

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.011

马铃薯中耕前期圆盘式中耕机设计与试验

衣淑娟¹ 孙志江¹ 李衣菲¹ 李紫辉² 李季成² 吕金庆^{1,2}

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对现有马铃薯中耕机在第1次中耕作业时存在作业效果不佳、易伤苗的问题,对圆盘式马铃薯中耕机进行设计与试验。阐述了该机的工作原理,通过理论计算对其关键部件进行设计,根据农艺培土、除草等作业要求,确定了圆盘式马铃薯中耕机主要结构参数和作业参数;采用单因素和二次旋转正交组合试验,以耕作深度、机车前进速度、调节角为试验因素,以除草率及伤苗率为试验指标进行了样机试验。试验结果表明,当耕作深度为0.13 m、机车前进速度为4.6 km/h、调节角为52°时,除草率为95.2%,伤苗率为3.9%,满足国家标准伤苗率不大于5%、除草率不小于90%的要求。

关键词: 马铃薯; 中耕机; 圆盘式; 中耕前期

中图分类号: S224.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)08-0098-11

OSID:



Design and Test of Disc Potato Cultivator at Early Inter-tillage

YI Shujuan¹ SUN Zhijiang¹ LI Yifei¹ LI Zihui² LI Jicheng² LÜ Jinqing^{1,2}

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The damage rate of potato seedlings was high when traditional potato cultivators were used in the early stage of potato emergence. The reason was that the potato seedlings in the early stage of potato emergence were vulnerable to damage. The traditional potato cultivator had a large amount of ridging, so the damage rate of potato seedlings was high during potato tillage. In order to solve this problem, a kind of disc potato cultivator was designed, which can not only adapt to the inter-tillage of potato at the early stage of seedling emergence, but also it was suitable for middle and late potato tillage. The structure and working principle of the cultivator were described, and the monomer of the ridging disc was analyzed theoretically, and the factors affecting the effect of the tillage operation were obtained. The depth of cultivation, locomotive speed and angle were used as the experimental factors, the rate of weeding and seedling injury were used as the experimental index. The test was taken place on June 1, 2019 at the Acheng Experimental and Demonstration Base of Northeast Agricultural University, and the machine was driven by a tractor. The test results showed that when the tillage depth was 0.13 m, the forward speed of the locomotive was 4.6 km/h, and the adjustment angle was 52°, the rate of weeding and seedling injury were respectively 95.2% and 3.9%. The test determined the optimal structural parameters of the ridging disk and verified the correctness of the theoretical formula. The experiment was carried out according to the agronomic requirements. Compared with the traditional potato cultivator, the ridging amount of disc potato cultivator had a large regulating range, which improved the applicable period of the machine, and it can achieve better tillage operation effect. The problem of too much ridging amount in the early stage of potato seedling emergence was basically solved by the machine. Compared with the traditional potato cultivator, it was more suitable for potato tillage operation. The research result provided an important theoretical and technical reference for the improvement and optimization of the driven-type disc potato cultivator.

Key words: potato; cultivator; disc; early inter-tillage

收稿日期: 2020-05-08 修回日期: 2020-06-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701600、2017YFD0700705)、黑龙江省马铃薯产业技术协同创新推广体系项目和黑龙江八一农垦大学三横三纵支持计划项目(TDJH201803)

作者简介: 衣淑娟(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事农业装备研究,E-mail: yishujuan_2005@126.com

0 引言

马铃薯是一种适应性强、营养丰富、高产量的作物,在食品加工业和牲畜饲料业广泛使用。我国马铃薯总产量高、种植面积广,已发展成我国第四大主要粮食作物,具有很大的发展潜力。马铃薯中耕作业是指在马铃薯出苗前期以及生长中期对马铃薯进行松土、除草、碎土、培土等作业,其目的是疏松土壤、改善土壤结构、增强土壤地力、提高土壤透气性、保墒抗旱以及去除杂草,从而提高马铃薯的产量^[1-3]。目前国内马铃薯中耕机发展迅速,但是缺乏适用于第1次中耕作业的马铃薯中耕机。第1次马铃薯中耕作业时,由于马铃薯刚出苗,中耕培土作业过程中培土量过大,致使伤苗率过高。目前市场上的马铃薯中耕机主要是大培土量的机具。

国外对马铃薯中耕机研究较早,其技术水平和可靠性高^[4-5],具有代表性的马铃薯中耕机有:德国 GRIMME 公司的 GH 型马铃薯中耕机以及荷兰 STRUIK 公司的 ZF 型马铃薯中耕机,其作业效果好,适合欧美国家的大地块作业,但造价昂贵、维修难度大,不适合我国国情。国内对马铃薯中耕机研究起步较晚,但是发展迅速。吕金庆等^[6]研制的 1ZL5 型马铃薯中耕机能一次完成松土、除草、筑垄等作业,该机使用锄铲式培土器,培土量较大,在马铃薯出苗前期作业时不太适用;吕金庆等^[7]研制的驱动式碎土除草多功能马铃薯中耕机,集碎土、施肥、除草、培土于一体,适用于黏重土壤条件的马铃薯地,培土器对碎土刀抛洒的土壤收集后进行培土,但在沙壤土地块中作业存在动力消耗过大的问题;刘恩宏等^[8]研制的 3ZF-3200/3 型立旋式马铃薯中耕机,主要针对土壤板结、杂草过多的黏重土壤,在马铃薯出苗前期,马铃薯苗较为脆弱,该机不适于这个时期的马铃薯中耕作业;李洋等^[9]针对大规模马铃薯中耕作业而研制的 1304 马铃薯中耕机,适用性强,结构简单。以上机具培土部件采用培土器或培土铲,基本满足马铃薯中耕作业要求。但是,在马铃薯出苗前期,马铃薯苗小,且易受损伤,此时只能进行较少的培土量作业;在马铃薯生长中期,此时的马铃薯苗大,且不易受损,可进行大培土量作业。因此,设计一种适于马铃薯中耕前期的作业机具具有重要意义^[10]。

本文设计一款圆盘式马铃薯中耕机,通过理论分析确定马铃薯中耕机培土圆盘的结构参数及取值范围,通过调节圆盘的角度调整作业的培土量,以适应马铃薯出苗前期和生长中期的中耕作业要求,并进行马铃薯中耕机的田间试验。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

整机主要由机架、悬挂机构、限深轮、培土圆盘、S型振动弹齿、调节装置、液压折叠机构等组成;整机共有5个圆盘单体,最多可同时进行4垄耕作作业,每个圆盘单体与机架通过2个U型卡子固定;每个圆盘单体上配有3个S型振动弹齿,对应行间1个,两侧垄壁各1个,每个圆盘单体之间的距离可根据不同的垄距在700~900 mm^[11]间进行调节,其整体结构如图1所示。

