

播量可调式水稻穴播排种器设计与试验

张明华^{1,2} 王称称^{1,2} 刘嘉文^{1,2} 臧英^{1,2} 王在满^{1,2} 乔君³
秦伟^{1,2} 严伟杰¹

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642;

2. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;

3. 华南农业大学黄埔创新研究院, 广州 510700)

摘要: 为满足不同品系稻种多样化播量需求,提高水稻排种器对不同粒型稻种的播量适应性,本文基于多品系稻种的播种农艺,以4类粒型差异显著的稻种为试验对象,基于其基础物理特性,设计了一种腰形型孔开度可调的排种装置。该装置采用型孔式与槽轮式复合结构,通过调节齿轮联动弹簧机构驱动排种轮调节轮横向位移,实现型孔开度(0~14 mm)无级调节。基于稻种三轴尺寸,优化型孔关键参数为:型孔长13 mm、宽6 mm、深4 mm,集成柔性清种刷与种量调节板(种量调节板高度为58 mm)。对该排种器进行三因素试验,试验结果表明:随型孔开度增大(从0 mm增大到14 mm),籼稻平均单穴播量由1.55~3.30粒增至15.95~23.09粒,粳稻由1.89~3.98粒增至16.54~21.69粒。在排种轮转速40~140 r/min范围内,播量变异系数随开度增加从67.42%降至9.27%。该排种器实现了3~20粒无级调节,变异系数为10%~70%,满足不同水稻品种的精准播种需求。

关键词: 水稻;排种器;播量可调;穴播

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)07-0175-08

OSID:



Design and Experiment of Rice Hill-drop Seeding Metering Device with Adjustable Seeding Rate

ZHANG Minghua^{1,2} WANG Chengcheng^{1,2} LIU Jiawen^{1,2} ZANG Ying^{1,2} WANG Zaiman^{1,2}
QIAO Jun³ QIN Wei^{1,2} YAN Weijie¹

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Key Laboratory of Southern Agricultural Machinery and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3. Huangpu Innovation Research Institute of SCAU, Guangzhou 510700, China)

Abstract: Aiming to meet the diverse seeding rate requirements of different rice varieties and improve the adaptability of rice seed metering devices to rice seeds of different grain types, based on the seeding agronomy of multiple rice varieties, taking four types of rice seeds with significantly different grain types as test objects, based on their basic physical properties, a seed metering device with adjustable opening of ladle-shaped holes was designed. The device adopted a composite structure of hole-type and fluted roller-type. It drove the transverse displacement of the adjusting wheel of the seed metering wheel through a gear-linked spring mechanism, realizing stepless adjustment of the hole opening (0~14 mm). Based on the three-axis dimensions of rice seeds, the optimized key parameters of the holes were as follows: hole length was 13 mm, width was 6 mm, depth was 4 mm, and a seed quantity adjusting plate (with a height of 58 mm) integrated with a flexible seed cleaning brush and a guiding tooth structure. A three-factor test was conducted on the seed metering device, and the test results showed that as the hole opening increased (from 0 mm to 14 mm), the average seeding rate per hill of indica rice was increased

收稿日期: 2025-07-10 修回日期: 2025-11-22

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000400)、国家自然科学基金项目(32001426)、广东省重点领域研发计划项目(2020B0202010007)和江西省重点研发计划“揭榜挂帅”项目(20223BBF61025)

作者简介: 张明华(1987—),副研究员,博士,主要从事水稻与蔬菜精准化种植技术研究,E-mail: zhangminghuascau@163.com

通信作者: 臧英(1973—),教授,博士,主要从事高性能播种技术和智能农机装备研究,E-mail: yingzang@scau.edu.cn

from 1.55 ~ 3.30 grains to 15.95 ~ 23.09 grains, and that of japonica rice was increased from 1.89 ~ 3.98 grains to 16.54 ~ 21.69 grains. When the rotation speed of the seed metering wheel was in the range of 40 ~ 140 r/min, the coefficient of variation of the seeding rate was decreased from 67.42% to 9.27% as the opening increased. The seed metering device realized stepless adjustment of 3 ~ 20 grains with a coefficient of variation of 10% ~ 70%, meeting the precision seeding requirements of different rice varieties.

