

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.02.004

# 油菜侧深穴施肥装置设计与试验

廖庆喜<sup>1,2</sup> 陈勇<sup>1,2</sup> 张青松<sup>1,2</sup> 王磊<sup>1,2</sup> 林建新<sup>1,2</sup> 杜文斌<sup>1,2</sup>

(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:** 为提高肥料利用率、降低肥料施用量、实现油菜根区施肥, 结合油菜种植施肥农艺要求, 提出了一种油菜侧深穴施肥工艺, 设计了一种机械式穴施肥装置, 阐述了穴施肥装置的工作过程, 确定了穴施肥装置的基本参数, 建立了充肥和排肥环节中肥料颗粒群的力学模型, 分析了影响穴施肥装置成穴性能的主要因素; 应用离散元软件 EDEM 对穴施肥排肥器的成穴性能进行了仿真试验, 分析了排肥轮转速、充肥型孔长度、导肥管材料对穴排肥量误差和穴径长轴长度的影响; 利用正交组合试验确定了成穴性能较优的参数组合, 排肥轮转速为 60 r/min、充肥型孔长度为 18 mm、导肥管材料为 ABS 塑料管时, 穴排肥量误差为 7.05%、穴径长轴长度为 62.45 mm; 优选参数组合下的排肥性能试验结果表明, 排肥轮转速为 30~90 r/min 时, 穴排肥量误差为 4.56%~15.69%、穴径长轴长度为 76.32~91.50 mm、穴径长轴长度稳定性变异系数为 4.53%~9.78%、穴距误差为 3.24%~7.31%; 田间试验表明, 排肥轮转速为 30~90 r/min 时, 穴排肥量误差为 4.73%~16.07%、穴径长轴长度为 85.21~101.65 mm、穴径长轴长度稳定性变异系数为 4.82%~10.63%、穴距误差为 3.36%~7.58%、施肥深度稳定性变异系数为 6.43%~10.85%, 成穴性能较好, 满足穴施肥要求。

**关键词:** 油菜; 穴施肥; 排肥器; 侧深施肥; 离散元仿真

中图分类号: S223.2<sup>+</sup>5

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)02-0041-12

OSID:



## Design and Experiment of Side Deep Hole Fertilization Device for Rapeseed

LIAO Qingxi<sup>1,2</sup> CHEN Yong<sup>1,2</sup> ZHANG Qingsong<sup>1,2</sup> WANG Lei<sup>1,2</sup> LIN Jianxin<sup>1,2</sup> DU Wenbin<sup>1,2</sup>

(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 utilization efficiency of fertilizers, reduce the amount of chemical fertilizers applied, and realize fertilization in the root zone of rapeseed, combined with agronomic requirements for rapeseed sowing and fertilization, the side deep hole fertilization process for rapeseed was proposed, and a kind of mechanical hole fertilization device was designed. The working process of the hole fertilization device was explained, the basic parameters of the device were determined through theoretical analysis, the mechanical models of fertilizer particle group in fertilizer filling and feeding zone were established, and the main influencing factors affecting its fertilizer distribution performance were determined. The discrete element software EDEM was used to carry out a simulation analysis on the fertilizer distribution performance of the fertilizer point-applied device, and the influence of rotation speed of fertilizer feeding unit, length of fertilizer hole and fertilizer tube on the error of hole fertilizer amount and the fertilizer distribution long axis was studied. The optimized result showed that when the fertilizer feeding unit speed, the length of the fertilizer hole and the fertilizer tube were 60 r/min, 18 mm and ABS fertilizer tube, respectively, the error of hole fertilizer amount and the fertilizer distribution long axis were 7.05% and 62.45 mm, respectively. The bench test showed that under the conditions of rotation speed of fertilizer feeding unit of 30~90 r/min, the error of the hole fertilizer amount was 4.56%~15.69%, the fertilizer distribution long axis was 76.32~91.50 mm, the stability coefficient of fertilizer distribution long axis was 4.53%~9.78% and the error of fertilizer pointed distance was 3.24%~7.31%,

收稿日期: 2022-03-14 修回日期: 2022-11-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000405)

作者简介: 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

respectively. Field test results showed that when the fertilizer feeding unit was 30 ~ 90 r/min, the error of the hole fertilizer amount was 4.73% ~ 16.07%, the fertilizer distribution long axis was 85.21 ~ 101.65 mm, the coefficient of variation of the fertilizer distribution long axis stability was 4.82% ~ 10.63%, the error of the fertilizer pointed distance was 3.36% ~ 7.58% and the stability coefficient of fertilization depth was 6.43% ~ 10.85%, respectively. The cavitation performance was well, and it met the requirements of hole fertilization.

**Key words:** rapeseed; hole fertilization; fertilizer discharge device; side deep fertilization; discrete element simulation

## 0 引言

施肥是作物种植过程中的重要环节,是作物稳产增产的重要影响因素<sup>[1-3]</sup>;目前播种作业中普遍采用条状施肥方式,该方式化肥施用量较大、肥效利用率较低,且化肥的过量施用引起土壤板结与酸化,并导致环境污染等问题<sup>[4-6]</sup>;肥料穴施技术针对单穴作物供应单穴肥料,可以实现定点定量施肥,起到很好的节肥增产的效果,是提高肥料利用率、降低化肥施用量的有效方法和手段<sup>[7-8]</sup>。

施肥装置是穴施肥技术推广应用的核心载体,国内外学者针对穴施肥装置开展了深入研究。胡红等<sup>[9]</sup>研制了一种玉米行间定点扎穴深施追肥机,对定点扎穴机构进行了分析与研究,实现了颗粒肥料的扎穴施用;王金武等<sup>[10]</sup>为实现液态肥料的穴式施用,开展了非规则齿轮行星系扎穴机构设计,主要在机构动力学分析、优化设计及工作参数优化等方面进行了研究;刘正道等<sup>[11]</sup>设计了一种用于颗粒状肥料穴式施用的腔盘式精量穴施肥装置,开展了不同肥腔形状对排肥性能影响的研究;万玲等<sup>[12]</sup>针对玉米中期追肥机械化水平低的问题,设计了一种玉米行间滚轮式穴施排肥器;都鑫等<sup>[13]</sup>研制了一种倾斜梯形孔式穴施肥排肥器,研究了肥料落地后穴排肥量误差、穴长、穴距误差对穴施肥性能的影响;吴南等<sup>[14]</sup>通过摇杆机构控制鸭嘴阀开合实现精量穴施肥,采用正交旋转组合试验得出了播种机前进速度、鸭嘴阀旋转角及安装高度的最佳参数组合;李沐桐等<sup>[15]</sup>为提高肥料利用率,采用机械式识别装置配合曲柄连杆机构实现了中耕作物的精准穴式施肥。上述装置主要通过排肥器与成穴机构的配合实现穴式施肥,且主要为玉米等宽行株距作物的穴施肥装置,而目前国内对油菜穴施肥装置的研究鲜见报道,缺少油菜播种的配套穴施肥装置。

为提高肥料利用率、降低肥料施用量、实现油菜根区施肥,本文设计一种油菜机械式穴施肥装置,分析确定穴施肥装置关键部件的主要结构参数,利用离散元软件 EDEM 确定影响穴施肥装置排肥成穴性的关键参数,以期提高成穴性能,为油菜穴施肥装

置结构改进提供参考。

## 1 总体工艺方案与整机结构

### 1.1 油菜侧深穴施肥工艺方案设计

长江中下游地区现有油菜机械直播同步施肥方式为浅层混施,肥料分布于浅层土壤和土壤表面,颗粒化肥施用量大,肥料利用率低,且播种后存在烧种现象<sup>[16]</sup>。研究表明,对于油菜肥料集中施用,施肥位置至关重要,同步侧深施肥在增产的同时可显著提高肥料利用率<sup>[17]</sup>。为提供油菜合理施肥方案,实现稳产增产,本文提出一种油菜侧深穴施肥工艺,将肥料深施在油菜根系侧位且肥料颗粒成穴状分布,油菜苗根系与成穴肥料颗粒位置分布如图 1 所示。肥料颗粒与油菜根系的位置关系可由肥料颗粒与油菜根系横向距离  $a$  和纵向距离  $b$  控制, $S$  为肥沟内肥料颗粒施肥穴距,根据油菜侧深施肥技术要求, $a$  取 140 mm, $b$  取 80 ~ 100 mm;基于前期人工穴施肥田间试验,分析确定油菜施肥穴距范围为 100 ~ 300 mm,且当穴距为 200 mm 时,油菜产量和肥料利用率较高,故本文选取油菜施肥穴距  $S$  为 200 mm。

