doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.10.026

播量可调式水稻毯苗条播机滚筒排种器设计与试验

俞亚新　潘一隆　王　通　王英豪　罗天龙
(浙江理工大学机械工程学院, 杭州 310018)

摘要: 为满足杂交稻和常规稻育秧播量不同的农艺要求,设计了一种机械式滚筒排种器,通过更换不同型孔深度的滚筒实现稻种播量调节。基于水稻充种姿态的理论分析对滚筒型孔进行设计,并开展型孔排布、型孔深度、落种高度及生产率对排种器充种、落种性能影响的研究。以杂交稻华香优 228 和常规稻黄华占为研究对象进行仿真试验。仿真结果表明,滚筒型孔轴向分布为 18 行分布,深度为 2.5 mm(杂交稻)和 4.5 mm(常规稻)时,充种效果最佳;条播排量一致性变异系数随落种高度的增加而提高。以毯苗播种均匀度合格率、条播排量一致性变异系数为性能评价指标开展三因素三水平全因素台架试验,研究型孔深度、生产率及落种高度对排种器工作性能的影响。建立性能评价指标回归模型,获取响应优化结果,并通过台架试验进行优化验证。结果表明:杂交稻华香优 228 在型孔深度为 3.0 mm、生产率为 591.0 盘/h、落种高度为 42.4 mm 时,合格率为 88.6%,变异系数为 14.9%;常规稻黄华占在型孔深度为 4.5 mm、生产率为 500.0 盘/h、落种高度为 57.4 mm 时,合格率为 89.8%,变异系数为 10.2%。开展播量测定试验:在响应优化参数下,长粒型杂交稻华香优 228 与常规稻黄华占播量分别为 40.6 g/盘与 73.9 g/盘;型孔深度为 2.0 mm 与 4.0 mm 时,短粒型杂交稻甬优 538 与常规稻南粳 9108 播量分别为 44.2 g/盘与 78.8 g/盘,满足常规稻及杂交稻育秧播种的农艺要求。

关键词: 水稻毯苗条播机; 滚筒排种器; 播量调节; EDEM
中图分类号: S223.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-1298(2025)10-0310-11　　**OSID:**

Design and Test of Drum Seed Metering Device for Drill Seeding of Rice Blanket Seedlings

YU Yaxin　PAN Yilong　WANG Tong　WANG Yinghao　LUO Tianlong
(*School of Mechanical Engineering*, *Zhejiang Sci-Tech University*, *Hangzhou* 310018, *China*)

Abstract: In order to meet the agronomic requirement of different sowing quantities of hybrid rice and conventional rice during the seedling raising, a mechanical drum seed metering device was designed, which can achieve adjustment of the sowing quantity by replacing drums with different hole depths. The drum holes were designed based on the theoretical analysis of the seed-filling posture of rice, and a study was conducted on influences of hole arrangement, hole depth, seed-dropping height, and productivity on the seed-filling and seed-dropping performance of the seed metering device. Simulation tests were conducted with the hybrid rice "Huaxiangyou 228" and the conventional rice "Huanghuazhan" as the research objects. The simulation results indicated that the optimal seed-filling effect was achieved when the drum holes were axially arranged in 18 rows with depths of 2.5 mm (for hybrid rice) and 4.5 mm (for conventional rice); the coefficient of variation of sowing quantity consistency of drill seeding was increased as the seed-dropping height rose. Full-factorial bench tests with three factors and three levels was conducted, taking the qualified rate of the sowing uniformity for blanket seedlings and the coefficient of variation of sowing quantity consistency of drill seeding as the performance evaluation indexes, to study the influences of the hole depth, productivity, and seed-dropping height on the working performance of the seed metering device. A regression model for performance evaluation indices was established, the optimized results were obtained, which were subsequently verified through the bench tests. The verification results showed that: for hybrid rice "Huaxiangyou 228", when the hole depth was 3.0 mm, the productivity was 591.0 trays per hour, and the seed-dropping height was 42.4 mm, the qualified rate

收稿日期: 2025-02-20　修回日期: 2025-05-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(51975538)
作者简介: 俞亚新(1974—),女,教授,博士,主要从事农业机械设计与分析研究,E-mail: yyxin@zstu.edu.cn

and the coefficient of variation were 88.6% and 14.9%, respectively; for conventional rice "Huanghuazhan", when the hole depth was 4.5 mm, the productivity was 500.0 trays per hour, and the seed-dropping height was 57.4 mm, the qualified rate and the coefficient of variation were 89.8% and 10.2%, respectively. Sowing quantity measurement test was carried out: under the optimized response parameters, the sowing quantities of long-grained hybrid rice "Huaxiangyou 228" and conventional rice "Huanghuazhan" were 40.6 g per tray and 73.9 g per tray, respectively; when the hole depth was 2.0 mm and 4.0 mm, the sowing quantities of short-grained hybrid rice "Yongyou 538" and conventional rice "Nanjing 9108" were 44.2 g per tray and 78.8 g per tray, respectively. The seeding results met the agronomic requirement of sowing of seedling raising for conventional rice and hybrid rice.

Key words: rice blanket seeding drill; drum seed metering device; sowing quantity adjustment; EDEM

0　引言

我国水稻育秧播种以毯苗撒播方式为主，目前水稻育秧的播种环节存在稻种分布不均、漏播等现象[1]，杂交稻实际播量通常需达到理论播量约 2 倍才能保证漏秧率满足农艺要求[2]。部分农户为了降低漏秧率而提高了秧盘播种量，导致水稻播种密度变大，秧苗生长空间减小，进而造成秧苗素质下降、机插取秧苗数不均匀等现象。育苗移栽对发展高产、高效农业具有重要意义[3]，而育秧是移栽的前提，育秧播种的质量对后续移栽工作具有重大影响。因此，在合理播量下保持低漏秧率以及均匀的稻种分布是提高育秧播种质量、保证移栽工作质量的关键。

中国水稻研究所资料[4]表明，以条播方式代替传统的撒播能在提高秧盘内种苗均匀度的同时有效降低育秧用种量，杂交稻育秧每盘用种量下降到 30～50 g[5-7]，而常规稻育秧每盘种量则需 60 g 以上[8-9]。杂交稻与常规稻的育秧播量需求存在差异，排种器需具备播量调节功能，才能满足杂交稻与常规稻播量不同的农艺要求[10-11]。

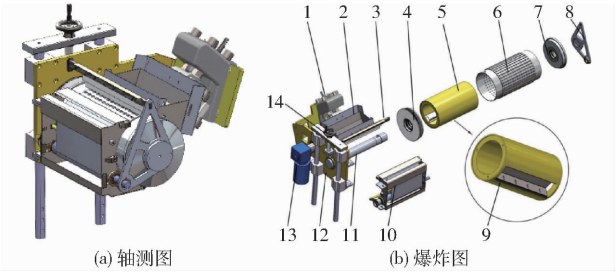
目前水稻播量调节主要应用于直播，如王传雯等[12]设计的穴播排种器，通过设计排种轴的轴向移动带动排种器一侧壳体轴向运动，影响充种空间以调节排种量。XING 等[13-14]从气力方向对直播排种器进行播量调节，设计多气道、吸孔，通过调节工作吸孔的数量，达到播量可调的目的。张明华等[15]采用不同大小的瓢形型孔旋转组合成一个型孔，作为调节机构调节播量。舒彩霞等[16]设计了一种凸轮摇杆机构，用于调节油菜播量。LI 等[17]设计双轨道结构，双轨道配合调节使型孔深度发生改变，以容纳不同数量的稻种，完成播量的调节。上述研究所设计的播量调节机构主要针对圆盘型排种器，空间小易调节，适用于直播，对于毯苗育秧使用的标准 7 寸秧盘或 9 寸秧盘，则难以满足需求。

