

# 西北寒旱农区胡麻滚勺式精量 穴播器的设计及试验

石林榕, 赵武云

(甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070)

**摘要:** 针对胡麻穴播器用种量大、穴粒数变异系数大、穴孔缺种等实际问题, 结合甘肃覆膜种植环境, 设计了一种带舀种勺舌的滚勺式精量穴播器。通过分析穴播器的作业原理和排种过程, 确定了滚勺组件组成及舀种勺尺寸、安装数量、安装角等主要参数, 并采用响应曲面法分析了主勺深度、舀种勺安装角和穴播器角速度对穴播器排种性能的影响。结果表明: 当主勺深度为 6.68 mm、舀种勺安装角为 7.62°、穴播器角速度为 3.22 rad/s 时, 穴粒数合格率为 92.5%, 漏播率为 2.54%, 重播率为 4.96%。本文研究结果可为胡麻精量穴播排种装置设计提供参考。

**关键词:** 农业机械工程; 胡麻; 穴播器

**中图分类号:** S223.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2023)09-2706-12

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211270

## Design and test of rolling spoon type *flaxes* precision hole sower for caraway in northwest cold and arid agricultural region

SHI Lin-rong, ZHAO Wu-yun

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In view of the practical problems such as large seed consumption, large variation coefficient of hole number and lack of seed in hole holes, a roller scoop type precision hole sowing seeder with scoop tongue was designed in Gansu mulch planting environment. By analyzing the operation principle of the seed rower and seed rowing process, the main parameters such as the composition of the rolling spoon assembly and the size, installation number and installation angle of the scooping spoon were determined, and the effects of the main spoon depth, the installation angle of the scooping spoon and the angular speed of the seed rowing wheel on the seed rowing performance of the seed rower were analyzed by the response surface method. The test showed that when the depth of main scoop was 6.68 mm, the installation angle of scoop was 7.62° and the angular speed of seed releasing wheel was 3.22 rad/s, the qualified rate of hole number was 92.5%, the rate of missed seeding was 2.54%, the rate of reseeding was 4.96%, and the seed

**收稿日期:** 2022-02-21.

**基金项目:** 财政部和农业农村部国家现代农业产业技术体系项目 (CARS-14-1-28); 国家自然科学基金项目 (52065004); 甘肃省高等学校创新能力提升项目 (2020A-51).

**作者简介:** 石林榕 (1983-) 男, 副教授, 博士. 研究方向: 西北旱区精密、智能播种关键技术与装备.

E-mail: shilr@gsau.edu.cn

**通信作者:** 赵武云 (1966-) 男, 教授, 博士. 研究方向: 农业工程技术与装备. E-mail: zhaowu@gsau.edu.cn

releasing performance was better. This study can provide a basis for the design of precision hole-sowing seeding device for flaxes.

**Key words:** agricultural mechanical engineering; *flaxes*; cavity seeders

## 0 引言

胡麻(又称亚麻, *Flaxes*)主要产于甘肃、山西、新疆、宁夏等地,是食用油的主要原料之一,对保障国家粮食安全具有重要战略意义<sup>[1,2]</sup>。甘肃地处黄土高原,地理条件独特,是油用型亚麻的主要产区。胡麻作为甘肃主要特色经济作物之一,对甘肃经济具有提升作用<sup>[3]</sup>。近几年,胡麻种植面积和产量逐年增加<sup>[4]</sup>,机械化生产是提高生产效率的重要途径<sup>[5]</sup>。播种环节是制约胡麻规模化的“瓶颈”问题,也是胡麻生产机械化亟待解决的关键技术问题之一。甘肃以地膜覆盖栽培技术为主<sup>[6]</sup>,在玉米<sup>[7]</sup>和马铃薯<sup>[8]</sup>等作物中应用广泛,增产效益较高。目前,胡麻地膜覆盖种植技术逐渐发展起来,但针对胡麻覆膜播种的专用机具缺失。国外采用专用播种机,由于其农业基础设施较完善,地域降水量和作业气候对胡麻生长影响较小<sup>[9]</sup>,但其播种机不具备覆膜作业功能,且价格昂贵。国内胡麻播种机械化程度低,多以条播机和人工撒播为主<sup>[10,11]</sup>。机械化穴播是实现精量播种的主要方式之一,由于存在行间和穴间,胡麻苗透风、透光度较条播好<sup>[12]</sup>。同时,地膜覆盖可增温保墒,提高胡麻出苗率和存活率。

为提高穴播器排种性能,需优化穴播器结构和作业参数,石林榕等<sup>[13]</sup>针对甘肃省普遍种植的胡麻品种,结合试验和仿真法标定了胡麻排种仿真参数,通过仿真试验提高了异型窝眼轮排种性能。国内多位学者针对较规则和不规则种子研发了专用穴播器。针对较规则种子(如油菜和谷子等),张青松等<sup>[14]</sup>设计了一种带缺口矩形勺式型孔精量取种的油菜勺式精量穴播器,其排种性能优异;衣淑娟等<sup>[15]</sup>针对谷子穴播存在堵孔、排种均匀性差等问题,设计了一种正负气压-型孔轮组合式谷子穴播器,可满足谷子穴播农艺要求。针对不规则种子(如水稻等),张顺等<sup>[16]</sup>设计了一种U型腔道式水稻精量穴播器,实现了常规稻的精量穴播;张国忠等<sup>[17]</sup>设计了一种具有弧形毛刷清种护种装置的双腔侧充式水稻精量穴播器,能满足杂交稻和常规稻的播种要求;刘俊等<sup>[18]</sup>设计了一种舀勺型孔

轮式水稻精量穴播器,其排种性能可满足水稻精量播种的要求。水稻籽粒呈近椭球体,有一定的硬度,而胡麻籽粒呈长扁平状,外皮较脆。若采用以上规则和不规则种子穴播器进行胡麻播种,会存在取种量不足、伤种严重等问题。借鉴水稻主动舀种技术研发胡麻精量穴播器是一种思路。

针对胡麻穴播器用种量大、穴粒数变异系数大、缺苗严重等实际问题<sup>[19]</sup>,结合甘肃河西走廊胡麻种植环境,本文设计了一种带舀种勺舌的胡麻滚勺式精量穴播器;分析了穴播器的作业过程,确定了影响穴播器作业性能的关键部件,对关键部件进行理论计算以确定关键参数及范围;采用台架试验对穴播器关键参数进行优化,在优化结果的基础上进行了田间试验。

