

梅志雄,夏俊芳,张居敏,等.稻麦两用螺旋舀种式排种器排种性能试验[J].华中农业大学学报,2020,39(5):136-146.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2020.05.019

稻麦两用螺旋舀种式排种器排种性能试验

梅志雄,夏俊芳,张居敏,杜俊,杨全军,胡梦杰,骆双成,刘政源,李支轶

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070

摘要 设计了一种稻麦两用螺旋舀种式排种器,确定了该排种器关键部件的结构和参数;运用 Design-Expert 软件进行数据分析,得到最优参数组合,采用响应面试验方案,进行台架验证试验。结果显示:播种水稻时,在转速为 45 r/min、倾斜角度为 3°、出种孔长度为 9 mm 情况下的合格率为 78.20%,重播率为 3.71%,空穴率为 1%,穴距合格率为 97.93%,穴距变异系数为 16.17%;播种小麦时,在转速为 60 r/min、倾斜角度为 1°、出种孔长度为 9 mm,此组合下的合格率为 93.37%,重播率为 3.44%,空穴率为 3.19%,穴距合格率为 93.60%,穴距变异系数为 25.50%。

关键词 农业机械;播种机;兼用排种器;舀种式;螺旋舀种管;稻麦两用

中图分类号 S 223.2⁺3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2020)05-0136-11

长江中下游区域是我国的粮食主产区之一,2018 年该地区稻谷播种面积和总产量分别占全国的 50.8%和 51.6%,小麦播种面积和总产量分别占全国的 26.9%和 25.6%^[1]。现有的水稻或小麦播种机使用的排种器一般只能进行单一作物的播种,机具利用率不高。近年来,为了提高排种器的通用性,一些学者开展了相关的研究,提出了一些兼用型的排种器。廖庆喜等^[2]、邢鹤琛等^[3]设计了一种气力式油菜、小麦兼用精量排种器,通过更换排种滚轮以期实现油菜、小麦的兼用播种,但其播种小麦株距合格指数不高。丛锦玲^[4]设计了一种油菜小麦兼用型气力式精量排种器,研制了一种兼用型内嵌入导种条式排种盘及其型孔结构,以实现油菜小麦兼用播种。颜秋艳^[5]设计了一种一器双行气力式油麦兼用型排种器,采用正负气压组合式原理,通过更换排种盘实现一器双行兼用排种,但其播种小麦时不能完全达到单粒精密播种要求。Lei 等^[6]以及雷小龙等^[7]设计了一种油麦兼用型气送式集排器,可实现油菜、小麦种子定量供种,并在一定供种量范围内调节倾斜锥孔轮数量和转速实现变量供种,但其未评价精量播种精度和株距均匀度是否满足农艺要求。李伟^[8]设计了一种多功能稻麦免耕施肥播种机,利用可调节播量的外槽轮排种器,实现稻麦的条播,但

采用条播方式种子耗费量大,种植成本较高。徐高明^[9]设计的稻麦施肥播种机亦采用外槽轮排种器条播播种,播种水稻的播种量为 5 kg/667 m²,不能实现精密播种,且耗种量大。初尔庄等^[10]设计了一种多功能排种器,可实现小籽粒种子的机械化播种,但其主体加工成本较高且精度和一致性差,导致排种时各行排量一致性差,且其海绵盘易磨损。金梅等^[11]设计了一种多功能施肥播种机,可播种水稻、小麦、油菜等作物,但其采用条播方式,播种量较精密播种大。Yazgi 等^[12]通过对安装有不同吸孔直径吸种盘的气吸式排种器进行播种棉花和玉米的台架试验,得到排种效果最优的参数组合。

综上可知,部分学者开展了多功能兼用型排种器的研究,但大多采用条播方式,耗种量大,且其中针对稻麦轮作耕作制度特点研制稻麦兼用型排种器的很少;部分学者研制的稻麦免耕施肥播种机,直接在现有的外槽轮排种器的基础上改进,可实现稻麦条播,但该方式耗种量大。

本研究分析水稻、小麦的三轴尺寸和农艺要求,设计一种稻麦两用螺旋舀种式排种器,确定其关键部件的结构和参数,通过响应面试验,探寻转速、倾斜角度和出种孔长度对稻麦穴播合格率、重播率等试验指标的影响规律,旨在为稻麦兼用型播种机的

收稿日期:2019-07-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0301303);公益性行业(农业)科研专项(201503136)

梅志雄,硕士研究生。研究方向:现代农业装备设计与测控。E-mail: hgmeizhixiong@163.com

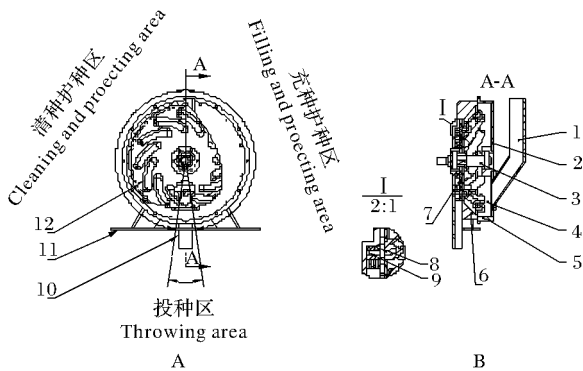
通信作者:夏俊芳,博士,教授。研究方向:现代农业装备设计及测控研究。E-mail: xjf@mail.hzau.edu.cn

设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 排种器结构与工作原理

1) 排种器结构。稻麦两用螺旋舀种式排种器结构如图1所示, 主要由进种管、前中后壳体、中心轴、种腔、舀种管组件固定盘、出种孔长度调节块、排种管、底座、螺旋舀种管组件(后文简称“舀种管”)等组成。其中, 种腔为前壳体、中壳体、后壳体及舀种管组件固定盘等所组成的容腔。如图1A主视图的中下方局部剖面视图所示, 柔性胶带粘贴于后壳体与舀种管末端出种孔对应的圆柱面上, 用以弥补后壳体圆柱面与舀种管末端出种孔的间隙, 避免因后壳体加工误差和舀种管安装误差导致舀种管在二者相对运动中发生干涉碰撞损坏。



A. 主视图 Front view; B. 全剖视图 Full section view; 1. 进种管 Seed tube; 2. 前壳体 Front shell; 3. 中心轴 Center shaft; 4. 种腔 Seed cavity; 5. 中壳体 Middle shell; 6. 后壳体 Rear shell; 7. 舀种管组件固定盘 Fixed disc of spiral seed-scoop tube assembly; 8. 柔性胶带 Flexible tape; 9. 出种孔长度调节块 Seeding out hole length adjustment block; 10. 排种管 Seed-metering tube; 11. 底座 Base; 12. 螺旋舀种管组件 Spiral seed-scoop tube assembly.

