# 油菜高速带状微垄联合直播机浅耕犁设计与试验

杜文斌1,林建新1,李晓冉1,李林1,张青松1,2,廖庆喜1,2\*

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

摘 要:针对现有微垄种床制备装置与传统旋耕装置组合作业效率低且耕层浅的问题,该研究提出了一种先抬-后抛高速带状浅耕成垄、微垄种床整形、垄顶垄沟播种的油菜高速微垄直播工艺,研制了一种用于高速作业下定向抛土的浅耕犁。 通过分析微垄垄形和变螺距扭曲螺旋犁体曲面,确定了浅耕犁的犁铧铧刃角为120°、入土角30°、犁铧宽度120 mm;构 建了犁体导曲线数学模型并开展了土垡抬升-抛送过程的运动学分析;利用 EDEM 仿真软件探究了各因素对土壤定向抛 送效果的影响,确定犁体高度为375 mm,犁体开度为200 mm,末端螺距角为40°。通过在砂质黏壤土和壤土两种土壤条 件下开展不同作业速度与整机性能田间试验,结果表明:浅耕犁在高速(12 km/h)比常规(4 km/h)作业速度下的抛土性 能要好,高速作业土壤定向抛送明显,垄沟明显且土壤成条状堆积于起垄区域,土壤回流垄沟比为26.18%,土壤定向 迁移比为57.42%,土壤抛送堆积高度为160.60 mm;整机作业通过性好,垄形稳定,垄高为148.64 mm, 整宽为349.06 mm, 垄高及垄宽变异系数均小于5%,表明浅耕犁定向抛送位置、土壤量及抛送堆积高度满足微垄要求且稳定性较好;出苗 效果说明微垄种床满足油菜种植农艺要求。研究结果可为油菜高质量种床制备和微垄直播装备开发提供一种途径。

关键词:农业机械;油菜;微垄;高速;直播

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202411157

中图分类号: S223.1 文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-12-0038-11

杜文斌,林建新,李晓冉,等.油菜高速带状微垄联合直播机浅耕犁设计与试验[J].农业工程学报,2025,41(12):38-48.doi:10.11975/j.issn.1002-6819.202411157 http://www.tcsae.org

DU Wenbin, LIN Jianxin, LI Xiaoran, et al. Design and experiments of the shallow plow for the high-speed strip micro-ridge combined direct seeding machine for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(12): 38-48. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202411157 http:// www.tcsae.org

## 0 引 言

油菜是中国重要的油料作物<sup>[1-2]</sup>,因其抗逆性强、适应范围广的特点而成为了长江中下游流域冬季种植一种优势作物。近年来开发利用冬闲田种植油菜的扶持力度日益加大<sup>[3]</sup>,2016年至2022年全国油菜播种面积由662.3万hm<sup>2</sup>逐年增加至725.3万hm<sup>2</sup><sup>[4]</sup>。由于长江中下游流域冬油菜种植区常采用稻油轮作模式,生产中常发生因上茬水稻跨区域收割较晚造成油菜播种晚,导致油菜出苗少,长势弱的问题<sup>[5]</sup>,同时冬闲田油菜扩种的背景加剧了这一问题,因此提升油菜直播机作业速度对油菜生产具有重要的现实意义。

近年来,全球气候变暖与局部地区降雨时空分布不 均匀加剧导致冬油菜种植区在油菜适播期、苗期易发生 持续干旱或降雨等极端恶劣气候<sup>[6]</sup>。由于油菜播种深度 较浅(0~20 mm),根系忌水<sup>[7]</sup>,在生长初期若持续降 雨,常会发生渍害导致减产;若气候持续干旱,导致种 子萌发缺乏水分而无法出苗。为此,相关学者提出了一 种油菜微垄种床种植农艺方案<sup>[8-9]</sup>,即构建垄高为75~

收稿日期: 2024-11-19 修订日期: 2025-05-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFD2000405)

作者简介:杜文斌,博士生,研究方向为现代农业装备设计与测控。 Email: duwenbin@webmail.hzau.edu.cn 150 mm, 垄距为 300~350 mm 的微垄种床, 同步开设深 度为180mm,宽度为250mm的畦沟,形成一种畦沟比 垄沟深的布局,便于排水防涝。将油菜种子播种至微垄 垄顶和 垄沟的 播种带内,有效利用立体化种植增加了光 能截获量,同时播种行距为150~175mm,满足油菜合 理密植的种植要求,若发生持续干旱,由于垄沟的保墒 能力强,可保证垄沟种子萌发;若发生持续降雨, 垄沟 排涝, 垄顶种子萌发, 以提高极端条件下油菜出苗、成 苗率,实现旱涝保收,稳产增产。相关的研究表明,起 垄作业还可以改善土壤微环境,调节根系激素水平,促 进地上部分及地下根系发育,提高作物产量<sup>[10-11]</sup>。目前 湖北地区的油菜微垄种植相比平作种植,在出苗、成苗 率和产量上均有显著提升,已在一定范围内得到推广应 用,但生产中微垄种床构建仍以人工作业为主,劳动强 度大且效率低。国内相关专家学者围绕微垄种床构建的 农机具开展了研究,李蒙良等<sup>[9,12]</sup>设计了一种旋切式微 垄种床制备装置,通过与油菜直播机联合作业形成与机 具前进方向垂直的微垄种床,戴飞等<sup>[13]</sup>通过先旋耕再主 动滚压的方式完成垄向与机具前进方向相同的微垄种床 构建。由于目前相关研究均搭配旋耕装置,适用于4~ 6 km/h 的常规速度作业,在高速(≥10 km/h)作业时旋 耕装置切土节距过大, 机具功耗增大且种床质量下降, 同时采用旋耕装置只能对 0~90 mm 的耕层进行作业, 长期作业导致犁底层变浅。综上所述,微垄种植模式可 保证油菜旱涝保收,稳产增产,但人工作业劳动强度大,

<sup>※</sup>通信作者:廖庆喜,教授,博士生导师,研究方向为油菜全程机械化生 产技术及配套装备。Email: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

相关配套农机具作业效率有待提高成为制约微垄种植模 式进一步推广的重要因素,因此开展可实现高速高质播 种作业的油菜微垄播种装备具有重要意义。

为此,本文对油菜高速带状微垄联合直播机关键部 件浅耕犁进行动力学分析得出相关结构参数,并对浅耕 犁开展 EDEM 仿真分析和田间试验,以期提高整机在高 速作业时的通过性能和微垄种床的稳定性,并为油菜高 速微垄直播装备研究提供参考。

## 1 整机结构及工作过程

## 1.1 整机结构

油菜高速带状微垄联合直播机主要由浅耕犁组、开 畦沟犁、笼式碎土辊、挤压整形板、四杆调节机构、排 肥装置、排种装置等组成,结构如图 la 所示。浅耕犁组 可按照翻土方向分为左翻浅耕犁、右翻浅耕犁和中间分 土犁,分两排安装于机具前方,如图 lb 所示;开畦沟犁 对称布置于直播机两侧;笼式碎土辊和挤压整形板通过 四杆调节机构固定于机架上,其中船型开沟器安装于挤 压整形板尾部的顶端和底部。该机主要参数如表 1 所示。



1. 开畦沟犁 2. 浅耕犁组 3. 笼式碎土辊 4. 挤压整形板 5. 四杆调节机构 6. 排 肥装置 7. 排种装置 8. 种箱 9. 肥箱 10. 右翻浅耕犁 11. 中间分土犁 12. 左翻 浅耕犁

1. Ditching plow 2. Shallow plow group 3. Cage type soil crushing roller 4. Extruded shaping plates 5. Four-bar adjusting mechanism 6. Fertilizer discharge device 7. Rape seed metering device 8. Rape seed box 9. Fertilizer box 10. Right-turn shallow plow 11.Central soil-dividing plow 12. Left-turn shallow plow

