

## 棉花精量排种器排种性能试验研究

肖旭<sup>1</sup> 全腊珍<sup>1,2\*</sup> 全伟<sup>1,2</sup> 李明<sup>1,2</sup> 廖配<sup>1</sup> 杨思远<sup>1</sup> 李岑<sup>1</sup>

(1. 湖南农业大学 工学院,长沙 410128;

2. 湖南省现代农业装备工程技术研究中心,长沙 410128)

**摘要** 为实现南方棉花种子的精量播种,设计一种满足南方棉花种子“一穴两粒”农艺要求的机械式精量穴播棉花排种器,将该排种器安装在 JPS-12 型全自动排种器性能检测台上进行棉花种子排种性能试验。分别以合格指数、漏播指数和重播指数为评价该排种器排种性能指标,以适用于南方的棉花种子(湘杂棉 3 号、湘杂棉 8 号和慈抗杂 3 号)为试验对象,对排种器转速、勺孔直径和种室曲面曲率半径 3 个因素进行单因素试验,得出各因素作业时的最优范围。正交试验结果得到排种性能各因素的最优组合为:排种器转速 100 rad/s,勺孔直径 9 mm,种室曲面曲率半径 25 mm;该组合下,棉花种子精量排种效果较好,穴粒数合格指数为 93.62%,重播指数 3.87%,漏播指数 2.51%。该机械式精量穴播棉花排种器满足国家标准对棉花种子的播种要求。

**关键词** 棉花;精量穴播排种器;合格率;重播率;漏播率

**中图分类号** S 223.2+3

**文章编号** 1007-4333(2018)09-0148-08

**文献标志码** A

## Design and experiment of a cotton precision bunch sowing device

XIAO Xu<sup>1</sup>, QUAN Lazhen<sup>1,2\*</sup>, QUAN Wei<sup>1,2</sup>, LI Ming<sup>1,2</sup>, LIAO Pei<sup>1</sup>, YANG Siyuan<sup>1</sup>, LI Cen<sup>1</sup>

(1. College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center for Modern Agricultural Equipment, Changsha 410128, China)

**Abstract** In order to realize the agronomic requirements of "one hole two grains" in the southern cotton field, a two-row mechanical precision cotton seed metering device was designed. The seed metering device adopted the principle of seeding with a spoon hole in JPS-12 automatic seeding performance test bench to test the new seeding device's performance. In order to evaluate the seeding performance index of the seeding device, the cotton varieties (Xiangzamian No.3, Xiangzamian No.8 and Ciqizha No.3) in the south were evaluated by passing rate, leakage rate and replay rate. The effects of seeding speed, spoon hole diameter and the curvature radius of seed room surface were studied. The results showed that when the speed of seed metering device was 100 rad/s, the diameter of the spoon hole was 9 mm and the radius of curvature of the chamber surface was 25 mm, the pass rate reached 93.62%, the replay rate reached 3.87% and the sowing rate reached 2.51%. The cotton precision bunch sowing device meets the national seeding standard requirements.

**Keywords** cotton; precision bunch; pass rate; replay rate; leak sowing rate

排种器是播种机实现精量播种的关键部件<sup>[1]</sup>,排种器排种性能直接影响农作物种植质量。精量排种器从原理上分为气力式排种器和机械式排种器<sup>[2-4]</sup>。气力式排种器对种子的适应性较强,对种子的损伤较低,但结构较为复杂,技术和成本较高。而

机械式排种器对种子的外形尺寸有严格要求,难以实现高速化精量播种且存在种子破碎的情况。目前,高速精量排种器在国内外已有研究<sup>[5]</sup>。如刘艳芬等<sup>[6]</sup>研制的水平圆盘排种器,播种效果随着排种器转速的增加而明显降低,难以实现高速化精量播

收稿日期:2017-12-19

基金项目:湖南省财政厅项目(6211009)

