

弹射式耳勺型水稻精量穴直播排种器设计与试验

田立权 唐 汉 王金武 李树伟 周文琪 闫东伟

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为满足水稻种植精量穴直播要求,设计了一种弹射式耳勺型水稻精量穴直播排种器。阐述了排种器的工作原理,并应用 Matlab 软件对投种过程中水稻芽种的弹射轨迹进行了研究。为评价排种器性能,选取龙稻 6 号、龙庆稻 2 号、龙庆稻 3 号为试验品种,以旋转盘工作转速、种箱容种高度为影响因素,以排种合格率、重播率、漏播率为指标,采用二次正交旋转组合设计,利用 JPS-12 型排种器检测试验台进行台架试验,构建了排种性能数学模型。运用 Design-Expert 6.0.10 软件对试验数据分析并进行验证试验,结果表明:当旋转盘工作转速为 29.34 r/min 和种箱容种高度为 60 mm 时,龙稻 6 号排种合格率为 87.23%,重播率为 9.56%;龙庆稻 2 号排种合格率为 90.86%,重播率为 6.97%;龙庆稻 3 号排种合格率为 89.12%,重播率为 7.46%。此排种性能满足水稻精量穴直播要求。

关键词: 水稻;排种器;弹射式耳勺;精量穴直播;设计;试验

中图分类号: S223.2⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)04-0065-08

Design and Experiment of Rebound Dipper Hill-drop Precision Direct Seed-metering Device for Rice

TIAN Liquan TANG Han WANG Jinwu LI Shuwei ZHOU Wenqi YAN Dongwei

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming at the need of precision rice hill-direct-seeding, the precision hill-direct-seeding seed-metering device for rice was designed with the rebound dipper, the work principle of seed-metering device was stated and the movement track of rice seed was analyzed in the process of seeder's dropping by means of the Matlab software, the evaluation test of the seed-metering device was conducted by using three kinds of rice, which were Longdao 6, Longqingdao 2 and Longqingdao 3, and rotational quadratic orthogonal experiments was carried out to further analyze the effects of qualified rate, reseeding rate and missing rate on seeding performance, including rotation speed of spinning disk and height of hopper. The JPS-12 detecting and experimental set of seed-metering device was selected to test sowing performances. Experimental data was analyzed by Design-Expert software so as to establish the mathematical model between the experimental factors and indexes. The result showed that the best operational parameter combination was that as the rotation speed of spinning disk was 29.34 r/min and height of seed hopper was 60 mm, the qualified rate and reseeding rate of Longdao 6 were 87.23% and 9.56%, the qualified rate and reseeding rate of Longqingdao 2 were 90.86% and 6.97%, the qualified rate and reseeding rate of the Longqingdao 3 were 89.12% and 7.46%, The sowing performance can meet the requirement of precision rice hill-direct-seeding. The research provided a theoretical reference for the improvement design of precision hill-direct-seeding seed-metering device for rice.

Key words: rice; seed-metering device; rebound dipper; precision hill-direct-seeding; design; experiment

引言

水稻直播技术相比移栽是一种省时省水节本增

效的轻简化种植技术^[1-6]。穴直播是按农艺要求,将水稻芽种依所需的穴距、行距和穴粒数精准地播到水田田间^[7-8]。然而,稻种经过浸种催芽处理后,

收稿日期: 2016-07-13 修回日期: 2016-08-22

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD06B04)和国家自然科学基金项目(51205056)

作者简介: 田立权(1979—),男,博士生,主要从事田间机械研究, E-mail: tlqbuct@sohu.com

通信作者: 王金武(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事田间机械及机械可靠性研究, E-mail: jinwuw@163.com

芽种含水率增加、形状不规则、流动性降低,因此推广水稻穴直播的关键在于播种机具核心部件排种器的设计^[4,7]。

国内外学者对排种器的结构与工作原理进行了广泛研究。PRASANNA等^[9]设计了滚筒式水稻排种装置,其结构简单,但播种量大,多应用于水稻条播。罗锡文等^[4,7]研制了瓢形型孔穴直播排种轮控制每穴播种量,并设计弹性随动护种装置,实现了有序种植。王在满等^[10]对型孔轮式排种器工作过程进行了高速摄影分析,提出了排种器结构改进方案。马旭等^[11]设计了螺旋勺轮式播种器,提高了育秧播种的合格率和稳定性。王林力等^[12]设计了偏心顶杆式水稻精量排种器,由于采用顶杆机构强制排种,减少了芽种堵塞,但对种芽损伤率较高。张国忠等^[13]为实现杂交稻和常规稻的田间精量穴直播,提出了具有双腔侧充式排种器,但随排种器转速增加,漏播率呈上升趋势,排种合格率下降。王俊等^[14]提出了一种排种轮表面形成可调节窝眼的排种器,该排种器对球度较高、流动性好的稻种排种性能较好。袁月明^[15]研制了具有双排吸孔的垂直盘式水稻精密排种器,并进行了气室流场仿真分析与性能试验。曹成茂等^[16]设计了一种气吹辅助异形孔勺轮式水稻穴播排种器,采用气吹方式清种,提高了排种性能。翟建波等^[17]研制了一种气力式杂交稻精量穴直播排种器,解决了杂交稻流动性差造成的堵塞问题。上述气力式水稻排种器难以满足田间直播要求,而且上述装置结构复杂,作业中存在效率低、播种成本高等不足。因此,目前黑龙江省水稻直播仍以条播为主,由于条播机用种量大,浪费大量优良稻种,所以研制一种定量播种成行成穴的水稻直播机械很有必要。

