

犁铧式马铃薯中耕机培土装置设计与试验

吕金庆 刘齐卉 李紫辉 李季成 刘中原

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对砂壤土条件下马铃薯中耕机作业效率低、培土效果不佳等问题,设计了一种犁铧式马铃薯中耕机。阐述了该机整体结构及工作原理,阐明了犁体曲面成形原理,采用水平元线法并结合马铃薯中耕作业要求以及动力学分析确定了影响培土犁作业效果的犁体结构参数及其取值范围。基于 EDEM 离散元仿真技术,建立了部件-土壤仿真模型,以培土高度、土壤破碎率为试验指标,以导曲线上端切线夹角、初始元线角、元线角差值为试验因素,进行了二次正交旋转回归仿真试验。在仿真试验基础上进行了田间试验,结果表明,所设计的犁铧式马铃薯中耕机碎土率为 94.7%、培土高度为 8.4 cm、作业深度为 13.6 cm,根深稳定性系数为 92.1%,油耗为 14.6 kg/hm²,明显优于锄铲式马铃薯中耕机的作业效率及作业效果,满足马铃薯中耕机作业要求。

关键词: 马铃薯中耕机;犁铧式;犁体曲面;离散元法

中图分类号: S224.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)07-0071-12

OSID:



Design and Experiment of Soil Cultivating Device of Plowshare Potato Field Cultivator

LÜ Jinqing LIU Qihui LI Zihui LI Jicheng LIU Zhongyuan

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to solve the problems of low operating efficiency and poor soil cultivation effect of potato cultivators in sandy loam soil conditions, a type of plowshare potato cultivator was designed. The overall structure and working principle of the machine were described. It clarified the main view of the plow body's contour, the establishment of the guide curve, and the change law of the angle between the horizontal element straight line and the x -axis, and using the horizontal element line method, combined with the requirements of potato field tillage operation and dynamic analysis, the plow body structure parameters and their ranges that affected the effect of soil plow operation were determined. Based on the EDEM discrete element simulation technology, a component-soil simulation model was established. The soil height and soil fragmentation rate were used as test indicators. The tangent angle at the upper end of the guide curve, the initial element line angle, and the element line angle difference were the test factors, and the simulated quadratic orthogonal rotation regression test was carried out. Field experiments were conducted on the basis of simulation. The test results showed that the plowshare potato field cultivator developed had the soil crushing rate of 94.7%, the soil height of 8.4 cm, the working depth was 13.6 cm, the root depth stability coefficient was 92.1%, and the fuel consumption was 14.6 kg/hm², which was significantly better than the shovel type potato field cultivator's operating efficiency and results, and satisfied the operating requirements of the potato field cultivator.

Key words: potato cultivator; plowshare type; plough surface; discrete element method

0 引言

马铃薯中耕作业是指在马铃薯生长期进行除

草、培土、筑垄、施肥等作业,该作业环节可有效提高地温、促进马铃薯根系的发育,是提高马铃薯产量的关键环节之一^[1-4]。马铃薯中耕作业强度大、所需

时间较长,而人工作业费时费力,因此设计高效的马铃薯中耕机对提高生产效率、规范薯类培土作业、增加马铃薯收益^[5-7]具有重要意义。

国外对马铃薯中耕机研究与应用较早^[8],具有代表性的有荷兰 STRUIK 公司的 4WR380 型中耕机,该中耕机由齿轮箱驱动单体转动,在粘重土壤下进行中耕作业仍能保持较高的碎土率,但在砂壤土中耕时土壤流向不易控制,导致培土效果较差。澳大利亚研究人员研制了一种弹齿式中耕机,该中耕机弹齿具有应急保护系统,当遇到坚硬异物时会自动弹起,机具使用寿命较长,但培土高度较低,导致培土效果不佳。国内马铃薯中耕机的研究虽起步较晚,但发展迅速,东北农业大学研制的 1ZL5 型驱动式马铃薯中耕机采用旋耕刀组作为碎土部件^[9],其抛土性能好,可满足东北粘重板结土壤条件下的中耕作业要求;中机美诺公司的 1304 型锄铲式马铃薯中耕机采用锄铲开沟^[10],其结构简单,可一次完成多项中耕作业,但碎土效果及垄型适应性较差。现有马铃薯中耕机存在培土高度较低、碎土率难以保证、中耕适应性差的问题,作业效果不能达到预期目标^[11-13]。

本文针对我国西北地区砂壤土条件下马铃薯种植模式为单垄单行、所需培土高度在 5~10 cm 的第 1 次中耕作业要求,设计一种犁铧式马铃薯中耕机培土装置,结合犁体曲面成型原理及培土过程动力学分析,确定影响马铃薯中耕作业效果的培土犁结构参数及取值范围,通过仿真模拟试验获得最佳工作参数组合,并对得到的参数进行田间试验验证。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

如图 1 所示,整机主要由悬挂机构、机架、侧板、S 形弹齿、培土犁、培土器等组成。机架前梁安装 S 形弹齿组,每组由 3 个弹齿单体三角形排列,以减小开沟阻力;中间梁上装有可调节高度的培土犁,犁体采用对称曲面设计保证两侧土垄耕后一致;后梁上安装培土器,培土器上表面培土板可拆卸,以适于出苗前、后中耕作业。

1.2 工作原理和主要技术参数

拖拉机三点悬挂带动中耕机组前进,工作时,机架前端安装的 S 形弹齿首先对垄沟底的土壤进行预深松^[14-16];随着机具的前进,培土犁入土并对土壤进行切削破碎,并使得垄沟土壤沿犁体表面输送并最终由于重力因素跌落至所培土垄上,同时进行去除杂草等作业;最后位于机具末端的培土器将处理后的土垄进一步塑型、平滑以形成适合马铃薯生长

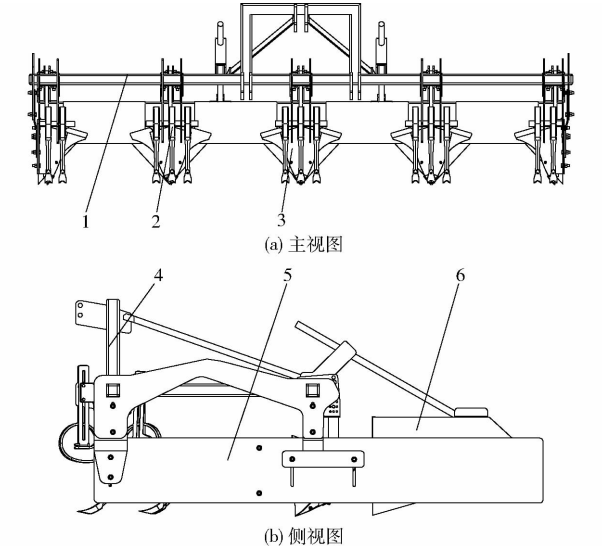


图 1 犁铧式马铃薯中耕机整体结构图
Fig. 1 Overall structure diagram of plowshare potato field cultivator
1. 机架 2. S 形弹齿 3. 培土犁 4. 悬挂机构 5. 侧板 6. 培土器
的垄型^[17-18]。

设计的犁铧式马铃薯中耕机主要适用于砂壤土条件下的中耕作业,其主要参数如表 1 所示。

表 1 犁铧式马铃薯中耕机主要技术参数	
Tab. 1 Main technical parameters of plowshare type potato cultivator	
参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 380×3 270×1 500
发动机功率/kW	≥50
整机质量/kg	950
作业行数	4
作业行宽/mm	750~920
作业速度/(km·h ⁻¹)	3.6~5.4
作业幅宽/mm	2 800~3 600

2 关键部件设计

培土犁为关键培土装置,作业时将垄沟内土壤沿犁体表面翻至两侧马铃薯垄上,能松碎土壤增强土壤透气性且同时去除垄沟内杂草,其性能直接影响整机的工作效果^[19-20]。针对砂壤土粘聚性较小、土质较为疏松等特点,设计一种新型培土犁,该培土犁的设计需满足以下要求:在培土过程中克服各种阻力消耗的能量较小,垄型一致性好;保证碎土率及中耕培土高度要求。

