高，后续清选压力较大	
3	双滚筒式	前后装有两组滚筒共同作用完成对收获作物的脱粒分离。	优点：脱净率高，分离性能好，效率高； 缺点：结构复杂，破碎多，后续清选压力大	
4	纵轴流式	滚筒与机器前进方向平行，谷物从轴的一端喂入。由于 纵向放置脱粒滚筒，机器不受其长度限制，多用于大型收获机。	优点：可兼顾高脱净率、低破碎率； 缺点：喂入不流畅，螺旋喂入叶片易磨损、传动结构较复杂，功耗大	
5	横轴流式	滚筒与机器前进方向垂直，谷物在滚筒的一侧喂入 并随滚筒沿轴向移动脱粒，稿草从滚筒的另一侧排出。 机器因横置滚筒长度的限制，一般用于中小型收获机。	优点：高茬收割时，可以更好实现脱粒与分离，效率较高； 缺点：低茬收割时，喂入量加大，脱粒与分离能力不能 满足作业需求，导致作业速度放慢工作效率下降且作物 潮湿时易堵塞滚筒。	

关于油莎豆收获装备中分离装置的研究，国外学者在此方面的文献较少，大多数研究集中在国内高校和科研院所。王君等[74]针对油莎豆收获期间破损率高、脱净率低等问题，基于现有的农作物脱粒分离装置，设计出一款纵式轴流油莎豆脱粒分离装置。在考虑油莎豆收获特点的前提下，对脱粒滚筒进行应力和模态分析，确定了合理的设计参数，并得到脱粒分离性能较好的滚筒转速及脱粒间隙范围。张胜伟等[75]为了解决油莎豆机收时豆、土、草分离不彻底及含杂率高等问题，设计了一种双层滚筒筛式果杂分离装置，通过建立分离装置与收获物料相互作业的EDEM-MBD耦合仿真模型，确定了滚筒筛转速、分离螺旋输送器转速、柔性齿段长度这3项的最优工作参数并进行了田间试验验证。季明仁[76]基于油莎豆的物理和力学特性，设计了一种横轴流脱粒装置结构，通过对工作状态下脱粒滚筒的静力学分析和模态分析，验证了装置的工作可靠性和稳定性。孙建超[77]通过对油莎豆在收获过程中的碰撞损伤特性分析，优化并改进了现有油莎豆脱粒分离装置的结构和工作参数，显著降低收获作业时的油莎豆损伤率。刘文亮等[78]针对油莎豆收获时混合物含土量大，茎、豆、土高效分离困难，传统大直径双层滚筒筛分离效果差、损失率高、结构庞大等问题，设计一种可适应油莎豆适时收获的立式轴流油莎豆脱粒分离装置，如图 14 所示。刘学敏等[79]根据现有花生收获机的结构特征，在考虑油莎豆收获的作业背景和农艺要求，运用模块化设计理念，研制了一种振动筛式多功

能油莎豆脱粒分离装置。

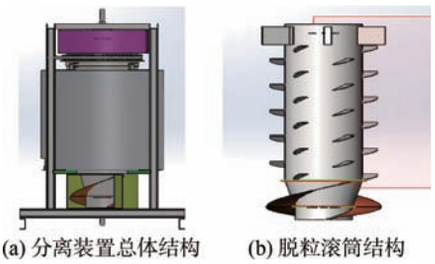


图 14 立式轴流脱粒分离装置

Figure 14 Vertical axial-flow threshing and separation device

目前,国内外在脱粒分离装置结构设计和应用方面的研究主要集中在谷物、玉米、油菜等传统经济作物。国内用于油莎豆收获的分离装置在适用性、可靠性、作业质量以及效率上均无法满足实际生产的需要,其研制路线上始终没有摆脱“拿来主义”的影响,仍是以模仿现有装置为主,没有针对国内油莎豆种植农艺和收获要求开展系统性的理论和应用研究。因此,设计一款适用于我国油莎豆收获现状的高效低损脱粒分离装置,对于推动国内油莎豆产业的快速发展具有重要价值。

