doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.05.005

油菜直播机旋切式微垄种床制备装置设计与试验

李蒙良[1]　廖庆喜[1,2]　裴立民[1]　廖宜涛[1,2]　王　磊[1,2]　张青松[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: 针对长江中下游油菜适播期持续干旱或降雨导致土壤含水率波动大影响油菜成苗的实际情况,探究油菜农机农艺融合模式,提出一种旋耕碎土、两侧开畦沟、厢面旋切微垄、微垄表面播种的油菜微垄直播工艺,设计一种油菜直播机旋切式微垄种床制备装置。根据油菜直播株行距配置、根系生长特点,结合垄作土壤水热特性,确定微垄几何尺寸;基于运动学解析腹板端点旋切土壤的运动规律和腹板滚动包络线,从结构角度定性分析被动旋转过程并确定回转半径、腹板数量、腹板顶角范围;利用 DEM - MBD 耦合仿真,进行单因素试验和正交旋转回归试验,从土壤角度定量研究了腹板数量、腹板顶角、旋切深度、前进速度对微垄成形的影响规律,并得到装置腹板数量分别为 6 和 8 的较优工作参数组合;田间试验使用 Trimble TX8 三维激光扫描仪重构装置作业后微垄厢面,与仿真结果进行对比分析。结果表明,腹板数量分别为 6 和 8 时较优工作参数组合为:腹板顶角、旋切深度、有效沟深分别为 28.00°、100 mm、83.59 mm 和 26.50°、92 mm、64.26 mm,田间试验微垄沟深和微垄距平均值为 103.08、85.16 mm 和 332.92、266.88 mm,与仿真结果最大误差为 8.25%,微垄合格率分别为 100% 和 90%。

关键词: 油菜; 直播机; 微垄; DEM - MBD 耦合; 旋切; 种床制备
中图分类号: S222.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2023)05-0047-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Rotary-cut Micro-ridge Seedbed Device for Rapeseed Direct Seeding Machine

LI Mengliang[1]　LIAO Qingxi[1,2]　PEI Limin[1]　LIAO Yitao[1,2]　WANG Lei[1,2]　ZHANG Qingsong[1,2]
(1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: A rotary-cut micro-ridge seedbed preparation device (RMSD) was designed to facilitate rapeseed direct seeding in the mid-lower reaches of the Yangtze River region, where continuous rainfall and sunny days can cause significant fluctuations in soil moisture and affect seedling growth. The RMSD employs rolling boards that passively rotate and stack micro-ridges by cutting into the rotary-tilled soil as the machine moves forward, with grooves connecting to furrows on both sides. The geometric size of the micro-ridge was defined according to the row spacing configuration and root growth characteristics of direct rapeseed seeding, combined with soil water and ridge cultivation heat characteristics. Based on kinematics, the rolling board endpoint trace and the rolling board envelope were analyzed to determine the qualitative parameters in the structure terms. The results were that the number of rolling boards was 6 ~ 10, and the angle range of the rolling board was 0° ~ 28° for further study. The DEM - MBD coupling simulation was conducted with the single factor test and the orthogonal rotation regression test to investigate and optimize the parameters of the RMSD (rolling board number, rolling board angle, and forward speed). The optimization results were as follows: when the rolling board of the RMSD was 6 and 8, respectively, and the rolling board angle, rotary cutting depth, and efficient groove depth were 28.00°, 100 mm, 83.59 mm and 26.50°, 92 mm and 64.26 mm, respectively. The field test used the Trimble TX8 3D laser scanner to reconstruct the micro-ridge surface after RMSD operation and compared it with the simulation results. The field test showed the maximum deviations of actual depth and micro-

收稿日期: 2022 - 09 - 04　修回日期: 2022 - 12 - 09
基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000405)和财政部和农业农村部:国家现代农业(油菜)产业技术体系项目(CARS - 12)
作者简介: 李蒙良(1993—),男,博士生,主要从事农业装备设计与测控研究,E-mail: yaanlimengliang@msn.cn
通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

ridge distance were 8.25%, and the qualified rates of micro-ridge were 100% and 90%, respectively, under the optimal parameter combination of 6 and 8 rolling boards. The research result can provide a reference for the structural improvement of the rapeseed bed preparation device.

Key words: rapeseed; direct seeding machine; micro-ridge; DEM - MBD coupling; rotary-cut; seedbed preparation

0 引言

长江中下游流域是中国油菜主要种植区,该区域降水年内和年际变化大,降水分布不均匀[1],油菜适播期存在土壤含水率变化大影响油菜成苗的问题[2]。垄作具有雨季便于排涝,旱季便于灌溉的特点,对田间小气候和土壤水热进行调控,已广泛应用于玉米、小麦、大豆、马铃薯等作物栽培[3],同时土壤表面微形貌加工对灌溉水利用率、作物产量有积极作用[4]。

相关学者根据农艺需求,对油菜种床制备装置进行了研究。张青松等[5-6]针对积水渍害影响油菜生长的问题,研制了 2BFQ 系列油菜联合直播机开畦沟系统和起垄装置,并通过 EDEM 仿真优化了机具作业参数。刘晓鹏等[7]运用微分几何理论并结合 EDEM 仿真方法设计了一种组合式船形开沟器,可在黏重土壤制备符合农艺要求的畦沟。文献[8-9]针对南方水稻田种植油菜过程中种床制备中高湿度、高稻茬的问题研制了 2BYL 系列油菜垄作施肥联合播种机,并提出了深沟窄垄新种植模式。以上种床制备装置均为宽厢垄作模式[3],即平面厢面播种,厢面两侧开畦沟。畦沟可及时将厢面积水排出,但过深的种沟、作业质量较差的厢面在强降雨后仍易产生渍害,且遇连续伏秋连旱,厢面应提升蓄水保墒能力,减少土壤水分蒸发。

研究表明,垄作和土壤表面微形貌加工对种床环境、作物生长有积极的调控效果。垄作栽培立体化配置种床,强降雨时垄沟及时排水,垄顶、垄腰无积水,减少强降雨积水渍害幼苗根系[10];垄沟降低风速,抑制蒸发[11],保墒蓄水[12];垄作表面积变大增加光截获量[13],改善植株通风透光条件。相关学者对土壤表面微形貌加工进行研究,与传统耕作相比,土壤表面微形貌加工可增强土壤拦蓄水能力[4],不仅可显著提高灌溉水利用率、减少水土流失,对土壤物理特性改善和作物产量具有积极影响[14]。

目前,油菜种床研究主要集中在大秸秆量、黏重土壤等工况适应性方面,针对厢面表形改进的种床制备装置研究较少。本文提出一种油菜微垄直播工艺,设计一种油菜直播机旋切式微垄种床制备装置,通过等间距的腹板被动旋转切土(简称旋切),形成与畦沟方向垂直的微垄。根据油菜播种农艺要求,通过分析微垄装置滚动包络线得到作业参数范围,利用 DEM - MBD 耦合仿真和试验优化方法得到装置较优工作参数组合,进行田间验证试验、播种试验验证优化结果并测试出苗效果,为油菜直播机农机农艺融合提供新途径。

1 微垄与油菜直播工艺

微垄示意图如图 1 所示,考虑适配不同株行距配置[15],定义微垄距为 150 ~ 350 mm。相关研究表明[16-18],垄作栽培 0 ~ 150 mm 土层有明显增温效果,大于 150 mm 差异不明显;在浅旋和免耕作业模式下,油菜主根下扎深度为 68 ~ 143 mm,定义微垄高为 75 ~ 150 mm。为兼顾蓄水、灌水和排水,微垄沟与两侧畦沟相通,畦沟沟底低于微垄沟 20 mm。为扩大土壤表面积,调控土壤水热,微垄截面以弧面为宜,垄体高宽比不超过 0.5,利于保持垄体稳定。