本文基于常规稻与杂交稻播量不同的农艺要求，设计一种机械式滚筒排种器，工作时根据育秧需求更换播种滚筒，以解决水稻育秧播量调节的问题。通过理论分析与基于 EDEM 的充、落种性能仿真，完成关键部件的工作参数设计与优化。搭建排种性能试验台，开展以播种滚筒型孔深度、生产率、落种高度为影响因素的排种性能试验。并通过试验明确各因素对排种性能的影响规律，获取最优工作参数，以满足常规稻与杂交稻育种播种的农艺要求。

1　排种器结构与工作原理

1.1　排种器总体结构

如图 1 所示，排种器主要由种箱、毛刷、护种机构、滚筒、主轴、机架侧板等结构组成，其中主轴与内套一同安装在机架侧板上固定不动，滚筒安装在内套上，两端与端盖Ⅰ、Ⅱ轴向定位，绕主轴和内套旋转。



(a) 轴测图　　(b) 爆炸图

图 1　排种器整体结构图

Fig. 1　Overall structure diagrams of seed metering device

1. 电磁振动器　2. 种箱　3. 毛刷Ⅰ　4. 端盖Ⅰ　5. 内套　6. 滚筒　7. 端盖Ⅱ　8. 连接板　9. 毛刷Ⅱ　10. 护种机构　11. 主轴　12. 机架侧板　13. 电机　14. 手轮

种箱安装在滚筒型孔表面一侧上方，与电磁振动器配合固定在机架侧板上，护种机构安装于滚筒另一侧。手轮安装于机架侧板的一侧滑块连杆机构上方，用于调整排种器上下位移，以调节排种器落种高度。毛刷Ⅱ内嵌于内套，安装于主轴正下方，用于扫落堵塞于型孔内的种子。

1.2　排种器工作原理

排种器工作区域由充种区、清种区、携种区、排种区、回程区组成。滚筒由回程区运行到种箱下方

的充种区,种子通过种间摩擦力、种子与滚筒表面摩擦力、种子自身重力等共同作用下充入滚筒型孔内,完成充种过程;充种完成后,滚筒运行至清种区,随着滚筒的转动,型孔表面多余种子经毛刷Ⅰ的作用离开型孔并向后运动,落入后方可能形成漏充的型孔之中;清种后位于型孔内的稻种随护种机构运行至排种区,进行投种,安装于内套的毛刷Ⅱ扫落堵塞的种子,避免卡种。排种器整体工作原理如图 2 所示。

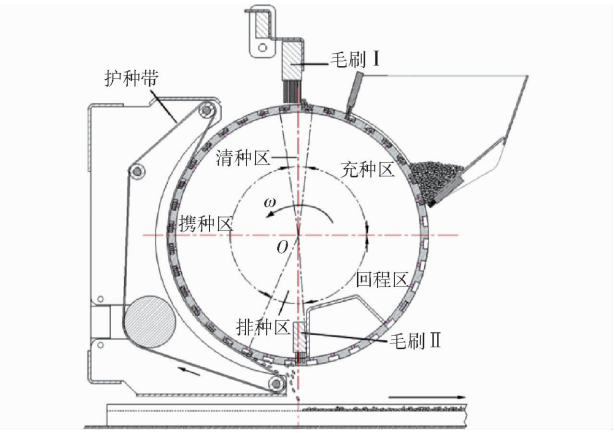


图 2 工作原理图

Fig. 2 Working principle diagram

本文通过设计与规划滚筒型孔分布、工作区域厚度,改变型孔充种量,以实现播量的调节。滚筒两端形状尺寸保持不变,与传动零件配合工作。需要改变播量时先卸下端盖Ⅱ,接着松开固定垫片,将滚筒从端盖Ⅰ中拔出,更换目标播量的滚筒即可,如图 3 所示。

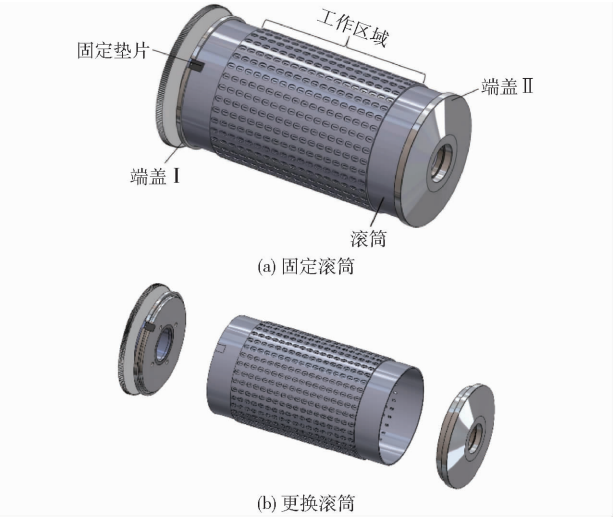


图 3 播量调节原理图

Fig. 3 Schematics of sowing quantity adjustment

2 播种滚筒结构设计

2.1 稻种充种姿态分析

文献[18-21]的研究表明,稻种充种时,在重力场中表现出的姿态以平躺、侧卧、竖立 3 种姿态为主,且概率与呈现相应姿态时稻种的截面积成正比,即

$$\begin{cases} \dfrac{P_L}{P_S}=\dfrac{S_L}{S_S} \\ \dfrac{P_L}{P_E}=\dfrac{S_L}{S_E} \\ \dfrac{P_S}{P_E}=\dfrac{S_S}{S_E} \end{cases} \tag{1}$$

式中 P_L、P_S、P_E——稻种呈平躺、侧卧、竖立姿态的概率,%

S_L、S_S、S_E——稻种呈平躺、侧卧、竖立姿态时的截面积,mm^2

稻种出现这 3 种姿态的概率总和为 1,即

$$P_L+P_S+P_E=1 \tag{2}$$

将式(1)代入式(2),则有

$$\begin{cases} P_L=\dfrac{S_L}{S_L+S_S+S_E}\times 100\% \\ P_S=\dfrac{S_S}{S_L}P_L \\ P_E=\dfrac{S_E}{S_L}P_L \end{cases} \tag{3}$$

由于平躺、侧卧、竖立 3 种姿态的投影面近似椭圆,则各姿态截面积分别表示为

$$\begin{cases} S_L=\dfrac{\pi}{4}LW \\ S_S=\dfrac{\pi}{4}LT \\ S_E=\dfrac{\pi}{4}WT \end{cases} \tag{4}$$

式中 L、W、T——稻种的长、宽、厚,mm

稻种充种姿态(俯视)及其长 L、宽 W、厚 T 如图 4 所示。

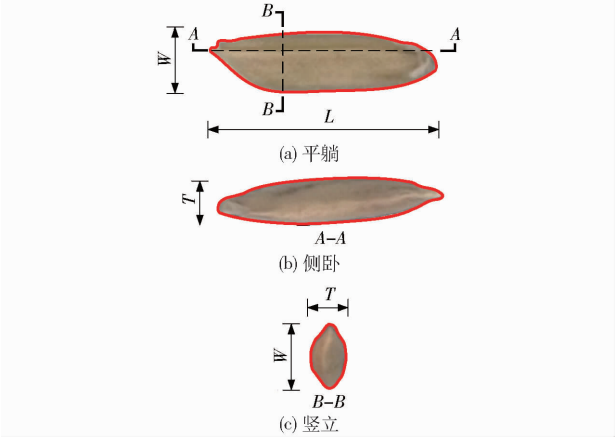


图 4 稻种充种姿态及三轴尺寸示意图

Fig. 4 Schematics of seed-filling attitude and triaxial size of rice seeds

为得到稻种各个充种姿态出现的概率，需对稻种的三轴尺寸进行测量，测量前需要对稻种进行去芒、温水侵泡、催芽后去除表面水分，使稻种表面呈“破胸露白”状态。以常规稻黄华占及杂交稻华香优 228 为研究对象，各取 100 粒，利用电子游标卡尺测量稻种三轴尺寸，并计算平均值。通过稻种三轴尺寸数据对常规稻和杂交稻充种后姿态的分布概率进行计算。两类稻种的三轴尺寸数据及充种姿态概率计算结果如表 1 所示。

