

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.008

# 凸包异形孔窝眼轮式人参精密排种器设计与试验

赖庆辉 贾广鑫 苏微 洪方伟 赵瑾汶

(昆明理工大学农业与食品学院, 昆明 650500)

**摘要:** 针对人参种子流动性差,导致排种器在充种环节漏充严重、伤种率高等问题,采用增大种群扰动、减小局部种间摩擦力的方法,提高排种器的充种性能,并基于此设计了一种凸包异形孔窝眼轮式精密排种器。通过对充种区种子受力状态和运动状态进行分析,阐明了凸包异形孔结构提高排种器充种性能的机理;进行理论计算和对充种过程运动学分析,利用 EDEM 软件进行了单因素仿真试验,分析了不同结构参数对种群的影响,并确定了窝眼轮的结构参数;以窝眼轮转速、凸包高径比和种层高度为试验因素,以合格指数、重播指数和漏播指数为试验指标,进行了二次回归正交旋转组合试验。试验结果表明:影响合格指数的主次顺序依次为凸包高径比、窝眼轮转速、种层高度;当窝眼轮转速为 29.75 r/min、凸包高径比为 0.43、种层高度为 53.92 mm 时,充种性能最佳,此时合格指数为 95.59%、重播指数为 2.97%、漏播指数为 1.40%。为验证排种器的工作性能,进行了台架试验和田间试验,结果表明,凸包异形孔窝眼轮式精密排种器的充种性能较好,满足人参播种要求。

**关键词:** 人参;精密排种器;凸包异形孔;性能试验

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)07-0060-12

OSID:



## Design and Test of Ginseng Precision Special-hole Type Seed-metering Device with Convex Hull

LAI Qinghui JIA Guangxin SU Wei HONG Fangwei ZHAO Jinwen

(Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the poor fluidity of ginseng seeds caused seed-metering device the serious shortage of filling-seed and the easy damage of seeds. The method of enlarging seeds disturbance and reducing local seeds friction was adopted to improve the filling-seed performance of seed-metering device. And based on this a precision special-hole type seed-metering device with convex hull was designed. Through the analysis of the force and motion state of seeds in the filling-seed area, the mechanism of convex hull and special-hole improving filling-seed performance of seed-metering device was expounded. And through the calculation of the kinematic analysis of theoretical calculation to filling-seed process, the single factor simulation test was conducted through the EDEM, the influence of different structural parameters on seeds was analyzed and the structural parameters of special-hole were ascertained. Then the quadratic regression orthogonal rotation combination test was done, with the rotation rate of special-hole, height diameter ratio of convex hull and seed's height as the test factors, and the qualified index, the multiple index and the missing index as the test index. Experimental results showed that the primary and secondary order of influencing conformity index was height diameter ratio of convex hull, the rotation rate of special-hole and seed's height. When the rotation rate of special-hole was 29.75 r/min, height diameter ratio of convex hull was 0.43 and seed's height was 53.92 mm, filling-seed performance was the optimum, the qualified index was 95.59%, the multiple index was 2.97% and the missing index was 1.40%. The bench test and field experiment were conducted to testify the working performance of seed-metering device, which showed that the precision special-hole type seed-metering device with convex hull had the filling-seed better performance and can meet the requirements of ginseng sow.

**Key words:** ginseng; seed-metering device; convex hull and special-hole; performance test

收稿日期: 2020-03-27 修回日期: 2020-05-15

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51975265、31960366)、国家重点研发计划项目(2017YFD0700600-2017YFD0700604)、云南省重大科技专项(2016ZF001、2017ZF001、2018ZC001-3、2018ZC001-4、2018ZC001-5)和云南省高校工程研究中心建设计划项目

**作者简介:** 赖庆辉(1980—),男,副教授,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail: laiqinghui007@163.com

**通信作者:** 苏微(1979—),女,副教授,主要从事农业机械化生产和管理研究,E-mail: laisubo@163.com

## 0 引言

近年来,人参播种采用1.2~1.5 m幅宽、4 cm×5 cm株行距床单粒点播栽培技术,成为培育优质高档人参的必选。随着人参种植面积的逐年增加,人参播种环节存在的机械化程度低、人工点播劳动强度大、播种成本高等问题,严重制约了人参产业化和规模化发展,因此,人参精密播种机械化问题亟待解决<sup>[1-3]</sup>。

排种器是实现精密播种的核心部件。我国人参的密集播种要求限制了传统气力式排种器在人参精密播种中的应用,一些新型气力式排种器的研究仍处于实验室阶段<sup>[4-7]</sup>,而结构简单、动力配备适应性强、能实现密集精密播种的窝眼轮式精密排种器成为解决人参精密播种的首选<sup>[8-10]</sup>。窝眼轮式精密排种器已在大豆、油菜和三七等近圆形种子的单粒精密播种中得到了广泛应用<sup>[11-14]</sup>,而对于形状不规则、播种前经催芽处理后有裂口、流动性差的人参种子,在充种过程中具有不确定性和复杂性,出现充种率低、漏充严重等问题。为提高窝眼轮式排种器的充种性能,国内外专家进行的研究大致分为两类:在排种器的基础上增设其他装置,对种子起到定向充种作用<sup>[15-16]</sup>;设计特殊形状的型孔或改变型孔分布,以增加对种群扰动作用<sup>[17-19]</sup>。但是,在排种器上增加其他装置使排种器结构变得复杂,改变型孔分布导致播种行距整齐性差,不利于田间管理。因此,解决人参种子对窝眼轮式排种器适应性差,进而造成充种困难的问题成为本文研究的关键。

为此,提出一种凸包异形孔窝眼轮式人参精密排种器,通过理论计算和离散元仿真试验分析得到结构参数和工作参数,通过台架试验和田间试验对排种器的充种性能和工作性能进行验证,以期解决人参种子对窝眼轮式排种器适应性差的难题。

## 1 排种器工作原理与充种过程分析

### 1.1 排种器工作原理

凸包异形孔窝眼轮式人参精密排种器为集排式排种器,本文以3行排种器作为研究对象,结构如图1所示。排种器主要由壳体、扭簧强制投种装置、窝眼轮、挡种毛刷、齿形清种板、毛刷轮、传动机构、柔性护种板和投种装置调节旋钮组成。

如图2,排种器工作时,动力从毛刷轮端输入经传动机构带动窝眼轮转动;工作状态下,窝眼轮表面的凸包结构扰动种群,“沸腾”状态的种子在重力与种间作用力的共同作用下充入异形孔(由导种槽和型孔构成),毛刷轮凭借与窝眼轮的旋转速度差将

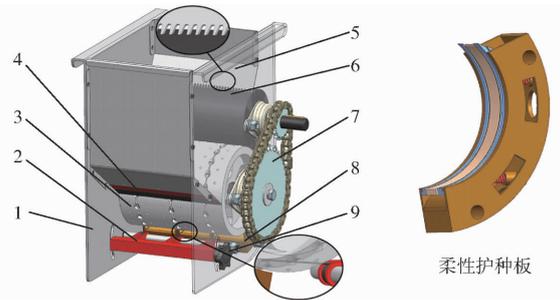


图1 凸包异形孔窝眼轮式人参精密排种器示意图  
Fig.1 Structure sketch of ginseng precision special-hole type seed-metering device with convex hull

