

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.06.008

油菜旋转盘式高速集排器螺旋供种装置设计与试验

姚露^{1,2} 廖庆喜^{1,2} 王磊^{1,2} 刘海^{1,2} 魏国梁^{1,2} 王宝山^{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: 针对现有机离心式集排器高速作业时供种能力不足, 供种量难以实现精量可调等实际问题, 设计一种具有“螺旋进种条”结构的油菜旋转盘式高速集排器。基于油菜种子机械物理特性及播量需求, 开发螺旋供种装置, 构建种子供种过程的力学模型并分析确定了其主要结构参数。采用三元二次回归正交组合试验建立供种速率、供种速率稳定变异系数、破损率与转速、叶片宽度、导程之间的数学模型, 分析得到影响供种速率的因素主次顺序为导程、叶片宽度、转速, 影响供种速率稳定性变异系数及破损率的因素主次顺序为转速、导程、叶片宽度; 且较优参数组合为: 转速 81 r/min、叶片宽度 4 mm、导程 15 mm。在较优参数组合下的台架验证试验得到供种装置的供种速率为 92.7 g/min, 供种速率稳定性变异系数为 0.32%, 破损率为 0.29%; 供种速率为 36.55 ~ 190.94 g/min 时, 供种速率稳定性变异系数均低于 1.29%, 破损率均低于 0.5%。田间试验表明机组作业速度为 10 km/h 时, 油菜播种均匀性变异系数为 9.4%, 种植密度为 48 ~ 60 株/m², 可实现高速播种, 满足油菜种植农艺要求, 可为旋转盘式集排器结构改进提供参考。

关键词: 油菜; 旋转盘式集排器; 高速; 螺旋进种条

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)06-0078-11 **OSID:** 

Design and Experiment of Spiral Seed Feeding Device in Spinning Disc High-speed Metering Device for Rapeseed

YAO Lu^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2} WANG Lei^{1,2} LIU Hai^{1,2} WEI Guoliang^{1,2} WANG Baoshan^{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: Considering the practical problem that the high-speed planting operation leads to the seed feeding capability insufficient and the difficulty of precise adjustment of feeding quantity of the existing centrifugal metering device, a prototype of spinning disc high-speed metering device for rapeseed with a spiral was developed. Based on the mechanical and physical properties and parameters and the demand of planting quantity for rapeseed, a spiral seed feeding device was proposed and the mechanical model of seed feeding were established and the main structural parameters were analyzed and determined. A three-factor quadratic orthogonal combination test was performed to establish a mathematical model between seed feeding rate, stability variation coefficient of seed feeding rate, damage rate and speed, blade width, and lead. The analysis result showed that the sequence of factors affecting the seed feeding rate were lead, blade width and speed, and the the sequence of factors affecting the stability variation coefficient of seed feeding rate and the damage rate were both speed, lead and blade width. The optimal parameter combination was established when the speed was 81 r/min, the blade width was 4 mm and the lead was 15 mm. The bench verification test results showed that the seed feeding rate was 92.7 g/min, the stability coefficient of variation was 0.32%, and the damage rate was 0.29% of the seed feeding device under the optimum combination of parameters. The seed feeding rate was varied from 36.55 g/min to 190.94 g/min, the stability variation coefficient of the seed rate was less than 1.29%, and the damage rate was less than 0.5%. The field experiment showed that when the planting speed of the seeder was

收稿日期: 2021-07-06 修回日期: 2021-11-25
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51875229)、国家油菜产业体系专项(CARS-12)和湖北省科技厅农业科技创新行动项目
作者简介: 姚露(1993—), 女, 博士生, 主要从事油菜播种技术与装备研究, E-mail: yaolu1993@163.com
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

10 km/h, the uniformity variation coefficient of rapeseed seeding was 9.4% , and the planting density was 48 ~ 60 plants/m², which could complete high-speed seeding. It could meet the performance requirements of rapeseed and would provide a reference for the structure improvement of spinning disc metering device for rapeseed.

Key words: rapeseed; spinning disc metering device; high-speed; spiral

0 引言

油菜是我国重要的油料作物,2019 年机械化播种水平仅约为 32.54% ,严重制约了我国油菜播种机械化的发展^[1-3]。随着农业栽植模式的转变及农业机械化技术的发展,为适应高速高效机械作业,各类集排器已成为国内外研究和应用的主要方向^[4-7]。离心式集排器因其排种过程简单、种子破损率低等特点被广泛运用于机械播种作业^[8-10],但播种速度大多集中在 1.6 ~ 5 km/h,无法满足高速播种需求。供种装置作为离心式集排器的核心部件,其结构形式影响离心式集排器高速作业时的排种效率、总排量稳定性及破损率等。

为提高集排器供种性能,国内外学者开展了深入的研究。美国 Sunflower 公司、John Deere 公司等均采用机械槽轮式排种器作为气送式播种机的供种装置,可实现定量稳定供种;GAO 等^[11]为增强种子流动性并减少种子堆积,运用 CFD-EDM 仿真分析了定量供种系统中文丘里管气流场特性并确定了其结构参数;雷小龙等^[12-14]为提高气送式集排器的兼用性并实现定量变量供种,分别以油菜、小麦及水稻为对象研制了兼用型供种装置;韩豹等^[15]为稳定梗稻定向精量播种装置在低播量时的播种性能,设计了一种离心式供种机构;李沐桐等^[16]为解决精密排种器高速作业时排种稳定性问题,提出了离心锥盘推送式充种方式,最大限度发挥了种层离心力对预充填籽粒的作用;王磊等^[17-18]为解决油菜种植区域地表坡度变化范围大导致供种稳定性不足的问题,设计了适用于气送式集排器可实现坡地稳定供种的供种装置及均匀分种的匀种涡轮。综上所述,国内外学者已开展了适用于不同类型集排器的供种装置的相关研究以提高播种性能,但满足离心式集排器作业速度大于 10 km/h 的高速作业时所需供种能力的供种装置却鲜有研究,制约了离心式集排器的发展与应用。

本文基于油菜种子的机械物理特性及农艺要求,设计一种用于“一器八行”旋转盘式高速集排器的螺旋进种条供种装置,确定其主要结构参数,探究转速和螺旋进种条结构对供种速率及其稳定性变异系数和破损率的影响,以期为油菜旋转盘式高速集排器结构改进提供参考。

1 总体结构及工作原理

1.1 油菜旋转盘式联合直播机总体结构

2BFQ-8 型油菜旋转盘式联合直播机主要由主机架、排种系统、排肥系统、开畦沟系统、仿形地轮、旋耕装置等组成,如图 1 所示。该机能一次性完成旋耕、施肥、播种、开畦沟等作业环节^[19]。排种系统主要由集排器、驱动电机、种箱、导种管及双圆盘开沟器组成^[20]。种子经由种箱通过集排器均匀分配到 8 个出种口,进入输种管道及双圆盘开沟器到达种床,实现播种作业。

