



祁天山, 赵武云, 石林榕, 孙步功, 周刚, 邓廷豪, 李辉, 李双成, 马永超. 西北旱区电控式玉米直插穴播器设计与试验[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(08): 198-209.

QI Tianshan, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, SUN Bugong, ZHOU Gang, DENG Tinghao, LI Hui, LI Shuangchen, MA Yongchao. Design and experiment of electronically controlled direct seeding and planting device for corn in arid northwest China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(08): 198-209.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.08.17

西北旱区电控式玉米直插穴播器设计与试验

祁天山¹ 赵武云¹ 石林榕^{1*} 孙步功¹ 周刚² 邓廷豪¹ 李辉¹
李双成¹ 马永超¹

(1. 甘肃农业大学 机电工程学院, 兰州 730070;

2. 甘肃省农业科学院 旱地农业研究所, 兰州 730070)

摘要 为解决现有直插式播种机在西北旱区实际播种中对地块平整度要求高的问题, 对该地区常用的2BZ-2型播种机的穴播器进行优化改进。以播种机平行四杆机构曲柄的转动角度为参考, 将穴播器的工作过程划分为充种、取种、打穴排种和回位4个阶段; 基于单片机设计电控系统, 对各工作阶段进行精准控制, 实现穴播器强制排种和鸭嘴强制开闭, 提高播种稳定性和适应性。通过二次旋转正交组合台架试验, 以取种轴转角、电推杆推程和电推杆推力为因素, 以单粒合格率、漏播率和重播率为响应值进行分析。优化结果表明: 当穴播器取种轴转角为59°, 电推杆推程为12.2 mm和电推杆推力为19.4 N时, 排种性能最优; 在该优化参数下进行试验验证, 本研究优化设计后的电控式玉米穴播器播种空穴率和穴粒数合格率分别为1.6%和91.8%, 达到穴播机播种作业质量要求。

关键词 玉米; 直插式播种机; 电控系统; 试验验证

中图分类号 S223.2

文章编号 1007-4333(2025)08-0198-12

文献标志码 A

Design and experiment of electronically controlled direct seeding and planting device for corn in arid northwest China

QI Tianshan¹, ZHAO Wuyun¹, SHI Linrong^{1*}, SUN Bugong¹, ZHOU Gang², DENG Tinghao¹,
LI Hui¹, LI Shuangchen¹, MA Yongchao¹

(1. College of Electromechanical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. Institute of Dryland Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract To address the issue of existing dibble seeders requiring high field flatness in practical operations in northwest arid regions, this study optimized the seed-metering device of the commonly used 2BZ-2 seeder. Taking the rotation angle of the crank in the seeder's parallelogram linkage mechanism as reference, the working process of the seed-metering device was divided into four stages: seed filling, seed picking, hole-making and seeding, and resetting. A microcontroller-based electronic control system was designed to achieve precise control of each working stage, enabling forced seed discharge and mandatory duckbill opening/closing mechanisms, thereby improving seeding stability and adaptability. Through

收稿日期: 2024-12-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(52365030); 甘肃农业大学伏羲青年英才项目(Gaufx-05Y02); 兰州市青年人才创新项目(2023-QN-146); 国家重点研发计划(2022YFD1602101); 甘肃农业大学科技创新基金-青年导师扶持基金(GAU-QDFC-2024-06)

第一作者: 祁天山(ORCID:0009-0006-9549-0031), 硕士研究生, E-mail: 794843784@qq.com

通讯作者: 石林榕(ORCID:0000-0003-2744-4237), 副教授, 博士, 主要从事西北旱区精密、智能播种关键技术与装备研究, E-mail: shilr@gsau.edu.cn

quadratic rotational orthogonal combination bench tests, analysis was conducted with three factors including seed-picking shaft rotation angle, electric actuator stroke, and thrust force, using single-seed qualification rate, missed sowing rate, and repetitive sowing rate as response indicators. Optimization results showed that the optimal seeding performance occurred at 59° seed-picking shaft rotation angle, 12.2 mm electric actuator stroke, and 19.4 N thrust force. Experimental verification under these optimized parameters demonstrated that the electronically controlled maize seed-metering device achieved 1.6% empty-hole rate and 91.8% qualified hole-seed quantity rate, which meets the operational quality requirements for dibble seeding machinery.

Keywords corn; direct-planting seeder; electronic control system; experimental verification

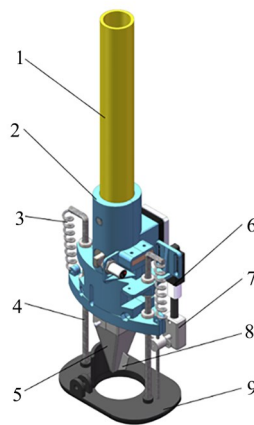
玉米是我国西北干旱地区的重要粮食作物,同时也是饲料和工业生产的主要原料,其在西北地区常采用全膜双垄沟播种技术^[1-3]。现有播种机在实际应用中存在撕膜、穴孔错位和漏播等问题,不仅严重影响播种质量和作业效率,而且增加了作业成本和劳动强度^[4-6]。因此,优化播种机设计对于提高西北地区玉米生产效率具有重要意义。

本研究团队基于 DEM-MBD 耦合技术开展直插穴播互作机理研究,设计出一种非圆齿轮驱动平行四杆机构的前进速度补偿机构,该机构可以在播种机鸭嘴近零速播种,有效地改善了挑膜和撕膜等问题^[7-10]。石林榕等^[11]设计了一种基于共轭凸轮强排-强启排种装置,可缓解因地形起伏较大导致的排种效果差的问题。戴飞等^[12]设计了一种气动直插式播种机,揭示锥形、楔形成穴器与双垄沟种床土壤相互作用机理。王方艳等^[13]设计了一种电控锥盘式播种机,通过设计闭环控制系统实现了供种器连续供种、锥盘排种器均匀排种和推种器滚轮推种。王云力等^[14]设计了一种以 STM32 单片机为核心的精量播种机控制系统,建立电机转速与播量间函数关系模型,达到精量播种目的。尽管现有研究为直插穴播器更好地适应双垄沟播种模式提供了理论依据和关键参数分析,但针对穴播机在作业过程中地形适应性不足及播种精度较低等问题,尚未提出切实可行的解决方案。

对此,本研究依据现有 2BZ-2 型玉米直插式播种机对穴播器进行改进,拟采用单片机控制穴播器实现取种轴强制取种和鸭嘴强制开闭,重点解决该机型穴播器在实际播种作业中因地块不平整而导致取种与排种机构失效,从而引发漏播率偏高等问题。通过台架开展二次旋转正交组合试验和参数优化,并对优化结果进行试验验证,以期对相关技术的进一步推广和应用提供技术参考。

1 穴播器结构与工作原理

本研究所设计的电控式穴播器安装于 2BZ-2 型玉米直插式播种机上,电控式穴播器是播种机的核心部件,主要由种管、穴播器主架、复位弹簧、导杆、推块、鸭嘴、取种轴和穴播器底座和电控系统组成,通过卡扣固定在播种机的平行四杆机构上。穴播器结构见图 1。