2.3.2 清选装置

尽管前端分离装置能够去除部分杂质,但为了保证收获成品的洁净度,在油莎豆收获机筛分系统中仍需设置清选装置,目前市面上常用的有风筛式和振筛式两种清选部件。

振动式清选机构作为常用的筛分清选机械,广泛应用于粮食、煤矿、磨料等领域。振动筛的种类多样,通常按部件运动轨迹分类,包括直线振动筛和圆振动筛。振动筛用于将不同粒径大小的颗粒进行分离,大于筛网尺寸的颗粒作为筛上物留在筛网上方,小颗粒则经过透筛过程进入到下方。国内外学者主要通过样机试验或建模仿真两种方法进行振动清选技术的研究。MANUEL 等[80]利用线性和非线性方法测试了振动筛的两个二维三自由度动态模型,并对双层直线运动振动筛进行了数值模拟,获取了不同工作状态下振动筛的准确运动参数,如图 15 所示。ZHAO 等[81]利用正交试验研究了不同粒径的球形和非球形颗粒平均流速和筛分效率的变化规律。讨论了振动强度对筛分过程的影响,论证了单因素分析对筛分性能的潜在误差。李立君等[82]基于油茶果粗选机振动筛的工作原理和动力学分析,利用 ADAMS 仿真研究了曲柄转速、筛面倾角和筛面长度对茶籽保有率和筛分效率的影响规律,并验证了振动筛的设计参数和可靠性。徐天昊[83]研究了多层直线振动筛结构参数对筛分效率的影响,总结颗粒在筛网上的筛分规律,上一层筛网的筛分过程会影响下层的筛网,从上到下的筛分效率逐渐降低。张红梅等[84]为了解决油莎豆收获后清选困难的难题,在脱粒系统下端增加振动筛分系统,采用矩阵法对筛分机构进行动力学分析得到筛面各点的位移、速度、加速度曲线图,确定了曲柄转速、筛面倾角、振幅式是影响筛面运动的关键因素。

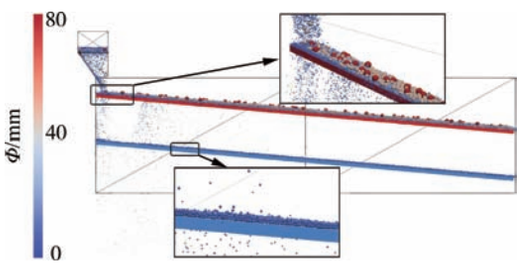


图 15 双层振动筛的 DEM 仿真

Figure 15 DEM simulation of double vibrating screen

风筛式清选机构是一种常见的用于谷物、豆类或其他颗粒状物料的清选设备,主要作用是通过气流和筛网的结合,将杂质、碎屑、异物等从物料中分离出来,从而实现对物料的净化和分级,这种清选方式广泛应用于农业机械(如收获机)、粮食加工行业以及种子处理等领域,按照工作原理不同,可分为吹出型、吸入型和吸入兼吹出型等[85]。国外很早就利用风力装置来对小麦、玉米等进行籽粒清选,美国 Blount 公司、德国 Robor 公司等在收获机风选装置的设计与改进方面不断提升和突破[86-87]。KARANTH 等[88]利用 PIV 和 CFD 等技术手段对小籽粒作物在离心风机内部通道中的流动特性,基于此对气道进行优化设计,实现了更低的损失率。HE 等[89]将动态网格与 CFD-DEM 相结合,分析小颗粒在流场中的动态行为,发现该方法可以提高处理自由体流固耦合问题的能力,并能够应用在风选机构中。尽管我国在农业领域的风力清选技术研究起步较晚,但随着多类农作物联合收获设备的研发,国内高校、科研院所等也开始对风力清选装置进行一系列研究工作。戴飞等[90]针对胡麻脱粒物料提出“先气流清、再风筛选”的作业模式,设计了双风道风筛式分离清选机。通过对双风道杂余集料装置及吸杂除尘装置等关键部件进行设计选型,实现对胡麻收获期脱粒物料不同组分的分离清选作业。于昭洋等[91]为解决切流式花生全喂入联合收获机在清选环节中的果杂分离不清、缠膜挂秧等问题,设计了一种风筛组合清选机构,通过主风机、副风机与上层杆筛、下层多阶弹性筛配合作业,实现无阻滞、大小杂并除的清选效果。贾洪雷等[92]设计了一种用于油莎豆收获的风筛选式清选机构,并运用动态静力学方法研究了筛面物料的相对运动,通过理论计算给出了吸杂风机的最优作业参数组

合，如图16所示。郑效帅等[93]针对油莎豆清选过程中含杂率高的问题，采用CFD-EDEM耦合方法对风筛式清选装置进行了仿真试验、参数优化、规律解析和试验验证，确定了风机气流速度、筛网振动频率和振幅等最优作业参数，为油莎豆优质清选提供理论支撑。

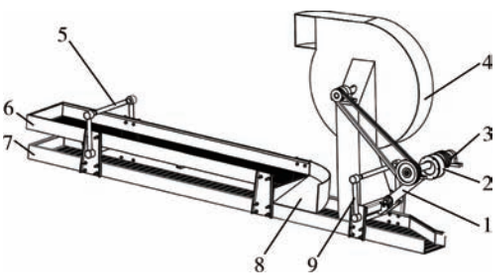


图16　清选机构结构图

Figure 16　The structure of selection institution

1. 驱振摆臂　2. 偏心套　3. 驱振带轮　4. 风机　5. 吊连杆Ⅰ
6. 上层筛　7. 下层筛　8. 排草口　9. 吊连杆Ⅱ

国内外学者对清选装置进行了大量研究[94-95]，包括多样化的振动清选技术和气动式风筛技术，但大部分清选技术集中应用在水稻、玉米、小麦等作物的分离清选装置中，对于油莎豆，花生等根茎类作物的高效清选理论和应用研究却很少涉及。考虑到油莎豆等根茎类作物在收获过程中混合物料成分复杂，包括大量土壤、碎草、缠绕根须、块茎、石块等，目前应用于此领域的机具存在收获效率低、清选效果差、脱净率低、损失率高等问题。因此，借鉴其他谷物的清选装置，并结合油莎豆生物特性和生长特点，研制出一种适应性强的油莎豆收获机清选装置，对提高油莎豆机收作业性能具有重要的意义。