本文采用取种耳勺舀种、毛刷清种、导种辊护种、弹射投种等方式,设计弹射式耳勺型精量穴直播排种器(以下简称排种器)。为评价该排种器性能,选取龙稻6号、龙庆稻2号和龙庆稻3号水稻为试验对象,以排种合格率、重播率和漏播率为指标,以旋转盘工作转速、种箱容种高度为影响因素,开展排种性能台架试验,以期对排种器的结构优化改进设计提供理论参考。

1 排种器结构与工作过程

1.1 排种器结构

如图1a所示,排种器主要由取种耳勺、勺轴挡杆、旋转盘、导种辊、辊轴、辊架、投种管、扭转弹簧、清种毛刷、种箱和排种轴等部件组成。

其中,旋转盘与排种轴固结,取种耳勺通过勺轴

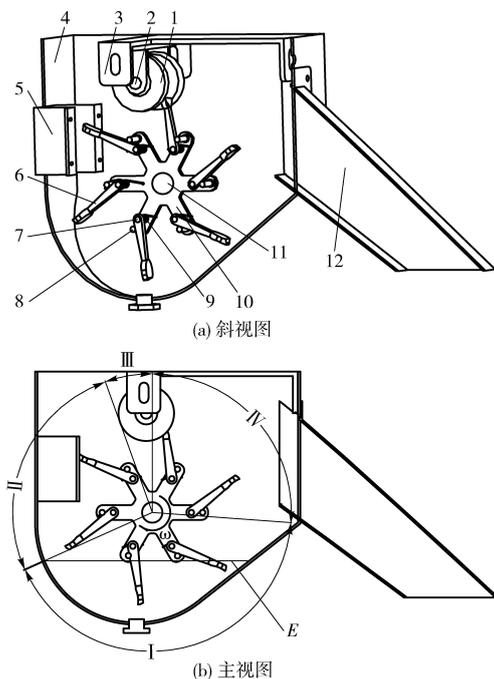


图1 排种器结构与工作过程简图

Fig.1 Structure diagrams of rice hill-direct-seeding and work process

1. 导种辊 2. 辊轴 3. 辊架 4. 种箱 5. 清种毛刷 6. 取种耳勺 7. 勺轴 8. 挡杆 9. 扭转弹簧 10. 旋转盘 11. 排种轴 12. 投种管 I. 舀种区 II. 清种区 III. 导种区 IV. 投种区 E. 初始种位线

安装在旋转盘上;取种耳勺与旋转盘随排种轴转动,同时取种耳勺亦可绕勺轴旋转;扭转弹簧安装在勺轴上,扭转弹簧的一侧端力臂固定在取种耳勺,另一侧端力臂固定在旋转盘上,使取种耳勺与挡杆接触;导种辊通过辊架安装在种箱顶部,并可绕辊轴转动;投种管安装在种箱后壁外侧,清种毛刷安装在种箱前壁内侧。

1.2 工作过程

排种器工作区域划分如图1b所示,种箱内水稻芽种依次经历舀种、清种、导种和投种4个过程。首先机具通过链条将动力传至排种轴,旋转盘带动取种耳勺绕排种轴顺时针转动。在舀种区,耳勺进入初始种位线,舀取定量的芽种并带离种群完成舀种过程;盛有芽种的取种耳勺转至清种区时,处于耳勺边缘非稳定状态的芽种在清种毛刷作用下回落种群,重新参与后续舀种过程;耳勺转入导种区并与导种辊接触,导种辊压动取种耳勺,使其绕勺轴逆时针转动,取种耳勺与挡杆分离,耳勺带动扭转弹簧一侧力臂转动,促使扭转弹簧存储角能量,产生角度回弹力,使取种耳勺紧贴导种辊,起到导种、护种作用;在投种区,耳勺脱离导种辊的压动作用,扭转弹簧复位释放角能量,扭转弹簧带动耳勺绕勺轴顺时针回转,重新与挡杆接触,从而将取种耳勺内芽种弹射入投

