

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.  
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2024.02.024

## 油菜基质块移栽机苗床带整备装置设计与试验

李心志<sup>1</sup>,廖庆喜<sup>1,2</sup>,袁华<sup>1</sup>,韩静轩<sup>1</sup>,王磊<sup>1</sup>,符明联<sup>3</sup>

1. 华中农业大学工学院,武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070;  
3. 云南省农业科学院经济作物研究所,昆明 650000

**摘要** 针对现有油菜基质块苗移栽机开沟装置作业存在沟宽稳定性差、沟底面平整度低、土壤扰动大等现象,导致立苗率低、覆土作业难度大等问题,基于船式开沟器腔体大以及铧式开沟器作业构建宽苗床、平沟底特点,结合类铧式曲面衔接过度,设计了一种适用于油菜基质块苗移栽机苗床构建的苗床带整备装置。建立了土壤与整备装置互作力学模型,确定了苗床带整备装置构建稳定苗床的主要结构参数。以整备装置作业速度、作业深度、类铧式曲面前端宽度、刃口角为因素,以土壤扰动量、沟宽变异系数为评价指标,利用EDEM开展四因素三水平二次正交组合仿真试验,试验结果显示:作业深度为41 mm、作业速度为0.52 m/s、类铧式曲面前端宽度为40 mm、刃口角为61°时土壤扰动量较小且沟宽变异系数较小;较优参数组合下台架试验得出土壤扰动量为13.01 cm<sup>2</sup>,沟宽变异系数8.52%。田间试验结果显示:安装在移栽单元上的苗床带整备装置相较船式开沟器的载苗基质块立苗率增加2.09个百分点,沟宽变异系数减少13.3%,土壤扰动量减少20.9%,沟底面紧实度增加28.7%,满足油菜基质块苗机械移栽苗床构建要求。

**关键词** 油菜;移栽机;苗床带整备装置;类铧式曲面;机械移栽

**中图分类号** S223.9 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2024)02-0215-12

油菜是我国重要的油料作物,其种植面积和产量均居世界前列,冬油菜种植区主要集中在长江中下游<sup>[1-3]</sup>。油菜机械化移栽是稻油水旱轮作种植模式下缓解茬口矛盾的重要途径之一<sup>[4-5]</sup>,其中油菜基质块育苗移栽具有成活率高、根系损伤低和病虫害少等优点<sup>[6-9]</sup>。油菜基质块苗移栽机开沟装置构建沟形稳定、沟底平整的苗床,是影响栽植效果的关键因素。采用传统船式开沟器楔角挤压土壤构建苗床,由于土壤易黏附于开沟楔角,导致船式开沟器触土面几何形状发生改变,作业阻力增大且沟形不稳定,难以构建良好的苗床土壤环境从而影响移栽质量。

国内外学者为提高开沟质量,对开沟器进行了深入研究。刘晓鹏等<sup>[10]</sup>根据土壤切削、挤压和犁体曲面成型原理,设计了组合式船型开沟器,有效提高播种时同步开畦沟作业稳定性;刘瑞等<sup>[11]</sup>设计了一种宽苗带减阻燕麦播种机开沟器,解决了播种机开沟器开出的种沟较窄从而无法适应燕麦宽苗带种植

农艺要求的问题;赵淑红等<sup>[12]</sup>为解决免耕播种机开沟器播种深度均匀性差、工作阻力大、土壤扰动大等问题,设计了一种分段式玉米播种开沟器;王磊等<sup>[13]</sup>为提高不平地作业工况下宽幅播种机各行播深稳定性和均匀性,基于仿形辊弹性形变方式设计了一种仿形播种开沟器;Solhjou等<sup>[14-16]</sup>基于不同倾角、铲尖形状、铲柄形状开沟器对土壤扰动位移的影响,优化了开沟器结构参数;Nandede等<sup>[17]</sup>以牵引阻力、土壤覆盖率为试验指标进行了铧式、铲式和靴式开沟器与双圆盘和八字形覆土器组合试验,得到铲式开沟器与圆盘覆土器是满足蔬菜吊杯式移栽机农艺要求的最佳组合。目前国内外学者对开沟器设计多集中在减少土壤扰动、降低牵引阻力、满足宽苗沟要求等方面,而适用于油菜基质块苗移栽机构建宽苗沟、平沟底、少扰动的苗床带整备装置鲜见报道。

本研究针对现有油菜基质块苗移栽机采用船式开沟器作业时,存在沟形稳定性差、沟底平整度低、

收稿日期:2023-01-13

基金项目:云南省创新引导与科技型企业培育计划项目(202204BI090020)

李心志, E-mail: 1138985969@163.com

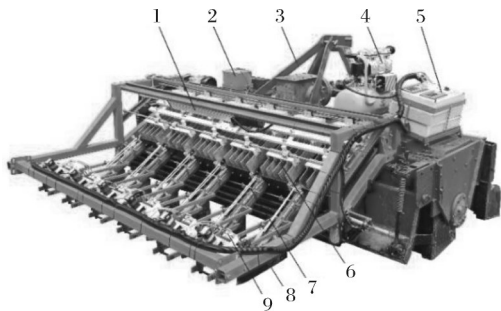
通信作者:廖庆喜, E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

土壤扰动大等问题,结合芯铧式开沟器沟幅宽、平沟底作业特点及入土隙角与圆弧腔底面高度差契合的结构特点与船式开沟器腔体大的结构特点,结合类铧式曲面组合船式开沟器与芯铧式开沟器设计一种适用于基质块苗机械移栽的苗床带整备装置,通过EDEM二次正交组合仿真试验得到整备装置最优参数组合,并通过田间试验检验安装苗床带整备装置的油菜基质块苗移栽机工作性能,旨在为油菜基质块苗移栽机苗床构建装置的设计提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 总体结构及工作过程

1)总体结构。油菜基质块苗移栽机(图1)主要由旋耕机、空气压缩机、横向送苗装置、纵向送苗装置、取苗装置、苗床带整备装置及控制箱等组成,工作幅宽2.2 m,可一次性完成旋耕、开苗床、横向送苗、纵向送苗、6行移栽等作业功能。



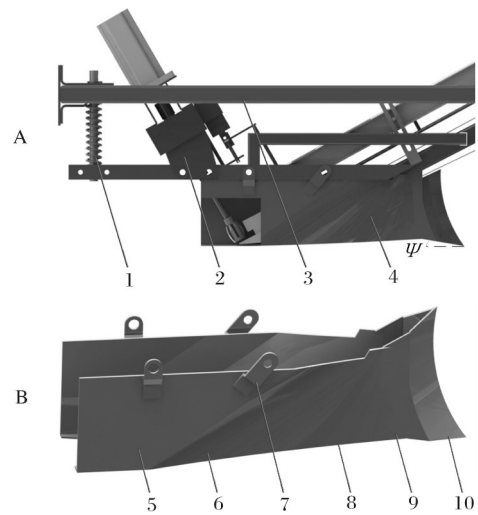
1. 直线滑台 Straight slide; 2. 电源 Power supply; 3. 旋耕机 Rotary cultivator; 4. 空气压缩机 Air compressor; 5. 控制箱 Control box; 6. 横向送苗装置 Horizontal seedling feeding device; 7. 纵向送苗装置 Longitudinal seedling feeding device; 8. 苗床带整备装置 Seedling belt preparation device; 9. 取苗装置 Pick-up mechanism.

图1 油菜基质块苗移栽机整机图

Fig.1 Sketch of rape substrate block seedlings transplanter

苗床带整备装置安装在移栽单元尾端,将分取苗装置包覆于内(图2A)。苗床带整备装置作为油菜移栽苗床构建的关键部件(图2B),主要由滑刀、分流板、类铧式曲面、尾翼板、腔底面等组成,主要触土结构为滑刀、类铧式曲面和腔底面。其中, $\psi$ 为入土隙角。

2)工作过程。移栽作业时,包覆分取苗装置的苗床带整备装置与旋耕后土壤接触构建连续苗床,整备装置与土壤间相互作用阶段分别为土壤分流、沟型挤压、平整沟底。移栽机作业时,滑刀切开土壤形成U型断面沟槽完成土壤分流阶段;土壤在分流



A: 移栽单元部分结构图 Part structure diagram of transplanting unit; B: 苗床带整备装置 Seedbed belt preparation device; 1. 仿形装置 Profiling device; 2. 分取苗装置 Separating seedling device; 3. 机架 Rack; 4. 苗床带整备装置 Seedbed belt preparation device; 5. 尾翼板 Tail plate; 6. 类铧式曲面 Share-like surface; 7. 连接耳 Connecting ear; 8. 腔底面 Cavity bottom; 9. 分流板 Splitter plate; 10. 滑刀 Slide knife.