第一作者:肖旭,硕士研究生,E-mail:395949410@qq.com

通讯作者:全腊珍,教授,主要从事棉花农业机械研究,E-mail:527752965@qq.com

种。陈玉龙等<sup>[7]</sup>研制了一种凸勺排种器,并利用 EDEM 对该排种器性能进行了离散元分析,但随着转速的提升,充种效果明显降低。Singh 等<sup>[8]</sup>对水平圆盘排种器进行优化设计,根据种子的几何尺寸决定排种型孔的参数,提高了排种精度。Than Shein<sup>[9]</sup>对水平圆盘排种器的适应性进行了研究,并提出了相关改进方案。为解决排种器充种效果不佳、种子破碎和南方地区“一穴两粒”的农艺要求问题<sup>[10]</sup>。本研究拟对机械式棉花精量排种器进行以排种器转速、种室曲面半径以及勺孔直径为主要因素的单因素试验和正交回归试验,研究各因素对排种器排种性能的影响,以期为实现棉花精密播种提供理论依据。

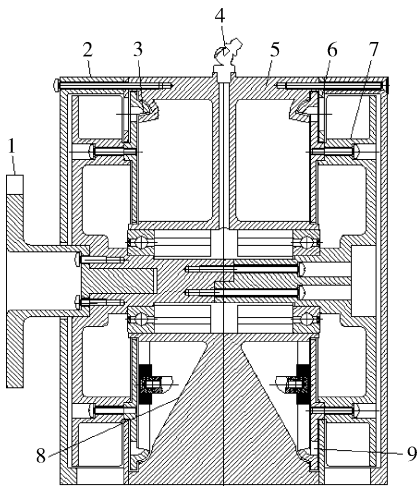
## 1 排种器结构及工作原理

### 1.1 排种器结构

机械式棉花精量排种器主要结构由:排种勺盘、递种盘、分种盘、进料盘、外壳、清种毛刷和链轮等组成(图 1)。其中,排种勺盘、递种盘和分种盘为进料盘机械式棉花精量排种器的排种部件,种室中有层用于引导种子进入勺孔的种室曲面,机械式棉花精量排种器的排种部件左右对称分布在进料盘左右,在工作过程中进行同步单粒精量排种,旨在满足播种机能实现“一穴两粒”的农艺要求。

### 1.2 工作原理

排种器工作过程分为充种、清种、护种、递种和投种 5 个阶段(图 2)。棉花种子从进料盘的入口进入,在重力作用下进入排种勺盘的勺孔中。排种器开始工作时,链轮转动带动排种轴转动,从而驱动排种勺盘转动。当排种勺盘进入充种区种群时,部分棉花种子进入勺孔中,当勺孔离开种群到达清种区时,清种毛刷将多余的棉花种子刷掉,保证勺孔中只有一粒棉花种子,被刷掉的棉花种子重新进入种群中。而后勺孔中的棉花种子进入护种区域,在护种盘的作用下保证勺孔中的棉花种子不会从勺孔中脱出。当排种勺盘离开护种区进入递种区,勺孔中的棉花种子在重力的作用下从递种口进入分种盘中。最后在分种盘的带动下,排种部件中的棉花种子受到重力和离心力的作用下同步从排种口排出棉花种子,完成投种过程。

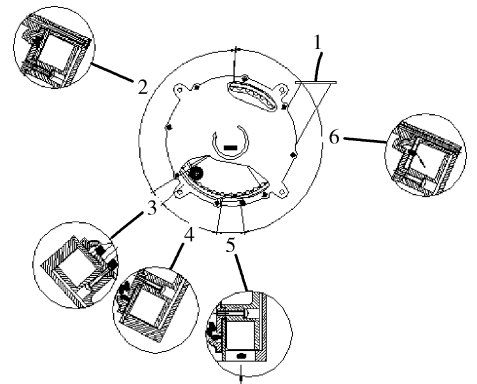


1. 链轮;2. 排种器外壳;3. 排种勺盘;4. 油嘴装置;5. 进料盘;6. 隔板;7. 分种盘;8. 种室曲面;9. 勺盘勺孔

1. Sprocket; 2. Row seed shell; 3. Rows of spoons; 4. Nozzles; 5. Incoming disc; 6. Partitions; 7. Seed dividing disc; 8. Seed chamber surface; 9. Spoon hole

