

甘薯双垄旋耕起垄覆膜机的设计及试验研究

王伯凯¹ 胡良龙^{1*} 王少康² 王冰¹ 于昭洋¹ 王公仆¹

(1. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014;

2. 南京市农业机械技术推广站, 南京 210001)

摘要 针对传统甘薯双垄旋耕起垄覆膜机具存在结构强度差、作业效率不高、垄体不规范等问题, 研究设计一款与 55~80 kW 大型拖拉机配套的新型甘薯双垄旋耕起垄覆膜机。采用理论设计与试验相结合的方法, 对起垄覆膜的影响因子及各部件间最优结构参数、工作参数、协调关系进行研究分析。结果表明: 甘薯种植起垄覆膜不规范、效果差主要与机具前进速度、压膜机构高度及旋耕深度有很大关系, 主次因素顺序为: 前行速度 > 压膜机构高度 > 旋耕深度, 优选组合为: 前行速度 0.3 m/s、压膜机构高度 360 mm、旋耕深度 400 mm。

关键词 农业机械; 甘薯; 起垄; 覆膜; 设计

中图分类号 S222.2

文章编号 1007-4333(2018)07-0116-10

文献标志码 A

Design and experiment of sweet potato transplanting operation machine with rotary tillage, ridging and covering film functions

WANG Bokai¹, HU Lianglong^{1*}, WANG Shaokang², WANG Bing¹, YU Zhaoyang¹, WANG Gongpu¹

(1. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization of Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China;

2. Nanjing Agricultural Machinery Technology Extending Station, Nanjing 210001, China)

Abstract In order to improve the mechanization transplanting level of sweet potato in major sweet potato producing areas and solve outstanding issues currently existed in mechanization transplanting of sweet potato including not enough ridging height, ridge density difference, low reliability, wheels going in ditches easy to cause damage and break ridges, low operating efficiency, etc. By means of combination of agricultural machinery and agronomy, a new type 1GQL-2 sweet potato transplanting compound operation machine matched with high-powered tractor of 55.13–80.85 kW was developed. The results show that: Compared with traditional segment operating machine, the machine can complete two ridges of rotary tillage, ridging, furrowing, shaping, covering film, suppressing and covering soil once, owning fewer farm working times and resulting in saving energy and reducing consumption, lightening roller compaction of farmland. This machine can solve effectively the traditional bottleneck problem, such as ridging height not enough, the ridge body of poor compactness, easy to collapse, destroyed ridge body side, non-standard river ridge distance easy to break, easy to wrinkle, not enough height and thickness, low reliability and low efficiency of the farm work problems. In conclusion, the preferred parameters are: the moving speed was 0.3 m/s, height of part of pressing film was 360 mm, and the rotary tillage depth was 400 mm. This study would provide theoretical basis and references for the innovation development and optimization of sweet potato ridging and laminating machine.

Keywords agricultural machinery; sweet potato; ridging; coverage film; design

收稿日期: 2017-05-25

基金项目: 国家现代农业甘薯产业技术体系专项资金资助(CARS-11-B-16); 中国农科院科技创新工程; 国家重点研发计划课题(2016YFD0701604); 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(14)2005); 江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(15)1033)

第一作者: 王伯凯, 助理研究员, 主要从事土下果实生产机械化技术及装备研究, E-mail: wangbokai219@163.com

通讯作者: 胡良龙, 研究员, 主要从事土下果实生产机械化技术及装备研究, E-mail: hurxbb@163.com

甘薯起垄覆膜不仅能提高生产效率,而且也有改善地温和土壤物理性状的作用^[1-2],但市场上现存起垄覆膜机具普遍存在起垄覆膜不规范、效果差的问题,不利于甘薯生产。尤其在当前我国农村劳动力普遍缺乏的情况下,研究甘薯种植起垄覆膜不规范、效果差的影响机理显得尤为重要。

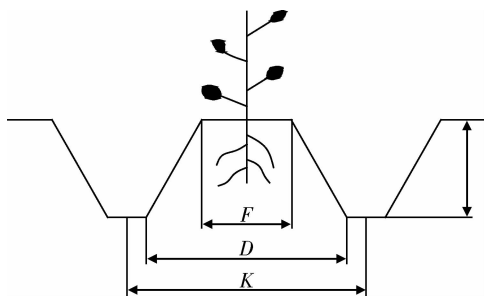
欧、美、日等国家对甘薯种植机械的研究与生产起步早、投入大、研究深,相关科研和生产都处于国际领先地位,机械化起垄覆膜装备结构复杂精巧、成熟可靠,起垄覆膜作业已经实现机械化、自动化^[3-5]。国内甘薯机械化起垄覆膜技术研发起步晚、投入小、发展慢,多为小型机械,对农机与农艺融合问题研究不足,对起垄覆膜的作业机理、影响因子还缺乏深入研究和足够的认识。现存机具普遍存在起垄覆膜不规范、效果差、农膜易破易皱、覆土不达标、结构不合理、作业效率低等问题^[6-7],不能满足我国的甘薯生产要求,也极大地制约了甘薯生产行业的发展,因此突破现有机械化起垄覆膜瓶颈是我国甘薯产业发展的关键点。

本研究通过对甘薯双垄旋耕起垄覆膜机进行理论设计与试验分析,分析起垄覆膜的影响因子,研究该机各部件间最优结构参数、工作参数及协调关系,以期阐明甘薯种植起垄覆膜不规范、效果差的影响机理。

1 甘薯垄形、覆膜特点及农艺要求

1.1 垄形

甘薯生产中常见的垄形有:半圆形垄、三角形垄和梯形垄。实际生产中梯形垄的应用最为广泛,故本研究选用梯形垄(图1),具体参数要求如下^[8]:



F 为垄顶宽; D 为垄底宽; H 为垄高; K 为垄距。

F is the size of ridge top; D is the size of ridge bottom; H is the height of ridge; K is the width of ridge.