图1 油菜高速带状微垄联合直播机结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the high-speed strip micro-ridge combined direct seeding machine for rapeseed

#### 1.2 工作过程

油菜高速带状微垄联合直播机由拖拉机提供动力, 采用被动作业的方式,先由浅耕犁组中各浅耕犁在高速



a. 起坐行业小息图 a. Schematic diagram of ridging operation

1.犁铧2.翼铲3.犁体曲面4.犁柱

1. Plowshare 2. Wing shovel 3. Plow body surface 4. Plow post

作业状态下对土壤进行定向抛送,初步形成垄沟和垄体, 排肥装置同步将肥料均布排至地表; 笼式碎土辊对翻耕 后未破碎的大土块进行挤压破碎,并进一步实现肥料的 混合;挤压整形板通过刮压作用对初步垄体进行整形, 同时安装于挤压整形板尾部顶端和底部的船型开沟器开 出 20 mm 深的种沟;油菜种子经排种装置同步播至种沟 内,在土壤自身回流作用下实现种子覆土,最终完成油 菜垄沟和垄顶播种作业,机具作业流程油菜高速带状微 垄联合直播机由拖拉机提供动力,采用被动作业的方式, 工艺流程主要为: ①浅耕犁组高速定向抛土, 初步形成 **垄沟和垄体**; ②开畦沟犁开出两侧畦沟; ③排肥装置同 步施肥至地表; ④笼式碎土辊对未破碎土块进行挤压破 碎并混合肥料;⑤挤压整形板对初步形成的垄体进行整 形;⑥安装于挤压整形板尾部顶端和底部的船型开沟器 开出 20 mm 深的种沟,油菜种子经排种装置播种至种沟 内,在土壤自身回流作用下实现种子覆土,最终完成油 菜垄沟和垄顶播种作业。其中浅耕犁可实现土壤定向抛 送,是油菜高速带状微垄联合直播机的关键部件。

表1	机具主要技术参数
Main to	physical parameters of the machine

Table 1 Main technical parameters	of the machine
参数 Parameter	数值 Values
整机尺寸(长×宽×高)	
Machine dimensions(length×width×height)/	1 500×2 100×1 400
(mm×mm×mm)	
作业速度 Working speed/(km·h <sup>-1</sup> )	8~12
配套动力 Matched power/kW	$\geq$ 70
垄宽 Ridge width/mm	300~350
垄高 Ridge height/mm	$100 \sim 150$
耕深 Tillage depth/mm	110~130

#### 2 浅耕犁结构设计及分析

浅耕犁组由多个不同翻土方向的犁体组成,作业时 土壤在犁体的配合下沿着箭头方向进行定向抛送初步形 成5个微垄,如图2a所示。浅耕犁主要由犁铧、犁体曲 面、翼铲和犁柱组成,结构如图2b所示,其作业的关键 在于高速作业时犁体可迅速抬升土垡至一定高度并具备 较大的初速度,然后在犁体曲面作用下实现土垡运动方 向偏转,最后土垡在离开犁体曲面后做斜抛运动以实现 定向抛土,翼铲对未翻耕区域进行土壤扰动以实现疏松 的作业效果,如图2c所示。由于浅耕犁设计方法相同, 仅是翻土方向不同,因此选择左翻浅耕犁开展结构设计 并进行动力学分析。



b. 浅耕犁结构示意图 b. Schematic diagram of the structure of a shallow plow



c. 浅耕犁作业示意图 c. Schematic diagram of shallow plow operation

图 2 浅耕犁结构及作业示意图 Fig.2 Diagram of shallow plow structure and operation

## 2.1 犁铧设计与参数分析

犁铧结构参数对牵引阻力及土垡抬升有较大影响<sup>[14]</sup>。 为提高犁铧在高速作业下的入土性能,同时减小工作阻 力,设计铧尖与土壤及根系接触为滑切接触形式<sup>[15]</sup>。犁 铧结构示意图如图 3 所示。



注: R 为圆弧段半径, mm;  $\theta$  为入土角, mm;  $h_2$  为犁铧高度, mm;  $L_1$  为 犁铧宽度, mm;  $\delta$  为铧刃角, (°);  $F_t$  为土壤推力, N;  $F_f$  为土粒与铧 尖摩擦力, N; AB 段为平面段; BC 段为圆弧曲面段。

Note: *R* is the radius of the arc segment, mm;  $\theta$  is the soil penetration angle, mm;  $h_2$  is the height of the plowshare, mm;  $L_1$  is the plowshare width, mm;  $\delta$  is the plowshare blade angle, (°);  $F_t$  is the soil thrust, N;  $F_f$  is the friction between soil particles and the plowshare tip, N; Segment *AB* is the planar segment; segment *BC* is the arc-curved surface segment.

#### 图 3 犁铧结构示意图及铧尖受力分析

Fig.3 Schematic diagram of plowshare structure and force analysis of the plowshare tip

为满足铧尖与土壤及根系接触形式为滑切,由图 3b 中铧尖受力分析可得,产生滑切的条件为

$$F_t \cos \frac{\delta}{2} \ge F_f \tag{1}$$

其中 $F_f = F_t \sin \frac{\delta}{2} \tan \sigma$ 

式中o为土壤与铧尖摩擦角, (°), 由式(1)可得

$$\tan\frac{\delta}{2}\tan\sigma \leq 1 \tag{2}$$

σ一般为 15°~38°<sup>[15-16]</sup>,选取 σ=30°,故 δ=120°。
 入土角 θ 对浅耕犁的入土性能和前进阻力影响较大,
 为减小入土阻力,一般选取 25°~35°<sup>[17]</sup>,综合考虑浅耕
 犁结构尺寸,设计入土角 θ=30°。

土垡被抛送至一侧完成侧向迁移的关键在于土垡能 在犁铧作用下抬升至地表以上高度,即犁铧高度 h<sub>2</sub> 大于 耕作深度,为确定犁铧高度 h<sub>2</sub>,对垄形进行分析。根据 微垄种植农艺要求,微垄垄形为拱形,设计微垄断面形 状为直线-抛物线-直线形,如图 4 所示。

作业后单位长度的垄体体积分为上部抛物线部分和 下部梯形部分,由于机具作业后微垄个数为5个,因此 起垄前后需满足以下关系:

$$\begin{cases}
V = V_1 + V_2 \\
V_1 = \frac{1}{2} (a+b) H_2 \\
V_2 = \frac{2a(H_1 - H_2)}{3} \\
V' = ch \\
5V = \lambda V'
\end{cases}$$
(3)

式中*V*为单位长度下单个垄体体积, mm<sup>3</sup>; *V*'为作业前 单位长度对应工作区域的土壤体积, mm<sup>3</sup>; *c*为机具作业 幅宽, mm; λ为土壤膨松系数, 取 1.0~1.8<sup>[18-19]</sup>。由式 (3)可得

$$h = \frac{(15b - 5a)H_2 + 20aH_1}{5\lambda c}$$
(4)

根据微垄垄形  $H_1$ =150 mm,  $H_2$ =100 mm, a=170 mm, b=350 mm 等相关参数要求<sup>[9]</sup>,结合式(4)可得 h=95 mm。 由于浅耕犁初步实现土壤抛送运移,后期还需挤压整形 板进行挤压成形,因此设计犁铧高度大于耕作深度,选 取  $h_2$ =120 mm。

浅耕犁作业时假定在土垡抬升及后续抛送阶段具有 连续性,由稳定翻土抛送的条件  $L_1/h>1.27^{[20]}$ ,可得犁 铧宽度  $L_1=120$  mm。



注:  $V_1$ 为垄体下部分体积, mm<sup>3</sup>;  $V_2$ 为垄体上部分体积, mm<sup>3</sup>; h为耕作 深度, mm;  $H_2$ 为墒面高度(距离垄底 2/3 垄高), mm;  $H_1$ 为垄高, mm; a为墒面宽度, mm; b为垄宽, mm。

Note:  $V_1$  is the volume of the lower part of the ridge, mm<sup>3</sup>;  $V_2$  is the volume of the upper part of the ridge, mm<sup>3</sup>; *h* is the tillage depth, mm;  $H_2$  is the height of the soil moisture surface (2/3 of the ridge height from the ridge bottom), mm;  $H_1$  is the ridge height, mm; *a* is the width of the soil moisture surface, mm; *b* is the ridge width, mm.

