

螺旋槽式水稻穴直播排种器设计与性能试验

田立权 王金武 唐汉 李树伟 周文琪 沈红光

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为满足水稻田间精量成行成穴机械直播要求,设计了一种螺旋槽式水稻田间精量穴直播排种器。应用 Matlab 软件对排种过程中螺旋槽内水稻芽种的运动轨迹进行了研究。采用二次回归正交旋转组合设计,以排种轮工作转速、螺旋槽长度、螺旋槽升角为试验因素,穴径合格率、穴粒数合格率和漏播率为指标,利用 JPS-12 型排种器检测试验台对排种性能进行试验,并运用 Design-Expert 6.0.10 软件对试验数据进行分析,得到因素与指标之间的数学模型。试验结果表明:当螺旋槽升角为 71.0° 、螺旋槽长度为 10.8 mm、排种轮工作转速为 23.2 r/min 时,穴径合格率、穴粒数合格率和漏播率分别为 91.06%、94.64% 和 3.64%,排种性能满足水稻田间播种的农艺要求。

关键词: 水稻穴直播;排种器;螺旋槽;设计;试验

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)05-0046-07

Design and Performance Experiment of Helix Grooved Rice Seeding Device

Tian Liquan Wang Jinwu Tang Han Li Shuwei Zhou Wenqi Shen Hongguang

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

Abstract: To meet the requirements of precision rice direct-seeder and linear and hole sowing of the seeds lining and holing in the operation of field seeding, a precision hill-direct-seeding seed metering device with spiral slots and hook-spoons was developed to improve the current situation of labor. The movement track of spiral slot inner sprouting rice seed was analyzed in the process of seed-sowing by means of the Matlab software, as well as rotational quadratic orthogonal experiments was used to further analyze the effects of the rate of average hill diameter, the rate of seeds' number in the hill and leakage-seeding rate on seeding performance; rotation speed, working length of spiral sheave and lead angle. The JPS-12 detecting and experimental set of seed metering device was selected to test sowing performance. Experimental data was analyzed by Design-Expert software so as to establish the mathematical model between the experimental factors and experimental indexes. The result showed that the best operational parameter combination was lead angle of 71.0° , working length of spiral sheave of 10.8 mm, and the rotation speed of 23.2 r/min. The correct rate of average hill diameter was 91.06%, the correct rate of seeds' number in the hill was 94.64% and the leakage-seeding rate was 3.64%. The sowing performance can meet the requirement of rice planting in the operation of field.

Key words: rice hill-direct-seeding; seed metering device; spiral slots and hook-spoons; design; experiment

引言

水稻机械化种植主要包括移植与直播两种体

系。水稻直播不需要秧苗,省掉移植中育秧、起秧、插秧等工序,是一种省工、省力、节本、节能的种植方式^[1-4]。水稻田间机械化精量穴直播使稻田的群体

收稿日期: 2015-10-17 修回日期: 2015-11-30

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(1970—),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

规模较小,群体内水稻植株均匀分布,通风透光较好,稻株根系无损伤,个体根系发达、有效分蘖多、成穗率高,节种增产^[5-6]。

因此,既能成行又能成穴的水稻精量直播技术成为水稻机械化种植的发展方向。目前,针对一些机械播种技术如水稻电磁振动穴盘播种技术、气力吸管式排种技术、搅龙式播种技术、播种带播种技术、种绳播种技术等研究均有报道,但上述技术的排种装置结构复杂,作业中存在效率低、播种成本高等不足^[7-12]。从20世纪70年代开始,我国开始进行水稻直播排种器的研究工作。罗锡文等设计了一种具有2个充种室的型孔轮式水稻田间直播排种器,但其播量调节困难。马旭等设计了一种水稻育秧播种机、袁月明等研制了气吸垂直盘式水稻精播排种器,此二者的研究主要是解决水稻移植育秧需求,难以满足田间直播的需要^[13-19]。