Key words: rice; metering device; adjustable seeding rate; hill-drop seeding

0 引言

水稻是我国主要的粮食作物,其常年种植面积稳定在 $2.89 \times 10^7 \text{ hm}^2$,总产量超 2 亿吨。近年来,机械化直播技术因其省工高效、利于分蘖和适用于规模化作业的优势,得到了广泛推广,并成为突破传统种植瓶颈的关键途径^[1-3]。

排种器是水稻精量直播机的核心工作部件,主要包括气力式和机械式 2 种。气力式排种器凭借气流作用实现低损伤投种,对稻种形状尺寸要求低、适应性强,但需克服高能耗与严苛气密性难题,且不适应高速作业;机械式排种具有结构简单、播量稳定、维护便捷的特点,但适应性差、播量调节范围窄,且在高速作业下穴粒数合格率骤降、破损率攀升,制约精量播种发展^[4-13]。

针对上述问题,国内外学者在排种器优化方面开展了大量研究。欧美日等发达国家主要通过精密调节、闭环电子反馈和气吹式 U 型分配器等方式,实现了种子尺寸适应性和排种均匀性的提升,但在高速无级调节和低损控制方面仍需突破^[14-19]。国内研究者聚焦于播量可调策略,研制了型孔深度可调式和具备无级调节功能的型孔结构排种器,但在高速作业下的低损控制方面同样缺乏技术突破^[20-25]。

针对不同品系稻种所需播种量各异的问题,本研究基于多品类稻种基础物理参数,设计一种播量可调式水稻穴播排种器。通过融合型孔式与槽轮式结构优势,采用瓢形型孔开度无级调节机构,结合柔性清种与种量调节板设计,突破机械式排种器品种适应性与高速精度的双重限制,为水稻直播装备性能提升提供新方案。

1 总体结构与工作原理

1.1 稻种三轴尺寸参数测量

水稻种子的三轴尺寸是设计排种器关键部件的重要依据,为提高排种器对多粒型稻种的作业适用性提供了参数指导,本文选用荃优 879、嘉优中科 6 号、华航 48 号和郑早 10 号外形尺寸差异较大的 4 类水稻品种为研究对象,为播量可调式水稻穴播排

种器的结构设计提供依据,参数确定方法为:随机选取 150 粒无损伤水稻种子,分为 3 组,每组 50 粒;用精度为 0.01 mm 的数显游标卡尺对种子的长度、宽度、厚度进行测量,并计算各组平均值。测量结果如表 1 所示。

表 1 种子三轴尺寸参数

Tab. 1 Triaxial size parameters of seeds mm

类型	品种	长度	宽度	厚度
籼型杂交稻	荃优 879	9.41 ± 0.21	2.58 ± 0.18	2.11 ± 0.11
粳型杂交稻	嘉优中科 6 号	7.69 ± 0.25	2.92 ± 0.34	2.12 ± 0.11
籼型常规稻	华航 48 号	9.94 ± 0.33	2.46 ± 0.10	2.11 ± 0.15
粳型常规稻	郑早 10 号	7.13 ± 0.21	3.45 ± 0.16	2.57 ± 0.09

注:数据表达形式为“平均值 ± 标准差”。

1.2 总体结构

播量可调式水稻穴播排种器总体结构如图 1 所示,主要由排种器壳体、排种轮、清种机构和护种机构等组成。排种轮由排种轮充种轮、排种轮调节轮、弹簧和调节齿轮等组成,如图 2 所示。排种轮充种轮上设置导向柱,充种轮与调节齿轮通过螺纹连接,调节齿轮安装于排种轮右端面。通过旋转调节齿轮,在内部弹簧张紧力的作用力下,排种轮调节轮沿着导向柱实现横向位移,并相对充种轮做左右往复运动,从而改变型孔开度,实现对型孔容积的连续调节。

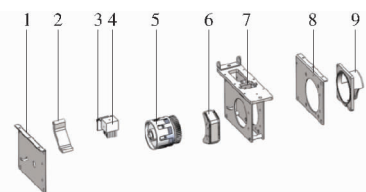


图 1 排种器总体结构示意图

Fig. 1 Schematic of overall structure of seed metering device

1. 左支架 2. 护板卸种板 3. 种量调节板 4. 清种毛刷 5. 排种轮 6. 柔性护种装置 7. 主支架 8. 右支架 9. 调节齿轮罩

1.3 工作原理

排种器工作时,排种器内部的排种轮逆时针转动,充种室内的稻种在自身重力和上方种子的压力作用下进入型腔内,而后在充种区 I 完成充种;随着排种轮转动,稻种进入清种区 II,由清种毛刷剔除型

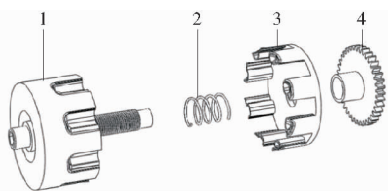


图2 排种轮结构示意图

Fig. 2 Schematic of seed metering wheel structure

1. 排种轮充种轮 2. 弹簧 3. 排种轮调节轮 4. 调节齿轮

孔表面多余稻种;完成清种后,型孔内的稻种在携种区Ⅲ的弹性护种板和柔性护种带的携持下进入投种区Ⅳ,稻种在重力和离心力的作用下脱离型孔,落入种沟,完成排种作业,如图3所示。