## 1 总体结构及工作原理

胡麻滚勺式精量穴播器主要由滚勺组件、侧板、壳体、活动鸭嘴和固定鸭嘴等组成,如图1所示。

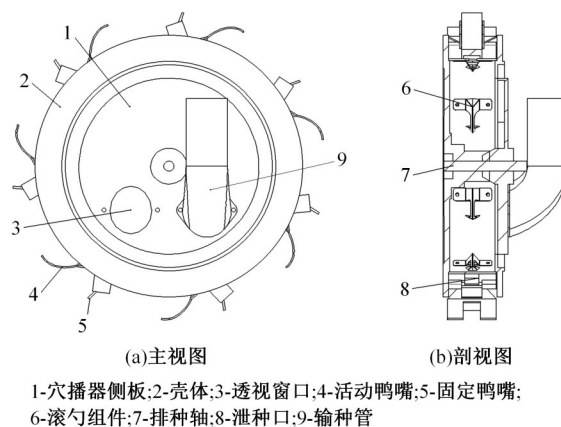
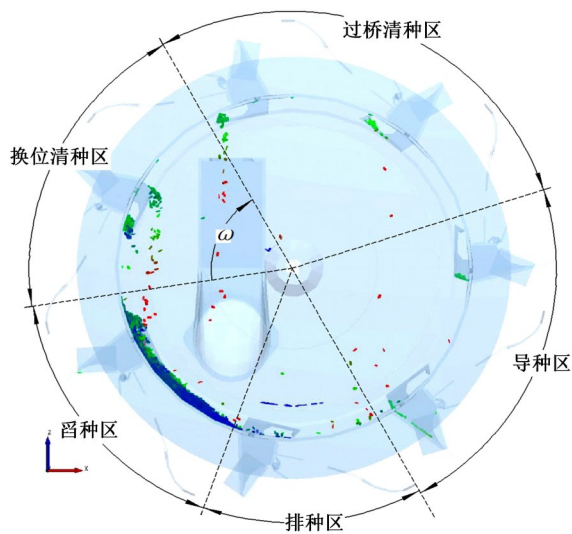


图1 胡麻滚勺式精量穴播器结构示意图

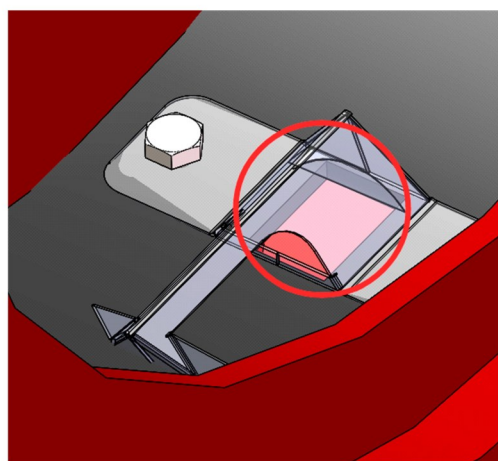
Fig. 1 Structure schematic diagram of *flaxes* rolling spoon-type cavity seeder

穴播器工作过程分为舀种、换位清种、过桥清种、导种和排种5个过程,如图2(a)所示。作业时,种箱内的胡麻种子经过输种管限量进入壳体内,堆积于壳体内最下方位置。播种器在地面上滚动,舀种勺随之顺时针转动,胡麻种子在重力、种间相互作用力、播种器内壁及舀种勺扰动的共同作用下进入种群,在舀种勺舌侧导向的作用下

胡麻种子进入主勺内,形成勺种;舀种勺继续转动,主勺相对于排种轴的方位发生变化,部分舀取的胡麻种子在此过程中未得到主勺支承力掉落,形成第1次清种;舀种勺继续转动,胡麻种子通过桥槽滑入种室,个别种子支承力不足掉落,形成第2次清种;当舀种勺转至导种区时,由于舀种勺种室与鸭嘴通过泄种孔(见图2(b)中圆圈标记)连通,胡麻种子滑入鸭嘴内;播种器继续转动,鸭嘴在穴播器重力作用下压入土壤形成穴孔,同时活动鸭嘴被动压开,胡麻种子排入穴孔,当鸭嘴离开穴孔后,穴孔内土壤坍塌掩埋种子,实现排种过程。



(a)穴播器工作阶段



(b)舀种勺与泄种孔位置关系

图 2 穴播器工作原理

Fig. 2 Operation principle of cavity seeder

## 2 关键部件设计及参数分析

本文试验品种为陇亚 10 号胡麻,是由甘肃省

农业科学院经济作物所选育出的品种,在甘肃种植面积较广。由课题组的前期研究结果可知<sup>[13]</sup>,胡麻种子平均长度为 4.43 mm、宽度为 2.38 mm、厚度为 0.95 mm,如图 3 所示;千粒重为 7.903 g、体积密度为 0.66 g/mL、质量密度为 1.05 g/mL、泊松比为 0.41、弹性模量为 558.28 MPa、胡麻碰撞恢复系数为 0.389、胡麻间的静摩擦因数和滚动摩擦因数分别为 0.201 和 0.043。



图 3 胡麻种子形状

Fig. 3 Shape of flaxes seeds

### 2.1 穴播器

作业时穴播器在地膜上滚动,鸭嘴入土出土过程中穴播器滚动半径瞬时变化。如图 4 所示,直径为  $D_1$  的穴播器在土壤或地膜上滚动,直径为  $D_2$  的勺架用于堆放种子,直径为  $D_3$  的舀种勺用于舀取种子。通过理论分析可知,株距为穴播器  $D_1$  外圆的节距,胡麻的株距和播深由农艺要求确定,鸭嘴个数  $Z$  由式(1)确定。

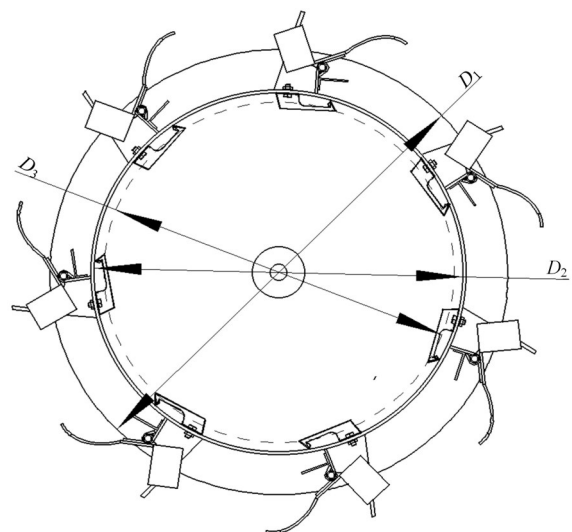


图 4 穴播器主要结构尺寸

Fig. 4 Main structural dimensions of the cavity seeder

$$Z = \frac{2\pi(R + H)}{S} \quad (1)$$

式中:R为穴播器半径,mm;H为实际播深,mm;S为种植穴距,mm

西北寒旱区胡麻播种农艺要求膜下播深为20 mm,穴距为200 mm<sup>[13]</sup>,膜上覆土厚度一般为5~15 mm,因此,实际播深H约为30 mm。参考其他滚勺式穴播器直径360~480 mm,将以上参数代入式(1)得Z≈7.5。当鸭嘴数量过多时,相应地要求增大穴播器直径,同时增大穴播器圆周方向跳动频率和取种量的变异系数;当鸭嘴数量过少时,穴播器直径也相应变小,造成穴播器质量不足,进而造成鸭嘴的入土深度不足。为保证穴播器作业时的平稳性,鸭嘴数目不宜太多,取鸭嘴数为7。

穴播器的外径是影响播种质量和播种效率的关键因素之一。当牵引速度一定时,穴播器直径D<sub>1</sub>越大,其角速度越小;直径越小,角速度越大,取种量变异系数相应增大,同时,穴播器质量减小,造成穴播器入土深度不足和滑移率增大等问题。当穴距和舀种勺数量一定时,穴播器直径D<sub>1</sub>也随之确定,有:

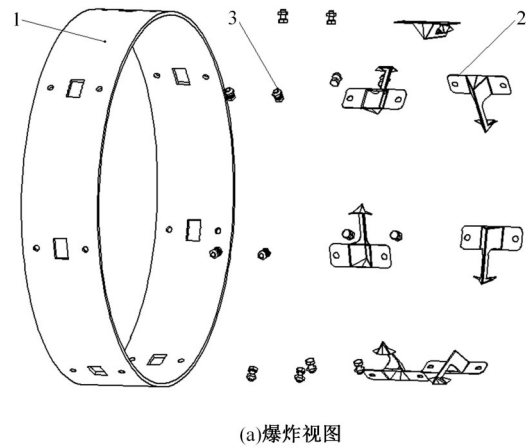
$$D_1 = \frac{NS}{\pi(1 + \delta)} \quad (2)$$

式中:N为舀种勺数量;δ为穴播器滑移系数。

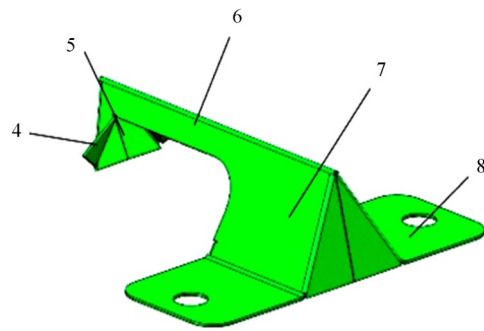
由式(2)可知,穴播器直径与舀种勺数量N、穴距S和滑移系数δ有关。当穴距一定时,舀种勺数量与穴播器直径正相关,与鸭嘴数目Z对应。试验地为砂土,穴播器在地膜上行走时,滑移系数约为9.3%<sup>[15]</sup>。由式(2)计算得D<sub>1</sub>为408.16 mm,穴播器在地面上存在下陷现象,下陷深度约为10~30 mm,参考其他滚勺式穴播器直径(360~480 mm),最终确定穴播器直径为460 mm。鸭嘴垂直高度为85 mm,穴播深度为20 mm,勺架厚度为10 mm,确定勺架内壁直径D<sub>2</sub>为310 mm。将舀种勺安装于勺架内壁,其主勺下端与勺壁接触,主勺勺尖分布直径D<sub>3</sub>约为295 mm,相邻鸭嘴对应的中心角为51.43°。

## 2.2 滚勺组件

滚勺组件主要由勺架、舀种勺和紧固件等组成,其结构如图5所示。舀种勺是穴播器的关键部件,其均布在勺架内壁圆周上。为方便种子快速填充舀种勺型腔,型腔两侧设有引种舌,为使种子顺利滑向过桥槽,型腔四周均设为圆角光滑过渡,型腔底部及型腔槽均设有倾角。



(a)爆炸视图



(b)舀种勺等轴视图

1-勺架;2-舀种勺;3-紧固件;4-舀种勺舌;5-主勺;6-过桥槽;7-种室;8-安装板

图5 滚勺组件结构组成

Fig. 5 Structure of spoon-wheel combination

### 2.2.1 舀种勺

根据胡麻农艺种植要求和出苗率,确定每穴排种量为(8±2)粒。舀种勺需实现舀种、清种和排种过程。由于胡麻形如心形,尾部呈圆形,头部稍尖、较薄,属于异型种子,而四面体结构能舀取更多异型种子,还方便调整结构尺寸,尤其当种子从主勺到过桥槽过渡时不易堵塞,因此,舀种勺设计成四面体结构。舀种勺舀种时,8粒胡麻种子呈无序方式填充主勺内腔,如图6(a)所示。

舀种勺主勺结构尺寸依据胡麻种子外形尺寸和体积密度综合确定。进入主勺内的种子数量过多,不利于实现精量播种,主勺尺寸偏小,舀种量不足,满足不了农艺要求。设舀种勺主勺截面高度为h、截面夹角为α、深度为w、底面夹角为β,如图6(a)所示。舀种勺主勺体积由下式计算:

$$\begin{cases} V = \frac{1}{3} \pi w^2 h \tan \frac{\alpha}{2} \\ h = k_0 h_r \end{cases} \quad (3)$$

式中:V为舀种勺主勺体积,mm<sup>3</sup>;h<sub>r</sub>为胡麻种子平均高度,mm;k<sub>0</sub>为长度调节系数,取为2~2.2。

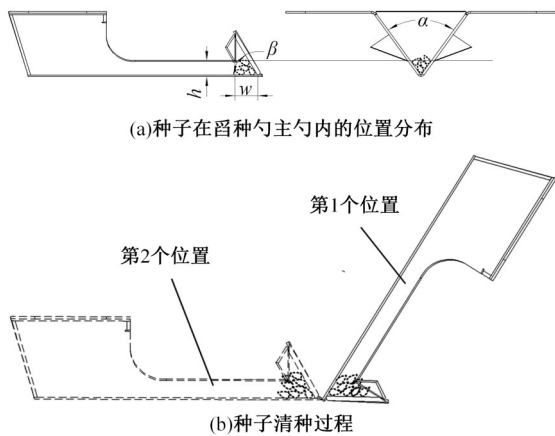


图 6 种子在舀种勺内流通过程

Fig. 6 Seed circulation process in scooping spoon

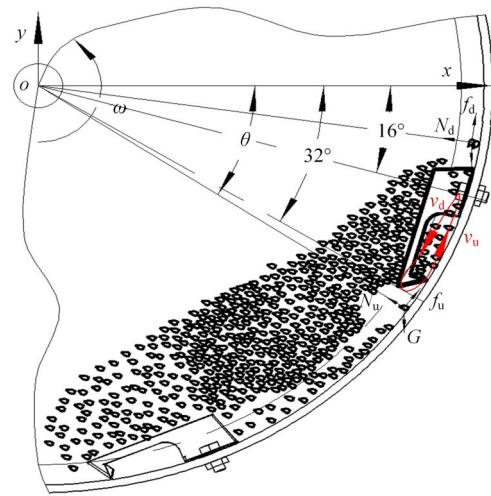
如图 6(b) 所示,随着穴播器的旋转,胡麻从第 1 个位置过渡到第 2 个位置,此过程部分种子滑落,即换位清种。陇亚 10 号胡麻种子体积密度为  $0.66 \text{ g/mL}^{[13]}$ ,  $6\sim 10$  粒种子充填舀种勺主勺所占体积约为  $72\sim 120 \text{ mm}^3$ 。由式(3)计算可得主勺截面高度  $h$  为  $2 \text{ mm}$ 。

