

# 跨越式膜上覆土装置的参数仿真设计与试验

李迪, 孙伟, 石林榕, 张华, 刘小龙, 吴建民

(甘肃农业大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 针对全膜种植模式中覆土装置覆土质量差引起的易受风力破坏、烧苗、出苗受阻等问题,设计了一种适用于全膜覆土机具的跨越式刮板升运链膜上覆土装置。为提高覆土机构的工作性能,构建了覆土装置的实体模型,运用离散单元法模拟仿真试验,结合 Box - Behnken 试验设计原理,采用三因素三水平响应曲面法,借助 Design - Expert 软件处理试验结果,建立了覆土宽度和覆土厚度合格率的二次回归模型,分析各因素交互作用对试验指标的影响,优化得到最佳参数组合,即链速与机组前进速度比为 1.38、排土口高度为 200 mm、排土口宽度为 120 mm,并依此进行田间验证试验。试验结果表明,用离散单元法模拟出的覆土宽度值和覆土厚度合格率接近田间重复试验均值,且满足农艺要求。

**关键词:** 膜上覆土装置;刮板升运链;离散单元法;响应曲面法

**中图分类号:** S223.5      **文献标志码:** A

## Parameter simulation design and experiment of crossing device of covering soil on film

LI Di, SUN Wei, SHI Lin-rong, ZHANG Hua, LIU Xiao-long, WU Jian-min

(College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** The mechanical device of covering soil on film with scraper lifting chain was designed to solve the problems including such as wind damage susceptible, burning seedlings, stemming emergence, which caused by the poor covering soil quality of device in whole plastic-film mulching planting pattern. In order to improve the working performance of covering soil mechanism, the entity model of this device was constructed. Using discrete element method to simulate experiment, combined with the experimental design principle of Box - Behnken, and applying response surface methodology with three factors and three levels, the quadratic regression models about width of covering soil and the qualified rate of covering soil thickness were built using Design - Expert software. Through analyzing the influence of factor's interaction on experimental aim, the best combination of parameters are proposed as follows: the ratio of chain speed and operating speed, 1.38; the height of dumping soil, 200 mm; and the width of dumping soil, 120 mm. Field experiment showed that the width of covering soil and the qualified rate of covering soil thickness simulated by discrete element method were close to the average value of repeated test, and it meet the agronomic requirement, thus providing theoretical basis for the design and improvement of the covering soil device.

**Keywords:** device of covering soil on film; scraper lifting chain; discrete element method; response surface methodology

近年来,覆膜种植作为一种抗旱技术在西北旱作农业区广泛应用于玉米、马铃薯、小麦、胡麻等作物<sup>[1-2]</sup>,其具有增温保墒、减轻杂草与病虫害、促进作物生长等显著作用<sup>[3-7]</sup>。在马铃薯全膜垄作种植

中,对种行覆土后,种芽可借助覆土带的压实作用,自行穿透地膜后破土而出,省去人工打孔、放苗、压土等作业<sup>[8]</sup>。铺膜覆土作业作为全膜覆土种植技术中的关键工序,目前基本上采用简易机具铺膜覆土

收稿日期:2016-10-21

修回日期:2017-02-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51765004);公益性行业专项(201503124);甘肃省高等学校科研项目(2017D-13)

作者简介:李迪(1992—),男,河南邓州人,硕士研究生,研究方向为现代旱作农机装备。E-mail: gsauld@qq.com。

通信作者:孙伟(1980—),男,甘肃高台人,副教授,硕导,主要从事现代旱作农机装备研究。E-mail: sunw@gsau.edu.cn。

吴建民(1958—),男,甘肃定西人,教授,博导,主要从事保护性耕作技术及机具研究。E-mail: wujm@gsau.edu.cn。

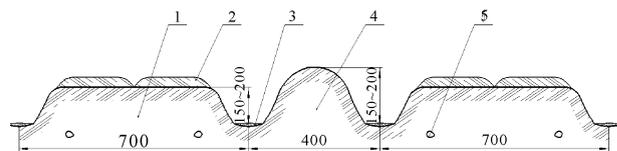
的方式,作业效率低、覆土均匀性较差,由此导致的易受风力破坏、烧苗、出苗受阻等问题严重制约着全膜覆土种植技术的推广。因此,解决覆土作业质量问题具有十分重要的意义。

