

基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机作业性能试验

戴 飞 赵武云 马军民 王久鑫 石林榕 刘小龙  
(甘肃农业大学工学院, 兰州 730070)

**摘要:**应用 Plackett – Burman 试验设计并结合玉米全膜双垄沟穴播机工作原理分析获得的 8 个初始参数(放大机构比例、近等速机构传动比、成穴器开启位移、成穴器角度、曲柄转速、机器前进速度、主动杆转速、成穴器播深)进行筛选,得到作业机曲柄转速、机器前进速度以及主动杆转速对穴孔错位率、采光面机械破损率影响显著。在通过最陡爬坡试验确定显著性参数最优值区间的基础上,根据 Box – Behnken 试验结果分别建立了穴孔错位率、采光面机械破损率与显著性参数的二阶回归模型,探究单一因素及交互因素对不同响应值的影响效应,并结合 Optimization – Numerical 计算方法对直插式穴播机工作参数进行优化与田间试验验证。试验结果表明:样机作业性能在符合国家标准要求前提下,各显著性参数对其穴孔错位率的影响主次顺序为机器前进速度、曲柄转速、主动杆转速;对采光面机械破损率的影响贡献由大到小为机器前进速度、主动杆转速、曲柄转速。优化所得的样机最佳工作参数条件为:机器前进速度为 0.52 m/s、曲柄转速为 72 r/min、主动杆转速为 140 r/min。同时在此条件下,样机田间验证试验的穴孔错位率均值为 1.23%,采光面机械破损率均值为 9.56%,较优化前穴孔错位率(1.56% ~ 5.87%)、采光面机械破损率(10.63% ~ 73.37%)有明显的下降,表明在优化工作参数条件下作业机能够实现零速投种,基本无穴孔错位与撕膜、挑膜现象出现,能够有效避免对采光面地膜的机械损伤,表明建立的回归模型是可靠的。

**关键词:**玉米;穴播机;近等速机构;全膜双垄沟;参数优化

**中图分类号:** S223.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0049-08

Operation Performance Test of Hill-seeder Based on Mechanism with Approximate Constant Speed for Corn Whole Plastic-film Mulching on Double Ridges

Dai Fei Zhao Wuyun Ma Junmin Wang Jiuxin Shi Linrong Liu Xiaolong  
(School of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, 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. The mechanical sowing with film was an inevitable trend in farming. The working performance of operation machine for direct insert hill-seeder based on mechanism with approximate constant speed for corn whole plastic-film mulching on double ridges was studied, and the best working parameters of prototype, which avoided phenomenon of dislocation of soil hole and mechanical damage of daylighting mulch, were obtained. The Plackett – Burman test was performed to screen the significant parameters from the eight selected parameters (proportion of amplification mechanism, transmission ratio of the mechanism with approximate constant speed, opening displacement of hole-former, angle of hole-former, rotation speed of crank, forward speed of machine, rotation speed of driving lever and planting depth of hole-former). It was found that the rotation speed of crank, forward speed of machine and rotation speed of driving lever

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-20  
**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51405086)、甘肃省青年科技基金计划项目(1506RJYA020)、甘肃省科技重大专项计划项目(143NKDF016)和甘肃省高等学校科研项目(2015A-079)  
**作者简介:** 戴飞(1987—),男,讲师,主要从事北方旱区作物生产装备工程研究,E-mail: daifei@gsau.edu.cn  
**通信作者:** 赵武云(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事旱区农业工程技术与装备研究,E-mail: zhaowuy@gsau.edu.cn

had significant effects on dislocation of soil hole rate and mechanical damage rate of daylighting mulch while the other five parameters' influence was negligible. The steepest ascent test was used to determine the best region of significant parameters. Based on the result of Box - Behnken test, the quadratic polynomial model for dislocation of soil hole rate and mechanical damage rate of daylighting mulch with the three significant parameters were created, the effect of single factor and interaction factors on different response values was explored, and the Optimization - Numerical calculation method was combined to optimize and test the work parameters of direct insert hill-seeder in the fields. The test results showed that the operation performance of prototype was in accordance with requirements of national standard, the effects orders of three parameters on dislocation of soil hole rate were as follows: forward speed of machine, rotation speed of crank and rotation speed of driving lever. The effects orders of three parameters on mechanical damage rate of daylighting mulch were as follows: forward speed of machine, rotation speed of driving lever and rotation speed of crank. The optimal working parameters were machine forward speed of 0.52 m/s, crank rotation speed of 72 r/min and driving lever rotation speed of 140 r/min. Confirmatory tests showed that the average value of dislocation of soil hole rate was 1.23% and mechanical damage rate of daylighting mulch was 9.56%, which were dropped significantly compared with before optimization of dislocation of soil hole rate (1.56% ~ 5.87%) and mechanical damage rate of daylighting mulch (10.63% ~ 73.37%). With the optimized working parameters, the throw speed could achieve zero and the problems of picking and tore films and holes with seedlings dislocation were solved, and the mechanical damage of daylighting mulch was also avoided. Meanwhile, it proved that the established regression model was reliable.

