

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.009

# 三七压穴精密排种装置设计与试验

赖庆辉 曹秀龙 于庆旭 孙凯 秦伟

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

**摘要:**三七播种株行距均为5 cm左右,属于密集精密播种,为实现三七高密度精密播种,克服开沟易堵塞的难题,设计了一种三七压穴精密排种装置。阐述了三七压穴精密排种装置的工作原理,确定了其主要结构参数,以云南省文山市三七种子为研究对象,采用二次旋转正交组合试验方法,对排种装置进行排种性能试验,选取压穴柱直径、前进速度、投种点到压穴点水平距离为试验因素,建立了合格指数、漏播指数、重播指数、各行排量一致性变异系数的数学模型,分析了各试验因素交互作用对合格指数的影响规律。结果表明,影响合格指数的因素主次顺序为:压穴柱直径、投种点到压穴点水平距离和前进速度。通过参数优化,确定了最优参数为压穴柱直径24.5~29.5 mm、投种点到压穴点水平距离330 mm、前进速度0.44~0.61 m/s,此时合格指数大于90%,漏播指数小于5%,重播指数小于5%。经2BQ-15型三七精密播种机整机试验可知,作业速度为0.35 m/s时,播种机合格指数最高为93.5%,满足三七播种要求。

**关键词:**三七;播种机;排种器;压穴装置;优化设计

**中图分类号:** S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)01-0085-11

## Design and Experiment of Precision Seeding Device for Hole-drop Planter for *Panax notoginseng*

LAI Qinghui CAO Xiulong YU Qingxu SUN Kai QIN Wei

(College of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** *Panax notoginseng* is mainly grown in Yunnan Province. The row spacing and plant spacing of the seedlings of *Panax notoginseng* are about 5 cm. In order to achieve high-density precision seeding of *Panax notoginseng*, overcome the problem of easy blockage of trenching, a hole precision seed-metering device was designed. The main structure and the working principle of the metering device were expounded. The key structure parameters were determined through theoretical calculation according to planting requirements. According to the extensive testing combined with the experimental results of relevant scholars, the main factors which affected seeding performance of hole-drop planter precision seed-metering device were determined, which were pricking hole column diameter, forward velocity and dropping seeds point to the pricking hole roll distance. The *Panax notoginseng* seeds in Wenshan were chosen for sowing object. Based on the three-factor five-level quadratic orthogonal rotating combination test method, the influences of pricking hole column diameter, dropping seeds point to the pricking hole roll distance and forward velocity on sowing performance were explored. The experimental results showed that the influence of negative pressure on the qualified rate was very significant ( $P < 0.01$ ). Based on the results of examination, it was found that the fitting of the equations was good, the best parameter combination was pricking hole column diameter of 24.5~29.5 mm, forward velocity of 0.44~0.61 m/s and dropping seeds point to the pricking hole roll distance of 330 mm, and under the optimal condition, the qualified index was more than 90%, the missing index was less than 5% and the multiple index was less than 5%. The hole-drop planter precision seed-metering device met the standard and requirements by comparing the results with the national standard and *Panax notoginseng* planting requirements. Field

收稿日期: 2018-09-03 修回日期: 2018-11-07

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51305187)、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)、云南省教育厅项目(2016ZZX048)、云南省高校工程研究中心建设计划项目和云南省科技厅创新团队计划项目

**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

experiments were conducted to examine the performance of 2BQ-15 type precision planter for *Panax notoginseng*, the qualified index of the planter was up to 93.5%, when the operating speed was 0.35 m/s. The results indicated that precision seeding device for hole-drop planter can meet the requirements of *Panax notoginseng* seeding.

**Key words:** *Panax notoginseng*; seeder; seed-metering device; drilling device; optimization design

## 0 引言

三七是我国名贵中药材,在云南省广泛种植。三七播种的株距和行距均为 50 mm 左右,属于密集型精密播种<sup>[1]</sup>。开沟和精密排种是播种机两个重要的作业环节,开沟器和精密排种器的作业性能直接关系到播种质量。由于三七种植株距较小,采用开沟方式极易堵塞,因此,压穴播种方式适合三七等密集型精密播种作物。

国外在压穴精密播种方面研究较早,尤其在关键成穴部件的研发上有很大的突破<sup>[2-5]</sup>。国内目前已研发的压穴播种机采用带有鸭嘴、柱塞、铲斗等成穴部件的滚轮作为成穴器<sup>[6]</sup>。学者们对玉米、小麦、水稻、蔬菜等作物穴播的研究已趋成熟,并得到广泛推广<sup>[7-10]</sup>。文献[11-17]研制的穴播机大多采用鸭嘴式成穴部件,播种株距和行距均大于 150 mm,不适用于三七密集播种,故现有的穴播机不能满足三七的种植农艺要求。

与传统开沟播种作业相比,压穴播种对土壤的扰动较小,有利于土壤保墒和抗旱播种<sup>[18-21]</sup>。播种时种子在土壤中的滚动受到穴孔范围的限定,因而可以获得较满意的播种行距<sup>[22]</sup>。为了解决三七播种密度大、播种深度为 20~30 mm、开沟土壤拥堵严重等问题,本文设计一种三七压穴精密排种装置,以改善排种精度,满足三七种植农艺要求。

## 1 排种装置结构与工作原理

三七压穴精密排种装置主要由排种器、压穴辊和传动机构组成,如图 1 所示。排种器由排种轮、毛刷轮、护种板、清种刀和壳体组成。

压穴辊通过轴承和轴承座固定在连接架前端,

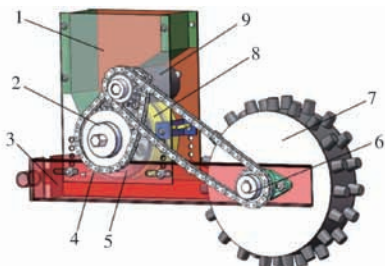


图 1 压穴排种装置结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of hole seed-metering device

1. 壳体 2. 二级传动机构 3. 连接架 4. 清种刀 5. 排种轮  
6. 一级传动机构 7. 压穴辊 8. 护种板 9. 毛刷轮

排种器通过螺栓固定在连接架后端,可通过螺栓调整投种点到压穴辊的水平距离和投种高度;随着压穴辊的转动,一级传动机构使毛刷轮转动,二级传动机构使排种轮转动;压穴排种装置工作时,压穴辊向前滚动在土壤上压出穴孔;通过一级传动机构和二级传动机构的动力传动,排种轮和毛刷轮转动;排种轮型孔中充入的多余种子通过毛刷轮转动刷出,保证每个型孔中只保留一粒种子;种子随着排种轮的转动,进入护种区,到达投种点时种子靠自身重力脱离型孔开始投种,清种刀将型孔中未脱落的种子清出;排种器投出的种子落入压穴辊压出的穴孔中,即完成整个压穴排种过程。

