

邬 备, 李 卓, 向青苗, 等. 马铃薯切块薯种取种勺设计与仿真优化[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(2): 207-215.

WU Bei, LI Zhuo, XIANG Qingmiao, et al. Design and simulation optimization of seed picking spoon for cut-potato tubers[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(2): 207-215.

马铃薯切块薯种取种勺设计与仿真优化

邬 备^{a,b}, 李 卓^a, 向青苗^a, 钱怀源^a, 谢方平^{a,b}, 刘大为^{a,b}, 王修善^{a,b}

(湖南农业大学 a. 机电工程学院, b. 智能农机装备湖南省重点实验室, 长沙 410128)

摘 要: 马铃薯切块播种是节约用种成本、打破薯种休眠的有效途径, 针对马铃薯播种机传统圆形取种勺对切块薯种适应性较差, 导致漏播率高, 播种合格率低的问题, 对马铃薯播种机取种勺进行了设计与仿真优化。在测定薯种力学特性参数的基础上, 利用 EDEM 软件, 选取 Hertz-Mindlin 接触模型, 构建了切块薯种离散元模型。通过对切块薯种取种勺取种状态进行分析, 以传统圆形取种勺为基础, 设计了一种切口式马铃薯播种机取种勺, 并确定了影响取种效果的主要因素。以切口圆心角、切口深度和切口个数为试验因素, 以取种成功率、重种率和空种率为评价指标, 开展三因素三水平虚拟仿真正交试验。正交试验结果表明: 切口式取种勺取种能力明显优于传统圆形取种勺, 当切口圆心角为 60°, 切口深度为 15 mm、切口数量为 3 个时, 其取种效果最优。利用优化后的取种勺进行切块薯种播种验证试验, 结果表明: 播种取种成功率为 82.2%, 重种率为 7.1%, 空种率为 10.7%, 相比于传统圆形种勺, 其重种率降低约 12 个百分点, 取种成功率提升约 12.5 个百分点。

关键词: 马铃薯; 切块薯种; 取种勺; EDEM; 正交试验

中图分类号: S223.2

文章编号: 1000-1700(2024)02-0207-09

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and Simulation Optimization of Seed Picking Spoon for Cut-potato Tubers

WU Bei^{a,b}, LI Zhuo^a, XIANG Qingmiao^a, QIAN Huaiyuan^a, XIE Fangping^{a,b},
LIU Dawei^{a,b}, WANG Xiushan^{a,b}

(a. College of Mechanical and Electrical Engineering, b. Hunan Provincial Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

Abstract: Cutting potatoes before planting is an effective way to save seed costs and break seed dormancy. Aiming at the problem that the traditional round seed picking spoon of potato planter is poorly adapted to the cut-potato tubers, resulting in high miss-planting rate and low sowing qualification rate, the seed picking spoon of potato planter was designed and simulation optimization. On the basis of determining the mechanical characteristic parameters of potato tubers, a discrete elemental model of cut-potato tubers was constructed by using EDEM software and selecting the Hertz-Mindlin contact model. By analyzing the state of seed picking and seed filling, a notched potato seed picking spoon was designed based on the traditional round seed picking spoon, and the main factors affecting the effect of seed picking were determined. A three-factor, three-levels virtual orthogonal simulation test was carried out using the incision center angle, incision depth and number of incisions as test factors, and the successful seeding rate, reseeding rate and missed seeding rate as evaluation indexes. The results of orthogonal test showed that the seed picking ability of incision type spoon was significantly better

收稿日期: 2023-12-15

基金项目: 湖南省教育厅资助科研项目(23A0181); 长沙市自然科学基金项目(kq2208071); 湖南省早粮产业技术体系项目(湘农发[2019]105号)

第一作者: 邬 备(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要从事农业机械创新设计研究, E-mail: wubei@hunau.edu.cn

通信作者: 王修善(1990-), 男, 博士, 实验师, 主要从事农业机械创新设计与试验研究, E-mail: hnwxsh@hunau.edu.cn

than that of traditional round seed picking spoon, and its working effect was optimal when the incision center angle was 60° , the incision depth was 15mm, and the number of the incisions was 3. The optimized seed picking spoon was used to conduct a cut-potato seed planting validation test, which showed that the successful seeding rate was 82.2%, the reseeded rate was 7.1%, and the missed seeding rate was 10.7%. Compared with the traditional round seed picking spoon, its missed seeding rate was reduced by about 12 percentage points and the successful seeding rate was improved by about 12.5 percentage points.

