doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.007

油菜精量穴播集中排种装置设计与试验

雷小龙[1,2]　杨文浩[1]　杨龙君[1]　刘礼阳[1]　廖庆喜[3]　任万军[2]

(1. 四川农业大学机电学院, 雅安 625014; 2. 四川农业大学作物生理生态及栽培四川省重点实验室, 成都 611130;
3. 华中农业大学工学院, 武汉 430070)

摘要: 为实现油菜轻简化精量播种,设计了一种油菜精量穴播集中排种装置。基于油菜种子的机械物理特性和精量播种要求,提出了适宜油菜穴播 1 ~ 3 粒的渐开线状型孔,确定了主要结构参数。应用 EDEM 软件构建了穴播集中排种装置仿真模型,分析了型孔长度、截面尺寸和型孔深度对充种性能的影响,发现渐开线状型孔有助于充种,且型孔长度和深度分别为 3.5 mm 和 2.6 mm 的渐开线状型孔均充种 1 粒或 2 粒;护种带提高了投种一致性,当排种轮与护种带间隙为 0.2 mm 时,成穴较优。通过台架试验研究了油菜品种和转速对排种性能影响,结果表明:品种、排种轮转速及其二者的交互作用对排种合格率均有显著影响,排种合格率随转速增加呈先增大后减小的趋势,在转速为 20 ~ 40 r/min 时,排种合格率(1 ~ 3 粒)高于 94%,穴距变异系数低于 12%;50 穴的总粒数标准误差在 10 粒之内,排种量一致性变异系数低于 10.0%。田间试验结果表明,油菜平均株数为 2.05 株/穴,能够适应不同含水率条件的油菜精量播种要求。油菜精量穴播集中排种装置可实现 6 行成行成穴精量排种,为轻简化油菜排种器结构设计和成穴精量播种提供了参考。

关键词: 油菜; 精量播种; 穴播; 集中排种装置

中图分类号: S223.2+3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)02-0054-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Seed Hill-seeding Centralized Metering Device for Rapeseed

LEI Xiaolong[1,2]　YANG Wenhao[1]　YANG Longjun[1]　LIU Liyang[1]　LIAO Qingxi[3]　REN Wanjun[2]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Sichuan Agricultural University*, *Ya'an* 625014, *China*
2. *Crop Ecophysiology and Cultivation Key Laboratory of Sichuan Province*, *Sichuan Agricultural University*, *Chengdu* 611130, *China*
3. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: In order to achieve light and simplified precision seeding for rapeseed, the hill-seeding centralized metering device was carried out. According to the mechanical and physical properties, and precision seeding requirements of rapeseed, the involute-type model-hole which could contain 1 ~ 3 seeds was designed by using empirical equations. The main structural parameters of involute-type model-hole and hill-seeding wheel were determined. Effects of model-hole structure on seed feeding performance were investigated by using the EDEM simulation approach and using EDEM software. It was found that the involute-type model-hole was helpful for seed filling, and each model-hole was filled with one or two seeds for model-hole's length of 3.5 mm, the type Ⅱ model-hole and model-hole's depth of 2.6 mm. The consistency of seeding's time improved through the seed guard belt and the hill diameter was lower while the gap between guard belt and seeding wheel was 0.2 mm. The bench test results showed that seed varieties, rotational speed of metering wheel and their interaction had significant effects on the qualified rate of seeding. The qualified rate of seeding was increased first and then decreased with the increase of rotational speed. When rotational speed was 20 ~ 40 r/min, the qualified rate of seeding was larger than 94% with 1 ~ 3 seeds in each model-hole, and the variation coefficient of hill spacing was less than 12%. The standard error of the seeds' number of 50 hills was within 10, and the variation coefficient of uniformity of seeds' quantity was less than 10.0%. The field experiment results showed that the average

收稿日期: 2019-11-10　修回日期: 2019-12-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0301204)和国家自然科学基金项目(31901413)

作者简介: 雷小龙(1989—),男,讲师,博士,主要从事油稻种植技术与装备研究,E-mail: leixl1989@163.com

通信作者: 任万军(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事作物机械化栽培技术研究,E-mail: rwjun@126.com

seedlings per hill was 2.05, which can realize adjustment of precision seeding for rapeseed. The seed hill-seeding device could ensure the performance of filling and protecting seeds, and realize six rows of hill-forming seeding. This research can provide basis for structural design of hill-seeding centralized metering device and precision hill-forming seed sowing for rapeseed.

Key words: rapeseed; precision seeding; hill-seeding; centralized metering device

0　引言

油菜是中国重要的油料作物，也是冬季长江流域稻田和旱地主要种植作物[1]。受限于粘重土壤、播种季节正值连续阴雨天气、田块小而分散、存在一定坡度等客观条件，轻简化、精量化和集成化的油菜精量直播机成为解决丘陵山区油菜机械化播种水平低问题的重要途径[2]。

排种器是影响播种质量的核心部件，可分为单体式排种器和集中排种器。吴福通[3]、田波平等[4]采用“负压吸种、正压吹种”的原理，研制了正负气压组合式油菜精量排种器，属单体式油菜排种器，实现了油菜等小粒径种子精量排种，排种器的合格指数高于 90%[5]。以正负气压组合式油菜精量排种器为核心的 2BFQ 系列油菜精量联合直播机在湖北、湖南、江西和新疆等地区进行了大面积示范和推广。

集中排种器具有播种机结构和传动系统简单，装卸种便捷、高速，作业高效等优点，已广泛应用于国内外播种机[6]。为解决油菜集中排种的问题，廖庆喜等[7]设计了油菜槽孔轮式排种器，提出了清种轴清种、护种带护种和钢丝推种的排种技术；还研制了机械离心式油菜排种器[8]，其核心部件为倒置内锥筒，依靠种子离心力实现一器多行排种，可同时排种 6～10 行，结构简单；应用 EDEM 软件对离心式排种过程进行仿真，优化型孔结构和工作参数[9-10]，并设计枝状阀式分流装置，将单个型孔的排出种子分成 2 行，提高了田间作业适应性[11]。李明等[12-13]设计了气力滚筒式油菜精量集排器，可实现 6 行精量播种，并建立了负压值、正压值与结构参数、运行参数的关系模型。李兆东等[14-15]采用气流清种与气压护种组合技术，设计了一种油菜精量气压式集排器。除了针对油菜的集中排种器，应用于小麦、玉米、水稻的气力式集中排种器也成为排种器的研究热点[16-21]。

笔者前期基于油菜、小麦的物料特性和单位面积播种量，研制了油麦兼用型气送式集中排种器[22-26]；采用倾斜锥柱状排种轮机械供种和气流输送分配成行的排种方式，实现了油菜小麦兼用排种，并开展了较大面积生产性试验示范[27]。为进一步提高播种精度和精简排种环节，实现油菜成穴或株距均匀播种，提出一种油菜精量穴播集中排种装置，确定穴播集中排种装置的渐开线型孔结构参数，进行排种过程的 EDEM 仿真和油菜成行成穴排种性能试验，以适应长江流域的油菜播种轻简化作业。