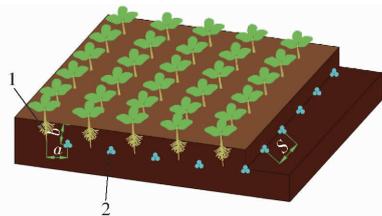


图 1 油菜侧深穴施肥工艺方案示意图

Fig. 1 Schematic of side deep hole fertilization process for rapeseed

1. 油菜植株 2. 肥料颗粒

### 1.2 整机总体结构与工作过程

基于上述工艺方案开展油菜机械式穴施肥装置的研究,装配穴施肥装置的 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机由主机架、排种系统、风泵总成、开畦沟犁、旋耕部件、穴施肥装置等组成,可一次完成旋耕、开沟、播种、穴施肥、覆土等功能。穴施肥装置通过 U 型卡箍固定在主机架后梁上。穴施肥装置主要由种肥开沟辊、播种铲、深施肥铲、穴施肥排肥器、导肥管、覆土铁链等组成,播种机及穴施肥装置结构如

图 2 所示,主要技术参数如表 1 所示。

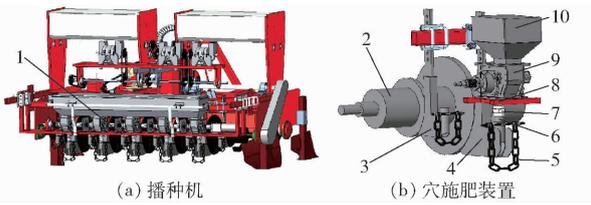


图 2 播种机及穴施肥装置结构示意图

Fig. 2 Structure diagrams of planter and hole-fertilization device

1. 穴施肥装置 2. 种肥开沟辊 3. 播种铲 4. 深施肥铲 5. 覆土铁链 6. 导肥管 7. 连接头 8. 排肥器支架 9. 排肥器 10. 肥箱

表 1 主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters

参数	数值
外形尺寸/(mm × mm × mm)	1 900 × 1 410 × 1 100
整机质量/kg	935
作业速度/(km · h <sup>-1</sup> )	1.44 ~ 4.32
作业幅宽/mm	2 000
施肥行数/行	5
施肥穴距/mm	100 ~ 300
施肥深度/mm	80 ~ 100
穴施肥量/g	1.80 ~ 9.00

穴施肥过程中,中央齿轮箱采用侧传动的方式,将动力传递到中间轴,通过中间轴上的链传动驱动种肥开沟辊转动,种肥开沟辊主动挤压旋耕后地表土壤,形成初始沟形;深施肥铲配合种肥开沟辊形成稳定深度的肥沟,排肥器按照一定的时间间隔成穴的将肥料颗粒排至出肥口,经深施肥铲内导肥管快速投入肥沟;覆土铁链将肥沟两侧土壤聚拢填入肥沟内实现覆土,完成穴排肥过程。

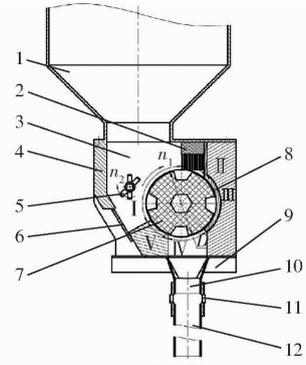
## 2 关键部件设计与分析

### 2.1 穴施肥排肥器设计与分析

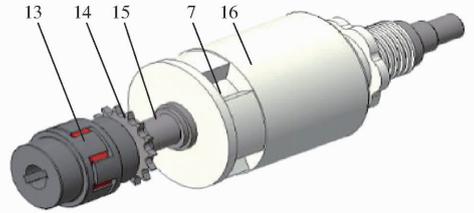
#### 2.1.1 结构与工作过程

穴施肥排肥器结构如图 3 所示。主要包括肥箱、毛刷、壳体、卸肥板、搅肥机构、护肥带、排肥机构、出肥口和导肥管等部件。排肥机构主要由排肥轮、肥量调节轮等组成。

排肥器工作时,排肥轴带动排肥轮和肥量调节轮同步转动,同时排肥轴通过搅肥驱动链轮将动力传递到搅肥机构上,搅肥机构扰动颗粒化肥增强充肥能力和防止化肥粘结、结拱<sup>[18]</sup>,排肥轮在充肥区填充一定量的肥料后经清肥区毛刷清肥后进入到护肥区,在排肥器壳体、护肥带和充肥孔的保护下由护肥区进入排肥区,颗粒肥料在重力和离心力作用下快速脱离排肥轮,成团的肥料颗粒通过出肥口进入导肥管,经导肥管落入肥沟,完成定量成穴排肥过



(a) 排肥器



(b) 排肥机构

图 3 排肥器结构示意图

Fig. 3 Structure diagrams of fertilizer-metering device

1. 肥箱 2. 毛刷 3. 充肥室 4. 壳体 5. 搅肥机构 6. 卸肥板 7. 排肥轮 8. 护肥带 9. 排肥器支架 10. 出肥口 11. 连接头 12. 导肥管 13. 联轴器 14. 搅肥驱动链轮 15. 排肥轴 16. 肥量调节轮 I. 充肥区 II. 清肥区 III. 护肥区 IV. 排肥区 V. 过渡区

程。通过肥量调节轮上的螺旋机构调节排肥轮和肥量调节轮型孔相对重合长度,实现施肥量的无级调节。

#### 2.1.2 排肥轮结构与参数分析

油菜播种以穴施肥方式施肥,直播机田间作业时的施肥穴距为

$$S = \frac{60v_m}{nZ} \quad (1)$$

式中  $v_m$ ——机具作业速度, m/s

$n$ ——排肥轮转速, r/min

$Z$ ——排肥轮型孔个数

由式(1)可知,肥料颗粒在田间的穴距分布与机具作业速度、排肥轮转速及型孔个数有关,当穴距和作业速度一定时,型孔个数  $Z$  与转速  $n$  成反比。同时,型孔个数也受排肥轮直径影响,排肥轮直径过小,肥箱与深施肥铲干涉;直径过大,排肥器尺寸较大,深施肥铲伸出的左、右翼板过长,易夯实沟壁,不利于后续的覆土作业。综合考虑排肥器整体结构尺寸和成穴要求,设计排肥轮直径  $D$  为 80 mm。

型孔的形状和尺寸对型孔容积以及充肥、排肥环节均有显著影响。为便于颗粒肥料易充入、连续成穴排出的要求,采用倾斜式型孔,型孔的关键参数主要包括型孔底槽宽度  $l_1$ 、型孔上沿宽度  $l_2$ 、型孔深度  $h$ 、型孔左侧壁倾角  $\theta$  和型孔右侧壁倾角  $\varphi$ ,其结构如图 4 所示。

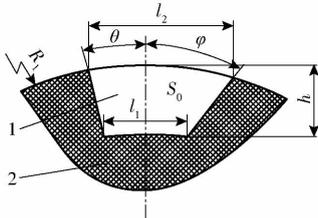


图4 型孔结构示意图

Fig.4 Model-hole's structure

1. 型孔 2. 排肥轮壳体

田间作业时,油菜每穴施肥量为

$$m = \frac{MBS}{1 \times 10^7 J} \quad (2)$$

式中  $m$ ——每穴施肥量, g

$M$ ——施肥量, kg/hm<sup>2</sup>      $J$ ——施肥行数

$B$ ——播种机作业幅宽, m

我国油菜肥料施用以缓释复合肥为主,施肥量一般为 525 ~ 675 kg/hm<sup>2</sup>[19],穴式施肥方式可提高化肥利用率,减少施肥量,故设定排肥量范围时适当降低排肥量下限,施肥量范围为 450 ~ 750 kg/hm<sup>2</sup>。为满足不同穴距下的施肥要求,施肥穴距范围在 100 ~ 300 mm 时,根据式(2)可得每穴施肥量为 1.8 ~ 9.0 g。为满足每穴排肥量要求,并提高充肥稳定性,确定型孔底槽宽度  $l_1$  和型孔深度  $h$  分别为 12.0、13.0 mm。