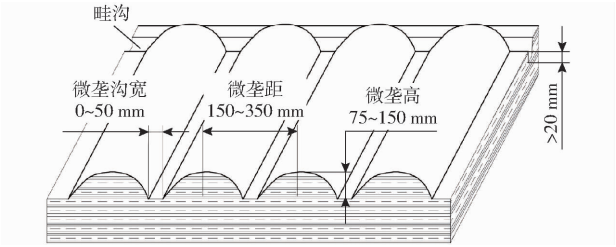


图 1 油菜微垄示意图

Fig. 1 Schematic of micro-ridge

油菜微垄直播工艺原理如图 2 所示,油菜微垄

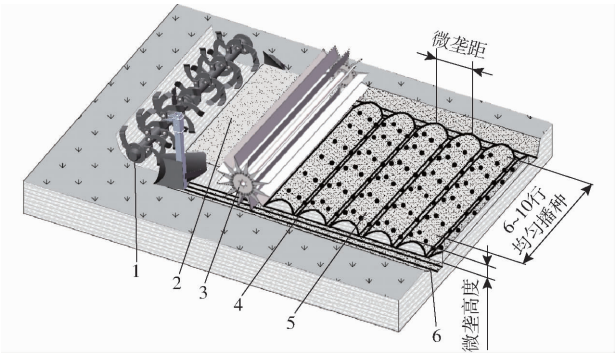


图 2 油菜微垄直播工艺原理图

Fig. 2 Schematic of rapeseed micro-ridge direct seeding

1. 旋耕装置 2. 已耕土壤 3. 微垄装置 4. 微垄沟 5. 微垄垄体 6. 畦沟

直播作业工序为旋耕碎土、两侧同步开畦沟、厢面旋切成微垄、微垄表面同步播种。

2　总体结构与工作过程

2.1　总体结构

油菜微垄联合直播机主要由旋耕装置、旋切式微垄种床制备装置(简称微垄装置)、施肥装置、排种系统组成,一次作业完成旋耕灭茬、开沟起微垄、施肥播种多道工序。整机结构示意图如图 3 所示,微垄装置结构示意图如图 4 所示,整机参数见表 1。其中微垄装置是制备厢面微垄的核心部件。

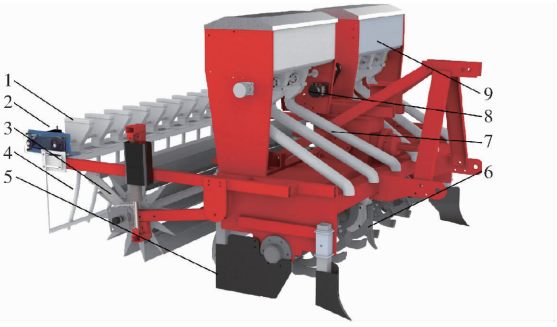


图 3　油菜微垄联合直播机结构示意图

Fig. 3　Structure of rapeseed micro-ridge combined direct seeder

1. 单体排种器　2. 排种驱动模块　3. 微垄装置　4. 导种管　5. 开沟犁　6. 旋耕装置　7. 导肥管　8. 排肥驱动电机　9. 肥箱

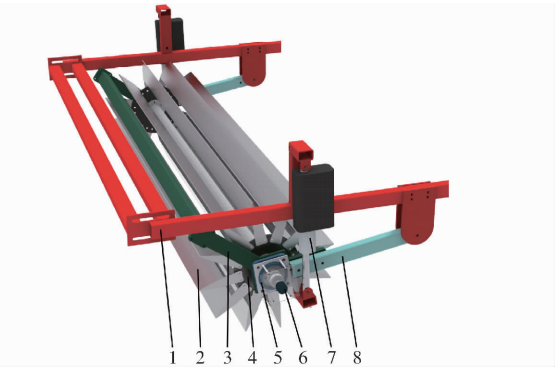


图 4　微垄装置结构示意图

Fig. 4　Structure diagram of rotary-cut micro-ridge seedbed preparation device(RMSD)

1. 机架　2. 腹板　3. 固定架　4. 旋切组件　5. 轴承座　6. 编码器　7. 电动推杆　8. 摆臂

2.2　工作过程

机具作业时,旋耕装置先将未耕土壤旋碎灭茬,旋耕装置两侧的开沟犁同步开出畦沟。旋耕后的细碎土壤经旋耕装置的拖板平整后,微垄装置腹板随机具前进被动循环切入土壤并旋转,将土壤堆积成微垄。旋切深度通过电动推杆调整,在微垄装置一侧轴承座上安装编码器检测微垄装置转速,为排种系统提供速度源。排种驱动模块转速与微垄装置转速同步,将种子均匀播种于微垄表面。其中微垄装置是将厢面旋切成等距横向微垄的关键装置。

表 1　油菜微垄联合直播机主要技术指标

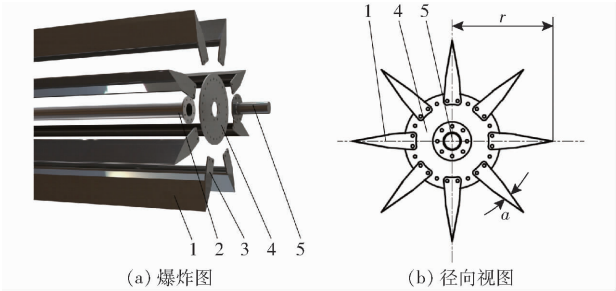
Tab. 1　Main technical indicators of rapeseed micro-ridge combined direct seeding machine

参数	数值
整机尺寸/(mm × mm × mm)	1 800 × 2 000 × 1 400
作业幅宽/mm	1 950
配套动力/kW	55 ~ 80
作业速度/(km·h^{-1})	≤5
播种行数	10
排种量/(g·hm^{-2})	3 000 ~ 6 250
畦沟深度/mm	180 ~ 220
旋耕深度/mm	100 ~ 150
微垄距/mm	266、332
微垄高度/mm	100

3　微垄装置结构设计与分析

3.1　结构组成

微垄装置整体结构如图 4 所示,旋切组件(图 5)是微垄装置的核心,旋切组件通过轴承座安装于固定架、摆臂组成的支架上,调节两侧的电动推杆伸缩控制旋切组件的旋切深度,电动推杆行程为 200 mm,当机具存放或不需要旋切土壤时,可将电动推杆收缩至上止点。



(a) 爆炸图　　(b) 径向视图

图 5　旋切组件结构示意图

Fig. 5　Structure diagrams of rotary-cut device

1. 腹板　2. 中心轴　3. 腹板固定件　4. 腹板盘　5. 端面轴

旋切组件由中心轴、端面轴、腹板盘、腹板组成。中心轴为直径 80 mm 空心轴,两侧端面焊接有法兰盘,用于安装腹板盘和端面轴。腹板作业面由 3 mm 钢板折弯成形,两端面焊接腹板固定件,通过螺栓安装于腹板盘。更换不同孔数的腹板安装盘可调整腹板数量。腹板安装数量、回转半径、顶角是装置的关键参数。

3.2　腹板回转半径分析与确定

机具前进过程中,腹板循环旋切土壤。对腹板端点旋切过程进行静力学和运动学分析,分析并确定微垄装置回转半径 r、被动旋切转动速比 λ 等参数,考虑旋切过程中土壤产生堆积,实际沟深大于旋切深度,设旋切深度 D 为 0.10 m。

参考《农业机械设计手册》中的轧滚设计,腹板安装数 N 通常不少于 6 件,腹板安装间隔角度越小,越易被动旋转,因此对 N 为 6 时进行分析。简化相邻腹板为线段 OM、ON,O 为旋转中心,M、N 为腹板端点。设点 M 触土时静止,受力如图 6 所示。

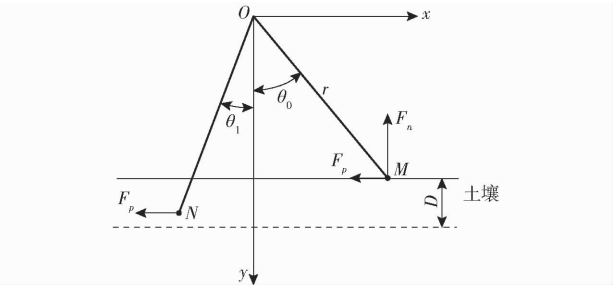


图 6 腹板端点受力分解图

Fig. 6 Force diagram of edge point of rolling board

设点 M 静止,受到推力为 F_p,根据合力矩定理和几何关系有

$$\begin{cases} M_o = -r\cos\theta_1 F_p - r\cos\theta_0 F_p + r\sin\theta_0 F_n = 0 \\ \dfrac{\pi}{3} = \theta_0 + \theta_1 \\ \theta_0 = \arccos\dfrac{r-D}{r} \end{cases} \tag{1}$$

式中 M_o——点 M 对于点 O 力矩,N·m

θ_0——点 M 触土时 OM 与 y 轴夹角,(°)

θ_1——ON 与 y 轴夹角,(°)

F_n——土壤对点 M 法向支持力,N

点 M 和土壤摩擦角 φ 与 θ_0、r 关系为

$$\begin{cases} \varphi = \arctan\dfrac{F_p}{F_n} = \arctan\dfrac{\sin\theta_0}{\cos\left(\dfrac{\pi}{3}-\theta_0\right)+\cos\theta_0} \\ \varphi = -\arctan\dfrac{\sqrt{1-\dfrac{(D-r)^2}{r^2}}}{\cos\left(\arccos\dfrac{D-r}{r}+0.955\right)+\dfrac{D-r}{r}} \end{cases} \tag{2}$$

当点 M 摩擦角 φ 小于土壤与金属摩擦角时,点 M 不产生 x 方向滑动,微垄装置可被动旋转。参考文献[19],金属与土壤摩擦角范围 23°~45°,取下限值计算得到 $r=0.33$ m。为减小机具纵向尺寸,向下取整 $r=0.30$ m,当腹板数量为 6 时,相邻腹板端点间弧长为 0.31 m,处于定义的微垄距范围内;代入式(2)验算得点 M 摩擦角 φ 最大为 24.45°,与摩擦角范围下限接近,判定可连续被动旋转作业。