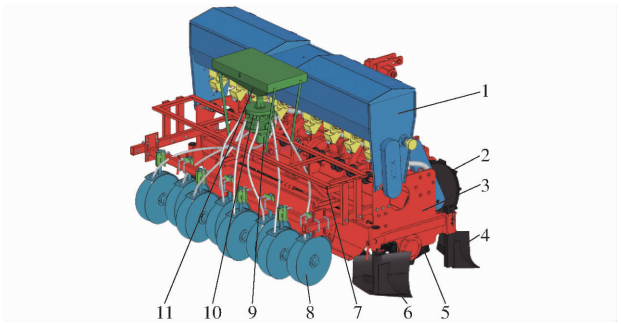


图 1 2BFQ-8 型油菜旋转盘式联合直播机结构示意图

Fig.1 Structure diagram of 2BFQ-8 rapeseed spinning disc direct seeder

- 1. 肥箱 2. 仿形地轮 3. 主机架 4. 开畦沟前犁 5. 旋耕装置
- 6. 开畦沟后犁 7. 副机架 8. 双圆盘开沟器 9. 驱动电机
- 10. 旋转盘式集排器 11. 种箱

1.2 供种装置结构及工作过程

油菜旋转盘式高速集排器主要包括种箱、供种套筒、螺旋进种条、上盖本体、下盖本体、旋转盘、导叶、导种嘴等,结构如图 2a 所示。螺旋进种条与供种套筒共同组成螺旋供种装置,旋转盘、导种嘴、下盖本体与主轴共同组成分种装置,螺旋进种条与旋转盘通过主轴连接由电机同轴驱动。油菜旋转盘式高速集排器主要结构与技术参数如表 1 所示。

集排器工作时,如图 2b 所示,螺旋进种条的主轴在电机驱动下绕转动中心以角速度 ω 逆时针转动,其顶端的破拱锥可对种箱内处于充填区 I 的种子起到搅种、破拱作用;种子经过充填区进入螺旋进种条与供种套筒共同形成的迁移区 II 内,并在螺旋叶片侧向推动与种子自重的共同作用下向下有序输种;到达螺旋进种条底端即处于出种区 III 的种子,在

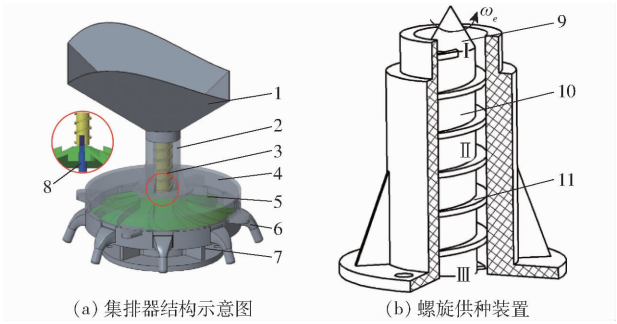


图 2 油菜旋转盘式高速集排器结构示意图
Fig.2 Structure diagrams of spinning disc high-speed metering device for rapeseed

1. 种箱 2. 供种套筒 3. 螺旋进种条 4. 上盖本体 5. 旋转盘
6. 导种嘴 7. 下盖本体 8. 主轴 9. 破拱锥 10. 螺旋轴
11. 螺旋叶片 I. 充填区 II. 迁移区 III. 出种区

表 1 旋转盘式高速集排器主要技术参数
Tab.1 Main parameters of spinning disc high-speed metering device

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	600×344×544
集排器形式	离心式
转速/(r·min ⁻¹)	60~100
电机功率/kW	0.15
作业速度/(km·h ⁻¹)	4.15~12.00
排种速率/(g·min ⁻¹)	36.55~190.94
播种行数	8 或 16

螺旋叶片的约束下按照“先到先出种”的原则开始有序为旋转盘供种,其在外力作用下沿着导叶骨线运移,到达旋转盘边缘以一定的初速度经由导种嘴运输至种床。种子在螺旋供种装置的作用下形成连续均匀的种子流并实现精量可控。

2 供种装置主要结构参数设计与分析

2.1 螺旋进种条结构设计与参数分析

螺旋进种条作为供种装置的核心部件,其主要结构参数包括破拱锥锥度、螺旋叶片宽度、螺距、外径等。旋转盘式高速集排器由电机带动主轴逆时针旋转,种子输送方向为自上而下、由串联到并联的过程,为保证螺旋进种条能够顺利充种并精量供种,确定螺旋方向为右旋。试验中螺旋进种条采用工程塑料 ABS 进行 3D 打印加工。

2.1.1 破拱锥结构参数

种箱内种子进入螺旋供种装置的过程中可分别形成整体流和中心流。当种箱出种孔径较小时易出现中心流,靠近种箱壁层的种子群流速较慢或停滞,此时种群颗粒间以及颗粒与种箱壁间无相对运动,产生的接触力会形成连续拱形结构并指向结拱中心处的颗粒群,当处于拱形结构下方的部分种群被强

制向下持续输送后,充填区 I 会出现“架空”现象。为满足种子流“先进先出”原则及避免出现流动堵塞导致“结拱”、供种不均等问题,种子流首选流型应为整体流。现设计一种防结拱结构,可对种箱内部的种群产生扰动作用,并破坏形成的拱形固定结构,带动种群向充填区实现趋于整体流的稳定过渡;破拱锥对种子具有导向作用,为了增加种子群与破拱锥的接触面,同时避免转动时种子停留在破拱锥上并对种子造成损伤,设计其结构为表面光滑过渡的正圆锥状,如图 3 所示,则其顶角为

$$\theta \leq 180^{\circ} - 2\theta_0$$
 (1)

式中 θ ——破拱锥顶角,(°)
 θ_0 ——油菜种子自然休止角,(°)

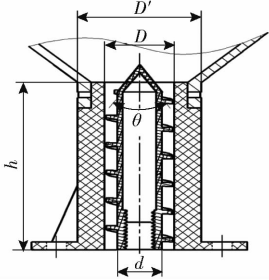


图 3 供种装置相对位置关系图
Fig.3 Relative positional relationship of seed feeding device

选取试验对象为华油杂 62,其自然休止角为 26.7° ^[21],计算得破拱锥顶角 $\theta \leq 126.6^{\circ}$,可满足破拱要求;破拱锥的高度越高对种群的扰动作用越大,但过高则破拱锥底端与种箱形成的锐角越小,会产生种子破损现象,综合考虑取破拱锥顶角为 60° ,即轴截面为等边三角形,轴截面边长计算式为

$$L = d$$
 (2)

式中 L ——破拱锥轴截面边长,mm
 d ——螺旋进种条内径,mm

为避免连锁结拱,种箱下部圆形出种口直径 D (与螺旋进种条外径、供种套筒内径相同)应不小于油菜种子直径 d_s 的 6~12 倍^[22],根据文献[21]取 d_s 为 2 mm,计算可得种箱出种口直径 $D > 24$ mm。