为便于颗粒化肥充入和排出型孔,型孔左侧壁倾角  $\theta$  和右侧壁倾角  $\varphi$  应满足

$$\begin{cases} \theta \leq \gamma \\ \varphi > \gamma \\ \tan\theta = \frac{l_1}{2(R_1 - h)} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $\gamma$ ——颗粒肥料休止角, (°)

$R_1$ ——排肥轮半径, mm

单个型孔体积计算式为

$$V_0 = S_0 l_c = \frac{m}{\rho_d} \quad (4)$$

其中

$$S_0 = \frac{\pi\theta}{360} [R_1^2 - (R_1 - h)^2] + \frac{\pi R_1^2 \beta}{360} -$$

$$\frac{1}{2} R_1 \left( R_1 - h - \frac{l_1}{2 \tan\varphi} \right) \sin\beta - \frac{l_1^2}{8 \tan\varphi}$$

$$\beta = \arcsin \frac{h \tan\varphi \left( 2 - \frac{1}{\cos\varphi} \right)}{R_1}$$

式中  $V_0$ ——充肥型孔体积, mm<sup>3</sup>

$S_0$ ——充肥型孔截面积, mm<sup>2</sup>

$l_c$ ——充肥型孔有效长度, mm

$\rho_d$ ——颗粒肥料容重, kg/m<sup>3</sup>

综合式(3)、(4)和颗粒肥料休止角,确定型孔左侧壁倾角  $\theta$  和右侧壁倾角  $\varphi$  分别为 12.53° 和

35°, 计算可得型孔截面积  $S_0$  为 229.00 mm<sup>2</sup>。根据式(4)可知,每穴排肥量为 1.8 ~ 9.0 g 时,对应单个型孔体积  $V_0$  为 1.92 ~ 9.58 cm<sup>3</sup>,则排肥轮型孔在长度方向上  $l_c$  变化范围为 9.00 ~ 45.02 mm,确定排肥轮型孔总长度为 50 mm。

根据型孔几何尺寸可得

$$l_2 = \frac{l_1 R_1}{2(R_1 - h)} + h \left( 2 - \frac{1}{\cos\varphi} \right) \tan\varphi \quad (5)$$

排肥轮径向型孔个数  $Z$  与型孔上沿宽度  $l_2$  有关,增加型孔数量可降低排肥轮线速度,为保证型孔在充肥室内取肥时间充足,应增加型孔个数,根据型孔个数与型孔上沿宽度之间的关系及成穴要求,型孔数量应满足

$$Z < \frac{2\pi R_1}{l_2} \quad (6)$$

排肥轮线速度  $v_q$  由机具作业速度  $v_m$ 、施肥穴距  $S$  和型孔个数  $Z$  决定,即

$$v_q = \frac{2\pi R_1 v_m}{SZ} \quad (7)$$

由式(7)可知,型孔个数越少,排肥轮线速度越高,型孔与肥料颗粒接触时间缩短,充肥性能降低[20]。综合式(6)、(7)和满足型孔结构尺寸要求,确定排肥轮径向型孔个数  $Z$  为 4。排肥轮和肥量调节轮均采用 3D 打印加工,材料为 ABS 工程塑料。

### 2.1.3 充肥环节力学分析

肥料颗粒在充肥室受到搅肥机构和排肥轮型孔的扰动,在重力、肥料群压力和摩擦力等作用下,肥料充入型孔。将型孔内的肥料颗粒视为一个整体,肥料群在充肥室的受力分析如图 5 所示。

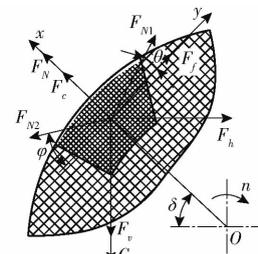


图5 充肥环节受力分析

Fig.5 Mechanics analysis of fertilizer filling stage

根据充肥室肥料颗粒受力情况和达朗贝尔原理,受力平衡方程为

$$\begin{cases} F_f + F_{N1} \cos\theta + F_h \sin\delta - (F_v + G) \cos\delta - F_{N2} \cos\varphi = 0 \\ F_N + F_c + F_{N1} \sin\theta + F_{N2} \sin\varphi - (F_v + G) \sin\delta - F_h \cos\delta = 0 \\ F_f = \mu_1 F_N \\ F_c = m_c \frac{\pi^2 n^2}{900} R_1 \\ G = \rho_d S_0 l_c g \end{cases} \quad (8)$$

式中  $m_e$ ——充肥型孔有效长度内肥料颗粒质量,kg  
 $G$ ——充肥型孔有效长度内肥料颗粒重力,N  
 $F_N$ ——型孔下壁面对肥料的支持力,N  
 $F_c$ ——颗粒肥料离心力,N  
 $F_{N1}$ ——型孔左壁面对肥料的支持力,N  
 $F_{N2}$ ——型孔右壁面对肥料的支持力,N  
 $F_f$ ——肥料群与充肥室肥料间摩擦力,N  
 $F_h$ ——上层颗粒肥料水平压力,N  
 $F_v$ ——上层颗粒肥料垂直压力,N  
 $\delta$ —— $x$ 轴与水平面夹角, ( $^\circ$ )  
 $\mu_1$ ——颗粒肥料间摩擦因数,取 0.55  
 $g$ ——重力加速度,  $m/s^2$

排肥器的充肥室可简化为深仓模型,基于深仓压力分布理论分析可得颗粒肥料在肥料充填室的压力比<sup>[21]</sup>为

$$\lambda = \frac{F_h}{F_v} = \frac{K\sigma_h l_2 l_e \cos\delta}{\sigma_h l_2 l_e \sin\delta} = \frac{K}{\tan\delta} \quad (9)$$

其中  $\sigma_h = \frac{\rho_d d_e}{Kf} (1 - e^{-\frac{Kl_h}{d_e}})$

式中  $\lambda$ ——压力比  
 $K$ ——侧压系数,取 0.44  
 $\sigma_h$ ——颗粒肥料深度  $L_h$  的垂直应力,Pa  
 $d_e$ ——肥箱的等效直径,m  
 $L_h$ ——颗粒肥料深度,m  
 $f$ ——静态滑动摩擦因数,取 0.5

联立式(8)、(9),可得

$$\delta = \arccos \frac{\sqrt{q_1 - 174.64q_2}}{95.26l_e} \quad (10)$$

其中  $q_1 = 9074.47l_e - G^2 - 0.19m_e\pi^2 n^2 R_1$   
 $q_2 = F_N + F_{N1} \sin\theta + F_{N2} \sin\varphi - 34.57l_e - G$

由式(10)可知,颗粒肥料充肥角  $\delta$  与型孔左侧壁倾角  $\theta$ 、型孔右侧壁倾角  $\varphi$ 、排肥轮转速  $n$  等参数相关。当型孔左侧壁倾角  $\theta$  和右侧壁倾角  $\varphi$  一定时,充肥角  $\delta$  随排肥轮转速  $n$  增加而增大;当排肥轮转速  $n$  一定时,充肥角  $\delta$  随型孔左侧壁倾角  $\theta$  增大而增大,故增加型孔左侧壁倾角  $\theta$  会使肥料颗粒充填时间变短,降低型孔内颗粒肥料的填充率。

#### 2.1.4 排肥环节力学分析

排肥时,型孔中的肥料颗粒受离心力和重力作用沿排肥轮周向和径向依次排出型孔,将型孔中的肥料颗粒视为整体,肥料群在投肥过程的受力分析如图6所示。

根据型孔内肥料颗粒的受力情况,肥料群处于临界投肥状态时,受力平衡方程为

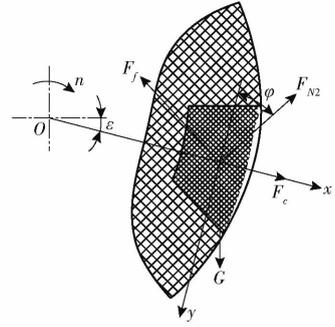


图6 排肥环节受力分析

Fig.6 Mechanics analysis of fertilizer discharging stage

$$\begin{cases} F_{N2} \cos\varphi + F_f \sin\varphi - G \cos\epsilon = 0 \\ F_c + F_{N2} \sin\varphi + G \sin\epsilon - F_f \cos\varphi = 0 \\ F_f = \mu_1 F_{N2} \\ F_c = m_e \frac{\pi^2 n^2}{900} R_1 \\ G = \rho_d S_0 l_e g \end{cases} \quad (11)$$

