

双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化

戴飞¹ 赵武云¹ 马明义² 王久鑫¹ 石林榕¹ 马军民¹

(1. 甘肃农业大学工学院, 兰州 730070; 2. 甘肃洮河拖拉机制造有限公司, 定西 730500)

摘要: 为进一步改进双垄耕作施肥喷药覆膜机工作性能,以作业机前进速度、土壤升运器速度、覆土侧流槽角和覆土直流槽角为自变量,采光面地膜机械破损率为响应值,依照 Box - Behnken 试验设计原理,采用四因素三水平响应面分析方法,建立了各因素与采光面地膜机械破损率之间的数学模型,并对各因素及其交互作用进行分析。试验结果表明:4 个因素对采光面地膜机械破损率影响的主次顺序为:土壤升运器速度、作业机前进速度、覆土侧流槽角和覆土直流槽角;作业机最佳工作参数为:土壤升运器速度 0.67 m/s、作业机前进速度 0.70 m/s、覆土侧流槽角 75°和覆土直流槽角 48°。验证试验表明,采光面地膜机械破损率均值为 0.216%,较优化前有显著下降。

关键词: 全膜双垄沟; 联合作业机; 参数优化

中图分类号: S223.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)01-0083-08

Parameters Optimization of Operation Machine for Tillage-fertilization and Spraying-filming on Double Ridges

Dai Fei¹ Zhao Wuyun¹ Ma Mingyi² Wang Jiuxin¹ Shi Linrong¹ Ma Junmin¹

(1. School of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China

2. Gansu Tao River Tractor Manufacturing Co., Ltd., Dingxi 730500, China)

Abstract: The furrow sowing with whole plastic-film mulching on double ridges had been widely used in the arid region of northwest China, because it could resist drought and increase production. So the mechanical plowing and filming on seedbed was an inevitable trend in farming. For further study of the improved working performance of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges, the Box - Behnken experimental design with four factors and three levels was performed, parameters such as operation machine speed, soil elevator speed, lateral flow angle of covering unit and straight flow angle of covering unit were selected as independent variables, which would influence mechanical damage rate of daylighting mulch. The mathematical model was established, then the effects of various parameters and their interactions were analyzed as well. The test results showed that effects order of four parameters on mechanical damage rate of daylighting mulch were as follows: soil elevator speed, operation machine speed, lateral flow angle of soil covering unit and straight flow angle of soil covering unit. The optimal working parameters were combined operation machine speed of 0.67 m/s, soil elevator speed of 0.70 m/s, lateral flow angle of soil covering unit of 75° and straight flow angle of soil covering unit of 48°. Confirmatory tests showed that the average value of mechanical damage rate of daylighting mulch was 0.216%, which compared with the optimization before, had dropped significantly, and also avoided mechanical damage of daylighting mulch under this condition.

Key words: whole plastic-film mulching on double ridges; combined operation machine; parameters optimization

收稿日期: 2015-01-10 修回日期: 2015-01-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51405086)、甘肃省科技重大专项计划项目(143NKDJ018)和甘肃省农业科学院科技创新工程学科团队项目(2014GAAS01)

作者简介: 戴飞(1987—),男,讲师,主要从事旱区农业工程技术与装备研究,E-mail: daifei@gsau.edu.cn

通信作者: 赵武云(1966—),男,教授,博士,主要从事旱区农业工程技术与装备研究,E-mail: zhaowuy@gsau.edu.cn

引言

旱地全膜双垄沟播技术是针对我国西北地区旱作农业的一项突破性创新技术,主要针对玉米生产种植提出,要求先完成大小垄体、垄沟种床的耕整、覆膜准备,后在小垄垄沟内完成膜上播种^[1-2]。实践证明,全膜双垄沟播技术增产效果显著^[3-8]。

结合农机装备完成起垄、施肥、喷药、覆膜联合作业的播前种床准备是实现全膜双垄沟大田作物生产全程机械化的重要环节,而种床覆膜铺设过程中产生的地膜机械破损更是影响后续覆盖抑蒸、膜面集雨、膜上低损伤播种及增产效果的最关键因素^[9]。

针对全膜双垄沟播技术所配套的农机装备研发还不够深入,为此,自行研制了双垄耕作施肥喷药覆膜机^[10]。本文以改进的二代样机为依托,并在此基础上进一步提高作业机低损伤覆膜作业性能,以该机各工作参数作为自变量,通过试验测得不同因素水平组合条件下覆膜种床采光面机械破损率,采用响应面分析法确定各因素及其交互作用对采光面机

械破损率的影响和获取最优控制变量组合,以达到最佳起垄施肥喷药覆膜联合作业效果。

1 工作过程分析与关键参数选取

1.1 结构组成及作业过程

双垄耕作施肥喷药覆膜机主要由悬挂架、机架、喷药装置、土壤升运器、旋耕刀组、取土铲、中置镇压轮、侧置镇压轮、挂膜装置、覆土侧流槽、覆土直流槽、肥料箱、磁力泵等组成,如图1所示。作业机在田间作业时采用四轮拖拉机后置悬挂方式,通过动力输入变速箱传动刀轴带动旋耕刀组将种床土壤旋耕疏松,取土铲随着整机前进完成开沟起垄,肥料箱下置排肥器转动完成小垄两侧沟内施肥,并在喷药装置的作用下向大、小垄面进行药剂喷施,地膜同时随挂膜装置的转动前行覆膜。作业机在旋耕刀组和取土铲的共同作用下将土壤送至升运器并后输至覆土装置,覆土装置可将土壤分为两条路径,并在覆土侧流槽、覆土直流槽及中置、侧置镇压轮的共同配合下完成两侧膜边、垄沟内的覆土镇压。