陇亚 10 号胡麻种子的自然休止角为  $23^\circ$ , 为方便种子在舀种勺上从第 1 个位置过渡到第 2 个位置,过桥槽型腔底面夹角应比胡麻休止角大,取  $\beta$  为  $60^\circ$ 。为使种子从槽壁滑向槽底,截面夹角  $\alpha$  需处于  $0^\circ\sim 134^\circ$ 。若截面夹角  $\alpha$  过小,种子从舀种勺主勺滑向种室过程中单位时间通过种量不足,  $\alpha$  过大则滑过时间较长,不利于清种。同时,为便于折弯种勺,综合考虑取  $\alpha$  为  $90^\circ$ ,由式(3)计算得舀种勺主勺深度  $w$  为  $5.86 \text{ mm}\sim 7.57 \text{ mm}$ 。

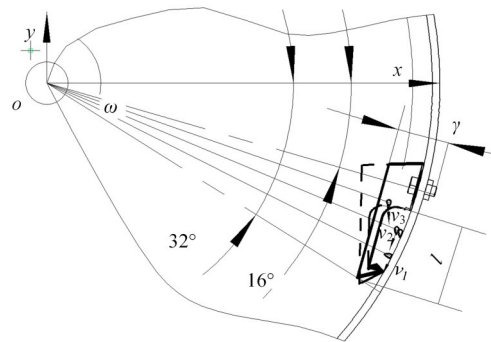
角速度影响穴播器作业性能和工作效率。舀种勺在取种阶段,种子依靠自身重力和摩擦力被舀种勺舀入主勺。穴播器转动时,其内壁带动种子作回转运动,种子回落方向与主勺方向相同,种子容易进入主勺。舀种勺与水平面有一定的夹角能增加种子与舀种勺之间的相对速度,更有利于舀种勺舀种,种子充填舀种勺主勺的姿态如图 7(a) 所示。

图 7 中,  $G$  为种子自重,  $N; f_u$  为穴播器内底板对种子的静摩擦力,  $N; N_u$  为穴播器内底板对种子的支撑力,  $N; f_d$  为种间的静摩擦力,  $N; N_d$  为种子对种子的支撑力,  $N$ 。

如图 7(a) 所示,种子被穴播器转动带动,此时种子的瞬时速度为  $v_u$ ; 当种子转至自重分力大于种间静摩擦力时,开始向下滑移,此时种子的瞬



(a) 种子运动分析



(b) 种子填充主勺方向

图 7 种室内种子受力分析

Fig. 7 Force analysis of seeds in the seed box

时速度为  $v_d$ , 其方向与舀种勺主勺开口方向一致, 此后,在舀种勺勺舌引导下进入主勺。

种子随穴播器转动时,种子对穴播器内壁的压力  $N_u$  由种子自重分力、其他种子对其压力和离心力组成,此时种子受力分析如下:

$$\begin{cases} G \cos \theta \leq f_u \\ f_u = N_u \mu_1 \\ N_u = 9G \sin \theta \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\mu_1$  为穴播器内底板对种子的静摩擦因数。

对式(4)化简得:

$$9\mu_1 \geq \cot \theta \quad (5)$$

当种子开始滑落时,种子对穴播器内壁的压力  $N_d$  由种子重力分力、其他种子对其压力和离心力引起,此时种子受力分析如下:

$$\begin{cases} G \cos \theta \geq f_d \\ f_d = N_d \mu_2 \\ N_d = 8G \sin \theta \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\mu_2$  为种间的静摩擦因数。

对式(6)化简可得:

$$8\mu_2 \leq \cot \theta \quad (7)$$

利用前期研究结果<sup>[13]</sup>进行滚勺式精量穴播器排种仿真,测得种子与穴播器内壁最大法向接触力约为 0.000 691 N,约为种子自重的 8 倍。种间法向接触力平均值约为 0.000 528 N,约为胡麻种子自重的 7 倍。结合式(5)和式(7)可得  $16^\circ \leq \theta \leq 32^\circ$ 。舀种勺分布直径  $D_3$  设为 295 mm,由舀种勺分布半径与舀种勺转动角  $\theta$  相乘得到主勺充种有效长度  $l \leq 41$  mm。当充种有效长度  $l$  过长时,清种过程耗时较多; $l$  过短则清种不彻底,同时取种量变异系数会增大,最终确定  $l$  为 32 mm。胡麻种子在此区间回流频繁,有利于舀种勺主勺舀种。

分析图 7(b)可知,种子填充舀种勺主勺的方式分为 3 种:当穴播器角速度较低时,种子沿勺架内壁滑入主勺;当穴播器角速度较高时,种子会被抛离种群,种子呈“自由”状态下下降填充主勺。若使种子 3 个方向充种,舀种勺安装角度应设为  $0^\circ \sim 15^\circ$ 。种子 3 个方向的速度满足  $v_3 > v_2 > v_1$ ,舀种勺安装在勺架上运动,线速度一定时,舀种勺与自由状态种子相对速度较高,种子填充过程中容易弹出,缩小舀种勺安装角为  $0^\circ \sim 10^\circ$ 。

种子还需经过过桥清种,进一步清除多余种子。种子能否顺利通过过桥清种区取决于穴播器角速度。穴播器角速度越大,离心力越大,种子脱离过桥清种槽而掉落,导致漏播率增大,与此同时舀种、排种过程时间变短。过桥清种时种子受力分析如图 8 所示。

如图 8(a)所示,种子经过换位清种后停留在离舀种勺主勺较近的过桥槽内,舀种勺随穴播器继续转动,过桥槽与水平面之间的夹角增大,种子开始沿过桥槽滑向种室。此时停留种子最多的过桥槽截面如图 8(b)所示,按种子稳定状态将其分为不稳定种子  $a$  和稳定种子  $b$ 。稳定种子处于过桥槽和胡麻堆积角所包围的范围内,不稳定种子处于堆积角范围之外,有滑落趋势。为保证穴播器的清种性能,舀种勺型孔内的种子需自行通过过桥槽滑入舀种勺种室,应满足:

$$\begin{cases} G \sin \theta \geq (G \cos \theta - m\omega^2 r) \mu_1 \\ G \cos \theta - m\omega^2 r \geq 0 \\ \frac{g \cos \theta}{r} - \frac{g \sin \theta}{\mu_1 r} \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\theta$ 为舀种勺转动角, $(^\circ)$ ; $\omega$ 为勺轮临界角速度,rad/s; $r$ 为舀种勺型孔中心处半径,mm。

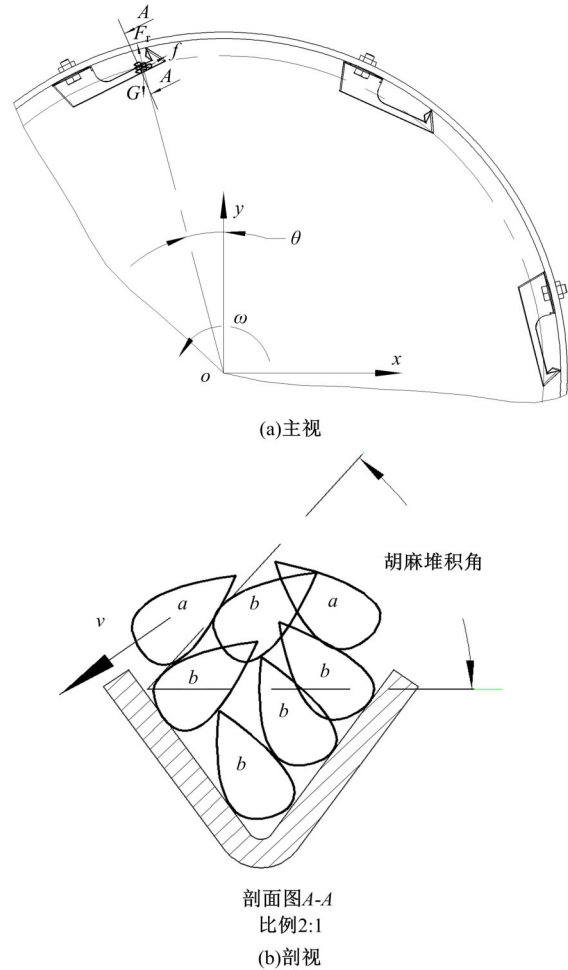


图 8 胡麻种子过桥清种过程受力分析  
Fig. 8 Force analysis of seed cleaning process in the seed scoop