3.3 被动旋转速比分析

将腹板简化为线段 OM,设腹板回转中心点 O 为静系,土壤为动系,腹板尖端点 M 为动点(图 7)。设机具前进速度为 v_m,方向为 x 轴负方向,腹板尖

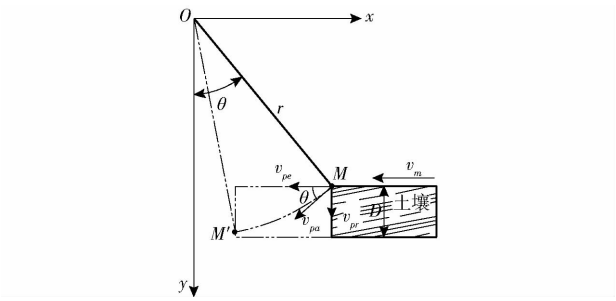


图 7 腹板运动速度分解示意图

Fig. 7 Speed decomposition diagram of rolling board

端动点 M 触土时运动速度可分解为速度 v_{pa} 与速度 v_{pr},当点 M 运动到 y 轴时,点 M 旋切深度为 D。根据点的速度合成定理有

$$\boldsymbol{v}_{pa} = \boldsymbol{v}_{pe} + \boldsymbol{v}_{pr} \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{v}_{pa}$——动点 M 的切向速度,m/s

$\boldsymbol{v}_{pe}$——动点 M 的 x 轴负方向速度,与 v_m 大小相等,m/s

$\boldsymbol{v}_{pr}$——动点 M 的 y 轴方向速度,m/s

$\boldsymbol{v}_{pe}$ 与 $\boldsymbol{v}_{pa}$ 模的比值为

$$\cos\theta = \frac{|\boldsymbol{v}_{pe}|}{|\boldsymbol{v}_{pa}|} \tag{4}$$

式中 θ——OM 与 y 轴夹角,(°)

设 OM 转动角度 θ 与时间的函数为 $\omega(t)$,则有

$$|\boldsymbol{v}_{pa}| = r\omega(t) = r\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

式中 ω——OM 转动角速度,rad/s

结合式(4)和式(5)有

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}r\cos\theta = |\boldsymbol{v}_{pe}| \tag{6}$$

微分方程(6)边界条件为动点 M 由初始位置 θ_0 运动到 y 轴所需时间 t。由腹板旋切深度 D、转动半径 r 决定。在无滑移情况下,点 M 运动到 y 轴所需时间 t 为

$$t = \frac{r\sin\theta_0}{|\boldsymbol{v}_{pe}|} = \frac{0.75r}{|\boldsymbol{v}_{pe}|} \tag{7}$$

根据边界条件求解微分方程(6)并求导得 OM 转动角度与角速度为

$$\begin{cases} \theta(t) = \arcsin\left(0.75 - \dfrac{|\boldsymbol{v}_{pe}|t}{r}\right) \\ \dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \dfrac{-|\boldsymbol{v}_{pe}|}{r\sqrt{1-\left(0.75-\dfrac{t|\boldsymbol{v}_{pe}|}{r}\right)^2}} \end{cases} \tag{8}$$

结合式(5)、(8),$\boldsymbol{v}_{pa}$ 与 $\boldsymbol{v}_{pe}$ 的速度比例 λ 为

$$\lambda = \frac{\left|r\dfrac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}\right|}{|\boldsymbol{v}_{pe}|} = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\dfrac{t|\boldsymbol{v}_{pe}|}{r}-0.75\right)^2}} \tag{9}$$

由几何关系可知点 M 的入土深度为

$$D = r\cos\theta - r\cos\theta_0 \tag{10}$$

对于给定的机具前进速度 v_{pe} 和时间 t 可求得对应入土深度 D。通过式(8)、(10)可得到 t、D、v_{pe} 的关系为

$$t = \frac{3r - \frac{2\sqrt{-(50D-17r)(50D+83r)}}{25}}{4v_{pe}} \tag{11}$$

由式(9)、(11)得到速比 λ 与点 M 入土深度 D 关系为

$$\lambda = \frac{50}{\sqrt{\frac{(50D+33r)^2}{r^2}}} \tag{12}$$

使用 Matlab 绘制出式(9)、(12)速比 λ 的函数图(图 8)。在参数范围内,速比 λ 随着旋切深度逐渐减小,减小速度先快后慢。当旋切深度为 0.05 m 时速比降低为 1.2,当旋切深度到 0.1 m 即达到最深时,λ 为 1。微垄表面形状由线段 OM 自点 M 向点 O 包络而成,当腹板端点 M 入土较浅时,后部腹板尚未入土,未形成有效的包络线;当旋切深度过半时顶部包络线逐渐成形,此时速比小于 1.2,并随着入土深度增加逐渐逼近于 1。

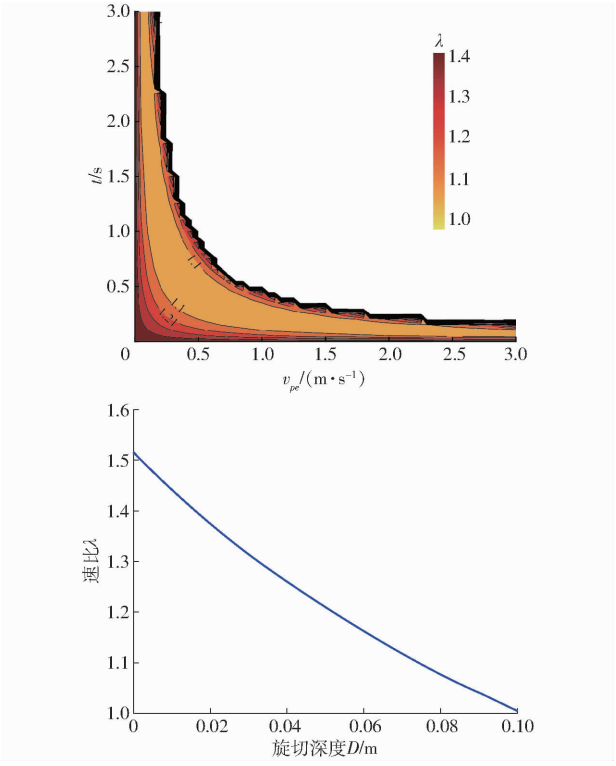


图 8　速比 λ 变化曲线

Fig. 8　Trend of λ

3.4　腹板运动包络线设计与分析

分析腹板运动包络线,研究微垄距 p 与腹板数量 N 的关系,并确定腹板顶角 a 参数范围。

3.4.1　腹板运动包络线设计

考虑实际情况下动点 M 存在滑移,装置被动旋转过程中至少有 2 件腹板同时触土,为进一步分析微垄装置运动轨迹,设 λ 为 1,即微垄装置腹板端点线速度与机具前进速度相同,在微垄底部所在平面发生纯滚动。根据次摆线参数方程,线段 OM 上各点的运动轨迹为

$$\begin{cases} x_i = r\theta_r - i\sin\theta_r \\ y_i = r - i\cos\theta_r \end{cases} \quad (150\ \text{mm} \leqslant i \leqslant 300\ \text{mm}) \tag{13}$$

式中　i——OM 上某点与点 O 距离,mm

x_i——点 i 运动轨迹 x 坐标

y_i——点 i 运动轨迹 y 坐标

θ_r——动圆转动的弧度,rad

使用 Matlab 绘制出 150 mm$\leqslant i \leqslant$300 mm 时,相邻腹板 A 和 B 的运动轨迹(图 9),腹板 A、B 相位差为 30°。在 y 轴 0 ~ 250 mm 范围内标出包络线间断点 CP1 ~ CP10,并计算出各点斜率和切线角度(表 2),并使用三次样条插值法绘制出包络图像。由图 10 所示,腹板运动包络线的高度 h 从 200 mm 逐渐运动至 0 mm 时,包络线切线与水平方向夹角逐渐增大,当 y 为 0 mm,即点 M 运动到最低点时,切土角度为 90°。