1.壳体 2.扭簧强制投种装置 3.窝眼轮 4.挡种毛刷 5.齿形清种板 6.毛刷轮 7.传动机构 8.柔性护种板 9.投种装置调节旋钮

窝眼轮轮缘多余的种子刷去,齿形清种板可将粘附在毛刷轮表面的种子清除;充入异形孔的种子随排种轮经护种区到达投种点,为保证种子完全投出,利用扭簧强制投种装置强制投种。为降低对种子的损伤,柔性护种板由曲板和护种板壳两部分构成,二者通过弹簧连接,可对种子受力起到缓冲作用;曲板内侧设计有与凸包结构相对应的内环槽,使柔性护种板在起到护种作用的同时又保证了窝眼轮的通过性。

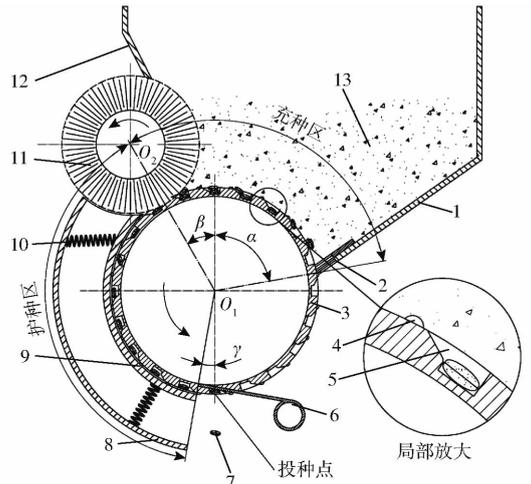


图2 排种器工作示意图

Fig.2 Work diagram of seed-metering device

1.壳体 2.挡种毛刷 3.窝眼轮 4.凸包 5.异形孔 6.扭簧 7.人参种子 8.护种板外壳 9.曲板 10.弹簧 11.毛刷轮 12.齿形清种板 13.种层

### 1.2 排种器充种过程分析

排种器的播种精度取决于充种过程,充种过程是由种子自身重力,种子间和种子与窝眼轮间的正压力、滑动摩擦力和滚动摩擦力等构成的不断变化的动力学系统,是将种子从种群中分离出来的复杂过程<sup>[20]</sup>。因此,充种过程可分为种群离散和脱离种群两个阶段。

在种群离散阶段,贴近窝眼轮的种层受到窝眼

轮的托持力和摩擦力,种子在托持力和摩擦力的作用下克服种间阻力而产生滑移和翻滚,形成种层波动,目标种子由静止状态转变为运动状态,更容易脱离种群,且目标种子在重力场中的不断运动最终会趋于稳定状态。一定程度上,充种区内种层波动越大种群离散程度越大,越有利于充种。为在该阶段提高充种性能,在窝眼轮上增加凸包,该结构对种子起到了一定的托持作用并增大了种子与窝眼轮间的摩擦力,配合异形孔对种群的作用,使种群产生更大、更稳定而连续的波动,种子流动性提高,充种率增加,如图3所示。

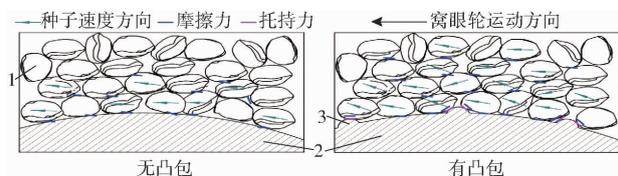


图3 不同形式窝眼轮在种群离散阶段种子接触状态

Fig. 3 Seed contact state in population dispersion stage

with different seed-metering wheels

1. 充种区内种子 2. 窝眼轮 3. 窝眼轮上的凸包

在脱离种群阶段,稳定状态下的种子在自身重力,以及种子间和种子与窝眼轮间的力作用下占据型孔优势位置,从而被完全囊入型孔,并随着窝眼轮的转动脱离种群。为提高该阶段的充种性能,将型孔设计成带有导种槽的异形孔。导种槽可使目标种子在充种前产生趋于流向型孔的趋势,克服第一层种层因种间摩擦力大于其自身重力在型孔处发生临时“结拱”而导致的漏播现象,如图4所示。

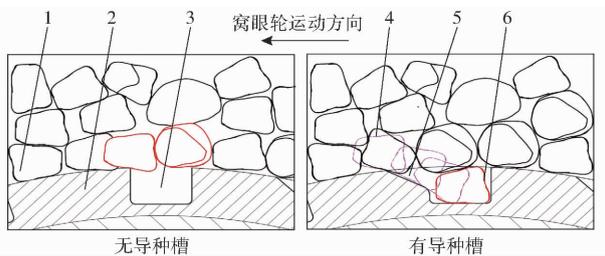


图4 目标种子在不同型孔下的充种状态

Fig. 4 Filling-seed condition of target seed under different orifices

1. 充种区内种子 2. 窝眼轮 3. 型孔 4. 目标种子运动轨迹 5. 导种槽 6. 目标种子

## 2 关键部件设计

### 2.1 人参种子基本参数

种子自身的物理特性是排种器设计重要参考依据。播种时催芽人参种子平均含水率 $\omega'$ 为34.8%;平均千粒质量 $m_H$ 为43.24 g;平均自然休止角 $\varphi$ 为30.05°;人参种子三轴尺寸平均值,长 $L$ 、宽 $W$ 、厚 $H$ 分别为5.8、4.7、3.0 mm,球度 $S_p$ 为74.84%,呈“肾

形”扁平状。

### 2.2 窝眼轮参数设计

窝眼轮是窝眼轮式排种器的关键部件,其主要结构参数包括窝眼轮直径、型孔个数、型孔尺寸、凸包分布距离(与型孔中心距)、凸包高径比。窝眼轮结构示意图如图5所示,其中 $d_1$ 为窝眼轮直径, $d_2$ 为强制投种沟槽直径, $d_3$ 为驱动轮毂直径, $A$ 为型孔长度, $B$ 为型孔宽度, $C$ 为型孔深度, $B_1$ 为储种深度, $A_1$ 为导种槽长度, $\theta$ 为导种槽倾角, $L_s$ 为凸包分布距离, $\varepsilon$ 为凸包分布角。

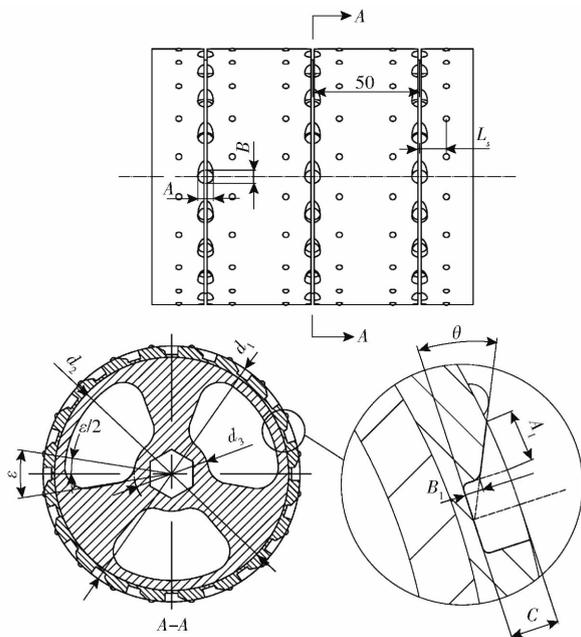


图5 窝眼轮结构示意图

Fig. 5 Schematic of seed-metering wheel structure

#### 2.2.1 窝眼轮直径

窝眼轮直径是排种器的基本结构参数之一,决定排种器结构分布和其他部件的结构尺寸,是影响充种性能的重要因素。窝眼轮直径决定型孔处于充种区的时间。为研究窝眼轮各参数对充种时间 $T$ 的影响,建立充种时间 $T$ 的方程

$$\begin{cases} T = \frac{\pi\gamma}{180\omega} \\ \omega = \frac{2\pi n}{60} \\ \frac{v_m}{S} = \frac{zn}{60} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\gamma$ ——种子充填角, (°)