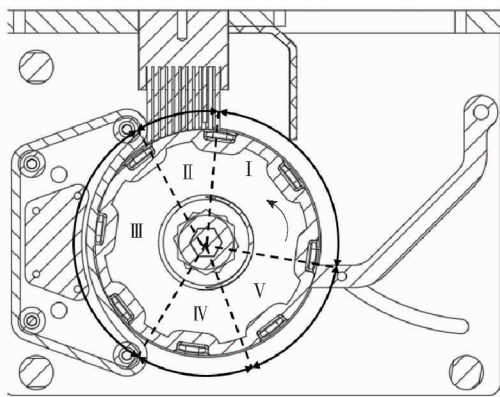


图3 排种器工作原理图

Fig. 3 Working principle diagram of seed metering device

2 关键结构设计

2.1 排种轮充种轮设计

型孔容积直接影响排种器的播种量,其中型孔长度 L_h 、型孔宽度 W 和型孔深度 H 为型孔设计的关键参数,本文根据试验稻种的三轴尺寸进行型孔结构设计,并结合播量调节需求,采用宽度方向可调的基本结构形式,并在此基础上,选取腰形型孔构型开展研究,如图4所示。

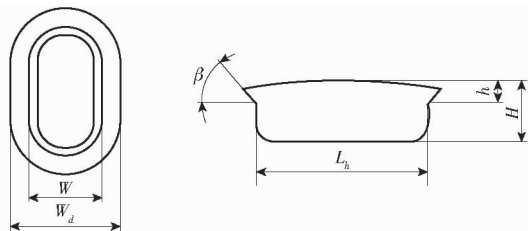


图4 排种轮型孔结构参数示意图

Fig. 4 Structure parameters of seed metering wheel hole

结合实际生产情况可知,常规稻每穴播种大致为5~8粒,杂交稻每穴播种大致为3~4粒^[26],在新疆、宁夏等地单穴播量需达到20粒左右。因此选取单穴3粒为最小播量要求,单穴20粒为最大播量要求,进而开展播量可调型孔结构设计。采用不同稻种填充型孔得到,当型孔开度 L_h 为14 mm时,排

种器满足最大播量要求。

短粒型稻种在相同型孔容积的情况下充种量比长粒型稻种多,最小充种型孔应满足最小播量的要求,故以稻种嘉优中科6号的三轴尺寸为最小播量的主要设计依据。

当播量 k 为 (3 ± 1) 粒时,稻种从充种室进入型孔出现2粒种子平躺、1粒种子竖立的概率最大^[27]。因此,型孔长度 L_h 的计算公式为

$$L_h \geq l_{\max} + w_{\max} \quad (1)$$

式中 l_{\max} ——种子最大长度,mm

w_{\max} ——种子最大宽度,mm

结合表1,可知华航48号稻种的最大长度与最大宽度之和最大。因此,型孔长度 L_h 取13 mm符合要求。

假设每层1~2粒稻种,型孔宽度 W 应为稻种宽度的1~2倍,即4~8 mm。假设型孔能容纳1~2层稻种,型孔深度范围为稻种厚度的1~2倍,即3~5 mm,本文取型孔深度 H 为4 mm。参考已有的研究基础,型孔倒角 β 取 30° ,倒角深度 h 取1 mm^[28]。

2.2 种量调节板设计

增加种量调节板可有效减少清种刷前方区域的种子堆积层数,从而减轻清种刷的作业负担,提升清种效果,然而调节板带来的种量减少可能对充种性能产生不利影响,因此在设计过程中需兼顾清种效果与充种效果之间的平衡。

