

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.03.006

# 组合型孔轮式玉米精量穴播器设计与试验

伍皖闽<sup>1</sup> 陈学庚<sup>1,2</sup> 王士国<sup>3</sup> 颜利民<sup>1</sup> 蒋德莉<sup>1</sup> 纪超<sup>3</sup>

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003; 2. 农业农村部西北农业装备重点实验室, 石河子 832003; 3. 新疆农垦科学院机械装备研究所, 石河子 832000)

**摘要:** 针对新疆现有夹持式穴播器易空穴, 充种性能还需进一步提高等问题, 结合型孔轮式穴播器和阶梯形型孔对种子适应性强的特点, 设计一种组合型孔轮式玉米精量穴播器, 通过理论分析建立型孔与取种块间相对运动模型, 分析其相对位置对充种性能的影响规律, 确定影响排种性能的参数及范围, 完成组合型孔和齿板的参数设计。通过单因素试验确定并缩小关键参数范围, 以型孔方向角、型孔位置角、穴播器转速为试验因素, 以排种合格指数、重播指数、漏播指数为试验指标进行三因素三水平 Box - Behnken 中心组合试验, 得到试验因素与试验指标间的数学模型, 应用 Design-Expert 软件对回归模型进行多目标优化, 得到最佳参数为: 型孔深度 12.3 mm, 型孔方向角 20.3°, 型孔位置角 44.7°, 穴播器转速 40 r/min, 此时排种合格指数 89.12%, 重播指数 7.30%, 漏播指数 3.87%。在最优参数组合下进行台架验证试验, 合格指数为 91.14%, 重播指数 4.23%, 漏播指数 4.63%。土槽试验结果表明, 穴播器前进速度为 3.38 km/h 时, 排种合格指数为 92.53%, 重播指数为 3.54%, 漏播指数为 3.93%, 较夹持式穴播器排种合格指数提高了 2.53 个百分点。

**关键词:** 组合型孔轮式; 玉米精量穴播器; 参数优化

**中图分类号:** S223.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2022)03-0060-11

**OSID:**



## Design and Experiment of Combined-hole Maize Precision Dibbler

WU Wanmin<sup>1</sup> CHEN Xuegeng<sup>1,2</sup> WANG Shiguo<sup>3</sup> YAN Limin<sup>1</sup> JIANG Deli<sup>1</sup> JI Chao<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China

2. Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832003, China

3. Mechanical Equipment Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the existing gripper hill-seeder in Xinjiang is easy to hole, and the seed filling performance needs to be further improved, a kind of combination-hole maize precision dibbler metering device was designed combining with the characteristics of wheel hole hill-seeder and stepped hole with strong adaptability to seeds, through theoretical analysis, the relative movement model between the combined-hole and the seed wheel was established, and the influence rule of its relative position on seed filling process was analyzed, and the parameters and range that affected seeding performance was determined, and the parameters of the combined-hole and the truss plate were designed. The single factor test was carried out to determine and narrow the scope of key parameters. The direction angle of hole, location angle of hole and rotating speed of metering device were taken as experimental factors, and taking the qualified index of seed spacing, multiple index and missing index as the test evaluations for three factors and three levels Box - Behnken central combination tests, and the mathematical model between experimental factors and indexes was got. Design-Expert software was used to optimize the regression model. The optimum parameters were as follows: the hole depth was 12.3 mm, the direction angle of hole was 20.3°, the location angle of hole was 44.7°, the rotating speed of metering device was 40 r/min. At this time, the qualified index of seeding was 89.12%, the multiple index was 7.30%, and the missing index was 3.87%. In the optimal parameter combination test, the qualified, the multiple and

收稿日期: 2021-12-06 修回日期: 2021-12-30

**基金项目:** 兵团重点领域科技攻关计划项目(2020AB011)、兵团中青年科技创新领军人才计划项目(2018CB010)和新疆农垦科学院院级科研项目(2020YJ011)

**作者简介:** 伍皖闽(1998—),男,研究实习员,主要从事农业机械与农业装备研究,E-mail: soolitary@163.com

**通信作者:** 陈学庚(1947—),男,中国工程院院士,研究员,主要从事农业机械装备与技术研究,E-mail: chenxg130@sina.com

missing index were 91.14%, 4.23% and 4.63%, respectively. The result of soil bin test showed that the forward speed of seeder was 3.38 km/h, the qualified index for seeding was 92.53%, the multiple index was 3.54%, and the missing index was 3.93%, The qualified index of seeding was increased by 2.53 percentage points compared with the clamping dibbler.

**Key words:** combined-hole wheel type; maize precision dibbler; parameter optimization

## 0 引言

玉米机械化精量播种是指在农艺要求下将种子均匀播到土壤中指定地点(行距、粒距和深度一定),达到节省种子,省去间苗作业,提高产量的目的,受到高度重视和广泛应用。穴播器作为铺膜播种机的核心部件,其排种性能是影响播种质量的重要因素<sup>[1-3]</sup>。

玉米穴播器按其工作原理可分为机械式和气力式,气力式穴播器对种子的形状适应性较强,但存在结构复杂、能耗大、价格昂贵等缺点。机械式穴播器因具有结构简单、成本低、维修方便等优点在实际中得到广泛应用<sup>[4-7]</sup>。目前,新疆机械式穴播器主要分为夹持式和型孔轮式<sup>[8]</sup>。夹持式穴播器利用夹持原理完成充种,按其取种模块的不同可分为动定夹取种和夹板夹盘取种。付威等<sup>[9]</sup>设计了强制夹持式穴播器,滚轮通过导轨使动夹打开和闭合,完成与定夹对种子的夹取,播种机工作速度为 3.54 km/h 时,穴播器排种性能较好;蒋蓓等<sup>[10]</sup>对夹持式穴播器夹板夹盘进行设计,当播种机速度为 2.1 km/h 时,排种合格率为 90%,分析可知,夹持式穴播器存在夹取多粒,籽粒形状要求严苛,清种不彻底等问题<sup>[11]</sup>。

型孔轮式穴播器通过振动齿板与拐臂接触使取种块转动,实现取种块上型孔朝向的变化,从而完成充种与排种;同时振动齿板与拐臂相对运动产生小幅高频振动,增强了穴播器的清种和种群扰动能力,有效提高穴播器充种性能<sup>[12-13]</sup>。李娟娟等<sup>[14]</sup>对棉花穴播器的充种性能分析发现,排种合格率随振动频率的增大,呈先增大后减小趋势,振动频率为 6.08 Hz 时,排种合格率达到最大,为 94.65%;房硕等<sup>[15]</sup>对 24 穴棉花穴播器试验发现,穴播器转速过快易产生甩籽现象;型孔轮式穴播器目前在新疆棉花播种领域应用广泛,在玉米领域的研究未见报道。

国内外学者对型孔进行了大量的研究。于建群等<sup>[16-17]</sup>提出一种阶梯形型孔,研究发现只要选择合适的内窝定量孔与充填孔的尺寸与形状,对不同品种和不分级的玉米种子均能达到精播要求。SINGH 等<sup>[18]</sup>和 MALEKI 等<sup>[19]</sup>发现种子尺寸决定排种器型孔形状、尺寸等参数,直接影响排种精度。刘艳芬

等<sup>[20]</sup>对水平圆盘式排种器的型孔进行优化设计,结果表明,型孔倒角与倾角对排种器播种性能影响显著。夏连明等<sup>[21]</sup>对丸粒化玉米排种器研究发现,增大型孔直径会使型孔体积增大,易造成重播。通过已有研究可知<sup>[22]</sup>,阶梯形型孔通过改变型孔形状和尺寸来约束种子姿态,实现定量充种,增强了型孔对种子的适应性,有效提高播种质量。

