

粳稻定向精量播种装置排种性能试验

韩 豹, 孟繁超, 梁丽娜, 葛玉晓, 徐洪岩

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘 要: 为探究粳稻定向精量播种装置排种性能的影响规律并获得因素的最优组合, 以东农 419 长粒型粳稻为播种对象, 采用单因素及三因素三水平正交试验设计方法, 对粳稻定向精量播种装置进行了排种性能试验研究。建立了定距输送板输送频率、输送板齿距和滑道夹角 3 个主要因素与排种合格率 (1~3 粒率)、理想排种率 (2~3 粒率) 的数学模型, 分析了各影响因素及其交互作用对排种合格率与理想排种率的影响规律, 并进行了参数优化与试验验证。影响排种合格率的主次因素依次为输送板输送频率、输送板齿距和滑道夹角; 确定优选组合为输送频率 2.7 Hz、滑道夹角 46.8°、输送板齿距 9.6 mm, 平均排种合格率为 98.75%, 经试验验证, 与理论优化结果基本一致。在相同的试验条件下采用北方常用的 3 个长粒型粳稻和 2 个短粒型粳稻品种进行综合播种作业性能试验, 在纸介种带喂入速度为 0.04 m/s 时, 平均播种合格率为 97.22%, 平均理想排种率为 77.57%, 漏播率与重播率分别低于 2.6% 和 0.4%, 试验结果表明该装置对北方长粒型粳稻具有更好的适应性能, 能够满足粳稻机插秧育秧播种要求。该研究为北方粳稻种子带育秧设备定向精量播种装置的优化设计与排种性能的提升提供了参考。

关键词: 农业机械; 种子; 优化; 粳稻; 育秧; 定向精量播种; 试验

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.002

中图分类号: S223.2⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-16-0008-08

韩 豹, 孟繁超, 梁丽娜, 葛玉晓, 徐洪岩. 粳稻定向精量播种装置排种性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 8—15. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.002 http://www.tcsae.org

Han Bao, Meng Fanchao, Liang Li'na, Ge Yuxiao, Xu Hongyan. Performance experiment of directional precision seeding device for japonica rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 8—15. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.002 http://www.tcsae.org

0 引 言

高产与超高产粳稻田间栽植农艺要求为每穴 (2±1) 株健壮秧苗 (最佳为每穴 2~3 株), 盘播种量仅相当于普通粳稻盘播量的 1/2 左右^[1-6]。为保证插秧机秧爪每次均能抓取 1~3 株秧苗, 播种设备不但要具备精量播种性能, 而且还应保证落种定位准确或使所播种子具有一定的定向排列规律^[7-8]。原有普通粳稻盘育秧播种设备主要采用传统的槽轮 (或窝眼轮) 式机械排种器, 播种时均为无约束地向床面上以撒播的方式投种, 不能满足高产与超高产粳稻育秧播种的播量精度和位置精度要求^[9-13]。目前, 国内已经研制出许多水稻育秧精密播种装备^[14-16], 可实现精量取种与排种, 以及种子在育秧钵盘内的落种定位, 满足每钵 (穴) 拥有 (2±1) 粒种子的精播要求^[17-22]。但对于粳稻机插秧状苗育秧, 因种子在秧盘土上落种时没有钵 (穴) 定位, 落种无序且分布不均匀, 培育出的秧苗无法满足田间机插作业时, 秧爪每次均能抓取 1~3 株秧苗的要求。为此, 韩豹等^[23-24]研制出水稻纸夹定位育秧播种设备, 通过纸带和粘结剂实现落种定位与封固,

制成宽带状的种子带 (或植生带)。但由于该设备的排种装置不具备排种定向功能, 呈无序撒播方式排种, 不利于种子在纸带上的封固。

为此, 课题组基于在组合 V 型槽内沿 D 字形轨迹运动的输送板在定距驱动种子移动过程中可使稻种沿其长轴方向形成连续种子流的原理, 研制出粳稻定向精量播种装置并进行育秧试验^[25-27]。本文在前期定向连续供种试验基础上, 为获得最佳的播种性能, 以粳稻东农 419 种子为播种对象, 采用单因素试验及正交试验方法, 对影响粳稻精量播种性能的主要参数进行优化, 旨在为进一步优化北方粳稻种子带 (植生带) 育秧设备精量播种装置的设计与精量排种性能的提升提供参考。

1 材料与方 法

1.1 试验装置及材料

在东北农业大学农具实验室自行研制的种子定向排种试验台 (图 1) 上进行了定量排种试验, 试验装置主要由台架、组合滑道、种子分离输送机构、水平输送系统、清种辊、刮板和驱动系统等构成。

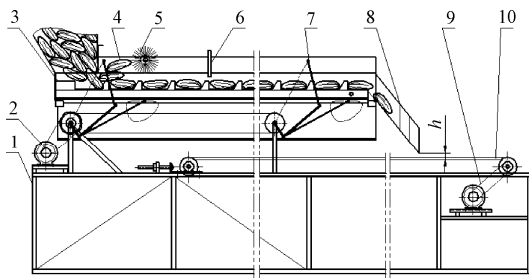
其中, 组合滑道和种子分离输送机构是该试验装置的两大核心部件, 后者按一定运动规律驱动稻种朝排种口方向定位移动, 前者使移动的稻种自动沿长轴方向定向排序, 二者与清种辊刷、清种刮板和排种口构成定向排种装置。可实现粳稻种子精量、定向排种。

收稿日期: 2015-06-12 修订日期: 2015-07-25

基金项目: 国家自然科学基金 (51175074) 和黑龙江省教育厅 (12521017) 联合资助。

作者简介: 韩 豹, 男, 研究员, 博士, 硕士生导师, 主要从事农业机械设计及理论的研究。哈尔滨 东北农业大学工程学院, 150030。

Email: hanbao2004@126.com



1.台架 2.传动系统 3.组合滑道 4.稻种 5.清种辊刷 6.清种刮板 7.种子分离喂送机构 8.排种口 9.水平驱动系统 10.水平输送系统
1. Test-bed bracket 2. Driving system 3. Combined slide rail 4. Rice seeds 5. Cleaning-seeds brush roll 6. Cleaning-seeds scraper 7. Seeds separating and feeding mechanism 8. Exit 9. Horizontal driving system 10. Horizontal conveying system