1. 种管;2. 穴播器主架;3. 复位弹簧;4. 导杆;5. 固定鸭嘴;6. 电推杆;7. 推块;8. 活动鸭嘴;9. 穴播器底座

1. Seed tube; 2. Main frame of hole planter; 3. Reset the spring; 4. Guide rod; 5. Fixed duckbill; 6. Electric push rod; 7. Push the block; 8. Active duckbill; 9. Base of hole planter

图1 电控式玉米直插式穴播器结构示意图

Fig. 1 Structural components of electrically controlled corn direct insertion hole sowing machine

播种机工作时,发动机带动整机前行,通过多级传动由零速补偿机构带动平行四杆机构做非匀速圆周运动完成直插打穴,旋转编码器将曲柄转动信息编译为脉冲信号传递至 STM32 单片机控制集成模块,控制穴播器在适当的时候完成取种、排种和鸭嘴开闭等动作,排出的种子落入穴内后由导向轮镇压完成 1 次播种。播种穴距为 330 mm,同时可

播种 2 行,行距 400 mm,播种深度 35 mm。

2 关键部件设计

2.1 电控系统结构

本研究所设计的穴播器电控系统主要由排种模块、控制集成模块、角位移检测机构、42 步进电机、直流电推杆、光电旋转编码器和锂电池组成。控制器工作时,旋转编码器检测零速补偿机构曲柄转动角位移,将转动信息编译为数字信号传递至单片机控制集

成模块,控制电路将开关信号分别传递至排种模块和 IP60 直流电推杆。排种模块由 42 步进电机、电机驱动器、取种轴、清种刷和霍尔接近式开关构成,步进电机控制器收到控制电路脉冲信号后驱动步进电机带动取种轴转动,完成 1 次取种过程,种子靠重力进入鸭嘴,等待排种。当平行四杆机构带动鸭嘴完成打穴,电推杆推出,带动鸭嘴张开,种子落入穴内,随后电推杆拉回,鸭嘴闭合,实现对排种机构和鸭嘴开合的控制。闭环控制系统见图 2。

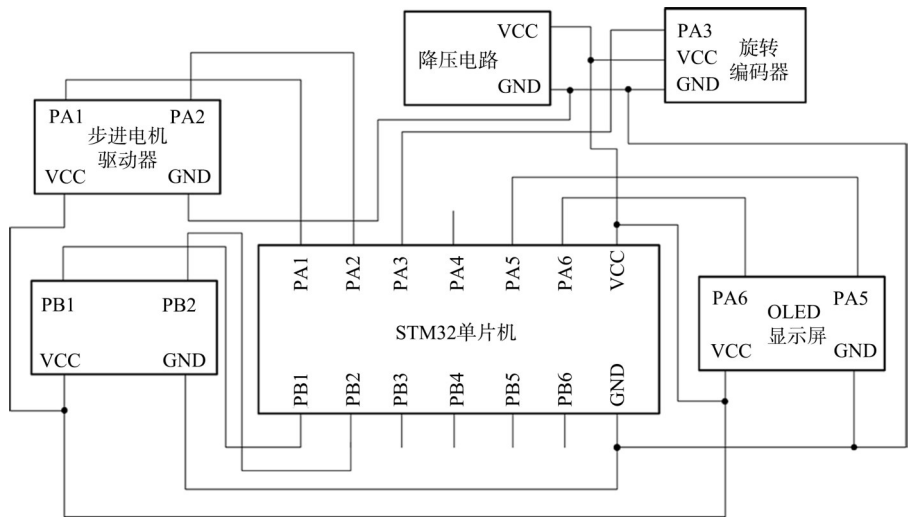
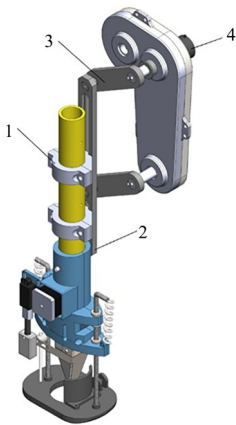


图 2 闭环控制系统框图
Fig. 2 Block diagram of closed-loop control system

2.2 角位移检测机构

角位移检测机构是穴播器控制信号来源装置,该机构主要用于检测播种机平行四杆机构的曲柄工作时的角位移,对各工作阶段进行精准控制,实现穴播器强制排种与鸭嘴强制开闭。其主要由旋转编码器、穴播杆和曲柄构成,角位移检测机构结构组成见图 3。

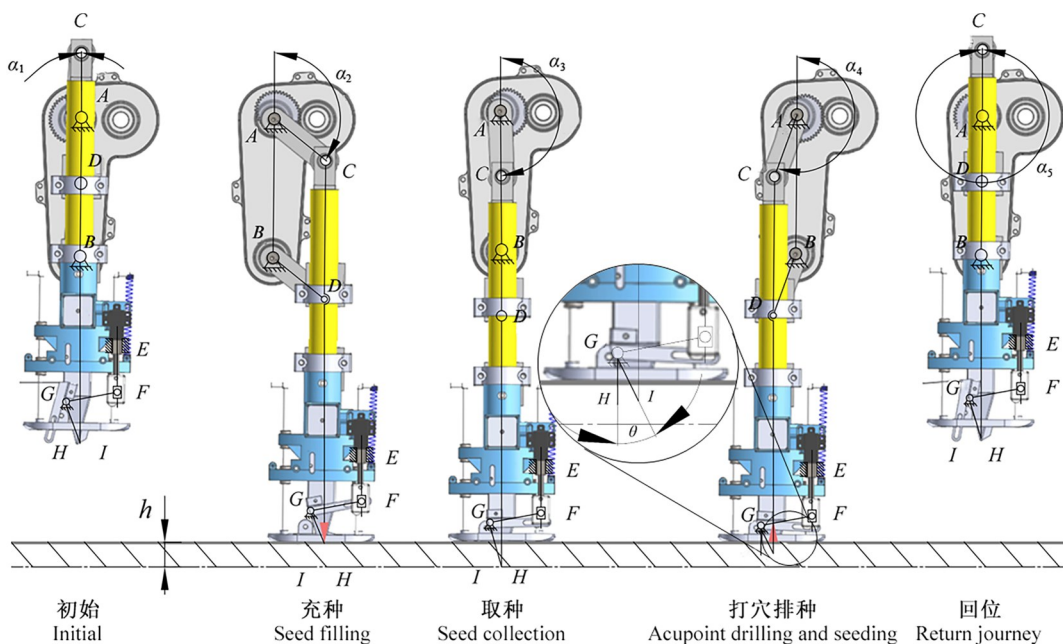
当播种机沿水平方向前行,平行四杆机构带动穴播器沿顺时针方向做非匀速圆周运动,实现穴播器垂直入土和出土,其工作过程见图 4。设定穴播杆(CD)和曲柄(AC)均处于竖直向上的状态为初始位置。此时,活动鸭嘴(GH)在电推杆(EF)的自锁作用下与固定鸭嘴(GI)紧密配合,保持常闭状态。鸭嘴底端位于穴播器底座上端,复位弹簧处于无弹性势能的状态。取种轴上的强磁片与霍尔接触式开关的感应面平行且呈水平分布,排种腔内的种子充满至取种轴的排种槽内,旋转编码器归零,曲柄(AC)与连杆(AB)间的夹角(α)为 0° 。角位移检测机构通过检测 α 的变化,控制



