

油菜勺式精量穴播排种器设计与试验

张青松^{1,2} 余琦¹ 王磊¹ 廖宜涛^{1,2} 王迪¹ 廖庆喜^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对传统油菜条播排种器用种量大、株距变异系数大、个体生长良莠不齐等生产实际问题,结合油菜种植农艺要求,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排种器,分析了排种器的工作过程,确定了勺轮组合,以及取种勺式型孔尺寸、安装数量、安装倾斜角、勺轮转速等主要参数。采用响应面优化试验分析了取种勺安装前倾角、取种勺式型孔长度和勺轮转速对穴粒数合格率、漏播率及重播率的影响,试验表明,在取种勺安装前倾角为 47.5°、取种勺式型孔长度为 5.4 mm、勺轮转速为 24.3 r/min 时,穴粒数合格率((3±1)粒/穴)为 91.40%、漏播率(0 或 1 粒/穴)为 4.84%、重播率(大于 4 粒/穴)为 3.76%,排种性能较优。由田间播种试验统计得到,油菜种植密度为 63 株/m²,满足油菜农艺种植要求。该研究可为油菜精量穴播排种装置设计提供参考。

关键词: 油菜; 穴播排种器; 勺式型孔; 结构设计; 田间试验

中图分类号: S223.2+3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)06-0047-08 OSID: 

Design and Experiment of Scoop-type Precision Hole Metering Device for Rapeseed

ZHANG Qingsong^{1,2} YU Qi¹ WANG Lei¹ LIAO Yitao^{1,2} WANG Di¹ LIAO Qingxi^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to improve the practical problems of traditional rapeseed stripping technology, such as needing large rapeseed quantity to broadcast, having big variable coefficient of row spacing and existing difference of growth rate between individual rapeseed seedlings, combining the requirement of direct agronomic requirements of rapeseed, a rapeseed spoon-type precision seeding and seeding device was designed, which used the spoon to carry out precision sampling. Based on the mechanical properties of rapeseed and the agronomic requirements of hole-seeding agronomy, a rectangular-shaped spoon-shaped hole with a notch was proposed. The working process of the seeding device was described and the main parameters of scoop assembler, spoon hole, spoon number, spoon pre-tilt angle and scoop wheel rotatory speed were determined. The influencing factors of the performance of seed meter were analyzed. The bench test was carried out by using the BBD response surface optimization test design method. The effects of the pre-tilt angle, the length of spoon-shaped hole and the rotation speed of scoop wheel on pass rate of number of cells, the missed rate and the re-broadcast rate were analyzed. The test results showed that the spoon pre-tilt angle was 47.5°, the length of the spoon-shaped hole was 5.4 mm and the rotation speed of the scoop wheel was 24.3 r/min. The pass rate of the seedling number ((3±1) capsule/hole) was 91.40%. The rate of missed broadcast (0 or 1 capsule/hole) was 4.84% and the re-broadcasting rate (greater than 4 capsules/hole) was 3.76%. The field test results showed that the average pass rate of the seedling number was 88.64%, the average rate of missed broadcast was 3.52%, the density of rapeseed was 63 plants per square meter, which met the direct agronomic requirements of rapeseed. The research had novelty in the design of spoon-type seeding device, which can provide reference for the design and experiment of the rapeseed spoon-type precision seeding device.

Key words: rapeseed; hole seed metering device; scoop-type hole; structure design; field test

收稿日期: 2020-02-06 修回日期: 2020-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875229、51975238)、国家油菜产业技术体系专项(CARS-12)和湖北省自然科学基金项目(2019CFB153)

作者简介: 张青松(1987—),男,讲师,博士,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: qszhang@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

0 引言

油菜是我国重要的油料作物,广泛种植于长江中下游和新疆、内蒙古等地区^[1-3]。油菜机械化直播可分为条播、单粒精密播种和穴播,播种环节的核心技术是排种技术,播种方式由排种器决定^[4-5]。提高油菜机械化精量播种水平有利于提高油菜产量、节本增效^[6]。穴播是实现精量播种的主要方式之一,可实现播种定量、定穴距,提高出苗率、成苗率,透风、透光度好,可保持油菜植株个体生长的一致性^[7]。

为提高穴播排种器排种性能,优化穴播排种器结构,石林榕等^[8]对玉米直插穴播机强排-强启排种装置进行了优化设计,改善了作业效果;付威等^[9]设计了一种机械式强制夹持排种装置,适用于播种玉米;李沐桐等^[10]提高了旱地回转扎穴式播种器作业性能;林悦香等^[11]设计了斜插式免耕穴播机,解决了播种均匀性差的问题;石林榕等^[12]设计了电驱式小区玉米膜上直插穴播机,实现了玉米膜上穴播;周勇等^[13]研制了一种组合式阶梯状充填孔的棉花穴播排种器,阶梯状型孔可延长充种时间、约束充种形态;曹成茂等^[14]设计了气吹异型孔勺轮式水稻排种装置,并研究了4种不同型孔的排种盘性能;张顺等^[15]设计了一种水稻气力滚筒式水稻穴直播精量排种装置,实现了水稻穴播;张国忠等^[16]研制了一种水稻双腔侧充种式精量穴播排种器,实现杂交稻每穴2~4粒播种;RATNYAKE等^[17]研究了可调锥形滚筒式水稻穴播排种器;ANANTACHAR等^[18]研究了排种器型孔结构,优化了尺寸和工作转速;SINGH等^[19]对穴播排种器进行优化设计,确定了排种器较优的型孔锥角;雷小龙等^[20]为实现油菜轻简化播种,设计了一种渐开线型孔的油菜精量穴播集中排种装置,实现了油菜穴播。国内外对穴播排种器的研究主要适用于玉米、小麦、水稻、棉花等大粒径作物^[21-26],而对适用于油菜等小粒径作物种子的穴播排种器研究较少。