本文结合拐臂窝眼式穴播器特点和阶梯形型孔设计思想,设计一种组合型孔轮式玉米精量穴播器。以新玉 23 玉米种子为研究对象,对穴播器组合型孔和齿板进行设计,优化求解关键部件的最优参数组合,进行台架和土槽试验,测试其在种子不分级条件下的排种性能,以期为玉米机械式穴播器的设计与应用提供参考。

## 1 穴播器整体结构与工作原理

组合型孔轮式玉米精量穴播器主要由定盘、压盘、取种腰带、齿板、鸭嘴等组成,如图 1a 所示,其中取种腰带由多个取种模块连接而成,每个取种模块包括拐臂、连接块、取种块、种盒、扭转弹簧、清种刷,如图 1b 所示。穴播器按其功能和工作顺序分为充种区、清种区、携种区和投种区,如图 1c 所示。

穴播器工作原理为:种箱内的玉米种子通过进种口进入穴播器形成种群,取种块随着穴播器在拖拉机动力牵引下转动,穴播器上取种块进入充种区时,取种模块上拐臂与齿板接触带动取种块转动,取种块上型孔开口朝向充种室,种子在自身重力、离心力和种间相互作用力下充入型孔;拐臂离开齿板时,拐臂经过齿板产生的振动和清种条共同作用下将型孔中多余种子清出,取种块在弹簧恢复力作用下回到相对初始位置,完成充种与清种;型孔内的种子随穴播器继续转动,在投种区时由重力作用落入鸭嘴腔;随着穴播器转动,定鸭嘴完成破膜与成穴,动鸭嘴在土壤支持力作用下回转,鸭嘴打开,种子通过鸭嘴口落入土壤,完成播种。

## 2 穴播器关键部件设计

### 2.1 取种块组合型孔设计

取种块是组合型孔的载体,是穴播器充种的核心,取种块上组合型孔尺寸直接影响穴播器的充种

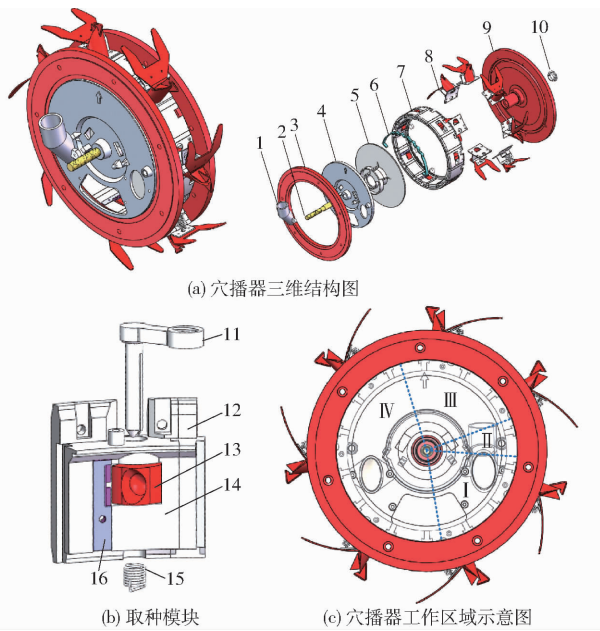


图1 穴播器结构及工作区域示意图

Fig. 1 Structure and working area of seed-metering device

1. 进种口 2. 穴播器轴 3. 动盘 4. 压盘 5. 芯盘 6. 齿板  
7. 取种腰带 8. 鸭嘴 9. 定盘 10. 轴端盖 11. 拐臂 12. 连接块  
13. 取种块 14. 种盒 15. 扭转弹簧 16. 清种刷 I. 充种区  
II. 清种区 III. 携种区 IV. 落种区

性能。为保证穴播器单粒充种,确定组合型孔尺寸与形状,依据玉米种子尺寸对组合型孔进行参数设计。组合型孔结构如图2所示。

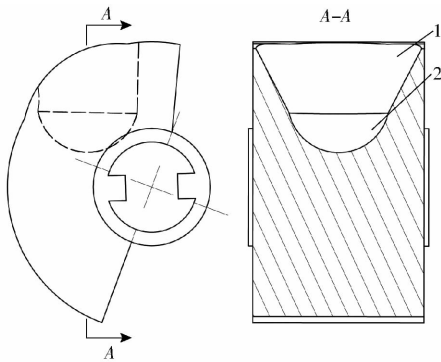


图2 组合型孔结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of combined-hole

1. 内窝定量孔 2. 充填孔

### 2.1.1 组合型孔数目确定

取种腰带直径范围<sup>[23]</sup>一般为300~400 mm,腰带直径选取较大值时,有利于提高充种和清种效率。因此本文腰带外直径设计为312 mm,内直径为272 mm,穴播器最大直径(鸭嘴外圈直径) $d_a$ 为450 mm。

组合型孔的数量是影响播种质量的重要因素。在株距和机具牵引速度一定时,型孔越多,排种转速越低,有利于提高穴播器充种性能。穴播器型孔个数<sup>[24]</sup>应满足

$$K = \frac{\pi d_a}{L_d} \quad (1)$$

式中  $K$ ——型孔个数

$L_d$ ——播种株距,mm

根据新疆玉米种植农艺要求与经验,玉米的播种株距一般为100~300 mm,取 $L_d = 200$  mm;穴播器由播种机具直接牵引前进,不存在速比,计算得 $K = 7.069$ ,取型孔个数为7。

### 2.1.2 内窝定量孔设计

种子尺寸、种子趋近型孔的姿态、种子进入型孔的姿态和型孔相对取种块位置都直接影响型孔参数的确定。本文随机选择1000粒新玉23玉米种子,对其长 $L$ 、宽 $W$ 、厚 $T$ 进行测量并统计,测得其长度、宽度和厚度的正态分布均值分别为10.97、8.83、6.78 mm,最大值分别为14.33、10.53、9.62 mm,根据种子尺寸,确定内窝定量孔和充填孔结构参数。

#### 2.1.2.1 定量孔长度

内窝定量孔是依靠容积来控制充种量<sup>[25]</sup>,因此,确定合适的容积尺寸,有利于提高充种性能。为保证单粒充种,定量孔长度应小于两粒种子囊入型孔的长度最小值,即此时一颗种子呈平躺姿态,另一颗呈侧立姿态,如图3a所示,型孔有效长度为

$$\begin{cases} L_{\max} < L_s < D_1 \\ D_1 = \frac{W_a^2 + 4(L_{\max} + T_a)^2}{4(L_{\max} + T_a)} \\ L_s = L_{\max} + \Delta L \\ \Delta L < 0.5T_a \end{cases} \quad (2)$$

式中  $L_{\max}$ ——种子最大长度,mm

$W_a$ ——种子宽度正态分布均值,mm

$L_s$ ——定量孔长度,mm

$T_a$ ——种子厚度正态分布均值,mm

$D_1$ ——定量孔最大长度,mm

$\Delta L$ ——长度间隙,mm

为提高充种性能,避免种子在型孔口卡住,故本文长度间隙应取较大值, $\Delta L$ 取3 mm,式(2)计算得定量孔长度为17.33 mm,取 $L_s = 17.5$  mm。

#### 2.1.2.2 定量孔宽度

充种过程中,定量孔宽度应小于两粒种子侧立囊入型孔的厚度最小值和侧立囊入型孔的宽度最小值,如图3b所示,定量孔宽度为

$$\begin{cases} W_{\max} < W_s < D_2 \\ D_2 = \sqrt{W_{\max}^2 + 4T_a^2} \\ W_s = W_{\max} + \Delta W \\ \Delta W < 0.5T_a \end{cases} \quad (3)$$