1. 固定卡扣; 2. 穴播杆; 3. 曲柄; 4. 旋转编码器
1. Fixed buckle; 2. Hole sowing rod; 3. Cranks; 4. Rotary encoder
图 3 角位移检测机构组成

Fig. 3 Structural composition of angular displacement detection mechanism

取种轴转动和鸭嘴张开角度(θ)。穴播器的工作过程可分为充种、取种、打穴排种和回位 4 个阶段。



AB为连杆;CD为穴播杆;AC为主动曲柄;BD为从动曲柄;EF为电推杆;GH为活动鸭嘴;GI为固定鸭嘴。

h 为打穴深度; θ 为鸭嘴开合角度。

AB is the connecting rod. CD is a hole sowing rod. AC is the active crank. BD is the driven crank. EF stands for electric push rod. GH stands for active duckbill. GI stands for fixed duckbill.

h is the depth of the acupoint insertion. θ is the angle at which the duckbill opens and closes.

图4 穴播器工作过程

Fig. 4 Working process of the seed-metering device

1)充种阶段。测得穴播器底座触土时曲柄转角为 135° ,因此设定 $0^\circ \leq \alpha \leq 135^\circ$ 时为播种机充种阶段,此时种群在种管内经重力作用被倒钩块限制在种管下端,取种轴窝眼内充填粒种子。

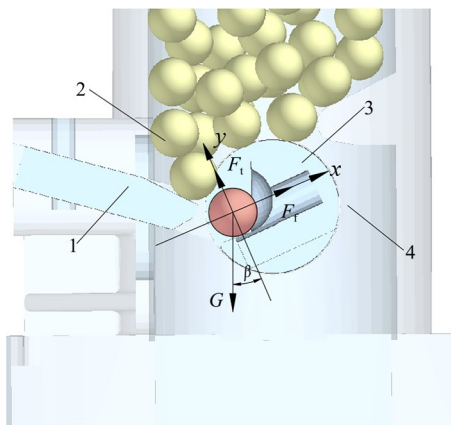
2)取种阶段。测得穴播器完成打穴时曲柄转角为 180° ,设定 $135^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 时为播种机取种阶段,为保证提前充填的种子能顺利落入闭合的鸭嘴内,取种轴逆时针旋转一定角度。此时种子受自身重力(G)、取种轴对种子的支持力(F_f)、与取种轴摩擦力(F_t)。取种阶段玉米种子受力分析见图5。

种子可以从取种轴顺利排出至鸭嘴内的条件为:

$$\begin{cases} F_g = G \sin \beta \\ F_f = \mu G \cos \beta \\ F_g > F_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: F_g 为重力在 x 轴的分力,N; β 为取种轴转动角度, $^\circ$; μ 为种子与取种轴之间的静摩擦因数。

本研究取种轴采用光固化3D打印制作,种子与取种轴之间的静摩擦因数为0.67,千粒种子质量为 $347.30 \text{ g}^{[15]}$,简化式(1)可得种子能够被稳定取种的临界条件为:



1. 种刷片;2. 玉米种子;3. 取种轴;4. 种管内壁

G 为种子所受重力; F_t 和 F_f 为种子所受支持力和摩擦力。

1. Planting brush blades; 2. Corn seeds; 3. Seed taking axis; 4. Inner wall of the tube

G is the gravitational force acting on the seed. F_t and F_f represent the support force and friction force acting on the seed.

图5 取种阶段玉米种子受力分析

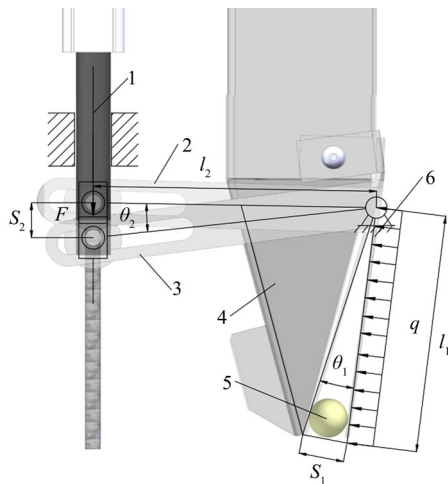
Fig. 5 Analysis of stress on corn seeds during the harvesting stage

$$\beta > \arctan \mu \quad (2)$$

由式(2)得,当 $\beta > 34.2^\circ$ 时种子可以顺利落下,考虑到当转角 β 过大,种子可能会从卸种槽继续

排出造成重播,将取种轴转角范围设为 $30^\circ\sim 70^\circ$,确保种子可顺利排出鸭嘴。未完全充入的种子会被种刷片清出取种槽内,随后单片机控制步进电机驱动器回位至霍尔接近式开关与强磁片感应,指示灯亮起时,新种子会再次进入取种槽等待排种。

3)打穴排种阶段。随着穴播器继续下降至限位底座下端触土后,主架带动鸭嘴下行距离 h 后完成打穴,单片机控制电推杆顶杆 EF 推出一定距离带动活动鸭嘴沿铰接点张开,鸭嘴开合工作原理及受力分析见图6。电推杆顶杆和活动鸭嘴(l_1)上固定杆的推块沿竖直方向顶开,活动鸭嘴以铰接轴为圆心逆时针方向转动角度(θ)后,种子依靠自身重力从鸭嘴落入穴内,随后电推杆拉回,带动活动鸭嘴顺时针方向转动闭合鸭嘴。为确保种子能够顺利落入穴内,鸭嘴张开角度 θ 必须在一个适当的范围,如果 θ 过小,种子可能被限制在鸭嘴内,无法顺利滑出; θ 过大则会造成种子在下落过程中受力不均匀,掉入穴孔位置随机。



1. 电推杆;2. 鸭嘴未开前连臂;3. 鸭嘴开合后连臂;4. 固定鸭嘴;5. 玉米种子;6. 活动鸭嘴

θ_1 为鸭嘴开合角度; θ_2 为推杆推动角度; l_1 为活动鸭嘴长度; l_2 为连臂长度; S_1 为种子直径; S_2 为推杆推出距离。 F 为电推杆施加给推块的推力; q 为动鸭嘴受到土壤的分布阻力。

1. Electric push rod; 2. The front connecting arm of the duckbill is not open; 3. The duckbill opens and closes, connecting the arms; 4. Fixed duckbill; 5. Corn seeds; 6. Active duckbill

θ_1 is the angle of opening and closing of the duckbill. θ_2 is the push angle of the push rod. l_1 is the length of the active duckbill. l_2 is the length of the connecting arm. S_1 is the diameter of the seed. S_2 is the pushing distance of the push rod. F is the thrust applied by the electric push rod to the pushing block. q is the distributed resistance received by the dynamic pressure nozzle from the soil.