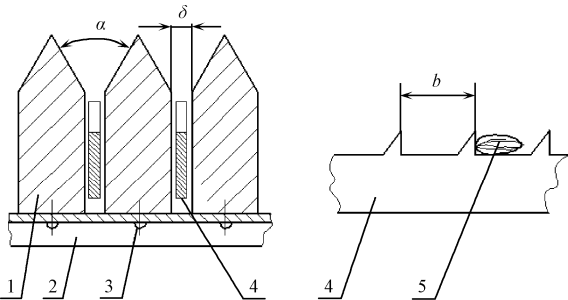
图 1 种子定向排种试验台结构示意图

Fig.1 Structure sketch of seed directional delivery test-bed

工作原理：种箱内的稻种首先落入组合滑道构成的一组 V 形槽内，位于 V 形长槽底部缝隙内的种子定距输送板以一定频率作 D 形轨迹运动，将 V 形槽内种子向排种口端定距定位输送。种子在移动的同时受到 V 形槽槽面和自身重力的作用，逐渐移至槽底并自动调整其长轴方向与滑道同向排列；其次，随着定距输送板的重复运行，种子在 V 形槽内逐渐形成沿长轴方向定向且连续的种子流。最后，由排种口定向排出的种子落在水平输送

带上的育秧盘内，实现精量定向条播或穴播。因为定距输送板每运行一个完整的 D 形运动轨迹，滑道内的种子将沿 V 形长槽被定距推进相同距离并定位，所以通过改变定距输送板的运动频率，就可控制定向种子在单位时间内由排种口定向排出的种子粒数。

主要结构参数：组合滑道由 19 根五棱柱形滑道组合成 18 条 V 形槽，定距输送板位于两根滑道所形成的间隙 $\delta=1.8\text{ mm}$ 内，每根滑道长度为 580 mm，滑道夹角为 α ，齿距为 b ，如图 2 所示。



1.滑道 2.固定架 3.螺钉 4.定距输送板 5.种子
1. Slide rail 2. Fixed shelves 3. Screw 4. Fixed-distance conveying plate 5. Seed
注：b 为齿距，mm； α 为滑道夹角，(°)； δ 为滑道间隙，mm。
Note: b represents tooth space of positioning conveying plate, mm. α represents angle between slide rails, (°). δ represents gap between slide rails, mm.

图 2 组合滑道结构示意图

Fig.2 Structure sketch of combined slide rails

试验用的种子为东北农业大学培育的东农 419 超级粳稻种，经盐水浸泡精选未催芽，平均含水率为 22.3%，其外形尺寸平均值（粒长×粒宽×粒厚）为：7.74 mm×

3.14 mm×2.16 mm，千粒质量为 24.86 g。

1.2 试验方法

试验参照国家标准 GB/T6973-2005，单粒（精密）播种机试验方法^[28]、GB/T9478-2005，谷物条播机试验方法^[29]，在连续 60 s 时间内，统计定距输送板每次由排种口输出 1 粒、2 粒和 3 粒种子的粒数。每次试验重复 5 次。对应排种率为在 60 s 时间内由定距输送板每次从排种口排出 1 粒、2 粒和 3 粒种子的次数分别与定距输送板输送频率的百分比。根据北方粳稻种植农艺要求，将定距输送板在 60 s 时间内每次由排种口输送出 1~3 粒种子的排种率（1~3 粒率）定义为排种合格率，将定距输送板在 60 s 时间内每次由排种口输送出 2~3 粒种子的排种率（2~3 粒率）定义为理想排种率。定距输送板的输送频率由变频控制器控制电机的转速实现。

根据前期试验研究^[25-27]，影响粳稻定向排种性能的主要参数有两根滑道组合成的滑道夹角、位于滑道间隙内沿 D 形轨迹运动的定距输送板的输送频率以及齿距。故选取输送频率 x_1 、滑道夹角 x_2 和齿距 x_3 作为此次试验的 3 个主要试验因素。为明确上述 3 个主要因数对排种性能的影响，取第 2、第 8 和第 14 排种口为测试对象，以排种合格率 Y_1 、理想排种率 Y_2 作为试验评价指标，进行单因素与正交试验。由于当定距输送板的输送频率达到 2 Hz 及以上时，人眼很难准确分辨每次排出稻种粒数，因此采用美国 VRI 公司生产的 Phantom v5.1 高速摄影机进行图像采集，并配合高速摄影软件对图像进行识别、分析及数据处理。

2 排种性能试验

2.1 单因素试验

2.1.1 输送频率对排种性能的影响

在滑道夹角为 60°、定距输送板的齿距为 10 mm 的情况下，选择定距输送板的输送频率分别为 1、2、3、4 Hz 进行试验，定距输送板的输送频率与排种率（单粒率、双粒率、三粒率以及排种合格率）关系如表 1 所示。

表 1 输送频率与排种率关系				
Table 1 Relationship between conveying frequency and seeding rate				
输送频率 Conveying frequency/Hz	合格率 Qualified rate/%	单粒率 Single seed rate/%	双粒率 Double eeds rate/%	三粒率 Three seeds rate/%
1	95.975	10.097	39.428	46.450
2	98.745	15.240	53.176	30.329
3	98.335	13.152	47.763	37.420
4	95.355	38.164	38.322	18.869

注：滑道夹角为 60°，齿距为 10 mm，输送频率分别为 1、2、3、4 Hz。
Note: Angle between slide rails is 60°. Tooth space of positioning conveying plate is 10 mm. Conveying frequency are 1, 2, 3 and 4 Hz, respectively.