图2 苗床带整备装置示意图

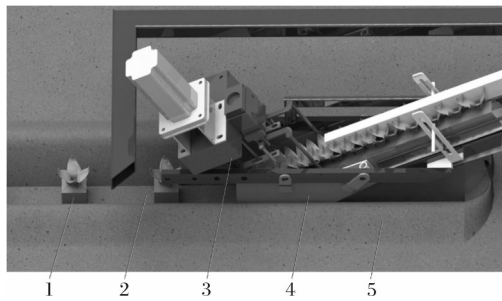
Fig.2 Schematic diagram of continuous seedbed belt preparer

板左、右两侧及腔底面作用下形成“槽钢”型断面,类铧式曲面是苗床带整备装置实现开沟成型功能的主要曲面,土垡沿曲面运动,按休止角堆积在苗沟两侧,完成沟型挤压阶段;整备装置底面的土壤通过腔底面法向挤压力作用被挤压抹平,完成平整沟底阶段。油菜载苗基质块通过分取苗装置铺放在沟底平整且连续的苗床带上,铺放阶段尾翼板与土壤接触点沿法线方向挤压土壤,避免土壤回流苗沟,保护载苗基质块铺放过程不受土壤干扰,保证载苗基质块入土稳定性,提高载苗基质块直立度。

### 1.2 苗床带整备装置设计

1)苗床带整备装置构建。苗床带整备装置由滑刀、类铧式曲面、圆弧腔底面等组成,采用芯铧式开沟器开沟芯铧替代船式开沟器开沟楔角,可有效减少整备装置前端对土壤的挤压,同时实现入土隙角与腔底面圆弧前端契合,结合腔底面对苗床底面土壤进行抹压,保证苗床底面平整度。苗床带整备装置通过对土壤分流、沟形挤压、沟底平整3个过程构建沟形稳定、沟底平整、土壤扰动少的苗床。

①苗床带整备装置土壤分流阶段。移栽机分取苗装置被苗床带整备装置包覆在土壤中作业,滑刀

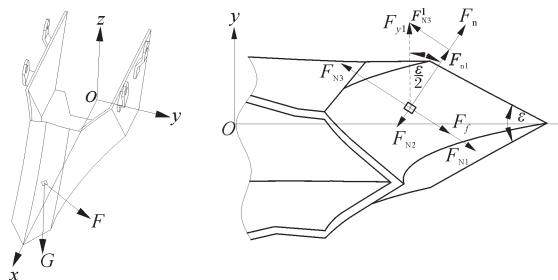


1. 载苗基质块 Seedling matrix block; 2. 苗床 Seedbed; 3. 移栽单元 Transplanting unit; 4. 苗床带整备装置 Seedbed belt preparation device; 5. 旋耕土壤 Rotary tillage soil.

图3 苗床带整备装置工作示意图

Fig.3 Working diagram of continuous seedbed belt preparation

分流是防止开沟作业过程土壤运动至整备装置内部干扰分取苗装置运动的关键。滑刀刃口分流应保证开沟时降低土壤扰动、减少整备装置前端土壤堆积。刃口角偏小可有效降低牵引阻力但强度较低容易折刃；刃口角偏大可增加强度但牵引阻力增大<sup>[18]</sup>。为便于分析刃口角对土壤的横向挤压力，以整备装置中心线前进方向为x轴正方向，垂直x轴向外为y轴正方向，建立平行于前进方向的坐标系(图4)，为便于分析影响滑刀分流(即滑刀对土堡y方向挤压力)因素，在xOy平面对土堡进行分析。其中，F为土堡所受滑刀支持力，G为土堡所受重力，ε为刃口角，F<sub>n</sub>为土堡所受滑刀在xOy平面上的支持力，F<sub>f</sub>为土堡所受滑刀摩擦力，F<sub>N1</sub>为土堡上侧土壤对其挤压力，F<sub>N2</sub>为土堡后侧土壤对其挤压力，F<sub>N3</sub>为土堡前侧土壤对其挤压力。



A: 坐标系建立 Establishment of coordinate system; B: xOy平面土堡受力简图 xOy plane soil stress diagram.

图4 土壤运动受力简图

Fig.4 Schematic diagram of working forces for soil

以土壤为研究对象，受力为：

$$\begin{cases} F_x = (F_f + F_{N2} - F_{N3}) \cos \frac{\epsilon}{2} + (F_n - F_{N1}) \sin \frac{\epsilon}{2} \\ F_y = (F_{N3} - F_f - F_{N2}) \sin \frac{\epsilon}{2} + (F_n - F_{N1}) \cos \frac{\epsilon}{2} \\ F_f = F_n \tan \phi \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中:φ为土壤摩擦角,(°)。在xOy平面,考虑土壤颗粒的实际运动相对于苗床带整备装置向后、向外,故将土壤颗粒所受作用力进行简化

$$\vec{F}_{N3}^1 + \vec{F}_n^1 = \vec{F}_y^1 \quad (2)$$

式(2)中:F<sub>N3</sub><sup>1</sup>为土堡所受平行于滑刀面的简化力,N;F<sub>n</sub><sup>1</sup>为土堡所受垂直于滑刀面的简化力,N;F<sub>y</sub><sup>1</sup>为F<sub>N3</sub><sup>1</sup>、F<sub>n</sub><sup>1</sup>的合成力,N。由式(2)可知,ε/2越小y轴方向分力越大,滑刀对土壤的分流效果越好,由摩擦原理可知,刃口角小于(180°-ε),土壤颗粒沿刃口楔面具有向后滑移的趋势<sup>[10]</sup>;为保证土壤沿刃口楔面的流动性刃口角应大于ε,故50°≤ε≤130°,考虑到整备装置总体长度及滑刀强度,确定刃口角为60°~70°。

②苗床带整备装置沟形挤压阶段。整备装置前后幅宽一致,导致整备装置与土壤相互作用集中在装置前端,对土壤局部扰动大,整备装置土壤扰动量较大。设计类铍式曲面过度衔接开沟滑刀与尾翼板,保证整备装置整体幅宽由前向后变小,减少前端作用集中,同时土壤在类铍式几何形状约束下运动减少扰动。苗床带整备装置类铍式曲面形成原理如图5所示,其中γ为曲元线与导曲线交点切线与x轴的夹角,H<sub>z</sub>为类铍式曲面高度,L<sub>y</sub>为类铍式曲面末端宽度,L<sub>x</sub>为类铍式曲面长度,L<sub>q</sub>为类铍式曲面前端宽度。曲元线CB沿导曲线AB按切线角γ逐渐增大的规律运动形成曲面ABCD,截取部分曲面即为整形曲面。