1　排种装置结构与工作原理

1.1　油菜精量穴直播机工作原理

油菜精量穴直播机包括自走式驱动底盘、穴播排种装置、电机、导种管、双圆盘开沟器和封闭除草装置等，如图 1 所示。油菜精量穴直播机以自走式驱动底盘作为动力源带动油菜精量集排器和双圆盘开沟器等装置前进，自走式驱动底盘的驱动轮为实心窄橡胶轮，可适应较高含水率条件下的黏重土壤。穴播集中排种装置和双圆盘开沟器分别安装于自走式驱动底盘上方和后端。

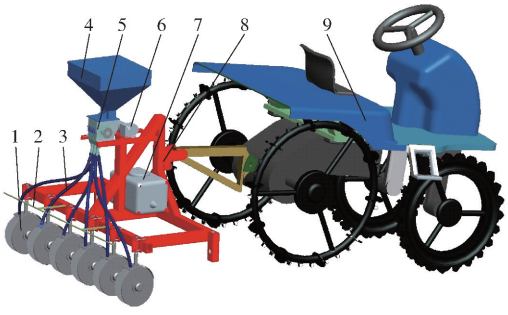


图 1　油菜精量穴直播机结构示意图

Fig. 1　Structure diagram of precision hill-metering planter for rapeseed

1. 双圆盘开沟器　2. 封闭除草装置　3. 导种管　4. 种箱　5. 穴播集中排种装置　6. 电机　7. 药箱　8. 机架　9. 自走式驱动底盘

油菜精量穴直播机工作时，穴播集中排种装置在电机和变速控制器的作用下排出 6 行成穴种子流进入导种管中，在双圆盘开沟器作用下种子进入适当深度的土壤中，完成开沟覆土；同步地，封闭除草装置打开喷药泵进行施药，完成封闭除草，从而提高生产效率。油菜精量穴直播机通过精简传动系统和结构，属油菜轻简型直播机械，其主要技术参数如表 1 所示。

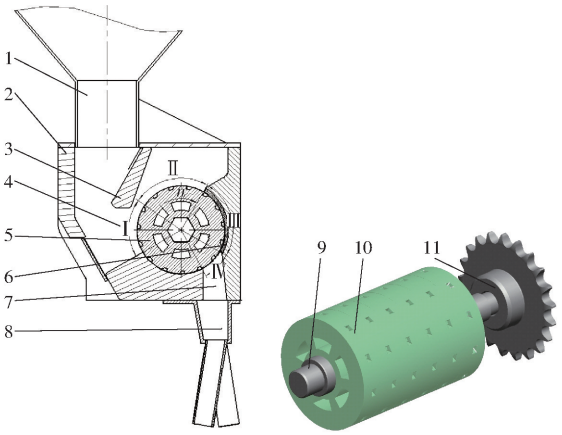
1.2　油菜穴播集中排种装置结构与工作过程

油菜穴播集中排种装置主要包括种箱、壳体、种层调节板[23]、成穴排种机构、护种带和分配管等，如图 2 所示。种层调节板位于壳体与成穴排种机构形成的充种室内，调节种层高度控制充种量。油菜穴

表 1 油菜精量穴直播机主要技术参数

Tab. 1 Main parameters of precision hill-metering planter for rapeseed

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	950×1 772×1 485
作业速度/(km·h^{-1})	2.5~5.0
作业幅宽/m	1.8
播种行数	6
穴播排种装置转速/(r·min^{-1})	10~50
行距/mm	300
穴距/mm	60~150(可调)



(a) 油菜精量成穴集中排种装置 (b) 成穴排种机构

图 2 油菜精量成穴集中排种装置结构示意图

Fig. 2 Structure of hill-seeding centralized metering device

1. 种箱 2. 排种装置外壳 3. 种层调节板 4. 充种室 5. 成穴排种机构 6. 护种带 7. 投种口 8. 分配管 9. 传动轴 10. 成穴排种轮 11. 传动链轮 Ⅰ. 充种区 Ⅱ. 携种区 Ⅲ. 护种区 Ⅳ. 投种区

播集中排种装置包括充种、携种、护种和投种 4 个过程,成穴排种机构在充种室完成单穴 1~3 粒精量充种,携种至由硅胶板形成的护种带护送种子进入投种区,完成投种过程。其中,由 6 个成穴排种轮组成的排种机构对应 6 行排种,是实现集中精量穴播的核心。

油菜穴播集中排种装置工作时,油菜种子由种箱进入充种室,在种层调节板作用下保持稳定的种层厚度,种子在重力和成穴排种轮扰动作用下充入型孔,充入种子的型孔经过携种区进入护种区,种子持续停留在型孔中进入投种区,在重力和离心力作用下完成投种。6 行成穴排种轮型孔排出 6 行种子进入分配管,成穴地将种子输送至导种管,完成集中排种过程。

2 排种装置结构设计

2.1 排种轮型孔设计

油菜种子具有粒径小、球形度高和流动性好的特征,选取了常用的蓉油 11、中双 11 和华油杂 62 共 3 个品种为测试对象,三轴尺寸如表 2 所示。不同类型油菜种子的外形尺寸、千粒质量具有一定差异,油菜种子的长度范围为 1.6~2.5 mm(图 3);当量直径集中于 1.9~2.1 mm,球形度高于 94%。由于油菜种子粒径范围较大,为实现精量穴播排种,考虑农艺技术的成苗率等因素,确定单穴(2±1)粒为播种量。油菜充种、投种和排种性能受排种轮型孔结构与尺寸的影响。

表 2 不同油菜种子的参数

Tab. 2 Parameters of different rapeseed

油菜品种	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm	当量直径/mm	球形度/%	千粒质量/g	容重/(kg·m^{-3})	含水率/%
蓉油 11	2.05±0.19	1.98±0.20	1.94±0.20	1.99	97.12	5.93	688.14	6.55
中双 11	1.95±0.12	1.90±0.14	1.87±0.15	1.91	97.56	3.98	683.30	4.93
华油杂 62	2.05±0.23	1.93±0.20	1.81±0.19	1.92	94.18	4.31	701.10	6.87
平均	2.02	1.94	1.87	1.94	96.29	4.74	690.85	6.12

