

基于 EDEM 的油菜播种机仿真试验研究

冯 岩<sup>1</sup>,孙步功<sup>1</sup>,张克平<sup>1,2</sup>,石林榕<sup>1</sup>,赵武云<sup>1</sup>

(1.甘肃农业大学工学院,甘肃 兰州 730070; 2.甘肃农业大学干旱生境国家重点实验室培育基地,甘肃 兰州 730070)

**摘 要:**为提高油菜播种质量,探索最佳螺旋窝眼轮式排种器工作参数组合,运用 EDEM 技术对不同排种轮转速、窝眼轮型孔圆角直径、窝眼轮型孔排列螺旋升角进行仿真分析,确定了排种轮转速、窝眼轮型孔圆角直径及窝眼轮型孔排列螺旋升角与排种性能的关系。仿真结果表明:排种器转速  $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、窝眼轮型孔圆角直径  $3\text{ mm}$ 、螺旋升角  $59.31^\circ$  时,合格指数在  $93.7\%$  以上,漏播指数为  $1.3\%$ ,重播指数为  $5\%$ ;随转速的增加,合格指数呈线性下降趋势,漏播指数、重播指数、变异系数均一定程度有所上升。经方差分析,得综合指数影响显著性顺序依次为排种轮转速、窝眼轮型孔圆角直径大小及窝眼轮型孔排列螺旋升角。仿真与田间试验拟合度高,表明采用离散元法分析油菜播种作业是可行的。

**关键词:** EDEM;油菜播种机;排种轮转速;排种性能;仿真

**中图分类号:** S223.2      **文献标志码:** A

Simulation test for cole seeding machine based on EDEM

FENG Yan<sup>1</sup>, SUN Bu-gong<sup>1</sup>, ZHANG Ke-ping<sup>1,2</sup>, SHI Lin-rong<sup>1</sup>, ZHAO Wu-yun<sup>1</sup>

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

2. Cultivation Base of National Key Laboratory for Arid Habitats, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

**Abstract:** For improving the seeding quality of cole, exploring the best parameter for Spiral Wobble Wheel Seed Metering Device, by using EDEM analyze the speed , diameter, position of different type of seeding device; defined the relationship between speed, diameter of the whirling hole, rising angle and the seeding quality. Simulation results showed: when the speed was  $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ , whirling hole diameter was  $3\text{ mm}$ , and the rising angle was  $59.31^\circ$ , the qualification rate was over  $93.7\%$ , missing rate by  $1.3\%$ , reseeding rate was  $5\%$ ; By increasing the speed, will decrease the qualification rate, and increase the missing rate, reseeding rate as well as variation figures. According to the variance analysis, the order of the significance among those factors was first speed, second whirling hole diameter and then the rising angle. Because of the highly matching of the simulation results and the field experiments proved that it's possible to use the method of the discrete element for analyzing the Cole seeding machine.

**Keywords:** EDEM; cole seeding machine; wheel speed; seeding quality; simulation

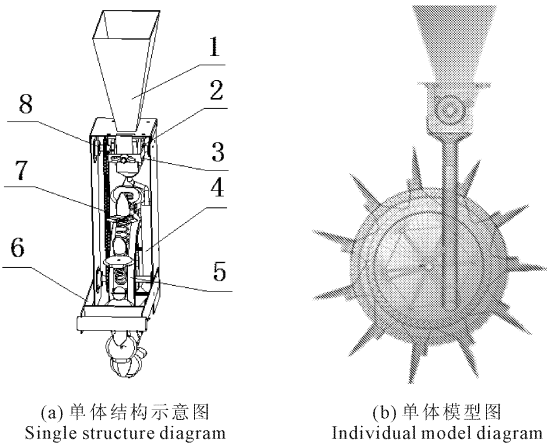
油菜籽是我国主要的油料作物,约占 50% 的国产植物食用油来自于油菜籽,油菜作为我国的主要经济作物,其机械化种植非常重要。廖庆喜等人针对传统单行排种器,设计出四行离心式排种器,利用驱动轴带动内锥筒旋转,在离心作用下,将种子推至出种孔排出<sup>[1]</sup>。吴明亮等人设计了 2BYD-6 型油菜浅耕直播联合播种机,实现了浅耕、灭茬、开排水沟、播种和施肥联合作业,并针对三行偏心轮型孔轮式排种器进行油菜排种性能台架试验<sup>[2-3]</sup>。郭玉明等人研制的 2BX 系列谷子精少量播种机,利用环槽式高频振动和异型螺旋槽两种类型的排种装置控制播种量,并设计出形状尺寸不同的槽断面排种轮来适应粒径大小不同(谷子、糜子、菜籽、牧草等谷物种子)的小籽粒谷物种子的排种要求<sup>[4]</sup>。目前研究或试验推广的油菜播种机针对油菜籽粒小、流动性大的特点,采用油菜籽与化肥均匀混合播种的方法,实现油菜机械式条播,机械式条播存在重播严重、出苗后需间苗等难以克服的问题;目前试验推广的油菜穴播机,由于油菜籽含油率高,种子易受排种器的作用发生种子破损并粘附,引起排种器型孔的堵塞,导