## 2 关键部件参数设计

### 2.1 精密排种器设计

垂直圆盘排种器结构简单,投种高度较小,无需输种管即可直接将种子投入种沟<sup>[23]</sup>。

#### 2.1.1 排种轮参数确定

##### 2.1.1.1 排种轮直径

排种轮作为排种器的核心部件,其直径决定排种器的整体结构、型孔数量及其他部件的尺寸<sup>[24-26]</sup>。图 2 所示为排种轮结构示意图,图中  $D_{kl}$  为型孔分布圆直径,  $D_k$  为型孔直径。

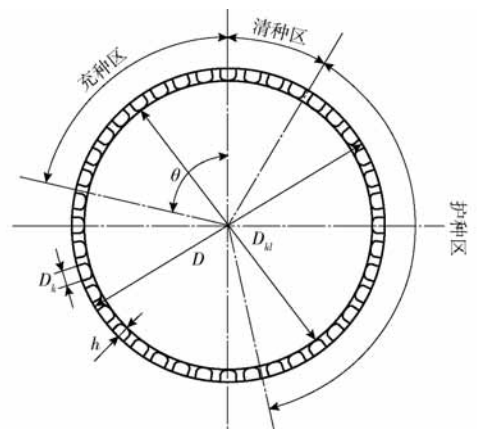


图 2 排种轮结构示意图

Fig. 2 Schematic of structural parameters of seeding wheel

一般情况下,型孔在充种区的时间越长,充种性能越好。排种轮直径对充种时间的影响为

$$t = \frac{\frac{\theta D}{2}}{\frac{\pi n_p D}{60}} \quad (1)$$

式中  $t$ ——充种时间, s

$\theta$ ——型孔充种区弧度, rad

$D$ ——排种轮直径, mm

$n_p$ ——排种轮转速, r/min

整理式(1)得出

$$t = \frac{30\theta}{\pi n_p} \quad (2)$$

由式(2)可知,型孔在充种区停留时间  $t$  只与排种轮转速有关,而与排种轮直径无关。所以排种轮直径的确定需考虑播种作业速度以及排种器整体结构等因素,我国目前一般采用的排种轮直径为 140 mm 左右<sup>[23]</sup>,本文选取排种轮直径  $D$  为 155 mm。

### 2.1.1.2 型孔直径与型孔深度

排种轮型孔形状和尺寸需根据种子的形状和尺寸来确定。三七种子的平均直径为 5.6 mm,种子长度为 5.2 ~ 7.2 mm,宽度为 4.8 ~ 6.8 mm,高度为 4.0 ~ 6.0 mm,球度为 90.86%,可近似为球体<sup>[24]</sup>。所以设计型孔形状为圆柱球底型,根据经

验公式

$$D_k = L_{\max} + k \quad (3)$$

式中  $L_{\max}$ ——种子最大尺寸, mm

$k$ ——间隙余量,取 0.5 ~ 1 mm

可得出型孔直径为 7.7 ~ 8.2 mm,取型孔直径为 8.0 mm。型孔深度应满足最大尺寸的种子充入,取型孔深度  $h$  为 8.0 mm。

### 2.1.1.3 排种轮型孔数

型孔之间的壁厚为 4.0 mm,型孔直径  $D_k$  为 8.0 mm,在直径 155 mm 的排种轮上最多可布置型孔数量  $Z$  为

$$Z \leq \frac{360}{2 \arcsin \frac{D_k + 4}{D}} \quad (4)$$

由式(4)可得型孔数量为 40。

### 2.1.2 充种过程力学分析

在排种轮充种区域内,选取型孔边缘的种子进行受力分析。种子的受力情况如图 3 所示。

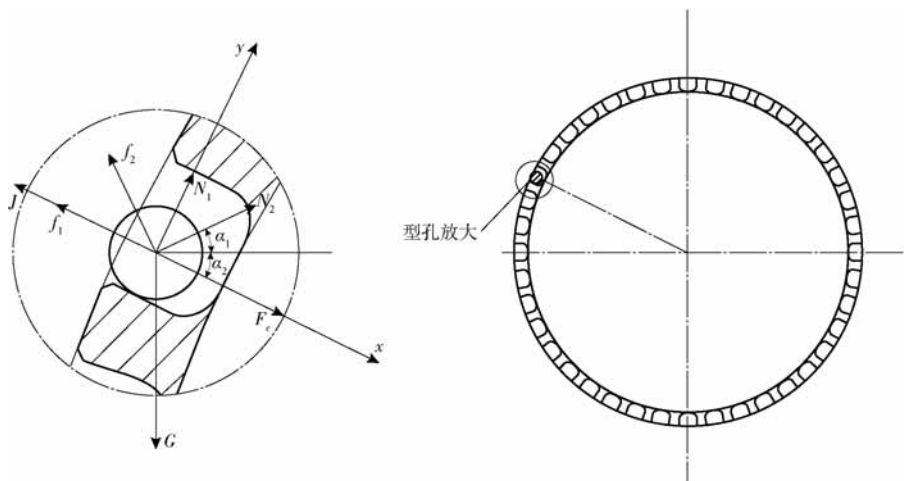


图 3 充种过程力学分析示意图

Fig. 3 Structure sketch of force analysis of filling process

通过分析可知,在  $x$  轴正方向上种子的合力  $F_c$  即为充填力,当充填力  $F_c$  大于零时,种子才有可能充入型孔内。由图 3 可知,种子受到的充填力为

$$F_c = N_2 \cos(\alpha_1 + \alpha_2) + mg \sin \alpha_2 - f_1 - f_2 \sin(\alpha_1 + \alpha_2) - J \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} f_1 = \mu_1 N_1 \\ f_2 = \mu_2 N_2 \\ N_1 = mg \cos \alpha_2 \\ J = m \omega_p^2 R \end{cases} \quad (6)$$

式中  $F_c$ ——充填力, N

$f_1$ ——种子与型孔的滚动摩擦力, N

$f_2$ ——种子受到的种群摩擦力, N

$N_1$ ——种子受到的型孔支撑力, N

$N_2$ ——种群对种子的支撑力, N

$m$ ——种子质量, kg

$J$ ——种子受到的离心力, N

$\alpha_1$ —— $N_2$ 与水平方向的夹角,其大小与种层高度有关, ( $^\circ$ )

$\alpha_2$ ——充种角, ( $^\circ$ )

$\mu_1$ ——种子与排种轮的滚动摩擦因数

$\mu_2$ ——种间摩擦因数

$\omega_p$ ——排种轮角速度, rad/s

$R$ ——排种轮半径, m

$g$ ——重力加速度,  $m/s^2$

由式(5)、(6)得出,种子受到的充填力与充种角、排种轮角速度、种子质量及内摩擦角等因素有关。经试验测得  $\mu_1 = 0.132$ ,  $\mu_2 = 0.05$ 、千粒质量为 69.77 g、 $\alpha_1 = 15^\circ$ 、 $\alpha_2$  为  $25^\circ \sim 35^\circ$ 。考虑到排种器实际作业情况

