doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.003

多螺旋杆式丸粒化肉苁蓉精量排种器设计与试验

刘平义　张　旭　杨景睿　李恒达　张　杰　梁龙锦
（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：针对目前肉苁蓉诱导机制不完善而需要多轮补种以及传统肉苁蓉排种器散播面窄和散播面内均匀性差的问题，设计了一种多螺旋杆式丸粒化肉苁蓉精量排种器，采用螺旋杆机构使种子沿螺旋叶片前进并横向安装10根相同螺旋杆扩大了散播面，建立了丸粒化肉苁蓉种子与螺旋杆的动力学模型并通过理论分析和离散元仿真确定了螺旋杆的关键结构参数。基于肉苁蓉种植农艺和特定规格丸粒化肉苁蓉种子参数计算了理论排种量并运用离散元法分析了螺旋杆螺距、螺纹深度和螺旋杆转速等关键参数对排种性能的影响，应用EDEM软件构建丸粒化肉苁蓉种子和排种器离散元模型，以排种均匀变异系数和排种量变异系数为试验指标，通过单因素试验确定排种均匀性较优的螺旋杆螺距、螺纹深度和螺旋杆转速取值范围，仿真试验结果表明最佳螺距为15~20 mm，最佳螺纹深度为7~9 mm，最佳螺旋杆为60~100 r/min；进一步开展三因素三水平Box-Behnken中心组合试验，利用Design-Expert软件建立多元回归模型并进行方差和响应面分析，以排种均匀变异系数和排种量变异系数最小为目标进行参数优化，求解得最优螺旋杆螺距为17.77 mm、螺纹深度为7.81 mm、螺旋杆转速为83.32 r/min；依据优化后参数进行台架验证试验，结果表明在最优参数设置下排种均匀变异系数为3.75%，排种量变异系数为5.33%。该设计满足丸粒化肉苁蓉诱导机制不完善下进行的散播作业农艺要求。

关键词：多螺旋杆式排种器；丸粒化肉苁蓉；离散元法
中图分类号：S223.2　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2024)S2-0020-10

Design and Test of Pelleted Cistanche Seed Metering Device with Multi-helical Rod

LIU Pingyi　ZHANG Xu　YANG Jingrui　LI Hengda　ZHANG Jie　LIANG Longjin
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: A multi-helical rod pelleted Cistanchis precision seed metering device was designed to address the problems of current imperfect induction mechanism of Cistanche which requires multiple rounds of replanting, as well as the problems of narrow dispersal surface and poor uniformity within the dispersal surface of Cistanchia seed metering device. A helical rod mechanism was used to move the seed along the helical and the dispersal surface which was expanded by installing ten helical rods. The kinetic model of pelleted Cistanche seeds and helical rod was established, and the key structural parameters of the helical rods were theoretically analyzed and determined. Based on the agronomy of Cistanchis cultivation and the parameters of pelletised Cistanchis seeds of specific specifications, the theoretical seeding rate was calculated. The effects of key parameters such as pitch, depth and rotational speed on seeding performance were analyzed by using the discrete element method. The model of pelleted Cistanchis seed metering device was constructed by EDEM. The variation coefficients of seeding uniformity and seeding capacity were used as the test indexes, and the ranges of pitch, depth and rotational speed were determined through a single factor test. The test results showed that the optimal parameter range of pitch was 15~20 mm, the optimal parameter range of thread depth was 7~9 mm, and the optimal range of rotational speed was 60~100 r/min. The Box-Behnken central combination test of three-factor and three-level was carried out, and a multiple regression model was established. The variance and response surface analyses were performed by Design-Expert software, the helical rod structure and working parameters were obtained through objective optimization. The optimal pitch of the helical rod was 17.77 mm, the depth was 7.81 mm, and the rotational speed was 83.32 r/min. The bench test showed that the variation coefficient of

收稿日期：2024－07－20　修回日期：2024－09－20
基金项目：新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02012-4)
作者简介：刘平义(1978—)，女，副教授，博士生导师，主要从事智能农机装备设计研究，E-mail: liupingyi@cau.edu.cn

seeding uniformity and seeding capacity were 3.75% and 5.33%, respectively. The design met the agronomic requirements of seed dispersal under the imperfect induction mechanism of pelleted Cistanche, and provided a reference for research programme of seed metering device to improve the uniformity of seed dispersal in the dispersal surface of pelleted Cistanche.

Key words: seed metering device with multi-helical rod; pelleted Cistanche; EDEM

0　引言

肉苁蓉作为具有极高药用价值的名贵药材，已成为新疆荒漠地区重要的经济作物之一[1]。肉苁蓉是根寄生作物，依靠梭梭树根须生长，提高肉苁蓉播种技术，实现肉苁蓉提质增效和增加产量是促进新疆经济和生态效益发展的重要手段[2-3]。

机械化播种技术是影响肉苁蓉播种效率和质量的主要因素。目前国内肉苁蓉机械播种采用窄沟播种技术，主要分为传统机械播种、气吹式播种和喷洒式播种[4]。传统机械排种器通过安装在种箱下料口的齿轮将齿间的种子运送至下种管道内，这种播种方式简单耐用，但播种粗糙、散播性和均匀性较差[5]。气吹式排种器通过控制气体吹出速率实现控制播种量，但沙漠种植环境容易出现气泵堵塞现象[6]。喷洒式排种器通过水泵将水箱内的肉苁蓉种子混合液喷射到播种位置，这种播种方式需要保证水箱内种子时刻混合均匀，并且大量的液体增加了排种器重量，使机器在沙漠中行驶困难[7]。

肉苁蓉种子籽粒微小且种子诱导机制体系不完善，种子与寄主根须结合概率低。目前通常采用多轮补种的方法提升接种成功率，费时费力且造成种子浪费[8]。为解决这一问题，有学者研制了肉苁蓉丸粒化种子，为解决定量和机械化播种难题提供了基础[9-10]。种子经过丸粒化工艺处理并包含多粒种子和促进萌芽的营养物质，这使得种子的萌芽率和成活率大大提升且种子消耗量降低[11-15]。文献[16-17]通过播种试验也验证了这一结论，结果显示丸粒化后种子出苗率明显高于未丸粒化种子。

为了提高播种质量，许多学者进行丸粒化种子排种器的研究。孙振雨等[18]设计了水稻丸粒化排种器，建立了用于水稻直播方式的丸粒化参数。夏连明等[19-20]设计了一种丸粒化玉米种子精密排种器，解决了种子数量较少时充种不足的问题，且排种单粒指数达到98.31%。周宇杰等[21]设计了一种新型的丸粒化朝天椒种子直播机，装置通过齿轮齿条板配合的方式控制种子流量，并设计了不同内径的导种管适配多种规格丸粒化种子，提高了播种效率和稳定性。对于具有特殊种植农艺要求的丸粒化肉苁蓉种植，未见相关排种器的研究报道。

针对上述问题，本文设计一种多螺旋杆式丸粒化肉苁蓉精量排种器，基于肉苁蓉种植农艺特性确定排种器的结构和参数，测量丸粒化肉苁蓉接触参数，并通过离散元分析确定螺旋杆最佳组合参数，最后通过台架试验加以验证，为扩大肉苁蓉播种面积，提高播种均匀性提供基础。