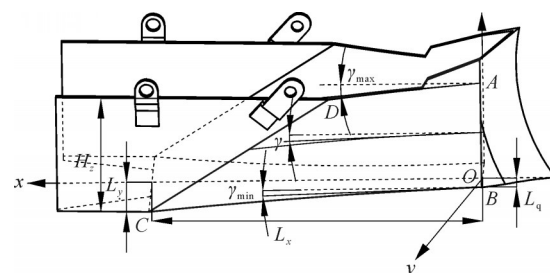


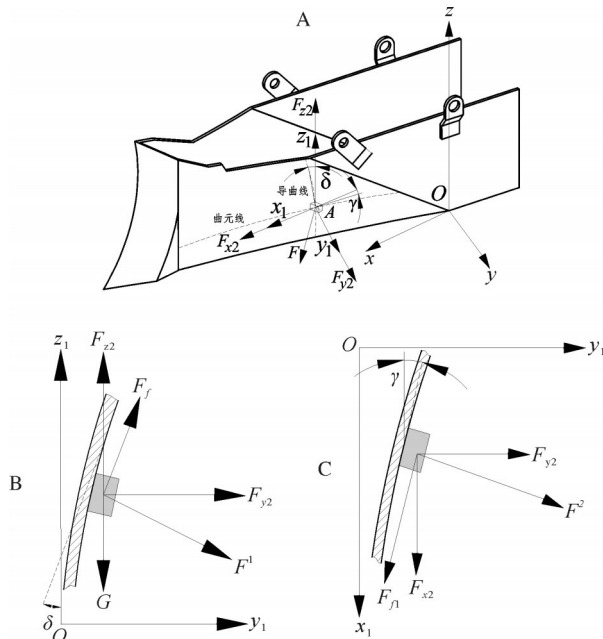
图5 类铍式曲面形成原理图

Fig.5 Schematic diagrams of plough surface

苗床带整备装置对土壤挤压可看作曲面对土壤的侧向倒置挤压,选取曲面上任一点土堡A为研究对象。以犁体前进方向为x轴,垂直向上为z轴,垂



直 $x, z$ 平面为 $y$ 轴建立如图6所示空间坐标系,其中, $\delta$ 为 $z_1$ 轴与导曲线切线夹角, $F$ 为挤压曲面对土堡的瞬时压力, $G$ 为土堡所受重力。为便于分析,以曲元线上任一点为原点,在原点沿导曲线法线向外方向为 $y_1$ 轴,垂直向上方向为 $z_1$ 轴,沿前进方向向前为 $x_1$ 轴建立坐标系,其中 $F_{x2}$ 为相邻土堡对土堡A作用了沿 $x_1$ 轴方向的分力, $F_{y2}$ 为相邻土堡对土堡A作用了沿 $y_1$ 轴方向的分力, $F_{z2}$ 为相邻土堡对土堡A作用了沿 $z_1$ 轴方向的分力, $F^1$ 为 $F$ 在 $y_1Oz_1$ 平面分力, $F^2$ 为 $F$ 在 $x_1Oy_1$ 平面分力。



A: 空间受力分析 Spatial force analysis; B:  $y_1Oz_1$  平面受力分析  $y_1Oz_1$  plane stress analysis; C:  $x_1Oy_1$  平面受力分析  $x_1Oy_1$  plane stress analysis.

图6 类铧式曲面挤压力学分析

Fig.6 Extrusion mechanical analysis of plough-like surface

土壤在 $y_1Oz_1$ 平面受力为:

$$\begin{cases} F^1 \cos \delta + F_{y2} + F_f \sin \delta = F_{y1} \\ F_{z2} - G + F_f \cos \delta - F^1 \sin \delta = F_{z1} \\ G = mg \\ F_f = F^1 \tan \phi \\ F^1 = F \cos \gamma \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $F_f$ 为 $y_1Oz_1$ 平面土堡所受摩擦力,N。

土壤在 $x_1Oy_1$ 平面受力为:

$$\begin{cases} F_{y2} - F_{f1} \cos \gamma + F^2 \sin \gamma = F_{y1} \\ F_{f1} \sin \gamma + F^2 \cos \gamma + F_{x2} = F_{x1} \\ F_{f1} = F^2 \tan \phi \\ F^2 = F \cos \delta \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: $F_{f1}$ 为 $x_1Oy_1$ 平面土堡所受摩擦力,N。将式(3)~(4)联立可知土堡在类铧式曲面的受力为:

$$\begin{cases} F \cos \gamma \cos \delta + F \cos \delta \tan \phi \sin \gamma + F_{x2} = F_{x1} \\ F \cos \gamma \cos \delta + F \cos \gamma \tan \phi \sin \delta + F_{y2} = F_{y1} \\ F \cos \gamma \tan \phi \cos \delta - F \cos \gamma \sin \delta + F_{z2} - mg = F_{z1} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可知,类铧式曲面工作状态与曲面 $\delta, \gamma$ 等结构参数及 $\phi$ 等土壤物理机械特性参数有关。类铧式曲面对土壤的挤压力与 $\delta$ 有关, $\delta$ 越小挤压力越大, $\delta$ 随犁体高度的增加而增加,在犁体曲面上端挤压力降低,减少曲面对土壤挤压及扰动;土堡在整备装置前进方向受到的作用力与 $\gamma$ 有关, $\gamma$ 随曲面到滑刀距离增加而增大,类铧式曲面尾端土堡受到牵引力最小,减少尾端土堡动能进而降低土壤扰动。

③苗床带整备装置沟底平整阶段。腔底面是苗床带整备装置满足沟底面平整度关键部件,运动至苗沟底部的稻坂田团聚土壤,影响载苗基质块入土栽植过程重心位置。为保证载苗基质块不发生倾翻,设计前后具有一定高度差的腔底面对沟底团聚土壤进行抹压完成沟底平整,降低土壤颗粒顶端到沟底面的距离,进而提高沟底面平整度。以整备装置前进方向为 $x$ 轴,垂直前进方向为 $y$ 轴建立坐标系,如图7所示,其中 $M$ 为土粒质点; $\varphi$ 为滑推曲线的滑推角, $\tau$ 为滑推曲线切线方向; $n$ 为滑推曲线法线方向。苗床带整备装置腔底面接触土壤瞬间,土壤受到曲面的法向挤压力发生变形,以与曲面接触土粒为研究对象,列平衡方程为:

$$\begin{cases} F_{sn} - F_{fx} \cos \varphi - F_{fy} \sin \varphi = ma_e \cos \varphi \\ F_{sr} - F_{fx} \sin \varphi + F_{fy} \cos \varphi = m(a_e \sin \varphi - a_r) \\ F_{sr} = F_{sn} \tan \phi \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: $F_{sn}$ 为质点 $M$ 受到滑推曲线所给的正压力,N; $F_{fx}$ 为质点受到 $xOy$ 平面的周围土壤所给的阻力沿 $x$ 轴的分力,N; $F_{fy}$ 为质点受到 $xOy$ 平面的周围土壤所给的阻力沿 $y$ 轴的分力,N; $a_e$ 为质点的牵连加速度, $m/s^2$ ; $F_{sr}$ 为质点 $M$ 受到滑推曲线所给的切向力,N; $a_r$ 为质点的相对加速度, $m/s^2$ 。整理得到切线方向受力为:

$$F_{sn}(\tan \varphi - \tan \phi) - \frac{F_{fy}}{\cos^2 \varphi} = ma_r \quad (7)$$

由式(7)可知,正压力 $F_{sn}$ 、摩擦角 $\varphi$ 、阻力 $F_{fy}$ 和滑推角 $\varphi$ 决定 $a_r$ 。为使土壤颗粒沿曲面向下运动,需要质点相对加速度 $a_r > 0$ ,进一步要求 $\varphi > \phi$ ,且 $\varphi$ 越大, $a_r$ 越大。对于底面圆弧相同位置,半径越大,滑推角 $\varphi$ 越大,挤压效果越好,考虑到入土隙角及整备装置

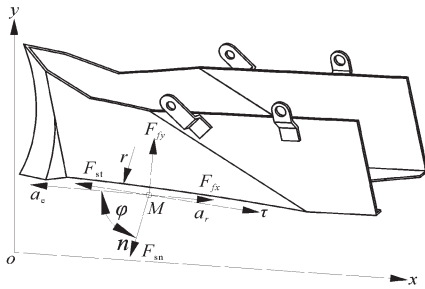
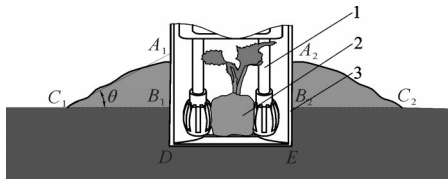


图7 土壤质点挤压原理图

Fig.7 Schematic diagram of soil particle extrusion

底面与犁尾翼平底面顺滑过度,圆弧半径后续由计算得到。

2)苗床整备装置关键参数。①苗床整备装置高度。为确定整备装置稳定作业参数,建立整备装置成型作业过程中土壤堆积模型,整备装置与土壤相互作用过程忽略被挤压土壤体积变化。整备装置前进方向垂直截面土壤堆积模型(图8),开沟过程中土壤颗粒在整备装置类犁式曲面作用下按照土壤休止角堆积在整备装置两侧。



1. 分取苗装置 Separated seedling device; 2. 油菜载苗基质块 Rape-seed seedling matrix block; 3. 苗床带整备装置 Seedbed belt preparation device.