根据试验得输送频率分别为 1、2、3、4 Hz 时的排种合格率分别为 95.975%、98.745%、98.335%和 95.355%，可以看出当输送频率为 2 Hz 时，排种合格率最高，输送频率为 3 Hz 时次之；而输送频率为 1、4 Hz 时，排种合格率虽有所下降，但降幅均很小。通过试验观察发现，输送频率较低时，排种合格率低的主要原因是供种箱排

出的种子数不能被定距输送板及时分离输送, 导致 V 形槽滑道内有种子堆叠现象, 偶尔有单次排出 4 粒种子情况发生; 而输送频率较高时, 由于输送板运动频率加快, 稻种沿 V 形槽移动时产生惯性随之增大, 稻种因惯性导致每次移动后, 不能准确定位, 当再次被定距输送板输送时容易发生翻滚, 导致 V 形槽内移动的种子流的稳定性变弱。同时, 输送板运动产生的惯性导致滑道振动, 影响稻种稳定定位和排种。由表 1 可见, 定距输送板的输送频率为 2~3 Hz 时, 排种率合格率均可达 98% 以上。其中, 定距输送板的输送频率为 3 Hz 时, 理想排种率(2~3 粒率) 可达 85% 以上。

2.1.2 定距输送板齿距对排种性能的影响

设定输送频率为 3 Hz, 滑道夹角为 60°, 并根据前期试验研究, 定距输送板的齿距取 9、10、11、12 mm 4 个水平进行单因素试验, 齿距与排种率关系如表 2 所示。

表 2 齿距与排种率关系

Table 2 Relationship between tooth spacing and seeding rate

齿距 Tooth spacing/mm	合格率 Qualified rate/%	单粒率 Single seed rate/%	双粒率 Double seeds rate/%	三粒率 Three seeds rate/%
9	95.355	36.486	38.124	20.745
10	98.100	50.054	40.018	8.028
11	95.090	44.212	41.211	9.667
12	94.560	31.880	35.826	26.854

注: 滑道夹角为 60°, 输送频率为 3 Hz, 齿距分别为 9、10、11、12 mm。
Note: Angle between slide rails is 60°. Conveying frequency is 3 Hz. Tooth space of positioning conveying plate are 9, 10, 11 and 12 mm, respectively.

对应排种合格率分别为 95.355%、98.1%、95.09% 与 94.56%。其中, 齿距为 10 mm 时, 排种合格率最高, 但齿距变化对排种合格率影响不显著。由试验观察, 定距输送板齿距的大小主要对 V 形槽内种子的平稳输送和定向有影响。其原因是齿距越小, 定距输送板对 V 形槽内种子分离、推、带的作用能力越强, 种子虽然在 V 形槽内能够形成稳定的种子流, 但种子的定向性变差。相反, 随着齿距的加大, 种子的定向性相对改善, 但齿距过大时, 稻种在移动过程中易发生翻滚和叠加, 同时定向性不稳定。根据上述分析并鉴于本项试验理想排种率(2~3 粒率) 均处于 50%~60% 范围内变化, 故取试验排种率最高时的齿距作为最优齿距 d , 即 d 为 10 mm。

2.1.3 滑道夹角对排种性能的影响

设定输送板的输送频率为 3 Hz, 齿距为 10 mm, 滑道夹角 α 取 30°、45°、60°、80° 4 个水平进行单因素试验, 滑道夹角与排种率关系如表 3 所示。

表 3 滑道夹角与排种率关系

Table 3 Relationship between slide angles and seeding rate

滑道夹角 slide angles/(°)	合格率 Qualified rate/%	单粒率 Single seed rate/%	双粒率 Double seeds rate/%	三粒率 Three seeds rate/%
30	96.260	32.028	50.986	13.246
45	98.390	21.670	61.448	15.272
60	97.600	33.152	40.072	24.376
80	95.355	36.462	37.046	21.847

注: 齿距为 10 mm, 输送频率 3 Hz, 滑道夹角分别为 30°、45°、60° 和 80°。
Note: Tooth spacing is 10 mm. Conveying frequency is 3 Hz, and angle between slide rails are 30°, 45°, 60° and 80°, respectively.

由试验得各滑道夹角所对应的排种合格率分别为 96.260%、98.390%、97.600% 和 95.355%, 其中, 当滑道夹角为 45° 时, 排种合格率最高。而且理想排种率(2~3 粒率) 可达 76% 以上。

2.2 正交试验

根据上述单因素试验及结果分析, 以排种合格率 Y_1 为试验指标, 以理想排种率 Y_2 为参考指标, 设置各因素水平范围为: 输送频率 2~4 Hz、滑道角度 30°~60°、齿距 9~11 mm。采用三因素二次回归正交旋转组合试验设计方案, 对影响试验指标的 3 个主要试验参数组合进行显著性分析, 并对试验结果进行二次多项方程拟合, 获得排种合格率 Y_1 和理想排种合格率 Y_2 的响应面模型方程, 确定出最佳组合。最后对获得的结果进行优化。试验因素与水平如表 4 所示。

表 4 试验因素及水平表

Table 4 Experimental factors and levels

水平 Levels	试验因素 Test factors		
	输送频率 Conveying frequency X_1 /Hz	滑道夹角 Angle between two slides X_2 (°)	齿距 Tooth pitch X_3 /mm
1	2	30	9
2	3	45	10
3	4	60	11

2.3 正交试验结果及分析

2.3.1 试验结果

2014 年 11 月, 在东北农业大学农具实验室进行试验, 试验结果如表 5 所示。

表 5 试验设计及结果

Table 5 Experimental design and results

序号 No.	试验因素 Test factors			合格率 Qualified rate Y_1 /%	理想合格率 Ideal qualified rate Y_2 /%
	x_1	x_2	x_3		
1	2	3	1	98.4	75.235
2	1	2	3	94.105	75.802
3	1	2	1	95.51	80.8
4	3	1	2	96.215	57.45
5	2	2	2	98.69	87.375
6	2	2	2	98.55	88.73
7	2	2	2	96.05	83.093
8	1	1	2	90.96	84.845
9	2	3	2	95.275	78.325
10	2	3	3	95.36	50.76
11	3	2	1	98.745	65.16
12	2	2	2	98.598	82.085
13	1	3	2	97.635	83.095
14	2	1	3	93.71	65.4
15	2	1	1	97.99	60.372
16	3	2	3	93.145	52.715
17	2	2	2	98.76	79.895