本文针对传统油菜条播排种器用种量大、株距变异系数大、个体生长良莠不齐等生产实际问题,设计一种带缺口矩形勺式型孔精量取种的油菜勺式精量穴播排种器,分析该排种器的工作过程,确定其主要结构参数,进行影响排种性能参数的组合试验,得出最优参数组合,并通过田间试验验证排种器作业效果,以期为油菜勺式精量穴播排种器的优化改进提供参考。

1 总体结构及工作原理

油菜勺式精量穴播排种器主要由勺轮组合、种箱、壳体、排种轴及链轮等组成,其结构如图1所示。工作时,通过安装在勺轮圆周的取种勺进行精量取种,油菜种子将沿勺轮切向进入取种勺式型孔内,同时取种勺在径向安装方向具有一定前倾角,可提高取种勺取种能力且利于油菜种子靠自身重力自动清种。

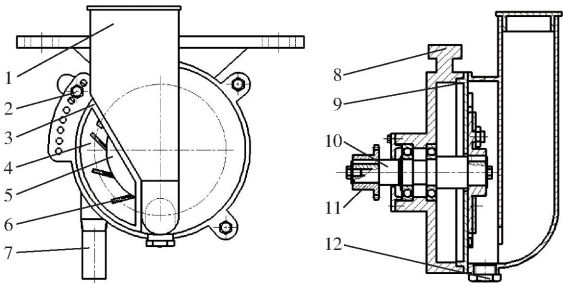
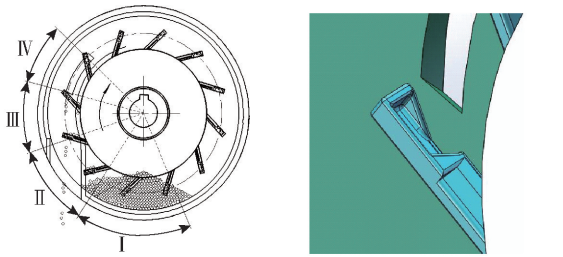


图1 油菜勺式精量穴播排种器结构示意图
Fig.1 Schematic of scoop-type precision metering device for rapeseed

1. 种箱 2. 壳体连接件 3. 透视窗口 4. 侧位板 5. 勺轮组合
6. 取种勺 7. 投种管 8. 主壳体 9. 右侧盖 10. 排种轴
11. 驱动链轮 12. 卸种口塞

油菜勺式精量穴播排种器工作过程可分为取种、携种、清种和投种4个阶段。工作原理如图2所示,工作时,种箱中的油菜种子经过侧盖上一定高度的进种口限量进入勺式精量穴播排种器内的充种腔形成堆积,勺轮组合跟随排种轴顺时针方向转动,油菜种子在重力、种子间相互作用力及取种勺扰动的作用下定量进入取种勺式型孔内;取种勺继续旋转,当到达一定的高度后,取种勺式型孔外部拖带多余种子通过自身重力作用滑落至充种区;当取种勺转动到侧位板缺口位置时,由于油菜种子所受到的侧位板支持力消失,型孔内种子从取种勺缺口处掉落,并穿过侧位板缺口,从导种管中流出,实现排种过程。



(a) 排种器各工作阶段 (b) 投种区取种勺与侧位板位置关系
图2 排种器工作原理图

Fig.2 Working principle of metering device for rapeseed
I. 取种区 II. 携种区 III. 清种区 IV. 投种区

2 关键部件设计与参数分析

2.1 勺轮组合

勺轮组合主要由勺轮、取种勺、盖板和紧固件组成,结构如图3所示,其中取种勺是勺式精量穴播排种器的关键部件,其均布在勺轮圆周上。在排种器结构尺寸允许下,应选择直径较大的勺轮,有利于提高排种器充种和清种性能。油菜排种装置排种盘直径一般为80~220 mm,为保证油菜勺式精量穴播排种器的性能要求,取勺轮直径 D_1 为90 mm,取种勺式型孔中心对应的直径 D_d 为110 mm,取种勺外边直径 D_2 为120 mm。

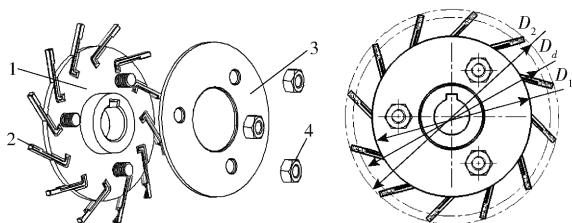


图3 勺轮组合结构图

Fig. 3 Composite structure of spoon and wheel

1. 勺轮 2. 取种勺 3. 盖板 4. 紧固件

2.2 取种勺式型孔

根据油菜农艺种植要求以及考虑油菜种子大小差异和在稻茬田油菜种植成苗率^[27-28],依据油菜生物特性,每个取种勺设计取种量为 (3 ± 1) 粒。根据油菜种子的外形结构尺寸,取种勺式型孔设计为带缺口的类长方体,如图4a所示,取种时,3粒油菜种子采用单层并排方式充种,如图4b所示,可缩短充种时间且有助于减少种子在型孔中的堵塞。

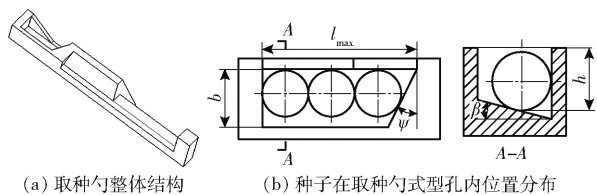


图4 取种勺承种型孔结构图

Fig. 4 Structure of scoop-type hole

为便于种子能快速充入型孔和及时从型孔滑落,型孔四周均为圆角光滑过渡,型孔底部及型孔靠转动中心侧壁均设置一定倾斜角。

取种勺式型孔尺寸依据油菜种子结构尺寸确定,型孔过大,稳定进入型孔内的种子数量增多,不利精量穴播,型孔尺寸偏小,取种数量不足,难以满足穴播种量要求。油菜种子平均尺寸:长 $\times$ 宽 $\times$ 高为2.03 mm $\times$ 1.87 mm $\times$ 1.92 mm,形状为类球形,球形度为0.96,当量直径为1.94 mm^[29],设取种勺式型孔最大长度为 $l_{\max}$ 、型孔宽度为 b 、型孔深度为 h ,根据3粒油菜种子在取种勺式型孔的分布,需满足

$$\begin{cases} l_{\max} = 3l_r + k_l \\ b = k_b w_r \\ h = k_h h_r \end{cases} \quad (1)$$

