

引用格式:

周中林, 戴逸群, 邱旺聪, 胡洪基, 陶有凤, 秦琴, 雷小龙, 任万军. 沟插垄播式杂交稻制种机开沟装置的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(3): 355–362.

ZHOU Z L, DAI Y Q, QIU W C, HU H J, TAO Y F, QIN Q, LEI X L, REN W J. Design and experiment of a ditching device on the transplanting in ditch and seeding in ridge hybrid rice breeding machine[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(3): 355–362.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 沟插垄播式杂交稻制种机开沟装置的设计与试验

周中林<sup>1</sup>, 戴逸群<sup>1</sup>, 邱旺聪<sup>1</sup>, 胡洪基<sup>1</sup>, 陶有凤<sup>2</sup>, 秦琴<sup>2</sup>, 雷小龙<sup>1,2\*</sup>, 任万军<sup>2</sup>

(1.四川农业大学机电学院, 四川 雅安 625014; 2.作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 四川 成都 611130)

**摘要:**为实现杂交稻制种“沟底机插父本+垄台直播母本”种植模式下父本浅水、母本湿润的水管理目标,根据2ZD-2.4型沟插垄播式杂交稻制种机设计了一种开沟装置。该装置由种沟开沟器、蓄水沟开沟器、插秧沟开沟器和浮板组成,由浮板带动开沟器同步开出所需沟型。采用三因素三水平正交试验分析开沟器起土角角度、元线角角度和挤压成型面长度对回土率和沟深稳定系数的影响,并进行多目标寻优,获取开沟器最佳参数组合。结果表明:当开沟器起土角为5°、开沟器元线角为65°、挤压成型面长度为140 mm时,种沟开沟器的回土率和沟深稳定系数分别为10.99%和8.34%,可实现种沟、插秧沟和蓄水沟同步作业。田间试验结果表明,插秧开沟深度为50 mm时,插秧深度为22.8 mm,漏插率和漂秧率均低于2.0%,母本出苗率达87.67%,可满足杂交稻制种种植农艺要求。

**关键词:** 杂交稻; 制种机; 沟插垄播方式; 舰型开沟器; 设计

中图分类号: S222.5<sup>+</sup>2

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)03-0355-08

## Design and experiment of a ditching device on the transplanting in ditch and seeding in ridge hybrid rice breeding machine

ZHOU Zhonglin<sup>1</sup>, DAI Yiqun<sup>1</sup>, QIU Wangcong<sup>1</sup>, HU Hongji<sup>1</sup>,  
TAO Youfeng<sup>2</sup>, QIN Qin<sup>2</sup>, LEI Xiaolong<sup>1,2\*</sup>, REN Wanjun<sup>2</sup>

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China; 2.Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu, Sichuan 611130, China)

**Abstract:** In order to realize water management target of male parent in shallow water and female parent wetted under the planting mode of “mechanical transplanting of male parent at the bottom of ditch + direct-seeding of female parent on ridge platform”, a ditching device was designed for 2ZD-2.4 type transplanting in ditch and seeding in ridge hybrid rice breeding machine, which was composed of seed ditch opener, water storage ditch opener, rice transplanting ditch opener and floating plate. The floating plate drives the ditch opener to open the required groove synchronously. Through the mechanical analysis, the effects of the soil angle, element line angle of ditching device and length of extrusion molding surface on the ditching performance were investigated using three factors and three levels orthogonal test. The multi-objective optimization was conducted to obtain the optimal parameter combination of the ditch opener. The results indicated that when the soil angle of 5°, the element line angle of 65°, and the length of the extrusion molding surface of 140mm, the soil reflux rate of sowing ditch and the stability coefficient of ditching depth were 10.99% and 8.34%, respectively. The sowing ditch, water storage ditch and seedling transplanting ditch were accomplished simultaneously

收稿日期: 2021-03-05

修回日期: 2022-01-06

基金项目: 四川省农业农村厅创新团队项目(sccxtd-2021-01); 四川省科学技术厅项目(2016NYZ0051); 科学技术部重点研发计划(2018YF D0301204)

作者简介: 周中林(1994—), 男, 四川眉山人, 硕士研究生, 主要从事杂交稻制种种植机械装备技术与农艺研究, xiaozhou0116@163.com;

\*通信作者, 雷小龙, 博士, 副教授, 主要从事水稻种植技术与装备研究, leixl1989@163.com

through ditching device. Field experiment results showed that both the leakage rate and dumping rate were lower than 2.0% and germination rate of female parent was 87.67% when the depth of transplanting ditch was 50 mm and the depth of transplanting was 22.8 mm, which can meet the agronomic requirements of hybrid rice seed production and planting.