2.3.2 回归数学模型的建立与显著性检查

利用 Design-Expert 8.0.5b 对试验数据进行多元回归拟合, 对试验结果进行回归分析, 可以得到排种合格率

Y_1 和理想排种率 Y_2 回归方程, 并用 F 检验其显著性^[30-31]。

1) 排种合格率 Y_1 回归模型的建立与显著性检验

通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合, 得到各因素对排种合格率 Y_1 影响的回归模型如式 (1)。回归方程的显著性检验如表 6 所示。

$$Y_1 = -26.57743 + 29.13630x_1 + 0.66296x_2 + 14.52163x_3 - 0.12692x_1x_2 - 1.04875x_1x_3 + 0.020667x_2x_3 - 2.04855x_1^2 - 4.71022 \times 10^{-3}x_2^2 - 0.70480x_3^2 \quad (1)$$

由表 6 可知, 这个模型的拟合度是较显著的 ($P < 0.01$)。但滑道夹角和输送板齿距的交互项 (x_2x_3) 的 P 值和输送板齿距二次项 (x_3^2) 的 P 值均 > 0.1 , 说明滑道夹角和齿距的交互项、输送板齿距的二次项对排

种合格率的影响不显著, 其他各项的 F 检验均显著或非常显著, 说明相关试验因素对响应值的影响存在二次关系。对于失拟项 $P = 0.7435$, 不显著, 说明不存在其他影响指标的主要因素存在。剔除不显著因素后的回归模型如式 (2)。剔除不显著因素的回归模型方差分析如表 6 所示。

$$Y_1 = -35.87743 + 29.13630x_1 + 0.86963x_2 + 15.45163x_3 - 0.12692x_1x_2 - 1.04875x_1x_3 - 2.04855x_1^2 - 4.71022 \times 10^{-3}x_2^2 - 0.70480x_3^2 \quad (2)$$

通过对式 (2) 回归系数的检验得出, 影响排种合格率的因子主次要顺序为输送板输送频率、输送板齿距和滑道夹角。

表 6 排种合格率 Y_1 方差分析表
Table 6 Variance analysis for qualification rate Y_1

变异来源 Variation source	平方和 Sum of squares	自由度 DF	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
Model	82.56/82.17	9/8	9.17/10.27	8.94/10.86	0.0043**/0.0014**
x_1	3.34/3.34	1/1	3.34/3.34	3.26/3.53	0.1141/0.0970
x_2	7.60/7.60	1/1	7.60/7.60	7.40/8.03	0.0297*/0.0220
x_3	25.65/25.65	1/1	25.65/25.65	25.00/27.12	0.0016**/0.0008***
x_1x_2	14.50/14.50	1/1	14.50/14.50	14.13/15.33	0.0071**/0.0044**
x_1x_3	4.40/4.40	1/1	4.40/4.40	4.29/4.65	0.0771/0.0631
x_2x_3	0.38/	1/	0.38/	0.37/	0.5598/
x_1^2	17.67/17.67	1/1	17.67/17.67	17.22/18.68	0.0043**/0.0025**
x_2^2	4.73/4.73	1/1	4.73/4.73	4.61/5.00	0.0689/0.0558
x_3^2	2.09/2.09	1/1	2.09/2.09	2.04/2.21	0.1964/0.1753
残差 Residual	7.18/7.57	7/8	1.03/0.95		
失拟差 Lack of fit	1.75/2.13	3/4	0.58/0.53	0.43/0.39	0.7435/0.8063
总和 Correct total	89.74/89.74	16/16			

注: “/”下数字为剔除不显著因素后排种率 Y_1 方差分析结果; “***”表示极显著 ($P < 0.001$); “**”表示比较显著 ($P < 0.01$); “*”表示显著 ($P < 0.05$)。下同。
Note: Numbers under “/” are variance analysis results for qualified rate Y_1 after rejected no significant factors. “***” means highly Significant ($P < 0.001$), “**” means very significant ($P < 0.01$), “*” means significant ($P < 0.05$). Same as below.

2) 理想排种率 Y_2 回归模型的建立与显著性检验

通过对试验数据进行多元回归拟合, 得到各因素对理想排种率 Y_2 影响的回归模型如式 (3)。回归方程的显著性检验如表 7 所示。

$$Y_2 = -1581.47080 + 0.67530x_1 + 6.74402x_2 + 309.13475x_3 + 0.37708x_1x_2 - 1.86175x_1x_3 - 0.49172x_2x_3 - 1.31467x_1^2 - 0.031076x_2^2 - 14.30168x_3^2 \quad (3)$$

根据表 7, 在这个模型当中 $P = 0.0005$, 其模型的拟合度是极其显著的 ($P < 0.001$)。因素 x_1^2 以及输送板输送频率 x_1 和齿距 x_3 交互作用的 P 值均 > 0.10 , 对理想排种率

Y_2 影响不显著。同样, 失拟度的 P 值不显著, 说明不存在其他未考虑的主要因素对指标会有影响。剔除不显著的因子项后的回归模型如式 (4), 模型显著性检验与方差分析如表 7 所示。

$$Y_2 = -1521.88186 - 25.83025x_1 + 6.77170x_2 + 304.93337x_3 + 0.37708x_1x_2 - 0.49172x_2x_3 - 0.031384x_2^2 - 14.37087x_3^2 \quad (4)$$