2.1.2 螺旋叶片结构参数

在破拱锥的扰动及自身重力作用下,油菜种群充入螺旋进种条,并在螺旋叶片的推动下将种子输出。实际田间作业中农艺要求的播种速率^[23]为

$$Q_s = 10Q_n B v_m$$
 (3)

式中 Q_s ——农艺要求播种速率,g/s
 Q_n ——农艺要求目标播种量,kg/hm²
 B ——播种机工作幅宽,m
 v_m ——播种机作业速度,m/s

螺旋供种装置的供种速率^[23]为

$$Q_m = \frac{\pi[(D+2\lambda)^2 - d^2]}{240} \varphi n_e \gamma PC \quad (4)$$

式中 Q_m ——螺旋供种装置供种速率, g/s
 λ ——螺旋进种条外径与套筒内表面间隙, 取 0 mm
 φ ——油菜种子充满系数
 n_e ——螺旋进种条转速, r/min
 γ ——油菜种子容重, 取 6.3251×10^{-4} g/mm³
 P ——螺旋进种条螺旋线导程, mm
 C ——螺旋进种条倾斜输送修正系数, 当输送角为 90°即垂直输送时取 0.36

由式(3)、(4)可知, 农艺要求的供种速率应与供种装置的供种速率相同, 则

$$Q_n = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{2400Bv_m} \varphi n_e \gamma PC \quad (5)$$

式(5)表明, 在满足农艺要求的单位面积目标播种量前提下, 当播种幅宽 B 、播种机作业速度 v_m 、油菜种子容重 γ 和螺旋进种条倾斜输送修正系数 C 一定时, 油菜种子充满系数 φ 、螺旋进种条外径 D 、螺旋线导程 P 与转速 n_e 呈负相关关系, 螺旋进种条内径 d 与转速 n_e 呈正相关关系。供种装置转速具有适宜的区间, 转速过大则会出现种子随螺旋供种装置一起转动而不向下供种的现象, 存在最大临界转速。在保证相同供种速率的条件下适当降低转速可增加充种时间, 提高油菜种群充填性能, 保证供种均匀性。当保持螺旋线导程 P 不变时, 可通过增加螺旋进种条外径 D 或减小螺旋进种条内径 d 以适当降低转速, 但若增大螺旋进种条外径, 其直接约束供种套筒外径, 过大会导致供种装置体积增大, 且处于螺旋进种条外沿处的种群所受牵连速度显著增大, 由前文分析可知 $D > 24$ mm, 考虑到螺旋进种条叶片对称性质选取其外径 D 为偶数, 即 26 mm; 若减小螺旋进种条内径, 则与螺旋轴连接的主轴直径相应减小, 在动力传输时扭矩过大, 装置强度降低, 稳定性及可靠性随即降低。为保证能顺利充种且适量供种, 设计叶片宽度 l 至少大于一个油菜种子直径且小于 3 个油菜种子直径, 可得螺旋叶片宽度满足关系

$$\begin{cases} d_e < l < 3d_e \\ l = \frac{D-d}{2} \end{cases} \quad (6)$$

式中 l ——螺旋叶片宽度, mm

由式(6)计算得螺旋叶片宽度 $2 \text{ mm} < l < 6 \text{ mm}$, 则螺旋进种条内径确定为 $14 \text{ mm} < d < 22 \text{ mm}$, 考虑实际田间播量调节范围需求较大, 确定叶片宽度 l 为整数并在该范围内变量可调。

螺旋进种条叶片是长方形截面以螺旋升角绕中

心圆柱体形成的螺旋线, 其与螺旋线导程 P 之间的关系^[24]为

$$\tan \alpha = \frac{P}{\pi D} \quad (7)$$

式中 α ——螺旋进种条螺旋升角, (°)

螺旋升角 α 与导程 P 呈正相关关系, 螺旋进种条起到有效控制种子流的作用, 当装置处于静止状态时应保证种子不自然下落, 则螺旋升角 α 应小于油菜种子与工程塑料 ABS 的静摩擦角, 查阅文献[25]可知其静摩擦因数为 0.3, 计算可得螺旋线导程 $P \leq 25 \text{ mm}$; 若螺旋线导程过小, 叶片节距相应减小会造成种子挤压破损, 也不利于种子的轴向输送, 综合考虑 $13 \text{ mm} \leq P \leq 25 \text{ mm}$ 。装置的供种速率由转速和螺旋进种条结构尺寸共同决定。

2.2 供种套筒结构参数分析

供种套筒与螺旋进种条间隙配合, 则间隙 λ 取 0 mm, 即供种套筒内径与螺旋进种条外径相等, 为 26 mm。供种套筒同时作为支撑装置选取其壁厚为 10 mm, 即供种套筒外径 D' 为 46 mm。若供种套筒高度 h 较高, 会出现: ①排种装置重心上移, 实际田间作业中持续存在振动、倾斜等工况, 整机可靠性与稳定性下降。②供种套筒高度与螺旋进种条高度成正比, 高度越高种子在供种装置中经过路程则越长, 不符合“短程排种”设计思想。综合以上因素, 参考上盖本体与下盖本体高度, 取供种套筒高度 h 为 80 mm。

3 供种装置供种力学分析

3.1 供种装置动力学分析

油菜种子顺利充入供种装置是实现后续分种、输种等过程的关键前提, 种子在破拱锥的扰动下依次经过充填区、迁移区和出种区, 在重力、摩擦力和离心力等作用下, 实现整个供种过程。油菜种子流动性能和球度较好, 在供种装置中以散粒体方式运动, 建立螺旋进种条内种子稳定输送时的运动假设:

(1) 种子颗粒群沿周向环形扩散分布, O' 为该种群微段所在平面(与中心转轴垂直)的圆心, 如图 4a 所示, 其转速沿径向发生变化, 即任意径向相邻位置的种群颗粒转速不同, 且从螺旋轴到供种套筒内壁之间转速逐渐减小且呈线性变化。

(2) 取处于螺旋进种条任一半径为 r 处圆柱面某段弧面的种群微段 d_s (d_s 、 s 为种群微段的长度、位置)为研究对象, 将其视为矩形截面 $e \times j$ (e 为种群接触面与螺旋叶片接触面的距离, j 为种群微段厚度)的种子流, 如图 4b 所示。