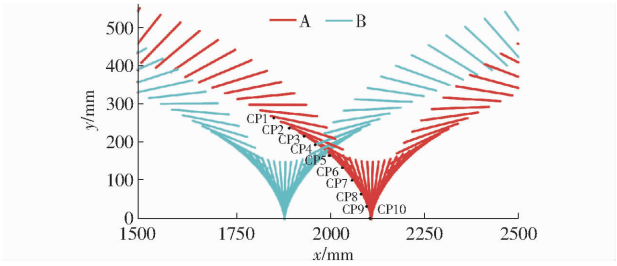


图 9　相邻腹板运动包络线

Fig. 9　Motion contour of rolling board

表 2　微垄装置腹板包络线各点统计

Tab. 2　Statistics of points on envelope of rolling board

采样点编号	x/mm	y/mm	斜率 K	切线角度/(°)
CP1	1 941.15	218.17		
CP2	1 981.93	190.20	-0.69	34.45
CP3	2 017.04	160.48	-0.85	40.23
CP4	2 046.66	129.72	-1.04	46.09
CP5	2 068.97	101.47	-1.27	51.69
CP6	2 086.45	74.17	-1.56	57.38
CP7	2 098.60	50.18	-1.97	63.13
CP8	2 106.71	29.07	-2.60	68.97
CP9	2 110.69	14.61	-3.63	74.61
CP10	2 112.72	0.15	-7.13	82.02

3.4.2　包络线分析与关键参数确定

根据腹板运动包络线对微垄距 p、腹板数量 N 进行分析。设微垄距最小时,两相邻腹板包络线相

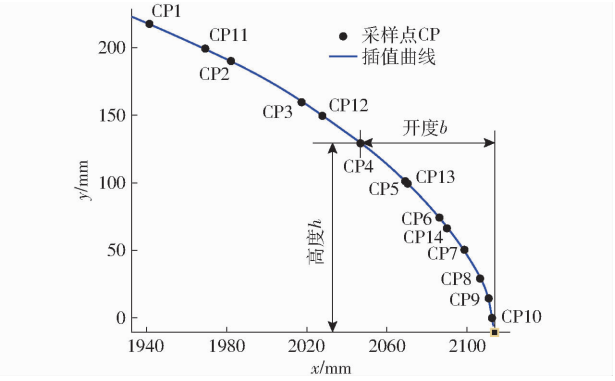


图 10 腹板运动包络线三次样条插值曲线

Fig. 10 Cubic spline curve of rolling board envelope

交高度 h 为 1.5 倍旋切深度 D,避免发生“切顶”扰动微垄顶部土壤回落至微垄沟。当 h 为 150 mm 时,开度 b 为 92.58 mm,因微垄包络线对称,微垄距为 2 倍开度 b,即 185.16 mm。当 λ 为 1,腹板回转半径 r 为 0.30 m 时,微垄距 p 与腹板数量 N 的关系为

$$p=\frac{2\,000\pi r}{N} \tag{14}$$

根据式(14)计算得出腹板最大安装数量为 10.18,取整为 10,当腹板数量 N 为 6 ~ 10 时,对应理论微垄距 p 为 188.50 ~ 314.17 mm。

确定腹板顶角 a 范围:考虑土壤回流至沟内形成无效深度,参考 GB/T 5668—2017《旋耕机》中旋耕后 1 级碎土土块最长边为 40 mm,视沟宽小于 40 mm 的沟深为无效沟深(图 11)。结合表 3 和图 10,当开度 b 为 20 mm,即沟宽为 40 mm 时,高度 h(无效沟深)为 64.06 mm,为降低无效沟深,设置腹板面按一定角度折弯(腹板顶角 a),如图 12 所示。

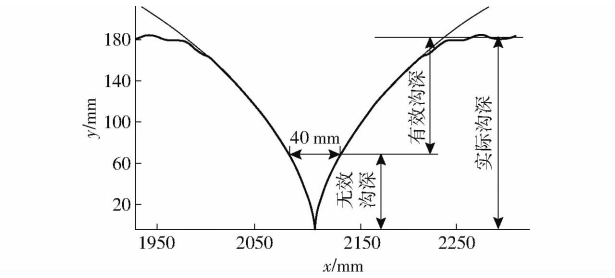


图 11 微垄沟示意图

Fig. 11 Schematic of micro-furrow

表 3 微垄装置腹板包络线反求特殊点

Tab. 3 Statistics of reversed points on envelope of rolling board mm

编号	高 h	开度 b
CP11	200.00	151.58
CP12	150.00	92.58
CP13	100.00	50.58
CP14	64.06	20.00

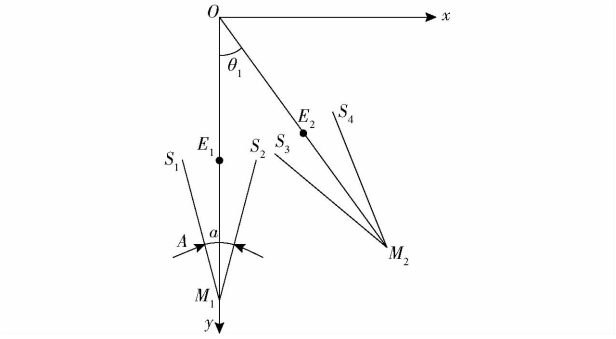


图 12 腹板侧板角度示意图

Fig. 12 Schematic of angle of rolling board

为避免土壤进入腹板内侧夹角中,设定 M_1E_1 长度为 1.5 倍旋切深度 D,S_1S_2 连线与 OM_1 垂直且过点 E_1。当 OM_1 长度为 300 mm,腹板数量为 10 时,θ_1 为 36°。考虑安装间隙 S_2S_3,设定腹板顶角 a 区间为 0° ~ 28°。

通过理论分析得到微垄装置主要结构参数为:回转半径 r 为 0.30 m,腹板数量为 6 ~ 10,腹板顶角 a 为 0° ~ 28°。

4 DEM - MBD 耦合仿真分析与参数优化

微垄装置作业对象为旋耕后土壤,是具有离散性的散体颗粒群。被动旋转切土过程中散体颗粒群与机具相互作用,颗粒、机具的运动状态、受力随时间持续变化,难以通过解析法定量表达颗粒群的运动。为进一步探究机具性能,使用 DEM - MBD 耦合仿真探究理论分析得到的主要结构参数,从土壤角度定量研究微垄成形过程,结合试验优化方法,得到较优参数组合。

4.1 DEM - MBD 耦合仿真试验模型建立

4.1.1 模型仿真基础参数

使用 RecurDyn 和 EDEM 软件进行 DEM - MBD 耦合仿真。DEM - MBD 耦合仿真结合 MBD 和 DEM 仿真的优势,可对单一仿真无法完成的工况进行模拟,得到了广泛运用[20-21]。微垄装置的作业土壤为旋耕后碎土,颗粒之间黏结力较小,作业过程中无直接垂直向下的压力,忽略颗粒塑性变形,设颗粒与颗粒之间的接触模型为 Hertz - Mindlin[22]。机具材料的本征参数、材料与 EDEM 颗粒间接触参数通过文献[22 - 25]获得。EDEM 颗粒之间接触参数对作业区域内旋耕后的土壤进行参数标定获得,详细参数见表 4。

4.1.2 虚拟土槽生成

对旋耕后的土壤进行采样统计,将采样后土壤颗粒按最长边大于 50 mm、40 ~ 50 mm、30 ~ 40 mm、20 ~ 30 mm、0 ~ 20 mm 筛分成 5 类并统计质量比,每

表 4　仿真材料与模型参数

Tab. 4　Simulation materials and model parameters

参数	数值
密度/(kg·m^{-3})	1 741
颗粒泊松比	0. 38
颗粒剪切模量/Pa	1. 16 × 10^{6}
钢密度/(kg·m^{-3})	7 865
钢泊松比	0. 3
钢剪切模量/Pa	7. 9 × 10^{10}
颗粒-颗粒恢复系数	0. 350
颗粒-颗粒静摩擦因数	0. 351
颗粒-颗粒滚动摩擦因数	0. 257
颗粒-钢恢复系数	0. 3
颗粒-钢静摩擦因数	0. 3
颗粒-钢滚动摩擦因数	0. 15

种尺度类型土壤颗粒随机选取 1 种进行三维扫描建立 STL 模型，在 EDEM 中按质量比填充复现 5 种尺度土块，重构旋耕后土壤。考虑旋耕作业后土壤蓬松度增加，种床体积膨胀，将虚拟土槽厚度设定为 220 mm。考虑计算量[23-24]，设定颗粒床尺寸为 3 000 mm × 500 mm × 220 mm。

4.1.3　模型设置

建立微垄装置的简化模型，如图 13 所示。为模拟装置在实际作业中被动旋转工况，在 RecurDyn 软件中定义微垄装置与中心轴之间的运动副为旋转副，中心轴匀速直线运动，方向与机具前进方向相同。离散元仿真时间步长设定为 2 × 10^{-5} s，当装置旋切完虚拟土槽时停止仿真。