式中  $\epsilon$ —— $x$ 轴与水平面夹角, ( $^\circ$ )

由式(11)得

$$\epsilon = \arcsin \frac{\pi^2 n^2 R_1 (\cos\varphi + \mu_1 \sin\varphi)}{900g \sqrt{1 + \mu_1}} + \varphi - \arctan\mu_1 \quad (12)$$

式(12)表明,颗粒肥料投肥角  $\epsilon$  与型孔右侧壁倾角  $\varphi$ 、排肥轮转速  $n$  等参数相关。投肥位置一定时,排肥轮转速  $n$  随型孔右侧壁倾角  $\varphi$  增加而降低;当排肥轮转速  $n$  一定时,投肥角  $\epsilon$  随型孔右侧壁倾角  $\varphi$  增加而增大,表明适当增大型孔右侧壁倾角  $\varphi$  可增加投肥时间;同一型孔中肥料颗粒排出的时间间隔直接影响肥料落地后的穴径长轴长度,即型孔右侧壁倾角  $\varphi$  应在合理范围内增大,综合考虑投肥时间和肥料休止角,取型孔右侧壁倾角  $\varphi$  为  $35^\circ$ 。

#### 2.2 种肥开沟辊设计与分析

为降低深施肥铲开沟阻力,防止秸秆缠绕和深施肥铲开沟过程中土壤黏附堵塞排肥口,播种作业中采用种肥开沟辊圆盘辊压土壤,同时种肥开沟辊以速度  $v_m$  做直线运动、转动角速度  $\omega_2$  做回转运动与土壤进行相互作用,土壤被挤压成一定宽度和深度的种沟及肥沟,同时种肥开沟辊平整滚筒对旋耕后地表进行整平,保证厢面的平整度,其开沟原理如图7所示。

主动式种肥开沟辊主要包括种肥开沟辊转轴、平整滚筒、肥沟圆盘和种沟圆盘,其结构如图8所示。根据整机作业幅宽及油菜侧深穴施肥工艺方案,结合种肥开沟辊结构的对称性确定种肥开沟辊的结构参数。以现有播种机工作幅宽 2 000 mm 为基准,种肥开沟辊参数方程为

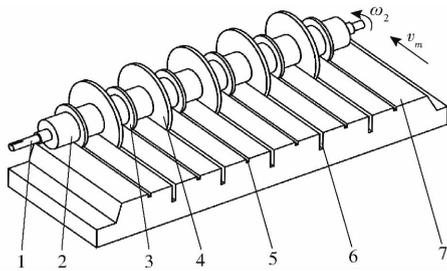


图7 开沟原理图

Fig. 7 Schematic of ditching principle

1. 种肥开沟辊转轴 2. 平整滚筒 3. 种沟圆盘 4. 肥沟圆盘
5. 种沟 6. 肥沟 7. 平整后地表

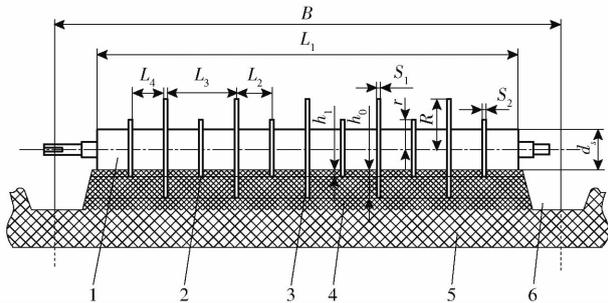


图8 种肥开沟辊结构示意图

Fig. 8 Structure diagram of seed and fertilizer ditching roller

1. 种肥开沟辊 2. 种沟圆盘 3. 肥沟圆盘 4. 已旋耕地表 5. 未旋耕地表 6. 畦沟

$$\left\{ \begin{array}{l} L_1 = 2L_2 + 5L_3 - S_1 \\ L_2 = L_4 + \frac{S_1}{2} + \frac{S_2}{2} \\ L_3 = 2L_2 \\ r = \frac{d_s}{2} + h_1 \\ R = h_0 + \frac{d_s}{2} \end{array} \right. \quad (13)$$

- 式中
- $L_1$ ——平整滚筒长度, mm
  - $L_2$ ——相邻种肥圆盘间距, mm
  - $L_3$ ——相邻肥沟圆盘间距, mm
  - $L_4$ ——相邻种肥圆盘间滚筒长度, mm
  - $R$ ——肥沟圆盘半径, mm
  - $r$ ——种沟圆盘半径, mm
  - $d_s$ ——平整滚筒直径, mm
  - $S_1$ ——肥沟圆盘厚度, mm
  - $S_2$ ——种沟圆盘厚度, mm
  - $h_1$ ——种沟圆盘入土深度, mm
  - $h_0$ ——肥沟圆盘入土深度, mm

根据油菜种植中施肥农艺要求,油菜播种行距为 260 ~ 280 mm<sup>[22]</sup>,播种深度为 0 ~ 20 mm<sup>[23-24]</sup>,油菜穴施肥采用侧位深施的方式,确定相邻肥沟圆盘间距  $L_3$  为 280 mm,种沟圆盘入土深度  $h_1$  为 20 mm。为保证种沟圆盘挤压出明显的种沟沟形,种沟圆盘

厚度  $S_2$  取 15 mm。油菜施肥深度为 80 ~ 100 mm,为满足油菜最大施肥深度要求,取施肥深度 100 mm,则肥沟圆盘入土深度  $h_0$  为 100 mm。主动式种肥开沟辊的传动方式为链传动,为避免种肥开沟辊转轴上的驱动链轮与地面间干涉,并防止平整滚筒直径过大压实地表土壤,综合考虑取平整滚筒直径  $d_s$  为 160 mm;将肥沟圆盘入土深度  $h_0$ 、相邻肥沟圆盘间距  $L_3$ 、平整滚筒直径  $d_s$  等参数代入式(13),求出相邻种肥圆盘间距  $L_2$ 、肥沟圆盘半径  $R$  和种沟圆盘半径  $r$  分别为 140、200、120 mm。

### 2.3 深施肥铲设计与分析

深施肥铲与种肥开沟辊相互配合形成稳定深度的肥沟,深施肥铲主要由铲柄、铲体、进肥管、翼板和覆土铁链等组成,其结构如图 9 所示。深施肥铲前壁面厚度  $S_3$  与种肥开沟辊肥沟圆盘厚度  $S_1$  相等,为保证种肥开沟辊肥沟圆盘挤压出明显的肥沟沟形,取肥沟圆盘厚度  $S_1$  为 20 mm;为防止土壤堵塞排肥口,深施肥铲伸出的左、右翼板夹角为  $\alpha$ ,夹角  $\alpha$  由进肥管内径  $d_f$  确定,当进肥管内径  $d_f$  为 32 mm 时,两侧翼板夹角  $\alpha$  为 5.2°。根据穴施肥排肥器的结构尺寸,确定进肥管中心至深施肥铲后壁面的距离  $L_b$  为 85 mm;将肥沟圆盘厚度  $S_1$  和种沟圆盘厚度  $S_2$  代入式(13),求出平整滚筒长度  $L_1$  和相邻种肥圆盘间滚筒长度  $L_4$  分别为 1 660 mm 和 122.5 mm。

