

孟 华,李晓红,屈 哲,等. 自扰动内充种式大豆精量排种器的设计与试验[J]. 江苏农业科学,2023,51(11):179-184.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.11.026

# 自扰动内充种式大豆精量排种器的设计与试验

孟 华<sup>1</sup>,李晓红<sup>1,2</sup>,屈 哲<sup>2</sup>,李 赫<sup>2</sup>,余永昌<sup>2</sup>,刘 龙<sup>2,3</sup>

(1. 商丘工学院机械工程学院,河南商丘 476000; 2. 河南农业大学机电工程学院,河南郑州 450002;

3. 河南省农业科学院长垣分院,河南长垣 453400)

**摘要:**为提高大豆种子在排种器的活跃度和充种性能,改善大豆播种过程中机械式排种器的工作性能,设计一种自扰动内充种式大豆精量排种器。阐述排种器的结构和工作原理,依据大豆种子的外形特征及主要物理参数,对单粒种子在型孔内的3种主要不同姿态进行分析,确定了排种盘直径为140 mm、宽度为23 mm,型孔长度为7~11 mm、宽度和深度均为8 mm;根据工作原理与结构,分析排种器在充种、清种过程中种子受到扰种片的主要作用以及对排种性能的影响,并与传统结构形式的排种盘进行对比分析。为确定排种器的最佳结构参数与转速,运用 EDEM 仿真软件,以排种器转速、型孔长度和扰种片长度为研究对象,以排种合格率为试验指标进行正交试验。试验结果表明,影响排种质量的因素大小依次为排种器转速、型孔长度、扰种片长度;排种器最佳结构与工作参数为转速33.8 r/min,型孔长度7.3 mm,扰种片长度7.7 mm,排种合格率为95.3%。台架试验结果表明,最优参数组合下排种合格率为94.8%,与预测值基本一致,相对误差较小仅为0.5个百分点,能够满足大豆单粒播种农艺需求。

**关键词:**自扰动;内充种式;大豆;排种器;EDEM;试验优化

**中图分类号:**S223.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)11-0179-06

大豆富含大量的营养物质,是我国重要的粮食作物、油料作物和饲料来源之一<sup>[1-2]</sup>。在大豆生产全程机械化过程中,播种机作为其中关键的环节之一,直接影响播种质量和产量<sup>[3-5]</sup>。目前,播种机上配套使用的排种器主要分为机械式和气力式两大类,机械式相对于气力式具有加工制造简单、成本低、易于维修与更换等优势,在播种机上应用最早,也最为广泛。凌轩等为提高花生播种质量,降低传统排种器漏播率,设计了一种花生内侧充种式排种器<sup>[6]</sup>。陈欣等为提高不同尺寸种子的适应性,对现有排种器进行改进设计,使排种器型孔的长度实现可调<sup>[7]</sup>。李晓红等为提高大豆播种质量,节约种子用量,设计了一种内充种式大豆排种器<sup>[8]</sup>。曾心玥等针对三七播种,设计了一种内充式三七精密排种器,得到最佳工作转速范围为31.1~37.8 r/min<sup>[9]</sup>。杨红光等为提高花生播种机播种质量,对内充种式

排种器进行性能分析,得出排种器转速最佳参数为38 r/min<sup>[10]</sup>。李政权等为提高播种质量,对小麦种子在内充种式排种器工作过程中的排种性能进行了分析<sup>[11]</sup>。李智采用气流对排种器内种子群进行扰动,增大种子活跃程度,使其更易进入型孔<sup>[12]</sup>。谢东波等以大蒜种子为研究对象,在现有的气吸排种器上增加了扰种齿,提高了排种器单粒取种性能<sup>[13]</sup>。都鑫等以玉米种子为研究对象,在内充式排种器的基础上增加扰种条,提高了种子在排种器内的充种性能<sup>[14]</sup>。