图 1 排种器结构示意图

Fig. 1 The structure of seed-metering device



1. 种子入口;2. 护种区;3. 清种区;4. 充种区;5. 投种区;6. 递种区

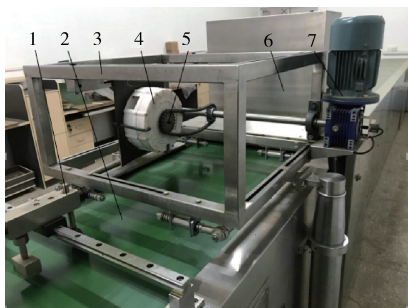
1. Seed entrance; 2. Breeding area; 3. Clearing areas; 4. Reclamation areas; 5. Put in area; 6. Delivery area

图 2 排种器工作区域示意图

Fig. 2 The area of seed-metering working

### 1.3 试验装置

试验设备为 JPS-12 型全自动排种器性能检测台(图 3)。本研究排种器通过销钉固定在多功能排种试验输送台的台架上,排种器的运动方向与传送带的运动方向一致,输送带速度由全自动排种器性能检测台的电脑控制,排种器转速由试验台自带的调速电机控制。试验之前,先将调速电机和高速摄影装置箱打开,排种器开始运动。当工作稳定后,由试验台的控制系统控制润滑油滴在输送带上接收排出的种子,根据高速摄影装置箱记录的落种情况<sup>[11]</sup>,



1. 滴油装置;2. 传送带;3. 固定装置;4. 棉花精量排种器;5. 链轮;6. 高速摄影箱;7. 调速电机

1. Oil drop device; 2. Conveyor belt; 3. Fixtures; 4. Cotton precision metering device; 5. Sprockets; 6. High speed camera; 7. Speed regulating motor

图3 排种器性能试验台

Fig. 3 The structural diagram of the seeder test

计算合格率、漏播率、重播率。每组试验重复5次,取平均值作为最终试验结果。

## 2 试验材料及方法

### 2.1 试验材料

试验对象为湖南常见的3种棉花种子,分别为:湘杂棉3号棉花种子、湘杂棉8号棉花种子和慈抗杂3号棉花种子。为更好的研究棉花种子的物理特性,将各种棉花种子根据外型不同分为两大类:扁平状和椭圆状。从每份种子中随机抽取500粒,测量其尺寸并计算平均值,得平均长度、长度变异系数、平均宽度、宽度变异系数、平均厚度以及厚度变异系数(表1)<sup>[12]</sup>。

表1 棉花种子的物理特性

Table 1 Physical properties of cotton seed

品种 Variety	平均长度/mm Average length	$P_L$	平均宽度/mm Average width	$P_w$	平均厚度/mm Average thickness	$P_t$
湘杂棉3号棉花种子(扁平状) Xiangzamian No. 3 (Flat)	9.32	3.52	4.34	2.51	4.01	1.93
湘杂棉3号棉花种子(椭圆状) Xiangzamian No. 3 (Elliptical)	9.58	3.47	4.03	2.73	3.87	2.03
湘杂棉8号棉花种子(扁平状) Xiangzamian No. 8 (Flat)	8.89	4.01	4.93	3.93	4.32	2.19
湘杂棉8号棉花种子(椭圆状) Xiangzamian No. 8 (Elliptical)	9.03	4.23	4.87	4.01	4.23	2.97
慈抗杂3号棉花种子(扁平状) Ciqizha No. 3 (Flat)	9.23	3.62	5.25	3.85	4.45	2.42
慈抗杂3号棉花种子(椭圆状) Ciqizha No. 3 (Elliptical)	9.37	3.58	4.98	3.98	4.32	2.74

注: $P_L$ 为长度变异系数/%; $P_w$ 为宽度变异系数/%; $P_t$ 为厚度变异系数/%。

Note: $P_L$  is coefficient of variation length.  $P_w$  is coefficient of variation width.  $P_t$  is coefficient of variation thickness.