收稿日期:2016-12-06      修回日期:2017-03-26  
基金项目:国家自然科学基金项目(51665001);甘肃省自然科学基金(1506RJZA021)  
作者简介:冯 岩,女,山东菏泽人,硕士,研究方向为农业工程。E-mail:1269003171@qq.com。  
通信作者:孙步功,男,甘肃通渭人,副教授,博士,主要从事农业机械装备研发。E-mail:sunbg@gsau.edu.cn。

致漏播;由于油菜籽粒小,穴播机也容易产生重播。针对油菜籽播种过程中的重播和漏播等问题,设计一种可调节油菜精量播种机,并应用 EDEM 软件构建分析籽粒播种运动;制作样机,并进行田间试验。

1 单体模型及工作原理

油菜精量播种装置以 3 点悬挂连接于轮式拖拉机后方,利用多个单体实现一器多行播种,播量可调。其单体结构如图 1(a)所示,由种箱、排种器、排种轴、导种管、穴播轮、支撑架、链传动装置等组成。其中排种器又由阻塞轮、排种轮、滚筒毛刷、护种板等组成。滚筒式毛刷可在油菜籽排种过程中利用自身旋转优势进行有效清种护种,减少由于种子群扰动与排种箱内壁碰撞摩擦等造成的籽粒破损,穴播轮内由隔板均匀分隔成独立小室,确保种子精量播种。工作时,穴播轮和排种轮在链传动装置带动下同步运转,油菜籽在重力及种间接触力的作用下由种箱进入型孔完成充种过程,经排种器中滚筒毛刷清种,随排种轮转动通过护种板,在自身重力作用下,经导种管到达穴播轮独立小室,此时,工作鸭嘴垂直插入地面,在动力驱动下,鸭嘴张开,完成投种过程,随后弹簧伸张,鸭嘴闭合,等待下次播种。图 1(a)中调节器 3 与排种器外壳相连接,通过调整排种器与种箱出种孔的相对位置选取适当的窝眼数来满足不同播种量的需求,其单体模型如图 1(b)所示。



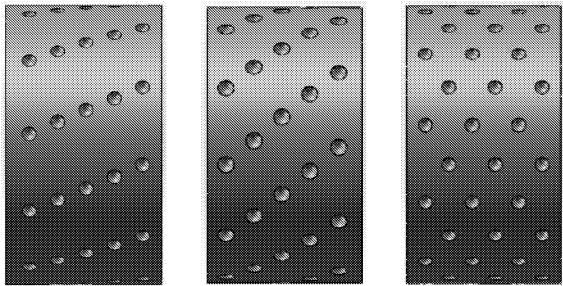
1.种箱;2.排种轮;3.调节器;4.导种管;5.穴播轮;6.支撑架;7.链传动装置;8.传动轴  
1.Kinds of cases; 2. Row of kind of wheel; 3. Regulator; 4. Guide pipe; 5. Dibbling wheel; 6.Support frame; 7.Chain gearing; 8. Transmission shaft