表 1　稻种不同充种姿态概率

Tab. 1　Probabilities of different seed-filling postures of rice seeds

品种	长/mm	宽/mm	厚/mm	姿态概率/%		
				平躺	侧卧	竖立
华香优 228	9.97	2.34	1.93	49.59	40.92	9.49
黄华占	9.97	2.31	1.94	49.18	41.30	9.52

对于依靠稻种自身重力作用进行的充种，充种完成后稻种以平躺和侧卧姿态分布在型孔内的总概率高于 90%。因此，滚筒型孔的设计应有利于稻种充填后呈平躺和侧卧姿态。

2.2　滚筒型孔结构设计

图 5 所示的 9 寸秧盘内宽为 280 mm，滚筒设计长度为 377 mm，滚筒内径为 200 mm。滚筒型孔分布如图 5 所示，n 表示滚筒型孔轴向分布行数，其可取 14、16、18，对应 14 行、16 行、18 行条播。

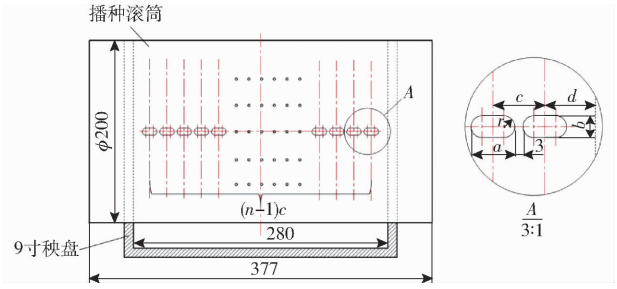


图 5　型孔分布图

Fig. 5　Diagram of hole distribution

图 5 中 a 为腰形型孔长度，b 为型孔宽度，c 为两相邻型孔中心距，d 为型孔与秧盘边缘距离，r 为型孔圆弧半径。根据加工要求，轴向相邻型孔间最短距离为 3 mm；周向相邻型孔间隔为 10°，周向均匀分布 36 个型孔。可得关系表达式

$$\begin{cases} 2d+(n-1)c=280 \\ a+3=c \\ r=\dfrac{1}{2}b \end{cases} \tag{5}$$

为保证种子呈平躺或侧卧姿态时能顺利充种，将腰形型孔长度 a 设置为 16、14、12 mm，型孔圆弧半径 r 统一设置为 4 mm，对应型孔轴向分布为 14 行、16 行、18 行。设计完成的型孔长度与宽度分别大于所选试验水稻种子的平均长度及宽度。型孔参数如表 2 所示。

表 2　型孔相关尺寸参数

Tab. 2　Related parameters of hole size　mm

n	a	b	c	d	r
14	16	8	19	16.5	4
16	14	8	17	12.5	4
18	12	8	15	12.5	4

根据稻种三轴尺寸数据，型孔深度按杂交稻及常规稻农艺要求的不同分别设置 2.0、2.5、3.0 mm 与 4.0、4.5、5.0 mm 3 个水平，保证能以平躺或侧卧姿态充入 1 ~ 3 粒杂交稻种子或 3 ~ 6 粒常规稻种子于型孔内，充种情况如图 6 所示。

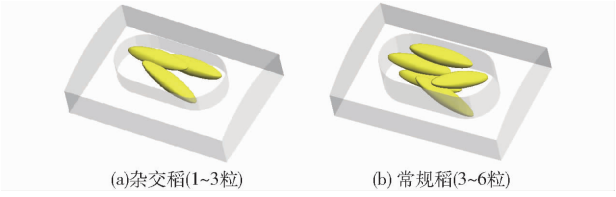


图 6　充种情况

Fig. 6　Seed-filling situation

3　充种与落种过程离散元仿真

3.1　排种器仿真模型

为缩短仿真流程，对排种器结构进行简化，滚筒型孔轴向行数缩减至 3 行，其它部件同样进行简化，如图 7 所示。仿真模型包括种箱、滚筒、内套、毛刷Ⅰ、护种带等。

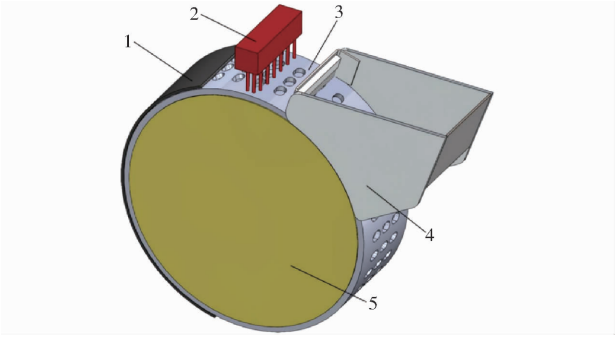


图 7　排种器简化仿真模型

Fig. 7　Simplified simulation model of seed metering device

1. 护种带　2. 毛刷Ⅰ　3. 滚筒　4. 种箱　5. 内套

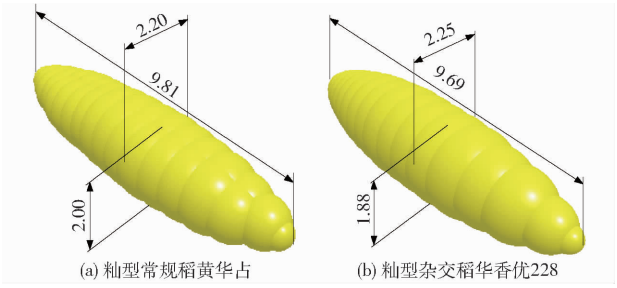
以常规稻黄华占、杂交稻华香优 228 为研究对象，各取 1 000 颗种子进行相关物性参数测定，结果如表 3 所示。根据表 1 中稻种的三轴尺寸建立稻种三维模型，并将稻种的三维模型以 x_t 格式导入 ANSYS Workbench 中进行网格划分，再将导出的 mesh 文件导入 EDEM 中作为稻种边界模型，进行多

表 3 稻种物理特性参数

Tab. 3 Physical characteristics parameters of rice seeds

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/(kg·m^{-3})	与种子的恢复系数		与种子的静摩擦因数		与种子的动摩擦因数	
				常规稻	杂交稻	常规稻	杂交稻	常规稻	杂交稻
杂交稻	0.25	37	1 350		0.60		0.86		0.83
常规稻	0.30	11	1 130	0.30		0.76		0.74	
不锈钢	0.28	70 000	7 800	0.67	0.52	0.51	0.51	0.30	0.40
铝合金	0.25	27 000	2 700	0.32	0.23	0.62	0.65	0.28	0.38
树脂	0.41	887	1 117	0.20	0.21	0.76	0.73	0.25	0.24

球填充。建立的多球填充稻种模型如图 8 所示,常规稻与杂交稻填充颗粒均为 36 颗。



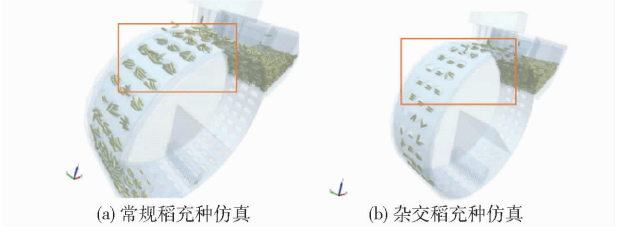
(a) 籼型常规稻黄华占 (b) 籼型杂交稻华香优228

图 8 两类水稻种子仿真模型

Fig. 8 Simulation models of two types of rice seeds

3.2 水稻充种过程仿真

以滚筒型孔参数为影响因素,对排种器的充种情况进行单因素研究。在稻种颗粒产生且处于稳定状态后,排种器开始转动,记录其经过毛刷Ⅰ后的型孔数,并统计各型孔的充种数,如图 9 所示,方框内为充种区域。