Key words: potato; cut-potato tubers; seed picking spoon; EDEM; orthogonal test

马铃薯是世界最主要的四大粮食作物之一^[1-2],既可作为食品加工原材料,又可作为蔬菜和粮食食用,具有营养丰富、生长周期短、产量高、适应性强等优点。马铃薯产业对我国农业发展有重要影响^[3-5],但长期以来,马铃薯耕种收综合机械化率较低,远落后于其他粮食作物。机械化播种是马铃薯全程机械化的薄弱环节,高效单粒取种是实现马铃薯机械化播种的关键技术之一^[6-7],马铃薯播种关键装置开展的优化研究对于推动马铃薯产业的发展具有一定现实意义。

目前,我国马铃薯的取种方式主要有薯夹式、针刺式、勺链式、转盘式、板阀式和输送带式等^[8]。勺链式排种装置在我国应用最为广泛,其结构简单,造价低,可靠性高,但在田间高速作业时振幅较大,易导致取种勺掉种或漏种。针对勺链式播种装置漏播、重播等问题,对取种勺结构进行优化设计是有效解决途径之一。牛康等^[9]采用勺链式结构对马铃薯单粒薯种进行取种,对取种勺进行了结构优化;杨锴等^[10]设计了半杯勺式取种勺结构;高原等^[11]设计了一种三爪式取种勺。对取种勺进行结构优化时,薯种支撑点的数量是关键因素之一,传统的圆形取种勺对种薯多为两点支撑,使得种薯在勺内不稳定,在机器作业过程中易出现晃动或掉落的情况。支撑点的增加会提高稳定性,三点支撑、四点支撑或多点支撑均可对种薯实现稳定支撑^[12-15]。

目前,我国马铃薯播种多采用先切块后播种的农艺流程,具有用种成本低,打破薯种休眠等优点。但是,因切块薯种形状不规则,在使用勺链式播种装置进行播种时,种箱内薯种易结拱堵塞^[16-21],薯种在取种勺内充种姿态复杂,支撑不稳定,从而导致切块薯种漏播率高。在考虑切块薯种形状的前提下,本研究以传统圆形取种勺为基础,设计了一种切口式马铃薯取种勺,在构建切块薯种和播种关键装置离散元模型的基础上,对切口式取种勺进行了仿真正交优化试验,确定了切口式取种勺最佳结构参数,以期在切块薯种取种充种过程中形成三点支撑或多点支撑,从而降低切块薯种播种时的漏播率。

1 仿真模型构建

1.1 切块薯种离散元模型构建

1.1.1 薯种参数测定与选择 采用EDEM软件中 Hertz-Mindlin 接触模型构建切块薯离散元模型。模型的主要物理参数为马铃薯种薯密度、剪切模量和泊松比,主要接触力学参数为碰撞恢复系数、滚动摩擦系数和静摩擦系数。本研究采用试验自测和参考文献的方法确定上述参数。

试验薯种的品种选择荷兰15号,用薯种取样器(高30 mm、内径22 mm)沿薯种高度方向取10个圆柱形试验样本。利用微机控制电子万能试验机(SANS,型号CMT6104)对薯种样体进行静态压缩试验(图1),试验采用平板压头,加载速度为 $10 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,加载位移为10 mm。通过静态压缩试验可得薯种的加载力—位移曲线图,确定试验样本的高度变化范围。试样压缩全过程由高清摄像机记录,利用压缩后试样即将破碎时的照片,可获取试样即将被压破时的直径。利用式(1)、式(2)和式(3)可计算出薯种的弹性模量 E 、泊松比 μ 、剪切模量 G 。

弹性模量 E 计算公式为:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_1} = \frac{F \times l}{A \times \Delta l} \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量(MPa); σ 为试样所受应力(MPa); ε_1 为纵向应变; A 为试样初始横截面积(mm^2); l 为圆柱试样初始高度(mm); Δl 为试样压缩前后的高度变化量(mm); F 为加载力(N)。

泊松比 μ 计算公式为:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \right| = \frac{\Delta d \times l}{\Delta l \times d_0} \quad (2)$$