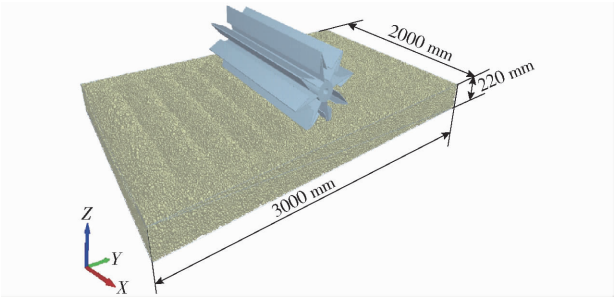


图 13　耦合仿真模型

Fig. 13　Diagram of DEM - MBD simulation

4.2　微垄成形过程分析

4.2.1　微垄装置被动旋转分析

使用 RecurDyn 后处理中 Plot 功能导出微垄装置被动旋转角速度与 y 方向位移关系折线图（图 14）。腹板数量、腹板顶角取分析结果中间值，即腹板数量为 8、腹板顶角 14°，前进速度分别为 1、3、5 km/h。结果表明，微垄装置被动旋转角速度呈周期性变化，且变化幅度随着前进速度增大而变大；微垄装置转动平均角速度分别为 0. 927、2. 70、4. 47 rad/s，腹板端点平均线速度分别为 0. 98、2. 92、4. 83 km/h，滑移率分别为 2. 02%、2. 73%、3. 44%，与理论分析中 λ 为 1 相符。

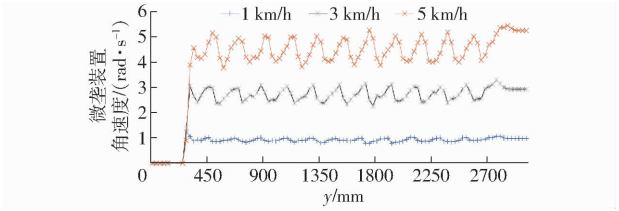


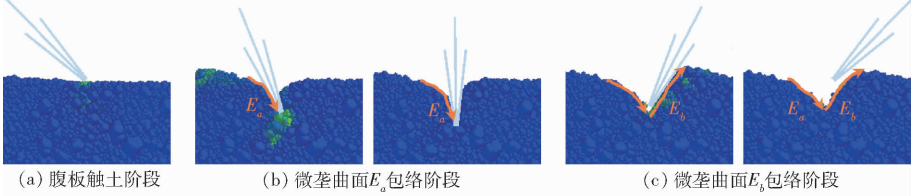
图 14　不同前进速度微垄装置被动旋转角速度变化曲线

Fig. 14　Angular velocity of passive rotation of micro-ridge device at different working speeds

4.2.2　土壤颗粒扰动分析

使用 EDEM 后处理分析微垄曲面成形过程中颗粒扰动规律。腹板数量、腹板顶角取分析结果中间值，即腹板数量为 8、腹板顶角 14°，前进速度分别为 1、3、5 km/h。相邻的微垄表面由 E_a、E_b 两个包络曲面组成，E_a、E_b 通过腹板侧面旋转包络成形。对于先成形的包络曲面 E_a，腹板端点触土后，腹板侧面将下后方的土壤颗粒沿包络线进行推挤，逐渐形成包络曲面 E_a；随着机具前进腹板旋转至 90°达到旋切深度，此时包络曲面 E_a 成形（图 15b），包络方向沿微垄自上而下。对于后成形的包络曲面 E_b，随着机具前进，腹板继续转动，腹板侧面将前方土壤朝作业方向推挤，至腹板离开土壤，包络曲面 E_b 成形（图 15c），包络方向沿微垄自下而上。

对微垄成形过程中土壤颗粒扰动情况进行分析。以腹板数量为 8、腹板顶角 14°，前进速度分别为 1、3、5 km/h 为例，分析单个微垄成形过程中土壤颗粒扰动情况。使用矢量箭头表示土壤颗粒运动方向，不同颜色表示土壤颗粒的运动速度，为便于统一比较，将颗粒速度色阶范围设置为 0 ~ 0. 6 m/s。腹板沿微垄装置圆周均匀布置，作业过程中交替旋切入土，当腹板数量为 8 时，微垄装置每转动 45°形成一个微垄。为记录微垄成形完整过程，观察微垄装



(a) 腹板触土阶段　(b) 微垄曲面E_a包络阶段　(c) 微垄曲面E_b包络阶段

图 15　相邻微垄曲面成形过程

Fig. 15　Forming process of adjacent micro-ridge surfaces

置转动相位角分别为 0°、15°、30°、45°时颗粒扰动情况，如图 16 所示。

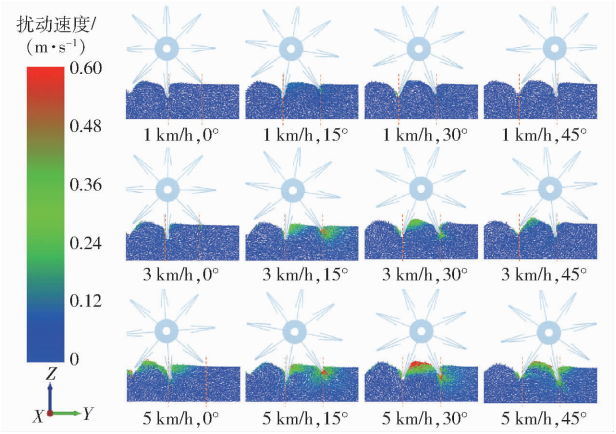


图 16 不同前进速度与相位土壤颗粒扰动分析

Fig. 16 Analysis of soil particles disturbance at different working speeds and phases

土壤颗粒扰动方向从后向前，颗粒扰动区域和扰动速度随着机具前进速度增大而增大，当前进速度为 1 km/h 时，最大扰动速度相位角为 15°，有少量土壤颗粒回落至后方微垄沟中；当前进速度为 3 km/h，最大扰动速度相位角在 15°～30°之间，部分土壤颗粒扰动至微垄顶部；当前进速度为 5 km/h 时，最大扰动速度相位角为 30°，部分土壤颗粒扰动后越过微垄顶部，落入前方微垄沟。前进速度增加，土壤颗粒沿前进方向流动量增加，最大扰动速度相位角有延后的趋势。当前进速度较低时，土壤颗粒易朝后流动并回落至后方微垄沟中，随着前进速度增加，土壤颗粒朝前扰动速度增加，易落入前方微垄沟中。

4.3 优化仿真试验指标与方法

微垄成形过程中土壤颗粒经扰动后将不同程度地回流至微垄沟中，为便于定量探究各参数对微垄成形的影响，将有效沟深作为主要指标。有效沟深是微垄装置推动后颗粒在临界滑动状态的一种特征，在微垄定义范围内有效沟深越大越好。

通过 EDEM 后处理中切片功能将微垄部位颗粒切出显示，导出 x 轴方向正视图，将图像二值化处理后提取轮廓路径，将轮廓路径导入 AutoCAD 缩放至实际尺寸后进行参数测量。测量指标为实际沟深、无效沟深、微垄距(图 11)，有效沟深为实际沟深与无效沟深之差，微垄距为相邻微垄沟距离。为减少误差，虚拟土槽中第一个和最后一个完整微垄不计入统计，每次试验至少统计 5 个微垄。

4.4 单因素试验与结果分析

理论分析得到的腹板数量 N、腹板顶角 a 为区间值，旋切深度 D 与机具前进速度 S 是作业过程中关键作业参数。探究作业旋切深度 D、前进速度 S、腹板数量 N、腹板顶角 a 对作业效果的影响，并确定各因素的范围。

考虑旋切后土壤堆积、旋耕机前进速度区间及 3.4.2 节分析结果，设定单因素试验中水平为：旋切深度 80 mm、前进速度 3 km/h、腹板数量 8、腹板顶角 14°。进行某一因素试验时将其他因素设为中间水平。试验结果如图 17 所示。各因素水平间差异使用 LSD 法比较(***、**、* 分别表示方差分析在 0.001、0.01、0.05 水平上显著，ns 表示不显著)。