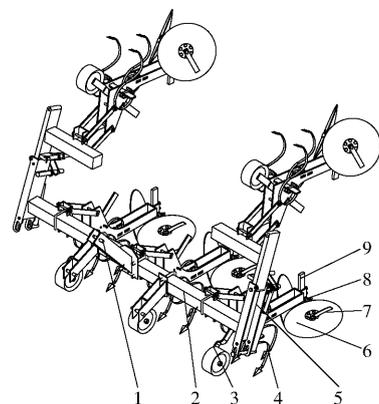


图1 圆盘式马铃薯中耕机整机结构图

Fig. 1 Structure of disc potato cultivator diagram

1. 悬挂机构 2. 机架 3. 限深轮 4. S型振动弹齿 5. 液压折叠机构 6. 培土圆盘 7. 小犁壁 8. 圆盘角度调节把手 9. 圆盘高度调节部件

1.2 工作原理

机具通过三点悬挂方式挂接于拖拉机,作业前,根据地况通过液压折叠机构放下或升起圆盘单体,再牵引机具前进作业;作业时,拖拉机牵引机具向前行进,带动培土圆盘向前运动,由于培土圆盘和地接触,因此培土圆盘会绕轴自转;在培土圆盘前壁,安装有S型振动弹齿,能对垄沟土壤进行松土,培土圆盘向前运动能切开和推动土壤,同时在培土圆盘前进时能对马铃薯垄进行刮土除草,又由于培土圆盘和土壤摩擦力的作用下,培土圆盘在绕轴旋转运动时能带动土壤壅到垄上;根据马铃薯生长情况,可调节耕深和培土圆盘角度,以满足马铃薯中耕作业要求;因此,机具进行一次田间作业可以实现浅耕松土、去除杂草、培土的联合作业功能。

圆盘式马铃薯中耕机主要用于东北熟地作业,其主要参数如表1所示。

2 关键部件设计与参数确定

2.1 圆盘单体设计

圆盘单体主要由四杆机构、限深轮、S型振动弹

齿、培土圆盘、调节装置等组成,其结构如图2所示。

表1 圆盘式马铃薯中耕机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of disc potato cultivator

参数	数值
配套动力/kW	≥44.1
长×宽×高/(mm×mm×mm)	2 100×3 400×1 200
整机质量/kg	422
作业深度/mm	60~150
作业行数	2~4
适应垄距/mm	800~900
工作速度/(km·h ⁻¹)	≤7
作业幅宽/mm	2 000~3 400

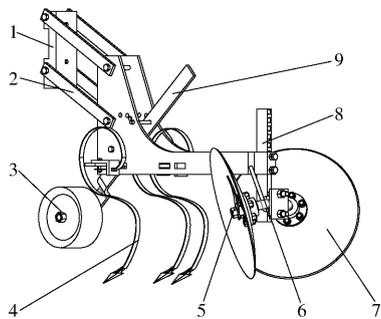


图2 圆盘单体结构图

Fig.2 Structure diagram of disc monomer

1. 连接板
2. 连接杆
3. 限深轮
4. S型振动弹齿
5. 小犁壁
6. 圆盘角度调节部件
7. 培土圆盘
8. 圆盘高度调节部件
9. 限深轮深度调节部件

S型振动弹齿安装在圆盘单体机架上,并可以调节两侧S型振动弹齿的位置;培土圆盘安装在圆盘角度调节把手两侧,通过螺栓固定;圆盘高度调节部件和圆盘角度调节把手之间通过螺栓紧固在一起;圆盘高度调节部件通过螺栓固定在圆盘单体机架,单次可调节的高度为28 mm;在机具工作时,S型振动弹齿对垄底的土壤进行松土作业,调整完毕的培土圆盘向前运动的同时绕轴自转,对疏松后的土壤完成马铃薯第1次中耕的培土、除草作业。

2.1.1 圆盘角度调节部件

圆盘角度调节部件与旋转部件位置关系如图3所示,圆盘角度调节部件(图4)两侧对称安装培土圆盘,每个培土圆盘背侧和凸台之间通过6个螺栓安装,培土圆盘内侧通过螺丝紧固方式将小犁壁和培土圆盘固定在一起;圆盘角度调节部件焊接一调节把手,用于简便调节培土圆盘角度,为节约成本设计调节把手直径为12 mm;为适应培土圆盘的角度调节和90 cm大垄的马铃薯地块,本文圆盘角度调节部件两端设计的角度为120°;考虑结构的紧凑和合理,两侧轴长90 mm,直径为20 mm,凸台接触面直径为30 mm,且通过螺母紧固依次安装凸台、培土圆盘、套筒、小犁壁,通过6个螺栓固定安装凸台和

培土圆盘。

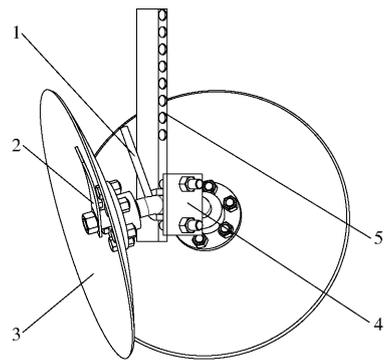


图3 旋转部件结构图

Fig.3 Structure diagram of rotating component

1. 圆盘角度调节部件
2. 小犁壁
3. 培土圆盘
4. 连接部件
5. 圆盘高度调节部件

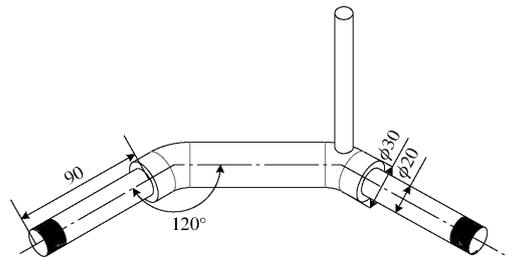


图4 圆盘角度调节部件结构图

Fig.4 Structure diagram of disk angle adjusting component

2.1.2 圆盘高度调节部件

耕作深度是中耕机最主要的工作指标之一,主要由圆盘高度调节部件参数决定;圆盘高度调节部件通过螺栓连接固定于圆盘单体机架,随着机具带动培土圆盘作前进运动,圆盘高度调节部件和圆盘角度调节部件之间由半套筒和小方板通过螺栓固定,需要对培土圆盘角度调节时,松开螺母后进行调节,调节完毕后再紧固,需要调节耕深时,旋松圆盘高度调节部件对应的螺栓,然后上下调节部件的位置,调节完毕后再由螺栓紧固。圆盘高度调节部件如图5所示。