为满足精量播种要求,方便播种量调节,本文设计螺旋槽式水稻田间精量穴直播排种器。对其工作

过程进行理论分析,优化关键部件结构参数;并以水稻芽种为研究对象,通过台架试验得到排种器各参数的最佳组合,以期整机设计提供参考。

1 排种器结构与工作原理

1.1 主要结构

排种器结构如图1所示,主要由螺旋槽排种轮、排种轮盖板、清种滚刷、护种弧板、推种刮片、排种轮定位套、盖板和链轮等部件组成。排种器通过装配孔安装到种箱底部,确定螺旋槽排种轮在排种器内工作长度(即螺旋槽段长度)后,将排种轮定位套紧固在主轴上,使螺旋槽排种轮无法沿主轴轴向移动。清种链轮与驱动链轮由链条连接,清种滚刷与排种轮转动方向相反。护种装置采用弹性护种弧板,使护种弧板的短弧面与清种滚刷接触,长弧面与螺旋槽排种轮接触。将推种刮片装入螺旋槽排种轮上切开的周向环槽内,使推种刮片与环槽底紧密贴合,以提高投种效果。

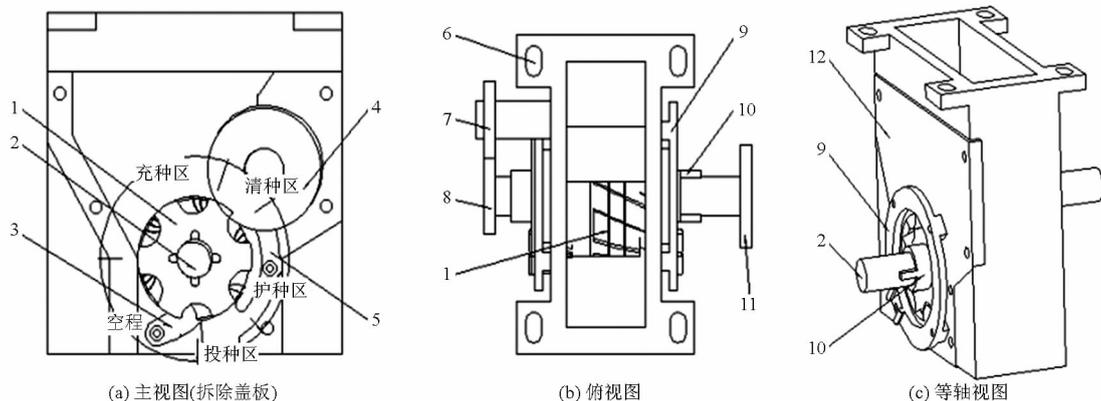


图1 排种器示意图

Fig.1 Sketch of direct-seeder

1.螺旋槽排种轮 2.主轴 3.推种刮片 4.清种滚刷 5.护种弧板 6.上装配孔 7.清种链轮 8.驱动链轮 9.排种轮盖板 10.排种轮定位套 11.主轴链轮 12.盖板

1.2 工作原理

排种器作业过程可分为充种、清种、护种和投种4个阶段。如图1a所示,作业时水稻芽种由种箱填充至排种器内,主轴链轮由机具提供动力转动,同轴传动的驱动链轮带动清种链轮转动。在排种器充种区,水稻芽种充入螺旋槽排种轮内。充入螺旋槽内的芽种随排种轮转动进入清种区,清种滚刷清除螺旋槽钩勾外多余的芽种;清除的芽种留存在充种区,进行二次充种。经过清种区,芽种随螺旋槽进入护种区。护种装置采用弹性护种弧板,以保证护种弧板与排种轮的间距,使其既避免间距过小而使芽种卡在螺旋槽排种轮与护种弧板间造成磕伤,又减轻芽种对护种弧板的磨损。经过护种区后,水稻芽种随螺旋槽排种轮转动到投种区,芽种依靠推种刮片

脱离螺旋槽,到达水田田面完成播种。

2 排种器关键部件设计与分析

2.1 螺旋槽排种轮

螺旋槽排种轮是排种器的关键部件之一,其结构形状及尺寸参数的设计直接影响排种性能。如图2所示,排种轮由螺旋槽段Ⅰ与同径圆柱段Ⅱ组成。螺旋槽段钩勾按螺旋线型均布在圆柱面上,在螺旋槽段上切开若干周向环型浅槽,排种轮中心设主轴孔,通过轴孔沿主轴移动排种轮,排种轮定位套可以调节排种壳体内螺旋槽段长度,进而达到调节播量的目的。