式中 l_r ——油菜种子平均长度,mm
 w_r ——油菜种子平均宽度,mm
 h_r ——油菜种子平均高度,mm
 k_l ——长度增量,取0.5~1.5 mm
 k_b ——宽度调节系数,取1.1~1.3
 k_h ——高度调节系数,取0.9~1.1

为满足排种器性能,3粒油菜种子须完全进入取种勺式型孔内且能顺利从型孔缺口滑出,设计取种勺式型孔最大长度 $l_{\max}$ 保证3粒种子同时顺利充入型孔,取种勺式型孔宽度 b 取值范围为 $w_r \leq b \leq 1.5w_r$,取种勺式型孔深度 h 取值范围为 $0.5h_r \leq h \leq 1.5h_r$ 。根据油菜种子三轴尺寸,取 $l_{\max}$ 、 b 、 h 分别为6.7、2.5、2 mm。

对投种过程进行分析,当取种勺转动到投种区时,型孔内种子沿型孔底部向下移动,径向受到侧位板支持力。当取种勺转动到侧位板缺口处时,侧位板轴向支持力消失,从型孔缺口处滑落,选取型孔中单粒种子为研究对象,建立如图5a所示的空间坐标系 xyz ,其中 x 方向为垂直勺轮平面方向, z 方向为垂直取种勺式型孔方向。取种勺式型孔底部和侧壁都对种子有支持力,在 xoy 平面和 xoz 平面对种子进行受力分析,如图5b和图5c所示。

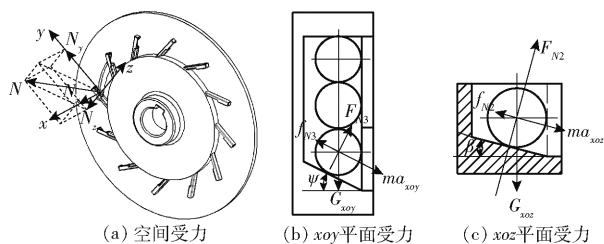


图5 投种过程种子受力分析

Fig. 5 Force analysis of dropping seed progress

投种时,种子从型孔缺口处滑落下,在 xoy 平面和 xoz 平面受力应满足

$$\begin{cases} G_{xoy} \sin\psi - f_{N3} = ma_{xoy} \\ G_{xoz} \sin\beta - f_{N2} = ma_{xoz} \\ G_{xoy} \cos\psi = F_{N3} \\ G_{xoz} \cos\beta = F_{N2} \\ f_{N2} = \mu F_{N2} \\ f_{N3} = \mu F_{N3} \end{cases} \quad (2)$$

式中 G_{xoy} ——种子重力在 xoy 平面上的分力,N
 G_{xoz} ——种子重力在 xoz 平面上的分力,N
 m ——种子质量,kg
 F_{N2} ——取种勺式型孔底部对种子的支持力,N

F_{N3} ——取种勺转动中心侧壁对种子支持力, N
 f_{N2} ——取种勺式型孔底部对种子摩擦力, N
 f_{N3} ——取种勺转动中心侧壁对种子摩擦力, N
 μ ——取种勺式型孔与种子群间的摩擦因数
 a_{xoy} —— xoy 平面种子滑落后型孔加速度, m/s^2
 a_{xoz} —— xoz 平面种子滑落后型孔加速度, m/s^2
 ψ ——型孔靠转动中心侧壁倾斜角, ($^\circ$)
 β ——取种勺式型孔底部倾斜角, ($^\circ$)

由式(2)可知, 当取种勺转动到投种区时, 取种勺式型孔底部和靠转动中心侧壁具有一定倾斜角时, 利于种子从型孔缺口处滑落后, 穿过侧位板缺口落入导种口, 完成投种过程。取种勺式型孔底部倾斜角 β 为 15° , 型孔靠转动中心侧壁倾斜角 ψ 为 27° , 利于辅助完成投种过程。

2.3 取种勺数量

当机组作业速度和穴距一定时, 由于勺轮圆周上安装的取种勺数量越大时, 勺轮转速越慢, 取种勺式型孔中心处的线速度越低, 单个取种勺充种时间越长, 更利于取种, 故在勺轮组合尺寸允许和不影响取种勺作业情况下, 可增加取种勺数量。设勺轮圆周上安装的取种勺数量为 N , 机组作业时, 勺轮转动一周, 厢面播种 M 穴, 则有

$$\begin{cases} N = \frac{\pi D_d v_m}{sv_d(1-c)} \\ v_d = \frac{\pi D_d n}{60} \end{cases} \quad (3)$$

式中 v_m ——机组作业速度, m/s
 s ——穴距, m
 c ——地轮滑移系数
 n ——勺轮转速, r/min
 v_d ——取种勺式型孔中心处线速度, m/s

由式(3)可得

$$N = \frac{60v_m}{sn(1-c)} \quad (4)$$

由式(4)可知, 油菜种子在田间的穴距分布与机组作业速度 v_m 、勺轮转速 n 、取种勺数量 N 有关。当穴距和机组作业速度一定时, 取种勺数量 N 与勺轮转速 n 成反比。当机组作业速度为 $0.6 m/s$, 穴距为 $0.15 m$, 转速为 $20 r/min$ 时, 地轮滑移系数 c 为 $5\% \sim 12\%$, 取 8% , 计算可得种勺数量为 12 个, 此时相邻取种勺式型孔对应的中心角为 30° 。