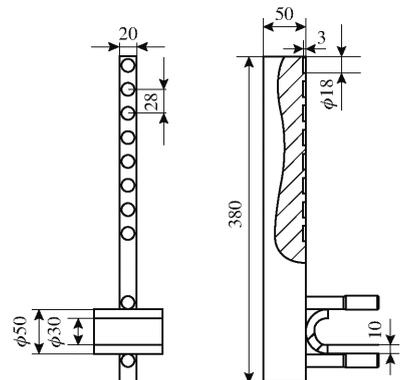


图5 圆盘高度调节部件结构图

Fig.5 Structure diagram of disk height adjusting component

2.2 培土圆盘设计

培土效果也是中耕机主要工作指标之一,设计

的培土圆盘如图 6 所示,其培土效果主要由圆盘设计参数决定。培土圆盘与圆盘高度调节部件通过螺栓连接固定,随着机具一起作前进运动,其盘刃直接和土壤接触从而绕轴转动;旋转式中耕机大多采用培土铲装置进行培土,但在马铃薯第 1 次中耕作业时培土铲培土量稍大。

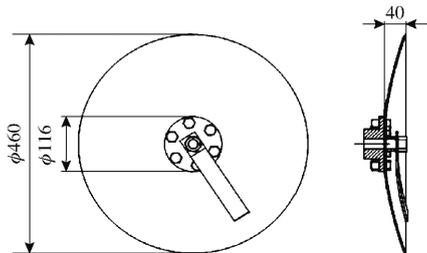


图 6 培土圆盘结构图

Fig. 6 Structure diagram of ridging disk

设计的培土装置为圆盘式培土装置,与培土铲相比,培土量较小,满足第 1 次马铃薯中耕的作业需求,第 1 次马铃薯中耕作业需要少培土,同时培土圆盘和马铃薯垄接触,随机具的前进能清除马铃薯垄的杂草。培土圆盘的设计和计算参考了土壤耕作机械的理论和计算,浅耕深的培土圆盘直径在 450 ~ 500 mm^[12],设计培土圆盘直径为 460 mm;根据培土圆盘厚度是培土圆盘直径的 0.008 倍^[13],培土圆盘厚度设计为 4 mm,可保证培土圆盘有较高的强度;曲率半径较大会使培土圆盘碎土和翻垡较差,曲率半径较小将妨碍圆盘入土,导致机具作业阻力增大,试验过程中发现培土圆盘深度为 40 mm 时作业效果较好;小犁壁厚度设计为 4 mm,为了减少堵土的可能性,小犁壁和培土圆盘距离为 20 mm,在培土圆盘上有 7 个安装孔,便于培土圆盘螺栓与部件固定^[14]。

3 培土圆盘作业分析

3.1 运动分析

作业时,培土圆盘旋转运动,旋转方向和培土圆盘前进方向相同,培土圆盘在运动时做直线运动和圆周运动。为了满足工作要求,培土圆盘在安装时需要调整其相对于水平面角度 β 和垂直面角度 α , β 为培土圆盘倾角, α 为培土圆盘偏角。培土圆盘空间示意如图 7 所示^[15-16]。

图 7 中 V 表示垂直面, H 表示水平面, x 正向表示机具前进方向。培土圆盘运动比较复杂,既有旋转运动,又有直线运动,同时偏角和倾角对运动轨迹有直接影响,将分 3 种情况分析培土圆盘的运动情况^[17-22]。

(1) 当 $\alpha = 0, \beta = 0$ 时,此时培土圆盘只具有滚切土壤的效果,如图 8 所示。

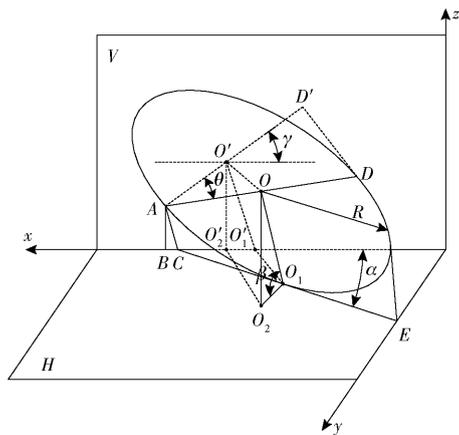


图 7 培土圆盘三维坐标系图

Fig. 7 Three-dimensional coordinate system diagram of clay disc

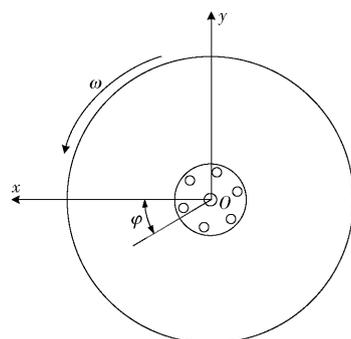


图 8 圆盘滚切运动示意图

Fig. 8 Diagram of disk roll cutting motion

坐标轴原点为培土圆盘中心, xOz 为投影面, 设培土圆盘边缘上任一点坐标为 (x, y, z) , 由圆盘结构图(图 9)可得

$$D = 2R \quad (1)$$

$$l = \frac{R}{\cos\theta} \quad (2)$$

$$h = l \sin\theta \quad (3)$$

式中 D ——培土圆盘直径, mm
 R ——培土圆盘半径, mm
 h ——培土圆盘高度, mm
 l ——培土圆盘边缘与圆盘安装中心的直线距离, mm

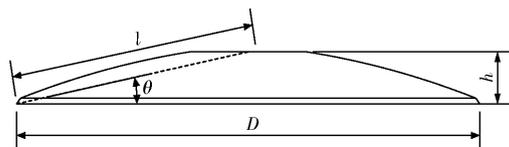


图 9 圆盘结构图

Fig. 9 Disk structure diagram

其运动方程可表示为

$$\begin{cases} x = v_m t + R \cos\theta \\ y = l \sin\theta \\ z = R - R \sin\theta \end{cases} \quad (4)$$

其中

$$\varphi = \omega t$$

式中 t ——工作部件转过 φ 所需时间, s

v_m ——机车前进速度, km/h

φ ——圆盘转过角度, rad

ω ——圆盘回转角速度, rad/s

(2) 当 $\alpha = 0, \beta \in (0, \frac{\pi}{2})$, 此时培土圆盘只有倾角, 没有偏角, 培土圆盘能滚切土壤但不能侧推土壤。坐标轴原点为培土圆盘中心, 以 yOz 面为投影平面, 设培土圆盘边缘上任一点坐标为 (x, y, z) , 如图 10 所示。