图 1 运动单体及 EDEM 中简化模型

根据农艺和设计要求,油菜精量播种的合理株距为 9 ~ 12 cm<sup>[5]</sup>。据公式

$$Z = \frac{\pi D(1 + \delta)}{I_p S} \tag{1}$$

式中, $Z$  为型孔数; $D$  为地轮直径,为 0.3194 m; $\delta$  为地轮转移系数,取 0.12; $I_p$  为传动比,取 1; $S$  为株距,m。计算得油菜排种轮型孔数为 9 ~ 12,按照合适的型孔数量,排种轮线速度相对降低,有利于提高型孔充填性能的原则,选择  $Z$  为 11,相邻型孔对应的中心角为 32.72°,两孔间弧距为 33.68 mm。为了更好探索播种机的工作机理,设计了三种类型的排种轮,对不同排种器的工作过程分别进行仿真,找出播种机的最佳播种条件,三者直径皆为 59 mm,型孔数为 11,窝眼轮型孔排列螺旋升角分别为 23.22°、40.63°、59.31°。以“青杂七号”油菜籽为例,从 1 kg 油菜种子中随机取样 5 次,每次抽取 1 000 粒,其千粒质量为 5.6 g,籽粒外形参数为 2.03、1.94、1.83 mm。将油菜种子简化为球形颗粒模型,半径为 0.97 mm。为了减少空穴率及重播率,型孔的直径应不小于种子最大尺寸,不大于两粒最小种子尺寸之和<sup>[6]</sup>,油菜种子的最佳播种量为每穴 2 ~ 3 粒,分别设置窝眼型孔直径为 2、3、4 mm,三种排种轮三维模型结构如图 2,窝眼轮型孔结构图如图 3 所示。



(a)螺旋升角为23.22°  
The spiral Angle is 23.22°  
(b)螺旋升角为40.63°  
The spiral Angle is 40.63°  
(c)螺旋升角为59.31°  
The spiral Angle is 59.31°

图 2 三种螺旋升角排种轮型孔结构三维图

Fig.2 graphic model of seed metering wheel with three kinds of helical angle type hole structures

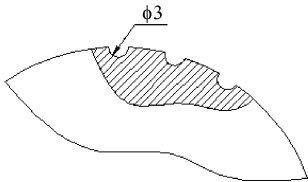


图 3 窝眼轮型孔结构简图

Fig.3 Structure of pit wheel seed metering device

2 仿真分析

2.1 接触参数设置

借助 SolidWorks 软件建立运动单体模型并导入

EDEM,建立输送带模型,将运动单体模型简化为上壳体、滚筒毛刷、排种轮、穴播轮和输送带 5 个部分,定义排种轮、上壳体、滚筒毛刷为塑料材料、输送带为泥土材料,穴播轮为钢材料,并定义种子与输送带为完全非弹性碰撞。种子与种子、种子与排种器之间选用 Hertz – Mindlin ( no slip)接触模型,种子与输送带之间选择 Moving Plan 接触模型,按表 1、2 设置材料特性及材料间接触参数<sup>[7,8-11]</sup>。

表 1 仿真模型材料参数

| Table 1 Property parameter of material in the simulation model |                        |                            |                                      |
|----------------------------------------------------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 材料<br>Material                                                 | 泊松比<br>Poisson's ratio | 剪切模量<br>Shear modulus /MPa | 密度<br>Density /(kg·m <sup>-3</sup> ) |
| 油菜籽 Rape seed                                                  | 0.28                   | 11.0                       | 1060                                 |
| 钢 Steel                                                        | 0.30                   | 102.0                      | 7850                                 |
| 塑料 Plastic                                                     | 0.40                   | 100.0                      | 7800                                 |
| 土壤 Soil                                                        | 0.30                   | 100.0                      | 2680                                 |

