

耙齿式残膜回收机收膜机构参数优化与试验

周新星^{1,2} 吴努² 严伟^{1,2} 游兆延¹ 施丽莉¹ 胡志超^{1*}

(1. 农业部 南京农业机械化研究所, 南京 210014;

2. 南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要 针对耙齿式残膜回收机收膜率低及漏膜严重的问题,运用 Box-Behnken 的中心组合试验方法对残膜回收机收膜机构的工作参数进行试验研究,以耙齿曲率半径、耙齿入土角度、耙齿间距为影响因素,以拾膜率、漏膜率为试验指标进行 3 因素 3 水平的响应面试验。建立响应面数学模型,分析各影响因素对作业质量的影响,同时对影响因素进行综合优化。试验结果表明:拾膜率影响显著顺序依次为耙齿曲率半径、耙齿入土角度、耙齿间距;漏膜率影响显著顺序依次为耙齿入土角度、耙齿间距、耙齿曲率半径;最优工作参数组合为,耙齿曲率半径 195 mm、耙齿入土角度 60°、耙齿间距 110 mm,对应的收膜率和漏膜率分别为 94.7%、0.75%,且各性能指标和理论优化值相对误差均小于 5%。研究结果可为耙齿式残膜回收机收膜机构的结构完善设计和作业参数优化提供依据。

关键词 耙齿式;收膜机构;数学模型;响应曲面;优化

中图分类号 S222.21

文章编号 1007-4333(2017)05-0090-09

文献标志码 A

Parameters optimization and experiment for film receiving institutions of rake teeth type residual film recovery machine

ZHOU Xinxing^{1,2}, WU Nu², YAN Wei^{1,2}, YOU Zhaoyan¹, SHI Lili¹, HU Zhichao^{1*}

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

2. College of Mechanical and Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract In order to improve the work quality of the film receiving mechanism of rake teeth type residual film recovery machine, increase film receiving mechanism in the film picking rate and reduce the leakage rate of film, Box-Behnken central composite test method was adopted to test parameters of the film receiving mechanism of residual film recovery machine by taking tooth curvature radius, buried rake angle, tooth pitch as influencing factors. And response surface experiment was conducted on three factors and three levels by using the picking up rate of film and leakage rate of film for index test as experimental index. The mathematical model of response surface was established, and the influence factors on the quality of work was analyzed, and optimized. The results showed that the order of significant level of effectors was tooth curvature radius, buried rake angle and tooth pitch; And the order of significant level of effectors on membrane leakage rate was buried teeth angle, tooth pitch, and the curvature radius of the tooth; The optimal parameter combination for the curvature radius is tooth 195 mm, harrow penetration angle 60°, tooth spacing 110 mm, corresponding film collecting rate and membrane leakage rate reached 94.7% and 0.75%, respectively. The performance and theory optimization values of relative error was less than 5%. The study provides basis for the film receiving mechanism of tooth type residual film recycling machine improvement and operating parameters optimization.

Keywords tooth type; film receiving mechanism; mathematical model; response surface; optimization

收稿日期: 2016-05-24

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503105_08)

第一作者: 周新星, 硕士研究生, E-mail: 409566849@qq.com

通讯作者: 胡志超, 研究员, 博士生导师, 主要从事农作物收获及产后加工技术装备研究, E-mail: zchu369@163.com

残膜污染问题是影响农作物覆膜技术进一步推广应用的障碍^[1-3],也是束缚我国农业现代化、机械化及制约我国农业可持续性发展的重要影响因素。因此对残膜的回收工程迫在眉睫,采用机械方式回收残膜能够解放劳动力、降低劳动成本、提高生产效率。经过几十年的不断研究,残膜回收机具的种类十分丰富,主要的类型为伸缩杆齿式、弹齿式、齿轮式、齿链式、耙齿式等^[4-5]。

伸缩杆齿式残膜回收机主要由伸缩齿、滚筒和偏心滚筒所组成。其收膜装置为伸缩杆齿,工作时滚筒内偏心安装的伸缩齿杆随着滚筒的转动扎入地表残膜,并带动残膜沿滚筒圆周方向向上运动,并随着齿杆逐渐缩入滚筒,齿杆与残膜分离,残膜被带到脱膜位置,然后由脱送叶轮从捡拾滚筒上脱下并抛送到集膜箱中。伸缩杆齿式残膜回收机结构复杂,成本高,收膜率低。

弹齿式残膜回收机收膜装置为拾膜轮,其上装有弹齿,每根齿用护板隔开,弹齿的运动轨迹由滑道控制。每根齿的上部有一块推板,其作用是协助弹齿脱膜,防止返带,并将捡起的残膜推进集膜箱内。弹齿式拾膜机结构简单,但曲线轨迹滑道制造困难。