图1 稻麦两用螺旋舀种式排种器结构示意图

Fig.1 Structural schematic diagram of rice and wheat dual-purpose spiral tube scoop type seed metering device

2) 工作原理。如图1A所示, 排种器工作过程可分为充种护种、清种护种与投种3个阶段。排种器工作前, 种子由种箱经进种管连续均匀地进入种腔中, 并形成一定高度的种子群。工作时, 中心轴在动力驱动下带动固定于舀种管组件固定盘上的舀种管转动, 舀种管进入充种护种区, 依次插入种子群舀取部分种子。随着舀种管的继续转动, 最先充入舀种管的种子在重力、摩擦力、种子间相互作用力的作用下滑至舀种管末端。由于螺旋舀种管组件末端靠近排种器中心轴线的一端为带有出种孔的半螺旋舀

种管, 而远离中心轴线的端为不带出孔的半螺旋舀种管, 因此少量的种子充入舀种管出种孔内并被粘贴于后壳体内圆柱面上的柔性胶带护住, 大量的种子被不带出种孔的半螺旋舀种管末端的斜面挡住。随着舀种管的转动, 充入出种孔内的种子被推动着和舀种管一起转动。当舀种管经过最高点后, 舀种管进入清种护种区, 舀种管出种孔前端舀取的多余的种子在重力作用下沿不带出种孔的半螺旋舀种管末端斜面滑出舀种管掉落至种腔内, 出种孔内的种子则继续随舀种管转动, 当其转动至最低点时, 在重力和离心力作用下从后壳体上的出种口排出, 经排种管后掉落至地面, 排种器完成投种过程。通过调节出种孔长度, 配合合适的传动比, 实现水稻和小麦的兼用播种。

1.2 关键部件设计与参数确定

1) 螺旋舀种管组件数量。根据农艺种植要求, 水稻精量穴直播合理株距为15~25 cm^[13], 小麦精量播种合理株距为5~7 cm^[14]。根据农业机械设计手册可知^[15]:

$$Z = \frac{\pi D(1+\delta)}{i_p S} \quad (1)$$

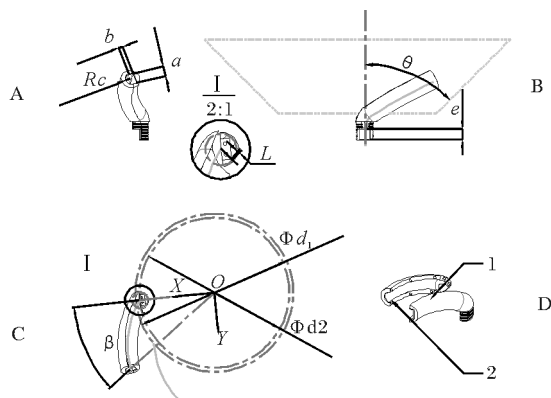
式(1)中: Z 为舀种管数量; D 为地轮直径, 为0.60 m; δ 为地轮滑移系数, 一般为0.05~0.12; i_p 为传动比; S 为株距。

因水稻株距约是小麦的3倍, 为兼播水稻和小麦, 取播种水稻时 $i_p=1$, 则播种小麦时 $i_p=3$, 将已知量代入式1中得播种水稻所需的舀种管数量为8~14, 播种小麦所需的舀种管数量为9.4~14.0。增加舀种管数量可以降低排种器的转速, 提高排种器的充种性能; 但舀种管数量增多后会减小相邻舀种管出种孔之间的距离, 因该排种器舀种管采用螺母固定, 距离太小不便于安装, 且会影响穴与穴之间种子分离的准确性。综合考虑该排种器的舀种管数量选择为12。

2) 螺旋舀种管组件结构与参数。螺旋舀种管结构如图2所示。本研究选用螺旋舀种管进行舀种, 主要原因是螺旋结构可使种子在舀种管内运动更为流畅, 种子更易充入舀种管直线段的出种孔内。若采用等螺距的圆柱螺旋舀种管, 则相邻的舀种管之间距离太近容易干涉, 故采用外锥形螺旋舀种管, 且采用外锥形螺旋管较圆柱螺旋舀种管有更大的种腔, 可以容纳更多的种子, 增加充种概率。

如图2A所示, 该舀种管进种口型孔主要由半圆段和矩形段组成, 其中半圆段半径为 c , 矩形段长

为 a , 宽为 b 。该螺旋舀种管组件的扫描曲线主要由右旋外锥形螺旋线、过渡圆弧线、直线组合而成。其中, 右旋外锥形螺旋线的锥形角度为 θ , 基圆直径为 d_1 , 螺距为 p , 圈数为 n 。过渡圆弧线的半径为 f , 过渡圆弧线在图 2C 俯视图所在平面上的投影直线与外锥形螺旋线在该面上的投影曲线在连接点处相切, 过渡圆弧线与其外锥形螺旋线在其连接点处相切。直线段长度为 g , 其与过渡圆弧线在其连接点处相切, 且其垂直于外锥形螺旋线基圆所在平面。该螺旋舀种管出种孔最大长度为 e , 出种孔长度可通过安装不同厚度的出种孔长度调节块进行调节。舀种管安装孔的圆心所在圆的直径为 d_2 。螺旋舀种管组件由带有若干凹槽的半螺旋舀种管 1 和带有与凹槽对应凸起的半螺旋舀种管 2 通过扣合连接而成, 且半螺旋舀种管 1 的直线段带有出种孔, 而半螺旋舀种管 2 的直线段不带有出种孔, 其末端带有斜面(图 2D)。



A: 主视图 Front view; B: 左视图 Left view; C: 俯视图 Top view; D: 爆炸视图 Exploded view.

图 2 螺旋舀种管组件结构图

Fig.2 Structural diagram of spiral seed-scoop tube assembly

3) 螺旋舀种管组件进种口型孔参数。螺旋舀种管组件进种口型孔参数主要包括半圆段半径 c 、矩形段长 a 和矩形段宽度 b , 其矩形段宽度直线与半圆段的圆弧相切, 则矩形段长度 a 即为半圆段直径长度, 因此 $a=2c$ 。

选取水稻品种黄华占、小麦品种郑麦 9023 为测试对象, 随机取出 100 粒测量其三轴尺寸, 测量结果显示, 黄华占种子长度最大值为 10.76 mm, 郑麦 9023 种子长度最大值为 7.60 mm。为了增加出种孔充种概率, 降低漏播率, 使横卧、斜卧的种子都能充入出种孔, 应满足出种孔截面矩形段长度 $a \geq 10.76$ mm, 取 $a=11$ mm, 则 $c=a/2=5.5$ mm。黄华占种子宽度最大值为 2.68 mm, 郑麦 9023 种子宽

度最大值为 3.47 mm, 为了使水稻和小麦种子均能横卧、斜卧充入出种孔, 有 $b \geq 3.47$ mm。为使舀种管内的种子更易充入出种孔, 矩形段宽度 b 应尽可能取大值。考虑安装及强度问题, 初取螺旋舀种管外圆直径为 20 mm, 螺纹固定端用 M18×1.5 螺纹, 如图 2C 中局部放大视图所示, 为保证强度, 初步确定带有出种孔的半螺旋舀种管 1 的出种端螺纹安装段的螺纹小径所在圆柱面离矩形段直角处的倒圆角最小距离 L 大于或等于 1 mm, 即图 2C 中虚线所在圆到圆角的最短距离。查机械设计手册可知 M18×1.5 螺纹的小径为 16.376 mm, 又取矩形段直角处的倒圆角半径为 0.5 mm, 则有:

$$L = \left[\frac{16.376/2 - \sqrt{(a/2)^2 + b^2}}{(0.5 \times \sqrt{2} - 0.5)} \right] \geq 1 \quad (2)$$