种管内,投落至水田田面,完成投种过程。

2 关键部件设计

2.1 取种耳勺

2.1.1 耳勺数量

水稻播种机具在作业速度和穴距确定的条件下,相同直径的旋转盘上取种耳勺数量越多,旋转盘线速度越低^[18]。较低的旋转盘线速度,能够延长耳勺通过舀种区的时间,有利于提高耳勺舀种性能。因此,在排种器结构允许条件下,旋转盘上应尽可能多的设计取种耳勺数量。耳勺在旋转盘上采用均布形式,设取种耳勺数量为 Z ,则有

$$Z = \frac{6 \times 10^4 v}{nS} \quad (1)$$

式中 Z ——取种耳勺数量,个

v ——试验台架种床带速度, m/s

S ——穴距, mm

n ——旋转盘转速, r/min

试验台架种床带速度模拟田间播种机具前进速度 0.52 m/s,设计旋转盘及其上的取种耳勺旋转直径为 200 mm;根据农艺要求水稻播种穴距取 150 mm,旋转盘工作转速取 34 r/min,根据式(1)确定取种耳勺数量 Z 为 6 个。

2.1.2 取种耳勺结构

为保证取种耳勺顺利舀取定量水稻芽种,设计时应考虑芽种参数。浸种催芽后,水稻芽种长、宽、厚差别较大。本试验选取黑龙江省直播种植的 3 个水稻品种,测得浸种催芽后芽种平均长(l)×宽(w)×厚(t)分别为:龙稻 6 号 8.91 mm×2.82 mm×2.15 mm,龙庆稻 3 号 7.75 mm×3.11 mm×2.12 mm,龙庆稻 2 号 6.29 mm×3.29 mm×2.35 mm。

水稻芽种近似椭球状,其平躺、侧卧和竖立姿态的投影截面近似椭圆形,其截面积为

$$s_t = \frac{\pi lw}{4} \quad (2)$$

$$s_w = \frac{\pi tl}{4} \quad (3)$$

$$s_l = \frac{\pi wt}{4} \quad (4)$$

式中 s_t ——水稻芽种平躺状态截面积, mm²

s_w ——水稻芽种侧卧状态截面积, mm²

s_l ——水稻芽种竖立状态截面积, mm²

舀种过程中,取种耳勺盛种部舀入的芽种姿态可能是平躺、竖立或侧卧。有研究表明,芽种稳定舀入盛种部状态概率与其本身平躺、竖立或侧卧状态的截面积成正相关^[19]。即

$$\frac{p_t}{p_w} = \frac{s_t}{s_w} \quad (5)$$

$$\frac{p_t}{p_l} = \frac{s_t}{s_l} \quad (6)$$

$$\frac{p_w}{p_l} = \frac{s_w}{s_l} \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} p_t = \frac{s_t}{s_t + s_w + s_l} \times 100\% \\ p_l = \frac{s_l}{s_t + s_w + s_l} \times 100\% \\ p_w = \frac{s_w}{s_t + s_w + s_l} \times 100\% \end{cases} \quad (8)$$

式中 p_t ——水稻芽种平躺状态概率, %

p_w ——水稻芽种侧卧状态概率, %

p_l ——水稻芽种竖立状态概率, %

水稻芽种囊入盛种部姿态概率为互不相容的事件,3 种姿态的概率总和为 1,即

$$p_t + p_w + p_l = 1 \quad (9)$$

根据式(8)和式(9)分别得到芽种囊入盛种部姿态概率,见表 1。

表 1 水稻芽种囊入盛种部姿态概率

Tab.1 Probability of rice seeds' pose in seed container %

品种	平躺	侧卧	竖立
龙稻 6 号	49.91	38.05	12.04
龙庆稻 3 号	51.15	34.86	13.99
龙庆稻 2 号	47.90	34.21	17.89

由表 1 可知,水稻芽种主要以平躺和侧卧的姿态被舀入取种耳勺盛种部,二者概率之和占 80% 以上。考虑到浸种催芽后芽种尺寸及流动性,本文设计取种耳勺盛种部在旋转盘径向截面为椭圆形,该盛种部椭圆长轴 D 与旋转盘回转方向相切,取种耳勺结构如图 2 所示。 d 为盛种部椭圆短轴, W 为盛种部深度, γ 为盛种部倾角。