1　排种器结构与工作原理

1.1　丸粒化肉苁蓉种子尺寸确定

采用的丸粒化肉苁蓉种子来自新疆种褪农业种子科技有限公司制作的5 mm规格球形种子。随机选取200粒丸粒化肉苁蓉种子，分别测量三轴尺寸（图1）。L_1、L_2、L_3分别表示丸粒化肉苁蓉种子3个方向长度。

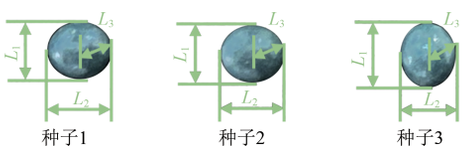


图1　丸粒化肉苁蓉种子三轴尺寸示意图

Fig. 1　Triaxial dimensions schematic of pelleted Cistanche seeds

丸粒化肉苁蓉种子的平均直径和球形度用于螺旋杆结构设计和仿真，球形度使用Sneed模型[22-23]计算。计算结果表明，5 mm规格球形种子平均直径为4.92 mm，球形度为0.96。因此以球形为丸粒化肉苁蓉几何特征进行后续排种器关键部件设计。计算公式为

$$D = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{3} \tag{1}$$

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{L_3^{\,2}}{L_1 L_2}} \tag{2}$$

式中　D——丸粒化肉苁蓉种子平均直径，mm

λ——丸粒化肉苁蓉种子球形度

1.2　整体结构与工作原理

丸粒化肉苁蓉排种器将储存在种箱的种子以连续、均匀的形态落入种子管中（图2）[24]，种箱种子堆积在排种器充种区Ⅰ内，由电机驱动10根结构相同旋向不同的螺旋杆以特定的转速使种子均匀分布在螺旋管内；在种子移动区Ⅱ中，种子受到螺旋叶片和内壁的引导而具有连续移动的轨迹，螺旋杆出口处一段无叶片的排种区Ⅲ使管内堆积到特定数量的种子依次落出螺旋管，以消除叶片厚度的影响。最终种子从排种通道落入种子管内，经过种子管引导落入沙土，实现精准播种作业。

多螺旋杆式排种器使种子在空腔内堆积，随后在螺旋叶片引导下移动。因此影响种子移动轨迹的螺旋叶片螺距、螺纹深度以及中心轴转速成为设计的关键参数。

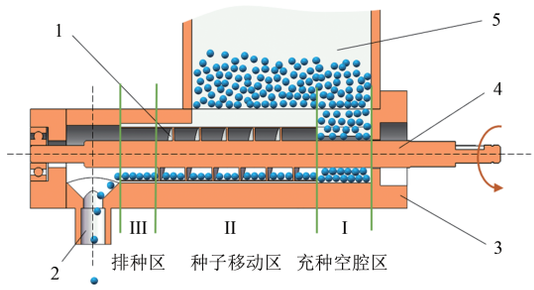


图2 多螺旋杆式排种器结构和工作原理图

Fig. 2 Structure and working principle of multi-helical rod seed metering device

1. 螺旋叶片 2. 排种通道 3. 排种器底座 4. 螺旋杆 5. 种箱

2 关键结构参数设计

2.1 螺旋杆结构

图3为受力示意图，以种子中心为坐标原点建立坐标系$oxyz$，图中平行轴线方向为x轴方向，竖直方向为y轴方向，根据直角右手坐标系原理确定z轴方向。图中箭头为螺旋杆转动方向，当丸粒化肉苁蓉种子进入螺旋杆的种子移动区时，叶片推力F_T可分解为沿x轴方向分力F_{Tx}和沿z轴方向分力F_{Tz}。其中分力F_{Tx}与管壁摩擦力F_f、种间压力F_h共同作用使种子有沿x轴正向的加速度a_x；分力F_{Tz}与重力G、管壁摩擦力F_f、中间摩擦力F_e共同作用使种子有沿螺旋杆圆周切向的加速度a_τ。

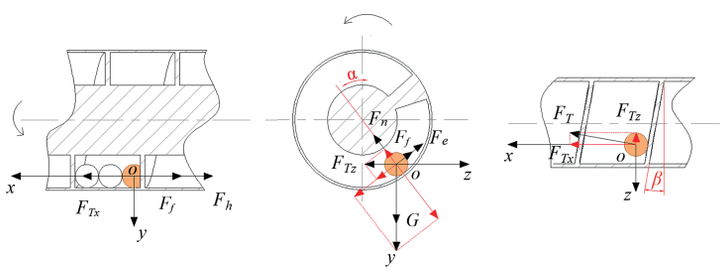


图3 种子在螺旋叶片中受力示意图

Fig. 3 Force diagram of seed in helical blade

根据受力平衡原理有

$$ma_x = F_{Tx} - F_f - F_h \tag{3}$$

$$ma_\tau = G\sin\alpha + F_{Tz}\cos\alpha - F_f - F_e \tag{4}$$

其中

$$\begin{cases} F_f = \mu F_n \\ F_e = \mu_h F_h \\ F_{Tz} = F_T \sin\beta \\ F_{Tx} = F_T \cos\beta \\ F_n = G\cos\alpha - F_{Tz}\sin\alpha \end{cases} \tag{5}$$

式中 a_x——种子x轴方向的加速度，m/s²

a_τ——种子沿圆周切向的加速度，m/s²

m——种子质量，g

F_f——种子与管壁摩擦力，N

F_h——种子间压力，N

F_e——种子间摩擦力，N

F_n——种子受到管壁的支持力，N

G——种子重力，N

α——种子中心与螺旋杆中心连续竖直方向的夹角，(°)

β——螺旋杆螺旋升角，(°)

μ——种子与管壁摩擦因数

μ_h——种子间摩擦因数

整合公式(3)~(5)可得

$$\begin{cases} a_x = \dfrac{1}{m}(F_T\cos\beta + \mu F_T \sin\alpha\sin\beta - F_h) - \mu g\cos\alpha \\ a_\tau = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha) + \dfrac{1}{m} \\ \quad (F_T\cos\alpha\sin\beta + \mu F_T\sin\alpha\sin\beta - \mu_h F_h) \end{cases} \tag{6}$$

式中 g——重力加速度，m/s²

加速度a_x和a_τ的共同作用使种子向排种区移动，当转速增大时夹角α增大，当α超过180°时，种子会落入后一个螺旋叶片槽中而影响排种的连续性；当螺距增大时夹角β增大，螺距是影响螺旋叶片间存种量的关键参数之一。