将 $a=11$ mm 代入式(2)可得 $b \leq 4.943$ mm, 综上 $3.500 \text{ mm} \leq b \leq 4.943 \text{ mm}$, 取 $b=5$ mm, 代入式(2)左边可得最小距离 L 为 0.962 mm, 基本满足强度要求。综上可知, 该舀种管型孔矩形段长 $a=11$ mm, 宽 $b=5$ mm, 半圆段半径 $c=5.5$ mm, 舀种管外圆直径为 20 mm, 螺纹固定端用 M18×1.5 螺纹。

4) 螺旋舀种管组件扫描曲线参数。螺旋舀种管组件的扫描曲线参数有右旋外锥形螺旋线的锥形角度 θ 、基圆直径 d_1 、螺距 p 、圈数 n ; 过渡圆弧线的半径 f ; 直线段长度 g ; 舀种管安装孔的圆心所在圆的直径 d_2 。

如图 1B 所示, 该排种器后壳体内圆锥面的半锥顶角应与舀种管螺旋线的锥形角度 θ 相等。因此, 为使排种器内流动的种子在重力作用下能沿后壳体内锥面滑落集中在舀种管进种口附近, 应满足舀种管螺旋线的锥形角度大于等于种子的自然休止角。由文献[7]可知, 郑麦 9023 休止角为 30.6° (含水率 4.1%), 黄华占芽种休止角为 $28.45^\circ \sim 40.77^\circ$ (含水率 20%~30%)^[16], 因此 $\theta \geq 40.77^\circ$, 取 $\theta=45^\circ$ 。现有排种器排种盘直径一般为 140~260 mm^[15], 考虑该螺旋线为锥度外张的锥形螺旋线, 为使螺旋线最远点在图 2C 俯视图所在平面上的投影点离螺旋线基圆圆心的距离不至于过大而导致排种器整体尺寸过大, 取螺旋线的基圆直径 $d_1=164$ mm。为使排种器的厚度不至于过大, 取螺旋线最远点高度为 36 mm, 则有 $np=36$, 此时螺旋线最远点在图 2C 俯视图所在平面上的投影点离螺旋线基圆圆心的距离为 118 mm。

在舀种管螺旋线基圆的圆心建立如图 2C 所示

坐标系,螺旋线的起点在 X 轴上,令螺旋线的终点与起点相对坐标系原点 O 的夹角为 β ,则 $\beta=2\pi n$,螺旋线在 XOY 平面的投影曲线的方程为:

$$\begin{cases} X=(d_1/2+n p \tan \theta) \cos (2 \pi n) \\ Y=(d_1/2+n p \tan \theta) \sin (2 \pi n) \end{cases} \quad (3)$$

将螺旋线已确定参数代入方程(3),得该螺旋线终点坐标为:

$$\begin{cases} X=118 \cos (2 \pi n) \\ Y=118 \sin (2 \pi n) \end{cases} \quad (4)$$

由方程(4)可知,螺旋线的圈数 n 越小, β 越小, X 越大, Y 越小,从图 2C 俯视图看,螺旋线的投影曲线弧长越短,螺旋线外张,相邻舀种管之间的最小距离越大,舀种管之间不易干涉或夹种。但 n 不宜太小, n 太小则 β 太小,螺旋线在 XOY 面上的投影曲线太直,舀种管进种口不易舀起种子。综合考虑取 $n=0.09$,则 $p=400$ mm,此时 $\beta=32.4^\circ$ 。

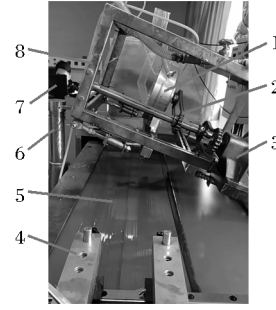
舀种管外径为 20 mm,为使舀种管过渡流畅,不出现尖角,应满足过渡圆弧线的半径 $f>10$ mm,取 $f=15$ mm。为保证出种孔内长度方向与图 2B 中中心线平行的种子均能顺利排出,取出种孔最大长度 $e=a=11$ mm。考虑舀种管组件固定盘的厚度及固定舀种管的特薄螺母的厚度,取直线安装段长度 $g=15$ mm。因舀种管螺旋线与过渡圆弧线在图 2C 所示平面的投影曲线在螺旋线与过渡圆弧线的连接点处相切,故在舀种管扫描曲线的螺旋线、过渡圆弧线和直线参数确定后,舀种管安装孔的圆心所在圆的直径 d_2 为定值,在三维绘图软件内测量得知, $d_2=155.632$ mm。

综上所述,右旋外锥形螺旋线的锥形角度 $\theta=45^\circ$ 、基圆直径 $d_1=164$ mm、螺距 $p=400$ mm、圈数 $n=0.09$;过渡圆弧线的半径 $f=15$ mm;直线段长度 $g=15$ mm;舀种管安装孔的圆心所在圆的直径 $d_2=155.632$ mm。

1.3 排种性能试验

1) 试验材料和装置。选用黄华占、郑麦 9023 作为试验材料,将稻麦两用螺旋舀种式排种器安装在 JPS-12 排种器性能检测试验台(图 3)上进行试验。

试验前,调节角度调节装置,使排种器的倾角达到要求值;打开种床带开关,调节控制种床带的变频器,使种床带前进速度达到要求值;启动控制动力装置的变频器,使排种器排种,调节工业相机的位置,使种子流位于图像正中间;打开油泵开关,根据前进速度调节喷油量,通过调节毛刷的高度,使油分布均匀且无气泡,调节布油装置的位置使落种区域在油



1.排种器 Seed metering device; 2.传动装置 Transmission device; 3.动力装置 Power device; 4.布油装置 Oil distribution device; 5.种床带 Seed bed belt; 6.角度调节装置 Angle adjustment device; 7.控制台 Console; 8.安装架 Installation frame.

图 3 试验装置

Fig.3 Test device

带上;关闭动力装置。试验时,启动动力装置,调节其变频器使转速达到要求值;点击软件界面上的同步检测按钮开始检测,当检测的种子数达到设定的种子数时自动停止检测,关闭动力装置,将试验结果保存成穴播,并保存原始数据,即完成 1 次试验,每种参数组合重复 3 次取平均值。调节种床带速度、排种轴转速、排种器倾角,完成同一出种孔长度下的所有试验,然后卸下排种器,更换其他厚度出种孔长度调节块,重新安装,完成其他出种孔长度下的试验。

2) 评价指标。根据农艺要求,水稻机械化直播每穴 (3 ± 1) 粒,小麦穴播每穴 (2 ± 1) 粒。参照文献 [17-19],以合格率、重播率、空穴率、穴距合格率、穴距变异系数为评价指标开展台架试验。