齿轮式残膜回收机包括机架、起膜铲、输膜轮、传动装置、脱膜轮和残膜箱。其收膜装置主要是由起膜铲、输膜轮、传动装置组成。起膜铲固装在机架上、位于输膜轮的后下方,起膜铲的前端面与输膜轮齿的转动轨迹吻合。输膜轮通过轴承安装在机架前部,输膜轮通过传动装置带动脱膜轮高速转动,将捡膜弹齿上的残膜脱下并送入残膜箱内。齿轮式拾膜机结构简单,成本低,有利于整块且破损不严重的残膜回收,具有很好的应用前景。

齿链式残膜回收机由机架、捡膜滚筒、脱膜滚筒、传动机构、拨草杆、搂膜齿、集膜筐等主要部分构成。其收膜装置为捡膜滚筒和搂膜齿,捡膜滚筒由若干片指状捡拾齿在滚筒上排列组成。脱膜滚筒安装在捡拾滚筒的上方机架上,其表面均布有软毛刷脱膜齿,脱膜齿与指状捡拾齿相互交错配合,两滚筒在相互转动的过程中将残膜从捡拾齿上脱下,丢入集膜框。集膜框通过液压缸和连杆可以做前后翻转运动,将收集的残膜倒出。收膜装置在收膜过程中作业平稳顺畅,收膜率高、残留少,基本实现了捡膜、脱膜、集膜一体化作业流程。有利于

整地复式作业,且不受季节的限制,但缠膜率高,需定期清理缠膜。

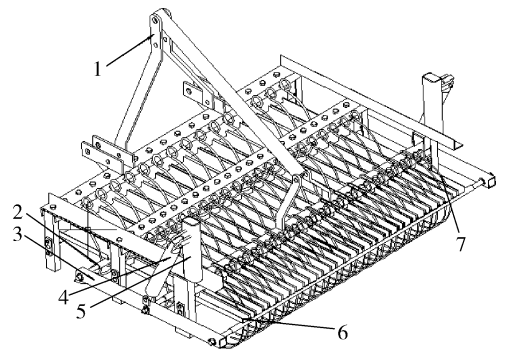
本研究以耙齿式残膜回收机收膜机构为研究对象,以耙齿拾膜率、漏膜率为主控目标,对影响残膜回收捡拾效果的关键参数进行试验研究,以期为进一步提高耙齿式残膜回收的捡拾率提供理论依据和参考。

1 试验设备与方法

1.1 耙齿式自动卸膜残膜回收机结构及工作原理

耙齿式残膜回收机包括牵引架、机架、收膜机构、脱膜机构4个部分(图1)。收膜机构为弹齿,3排弹齿等径等高排列,且直径前粗后细,间距前疏后密,前排弹齿负责松土且收一定程度的残膜,要求强度较高,后排弹齿负责收集前排遗漏的残膜,要求间距较小,另外弹齿以一定的合理入土角收膜,以便于收膜时具有良好的输送性能;脱膜机构与机架连接,脱膜机构由脱膜杆、脱膜连接架、液压装置、脱膜刮板构成。脱膜刮板设计为倒八字型折弯平板,以便于弹齿的回位,防止碰撞变形,脱膜刮板按照脱膜杆的轴向顺序安装在脱膜杆上,并且半径相同,满足平行四杆结构。脱膜杆一共有3排,前梳后密。液压装置的一边与脱膜装置铰接,另一边与整体机架铰接。

作业时,将牵引机悬挂装置中央拉杆的后端孔



1. 牵引架;2. 脱膜杆;3. 脱膜连接架;4. 液压装置;5. 机架;6. 脱膜刮板;7. 搂膜齿

1. Traction frame; 2. Film stripping rod; 3. Film stripping connecting frame; 4. Hydraulic device; 5. Frame; 6. Film stripping scraper; 7. Raking film tooth

图1 耙齿式残膜回收机结构简图

Fig. 1 Tooth type residual film recycling machine structure diagram

与收膜机中央拉杆的连接孔用销轴联接起来,用来调节机具工作时的机具前后的高度,方便拆装及下田工作。机具在前进过程中,3排耙齿水平放入土壤,土壤中的残膜被耙齿勾住并挂在耙齿上,从而达到清除土壤中残膜的目的。同时通过两边的液压缸推动脱膜连接架,使脱膜杆带动脱膜刮板转动,脱去耙齿上收集到的残膜,完成卸膜^[6]。

1.2 试验材料

试验地点选在辽宁省锦州市义县垄作花生试验田。花生种植方式为垄作,一垄双行,垄宽 900 mm,垄高 110 mm,土壤类型为沙土,表层含水率约 10%。试验对象为秋收后残膜,覆膜宽度 680 mm,厚度 0.008 mm。