西北农机工作者对适用于膜上覆土种植模式的覆土装置进行了一系列的研究,如安世才等<sup>[9]</sup>设计研制了集开沟、起垄、整形、施肥、铺膜、覆土压膜作业为一体的起垄全铺膜联合作业机,张勇等<sup>[10]</sup>在此基础上对该覆土机构进行了优化改进;黄闪闪等<sup>[11]</sup>将升运式覆土机构运用到移栽机当中,实现了对穴覆土功能;孙伟等<sup>[12]</sup>对刮板升运带式覆土机构的覆土特性主要是覆土量进行了研究。但这些研究对覆土宽度和覆土厚度均未有详细的论述,而覆土宽度和覆土厚度也是衡量覆土作业质量的两个重要指标。

为此,本研究以自制马铃薯全膜双垄沟播种机<sup>[13]</sup>为依托,针对刮板升运链膜上覆土装置,运用 EDEM 离散单元法和响应曲面法,通过对覆土宽度和覆土厚度合格率与相关作业参数的模拟研究分析,建立二次回归模型,优化得到最佳工作参数,并进行验证试验,以获得较合理的、能够满足农艺要求的链速与机组前进速度比、排土口高度、排土口宽度,从而为膜上覆土机构的研究设计提供参考。

## 1 覆土作业农艺要求

以西北旱区马铃薯全膜双垄沟垄作种植模式为例,种植垄形如图 1 所示,大小垄总宽 1 100 mm,其中大垄宽 700 mm,高 100~150 mm;小垄宽 400 mm,高 150~200 mm。根据农艺要求,种行覆土宽度应为 540 mm 左右,膜上覆土厚度为 30~50 mm。



1. 大垄; 2. 种行覆土; 3. 沟底压土; 4. 小垄; 5. 种薯  
1. wide ridge; 2. covering soil on seed potato; 3. filling soil in bottom; 4. narrow ridge; 5. seed potato

图 1 马铃薯全膜双垄沟种植垄形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ridge shape of potato whole plastic-film mulching on double ridges planting

膜上覆土作业要求土壤从种行膜顶覆盖至膜侧,然而,覆土带过宽或覆土过厚,采光面减小,势必将减弱地膜的增温作用,而且在升运、传送额外土壤的过程中会消耗更多的能量;覆土带过窄或覆土过

薄,发挥不出土壤对种苗的压实作用,影响出苗效果。因此,覆土宽度和覆土厚度是覆土作业质量的两个重要指标,合理控制这两个指标对马铃薯全膜双垄沟覆土种植作业至关重要。

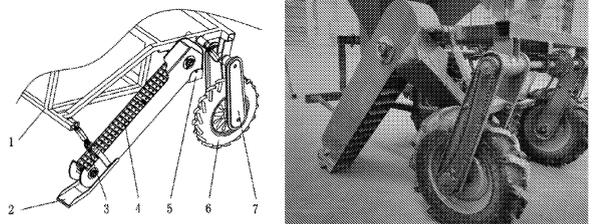
其中,覆土厚度以覆土厚度合格率衡量,覆土厚度合格率为膜上覆土厚度合格点数与小区总测定点数之比,即

$$F_h = \frac{d}{d_0} \times 100 \quad (1)$$

式中, $F_h$  为膜上覆土厚度合格率(%); $d$  为膜上覆土厚度合格点数; $d_0$  为小区总测定点数。

## 2 结构组成及工作原理

跨越式膜上覆土装置如图 2 所示,基于现有的刮板升运带式膜上覆土装置,采用链式刮板输土机构设计而成,主要由起土铲、调节机构、刮板升运链、张紧机构、分土器、主动轮、从动轮等构成。起土铲在铺膜装置前取土,刮板升运链将起土铲铲起的土壤提升、传送,越过铺膜机构,经分土器将土壤按要求铺洒在种行对应的地膜条带上,完成膜上覆土作业。



1. 机架; 2. 起土铲; 3. 调节拉杆; 4. 刮板升运链; 5. 分土器; 6. 地轮; 7. 传动链

1. frame; 2. digging shovel; 3. adjusting rod; 4. scraper lifting chain; 5. soil separating device; 6. ground wheel; 7. transmission chain