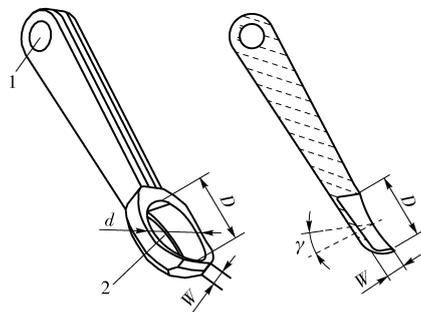


图 2 取种耳勺结构简图

Fig.2 Structure diagram of grasping dipper

1. 勺轴孔 2. 盛种部

为了提高取种耳勺舀种、投种性能,同时保证每个耳勺盛种部舀取 5~8 粒芽种,参照经验公式^[20],

耳勺盛种部椭圆长轴 D 、盛种部椭圆短轴 d 和盛种部深度 W 分别为

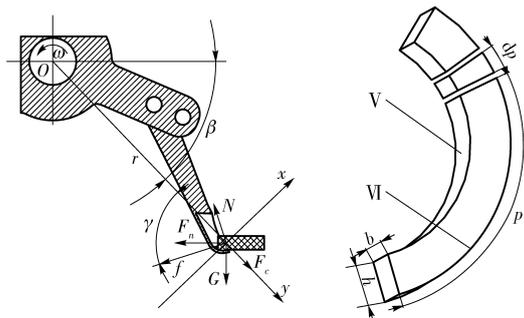
$$\begin{cases} D = k_l l_{\max} \\ d = k_w w_{\max} \\ W = k_i w_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中 l_{\max} ——水稻芽种长度最大值, mm
 w_{\max} ——水稻芽种宽度最大值, mm
 k_l ——盛种部椭圆长轴调节系数
 k_w ——盛种部椭圆短轴调节系数
 k_i ——盛种部深度调节系数

根据水稻芽种三轴尺寸, 确定 $D = 14$ mm、 $d = 8$ mm、 $W = 4$ mm, 可以盛装 5 ~ 8 粒芽种。

2.1.3 取种耳勺盛种部倾角 γ

排种器作业时, 由于水稻芽种在舀种区以散粒体方式运动, 图 3b 为在取种耳勺带动下芽种形成强



(a) 种群微段受力 (b) 种群微段在舀种区位置

图 3 水稻芽种群在舀种区受力分析图

Fig. 3 Stress sketches of seeds population in grasp

V. 耳勺接触面 VI. 种群接触面

制运动的弧形种群^[21]。为简化分析过程, 将弧形种群视为矩形截面 $h \times b$ (h 为芽种群接触面与取种耳勺间距, b 为厚度) 的芽种流。选取舀种区内种群微段 dp 为研究对象, 受力分析如图 3a 所示, 建立平衡方程

$$\begin{cases} N \cos \gamma - F_n \sin \beta - f \sin \gamma = G \cos \beta \\ F_n \cos \beta + f \cos \gamma + N \sin \gamma - G \sin \beta \geq F_c \\ f = \mu N \\ F_n = \mu G \\ F_c = m \omega^2 r \\ G = mg \end{cases} \quad (11)$$

式中 m ——水稻芽种质量, kg
 F_n ——种群对芽种流微段的侧向压力, N
 β —— y 轴与水平面的夹角, ($^\circ$)
 G ——水稻芽种自身重力, N
 f ——芽种流微段与取种耳勺摩擦力, N
 F_c ——芽种流微段惯性离心力, N
 μ ——芽种流微段与取种耳勺摩擦因数
 N ——取种耳勺对芽种流微段支持力, N

ω ——取种耳勺角速度, rad/s

r ——取种耳勺旋转半径, mm

由式(11)得

$$\beta \geq \pi - \arcsin \frac{\omega^2 r}{g \sqrt{1 + \mu^2} \sqrt{1 + K^2}} - \arctan \frac{1}{\mu} - \arctan \frac{1}{K} \quad (12)$$

其中

$$K = \frac{\mu \cos \gamma + \sin \gamma}{\cos \gamma - \mu \sin \gamma}$$

由式(12)可以得到, 取种耳勺有效舀种位置角即 y 轴与水平面的夹角 β , 与芽种物料特性 μ 、耳勺盛种部倾角 γ 、取种耳勺角速度 ω 有关。根据排种器工作原理可知, 有效舀种位置角不大于 90° , 即 $\beta \leq 90^\circ$, 取种耳勺角速度取 $\omega = 3.35$ rad/s, 芽种流微段与取种耳勺摩擦因数取 $\mu = 0.78$ ^[22], 耳勺旋转半径 r 为 100 mm, 取整求得耳勺盛种部倾角 γ 为 17° 。

2.2 投种管

为了减少水稻芽种与投种管碰撞产生损伤, 降低芽种与投种管摩擦, 及时抛投到水田田面, 应研究投种过程中芽种弹射轨迹, 根据轨迹线设计投种管。

如图 4 所示, 设弹射轨迹线为 $y^2 = -\frac{1}{k}x$, 其出口端为抛物线顶端, 抛物线开口方向为 x 轴负方向。

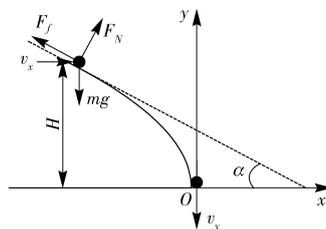


图 4 芽种在投种管运动示意图

Fig. 4 Sketch of motioning seed in different shaped orifices

已知取种耳勺弹射点高度为 H , 芽种抛入投种管速度为 v_x , 离开投种管速度为 v_y , 芽种下落过程中轨迹线微元记作 ds , 芽种与投种管的摩擦角为 φ , 芽种所处投种管点切线与 x 轴夹角为 α , 投种管对芽种支持力为 F_n , 摩擦力为 F_f , 芽种自身重力为 mg , 则有

$$\begin{cases} mg \cos \alpha = F_n \\ F_f = F_n \tan \varphi \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \tan \alpha = y' \\ \cos \alpha = -\frac{dx}{ds} \end{cases} \quad (14)$$