本文设计的培土犁主要由主犁体、犁柱、引导板、铧尖、固定调节座等组成,其结构如图 2 所示。

培土犁犁柱与固定调节座相连,通过选取固定调节座上不同位置螺栓孔,调整犁柱位置,从而对入土深度进行调节;铧尖通过沉头螺钉安装在主犁体

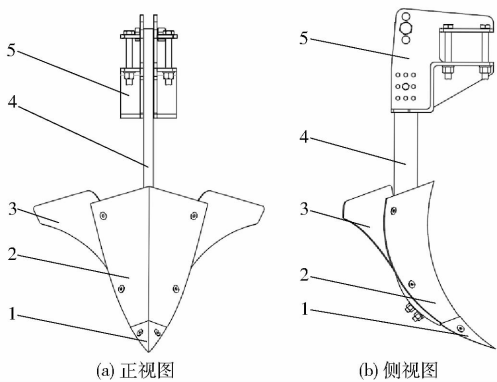


图 2 培土犁体结构简图

Fig. 2 Structure diagrams of soil-cultivating plough

1. 锋尖 2. 主犁体 3. 引导板 4. 犁柱 5. 固定调节座

尖端,防止犁尖磨损且便于更换;引导板位于主犁体后方两侧,使所培土壤沿着犁体曲面上升到一定高度后,继续沿着引导板滑动,引导土壤培于两侧马铃薯垄上。

2.1 犁体曲面绘制原理及影响参数分析

根据水平直元线绘制犁体曲面的方法,可以将犁体曲面看作水平元线沿导曲线从底面向上运动,且随着导曲线上升水平元线长度、与 x 轴夹角 θ 发生变化^[21-22],水平元线法绘制的犁体曲面如图 3 所示。

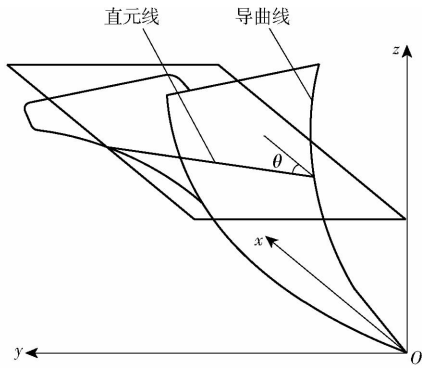


图 3 水平元线法犁体曲面简图

Fig. 3 Sketch of surface of plough with horizontal element method

犁体曲面设计的关键因素为犁体外形轮廓主视图、导曲线的建立以及水平元直线与 x 轴夹角 θ 的变化规律^[23]。

2.2 培土垄形分析及轮廓参数确定

在培土过程中,经由弹齿疏松过的土壤由培土犁进一步松碎,且随着犁体运动沟底土壤沿曲面上升至土垄上,培土前与培土后土垄关系见图 4。

假设犁体曲面正视轮廓投影为顶点在原点的抛物线,即

$$y = kx^2 \quad (1)$$

式中 k ——抛物线方程系数

由图 4 中几何关系可知

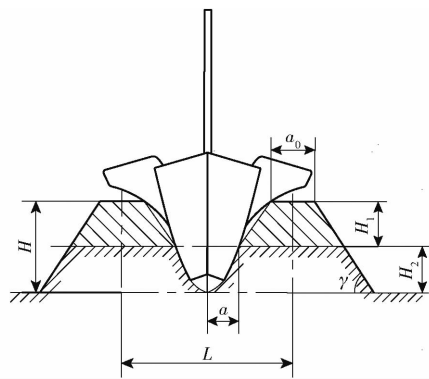


图 4 培土犁及垄形断面示意图

Fig. 4 Schematic of soil-cultivating plough and soil ridge section

$$\begin{cases} V_1 = 2 \int_0^a kx^2 dx \\ V_2 = \left(\frac{a_0}{2} + \frac{L}{2} - a \right) H_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中 V_1 ——培土犁培土前土壤体积, mm^3

V_2 ——培土后所培土壤体积, mm^3

L ——垄距, mm

a ——1/2 培土横截长度, mm

a_0 ——垄顶宽, mm

H_2 ——所培土垄高度, mm

V_1 与 V_2 应相等,但土壤经工作部件疏松,翻扣后体积增大,设蓬松系数 λ 为 1.2^[24],所需土量与出土量应满足

$$V_2 = \lambda V_1 \quad (3)$$

联立式(2)、(3)可得

$$\left(\frac{a_0}{2} + \frac{L}{2} - a \right) H_2 = 2\lambda \int_0^a kx^2 dx$$

$$\text{即} \quad 2\lambda \frac{k}{3} a^3 = \left(\frac{a_0}{2} + \frac{L}{2} - a \right) H_2 \quad (4)$$

$$\text{由图可知} \quad L = a_0 + 2a + 2H_1 \cot \gamma \quad (5)$$

式中 H_1 ——培土深度, mm

γ ——土壤自然休止角, ($^\circ$)

根据马铃薯中耕农艺要求,垄距 L 为 700 ~ 900 mm,培土横截长度 $2a$ 为 84 ~ 90 mm,垄顶宽 a_0 为 310 ~ 400 mm,土壤自然休止角 γ 为 $33^\circ \sim 37^\circ$ 。根据实际垄作情况确定 $L = 800 \text{ mm}$, $a = 43 \text{ mm}$, $a_0 = 345 \text{ mm}$, $\gamma = 35^\circ$ 。将上述参数代入式(4)可求解出 $k = 0.83$,因此,顶点在原点的犁体曲面正视轮廓投影的抛物线为

$$y = 0.83x^2 \quad (6)$$

2.3 培土过程分析及参数确定

2.3.1 入土受力分析及导曲线确定

开始中耕作业时,犁尖对土壤进行切削破碎,减小犁尖所受土壤反力在水平方向分力可有效提高犁

尖入土性能,对铧尖进行受力分析,如图 5 所示。

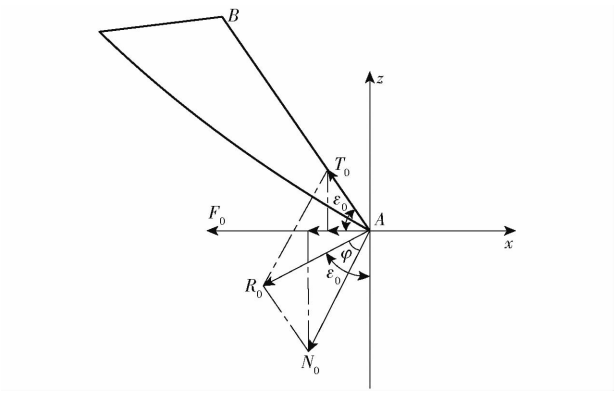


图 5 铧尖受力分析

Fig. 5 Force analysis of share point

当犁体稳定匀速运动时,铧尖部分正压力 N_0 沿前进方向的分力 F_0 是一常量,其大小等于在一定深度下的二面楔的土壤阻力。 φ 为土壤摩擦角,一般取 $25^\circ \sim 35^\circ$ ^[25],根据实际情况取 $\varphi = 30^\circ$,因此作用到工作表面的力 R_0 可以通过犁体表面正压力 N_0 与摩擦力 T_0 的合力而间接由正面阻力来表示。

犁尖处土壤反力在水平方向的分量 R_0 为

$$R_0 = F_0 \sin^2 \varepsilon_0 + F_0 \sin \varepsilon_0 \tan \varphi \cos \varepsilon_0 = F_0 \left(\sin^2 \varepsilon_0 + \frac{\sin(2\varepsilon_0)}{2} \tan \varphi \right) \tag{7}$$