图6 鸭嘴开合工作原理及受力分析

Fig. 6 Force analysis of the mouth opening mechanism

电推杆可以推动活动鸭嘴在土壤中张开的条件为:

$$\begin{cases} \theta_1 = \arccos\left(\frac{2l_1^2 - S_1^2}{2l_1^2}\right) \\ \theta_1 = \theta_2 \\ S_2 = 2l_2 \sin\left(\frac{\theta_2}{2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ_1 为鸭嘴开合角度, $(^\circ)$; θ_2 为推杆推动角度, $(^\circ)$; l_1 为活动鸭嘴长度,mm; l_2 为连臂长度,mm; S_1 为种子直径,mm; S_2 为推杆推出距离,mm。

通过测量得 l_1 为45 mm, l_2 为57.6 mm, S_1 取8 mm,带入式(3)计算得 θ_1 约为 11° , S_2 约为10 mm,考虑到推程越大推出和拉回所需要的时间就越长,应在适当增加冗余同时保持较低的推杆运行时长,故将试验范围设定为 $10\sim 18$ mm。 $180^\circ \leq \alpha \leq 191^\circ$ 视为打穴排种阶段。

4)回位阶段。 $191^\circ \leq \alpha \leq 360^\circ$ 时为播种机回位阶段,随着穴播器限位底座逐渐上行离开地面,复位弹簧拉回穴播器主架和鸭嘴至初始状态,当平行四杆机构连杆再次与地面相垂直,旋转编码器调零并在OLED显示屏中显示角度为 0° 时,穴播器回到初始状态,完成1次直插穴播作业。

2.3 鸭嘴控制系统

鸭嘴控制系统是实现穴播的关键部件,主要由动鸭嘴、电推杆和推块组成。鸭嘴在完成膜上打穴后,电推杆推动推块将力传递至与铰接点相连的活动鸭嘴上使活动鸭嘴张开,将玉米种子投入穴孔中,随后闭合准备下一次播种。活动鸭嘴张开时受土壤分布阻力(q),推块受电推杆作用力(F),受力分析见图6。种子能够顺利从鸭嘴落入穴内的条件为:

$$Fl_2 \cos \theta_2 = ql_1 \frac{l_1}{2} \quad (4)$$

式中: F 为电推杆施加给推块的推力,N; q 为动鸭嘴受到土壤的分布阻力,N/m。

本研究试验用地位于甘肃省玉米主要产地河西走廊地区,该地区背靠巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠,土壤类型主要以沙土和沙壤土为主,通过查阅相关文献^[16-17]可得 q 为0.67 N/m,考虑到动鸭嘴张开时可能还会受到铰接点摩擦力和鸭嘴自重等因素的影响,引入安全系数 k ,取值1.4,代入式(4)得电推杆推力为:

$$\begin{cases} F = \frac{ql_1^2}{2l_2 \cos \theta_2} \\ F_s = kF \end{cases} \quad (5)$$

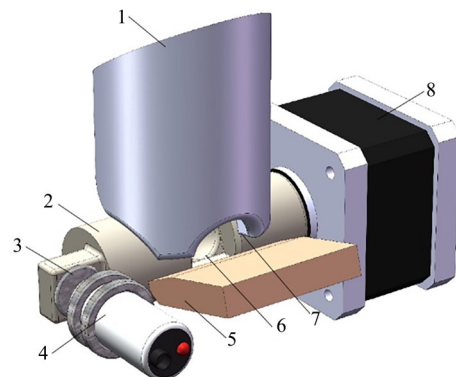
式中: F_s 为电推杆实际需要的力,N。

计算得 F_s 约为17 N,由于电推杆功率恒定,设定电推杆推力增大的同时会降低推杆推出的速度,导致鸭嘴张开不及时,种子不能准确落入穴内造成漏播。因此,设定电推杆推力范围为17~29 N进行后续试验,以保证种子顺利排出。

2.4 排种机构及取种轴

本研究的排种机构负责响应单片机发出的信号,控制取种轴转动一定角度完成取种动作后并强制回位至霍尔传感器的位置,可有效避免因取种时卡种子所导致的取种轴无法回位,排种机构结构示意图见图7。

取种轴是实现取种最重要的部件,其上设置有窝眼方便种子排出,与种刷片相配合以保证取种轴转动时多余的种子被及时清出,取种轴及种刷片尺寸关系及结构见图8。本研究借鉴传统直插式穴播器的取种轴确定其直径(d)为21 mm,取种窝眼长



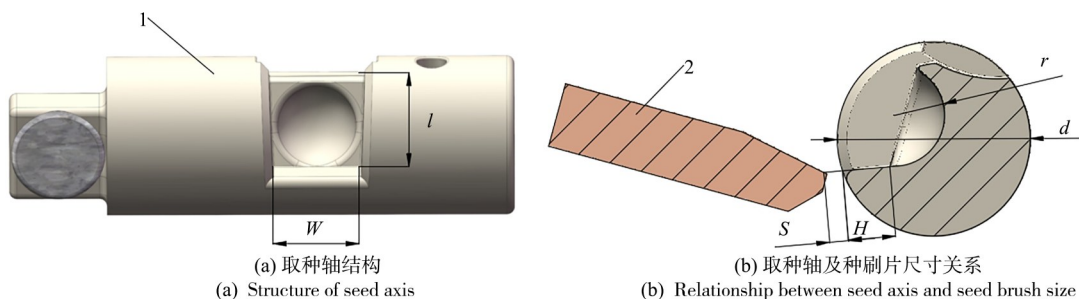
1. 倒钩块;2. 取种轴;3. 强磁片;4. 霍尔传感器;5. 种刷片;6. 取种窝眼;7. 拱形孔;8. 步进电机

1. Inverted hook block; 2. seed axes; 3. Strong magnetic sheet; 4. Hall sensor; 5. Planting brush blades; 6. Nest eyes; 7. Arched hole; 8. Stepper motor

图7 排种机构结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of seeding mechanism structure

度(l)为14 mm,取种窝眼宽度(W)为14 mm,球形孔半径(r)为5.5 mm。



(a) 取种轴结构
(a) Structure of seed axis

(b) 取种轴及种刷片尺寸关系
(b) Relationship between seed axis and seed brush size

1. 取种轴;2. 种刷片

l 为取种窝眼长度; W 为取种窝眼宽度; r 为球形孔半径; d 为取种轴直径; H 为取种窝眼高度; S 为种刷片与取种轴距离。

1. Seed taking axis; 2. Planting brush blades

l is the length of the seed hole. W is the width of the seed hole. r is the radius of the spherical hole. d is the diameter of the seed axis. H is the height of the seed hole. S is the distance between the seed brush and the seed axis.