3　结论

本研究以油莎豆高效低损收获装备为背景，综述了国内外关于油莎豆收获技术的研究现状，对现有收获装备中的低损挖掘技术、高效输运技术、筛分清选技术等关键核心技术进行了汇总和系统分析。研究表明，尽管国内外学者在油莎豆机械化收获技术方面取得了一定的进展，但结合实际应用，无论是在理论分析还是结构设计上仍存在许多问题需要进一步探索。

1）油莎豆“土壤—块茎—根系”团聚体形态复杂，现有收获挖掘方式从传统旋耕作业改进而来，团聚体分离效果差，挖掘深度和宽度无法控制，挖掘刀具作业过程中附土量大，导致收获机触土部件工作阻力大。因此，探索挖掘部件与土壤-根茎作物-根系团聚体的耦合作用机理，形成以脱土减附降耗为目的的挖掘技术是所有根茎类收获装备亟须突破的核心技术之一。

2）目前应用于油莎豆联合收获机中的物料输运技术多源于马铃薯等收获装备，存在适应性差、易堵塞、漏果率高等问题，而油莎豆收获过程中输运物料具有体量大、多元化、分散性等特点，现有技术无法满足高效低损的输运要求。针对油莎豆收获特点，开发适用于复杂物料的高效输运技术是目前迫切需要解决的关键技术问题。另外，输运装置与挖掘、筛分等其他关键结构的合理化衔接也是保证收获效率和质量的关键环节。

3）现有油莎豆收获装备存在分离清选系统的机械调节精度低、稳定性差以及自适应能力弱等问题，如何利用智能传感技术实时获取分离清选部件作业参数，并开发针对小果粒、多杂质的新型分离清选装置也是实现高效低损收获的关键内容。

4）针对油莎豆特定生长环境和生理特性的适应性机械设计是提高收获效率的关键。通过优化挖掘部件结构、改进输送系统设计以及引入智能化控制技术，可以有效降低收获过程中的机械损伤和损失率，提升整体作业质量。此外，高效低损收获装备的集成化和智能化水平仍有提升空间。未来的研究应更加注重多学科交叉融合，例如将机械工程、计算机科学与农业生物学相结合，开发更具适应性和智能化的收获设备。

参　考　文　献

[1] 桑巴叶，陈启民，古丽米娜·吐尔孙江. 新疆油莎豆研究及产业发展现状[J]. 林产工业，2025，62(3)：88－92.
SANG Baye，CHEN Qimin，GULIMINA·Tuersunjiang. Current status of research and industrial development of *Cyperus esculentus* L. industry in Xinjiang [J]. China Forest Products Industry，2025，62(3)：88－92.

[2] 陈红娟，罗晓宏，王楠希，等. 不同产地油莎豆中水溶性糖分析[J]. 食品安全质量检测学报，2025，16(4)：145－152.
CHEN Hongjuan，LUO Xiaohong，WANG Nanxi，et al. Analysis of water soluble sugars in *Cyperus esculentus* collected in different producing areas [J]. Journal of Food Safety & Quality，2025，16(4)：145－152.

[3] 朱淑娟，康才周，安红燕，等. 10种油莎豆种质资源蛋白质氨基酸组成及其相互关系[J]. 安徽农业科学，2024，52(21)：102－106.
ZHU Shujuan，KANG Caizhou，AN Hongyan，et al. Composition & interrelation of protein and amino acid of 10 germplasm resources of *Cyperus esculentus* [J]. Journal of Anhui Agricultural Science，2024，52(21)：102－106.

[4] 张艳，薛沾枚，刘雪松，等. 油莎豆营养成分和生物学功能及其应用的研究进展[J]. 饲料工业，2025，46(6)：56－60.

ZHANG Yan, XUE Zhanmei, LIU Xuesong, et al. Research progress on nutritional components and biological functions of *Cyperus esculentus* and its application [J]. Feed Industry, 2025, 46(6): 56－60.

[5] 郑新立, 阮少范. 攻克技术关沙漠变良田——新疆生产建设兵团三师五十四团发展油莎豆产业纪实[J]. 新型城镇化, 2025, (1): 35－37.

[6] 刘林, 余向东. 一颗实打实的"金豆子"——我国油莎豆产业曙光已现[N]. 农民日报·中国农网, 2021－07－21.