螺旋槽段截面为由圆弧线构成的钩勾形轮廓,其中 L 为钩勾轮廓的开口宽度,其值由最长水稻芽种长度确定,钩勾开口宽度应为芽种最大长度的

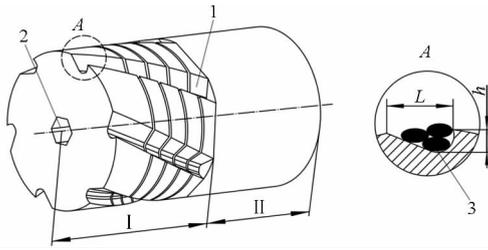


图2 排种轮示意图

Fig. 2 Sketch of seed-metering axle

1. 螺旋槽 2. 主轴孔 3. 芽种

1.1倍; h 为钩勺深度, 其大小影响排种轮的排种均匀性, 取值应大于芽种厚度与宽度的最大值, 为了保证至少3粒芽种充入钩勺内, 钩勺深度 h 应取芽种厚度与宽度最大值的1.4倍。根据表1可知, 龙粳36号稻种的宽度大于厚度, 因此只考虑宽度最大值。为便于水稻芽种充入和由钩勺中排出, 槽钩勺形轮廓参数设计原则为

$$\begin{cases} L = 1.1l_{\max} \\ h = 1.4w_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

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

为提高螺旋槽钩勺形轮廓的充种适应范围, 优化设计合理的结构参数, 选取黑龙江地区直播范围较广的龙粳36号稻种, 随机抽取1000粒, 浸种催芽, 使其破胸露白, 测量芽种物料特性, 统计数据平均值及其他参数见表1。

表1 龙粳36号稻种物料特性

Tab. 1 Material characters of Longjing36

参数	数值
千粒质量/g	36.7
含水率/%	21.8
自然休止角/(°)	36.6
滑动摩擦角/(°)	32.7
长×宽×厚/(mm×mm×mm)	8.08×3.26×2.29

排种轮直径和螺旋槽排种轮钩勺的槽数是影响排种质量的重要因素。通过单因素预试验表明: 排种轮直径过小, 其上均布的螺旋槽钩勺数量少, 排种作业时为保证所需的穴距, 则需增加排种轮的转速^[10]; 而排种轮转速过大, 螺旋槽钩勺转经充种区时间变短, 芽种不能及时充入钩勺内, 易造成漏播。因此排种轮直径应取较大值, 但排种轮直径过大, 导致排种器尺寸增大和质量增加。因此本设计的排种轮半径为40 mm, 螺旋槽钩勺槽数为6个。

2.2 螺旋槽钩勺充种动力学分析

随着排种轮转动, 充种区内水稻芽种被螺旋槽外壁带动并充入钩勺内。芽种运动速度沿螺旋槽钩勺切向速度与钩勺外壁切向的速度应具有速度差,

否则无法保证钩勺正常充种^[20]。同时芽种进入螺旋槽钩勺的时间是影响充种性能的主要因素之一, 芽种进入时间过长, 不能快速进入螺旋槽钩勺内, 导致钩勺充种不充分, 增加漏播率。所以需要分析充种过程, 探索螺旋槽钩勺设计参数、芽种参数与充种时间的关系。以芽种质心为坐标原点、螺旋槽截面法向为 x 轴建立坐标系, 如图3所示。

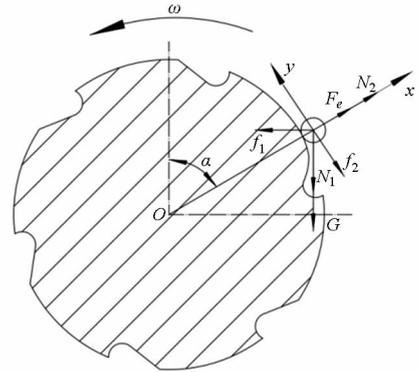


图3 钩勺充种受力示意图

Fig. 3 Stress sketch of hook spoon in seed-metering process

为简化分析, 本文假设水稻芽种为圆球体且规则排列, 芽种所受压力为其上方所有芽种重力之和, 侧压力为零。根据排种器工作条件可知, 水稻芽种在自身重力 G 、离心力 F_e 、芽种种群间的推挤力 N_1 、螺旋槽钩勺对芽种的支承力 N_2 、螺旋槽钩勺外壁与芽种的摩擦力 f_2 及芽种种群内摩擦力 f_1 共同作用下充入螺旋槽钩勺内, 将力系向螺旋槽钩勺截面的法向和切向进行分解, 建立力学平衡方程式

$$\begin{cases} ma_x = (G + N_1) \cos\alpha + f_1 \sin\alpha - F_e - N_2 \\ ma_y = (G + N_1) \sin\alpha - f_1 \cos\alpha + f_2 \\ f_1 = \mu_1 N_1 \\ f_2 = \mu_2 N_2 \\ F_e = mr\omega^2 \\ G = mg \end{cases} \quad (2)$$