螺旋进种条是利用螺旋叶片与颗粒之间的相对运动对种子进行输送, 当螺旋叶片转动时其产生的

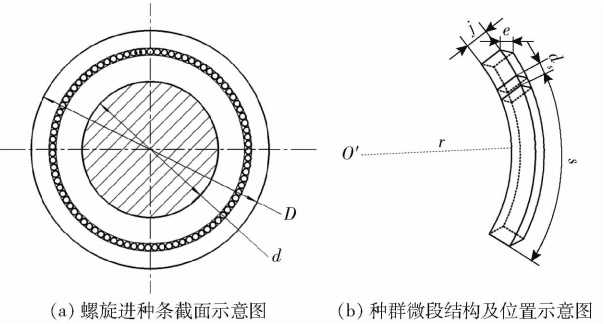


图 4 供种装置中种群微段运动模型

Fig. 4 Motion model building of differential seeds population in feeding device

摩擦力 $F_{\mu 1}$ 使种群微段跟随叶片一起转动;在离心力 F_e 的作用下,种群微段沿着径向逐步向供种套筒壁面移动,从而对外侧种群产生压力作用引起其对种群微段的摩擦力 $F_{\mu 2}$,此外种群微段还在自身重力 G 、支反力等作用下达到受力平衡,此时种群沿着叶片稳定输送,现均以单头螺旋为例分析供种装置中最为典型的迁移过程受力情况。输送过程中种群紧贴叶片且全部充满螺旋进种条与供种套筒形成的中空空间中,不会出现脱离、跳动等现象。螺旋进种条的旋转为牵连运动,种群微段相对于其的运动为相对运动,以种群微段中心为坐标原点 O 建立空间运动参考系并对该模型进行动力学分析,如图 5a 所示,受力简化至 yOz 平面内开展动力学分析,如图 5b 所示。

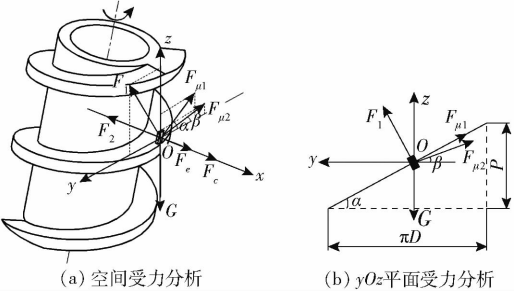


图 5 种群在供种装置的动力学分析

Fig. 5 Mechanics analysis of seeds in feeding device

根据质点相对运动动力学知识,建立种群微段动力学基本方程

$$\begin{cases} m\boldsymbol{a}_r = \boldsymbol{F}_e + \boldsymbol{F}_c + \boldsymbol{F} \\ F_e = mr\omega_e^2 \\ F_c = 2mr\omega_e\omega_r \\ \omega_a = \omega_e - \omega_r \\ F_{\mu 1} = \mu_1 F_1 \\ F_{\mu 2} = \mu_2 F_2 \\ G = mg \\ \tan\alpha = \frac{P}{\pi D} \end{cases} \quad (8)$$

- 式中
- m ——种群微段质量,kg

$\boldsymbol{a}_r$ ——种群微段相对加速度, m/s^2

$\boldsymbol{F}_e$ ——种群微段离心力,N

$\boldsymbol{F}_c$ ——种群微段科氏惯性力,N

$\boldsymbol{F}$ ——种群微段所受外力合力,N

r ——种群微段所处半径,mm

ω_a ——种群微段绝对角速度, rad/s

ω_e ——螺旋进种条角速度, rad/s

ω_r ——种群微段与螺旋进种条相对角速度, rad/s

μ_1 ——螺旋叶片与种子间摩擦因数,取 0.3

μ_2 ——种群间的内摩擦因数,取 0.5

F_1 ——螺旋叶片对种群微段的支反力,N

F_2 ——外侧种群对种群微段的支反力,N

$F_{\mu 1}$ ——螺旋叶片对种群微段的摩擦力,N

$F_{\mu 2}$ ——外侧种群对种群微段的摩擦力,N

g ——重力加速度, m/s^2

G ——种群微段的重力,N

将加速度沿坐标轴分解, a_{r-x} 、 a_{r-y} 、 a_{r-z} 分别为在 3 个坐标轴上的投影,取各坐标轴方向为正,并由式(8)可得

$$\begin{cases} ma_{r-x} = m \frac{d^2x}{dt^2} = m \frac{dv_{r-x}}{dt} = F_e + F_c - F_2 \\ ma_{r-y} = m \frac{d^2y}{dt^2} = m \frac{dv_{r-y}}{dt} = F_1 \sin\alpha - \mu_1 F_1 \cos\alpha - \mu_2 F_2 \cos\beta \\ ma_{r-z} = m \frac{d^2z}{dt^2} = m \frac{dv_{r-z}}{dt} = F_1 \cos\alpha + \mu_1 F_1 \sin\alpha + \mu_2 F_2 \sin\beta - mg \end{cases} \quad (9)$$

- 式中
- a_{r-x} ——种群微段相对加速度沿 x 轴分量, m/s^2

a_{r-y} ——种群微段相对加速度沿 y 轴分量, m/s^2

a_{r-z} ——种群微段相对加速度沿 z 轴分量, m/s^2

β ——种群运动降角, ($^\circ$)

种群微段相对于螺旋进种条做稳定运动时,在 3 个轴上的加速度分量分别为

$$\begin{cases} a_{r-x} = r\omega_r^2 \\ a_{r-y} = a_{r-z} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

又据螺旋升角关系式得

$$\begin{cases} \sin\alpha = \frac{P}{\sqrt{P^2 + 4\pi^2 r_0^2}} \\ \cos\alpha = \frac{2\pi r_0}{\sqrt{P^2 + 4\pi^2 r_0^2}} \end{cases} \quad (11)$$

联立式(8)~(11)可得

$$u(\omega_a, \omega_e, r) = \frac{\mu_2 \omega_a^2 [2\pi r (2\pi r + P\mu_1) \omega_a - P(P - 2\pi r \mu_1) (\omega_e - \omega_a)]}{(P - 2\pi r \mu_1) \sqrt{P^2 (\omega_e - \omega_a)^2 + 4\pi^2 r^2 \omega_a^2}} \quad (12)$$

式(12)是对种群微段在螺旋进种条稳定输送达到平衡状态时的动力学分析结果,可知当供种装置相关结构参数以及油菜颗粒机械物理特性确定时,种群微段的绝对角速度与螺旋进种条角速度以及种群微段与中心转轴的距离 r 有关,当螺旋进种条角速度一定时,种群微段的绝对角速度与半径 r 成反比,即越靠近螺旋进种条中心种群微段的绝对角速度越高,与前述运动假设契合,证明分析合理。

当螺旋角速度 ω_e 逐渐增大,处于螺旋进种条内半径 r_0 ($r_0 = d/2$) 处的种群最先达到临界状态,此时种子随着螺旋进种条一起转动无相对运动,且有向上运动的趋势,则

$$\begin{cases} a_r = 0 \\ F_c = 0 \\ \beta = 0 \end{cases} \quad (13)$$

根据上文分析可知种群微段受到的外侧种群支反力 F_2 逐渐增大,外侧种群对其摩擦力 $F_{\mu 2}$ 随之增大,为在 y 轴上达到受力平衡,则螺旋叶片对种群微段的支反力也需增大,此时螺旋叶片对种群微段的摩擦力 $F_{\mu 1}$ 逐渐减小至 0 并沿相反方向增大为 $F'_{\mu 1}$,且在临界状态时 $F'_{\mu 1}$ 为最大静摩擦力,为 $F'_{\mu 1} = \mu_1 F_1$ 。