图1 甘薯垄形结构简图

Fig. 1 Ridge shape of structure diagram of sweet potato

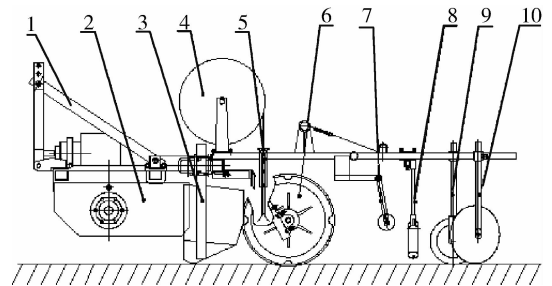
$200 \leq F \leq 240$ mm, $500 \leq D \leq 700$ mm, $250 \leq H \leq 300$ mm, $900 \leq K \leq 1\ 100$ mm, 其中, F 为垄顶宽, D 为垄底宽, H 为垄高, K 为垄距。

1.2 覆膜

按农艺要求,膜厚度为 0.008 mm,宽度 1 000 mm,需均匀地覆在垄面上,不能有漏覆和破裂现象。机械化覆膜要展得平,封得严,薄膜的机械损伤度和展平度符合要求。

2 总体结构及工作原理

甘薯双垄旋耕起垄覆膜机主要由机架 1、旋耕部件 2、起垄犁 3、滴灌带部件 4、过渡槽 5、塑形轮 6、放膜机构 7、压膜机构 8、镇压轮 9、覆土机构 10 组成(图 2),可以一次完成旋耕、起垄、覆膜、覆滴灌带、压膜、镇压、覆土等工序。



1. 机架; 2. 旋耕部件; 3. 起垄犁; 4. 滴灌带部件; 5. 过渡槽; 6. 塑形轮; 7. 放膜机构; 8. 压膜机构; 9. 镇压轮; 10. 覆土机构

1. Frame; 2. Rotary part; 3. Ridging plough; 4. Drip irrigation belt parts; 5. Tanks; 6. Sheeping wheels; 7. Part of dropping film; 8. Part of pressuring film; 9. Wheel of pressuring film; 10. Part of turning soil

图2 甘薯双垄旋耕起垄覆膜机简图

Fig. 2 Structure diagram of double ridges sweet potato rotary tillage ridging laminating machine

作业前先将整卷薄膜装在放膜机构 7 上,将整卷滴灌带装于安装架上。田间试验前,机具与拖拉机三点悬挂,配套动力 55 kW 以上,拖拉机近匀速平稳前进,拖拉机后输出轴提供动力给旋耕部件 2 对土壤进行旋耕作业,然后起垄犁 3 将土壤翻到中间形成垄体,被翻一侧形成垄沟。形成的垄体被塑形轮 6 镇压塑形,然后放膜机构 7 在拖拉机前行拉力,将滴灌带通过过渡槽 5 输送到垄顶一侧,压在薄膜上部。该机主要结构参数及工作参数见表 1。

表1 甘薯旋耕起垄覆膜机工作参数

Table 1 Working parameters of double ridges sweet potato rotary tillage ridging laminating machine

项目 Item	数值 Value	项目 Item	数值 Value
作业幅宽/mm	1 800	开沟深度/mm	60~100 可调
配套动力/kW	55~80	平均展平度/%	≥95
最宜垄距/mm	900	采光面机械损伤度/(mm/m ²)	≤15
前行速度/(m/s)	0.2~0.4	适宜土壤类型	多种类型土壤

3 关键工作部件设计

3.1 起垄犁设计

起垄犁的作用是形成垄形的初始形状,它的结构形式和外形尺寸直接决定了垄形的初始质量。

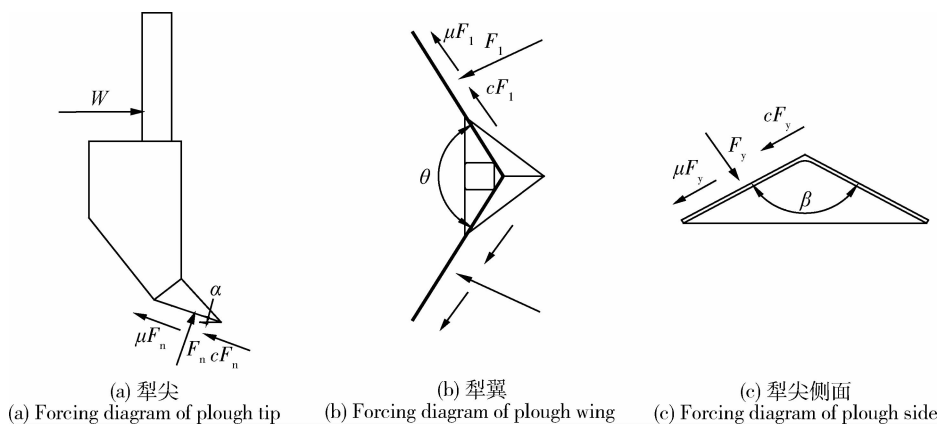
起垄犁设计原则包括:降低前行阻力,可靠性好、拢土性能好、自洁性好、对邻垄影响小及制作工艺方便等。本机由两把单翼犁和中间一把双翼犁组成,作业时左右两侧翼犁与中间犁形成左右两垄,由于左右两单翼犁在结构式上基本对称,本研究主要以中间犁为研究对象。