式中 m ——水稻芽种质量, g

a_x ——水稻芽种法向加速度, m/s^2

a_y ——芽种切向加速度, m/s^2

α ——芽种角位移, (°)

r ——芽种质心至螺旋槽钩勺中心距离, mm

ω ——芽种角速度, rad/s

μ_1 ——芽种间摩擦因数

μ_2 ——螺旋槽钩勺外壁与芽种间摩擦因数

整理式(2)可得

$$\begin{cases} a_x = \frac{(mg + N_1) \cos\alpha + \mu_1 N_1 \sin\alpha - N_2}{m} - r\omega^2 \\ a_y = \frac{(mg + N_1) \sin\alpha - \mu_1 N_1 \cos\alpha + \mu_2 N_2}{m} \end{cases} \quad (3)$$

分析水稻芽种充入螺旋槽钩匀的过程可知, 芽种质心沿螺旋槽钩匀截面法向方向的位移量 h (即螺旋槽钩匀的深度) 与芽种法向加速度关系为

$$h = \frac{1}{2} a_x t^2 \quad (4)$$

式中 t ——芽种质心充入螺旋槽钩匀内时间, s

结合式(3)与式(4)求得

$$t = \sqrt{\frac{2hm}{(mg + N_1) \cos\alpha + \mu_1 N_1 \sin\alpha - mr\omega^2 - N_2}} \quad (5)$$

为保证水稻芽种充分充入螺旋槽钩匀内, 需要缩短芽种进入螺旋槽钩匀的时间。由式(5)分析可知, 在确定充种区夹角 α 后, 水稻芽种充入螺旋槽钩匀的时间 t 与芽种参数 m 、 μ_1 以及螺旋槽钩匀的设计参数 h 、 r 、 ω 有关。

2.3 螺旋槽升角

水稻芽种充入螺旋槽钩匀后, 在螺旋槽内的运动可分解为沿螺旋槽排种轮的轴向移动和沿排种轮径向旋转运动。将螺旋槽钩匀内芽种 M 在 A 点的速度分解, 螺旋槽升角 θ 在展开状态下, 螺旋线用一条斜直线表示^[21-22], 如图 4 所示。

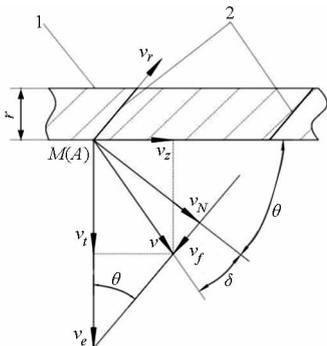


图 4 芽种质点速度示意图

Fig. 4 Force diagram of seed in filling part

1. 轴线 2. 螺旋线

螺旋槽钩匀绕轴线转动, 水稻芽种 M 在 A 点线速度 v_e 方向为该点的切向方向, 为芽种的牵连速度; v_r 为相对速度, 方向为平行于 A 点螺旋线方向。如果不考虑螺旋槽摩擦力影响, 芽种将沿着螺旋线 A 点法线方向以 v_N 的理论绝对速度运动。但是由于螺旋槽摩擦力的关系, 水稻芽种在 A 点的实际绝对速度 v 将偏转一个角度, 偏转的角度近似等于水稻芽种颗粒的外摩擦当量角 δ 。将实际绝对速度 v 分解为芽种的周向速度 v_t 和轴向速度 v_z , 得到

$$\begin{cases} v_z = v \cos(\theta + \delta) \\ v_t = v \sin(\theta + \delta) \end{cases} \quad (6)$$