结合式(8)~(13)可得此时螺旋临界角速度为

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{g(\sin\alpha - \mu_1 \cos\alpha)}{\mu_2 r_0 (\cos\alpha + \mu_1 \sin\alpha)}} \quad (14)$$

式中 ω_0 ——螺旋进种条临界角速度,rad/s

联立式(11)、(14)可得螺旋进种条临界转速为

$$n_0 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g(P - \pi r_0 \mu_1)}{r_0 \mu_2 (\pi r_0 + P\mu_1)}} \quad (15)$$

式中 n_0 ——螺旋进种条临界转速,r/min

由式(15)可知,当供种装置材料及油菜品种选定之后,该临界转速仅与螺旋进种条的内径及螺旋线导程有关,根据前文参数设计分析,代入各参数值计算可得临界转速 $n_0 \leq 105$ r/min。

3.2 供种装置运动学分析

当螺旋进种条的工作转速 $n_e < n_0$ 时,种群颗粒得以正常输送。取处于任意半径为 r 处的种群微段,对其开展运动学分析,如图 6 所示。由图 6 可知,种群微段的绝对运动速度 v_a 是由两种运动合成:绕螺旋轴回轮的牵连运动 v_e 和在螺旋展开线

方向上与螺旋叶面的相对运动 v_r 。将种群微段的绝对速度分解为周向速度 v_y 和轴向速度 v_z 。

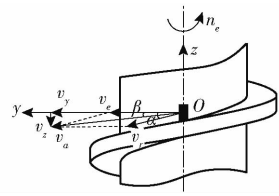


图 6 种群在供种装置的运动学分析

Fig. 6 Kinematic analysis of seeds in feeding device

由图 6 速度分析及三角形几何关系可知

$$\begin{cases} v_a = v_e + v_r \\ \frac{v_a}{\sin(180^\circ - \alpha)} = \frac{v_e}{\sin(\alpha - \beta)} \\ v_y = v_a \cos\beta \\ v_z = v_a \sin\beta \\ \tan\alpha = \frac{P}{\pi D} \\ v_e = \omega_e r \\ \omega_e = \frac{2\pi n_e}{60} \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可得种群微段的周向速度为

$$v_y = \frac{n_e P}{60} \frac{1}{\tan\alpha - \tan\beta} \quad (17)$$

轴向速度为

$$v_z = \frac{n_e P}{60} \frac{\tan\beta}{\tan\alpha - \tan\beta} \quad (18)$$

由以上运动分析可知,装置正常供种时种群颗粒的运动轨迹为一条螺旋线,该螺旋线中心与供种装置中心轴线重合。电机通过主轴带动螺旋进种条旋转,其中大部分能量消耗在保持颗粒进行圆周运动上;种群轴向速度 v_z 直接影响供种装置的供种速率且呈正相关关系。轴向速度与螺旋进种条转速 n_e 、螺旋线导程 P 、螺旋升角 α 和物料运动降角 β 有关。由式(7)可知螺旋升角 α 又与螺旋线导程 P 和螺旋进种条外径 D 有关;据经验可知种群运动降角 β 与螺旋进种条转速 n_e 及其外径 D 有关,一旦螺旋进种条结构确定,垂直输送速度 v_z 就仅由转速 n_e 决定。在相同转速条件下, v_z 随 P 增大而减小,随 D 增大而增大;且 v_z 与螺旋进种条转速 n_e 呈正相关关系,说明在临界转速 n_0 范围之内适当增加转速利于有效供种。以此为基础开展供种性能试验。

4 供种装置供种性能试验

4.1 试验材料与装置

试验以华油杂 62 为试验材料,千粒质量 4.68 g,含水率 4.58%。采用自制的供种装置试验台开展试

验研究,如图 7 所示。

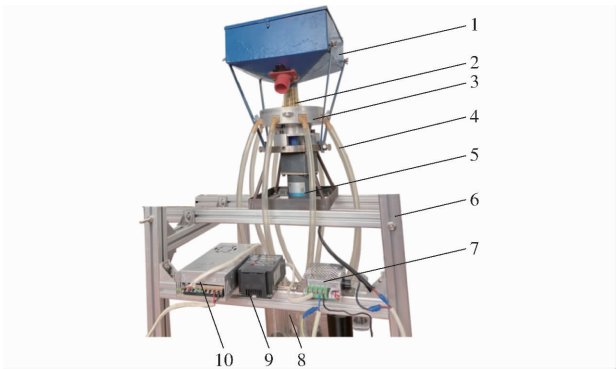


图 7 供种装置试验台
Fig.7 Platform of seed feeding device

1. 种箱 2. 供种装置 3. 分种装置 4. 导种管 5. 电机 6. 试验台架 7. 转速调节器 8. 盛种杯 9. 时控开关 10. 变压器

4.2 试验设计与方法

为获得较优的螺旋进种条供种性能参数,并验证理论分析的合理性,开展三因素三水平二次回归正交组合试验。通过前述理论分析及前期预试验确定影响供种性能的主要因素及其取值范围:螺旋转速 60 ~ 100 r/min,螺旋叶片宽度 3 ~ 5 mm 和螺旋线导程 13 ~ 25 mm。试验均以供种速率、供种速率稳定变异系数和种子破损率为响应指标。试验因素编码如表 2 所示。

编码	因素		
	转速	叶片宽度	导程
	$x_1/(r \cdot \min^{-1})$	x_2/mm	x_3/mm
-1	60	3	13
0	80	4	19
1	100	5	25

试验按照 GB/T 9478—2005《谷物条播机 试验方法》进行供种装置供种性能试验和测定^[26]。试验中收集集排器 8 个出种口处 1 min 排出的种子量总和,称量,每组试验条件下重复 5 次,计算不同处理下供种速率、供种速率稳定变异系数和种子破损率。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 试验结果

试验结果如表 3 所示,试验方案设计及结果分析应用数据处理软件 Design-Expert 8.0.6 完成,其中 X_1 、 X_2 和 X_3 为因素编码值。