2.4 取种勺安装前倾角

对清种过程进行分析, 型孔外侧拖带种子为强行拖带层种子, 以型孔外侧拖带种子为研究对象, 种子间以散粒体形式堆积, 简化取种勺式型孔外多余种子为整体作为研究对象, 确定清种临界状态, 令起

始投种位置与水平面的偏角为清种角 θ_1 , 受力如图6所示。

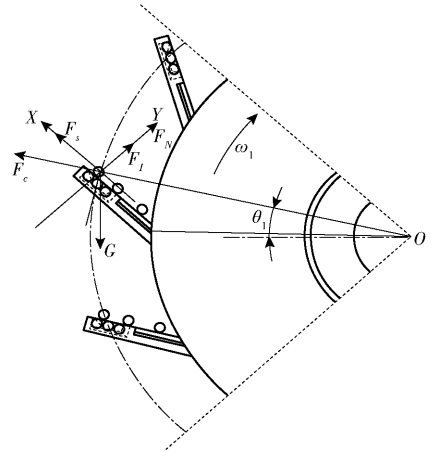


图6 清种过程受力分析

Fig. 6 Force analysis of clearing seed progress

将拖带种子群视为整体, 相对于勺轮做沿取种勺斜面下落运动, 而勺轮组合绕排种轴转动, 对拖带种子群进行受力分析可得

$$\begin{cases} G\sin(\theta_1 + \delta - \alpha) - F_s - F_c\cos(\delta - \alpha) = ma_t \\ F_c\sin(\delta - \alpha) + G\cos(\theta_1 + \delta - \alpha) = F_N + F_I \\ F_s = \mu_1 F_N \\ F_c = m\omega_1^2 r \\ F_I = ma_l \\ \mu_1 = \tan\varphi \end{cases} \quad (5)$$

式中 G ——种子重力, N

F_s ——型孔内种子对拖带种子群摩擦力, N

F_c ——种子惯性离心力, N

F_N ——型孔内种子对拖带种子群支持力, N

F_I ——种子科氏惯性力, N

δ ——取种勺安装前倾角, ($^\circ$)

α ——取种勺型孔中心与安装位置对顶角, ($^\circ$)

φ ——油菜种子自然休止角, ($^\circ$)

r ——取种勺式型孔中心对应的半径, m

a_t ——种子沿取种勺下落加速度, m/s^2

a_l ——种子科氏加速度, m/s^2

ω_1 ——勺轮角速度, rad/s

μ_1 ——种子间摩擦因数

由式(5)可得, 清种角为

$$\theta_1 = \arctan \frac{ma_t + \mu F_N + m\omega_1^2 r \cos(\delta - \alpha)}{F_N + ma_l - m\omega_1^2 r \sin(\delta - \alpha)} - (\delta - \alpha) \quad (6)$$

由式(6)可知, 种子群清种角 θ_1 与取种勺安装前倾角 δ 、勺轮角速度 ω_1 、油菜种子自然休止角 φ 等参数相关。当转速与支持力同向时, 清种角 θ_1 与前倾角 δ 呈负相关, 即取种勺具有一定安装前倾角时,

有利于型孔外侧拖带的多余种子及时从型孔滑落，避免重播。同时取种勺具有一定安装前倾角也便于取种勺在投种过程油菜种子顺利滑出型孔。取种勺安装前倾角改变时，对取种勺清种和投种性能产生影响，如取种勺安装前倾角过大，则取种勺式型孔内种子在进入投种区之前开始滑落，造成漏播。油菜种子自然休止角一般为 27° ^[30]，结合勺轮结构尺寸，综合考虑，取种勺安装前倾角范围取 $30^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。

2.5 勺轮转速

勺轮转速影响排种器工作效率。取种勺在取种阶段，种子依靠自身重力和摩擦力被囊取入型孔内，由于取种勺安装时具有一定倾斜角，油菜种子充入取种勺式型孔姿态如图7a所示，种子充填入型孔的方向与型孔开口方向相同，勺轮转动时，种子易于进入型孔内。图中 v_p 为取种勺运动速度， v_s 为种子充填速度。

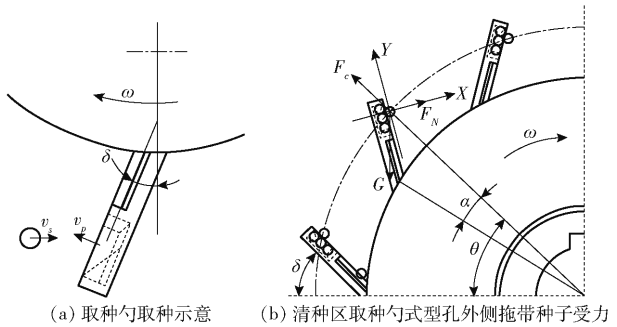


图7 取种勺取种示意图和清种区取种勺型孔外侧拖带种子受力

Fig.7 Diagrams of filling direction for spoon and redundant seed force analysis in cleaning area

在清种区，取种勺式型孔外拖带种子能否自动掉落是决定勺轮极限转速的关键。勺轮的线速度越高，离心力越大，种子仅通过自身重力难以掉落，导致重播率增加，且投种时间变短，投种不完全导致漏播。为保证排种器的清种性能，处于清种区取种勺式型孔外侧拖带的种子受力如图7b所示，得拖带种子能依靠重力自行掉落时，应满足

$$\begin{cases} G\cos(90^{\circ}-\delta-\theta+\alpha) \geq m\omega^2 r\cos(\delta-\alpha) \\ \omega = \frac{2\pi n}{60} \end{cases} \quad (7)$$

式中 θ ——取种勺转动角，($^{\circ}$)

ω ——勺轮临界角速度，rad/s

由式(7)可得勺轮临界转速 n 为

$$n \leq \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g\cos(90^{\circ}-\delta-\theta+\alpha)}{r\cos(\delta-\alpha)}} \quad (8)$$