如图4所示，螺距为P，螺旋杆螺纹深度为H，螺旋杆螺纹长度为l，螺旋杆半径为R，种子直径为D。

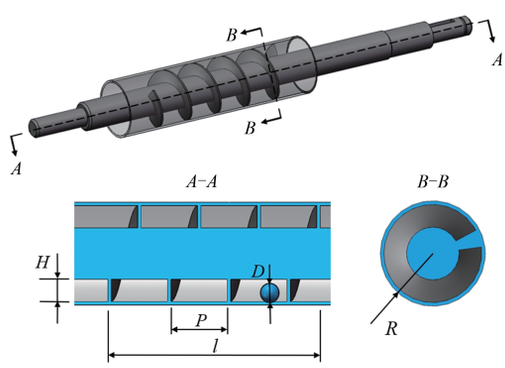


图4 螺旋杆结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of helical rod

为保证种子顺利进入螺旋杆，螺距和螺纹深度均需大于D。通过仿真发现当螺距小于$2D$时，会出现螺纹堵塞现象而导致种子无法移动。为避免种子在螺旋杆内堆积，螺纹深度应小于$2D$。种子与螺旋叶片和管壁之间还需留有间隙以避免堵塞。螺旋杆在转动过程中需要安全的强度以避免发生扭矩变形和断裂，选择螺旋杆半径R不小于$1.5H$。综合以上分析，相关参数选取条件为

$$\begin{cases} P \geqslant 2D \\ D < H < 2D \\ l = NP \\ R \geqslant 1.5H \end{cases} \tag{7}$$

式中　N——螺纹圈数

受排种器整体结构尺寸限制，螺纹长度不应过大。选取螺纹长度为 110 mm，圈数 N 不小于 4 的设计尺寸。综合上述条件，选择螺距为 10~20 mm，选择叶片深度为 6~10 mm。

2.2　排种量和作业参数

如图 5 所示，多螺旋杆式排种器种箱内的种子主要分布在充种空腔区Ⅰ、种子移动区Ⅱ以及排种区Ⅲ内。充种空腔区Ⅰ内的种子不断被种子移动区Ⅱ内的螺旋叶片推到排种区Ⅲ。因此排种量表示为单位时间内从排种区Ⅲ进入排种通道内的种子。

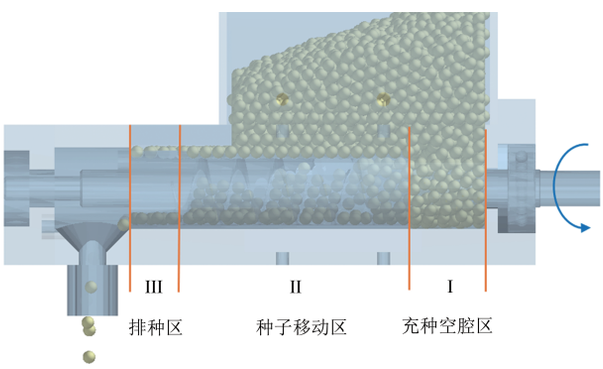


图 5　排种过程示意图

Fig. 5　Schematic of seeding process

根据 GB/T 41628-2022《肉苁蓉培育技术规程》中机械接种法推荐的肉苁蓉播种量为 750~3750 g/hm^2，Ⅰ级（荒漠）肉苁蓉种子千粒质量为 0.1 g，播种宽度 25~40 cm[25]。采用丸粒化肉苁蓉种子每丸包含（10±2）粒肉苁蓉种子，播种量计算式为

$$M = \frac{1000 m_1 M_0}{n_0 m_0} \tag{8}$$

式中　M——丸粒化肉苁蓉种子播种量，g/hm^2

M_0——肉苁蓉种子播种量，g/hm^2

n_0——每丸包含肉苁蓉种子数

m_0——肉苁蓉千粒质量，g

m_1——丸粒肉苁蓉种子单丸质量，g

研究的多螺旋杆式丸粒化肉苁蓉排种器针对新疆吐鲁番地区荒漠肉苁蓉机械播种作业，结合肉苁蓉机械精量播种农艺要求，确定丸粒化肉苁蓉播量为 7.5×10^5~3.75×10^{6}粒/hm^2。荒漠肉苁蓉寄主种植行距为 4 m，采用双层播种农艺，计算得丸粒化肉苁蓉排种器单行播种宽度内的单层排种量为 150~750 粒/m。

3　排种器参数仿真优化

3.1　丸粒化肉苁蓉种子参数测量

3.1.1　丸粒化肉苁蓉种子静摩擦因数测量

丸粒化肉苁蓉种子呈球形，根据种子静摩擦因数测定方法[26-27]，用透明胶带粘接一层种子，将有种子的一面放置在与螺旋杆材料相同的平面上，逐渐使平面倾斜。当透明胶带出现滑动趋势时拍照记录，此时的斜面状态如图 6 所示。

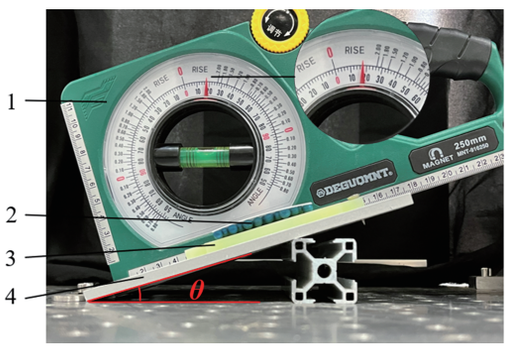


图 6　静摩擦因数测量试验

Fig. 6　Static friction coefficient measurement test

1. 角度尺　2. 丸粒化肉苁蓉种子　3. 树脂板　4. 测量平台

进行 3 次重复试验并记录平面倾斜角度，取平均值 17.5°，计算种子静摩擦因数

$$\mu = \tan\theta \tag{9}$$

式中　θ——测量平台倾斜夹角，(°)

最终测得丸粒化肉苁蓉种子静摩擦因数为 0.32。

3.1.2　丸粒化肉苁蓉种子弹性恢复系数测量

根据弹性系数测量方法[28]，将与螺旋杆材料相同的平面板放置试验台上，使丸粒化肉苁蓉种子距平面板 100 mm 高度处自由下落并记录种子反弹的最大高度。重复 3 次试验并记录数据，根据公式

$$e = \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{h_2}{h_1}} \tag{10}$$

式中　e——弹性恢复系数

v_1——种子与平面碰撞前速度，m/s

v_2——种子与平面碰撞后速度，m/s

h_1——种子下落高度，m

h_2——种子碰撞后弹起的最大高度，m

计算弹性恢复系数，取平均值得 0.38。

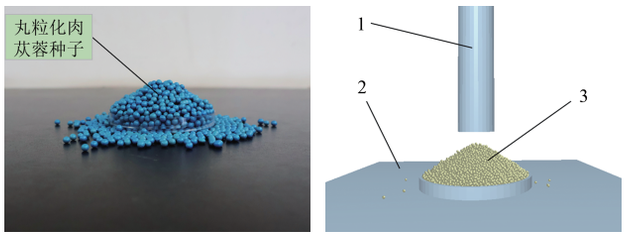
3.1.3　丸粒化肉苁蓉种子自然休止角测量

对丸粒化肉苁蓉种子进行种子自然休止角测量并建立测量模型（图 7 所示）。试验台和仿真测量均重复 3 次试验，得到如表 1 所示的试验结果。仿真测量结果和试验台测量结果平均误差为 0.9°，说明上述测量参数可用于多螺旋杆式丸粒化肉苁蓉排种器的离散元仿真，取平均值 31.92° 为丸粒化肉苁蓉种子的自然休止角。

