

油豆角穴播器的设计与试验

杨沫^{1,2}, 陈长海², 马永财¹, 毕春辉²

(1. 黑龙江八一农垦大学 工程学院, 黑龙江 大庆 163000; 2. 哈尔滨市农业科学院, 哈尔滨 150029)

摘要: 针对油豆角穴播器作业过程中容易出现鸭嘴撕膜、挑膜造成的“连筋”现象, 导致播种质量差、地膜漏风、播种合格率不高等问题, 设计了一种油豆角鸭嘴式穴播器, 并确定了穴播器的内部结构、工作原理和关键技术参数。利用 EDEM 软件进行单因素仿真试验, 确定影响排种合格率的相关因素; 以穴播器转速、种层高度和毛刷轮与排种轮线速比为试验因素, 以穴播器排种的合格率、漏播率、重播率为试验指标, 进行二次回归正交旋转组合试验, 并对试验结果进行参数优化; 进行穴播器台架性能试验, 验证仿真结果可靠性。试验表明: 当穴播器转速为 34.7 r/min、毛刷轮与排种轮线速比为 1.4、种层高度为 180 mm 时, 穴播器排种的合格率为 98.2%, 漏播率为 0.64%, 重播率为 0.94%。研究结果可为油豆角穴播器播种性能研究及提高油豆角播种机作业质量提供参考。

关键词: 油豆角; 覆膜播种; 穴播器

中图分类号: S223.2⁺5; S220.3 文献标识码: A

文章编号: 1003-188X(2024)11-0182-09

DOI:10.13427/j.cnki.njyi.2024.11.022

0 引言

油豆角作为常见的餐桌美食, 营养丰富。黑龙江地理条件得天独厚, 成为了油豆角种植主要产区, 豆角种植面积高达 2.46 万 hm^2 ^[1]。目前, 油豆角穴播器种类较少, 生产上大多由花生、棉花等功能相似排种器简单改进而形成, 在播种作业过程中常常出现农艺要求与穴播器不匹配的情况, 容易发生穴播器鸭嘴对地膜的撕膜、挑膜造成的“连筋”现象, 造成播种作业质量不佳及地膜漏风等问题, 影响穴播效果, 进而影响油豆角的播种质量与产量。

穴播是精量播种的重要方式之一, 能够提高播种的精度和稳定性, 减少漏播, 有利于植株生长的一致性及提高产量。由于油豆角种植面积与推广等方面原因, 国内学者对油豆角穴播器的研究较少, 大多以花生、棉花、黑豆等作物排种器的研究为主。石林榕^[2]设计了一种带舀种勺舌的滚勺式精量穴播排种器, 同时结合了甘肃覆膜种植农艺要求, 解决了传统胡麻穴播排种器耗种量大、穴粒数不均匀、穴孔缺种等实际问题。伍皖闽^[3]根据型孔轮式穴播器、阶梯型孔对种子适应性强的优点, 整理并设计了一种组合

型孔式玉米精量穴播器, 使新疆现有夹持式穴播器易空穴、充种性能不足等问题得到解决。李彦平^[4]设计了一种型孔式燕麦穴播排种器, 解决了燕麦播种过程中出现种子破损、重播或漏播等造成播种质量差及无专用的燕麦排种器的问题。李衣菲^[5]为了探究黑豆排种器最佳排种性能, 在 JPS-12 试验台上进行多因素试验, 试验结果符合播种作业性能评价指标。

本文以油豆角种植农艺要求为基础, 设计了一种油豆角穴播器, 分析了其工作原理与工作过程, 确定了穴播器的总体结构与关键技术参数, 并对穴播器的播种性能进行了相关试验研究, 以保证油豆角穴播器排种性能的稳定性。

1 穴播器结构设计

1.1 总体结构与工作原理

1.1.1 总体结构

油豆角穴播器主要由拨动轮、外壳、拨动伞齿、毛刷轮齿轮、排种轮齿轮、毛刷轮、排种轮、种箱、剃种片、导种槽、穴播鸭嘴及滚筒组成, 如图 1 所示。

1.1.2 工作原理

作业时, 种箱在穴播器内部保持固定, 滚筒与外壳相连随着穴播器滚动前进, 外壳上的拨动轮带动拨动伞齿同向转动, 拨动伞齿与毛刷轮齿轮、排种轮齿轮外啮合, 使其反向转动, 带动毛刷轮、排种轮反向运动; 种子在种箱内受重力作用, 落入排种轮, 经毛刷轮、剃种片剃种后落入滚筒内壁, 随后滑落到滚筒底

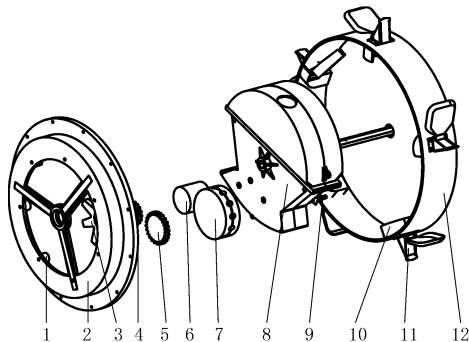
收稿日期: 2022-11-18

基金项目: 黑龙江省自然科学基金项目(LH2019E073)