图 2 跨越式覆土装置机构示意图及实物图

Fig. 2 Structure diagram of crossing covering soil device and physical photo

## 3 关键部件设计

### 3.1 起土铲

起土部件的作用是将土壤铲起,并将其提升到刮板升运链传送部件上去。对起土部件的要求是:(1) 在保证起土量足够的情况下尽可能少挖取土壤,并保证铲土深度稳定且根据不同地况可适量调节;(2) 保证土堡能够沿着铲面顺利提升至刮板升运链部件。为避免工作时壅土现象的发生,要求起土铲铲面阻力小,输送顺畅,铲刃锋利、耐磨性能好。

起土量、起土深度、铲面宽度各量之间的关系为:

$$q_0 = v \times \Delta t \times b_0 \times h_0 \quad (2)$$

式中,  $q_0$  为起土量;  $v$  为机组前进速度;  $\Delta t$  为机组工作时间;  $b_0$  为起土铲铲面宽度;  $h_0$  为起土深度。

起土铲受力情况如图所示, 起土铲入土倾角  $\theta$  一般设计角度为  $14^\circ \sim 25^\circ$ 。由起土铲受力情况图可建立如下方程<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} P \cos \theta - T - G \sin \theta = 0 \\ R - G \cos \theta - P \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $P$  为起土铲移动掘起土壤所需要的力;  $R$  为起土铲对土壤的反作用力;  $\theta$  为铲的倾角;  $\mu$  为土壤对起土铲的摩擦系数。由此可推导出起土铲倾角为:

$$\theta = \arctan \frac{P - \mu G}{\mu P + G} \quad (4)$$

由起土铲受力情况可知, 倾角  $\theta$  越小, 掘起土壤越少, 阻力愈小, 在满足起土性能的前提下, 起土铲倾角  $\theta$  取值应尽可能小。

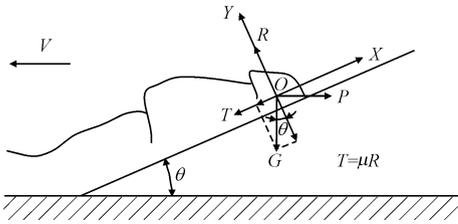


图 3 起土铲受力简图

Fig.3 Forced diagram of digging shovel

### 3.2 升运链

升运链安装在机架两侧, 由拖拉机动力输出轴经变速箱提供驱动力, 刮土板在升运链的带动下作回转运动, 将起土铲铲起的土壤向后上方提升至分土器。要求在输土过程中作业平稳, 输土量均匀, 以避免堵塞和堆积, 从而有利于土壤的高效传送。

传统的带式土壤传送部件是在传送带上安装刮土板, 以此实现对土壤的传送、提升。然而, 该种带式结构在输送土壤的过程中易打滑, 影响输土效果。本机采用改进的链式升运机构, 将刮土板安装在链条上, 故障率较低、作业稳定、输土效率高, 能够获得良好的输土效果。

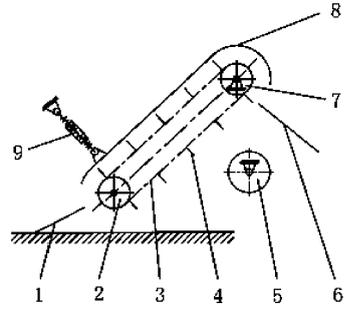
### 3.3 调节机构

通过调节拉杆(见图 4)对升运链部件进行整体调节, 改善了以往起土铲入土角度和升运链倾角需分别调节的繁琐、难以配合的境况, 有效降低了土壤传送装置作业过程中的堵塞问题, 达到了适应不同地况的技术要求。起土深度可通过调节地轮实现。

### 3.4 分土器

分土器如图 5 所示, 图中,  $b$  为排土口宽度,  $h$  为排土口离地高度。由图可知, 排土口宽度越大, 离

地高度越高, 土壤铺洒比较分散, 严重影响最终的覆土宽度。铺膜机两侧各配备一套覆土机构, 对称布置, 垄面覆土宽度约为 540 mm 左右, 则每套机构的覆土宽度应在 270 mm 左右。为保证能够得到满足农艺要求的覆土效果, 需要合理选取分土器的结构参数, 故有必要研究分土器的排土口宽度和离地高度对覆土宽度和覆土厚度的影响。