[7] 刘佳遥, 曹嘉芮, 程艳, 等. 吉林省油莎豆产业发展现状及对策建议[J]. 农业科技管理, 2023, 42(6): 52－55.
LIU Jiayao, CAO Jiarui, CHENG Yan, et al. Development status and suggestions of *Cyperus esculentus* L. industry in Jilin Province [J]. Management of Agricultural Science and Technology, 2023, 42(6): 52－55.

[8] 张斌, 刘晶, 范仲学, 等. 盐碱地油莎豆机械化播种收获技术与装备研究进展[J]. 山东农业科学, 2019, 51(4): 144－148.
ZHANG Bin, LIU Jing, FAN Zhongxue, et al. Research progresses of mechanical seeding and harvesting technology and equipment for saline-alkali *Cyperus esculentus* [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(4): 144－148.

[9] 马星玉, 郭子玥, 石慧东, 等. 油莎豆种植及开发利用价值研究初探[J]. 内蒙古林业, 2024(2): 29－31.

[10] 张晴晴, 杜艺, 张玉林, 等. 块茎形成期不同灌溉量对油莎豆产量和品质的影响[J]. 草地学报, 2024, 32(11): 3636－3645.
ZHANG Qingqing, DU Yi, ZHANG Yulin, et al. Effects of different irrigation levels on the yield and quality of the *Cyperus esculentus* L. at tuber stage [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(11): 3636－3645.

[11] 张丽, 刘旋峰, 叶尔波拉提·铁木尔, 等. 油莎豆收获机发展现状及建议[J]. 农业工程, 2024, 14(10): 9－15.
ZHANG Li, LIU Xuanfeng, YEERBOLATI Tiemuer, et al. Development status and suggestions for *Cyperus esculentus* harvester [J]. Agricultural Engineering, 2024, 14(10): 9－15.

[12] 吉林省农业农村厅. 油莎豆生产技术规程: DB22/T 3309－2021[S]. 吉林省: 吉林省市场监督管理局, 2021: 2.

[13] 黑龙江省农业农村厅. 寒地油莎豆栽培技术规程: DB23/T 3239－2022[S]. 黑龙江: 黑龙江省市场监督管理局, 2022: 2.

[14] 石河子大学. 新疆南疆复播油莎豆高产栽培技术规程: T/SHZSAQS 00246－2024[S]. 新疆维吾尔自治区: 石河子市质量标准化协会, 2024: 3.

[15] 河南省农业农村厅. 油莎豆春播栽培技术规程: DB41/T 2358－2022[S]. 河南省: 河南省市场监督管理局, 2023: 3.

[16] 衡水市市场监督管理局. 油莎豆栽培技术规程: DB13/T 5907－2024[S]. 河北省: 河北省市场监督管理局, 2024: 3.

[17] 内蒙古自治区农业标准化技术委员会. 油莎豆合理密植宜机收技术规程: DB15/T 3476－2024[S]. 内蒙古自治区: 内蒙古自治区市场监督管理局, 2024: 2.

[18] 邸志峰, 李青龙, 姜伟, 等. 油莎豆种植与收获机械技术装备研究现状[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(2): 96－106.
DI Zhifeng, LI Qinglong, JIANG Wei, et al. Research advance and perspective of *Cyperus esculentus* planting and harvesting machinery technology and equipment [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2022, 42(2): 96－106.

[19] 毕晓伟. 影响旋耕机作业质量和功耗的主要因素[J]. 农业机械, 2009(2): 109－110.

[20] 孔令德, 张认成. 旋耕刀研究的现状与展望[J]. 江苏理工大学学报, 1997, 18(3): 6－13.
KONG Lingde, ZHANG Rencheng. State of art and prospect for rotary tillage blades [J]. Journal of Jiangsu University of Technology, 1997, 18(3): 6－13.

[21] 李玖详, 刘仁鑫. 旋耕刀研究现状与展望[J]. 现代农业科技, 2015(6): 182－183.
LI Jiuxiang, LIU Renxin. Research present status and prospect of rotary blade [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015(6): 182－183.

[22] BEENY J M, KHOO D C P. Preliminary investigations into the performance of different shaped blades for the rotary tillage of wet rice soil [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1970, 15: 27－33.

[23] 全国农业机械标准化技术委员会. 旋耕机械 刀和刀座: GB/T 5669－2008[S]. 中国标准出版社, 2008.

[24] 旋耕机及其理论计算[DB/OL]. http://www.doc88.com/p－9826120435122.html, 2013－08－26.

[25] 李自华, 柯保康. 农业机械学上册[M]. 北京: 中国农业出版社, 1991.

[26] 石林榕. 马铃薯力学特性与挖掘铲减阻机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
SHI Linrong. Research on biomechanical properties of potato and drag reduction mechanism of mining shovel [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013.

[27] YANG R B, SHANG S Q. Design and test of multifunctional curved-surface shovel in digging harvest [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28: 47－52.

