DOI:10.16853/j.cnki.1009-3575.2026.05.008

变容勺式大豆玉米带状复合精量穴播器关键部件参数优化与性能试验

玄德正,董文学,刘 飞*,张安斌,任宇星
(内蒙古农业大学机电工程学院,呼和浩特 010018)

摘要:本研究针对内蒙古鄂尔多斯地区大豆玉米带状复合种植缺乏专用精量播种机具的问题,提出了一种变容勺式精量穴播器,并结合3种适宜的带状种植模式进行应用探索。通过建立充种、种勺清种与过桥清种阶段的力学模型,确定穴播器的理论角速度范围为0~6.6 rad/s。利用EDEM软件开展单因素与响应面仿真试验,对角速度、引种勺倾角及过桥槽长度3个关键参数进行优化。结果表明,玉米最佳播种参数为角速度4.7 rad/s、引种勺倾角71.3°、过桥槽长度15 mm;大豆播种最佳参数为角速度5.5 rad/s、引种勺倾角78.8°、过桥槽长度10 mm。田间试验进一步验证了仿真结果:大豆播种合格率达89.2%~90.2%,漏播率为2.5%~2.9%,重播率为2.9%~3.8%;玉米播种合格率为93.8%~94.4%,漏播率2.8%~3.0%,重播率2.6%~2.8%。田间试验与仿真结果误差较小,符合农艺要求。研究表明,该播种装置结构简单、成本低廉,适用于鄂尔多斯及类似地区大豆玉米带状复合机械化种植的推广应用。

关键词:变容勺式穴播器;带状复合种植;EDEM仿真;参数优化;排种性能
中图分类号:TS255.7 **文献标志码**:A **文章编号**:1009-3575(2026)05-0068-11

Parameter Optimization and Performance Testing of a Variable-capacity Spoon-type Precision Hill Seeder for Strip-intercropping of Soybean and Maize

XUAN Dezheng, DONG Wenxue, LIU Fei*, ZHANG Anbin, REN Yuxing
(*College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *China*)

Abstract: This study addressed the lack of specialized precision seeding machinery for soybean-maize strip intercropping in the Ordos region of Inner Mongolia by proposing a variable-capacity spoon-type precision hill seeder, combined with three suitable strip intercropping patterns. Mechanical models were established for the seed filling, spoon cleaning, and bridge cleaning stages, and the theoretical operating angular velocity range of the seeder was determined as 0~6.6 rad/s. Using the EDEM software, single-factor and response surface simulations were conducted to optimize three key parameters, i.e., the angular velocity, the spoon inclination angle, and the bridge groove length. The results showed that the optimal seeding parameters for maize were an angular velocity of 4.7 rad/s, a spoon inclination angle of 71.3°, and a bridge groove length of 15 mm, for soybean, the optimal parameters were 5.5 rad/s, 78.8°, and 10 mm, respectively. Field experiments further validated the simulation outcomes, which showed that the soybean achieved a qualified seeding rate of 89.2%~90.2%, a missed seeding rate of 2.5%~2.9%, and a reseeding rate of 2.9%~3.8%, the maize achieved a qualified seeding rate of 93.8%~94.4%, a missed seeding rate of 2.96%~3.01%, and a reseeding rate of 2.6%~2.8%. The discrepancy between the simulation and field results was minimal, meeting agronomic requirements. Overall, the seeder is structurally simple, cost-effective, and suitable for large-scale promotion of mechanized soybean-maize strip intercropping in Ordos and similar regions.

Key words: Variable-capacity spoon-type hill seeder; Soybean-maize strip intercropping; EDEM simulation; Parameter optimization; Seeding performance

我国粮食安全长期受限于耕地面积不足和大豆巨大的供需缺口。解决这一问题的核心在于扩大大豆油料种植面积,但单纯依赖大豆或玉米单作无法突破土地资源的限制。推广大豆玉米带状复合种植,能够有效优化种植结构,因此成为保障国家粮食安全的一项关键战略措施。大豆玉米带状复合种植模式是在现有耕作面积基础上实现大豆和玉米间套复种的一种新种植模式[1],其采用"选配品种、扩间增光、缩株保密"核心技术[2],实现作物间协同共生,提高土地产出率,在玉米不减产前提下增收大豆[3]。目前,黄淮海、西

收稿日期:2025-07-31
基金项目:内蒙古自治区科技计划项目(2023YFHH0012);内蒙古自治区科技计划项目(2025YFHH0133);中央引导地方科技发展资金项目(2024ZY0052);鄂尔多斯市重点研发计划项目(YF20232341)
作者简介:玄德正(2000—),男,硕士研究生,主要从事农产品初加工方面的研究;*为通信作者,刘 飞(1984—),博士,教授,主要从事高寒干旱地区农业机械化工程与智能农机装备方面的研究,E-mail:afei2208@imau.edu.cn

北、西南等地区大力推广带状复合种植模式[4]。然而，现如今大豆玉米复合播种还存在播种均匀性差、播量变异系数大、种子浪费严重的问题，导致无法满足精准播种的需求。

当前，在大豆玉米复合播种机具方面已有一定研究进展。文献[5]研制的2BF-1+3+1型播种机采用了大豆和玉米专用排种器，提升了种子适应性，并通过优化外槽轮式排种装置的结构参数，提高了播种质量。然而，该机缺乏对大豆和玉米株距的独立调节功能，难以满足带状种植对株距精准控制的要求。薛荣[6]设计的气吹式精量播种机，通过集成式气吹排种器与空气放大器实现气流输种，可一次性播种3行大豆和2行玉米，拓展了行距调节范围。但其播种传动系统以玉米株距为基础设计，缺乏对大豆株距的灵活调节能力。河北农哈哈公司研制的2BFYDM-2/4型密植分控施肥播种机，以及2MBSF-1/2、2MBSF-3/6、2MBSF-2/4型铺膜铺管穴播机，山东泽荣推出的2BDYJ系列播种机，均具备同时播种大豆和玉米的能力，作业效率较高[7]。但这些机型未针对鄂尔多斯沙化地区进行适配性优化，导致播种质量不稳定。总体而言，上述研究在提升穴播器播种质量、降低用种量等方面取得了一定成效，对大豆玉米复合播种具有参考价值。然而，受限于不同区域的种植模式和农艺差异，目前尚缺乏真正适用于多地区特别是鄂尔多斯沙化地区的大豆玉米通用穴播器。机械化穴播仍缺乏专用设备，播种精度也存在明显差异。