#### 图4 微垄断面示意图

Fig.4 Schematic diagram of the cross section of micro-ridge

#### 2.2 犁体曲面设计及影响参数分析

犁体曲面会对土垡进一步破碎、翻转及抛掷,其曲 面结构参数对于土垡破碎效果、翻转过程及抛掷距离有 较大影响。

螺旋桨高速转动时,曲面可在流体中产生不同升力 的特性在航空、船舶等领域应用较多<sup>[21]</sup>。为满足浅耕犁 的高速作业性能,参照螺旋桨设计方法,以犁体破碎、 翻转及抛掷土垡的工艺流程,设计犁体曲面为变螺距扭 曲螺旋面,如图 5a 所示。其中犁体曲面为螺距面上截取 的一个区域,C'D 为螺旋面的母线,犁体曲面以母线 C' D为分界线划分为1和II两个区域,土垡在上升过程中 经由 I 区域发生破碎并偏转至抛送方向,经由 II 区域发 生土垡的翻转和抛掷。由于螺距越大,曲面扭曲程度越 大,当I 区域和 II 区域螺距均较大时,土垡过早抛掷,使 得土垡侧向抛送距离不够,造成土垡堆积于沟边位置造 成回流;当两区域螺距均较小时,土垡上升高度过大, 且土垡侧向抛送距离过大,不满足定向抛土要求,因此 设计 I 区域为小螺距,II 区域为大螺距,土垡在 I 区域上升 一定高度并完成转向后转移至 II 区域实现快速抛送过程。

犁体中间面部分由犁铧和犁体曲面母线 C'D 投影形成一条曲线 ACD 为导曲线,如图 5a 所示。为减少犁体磨损,满足土垡先抬后抛的作业方式,设计导曲线平滑过渡。由 2.1 节可知,犁铧部分由平面和圆弧曲面组成,设计投影曲线 CD 为抛物线,故螺旋面母线 C'D 也为抛物线。导曲线第 1 段 AB 为直线,对应犁铧的直面部分;

第2段 BC 为圆弧,对应犁铧的曲面部分;第3段 CD 为抛物线,代表犁体曲面的导曲线。各段端点为A (0,0)、 $B(x_1,h_1)$ 、 $C(x_2,h_2)$ 、 $D(x_3,h_3)$ ,为了使导曲线各段之间平滑过渡,保持在B、C过渡点的斜率一致。



注: L为犁体开度, mm; H为犁体高度, mm; o'为圆弧段圆心; R为圆 弧段半径, mm;  $\phi$ 为抛物线段起始点切线与水平线夹角, (°);  $x_1$ 为圆弧段 起始点横坐标, mm;  $h_1$ 为圆弧段起始点纵坐标, mm;  $x_2$ 为抛物线段起始 点横坐标, mm;  $h_2$ 为抛物线段起始点纵坐标, mm;  $x_3$ 为抛物线段末端点 横坐标, mm;  $h_3$ 为抛物线段末端点纵坐标, mm。

Note: *L* is the shallow plow opening, mm; *H* is the shallow plow height, mm; o' is the center of the arc segment; *R* is the radius of the arc segment, mm;  $\phi$  is the angle between the tangent at the starting point of the parabola segment and the horizontal line, (°);  $x_1$  is the coordinate of the starting point of the arc segment, mm;  $h_1$  is the coordinate of the starting point of the arc segment, mm;  $x_2$  is the coordinate of the starting point of the parabolic segment, mm;  $x_2$  is the coordinate of the starting point of the parabolic segment, mm;  $x_3$  is the coordinate of the starting point of the parabolic segment, mm;  $x_3$  is the coordinate of the arc point of the parabolic segment, mm;  $h_3$  is the coordinate of the parabolic segment, mm;  $h_3$  is the coordinate of the parabolic segment, mm;  $h_3$  is the coordinate of the parabolic segment, mm;  $h_3$  is the coordinate of the parabolic segment, mm;  $h_3$  is the coordinate of the parabolic segment, mm.

#### 图 5 导曲线形状与参数

Fig.5 Guiding curve shape and parameters

建立导曲线数学模型为

$$z = \begin{cases} kx & (AB\mathcal{B}) \\ \sqrt{R^2 - (x-d)^2} + u & (BC\mathcal{B}) \\ ex^2 + fx + g & (CD\mathcal{B}) \end{cases}$$
(5)

式中k、d、e、f、g为常数。

由导曲线各段平滑过渡,在B、C点斜率一致可得:

$$\begin{cases} \tan \theta = k = \frac{d - x_1}{2\sqrt{R^2 - (x_1 - d)^2}} \\ \tan \varphi = \frac{d - x_2}{2\sqrt{R^2 - (x_2 - d)^2}} = 2ex_2 + f \end{cases}$$
(6)

由式(5)、(6)及图中几何关系可知圆弧段半径 R、导曲线各点坐标对犁体的开度L、高度H有较大影 响,对土垡抬升等运动影响较大,故开展土垡运动学分 析以确定各参数。

#### 2.3 土垡定向抛送运动学分析

浅耕犁定向抛送土壤对起垄作业起关键作用。土垡 的运动主要分两个阶段,第1阶段为土垡在犁体的I区 域沿犁面快速上升破碎并发生偏转和侧移,运动至II区 域,第2阶段为土垡在II区域犁面作用下发生翻转并以 一定的速度抛出,如图6所示。为明析高速作业时土垡 运动过程,确定土垡抛送位置,对其进行分析。



注:  $v_0$ 为初始状态土垡相对犁的运动速度, m s<sup>-1</sup>;  $v_1$ 为土垡沿犁体曲面抛 出速度, m s<sup>-1</sup>; y为土垡抛出点犁体曲面螺距角, (°);  $x_4$ 为土垡沿速度方 向的位移, m;  $x_5$ 为土垡只在重力作用下的位移, m;  $x_6$ 为土垡在抛出速度 作业面内的最大抛出距离, m; h为土垡在犁面上的上升高度, m;  $\Delta h$ 为 抛出点距离落地点的高度, m; l为土垡横向抛送最大距离, m。

Note:  $v_0$  is the speed of the clod relative to the plow in the initial state,  $\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$ ;  $v_1$  is the speed of the clod being thrown along the plow body surface,  $\mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$ ;  $\gamma$  is the plow body surface helix angle at the clod throwing point, (°);  $x_4$  is the displacement of the clod in the direction of velocity,  $\mathbf{m}$ ;  $x_5$  is the displacement of the clod in the direction of velocity,  $\mathbf{m}$ ;  $x_5$  is the displacement of the clod in the direction of velocity,  $\mathbf{m}$ ;  $x_6$  is the maximum throwing distance of the clod in the throwing speed working surface,  $\mathbf{m}$ ; h' is the height of clod rise in shallow plow,  $\mathbf{m}$ ;  $\Delta h$  is the height from the throwing point to the landing point,  $\mathbf{m}$ ; l is the maximum lateral throwing distance of the clod,  $\mathbf{m}$ .