[28] 汲文峰. 旋耕—碎茬仿生刀片[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
JI Wenfeng. Biomimetic blades for soil-rototilling and stubble-breaking [D]. Changchun: Jilin University, 2010.

[29] 杨玉婉．鼹鼠前足多趾组合结构切土性能研究与仿生旋耕刀设计[D]．长春：吉林大学，2019.
YANG Yuwan. Study on the soil-cutting performance of multi-claw combination of mole rats and design of biomimetic rotary tillage blade [D]. Changchun: Jilin University, 2019.

[30] 王建波．小型马铃薯挖掘机的总体设计与关键部件性能研究[D]．武汉：华中农业大学，2010.
WANG Jianbo. General design of small potato digger and performance research of key parts [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.

[31] 赵吉喆．基于离散元法的马铃薯挖掘铲工作阻力仿真与试验研究[D]．沈阳：沈阳农业大学，2017.
ZHAO Jizhe. Simulation and experimental investigation of potato digging shovel working resistance based on discrete element method [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017.

[32] KLEMENS K. Harvester for root crops, particularly potatoes: EP, EP1287730 A1[P]. 2012.

[33] 魏丽娟．基于ADAMS的4UD-600型马铃薯挖掘机振动机构的参数优化设计[D]．兰州：甘肃农业大学，2014.
WEI Lijuan. The optimal design of the 4UD-600 potato digger′s vibrational mechanism based on ADAMS [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2014.

[34] 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.

[35] 路战远，刘和，张建中，等．油莎豆产业发展现状、问题与建议[J]．现代农业，2019(6)：11－13.

[36] 西北植物研究所．油莎豆简易筛选机[J]．农业机械资料，1976(6)：8－9.

[37] 何晓宁，张学军，赵壮，等．基于离散元法的油莎豆降阻挖掘装置设计与试验[J]．农业机械学报，2021，52(12)：124－133.
HE Xiaoning, ZHANG Xuejun, ZHAO Zhuang, et al. Design and test of resistance-reducing excavation device of *Cyperus edulis* based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 124－133.

[38] 赵壮，王东伟，何晓宁，等．油莎豆联合收获机反旋抛送装置的设计与试验[J]．农机化研究，2023，45(7)：65－70.
ZHAO Zhuang, WANG Dongwei, HE Xiaoning, et al. Design and test of the anti-rotation throwing device of the *Cyperus edulis* combine harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(7): 65－70.

[39] 吕严柳．油莎豆收获机挖掘升运装置设计与试验[D]．郑州：河南农业大学，2022.
LÜ Yanliu. Design and experiment of excavating and hoisting device of *Cyperus esculentus* harvester [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022.

[40] 丁为民，彭嵩植．旋耕刀滑切角及滑切角方程的研究[J]．农业工程学报，1995，11(4)：67－72.
DING Weimin, PENG Songzhi. Research on grass-removing angles and equations of rotary blades [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1995, 11(4): 67－72.

[41] 孔令德，桑正中．斜置旋耕刀的研制[J]．农业机械学报，2000，31(6)：45－48.
KONG Lingde, SANG Zhengzhong. Development of an oblique rotary tillage blade [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(6): 45－48.

[42] 熊平原，杨洲，孙志全，等．基于离散元法的旋耕刀三向工作阻力仿真分析与试验[J]．农业工程学报，2018，34(18)：113－121.
XIONG Pingyuan, YANG Zhou, SUN Zhiquan, et al. Simulation analysis and experiment for three-axis working resistances of rotary blade based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(18): 113－121.

[43] 熊平原，杨洲，孙志全，等．旋耕刀三向工作阻力试验及作业参数优化[J]．农业工程学报，2017，33(19)：51－58.
XIONG Pingyuan, YANG Zhou, SUN Zhiquan, et al. Experiment on three-axis working resistances of rotary blade and working parameters optimization [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(19): 51－58.

[44] 康栋．谷子联合收获机脱粒装置研究设计[D]．合肥：安徽农业大学，2016.
KANG Dong. Design and experiment of threshing device of millet combine harvester [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.

[45] 周三爱，王再辉．刮板输送机的设计与使用[J]．饲料工业，2008，29(21)：3－6.

[46] 彭正昶，陆祥辉，牛旭东，等．4U-1400型薯类联合收获机刮板输送装置的设计[J]．中国农机化学报，2017，38(2)：7－11.
PENG Zhengchang, LU Xianghui, NIU Xudong, et al. Design on scraper conveyor of 4U-1400 potato combine harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(2): 7－11.

[47] 陈志．农业机械设计手册[M]．北京：中国农业科学技术出版社，2007.

[48] BERGLUND D R. National sunflower association survey: Yield, cultural practices and yield limiting factors [C]// Proc. 32nd Annual Sunflower Res. Forum. National Sunflower Assoc., Mandan, ND. 2009.

[49] 陆祥辉, 王昕, 张文杰, 等. 4U-1400马铃薯联合收获机分离输送装置的参数分析与试验[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(6): 269－276.
LU Xianghui, WANG Xin, ZHANG Wenjie, et al. Parameter analysis and experiment for separation conveyor of 4U-1400 type potato harvester [J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20(6): 269－276.