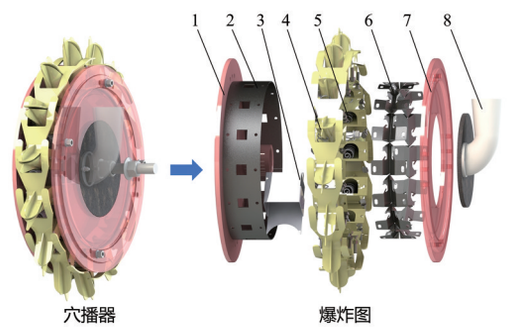
目前，内蒙古鄂尔多斯地区尚未形成一套完全适应本地土壤与气候条件的大豆玉米带状复合种植播种机具。随着作物产量的持续提升及农艺技术的不断发展，现有通用播种设备在精密播种方面已难以满足新的种植需求[8]。因此，开展针对鄂尔多斯地区农田特征的大豆玉米带状复合种植穴播技术研究，具有重要现实意义。该研究不仅有助于填补该地区专用机具的技术空白，也将有力支撑自治区沿黄河流域“稳玉米、扩大豆、提产能”的粮食安全战略，为提升区域农业机械化水平与作物综合生产能力提供关键技术支撑。

1　材料与方法

1.1　大豆玉米穴播器结构与工作原理

1.1.1　总体结构

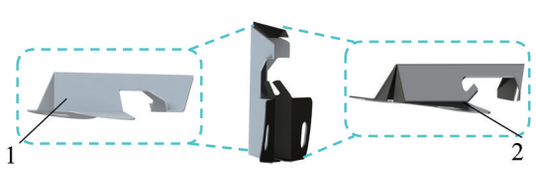
大豆玉米精量穴播器主要由取种勺、排种嘴（鸭嘴）、复位弹簧、护种板、外壳及输种管等结构组成，如图1所示。取种勺由上取种勺和下取种勺组成，取种勺结构主要包括后挡板、固定底板、护种舌、过桥槽、引种舌和引种勺等。取种勺均匀分布在滚筒内侧，对穴播器性能影响至关重要。为方便种子快速进入引种勺，引种勺侧边设置两个引种舌。作业地块不平会引起穴播器倾斜，导致种子滑出过桥槽。为防止该现象发生，在过桥槽末端设置护种舌，如图2所示。上、下取种勺配合时横向间距可调，取种勺腔内容积随之改变。由此可根据不同地块的播种需求及不同作物改变取种量。



1. 后盖；2. 种子滚筒分配器；3. 护种板；4. 鸭嘴；5. 复位弹簧；6. 取种勺；7. 前盖；8. 输种管。

图1　大豆、玉米穴播器结构图

Fig. 1　Structural diagram of soybean and corn hole planter



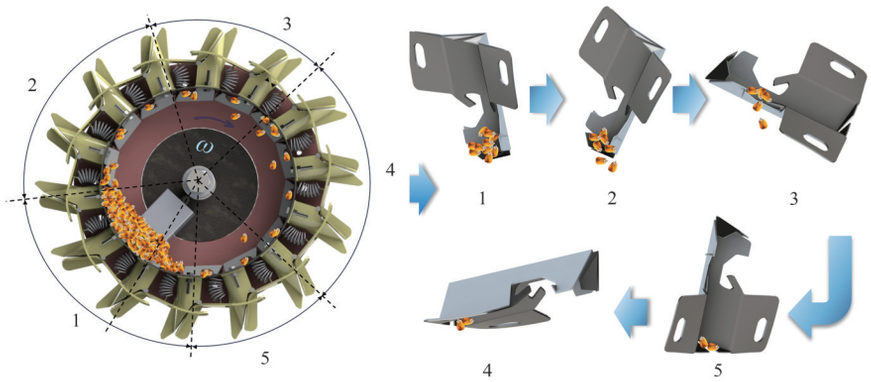
1. 上取种勺；2. 下取种勺。

图2　取种勺结构图

Fig. 2　Seed spoon structure diagram

1.1.2　工作原理

图3为变容式大豆玉米精量穴播器的工作原理图。在充种区，取种勺在种群中舀取一定种子进入引种勺内，并随穴播器转动。当取种勺脱离种群后，一部分大豆或玉米种子所受的支持力小于自身重力。这些种子会因为支持力不足掉落至穴播器内腔，上述过程即为种勺清种机制的工作过程。过桥清种时种子沿过桥槽滑入种室内，过桥槽的长度和槽深决定滑过的种子数量。种子较多时，所受支持力不足的种子将掉落至穴播器内腔。取种勺腔体内的种子在导种区经过排种滚筒进种孔进入排种嘴内。排种嘴入土后，排种嘴后端压板触底使排种嘴打开，大豆、玉米种子顺利排入种穴中。至此完成排种作业。



1. 充种区;2. 种勺清种区;3. 过桥清种区;4. 种子引导区;5. 播种区。

图3 穴播器工作原理图

Fig. 3 A thill seeder structure diagram

1.2 理论分析

1.2.1 种子填充过程受力分析

在种子填充过程中,将勺腔内的种子群视为一个整体,对其质心进行力学分析,建立空间直角坐标系。x方向垂直于支持力方向,y方向与支持力方向相同,z轴与穴播器回转轴平行且垂直于x轴。大豆、玉米种子在引种勺内受重力、支持力、摩擦力及离心力的作用。假设此时引种勺内种子受力平衡且处于相对静止状态,受力分析如图4所示[9]。

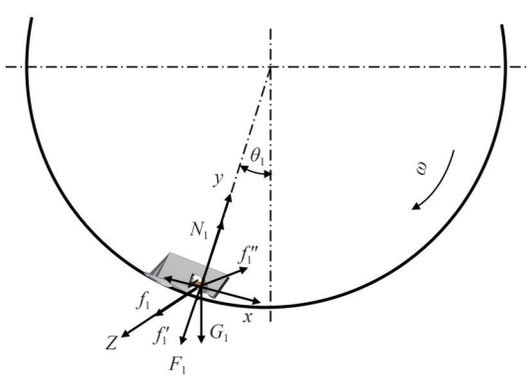


图4 种子填充过程受力分析

Fig. 4 Force analysis during the seed filling stage

$$\begin{cases} N_1 = F_1 + G\cos\theta_1 \\ f_1 = \mu N_1 \\ F_1 = m_1\omega^2 R \\ f_1' = -f_1'' \end{cases} \tag{1}$$

式中:ω为穴播器角速度,rad/s;G_1为引种勺内种子所受重力,N;m_1为引种勺内种子质量,kg;μ为种子与取种勺之间的静摩擦因数,分别取0.21、0.48;θ_1为y轴与竖直方向夹角,°;R为穴播器内壁半径,本研究取半径为175 mm;f_1、f_1'、f_1''分别为在充种阶段种子与取种勺、种子与穴播器内壁、种子与种子之间的摩擦力,N;F_1为种子所受离心力,N;N_1为种子所受支持力,N。

为保证大豆、玉米种子顺利滑进引种勺内并随之旋转,需满足

$$G_1\sin\theta_1 \geqslant f_1 \tag{2}$$

将式(2)带入式(1)可得

$$\omega \leqslant \sqrt{\frac{g\sin\theta_1 - \mu g\cos\theta_1}{\mu R}} \tag{3}$$