1. 起土铲; 2. 从动轮; 3. 升运链; 4. 刮板; 5. 膜辊; 6. 分土器; 7. 主动轮; 8. 起土护罩; 9. 调节拉杆

1. digging shovel; 2. driven wheel; 3. lifting chain; 4. scraper; 5. film roller; 6. soil separating device; 7. drive wheel; 8. soil guard shield; 9. adjusting rod

图 4 升运装置结构

Fig.4 Structure diagram of lifting device

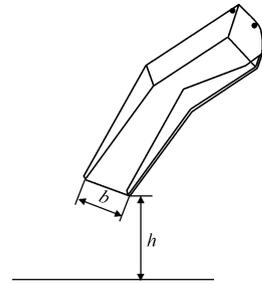


图 5 分土器示意图

Fig.5 Schematic diagram of soil separating device

## 4 仿真试验及结果分析

为对跨越式膜上覆土装置的覆土特性进行研究, 借助 EDEM 离散单元法对覆土宽度和覆土厚度进行数值模拟。主要以分土器和土壤为研究对象, 不考虑其他杂余, 从而便于模拟和减少计算量。其中, 设置土壤颗粒之间和土壤颗粒与分土器之间的接触模型为 Hertz Mindlin 无滑动接触模型<sup>[15]</sup>, 材料参数和接触参数如表 1 所示。为方便仿真, 设置重力方向为  $y$  轴负方向, 仿真时使地膜相对于  $x$  轴负方向运动, 大小为机组前进速率。设置土壤颗粒半径为 1.3 mm, 选择土壤材料并自动计算其属性。依照样机在 Pro/E 中建立分土器模型, 导入 EDEM 软件, 建立地膜模型并选择相应的材料, 在分土器模型

上方建立颗粒工厂并选择虚拟类型,设置颗粒的产生速率为  $6\ 000\ \text{个}\cdot\text{s}^{-1}$ 。EDEM 软件会自动计算雷利时间步长  $T_R$ ,设置时间步长为  $0.38T_R$ ,时间间隔为  $0.01\ \text{s}$ ,网格大小为  $9.28R_{\min}$ (最小颗粒半径),选取碰撞跟踪<sup>[16]</sup>。

表 1 材料力学特性<sup>[17]</sup>

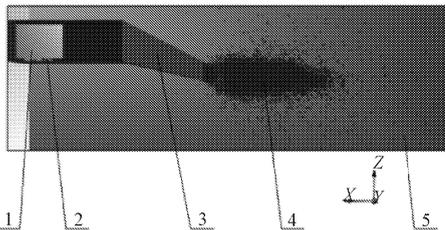
Table 1 Material mechanical properties

材料 Material	材料参数 Material parameters		
	泊松比 Poisson ratio	剪切模量 Shear modulus /MPa	密度 Density /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
土壤 Soil	0.30	100	2680
钢 Steel	0.28	$3.5 \times 10^4$	7850
地膜 Plastic film	0.49	6.1	1000

碰撞形式 Impact form	接触参数 Contact parameters		
	恢复系数 Recovery coefficient	静摩擦系数 Static friction coefficient	动摩擦系数 Dynamic friction coefficient
颗粒 - 颗粒 Particle - particle	0.3	0.5	0.3
颗粒 - 溜土槽 Particle - soil slipping groove	0.3	0.3	0.2
颗粒 - 地膜 Particle - plasticfilm	0.3	0.42	0.34

进行仿真试验前,需根据试验设计改变参数设置和模型结构。通过调整 EDEM 中的地膜模型的位置改变排土口高度,通过改变三维模型实现开口宽度的调整<sup>[12]</sup>。为较准确地进行覆土宽度的数值模拟仿真,应保证粒子群产生量与实际覆土量一致。因此,需待粒子生成一定厚度后,开始仿真覆土过程,粒子产生时间依据单位时间内的取土量计算。图 6 为膜上覆土过程模拟。



1. 粒子工厂; 2. 升运链; 3. 溜土槽; 4. 土壤; 5. 地膜  
1. particle factory; 2. lifting chain; 3. soil sliding groove; 4. soil; 5. plastic film