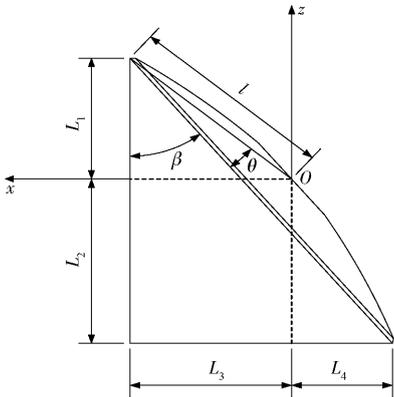


图 10 倾斜圆盘运动示意图

Fig. 10 Motion diagram of oblique disc

其运动方程可表示为

$$\begin{cases} x = v_m t + R \cos \varphi \\ y = \begin{cases} l \sin(\theta + \beta) - \frac{2\varphi}{\pi} R \sin \beta & (0 < \varphi \leq \pi) \\ \frac{\varphi}{\pi} R \sin \beta - (2R \sin \beta - l \sin(\theta + \beta)) & (\pi < \varphi \leq 2\pi) \end{cases} \\ z = l \cos(\theta + \beta) - R \sin \varphi \cos \beta \end{cases} \quad (5)$$

(3) 当 $\alpha \in (0, \frac{\pi}{2}), \beta = 0$, 此时培土圆盘只有偏角没有倾角, 培土圆盘具有滚切土壤和侧推土壤的能力。坐标轴原点为培土圆盘中心, 以 xOy 面为投影平面, 设培土圆盘边缘上任一点坐标为 (x, y, z) , 如图 11 所示。

其运动方程可表示为

$$\begin{cases} x = \begin{cases} l \cos(\alpha - \theta) - \frac{2\varphi}{\pi} R \cos \alpha & (0 < \varphi \leq \pi) \\ \frac{\varphi}{\pi} R \cos \alpha - (2R \cos \alpha - l \cos(\alpha - \theta)) & (\pi < \varphi \leq 2\pi) \end{cases} \\ y = \begin{cases} \frac{2\varphi}{\pi} R \sin \alpha - l \sin(\alpha - \theta) & (0 < \varphi \leq \pi) \\ 2R \sin \alpha - l \sin(\alpha - \theta) - \frac{2\varphi}{\pi} R \sin \alpha & (\pi < \varphi \leq 2\pi) \end{cases} \\ z = R - R \sin \varphi \end{cases} \quad (6)$$

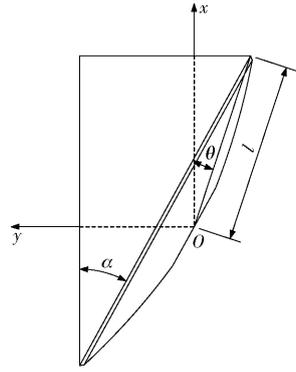


图 11 偏转圆盘运动示意图

Fig. 11 Motion diagram of deflection disc

根据以上 3 种情况对培土圆盘的运动进行分析, 得到培土圆盘参数 D, θ, l 以及工作偏角 α 和工作倾角 β 的运动方程。

对式(4)的运动方程进行求导, 即可得到培土圆盘的刃角端点在 x, z 轴速度为

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} = v_m - R\omega \sin(\omega t) \\ v_z = \frac{dz}{dt} = -R\omega \cos(\omega t) \end{cases} \quad (7)$$

可得刃角端点的绝对速度为

$$v_a = \sqrt{v_x^2 + v_z^2} = v_m \sqrt{\varepsilon^2 - 2\varepsilon \sin \varphi + 1} \quad (8)$$

其中

$$\varepsilon = \frac{\omega R}{v_m}$$

式中 v_a ——刃角端点的绝对速度, m/s

ε ——圆盘线速度与机具速度比值

综合式(1)~(8)可知, 培土圆盘上点的速度与机具的速度和培土圆盘的位置均有关, 随工作偏角的增大, 培土圆盘培土土量增加, 培土圆盘速度降低, 随工作倾角的增大, 培土圆盘的翻垡效果增强。

利用 SolidWorks 软件中的 Motion 插件^[23], 建立圆盘的装配体, 添加 2 个马达完成圆盘绕轴的自转运动以及圆盘随机架的直线运动, 在圆盘边缘添加一点, 仿真计算得到该点的运动轨迹并导出数据到 Matlab^[24], 得到该点一段运动轨迹如图 12 所示, 显示轨迹为螺旋线运动。

3.2 培土作业过程分析

培土是将垄体基部的土壤塞到马铃薯植株的基部, 起到疏松土壤、增厚土层的作用, 形成适合地下作物生长的黑暗环境, 为多结薯创造条件, 同时培土结束后可使得已形成的薯块不致日晒而发绿, 提升了马铃薯的品质。根据目前马铃薯种植模式, 结合农艺要求, 为机具的培土作业以及培土圆盘参数选取提供参考。

培土圆盘在垄田中工作状态如图 13 所示。图

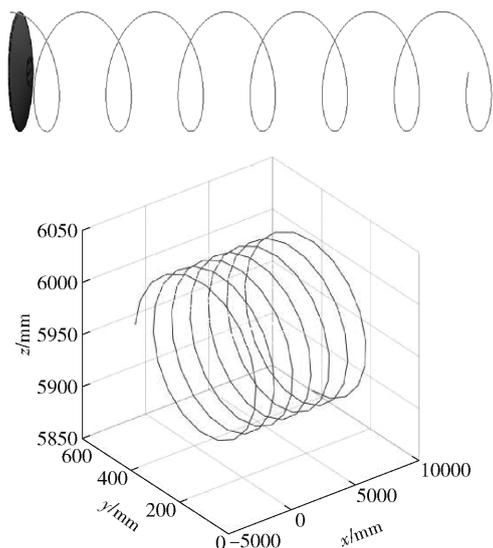


图 12 圆盘运动轨迹

Fig. 12 Disk trajectory diagrams

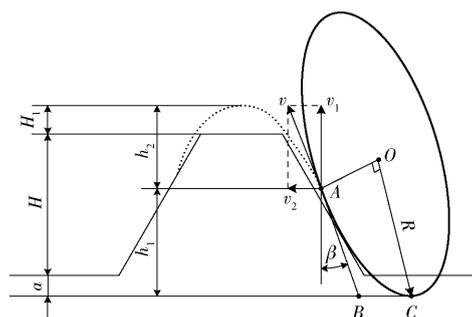


图 13 圆盘工作状态图

Fig. 13 Disk working state diagram

中点 O 是培土圆盘的圆心；点 C 是培土圆盘在此时刻和耕深处的切点；培土圆盘从点 C 运动到点 A 的过程中，虽也有土壤被抛出，但均不能达到最高点，当 $\angle AOC$ 为 90° 时，土壤抛出的高度达最大。