由式(3)可知,穴播器角速度ω随θ_1的增大而增大。取种勺处于取种极限位置时,θ_1=90°。为保证取种勺顺利取种,角速度须小于11.6 rad/s。

1.2.2 种勺清种过程受力分析

建立种勺清种过程时的空间直角坐标系。x轴垂直于支持力方向,y轴与支持力方向相同,z轴与穴播器回转轴平行且垂直于x轴。假设此时取种勺内大豆玉米种子受力平衡且处于相对静止状态,受力分析如图5所示。

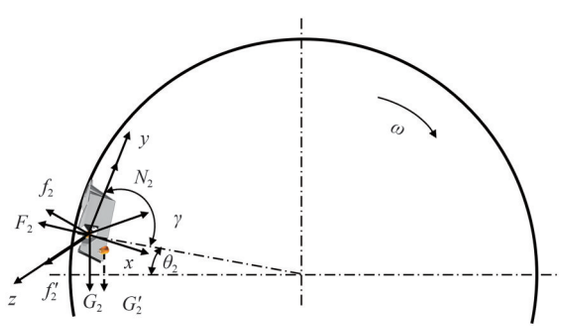


图5 种勺清种过程受力分析

Fig. 5 Force analysis during the spoon cleaning stage

由受力分析可知

$$\begin{cases} N_2 = F_2\cos\gamma + G_2\cos\theta_2 \\ f_2 = \mu N_2 \\ F_2 = m_2\omega^2 R \\ f_2' = -f_2'' \end{cases} \tag{4}$$

式中：G_2为种勺清种阶段种子所受总重力，N；m_2为种勺清种阶段种子质量，kg；θ_2为y轴与水平方向夹角，°；f_2、f_2'、f_2''为种子所示摩擦力，N；F_2为种子所受离心力，N；N_2为种子所受支持力，N。

当大豆玉米种子所受摩擦力与支持力的合力小于重力时，种子依靠自身重力完成种勺清种过程。受力关系如下

$$N_2'\cos\theta_2 + \mu m_2' g\cos\theta_2\cos\gamma < G_2' \tag{5}$$

式中，G_2'为清种阶段被清除的种子所受重力，N；m_2'为清除的种子质量，kg。

1.2.3　过桥清种过程受力分析

建立过桥清种时的空间直角坐标系。x轴垂直于支持力方向，y轴与支持力方向相同，z轴与穴播器回转轴平行且垂直于x轴。假设此时取种勺内大豆玉米种子受力平衡且处于相对静止状态，受力分析如图6所示。

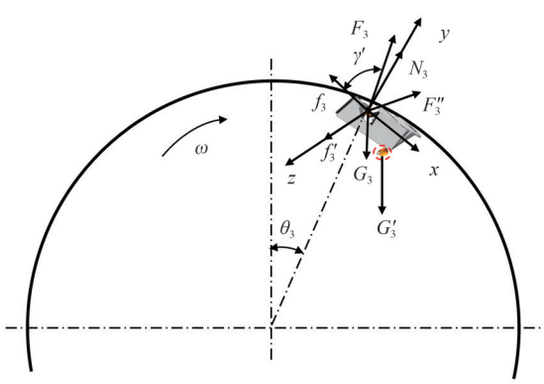


图6　种过桥清种过程受力分析

Fig. 6　Force analysis during the crossing bridge cleaning process

过桥清种阶段，大豆玉米种子在x方向与y方向的合力满足：

$$\begin{cases} \sum X = G_3\sin(\theta_3+\gamma) - f_3 - F_3\sin\gamma > 0 \\ \sum Y = G_3\cos(\theta_3+\gamma) - N_3 - F_3\cos\gamma > 0 \\ \sum Z = f_3' + f_3'' = 0 \end{cases} \tag{6}$$

其中

$$\begin{cases} f_3 = \mu N_3 \\ F_3 = m_3\omega^2 R \end{cases} \tag{7}$$

式中：G_3为过桥槽内种子所受重力，N；m_3为过桥槽内种子质量，kg；θ_3为y轴与水平方向夹角，°；f_3、f_3'、f_2''为种子所示摩擦力，N；F_3为种子所受离心力，N；N_3为种子所受支持力，N。

过桥清种过程中，穴播器角速度转速较快，通过公式(7)得出，种子通过过桥槽时所受离心力F_3远大于N_3。因此，该过程种子所受支持力忽略不计。由式(6)—(7)可得

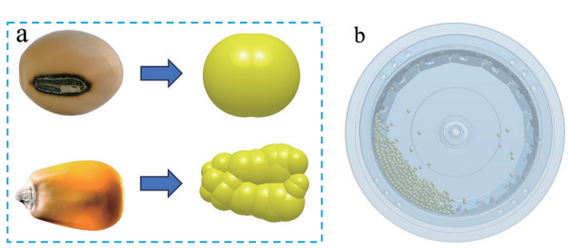
$$\omega < \sqrt{\frac{g(\sin\theta_3+\gamma') + \cos(\theta_3+\gamma')}{R(\sin\gamma' + \cos\gamma')}} \tag{8}$$

由式(8)可知，穴播器半径R、取种勺转动角θ_3及取种勺倾角γ直接影响穴播器临界转速。较多的种子进入导种区，会增加重播率。因此，过桥清种阶段需在取种勺与水平位置向竖直位置过渡时完成，θ_3极限值为90°且穴播器角速度大于零。由此得到穴播器角速度范围为$0<\omega<6.6$ rad/s。

1.3　仿真试验

1.3.1　仿真模型建立

考虑到仿真计算效率，并重点关注穴播器工作机制而非种子形状差异，本研究采用等体积球形颗粒替代真实的大豆和玉米种子进行仿真分析。利用SolidWorks软件对大豆玉米种子进行三维建模，并将其三维模型转化为.step格式。将.step格式的大豆、玉米模型导入EDEM仿真软件进行填充，如图7-a所示。为了减少仿真时间，简化穴播器三维模型，利用上述方法导入EDEM仿真软件中，如图7-b所示[10-16]。



a. 大豆、玉米颗粒模型；b. 仿真模型。

图7　种子模型及仿真模型示意图

Fig. 7　Schematic diagram of seed models and simulation models

1.3.2　评价指标

根据NY/T1628—2008《玉米免耕播种机 作业质量》[17]，本以1 000粒种子为样本总量，取大豆理论株距为180 mm，玉米理论株距150 mm，以合格率、重播率和漏播率作为穴播器性能评价指标。由于仿真条件的限制，粒距较难测量，因此，本文以大豆种子从鸭嘴正常排出3~5粒、玉米种子排出2~3粒记为合格，少于最低标准，则判定为漏播；若超过最大限定粒数，则判定为重播。

漏播率：

$$M = \frac{Z_1}{Z} \times 100\% \quad (9)$$

式中:M为漏播率,%;Z_1为粒数少于最低标准的种子粒距数;Z为测定的粒距总数。

重播率:

$$D = \frac{Z_2}{Z} \times 100\% \quad (10)$$

式中:D为重播率,%;Z_2为粒数超过最大限定粒数的种子粒距数。

合格率:

$$A = (1 - M - D) \times 100\% \quad (11)$$

式中:A为合格率,%。

1.3.3 单因素仿真试验

根据文献[18-20]确定本次仿真模拟各参数,如表1所示。颗粒工厂将种子仿真模型尺寸设为正态分布,颗粒工厂分布在穴播器充种区上方,每次仿真共生产1 000个颗粒。仿真总时长为5 s,每隔0.01 s记录一次数据。在充种区和清种区分别添加种子检测单元,用于检测充种和清种数量。

