

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.

DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.02.008

油菜种床整备开畦沟仿靴形锐角开沟犁设计与试验

卜祥利, 廖庆喜, 孙文成, 魏国梁, 张青松, 王鹏程

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

摘要 针对长江中下游土壤黏重板结、含水率波动大及前茬水稻秸秆留存量大的复杂工况和油菜种植需开畦沟的生产要求, 研制了油菜机械直播种床整备开畦沟仿靴形锐角开沟犁。选择平滑抛物线作为滑切刃口曲线, 开展仿靴形锐角开沟犁三面楔建模和犁体与土壤相互作用动力学分析, 确定滑切刃口曲线的滑切角范围为 $23^{\circ} \sim 67^{\circ}$ 、犁体入土角为 30° 、犁尖张角为 60° 、挡土板的长度为 400 mm、翼板倾角为 $40^{\circ} \sim 79.2^{\circ}$ 。田间试验表明, 仿靴形锐角开沟犁可开出沟宽为 200~400 mm、沟深为 175~250 mm 的梯形沟, 沟宽及沟深稳定性均达 90% 以上, 且翼板倾角为 46° 、开沟深度为 183 mm、作业速度为 0.6 m/s 时, 开沟作业效果满足油菜种植农艺要求。

关键词 油菜直播机; 种床整备; 开沟犁; 仿靴形; 耕整地; 机械开沟

中图分类号 S 222.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)02-0077-08

长江中下游是我国冬油菜主产区, 该区域降雨量充足^[1]。油菜根系忌水, 种植油菜时需要开沟排水, 开好“三沟”(厢沟、腰沟、畦沟)且要求三沟相通是避免油菜渍害的保证^[2]。目前开沟方式主要分为人工开沟和机械开沟 2 种。传统油菜种植, 人工开沟劳动强度大, 开沟效率低, 因此在大田种植时, 多用机械开沟作业。机械开沟多采用被动式犁体或主动式开沟机具。主动式开畦沟装置作业效果好, 但功耗高, 而被动式犁体结构简单, 能适应较高的作业速度, 在农田开沟领域得到了广泛应用^[3-5]。

国内外学者对农田开沟技术进行了研究^[6-10], 但主要针对大田或旱田的开沟机具, 适用于长江中下游油菜种植的开沟器研究相对较少。目前, 华中农业大学工学院研制的 2BFQ-6 型油菜联合直播机采用前后犁组合式开畦沟, 前犁破土、后犁整形, 可形成完整畦沟, 在油菜种植时被广泛应用^[11]。张青松等^[12-13]利用 EDEM 仿真对犁体曲面进行了研究, 提出曲面优化方法实现犁体降附减阻。但铧式犁在土壤黏重板结、含水率高、稻茬留量大的工况下作业时, 开沟后犁易产生粘土、壅土、挂草或堵草现象, 导致作业后沟边土壤堆积、沟壁垮塌等问题, 造成沟型不稳定。为提高开沟稳定性, 包攀峰等^[14]研制了双

翼开沟犁与后置分土螺旋器组合完成开沟作业的分土开沟装置, 为主动与被动开沟装置相结合的研究提供了参考。刘晓鹏等^[15]设计了一种配合铧式前犁完成开畦沟功能的组合式船型开沟器, 提高了油菜联合直播机开畦沟的稳定性, 并通过微分几何分析与 EDEM 仿真对犁体曲面进行了优化, 但需与破土前犁配套使用。

本研究在 2BFQ-8 油菜联合直播机用组合式船型开沟器的研究基础上, 针对长江中下游土壤黏重板结、含水率波动大、前茬水稻秸秆留存量大的复杂工况和油菜种植需开畦沟的生产要求, 考虑到锐角开沟犁具有开沟阻力小、土壤扰动小的特点, 研制了一种与驱动型犁旋联合耕整机配套使用的仿靴形锐角开沟犁, 旨在为长江中下游油菜开畦沟装置的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 联合耕整机结构与工作原理

配备仿靴形锐角开沟犁的驱动型犁旋联合耕整机主要由主机架、驱动圆盘犁组、旋耕装置、人字形齿轮传动箱、平土托板、仿靴形锐角开沟犁等组成, 整机结构如图 1A 所示。仿靴形锐角开沟犁安装于