当 $y = H$ 时, $x = -KH^2$, $dQ = F_f ds$, 有

$$Q = \int F_f ds = \int mg \cos \alpha \tan \varphi ds = - \int_{-KH^2}^0 mg \tan \varphi dx = mgKH^2 \tan \varphi \quad (15)$$

水稻芽种在弹射投种管和离开投种管时能量守恒,即

$$\frac{1}{2}mv_x^2 + mgH = \int F_f ds + \frac{1}{2}mv_y^2 \quad (16)$$

则 $v_x^2 + 2gH = 2gKH^2 \tan\varphi + v_y^2 \quad (17)$

求得 $v_x^2 + 2gH - v_y^2 = 2gKH^2 \tan\varphi \quad (18)$

化简得 $K = \frac{v_x^2 - v_y^2 + 2gH}{2gH^2 \tan\varphi} \quad (19)$

得到弹射轨迹线方程

$$y = \sqrt{-\frac{2gH^2 \tan\varphi}{v_x^2 - v_y^2 + 2gH}x} \quad (20)$$

由式(20)可知,通过改变 H 、 v_x 、 v_y 等参数,应用 Matlab 软件可以绘制一系列水稻芽种的弹射轨迹^[23],如图5所示。

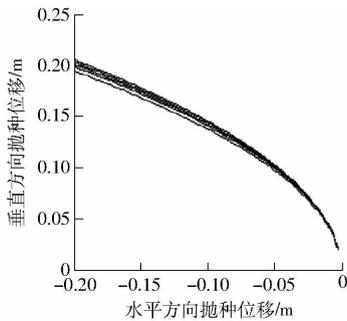


图5 水稻芽种弹射轨迹

Fig.5 Track of rice unloading

根据弹射轨迹设计投种管,将弹射轨迹最大限度的包络在投种管范围内。水稻芽种在依此方法设计的投种管内运动,可以降低芽种与投种管碰撞,减少芽种损伤,降低芽种与投种管摩擦,顺利成穴投落到水田田面。

3 性能试验

3.1 试验装置

为了测试排种器性能,用 JPS-12 型计算机视觉技术排种器自动试验台(黑龙江省农业机械工程科学研究院研制)进行台架试验,如图6所示。试验品种选择龙庆稻3号,千粒质量27.2g,由黑龙江省庆安县北方绿洲稻作研究所选育,需对其浸种催芽至破胸露白。

试验时,将排种器固定在安装架上,由电动机控制种床带速度,模拟播种机具前进状态;通过变频器调节排种轴在10~150 r/min内无级调速;黏种油以一定的宽度喷涂于种床带表面,可有效对芽种进行黏附,模拟芽种播种至水田情况。

3.2 评价指标

按照农艺要求,常规稻直播每穴5~8粒^[24],将每穴0~4粒记为漏播,每穴5~8粒记为合格,每穴

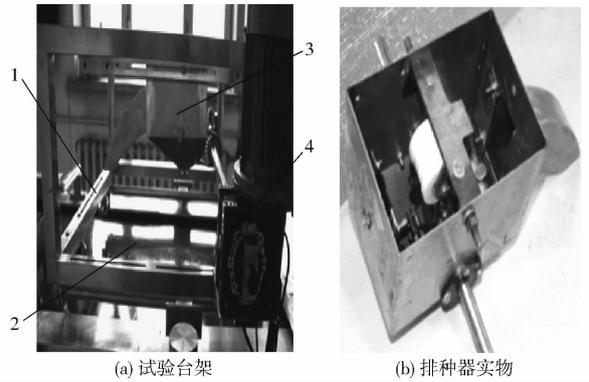


图6 排种性能试验台架

Fig.6 Test platform of seed-metering device on performance

1. 安装架 2. 种床带 3. 排种器 4. 电动机

超过8粒记为重播。参考 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》中播种合格率、漏播率和重播率计算方法。连续记录排种器排出每穴内芽种数 X_i ,每250次为1组,记录3组,对每穴内芽种出现0~4粒、5~8粒与8粒以上次数 X_i 进行统计^[25],则每穴不同粒数芽种的概率为

$$p(i) = \frac{\sum_{j=1}^3 X_{ij}}{750} \quad (i=0,1,2,\dots) \quad (21)$$

播种合格率、重播率、漏播率计算公式为

$$\begin{cases} y_1 = \sum_{i=5}^8 p(i) \times 100\% \\ y_2 = \sum_{i=9}^n p(i) \times 100\% \\ y_3 = \sum_{i=0}^4 p(i) \times 100\% \end{cases} \quad (22)$$