第1阶段土垡受重力、支持力和摩擦力作用,根据 动能定理可得

$$-mgh' - W = \Delta E_p \tag{7}$$

其中  $W = \int_{0}^{s} mg\mu \cos\alpha ds$ ,  $\Delta E_{p} = \frac{1}{2}mv_{1}^{2} - \frac{1}{2}mv_{0}^{2}$ 式中 W为摩擦力做功, J;  $\Delta E_{p}$ 为动量增量, J;  $\mu$ 为土 壤与犁体的摩擦系数;  $\alpha$ 为土垡运动过程中犁体各点的 起土角, (°); s为土垡在犁体上移动的距离, m。由式

(7) 可得

 $v_{1} = \sqrt{v_{0}^{2} - 2gh' - 2\int_{0}^{s} g\mu \cos\alpha ds}$  (8)

在第2阶段中,土垡以速度v<sub>1</sub>做斜抛运动,将斜抛运动分解为沿速度v<sub>1</sub>方向的匀速直线运动和竖直方向的自由落体运动,根据图6几何关系可得

$$\begin{cases} x_6 = \sqrt{x_4^2 - (x_5 - \Delta h)^2} \\ x_4 = v_1 t \\ x_5 = \frac{1}{2}gt^2 \\ l = x_6 \cos \gamma \\ h' = h + \Delta h \end{cases}$$
(9)

式中 t 为土垡做斜抛运动所需时间, s。由式(9)计算可得:

$$l = \frac{v_1 \sqrt{v_1^2 + 2g\Delta h}}{g} \cos\gamma \tag{10}$$

由式(8)和式(10)可得,土垡横向最大抛送距 离1与初速度v<sub>0</sub>、土垡上升高度h、土垡在犁体上移动 的距离s,土垡运动过程中犁体各点起土角a、土垡抛出 位置螺距角y有关。而h、s及a与犁体开度L及高度 H有关;土垡抛出位置螺距角y与螺旋曲面末端螺距角 y<sub>3</sub>有关。参考农业机械设计手册<sup>[20]</sup>,犁体高度H常取1.3H<sub>1</sub>, 由于高速犁体作业速度较快,土垡上升高度较大,设计 犁体高度为  $2H_1 \leq H \leq 3H_1$ ,即 H取  $300 \sim 450$  mm; 综合考虑农业机械设计手册中犁体末端抛土角度和高速 作业工况,选择螺旋曲面末端螺距角  $\gamma_3$ 为  $15^\circ \sim 45^\circ$ ;选 择犁体开度 L为  $180 \sim 220$  mm。后续将设计具有不同犁 体高度 H,开度 L与不同末端螺距角  $\gamma_3$ 的犁体,通过 EDEM 仿真分析的方法开展各犁体对土壤定向抛送效果 的研究,以进一步确定犁体曲面模型。

#### 3 仿真试验

## 3.1 模型建立

为探究犁体高度、犁体开度以及末端螺距角对起垄 作业效果的影响并确定较优结构参数组合,利用 EDEM 开展仿真研究,构建长×宽×高为 4 000 mm×1 000 mm× 150 mm的土槽,采用平均直径为 6 mm 的球体模拟土壤 颗粒进行填充,填充时从土槽底部开始按照高度 0~ 60 mm、60~150 mm 分两次进行填充,每次填充后采用 板材进行压实,以模拟实际田间密度均匀且耕作层为 90 mm 的土壤耕层状况,如图 7 所示。土壤接触模型采 用 Hertz-Mindlin with Bonding 模型,其本征参数及接触 参数参考文献<sup>[22-25]</sup>确定,如表 2 所示。



Fig.7 Discrete element simulation model

Table 2	Material parameters of simulation model			
项目			新店 Values	
Items	Type and contact	Parameters	致恒 values	
	1. 中市	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 650	
	工場	泊松比	0.31	
本征参数	3011	剪切模量/Pa	$1.82 \times 10^{6}$	
Intrinsic parameters	<i>म</i> ज	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 860	
	刊 Steel	泊松比	0.25	
	Steel	剪切模量/Pa	$7.9 \times 10^{10}$	
	土壤-土壤 Soil-soil	静摩擦系数	0.75	
		动摩擦系数	0.5	
接触参数		碰撞恢复系数	0.6	
Contact parameters	土壤-钢 Soil-steel	静摩擦系数	0.75	
		动摩擦系数	0.4	
		碰撞恢复系数	0.2	
		单位面积法向刚度 (N·m <sup>-3</sup> )	$2.0 \times 10^{8}$	
		单位面积切向刚度 (N·m <sup>-3</sup> )	$7.5 \times 10^{7}$	
Bonding 模型	土壤	临界法向应力/kPa	$1.0 \times 10^{5}$	
Bonding model	Soil	临界切向应力/kPa	5.3×10 <sup>4</sup>	
		粘结键半径/mm	3	
		接触半径/mm	3.9	

#### 表 2 仿真模型材料及接触参数 2 Material parameters of simulation mod

### 3.2 试验因素与指标

仿真试验时,设置入土深度为120 mm,作业速度参考当前油菜高速排种技术已达10~14 km/h的发展现状<sup>[26]</sup>,本文以12 km/h为例开展研究,以前期分析所得犁体高度*H*、犁体开度*L*、末端螺距角 γ<sub>3</sub>为试验因素,以土壤回流垄沟比 *Y*<sub>1</sub>、土壤定向迁移比 *Y*<sub>2</sub>及土壤抛送堆积高度*H*<sub>3</sub>作为试验指标。各评价指标的测量运用 EDEM 后处理模块在作业稳定区域内进行测量,采用 Total Mass Sensor 模块在作业前沿前进方向等距选用 200 mm×120 mm 质量提取框 *I* '以获取作业前犁体扰动区域土壤质量,在作业后获取回流土壤质量,在前进方向相同位置处等距选用 200 mm×350 mm×120 mm 质量提取框 *II* '以获取作业后垄体区域土壤质量,如图 8 所示。

相关指标计算方法如式(11)。

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{\sum \frac{m_1}{m_0}}{n} \times 100\% \\ Y_2 = \frac{\sum \frac{m_2}{m_0}}{n} \times 100\% \\ H_3 = \frac{\sum (z_1 - z_2)}{n} \end{cases}$$
(11)

式中 $m_1$ 为作业后回流土壤质量, $kg; m_0$ 为作业前犁体 扰动区域土壤质量,kg; n为测点数量; $m_2$ 为作业后垄 体区域土壤质量, $kg; z_1$ 为沿前进方向稳定作业区段随 机选取截面的垄顶颗粒的纵坐标; $z_2$ 为截面处垄沟底部 颗粒的纵坐标。





为得到较优结构参数组合,结合前期分析所得犁体 高度为 300~450 mm,犁体开度为 180~220 mm,螺旋 曲面末端螺距角为 15°~45°,进行单因素试验。开展单 因素试验时,其他因素取中心值,如开展犁体高度单因 素试验时,犁体开度取 200 mm,末端螺距角取 30°。

### 3.3 单因素试验结果与分析

浅耕犁体高度、开度及末端螺距角对土壤定向抛送 效果及土壤流向的影响如图 9、10 所示。

3.3.1 犁体高度对作业效果的影响

 度的增加呈现先增加再降低的变化趋势,在犁体高度为 375 mm 时,土壤定向迁移比与土壤抛送堆积高度达到最 大,在 375~450 mm 范围内,两个指标的降低趋势变化 较小。







图 10 不同犁体高度、开度及末端螺距角对土壤流向的影响 Fig.10 Impacts of different shallow plow height, opening, and end helix angle on soil flow direction