根据垄体的尺寸要求,先基本确定中间犁的结构尺寸。确定犁体高度 U 为 400 mm。犁宽 T 为 640 mm,在犁宽 T 确定后,犁翼角 β 的大小与犁体的前进阻力有直接关系。

由于起垄犁与土壤的相互作用涉及复杂的接触问题、高度非线性问题以及材料退化和失效问题,在与土壤相互作用的过程中,既对土壤产生剪切作用,又使土壤发生体积变化。犁体运动过程与土壤、杂物的相互作用力非常复杂,因此本研究做如下基本假设:

1) 忽略地面的不平现象,近似地认为地面为平面;2) 起垄犁前行速度恒定,其值与牵引机构的速度相同;3) 土壤中没有较大的硬石块等干扰物,土壤在耕作层内物理性质不随深度变化。

犁体总阻力主要受土壤类型、内摩擦因数、附着因数、内聚力和挖掘铲对土壤作用的纯切削阻力等因素的影响^[9-10],犁体受力分析如图 3 所示。本机由两侧单翼犁和中间的双翼犁组成,假设两单翼犁受力之和等于双翼犁,由于水平方向无运动,可知犁体水平方向作用力平衡,则运动学方程为:



W 为机具对犁体牵引力, N ; μ 为犁体与土壤摩擦因数; c 为土壤内聚力因数, N/m^2 ; α 为犁尖入土角, ($^\circ$); β 为犁尖夹角, ($^\circ$); θ 为犁翼角, ($^\circ$); F_y 为土壤对犁尖上表面切向载荷, N ; F_1 为土壤对犁面的阻力, N ; F_y 为土壤对犁尖上表面法向载荷, N ; F_n 为土壤对犁尖底法向载荷, N 。

W is the the traction force of plow body, N ; μ is rubbing factor; c is soil cohesion factor, N/m^2 ; α is buried angle, ($^\circ$); β is angle of plow tips, ($^\circ$); θ is plow blade angle, ($^\circ$); F_1 is the resistance of the soil to the plow surface, N ; F_y is soil tangential load on the tip of plough, N ; F_n is directional load of soil on the plow bottom, N 。

图3 犁体受力图

Fig. 3 Forcing diagram of the plough

$$\frac{1}{2}W = 2F_1 \sin \frac{\theta}{2} + 2(\mu + c)F_1 \cos \frac{\theta}{2} + F_n \cos \alpha + F_y \cos \frac{\beta}{2} \quad (1)$$

式中： W 为机具对犁体牵引力， N ； F_1 为土壤对犁面的阻力， N ； θ 为犁翼角， $(^\circ)$ ； μ 为犁体与土壤摩擦因数； c 为土壤内聚力因数， N/m^2 ； F_n 为土壤对犁尖底法向载荷， N ； α 为犁尖入土角， $(^\circ)$ ； β 为犁尖夹角， $(^\circ)$ ； F_y 为土壤对犁尖上表面切向载荷， N 。

因为犁体有入土角 α ，入土角的大小对犁的入土能力影响很大，因此，机具在前进过程中，犁体要在垂直方向上受力平衡，需满足条件：

$$F_n \cos \alpha + F_n(\mu + c) \sin \alpha - G_1 - G_2 = 0 \quad (2)$$

式中： G_1 为机具对犁尖牵引力， N ； G_2 为机具对犁尖下压力， N 。将式(2)带入式(1)，则犁体水平方向作用力的数学模型为：

$$\frac{1}{2}W = 2F_1 \sin \frac{\theta}{2} + 2(\mu + c)F_1 \cos \frac{\theta}{2} + \frac{(G_1 + G_2) \cos \alpha}{\cos \alpha + (\mu + c) \sin \alpha} + F_y \cos \frac{\beta}{2} \quad (3)$$

经过理论推算与多次实际试验证明：犁翼角 $\theta < 90^\circ$ 时，旋耕起垄能力下降； $\theta > 100^\circ$ 时，受土壤阻力明显过大，取犁翼角 $\theta = 100^\circ$ 。入土角 $\alpha > 8^\circ$ 时，作业阻力加大，严重时不能入土；入土角 $\alpha < 6^\circ$ 时，深松深度不足，严重时也不能入土，确定开沟犁尖的入土角 $\alpha = 7^\circ$ ，这 2 个主要设计值的选取可保证土壤在开沟铲上流动通畅，确保犁尖入土效果，对保证整个垄形的轮廓尺寸及垄形质量有重要意义。

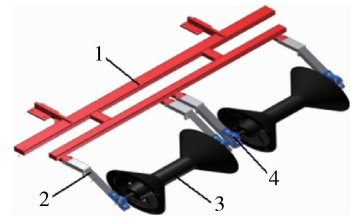
3.2 仿形镇压机构

仿形镇压机构的主要作用是对初步形成的垄形表面土壤进行压碎、压实、压紧，以减小土块空隙，有效稳固垄形，增强垄体蓄水能力和有利于土壤适度紧实，利于后期甘薯生长膨大。

仿形镇压机构主要由机架 1、铰接架 2、镇压装置 3、立式座轴承 4 等组成(图 4)。作业时，土壤受到镇压装置 3 的挤压摩擦力，将镇压装置 3 与立式座轴承 4 相连，两者之间为滚动挤压摩擦，可以大大减小前行阻力，降低功耗。镇压装置锥形垄侧镇压盘的锥形角设计为 45° ，比起垄犁侧向夹角 55° 要小，目的是使土壤有较大的形变空间，更易压实。