表 2 仿真模型材料接触参数

| Table 2 Contact parameter of material in the simulation model |                                    |                                         |                                           |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|
| 接触参数<br>Contact parameter                                     | 恢复系数<br>Coefficient of restitution | 静摩擦系数<br>Coefficient of static friction | 滚动摩擦系数<br>Coefficient of rolling friction |
| 油菜籽 ~ 油菜籽<br>Rape seed and rape seed                          | 0.600                              | 0.50                                    | 0.01                                      |
| 油菜籽 ~ 塑料<br>Rape seed and plastic                             | 0.600                              | 0.50                                    | 0.01                                      |
| 油菜籽 ~ 钢<br>Rape seed and steel                                | 0.600                              | 0.30                                    | 0.01                                      |
| 油菜籽 ~ 土壤<br>Rape seed and soil                                | 0.001                              | 1.00                                    | 1.00                                      |
| 塑料 ~ 塑料<br>Plastic and plastic                                | 0.450                              | 0.50                                    | 0.05                                      |
| 塑料 ~ 钢<br>Plastic and steel                                   | 0.450                              | 0.50                                    | 0.01                                      |

2.2 仿真过程

设颗粒产生方式为静态填充,颗粒半径为 0.97 mm,服从正态分布,排种轮和穴播轮为转动件,其余为固定件,转速一致,分别设为 20、30 r·min<sup>-1</sup>和 40 r·min<sup>-1</sup>,分别对 3 种不同结构的排种轮进行模拟仿真。为将整个排种器充满,种子颗粒数量为 20 000 粒。由于仿真颗粒较多,将仿真瑞利时间步长百分比设为 20%,输出时间步长为 0.01 s,仿真时间总长为 10 s(第 1 秒生成颗粒,2~10 s 排种),网格尺寸为最小颗粒半径的 2 倍。每次仿真结束后在各个出种

孔处设置网格单元组,计算各个下落种子的信息。每种排种轮的仿真过程显示模式设置为 points = 0.2,如图 4 所示。

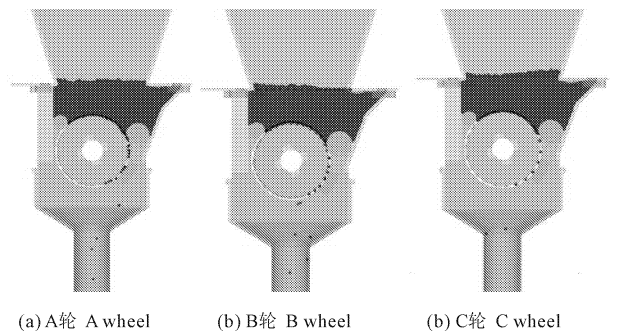


图 4 2.3 s 各轮充种情况

Fig.4 The seed fill for each wheel at 2.3 s

为提高仿真运动质量,设输送带与穴播轮以穴播轮的线速度发生相对运动,穴播轮只在原地旋转,播下的种子落在移动上的输送带上。仿真结束后,在输送带表面设置框选区域,记录掉落种子的进出信息,根据仿真结果统计出输送带上每穴种子粒数及相对株距,计算出每种排种器的性能指标。图 5 为 8.3s 时的播种情况。

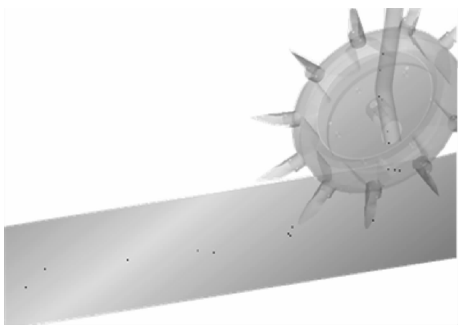


图 5 8.3 s 播种情况

Fig.5 Sow status at 8.3 s

2.3 仿真结果分析

当转速为 30 r·min<sup>-1</sup>时,导种管中下落种子的质量随时间的变化如图 6 所示,可以看出随着窝眼轮型孔线性排列螺旋升角的变大,排种器的均匀性亦变好。由图可以看出 A 轮在 3.42 s 和 9 s 时有漏播现象,在 2.79 s 和 5.63 s 产生重播,B 轮在 8.5 s 有漏播现象,在 7.3 s 产生重播,C 轮基本没有漏播,在 4.6 s 产生重播。图 7 为输送带上表面框选区域排种数量随时间的变化曲线,从侧面反映了每穴的油菜籽数量,从图可以清晰看出相同转速下螺旋升角较大的合格指数相对较高。