收稿日期: 2020-04-23

基金项目: 国家油菜产业技术体系专项(CARS-12); 湖北省自然科学基金项目(2019CFB153); 湖北省农业科技创新行动项目

卜祥利, E-mail: 1130674677@qq.com

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

机组中部,对土壤进行侧向挤压和沟底托平,形成完整沟型。通过犁耕、旋耕相匹配的联合作业,一次作业完成犁耕、旋耕、秸秆切碎还田、埋茬、开畦沟等多道工序,形成适宜油菜生长的种床。仿靴形锐角开沟犁如图1B所示,主要由犁尖、滑切刃、犁柱、支撑梁、挡土板、仿靴整形板、挡土板、底板、起土板等组成。犁尖位于开沟犁最前端,犁尖与刃口曲线随牵引装置前进时破土,随后由分土板将土壤向两侧分离,引导土壤至仿靴整形板和挡土板处,并将土壤提升至地面,仿靴整形板对侧边土壤进行挤压成型,挡土板在对土壤挤压的同时防止土壤回流,从而形成完整的沟侧壁,仿靴整形板与挡土板成一定角度,保证梯形斜边的形成。支撑梁起支撑作用,防止挡土板在工作过程中受土壤作用挤压变形,影响开沟质量。底部安装有底板,底板在拖动作用下对沟底土壤作用形成平整沟底。犁柱上有销孔,便于安装和调节开沟深度。

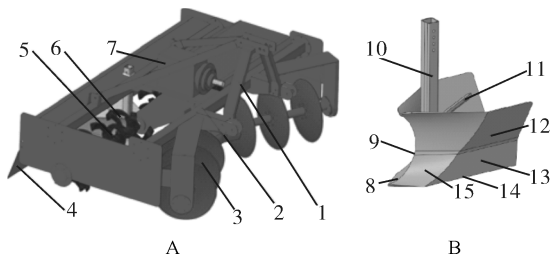


图1 驱动型犁旋联合耕整机结构示意图
A:整机结构图 Structure diagram of machine; B:仿靴形锐角开沟犁示意图 Shoe-shaped acute angle groove plough; 1.三点悬挂 Three-point suspension; 2.机架 Main frame; 3.驱动圆盘犁组 Drive disc plows; 4.平土托板 Flat soil pallet; 5.旋耕装置 Rotary cultivation mechanism; 6.仿靴形锐角开沟犁 Shoe-shaped acute angle opener; 7.人字形传动齿轮箱 Herringbone transmission gearbox; 8.犁尖 Plow tip; 9.滑切刃 Sliding cutting edge; 10.犁柱 Plow column; 11.支撑梁 Support beam; 12.挡土板 Retaining plate; 13.仿靴整形板 Boot-shaping plate; 14.底板 Base plate; 15.起土板 Lifting plate.

图1 驱动型犁旋联合耕整机结构示意图

Fig.1 Structure of the driven plough-rotating combine machine

1.2 仿靴形锐角开沟犁主要参数设计

1)滑切刃口曲线设计。仿靴形锐角开沟犁采用对称式结构设计,由前端两破土曲面相交形成滑切刃口曲线,对仿靴形锐角开沟犁破土阻力影响较大。开沟犁入土后随机组前进,土壤受刃口曲线作用发生剪切破坏,参考文献[6,16],根据滑切原理,摩擦角应小于滑切角。本研究选用抛物线函数曲线作为滑切刃口曲线,滑切刃口曲线的形状如图2所示。

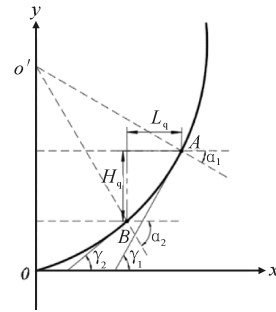


图2 滑切刃口曲线示意图

Fig.2 Schematic diagram of smooth cutting edge curve

根据抛物线方程,设滑切刃口曲线方程为:

$$y = ax^2 + b \quad (1)$$

式(1)中, b 为常数,函数位置随 b 的大小而变化,且不会发生线形变化,故令常数 b 为0。设滑切刃口曲线起始点 $A(x_1, y_1)$ 、终止点 $B(x_2, y_2)$,则 A 、 B 两点的垂直距离为 H_q ,水平距离为 L_q , A 、 B 两点的斜率为:

$$\begin{cases} k_1 = \tan\gamma_1 \\ k_2 = \tan\gamma_2 \\ \tan\gamma_1 = 2ax_1 \\ \tan\gamma_2 = 2ax_2 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, γ_1 为曲线起始点 A 的切线与 x 轴夹角, $(^\circ)$; γ_2 为曲线终止点 B 的切线与 x 轴夹角, $(^\circ)$;联立式(1)、(2)可得常数 a 的关系式:

$$a = \frac{(\tan\gamma_1)^2 - (\tan\gamma_2)^2}{4H_q} \quad (3)$$

由于滑切角 α_1 、 α_2 与 γ_1 、 γ_2 互为余角,可得最终滑切刃口曲线方程为:

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

式(4)中, α_1 为起始滑切角, $(^\circ)$; α_2 为终止滑切角, $(^\circ)$ 。如式(4)所示,滑切刃口曲线的形状受滑切角和 A 、 B 两点垂直距离大小的影响。由图2可知,滑切角成递增趋势,即 $\alpha_2 > \alpha_1$ 。根据文献[17],取摩擦角为 23° ,即 $\alpha_1 > 23^\circ$ 。 α_1 与 α_2 互为余角,所以 $\alpha_2 < 67^\circ$,因此终止滑切角的取值范围为 $23^\circ < \alpha_2 < 67^\circ$ 。当曲线高度 H_q 不变时,改变滑切角大小将会得到不同的滑切刃口曲线。

2)犁体入土角及犁尖张角的设计分析。犁体能否较好入土和分土与入土角和犁尖张角大小密不可分。犁尖在入土的同时,将土壤从沟底提升到地面并将土壤导向两侧,使犁体曲面能够发挥作用。参

考犁体入土角的设计方法,本研究选用三面楔模型对犁尖进行分析(图 3)。

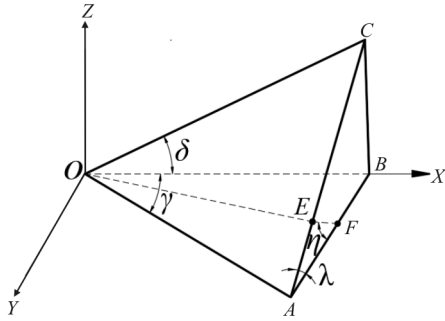


图 3 三角楔模型分析

Fig.3 Analysis of triangle wedge model

以机具前进方向的反方向为 X 轴正方向,沟宽方向为 Y 轴,垂直方向为 Z 轴,建立空间坐标系。其中,面 OAC 为犁尖左半部分,面 ABC 为犁尖作业横截面, γ 为犁尖张角的 1/2, δ 为入土角, λ 为翻土角。机具以一定速度前进时,假设土壤颗粒以最快速度穿过犁尖进入仿靴整形板区域,则其运动轨迹 OE 应垂直于 AC,过 F 点作与 AB 成 η 角的直线 EF,则 η 角为土壤堆积角。由图 3 可知:

$$\begin{cases} \tan\delta = BC/OB \\ \tan\gamma = AB/OB \\ \tan\lambda = BC/OB \\ \eta + \lambda = 90^\circ, \eta = 45^\circ \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可得, $\tan\lambda = \tan\delta/\tan\gamma = 45^\circ$, 所以 $\delta = \gamma$ 。根据农机设计手册,当入土角过大时,土层抬高,工作阻力增加;入土角过小时,会增加犁体高度及长度造成浪费。犁尖张角偏大时,土壤易被推向两侧外翻而乱,同时容易缠绕秸秆;犁尖过小时,切断草根的能力减弱^[18]。综合考虑设定入土角为 30° 、犁尖张角为 60° , 即 $\delta = \gamma = 30^\circ$, 即入土角和犁尖张角均为锐角。

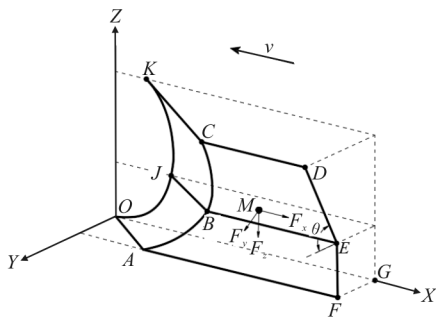


图 4 犁体曲面示意图

Fig.4 Schematic diagram of plough surface

3)挡土板与仿靴整形板的设计分析。挡土板与仿靴整形板采用一体式设计,两者共同组成的犁体曲面如图 4 所示。其中,面 BCDE 为挡土曲面,面 ABEF 为仿靴整形曲面,面 OKCA 为起土曲面,起土曲面参考农机设计手册的水平直元线法形成,根据滑切刃口曲线高度及犁体高度要求,起土曲面高度为 300 mm,曲面宽度为 200 mm。

仿靴形锐角开沟犁对土壤作用后,土壤颗粒在梯形沟沟壁上保持稳定。假设开沟深度一定,且机组匀速前进,则挡土板与仿靴形整形板跟土壤接触的每个点上沿法向方向挤压土粒,以斜面上单个土壤颗粒为研究对象,将其看作质点 M,土壤间的相互作用忽略不计,质点 M 的受力情况如图 5 所示,土壤颗粒受重力 G、沟壁对其产生的支持力 F_N 、摩擦力 F_f 。土壤回流时,土壤颗粒沿沟壁边下滑,则沿 Y 方向的加速度 a_y 为 0。