2.2.1 种量调节板疏引齿设计

由文献[29]可知,90%左右的稻种集中在第2充种室完成最终的充种,且越靠近种量调节板位置,稻种流动性越强,因此,种量调节板有利于改变稻种的充种姿态。

为优化种量调节板的结构,在其中间空隙处增设疏引齿。疏引齿呈品字形结构,由1个前齿和2个后齿组成,如图5所示。

由于稻种的几何轮廓近似于椭球,为了研究稻种在疏引齿的作用下如何改变充种姿态,将稻种简化为形状规整的椭球模型,如图6所示,在此基础上,可得相关参数方程为

$$\frac{4x^2}{l^2} + \frac{4y^2}{w^2} + \frac{4z^2}{d_b^2} = 1 \quad (2)$$

式中 l ——稻种长度,mm

w ——稻种宽度,mm

d_b ——稻种厚度,mm

基于图6,可得稻种分别绕 X 轴、 Y 轴、 Z 轴旋转时的转动惯量为

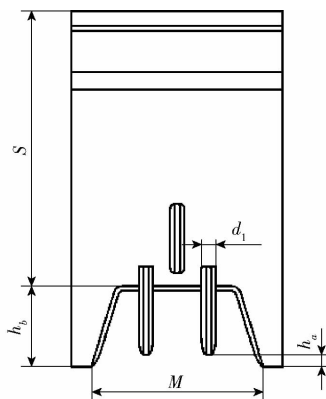


图5 种量调节板结构示意图

Fig. 5 Seed quantity regulating plate

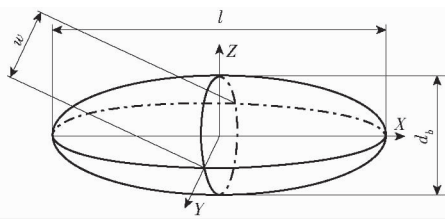


图6 稻种外形示意图

Fig. 6 Diagram of rice seed shape

$$\begin{cases} I_x = \frac{m(w^2 + d_b^2)}{20} \\ I_y = \frac{m(l^2 + d_b^2)}{20} \\ I_z = \frac{m(w^2 + l^2)}{20} \end{cases} \quad (3)$$

式中 I_x ——绕 X 轴旋转时的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

I_y ——绕 Y 轴旋转时的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

I_z ——绕 Z 轴旋转时的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$

m ——稻种质量, kg

由表1可知,稻种的宽度和厚度值近似,且都远小于长度。由此,结合式(3)可知,当稻种绕 Y 轴和 Z 轴旋转时,转动惯量较大。这意味着稻种不易绕这两个轴发生旋转。因此,在排种轮转动下,稻种转动前移,通过疏引齿时,稻种在 X 轴方向具有较小转动惯量使稻种易发生翻转,进而改变稻种充种姿态,使其以平躺姿态进入型孔进而提升充种过程中的稳定性和一致性。

2.2.2 种量调节板参数

如图5和图7所示,种量调节板的关键参数包括种量调节板与排种轮中心的水平距离 G 、种量调节板开口宽度 M 、限种板高度 D 和种量调节板距离轮面的高度 F 。

种量调节板开口宽度 M 应尽量小,最大程度限制稻种进入第2充种室的数量,但应大于最大型孔宽度 W_{\max} ,其计算公式为

$$W_{\max} = W + L_k + h \tan \beta \quad (4)$$

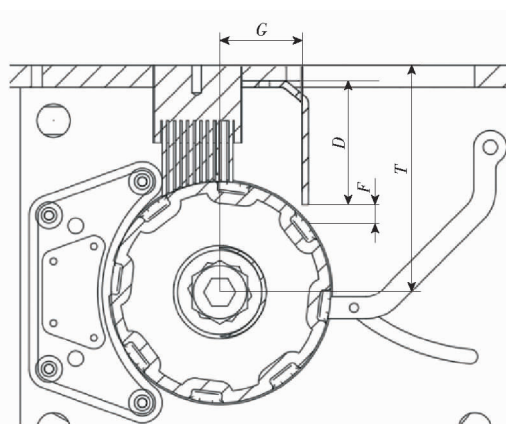


图7 种量调节板位置关系图

Fig. 7 Position relation diagram of seed quantity regulating plate

由于型孔宽度 W 为 $4 \sim 8 \text{ mm}$,最大型孔开度为 14 mm ,因此,最大型孔宽度 $W_{\max} \approx 25 \text{ mm}$ 。同时,开口宽度 M 应小于充种室宽度(充种室宽度为 39 mm)。因此,可将 M 设置为 30 mm 。

为避免种量调节板与高于型孔表面的种子挤压造成的破损^[26],由表1可知,种量调节板距离轮面的高度 F 应不小于 4 mm 。因此,种量调节板最大高度计算公式为

$$D_{\max} = T - F_{\min} - \sqrt{R^2 - G^2} \quad (5)$$

式中 D_{\max} ——种量调节板最大高度, mm

F_{\min} ——种量调节板距离排种轮表面的最低高度,取 4 mm

T ——充种室高度,取 95.5 mm

R ——排种轮半径,取 50 mm

以限种板高度 D 和排种轮转速为试验因素,以象牙香占为试验稻种,试验参数如表2所示,以平均单穴播量和合格率为评价指标开展种量调节板限种性能试验。试验结果如表3所示,随着 D 的减小,种量调节板与排种轮面的距离增大,进入第2充种室的种子量逐渐增加,平均单穴播量随之增加且合格率呈同步上升趋势。当 D 为 58 mm 时,在转速为 $40, 60, 80 \text{ r/min}$ 的条件下,播种合格率均大于 80% ,且增幅均表现出先上升后平缓的变化趋势。因此在试验参数范围内,为保证最佳低损效果, D 最大值取 58 mm 。

表2 种量调节板限种性能试验参数

Tab. 2 Test parameters for seed limiting performance of type regulating plate

排种轮转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	限种板高度 D/mm
40	38/42/46/50/54/58/62/66/70/74
60	38/42/46/50/54/58/62/66/70/74
80	38/42/46/50/54/58/62/66/70/74

表 3 种量调节板限种性能试验结果

Tab. 3 Test results of seed restriction performance of seed quantity regulating plate