式中 X_{ij} ——每穴排出 i 粒芽种的次数

y_1 ——合格率,% y_2 ——重播率,%

y_3 ——漏播率,%

3.3 试验设计

根据排种器结构和工作过程可知,影响排种器性能的主要因素有种箱容种高度和旋转盘工作转速。分别对容种高度和工作转速进行单因素预备试验,以合理控制因素变化范围^[26]。在此基础上,采用二因素五水平二次旋转组合设计试验以确定排种器最佳组合参数,试验因素编码如表2所示。

表2 试验因素编码

Tab.2 Coding of experimental factors

编码	工作转速 $x_1/(r \cdot \min^{-1})$	容种高度 x_2/mm
1.414	36.00	120
1	32.78	107
0	25.00	75
-1	17.72	43
-1.414	14.00	30

试验方案与结果如表3所示。

表3 试验方案与结果

Tab.3 Results and design of tests

序号	试验因素		性能指标		
	$x_1/(r \cdot \min^{-1})$	x_2/mm	$y_1/\%$	$y_2/\%$	$y_3/\%$
1	17.72	43	76.56	18.42	5.02
2	32.78	43	91.15	6.48	2.37
3	17.72	107	90.96	7.18	1.86
4	32.78	107	63.74	30.09	6.17
5	14.00	75	79.10	16.65	4.25
6	36.00	75	88.28	3.42	8.30
7	25.00	30	71.47	24.32	4.21
8	25.00	120	67.33	29.86	2.81
9	25.00	75	92.32	4.68	3.00
10	25.00	75	89.09	9.77	1.14
11	25.00	75	88.13	9.15	2.72
12	25.00	75	81.46	17.74	0.80
13	25.00	75	89.41	9.39	1.20
14	25.00	75	92.28	7.40	0.32
15	25.00	75	82.05	16.88	1.07
16	25.00	75	90.77	8.49	0.74

通过 Design-Expert 6.0.10 软件对试验数据进行回归分析,进而得到相应的回归方程。其中 x_1 为工作转速, x_2 为容种高度。

$$\begin{cases} y_1 = -35.37 + 3.26x_1 + 2.25x_2 - 0.04x_1x_2 - 8.18x_2^2 \\ y_2 = 117.42 - 2.84x_1 - 1.94x_2 + 0.04x_1x_2 + 7.40x_2^2 \\ y_3 = 36.72 - 2.32x_1 - 0.19x_2 + 0.01x_1x_2 + 0.04x_2^2 \end{cases} \quad (23)$$

为了直观地分析各试验因素与排种性能指标间关系,运用 Design-Expert 6.0.10 软件得到相应曲面,如图7所示。

根据式(23)和图7可知,种箱容种高度与旋转盘工作转速存在交互作用。由图7a可知,旋转盘工作转速一定时,合格率随容种高度的增加先增加后降低;当容种高度变化时,合格率变化区间较大,因此容种高度是影响合格率的主要因素。由图7b可知,种箱容种高度对重播率的影响显著。随容种高度的增加,重播率先降低后增加,原因为容种高度过

大,清种区域变小,甚至没有清种过程,导致取种耳勺内芽种数不稳定。由图7c可知,旋转盘工作转速对漏播率影响显著,随工作转速的增加,漏播率呈现先降低后增加的趋势。

3.4 优化与验证

为得到试验因素最优组合,结合各因素边界条件建立数学模型^[27]。对式(23)回归方程进行分析,其数学模型为

$$\begin{cases} \max y_1 \\ \min y_2 \\ \min y_3 \\ \text{s. t. } 14 \text{ r/min} \leq x_1 \leq 36 \text{ r/min} \\ 30 \text{ mm} \leq x_2 \leq 120 \text{ mm} \\ 0 \leq y_1(x_1, x_2) \leq 1 \\ 0 \leq y_2(x_1, x_2) \leq 1 \\ 0 \leq y_3(x_1, x_2) \leq 1 \end{cases} \quad (24)$$

由式(24),基于 Design-Expert 6.0.10 软件中的 Optimization 模块进行多目标参数优化,得到当旋转盘工作转速为 29.34 r/min 和种箱容种高度为 60 mm 时,排种性能最优,此时合格率为 89.80%、重播率为 7.85%、漏播率为 2.35%。根据数据优化获得的参数进行台架试验验证,得到播种合格率为 89.12%、重播率为 7.46%、漏播率为 3.42%。验证结果与优化结果基本一致,误差在可接受范围内,误差的产生原因可能为机器振动。