作者简介: 杨沫(1991-), 男, 黑龙江安达人, 硕士研究生, (E-mail) 562020854@qq.com。

通讯作者: 陈长海(1979-), 男, 山东东阿人, 研究员, 硕士, 硕士生导师, (E-mail) chenchanghai916@163.com。

部后进入导种槽,通过导种槽进入穴播鸭嘴;穴播鸭嘴扎破地膜插入土壤中,穴播鸭嘴上弹簧受到土壤挤压力将鸭嘴打开,种子经过鸭嘴进入土壤中,鸭嘴离开土壤后,穴播鸭嘴闭合,完成穴播。



1. 拨动轮 2. 外壳 3. 拨动伞齿 4. 毛刷轮齿 5. 排种轮齿 6. 毛刷轮 7. 排种轮 8. 种箱 9. 剃种片 10. 导种槽 11. 穴播鸭嘴 12. 滚筒
图 1 油豆角穴播器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of kidney beans hole planter

1.2 穴播器半径

穴播器半径与油豆角株距和播种深度有关,同时决定穴播器外壳上鸭嘴数量^[6]。合适的穴播器半径有利于提高播种质量;半径过小会引起穴播器转速过高,田间作业时穴播器震动较大,不利于充种、清种和排种,且转速过高也会造成穴播鸭嘴将地膜撕裂、撕破现象;半径过大会导致机器体积、质量过大,显得笨重,增加负担^[7-8]。在理想状态下,穴播器工作时不产生滑移,穴播器的半径与株距、种植深度、穴播器上鸭嘴数量间计算式为

$$R = \frac{ZL - 2\pi H}{2\pi} \quad (1)$$

其中, L 为种子播种株距(mm); H 为播种深度(mm); R 为穴播器半径(mm); Z 为穴播器上鸭嘴数量(个)。

选择油豆角品种为哈菜豆 11 号,株距为 350mm,播种深度为 40mm。由于鸭嘴数量过少,会导致穴播器作业时上下振幅较大,播种作业性能不稳定,故将鸭嘴数量确定为 5 个,通过式(1)计算可得出穴播器半径 $R=240\text{mm}$ 。

1.3 鸭嘴重合度

穴播器纯滚动无滑移,是理想状态下的运动,但在实际作业过程中穴播器并非为纯滚动状态,而是与地面有一定的滑移率。滑移率的大小可以通过鸭嘴重合度来表示。鸭嘴重合度指的是穴播器鸭嘴在穴播过程中,鸭嘴入土、鸭嘴出土转过的角度与相邻鸭嘴的对应中心角的比值^[9],如图 2 所示。

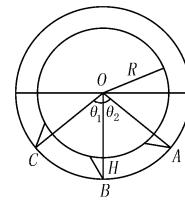


图 2 鸭嘴重合度示意图

Fig. 2 Schematic diagram of duck mouth coincidence

图 2 中,穴播器鸭嘴入土点为 A 点,穴播器穴播深度最低点为 B 点,鸭嘴出土点为 C 点, θ_1 、 θ_2 为相邻鸭嘴与穴播器垂直线之间的夹角,根据几何关系知

$$\theta_1 = \theta_2 = \arccos \frac{R}{R + H} \quad (2)$$

设 θ_0 为穴播器上两相邻鸭嘴中心所对应的夹角, θ_0 大小与穴播器上安装的鸭嘴数量 Z 相关。所以,穴播器上鸭嘴重合度 e 计算式为

$$\theta_0 = \frac{2\pi}{Z} \quad (3)$$

$$e = \frac{\theta_1 + \theta_2}{\theta_0} \quad (4)$$

根据式(2)~式(4)的代数关系可得

$$e = \frac{Z}{\pi} \arccos \frac{R}{R + H} \quad (5)$$

根据式(5)分析可得,鸭嘴重合度 e 与穴播器外壳鸭嘴数量 Z 、穴播器的半径 R 、油豆角种植深度 H 相关,将穴播器相应的技术参数代入鸭嘴重合度式(5)中,可得 $e=2.2$ 。在实际穴播作业过程中,滑移率可以得到补偿,从而减少鸭嘴对地膜撕膜、挑膜造成“连筋”现象^[10],以保证穴播器播种性能。

1.4 穴播器转速分析

穴播器在滚动过程中,种子落入排种轮窝眼内,经毛刷轮、剃种片剃种后,将种子排出,再落入穴播器滚筒中;种子需要始终保持在穴播器滚筒底部,不随穴播器滚筒滚动,才能使种子顺利滑进导种槽;若穴播器滚筒转速过高,由于离心力的作用,会导致种子贴在穴播器滚筒内壁,无法进入导种槽,造成无法排种^[11]。如图 3 所示,想要穴播器滚筒内壁上的种子一直保持在底部,需要满足以下条件

$$F < mg \sin \theta \quad (6)$$

$$F < \mu N \quad (7)$$

$$\mu = \tan \theta = \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \quad (8)$$

$$N = P + mg \cos \theta \quad (9)$$

$$P = m\omega^2 R \quad (10)$$

式(6)~式(10)中, F 为种子与滚筒内壁之间的摩擦力; mg 为种子的质量; θ 为种子、穴播器滚筒中心

连接线与滚筒垂直中心线夹角; μ 为摩擦因数; N 为穴播器滚筒内壁对种子法向作用力; P 为穴播器滚筒对种子产生的离心力; ω 为穴播器滚筒转动的角速度; R 为穴播器滚筒半径。当 $N=0$ 时, $mg\cos\theta = -m\omega^2R$, 可得 $\omega = \sqrt{\frac{-g\cos\theta}{R}}$; 当 $\theta=\pi$ 时, $\omega = \sqrt{\frac{g}{R}} = 61\text{r/min}$, 为了保证穴播器作业性能, 作业转速要小于 61r/min 。