D/mm	转速 40 r/min		转速 60 r/min		转速 80 r/min	
	平均单穴播量/粒	合格率/%	平均单穴播量/粒	合格率/%	平均单穴播量/粒	合格率/%
38	3.78	83.45	3.67	87.45	3.54	84.56
42	3.71	82.01	3.62	83.45	3.46	84.78
46	3.61	82.34	3.59	84.56	3.56	85.67
50	3.74	87.34	3.62	85.67	3.65	83.45
54	3.76	83.21	3.64	84.78	3.45	86.90
58	3.54	86.90	3.74	85.67	3.28	82.15
62	3.65	83.23	3.54	82.18	2.89	71.35
66	3.36	78.45	3.15	76.54	2.76	64.9
70	2.89	66.54	2.78	67.89	2.36	62.56
74	2.56	64.90	2.54	64.35	2.08	58.76

表 4 最小播量试验结果

Tab. 4 Minimum seeding rate test results

排种轮转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	型孔宽度/ mm	平均单穴播量/粒	合格率/%
40	4	2.11	69.45
	5	3.19	70.98
	6	3.89	83.45
	7	5.71	63.19
60	8	7.71	42.56
	4	2.28	67.89
	5	3.25	68.79
	6	3.64	87.65
80	7	5.83	61.23
	8	6.98	45.14
	4	2.10	62.34
	5	2.48	64.56
80	6	3.44	86.67
	7	4.04	78.23
	8	6.88	45.78

3 台架性能试验

为检验排种器的播种性能,在华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室的计算机视觉排种器试验台进行台架性能试验。

3.1 试验设备

JPS-12 型计算机视觉排种器试验台;游标卡尺(精度:0.02 mm);霍尔转速记录仪(量程范围:5~200 r/min,分度值:0.1 r/min)。

3.2 最小播量试验

为确定能够满足最小播量要求的最优型孔尺寸,以粳型常规稻郑早 10 号为试验稻种,以型孔宽度和排种轮转速为试验因素,以播种合格率和平均单穴播量为试验指标,开展最小播量双因素试验。其中,型孔基础参数为:型孔开度 0 mm、长度 13 mm、深度 4 mm,转速为 40~80 r/min,型孔宽度为 4~8 mm。

参考 NY/T 1143—2006,穴播机播种穴粒数在 $n \pm 3$ 范围内视为合格,本试验确定最小播量穴粒数为 2~4 粒。以平均单穴播量和合格率为试验评价指标,开展最小播量试验。

如表 4 所示,在转速为 40、60、80 r/min 条件下,不同型孔宽度对单穴播量的影响如下:型孔宽度为 4 mm 时,平均单穴播量在 2 粒左右,且存在明显卡种现象,如图 8 所示;当型孔宽度为 5 mm 时,平均单穴播量为 3 粒,仍存在卡种问题;当型孔宽度为 6 mm 时,平均单穴播量达 3.5 粒,3 个转速水平下皆满足最小播量 3 粒的要求;当型孔宽度为 7、8 mm 时,平均单穴播量分别达到 5 粒和 7 粒。

综上所述,满足单穴最小播量 3 粒要求的最优型孔尺寸为:型孔长度为 13 mm,型孔宽度为 6 mm,型孔高度为 4 mm。



图 8 卡种现象

Fig. 8 Jamming phenomenon

3.3 台架性能试验

3.3.1 试验品种

试验选取的稻种:粳型杂交稻茎优 879、粳型杂交稻嘉优中科 6 号、粳型常规稻华航 48 号和粳型常规稻郑早 10 号。

3.3.2 试验方法

水稻直播中,稻种的含水率是影响穴播质量的关键因素,直接影响播种均匀性和出苗率。当含水率过大时,稻种表面黏性增大,在排种器中易粘连成团。为研究排种轮转速、型孔开度和含水率对机械式水稻精量排种器单穴播量的影响,以排种轮转速、型孔开度和含水率为试验因素,并参考 DG/T 083—2021《水稻直播机推广鉴定标准》,以平均单穴播量、变异系数为评价指标,开展三因素台架试验,分别记录 250 穴的穴粒数,重复 3 次,试验因素水平如表 5 所示。

排种轮转速计算公式为

$$N = \frac{60V}{LX} \quad (6)$$

式中 X ——排种轮槽数,个

表5 试验因素水平
Tab.5 Test factors levels

水平	型孔开度/mm	排种轮转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	含水率/%
1	0	40	19
2	4	60	22
3	8	80	25
4	12	—	—
5	14	—	—