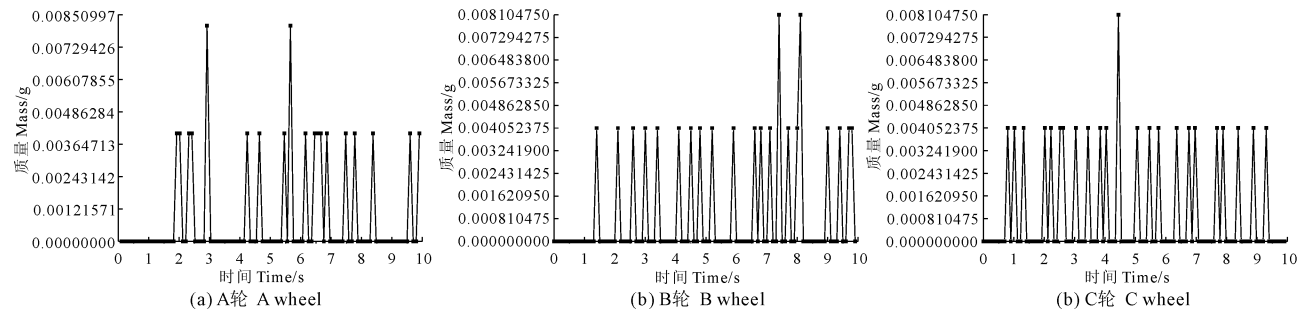


图 6 下落种子质量随时间的关系曲线  
Fig.6 Relation between drop mass and time

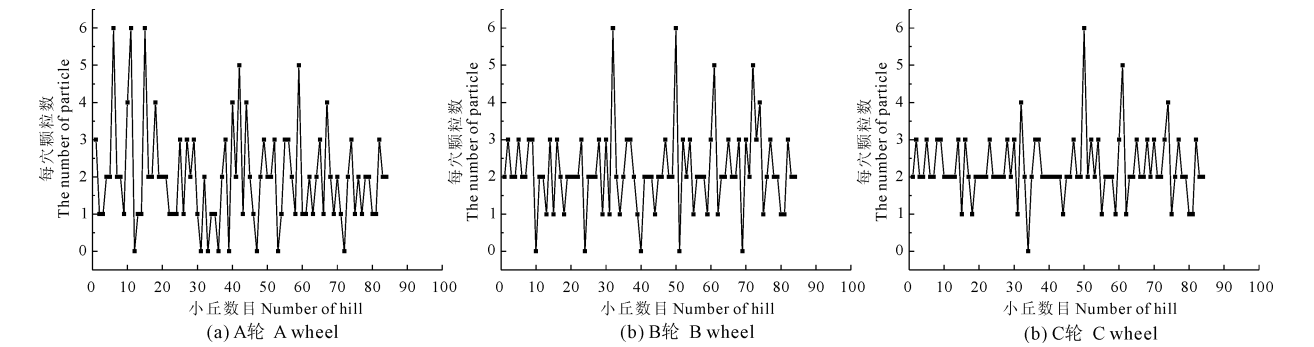


图 7 框选区域颗粒数  
Fig.7 The number of particle in the selection area

3 试验分析

3.1 试验因素与指标

测试排种器的排种性能是检验播种机播种效果的最直接手段。转速是影响种子充种性能的重要影响因素,因此以排种轮转速、窝眼轮型孔圆角直径大小及窝眼轮型孔排列螺旋升角为试验因素,对油菜排种器进行三因素三水平正交试验。表 3 所示为排种器性能试验因素水平编码表。