对式(8)简化可得:

$$\sqrt{\frac{g \cos \theta}{r} - \frac{g \sin \theta}{\mu_1 r}} \leq \omega \leq \sqrt{\frac{g \cos \theta}{r}} \quad (9)$$

由式(9)可知,穴播器临界角速度与舀种勺型孔中心处半径  $r$ 、舀种勺转动角  $\theta$ 、种子与接触材料间的静摩擦因数有关。为避免种子被舀种勺拖带到第 3 象限,种子能自由掉落至种室,清种过程需在第 2 象限内完成,穴播器具有一定的角速度,式(9)可简化为:

$$0 \leq \omega \leq \sqrt{g/r} \quad (10)$$

设舀种勺过桥清种处距中心 150 mm,由式(10)可得,角速度应满足:  $0 \text{ rad/s} \leq \omega \leq 8 \text{ rad/s}$ 。为提高排种质量和稳定性,穴播器角速度初定为  $0 \text{ rad/s} \leq \omega \leq 6 \text{ rad/s}$ 。

### 2.2.2 导种轨迹

胡麻种子进入种室后,当种子路径无规划时,种子停留时间会增加。种子通过导种轨迹滑入鸭

嘴内可提高排种效率。在种子沿轨迹线滑入鸭嘴过程中,对种子进行受力分析,如图9所示。假设种子从过桥清种槽口进入导种区瞬时速度为 $v_y$ ,种子离开导种槽时水平速度为 $v_x$ ,y轴方向无速度<sup>[20]</sup>。导种槽垂直高度为 $h$ 。为便于设计研究,导种槽轨迹采用抛物线形式。由于抛物线轨迹从远点向顶点过渡时,其曲率增大,因此种子在其上滑动会降速,有利于种子在鸭嘴中提早稳定。设其出口端为抛物线顶端,开口向上,滑道抛物线方程为 $y=ax^2$ 。鉴于种子离心力相比重力做功较小,可忽略不计,则有 $N_u = mg \cos \alpha, f_u = \mu N_u$ ,滑道摩擦力 $f_u$ 对种子做功为 $A$ 。

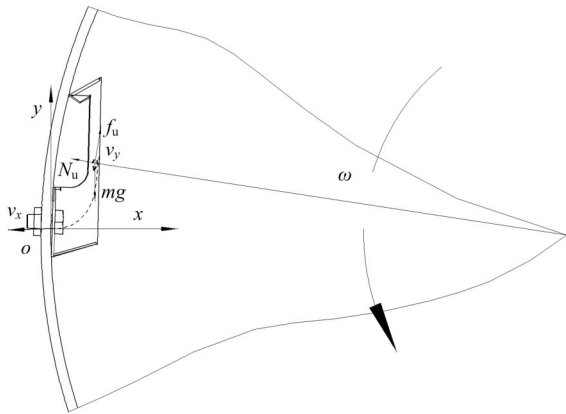


图9 种子滑过导种槽受力分析

Fig. 9 Force analysis of seeds sliding through the seed guide slot

当 $y=h$ 时, $x = \sqrt{h/a}$ ,种子在进入滑道和离开滑道时能量守恒。dA =  $f_u ds$ ,则:

$$\begin{cases} A = \int F_f ds = \mu_1 \int mg \cos \alpha ds = \\ \mu_1 \int_0^{\sqrt{h/a}} mg dx = mg\mu_1 \sqrt{h/a} \quad (11) \\ \frac{1}{2}mv_y^2 + mgh = \int F_f ds + \frac{1}{2}mv_x^2 \end{cases}$$

化简式(11)可得:

$$a = h \left( \frac{2g\mu_1}{v_y^2 - v_x^2 + 2gh} \right)^2 \quad (12)$$

为降低种子离开导种槽时的速度,避免种子在鸭嘴内弹跳,设 $v_x=0$ , $v_y$ 为种子在过桥清种槽内自由落体后的速度,由能量守恒定律可知, $v_y^2 = 2gh_1$ ,因此导种轨迹方程为 $y = \mu_1^2 h x^2 (h_1 + h)^{-1}$ 。设计导种槽垂直高度 $h$ 为15 mm,过桥槽长 $h_1$ 为20 mm,种间的静摩擦因数为0.201,由此可知导种轨迹方程为 $y=0.017x^2$ 。

### 3 排种性能试验

#### 3.1 台架试验

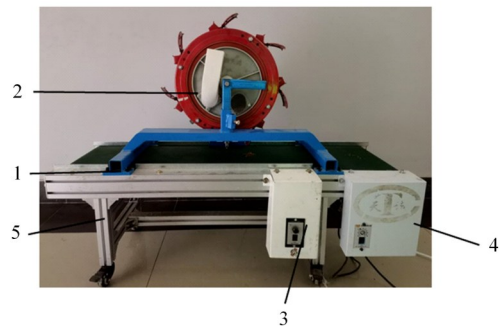
根据滚勺式穴播器的特点、预试验研究及理论计算,为分析穴播器主要结构和运动参数对穴播器排种性能的影响,开展穴播器台架试验。导种槽的轨迹是由3D打印而成,并将其粘贴在舀种勺种室内。以舀种勺主勺深度、安装角和穴播器角速度为试验因素,以穴粒数合格率、漏播率和重播率为试验指标,采用响应曲面法(Response surface method, RSM)中Box-Behnken设计试验<sup>[21,22]</sup>,试验方案如表1所示。

表1 因素水平编码

Table 1 Factor level codes			
水平	主勺深度 $X_1/\text{mm}$	舀种勺安装角 $X_2/(\text{°})$	穴播器角速度 $X_3/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$
-1	5.9	0	2
0	6.7	5	4
1	7.6	10	6