式中 ε_0 ——滑刃角,即入土角, ($^\circ$)

对式(7)右端求导并令其等于零,得

$$\sin(2\varepsilon_0) + \frac{\sqrt{3}}{3} \cos(2\varepsilon_0) = 0 \tag{8}$$

得到土壤反力 R_0 的极小值点所对应的 ε_0 即为最佳滑刃角,由式(8)可得 $\varepsilon_0 = 60^\circ$ 。

建立导曲线数学模型,如图 6 所示,第 1 部分为直线,对应培土犁铧尖部分;第 2 部分为一段圆锥曲线,其斜率逐步增大,以利于土壤在中间段随犁体曲面逐步抬升,及在末端平稳翻垡。

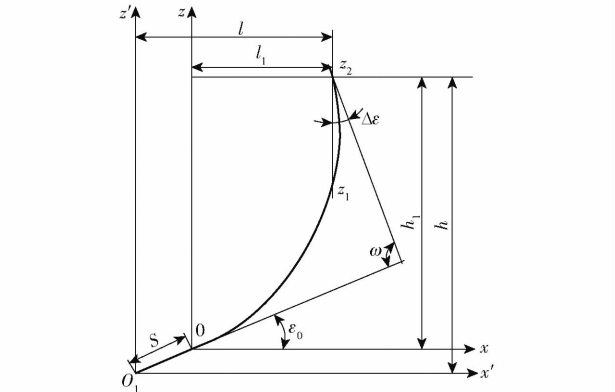


图 6 导曲线形状与参数示意图

Fig. 6 Schematic of guide curve shape and parameters

设此部分参数方程为

$$a_1 x^2 + b_1 z^2 + c_1 xz + d_1 x + e_1 z = f_1 \tag{9}$$

式中 a_1, b_1, c_1, d_1, e_1 ——化简前曲线方程系数
 f_1 ——化简前导曲线参数方程常数

由图 6 可知,抛物线过点 $(0,0)$,因此导曲线方程中 $f_1 = 0$,为减少参数方程未知量个数,将式(9)左右两端同时除 a_1 ,使得 x^2 系数转换为 1,可将公式化简为

$$x^2 + Ax^2 + Bxz + Cx + Dz = 0 \tag{10}$$

式中 A, B, C, D ——化简后曲线方程系数

由图 6 几何关系可得

$$\begin{cases} l_1^2 + Ah_1^2 + Bl_1 h_1 + Cl_1 + Dh_1 = 0 \\ C + D \tan \varepsilon_0 = 0 \\ 2l_1 + Ah_1 + Al_1 \tan(90^\circ + \Delta \varepsilon) + 2B \tan(90^\circ + \Delta \varepsilon) h_1 + C + D \tan(90^\circ + \Delta \varepsilon) = 0 \\ Ax_2 + 2Bz_2 + D = 0 \\ z_2 = z_1 + \frac{h_1 - z_1}{2} \\ l_1^2 + Al_1 z_1 + Bz_1^2 + Cl_1 + Dz_1 = 0 \end{cases} \tag{11}$$

式中 h_1 ——导曲线抛物线部分高度, mm
 l_1 ——导曲线抛物线部分开度, mm
 $\Delta \varepsilon$ ——导曲线上端点切线与铅垂线夹角, ($^\circ$)
 z_1 ——导曲线参数方程当 x 轴坐标为 l_1 时所对应绝对值较小的 z 值, mm
 z_2 ——导曲线参数方程当 x 轴坐标为 l_1 时所对应绝对值较大的 z 值, mm

联立可求得参数系数,经化简得

$$\begin{cases} x^2 + \frac{2(m \tan \Delta \varepsilon + n)}{(m - n \tan \varepsilon_0)^2} xz + \frac{(m \tan \Delta \varepsilon + n)^2}{(m - n \tan \varepsilon_0)^2} z^2 + \frac{4mn^2 \tan \varepsilon_0}{(m - n \tan \varepsilon_0)^2} x - \frac{4mn^2}{(m - n \tan \varepsilon_0)^2} z = 0 \\ m = h_1 - l_1 \tan \varepsilon_0 \\ n = h_1 \tan \Delta \varepsilon + l_1 \\ h_1 = h - S \sin \varepsilon_0 \\ l_1 = l - S \cos \varepsilon_0 \end{cases} \tag{12}$$

式中 h ——导曲线总高度, mm
 l ——导曲线总开度, mm
 m, n ——为简化计算结果所引参数
 S ——犁尖直线部分长度, mm

根据式(8)求得入土角(即滑刃角) ε_0 为 60° ,根据《农业机械设计手册》中导曲线的设计, $\Delta \varepsilon$ 一般为 $0^\circ \sim 10^\circ$ ^[26],为满足中耕作业垄型要求犁体总高度 $h_{\max}$ 取 480 mm,开度 L 取 303 mm,犁尖直线部分

长度 $S = 60\text{ mm}$ ，代入式 (12) 即可得出导曲线参数方程。

2.3.2 犁体任一点受力分析及元线夹角确定

根据三面楔简化原理，分析犁体任一点受力情况，如图 7a 所示，设三面楔沿 x 轴正方向匀速运动，此时三面楔主要受力为土堡的空间压力 N ，及土堡与楔面间的总摩擦力 T ， R 为 N 与 T 的合力， α 、 β 、 η 为楔角。将受力投影到 xoy 平面内，并将三面楔转化为二面楔受力，受力分析如图 7b 所示，当楔面做匀速运动时，楔面所受水平方向的土壤阻力只与深度有关^[27]，大小等于沿前进方向的分力 F ，因此，可用土壤阻力来表示楔面受力，建立力学方程

$$\begin{cases} R_x = F\sin^2\alpha + F\sin\alpha\tan\phi\cos\alpha = \\ F\left(\sin^2\alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}\tan\phi\right) \\ R_z = F\sin\alpha\cos\alpha - F\sin\alpha\tan\phi\sin\alpha = \\ F\left(\frac{\sin(2\alpha)}{2} - \sin^2\alpha\tan\phi\right) \end{cases} \quad (13)$$

式中 F ——土壤阻力， N

α —— xoz 面楔角， $(^\circ)$

ϕ ——摩擦角， $(^\circ)$

R_x ——土壤反力在 x 轴分量， N

R_z ——土壤反力在 z 轴分量， N

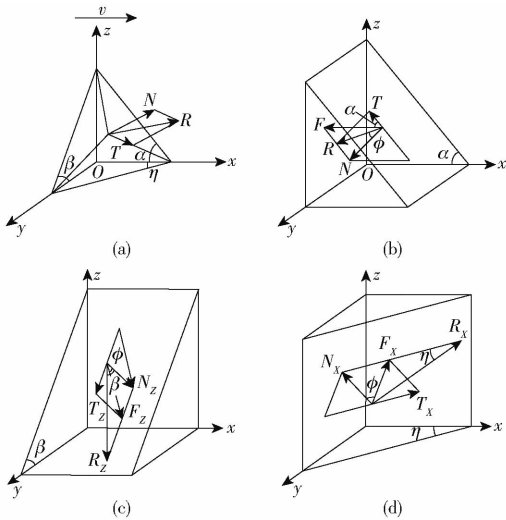


图 7 楔面受力示意图

Fig. 7 Schematics of wedge surface force

将受力投影到 $yozy$ 平面并分析所对应二面楔受力情况，如图 7c 所示，有

$$\begin{cases} N_z = R_z\cos\beta = \\ F\left(\frac{\sin(2\alpha)}{2} - \sin^2\alpha\tan\phi\right)\cos\beta \\ T_z = R_z\cos\beta\tan\phi = \\ F\left(\frac{\sin(2\alpha)}{2} - \sin^2\alpha\tan\phi\right)\cos\beta\tan\phi \end{cases} \quad (14)$$