式中  $W_{\max}$ ——种子最大宽度,mm

$W_s$ ——定量孔宽度,mm

$D_2$ ——定量孔最大宽度,mm

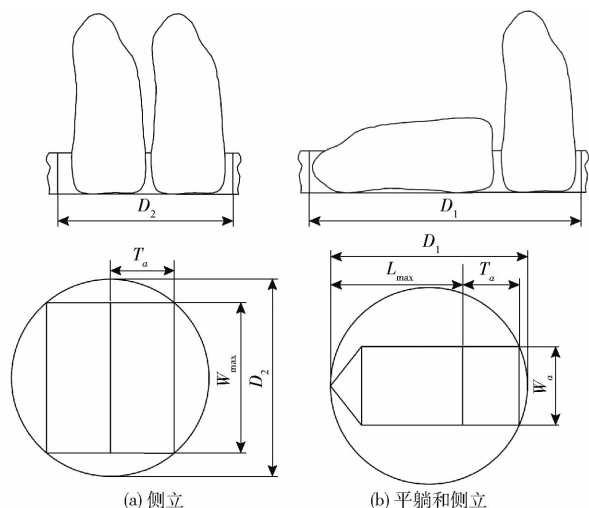


图 3 型孔直径与种子姿态关系图

Fig. 3 Relation diagrams between hole diameter and seed posture

$\Delta W$ ——宽度间隙, mm

为使单粒种子能以直立姿态进入型孔, 定量孔宽度应大于种子的最大宽度, 宽度间隙  $\Delta W$  一般为 1.5 mm<sup>[26]</sup>, 由式(3) 计算可得, 定量孔宽度为  $W_s = 12$  mm。

### 2.1.3 充填孔设计

#### 2.1.3.1 充填孔直径

为了进一步保证精量播种, 对充填孔直径进行控制, 使其容纳一粒种子, 并用种子宽度和厚度的临界值来确定直径。同时保证种子以直立和侧立的姿态进入型孔, 避免进入充填孔是平躺姿态, 导致型孔堵塞, 故充填孔直径要小于种子长度的最大值。

$$\begin{cases} W_{\max} < D_r < L_{\max} \\ T_{\max} < D_r < L_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $D_r$ ——充填孔直径, mm

$T_{\max}$ ——种子厚度最大值, mm

由式(4) 计算可得充填孔直径范围为 10.53 ~ 14.33 mm, 此时种子除平躺姿态外, 任何姿态都能进入充填孔, 为减少重播, 充填孔直径应取小值, 本文  $D_r$  取 11 mm。

#### 2.1.3.2 充填孔形状

充填孔一般分为平底长形、锥形和球形<sup>[27-28]</sup>, 通过大量试验发现, 平底长形充填孔在进种时易囊

入多粒种子, 造成重播; 当种子以头朝下充入锥型充填孔时, 型孔易堵塞, 造成漏播; 球形充填孔与前两者相比, 对种子的适应性较强, 囊种效果较好, 因此本设计采用球形充填孔。

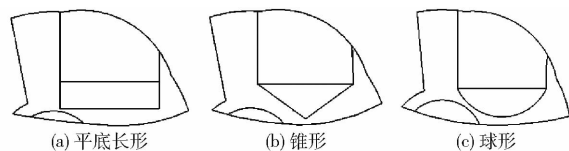


图 4 充填孔孔型

Fig. 4 Structure shapes of filling hole

### 2.1.4 组合型孔深度

根据《农业机械设计手册》可知, 组合型孔深度由种子的长度最大值确定。型孔深度过大会导致型孔容积变大, 提高了多粒种子进入型孔的可能性, 这是导致穴播器播种性能下降的因素之一。故本设计型孔深度应不大于种子长度最大值, 且为减少种子的磨损, 深度应大于种子长度均值, 即

$$L_a < H \leq L_{\max} \quad (5)$$

式中  $H$ ——组合型孔总深度, mm

为避免型孔中种子的露出部分与种盒内壁刮蹭, 出现种子损伤现象, 型孔深度应取较大值, 本文深度初步定为 12.3 mm。组合型孔深度为定量孔深度与充填孔深度之和。玉米种子的重心确定方法为<sup>[29]</sup>: 重心至其大头处的距离占玉米总长度的 40%, 故充填孔深度为

$$H_d = 0.4L_a \quad (6)$$

式中  $H_d$ ——充填孔深度, mm

由式(6) 可得, 充填孔深度取 4.4 mm。

### 2.2 型孔位置确定

组合型孔在取种块上相对位置的不同直接影响穴播器的充种性能。通过分析穴播器工作原理发现, 穴播器在工作时存在极限位置, 如图 5a、5b 所示, 即: 充种时, 型孔开口应完全指向穴播器充种室, 有利于种子囊入型孔, 提高充种性能; 落种时, 型孔开口指向鸭嘴腔, 有利于种子落入鸭嘴腔, 完成排种。以充种时取种块为对象, 分析型孔在取种块上的位置, 研究型孔在取种块上相对位置的最佳组合, 且为保证型孔制造中不被打穿, 型孔与取种块轴孔间应保持距离 0.9 mm。建立如图 5c 所示的极坐标

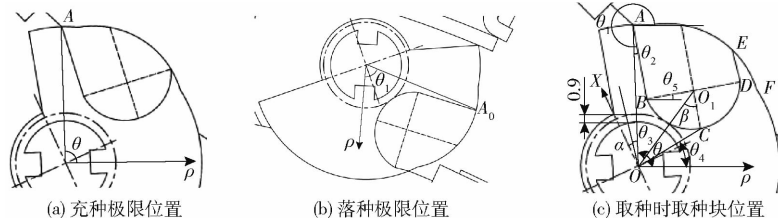


图 5 型孔位置分析图

Fig. 5 Analysis diagrams of hole location

系。假设型孔在取种块上可动,因型孔深度为定值,故可把曲线  $ABCD$  当成刚体,型孔在取种块上的运动可描述为刚体  $ABCD$  沿曲线  $AE$  运动,则点  $A$ 、 $O_1$ 、 $B$ 、 $D$  和  $C$  坐标为: $A(l_{AO} \cos \theta, l_{AO} \sin \theta)$ ;  $O_1(l_{AO} \cos \theta + l_{AB} \cos \theta_1 + l_{BO_1} \cos \theta_5, l_{AO} \sin \theta + l_{AB} \sin \theta_1 + l_{BO_1} \sin \theta_5)$ ;  $B(l_{AO} \cos \theta + l_{AB} \cos \theta_1, l_{AO} \sin \theta + l_{AB} \sin \theta_1)$ ;  $D(l_{AO} \cos \theta + l_{AB} \cos \theta_1 + 2l_{BO_1} \cos \theta_5, l_{AO} \sin \theta + l_{AB} \sin \theta_1 + 2l_{BO_1} \sin \theta_5)$ ;  $C(l_{AO} \cos \theta + l_{AB} \cos \theta_1 + l_{BO_1} \cos \theta_5 + l_{CO_1} \cos \theta_1, l_{AO} \sin \theta + l_{AB} \sin \theta_1 + l_{BO_1} \sin \theta_5 + l_{CO_1} \cos \theta_1)$ 。其中

$$\begin{cases} \theta + \alpha + \theta_3 = \theta_4 + \frac{\pi}{2} \\ \theta_1 = \pi + \theta + \theta_2 \\ \theta_5 = \theta_4 - \alpha \\ \theta_2 = \theta_3 \end{cases} \quad (7)$$

在三角形  $OO_1C$  中,由余弦定理可得

$$\cos \beta = \frac{l_{AO} \sin(\alpha + \theta - \theta_4) - l_{AB}}{l_{OO_1}} \quad (8)$$

式中  $\theta$ ——点  $A$  极角, ( $^\circ$ )

$\theta_1$ —— $AB$  方向角, ( $^\circ$ )

$\theta_2$ —— $AB$  相对  $AO$  的夹角, ( $^\circ$ )

$\theta_4$ ——点  $C$  极角, ( $^\circ$ )

