doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.020

圆盘滑刀式小粒径蔬菜窄行密植播种机设计与试验

李运通[1]　郑　娟[1]　张百祥[1]　刘　海[2]　廖庆喜[1,3]　廖宜涛[1,3]

(1.华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2.武汉市农业科学院农业机械化研究所, 武汉 430065;
3.农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对菠菜等小粒径蔬菜种子窄行密植种植农艺中播种均匀性要求高和缺乏适用播种机械等问题,设计了一种集旋耕起垄、开沟、播种、覆土等功能于一体的窄行密植精密播种机,实现密植蔬菜垄上窄行精量播种作业。阐述了播种机整机设计方案,设计了开沟-排种总成;通过分析气力针式行星轮系窄行密植多行并联精密排种器投种过程种子受力与运动,明确了影响落种轨迹及株距均匀性的主要因素;通过构建开沟器与土壤接触力学模型,确定了开沟器圆盘、滑刀式分土板和投种口结构参数;开展开沟器作业过程离散元仿真,以开沟深度、滑刀式分土板倾角、作业速度为试验因素,以土壤扰动量和开沟深度变异系数为试验指标,进行二次回归正交组合试验,得到开沟器各参数最优组合为开沟深度 45.45 mm、滑刀式分土板倾角 20.14°、作业速度 0.40 m/s。田间作业开种沟试验结果表明,最优参数组合下,圆盘-滑刀组合式开沟器开沟深度变异系数为 9.57%,土壤扰动量为 13.37 cm^2,开沟性能较优;田间播种试验结果表明,窄行密植精密播种机播种作业后单行苗数变异系数、各行苗数一致性变异系数均不高于 9.95%,满足小粒径蔬菜种子窄行密植播种农艺要求。

关键词: 播种机; 圆盘滑刀开沟器; 窄行; 密植

中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0197-13　　**OSID**:

Design and Testing of Disc-sliding Knife Narrow-row Precision Seeder

LI Yuntong[1]　ZHENG Juan[1]　ZHANG Baixiang[1]　LIU Hai[2]　LIAO Qingxi[1,3]　LIAO Yitao[1,3]

(1. *College of Engineering*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*
2. *Institute of Agricultural Mechanization*, *Wuhan Academy of Agricultural Sciences*, *Wuhan* 430065, *China*
3. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: In response to issues such as the high requirements for uniform seeding and the lack of suitable sowing machinery when using narrow-row dense planting agronomy for small-seed vegetables like spinach, a narrow-row precision seeder that integrated functions such as rotary tilling, ridging, furrowing, seeding, and soil covering was designed. This seeder achieved precise sowing in narrow rows on ridges for densely planted vegetables like spinach. The study outlined the overall design of the seeder, with a focus on the design of the furrowing and seed dispensing assembly. By analyzing the forces and movement of seeds during the dispensing process in a pneumatic needle-type planetary gear system for narrow-row multi-row parallel precision seeding, the main factors affecting seed drop trajectory and plant spacing uniformity were identified. A mechanical model of the furrow opener's interaction with the soil was constructed, and the structural parameters of the furrow opener disc, sliding knife-type soil separator, and seed drop opening were determined. A discrete element simulation analysis of the furrow opener's operation was conducted, using furrow depth, sliding knife-type soil separator inclination, and operating speed as test factors, with soil disturbance and furrow depth coefficient of variation as test indicators. A second-order regression orthogonal combination experiment was carried out to determine the optimal parameter combination for the furrow opener as a furrow depth of 45.45 mm, a sliding knife-type soil separator inclination of 20.14°, and an operating speed of 0.40 m/s. Field furrow opening tests showed that under

收稿日期: 2024-08-13　修回日期: 2024-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51975238)和武汉市农业科学院创新项目(XKCX202406-1)

作者简介: 李运通(1998—),男,博士生,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liyuntong7188@163.com

通信作者: 廖宜涛(1982—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: liaoetao@mail.hzau.edu.cn

the optimal parameter combination, the coefficient of variation in furrow depth for the disc-sliding knife combination furrow opener was 9.57%, with a soil disturbance amount of 13.37 cm^2, indicating superior furrow opening performance. Field seeding tests showed that the coefficients of variation for the number of seedlings per row and consistency of seedlings across rows after sowing with the narrow-row precision seeder were no more than 9.95%, meeting the agronomic requirements for narrow-row dense planting of small-seed vegetables.

Key words: seeder; disc-sliding knife furrow opener; narrow-row; dense planting

0 引言

优良的栽培模式及配套机械化生产是提高作物产量的重要手段,窄行密植种植模式可合理缩小植株行株距,均匀植株分布,改善光照条件,保证作物稳产高产[1-2]。但由于部分作物种植密度大、行株距小,对播种机播种均匀性要求高,常规机械化精密播种难以控制种植行距,迫切需要配套机械化播种装备[3-4]。

目前参类作物和经济类叶菜多采用窄行密植栽培模式,近年来国内外学者开展了窄行密植排种器研究[5-6],如高筱钧等[7]设计了三七气吸式排种器,廖宜涛等[8]设计了管针式西洋参集排器等,均可满足作物窄行密植排种需求。

为保证导种和投种环节种子的有序状态,提高种子田间分布均匀性,现有播种机多增加导种过程种子约束或降低投种高度[9]。针对窄行密植播种机导种,赖庆辉等[10]设计链勺式人参精密排种器,加工开沟-排种单体式人参播种机;廖宜涛等[11]设计了一种多行并联行星轮点播式全约束导种装置,并开发窄行密植西洋参精密播种机。上述窄行密植播种机通过全约束导种、点播等方式实现作物单粒精播,适用于窄行密植模式,但整机结构较为复杂[12-13]。

为提高开沟器作业性能,学者们利用离散元仿真、遗传算法等多种手段开展开沟器研究。针对开沟器播深难以控制问题,赵淑红等[14]搭建试验台架,利用遗传算法 NSGA-Ⅱ开展滑推式开沟器结构参数优化,提高了开沟器回土性能和播深控制性能;李心志等[15]为合理设计油菜移栽机开沟装置,通过离散元试验优化开沟器结构参数和运动参数,提高了沟宽稳定性,降低了土壤扰动量。上述研究在一定程度上提高了开沟器作业性能,但常规开沟器因存在土壤扰动大、沟形稳定性低等问题,配套窄行距播种开沟装置较少,限制了窄行密植播种机推广应用[16-17]。

本文基于前期研制的气力针式行星轮系多行并联精密排种器,设计一种窄行密植精密播种机;通过分析排种器落种点和种子运动轨迹,确定开沟-排种总成关键参数;分析气力针式行星轮系精密排种器运动轨迹,开展离散元仿真与台架试验,设计并优化圆盘-滑刀组合式开沟器结构参数,以提升开沟器性能;开展田间试验,以验证开沟器与播种机作业效果。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

窄行密植精密播种机整机结构如图 1 所示,其主要由主机架、前置圆盘犁、旋耕装置、起垄整形装置、汽油旋涡式风机、开沟-排种总成、覆土装置等组成,完成旋耕碎土、起垄整形、开沟、播种、覆土作业。开沟-排种总成主要包括圆盘-滑刀组合式开沟器、气力式行星轮系窄行密植精密排种器和播深调节装置等,12 组圆盘-滑刀组合式开沟器通过主机架连接杆和开沟器横轴均布安装在播种机上。旋涡式风机为排种器提供风压,通过调节调压阀门开度可调节风压和流量。窄行密植精密播种机技术参数如表 1 所示。

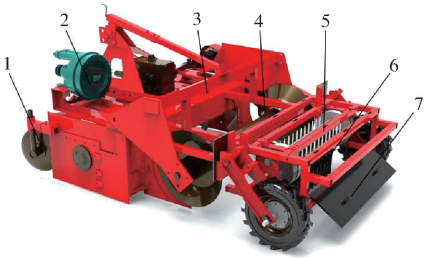


图 1 窄行密植精密播种机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of narrow-row intensive precision seeder