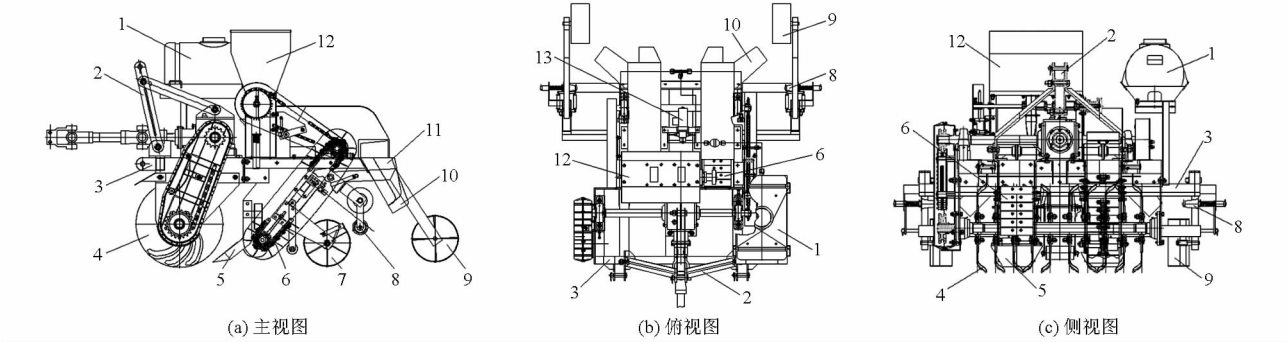


图1 双垄耕作施肥喷药覆膜机结构简图

Fig.1 Structure diagram of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges

1. 喷药装置 2. 悬挂架 3. 机架 4. 旋耕刀组 5. 取土铲 6. 土壤升运器 7. 中置镇压轮 8. 挂膜装置 9. 侧置镇压轮 10. 覆土侧流槽 11. 覆土直流槽 12. 肥料箱 13. 磁力泵

1.2 工作参数分析

通过对双垄耕作施肥喷药覆膜机的改进,二代样机关键部件排肥装置、施药装置及取土铲已能保证样机田间作业时顺利施药施肥,所起大、小垄的垄宽与垄高符合全膜双垄沟农艺技术要求,但由大、小垄体尺寸不一致所引起地膜铺设过程中的机械伤膜仍然是制约作业机工作性能优劣的最核心问题。

全膜双垄沟覆膜种床的耕整、铺设是在作业机田间工作前进过程中先由旋耕刀组和取土铲的共同作用获取覆膜土壤,随即土壤升运器将覆膜土壤输送至覆土装置,并在覆土直流槽、覆土侧流槽通过土壤分流来完成的。因此,除地膜自身质量的优劣外,作业机前进速度 v_1 、取土铲入土角 α (图2)、土壤升运器速度 v_2 (图2)、旋耕刀组刀头线速度 v_3 、覆土侧

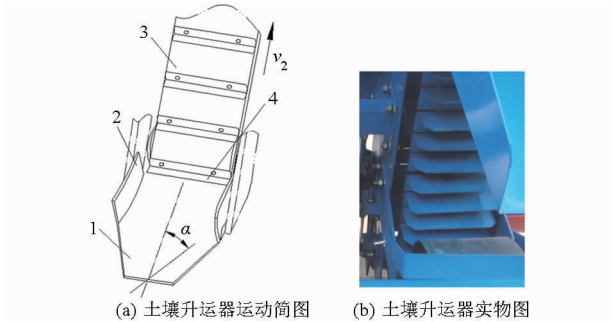


图2 土壤升运器作业过程简图

Fig.2 Structure diagram of operation process of soil elevator

1. 取土铲 2. 侧板 3. 土壤升运器 4. 刮土板

流槽角 β (图3)及覆土直流槽角 γ (图3)皆是影响地膜采光面机械破损相对率的关键因素。

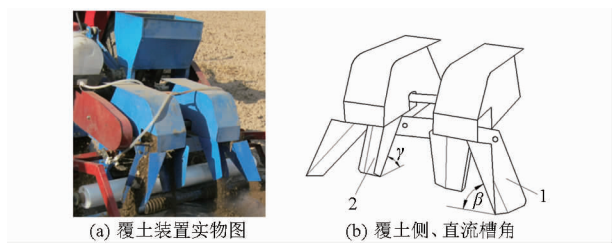


图 3 覆土装置图

Fig. 3 Schematic diagram of soil covering unit

1. 覆土侧流槽 2. 覆土直流槽

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化试验在甘肃省洮河拖拉机制造有限公司农机装备工程中心试验田内进行,试验地面积为 0.60 hm²,所处地势平坦,土壤为黄绵土,土壤含水率为 14.6%~15.9%。试验地依照全膜双垄沟农艺技术相关要求,通过变换作业机不同工作参数进行耕整、覆膜作业,选用地膜为甘肃省政府采购白色地膜,厚度为 0.01 mm^[1]。