**Key words:** corn; hill-seeder; mechanism with approximate constant speed; whole plastic-film mulching on double ridges; parameters optimization

## 引言

旱区全膜双垄沟穴播技术集“垄沟种植、膜面集雨、覆盖抑蒸”农艺要求为一体,能够最大限度地保蓄田间自然降水,使地面蒸发量降到最低,实现集雨、保墒、抗旱、增产<sup>[1-2]</sup>。该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<sup>[3-4]</sup>。机械化膜上精量播种是实现全膜双垄沟大田玉米生产全程机械化的重要环节之一,其配套播种机具在“直插、破膜、成穴”作业过程中产生的穴孔错位、地膜采光面机械破损皆是抑制玉米全膜双垄沟生产系统抑蒸、集雨、增产功能的关键因素<sup>[5-6]</sup>。

目前,与全膜双垄沟播技术相配套的播种机具主要有滚轮式穴播器和手持式点播枪,作业效果存在伤膜与种穴错位现象,劳动强度高、播种效率低,严重制约了全膜双垄沟穴播技术的推广应用。直插式膜上穴播机是近年来针对玉米全膜双垄沟播特殊农艺技术要求提出,除满足普通穴播机作业性能要求外,主要意在借助相关速度补偿机构补偿整机的前进速度,使得穴播机前行作业过程中其成穴器位于播种段与出土段的水平分速度为零,实现成穴器在覆膜种床上的垂直插入投种控制(零速投种)与

定点强制开启播种,有效缓解回转式穴播机余摆线所引发的撕膜、挑膜与穴孔错位现象<sup>[7]</sup>,提高播种作业效率,降低农机装备对全膜双垄沟生产系统的损害,提升其产量效应。

笔者课题组设计了一种基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机,通过近等速补偿机构与放大机构相配合,对直插播种机构进行控制、协调,其作业效果满足玉米全膜双垄沟穴播的农艺技术要求<sup>[8]</sup>。本文以玉米全膜双垄沟穴播机工作参数作为试验因素,通过 Plackett - Burman 试验、最陡爬坡试验分别获取相关显著参数与响应面中心点,采用响应曲面分析法确定作业机各显著参数及其交互作用对穴孔错位率、采光面机械破损率的影响和获取最优控制变量组合,以达到最佳膜上播种作业性能。

## 1 整机组成与工作原理

### 1.1 结构组成

如图1所示,设计的基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机通过电动机驱动作业,主要由近等速机构(转动导杆机构与正弦机构串联组成)、直插播种装置(曲柄-连杆机构与成穴器组成)、放大机构、传动系统、强排播种机构、排种系统、行走系统及操作手柄等部件组成。

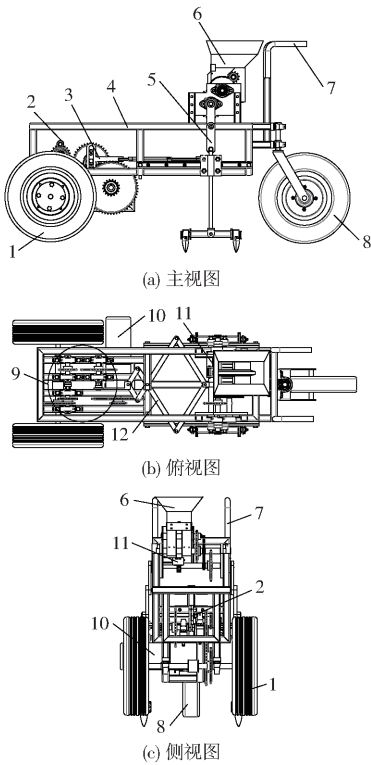


图1 基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机

Fig.1 Structures of hill-seeder based on mechanism

with approximate constant speed for corn whole plastic-film mulching on double ridges

1. 驱动轮 2. 转动导杆机构 3. 正弦机构 4. 机架 5. 直插播种装置 6. 种箱 7. 操作手柄 8. 尾轮 9. 传动系统 10. 直流减速电动机 11. 强排播种装置 12. 放大机构

1.2 工作原理与参数分析

如图2所示,样机工作时电动机转动,通过动力输出端的大链轮将动力传递并带动转动导杆机构与正弦机构运行,实现近等速机构、放大机构及曲柄-连杆机构共同控制成穴器运动,以补偿成穴器在机具水平前进方向位移,保证其相对于地面的水平分速度接近于零,近似垂直破膜入土、出土完成膜上播种作业<sup>[8]</sup>。其中,近等速机构由转动导杆机构(包括主动杆、导杆滑槽、导杆、小链轮)与正弦机构(包括曲柄、平移杆滑槽、平移杆、大链轮)通过选取不同传动比的大小链轮且由传动链串联组成,如图3所示。

依据样机上述工作原理及其补偿机构组成分析得出,影响基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机作业性能的试验因素有:机器前进速度、近等速机构传动比、主动杆转速、放大机构比例、曲柄转速、成穴器开启位移、成穴器角度、成穴器播深。

2 试验材料与方法

2.1 试验材料

基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机作业

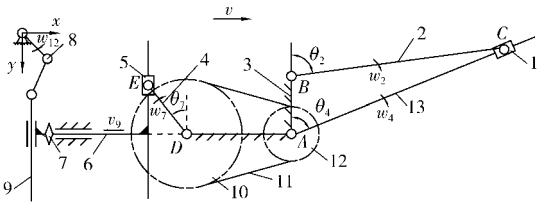


图2 工作原理图

Fig.2 Schematic diagram of operation machine

1. 机架 2. 主动杆 3. 导杆滑槽 4. 导杆 5. 小链轮 6. 大链轮 7. 曲柄 8. 平移杆滑槽 9. 平移杆 10. 传动链 11. 放大机构 12. 曲柄-连杆机构 13. 成穴器