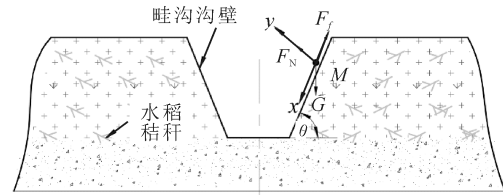


图 5 土壤颗粒受力分析

Fig.5 Force analysis of soil slope

则土壤颗粒的平衡方程为:

$$\begin{cases} G \cdot \sin\theta - F_f = ma_x \\ F_N - G \cdot \cos\theta = 0 \\ F_f = \mu \cdot F_N \\ G = mg \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中, m 为土壤颗粒的质量, g 为重力加速度, μ 为土壤颗粒间动摩擦系数, θ 为仿靴整形板与挡土板的倾角(简称翼板倾角)。由式(6)可知,若 $\mu = \tan\theta$,即土壤的动摩擦系数等于土壤沟壁堆积角正切值时,土壤颗粒不流入沟底;若 $\mu < \tan\theta$,土壤发生回流, a_x 为 X 轴方向加速度,则有:

$$a_x = g \sin\theta - \mu g \cos\theta \quad (7)$$

根据土壤颗粒在 X 轴方向的运动方程,可知土壤颗粒沿 X 轴方向的位移 S_x ,即土壤回流量为:

$$S_x = \frac{1}{2} a_x t^2 \quad (8)$$

$$S_H = \frac{1}{2} (g \sin\theta - \mu g \cos\theta) t_0^2 \quad (9)$$

式(9)中, S_H 为土壤回流量,mm。由于开沟犁以均匀速度和稳定深度作业,则任意一段区域内

土壤回流的时间 t_0 不变,视为常数,则根据式(9)可知,土壤回流量与挡土板和仿靴整形曲面间的夹角 θ 有关。

设左右仿靴整形板的底端距离和挡土板的上端距离分别为 l_1 、 l_2 ,考虑土壤流动性,为保证形成梯形沟,仿靴形整形板的下端距离设计为200 mm。若挡土板上宽度过大,导致倾角 θ 过大,会将过多扰动土推出沟外。考虑土壤的扰动和流动特性,取 $l_2=350$ mm。为保证开沟器作业后畦沟无土壤回流,取挡土板长度 l 为 $1.5(h+h')$,其中 h 为开畦沟深度, h' 为扰动土垄起高度,取20 mm。根据《合理耕层构建的水旱轮作耕整作业技术规程要求》,开沟深度为150~250 mm,所以挡土板的长度为 $255\text{ mm}<l<405\text{ mm}$,为便于加工,取挡土板长度 l 为400 mm。

$$\theta = \arccos \left(\frac{l_2 - l_1}{2l} \right) \quad (10)$$

挡土板与仿靴整形曲面的夹角可由式(10)计算得出: $0^\circ < \theta < 79.2^\circ$ 。根据试验可得长江中下游地区土壤含水率在22.86%~32.46%时的土壤堆积角为 $33.94^\circ \sim 39.76^\circ$,为防止沟壁崩塌、沟内壅土等现象出现,设计倾角 θ 应大于 40° ,所以 $40^\circ < \theta < 79.2^\circ$ 。

1.3 田间开沟质量试验

1) 试验器材与条件。试验器材包括:卷尺(5.0 m)、直尺(500 mm)、土壤坚实度测量仪、取土钻、烘干箱、500 mm×500 mm自制铁框等。试验田块常年稻-油轮作,土壤类型属于粉质黏壤土。经测量,试验环境特性参数如下:土壤深度0~250 mm的平均坚实度为1 173.08 kPa,平均土壤含水率为23.9%,土壤容重为 1.12 g/cm^3 ,秸秆覆盖量为 $1\ 256.4\text{ g/m}^2$,秸秆平均留茬高度为330 mm,秸秆平均含水率为38.6%。

2) 试验方法。以仿靴形锐角开沟犁为试验对象,仿靴形锐角开沟犁与驱动型犁旋耕整机配套使用,配套动力均为东风井关T954拖拉机,参考NY/T 740—2003《田间开沟机械作业质量》,通过调节拖拉机挡位和手油门保证机组前进速度为2.6 km/h,机组沿直线行驶50 m,取中间行程30 m为稳定测量区域,在测量区域等距取10个测量点,测绘每个测量点处的厢面断面形状,每组试验重复3次。试验指标为沟宽、沟宽稳定性、沟深、沟深稳定性、土壤黏附量等。