图8 取种轴和种刷片尺寸关系及结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of the size relationship and structure of the seed axis and seed brush blade

通过前期研究发现取种窝眼高度(H)和种刷片与取种轴距离(S)可能对播种质量产生显著影响^[4],设计 H 和 S 的尺寸时应满足:

$$\begin{cases} T_{\max} < H < D_{\max} \\ 0 < S < D_{\min} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $T_{\max}$ 为玉米种子厚度最大值,mm; $D_{\max}$ 为玉米种子基圆直径最大值,mm; $D_{\min}$ 为玉米种子基圆直径最小值,mm。

通过查阅石林榕等^[18]对玉米种子参数标定相关研究,结合式(6),初步确定 H 为7.24 mm, S 为2 mm,后续将通过试验继续对具体数值进行

探讨。

3 试验材料与方法

于2024年10月在甘肃农业大学机电工程学院进行穴播器台架试验,研究穴播器各因素对播种性能的影响。试验玉米种子为‘郑丹958’,该品种玉米含水率为12%,千粒重347.30 g。

为保证测试时输出转速恒定且可调,选用12V-600W直流永磁电机直接驱动输入轴进行转动,输入轴上固定有粘贴荧光条且随轴转动的圆盘,借助AR926非接触式光电转速表测量转速以辅助电机

驱动器调节输入轴到试验所需的转速;使用恒定拉力的皮筋对鸭嘴束缚以模拟土壤对鸭嘴分布阻力;使用3030铝型材制作穴播器底座导轨并对上述设备进行固定,保证试验数据的可靠性。电控式玉米直插播种机试验台架见图9。



1. 非接触式光电转速表;2. 测速圆盘;3. 直流永磁电机;4. 控制器及12 V电源;5. 电控式直插式穴播器;6. 机架及底座导轨;7. 接种盒

1. Non-contact photoelectric tachometer; 2. Speed measuring disc; 3. DC permanent magnet motor; 4. Controller and 12 V power supply; 5. Electric controlled direct insertion hole seeder; 6. Rack and base rails; 7. Vaccination box

图9 电控式玉米直插播种机试验台架

Fig. 9 Experimental bench for electrically controlled corn direct insertion seeder

台架试验平台模拟实际农田的地形条件,平台上配备控制排种器参数的传感器和反馈模块。试验时通过调节单片机控制模块以实现取种轴转角、电推杆推程和电推杆推力的精确控制,确保测试过程稳定。每次试验开始前,校准穴播器的各项参数,确保传感器与控制系统工作正常,通过主控板归零按钮调整四杆机构两端曲柄都为竖直向上时为工作初始状态。在单因素试验中,分别对影响穴播器播种性能的3个关键因素进行测试,包括取种轴转角、电推杆推程和电推杆推力。为深入分析种子形态对播种性能的影响,研究选取3类典型玉米种子的混合包括马齿型、球锥型和类球型,混合比例分别为5:3:2^[4]。通过逐一调整取种轴转角、电推杆推程和电推杆推力,评估其对播种合格率的影响,并筛选出性能较优的参数区间,在此基础上,采用多因素正交试验设计,利用Design Expert 13软件对试验结果进行线性拟合得回归方程,通过优化模块优化后得最佳参数组合。

3.1 试验评价指标及数据处理

根据GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试

验方法》^[19]的要求,台架试验选取合格率、漏播率和重播率作为主要性能指标。各指标计算公式如下:

$$\begin{cases} P_g = \frac{N_g}{N_t} \times 100\% \\ P_m = \frac{N_m}{N_t} \times 100\% \\ P_r = \frac{N_r}{N_t} \times 100\% \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_g 为合格率,%; P_m 为漏播率,%; P_r 为重播率,%; N_t 为总穴数; N_g 为每穴成功播下且仅1粒种子的穴数; N_m 为未成功播种的穴数; N_r 为播入多粒种子的穴数。

每组试验投放250粒种子并重复3次,取平均值作为最终结果。试验数据通过Excel软件记录并使用Design-Expert 13软件进行统计分析。为系统地探索不同因素对合格率的影响,采用响应面法进行Box-Behnken设计试验,构建二次多项式回归模型,生成响应面图,以直观呈现播种合格率在不同因素组合下的变化趋势。通过对响应面模型的拟合优度进行评估,识别出最优的参数设置,以实现播种合格率的最大化。同时,采用方差分析对模型进行显著性检验,评估各因素对响应变量的影响程度,确保分析结果的统计学可靠性与科学性。

3.2 单因素试验分析

本研究以取种轴转角、电推杆推程和电推杆推力为影响因素,合格率、漏播率和重播率为性能指标,每个因素下设置5个水平进行单因素试验,得到各因素与性能指标的关系见图10。

1)取种轴转角对播种合格率的影响。设定电推杆推程为12 mm,电推杆推力为20 N,取种轴转角设置30°、40°、50°、60°和70°共5个水平进行试验。由试验结果(图10(a))可知,随着取种轴转角增大,单粒合格率先升后降,在转角为50°时出现峰值为74.2%。重播率和漏播率则随着取种轴转角逐渐增大分别呈现上升和降低的趋势。试验发现,取种轴转角过小时,会导致种子无法顺利取种造成漏播,转角过大时,种子可能会从卸种槽内排出,造成重播。试验表明,合理取种轴转角对于提高播种合格率至关重要,考虑到试验可能存在误差且玉米播种要满足“宁重勿漏”农艺要求,故将多因素试验水平范围选择为50°~70°。

2)电推杆推程对播种合格率的影响。设定取

种轴转角为 60° , 电推杆推力为 20 N, 电推杆推程设置 10、12、14、16 和 18 mm 共 5 个水平进行试验。合格率随电推杆推程的提高呈现下降的趋(图 10(b))势, 表明适当的推程最有利于单粒播种, 此时系统供种与排种节奏配合最协调。在更大推程时, 漏播率开始上升, 分析原因与前期推测一致, 过大的推程导致推杆运行时间增大, 使得种子掉落延迟无法准确落入穴内, 造成漏播。剔除导致漏播率过大的水平, 选择多因素试验范围为 10~14 mm。

3) 电推杆推力对播种合格率的影响。设定取种轴转角为 60° , 电推杆推程为 12 mm, 电推杆推力设置 17、20、23、26 和 29 N 共 5 个水平进行试验。合格率和漏播率随着电推杆推力增加分别呈下降趋势和上升趋势(图 10(c)), 表明过大的推力会导致鸭嘴开合速度变慢, 使种子不能及时排入穴内。为满足“宁重勿漏”农艺要求且考虑到试验可能存在误差, 剔除漏播率过大的水平并选择多因素试验范围为 17~23 N。