1. 前置圆盘犁 2. 汽油旋涡式风机 3. 旋耕装置 4. 起垄整形装置 5. 排种装置 6. 窄行密植开沟总成 7. 覆土装置

1.2 工作原理

播种机作业时,启动旋涡式风机,前置圆盘犁破土、开沟、聚土并初步形成垄沟,旋耕装置完成碎土及抛土作业,起垄整形装置压实土壤并平整垄壁及垄面,形成适宜播种的种床;开沟-排种总成完成开种沟和单粒精密排种环节,具体过程为:圆盘-滑刀组合式开沟器开出深度一致、沟形整齐的种沟,气力针式行星轮系精密排种器通过负压吸种和正压卸种排出单粒种子,种子通过投种口落入种沟内;圆盘-

表 1　播种机主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters of precision seeder

参数	数值
长×宽×高/(mm×mm×mm)	2 000×1 600×1 300
整机质量/kg	590
播种行数	12
作业速度/(km·h^{-1})	1.44～2.88
播种行距/mm	75
播种粒距/mm	80～120
播种深度/mm	0～50
垄面宽/mm	1 000
垄高/mm	150～200(可调)

滑刀组合式开沟器与气力针式行星轮系精密排种器配合作用,保证开沟深度与播种深度,实现窄行密植;覆土装置回填种沟土壤并平整垄面,完成覆土作业。

2　关键部件设计与参数确定

种床整理是作物播种作业前重要环节,稳定的土层深度和适宜的厢面平整度是作物生长发育的必备条件[18];旋耕装置破碎地表后,起垄整形装置通过柱形起垄辊和两侧的锥形辊将土壤形成垄面平整的梯形垄。开沟和排种是播种作业关键步骤,开沟-排种总成是播种机核心工作部件[19-20],开沟器开出适宜种沟,排种器将种子从种仓由种群定量分离形成连续种子流,保持均匀有序状态入土。

2.1　起垄整形装置设计

起垄整形装置由柱形起垄辊和两侧锥形辊等组成,起垄整形作业工艺过程如图 2 所示。起垄整形装置采用主动式起垄,其运动轨迹为随机具前进运动和自身旋转运动的合成运动[21]。起垄辊外形曲线决定垄体形状,土壤颗粒在柱形起垄辊和两侧锥形共同作用下相互挤压,形成坚实度合理、垄型稳定的梯形垄。

柱形起垄辊直径直接影响垄面土壤坚实度,直径过小则压实力不够导致垄体土壤松软坍塌,直径过大则会过度压实垄面土壤造成开沟困难,参考现有起垄整形装备[22-23]和本播种机参数,设计柱形起垄辊直径为 180 mm。为避免两侧锥形辊接触垄沟底部造成柱形起垄辊脱离垄面,锥形辊直径需满足

$$\frac{D_t}{2} < \frac{d_t}{2} + L_3 \tag{1}$$

式中　D_t——锥形辊直径,mm

d_t——柱形辊直径,mm

L_3——垄高,取 200 mm

根据密植蔬菜种植起垄要求,垄面宽 L_1 为 1 000 mm,垄底宽 L_2 为 1 200 mm,垄高 L_3 为 200 mm,

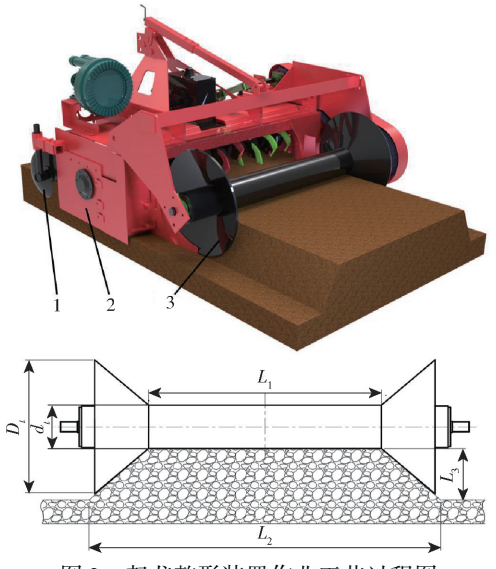


图 2　起垄整形装置作业工艺过程图

Fig. 2　Process diagram of ridge shaping operations

1. 起垄整形装置　2. 旋耕装置　3. 前置圆盘犁

代入式(1)求得 D_t < 580 mm,考虑加工要求,取 500 mm。

2.2　开沟-排种总成设计

2.2.1　排种装置结构与工作原理

排种装置性能直接决定机具播种质量[24]。气力针式行星轮系窄行密植精密排种器[9]主要由行星轮系排种机构、机架、左气室、种仓、右气室等组成,结构如图 3 所示。

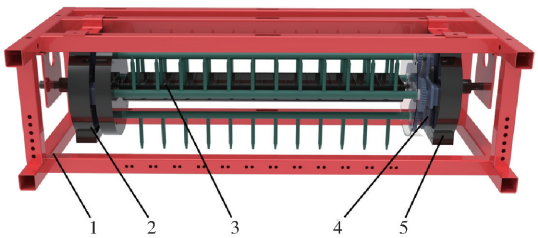


图 3　排种装置结构简图

Fig. 3　Schematic of seed metering device

1. 机架　2. 左气室　3. 种仓　4. 行星轮系排种机构　5. 右气室

行星轮系排种机构主要包括行星轮系机构、气流分配管、吸种针和链轮等。排种器为对称结构,行星轮系排种机构两端分别设置气室,为排种器提供正压和负压,行星轮系机构包括固定在太阳轮轴上的太阳轮和绕太阳轮转动且均匀分布在太阳轮周围的 4 个行星轮,气流分配管上均布用于单粒排种的吸种针,气流分配管与行星轮固定连接,两端分别穿过气室盖通到气室内,驱动轴与气室盖为刚性连接的一体结构,气室安装固定于机架上,驱动轴带动行星轮和气流分配管绕太阳轮转动。

根据菠菜等叶菜类作物所采用的窄行密植种植模式和播种农艺要求,设定播种行距为 75 mm,播种行数为 12,可得每根气流分配管上轴向均布 12 个

吸种针,吸种针型孔直径为 2.0 mm,根据前期研究[25],取吸种针长度为 80 mm。

吸种针工作区可分为吸种区、携种区、投种区和过渡区 4 个区域,其中吸种区、携种区和过渡区为负压区,投种区为正压区,如图 4 所示。工作时,位于气室外侧空心轴上的链轮在动力作用下带动行星轮架转动,行星轮架带动行星轮转动,同时行星轮与太阳轮啮合,太阳轮固定不动,行星轮绕太阳轮转动,与行星轮固接的气流分配管同步转动,进而带动吸种针转动。气流分配管运动到充种室正上方时吸种针竖直向下,在负压作用下单粒吸种,经过携种区进入投种区,气流分配管运动到充种室正下方时吸种针同样竖直向下,在正压、自重作用下卸种,完成投种作业后吸种针经过过渡区再次到达充种室正上方进行吸种动作。排种器连续工作,气流分配管和吸种针将种子群转变为均匀单粒种子,行星轮系排种机构保证低位零速投种。