垄面镇压前，垄顶及垄侧可能会有较大的土块，在挤压塑形垄体时，会受到垄体的反向力，通常镇压装置都是用薄钢板焊接而成，高频作业和长时间作业过程中，受到垄侧的挤压力及不确定的恶劣条件

影响，边缘容易变形受损，因此需要一定的结构强度，但同时为了不压坏垄也要求不要太重，因此在其内侧焊接了加强板及加强杆，总质量控制在 45 kg 以内。



1. 机架；2. 铰接架；3. 镇压装置；4. 立式座轴承
1. Frame; 2. Articulated frame; 3. Suppression device; 4. Vertical bearing

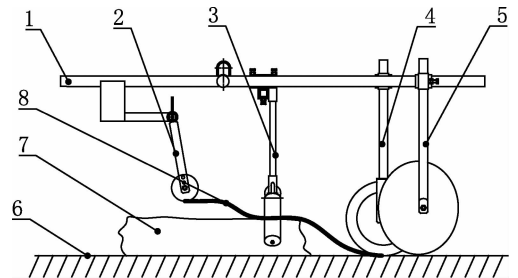
图 4 仿形镇压机构简图

Fig. 4 Structure diagram of copying body

3.3 覆膜机构

3.3.1 基本结构与原理

覆膜机构主要由机架 1、放膜机构 2、顺膜装置 3、压膜轮 4 及覆土机构 5 组成(图 5)。试验前，先将一段薄膜拉出至压膜轮 4 后方用土壤盖住，然后在拖拉机前行拉力作用下，放膜机构 2 上的膜辊自动绕轴心旋转放膜，后经顺膜装置 3 轻压在垄面上，同时，压膜轮 4 将膜压贴在垄侧，后面覆土机构 5 上的覆土圆盘将带起的土覆到垄侧面的下方，将膜压实、压紧，完成覆膜作业。



1. 机架；2. 放膜机构；3. 顺膜装置；4. 压膜轮；5. 覆土机构；6. 垄沟面；7. 垄体；8. 薄膜
1. Frame; 2. Part of dropping film; 3. Part of pressuring film; 4. Wheel of pressuring film; 5. Part of turning soil; 6. Ridge bottom; 7. Ridge; 8. Film

图 5 覆膜原理简图

Fig. 5 Schematic diagram of coverage film

3.3.2 薄膜基本特性研究

覆膜是本机重要工序。由于作业条件恶劣及薄膜轻薄易损，作业时，薄膜受力情况复杂，并且经常出现拉裂、压破、覆膜不均匀等问题。因此需要对薄膜材料特性进行分析研究。

薄膜属于柔性材料,只有面内刚度而无面外刚度,只能承受轻微拉力而不能承受压力、弯矩等作用,主要通过曲率变化来平衡外荷载,有纯拉、褶皱和松弛3种状态。

假设薄膜上的任意一点的主应力为 δ_1 和 δ_2 ($\delta_1 \geq \delta_2$),则由应变产生的分应力为 $(\delta_x, \delta_y, \zeta_{xy})$,那么通过该点的分应力可计算出其主应力方程为^[13]:

$$\delta_1 = \frac{\delta_x + \delta_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\delta_x - \delta_y)^2 - \zeta_{xy}^2} \quad (5)$$

$$\delta_2 = \frac{\delta_x + \delta_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\delta_x - \delta_y)^2 - \zeta_{xy}^2} \quad (6)$$

这样,主应力准则可表述为:

1)当 $\delta_1 > 0$ 时,薄膜处于纯拉状态;2)当 $\delta_1 > 0, \delta_2 \leq 0$ 时,薄膜处于单向褶皱状态;3)当 $\delta_1 \leq 0$ 时,薄膜处于双向褶皱状态。

通过计算薄膜基本特性并结合大量田间试验数据,研究其在不同受力状态下的拉伸、破损、褶皱程度,进而调整机架、放膜机构、顺膜装置、压膜机构及覆土机构之间的大致关系,并通过大量田间试验进一步确定上述各部件的作业参数,确保覆膜机构在作业时不会压破薄膜,并将其可靠地覆盖在垄面上。

3.3.3 压膜覆土装置设计

压膜覆土装置是影响覆膜性能的关键部件,主要由压膜轮和覆土轮组成。覆膜是本机重要工序,压膜不好会导致地膜产生褶皱、破裂等问题,从而保温保墒能力降低,进而会影响农作物产量。

压膜轮的作用是把覆盖在垄面上地膜两侧边压入已开出的膜沟内,并使地膜横向拉紧,然后由覆土轮压平。压膜轮材料通常有为金属、尼龙、橡胶等等。压膜轮还应该具有一定的轮缘宽度、合适的直径及合适的重量。其中最关键的因素是直径的大小和宽度。由于在相同的速度下,同样重量的压膜轮直径越小,镇压地膜的时间就越短,效果越差。为保证压紧压实薄膜边缘,采用实心橡胶压膜轮。总体设计应满足如下要求^[14]:

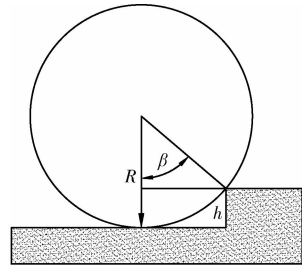
1)压膜轮工作时必须转动灵活;2)压膜轮的下压力应能调节;3)在结构上压膜轮前后及左右位置均能调节。

工作时压膜轮会将地膜和土壤下压(图6)同时又要保证压膜轮正常前进,由此可计算出压膜轮半径需满足条件:

$$R \geq \frac{h}{1 - \cos\beta} \quad (7)$$

式中: R 为压膜轮半径,mm; h 为下压深度,一般 $h \leq 15$ mm; β 为压膜轮翻转角,一般 $\beta \leq 20^\circ$ 。经过计算可得,压膜轮半径大于290 mm,经过圆整,取其最小半径为300 mm。

对于压膜轮的宽度,其尺寸应该参考开沟宽度而定。如果压膜轮宽度过大,则地膜很难被压入沟底,会严重影响覆膜的效果,但是如果压膜轮的宽度过小,又会使地膜由于所受压强过大而导致破裂,影响了保温保墒的效果^[15-17]。一般来讲,开沟器开沟宽度为30~50 mm,本设计选45 mm。



β 为压膜轮翻转角,°; R 为压膜轮半径,mm; h 为下压深度,mm。

β is the turning angle of covering film,°; R is the radius of covering film,mm; h is pressuring depth,mm.

图6 压膜轮原理简图

Fig. 6 Schematic diagram of covering film

4 田间性能试验测定

4.1 试验条件及现场

试验地点选在河南省商丘市农科院试验田,试验田为传统翻耕地(起垄)和2年固定垄茬地(修垄)。土壤为沙壤土,试验用聚氯乙烯薄膜,厚度为0.008 mm,试验分别测定起、修垄作业后的垄形尺寸和垄面平整度等数据,综合分析机具的田间适应性和可靠性。并对试验地的含水率和坚实度进行测试,确定平均含水率为25.6%,坚实度0.201 kN/cm,同时,由于在覆膜过程中风会吹动薄膜影响压膜效果,测定风速为0.5 m/s。

4.2 试验设计及结果分析

多次田间试验表明,前行速度、旋耕深度、压膜机构高度3个试验因素对起垄覆膜作业质量的影响较大,因此以这3个因素进行3因素3水平正交试验,测试上述因素对评价甘薯起垄覆膜作业质量最为重要的垄形参数合格率 Y_1 、采光面机械破损度 Y_2 及采光面展平度 Y_3 3个指标的影响。试验中,每

50 m 为 1 组,每 1 组分 50 段,每段 1 m,共 20 组。分别测试每组垄形参数合格率 Y_1 、采光面机械破损度 Y_2 及采光面展平度 Y_3 ,取平均值。试验因素与水平设计见表 2,试验方案见表 3。

1) 垄形参数合格率:

$$Y_1 = (l_1 + l_2 + \dots + l_i + \dots + l_n) / n \quad (8)$$

式中: Y_1 为垄形参数平均合格率,%; l_i ($i=1,2,\dots,20$) 为第 i 组垄形参数合格率,%; n 为总个数。结合本设计,将本试验垄合格标准定为:垄高 $H=280$ mm,垄顶宽 $F=220$ mm,垄底宽 $D=650$ mm,垄距 $K=900$ mm。

2) 采光面机械破损度^[18-20]:

$$Y_2 = 1\ 000 \sum l_i / Lb \quad (9)$$

式中: Y_2 为采光面机械破损度,mm/m²; l_i ($i=1,2,\dots,50$) 为第 i 段机械破损长度,mm,当 $l_i > 5$ 时即视为机械破损; L 为总长度,m; b 为采光面宽度平均值,m。

3) 采光面展平度:

$$Y_3 = b / G \quad (10)$$

式中: Y_3 为采光面展平度,%; b 为采光面宽度平均值,m,当 $b > 10$ 时即视为影响了采光面展平度; G 为展平后采光面宽度平均值,m。

表 2 起垄覆膜试验因素与水平

Table 2 Experimental factors and levels of ridging and covering film

水平 Level	A, 前行速度/(m/s) Operating speed	B, 旋耕深度/mm Depth of rotary tillage	C, 压膜机构高度/mm Height of pressing film
1	0.2	300	320
2	0.3	350	360
3	0.4	400	400

在多次田间试验过程中,机具作业顺畅,起垄的合格率达 98% 以上,覆膜效果良好合格率基本 95% 以上,通过研究分析传统机具起垄质量差、覆膜效果不好、作业效率低的影响因素,进一步确立各结构最优工作参数。

4.3 数据处理

4.3.1 各因素对起垄覆膜质量指标的影响

试验结果和极差分析见表 3。极差分析表明:垄形参数合格率 Y_1 各试验因素水平的较优组合为 $A_2B_3C_3$,因素主次作用顺序为:前行速度 > 旋耕深度 > 压膜机构高度;采光面机械破损度 Y_2 各试验因素水平的较优组合为 $A_1B_3C_2$,因素主次作用顺序为:压膜机构高度 > 旋耕深度 > 前行速度;采光面展平度 Y_3 各试验因素水平的较优组合为 $A_2B_3C_2$,因素主次作用顺序为:前行速度 > 压膜机构高度 > 旋耕深度。