图8 开沟过程土壤模型

Fig.8 Soil model of ditching process

整备装置作业过程中满足土壤体积守恒,为便于分析,假设苗床消失部分土壤体积与苗沟两侧堆积体积一致<sup>[19]</sup>。根据土壤体积守恒定律可知:

$$\begin{cases} S_1V = (S_2 + S_3)V = 2S_2V = 2S_3V \\ S_1 = L_{ED}L_{B1D} \\ S_2 = \frac{L_{A1B1}L_{B1C1}}{2} \\ L_{B1C1} = \frac{L_{A1B1}}{\tan \theta} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: $V$ 为整备装置前进速度,  $m/s$ ;  $S_1$ 为整备装置构建苗沟的区域面积  $S_{DEB1B2}$ ,  $mm^2$ ;  $S_2$ 为整备装置侧边堆放的土壤面积  $S_{A1B1C1}$ ,  $mm^2$ ;  $S_3$ 为整备装置侧边堆放的土壤面积  $S_{A2B2C2}$ ,  $mm^2$ ;  $L_{ED}$ 为整备装置宽度,  $mm$ ;  $L_{B1D}$ 为开沟高度,  $mm$ ;  $\theta$ 为土壤堆积角,  $22^\circ \sim 26^\circ$ ;  $L_{A1B1}$ 为堆积土壤高度,  $mm$ ;  $L_{B1C1}$ 为堆积土壤宽度,  $mm$ 。堆积土壤高度为:

$$L_{A1B1} = (L_{ED}L_{B1D} \tan \theta)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

考虑取苗装置结构尺寸,取  $L_{ED}$ 为  $110\text{ mm}$ ;载苗基质块高度为  $40\text{ mm}$ ,取  $L_{B1D}$ 为  $40\text{ mm}$ 。带入式(9),得  $L_{A1B1} = 42.0 \sim 46.4\text{ mm}$ 。由上述分析可知,扰动土壤垄起高度最高为  $46.4\text{ mm}$ ,土壤扰动到最高点具有动能,为保证苗沟侧边土壤不流动至分取苗装置运动区域,取整备装置高度  $h > 1.2 \times (46.4 + 50)\text{ mm}$ ,即  $h > 115.68\text{ mm}$ ,为保证整备装置将分取苗装置包覆,减少土壤流动至整备装置内部,同时考虑整备装置与机架链接空间限制,确定整备装置高度为  $120\text{ mm}$ 。

②刃口曲线参数。刃口曲线设计常采用直线、圆弧曲线、抛物线、指数曲线<sup>[20]</sup>,当导曲线为抛物线时犁壁曲面具有较好的减阻特性<sup>[21]</sup>。本研究以抛物线作为刃口曲线,建立抛物线直角坐标系,如图9所示。其中, $B(x_2, y_2)$ 为刃口曲线起始点, $A(x_1, y_1)$ 为刃口曲线终止点, $l_{AB}$ 为  $A, B$ 两点垂直距离,  $\alpha_1$ 为滑刀终止滑切角,  $\alpha_2$ 为滑刀起始滑切角,  $\beta_1$ 为滑切曲线终止角,  $\beta_2$ 为滑切曲线入土角。

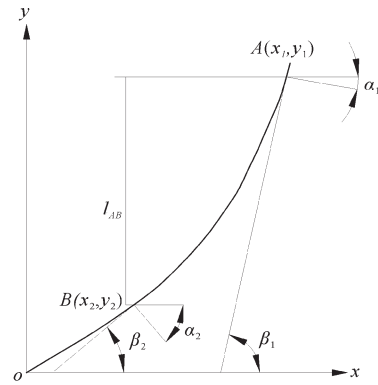


图9 刃口曲线设计示意图

Fig.9 Sketch of blade curve

刃口曲线方程为:

$$y = ax^2 + bx + c \quad (10)$$

考虑到系数  $b, c$  仅影响抛物线对称轴相对位置,不会改变抛物线其线型,为便于分析以  $y$ 轴为对称轴,令系数  $b = c = 0$ 。则刃口曲线方程为:

$$y = ax^2 \quad (11)$$

由图5中几何关系可知:

$$\begin{cases} y'_A = 2ax_1 = \tan \beta_1 \\ y'_B = 2ax_2 = \tan \beta_2 \\ l_{AB} = y_1 - y_2 \\ y_1 = ax_1^2 \\ y_2 = ax_2^2 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: $y'_A$ 为  $A$ 点切线斜率; $y'_B$ 为  $B$ 点切线斜率。联立式(4)、(5)可得:

$$a = \frac{(\tan \beta_1)^2 - (\tan \beta_2)^2}{4l_{AB}} \quad (13)$$

由于 $\alpha, \beta$ 互为余角,即

$$\begin{cases} \alpha_1 + \beta_1 = 90^\circ \\ \alpha_2 + \beta_2 = 90^\circ \end{cases} \quad (14)$$

联立式(11)~(14)可得刃口曲线方程为:

$$y = \frac{[\tan(90^\circ - \alpha_1)]^2 - [\tan(90^\circ - \alpha_2)]^2}{4LAB} x^2 \quad (15)$$

由式(15)可知,终止滑切角 $\alpha_1$ 、起始滑切角 $\alpha_2$ 、刃口曲线高度 $L_{AB}$ 3个参数决定刃口曲线的形状。根据文献[22-23],取土壤摩擦角 $\phi$ 为 $22^\circ \sim 25^\circ$ ,滑切角从A点到B点移动过程中逐渐增大,由式(14)可知刃口曲线AB上任一点的切线与x轴夹角互为余角,故 $\alpha_1 > 23^\circ$ 、 $\alpha_2 \leq 90^\circ - \phi$ ,考虑到起始、终止滑切角差值偏小,刃口曲线平直,不利于土壤抬升增加对土壤挤压,取 $\alpha_1 = 25^\circ$ 、 $\alpha_2 = 60^\circ$ 。

③类铧式曲面参数。苗床带整备装置作业时,类铧式曲面参数是影响整备装置作业性能的关键因素,参照文献[11],整备装置作业阻力为:

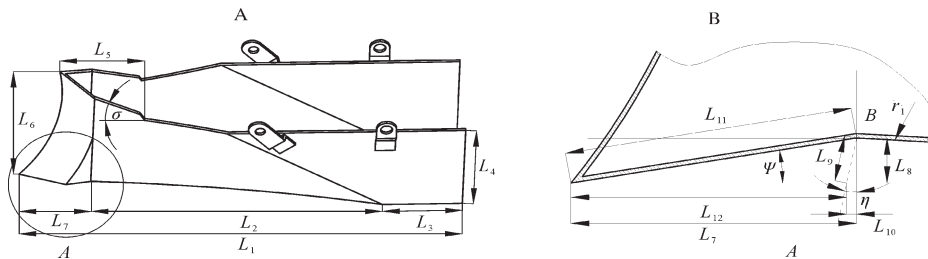
$$\begin{cases} F = F_\gamma(\gamma_{\min}, \gamma_{\max}, L_x, H_z, T)V \\ V_T = (L_y - L_q)H_W S_W \end{cases} \quad (16)$$

式(16)中: $\gamma_{\min}$ 为挡土曲面最小切线线角,°; $\gamma_{\max}$ 为挡土面最大切线线角,°; $T$ 为导曲线类型; $V_T$ 为挡土曲面扰动土壤体积, $\text{mm}^3$ ; $H_W$ 为开沟深度,mm; $S_W$ 为整备装置作业距离,m。由式(16)可知,整

备装置作业深度 $H_W$ 、类铧式曲面前端宽度 $L_q$ 、类铧式曲面末端宽度 $L_y$ 决定作业扰动土壤体积,进而影响作业阻力及整备装置性能。类铧式曲面末端宽度 $L_y$ 由分取苗装置空间尺寸限制,类铧式曲面前端宽度 $L_q$ 直接决定类铧式曲面宽度,曲面前端宽度偏大,对土壤作用范围减少,影响曲面对土壤约束效果;前端宽度偏小,导致整备装置内腔空间尺寸无法满足分取苗装置空间要求,故确定类铧式曲面前端宽度 $40 \sim 60 \text{ mm}$ 。