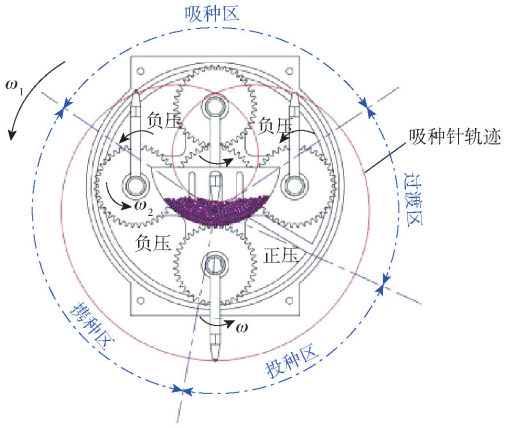


图 4 排种器工作原理图

Fig. 4 Working principle diagram of seed metering device

2.2.2 圆盘-滑刀组合式开沟器设计

开沟器是主要的触土工作部件,开沟器作业效果直接影响播种机播种质量[26]。单圆盘开沟器具有土壤扰动小、切草效果好等优点,但沟形不稳定、土壤易回流;滑刀式开沟器开沟稳定性高,但土壤扰动量大,间距较小时开沟器扰动土壤会影响相邻种沟。针对传统单圆盘式开沟器沟形不稳定造成播深不一致的问题,结合滑刀式开沟器结构优点,设计一种适用于小粒径种子垄上窄行密植种植模式的圆盘-滑刀组合式开沟器,该开沟器主要由球面圆盘、滑刀式分土板、投种口、连接杆等组成,结构如图 5 所示。球面圆盘与播种机前进方向有一偏角,滑刀式分土板一侧紧贴球面圆盘,提高开沟器通过性,作业时球面圆盘在牵引力作用下滚动前进将土切开,滑刀式分土板将土推向一侧从而形成种沟。滑刀式分土板可有效清除黏附在圆盘内侧的泥土,提高了开沟器减阻性能和种沟质量,创造了良好的种子着床环境。

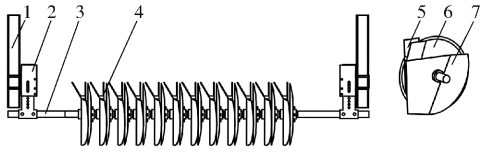


图 5 圆盘-滑刀组合式开沟器结构示意图

Fig. 5 Schematic of furrow opener structure

1. 机架 2. 仿形机构 3. 开沟器横轴 4. 圆盘-滑刀组合式开沟器 5. 投种口 6. 球面圆盘 7. 滑刀式分土板

2.2.2.1 球面圆盘

圆盘-滑刀组合式开沟器工作时,球面圆盘首先入土并向侧面挤压土壤,球面圆盘凸面一侧边缘设计有刃口,以增强入土和切土能力。以圆盘刃口处土壤颗粒为研究对象,分析其与圆盘接触时受力情况,如图 6 所示。

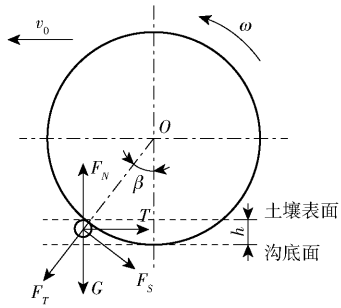


图 6 圆盘与土壤互作力学模型

Fig. 6 Mechanical model of disc-soil interaction

由土壤颗粒静力平衡可知

$$\begin{cases} F_T\sin\beta - F_S\cos\beta - T = 0 \\ F_T\cos\beta + G + F_S\sin\beta - F_N = 0 \end{cases} \tag{2}$$

式中 F_T——圆盘对土壤颗粒的作用力,N

F_S——圆盘对土壤颗粒摩擦力,N

T——种床对土壤颗粒摩擦力,N

G——土壤颗粒自身重力,N

F_N——种床对土壤颗粒的支持力,N

β——压力角,(°)

为保证圆盘顺利切土并开出种沟,需满足

$$F_T\sin\beta \geqslant F_S\cos\beta + T \tag{3}$$

设土壤颗粒与圆盘摩擦角为 φ_1,土壤之间的滑动摩擦角为 φ_2,忽略土壤颗粒质量和体积,联立式(2)、(3)可得

$$\tan\beta \geqslant \frac{\tan\varphi_1 + \tan\varphi_2}{1 - \tan\varphi_1\tan\varphi_2} \tag{4}$$

由图 6 可得

$$\cos\beta = 1 - \frac{2h}{D} \tag{5}$$

式中 D——圆盘直径,mm

h——开沟深度,mm

以常见密植蔬菜为例,菠菜播种深度为 30 ~ 60 mm,

小白菜播种深度为 10 ~ 30 mm，故取开沟深度为 30 ~ 60 mm。参照文献[27]，并开展相关试验，得到土壤颗粒与圆盘滑动摩擦角为 24°，土壤颗粒间滑动摩擦角为 37°，联立式(4)、(5)计算可得圆盘直径 $D \leqslant 200$ mm。圆盘直径过小会导致开沟器转动不灵活和易壅土等问题，故圆盘直径取 200 mm。

2.2.2.2　滑刀式分土板

滑刀式分土板包括滑刀和分土板主体，滑刀贴紧球面圆盘可清除圆盘上泥土，分土板主体固定投种口。球面圆盘凸面将土壤推挤形成种沟侧壁后滑刀切土，分土板主体将其余土壤向另一侧推挤形成种沟另一侧壁，球面圆盘与滑刀式分土板配合作用形成完整种沟。

滑刀刃口曲线影响滑刀入土阻力，是决定滑刀性能的关键因素，刃口曲线通常为抛物线函数或指数函数[28-29]，选取抛物线函数曲线作为滑刀刃口曲线。设滑刀刃口曲线方程为

$$y = a_1 x^2 \tag{6}$$

刃口曲线上任意点点 A 与点 B 斜率为

$$\begin{cases} k_1 = \tan\beta_1 = 2a_1 x_1 \\ k_2 = \tan\beta_2 = 2a_1 x_2 \end{cases} \tag{7}$$

式中　k_1、k_2——刃口曲线在点 A、B 的斜率

β_1、β_2——滑刀刃口曲线在点 A、B 的切线与 x 轴的夹角

a_1——常数

设点 A 坐标为(x_1, y_1)，点 B 坐标为(x_2, y_2)，通过坐标可得曲线上 2 点的垂直距离为

$$l_{AB} = y_2 - y_1 = a_1 x_2^2 - a_1 x_1^2 \tag{8}$$

式(7)、(8)联立可得

$$a_1 = \frac{\tan^2\beta_2 - \tan^2\beta_1}{4 l_{AB}} \tag{9}$$

根据几何关系可知，滑切角 α_1、α_2 与 β_1、β_2 互为余角，代入式(6)可得最终滑刀曲线方程为

$$y = \frac{\tan^2(90° - \alpha_2) - \tan^2(90° - \alpha_1)}{4 l_{AB}} x^2 \tag{10}$$

由式(10)可知，滑刀刃口曲线形状与滑刀刃口曲线高度 l_{AB}、初始滑切角 α_1、终止滑切角 α_2 有关。根据《农业机械设计手册》，为满足滑切条件，初始滑切角 α_1 应大于摩擦角 φ(14° ~ 38°)，结合该播种机作业工况取摩擦角 φ 为 23°，则 $\alpha_1 > 23°$，$\alpha_2 < 67°$，即滑切角为 23° ~ 67°。考虑加工限制，滑切角取 25° ~ 65°，刃口曲线按上述取值范围设计。滑刀紧贴球面圆盘，根据圆盘直径尺寸确定刃口曲线高度为 130 mm。

滑刀与分土板主体的夹角即滑刀式分土板倾角是保证种沟宽度和减小土壤阻力的关键参数[30]。以分土板主体处土壤颗粒为研究对象，建立分土板与土壤颗粒力学模型，如图 7 所示。土壤被滑刀刀刃切开后，土壤颗粒沿分土板主体向后滑移的条件为：土壤颗粒所受的水平向右合力大于水平向左合力，即

$$F_{S1} > F_f + F_{S2}\sin\sigma \tag{11}$$

其中

$$\begin{cases} F_{S1} = F_{N1}\tan\varphi_2 \\ F_f = N_1\tan\varphi_1 \\ F_{S2} = N_2\tan\varphi_1 \end{cases} \tag{12}$$

式中　F_f——分土板主体对土壤颗粒的摩擦力，N

F_{S2}——滑刀对土壤颗粒的摩擦力，N

F_{N1}——土壤种床对土壤颗粒的支持力，N

N_1——分土板主体对土壤颗粒的支持力，N

F_{S1}——土壤种床对土壤颗粒的摩擦力，N

σ——滑刀与分土板主体的夹角，即滑刀式分土板倾角，(°)