通过对式 (4) 回归系数的检验得出, 影响理想排种合格率的因子主次要顺序为输送板齿距、输送板输送频率和滑道夹角。

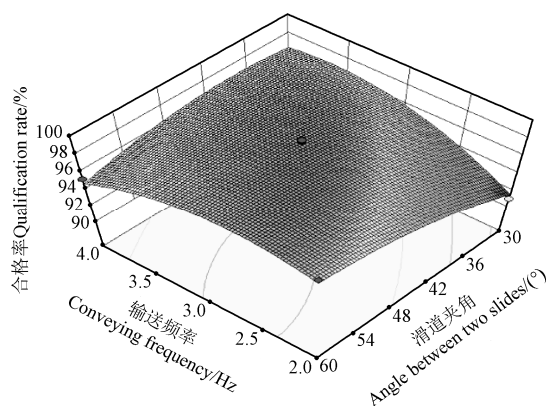
表 7 理想排种率 Y_2 方差分析表
Table 7 Variance analysis for ideal seeding rate Y_2

变异来源 Variation source	平方和 Sum of squares	自由度 DF	均方 Mean square	F 值 F Value	概率值 P $Pr > F$
Model	2345.45/2324.31	9/7	260.61/332.04	17.31/23.62	0.0005***/<0.0001***
x_1	628.21/628.21	1/1	628.21/628.21	41.73/44.69	0.0003***/<0.0001***
x_2	46.79/46.79	1/1	46.79/46.79	3.11/3.33	0.1213/0.1014
x_3	170.11/170.11	1/1	170.11/170.11	11.30/12.10	0.0121*/0.0070**
x_1x_2	127.97/127.97	1/1	127.97/127.97	8.50/9.10	0.0225*/0.0145*
x_1x_3	13.86/	1/	13.86/	0.92/	0.3692/
x_2x_3	217.61/217.61	1/1	217.61/217.61	14.46/15.48	0.0067**/0.0034**
x_1^2	7.28/	1/	7.28/	0.48/	0.5093/
x_2^2	205.85/210.53	1/1	205.85/210.53	13.68/14.98	0.0077**/0.0038**
x_3^2	861.21/871.98	1/1	861.21/871.98	57.21/62.03	0.0001***/<0.0001***
残差 Residual	105.37/126.51	7/9	15.05/14.06		
失拟差 Lack of fit	50.55/71.69	3/5	16.85/14.34	1.23/1.05	0.4085/0.4965
总和 Correct total	2450.82/2450.82	16/16			

注: “/”下数字为剔除不显著因素后理想排种率 Y_2 方差分析结果。
Note: Numbers under “/” are variance analysis results for ideal qualified rate Y_2 after rejected no significant factors.

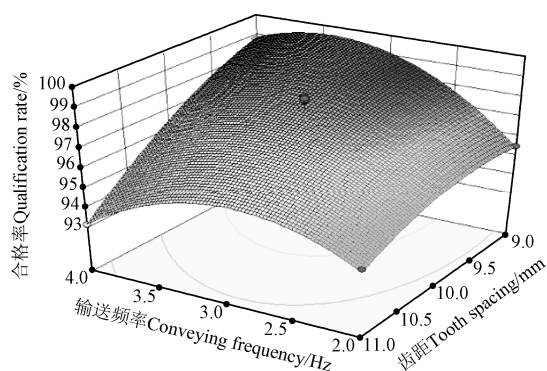
2.4 响应曲面分析

通过 Design-Expert8.0.5b 对数据的处理可知, 输送频率 X_1 、滑道夹角 X_2 和齿距 X_3 的交互作用对排种合格率影响均显著, 影响响应曲面如图 3。



a. 输送频率和滑道夹角的交互作用

a. Interaction of conveying frequency and slide angle



b. 输送频率和齿距交互作用

b. Interaction of seeding frequency and tooth spacing

注: 图 3a 中齿距为 10 mm, 图 3b 中滑道夹角为 45°。

Note: Tooth spacing is 10 mm in Fig.3a. Slide angle is 45° in Fig.3b.

图 3 排种合格率双因素曲面

Fig.3 Surface of double parameters about seeding qualified rate

任意固定某个因素的水平, 根据相应曲面图, 分析其余 2 个因素间的交互作用对排种合格率与理想排种合格率的影响。

2.4.1 输送频率和滑道夹角的交互作用对排种合格率的影响

齿距为 10 mm 时, 由图 3a 可知, 输送频率和滑道夹角的交互作用对排种合格率的影响为上凸型曲面。当滑道夹角一定时, 排种合格率随着输送板输送频率的增加先增大后减小, 最优的输送频率范围应在 2.6~3.2 Hz 之间; 当输送频率一定时, 排种合格率随着滑道夹角的增大先增加后减少, 最优的滑道夹角范围应在 42°~48°之间。在滑道夹角和输送频率的交互作用中, 影响排种合格率的主要因素是输送频率。

2.4.2 输送频率和齿距交互作用对排种合格率的影响

滑道夹角为 45°时, 从图 3b 中可以看出, 输送频率

和齿距的交互作用对排种合格率的影响为上凸型曲面。当输送频率一定时, 排种合格率随着齿距的增大而降低, 最优齿距范围在 9.0~10.0 mm 之间; 当输送板齿距一定时, 排种合格率随着输送频率的增加先增大后减小, 最优输送频率范围在 2.6~3.6 Hz 之间。在输送板齿距和输送频率的交互作用中, 影响排种合格率的主要因素是齿距。

由于滑道夹角和输送板齿距的交互作用在对排种合格率的方差分析中, 因影响不显著, 故不再分析。

3 参数优化与试验验证

为培育大龄带蘖壮秧, 参数优化理想的结果是在约束条件范围内排种合格率最高。因此, 将排种合格率作为评价指标, 对排种合格率回归模型进行优化求解, 优化约束条件如下:

目标函数: $\max Y_1(x_1, x_2, x_3)$

约束函数: $2 \leq X_1 \leq 4, 30^\circ \leq X_2 \leq 60^\circ, 9 \leq X_3 \leq 11$

利用 Design-Expert8.0.5b, 对其参数优化求解可以得到最佳参数组合为输送频率 2.7 Hz、滑道夹角 46.8°、齿距为 9.6 mm, 排种合格率为 98.75%。