3.2 试验设计与结果分析

选用  $L_9(3^4)$ 表安排试验,测出结果,见表 4。对

表 4 的试验结果进行极差分析,见表 5<sup>[12-13]</sup>。

| 表 3 排种器性能试验因素水平编码表                                  |                                                              |                                     |                                            |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|
| Table 3 Test factor level coding of metering device |                                                              |                                     |                                            |
| 水平<br>Level                                         | 因素 Element                                                   |                                     |                                            |
|                                                     | A<br>排种轮转速<br>Row rotation speed<br>/( $r \cdot \min^{-1}$ ) | B<br>窝眼圆角直径<br>Hole diameter<br>/mm | C<br>螺旋升角<br>Lead angle<br>/( $^{\circ}$ ) |
| 1                                                   | 20                                                           | 2                                   | 23.22                                      |
| 2                                                   | 30                                                           | 3                                   | 40.63                                      |
| 3                                                   | 40                                                           | 4                                   | 59.31                                      |

表 4 正交试验设计及结果  
Table 4 Orthogonal test scheme and results

| 试验编号<br>Test number | 因素水平 Level of factor |   |   | 试验结果 Test results |      |      |       |
|---------------------|----------------------|---|---|-------------------|------|------|-------|
|                     | A                    | B | C | S                 | D    | M    | V     |
| 1                   | 1                    | 1 | 1 | 83.0              | 11.7 | 5.3  | 75.8  |
| 2                   | 1                    | 2 | 2 | 89.7              | 2.1  | 8.2  | 61.2  |
| 3                   | 1                    | 3 | 3 | 89.6              | 5.8  | 4.6  | 50.0  |
| 4                   | 2                    | 1 | 2 | 86.5              | 6.0  | 7.5  | 15.81 |
| 5                   | 2                    | 2 | 3 | 93.7              | 5.0  | 1.3  | 11.18 |
| 6                   | 2                    | 3 | 1 | 87.53             | 4.17 | 8.3  | 27.39 |
| 7                   | 3                    | 1 | 3 | 80.7              | 7.8  | 11.5 | 22.36 |
| 8                   | 3                    | 2 | 1 | 83.0              | 10.8 | 6.2  | 26.11 |
| 9                   | 3                    | 3 | 2 | 82.3              | 4.7  | 13.0 | 19.36 |

表 5 正交试验极差分析

Table 5 Range analysis of orthogonal test

| 水平<br>Level                              | 粒距合格指数 $S/\%$<br>Particle distance conformity index $S$ |        |        | 重播指数 $D/\%$<br>Reply index $D$ |       |       | 漏播指数 $M/\%$<br>Leak seeding index $M$ |       |       | 变异系数 $V/\%$<br>Variable coefficient $V$ |        |        |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------|--------|--------------------------------|-------|-------|---------------------------------------|-------|-------|-----------------------------------------|--------|--------|
|                                          | A                                                       | B      | C      | A                              | B     | C     | A                                     | B     | C     | A                                       | B      | C      |
|                                          |                                                         |        |        |                                |       |       |                                       |       |       |                                         |        |        |
| K <sub>1</sub>                           | 262.30                                                  | 250.20 | 253.53 | 19.60                          | 25.50 | 26.67 | 18.09                                 | 24.30 | 19.80 | 187.00                                  | 113.97 | 129.30 |
| K <sub>2</sub>                           | 267.73                                                  | 266.40 | 258.51 | 15.17                          | 17.91 | 12.81 | 17.10                                 | 15.69 | 28.71 | 54.38                                   | 98.49  | 96.37  |
| K <sub>3</sub>                           | 246.00                                                  | 259.44 | 264.00 | 23.30                          | 14.67 | 18.60 | 30.69                                 | 25.89 | 17.40 | 67.83                                   | 96.75  | 83.54  |
| k <sub>1</sub>                           | 87.43                                                   | 83.40  | 84.51  | 6.53                           | 8.50  | 8.89  | 6.03                                  | 8.10  | 6.60  | 62.33                                   | 37.99  | 43.10  |
| k <sub>2</sub>                           | 89.24                                                   | 88.80  | 86.17  | 5.06                           | 5.97  | 4.27  | 5.70                                  | 5.23  | 9.57  | 18.13                                   | 32.83  | 32.12  |
| k <sub>3</sub>                           | 82.00                                                   | 86.48  | 88.00  | 7.77                           | 4.89  | 6.20  | 10.23                                 | 8.63  | 5.80  | 22.61                                   | 32.25  | 27.85  |
| 极差 $R$ Range                             | 7.24                                                    | 2.32   | 3.49   | 2.71                           | 3.61  | 4.62  | 0.73                                  | 3.40  | 3.77  | 44.2                                    | 5.74   | 15.25  |
| 优方案<br>Gifted program                    | A2                                                      | B2     | C3     | A2                             | B3    | C2    | A2                                    | B2    | C3    | A2                                      | B3     | C3     |
| 主次因素<br>Primary and<br>secondary factors | A > C > B                                               |        |        | C > B > A                      |       |       | C > B > A                             |       |       | B > C > A                               |        |        |