由式(8)可知，勺轮临界转速 n 与取种勺式型孔中心处半径 r 、前倾角 δ 及取种勺转动角 θ 有关，对顶角 α 由前倾角 δ 确定。为达到较优清种和投种

效果，勺轮工作线速度应为临界速度的70%~80%，当勺轮结构尺寸一定时，临界转速由前倾角及起始投种角确定，综合考虑，取勺轮转速范围为10~30 r/min。

3 排种性能试验

3.1 台架试验

根据结构设计及排种过程分析，结合预试验研究，为探明取种勺安装前倾角 δ 、取种勺式型孔长度 l 、勺轮转速 n 对排种器排种性能的影响，开展台架试验。选取取种勺安装前倾角、取种勺式型孔长度、勺轮转速为试验因素，以穴粒数合格率 Y_1 、漏播率 Y_2 和重播率 Y_3 为试验指标，开展响应面BBD(Box- Behnken design)试验，试验因素编码值和试验方案如表1、2所示，其中 X_1 、 X_2 、 X_3 分别为取种勺安装前倾角、取种勺式型孔长度、勺轮转速编码值。试验以长江中下游常用油菜品种“华油杂62”油菜种子为试验材料，千粒质量4.87 g，油菜勺式精量穴播种器由3D打印加工而成，材料为工程塑料，勺轮圆周

表1 试验因素编码
Tab.1 Coding of factors

编码	因素		
	取种勺安装前倾角 $x_1/(^{\circ})$	取种勺式型孔长度 x_2/mm	勺轮转速 $x_3/(r \cdot \text{min}^{-1})$
-1	30	4.7	10
0	45	5.7	20
1	60	6.7	30

表2 试验方案及结果

Tab.2 Experiment scheme and results						
试验序号	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
1	0	1	-1	80.00	13.00	7.00
2	0	0	0	92.00	2.00	6.00
3	0	0	0	95.00	2.50	2.50
4	0	1	1	90.26	2.56	7.18
5	-1	0	-1	80.20	11.40	8.40
6	0	0	0	92.78	2.78	4.44
7	0	-1	-1	87.00	7.30	5.70
8	1	0	1	94.80	3.00	2.20
9	1	1	0	87.80	7.60	4.60
10	1	1	0	83.90	2.80	13.30
11	0	-1	1	89.60	3.10	7.30
12	1	-1	0	91.40	7.30	1.30
13	-1	-1	0	95.40	0.60	4.00
14	1	0	-1	89.10	10.00	0.90
15	0	0	0	93.40	1.80	4.80
16	-1	0	1	90.80	1.30	7.90
17	0	0	0	94.80	2.20	3.00

均匀分布 12 个取种勺。试验于 JPS-16 型排种器性能检测试验台上开展,如图 8 所示,该试验台种距测量精度为 $\pm 2\text{ mm}$,试验标准参照 NY/T 987—2006《铺膜穴播机作业质量》。

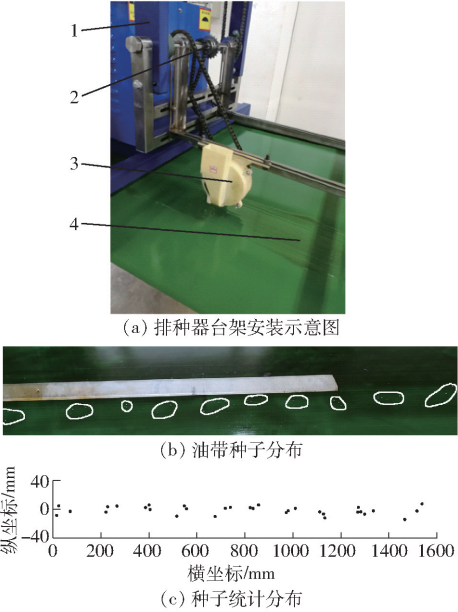


图 8 排种器台架试验及油带种子分布

Fig. 8 Seed metering device bench test and rapeseed distributions in oil belt

1. 试验台 2. 传动系统 3. 油菜勺式精量排种器 4. 种床带

3.2 试验结果分析

进行响应面试验时,统计各试验结果,重复 5 次,计算穴粒数合格率、漏播率、重播率,试验结果如表 2 所示,并建立穴粒数合格率 Y_1 、漏播率 Y_2 和重播率 Y_3 与取种勺安装前倾角 X_1 、取种勺式型孔长度 X_2 、勺轮转速 X_3 间的三元二次回归方程,结果为