由图 4 所示, 不考虑摩擦力影响下, 芽种理论绝对速度有

$$v_N = v_e + v_r \quad (7)$$

由于螺旋槽摩擦力的影响, 芽种在 A 点的实际绝对速度 v 与 v_N 以及偏转速度 v_f 关系为

$$v = v_f + v_N \quad (8)$$

利用速度三角形求解可得

$$v = \frac{v_N}{\cos\delta} = \frac{v_e \sin\theta}{\cos\delta} \quad (9)$$

水稻芽种在 A 点牵连速度 v_e 为

$$v_e = \omega r = \frac{2\pi nr}{60} \quad (10)$$

将式(7)~(10)代入式(6), 整理可得

$$\begin{cases} v_z = \frac{2\pi nr}{60} \frac{\sin\theta}{\cos\delta} \cos(\theta + \delta) \\ v_t = \frac{2\pi nr}{60} \frac{\sin\theta}{\cos\delta} \sin(\theta + \delta) \end{cases} \quad (11)$$

式中 n ——螺旋槽排种轮转速, r/min

由式(11)得到螺旋槽排种轮转速、水稻芽种质心与螺旋槽中心距离以及外摩擦当量角确定情况下, 应用 Matlab 软件绘制的 v_z 与 v_t 随螺旋槽升角增加而变化的趋势曲线如图 5。

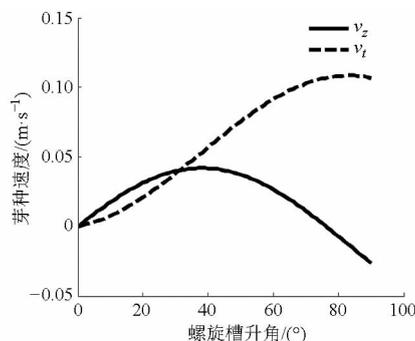


图 5 轴向速度与周向速度变化曲线

Fig. 5 Changing curves of axial velocity and circumferential velocity

由图 5 可知, 随着螺旋槽升角的增大, 水稻芽种轴向速度先增大后减小; 周向速度逐渐增大。在某一螺旋升角范围内能得到较好的轴向速度 v_z 与周向速度 v_t , 使排种时轴向速度较小有利于降低穴径变异系数, 而周向速度较大有利于芽种由螺旋槽钩匀内顺利排出。所以进行排种性能试验时, 根据农业机械设计手册并结合上述分析, 螺旋槽升角 θ 取值范围为 $40^\circ \sim 86^\circ$ 。

3 试验

3.1 试验材料

为探索排种轮工作转速、螺旋槽长度、螺旋槽升角对排种性能的影响, 得到其最佳工作参数, 对排种器进行台架试验, 如图 6 所示。

试验地点为东北农业大学排种性能实验室; 试验品种为水稻龙粳 36 号, 稻种需浸种催芽, 使其破

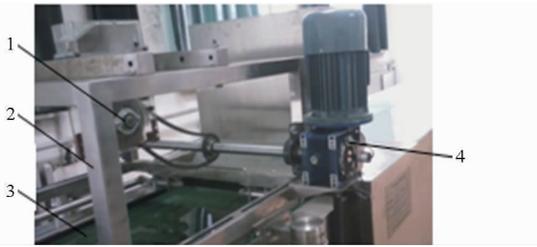


图6 排种器台架试验

Fig. 6 Rack experiment of seed-metering device

1. 排种器 2. 安装架 3. 种床带 4. 控制电动机

胸露白^[23];试验装置为JPS-12型排种器检测试验台^[24]。排种器固定在安装架上;控制电动机带动种床带转动,种床带上涂有一定宽度的黏种油,水稻芽种由排种口投落至黏种油层上,可以实时采集数据,实现各项排种性能指标的测量。

3.2 试验因素及指标

排种轮工作转速和螺旋槽升角是影响芽种轴向速度与周向速度的重要因素,同时螺旋槽长度的变化对排种量也有重要的影响。因此选取排种轮工作转速、螺旋槽长度和螺旋槽升角为试验因素,结合GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》和文献[15],选取排种穴内有3~8粒芽种的穴数与总穴数的百分比作为穴粒数合格率,直播到田面的芽种下落在一个合适的穴范围内,其穴范围直径即穴径,穴径不大于50 mm的穴数与总穴数的百分比作为穴径合格率,排种穴内有0~2粒芽种的穴数与总穴数的百分比为漏播率,穴粒数合格率、穴径合格率与漏播率作为排种性能的考核指标^[10]。

3.3 试验设计与结果分析

首先对排种轮工作转速、螺旋槽长度与螺旋槽升角进行了单因素预备试验,以确定各因素合理的变化范围。在此基础上采用三因子二次回归正交旋转组合设计进行试验分析,试验因素水平编码如表2所示。