2.2 试验方法

按照 NY/T 986—2006《铺膜机作业质量》和 DB62/T 1935—2010《全膜双垄沟铺膜机操作规程及作业质量验收》标准要求,测定计算双垄耕作施肥喷药覆膜机田间作业后的采光面地膜机械破损率。以 1.2 m(地膜幅宽)×5 m(测区长度)的面积为 1 个测定小区,用钢卷尺以人工测量的作业方式获取各测区内采光面地膜上所有机械破损部位的边长或缝长(其中: $S_c \leq 50 \text{ mm/m}^2$ 表明联合机作业性能符合标准要求)^[11-12],以 3 个作业小区的测定平均值为测试结果。采光面地膜机械破损率计算式为

$$S_c = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{LB} \quad (1)$$

$$Y = \frac{S_c}{50} \times 100\% \quad (2)$$

式中 S_c ——采光面地膜机械破损程度,mm/m²
 Y ——采光面地膜机械破损率,%
 L_i ——测区内第 i 处机械破损部位的边长或缝长,mm
 L ——测区长度,m
 B ——测区内采光面地膜宽度平均值,m

2.3 单因素试验

2.3.1 土壤升运器速度

当旋耕刀组刀头线速度为 0.9 m/s,覆土侧流槽角为 65°,覆土直流槽角为 35°,取土铲入土角为 30°,土壤升运器速度为 0.5、0.8、1.1 m/s 时,采光

面地膜机械破损率随作业机前进速度变化如图 4 所示。

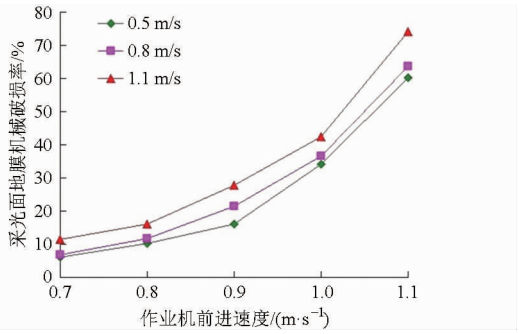


图 4 不同土壤升运器速度下作业机前进速度对采光面地膜机械破损率的影响曲线

Fig. 4 Effects of operation machine speed on mechanical damage rate of daylighting mulch at different soil elevator speeds

由图 4 可以看出,随着作业机前进速度的增加,采光面地膜机械破损率增大。当前进速度大于 0.9 m/s 时,土壤升运器线速度分别为 0.5 m/s、0.8 m/s 时采光面地膜机械破损率变化显著;当土壤升运器线速度为 1.1 m/s 时采光面地膜机械破损率显著增加,每平方米测区地膜的边缝长最大破损接近 40 mm。

2.3.2 旋耕刀组刀头线速度

当土壤升运器速度为 0.8 m/s,覆土侧流槽角为 65°,覆土直流槽角为 35°,取土铲入土角为 30°,旋耕刀组刀头线速度分别为 0.6、0.9、1.2 m/s 时,采光面地膜机械破损率随作业机前进速度变化如图 5 所示。

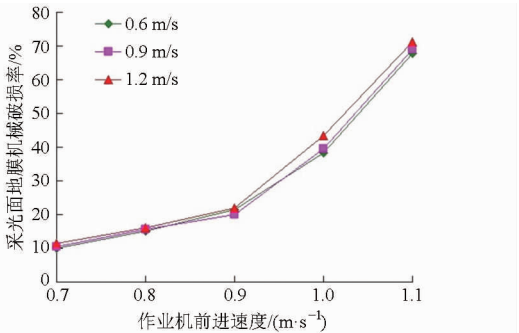


图 5 不同旋耕刀组刀头线速度下作业机前进速度对采光面地膜机械破损率的影响曲线

Fig. 5 Effects of operation machine speed on mechanical damage rate of daylighting mulch at different linear velocities of rotary cutter

由图 5 可以看出,随着作业机前进速度不断增加,采光面地膜机械破损率增大。当前进速度大于 0.9 m/s 时,采光面地膜机械破损率变化程度显著;但试验同时发现当旋耕刀组刀头线速度由 0.6 m/s 向 1.2 m/s 变化时,作业机工作性能对采光面地膜

机械破损率无明显影响,因此该因素将不作为影响采光面地膜机械破损率因素进行研究。

2.3.3 覆土侧流槽角

当土壤升运器线速度为 0.8 m/s,旋耕刀组刀头线速度为 0.9 m/s,覆土直流槽角为 35°,取土铲入土角为 30°,覆土侧流槽角为 55°、65°、75°时,采光面地膜机械破损率随作业机前进速度变化如图 6 所示。