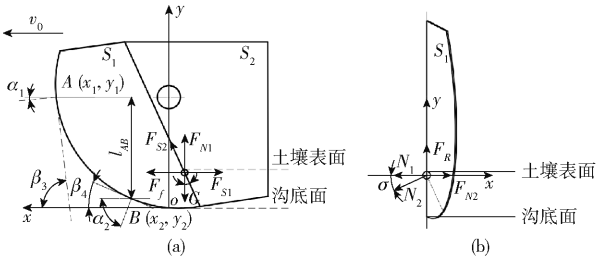


图 7　滑刀刃口曲线及分土板与土壤互作力学模型

Fig. 7　Mechanical model of sliding blade edge curve and soil divider-soil interaction

由图 7b 可知

$$N_1 + N_2\cos\sigma = F_{N2} \tag{13}$$

式中　N_2——滑刀对土壤颗粒的支持力，N

F_{N2}——土壤种床对土壤颗粒径向支持力，N

假设土壤种床对土壤颗粒在任何方向上支持力都相等，即 $F_{N1} = F_{N2}$，设滑刀式分土板对土壤颗粒支持力都相等，即 $N_1 = N_2$，联立式(11) ~ (13)可得

$$\sin\left(\sigma - \frac{\pi}{4}\right) < \frac{\tan\varphi_2 - \tan\varphi_1}{\sqrt{2}\tan\varphi_2} \tag{14}$$

将 φ_1、φ_2 代入式(14)，可得 $\sigma < 30°$，分土板倾角 σ 直接影响球面圆盘和滑刀式分土板之间的距离，为保证吸种针从球面圆盘和滑刀式分土板之间划过，需 $\sigma > 15°$，所以 $15° < \sigma < 30°$。

2.2.2.3　投种口设计

投种口结构合理性是影响株距合格率的主要因素，气力针式行星轮系窄行密植精密排种器属于低位投种无约束导种式排种器，为保证排种器排出的种子能顺利进入到开沟器投种口，进而精确落入种沟内，需确定排种器投种点与投种口位置关系。投种口尺寸与排种装置投种过程种子水

平和竖直方向位移有关,因而开展排种器投种过程种子运动规律和轨迹研究,为投种口结构与尺寸设计提供依据。

气室隔板将气室分为负压区和正压区,当气流分配管从携种段负压区运动至投种段正压区时,吸种针种子掉落完成投种。假设种子为尺寸均匀且受力作用于质心的刚性球体,吸种针吸附面气流稳定,投种过程种子力学分析如图 8 所示。

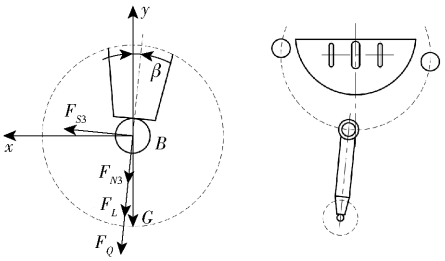


图 8 投种时种子受力分析

Fig. 8 Force analysis of seeds during sowing

投种时种子应满足

$$\begin{cases} \sum F_X = F_{S3} - G\sin\theta = 0 \\ \sum F_Y = F_{N3} + F_L + F_Q + G\cos\theta = ma \\ F_Q = \dfrac{\pi}{4}k\Delta P d_x^2 \\ F_{S3} = F_{N3}\tan\varphi \\ F_L = m\omega^2 R \\ G = mg \end{cases} \tag{15}$$

式中 F_Q——投种瞬间种子所受压差作用力,N

F_{S3}——种子受到吸种针的摩擦力,N

F_{N3}——种子受到吸种针的支持力,N

F_L——种子所受离心力,N

θ——卸种角,(°)

投种瞬间种子法向加速度为

$$a = \frac{\pi k\Delta P d_x^2}{4m} + \omega^2 R + g\left(\frac{\sin\theta}{\tan\varphi} + \cos\theta\right) \tag{16}$$

式中 k——压力差系数

m——种子质量,kg

d_x——种子受压力差作用直径,m

ω——吸种针角速度,rad/s

R——行星轮半径,mm

由式(16)可知,投种瞬间种子法向加速度与种子所受压差作用力 ΔP、排种转速和投种角等有关。建立种子投种过程运动学模型,忽略空气阻力对种子的作用,建立 xoy 坐标系,投种过程种子运动分析如图 9 所示。

投种点种子脱离吸种针时水平速度 v_x 和竖直方向速度 v_y 计算式为

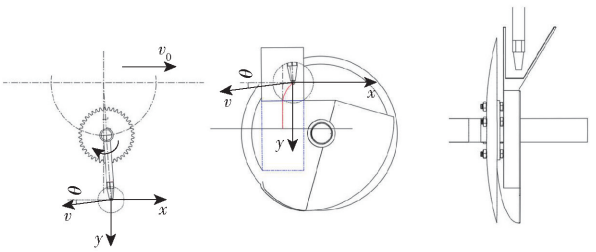


图 9 投种过程种子的速度分析及吸种针与投种口位置关系

Fig. 9 Velocity analysis diagram of seeds during sowing and positional relationship between seed suction needle and seed tube

$$\begin{cases} v_x = v\cos\theta = 2(L+R)\omega\cos\theta \\ v_y = v\sin\theta = 2(L+R)\omega\sin\theta \\ v = 2(L+R)\omega \end{cases} \tag{17}$$

式中 L——吸种针长度,mm

v——投种瞬间种子脱离吸种针线速度,m/s

由图 9 可知,脱离吸种针型孔的种子在自身重力和离心力的作用下,以一定初速度沿投种点的切线方向作抛物线运动,则投种过程种子运动方程为

$$\begin{cases} x = (v_x - v_0)t \\ y = v_y t + \dfrac{1}{2}gt^2 \end{cases} \tag{18}$$

式中 x、y——种子从脱离吸种针到接触种床土壤水平和竖直方向运动距离,m

t——投种过程种子从脱离吸种针到接触种床土壤运动时间,s

v_0——播种机作业速度,m/s

联立式(17)、(18)可得

$$x = \frac{1}{g}[2(L+R)\omega\cos\theta - v_0]\cdot$$
$$[\sqrt{4(L+R)^2\omega^2\sin^2\theta + 2gy} - 2(L+R)\omega\sin\theta] \tag{19}$$

由式(19)可知,种子从脱离吸种针到接触种床土壤的运动轨迹与排种转速、吸种针运动半径和投种高度等因素有关,根据前期研究,气力针式行星轮系窄行密植精密排种器当投种正压 1.0 kPa、工作转速 20 r/min、投种高度 200 mm 以下时,粒距变异系数低于 13.2%,工作性能较优。田间作业时为保证作业效果,排种器投种高度应设置在 200 mm 以下,但投种高度不宜过低,播种作业时投种高度过低可能会导致田间土壤杂质等堵塞吸种针型孔,影响播种质量,因此确定实际投种高度为 150 mm。当排种转速为 20 r/min、理论株距为 80 mm 时,可计算出播种机前进速度为 0.4 m/s,将上述参数代入式(19)可计算得投种过程种子水平方向位移约为 22 mm,为减少种子与投种口的碰撞,设计种子落入投种口

的中心，因此设计投种口接口长度大于 44 mm，宽度大于吸种针直径，综合考虑确定投种口接口为长方形，长度为 50 mm，宽度为 25 mm，投种口整体高度为 100 mm。

3　开沟器离散元仿真试验

3.1　仿真模型

为进一步优化圆盘-滑刀开沟器结构参数，验证开沟器作业效果，设计并开展离散元仿真试验。采用 EDEM 2018 建立离散元仿真模型，设置土壤仿真模型区域长 1 000 mm、宽 400 mm、高 150 mm。结合现有土壤离散元仿真结果[27,31]和本播种机作业情景，设置土壤颗粒半径为 4 mm，土壤颗粒间接触模型选用 Hertz－Mindlin with JKR Cohesion，表面能为 9.04 J/m^2，土壤颗粒与机具间接触模型选用 Hertz－Mindlin(no slip)。开沟器材料设置为 65Mn 钢，仿真所用本征参数和接触参数主要通过文献查阅和试验确定。其中，土壤和钢泊松比分别为 0.37、0.3，密度分别为 2 315、7 865 kg/m^3，剪切模量分别为 1.0×10^6、7.9×10^{10} Pa；其余土壤模型接触参数如表 2 所示。利用 Solidworks 开展开沟器三维模型建模，导入 EDEM 2018 中，得到开沟仿真模型如图 10 所示。