① 沟深及其稳定性。以绘制的沟型断面图为基

础,以耕作平面为基准,测量沟底与耕作平面的差值,取10个测量点的数据平均值作为作业沟深。根据计算得出每组沟型的沟深值,沟深稳定性系数按式(11)~(12)计算。

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} \quad (11)$$

$$U_a = \left[1 - \frac{1}{a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i - a)^2}{n-1}} \right] \times 100\% \quad (12)$$

式(12)中, a 为沟深,mm; a_i 表示所测行程中第 i 个测试点的沟深,mm; n 表示所测行程的测试点数; U_a 为沟深稳定性系数,%。

② 沟宽及其稳定性。以绘制的沟型断面图为基础,任意选取沟型断面一侧的测量点坐标为计算基准,以选取点的纵坐标值为基准在沟型断面图中绘制沟宽基准直线,基准线与左右沟壁相交所得点的横坐标差值(精确到1 mm)作为畦沟的宽度。依次计算10个测量点的数据取平均值即为作业沟宽。沟宽稳定性的计算方法与沟深稳定性的计算方法相同。

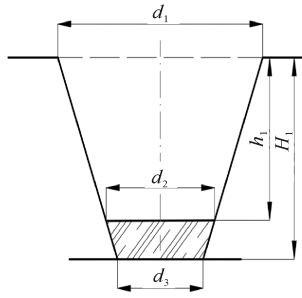
③ 土壤黏附量。机组每行程作业完成后,将黏附在犁体的土壤秸秆混合物刮下装入自封袋中称量,每组试验重复3次取平均值,即为该犁体的土壤黏附量。

1.4 田间开沟效果正交试验

影响开沟犁开沟效果的因素主要有开沟深度、开翼板倾角、作业速度、土壤工况等^[19]。在不考虑土壤工况的前提下,即试验在同一地块进行,试验选择翼板倾角 X_1 、开沟深度 X_2 、作业速度 X_3 为主要考察因素。本研究以回土量作为评价指标。回土量的多少直接反映了畦沟的塑形好坏以及沟壁土壤是否均匀紧实。为更加直观准确地测量评价指标,使用回土体积与理论沟型体积比作为回土量的计算方法^[6]。

在田间试验过程中,通过调节拖拉机悬挂杆控制锐角开沟犁开沟深度保持一定,调节拖拉机挡位和手油门控制机组以匀速前进,忽略由于地表不平或拖拉机轮胎滑移造成耕深和前进速度波动的影响。沿畦沟中段取30 m的范围,随机取10个横断面,实际畦沟截面示意图如图6所示。测量实际开沟深度 h_1 、实际上沟宽度 d_1 、下沟宽度测量值 d_2 、去除回土后开沟深度 H_1 、去除回土后实际下沟宽

度,约看作为 $d_3 = d_2$, 则回土量可通过式(13)计算得出。



H_1 为实际开沟深度,mm; h_1 为开沟深度测量值,mm; d_1 为上沟宽度,mm; d_2 为下沟宽度测量值,mm; d_3 为实际下沟宽度,mm。
 H_1 is the actual ditch depth,mm; h_1 is the measured ditch depth,mm; d_1 is the upper ditch width,mm; d_2 is the lower ditch width measurement,mm; d_3 is the actual ditch width,mm.

图 6 实际畦沟截面示意图

Fig.6 Schematic diagram of actual furrow section

$$\varphi = \frac{V}{V'} \times 100\% = \frac{(H_1 - h_1)^2}{H_1^2} \quad (13)$$

式(13)中, φ 为回土量,%; V' 为理论沟形体积, mm^3 ; V 为回土体积, mm^3 。

2 结果与分析

在湖北省荆州市监利县水稻-油菜(轮作)全程机械化生产示范基地开展田间试验,田间试验分为开沟质量试验和正交试验。

2.1 田间开沟质量

依据试验方法,仿靴形锐角开沟犁开出畦沟效果见图 7。试验结果表明,仿靴形锐角开沟犁开畦沟沟宽为 200~400 mm,沟宽稳定性为 90.6%,沟深为 175~250 mm,沟深稳定性为 92.4%,畦沟断面形状为梯形,作业稳定性高;且机组作业完成后,犁体土壤黏附量平均为 238 g,犁体上基本无挂草壅