式中 β —— $yozy$ 面楔角， $(^\circ)$

N_z —— $yozy$ 二面楔压力， N

T_z —— $yozy$ 二面楔摩擦力， N

将上述力投影到 z 轴可得到任一点土壤垂直反力 R_v 为

$$R_v = F\left(\frac{\sin(2\alpha)}{2} - \sin^2\alpha\tan\phi\right)\left(\cos^2\beta + \frac{\sin(2\beta)}{2}\tan\phi\right) \quad (15)$$

同理可将力投影到 xoy 平面分析所对应二面楔受力，如图 7d 所示，得到土壤反力在水平面上力 R_l 为

$$R_l = F\left(\sin^2\alpha - \frac{\sin(2\alpha)}{2}\tan\phi\right)\left(\cos^2\eta + \frac{\sin(2\eta)}{2}\tan\phi\right) \quad (16)$$

式中 η —— xoy 面楔角， $(^\circ)$

根据式 (15)、(16) 即可求出犁体任一点所受土壤反力的大小与方向。

犁体性能与元线角 θ 的变化紧密相关。为提高犁体入土性能初始元线角 θ_0 取 $40^\circ \sim 45^\circ$ ，培土犁培土过程中应具有良好的碎土性能，因此犁体中部抬垄运动部分元线角 θ 变化较快，犁体上端扣垄运动部分应使土堡尽可能平稳落到所培土垄，此处元线角 θ 变化较慢^[28]。元线夹角变化规律如图 8 所示， $0 \sim Z_1$ 为直线， $Z_1 \sim Z_{\max}$ 选取抛物线，参数方程可表示为

$$\theta = \begin{cases} \theta_0 & (0 \leq Z \leq Z_1) \\ \sqrt{M(Z - Z_1)} + \theta_0 & (Z_1 < Z \leq Z_{\max}) \end{cases} \quad (17)$$

式中 M ——常数

Z_1 ——铧尖高度， mm

Z ——任一高度， mm

$Z_{\max}$ ——犁体高度， mm

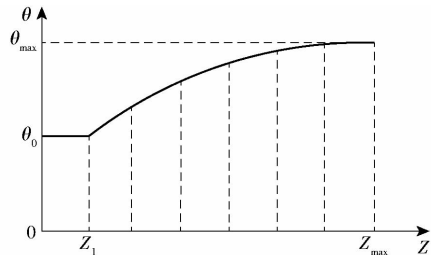


图 8 元线角变化曲线

Fig. 8 Curve of angle change

铧尖高度 $Z_1 = S\sin\epsilon_0$ ，即 52 mm ，按元线角变化规律，可将犁体分为碎土型与翻土型两类，碎土型犁体曲面犁翼部分扭曲较小，碎土能力强，通常元线角 $\Delta\theta$ 变化范围为 $1^\circ \sim 7^\circ$ ， $\theta_{\max} = \theta_0 + \Delta\theta$ ，犁体高度 $h_{\max} = Z_{\max} = 480\text{ mm}$ ，将 $\theta_{\max}$ 、 $Z_{\max}$ 代入式 (17) 可求得常数 M ，根据培土犁正视图轮廓、导线和元线夹角变

化规律,绘制犁体曲面。

3 仿真试验

3.1 几何模型建立及参数设定

3.1.1 培土犁仿真模型

应用三维制图软件 SolidWorks 对马铃薯中耕机培土犁单体进行实体建模,以 .step 格式导入 EDEM 软件中。设置培土犁材料为 65Mn 钢,泊松比为 0.35,剪切模量为 7.8×10^{10} Pa,密度为 $7\,850\text{ kg/m}^3$ 。

3.1.2 土壤颗粒模型

针对砂壤土结构特点分别进行简化,砂壤土土壤颗粒主要包括球形颗粒、核状颗粒、块状三角形颗粒、柱状颗粒。在 EDEM 中对这 4 种颗粒进行设定,并设置单球体半径为 3 mm 进行颗粒建模,如图 9 所示。其中球形颗粒、核状颗粒、块状三角形颗粒、柱状颗粒在填充时设置数目比例为 2:1:1:1,颗粒大小呈正态分布^[29-30]。

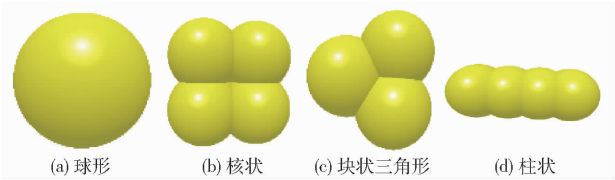


图 9 土壤颗粒离散元模型

Fig.9 Discrete element simulation models of soil particles

为尽可能保证仿真有效性,及模拟土壤颗粒间的圆柱形粘结键,设置颗粒之间的接触模型为 Hertz-Mindlin with Bonding 模型^[31]。

3.1.3 其他参数确定

将所建立的培土犁、土壤颗粒导入 EDEM 软件后,通过查阅文献,对接触参数土壤-土壤、土壤-培土犁间参数进行设定,模型间的仿真参数如表 2 所示^[32]。

表 2 离散元模型基本参数

Tab.2 Basic parameters of discrete element model	
参数	数值
土壤-土壤间恢复系数 e_1	0.6
土壤-土壤间动摩擦因数 e_2	0.2
土壤-土壤间静摩擦因数 e_3	0.3
土壤-培土犁间恢复系数 f_1	0.6
土壤-培土犁间动摩擦因数 f_2	0.105
土壤-培土犁间静摩擦因数 f_3	0.46

结合马铃薯生长状况,在 EDEM 上建立虚拟土槽,设置土槽基本尺寸(长×宽×高)为 $1\,500\text{ mm} \times 1\,500\text{ mm} \times 450\text{ mm}$,设置与土槽上表面重合的虚拟平面为颗粒工厂,以 2×10^4 个/s 的速度生成土壤颗粒,总量为 2.2×10^5 个,生成颗粒总时间为 11 s。

3.2 仿真过程与评价指标

3.2.1 仿真过程

在仿真开始时,犁体位于土槽一侧开始作业,如图 10a 所示,并沿着 x 轴水平直线运动,根据中耕农艺要求设置犁体入土深度为 130 mm,前进速度为 1.2 m/s。设置总时间 3 s,每 0.1 s 记录一次数据,仿真结束时如图 10b 所示。

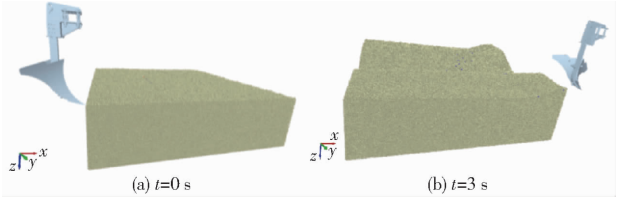


图 10 EDEM 仿真过程

Fig.10 Virtual simulation process of EDEM

3.2.2 评价指标

参考 JB/T 7864—2013《旱田中耕追肥机试验方法》,选取平均培土高度 h 和土壤破碎率 d 为试验指标。

(1) 培土高度

培土高度指高于耕前地表的土壤厚度,适当的培土高度有利于马铃薯发育。EDEM 仿真作业结束后在耕作稳定区选取与犁体前进方向垂直的颗粒横截面,如图 11 所示,分别对两侧土壤高度进行测量,取平均值。

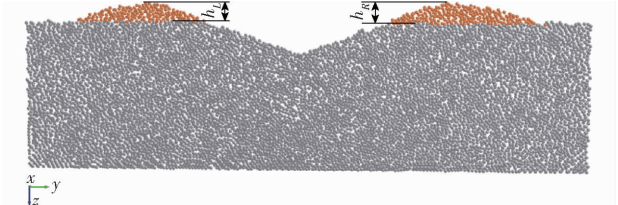


图 11 离散元土垄上土壤颗粒分布

Fig.11 Distribution of discrete element soil particles

根据马铃薯中耕农艺要求培土高度以 5 ~ 10 cm 为宜。计算公式为

$$h = \frac{h_L + h_R}{2}$$

(18)