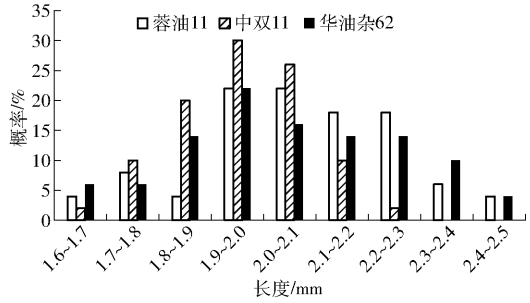


图 3 油菜种子长度概率分布

Fig. 3 Distribution of length's probability for rapeseed

为实现油菜单穴(2±1)粒精量排种,主要体现为大粒种子单粒排种,中小粒种子 2 或 3 粒排种。设计型孔应满足型孔不堵塞,基于前期研究[22,28],锥柱状和渐开线状型孔均能有效提高充种性能。为提高充种性能且精量排种,采用的渐开线状型孔结构如图 4 所示。参照经验公式[28],得到型孔关键参数的公式为

$$\begin{cases} a = k_a L_{\max} \\ a < b < k_b L_{\max} \\ c = L_{\text{mean}} + k_c \\ d = k_d L_{\max} \\ L_{\max} < h < k_h L_{\max} \end{cases} \tag{1}$$

式中 a——型孔下沿宽度,mm

k_a——下沿宽度系数，范围为 1.1 ~ 1.3
b——型孔上沿宽度，mm
k_b——上沿宽度系数，范围为 1.7 ~ 2.0
c——型孔下沿长度，mm
k_c——下沿长度增量，取 0.1 ~ 0.4 mm
d——型孔上沿长度，mm
k_d——上沿长度系数，取 1.2 ~ 1.5
h——型孔深度，mm
k_h——孔深系数，取 1.1 ~ 1.3
L_{max}——油菜种子最大长度，mm
L_{mean}——油菜种子平均长度，mm

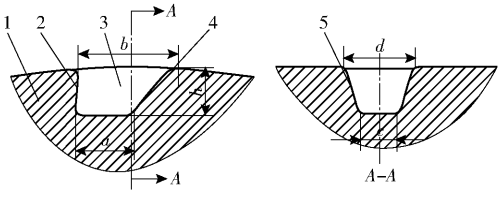


图 4　型孔结构

Fig. 4　Structure of model-hole

1. 成穴排种轮　2. 型孔左壁面　3. 型孔　4. 型孔右壁面　5. 型孔侧面

根据图 3 中油菜种子的最大尺寸和油菜种子的粒径范围为 1.6 ~ 2.5 mm，取 k_a 和 k_h 均为 1.2，确定 a 和 h 分别为 3.0 mm 和 2.6 mm；取 k_b、k_d 分别为 2.0、1.4，b 和 d 分别为 4.9、3.5 mm；k_c 取 0.25 mm，c 为 2.25 mm。

为满足型孔尺寸，型孔左壁面和右壁面需满足渐开线方程[28]，渐开线结构如图 5 所示。图 5 中，A 为左壁面渐开线始点；B 为左壁面渐开线与排种轮交点；C 为右壁面渐开线始点；D 为右壁面渐开线与型孔的初始交点；F 为右壁面渐开线与排种轮交点。其中

$$\begin{cases} x = x_0 + s\sin(\theta t) \\ y = y_0 + s\cos(\theta t) \\ s = 2\pi r_0 t \end{cases} \tag{2}$$

式中　x——渐开线横坐标，mm
y——渐开线纵坐标，mm
x_0——渐开线初始横坐标，mm
y_0——渐开线初始纵坐标，mm
s——调节参数，mm
r_0——基圆半径，mm
t——时间，s
θ——渐开线极角，(°)

点 A 和 D 的坐标分别为 (−3, 37.4) 和 (0, 37.4)。根据文献[28]的方法，确定 r_0 为 8 mm，则 B 的坐标为 (−2.8, 39.9)。根据型孔尺寸，F 的坐标为 (2.1, 39.95)，则确定 C 坐标为 (−3, 28)、r_0 为 8 mm。型孔侧面呈弧形，圆弧半径 R 为 40 mm。

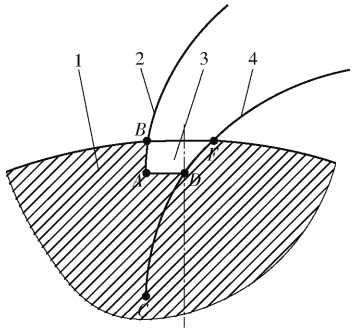


图 5　渐开线状型孔结构图

Fig. 5　Structure diagram of involute-type model-hole

1. 成穴排种轮　2. 左壁面渐开线　3. 型孔　4. 右壁面渐开线

同时对各边沿倒圆 0.5 mm，形成的油菜排种轮型孔如图 5 所示。

2.2　成穴排种轮结构设计

根据农艺要求，油菜种植密度 45 ~ 60 万株/hm^2，可有效增加产量[29]。田间播种时，农艺要求的种植密度为

$$Q_f = \frac{k}{mw} \tag{3}$$

式中　k——单穴植株数量，株
m——行距，m　　w——株距，m

田间作业的播种速率为

$$Q_b = \frac{vBk}{mw} \tag{4}$$

式中　v——播种机前进速度，m/s
B——幅宽，m

成穴排种机构的排种速率为

$$Q_m = \frac{k_p ZNn}{60} \tag{5}$$

式中　k_p——型孔充种数量，粒
Z——成穴排种轮数量
N——成穴排种轮上型孔数量
n——成穴排种轮转速，r/min

农艺要求的种植密度与播种速率的关系为

$$Q_f = pvBQ_b \tag{6}$$

式中　p——出苗率

由式(3) ~ (6)可知，农艺要求的播种速率应与成穴排种机构的排种速率相同，则

$$Q_f = \frac{vBk_p ZNnp}{60} \tag{7}$$

式(7)表明，当播种幅宽 B、前进速度 v 一定时，油菜田间种植密度与型孔充种数量 k_p、成穴排种轮数量 Z、成穴排种轮上型孔数量 N、成穴排种轮转速 n 呈正相关关系。本研究针对 6 行排种，则成穴排种轮数量 Z 为 6 个。成穴排种轮转速 n 具有适宜的区间，转速 n 和排种轮型孔数量 N 均受成穴排种轮直

径的影响。增加成穴排种轮直径可增加型孔数量 N,在相同排种穴数条件下降低转速,提高油菜种子充种性能;但增加成穴排种轮直径增大排种器尺寸,不利于实现轻简化。因此,结合窝眼轮排种器和降低排种器尺寸的设计要求,确定成穴排种轮直径 D 为 80 mm。