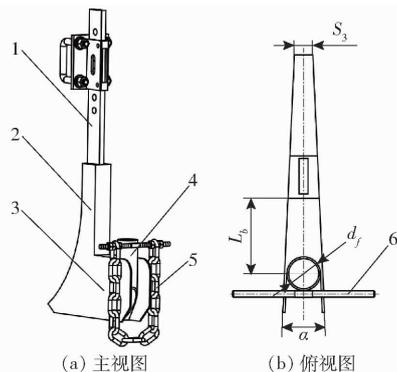


图9 深施肥铲结构示意图

Fig. 9 Schematics of deep fertilizing shovel

1. 铲柄 2. 铲体 3. 翼板 4. 进肥管 5. 覆土铁链 6. 螺杆

深施肥铲与种肥开沟辊肥沟圆盘表面形成包络面,深施肥铲结构曲线如图 10 所示。其沿机组前进方向触土部分主要为 AB 段和 AF 段,支撑部分为铲体 BC、CD 段和铲柄 DE 段。工作时,深施肥铲与种肥开沟辊随机组前进,种肥开沟辊圆盘通过挤压土壤形成规则的沟形轮廓,ABC 段包络圆弧与种肥开沟辊肥沟圆盘回转中心同心,ABC 圆弧段根据施肥铲与种肥开沟辊肥沟圆盘的间隙确定。间隙太小导致土壤堵塞,增大开沟阻力;间隙过大则导致穴施肥装置重心后移。

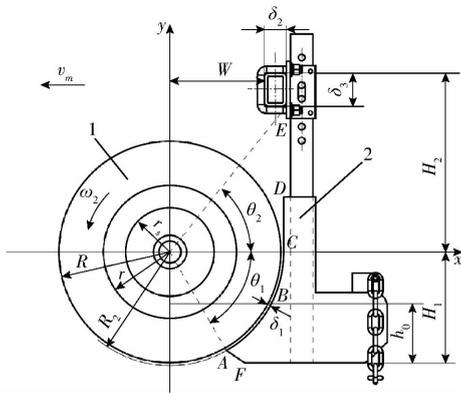


图 10 深施肥铲结构曲线

Fig. 10 Curve of deep fertilizing shovel

1. 种肥开沟辊 2. 深施肥铲

深施肥铲各参数之间的几何关系为

$$\begin{cases} R_2 = R + \delta_1 \\ W + \delta_2 = R_2 \\ H_1 = r_s + h_0 \\ (R + \delta_1) \cos \theta_1 = r \\ H_2 = R_2 \tan \theta_2 + \delta_3 \end{cases} \quad (14)$$

- 式中  $R_2$ ——包络圆弧  $ABC$  段半径, mm  
 $r_s$ ——种肥开沟辊平整滚筒半径, mm  
 $W$ ——种肥开沟辊回转中心至方管水平距离, mm  
 $H_1$ ——种肥开沟辊回转中心至深施肥铲下壁面垂直高度, mm  
 $H_2$ ——种肥开沟辊回转中心至方管顶端高度, mm  
 $\delta_1$ ——深施肥铲与种肥开沟辊间隙, mm  
 $\delta_2$ ——支架方管宽度, mm  
 $\delta_3$ ——支架方管高度, mm  
 $\theta_1$ ——深施肥铲圆弧  $ABC$  段圆心角, ( $^\circ$ )  
 $\theta_2$ ——点  $E$  和点  $C$  到种肥开沟辊回转中心的夹角, ( $^\circ$ )

为满足油菜施肥深度要求,令  $H_1 = R = 200$  mm, 根据整机相对位置关系得知  $W = 170$  mm,  $H_2 = 323$  mm,  $\delta_2 = 40$  mm,  $\delta_3 = 60$  mm, 代入式(14)得  $R_2 = 210$  mm,  $\delta_1 = 10$  mm,  $\theta_1 = 55.15^\circ$ ,  $\theta_2 = 51.39^\circ$ 。

#### 2.4 穴施肥装置参数匹配

为满足油菜施肥深度的要求,应合理匹配油菜机械式穴施肥装置的关键参数,排肥器、种肥开沟辊、深施肥铲及地面的相对位置如图 11 所示。

为减少种肥开沟辊平整滚筒对旋耕后地表的压实对作物生长的不利影响,平整滚筒应与地面有一定的间隙,结合图 11 可得

$$d_g = R - r_s - h_f \quad (15)$$

- 式中  $d_g$ ——种肥开沟辊平整滚筒表面至地面垂直高度, mm

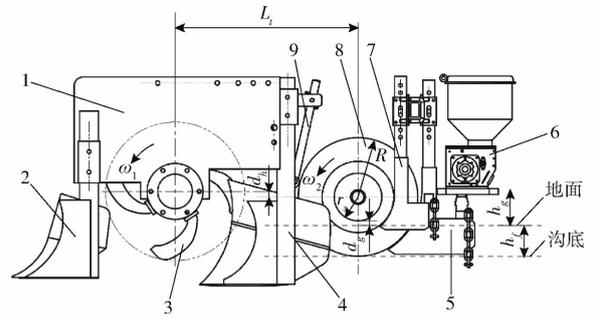


图 11 排肥器、种肥开沟辊、深施肥铲和地面相对位置示意图

Fig. 11 Relative position of ground and fertilizer discharging device, ditching roller and deep fertilizing shovel

1. 机架 2. 前犁 3. 旋耕刀 4. 后犁 5. 深施肥铲 6. 排肥器  
 7. 播种铲 8. 种肥开沟辊 9. 挡土板

$h_f$ ——肥沟深度, 取 100 mm

根据前述种肥开沟辊结构参数,计算可得  $d_g$  为 20 mm。播种机选用 IT245 型旋耕刀片,旋耕深度为 100 ~ 150 mm, 根据种肥开沟辊肥沟圆盘的结构尺寸,并满足施肥深度要求,取旋耕刀轴中心至种肥开沟辊中心垂直距离  $d_h$  为 30 mm。为防止种肥开沟辊与挡土板和播种机后犁产生干涉,结合整机结构取旋耕刀轴中心至种肥开沟辊中心水平距离  $L_f$  为 615 mm。

深施肥铲在工作时将部分土壤抬起并向两侧抛出,假设土体上抬过程体积守恒,排肥器离地高度  $h_g$  应满足

$$h_g \geq \sqrt{h_w h_f \tan \theta_r} \quad (16)$$

- 式中  $h_w$ ——深施肥铲两侧翼板宽度, 取 45 mm  
 $\theta_r$ ——土壤自然休止角, 取  $34^\circ$

穴施肥排肥器排肥口通过接头与导肥管相连,为预留接头充足的安装空间,结合式(16)确定排肥器离地高度  $h_g$  为 100 mm。

### 3 成穴性能仿真分析

为研究穴施肥排肥器的成穴性能,本文采用 EDEM 开展成穴性能仿真试验,分析排肥轮转速、充肥型孔长度及导肥管材料对穴施肥排肥器成穴性能的影响。

#### 3.1 仿真模型

采用 Creo 6.0 按照 1:1 的比例绘制穴施肥排肥器结构模型,并将其导入 EDEM 2020 进行仿真。由于肥料属于类球型颗粒,且球形度在 90% 以上,因此仿真模型可用球体代替肥料颗粒,肥料颗粒模型设置为等效直径 3.56 mm,模型直径正态分布,标准差设置为 0.05 mm,颗粒间及颗粒与几何体的接触模型选择 Hertz - Mindlin 无滑动接触模型,仿真模

型如图 12 所示,仿真参数见表 2、3<sup>[25-29]</sup>。

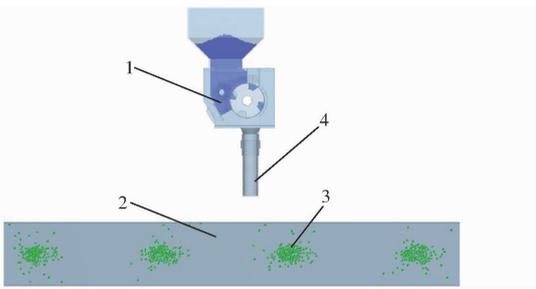


图 12 仿真模型

Fig. 12 Simulation model

1. 排肥器 2. 传送带 3. 肥料颗粒 4. 导肥管

表 2 仿真参数

Tab. 2 Parameters of simulation

物料	泊松比	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	剪切模量/Pa
肥料颗粒	0.25	1 325	$2.86 \times 10^7$
工程塑料 ABS	0.394	1 060	$8.96 \times 10^8$
PVC	0.47	1 282	$2.04 \times 10^6$
不锈钢	0.30	7 865	$7.90 \times 10^{10}$
土壤	0.35	1 357	$7.27 \times 10^8$