式中 h_L ——左侧土垄培土高度,cm

h_R ——右侧土垄培土高度,cm

(2) 土壤破碎率

土壤破碎率可由颗粒接触模型中粘结键断裂系数来表示,也与土壤蓬松度直接相关,土壤蓬松度越好,透气性越好,越有利于马铃薯根系的生长。运用 EDEM 后处理收集试验数据,得出离散元土壤颗粒间粘结键断裂数量与时间的关系曲线如图 12 所示。

当时间为 0.11 s 时,犁体开始与土壤接触并出现粘结键断裂颗粒,随着时间的增加断裂粘结键的离散元土壤颗粒数量逐渐增多,后又趋于稳定,当时

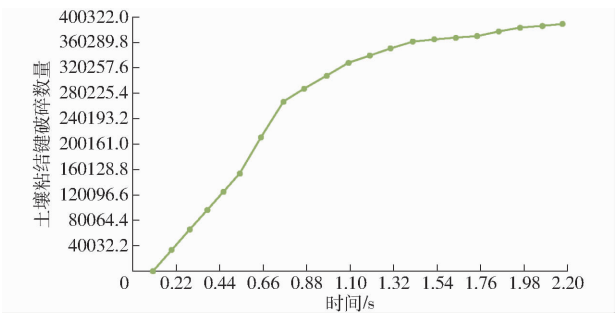


图 12 断裂粘结键土壤颗粒数量与时间关系曲线
Fig. 12 Relationship between number of broken bond soil particles and time bond

间到达 2.2 s 即犁体与土壤颗粒层完全脱离时所对应数值即为断裂粘结键颗粒数。利用软件对土槽内产生位移的土壤颗粒数量进行统计,统计结果为 576 533 个,为工作区域总土壤颗粒个数。土壤破碎率计算公式为

$$d = \frac{N_1}{N_z} \times 100\% \tag{19}$$

式中 d ——土壤破碎率, %
 N_1 ——作业区域断裂粘结键土壤颗粒数
 N_z ——作业区域土壤颗粒总数

仿真试验中土壤破碎率是对离散元土壤颗粒间粘结键断裂数目的统计,在生成离散元土壤颗粒时能保证所有颗粒都存在粘结键;而在进行田间试验时,碎土率是对小于 25 mm 土块的测定,且根据实际情况作业前部分土块已满足此要求。因此仿真中的土壤破碎率低于田间试验中实际碎土率。

3.3 仿真试验结果与分析

3.3.1 试验方案与结果

采用二次旋转正交组合试验设计安排试验,以犁体导曲线上端切线夹角、初始元线角和元线角差值为试验因素;以培土高度 h 和土壤破碎率 d 为试验指标。根据编码后的试验方案及理论分析确定的犁体曲面参数,分别建模并仿真。通过仿真结果对影响试验指标的因素进行显著性分析,对各组合进行优化,最终获得较合适的各试验因素组合。试验因素编码如表 3 所示,试验方案及结果如表 4 所示。

表 3 试验因素编码

Tab. 3 Experimental factors and codes

编码	因素		
	导曲线上端切线夹角	初始元线角	元线角差值
	$x_1/(^{\circ})$	$x_2/(^{\circ})$	$x_3/(^{\circ})$
1. 682	10. 00	45. 00	7. 00
1	7. 97	43. 99	5. 78
0	5. 00	42. 50	4. 00
- 1	2. 03	41. 01	2. 22
- 1. 682	0	40. 00	1. 00

表 4 试验方案与结果

Tab. 4 Test plan and data

序号	因素			培土高度 h/cm	土壤破碎率 $d/\%$
	$x_1/(^{\circ})$	$x_2/(^{\circ})$	$x_3/(^{\circ})$		
1	2. 03	41. 01	2. 22	5. 25	59. 73
2	7. 97	41. 01	2. 22	7. 94	62. 89
3	2. 03	43. 99	2. 22	4. 30	62. 91
4	7. 97	43. 99	2. 22	6. 12	70. 99
5	2. 03	41. 01	5. 78	6. 11	59. 67
6	7. 97	41. 01	5. 78	8. 46	64. 07
7	2. 03	43. 99	5. 78	5. 77	64. 10
8	7. 97	43. 99	5. 78	10. 10	72. 70
9	0	42. 50	4. 00	4. 56	59. 30
10	10. 00	42. 50	4. 00	8. 98	69. 87
11	5. 00	40. 00	4. 00	8. 20	60. 11
12	5. 00	45. 00	4. 00	6. 64	70. 23
13	5. 00	42. 50	1. 00	5. 43	63. 81
14	5. 00	42. 50	7. 00	7. 50	64. 39
15	5. 00	42. 50	4. 00	8. 54	64. 00
16	5. 00	42. 50	4. 00	8. 72	64. 33
17	5. 00	42. 50	4. 00	9. 24	64. 79
18	5. 00	42. 50	4. 00	7. 76	64. 60
19	5. 00	42. 50	4. 00	8. 37	64. 43
20	5. 00	42. 50	4. 00	7. 94	64. 70
21	5. 00	42. 50	4. 00	8. 54	63. 85
22	5. 00	42. 50	4. 00	8. 11	64. 54
23	5. 00	42. 50	4. 00	8. 89	64. 66

3.3.2 试验结果分析

利用 Design-Expert 8. 0. 6 软件对试验结果进行二次回归分析,并进行多元回归拟合^[33-34],得到培土高度 h 和土壤破碎率 d 回归方程,并进行显著性检验。

(1) 培土高度回归模型建立与显著性分析

通过对试验数据的分析和拟合,培土高度 h 方差分析如表 5 所示。由表 5 可知, x_1 、 x_3^2 、 x_3 、 x_1^2 对培土高度 h 的影响极显著 ($P < 0. 01$); x_2^2 、 x_2x_3 、 x_2 对培土高度 h 的影响显著 ($0. 01 < P < 0. 05$); 其余因素对试验指标培土高度 h 的影响不显著 ($P > 0. 1$)。将不显著的交互作用项的回归平方及自由度并入残差项,再次进行方差分析,结果如表 5 所示。得到各因素对培土高度 h 影响的回归方程

$$Y_1 = -264. 884\ 45 + 1. 141\ 19x_1 + 13. 396\ 08x_2 - 5. 943\ 06x_3 + 0. 191\ 86x_2x_3 - 0. 068\ 251x_1^2 - 0. 169\ 00x_2^2 - 0. 223\ 47x_3^2 \tag{20}$$

对上述回归方程进行失拟检验,结果如表 5 所示,失拟项 $P = 0. 306\ 8$,不显著 ($P > 0. 1$),证明不存在其他影响试验指标的主要因素。试验指标和试验

因素存在显著的二次关系,分析结果合理。

(2)土壤破碎率回归方程建立与显著性检验

通过对试验数据的分析和多元回归拟合,试验指标土壤破碎率 d 方差分析如表 6 所示。由表 6 可知, x_1 、 x_2 、 x_1x_2 、 x_3 、 x_2^2 对土壤破碎率 d 的影响极显著 ($P<0.01$); x_2x_3 、 x_1x_3 对土壤破碎率 d 的影响较显著 ($0.05<P<0.1$); 其余因素对试验指标土壤破碎率 d 的影响不显著 ($P>0.1$)。将不显著的交互作用项的回归平方和及自由度并入残差项,而后再进

行方差分析,结果如表 6 所示。得到各因素对土壤破碎率 d 影响的回归方程

$$Y_2 = 255.473\,70 - 10.094\,08x_1 - 9.646\,88x_2 - 3.568\,54x_3 + 0.257\,95x_1x_2 + 0.041\,484x_1x_3 + 0.083\,910x_2x_3 + 0.118\,34x_2^2 \quad (21)$$