试验以甘肃普遍种植的陇亚10号胡麻品种为试验材料,千粒重为7.90 g,舀种勺由钣金折弯而成,材料为Q235,厚度为0.47 mm,穴播器内均匀分布有7个舀种勺。台架试验在多功能排种试验台上进行,如图10所示。由于缺乏指导胡麻精量穴播的标准,试验参考标准《铺膜穴播机作业质量》(NY/T 987—2006)<sup>[23]</sup>和《单粒(精密)播种机试验方法》(GB/T 6973—2005)<sup>[24]</sup>进行。当穴粒数处于6~10粒之间,为合格;当穴粒数小于6粒时,按漏播率计算;当穴粒数大于10粒时,按重播率计算。穴粒数合格率 $Y_1$ 、漏播率 $Y_2$ 和重播率 $Y_3$ 计算公式分别为:

$$Y_1 = \frac{n_i}{N} \times 100\% \quad (13)$$



1-输送带;2-滚轮式穴播器;3-穴播轮调速电机;4-输送带调速电机;5-机架

图10 多功能穴播器试验台

Fig. 10 Multi-functional test bench for seeder

$$Y_2 = \frac{n_j}{N} \times 100\% \quad (14)$$

$$Y_3 = \frac{n_k}{N} \times 100\% \quad (15)$$

式中: $N$ 为总穴数; $n_i$ 为穴粒数合格次数; $n_j$ 为穴粒数小于6粒的次数; $n_k$ 为穴粒数大于10粒的次数。

试验结果如表2所示。

表2 试验方案及结果

序号	试验因素			试验结果		
	$X_1$ /mm	$X_2$ /(°)	$X_3$ /(rad·s <sup>-1</sup> )	穴粒数合格 率 $Y_1$ /%	漏播率 $Y_2$ /%	重播率 $Y_3$ /%
1	5.90	10	4	86.67	13.33	0.00
2	7.60	5	6	6.67	0.00	93.33
3	6.75	5	4	83.33	3.33	13.34
4	6.75	0	6	6.66	0.00	93.34
5	5.90	5	2	76.67	16.67	6.66
6	6.75	10	6	66.67	23.33	10.00
7	6.75	0	2	16.67	0.00	83.33
8	6.75	10	2	90.00	3.33	6.67
9	7.60	5	2	63.34	3.33	33.33
10	5.90	5	6	73.33	3.33	23.34
11	7.60	0	4	16.67	0.00	83.33
12	6.75	5	4	83.33	3.33	13.34
13	7.60	10	4	56.67	0.00	43.33
14	6.75	5	4	83.33	3.33	13.34
15	6.75	5	4	66.67	0.00	33.33
16	6.75	5	4	73.33	13.33	13.34
17	5.90	0	4	60.00	6.66	33.34

### 3.2 试验结果分析

#### 3.2.1 穴粒数合格率方差分析

对试验中穴粒数合格率做方差分析,结果如表3所示。去除不显著回归项,建立主勺深度  $X_1$ 、舀种勺安装角  $X_2$ 、穴播器角速度  $X_3$ 对穴粒数合格率  $Y_1$ 影响的二次多项式的回归方程,如下所示:

$$Y_1 = -70.16 + 8.82X_1 + 11.74X_2 + 80.79X_3 - 7.84X_1X_3 - 0.67X_2^2 - 4.21X_3^2 \quad (16)$$

由表3可知,通过比较  $F$  值的大小可得影响穴粒数合格率的因子从大到小排序分别为:舀种勺安装角、主勺深度、穴播器角速度。通过显著性检验,交互作用  $X_1X_3$ 对穴粒数合格率  $Y_1$ 影响显著,将舀种勺安装角设置为0水平,即5°时,响应曲面如图11所示。

由图11可见,随着主勺深度的减小和穴播器角速度的增大,穴粒数合格率逐渐增大;当穴播器角速度增大到一定程度时,穴粒数合格率再逐渐

表3 穴粒数合格率方差分析

Table 3 Analysis of variance for the number of grains passed in the hole

方差来源	自由度	平方和	均方和	$F$	$P$	显著性
模型	9	12 927.34	1436.37	11.53	0.0020	**
$X_1$	1	2938.79	2938.76	23.59	0.0018	**
$X_2$	1	5000.50	5000.50	40.14	0.0004	**
$X_3$	1	1089.04	1089.04	8.74	0.0212	*
$X_1X_2$	1	44.42	44.42	0.3566	0.5692	
$X_1X_3$	1	710.76	710.76	5.71	0.0483	*
$X_2X_3$	1	44.36	44.36	0.3560	0.5695	
$X_1^2$	1	236.70	236.70	1.90	0.2105	
$X_2^2$	1	1289.14	1289.14	10.35	0.0147	*
$X_3^2$	1	1289.51	1289.51	10.35	0.0147	*
残差	7	872.06	124.58			
失拟项	3	650.02	216.67	3.90	0.11	
误差	4	222.04	55.51			
总和	16	13 799.40				

注:\*\*表示极显著( $P < 0.01$ ),\*表示显著( $P < 0.05$ )。下表同。

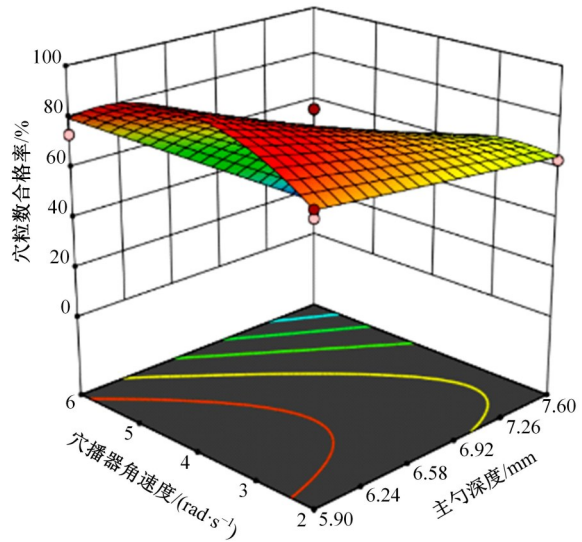


图11 主勺深度与穴播器角速度对穴粒数合格率的影响  
Fig. 11 Effect of main scoop depth and wheel speed on the number of grains in the hole qualified rate

下降。从图11中等高线可以看出:穴粒数合格率沿穴播器角速度方向的变化速率比沿主勺深度方向的变化速率快,即穴播器角速度对穴粒数合格率的影响大于主勺深度。主勺深度为5.9~6.24 mm、穴播器角速度为4~5 rad/s时,穴粒数合格率最高。

#### 3.2.2 重播率方差分析

对重播率做方差分析,结果如表4所示。去除不显著回归项,建立主勺深度  $X_1$ 、舀种勺安装角  $X_2$ 、穴播器角速度  $X_3$ 对重播率  $Y_3$ 影响二次多项

表 4 重播率方差分析

Table 4 Analysis of variance for reply seeding rate

方差来源	自由度	平方和	均方和	F	显著性
模型	9	1695.79	6.74	0.0099	**
$X_1$	1	4511.55	17.93	0.0039	**
$X_2$	1	6805.94	27.05	0.0013	**
$X_3$	1	1012.95	4.03	0.0848	
$X_1 X_2$	1	11.09	0.044	0.8397	
$X_1 X_3$	1	469.16	1.86	0.2144	
$X_2 X_3$	1	11.16	0.044	0.8392	
$X_1^2$	1	191.61	0.76	0.4118	
$X_2^2$	1	1066.61	4.24	0.0785	
$X_3^2$	1	957.63	3.81	0.0920	
残差	7	251.62			
失拟项	3	480.54	6.01	0.0579	
误差	4	79.92			
总和	16				