在排种器与种床带稳定工作状态下,排种器连续排出 250 粒左右种子,记录此时的穴距、穴粒数、总穴数等。则播种合格率 A 、重播率 D 、空穴率 H_k 、穴距合格率 H_x 、穴距变异系数 a 计算公式如下:

$$A=\frac{n_1}{N} \times 100 \% \quad (5)$$

$$D=\frac{n_2}{N} \times 100 \% \quad (6)$$

$$H_k=\frac{k_h}{N} \times 100 \% \quad (7)$$

$$H_x=\frac{x_h}{N-1} \times 100 \% \quad (8)$$

$$S=\sqrt{\frac{\sum(X_i-\bar{X})^2}{n}} \quad (9)$$

$$a=\frac{S}{\bar{X}} \times 100 \% \quad (10)$$

式(5)~(6)中 n_1 在播种水稻时为一穴 (3 ± 1) 粒的穴数,在播种小麦时为一穴 (2 ± 1) 粒的穴数; n_2 在播种水稻时为 1 穴 5 粒及以上的穴数,在播种小

麦时为 1 穴 4 粒及以上的穴数; N 为试验所记录的总穴数; k_h 为空穴数(穴距 > 1.5 倍理论穴距时即为空穴); x_h 为穴距合格数(0.5 倍理论穴距 $<$ 穴距 < 1.5 倍理论穴距即为合格); X_i 为各穴距; X 为穴距的平均值; S 为穴距标准差。

3) 试验设计。若排种轴转速过低, 可能导致充种时间长充种量过多, 转速过高时相反; 若出种孔长度太小, 则出种孔容积很小, 导致可容纳的种子量少而造成漏播率高, 出种孔长度过大时相反; 当排种器向后倾斜时, 理论上可增加充种概率, 但倾斜角度不宜过大, 过大可能造成重播率增大。因此, 影响排种器的播种性能的因素主要有排种轴转速、出种孔长度、排种器倾斜角度。针对以上因素对排种器按 Box-Behnken Design(BBD) 分别进行水稻和小麦播种响应面设计, 因素水平编码表见表 1。

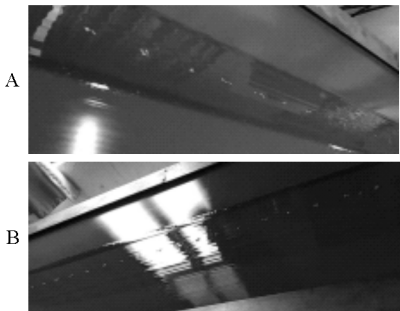
表 1 因素水平编码表
Table 1 Level coding table for factors

播种作物 Sowing crops	编码水平 Coding level	因素 Factors		
		X_1 转速/ (r/min) Rotationa speed	X_2 倾斜角度/ ($^{\circ}$) Inclination angle	X_3 出种 孔长度/mm Length of seeding out hole
水稻 Rice	1	45	12	11
	0	30	6	10
	-1	15	0	9
小麦 Wheat	1	60	12	11
	0	45	6	10
	-1	30	0	9

2 结果与分析

2.1 回归模型的建立与显著性检验

分别对稻麦两用螺旋舀种式排种器的水稻和小麦播种性能试验进行设计, 设计了 15 个试验点的响应面分析试验, 其中有 12 个析因点, 3 个零点, 试验方案和结果如表 2 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。播种效果如图 4 所示。



A: 水稻播种 Rice seeding; B: 小麦播种 Wheat seeding.

图 4 排种器播种效果图

Fig.4 Seed metering result

由表 2 可知: 在序号 1、2、5、8、13 的参数组合下, 可以满足水稻播种的农艺要求; 在序号 19、20、28、29 的参数组合下, 可满足小麦播种的农艺要求。针对表 2 中数据, 运用 Design-Expert 数据分析软件进行多元回归拟合分析和方差分析, 并对试验因素和回归模型进行 F 检验, 若考虑全部一次项和二次项的模型不满足模型显著且失拟不显著, 则将对试验指标影响最不显著的二次项(P 值最高的二次项)去除, 并重新进行 F 检验, 若仍不满足, 则再将余下的一次项和二次项中最不显著的二次项去除, 直至拟合的模型满足模型显著且失拟不显著为止, 最终结果如表 3 所示。

1) 合格率。对试验得到的数据进行多元回归拟合, 分别得到播种水稻和小麦的合格率 A 以编码值作为自变量的回归模型为:

$$A_{\text{稻}} = 74.98 - 0.063X_1 - 0.73X_2 + 0.71X_3 - 12.12X_1X_2 - 6.25X_1X_3 - 2.22X_2X_3 - 1.63X_1^2 - 11.36X_2^2$$
$$A_{\text{麦}} = 53.90 + 0.25X_1 - 28.49X_2 - 2.44X_3 + 3.92X_1X_2 - 5.57X_1X_3 + 4.55X_2X_3 + 5.28X_1^2 + 2.4X_2^2 + 4.8X_3^2$$

表 2 试验设计与结果

Table 2 Experimental design and results

试验对象 Test name	序号 Number	X_1	X_2	X_3	$A/\%$	$D/\%$	$H_k/\%$	$H_x/\%$	$a/\%$
水稻 Rice	1	-1	1	0	75.9	13.1	0.8	98.3	11.5
	2	-1	0	1	79.2	6.2	2.6	94.7	19.5
	3	-1	0	-1	69.1	3.8	7.4	85.4	29.4
	4	-1	-1	0	46.7	0.2	12.0	77.0	39.1
	5	0	0	0	77.1	9.6	2.4	95.1	17.5
	6	0	1	-1	58.5	31.4	3.4	93.2	17.6
	7	0	0	0	74.4	15.4	0.0	100	9.5
	8	0	0	0	76.6	15.6	1.3	97.4	14.6
	9	0	1	1	59.3	37.9	0.0	100	7.0
	10	0	-1	1	71.6	2.2	4.0	91.9	21.0
	11	0	-1	-1	61.9	0.7	7.6	84.7	28.9
	12	1	0	1	63.5	23.5	1.4	96.9	14.2
	13	1	0	-1	78.4	10.2	0.4	99.2	11.9
	14	1	-1	0	73.9	1.8	6.1	87.7	25.1
	15	1	1	0	54.6	39.9	0.6	98.9	10.6
小麦 Wheat	16	0	0	0	56.8	43.2	0.0	100	10.1
	17	0	1	1	36.1	63.9	0.0	11.9	11.9
	18	-1	0	1	69.0	30.2	0.8	98.3	17.3
	19	0	-1	-1	95.2	2.4	2.4	95.1	19.5
	20	1	-1	0	89.9	8.4	1.7	89.9	22.7
	21	0	1	-1	31.5	68.5	0.0	100	10.4
	22	1	0	-1	70.1	29.5	0.4	99.2	14.9
	23	-1	1	0	25.4	74.6	0.0	100	11.9
	24	1	0	1	53.7	46.3	0.0	100	11.9
	25	0	0	0	52.1	45.2	2.7	94.4	20.0
	26	-1	0	-1	63.1	35.2	1.8	96.3	19.1
	27	0	0	0	52.8	47.2	0.0	100	9.3
	28	0	-1	1	81.6	17.1	1.3	96.9	16.0
	29	-1	-1	0	92.6	5.7	1.7	96.6	18.1
	30	1	1	0	38.4	61.6	0.0	100	10.7