对上述回归方程进行失拟性检验,如表 6 所示,其中 $P=0.483\,4$,不显著 ($P>0.1$),证明不存在其他影响指标的主要因素,试验指标和试验因素存在显著的二次关系,分析结果合理。

表 5 培土高度 h 方差分析
Tab.5 Variance analysis for soil height h

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	53.06/52.31	9/7	5.90/7.47	23.54/28.04	<0.000 1 *** / <0.000 1 ***
x_1	25.40/25.40	1/1	25.40/25.40	101.42/95.29	<0.000 1 *** / <0.000 1 ***
x_2	1.23/1.23	1/1	1.23/1.23	4.90/4.60	0.045 3 ** /0.048 7 **
x_3	7.79/7.79	1/1	7.79/7.79	31.09/29.21	<0.000 1 *** / <0.000 1 ***
x_1x_2	0.15	1	0.15	0.62	0.447 0
x_1x_3	0.59	1	0.59	2.35	0.149 2
x_2x_3	2.07/2.07	1/1	2.07/2.07	8.27/7.77	0.013 0 ** /0.013 8 **
x_1^2	5.78/5.78	1/1	5.78/5.78	23.09/21.70	0.000 3 *** /0.000 3 ***
x_2^2	2.22/2.22	1/1	2.22/2.22	8.85/8.31	0.010 7 ** /0.011 4 **
x_3^2	8.03/8.03	1/1	8.03/8.03	32.08/30.14	<0.000 1 *** / <0.000 1 ***
残差	3.26/4.00	13/15	0.25/0.27		
失拟	1.49/2.23	5/7	0.30/0.32	1.35/1.45	0.335 0/0.306 8
总和	56.31/56.31	22/22			

注:“/”后数字为剔除不显著因素后培土高度方差分析结果;*** 表示影响极显著 ($P<0.01$);** 表示影响显著 ($0.01<P<0.05$)。下同。

表 6 土壤破碎率 d 方差分析
Tab.6 Variance analysis for soil fragmentation rate d

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	268.89/268.62	9/7	29.88/38.37	298.96/367.64	<0.000 1 *** / <0.000 1 ***
x_1	129.27/129.27	1/1	129.27/129.27	1 293.53/1 238.44	<0.000 1 *** / <0.000 1 ***
x_2	125.26/125.26	1/1	125.26/125.26	1 253.40/1 200.02	<0.000 1 *** / <0.000 1 ***
x_3	1.83/1.83	1/1	1.83/1.83	18.28/17.51	0.000 9 *** /0.000 8 ***
x_1x_2	10.40/10.40	1/1	10.40/10.40	104.04/99.61	<0.000 1 *** / <0.000 1 ***
x_1x_3	0.39/0.39	1/1	0.39/0.39	3.87/3.71	0.070 7 * /0.073 3 *
x_2x_3	0.40/0.40	1/1	0.40/0.40	3.96/3.79	0.068 0 * /0.070 4 *
x_1^2	0.047	1	0.047	0.47	0.506 1
x_2^2	1.08/1.09	1/1	1.08/1.09	10.84/10.41	0.005 8 *** /0.005 6 ***
x_3^2	0.22	1	0.22	2.19	0.163 1
残差	1.30/1.57	13/15	0.10/0.10		
失拟	0.47/0.74	5/7	0.094/0.10	0.91/1.02	0.326 8/0.483 4
总和	270.19/270.19	22/22			

注:* 表示影响较显著 ($0.05<P<0.10$)。

3.3.3 响应曲面分析

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对数据处理,得出导曲线上端切线夹角 x_1 、初始元线角 x_2 、元线角差值 x_3 之间的显著和较显著交互作用对培土高度 h 、土壤破碎率 d 两个试验指标影响的响应曲面,如图 13 所示。

如图 13a 所示,当元线角差值取值较小时,培土高度随初始元线角的增加呈逐渐减小趋势;当元线角差值取值较大时,培土高度随初始元线角增加呈逐渐增加趋势;选择较优元线角差值为 5° 时,培土高度随初始元线角呈先增加后减小趋势,最优初始元线角范围为 $42.5^\circ\sim43.99^\circ$ 。当初始元线角一定

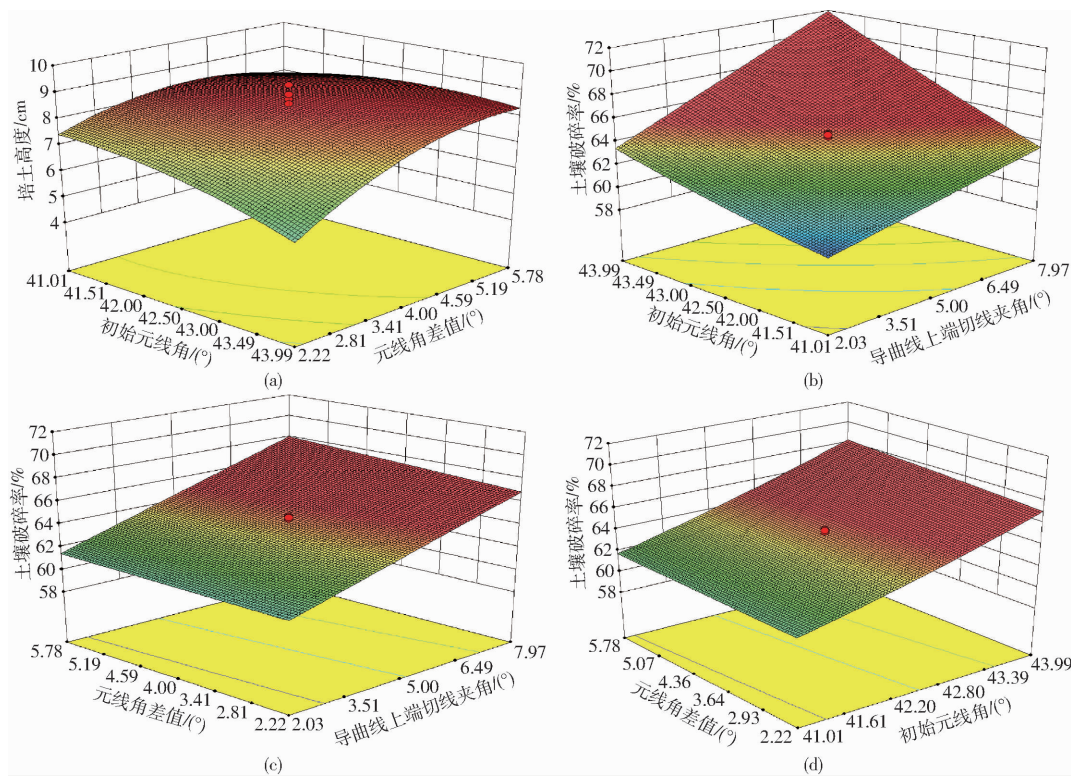


图 13 试验因素对指标影响的响应曲面

Fig. 13 Response surface of influence of test factors on index

时,培土高度随元线角差值的增加逐渐增加,最优元线角差值为 3.4°~5.78°,其中元线角差值是影响培土高度的主要试验因素。

如图 13b 所示,当初始元线角一定时,土壤破碎率随导曲线上端切线夹角的增加呈逐渐增加趋势,最优导曲线上端切线夹角范围为 4.2°~7.97°;当导曲线上端切线夹角一定时,土壤破碎率随初始元线角的增加逐渐增加,最优初始元线角为 42.3°~43.99°,其中初始元线角是影响培土高度的主要试验因素。

如图 13c 所示,当元线角差值一定时,土壤破碎率随导曲线上端切线夹角的增加呈逐渐增加趋势,最优导曲线上端切线夹角范围为 5.7°~7.97°;当导曲线上端切线夹角一定时,土壤破碎率随元线角差值的增加逐渐增加,最优元线角差值为 2.5°~5.78°,其中导曲线上端切线夹角是影响培土高度的主要试验因素。