表2 试验因素水平编码

Tab. 2 Coding and level of experimental factors

编码	工作转速 $x_1/(r \cdot \min^{-1})$	螺旋槽长度 x_2/mm	螺旋槽升角 $x_3/(\circ)$
1. 682	30.0	12.0	86.0
1	27.6	10.8	76.7
0	24.0	9.0	63.0
-1	20.4	7.2	49.3
-1. 682	18.0	6.0	40.0

根据二次回归正交旋转组合设计23组试验,试验方案与结果见表3。其中 y_1 为穴径合格率, y_2 为穴粒数合格率, y_3 为穴粒数漏播率。

通过 Design - Expert 6. 0. 10 软件对试验数据进

行回归分析,筛选出显著的影响因素,得到相应的回归方程。

表3 试验方案与结果

Tab. 3 Schemes and results of experiment

序号	试验因素			性能指标		
	$x_1/$ $(r \cdot \min^{-1})$	$x_2/$ mm	$x_3/$ (\circ)	$y_1/$ %	$y_2/$ %	$y_3/$ %
1	20.4	7.2	49.3	89.16	87.13	6.28
2	27.6	7.2	49.3	88.95	85.09	7.86
3	20.4	10.8	49.3	90.87	87.24	8.20
4	27.6	10.8	49.3	90.25	84.56	9.20
5	20.4	7.2	76.7	89.74	87.45	8.22
6	27.6	7.2	76.7	87.97	87.55	7.38
7	20.4	10.8	76.7	91.31	91.97	4.36
8	27.6	10.8	76.7	89.76	89.71	7.18
9	18.0	9.0	63.0	90.33	76.74	7.48
10	30.0	9.0	63.0	88.54	72.41	5.18
11	24.0	6.0	63.0	88.08	94.1	2.32
12	24.0	12.0	63.0	91.04	94.07	4.80
13	24.0	9.0	40.0	89.41	88.1	9.06
14	24.0	9.0	86.0	90.28	93.32	6.30
15	24.0	9.0	63.0	91.05	93.41	3.20
16	24.0	9.0	63.0	90.40	90.13	2.74
17	24.0	9.0	63.0	90.71	88.31	3.32
18	24.0	9.0	63.0	90.54	91.2	3.72
19	24.0	9.0	63.0	90.76	90.38	3.96
20	24.0	9.0	63.0	91.11	90.82	3.04
21	24.0	9.0	63.0	90.59	94.04	5.46
22	24.0	9.0	63.0	90.64	89.72	3.20
23	24.0	9.0	63.0	90.70	93.63	5.50

$$y_1 = 46.97 + 1.78x_1 + 2.51x_2 + 0.34x_3 - 6.31x_1x_3 - 0.03x_1^2 - 0.11x_2^2 - 0.001x_3^2 \quad (12)$$

$$y_2 = -108.42 + 20.51x_1 - 9.14x_2 - 0.21x_3 + 0.04x_2x_3 - 0.43x_1^2 + 0.40x_2^2 \quad (13)$$

$$y_3 = 71.55 - 4.34x_1 + 2.47x_2 - 0.82x_3 - 0.04x_2x_3 + 0.09x_1^2 + 0.01x_2^2 \quad (14)$$

运用 Design - Expert 6. 0. 10 软件得到响应曲面图,如图7所示。

对上述回归方程与响应曲面图进行分析可知,螺旋槽长度与螺旋槽升角的交互作用对穴粒数合格率与漏播率影响显著;螺旋槽升角与排种轮工作转速的交互作用对穴径合格率影响显著。由图7a可知,当螺旋升角一定时,穴径合格率随工作转速的增加而先增加后降低;当工作转速一定时,穴径合格率随螺旋槽升角的增加而增加,此结果与前文螺旋槽升角对水稻芽种轴向速度变化影响分析结果相一致。由图7b可知,当螺旋槽长度一定时,穴粒数合格率随螺旋槽升角增加而先降低后增加;当螺旋升角一定时,穴粒数合格率随螺旋槽长度增加而降低。