式中: μ 为泊松比; ε_2 为横向应变; d_0 为试样初始直径; Δd 为试样压缩前后直径变化量(mm)。

剪切模量 G 计算公式为:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (3)$$

式中: G 为剪切模量(MPa)。

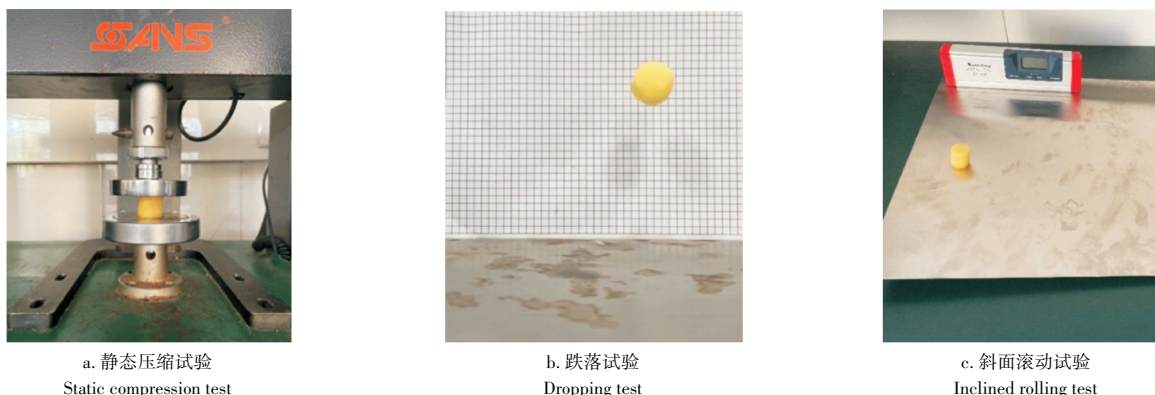


图1 薯种模型参数测定

Figure 1 Determination of mechanical parameters of potato tubers

参考文献[22]中的方法与计算公式,利用跌落法测定薯种与材料间的碰撞恢复系数,利用斜面法测定薯种与材料间的静摩擦系数和滚动摩擦系数。薯种间的碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数,综合参考文献[23-24]进行取值,最终确定的薯种模型参数结果如表1。

表1 薯种离散元模型参数

Table 1 Parameters of the discrete model of potato tubers

参数 Parameters	数值 Value	参数来源 Sources
种薯泊松比 Poisson's ratio of potato	0.446	测量 Measurement
种薯剪切模量 Shear modulus of potato/MPa	0.504	测量 Measurement
种薯密度 Density of potato/(kg·L ⁻¹)	1	测量 Measurement
种薯-材料间碰撞恢复系数 Potato-material restitution coefficient	0.216	测量 Measurement
种薯-材料间静摩擦系数 Potato-material static friction coefficient	0.534	测量 Measurement
种薯-材料间滚动摩擦系数 Potato-material rolling friction coefficient	0.129	测量 Measurement
种薯-种薯间碰撞恢复系数 Potato-potato restitution coefficient	0.3	文献[23-24] Literature
种薯-种薯间静摩擦系数 Potato-potato static friction coefficient	0.375	文献[23-24] Literature
种薯-种薯间滚动摩擦系数 Potato-potato rolling friction coefficient	0.45	文献[23-24] Literature

1.1.2 切块薯颗粒模型构建 切块薯的形状是影响其取种效果的重要特性之一。参考实际生产中马铃薯的切种方法,构建切块薯种颗粒模型,同时,为了更好地评估种勺取种能力,构建的切块薯颗粒模型尺寸相比于实际播种时切块薯种尺寸分布范围更大。具体建模方法为:利用三维软件建立长轴长度126 mm,短轴长度60 mm的椭球几何模型,先沿长轴方向纵向剖开,然后在长轴长度1/3处垂直于长轴方向横切,再沿长轴长度1/6处和1/2处连线方向斜切,获得3种不同尺寸和形状的切块薯薯块。获得切块薯三维模型后,将其另存为igs格式导入EDEM软件,利用多球聚合法建立马铃薯薯块颗粒模型,薯种切块方法及生成的薯种颗粒模型如图2。