$\omega$ ——窝眼轮角速度, rad/s

$n$ ——窝眼轮转速, r/min

$v_m$ ——播种机作业速度, m/s

$S$ ——株距, m

$z$ ——型孔数量

整理公式(1)可得

$$T = \frac{\gamma z S}{360 v_m} \quad (2)$$

由式(2)可知,当种子充填角 $\gamma$ 、播种机作业速度 $v_m$ 和株距 $S$ 一定时,充种时间 $T$ 只与型孔数量 $z$ 有关,故窝眼轮直径不宜太小,因其曲率大不利于充种。参考常用窝眼轮直径80~140 mm,本文选用窝眼轮直径为120 mm<sup>[21]</sup>。

### 2.2.2 异形孔设计

型孔的形状和尺寸取决于种子的形状和尺寸。催芽后人参种子三轴尺寸满足 $L > W > H$ ,根据最小势能原则,确定种子在“平躺”状态下为最稳定状态,种子以长度方向充入型孔的几率最高。为便于充种和投种,将型孔设计为横向分布并带有导种槽的非对称结构,其中型孔的长度、宽度和深度应满足

$$\begin{cases} L_{\max} < A < L + H_{\min} \\ W_{\max} < B < W + H_{\min} \\ H_{\max} < C < 2H_{\min} \\ C < B < A \\ B_1 > \frac{2}{3}C \end{cases} \quad (3)$$

式中  $L_{\max}$ ——人参种子长度最大值,mm

$W_{\max}$ ——人参种子宽度最大值,mm

$H_{\max}$ ——人参种子厚度最大值,mm

$H_{\min}$ ——人参种子厚度最小值,mm

试验测得人参种子长、宽、厚最大值分别为6.5、5.8、3.6 mm,厚度最小值为2.0 mm。考虑人参种子为扁平状,因此选择型孔长度 $A$ 、宽度 $B$ 、深度 $C$ 分别为7.2、6.2、3.8 mm,正视图为椭圆的柱状型孔。

导种槽起导种作用,其倾角 $\theta$ (大于种子与窝眼轮材料的最大静摩擦角 $\varphi_{\text{abs}}$ ,试验测得 $\varphi_{\text{abs}} = 24.6^\circ$ )即为加工导种槽的平头铣刀与型孔底面的加工倾角,考虑充种时种子受损最小,导种槽延伸至型孔最深处,加工出来的异形孔类似瓢形。根据图5结构示意图,可满足几何关系

$$\begin{cases} A_1 = \frac{C}{\tan\theta} - \frac{1}{2}B \\ B_1 = C - A_1 \tan\theta \end{cases} \quad (4)$$

当导种槽倾角大于 $45^\circ$ 时,导种槽长度 $A_1$ 减小,不利于充种,故初选导种槽倾角 $\theta$ 为 $35^\circ$ ,则导种槽长度 $A_1$ 与储种深度 $B_1$ 分别为2.3、2.4 mm。

根据窝眼轮直径和异形孔基本尺寸,以人参精密播种要求设计每周异形孔数,在保证异形孔强度的要求下,异形孔间相隔距离为7.5 mm,异形孔数最大为24个。按照人参播种株距4 cm,窝眼轮线速度不超过0.3 m/s,播种机作业速度2 km/h计算,窝

眼轮异形孔数 $z$ 满足

$$z = \frac{\pi d_1 v_m}{S v_w} \quad (5)$$

其中

$$v_w = \omega R \quad (6)$$

式中  $v_w$ ——窝眼轮线速度,m/s

$R$ ——窝眼轮半径,m

由式(5)可知窝眼轮每周异形孔数 $z \geq 17.45$ ,确定为18~24之间。

### 2.2.3 充种过程运动学分析

异形孔的充种性能是评价排种器工作质量的重要指标,种子从窝眼轮表面运动到异形孔内部受力复杂,选取异形孔边缘的种子对其充种过程进行运动学分析,如图6所示,种子顺利囊入异形孔的极限相对速度应满足

$$v_w \leq v_r \left( D_n - \frac{d_0}{2} \right) \sqrt{\frac{g}{d_0}} \quad (7)$$

式中  $v_r$ ——种子顺利囊入异形孔的极限相对速度,m/s

$D_n$ ——型孔最大开口尺寸,mm

$d_0$ ——种子的当量直径,mm

$g$ ——重力加速度, $\text{m/s}^2$

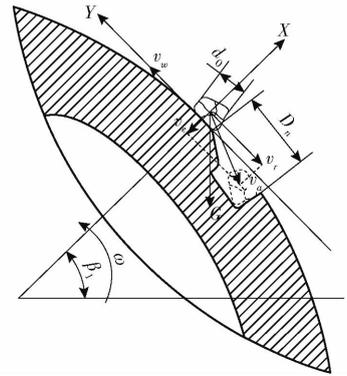


图6 种子充入异形孔的运动学分析示意图

Fig.6 Diagram of seed filling special-hole kinematic analysis

由公式(6)、(7)可以确定窝眼轮转速的取值范围

$$n \leq \frac{30}{\pi R} \left( D_n - \frac{d_0}{2} \right) \sqrt{\frac{g}{d_0}} \quad (8)$$

已知 $R = 60$  mm,根据异形孔设计参数 $D_n = B + A_1 = 8.1$  mm, $d_0 = (W + H)/2 = 3.85$  mm,代入公式(8)可得 $n \leq 49.58$  r/min。

### 2.2.4 凸包设计

凸包是稳定充种区摩擦力,使离散种子处于稳定状态和提高充种率的关键结构。设计凸包相间分布在型孔两侧,如图5所示。凸包是球体的部分曲面,其高径比需要满足一定的条件才能起到扰动种群的作用<sup>[22]</sup>,要求凸包摩擦角 $\delta$ 大于种子与窝眼轮

的静摩擦角,结构示意图如图7所示,几何关系满足

$$\begin{cases} r^2 = (r-h)^2 + \frac{1}{4}d^2 \\ \frac{2h}{d} > \tan\varphi_{\text{abs}} \\ \frac{A+d}{2} \leq L_s \leq 25 - \left(L_{\text{max}} + \frac{d}{2}\right) \end{cases} \quad (9)$$

式中  $r$ ——凸包基球半径,mm

$h$ ——凸包高度,mm

$d$ ——凸包基座直径,mm

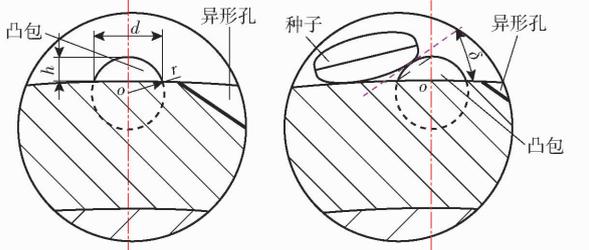


图7 凸包结构示意图

Fig.7 Schematic of convex hull structure

在保证凸包不携种的前提下,凸包基球半径越大对种群的扰动性越强,因此需要凸包高径比满足

$$\xi = \frac{h}{d} \leq 0.5 \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} h \leq H_{\text{min}} \\ d \leq W_{\text{min}} \end{cases} \quad (11)$$