图 7 开畦沟作业效果

Fig.7 Effect diagram of trenching experiment

土,说明机组通过性好。各项试验指标均满足油菜种植农艺要求。

2.2 田间开沟效果

经过前期计算设计,翼板倾角为 $40^\circ \sim 79.2^\circ$,开沟深度为 170~250 mm,驱动型犁旋耕整机的作业速度为 0.58~1.0 m/s,即仿靴形锐角开沟犁作业速度为 0.58~1.0 m/s。在试验可控范围内,对翼板倾角 X_1 、开沟深度 X_2 、作业速度 X_3 分别选择 3 个水平,采用三因素三水平 Box-Behnken 响应曲面试验法进行优化试验,采用多元二次回归方程拟合因素与响应值间的函数关系,最终对回归方程分析以寻求最优参数。共 17 组试验,因素水平如表 1 所示。

表 1 试验因素及水平

Table 1 Factors and levels

水平 Level	翼板倾角/ $^\circ$ Wing angle X_1	开沟深度/mm Furrowing depth X_2	作业速度/(m/s) Operating speed X_3
-1	45	170	0.6
0	55	210	0.8
1	65	250	1.0

利用 Design-Expert 软件对数据进行处理,得出试验方案与结果如表 2 所示,回土量的方差分析如表 3 所示。

表 2 试验方案与结果

Table 2 Test scheme and result of experiment

试验序号 Test number	影响因素 Influence factor			响应值 φ / % Response
	X_1 / %	X_2 / mm	X_3 / (m/s)	
1	45	210	0.6	2.8
2	55	210	0.8	7.2
3	55	170	0.6	8.2
4	55	210	0.8	3.9
5	65	210	0.6	7.5
6	65	250	0.8	12.5
7	45	250	0.8	35.6
8	55	210	0.8	11.8
9	55	210	0.8	4.2
10	55	250	0.6	14.3
11	45	170	0.8	12.5
12	55	210	0.8	4.6
13	55	170	1.0	13.3
14	65	170	0.8	14.2
15	45	210	1.0	29.6
16	65	210	1.0	12.5
17	55	250	1.0	22.4

表3 回土量方差分析

Table 3 Variance analysis of the quantity of backfill

方差来源 Source	方差和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方差 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model	1 198.69	9	133.19	9.11	0.004 1
X_1	142.80	1	142.80	9.77	0.016 7
X_2	167.44	1	167.44	11.46	0.011 7
X_3	253.12	1	253.12	17.32	0.004 2
$X_1 X_2$	153.76	1	153.76	10.52	0.014 2
$X_1 X_3$	118.81	1	118.81	8.13	0.024 6
$X_2 X_3$	2.25	1	2.25	0.15	0.706 4
X_1^2	125.29	1	125.29	8.57	0.022 1
X_2^2	200.75	1	200.75	13.74	0.007 6
X_3^2	7.17	1	7.17	0.49	0.506 2
残差 Residual	102.29	7	14.61		
失拟 Lack of fit	58.18	3	19.39	1.76	0.293 6
误差 Pure error	44.11	4	11.03		
总和 Cor total	1 300.98	16			

注: $P < 0.01$ 表示差异极显著, $P < 0.05$ 表示差异显著。Note: $P < 0.01$ means extremely significant, $P < 0.05$ means significant.

对表3中的数据进行多元回归拟合,可得回土量 φ 的二次回归方程为:

$$\begin{aligned} \varphi = & 6.34 - 4.22X_1 + 4.58X_2 + 5.63X_3 - \\ & 6.20X_1X_2 - 5.45X_1X_3 + 0.75X_2X_3 + \\ & 5.46X_1^2 + 6.91X_2^2 + 1.31X_3^2 \end{aligned}$$

由表3分析可知,建立二次回归模型的 $P < 0.01$,表明回归模型极显著;失拟项 $P > 0.05$,即失拟不显著,说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符,能正确反映回土量 φ 与 X_1 、 X_2 、 X_3 的关系,回归模型可较好地试验中各试验结果进行预测。各影响因子对回土量的显著性顺序从小到大依次为:翼板倾角 < 开沟深度 < 作业速度。

2.3 参数优化与验证

根据油菜种植农业要求,以开沟回土量最小为优化目标,在翼板倾角为 $45^\circ \sim 65^\circ$ 、开沟深度为 $170 \sim 250$ mm、作业速度为 $0.6 \sim 1.0$ m/s 约束条件下进行优化,用 Design-Expert 软件计算得出最佳参数组合为:翼板倾角为 46.22° 、开沟深度为 183.06 mm、作业速度为 0.608 m/s 时,回土量为 2.34% 。为验证优化结果的可行性,按照实际翼板倾角为 46° 、开沟深度为 183 mm、作业速度为 0.6 m/s 的参数组合在田间进行3次重复试验,验证结果显示开沟回土量为 3.28% ,回归方程计算预测值为 2.34% ,试验结果相差 0.94 个百分点,验证了模型的可靠性。