**Keywords:** hybrid rice; seed breeding machine; method of transplanting in ditch and seeding in ridge; ship-type ditching device; design

杂交稻制种种植机械化率低,人工成本逐年增加,制约了杂交稻种业的发展。杂交稻制种种植机械化<sup>[1-3]</sup>主要采取2种方式:一种是父本和母本分别机插;另一种是父本机插和母本直播同时进行,一次性完成父、母本种植作业,父、母本行比可选,行距可调,这种方式省工省时,可提高制种效率,降低制种成本<sup>[4-6]</sup>。第2种方式,由于机插秧和直播对水分需求不同,开沟装置成为实现父本浅水、母本湿润和父、母本种植同步作业的关键部件。

对于开沟装置的研究<sup>[7-11]</sup>多集中于旱地开沟装置,针对稻田开沟装置的研究较少。罗锡文等<sup>[12-13]</sup>根据“精量穴播”“开沟起垄”“垄畦栽培”的技术思路,设计了水稻精量穴直播机同步开沟起垄装置,实现直播水稻成行成穴齐苗生长。曾山等<sup>[14]</sup>根据2BDH-8型水稻精量旱穴直播机研制了一种同步开沟起垄施肥水稻精量旱穴直播机,通过开沟装置实现肥料定量、定位和均匀地施埋在肥沟内。刘晓鹏等<sup>[15]</sup>、张青松等<sup>[16]</sup>研制了一种组合式船型畦开沟器,实现了开厢沟和平土整形功能,沟宽、沟深稳定性系数均达90%以上,有利于雨水排出。赵淑红等<sup>[17]</sup>采用仿生原理设计出一种仿旗鱼头部曲线型滑推式开沟器,降低开沟器对土壤的扰动,有效提高了开沟后播种的均匀性。

为满足杂交稻“沟底机插父本+垄台直播母本”制种的种植模式,父本机插移栽期浅水、母本直播幼苗期湿润的水分管理要求,笔者设计了一种适用于父本沟插和母本垄播的开沟装置,开沟器采用舰形设计,确定了开沟器的主要结构参数,并开展开沟性能的路面试验和田间试验,以为杂交稻制种机开沟装置的完善提供参考。

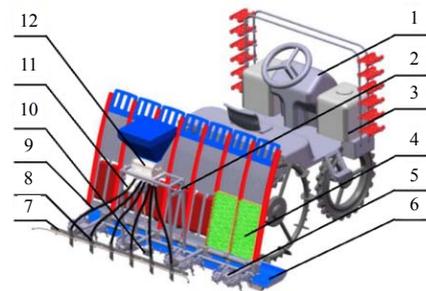
## 1 沟插垄播式杂交稻制种机的结构与工作原理

沟插垄播式杂交稻制种的种植模式采用“沟底机插父本+垄台直播母本”方式,父本秧苗机插于插秧沟的沟底,母本直播于垄台上的种沟内,蓄水沟

和插秧沟均灌水但不上垄台。这种种植模式需开好种沟、蓄水沟和插秧沟,从而保证插秧沟和蓄水沟的灌水以及种沟的湿润,满足同步机插与直播的水分管理要求。根据杂交稻制种要求,采用父本、母本行比4:12设计,左侧6行蓄水沟与6行种沟交替,等距间隔300 mm,蓄水沟与种沟间隔125 mm。为适应后续植保和机收作业需要,种沟与插秧沟间隔400 mm,右侧2行插秧沟之间间隔300 mm。

### 1.1 结构

沟插垄播式杂交稻制种机包括动力系统、机架、传动系统、沟插垄播开沟装置与精量成穴排种装置等(图1),机具幅宽2400 mm,父母本行数分别为2行和6行、行距分别为300 mm和250 mm,穴距可调。精量成穴排种装置可实现制种母本稻种均匀成穴播于垄台种沟内;沟插垄播开沟装置同步完成蓄水沟、种沟和插秧沟的开沟。



1 插秧机头; 2 药箱; 3 父本秧苗; 4 栽植机构; 5 沟插垄播开沟装置; 6 机架; 7 排种装置; 8 变速装置; 9 导种管; 10 直角换向器; 11 投种口; 12 植保喷雾装置。

图1 沟插垄播式杂交稻制种机的结构

Fig.1 Structure of the transplanting in ditch and seeding in ridge hybrid rice breeding machine

### 1.2 工作原理

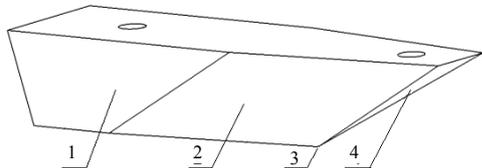
沟插垄播式杂交稻制种机工作时,高速插秧机底盘驱动栽植机构工作,插秧台带动沟插垄播开沟装置随田面高低变化自动调节高度;插秧沟开沟器、蓄水沟开沟器和种沟开沟器分别开出插秧沟、蓄水沟和种沟;父本秧苗由插秧机秧爪栽植在插秧沟内,通过秧爪传动轴驱动直角换向器,经过变速

装置带动精量穴排种器工作，母本稻种通过精量穴排种器进入导种管，通过导种管牵引作用落入种沟沟底。后方植保装置进行封闭除草作业，实现仿形平整地、开沟、母本直播、父本插秧及封闭除草同步作业。

## 2 沟插垄播开沟装置的设计

沟插垄播开沟装置主要由蓄水沟开沟器、种沟开沟器、插秧沟开沟器与仿形浮板等组成。为满足开沟要求，蓄水沟、种沟和插秧沟的开沟器均设计为舰形开沟器，各开沟器安装于仿形浮板正下方，依靠其重力平整厢面，仿形浮板的前端设计成圆弧形，同时结合插秧台的仿形功能，以保证仿形平地效果。