表 3 试验结果统计分析 P 值Table 3 Statistical analysis of test results P value

试验对象 Test name	来源 Origin	A	D	H_k	H_x	a
水稻 Rice	X_1	0.972 5	0.003 5 *	0.028 5 *	0.030 9 *	0.026 0 *
	X_2	0.691 2	<0.000 1 **	0.003 2 **	0.003 0 **	0.002 5 **
	X_3	0.696 2	0.064 8	0.069 5	0.070 6	0.082 5
	X_1X_2	0.002 6 **	0.016 4 *	0.146 3	0.179 9	0.184 8
	X_1X_3	0.044 0 *	0.185 4	0.140 7	0.133 5	0.211 6
	X_2X_3	0.400 4	0.512 8	0.954 2	0.953 2	0.764 1
	X_1^2	0.545 4	0.120 5	0.160 6	0.168 7	0.137 5
	X_2^2	0.004 3 **	0.103 7	0.049 8 *	0.050 8	0.147 9
	X_3^2		0.666 4	0.745 7	0.680 1	0.681 0
	模型 Model	0.017 5 *	0.001 8 **	0.027 4 *	0.028 0 *	0.029 1 *
	失拟 Lack of fit	0.056 1	0.498 1	0.297 8	0.322 9	0.489 9
小麦 Wheat	X_1	0.855 1	0.993 0	0.325 0	0.745 8	0.534 1
	X_2	<0.000 1 **	<0.000 1 **	0.007 5 **	0.006 6 **	0.0077 **
	X_3	0.119 8	0.097 7	0.266 8	0.482 2	0.496 1
	X_1X_2	0.086 0	0.094 3		0.163 6	
	X_1X_3	0.029 1 *	0.035 3 *			
	X_2X_3	0.056 3	0.052 3	0.481 0		
	X_1^2	0.040 1 *	0.048 3 *			
	X_2^2	0.265 4	0.267 0			
	X_3^2	0.054 0	0.061 9			
	模型 Model	0.000 2 **	0.000 2 **	0.047 9 *	0.044 5 *	0.042 4 *
	失拟 Lack of fit	0.271 1	0.160 9	0.999 6	0.887 7	0.973 5

注: * 表示在 95% 的置信区间内有显著影响, ** 表示在 99% 的置信区间内有显著影响。Note: * means significant influence in 95% confidence interval, ** means significant influence in 99% confidence interval.

由表 3 可知:转速和倾斜角度的交互项、倾斜角度的二次方项对水稻播种合格率的影响极显著,转速和出种孔长度的交互项对水稻播种合格率的影响显著,其余项均不显著;倾斜角度对小麦播种合格率的影响极显著,转速和出种孔长度的交互项、转速的二次方项对小麦播种合格率的影响显著,其余项均不显著。去除不显著的二次项后,可得播种水稻和小麦合格率 A 的回归模型为:

$$A_{\text{稻}} = 74.04 - 0.063X_1 - 0.73X_2 + 0.71X_3 - 12.12X_1X_2 - 6.25X_1X_3 - 11.24X_2^2$$

$$A_{\text{麦}} = 58.01 + 0.25X_1 - 28.49X_2 - 2.44X_3 - 5.57X_1X_3 + 4.76X_1^2$$

2) 重播率。对试验得到的数据进行多元回归拟合,分别得到播种水稻和小麦的重播率 D 的回归模型为:

$$D_{\text{稻}} = 13.53 + 6.51X_1 + 14.67X_2 + 2.96X_3 + 6.30X_1X_2 + 2.72X_1X_3 + 1.25X_2X_3 - 3.45X_1^2 + 3.67X_2^2 + 0.85X_3^2$$

$$D_{\text{麦}} = 45.20 + 0.012X_1 + 29.37X_2 + 2.74X_3 - 3.92X_1X_2 + 5.45X_1X_3 - 4.83X_2X_3 - 5.15X_1^2 - 2.48X_2^2 - 4.75X_3^2$$

由表 3 可知,转速、倾斜角度对水稻播种重播率的影响极显著,转速和倾斜角度的交互项对水稻播种重播率的影响显著,其余项均不显著;倾斜角度对

小麦播种重播率的影响极显著,转速和出种孔长度的交互项、转速的二次方项对小麦播种重播率的影响显著,其余项均不显著。去除不显著的二次项后,可得播种水稻和小麦重播率 D 的回归模型为:

$$D_{\text{稻}} = 14.10 + 6.51X_1 + 14.67X_2 + 2.96X_3 + 6.30X_1X_2$$

$$D_{\text{麦}} = 41.07 + 0.012X_1 + 29.37X_2 + 2.74X_3 + 5.45X_1X_3 - 4.63X_1^2$$

3) 空穴率。对试验得到的数据进行多元回归拟合,分别得到播种水稻和小麦的空穴率 H_k 的回归模型为:

$$H_{k\text{稻}} = 1.23 - 1.79X_1 - 3.11X_2 - 1.35X_3 + 1.42X_1X_2 + 1.45X_1X_3 + 0.05X_2X_3 + 1.42X_1^2 + 2.22X_2^2 + 0.30X_3^2$$

$$H_{k\text{麦}} = 0.85 - 0.27X_1 - 0.89X_2 - 0.31X_3 + 0.27X_2X_3$$

由表 3 可知,倾斜角度对水稻播种空穴率的影响极显著,转速、倾斜角度的二次方项对水稻播种空穴率的影响显著,其余项均不显著;倾斜角度对小麦播种空穴率的影响极显著,其余项均不显著。去除不显著的二次项后,可得播种水稻和小麦空穴率 H_k 的回归模型为:

$$H_{k\text{稻}} = 2.21 - 1.79X_1 - 3.11X_2 - 1.35X_3 + 2.10X_2^2$$

$$H_{k\text{麦}} = 0.85 - 0.27X_1 - 0.89X_2 - 0.31X_3$$

4) 穴距合格率。对试验得到的数据进行多元回归拟合, 分别得到播种水稻和小麦的穴距合格率 H_x 的回归模型为:

$$H_{x\text{稻}} = 97.5 + 3.41X_1 + 6.14X_2 + 2.63X_3 - 2.52X_1X_2 - 2.90X_1X_3 - 0.10X_2X_3 - 2.71X_1^2 - 4.31X_2^2 - 0.74X_3^2$$

$$H_{x\text{麦}} = 97.78 - 0.26X_1 + 2.69X_2 + 0.58X_3 + 1.68X_1X_2$$

由表 3 可知, 倾斜角度对水稻播种穴距合格率的影响极显著, 转速对水稻播种穴距合格率的影响显著, 其余项均不显著; 倾斜角度对小麦播种穴距合格率的影响极显著, 其余项均不显著。去除不显著的二次项后, 可得播种水稻和小麦穴距合格率 H_x 的回归模型为:

$$H_{x\text{稻}} = 93.36 + 3.41X_1 + 6.14X_2 + 2.63X_3$$

$$H_{x\text{麦}} = 97.78 - 0.26X_1 + 2.69X_2 + 0.58X_3$$

5) 穴距变异系数。对试验得到的数据进行多元回归拟合, 分别得到播种水稻和小麦的穴距变异系数 a 的回归模型为:

$$a_{\text{稻}} = 13.87 - 4.71X_1 - 8.43X_2 - 3.26X_3 + 3.28X_1X_2 + 3.05X_1X_3 - 0.68X_2X_3 + 3.92X_1^2 + 3.79X_2^2 + 0.97X_3^2$$

$$a_{\text{麦}} = 14.92 - 0.78X_1 - 3.93X_2 - 0.85X_3$$

由表 3 可知, 倾斜角度对水稻播种穴距变异系数的影响极显著, 转速对水稻播种穴距变异系数的影响显著, 其余项均不显著; 倾斜角度对小麦播种穴距变异系数的影响极显著, 其余项均不显著。去除不显著的二次项后, 可得播种水稻和小麦穴距变异系数 a 的回归模型为:

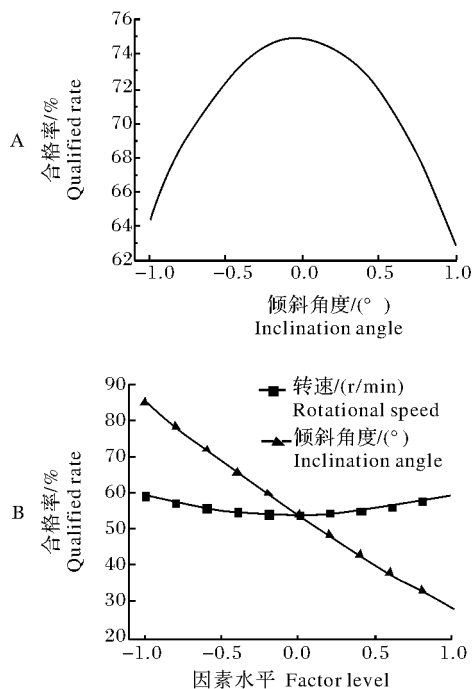
$$a_{\text{稻}} = 18.49 - 4.71X_1 - 8.43X_2 - 3.26X_3$$

$$a_{\text{麦}} = 14.92 - 0.78X_1 - 3.93X_2 - 0.85X_3$$

2.2 各因素对播种合格率的影响

由表 3 可知, 该排种器播种水稻时, 倾斜角度的二次方项(X_2^2)对播种合格率影响极显著, 其余一次项或二次方项不显著; 该排种器播种小麦时, 倾斜角度(X_2)对播种合格率影响极显著, 转速的二次方项(X_1^2)对播种合格率影响显著, 其余一次项或二次方项不显著。只对显著或极显著的因素进行分析。通过 Design-Expert 软件对数据进行处理, 分别得到因素对播种水稻和小麦合格率影响的曲线, 如图 5 所示。

由图 5A 可知, 在转速为 30 r/min、出种孔长度为 10 mm 时, 播种水稻的合格率随倾斜角度的增加呈先增大后减小趋势, 在倾斜角度为 6° 左右时达到



A: 倾斜角度对水稻播种合格率的影响 Effect of inclination angle on rice seeding qualified rate; B: 转速和倾斜角度对小麦播种合格率的影响 Effect of rotational speed and inclination angle on wheat seeding qualified rate.

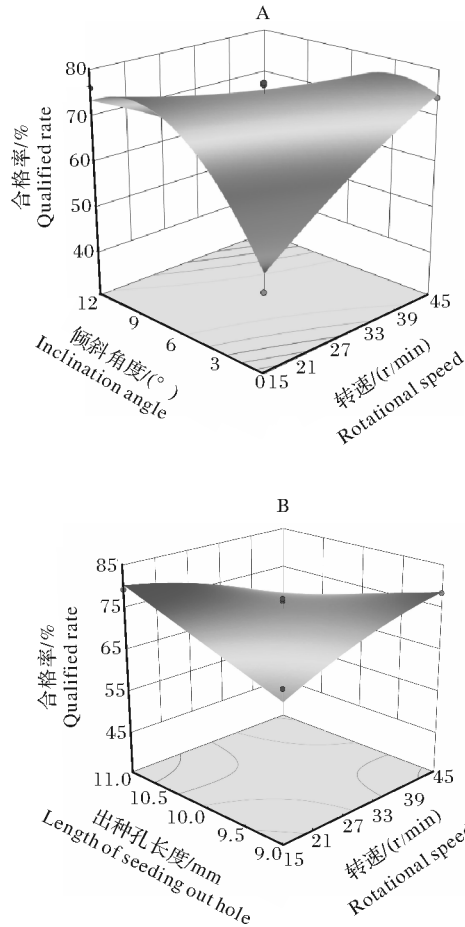
图 5 试验因素对播种合格率的影响

Fig. 5 Effect of factors on seeding qualified rate

最大值, 约为 75%。因此, 在该条件下, 为使排种器合格率较高, 应将倾斜角度调至 6°。由图 5B 可知, 在倾斜角度为 6°、出种孔长度为 10 mm 时, 播种小麦的合格率随转速的增加呈先降低后增加趋势, 在转速为 45 r/min 时达到最小值, 约为 54%。因此, 在该条件下, 为使合格率较高, 应使转速较低或较高, 考虑播种效率应尽可能大, 应使转速较高。在转速为 45 r/min、出种孔长度为 10 mm 时, 播种小麦的合格率随倾斜角度的增加呈逐渐降低趋势, 在倾斜角度为 0° 时最大, 约为 85%。因此, 在该条件下, 为使合格率较高, 应使倾斜角度较小。

2.3 因素交互作用对播种合格率的影响

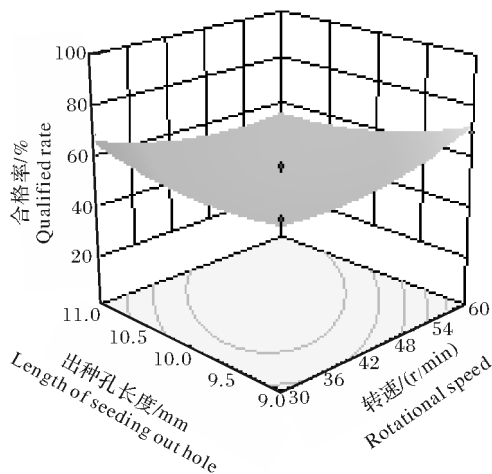
由表 3 可知, 该排种器播种水稻时, 转速与倾斜角度的交互项(X_1X_2)对播种合格率影响极显著, 转速和出种孔长度的交互项(X_1X_3)对播种合格率影响显著, 其余交互项不显著; 该排种器播种小麦时, 转速和出种孔长度的交互项(X_1X_3)对播种合格率影响显著, 其余交互项不显著。只对显著或极显著的交互项进行分析。通过 Design-Expert 软件对数据进行处理, 分别得到因素交互作用对播种水稻和小麦合格率影响的响应面, 如图 6 和图 7 所示。



A: 出种孔长度为 10 mm Length of seeding out hole is 10 mm;
B: 倾斜角度为 6° Inclination angle is 6° .

图 6 交互因素对水稻播种合格率的影响

Fig.6 Effect of interaction factors on rice seeding qualified rate



倾斜角度为 6° Inclination angle is 6° .