式中  $\xi$ ——高径比

$W_{\text{min}}$ ——人参种子宽度最小值,mm

人参种子宽度最小值为3.5 mm,本文定义凸包基座直径  $d$  为3.2 mm,根据公式(9)~(11)确定凸包高径比在0.24~0.50之间,凸包分布距离在5.2~23.4 mm之间。

### 3 EDEM 离散元仿真试验

#### 3.1 仿真试验模型建立及仿真参数确定

##### 3.1.1 仿真试验模型建立

以长白山地区常见的“大马牙”人参种子作为建模对象,选取与三轴尺寸平均值相近的人参种子,利用三维激光扫描得到人参种子的三维空间点云数据,运用逆向工程技术获得人参种子真实三维几何模型。将模型导入 EDEM 软件并利用非球形颗粒的快速填充功能,得到种子的多球面聚合颗粒模型,如图8所示,图中由左到右依次为种子的真实图像、三维几何模型和多球面聚合颗粒模型。本文选用颗粒-颗粒和颗粒-排种器的接触模型均为 Hertz-Mindlin 无滑移动接触模型。

建立排种器仿真试验模型,为减少仿真试验计算量,去除无接触部件,在 NX 中创建3行排种器三

维模型并导入到 EDEM 中,如图9所示。



图8 人参种子实物图与仿真模型

Fig.8 Real figure and simulation models of ginseng seed

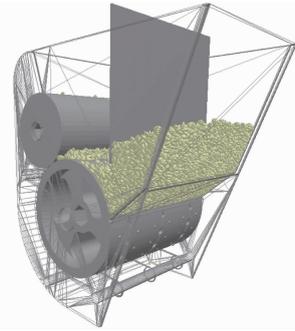


图9 排种器仿真模型

Fig.9 Simulation models of seed-metering device

##### 3.1.2 仿真参数

排种器中与种子接触的部件有壳体、窝眼轮、毛刷轮和清种扭簧,其中壳体和清种扭簧为不锈钢材料,窝眼轮和毛刷轮的刷丝为 ABS 塑料。经参数标定后确定颗粒-颗粒和颗粒-几何模型的接触参数,人参颗粒、不锈钢和 ABS 塑料的本征参数及相互间的接触参数如表1所示<sup>[23-24]</sup>。

表1 离散元仿真参数

Tab.1 Simulation parameters of EDEM

参数	人参颗粒	不锈钢	ABS 塑料
泊松比	0.37	0.30	0.34
剪切模量/Pa	$1.28 \times 10^7$	$7.0 \times 10^{10}$	$3.0 \times 10^9$
密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	0.972	7.800	1.250
碰撞恢复系数(与人参颗粒)	0.431	0.465	0.321
静摩擦因数(与人参颗粒)	0.613	0.414	0.457
滚动摩擦因数(与人参颗粒)	0.087	0.075	0.060

##### 3.2 单因素仿真试验

为使参数设计进一步具体化,对排种器的充种性能进行单因素仿真试验分析,依据现有的研究成果<sup>[25-26]</sup>,确定设计参数为异形孔数、导种槽倾角、凸包分布距离和毛刷轮与窝眼轮的线速比,定义各试验因素的固定值为20、35°、14.5 mm和1.7。以充种单粒率(1粒/孔)和漏充率(0粒/孔)为试验指标。充种区种群的离散程度和第1层种子与窝眼轮的相对运动状态是影响充种性能的重要因素,因此结合 EDEM 软件的后处理功能,采用局部种群质量比率和第1层种子与窝眼轮接触的

单粒平均法向力,分别衡量不同时步下的种群离散程度和第 1 层种子的运动状态。其中局部种群质量比率越小,证明种群离散程度越大。监测局部种群质量比率需要在种群中建立监测器,如图 10 所示,输出每个时间步长下监测器中种子质量进而得到局部种群质量比率

$$\eta_i = \frac{M_i}{\rho V_k} \quad (12)$$

式中  $\eta_i$ —— $i$  时刻局部种群质量比率  
 $M_i$ —— $i$  时刻监测器内种子质量, g  
 $\rho$ ——颗粒密度, g/cm<sup>3</sup>  
 $V_k$ ——监测器体积, cm<sup>3</sup>

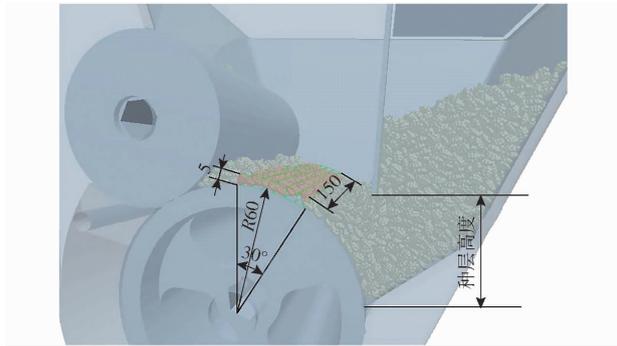


图 10 仿真试验建立的监测器

Fig. 10 Bin group built in simulation test

仿真设定窝眼轮转速为 31.25 r/min (株距为 4 cm,作业速度为 1.5 km/h 左右),每组仿真试验从排种器运转稳定后开始输出记录 10 s 试验数据,本文数据输出时间区间为 3 ~ 13 s,每排统计 100 粒种子。

### 3.2.1 异形孔数

按照 2.2.2 节的参数设计结果,分析异形孔数分别为 18、20、22 和 24 时对充种过程的影响,试验结果如表 2 所示。

由表 2 可知,随着异形孔数的增加,充种单粒率先增加后减小;相比较漏充率变化不大。为进一步分析异形孔数对充种单粒率的影响,分别导出不同试验局部种群质量比率和第 1 层种子与窝眼轮接触的单粒平均法向力。如图 11 所示。当异形孔数为 18 时,法向力波动较大,种群不稳定不利于充种;当异形孔数为 22 和 24 时法向力相对稳定,但随着异形孔数的增加单个异形孔充种时间变短,充种单粒率减小,其变异系数增大。异形孔数为 20 时,充种单粒率较高,单粒率变异系数较小,因此确定异形孔数为 20 个。

### 3.2.2 导种槽倾角

导种槽倾角决定着异形孔的容积,是影响充种性能的重要因素之一,结合 2.2.2 节的参数设计分

析导种槽倾角为 25°、35°、45° 和 90° (即无导种槽时)对充种过程的影响,试验结果如表 3 所示。

表 2 不同异形孔数的仿真结果

Tab. 2 Simulation results of different number of special-holes

异形孔数	试验序号	单粒率	漏充率	单粒率平均值	单粒率变异系数	漏充率平均值	漏充率变异系数
18	1	89	4				
	2	93	3	89.67	3.41	3.67	15.75
	3	87	4				
20	1	95	2				
	2	96	2	95.33	0.61	2.33	24.74
	3	95	3				
22	1	94	2				
	2	91	4	93.00	1.86	3.00	33.33
	3	94	3				
24	1	92	3				
	2	90	3	91.67	1.67	3.00	0
	3	93	3				