复杂,排种轮角速度取值范围为  $0.16 \sim 0.5 \text{ rad/s}$ 。

### 2.1.3 清种过程力学分析

图4为清种过程力学分析示意图,此时为清种瞬间,被清种子  $O_1$  尚未接触到型孔倒角边缘,同时受到毛刷轮  $O_3$  和种子  $O_2$  的作用力;以  $O_1O_2$  连线为  $y$  轴,垂直于该连线方向为  $x$  轴,建立坐标系,当被清种子处于平衡状态时,建立关系式

$$\begin{cases} f_4 - f_3 \cos\alpha - N_3 \sin\alpha = 0 \\ N_4 + f_3 \sin\alpha - N_3 \cos\alpha = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中  $N_3$ ——毛刷轮对被清种子的作用力, N

$N_4$ ——型孔内种子对被清种子的支撑力, N

$f_3$ ——毛刷轮与被清种子之间的摩擦力, N

$f_4$ ——型孔内种子与被清种子之间的摩擦力, N

$\alpha$ ——毛刷轮与排种轮之间的清种夹角, ( $^\circ$ )

种子  $O_1$  被清除需满足条件

$$N_4 + f_3 \sin\alpha \geq N_3 \cos\alpha \quad (8)$$

进一步整理可得

$$\begin{cases} N_4 \tan\beta_4 = N_3 \tan\beta_3 \cos\alpha + N_3 \sin\alpha \\ N_4 + N_3 \tan\beta_3 \sin\alpha \geq N_3 \cos\alpha \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\beta_3$ ——毛刷轮与被清种子之间的滑动摩擦角,取  $5.7^\circ \sim 8^\circ$

$\beta_4$ ——种子之间的滑动摩擦角,取  $26.5^\circ \sim 27.9^\circ$

由式(9)可得  $\alpha$  的取值范围为

$$\alpha \geq \beta_4 - \beta_3 \quad (10)$$

综合上述关系,取  $\alpha$  为  $35^\circ$ 。结合排种轮结构布置及工作参数,毛刷轮直径设计为  $70 \text{ mm}$ 。

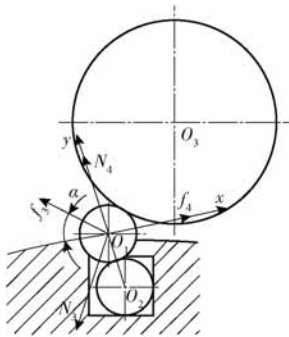


图4 清种过程力学分析示意图

Fig.4 Schematic of analysis of force about seed cleaning process

## 2.2 压穴辊设计

### 2.2.1 压穴辊直径

压穴辊由滚筒、压穴柱、轴 I、轴 II 和端盖组成,如图5所示。压穴辊通过链条带动排种器工作,压穴辊还起到地轮的作用,有经验公式

$$D_1 = \frac{sZ}{i\pi(1 + \delta_1)} \quad (11)$$

式中  $D_1$ ——压穴辊直径, mm

$s$ ——株距, mm

$i$ ——压穴辊与排种器之间的传动比

$\delta_1$ ——滑移系数

三七播种株距  $s$  为  $50 \text{ mm}$ , 选取压穴辊与排种器之间的传动比  $i = 2$ , 地轮的滑移系数  $\delta_1$  一般在  $0.05 \sim 0.12$  之间, 选取  $0.1$ , 由式(11)得出压穴辊直径  $D_1 = 280 \text{ mm}$ 。

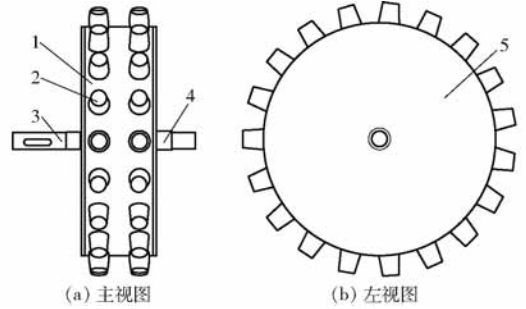


图5 压穴辊结构示意图

Fig.5 Structure diagram of hole pressure roller

1. 滚筒 2. 压穴柱 3. 轴 I 4. 轴 II 5. 端盖

### 2.2.2 压穴柱数量及尺寸

设计压穴辊周向压穴柱数量时,既要考虑播种株距,保证两个相邻压穴柱最顶端的弧长为播种株距,又要考虑压穴柱直径,直径太大不利于压出穴孔,直径太小压出的穴孔不明显。由于三七播种的行距和株距均需控制在  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  左右,播种深度为  $20 \sim 30 \text{ mm}$ , 综上两点考虑,压穴柱设计为圆台形,高度为  $25 \text{ mm}$ , 上底直径为  $16 \text{ mm}$ , 下底直径为  $27 \text{ mm}$ 。压穴辊周向压穴柱数量为  $20$  个,两个相邻压穴柱最顶端的弧长为  $51.81 \text{ mm}$ , 满足设计要求。

### 2.3 播种机前进速度

压穴辊与排种器通过链条传动,播种机前进速度由排种轮转速决定,可得

$$\begin{cases} v = \omega_1 \frac{D_1}{2} (1 - \delta_1) \\ \frac{\omega_1}{\omega_p} = i \\ \omega_p = \frac{2\pi n_p}{60} \end{cases} \quad (12)$$

式中  $\omega_1$ ——压穴辊角速度,  $\text{rad/s}$

由式(12)可得到播种机前进速度与排种轮转速关系式为

$$v = \frac{i\pi n_p D_1 (1 - \delta_1)}{60} \quad (13)$$

排种轮转速  $n_p$  在  $10 \sim 30 \text{ r/min}$  时充种效果最好,此时前进速度为  $0.25 \sim 0.8 \text{ m/s}$ 。

### 2.4 投种分析和投种点位置确定

投种点位置是排种器重要参数之一,投种点位置决定护种板包角大小和清种刀清种点位置;图 6 为护种板和清种刀安装示意图。

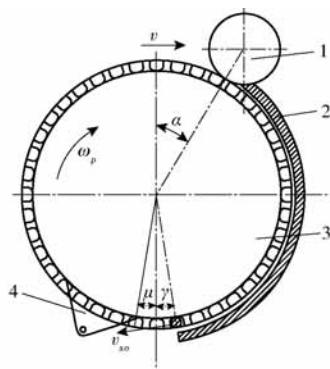


图 6 护种板和清种刀安装示意图

Fig. 6 Schematic of seed-guarding plate and seed-clearing plate

1. 毛刷 2. 护种板 3. 排种轮 4. 清种刀

投种点处种子的水平初始速度越小,投种精度通常越高,投种点处种子水平初始速度  $\Delta v$  为

$$\Delta v = v - v_{xo} \cos \gamma \quad (14)$$

其中

$$v_{xo} = \frac{\pi n_p D}{60} \quad (15)$$

式中  $v_{xo}$ ——排种轮切线速度, m/s

$\gamma$ ——投种角, ( $^\circ$ )