根据仿真试验可知,当犁体高度较小时,土壤上升 高度大于犁体高度并从犁体顶端溢出至垄沟中,导致土 壤回流垄沟比较大,同时土壤过早进入犁面上的Ⅱ区域 发生侧滑,导致土壤回流较多,土壤定向迁移比较小, 如图 10a 绿色颗粒所示,其中虚线为土壤抛送稳定后地 表形状。土壤抛送堆积高度也因土壤定向迁移少而土量 不足,因此土壤抛送堆积高度较低,且各指标变化趋势 较大。通过对试验结果分析可得,土壤上升高度为 370 mm;随着犁体高度增大,犁体对土壤的横向抛送距 离增大,垄沟土壤回流减少,土壤定向迁移增多,垄体 区土量增多,土壤抛送堆积高度增大。当犁体高度大于 土壤上升高度时,各指标变化趋势变小,但随着犁体高 度的增加,犁体前方壅土增多,单位高度下的导曲线曲 率变化减小,土壤流动性增强,从犁体边缘流出至垄沟 中,同时向相反方向运动的土壤增多,导致在 375~ 450 mm 范围内土壤回流垄沟比有所增加,土壤定向迁移 比有所减少,且土壤定向迁移比减小值比土壤回流垄沟 比增加值大,如图 10b 绿色颗粒所示。

3.3.2 犁体开度对作业效果的影响

根据仿真试验可知,当犁体开度较小时,抛物线曲 率较大,犁体前方壅土较多且无法及时排出,向相反方 向运动的土壤较多,同时部分土壤横向运动距离超出垄 体区域,因此土壤定向迁移比较小,如图 10c 绿色颗粒 所示。当犁体开度增大时,抛物线曲率变小,土壤上升 相对平缓,流动性增强,壅土有所缓解,土壤定向迁移 比增加,垄体区域的土壤增加,土壤抛送堆积高度增大, 但流动性增强后土壤成垡显著,犁体边缘土壤在土垡侧 向运移时发生挤压从侧边流出,如图 10d 绿色颗粒所示, 导致土壤回流垄沟比增大;当犁体开度增大到一定值后, 土垡窜动的横向距离超出垄体区域,导致土壤定向迁移 比降低,土壤抛送堆积高度减小,因此土壤定向迁移比 降低值要比土壤回流垄沟比增加值要大。

#### 3.3.3 末端螺距角对作业效果的影响

末端螺距角对作业效果的影响如图 9c 所示,土壤回 流垄沟比随着末端螺距角的增大呈现先递减再增大的变 化趋势,在末端螺距角为 37.5°时,土壤回流垄沟比最小。 土壤定向迁移比随着末端螺距角的增大而递增。土壤抛 送堆积高度随着末端螺距角增大呈现先增加再降低的变 化趋势,在末端螺距角为 30°时,土壤抛送堆积高度达 到最大。 根据仿真试验可知,当末端螺距角较小时,土壤抛 送横向距离较大,同时犁体前方壅土增多,来不及抛出, 因此抛送至相反方向的土壤、从犁两侧流出的土壤及超 出垄体区域的土壤较多,导致土壤定向迁移比较小,垄 沟回流比较大,如图 10e 绿色颗粒所示。随着末端螺距 角增大,土壤在犁体上的流动性增强,定向迁移的土壤 量增多,土壤抛送堆积高度也在增加。当末端螺距角增 大到一定值时,土壤抛送的横向距离变小,土壤堆积后 发生回流导致土壤回流垄沟比增大,且土壤抛送堆积高 度降低,如图 10f 绿色颗粒所示。

## 3.4 中心复合试验与结构参数优化分析

#### 3.4.1 试验方案及回归模型构建

通过对单因素试验结果分析可得,对于不同犁体高度(≥375 mm)、犁体开度和末端螺距角,土壤在犁体上的上升高度均为370 mm,故选取犁体高度为375 mm。 基于单因素试验中在犁体开度190~210 mm,末端螺距角22.5~37.5°条件下,可获得较大的土壤定向迁移比及 土壤抛送堆积高度的结果,开展二因素五水平中心复合 试验,以分析犁体开度及末端螺距角对试验指标的交互 作用,得到机具较优的作业参数组合。各因素水平编码 如表3所示,试验方案及结果如表4所示。

表 3 试验因素和水平 Table 3 Test factors and levels

水平值	犁体开度	末端螺距角
Level value	Shallow plow opening L/mm	End helix angle $\gamma_3 / (^\circ)$
-γ	185.86	19.39
-1	190.00	22.50
0	200.00	30.00
1	210.00	37.50
γ	214.14	40.61

表 4	试验方案及结果
Table /	Test plan and result

	1 4010	- 1030 p	and the	Suit	
序号 No.	L	γ <sub>3</sub>	Y1/%	Y2//%	$H_{3}/$ mm
1	200.00	30.00	27.56	54.41	162.64
2	190.00	37.50	29.45	54.51	149.51
3	200.00	30.00	28.34	56.29	165.81
4	200.00	30.00	27.66	54.94	156.78
5	210.00	37.50	31.13	53.32	130.91
6	214.14	30.00	31.62	48.28	138.53
7	200.00	19.39	32.57	54.97	155.05
8	200.00	30.00	28.25	55.97	157.61
9	200.00	30.00	28.44	55.42	157.21
10	200.00	40.61	30.54	57.77	142.91
11	210.00	22.50	34.47	48.51	148.88
12	190.00	22.50	30.32	53.44	151.31
13	185.86	30.00	28.37	51.15	154.10

建立土壤回流垄沟比、土壤定向迁移比和土壤抛送 堆积高度与犁体开度及末端螺距角的回归模型,并进行 方差分析,结果如表 5 所示。

通过响应面分析,试验指标的变化值与单因素试验 的变化趋势相同。由表 5 可知,各试验指标的回归模型 均极显著(P<0.01),失拟项 P 值不显著, y<sub>3</sub><sup>2</sup> 对土壤 定向迁移比影响不显著,其他各项均显著,剔除不显著 项,得到各试验指标与各因素的回归关系为

$$Y_1 = 432.40 - 4.08L - 0.49\gamma_3 - 0.01L\gamma_3 + 0.01L^2 + 0.03\gamma_3^2$$
(12)

$$Y_2 = -1\ 064.63 + 11.65L - 2.33\gamma_3 + 0.01L\gamma_3 - 0.03L^2 \quad (13)$$

$$H_3 = -3\ 125.08 + 30.98L + 16.71\gamma_3 - 0.05L\gamma_3 - 0.07L^2 - 0.11\gamma_3^2$$
(14)

表 5 起垄效果方差分析

Table 5	Analysis	of varia	nce for	seed bed	quality
	)				

指标	来源	平方和	白由度	均方		
Index	Sources	Sum of	Freedom	Mean	F	P
	t the model	Squares		Square		-
	模型	51.67	5	10.33	41.83	< 0.000 1**
	L	13.59	1	13.59	55.01	0.000 1**
	γ <sub>3</sub>	6.27	1	6.27	25.37	0.001 5**
	$L\gamma_3$	1.53	1	1.55	0.17	0.041 9*
Υ.	$L^2$	8.64	1	8.64	34.99	0.000 6**
1	γ <sub>3</sub> <sup>2</sup>	24.96	1	24.96	101.05	< 0.000 1**
	残差	1.73	7	0.247 0		
	失拟项	1.06	3	0.353 6	2.12	0.241 0
	纯误差	0.6684	4	0.167 1		
	总和	53.40	12			
	模型	94.65	5	18.93	33.02	0.000 1**
	L	12.95	1	12.95	22.59	0.002 1**
	$\gamma_3$	12.10	1	12.10	21.11	0.002 5**
	$L\gamma_3$	3.50	1	3.50	6.10	0.042 8*
V	$L^2$	62.39	1	62.39	108.84	< 0.000 1**
$Y_2$	$\gamma_3^2$	0.7712	1	0.771 2	1.35	0.2841
	残差	4.01	7	0.573 2		
	失拟项	1.70	3	0.5679	0.983 8	0.4846
	纯误差	2.31	4	0.577 2		
	总和	98.66	12			
	模型	1 044.61	5	208.92	18.74	0.000 6**
	L	231.65	1	231.65	20.78	0.002 6**
	γ3	170.55	1	170.55	15.30	0.005 8**
	$L\gamma_3$	65.37	1	65.37	5.86	0.046 0*
H3 -	$L^2$	388.41	1	388.41	34.84	0.000 6**
	$\gamma_3^2$	262.07	1	262.07	23.51	0.001 9**
	残差	78.03	7	11.15		
	失拟项	13.44	3	4.48	0.2774	0.8398
	纯误差	64.59	4	16.15		
	总和	1 122.63	12			-

注: \*为显著 (P<0.05), \*\*为极显著 (P<0.01)。下同。

Note: \* is significant (P < 0.05), \*\* is extremely significant (P < 0.01). The same below.