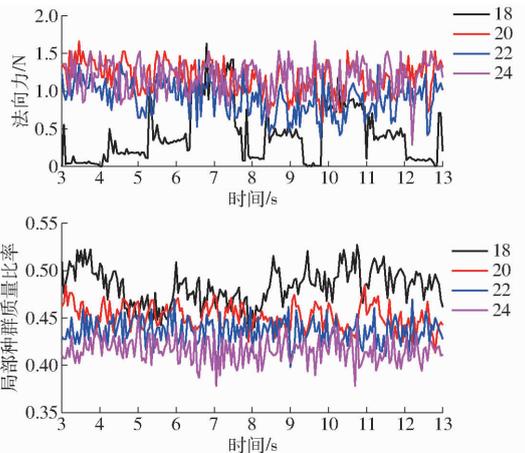


图 11 异形孔数对种群状态的影响

Fig. 11 Effects of number of special-hole on population state

表 3 不同导种槽倾角的仿真结果

Tab. 3 Simulation results of different slot's angles

倾角/ (°)	试验序号	单粒率	漏充率	单粒率平均值	单粒率变异系数	漏充率平均值	漏充率变异系数
25	1	92	1				
	2	94	1	92.33	1.65	1.33	43.30
	3	91	2				
35	1	95	2				
	2	96	1	95.67	0.60	1.67	34.64
	3	96	2				
45	1	94	5				
	2	92	4	93.33	1.24	4.67	12.37
	3	94	5				
90	1	88	8				
	2	90	6	88.00	2.27	7.00	14.29
	3	86	7				

由表3可知,随着导种槽倾角的增加充种单粒率先增大后减小,漏充率逐渐增加。原因是导种槽倾角为 $25^\circ$ 时,异形孔容积最大,种子复充现象严重;结合图12,随着导种槽倾角的增加,导种效果变差,异形孔对种群的扰动减小,种群的离散程度减小流动性变差,不利于目标种子充入异形孔。因此当导种槽倾角为 $35^\circ$ 时,充种单粒率最高,单粒率变异系数相对较小,因此确定导种槽倾角为 $35^\circ$ 。

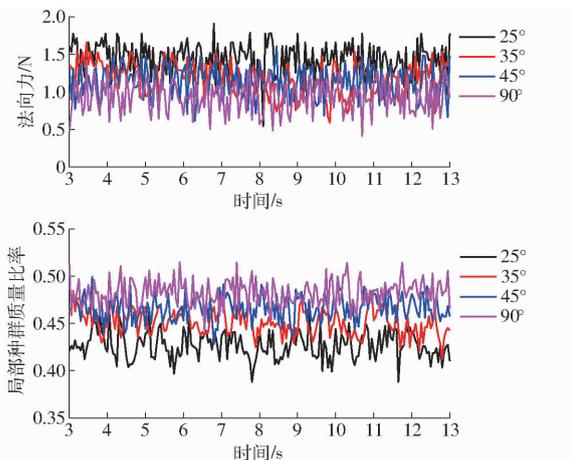


图12 导种槽倾角对种群状态的影响

Fig.12 Effect of slot's angle on population state

### 3.2.3 凸包分布距离

根据1.2节中对充种过程的分析,凸包分布距离是对种群产生稳定而连续波动的关键因素,按照2.2.4节的参数设计结果,分析凸包分布距离为6、14.5、23 mm(凸包分布距离最小值、凸包分布距离中值和凸包分布距离最大值)和无凸包时对充种过程的影响,试验结果如表4所示。

表4 不同凸包分布距离的仿真结果

Tab.4 Simulation results of different distribution

分布距离/mm	试验序号	distance of convex hull		%			
		单粒率	漏充率	单粒率平均值	单粒率变异系数	漏充率平均值	漏充率变异系数
6.0	1	88	9				
	2	92	6	89.00	2.97	7.33	20.83
	3	87	7				
14.5	1	95	2				
	2	96	1	95.33	0.58	1.67	34.64
	3	95	2				
23.0	1	93	3				
	2	94	4	92.67	1.65	3.33	17.32
	3	91	3				
无	1	89	8				
	2	86	9	87.67	1.74	9.33	16.37
	3	88	11				

由表4可知,随着凸包分布距离的增大,充种单

粒率先增大后减小,漏充率先减小后增大,单粒率变异系数与漏充率变异系数均相对稳定。根据图13分析其原因,当分布距离为6 mm和23 mm时,第1层种子与窝眼轮接触的单粒平均法向力出现多个波峰,凸包对种群的作用与型孔对种群的作用处于不平衡状态;无凸包时第1层种子与窝眼轮摩擦力最小,种子在壳体处形成堆积,处于监测器内的种子数量较少,故种群离散程度明显减小,且法向力出现多个波峰,因此充种区减小且种层运动状态不稳定不利于充种而使漏充率增加。分布距离为14.5 mm时,第1层种子与窝眼轮接触的单粒平均法向力稳定,种群离散程度大,充种单粒率高,故确定凸包分布距离为14.5 mm。

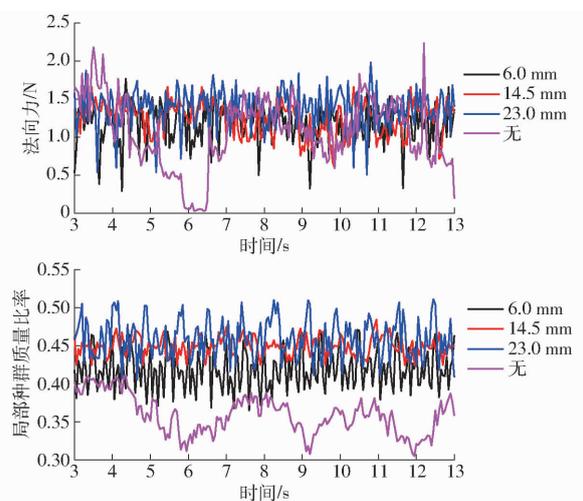


图13 凸包分布距离对种群状态的影响

Fig.13 Effects of distribution distance of convex hull on population state

### 3.2.4 毛刷轮与窝眼轮线速比

毛刷轮与窝眼轮线速比对清种过程有着重要影响,要求毛刷轮比较柔软并有一定的弹性,毛刷轮外径切入排种轮2~3 mm不仅清种效果好,不伤种,而且还能扰动种群,有利于充种,因此要求毛刷轮与窝眼轮的线速比在一定范围内。本文选用毛刷轮直径为80 mm,结合2.2.1节中的参数设计并参考《农业机械设计手册》,毛刷轮与窝眼轮的线速比在1.0~2.0间,故确定线速比分别为1.0、1.4、1.7和2.0时进行仿真试验研究,结果如表5所示。由试验结果可知,当线速比过小时,易在毛刷轮与窝眼轮相切处形成种子堆积;当线速比过大时,易将毛刷轮与窝眼轮相切处的种层刷飞,对种群扰动过大,以上均不利于充种。参照《农业机械设计手册》并结合仿真试验结果,确定线速比为1.7。

## 3.3 二次回归正交旋转组合仿真试验

### 3.3.1 试验方案与结果分析

为研究窝眼轮转速、凸包高径比和种层高度对

表 5 不同毛刷轮与窝眼轮线速比的仿真结果

Tab.5 Simulation results of line speed ratio between different brush wheels and seed-metering wheel %

线速比	试验序号	单粒率	漏充率	单粒率平均值	单粒率变异系数	漏充率平均值	漏充率变异系数
1.0	1	91	2				
	2	92	1	90.33	2.30	2.00	50.00
	3	88	3				
1.4	1	90	5				
	2	95	2	92.00	2.88	3.33	45.83
	3	91	3				
1.7	1	97	2				
	2	96	2	96.00	1.04	2.33	24.74
	3	95	3				
2.0	1	94	3				
	2	96	2	95.67	1.60	2.33	24.74
	3	97	2				