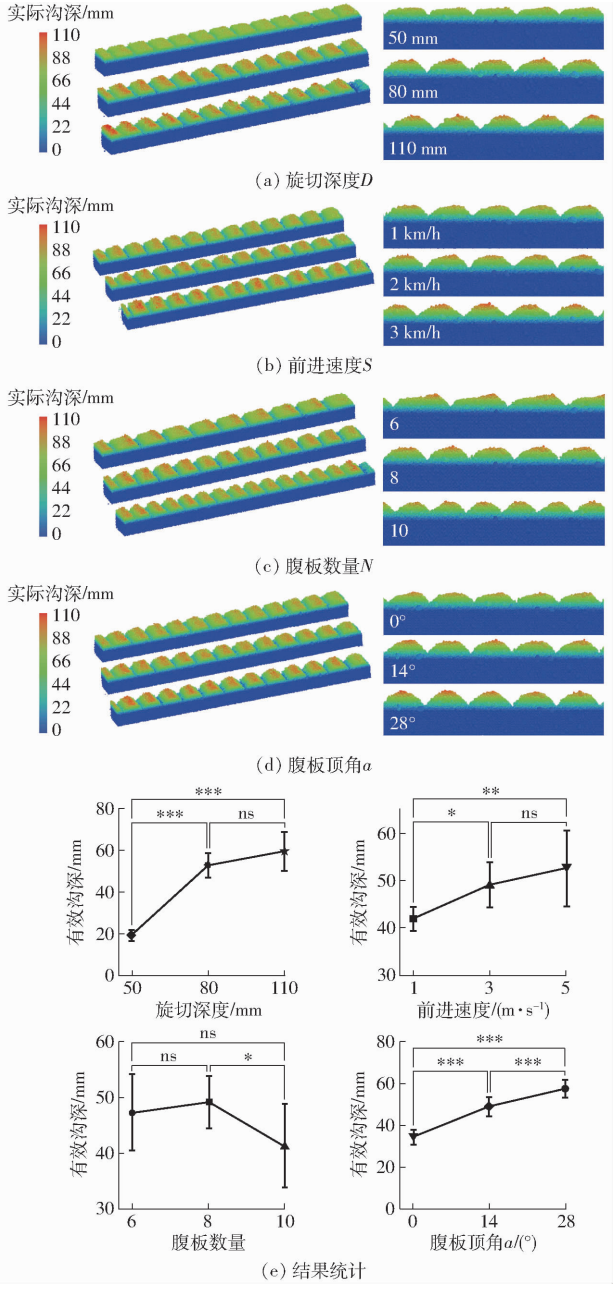


图 17 单因素试验仿真结果与统计

Fig. 17 Simulation results of single factor test

(1)分析旋切深度分别为 50、80、110 mm 时对微垄成形的影响。当旋切深度为 50 mm，其他因素为中水平时，有效沟深平均值为 19.19 mm，深度较

浅。随着旋切深度增加，有效沟深从 53.71 mm 增加至 59.59 mm，旋切深度在 50 ~ 80 mm 时增幅较大，80 ~ 110 mm 时增幅减小。方差分析和多重比较表明，旋切深度对有效沟深有极显著影响，旋切深度在 80 mm 和 110 mm 时差异不显著。

（2）分析前进速度分别为 1、3、5 km/h 时对微垄成形的影响。当前进速度从 1 km/h 增加至 5 km/h 时，有效沟深缓慢从 42.41 mm 增加至 52.59 mm。方差分析和多重比较表明，前进速度对有效沟深有较显著影响，当前进速度为 3 km/h 和 5 km/h 时，有效沟深差异不显著，前进速度为 1 km/h 和 3 km/h、1 km/h和 5 km/h 时差异显著。

（3）分析腹板数量为 6、8、10 时对微垄成形的影响。当腹板数量从 6 增加至 8 时，有效沟深平均值从47.24 mm 增加至53.71 mm，再跌至41.29 mm。方差分析和多重比较表明，腹板数量对有效沟深有显著影响，腹板数量在 6 和 8 之间差异不显著，但腹板数量 8 和 10 之间差异显著，有效沟深降低。

（4）分析腹板顶角为 0°、14°、28°时对微垄成形的影响。当腹板顶角从 0°增加至 28°时，有效沟深平均值从 34.30 mm 增加至 58.66 mm，标准差变化幅度较小。方差分析和多重比较表明，腹板顶角对有效深度有极显著影响，各个水平之间差异均为极显著水平。

4.5　正交旋转回归试验与参数优化

单因素试验表明，腹板数量 N 为 10 时，有效沟深显著降低，仅 41.29 mm，且与 8 水平差异显著，将腹板数量 N 设置为 6、8 两种进行试验。因前进速度 S 为 3 ~ 5 km/h 时，对微垄有效沟深影响不显著，将前进速度 S 设置为 3 km/h 进行试验。旋切深度 D、腹板顶角 a 是影响有效沟深的极显著因素（$P < 0.001$），将旋切深度 D 和腹板顶角 a 设定为二次正交旋转回归试验因素。试验设计与结果见表 5，y_6、y_8 分别为 N 取 6、8 时有效沟深。

试验使用 Design-Expert 11.0 软件进行分析，当腹板数量为 6、8 时，方差分析见表 6、7。方差分析表明，腹板数量为 6 或 8 时，旋切深度 D 和腹板顶角 a 对有效沟深影响极显著，有效沟深 y_6、y_8 与旋切深度 D、腹板顶角 a 之间的回归方程分别为

$$y_6 = -204.46 + 45.13D + 0.03a + 0.17Da - 1.94D^2 - 0.02a^2 \quad (15)$$

$$y_8 = -363.65 + 75.30D + 36.11a - 0.43Da - 3.47D^2 - 0.04a^2 \quad (16)$$

旋切深度 D 和腹板顶角 a 与有效沟深的响应曲面见图 18。当腹板数量为 6 时，随着旋切深度 D 和腹板顶角 a 的增加，有效沟深增加，旋切深度 D 为增加的主要因素，由等高线图可知，为获得不小于 70 mm 的有效沟深，旋切深度应大于 90 mm，为获得较深的有效沟深，腹板顶角 a 和旋切深度 D 应尽量取最

表 5　正交旋转回归试验设计与结果

Tab.5　Results of orthogonal rotation regression test

编号	因素		y_6/mm	y_8/mm
	D/mm	a/(°)		
1	8.00	14.00	47.00	47.06
2	10.00	14.00	72.41	59.77
3	8.00	28.00	53.02	60.69
4	10.00	28.00	83.26	61.27
5	7.85	21.00	49.88	52.04
6	10.15	21.00	81.16	62.40
7	9.00	12.96	61.69	54.66
8	9.00	29.03	71.45	63.80
9	9.00	21.00	67.10	63.59
10	9.00	21.00	66.29	61.74
11	9.00	21.00	68.02	62.17

表 6　N=6 时正交旋转回归试验方差分析

Tab.6　N=6 ANOVA of orthogonal rotation regression test

项目	自由度	均方	F	P
模型	5	281.11	329.17	<0.000 1
D	1	1 263.32	1 479.30	<0.000 1
a	1	118.78	139.08	<0.000 1
Da	1	5.83	6.83	0.047 5
a^2	1	13.08	15.31	0.011 3
D^2	3	4.54	5.32	0.069 3
残差	5	0.854 0		
失拟项	3	0.921 4	1.22	0.479 1
R^2		0.997 0		
调整 R^2		0.993 9		
预测 R^2		0.983 9		
模型信噪比		52.840 5		

表 7　N=8 时正交旋转回归试验方差分析

Tab.7　N=8 ANOVA of orthogonal rotation regression test

项目	自由度	均方	F	P
模型	5	57.21	49.86	0.000 3
D	1	95.53	83.26	0.000 3
a	1	99.00	86.28	0.000 2
Da	1	36.81	32.08	0.002 4
a^2	1	41.67	36.32	0.001 8
D^2	3	13.04	11.37	0.019 9
残差	5	1.15		
失拟项	3	1.28	1.37	0.449 2
R^2		0.980 3		
调整 R^2		0.960 7		
预测 R^2		0.882 8		
模型信噪比		22.724 3		

大值。当腹板数量为 8 时,有效沟深随旋切深度 D 和腹板顶角 a 在各自因素范围内出现拐点,从等高线图可知,有效沟深最大值为 64.26 mm,为获得较深的有效沟深,腹板顶角范围应设置在 22°~27°之间,旋切深度应设置在 86.00~97.00 mm 之间。

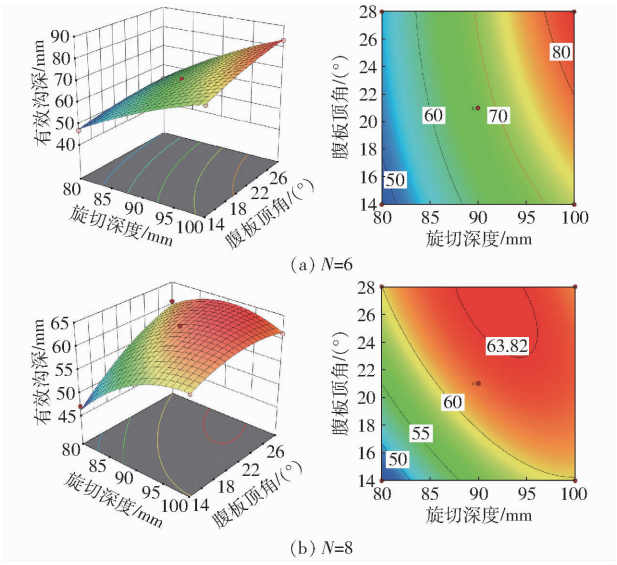


图 18 旋切深度与腹板顶角交互作用的响应曲面

Fig. 18 Response surfaces of rolling depth and rolling board angle

为获得较优因素组合,使用 Design-Expert 11.0 进行求解,设置旋切深度 D 和腹板顶角 a 范围分别为 80~100 mm、14°~28°,求解设置有效沟深为最大,获得的较优参数组合分别为:当腹板数量为 6 时,腹板顶角 a 和旋切深度 D 分别为 28.00°、100 mm,有效沟深 y_6 为 83.59 mm;当腹板数量为 8 时,腹板顶角 a 和旋切深度 D 分别为 26.50°、92.00 mm,有效沟深 y_8 为 64.26 mm。