由式(14)、(15)可知,当排种轮直径和转速一定时,投种角  $\gamma = 0^\circ$ ,投种点处种子水平初始速度  $\Delta v$  最小,因此最佳排种点位于排种轮最下端。清种刀将型孔中未脱落的种子清出,清种角  $\mu = 5^\circ$ 。

### 2.5 压穴投种过程分析

投种点位于排种轮最下端,在投种点处建立直角坐标系,如图 7 所示,投种点到地面高度为投种高度  $H_1$ ,投种点处三七种子水平移动距离为  $x_1$ 。

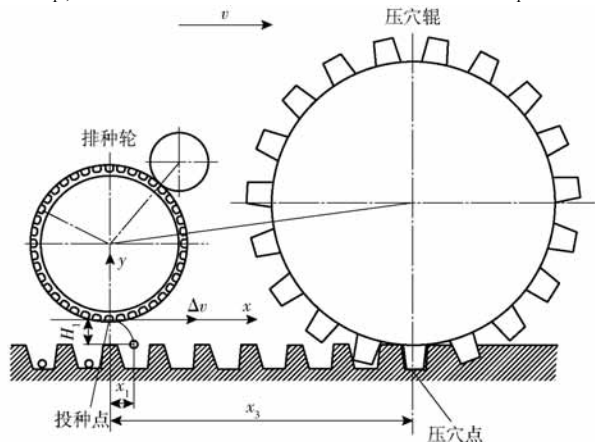


图 7 压穴投种示意图

Fig. 7 Schematic of planting by pressing hole

建立投种点处三七种子的运动方程

$$\begin{cases} x_1 = \Delta v t \\ H_1 = \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (16)$$

由式(13)~(16)可求出种子水平移动距离为

$$x_1 = \frac{\pi n_p}{60} [iD_1(1 - \delta_1) - D_p] \sqrt{\frac{2H_1}{g}} \quad (17)$$

投种高度  $H_1$  为 15 ~ 40 mm,排种轮转速  $n_p$  为 10 ~ 30 r/min,可得投种点处三七种子水平移动距离  $x_1$  为 10 ~ 50 mm。

投种点到压穴点的水平距离为  $x_3$ ,根据排种器整体的结构布置,每个种子能恰好落入穴孔中,投种点到压穴点的水平距离为

$$x_3 = x_1 + Ns \quad (18)$$

式中  $N$ ——间隔穴孔的数量

为了避免压穴辊与排种器运动干涉和装配方便,本文选取间隔穴孔的数量  $N = 6$ ,最终确定投种点到压穴点的水平距离  $x_3$  为 310 ~ 350 mm。

## 3 压穴排种性能试验

### 3.1 试验仪器设备

试验选用云南文山三七种子,试验时所用种子含水率为 57%,千粒质量为 69.77 g。在土槽上搭建台架试验台,土槽长 15 m,试验所需的动力由 MS-130ST-M10015 型电机提供,功率为 1.5 kW。压穴排种试验台如图 8 所示。台架前进速度由变频器调节,在行走稳定的情况下进行试验。



图 8 压穴排种试验台

Fig. 8 Platform of hole precision seed-metering device

1. 压穴辊 2. 一级传动机构 3. 排种器 4. 台架 5. 连接架

### 3.2 试验设计与方法

根据前期预试验结果,取压穴柱直径(下底直径)为 19 ~ 35 mm,前进速度为 0.25 ~ 0.8 m/s,投种点至压穴点水平距离为 310 ~ 350 mm。为寻求三因素最佳参数组合,采用三因素二次正交旋转中心组合试验的方法,按照文献[25]进行试验,选取压穴柱直径、前进速度、投种点到压穴点水平距离为试验因素,以入穴合格指数  $Y_1$ 、漏播指数  $Y_2$ 、重播指数  $Y_3$  及各行排量一致性变异系数  $Y_4$  为排种器工作性能指标,试验因素编码如表 1 所示,每组试验重复 3 次,取均值作为试验结果,每组试验统计两行连续

200个穴孔中每穴的粒数及穴孔深度。

表1 试验因素编码

Tab.1 Experimental factors and codes

编码	因素		
	压穴柱直径/ mm	前进速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	投种点到压穴点 水平距离/mm
-1.682	19	0.25	310
-1	22	0.36	318
0	27	0.53	330
1	32	0.69	342
1.682	35	0.80	350

### 3.3 试验结果分析

#### 3.3.1 试验结果

试验结果如表2所示,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 为压穴柱直径、前进速度、投种点到压穴点水平距离编码值。

表2 试验结果

Tab.2 Experiment results

试验 序号	因素			试验结果			
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$	$Y_4/\%$
1	-1	-1	-1	51.2	23.3	25.5	5.92
2	1	-1	-1	64.3	19.1	16.6	4.21
3	-1	1	-1	54.6	25.5	19.9	7.24
4	1	1	-1	68.5	14.8	16.4	4.38
5	-1	-1	1	55.3	18.9	25.8	3.92
6	1	-1	1	82.6	17.0	0.4	2.57
7	-1	1	1	68.6	14.5	16.7	8.83
8	1	1	1	84.4	5.6	10.0	5.23
9	-1.682	0	0	54.3	25.6	23.1	7.49
10	1.682	0	0	82.7	14.5	2.8	3.47
11	0	-1.682	0	55.6	23.5	20.9	2.17
12	0	1.682	0	82.6	1.1	16.3	9.42
13	0	0	-1.682	56.8	15.9	27.3	4.27
14	0	0	1.682	83.6	12.8	3.6	3.96
15	0	0	0	89.7	7.8	2.5	2.71
16	0	0	0	88.7	9.4	1.9	3.19
17	0	0	0	92.5	5.8	1.7	3.07
18	0	0	0	95.5	4.0	0.5	2.01
19	0	0	0	92.2	6.6	1.2	2.54
20	0	0	0	84.3	7.9	7.8	4.92
21	0	0	0	90.2	7.7	2.1	3.38
22	0	0	0	90.9	5.7	3.4	3.67
23	0	0	0	93.5	2.2	4.3	3.15

#### 3.3.2 回归模型的建立与显著性检验

采用 Design-Expert 8.0.6 软件对数据进行多元回归拟合<sup>[26-29]</sup>,对试验结果进行回归分析,得到合格指数  $Y_1$ 、漏播指数  $Y_2$ 、重播指数  $Y_3$ 和各行排量一致性变异系数  $Y_4$ 的回归方程。