图 6 膜上覆土过程

Fig. 6 Procedure of covering soil on film

#### 4.1 仿真试验设计方案及结果

采用 Box - Behnken 试验设计模型能用较少的试验次数进行全面的分析研究,以升运链速度与

机组前进速度之比  $i$ 、排土口高度  $h$ 、排土口宽度  $b$  为自变量,以覆土宽度  $B$  和覆土厚度合格率  $F_h$  为响应值,各试验因素水平编码见表 2。依响应曲面法试验安排 15 组仿真试验<sup>[18]</sup>,如表 3 所示。

表 2 因素水平编码

Table 2 Codes of factors and levels

水平 Levels	因素 Factors		
	$i$	$h$	$b$
-1	1.38	190	100
0	—	200	110
1	2.56	210	120

表 3 试验方案及仿真试验结果

Table 3 Test scheme and simulation results

试验编号 Test number	$i$	$h$	$b$	$B$	$F_h$
1	1	1	0	264.56	90.7
2	1	0	-1	254.34	93.2
3	0	-1	-1	259.43	85.9
4	1	0	1	268.45	94.8
5	0	1	-1	276.53	84.7
6	1	-1	0	251.65	91.8
7	0	0	0	268.34	89.5
8	0	0	0	269.68	92.3
9	0	1	1	284.54	91.3
10	0	0	0	273.35	92.0
11	-1	0	1	274.63	89.1
12	0	-1	1	271.32	91.8
13	-1	0	-1	251.54	85.9
14	-1	1	0	264.35	86.4
15	-1	-1	0	257.98	83.8

#### 4.2 回归模型建立与检验

运用 Design - Expert 8.0.6 软件对试验结果数据(表 3)进行二次回归分析,并进行回归拟合,获得编码值表示的覆土宽度  $B$  的二次回归模型为:

$$B = 270.46 - 1.19i + 6.20h + 7.14b + 1.64ih - 2.25ib - 0.97hb - 10.77i^2 - 0.053h^2 + 2.55b^2 \quad (5)$$

覆土厚度合格率  $F_h$  的二次回归模型为:

$$F_h = 91.27 + 3.22i - 0.088h + 2.16b - 0.80ih - 0.40ib + 0.18hb - 0.45i^2 - 2.77h^2 - 0.017b^2 \quad (6)$$

通过对试验数据的分析和拟合,得到方差分析结果如表 4 和表 5 所示。覆土宽度回归模型  $P_1 < 0.0001$ ,表明回归模型极其显著( $P < 0.01$ );覆土厚度合格率回归模型  $P_2 = 0.0265$ ,表明回归模型显著( $0.01 < P < 0.05$ )。回归模型能正确反映试验指标与试验因素之间的关系,能够较好地对比试验结果进

行预测<sup>[19]</sup>。

对上述回归方程进行失拟性检验,失拟项  $P_1 = 0.2854$ ,  $P_2 = 0.4905$ ,均不显著 ( $P > 0.1$ ),表明不存在其它影响试验指标的主要因素,试验因素与试验指标存在显著的二次关系。

表 4 覆土宽度 ( $B$ ) 方差分析

Table 4 Variance analysis of covering soil width

变异来源 Variation source	平方和 Sum of square	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	$F$	$P$
回归模型 Model	1232.61	9	136.96	10.21	< 0.0001
残差 Residue	67.04	5	13.41		
失拟项 Lack of fit	53.58	3	17.86	2.66	0.2854
纯误差 Pure error	13.45	2	6.73		
校正总和 Corrected total	1299.65	14			

表 5 覆土厚度合格率 ( $F_h$ ) 方差分析

Table 5 Variance analysis of qualified rate of covering soil thickness

变异来源 Variation source	平方和 Sum of square	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	$F$	$P$
回归模型 Model	152.64	9	16.96	6.50	0.0265
残差 Residue	13.05	5	2.61		
失拟项 Lack of fit	8.33	3	2.78	1.17	0.4905
纯误差 Pure error	4.73	2	2.36		
校正总和 Corrected total	165.70	14			