$\theta_5$ —— $BD$  方向角, ( $^\circ$ )

$\alpha$ ——型孔方向角, ( $^\circ$ )

$\beta$ ——型孔位置角, ( $^\circ$ )

由式(8)可知,当  $\theta_4$  已知时,型孔位置角  $\beta$  与型孔方向角  $\alpha$  及点  $A$  处的极角  $\theta$  有关。点  $A$  又为型孔左侧壁极限,当刚体  $ABCD$  沿着曲线  $AE$  移动时,无论型孔方向角  $\alpha$  增大或减小,极角  $\theta$  都呈递减趋势。当极角  $\theta$  一定,刚体  $ABCD$  绕点  $A$  逆时针旋转,为保持充填孔的完整性,此时点  $D$  存在上极限, $\alpha$  存在极小值,即点  $D$  应位于  $AEF$  曲线内,以  $EF$  为圆弧圆的方程为

$$(x - 3.7)^2 + (y - 5.35)^2 = 10.6^2 \quad (9)$$

点  $D$  轨迹应满足

$$\begin{aligned} & (l_{AO} \cos \theta + l_{AB} \cos \theta_1 + 2l_{BO_1} \cos \theta_5 - 3.7)^2 + \\ & (l_{AO} \sin \theta + l_{AB} \sin \theta_1 + 2l_{BO_1} \sin \theta_5 - 5.35)^2 \leq 10.6^2 \end{aligned} \quad (10)$$

当刚体  $ABCD$  绕点  $A$  顺时针旋转时,为保证型孔与取种块回转孔之间保持  $0.9 \text{ mm}$  的距离,此时点  $D$  有下极限, $\alpha$  存在极大值,极限为圆弧  $BCD$  与临界圆相切,有

$$\begin{aligned} & (l_{AO} \cos \theta + l_{AB} \cos \theta_1 + l_{BO_1} \cos \theta_5 - 1.2 \sin \theta_5)^2 + \\ & (l_{AO} \sin \theta + l_{AB} \sin \theta_1 + l_{BO_1} \sin \theta_5 + 1.2 \cos \theta_5)^2 \geq 11.5^2 \end{aligned} \quad (11)$$

由式(11)可知极角  $\theta$  与  $\alpha$  有关,由图 5a、5b 可

知,极角  $\theta$  在充种和落种极限位置处分别为  $100^\circ$  和  $90^\circ$ ,将其代入式(10)、(11),可得型孔方向角范围为  $6^\circ \sim 26^\circ$ ,由式(8)可得型孔位置角范围为  $38^\circ \sim 50^\circ$ 。式(8)求出的  $\alpha$  和  $\beta$  的范围为交集,即其所有的组合并不能都满足上述边界要求,对范围进行分析可知,当  $\alpha$  为  $6^\circ$ , $\beta$  为  $27^\circ \sim 38^\circ$  时,此时型孔极角  $\theta$  不在极限范围内,故  $\beta$  在  $38^\circ \sim 50^\circ$  间选取。又因为  $\alpha$  和  $\beta$  是型孔与取种块间的相对结构参数,不随穴播器转动而变化,故由  $\alpha$  和  $\beta$  确定型孔在取种块上相对位置,并由后续试验确定最佳参数组合。

### 2.3 充种过程运动分析

种子能否进入型孔与种子和型孔间的相对速度有关,为分析种子和型孔间相对运动对充种过程的影响,建立充种过程种子的运动分析图。以种子长轴方向为  $X$  轴方向,垂直  $X$  轴方向为  $Y$  轴,建立图 6 所示的坐标系。

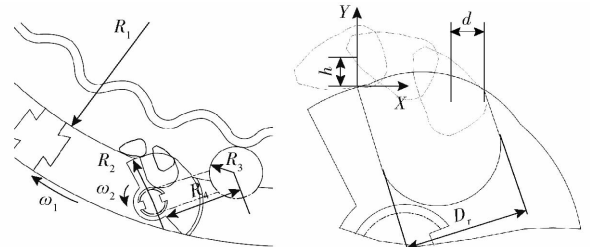


图 6 种子充入型孔运动学分析

Fig. 6 Kinematic analysis of seed filling hole

型孔囊种过程包括种子质心沿  $X$  轴方向做匀速运动和沿  $Y$  轴方向做自由落体运动,忽略种间相互作用力,种子质心运动方程为

$$\begin{cases} D_r - d = v_\tau t \\ h = \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (12)$$

式中  $h$ ——种子质心与取种块间的高度,  $\text{mm}$

$d$ ——种子质心至型孔后端的距离,  $\text{mm}$

$v_\tau$ ——种子相对速度,  $\text{m/s}$

$t$ ——种子充入型孔所需时间,  $\text{min}$

由式(12)可得种子充入型孔的最大速度为

$$v_{\tau \max} = (D_r - d) \sqrt{\frac{g}{2h}} \quad (13)$$

种子充入型孔的速度可分为:种子与穴播器间的相对速度和取种块线速度在  $X$  轴方向上的矢量和,即

$$\mathbf{v}_\tau = \mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2 \quad (14)$$

其中

$$\begin{cases} v_1 = \omega_1 (R_1 - d) \\ v_2 = \omega_2 R_2 \\ \omega_2 = \frac{\omega_1 (R_1 - R_3)}{R_4} \end{cases} \quad (15)$$

由式(14)、(15)可得种子的最大相对极限转速

为

$$n_{\max} = \frac{30R_4(D_r - d)}{\pi[R_4(R_1 - d) - (R_1 - R_3)R_2]} \sqrt{\frac{g}{2h}} \quad (16)$$

- 式中  $v_1$ ——种子与穴播器间相对速度, m/s  
 $v_2$ ——取种块与穴播器间相对速度, m/s  
 $\omega_1$ ——穴播器角速度, rad/s  
 $\omega_2$ ——取种块角速度, rad/s  
 $R_1$ ——腰带内径, 取 136 mm  
 $R_2$ ——取种块半径, 取 16 mm  
 $R_3$ ——拐臂顶部半径, 取 9 mm  
 $R_4$ ——拐臂中心长度, 取 30 mm

目前新疆玉米铺膜播种作业速度为 3~4 km/h, 由式(16)得出排种盘的最大转速为 45 r/min, 满足新疆玉米铺膜播种作业速度要求。

### 2.4 齿板设计

齿板是影响穴播器充种性能的重要因素。拐臂与齿板做相对运动时, 齿的齿形轮廓不同, 导致拐臂旋转角度不同, 窝眼打开的方向随之发生变化, 影响充种性能; 同时, 拐臂通过齿板产生振动, 将型孔内多余种子抖动下来, 提高清种效率, 增强了一定的种群扰动能力。因此, 为研究齿板最佳齿形轮廓, 对穴播器齿板进行设计。将齿板上的齿设计为直齿状, 并把拐臂和齿板中的齿分别简化成摆杆和凸轮, 拐臂经过齿板的运动过程即可转化为凸轮带动摆杆转至凸轮最高点  $B_2$  的过程, 不考虑拐臂经过齿最高点以后扭转弹簧施加给拐臂的回转力所做的回转运动, 运用解析法求解凸轮轮廓线, 如图 7 所示。

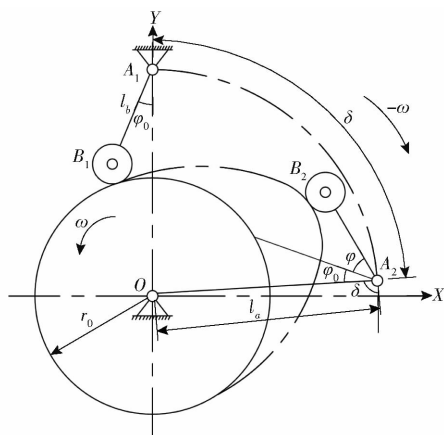


图 7 凸轮轮廓线设计

Fig. 7 Cam profile synthesis

点  $B_2$  处  $x$  和  $y$  坐标公式<sup>[30]</sup> 为

$$\begin{cases} x = l_a \sin \delta - l_b \sin(\delta + \varphi + \varphi_0) \\ y = l_a \cos \delta - l_b \cos(\delta + \varphi + \varphi_0) \end{cases} \quad (17)$$