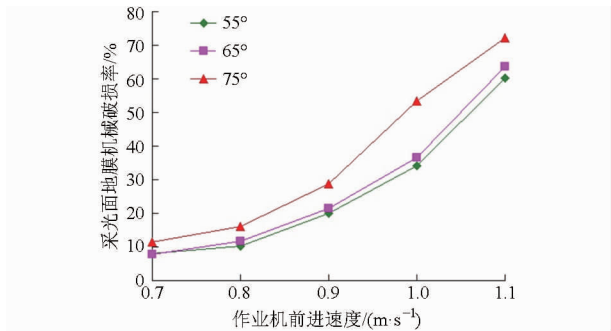


图 6 不同覆土侧流槽角下作业机前进速度对采光面地膜机械破损率的影响曲线

Fig. 6 Effects of operation machine speed on mechanical damage rate of daylighting mulch at different lateral flow angles of soil covering unit

由图 6 可以看出,随着作业机前进速度的增加,采光面地膜机械破损率增大。当前进速度大于 1.0 m/s 时,覆土侧流槽角为 55°、65° 时采光面地膜机械破损率变化明显;当覆土侧流槽角为 75° 时,在作业机不同前进速度下其采光面地膜机械破损率显著增加,均高于其它覆土侧流槽角对应的采光面地膜机械破损率。

2.3.4 覆土直流槽角

当土壤升运器线速度为 0.8 m/s,旋耕刀组刀头线速度为 0.9 m/s,覆土侧流槽角为 65°,取土铲入土角为 30°,覆土直流槽角为 35°、45°、55° 时,采光面地膜机械破损率随作业机前进速度变化如图 7 所示。

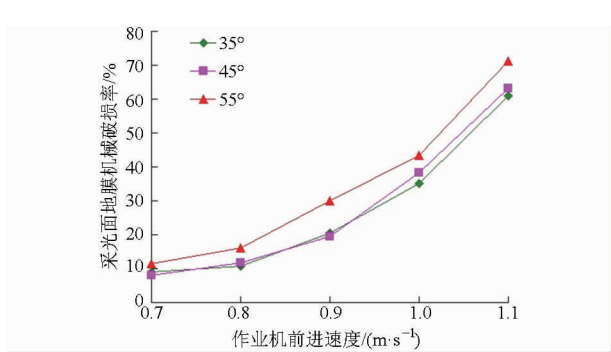


图 7 不同覆土直流槽角下作业机前进速度对采光面地膜机械破损率的影响曲线

Fig. 7 Effects of operation machine speed on mechanical damage rate of daylighting mulch at different straight flow angles of soil covering unit

由图 7 可以看出,当作业机前进速度大于 0.9 m/s,覆土侧流槽角为 55° 时采光面地膜机械破损率变化极其显著;而覆土侧流槽角为 35°、45° 时随作业机前进速度的增加采光面地膜机械破损率变化趋势一致。

2.3.5 取土铲入土角

当土壤升运器线速度为 0.8 m/s,旋耕刀组刀头线速度为 0.9 m/s,覆土侧流槽角为 65°,覆土直流槽角为 35°,取土铲入土角为 25°、30°、35° 时,采光面地膜机械破损率随作业机前进速度变化如图 8 所示。

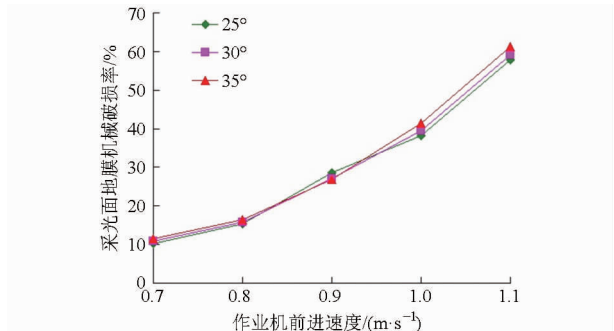


图 8 不同取土铲入土角下作业机前进速度对采光面地膜机械破损率的影响曲线

Fig. 8 Effects of operation machine speed on mechanical damage rate of daylighting mulch at different penetrating angles of shovel

由图 8 可以看出,在作业机前进速度、土壤升运器线速度、旋耕刀组刀头线速度、覆土侧流槽角及覆土直流槽角不变的条件下,采光面地膜机械破损率随取土铲入土角的不断增大无明显变化,故此因素不作为影响采光面地膜机械破损率因素进行研究。

2.4 响应曲面法试验方案

综合上述单因素试验结果与分析,采用 Box - Behnken 试验设计原理^[13],以作业机前进速度(x_1)、土壤升运器速度(x_2)、覆土侧流槽角(x_3)和覆土直流槽角(x_4)为自变量,采光面地膜机械破损率(Y)为响应值,各试验因素水平编码如表 1 所示,共实施 29 组响应面分析试验(表 2)。表中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为因素编码值。应用 Design - Expert 8.050 进行数据处理分析。

表 1 因素水平编码

Tab. 1 Coding of factors and levels

编码	因素			
	作业机前进速度 x_1	土壤升运器速度 x_2	覆土侧流槽角 x_3	覆土直流槽角 x_4
	/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	/($^\circ$)	/($^\circ$)
-1	0.7	0.5	55	35
0	0.9	0.8	65	45
1	1.1	1.1	75	55