上述研究表明,内充种式排种器在多种作物播种过程中均有所使用,因此本研究设计了一种自扰动内充种式大豆精量排种器,通过在排种盘型孔径向方向设置扰动结构,起到对种子群进行搅动的作用,使种子能更好地充入型孔,提高播种质量。

## 1 总体结构与工作原理

自扰动内充种式大豆精量排种器主要由排种盘、外壳、护种板、进种口、轴套和强制排种板等组成,具体如图1所示。

由图2可知,排种盘外缘处设置有均布的型孔,靠近型孔处有相应的扰种片。以其中一个型孔作为研究对象,随着排种盘的转动,型孔首先经过种

收稿日期:2022-08-03

基金项目:国家大豆产业技术体系建设专项(编号:CARS-04);河南省科技攻关项目(编号:212102110225)。

作者简介:孟 华(1988—),女,河南商丘人,硕士,讲师,主要从事机械工程研究。E-mail:463310334@qq.com。

通信作者:李晓红,硕士,副教授,主要从事农业装备智能控制技术研究。E-mail:294697938@qq.com。

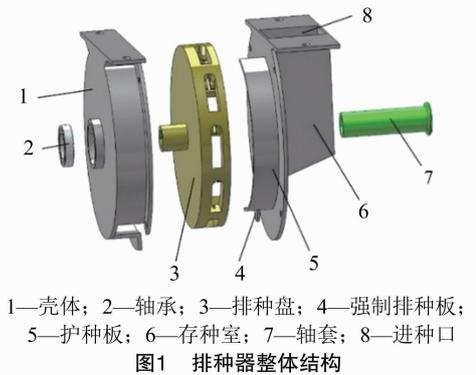


图1 排种器整体结构

子群底层,在种子自重、种子间的挤压力和离心力的共同作用下,最底层种子脱离种子群开始进入型孔的囊种空间。当携种型孔运动至清种区时,由于该排种器结构的原理,型孔外的种子受到自重掉落至种子群,从而使型孔内只保留1粒种子。当型孔运动至护种区时,种子在护种板的作用下只在相邻的2个型孔之间运动,直到运动至投种口上方。当型孔运动至投种区时(排种口上部),种子在自身重力、离心力以及强制排种板的共同作用下脱离型孔开始投种。

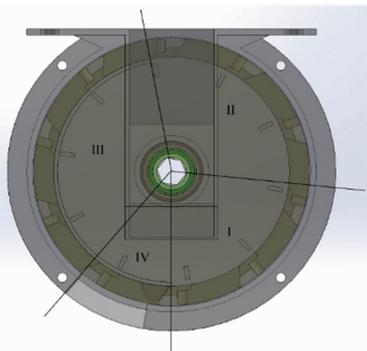


图2 排种器工作区域

## 2 关键结构与参数设计

### 2.1 排种盘

排种盘直接影响充种性能,其结构尺寸的合理设计和参数是提高播种质量的必要条件,结构如图3所示。排种盘由圆盘、型孔和扰种片组成,型孔均匀分布在排种盘的外缘处,实现囊种与排种;型孔四周沿排种盘径向方向设置有相同数量的扰种片,与每个型孔位置一一对应,起到搅动种群,避免种子结拱的同时,使靠近型孔的种子在扰种片和离心力的共同作用下进一步充种,以提高充种效果。