其中  $\varphi_0 = \arccos \sqrt{(l_a^2 + l_b^2 - r_0^2) / (2l_a l_b)}$  (18)

齿板(图 8)安装在穴播器芯盘上, 故齿顶圆半径应不大于芯盘的半径, 即

$$\sqrt{x^2 + y^2} \leq r_s \quad (19)$$

- 式中  $l_a$ ——摆杆与凸轮回转中心间距离, 148 mm  
 $l_b$ ——摆杆长度, 取 39 mm  
 $\delta$ ——凸轮转角, ( $^\circ$ )  
 $\varphi$ ——摆杆角位移, ( $^\circ$ )  
 $\varphi_0$ ——摆杆初始位置角, ( $^\circ$ )  
 $r_0$ ——齿板基圆半径, 116 mm  
 $r_s$ ——芯盘半径, 126.5 mm

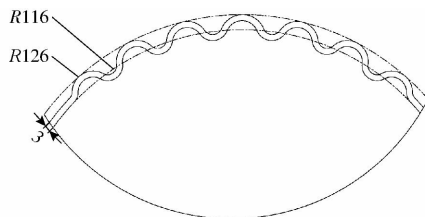


图 8 齿板

Fig. 8 Truss plate

由式(18)计算可得  $\varphi_0$  为  $30^\circ$ 。由式(17)可知, 点  $B$  的坐标与凸轮转角  $\delta$  及摆杆角位移  $\varphi$  有关, 凸轮转角一般为  $55^\circ \sim 75^\circ$ , 当凸轮转角  $\delta$  为  $75^\circ$ , 角位移  $\varphi$  为 0.07 rad, 点  $B$  坐标为 (111 mm, 60 mm), 齿板最大半径设计为 126 mm, 齿板厚度为 3 mm, 齿数为 7。

## 3 排种性能试验

### 3.1 台架试验

#### 3.1.1 试验材料及装置

试验选用新玉 23 号包衣玉米种子, 千粒质量为 491 g, 含水率为 13.4%, 人工精选剔除破损种子。使用 Lite-600 型三维打印机对取种块和齿板进行 3D 打印, 打印材料为光敏树脂 R4600, 打印精度 0.2 mm。在新疆农垦科学院进行台架试验, 试验装置为 JPS-12 型计算机视觉排种器试验台, 如图 9 所示, 排种轴转速可调范围 10~150 r/min, 种床带速度可调范围 1.5~12 km/h。

#### 3.1.2 评价指标

根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》, 以排种合格指数  $y_1$ 、漏播指数  $y_2$  和重播指数  $y_3$  作为试验指标, 开展穴播器台架性能试验。

#### 3.1.3 试验设计

组合型孔深度影响型孔位置角  $\beta$ , 为降低试验复杂性, 采用单因素试验确定型孔深度, 缩小型孔方向角和型孔位置角的范围。然后根据理论分析和前期试验, 采用 Box-Behnken 中心组合试验设计进行试验, 确定影响排种性能的各因素最佳参数组合。

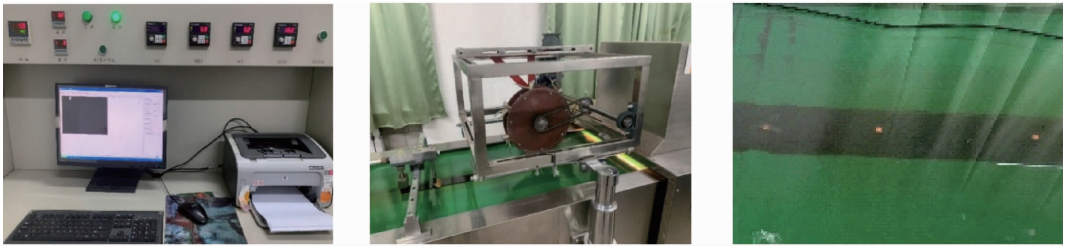


图9 计算机视觉排种器试验台及种子分布图

Fig.9 Computer vision seed metering device test bench and seed distribution graph

### 3.1.4 试验结果与分析

#### 3.1.4.1 型孔深度对排种性能的影响

设定型孔方向角为  $21^\circ$ ，型孔位置角为  $44^\circ$ ，穴播器转速为  $40 \text{ r/min}$ ，分析型孔深度分别为  $12.0$ 、 $12.3$ 、 $12.6 \text{ mm}$  时对排种性能的影响，每组试验测种子数为  $251$  粒，每组试验重复  $3$  次，取平均值，试验结果如表 1 所示。

表 1 不同型孔深度时的排种性能试验结果

Tab.1 Result of seeding performance at different hole depths

型孔深度 $H/\text{mm}$	合格指数/%	重播指数/%	漏播指数/%
12.0	78.97	4.10	16.93
12.3	85.92	7.17	6.91
12.6	81.67	11.95	6.38

由表 1 可知，当型孔深度为  $12.3 \text{ mm}$  时，排种合格指数为  $85.92\%$ 、重播指数为  $7.17\%$ 、漏播指数为  $6.91\%$ ，此时排种性能最好；当型孔深度为  $12 \text{ mm}$  时排种性能较差，主要原因是，深度减小，型孔容积变小，型孔中的种子易被清种，漏播指数增大；当型孔深度为  $12.6 \text{ mm}$  时，型孔容积变大，易囊入多粒种子，且部分多余种子会卡在取种块与清种条之间，在落种区和型孔中的种子一起掉落进鸭嘴腔，从而导致重播指数增大。

#### 3.1.4.2 型孔方向角对排种性能的影响

由 2.2 节分析可得，型孔方向角的范围为  $6^\circ \sim 26^\circ$ ，设定型孔位置角  $44^\circ$ 、型孔深度  $12.3 \text{ mm}$ 、穴播器转速  $40 \text{ r/min}$  进行试验，试验结果如表 2 所示。

表 2 不同型孔方向角时的排种性能试验结果

Tab.2 Result of seeding performance at different hole direction angles

型孔方向角 $\alpha/(\circ)$	合格指数/%	重播指数/%	漏播指数/%
6	21.16	41.94	37.90
11	60.91	24.90	14.19
16	73.80	16.48	8.72
21	89.07	6.88	4.05
26	71.10	9.59	19.31

由表 2 可知，随着型孔方向角增大，排种合格指数呈先增大后减小的趋势。分析其原因为，型孔方向角越小，型孔越趋近于取种块左极限位置，型孔容积越小，清种时间越少；型孔方向角越大，型孔容积越大，充种性能提高，并在  $21^\circ$  时，合格指数达到最大值，此时型孔方向角再增大，充种时种子也不再斜躺于型孔内，取种块回程时易被清种。

#### 3.1.4.3 型孔位置角对排种性能的影响

型孔方向角只能确定型孔在取种块上的朝向，并不能确定型孔相对位置，型孔位置角和型孔方向角紧密相关，二者之间相互约束。在穴播器转速为  $40 \text{ r/min}$ ，型孔方向角为  $16^\circ$ ，型孔深度为  $12.3 \text{ mm}$  时，分别分析型孔位置角为  $32^\circ$ 、 $38^\circ$ 、 $44^\circ$ 、 $50^\circ$  时穴播器的充种情况，结果如表 3 所示。