4.3.2 回归分析与显著性检验

运用软件 Design-Expert 8.0.6 对试验数据进行多元回归拟合,得到以供种速率 Y_1 为响应函数,以各因素编码值为自变量的回归数学模型为

表 3 试验结果						
Tab.3 Experiment results						
试验 序号	因素			供种速率 $Y_1/(g \cdot \min^{-1})$	变异系数 $Y_2/\%$	破损率 $Y_3/\%$
	X_1	X_2	X_3			
1	-1	-1	0	55.00	2.11	1.84
2	-1	1	0	125.37	2.16	0.99
3	-1	0	-1	34.53	2.30	0.86
4	-1	0	1	145.83	2.75	0.44
5	1	1	0	199.67	1.31	2.35
6	1	-1	0	90.97	0.79	2.55
7	1	0	1	239.83	2.44	3.06
8	1	0	-1	62.93	1.09	1.23
9	0	-1	-1	34.47	1.73	1.13
10	0	-1	1	109.23	1.30	2.19
11	0	1	1	254.17	2.81	1.39
12	0	1	-1	53.60	1.04	0.68
13	0	0	0	118.07	0.33	0.13
14	0	0	0	114.17	0.13	0.47
15	0	0	0	116.07	0.37	1.01
16	0	0	0	111.97	0.68	0.29
17	0	0	0	112.90	0.12	0.37

$$Y_1 = 114.64 + 29.08X_1 + 42.89X_2 + 70.44X_3 + 9.58X_1X_2 + 16.4X_1X_3 + 31.45X_2X_3 + 5.51X_1^2 - 2.4X_2^2 + 0.63X_3^2 \quad (19)$$

对供种速率进行方差分析,如表 4 所示。结果显示:供种速率回归模型极显著($p < 0.01$),说明该模型具有统计学意义; X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 影响极显著($p < 0.01$), X_1^2 影响显著($p < 0.05$),其他因子影响不显著;供种速率失拟项 p 值为 0.119 1,回归方程失拟不显著,在试验范围内模型与实际情况拟合较好。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_1 = 113.85 + 29.08X_1 + 42.89X_2 + 70.44X_3 + 9.58X_1X_2 + 16.4X_1X_3 + 31.45X_2X_3 + 5.42X_1^2 \quad (20)$$

表 4 供种速率方差分析					
Tab.4 Variance analysis of seed feeding rate					
方差来源	平方和	自由度	均方差	F	p
模型	66 730.51	9	7 414.50	567.80	<0.000 18 **
X_1	6 766.92	1	6 766.92	518.20	<0.000 1 **
X_2	14 718.13	1	14 718.13	1 127.10	<0.000 1 **
X_3	39 695.76	1	39 695.76	3 039.86	<0.000 1 **
X_1X_2	367.30	1	367.30	28.13	0.001 1 **
X_1X_3	1 075.84	1	1 075.84	82.39	<0.000 1 **
X_2X_3	3 957.04	1	3 957.04	303.03	<0.000 1 **
X_1^2	128.04	1	128.04	9.81	0.016 6 *
X_2^2	24.21	1	24.21	1.85	0.215 5
X_3^2	1.67	1	1.67	0.13	0.731 3
失拟	67.22	3	22.41	3.71	0.119 1
误差	24.19	4	6.05		
总和	66 821.92	16			

注:**表示极显著($p < 0.01$),*表示显著($p < 0.05$),下同。

由式(20)回归系数可知,供种速率的因素影响由大到小为导程、叶片宽度、转速。供种速率分别随着转速、叶片宽度和导程的增加而增加,且导程影响最大,三者之间对供种速率的影响符合理论分析结果,证明了理论分析合理性。

以供种速率稳定性变异系数 Y_2 为响应函数、以各因素编码值为自变量的回归数学模型为

$$Y_2=0.33-0.46X_1+0.17X_2+0.39X_3+0.12X_1X_2+0.22X_1X_3+0.55X_2X_3+0.85X_1^2+0.42X_2^2+0.97X_3^2 \quad (21)$$

对供种速率稳定性变异系数进行方差分析,如表 5 所示。结果显示:供种速率稳定性变异系数回归模型极显著 ($p < 0.01$),说明该模型具有统计学意义; X_1 、 X_3 、 X_2X_3 、 X_1^2 、 X_3^2 影响极显著 ($p < 0.01$), X_2 、 X_2^2 影响显著 ($p < 0.05$),其他因子影响不显著;供种速率稳定性变异系数失拟项 p 值为 0.670 4,回归方程失拟不显著,在试验范围内模型与实际情况拟合较好。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_2=0.33-0.46X_1+0.17X_2+0.39X_3+0.55X_2X_3+0.85X_1^2+0.42X_2^2+0.97X_3^2 \quad (22)$$

表 5 供种速率稳定性变异系数方差分析
Tab.5 Variance analysis of stability variation coefficient of seed feeding rate

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	p
模型	13.18	9	1.46	34.73	<0.000 1 **
X_1	1.70	1	1.70	40.36	0.000 4 **
X_2	0.24	1	0.24	5.73	0.047 9 *
X_3	1.23	1	1.23	29.23	0.001 0 **
X_1X_2	0.055	1	0.055	1.31	0.290 1
X_1X_3	0.20	1	0.20	4.80	0.064 6
X_2X_3	1.21	1	1.21	28.69	0.001 1 **
X_1^2	3.01	1	3.01	71.42	<0.000 1 **
X_2^2	0.75	1	0.75	17.68	0.004 0 *
X_3^2	3.99	1	3.99	91.57	<0.000 1 **
失拟	0.087	3	0.029	0.56	0.670 4
误差	0.21	4	0.052		
总和	14.00	16			

由式(22)回归系数可知,供种速率稳定性变异系数的因素影响由大到小为转速、导程、叶片宽度。

以破损率 Y_3 为响应函数、以各因素编码值为自变量的回归数学模型为

$$Y_3=0.45+0.63X_1-0.29X_2+0.4X_3+0.16X_1X_2+0.56X_1X_3-0.088X_2X_3+0.76X_1^2+0.71X_2^2+0.18X_3^2 \quad (23)$$

对破损率进行方差分析,如表 6 所示。结果显示:破损率回归模型极显著 ($p < 0.01$),说明该模型

具有统计学意义; X_1 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 影响极显著 ($p < 0.01$), X_2 影响显著 ($p < 0.05$),其他因子影响不显著;破损率失拟项 p 值为 0.775 1,回归方程失拟不显著,在试验范围内模型与实际情况拟合较好。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_3=0.53+0.63X_1-0.29X_2+0.4X_3+0.56X_1X_3+0.77X_1^2+0.72X_2^2 \quad (24)$$

表 6 破损率方差分析
Tab.6 Variance analysis of damage rate

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	p
模型	11.68	9	1.30	15.79	0.000 7 **
X_1	3.20	1	3.20	38.94	0.000 4 **
X_2	0.66	1	0.66	8.05	0.025 2 *
X_3	1.26	1	1.26	15.38	0.005 7 **
X_1X_2	0.11	1	0.11	1.29	0.294 3
X_1X_3	1.27	1	1.27	15.40	0.005 7 **
X_2X_3	0.031	1	0.031	0.37	0.560 9
X_1^2	2.46	1	2.46	29.92	0.000 9 **
X_2^2	2.15	1	2.15	26.14	0.001 4 **
X_3^2	0.14	1	0.14	1.65	0.240 3
失拟	0.13	3	0.042	0.38	0.775 1
误差	0.45	4	0.11		
总和	12.26	16			