为减小阻力，开沟器采用舰形设计，如图 2 所示。以种沟开沟器为例，舰形开沟器与土壤的相互作用可分为入土切削、挤压成型和二次整形 3 个过程：首先与土壤接触的刃口面采用等腰倒三角形斜面设计，减小土壤对开沟器的阻力；其次接触土壤的挤压成型面利用光滑斜面逐步入土和挤压成型，能有效避免杂草缠绕和土壤黏附；最后对沟型进行二次整形与平整，防止沟壁土壤回流。



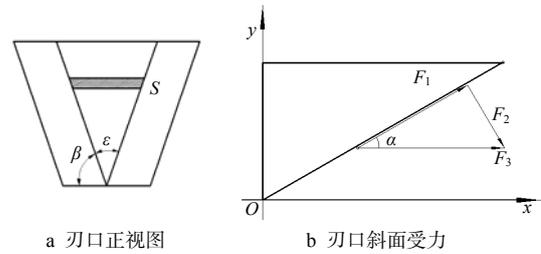
1 二次整形面；2 挤压成型面；3 刃口；4 刃口面。

图2 种沟开沟器的结构

Fig.2 Structure of the seed ditch opener

### 2.1 开沟器刃口的设计

开沟器刃口是降低土壤阻力的重要部分，根据水稻机械化播栽农艺要求，水稻栽插深度为 20~40 mm<sup>[18]</sup>，通过多品种投种试验，根据穴径取种沟开沟宽 30 mm。据土壤坚实度曲线及其压缩性可知，开沟深度 0~100 mm 为土壤弹性与塑性变形阶段，超过 100 mm 将会出现压力增大而变形急剧增加<sup>[19]</sup>。选取刃口斜面上任意一点的土粒质点建立坐标系，x 方向为开沟器作业时前进方向，y 方向为开沟器所受压力方向，如图 3 所示。



a 刃口正视图

b 刃口斜面受力

$\epsilon$  为开沟器刃口锥角； $S$  为开沟器刃口与土壤在任一高度所接触的面积； $\beta$  为开沟器元线角； $OA$  为开沟器刃口； $\alpha$  为开沟器刃口倾角。

图3 开沟器刃口斜面的受力

Fig.3 Mechanical analysis of cutting edge for ditching device

假设斜面对土粒质点的合力为  $F_3$ ，则有：

$$F_1 = F_3 \times \cos \alpha; F_2 = F_3 \times \sin \alpha \quad (1)$$

式中： $\alpha$  为开沟器刃口倾角； $F_1$  为土粒质点在  $xOy$  平面所受切应力； $F_2$  为土粒质点在  $xOy$  平面所受正应力。

由式(1)可知，刃口倾角  $\alpha$  决定了开沟器刃口  $OA$  的形状和阻力，且开沟深度与土壤对刃口压力相关。取开沟器刃口任一高度  $h$  与土壤所接触的面积  $S$ ，根据土壤坚实度曲线，所受压强  $P_1$  随土壤深度增大而增大，其在  $S$  面所受合力  $F_3 = P_1 \cdot S$ 。在开沟深度为 0~100 mm 的土层内，平均坚实度  $P_2$  的公式如下：

$$P_2 = \frac{\int_0^h f(h) \cdot dh}{h} \quad (2)$$

式中： $f(h) \cdot dh$  为坚实度曲线与  $oh$  轴围成的微分面积； $\int_0^h f(h) \cdot dh$  为  $0 \sim h$  深度范围内坚实度曲线与  $oh$  轴围成的面积。

由此可知，舰型开沟器以刃口为等腰倒三角形斜面， $S$  随深度增加而减小，土壤平均坚实度随深度增大而增大，同时刃口倾角  $\alpha$  决定  $F_3$  大小。

在  $h < 100$  mm 的范围内，以  $h$  为自变量，对图 3 进行动力学分析，可得：在  $0 < h < 60$  mm 时开沟器任一高度面积  $S$  所受合力  $F_3$  满足式(3)。

$$\begin{cases} F_3 = (-kh + b)S, k > 0 \\ S = \frac{2 \tan \frac{\pi - 2\beta}{2}}{\sin \alpha} \cdot h^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中： $b$  为刃口纵向截距。开沟器在  $h < 30$  mm 时的压力随深度增大而逐渐增大，当  $h > 30$  mm 时压力开始减小。在  $60 < h < 100$  mm，土壤逐渐不产生塑性变形， $h$  增大使开沟器底部面积增大，压强不变的情况下导致底部压力急剧增大，容易使刃口底部发生断裂或变形，由于  $\alpha$  越小，开沟器刃口所受正

应力越小,由式(3)可知,  $\tan \frac{\varepsilon}{2} / \sin \alpha < 1$ , 则  $\alpha$  取整刃口倾角为  $30^\circ$ 。