曲元线直径偏小,类铧式曲面偏短难以构建稳定苗沟;曲元线直径偏大,类铧式曲面较平直,对土壤作用减小,取曲元线前端与分流板面相切,后端与尾翼板相连,得到曲元线半径为 $1\,330 \text{ mm}$ 。曲元线犁体对土壤进行侧面挤压,为保证整备装置分流板与类铧式曲面过度平滑,设置 $\gamma_{\min}$ 为 $0^\circ$ ,参考文献[20]方法,曲元线犁体曲线切线角的变化范围为 $11.8^\circ \sim 19^\circ$ 。结合分取苗装置在整备装置内腔空间布局,取 $\gamma_{\max}$ 为 $13^\circ$ 。

④苗床带整备装置尺寸参数。为降低整备装置牵引阻力,保证曲面间组合平滑过度,对整备装置结构参数进行分析(图10),其中 $\phi$ 为入土隙角, $\eta$ 为腔底面圆弧对应圆弧角, $\sigma$ 为增高部分的夹角,A为放大区域;B为腔底面与滑刀底面的交点。



A: 整备装置总体尺寸 The overall size of the finishing device; B: 整备装置局部放大图 Local amplification diagram of the whole device.

图10 苗床带整备装置

Fig.10 Continuous seedbed belt preparer

由图10B中的几何关系可知:

$$\begin{cases} L_7 = L_{10} + L_{12} \\ L_8 \tan \eta = L_{10} \\ \frac{L_8}{\cos \eta} = L_9 \\ L_7 = \frac{L_8}{\tan \phi} \\ L_{11} = \frac{L_8}{\sin \phi} \\ \cos \phi = \frac{L_{11}^2 + L_{12}^2 - L_9^2}{2L_{11}L_{12}} \end{cases} \quad (17)$$

式(17)中: $L_7$ 为入土隙角的长度,mm; $L_8$ 为腔底面前端的离地高度,mm; $L_9$ 为半径延长线的长度,

mm; $L_{10}$ 为延长线交点到B点的长度,mm; $L_{11}$ 为滑刀底斜面长度,mm; $L_{12}$ 为延长线交点到滑刀前端的距离,mm。

$$\cos \phi = \frac{\left(\frac{L_8}{\sin \phi}\right)^2 + \left(\frac{L_8}{\tan \phi} - L_8 \tan \eta\right)^2 - \left(\frac{L_8}{\cos \eta}\right)^2}{2 \frac{L_8}{\sin \phi} \left(\frac{L_8}{\tan \phi} - L_8 \tan \eta\right)} \quad (18)$$

腔底面前端离地间隙是决定整备装置作业质量的关键因素,间隙偏大,苗沟底面坚实度增加,影响载苗基质块后期田间生长;间隙偏小,开沟抹压效果差沟底面平整度低。入土隙角 $\phi$ 与腔底面离地尺寸间隙相互配合。入土间隙角一般为 $5^\circ \sim 10^\circ$ ,为保证

滑刀底面与腔底面弧面前端匹配精度,即离地间隙与入土隙角尺寸匹配,取 $L_8=15\text{ mm}$ ,则 $\psi=9.5^\circ$ 。带入式(17)~(18),确定 $\eta$ 为 $2.36^\circ$ 、 $L_7$ 为 $90\text{ mm}$ 。

由图10A中的几何关系可知:

$$\begin{cases} r_1 - r_1 \cos \eta = L_8 \\ r_1 \sin \eta = L_2 \\ L_2 + L_3 + L_7 = L_1 \\ L_6 = L_4 + L_5 \tan \sigma \\ L = Vt \\ vt = L_0 \\ L_3 \geq L \end{cases} \quad (19)$$

式(19)中: $L_1$ 为整备装置总体长度,mm; $L_2$ 为腔底面圆弧曲面长度,mm; $L_3$ 为尾翼板的长度,mm; $L_4$ 为尾翼板高度,mm; $L_5$ 为整备装置增高部分长度,mm; $L_6$ 为滑刀高度,mm; $r_1$ 为腔底面圆弧半径,mm; $L$ 为机具前进距离,mm; $V$ 为机具前进速度,取 $V=0.5\text{ m/s}$ ; $t$ 为前进时间,s; $v$ 为对辊线速度,取 $v=238.2\text{ mm/s}$ ; $L_0$ 为载苗基质块长度,取 $L_0=40\text{ mm}$ 。

由式(19)可知, $L_3 \geq L=84.0\text{ mm}$ ,尾翼板偏长,苗床两侧土壤无法及时回填,影响基质块横向位置;尾翼板偏短,无法在接触类型由线向面转化过程中保护运动区域,使土壤颗粒运动到基质块铺放区域干涉基质块运动,降低苗块直立度,取尾翼板长度 $L_3$ 为 $90\text{ mm}$ 。将 $\eta=2.36^\circ$ 、 $L_7=90\text{ mm}$ 代入式(19),得: $r_1=7\ 000\text{ mm}$ 、 $L_2=288\text{ mm}$ 。避免整备装置作业过程与土壤的相互作用导致土壤流动至整备装置内部,干扰分取苗装置得运动,增加滑刀高度,降低整备装置前端与机架间隙。传送带倾角 $\sigma$ 为 $30^\circ$ <sup>[24]</sup>, $L_4=120\text{ mm}$ 、 $L_3=90\text{ mm}$ ,则 $L_1=473\text{ mm}$ ,由分取苗空间尺寸确定 $L_5$ 为 $85\text{ mm}$ ,则刃口曲线高度 $L_6=164\text{ mm}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 EDEM 仿真试验

为确定苗床带整备装置最佳组合参数,结合上述分析,以整备装置作业深度、作业速度、类铍式曲面前端宽度(简称前端宽度)、刃口角为影响作业效果的主要因素,以整备装置土壤扰动量、沟宽变异系数为评价指标进行仿真回归正交试验,确定其最佳参数组合。采用Hertz Mindlin(no slip)土壤接触模型建立EDEM土壤离散元模型,土壤颗粒半径为 $5\text{ mm}$ ,土壤泊松比为 $0.3$ ,剪切模量为 $2.5 \times 10^6\text{ Pa}$ ,土壤密度为 $2\ 500\text{ kg/m}^3$ ,土壤与土壤之间恢复系数、静摩擦因数和动摩擦因数分别为 $0.66$ 、 $0.83$ 、 $0.25$ ;钢

泊松比为 $0.4$ ,钢剪切模量为 $7.9 \times 10^{10}\text{ MPa}$ ,土壤与整备装置间恢复系数、静摩擦和动摩擦因数分别为 $0.30$ 、 $0.25$ 、 $0.02$ <sup>[25]</sup>,仿真过程如图11所示。

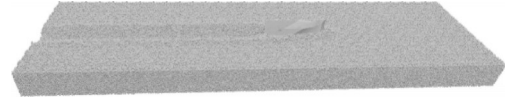


图11 苗床带整备装置仿真过程

Fig.11 Simulation process of continuous seedbed belt preparer

土壤扰动量主要用于衡量整备装置对土壤的扰动性。如图12所示,以苗床两侧堆积土壤的横截面积表示整备装置的扰动性,将仿真截图导入到CAD中利用样条曲线拟合土壤轮廓,通过比例换算出扰动面积。苗床宽度变异系数是衡量整备装置作业质量的重要指标。测量苗床宽度时,等间距取整备装置成型苗床带中段5个垂直于整备装置前进方向的断面,将测量的断面下底边长度作为测量种沟宽度,种沟宽度变异系数为:

$$\lambda = \frac{W}{l_p} \times 100\% \quad (20)$$

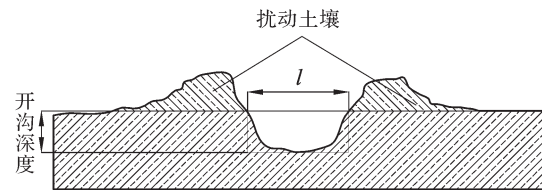


图12 土壤沟型轮廓

Fig.12 Soil gully profile

$$W = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (l_i - l_p)^2}{n - 1}} \quad (21)$$