3 试验结果与分析

3.1 回归模型建立与检验

试验结果如表 2 所示,双垄耕作施肥喷药覆膜机作业后采光面地膜机械破损率为 8.18% ~ 70.56%,符合 NY/T 986—2006《铺膜机作业质量》和 DB62/T 1935—2010《全膜双垄沟铺膜机操作规程及作业质量验收》标准要求。

表 2 响应面分析结果

Tab. 2 Results of response surface analysis					
试验序号	X_1	X_2	X_3	X_4	$Y/\%$
1	1	1	0	0	70.29
2	0	-1	1	0	13.27
3	-1	1	0	0	59.35
4	-1	0	1	0	8.18
5	1	0	1	0	27.16
6	-1	-1	0	0	15.85
7	-1	0	-1	0	10.28
8	0	1	-1	0	62.17
9	0	1	0	1	56.41
10	1	0	0	1	34.18
11	0	1	1	0	70.56
12	1	0	-1	0	27.72
13	0	0	0	0	18.64
14	0	0	0	0	18.91
15	1	-1	0	0	35.13
16	-1	0	0	1	12.26
17	0	-1	0	1	20.27
18	-1	0	0	-1	15.12
19	0	-1	0	-1	25.29
20	0	0	1	1	16.52
21	0	1	0	-1	65.22
22	0	0	0	0	19.56
23	0	0	-1	-1	23.53
24	0	0	0	0	14.81
25	0	0	0	0	21.83
26	0	0	-1	-1	22.52
27	0	-1	-1	0	39.38
28	1	0	0	-1	28.22
29	0	0	1	-1	17.61

借助 Design - Expert 8.050 软件对所得试验结果进行分析,获得编码值表示的采光面地膜机械破损率 Y 的二次回归模型为

$$Y = 18.75 + 8.47X_1 + 19.57X_2 - 2.69X_3 - 0.90X_4 + 1.24X_1^2 + 24.92X_2^2 + 0.63X_3^2 + 0.42X_4^2 - 2.09X_1X_2 + 0.38X_1X_3 + 2.20X_1X_4 + 8.63X_2X_3 - 0.95X_2X_4 - 0.52X_3X_4 \quad (3)$$

对上述二次回归模型进行方差分析和回归系数显著性检验,结果如表 3 所示。

表 3 回归方程方差分析

Tab. 3 Variance analysis of regression equation

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
回归	10 162. 43	14	725. 89	57. 07	<0. 000 1
X_1	861. 23	1	861. 23	67. 71	<0. 000 1
X_2	4 594. 64	1	4 594. 64	361. 23	<0. 000 1
X_3	86. 94	1	86. 94	6. 84	0. 020 4
X_4	9. 74	1	9. 74	0. 77	0. 396 3
X_1X_2	17. 39	1	17. 39	1. 37	0. 261 8
X_1X_3	0. 59	1	0. 59	0. 047	0. 832 2
X_1X_4	19. 45	1	19. 45	1. 53	0. 236 6
X_2X_3	297. 56	1	297. 56	23. 39	0. 000 3
X_2X_4	3. 59	1	3. 59	0. 28	0. 603 5
X_3X_4	1. 10	1	1. 10	0. 087	0. 772 8
X_1^2	9. 95	1	9. 95	0. 78	0. 391 3
X_2^2	4 028. 15	1	4 028. 15	316. 70	<0. 000 1
X_3^2	2. 61	1	2. 61	0. 20	0. 657 8
X_4^2	1. 12	1	1. 12	0. 088	0. 771 3
残差	178. 07	14	12. 72		
失拟	152. 37	10	15. 24	2. 37	0. 210 3
误差	25. 70	4	6. 43		
总和	10 340. 51	28			

由表 3 可知,回归模型 $P < 0. 000 1$,表明回归模型极其显著;失拟项 $P > 0. 05$,失拟不显著,说明模型所拟合的二次回归方程与实际相符合,能正确反映采光面地膜机械破损率 Y 与 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 之间的关系,回归模型可以较好地对优化试验中各种试验结果进行预测。其中模型的一次项 X_1 (作业机前进速度)和 X_2 (土壤升运器速度)影响极显著, X_3 (覆土侧流槽角)影响较显著,而 X_4 (覆土直流槽角)影响不显著;二次项 X_2^2 影响极显著;交互项 X_2X_3 影响极显著,其余各项均不显著。根据模型各因素回归系数的大小,可得到各因素的影响主次顺序为: X_2 、 X_1 、 X_3 、 X_4 ,即土壤升运器速度、作业机前进速度、覆土侧流槽角、覆土直流槽角。

3.2 模型交互项的解析

根据式(3)作出各因素之间关系的响应面图。响应曲面的形状能够反映出交互因素作用的强弱^[14-15]。

由图 9 可以看出,当作业机前进速度固定在某一水平,土壤升运器速度由 0.5 m/s 递增至 1.1 m/s 时,采光面地膜机械破损率呈现出先减小、后增大的变化趋势。产生该现象的主要原因是当作业机土壤升运器运行速度较慢时,没有足够的土壤输送至覆土装置,随着作业机的前进已覆在种床上的地膜定位不稳定,容易产生滑移、撕裂;而当土壤升运器运行速度较快时,由覆土装置侧、直流槽排出大量土壤,对地膜沉降效果影响显著,垄体膜面也会随着土