对优化后的理论值进行试验验证。在相同的试验条件下重复验证试验 10 次。得排种合格率平均值为 97.98%, 与理论优化结果基本一致。

4 播种综合性能试验

为考察该播种装置在上述参数优化组合条件下的播种综合性能与适应性能, 试验以黑龙江常用长粒型粳稻 (龙洋 16、稻花香、东农 419) 与短粒型粳稻 (空育 131、龙粳 26) 为试验对象, 选取中间 6 列 V 形槽进行试验。采用宽度为 110 mm 的纸介种带, 并在纸介种带上对应的各排种口正下方、沿输送带传输方向均匀涂刷 6~8 mm 宽的糯米胶带, 试验时由位于排种口下方的水平输送带匀速喂入。首先设定输送频率为 2.7 Hz, 当每列 V 形槽内均形成定向且稳定移动的种子流后, 水平输送带以 0.04 m/s 速度喂入纸介种带, 每个品种的试验均重复试验 5 次, 每次随机截取长度约 600 mm 的种子带。然后将每片种子带按插秧机秧爪纵向取秧长度 14 mm 与 V 形槽列距 16 mm 划分成 240 个小格, 统计每片种子带中包含 0 粒、1 粒、2 粒、3 粒和 4 粒及以上种子的小格的个数; 最后分别计算出漏播率 (5 片种子带中没有种子的小格数与总格数之比)、播种合格率 (5 片种子带中包含 1~3 粒种子的小格数与总格数之比)、理想播种率 (5 片种子带中包含 2~3 粒种子的小格数与总格数之比) 与重播率 (5 片种子带中包含 4 粒及以上种子的小格数与总格数之比), 同时测种子在种子带上的定向性, 即偏转角度 β (稻种长轴方向与种子带前进方向夹角大小)。将 β 以 5° 为间隔分别设定 $0^\circ \leq \beta \leq 5^\circ$ 、 $6^\circ \leq \beta \leq 10^\circ$ 和 $11^\circ \leq \beta \leq 15^\circ$ 3 个偏转角度区, 测量并计算 β 在各偏转角度区内的频度 (5 片种子带中各偏转角度区内种子粒数与总粒数之比)。试验结果如表 8 所示。

表 8 排种综合性能试验
Table 8 Overall performance test of seeding

试验对象 Test objects	合格率 Qualified rate/%	理想播种率 Ideal seeding rate/%	漏播率 Missing rate/%	重播率 Reseeding rate/%	频度 Frequency /%		
					$0^{\circ} \leq \beta \leq 5^{\circ}$	$6^{\circ} \leq \beta \leq 10^{\circ}$	$11^{\circ} \leq \beta \leq 15^{\circ}$
东农 419 Dongnong 419	97.95	74.46	1.84	0.21	51.30	25.66	20.08
龙洋 16 Longyang 16	97.69	73.63	1.98	0.33	53.34	26.18	16.16
稻花香 Daohuaxiang	98.03	77.91	1.58	0.39	52.78	25.34	18.98
空育 131 Kongyu 131	96.27	80.12	2.41	1.32	43.38	29.18	22.82
龙粳 26 Longjing 26	96.18	81.73	2.57	1.25	44.47	28.84	22.26

注： β 为所播种子长轴方向与纸带前进方向夹角（偏转角度）。

Note: β represents included angle between sowing seeds' long-axis and direction of forward motion of paper tape (deflection angle).

试验结果表明，该播种装置对黑龙江常用的长粒型和短粒型粳稻均具有较好的适应性能。其中长粒型粳稻排种合格率、漏播率、重播率和定向性均优于短粒型粳稻，平均排种合格率为 97.22%，平均理想排种率为 77.57%，漏播率与重播率分别低于 2.6% 和 0.4%。纸带上种子偏转角度在 $0^{\circ} \leq \beta \leq 5^{\circ}$ 、 $6^{\circ} \leq \beta \leq 10^{\circ}$ 和 $11^{\circ} \leq \beta \leq 15^{\circ}$ 3 个偏转角度区内的频度分别大于或等于 43.38%、25.34% 和 16.16%，即该装置可实现 84.88% 以上种子偏转角度在小于或等于 15° 的偏转角度区内，优于原气吸滚筒式自动清堵排种器播种效果^[22]。

5 结 论

1) 对研制的粳稻定向精量播种装置进行了单因素与正交试验研究，分析得出影响排种合格率的因素主次顺序为定距输送板输送频率、输送板齿距和滑道夹角；影响理想排种率的因素主次顺序为定距输送板齿距、输送板输送频率和滑道夹角。

2) 利用了 Design-Expert8.0.5b 的约束函数参数优化功能，以排种合格率为评价指标，对排种合格率回归模型进行优化求解，获得最佳优化组合为输送频率 2.7 Hz、滑道夹角 46.8° 、齿距为 9.6 mm，排种合格率为 98.75%。

3) 经过综合播种作业性能试验，验证了播种装置对黑龙江常用的长粒型粳稻具有更好的适应性能。得到了平均排种合格率为 97.22%，平均理想排种率为 77.57%，漏播率与重播率分别低于 2.6% 和 0.4%，84.88% 以上种子偏转角度在小于或等于 15° 的偏转角度区内，优于原气吸滚筒式自动清堵排种器定向播种效果，满足北方粳稻种子带育秧精量定位播种要求。

【参 考 文 献】

- [1] 孙涛, 商文楠, 金学泳, 等. 不同播种粒数对水稻生育及其产量的影响[J]. 中国农学通报, 2005, 21(7): 134—137. Sun Tao, Shang Wennan, Jin Xueyong, et al. Effects of seeding number per hill on rice and yield[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(7): 134—137. (in Chinese with English abstract)
- [2] 钱银飞, 张洪程, 吴文革, 等. 机插穴苗数对不同穗型粳稻品种产量及品质的影响[J]. 作物学报, 2009, 35(9): 1689—1707.

Qian Yinfei, Zhang Hongcheng, Wu Wen'ge, et al. Effects of seedlings number per hill on grain yield and quality in different panicle types of mechanical transplanted japonica rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2009, 35(9): 1689—1707. (in Chinese with English abstract).