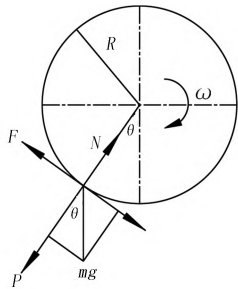


图 3 穴播器转速分析示意图

Fig. 3 Schematic diagram of speed analysis of hill planter

2 穴播器仿真试验

2.1 穴播器排种性能仿真试验

2.1.1 油豆角种子仿真模型的建立

随机取若干平均三轴尺寸接近的油豆角种子^[12], 测得种子的长度在 $13\sim 16\text{mm}$ 之间, 宽度在 $8\sim 10\text{mm}$ 之间, 厚度在 $6\sim 7\text{mm}$ 之间, 求得平均值长度为 14mm , 宽度为 9.5mm , 厚度为 6.8mm 。在 EDEM 前处理过程中, 利用 4 球面组合方式对油豆角种子进行仿真模型建立, 如图 4 所示。

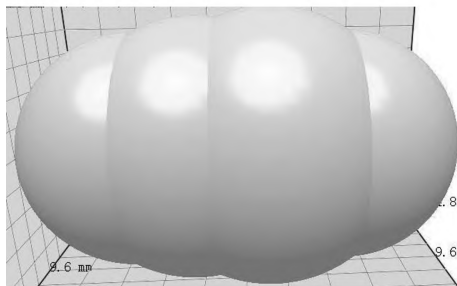


图 4 EDEM 油豆角种子模型图

Fig. 4 EDEM figure of bean seed model

2.1.2 穴播器仿真试验

利用离散元仿真分析软件-EDEM, 对穴播器进行运动学仿真。首先, 利用 SolidWorks 软件对穴播器结构进行三维建模, 简化或者去除对仿真影响较小的零部件, 以便 EDEM 仿真时减少计算量, 提高运行速度, 并将穴播器格式存为 igs 格式, 将其导入 EDEM 软件中。仿真模型主要由 3 个模型参数组成: 排种轮由树脂材料组成, 毛刷轮刷丝和穴播器种箱主要由 ABS 塑料组成^[13], 各仿真材料的具体参数设置如表 1 所示。

表 1 EDEM 仿真参数设置

Table 1 EDEM simulation parameter setting

| 参数 | 油豆角种子 | 树脂 | ABS 塑料 |
|-----------------------------------|------------------|-------------------|----------------|
| 泊松比 | 0.25 | 0.40 | 0.34 |
| 剪切模量/Pa | 5.5×10^6 | 1.35×10^8 | 3×10^9 |
| 密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 900 | 1385 | 1250 |
| 碰撞恢复系数(与油豆角种子) | 0.55 | 0.52 | 0.32 |
| 静摩擦因数(与油豆角种子) | 0.40 | 0.50 | 0.46 |
| 动摩擦因数(与油豆角种子) | 0.05 | 0.05 | 0.06 |

为了更好地观察和统计排种情况, 将穴播器的显示形式设置为 Filled, 其中透明度 Opacity 设置为 0.5, 穴播器排种过程如图 5 所示。仿真从 0s 开始, 颗粒工厂开始生成种子模型, 1s 时毛刷轮和排种轮进行转动。因此, 将仿真开始时间定为 3s, 待排种稳定后记录并统计 100 次穴播器排种情况。

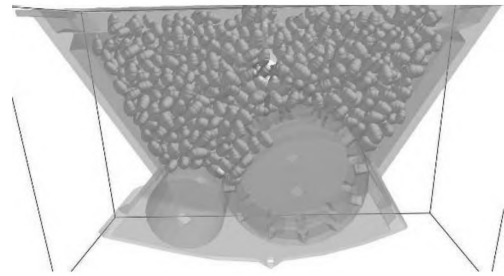


图 5 穴播器仿真试验仿真模型

Fig. 5 Simulation model of hill planter simulation test

2.2 试验因素与评价指标

1) 单因素仿真试验。为了探究不同因素对穴播器排种性能的影响, 进行单因素仿真试验。相关资料表明, 穴播器转速、毛刷轮与排种轮线速比和种层高度对排种性能有重要影响^[14-15]。定义单因素试验中各因素的固定取值, 将穴播器转速定为 40r/min 、毛刷轮与排种轮线速比定为 1.4、种层高度定为 150mm 。以穴播器排种合格率和漏播率为试验指标。穴播器排种的合格率、漏播率计算方法为

$$\text{合格率: } y_1 = \frac{N_1}{N_0} \times 100\%$$

$$\text{漏播率: } y_2 = \frac{N_2}{N_0} \times 100\%$$

其中, N_1 为排种轮排出 2 粒种子次数; N_2 为穴播器排出 0~1 粒种子次数; N_0 为排种轮排种的总次数。

2) 穴播器转速对排种性能影响。为了探究穴播器不同转速对排种性能的影响, 将穴播器转动速度定

为 20、30、40、50r/min,将毛刷轮与排种轮线速比定为 1.4,种层高度定为 150mm。通过仿真试验,记录并分析排种情况,每组试验重复进行 3 次,取平均值,结果如表 2 所示。