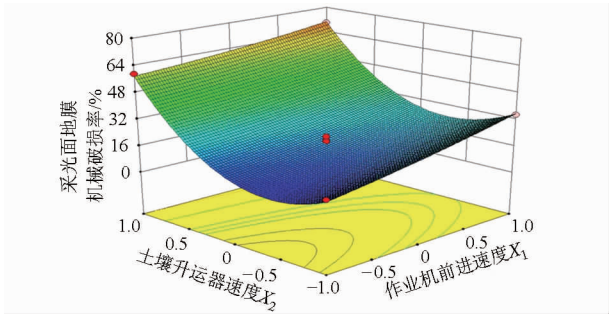


图 9 作业机前进速度与土壤升运器速度对
采光面地膜机械破损率的影响

Fig. 9 Impact of operation machine speed and soil elevator
speed on mechanical damage rate of daylighting mulch

壤质量的不断增加而降低其断裂伸长率与拉伸强度。

由偏回归分析与等高线密度可以得出,土壤升运器速度对采光面地膜机械破损率的影响大于作业机前进速度的影响。

由图 10 可知,当作业机前进速度为 0.70 m/s、覆土侧流槽角为 75°时,采光面地膜机械破损率较低,由等高线密度可以看出,作业机前进速度和覆土侧流槽角的交互作用对采光面地膜机械破损率影响并不显著,与方差分析结果相同。

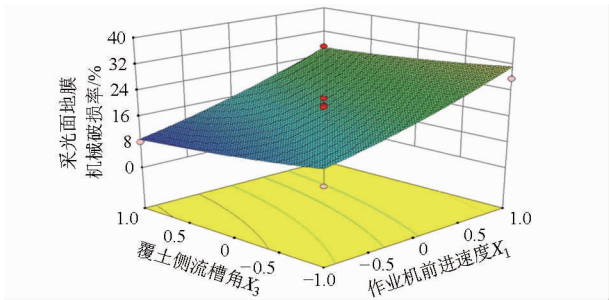


图 10 作业机前进速度与覆土侧流槽角
对采光面地膜机械破损率的影响

Fig. 10 Impact of operation machine speed and lateral
flow angle of soil covering unit on mechanical damage
rate of daylighting mulch

由图 11 可以看出,当作业机前进速度固定在某一水平,覆土直流槽角由 35°向 55°变化时,采光面地膜机械破损率呈现出略微减小的变化趋势。由等高线密度可以看出,覆土直流槽角和作业机前进速度的交互作用对采光面地膜机械破损率影响不显著,与方差分析结果相同。

通过图 12 响应曲面分析,当土壤升运器速度固定在某一水平,覆土侧流槽角由 55°递增至 75°时,采光面地膜机械破损率呈现出逐渐降低的变化趋势。出现该现象的主要原因是当土壤升运器速度一定时,输送至覆土装置的土壤保持定量,当覆土侧流槽角度不断增大时,必然增加了土壤覆膜作业的流

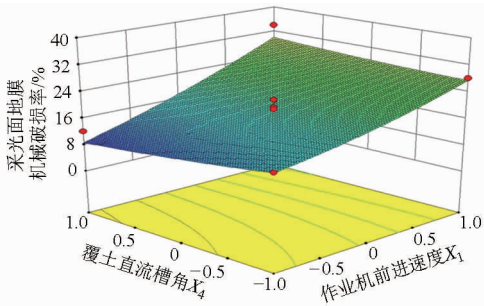


图 11 作业机前进速度与覆土直流槽角对
采光面地膜机械破损率的影响

Fig. 11 Impact of operation machine speed and straight
flow angle of soil covering unit on mechanical
damage rate of daylighting mulch

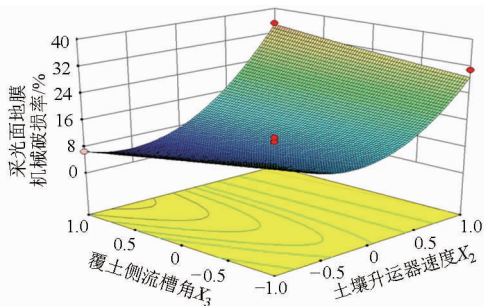


图 12 土壤升运器速度与覆土侧流槽角对
采光面地膜机械破损率的影响

Fig. 12 Impact of soil elevator speed and lateral flow
angle of soil covering unit on mechanical damage
rate of daylighting mulch

畅性,稳定的土壤重量既能保证已覆在种床土地膜的准确定位,又可以避免因覆土侧流槽角选取不合理致使覆土装置产生输送土壤流槽内的自锁与堵塞。

土壤升运器速度和覆土侧流槽角的交互作用对采光面地膜机械破损率影响极其显著,与方差分析结果相同。

由图 13 可以看出,土壤升运器速度对采光面地膜机械破损率影响大于覆土直流槽角的影响,这与

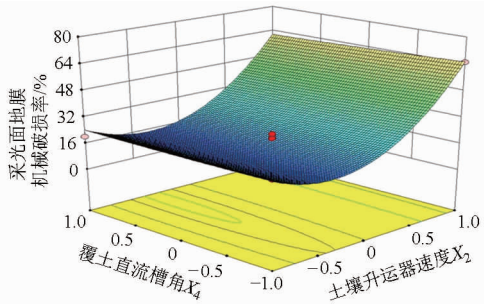


图 13 土壤升运器速度与覆土直流槽角对
采光面地膜机械破损率的影响

Fig. 13 Impact of soil elevator speed and straight flow
angle of soil covering unit on mechanical damage
rate of daylighting mulch