由式(24)回归系数可知,破损率的因素影响由大到小为转速、导程、叶片宽度。

4.3.3 响应曲面分析

供种速率稳定性变异系数和破损率是评价本集排器排种性能的关键指标,应用响应曲面分析各因素对两指标的影响,如图 8、9 所示。由图 8a、9a 可知,当导程置于零水平(19 mm),转速一定时,变异系数和破损率都随叶片宽度的增加先缓慢下降后呈上升趋势;叶片宽度一定时,变异系数随转速的增加呈先降后升趋势且变化明显,破损率随转速的增加先缓慢下降后呈快速上升趋势。由图 8b、9b 可知,当叶片宽度置于零水平(4 mm),转速一定时,变异系数随导程的增加呈先降后快速上升趋势,破损率随导程的增加呈上升趋势且在转速较高时变化明显;导程一定时,变异系数随转速增加呈先降后升趋势,破损率在不同导程时随转速的变化趋势有些不同,但整体变化趋势为持续上升状态。由图 8c、9c 可知,当转速置于零水平(80 r/min),导程取较小值时,变异系数随叶片宽度的增加呈先降后缓慢上升趋势,导程取较大值时,变异系数随叶片宽度的增加呈上升趋势,导程一定时,破损率随叶片宽度的增加呈先降后升趋势;当叶片宽度一定时,变异系数随导程的增加呈先降后升趋势且在叶片宽度较大时变化明显,破损率随导程的增加呈缓慢上升趋势。

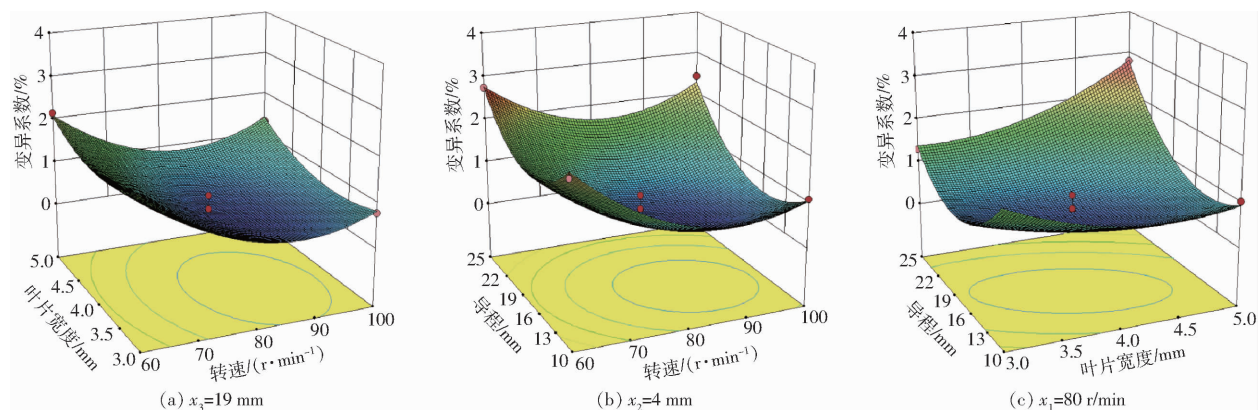


图8 各因素对供种速率稳定性变异系数的影响

Fig.8 Effects of various factors on stability variation coefficient of seed feeding rate

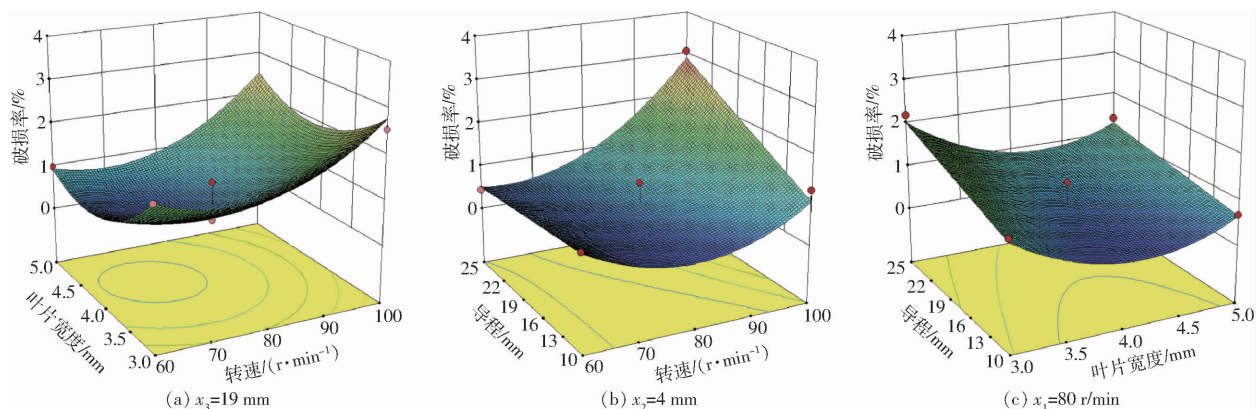


图9 各因素对破损率的影响

Fig.9 Effects of various factors on damage rate

采用 Design-Expert 8.0.6 软件回归方程及响应曲面分析可得,各因素的较优参数组合为:转速 80.8 r/min、叶片宽度 4.1 mm 及导程 14.7 mm;此时集排器供种装置的供种速率为 93.2 g/min,供种速率稳定性变异系数为 0.3%,破损率为 0.33%。

选取螺旋进种条转速为 81 r/min、叶片宽度为 4 mm 及导程为 15 mm,进行 5 次重复试验,试验测得集排器供种装置的供种速率为 92.7 g/min,供种速率稳定性变异系数为 0.32%,破损率为 0.29%,试验结果与理论结果基本一致;且排种的均匀性、供种速率稳定性及破损率满足国家排种性能指标,可实现精量播种。

根据国标要求的供种速率稳定性变异系数不大于 1.3% 以及破损率不大于 0.5%^[27] 设定指标范围,可得供种速率为 36.55 ~ 190.94 g/min,播量可调且可满足不同的播种量需求;结合机组作业速度为 6 ~ 10 km/h,作业幅宽为 2 m,计算可得播量为 1.10 ~ 9.55 kg/hm²。实际田间作业中针对不同播期、不同地区的播量需求及工作效率要求,可得到相应的供种速率,与之对应的有螺旋进种条结构与转速的参数匹配组合,结构参数通过更换螺旋进种条

来实现,转速通过转速调节器来实现,可满足不同的播量及作业速度要求。

5 田间试验

为进一步检验油菜旋转盘式高速集排器螺旋供种装置的供种效果,于 2019 年 10 月 1 日在华中农业大学现代农业科技试验基地以东方红 LX954 型拖拉机为动力、2BFQ-8 型油菜联合直播机为平台、供种装置较优参数组合下的集排器开展了油菜播种功能性试验,如图 10a 所示,前茬作物为水稻,油菜品种为华油杂 62。播种机作业速度为 6 km/h,工作幅宽为 2 m,同时播种 8 行,行距为 210 mm。于田间播种 35 d 之后每厢取 3 个点测定 1 m × 2 m 范围内 8 行的种植密度^[28],苗期长势如图 10b 所示。其播种均匀性变异系数为 7.8%,种植密度 57 ~ 72 株/m²,满足 NY/T 2709—2015《油菜播种机作业质量》^[29] 技术要求。