1.3 试验仪器

试验仪器设备主要有福田雷沃 704 拖拉机、1MP-170A 型耙齿式自动卸膜残膜回收机、液压缸、弹齿、水分测定仪、电子天平、计算器、皮尺、若干塑料袋等。

1.4 收膜指标

试验分别测定残膜回收机不同工作参数下拾膜率 Y_1 、漏膜率 Y_2 等参数作为评价指标。试验指标计算方法如下:

$$Y_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (1)$$

$$Y_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (2)$$

式中: P 为机具拾膜率,%; Q 为机具的漏膜率,%; m_1 、 m_2 、 m_3 分别为脱膜机构脱下来残膜的质量、耙齿捡拾过程中遗漏残膜的质量、地底未捡拾到残膜的质量,g。

1.5 试验设计及方法

在单因素试验研究的基础上,依据中心组合设计理论,采用 3 因素 3 水平 2 次回归正交试验设计方案,以拾膜率 Y_1 、漏膜率 Y_2 等参数作为响应值,对耙齿曲率半径 X_1 、耙齿入土角度 X_2 、耙齿间距 X_3 等因素开展响应面试验。试验因素及水平见表 1^[7]。

表 1 响应面试验因素及水平

Table 1 Factors and levels of response surface test

试验水平 Level	因素 Factors		
	耙齿曲率半径 X_1 /mm Tooth curvature radius	耙齿入土角度 X_2 /($^{\circ}$) Tooth penetration angle	耙齿间距 X_3 /mm Tooth spacing
-1	155	33	60
0	195	56	100
1	235	79	140

按照 NY/T 1227—2006《残地膜回收机作业质量》,确定好测试点的位置及区域大小^[8]。机具作业幅宽可收 2 垄地膜,机具以 1.2 m/s 的速度匀速行驶 50 m 为 1 次试验过程,在各因素交互作用下,每个试验做 3 次,取平均值。收集地表遗漏地膜,地底未收地膜以及机具捡拾到的地膜,3 方取样,清土并测出残膜质量进行分析。

1.6 数据分析及处理

试验采用 Design Expert Version 8.0.6 软件(Stat-Ease Inc., USA)进行二次多项式回归分析,运用响应曲面法对各因素相关性和交互效应的规律进行分析^[9-12]。

2 试验结果

2.1 试验设计方案及结果

根据 Box-Benhnken 试验方案进行 3 因素 3 水平响应面分析试验,共有 17 个试验点,其中包含 12 个分析因子,5 个零点估计误差。表 2 为响应面试验设计与试验结果。

2.2 响应面模型及显著性检验

针对试验中的拾膜率和漏膜率(表 2),采用 Design Expert 8.0.6 软件开展多元回归拟合分析,建立拾膜率 Y_1 、漏膜率 Y_2 等对耙齿曲率半径 X_1 、耙齿入土角度 X_2 、耙齿间距 X_3 3 个自变量的 2 次多

项式响应面回归模型：

$$Y_1 = -189.16 + 2.22X_1 + 1.14X_2 + 0.69X_3 + 3.26 \times 10^{-4} X_1 X_2 + 6.25 \times 10^{-5} X_1 X_3 + 5.43 \times 10^{-5} X_2 X_3 - 5.83 \times 10^{-3} X_1^2 - 0.01X_2^2 - 3.30 \times 10^{-3} X_3^2 \quad (3)$$

$$Y_2 = 117.74 - 0.79X_1 - 0.66X_2 - 0.40X_3 + 2.99 \times 10^{-4} X_1 X_2 + 1.25 \times 10^{-4} X_1 X_3 - 4.08 \times 10^{-4} X_2 X_3 + 2.03 \times 10^{-3} X_1^2 + 5.15 \times 10^{-3} X_2^2 - 1.78 \times 10^{-3} X_3^2 \quad (4)$$

式中： X_1 为耙齿曲率半径； X_2 为耙齿入土角度； X_3 为耙齿间距； Y_1 为拾膜率、 Y_2 为漏膜率。对 3 个回归方程进行方差分析^[13-16]，分析结果见表 3。拾膜率 Y_1 、漏膜率 Y_2 的响应面模型 $P < 0.000 1$ ，表明回归模型高度显著；失拟项 $P > 0.05$ （分别为 0.174 2、0.593 7），表明回归方程拟合度高；其决定系数 R^2 值