(a) 常规稻充种仿真 (b) 杂交稻充种仿真

图 9 充种仿真过程及统计区域

Fig. 9 Simulation process of seed-filling and statistical area

3.2.1 型孔轴向分布对充种性能的影响

依次进行滚筒型孔轴向分布为 14 行、16 行、18 行分布的充种性能仿真试验。滚筒 14 行、16 行、18 行分布的主要区别在于型孔长度不同,对应为 16、14、12 mm。型孔宽度统一为 8 mm,型孔深度取 4.5 mm(常规稻)与 2.5 mm(杂交稻),生产率设为 500 盘/h,仿真结果如图 10 所示,共统计 96 个型孔。

由图 10 中型孔平均充种数结果可知,除 14 行分布时的杂交稻外,其余分布的充种结果基本符合杂交稻充种 1~3 粒、常规稻 3~6 粒的要求。18 行分布的充种合格率最高,杂交稻和常规稻的充种合格率分别为 94.80% 和 91.67%。其余分布充种合格率偏低,

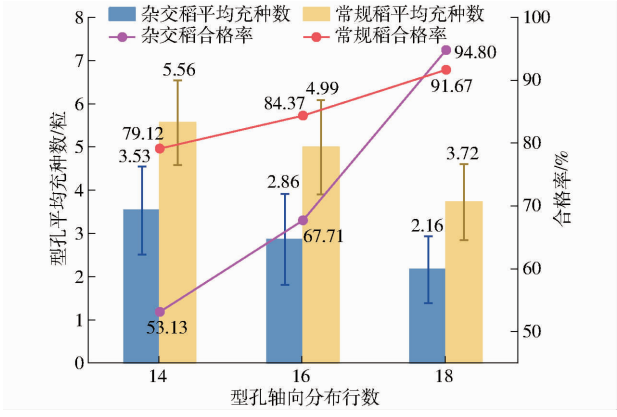


图 10 型孔轴向分布对充种性能的影响

Fig. 10 Influence of axial distribution of hole on seed-filling performance

原因是其余分布较 18 行分布的行数少,导致单个型孔长度偏长、型孔充种空间偏大,出现了多充现象。

3.2.2 型孔深度对充种性能的影响

型孔深度影响型孔充种量,进而影响型孔的充种性能。滚筒型孔轴向分布取 18 行分布,生产率取 500 盘/h,型孔深度分别选择为 2.0、2.5、3.0 mm(杂交稻)与 4.0、4.5、5.0 mm(常规稻),进行充种性能仿真试验。仿真试验结果如图 11 所示,共统计 96 个型孔。

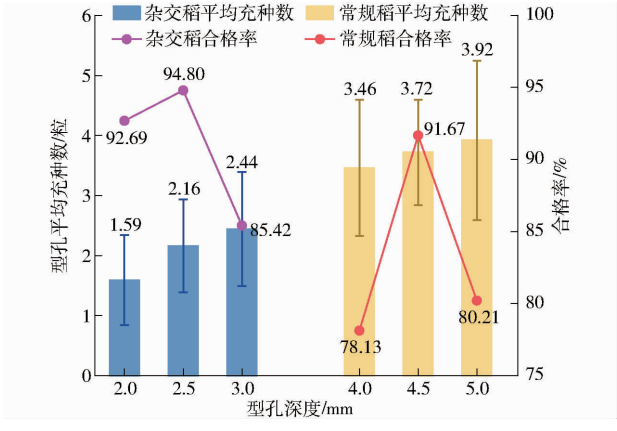


图 11 型孔深度对充种性能的影响

Fig. 11 Influence of hole depth on seed-filling performance

由图 11 可知,随型孔深度的提高,型孔的容量变大,型孔平均充种数随之提升。型孔深度的变化对于杂交稻充种合格率的影响相对较小,合格率均在 85% 以上,且型孔平均充种数均满足要求。在型

孔深度为 4 mm 时，常规稻的充种合格率下降到 78.13%，不满足农艺要求。对于杂交稻及常规稻，型孔深度分别选择 2.5 mm 与 4.5 mm 最佳，此时的充种合格率达到最高，分别为 94.80% 与 91.67%。

3.3　水稻落种过程仿真

稻种在秧盘内的分布情况除了与滚筒前期充种情况[22]有关外，还与滚筒与秧盘之间的落种高度有关。条播时，落种高度的变化影响稻种落到秧盘的时间，同时也影响了稻种的触土跳跃，导致秧盘上的稻种分布情况发生变化。

为分析水稻落种分布情况，以生产率为 500、600、700 盘/h，落种高度为 40、50、60 mm，进行全因素仿真试验。滚筒型孔分布取 18 行分布，杂交稻和常规稻所对应的型孔深度分别采用 2.5、4.5 mm。

仿真试验前，在排种器仿真模型正下方 40、50、60 mm 处各设置一条长 2 000 mm、宽 70 mm 的平面用以代替秧盘，其材料设置为育秧土壤。

如图 12 所示，仿真结束后，在秧盘平面上完成排种的区域中，设定轴向 3 行，每行 6 条长 100 mm、宽 15 mm 的测量区域作为条播排量一致性统计区域，共计 18 个区段。

设定条播排量一致性变异系数 C_s 为条播性能指标[23]。

仿真结果如图 13 所示。图 13 中，颜色越偏向

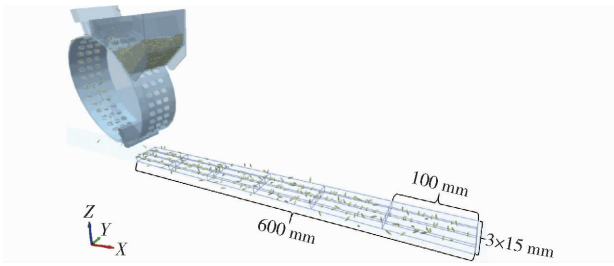


图 12　条播排量一致性统计分析区域

Fig. 12　Statistical analysis area of sowing quantity consistency of drill seeding

红色的区域种子数量越多，颜色越偏向蓝色的区域种子数量越少。整体区域颜色越趋于统一，则种子分布越均匀。随着生产率和落种高度 H 的提高，图 13 内红色、蓝色区域增多，整体色差越加明显。生产率的提高导致排种器充种时间减少，型孔漏充、少充情况增多，且落种高度的增加导致落种时间的增加，使统计区域内的落种情况产生较大的变化，影响条播均匀性。具体统计结果如图 14 所示。

由图 14 可知，生产率为 500 盘/h 时，常规稻与杂交稻的条播排量一致性变异系数 C_s 较低，均处于 10% 以内；对于杂交稻，随生产率的提高，滚筒转速加快，稻种所受离心力增大，落种时的下落速度增加，使得稻种的触土跳跃更加剧烈，从而导致 C_s 提高，且变化较为显著；对于常规稻，其播量较杂交稻多，落种时稻种间的相互作用与影响更加显著，落种