抛土速度为

$$v = v_m \cos \alpha \quad (9)$$

式中 v ——抛土速度， m/s

抛出后，继续上升的最大高度为

$$h_2 = \frac{v_1^2}{2g} \quad (10)$$

其中

$$v_1 = v \cos \beta$$

式中 v_1 ——抛土速度竖直分量， m/s

h_2 ——抛出后上升的最大高度， m

g ——重力加速度， m/s^2

抛土点与耕深处距离为

$$h_1 = R \cos \beta \quad (11)$$

综合式(9)~(11)可得培土高度为

$$H_1 = h_1 + h_2 - a - H \quad (12)$$

式中 a ——耕作深度， m

H ——垄高， m

H_1 ——培土高度， m

最终解得

$$H_1 = \frac{D \cos \beta}{2} + \frac{(v_m \cos \alpha)^2}{2g} - \frac{D}{k} - H \quad (13)$$

其中

$$D = ka$$

式中 k ——耕深和圆盘直径间系数

农艺对中耕培土要求为

$$5 \text{ cm} \leq H_1 \leq 10 \text{ cm} \quad (14)$$

由式(13)、(14)可知，影响培土高度的因素主要有耕深、机车速度、培土圆盘工作倾角和工作偏角等；圆盘式马铃薯中耕机耕深为 $0.06 \sim 0.15 \text{ m}$ ；随着机车前进速度的增加，培土圆盘抛掷土袋的距离急剧增加，因此机车前进速度不超过 7 km/h ；调节角 γ 通过圆盘角度调节部件调节，调节范围为 $20^\circ \sim 60^\circ$ 。

在培土圆盘作业过程中，培土作业是通过培土圆盘的螺旋运动将土壤带到垄上，培土圆盘带出的土壤携带能量越大，越可能伤苗。土壤携带的能量主要与耕深、机车速度、培土圆盘工作角有关，机车速度越大，培土圆盘抛出的土壤速度越大，其携带的能量越大，耕深越大，单位时间培土圆盘抛出的土壤越多。培土圆盘工作角影响培土圆盘抛土的高度，高度越大，土壤携带的能量越多，同时倾斜的培土圆盘在运动过程中对马铃薯垄有刮土除草效果，在一定范围内，培土圆盘相对垄侧角越大，其除草效果越明显。

4 田间试验

4.1 试验条件与设备

2019年6月1日在东北农业大学阿城试验示范基地进行圆盘式马铃薯中耕机田间试验。该试验地为东北旱作黑土地，选取长度和宽度为 $500 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ 的地块作为试验区，土壤含水率为 9.4% 、土壤坚实度为 892 kPa ，试验地块长有杂草，马铃薯幼苗高度为 $150 \sim 200 \text{ mm}$ ，密度为 $7 \text{ 株}/\text{m}^2$ 。地块各处试验条件基本相同。试验通过机车仪表盘调整机车前进速度，通过直尺测量以及通过圆盘高度调节部件调节耕作深度，通过角度仪测量以及圆盘角度调节部件调整调节角；试验后，以 JB/T 7864—1999《旱田中耕追肥机 试验方法》对除草率和伤苗率进行统计和测量。田间试验如图 14 所示。

4.2 评价指标

为评价圆盘式马铃薯中耕机关键部件的除草效果，以耕作深度、机车前进速度、调节角为因素进行二次旋转正交组合试验，以除草率、伤苗率和培土高度作为试验指标。



图 14 田间试验

Fig. 14 Field experiment

4.3 试验方案与结果分析

4.3.1 试验方案及结果

采用二次旋转正交组合试验方案进行试验,以除草率、伤苗率和培土高度为试验指标。试验中机车前进速度为 4~7 km/h,耕作深度为 0.06~0.15 m,调节角为 20°~60°。通过试验对影响试验指标的因素进行显著性分析,根据前文分析得到参数范围,对参数组合优化并获得较合适的参数组合。试验因素编码如表 2 所示,试验方案及结果如表 3 所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 表示因素编码值。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Experimental factors codes

编码	试验因素		
	耕作深度	机车前进速度	调节角
	x_1/m	$x_2/(km \cdot h^{-1})$	$x_3/(^\circ)$
1.682	0.150	7.0	60
1	0.132	6.4	52
0	0.105	5.5	40
-1	0.078	4.6	28
-1.682	0.060	4.0	20

4.3.2 结果分析

对田间试验采集到的数据由 Design-Expert 8.0.6 软件进行二次回归分析,并进行多元回归拟合,得到培土高度 H_1 、除草率 C 以及伤苗率 S 回归方程,并进行显著性检验。

(1) 除草率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,除草率 C 方差分析如表 4 所示。由表 4 可知,耕作深度 X_1 、机车前进速度 X_2 、调节角 X_3 、耕作深度二次项 X_1^2 对除草率 C 影响极显著 ($P < 0.01$); 调节角二次项 X_3^2 对除草率 C 影响显著 ($0.01 < P < 0.05$); 其余因素对除草率 C 影响不显著 ($P > 0.1$)。将不显著交互作用项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 4 所示。得到各因素对除草率 C 回归方程为

$$C = 95.23 + 0.66X_1 + 0.49X_2 + 0.66X_3 - 0.42X_1^2 - 0.31X_3^2 \quad (15)$$

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Test plan and experimental data

序号	试验因素			除草率 $C/\%$	伤苗率 $S/\%$	培土高度 H_1/m
	X_1	X_2	X_3			
1	1	1	1	96.1	4.5	0.085
2	1	1	-1	94.7	4.1	0.100
3	1	-1	1	95.2	3.9	0.065
4	1	-1	-1	93.8	3.8	0.075
5	-1	1	1	94.8	4.2	0.060
6	-1	1	-1	94.4	3.7	0.075
7	-1	-1	1	93.2	3.6	0.055
8	-1	-1	-1	93.3	3.5	0.070
9	1.682	0	0	95.6	4.2	0.095
10	-1.682	0	0	92.7	3.4	0.050
11	0	1.682	0	96.2	4.5	0.070
12	0	-1.682	0	94.9	3.4	0.055
13	0	0	1.682	96.2	4.5	0.055
14	0	0	-1.682	92.7	3.6	0.075
15	0	0	0	95.6	3.6	0.065
16	0	0	0	95.8	3.7	0.060
17	0	0	0	95.3	3.9	0.065
18	0	0	0	94.8	3.7	0.070
19	0	0	0	94.6	3.8	0.065
20	0	0	0	95.4	3.7	0.075
21	0	0	0	94.7	3.8	0.055
22	0	0	0	95.5	3.7	0.060
23	0	0	0	94.9	3.6	0.065