式(21)中: $l_p$ 为种沟平均宽度,mm; $l_i$ 为第 $i$ 个测量点的种沟宽度,mm; $W$ 为种沟宽度标准差,mm。

对苗床带整备装置作业深度( $X_1$ )、作业速度( $X_2$ )、前端宽度( $X_3$ )、刃口角( $X_4$ )进行四元二次回归正交组合试验(表1)。

1)仿真试验结果。各试验方案与评价指标结果

表1 试验因素编码表

Table 1 Coding table of test factors

编码 Code	$X_1/\text{mm}$ Working depth	$X_2/(\text{m/s})$ Working speed	$X_3/(\text{°})$ Front width	$X_4/(\text{°})$ Cutting edge angle
-1	40	0.4	40	60
0	50	0.5	50	65
1	60	0.6	60	70



如表2所示,表2中 $Y_1$ 为土壤扰动面积, $Y_2$ 为沟宽变异系数。①土壤扰动量显著性分析。由表3可知, $Y_1$ 模型 $P<0.0001$ ,表示此回归模型极显著,其中 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_4$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$ 、 $X_4^2$ 对土壤扰动量模型影响极显著, $X_3$ 、 $X_1^2$ 对土壤扰动量模型影响显著。各变量对土壤扰动量的影响显著性由大到小分别为作业速度、作业深度、刃口角、前端宽度。剔除不显著因素,得到各变量对土壤扰动量的二次回归方程如式(22)所示,并对其失拟性进行检验,失拟项 $P>0.1$ ,表明二次回归方程拟合度高。

表2 试验方案与结果

Table 2 Experimental scheme and results						
序号 Number	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_1/\text{cm}^2$	$Y_2/\%$
1	1	0	0	1	39.24	9.00
2	0	0	0	0	35.12	7.99
3	0	0	1	-1	21.62	13.06
4	1	0	-1	0	34.36	8.02
5	-1	-1	0	0	12.40	18.45
6	0	1	0	-1	36.80	6.94
7	1	-1	0	0	23.56	13.09
8	0	0	0	0	36.42	8.57
9	1	1	0	0	47.16	7.08
10	0	0	-1	1	24.28	10.37
11	-1	0	-1	0	17.60	8.14
12	0	-1	0	-1	18.64	18.10
13	0	1	0	1	47.70	9.33
14	0	-1	0	1	17.76	17.35
15	1	0	1	0	41.50	9.65
16	0	0	1	1	33.68	13.57
17	0	0	-1	-1	22.38	9.01
18	0	0	0	0	37.62	9.76
19	0	0	0	0	34.48	8.85
20	-1	0	0	1	28.42	16.61
21	0	1	-1	0	33.50	9.55
22	-1	1	0	0	26.70	11.21
23	-1	0	0	-1	16.84	11.59
24	0	-1	1	0	17.54	17.69
25	1	0	0	-1	26.94	7.67
26	0	0	0	0	38.92	7.80
27	0	-1	-1	0	17.16	10.78
28	-1	0	1	0	20.04	15.74
29	0	1	1	0	39.82	7.43

$$Y_1=36.51+7.56X_1+10.38X_2+2.08X_3+3.99X_4-4.15X_1^2-3.65X_2^2-5.56X_3^2-4.20X_4^2 \quad (22)$$

②沟宽变异系数显著性分析。由表3可知, $Y_2$ 模

型 $P<0.0001$ ,表示此回归模型极显著,其中 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_2X_3$ 、 $X_2^2$ 、 $X_4^2$ 对沟宽变异系数模型影响极显著, $X_4$ 、 $X_1X_3$ 、 $X_1^2$ 对沟宽变异系数模型影响显著。各变量对沟宽变异系数的影响显著性由大到小分别为作业速度、作业深度、前端宽度、刃口角。剔除不显著因素,得到各变量对沟宽变异系数的二次回归方程如式(23)所示,并对其失拟性进行检验,失拟项 $P>0.1$ ,表明二次回归方程拟合度高。

$$Y_2=9.04-2.27X_1-3.66X_2+1.77X_3+0.84X_4-1.49X_1X_3-2.26X_2X_3+0.96X_1^2+2.31X_2^2+1.75X_4^2 \quad (23)$$

2)参数优化设计与试验。由表3可知,作业深度对土壤扰动量、沟宽稳定性影响极显著,随着作业深度的增加,苗床整备装置作业土壤体积增加,进而导致苗床两侧堆积土壤体积增加,过多堆积土壤回流至苗床内降低苗沟宽度稳定性。前端宽度对土壤扰动量影响显著,对沟宽变异系数影响极显著,前端宽度决定类铧式曲面结构参数,前端宽度偏小,类铧式曲面宽度偏大,对土壤挤压程度偏大,土壤堆积后流动变差,降低沟宽变异系数,与理论分析基本一致;刃口角度对土壤扰动量影响极显著,对沟宽变异系数影响显著,增大刃口角度会增加土壤扰动量,与理论分析一致。基于上述分析,对模型进行优化,以最小土壤扰动量、最小沟宽变异系数为目标函数,约束条件为:

$$\min Y_1(X_1, X_2, X_3), \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \text{ s.t. } \begin{cases} 40 \leq X_1 \leq 60 \\ 0.4 \leq X_2 \leq 0.6 \\ 40 \leq X_3 \leq 60 \\ 60 \leq X_4 \leq 70 \end{cases} \quad (24)$$

运用Design-Expert 8.0.6软件对约束指标分析,求得较优参数组合为作业深度40.55 mm、前进速度0.52 m/s、前端宽度40 mm、刃口角60.35°,此时土壤扰动量为12.40 cm<sup>2</sup>,沟宽变异系数为8.67%。为验证参数优化结果的可行性,考虑实际加工精度及作业条件,采用较优参数组合为:作业深度41 mm、前进速度0.52 m/s、前端宽度40 mm、刃口角61°,开展连续苗床带构建装置田间试验验证,得到土壤扰动量 $Y_1=13.01 \text{ cm}^2$ ,沟宽变异系数 $Y_2=8.52\%$ ,试验结果与理论预测结果相符,满足油菜基质块苗移栽机连续苗床带构建装置技术要求。

## 2.2 田间性能试验结果

为进一步验证苗床带整备装置田间作业性能,于2022年9月7日在华中农业大学现代农业示范基



表3 方差分析

Table 3 Variance analysis

项目 Item	Y <sub>1</sub> 扰动面积 Disturbance area					Y <sub>2</sub> 沟宽变异系数 Coefficient of variation of ditch width				
	平方和 Sum of squares	自由度 Free degree	均方差 Mean square error	F值 F value	P值 P value	平方和 Sum of squares	自由度 Free degree	均方差 Mean square error	F值 F value	P值 P value
模型 Model	2 654.65	14	189.62	20.89	< 0.000 1**	357.34	14	25.52	1.13	<0.000 1**
X <sub>1</sub>	686.45	1	686.45	75.63	< 0.000 1**	61.82	1	61.82	0.11	<0.000 1**
X <sub>2</sub>	1 294.18	1	1 294.18	142.58	< 0.000 1**	160.75	1	160.75	1.31	<0.000 1**
X <sub>3</sub>	51.75	1	51.75	5.70	0.031 6*	37.70	1	37.70	0.000 08	0.000 2**
X <sub>4</sub>	190.88	1	190.88	21.03	0.000 4**	8.10	1	8.10	0.20	0.039 7*
X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	21.62	1	21.62	2.38	0.145 0	0.38	1	0.38	0.23	0.631 8
X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	5.52	1	5.52	0.61	0.448 4	8.91	1	8.91	5.17	0.032 2*
X <sub>1</sub> X <sub>4</sub>	0.13	1	0.13	0.014	0.906 6	3.40	1	3.40	5.65	0.163 7
X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	8.82	1	8.82	0.97	0.341 0	20.39	1	20.39	0.78	0.002 9**
X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	34.69	1	34.69	3.82	0.070 8	2.46	1	2.46	0.17	0.231 5
X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	25.81	1	25.81	2.84	0.113 9	0.18	1	0.18	0.24	0.739 9
X <sub>1</sub> <sup>2</sup>	111.50	1	111.50	12.28	0.003 5**	7.72	1	7.72	0.50	0.044 0*
X <sub>2</sub> <sup>2</sup>	86.35	1	86.35	9.51	0.008 1**	38.47	1	38.47	0.83	0.000 2**
X <sub>3</sub> <sup>2</sup>	200.23	1	200.23	22.06	0.000 3**	3.06	1	3.06	0.05	0.185 3
X <sub>4</sub> <sup>2</sup>	114.61	1	114.61	12.63	0.003 2**	23.04	1	23.04	0.38	0.001 9**
残差 Residual	127.07	14	9.08			22.06	14	1.58		
失拟项 Lack of fit	113.97	10	11.40	3.48	0.120 4	19.64	10	1.96	3.24	0.134 0
误差 Error	13.10	4	3.28			2.42	4	0.61		
总和 Sum	2 781.72	28				379.40	28			