表 3 不同型孔位置角时的排种性能试验结果

Tab.3 Result of seeding performance at different hole position angles

型孔位置角 $\beta/(\circ)$	合格指数/%	重播指数/%	漏播指数/%
32	10.61	48.67	40.72
38	48.24	31.14	20.62
44	79.39	9.34	11.27
50	74.54	16.53	8.93

结果表明型孔位置角影响穴播器充种性能，排种合格指数随型孔位置角的增大先增大后减小，说明型孔位置角增大，型孔左极限与点 A 间实体部分对充种性能影响显著，对下层种群有一定的阻挡作用，减少了型孔堵塞；当型孔位置角继续增大为  $50^\circ$  时，回程时间增大，回程时部分种子会被卡在取种块和取种条之间，随着型孔中种子一起落入鸭嘴腔，重播指数增大。

#### 3.1.4.4 Box - Behnken 中心组合试验设计

根据 Box - Behnken 中心组合试验设计共进行  $17$  次试验，各因素取值范围为：型孔方向角  $17^\circ \sim 25^\circ$ ，型孔位置角  $42^\circ \sim 46^\circ$ ，穴播器转速  $35 \sim 45 \text{ r/min}$ ，试验因素编码如表 4 所示，根据试验安排进行参数组合试验，每组试验重复  $3$  次取平均值，试验方案与结果如表 5 所示， $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  为因素编码值。

表 4 试验因素编码  
Tab. 4 Codes of test factors

编码	因素		
	型孔方向角	型孔位置角	穴播器转速
	$\alpha/(\circ)$	$\beta/(\circ)$	$n/(r \cdot \text{min}^{-1})$
-1	17	42	35
0	21	44	40
1	25	46	45

表 5 试验方案与结果  
Tab. 5 Experimental project and results

序号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	合格指数	重播指数	漏播指数
				$y_1/\%$	$y_2/\%$	$y_3/\%$
1	-1	-1	0	66.45	22.54	11.01
2	1	-1	0	82.37	6.19	11.44
3	-1	1	0	83.01	10.95	6.04
4	1	1	0	75.37	9.86	14.77
5	-1	0	-1	78.38	14.91	6.71
6	1	0	-1	78.32	7.93	13.75
7	-1	0	1	75.11	16.74	8.15
8	1	0	1	79.35	7.34	13.31
9	0	-1	-1	81.24	11.54	7.22
10	0	1	-1	85.77	6.37	7.86
11	0	-1	1	81.25	12.22	6.53
12	0	1	1	86.42	6.16	7.42
13	0	0	0	88.28	8.37	3.35
14	0	0	0	89.07	6.88	4.05
15	0	0	0	91.84	5.31	2.85
16	0	0	0	86.94	8.16	4.90
17	0	0	0	87.91	6.85	5.24

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对正交试验结果进行回归拟合并方差分析, 方差分析如表 6 所示, 得到合格指数  $y_1$ 、重播指数  $y_2$ 、漏播指数  $y_3$  与试验因

表 6 试验结果方差分析

Tab. 6 Variance analysis of experimental result

来源	合格指数				重播指数				漏播指数			
	自由度	均方差	$F$	$P$	自由度	均方差	$F$	$P$	自由度	均方差	$F$	$P$
模型	9	70.11	28.88	0.000 1	9	36.52	33.49	<0.000 1	9	23.38	23.27	0.000 2
$X_1$	1	19.41	8.00	0.025 5	1	142.97	131.09	<0.000 1	1	56.98	56.70	0.000 1
$X_2$	1	46.37	19.10	0.003 3	1	45.84	42.03	0.000 3	1	0.001 8	0.001 8	0.967 4
$X_3$	1	0.312 0	0.128 6	0.730 5	1	0.365 5	0.335 1	0.580 8	1	0.002 1	0.002 1	0.964 7
$X_1 X_2$	1	138.77	57.17	0.000 1	1	58.22	53.38	0.000 2	1	17.26	17.18	0.004 3
$X_1 X_3$	1	4.62	1.90	0.210 1	1	1.46	1.34	0.284 6	1	0.883 6	0.879 3	0.379 6
$X_2 X_3$	1	0.102 4	0.042 2	0.843 1	1	0.198 0	0.181 6	0.682 8	1	0.015 6	0.015 5	0.904 3
$X_1^2$	1	336.82	138.76	<0.000 1	1	66.17	60.67	0.000 1	1	104.42	103.92	<0.000 1
$X_2^2$	1	39.53	16.28	0.005 0	1	7.19	6.59	0.037 1	1	13.01	12.94	0.008 8
$X_3^2$	1	18.11	7.46	0.029 3	1	1.79	1.64	0.241 1	1	8.49	8.45	0.022 8
残差	7	2.43			7	1.09			7	1.00		
失拟	3	1.05	0.304 0	0.822 3	3	0.528 0	0.349 1	0.793 1	3	0.998 0	0.988 1	0.483 1
误差	4	3.46			4	1.51			4	1.01		
总和	16				16				16			

素编码值的回归方程为

$$y_1 = 88.81 + 1.56X_1 + 2.41X_2 - 0.1975X_3 - 5.89X_1X_2 + 1.07X_1X_3 + 0.16X_2X_3 - 8.94X_1^2 - 3.06X_2^2 - 2.07X_3^2 \quad (20)$$

$$y_2 = 7.11 - 4.23X_1 - 2.39X_2 + 0.2137X_3 + 3.81X_1X_2 - 0.605X_1X_3 - 0.2225X_2X_3 + 3.96X_1^2 + 1.31X_2^2 + 0.6518X_3^2 \quad (21)$$

$$y_3 = 4.08 + 2.67X_1 - 0.015X_2 - 0.0162X_3 + 2.08X_1X_2 - 0.47X_1X_3 + 0.0625X_2X_3 + 4.98X_1^2 + 1.76X_2^2 + 1.42X_3^2 \quad (22)$$

对回归模型进行显著性分析, 由表 6 可知, 试验指标合格指数、重播指数和漏播指数模型均极显著 ( $P < 0.01$ ), 失拟项均不显著 ( $P > 0.05$ ), 回归方程不失拟。其中,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_1X_2$ 、 $X_1^2$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$  对合格指数影响均显著,  $X_3$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_2X_3$  对合格指数影响不显著, 剔除回归模型中不显著项, 回归方程为

$$y_1 = 88.81 + 1.56X_1 + 2.41X_2 - 5.89X_1X_2 - 8.94X_1^2 - 3.06X_2^2 - 2.07X_3^2 \quad (23)$$

同理可得, 剔除回归模型中不显著项后重播指数和漏播指数的回归方程为

$$y_2 = 7.11 - 4.23X_1 - 2.39X_2 + 3.81X_1X_2 + 3.96X_1^2 + 1.31X_2^2 \quad (24)$$

$$y_3 = 4.08 + 2.67X_1 + 2.08X_1X_2 + 4.98X_1^2 + 1.76X_2^2 + 1.42X_3^2 \quad (25)$$

此时回归模型拟合决定系数  $R^2$  分别为 0.966 5、0.966 0、0.963 5, 表明回归模型预测值与实际值有较高相关性。失拟项  $P$  值分别为 0.822 3、0.793 1、0.483 1, 均大于 0.05, 表明回归方程拟合度高, 可用此方程来优化穴播器的参数。



方差分析表明,试验因素对合格指数影响的主要顺序为型孔位置角、型孔方向角、穴播器转速;对重播指数影响的主要顺序为型孔方向角、型孔位置角、穴播器转速;影响漏播指数的主要顺序为型孔方向角、穴播器转速、型孔位置角。型孔方向角和型孔位置角的交互项  $X_1X_2$  对合格指数、重播指数和漏播

指数影响均极显著。

利用 Design-Expert 8.0.6 软件得到穴播器转速为 40 r/min 时,型孔方向角和型孔位置角交互作用对合格指数、重播指数和漏播指数影响的响应曲面,如图 10 所示。