如图 13d 所示,当元线角差值一定时,土壤破碎率随初始元线角的增加呈逐渐增加趋势,最优初始元线角范围为 43.2°~43.99°;当初始元线角一定时,土壤破碎率随元线角差值的增加逐渐增加,最优元线角差值为 3.2°~5.78°,其中初始元线角是影响培土高度的主要试验因素。

通过对图 13 中 4 个响应曲面的分析,得到最佳的试验因素水平组合,利用 Design-Expert 8.0.6 软

件中的优化模块对 4 个回归模型进行求解,根据马铃薯中耕机的实际工作条件、作业性能要求及上述相关模型分析结果,选择优化约束条件为

$$\begin{cases} \max Y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \max Y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t. } \begin{cases} 5.7^\circ \leq x_1 \leq 7.97^\circ \\ 43.2^\circ \leq x_2 \leq 43.99^\circ \\ 3.4^\circ \leq x_3 \leq 5.78^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

从所得到的多组优化参数组合中选取一组合理参数组合,即当导曲线上端切线夹角为 6.2°,初始元线角为 43.5°,元线角差值为 5°时,机具综合作业性能较理想,预测培土高度为 8.93 cm,土壤破碎率为 68.44%,对这组数据进行离散元模拟试验。

在培土作业过程中,工作部件对土壤切削、挖掘、升运的同时受到来自土壤反力所产生的工作阻力。工作阻力越小,其生产效率越高,同时油耗减少,选取刚入土时与工作稳定时培土犁受力进行观察,运用 EDEM 后处理对犁体进行网格划分,得到仿真犁体受力图,如图 14 所示。

如图 14a 所示,时间为 0.120 04 s 时,即犁体中只有铧尖部分入土时犁体中铧尖尖端受力最大值为 492 N。如图 14b 所示,时间为 1.100 11 s 时即犁体工作稳定时犁体曲面受到的工作阻力,从图中可以看出此时犁体所受最大阻力在犁胸位置,最大阻力为 743 N。对离散元仿真结果进行验证,培土高度

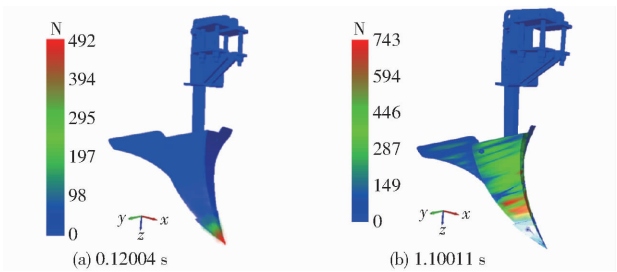


图 14 仿真犁体受力图

Fig. 14 Simulation plow body force diagrams

8.65 cm,土壤破碎率为 69.23%,与优化结果基本一致。

4 田间试验

4.1 培土垄形分析及参数确定

2020 年 5 月 18 日在东北农业大学试验示范基地,进行犁铧式马铃薯中耕机田间中耕作业性能试验和对照试验。该试验地块为旱作区,选取长度为 500 m、宽度为 400 m 的地块为试验区,土壤含水率为 9.7%,土壤坚实度为 912 kPa,地块各处试验条件基本相同。试验设备主要包括 TJSD-750 型土壤坚实度测量仪、TZS-2X-G 型土壤水分测量仪、游标卡尺、卷尺、电子秤、土壤取样环刀、干燥箱等。

4.2 试验方法

犁铧式马铃薯中耕机以 4.3 km/h 的作业速度对试验田进行作业,配套动力为 99.2 kW 的约翰迪尔 1354 型拖拉机,作业现场如图 15 所示。参考 JB/T 7864—2013《旱田中耕追肥机试验方法》,根据实际情况将碎土率、培土高度及耕深稳定性系数等为试验指标。为验证所设计的犁铧式马铃薯中耕机作业性能,增加与传统机型的对照试验,对照机型为锄铲式 1ZL5 型马铃薯中耕机,其关键部件为传统开沟铲和塑型器,在同一块地进行性能对照试验。



图 15 田间验证试验

Fig. 15 Field validation test

4.2.1 碎土率测定

在试验区域内耕后土垄随机选取 3 块尺寸为

500 mm × 500 mm 的取样区,以直径小于 25 mm 的土块为满足碎土标准的土块,取样区满足碎土要求的土块质量占该区域所有土壤质量的比例为碎土率,并将 3 次测量结果取平均值,碎土率表达式为

ρ = (W1 / W) × 100% (23)

式中 ρ——碎土率,%

W1——取样区直径小于 25 mm 土块质量,g

W——取样区土壤总质量,g

4.2.2 培土高度测定

在中耕试验区域的作业行程稳定区随机取 3 处作为观测地,分别测量 3 处观测地高于耕前地表的土壤高度并求均值。

4.2.3 耕深稳定性系数测定

在中耕试验区机组前进方向每隔 2 m 土垄两侧各取一点,单个行程取测量点 20 个,用耕深尺测量每个测量点耕深,共测 3 个行程得到

U = (1 - (sqrt(sum(Sj^2) / n) / sum(a_j) / n)) × 100% (24)

其中 a_j = (sum(a_ji) / n_j) (25)

S_j = sqrt((sum(a_ji^2) / n_j - (sum(a_ji) / n_j)^2 / (n_j - 1))) (26)

式中 a_ji——第 j 行程中第 i 点耕深,cm

n_j——第 j 行程测量点数目

a_j——第 j 行程耕深均值,cm

S_j——第 j 行程耕深标准差,cm

n——同一工况行程数

U——耕深稳定性系数,%

4.3 试验结果与分析

试验结果如表 7 所示,试验结果表明:犁铧式马铃薯中耕机满足马铃薯中耕碎土、培土以及起垄等多项要求,具有较好的作业性能。

表 7 犁铧式马铃薯中耕机试验结果

Tab.7 Plowshare type potato cultivator test results

类型	碎土率/ %	培土高 度/cm	作业 深度/cm	耕深稳定 性系数/%	油耗/ (kg·hm ⁻²)
犁铧式	94.7	8.4	13.6	92.1	14.6
锄铲式	91.6	6.8	12.5	83.3	18.8

对照组结果表明:犁铧式马铃薯中耕机的碎土率、培土高度、作业深度、耕深稳定性系数及油耗均优于对照组锄铲式马铃薯中耕机。相对于锄铲式中耕机,犁铧式马铃薯中耕机碎土率提高了3.1个百分点,培土高度提高了1.6 cm;由于所研制的中耕机以培土犁代替传统锄铲为碎土关键部件,使耕作区域垄沟内土壤被犁体切削破碎的同时沿犁体表面抬起,增加了土壤与工作部件接触的表面积,提高了作业效果。犁铧式中耕机培土犁前安装有弹齿组,可以对土壤进行预先深松,减小后方工作部件的入土阻力;且弹齿组采用S形设计,使得弹齿在工作时具有较好回弹力,能较好地保证耕深稳定性,因此与传统锄铲式机型相比作业深度提高了1.1 cm,耕深稳定性系数提高了8.8个百分点,油耗下降了22.3%。

5 结论

(1)设计了犁铧式马铃薯中耕机培土关键部件,对培土犁结构组成、犁体曲面形成原理及任一点

犁体受力进行了分析,构建了犁体轮廓以及导曲线、元线夹角的参数方程。

(2)利用 EDEM 软件对犁体耕作过程进行仿真分析,建立了部件-土壤仿真模型,以犁体导曲线上端切线夹角、初始元线角、元线角差值为试验因素,以培土高度、土壤破碎率为试验指标,建立了各试验因素与指标间的回归数学模型,得出犁体曲面优化参数组合为导曲线上端切线夹角 6.2° 、初始元线角 43.5° 、元线角差值 5° 。对优化结果进行仿真验证及阻力分析,得到入土时犁尖受到的最大阻力为492 N,稳定时犁体受到的最大阻力在犁胸位置,为743 N,培土高度为8.65 cm,土壤破碎率为69.23%,与优化结果基本一致。