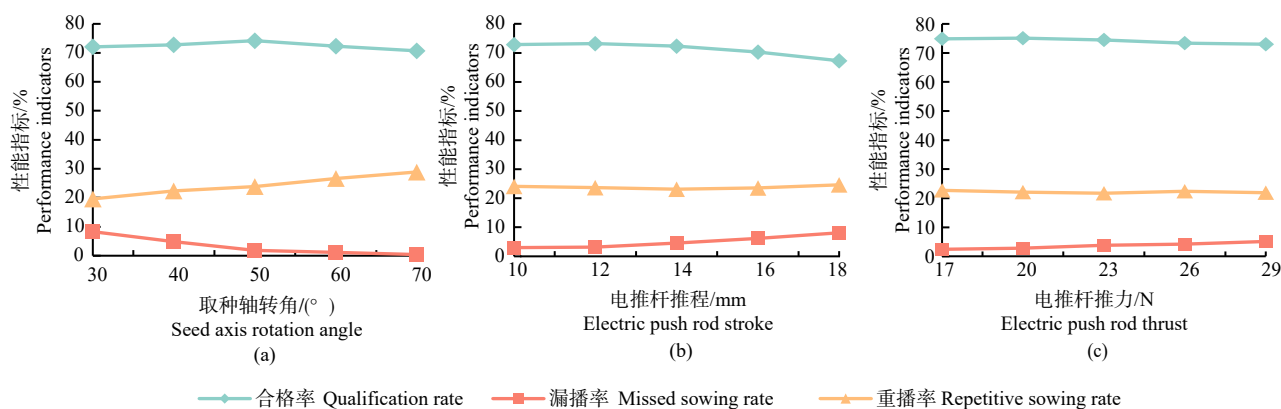


图 10 取种轴转角(a)、电推杆推程(b)和电推杆推力(c)对合格率、漏播率及重播率的影响

Fig. 10 The influence of seed shaft angle (a), electric push rod stroke (b), and electric push rod thrust (c) on qualification rate, missed sowing rate, and repetitive sowing rate

3.3 多因素试验及结果分析

3.3.1 试验方案及结果分析

基于单因素试验结果, 采用响应面法设置三因素三水平的组合共 17 组试验, 以取种轴转角(X_1)、

电推杆推程(X_2)和电推杆推力(X_3)为自变量, 以合格率(Y_1)、漏播率(Y_2)和重播率(Y_3)为响应值, 穴播器播种性能试验因素与水平编码见表 1, 多因素台架试验方案及性能指标见表 2。

表 1 穴播器播种性能试验因素与水平编码

Table 1 Factors and horizontal coding of seeding performance test for hole seeders

水平 Level	因素 Factor		
	取种轴转角(X_1)/($^\circ$) Seed axis rotation angle	电推杆推程(X_2)/mm Electric push rod stroke	电推杆推力(X_3)/N Electric push rod thrust
-1	50	10	17
0	60	12	20
1	70	14	23

采用 Design-Expert 13 软件对表 2 的试验数据进行方差分析, 结果见表 3。

基于方差分析结果(表 3), 各质量指标呈现差异化影响因素。对于合格率(Y_1), X_1 和 X_3 存在极显

著主效应, 而 X_2 影响不显著, 但其平方项 X_1^2 、 X_2^2 和 X_3^2 均对 Y_1 产生极显著非线性效应; 对于漏播率(Y_2), X_2 与 X_3 的主效应达到显著水平, 且 X_2^2 、 X_3^2 表现出极显著二次响应特征; 对重播率(Y_3), X_1 和 X_3

表2 多因素台架试验方案及试验结果

Table 2 Multi-factor bench test design and results

编号 Number	因素水平 Factor level			性能指标/% Performance index		
	x_1	x_2	x_3	Y_1	Y_2	Y_3
1	-1	-1	0	70.45	4.79	24.98
2	1	-1	0	69.18	3.91	26.91
3	-1	1	0	72.66	3.97	23.37
4	1	1	0	68.98	4.18	26.84
5	-1	0	-1	71.96	3.83	24.21
6	1	0	-1	69.77	3.76	26.47
7	-1	0	1	68.23	3.82	27.95
8	1	0	1	64.76	3.67	31.57
9	0	-1	-1	70.63	4.72	24.65
10	0	1	-1	72.70	3.79	23.51
11	0	-1	1	67.53	3.72	28.75
12	0	1	1	65.72	4.64	29.64
13	0	0	0	77.43	2.35	20.22
14	0	0	0	77.02	2.57	20.41
15	0	0	0	78.64	1.61	19.75
16	0	0	0	77.37	2.36	20.27
17	0	0	0	77.58	2.24	20.18

注: x_1, x_2, x_3 分别为取种轴转角、电推杆推程和电推杆推力的水平值; Y_1, Y_2 和 Y_3 分别为合格率、漏播率和重播率。表3和图11同。

Note: x_1, x_2, x_3 are the rotation angle of seed taking shaft, the push distance of electric push rod and the thrust of electric push rod respectively. Y_1, Y_2, Y_3 are the qualification rate, missed sowing rate and repetitive sowing rate respectively, Same as Table 3 and Fig. 11.

的主效应极显著,同时 X_2X_3 呈现显著影响,表明各参数的非线性变化及交互作用对性能指标具有显著影响。拟合 Y_1, Y_2 和 Y_3 的回归方程得:

$$Y_1 = 77.61 - 1.3X_1 - 2.35X_3 - 0.97X_2X_3 - 3.91X_1^2 - 3.44X_2^2 - 5.02X_3^2 \quad (8)$$

$$Y_2 = 2.23 + 0.46X_2X_3 + 0.77X_1^2 + 1.22X_2^2 + 0.78X_3^2 \quad (9)$$

$$Y_3 = 20.17 + 1.41X_1 + 2.38X_3 + 0.51X_2X_3 + 3.14X_1^2 + 2.22X_2^2 + 4.25X_3^2 \quad (10)$$

3因素对性能指标的影响主次顺序为:电推杆推力(X_3)、电推杆推程(X_2)和取种轴转角(X_1)。交互因素 X_2X_3 对3项性能指标的显著性水平 $P < 0.05$ (表3),影响显著。当 X_3 为20 N时, X_2 一定,合格率(Y_1)随 X_1 的增大先增大后减小; X_1 一定, Y_1 随 X_2 的增加先增大后减小(图11(a));当 X_1 为60°时, X_3 一定,漏播率(Y_2)随 X_2 的增加呈现先减小后增大的趋势,当电推杆推程

X_2 一定, Y_2 随 X_3 的增大呈现先减小后增大的趋势(图11(b));当 X_2 为12 mm时, X_1 一定,重播率(Y_3)随 X_3 的增加呈现先减小后增大的趋势, X_3 一定,重播率 Y_3 随 X_1 的增大呈现先减小后增大的趋势(图11(c))。

3.3.2 参数优化

结合各因素取值范围进行参数优化,其约束条件为:

$$\begin{cases} \text{Max } Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \text{Min } Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{Min } Y_3(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s.t.} \begin{cases} X_1 \in [50^\circ, 70^\circ] \\ X_2 \in [10 \text{ mm}, 14 \text{ mm}] \\ X_3 \in [17 \text{ N}, 23 \text{ N}] \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