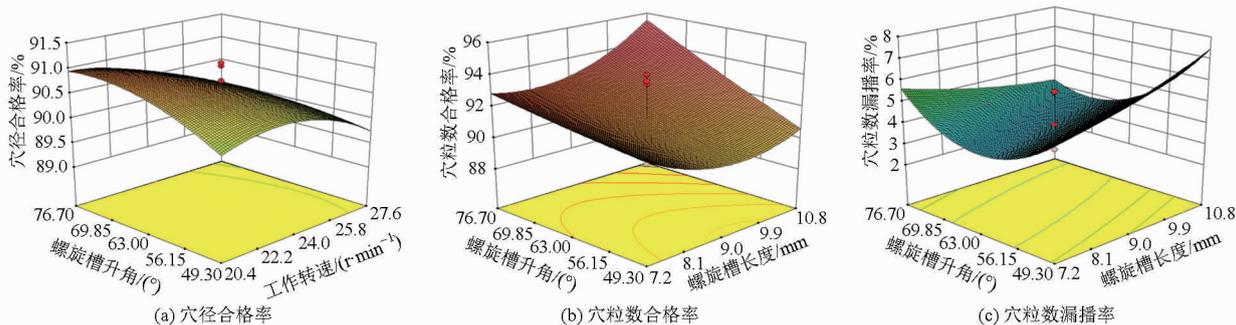


图7 响应曲面图

Fig. 7 Response curved surface figures

由图7c可知,当螺旋槽长度一定时,漏播率随螺旋槽升角增加而先降低后增加;当长度变化时,漏播率变化区间大,因此螺旋槽长度是影响漏播率的主要因素。

3.4 优化与验证

为得到试验因素的最优组合,结合因素的边界条件建立数学模型,对穴径合格率、穴粒数合格率、穴粒数漏播率的回归方程进行分析,其数学模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \max y_1 \\ \max y_2 \\ \min y_3 \\ \text{s. t. } 18 \text{ r/min} \leq x_1 \leq 30 \text{ r/min} \\ 6 \text{ mm} \leq x_2 \leq 12 \text{ mm} \\ 40^\circ \leq x_3 \leq 86^\circ \\ 0 \leq y_1(x_1, x_2, x_3) \leq 1 \\ 0 \leq y_2(x_1, x_2, x_3) \leq 1 \\ 0 \leq y_3(x_1, x_2, x_3) \leq 1 \end{array} \right. \quad (15)$$

当排种轮工作转速为 23.2 r/min、螺旋槽长度为 10.8 mm、螺旋槽升角为 71.0°时,排种器性能最优,穴径合格率为 91.27%,穴粒数合格率为 94.42%,穴粒数漏播率为 3.82%。根据优化结果对其进行台架试验验证,得到穴径合格率为

91.06%,穴粒数合格率为 94.64%,穴粒数漏播率为 3.64%。验证结果与优化结果基本一致,误差在可接受范围内。

4 结论

(1)设计了一种能实现水稻穴直播的排种器,对关键部件排种轮和螺旋槽钩匀进行了研究,应用 Matlab 软件分析排种过程中螺旋槽内水稻芽种的运动状态。分析可知,排种过程中随螺旋槽升角的增加,水稻芽种轴向速度先增大后减小,周向速度逐渐增大。

(2)采用二次回归正交旋转组合设计,建立试验因素与排种性能指标的数学模型,分析响应曲面图,得出因素对指标影响趋势和因素交互作用的关系并进行台架试验验证,优化结果与验证结果基本一致。

(3)运用 Design - Expert 6.0.10 软件对试验结果进行分析,并对回归模型进行优化、验证,在排种轮工作转速为 23.2 r/min、螺旋槽长度为 10.8 mm、螺旋槽升角为 71.0°时,得到最优组合为穴径合格率为 91.06%,穴粒数合格率为 94.64%,漏播率为 3.64%。

参 考 文 献

- 夏俊芳,许绮川,王志山,等. 2BFS-8型水稻芽种播种施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(10):44-47.
XIA Junfang, XU Qichuan, WANG Zhishan, et al. Design of rice bud seed sowing and fertilizer machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 44-47. (in Chinese)
- 程建平,罗锡文,樊启洲,等. 不同种植方式对水稻生育特性和产量的影响[J]. 华中农业大学学报,2010,29(1):1-5.
CHENG Jianping, LUO Xiwen, FAN Qizhou, et al. Influence of different planting types on growth and development characteristics and yield of rice[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2010, 29(1): 1-5. (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)
- 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)
- 张文忠,苏悦,殷延勃,等. 北方水稻直播栽培的农艺问题与对策[J]. 沈阳农业大学学报,2012,43(6):699-703.
ZHANG Wenzhong, SU Yue, YIN Yanbo, et al. Agronomic problems and countermeasures of north rice in direct seeding cultivation