表 2　仿真模型接触参数

Tab. 2　Simulation model contact parameters

参数	数值
土壤-土壤恢复系数	0.60
土壤-土壤静摩擦因数	0.57
土壤-土壤动摩擦因数	0.14
土壤-钢恢复系数	0.42
土壤-钢静摩擦因数	0.48
土壤-钢动摩擦因数	0.22

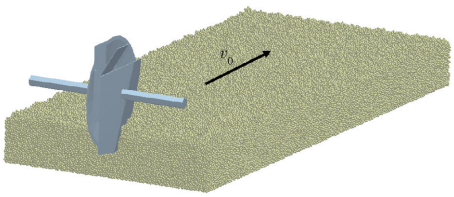
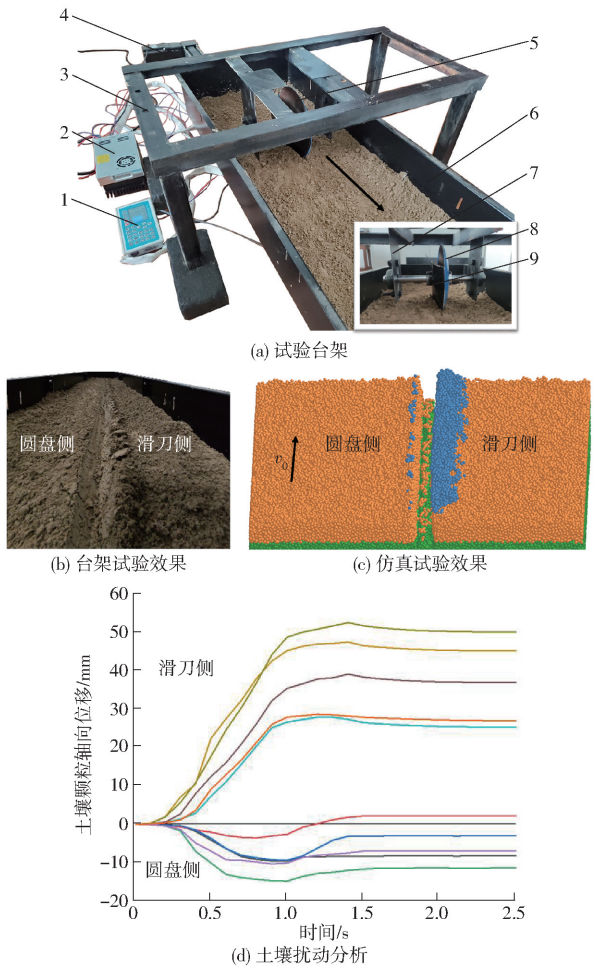


图 10　圆盘-滑刀组合式开沟器开沟仿真模型

Fig. 10　Simulation model of furrow opening process

3.2　仿真模型验证与土壤扰动过程

为验证仿真模型参数准确性，开展圆盘-滑刀组合式开沟器作业的台架试验和仿真对比试验。搭建试验土槽台架如图 11a 所示，台架主要由土槽同步带模组、土槽台架控制模块、土槽、开沟器固定装置、开沟深度调节装置等组成，长 3 000 mm、宽 400 mm、高 150 mm，铺设土层厚度 100 mm，土壤为田间采集的细碎沙壤土，土壤含水率为 18.37%。试验时将



(a) 试验台架　(b) 台架试验效果　(c) 仿真试验效果　(d) 土壤扰动分析

图 11　开沟器台架试验与仿真试验

Fig. 11　Bench and simulation tests of furrow opener

1. 土槽台架控制模块　2. 电源　3. 试验台架　4. 土槽同步带模组　5. 圆盘-滑刀组合式开沟器　6. 土槽　7. 开沟器固定装置　8. 球面圆盘　9. 滑刀式分土板

圆盘-滑刀组合式开沟器安装在开沟器固定装置上，通过土槽台架控制模块改变土槽运动速度，模拟开沟器实际作业速度；通过调整开沟深度调节装置螺栓改变开沟器入土深度，从而调整开沟深度。

与仿真试验在相同试验条件下进行圆盘-滑刀组合式开沟器台架试验，设开沟深度为 45 mm、开沟速度为 0.4 m/s，台架和仿真开沟试验效果如图 11b、11c 所示。对比试验评价指标为土壤扰动量和开沟深度变异系数；为获得仿真试验土壤扰动量，提取垂直于作业方向的开沟横截切面，拟合土壤轮廓并计算扰动面积；为获得台架试验土壤扰动量，通过沟形轮廓仪测得沟形面积；种床表面到沟底垂直距离作为开沟深度，开沟深度变异系数计算式为

$$V=\frac{S}{\bar{h}_t}\times100\% \tag{20}$$

式中　V——开沟深度变异系数，%

S——开沟深度标准差，mm

$\bar{h}_t$——开沟深度平均值，mm

开沟器仿真试验中,以开沟器两侧被扰动土壤颗粒最初位置为原点统计土壤颗粒轴向位移,选取其中具有代表性的 10 组颗粒样本,结果如图 11d 所示。球面圆盘作业时首先将土壤颗粒向前进方向和轴向挤压形成种沟,但由于其外形为球面,在形成种沟后部分土壤颗粒随球面圆盘外侧面回流至种沟底部和侧面,因而球面圆盘开沟器土壤扰动小、开沟稳定性较低;滑刀式分土板前侧斜板将土壤颗粒向前进方向和轴向挤压后,后侧直板持续挤压土壤颗粒使种沟成形、避免土壤回流,沟形稳定性较高。圆盘-滑刀组合式开沟器台架试验与仿真试验结果对比如表 3 所示。

表 3 台架试验和仿真开沟试验结果对比

Tab. 3 Comparison of bench test and simulation furrow opening test results

试验类型	平均开沟深度/mm	开沟深度变异系数/%	土壤扰动量/cm^2
台架	41.4	10.88	14.12
仿真	40.5	11.54	13.50

由表 3 可知,仿真试验结果与台架试验结果差异小于 10%,表明仿真试验有效。根据仿真试验开沟横截切面轮廓可知,该试验所用开沟器土壤轴向扰动距离为 92.5 mm,滑刀式分土板一侧土壤最大轴向扰动 72.9 mm,球面圆盘一侧土壤最大轴向扰动 19.6 mm,两侧土壤扰动距离相差 53.3 mm。上述分析表明,滑刀式分土板对土壤扰动作用远大于球面圆盘。

3.3 正交试验

3.3.1 试验设计

为保证圆盘-滑刀组合式开沟器与排种装置窄行低位投种效果,以圆盘-滑刀组合式开沟器开沟深度、滑刀式分土板倾角、作业速度为试验因素,以土壤扰动量和开沟深度变异系数为评价指标,开展三因素五水平二次回归正交旋转组合试验以确定开沟器最佳参数组合。根据前文分析,确定开沟深度为 30~60 mm、滑刀式分土板倾角为 15°~30°、作业速度为 0.3~0.5 m/s,试验因素编码如表 4 所示,每组试验重复 3 次,取平均值作为试验结果。

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Coding of experimental factors

编码	因素		
	开沟深度 x_1/mm	滑刀式分土板倾角 x_2/(°)	作业速度 x_3/(m·s^{-1})
-1.682	30.00	15.00	0.30
-1	36.08	18.04	0.34
0	45.00	22.50	0.40
1	53.92	26.96	0.46
1.682	60.00	30.00	0.50