3 讨论

本研究设计了油菜种床整备开畦沟仿靴形锐角

开沟犁。根据犁体设计原则,对开沟犁的滑切刃口曲线、犁体入土角及犁尖张角进行了设计分析,选用抛物线作为滑切刃口曲线,通过分析确定了切削刃口的滑切角范围为 $23^\circ \sim 67^\circ$,并求得刃口曲线方程;通过建立三面楔模型对犁尖进行了分析,确定了犁体入土角为 30° 、犁尖张角为 60° ,即犁体入土角与犁尖张角均为锐角;建立了仿靴形锐角开沟犁与土壤相互作用的动力学模型,确定了挡土板的长度为 400 mm,挡土板与仿靴整形板的夹角为 $40^\circ \sim 79.2^\circ$ 。

本研究开展了仿靴形锐角开沟犁的开沟质量试验与正交试验。开沟质量试验表明:仿靴形锐角开沟器可开出沟宽为 $200 \sim 400$ mm、沟深为 $175 \sim 250$ mm 的梯形沟,沟宽及沟深稳定性均达 90% 以上。正交试验表明:翼板倾角、开沟深度、作业速度均对开沟质量有影响,且翼板角度为 46° 、开沟深度为 183 mm、作业速度为 0.6 m/s 时,开沟作业效果满足油菜种植的农艺要求。

本研究仅开展了仿靴形锐角开沟犁在同一工况下的作业质量试验,仿靴形锐角开沟犁的功耗及不同区域土壤环境的适用性还有待于进一步研究。

参考文献 References

- [1] 马磊,廖庆喜,魏国梁,等.油菜联合直播机种床松旋装置设计与试验[J].华中农业大学学报,2019,38(6):132-138. MA L, LIAO Q X, WEI G L, et al. Design and test of seedbed subsoiling and rotating device for rapeseed combined planter[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(6):

- 132-138(in Chinese with English abstract).
- [2] 张青松,廖庆喜,肖文立,等.油菜种植耕整地技术装备研究与发展[J].中国油料作物学报,2018,40(5):702-711.ZHANG Q S, LIAO Q X, XIAO W L, et al. Research process of tillage technology and equipment for rapeseed growing [J]. Chinese journal of oil crop sciences, 2018, 40(5): 702-711 (in Chinese with English abstract).
- [3] 肖文芳,舒彩霞,廖庆喜,等.犁旋组合式稻茬全量还田油菜直播种床整理机设计与试验[J].华中农业大学学报,2019,38(6):139-146.XIAO W F, SHU C X, LIAO Q X, et al. Design and test of tillage machine combined with plough and rotary for managing before planting rapeseed by burying of rice straw incorporated into soil[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(6): 138-146 (in Chinese with English abstract).
- [4] 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 Chinese society for agricultural machinery, 2017, 48(11): 79-87 (in Chinese with English abstract).
- [5] 刘晓鹏,张青松,肖文立,等.稻油轮作区驱动圆盘犁对置组合式耕整机设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(12):33-41. LIU X P, ZHANG Q S, XIAO W L, et al. Design and experiment on symmetrical driven disc plows combined tillage machine for rice-rapeseed rotation area [J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2017, 48(12): 33-41 (in Chinese with English abstract).
- [6] 贾洪雷,郑嘉鑫,袁洪方,等.仿形滑刀式开沟器设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(4):16-24.JIA H L, ZHENG J X, YUAN H F, et al. Design and experiment of profiling sliding-knife opener[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4): 16-24 (in Chinese with English abstract).
- [7] 赵淑红,刘宏俊,谭贺文,等.仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J].农业工程学报,2017,33(5):32-39.ZHAO S H, LIU H J, TAN H W, et al. Design and performance experiment of opener based on bionic sailfish head curve[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 32-39 (in Chinese with English abstract).
- [8] 赵淑红,谭贺文,王加一,等.多功能集成式播种开沟器的设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(11):58-67.ZHAO S H, TAN H W, WANG J Y, et al. Design and experiment of multi-functional integrated seeding opener [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11): 58-67 (in Chinese with English abstract).
- [9] 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 P F, WU M L, GUAN C Y, et al. Design of plow-rotary style ditching and ridging device for rapeseed seeding[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 23-31 (in Chinese with English abstract).
- [10] 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(1): 41-49.
- [11] 田波平,廖庆喜,黄海东,等.2BFQ-6型油菜精量联合直播机的设计[J].农业机械学报,2008,39(10):211-213. TIAN B P, LIAO Q X, HUANG H D, et al. Design of 2BFQ-6 type rape precision combined direct seeding machine[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2008, 39(10): 211-213 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张青松,汲文峰,廖宜涛,等.油菜直播机铧式开畦沟前犁体曲面分析与阻力特性试验[J].农业机械学报,2014,45(2):130-135. ZHANG Q S, JI W F, LIAO Y T, et al. Surface analysis and resistance characteristics experiment on ditch plow ahead of direct rapeseed seeder[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2014, 45(2): 130-135 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张青松,廖庆喜,汲文峰,等.油菜直播机开畦沟前犁体曲面优化与试验[J].农业机械学报,2015,46(1):53-59. ZHANG Q S, LIAO Q X, JI W F, 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 with English abstract).
- [14] 包攀峰,吴明亮,罗海峰,等.中置螺旋分土开沟装置的设计与试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2017,43(3):320-323. BAO P F, WU M L, LUO H F, et al. Design and experiment of ditching device with central spiral soil splitter [J]. Journal of Hunan Agricultural University (natural sciences edition), 2017, 43(3): 320-323 (in Chinese with English abstract).
- [15] 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 Chinese society for agricultural machinery, 2019, 50(8): 59-69 (in Chinese with English abstract).
- [16] DAMORA D, PANDEY K P. Evaluation of performance of furrow openers of combined seed fertilizer drills[J]. Soil and tillage research, 1995, 34(2): 127-139.
- [17] TESSIER S, SAXTON K E, PAPENDICK R I, et al. Zero-tillage furrow opener effects on seed environment and wheat emergence[J]. Soil and tillage research, 1991, 21(3/4): 347-360.
- [18] 罗海峰.稻板田免耕油菜播种机开沟部件的试验研究[D].长沙:湖南农业大学,2006. LUO H F. Experimental research on the ditching components of no-tillage sower in paddy stubble field [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2006 (in Chinese with English abstract).
- [19] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007. China Academy of Agricultural Mechanization Sciences. Handbook of agricultural machinery design [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007 (in Chinese).