由于型孔数量 N 受成穴排种轮直径 D 的限制,即

$$N < \frac{\pi D}{2b} \tag{8}$$

根据型孔尺寸和满足强度要求,型孔数量应满足 $N<25$。

在播种幅宽 B 和前进速度 v 分别为 2 m 和 2.5 ~ 5.0 km/h 时,要求单位种植密度为 45 株/m^2 条件下,根据式(7)分析,排种排种轮转速 n 一般为 10 ~ 50 r/min,出苗率 p 为 0.8,则型孔数量应满足 $N \geqslant 12$。为更好地实现油菜种子成穴,应适当增大型孔间距,取型孔数量 N 为 15 个。成穴排种轮应用 3D 打印技术加工,材料为 ABS 工程塑料。

3 排种过程仿真分析

油菜成穴集中排种装置工作时,在种群压力和重力作用下,油菜种子以散粒体的形式充入渐开线状型孔,当油菜种子经过携种过程进入护种区,在护种区种子在型孔内移动,直至进入投种区。排种过程中种子与种群、壁面间相互作用难以准确描述,本研究采用 EDEM 仿真定量分析排种过程。

3.1 仿真试验方法

EDEM 仿真中将穴播集中排种装置几何体模型简化为外壳和成穴排种机构 2 部分,根据穴播集中排种装置加工所用材料,外壳设定为铝合金,成穴排种机构的成穴排种轮设为工程塑料 ABS。油菜种子设为球形,仿真中颗粒模型设为硬球模型,接触模型选取 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型,仿真模型如图 6 所示,材料特性及其相互间的力学特性参数[23]见表 3。

为更好地获取型孔结构参数,开展型孔结构参数仿真试验,试验设计如表 4 所示。确定影响型孔充种性能的因素为型孔长度 d、型孔截面和型孔深度 h,型孔长度设 3.0、3.5、4.0 mm 共 3 个水平;型孔深度设 2.2、2.6、3.0 mm 共 3 个水平;型孔截面设 3 种尺寸截面,型孔截面通过改变渐开线的位置改变型孔宽度,其结构如图 7 所示。应用 EDEM 软件仿真时,排种轮转速为 20 r/min,后处理器统计不同处理的 30 穴的型孔充种量,计算 1 ~ 3 粒/穴的合格率、漏播率、重播率和各行排种量一致性变异系数。

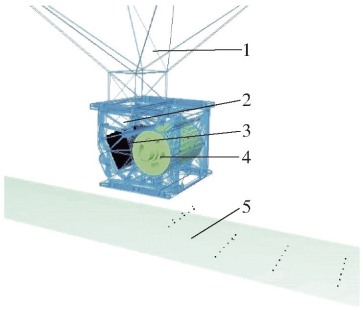


图 6 EDEM 仿真模型

Fig. 6 EDEM simulation model

1. 种箱 2. 油菜种子 3. 成穴排种机构 4. 排种装置外壳 5. 油带

表 3 种子与材料特性参数

Tab. 3 Values of seed and material properties used in EDEM

属性	参数	数值
颗粒	直径/mm	2.00
	密度/(kg·m^{-3})	1 060
	泊松比	0.25
	剪切模量/Pa	1.1×10^{7}
铝合金材料	密度/(kg·m^{-3})	2 700
	泊松比	0.30
	剪切模量/Pa	2.7×10^{10}
工程塑料材料	密度/(kg·m^{-3})	1 060
	泊松比	0.394
	剪切模量/Pa	8.96×10^{8}
橡胶材料	密度/(kg·m^{-3})	1 350
	泊松比	0.47
	剪切模量/Pa	2.9×10^{9}
颗粒与其他材料相互作用	颗粒与颗粒恢复系数	0.60
	颗粒与颗粒静摩擦因数	0.50
	颗粒与颗粒动摩擦因数	0.01
	颗粒与铝合金恢复系数	0.60
	颗粒与铝合金静摩擦因数	0.30
	颗粒与铝合金动摩擦因数	0.01
	颗粒与工程塑料 ABS 恢复系数	0.75
	颗粒与工程塑料 ABS 静摩擦因数	0.30
	颗粒与工程塑料 ABS 动摩擦因数	0.01
	颗粒与橡胶恢复系数	0.000 1
	颗粒与橡胶静摩擦因数	10
	颗粒与橡胶动摩擦因数	10
	重力加速度/(m·s^{-2})	9.81

注:种子与橡胶相互间力学特性参数是为方便固定种子落点设定,非真实值。

3.2 型孔结构参数优化结果与分析

试验结果如表 5 所示,表中 A、B、C 分别为型孔长度、型孔截面和型孔深度水平值。型孔截面对充种合格率、漏播率和各行排种量一致性变异系数均显著或极显著影响,型孔截面Ⅰ处理的漏播率和各行排种量一致性变异系数均高于其他型孔截面,说

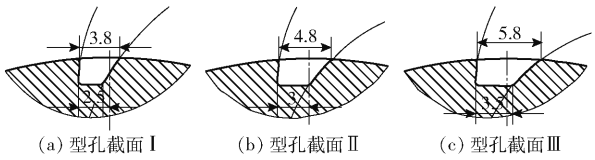
表 4　试验因素及水平

Tab. 4　Test factors and levels

水平	因素		
	型孔长度/mm	型孔截面	型孔深度/mm
1	3.0	截面Ⅰ	2.2
2	3.5	截面Ⅱ	2.6
3	4.0	截面Ⅲ	3.0

明型孔截面Ⅰ的充种性能较差。随型孔长度和深度增加，型孔充种 2 ~ 3 粒的概率增加；型孔截面Ⅲ出现单个型孔充种数量大于 3 粒的现象。

极差分析结果表明：影响充种合格率和各行排种量一致性变异系数的主次因素为：型孔截面、型孔长度、型孔深度，型孔截面Ⅱ的充种合格率最高，单个型孔充种 1 ~ 3 粒的概率达 100%（表 6）。综合考虑充种合格率和各行排种量一致性变异系数，以 $B_2A_2C_2$ 较优，即型孔长度和深度分别为 3.5 mm 和 2.6 mm 的型孔截面Ⅱ。



（a）型孔截面Ⅰ　（b）型孔截面Ⅱ　（c）型孔截面Ⅲ

图 7　不同渐开线状型孔截面尺寸

Fig. 7　Section size of different model-holes

表 5　型孔结构参数对充种性能的影响

Tab. 5　Effects of model-hole's parameters on seed filling performance

试验序号	因素			1 粒率/%	2 粒率/%	3 粒率/%	充种合格率/%	漏播率/%	重播率/%	各行排种量一致性变异系数/%
	A	*B*	*C*							
1	1	1	1	79.17	0	0	79.17	20.83	0	49.12
2	1	2	2	81.88	18.12	0	100	0	0	7.87
3	1	3	3	23.56	72.99	3.45	100	0	0	4.44
4	2	1	2	83.33	0	0	83.33	16.67	0	48.99
5	2	2	3	22.38	77.62	0	100	0	0	12.76
6	2	3	1	25.00	67.26	7.74	100	0	0	11.36
7	3	1	3	12.64	68.39	1.15	82.18	17.82	0	48.46
8	3	2	1	50.00	50.00	0	100	0	0	7.41
9	3	3	2	1.75	24.12	60.09	85.96	0	14.04	3.69
		A		4.80	1.14	0.95	0.88	1.00	1.00	4.08
F		*B*		5.92	3.22	1.26	11.76 **	147.37 **	1.00	381.38 **
		C		4.64	9.79 *	0.89	0.65	1.00	1.00	1.07