4.3 响应曲面分析

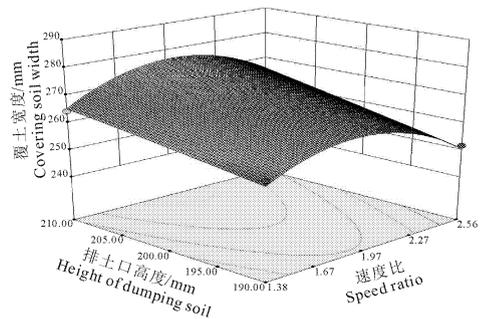
利用 Design - Expert 8.0.6 软件对数据进行处理,通过对速度比  $i$ 、排土口高度  $h$ 、排土口宽度  $b$  之间的交互作用对试验指标覆土宽度  $B$  和覆土厚度合格率  $F_h$  的影响进行分析比较,作出响应面和等高线。

4.3.1 覆土宽度响应曲面分析 当排土口宽度为 110 mm 时,速度比  $i$  和排土口高度  $h$  的交互作用对于覆土宽度  $B$  的响应曲面如图 7a 所示。由图可知,速度比与排土口高度的交互作用对于覆土宽度有显著的影响。当速度比一定时,覆土宽度随着排土口高度的增加而增加。

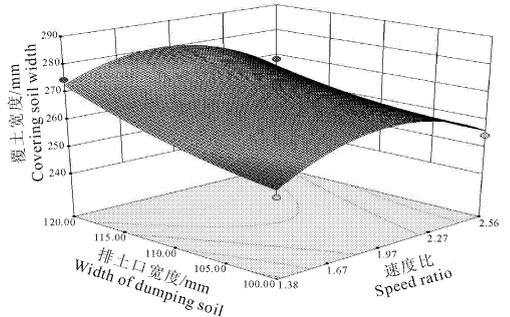
当排土口高度为 200 mm 时,速度比  $i$  和排土口宽度  $b$  的交互作用对覆土宽度  $B$  的响应曲面如图

7b 所示。由图可知,速度比和排土口宽度的交互作用对覆土宽度有显著影响;当速度比  $i$  一定时,覆土宽度  $B$  随着排土口宽度  $b$  的增加而增加。

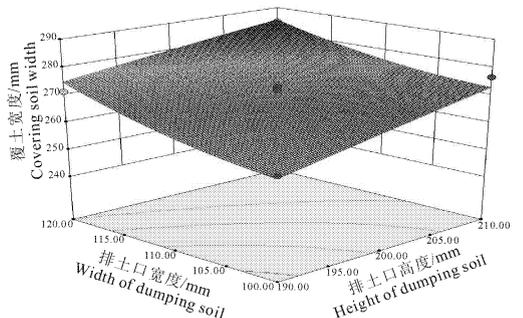
当速度比为 2.56 时,排土口宽度  $b$  与排土口高度  $h$  的交互作用对于覆土宽度  $B$  的响应曲面如图 7c 所示。由图可知,覆土宽度受排土口宽度与排土口高度的影响不大。当排土口高度  $h$  固定在某一水平时,随着排土口宽度  $b$  的增加,覆土宽度  $B$  呈上升趋势;当排土口宽度  $b$  固定时,随着排土口高度  $h$  的增加,覆土宽度  $B$  也呈上升趋势。



(a) 速度比与排土口高度的交互作用  
The interaction of speed ratio and height of dumping soil



(b) 速度比与排土口宽度的交互作用  
The interaction of speed ratio and width of dumping soil



(c) 排土口宽度与排土口高度的交互作用  
The interaction of width and height of dumping soil

图 7 覆土宽度 ( $B$ ) 的响应曲面

Fig.7 Response surface of covering soil width

4.3.2 覆土厚度合格率的响应曲面分析 当排土口宽度为 110 mm 时,速度比 ( $i$ ) 和排土口高度 ( $h$ ) 的交互作用如图 8a 所示。当排土口高度一定时,覆土厚度合格率随着链速与机组前进速度比的增大呈增高趋势;当速度比一定时,覆土厚度合格率随着排

土口高度的增加而先增大后减小;影响覆土厚度合格率的主要因素是链速与机组前进速度比。

当排土口高度为 200 mm 时,速度比( $i$ )和排土口宽度( $b$ )的交互作用如图 8b 所示。当速度比一定时,覆土厚度合格率随着排土口宽度的增大呈增高趋势;当排土口宽度一定时,覆土厚度合格率随着速度比的增大而提高;影响覆土厚度合格率的主要因素是链速与机组前进速度比。