由极差  $R$  可知,按合格指数、重播指数、漏播指数、变异系数确定各因素主次顺序依次为  $A > C > B$ 、 $C > B > A$ 、 $C > B > A$ 、 $B > C > A$ ,对合格指数影响最大的是排种轮转速。按合格指数确定各因素最佳水平组合为  $A_2B_2C_3$ ,重播指数各因素最佳水平组合为  $A_2B_3C_2$ ,漏播指数各因素最佳水平组合为

$A_2B_2C_3$ ,变异系数最佳水平组合为  $A_2B_3C_3$ ,可见排种器转速及窝眼轮型孔排列螺旋升角根据合格指数、漏播指数、变异系数等性能指标的最佳水平均为  $A_2C_3$ ,窝眼轮型孔圆角直径大小为 3 mm 时合格指数和漏播指数均处于较优水平。

表 6 正交试验数据方差分析表

Table 6 Variance analysis of orthogonal test

| 源<br>Source                 | Ⅲ 型平方和<br>Triple Ⅲ of squares | df | 均方<br>Mean square | $F$        | Sig.  |
|-----------------------------|-------------------------------|----|-------------------|------------|-------|
| 校正模型 Calibration model      | 147.573a                      | 6  | 24.595            | 175.417    | 0.006 |
| 截距 Intercept                | 66913.618                     | 1  | 66913.618         | 477234.774 | 0.000 |
| A                           | 85.263                        | 2  | 42.632            | 304.053    | 0.003 |
| B                           | 44.024                        | 2  | 22.012            | 156.991    | 0.006 |
| C                           | 18.286                        | 2  | 9.143             | 65.208     | 0.015 |
| 误差 Error                    | 0.280                         | 2  | 0.140             |            |       |
| 总计 Total                    | 67061.471                     | 9  |                   |            |       |
| 校正的总计 Correction of a total | 147.853                       | 8  |                   |            |       |

运用数理统计的知识分析正交试验数据方差分析(表 6)可知,排种轮转速的 sig 值小于 0.005,其对油菜播种性能具有极显著影响;窝眼轮型孔圆角直径大小及窝眼轮型孔排列螺旋升角的 sig 值均大于 0.005,二者对油菜播种性能影响不显著,但相比之下因素 B 较因素 C 显著,综合考虑各种因素,性能试验指标最优水平组合为  $A_2B_2C_3$ ,即当排种轮转速  $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、窝眼轮型孔圆角直径大小为 3 mm 及窝眼轮型孔排列螺旋升角为  $59.31^\circ$ 时,合格指数为 93.7%、重播指数为 5%、漏播指数为 1.3%、变异系数为 11.18%。

## 4 验证试验与分析

2016 年 4 月中旬在青海省互助土族自治县南门峡镇农作物试验基地开展了田间播种试验,试验田毗邻南门峡水库,地处祁连山脉山间盆地,海拔 3 000 m 左右,地势平坦,土壤肥沃,地表为平铺膜。试验设备为自主研发的 2BR-1 型可调式油菜精量播种机。播种深度 20~30 mm,播种株距 100~150 mm。试验选取对油菜播种性能具有极显著影响的排种轮转速为指标,以窝眼轮型孔圆角直径大小为 3 mm,窝眼轮型孔排列螺旋升角为  $59.31^\circ$ 进行与仿