注:—表示添加该因素水平组合未设置。

V ——试验带运动速度, m/s

N ——排种轮转速, r/min

L ——理论穴距, m

其中,排种轮槽数 $X=8$,理论穴距 $L=0.1 m$ 。因此,台架试验中模拟的直播机作业速度为 $0.8 \sim 1.6 m/s$ 。

3.3.3 台架试验结果

台架试验结果如表6所示。当型孔开度为 $0 mm$ 时,籼稻的平均单穴播量为 $2.27 \sim 3.30$ 粒。粳稻的平均单穴播量为 $2.60 \sim 3.98$ 粒;当型孔开度为 $14 mm$ 时,籼稻的平均单穴播量为 $19.42 \sim 23.09$ 粒,粳稻的平均单穴播量为 $18.75 \sim 21.69$ 粒。由此可知,该排种器可实现最小播量3粒的设计目标,且具备播量 $3 \sim 20$ 粒可调的功能。当型孔开度为 $0 mm$ 时,籼稻的单穴播量变异系数为 $42.13\% \sim 63.42\%$,粳稻的单穴播量变异系数为 $34.17\% \sim 53.15\%$;当型孔开度为 $4 \sim 14 mm$ 时,籼稻的单穴播量变异系数为 $10.34\% \sim 28.42\%$,粳稻的单穴播量变异系数为 $9.27\% \sim 27.25\%$ 。

表6 台架试验结果
Tab.6 Bench test results

项目	型孔开度/mm	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	荃优 879 含水率/%			华航 48 号含水率/%			嘉优中科 6 号含水率/%			郑早 10 号含水率/%		
			19	22	25	19	22	25	19	22	25	19	22	25
平均单穴播量/粒	0	40	3.30	2.96	3.19	3.05	2.85	2.85	3.72	35.48	3.00	3.98	3.70	3.26
		60	3.09	2.75	2.88	2.81	2.63	2.63	3.54	44.35	2.80	3.88	3.41	3.15
		80	2.43	2.63	2.61	2.63	2.27	2.27	2.83	50.60	2.60	3.17	3.26	2.90
	4	40	8.72	8.25	7.95	8.33	7.63	7.63	9.03	17.27	8.70	9.41	8.96	9.03
		60	7.66	7.58	7.28	7.37	6.91	6.91	8.14	17.57	8.00	8.36	8.29	8.22
		80	7.53	6.84	6.83	7.19	6.58	6.58	7.88	25.62	7.25	8.17	7.46	7.61
	8	40	14.11	13.54	12.99	13.81	12.69	12.69	14.12	12.61	12.52	14.41	13.09	12.88
		60	13.61	13.23	12.30	13.27	11.98	11.98	12.55	13.15	11.97	12.86	12.28	12.27
		80	12.98	12.07	11.74	12.74	11.52	11.52	12.03	17.38	10.76	12.33	11.99	11.07
12	40	19.81	18.43	17.79	19.47	17.52	17.52	18.87	12.70	17.46	19.13	18.18	17.72	
	60	19.41	18.10	17.36	19.09	17.08	17.08	18.35	12.52	16.60	18.65	17.40	16.90	
	80	19.07	18.02	16.76	18.78	16.50	16.50	17.27	14.04	16.10	17.61	16.48	16.40	
14	40	23.09	22.33	21.48	22.83	21.21	21.21	21.32	10.84	19.76	21.69	20.61	20.09	
	60	21.11	21.48	20.34	20.73	19.97	19.97	20.30	11.30	19.30	20.53	19.99	19.52	
	80	20.45	20.58	19.67	20.15	19.42	19.42	20.00	12.43	18.75	20.24	19.19	19.11	
变异系数/%	0	40	49.39	55.74	42.13	52.46	45.54	45.54	35.48	35.47	39.33	34.17	42.43	40.12
		60	52.43	58.91	44.79	55.16	46.39	46.39	44.35	42.31	41.32	37.11	42.52	41.90
		80	62.55	57.41	57.05	55.97	63.44	63.44	50.60	47.03	53.15	45.49	43.93	48.28
	4	40	18.46	19.64	20.81	19.08	21.33	21.33	17.27	12.98	18.04	16.68	17.74	17.69
		60	21.02	23.35	22.25	21.85	22.43	22.43	17.57	16.60	19.75	19.26	18.70	18.73
		80	28.42	29.82	21.96	28.92	22.04	22.04	25.62	27.25	27.02	25.08	26.53	20.37
	8	40	13.75	14.18	14.81	13.95	15.00	15.00	12.61	14.47	13.10	13.16	14.26	14.55
		60	14.77	16.02	16.10	16.20	14.18	14.18	13.15	14.26	14.63	16.41	16.12	16.14
		80	16.64	17.73	18.05	16.73	18.13	18.13	17.38	17.46	18.97	17.04	17.19	18.60
	12	40	12.52	13.19	13.86	12.38	13.92	13.92	12.70	13.11	13.44	12.63	13.01	13.42
		60	12.42	13.87	13.77	12.41	14.11	14.11	12.52	13.25	13.84	13.08	13.85	13.57
		80	13.32	13.82	14.58	13.23	14.56	14.56	14.04	14.57	14.56	13.94	14.59	14.46
	14	40	10.35	10.48	10.52	10.34	10.61	10.61	10.84	11.13	11.44	9.27	11.07	11.15
		60	10.71	10.94	11.18	10.82	11.17	11.17	11.30	11.24	11.52	11.07	11.71	11.43
		80	12.62	12.49	12.54	12.63	12.70	12.70	12.43	12.95	12.99	12.38	12.95	12.60