在模型优化确定最优参数基础上,为研究排种器对不同品种水稻排种情况,进行台架适应性试验。选取3个品种水稻(龙稻6号、龙庆稻2号、龙庆稻3号)为试验对象,在旋转盘工作转速为 29.34 r/min 和容种高度为 60 mm 工况下进行5次重复试验,数据处理取平均值,试验结果见表4。

由表4可知,排种器对3个品种水稻排种性能均满足水稻直播要求,其中龙庆稻2号(呈短圆形)流动性较好,易于舀种、投种,因此性能指标最优;龙稻6号(呈长圆形)流动性较差,清种不彻底,重播率较高。

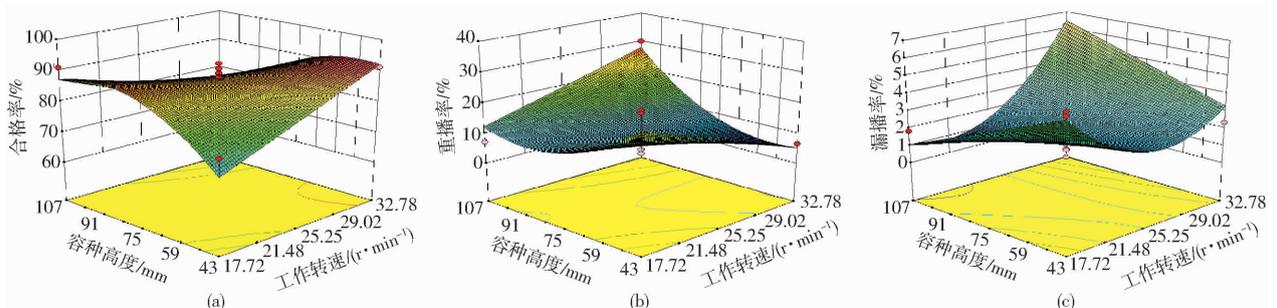


图7 各因素对性能指标影响的响应曲面

Fig.7 Response surfaces of all factors on seeding qualified index

表4 验证试验结果

Tab.4 Results of suitability tests

品种	性能指标		
	合格率/%	重播率/%	漏播率/%
龙稻6号	87.23	9.56	3.21
龙庆稻2号	90.86	6.97	2.17
龙庆稻3号	89.12	7.46	3.42

4 结论

(1)针对黑龙江省水稻直播要求,设计了一种弹射式耳勺型水稻精量穴直播排种器,对其工作过程进行分析。依此确定取种耳勺结构参数和水稻芽种弹射轨迹线,以满足精量穴直播要求。

(2)采用二次回归正交旋转组合设计,运用 Design-Expert 6.0.10 软件对试验数据进行分析,建立试验因素与排种性能数学模型,并对数学模型进行优化、验证,模型优化结果与台架验证结果基本一致。

(3)以种箱容种高度和旋转盘工作转速为影响因素,对该排种器排种性能进行了室内台架试验。结果表明,当旋转盘工作转速为 29.34 r/min 和种箱容种高度为 60 mm 时,得到龙庆稻 3 号最优排种性能指标合格率为 89.12%、重播率为 7.46%,龙庆稻 2 号合格率为 90.86%、重播率为 6.97%,龙稻 6 号合格率为 87.23%、重播率为 9.56%,性能满足直播要求。