3.3.2 试验结果与分析

开展三因素五水平正交旋转组合试验,试验结果如表 5 所示。X_1、X_2、X_3 为开沟深度、滑刀式分土板倾角和作业速度因素编码值。

表 5 正交试验结果

Tab. 5 Orthogonal test results

试验序号	因素 X_1	因素 X_2	因素 X_3	土壤扰动量 Y_1/cm^2	开沟深度变异系数 Y_2/%
1	-1	-1	-1	11.62	12.50
2	1	-1	-1	12.05	12.40
3	-1	1	-1	17.58	16.13
4	1	1	-1	20.33	17.39
5	-1	-1	1	19.92	9.09
6	1	-1	1	14.82	14.89
7	-1	1	1	18.19	16.13
8	1	1	1	24.23	31.71
9	-1.682	0	0	16.78	15.38
10	1.682	0	0	19.06	17.65
11	0	-1.682	0	12.76	12.50
12	0	1.682	0	24.10	28.57
13	0	0	-1.682	18.98	8.17
14	0	0	1.682	17.58	15.38
15	0	0	0	13.30	9.65
16	0	0	0	13.93	9.17
17	0	0	0	13.71	9.76
18	0	0	0	14.42	9.89
19	0	0	0	13.02	9.41
20	0	0	0	14.37	8.70

运用数据处理软件 Design-Expert 对试验数据进行多元回归拟合,对试验结果进行回归分析,建立开沟深度、滑刀式分土板倾角和作业速度与土壤扰动量和开沟深度变异系数之间的回归方程,并对试验结果和回归方程进行方差分析,结果如表 6 所示。

3.3.2.1 土壤扰动量

通过分析试验数据,多元回归拟合得到土壤扰动量回归模型为

$$Y_1 = 13.37 + 2.2X_1 + 6.25X_2 + 2.45X_3 + 1.2X_1X_2 + 2.69X_1X_3 + 1.19X_2X_3 + 4.15X_1^2 + 4.66X_2^2 - 0.49X_3^2 \quad (21)$$

由表 6 可知,建立二次回归模型的 P 小于 0.01,表明回归模型极显著;失拟项 P 大于 0.05,即失拟不显著,说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符。分土板倾角对土壤扰动量的影响极显著,开沟深度及其二次方项、作业速度、分土板倾角的二次方项对土壤扰动量影响显著,其余因素影响不显著,各因素对土壤扰动量的影响由大到小为分土板倾角、作业速度、开沟深度。剔除不显著因素后的回

表 6　回归方程方差分析

Tab. 6　Variance analysis of regression equation

方差来源	土壤扰动量 Y_1				开沟深度变异系数 Y_2			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	307.14	9	12.82	0.001 4 **	642.14	9	18.10	0.000 5 **
X_1	23.69	1	8.90	0.020 4 *	51.12	1	12.97	0.008 7 **
X_2	190.53	1	71.60	<0.000 1 **	259.09	1	65.73	<0.000 1 **
X_3	29.25	1	10.99	0.012 8 *	47.66	1	12.09	0.010 3 *
X_1X_2	1.50	1	0.56	0.477 8	15.51	1	3.94	0.087 7
X_1X_3	7.53	1	2.83	0.136 5	51.11	1	12.96	0.008 7 **
X_2X_3	1.48	1	0.56	0.480 2	29.03	1	7.36	0.030 0 *
X_1^2	24.60	1	9.24	0.018 8 *	63.03	1	15.99	0.005 2 **
X_2^2	31.01	1	11.65	0.011 2 *	162.36	1	41.19	0.000 4 **
X_3^2	0.34	1	0.13	0.730 7	5.18	1	1.31	0.289 4
残差	18.63	7			27.59	7		
失拟	18.32	5	2.407	0.404	27.40	5	0.57	0.177
误差	0.30	2			0.20	2		
总和	325.77	16			669.74	16		

注：** 表示极显著（$P<0.01$）；* 表示显著（$0.01\leqslant P<0.05$）。

归模型为

$$Y_1 = 13.37 + 2.2X_1 + 6.25X_2 + 2.45X_3 + 4.15X_1^2 + 4.66X_2^2 \quad (22)$$

3.3.2.2　开沟深度变异系数

通过分析试验数据，多元回归拟合得到开沟深度变异系数的回归模型为

$$Y_2 = 9.57 + 3.24X_1 + 7.29X_2 + 3.12X_3 + 3.87X_1X_2 + 7.02X_1X_3 + 5.29X_2X_3 + 6.64X_1^2 + 10.66X_2^2 + 1.9X_3^2 \quad (23)$$

由表 6 可知，建立二次回归模型的 P 小于 0.01，表明回归模型极显著；失拟项 P 大于 0.05，即失拟不显著，说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符。开沟深度及其二次方项、分土板倾角及其二次方项、开沟深度与作业速度的交互项对开沟深度变异系数影响极显著，作业速度、分土板倾角与作业速度的交互项对开沟深度变异系数影响显著，其余因素影响不显著，各因素对开沟深度变异系数的影响由大到小为分土板倾角、开沟深度、作业速度。剔除不显著因素后回归模型为

$$Y_2 = 9.57 + 3.24X_1 + 7.29X_2 + 3.12X_3 + 7.02X_1X_3 + 5.29X_2X_3 + 6.64X_1^2 + 10.66X_2^2 \quad (24)$$

3.3.3　因素交互作用对开沟深度稳定性的影响

由表 6 可得，X_1X_3 交互作用和 X_2X_3 交互作用对开沟深度变异系数的影响显著，其响应曲面如图 12 所示。由图 12 可知，分土板倾角的变化相较于开沟深度和作业速度对开沟深度变异系数的影响较大。由图 12a 可知，当分土板倾角处于零水平（22.5°）、开沟深度为 42 ~ 54 mm、作业速度为0.35 ~ 0.45 m/s 时，开沟深度变异系数较低。作业速度一定时，随着开沟深度的增大，开沟深度变异系数先减小后增大。由图 12b 可知，当开沟深度处于零水平（45 mm）、分土板倾角为 20° ~ 24°、作业速度为 0.35 ~ 0.45 m/s 时，开沟深度变异系数较低。当作业速度一定时，随着分土板倾角增大，开沟深度变异系数先减小后增大。

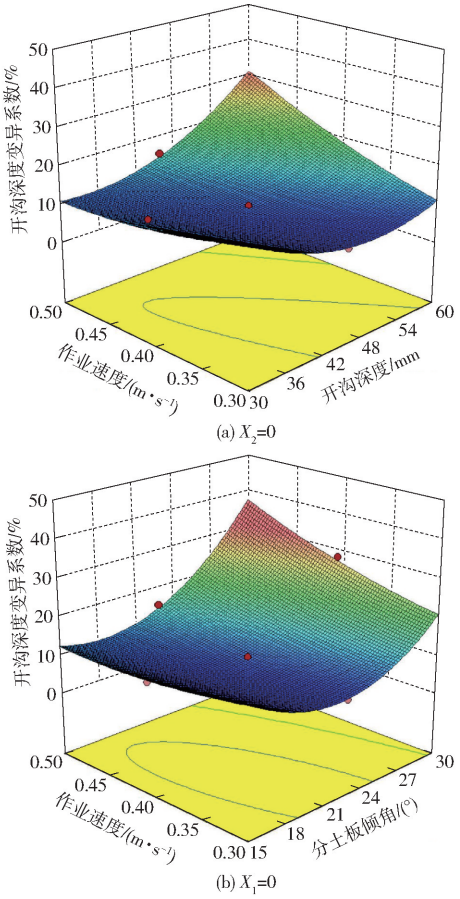


图 12　交互因素对开沟深度变异系数的影响

Fig. 12　Effects of interactive factors on qualified index

3.3.4 参数优化与验证试验

土壤扰动量和开沟深度变异系数反映开沟器工作性能，土壤扰动量直接影响种沟沟形稳定性，开沟深度变异系数直接影响种子播深及出苗效果[32-33]。为保证开种沟作业时种沟深度稳定、沟形整齐，在试验范围内最大程度降低土壤扰动量和开沟深度变异系数，对所建立的二次回归模型开展多因素优化求解，运用 Design-Expert 的优化模块求解[34-35]，根据实际工作条件及上述模型分析结构，设定试验因素约束条件为

$$\begin{cases} \min(Y_1(X_1,X_2,X_3)+Y_2(X_1,X_2,X_3)) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1.682 \leqslant X_1 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_2 \leqslant 1.682 \\ -1.682 \leqslant X_3 \leqslant 1.682 \end{cases} \end{cases} \tag{25}$$