式的回归方程为:

$$Y_3 = -124.36 + 27.94X_1 - 5.83X_2 \quad (17)$$

由表 4 可知,通过比较  $F$  值的大小可得影响重播率的因素由大到小排序为:舀种勺安装角、主勺深度、穴播器角速度。重播率与各因素的关系曲线如图 12 所示。

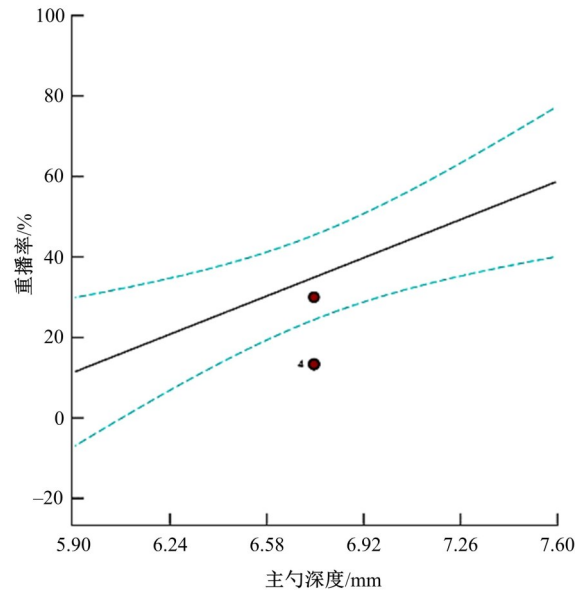
由图 12 可知,在给定范围内重播率与主勺深度呈现正相关,主勺深度增加,重播率也随之提高;重播率又与舀种勺安装角呈负相关,舀种勺安装角越大,重播率越低。

### 3.3 参数优化

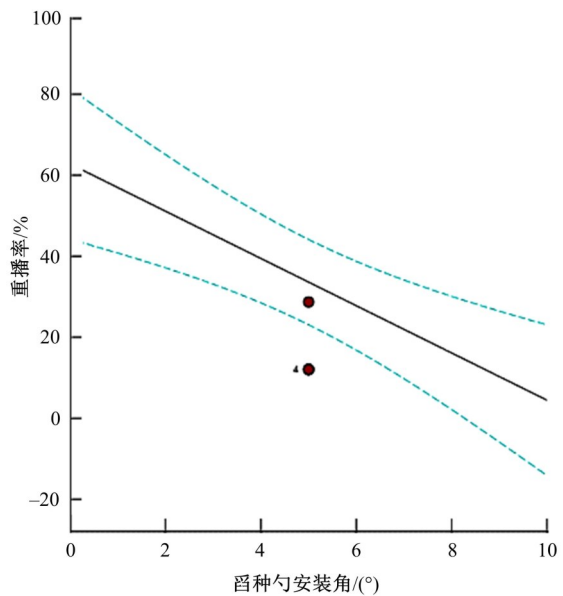
为了得到最佳的试验因素水平,结合因素的边界条件,通过式(16)(17)回归方程模型进行优化求解,以穴粒数合格率最大,漏播率、重播率最小为目标,要求穴粒数合格率大于 80%、漏播率小于 5%、重播率小于 15%,建立参数优化数学模型如下所示:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{target} \left\{ \begin{array}{l} \max y_1 \\ \min y_2 \\ \min y_3 \end{array} \right. \\ \text{s.t.} \left\{ \begin{array}{l} 5.9 \text{ mm} < x_1 < 7.6 \text{ mm} \\ 0^\circ < x_2 < 10^\circ \\ 2 \text{ rad/s} < x_3 < 6 \text{ rad/s} \\ 0 \leq y_1 \leq 1 \\ 0 \leq y_2 \leq 1 \\ 0 \leq y_3 \leq 1 \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (18)$$

由上文可知,舀种勺主勺深度为 5.9~7.6 mm,安装角为 0°~10°,穴播器角速度为 2~6 rad/s。将



(a)主勺深度对重播率影响



(b)舀种勺安装角对重播率影响

图 12 重播率与变量的关系

Fig. 12 Relationship between replay rate and variables

其代入式(18)可知:当主勺深度为 6.68 mm、舀种勺安装角为 7.62°、穴播器角速度为 3.22 rad/s 时,穴粒数合格率为 91.80%、漏播率为 5.51%、重播率为 2.69%。

### 3.4 田间试验

基于自主研发的胡麻联合播种机,于 2020 年 4 月在张掖市民乐县华瑞农业有限公司胡麻种植试验田开展排种试验,播种机作业速度为 0.68 m/s,胡麻品种为陇亚 10 号,播种量为 3.5 kg/亩。通过数显式卡尺、数显式角度尺和尖嘴钳等工具调整舀种勺,使主勺深度为 6.68 mm,舀种勺安装

角为 $7.62^\circ$ 。用数显式角速度测量仪测定穴播器角速度,使其稳定在 $3.2\text{ rad/s}$ 左右。播种后1天,进行数据测定,每行测6段,测1 m内每穴胡麻种子数,统计得平均穴粒数合格率为92.5%、平均漏播率为2.54%、平均重播率为4.96%。由于拖拉机振动会传递至穴播器上,振动使种子流动性提高,即种子充填舀种勺的能力提高。本文种植地为沙土,土壤拥堵鸭嘴,鸭嘴打不开等情况较砂壤土、壤土少,使平均穴粒数合格率和平均漏播率指标优于台架试验。播种试验和出苗情况如图13所示。



(a)田间试验



(b)出苗情况

图13 穴播器田间试验

Fig. 13 Field test of cavity seeder

## 4 结 论

(1)针对胡麻穴播器用种量大、穴粒数变异系数大、穴孔缺种等实际问题,结合甘肃胡麻种植特点,设计了一种带舀种勺舌的滚勺式精量穴播器。在此基础上结合胡麻滚勺式精量穴播器舀种、换位清种、过桥清种、导种和排种等过程,对穴播器和舀种勺进行了优化设计,确定舀种勺主勺截面高度为 $2\text{ mm}$ 、底面夹角为 $60^\circ$ 、截面夹角为 $90^\circ$ 、舀种勺主勺深度为 $5.86\sim 7.57\text{ mm}$ 、舀种勺安装角

为 $0^\circ\sim 10^\circ$ 、穴播器角速度为 $0\sim 6\text{ rad/s}$ 。

(2)对滚勺式穴播器进行台架排种试验,并对结果进行了响应曲面法分析。得出舀种勺安装角、主勺深度和穴播器角速度对穴粒数合格率和重播率有显著性影响,影响从大到小排序为:舀种勺安装角、主勺深度和穴播器角速度。参数优化结果为:主勺深度为 $6.68\text{ mm}$ 、舀种勺安装角为 $7.62^\circ$ 、穴播器角速度为 $3.22\text{ rad/s}$ 。在此条件下,田间试验穴粒数合格率为92.5%、漏播率为2.54%、重播率为4.96%。研究结果可为胡麻精量穴播设计提供借鉴。