3.2　离散元模型建立

除本文测量的丸粒化肉苁蓉种子参数外，其余参数由新疆颂春维药农业有限公司和新疆种褆农业种子科技有限公司提供。丸粒化肉苁蓉种子与排种器接触部分采用 3D 打印的树脂材料，选择 Hertz-Mindlin 接触模型，仿真参数如表 2 所示。

为提高仿真试验效率，省去不影响仿真结果的动力和传动结构，保留种箱、螺旋杆、底座和排种通道等结构，使用 Solidworks 建立排种器模型。为方便试验结果



(a) 休止角试验台试验 (b) 休止角仿真试验

图7 休止角对照试验

Fig. 7 Angle of repose control test

1. 圆筒 2. 树脂板 3. 丸粒化肉苁蓉种子

表1 丸粒化肉苁蓉种子休止角测量结果

Tab. 1 Measurement results of pelleted Cistanche seed resting angle

序号	试验台测量值/(°)	仿真测量值/(°)
1	32.15	31.28
2	32.08	33.42
3	31.54	32.04

表2 离散元仿真材料参数和接触参数

Tab. 2 Material parameters and contact parameters for DEM simulation

项目	参数	数值
丸粒化肉苁蓉种子	泊松比	0.31
	密度/(kg·m^{-3})	2 550
	剪切模量/Pa	1.25×10^{8}
树脂	泊松比	0.25
	密度/(kg·m^{-3})	1 117
	剪切模量/Pa	8.87×10^{8}
种子-种子	弹性恢复系数	0.31
	静摩擦因数	0.35
	滚动摩擦因数	0.03
种子-树脂	弹性恢复系数	0.38
	静摩擦因数	0.32
	滚动摩擦因数	0.01

获取,在排种器下方建立尺寸相同的10个种子收集槽。将模型导入EDEM软件中,设置表2中所示的材料和接触参数,建立排种器和丸粒化肉苁蓉种子离散元模型(图8)。

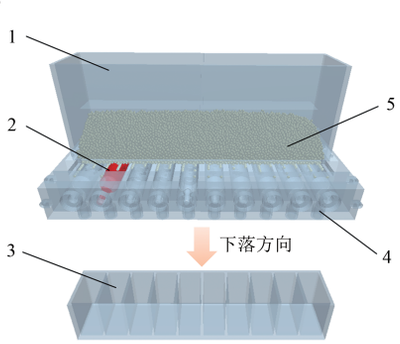


图8 排种器和丸粒化肉苁蓉种子离散元仿真模型

Fig. 8 DEM simulation models of seed meter device and pelleted Cistanche seed

1. 种箱 2. 螺旋杆 3. 接种槽 4. 排种通道 5. 丸粒化肉苁蓉种子

3.3 性能指标

在试验中需要通过设定评价指标对试验的结果进行评估,本文采用排种均匀变异系数和排种量变异系数来反映排种均匀性。通过分析排种器排出相邻种子的时间间隔间接比较不同结构参数下排种均匀性。

3.4 仿真试验设计

为探究丸粒化肉苁蓉种子排种器螺旋杆结构尺寸对排种均匀性的影响,确定螺旋杆螺距P、螺纹深度叶片深度H和螺旋杆转速n等试验参数,螺旋杆基本参数如图9所示。

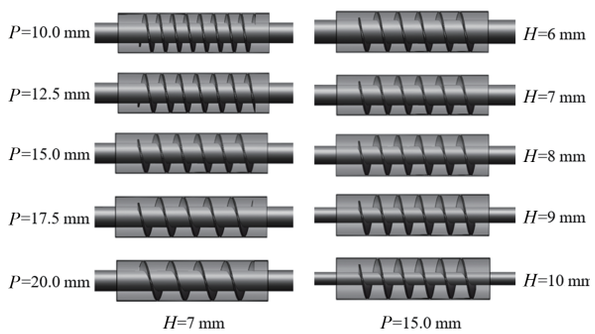


图9 螺旋杆不同关键试验参数仿真模型

Fig. 9 Simulation model of helical rod with different key test parameters

每个试验参数设置5组水平进行单因素仿真试验,其中螺距反映螺旋杆的轴向存种能力,螺纹深度因素反映螺旋杆的径向存种能力,转速反映螺旋杆排种能力。试验中设置参数水平如表3所示。

表3 试验因素和水平

Tab. 3 Experimental parameters and levels

参数	水平				
	1	2	3	4	5
螺旋杆螺距P/mm	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
螺纹深度H/mm	6	7	8	9	10
螺旋杆转速n/(r·min^{-1})	40	60	80	100	120

单因素仿真试验后,采用三因素三水平Box-Behnken中心组合试验,并通过多元回归分析、方差分析和响应面分析获得各因素交互作用对排种器性能的影响,最后通过目标优化得到螺旋杆的最优参数组合。

3.5 单因素试验

3.5.1 螺纹深度对排种性能的影响

设置螺纹深度为6、7、8、9、10 mm进行单因素试验,仿真时间为30 s。为了更清楚地反映排种均匀性,从第15 s开始连续统计15粒种子的相邻时间间隔并绘制曲线,如图10a所示。为便于清晰对比,计算时间间隔的标准差,如图10b所示。不同螺纹深度对应的时间间隔标准差分别为0.023、0.021、0.034、0.053、0.025s。螺纹深度为7 mm时的时间间隔标准差最小,最佳螺纹深度取值范围为6~8 mm。进一步分析排种均匀性,统计每个种子收集槽内种子数量和每秒时间的排种量,并分别计

算排种均匀变异系数和排种量变异系数，结果如图11所示。对于排种均匀变异系数，最佳螺纹深度为7~9 mm。对于排种量变异系数，最佳螺纹深度为7~10 mm。综合以上，螺纹深度为7~9 mm时可得到最佳排种均匀性。