[50] 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.
LÜ 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.

[51] HOBSON R N, BRUCE D M. Seed loss when cutting a standing crop of oilseed rape with two types of combine harvester header [J]. Biosystems Engineering, 2002, 81(3): 281－286.

[52] KALSIRISILP R, SINGH G. PM—Power and machinery: Adoption of a stripper header for a Thai-made rice combine harvester [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 80(2): 163－172.

[53] ZHANG K, CAO S K, CHEN X S, et al. Design of longitudinal axial flow threshing and separating device of maize grain combine harvester [J]. Applied Mechanics and Materials, 2017, 863: 251－254.

[54] 孙贺. 升运链式马铃薯挖掘机输送分离装置的设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
SUN He. Design and experimental research on transporting and separating device of lifting chain potato digger [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.

[55] 赵壮, 何晓宁, 王东伟, 等. 油莎豆联合收获机中间输送装置的设计与试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(8): 172－176.
ZHAO Zhuang, HE Xiaoning, WANG Dongwei, et al. Design and test of the anti-rotation throwing device of the *Cyperus edulis* combine harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(8): 172－176.

[56] 何晓宁, 张方焱, 尚书旗, 等. 油莎豆联合收获机合页筛片式升运装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 148－157.
HE Xiaoning, ZHANG Fangyan, SHANG Shuqi, et al. Design and experiment of hinge lifting device of *Cyperus esculentus* combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 148－157.

[57] 高波, 祁玉卓, 陈林, 等. 根茎类中药材收获机输送分离装置设计[J]. 农机化研究, 2025, 47(8): 52－60.
GAO Bo, QI Yuzhuo, CHEN Lin, et al. Design of conveying and separating device of rhizome Chinese medicinal materials harvesting machine [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(8): 52－60.

[58] 郑刚, 许鹏, 陈栋泉, 等. 沙地鲜食甘薯收获机输送分离装置设计与试验[J]. 中国农业科技导报, 2025, 27(6): 104－112.
ZHENG Gang, XU Peng, CHEN Dongquan, et al. Design and experimentation of conveying and separating device for fresh-eating sweet potato harvester in sandy soil [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2025, 27(6): 104－112.

[59] 赵英琦, 李兵杰, 孟靓, 等. 油莎豆机械收获除杂系统优化设计[J]. 农机化研究, 2022, 44(8): 51－56.
ZHAO Yingqi, LI Bingjie, MENG Liang, et al. Optimal design of mechanical harvesting and separation system for tiger nut [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(8): 51－56.

[60] 唐小涵, 金诚谦, 张国海, 等. 我国联合收获机脱粒分离装置的研究现状[J]. 农机化研究, 2022, 3(3): 1－9.
TANG Xiaohan, JIN Chengqian, ZHANG Guohai, et al. Research status of threshing and separating device for combine harvester in China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 3(3): 1－9.

[61] 唐忠, 何俊增, 周跃鹏, 等. 多滚筒脱粒分离装置脱粒参数试验与分析[J]. 农机化研究, 2017, 37(2): 153－157.
TANG Zhong, HE Junzeng, ZHOU Yuepeng, et al. Test and analysis of best parameter of transverse multi-cylinder device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 37(2): 153－157.

[62] ALIZADEH M R, KHODABAKHSHIPOUR M. Effect of threshing drum speed and crop moisture on paddy grain damage in axial-flow thresher [J]. Cercetari Agronomice in Moldova, 2010, 4(144): 5－11.

[63] BRUCE D M, HOBSON R N, MORGAN C L. Threshability of shatter-resistant seed pods in oilseed rape [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 80(4): 343－350.

[64] OLAYE A R B. Effect of threshing drum speed and crop weight on paddy grain quality in Axial-Flow Thresher (ASI)[J]. JMEST, 2016, 1(3): 16－21.

[65] 毛欣, 赵瑞男, 衣淑娟, 等. 裸燕麦脱粒与分离装置二次正交旋转组合试验研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(9): 181－188.
MAO Xin, ZHAO Ruinan, YI Shujuan, et al.

Experimental study on the double orthogonal rotation combination of naked oat axial-flow threshing and separation unit [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(9): 181－188.

[66] 陈霓，余红娟，陈德俊，等. 半喂入联合收获机同轴差速脱粒滚筒设计与试验[J]. 农业机械学报，2011，42(S1)：39－42.
CHEN Ni, YU Hongjuan, CHEN Dejun, et al. Design and test on coaxial differential threshing rotor of head-feed combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(S1): 39－42.

[67] 卡那沃依斯基. 收获机械[M]. 北京：中国农业机械出版社，1983.

[68] 尚书旗. 农业机械应用技术[M]. 北京：高等教育出版社，2002.