对上述回归方程进行失拟性检验,如表 4 所示,其中 $P > 0.1$,不显著,证明试验因素和试验指标存在显著的二次关系。

(2) 伤苗率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,伤苗率 S 方差分析如表 4 所示。由表 4 可知,耕作深度 X_1 、机车前进速度 X_2 、调节角 X_3 、调节角二次项 X_3^2 对伤苗率 S 影响极显著 ($P < 0.01$); 机车前进速度的二次项 X_2^2 对伤苗率 S 影响显著 ($0.01 < P < 0.05$); 机车前进速度和调节角交互项 X_2X_3 对伤苗率 S 影响较显著 ($0.05 < P < 0.1$); 其余因素对试验指标伤苗率 S 影响不显著 ($P > 0.1$)。其中不显著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 4 所示。得到各因素对伤苗率 S 回归方程为

$$S = 1.93 + 0.049X_1 + 0.065X_2 + 0.048X_3 + 0.021X_2X_3 + 0.018X_2^2 + 0.027X_3^2 \quad (16)$$

对上述回归方程进行失拟性检验,如表 4 所示,其中 $P > 0.1$,不显著,证明试验因素和试验指标存在显著的二次关系。

(3) 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_1 的

表 4 除草率、伤苗率与培土高度方差分析
Tab. 4 Variance analysis of damage comprehensive index

指标	变异来源	平方和		自由度		均方		F		P	
		原数据	剔除不显著因素	原数据	剔除不显著因素	原数据	剔除不显著因素	原数据	剔除不显著因素	原数据	剔除不显著因素
除草率	模型	20.35	19.34	9	5	2.26	3.87	8.01	14.04	0.000 5***	<0.000 1***
	X_1	5.90	5.90	1	1	5.90	5.9	20.91	21.42	0.000 5***	0.000 2***
	X_2	3.27	3.27	1	1	3.27	3.27	11.60	11.88	0.004 7***	0.003 1***
	X_3	5.91	5.91	1	1	5.91	5.91	20.95	21.46	0.000 5***	0.000 2***
	X_1X_2	0.10		1		0.10		0.36		0.559 5	
	X_1X_3	0.78		1		0.78		2.77		0.120 1	
	X_2X_3	0.031		1		0.031		0.11		0.744 6	
	X_1^2	2.74	2.75	1	1	2.74	2.75	9.72	9.98	0.008 2***	0.005 7***
	X_2^2	0.10		1		0.10		0.36		0.561 0	
	X_3^2	1.52	1.53	1	1	1.52	1.53	5.39	5.54	0.037 2**	0.030 9**
	残差	2.15	3.17	5	9	0.43	0.35	2.27	1.86		
	失拟差	1.52	1.52	8	8	0.19	0.19			0.144 4	0.197 6
总和	24.02	24.02	22	22							
伤苗率	模型	0.14	0.14	9	6	0.016	0.024	16.11	28.44	<0.000 1***	<0.000 1***
	X_1	0.033	0.033	1	1	0.033	0.033	33.72	39.84	<0.000 1***	<0.000 1***
	X_2	0.058	0.058	1	1	0.058	0.058	59.07	69.80	<0.000 1***	<0.000 1***
	X_3	0.031	0.031	1	1	0.031	0.031	31.38	37.07	<0.000 1***	<0.000 1***
	X_1X_2	3.712×10^{-5}		1		3.712×10^{-5}		0.038		0.849 4	
	X_1X_3	1.158×10^{-4}		1		1.158×10^{-4}		0.12		0.737 7	
	X_2X_3	3.626×10^{-3}	3.626×10^{-3}	1	1	3.626×10^{-3}	3.626×10^{-3}	3.67	4.33	0.077 8*	0.053 8*
	X_1^2	3.826×10^{-4}		1		3.826×10^{-4}		0.39		0.544 7	
	X_2^2	4.934×10^{-3}	4.916×10^{-3}	1	1	4.934×10^{-3}	4.916×10^{-3}	4.99	5.87	0.043 7**	0.027 6**
	X_3^2	0.012	0.012	1	1	0.012	0.012	11.78	13.88	0.004 5***	0.001 8***
	残差	7.806×10^{-3}	8.342×10^{-3}	5	8	1.561×10^{-3}	1.043×10^{-3}	2.47	1.65		
	失拟差	5.051×10^{-3}	5.051×10^{-3}	8	8	6.314×10^{-4}	6.314×10^{-4}			0.122 4	0.246 9
总和	0.16	0.16	22	22							
培土高度	模型	2.970×10^{-3}	2.922×10^{-3}	9	5	3.300×10^{-4}	5.844×10^{-4}	8.30	17.58	0.000 4***	<0.000 1***
	X_1	1.449×10^{-3}	1.449×10^{-3}	1	1	1.449×10^{-3}	1.449×10^{-3}	36.45	43.59	<0.000 1***	<0.000 1***
	X_2	4.713×10^{-4}	4.713×10^{-4}	1	1	4.713×10^{-4}	4.713×10^{-4}	11.86	14.18	0.004 4***	0.001 5***
	X_3	5.753×10^{-4}	5.753×10^{-4}	1	1	5.753×10^{-4}	5.753×10^{-4}	14.47	17.30	0.002 2***	0.000 7***
	X_1X_2	1.531×10^{-4}	1.531×10^{-4}	1	1	1.531×10^{-4}	1.531×10^{-4}	3.85	4.61	0.071 5*	0.046 6**
	X_1X_3	3.125×10^{-6}		1		3.125×10^{-6}		0.079		0.783 6	
	X_2X_3	3.125×10^{-6}		1		3.125×10^{-6}		0.079		0.783 6	
	X_1^2	2.749×10^{-4}	2.730×10^{-4}	1	1	2.749×10^{-4}	2.730×10^{-4}	6.91	8.21	0.020 8**	0.010 7**
	X_2^2	6.182×10^{-6}		1		6.182×10^{-6}		0.16		0.699 7	
	X_3^2	3.612×10^{-5}		1		3.612×10^{-5}		0.91		0.357 9	
	残差	5.168×10^{-4}	5.651×10^{-4}	13	17	3.975×10^{-5}	3.324×10^{-5}				
	失拟差	2.446×10^{-4}	2.929×10^{-4}	5	9	4.891×10^{-5}	3.255×10^{-5}	1.44	0.96	0.308 0	0.530 5
总和	3.487×10^{-3}	3.487×10^{-3}	22	22							

注：***表示影响极显著($P < 0.01$)；**表示影响显著($0.01 < P < 0.05$)；*表示影响较显著($0.05 < P < 0.1$)。

方差分析如表 4 所示。由表 4 可知,耕作深度 X_1 、机车前进速度 X_2 、调节角 X_3 对培土高度 H_1 的影响极显著($P < 0.01$)；耕作深度和机车前进速度的交互项 X_1X_2 对培土高度影响较显著($0.05 < P < 0.1$)；耕作深度二次项 X_1^2 对培土高度 H_1 的影响显著($0.01 < P < 0.05$)；其余因素对试验指标培土高度 H_1 影响不显著($P > 0.1$)；将不显著交互作用项回归平方及自由度