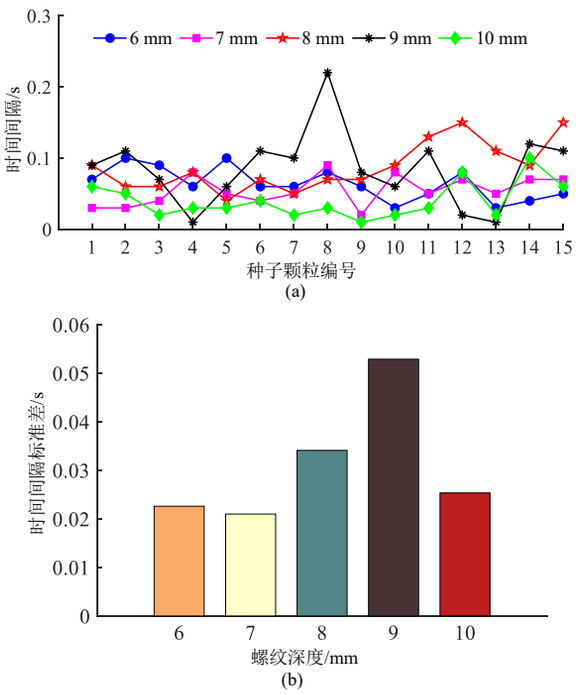


图10　不同螺纹深度的排种均匀性性能

Fig. 10　Performance of seeding uniformity with different thread depths

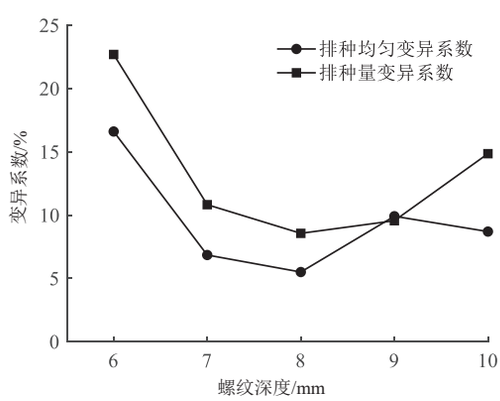


图11　排种均匀变异系数和排种量变异系数随螺纹深度变化曲线

Fig. 11　Variation coefficient of seeding uniformity and seeding capacity with thread depths

3.5.2　螺距对排种性能的影响

设置螺距为10.0、12.5、15.0、17.5、20.0 mm进行单因素试验，仿真时间为30 s。统计连续15粒种子的相邻时间间隔并计算标准差（图12）。不同螺距对应的时间间隔标准差分别为0.096、0.028、0.021、0.012、0.014 s。通过对试验过程观察，当螺距为10 mm时，螺旋杆种子移动区内的存种量大大减少，进而在排种区堆积足够的种子需要一定的时间，因此排种时间间隔较大。进一步分析排种均匀性（图13），整体看出随着螺距增大排种均匀变异系数和排种量变异系数在波动中降低，螺纹为17.5 mm时出现最低变异系数。综合以上分析，最佳螺距为15~20 mm。

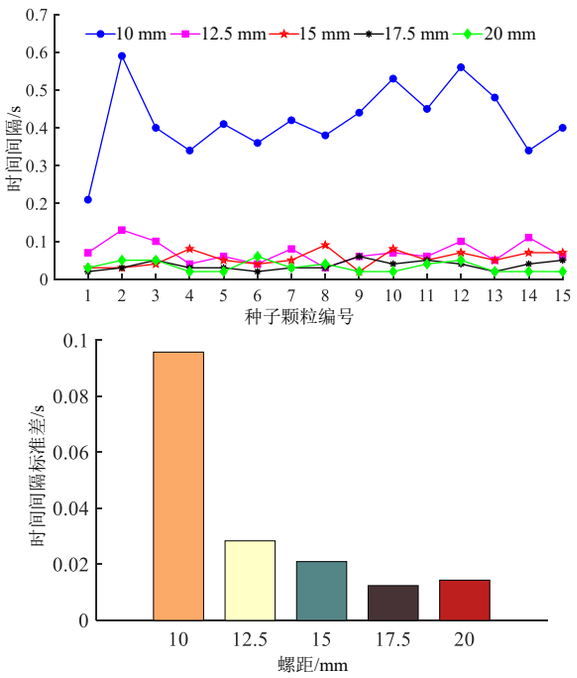


图12　不同螺距排种均匀性性能

Fig. 12　Seeding uniformity at different pitches

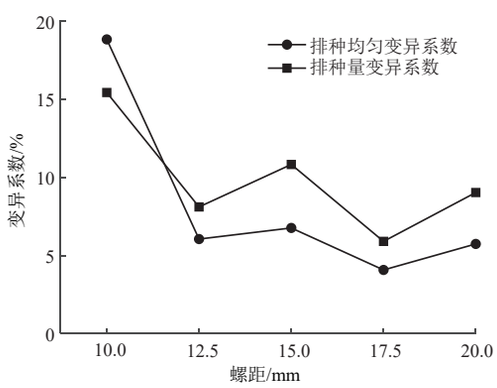


图13　排种均匀变异系数和排种量变异系数随螺距变化曲线

Fig. 13　Variation coefficient of seeding uniformity and seeding capacity with pitches

3.5.3　螺杆转速对排种性能的影响

螺旋杆转速设置为40、60、80、100、120 r/min 5个水平进行单因素试验，仿真时间为30s。统计连续15粒种子的相邻时间间隔并计算标准差（图14）。不同转速对应的时间间隔标准差分别为0.084、0.064、0.021、0.093、0.06 s。较慢和较快的转速都会增大时间间隔的波动性，因此最佳转速区间位于60~100 r/min。图15表明随着转速增大排种均匀变异系数和排种量变异系数先降低后增大。当转速为120 r/min时变异系数增加并不明显，而通过对试验过程观察发现，转速越快单位时间进入螺旋杆内种子数越多，进而从种子移动区进入排种区的种子就越多，种子堆积导致多粒种子同时排出，出现

成簇和间断排种现象，使播种效果变差。综合以上分析，在60~100 r/min范围内取得最佳的播种效果。

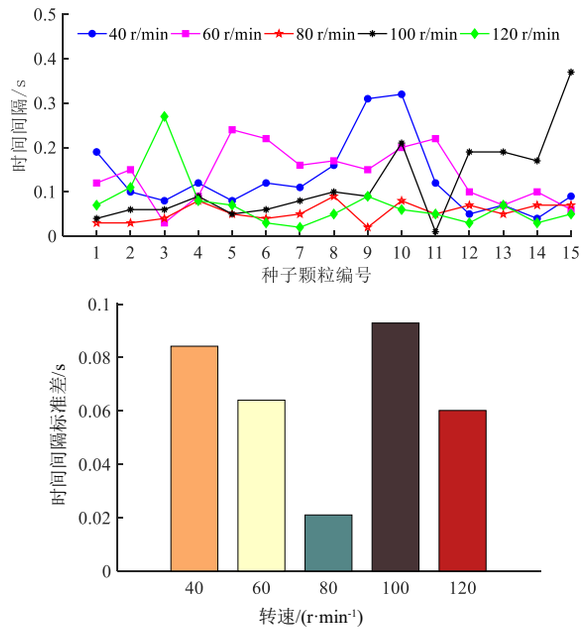


图14 不同转速的排种均匀性性能

Fig. 14 Seeding uniformity at different rotation speeds

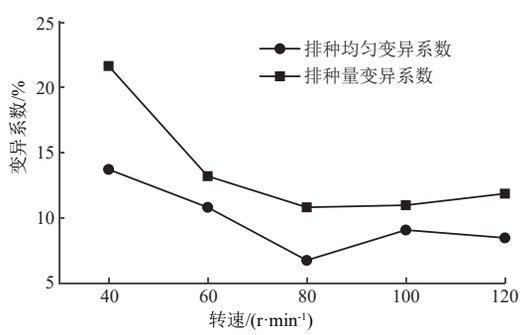


图15 排种均匀变异系数和排种量变异系数随转速变化曲线

Fig. 15 Variation coefficient of seeding uniformity and seeding capacity with rotational speeds