[69] 李漫江，何军，冯欣. 脱粒机械与脱粒装置[J]. 农机化研究，2004(2)：124－125.
LI Manjiang, HE Jun, FENG Xin. Threshing machinery and threshing equipment [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004(2): 124－125.

[70] 吴守一. 农业机械学(下册)[M]. 北京：机械工业出版社，1987.

[71] 北京农业工程大学. 农业机械学(下册)[M]. 北京：中国农业出版社，1989.

[72] 李洪昌，李耀明，徐立章. 联合收割机脱粒分离装置的应用现状及发展研究[J]. 农机化研究，2008(1)：223－225.
LI Hongchang, LI Yaoming, XU Lizhang. Studies on factors to chopping cotton stalk compression forming process [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(1): 223－225.

[73] 苏航. 脱粒与清选装置参数匹配技术与方法研究[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2019.
SU Hang. Research on parameter matching technology and method of threshing and cleaning device [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.

[74] 王君，孙建超，季明仁，等. 纵式轴流油莎豆脱粒分离装置设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报，2024，55(2)：195－206.
WANG Jun, SUN Jianchao, JI Mingren, et al. Design and testing of a longitudinal axial flow *Cyperus esculentus* threshing and separating device [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(2): 195－206.

[75] 张胜伟，张瑞雨，曹庆秋，等. 油莎豆收获机双层滚筒筛式果杂分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(3)：148－157.
ZHANG Shengwei, ZHANG Ruiyu, CAO Qingqiu, et al. Design and experiment of double-deck roller sieve type fruit impurity separation device for tiger nut harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 148－157.

[76] 季明仁. 横轴流油莎豆脱粒装置的设计与试验研究[D]. 长春：吉林农业大学，2023.
JI Mingren. Design and experimental study of cross-axis flow tiger nut threshing device [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2023.

[77] 孙建超. 油莎豆的碰撞损伤特性及其脱粒装置的优化研究[D]. 长春：吉林农业大学，2024.
SUN Jianchao. Research on collision damage characteristics of *Cyperus esculentus* and optimization of threshing device [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2024.

[78] 刘文亮，胡浩，姜彩宇，等. 油莎豆收获机立式轴流脱粒分离装置的研究[J]. 农业开发与装备，2019(9)：103－104.

[79] 刘学敏，刘志辉，梁燕，等. 基于模块化设计理念的多功能收获机开发[J]. 中国农机化，2012(5)：47－50.
LIU Xuemin, LIU Zhihui, LIANG Yan, et al. Development of multifunctional harvesting machine based on modular theory [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012(5): 47－50.

[80] MANUEL M M, RODRIGUEZ C G. Dynamic modeling of a vibrating screen considering the ore inertia and force of the ore over the screen calculated with discrete element method [J]. Shock and Vibration, 2018, 1714738 (PT.12): 1－13.

[81] ZHAO L L, ZHAO Y M, BAO C Y, et al. Optimisation of a circularly vibrating screen based on DEM simulation and Taguchi orthogonal experimental design [J]. Powder Technology: An International Journal on the Science and Technology of Wet and Dry Particulate Systems, 2017, 310.

[82] 李立君，胡文宇，高自成，等. 曲柄摇杆振动破壳油茶果粗选机运动学分析及试验[J]. 农业工程学报，2016，32(7)：28－35.
LI Lijun, HU Wenyu, GAO Zicheng, et al. Kinematics analysis and experiment of crank rocker vibrating coarse sorting machine for unshelled oil-tea fruit [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 28－35.

[83] 徐天昊. 基于EDEM的振动筛分参数对效率的对比研究[J]. 南方农机，2024，55(1)：166－168.

[84] 张红梅，周正，吕志军，等. 油莎豆收获筛分机构运动学分析与试验[J]. 中国农机化学报，2021，42(10)：92－99.
ZHANG Hongmei, ZHOU Zheng, LÜ Zhijun, et al. Kinematic analysis and testing of vibratory sieving mechanism for *Cyperus esculentus* L. harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(10): 92－99.

[85] 韩敏，马征，李耀明，等. 测控技术在物料清选中的应用现状浅析[J]. 中国农机化学报，2019，40(6)：106－111.

HAN Min, MA Zheng, LI Yaoming, et al. Brief analysis of the application status of measurement and control technology in material cleaning [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(6): 106－111.

[86] ROWLAND H, EDWARD W. Concave for an axial flow threshing and separating machine: CA898649A [P]. 1972－04－25.

[87] HELDMAN D R and SINGH R P. Heating and Cooling Processes [J]. Food Process Engineering, 1981: 87－157.

[88] KARANTH K V, SHARMA N Y. CFD analysis on the effect of radial gap on impeller-diffuser flow interaction as well as on the flow characteristics of a centrifugal fan of unsteady flow in a centrifugal fan [J]. International of Rotating Machinery, 2009, 293508: 1－8.