求解得到取种轴转角为59°,电推杆推程为12.2 mm,电推杆推力为19.4 N时结果最优,合格

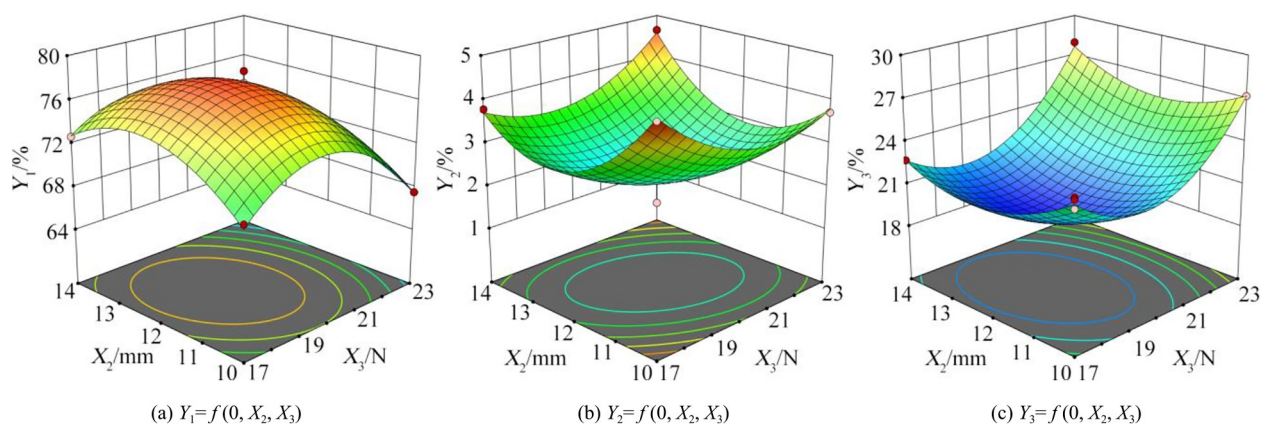
表 3 穴播器台架试验方差分析及试验结果

Table 3 Variance analysis of bench test and experimental results for hill-drop planter

来源 Source	Y_1				Y_2				Y_3			
	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P
模型 Model	309.70	9	103.94	<0.000 1**	13.79	9	18.07	0.000 5**	216.93	9	218.42	<0.000 1**
X_1	13.49	1	40.76	0.000 4**	0.10	1	1.17	0.315 6	15.90	1	144.13	<0.000 1**
X_2	0.78	1	2.34	0.169 9	0.04	1	0.46	0.518 3	0.47	1	4.22	0.079 0
X_3	44.27	1	133.73	<0.000 1**	0.01	1	0.09	0.770 3	45.46	1	411.95	<0.000 1**
$X_1 X_2$	1.73	1	5.22	0.056 2	0.30	1	3.50	0.103 4	0.59	1	5.37	0.053 6
$X_1 X_3$	0.41	1	1.24	0.302 8	0.01	1	0.02	0.894 6	0.46	1	4.19	0.079 9
$X_2 X_3$	3.76	1	11.37	0.011 9*	0.86	1	10.10	0.015 6*	1.03	1	9.34	0.018 4*
X_1^2	64.21	1	193.96	<0.000 1**	2.49	1	29.40	0.001 0**	41.40	1	375.19	<0.000 1**
X_2^2	49.83	1	150.52	<0.000 1**	6.24	1	73.57	<0.000 1**	20.81	1	188.60	<0.000 1**
X_3^2	106.22	1	320.84	<0.000 1**	2.53	1	29.80	0.000 9**	76.00	1	688.63	<0.000 1**
残差 Residual	2.32	7			0.59	7			0.77	7		
失拟 Lack of fit	0.82	3	0.73	0.587 0	0.06	3	0.16	0.920 7	0.53	3	2.84	0.169 3
误差 Pure error	1.50	4			0.53	4			0.25	4		
总和 Total	312.01	16			14.38	16			217.70	16		

注：**和*分别表示极显著($P<0.01$)和显著($0.01<P<0.05$)。

Note: ** and * indicate highly significant ($P<0.01$) and significant ($0.01<P<0.05$) respectively.

图 11 X_2 和 X_3 交互作用对性能指标的影响Fig.11 Impact of X_2 and X_3 interaction on performance metrics

率为77.98%、重播率为2.27%、漏播率为19.75%。

4 试验验证

为验证穴播器优化后的性能,于2024年12月10日在甘肃农业大学土槽试验田进行电控式玉米播种机田间试验,试验采用‘郑单958’玉米种子,试验田地势平坦,土壤为沙壤土,含水率为6.7%。

试验根据NY/T987—2006《铺膜播种机作业质量》^[20]和T/GMES 012—2019《2BZ-2型直插式玉米种植机》^[21]标准测试播种机播种性能。试验仅对电控系统可靠性进行验证,不验证膜上打穴效果,记录试验空穴数和穴粒数,分别计算空穴率和穴粒数合格率。计算公式为:

$$\begin{cases} H_k = \frac{k_h}{f} \times 100\% \\ H_l = \frac{l_h}{f} \times 100\% \end{cases} \quad (12)$$

式中: H_k 为空穴率,%; k_h 为空穴个数; f 为单元内测定的总孔个数; H_l 为穴粒数合格率,%; l_h 为穴粒数合格穴数。

统计试验数据计算得,空穴率为1.6%,穴粒数合格率为91.8%,各性能指标均满足T/GMES 012—2019《2BZ-2型直插式玉米种植机》技术要求,达到穴播机播种作业质量要求。

5 结论

本研究针对西北旱区现有直插式播种机实际应用中地对地块平整度要求高的问题,对该地区常用的2BZ-2型播种机的穴播器进行优化改进。以播种机平行四杆机构的曲柄从起点开始的转动角度为参考,将穴播器的工作过程划分为充种、取种、打穴排种和回位4个工作阶段。基于单片机设计电控系统,对各工作阶段进行精准控制,实现穴播器强制排种与鸭嘴强制开闭,以提高播种稳定性和适应性。设定其 $0^\circ \sim 135^\circ$ 为穴播器充种阶段; $135^\circ \sim 180^\circ$ 为穴播器取种阶段; $180^\circ \sim 191^\circ$ 为穴播器打穴排种阶段; $191^\circ \sim 360^\circ$ 为穴播器回位阶段。采用二次旋转正交组合台架试验,以取种轴转角、电推杆推程和电推杆推力为因素,以单粒合格率、漏播率和重播率为响应值进行验证。优化结果表明在穴播器取种轴转角为 59° ,电推杆推程为12.2 mm和电推杆推力为19.4 N时最优。按照优化参数进行试验

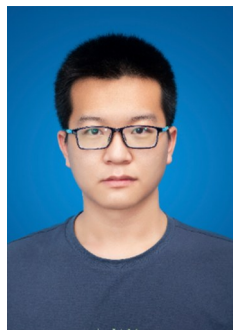
验证,结果显示,空穴率为1.6%,穴粒合格率为91.8%,均符合T/GMES 012—2019《2BZ-2型直插式玉米种植机》技术要求。