### 2.2 试验方法与评价指标

试验采用单因素与多因素正交试验。考察排种器转速、种室曲面曲率半径、勺孔直径对排种器性能的影响,依据GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》<sup>[13]</sup>,重点将穴粒数合格率、重播率和漏播率作为评价指标。根据棉花的播种要求,每穴播种为2粒为合格;多余2粒为重播;少于2粒为漏播。试验过程中每组重复5次测定。

#### 2.2.1 单因素试验

影响排种性能因素较多,本研究主要探讨排种盘转速、勺孔直径以及种室曲面曲率在其他因素不

变的前提下对棉花排种器排种性能的影响<sup>[13]</sup>。

1)排种器转速对排种器性能的影响。

排种盘转速 $r$ 采用式(1)计算<sup>[12]</sup>:

$$r = \frac{v \times 60 \times 1\,000}{xN} \quad (1)$$

式中: $N$ 为棉花精量排种器的勺孔数,个; $v$ 为PS-12型自动排种器性能检测台的种床带速度,m/s; $x$ 为棉花种子的适用穴距,mm。计算得排种盘转速 $r$ 约为90 rad/s,所以排种器转速选择80、90、100、110和120 rad/s这5个因素水平进行单因素试验研究,分析排种器转速的变化对排种器排种性能的影响。

随着排种器转速的不断增大,由排种器排出的棉

花种子合格率先上升后下降,漏播率先下降后上升,重播率缓慢下降(图 4)。其中,当转速为 100 rad/s 时合格率最高。当转速为 80 rad/s 时重播率最高,这是因为排种器转动的速度相对较慢,堆积在种室曲面上的棉花种子有充分的时间与勺孔进行接触完成充种过程,所以排出的棉花种子重播率较高。当转速为 120 rad/s 时漏播率最高,这是因为排种器转动的速度相对较快,棉花种子与勺孔的接触时间很短,不能全部都及时进入充种勺孔中,所以排出的棉花种子漏播率较高。

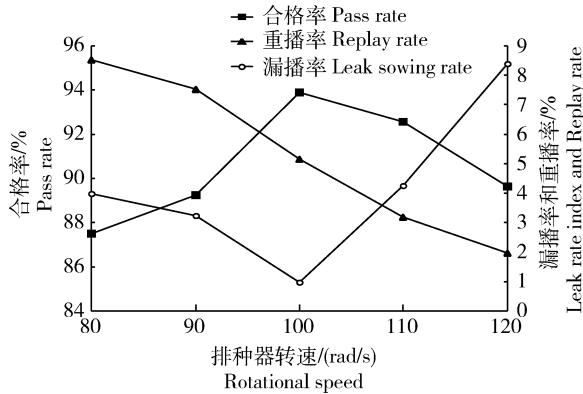


图 4 不同转速对排种性能的影响  
Fig. 4 Effects of rotation rate on the pass percentage of seeding

2) 种室曲面曲率半径对排种器性能的影响。

种室曲面可以有效控制棉花种子进入勺孔中,可以有效提高棉花种子在排种器工作过程中的流畅性,能提升棉花种子的充种合格率和降低棉花种子破碎率,因此有必要对种室曲面进行定义设计。参照王吉奎等<sup>[12]</sup>研究测定棉花种子的摩擦角约为 30°,测量出种室曲面半径约为 25 mm,所以种室曲面半径选择 15、20、25、30 和 35 mm 这 5 个因素水平进行单因素试验研究,分析种室曲面曲率半径的变化对排种器排种性能的影响。

随着种室曲面曲率的增大,排种合格率先上升后下降,漏播率缓慢下降(图 5)。其中,当种室曲面曲率为 25 mm 时合格率最高。当种室曲面曲率为 15 mm 时重播率最高,这是因为棉花种子受到的曲面缓冲力小,故在排种器工作过程中,棉花种子堆积在勺孔上方导致重播率较高。当种室曲面曲率在 35 mm 时漏播率最高,这是因为棉花种子堆积在种室中的倾斜角较大,受到的缓冲力较大,不能按时进入勺孔中导致漏播率较高。