方差分析结果相同。当土壤升运器速度在某一水平,覆土直流槽角由 35°变化到 55°时,采光面地膜机械破损率有所降低,但变化趋势不很明显。

由图 14 可知,当作业机覆土装置侧流槽角为 70°~75°之间,覆土直流槽角度为 50°~55°时,采光面地膜机械破损率最小。覆土侧流槽角对采光面地膜机械破损率影响明显大于覆土直流槽角的影响。主要是在作业过程中覆土侧流槽输送土壤均用于地膜两侧膜边的定位,防止地膜滑移、撕裂;而覆土直流槽输出土壤主要用作小垄两侧垄沟内作物的种植覆土,两因素对采光面地膜机械破损率影响权重有所差异,这与方差分析结果相一致。

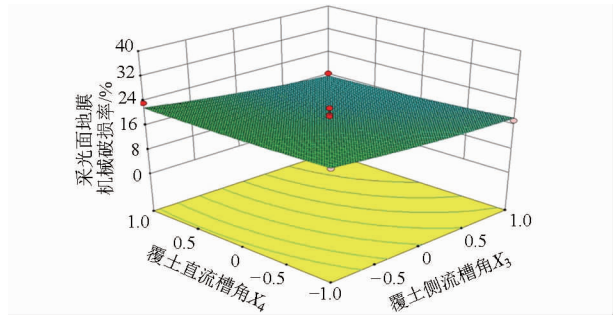


图 14 覆土侧流槽角与覆土直流槽角对采光面地膜机械破损率的影响

Fig. 14 Impact of lateral flow angle of soil covering unit and straight flow angle of soil covering unit on mechanical damage rate of daylighting mulch

3.3 作业机最优工作参数确定与试验验证

为保证作业机田间工作时采光面地膜无机械破损 ($Y = 0\%$),应用 Design - Expert 8.050 软件中 Optimization - Numerical 模块对回归方程模型进行该目标下的优化求解,得到双垄耕作施肥喷药覆膜机最优工作参数为:土壤升运器速度 0.67 m/s、作业机前进速度 0.70 m/s、覆土侧流槽角 75°和覆土直流槽角 48°。

为了验证式(3)的可靠性,应用双垄耕作施肥喷药覆膜机按照上述最优工作参数进行 9 次田间性能试验,试验材料与方法与 2.1 节和 2.2 节相同,如

图 15 所示。9 次试验的采光面地膜机械破损率均值为 0.216%,较优化前机械破损率 (8.18% ~ 70.56%) 有明显的下降,表明在优化工作参数条件下能够避免采光面地膜的机械损伤,因此该回归模型是可靠的。



图 15 作业机田间性能试验

Fig. 15 Field performance test of combined operation machine

4 结论

(1) 结合 Box - Behnken 试验设计原理,采用四因素三水平响应面分析方法,进行双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化,通过试验优化结果可得影响采光面地膜机械破损率的因素由大到小依次为:土壤升运器速度、作业机前进速度、覆土侧流槽角和覆土直流槽角。

(2) 建立了采光面地膜机械破损率与作业机土壤升运器速度、作业机前进速度、覆土侧流槽角、覆土直流槽角的二次多项式回归模型。以采光面地膜机械无破损 ($Y = 0\%$) 为目标,优化得到作业机最佳工作参数:土壤升运器速度 0.67 m/s、作业机前进速度 0.70 m/s、覆土侧流槽角 75°和覆土直流槽角 48°。

(3) 田间验证试验表明,采光面地膜机械破损率均值为 0.216%,较优化前地膜机械破损率 (8.18% ~ 70.56%) 有明显下降,基本避免了采光面地膜的机械损伤,表明优化后的工作参数组合可以作为双垄耕作施肥喷药覆膜机田间作业的最佳依据。

参 考 文 献

- 1 赵武云,戴飞,杨杰,等. 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 Wuyun, Dai Fei, Yang Jie, et al. 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)
- 2 刘广才,杨祁峰,段襁全,等. 甘肃发展旱地全膜双垄沟播技术的主要模式[J]. 农业现代化研究,2008,29(5):629-632.
Liu Guangcai, Yang Qifeng, Duan Rangquan, et al. Main modes for Gansu developing techniques of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows in dry land[J]. Research of Agricultural Modernization, 2008, 29(5): 629-632. (in Chinese)
- 3 Zhou Limin, Jin Shengli, Liu Changan, et al. Ridge-furrow and plastic-mulching tillage enhances maize-soil interactions: opportunities and challenges in a semiarid agroecosystem[J]. Field Crops Research, 2012, 126: 181-188.