##### 3.3.2.1 合格指数 $Y_1$

通过对试验数据分析,多元回归拟合得到各因

素影响合格指数  $Y_1$ 的回归模型为

$$Y_1 = 90.89 + 8.63X_1 + 4.99X_2 + 7.13X_3 - 1.34X_1X_2 + 2.01X_1X_3 + 0.94X_2X_3 - 8.26X_1^2 - 8.05X_2^2 - 7.66X_3^2 \quad (19)$$

根据方差分析(表3)可知,该模型的拟合度极显著( $P < 0.01$ )。但压穴柱直径和前进速度的交互项( $X_1X_2$ )、压穴柱直径和投种点到压穴点水平距离的交互项( $X_1X_3$ )以及前进速度和投种点到压穴点水平距离的交互项( $X_2X_3$ )的  $P$ 值均大于0.05,说明以上各项对合格指数的影响不显著,得出相关试验因素对响应值存在二次关系。失拟项不显著( $P = 0.1267$ ),说明不存在其他影响指标的主要因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_1 = 90.87 + 8.44X_1 + 8.03X_2 + 7.97X_3 - 8.26X_1^2 - 8.05X_2^2 - 7.66X_3^2 \quad (20)$$

通过对回归方程系数的检验,得到影响合格指数的因素主次顺序为:压穴柱直径、投种点到压穴点水平距离和前进速度。

##### 3.3.2.2 漏播指数 $Y_2$

通过对试验数据分析,多元回归拟合得到各因素影响漏播指数  $Y_2$ 的回归模型为

$$Y_2 = 6.32 - 3.25X_1 - 4.07X_2 - 2.34X_3 - 1.69X_1X_2 + 0.51X_1X_3 - 1.71X_2X_3 + 5.1X_1^2 + 2.36X_2^2 + 3.08X_3^2 \quad (21)$$

根据方差分析(表3)可知,该模型的拟合度极显著( $P < 0.01$ )。压穴柱直径和前进速度的交互项( $X_1X_2$ )、压穴柱直径和投种点到压穴点水平距离的交互项( $X_1X_3$ )以及前进速度和投种点到压穴点水平距离的交互项( $X_2X_3$ )的  $P$ 值均大于0.05,说明以上各项对排种漏播指数的影响不显著,得出相关试验因素对响应值存在二次关系。失拟项不显著( $P = 0.0519$ ),说明不存在其他影响指标的主要因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_2 = 6.32 - 3.3X_1 - 6.66X_2 - 0.92X_3 + 5.1X_1^2 + 2.36X_2^2 + 3.08X_3^2 \quad (22)$$

通过对回归方程系数的检验,得到影响漏播指数的因素主次顺序为:前进速度、压穴柱直径和投种点到压穴点水平距离。

##### 3.3.2.3 重播指数 $Y_3$

通过对试验数据分析,多元回归拟合得到各因素影响重播指数  $Y_3$ 的回归模型为

$$Y_3 = 2.82 - 5.76X_1 - 0.95X_2 - 4.79X_3 + 3.01X_1X_2 - 2.46X_1X_3 + 0.79X_2X_3 + 3.57X_1^2 + 5.57X_2^2 + 4.46X_3^2 \quad (23)$$

根据方差分析(表3)可知,该模型的拟合度极显著( $P < 0.01$ )。但前进速度( $X_2$ )、前进速度和投

表 3 回归方程方差分析

Tab. 3 Variance analysis of regression equation

方差来源	合格指数				漏播指数				重播指数				各行排量一致性变异系数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	5 111.1	9	35.54	<0.000 1**	1 137.54	9	12.83	<0.000 1**	1 902.89	9	24.56	<0.000 1**	84.80	9	13.68	<0.000 1**
$X_1$	1 017.19	1	63.65	<0.000 1**	144.14	1	14.63	0.002 1**	453.84	1	52.61	<0.000 1**	19.41	1	28.18	0.000 1**
$X_2$	339.66	1	21.25	0.000 5**	226.13	1	22.96	0.000 4**	12.44	1	1.45	0.250 7	33.07	1	48.01	<0.000 1**
$X_3$	694.25	1	43.44	<0.000 1**	74.58	1	7.57	0.016 5*	312.79	1	36.34	<0.000 1**	0.22	1	0.31	0.584 2
$X_1X_2$	14.31	1	0.9	0.361 2	22.78	1	2.31	0.152 3	72.60	1	8.43	0.012 3*	1.44	1	2.10	0.171 2
$X_1X_3$	32.4	1	2.03	0.178	2.1	1	0.21	0.651 8	48.51	1	5.64	0.033 7*	0.018	1	0.026	0.873 9
$X_2X_3$	7.03	1	0.44	0.518 7	23.46	1	2.28	0.146 7	4.96	1	0.58	0.461 3	4.62	1	6.71	0.022 4*
$X_1^2$	1 084.94	1	67.87	<0.000 1**	412.77	1	41.91	<0.000 1**	202.94	1	23.58	0.000 3**	10.70	1	15.53	0.001 7**
$X_2^2$	1 029.95	1	64.45	<0.000 1**	88.26	1	8.96	0.010 4*	493.21	1	57.3	<0.000 1**	13.80	1	20.03	0.000 6**
$X_3^2$	932.85	1	58.37	<0.000 1**	150.89	1	15.32	0.001 8**	315.74	1	36.68	<0.000 1**	1.81	1	2.63	0.128 6
残差	207.76	13			128.05	13			111.89	13			8.95	13		
失拟	125.3	2	2.43	0.126 7	88.88	2	3.63	0.051 9	73.84	2	3.1	0.075 1	3.63	5	1.09	0.432 6
误差	82.46	8			39.16	8			38.06	8			5.32	8		
总和	5 318.85	22			1 265.58	22			2 014.78	22			93.76	22		

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

种点到压穴点水平距离的交互项( $X_2X_3$ )的  $P$  值大于 0.05,说明以上各项对排种重播指数的影响不显著,得出相关试验因素对响应值存在二次关系。失拟项不显著( $P = 0.075 1$ ),说明不存在其他影响指标的主要因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_3 = 2.82 - 6.04X_1 - 7.05X_3 + 3.01X_1X_2 - 2.46X_1X_3 + 3.57X_1^2 + 5.57X_2^2 + 4.46X_3^2 \quad (24)$$

通过对回归方程系数的检验,得到影响重播指数的因素主次顺序为:压穴柱直径、投种点到压穴点水平距离和前进速度。

### 3.3.2.4 各行排量一致性变异系数 $Y_4$

通过对试验数据分析,多元回归拟合得到各因素影响各行排量一致性变异系数  $Y_4$  的回归模型为

$$Y_4 = 3.18 - 1.19X_1 + 1.56X_2 - 0.13X_3 - 0.42X_1X_2 - 0.047X_1X_3 + 0.76X_2X_3 + 0.82X_1^2 + 0.93X_2^2 + 0.34X_3^2 \quad (25)$$