Design and test of a boot-like acute angle furrow plough for preparing ditch of rapeseed seedbed

BU Xiangli, LIAO Qingxi, SUN Wencheng, WEI Guoliang, ZHANG Qingsong, WANG Pengcheng

College of Engineering/Ministry of Agriculture and Rural Affairs Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

Abstract In view of the complex conditions of soil stickiness and compaction, large fluctuations of soil water content, large retention of previous rice straw, and the production requirements of furrow for rapeseed planting in the middle and lower reaches of the Yangtze River, a furrow plough with boot shape and sharp angle was developed to mechanically prepare ditch for rapeseed seedbed. A smooth parabola was selected as the sliding edge curve, and a three-sided wedge model of the imitating boot-shaped acute-angled furrowing plough was established. Simultaneously, the dynamic analyses of the interaction between the plough body and the soil were carried out. Results showed that the sliding angle of the sliding cutting edge curve ranged from 23° to 67° , the plow body entry angle was 30° , the plow tip opening angle was 60° , the length of the retaining plate was 400 mm, and the wing angle varied from 40° to 79.2° . Results of field trials showed that the shoe-shaped acute-angle ditching plow can produce trapezoidal grooves with a width and depth of 200-400 mm and 175-250 mm, respectively. The stability of the groove width and depth was 90.6% and 92.4%, respectively. After the unit operation, the soil adhesion capacity of plough was 238 g on average and no grass choked the plough, indicating that the unit has good feasibility. Fin inclination angle, furrow depth, and operating speed significantly affected working quality of ditching (such as soil return quantity) in the increasing order of fin inclination angle, furrow depth, and operating speed. Furthermore, an orthogonal experiment with Design-Expert software was designed to obtain the optimal combination of parameters. The optimized parameters were wing angle of 46.22° , ditching depth of 183.06 mm, and operating speed of 0.6 m/s. Under this condition, soil return quantity was 2.34%. In order to verify the feasibility of the optimization, a field experiment with a wing angle of 46° , a ditching depth of 183 mm, and operating speed of 0.6 m/s was carried out in the demonstration base of whole-process mechanized production of rice-rapeseed rotation in Jianli County, Jingzhou City, Hubei Province. 3.28% of soil return quantity and 0.94% of the difference of the test results were observed. It is indicated that a furrow plough designed with boot shape and sharp angle has a better ditching effect, which meets the agronomic requirements of rapeseed planting. It will provide a reference for preparing canola ditches in the middle and lower reaches of the Yangtze River. This study only carried out the operation quality test of the bootleg sharp angle furrow plough under the same working condition. The power consumption of the bootleg sharp angle furrow plough and the applicability of the soil environment in different regions need to be further studied.

Keywords rapeseed direct seeder; seedbed preparation; ditching plough; boot-like; tillage; mechanical ditching

(责任编辑:陆文昌)