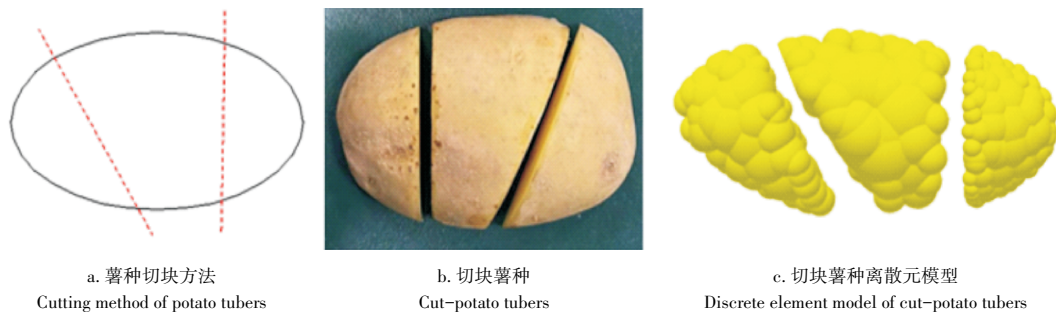


图2 薯种切块方法及薯种颗粒模型

Figure 2 Potato tuber cutting method and cut-potato tuber model

1.1.3 切块薯种离散元模型验证 为了验证切块薯种离散元模型的准确性,利用箱体抽板法对切块薯种进行堆积试验。先将切块薯堆积到几何尺寸为400 mm×300 mm×500 mm的长方体箱体中,静置一段时间,待薯种保持稳定后,迅速抽走箱体一侧侧板,薯块堆体向一侧崩塌形成稳定堆体,再使用相机从一侧拍摄薯种堆体图像,采用拟合直线法测定切块薯种堆积角,具体方法为:针对实际堆积试验和仿真堆积试验的薯种堆体图像,使用Origin软件中的Digitizer工具在图中描取堆体轮廓上点的坐标值,再利用Excel将这些散点坐标绘制成散点图并进行线性拟合,获取线段斜率并计算堆积角大小。实际试验和仿真试验的堆体图像如图3,计算得到实际堆积角为35.80°,仿真堆积角为36.47°,相对误差为1.87%,且薯种堆形相似性较高,验证了切块薯种离散元模型的准确性。

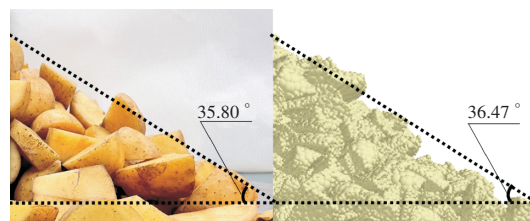
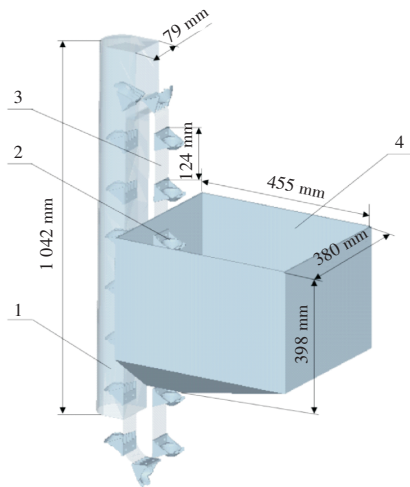


图3 仿真堆积角与实际堆积角

Figure 3 Actual repose angle and simulated repose angle

1.2 取种关键装置模型构建

1.2.1 取种装置几何模型 马铃薯播种装置主要由引导管、取种勺、取种链条和种箱组成。在取种链条驱动下,取种勺从下往上移动并通过种箱,从种箱取种后携种运动至引导管中,再由引导管引导播种至装置下方的种沟中。马铃薯播种装置几何模型如图4,为了提高仿真计算速度,取种链条在仿真模型中简化为平带型式。



1.引导管; 2.取种勺; 3.取种链条; 4.种箱

1.Guiding tube; 2.Seed picking spoon; 3.Mounting chain; 4.Seeds hopper

图4 马铃薯播种装置结构

Figure 4 Structure of potato seeds picking device

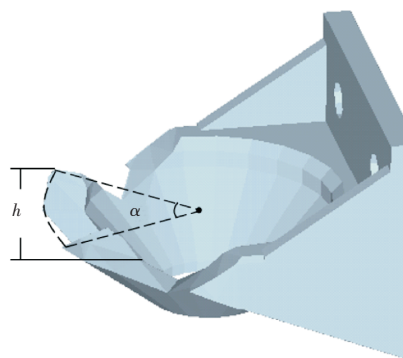


图5 切口式取种勺结构

Figure 5 Structure of notched potato seed picking spoon

图5为切口式种勺的几何模型。切口式种勺是在传统圆形种勺的基础上增加切口形成的,切口参数主要有切口个数,切口深度 h 和切口圆心角 α ,其中切口深度为取种勺上方边缘到切口底部的深度,切口圆心角为切口在上方圆形边缘上切取的弧长所对应的圆心角大小,切口圆心角决定了切口的开口宽度与角度。

1.2.2 取种装置运行参数 取种装置的主要运行参数为取种链线速度。在一段时间 Δt 内,排种装置在装置下方投出的薯种数应和按理论株距落入种沟中的薯种数相等,即:

$$\frac{v_1 \cdot \Delta t}{L} = \frac{v \cdot \Delta t}{s} \quad (4)$$

化简可得:

$$v_1 = \frac{v \cdot L}{s} \quad (5)$$

式中: v_1 为取种链线速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); v 为播种机的前进速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); s 为理论合格粒距(mm); L 为种勺间距(mm)。取马铃薯播种合格粒距为250 mm,播种机前进速度取 $0.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,种勺间距为124 mm,通过式(5)可求出取种链线速度 v_1 为 $0.3968 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,符合推荐线速度要求^[24]。