### 2.2 开沟器挤压成型面的设计

沟型呈“倒八字”形有利于后期沟内土壤回土,且最理想沟型状态为随着水稻出苗和生长而慢慢覆盖平整<sup>[12,18]</sup>。舰形开沟器的挤压成型面采用光滑平行四边形斜面设计(图4),避免挤压成型面依附土壤产生壅泥现象。

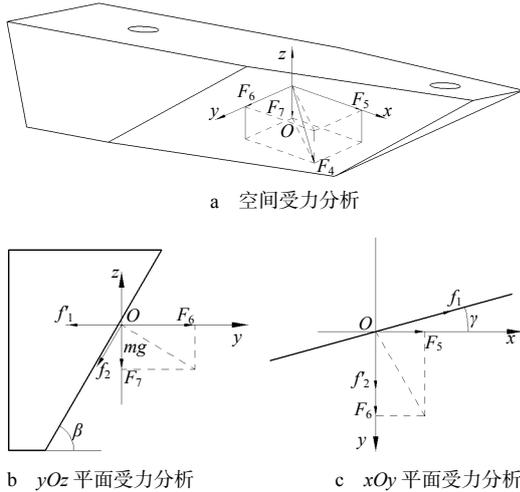


图4 开沟器挤压成型面的受力  
 $F_4$ 为整形平面对土粒质点压力的合力; $F_5$ 为土粒质点所受在x方向上的分力; $F_6$ 为土粒质点所受在y方向上的分力; $F_7$ 为土粒质点所受在z方向上的分力; $G$ 为土粒质点重力; $f_1$ 为 $f_i$ 在y方向上的摩擦分力; $f_2$ 为土粒质点在yz平面所受的摩擦力; $\beta$ 为开沟器在整形平面上的元线角; $f_2$ 为 $f_2$ 在y方向上的摩擦分力; $f_1$ 为土粒质点在xy平面所受的摩擦力; $\gamma$ 为开沟器在挤压成型面前方的起土角。

Fig.4 Mechanical analysis of extrusion surface on ditch opener

舰形开沟器对土壤的挤压与整形主要受土壤接触的挤压成型面影响。选取整形平面上任意一点的土粒质点O,建立空间坐标系(图4-a)。设x方向为开沟器作业时前进方向,速度为v,整形平面对土粒质点的压力为 $F_4$ 。

则土粒质点所受分力与总压力的关系为:

$$\begin{cases} F_4 = \sqrt{F_5^2 + F_6^2 + F_7^2} \\ F_5 = F_6 \cdot \tan \gamma \\ F_7 = F_6 \cdot \cot \beta \end{cases} \quad (4)$$

土粒质点在x、y方向上的加速度为:

$$\begin{cases} a_x = \frac{F_4(\tan \rho + \tan \gamma)}{m\sqrt{1 + \cot^2 \beta + \tan^2 \gamma}} \\ a_y = \frac{F_4[1 + \tan \rho(\cot \beta - \tan \gamma)]}{m\sqrt{1 + \cot^2 \beta + \tan^2 \gamma}} \\ a_{xy} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $m$  为土粒质点质量。

分析式(5)可知,起土角 $\gamma$ 、元线角 $\beta$ 和挤压成型斜面长度是影响前进阻力和挤压成型面挤压效果的主要因素。当元线角 $\beta < 90^\circ - \rho$ ,起土角 $\gamma$ 越小, $a_y$ 越大, $a_x$ 越小,对土壤侧向挤压力越大,挤压成型面对土壤的挤压效果越好,前进阻力越小。当 $\beta$ 过小时,当土粒沿挤压成型面运动时,挤压成型斜面越长,前进速度v越小;因此,控制土粒所受正向应力小于切向应力,即 $a_x < a_y$ 。从安装位置考虑,开沟器挤压成型斜面长度最大值为150mm时,则起土角 $\gamma$ 为 $5^\circ$ ;挤压成型斜面长度最小值为50mm时,则起土角为 $10^\circ$ 。根据《农业机械设计手册》<sup>[20]</sup>黏性土壤颗粒的应力分析,选取土壤摩擦角 $\rho$ 为 $25^\circ$ ,则元线角 $\beta$ 为 $65^\circ$ 。

### 3 沟插垄播开沟装置的路面试验

试验在四川农业大学雅安教学科研园区进行。以洋马VP8D高速插秧机为平台,试验装置为自主设计的沟插垄播开沟装置。试验田块前茬为水稻,土壤类型为重壤土,机具前进速度0.95m/s,土壤含水率(1~200mm)为60.91%,土壤坚实度(1~200mm)为0.96kPa,茬高为215.9mm。

#### 3.1 三因素正交试验

为优化开沟器结构参数,采用二次旋转正交组合试验(表1),确定影响开沟性能试验因素为开沟器起土角角度 $X_1$ 、开沟器元线角角度 $X_2$ 和开沟器挤压成型面长度 $X_3$ 。

表1 二次旋转正交组合试验因素及水平

Table 1 Quadrature rotation combination coding for test factors			
编码水平	$X_1/^\circ$	$X_2/^\circ$	$X_3/\text{mm}$
+1	10.0	65	150
0	7.5	60	125
-1	5.0	55	100
$\Delta i$	2.5	5	25