表1 EDEM参数设置

Table1 EDEM parameter settings

参数	数值	参数	数值
大豆泊松比	0.40	大豆-穴播器滚动摩擦系数	0.06
大豆剪切模量/Pa	2.17×10^8	玉米泊松比	0.46
大豆密度/(g/cm^3)	1.26	玉米剪切模量/Pa	1.41×10^8
大豆-大豆碰撞恢复系数	0.58	玉米密度/(g/cm^3)	1.15
大豆-大豆静摩擦系数	0.23	玉米-玉米碰撞恢复系数	0.18
大豆-大豆滚动摩擦系数	0.03	玉米-玉米静摩擦系数	0.20
穴播器泊松比	0.28	玉米-玉米滚动摩擦系数	0.07
穴播器剪切模量/Pa	3.5×10^{10}	玉米-穴播器碰撞恢复系数	0.62
穴播器密度/(g/cm^3)	7.85	玉米-穴播器静摩擦系数	0.48
大豆-穴播器碰撞恢复系数	0.64	玉米-穴播器滚动摩擦系数	0.09
大豆-穴播器静摩擦系数	0.21		

通过受力分析及穴播机前进速度(3~6 km/h)工况下,计算出穴播器角速度为0<ω<6.6 rad/s,因此仿真试验选取穴播器角速度的范围为0.5~6.5 rad/s。根据预试验可知,引种勺倾角直接影响穴播器充种性能。因此选取引种勺倾角α的取值范围40°~80°。过桥槽长度直接影响清种性能,因此选取过桥槽长度为5~25 mm,如表2所示。

表2 单因素试验参数表

Table 2 Single-factor evaluate parameter

水平	因素		
	穴播器转速/(rad/s)	引种勺倾角/(°)	过桥槽长/mm
1	0.5	40	5
2	2.0	50	10
3	3.5	60	15
4	5.0	70	20
5	6.5	80	25

1.3.4 响应面试验

为进一步研究上述三因素是否存在交互影响以及三因素交互作用对穴播器排种性能的影响,以穴播器角速度(A)、引种勺倾角(B)和过桥槽长度(C)为试验因素,以合格率、漏播率和重播率为试验指标进行响应面试验[21-22]。因素编码如表3所示。

表3 仿真筛分试验因素编码

Table 3 Factor code of simulation screening test

编码	因素水平		
	穴播器角速度/(rad/s)	引种勺倾角/(°)	过桥槽长度/mm
-1	3.5	60	10
0	4.5	70	15
1	5.5	80	20

1.4 田间性能试验

试验时间为2025年4月20日,试验在内蒙古自治区鄂尔多斯市悍龙园林科技有限公司试验田进行。在播种机稳定工作区域进行统计,按照表4种植参数,各播种模式进行2组试验,共统计6组试验,每组统计250个数据。当每穴大豆播种粒数在3~5粒之间时,视为播种合格;玉米每穴播种粒数在2~3粒之间时,亦视为合格。若每穴播种粒数少于上述最低标准,则判定为漏播;若超过最大限定粒数,则判定为重播。当每穴种子数量大于最大粒数时,按重播计算。基于响应面试验结果,玉米穴播器角速度取4.7 rad/s、引种勺倾角

取71.3°及过桥槽长度取15 mm。在大豆穴播器角速度取5.5 rad/s、引种勺倾角取78.8°及过桥槽长度取10 mm时。在此条件下，进行田间试验，大豆玉米种植参数如表4所示。

表4　大豆玉米种植参数

Table 4　Soybean and corn planting parameters

参数	数值
间作模式	2+2、4+4、6+2
播种深度/mm	玉米30~50大豆20~40
行距/mm	玉米40~50大豆30~35
株距/mm	大豆180，玉米株150
施肥量/(kg/hm^2)	玉米750~1 800大豆450~1 200
玉米与大豆带宽/mm	60~70

2　结果与分析

2.1　穴播器运动分析

穴播器转动时，种群具有一定流动性。种群底部的种子受摩擦力作用向上流动。当种子自身重力大于摩擦力时，种子沿种群顶部向下滑动。整个种子群呈现底部上流、中间静止、顶部回流的状态，如图8所示。在种勺清种过程中，种子受取种勺支持力作用随取种勺转动，而部分支持力较小的种子脱离取种勺。在过桥清种过程中，种子速度需大于取种勺速度，才能保证种子从引种舌顺利过渡到取种勺腔内。

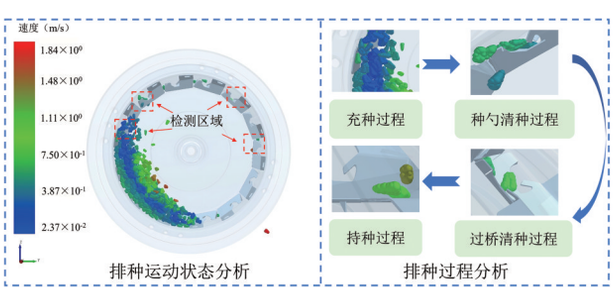


图8　穴播器仿真运动分析

Fig. 8　Simulation test diagram of dibbler

2.2　单因素试验结果

图9-a所示为不同穴播器角速度下的大豆玉米排种性能曲线。合格率随穴播器角速度的增加呈先上升后下降趋势。漏播率随穴播器角速度的增加呈先下降后缓慢上升趋势。重播率随穴播器角速度的增加呈先上升后下降再上升的趋势。穴播器角速度较低时，种群平均速度较小，流动性较差，不利于充种，导致漏播率较大。穴播器转速较高时，种子离心力较大不利于清种，导致重播率较大，而在一定范围内提高角速度有助于增强种群流动性，改善充种性能。因此，确定穴播器角速度较优范围为3.5~5.5 rad/s。