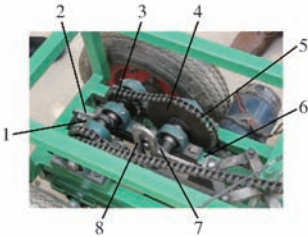


图3 近等速机构组成

Fig.3 Composition of mechanism with approximate constant speed

1. 主动杆 2. 导杆 3. 小链轮 4. 大链轮 5. 传动链 6. 机架 7. 曲柄 8. 平移杆

性能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 hm<sup>2</sup>,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进行起垄铺膜整地作业,覆膜厚度0.01 mm,试验用玉米种子为郑单958号,样机作业性能试验通过变换其不同工作参数进行全膜双垄沟膜上播种作业。

2.2 试验方法

试验依据 NY/T 987—2006《铺膜穴播机作业质量》标准对播种机作业效果的要求,以测定计算玉米全膜双垄沟穴播机膜上播种后的穴孔错位率、采光面机械破损率作为优化样机作业性能目标。其中,穴孔错位率测定以0.4 m(播种株距)×12 m(作业小区长度)的面积为1个作业小区,采光面机械破损率以1.2 m(地膜幅宽)×5 m(测区长度)的面积为1个测定小区,应用钢卷尺进行人工测量的作业方式分别获取膜孔与孔穴错开1/2膜孔直径及以上的膜孔个数、播种总膜孔数和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: $S_c \leq 50 \text{ mm/m}^2$ 表明直插式播种机作业性能符合标准要求),分别以3个不同作业小区的测定平均值为测试结果。

样机穴孔错位率、采光面机械破损率分别为

$$Y_1 = \frac{c_h}{f} \times 100\% \tag{1}$$

$$Y_2 = \frac{S_c}{50} \times 100\%$$
 (2)

其中

$$S_c = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{LB}$$
 (3)

式中  $Y_1$ ——穴孔错位率, %  
 $Y_2$ ——采光面地膜机械破损率, %  
 $c_h$ ——作业小区内膜孔与孔穴错开 1/2 膜孔直径及以上的膜孔个数, 个  
 $f$ ——作业小区内测定总膜孔数, 个  
 $S_c$ ——采光面地膜机械破损程度, mm/m<sup>2</sup>  
 $L_i$ ——测定小区内第  $i$  处机械破损部位的边

长或缝长, mm  
 $L$ ——测定小区长度, m  
 $B$ ——测定小区内采光面地膜宽度平均值, m

2.3 Plackett – Burman 试验设计参数筛选

由于影响基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机作业效果试验因素较多, 为避免因素太多或部分因素不显著而对后续样机性能优化试验结果产生干扰, 应用 Plackett – Burman 试验设计, 因素水平设计如表 1 所示, 对作业机相关的 8 个试验参数进行筛选, 外加 3 个虚拟参数, 每个参数根据已有研究与标准规定取高、低 2 个水平, 以编码 -1 和 1 形式表示, 试验参数如表 1 所示<sup>[9-10]</sup>。

表 1 Plackett – Burman 试验参数  
Tab.1 Parameters of Plackett – Burman test

| 编码 | 因素        |          |                    |                    |                                      |                                    |                                      |                 |                   | 虚拟参数 |
|----|-----------|----------|--------------------|--------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|-------------------|------|
|    | 近等速机构     | 放大机构     | 成穴器开启              | 成穴器角度              | 曲柄转速                                 | 机器前进速度                             | 主动杆转速                                | 成穴器播深           |                   |      |
|    | 传动比 $x_1$ | 比例 $x_2$ | 位移 $x_3/\text{mm}$ | $x_4/({}^{\circ})$ | $x_5/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$ | $x_6/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | $x_7/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$ | $x_8/\text{mm}$ | $x_9 \sim x_{11}$ |      |
| -1 | 2         | 2        | 9                  | 45                 | 60                                   | 0.4                                | 100                                  | 30              | -                 |      |
| 1  | 3         | 2.5      | 12                 | 60                 | 80                                   | 0.6                                | 140                                  | 45              | -                 |      |

应用 Plackett – Burman 试验设计及测定结果如表 2 所示, 共进行 12 组优化设计变量筛选试验。其中, 作业机穴孔错位率在 1.17% ~ 5.72% 之间, 采