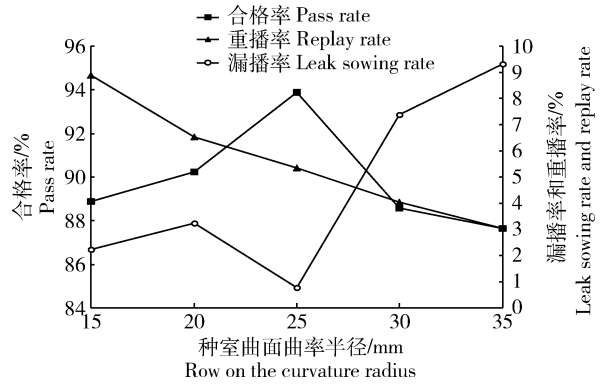


图 5 不同种室曲面曲率半径下的排种性能  
Fig. 5 Performance of the row on the curvature radius of different kinds of ventricle

3) 勺孔直径对排种性能的影响。

根据棉花种子的物理特性做了前期的初步试验,得出勺孔直径约为 9 mm 时,单边排种部件排出的棉花种子的单粒率最高,所以选择勺孔直径为 8.0、8.5、9.0、9.5 和 10.0 mm 这 5 个水平进行单因素试验研究,分析勺孔直径的变化对排种器排种性能的影响。

随着勺孔直径的增加,排种合格率先上升后下降,重播率缓慢增大,漏播率先减小后缓慢增大(图 6)。当勺孔直径为 8 mm 时漏播率最高,这是因为勺孔的直径较小,勺孔中的棉花种子通过率较小,漏播率较高。当勺孔直径为 10 mm 时漏播率最高,这是因为孔直径较大,勺孔中的棉花种子能较好的通过勺孔,导致重播率较高;当勺孔直径为 9 mm 时合格率最高。

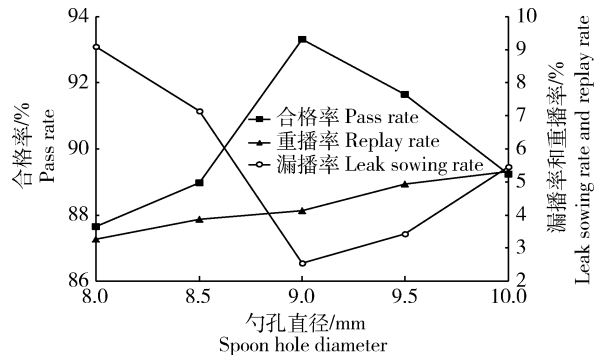


图 6 不同勺孔直径下的排种性能

Fig. 6 Metering performance of spoon holes of different diameters diameter of the hole

2.2.2 多因素试验

考虑到各参数的相互影响,根据单因素试验结果,对排种器转速、种室曲面曲率半径、勺孔直径进

行多因素正交试验,每组试验进行5次,结果取平均值。试验设计见表2。

表2 排种器性能试验因素水平编码表

Table 2 Test factor level coding table of seeder performance simulation

水平 Level	因素 Factor		
	$X_1$ /(rad/s)	$X_2$ /mm	$X_3$ /mm
1.682	80	15	8.0
1	90	20	8.5
0	100	25	9.0
-1	110	30	9.5
-1.682	120	35	10.0

注: $X_1$ 为排种器转速; $X_2$ 为种室曲面曲率半径; $X_3$ 为勺孔直径。表3同。

Note:  $X_1$  is rotational speed;  $X_2$  is the row on the curvature radius;  $X_3$  is the diameter of the hole. The same as in Table 3.