## 参考文献:

- [1] 邓欣,陈信波,邱财生,等. 我国亚麻种质资源研究与利用概述[J]. 中国麻业科学, 2015, 37(6): 322-329.  
Deng Xin, Chen Xin-bo, Qiu Cai-sheng, et al. Review on research and utilization of flax (*linum usitatissimum* L.) germplasm resources[J]. Plant Fiber Sciences in China, 2015, 37(6): 322-329.
- [2] 金晓蕾,张辉,贾霄云,等. 我国胡麻品质育种现状及展望[J]. 内蒙古农业科技, 2014, 42(1): 117-119.  
Jin Xiao-lei, Zhang Hui, Jia Xiao-yun, et al. Present situation and prospects of linseed quality breeding in our country[J]. Journal of Northern Agriculture, 2014, 42(1): 117-119.
- [3] 张运晖,赵瑛,罗俊杰. 甘肃胡麻产业发展浅议[J]. 甘肃农业科技, 2013(7): 54-55.  
Zhang Yun-hui, Zhao Ying, Luo Jun-jie. The development of hops industry in Gansu province[J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2013(7): 54-55.
- [4] 周刚,石林榕,赵武云,等. 旱地胡麻起垄覆膜播种联合作业机工作参数优化与性能试验[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(6): 147-156.  
Zhou Gang, Shi Lin-rong, Zhao Wu-yun, et al. Optimization of the working parameters and performance experiment of flax ridging and covering film combined seeder in dry-land[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(6): 147-156.
- [5] 杜佳伟,杨学军,刘立晶,等. 小粒种子精量播种机研究现状及发展趋势[J]. 农业工程, 2017, 7(6): 9-13.  
Du Jia-wei, Yang Xue-jun, Liu Li-jing, et al. Research status and development trend of precision seeder for small seeds[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(6): 9-13.
- [6] 李来祥,刘广才,杨祁峰,等. 甘肃省旱地全膜双垄

- 沟播技术研究与应用进展[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(1): 114-118.
- Li Lai-xiang, Liu Guang-cai, Yang Qi-feng, et al. Research and application development for the techniques of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows in dry land[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(1): 114-118.
- [7] 杨祁峰, 刘广才, 熊春蓉, 等. 旱地玉米全膜双垄沟播技术的水分高效利用机理研究[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(1): 113-116.
- Yang Qi-feng, Liu Guang-cai, Xiong Chun-rong, et al. Study on highly efficient water utilizing mechanisms on techniques of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows of dry-land maize[J]. Research of Agricultural Modernization, 2010, 31(1): 113-116.
- [8] 贾晶霞, 杨德秋, 李建东, 等. 马铃薯栽培农艺与机械化生产技术调研综述[J]. 农机化研究, 2010, 32(11): 1-6.
- Jia Jing-xia, Yang De-qiu, Li Jian-dong, et al. Investigation summary about potato planting agriculture and mechanical production technique[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(11): 1-6.
- [9] 曹海峰, 高立辉, 胡科全, 等. 我国亚麻生产机械化及产业发展建议[J]. 中国农机化, 2009(3): 22-25.
- Cao Hai-feng, Gao Li-hui, Hu Ke-quan, et al. Suggestions on mechanization and development of flax production in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2009(3): 22-25.
- [10] 郑立, 杨作范. 我国西北地区胡麻产业发展的必要性及对策[J]. 现代农业科技, 2012(15): 55-57.
- Zheng Li, Yang Zuo-fan. Development necessity and countermeasures of flax industry in northwest of China [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2012(15): 55-57.
- [11] 周刚, 石林榕, 赵武云, 等. 旱地垄作膜面胡麻精量播种机设计和仿真[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 245-252.
- Zhou Gang, Shi Lin-rong, Zhao Wu-yun, et al. Design and simulation of precision seeder for flax in dry-land ridge with plastic-film mulching[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(2): 245-252.
- [12] 宗平, 吴海鹏, 姜忠旭, 等. 水稻机穴播种植模式探析[J]. 现代农业科技, 2018(10): 38-39.
- Zong Ping, Wu Hai-peng, Jiang Zhong-xu, et al. Exploration of rice machine hole-sowing planting pattern[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(10): 38-39.
- [13] 石林榕, 马周泰, 赵武云, 等. 胡麻籽粒离散元仿真参数标定与排种试验验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 25-33.
- Shi Lin-rong, Ma Zhou-tai, Zhao Wu-yun, et al. Calibration of simulation parameters of flaxed seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20): 25-33.
- [14] 张青松, 余琦, 王磊, 等. 油菜勺式精量穴播穴播器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 47-54, 64.
- Zhang Qing-song, Yu Qi, Wang Lei, et al. Design and experiment of scoop-type precision hole metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 47-54, 64.
- [15] 衣淑娟, 陈涛, 李衣菲, 等. 正负气压-型孔轮组合式谷子穴播穴播器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 83-94.
- Yi Shu-juan, Chen Tao, Li Yi-fei, et al. Design and test of millet hill-drop seed-metering device with combination of positive-negative pressure and hole wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 83-94.
- [16] 张顺, 李勇, 王浩宇, 等. U型腔道式水稻精量穴播穴播器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 98-108.
- Zhang Shun, Li Yong, Wang Hao-yu, et al. Design and experiment of U-shaped cavity type precision hill-drop seed-metering device for rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 98-108.
- [17] 张国忠, 张沙沙, 杨文平, 等. 双腔侧充种式水稻精量穴播穴播器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 9-17.
- Zhang Guo-zhong, Zhang Sha-sha, Yang Wen-ping, et al. Design and experiment of double cavity side-filled precision hole seed metering device for rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8): 9-17.
- [18] 刘俊, 朱德泉, 于从羊, 等. 舀勺型孔轮式水稻精量穴播器设计与试验[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(4): 739-752.
- Liu Jun, Zhu De-quan, Yu Cong-yang, et al. Design and experiment on scoop hole-wheel precision seed-metering device for rice[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(4): 739-752.
- [19] 周刚, 石林榕, 赵武云, 等. 旱地胡麻起垄覆膜播种联合作业机工作参数优化与性能试验[J]. 中国农业

- 大学学报, 2019, 24(6): 147-156.
- Zhou Gang, Shi Lin-rong, Zhao Wu-yun, et al. Optimization of the working parameters and performance experiment of flax ridging and covering film combined seeder in dry-land[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(6): 147-156.
- [20] 赵匀. 农业机械分析与综合[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [21] 王立军, 张志恒, 刘天华, 等. 玉米收获机割台砍劈式茎秆粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 109-117.
- Wang Li-jun, Zhang Zhi-heng, Liu Tian-hua, et al. Design and experiment of device for chopping stalk of header of maize harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 109-117.
- [22] 石林榕, 孙步功, 赵武云, 等. 弹性气吸嘴式玉米滚轮穴播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 Lin-rong, Sun Bu-gong, Zhao Wu-yun, et al. Optimization and test of performance parameters 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.
- [23] NY/T 987—2006. 铺膜穴播机作业质量[S].
- [24] GB/T 6973—2005. 单粒(精密)播种机试验方法[S].