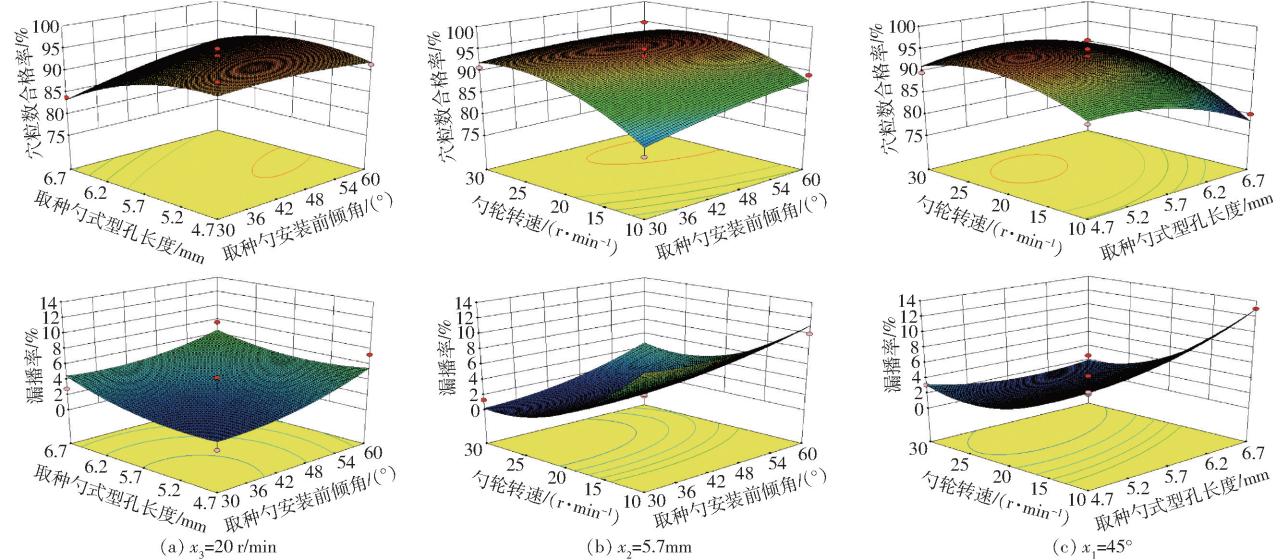


图 9 试验因素对穴粒数合格率和漏播率的影响规律

Fig. 9 Effects of experiment factors on pass rate and missed broadcast rate

$$\left\{\begin{aligned} Y_1 &= 93.596 + 1.6X_1 - 2.68X_2 + \\ &\quad 3.645X_3 + 1.975X_1X_2 - 1.225X_1X_3 + \\ &\quad 1.915X_2X_3 - 0.9805X_1^2 - 2.9905X_2^2 - \\ &\quad 3.8905X_3^2 \quad (P < 0.01) \\ Y_2 &= 2.56 + 1.475X_1 + 0.9575X_2 - \\ &\quad 3.9675X_3 - 0.475X_1X_2 + \\ &\quad 0.775X_1X_3 - 1.56X_2X_3 + 0.975X_1^2 + \\ &\quad 1.04X_2^2 + 2.89X_3^2 \quad (P < 0.01) \\ Y_3 &= 4.134 - 3.075X_1 + 1.7225X_2 + \\ &\quad 0.3225X_3 - 1.5X_1X_2 + 0.45X_1X_3 - \\ &\quad 0.355X_2X_3 - 0.1395X_1^2 + \\ &\quad 1.8055X_2^2 + 0.8555X_3^2 \quad (P < 0.05) \end{aligned}\right. \quad (9)$$

由回归结果可知,所建立的穴粒数合格率 Y_1 、漏播率 Y_2 和重播率 Y_3 3 个回归方程都显著。田间作业时,需在满足播种穴粒数合格率下降低漏播率,根据回归结果,分别固定勺轮转速、取种勺式型孔长度和取种勺安装前倾角为零水平,绘制相应的曲面和等值曲线,分析试验因素对合格率及漏播率影响规律,如图 9 所示。取种勺安装前倾角 X_1 、取种勺式型孔长度 X_2 、勺轮转速 X_3 对穴粒数合格率 Y_1 显著性影响从大到小顺序为勺轮转速 X_3 、取种勺式型孔长度 X_2 、取种勺安装前倾角 X_1 ,对漏播率 Y_2 显著性影响从大到小顺序为勺轮转速 X_3 、取种勺安装前倾角 X_1 、取种勺式型孔长度 X_2 。穴粒数合格率随勺轮转速增加先增加后减小至趋于稳定,随取种勺式型孔长度的增大逐渐减小,随取种勺安装前倾角增大逐渐增加再趋于稳定。漏播率随勺轮转速增加逐渐减小,随取种勺式型孔长度和安装前倾角的增加

逐渐增加。

3.3 工作参数优化

田间作业时,需在满足播种穴粒数合格率下降
低漏播率。为获得排种器最佳工作参数组合,以穴
粒数合格率 Y_1 、漏播率 Y_2 、重播率 Y_3 综合指标建立
优化函数,排种器性能指标要求穴粒数合格率大于
80%、漏播率小于 5%、重播率小于 15%,结合各因
素试验取值边界条件,建立参数化数学模型,其目标
函数和约束条件为

$$F_{\max} = Y_1 - Y_2 - Y_3 \tag{10}$$

s. t.
$$\begin{cases} Y_1 > 80\% \\ Y_2 < 5\% \\ Y_3 < 15\% \\ 30^\circ \leq x_1 \leq 60^\circ \\ 4.7 \text{ mm} \leq x_2 \leq 6.7 \text{ mm} \\ 10 \text{ r/min} \leq x_3 \leq 30 \text{ r/min} \end{cases}$$

采用线性规划数学模型对目标函数进行优化求
解,得取种勺安装前倾角 47.5° ,取种勺型式孔长度
5.4 mm、勺轮转速 24.3 r/min 时,对应的穴粒数合
格率为 94.59%、漏播率为 1.78%、重播率为
3.63%。基于最佳工作参数组合,开展优化结果的
台架验证试验,试验重复 5 次,试验结果如表 3 所
示,得穴粒数合格率为 91.40%、漏播率为 4.84%、
重播率为 3.76%,表明最佳工作参数组合下的排种
器作业性能满足油菜田间精量穴播对穴粒数合格
率、漏播率和重播率的要求。

表 3 优化参数台架验证试验结果

Tab.3 Bench validation test for optimization parameter

序号	穴粒数/粒							总穴 粒数/ 粒	合格 率/%	漏播 率/%	重播 率/%
	0	1	2	3	4	5	6				
1	1	3	45	49	31	4	3	136	91.91	5.15	2.94
2	2	3	48	55	23	4	2	137	91.97	4.38	3.65
3	3	4	53	58	26	5	2	151	90.73	4.64	3.47
4	2	3	47	57	28	5	2	144	91.67	4.86	3.47
5	1	4	43	51	23	4	3	129	90.70	5.43	3.88
平均值									91.40	4.84	3.76

3.4 田间试验

基于 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机平台,于
2019 年 9 月在华中农业大学现代农业种植示范基
地开展排种器最优参数组合下的油菜田间播种试
验。试验配套动力为东方红 LX954 型拖拉机,作业
速度为 2.17 km/h,油菜品种为“华油杂 62”,播量为

5.2 kg/hm²,播种试验和出苗情况如图 10 所示。播
种 30 d 后,每行测 5 段,测 1 m 内每穴株数,统计得
平均穴株数合格率((3±1)株/穴)为 88.64%、平均
漏播率(0 或 1 株/穴)为 3.52%,油菜平均种植密
度为 63 株/m²,满足油菜实际田间穴播要求。