排种器工作性能的影响,基于单因素试验所确定的设计参数进一步研究各因素对排种器工作性能的影响。试验因素编码如表 6 所示,试验设计方案与结果如表 7 所示,其中  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  分别为窝眼轮转速、凸包高径比、种层高度的编码值,试验指标  $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$  分别为合格指数、重播指数、漏播指数。

表 6 试验因素编码

Tab.6 Experimental factors and codes

编码	因素		
	窝眼轮转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	凸包高径比	种层高度/ mm
-1.682	16.00	0.24	30.00
-1	22.69	0.29	40.14
0	32.50	0.37	55.00
1	42.31	0.45	69.86
1.682	49.00	0.50	80.00

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行多元回归拟合,试验结果  $Y_2 \leq 5\%$ ,结合本研究重点为凸包异形孔结构对窝眼轮式排种器充种性能的影响,因此只对合格指数和漏播指数进行方差分析。表 8 为合格指数与漏播指数方差分析,二次回归模型均高度显著 ( $P < 0.01$ ),失拟项均不显著 ( $P > 0.05$ ),回归方程不失拟,剔除不显著影响因素后,得到  $Y_1$ 、 $Y_3$  的回归方程

$$Y_1 = 94.69 - 0.81X_1 + 1.40X_2 + 0.61X_3 + 0.88X_1X_2 - 0.73X_1^2 - 0.62X_2^2 \quad (13)$$

$$Y_3 = 2.18 + 0.60X_1 - 0.55X_2 - 0.50X_3 + 0.42X_2X_3 + 0.27X_1^2 \quad (14)$$

表 7 试验方案与结果

Tab.7 Experiment design and results

序号	因素			试验结果		
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
1	-1	-1	-1	92.33	4.33	3.33
2	1	-1	-1	90.33	5.00	4.67
3	-1	1	-1	93.33	5.67	1.00
4	1	1	-1	93.67	3.33	3.00
5	-1	-1	1	94.33	4.33	1.33
6	1	-1	1	90.67	6.33	3.00
7	-1	1	1	94.33	4.00	1.67
8	1	1	1	95.33	2.67	2.00
9	-1.682	0	0	94.33	3.67	2.00
10	1.682	0	0	90.33	6.00	3.67
11	0	-1.682	0	89.67	7.33	3.00
12	0	1.682	0	95.67	3.00	1.33
13	0	0	-1.682	92.00	5.33	2.67
14	0	0	1.682	94.00	5.00	1.00
15	0	0	0	92.67	5.67	1.67
16	0	0	0	95.00	3.00	2.00
17	0	0	0	94.00	3.33	2.67
18	0	0	0	94.67	2.33	3.00
19	0	0	0	96.67	1.67	1.67
20	0	0	0	94.33	3.67	2.00
21	0	0	0	95.67	1.67	2.67
22	0	0	0	94.33	4.00	1.67
23	0	0	0	95.00	2.67	2.33

由表 8 可知,三因素对合格指数的影响重要性依次为凸包高径比、窝眼轮转速、种层高度,其中窝眼轮转速与凸包高径比间存在的交互作用不容忽视,二者响应曲面如图 14 所示。在低转速区合格指数随凸包高径比的增大先增大后减小,在高转速区合格指数随凸包高径比的增大而增大;在凸包高径比较小区合格指数随转速增加而减小,在凸包高径比较大区合格指数随着转速的增加先增大后减小,因此二者具有较显著的相关性。

从表 8 可以看出,各因素对于漏播指数的影响极为显著,其中影响重要性依次为窝眼轮转速、凸包高径比、种层高度,其中凸包高径比与种层高度间存在交互作用。

### 3.3.2 试验结果目标优化

为在水平约束条件下寻求各因素的最优组合,仍将合格指数和漏播指数作为评价指标,结合因素边界条件建立数学模型,并对评价指标回归模型进行多目标化求解,优化目标函数的边界条件为

表8 合格指数与漏播指数方差分析

Tab.8 Variance analysis of eligibility index and missed seeding index

方差来源	合格指数				漏播指数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	65.36	9	6.66	0.0013**	15.31	9	7.90	0.0005**
$X_1$	8.96	1	8.21	0.0133*	4.85	1	22.53	0.0004**
$X_2$	26.69	1	24.46	0.0003**	4.09	1	18.99	0.0008**
$X_3$	5.12	1	4.69	0.0494*	3.39	1	15.75	0.0016**
$X_1X_2$	6.13	1	5.61	0.0340*	0.06	1	0.26	0.6199
$X_1X_3$	0.12	1	0.11	0.7404	0.22	1	1.03	0.3281
$X_2X_3$	0.01	1	0.01	0.9119	1.39	1	6.45	0.0246*
$X_1^2$	8.58	1	7.86	0.0149*	1.19	1	5.55	0.0349*
$X_2^2$	6.05	1	5.54	0.0350*	0.02	1	0.11	0.7469
$X_3^2$	3.96	1	3.63	0.0792	0.10	1	0.47	0.5066
残差	14.18	13			2.80	13		
失拟	4.31	5	0.70	0.6405	0.77	5	0.61	0.6957
误差	9.88	8			2.02	8		
总和	79.55	22			18.11	22		

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

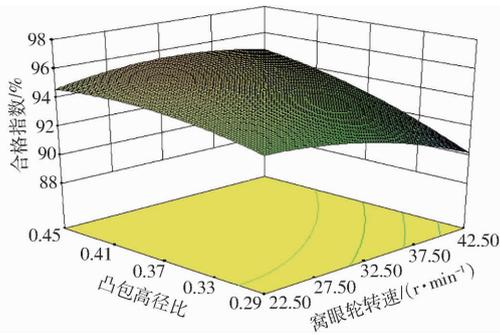


图14 窝眼轮转速与凸包高径比交互作用的响应曲面  
Fig.14 Response surface for interaction of speed and DRH

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_3(X_1, X_2, X_3) \\ -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

以合格指数最高和漏播指数最低为优化目标进行多目标优化,求解得窝眼轮转速为 29.75 r/min、凸包高径比为 0.43、种层高度为 53.92 mm 时性能最优,合格指数为 95.59%、重播指数为 2.97%、漏播指数为 1.40%。

## 4 排种器性能试验

### 4.1 台架试验

为验证仿真试验的优化结果,选取经过催芽后的长白山“大马牙”人参种子,含水率为 40%,在 JPS-12 型视觉排种器性能试验台上进行试验验证,按照仿真试验优化后的参数使用 ABS 材料 3D 打印窝眼轮并制作排种器,为方便观察排种器工作状态下种群情况,种箱前板用亚克力板制作,试验装置如

图 15 所示。设置排种器工作转速为 29.75 r/min,种层高度为 54 mm。

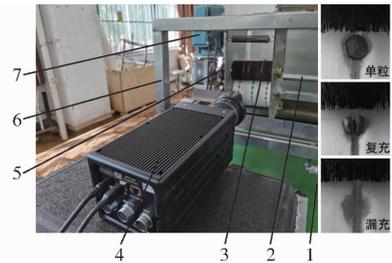


图15 排种器性能试验装置

Fig.15 Seed-metering device performance test

1. 传送带 2. 排种轴 3. 凸包异形孔窝眼轮式排种器 4. 高速摄像装置 5. 链传动 6. 台架 7. 电机

### 4.1.1 充种性能试验

为验证排种器的充种性能,去掉柔性护种板,利用合肥富煌君达高科信息技术有限公司生产的千眼狼 5F01M 高速摄像机拍摄充种情况,待排种器工作稳定后取 10 转统计数据,试验结果如表 9 所示。