光面机械破损率在 20.8% ~ 68.4% 之间, 符合膜上播种机相关作业标准要求。

表 2 Plackett – Burman 试验设计及结果  
Tab.2 Design and results of Plackett – Burman test

| 序号 | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $X_4$ | $X_5$ | $X_6$ | $X_7$ | $X_8$ | $X_9$ | $X_{10}$ | $X_{11}$ | 穴孔错位率<br>$Y_1/\%$ | 采光面机械<br>破损率 $Y_2/\%$ |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|----------|-------------------|-----------------------|
|    |       |       |       |       |       |       |       |       |       |          |          |                   |                       |
| 1  | 1     | 1     | 1     | -1    | -1    | -1    | 1     | -1    | 1     | 1        | -1       | 4.83              | 59.6                  |
| 2  | -1    | 1     | -1    | 1     | 1     | -1    | 1     | 1     | 1     | -1       | -1       | 3.76              | 48.7                  |
| 3  | -1    | 1     | 1     | 1     | -1    | -1    | -1    | 1     | -1    | 1        | 1        | 5.72              | 68.4                  |
| 4  | -1    | 1     | 1     | -1    | 1     | 1     | 1     | -1    | -1    | -1       | 1        | 1.17              | 20.8                  |
| 5  | 1     | 1     | -1    | 1     | 1     | 1     | -1    | -1    | -1    | 1        | -1       | 3.08              | 40.6                  |
| 6  | -1    | -1    | -1    | 1     | -1    | 1     | 1     | -1    | 1     | 1        | 1        | 4.94              | 55.7                  |
| 7  | 1     | -1    | 1     | 1     | 1     | -1    | -1    | -1    | 1     | -1       | 1        | 5.11              | 61.3                  |
| 8  | -1    | -1    | -1    | -1    | -1    | -1    | -1    | -1    | -1    | -1       | -1       | 5.68              | 67.9                  |
| 9  | 1     | -1    | 1     | 1     | -1    | 1     | 1     | 1     | -1    | -1       | -1       | 4.31              | 55.3                  |
| 10 | 1     | 1     | -1    | -1    | -1    | 1     | -1    | 1     | 1     | -1       | 1        | 4.65              | 57.1                  |
| 11 | -1    | -1    | 1     | -1    | 1     | 1     | -1    | 1     | 1     | 1        | -1       | 3.19              | 42.1                  |
| 12 | 1     | -1    | -1    | -1    | 1     | -1    | 1     | 1     | -1    | 1        | 1        | 3.71              | 48.5                  |

通过对显著因素筛选试验结果进行方差分析, 可得各试验参数对作业机穴孔错位率、采光面机械破损率的影响效果如表 3 所示。

由表 3 可知, 作业机曲柄转速( $x_5$ )、机器前进速度( $x_6$ )及主动杆转速( $x_7$ )均对作业机穴孔错位率、采光面机械破损率影响显著(大于 10%), 而其余参数对试验目标影响不显著或极小。因此在后续最陡爬坡试验以及 Box – Behnken 试验中只考虑这 3 个影响显著的试验参数。

2.4 最陡爬坡试验

为进一步确定 Box – Behnken 试验响应面的中心点, 应用对作业机穴孔错位率、采光面机械破损率影响显著的 3 个试验参数进行最陡爬坡试验设计, 试验设计及结果如表 4 所示<sup>[11]</sup>。试验结果表明随着样机曲柄转速、机器前进速度、主动杆转速的不断增加, 穴孔错位率、采光面机械破损率呈现出先减小后增加的趋势。其中在进行 4 号试验时, 穴孔错位率(2.31%)、采光面机械破损率(14.6%)均为最小

表 3 Plackett – Burman 试验参数显著性分析  
Tab.3 Significance analysis of parameters in Plackett – Burman test

| 参数    | 穴孔错位率 $Y_1$ |        |        |       | 采光面机械破损率 $Y_2$ |         |        |       |
|-------|-------------|--------|--------|-------|----------------|---------|--------|-------|
|       | 效应          | 均方和    | 影响率/%  | 显著性排序 | 效应             | 均方和     | 影响率/%  | 显著性排序 |
| $x_1$ | 0. 21       | 0. 13  | 0. 69  | 7     | 3. 13          | 29. 45  | 1. 52  | 6     |
| $x_2$ | -0. 62      | 1. 16  | 6. 31  | 4     | -5. 93         | 105. 61 | 5. 44  | 4     |
| $x_3$ | -0. 25      | 0. 19  | 1. 01  | 6     | -1. 83         | 10. 08  | 0. 52  | 8     |
| $x_4$ | 0. 62       | 1. 13  | 6. 18  | 5     | 5. 67          | 96. 33  | 4. 96  | 5     |
| $x_5$ | -1. 68      | 8. 52  | 46. 36 | 1     | -17. 00        | 867. 00 | 44. 67 | 1     |
| $x_6$ | -1. 24      | 4. 65  | 25. 31 | 2     | -13. 80        | 571. 32 | 29. 44 | 2     |
| $x_7$ | -0. 79      | 1. 85  | 10. 06 | 3     | -8. 13         | 198. 45 | 10. 23 | 3     |
| $x_8$ | 0. 088      | 0. 023 | 0. 13  | 8     | 2. 37          | 16. 80  | 0. 87  | 7     |

表 4 最陡爬坡试验设计及结果  
Tab.4 Design and results of the steepest ascent test

| 序号 | 曲柄转速/<br>( $r \cdot \min^{-1}$ ) | 机器前进<br>速度/<br>( $m \cdot s^{-1}$ ) | 主动杆<br>转速/<br>( $r \cdot \min^{-1}$ ) | 穴孔错位<br>率/% | 采光面机<br>械破损<br>率/% |
|----|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-------------|--------------------|
| 1  | 60                               | 0. 40                               | 100                                   | 5. 18       | 47. 9              |
| 2  | 65                               | 0. 45                               | 110                                   | 4. 23       | 33. 2              |
| 3  | 70                               | 0. 50                               | 120                                   | 3. 56       | 31. 7              |
| 4  | 75                               | 0. 55                               | 130                                   | 2. 31       | 14. 6              |
| 5  | 80                               | 0. 60                               | 140                                   | 2. 75       | 28. 8              |