最优参数组合为：开沟深度 45.45 mm、分土板倾角 20.14°、作业速度 0.40 m/s，此时土壤扰动量为 13.37 cm^2，开沟深度变异系数为 9.57%。分土板倾角为影响开沟深度变异系数的关键因素，为保证开沟器分土效果、降低土壤扰动量，在满足播深条件下考虑实际加工制造约束，确定分土板倾角为 20°。

以最优参数组合开展仿真试验得到开沟器土壤扰动轴向距离为 67.5 mm，滑刀式分土板一侧土壤轴向扰动距离为 50.6 mm，球面圆盘一侧土壤轴向扰动距离为 16.9 mm。土壤扰动轴向总距离小于开沟器行距 75 mm，因此该开沟器能在保证开沟效果的前提下，避免因开沟器扰动土壤至相邻种沟造成土壤回流、沟形不稳定等问题，满足窄行密植播种机设计要求。

4 田间试验

为验证最佳参数组合下开沟器和窄行密植精密播种机整机作业效果，开展田间开种沟试验和田间播种试验。

4.1 开种沟试验

试验于 2022 年 11 月 2 日在华中农业大学现代农业示范基地进行，试验地为耕整地，耕作模式为垄作。试验设备为窄行密植精密播种机，配套动力为东方红 954 型拖拉机，机具前进速度 0.4 m/s，试验装置为圆盘-滑刀组合式开沟器，试验装置如图 13 所示。试验过程中，设定开沟器入土深度为 45 mm，播种机沿直线方向作业距离 50 m，选取中间段工作稳定区域作为测量区域，每隔 3 m 测量开沟深度及土壤扰动量，随机选取 10 个开沟测量点。

圆盘-滑刀组合式开沟器田间试验与仿真试验结果对比如表 7 所示。



图 13 田间开种沟试验

Fig. 13 Field trial of furrow opening for seeding

表 7 田间开种沟试验与仿真试验结果对比

Tab. 7 Comparison of field furrow opening trial and simulation test results

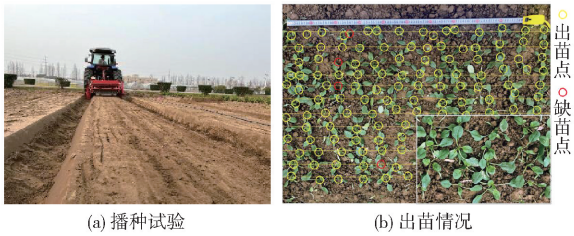
项目	平均开沟深度/mm	开沟深度变异系数/%	土壤扰动量/cm^2
田间	39.0	10.04	14.00
仿真	40.5	11.54	13.50

由表 7 可知，田间试验较仿真试验开沟深度减小，原因为田间试验时机具振动等因素导致沟边土壤松动、塌落，从而造成实际开沟深度减小。总体而言，离散元仿真结果与田间试验结果基本一致，未出现开沟器土壤扰动影响相邻种沟现象，证明圆盘-滑刀组合式开沟器能够满足窄行密植开沟要求。

4.2 播种试验

为验证窄行密植精密播种机田间作业性能，于 2022 年 11 月 2 日在华中农业大学现代农业示范基地和武汉市农业科学院设施蔬菜试验基地开展田间播种试验，土壤类型为沙壤土，播种作业前对地块旋耕碎土整地处理；试验材料选用“墨绿先锋”菠菜种子，千粒质量为 9.13 g，种子外形尺寸（长×宽×高）平均值为 3.69 mm×3.25 mm×2.36 mm，几何平均宽度为 3.05 mm；试验机具为自主研制的窄行密植精密播种机，根据前期试验最佳参数，调节吸种负压调节至 2.0 kPa，调节卸种正压至 1.0 kPa。

播种 30 d 后，测量 1 m 长度内的菠菜苗数，每行测 5 段。播种试验和出苗情况如图 14 所示。



(a) 播种试验 (b) 出苗情况

图 14 田间播种试验

Fig. 14 Field seeding experiment

田间播种试验结果表明，播种机播种作业后单行苗数变异系数为 7.44% ~9.95%、各行苗数一致性变异系数为 9.16%，播种效果满足设计要求。试

验同时表明窄行密植开沟总成和多行并联低位投种排种装置能实现窄行低位投种，保证播种均匀性。

5　结论

（1）针对蔬菜窄行密植播种均匀性要求高、缺乏适用播种机械的问题，设计了一种蔬菜窄行密植低位投种精密播种机，可一次完成旋耕起垄、开沟、播种、覆土等工序，实现菠菜等密植蔬菜垄上窄行精密播种作业。设计了开沟-排种总成，通过圆盘-滑刀组合式开沟器与气力针式行星轮系精密排种器配套作业，实现低位投种，保证播深一致。

（2）明确了落种轨迹和株距均匀性的主要影响因素；构建了开沟器与土壤力学模型，确定了开沟-排种总成球面圆盘和滑刀式分土板的结构参数；分析了排种器落种点和运动轨迹，确定了投种口结构参数。

（3）开展了开沟深度、滑刀式分土板倾角、作业速度对土壤扰动量、开沟深度变异系数影响的三因素五水平二次正交组合仿真试验，结果表明：开沟深度为 45.45 mm、滑刀式分土板倾角为 20.14°、作业速度为 0.40 m/s 时效果最优。最优参数组合下土壤扰动量为 13.37 cm^2、开沟深度变异系数为 9.57%。

（4）田间开种沟试验表明，最优参数组合下，圆盘-滑刀组合式开沟器开种沟验证试验平均开沟深度为 39.0 mm，开沟深度变异系数为 10.04%；田间播种试验表明，窄行密植蔬菜精密播种机播种作业后的单行苗数变异系数、各行苗数一致性变异系数均不高于 9.95%，满足小粒径蔬菜种子窄行密植播种农艺要求。

参　考　文　献

[1] SEN S, CHEN Shali, FENG Biao, et al. Preventive effects of North American ginseng (*Panax quinquefolium*) on diabetic nephropathy[J]. Phytomedicine, 2012, 19(6): 494 - 505.

[2] 李玉环, 杨丽, 张东兴, 等. 豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 61 - 73.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 61 - 73. (in Chinese)

[3] 陈海涛, 李桐辉, 王洪飞, 等. 气吸滚筒式垄上三行大豆密植排种器设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 16 - 24.
CHEN Haitao, LI Tonghui, WANG Hongfei, et al. Design and parameter optimization of pneumatic cylinder ridge three-row close-planting seed-metering device for soybean[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(17): 16 - 24. (in Chinese)

[4] 赖庆辉, 于庆旭, 苏微, 等. 三七超窄行气吸式精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 102 - 112.
LAI Qinghui, YU Qingxu, SU Wei, et al. Design and experiment of air-suction ultra-narrow-row device for precise *Panax notoginseng* seed metering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 102 - 112. (in Chinese)

[5] 陈美舟, 刁培松, 张银平, 等. 大豆窄行密植播种机单盘双行气吸式排种器设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 8 - 16.
CHEN Meizhou, DIAO Peisong, ZHANG Yinping, et al. Design of single-disk double-row air-aspirated seed discharger for soybean narrow-row dense-planting planter[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(21): 8 - 16. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 高筱钧, 周金华, 赖庆辉. 中草药三七气吸滚筒式精密排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 20 - 28.
GAO Xiaojun, ZHOU Jinhua, LAI Qinghui. Design and experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for *Panax notoginseng*[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 20 - 28. (in Chinese)

[8] 廖宜涛, 郑娟, 廖庆喜, 等. 正负气压组合管针式西洋参集排器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 46 - 57.
LIAO Yitao, ZHENG Juan, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combined tube-needle centralized seeding device for American ginseng[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 46 - 57. (in Chinese)