图 7 交互因素对小麦播种合格率的影响

Fig.7 Effect of interaction factors on wheat seeding qualified rate

由图 6A 可知,当出种孔长度为 10 mm 时,在转速较高且倾斜角度较小或转速较低且倾斜角度较大时,该排种器播种水稻的合格率较高;在转速较低且一定时,合格率随倾斜角度增加呈先持续上升后略微下降趋势;在转速较高且一定时,合格率随倾斜角度增加呈先略微上升后持续下降趋势;在倾斜角度较小且一定时,合格率随着转速增加呈逐渐增大的趋势;在倾斜角度较大且一定时,合格率随转速增加呈逐渐减小的趋势;在倾斜角度为 6° 时,无论转速为多少,合格率均较高。因此,在该条件下,为使合格率较高,应使倾斜角度较大且转速较低或使倾斜角度较小且转速较高,考虑排种效率应尽可能大,应使倾斜角度较小且转速较高。

由图 6B 可知,当倾斜角度为 6° 时,在转速较高且出种孔长度较小或转速较低且出种孔长度较大时,该排种器播种水稻的合格率较高;在转速较低且一定时,合格率随出种孔长度增加呈逐渐增大趋势;在转速较高且一定时,合格率随出种孔长度增加呈逐渐减小趋势;在出种孔长度较小且一定时,合格率随转速增加呈逐渐增大趋势;在出种孔长度较大且一定时,合格率随转速增加呈逐渐降低趋势。因此,在该条件下,为使合格率较高,应使转速较高且出种孔长度较小或转速较低且出种孔长度较大,考虑排种效率应尽可能大,应使转速较高且出种孔长度较小。

综上,在转速较高、倾斜角度较小且出种孔长度较小时,该排种器合格率较高。

由图 7 可知,当倾斜角度为 6° 时,在转速较高且出种孔长度较小或转速较低且出种孔长度较大时,该排种器播种小麦的合格率较高;在转速较低且出种孔长度较小或转速较高且出种孔长度较大时,该排种器播种小麦的合格率亦较高,但较前者的合格率低;当转速为 45 r/min 左右且出种孔长度在 10 mm 左右时,合格率最低;因此,在该条件下,为使合格率较高,应使转速较高且出种孔长度较小或使转速较低且出种孔长度较大,考虑排种效率应尽可能大,应使转速较高且出种孔长度较小。

2.4 最佳参数优化

运用 Design-Expert 软件的 Optimization 模块,以合格率为评价指标,根据试验因素水平和试验指标参考的相关标准^[17-19],分别建立播种水稻和播种小麦的数学模型。

目标函数均为:

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ 0\% \leq Y_2 \leq 25\% \\ 0\% \leq Y_3 \leq 5\% \\ 80\% \leq Y_4 \leq 100\% \\ 0\% \leq Y_5 \leq 40\% \end{cases} \quad (11)$$

播种水稻的约束条件为:

$$\begin{cases} 15 \text{ r/min} \leq X_1 \leq 45 \text{ r/min} \\ 0^\circ \leq X_2 \leq 12^\circ \\ 9 \text{ mm} \leq X_3 \leq 11 \text{ mm} \end{cases} \quad (12)$$

播种小麦的约束条件为:

$$\begin{cases} 30 \text{ r/min} \leq X_1 \leq 60 \text{ r/min} \\ 0^\circ \leq X_2 \leq 12^\circ \\ 9 \text{ mm} \leq X_3 \leq 11 \text{ mm} \end{cases} \quad (13)$$

求得满足约束条件的最优参数组合。播种水稻时的较优组合有 2 个,分别为:①转速为 15 r/min、倾斜角度为 8°、出种孔长度为 11 mm,此组合下的合格率为 82.2%,重播率为 13.3%,空穴率为 1.8%,穴距合格率为 94.6%,穴距变异系数为 13.4%;②转速为 45 r/min、倾斜角度为 3°、出种孔长度为 9 mm,此组合下的合格率为 81.3%,重播率为 2.8%,空穴率为 2.5%,穴距合格率为 94.8%,穴距变异系数为 17.4%,为了提高播种效率,尽管组合①的合格率较高,但仍选择组合②,将该组合下各因素水平与前文交互作用对水稻播种合格率影响规律的分析结果对比可知,两者基本吻合,说明通过响应面图分析的趋势正确。

播种小麦时的最优组合为转速为 60 r/min、倾斜角度为 1°、出种孔长度为 9 mm,此组合下的合格率为 98.2%,重播率为 0.2%,空穴率为 1.6%,穴距合格率为 93.3%,穴距变异系数为 18.3%,将该组合下转速和出种孔长度所处水平与前文交互作用对小麦播种合格率影响规律的分析结果对比可知,两者基本吻合,说明通过响应面图分析的趋势正确。

根据最优参数组合进行台架试验,试验重复 3 次取平均值,得到播种水稻时,在转速为 45 r/min、倾斜角度为 3°、出种孔长度为 9 mm 情况下的合格率为 78.2%,重播率为 3.7%,空穴率为 1.0%,穴距合格率为 97.9%,穴距变异系数为 16.2%;播种小麦时,在转速为 60 r/min、倾斜角度为 1°、出种孔长度为 9 mm,此组合下的合格率为 93.4%,重播率为

3.4%,空穴率为 3.2%,穴距合格率为 93.6%,穴距变异系数为 25.5%。试验结果与理论结果基本一致。根据相关标准^[17-19]可知,该排种器在最优参数条件下播种水稻和小麦时,合格率均大于 75%,重播率均小于 25%,空穴率均小于 5%,穴距合格率均大于 80%,穴距变异系数均小于 40%,满足水稻和小麦播种的农艺要求。

3 讨 论

为解决稻麦轮作区机械化生产的技术难题,本研究设计了一种稻麦两用螺旋舀种式排种器,并确定了该排种器关键部件的参数。按照响应面试验设计方案,对该排种器进行台架试验,试验结果表明,该排种器在一定参数组合下能满足水稻和小麦播种的农艺要求,对试验结果进行回归分析,分别得到该排种器播种水稻和小麦各试验指标的回归模型。分析了各因素对播种合格率的影响规律,也分析了因素交互作用对播种合格率的影响规律。利用 Design-Expert 软件进行数据分析,建立了播种水稻和小麦的数学模型,得出最优参数组合为:播种水稻时的最优组合为转速为 45 r/min、倾斜角度为 3°、出种孔长度为 9 mm,此组合下的合格率为 81.3%,重播率为 2.8%,空穴率为 2.5%,穴距合格率为 94.8%,穴距变异系数为 17.4%,将该组合下各因素水平与前文交互作用对水稻播种合格率影响规律的分析结果对比可知,两者基本吻合,说明通过响应面图分析的趋势正确。播种小麦时的最优组合转速为 60 r/min、倾斜角度 1°、出种孔长度 9 mm,此组合下的合格率为 98.2%,重播率为 0.2%,空穴率为 1.6%,穴距合格率为 93.3%,穴距变异系数为 18.3%,将该组合下转速和出种孔长度所处水平与前文交互作用对小麦播种合格率影响规律的分析结果对比可知,两者亦基本吻合。