分别为 0.997 0、0.998 0，表明 99% 的响应值均可以由这个模型解释。从而该模型可以用来优化耙齿式拾膜机收膜机构工作参数。

$P < 0.01$ 表明参数对模型影响极显著， $P < 0.05$ 表明参数对模型影响显著。拾膜率 Y_1 模型中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 ($P < 0.01$) 6 个回归项影响极显著；漏膜率 Y_2 模型中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 ($P < 0.01$) 6 个回归项影响极显著， $X_1 X_2$ 、 $X_2 X_3$ ($P < 0.05$) 对模型影响显著。模型 Y_1 中 $X_1 X_2$ 、 $X_1 X_3$ 、 $X_2 X_3$ ($P > 0.05$) 对试验影响不显著；模型 Y_2 中 $X_1 X_3$ ($P > 0.05$) 对试验影响不显著。剔除模型不显著回归项，对模型 Y_1 、 Y_2 进行优化，如式(5)~(6)所示，分析优化后的模型，可知模型 Y_1 的 $P < 0.000 1$ 、失拟项 P 为 0.301 3，模型 Y_2 的 $P < 0.000 1$ 、失拟项 P 为 0.413 7，表明优化模型可靠。

表 2 试验设计方案及响应值结果

Table 2 Experiment design and response values

试验号 No.	因素水平 Level			响应值 Response value	
	耙齿曲率半径 X_1 /mm Tooth curvature radius	耙齿入土 角度 X_2 /($^\circ$) Tooth penetration angle	耙齿间距 X_3 /mm Tooth spacing	拾膜率 Y_1 / % Film picking up rate	漏膜率 Y_2 / % Film leakage rate
1	0	0	0	94.5	1.2
2	-1	0	1	83.2	4.5
3	-1	0	-1	79.3	7.8
4	0	1	1	86.2	3.2
5	0	0	0	93.8	1.3
6	1	-1	0	77.2	9.3
7	1	1	0	80.2	7.1
8	0	0	0	94.7	0.9
9	0	-1	1	85.1	6.8
10	1	0	-1	76.3	9.5
11	0	-1	-1	81.2	9.4
12	-1	-1	0	79.6	7.6
13	0	1	-1	82.1	7.3
14	0	0	0	94.9	0.8
15	0	0	0	94.3	1.3
16	1	0	1	80.6	7.0
17	-1	1	0	81.4	4.3

表3 回归方程方差分析

Table 3 Variance analysis of regression equation

方差来源 Source	Y ₁ 拾膜率/% Film picking up the rate				Y ₂ 漏膜率/% Film leakage rate			
	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	F 值 F value	显著水平 P Significant level	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	F 值 F value	显著水平 P Significant level
模型 Model	725.15	9	256.72	<0.000 1	168.46	9	388.23	<0.000 1
X ₁	10.58	1	33.71	0.000 7	9.46	1	196.23	<0.000 1
X ₂	5.78	1	18.42	0.003 6	15.68	1	325.21	<0.000 1
X ₃	32.81	1	104.52	<0.000 1	19.53	1	405.09	<0.000 1
X ₁ X ₂	0.36	1	1.15	0.319 7	0.30	1	6.27	0.040 7
X ₁ X ₃	0.040	1	0.13	0.731 6	0.16	1	3.32	0.111 3
X ₂ X ₃	1.00×10 ⁻²	1	0.03	0.863 4	0.56	1	11.67	0.011 2
X ₁ ²	365.74	1	1165.3	<0.000 1	44.47	1	922.42	<0.000 1
X ₂ ²	128.30	1	408.77	<0.000 1	31.27	1	648.48	<0.000 1
X ₃ ²	116.94	1	372.59	<0.000 1	34.20	1	709.33	<0.000 1
残差 Residual	2.20	7			0.34	7		
失拟 Lack of fit	1.49	3	2.78	0.174 2	0.12	3	0.71	0.593 7
误差 Pure error	0.71	4			0.22	4		
总和 Total	727.35	16			168.80	16		

$$Y_1 = -194.24 + 2.24X_1 + 1.21X_2 + 0.71X_3 - 5.83 \times 10^{-3} X_1^2 - 0.01X_2^2 - 3.29 \times 10^{-3} X_3^2 \quad (5)$$

$$Y_2 = 115.30 - 0.78X_1 - 0.66X_2 - 0.37X_3 + 2.99 \times 10^{-4} X_1X_2 - 4.08 \times 10^{-4} X_2X_3 + 2.03 \times 10^{-3} X_1^2 + 5.15 \times 10^{-3} X_2^2 - 1.78 \times 10^{-3} X_3^2 \quad (6)$$

2.3 各单因素对性能影响效应分析

各单因素对模型的性能影响大小可以通过贡献

率 K 值进行比较, K 值的计算如式(7)~式(8)所示。各因素对峰值拾膜率贡献率大小排序为: 耙齿曲率半径 > 耙齿入土角度 > 耙齿间距; 各因素对峰值漏膜率贡献率大小排序为: 耙齿入土角度 > 耙齿间距 > 耙齿曲率半径, 分析结果如表 4 所示。

$$\delta = \begin{cases} 0 & F \leq 1 \\ 1 - \frac{1}{F} & F > 1 \end{cases} \quad (7)$$