当速度比为 2.56 时,排土口高度( $h$ )和排土口宽度( $b$ )的交互作用如图 8c 所示。当排土口宽度一定时,覆土厚度合格率随着排土口高度的增大而先增大后减小;当排土口高度一定时,覆土厚度合格率随着排土口宽度的增大呈微弱的增大趋势;影响覆土厚度合格率的主要因素是排土口高度。

#### 4.4 参数优化

为保证覆土宽度满足农艺要求,即覆土宽度为 270 mm 左右,覆土厚度合格率 $\geq 90\%$ ,通过 Design - Expert 软件中的 Optimization - Numerical 模块对二次回归方程模型进行优化求解,得到分土器的最佳工作参数:速度比为 1.38,排土口高度为 200 mm,排土口宽度为 120 mm。

### 5 验证试验

#### 5.1 试验条件

田间验证试验于 2015 年 4 月下旬在陇中黄土高原旱农区定西市安定区试验点进行,覆土作业效果见图 9。试验土壤为黄绵土,含水率约为 16.3%,容重为  $1.30 \sim 1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,坚实度为  $2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。试验机具为自制马铃薯全膜双垄沟播种机,配套动力为 22.1 kW 东方红 - 300 型轮式拖拉机,起土铲倾角为  $15^\circ$ ,排土口离地高度为 200 mm,排土口宽度为 190 mm,拖拉机动力输出轴转速为  $540 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ,匀速作业,保证链速与机组前进速度比约为 1.38。试验中所用地膜宽度为 1 200 mm,厚度为 0.008 mm。



图 9 作业效果图

Fig.9 Photo of operation effect

#### 5.2 试验方法

验证试验中对覆土宽度和覆土厚度两个试验指标进行了测定,方法如下<sup>[20]</sup>:

在测定地块上,沿对角线随机等距离取 5 个测区,每个测区宽度为 1 个作业幅宽,长度为 10 m。在每个测区内随机抽取 5 个测点,测定覆土宽度和覆土厚度。覆土厚度以种行正上方的实测值为准进行统计。

#### 5.3 试验结果

为验证工作参数的合理性与科学性,选取上述仿真试验中优化后的水平因素,即链速与机组前进速度比 1.38、排土口高度 200 mm、排土口宽度 120 mm,进行田间重复试验,得到覆土宽度均值为 279.6 mm,覆土厚度合格率为 93.7%。按最优组合调整仿

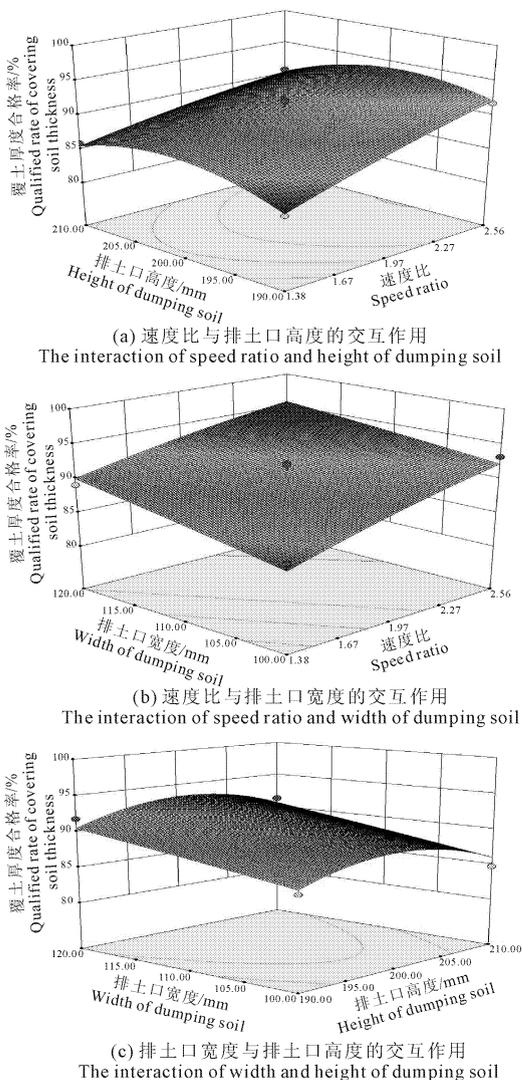


图 8 覆土厚度合格率( $F_h$ )的响应曲面

Fig.8 Response surface of qualified rate of covering soil thickness

真模型参数后进行数值模拟,得到的模拟覆土宽度为 265.87 mm,覆土厚度合格率为 94.3%。覆土宽度和覆土厚度合格率模拟值在误差允许范围内接近田间测试均值,并能够满足农艺要求,说明建立的二次回归模型能够较好地预测试验结果,可以为覆土装置的设计和参数优化提供一定的参考。