并入残差项,再次进行方差分析,结果如表 4 所示。得到各因素对培土高度 H_1 影响的回归方程为

$$H_1 = 0.066 + 0.010X_1 + 0.0059X_2 - 0.0065X_3 + 0.0044X_1X_2 + 0.0041X_1^2 \quad (17)$$

对上述回归方程进行失拟性检验,如表 4 所示,其中 $P > 0.1$,不显著,证明试验因素和试验指标存在显著的二次关系。

4.3.3 响应曲面分析

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对数据处理,得出耕作深度 X_1 和机车前进速度 X_2 交互作用对除草率 C 、伤苗率 S 、培土高度 H_1 试验指标影响的响应曲面,如图 15~17 所示。

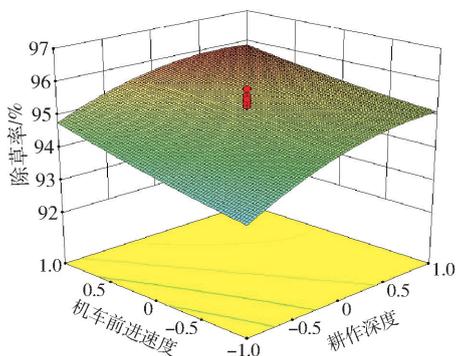


图 15 调节角为 40° 时因素对除草率的响应曲面

Fig. 15 Response surface of weeding control rate when angle adjustment was 40°

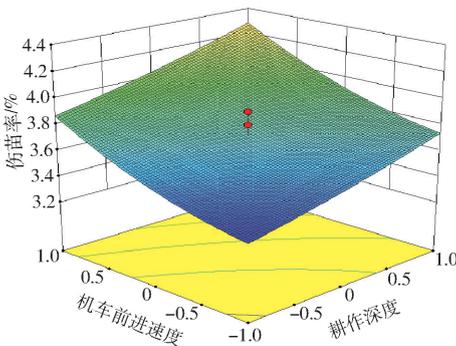


图 16 调节角为 40° 时因素对伤苗率的响应曲面

Fig. 16 Response surface of seedling injury rate when angle adjustment was 40°

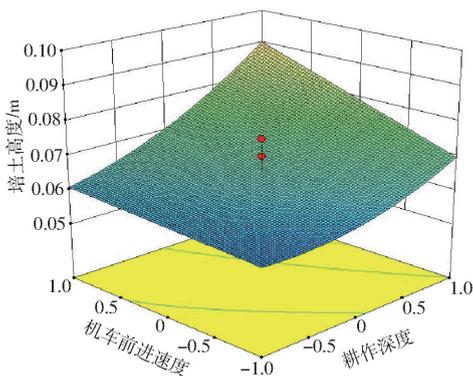


图 17 调节角为 40° 时因素对培土高度的响应曲面

Fig. 17 Response surface of ridging height when angle adjustment was 40°

当调节角为 40° 时,耕作深度和机车前进速度的交互作用对除草率的影响如图 15 所示。当耕作深度一定时,除草率 C 随着机车前进速度的增加而逐渐增加,最优机车前进速度范围为 $5.8 \sim 6.4$ km/h;当机车前进速度一定时,培土高度与耕作深度成正比,最佳的耕作深度为 $0.10 \sim 0.13$ m,其中机车前

进速度是影响除草率 C 的主要试验因素。

当调节角为 40° 时,耕作深度和机车前进速度的交互作用对伤苗率的影响如图 16 所示。当耕作深度一定时,伤苗率 S 整体随着机车前进速度的增加呈现逐渐增加的趋势,最优的机车前进速度范围为 $4.6 \sim 5.5$ km/h;当机车前进速度一定时,伤苗率 S 与耕作深度成正比,最佳的耕作深度为 $0.08 \sim 0.11$ m,耕作深度是影响伤苗率 S 的主要试验因素。

当调节角为 40° 时,耕作深度和机车前进速度的交互作用对培土高度的影响如图 17 所示。当耕作深度一定时,培土高度 H_1 整体随着机车前进速度的增加呈现逐渐增加的趋势,最优的机车前进速度范围为 $5.6 \sim 6.8$ km/h;当机车前进速度一定时,培土高度与耕作深度成正比,最佳的耕作深度为 $0.085 \sim 0.12$ m,其中耕作深度是影响培土高度 H_1 的主要试验因素。

通过对响应曲面的分析,利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化模块对 3 个回归模型进行求解,根据圆盘式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,根据 JB/T 7864—1999《旱田中耕追肥机 试验方法》选择优化约束条件为

$$\begin{cases} \max C(x_1, x_2, x_3) \\ \min S(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t. } \begin{cases} 0.08 \text{ m} \leq x_1 \leq 0.13 \text{ m} \\ 4.6 \text{ km/h} \leq x_2 \leq 6.8 \text{ km/h} \\ 20^\circ \leq x_3 \leq 60^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (18)$$

通过对目标函数 3 个参数进行优化求解,能够得到多种参数组合,考虑到实际工作要求,选择其中最优化参数组合:耕作深度为 $0.08 \sim 0.13$ m、机车前进速度为 $4.6 \sim 6.8$ km/h、调节角为 $20^\circ \sim 60^\circ$ 时,得到除草率为 $92.7\% \sim 96.2\%$,伤苗率为 $3.4\% \sim 4.5\%$ 。

根据二次正交组合试验分析得到,当耕作深度为 0.13 m、机车前进速度为 4.6 km/h、调节角为 52° 时,除草率为 95.2% ,伤苗率为 3.9% ,其结果均满足旱田中耕作业的国家标准,机具田间通过性以及作业效果良好,由于培土圆盘在机具前进作业过程中,自身也会做圆周运动,同时在培土圆盘内侧装备小犁壁,极大减少堵塞现象,提高机具通过性,而且作业时培土圆盘刮擦垄壁,增强除草效果,并且培土圆盘输出的土量较少,降低薯苗的损伤,提高马铃薯出苗前期中耕作业效果。

5 结论

(1) 设计了一种圆盘式马铃薯中耕机,对培土圆盘结构、耕深及角度调节装置进行设计,并对培土

圆盘关键参数和培土高度进行分析,结合农艺要求,设计培土圆盘直径460 mm、高度为40 mm。

(2)通过对培土圆盘的运动学分析和培土作业过程的分析,得出影响圆盘式马铃薯中耕机作业效果的主要因素为耕作深度、机车前进速度和调节角。在田间进行了圆盘式马铃薯中耕机二次旋转正交组

合试验,建立了各试验指标与影响因素间的回归数学模型,根据回归模型进行了参数优化。试验结果表明:当耕作深度为0.13 m、机车前进速度为4.6 km/h、调节角为 52° 时,除草率为95.2%,伤苗率为3.9%,满足国家标准规定的伤苗率不大于5%、除草率不小于90%的要求。