1.3 仿真流程及参数设置

为了模拟取种勺随取种链条的运动情况,其运动由4段运动合成并重复,第1段为竖直向上平移,线速度为 $0.3968 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,第2段为逆时针匀速圆周运动,角速度 $5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,第3段为竖直向下平移,线速度为 $0.3968 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,第4段为逆时针匀速圆周运动,角速度 $5 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。仿真初始时,利用EDEM软件颗粒工厂生成切块薯种,待薯种堆满种箱超过2/3后,静止薯块2 s再进行取种播种。设置仿真时间步长为 $8.7649 \times 10^{-6} \text{ s}$,每隔0.1 s保存1次数据,每组仿真至超过100个取种勺完成取种后停止。

2 试验方法

2.1 正交试验方案

本研究通过开展正交试验,对切口式取种勺的结构进行优化设计。以切口圆心角、切口深度和切口个数为试验因素(编码为A、B、C),每个因素选取3个水平,选用正交表 $L_9(3^3)$,以取种成功率、重种率和空种率为评价指标。正交试验因素水平如表2。

表2 正交试验因素水平
Table 2 Orthogonal test factor level

水平 Level	因素 Factor		
	A 切口圆心角/ $^\circ$ Incision center angle	B 切口深度/mm Incision depth	C 切口个数/个 Number of incisions
1	30	5	1
2	45	10	2
3	60	15	3

2.2 试验指标测定方法

在马铃薯播种过程中,单个取种勺每次取到一块薯种并成功输送至引导管内视为取种成功。取种成功率的计算公式为:

$$Q(\%) = \frac{n_1}{N} \times 100 \quad (6)$$

式中: Q 为取种成功率(%); n_1 为取种勺取到一块薯种并成功输送至引导管内的次数; N 为取种勺取种总次数。

重播是指播种作业时理论上种植一个种薯的地方实际上种植了两个或多个种薯。单个取种勺每次取到两块或两块以上的薯种并输送至引导管视为重种,会造成重播。重种率的计算公式为:

$$R(\%) = \frac{n_2}{N} \times 100 \quad (7)$$

式中： R 为重种率(%)； n_2 为取种勺取到两块或两块以上薯种并输送到引导管内的次数。

漏播是指播种作业时理论上应该种植一个种薯的地方实际上没有种薯。取种勺没有取到薯种视为空种，会造成漏播。空种率的计算公式为：

$$M(\%) = \frac{n_3}{N} \times 100 \quad (8)$$

式中： M 为空种率(%)； n_3 为统计范围内取种勺未能取到薯种的次数。

3 试验结果与分析

3.1 取种效果对比

取种勺从种箱取种后，携种并输送至引导管的过程称为输种阶段，输种阶段薯块掉落是造成漏播的重要原因之一，薯种在取种勺中的充种状态则影响薯块掉落的难易程度。对仿真后的取种勺充种状态进行分析，切口式取种勺的充种状态有3种：薯块仰卧(图6a)、薯块侧卧(图6b)和薯块俯卧(图6c)。圆形种勺的充种状态有2种：薯块仰卧(图6d)和薯块侧卧(图6e)，因圆形种勺边缘无切口支撑，原本俯卧的薯块侧翻转变为侧卧或直接掉落。从薯块支撑点数目分析，圆形种勺中薯块的支撑点一般为2个，即勺底和勺沿同时支撑(图6e)，或勺沿两侧支撑(图6d)，而切口式取种勺的每个切口两侧均能提供2个支撑点，薯块在种勺上能获得3~4个支撑点，使得薯块输种过程更稳定，不易掉落。此外，因切口式取种勺有向下的切口设计，薯块在取种勺上的重心位置更低，薯块翻落难度更大。由图6网格线可知，不同充种状态下薯块重心由高到低依次为：圆形种勺侧卧>圆形种勺仰卧>切口种勺侧卧>切口种勺仰卧>切口种勺俯卧，随着重心降低，薯块越稳定，种勺携种能力越强。