表 2 穴播器转速单因素试验

Table 2 Single factor test on the rotational speed of acupoint planter

| 穴播器转速 /r · min ⁻¹ | 试验 序号 | 合格率 /% | 合格率 平均值 /% | 漏播率 /% | 漏播率 平均值 /% |
|---------------------------------|----------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| 20 | 1 | 94 | | 2 | |
| | 2 | 95 | 94.6 | 1 | 1.6 |
| | 3 | 95 | | 2 | |
| 30 | 1 | 95 | | 1 | |
| | 2 | 95 | 95.0 | 1 | 1.0 |
| | 3 | 95 | | 1 | |
| 40 | 1 | 98 | | 0 | |
| | 2 | 98 | 98.3 | 1 | 0.3 |
| | 3 | 99 | | 0 | |
| 50 | 1 | 93 | | 1 | |
| | 2 | 94 | 93.3 | 1 | 1.3 |
| | 3 | 93 | | 2 | |

由表 2 可知:随着穴播器转速的增加,合格率先增加后减少,而漏播率先减小后增大,当穴播器转速为 40r/min 时,合格率最高,漏播率最低;当穴播器转速为 20r/min 时,合格率最低,漏播率最高。

3)毛刷轮与排种轮线速比对排种性能影响。为了探究毛刷轮与排种轮不同线速比对排种性能的影响,将毛刷轮与排种轮转速比确定为 1.1、1.4、1.7、2.0。穴播器转速定为 40r/min,种层高度定为 150mm,进行仿真试验,每组试验重复进行 3 次取平均值,结果如表 3 所示。

表 3 毛刷轮与排种轮线速比单因素试验

Table 3 Single factor test of linear speed ratio between brush wheel and seed metering wheel

| 线速比 | 试验 序号 | 合格率 /% | 合格率 平均值 /% | 漏播率 /% | 漏播率 平均值 /% |
|-----|----------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| 1.1 | 1 | 91 | | 2 | |
| | 2 | 92 | 91.7 | 3 | 2.0 |
| | 3 | 92 | | 1 | |
| 1.4 | 1 | 92 | | 3 | |
| | 2 | 93 | 93.3 | 2 | 3.3 |
| | 3 | 95 | | 5 | |

续表 3

| 线速比 | 试验 序号 | 合格率 /% | 合格率 平均值 /% | 漏播率 /% | 漏播率 平均值 /% |
|-----|----------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| 1.7 | 1 | 96 | | 2 | |
| | 2 | 97 | 96.0 | 3 | 2.3 |
| | 3 | 95 | | 2 | |
| 2.0 | 1 | 91 | | 3 | |
| | 2 | 93 | 92.0 | 2 | 2.3 |
| | 3 | 92 | | 2 | |

由表 3 可知:随着毛刷轮与排种轮线速比的增加,排种合格率先增加后减少,而漏播率先增大后减小逐渐稳定。当线速比为 1.7 时,合格率最高,漏播率最低;当线速比为 2 时,合格率降低;过高的速度对种箱内种子扰动较大,不利于充种。

4)穴播器内种层高度对排种性能影响。为了探究穴播器内种层高度对排种性能的影响,将种层高度定为 50、100、150、200mm,将毛刷轮与排种轮转速比确定为 1.4,同时将穴播器转动速度定为 40r/min。进行仿真试验,每个参数仿真试验重复进行 3 次,进行数据统计然后取平均值,结果如表 4 所示。

表 4 种层高度单因素试验

Table 4 Single factor test of seed layer height

| 种层高度 /mm | 试验 序号 | 合格率 /% | 合格率 平均值 /% | 漏播率 /% | 漏播率 平均值 /% |
|-------------|----------|-----------|------------------|-----------|------------------|
| 50 | 1 | 91 | | 5 | |
| | 2 | 92 | 91.3 | 6 | 5.0 |
| | 3 | 91 | | 4 | |
| 100 | 1 | 97 | | 3 | |
| | 2 | 94 | 95.7 | 2 | 2.7 |
| | 3 | 96 | | 3 | |
| 150 | 1 | 97 | | 3 | |
| | 2 | 96 | 97.0 | 2 | 2.3 |
| | 3 | 98 | | 2 | |
| 200 | 1 | 95 | | 3 | |
| | 2 | 97 | 96.7 | 1 | 2.3 |
| | 3 | 98 | | 3 | |

由表 4 可知:当种层高度小于 50mm 时,合格率和漏播率均较小;当种层高度大于 50mm 时,合格率先增加后减小,而漏播率先下降后趋于稳定。

2.3 二次回归正交旋转组合仿真试验

2.3.1 试验方案与结果

穴播器转速、种层高度和毛刷轮与排种轮线速比,是影响穴播器充种、排种的关键技术指标,直接影响着排种性能。因此,选穴播器转速(X_1)、毛刷轮与排种轮线速比(X_2)、种层高度(X_3)作为试验因素,以排种合格率(Y_1)、漏播率(Y_2)、重播率(Y_3)为试验指标,进行二次回归正交旋转组合仿真试验,合格率、漏播率、重播率计算方法为

$$\text{合格率: } Y_1 = \frac{N_1}{N_0} \times 100\%$$

$$\text{漏播率: } Y_2 = \frac{N_2}{N_0} \times 100\%$$

$$\text{重播率: } Y_3 = \frac{N_3}{N_0} \times 100\%$$

其中, N_1 为排种轮排出 2 粒种子次数; N_2 为穴播器排出 0~1 粒种子次数; N_3 为穴播器排出大于 2 粒种子次数; N_0 为排种轮排种的总次数。