方差分析见表 4。分析表明:对于垄形参数合格率指标,在 95% 的置信度下,前行速度影响及旋耕深度影响显著,压膜机构高度影响不太显著。对于采光面机械破损度指标,在 95% 的置信度下,压膜机构高度影响非常显著,前行速度及旋耕深度影响显著。对于采光面展平度指标,在 95% 的置信度

下,前行速度影响非常显著,压膜机构高度影响显著,旋耕深度影响不显著。

4.3.2 各因素的综合优化

由起垄覆膜试验结果可知,3 个指标的影响因素主次顺序和较优组合水平均不相同,为分析各因素对起垄覆膜质量综合影响效果,本研究采用模糊综合评价法开展综合优化,选出使 3 个指标都尽可能达到最优的参数组合。为消除 3 个评价指标量纲和数量级不同的影响,对垄形参数合格率 Y_1 、采光面机械破损度 Y_2 及采光面展平度 Y_3 进行处理,转换为指标隶属度值。评价因素中, Y_1 、 Y_3 均为偏大型指标(越大越好), Y_2 为偏小型指标(越小越好)。根据式(11)、(12)建立隶属函数,得出指标 Y_1 、 Y_3 的隶属度值 r_{1n} 、 r_{3n} ,由隶属度值构成模糊关系矩阵 $R_{r,1}$ 。

$$r_m = \frac{Y_m - Y_{i\min}}{Y_{i\max} - Y_{i\min}} \quad i = 1, 3; n = 1, 2, \dots, 9 \quad (11)$$

$$R_{r,1} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} & r_{15} & r_{16} & r_{17} & r_{18} & r_{19} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} & r_{35} & r_{36} & r_{37} & r_{38} & r_{39} \end{pmatrix} \quad (12)$$

表3 起垄覆膜试验方案及结果

Table 3 Test scheme and results of ridging and covering film

试验号 Test number	因素水平值 Factor level			垄形参数 合格率 Y ₁ / % Ridge rate	采光面机械 破损度 Y ₂ / (mm/m ²) Mechanical damage of surface	采光面 展平度 Y ₃ / % Flat of surface
	前行速度 A Operating speed	旋耕深度 B Depth of rotary tillage	压膜机构 高度 C Height of pressing film			
1	1	1	1	93.8	23	93.5
2	1	2	2	94.6	14	95.4
3	1	3	3	96.8	16	94.4
4	2	1	2	96.3	15	97.8
5	2	2	3	97.4	20	96.2
6	2	3	1	97.9	21	96.3
7	3	1	3	93.1	22	94.1
8	3	2	1	93.5	25	93.5
垄形参数合格率 Y ₁ / % Ridge rate	K ₁₁		285.6	283.2	285.5	—
	K ₁₂		291.6	285.6	285.2	—
	K ₁₃		280.8	288.6	287.7	—
	极差		10.8	5.4	2.2	—
因素主次			A ₂ B ₃ C ₃			
采光面机械破损度 Y ₂ / (mm/m ²) Mechanical damage of surface	K ₂₁		53	60	69	—
	K ₂₂		56	59	42	—
	K ₂₃		60	48	58	—
	极差		7	12	17	—
因素主次			C ₂ B ₃ A ₁			
采光面展平度 Y ₃ / % Flat of surface	K ₃₁		283.1	285.4	283.3	—
	K ₃₂		290.3	285.1	288.5	—
	K ₃₃		282.9	285.7	284.4	—
	极差		7.4	0.6	5.2	—
因素主次			A ₂ C ₂ B ₃			

注:K_{jt}为第j(j=1,2,3)列水平为t(t=1,2,3)的结果之和。

Notes:K_{jt} is the sum of the results of the column j(j=1,2,3) whose level is t(t=1,2,3).

式中:r_n为第n次试验垄形参数合格率Y₁和采光面展平度Y₃的隶属度值;Y_{in}为第n次试验指标值;Y_{imax}为指标Y_{in}的最大值;Y_{imin}为指标Y_{in}的最小值。第n次试验采光面机械破损度Y₂的隶属度值为:

$$r_n = \frac{Y_n - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} (n = 1, 2, \dots, 9)$$

式中:Y_n为第n次试验指标值;Y_{max}为指标Y_n的最大值;Y_{min}为指标Y_n的最小值。r_{2n}构成的模糊关系矩阵为:

$$\mathbf{R}_{r,2} = (r_{21} \quad r_{22} \quad r_{23} \quad r_{24} \quad r_{25} \quad r_{26} \quad r_{27} \quad r_{28} \quad r_{29}) \quad (13)$$

根据机具3个性能指标的重要性,确定本试验

表 4 起垄覆膜作业质量指标方差分析
Table 4 Variance analysis of performance indexes

指标 Index	方差来源 Source	离差平方 和 SS	自由度 DF	平均离差 平方和 MS	F 值 F value	显著水平 P Significant level
垄形参数合格率 $Y_1/\%$ Ridge rate	A	19.662	2	9.831	71.355	0.014
	B	5.482	2	2.741	19.895	0.048
	C	1.029	2	0.514	3.734	0.211
采光面机械破损度 $Y_2/(\text{mm}/\text{m}^2)$ Mechanical degree of surface	A	8.222	2	4.111	37.000	0.026
	B	20.222	2	10.111	91.000	0.011
	C	122.889	2	61.444	553.000	0.002
采光面展平度 $Y_3/\%$ Flat of surface	A	12.007	2	6.003	112.563	0.009
	B	0.060	2	0.030	0.562	0.640
	C	5.007	2	2.503	46.938	0.021

注： $P < 0.01$ ，极显著； $0.01 \leq P \leq 0.05$ ，显著； $P > 0.05$ ，不显著。

Notes: $P < 0.01$, very significance; $0.01 \leq P \leq 0.05$, significance; $P > 0.05$, no significance; SS, sum of squares of deviations; DF, degree of freedom; MS, sum of squares of average deviations.