为验证油菜旋转盘式集排器高速作业适应性,于 2019 年 9 月 24—29 日在浙江温州苍南滩涂地试验基地以履带自走式油菜精量播种机为平台开展播种试验,如图 11a 所示。油菜品种为华油杂 62,播种机作业速度为 10 km/h,工作幅宽为 2.3 m,同时



图 10 油菜播种田间试验与苗期长势
Fig. 10 Field experiment and growth for rapeseed



图 11 油菜旋转盘式高速集排器田间示范
Fig. 11 Field demonstration of spinning disc high-speed metering device for rapeseed

播种 8 行,行距为 250 mm,播种 3.67 hm²。据上述测定方法测得播种均匀性变异系数为 9.4%,种植密度 48 ~ 60 株/m²,苗期长势如图 11b 所示,满足实际生产要求。

6 结论

- (1)结合油菜机械物理特性及种植农艺要求,开发了一种螺旋进种条结构,研制了油菜旋转盘式高速集排器供种装置,确定螺旋进种条关键结构参数:外径为 26 mm、叶片宽度为 2 ~ 6 mm 及导程为 13 ~ 25 mm;确立螺旋供种装置最大临界转速为 105 r/min。
- (2)采用三因素三水平二次回归正交组合试验,建立了供种速率、供种速率稳定变异系数、破损率与转速、叶片宽度、导程之间的数学模型,分析了各因素对供种速率、供种速率稳定变异系数和破损率的影响,得出较优参数组合为:转速 81 r/min、叶片宽度 4 mm、导程 15 mm。在该参数组合下开展验证试验,得到集排器螺旋供种装置的供种速率为 92.7 g/min,供种速率稳定性变异系数为 0.32%,破损率为 0.29%,可满足油菜旋转盘式高速集排器稳定播种要求。
- (3)田间试验表明机组作业速度分别为 6、10 km/h 时,油菜播种均匀性变异系数为 7.8% 和 9.4%,种植密度为 57 ~ 72 株/m² 和 48 ~ 60 株/m²,集排器可实现高速播种,满足油菜种植农艺要求。

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]. 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)

[2] 万星宇,廖庆喜,廖宜涛,等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报, 2021,40(2):24-44.
WAN Xingyu, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Situation and prospect of key techology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021,40(2):24-44. (in Chinese)

[3] 中国机械工业信息研究院. 2020 年中国农业机械工业年鉴[M]. 北京:机械工业出版社,2021.

[4] RAJAIAH P, MANI I, PARRAY R A, et al. Design and development of precision planter for paddy direct seeding[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2020, 57(4): 302-314.

[5] 李兆东,杨文超,张甜,等. 油菜高速精量排种器槽齿组合式吸种盘设计与吸附性能试验[J]. 农业工程学报,2019, 35(1):12-22.
LI Zhaocong, YANG Wenchao, ZHANG Tian, et al. Design and suction performance test of sucking-seed plate combined with groove-tooth structure on high speed precision metering device of rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 12-22. (in Chinese)

[6] LEI Xiaolong, HU Hongji, WU Wencheng, et al. Seed motion characteristics and seeding performance of a centralised seed metering system for rapeseed investigated by DEM simulation and bench testing[J]. Biosystems Engineering, 2021, 203(22): 22-33.

[7] COETZEE C J, LOMBARD S G. Discrete element method modelling of a centrifugal fertilizer spreader[J]. Biosystems Engineering, 2011, 109(4): 308-325.

[8] KHAN A U, MCCOLIY H F. High speed precision centrifugal seed planting[J]. Transactions of the ASAE, 1971,14(5): 972-975.

[9] 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]. 农业机械学报,2014,45(增刊):40-46.
CAO Xiying, LIAO Qingxi, CONG Jinling, et al. Design and experiment on metering hole structure of centrifugal precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 40-46. (in Chinese)

- [10] 王都. 集排离心式油菜精量排种系统设计与仿真分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019.
- [11] GAO Xiaojun, ZHOU Zhongyan, XU Yang, et al. Numerical simulation of particle motion characteristics in quantitative seed feeding system[J]. Powder Technology, 2020, 367(10): 643–658.
- [12] 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 feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 10–18. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] 韩豹, 孟繁超, 梁丽娜, 等. 粳稻定向播种装置供种机构性能数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 22–29. HAN Bao, MENG Fanchao, LIANG Li'na, et al. Numerical simulation and experiment on performance of supplying seeds mechanism of directional precision seeding device for japonica rice[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 22–29. (in Chinese)
- [16] 李沐桐, 李天宇, 官晓东, 等. 锥盘排种器离心推送结构设计与充种机理分析[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 77–85. LI Mutong, LI Tianyu, GUAN Xiaodong, et al. Design on push structure of centrifugal cone seed-metering device and its filling mechanism analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 77–85. (in Chinese)
- [17] 王磊, 廖宜涛, 廖庆喜, 等. 气送式油菜播种机集排器供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 75–85. WANG Lei, LIAO Yitao, LIAO Qingxi, et al. Design and test on centralized metering seed feeding device of air-assisted planter for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 75–85. (in Chinese)
- [18] 王磊, 席日晶, 廖宜涛, 等. 油麦兼用型气送式集排器匀种涡轮设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 62–72, 97. WANG Lei, XI Rijing, LIAO Yitao, et al. Design and test on even seeding turbine of air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 62–72, 97. (in Chinese)
- [19] 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 seeder for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 211–213. (in Chinese)
- [20] 刘晓鹏, 肖文立, 马磊, 等. 油菜联合直播机组合式船型开沟器设计与开沟质量试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 79–87. LIU Xiaopeng, XIAO Wenli, MA Lei, et al. Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 79–87. (in Chinese)
- [21] 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.
- [22] TEJCHMAN J. Confined granular flow in silos: experimental and numerical investigations[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2013.
- [23] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械手册(上)[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 2007.
- [24] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械手册(下)[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 2007.
- [25] 雷小龙. 油麦兼用型气送式集排器设计及其工作机理[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 谷物条播机 试验方法: GB/T 9478—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [27] 中华人民共和国农业部. 播种机质量评价技术规范: NY/T 1143—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [28] 杨松, 廖庆喜, 陈立, 等. 2BFQ-6 型油菜精量联合直播机播种油菜的田间植株分布规律[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 23–28. YANG Song, LIAO Qingxi, CHEN Li, et al. Distribution of rapeseed sowed by 2BFQ-6 precision planter[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 23–28. (in Chinese)
- [29] 中华人民共和国农业部. 油菜播种机作业质量: NY/T 2709—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.