注:\*\*表示影响极显著,  $P < 0.01$ , \*表示影响显著,  $P < 0.05$ 。Note: \*\* indicates extremely significant impact,  $P < 0.01$ , \* indicates significant impact,  $P < 0.05$ .

地进行苗床带整备装置(材质为65Mn)与船式开沟器(相同刃口曲线、刃口角61°、作业宽度110 mm)田间对比试验(图13,左侧为苗床带整备装置;右侧为船式开沟器),作业速度为0.52 m/s,作业深度为41 mm。试验前测得土壤坚实度为1 614.33 kPa、含水率为13.63%,拖拉机型号为雷沃1004。试验材料为自主培育的适栽期“华油杂62”油菜基质块苗;试验配套移栽机为自主研制的油菜基质块苗移栽机。试验参照JB/T10291—2013中旱地移栽机械的相关试验方法,移栽机每行送苗装置容量为64株,为保证试验结果准确性,1、3、5行安装苗床带整备装置,2、4、6



图13 田间试验

Fig.13 Field experiment

行安装船式开沟器,结合苗床带整备装置作业后土壤回流导致苗沟底面作业效果无法量化的问题,试验测量采用立苗率、沟底面紧实度为评价指标,以沟底面紧实度表征沟底面平整度;结合油菜机械化移栽沟幅宽、土壤扰动小等农艺要求,试验测量采用土壤扰动量、沟宽变异系数为试验指标。

立苗率是基质块苗移栽机作业质量指标,是影响移栽对象产量的重要原因。立苗是栽植后秧苗主茎与底面的夹角大于30°的秧苗。立苗率计算公式为:

$$T = N_{DF} / N \times 100\% \quad (25)$$

式(25)中: $N_{DF}$ 为角度大于30°的株数; $N$ 为总株数。土壤扰动量通过沟形轮廓仪在坐标纸上勾勒出苗沟形状,计算出扰动量。测量2种整备装置作业后土壤50 mm沟底面紧实度,重复5次取平均值作为沟底面紧实度。试验选取苗床带整备装置与船式开沟器进行性能对比试验,测量载苗基质块立苗率、土壤扰动量、沟宽变异系数及沟底面紧实度。

试验结果表明:安装苗床带整备装置移栽单元

立苗率为91.68%(表4),装有船式开沟器移栽单元实际立苗率为89.59%,相较于船式开沟器,苗床带整备装置立苗率增加2.09百分点;安装苗床带整备装置移栽单元构建沟底面紧实度为79.927 kPa,装有船式开沟器移栽单元构建沟底面紧实度为62.119 kPa,相较于船式开沟器,苗床带整备装置沟底面紧实度增加28.7%。由于整备装置入土间隙及腔底面前后高度差存在,使滑刀作用后土壤流动到整备装置底面,在整备装置腔底面作用下抹平,达到开沟抹平的效果,进而提高沟底面紧实度及立苗率,满足油菜基

质块移栽苗沟平整度要求。

苗床带整备装置沟宽变异系数为9.58%、土壤扰动量为14.79 cm<sup>2</sup>,船式开沟器沟宽变异系数为11.05%、土壤扰动量为18.69 cm<sup>2</sup>。苗床带整备装置比船式开沟器沟宽变异系数减少13.3%、土壤扰动量减少20.9%。由于滑刀对土壤作用范围减少,土壤沿类铧式曲面铺放在苗沟两侧,类铧式曲面挤压引导土壤运动,增加整备装置对土壤运动约束,进而减低沟宽变异系数及土壤扰动量。田间试验结果显示,苗床带整备装置可有效改善苗床环境、降低土壤扰动,满足油菜基质块苗移栽要求。

表4 田间对比试验结果

Table 4 Results of contrast test

整备装置类型 Type of servicing device	行编号 Number	单行立苗率/% Single row seedling rate	立苗率/% Seedling rate	沟宽变异系数/% Coefficient of variation of ditch width	土壤扰动量/cm <sup>2</sup> Soil disturbance	沟底面紧实度/kPa Tightness of ditch bottom surface
苗床带整备装置 Nursery bed belt preparation device	1	90.65				
	3	92.19	91.68	9.58	14.79	79.927
	5	92.19				
船式开沟器 Boat type trencher	2	89.06				
	4	89.06	89.59	11.05	18.69	62.119
	6	90.65				

### 3 讨论

本研究设计了一种油菜基质块苗移栽机苗床带整备装置,通过分析苗床带整备土壤分流阶段、沟型挤压阶段、沟底平整阶段等苗床带构建过程,建立土壤与整备装置相互作用力学模型,确定了作业深度、作业速度、类铧式曲面前端宽度、刃口角对土壤扰动量、沟宽变异系数为影响整备装置关键因素,并确定了苗床带整备装置部分结构参数。

结合EDEM开展了作业深度、作业速度、类铧式曲面前端宽度、刃口角对土壤扰动量、沟宽变异系数影响的四因素三水平二次正交组合试验,结果表明:作业深度41 mm、作业速度0.52 m/s、类铧式曲面前端宽度40 mm、刃口角61°时效果最优。较优参数组合下土壤扰动量13.01 cm<sup>2</sup>、沟宽变异系数8.52%。

田间移栽对比试验表明,安装苗床带整备装置的基质块苗移栽机单元比安装船式开沟器的移栽单元,栽苗基质块立苗率提高2.09百分点,沟宽变异系数减少13.3%,土壤扰动量减少20.9%,沟底面紧实度增加28.7%,苗床带整备装置满足油菜机械化移栽对苗床带的农艺要求。

由于油菜基质块苗机械化移栽对苗床带提出沟

宽稳定、沟底面平整度、土壤扰动小等农艺要求,开沟器对基质块苗机械化移栽苗床带农艺要求适应差,本研究设计的苗床带整备装置能够满足油菜基质块苗移栽机苗床带农艺要求。

### 参考文献 References

- [1] 廖庆喜,刘明峰,张照,等.油菜钵苗移栽机双五杆栽植机构多目标优化设计[J].农业机械学报,2015,46(11):49-56.LI-AO Q X, LIU M F, ZHANG Z, et al. Multi-objective optimization design of double five-bar transplanting mechanism for rape pot seedling [J]. Transactions of the CSAM, 2015, 46 (11): 49-56 (in Chinese with English abstract).
- [2] 王永维,何焯亮,王俊,等.旱地蔬菜钵苗自动移栽机栽植性能试验[J].农业工程学报,2018,34(3):19-25.WANG Y W, HE Z L, WANG J, et al. Experiment on transplanting performance of automatic vegetable pot seedling transplanter for dry land [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34 (3) : 19-25 (in Chinese with English abstract).
- [3] 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 Q X, LEI X L, LI-AO Y T, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed [J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48 (9) : 1-16 (in Chinese with English abstract).
- [4] 廖庆喜,胡先朋,张照,等.油菜移栽机分苗装置分苗过程与