权重 $\mathbf{P} = (0.4, 0.4, 0.2)$ 分配集, 即垄形参数合格率 Y_1 、采光面机械破损度 Y_2 及采光面展平度 Y_3 的权重分别为 0.4、0.4、0.2。由模糊矩阵 \mathbf{R}_r 与权重分配集 \mathbf{P} 确定模糊综合评价集 $\mathbf{W} = \mathbf{P}$, 综合评分结

果见表 5。将综合评分结果进行极差分析, 结果表明 (表 6), 综合影响起垄覆膜作业质量的主次因素为: $A > B > C$, 最优参数组合为 $A_2C_2B_3$, 即前行速度 0.3 m/s, 压膜机构高度 360 mm, 旋耕深度 400 mm。

表 5 起垄覆膜作业质量综合评分结果
Table 5 Results of performance indexes

试验号 Number	垄形参数合格率隶属度 r_{1n} Membership values of ridge rate	采光面机械破损度隶属度 r_{2n} Membership values of mechanical damage of surface	采光面展平度隶属度 r_{3n} Membership values of flat of surface	评分 W_x Score
1	0.146	0.254	0	0.125
2	0.313	0.917	0.442	0.580
3	0.771	0.750	0.139	0.636
4	0.667	0.833	1	0.800
5	0.896	0.417	0.628	0.651
6	1	0.333	0.651	0.664
7	0	0.250	0.139	0.128
8	0.083	0	0	0.033
9	0.229	1	0.419	0.575

表6 起垄覆膜质量影响因子综合评分极差分析
Table 6 Range analysis of comprehensive impact factors

项目 Item	前行速度 A/(m/s) Operating speed	旋耕深度 B/mm Depth of rotary tillage	压膜机构高度 C/mm Height of pressing film
K_1	1.341	1.053	0.822
K_2	2.114	1.264	1.955
K_3	0.737	1.875	1.414
极差 Range	1.377	0.822	1.133
因素主次 Sequence of factors	ACB		
最优组合 Optimal decision	$A_2C_2B_3$		

注： $K_1 \sim K_3$ 分别表示各因素各水平下综合评分的总和。

Notes: K_1, K_2 and K_3 are sum of the results of levels.

5 结论

1) 本研究对影响甘薯起垄覆膜的关键部件进行了力学分析和大量试验发现, 甘薯种植起垄覆膜不规范、效果差主要与机具前进速度、压膜机构、旋耕深度及覆土机构的最优结构参数、工作参数及协调性有很大关系。

2) 本机型采用仿垄形镇压原理, 仿垄形镇压轮用合金材料制成, 强度高、重量轻, 并且锥形角为 45° , 塑垄紧实, 有效解决了常见的垄形易塌陷、压扁问题, 提高了仿形精确度和稳定性, 但在粘土中作业效果略差, 应进一步研究粘土中起垄覆膜影响因子, 提升作业效果。

3) 为提高覆膜质量, 放膜机构、压膜机构、镇压轮及覆土机构协调工作, 作业前需调整覆土轮与前进方向夹角为 $35^\circ \sim 50^\circ$, 调整好镇压轮最低端压在垄侧面上。

4) 试验证明影响甘薯起垄覆膜作业质量的主次因素顺序为, 前行速度 > 压膜机构高度 > 旋耕深度; 其优选参数组合为, 前行速度 0.3 m/s、压膜机构高度 360 mm、旋耕深度 400 mm, 此时垄形参数合格率为 99.2%, 采光面机械破损度 10 mm/m^2 , 采光面展平度 96.8%。

参考文献 References

[1] 刘庆昌. 甘薯在我国粮食和能源安全中的重要作用[J]. 科技导报, 2004(9): 21-22
Liu Q C. The important role of food and energy security of Sweet potato in our country [J]. *Science and Technology*

Review, 2004(9): 21-22 (in Chinese)

- [2] 秦舒浩, 张俊莲, 王蒂, 蒲育林, 杜全中. 覆膜和沟垄种植模式对旱作马铃薯产量形成及水分运移的影响[J]. 应用生态报, 2011, 22(2): 389-394
Qin S H, Zhang J L, Wang D, Pu Y L, Du Q Z. Coated with groove ridge planting patterns on dry potato yield formation and the influence of moisture migration [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(2): 389-394 (in Chinese)
- [3] 何进, 李洪文, 张学敏, 李向盈, 张喜瑞. 1QL-70 型固定垄起垄机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2009, 40(7): 55-60
He J, Li H W, Zhang X M, Li W Y, Zhang X R. Design and experiment of 1QL-70 bed former for permanent raised beds [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 40(7): 55-60 (in Chinese)
- [4] 张莉, 熊波, 高娇, 李传友, 闫子双. 北京市甘薯机械化生产现状及发展建议[J]. 农业工程, 2013, 11(3): 6-9
Zhang L, Xiong B, Gao J, Li C Y, Yan Z S. Status quo and development of sweet potato production mechanization in Beijing [J]. *Agricultural Engineering*, 2013, 11(3): 6-9 (in Chinese)
- [5] 王文智, 谭静. 1GZ-60V 型山地旋耕起垄机研制与试验[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(2): 67-69
Wang W Z, Tan J. 1GZ-60V mountain development and test of rotary tilling ridger [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013, 34(2): 67-69 (in Chinese)
- [6] 王冰, 胡良龙, 胡志超, 田立佳, 计福来. 我国甘薯起垄技术及设备探讨[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(3): 353-356
Wang B, Hu L L, Hu Z C, Tian L J, Ji F L. Sweet potato ridging technology and equipment to explore in our country [J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2012, 40(3): 353-356 (in Chinese)
- [7] 胡良龙, 王冰, 王公仆, 于昭洋, 游兆延, 胡志超, 王伯凯, 高学梅. 2ZGF-2 型甘薯复式栽植机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 8-16