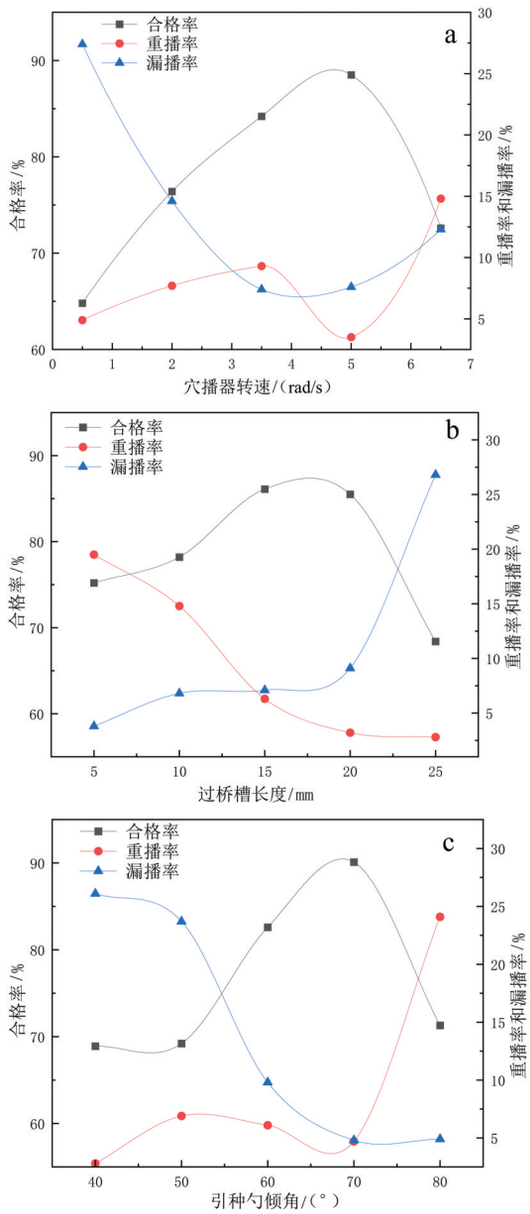


图9　不同因素下穴播器排种性能曲线

Fig. 9　Seeding performance curves of the seed drill under different conditions

图9-b所示为不同引种勺倾角下的大豆玉米排种性能曲线。合格率随引种勺倾角的增大呈先缓慢下降后上升再下降趋势。重播率随引种勺倾角的增大呈先缓慢上升后缓慢下降再上升的趋势。漏播率随引种勺倾角的增大呈下降趋势，当引种勺倾角大于70°时，漏播率基本保持不变。引种勺倾角较小时，引种勺取种数量较少，导致漏播率较大。适当增大引种勺倾角，有利于引种勺取种。因此确定引种勺倾角较优范围为60°~80°。

图9-c所示为不同过桥槽长度下的大豆玉米排种性能曲线。合格率随过桥槽长度的增加呈先上升后下

降趋势。重播率随过桥槽长度的增加呈先下降后趋于稳定。漏播率随过桥槽长度的增加呈先缓慢上升后快速上升趋势。过桥槽长度直接影响清种时间。过桥槽长度较大则清种时间较长,导种漏播率较大。过桥槽长度较小则清种时间较短,导种重播率较大。因此确定过桥槽长度的较优范围为10~20 mm。

2.3 响应面试验结果

对大豆排种响应面试验结果进行回归分析,如表5—6所示[23-24]。大豆排种的3个试验指标的回归模型拟合度极显著,且失拟项P值大于0.05,不显著,表明回归方程对试验数据的拟合较好,未控制因素对试验结果的影响较小,模型可靠性高。

剔除不显著因素后的回归方程为

$$Y_1 = 85.00 + 3.19B - 5.50AB - 4.05AC + 4.01A^2 - 1.51B^2 \quad (12)$$

$$Y_2 = 7.04 - 2.44A - 0.7375B + 1.50AC + 1.74A^2 + 2.39B^2 - 4.03C^2 \quad (13)$$

$$Y_3 = 7.82 - 1.32B + 1.15AB - 2.13AC + 2.25BC - 3.00A^2 - 1.52B^2 \quad (14)$$

通过回归系数检验得出,大豆播种合格率的各因素影响显著顺序为B、A、C,漏播率顺序为A、B、C,重播率顺序为B、C、A。

根据回归方程,绘制两两交互作用显著的因素对评价指标影响的曲面图,如图10所示[25-31]。由图10-a可知,穴播器角速度(A)与取种勺倾角(B)对合格率的交互效应显著。当取种勺倾角(B)处于高水平(80°)时,合格率随角速度(A)增大呈现先升高后降低的趋势;而当B处于低水平(60°)时,合格率随A增大则总体呈下降趋势。由图10-b可知,角速度(A)与过桥槽长度(C)对合格率也存在显著交互作用。当过桥槽长度(C)处于低水平(10 mm)时,合格率随角速度(A)增加下降明显;而当C处于高水平(20 mm)时,合格率随A变化相对平缓,仅在较高转速时略有下降。由图10-c可知,角速度(A)与过桥槽长度(C)对漏播率交互作用显著。当C处于低水平时,漏播率随A增大而降低;而

表5 大豆响应面试验方案与结果

Table 5 Soybean response surface experiment plan and results

试验序号	因素			合格率	漏播率	重播率
	A	B	C	Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%
1	−1	0	−1	83.9	9.2	2.8
2	−1	−1	0	77.4	15.8	5.7
3	−1	1	0	94.3	12.4	2.0
4	−1	0	1	93.4	4.2	8.0
5	0	−1	−1	80.3	6.9	10.7
6	0	1	−1	85.4	4.2	2.3
7	0	0	0	83.2	6.4	8.1
8	0	0	0	86.1	7.8	7.6
9	0	0	0	84.6	7.5	8.2
10	0	0	0	86.6	6.7	8.4
11	0	0	0	84.5	6.8	6.8
12	0	−1	1	79.6	4.9	7.5
13	0	1	1	88.2	5.6	8.1
14	1	0	−1	92.5	2.3	7.6
15	1	−1	0	91.7	8.5	2.3
16	1	1	0	86.6	8.0	3.2
17	1	0	1	85.8	3.3	4.3

表6 大豆回归方程分析

Table 6 Soybean regression equation analysis

方差来源	Y_1				Y_2				Y_3			
	平方和	df	F	P	平方和	df	F	P	平方和	df	F	P
模型	356.12	9	23.37	0.000 2**	168.61	9	25.37	0.000 2**	111.61	9	14.01	0.001 1**
A	7.22	1	4.26	0.077 8	47.53	1	64.36	<0.000 1**	0.15	1	0.17	0.691 7
B	81.28	1	48.00	0.000 2**	4.35	1	5.89	0.045 6*	14.05	1	15.87	0.005 3**
C	3.00	1	1.77	0.224 8	2.64	1	3.58	0.100 3	2.53	1	0.13	0.134 7
AB	121.00	1	71.46	<0.000 1**	2.10	1	2.85	0.135 4	5.29	1	5.98	0.044 4*
AC	65.61	1	38.75	0.000 4**	9.00	1	12.19	0.010 1*	18.06	1	20.41	0.002 7**
BC	3.06	1	1.81	0.220 6	2.89	1	3.91	0.088 4	20.25	1	22.88	0.002 0**
A^2	67.79	1	40.04	0.000 4**	12.78	1	17.31	0.004 2**	37.83	1	42.74	0.000 3**
B^2	9.63	1	5.69	0.048 5*	24.10	1	32.64	0.000 7**	9.76	1	11.03	0.012 8*
C^2	0.05	1	0.03	0.864 2	68.47	1	92.71	<0.000 1**	3.06	1	3.46	0.105 3
残差	11.85	7			5.17	7			6.20	7		
失拟项	4.43	3	0.79	0.556 5	3.80	3	3.69	0.119 7	4.55	3	3.68	0.120 2
误差	7.42	4			1.37	4			1.65	4		
总和	367.97	16			173.78	16			117.81	16		