根据NY/T 740—2003田间开沟机械作业质量的试验方法<sup>[25]</sup>,选取回土率和沟深稳定系数为开沟装置路面试验性能评价指标。试验中取作业长度30m为测量区域,沿前进方向每隔6m测定开沟沟型截面、沟宽、沟深。重复3次<sup>[21]</sup>。

沟型参数采用自制沟型测绘装置进行测定,测距仪为SW-50G激光测距仪(东莞市森威电子有限公司)。将测绘支架横架于沟型之上并保持支架与开

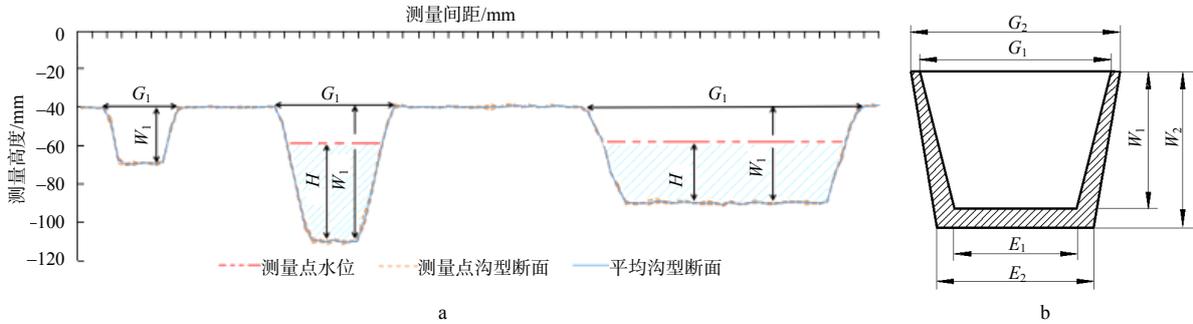
沟方向垂直，利用水平尺调节两端高度，使支架保持水平；将激光测距仪安装在支架滑块上，按照滑轨上的刻度尺从左往右依次每隔 5 mm 读取 1 次数据；拟合得到开沟沟型断面如图 5-a 所示，并根据沟型断面计算出所对应开沟的回土率  $Y_1$ 、沟深稳定系数  $Y_2$ ，如图 5-b 所示。

$$Y_1 = \frac{S_1}{S_2} \times 100\% \quad (6)$$

式中： $S_1$  为回土截面面积； $S_2$  为理论开沟截面面积。

$$Y_2 = \frac{(W_2 - W_1)}{W_2} \times 100\% \quad (7)$$

式中： $W_2$  为理论开沟深度； $W_1$  为测量开沟深度。



a 沟型拟合断面；b 开沟断面； $W_1$  测量开沟深度； $W_2$  理论开沟深度； $G_1$  测量开沟上宽度； $G_2$  理论开沟上宽度； $H$  测量点水位深度； $E_1$  测量开沟下宽度； $E_2$  理论开沟下宽度。

图5 沟插垄播沟型断面

Fig.5 Cross-sectional furrow for transplanting in ditch and seeding in ridge

### 3.2 回归模型建立与显著性检验

正交试验的回土率和沟深稳定系数列于表 2。

表 2 正交试验的回土率和沟深稳定系数

Table 2 Soil reflux rate and stability coefficient of ditching depth test by orthogonal experimental

试验号	$X_1/(^\circ)$	$X_2/(^\circ)$	$X_3/\text{mm}$	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
1	10.0	60	150	7.08	21.15
2	7.5	60	125	13.39	14.89
3	7.5	65	100	12.50	8.96
4	7.5	60	125	15.02	10.61
5	7.5	60	125	15.14	17.86
6	10.0	55	125	16.55	10.29
7	5.0	65	125	10.47	8.00
8	5.0	60	150	10.56	8.62
9	7.5	65	150	9.84	17.86
10	7.5	55	100	19.60	7.35
11	5.0	55	125	14.38	10.67
12	10.0	60	100	19.81	12.50
13	7.5	60	125	14.80	16.67
14	7.5	60	125	13.25	14.29
15	7.5	55	150	12.05	9.96
16	5.0	60	100	13.51	7.35
17	10.0	65	125	11.56	23.22

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行二次回归分析，并进行多元回归拟合，得到二次多项式回归模型。

$$Y_1 = 14.32 + 0.76X_1 - 2.28X_2 - 3.24X_3 - 0.27X_1X_2 - 2.45X_1X_3 + 1.22X_2X_3 - 0.92X_1^2 - 0.16X_2^2 - 0.66X_3^2$$

$$Y_2 = 14.86 + 4.07X_1 + 2.47X_2 + 2.68X_3 + 3.90X_1X_2 + 1.85X_1X_3 + 1.57X_2X_3 - 0.22X_1^2 - 0.16X_2^2 - 2.24X_3^2 \quad (8)$$

从方差分析结果(表 3)可知，回归模型的  $P$  值均小于 0.01，表明回归模型高度显著；模型失拟项的  $P > 0.05$ ，其  $R^2$  值分别为 0.95、0.91，说明模型失拟性不显著，回归模型可以拟合 91% 以上的试验结果，拟合程度高；因此，该模型可以优化开沟器的工作参数。