[9] 廖宜涛, 李成良, 廖庆喜, 等. 播种机导种技术与装置研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(12): 1 - 14.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Research progress of seed guiding technology and device of planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 1 - 14. (in Chinese)

[10] 赖庆辉, 吕勤, 贾广鑫, 等. 开沟-排种单体式人参精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 72 - 82, 98.
LAI Qinghui, LÜ Qin, JIA Guangxin, et al. Design and test of ginseng precision seeder with ditching and seeding monomer type[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 72 - 82, 98. (in Chinese)

[11] 廖宜涛, 李成良, 廖庆喜, 等. 窄行密植西洋参精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 92 - 103.
LIAO Yitao, LI Chengliang, LIAO Qingxi, et al. Design and test of narrow row dense planting American ginseng precision seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 92 - 103. (in Chinese)
[12] 杨丽, 颜丙新, 张东兴, 等. 玉米精密播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 38 - 48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38 - 48. (in Chinese)
[13] 赖庆辉, 曹秀龙, 于庆旭, 等. 三七压穴精密排种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 85 - 95.
LAI Qinghui, CAO Xiulong, YU Qingxu, et al. Design and experiment of precision seeding device for hole-drop planter for *Panax notoginseng*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 85 - 95. (in Chinese)
[14] 赵淑红, 刘宏俊, 张先民, 等. 滑推式开沟器设计与作业性能优化试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 26 - 34.
ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, ZHANG Xianmin, et al. Design and optimization experiment of working performance of sliding push opener[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(19): 26 - 34. (in Chinese)
[15] 李心志, 廖庆喜, 袁华, 等. 油菜基质块移栽机苗床带整备装置设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(2): 215 - 226.
LI Xinzhi, LIAO Qingxi, YUAN Hua, et al. Design and test of seedbed belt preparation device for rapeseed substrate block transplanter[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(2): 215 - 226. (in Chinese)
[16] 李杞超, 纪文义, 赵宇, 等. 2BZJ - 12 型大豆窄行平作精密播种机设计与性能试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2013, 44(5): 85 - 89.
LI Qichao, JI Wenyi, ZHAO Yu, et al. Design and experimental of 2BZJ - 12 type of using for narrow-row, flat planting and close seeder of soybean[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44 (5): 85 - 89. (in Chinese)
[17] 李天华, 黄圣海, 牛子孺, 等. 行星轮式大蒜插播机播种直立度优化与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3): 37 - 45.
LI Tianhua, HUANG Shenghai, NIU Ziru, et al. Optimization and experiment of planting perpendicularity of planetary wheel garlic planter[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(3): 37 - 45. (in Chinese)
[18] 廖庆喜, 王迪, 姚露, 等. 油菜覆膜打孔穴播机打孔装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 62 - 72.
LIAO Qingxi, WANG Di, YAO Lu, et al. Design and experiment of membrane punch device for rapeseed film perforating and precision dibbling-planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 62 - 72. (in Chinese)
[19] 丁力, 杨丽, 刘守荣, 等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 1 - 11.
DING Li, YANG Li, LIU Shourong, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1 - 11. (in Chinese)
[20] 胡梦杰, 夏俊芳, 郑侃, 等. 内充气力式棉花高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 73 - 85.
HU Mengjie, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of inside-filling pneumatic high speed precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 73 - 85. (in Chinese)
[21] 邢赫, 臧英, 曹晓曼, 等. 水稻气力式排种器投种轨迹试验与分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 23 - 30.
XING He, ZANG Ying, CAO Xiaoman, et al. Experiment and analysis of dropping trajectory on rice pneumatic metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 23 - 30. (in Chinese)
[22] WANG Xianling, ALI M E, LI Mengliang, et al. Micro-ridge-furrow soil moisture regulation technology improves seedling quality and yield of winter rapeseed[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 237: 105960.
[23] 张青松, 蔡家顺, 于良航, 等. 冷浸田起垄平整装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 50 - 59.
ZHANG Qingsong, CAI Jiashun, YU Lianghang, et al. Design and experiment of ridging leveling device for cold waterlogged paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 50 - 59. (in Chinese)
[24] 廖宜涛, 廖庆喜, 王磊, 等. 气力式小粒径种子精量排种器吸种效果影响因素研究[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 10 - 17.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Investigation on vacuum singulating effect influencing factors of pneumatic precision seed metering device for small particle size of seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 10 - 17. (in Chinese)
[25] 廖宜涛, 张百祥, 郑娟, 等. 气力针式行星轮系窄行密植精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 86 - 99.
LIAO Yitao, ZHANG Baixiang, ZHENG Juan, et al. Design and experiment of pneumatic needle planetary gear narrow-row close planting precision seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 86 - 99. (in Chinese)
[26] 贾洪雷, 王万鹏, 陈志, 等. 农业机械触土部件优化研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 1 - 13.
JIA Honglei, WANG Wanpeng, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 1 - 13. (in Chinese)
[27] 孙景彬, 刘琪, 杨福增, 等. 黄土高原坡地土壤与旋耕部件互作离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2022,

53(1)：63－73.
SUN Jingbin, LIU Qi, YANG Fuzeng, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of sloping soil on Loess Plateau and its interaction with rotary tillage components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1):63－73. (in Chinese)

[28] 赵淑红, 杨罗罗, 张鑫, 等. 大豆垄上双行免耕播种机锯齿式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1)：74－84.
ZHAO Shuhong, YANG Luoluo, ZHANG Xin, et al. Design and experiment of zigzag opener for double-row no-tillage seeding on soybean ridge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1):74－84. (in Chinese)

[29] 赵淑红, 刘佳明, 赵国鹏, 等. 侧深施肥直斜偏置式免耕播种开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(11):26－37.
ZHAO Shuhong, LIU Jiaming, ZHAO Guopeng, et al. Design and experiment of the straight oblique offset no-tillage sowing furrow opener with side deep fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(11):26－37. (in Chinese)

[30] 韩丹丹, 黄与霞, 黄金路, 等. 2BF－4 轻简型玉米精量播种机的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2023, 58(5)：236－245.
HAN Dandan, HUANG Yuxia, HUANG Jinlu, et al. Design and testing of the lightweight and simple 2BF－4 maize precision seeder[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(5)：236－245. (in Chinese)

[31] 李蒙良, 廖庆喜, 裴立民, 等. 油菜直播机旋切式微垄种床制备装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5)：47－58, 90.
LI Mengliang, LIAO Qingxi, PEI Liming, et al. Design and experiment of rotary-cut micro-ridge seedbed device for rapeseed direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5):47－58, 90. (in Chinese)

[32] 王磊, 廖宜涛, 张青松, 等. 油麦兼用型精量宽幅免耕播种机仿形凿式开沟器研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11)：63－73.
WANG Lei, LIAO Yitao, ZHANG Qingsong, et al. Design on profiling chisel opener of precision broad width no-tillage planter for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11):63－73. (in Chinese)

[33] 赵艳忠, 王勇, 龚振平, 等. 免耕播种机侧深分层施肥播种部件设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8)：40－50.
ZHAO Yanzhong, WANG Yong, GONG Zhenping, et al. Design and experiment on side deep and layered fertilizing and seeding components of no-tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8):40－50. (in Chinese)

[34] 刘芳, 高筱钧, 贾宪, 等. 高速精量播种机阿基米德螺线型弧面双齿盘覆土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6)：91－100, 120.
LIU Fang, GAO Xiaojun, JIA Xian, et al. Design and experiment of Archimedean spiral-type arc double-toothed disc soil-covering device for high-speed precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6)：91－100, 120. (in Chinese)

[35] 侯加林, 方立志, 张海阔, 等. 多重扰动清种式大蒜单粒取种排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1):65－75, 163.
HOU Jialin, FANG Lizhi, ZHANG Haikuo, et al. Design and experiment of multi-disturbance cleaning and single-seed sowing device for garlic[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1):65－75, 163. (in Chinese)