表9 排种器充种性能试验结果

Tab.9 Test results of seed filling performance %

试验序号	单粒率	漏充率	单粒率平均值	单粒率变异系数	漏充率平均值	漏充率变异系数
1	93.00	3.00				
2	94.50	2.00	93.67	0.76	2.50	20.00
3	93.50	2.50				

试验结果表明,充种单粒率为 93.67%,其变异系数为 0.76%;漏充率为 2.50%,其变异系数为 20.00%。充种性能稳定,3 排排种器间的差异性不大,结果与仿真试验吻合,验证了仿真试验的可靠

性。从高速摄像的记录中可以看出种子多以“平躺”状态充入异形孔,未出现大于(等于)3 粒/孔的情况,复充情况均为两粒竖直插入异形孔,柔性护种板可以避免伤种问题。

#### 4.1.2 工作性能试验

为研究排种器的工作性能和播种分布均匀性,将柔性护种板装到排种器上,调整落种点与传动带的高度为 120 mm,设置传动带速度为 0.36 m/s,控制油泵在传送带上刷油,待排种稳定后,测定 1 m 范围内种子数量,并统计伤种情况。按照人参种植株距 4 cm 计算,1 m 范围内理论播种数量为 25 粒,随机测定 20 组数据取平均值,试验结果如表 10 所示。

表 10 分段测量试验结果

Tab. 10 Sectional measurement test results

序号	种子数量 均值	种子数量标 准差	种子数量 变异系数/%	损伤种子 数量 均值	损伤种子 数量标 准差	损伤种子 数量变异 系数/%
1	25.45	0.58	2.28	0.25	0.44	177.70
2	25.65	0.63	2.45	0.30	0.47	156.72
3	25.50	0.57	2.23	0.25	0.44	177.70
平均值	25.53	0.59	2.32	0.27	0.45	170.71

由表 10 可知,排种器行内排种量分布均匀性的变异系数为 2.32%,因此凸包异形孔窝眼轮式排种器较常规窝眼轮式排种器具有明显优势。

#### 4.2 田间试验

为进一步研究凸包异形孔窝眼轮式精密排种器的工作性能,按照人参种植农艺要求(移栽法)加工了 28 行凸包异形孔窝眼轮式排种器,经实验室台架试验验证其工作稳定性后,组装成 2BS-28 型人参播种机,并在吉林省四平市兴宝生态园人参种植基地进行田间试验。图 16 为田间试验现场和试验效果。

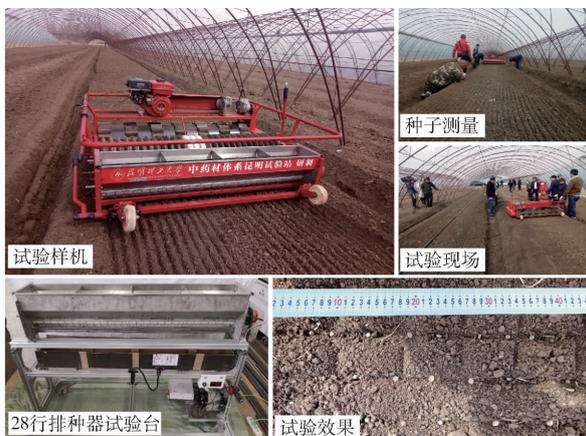


图 16 田间试验

Fig. 16 Field test

种机工作速度 1.4 km/h,试验地地表已旋耕平整;随机选取 10 组,每组试验段 1 m 对播种粒距的合格指数、重播指数、漏播指数以及种子破损率进行统计,试验结果与 NY/T 1143—2006《播种机质量评价技术规范》进行对比,如表 11 所示。田间试验结果表明,本文设计的凸包异形孔窝眼轮式人参精密排种器满足人参精密播种要求。

表 11 田间试验结果

Tab. 11 Field test results

参数	本文装置	技术规范
粒距合格指数	86.50	≥60.0
重播指数	8.26	≤30.0
漏播指数	5.24	≤15.0
合格粒距变异系数	7.74	≤40.0
种子破损率	0.50	≤1.50

#### 5 结论

(1)设计了凸包异形孔窝眼轮式人参精密排种器,以充种条件为依据,通过理论计算和运动学分析设计了窝眼轮的基本参数。确定窝眼轮直径为 120 mm,型孔的长、宽、深分别为 7.2、6.2、3.8 mm。

(2)借助离散元单因素仿真试验对设计参数进行优化,确定了异形孔数为 20 个,导种槽倾角为 35°,凸包分布距离为 14.5 mm,毛刷轮与窝眼轮的线速比为 1.7。通过设计二次回归正交旋转组合试验,得到合格指数和漏播指数的回归方程,经方差分析可知,影响合格指数的因素主次顺序依次为凸包高径比、窝眼轮转速、种层高度,其中凸包高径比与窝眼轮转速间的交互作用不容忽视;影响漏播指数的因素主次顺序依次为窝眼轮转速、凸包高径比、种层高度,其中凸包高径比与种层高度间存在交互作用。对回归方程进行多目标优化求解得出,当窝眼轮转速为 29.75 r/min、凸包高径比为 0.43、种层高度为 53.92 mm 时,合格指数为 95.59%、重播指数为 2.97%、漏播指数为 1.40%。

(3)对最优参数组合进行了试验验证。台架试验充种性能试验结果表明,充种单粒率为 93.67%,单粒率变异系数为 0.76%,漏充率为 2.50%,漏充率变异系数为 20.00%;台架试验的工作性能试验结果表明,排种器行内排种量分布均匀性的变异系数均值为 2.32%。田间试验结果表明,粒距合格指数 86.5%,重播指数 8.26%,漏播指数 5.24%,合格粒距变异系数 7.74%,种子破损率 0.50%。凸包异形孔窝眼轮式人参精密排种器充种性能较好,伤种率低,能够满足人参精密播种要求。