- [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2012, 43(6): 699 - 703. (in Chinese)
- 6 曾山, 黄忠林, 王在满, 等. 不同密度对精量穴直播水稻产量的影响[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(3): 12 - 18.
ZENG Shan, HUANG Zhonglin, WANG Zaiman, et al. Effects of different planting density on grain yield of precision hill-drop drilling rice[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(3): 12 - 18. (in Chinese)
- 7 PENG Shaobing, YANG Jianchang. Current status of the research on high-yielding and high efficiency in resource use and improving grain quality in rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2003, 17(3): 275 - 280.
- 8 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)
- 9 陈立东, 马淑英, 何堤, 等. 气吸式排种器充种室种面调节装置的设计[J]. 河北科技师范学院学报, 2007, 21(3): 59 - 62.
CHEN Lidong, MA Shuying, HE Di, et al. Design of seed surface regulating device of seed room in suction seed metering device [J]. Journal of Hebei Normal University of Science & Technology, 2007, 21(3): 59 - 62. (in Chinese)
- 10 付威, 李树峰, 孙嘉亿, 等. 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 Wei, LI Shufeng, SUN Jiayi, et al. Design of compulsory clamp-type precision seed-metering device for corn [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 38 - 42. (in Chinese)
- 11 西村洋, 林和信, 後藤隆志, 等. 高精度水稻湛水条播技术に関する研究[R]. 筑波: 農業機械化研究所, 2007.
- 12 任文涛, 吕小荣, 孔爱菊, 等. 水稻种绳直播机的设计[J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(1): 62 - 66.
REN Wentao, LÜ Xiaorong, KONG Aiju, et al. Development of the tapedtype rice direct seeding machine [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2009, 40(1): 62 - 66. (in Chinese)
- 13 夏萍, 张建华, 马有华, 等. 水稻包衣直播机设计与试验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(3): 99 - 103.
XIA Ping, ZHANG Jianhua, MA Youhua, et al. Design and experimental study on a new rice seed coating and direct sowing machine [J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(3): 99 - 103. (in Chinese)
- 14 龙亮, 吴明亮, 高英武, 等. 杂交水稻精密播种机搅龙式排种器的设计[J]. 湖南农业大学学报: 自然科学版, 2004, 30(2): 169 - 171.
LONG Liang, WU Mingliang, GAO Yingwu, et al. Design for the volute distributor for rice precision seeder [J]. Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences, 2004, 30(2): 169 - 171. (in Chinese)
- 15 罗锡文, 欧洲, 蒋恩臣, 等. 抛掷成穴式水稻精量直播排种器试验[J]. 农业机械学报, 2005, 36(9): 36 - 40.
LUO Xiwen, OU Zhou, JIANG Enchen, et al. Experimental research on precision rice direct-seeder with hill sowing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(9): 36 - 40. (in Chinese)
- 16 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 - 217.
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 - 217. (in Chinese)
- 17 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)
- 18 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)
- 19 曹成茂, 秦宽, 王安民, 等. 水稻直播机气吹辅助勺轮式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 66 - 72.
CAO Chengmao, QIN Kuan, WANG Anmin, et al. Design and experimental research on rice hill seeder with air-blowing special hole & scoop-wheel type [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 66 - 72. (in Chinese)
- 20 王永梅, 杨宛章, 王希贵. 螺旋槽轮式排种器的研究[J]. 新疆农业大学学报, 2006, 29(1): 67 - 70.
WANG Yongmei, YANG Wanzhang, WANG Xigui. Study on row sowing device with spiral sheave [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2006, 29(1): 67 - 70. (in Chinese)
- 21 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- 22 王东霞. 螺旋输送机的数值分析及优化设计的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012.
WANG Dongxia. The study of numerical analysis and optimization design of screw conveyor [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- 23 於海明. 特种稻谷(粳稻)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 (Xiandao) [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 24 王玉顺, 郭俊旺, 聂永芳, 等. 外槽轮排种器性能检测及分析[J]. 山西农业大学学报, 2004, 17(3): 256 - 258.
WANG Yushun, GUO Junwang, NIE Yongfang, et al. Detecting and analyzing on performance of external force feed [J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2004, 17(3): 256 - 258. (in Chinese)