参 考 文 献

- 曾山,汤海涛,罗锡文,等.同步开沟起垄施肥水稻精量旱穴直播机设计与试验[J/OL].农业工程学报,2012,28(20):12-19. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20122002&journal_id=nygxcb. DOI: ZENG Shan, TANG Haitao, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of precision rice hill-drop drilling machine for dry land with synchronous fertilizing[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20): 12-19. (in Chinese)
- 臧英,罗锡文,周志艳.南方水稻种植和收获机械化的发展策略[J].农业机械学报,2008,39(1):60-63. ZANG Ying, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan. Development strategy on rice planting and harvesting mechanization in south China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 60-63. (in Chinese)
- 张国忠,臧英,罗锡文,等.水稻气力式排种器导向型搅种装置的设计与试验[J/OL].农业工程学报,2013,29(12):1-8. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131201&journal_id=nygxcb. DOI: ZHANG Guozhong, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of oriented seed churning device on pneumatic seed metering device for rice[J/OL]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 1-8. (in Chinese)
- 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)
- 王在满,罗锡文,唐湘如,等.基于农机与农艺相结合的水稻精量穴直播技术及机具[J].华南农业大学学报,2010,31(1):91-95. WANG Zaiman, LUO Xiwen, TANG Xiangru, et al. Precision rice hill-direct-seeding technology and machine based on the combination of agricultural machinery and agronomic technology[J]. Journal of South China Agricultural University, 2010, 31(1): 91-95. (in Chinese)
- 臧英,邢赫,王在满,等.水稻气力式排种器挡种装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(5):33-38. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150506&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.006. ZANG Ying, XING He, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of shield device on rice pneumatic metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5): 33-38. (in Chinese)
- 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 directseeder [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3): 108-112. (in Chinese)
- 张欣悦,李连豪,汪春,等.2BS-420型水稻植钵育秧盘精量播种机[J/OL].农业机械学报,2013,44(6):51-56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130611&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.06.011. ZHANG Xinyue, LI Lianhao, WANG Chun, et al. Type 2BS-420 precision seeder for rice seedling-growing tray made of paddy-straw[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 51-56. (in Chinese)
- PRASANNA K G V, BRIJESH S, NAGESHB D S. Modeling and optimization of parameters of flow rate of paddy rice grains through the horizontal rotating cylindrical drum of drum seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 65(1): 26-35.
- 王在满,罗锡文,黄世醒,等.型孔式水稻排种轮充种过程的高速摄像分析[J].农业机械学报,2009,40(12):56-61. WANG Zaiman, LUO Xiwen, HUANG Shixing, et al. Rice seeds feeding process in cell wheel based on high-speed photography technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 56-61. (in Chinese)
- 马旭,邝健霞,齐龙,等.水稻田间育秧精密播种机设计与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(7):31-37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150705&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.005.

- MA Xu, KUANG Jianxia, QI Long, et al. Design and experiment of precision seeder for rice paddy field seedling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 31-37. (in Chinese)
- 12 王林力, 谢方平, 孙松林, 等. 水稻芽种偏心顶杆式精量播种机设计[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 215-216, 222. WANG Linli, XIE Fangping, SUN Songlin, et al. Analysis for working course of eccentric mandril metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 215-216, 222. (in Chinese)
- 13 张国忠, 张沙沙, 杨文平, 等. 双腔侧充种式水稻精量穴播排种器的设计与试验[J/OL]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 9-17. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160802&journal_id=nygxcb. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2016.08.002. ZHANG Guozhong, ZHANG Shasha, YANG Wenping, et al. Design and experiment of double cavity side-filled precision hole seed metering device for rice [J/OL]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 9-17. (in Chinese)
- 14 王俊, 陆秋君, 竺雅雅, 等. 水稻直播机专用播种器: 中国, ZL02126718.9[P]. 2002-07-14.
- 15 袁月明. 气吸式水稻芽种直播排种器的理论及试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006. YUAN Yueming. Research of theory and experiment on air suction seed-metering device for direct drilling of rice bud-sowing [D]. Changchun: Jilin University, 2006. (in Chinese)
- 16 曹成茂, 秦宽, 王安民, 等. 水稻直播机气吹辅助匀轮式排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 66-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150110&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.010. CAO Chengmao, QIN Kuan, WANG Anmin, et al. Design and experiment on rice hill seeder with air-blowing special hole and scoop-wheel [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 66-72. (in Chinese)
- 17 翟建波, 夏俊芳, 周勇, 等. 气力式杂交稻精量穴直播排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 75-82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.011. ZHAI Jianbo, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Design and experiment of pneumatic precision hill-drop drilling seed metering device for hybrid rice [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 75-82. (in Chinese)
- 18 张德文, 李林, 王慧民. 精密播种机械[M]. 北京: 农业出版社, 1982.
- 19 张波屏. 现代种植机械工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- 20 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.
- 21 王业成, 邱立春, 张文娇, 等. 摩擦型立式圆盘精密排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 22-26. http://www.tcsae.org/nygxcb/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120105&journal_id=nygxcb. DOI: WANG Yecheng, QIU Lichun, ZHANG Wenjiao, et al. Design and experiment of friction vertical plate precision seed-metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 22-26. (in Chinese)
- 22 於海明. 特种稻谷-籼稻-物理特性的实验测定[D]. 南京: 南京农业大学, 2006. YU Haiming. The experimental measurement of physical characteristics for special grain (xian dao) [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 23 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. 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)
- 24 曾新宇. 不同早稻品种的机直播方式和播量研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013. ZENG Xinyu. The reasearch in mechanization planting ways and seeding ratios at different early direct seeding rice [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 25 GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 2005.
- 26 王延耀, 李建东, 王东伟, 等. 气吸式精密排种器正交试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 54-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s11&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.011. WANG Yanyao, LI Jiandong, WANG Dongwei, et al. Orthogonal experiment optimization on air-suction precision seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 54-58. (in Chinese)
- 27 王金武, 唐汉, 周文琪, 等. 指夹式精量玉米排种器改进设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 68-76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150910&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.010. WANG Jinwu, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Improved design and experiment on pickup finger precision seed metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 68-76. (in Chinese)