注：** 和 * 分别表示方差分析在 0.01 和 0.05 水平上显著，下同。

表 6　试验结果极差分析

Tab. 6　Analysis of experimental results

分析项	充种合格率			各行排种量一致性变异系数		
	A	*B*	*C*	*A*	*B*	*C*
k_1	93.06	81.56	93.06	20.48	48.86	22.63
k_2	94.44	100	89.76	24.37	9.35	20.18
k_3	89.38	95.32	94.06	19.85	6.50	21.89
R	5.06	18.44	4.30	−39.71	−42.36	−2.45
较优水平	A_2	B_2	C_3	A_3	B_3	C_2
主次因素	$B_2A_2C_3$			$B_3A_3C_2$		

3.3　护种过程分析

以 $B_2A_2C_2$ 排种型孔的排种装置为对象，分析种子在护种过程的运动状态，其受力及运动状态如图 8 所示。油菜种子充种完成后进入携种区，2 粒种子在型孔内的受力稳定，种子在 5.05 s 进入护种区。油菜种子受力和转速显著增加，种子随排种机构转动出现移动，在 5.25 s 合力和转速达到较大值，此时油菜种子脱离型孔底部运动到与护种带接触。位于上方的油菜颗粒 2 的受力和转速高于油菜颗粒 1，这是由于油菜颗粒 2 具有较大活动空间所致。种子在护种初始阶段保持稳定，但随着排种机构转动，种子在渐开线状型孔的位置超过休止角，种子向护种带方向移动，在护种带的作用下存在一定的滚动，直至投种区。护种过程保证投种时间一致，提高了成穴性能；而渐开线状型孔右壁面和倾斜侧边确保未出现型孔堵塞。

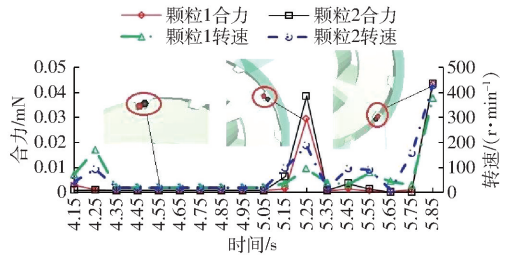


图 8　护种过程分析

Fig. 8　Analysis of seed protecting process for rapeseed

为分析护种带与排种轮的合理间隙，分析了间隙为 0 ~ 0.6 mm 对型孔排种性能的影响，间隙对排种数量影响不明显，其合格率均达到 100%，其中单个型孔 1 粒和 2 粒的概率分别约为 80% 和 20%

(图 9);但间隙为 0.2 mm 时,穴径最小,说明种子落点一致性较好。

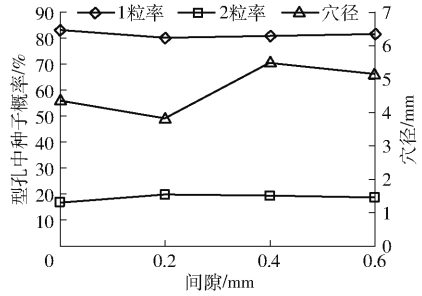


图 9 间隙对排种性能的影响

Fig. 9 Effects of gap on seed filling performance

3.4 渐开线状型孔的作用机理

分析种子充种过程发现(图 10),进入充种室后种子受种群挤压、扰动的作用,不断靠近排种机构型孔的位置;渐开线型孔结构左壁面在充种区形成向上"挖取"的姿态,种子在种群压力、排种机构作用力和重力等综合作用下,种子充入型孔并随排种机构转动。型孔渐开线状的左壁面提升了充种性能,加之适宜的尺寸保证充种数量,从而保证了充种质量。

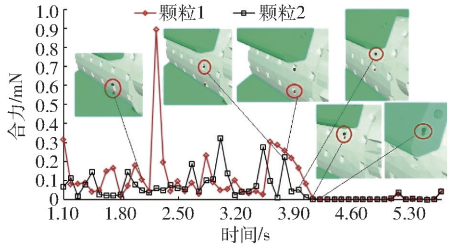


图 10 种子充入型孔受力与状态

Fig. 10 Mechanics analysis and seed status of seed filling

型孔在护种过程中因其弧形侧面使种子与型孔间接触为点接触,使型孔不易发生堵塞;同时型孔渐开线状的右壁面使投种时刻基本一致,从而保证了成穴性能。

4 穴播集中排种装置排种性能试验

4.1 试验材料与装置

试验以华油杂 62、中双 11 和蓉油 11 共 3 个油菜品种为试验材料,油菜穴播集中排种装置在 JPS-12 型计算机视觉排种器试验台上开展排种性能试验。

4.2 试验设计与方法

为检测油菜穴播集中排种装置的排种性能,选用 1 个成穴排种轮开展了供试品种与排种轮转速的双因素试验,供试品种为蓉油 11、中双 11 和华油杂 62 共 3 个品种,排种轮转速设 10~50 r/min 共 5 个水平,增量为 10 r/min。为进一步检验集中多行排种质量,采用 6 行同时排种,分析油菜穴播集中排种装置的品种与转速适应性。试验中每个处理重复 3 次,每次测定 50 穴,测定单穴排种数量、穴距,计算排种合格率、漏播率、重播率、穴距和穴距变异系数,并分析 6 行的排种量一致性变异系数。测定合格率为 1~3 粒/穴的概率,漏播率为 0 粒/穴的概率和重播率为大于 3 粒/穴的概率。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 品种与排种轮转速对排种性能的影响

品种和排种轮转速对排种性能的影响结果表明(表 7),品种、排种轮转速及其二者的交互作用对排种合格率均有显著影响($P<0.05$),华油杂 62 和蓉油 11 的排种合格率均随转速增加呈先增加后降低的趋势,在转速为 20~40 r/min 时合格率较高;中双 11 排种合格率随转速增加而增加,在 20~40 r/min 时合格率高于 95%,这与油菜种子的粒径有关,中双 11 的粒径明显小于华油杂 62 和蓉油 11。在转速较低时,油菜种子有充足时间进入型孔,因此导致小粒种子的重播率较高;当转速达到 50 r/min 时,充种时间缩短,华油杂 62 和蓉油 11 的漏播率增加。