试验因素编码如表 5 所示,试验设计方案与结果如表 6 所示。

表 5 试验因素编码表

Table 5 Table of test factor codes

| 编码 | 因素 | | |
|--------|---------------------------------|----------------|-------------|
| | 穴播器转速 /r · min ⁻¹ | 毛刷轮与排种轮 线速比 | 种层高度 /mm |
| -1.682 | 30 | 1.1 | 100 |
| -1 | 34 | 1.2 | 120 |
| 0 | 40 | 1.4 | 150 |
| 1 | 46 | 1.6 | 180 |
| 1.682 | 50 | 1.7 | 200 |

表 6 试验结果

Table 6 Test result

| 试验号 | 因素 | | | 试验结果/% | | |
|-----|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | X_1 | X_2 | X_3 | Y_1 | Y_2 | Y_3 |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 96.4 | 1.4 | 2.8 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | 89.5 | 9.9 | 4.2 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | 94.0 | 1.4 | 0.5 |

续表 6

| 试验号 | 因素 | | | 试验结果/% | | |
|-----|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| | X_1 | X_2 | X_3 | Y_1 | Y_2 | Y_3 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | 94.5 | 1.7 | 2.5 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | 96.8 | 1.4 | 0.8 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | 85.5 | 14.4 | 2.5 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | 96.8 | 1.4 | 1.2 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 91.5 | 7.7 | 1.5 |
| 9 | -1.682 | 0 | 0 | 96.1 | 2.0 | 1.5 |
| 10 | 1.682 | 0 | 0 | 84.5 | 14.0 | 3.2 |
| 11 | 0 | -1.682 | 0 | 91.5 | 5.7 | 2.5 |
| 12 | 0 | 1.682 | 0 | 93.8 | 1.4 | 0.8 |
| 13 | 0 | 0 | -1.682 | 96.8 | 0.7 | 2.2 |
| 14 | 0 | 0 | 1.682 | 94.1 | 4.7 | 0.5 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 97.5 | 0.9 | 1.2 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 96.5 | 0.9 | 1.5 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 97.5 | 1.9 | 2.2 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 98.8 | 0.7 | 2.5 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 96.8 | 2.4 | 1.2 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | 96.8 | 1.4 | 1.5 |
| 21 | 0 | 0 | 0 | 98.8 | 0.7 | 2.2 |
| 22 | 0 | 0 | 0 | 98.8 | 0.7 | 1.2 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 97.8 | 0.7 | 1.8 |

2.3.2 多因素仿真试验结果分析

试验数据采用 Design-Expert 数据分析处理软件,对表 6 的试验数据结果进行多元回归拟合分析,进行显著性检验,利用响应面分析法对两两因素交互作用进行分析,所得到方差分析如表 7 所示。

表7 试验结果方差分析
Table 7 Analysis of variance of test results

| 方差来源 | 合格率 | | | | 漏播率 | | | | 重播率 | | | |
|----------|--------|-----|--------|-----------|--------|-----|--------|-----------|-------|-----|-------|----------|
| | 平方和 | 自由度 | F值 | P值 | 平方和 | 自由度 | F值 | P值 | 平方和 | 自由度 | F值 | P值 |
| 模型 | 290.27 | 9 | 47.34 | <0.0001** | 353.35 | 9 | 105.78 | <0.0001** | 15.57 | 9 | 7.79 | 0.0018** |
| X_1 | 132.31 | 1 | 194.21 | <0.0001** | 170.69 | 1 | 459.91 | <0.0001** | 4.99 | 1 | 22.48 | 0.0008** |
| X_2 | 11.38 | 1 | 16.71 | 0.0022** | 35.87 | 1 | 96.64 | <0.0001** | 4.07 | 1 | 18.34 | 0.0016** |
| X_3 | 5.09 | 1 | 7.48 | 0.0210* | 21.73 | 1 | 58.55 | <0.0001** | 3.44 | 1 | 15.51 | 0.0028** |
| X_1X_2 | 22.45 | 1 | 32.95 | 0.0002** | 27.75 | 1 | 74.77 | <0.0001** | 0.080 | 1 | 0.36 | 0.5618 |
| X_1X_3 | 13.00 | 1 | 19.09 | 0.0014** | 13.78 | 1 | 37.13 | 0.0001** | 0.24 | 1 | 1.10 | 0.3183 |
| X_2X_3 | 1.45 | 1 | 2.12 | 0.1760 | 0.28 | 1 | 0.76 | 0.4044 | 1.44 | 1 | 6.50 | 0.0288* |
| X_1^2 | 79.88 | 1 | 117.25 | <0.0001** | 78.66 | 1 | 211.93 | <0.0001** | 1.13 | 1 | 5.09 | 0.0477* |
| X_2^2 | 33.45 | 1 | 49.10 | <0.0001** | 8.39 | 1 | 22.60 | 0.0008** | 0.015 | 1 | 0.069 | 0.7979 |
| X_3^2 | 4.10 | 1 | 6.02 | 0.0340* | 3.08 | 1 | 8.30 | 0.0163* | 0.078 | 1 | 0.35 | 0.5675 |
| 残差 | 6.81 | 10 | | | 3.71 | 10 | | | 2.22 | 10 | | |
| 失拟 | 3.34 | 5 | 0.96 | 0.5154 | 1.48 | 5 | 0.66 | 0.6692 | 0.75 | 5 | 0.51 | 0.7594 |
| 误差 | 3.47 | 5 | | | 2.23 | 5 | | | 1.47 | 5 | | |
| 总和 | 297.09 | 19 | | | 357.06 | 19 | | | 17.79 | 19 | | |