根据方差分析(表 3)可知,该模型的拟合度极显著( $P < 0.01$ )。回归模型失拟项  $P = 0.432 6$ ,表现为不显著。其中投种点到压穴点水平距离( $X_3$ )、压穴柱直径与前进速度交互项( $X_1X_2$ )、压穴柱直径和投种点到压穴点水平距离的交互项( $X_1X_3$ )、投种点到压穴点水平距离的平方( $X_3^2$ )的影响均不显著,将其剔除后得到回归方程

$$Y_4 = 3.18 - 1.2X_1 + 2.16X_2 + 0.76X_2X_3 + 0.82X_1^2 + 0.93X_2^2 \quad (26)$$

通过对回归方程系数的检验,得到影响各行排量一致性变异系数因素的主次顺序为:前进速度、压穴柱直径和投种点到压穴点水平距离。

## 3.4 各因素对合格指数的影响

通过 Design-Expert 8.0.6 对数据进行处理,可得到压穴柱直径  $X_1$ 、前进速度  $X_2$  和投种点到压穴点水平距离  $X_3$  对合格指数的影响,其响应曲面如图 9 所示。固定其中某个因素水平,根据响应曲面,分析另外 2 个因素的相互作用对合格指数的影响。

### 3.4.1 压穴柱直径和前进速度的交互作用

图 9a 为投种点到压穴点水平距离在 330 mm 时,压穴柱直径和前进速度的交互作用的响应曲面。可知,压穴柱直径为 24.5 ~ 29.5 mm、前进速度在 0.44 ~ 0.61 m/s 时,排种器合格指数较高。压穴柱直径一定时,随着前进速度的增大,合格指数先上升后下降。前进速度一定时,随着压穴柱直径的增大,合格指数先上升后下降。压穴柱直径为 27 mm、前进速度为 0.53 m/s 时,合格指数最高。

### 3.4.2 压穴柱直径和投种点到压穴点水平距离的交互作用

图 9b 为前进速度为 0.53 m/s 时,压穴柱直径和投种点到压穴点水平距离交互作用对合格指数的响应曲面。可知,压穴柱直径为 24.5 ~ 29.5 mm、投种点到压穴点水平距离为 324 ~ 336 mm 时,合格指数较高。压穴柱直径一定时,随着投种点到压穴点水平距离增大,合格指数先上升后下降。投种点到压穴点水平距离一定时,随着压穴柱直径增大,合格指数先上升后下降。压穴柱直径为 27 mm、投种点到压穴点水平距离为 330 mm 时,合格指数最高。

### 3.4.3 前进速度和投种点到压穴点水平距离的交互作用

图 9c 为压穴柱直径为 27 mm 时,前进速度和投

种点到压穴点水平距离的交互作用对合格指数的响应曲面。可知,前进速度为0.44~0.61 m/s、投种点到压穴点水平距离为324~336 mm时,合格指数较高。前进速度一定时,随着投种点到压穴点水平距

离增大,合格指数先上升后下降。投种点到压穴点水平距离一定时,随着前进速度增大,合格指数先上升后下降。前进速度为0.53 m/s、投种点到压穴点水平距离为330 mm时,合格指数最高。

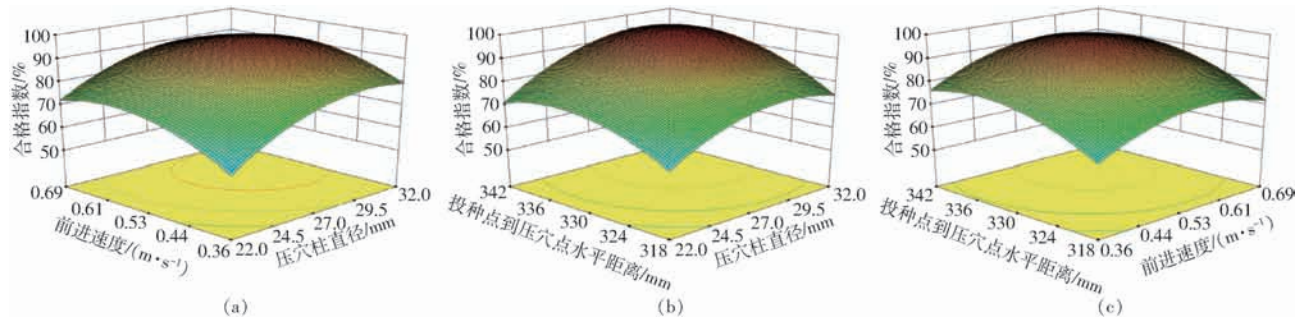


图9 交互因素对合格指数影响的响应曲面

Fig. 9 Response surface of interaction factors affecting qualified index

### 3.5 最佳参数优化

设定合格指数大于90%,重播指数小于5%,漏播指数小于5%,优化得到最佳参数范围如图10所示。在投种点到压穴点水平距离为330 mm时,黄色区域为参数优化区域,即前进速度为0.44~0.61 m/s、压穴柱直径为24.5~29.5 mm时,合格指数大于90%,漏播指数小于5%,重播指数小于5%。

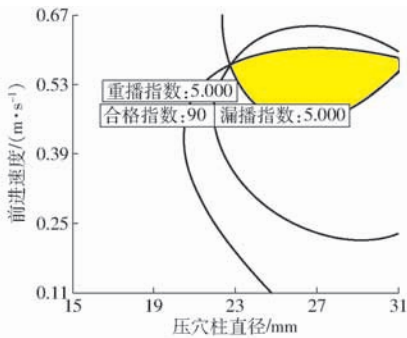


图10 参数优化分析

Fig. 10 Parameters optimum analysis

对于优化后的结果进行试验验证。在相同的试验条件下选取压穴柱直径为27 mm,前进速度为0.53 m/s,投种点到压穴点水平距离为330 mm,进行3次重复试验,得到合格指数平均值为93.25% (大于90%),漏播指数平均值为3.18% (小于5%),重播指数平均值为3.57% (小于5%),试验结果与优化结果相符。

### 3.6 播种深度一致性试验

在二次旋转正交组合试验基础上,对播种深度一致性进行了试验验证,选取压穴柱直径为27 mm,前进速度为0.53 m/s,投种点到压穴点水平距离为330 mm,进行排种性能试验,统计两行连续200个穴孔深度,测量3次,试验结果如表4所示。

由表4可知,播深合格指数均值均大于90%,且均值差异为6.1%,差异较小,压穴一致性较好。

表4 播种深度一致性试验结果

Tab. 4 Test result of consistency of seeding depth

试验序号	平均播深/mm	播深合格指数/%	标准差/mm	变异系数/%
1	24.3	96.2	1.80	7.4
2	24.5	94.6	2.10	8.6
3	25.1	95.4	1.90	7.6

## 4 田间试验

在三七压穴精密排种装置基础上,研制了2BQ-15型三七精密播种机,图11为整机结构简图,该播种机由汽油机提供动力,依靠离心式摩擦离合器和皮带张紧机构等完成整机前进和停止;播种机工作时,闭合胶带张紧机构,汽油机动力由带传动机构带动地轮转动,播种机向前行驶,压穴辊转动压出穴孔,排种器排出的种子落入穴孔,即完成整机播种。