真相同的 3 种转速试验,每组试验重复 5 次。

宽窄行种植能充分合理利用有限空间,改善油菜幼苗根系活力<sup>[14]</sup>,每副地膜播种 4 行,宽窄行播

种,窄行行距 20 mm,宽行 40 mm,株距 10 mm,地膜间距 45 mm。



图 8 田间试验  
Fig.8 Field testing

试验结果对比如图 9。田间试验结果表明,在转度不高时,播种机的合格指数会随着速度增大而增大,但播种速度大到一定程度时合格指数会出现下降的情况,对应的漏播指数和重播指数一定程度提高,根据观察到的试验现象,认为产生这种现象的原因是此时排种器旋转速度太高,种子群扰动量较大,种子还来不及填充到囊种空间,排种轮充种不充分造成空穴,速度较高时,鸭嘴式的播种方式使种子落入地面有一定的时间间隔,这样就造成了较高的重播率和漏播率。高速运转下的机器震动,也对合格指数有很大影响,因此在播种时,为了保证播种质量,速度控制在  $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  左右。

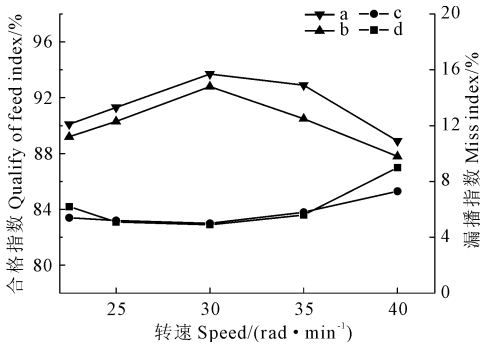
漏播指数。得该排种器田间试验中  $20\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时粒距合格指数  $S=91.7\%$ 、重播指数  $D=5.3\%$  和漏播指数  $M=3\%$ ;  $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时粒距合格指数  $S=92.8\%$ 、 $D=4.9\%$  和漏播指数  $M=2.3\%$ ;  $40\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时粒距合格指数  $S=87.8\%$ 、 $D=8.4\%$  和漏播指数  $M=3.8\%$ 。粒距合格指数田间试验与仿真试验误差  $0.9\%(P<5\%)$ 。仿真结果和试验结果拟合度高,但田间试验粒距合格指数略低于仿真试验,因为在田间试验时,由种子的均匀性、土壤特性、机器自身特性、人为因素等造成的影响,说明油菜精量播种机仿真试验优化排种性能参数具有可行性。

5 结 论

1) 借助 EDEM 对排种轮转速、窝眼轮型孔圆角直径大小及窝眼轮型孔排列螺旋升角三种试验因素进行不同水平的正交试验仿真,分析得,排种轮转速对油菜播种性能具有极显著影响,其次为窝眼轮型孔圆角直径大小及窝眼轮型孔排列螺旋升角;排种轮转速和窝眼轮型孔排列螺旋升角对合格指数、漏播指数、变异系数等性能指标均有显著影响。

2) 通过对排种器结构参数的影响分析,对仿真结果进一步改进优化,以合格指数较高为重点、兼顾重播指数和漏播指数较低的原则,性能试验指标最优水平组合为  $A_2B_2C_3$ , 即当排种轮转速  $30\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、窝眼轮型孔圆角直径大小为 3 mm 及窝眼轮型孔排列螺旋升角  $59.31^\circ$  时,合格指数为  $93.7\%$ 、重播指数为  $5\%$ 、漏播指数为  $1.3\%$ 、变异系数为  $11.18\%$ 。

3) 对比仿真结果和试验结果,粒距合格指数田间试验与仿真试验误差为  $0.9\%(P<5\%)$ ,二者在



注: a. 为合格指数模拟结果; b. 合格指数试验结果; c. 漏播指数模拟结果; d. 漏播指数试验结果  
Note: a. Conformity index simulation results; b. Conformity index test results; c. Leak seeding index simulation results; d. Leak seeding index test results

图 9 试验结果对比  
Fig.9 Testing contrast

参考《单粒(精密)播种机试验方法》(GB6973 – 2005)测定田间试验中的粒距合格指数、重播指数和