为了减少不必要的试验,更确切地寻求最佳的组合<sup>[15]</sup>。根据以上单因素试验结果进行综合分析,确定了正交试验的水平因素,进行棉花种子排种性能正交试验。试验结果见表3。

采用 Design-Expert8.0 软件分析得出,合格指数  $Q$ 、重播指数  $C$  和漏播指数  $M$  与排种器转速  $X_1$ 、种室曲面曲率半径  $X_2$  和勺孔直径  $X_3$  之间的回归系数及方程如下:

合格指数

$$Q = 92.45 + 0.1X_1 - 0.76X_2 + 0.13X_3 - 0.65X_1X_2 - 0.089X_1X_3 - 1.28X_2X_3 - 1.79X_1^2 - 1.04X_2^2 - 1.08X_3^2 \quad (2)$$

重播指数

$$C = 3.77 + 0.35X_1 - 0.48X_2 - 0.48X_3 - 0.17X_1X_2 - 0.5X_1X_3 + 0.66X_2X_3 + 0.5X_1^2 + 0.37X_2^2 + 0.5X_3^2 \quad (3)$$

表3 棉花种子正交试验结果

Table 3 Result of orthogonal tests

序号 Serial number	因素水平 Level of factor			合格指数 $Q$ /%	重播指数 $C$ /%	漏播指数 $M$ /%
	$X_1$ /(rad/s)	$X_2$ /mm	$X_3$ /mm			
1	-1	-1	-1	87.66	4.76	7.58
2	1	-1	-1	88.88	3.87	7.25
3	-1	1	-1	89.64	3.70	6.66
4	1	1	-1	88.23	4.44	7.33
5	-1	-1	1	90.89	4.20	4.91
6	1	-1	1	91.72	3.65	4.63
7	-1	1	1	87.72	8.12	4.16
8	-1.682	0	0	86.23	3.19	10.58
9	1.682	0	0	87.70	8.58	3.72
10	0	-1.682	0	89.92	8.72	1.36
11	0	1.682	0	88.23	2.31	9.46
12	0	0	-1.682	89.03	8.92	2.05
13	0	0	1.682	88.92	2.82	8.26
14	0	0	0	93.27	3.23	3.50
15	0	0	0	92.00	3.42	4.58
16	0	0	0	91.80	2.98	5.22
17	0	0	0	91.65	5.81	2.54
18	0	0	0	91.21	3.63	5.16
19	0	0	0	93.62	3.87	2.51
20	0	0	0	92.87	4.12	3.01
21	0	0	0	92.13	3.98	3.89
22	0	0	0	93.45	3.65	2.90
23	0	0	0	92.65	2.76	4.59

漏播指数

$$M = 3.78 - 0.45X_1 - 1.24X_2 + 0.35X_3 + 0.83X_1X_2 + 0.59X_1X_3 + 0.62X_2X_3 + 1.28X_1^2 + 0.67X_2^2 + 0.58X_3^2 \quad (4)$$

可以看出,影响合格率的因素大小依次为  $X_2X_3$ 、 $X_2$ 、 $X_1X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_1$ 、 $X_1X_3$ ;影响重播率的因素大小依次是  $X_2X_3$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_2 = X_3$ 、 $X_1$ 、 $X_1X_2$ ;影响漏播指数的因素大小依次是  $X_2$ 、 $X_1X_2$ 、 $X_2X_3$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_1$ 、 $X_3$ 。

2.3 参数优化

当排种器转速为 80~120 rad/s,种室曲面曲率半径为 15~35 mm,勺孔直径为 8~10 mm 时,采用多重响应方法中的主目标函数法对排种器影响因素(排种器转速、勺孔直径和种室曲面曲率半径)进行优化,分别以合格指数、重播指数和漏播指数作为性能指数函数,进行优化求解,其目标函数和约束条件为:

$$\begin{cases} Q_{\max} \\ C < 3\% \\ M < 6\% \\ 80 \text{ rad/s} \leq X_1 \leq 120 \text{ rad/s} \\ 20 \text{ mm} \leq X_2 \leq 30 \text{ mm} \\ 8 \text{ mm} \leq X_3 \leq 10 \text{ mm} \end{cases} \quad (5)$$