从穴距变异系数来看,穴距设定为 10 cm 时,品种、排种轮转速及其二者的交互作用对穴距变异系数影响显著($P<0.05$),华油杂 62 的穴距变异系数随转速增加而增加;中双 11 和蓉油 11 随转速增加呈先降后升的趋势,转速为 20~40 r/min 时穴距变异系数均低于 16%。通过观察种子在排种器试验台的分布状态(图 11),发现各品种的成穴性能和穴距均匀性均较好,中双 11 以 2 粒/穴较多;华油杂 62 和蓉油 11 以 1 粒/穴较多,符合油菜种植要求和集排器设计目标。

4.3.2 油菜穴播集中排种性能分析

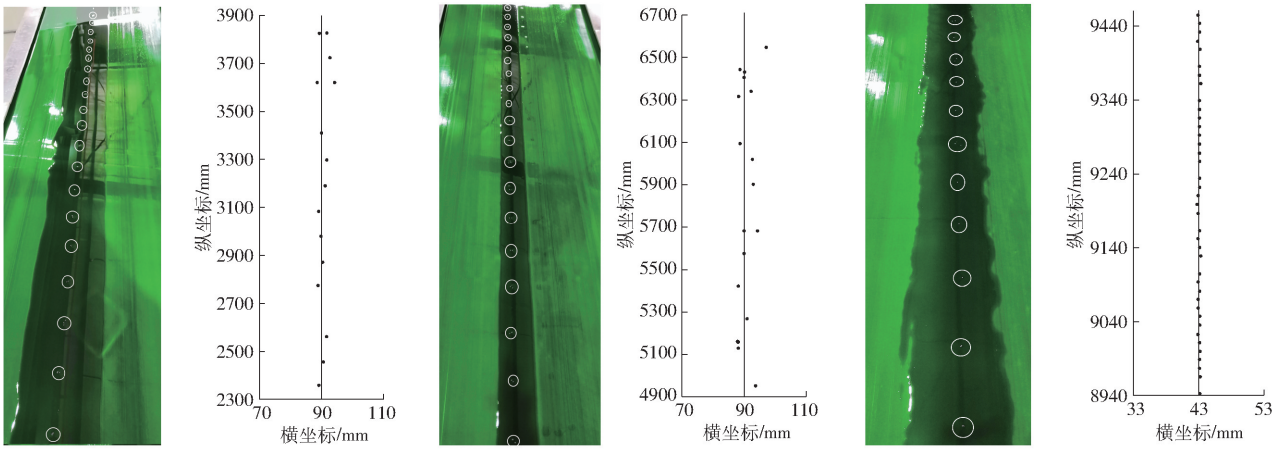
在 6 个成穴排种轮条件下,集中排种性能如表 8 所示,品种、成穴排种轮转速及其交互作用对 1 粒率、2 粒率和 3 粒率均有极显著影响($P<0.01$),影响规律与单行排种结果一致。转速为 20~40 r/min 时,3 个品种的合格率高于 94%。以 50 穴的排种数量来看,中双 11 的排种数量显著高于华油杂 62 和蓉油 11,这与中双 11 的 3 粒率较高一致;排种数量随转速增加而降低,说明转速增加降低了充种数量;但 50 穴的总粒数标准误差在 10 粒范围内,各行排种量一致性变异系数低于 10.0%。不同品种的穴距差异不显著($P>0.1$),说明穴距稳定性较好,且转速为 20~40 r/min 范围内的穴距变异系数在 12% 范围内,油菜种子分布的成穴性和均匀性均较好。

6 行油菜种子分布如图 12 所示,种子的分布成行成穴效果明显,不同行间的种子位置略有差异,这与投种时间的随机性有关;但行内的种子分布均匀,

表 7　供试品种与排种轮转速对排种性能的影响

Tab. 7　Effects of varieties and rotational speed on seeding performance for rapeseed

品种	成穴排种轮转速/(r·min^{-1})	1 粒率/%	2 粒率/%	3 粒率/%	合格率/%	漏播率/%	重播率/%	穴距/cm	穴距变异系数/%
华油杂 62	10	31. 91	44. 68	21. 99	98. 58	0	1. 42	10. 83	6. 03
	20	55. 32	31. 91	12. 06	99. 29	0	0. 71	10. 20	7. 76
	30	68. 79	25. 53	5. 67	100	0	0	9. 48	8. 11
	40	74. 31	20. 83	2. 78	97. 92	2. 08	0	11. 48	15. 81
	50	77. 94	12. 33	1. 29	91. 57	8. 43	0	10. 48	27. 03
中双 11	10	14. 04	32. 46	39. 47	85. 96	0	14. 04	9. 61	6. 20
	20	26. 05	43. 44	25. 52	95. 02	0	4. 98	10. 09	5. 80
	30	42. 22	33. 54	21. 12	96. 88	0	3. 12	10. 09	7. 82
	40	35. 56	48. 76	14. 47	98. 79	0	1. 21	9. 75	8. 34
	50	47. 77	40. 22	11. 36	99. 36	0	0. 64	10. 31	8. 15
蓉油 11	10	58. 13	30. 95	9. 11	98. 19	0	1. 81	10. 00	7. 03
	20	66. 45	22. 57	10. 36	99. 38	0	0. 62	9. 96	4. 77
	30	70. 94	21. 30	7. 11	99. 36	0. 64	0	10. 45	6. 52
	40	82. 28	14. 03	3. 08	99. 38	0. 62	0	9. 86	13. 39
	50	83. 96	9. 61	2. 57	96. 13	3. 87	0	11. 06	18. 60
F	品种	157. 96 **	46. 85 **	67. 16 **	5. 08 *	13. 24 **	13. 28 **	42. 98 **	10. 29 **
	转速	44. 85 **	9. 43 **	30. 26 **	4. 31 **	21. 97 **	6. 57 **	23. 99 **	13. 99 **
	品种×转速	2. 46 *	7. 32 **	3. 50 **	5. 58 **	8. 12 **	3. 18 **	44. 67 **	3. 05 *



(a) 华油杂62油带分布　(b) 华油杂62统计分布　(c) 中双11油带分布　(d) 中双11统计分布　(e) 蓉油11油带分布　(f) 蓉油11统计分布

图 11　油菜排种分布

Fig. 11　Rapeseed distributions in oil belt

具有较好的种子落点分布。

5　田间试验

为验证油菜精量穴播集中排种装置的排种性能，于 2019 年 10 月在四川省崇州市和南部县等地开展了油菜播种试验(图 13)，供试品种为蓉油 11、德新油 88 和中双 11，土壤平均湿基含水率为 31. 33%。试验以插秧机机头为动力，油菜穴播精量直播机一次性完成精量播种和封闭除草等功能，机组幅宽 1. 8 m，一次播种 6 行，行距为 300 mm。试验中应用 12 V 蓄电池提供直流电机的动力源，通过直流电机调速器驱动油菜穴播排种装置转动。