- [3] 许娜, 王嘉宇, 李涛, 等. 每穴苗数对北方不同穗型粳稻物资生产和抗倒伏能力的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(8): 1506—1512. Xu Na, Wang Jiayu, Li Tao, et al. Effects of seedlings number per hole on matter oduction characteristics and loading resistance in japonica rice with different panicle types[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(8): 1506—1512. (in Chinese with English abstract).
- [4] 于林惠, 丁艳锋, 薛艳凤, 等. 水稻机插秧田间育秧秧苗素质影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 73—78. Yu Linhui, Ding Yanfeng, Xue Yanfeng, et al. Factors affecting rice seedling quality of mechanical transplanting rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(3): 73—78. (in Chinese with English abstract)
- [5] 袁奇, 于林惠, 石世杰, 等. 机插秧每穴栽插苗数对水稻分蘖与成穗的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 121—125. Yuan Qi, Yu Linhui, Shi Shijie, et al. Effects of different quantities of planting seedlings per hill on outgrowth and tiller production for machine-transplanted rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(10): 121—125. (in Chinese with English abstract)
- [6] 宋云生, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻机栽钵苗单穴苗数对分蘖成穗及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 37—47. Song Yunsheng, Zhang Hongcheng, Dai Qigen, et al. Effect of rice potted-seedlings per hole by mechanical transplanting on tillers emergence, panicles formation and yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(10): 37—47. (in Chinese with English abstract)
- [7] 张斌, 俞亚新, 赵匀. 超级稻稻种定向播种的原理研究[J]. 浙江理工大学学报, 2008, 25(4): 454—456.

- Zhang Bin, Yu Yaxin, Zhao Yun. Study on principle of the rice seeds' embryo oriented seeding[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2008, 25(4): 454—456. (in Chinese with English abstract)
- [8] 俞亚新, 赵匀, 张斌, 等. 基于稻种胚胎定向排列的排种器及参数优化[J]. 江苏大学学报, 2008, 29(3): 194—197. Yu Yaxin, Zhao Yun, Zhang Bin, et al. Seed metering device based on orienting ordered arrangement in embryo and parameter optimization[J]. Journal of Jiangsu University, 2008, 29(3): 194—197. (in Chinese with English abstract)
- [9] 吴崇友, 陈南云. 超级稻机械化生产关键技术装备研究开发的技术途径[J]. 农业装备技术, 2006, 32(6): 16—19. Wu Chongyou, Chen Nanyun. Technical ways of developing key technologies & machines of super rice mechanization[J]. Agricultural Equipment & Technology, 2006, 32(6): 16—19. (in Chinese with English abstract)
- [10] 张锦萍, 钟平, 陈川, 等. 杂交稻机插秧现状及关键技术研究进展[J]. 现代农业科技, 2011(3): 50—52. Zhang Jinping, Zhong Ping, Chen Chuan, et al. Status and research progress on key techniques of hybrid rice transplanting with machinery[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2011(3): 50—52. (in Chinese with English abstract)
- [11] 孙勇飞, 吴崇友, 张文毅, 等. 水稻育秧播种机的发展概况与趋势[J]. 农机化研究, 2013(12): 210—215. Sun Yongfei, Wu Chongyou, Zhang Wenyi, et al. Developing situation and tendency of rice seedling planter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013(12): 210—215. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张文毅, 袁钊和, 朱成强, 等. 当前机插秧发展中的问题分析及对策[J]. 中国农机化, 2012(4): 12—13, 5. Zhang Wenyi, Yuan Zhaohe, Zhu Chengqiang, et al. Problems analysis and countermeasures on current rice transplanting mechanization[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012(4): 12—13, 5. (in Chinese with English abstract)
- [13] 蔡亚军. 加快机插水稻集中育秧的探讨[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(3): 57—58, 62. Cai Yajun. Exploring acceleration of centralized rice seedlings[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(3): 57—58, 62. (in Chinese with English abstract)
- [14] 周海波, 马旭, 姚亚利. 水稻秧盘育秧播种技术与装备的研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2008, 24(4): 301—305. Zhou Haibo, Ma Xu, Yao Yali. Research advances and prospects in the seeding technology and equipment for tray nursing seedlings of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(4): 301—305. (in Chinese with English abstract)
- [15] 俞亚新, 赵云, 张斌. 水稻精密排种器的研究现状与展望[J]. 农机化研究, 2007(9): 5—8. Yu Yaxin, Zhao Yun, Zhang Bin. Review for the research of the rice precision seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(9): 5—8. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李耀明, 徐立章, 向忠平, 等. 日本水稻种植机械化技术的最新研究进展[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 182—185. Li Yaoming, Xu Lizhang, Xiang Zhongping, et al. Research advances of rice planting mechanization in Japan[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(11): 182—185. (in Chinese with English abstract)
- [17] Gaikwad B B, Sirohi N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(3): 322—329.
- [18] 张晓慧, 宋建农. 针吸滚筒式水稻排种器设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 69—71. Zhang Xiaohui, Song Jiannong. Design and research on rice precision needle-like vacuum seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 69—71. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陶桂香, 衣淑娟, 汪春, 等. 水稻钵盘精量播种机充种性能试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 44—50. Tao Guixiang, Yi Shujuan, Wang Chun, et al. Performance experiments of bowl dish precision seeder for rice in filling processing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 44—50. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈进, 龚智强, 李耀明, 等. 超级稻穴盘育苗精密播种装置研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(1): 73—78. Chen Jin, Gong Zhiqiang, Li Yaoming, et al. Experimental study on the nursing seedlings of super rice precision seeder device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 73—78. (in Chinese with English abstract)
- [21] 左彦军, 马旭, 齐龙, 等. 窝眼窄缝式气吸滚筒排种装置的试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 141—144. Zuo Yanjun, Ma Xu, Qi Long, et al. Seeding experiments of suction cylinder-seeder with socket-slot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 141—144. (in Chinese with English abstract)
- [22] 韩豹, 吴文福, 王宏业. 水稻机摆钵育苗气吸滚筒式自动清堵排种器[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 96—99. Han Bao, Wu Wenfu, Wang Hongye. Suction drum-type seed metering device with auto-cleaning block of transplanter for tray grown rice seedling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(9): 96—99. (in Chinese with English abstract)
- [23] 韩豹. 气吸式纸夹定位单粒水稻育秧设备的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2006. Han Bao. Study on Single-seed and Its Position with Paper Fixed Metering Device with Air-suction for Nursing Rice Seedling[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [24] 韩豹, 申建英. 气吸式纸夹定位水稻精密育秧设备的研制[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 92—95. Han Bao, Shen Jianying. Design of air-suction rice precision