表 3 接触参数

Tab. 3 Parameters of contact

项目	恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
肥料颗粒-肥料颗粒	0.28	0.34	0.21
ABS-肥料颗粒	0.39	0.37	0.20
PVC-肥料颗粒	0.35	0.41	0.15
不锈钢-肥料颗粒	0.32	0.57	0.28
土壤-肥料颗粒	0.02	1.25	1.24

### 3.2 试验方法

排肥轮线速度与充肥性能有关,排肥轮转速决定了排肥轮线速度,为确定适宜的排肥轮转速区间,充肥型孔长度为 25 mm、导肥管为 ABS 塑料管条件下,开展排肥轮转速为 30 ~ 120 r/min,每间隔 10 r/min 为一个水平的转速对肥料成穴性能影响的单因素试验。

作业参数主要为排肥轮转速,充肥型孔长度决定排肥装置的单穴排肥量,导肥管作为穴施肥排肥器排肥口和深施肥铲进肥管的连接部件,肥料颗粒与不同类型导肥管间的碰撞影响成穴性。为研究不同作业参数、充肥型孔长度及导肥管类型对穴施肥排肥器成穴性能的影响,开展排肥轮转速、充肥型孔长度和导肥管材料的三因素正交试验,试验均以穴排肥量误差和穴径长轴长度为试验指标。

在 EDEM 后处理界面通过 Selection Group 功能在平行于传送带平面且位于传送带底部中间位置添加 Geometry Bin,其宽度与传送带一致,高度设置为 20 mm,长度为传送带速度与数据记录时间间隔

(0.01 s) 的乘积,计算每穴肥料通过 Geometry Bin 所用时间;在出肥口创建质量流量传感器,记录排肥轮转动阶段传感器区域内的颗粒质量总和。每次采集 20 穴肥料颗粒数据,计算不同处理下穴排肥量误差和穴径长轴长度,各测试指标计算公式为

$$q_e = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{|m_{i\max} - m_s|}{m_s}}{k} \times 100\% \quad (17)$$

$$L_a = \frac{\sum_{i=1}^k v_s t_i}{k} \quad (18)$$

式中  $q_e$ ——穴排肥量误差, %

$k$ ——肥料穴数,个

$m_{i\max}$ ——第  $i$  穴肥料经过质量流量传感器过程中传感器区域内最大质量, g

$m_s$ ——每穴标准排肥量, g

$L_a$ ——穴径长轴长度, mm

$v_s$ ——传送带速度, m/s

$t_i$ ——第  $i$  穴肥料质量经过 Geometry Bin 过程中由 0 增加到最大再减小为 0 所用时间, s

### 3.3 试验结果与分析

#### 3.3.1 排肥轮转速对成穴性能的影响

不同排肥轮转速对肥料颗粒穴排肥量误差和穴径长轴长度的影响如图 13 所示,可知穴排肥量误差及穴径长轴长度随排肥轮转速增加均呈先减小后增大的趋势,表明排肥轮转速过高不利于肥料颗粒充入型孔及肥料颗粒的集中分布,结合图 13,确定排肥轮转速范围为 30 ~ 90 r/min。

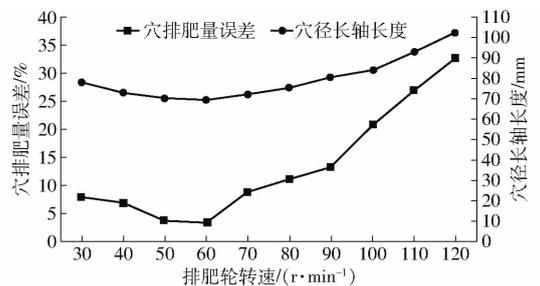


图 13 不同排肥轮转速时成穴性能变化曲线

Fig. 13 Performance curves of fertilizer discharge at different fertilizer feeding unit speeds

#### 3.3.2 各因素对成穴性能的影响

在施肥量为 450 ~ 750  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 、施肥穴距为 100 ~ 300 mm 的条件下,每穴施肥量为 1.8 ~ 9.0 g,当油菜施肥穴距为 200 mm 时,根据式(2)可得每穴排肥量为 3.6 ~ 6.0 g,对应充肥型孔长度为 18 ~ 30 mm。试验因素水平见表 4。试验设计与结果见表 5。表中 A、B、C 为因素水平值。

表4 试验因素水平

Tab.4 Test factors and levels

水平	因素		
	排肥轮转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	充肥型孔长度/ mm	导肥管材料
1	30	18	ABS 塑料管
2	60	24	PVC 波纹管
3	90	30	不锈钢管

表5 试验设计与结果

Tab.5 Experimental design and results

序号	因素			穴排肥量 误差/%	穴径长轴 长度/mm
	A	B	C		
1	1	1	1	3.50	72.67
2	1	2	2	6.76	86.42
3	1	3	3	8.64	95.15
4	2	2	3	4.76	80.79
5	2	3	1	3.28	78.55
6	2	1	2	7.32	65.90
7	3	3	2	11.79	85.70
8	3	1	3	14.02	78.33
9	3	2	1	12.27	76.50

以穴排肥量误差、穴径长轴长度为评价指标,方差分析如表6所示,极差分析如表7所示。

表6 试验结果方差分析

Tab.6 Variance analysis of experimental results

指标	来源	F	P
穴排肥量误差	A	13.09	0.032 9 *
	B	0.35	0.966
	C	1.74	0.316
穴径长轴长度	A	23.92	0.040 1 *
	B	52.49	0.018 7 *
	C	20.36	0.046 8 *

注: \* 表示影响显著( $P < 0.05$ )。

表7 试验结果极差分析

Tab.7 Range analysis of experimental results

分析项	穴排肥量误差			穴径长轴长度		
	A	B	C	A	B	C
$K_1$	18.90	24.84	19.05	254.24	216.90	227.72
$K_2$	15.36	23.79	25.87	225.24	243.71	238.02
$K_3$	38.08	23.71	27.42	240.53	259.40	254.27
R	22.72	1.13	8.37	29.00	42.50	26.55
较优水平	$A_2$	$B_3$	$C_1$	$A_2$	$B_1$	$C_1$
主次因素	A、C、B			B、A、C		

各因素对穴排肥量误差的影响:排肥轮转速对穴排肥量误差影响显著( $P < 0.05$ ),充肥型孔长度和导肥管材料对穴排肥量误差影响不显著,主次因素为:排肥轮转速、导肥管材料、充肥型孔长度。各因素对穴径长轴长度的影响:排肥轮转速、充肥型孔

长度、导肥管材料均对穴径长轴长度影响显著( $P < 0.05$ ),主次因素为:充肥型孔长度、排肥轮转速、导肥管材料。

结合极差分析和方差分析,对于穴排肥量误差和穴径长轴长度最优方案分别为  $A_2B_3C_1$  和  $A_2B_1C_1$ 。由于充肥型孔长度对穴排肥量误差影响不显著,对穴径长轴长度影响显著,确定成穴性能较优的参数组合为  $A_2B_1C_1$ ,即排肥轮转速为 60 r/min,充肥型孔长度 18 mm,导肥管为 ABS 塑料管,对应的穴排肥量误差和穴径长轴长度分别为 7.05% 和 62.45 mm。优选参数组合下进行 EDEM 仿真验证试验,得出穴排肥量误差为 6.98%,穴径长轴长度为 62.59 mm。

## 4 台架试验

### 4.1 试验条件

为验证仿真试验的合理性,开展不同排肥轮转速下的穴施肥排肥器成穴性能台架试验。采用 ABS 材料 3D 打印排肥轮、肥量调节轮,通过调节肥料调节轮使排肥轮充肥型孔长度为 18 mm,对应每穴排肥量为 3.6 g,导肥管材料为 ABS 塑料管。试验在华中农业大学工学院室内土槽实验室进行,试验装置如图 14 所示。