- 4 Qin Shuhao, Zhang Junlian, Dai Hailin, et al. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area[J]. *Agricultural Water Management*,2014,131:87-94.
- 5 Daniel S Egel, Ray Martyn, Chris Gunter. Planting method, plastic mulch, and fumigation influence growth, yield, and root structure of watermelon[J]. *Hort Science*,2008,43(5):1410-1414.
- 6 李来祥,刘广才,杨祁峰,等. 甘肃省旱地全膜双垄沟播技术研究与应进展[J]. *干旱地区农业研究*,2009,27(1):114-118.
- Li Laixiang, Liu Guangcai, Yang Qifeng, et al. Research and application development for the techniques of whole plastic-film mulching on double ridges and planting in catchment furrows in dry land[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2009,27(1):114-118. (in Chinese)
- 7 刘晓伟,何宝林,郭天文. 全膜双垄沟不同覆膜时期对玉米土壤水分和产量的影响[J]. *核农学报*,2012,26(3):602-609.
- Liu Xiaowei, He Baolin, Guo Tianwen. Effects of full mulching on double ridges with different mulching methods on soil water content and maize yield in dryland[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*,2012,26(3):602-609. (in Chinese)
- 8 Borut Gosar, Dea Baričević. Incorporation of a ridge-furrow-ridge rainwater harvesting system with mulches in high-value plant production[J]. *Irrigation and Drainage*,2011,60(4):518-525.
- 9 赵武云,戴飞,张锋伟,等. 全膜双垄沟玉米种植全程机械化作业方法:中国,201310492318.1[P],2015-04-01.
- 10 史增录,赵武云,马海军,等. 全膜双垄沟播起垄施肥铺膜机的研制[J]. *干旱地区农业研究*,2012,30(2):169-174.
- Shi Zenglu, Zhao Wuyun, Ma Haijun, et al. Whole plastic-film double furrow sowing cultivation of the design and manufacture of ridge fertilization filming machine[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*,2012,30(2):169-174. (in Chinese)
- 11 NY/T 986—2006 铺膜机作业质量[S]. 2006.
- 12 DB62/T 1935—2010 全膜双垄沟铺膜机操作规程及作业质量验收[S]. 2010.
- 13 夏连明,王相友,耿端阳. 倾斜圆台型玉米精密排种器种子破损试验[J]. *农业机械学报*,2012,43(12):67-71.
- Xia Lianming, Wang Xiangyou, Geng Duanyang. Corn seed damaging experiment in truncated cone precision metering[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2012,43(12):67-71. (in Chinese)
- 14 易军鹏,朱文学,马海乐,等. 牡丹籽油超声波辅助提取工艺的响应面法优化[J]. *农业机械学报*,2009,40(6):103-110.
- Yi Junpeng, Zhu Wenxue, Ma Haile, et al. Optimization on ultrasonic-assisted extraction technology of oil from *paeonia suffruticosa* andr. seeds with response surface analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2009,40(6):103-110. (in Chinese)
- 15 袁雪,祁力钧,王虎,等. 温室摇摆式变量弥雾机喷雾参数响应面法优化[J]. *农业机械学报*,2012,43(4):45-50.
- Yuan Xue, Qi Lijun, Wang Hu, et al. Spraying parameters optimization of swing, automatic variables and greenhouse mist sprayer with response surface method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2012,43(4):45-50. (in Chinese)

(上接第 107 页)

- 15 邱威,丁为民,汪小岳,等. 3WZ-700 型自走式果园风送定向喷雾机[J]. *农业机械学报*,2012,43(4):26-30,44.
- Qiu Wei, Ding Weimin, Wang Xiaochan, et al. 3WZ-700 self-propelled air-blowing orchard sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012,43(4):26-30,44. (in Chinese)
- 16 邱威,丁为民,傅锡敏,等. 果园喷雾机圆环双流道风机的设计与试验[J]. *农业工程学报*,2012,28(12):13-17.
- Qiu Wei, Ding Weimin, Fu Ximin, et al. Design and experiment of ring double-channel fan for spraying machine in orchard[J]. *Transactions of the CSAE*,2012,28(12):13-17. (in Chinese)
- 17 祁力钧,胡开群,莽璐,等. 基于图像处理的雾滴检测技术[J]. *农业机械学报*,2009,40(增刊):48-51.
- Qi Lijun, Hu Kaiqun, Mang Lu, et al. Droplet detection based on image processing[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2009,40(Supp.):48-51. (in Chinese)
- 18 张晓辛,吕晓兰,丁素明,等. 果园风送式喷雾机仿形喷雾试验研究[J]. *中国农机化*,2011,32(3):68-72.
- Zhang Xiaoxin, Lü Xiaolan, Ding Suming, et al. Experimental research on profiling spray of air-assisted orchard sprayer [J]. *Chinese Agricultural Mechanization*,2011,32(3):68-72. (in Chinese)
- 19 吕晓兰,傅锡敏,吴萍,等. 喷雾技术参数对雾滴沉积分布影响试验[J]. *农业机械学报*,2011,42(6):70-75.
- Lü Xiaolan, Fu Ximin, Wu Ping, et al. Influence of spray operating parameters on droplet deposition[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2011,42(6):70-75. (in Chinese)