分析表6的数据可得:在排种轮转速与含水率不变的条件下,随着型孔开度的增加,平均单穴播量

和单穴播量变异系数呈明显增大趋势;在型孔开度与含水率不变的条件下,随着排种轮转速的增加,平

均单穴播量呈明显减小趋势,而单穴播量变异系数呈明显增大趋势;在排种轮转速与型孔开度不变的条件,随着含水率的降低,平均单穴播量呈增大趋势,而单穴播量变异系数与含水率无明显关系。

同时,同一型孔开度下,籼稻的单穴播量比粳稻的单穴播量少,但籼稻的单穴播量变异系数却比粳稻的单穴播量变异系数大。其主要原因在于粳稻属于粗短粒稻种,形状更接近椭球形,其重心接近几何中心,稳定性高。而籼稻属于细长粒稻种,其重心偏离几何中心,稳定性差,易受到外部影响,导致稻种翻转。因此,籼稻的单穴播量比粳稻的单穴播量少。同时,由于单穴播量越少,其变异系数越大。因此,与粳稻相比,籼稻的单穴播量变异系数更大。

4 结论

(1)基于不同粒型稻种的多样化播种需求,设计了一种播量可调式水稻穴播排种器。该排种器排种轮采用对插式结构调节型孔开度,能够针对不同品种稻种精确调节对应播量,有效解决了传统机械

式排种器对稻种粒型适应性差、播量一致性低的问题。

(2)结合型孔式与槽轮式排种器的排种孔结构优势,设计了具备腰形型孔构型的排种轮,并进行了最小播量验证试验,结果表明:当型孔长度为13 mm、宽度为6 mm、厚度为4 mm且种量调节板高度为58 mm时,排种器在播量控制和作业性能方面表现最优。

(3)以荃优879、嘉优中科6号、华航48号和郑早10号4类稻种为试验对象,选取排种轮转速、型孔开度和含水率为试验因素,以平均单穴播量及其变异系数为试验指标,开展排种性能三因素组合试验,结果表明:排种器可实现最小播量3粒的设计目标,且具备播量3~20粒可调的功能。在高速作业状态下(80 r/min),以最小播量(型孔开度为0 mm)播籼稻品种时,变异系数较大。主要原因有:籼稻品种的流动性较差;机械式排种器达到一定工作转速后,平均单穴播量随着转速的升高而减小,且小于3粒;转速升高时,可以通过适当增大型孔开度保证穴粒数与播种均匀性。

参 考 文 献

- [1] 杨家豪,房欣,马浏轩,等. 水稻育秧机械的研究和进展[J]. 农机化研究, 2023,45(6):264-268.
YANG Jiahao, FANG Xin, MA Liuxuan, et al. Research and development of rice seedling raising machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023,45(6):264-268. (in Chinese)
- [2] XING He, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Mechanism modeling and experimental analysis of seed throwing with rice pneumatic seed metering device with adjustable seeding rate[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020,178:105697.
- [3] CHEN Liming, YI Yanhong, WANG Wenxia, et al. Innovative furrow ridging fertilization under a mechanical direct seeding system improves the grain yield and lodging resistance of early indica rice in South China[J]. Field Crops Research, 2021,270:108184.
- [4] 刘俊,朱德泉,于从羊,等. 舀勺型孔轮式水稻精量排种器设计与试验[J]. 浙江农业学报, 2021,33(4):739-752.
LIU Jun, ZHU Dequan, YU Congyang, et al. Design and experiment on scoop hole-wheel precision seed-metering device for rice[J]. Journal of Zhejiang Agriculture, 2021,33(4):739-752. (in Chinese)
- [5] 臧英,何思禹,王在满,等. 气力式包衣杂交稻单粒排种器研制[J]. 农业工程学报, 2021,37(1):10-18.
ZANG Ying, HE Siyu, WANG Zaiman, et al. Design of pneumatic single seed metering device for coated hybrid rice[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(1):10-18. (in Chinese)
- [6] 张顺,李勇,王浩宇,等. U型腔道式水稻精量穴播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(10):98-108.
ZHANG Shun, LI Yong, WANG Haoyu, et al. Design and experiment of U-shaped cavity type precision hill-drop seed-metering device for rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(10):98-108. (in Chinese)
- [7] 刘礼阳,唐兴月,祝培棚,等. 水稻气压滚筒式集中排种器设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2020,25(12):122-133.
LIU Liyang, TANG Xingyue, ZHU Peixu, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder-type centralized seed-metering device for rice[J]. Journal of China Agricultural University, 2020,25(12):122-133. (in Chinese)
- [8] 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, 2023.
LIU Hao. Design and performance test of combination and adjustable precision hill rice seeder[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [9] 姜毓. 型孔深度渐变低损水稻排种器设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学, 2023.
JIANG Liu. Design and experiment of rice seed metering apparatus with gradient hole depth and low loss[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [10] 唐楠锐,周勇,张国忠,等. 搅种型孔式水稻穴播排种器的性能模拟与试验[J]. 中国农业科技导报, 2022,24(4):107-115.
TANG Nanrui, ZHOU Yong, ZHANG Guozhong, et al. Performance simulation and experiment of stirred and bunch rice