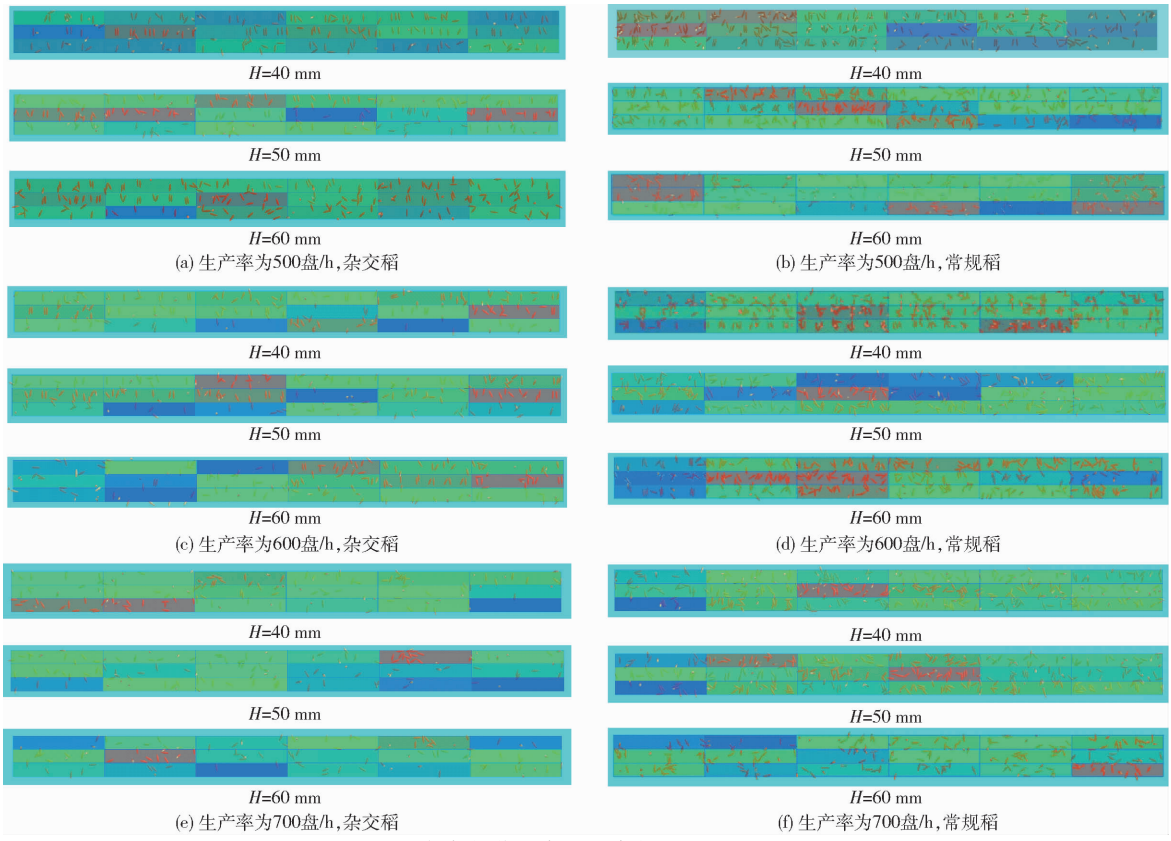


图 13　生产率与落种高度对条播排量一致性的影响

Fig. 13　Influences of productivity and seed-dropping height on sowing quantity consistency of drill seeding

情况更为复杂，C_S随生产力的提高呈现出先提高后降低的变化趋势，整体均小于 15%；随着落种高度的增加，稻种在落种触土时的速度也相应增加，跳跃更加显著，除常规稻在生产率为 500 盘/h 时 C_S呈先提高后降低趋势，其余情况下杂交稻与常规稻的条播排量一致性变异系数 C_S均呈现提高趋势。

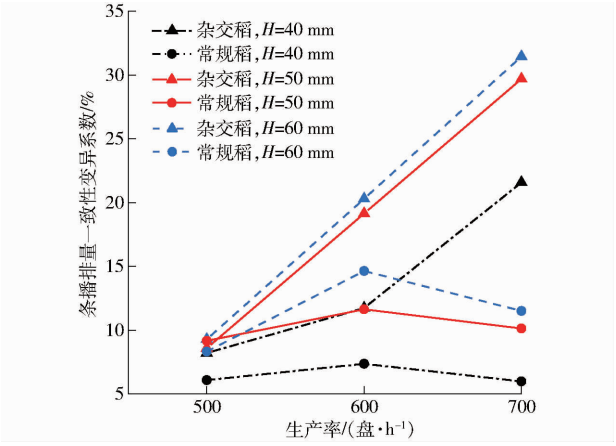


图 14 不同落种高度下条播排量一致性变异系数随生产率变化曲线

Fig. 14 Variation curves of coefficient of variation of sowing quantity consistency of drill seeding with productivity under different seed-dropping heights

4 排种性能台架试验

4.1 试验材料与设备

加工排种器部件，搭建的排种性能试验台如图 15 所示。

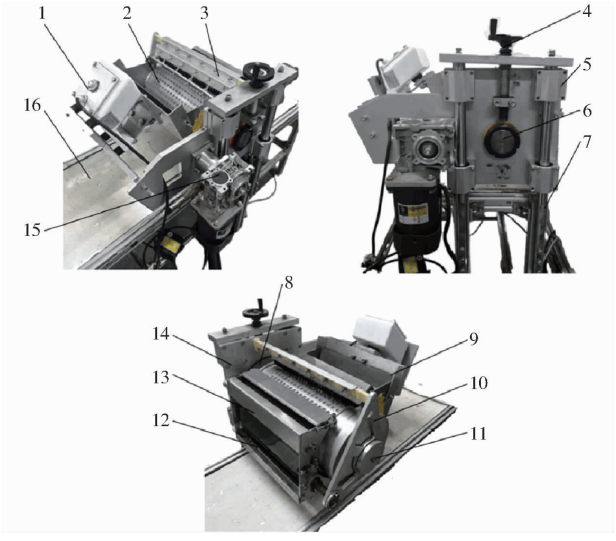


图 15 排种性能试验台

Fig. 15 Test bench for seeding performance

1. 电磁振动器 2. 滚筒 3. 清种毛刷 4. 手轮 5. 滑块 6. 主轴 7. 机架导轨 8. 传动齿轮组 9. 种箱 10. 连接板 11. 端盖 12. 护种带 13. 护种机构 14. 机架侧板 15. 电机 16. 传送带

4.2 试验因素及水平

参考标准 NY/T 1635—2008《水稻工厂化(标准化)育秧设备试验方法》与 GB/T 9478—2005《谷物条播机试验方法》，选择毯苗播种均匀度合格率、条播排量一致性变异系数为主要性能指标，针对常规、杂交稻种的播量变化开展试验研究，以探究型孔深度、生产率及落种高度对试验指标的影响，验证仿真研究的准确性，测试排种器的播种性能。测量毯苗播种均匀度合格率时的取样方案如图 16 所示[24]。

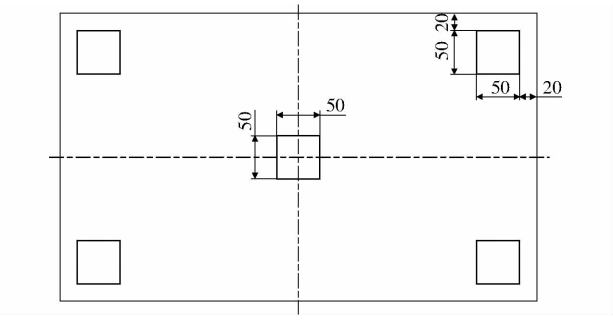


图 16 取样方案

Fig. 16 Sampling scheme

根据取样方案加工取样板，并采用取样板统计秧盘中各取样框内的稻种数，再计算毯苗播种均匀度合格率[24]

$$u_p = \left(1 - \frac{\sqrt{\dfrac{1}{n_u - 1}\sum_{i=1}^{n_u}(x_i - \bar{x})^2}}{\bar{x}}\right) \times 100\% \quad (6)$$