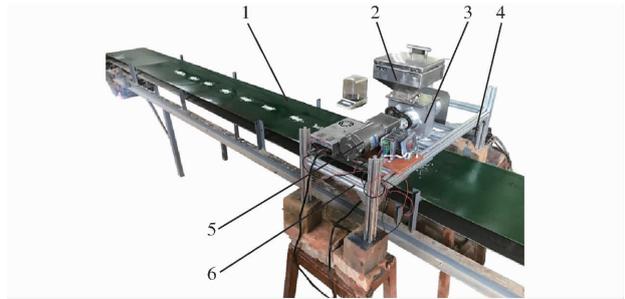


图14 台架试验装置

Fig.14 Bench test device

1. 传送带
2. 肥箱
3. 排肥器
4. 传送带调速器
5. 调速电机
6. 安装台架

选取深圳市芭田生态工程有限公司生产的芭田新时代复合肥( $N:P_2O_5:K_2O$  为 17:17:17)为试验对象,测得肥料的平均三轴尺寸为 3.86 mm × 3.59 mm × 3.26 mm、等效直径为 3.56 mm、球形度为 92.49%、休止角为 32.40°、堆积密度为 873 kg/m<sup>3</sup>、含水率为 2.17%。设置穴施肥排肥器排肥轮转速为 30 ~ 90 r/min,每间隔 30 r/min 为一个水平,对应传送带速度为 0.4 ~ 1.2 m/s,传送带涂抹 1 mm 厚的油脂以防肥料颗粒弹跳。其它试验设备有:游标卡尺、直尺和 BSM-520.3 型电子秤(量程为 520 g,精度为 0.001 g)。

### 4.2 试验指标与测定方法

试验以穴排肥量误差、穴径长轴长度、穴径长轴

长度稳定性变异系数和穴距误差为评价指标,测定方法如图 15 所示。

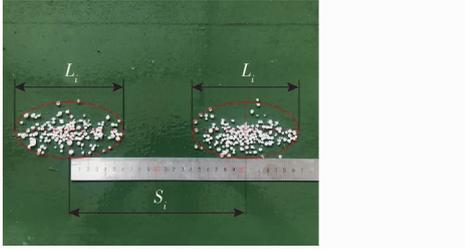


图 15 肥料颗粒分布图

Fig. 15 Diagram of fertilizer particle distribution

以每穴肥料堆积最密集区域为中心点,统计中心点四周沾油的肥料颗粒数,并随机从肥袋中选取相同粒数以替代沾油的肥料颗粒进行称量,并用于计算穴排肥量误差。量取中心点周围肥料颗粒分布的长度为穴径长轴长度  $L_i$ ,则穴排肥量误差和平均穴径长轴长度计算式为

$$q_e = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{|m_a - m_s|}{m_s}}{k} \times 100\% \quad (19)$$

$$L_a = \frac{\sum_{i=1}^k L_i}{k} \quad (20)$$

式中  $m_a$ ——每穴实际排肥量, g

穴径长轴长度稳定性变异系数计算式为

$$C_v = \sqrt{\frac{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (L_i - L_a)^2}{L_a}} \times 100\% \quad (21)$$

以相邻两穴肥料堆积中心点间的距离为穴距  $S_i$ ,则穴距误差计算式为

$$D_e = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{|S_i - S|}{S}}{k} \times 100\% \quad (22)$$

### 4.3 试验结果与分析

由于传送带长度有限,每次对传送带上 12 穴肥料颗粒的成穴情况进行统计,试验重复 3 次,分别计算穴排肥量误差、穴径长轴长度、穴径长轴长度稳定性变异系数及穴距误差,统计结果如表 8 所示。

表 8 台架试验结果  
Tab. 8 Bench test results

排肥轮转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	穴排肥量 误差/%	穴径长轴 长度/mm	穴径长轴长 度稳定性变 异系数/%	穴距误差/ %
30	4.56	91.50	4.53	3.24
60	8.21	76.32	6.59	5.16
90	15.69	85.46	9.78	7.31

表 8 表明,充肥型孔长度为 18 mm,导肥管为

ABS 塑料管时,排肥轮转速为 30 ~ 90  $r/\min$  时,穴排肥量误差为 4.56% ~ 15.69%,穴径长轴长度为 76.32 ~ 91.50 mm,穴径长轴长度稳定性变异系数为 4.53% ~ 9.78%,穴距误差为 3.24% ~ 7.31%。穴排肥量误差和穴径长轴长度稳定性变异系数较小,穴距误差不大于 7.31%。

## 5 田间试验

### 5.1 试验方法

为验证油菜机械式穴施肥装置整体作业性能及穴施肥效果,于 2021 年 11 月在湖北省荆州市监利县容城镇开展田间试验,如图 16 所示。试验选用芭田复合肥,施肥深度 100 mm,施肥穴距 200 mm,导肥管为 ABS 塑料管,每穴理论排肥量为 3.6 g,设置排肥器排肥轮转速为 30 ~ 90  $r/\min$ ,每个水平间隔为 30  $r/\min$ 。为便于田间测量相关成穴性能指标,拆除深施肥铲后覆土铁链,即施肥后不进行覆土环节。



(a) 穴施肥装置性能试验

(b) 穴施肥作业效果

图 16 田间试验

Fig. 16 Field test

### 5.2 试验结果与分析

穴施肥装置开沟深度的稳定性直接影响施肥深度的稳定性,通过测定施肥深度稳定性变异系数来表征穴施肥装置开沟性能;参照 NY/T 987—2006《铺膜穴播机作业质量》和 NY/T 1003—2006《施肥机械质量评价技术规范》中规定的相关试验方法和评价指标进行本次田间试验,选取穴施肥作业段 10 m 有效长度测量穴排肥量误差、穴径长轴长度、穴径长轴长度稳定性变异系数、穴距误差及施肥深度稳定性变异系数。施肥深度稳定性变异系数计算公式为

$$C_L = \frac{\sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (H_i - H_a)^2}}{H_a} \times 100\% \quad (23)$$

$$\text{其中 } H_a = \frac{\sum_{i=1}^k H_i}{k} \quad (24)$$

式中  $H_i$ ——第  $i$  穴肥料颗粒施肥深度, mm

$H_a$ ——平均施肥深度, mm

田间试验数据统计结果如表 9 所示。

表9 田间试验结果  
Tab.9 Field test results

排肥轮转速/ ( $r \cdot \min^{-1}$ )	穴排肥	穴径长	穴径长轴长	穴距	施肥深度
	量误差/ %	轴长度/ mm	度稳定性变 异系数/%	误差/ %	稳定性变 异系数/%
30	4.73	101.65	4.82	3.36	6.43
60	8.45	85.21	6.72	5.64	9.51
90	16.07	92.72	10.63	7.58	10.85

由表9可知,穴径长轴长度随排肥轮转速增大先减小后增大,穴排肥量误差、穴径长轴长度稳定性变异系数、穴距误差和施肥深度稳定性变异系数随排肥轮转速增加而增大,成穴性能指标变化趋势与台架试验结果相同,验证了台架试验结果的合理性;排肥轮转速为30~90 r/min时,穴排肥量误差为4.73%~16.07%,穴径长轴长度为85.21~101.65 mm,穴径长轴长度稳定性变异系数为4.82%~10.63%,穴距误差为3.36%~7.58%,施肥深度稳定性变异系数为6.43%~10.85%,满足油菜播种穴施肥要求。

## 6 结论

(1)提出了一种油菜侧深穴施肥工艺方案,研制了一种机械式穴施肥装置,进行了排肥器、种肥开沟辊及深施肥铲的结构设计,并分析了种肥开沟辊

与深施肥铲参数之间的几何关系;确定了穴施肥排肥器型孔和排肥轮的主要结构参数,得出排肥轮直径为80 mm,型孔个数为4,单个型孔体积调节范围为1 920~9 580 mm<sup>3</sup>。

(2)开展了排肥轮转速对成穴性能影响的单因素仿真试验,结果表明,排肥轮转速对穴排肥量误差影响明显,排肥轮适宜转速为30~90 r/min时,型孔的充肥性能较好。采用三因素三水平仿真试验分析确定了成穴性能较优的参数组合:排肥轮转速为60 r/min,充肥型孔长度18 mm,导肥管材料为ABS塑料管,对应的穴排肥量误差和穴径长轴长度分别为7.05%和62.45 mm。

(3)优选参数组合下的排肥性能台架试验结果表明,排肥轮转速为30~90 r/min时,穴排肥量误差为4.56%~15.69%,穴径长轴长度为76.32~91.50 mm,穴径长轴长度稳定性变异系数为4.53%~9.78%,穴距误差为3.24%~7.31%。田间试验表明,排肥轮转速为30~90 r/min时,穴排肥量误差为4.73%~16.07%,穴径长轴长度为85.21~101.65 mm,穴径长轴长度稳定性变异系数为4.82%~10.63%,穴距误差为3.36%~7.58%,施肥深度稳定性变异系数为6.43%~10.85%,成穴性能较好,满足穴施肥要求。