3.6 多因素中心组合试验

3.6.1 试验设计

以螺旋杆螺距、螺纹深度和螺旋杆转速为试验因素，以排种均匀变异系数和排种量变异系数为试验指标，开展三因素三水平的Box-Behnken中心组合试验。根据单因素试验结果确定螺纹深度为7~9 mm，螺距为15~20 mm，转速为60~100 r/min。试验因素编码如表4所示。

3.6.2 试验结果

试验结果如表5所示，X_1、X_2、X_3为试验因素编码值。

使用Design-Expert软件对试验结果数据进行多元回归拟合，得到排种均匀变异系数Y_1、排种量变异系数Y_2分别与螺旋杆螺距X_1、螺纹深度X_2、螺旋杆转速X_3之间的回归方程

表4 试验因素编码

Tab. 4 Codes of testing factors

编码	因素		
	螺旋杆螺距P/mm	螺纹深度H/mm	螺旋杆转速n/(r·min^{-1})
−1	15.0	7	60
0	17.5	8	80
1	20.0	9	100

表5 Box-Behnken试验设计与结果

Tab. 5 Box-Behnken test design and results

序号	因素			排种均匀变异系数Y_1/%	排种量变异系数Y_2/%
	X_1	X_2	X_3		
1	−1	0	−1	8.22	9.5
2	0	−1	−1	6.23	8.52
3	0	1	−1	12.5	8.43
4	−1	1	0	11.26	9.56
5	1	1	0	11.24	8.51
6	0	−1	1	6.05	7.46
7	1	0	−1	8.96	8.32
8	1	0	1	7.38	7.45
9	0	0	0	4.45	5.23
10	1	−1	0	5.74	9.42
11	−1	0	1	8.12	8.99
12	−1	−1	0	6.76	10.69
13	0	0	0	4.02	5.03
14	0	1	1	10.64	7.25

$$Y_1 = 4.24 - 0.13X_1 + 2.61X_2 - 0.465X_3 + 0.25X_1X_2 - 0.37X_1X_3 - 0.42X_2X_3 + 1.92X_1^2 + 2.6X_2^2 + 2.02X_3^2 \tag{11}$$

$$Y_2 = 5.13 - 0.63X_1 - 0.2925X_2 - 0.4525X_3 + 0.055X_1X_2 - 0.009X_1X_3 - 0.03X_2X_3 + 2.53X_1^2 + 1.88X_2^2 + 0.9025X_3^2 \tag{12}$$

3.6.3 试验因素方差与回归分析

回归模型的方差和显著性分析结果如表6所示。结果表明排种均匀变异系数Y_1模型和排种量变异系数Y_2模型均显著($P<0.05$)，失拟项不显著($P>0.05$)，说明回归模型有效。

对于排种均匀变异系数Y_1，X_2、X_1^2、X_2^2、X_3^2影响极显著，X_3、X_2X_3影响显著，其他模拟项不显著。对于排种量变异系数Y_2，X_1、X_1^2、X_2^2影响极显著，X_3、X_3^2影响显著，其他模拟项不显著。剔除不显著的交互项和平方项后，排种均匀变异系数Y_1和排种量变异系数Y_2的回归方程为

$$\begin{cases} Y_1 = 4.24 - 0.13X_1 + 2.61X_2 - 0.465X_3 - 0.42X_2X_3 + 1.92X_1^2 + 2.6X_2^2 + 2.02X_3^2 \\ Y_2 = 5.13 - 0.63X_1 - 0.2925X_2 - 0.4525X_3 + 2.53X_1^2 + 1.88X_2^2 + 0.9025X_3^2 \end{cases} \tag{13}$$

3.6.4 试验因素响应分析

采用固定因子的方法获得单因素响应曲线(图16)，

表 6　回归模型方差分析

Tab. 6　Significance analysis of regression models

方差来源	排种均匀变异系数 Y_1				排种量变异系数 Y_2			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	91.39	9	120.78	0.000 2**	32.48	9	28.25	0.002 9**
X_1	0.135 2	1	1.61	0.273 5	3.18	1	24.86	<0.01**
X_2	54.39	1	646.95	<0.01**	0.684 5	1	5.36	0.081 6
X_3	1.73	1	20.57	0.010 5*	1.64	1	12.82	0.023 1*
X_1X_2	0.25	1	2.97	0.159 7	0.012 1	1	0.094 7	0.773 6
X_1X_3	0.547 6	1	6.51	0.063 2	0.032 4	1	0.253 7	0.641
X_2X_3	0.705 6	1	8.39	0.044 3*	0.003 6	1	0.028 2	0.874 8
X_1^2	11.74	1	139.58	<0.01**	20.52	1	160.68	<0.01**
X_2^2	21.63	1	257.29	<0.01**	11.34	1	88.79	<0.01**
X_3^2	13.06	1	155.31	<0.01**	2.61	1	20.41	0.010 7*
残差	0.336 3	4			0.510 9	4		
失拟项	0.243 9	3	0.879 2	0.635 6	0.490 9	3	8.18	0.250 3
误差	0.092 5	1			0.02	1		
总和	91.72	13			32.99	13		

注：*表示影响显著（0.01<P<0.05）；**表示影响极显著（P<0.01）。

螺距、螺纹深度、转速对排种均匀变异系数和排种量变异系数的影响规律均呈现随着因素数值增大，响应值先减小后增大的趋势。对于排种均匀变异系数，螺纹深度影响的效果较明显，当螺距、螺纹深度以及转速分别为 17.6 mm、7.5 mm、81.2 r/min 时获得极值；对于排种量变异系数受到螺距和螺纹深度影响的效果较明显，当螺距、螺纹深度以及转速分别为 17.8 mm、8.06 mm、84.8 r/min 时获得极值。