式中 n_u——样本总数

x_i——第 i 个取样框内稻种数，粒

$\bar{x}$——各取样框平均稻种数，粒

u_p——毯苗播种均匀度合格率，%

鉴于充种过程仿真试验中 18 行型孔排布时，排种器充种性能较好，且出于滚筒加工数量及周期的考虑，将台架试验中的型孔轴向排布确定为 18 行排布。因此，试验因素选择为型孔深度、生产率及落种高度。为便于后续台架试验结果与前文仿真试验结果比对以验证仿真试验结果的可靠性，试验因素的水平采用与仿真试验相同的水平设置，如表 4 所示。

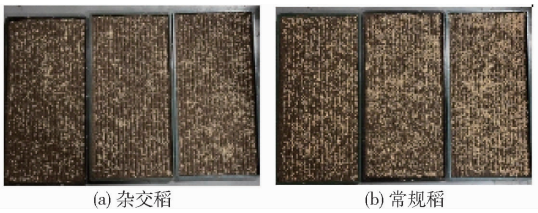
表 4 排种性能试验因素编码

Tab. 4 Factors and codes for seeding performance test

品种	编码	因素		
		型孔深度/mm	生产率/(盘·h⁻¹)	落种高度/mm
杂交稻	-1	2.0	500	40
	0	2.5	600	50
	1	3.0	700	60
常规稻	-1	4.0	500	40
	0	4.5	600	50
	1	5.0	700	60

4.3 试验结果与分析

通过 Minitab 21 设计三因素三水平全因子试验，对杂交稻、常规稻分别进行 27 组试验，合计 54 组试验，每组试验连续统计 3 个秧盘的数据并取平均值记录。排种效果如图 17 所示。



(a) 杂交稻　　(b) 常规稻

图 17　台架试验排种效果图

Fig. 17　Diagrams of seeding effect of bench test

试验方案与结果如表 5 所示，x_1、x_2、x_3为因素编码值，方差分析结果如表 6 所示。由表 6 可知，各评价指标的模型项均显著，拟合较好。各个因素的一、二次项及交互项都存在显著项。剔除不显著项(除一次项外)，得到各评价指标的编码因子回归方程：

常规稻

$$\begin{cases} Y_1 = 0.898\,4 + 0.000\,01x_1 + 0.023\,8x_2 + \\ \quad 0.051\,18x_3 - 0.067\,0x_1^2 - \\ \quad 0.046\,5x_3^2 - 0.051\,9x_1^2x_2 \\ Y_2 = 0.114\,31 + 0.004\,48x_1 + 0.026\,07x_2 + \\ \quad 0.013\,84x_3 + 0.011\,88x_2x_3 + \\ \quad 0.018\,29x_1^2 - 0.027\,93x_1^2x_2 \end{cases} \tag{7}$$

表 5　试验方案与结果

Tab. 5　Test scheme and results

编号	因素			常规稻		杂交稻	
	x_1	x_2	x_3	合格率 Y_1/%	变异系数 Y_2/%	合格率 Y_3/%	变异系数 Y_4/%
1	-1	-1	-1	75.22	14.03	76.13	23.54
2	-1	-1	0	85.01	11.77	78.70	21.35
3	-1	-1	1	81.69	13.2	65.89	22.78
4	-1	0	-1	66.66	10.18	77.03	37.27
5	-1	0	0	79.31	12.44	75.14	27.31
6	-1	0	1	83.68	14.62	70.39	27.03
7	-1	1	-1	78.23	12.13	81.20	25.33
8	-1	1	0	82.12	10.18	67.37	21.11
9	-1	1	1	78.39	16.76	61.35	27.18
10	0	-1	-1	67.80	9.36	75.62	15.63
11	0	-1	0	84.15	8.34	81.77	16.57
12	0	-1	1	92.24	8.91	78.20	20.10
13	0	0	-1	72.31	11.53	82.82	17.03
14	0	0	0	85.93	10.64	86.55	16.65
15	0	0	1	89.73	11.85	77.12	10.14
16	0	1	-1	74.06	11.33	79.39	18.27
17	0	1	0	95.76	14.76	81.04	22.07
18	0	1	1	88.62	16.16	77.55	18.23
19	1	-1	-1	76.68	13.19	88.23	17.45
20	1	-1	0	82.20	14.24	85.09	15.06
21	1	-1	0	93.75	14.03	74.12	14.83
22	1	0	-1	71.07	11.23	86.35	17.03
23	1	0	0	84.81	13.52	93.25	16.65
24	1	0	1	89.76	18.01	83.27	10.14
25	1	1	-1	68.36	10.94	85.27	14.62
26	1	1	0	79.05	12.91	81.66	11.61
27	1	1	1	74.65	15.3	77.46	16.38

表 6　方差分析

Tab. 6　Analysis of variance

方差来源	常规稻				杂交稻			
	合格率 Y_1		变异系数 Y_2		合格率 Y_3		变异系数 Y_4	
	F	P	F	P	F	P	F	P
模型	5.49	0.05 *	5.13	0.006 **	8.44	0.001 **	3.67	0.021 *
x_1	0.13	0.722	5.08	0.048 *	22.94	0.001 **	12.45	0.005 **
x_2	4.79	0.053	13.18	0.005 **	0.96	0.349	0.23	0.643
x_3	10.44	0.009 **	3.85	0.078	0.04	0.849	2.94	0.117
x_1x_2	4.33	0.064	0.29	0.603	0.56	0.471	0.70	0.423
x_1x_3	1.95	0.193	0.71	0.418	1.28	0.284	0.01	0.915
x_2x_3	4.19	0.068	10.31	0.009 **	0.56	0.473	0.04	0.850
x_1^2	18.62	0.002 **	12.29	0.006 **	2.15	0.173	4.46	0.061
x_2^2	0.09	0.766	0.00	0.959	9.93	0.012 *	0.37	0.559
x_3^2	8.99	0.013 *	2.61	0.138	8.42	0.016 *	0.36	0.563
$x_1^2x_2$	7.45	0.021 *	19.11	0.001 **	1.08	0.323	0.26	0.620
$x_1^2x_3$	0.32	0.585	1.99	0.189	8.35	0.016 *	0.29	0.600
$x_2^2x_1$	0.62	0.450	1.23	0.294	1.17	0.304	3.99	0.074
$x_2^2x_3$	2.67	0.133	1.60	0.235	1.3	0.281	5.66	0.039 *
$x_3^2x_1$	1.87	0.202	1.98	0.190	0.69	0.426	0.80	0.393
$x_3^2x_2$	2.52	0.143	0.14	0.713	3.81	0.079	0.01	0.928
$x_1x_2x_3$	0.17	0.686	0.29	0.603	3.54	0.089	0.03	0.869

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

杂交稻

$$\begin{cases} Y_3 = 0.822\,8 + 0.076\,94x_1 + 0.005\,86x_2 - \\ \quad 0.001\,6x_3 - 0.053\,2x_2^2 - \\ \quad 0.021\,0x_3^2 - 0.028\,2x_1^2x_3 \\ Y_4 = 0.193\,1 - 0.055\,07x_1 + 0.004\,16x_2 - \\ \quad 0.04x_3 + 0.043\,9x_2^2x_3 \end{cases} \tag{8}$$

选取表 5 中型孔深度为 2.5 mm(杂交稻)与 4.5 mm(常规稻)时的条播排量一致性变异系数数据与 3.3 节中水稻落种过程仿真分析的结果进行对比验证,结果如表 7 所示。

表 7 条播排量一致性变异系数试验与仿真结果对比

Tab.7 Comparison between experimental and simulation results of coefficient of variation of sowing quantity consistency of drill seeding