表4 各因素贡献率分析

Table 4 Importance of the effects of factors on response functions

性能指标 Performance index	各因素贡献率 Factors contribution rate			贡献率顺序 Sort contribution rate
	耙齿曲率半径 X ₁ Tooth curvature radius	耙齿入土角度 X ₂ Tooth penetration angle	耙齿间距 X ₃ Tooth spacing	
拾膜率 Y ₁ / % Film picking up rate	2.03	2.01	1.99	X ₁ > X ₂ > X ₃
漏膜率 Y ₂ / % Film leakage rate	2.76	2.87	2.80	X ₂ > X ₃ > X ₁

$$K_{x_j} = \delta_{x_j} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^s \delta_{x_i x_j} + \delta_{x_j^2} \quad j = 1, 2, 3; i \neq j \quad (8)$$

式中： F 值为回归方程中各回归项的 F 值； δ 值为回归项对 F 值的考核值； K 值为各回归项贡献率值。

2.4 交互因素对性能影响规律分析

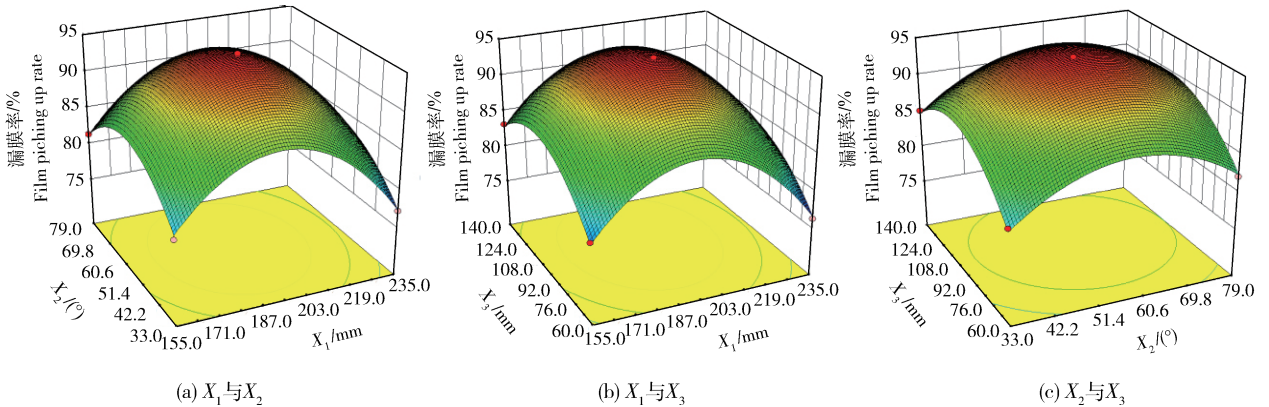
根据回归方程分析结果，考察耙齿曲率半径 X_1 、耙齿入土角度 X_2 、耙齿间距 X_3 交互因素对拾膜率 Y_1 、漏膜率 Y_2 性能指标的影响，并利用 Design-Expert 8.0.6 软件绘制响应面图。

2.4.1 交互因素对拾膜率的影响规律分析

耙齿间距 X_3 位于中心水平(100 mm)时，耙齿曲率半径 X_1 与耙齿入土角度 X_2 对拾膜率 Y_1 的交互作用见图 2(a)，可见适当减小耙齿曲率半径和减小耙齿入土角度有助于提高拾膜率；耙齿入土角度 X_2 位于中心水平(56)时，耙齿曲率半径 X_1 与耙齿

间距 X_3 对拾膜率 Y_1 交互作用见图 2(b)，可见适当减小耙齿曲率半径和增加耙齿间距有助于提高拾膜率；耙齿曲率半径 X_1 位于中心水平(195 mm)时，耙齿入土角度 X_2 与耙齿间距 X_3 对拾膜率 Y_1 交互作用见图 2(c)，可见减小耙齿入土角度和增加耙齿间距有助于提高拾膜率。

从图 2 可知，响应面变化规律与表 3 分析计算结果及模型(5)吻合，总体影响趋势为耙齿曲率半径越小、耙齿入土角度越小、耙齿间距越大，则拾膜率越高，反之则拾膜率越低。其主要原因为：在一定条件下，耙齿曲率半径减小时，残膜滚落性能越好，更易于搂起残膜，减少壅土^[17-18]；在一定条件下，耙齿入土角度减小时，更易于土壤中的捡拾物沿着弹齿上移至地表；在一定条件下，耙齿间距增大时，可以减少相邻耙齿间壅土情况，增加弹齿使用寿命^[19-21]。



(a) X_1 与 X_2 (b) X_1 与 X_3 (c) X_2 与 X_3
 X_1 , 耙齿曲率半径; X_2 , 耙齿入土角度; X_3 , 耙齿间距。下图同。
 X_1 , Tooth curvature radius; X_2 , Tooth penetration angle; X_3 , Tooth spacing. The same below.