运用 Design-Expert 进行优化求解得出:排种器转速为 100 rad/s,种室曲面曲率半径 25 mm,勺孔直

径 9 mm。目标函数的预测值为:合格率 93.62%,重播率 3.87%,漏播率 2.51%。

2.4 验证试验

根据优化结果进行 5 次重复性验证试验,试验结果为:合格率平均值 93.5%,重播率平均值 4.3%,漏播率平均值 2.2%,试验结果与优化结果基本一致,满足棉花播种的农艺要求。

2.5 排种适应性试验

在原有的正交试验的基础上,进一步研究排种器对不同品种棉花种子的适应情况,进行排种适应性试验。选取湘杂棉 3 号种子、湘杂棉 8 号种子、慈抗杂 3 号棉花种子为排种对象,其物理特性见表 1。在勺盘转速为 100 rad/s、勺孔直径 9 mm、种室曲面曲率半径 25 mm 的工作条件下进行 5 次重复试验,数据取平均值,试验结果见表 4。

在相同的条件下,机械式精量棉花排种器对物理特性存在差异的 3 种棉花种子具有一定适应性,合格指数均大于 92%,漏播指数均小于 4%,重播指数均小于 5%,满足棉花种子的精密播种要求。其中慈抗杂 3 号棉花种子和湘杂棉 3 号棉花种子几何尺寸差异较大,勺孔充种和流动性较差,因此排种性能指标较低。湘杂棉 8 号棉花种子种子几何尺寸差异较低且球形度较大,充种性和流动性较好,排种性能指标较高。

表 4 排种适应性试验结果

Table 4 Experimental results of row adaptability test

%

品种 Varieties	合格指数 Eligible index	漏播指数 Miss index	重播指数 Multiple index	变异系数 Coefficient of variation
湘杂棉 3 号种子 Xiangzamian No. 3	92.32	2.32	3.78	23.43
湘杂棉 8 号种子 Xiangzamian No. 8	93.56	3.68	4.50	26.72
慈抗杂 3 号棉花种子 CiqizhaNo. 3	92.88	2.51	4.66	28.86

2.6 排种外形适应性试验

为进一步研究排种器对不同形状棉花种子的适应情况,进行排种外形适应性试验。将棉花种子分为两大类:扁平状棉花种子和椭圆状棉花种

子。勺盘转速为 100 rad/s、勺孔直径 9 mm、种室曲面曲率半径为 25 mm 的工作条件下进行 5 次重复试验,进行数据处理取平均值,试验结果见表 5。

表5 排种外形适应性试验结果

Table 5 Experimental results of row adaptability test

%

棉花种子形状 The shape of cotton	合格指数 Eligible index	漏播指数 Miss index	重播指数 Multiple index	变异系数 Coefficient of variation
扁平状 Flat cotton	91.32	4.32	4.36	28.93
椭圆状 Elliptical cotton	93.88	2.51	3.61	23.66

在相同的条件下,机械式精量棉花排种器对不同外形的同种类棉花种子的排种效果具有一定的差异,结果表明:对于扁平状的棉花种子,合格指数为91.32%,漏播指数为4.32%,重播指数为4.36%。对于椭圆状的棉花种子,合格指数为93.88%,漏播指数为2.51%,重播指数为3.61%,满足棉花种子的播种要求。对于同种类的棉花种子,椭圆状的棉花种子在机械式精量棉花排种器的排种性能更好。

### 3 结 论

本研究根据棉花“一穴两粒”的农艺要求和棉花种子物理特性设计了一种机械式精量穴播棉花排种器,将该排种器进行台架排种性能试验和排种适用性试验,主要结论如下:

1)当排种器转速为100 rad/s,种室曲面曲率半径在25 mm,勺孔直径为10 mm时,排种器排种性能最优,合格率为93.62%,重播率3.87%,漏播率2.51%,符合国家标准。

2)排种器性能试验结果表明,影响排种器排种性能因素从大到小依次是种室曲面曲率半径、排种器转速、勺孔直径。

3)排种适应性结果表明,排种器对不同的棉花种子具有良好的适应性,满足棉花种子的播种农艺要求。

4)排种外形适应性结果表明,机械式精量棉花排种器对椭圆状的棉花种子的排种性能更好。

### 参考文献 References

[1] 于永良. 结合新疆实际的棉花双膜覆盖机械式精量播种机的研发与应用[J]. 湖南农机, 2013(7):3-5  
Yu Y L. Development and application of cotton double membrane covering mechanical precision planter combining with the actual of Xinjiang [J]. *Hunan Agricultural*