编号	因素			仿真结果/%	试验结果/%	误差/%
	型孔深度/mm	生产率/(盘·h^{-1})	落种高度/mm			
1	2.5	500	40	8.19	15.63	7.44
2	2.5	500	50	8.57	16.57	8.00
3	2.5	500	60	9.27	20.10	10.83
4	2.5	600	40	11.72	17.03	5.31
5	2.5	600	50	19.13	16.65	2.48
6	2.5	600	60	20.29	10.14	10.15
7	2.5	700	40	21.57	18.27	3.30
8	2.5	700	50	29.69	22.07	7.62
9	2.5	700	60	31.44	18.23	13.21
10	4.5	500	40	6.07	9.36	3.29
11	4.5	500	50	9.15	8.34	0.81
12	4.5	500	60	8.31	8.91	1.56
13	4.5	600	40	7.35	11.53	4.18
14	4.5	600	50	11.62	10.64	0.98
15	4.5	600	60	14.63	11.85	2.78
16	4.5	700	40	5.97	11.33	5.36
17	4.5	700	50	10.12	14.76	4.64
18	4.5	700	60	11.49	16.16	4.67

由表 7 可知,杂交稻试验与仿真结果误差在 0.81% ~13.21%;常规稻试验与仿真结果误差多数在 5% 以内,最大误差为 5.36%。仿真试验中,为缩短仿真时间,所用滚筒仿真模型的型孔轴向行数为 3 行,而台架试验所用完整滚筒的型孔轴向行数为 18 行,型孔轴向行数上的差别使得实际试验中滚筒工作状态与滚筒仿真模型有所差异,并且仿真试验结果的统计分析区域(3 行)远少于实际试验(每盘 18 行,共 3 盘),因此仿真与实际结果存在一定误差。上述差异结合稻种仿真模型误差、测量误差等误差累积导致了异常值,即最大误差值 13.21% 的产生,但整体上仿真与实际试验误差处于 10% 以内,该误差范围处于可接受的合理区间。

以最大合格率、最小变异系数为优化目标,对试验结果进行多目标优化。通过台架试验验证优化结果,验证结果如表 8 所示。

表 8 优化与试验验证结果

Tab.8 Optimization and experimental verification results

品种	型孔深度/mm	生产率/(盘·h^{-1})	落种高度/mm	响应优化结果		验证结果	
				合格率/%	变异系数/%	合格率/%	变异系数/%
杂交稻	3.0	591.0	42.4	91.3	12.4	88.6	14.9
常规稻	4.5	500.0	57.4	92.9	9.0	89.8	10.2

注:杂交稻和常规稻根据响应结果得出验证值的合格率 95% 置信区间为(88.22%,94.37%)、(89.22%,96.53%),变异系数的 95% 置信区间为(9.08%,15.80%)、(7.34%,10.64%)。

表 8 中杂交稻与常规稻的验证结果中合格率与响应优化结果误差分别为 2.66% 和 3.09%,变异系数误差分别为 2.49% 和 1.23%,都处于优化结果的 95% 置信区间内,表明响应优化结果与其置信区间正确,回归模型合理。

选取响应优化参数进行播量测定试验,杂交稻华香优 228、常规稻黄华占各 5 盘,试验种箱恒充种 500 g,秧盘内不覆土,试验完成后收集秧盘内种子,测量质量并计算平均值,试验结果如表 9 所示。

表 9 播量测定试验结果

Tab.9 Test results of sowing quantity measurement

品种	因素			播量/(g·盘$^{-1}$)
	型孔深度/mm	生产率/(盘·h^{-1})	落种高度/mm	
华香优 228	3.0	591.0	42.4	40.6
黄华占	4.5	500.0	57.4	73.9

杂交稻华香优 228、常规稻黄华占的播量测定结果分别为 40.6 g/盘与 73.9 g/盘,满足常规稻及杂交稻育秧播种的农艺要求。

由文献[25 - 28]中各品种稻种的三轴尺寸数据可知,稻种长度主要分布于 6.5 ~ 10.5 mm,长宽比处于 2.0 ~ 4.5 间。本文研究所用的杂交稻华香优 228 与常规稻黄华占的长宽比均为 4.3,属于长粒型稻种。为明确本文所设计的排种器对不同品种的杂交稻与常规稻的适应性,选取短粒型的杂交稻甬优 538 与常规稻南粳 9108 为研究对象,开展播量测定试验。

稻种甬优 538 与南粳 9108 进行催芽处理,并分别测定三轴尺寸及千粒质量,结果如表 10 所示。

表 10 短粒型稻种三轴尺寸及千粒质量

Tab.10 Three-axis dimensions and thousand-grain weight of short-grained rice seeds

品种	长 L/mm	宽 W/mm	厚 T/mm	千粒质量/g
甬优 538	6.90	3.25	2.38	29.8
南粳 9108	7.01	3.21	2.49	30.2

杂交稻甬优 538 与常规稻南粳 9108 的播量测定试验中，生产率与落种高度采用前文响应优化结果对应取值，型孔深度分别取 2.0、2.5、3.0 mm 和 4.0、4.5、5.0 mm，试验结果如表 11 所示。

表 11　短粒型稻种播量测定试验结果

Tab. 11　Test results of sowing quantity measurement for short-grained rice seeds

品种	因素			播量/(g·盘$^{-1}$)
	型孔深度/mm	生产率/(盘·h^{-1})	落种高度/mm	
甬优 538	2.0	591.0	42.4	44.2
	2.5	591.0	42.4	54.3
	3.0	591.0	42.4	63.1
南粳 9108	4.0	500.0	57.4	78.8
	4.5	500.0	57.4	93.8
	5.0	500.0	57.4	106.9

由表 11 可知，杂交稻甬优 538 在 2.0 ~ 3.0 mm 型孔深度下的播量为 44.2 ~ 63.1 g/盘，常规稻南粳 9108 在 4.0 ~ 5.0 mm 型孔深度下的播量为 78.8 ~ 106.9 g/盘。型孔深度为 3.0 mm 与 4.5 mm 时，短粒型杂交稻甬优 538 与常规稻南粳 9108 的播量分别为 63.1 g/盘与 93.8 g/盘，较相同型孔深度下的长粒型杂交稻华香优 228 与常规稻黄华占的播量有所提升。由于短粒型稻种的长度较长粒型稻种小，且三轴尺寸差异较小，充种时能更加充分利用型孔空间，使得型孔在相同深度下可容纳更多的短粒型稻种，因而在相同条件下，短粒型稻种的播量多于长粒型稻种。在型孔深度为 2.0 mm 与 4.0 mm 时，杂交稻甬优 538 与常规稻南粳 9108 的播量分别为 44.2 g/盘与 78.8 g/盘，满足常规稻及杂交稻育秧播种的农艺要求。

5　结论

（1）针对杂交稻和常规稻育秧播量不同的农艺要求，设计了一种播量可调的机械式滚筒排种器。确定了排种器整体结构、工作原理及播量调节原理。根据滚筒结构及稻种充种姿态的理论分析，对滚筒上的型孔参数进行设计，并初步确定型孔深度为 2.0、2.5、3.0 mm（杂交稻）与 4.0、4.5、5.0 mm（常规稻）。

（2）基于 EDEM，进行以型孔分布、型孔深度、落种高度及生产率为影响因素的排种器充种与落种性能仿真试验。由仿真结果可知，在型孔深度为 2.5 mm（杂交稻）和 4.5 mm（常规稻）情况下，杂交稻和常规稻充种率均高于 90%；在生产率为 500 盘/h 时，条播排量一致性变异系数均小于 10%；条播排量一致性变异系数随落种高度的增加而提高。

（3）开展杂交稻和常规稻的三因素三水平全因素排种性能台架试验，并通过回归模型生成响应优化结果。结果表明，当型孔深度为 3.0 mm、生产率为 590 盘/h、落种高度为 42.4 mm 时，杂交稻华香优 228 的播种合格率、条播排量一致性变异系数分别为 88.6%、14.9%；当型孔深度为 4.5 mm、生产率为 500 盘/h、落种高度为 57.4 mm 时，常规稻黄华占的播种合格率、条播排量一致性变异系数分别为 89.8%、10.2%。

（4）在响应优化参数下，测定长粒型杂交稻华香优 228 与常规稻黄华占播量，分别为 40.6、73.9 g/盘；在不同型孔深度下，测定短粒型杂交稻甬优 538 与常规稻南粳 9108 播量，当型孔深度为 2.0 mm 与 4.0 mm 时，甬优 538 与南粳 9108 的播量分别为 44.2 g/盘与 78.8 g/盘。播量测定试验结果满足常规稻及杂交稻育秧播种的农艺要求。

参　考　文　献

[1] 刘柱，由莉莉，王淑兰，等. 浅谈我国水稻育秧设备的现状及发展趋势[J]. 农业开发与装备，2020(11)：26 - 27.