值,由此可知,最优目标值区间应该在 4 号水平附近,因此选取 4 号水平为响应面中心点,3 号、5 号水平分别为低、高水平进行后续 Box – Behnken 试验设计。

2.5 响应曲面法试验方案

2.5.1 回归模型建立与检验

综合上述最陡爬坡试验结果与分析,采用 Box – Behnken 试验设计原理,以曲柄转速( $x_5$ )、机器前进速度( $x_6$ )和主动杆转速( $x_7$ )为自变量,穴孔错位率( $Y_1$ )、采光面地膜机械破损率( $Y_2$ )为响应值,各试验因素水平编码如表 5 所示,共实施 17 组响应面分析试验(表 6)。表中  $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$  为因素编码,应用 Design-Expert 8. 050 进行数据处理分析。

表 5 因素水平编码  
Tab.5 Coding of factors and levels

| 编码 | 因素                                |                                  |                                    |
|----|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
|    | 曲柄转速<br>$x_5/(r \cdot \min^{-1})$ | 机器前进速度<br>$x_6/(m \cdot s^{-1})$ | 主动杆转速<br>$x_7/(r \cdot \min^{-1})$ |
| -1 | 70                                | 0. 50                            | 120                                |
| 0  | 75                                | 0. 55                            | 130                                |
| 1  | 80                                | 0. 60                            | 140                                |

试验结果如表 6 所示,基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机膜上播种作业后其穴孔错位率为 1. 56% ~ 5. 87%、采光面地膜机械破损率达 10. 63% ~ 73. 37%,符合 NY/T 987—2006《铺膜穴播机作业质量》标准要求。

表 6 Box – Behnken 试验设计及结果  
Tab.6 Design and results of Box – Behnken test

| 序号 | 曲柄转速<br>$X_5$ | 机器前进<br>速度<br>$X_6$ | 主动杆<br>转速<br>$X_7$ | 穴孔错位<br>率/%<br>$Y_1$ | 采光面机械<br>破损率/%<br>$Y_2$ |
|----|---------------|---------------------|--------------------|----------------------|-------------------------|
| 1  | -1            | 0                   | -1                 | 2. 16                | 19. 18                  |
| 2  | -1            | 0                   | 1                  | 2. 38                | 10. 63                  |
| 3  | 1             | -1                  | 0                  | 5. 83                | 32. 67                  |
| 4  | 1             | 0                   | -1                 | 4. 21                | 57. 53                  |
| 5  | -1            | -1                  | 0                  | 1. 56                | 36. 19                  |
| 6  | -1            | 1                   | 0                  | 5. 87                | 61. 12                  |
| 7  | 0             | 0                   | 0                  | 2. 43                | 33. 66                  |
| 8  | 0             | 0                   | 0                  | 2. 41                | 33. 51                  |
| 9  | 0             | -1                  | 1                  | 1. 94                | 19. 94                  |
| 10 | 1             | 0                   | 1                  | 4. 29                | 12. 11                  |
| 11 | 0             | 0                   | 0                  | 2. 57                | 34. 17                  |
| 12 | 0             | 0                   | 0                  | 3. 56                | 32. 98                  |
| 13 | 0             | -1                  | -1                 | 2. 18                | 28. 43                  |
| 14 | 1             | 1                   | 0                  | 5. 65                | 73. 37                  |
| 15 | 0             | 0                   | 0                  | 2. 11                | 46. 08                  |

借助 Design-Expert 8. 050 软件对所得试验结果进行分析与多元回归拟合,得到曲柄转速、机器前进速度、主动杆转速对穴孔错位率  $Y_1$ 、采光面地膜机械破损率  $Y_2$  影响的二次回归模型分别为

$$Y_1 = 2. 62 + 1. 00X_5 + 1. 12X_6 + 0. 34X_7 - 1. 12X_5X_6 - 0. 035X_5X_7 + 0. 73X_6X_7 + 1. 05X_5^2 + 1. 06X_6^2 - 0. 41X_7^2 \tag{4}$$

$$Y_2 = 36. 08 + 6. 07X_5 + 15. 04X_6 - 15. 59X_7 + 3. 94X_5X_6 - 9. 22X_5X_7 - 13. 44X_6X_7 + 0. 88X_5^2 + 13. 88X_6^2 - 12. 10X_7^2 \tag{5}$$

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 7 所示。

由表 7 可以看出,回归模型  $Y_1$  的拟合度是极显著的( $P < 0. 01$ ),其中曲柄转速( $X_5$ )、机器前进速度( $X_6$ )、曲柄转速和机器前进速度交互项( $X_5X_6$ )及曲柄转速二次项( $X_5^2$ )、机器前进速度二次项( $X_6^2$ )的  $P$  值均小于 0. 01,表明上述因素对穴孔错位率的影