参考文献 References

- [1] 乔远,杨欢,雒金麟,汪思娴,梁蓝月,陈新平,张务帅. 西北地区玉米生产投入及生态环境风险评价[J]. 中国农业科学, 2022, 55(5): 962-976
Qiao Y, Yang H, Luo J L, Wang S X, Liang L Y, Chen X P, Zhang W S. Inputs and ecological environment risks assessment of maize production in northwest China [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, 55(5): 962-976 (in Chinese)
- [2] 孙洪新. 全膜双垄沟播玉米绿色环保种植技术[J]. 农业开发与装备, 2022 (9): 216-218
Sun H. Green and environmental protection planting technology of maize with full film double ridge furrow planting [J]. *Agricultural Development & Equipments*, 2022(9): 216-218 (in Chinese)
- [3] 赵丽霞. 农艺技术在甘肃省玉米生产中的应用[J]. 南方农业, 2024, 18(6): 59-61
Zhao L X. Application of Agronomic technology in maize production in Gansu Province. [J]. *South China Agriculture*, 2024, 18(6): 59-61 (in Chinese)
- [4] 石林榕. 西北旱区玉米直插穴播互作机理研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2022
Shi L R. Research on the intercropping mechanism of maize hole seeding with vertical insertion in the dry northwest [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2022 (in Chinese)
- [5] Deng T H, Zhao W Y, Shi L R, Sun B G, Qi T S, Li H. Analysis and optimization of control cam mechanism in a roller type corn finger planter based on DEM and MBD coupling technology[J] *Int J Agric & Biol Eng*, 2025, 18(1): 143 - 153
- [6] 李辉,赵武云,石林榕,戴飞,饶昱,王尊. 舀种勺舌式胡麻精量穴播器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 85-95
Li H, Zhao W Y, Shi L R, Dai F, Rao G, Wang Z. Design and test of seed ladle tongue type flax precision burrow planter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2024, 55(3): 85-95 (in Chinese)
- [7] Lu Y G, Sun W, Yang X P, Zhao M, Simionescu P A. Analytical design and test of licorice harvester based on DEM-MBD coupling[J]. *Agronomy*, 2024, 14(11): 2651
- [8] 王尊,赵武云,石林榕,石林榕,孙步功,孙伟,戴飞,周刚,郭军海,饶昱,李辉. 基于DEM-MBD耦合的滚勺式精量穴播器成穴器运动参数优化[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(1): 66-77
Wang Z, Zhao W Y, Shi L R, Sun B G, Sun W, Dai F, Zhou G, Guo J H, Rao G, Li H. Optimization of the motion parameters of a rolling spoon type precision hole planter based on DEM-MBD coupling [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29 (1): 66-77 (in Chinese)
- [9] Shi L R, Zhao W Y, Hua C T, Rao G, Guo J H, Wang Z. Study on the intercropping mechanism and seeding improvement of the cavity planter with vertical insertion using DEM-MBD coupling method[J]. *Agriculture*, 2022, 12(10): 1567
- [10] 石林榕,赵武云,孙伟,李荣斌,孙步功. 电驱式玉米膜上直插播种机前进速度补偿机构参数优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 87-94

- Shi L R, Zhao W Y, Sun W, Li R B, Sun B G. Parameters optimization of speed compensation mechanism of electric driving maize planter with dibbling on membrane [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8): 87-94 (in Chinese)
- [11] 石林榕,赵武云,杨小平,孙步功,孙伟. 玉米直插播种机强排-强启排种装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(2): 41-47
- Shi L R, Zhao W Y, Yang X P, Sun W, Sun B G. Design and test of metering device with forced seeding and opening for corn direct seeding machine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(2): 41-47 (in Chinese)
- [12] 戴飞,高爱民,张锋伟,韩正晨,赵武云,王松林. 玉米全膜双垄沟气动直插式播种机设计与仿真[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(5): 284-289
- Dai F, Gao A M, Zhang F W, Han Z S, Zhao W Y, Wang S L. Design and simulation of pneumatic direct insert hill-seeder with corn whole plastic-film on double ridges [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(5): 284-289 (in Chinese)
- [13] 王方艳,孙光全,张钦. 电控锥盘式蔬菜播种机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4): 70-79
- Wang F Y, Sun G Q, Zhang Q. Design and experiment of electric control cone type vegetable seeder [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 70-79 (in Chinese)
- [14] 王云力. 电控小麦精量播种机的设计研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2023
- Wang Y L. Design and research of electric control wheat precision seeder [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023 (in Chinese)
- [15] 杨正,李国锋,石林榕,王尊. 玉米种子静摩擦系数测定及离散元法验证[J]. *中国农机化学报*, 2023, 44(8): 12-16
- Yang Z, Li G F, Shi L R, Wang Z. Determination of the coefficient of static friction of maize seeds and validation of the discrete element method [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2023, 44(8): 12-16 (in Chinese)
- [16] 马子茗,张美玲,刘星宇. 基于SSA优化CatBoost的甘南草地土壤有机碳含量估算[J/OL]. *环境科学*, 1-17. 2025-02-17. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202408081>
- Ma Z M, Zhang M L, Liu X Y. Estimation of soil organic carbon content in Gannan grassland based on SSA optimized CatBoost [J/OL]. *Environmental Science*, 1-17. 2025-02-17. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202408081> (in Chinese)
- [17] 杨阳,马绎皓,赵鸿,齐月,张凯,王鹤龄. 甘肃省不同气候类型区土壤水分特性[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 213-220, 226
- Yang Y, Ma Y H, Zhao H, Qi Y, Zhang K, Wang H L. Soil moisture properties of different climate types in Gansu Province [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5): 213-220, 226 (in Chinese)
- [18] Shi L R, Zhao W Y, Rao G, Guo J H, Wang Z. Modeling of typically shaped corn seeds and calibration of the coefficient of rolling friction [J]. *Agronomy*, 2023, 13(6): 1573
- [19] GB/T 6973—2005 单粒(精密)播种机试验方法[S]. 北京:中国标准出版社, 2005
- GB/T 6973—2005 Testing method of single grain seed drills (precision drills) [S]. Beijing: China Standard Press, 2005 (in Chinese)
- [20] NY/T 987—2006 铺膜播种机作业质量[S]. 北京:中国农业出版社, 2006
- NY/T 987—2006 Operating quality grain film-covering hill-drop drill [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2006 (in Chinese)
- [21] T/GMES 012—2019 2BZ-2型直插式玉米种植机[S]. 兰州:甘肃省机械工程学会, 2019
- T/GMES 012—2019 2BZ-2 type direct-insertion corn planter [S]. Lanzhou: Gansu Mechanical Engineering Society, 2019 (in Chinese)

责任编辑:刘迎春



第一作者简介: 祁天山,甘肃农业大学硕士研究生,获得2023和2024年度国家学业奖学金,参与甘肃省科技计划项目、国家自然科学基金项目和甘肃省农科院重点研发计划等多项研究。



通讯作者简介: 石林榕,中共党员,副教授,工学博士。主要研究方向为西北旱区精密、智能播种关键技术与装备研究。荣获2023年度甘肃省专利发明人奖,为国家产业技术体系胡麻机械化岗位成员、农业机械学会会员、农业工程学会高级会员、美国农业与生物工程师学会会员、国际土壤耕作研究会会员。主持国家自然科学基金2项、省校级项目多项。发表学术论文多篇,其中SCI收录10篇,EI收录18篇。授权专利多项,其中发明专利4项。获省厅级奖多项,其中省级二等奖2项。立足甘肃农业,建立了较系统的农业物料参数标定仪器和方法。针对甘肃覆膜种植模式,研发玉米直插穴播机、胡麻联合播种机、油菜联合播种机、小杂粮联合播种机等农业装备。