[2] 李泽华，马旭，李秀昊，等. 水稻栽植机械化技术研究进展[J]. 农业机械学报，2018，49(5)：1 - 20.
LI Zehua，MA Xu，LI Xiuhao，et al. Research progress of rice transplanting mechanization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(5)：1 - 20. (in Chinese)

[3] 俞高红，王磊，孙良，等. 大田机械化移栽技术与装备研究进展[J]. 农业机械学报，2022，53(9)：1 - 20.
YU Gaohong，WANG Lei，SUN Liang，et al. Advancement of mechanized transplanting technology and equipments for field crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(9)：1 - 20. (in Chinese)

[4] 方文英，朱德峰，怀燕，等. 精准条播育秧提高单季杂交稻机插稀植群体产量的效应分析[J]. 作物杂志，2023，39(5)：124 - 130.
FANG Wenying，ZHU Defeng，HUAI Yan，et al. Analysis on the effects of precision drill sowing in machine transplanting for single-season hybrid rice to improve yield of sparsely planted population[J]. Crops，2023，39(5)：124 - 130. (in Chinese)

[5] 李泽华，马旭，陈林涛，等. 育秧播种密度与取秧面积耦合对杂交稻机插质量和产量的影响[J]. 农业工程学报，2019，35(24)：20 - 30.
LI Zehua，MA Xu，CHEN Lintao，et al. Effects of coupling of nursing seedling densities and seedling fetching area on transplanting quality and yield of hybrid rice[J]. Transactions of the CSAE，2019，35(24)：20 - 30. (in Chinese)

[6] 朱德峰，王亚梁，陈惠哲，等. 杂交稻精准播种育秧机插技术[J]. 中国稻米，2021，27(5)：19 - 22.
ZHU Defeng，WANG Yaliang，CHEN Huizhe，et al. Hybrid rice machine transplanting technology with precision sowing and seedling raising[J]. China Rice，2021，27(5)：19 - 22. (in Chinese)

[7] 王亚梁, 朱德峰, 向镜, 等. 杂交稻低播量精量播种育秧及机插取秧特性[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(4): 332 - 338.
WANG Yaliang, ZHU Defeng, XIANG Jing, et al. Characteristics of seedling raising and mechanized transplanting of hybrid rice with a low seeding rate by precise seeding method[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2020, 34(4): 332 - 338. (in Chinese)
[8] 何文洪, 陈惠哲, 朱德峰, 等. 不同播种量对水稻机插秧苗素质及产量的影响[J]. 中国稻米, 2008, 14(3): 60 - 62.
[9] 马晓丽, 葛茜, 张万春, 等. 播量与秧龄对优质常规水稻黄华占机械育秧秧苗素质的影响[J]. 陕西农业科学, 2022, 68(7): 69 - 72.
MA Xiaoli, GE Qian, ZHANG Wanchun, et al. Effect of sowing amount and seedling age on quality of mechanical seedling-raising of quality rice Huanghuazhan[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2022, 68(7): 69 - 72. (in Chinese)
[10] 王在满, 黄逸春, 王宝龙, 等. 播量无级调节水稻精量排种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(11): 9 - 16.
WANG Zaiman, HUANG Yichun, WANG Baolong, et al. Design and experiment of rice precision metering device with sowing amountstepless adjusting[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 9 - 16. (in Chinese)
[11] 刘浩. 组合可调式水稻精量穴播排种器设计与性能试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
LIU Hao. Design and performance test of combination and adjustable precision hill rice seeder[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
[12] 王传雯, 曾山, 罗锡文, 等. 播量可调式水稻穴播排种器的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(5): 169 - 176.
WANG Chuanwen, ZENG Shan, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of rice seeder for hole seeding with adjustable sowing rate[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2017, 52(5): 169 - 176. (in Chinese)
[13] XING H, WANG Z, LUO X, et al. Design and experimental analysis of rice pneumatic seeder with adjustable seeding rate [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(4): 113 - 122.
[14] XING H, WANG Z, LUO X, et al. Design of an active seed throwing and cleaning unit for pneumatic rice seed metering device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(2): 62 - 69.
[15] 张明华, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻直播机组合型孔排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 29 - 36.
ZHANG Minghua, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of combined hole-type metering device of rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 29 - 36. (in Chinese)
[16] 舒彩霞, 付云开, 王磊, 等. 油菜精量直播机凸轮摇杆式播量调节机构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 17 - 25.
SHU Caixia, FU Yunkai, WANG Lei, et al. Design and experiment of cam-rocker sowing rate adjusting mechanism for rapeseed precision direct seeding machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 17 - 25. (in Chinese)
[17] LI Hanqing, YAN Bingxin, MENG Zhijun, et al. Study on influencing factors of hole-filling performance of rice precision direct seed-metering device with hole ejection[J]. Biosystems Engineering, 2023, 233: 76 - 92.
[18] 陈林涛, 马旭, 李泽华, 等. 双充种型孔滚筒式杂交稻育秧精密播种器设计与试验[J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(5): 70 - 82.
CHEN Lintao, MA Xu, LI Zehua, et al. Design and experiment of precision seeder with double seed filling type hole roller for hybrid rice seedling raising[J]. Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(5): 70 - 82. (in Chinese)
[19] 安沛. 轻简型水稻秧盘育秧流水线精密播种及供土装置研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
AN Pei. Study on precision seeding and soil supplying device for simplified tray nursing seedlings assembly line of rice[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[20] 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)
[21] 罗锡文, 王在满, 蒋恩臣, 等. 型孔轮式排种器弹性随动护种带装置设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 60 - 63.
LUO Xiwen, WANG Zaiman, JIANG Enchen, et al. Design of disassemble rubber guard device for cell wheel feed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 60 - 63. (in Chinese)
[22] 吴飞. 蔬菜小粒径种子毯状苗播种装置设计与研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016.
WU Fei. Design and research on seeding device of flat seedling for small size vegetable seeds[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2016. (in Chinese)
[23] 谷物条播机试验方法 GB/T 9478—2005[S]. 2005.
[24] 水稻工厂化(标准化)育秧设备试验方法 NY/T 1635—2008[S]. 2008.
[25] 李勇. U 型腔道式水稻精量穴播排种器设计与试验研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021.
LI Yong. Design and experiment research of U-shaped cavity type precision hill-drop seed-metering device for rice[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[26] 刘礼阳. 水稻气压滚筒式集中排种器设计与试验[D]. 雅安: 四川农业大学, 2021.
LIU Liyang. Design and experiment of pneumatic cylinder-type centralized seed-metering device for rice[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[27] 赵海楠. 面向窝眼轮式排种器优化的水稻种子建模方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
ZHAO Hainan. A study on rice-seed modelling method for optimization of hole-wheel seeding metering device[D]. Changchun: Jilin University, 2024. (in Chinese)
[28] 朱义飞. 水稻精量穴播排种器的设计与研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2024.
ZHU Yifei. Design and research of precision seeding device for rice[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2024. (in Chinese)