表 7 回归模型方差分析  
Tab. 7 Variance analysis of regression models

| 试验指标           | 方差来源     | 平方和                    | 自由度 | 均方                     | <i>F</i> 值 | <i>P</i> 值  |
|----------------|----------|------------------------|-----|------------------------|------------|-------------|
| 穴孔错位率 $Y_1$    | 模型       | 36. 42                 | 9   | 4. 05                  | 15. 23     | 0. 000 8 ** |
|                | $X_5$    | 8. 02                  | 1   | 8. 02                  | 30. 19     | 0. 000 9 ** |
|                | $X_6$    | 10. 01                 | 1   | 10. 01                 | 37. 70     | 0. 000 5 ** |
|                | $X_7$    | 0. 94                  | 1   | 0. 94                  | 3. 53      | 0. 102 2    |
|                | $X_5X_6$ | 5. 04                  | 1   | 5. 04                  | 18. 98     | 0. 003 3 ** |
|                | $X_5X_7$ | $4. 90 \times 10^{-3}$ | 1   | $4. 90 \times 10^{-3}$ | 0. 018     | 0. 895 8    |
|                | $X_6X_7$ | 2. 13                  | 1   | 2. 13                  | 8. 03      | 0. 025 3 *  |
|                | $X_5^2$  | 4. 67                  | 1   | 4. 67                  | 17. 59     | 0. 004 1 ** |
|                | $X_6^2$  | 4. 72                  | 1   | 4. 72                  | 17. 75     | 0. 004 0 ** |
|                | $X_7^2$  | 0. 71                  | 1   | 0. 71                  | 2. 65      | 0. 147 2    |
|                | 残差       | 1. 86                  | 7   | 0. 27                  |            |             |
|                | 失拟项      | 0. 63                  | 3   | 0. 21                  | 0. 69      | 0. 604 8    |
|                | 误差       | 1. 23                  | 4   | 0. 31                  |            |             |
|                | 总和       | 38. 28                 | 16  |                        |            |             |
| 采光面机械破损率 $Y_2$ | 模型       | 6 533. 53              | 9   | 725. 95                | 17. 13     | 0. 000 6 ** |
|                | $X_5$    | 294. 76                | 1   | 294. 76                | 6. 96      | 0. 033 6 *  |
|                | $X_6$    | 1 810. 21              | 1   | 1 810. 21              | 42. 72     | 0. 000 3 ** |
|                | $X_7$    | 1 943. 76              | 1   | 1 943. 76              | 45. 87     | 0. 000 3 ** |
|                | $X_5X_6$ | 62. 17                 | 1   | 62. 17                 | 1. 47      | 0. 265 1    |
|                | $X_5X_7$ | 339. 85                | 1   | 339. 85                | 8. 02      | 0. 025 3 *  |
|                | $X_6X_7$ | 722. 27                | 1   | 722. 27                | 17. 04     | 0. 004 4 ** |
|                | $X_5^2$  | 3. 25                  | 1   | 3. 25                  | 0. 077     | 0. 789 8    |
|                | $X_6^2$  | 811. 03                | 1   | 811. 03                | 19. 14     | 0. 003 3 ** |
|                | $X_7^2$  | 616. 08                | 1   | 616. 08                | 14. 54     | 0. 006 6 ** |
|                | 残差       | 296. 64                | 7   | 42. 38                 |            |             |
|                | 失拟项      | 170. 92                | 3   | 56. 97                 | 1. 81      | 0. 284 6    |
|                | 误差       | 125. 72                | 4   | 31. 43                 |            |             |
|                | 总和       | 6 830. 17              | 16  |                        |            |             |

注: $P < 0. 01$ (极显著, \*\*),  $P < 0. 05$ (显著, \*)。

响极显著;机器前进速度和主动杆转速交互项( $X_6X_7$ )的  $P$  值小于 0. 05,对穴孔错位率的影响显著;而其余各项  $P$  值均大于 0. 05,对穴孔错位率的影响不显著。根据模型式(4)各因素回归系数的大小,可得到各因素的影响主次顺序为: $X_6$ 、 $X_5$ 、 $X_7$ ,即机器前进速度、曲柄转速、主动杆转速。

由表 7 可以看出,回归模型  $Y_2$  的拟合度是极显著的( $P < 0. 01$ ),其中机器前进速度( $X_6$ )、主动杆转速( $X_7$ )、机器前进速度和主动杆转速交互项( $X_6X_7$ )及机器前进速度二次项( $X_6^2$ )、主动杆转速二次项( $X_7^2$ )的  $P$  值均小于 0. 01,表明上述因素对采光面机械破损率的影响极显著;曲柄转速( $X_5$ )、曲柄转速和主动杆转速交互项( $X_5X_7$ )的  $P$  值小于 0. 05,对采光面机械破损率的影响显著;而其余各项  $P$  值均大于 0. 05,对采光面机械破损率的影响不显著。根据模型式(5)各因素回归系数的大小,可得到各因素的影响主次顺序为: $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_5$ ,即机器前进速度、主动杆转速、曲柄转速。