根据相关文献可知,排种盘直径一般为80~200 mm<sup>[14-15]</sup>。在相同作业速度条件下,当排种盘

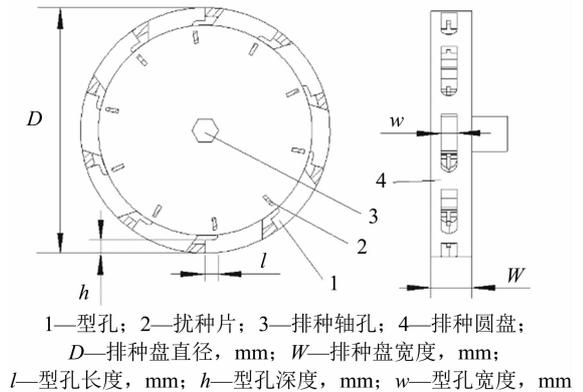


图3 排种盘结构与参数

直径过小时,排种器转速相对较高,型孔经过种子群时间过短,不利于种子进入型孔;当排种盘直径过大时,排种器的加工成本、质量以及排种器的安装空间要求较大,使播种机的生产成本过高。参考目前市场上常用的大豆排种器的尺寸<sup>[8]</sup>,窝眼轮式排种器排种盘直径范围为100~140 mm,根据实际需求确定排种盘的直径 $D$ 为140 mm,宽度 $W$ 为23 mm。

### 2.2 型孔参数确定

型孔结构和参数是排种盘的关键参数,在设计过程中具有重要作用,直接影响充种和清种质量<sup>[6]</sup>。以皖豆35大豆种子为研究对象,在确定排种器型孔参数前随机选取100粒种子作为尺寸参考样本,对其长度( $d_l$ )、宽度( $d_w$ )、厚度( $d_h$ )进行测量统计。根据测量统计结果计算得到,长度( $d_l$ )均值为7.62 mm,宽度( $d_w$ )均值为7.18 mm,厚度( $d_h$ )均值为5.87 mm。

由于大豆种子在形态上属于椭球类,与球类种子在排种器内的充种姿态有一定的差异性。大豆种子在排种器内的充种姿态有切向、径向和轴向3种<sup>[16-17]</sup>,在排种工作时,种子主要以切向姿态存在<sup>[14]</sup>,且稳定程度最高。以单粒种子为研究对象,种子在型孔内的3种主要姿态如图4所示。根据相关研究<sup>[7]</sup>,型孔的长度( $l$ )、宽度( $w$ )和深度( $h$ )应为 $0.8d_l < l < 1.5d_l$ ,  $d_w < w < 1.5d_h$ ,  $d_w < h < 1.5d_h$ 。通过计算可得:型孔长度( $l$ )、宽度( $w$ )、深度( $h$ )取值范围分别为6.096~11.43、7.18~8.805、7.18~8.805 mm,故选取 $l=7\sim 11$  mm、 $w=8$  mm、 $h=8$  mm进行仿真试验。

### 2.3 扰种片分析

相关研究表明,排种器作业过程中,当种子群底层与排种存在相对运动时才能充入型孔<sup>[18-19]</sup>。

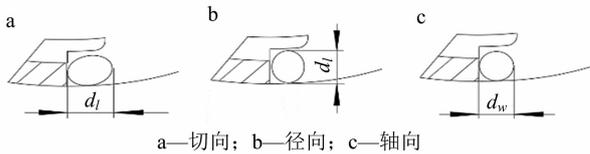
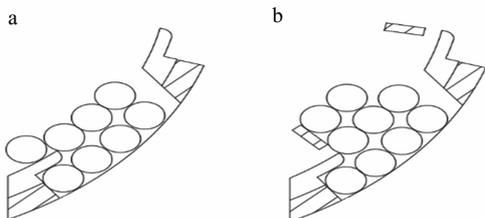


图4 种子在型孔内的姿态示意图

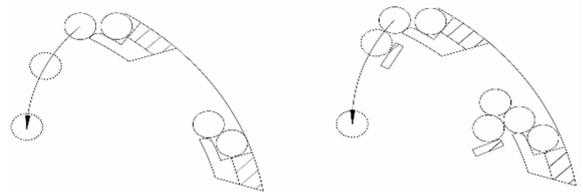
作业过程中,当排种器转速较高时,型孔经过种子群的时间相对较短,即种子充入型孔的有效时间变短,使种子未能及时充种或充种效果较差,易成型孔空穴形成漏播。当排种器转速较低时,种子群受到的运动程度随之降低,即种子群活跃程度较低,易导致充种效果差,造成空穴漏播。故根据相关研究,对现有的内充种式排种器的结构进行改进,在排种盘上设置均匀分布的扰种片。由图5可知,当型孔运动至种子群底层时,种子开始进入型孔囊种空间,通过对现有的排种器和扰动排种器进行对比分析可知,扰种片对型孔周围的种子群具有支撑和扰动作用。为便于分析,以单粒种子为研究对象,种子在排种器转速较高时,有无扰种片对充种过程的影响如图5-a和图5-b所示。排种盘加装扰种片后,在相同参数条件下,种子除了受到排种盘的离心力之外,同时还受到扰种片的支撑和搅动作用,提高了种子群的活跃度和充种效果。