以较优参数组合进行仿真验证试验(图 19),每组参数组合重复 3 次。试验结果为:腹板数量为 6 时,有效沟深 y_6 平均值为 83.25 mm;腹板数量为 8 时,有效沟深 y_8 平均值为 63.89 mm。验证仿真结果与优化结果偏差不超过 0.58%。

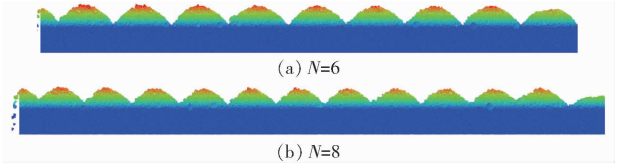


图 19 最优参数组合仿真结果

Fig. 19 Simulation diagrams with optimal parameter combination

5 田间试验

5.1 试验方法

为验证仿真优化结果,将微垄装置安装于播种机进行优化验证试验和播种试验。作业参数设定为最优参数组合进行田间优化验证试验,使用 Trimble TX8 三维激光扫描仪扫描作业后厢面以获得微垄点云图(图 20),通过 Trimble RealWorks 软件处理微垄实际轮廓并进行分析。试验时微垄装置各参数为:调节两侧电动推杆同步运动将作业深度分别设置为 100 mm 和 92 mm;调节拖拉机手油门将机具前进速度控制为 3 km/h。



图 20 田间优化验证试验

Fig. 20 Field test

将机具安装排种系统进行播种试验,排种系统由 10 行单体排种器、排种驱动模块、编码器、导种管组成(图 3)。在微垄装置轴端面安装编码器测定微垄装置转速,闭环步进电机为动力源,通过单片机控制闭环步进电机转速,以随速播种。

5.2 试验结果与分析

5.2.1 优化验证试验

因微垄沟噪点较多,无法准确标出无效沟深,将点云图中测得的实际沟深与仿真中的实际沟深进行对比,以验证仿真合理性。微垄点云图通过 Trimble RealWorks 软件在厢面中截取获得,随机截取 10 个连续微垄,将截面点云图导入 AutoCAD,在正投影方向测量微垄距、实际沟深。微垄点云图见图 21,测量统计结果见表 8。当腹板数量为 6 时,实际沟深和微垄距平均值分别为 103.08、332.92 mm,与最优参数组合下仿真结果(104.37、324.66 mm)基本一致,误差分别为 1.25% 和 2.48%,微垄合格率为 100%;当腹板数量为 8 时,实际沟深和微垄距平均值分别为 85.16、266.88 mm,与较优参数组合下仿真结果(82.51、244.85 mm)基本一致,误差分别为 3.11% 和 8.25%,微垄合格率为 90%。

5.2.2 播种试验

2021 年 9 月 29 日在湖北省荆门市掇刀区展开了油菜微垄直播试验,配套动力为雷沃 1204 型拖拉机,设置微垄装置腹板数量为 6,作业参数为最优参数组合。机具设置 10 行单体排种器,配置行距为 150 mm,播量为 5 277 g/hm^2,品种为高油酸杂交油菜 H2133,油菜出苗效果良好(图 22)。

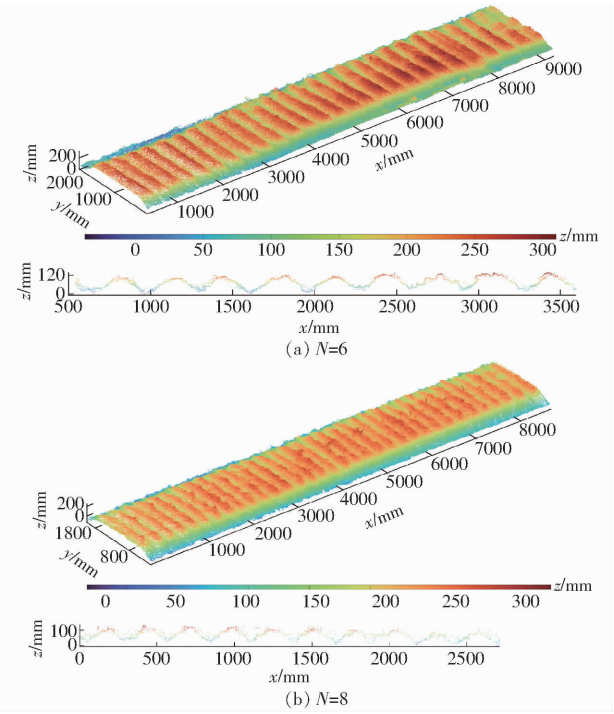


图 21　田间试验微垄点云图

Fig. 21　Micro-ridge point cloud maps in field test

表 8　田间试验微垄统计

Tab. 8　Statistics of micro-ridges in field test　　mm

微垄序号	N = 6		N = 8	
	微垄距	实际沟深	微垄距	实际沟深
1	344. 39	109. 29	280. 02	84. 94
2	336. 82	99. 06	242. 06	90. 64
3	303. 43	95. 70	284. 16	90. 28
4	352. 85	111. 00	267. 05	90. 70
5	311. 21	100. 17	278. 67	76. 69
6	315. 51	103. 37	265. 72	95. 29
7	322. 95	98. 19	246. 14	85. 14
8	372. 66	109. 33	272. 64	81. 07
9	338. 95	100. 37	242. 47	73. 42
10	330. 38	104. 35	289. 88	83. 47
平均值	332. 92	103. 08	266. 88	85. 16
仿真平均值	324. 66	104. 37	244. 85	82. 51



图 22　田间播种试验出苗图

Fig. 22　Seeding test

6　结论

(1)设计了一种油菜直播机旋切式微垄种床制备装置,基于运动学分析了装置运动过程,确定了装置基本结构参数。微垄装置从动滚动组件回转半径为 0. 30 m,腹板数量为 6 ~ 10,腹板顶角为 0° ~ 28°。

(2)DEM - MBD 耦合仿真试验分析了前进速度、旋切深度、腹板顶角、腹板数量对有效沟深的影响,并优化了工作参数。通过正交旋转回归试验得到有效沟深最大的较优参数组合为:腹板数量为 6 时,腹板顶角和旋切深度分别为 28. 00°、100 mm,有效沟深为 83. 59 mm;腹板数量为 8 时,腹板顶角和旋切深度分别为 26. 50°、92 mm,有效沟深为 64. 26 mm。

(3)田间优化验证试验使用 Trimble TX8 三维激光扫描仪扫描较优参数组合下作业的微垄厢面,与优化仿真结果进行对比分析。结果表明:当腹板数量为 6 时,微垄距平均为 332. 92 mm,实际沟深平均为 103. 08 mm;当腹板数量为 8 时,微垄距平均为 266. 88 mm,实际沟深平均为 85. 16 mm,微垄合格率不小于 90%,试验各指标与优化结果基本一致,最大误差为 8. 25%。在湖北省荆门市掇刀区展开了油菜微垄直播试验,出苗效果良好。

参　考　文　献

[1]　邹磊, 夏军, 张印. 长江中下游极端降水时空演变特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2021,30(5):1264 - 1274.
ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin. Spatial-temporal characteristics of extreme precipitation in the middle and lower reaches of the Yangtze River[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021,30(5):1264 - 1274. (in Chinese)

[2]　杨海云, 艾雪莹, BATOOL M, 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 M, 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)

[3]　梁玉刚, 胡文彬, 刘烨, 等. 中国垄作栽培模式的研究进展[J]. 生态学杂志, 2022, 41(7): 1414 - 1422.
LIANG Yugang, HU Wenbin, LIU Ye, et al. The research progress of ridge cultivation mode in China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(7): 1414 - 1422. (in Chinese)

[4]　张智泓, 赵亮亮, 赖庆辉, 等. 基于 DEM - MBD 耦合的铲板式滚动触土部件作业机理分析与试验[J]. 农业工程学报, 2022,38(15):10 - 20.
ZHANG Zhihong, ZHAO Liangliang, LAI Qinghui, et al. Operation mechanism analysis and experiments of shovel-type rolling soil-engaging components based on DEM - MBD coupling[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(15): 10 - 20. (in