图 2 交互因素对拾膜率的影响

Fig. 2 Effects of interactive factors on film picking up rate

2.4.2 交互因素对漏膜率的影响规律分析

交互因素对漏膜率响应面曲线如图 3 所示。耙齿间距 X_3 位于中心水平(100 mm)时，耙齿曲率半径 X_1 与耙齿入土角度 X_2 对漏膜率 Y_2 交互作用见图 3(a)，可见减小耙齿曲率半径和增大耙齿入土角度有助于降低漏膜率；耙齿入土角度 X_2 位于中心水平(56)时，耙齿曲率半径 X_1 与耙齿间距 X_3 对漏膜率 Y_2 交互作用见图 3(b)，可见减小耙齿曲率半径和减小耙齿间距有助于降低漏膜率；耙齿曲率半径 X_1 位于中心水平(195 mm)时，耙齿入土角度 X_2 与耙齿间距 X_3 对漏膜率 Y_2 交互作用见图 3(c)，可见增大

耙齿入土角度和减小耙齿间距有助于降低漏膜率。

由图 3 可知，响应面变化规律与表 3 分析计算结果及模型(6)吻合，总体影响趋势为耙齿曲率半径越小、耙齿入土角度越大、耙齿间距越小，则漏膜率越低，反之漏膜率高。其主要原因为：耙齿曲率半径减小时，残膜滚落性能越好^[22]，且单个弹齿间隙变小，遗漏的残膜越少；当耙齿入土角度增大时，残膜难以沿着弹齿上移至地表，基本伴随着耙齿在土壤中进行，所以地表遗漏的残膜极少；在一定条件下，耙齿间距减小时，耙齿间漏膜率减小，单个耙齿拾膜率增加。

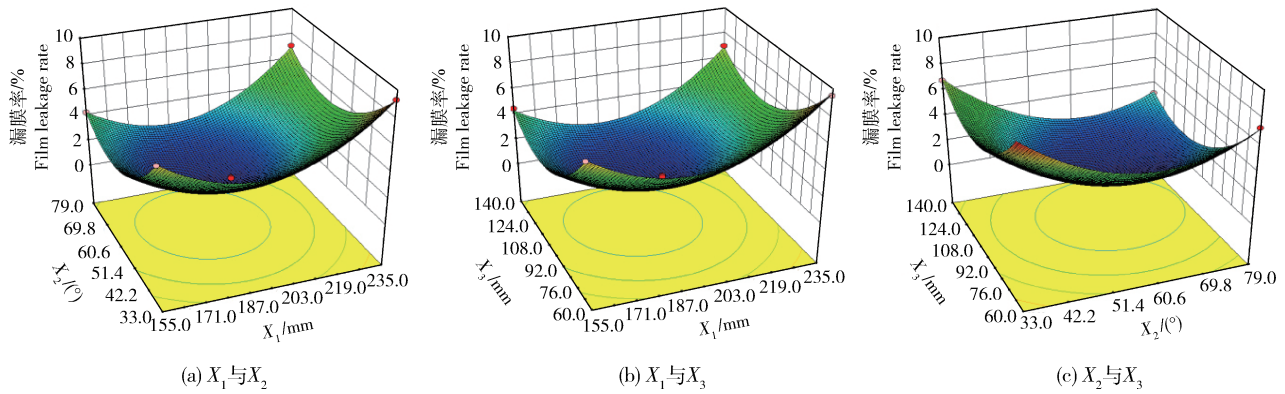


图3 交互因素对漏膜率的影响

Fig. 3 Effects of interactive factors on film leakage rate

3 参数优化与验证

3.1 参数优化

为了达到最佳收膜效果,根据交互因素对拾膜率及漏膜率影响效应分析可知:要获得较高拾膜率,就必须要求耙齿曲率半径小、耙齿入土角度小、耙齿间距大;要获得较低漏膜率,就必须要求耙齿曲率半径小、耙齿入土角度大、耙齿间距小。由于各因素对试验指标的影响不尽相同,因此,必须进行多目标优化,寻求满足高收膜率的最好参数组合。