- nursing equipment with seed fixed by paper band[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(10): 92—95. (in Chinese with English abstract)
- [25] 徐洪岩, 蒋恩臣, 梁丽娜, 等. 北方粳稻“植生带”育秧设备定向排种装置的研制[J]. 农机化研究, 2015, 37(6): 93—96.
Xu Hongyan, Jiang Enchen, Liang Li'na, et al. The development of northern japonica directional metering device of “vegetation zone” seedling equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37 (6): 93—96. (in Chinese with English abstract)
- [26] 梁丽娜, 韩豹, 孟繁超, 等. 粳稻定向排种装置种子分离机构仿真分析[J]. 农机化研究, 2015, 37 (9): 10—15.
Liang Lina, Han Bao, Meng Fanchao, et al. Simulation analysis of seed separation mechanism of directional precision seeding device for super rice[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(9): 10—15. (in Chinese with English abstract)
- [27] 韩豹, 梁丽娜, 孟繁超, 等. 水稻种子带育秧秧苗素质影响因素研究[J]. 农机化研究, 2015, 37 (11): 170—173.
Han Bao, Liang Lina, Meng Fanchao, et al. Research on the factors affecting seeding quality of seed nursery strip for rice[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(11): 170—173. (in Chinese with English abstract)
- [28] GB/T6973-2005, 单粒(精密)播种机试验方法[S].
- [29] GB/T9478-2005, 谷物条播机试验方法[S].
- [30] 邓少华, 姜奉华. 试验设计与数据分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [31] 何为, 薛卫东, 唐斌. 优化试验设计方法与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.

Performance experiment of directional precision seeding device for japonica rice

Han Bao, Meng Fanchao, Liang Li'na, Ge Yuxiao, Xu Hongyan

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

Abstract: In order to solve the problems that the seeding rate was large, the position of dropping seeds was inaccurate and the distribution of seeds was poorly uniform on seedling trays during northern japonica rice seedlings in greenhouses, a new directional precision seeding device with combined V-shaped groove slide was developed. It could achieve that each rice seed was serially arrayed in its long axis direction by the positioning conveying plates, which moved along the D-shaped trajectory in the V-shaped slide. This device was mainly composed of test-bed bracket, driving system, combined V-shaped groove slide, cleaning-seed brush roll, seed separating and feeding mechanism, and horizontal conveyor system. The combined V-shaped groove slide and the seed separating and feeding mechanism were key parts of the seed-metering device. The chief function of the former was to arrange the seeds in their long axis direction while the seeds moved along the combined V-shaped groove, and the latter could drive the directed seeds to move towards the exit intermittently. The working process of the device would be as follows: the rice seeds were placed in the hopper above the combined V-shaped groove slide at first, then the positioning conveying plates drove the seeds to move towards the exit intermittently; each seed moving in the V-shaped grooves would constantly readjust its own long axis direction influenced by the action of the positioning conveying plates and the inclined plane of the grooves, which made the seed in the long axis arranged in a row along the V-shaped grooves slide, and realized the automatic orientation of the seeds. Later, the directed seeds were conveyed to the exit and located on the seed tape or seedling trays according to the required number and spacing of seed. To study the influence law of different factors on seeding performance for directional precision seeding device and obtain the optimal combination of parameters, the conveying frequency, the tooth spacing and the slide angle were taken as the main impact factors of the seeding device performance. In the self-made test-bed, the long-grain type japonica rice Dong Nong 419 was selected as experimental material, the effects of the 3 main impact factors on seeding qualified rate (1-3 seeds every turn), ideal seeding rate (2-3 seeds every turn) were studied by single factor experiments and three-factor and three-level orthogonal experimental design, and the relationships between 3 main influencing factors and seeding qualified rate and ideal seeding rate were established respectively by regression analysis. The influence law of the factors and their interaction on seeding qualified rate and ideal seeding rate was analyzed, and the best optimized combination of the parameters was obtained. The results indicated that the order of primary and secondary factors affecting seeding qualified rate was: conveying frequency > tooth spacing > slide angle and that affecting ideal seeding rate was: tooth spacing > conveying frequency > slide angle. The optimal combination parameters were conveying frequency of 2.7 Hz, slide angle of 46.8° and tooth spacing of 9.6 mm. Under the combination condition of the optimal parameters, the seeding qualified rate and the ideal seeding rate were 98.75% and 84.8% respectively. The seeding verification test indicated that the result fitted in well with the optimal experiments. The seeding overall performance test was carried out under the same conditions with 3 varieties of long-grain type japonica rice seeds (Dongnong 419, Longyang 16 and Daohuaxiang) and 2 varieties of short-grain type japonica rice seeds (Kongyu 131 and Longjing 26). As the paper tape moved at the speed of 0.04 m/s, the average qualified rate and the ideal seeding rate were 97.22% and 77.57%, respectively, and all the miss-seeding rates and reseed rates were less than 2.6% and 0.4%, respectively. Experiment results indicated that when seeding long-grain type and short-grain type japonica rice seeds, the device had a better adaptability for the long-grain type. The seeding performance could meet the requirements of precision seeding for the japonica rice. The research provides a theoretical reference for optimizing the design and improving seeding performance of the directional precision seeding device for northern japonica rice.

Key words: agricultural machinery; seed; optimization; japonica rice; rice nurturing seedlings; directional precision seeding; experiments