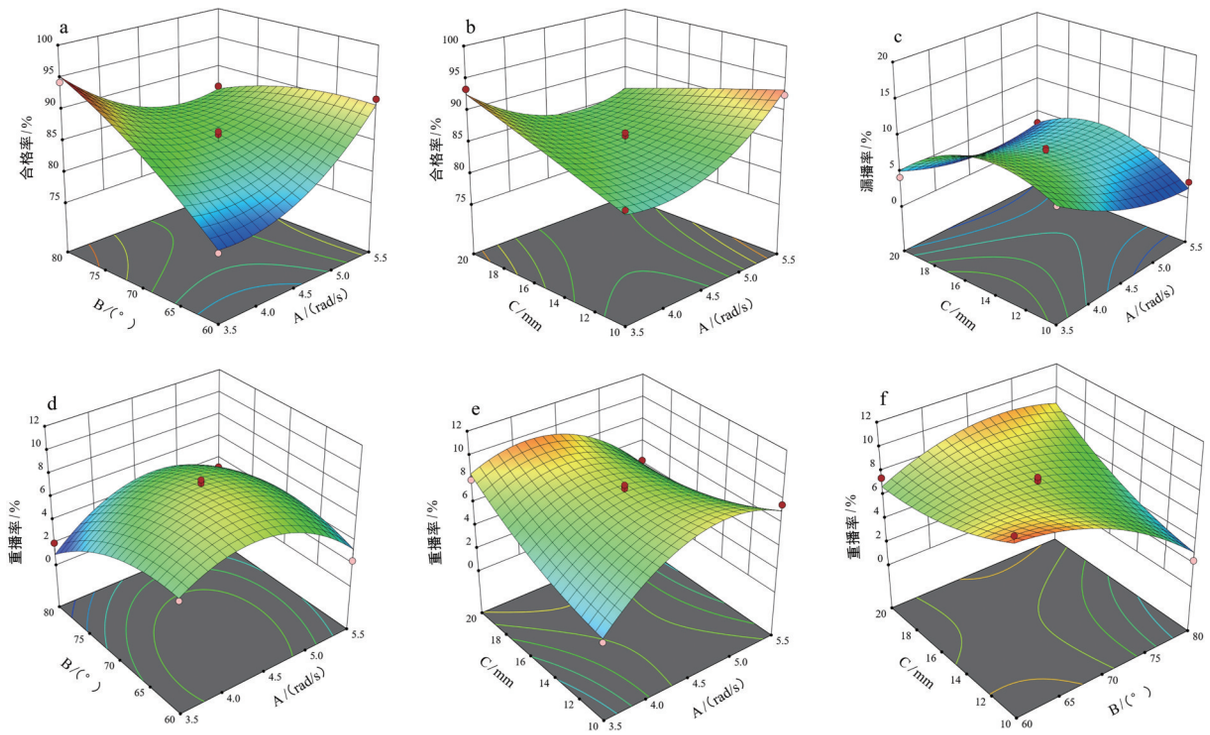


图 10　各因素交互作用对大豆排种性能影响的响应曲面

Fig. 10　Response surfaces of the interaction of numerous factors on soybean seed dispersal performance

当C处于高水平时，漏播率随A增大变化幅度较小，总体维持在较低水平。由图 10-d 可知，角速度(A)与取种勺倾角(B)对漏播率的交互影响显著。当B处于低水平时，漏播率随A增大而增加；当B处于高水平时，漏播率随A增大则表现为先降低后升高。由图 10-e 可知，角速度(A)与过桥槽长度(C)对重播率有显著交互影响。当C处于低水平时，重播率随A增大而下降；而当C处于高水平时，重播率随A增大表现为先上升后下降的趋势。由图 10-f 可知，取种勺倾角(B)与过桥槽长度(C)对重播率交互作用显著。当C处于低水平时，重播率随B增大而降低；当C处于高水平时，重播率随B增大表现为先下降后上升的趋势。

同理，根据表 7—8 对玉米排种响应面试验结果进行回归分析。玉米排种的 3 个试验指标的回归模型拟合度也极显著，且失拟项不显著$P>0.05$。这说明同样不存在其他影响评价指标的因素。

剔除不显著因素后的回归方程为

$$Y_1 = 94.04 + 1.40B - 0.7375C + 0.925AB + AC - 2.92A^2 - 6.05B^2 - 3.67C^2 \quad (15)$$

$$Y_2 = 3.02 - 0.725A + 1.1B + -0.8AB + 2.05BC + 0.615A^2 + 1.31B^2 - 3.32C^2 \quad (16)$$

$$Y_3 = 2.88 - 0.675A - 2.48B - 0.875AC - 1.77BC + 2.27A^2 + 4.72B^2 \quad (17)$$

通过回归系数检验得出，玉米播种合格率、漏播率及重播率的因素影响显著顺序均为B、A、C。

表 7　玉米响应面试验方案与结果

Table 7　Corn response surface experiment plan and results

试验序号	因素			合格率	漏播率	重播率
	A	B	C	Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%
1	−1	0	−1	87.6	7.6	4.8
2	0	1	−1	86.7	6.4	6.8
3	1	1	0	88.6	4.6	6.7
4	0	−1	1	82.5	4.8	12.5
5	0	0	0	93.6	2.5	3.7
6	1	−1	0	83.7	4.4	11.7
7	0	1	1	84.5	11.5	3.8
8	−1	0	1	84.3	8.3	7.4
9	0	0	0	94.0	3.5	2.4
10	−1	1	0	84.6	7.1	8.3
11	0	−1	−1	83.6	7.9	8.4
12	0	0	0	94.5	2.8	2.6
13	1	0	1	89.3	6.2	4.3
14	−1	−1	0	83.4	3.7	12.8
15	0	0	0	93.5	3.6	3.2
16	0	0	0	94.6	2.7	2.5
17	1	0	−1	88.6	5.7	5.2

根据回归方程，绘制两两交互作用显著的因素对评价指标影响的曲面图。如图 11 所示，各因素间的交互作用对排种性能指标的影响较为复杂。图 11-a 表

表8 玉米回归方程分析

Table 8 Corn regression equation analysis

方差来源	Y_1				Y_2				Y_3			
	平方和	df	F	P	平方和	df	F	P	平方和	df	F	P
模型	312.73	9	155.97	<0.000 1**	93.40	9	36.45	<0.000 1**	191.95	9	110.34	<0.000 1**
A	13.26	1	59.52	0.000 1**	4.20	1	14.77	0.006 3**	3.64	1	18.86	0.003 4**
B	15.68	1	70.38	<0.000 1**	9.68	1	34.00	0.000 6**	49.00	1	253.54	<0.000 1**
C	4.35	1	19.53	0.003 1**	1.28	1	4.50	0.071 7	0.980	1	5.07	0.059 0
AB	3.42	1	15.36	0.005 8**	2.56	1	8.99	0.020*	0.0625	1	0.32	0.587 4
AC	4.00	1	17.95	0.003 9**	0.01	1	0.0351	0.856 7	3.06	1	15.84	0.005 3**
BC	0.30	1	1.36	0.282 1	16.81	1	59.04	0.000 1**	12.60	1	65.20	<0.000 1**
A^2	35.90	1	161.14	<0.000 1**	1.59	1	5.59	0.050	21.74	1	112.50	<0.000 1**
B^2	153.86	1	690.62	<0.000 1**	7.28	1	25.57	0.001 5**	93.90	1	485.83	<0.000 1**
C^2	56.71	1	254.55	<0.000 1**	46.27	1	162.52	<0.000 1**	0.31	1	1.62	0.244 0
残差	1.56	7			1.99	7			1.35	7		
失拟项	0.55	3	0.72	0.589 5	1.01	3	1.36	0.375 6	0.12	3	0.14	0.933 7
误差	1.01	4			0.99	4			1.23	4		
总和	314.29	16			95.40	16			193.30	16		