(3)田间试验表明:犁铧式马铃薯中耕机作业后,碎土率为94.7%、培土高度为8.4 cm、作业深度为13.6 cm,耕深稳定性系数为92.1%,油耗为 14.6 kg/hm^2 ,均优于传统马铃薯中耕机。

参 考 文 献

- [1] 李紫辉,温信宇,吕金庆,等. 马铃薯种植机械化关键技术与装备研究进展分析与展望[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):1-16.
LI Zihui, WEN Xinyu, LÜ Jinqing, et al. Analysis and prospect of research progress on key technologies and equipments of mechanization of potato planting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190301&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.001. (in Chinese)
- [2] 高中超,刘峰,王秋菊,等. 马铃薯专用中耕培土犁的应用及增产效果[J]. 农业工程学报,2016,32(20):49-54.
GAO Zhongchao, LIU Feng, WANG Qiuju, et al. Application and yield increasing effect on potato using special-designed ridging cultivator[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20):49-54. (in Chinese)
- [3] KEMPENAAR C, STRUIK P C. The canon of potato science: haulm killing[J]. Potato Research, 2008, 50(3):341-345.
- [4] 柳俊. 我国马铃薯产业技术研究现状及展望[J]. 中国农业科技导报,2011,13(5):13-18.
LIU Jun. Research status and prospects of potato industry in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(5):13-18. (in Chinese)
- [5] 吕金庆,王英博,兑瀚,等. 驱动式马铃薯中耕机关键部件设计与碎土效果试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(10):49-58.
LÜ Jinqing, WANG Yingbo, DUI Han, et al. Design of key components of driving-type potato cultivator and its soil-broken effect experiment[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10):49-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171006&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.006. (in Chinese)
- [6] 王英博. 驱动式马铃薯中耕机关键部件设计与碎土效果试验研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2018.
WANG Yingbo. Soil-broken research experiment and design of key components of driving-type potato cultivator[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [7] 马春燕,李政平,杨洋,等. 液压调节行距马铃薯中耕培土机设计研究[J]. 农机化研究,2021,43(4):90-94.
MA Chunyan, LI Zhengping, YANG Yang, et al. Design and research of hydraulically adjusted row spacing potato medium-tillage and growing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(4):90-94. (in Chinese)
- [8] 姚宝刚. 现代农业与农业机械化发展[J]. 农业机械学报,2006,37(1):74-82.
YAO Baogang. Development of agricultural mechanization and modern agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1):74-82. (in Chinese)
- [9] 吕金庆,尚琴琴,杨颖,等. 1ZL5型马铃薯中耕机的设计与试验[J]. 农机化研究,2017,39(2):79-83.
LÜ Jinqing, SHANG Qinqin, YANG Ying, et al. Design and experiment analysis of 1ZL5 type cultivator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(2):79-83. (in Chinese)
- [10] 李洋,杨德秋,李建东,等. 1304型马铃薯中耕机的研制[J]. 农业机械,2011(12):65.
- [11] 赵旭志. 3Z-1.6型垄作马铃薯中耕机设计与试验[J]. 农业工程,2016,6(3):87-91.
ZHAO Xuzhi. Design and experiment of 3Z-1.6 type ridge potato cultivator[J]. Agricultural Engineering, 2016, 6(3):87-91. (in Chinese)
- [12] 刘恩宏,高明宇,吴家安,等. 3ZF-3200/3型立旋式马铃薯中耕机的设计与试验[J]. 现代化农业,2016(9):51-52.
- [13] 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.
LÜ Jinqing, LIU Zhifeng, WANG Pengrong, et al. Design and experiment of driving-type crushing-weeding multi-functional

- potato cultivator[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(10): 1–8. (in Chinese)
- [14] 衣淑娟, 孙志江, 李衣菲, 等. 圆盘式马铃薯中耕机关键部件设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 98–108. YI Shujuan, SUN Zhijiang, LI Yifei, et al. Design and test of key components of disc potato cultivator[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 98–108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200811&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.011. (in Chinese)
- [15] 彭曼曼, 吕金庆, 兑瀚, 等. 驱动式马铃薯中耕机的设计与仿真分析[J]. 农机化研究, 2019, 41(3): 58–63. PENG Manman, LÜ Jinqing, DUI Han, et al. Design and simulation analysis of driving-type potato cultivator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(3): 58–63. (in Chinese)
- [16] 张先达. 旋转中耕机主要参数的选择与计算[J]. 粮油加工与食品机械, 1982(5): 7–14.
- [17] 程鹏飞, 王琳琳, 李学强, 等. 3ZMP-360型马铃薯中耕起垄施肥机的改进设计[J]. 农机化研究, 2017, 39(7): 53–57. CHENG Pengfei, WANG Linlin, LI Xueqiang, et al. The improved design of 3ZMP-360 potato intertillage and ridge forming fertilizer applicator[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(7): 53–57. (in Chinese)
- [18] 白利杰, 丁宏斌, 康清华. 3ZGMP-4型马铃薯中耕培土两用机设计与使用[J]. 农业技术与装备, 2012(16): 80–81.
- [19] 刘和平. 马铃薯种植农艺与机械化生产技术[J]. 农业技术与装备, 2011(21): 46–47.
- [20] 闫贤邦. 马铃薯机械化种植技术要点[J]. 现代农业科技, 2007(1): 21, 39.
- [21] LU Haiying, FENG Yuanyuan, GAO Qian, et al. Surface soil mixing is more beneficial than the plough layer mixing mode of biochar application for nitrogen retention in a paddy system[J]. Science of the Total Environment, 2020, 718(20): 137399.
- [22] 魏国梁, 张青松, 刘立超, 等. 犁旋组合式油菜直播机扣垄装置设计与试验[J/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 38–46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200604&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.004. (in Chinese)
- [23] LUO Feng, ZHU Lin, WEI Min, et al. Tillage condition effects on soil/plow-breast flow interaction of a horizontally reversible plow[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 35: 980–985.
- [24] 张秀丽, 全振伟, 李连豪, 等. 复合切削式烟草中耕培土机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 73–81. ZHANG Xiuli, TONG Zhenwei, LI Lianhao, et al. Design and experiment of tobacco hilling machine for compound cutting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 73–81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180908&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.008. (in Chinese)
- [25] 龙玉民. 重塑粘性土 ϕ 值影响因素研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012. LONG Yumin. Influence factor study of remolded cohesive soil's ϕ values[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [26] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械手册(上)[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 2007.
- [27] 翟力欣. 犁体结构与工作参数对流变型土壤耕作阻力的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011. ZHAI Lixin. Study on the effects of plough's working and structure parameters on its resistance under rheological soil conditions[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [28] 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 Wenfang, SHU Caixia, LIAO Qingxi, et al. Design and test of tillage machine combined with plough and rotary for managing seedbed before planting rapeseed by burying of rice straw incorporated into soil[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(6): 139–146. (in Chinese)
- [29] 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婵, 等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80–88. HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80–88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160712&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012. (in Chinese)
- [30] SUN Jiyu, WANG Yueming, MA Yunhai, et al. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth > 40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 119: 30–37.
- [31] 王明. 马铃薯仿生培土器设计与试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019. WANG Ming. Design and experimental study of potato biomimetic soil cultivator[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [32] 邓佳玉, 胡军, 李庆达, 等. 基于 EDEM 离散元法的深松铲仿真与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(4): 14–18. DENG Jiayu, HU Jun, LI Qingda, et al. Simulation and experimental study on the subsoiler based on EDEM discrete element method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(4): 14–18. (in Chinese)
- [33] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 59–69. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190807&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.007. (in Chinese)
- [34] 肖文芳. 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[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019. XIAO Wenfang. Design and experiment on seedbed equipment with plough and rotary of rape planted[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2019. (in Chinese)