针对拾膜率高、漏膜率低的收膜作业要求,进行收膜机构工作参数优化。目标函数为: $Y_f \rightarrow Y_{f_{\min}} > 0$,其中 $f=1,2$;约束条件为: $-1 \leq X_m \leq 1$,其中 $m=1,2,3$ 。采用 Design-Expert 软件对各参数进行优化求

解,得到各因素最优工作参数,当耙齿曲率半径为 192.62 mm、耙齿入土角度为 57.78° 、耙齿间距为 107.68 mm 时,此时拾膜率为 94.7%、漏膜率为 0.75%。

3.2 试验验证

为了验证模型预测的准确性,采用上述参数在辽宁省锦州市义县垄作花生试验田进行 3 次重复试验。考虑试验的可行性,将耙齿曲率半径为 195 mm、耙齿入土角度为 60° 、耙齿间距为 110 mm,在此优化方案下进行试验,结果如表 5 所示。分析结果可知,各性能指标试验值与理论优化值均比较吻合,试验值相对误差均小于 5%,因此,参数优化模型可靠。在收膜作业时,采用该优化参数组合,耙齿曲率半径为 195 mm、耙齿入土角度为 60° 、耙齿间距为 110 mm。

表5 优化条件下各响应量实测值

Table 5 Experimental values of response at optimal condition %

试验序号 Test number	拾膜率 Film picking up rate	漏膜率 Film leakage rate
1	94.2	0.79
2	92.8	0.74
3	93.9	0.82
平均值 Average	93.6	0.78
相对误差 Relative error	1.16	4.44

4 结论

1) 采用 Box-Behnken 中心组合试验方法对耙齿曲率半径、耙齿入土角度、耙齿间距对拾膜率、漏

膜率的影响趋势进行了分析并建立优化模型,通过试验对模型和优化结果进行准确性验证。收膜机构最优工作参数组合为,耙齿曲率半径 195 mm、耙齿入土角度 60° 、耙齿间距 110 mm,该优化条件下拾

膜率为93.6%、漏膜率0.78%,理论优化结果为拾膜率94.7%、漏膜率0.75%,其相对误差均小于5%,表明模型可靠性较高。

2)收膜机构各因素对拾膜率影响显著顺序依次为耙齿曲率半径、耙齿入土角度、耙齿间距;各因素对漏膜率影响显著顺序依次为耙齿入土角度、耙齿间距、耙齿曲率半径。

本研究对耙齿式收膜机构工作参数开展多因素分析,研究各因素对拾膜率、漏膜率的影响。针对耙齿仅仅考虑了耙齿形状及排列分布的工作参数,对机具的行进速度、弹齿的工作寿命及收膜机构与脱膜机构间的组合设计等因素未全面开展相应试验,进一步应考虑在上述因素的基础上对收膜机构进行探讨。

参考文献 References

- [1] 侯书林,胡三媛,孔建铭,张惠友,那明君,董欣.国内残膜回收机研究的现状[J].农业工程学报,2002,18(3):186-190
Hou S L, Hu S Y, Kong J M, Zhang H Y, Na M Z, Dong X. Present situation of research on plastic film residue collector in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, 18(3): 186-190 (in Chinese)
- [2] 周新星,胡志超,严伟,游兆延,吴努.国内残膜回收机脱膜装置的研究现状[J].农机化研究,2016(11):263-268
Zhou X X, Hu Z C, Yan W, You Z Y, Wu N. Research status of domestic residual film recovery machine to take off the film device[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2016(11): 263-268 (in Chinese)
- [3] 严昌荣,梅旭荣,何文清,郑盛华.农用地膜残留污染的现状与防治[J].农业工程学报,2006,22(11):269-272
Yan C R, Mei X R, He W Q, Zhen S H. Current situation and prevention of residual contamination of agricultural plastic film [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(11): 269-272 (in Chinese)
- [4] 严伟,胡志超,周新星,徐弘博,游兆延,吴努.残膜回收机拾膜机构研究现状及展望[J].农机化研究,2016(10):258-262
Yan W, Hu Z C, Zhou X X, Xu H B, You Z Y, Wu N. Present situation of research and expectation on picking-up mechanism of plastic film collectors [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016 (10): 258-262 (in Chinese)
- [5] 张东兴.农用残膜的回收问题[J].中国农业大学学报,1998,3(6):103-106
Zhang D X. Study on collection of used plastic film in fields[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1998, 3(6): 103-106 (in Chinese)
- [6] 李斌.后置链齿耙式残膜回收机工作机理研究[D].石河子:石