由图 10a 可知,当型孔方向角一定时,随着型孔

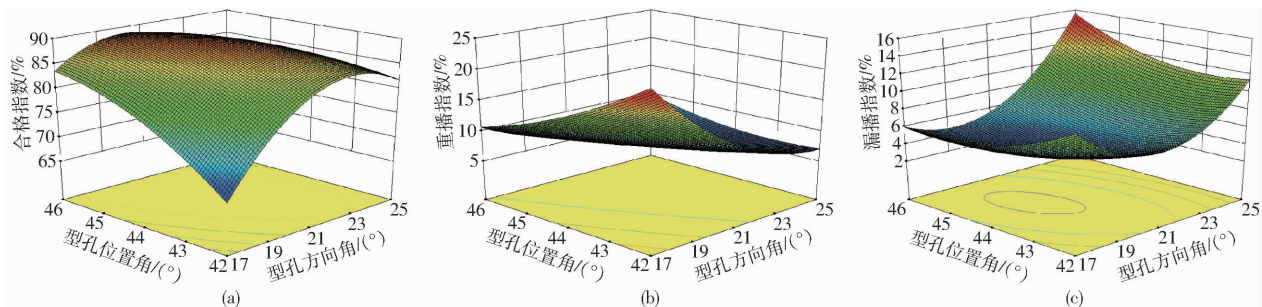


图 10 因素交互项对试验指标影响的响应面 ( $n = 40 \text{ r/min}$ )

Fig. 10 Response surfaces of influence of interactive factors on each index

位置角的增大,排种合格指数呈先增大后减小的趋势,型孔位置角在  $44^\circ \sim 46^\circ$  时排种合格指数较高;当型孔位置角一定时,随着型孔方向角的增大,排种合格指数呈现先增大后减小的趋势,型孔方向角在  $19^\circ \sim 23^\circ$  时排种合格指数较高。型孔方向角  $20.3^\circ$ 、型孔位置角  $44.7^\circ$  时,排种合格指数达到最大值。

由图 10b 可知,当型孔方向角一定时,随着型孔位置角的增大,重播指数呈递减趋势;当型孔位置角一定时,随着型孔方向角的增大,重播指数呈先减小后增大的趋势,型孔方向角在  $21^\circ \sim 25^\circ$  时重播指数较低。

由图 10c 可知,当型孔方向角一定时,随着型孔位置角的增大,漏播指数呈先减小后增大的趋势,型孔位置角在  $43^\circ \sim 45^\circ$  时漏播指数较低;当型孔位置角一定时,随着型孔方向角的增大,漏播指数呈现先减小后增大的趋势,型孔方向角在  $19^\circ \sim 21^\circ$  时漏播指数较低。

分析原因可知:随着型孔位置角增大,型孔左极限与点 A 之间的实体部分增多,首先对下层种群进种具有一定的阻挡作用,减少了种子在型孔处的堵塞,降低了重播;其次影响了中间种群的进种,漏播指数增大。随着型孔方向角的增大,型孔容积变大,种子易进入型孔,重播指数和漏播指数都减小;容积越大,重播越多,且型孔左极限与点 A 处实体部分越多,漏播指数越大。

为得到约束条件下各因素的最佳组合,以穴播器合格指数最大,重播指数和漏播指数最小为评价指标,对充种性能回归模型进行多目标优化求解,回归方程和约束条件为

$$\begin{cases} \max y_1(\alpha, \beta, n) \\ \min y_2(\alpha, \beta, n) \\ \min y_3(\alpha, \beta, n) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 17^\circ \leq \alpha \leq 25^\circ \\ 42^\circ \leq \beta \leq 46^\circ \\ 35 \text{ r/min} \leq n \leq 45 \text{ r/min} \end{cases} \end{cases} \quad (26)$$

将数据代入 Design-Expert 软件可得试验因素的最优组合:型孔方向角为  $20.3^\circ$ ,型孔位置角为  $44.7^\circ$ ,穴播器转速为 40 r/min,此时穴播器的合格指数为 89.12%,重播指数为 7.30%,漏播指数为 3.87%。为验证其可靠性,开展台架验证试验,试验重复 3 次取平均值,结果为:排种合格指数 91.14%,重播指数 4.23%,漏播指数 4.63%,台架验证试验合格指数、重播指数和漏播指数与优化结果绝对误差分别为 2.02%、3.07%、0.76%,分析原因:每次试验时夹紧装置松紧不一致,穴播器会有轻微的倾斜,且穴播器转动时传动链张紧程度不同,穴播器振动幅度会不同,从而导致绝对误差较大,但都在允许范围内。

### 3.2 土槽试验

为验证台架试验的可靠性,检验窝眼式玉米穴播器的工作性能,于 2021 年 10 月 31 日在新疆鑫昌盛农机有限公司进行土槽试验,试验土槽长 150 m,宽 10 m,如图 11 所示。试验前使用旋耕犁耕整,将优化后的穴播器挂在牵引机具上,通过对穴播器转速计算得牵引前进速度为 3.38 km/h,试验重复 5 次,取其平均值作为最终试验值。试验测得穴播器土槽作业的排种合格指数为 92.53%,重播指数为 3.54%,漏播指数为 3.93%,与优化结果相比合格指数提高了 1.39 个百分点,重播指数降低了

0.69个百分点,漏播指数降低了0.7个百分点,与台架验证结果基本一致。因为在实际工作中,存在很多振动来源,比如牵引机具的振动、土壤中的小土块等都会使穴播器产生振动,这些振动一方面增强了种群的扰动能力,另一方面提高了穴播器清种性能,降低了重播。与夹持式穴播器相比,排种合格率提高了2.53个百分点。满足新疆玉米精量播种作业要求。



图11 土槽试验

Fig. 11 Soil bin test

## 4 结论

(1)设计了一种组合型孔轮式玉米机械穴播器。对其工作原理进行分析,对穴播器关键部件进行结构参数设计,构建了型孔与取种块间相对位置

数学模型,确定影响穴播器排种性能的参数及范围。对型孔深度、型孔方向角和型孔位置角分别进行单因素试验,确定型孔深度和缩小型孔方向角、型孔位置角的参数范围;采用Box-Behnken中心组合试验设计,建立了排种性能指标与试验因素间的回归数学模型,得到了各因素对试验指标的影响规律和交互作用关系。

(2)运用Design-Expert 8.0.6软件对试验结果进行分析,对回归模型进行多目标优化,得到最优参数组合为型孔深度12.3 mm,型孔方向角 $20.3^\circ$ ,型孔位置角 $44.7^\circ$ ,穴播器转速40 r/min,此时合格指数为89.12%,重播指数为7.30%,漏播指数为3.87%。通过台架验证试验得到合格指数为91.14%,重播指数为4.23%,漏播指数为4.63%。

(3)将最优参数组合下的组合型孔轮式穴播器安装于牵引机具进行土槽试验,合格指数、重播指数和漏播指数试验结果分别为92.53%、3.54%、3.93%,与夹持式穴播器相比,排种合格指数提高了2.53个百分点,结果表明该穴播器作业性能较好,满足新疆玉米精量播种农艺要求。