进行验证性试验得到此最优参数组合下的各项指标分别为:播种水稻时的合格率为 78.2%,重播率为 3.7%,空穴率为 1.0%,穴距合格率为 97.9%,穴距变异系数为 16.2%。播种小麦时的合格率为 93.4%,重播率为 3.4%,空穴率为 3.2%,穴距合格率为 93.6%,穴距变异系数为 25.5%。试验结果与理论结果基本一致,可以满足水稻和小麦播种的农艺要求。

本研究可满足水稻和小麦兼用播种的农艺要求,但因水稻流动性不强,其播种水稻时的合格率仍有较大提升空间,有待后续进一步改善。同时,可开展排种器的投种过程研究,以改进排种管结构。

参考文献 References

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴—2019[DB/OL]. [2019-12-07]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2019/indexch.htm>. State Statistical Bureau. China Statistical Yearbook-2019 [DB/OL]. [2019-12-07]. <http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/2019/indexch.htm> (in Chinese).
- [2] 廖庆喜, 杨波, 李旭, 等. 内充气吹式油菜精量排种器气室流场仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 51-54. LIAO Q X, YANG B, LI X, et al. Simulation and experiment of inside-filling air-blow precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2012, 43(4): 51-54 (in Chinese with English abstract).
- [3] 邢鹤琛, 廖庆喜, 王磊, 等. 油麦兼用斜锥型孔轮式集排器设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(5): 143-151. XING H C, LIAO Q X, WANG L, et al. Design and test of oblique taper hole-type wheel centralized-metering device for rapeseed and wheat[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(5): 143-151 (in Chinese with English abstract).
- [4] 丛锦玲. 油菜小麦兼用型气力式精量排种系统及其机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014. CONG J L. Study on seeding system and mechanism of pneumatic precision metering device for wheat & rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [5] 颜秋艳. 一器双行气力式油麦兼用型排种器设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014. YAN Q Y. Design and experiment study on dual-purpose rape-wheat pneumatic meter device[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014 (in Chinese with English abstract).
- [6] LEI X L, LIAO Y T, LIAO Q X. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers and electronics in agriculture, 2016, 131: 29-39.
- [7] 雷小龙, 廖宜涛, 李兆东, 等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 10-18. LEI X L, LIAO Y L, LI Z D, et al. Design and experiment of seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2015, 31(20): 10-18 (in Chinese with English abstract).
- [8] 李伟. 多功能免耕施肥播种机的设计与试验研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010. LI W. Design and experimental research on multifunctional no-till fertilizer drill[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010 (in Chinese with English abstract).
- [9] 徐高明. 稻麦施肥播种机的设计与试验研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015. XU G M. Design and experimental research on rice and wheat seeding machine[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [10] 初尔庄, 周凤林. 一种多功能排种器—弹性材料转动盘摩擦式排种器[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2005(4): 61-63. CHU E Z, ZHOU F L. A multi-function device-elasticity-material turning disc friction seeding apparatus[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (natural science edition), 2005(4): 61-63 (in Chinese with English abstract).
- [11] 金梅, 梁苏宁, 张文毅, 等. 多功能施肥播种机的研发[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(1): 4-6. JIN M, LIANG S N, ZHANG W Y, et al. Development of multi-function fertilizing seeder[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2015, 36(1): 4-6 (in Chinese with English abstract).
- [12] YAZGI A, DEGIRMENCIOGIU 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.
- [13] 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 X W, JIANG E C, WANG Z M, et al. Precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2008, 24(12): 52-56 (in Chinese with English abstract).
- [14] 丛锦玲, 余佳佳, 曹秀英, 等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 46-52. CONG J L, YU J J, CAO X Y, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2014, 45(1): 46-52 (in Chinese with English abstract).
- [15] 中国农业机械科学研究所. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 358. China Academy of Agricultural Mechanization Sciences. Handbook of agricultural machinery design[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007.
- [16] 翟建波, 夏俊芳, 周俊华, 等. 气力式水稻芽种精量旱直播机的设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2017, 36(1): 110-116. ZHAI J B, XIA J F, ZHOU J H, et al. Design and field trials of pneumatic precision drilling planter of rice budded seed in dry land[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36(1): 110-116 (in Chinese with English abstract).
- [17] 中华人民共和国农业部. 铺膜穴播机作业质量: NY/T 987—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Operation quality of film laying hole seeder: NY/T 987—2006[S]. Beijing: China Standard Press, 2006 (in Chinese).

- [18] 北京市质量技术监督局.蔬菜穴播播种机技术条件:DB11/T 459—2007[S].Beijing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. Technical specifications of vegetable hole planter:DB11/T 459—2007[S].Beijing:China Standard Press, 2007(in Chinese).
- [19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会.单粒(精密)播种机试验方法:GB/T 6973—2005 [S].General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China & China National Standardization Administration. Test method for single seed (precision) seeder:GB/T 6973—2005[S]. Beijing:China Standard Press,2005(in Chinese).

Seeding performance of seed metering device with spiral tube scooping for rice and wheat

MEI Zhixiong, XIA Junfang, ZHANG Jumin, DU Jun, YANG Quanjun,
HU Mengjie, LUO Shuangcheng, LIU Zhengyuan, LI Zhiyi

College of Engineering/Ministry of Agriculture and Rural Affair Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract A seed metering device with spiral tube scooping for rice and wheat was designed to improve the utilization rate of planting equipment in the middle and lower reaches of the Yangtze River and realize the dual-purpose sowing of rice and wheat. The seed metering device uses a spiral seed-scoop tube assembly to take a certain amount of seeds. The structural parameters of the key components of the seed metering device are determined. The Design-Expert software was used to analyze data and obtain the optimal parameter combination. The response surface test plan was adopted to carry out the bench verification test. The theoretical results showed that the qualified rate, the reseeding rate, the no seeding rate, the qualified rate of hole distance and the variation coefficient of hole distance was 81.3%, 2.8%, 2.5%, 94.8% and 17.4% when the rice was sown on the 45 r/min rotational speed, 3° inclination angle and 9 mm the length of seeding out hole. The qualified rate, the reseeding rate, the no seeding rate, the qualified rate of hole distance, and the variation coefficient of hole distance was 98.2%, 0.2%, 1.6%, 93.3% and 18.3% when sowing wheat on the 60 r/min rotational speed, 1° inclination angle and 9 mm length of seeding out hole. The results of bench test showed that the seeding device can meet the agronomic requirements of rice and wheat sowing under certain conditions. The qualified rate, the reseeding rate, the no seeding rate, the qualified rate of hole distance, and the variation coefficient of hole distance was 78.2%, 3.7%, 1.0%, 97.9%, and 16.2% when sowing rice on 45 r/min rotational speed, 3° inclination angle and 9 mm length of seeding out hole. The qualified rate, the reseeding rate, the no seeding rate, the qualified rate of hole distance and the variation coefficient of hole distance was 93.4%, 3.4%, 3.2%, 93.6%, and 25.5% when sowing wheat on 60 r/min rotational speed, 1° inclination angle and 9 mm length of seeding out hole. The test results are basically consistent with the theoretical results obtained from software analyses. It will provide a reference for the designing rice and wheat dual-use planters.

Keywords farm machinery; seeder; dual purpose seed-metering device; scoop seed type; spiral tube; rice-wheat dual-purpose

(责任编辑:陆文昌)