明，穴播器角速度(A)与取种勺倾角(B)对合格率的交互作用极为显著。当取种勺倾角(B)处于较高水平时，合格率随角速度(A)增加先上升后下降；而当B处于较低水平时，合格率随A增加总体呈下降趋势。由图11-b可见，角速度(A)与过桥槽长度(C)对合格率也表现出极显著的交互效应。当过桥槽长度(C)较大时，合格率随A增加略有提高而后趋于平稳；而当C较小时，合格率随A增加下降较为明显。图11-c显示，角速度(A)与取种勺倾角(B)对漏播率存在显著交互影响。当B处于高水平时，漏播率随A增大先降后升；而当B处于低水平时，漏播率随A增加逐渐上升。图11-d表明，取种勺倾角(B)与过桥槽长度(C)对漏播率的影响交互作用极显著。当C取值较大时，漏播率随B增加先下降后略有回升；C取值较小时，漏播率随B增加持续降低。由图11-e可知，角速度(A)与过桥槽长度(C)对重播率的影响交互作用极为显著。当C处于较高水平时，

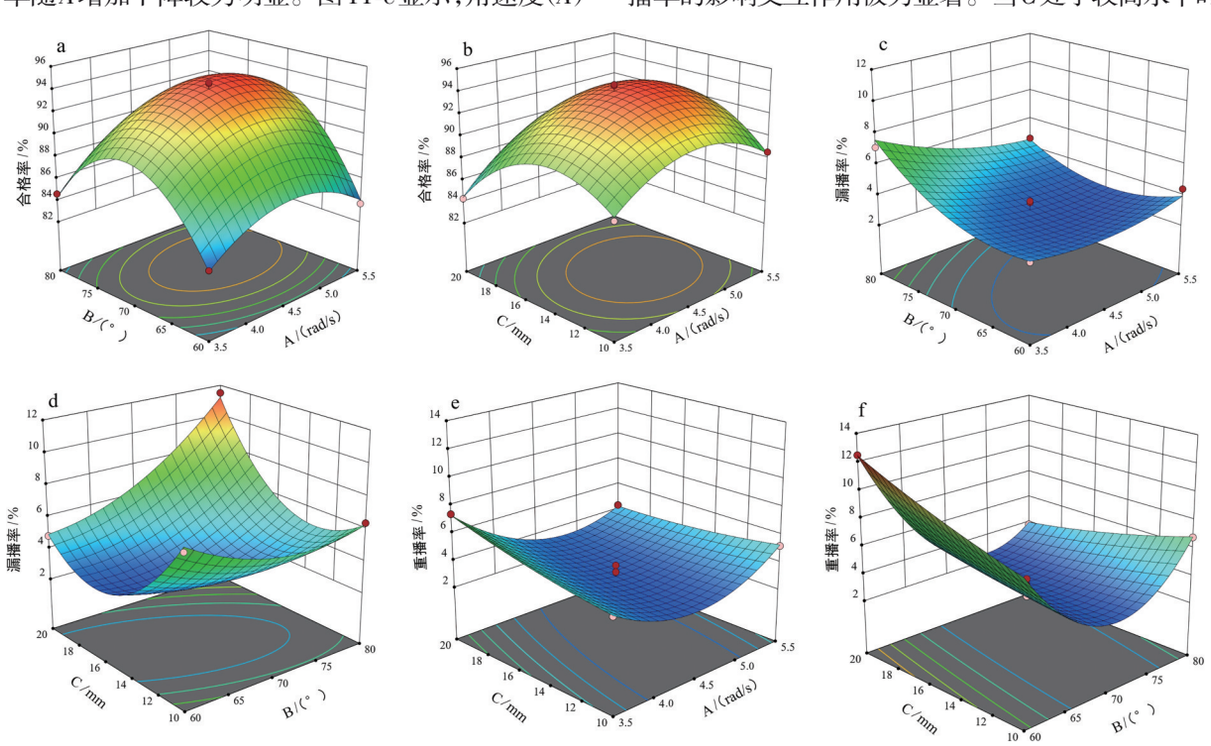


图11 各因素交互作用对玉米排种性能影响的响应曲面

Fig. 11 Response surfaces of the interaction of numerous factors on corn seed sowing performance

重播率随A增加显著上升；而当C较小时，重播率随A增加变化较为平缓，甚至略有下降。图11-f显示，取种勺倾角(B)与过桥槽长度(C)对重播率也存在极显著交互效应。当C较大时，重播率随B增加先降后升；当C较小时，重播率随B增加持续下降。

提高排种性能的关键是实现各参数间的合理匹配。因此，结合边界条件对所建立的二次回归模型进行多因素优化求解，其目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(A,B,C) \\ \min Y_2(A,B,C) \\ \min Y_3(A,B,C) \\ \text{s.t.} \begin{cases} 3.5\ \text{rad/s} \leqslant A \leqslant 5.5\ \text{rad/s} \\ 60^\circ \leqslant B \leqslant 80^\circ \\ 10\ \text{mm} \leqslant C \leqslant 20\ \text{mm} \end{cases} \end{cases} \tag{18}$$

求解可得，播种玉米时穴播器角速度为4.7 rad/s、引种勺倾角为71.3°及过桥槽长度为15 mm时，穴播器工作性能达到最优。此时合格率、漏播率及重播率分别为94.3%、2.98%及2.6%。播种大豆时穴播器角速度为5.5 rad/s、引种勺倾角为78.8°及过桥槽长度为10 mm时，穴播器工作性能达到最优。此时合格率、漏播率及重播率分别为89.3%、2.5%及3.7%。

2.4　验证试验结果

田间验证试验结果见表9。田间试验结果与仿真试验结果误差较小，这进一步验证了离散元法模拟试验的可行性。通过对大豆玉米出苗情况分析发现，变容勺式大豆玉米精量穴播器排种性能满足大豆玉米种植农艺要求，图12为大豆玉米长势情况。该穴播器具有结构简单、成本低的优点。它适合中国内蒙古大豆玉米带状种植区推广使用，可进一步推动大豆玉米带状复合机械化种植技术。