参 考 文 献

- [1] 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 马铃薯机械发展现状、存在问题及发展趋势[J]. 农机化研究,2015,37(12):258-263.
Lǚ Jinqing, Tian Zhongen, Yang Ying, et al. The development situation, existing problems and development trend of potato machinery [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015,37(12): 258-263. (in Chinese)
- [2] 杨帅,闵凡祥,高云飞,等. 新世纪中国马铃薯产业发展现状及存在问题[J]. 中国马铃薯,2014,28(5):311-316.
Yang Shuai, Min Fanxiang, Gao Yunfei, et al. Status quo and challenges of China potato industry of the 21st century[J]. Chinese Potato Journal,2014,28(5): 311-316. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 宋言明,王芬娥. 国内外马铃薯机械的发展概况[J]. 农机化研究,2008,30(9):224-227.
Song Yanming, Wang Fene. The general development of potato machinery at home and abroad[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(9): 224-227. (in Chinese)
- [5] 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):79-82,74.
Yao Baogang. Development of agricultural mechanization and modern agriculture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 79-82,74. (in Chinese)
- [6] 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.
Lǚ 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)
- [7] 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.
Lǚ Jinqing, Liu Zhifeng, Wang Pengrong, et al. Design and test of multi-function potato cultivator with drive type soil crushing and weeding[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(10):1-8. (in Chinese)
- [8] 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.
Liu Enhong, Gao Mingyu, Wu Jiaan, et al. Design and test of 3ZF-3200/3 potato cultivator with vertical rotation[J]. Modern Agriculture, 2016(9):51-52. (in Chinese)
- [9] 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.
Li Yang, Yang Deqiu, Li Jiandong, et al. Design of 1304 type potato cultivator[J]. Farm Machinery, 2011(4): 65. (in Chinese)
- [10] 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. The application and increasing yield of potato plough[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(20):49-54. (in Chinese)
- [11] 申宏波,赵海红,顾鑫,等. 马铃薯地上垄体栽培模式中不同垄距栽培试验研究[J]. 黑龙江农业科学,2012(10):39-42.
Shen Hongbo, Zhao Haihong, Gu Xin, et al. Experimental study on cultivation of potato with different ridge spacing in the field ridge culture model[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2012(10):39-42. (in Chinese)
- [12] 西涅阿科夫. 土壤耕作机械的理论和计算[M]. 北京:中国农业机械出版社,1981.
- [13] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 1版. 北京:机械工业出版社,1988.
- [14] 朱瑞祥,李成鑫,程阳,等. 被动式圆盘刀作业性能优化试验[J]. 农业工程学报,2014,30(18):47-54.
Zhu Ruixiang, Li Chengxin, Cheng Yang, et al. Performance optimization test of passive disc cutter operation [J]. Transactions of the CSAE,2014,30(18):47-54. (in Chinese)
- [15] 张守勤,马旭,左春桢,等. 圆盘开沟部件的受力及计算机模拟[J]. 农业工程学报,1995,11(4):52-56.
Zhang Shouqin, Ma Xu, Zuo Chuncheng, et al. The force and computer simulation of the disc ditching parts [J]. Transactions of the CSAE,1995,11(4):52-56. (in Chinese)
- [16] FIAZ A, DING Weimin, DING Qishuo, et al. Forces and straw cutting performance of double disc furrow opener in no-till paddy soil[J]. PLoS ONE, 2015, 10(3):e0119648.
- [17] 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/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):33-41.
Liu Xiaopeng, Zhang Qingsong, Xiao Wenli, et al. Design and test of combined tiller with disc plough in rice oil rotation

- area[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):33-41. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171204&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.004. (in Chinese)
- [18] 李宝筏,刘安东,包文育,等. 东北垄作滚动圆盘式耕播机[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5):57-59.
LI Baofa, LIU Andong, BAO Wenyu, et al. Northeast ridge rolling disc tillage planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5):57-59. (in Chinese)
- [19] 林静,李博,李宝筏,等. 阿基米德螺线型缺口圆盘破茬刀参数优化与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(6):118-124.
LIN Jing, LI Bo, LI Baofa, et al. Parameter optimization and experiment on Archimedes spiral type of gap cutting disc[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6):118-124. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140619&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.019. (in Chinese)
- [20] 赵旭,张祖立,唐萍,等. 被动式倾斜波纹圆盘破茬刀工作性能试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1):64-67.
ZHAO Xu, ZHANG Zuli, TANG Ping, et al. Behavior of passive stubble-cutting disc with oblique ripples[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1):64-67. (in Chinese)
- [21] 康建明,李树君,杨学军,等. 基于多体动力学的圆盘式开沟机虚拟仿真与功耗测试[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(1):57-63.
KANG Jianming, LI Shujun, YANG Xuejun, et al. Virtual simulation and power consumption test of disc ditching machine based on multi-body dynamics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1):57-63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170108&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.008. (in Chinese)
- [22] 庄健,贾洪雷,马云海,等. 具有滑刀式缺口的圆盘开沟器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1):83-88.
ZHUANG Jian, JIA Honglei, MA Yunhai, et al. Design and test of disc furrow opener with sliding knife notch[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1):83-88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013s116&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S1.016. (in Chinese)
- [23] 孙健. 基于 SolidWorks Motion 反求凸轮连杆组合机构模型的研究[J]. 机械研究与应用, 2019, 32(2):1-2,7.
SUN Jian. Research on the model of CAM linkage combination mechanism based on SolidWorks Motion[J]. Mechanical Research & Application, 2019, 32(2):1-2,7. (in Chinese)
- [24] CARMELO M, STEPHEN G P, PASCUAL I N, et al. Robotic path planning for non-destructive testing-a custom Matlab toolbox approach[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2016, 37:1-12.
- [25] 王全九,蔺树栋,苏李君. 马铃薯主要生长指标对有效积温响应的定量分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(3):306-316.
WANG Quanjiu, LIN Shudong, SU Lijun. Quantitative analysis of response of potato main growth index to growing degree days[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3):306-316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200335&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.03.035. (in Chinese)
- [26] 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)
- [27] 于志江. 马铃薯大垄密栽培法[J]. 农民致富之友, 2018(2):164.
- [28] 成军霞. 马铃薯田间管理及病虫害防治[J]. 河北农业科技, 2008(10):5.
- [29] 孙继英,汝甲荣,王腾,等. 不同培土方式对马铃薯生长发育及产量的影响[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(6):46-48,68.
SUN Jiying, RU Jiarong, WANG Teng, et al. Effects of different ways of growing soil on potato growth and yield[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017, 23(6):46-48,68. (in Chinese)