表 3 回土率与沟深稳定系数二次多项式模型的方差分析结果

Table 3 Variance analysis of soil reflux rate and stability coefficient of ditching depth simulated by quadratic polynomial model

变异来源	平方和		均方		F 值		P 值	
	回土率	沟深稳定系数	回土率	沟深稳定系数	回土率	沟深稳定系数	回土率	沟深稳定系数
模型	165.98	357.05	18.44	39.67	17.96	8.66	0.000 5**	0.004 7**
$X_1$	4.62	132.19	4.62	132.19	4.50	28.86	0.071 6	0.001 **
$X_2$	41.45	48.86	41.45	48.86	40.37	10.67	0.000 4**	0.013 7*
$X_3$	83.79	57.41	83.79	57.41	81.60	12.53	<0.000 1**	0.009 5**

表 3(续)

变异来源	平方和		均方		F 值		P 值	
	回土率	沟深稳定系数	回土率	沟深稳定系数	回土率	沟深稳定系数	回土率	沟深稳定系数
$X_1^2$	3.55	0.21	3.55	0.21	3.460	0.05	0.105 1	0.836 6
$X_2^2$	0.11	10.72	0.11	10.72	0.11	2.34	0.753 6	0.169 9
$X_3^2$	1.84	21.05	1.84	21.05	1.79	4.60	0.222 4	0.069 3
$X_1X_2$	0.29	60.84	0.29	60.84	0.28	13.28	0.610 6	0.008 2**
$X_1X_3$	23.91	13.62	23.91	13.62	23.29	2.97	0.001 9**	0.128 3
$X_2X_3$	5.98	9.89	5.98	9.89	5.82	2.16	0.046 6*	0.185 1
残差	7.19	32.06	1.03	4.58				
失拟项	3.79	1.39	1.26	0.46	1.48	0.061	0.346 5	0.977 9
误差	3.40	30.66	0.85	7.67				
总和	173.17	389.11						

\*\*表示该项极显著( $P < 0.01$ ); \*表示该项显著( $P < 0.05$ )。

### 3.3 交互因素对开沟器开沟性能的影响

方差分析结果表明,开沟器起土角角度与挤压成型面长度的交互作用、开沟器元线角与挤压成型

面长度的交互作用对回土率的影响显著;开沟器起土角角度与元线角角度的交互作用对沟深稳定系数的影响显著。各因素交互效应响应曲面如图 6 所示。

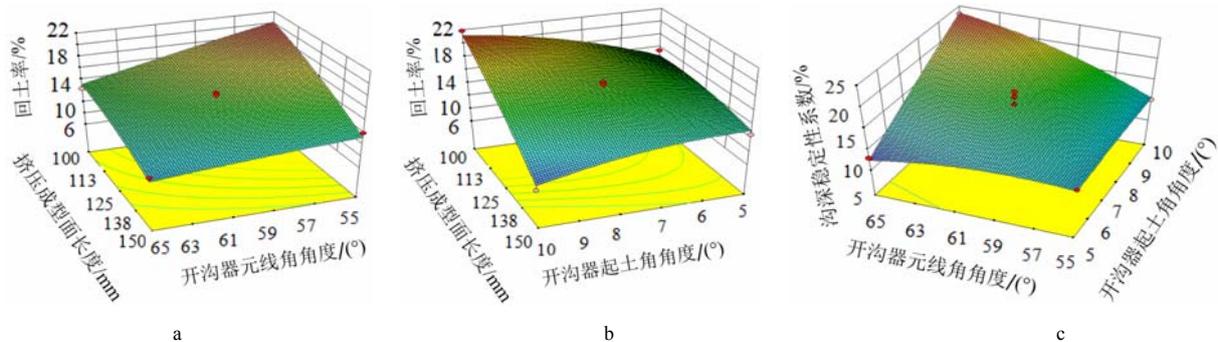


图6 三因素交互作用下的回土率和沟深稳定系数

Fig.6 Soil reflux rate and stability coefficient of ditching depth under the interaction of three factors

当开沟器元线角角度为  $60^\circ$  时,开沟器回土率随挤压成型面长度的减小快速增加,随开沟器起土角角度的增加逐步增加,当起土角为  $8.58^\circ$  后逐步减小。响应曲面沿挤压成型面长度变化比沿开沟器起土角角度变化更快,基于交互效应分析可知,挤压成型面长度比开沟器起土角角度的影响更大(图 6-a)。当开沟器起土角角度为  $7.5^\circ$  时,随挤压成型面长度的减小,开沟回土率随挤压成型面长度的减小而增加,随开沟器元线角角度的增加而减小,响应曲面沿挤压成型面长度变化比沿开沟器元线角变化更快。基于交互效应分析可知,挤压成型面长度比开沟器元线角角度的影响更大(图 6-b)。

当挤压成型面长度为  $125\text{ mm}$  时,随着开沟器元线角角度的增加,沟深稳定系数逐步增加,当开沟器元线角  $58.48^\circ$  后逐步减小;开沟器起土角逐渐增加时,沟深稳定系数逐渐降低,响应曲面沿开沟器刃口倾角变化比沿开沟器挤压面倾角方向变化更