田间试验中,配套汽油机动力 5.5 kW,设计播

## 参 考 文 献

- [1] 葛茂苑,王娇,张国权. 非林地人参栽培技术[J]. 农业科技通讯,2019(9): 304-305.  
GE Maoyuan, WANG Jiao, ZHANG Guoquan. Cultivation techniques of non-woodland ginseng [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2019(9): 304-305. (in Chinese)
- [2] 刘文亮,刘枫,付家庆,等. 人参机械化种植设备的设计研究[J]. 山西农业科学,2016,44(10): 1537-1540.  
LIU Wenliang, LIU Feng, FU Jiaqing, et al. Study on the design of mechanical planting equipment of ginseng [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(10): 1537-1540. (in Chinese)
- [3] 盛江源,马英春. 人参栽培和人参的机械播种[J]. 北京农业工程大学学报,1987,7(2): 34-41.  
SHENG Jiangyuan, MA Yingchun. On panax ginseng culture and its mechanized seeding [J]. Journal of Beijing Agricultural Engineering University, 1987, 7(2): 34-41. (in Chinese)
- [4] 赖庆辉,于庆旭,苏微,等. 三七超窄行气吸式精密排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4): 102-112.  
LAI Qinghui, YU Qingxu, SU Wei, et al. Design and experiment of air-suction ultra-narrow-row device for precise *Panax notoginseng* seed metering [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 102-112. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190412&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190412&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.012. (in Chinese)
- [5] 黄康永,闫兆彬,王志豪,等. 气吸式人参排种器设计与试验[J]. 农业开发与装备,2019(1): 107-108.  
HUANG Kangyong, YAN Zhaobin, WANG Zhihao, et al. Design and test of air-sucking ginseng seed extractor [J]. Agricultural Development & Equipments, 2019(1): 107-108. (in Chinese)
- [6] 廖宜涛,郑娟,廖庆喜,等. 正负压组合管针式西洋参集排器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3): 46-57.  
LIAO Yitao, ZHENG Juan, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combined tube-needle centralized seeding device for American ginseng [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 46-57. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190305&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190305&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.005. (in Chinese)
- [7] 刘晓蛟,尚书旗,王东伟,等. 气力式西洋参排种装置的设计与试验研究[J]. 农机化研究,2017,39(3): 213-217.  
LIU Xiaojiao, SHANG Shuqi, WANG Dongwei, et al. Design and experimental research of physical strength type seed-metering device for *Panax quinquefolius* [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 213-217. (in Chinese)
- [8] 黄春洋. 参类种子力学性能及型孔式排种器性能的试验研究[D]. 长春:吉林农业大学,2016.  
HUANG Chunyang. Ginseng seed mechanical properties and pore type metering device performance test research [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [9] WANG J W, TANG H, WANG J F, et al. Optimization design and experiment on ripple surface type pickup finger of precision maize seed metering device [J]. International Journal of Agriculture and Biological Engineering, 2017, 10(1): 61-71.
- [10] GARCIA P P. Participatory development of a corn seeder [J]. Journal of Applied Crystallography, 1993, 16(1): 133-135.
- [11] 顿国强,陈海涛,查韶辉. 基于EDEM的大豆窝眼轮式排种盘型孔参数优化与验证[J]. 大豆科学,2016,35(5): 830-839.  
DUN Guoqiang, CHEN Haitao, ZHA Shaohui. Parameter optimization and validation of soybean cell wheel seeding plate type-hole based on EDEM [J]. Soybean Science, 2016, 35(5): 830-839. (in Chinese)
- [12] 刘涛,何瑞银,陆静,等. 基于EDEM的窝眼轮式油菜排种器排种性能仿真与试验[J]. 华南农业大学学报,2016,37(3): 126-132.  
LIU Tao, HE Ruiyin, LU Jing, et al. Simulation and verification on seeding performance of nest hole wheel seed-metering device based on EDEM [J]. Journal of South China Agricultural University, 2016, 37(3): 126-132. (in Chinese)
- [13] 秦伟,于英杰,赖庆辉,等. 三七种子的大小对窝眼轮排种器充种性能的影响[J]. 华南农业大学学报,2019,40(4): 126-132.  
QIN Wei, YU Yingjie, LAI Qinghui, et al. Effect of *Panax notoginseng* seed size on seed-filling performance of the socket-roller seeding apparatus [J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 126-132. (in Chinese)
- [14] St JACK D, HESTERMAN D C, GUZZOMI A L. Precision metering of *Santalum spicatum* (Australian Sandalwood) seeds [J]. Biosystems Engineering, 2013, 115(2): 171-183.
- [15] 刘彩玲,王超,宋建农,等. 振动供种型孔轮式非圆种子精密排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5): 108-115.  
LIU Cailing, WANG Chao, SONG Jiannong, et al. Design and seed-filling test of cell-type precision seed-metering device with vibration technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 108-115. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180512&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180512&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.012. (in Chinese)
- [16] 刘娜. 窝眼轮式玉米精量排种器改进设计与试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2019.  
LIU Na. Improvement design and experimental study of corn precision seed-metering device [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [17] AN Xue, WANG Sheng, DUAN Hongyan, et al. Test on effect of the operating speed of maize-soybean interplanting seeders on performance of seeder-metering devices [J]. Procedia Engineering, 2017, 174: 353-359.

- [18] 罗锡文,刘涛,蒋恩臣,等.水稻精量穴直播排种轮的设计与试验[J].农业工程学报,2007,23(3):108-112. LUO Xiwen, LIU Tao, JIANG Enchen, et al. Design and experiment of hill sowing wheel of precision rice direct-seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 108-112. (in Chinese)
- [19] 袁文胜,吴崇友,金诚谦.异形孔窝眼轮式油菜排种器设计与试验[J].农业机械学报,2009,40(5):72-75. YUAN Wensheng, WU Chongyou, JIN Chengqian. Design and experiment on seed-metering device with special cells for cole seed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 72-75. (in Chinese)
- [20] 史嵩,周纪磊,刘虎,等.驱导辅助充种气吸式精量排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(5):61-70. SHI Song, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 61-70. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190507&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190507&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.05.007. (in Chinese)
- [21] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册(上)[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [22] 徐苏雷.仿生凸起几何结构对冰摩擦学特性的影响[D].长春:吉林大学,2013. XU Sulei. Effects of bionic convex geometry on the tribological properties of ice [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- [23] 曹秀龙.三七压穴精密播种机设计与试验[D].昆明:昆明理工大学,2019. CAO Xiulong. Design and experiment of precision seeding device for hole-drop planter for *Panax notoginseng* [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [24] 于庆旭.气吸窝眼轮式三七精密排种器设计与试验[D].昆明:昆明理工大学,2019. YU Qingxu. Design and experiment of precision air-suction cell-wheel seed metering device for *Panax notoginseng* [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [25] 赖庆辉,曹秀龙,于庆旭,等.三七压穴精密排种装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(1):85-95. LAI Qinghui, CAO Xiulong, YU Qingxu, et al. Design and experiment of precision seeding device for hole-drop planter for *Panax notoginseng* [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 85-95. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190109&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190109&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.009. (in Chinese)
- [26] 刘彩玲,魏丹,都鑫,等.宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(1):75-84. LIU Cailing, WEI Dan, DU Xin, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision hook-hole type seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 75-84. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20190108&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190108&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.008. (in Chinese)

(上接第90页)

- [22] 徐博,陈立平,谭彧,等.基于无人机航向的不规则区域作业航线规划算法与验证[J].农业工程学报,2015,31(23):173-178. XU Bo, CHEN Liping, TAN Yu, et al. Route planning algorithm and verification based on UAV operation path angle in irregular area [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 173-178. (in Chinese)
- [23] 徐博,陈立平,谭彧,等.多架次作业植保无人机最小能耗航迹规划算法研究[J/OL].农业机械学报,2015,46(11):36-42. XU Bo, CHEN Liping, TAN Yu, et al. Path planning based on minimum energy consumption for plant protection UAVs in sorties [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 36-42. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20151106&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151106&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.11.006. (in Chinese)
- [24] 李继宇,罗慧莹,朱长威,等.基于能量优化的无人机喷施规划组合算法研究[J/OL].农业机械学报,2019,50(10):106-115. LI Jiyu, LUO Huiying, ZHU Changwei, et al. Research and implementation of combination algorithms about UAV spraying planning based on energy optimization [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 106-115. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20191012&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191012&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.012. (in Chinese)
- [25] RADMANESH M, KUMAR M, GUENTERT P H, et al. Overview of path-planning and obstacle avoidance algorithms for UAVs: a comparative study [J]. Unmanned Systems, 2018, 6(2): 95-118.
- [26] 黄小毛.熔丝沉积成形若干关键技术研究[D].武汉:华中科技大学,2009. HUANG Xiaomao. Research on some key technologies of fuse deposition [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)