- Hu L L, Wang B, Wang G P, Yu Z Y, You Z Y, Hu Z C, Wang B K, Gao X M. Design and experiment of type ZZGF-2 duplex sweet potato transplanter [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(10): 8-16 (in Chinese)
- [8] 胡良龙, 田立佳, 计福来, 王冰. 甘薯生产机械化作业模式研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(5): 165-168
- Hu L L, Tian L J, Ji F L, Wang B. Research on the working mode of sweet potato production mechanization[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2014, 35(5): 165-168 (in Chinese)
- [9] 贾晶霞, 张东兴, 郝新明, 刘汉武. 基于计算机模拟的马铃薯挖掘铲参数优化与试验分析[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(5): 32-35
- Jia J X, Zhang D X, Hao X M, Liu H W. Parameters optimization and experiments of potato digger blade based on computer simulation [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2005, 10(5): 32-35 (in Chinese)
- [10] 陈书法, 李耀明, 孙星钊. 花生挖掘铲动力学分析与试验[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 59-63
- Chen S F, Li Y M, Sun X Z. Dynamic performance analysis and experiment on peanut digging shovel[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(11): 59-63 (in Chinese)
- [11] Ito M, Sakai K, Ha ta S. Damage to the surface of potatoes from collision[A]. *Transactions of the ASAE*, 1994, 37(5): 1431-1433 (in Chinese)
- [12] 俞永华, 王剑平, 应义斌. 塑料温室薄膜承载性的非线性有限元分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 181-185
- Yu Y H, Wang J P, Ying Y B. Nonlinear finite element analysis of the bearing capacity of the film in plastic greenhouse[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(9): 181-185 (in Chinese)
- [13] 谭锋, 杨庆山, 李作为. 薄膜结构分析中的褶皱判别准则及其分析方法[J]. 北京交通大学学报, 2006, 30(1): 35-39
- Tan F, Yang Q S, Li Z W. Fold in membrane structure analysis criterion and method of analysis [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2006, 30(1): 35-39 (in Chinese)
- [14] 张智泓. 田间土壤表面微形貌加工滚动触土部件与土壤相互作用及仿生几何结构[D]. 长春: 吉林大学, 2014
- Zhang Z H. Interaction of soil and rolling soil engaging components for micro-topographical preparation and their bionically[D]. Changchun: Jilin University, 2014 (in Chinese)
- [15] 魏德敏, 戴维炎. 张拉膜结构的有限元分析[J]. 力学与实践, 2005, 27(1): 46-50
- Wei D M, Dai W Y. The oretical analyses of tension membrane sructures[J]. *Mechanicd in Engineering*, 2005, 27(1): 46-50 (in Chinese)
- [16] 刘立辉, 杨然兵, 马根众, 崔功佩, 杨红光, 倪志伟, 刘志深. 滚筒式棉花覆膜装置设计与试验[J]. 农业工程, 2016, 6(6): 84-87
- Liu L H, Yang R B, Ma G Z, Cui G P, Yang H G, Ni Z W, Liu Z S. Design and experiment of roller type cotton laminating device [J]. *Agricultural Engineering*, 2016, 6(6): 84-87 (in Chinese)
- [17] 赵立军, 周福君. 2BF-1400型水稻覆膜播种机整地覆膜机构设计[J]. 农机化研究, 2010(9): 118-121
- Zhao L J, Zhou F J. Machine design of 2BF-1400 rice planter with covering plastic[J]. *Journal of Agricultural Mechanizati on Research*, 2010(9): 118-121 (in Chinese)
- [18] 常橙. 2BYP-4型覆膜播种机的设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2013(12): 90-97
- Chang C. The design of the preservation device of bright red jujube cleaning and coating equipment [J]. *Journal of Agricultural Mechanizati on Research*, 2013(12): 90-97 (in Chinese)
- [19] JB/T 7732. 2—1995 地膜覆盖机试验方法[S]. 北京: 机械科学研究院, 1995
- JB/T 7732. 2—1995 Plastic mulching machine test method [S]. Beijing: Mechanical Science Research Institute, 1995 (in Chinese)
- [20] 赵武云, 戴飞, 杨杰, 史增录, 杨正, 石林榕. 玉米全膜双垄沟直插式精量穴播机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(11): 91-97
- Zhao W Y, Dai F, Yang J, Shi Z L, Yang Z, Shi L R. Design and experiment of direct insert precision hill-seeder with corn whole plastic-film mulching on double ridges[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(11): 91-97 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春