a—无扰种片; b—有扰种片

图5 充种过程种子状态示意图

根据大豆播种农艺要求,每次只播1粒种子,即1粒/穴。由上述分析可知,扰种片在充种过程中能够提高排种盘型孔充种质量,但同时对于清种过程造成一定影响。排种盘有无扰种片、扰种片的尺寸均对清种有着重要影响,具体如图6所示。排种盘无扰种片时,在清种过程中,多余的种子依靠自重从型孔及周边脱离,完成清种(图6-a);当排种盘设置有扰种片时,在清种初期扰种片对多余的种子提供支撑力,使清种时间相对加长(图6-b)。其中,扰种片的尺寸(长度)对清种效果有着重要影响,在实际工作过程中,当扰种片过长时,充种过程中在扰种片的作用下,脱离种子群进入型孔囊种空间的种子相对增加;当扰种片过长,使种子脱离较慢,直接影响



a. 无扰种片

b. 有扰种片

图6 清种过程种子运动示意图

紧靠型孔或囊种空间的多余种子,易造成重播。

### 3 排种器工作性能的离散元仿真分析

#### 3.1 仿真平台的搭建

首先利用 SolidWorks 软件对设计排种器进行三维建模,并将模型进行简化后导入仿真软件 EDEM 2.6 中(图7)。根据皖豆 35 大豆种子的实际几何尺寸建模后在 EDEM 中利用球形颗粒进行填充,并设置颗粒间及颗粒与排种器间的接触模型为 Hertz - Mindlin 无滑动模型<sup>[20]</sup>。

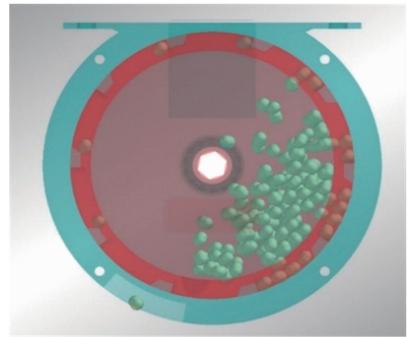


图7 仿真模型

#### 3.2 仿真参数设置

在离散元仿真计算时,对排种器材料进行设置,参数选取见表1。

#### 3.3 仿真试验

3.3.1 试验设计 该排种器的最佳性能为每个型孔内保留1粒种子,即每次排种时只排1粒。根据相关研究,选取排种器的转速、扰种片的长度和型孔长度为试验因素,以排种合格率为试验指标进行三因素三水平正交试验。根据相关研究<sup>[9]</sup>,内充种式排种器的最佳转速为30~35 r/min,故选取排种器转速分别为25、35、45 r/min;根据大豆种子实际长度,选取扰种片长度为0.5、10 mm;排种器型孔长度选取为7、9、11 mm(表2),宽度和深度均选取为8 mm。在仿真试验过程中,每组试验参数重复3次,计算其平均值作为试验结果,可以得到在不同参数下排种器的排种合格率,计算公式如下:

表1 仿真参数选取与设置

材料	参数	数值
大豆种子	泊松比	0.23
	剪切模量(MPa)	63
	密度(kg/m <sup>3</sup> )	1 290.00
排种器	泊松比	0.50
	剪切模量(MPa)	35
	密度(kg/m <sup>3</sup> )	1 180.00
种子-种子	碰撞恢复系数	0.30
	静摩擦系数	0.39
	滚动摩擦系数	0.17
种子-排种器	碰撞恢复系数	0.47
	静摩擦系数	0.49
	滚动摩擦系数	0.15

$$Y = n/N \times 100\%。$$

式中:  $Y$  为排种合格率;  $n$  为型孔单粒排种次数;  $N$  为理论排种次数。

3.3.2 试验结果 按照表2的试验因素编码在 Design-Expert 软件中进行试验方案制定, 并对每个试验方案进行3次重复试验, 取其平均值作为试验指标( $Y$ )的结果, 具体见表3。

表2 仿真试验因素编码

水平	A: 转速 (r/min)	B: 扰种片长度 (mm)	C: 型孔长度 (mm)
1	45	10	11
0	30	5	9
-1	25	0	7

表3 仿真试验的正文试验方案与结果

序号	各因素水平			$Y$ (%)
	A	B	C	
1	1	-1	0	93.76
2	0	-1	-1	94.51
3	1	0	-1	92.35
4	-1	0	-1	94.06
5	-1	0	1	97.39
6	0	0	0	97.52
7	-1	1	0	96.58
8	0	0	0	97.47
9	0	1	-1	93.92
10	0	0	0	97.32
11	-1	-1	0	96.20
12	1	0	1	93.04
13	0	0	0	97.43
14	1	1	0	92.54
15	0	-1	1	96.22
16	0	1	1	96.79
17	0	0	0	97.26

3.3.3 排种合格率的回归结果分析 利用 Design-Expert 软件对表3中的试验结果(排种合格率)进行方差分析。根据试验结果可得到其在不同试验因素下的回归方程, 即

$$Y = 97.400 - 1.560A - 0.095B + 1.080C - 0.445AB - 0.680AC + 0.295BC - 1.900A^2 - 0.716B^2 - 1.280C^2。$$

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为排种器转速、扰种片长度、型孔长度对应的编码值。

由表4方差分析结果可知, 模型的  $P$  值极显著 ( $P < 0.0001$ ), 失拟项不显著 ( $P = 0.0999$ ), 模型的调整决定系数  $R^2 = 0.9967$ , 说明所得回归数学模型与实际结果拟合精度高, 即此仿真模型的结果可用于排种器性能的分析 and 预测。根据系数的绝对值大小可知各因素对排种合格率的影响大小次序为  $A$ 、 $C$ 、 $B$ 。

表4 排种合格率方差分析结果

来源	平方和	$df$	均方	$F$ 值	$P$ 值	显著性
模型	58.51	9	6.50	232.31	<0.0001	**
A	19.47	1	19.47	695.74	<0.0001	**
B	0.07	1	0.07	2.58	0.1086	
C	9.33	1	9.33	333.46	<0.0001	**
AB	0.79	1	0.79	28.31	0.0019	**
AC	1.85	1	1.85	66.10	<0.0001	**
BC	0.35	1	0.35	12.44	0.0099	**
$A^2$	15.22	1	15.22	543.76	<0.0001	**
$B^2$	2.16	1	2.16	77.14	<0.0001	**
$C^2$	6.91	1	6.91	246.91	<0.0001	**
残差	0.1915	7	0.0274			
失拟项	0.1453	3	0.0484	4.19	0.0999	
纯误差	0.0462	4	0.0115			
$R^2$	0.9967					
调整 $R^2$	0.9926					

3.3.4 排种合格率与各参数响应曲面分析 由表3中试验数据可得不同因素之间对试验指标的二维和三维等高曲面图, 如图8至图10所示。

由图8可知, 排种器转速( $A$ )和扰种片长度( $B$ )的二维等高曲线呈椭圆形, 说明这2个因素间的交互作用显著。由三维等高曲线图可知, 排种合格率随排种器转速( $A$ )变化的曲面变化相对明显, 而随扰种片长度( $B$ )变化的曲面变化相对平缓。当型孔长度( $C$ )处于0水平、扰种片长度( $B$ )为定值时, 排种合格率随着排种器转速( $A$ )的增大呈现先升高后降低的趋势, 这是因为种子群进入型孔过程中, 随着排种器转速( $A$ )的增大, 扰种片对种子群的扰动作用加大, 种子群的活跃度增大, 提高了种子