## 参 考 文 献

- [1] 苑严伟,白慧娟,方宪法,等.玉米播种与测控技术研究进展[J].农业机械学报,2018,49(9):1-18.  
YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research process on maizes seeding and its measurement and control technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 1-18. (in Chinese)
- [2] 史嵩,周纪磊,刘虎,等.驱导辅助种气吸式精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(5):61-70.  
SHI Song, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with guided assistant seed-filling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 61-70. (in Chinese)
- [3] 廖宜涛,李成良,廖庆喜,等.播种机导种技术与装置研究进展分析[J].农业机械学报,2020,51(12):1-14.  
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1-14. (in Chinese)
- [4] 杨丽,史嵩,崔涛,等.气吸与机械辅助附种结合式玉米精量排种器[J].农业机械学报,2012,43(增刊):48-53.  
YANG Li, SHI Song, CUI Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate assist carrying seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 48-53. (in Chinese)
- [5] 韩丹丹,张东兴,杨丽,等.内充气吹式玉米排种器工作性能 EDEM-CFD 模拟与试验[J].农业工程学报,2017,33(13):23-31.  
HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. EDEM-CFD simulation and experiment of working performance of inside-filling air-blowing seed metering device in maize[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 23-31. (in Chinese)
- [6] 胡梦杰,夏俊芳,郑侃,等.内充气力式棉花高速精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(8):73-85.  
HU Mengjie, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of high speed precision cotton seed metering device with internal aeration force[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 73-85. (in Chinese)
- [7] 杨丽,颜丙新,张东兴,等.玉米精密播种技术研究进展[J].农业机械学报,2016,47(11):38-48.  
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. (in Chinese)
- [8] 陈玉龙,孙兴冻,李苗苗,等.机械式棉花精量穴播器的设计与试验[J].农机化研究,2015,37(6):124-126.  
CHEN Yulong, SUN Xingdong, LI Miaomiao, et al. Design and experiment on mechanical cotton precision dibbler[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(6): 124-126. (in Chinese)
- [9] 付威,李树峰,孙嘉亿,等.强制夹持式玉米精量排种器的设计[J].农业工程学报,2011,27(12):38-42.  
FU Wei, LI Shufeng, SUN Jiayi, et al. Design of compulsory clamp-type precision seed-metering device for corn[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 38-42. (in Chinese)
- [10] 蒋蓓,王吉奎,李斌,等.夹持式玉米精密穴播轮的设计及工作过程分析[J].农机化研究,2013,35(5):72-76.  
JIANG Bei, WANG Jikui, LI Bin, et al. Structure and working process of clamping dibber wheel of corn seeding[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(5): 72-76. (in Chinese)

- [11] 王金武,唐汉,周文琪,等.指夹式精量玉米排种器改进设计与试验[J].农业机械学报,2015,46(9):68-76.  
WANG Jinwu, TANG Han, ZHOU Wenqi, et al. Improved design and experiment on pick up finger precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 68-76. (in Chinese)
- [12] 石林榕,孙步功,赵武云,等.弹性气吸嘴式玉米滚轮排种器排种性能参数优化与试验[J].农业机械学报,2019,50(10):88-95,207.  
SHI Linrong, SUN Bugong, ZHAO Wuyun, et al. Optimization and verification of performance parameter of elastic air suction type corn roller seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 88-95, 207. (in Chinese)
- [13] 赵湛,李耀明,陈进,等.气吸滚筒式排种器吸种过程的动力学分析[J].农业工程学报,2011,27(7):112-116.  
ZHAO Zhan, LI Yaoming, CHEN Jin, et al. Dynamic analysis on seeds pick-up process for vacuum-cylinder seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 112-116. (in Chinese)
- [14] 李娟娟,张和平,毕新胜,等.转轴型孔式精量排种器充种性能仿真分析与试验[J].农业工程学报,2020,36(5):38-49.  
LI Juanjuan, ZHANG Heping, BI Xinseng, et al. Simulation analysis and test on the filling performance of rotary type-hole precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 38-49. (in Chinese)
- [15] 房硕,温浩军,颜利民.超窄株距机械式棉花穴播器的设计与试验[J].新疆农垦科技,2016,39(5):38-39.  
FANG Shuo, WEN Haojun, YAN Limin. Design and experiment of ultra-narrow plant-spacing mechanical cotton hill-seeder [J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2016, 39(5): 38-39. (in Chinese)
- [16] 于建群,马成林,左春桧.组合内窝孔玉米精密排种器清种过程分析[J].农业机械学报,2000,31(5):35-37.  
YU Jianqun, MA Chenglin, ZUO Chunheng. Analysis of the clearing process of seeds in com precision metering device with concave metering inner-cell[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(5): 35-37. (in Chinese)
- [17] 于建群,马成林,杨海宽,等.组合内窝孔玉米精密排种器型孔的研究[J].吉林大学学报(工学版),2000,30(1):16-20.  
YU Jianqun, MA Chenglin, YANG Haikuan, et al. Study on the combination inner-cell corn precision seed-metering device [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2000, 30(1): 16-20. (in Chinese)
- [18] SINGH R C, SINGH G, SARASWAT D C. Optimization of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cottonseeds[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4): 429-438.
- [19] MALEKI M, MOUAZEN A, KETELAERE B D, et al. A new index for seed distribution uniformity evaluation of grain drills [J]. Biosystems Engineering, 2006, 94(3): 471-475.
- [20] 刘艳芬,林静,李宝筏,等.玉米播种机水平圆盘排种器型孔设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(8):37-46.  
LIU Yanfen, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and experiment of horizontal disc seed metering device for maize seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 37-46. (in Chinese)
- [21] 夏连明,王相友,耿端阳,等.丸粒化玉米种子精密排种器[J].农业机械学报,2011,42(6):53-57.  
XIA Lianming, WANG Xiangyou, GENG Duanyang, et al. Precision seed-metering device for pelleted corn seeds [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery. 2011, 42(6): 53-57. (in Chinese)
- [22] 周勇,胡梦杰,夏俊芳,等.内充种组合型孔式播量可调棉花精量排种器设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(18):59-67.  
ZHOU Yong, HU Mengjie, XIA Junfang, et al. Design and experiment of inside-filling adjustable precision seed-metering device with combined hole for cotton[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(18): 59-67. (in Chinese)
- [23] 董万城,张立新,李文春,等.新疆棉花播种机械应用现状及发展趋势[J].新疆农机化,2021(2):11-15.  
DONG Wancheng, ZHANG Lixin, LI Wenchun, et al. Application status and development trend of cotton seeding machinery in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2021(2): 11-15. (in Chinese)
- [24] 马信春,李成松,李玉林,等.穴播器腰带总成焊接柔性夹具的设计及仿真分析[J].石河子大学学报(自然科学版),2016,34(6):790-795.  
MA Xinchun, LI Chengsong, LI Yulin, et al. The flexible design of belt assembly welding fixture and simulation analysis[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2016, 34(6): 790-795. (in Chinese)
- [25] 张德文,李林,王慧民.精密播种机械[M].北京:农业出版社,1982.
- [26] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等.自扰动内充型孔轮式玉米精量排种器设计与试验[J].农业工程学报,2019,35(13):23-34.  
DU Xin, LIU Cailing, JIANG Meng, et al. Design and experiment of self-disturbance inner-filling cell wheel maize precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(13): 23-34. (in Chinese)
- [27] 马连元,刘俊峰,王廷双,等.内侧充种垂直圆盘排种器精播分蘖作物的探讨[J].农业机械学报,1998,29(3):38-43.  
MA Lianyuan, LIU Junfeng, WANG Tingshuang, et al. Vertical-plate feed of seed-cell filling on inside seed-meter for tillering crops precise seeding [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1998, 29(3): 38-43. (in Chinese)
- [28] 张雷雨,毛欣,马跃,等.新型窝眼轮式玉米排种装置的设计与试验研究[J].中国农机化学报,2017,38(6):20-25.  
ZHANG Leiyu, MAO Xin, MA Yue, et al. Design and test of new cellular wheel metering device for corn seed[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(6): 20-25. (in Chinese)
- [29] 刘宗良.玉米定向排种机构的设计[D].太谷:山西农业大学,2015:17-23.  
LIU Zongliang. The design of directional sowing corn mechanism[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2015:17-23. (in Chinese)
- [30] 孙恒,陈作模,葛文杰.机械原理[M].北京:高等教育出版社,2013:178-180.