#### 3.4.2 结构参数优化分析

由上述分析可得,满足各指标的响应值的犁体参数 优化属于多目标优化问题,根据田间种植农艺要求,土 壤回流垄沟比应选择较小值,土壤定向迁移比应选择较 大值,土壤抛送堆积高度由于后续还需相关镇压部件进 行镇压整形,因此应选择较大值,建立如下优化模型

$$\begin{cases} \min Y_1(L,\gamma_3) \\ \max Y_2(L,\gamma_3) \\ \max H_3(L,\gamma_3) \\ s.t. \begin{cases} 185.86 \le L \le 214.14 \\ 19.39 \le \gamma_3 \le 40.61 \end{cases}$$
(15)

求解模型优化参数,得出优化参数组合为:犁体开度 *L*=203.60 mm、末端螺距角γ<sub>3</sub>=39.96°。该参数组合下, 模型预测土壤回流垄沟比为 30.53%、土壤定向迁移比为 56.87%、土壤抛送堆积高度为 138.24 mm。考虑后期加 工制造精度,选择犁体开度为 200 mm,末端螺距角为 40°,将该参数组合下的结构进行仿真试验,得出土壤回 流垄沟比为 29.92%,与模型预测值相差 0.61 个百分点; 土壤定向迁移比为 57.72%,与模型预测值相差 0.85 个百分点;土壤抛送堆积高度为 146.32 mm,与模型预测值 相差 8.08 mm,说明优化模型可靠。

## 4 田间试验

### 4.1 试验条件

为检验浅耕犁高速作业时的土壤定向抛送作业效果 及验证犁体在油菜高速带状微垄联合直播机上的种床制 备作业性能,根据 3.4 节得出的优化参数组合对浅耕犁 进行加工,于 2023 年 9 月在华中农业大学现代农业科学 试验基地开展浅耕犁单体不同作业速度下的对比试验, 试验地块为未耕杂草地,土壤类型为砂质黏壤土;于 2023 年 10 月在湖北省京山市屈家岭管理区华中农业大 学高性能播种关键技术集成与智能播种机生产示范基地 开展油菜高速带状微垄联合直播机性能试验,试验地块 1.67 hm<sup>2</sup>,试验前茬作物为大豆(2023 年 8 月收获), 秸秆量为 255.6 g/m<sup>2</sup>,土壤类型为壤土。试验前各地块工 况如表 6 所示。

表 6 试验地块工况参数

 Table 6
 Working condition parameters of test field

ナカ	试验类型	坚实度	含水率	容重
Conditions	Experiment	Compactness/	Moisture	Soil bulk
	type	kPa	content/%	density/( $g \cdot cm^{-3}$ )
1	不同作业速度试验	1 710.60	19.80	1.48
2	整机性能试验	1 434.41	17.76	1.39

## 4.2 试验指标及测试方法

试验机具动力均为东方红 954 型拖拉机,试验前通 过预试验确定浅耕犁工作状态下入土深度为 120 mm 时 下悬挂液压控制手柄的位置及拖拉机下悬挂的高度。试 验时根据预试验结果调整浅耕犁的作业深度;通过调节 拖拉机挡位和手油门位置调整拖拉机作业速度。试验机 组在相应地块沿直线方向作业距离为 60 m,每次试验进 行往返以实现重复,选择中间行程 40 m 稳定作业区段测 量相关作业指标。

#### 4.2.1 不同作业速度试验

为验证浅耕犁在高速状态下的作业性能,将浅耕犁 安装于台架上,如图 11a 所示,开展常规(4 km/h)与 高速(12 km/h)作业速度的对比试验,浅耕犁单体试验 评价指标与仿真试验作业指标相同。作业前在试验地块 按照五点取样法随机挖取5个长×宽×高为400 mm× 120 mm×120 mm的土方,测量其质量并求取平均值作为 该试验区域内犁体扰动区土壤质量,如图 11b 所示。在 每个行程内预计作业测量区域地表等距选取5点铺一薄 层长×宽为400 mm×1000 mm 白色标记物,如图 11c 所 示。犁体作业后以垄沟最低处为中心线,以白色标记物层 的高度为起始线向下取长×宽×高为400 mm×120 mm× 120 mm 区域内的土壤为垄沟回流土壤;沿土壤定向迁移 方向,以垄沟最低处为起始线,取350 mm 宽代表起垄 区域宽度,沿作业前进方向取400 mm,统计400 mm× 350 mm 选框内白色标记物层以上的土壤为定向迁移土壤; 沿机具前进方向,采用取型器测量垄顶至垄沟之间的高 度代表土壤抛送堆积高度。两个行程作业后,统计10个 取样点的垄沟回流土壤质量、定向迁移土壤质量及土壤 抛送堆积高度并求取平均值。



a. 浅耕犁台架 a. Shallow plough bench



b. 犁体扰动区域土壤 b. Soil in the plow- disturbed area

c. 试验区域 c. Test area

图 11 浅耕犁不同速度对比试验 Fig.11 Shallow plow comparative experiment at different speeds

#### 4.2.2 整机性能试验

整机性能试验中由于微垄种床制备主要由浅耕犁进行土壤定向抛送,实现土壤横向运移,笼式碎土辊及挤压整形板对土壤横向运移作用不大,因此微垄种床的垄形稳定性主要取决于浅耕犁定向抛送土量与土壤抛送堆积高度。为检验油菜高速带状微垄联合直播机的高速作业性能,选择作业速度为12 km/h,选取直播机作业后垄高及其变异系数、垄宽及其变异系数为作业指标。直播机作业后使用 Trimble TX8 三维激光扫描仪扫描微垄种床,以获得微垄点云图,通过 Trimble RealWorks 软件处理微垄轮廓并随机选取 5 点测量垄高及垄宽,并按照式(16)计算垄高变异系数 CV<sub>1</sub>和垄宽变异系数 CV<sub>2</sub>。

$$\begin{cases} CV_1 = \frac{s_1}{\overline{H}'_1} \times 100\% \\ CV_2 = \frac{s_2}{\overline{b}_1} \times 100\% \end{cases}$$
(16)

$$\underset{s_{2}}{\nexists} \quad \stackrel{}{\oplus} \overline{H_{1}} = \frac{\sum_{i=1}^{5} H_{1i}}{5}, \quad \overline{b_{1}} = \frac{\sum_{i=1}^{5} b_{1i}}{5}, \quad s_{1} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{5} \left(H_{1i}^{'} - \overline{H_{1}}\right)^{2}}}{5}, \\ s_{2} = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{5} \left(b_{1i} - \overline{b_{1}}\right)^{2}}}{5}$$

式中 $H_{1i}$ 为垄高测量值, mm;  $b_{1i}$ 为垄宽测量值, mm;  $\overline{H_i}$ 为垄高测量平均值, mm;  $\overline{b_1}$ 为垄宽测量平均值, mm;  $s_1$ 为垄高标准差, mm;  $s_2$ 为垄宽标准差, mm。