图 10 油菜田间试验及出苗效果

Fig.10 Field test and performance of rapeseed

4 结论

(1)针对传统油菜条播排种器用种量大、株距
变异系数大、个体生长良莠不齐等生产实际问题,研
制了一种带缺口矩形勺式型孔精量取种的油菜勺式
精量穴播排种器,实现每穴(3±1)粒穴播。

(2)分析了油菜勺式精量穴播排种器取种、清
种和投种等排种过程,发现取种勺安装前倾角有利
于取种、清种和投种过程,同时,取种勺式型孔底部
倾角和靠转动中心侧壁倾角有利于种子从型孔缺口
处滑落下,完成投种过程。对油菜勺式精量穴播排
种器关键部件取种勺进行了设计,确定了取种勺式
型孔最大长度为 6.7 mm、宽度为 2.5 mm、高度为
2 mm。勺轮上取种勺安装数量为 12 个,取种勺安
装前倾角范围为 30°~60°,勺轮转速范围为 10~
30 r/min。

(3)进行了油菜勺式精量穴播排种器性能试
验,对响应面试验结果进行回归分析,得出取种勺安
装前倾角、取种勺式型孔长度、勺轮转速对穴粒数合
格率显著性影响从大到小顺序为勺轮转速、取种勺
式型孔长度、取种勺安装前倾角,对漏播率显著性影
响从大到小顺序为勺轮转速、取种勺安装前倾角、取
种勺式型孔长度。优化得出,最优结果为种勺安装
前倾角 47.5°、取种勺式型孔长度 5.4 mm、勺轮转速
24.3 r/min,对应的穴粒数合格率为 91.40%、漏播
率为 4.84%、重播率为 3.76%,田间播种试验统计
得出,油菜平均种植密度为 63 株/m²,能够满足油菜
农艺种植要求。

参 考 文 献

[1] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9):1-16.
LIAO Qingxi,LEI Xiaolong,LIAO Yitao,et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J/OL]. Transactions of the
Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9):1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.

- aspx? file_no = 20170901&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)
- [2] 张青松,廖庆喜,肖文立,等.油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J].中国油料作物学报,2018,40(5):702-711. ZHANG Qingsong, LIAO Qingxi, XIAO Wenli, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(5): 702-711. (in Chinese)
- [3] 李强,贾东海,顾元国,等.新疆春油菜冬播对产量和品质的影响[J].中国农业大学学报,2019,24(8):27-40. LI Qiang, JIA Donghai, GU Yuanguo, et al. Effect of sowing before winter on the yield and quality of spring rapeseed in Xinjiang [J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(8): 27-40. (in Chinese)
- [4] 廖庆喜.油菜生产机械化技术[M].北京:科学出版社,2018.
- [5] 李宝阔.农业机械学[M].北京:中国农业出版社,2009.
- [6] 罗锡文,廖娟,胡炼,等.提高农业机械化水平促进农业可持续发展[J].农业工程学报,2016,32(1):1-11. LUO Xiwen, LIAO Juan, HU Lian, et al. Improving agricultural mechanization level to promote agricultural sustainable development [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(1): 1-11. (in Chinese)
- [7] 邢赫,王在满,罗锡文,等.气力式水稻穴播机播种精度与田间成苗率关系的试验研究[J].农业工程学报,2018,34(9):42-48. XING He, WANG Zaiman, LUO Xiwen, et al. Experimental study on relationship of seeding precision and germination rate in field of pneumatic rice hill-drop drilling planter [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(9): 42-48. (in Chinese)
- [8] 石林榕,赵武云,杨小平,等.玉米直插穴播机强排-强启排种装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(2):41-47. SHI Linrong, ZHAO Wuyun, YANG Xiaoping, et al. Design and test of metering device with forced seeding and opening for corn direct seeding machine [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 41-47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180206&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.006. (in Chinese)
- [9] 付威,李树峰,孙嘉忆,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] 李沐桐,李天宇,官晓东,等.旱地回转扎穴式播种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(2):48-57. LI Mutong, LI Tianyu, GUAN Xiaodong, et al. Design and experiment of rotary hole seeder for dryland [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 48-57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180207&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.007. (in Chinese)
- [11] 林悦香,尚书旗,王东伟,等.斜插式免耕穴播机设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(23):8-14. LIN Yuexiang, SHANG Shuqi, WANG Dongwei, et al. Design and experiment of inclined inserted no-tillage hill seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 8-14. (in Chinese)
- [12] 石林榕,赵武云,孙伟,等.电驱式小区玉米膜上直插穴播机的研制与试验[J].农业工程学报,2017,33(4):32-38. SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Development and experiment of electric driving insert hill-drop planter on film for plot corn [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 32-38. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 曹成茂,秦宽,王安民,等.水稻直播机气吹辅助勺轮式排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2015,46(1):66-72. CAO Chengmao, QIN Kuan, WANG Anmin, et al. Design and experiment on rice hill seeder with air-blowing special hole and scoop-wheel [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1): 66-72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150110&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.010. (in Chinese)
- [15] 张顺,夏俊芳,周勇,等.气力滚筒式水稻直播精量排种器的设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(1):11-19. ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device for rice [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 11-19. (in Chinese)
- [16] 张国忠,张沙沙,杨文平,等.双腔侧充式水稻精量穴播排种器的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(8):9-17. ZHANG Guozhong, ZHANG Shasha, YANG Wenping, et al. Design and experiment of double cavity side-filled precision hole seed metering device for rice [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(8): 9-17. (in Chinese)
- [17] RATNAYAKE R M, BALASORIYA B. Re-design, fabrication, and performance evaluation of manual conical drum seeder: a case study [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2013, 29(2): 139-147.
- [18] ANANTACHAR M, PRASANNA G V, KUMAR T. et al. Neural network prediction of performance parameters of an inclined plate seed metering device and its reverse mapping for the determination of optimum design and operational parameters [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2010, 72(2): 87-98.
- [19] SINGH R C, SINGH C X, SARASWAT X, et al. Optimization of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting of groundnut (*Arachis hypogaea*) seeds [J]. Indian Journal of Agricultural Sciences, 2007, 77(1): 40-42.
- [20] 雷小龙,杨文浩,杨龙君,等.油菜精量穴播集中排种装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2020,51(2):54-64. LEI Xiaolong, YANG Wenhao, YANG Longjun, et al. Design and experiment of seed hill-seeding centralized metering device for rapeseed [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 54-64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2002007&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.007. (in Chinese)