## 6 结 论

1) 构建覆土机构实体模型,运用 EDEM 离散单元法模拟仿真试验,采用三因素三水平响应曲面法,借助 Design - Expert 软件处理试验结果,建立了覆土宽度和覆土厚度合格率的二次回归模型,分析因素之间的交互作用对试验指标的影响,优化求解,得到最佳参数组合:链速与机组前进速度比为 1.38、排土口高度为 200 mm、排土口宽度为 120 mm。

2) 运用所得最佳参数组合,进行田间验证试验,结果表明,用离散单元法模拟出的覆土宽度值和覆土厚度合格率接近田间重复试验均值,说明了用该方法模拟的科学性及二次回归模型的准确性,能够为膜上覆土装置的设计和改进行提供一定的理论依据。

### 参 考 文 献:

[1] 何春雨,周祥椿,杜久元,等.全膜覆土免耕穴播栽培技术对冬小麦产量效应的研究[J].农业现代化研究,2010,(6):20-22.

[2] Jiang Xiaojin, Li xiaogang. Assessing the effects of plastic film fully mulched ridge-furrow on rainwater distribution in soil using dye tracer and simulated rainfall[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 152: 67-73.

[3] 毕继业,王秀芬,朱道林.地膜覆盖对农作物产量的影响[J].农业工程学报,2008,24(11):172-175.

[4] 岳维云,宋建荣,赵尚文,等.不同覆膜方式对地温及冬小麦地

上干物质累积规律的影响[J].干旱地区农业研究,2014,32(4):133-139.

[5] 王亚艺,李松龄,张 荣.不同栽培模式对马铃薯产量及肥料利用率的影响[J].浙江农业学报,2015,27(10):1802-1806.

[6] 李志军,赵爱萍,丁晖兵.旱地玉米垄沟周年覆膜栽培增产效应研究[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):12-17.

[7] 侯慧芝,吕军峰,郭天文,等.西北黄土高原半干旱区全膜覆土穴播对土壤水热环境和小麦产量的影响[J].生态学报,2014,34(19):5503-5513.

[8] 范玉滨,杨然兵,柴恒辉,等.膜上苗带覆土装置设计与试验研究[J].中国农机化学报,2014,35(5):5-8.

[9] 安世才,张 勇,王 赟,等.起垄全铺膜联合作业机的设计与试验研究[J].中国农机化,2009,(6):73-76.

[10] 张 勇,安世才,王 赟,等.1MLQS—40/70 起垄全铺膜联合作业机的改进设计[J].中国农机化,2011,(4):89-92.

[11] 黄闪闪,李 江,朱瑞祥,等.膜上移栽机穴覆土机构设计[J].农机化研究,2016,38(7):152-156.

[12] 孙 伟,刘小龙,石林榕,等.刮板升运带式膜上覆土装置覆土特性[J].机械工程学报,2016,52(7):38-45.

[13] 甘肃农业大学.一种可调式马铃薯全膜双垄沟播种机:中国,201510774316.0[P].2015-11-13.

[14] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:机械工业出版社,1990.

[15] 张永良.基于离散元的逆旋转耕施肥播种机抛土性能仿真及试验研究[D].镇江:江苏大学,2012.

[16] 李洪昌,李耀明,唐 忠,等.基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J].农业工程学报,2011,27(5):117-121.

[17] 孙其诚,王光谦.颗粒物质力学导论[M].北京:科学出版社,2009.

[18] 石林榕,孙 伟,吴建民,等.振动挖掘铲减阻数值模拟及参数优化[J].中国农业大学学报,2014,19(2):181-188.

[19] 戴 飞,赵武云,马明义,等.双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J].农业机械学报,2016,47(1):83-90.

[20] 中华人民共和国农业部.NY/T 986-2006.铺膜机作业质量[S].北京:中国农业出版社,2006.