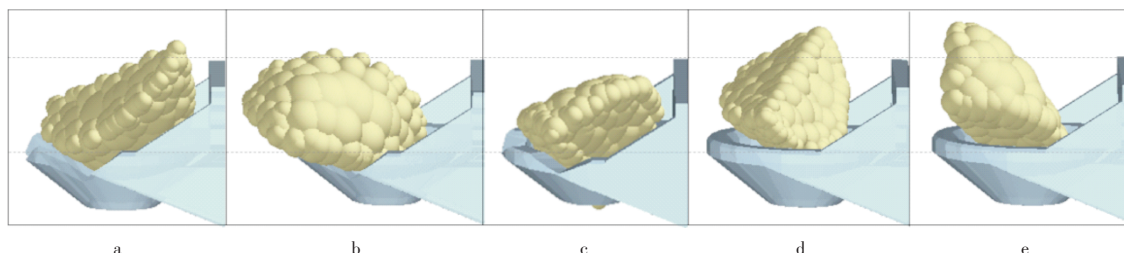


图6 薯种充种状态

Figure 6 Filling state of potato seeds

分别统计圆形种勺和切口式种勺200次取种后的取种情况以及单粒取种时的充种状态，进一步验证了上述分析，结果如表3。

表3 取种结果对比

Table 3 Comparison of seed picking results

取种勺种类 Type of seed picking spoon	空勺数 Number of empty spoons	多粒种勺数 Number of spoons with multiple seeds	单粒种勺 Number of spoons with one seed			合计 Total
			仰卧薯块数 Number of supine seeds	侧卧薯块数 Number of side-lying seeds	俯卧薯块数 Number of prone seeds	
圆形种勺 Round seed picking spoon	57	12	75	56	0	131
切口种勺 Notched seed picking spoon	23	14	75	50	38	163

上述结果表明，考虑薯种充种后支撑点个数和重心位置，切口式取种勺相比圆形取种勺在取种携种能力上均有一定优势，薯种在切口式取种勺上更加稳定，不易掉落，取种勺切口设计对于降低漏播率作用明显。

3.2 正交试验结果分析

根据正交表安排，利用播种装置离散元模型进行播种试验，统计得到各评价指标数据，试验结果和极差分析如表4。对取种成功率 Q ，影响因素的主次顺序为：切口深度>切口圆心角>切口个数；对重种率 R ，影响因素的主次顺序为：切口深度>切口圆心角>切口个数；对空种率 M ，影响因素的主次顺序

为:切口圆心角>切口深度>切口个数。对试验结果进行方差分析如表5,在显著性水平为0.05的条件下,切口圆形角、切口深度对取种成功率、重种率和空种率均影响显著,而切口个数对3个指标影响均不显著。

表4 正交试验结果及极差分析

Table 4 Results of orthogonal experiment and range analysis

指标 Index	试验序号 Number of tests	A	B	C	Q/%	R/%	M/%
	1	1	1	1	63.4	22.3	14.3
	2	1	2	2	69.2	15.4	15.4
	3	1	3	3	72.2	16.3	11.5
	4	2	1	3	64.2	21.0	14.8
	5	2	2	1	66.5	15.1	18.4
	6	2	3	2	73.7	12.3	14.0
	7	3	1	2	72.0	15.4	12.6
	8	3	2	3	77.8	10.1	12.1
	9	3	3	1	81.9	6.9	11.2
Q	K ₁	68.27	66.53	70.60			
	K ₂	68.13	71.17	71.63			
	K ₃	77.23	75.93	71.40			
	R	9.10	9.40	1.03			
	优水平 Priority level	A3	B3	C2			
主次因素 Priority ranking of factors		B > A > C					
R	K ₁	18.00	19.57	14.77			
	K ₂	16.13	13.53	14.37			
	K ₃	10.80	11.83	15.80			
	R	7.20	7.73	1.43			
	优水平 Priority level	A3	B3	C2			
主次因素 Priority ranking of factors		B > A > C					
M	K ₁	13.73	13.90	14.63			
	K ₂	15.73	15.30	14.00			
	K ₃	11.97	12.23	12.80			
	R	3.77	3.07	1.83			
	优水平 Priority level	A3	B3	C3			
主次因素 Priority ranking of factors		A > B > C					

本试验中,取种成功率是望大指标,重种率和空种率是望小指标。对于因素A切口圆形角,其对3个评价指标的优水平均为3水平,故确定切口圆心角的最佳参数为60°;对于因素B切口深度,其对3个评价指标的优水平均为3水平,故确定切口深度的最佳参数为15 mm;对于C切口个数,其对3个指标影响均不显著,对取种成功率和重种率的优水平为2水平,对空种率的优水平为3水平,考虑到切块薯播种过程中存在的主要问题是漏播率太高,确定切口个数为3个。综上所述,为了获得最佳播种效果,确定切口式取种勺最优结构参数为:切口圆心角60°,切口深度15 mm,切口数量3个。

4 验证试验

根据正交试验确定的切口式取种勺最优结构参数,利用3D打印技术制作切口式取种勺如图7b,取种勺结构参数为:切口圆心角60°,切口深度15 mm,切口数量3个。为了对比圆形取种勺和切口式取种勺的作业效果,同时制作了圆形取种勺如图7a。利用小型单垄马铃薯播种机,分别使用两种种勺进行了马铃薯播种试验,每种种勺统计超过100次取种情况,并计算取种成功率、重种率和空种率,试验结果如表6。