*Machinery*, 2013(7): 3-5(in Chinese)

[2] 郭雪峰, 李成华, 刘玉静. 基于ADAMS的勺式玉米精密排种器的动态仿真[J]. 农机化研究, 2007(6):146-148  
Guo X F, Li C H, Liu Y J. Dynamic simulation for disk-scoop-type precision metering device of maize based on ADAMS [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2007(6): 146-148(in Chinese)

[3] 廖庆喜, 高焕文, 臧英. 玉米水平圆盘精密排种器型孔的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2):109-113  
Liao Q X, Gao H Y, Zang Y. Experimental study on the cell of the horizontal plate precision meter for corn seed [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(2): 109-113(in Chinese)

[4] 付威, 李树峰, 孙嘉亿, 杨红英, 坎杂. 强制夹持式玉米精量排种器的设计[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12):38-42  
Fu W, Li S F, Sun J Y, Yang H Y, Kan Z. Design of compulsory clamp-type precision seed-metering device for corn [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(12): 38-42(in Chinese)

[5] 史嵩, 张东兴, 杨丽, 崔涛, 张瑞, 殷小伟. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5): 10-18  
Shi S, Zhang D X, Yang L, Cui T, Zhang R, Yin X W. Design and experiment of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(5): 10-18(in Chinese)

[6] 刘艳芬, 林静, 李宝筏, 马铁, 宋健鹏, 田阳. 玉米播种机水平圆盘排种器型孔设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8):37-46  
Liu Y F, Lin J, Li B F, Ma T, Song J P, Tian Y. Design and experiment of horizontal disc seed metering device for maize seeder [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(8): 37-46(in Chinese)

[7] 陈玉龙, 贾洪雷, 王佳旭, 王奇, 赵佳乐, 胡斌. 大豆高速精密播种机凸勺排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8):95-104  
Chen Y L, Jia H L, Wang J X, Zhao J L, Hu B. Design and experiment of scoop metering device for soybean high-speed

- and precision seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8): 95-104 (in Chinese)
- [8] Singh R C, Singh G, Saraswat D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cottonseeds[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 92(4): 429-438
- [9] Shein T. Evaluation of different metering devices for multi-crop seeding[D]. *Philippines: Philippines University*, 1988
- [10] 王磊, 陈永成, 王维新. 棉花排种器的现状和发展趋势[J]. *农机化研究*, 2005(6): 36-37  
Wang L, Chen Y C, Wang W X. Present situation and developing trend of the cotton seed metering device [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2005(6): 36-37(in Chinese)
- [11] 哈尔滨博纳科技有限公司. JPS-12 排种器性能检测试验台使用说明书[M]. 哈尔滨:博纳科技有限公司, 2007  
Harbin Bona Science and Technology Co. Ltd. *An Instruction Manual of JPS-12 Test Bench for Performance Test of the Device*[M]. Harbin: Bona Science and Technology Co Ltd, 2007(in Chinese)
- [12] 石林榕, 吴建民, 孙伟, 张锋伟, 孙步功, 刘全威, 赵武云. 基于离散单元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(8): 40-48  
Shi L R, Wu J M, Sun W, Zhang F W, Sun B G, Liu Q W, Zhao W Y. Simulation test for metering process of horizontal disc precision metering device based on discrete element method [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(8): 40-48(in Chinese)
- [13] GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2005  
GB/T 6973—2005 Testing method of single grain seed drills (precision drills)[S]. Beijing: China Standard Press, 2005(in Chinese)
- [14] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社, 2008  
Li Y Y, Hu C R. *Experimental Design and Data Processing* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008(in Chinese)
- [15] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007  
Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences. *Agricultural Machinery Design Manual*[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007(in Chinese)

责任编辑:刘迎春