进入型孔的概率,使排种合格率呈现升高趋势,排种合格率存在一个最优值;随着排种器转速( $A$ )的继续增大,型孔经过种子群底部时速度较快,使种子不能及时充入型孔而造成空穴,形成漏播。当排种器转速( $A$ )为定值时,排种合格率随着扰种片长度( $B$ )的增大呈现先升高后降低的趋势,但曲面变化相对平缓,同样也存在最优值。

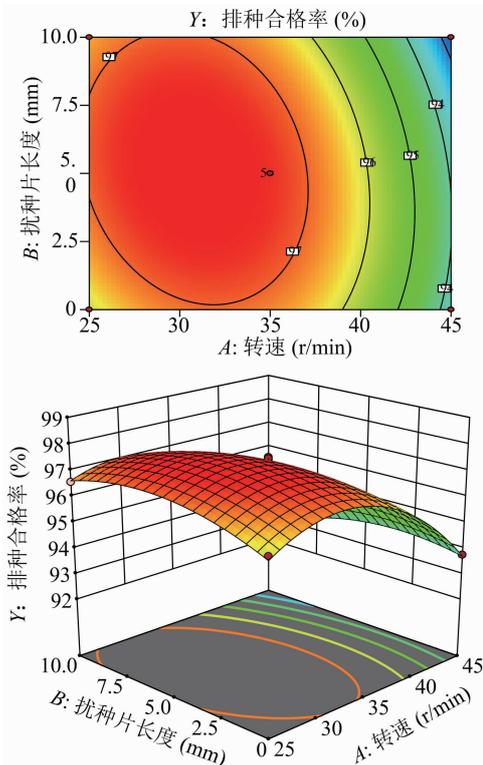


图8 排种器转速和扰种片长度对排种合格率的影响

由图9可知,排种器转速( $A$ )和型孔长度( $C$ )的二维等高曲线呈椭圆形,说明这2个因素间的交互作用显著。由三维等高曲线图可以看出,排种合格率随型孔长度( $C$ )和排种器转速( $A$ )变化的曲面变化均明显。当扰种片长度( $B$ )处于0水平、型孔长度( $C$ )为定值时,排种合格率随排种器转速( $A$ )的增大呈现先增大后降低的趋势,出现这样趋势的主要原因与上述分析相似。当扰种片长度( $B$ )处于0水平、排种器转速( $A$ )为定值时,随着型孔长度( $C$ )的逐渐增大,型孔囊种空间也随之增大,排种合格率逐渐升高,存在最优值;当型孔长度( $C$ )的继续增大,种子进入型孔以及清种时逐渐排种合格率先呈现上升趋势,当型孔长度( $C$ )为7.3 mm时,排种合格率达到最优值;随着型孔长度( $C$ )继续增大,型孔囊种空间大于单粒种子,在充种时型孔内超过1粒种子,且在清种时多余的种子不易被清出,出现