- seeding device[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2022, 24(4):107-115. (in Chinese)
- [11] 陈涛. 正负气压一型孔轮组合式谷子穴播排种器设计与试验[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2023.
CHEN Tao. Design and experimental study of millet hill-seeder with positive and negative air pressure and type hole wheel combination[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [12] 秦锋, 刘大为, 杨靖, 等. 水稻机械化育秧播种机排种器研究现状及展望[J]. *现代农业装备*, 2024, 45(1):9-16.
QIN Feng, LIU Dawei, YANG Jing, et al. Research status and prospect of rice mechanized seedling sowing and discharging seeder[J]. *Modern Agricultural Equipment*, 2024, 45(1):9-16. (in Chinese)
- [13] 蔡东林. 少精量水稻穴播机的研制与试验[D]. 南京:南京农业大学, 2014.
CAI Donglin. Master's degree dissertation manufacturing and test of accurate rice hill-drop planter[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [14] YAZGI A, DEGIRMENCIOLU A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate[J]. *Measurement*, 2014, 56: 128-135.
- [15] RYU I H, KIM K U. Design of roller type metering device for precision planting[J]. *Transactions of the ASAE*, 1998, 41(4): 923-930.
- [16] FURUHATA M, CHOSA T, SHIOYA Y, et al. Developing direct seeding cultivation using an air-assisted strip seeder[J]. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 2015, 49(3): 227-233.
- [17] RAJAJIAH P, MANI I, KUMAR A, et al. Development and evaluation of electronically controlled precision seed-metering device for direct-seeded paddy planter[J]. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 86(5): 598-604.
- [18] RATNAYAKE R M C, BALASORIYA B M C P. Re-design, fabrication, and performance evaluation of manual conical drum seeder: a case study[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2013, 29(2): 139-147.
- [19] ST JACK D, HESTERMAN D C, GUZZOMI A L, et al. Precision metering of santalum spicatum (Australian Sandalwood) seeds[J]. *Biosystems Engineering*, 2013, 115(2): 171-183.
- [20] 涂团鹏. 2BD-6型手扶式水稻精量穴播机的设计与试验[D]. 南昌:江西农业大学, 2020.
TU Tuanpeng. Design and experiment of 2BD-6 walk-behind rice precision direct seeding machine[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [21] 夏海洋. 高速乘坐式水稻精量穴直播机的设计与试验[D]. 南昌:江西农业大学, 2022.
XIA Haiyang. Design and experiment of high speed riding precision rice hill-drop direct seeding machine[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [22] 袁月明, 吴明, 于恩中, 等. 水稻芽种物料特性的研究[J]. *吉林农业大学学报*, 2003(6): 682-684.
YUAN Yueming, WU Ming, YU Enzhong, et al. A study on material characteristics of rice budded seeds [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2003(6): 682-684. (in Chinese)
- [23] 陈坤杰, 徐伟梁. 含水率对稻谷机械特性的影响[J]. *农业机械学报*, 2005(11): 177-178, 181.
CHEN Kunjie, XU Weiliang. Effect of moisture content on mechanical properties of paddy [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005(11): 177-178, 181. (in Chinese)
- [24] 姜业明. 气吸式水稻精量穴直播排种器设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2021.
JIANG Yeming. Design and experiment of suction seed metering device for rice hill-direct-seeding [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [25] 张明华. 水稻精量穴直播机的优化设计与试验[D]. 广州:华南农业大学, 2017.
ZHANG Minghua. Optimal design and experimental research of precision rice hill-drop drilling machine [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [26] 张明华, 罗锡文, 王在满, 等. 水稻直播机组复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)
- [27] 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.
- [28] 张顺, 何海龙, 苑严伟, 等. 导向充填式水稻精量穴播排种器孔-槽组合型孔设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(12): 39-50.
ZHANG Shun, HE Hailong, YUAN Yanwei, et al. Design and experiment of hole-slot combined type hole for guided filling precision hill-drop rice seeder [J]. *Transactions of the CSAE*, 2023, 39(12): 39-50. (in Chinese)
- [29] 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)