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

1) 合格率 Y_1 。由表7的方差分析表可得出:合格率模型的 P 值<0.0001,表示影响极显著,说明试验标准与试验影响要素存在明显的回归关系;失拟项 P 值为0.5154,表示检验结果不显著,说明方程的拟合情况相对较好,试验方案设计合理,回归方程具有可行性。对于合格率 Y_1 ,各因素及各因素之间的交互作用,对其的影响主次顺序为 X_1 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2 、 X_3 、 X_3^2 、 X_2X_3 。剔除表格中不显著因素项($P>0.05$)数据,最终得到影响合格率的因素水平编码,回归方程为

$$Y_1 = 97.3 - 3.11X_1 + 0.91X_2 - 0.61X_3 + 1.68X_1X_2 - 1.27X_1X_3 - 2.35X_1^2 - 1.52X_2^2 - 0.53X_3^2$$

根据回归方程可以得出,多个模型因素变化对方程的结果变化,有着关键性的作用,3个因素对合格率影响重要程度依次为穴播器转速、毛刷轮与排种轮线速比、种层高度。

2) 漏播率 Y_2 。由表7的方差分析表可得出:漏播

率模型的 P 值<0.0001,显著性远远小于0.01,表示影响极显著,说明试验标准与试验影响要素存在明显的回归关系;失拟项 P 值为0.6692,表示检验结果不显著,说明方程的拟合情况相对较好,试验方案设计合理,回归方程具有可行性。对于合格率 Y_2 ,各因素及各因素之间的交互作用,对其的影响主次顺序为 X_1 、 X_1^2 、 X_2 、 X_1X_2 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_2^2 、 X_3^2 、 X_2X_3 ,剔除表格中不显著因素项($P>0.05$)数据,最终得到影响合格率的因子水平编码,回归方程为

$$Y_2 = 1.37 + 3.54X_1 - 1.62X_2 + 1.26X_3 - 1.86X_1X_2 + 1.31X_1X_3 + 2.34X_1^2 + 0.76X_2^2 + 0.46X_3^2$$

3) 重播率 Y_3 。由表7的方差分析表可得出:重播率模型的 P 值为0.0018,显著性远远小于0.01,表示影响极显著,说明试验标准与试验影响要素存在明显的回归关系;失拟项 P 值为0.7549,表示检验结果不显著,说明方程的拟合情况相对较好,试验方案设计合理,回归方程具有可行性。对于重播率 Y_3 ,各因素

及各因素之间的交互作用,对其的影响主次顺序为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_2X_3 、 X_1^2 、 X_1X_3 、 X_1X_2 、 X_3^2 、 X_2^2 。剔除表格中不显著因素项($P>0.05$)数据,最终得到影响合格率的因子水平编码,回归方程为

$$Y_3 = 1.65 + 0.6X_1 - 0.55X_2 - 0.5X_3 + 0.43X_2X_3 + 0.28X_1^2$$

2.4 响应曲面分析

通过 Design-Expert 软件对试验数据进行处理,可得穴播器转速、毛刷轮与排种轮线速比、种层高度两两交互作用对穴播器排种合格率影响的响应曲面,结果如图 6 所示。由图 6(a)可知:当种层高度为 150mm 时,随着穴播器转速和毛刷轮与排种轮线速比的增加,合格率先增大后减小。其原因是:穴播器转速较低时有利于充种,种子能够进入排种轮窝眼内,但毛刷轮与排种轮线速比较低时,毛刷轮的清种效果不明显,容易造成重播;随着穴播器转速和毛刷轮与排种轮线速比增加,毛刷轮对种子扰动变大,清种效

果变好,同时充种效率也随之增加,所以合格率增大。当穴播器转速和毛刷轮与排种轮线速比过大时,充种时间变短,不利于充种,同时毛刷轮对种层扰动过大,容易造成漏播现象,因此合格率减小。由图 6(b)可知:毛刷轮与排种轮线速比为 1.4 时,随着穴播器转速和种层高度的增大,合格率先增大后减小。原因是:穴播器转速和种层高度的增加有利于种子进行充种,从而使排种合格率增加;而穴播器转速和种层高度较大时,容易刷轮与排种轮相切处形成种子堆积,不利于清种,容易导致重充,进而导致合格率降低。由图 6(c)可知,穴播器转速为 40r/min 时,随着毛刷轮与排种轮线速比和种层高度的增加,合格率先增大后减小;当毛刷轮与排种轮线速比和种层高度处在合理的范围内增加时,既有利于充种,同时清种效果也较好,因此合格率增加;但当毛刷轮与排种轮线速比和种层高度处于高水平时,继续增加将会导致毛刷对种子扰动过大,不利于充种,导致合格率降低。