通过测定苗期的油菜田间分布情况，测定每厢 6 行的穴苗数和穴距，每个品种选取 3 个点，试验结果如表 9 所示。油菜的平均株数为 2. 05 株/穴，穴苗数合格率平均值为 89. 51%；穴距平均值为 10. 50 cm，穴距变异系数平均值为 9. 79%。相比台架试验，油菜种子在导种管下，穴距均匀性有所降低，但单穴苗数均匀性和穴距可满足油菜田间种植要求。

6　结论

(1)基于油菜种子的机械物理特性和精量播种要求，设计了一种油菜精量穴播集中排种装置，提出

表 8 油菜穴播集中排种装置排种性能

Tab. 8 Seeding performance of hill-seeding centralized metering device for rapeseed

品种	成穴排种轮转速/(r·min^{-1})	1 粒率/%	2 粒率/%	3 粒率/%	合格率/%	漏播率/%	重播率/%	50 穴排种数量	各行排种量一致性变异系数/%	穴距/cm	穴距变异系数/%
华油杂 62	10	51.33	33.11	14.89	99.33	0	0.67	82.56 ± 6.77	8.20	9.92	14.40
	20	65.14	26.36	7.19	98.69	0.65	0.65	70.78 ± 6.82	9.63	10.47	8.51
	30	69.65	25.13	4.80	99.58	0	0.42	67.57 ± 6.40	9.47	10.26	9.61
	40	75.75	20.82	0.82	97.39	2.61	0	59.78 ± 5.59	9.34	9.73	11.89
	50	77.87	14.78	1.09	93.74	6.05	0.21	56.00 ± 3.81	6.80	10.60	19.29
中双 11	10	12.24	33.34	35.81	81.40	0	18.60	128.17 ± 7.91	6.17	10.00	6.43
	20	29.52	41.72	23.28	94.52	0.84	4.63	101.00 ± 7.57	7.49	10.22	9.80
	30	36.69	42.83	16.05	95.57	0	4.43	94.00 ± 4.06	4.31	10.12	6.97
	40	42.86	42.86	11.90	97.62	0	2.38	86.00 ± 8.00	9.30	9.75	9.94
	50	56.21	37.04	5.23	98.47	0.22	1.31	75.89 ± 3.66	4.82	10.42	8.93
蓉油 11	10	48.37	33.06	15.39	96.82	0.43	2.76	77.17 ± 7.65	9.92	9.96	8.68
	20	76.00	18.89	4.04	98.94	0	1.06	67.38 ± 6.61	9.81	10.11	7.81
	30	83.66	13.37	2.12	99.16	0.63	0.21	58.56 ± 3.68	6.28	10.19	8.17
	40	81.28	15.62	2.07	98.97	1.03	0	59.44 ± 4.48	7.53	9.79	11.35
	50	83.04	10.93	1.56	95.54	4.46	0	54.17 ± 4.07	7.51	10.95	20.83
F	品种	274.37**	132.08**	138.42**	20.43**	12.68**	47.45**	244.50**	3.66	2.10	4.02*
	转速	68.98**	12.99**	84.66**	10.80**	22.13**	20.57**	88.89**	2.14	47.10**	5.27**
	品种×转速	3.23**	8.88**	7.39**	13.41**	6.90**	12.15**	6.93**		3.40**	1.57

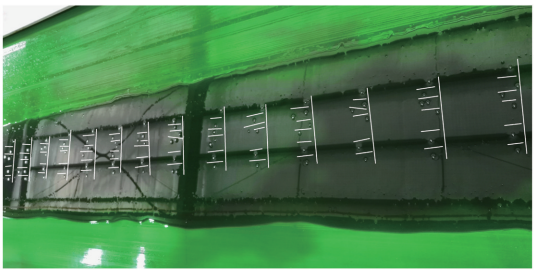
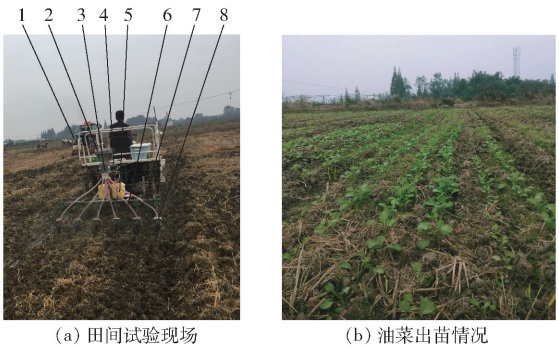


图 12 油菜集中排种分布

Fig. 12 Rapeseed distribution in oil belt for six rows



(a) 田间试验现场 (b) 油菜出苗情况

图 13 油菜播种田间试验

Fig. 13 Field experiment of rapeseed seeding

1. 插秧机机头 2. 种箱 3. 精量穴播集中排种装置 4. 电机驱动系统 5. 药箱 6. 导种管 7. 封闭除草装置 8. 双圆盘开沟器

了 1 ~3 粒/穴的渐开线状型孔,确定了主要结构参数。完成油菜种子充种、携种和护种环节,可实现 6 行成行成穴精量排种。

(2)应用 EDEM 软件构建了穴播集中排种装置仿真模型,分析了型孔长度、截面尺寸和型孔深度对充种性能的影响,发现渐开线状型孔有助于充种,且型孔长度和深度分别为 3.5 mm 和 2.6 mm 的型孔截面Ⅱ的单个型孔均充种 1 粒或 2 粒;携种过程受力稳定,护种带提高了投种一致性,当排种轮与护种带间隙为 0.2 mm 时,成穴较优。

表 9 油菜穴播田间试验结果

Tab. 9 Results of field experiment of hill-seeding for rapeseed

品种	穴苗数	穴苗数合格率/%	各行苗数一致性变异系数/%	穴距/cm	穴距变异系数/%
蓉油 11	1.85	93.92	9.74	11.10	5.49
德新油 88	2.29	85.45	13.59	10.35	9.07
中双 11	2.01	89.17	18.17	10.04	14.82
平均	2.05	89.51	13.83	10.50	9.79

(3)穴播排种性能台架试验表明,品种、排种轮转速及其二者的交互作用对排种合格率均有显著影响,排种合格率随转速增加呈先增大、后减小的趋势,在转速为 20 ~ 40 r/min 时,排种合格率(1 ~ 3 粒)高于 94%,穴距变异系数低于 12%;50 穴的总粒数标准误差在 10 粒范围之内,排种量一致性变异系数低于 10.0%。田间试验结果表明,油菜平均株数为 2.05 株/穴,穴距及其变异系数平均值分别为 10.50 cm 和 9.79%,满足油菜种植要求。

参 考 文 献

[1] 王汉中,殷艳. 我国油料产业形势分析与发展对策建议[J]. 中国油料作物学报,2014,36(3):414 - 421.
WANG Hanzhong, YIN Yan. Analysis and strategy for oil crop industry in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2014, 36(3): 414 - 421. (in Chinese)

[2] 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? flag = 1&file_no = 20170901&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)

[3] 吴福通. 正负气压组合式油菜籽精量直播排种器的研究[D]. 武汉:华中农业大学,2007.
WU Futong. Research on positive and negative pressure combination precision metering device for rape seed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007. (in Chinese)

[4] 田波平,廖庆喜,黄海东,等. 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机的设计[J]. 农业机械学报,2008,39(10):211 - 213.
TIAN Boping, LIAO Qingxi, HUANG Haidong, et al. Design of 2BFQ-6 precision planter for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10):211 - 213. (in Chinese)

[5] YU J J, LIAO Y T, CONG J L, et al. Simulation analysis and match experiment on negative and positive pressures of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(3): 1 - 12.