2. 5. 2 模型交互项的解析

根据二次回归模型式(4)、(5)作出各交互因素

之间关系的响应面图,如图 4 和图 5 所示。响应曲面的形状能够反映出不同交互因素作用的强弱<sup>[12-13]</sup>。

由图 4a 可知,当机器前进速度固定在低水平(0. 50 m/s),曲柄转速由 70 r/min 增至 80 r/min 时,作业机穴孔错位率呈逐步增大的变化趋势。这主要是由于作业机在恒速下曲柄转速越高,则直插式成穴装置对种床地膜的作用频率越快,使得成穴器在膜上播种作业时“直插、破膜”的动态有效时间缩短,致使成穴可靠性不高,而最终导致穴孔错位率不断增大。由偏回归分析与等高线密度可以得出,机器前进速度对穴孔错位率的影响大于曲柄转速的影响。

由图 4b 可得,当曲柄转速为 70 r/min、主动杆转速为 120 r/min 时,作业机穴孔错位率较低,由等高线密度可以看出,曲柄转速和主动杆转速的交互作用对穴孔错位率影响并不显著,与方差分析结果相同。

由图 4c 可以得出,当主动杆转速固定在低水平(120 r/min),机器前进速度由 0. 50 m/s 增至 0. 60 m/s 时,作业机穴孔错位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主动杆转速一定时,在近等速机构作用下直插式成穴装置的水平位

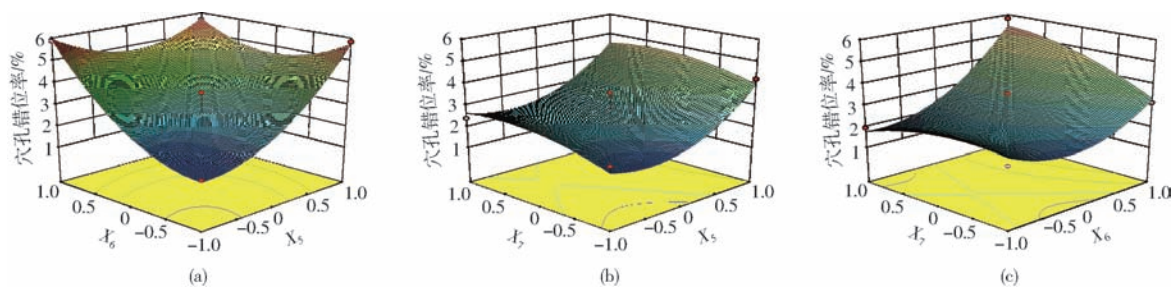


图4 交互因素对穴孔错位率的影响

Fig. 4 Effects of interactive factors on dislocation of soil hole rate

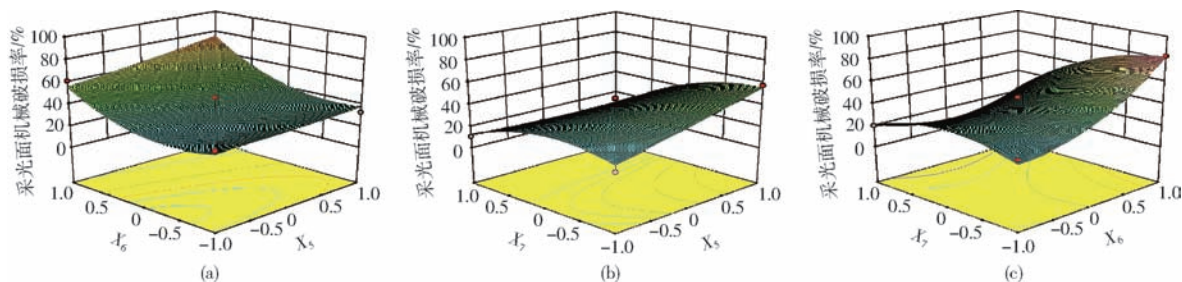


图5 交互因素对采光面机械破损率的影响

Fig. 5 Effects of interactive factors on mechanical damage rate of daylighting mulch

移补偿恒定,当机器前进速度不断增大时,水平前进位移与水平补偿位移不断接近,此时穴孔错位率逐渐降低;当机器前进速度进一步增大时,逐步加大了成穴器水平运动分速度,近等速补偿机构不能完全控制成穴器实现“直插、破膜”播种过程,使得穴孔周围地膜频繁出现拉伸与滑移,作业机穴孔错位率有所上升。

由图 5a 可以得出,当机器前进速度固定在低水平(0.50 m/s),曲柄转速由 70 r/min 增至 80 r/min 时,作业机采光面机械破损率无明显变化。机器前进速度和曲柄转速的交互作用对采光面机械破损率影响并不显著,与方差分析结果相同。

由图 5b 可知,当作业机曲柄转速固定在高水平(80 r/min),主动杆转速由 120 r/min 增至 140 r/min 时,其采光面机械破损率呈逐步减小的变化趋势。这主要是当作业机曲柄转速一定,主动杆转速不断递增时,近等速机构对与曲柄相连接直插式成穴装置水平运动分速的补偿增多,确保成穴器能够有效避免撕膜、挑膜现象发生,使得采光面机械破损率逐渐下降。由偏回归分析与等高线密度可以得出,作业机主动杆转速对采光面机械破损率的影响大于曲柄转速的影响。