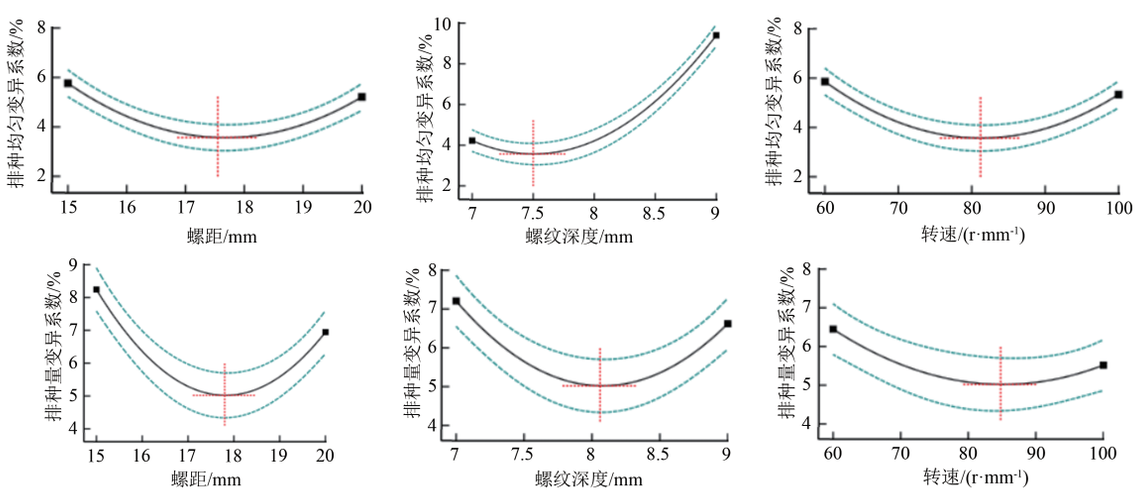


图 16　单因素响应曲线

Fig. 16　Single factor response curves

根据表 6 可知排种均匀变异系数 Y_1 受交互项 X_2X_3 的影响显著。如图 17 所示，螺旋杆转速一定时，随着螺纹深度增大，排种均匀性变异系数呈先减小后增大的趋势，当螺纹深度为 7~8 mm 时变化较小，当螺纹深度大于 8.0 mm 后，增大趋势明显；螺纹深度一定时，随着转速增大，排种均匀变异系数呈先减小后增大的趋势，其中转速对排种均匀变异系数变化的影响没有螺纹深度对排种均匀变异系数变化的影响显著。当螺纹深度为 7.1~7.9 mm、转速为 72~90 r/min 时能够获得较低的排种均匀变异系数，说明此时排种均匀性较好。

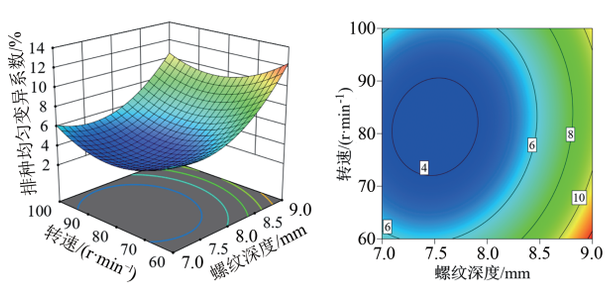


图 17　交互项对评价指标影响响应曲面

Fig. 17　Response surfaces for impact of interaction terms on evaluation indicators

3.6.5　参数优化

优化各试验因素以获得最优的螺旋杆结构和工作参数，以排种均匀变异系数、排种量变异系数最小作为优化目标，结合各试验因素边界条件，对回归模型进行

目标优化求解，目标函数和因素约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1,X_2,X_3) \\ \min Y_2(X_1,X_2,X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{14}$$

求解得螺距为17.77 mm、螺纹深度为7.81 mm、转速为83.32 r/min时，排种均匀变异系数和排种量变异系数预测值最小，分别为3.82%和5.16%。

4 台架试验

4.1 台架试验材料与方法

以排种均匀变异系数和排种量变异系数为指标，通过台架试验验证目标优化结果的准确性。为方便观察，种箱和排种器上部结构采用透明亚克力板材料，螺旋杆为3D打印的树脂材料，螺距为17.77 mm，螺纹深度为7.81 mm，将10根螺旋杆安装于排种器底座。将多螺旋杆式排种器安装在试验台上，使用伺服电机控制转速，在排种出口安装种子袋接取种子，如图18所示。选取丸粒化肉苁蓉种子为试验对象，设置螺旋杆转速为75、80、83.32、85、90 r/min进行台架试验。为计算排种均匀变异系数，试验记录排种器工作20 s后种子袋中的种子数量，重复3组，取平均值为试验结果；为计算排种量变异系数，试验记录每3 s内种子袋的种子数，连续记录10次，重复3组，取平均值作为试验结果。

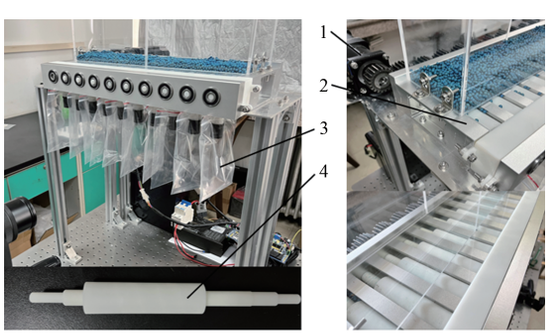


图18 排种器台架试验装置

Fig. 18 Laboratory test for seed metering device

1. 驱动电机 2. 排种器底座 3. 种子袋 4. 螺旋杆

4.2 台架试验结果与分析

统计每组试验数据，根据每个种子袋中的种子数计算排种均匀变异系数，将试验中每次记录的种子袋中的种子数相加得排种器的排种量并计算排种量变异系数，试验结果如表7所示。当螺距为17.77 mm、螺纹深度为7.81 mm、转速为83.32 r/min时，多螺旋杆式丸粒化肉苁蓉排种器排种均匀变异系数为3.75%，排种量变异系数为5.33%。

试验结果表明，对于排种均匀变异系数和排种量变异系数，试验值与模型预测值的绝对误差均小于2%，说明目标优化合理、模型预测可靠。从表7可以看出，对于试验所选螺距为17.77 mm和螺纹深度为7.81 mm的因素水平，台架试验与仿真试验得出的排种均匀变异系数和排种量变异系数随转速增大呈先减小后增大的变化趋势。当转速为83.32 r/min时，排种均匀变异系数和排种量变异系数最小且试验值与仿真值的误差最小，当转速小于或大于最佳转速时误差略有增大且台架试验值相较于仿真试验预测值偏大。螺旋杆打印件尺寸误差、台架装置安装误差以及种子接触参数测量误差，均可能导致台架试验结果与仿真试验结果产生误差。

表7 不同转速台架试验结果

Tab. 7 Test results of different rotational speeds %

转速/(r·min^{-1})	排种均匀变异系数		排种量变异系	
	模型预测值	试验值	模型预测值	试验值
75	4.07	5.49	5.38	7.01
80	3.84	4.73	5.21	5.70
83.32	3.82	3.75	5.16	5.33
85	3.86	3.99	5.17	6.39
90	4.13	5.16	5.21	6.73

5 结论

(1)基于肉苁蓉寄生特点和散播作业农艺需求设计了一种多螺旋杆式丸粒化肉苁蓉精量排种器，通过设置多个螺旋杆扩大排种器散播面，阐述了多螺旋杆式排种器作业原理并建立了丸粒化肉苁蓉种子与螺旋叶片的动力学模型，理论分析并确定了螺旋杆的基本结构参数，根据肉苁蓉种植农艺计算了丸粒化肉苁蓉的理论排种量并构建了排种均匀性评价指标。

(2)应用EDEM软件建立了排种器和丸粒化肉苁蓉离散元仿真模型并进行仿真试验，以排种均匀变异系数和排种量变异系数为试验指标分别探究了螺旋杆螺距、螺纹深度和螺旋杆转速对排种均匀性的影响。试验结果表明，当螺旋杆螺距为15~20 mm、螺纹深度为7~9 mm、螺旋杆转速为60~100 r/min时，排种器具有较优的排种均匀性。

(3)采用Box-Behnken中心组合试验进一步探究螺旋杆螺距、螺纹深度和螺旋杆转速对排种性能的影响规律，使用Design-Expert软件建立回归模型，通过方差分析和响应面分析探索各因素对排种器性能的影响，最后通过目标优化得到螺旋杆的最优参数为：螺距17.77 mm、螺纹深度7.81 mm、转速83.32 r/min。

(4)通过台架验证试验对优化参数进行验证，试验结果表明在最优参数下排种均匀变异系数为3.75%，排种量变异系数为5.33%。设计的多螺旋杆式丸粒化肉苁蓉精量排种器满足丸粒化肉苁蓉诱导机制不完善下进行的散播作业农艺要求。

参 考 文 献

[1] 白志业. 侧向自开式肉苁蓉排种器的设计与试验[D]. 石河子:石河子大学, 2023.
BAI Zhiye. Design and experiment of lateral self-opening Cistanche Herba seed metering device[D]. Shihezi: Shihezi University, 2023. (in Chinese)

[2] 阿瓦古丽·买塔都力. 吐鲁番市肉苁蓉生产机械化技术现状[J]. 农机科技推广, 2024(3):10,14.