快。基于交互效应分析可知,开沟器刃口倾角对沟深稳定系数的影响比开沟器挤压面倾角的影响更大(图 6-c)。

### 3.4 参数优化及性能验证

利用 Design-Expert 8.0.6 进行优化求解回土率与沟深稳定系数的回归模型,其目标函数与约束条件为  $Y_1, Y_2$  取最小值,  $X_1, X_2, X_3$  均在  $[-1, 1]$  范围内。优化结果为:开沟器起土角角度为  $5^\circ$ 、开沟器元线角角度为  $65^\circ$ 、挤压成型面长度为  $138.97\text{ mm}$ ,此时回土率为  $10.50\%$ 、沟深稳定系数为  $8.19\%$ 。为便于加工,挤压成型面长度取  $140\text{ mm}$ 。

2020年5月20日在四川农业大学崇州现代研发基地进行验证试验。试验田前茬为油菜,在优化参数条件下,机具前进速度为  $0.95\text{ m/s}$ ,含水率  $59.48\%$ ,试验重复 3 次,结果取均值。结果种沟开沟器回土率和沟深稳定系数分别为  $10.99\%$  和  $8.34\%$ 。测得蓄水沟开沟器的结构参数为起土角  $5^\circ$ 、元线角  $65^\circ$ 、挤压成型面长度为  $140\text{ mm}$  时,开沟深度、沟宽和开沟

坡角分别为 69.62 mm、80.18 mm 和 64.56°，回土率和沟深稳定系数分别为 10.54%和 8.08%，蓄水水位深度为 38 mm。插秧沟开沟器在起土角 5°、元线角 65°、挤压成型面长度 140 mm 时，开沟深度、沟宽和开沟坡角分别为 49.49 mm、201.36 mm 和 64.43°，回土率和沟深稳定系数分别为 10.43%和 8.39%，插秧沟水位深度为 27 mm。

#### 4 生产性能田间试验

以杂交稻宜香优 2115 组合(父本为雅恢 2115、母本为宜香 1A)为供试材料。洋马 VP8D 高速插秧机作为试验平台，搭载自主设计的沟插垄播开沟装置和水稻集排式精量穴排种器，进行田间试验。

##### 4.1 试验设计

采用最优参数的插秧沟开沟器(开沟器起土角 5°、开沟器元线角 65°、挤压成型面长度 133 mm)，在开沟深度分别为 30、50、70 mm 时进行田间试验。父本秧苗机插时叶龄平均为 3~3.5 叶，行穴距 300 mm×180 mm，平均苗数设定为 3~5 苗/穴。母本直播水沟和种沟深度分别为 70 mm 和 30 mm，母本宜香 1A 浸种 1 d，晾干后直播，穴粒数 10 粒，穴距

为 180 mm，水肥按制种要求管理。

试验后调查连续 20 穴父本移栽的穴苗数、漏插数、漂秧数、伤秧数、插秧深度和母本直播每穴粒数，播栽 7 d 后调查母本每穴出苗数，每隔 7 d 测父本秧苗茎蘖数。各处理重复 3 次。分析不同开沟深处理下父本秧苗的生长动态<sup>[22-23]</sup>。

##### 4.2 插秧沟深度对父母本播插质量的影响

3 种插秧开沟深度的父本栽插质量和母本直播出苗率见表 4。插秧开沟深度对穴苗数、漏插率、漂秧率、伤秧率、插秧深度和直播出苗率有显著影响，穴苗数、穴距和直播出苗率均随开沟深度的增加呈现增加的趋势，当开沟深度大于 50 mm 后逐步降低；伤秧率随开沟深度增加呈减少趋势，当开沟深度大于 50 mm 后，伤秧率逐步增大。漏插率和漂秧率均随开沟深度的增加而增加，插秧开沟深度为 50 mm 和 30 mm 时，漏插率和漂秧率差异不明显。插秧深度随开沟深度增加而减小，插秧开沟深度为 50 mm 时，插秧深度为 22.8 mm，且漏插率和漂秧率低于 2.0%，能满足母本对水分的需求，符合制种的农艺要求。

表 4 不同插秧沟深度下父母本秧苗的栽插质量

Table 4 The planting quality for male and female parents under different transplanting depth

开沟深度/mm	每穴平均苗数	漏插率/%	穴距/mm	漂秧率/%	伤秧率/%	平均插秧深度/mm	母本出苗率/%
70	3.62b	2.35a	184.50b	1.67a	2.33b	10.90c	86.38a
50	4.07a	1.27b	187.20a	0.00b	2.11c	22.80b	87.67a
30	3.77b	1.24b	185.00b	0.00b	2.48a	42.00a	70.72b
F	5.97*	8.16*	5.32*	35.06**	39.05**	208.82**	35.58**

同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)；“\*”“\*\*”“\*\*\*”分别表示该项显著(P<0.05)、极显著(P<0.01)。