- 钵苗钵体完整性分析[J].农业工程学报,2015,31(16):22-29.LIAO Q X,HU X P,ZHANG Z,et al.Analysis on detaching process of detaching device and seedling pot integrity about rape transplanter [J]. Transactions of the CSAM, 2015, 31(16):22-29(in Chinese with English abstract).
- [5] YANG Q Z,XU L,SHI X Y,et al.Design of seedlings separation device with reciprocating movement seedling cups and its controlling system of the full-automatic plug seedling transplanter [J]. Computers and electronics in agriculture, 2018, 147:131-145.
- [6] PETRE S N,PELE M,DRAGHICI E M.Influence of perlite and jiffy substrates on cucumber fruit productivity and quality [J].Journal of agricultural science,2015,7(8):89-93.
- [7] DOMINGUES SALVADOR E,EGIL HAUGEN L,RAGNAR GISLERØD H.Compressed coir as substrate in ornamental plants growing - part III : physical analysis[J].Acta horticulturae,2005(683):215-222.
- [8] MENGESHA A,AYENEW B,TADESSE T.Acclimatization of *in vitro* propagated pineapple (*Ananas comosus* (L.), var.smooth cayenne) plantlets to *ex vitro* condition in Ethiopia [J].American journal of plant sciences,2013,4(2):317-323.
- [9] RENISON D,CINGOLANI A,SCHINNER D.Optimizing restoration of *Polylepis australis* woodlands: when, where and how to transplant seedlings to the mountains? [J].Society for tropical ecology,2002,8:219-224.
- [10] 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 X P,XIAO W L,MA L,et al.Design and ditching quality experiment on combined ship type opener of direct rapeseed seeder[J].Transactions of the CSAM,2017,48(11):79-87(in Chinese with English abstract).
- [11] 刘瑞,李衍军,刘春晓,等.铲式宽苗带燕麦播种开沟器设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(9):89-96.LIU R,LI Y J,LIU C X,et al.Design and experiment of shovel type wide seedling belt oat seeding furrow opener [J]. Transactions of the CSAM,2021,52(9):89-96(in Chinese with English abstract).
- [12] 赵淑红,刘汉朋,侯磊涛,等.基于离散元法的免耕深施肥分段式玉米播种开沟器研制[J].农业工程学报,2021,37(13):1-10.ZHAO S H,LIU H P,HOU L T,et al.Development of deep fertilizing no-tillage segmented maize sowing opener using discrete element method [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(13):1-10(in Chinese with English abstract).
- [13] 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 L,LIAO Y T,ZHANG Q S,et al.Design on profiling chisel opener of precision broad width no-tillage planter for rapeseed and wheat [J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50(11):63-73(in Chinese with English abstract).
- [14] SOLHJOU A,FIELKE J M,DESBIOLLES J M A. Soil translocation by narrow openers with various rake angles [J]. Biosystems engineering,2012,112(1):65-73.
- [15] SOLHJOU A,DESBIOLLES J M A,FIELKE J M. Soil translocation by narrow openers with various blade face geometries [J].Biosystems engineering,2013,114(3):259-266.
- [16] SOLHJOU A,FIELKE J M,DESBIOLLES J M A,et al. Soil translocation by narrow openers with various bent leg geometries [J].Biosystems engineering,2014,127:41-49.
- [17] NANDEDE B M,RAHEMAN H,DEORE H V. Selection of suitable furrow opener and furrow closer for vegetable transplanter [J].Agricultural mechanization in Asia, Africa and Latin America,2014,45(2):40-47.
- [18] 赵淑红,王加一,陈君执,等.保护性耕作拟合曲线型深松铲设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(2):82-92.ZHAO S H,WANG J Y,CHEN J Z,et al.Design and experiment of fitting curve subsoiler of conservation tillage [J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(2):82-92(in Chinese with English abstract).
- [19] 王徐建,宋建农,刘彩玲,等.甘草倾斜移栽开沟器的设计与试验[J].农业工程学报,2016,32(13):16-23.WANG X J,SONG J N,LIU C L,et al.Design and experiment on licorice tilt transplanting furrow opener [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13):16-23(in Chinese with English abstract).
- [20] 第一机械部机械研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,1973.Mechanical Research Institute of the First Machinery Department. Design manual of agricultural machinery [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press,1973(in Chinese).
- [21] 刘晓鹏,张青松,刘立超,等.基于微分几何与EDEM的船型开畦沟装置触土曲面优化[J].农业机械学报,2019,50(8):59-69.LIU X P,ZHANG Q S,LIU L C,et al.Surface optimization of ship type ditching system based on differential geometry and EDEM simulation [J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50(8):59-69(in Chinese with English abstract).
- [22] 魏国梁,张青松,刘立超,等.犁旋组合式油菜直播机扣袋装置设计与试验[J].农业机械学报,2020,51(6):38-46.WEI G L,ZHANG Q S,LIU L C,et al.Design and experiment of plowing and rotary tillage buckle device for rapeseed direct seeder [J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(6):38-46(in Chinese with English abstract).
- [23] 卜祥利,廖庆喜,孙文成,等.油菜种床整备开畦沟仿靴形锐角开沟犁设计与试验[J].华中农业大学学报,2021,40(2):77-84.BU X L,LIAO Q X,SUN W C,et al.Design and test of a boot-like acute angle furrow plough for preparing ditch of rapeseed seedbed [J].Journal of Huazhong Agricultural University,2021,40(2):77-84(in Chinese with English abstract).
- [24] 王洋,张青松,胡乔磊,等.油菜基质块苗移栽机倾斜式分苗装置设计与稳定性分析[J].华中农业大学学报,2020,39(4):147-155.WANG Y,ZHANG Q S,HU Q L,et al.Design and stability analyses of inclined detach device for rapeseed substrate seedling transplanter [J].Journal of Huazhong Agri-



- cultural University, 2020, 39 (4) : 147-155 (in Chinese with English abstract).
- [25] 张青松, 廖宜涛, 陶威, 等. 油菜垄作精量联合直播机起垄装置设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2020, 55(3):181-189.
- ZHANG Q S, LIAO Y T, TAO W, et al. Design and experiment for ridge lifting device of rapeseed planter [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2020, 55(3) : 181-189 (in Chinese with English abstract).

## Design and test of seedbed belt preparation device for rapeseed substrate block transplanter

LI Xinzhi<sup>1</sup>, LIAO Qingxi<sup>1,2</sup>, YUAN Hua<sup>1</sup>, HAN Jingxuan<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>, FU Minglian<sup>3</sup>

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Wuhan 430070, China;

3. Institute of Cash Crops, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650000, China

**Abstract** A seedbed belt preparation device suitable for constructing rapeseed substrate block seedling transplanters was designed based on the large cavity of the boat type furrow opener and the characteristics of constructing a wide seedbed and a flat furrow bottom through the operation of the core ploughshare furrow opener, combined with the excessive connection of the similar ploughshare surface to solve the problems of poor stability of the furrow width, low flatness of the furrow bottom, and large soil disturbance, resulting in low seedling rate and high difficulty in soil covering operations in the operation of furrow opener device of rapeseed substrate block seedling transplanter. A mechanical model for the interaction between soil and preparation device was established. The main structural parameters for constructing a stable seedbed with a seedbed belt preparation device were determined. A four-factor and three-level quadratic orthogonal combination simulation test was conducted using EDEM and taking the operating speed, working depth, front-end width of the brush type surface, and edge angle of blade as factors, the soil disturbance amount and coefficient of variation of ditch width as evaluation indicators. The results of quadratic orthogonal combination test showed that the soil disturbance amount and the coefficient of variation of the ditch width was small when the working depth, the operating speed, the front-end width of the brush type surface and the edge angle of blade was 41 mm, 0.52 m/s, 40 mm, and 61°, respectively. The results of bench test under the optimal parameter combination showed that the soil disturbance amount was 13.01 cm<sup>2</sup> and the coefficient of variation of the ditch width was 8.52%. The results of field comparative test showed that the seedling bed equipped with the preparation device installed on the transplanting unit increased the seedling rate of the substrate block by 2.09 percentage points, decreased the coefficient of variation of the ditch width by 13.3%, reduced soil disturbance by 20.9%, and increased the compactness of the ditch bottom by 28.7% compared to the boat type opener, meeting the requirements for the construction of the rapeseed substrate block seedling transplanter.

**Keywords** rapeseed; transplanter; seedbed belt preparation device; brush type surface; mechanical transplantation

(责任编辑:陆文昌)