[3] 何军. 打造30万亩管花肉苁蓉产业推动和田生态与经济全面腾飞[C]//第六届肉苁蓉暨沙生药用植物学术研讨会论文集, 2011.

[4] 蒋永敏, 金红基. 沙质荒漠梭梭栽植、肉苁蓉播种一体机设计[J]. 农业机械, 2021(2): 106－107,112.

[5] 民勤县雪银沙产业有限公司. 肉苁蓉施肥播种覆膜镇压一体机: 201510034621.6[P]. 2016-05-11.

[6] 何磊, 刘向新, 张军, 等. 气吹式肉苁蓉播种机的设计[J]. 农机化研究, 2015, 37(5): 151－154,158.
HE Lei, LIU Xiangxin, ZHANG Jun, et al. Design of air blowing cistanche seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(5): 151－154,158. (in Chinese)

[7] 尤佳, 杨文奇, 韩长杰, 等. 喷洒式肉苁蓉接种机设计与试验[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(6): 255－259,268.
YOU Jia, YANG Wenqi, HAN Changjie, et al. Design and test of sprayed cistanche deserticola seeder[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(6): 255－259,268. (in Chinese)

[8] RAZAVIZADEH N, ZARE D, NASSIRI S M, et al. Nematollahi experimental study and numerical simulation of resistance to airflow in a storage bin of rough rice with three inlet duct configurations[J]. Biosystems Engineering, 2023, 225: 118－131.

[9] 屠鹏飞,姜勇,郭玉海,等. 肉苁蓉全产业链发展新模式的创建与应用[J]. 中国现代中药, 2021, 23(3): 395－400.
TU Pengfei, JIANG Yong, GUO Yuhai, et al. Establishment and application of a new development model of whole industrial chain of cistanches herba[J]. Modern Chinese Medicine, 2021, 23(3): 395－400. (in Chinese)

[10] 陈庆亮, 武志博, 郭玉海, 等. 荒漠肉苁蓉及其寄主梭梭栽培技术[J]. 中国现代中药, 2015, 17(4): 359－368.

[11] 张帅扬, 吕程序, 白圣贺, 等. 油菜种子甩盘式丸化加工试验与参数优化[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2):131－140.
ZHANG Shuaiyang, LÜ Chengxu, BAI Shenghe, et al. Processing test and parameter optimization on rotary disc pelleting machine for rapeseeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2):131－140. (in Chinese)

[12] AFZAL I, JAVED T, AMIRKHANI M, et al. Modern seed technology: seed coating delivery systems for enhancing seed and crop performance[J]. Agriculture, 2020, 10(11):526.

[13] 侯占峰, 张曦文, 陈智, 等. 丸粒化包衣种子识别检测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6):62－69,183.
HOU Zhanfeng, ZHANG Xiwen, CHEN Zhi, et al. Design and experiment of identification and detection system for pelleted coated seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6):62－69,183. (in Chinese)

[14] AMIRKHANI M, MAYTON H, LOOS M, et al. Development of superabsorbent polymer (SAP) seed coating technology to enhance germination and stand establishment in red clover cover crop[J]. Agronomy, 2023, 13(2):438.

[15] AFZAL I, JAVED T, AMIRKHANI M, et al. Modern seed technology: seed coating delivery systems for enhancing seed and crop performance[J]. Agriculture, 2020, 10(11):526.

[16] 乔艳荣, 范霞, 胡林立. 大粒种子丸粒化技术在远沙大沙飞播造林中的应用[J]. 内蒙古林业, 2012(7):14－15.

[17] 贾冰, 司建华, 武志博, 等. 飞播种子丸粒化技术应用对植被和土壤的影响[J]. 中国沙漠, 2023, 43(2):195－204.
JIA Bing, SI Jianhua, WU Zhibo, et al. Effects of seed pelleting in aerial seeding on vegetation and soil[J]. Journal of Desert Research, 2023, 43(2):195－204. (in Chinese)

[18] 孙振雨, 李宁, 吴忠民, 等. 水稻丸粒化种子直播方法研究[J]. 农机科技推广, 2022(7):39－41.

[19] 夏连明, 王相友, 耿端阳, 等. 丸粒化玉米种子精密排种器[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6):53－57.
XIA Lianming, WANG Xiangyou, GENG Duanyang, et al. Precision seed-metering device for pelleted corn seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):53－57. (in Chinese)

[20] 夏连明, 王相友, 耿端阳. 倾斜圆台型玉米精密排种器种子破损试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12):67－71.
XIA Lianming, WANG Xiangyou, GENG Duanyang. Corn seed damaging experiment in truncated cone precision metering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):67－71. (in Chinese)

[21] 周宇杰, 侯明鑫, 张创鑫, 等. 丸粒化辣椒种子智能直播机的设计[J]. 南方农机, 2024, 55(11):17－20.

[22] SNEED E D, FOLK R L. Pebbles in the lower Colorado river, Texas: a study in particle morphogenesis[J]. The Journal of Geology, 1958, 66:114－150.

[23] GAO Xiaojun, XIE Guanfu, YANG Xu, et al. Application of a staggered symmetrical spiral groove wheel on a quantitative feeding device and investigation of particle motion characteristics based on DEM[J]. Powder Technology, 2022, 407(7):117650.

[24] JIA Xian, ZHU Jingyu, GUO Gang, et al. Design and test of a novel converging groove-guided seed tube for precision seeding of maize[J]. Biosystems Engineering, 2024, 245(9):36－55.

[25] GB/T 41628-2022　肉苁蓉培育技术规程[S]. 2022.

[26] 白志业, 蒙贺伟, 彭慧杰, 等. 肉苁蓉种子离散元仿真参数标定[J]. 农机化研究, 2025, 47(2):19－47,53.
BAI Zhiye, MENG Hewei, PENG Huijie, et al. Parameter calibration for discrete element somulation of cistanche seeds[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(2):19－47,53. (in Chinese)

[27] 张春岭, 刘涛, 郑子浩, 等. 交错凸齿式宽苗带小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(5):47－59.

[28] LEI X L, HU H J, WU W C, et al. Seed motion characteristics and seeding performance of a centralised seed metering system for rapeseed investigated by DEM simulation and bench testing[J]. Biosystems Engineering, 2021, 203:22－33.