由图 5c 可得,机器前进速度与主动杆转速的交互作用对采光面机械破损率影响极显著,与方差分析结果相同。当作业机主动杆转速固定在低水平(120 r/min),机器前进速度由 0.60 m/s 向 0.50 m/s 递减时,采光面机械破损率呈逐步减小的变化趋势。产生该现象的主要原因是当主动杆转速一定时,近

等速机构对直插式成穴装置的水平位移补偿恒定,随着机器前进速度的不断减小,逐步延长了成穴器“直插、破膜”入土、出土时间,避免因成穴器还未离开膜面就水平前移,缓解了撕膜、挑膜现象的出现。

### 3 最优参数确定与验证

为进一步优化样机膜上播种时达到无穴孔错位( $Y_1=0$ )及采光面地膜无机机械破损( $Y_2=0$ )的作业性能,应用 Optimization - Numerical 计算方法对回归方程模型进行该目标下优化求解,得到基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机最优工作参数为:机器前进速度 0.52 m/s、曲柄转速 72 r/min、主动杆转速 140 r/min。

为了验证二次回归模型式(4)、(5)的可靠性,应用基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机按照上述最优工作参数进行 9 次田间性能试验,选取试验材料及方法与本文 2.1 节和 2.2 节相同,如图 6 所示。田间 9 次试验的穴孔错位率均值为 1.23%,采光面机械破损率的均值为 9.56%,较优化前的穴孔错位率(1.56%~5.87%)、采光面机械破损率(10.63%~73.37%)都有明显的下降,表明在优化工作参数条件下作业机能够实现零速投种,基本无穴孔错位与撕膜、挑膜现象发生,能够有效避免对采光面地膜的机械损伤,因此建立的回归模型是可靠的。

### 4 结论

(1) 由 Plackett - Burman 试验结果可知,机器前进速度、曲柄转速及主动杆转速对基于近等速机构



图6 作业机田间性能试验

Fig.6 Field performance test of operation machine

的玉米全膜双垄沟穴播机膜上播种作业时的穴孔错位率、采光面机械破损率影响显著;而近等速机构传动比、放大机构比例、成穴器开启位移、成穴器角度以及成穴器播深对穴孔错位率、采光面机械破损率无显著性的影响。

(2)结合 Box - Behnken 试验设计原理,采用三因素三水平响应面分析方法,进行基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机作业性能试验与工作参数优化,通过试验优化结果可得影响穴孔错位率的因

素由大到小依次为:机器前进速度、曲柄转速、主动杆转速;影响采光面机械破损率的因素由大到小依次为:机器前进速度、主动杆转速、曲柄转速。

(3)分别建立了穴孔错位率、采光面地膜机械破损率与作业机机器前进速度、曲柄转速、主动杆转速的二次多项式回归模型。以膜上播种后无穴孔错位、采光面地膜无机械破损( $Y_1=0$ 、 $Y_2=0$ )为目标,优化得到作业机最佳工作参数:机器前进速度为 0.52 m/s、曲柄转速为 72 r/min、主动杆转速为 140 r/min。

(4)田间验证试验表明,穴孔错位率均值为 1.23%,采光面机械破损率均值为 9.56%,较优化前穴孔错位率(1.56%~5.87%)、采光面机械破损率(10.63%~73.37%)有明显的下降,基本无穴孔错位与撕膜、挑膜现象出现,可有效避免对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基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机田间播种作业的最佳依据。

## 参 考 文 献

- 1 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.
- 2 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.
- 3 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.  
DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Mingyi, et al. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 83 - 90. (in Chinese)
- 4 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)
- 5 GOSAR Borut, BARICEVIC Dea. 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.
- 6 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.
- 7 赵建托,赵武云,任颜华,等. 玉米全膜覆盖双垄沟播机直插式播种装置设计与仿真[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 40 - 43.  
ZHAO Jiantuo, ZHAO Wuyun, REN Yanhua, et al. Design and simulation of direct insert corn planting device of furrow seeder with whole plastic-film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 40 - 43. (in Chinese)
- 8 戴飞,赵武云,石林榕,等. 基于近等速机构的玉米全膜双垄沟穴播机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11).  
<http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20160713.1540.012.html>  
DAI Fei, ZHAO Wuyun, SHI Linrong, et al. Design and experiment of hill-seeder based on the mechanism with approximate constant speed with corn whole plastic-film mulching on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11). <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20160713.1540.012.html> (in Chinese)
- 9 王春林,彭海波,丁剑,等. 基于响应面法的旋流泵优化设计[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 59 - 65.  
WANG Chunlin, PENG Haibo, DING Jian, et al. Optimization for vortex pump based on response surface method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 59 - 65. (in Chinese)
- 10 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.
- 11 贺伟,刘永乐,王发祥. 响应面法优化莲子磨皮粉中蛋白质的提取工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(8): 24 - 28.  
HE Wei, LIU Yongle, WANG Faxiang. Optimization of extraction process for peel waste protein from lotus seeds by response surface methodology[J]. Food Science, 2015, 36(8): 24 - 28. (in Chinese)
- 12 高筱钧,周金华,赖庆辉. 中草药三七气吸滚筒式精密排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 20 - 28.  
GAO Xiaojun, ZHOU Jinhua, LAI Qinghui. Design and experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for panax notoginseng[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(2): 20 - 28. (in Chinese)
- 13 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)