##### 4.3 插秧沟深度对父本分蘖动态的影响

插秧开沟深度对父本茎蘖有显著影响，其中开沟深度为 50 mm 的平均茎蘖数比沟深 30 mm 和 70 mm 的分别高 14%和 8%。开沟深度为 50 mm 时即能提供父本分蘖期所需水分，如图 7 所示。

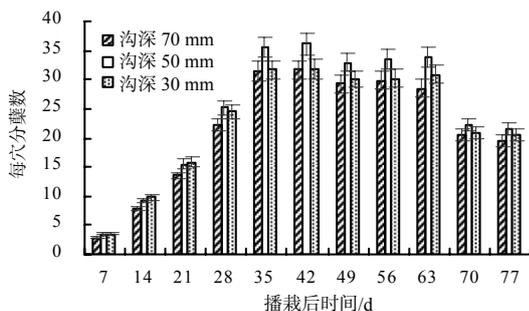


图7 不同插秧沟深度处理下的父本分蘖数

Fig.7 Tillers of male parent under different transplanting depth

## 5 结论

基于杂交稻制种植农艺要求，为适应“沟底机插父本+垄台直播母本”的制种植模式，设计了一种沟插垄播式开沟装置，实现种沟、蓄水沟和插秧沟同步作业。通过对关键部件开沟器的力学分析，确定了影响因素为开沟器起土角角度、开沟器元线角角度和挤压成型面长度。

采用三因素三水平正交试验设计，分析开沟器起土角角度、开沟器元线角角度和挤压成型面长度对回土率和沟深稳定系数的影响。路面试验结果表明，种沟开沟器起土角 5°、元线角 65°、挤压成型面长度 140 mm 时，回土率和沟深稳定系数分别为 10.99%和 8.34%，蓄水沟开沟器回土率和沟深稳定

系数分别为 10.54%和 8.08%，插秧沟开沟器回土率和沟深稳定系数分别为 10.43%和 8.39%。

田间试验结果表明：插秧开沟深度为 50 mm 时，插秧深度为 22.8 mm，漏插率和漂秧率均低于 2.0%，且母本出苗率达到 87.67%，能满足杂交稻制种机插父本浅水、直播母本湿润的水分管理要求。

#### 参考文献：

- [1] 王元伟. 全程机械化在杂交水稻制种中的应用及效益分析[J]. 现代农业科技, 2015(13): 73.
- [2] 刘爱民, 余雪晴, 王在满, 等. 杂交水稻母本机械穴直播制种技术试验总结[J]. 杂交水稻, 2013, 28(6): 21-23.
- [3] 刘爱民, 肖层林, 龙和平, 等. 杂交水稻全程机械化制种技术研究初步进展[J]. 杂交水稻, 2014, 29(2): 6-8.
- [4] 唐文帮, 张桂莲, 邓化冰. 杂交水稻机械化制种的技术探索与实践[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(2): 95-103.
- [5] 谭长乐, 王宝和, 薛良鹏, 等. 杂交水稻机械化制种现状与技术思路[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(6): 98-100.
- [6] 李建武, 邝翡婷, 李新奇, 等. 杂交水稻机械化制种研究综述[J]. 湖南农业科学, 2013(6): 39-40.
- [7] 王徐建, 宋建农, 刘彩玲, 等. 甘草倾斜移栽开沟器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 16-23.
- [8] 赵淑红, 刘宏俊, 张先民, 等. 滑推式开沟器设计与作业性能优化试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 26-34.
- [9] 贾洪雷, 郑嘉鑫, 袁洪方, 等. 仿形滑刀式开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(4): 16-24.
- [10] NADERI-BOLDAJI M, ALIMARDANI R, HEMMAT A, et al. 3D finite element simulation of a single-tip horizontal penetrometer-soil interaction[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 134: 153-162.
- [11] BARR J B, DESBIOLES J M A, FIELKE J M, et al. Development and field evaluation of a high-speed no-till seeding system[J]. Soil & Tillage Research, 2019, 194(1): 104337.
- [12] 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.
- [13] 罗锡文, 王在满, 曾山, 等. 水稻机械化直播技术研究进展[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 1-13.
- [14] 曾山, 汤海涛, 罗锡文, 等. 同步开沟起垄施肥水稻精量早穴直播机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 12-19.
- [15] 刘晓鹏, 肖文立, 马磊, 等. 油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 79-87.
- [16] 张青松, 廖宜涛, 陶威, 等. 油菜垄作精量联合直播机起垄装置设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(3): 181-189.
- [17] 赵淑红, 刘宏俊, 谭贺文, 等. 仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 32-39.
- [18] 张明华, 王在满, 罗锡文, 等. 水稻精量穴直播机开沟装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 10-15.
- [19] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [20] 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.
- [21] NY/T 740—2003 田间开沟机械作业质量评价技术规范[S].
- [22] 胡剑锋, 杨波, 周伟, 等. 播种方式和播种密度对杂交籼稻机插秧节本增效的研究[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(1): 81-90.
- [23] 蒋明金, 李敏, 周维佳, 等. 适宜机插密度提高优质杂交籼稻插秧质量及产量[J]. 杂交水稻, 2021, 36(1): 41-47.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 吴志立