表9　田间验证试验结果

Table 9　Field validation test results

种植模式	平均合格率/%		平均漏播率/%		平均重播率/%	
	大豆	玉米	大豆	玉米	大豆	玉米
2+2	90.2	93.8	2.9	3.0	3.5	2.8
4+4	89.8	93.9	2.6	2.9	3.8	2.7
2+6	89.7	94.4	2.5	2.8	2.9	2.6



图12　田间试验及大豆玉米长势情况

Fig. 12　Field trials and the crop growth of soybeans and corn

3　讨论与结论

①本研究成功引入了一种适用于大豆玉米带状复合种植的变容勺式精量穴播器，其核心在于可调容积的上、下取种勺结构，能够适应大豆和玉米不同的单粒播种量要求。且通过对充种、种勺清种和过桥清种3个关键阶段的种子进行受力分析，建立了力学模型，推导出穴播器角速度的理论工作范围为$0<\omega<6.6$ rad/s，为后续试验参数设置提供了理论依据。

②利用EDEM离散元仿真技术，结合单因素试验和Box-Behnken响应面试验设计，系统研究了穴播器角速度、引种勺倾角和过桥槽长度对排种性能的影响及其交互作用，并建立了回归模型。优化得到玉米播种最佳参数组合为穴播器角速度4.7 rad/s、引种勺倾角71.3°、过桥槽长度15 mm，大豆播种最佳参数组合为穴播器角速度5.5 rad/s、引种勺倾角78.8°、过桥槽长度10 mm。

③在内蒙古鄂尔多斯市田间试验田，采用“2+2”、“4+4”、“6+2”3种带状种植模式进行了性能验证试验。试验结果表明，在优化参数下，大豆播种平均合格率89.2%~90.2%、漏播率2.5%~2.9%、重播率2.9%~3.8%；玉米播种平均合格率93.8%~94.4%、漏播率2.8%~3.0%、重播率2.6%~2.8%。各项指标均达到农艺要求，且与仿真优化结果误差在接受范围内，验证了仿真模型的可靠性和参数优化的有效性。

参考文献：

[1]　刘　燕，陈　彬，于庆旭，等. 大豆玉米带状复合种植机械化技术与装备研究进展[J]. 中国农机化学报，2023，44(1)：39-47.

[2] 杨钰莹,司 伟. 大豆玉米带状复合种植:技术模式、成本收益与补贴政策[J]. 农业经济问题,2023,44(1):49-63.

[3] 任定林,刘 涛,夏守浩,等. 玉米大豆兼用腔盘组合孔式排种盘设计与充种性能试验[J]. 农业机械学报,2024,55(2):73-89.

[4] 崔文芳,秦德志,陈 静,等. 玉米大豆不同间作系统光合特性与产量边际效应[J]. 农业机械学报,2023,54(8):309-319.

[5] 任 领,张黎骅,丁国辉,等. 2BF-5型玉米-大豆带状间作精量播种机设计与试验[J]. 河南农业大学学报,2019,53(2):207-212+226.

[6] 薛 荣. 大豆玉米带状复合种植精量播种机的设计研究[J]. 农业开发与装备,2023(7):139-142.

[7] 钱 营,范宝鹤,郭开治. 2MBDYF-5型大豆玉米复合铺膜播种机的设计[J]. 机械研究与应用,2024,37(6):48-51.

[8] 陈小龙,赵元凤,张海勃. 大豆玉米带状复合种植模式与技术:以内蒙古为例[J]. 中国农机化学报,2023,44(1):48-52+64.

[9] DONG W X,ZHANG A B,LIU F,et al. Design and performance test of variable-capacity spoon-type oat precision hill seeder[J]. Agriculture,2025,15(9):986.

[10] 于庆旭,刘 燕,陈小兵,等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(2):123-132.

[11] 王宪良,钟晓康,耿元乐,等. 基于离散元非线性弹塑性接触模型的免耕土壤参数标定[J]. 农业工程学报,2021,37(23):100-107.

[12] YANG L,LI J W,LAI Q H,et al. Discrete element contact model and parameter calibration for clayey soil particles in the Southwest hill and mountain region[J]. Journal of Terramechanics,2024,111:73-87.

[13] FANG M,YU Z H,ZHANG W J,et al. Friction coefficient calibration of corn stalk particle mixtures using Plackett-Burman design and response surface methodology[J]. Powder Technology,2022,396:731-742.

[14] 廖洋洋,尤 泳,王德成,等. 燕麦和箭筈豌豆混合种子离散元模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):14-22.

[15] MA X J,LIU M,HOU Z F,et al. Calibration and experimental studies on the mixing parameters of red clover seeds and coated powders [J]. Processes, 2022, 10(11):2280.

[16] 田辛亮,丛 旭,齐江涛,等. 黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报,2021,52(10):100-108+242.

[17] 中华人民共和国农业部. 玉米免耕播种机作业质量:NY/T 1628—2008[S]. 北京:中国农业出版社,2008.

[18] BORODICH F M,GALANOV B A,KEER L M,et al. The JKR-type adhesive contact problems for transversely isotropic elastic solids [J]. Mechanics of Materials,2014,75:34-44.

[19] WALUNJ A,CHEN Y,TIAN Y Y,et al. Modeling soil-plant-machine dynamics using discrete element method:a review[J]. Agronomy,2023,13(5):1260.

[20] ZHOU L,DONG Q,YU J Q,et al. Validation and calibration of maize seed-soil inter-parameters based on the discrete element method[J]. Agronomy,2023,13(8):2115.

[21] 徐向宏,何明珠. 试验设计与Design-Expert SPSS应用[M]. 北京:科学出版社,2016.

[22] 王建楠,谢焕雄,胡志超,等. 甩盘滚筒式花生种子机械化包衣工艺参数优化[J]. 农业工程学报,2017,33(7):43-50.

[23] 陈 魁. 试验设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.

[24] 葛宜元. 试验设计方法与Design-Expert软件应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2015.

[25] 陈坤杰,贺鑫业,祁恒阳,等. 海苔片热压粘合工艺参数试验优化[J]. 农业机械学报,2023,54(4):407-415.

[26] 刘春山,陈思羽,肖世伟,等. 稻谷变温均质干燥装置工艺优化与性能试验[J]. 农业机械学报,2023,54(S1):366-372.

[27] 马学杰,刘 敏,侯占峰,等. 小粒牧草种子丸粒化包衣数值模拟与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(2):43-52.

[28] 何瑞银,王建林,徐高明,等. 限制充种姿态-正负压式小麦精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):39-49+167.

[29] 姚福强,王永维,郝一枫,等. 气力式杂交水稻制种授粉机授粉管结构参数优化[J]. 农业工程学报,2020,36(18):18-25.

[30] 刘 飞,赵满全. 玉米播种铺膜机的设计及排种装置性能试验[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2015,36(3):93-96.

[31] 张石平,赵 湛. 振动气吸式精密排种器自检测吸嘴设计与试验[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2015,36(5):79-83.