重播现象,造成排种合格率降低。

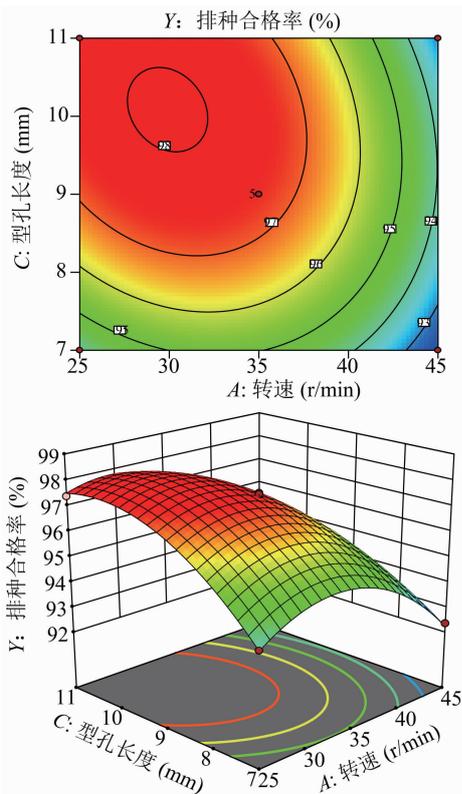


图9 排种器转速和型孔长度对排种合格率的影响

由图10可知,扰种片长度( $B$ )和型孔长度( $C$ )的二维等高线呈椭圆形,说明扰种片长度( $B$ )和型孔长度( $C$ )这2个因素间的交互作用显著。由三维等高曲线图可以看出,排种合格率随型孔长度( $C$ )变化的曲面变化相对明显,而随扰种片长度( $B$ )变化的曲面变化相对平缓。当排种器转速( $A$ )处于0水平、扰种片长度( $B$ )为定值时,排种合格率随着型孔长度( $C$ )的增大呈现升高趋势,型孔内容种空间相对较大,种子进入型孔后在清种过程中可更好地保护种子不脱离型孔,使漏播的概率降低,排种合格率提高;随着型孔长度( $C$ )继续增大,排种合格率存在最大值,即最优值;当型孔长度( $C$ )继续增大,型孔尺寸过大,重播概率增大,排种合格率逐渐降低。

由响应面BBD模型优化得到自扰动内充种式大豆精量排种器的排种性能试验最佳参数:排种器转速为33.8 r/min,扰种片长度为7.7 mm,型孔长度为7.3 mm,此时排种合格率最大(95.3%)。

#### 4 验证试验

为了检验该排种器的排种性能,根据仿真试验得到最佳结构参数,利用3D打印技术将排种器进

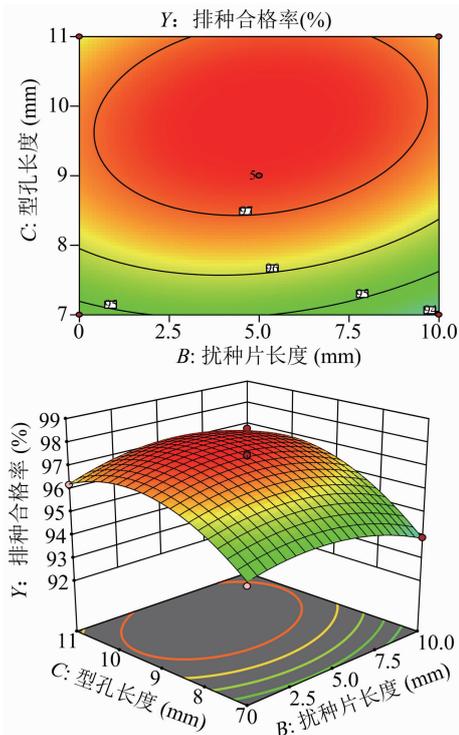


图10 扰种片长度和型孔长度对排种合格率的影响

行加工制造,并于2022年5月13日在河南农业大学机电工程学院农机试验室进行试验,将排种器搭建在STB-700排种器性能试验台上(中国农业大学研制)。

根据仿真试验结果,在试验前将排种器转速设定为33.8 r/min。待排种器和排种试验台油膜输送带工作稳定后,统计100粒大豆种子(皖豆35)的排种合格率,进行3次重复试验并取平均值,得到排种合格率为94.8%。与仿真试验结果进行对比可知,在相同条件下两者之间的相对误差仅为0.5百分点,即说明该参数条件下的排种效果较好(图11)。