Chinese)
[5] 张青松, 廖庆喜, 汲文峰, 等. 油菜直播机开沟犁体曲面优化与试验[J]. 农业机械学报, 2015,46(1):53 - 59.
ZHANG Qingsong,LIAO Qingxi, JI Wenfeng, et al. Surface optimization and experiment on ditch plow of direct rapeseed seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(1):53 - 59. (in Chinese)
[6] 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 Qingsong, LIAO Yitao, TAO Wei,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)
[7] 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 Xiaopeng, ZHANG Qingsong, LIU Lichao, et al. Surface optimization of ship type ditching system based on differential geometry and EDEM simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(8):59 - 69. (in Chinese)
[8] 吴明亮, 官春云, 罗海峰, 等. 2BYD - 6 型油菜浅耕直播施肥联合播种机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11):136 - 140.
WU Mingliang, GUAN Chunyun, LUO Haifeng,et al. Design and experiments of 2BYD - 6 shallow tilling and fertilizing seeder for rapes[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(11):136 - 140. (in Chinese)
[9] 罗海峰, 吴明亮, 官春云, 等. 2BYL - 4 型油菜垄作直播联合播种机设计与试验[C]// 作物多熟种植与国家粮油安全高峰论坛, 长沙, 2015.
LUO Haifeng, WU Mingliang, GUAN Chunyun,et al. Design and experiments of 2BYL - 4 ridge seeder for rapes[C]// Multi-cropping Crop Planting and National Grain and Oil Safety Summit, Changsha, 2015. (in Chinese)
[10] 胡宇倩, 周旋, 资涛, 等. 早熟冬油菜品种各器官干物质及养分积累特征[J]. 中国油料作物学报,2021,43(4):690 - 699.
HU Yuqian, ZHOU Xuan, ZI Tao,et al. Characteristics of dry matter and nutrient accumulation in various organs of early maturing winter rape[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2021,43(4):690 - 699. (in Chinese)
[11] 谷晓博, 李援农, 周昌明, 等. 垄沟集雨补灌对冬油菜根系、产量与水分利用效率的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4):90 - 98.
GU Xiaobo, LI Yuannong, ZHOU Changming, et al. Effects of ridge and furrow rain harvesting cultivation with supplemental irrigation on root, yield and water use efficiency of winter oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(4):90 - 98. (in Chinese)
[12] GU X, LI Y, DU Y. Optimized nitrogen fertilizer application improves yield, water and nitrogen use efficiencies of winter rapeseed cultivated under continuous ridges with film mulching[J]. Industrial Crops and Products, 2017,109:233 - 240.
[13] 刘建霞. 栽培方式与移栽期对稻稻油垄栽油菜生态因子及生长发育的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
LIU Jianxia. Effect of planting methods and transpianting time on ecologocal factors and growth-development of rice-rice-rape rapeseed under ridge cultivation[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015. (in Chinese)
[14] HAYTHAM M, VALERO C, MIGUEL Á, et al. Effect of integrated reservoir tillage for in-situ rainwater harvesting and other tillage practices on soil physical properties[J]. Soil and Tillage Research, 2015,151:50 - 60.
[15] 蒯婕, 李真, 汪波, 等. 密度和行距配置对油菜苗期性状及产量形成的影响[J]. 中国农业科学, 2021,54(11):2319 - 2332.
KUAI Jie, LI Zhen, WANG Bo,et al. Effects of density and row spacing on seedling traits of rapeseed and seed yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021,54(11):2319 - 2332. (in Chinese)
[16] 周苏玫, 李潮海, 常思敏, 等. 起垄栽培对夏玉米生态环境及生长发育的影响[J]. 河南农业大学学报, 2000,34(3):206 - 209.
ZHOU Sumei, LI Chaohai, CHANG Simin, et al. Effects of ridge culture on summer maize ecological environment and growth development[J]. Journal of Henan Agricultural University,2000,34(3):206 - 209. (in Chinese)
[17] 李红宇, 张巩亮, 郑桂萍, 等. 寒地水稻垄作双深耕作栽培模式技术效果的评价[J]. 水土保持研究, 2020,27(4):164 - 170.
LI Hongyu, ZHANG Gongliang, ZHENG Guiping,et al. Evaluation on technical effect of double depth ridge cultivation mode of rice in cold region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020,27(4):164 - 170. (in Chinese)
[18] 廖庆喜, 卜祥利, 孙文成, 等. 构建油菜种床合理耕层的驱动型犁旋联合耕整机研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11):74 - 84.
LIAO Qingxi, BU Xiangli, SUN Wencheng, et al. Development of driven plow rotary combined tillage machine for construction of rational tillage in rape seedbeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(11):74 - 84. (in Chinese)
[19] 王晓燕, 邓博, 谭丁炀,等. 无驱动式自动调平水田埋秆起浆整地机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(12):20 - 31.
WANG Xiaoyan, DENG Bo, TAN Dingyang, et al. Design and experiment of undriven soil puddling machine with improved auto-leveling and straw-burying design for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(12):20 - 31. (in Chinese)

(下转第 90 页)

[19] https://www.urbinati.com/en/product/wireless-transplanter-rw64 [EB/OL].
[20] TIAN Subo, LI C Q, NAOSHI K, et al. Development of automatic transplanter for plug seedling[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(26): 79 - 82.
[21] 严蕾, 毛罕平, 韩绿化, 等. 穴盘苗温室多末端移栽机运动定位装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(4): 83 - 87.
YAN Lei, MAO Hanping, HAN Lühua, et al. Design and experiment of motion positioning device of multi-end transplanter in greenhouse for cavity tray seedlings[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(4): 83 - 87. (in Chinese)
[22] 胡建平, 张晨迪, 王留柱, 等. 全自动温室钵苗移栽机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 149 - 154.
HU Jianping, ZHANG Chendi, WANG Liuzhu, et al. Design and experiment on automatic greenhouse seedling transplanting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 149 - 154. (in Chinese)
[23] 黎波, 辜松, 初麒, 等. 椰糠培育叶菜水培叶菜苗移植机械手设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 18 - 24.
LI Bo, GU Song, CHU Qi, et al. Design and experiment on manipulator for transplanting leaf vegetables seedling cultivated by coco-peat[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(14): 18 - 24. (in Chinese)
[24] LI Bo, GU Song, CHU Qi, et al. Development of transplanting manipulator for hydroponic leafy vegetables[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(6): 38 - 44.
[25] 俞高红, 王系林, 刘建刚, 等. 蔬菜钵苗密植移栽机多行取苗机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 95 - 102.
YU Gaohong, WANG Xilin, LIU Jian'gang, et al. Design and experiment of multi row seedling taking mechanism for dense planting and transplanting of vegetable pot peedlings[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 95 - 102. (in Chinese)
[26] 孟青新. 水培叶菜水培叶菜苗变间距移植装备设计与试验[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
MENG Qingxin. Design and experiment of variable spacing transplanting equipment for hydroponic leafy vegetable seedlings[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2021. (in Chinese)
[27] 童俊华, 蒋焕煜, 蒋卓华, 等. 钵苗自动移栽机器人抓取指针夹持苗坨参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 8 - 16.
TONG Junhua, JIANG Huanyu, JIANG Zhuohua, et al. Experiment on parameter optimization of gripper needles clamping seedling plug for automatic transplanter[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(16): 8 - 16. (in Chinese)
[28] 吴晓, 张晓忠. 材料力学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2018.
[29] 韦康成. 穴盘苗夹持装置综合性能指标研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2013.
WEI Kangcheng. Study on the comprehensive performance index of transplanting grippers[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2013. (in Chinese)
[30] 金诚谦, 李庆伦, 倪有亮, 等. 小麦联合收获机双出风口多风道清选作业试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 26 - 34.
JIN Chengqian, LI Qinglun, NI Youliang, et al. Experiment of double outlet multi-duct cleaning operation of wheat combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 26 - 34. (in Chinese)

(上接第 58 页)

[20] 赖庆辉, 贾广鑫, 苏微, 等. 基于 DEM - MBD 耦合的链勺式人参精密排种器研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 91 - 104.
LAI Qinghui, JIA Guangxin, SU Wei, et al. Design and test of chain-spoon type precision seed-metering device for ginseng based on DEM - MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 91 - 104. (in Chinese)
[21] 魏楷峰. 基于 DEM - MBD 双向耦合的履带车辆松软地面转向阻力研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
WEI Kaifeng. Research on steering resistance of tracked vehicle on soft ground based on DEM - MBD simulation[D]. Changchun: Jilin University, 2020. (in Chinese)
[22] 张锐, 韩佃雷, 吉巧丽, 等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 49 - 56.
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49 - 56. (in Chinese)
[23] 周华, 李栋, 刘政源, 等. 秸秆旋埋还田后空间分布效果仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 69 - 77.
ZHOU Hua, LI Dong, LIU Zhengyuan, et al. Simulation and experiment of spatial distribution effect after straw incorporation into soil by rotary burial[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 69 - 77. (in Chinese)
[24] DU J, HENG Y, ZHENG K, et al. Investigation of the burial and mixing performance of a rotary tiller using discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105349.
[25] ZHAO L, ZHOU H, XU L, et al. Parameter calibration of coconut bran substrate simulation model based on discrete element and response surface methodology[J]. Powder Technology, 2022, 395: 183 - 194.