## 4.3 试验结果与分析

4.3.1 不同作业速度试验

在砂质黏壤土条件下,浅耕犁在不同作业速度下均 打破了犁底层,相比常规旋耕作业提高了耕作层深度, 但在不同作业速度下土壤抛送距离及抛送位置存在较大 差异。在常规作业速度下土壤回流较多且抛送距离较小, 土壤堆积于垄沟边缘位置,如图 12a 所示;在高速作业 情况下土壤定向抛送效果明显, 垄沟显著且土壤成条状 堆积于起垄区域,如图 12b 所示,各指标参数如表 7 所 示。高速作业比常规速度作业的土壤回流垄沟比小 6.26 个百分点,土壤定向迁移比大 4.14 个百分点,土壤抛送 堆积高度大 12.40 mm,表明浅耕犁在高速作业情况下抛 土性能好。



a.  $4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$  b.  $12 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 



#### 表 7 浅耕犁不同作业速度对比试验结果

Table 7Comparison of test results of shallow tillage plows at<br/>different operating speeds

	01	
试验指标	速度/( km·h <sup>-1</sup> )	
Experimental indicators	4	12
土壤回流垄沟比 Soil flowback ridge-furrow radio/%	32.44	26.18
土壤定向迁移比 Soil directed migration radio/%	53.28	57.42
土壤抛送堆积高度 Soil throw accumulation height/mm	148.20	160.60

高速作业下各试验指标相较于仿真试验结果,土壤 回流垄沟比要小3.74个百分点,土壤定向迁移比要小 0.3个百分点,土壤抛送堆积高度要大14.28 mm,表明 仿真模型可靠。田间高速作业和仿真作业的土壤回流垄 沟比和土壤抛送堆积高度存在较大差异可能是由于田间 土壤含水率存在差异,作业后部分土壤破碎不充分,导 致部分土壤以块状的形式抛向相反方向; 垄体区域的土 壤以块状的形式堆积,导致土壤抛送堆积高度较高。

## 4.3.2 整机性能试验

整机性能试验结果表明,在壤土条件下油菜高速带 状微垄联合直播机作业通过性好, 垄形稳定,如图 13 所 示。作业后垄高为 148.64 mm, 垄宽为 349.06 mm, 垄高 变异系数为 4.05%, 垄宽变异系数为 3.86%。垄形的稳 定性说明了浅耕犁定向土壤抛送及土壤抛送高度满足作 业要求且稳定性较好,其作业形成的种床满足油菜种植农艺要求,15 d和 40 d的油菜出苗效果如图 13b,13c 所示,由于 2023 年油菜生长初期气候干旱,播种后 40 天内仅在第4、15、19、35 天有 3.4 mm、31 mm、7.9 mm 和 6.7 mm 的降雨量, 垄顶土壤水分较少,而垄沟保墒, 所以油菜多集中于垄沟中。



a. Experiment of whole machine

b. 出苗15 d b. Seedling emergence at 15 d

c. 出面40 d c. Seedling emergence at 40 d

图 13 整机田间试验及油菜出苗效果

# Fig.13 Field experiment of the machine and the effect of rapeseed seedling emergence

综上所述,通过在砂质黏壤土和壤土条件下试验, 基于仿真模拟分析设计的浅耕犁高速(12 km/h)优于常 规(4 km/h)作业速度下的抛土性能,高速作业土壤定向 迁移比大且土壤回流垄沟比小,抛送土量及抛送高度满 足微垄要求,说明浅耕犁在高速作业下定向抛土效果显 著,采用浅耕犁定向抛送的作业方式可满足油菜微垄种 床制备作业在高速时的通过性。后续将进一步开展不同 作业速度及不同工况下(如黏土等)的试验,以探索浅 耕犁在不同作业速度下的抛送规律及对不同工况的适应性。

## 5 结 论

 针对现有微垄种床制备装置搭载传统旋耕装置作 业效率有待提升且耕层浅的问题,结合油菜适播期与苗 期易遭受极端恶劣气候影响和油菜扩种的背景,提出了 一种油菜高速微垄直播工艺,设计了一种油菜高速带状 微垄联合直播机关键部件浅耕犁,可实现土壤定向抛送 并打破犁底层,以满足油菜微垄种床制备的高速化作业。

2)分析了变螺距扭曲螺旋面构建犁体曲面过程,确 定了浅耕犁的犁铧铧刃角为120°,入土角30°,犁铧宽 度120 mm;构建了犁体导曲线数学模型并开展了土垡抬 升-抛送过程的运动学分析,利用EDEM仿真开展了各 因素对土壤定向抛送效果的研究,确定犁体高度为 375 mm,犁体开度为200 mm,末端螺距角为40°。

3)田间试验结果表明:浅耕犁高速作业的抛土性能 比常规速度下的抛土性能好,高速作业土壤定向抛送明 显, 垄沟明显且土壤成条状堆积于起垄区域,土壤回流 垄沟比为 26.18%,土壤定向迁移比为 57.42%,土壤抛 送堆积高度为 160.60 mm; 整机作业通过性好,垄形稳 定, 垄高及垄宽变异系数均小于 5%,说明浅耕犁定向抛 送土壤量及抛送高度满足高速微垄制备要求,采用浅耕 犁定向抛送的作业方式可满足油菜微垄种床制备作业在 高速时的通过性,出苗效果也说明微垄种床满足油菜种 植农艺要求。

## [参考文献]

[1] 陈慧,高丽萍,陈勇,等.机械直播同步深施肥对冬油菜 茎秆抗倒性和产量的影响[J].农业工程学报,2022,38(5): 20-27.

CHEN Hui, GAO Liping, CHEN Yong, et al. Effects of mechanical direct seeding synchronous deep fertilization on winter rapeseed stem lodging resistance and yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(5): 20-27. (in Chinese with English abstract)

 [2] 高丽萍,陈慧,刘嘉诚,等.油菜机械直播同步分层施肥 对根系构型和抗倒伏能力影响[J].农业工程学报,2023, 39(11): 87-97.
 GAO Liping, CHEN Hui, LIU Jiacheng, et al. Effects of synchronous layered fertilization with machinery on the root architecture and lodging resistance of rape[J]. Transactions of

the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(11): 87-97. (in Chinese with English abstract)

- [3] 梁方,邓玮鸿,罗历强,等.油菜秸秆对置双螺旋埋覆还 田装置设计与优化[J].农业工程学报,2023,39(21):10-17. LIANG Fang, DENG Weihong, LUO Liqiang, et al. Optimizing double-screw burying device for rape straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(21): 10-17. (in Chinese with English abstract)
- [4] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2023.
- [5] 李晓冉,廖庆喜,王磊,等.稻麦油兼用高速气送式集排器型孔轮设计与试验[J].农业工程学报,2023,39(14):35-48. LI Xiaoran, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Design and experiments of the type-hole wheel with high-speed air-assisted centralized metering device for rice, wheat and rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(14): 35-48. (in Chinese with English abstract)
- [6] 杨海云,艾雪莹,BATOOL Maria,等.油菜响应水分胁迫的生理机制及栽培调控措施研究进展[J].华中农业大学学报,2021,40(2):6-16. YANG Haiyun, AI Xueying, BATOOL Maria, et al. Progress on physiological mechanisms of response to water stress and measures of cultivation controlling in rapeseed[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 6-16. (in Chinese with English abstract)

experiment for ridge lifting device of rapeseed planter[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020, 55(3): 181-189. (in Chinese with English abstract)

- [8] WANG X, El-BADRI A M, LI M, 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.
- [9] 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 Limin, 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 with English abstract)

[10] ZHOU X, WANG Q, ZHANG D, et al. Effects of ridge-furrow

rainwater harvesting with biochar application on soil physical properties and alfalfa fodder yield in semiarid region in China[J]. Journal of soils and sediments, 2023, 23(2): 1008-1022.