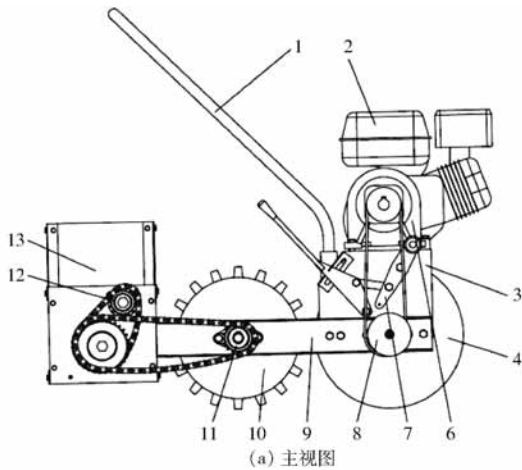
该播种机播种行数为15行,压穴柱直径为27 mm,投种点到压穴点水平距离为330 mm,为验证压穴精密排种装置性能,分析排种器各行排种性能一致性和总排种量稳定性,进行整机田间试验,如图12所示。表5为不同作业速度下播种机播种性能参数,该机型通过了云南省农业机械产品质量监督检验站检测。

由表5可知,在不同的作业速度下,播种机合格指数先升高后降低,在作业速度为0.35 m/s时,合格指数最高为93.5%;总排种量稳定性变异系数总体呈增大趋势,且波动范围较小;随着作业速度增加各行排种一致性变异系数呈增大趋势,且波动范围较大。

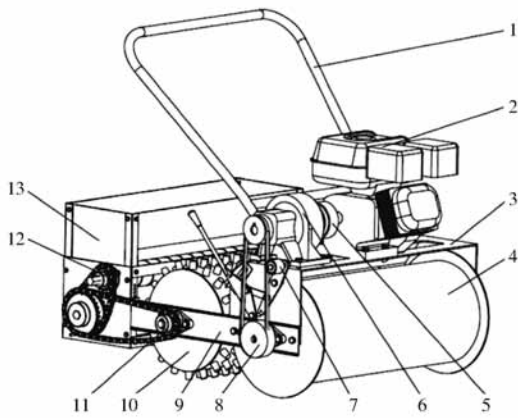
## 5 结论

(1) 设计的三七压穴精密排种器,集成了压穴和





(a) 主视图



(b) 轴测图

图 11 整机结构简图

Fig. 11 Structure diagrams of whole machine

1. 把手 2. 汽油机 3. 汽油机支架 4. 地轮 5. 离心式摩擦离合器 6. 连接架 7. 胶带张紧机构 8. 带传动机构 9. 机架 10. 压穴辊 11. 一级传动机构 12. 二级传动机构 13. 种箱

播种两大功能,结构紧凑,避免了传统开沟方式,减小了土壤的扰动,降低了排种阻力,针对不同尺寸的种子,可更换不同型孔尺寸的排种轮来满足播种要求。

(2) 采用二次旋转组合试验方法进行试验,并对试验结果进行方差分析,得出影响合格指数的主



图 12 2BQ-15 型三七精密播种机田间试验

Fig. 12 Field experiment of 2BQ-15 type precision planter for *Panax notoginseng*

表 5 2BQ-15 型三七精密播种机性能参数

Tab. 5 Seeding performance parameters of 2BQ-15 type precision planter for *Panax notoginseng*

作业速度/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	合格指数/ %	总排种量稳定性 变异系数/%	各行排种一致性 变异系数/%
0.25	92.3	0.60	1.84
0.35	93.5	0.66	2.69
0.45	92.5	0.68	2.40
0.55	89.6	0.57	3.02
0.65	88.4	0.75	8.36

次顺序为压穴柱直径、投种点到压穴点水平距离和前进速度。利用 Design-Expert 8.0.6 软件进行数据优化处理,以合格指数、漏播指数、重播指数为评价指标,得出最佳参数为:投种点到压穴点水平距离 330 mm,前进速度 0.44 ~ 0.61 m/s,压穴柱直径 24.5 ~ 29.5 mm,此时合格指数大于 90%,漏播指数小于 5%,重播指数小于 5%,经试验验证,与优化结果基本一致。

(3) 为了验证优化结果的准确性,通过整机田间试验,得到 2BQ-15 型三七精密播种机在作业速度为 0.35 m/s 时,播种机合格指数最高,为 93.5%,满足三七播种农艺要求。

## 参 考 文 献

- [1] 杨文彩,朱有勇,杜迁,等. 基于农机农艺融合的三七机械化精密播种系统研究[J]. 广东农业科学,2014(2):175-180. YANG Wencai, ZHU Youyong, DU Qian, et al. Systematic study on notoginseng mechanized precision seeding based on integration of agricultural machinery and agronomy[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014(2):175-180. (in Chinese)
  - [2] ISMAIL Z E, EL-HANIFY E H. Construction and testing the seed-punch planter[J]. Farm Machinery and Power, 2009, 26(1): 597-607.
  - [3] LAWRENCE M J, BUCKMASTER D R, LAMONT W J. A pneumatic dibbling machine for plastic mulch [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2007, 23(4):419-424.
  - [4] WILKINS D E, ADRIAN P A, CONLEY W J. Punch planting of vegetable seeds—a progress report[J]. Transactions of the ASAE, 1979, 22(4):746-749.
  - [5] JAFARI J V, FORNSTROM K J. A precision punch-planter for sugar beets[J]. Transactions of the ASAE, 1972, 15(3):569-571.
  - [6] 李沐桐,李天宇,官晓东,等. 旱地回转扎穴式播种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(2):48-57. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180207&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180207&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.007.
- LI Mutong, LI Tianyu, GUAN Xiaodong, et al. Mechanism design and experiment of rotary hole seeder for dryland [J/OL].

- Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 48-57. (in Chinese)
- [7] 陈学庚, 王敏. 气吸鸭嘴滚筒式精密穴播器关键因素的研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(3): 30-37.  
CHEN Xuegeng, WANG Min. Study on key factors of the duckbill punch roller-type pneumatic metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(3): 30-37. (in Chinese)
- [8] 杨善东, 杜瑞成. 多功能小麥覆膜穴播机的设计[J]. 农机化研究, 2007, 29(2): 33-37.  
YANG Shandong, DU Ruicheng. Design of multifunctional mulching film and punch planter for wheat[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(2): 33-37. (in Chinese)
- [9] 田立权, 王金武, 唐汉, 等. 螺旋槽式水稻穴直播排种器设计与性能试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 46-52.  
[http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160507&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160507&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.007.  
TIAN Liqun, WANG Jinwu, TANG Han, et al. Design and performance experiment of helix grooved rice seeding device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 46-52. (in Chinese)
- [10] 罗锡文, 蒋恩臣, 王在满, 等. 开沟起垄式水稻精量穴直播机的研制[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 52-56.  
LUO Xiwen, JIANG Enchen, WANG Zaiman, et al. Precision rice hill drop drilling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12): 52-56. (in Chinese)
- [11] 赵武云, 戴飞, 杨杰, 等. 玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 91-97.  
[http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20131117&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131117&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.11.017.  
ZHAO Wuyun, DAI Fei, YANG Jie, et al. Design and experiment of direct insert precision hill seeder with corn whole plastic film mulching on double ridge[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(11): 91-97. (in Chinese)
- [12] 付威, 罗锡文, 曾山, 等. 水稻精量旱穴播机穴距电液比例控制系统的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 25-31.  
FU Wei, LUO Xiwen, ZENG Shan, et al. Design and experiment of electro-hydraulic proportional control hill distance system of precision rice hill-drop drilling machine for dry land[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 25-31. (in Chinese)
- [13] 刘芳, 杜瑞成. 内置式双位投种穴播器[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 35-40.  
LIU Fang, DU Ruicheng. Embedded double-position throwing seeds dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 35-40. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 魏宏安, 邵世禄. 垂直插入式小麦覆膜穴播器的研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(6): 34-37.  
WEI Hongan, SHAO Shilu. Study on wheat hill-drop planter used for perpendicularly inserting film mulching field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(6): 34-37. (in Chinese)
- [16] 苗庆波, 张秀花. 一种鸭嘴式压穴和播种一体装置的设计与仿真研究[J]. 中国科技论文, 2017, 12(10): 35-40.  
MIAO Qingbo, ZHANG Xiuhua. Design and modeling on the integrated device of duckbill punching and sowing[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(10): 35-40. (in Chinese)
- [17] 陈学庚, 卢勇涛. 气吸滚筒式棉花精量穴播器排种性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 35-38.  
CHEN Xuegeng, LU Yongtao. Sowing performance of air-suction cylindrical cotton precision dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 35-38. (in Chinese)
- [18] 刘宏新, 王盼, 改广伟, 等. 基于五杆机构的注射式免耕播种成穴轨迹分析与参数求解[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 21-29.  
LIU Hongxin, WANG Pan, GAI Guangwei, et al. Analysis and parameter solution of injection type no-till seeding into hole trajectory based on five-bar mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 21-29. (in Chinese)
- [19] 戴飞, 赵武云, 石林榕, 等. 基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 74-81.  
[http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161110&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161110&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.010.  
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Design and experiment of hill-seeder with whole plastic-film mulching on double ridges for corn based on mechanism with approximate constant speed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 74-81. (in Chinese)
- [20] ZHOU Limin, JIN Shengli, LIU Changan, et al. Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize-soil interactions: opportunities and challenges in a semiarid agroecosystem[J]. Field Crops Research, 2012, 126: 181-188.
- [21] QIN Shuhao, ZHANG Junlian, DAI Hailin, et al. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area[J]. Agricultural Water Management, 2014, 131: 87-94.
- [22] 马成林, 李成华, 于海业. 打穴播种机研究的发展与现状[J]. 农业机械学报, 1999, 30(1): 101-105.  
MA Chenglin, LI Chenghua, YU Haiye. Development and status of research on punch planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(1): 101-105. (in Chinese)

- [23] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
- [24] 任闯,高筱钧,苏微,等. 三七种子的物理机械特性试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2015,41(1):109-112. REN Chuang, GAO Xiaojun, SU Wei, et al. Experimental study on physical and mechanical characteristics of *Panax notoginseng* seeds[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences),2015,41(1):109-112. (in Chinese)
- [25] GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 2005.
- [26] 王春林,彭海菠,丁剑,等. 基于响应面法的旋流泵优化设计[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(5):59-65. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130512&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130512&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.05.012. WANG Chunlin, PENG Haibo, DING Jian, et al. Optimization for vortex pump based on response surface method [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2013,44(5):59-65. (in Chinese)
- [27] 袁雪,祁力钧,王虎,等. 温室摇摆式变量弥雾机喷雾参数响应面法优化[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(4):45-50. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20120410&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120410&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.010. YUAN Xue, QI Lijun, WANG Hu, et al. Spraying parameters optimization of swing, automatic variables and greenhouse mist sprayer with response surface method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(4):45-50. (in Chinese)
- [28] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [29] 赖庆辉,马文鹏,刘素,等. 气吸圆盘式微型薯排种器充种性能模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(5):44-53. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170505&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170505&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.005. LAI Qinghui, MA Wenpeng, LIU Su, et al. Simulation and experiment on seed-filling performance of pneumatic disc seed-metering device for mini-tuber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(5):44-53. (in Chinese)

(上接第 161 页)

- [18] DAVIDSON J, SILWAL A, KARKEE M, et al. Hand-picking dynamic analysis for undersensed robotic apple harvesting[J]. Transactions of the ASABE, 2016, 59(4):745-758.
- [19] LI J, KARKEE M, ZHANG Q, et al. Characterizing apple picking patterns for robotic harvesting [J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2016, 127:633-640.
- [20] HE L, FU H, SUN D Z, et al. Shake-and-catch harvesting for fresh market apples in trellis-trained trees[J]. Transactions of the ASABE, 2017, 60(2):353-360.
- [21] 陈燕,蒋志林,李嘉威,等. 夹剪一体的荔枝采摘末端执行器设计与性能试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(1):35-41. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20180104&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180104&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.004. CHEN Yan, JIANG Zhilin, LI Jiawei, et al. Design and testing of litchi picking end-effector integrated clamping and cutting performance[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1):35-41. (in Chinese)
- [22] 杨义勇,金德闻. 机械系统动力学[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [23] 孙桓,陈作模,葛文杰. 机械原理[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [24] 季顺中,李双,陈树人,等. 基于 ADAMS 的高速插秧机三插臂分插机构运动仿真[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):82-85. JI Shunzhong, LI Shuang, CHEN Shuren, et al. Kinematical simulation of three separating planting bars of high-performance rice transplanter based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.):82-85. (in Chinese)
- [25] 杜岳峰,毛恩荣,宋正河,等. 基于 ADAMS 的玉米植株收获过程仿真[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(增刊):106-111. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=2012s21&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s21&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.021. DU Yuefeng, MAO Enrong, SONG Zhenghe, et al. Simulation on corn plants in harvesting process based on ADAMS[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.):106-111. (in Chinese)
- [26] 贾洪雷,郭明卓,郭春江,等. 免耕播种机动态仿生破茬装置设计与参数试验优化[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):103-114. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20181012&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181012&journal_id=jcsam). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.012. JIA Honglei, GUO Mingzhuo, GUO Chunjiang, et al. Design of dynamic bionic stubble cutting device and optimization test of parameters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):103-114. (in Chinese)