[6] KUMAR V J F, DURAIRAJ C D. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 75(1): 81 - 95.

[7] 廖庆喜,黄吉星,刘光,等. 油菜播种机槽孔轮式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(2):63 - 66.
LIAO Qingxi, HUANG Jixing, LIU Guang, et al. Design and experiment of precision metering device for slot wheeled seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 63 - 66. (in Chinese)

[8] 廖庆喜,张宁,张朋玲,等. 一器多行离心式油菜排种器[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(2):48 - 51,95.
LIAO Qingxi, ZHANG Ning, ZHANG Pengling, et al. Centrifugal metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 48 - 51, 95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120210&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.010. (in Chinese)

[9] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):109 - 114.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rapeseed metering device based on EDEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109 - 114. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20140219&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.019. (in Chinese)

[10] 曹秀英,廖庆喜,丛锦玲,等. 离心式油菜精量排种器型孔结构设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(增刊):40 - 46.
CAO Xiuying, LIAO Qingxi, CONG Jinling, et al. Design and experiment on metering hole structure of centrifugal precision metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 40 - 46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2014s107&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.007. (in Chinese)

[11] 曹秀英,廖宜涛,廖庆喜,等. 油菜离心式精量集排器枝状阀式分流装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(9):77 - 84.
CAO Xiuying, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment on valve-branch distributor of centrifugal precision metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 77 - 84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150911&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.011. (in Chinese)

[12] 李明,刘晓辉,廖宜涛,等. 气力滚筒式油菜精量集排器[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(12):68 - 73.
LI Ming, LIU Xiaohui, LIAO Yitao, et al. Pneumatic cylinder-type centralized precision metering device for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 68 - 73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20131212&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.012. (in Chinese)

[13] 李明,廖庆喜,廖宜涛,等. 滚筒集排式油菜精量排种器排种过程分析[J]. 农业工程学报,2014,30(23):17 - 27.
LI Ming, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Analysis on seeding process of pneumatic cylinder-type centralized rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 17 - 27. (in Chinese)

[14] 李兆东,雷小龙,曹秀英,等. 油菜精量气压式集排器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(7):9 - 17.
LI Zhaodong, LEI Xiaolong, CAO Xiuying, et al. Design and experiment of pneumatic-typed precision centralized metering

device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(7): 9 - 17. (in Chinese)

[15] 李兆东,李姗姗,曹秀英,等. 油菜精量气压式集排器排种性能试验[J]. 农业工程学报,2015,31(18):17 - 25.
LI Zhaodong, LI Shanshan, CAO Xiuying, et al. Seeding performance experiment of pneumatic-typed precision centralized metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 17 - 25. (in Chinese)

[16] YATSKUL A, LEMIERE J P, COINTAULT F. Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seed's distribution accuracy of the air-seeder[J]. Biosystems Engineering, 2017, 161: 120 - 134.

[17] 戴亿政,罗锡文,王在满,等. 气力集排式水稻分种器设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(24):36 - 42.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of rice pneumatic centralized seed distributor[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 36 - 42. (in Chinese)

[18] 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)

[19] 祁兵,张东兴,刘全威,等. 集排式精量排种器清种装置设计与性能试验[J]. 农业工程学报,2015,31(1):20 - 27.
QI Bing, ZHANG Dongxing, LIU Quanwei, et al. Design and experiment of cleaning performance in a centralized pneumatic metering device for maize[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 20 - 27. (in Chinese)

[20] 于兴瑞,耿端阳,杜瑞成,等. 气力输送式小麦免耕施肥播种机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):141 - 148.
YU Xingrui, GENG Duanyang, DU Ruicheng, et al. Design and experiment of wheat planter by pneumatic conveying with no-tillage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 141 - 148. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2018s019&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.019. (in Chinese)

[21] WANG B L, LUO X W, WANG Z M, et al. Design and field evaluation of hill-drop pneumatic central cylinder direct-seeding machine for hybrid rice[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(6): 33 - 40.

[22] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(20):10 - 18.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Design and experiment of seed feed device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 10 - 18. (in Chinese)

[23] 雷小龙,廖宜涛,李兆东,等. 种层厚度对油麦兼用集排器供种装置充种性能的影响[J]. 农业工程学报,2016,32(6):11 - 19.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LI Zhaodong, et al. Effects of seed layer thickness on seed filling performance of seed feeding device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 11 - 19. (in Chinese)

[24] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, LIAO Qingxi. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM - CFD coupling approach for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 131:29 - 39.

[25] 雷小龙,廖宜涛,王磊,等. 油麦兼用型气送式集排器增压管气固两相流仿真与参数优化[J]. 农业工程学报,2017,33(19):67 - 75.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, WANG Lei, et al. Simulation of gas-solid two-phase flow and parameter optimization of pressurized tube of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(19): 67 - 75. (in Chinese)

[26] LEI Xiaolong, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Numerical simulation of seed motion characteristics of distribution head for rapeseed and wheat[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 150:98 - 109.

[27] 雷小龙,廖宜涛,丛锦玲,等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(12):16 - 26.
LEI Xiaolong, LIAO Yitao, CONG Jinling, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted centralized seed-metering device of direct seeding machine for rape and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 16 - 26. (in Chinese)

[28] 雷小龙,杨文浩,刘礼阳,等. 杂交稻气送式集排器成穴供种装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11):58 - 67.
LEI Xiaolong, YANG Wenhao, LIU Liyang, et al. Design and experiment of seed hill feeding device in pneumatic centralized metering device for hybrid rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 58 - 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20181107 &journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.007. (in Chinese)

[29] 蒯婕,王积军,左青松,等. 长江流域直播油菜密植效应及其机理研究进展[J]. 中国农业科学,2018,51(24):4625 - 4632.
KUAI Jie, WANG Jijun, ZUO Qingsong, et al. Effects and mechanism of higher plant density on directly-sown rapeseed in the Yangtze River Basin of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(24): 4625 - 4632. (in Chinese)