表5 正交试验方差分析结果

Table 5 Analysis of variance for orthogonal experiment

指标 Index	方差来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	p
取种成功率 Q Successful seeding rate	模型 Model	297.540	6	49.590	22.911	0.042 0*
	切口圆心角 Incision center angle	163.229	2	81.614	37.707	0.025 8*
	切口深度 Incision depth	132.549	2	66.274	30.620	0.031 6*
	切口个数 Number of incisions	1.762	2	0.881	0.407	0.710 6
	误差 Error	4.329	2	2.164		
	总计 Total	301.869	8			
重种率 R Reseeding rate	模型 Model	186.147	6	31.024	29.991	0.032 6*
	切口圆心角 Incision center angle	83.769	2	41.884	40.490	0.024 1*
	切口深度 Incision depth	99.096	2	49.548	47.898	0.020 5*
	切口个数 Number of incisions	3.282	2	1.641	1.586	0.386 6
	误差 Error	2.069	2	1.034		
	总计 Total	188.216	8			
空种率 M Missed-seeding rate	模型 Model	40.653	6	6.776	18.423	0.052 4
	切口圆心角 Incision center angle	21.309	2	10.654	28.970	0.033 4*
	切口深度 Incision depth	14.142	2	7.071	19.227	0.049 4*
	切口个数 Number of incisions	5.202	2	2.601	7.073	0.123 9
	误差 Error	0.736	2	0.368		
	总计 Total	41.389	8			

注: *表示因素显著(p<0.05)。

Note: *indicated significance at 0.05 levels.

由表 6 可知,无论是圆形种勺还是切口种勺,仿真试验结果和实际试验结果一致性较好,验证了离散元虚拟仿真模型的准确性。相比于圆形种勺,切口式种勺的空种率由 22.7% 降低至 10.7%,降低约 12 个百分点,取种成功率由 69.7% 提高至 82.2%,提高了 12.5 个百分点。上述结果表明,在圆形种勺上设计切口结构,能有效降低马铃薯切块薯种播种过程中的漏播率,提高播种合格率,以上结果能为马铃薯取种勺的进一步优化提供参考和依据。

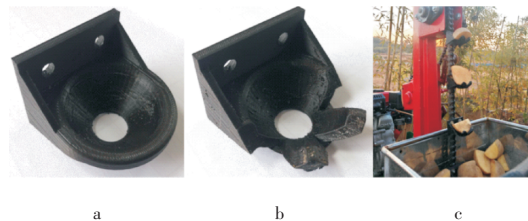


图7 取种勺实物及播种试验
Figure 7 Actual seed picking spoon and planting test

表6 验证试验结果

Table 6 Results of the verify testing

种勺类型 Type of seed picking spoon	试验类型 Type of tests	取种成功率 Q/% Successful seeding rate	重种率 R/% Reseeding rate	空种率 M/% Missed-seeding rate
圆形种勺 Round seed picking scoop	仿真试验 Simulation tests	66.7	6.3	27.0
	实际试验 Physical tests	69.7	7.6	22.7
	仿真试验 Simulation tests	81.9	6.9	11.2
切口种勺 Notched seed picking spoon	实际试验 Physical tests	82.2	7.1	10.7

5 讨论与结论

切块薯种形状不规则,使用勺链式播种装置进行播种时,薯块在取种勺内充种姿态复杂,支撑不

稳定,从而导致切块薯种漏播率高。已有研究表明,取种勺对薯种的支撑点个数是影响到充种时薯块稳定性的重要因素^[25-27],现有关于取种勺结构优化的研究,也将支撑点个数和薯种充种姿态作为考虑重点,如三爪式^[11]和半杯勺式^[28-29]等取种勺的结构创新设计。本研究在此基础上,考虑切块薯的特殊形状,设计了切口式的取种勺,以期增加支撑点的个数并提高薯块的稳定性。试验结果也表明,切口式取种勺使得薯块支撑点从1~2个增加到3~4个,部分薯种能够俯卧在种勺上形成更稳定的充种状态,同时薯块在种勺上重心位置更低,薯块翻落难度更大,因此空种率降低,取种成功率增加,该趋势与高原等^[11]中的结论一致。此外,本研究中仿真正交试验确定的最优结构参数均为各因素的最大水平,这一结果也进一步说明上述支撑点个数及薯块重心高度分析的正确性,因切口数量越多,薯块支撑点个数越多,切口圆心角越大,切口深度越深,薯块重心高度就越低。但值得注意的是,切口圆心角、切口深度和切口个数的增加势必会导致种勺强度的削弱,在实际生产中应当相应的结构改善和强度校核。