河子大学,2013

- Li B. Research on residual film recycling mechanism of rear chain harrow machine[D]. Shihezi: Shihezi University, 2013 (in Chinese)
- [7] 于昭洋,胡志超,王海鸥,彭宝良,谢焕雄,吴峰.大蒜果秧分离机构参数优化及试验[J].农业工程学报,2015,31(1):40-46
Yu Z Y, Hu Z C, Wang H O, Peng B L, Xie H X, Wu F. Parameters optimization and experiment of garlic picking mechanism [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(1): 40-46 (in Chinese)
- [8] GB/T 25412—2010 残地膜回收机[S].北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2010
GB/T 25412—2010 The residual plastic recycling machine[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision Inspection and Quarantine of People's Republic of China, 2010 (in Chinese)
- [9] 丁素明,薛新宇,方金豹,孙竹,蔡晨,周良富,秦维彩.手持式风送授粉机工作参数优化与试验[J].农业工程学报,2015,31(8):68-75
Ding S M, Xue X Y, Fang J B, Sun Z, Cai C, Zhou L F, Qin W C. Parameter optimization and experiment of air-assisted pollination device[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(8): 68-75 (in Chinese)
- [10] 丁素明,薛新宇,蔡晨,崔飞龙,陈晨.梨树枝条切割装置刀片参数优化与试验[J].农业工程学报,2015(S2):75-82
Ding S M, Xue X Y, Cai C, Cui L F, Chen C. Optimization and experiment of blade parameter for pear branches cutting device [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015(S2): 75-82 (in Chinese)
- [11] 白圣男.弹齿式收膜机拾膜装置的试验研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2006
Bai S N. Experimental research on the picking up plastic mulch device of spring-tooth collecting [D]. Harbin: Journal of Northeast Agricultural University, 2006 (in Chinese)
- [12] 王松林,高爱民,王波,戴飞,韩正晟.旱地全膜双垄沟残膜回收机关键作业参数试验分析[J].湖南农业大学学报:自然科学版,2014,40(6):660-664
Wang S L, Gao A M, Wang P, Dai F, Han Z S. Analysis of key operating parameters on retrieving machine for film residue from whole plastic film mulching double ridges in arid land[J]. *Journal of Hunan Agricultural University: Natural Sciences*, 2014, 40(6): 660-664 (in Chinese)
- [13] 彭海滨.正交试验设计与数据分析方法[J].计量与测试技术,2009,36(12):39-40
Peng H B. Orthogonal trial design and data analysis methods [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2009, 36(12): 39-40 (in Chinese)
- [14] 陈茂学,于金凤,韩祥铭.研究生高级生物统计课程体系的探索与实践[J].中国科教创新导刊,2009(22):61
Chen M X, Yu J F, Han X M. Graduate students advanced biometric exploration and practice of curriculum system[J].

- China Education Innovation Herald*, 2009(22): 61 (in Chinese)
- [15] 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert、SPSS 应用[M]. 北京:科学出版社,2010
Xu X H, He M Z. *Experiment Design and Application of Design-Expert and SPSS*[M]. Beijing: Science Press, 2010
- [16] 李革,聂新富. 弹齿式搂膜机弹齿的设计要点[J]. 新疆农机化, 1995(4):34-35
Li G, Nie X F. Design points of the elastic tooth of the elastic tooth type [J]. *Xinjiang Agricultural Mechanization*, 1995(4):34-35 (in Chinese)
- [17] 张佳. 驱动耙残膜回收联合作业机的设计及试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2013
Zhang J. Design and experimental study of the joint operation machine for the recovery of the trailing residual film [D]. Urumchi: Xinjiang Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [18] 王学农,史建新,郭俊先,陈发. 悬挂式棉秆粉碎还田搂膜机搂膜机构的设计与试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 135-140
Wang X N, Shi J X, Guo J X, Chen F. Experimental study and design on film raking mechanism of hanging film raker with cotton-stalk crushing and returning to field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2008, 24(1):135-140 (in Chinese)
- [19] 喻启忠,刘云. 4LM-2 型立秆搂膜机的研制[J]. 新疆农机化, 2013(2):12
Yu Q Z, Liu Y. Development of 4LM-2 type vertical stalk film machine [J]. *Xinjiang Agricultural Mechanization*, 2013(2): 12 (in Chinese)
- [20] Parish R L. An automated machine for remove of plastic mulch [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1998, 42(1): 49-51
- [21] 穆道欢,杨宛章. 残膜回收机弹齿式捡拾机构的设计及试验研究[J]. 农机化研究, 2015(11):91-94
Mu D H, Yang W Z. Design and experimental study of machine spring tooth picking mechanism of residual film recovery [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015(11): 91-94 (in Chinese)
- [22] 李明洋. 分区式残膜回收机的设计与试验研究[D]. 阿拉尔市:塔里木大学,2015
Li M Y. Design and experimental study of the partition type residual film recycling machine [D]. Aral: Tarim University, 2015 (in Chinese)

责任编辑:刘迎春