- [11] ZHANG G, HOU Y, ZHANG H, et al. Optimizing planting pattern and nitrogen application rate improves grain yield and water use efficiency for rain-fed spring maize by promoting root growth and reducing redundant root growth[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105385.
- [12] 李蒙良,王立宗,廖庆喜,等.油菜机直播微垄种床制备 过程旋耕后土壤离散元参数标定[J].农业工程学报,2023, 39(20): 10-19.
  LI Mengliang, WANG Lizong, LIAO Qingxi, et al. Calibration of rototilled soil discrete element parameters after rotary tillage in the preparation process of rapeseed mechanized direct seeding micro-ridge seed bed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(20): 10-19. (in Chinese with English abstract)
- [13] 戴飞,宋学锋,赵武云,等. 微垄式覆膜覆土联合作业机 设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(3):97-105,129.
  DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of operation machine for filming and covering soil on tiny ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 97-105,129. (in Chinese with English abstract)
- [14] 魏国粱,张青松,刘立超,等. 犁旋组合式油菜直播机扣 垡装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 38-46. WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Design and experiment of plowing and rotary tillage buckle device for rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 38-46. (in Chinese with English abstract)
- [15] 吕金庆,刘志峰,王鹏榕,等.驱动式碎土除草多功能马 铃薯中耕机设计与试验[J].农业工程学报,2019,35(10): 1-8.

LV Jinqing, LIU Zhifeng, WANG Pengrong, et al. Design and experiment of driving-type crushing-weeding multi-functional potato cultivator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(10): 1-8. (in Chinese with English abstract)

- [16] 包攀峰,吴明亮,官春云,等. 犁旋组合式油菜播种开沟 起垄装置设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 23-31.
  BAO Panfeng, WU Mingliang, GUAN Chunyun, et al. Design of plow-rotary style ditching and ridging device for rapeseed seeding[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(20): 23-31.
  (in Chinese with English abstract)
- [17] 张还,郭鑫雨,张健,等. 马铃薯播种机两段式组合起垄装 置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(S1): 76-83, 92. ZHANG Huan, GUO Xinyu, ZHANG Jian, et al. Design and Experiment of Two-stage Combined Ridging Device for Potato Planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(S1): 76-83, 92. (in Chinese with English abstract)
- [18] 杜文斌,杨春雷,杨锦鹏,等.雪茄烟叶可调式苗床起垄 铺膜机设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(1):116-126,295.
  DU Wenbin, YANG Chunlei, YANG Jinpeng, et al. Design and experiment of cigar tobacco adjustable seed-plot ridging and film spreading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 116-126,295. (in Chinese with English abstract)
- [19] 齐江涛,孙会彬,贾洪雷,等.曲翼中耕培土装置作业参数优化与试验[J].农业工程学报,2021,37(2):79-85.
   QI Jiangtao, SUN Huibin, JIA Honglei, et al. Optimization and

experiment of working parameters of cultivator-ridging-device with curved wing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(2): 79-85. (in Chinese with English abstract)

- [20] 中国农业机械科学研究院.农业机械设计手册(上)[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [21] 盛振邦.船舶原理(下册)[M].上海:上海交通大学出版 社,2019.
- [22] 王立宗,廖庆喜,张子龙,等.油菜高速直播机开畦沟装 置刀组优化与试验[J].农业工程学报,2024,40(3):37-49.
  WANG Lizong, LIAO Qingxi, ZHANG Zilong, et al. Optimization and experiments of the blade group of ditching devices in rapeseed direct seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(3): 37-49. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王立宗,廖庆喜,李蒙良,等.油菜高速免耕直播机驱动型开畦沟装置设计与试验[J].农业工程学报,2023,39(19): 15-26.

WANG Lizong, LIAO Qingxi, LI Mengliang, et al. Drive-type ditching device of the high-speed no-tillage direct seeder for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2023, 39(19): 15-26. (in Chinese with English abstract)

- [24] CHENG J, XIA J, ZHENG K, et al. Construction and analysis of a discrete element model for calculating friction resistance of the typical rotary blades[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108303.
- [25] HOSEINIAN S H, HEMMAT A, ESEHAGHBEYGI A, et al. Development of a dual sideway-share subsurface tillage implement: Part 1. Modeling tool interaction with soil using DEM[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 215: 105201.
- [26] 李晓冉,廖庆喜,廖宜涛,等.稻麦油兼用高速气送集排器螺旋斜置式搅种装置研制[J].农业工程学报,2024,40(4):51-61.

LI. Xiaoran, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Development of the spiral-inclined seed stirring equipment in high-speed airassisted centralized metering for rice, wheat, and rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(4): 51-61. (in Chinese with English abstract)

## Design and experiments of the shallow plow for the high-speed strip microridge combined direct seeding machine for rapeseed

DU Wenbin<sup>1</sup>, LIN Jianxin<sup>1</sup>, LI Xiaoran<sup>1</sup>, LI Lin<sup>1</sup>, ZHANG Qingsong<sup>1,2</sup>, LIAO Qingxi<sup>1,2</sup>\*

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Midlower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Existing micro-ridge seedbed preparation devices can often be equipped with conventional rotary tillage. However, the shallow tillage depth has been confined to the suboptimal operational efficiency. Particularly, the rapeseed cannot resist extremely adverse climates during optimal sowing and seedling in the current cultivation. In this study, a shallow plow was proposed with the high-speed micro-ridge direct seeding for rapeseed. Three sequential functions were integrated: 1) highspeed strip shallow tillage. A "lift-first and throw-later" mechanism was utilized to rapidly form the ridges using directional soil throwing; 2) micro-ridge seedbed shaping. The geometric configuration of the ridges was optimized to enhance the soil structure, and 3) sowing on ridge tops and furrows. The moisture was regulated to improve the stress resilience and yield stability of the rapeseed in the micro-ridge system. According to the operational requirements of the high-speed strip shallow tillage, a directional soil-throwing shallow plow was developed for the soil displacement at high speed. The micro-ridge morphology was analyzed for the curved surface of a variable-pitch twisted spiral plow body. The plowshare parameters were then determined: a cutting-edge angle of 120°, an entry angle of 30°, and a plowshare width of 120 mm. A mathematical model was established for the shallow plow guide curve. A kinematic analysis was also conducted on the soil lifting and throwing. Single-factor experiments were performed using EDEM software. A systematic investigation was also made on the effects of the shallow plow height, shallow plow opening, and end helix angle on the directional soil-throwing performance. A central composite design (CCD) with two factors (shallow plow opening and end helix angle) and five levels was implemented to determine their interactions on the directional soil-throwing performance. The optimal combination of the parameters was identified after iterative simulation and optimization: the shallow plow height of 375 mm, shallow plow opening of 200 mm, and end helix angle of 40°. Field experiments were conducted on the sandy clay loam and loam soil. The shallow plow achieved better soil-throwing performance at the high speed (12 km/h), compared with the conventional speed (4 km/h). Furthermore, the directional soil throwing was enhanced under the high-speed operation. There were well-defined furrows and strip-shaped soil accumulation in ridging zones. Key metrics included a soil flow back ridge-furrow ratio of 26.18%, a soildirected migration ratio of 57.42%, and a soil throw accumulation height of 160.60 mm. The better operational passage of the machined to the stable ridge with a ridge height of 148.64mm and a ridge width of 349.6mm. The coefficients of variation were less than 5% for the ridge height and width. The high stability was also achieved in the directional soil throwing position, soil quantity, and throwing accumulation height, thus fully meeting the micro-ridge requirements. Furthermore, directional soilthrowing with the shallow plow can be expected for optimal operational passage in the high-speed micro-ridge seedbed preparation. Seedling emergence validated that the micro-ridge seedbed configuration fully met the agronomic requirements for the rapeseed direct-seeding. These findings can provide a viable technical pathway to develop high-quality rapeseed seedbeds for micro-ridge direct seeding.

Keywords: agricultural machinery; rapeseed; micro-ridge; high speed; direct seeding