本研究结果表明,切口式取种勺的取种携种能力优于圆形取种勺,其最优结构参数为切口圆心角 60° ,切口深度15 mm,切口数量3个;切口式取种勺取种成功率为82.2%,重种率为7.1%,空种率为10.7%,相比于传统圆形种勺,其空种率降低约12个百分点,取种成功率提升约12.5个百分点。

参考文献:

- [1] 李彦彬,张兆国,王圆明,等.马铃薯收获机多级输送分离装置设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2021,52(6):758-768.
- [2] 高明全,张旭东,刘维佳,等.2CM-2型马铃薯播种机关键部件的设计[J].沈阳农业大学学报,2012,43(2):237-240.
- [3] 蒋晨晨,胡继连.马铃薯主粮化战略研究:一个综述[J].山东农业大学学报(社会科学版),2015,17(2):52-58.
- [4] 魏忠彩,李学强,张宇帆,等.马铃薯全程机械化生产技术与装备研究进展[J].农机化研究,2017,39(9):1-6.
- [5] 魏延安.世界马铃薯产业发展现状及特点[J].世界农业,2005(3):29-32.
- [6] 史万恩.滴灌条件下脱毒马铃薯灌溉制度试验研究[J].水资源与水工程学报,2017,28(5):255-260.
- [7] 吕金庆,田忠恩,杨 颖,等.马铃薯机械发展现状、存在问题及发展趋势[J].农机化研究,2015,37(12):258-263.
- [8] 杜宏伟,尚书旗,杨然兵,等.我国马铃薯机械化播种排种技术研究与分析[J].农机化研究,2011,33(2):214-217+221.
- [9] 牛 康,苑严伟,罗 敏,等.双层种箱式马铃薯排种装置设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(20):32-39.
- [10] 杨 镨,段宏兵,宋波涛,等.半杯勺式马铃薯排种器的设计与试验[J].华中农业大学学报,2018,37(2):103-109.
- [11] 高 原,黄玉祥,李 鹏,等.三爪勺式马铃薯精量排种器设计与试验[J].农机化研究,2023,45(12):191-197.
- [12] 胡春辉,弋景刚,姜海勇,等.基于三点调平的农田激光清平机设计与研究[J].农机化研究,2011,33(3):100-103.
- [13] 孙利生.一种大跨距四点支撑液压自动调平系统[J].液压与气动,2004(7):29-30.
- [14] 盛 英,仇原鹰.六点支撑液压式平台自动调平系统[J].液压与气动,1999(4):26-28.
- [15] 郭庆贺,赵丁选.基于主动悬挂的车载稳定平台调平系统设计及试验[J].农业机械学报,2020,51(10):403-410.
- [16] CHO G C, DODDS J, SANTAMARINA J C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(5):591-602.
- [17] CHAN K W, KWAN A K H. Evaluation of particle packing models by comparing with published test results[J]. Particology, 2014, 16(5):108-115.
- [18] 王 会,贾富国,韩燕龙,等.圆锥料仓内颗粒周期性脉动特征研究[J].物理学报,2017,66(1):198-208.
- [19] 杨 潭,王应彪,李 玮,等.离心式玉米种子定向整列排种装置设计与试验[J].南京农业大学学报,2022,45(4):809-817.
- [20] 李玉华,张智龙,李天华,等.轮勺式大蒜单粒取种装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(3):61-68.
- [21] 潘思奇,赵胜雪,刘崇林,等.勺带式马铃薯排种器薯种充种特性研究[J].农机化研究,2023,45(4):15-21.
- [22] 刘文政,何 进,李洪文,等.基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J].农业机械学报,2018,49(5):125-135+142.
- [23] 石林榕,孙 伟,赵武云,等.马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J].农业工程学报,2018,34(6):35-42.
- [24] 刘曙光,尚书旗,杨然兵,等.小区播种机充种装置工作性能试验[J].中国农业大学学报,2011,16(3):156-163.
- [25] 高 原.三爪勺式马铃薯精量排种器及补种系统设计与试验研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [26] 徐文仲,孙玉凯,王 娜,等.马铃薯中耕机关键部件作用机理分析与试验[J].东北农业大学学报,2022,53(7):88-96.
- [27] 吕金庆,张 航,李季成,等.马铃薯种薯切块机整列装置设计与试验[J].东北农业大学学报,2022,53(11):47-59.
- [28] 段宏兵,陈志鹏,宋波涛,等.三角链半杯勺式丘陵山区马铃薯精量播种机设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(1):96-104.
- [29] 杨 镨,段宏兵,宋波涛,等.半杯勺式马铃薯排种器的设计与试验[J].华中农业大学学报,2018,37(2):103-109.