## 参 考 文 献

- [1] 唐汉,王金武,徐常塑,等.化肥减施增效关键技术研究进展分析[J].农业机械学报,2019,50(4):1-19.  
TANG Han, WANG Jinwu, XU Changsu, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 1-19. (in Chinese)
- [2] CHEN Xinping, CUI Zhengling, FAN Mingsheng, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486-489.
- [3] 刘钦普.中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J].农业工程学报,2017,33(6):214-221.  
LIU Qinqu. Spatio-temporal changes of fertilization intensity and environmental safety threshold in China[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6): 214-221. (in Chinese)
- [4] TIMILSENA Y P, ADHIKARI R, CASEY P, et al. Enhanced efficiency fertilisers: a review of formulation and nutrient release patterns[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(6): 1131-1142.
- [5] 谷洁,高华.提高化肥利用率技术创新展望[J].农业工程学报,2000,16(2):17-20.  
GU Jie, GAO Hua. Prospects on the technical innovation to increase fertilizer use efficiency[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(2): 17-20. (in Chinese)
- [6] YANG Xianlong, LU Yongli, DING Yan, et al. Optimising nitrogen fertilisation: a key to improving nitrogen-use efficiency and minimising nitrate leaching losses in an intensive wheat/maize rotation (2008-2014)[J]. Field Crops Research, 2017, 206: 1-10.
- [7] 姜超强,王火焰,卢殿君,等.一次性根区穴施尿素提高夏玉米产量和养分吸收利用效率[J].农业工程学报,2018,34(12):146-153.  
JIANG Chaoqiang, WANG Huoyan, LU Dianjun, et al. Single fertilization of urea in root zone improving crop yield[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 146-153. (in Chinese)
- [8] ADU-GYAMFI R, AGYIN-BIRIKORANG S, TINDJINA I, et al. Minimizing nutrient leaching from maize production systems in northern Ghana with one-time application of multi-nutrient fertilizer briquettes[J]. Science of the Total Environment, 2019, 694: 133667.
- [9] 胡红,李洪文,王庆杰,等.玉米行间定点扎穴深施追肥机的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(24):26-35.  
HU Hong, LI Hongwen, WANG Qingjie, et al. Design and experiment of targeted hole-pricking and deep-application fertilizer applicator between corn rows[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 26-35. (in Chinese)
- [10] 王金武,周文琪,王金峰,等.斜置式非规则齿轮行星轮系扎穴机构工作参数试验优化[J].农业机械学报,2017,48(6):66-70.  
WANG Jinwu, ZHOU Wenqi, WANG Jinfeng, et al. Experiment and optimization of working parameters for pricking hole mechanism of oblique type non-circular gears planetary system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 66-70. (in Chinese)

- [11] 刘正道,王庆杰,刘春鸽,等.腔盘式精量穴施肥装置设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(10):137-144,355.  
LIU Zhengdao,WANG Qingjie,LIU Chungu,et al. Design of flexible fertilizer protection mechanism for hole-fertilizing apparatus with notched plate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):137-144,355. (in Chinese)
- [12] 万玲,谢东波,李杨,等.玉米行间滚轮式穴施排肥器设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(11):64-73.  
WANG Ling,XIE Dongbo,LI Yang,et al. Design and experiment of roller hole fertilizer application between corn rows[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):64-73. (in Chinese)
- [13] 都鑫,刘彩玲,姜萌,等.倾斜梯形孔式穴施肥排肥器设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(9):43-53.  
DU Xin,LIU Cailing,JIANG Meng,et al. Design and experiment of inclined trapezoidal hole fertilizer point-applied discharging device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):43-53. (in Chinese)
- [14] 吴南,林静,李宝筏.免耕播种机精量穴施肥系统设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(7):64-72.  
WU Nan,LIN Jing,LI Baofa. Design and test on no-tillage planter precise hole fertilization system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(7):64-72. (in Chinese)
- [15] 李沐桐,温翔宇,周福君.中耕作物精准穴施肥控制机构工作参数优化与试验[J].农业机械学报,2016,47(9):37-43.  
LI Mutong,WEN Xiangyu,ZHOU Fujun. Working parameters optimization and experiment of precision hole fertilization control mechanism for intertilled crop[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(9):37-43. (in Chinese)
- [16] 刘晓东,王绪坪,陈礼源,等.油菜直播机分层定量施肥装置设计与试验[J].农业工程学报,2021,37(5):1-10.  
LIU Xiaodong,WANG Xuping,CHEN Liyuan,et al. Design and experiments of layered and quantitative fertilization device for rapeseed seeder[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(5):1-10. (in Chinese)
- [17] 吕伟生,肖小军,肖国滨,等.缓释肥侧位深施及用量对油菜产量和肥料利用率的影响[J].农业工程学报,2020,36(19):19-29.  
LÜ Weisheng,XIAO Xiaojun,XIAO Guobin,et al. Effects of lateral deep application and dosage of slow-release fertilizer on yield and fertilizer utilization efficiency of rape[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(19):19-29. (in Chinese)
- [18] 雷小龙,李蒙良,张黎晔,等.颗粒化肥水平气送式螺旋组合可调定量供肥装置设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(19):9-18.  
LEI Xiaolong,LI Mengliang,ZHANG Lihua,et al. Design and experiment of horizontal pneumatic screw combination adjustable quantitative fertilizer feeding device for granular fertilizer[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(19):9-18. (in Chinese)
- [19] 鲁剑巍,任涛,丛日环,等.我国油菜施肥状况及施肥技术研究展望[J].中国油料作物学报,2018,40(5):712-720.  
LU Jianwei,REN Tao,CONG Rihuan,et al. Prospects of research on fertilization status and technology of rapeseed in China[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences,2018,40(5):712-720. (in Chinese)
- [20] 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].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(11):58-67. (in Chinese)
- [21] 刘宏新,徐晓萌,郭丽峰,等.具有复合充填力的立式浅盆型排种器充种机理[J].农业工程学报,2014,30(21):9-16.  
LIU Hongxin,XU Xiaomeng,GUO Lifeng,et al. Research on seed-filling mechanism of vertical shallow basin type seed-metering device with composite filling force[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(21):9-16. (in Chinese)
- [22] 廖宜涛,高丽萍,廖庆喜,等.油菜精量联合直播机深施肥装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(2):65-75.  
LIAO Yitao,GAO Liping,LIAO Qingxi,et al. Design and test of side deep fertilizing device of combined precision rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(2):65-75. (in Chinese)
- [23] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等.油菜精量播种技术研究进展[J].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(9):1-16. (in Chinese)
- [24] 王磊.油麦兼用型宽幅高速气送式播种机关键部件设计与试验[D].武汉:华中农业大学,2021.  
WANG Lei. Design and experiment on broad width and high speed air-assisted planter for rapeseed and wheat[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2021. (in Chinese)
- [25] 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].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(2):54-64. (in Chinese)
- [26] 刘彩玲,魏丹,宋建农,等.颗粒肥料离散元仿真边界参数系统化研究[J].农业机械学报,2018,49(9):82-89.  
LIU Cailing,WEI Dan,SONG Jiannong,et al. Systematic study on boundary parameters of discrete element simulation of granular fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(9):82-89. (in Chinese)
- [27] 袁全春,徐丽明,邢洁洁,等.机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J].农业工程学报,2018,34(18):21-27.  
YUAN Quanchun,XU Liming,XING Jiejie,et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(18):21-27. (in Chinese)
- [28] 温翔宇,袁洪方,王刚,等.颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J].农业机械学报,2020,51(2):115-122,142.  
WEN Xiangyu,YUAN Hongfang,WANG Gang,et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(2):115-122,142. (in Chinese)
- [29] 王磊,廖庆喜,廖宜涛,等.气送式排肥系统分配装置结构型式对排肥性能的影响[J].农业工程学报,2021,37(7):24-34,315.  
WANG Lei,LIAO Qingxi,LIAO Yitao,et al. Effects of distributor types on fertilizing performance in an air-assisted applicator[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(7):24-34,315. (in Chinese)