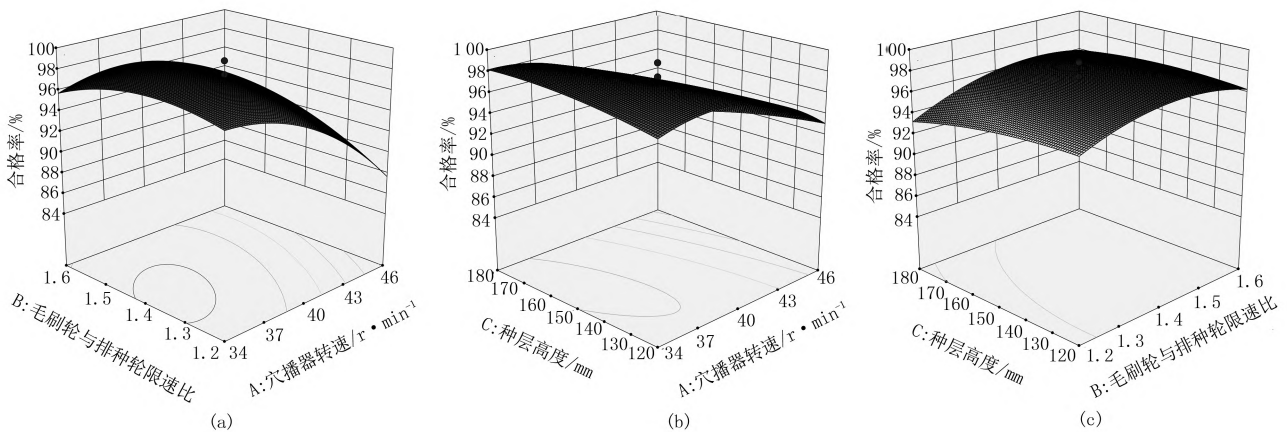


图 6 交互作用对合格率影响的响应曲面

Fig. 6 Response surface of interaction effect on qualification rate

2.5 试验结果目标优化

为了获得最佳穴播器排种参数,求各因素之间的最优组合,以表 5 中各因素范围为约束条件,利用 Design-Expert 对其参数作优化求解^[16-17]。以合格率最高、重播率和漏播率最低为目标,目标函数和各因素选取条件为

$$\begin{aligned} & \text{Max} Y_1 \\ & \text{Max} Y_2 \\ & \text{Max} Y_3 \\ & -1.682 \leq X_1 \leq 1.682 \\ & -1.682 \leq X_2 \leq 1.682 \\ & -1.682 \leq X_3 \leq 1.682 \end{aligned}$$

由此可知:穴播器转速为 34.7r/min、毛刷轮与排种轮线速比为 1.4、种层高度为 180mm 时,穴播器排

种合格率最大,为 98.2%,漏播率和重播率最小,分别为 0.64% 和 0.94%。

3 穴播器台架性能试验

为验证仿真试验的优化结果,选用哈菜豆 11 号油豆角种子,通过人工清选处理,保证提供试验的种子形状均匀、饱满无损伤及虫害^[18-19],其千粒质量为 375g,含水率约为 40%。将油豆角穴播器安装在 JPS-12 型排种器性能试验台上进行试验验证。试验过程中,穴播器固定安装在试验台上,与传动轴相连,传送带相对于穴播器反向运动,模拟播种作业实际工作状态;喷油泵将黏性油液喷在传送带上,种子从穴播器落至涂有油层的传送带上,通过试验台图像系统进行实时检测并采集数据,以准确测定排种性能指

标^[20-21]。设置穴播器转速为 34.7r/min、毛刷轮与排种轮线速比为 1.4、种层高度为 180mm 进行试验,结果如表 8 所示。

表 8 台架性能试验结果
Table 8 Bench performance test results %

| 试验序号 | 合格率 | 合格率平均值 | 漏播率 | 漏播率平均值 |
|------|------|--------|-----|--------|
| 1 | 97.4 | | 0.9 | |
| 2 | 96.8 | 97.1 | 1.3 | 1.13 |
| 3 | 97.1 | | 1.2 | |

试验结果表明:合格率为 97.1%,漏播率为 1.13%,充种性能稳定,且种子株距相等,证明穴播器排种性能的稳定性,结果与仿真试验吻合,验证了仿真试验的可靠性。

4 结论

1)设计了一种油豆角穴播器,确定了穴播器的总体结构与工作原理,并对穴播器关键技术参数进行设计。

2)以穴播器转速、毛刷轮与排种轮线速比、种层高度作为试验因素,以排种合格率、漏播率、重播率为试验指标,进行二次回归正交旋转组合仿真试验,并进行参数优化。结果表明:合格率最高、漏播率最低时参数组合为穴播器转速为 34.7r/min,毛刷轮与排种轮线速比为 1.4,种层高度为 180mm。

3)对穴播器进行台架性能试验,验证了仿真试验结果的可靠性。

参考文献:

- [1] 杨国威,许春林.菜豆角多功能播种机的研制[J].农机使用与维修,2017(4):4-5.
- [2] 石林榕,赵武云.西北寒旱农区胡麻滚匀式精量穴播器的设计与试验[J/OL].吉林大学学报(工学版):1-16 [2022-11-11].
- [3] 伍皖闽,陈学庚,王士国,等.组合型孔轮式玉米精量穴播器设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(3):60-70.
- [4] 李彦平,卢琦,安邦,等.燕麦穴播排种器的设计与试验[J].农机化研究,2022,44(12):156-162.
- [5] 李衣菲,衣淑娟,陶桂香.气吸式黑豆精量排种器性能多因素试验研究[J].农机化研究,2020,42(9):131-138.
- [6] 张学军,张海涛,史增录,等.棉花精量穴播器取种状态监测系统设计与试验[J].农业工程学报,2022,38(5):9-19.
- [7] 卢宇,蒋延金,陈立东,等.双U型棉花精量播种机设计与试验[J].中国农机化学报,2021,42(10):34-41.
- [8] 曲浩,石林榕,辛尚龙,等.玉米种肥同穴与膜下滴灌一体机的设计与试验[J].中国农业大学学报,2021,26(7):135-146.
- [9] 周刚.旱地胡麻施肥覆膜穴播联合作业机设计与试验[D].兰州:甘肃农业大学,2020.
- [10] 韩豹,刘俏,高英玲,等.大豆种子包衣机种药混合装置匀种性能数值模拟与试验[J].东北农业大学学报,2020,51(3):79-86.
- [11] 王士国,康建明,颜利民.2BM-12型旱作水稻铺膜铺管播种机的研制[J].中国农机化,2012(3):74-77,88.
- [12] 刘晓东,王东伟,何晓宁,等.2BMD-3/6型花生膜上穴播机的设计与试验[J].农机化研究,2019,41(7):90-94.
- [13] 徐照耀,周勇,胡梦杰,等.基于EDEM的内充种式棉花排种器排种仿真试验[J].甘肃农业大学学报,2020,55(4):175-183.
- [14] 张开兴,李金凤,宋正河,等.变粒径双圆盘气吸式精量排种器优化设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(6):52-63.
- [15] 董浩,徐卫浩,陈涛,等.气吸式黑豆精量排种装置性能试验研究[J].中国农机化学报,2019,40(1):26-31.
- [16] 张春艳,康建明,彭强吉,等.棉花气吸滚筒式穴播器二次投种机构设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(6):106-116.
- [17] 赖庆辉,贾广鑫,苏微,等.凸包异形孔窝眼轮式人参精密排种器设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(7):60-71.
- [18] 李娟娟,张和平,毕新胜,等.转轴型孔式精量排种器充种性能仿真分析与试验[J].农业工程学报,2020,36(5):38-49.
- [19] 王金武,王梓名,徐常塑,等.坡耕地鸭嘴式玉米排种器间歇同步充补装置设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(5):57-66.
- [20] 王金武,唐汉,关睿,等.动定指勾夹持式玉米精量排种器优化设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(12):48-57.
- [21] 赵淑红,陈君执,王加一,等.精量播种机V型凹槽拨轮式导种部件设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(6):146-158.

Design and Experiment of the Hole Planter for Snap Beans

Yang Mo^{1,2}, Chen Changhai², Ma Yongcai¹, Bi Chunhui²

(1. Engineering College, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163000, China; 2. Harbin Academy of Agricultural Sciences, Harbin 150029, China)

Abstract: In view of the fact that there is no special hole planter for snap beans in the process of sowing, which leads to the problems of low qualified rate of sowing, high rate of missed sowing and high rate of replanting, and in the process of hole planting, it is easy to see the phenomenon of "reinforcing" caused by the duck's beak of the hole planter tearing and picking up the film, resulting in poor sowing quality, air leakage of the film and other problems. The structure and working principle of a kind of hole planter for soybean were determined, and the relevant technical parameters were determined. The single factor simulation test was carried out by using the EDEM software to determine the value range of the factors affecting the qualified rate of seed metering; Taking the speed of the hill planter, the height of the seed layer and the linear speed ratio of the brush wheel to the seed metering wheel as the test factors, and taking the qualified rate of the hill planter seed metering, the rate of missed seeding, and the rate of replanting as the test indicators, the quadratic regression orthogonal rotation combination test was conducted to optimize the parameters; The optimized results were tested on the bench to verify the reliability of the simulation results. The results showed that when the qualified rate of seed metering was 98.2%, the rate of missed seeding was 0.64%, and the rate of replanting was 0.94%, the combination of the parameters was that the speed of the hole planter was 34.7r/min, the linear speed ratio of the brush wheel to the seed metering wheel was 1.4, and the seed layer height was 180 mm. This study provides a reference for the study of the sowing performance of the snap bean hole seeder and the improvement of the operation quality of the snap bean seeder.

Key words: snap bean; acupoint planter; hole planter

(上接第115页)

Abstract ID:1003-188X(2024)11-0110-EA

Design of Navigation Display Interface for Agricultural Machinery Based on Visual Attention Mechanism

Liu Tao

(Zhengzhou Shengda University, Zhengzhou 451191, China)

Abstract: China is a large agricultural country in the world, agriculture is the basis of the national economy, is to promote social progress and national food security guarantee, the development of agricultural machinery and equipment industry to promote the rapid development of agriculture. At present, China's agricultural machinery is developing in the direction of automation, informationization and intelligence, and agricultural machinery navigation technology is the basis for the intelligent development of agricultural machinery, of which the display interface is the medium of interaction between the operator and the navigation system, which directly affects the operator's experience of use and also affects the efficient and safe operation of agricultural machinery. This study addresses the current problems of poor usability and low user satisfaction of agricultural machinery navigation interface. Based on human visual mechanism, the study explores the visual attention mechanism of agricultural machinery operators during field monitoring operations from the perspective of cognitive physiology, and then designs and optimizes the agricultural machinery navigation display interface around icons, controls, navigation, layout, color and interaction of the display interface. Finally, the visual experience metric was evaluated by TOPSI-SI to verify the practicality and effectiveness of the design method of the agricultural machinery navigation display interface based on visual attention mechanism proposed in this study. The research results can provide design reference for the development of agricultural machinery.

Key words: visual attention; agricultural machine navigation; display interface; interaction design; visual experience