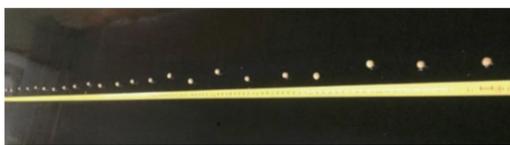


图11 排种效果

## 5 结论

设计了一种自扰动内充种式大豆精量排种器,通过对排种器的结构、工作原理进行分析;根据皖豆35大豆种子几何尺寸和相关研究,初步确定了排种器关键结构和参数:排种盘直径为140 mm,宽度为23 mm,型孔长度为7~11 mm,宽度和深度均为8 mm。

利用EDEM软件对排种器的转速、扰种片长度和型孔长度在不同参数下进行仿真,采用响应曲面

分析法对试验结果进行分析,得到最佳组合参数为排种器转速33.8 r/min,扰种片长度7.7 mm,型孔长度7.3 mm,排种合格率为95.3%。台架试验结果表明,在最佳参数组合下排种合格率为94.8%,能够满足实际播种要求。

## 参考文献:

- [1]郭天宝. 中国大豆生产困境与出路研究[D]. 长春:吉林农业大学,2017.
- [2]陈伟,朱俊峰,田国强. 中美贸易摩擦对中国大豆的影响及对策分析[J]. 大豆科学,2019,38(1):118-123.
- [3]刘龙,刘道奇,孙千涛,等. 链排种盒式小区播种机自动上种装置的设计与试验[J]. 农机化研究,2022,44(12):89-94,100.
- [4]刘龙,安雪,余永昌,等. 基于电控自动净种窝眼轮式大豆播种器的设计与试验[J]. 农机化研究,2021,43(7):58-63.
- [5]牛媛媛,徐铭辰,屈哲,等. 基于EDEM的自扰动内充式大豆精密排种器的设计与试验[J]. 江苏农业科学,2022,50(11):202-207.
- [6]凌轩,王旭东. 花生播种机内侧充种式排种器设计与试验[J]. 现代农业装备,2014(5):47-51.
- [7]陈欣,陈冠礼,王旭东. 花生排种器型孔结构的优化设计与试验[J]. 仲恺农业工程学院学报,2019,32(1):28-34.
- [8]李晓红,张汉山,屈哲,等. 内充种式大豆排种器仿真和试验研究[J]. 大豆科学,2021,40(4):546-552.
- [9]曾心玥,赖庆辉,赵瑾汶,等. 内充式三七精密排种器的设计[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(6):139-154.
- [10]杨红光,杨然兵,尚书旗,等. 内侧充种式花生精密排种器性能分析与破碎试验[J]. 农业现代化研究,2017,38(2):360-366.
- [11]李政权,于建群,张尉林,等. 内充式排种器工作过程和性能的离散元法仿真分析[J]. 农业工程学报,2011,27(11):32-36.
- [12]李智. 气流扰种气吸滚筒式大豆排种器的优化设计与试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2020.
- [13]谢东波,张春岭,吴晓庆,等. 扰种齿辅助气吸式大蒜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):47-57.
- [14]都鑫,刘彩玲,姜萌,等. 自扰动内充型孔轮式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(13):23-34.
- [15]中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(上册)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [16]顿国强,于春玲,杨永振,等. 大豆育种排种盘型孔参数仿真优化与试验[J]. 农业工程学报,2019,35(19):62-73.
- [17]赵瑞营,戴飞,赵武云,等. 基于离散单元法的高填充率窝眼轮式精密排种器排种仿真试验[J]. 甘肃农业大学学报,2017,52(1):132-138.
- [18]刘彩玲,王亚丽,都鑫,等. 摩擦复充种型孔带式水稻精量排种器充种性能分析与验证[J]. 农业工程学报,2019,35(4):29-36.
- [19]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.
- [20]顿国强,杨永振,郭艳玲,等. 不同品种大豆种子充填特性的EDEM仿真分析[J]. 河南农业大学学报,2019,53(1):93-98.