- LIU Baohua, LI Zhenliang, LI Ya, et al. Research on the flour pneumatic conveying system with multipoint feeding[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2014, 22(4): 19–21. (in Chinese)
- [17] 关佳斌, 裴旭明, 张琳荔. 粮食颗粒群密相变径气力输送的流动特性[J]. 中国粉体技术, 2018, 24(2): 38–43.
- GUAN Jiabin, PEI Xuming, ZHANG Linli. Research on flow characteristics of pneumatic conveying in dense phase stepped pipeline of grain particles[J]. China Powder Science and Technology, 2018, 24(2): 38–43. (in Chinese)
- [18] 杨腾. 石灰石粉密相气送式中试研究[J]. 化工进展, 2003, 22(11): 1213–1216.
- YANG Teng. Pneumatic conveying research of limestone-powder in dense phase[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2003, 22(11): 1213–1216. (in Chinese)
- [19] 郭晓镭, 龚欣, 代正华, 等. 竖直上升管中直密相气力输送压降特性[J]. 化工学报, 2007, 34(3): 602–607.
- GUO Xiaolei, GONG Xin, DAI Zhenghua, et al. Pressure drop characteristics of pneumatic dense phase transport in riser[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 34(3): 602–607. (in Chinese)
- [20] 杨俊. 浅析聚烯烃装置气流输送系统的设计思路[J]. 石油化工设计, 2007, 23(2): 38–39, 16.
- YANG Jun. Design ideas for pneumatic conveying plant in polyolefin plant[J]. Petrochemical Design, 2007, 23(2): 38–39, 16. (in Chinese)
- [21] 陈魁. 实验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [22] 吴珊, 刘彦辉, 张申海, 等. 供水管道压力调控对漏水量影响的试验研究[J]. 水利水电科技进展, 2007, 26(3): 27–29.
- WU Shan, LIU Yanhui, ZHANG Shenhui, et al. Experimental study on influences of pressure regulation and control in water supply pipes on volume of water leakage[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2007, 26(3): 27–29. (in Chinese)
- [23] 孙一坚. 简明通风设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [24] 周乃君. 工程流体力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [25] 史皓男. 灌溉管网中变径管水力特性研究[J]. 水利规划与设计, 2016, 28(5): 66–68.
- SHI Haonan. Experimental study on influences of pressure regulation and control in water supply pipes on volume of water leakage[J]. Water Resources Planning and Design, 2016, 28(5): 66–68. (in Chinese)
- [26] DIMOTAKIS P E, LYE R C, PAPANTONIOU D Z. Viscous flow in pipes[M] // BRUCE R M. Fundamentals of fluid mechanics. Department of Aerospace Engineering and Engineering Mechanics, USA, 2009: 383–460.
- [27] 李文科. 工程流体力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2007.
- [28] 陈超祥, 胡其登. Solidworks Flow Simulation 教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [29] 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.

(上接第 54 页)

- [21] 李复辉, 刁培松, 杜瑞成, 等. 内嵌勺盘式舵轮免耕施肥播种机的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 16–23.
- LI Fuhui, DIAO Peisong, DU Ruicheng, et al. Development and test of no-tillage fertilization planter with embedded spoon disc helm wheel[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19): 16–23. (in Chinese)
- [22] 谢永春, 张平良, 郭天文, 等. 覆膜穴播方式对旱地小麦田土壤硝态氮和铵态氮积累的影响[J]. 麦类作物学报, 2015, 35(6): 836–843.
- XIE Yongchun, ZHANG Pingliang, GUO Tianwen, et al. Effect of film-mulching on nitrate and ammonium nitrogen in dryland wheat fields[J]. Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(6): 836–843. (in Chinese)
- [23] 张国忠, 臧英, 罗锡文, 等. 粳稻穴播排种器直线型搅种装置设计及排种精度试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 1–9.
- ZHANG Guozhong, ZANG Ying, LUO Xiwen, et al. Line-churning tooth design and metering accuracy experiment of rice pneumatic precision hill-drop seed metering device on pregnant Japonica rice seed[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 1–9. (in Chinese)
- [24] 陈学庚, 卢勇涛. 气吸滚筒式棉花精量穴播器排种性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 35–38.
- CHEN Xuegang, LU Yongtao. Sowing-performance of air-suction cylindrical cotton precision dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 35–38. (in Chinese)
- [25] 王希英, 唐汉, 王金武, 等. 双列交错勺带式马铃薯精量排种器优化设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 82–90.
- WANG Xiying, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Optimized design and experiment on double-row cross spoon-belt potato precision seed metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 82–90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20161111&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.011. (in Chinese)
- [26] 耿端阳, 张明源, 何珂, 等. 倾斜双圆环型孔圆盘式玉米排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1): 68–76.
- GENG Duanyang, ZHANG Mingyuan, HE Ke, et al. Design and experiment of declined disc plate with double ring corn metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 68–76. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180108&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.008. (in Chinese)
- [27] 潘典进, 周江霞, 罗传贵, 等. 油菜精量直播栽培几个技术问题[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(4): 784–787.
- [28] 莫嵩山. 油菜机械覆膜穴播技术要点[J]. 农业开发与装备, 2019(4): 209–214.
- [29] 丛锦玲. 油菜小麦兼用型气力式精量排种系统及其机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [30] 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.