[89] HE Y, BAYLY A E, HASSANPOUR A. Coupling CFD-DEM with dynamic meshing: A new approach for fluid-structure interaction in particle-fluid flows [J]. Powder Technology, 2018, 325: 620－631.

[90] 戴飞, 付秋峰, 赵武云, 等. 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 117－125.
DAI Fei, FU Qiufeng, ZHAO Wuyun, et al. Design and test of double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 117－125.

[91] 于昭洋, 胡志超, 曹明珠, 等. 切流式花生全喂入联合收获机清选机构设计[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 29－37.
YU Zhaoyang, HU Zhichao, CAO Mingzhu, et al. Design of cleaning device of tangential flow and whole-feed peanut combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(9): 29－37.

[92] 贾洪雷, 马中洋, 王刚, 等. 油莎豆收获机风筛选式清选机构的设计与试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(12): 149－156.
JIA Honglei, MA Zhongyang, WANG Gang, et al. Design and experiment of cleaning device of *Cyperus esculentus* harvester [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(12): 149－156.

[93] 郑效帅, 尚书旗, 王东伟, 等. 风筛式油莎豆清选装置设计分析与试验[J]. 农机化研究, 2024, 46(5): 146－153.
ZHENG Xiaoshuai, SHANG Shuqi, WANG Dongwei, et al. Analysis and experimental study of air and screen *Cyperus esculentus* L. cleaning device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46 (5): 146－153.

[94] 李贵川, 李海宇, 杨少鹏, 等. 基于CFD-DEM耦合的不同出口形式气力集排系统分配器仿真与试验[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2024, 5(1): 1－11.
LI Guichuan, LI Haiyu, YANG Shaopeng, et al. Simulation and experiment of distributors of different outlet types of pneumatic collection and discharging systems based on CFD-DEM coupling [J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2024, 5(1): 1－11.

[95] 尹彦鑫, 孟志军, 赵春江, 等. 大田无人农场关键技术研究现状与展望[J]. 智慧农业(中英文), 2022, 4(4): 1－25.
YIN Yanxin, MENG Zhijun, ZHAO Chunjiang, et al. State-of-the-art andprospect of research on key technical for unmanned farms of field corp [J]. Smart Agriculture, 2022, 4(4): 1－25.

Research status and trend of high-efficiency and low-damage mechanical harvesting technology for *Cyperus esculentus*

ZHAO Yueyun[1, 2], WANG Peng[2], DU Xinwu[1, 2], JIN Xin[1, 2*], XIAO Liqiang[1, 2], WANG Shusong[2]

(1. *School of Agricultural Equipment Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang* 471000, *China*; 2. *Agricultural Machinery Equipment Industry Research Institute, Longmen laboratory, Luoyang* 471000, *China*)

Abstract: *Cyperus esculentus* is an emerging green economic crop that integrates grain, oil, forage, and feed production. It is drought-resistant, water-saving, high-yielding, and stable in production, making it highly valuable for ecological protection,

increasing farmers′ income, and poverty alleviation efforts. Although *Cyperus esculentus* has many advantages, its industrial development is facing a key bottleneck-the problem of harvesting. Due to the lack of advanced and applicable harvesting equipment, the planting scale of *Cyperus esculentus* grows slowly, and the level of mechanized harvesting is relatively low. This has become a major obstacle restricting the high-quality development of the entire industrial chain. This problem not only affects the economic benefits of *Cyperus esculentus*, but also limits its application in the process of agricultural modernization. This paper starts from the research published by domestic and international scholars in recent years on tiger nut harvesting technology. Focusing on the cultivation characteristics of *Cyperus esculentus* and the requirements for combined harvesting operations, it analyzes the research progress and existing issues in aspects such as digging technologies, conveying technologies, and screening technologies of harvesting equipment. For instance, there are issues like low operation efficiency, high loss rate, and poor adaptability, which seriously affect the mechanized harvesting effect of *Cyperus esculentus*. Furthermore, from the angles of structural design, optimization and improvement, and applicability, this paper extracts the research trends and key issues in the critical technological aspects of tiger nut harvesting, including the high efficiency and low-loss of the digging device, the stability and reliability of the transporting system, and the cleanliness and efficiency of the screening technology, etc. The development direction of these technologies can provide reference for further optimizing and improving the existing harvesting technology and creating new types of harvesting equipment, thereby promoting the wide application of mechanized harvesting in the production of *Cyperus esculentus*. This not only helps to expand the planting scale of *Cyperus esculentus*, but also improves the production efficiency and income level of farmers, providing a new economic growth point for industrial poverty alleviation.

Keywords: *Cyperus esculentus*; harvest equipment; low-loss digging; efficient transportation; screening and selection

Foundation items: Henan Province Major Science and Technology Special Project (Longmen Laboratory Investment and Grant Combined Project 0000200024); Henan Province Key Research and Development Project (241112220200)

First Author: ZHAO Yueyun, E-mail: zhaoyueyun@126.com

* **Correspondence Author:** JIN Xin, E-mail: jx.771@163.com