

秦伟, 于英杰, 赖庆辉, 等. 三七种子的大小对窝眼轮排种器充种性能的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 126-132.  
QIN Wei, YU Yingjie, LAI Qinghui, et al. Effect of *Panax notoginseng* seed size on seed-filling performance of the socket-roller seeding apparatus[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(4): 126-132.

# 三七种子的大小对窝眼轮排种器充种性能的影响

秦伟, 于英杰, 赖庆辉, 袁海阔, 占才学, 孙凯

(昆明理工大学 农业与食品学院, 云南 昆明 650500)

**摘要:**【目的】探究窝眼轮排种器型孔尺寸与分级后三七 *Panax notoginseng* 种子的适配性对充种性能的影响规律, 确定各级三七种子与适配型孔尺寸之间的关系。【方法】将三七种子分为 4 级, 设计了 4 种不同型孔尺寸的窝眼轮排种器, 利用离散元软件 EDEM 模拟各级种子在不同型孔尺寸排种器中的充种过程, 分析各级种子在不同型孔尺寸排种器中的充种性能, 得到各级种子适配排种器型孔尺寸, 并进行了试验验证。【结果】各级三七种子均有适配型孔排种器, 5.0~5.5 和 6.5~7.0 mm 分级段的种子适配排种器型孔尺寸为 7.5 和 8.5 mm; 5.5~6.0 和 6.0~6.5 mm 分级段的种子适配排种器型孔尺寸为 8.0 mm。各分级段的种子在其适配排种器中充种时, 合格指数均大于 95.83%, 漏播指数均低于 2.00%, 重播指数均低于 2.17%。确定了种子长轴 ( $l$ ) 与孔径 ( $L$ ) 之间以及高轴 ( $h$ ) 与孔深 ( $H$ ) 之间的线性关系方程分别为  $L=0.58l+4.28$  和  $H=0.75h+3.96$ 。【结论】排种器充种性能满足了三七播种的农艺要求, 为窝眼轮排种器型孔尺寸的设计提供了理论依据。

**关键词:** 三七种子; 排种器; 型孔参数; 充种性能; EDEM 软件

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2019)04-0126-07

## Effect of *Panax notoginseng* seed size on seed-filling performance of the socket-roller seeding apparatus

QIN Wei, YU Yingjie, LAI Qinghui, YUAN Haikuo, ZHAN Caixue, SUN Kai

(Faculty of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:**【Objective】To explore the influences of hole size of the nest hole wheel seed-metering and the adaptability of *Panax notoginseng* seeds on seed-filling performance, determine the relationships between *P. notoginseng* seeds of different grades and the adaptability shapes of seed-metering devices.【Method】We divided *P. notoginseng* seeds into four levels, and designed four different types of nest hole sizes. Using the discrete element software EDEM, we simulated the seed-filling process of graded seeds in seed-metering device with different size of nest hole. The seed filling performances of different grade seeds in seed-metering devices with different sizes were analysed, and the adaptability size of seed-metering device for the graded seeds was obtained. The experimental verification was carried out.【Result】*P. notoginseng* seeds of all levels have their suitable nest hole wheels. The 5.0~5.5 and 6.5~7.0 mm grading sections of seeds have the suitable hole sizes of 7.5 and 8.5 mm respectively, and both of 5.5~6.0 and 6.0~6.5 mm grading sections seeds match the hole size of 8.0 mm. When seeds of all gardes are filled in the adaptive seed-metering devices, the qualified indexes are more than 95.83%, the miss-seeding indexes are lower than 2.00% and the redundant-seeding indexes are 2.17%. The linear relationship between the long axis size of seed ( $l$ ) and aperture ( $L$ ), and the relationship

收稿日期: 2018-07-10 网络首发时间: 2019-06-25 15:53:48

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20190625.0932.032.html>

作者简介: 秦伟 (1994—), 男, 硕士研究生, E-mail: [1240672079@qq.com](mailto:1240672079@qq.com); 通信作者: 于英杰 (1980—), 女, 讲师, 博士, E-mail: [646677093@qq.com](mailto:646677093@qq.com); 赖庆辉 (1980—), 男, 副教授, 博士, E-mail: [laiqinhui007@163.com](mailto:laiqinhui007@163.com)

基金项目: 国家自然科学基金 (51305187)

between the height axis size of seed ( $h$ ) and hole depth ( $H$ ) are all established, which are  $L=0.58h+4.28$  and  $H=0.75h+3.96$ , respectively. 【Conclusion】The seed-filling performance fully meets the agronomic requirements of *P. notoginseng* seeding, which provides a theoretical basis for the design of nest hole size of the nest hole wheel seeding device.

**Key words:** *Panax notoginseng* seed; metering device; nest hole size; seed-filling performance; EDEM software

精密播种是按照精确的播种粒数、播种间距、行距和播种深度将种子播入土壤的方式,这一系列的作业过程需由精密播种机来完成。排种器作为播种机关键部件,其性能决定着播种质量<sup>[1]</sup>。三七 *Panax notoginseng* 属密集型播种作物,在播种作业时行距、株距均需控制在 50 mm 左右,为实现三七播种行距和株距一致的农艺要求,需对三七进行精密播种<sup>[2]</sup>。随着优良三七种子的推广使用,其昂贵的价格也使种植成本逐步增加,为了减少三七种植成本,进一步实现对三七“一穴一粒”的精播要求,除了要有性能良好的排种器外,种子的清选分级也十分重要。当前,将玉米、大豆种子在清选分级后进行精密播种在国内外已十分普遍<sup>[3-5]</sup>。刘佳等<sup>[6]</sup>在不同类型气力式排种器中对分级前后玉米种子进行了充种匹配对比试验,证明气吹式排种器更适于分级后玉米种子的播种。孙士明等<sup>[7]</sup>对分级后的玉米种子在相应机械式、气力式排种器中进行充种匹配对比试验,证明分级后不同形状的玉米种子均有实现其最佳播种效果的排种器类型。三七播种作业中窝眼轮排种器虽已广泛应用,但窝眼轮排种器存在种子与型孔适配性差等问题<sup>[8]</sup>。有关三七种子尺寸相适应的窝眼轮型孔尺寸设计研究鲜见报道,使得分级后的三七种子在当前设计的窝眼轮排种器中充种时,由于种子与窝眼轮型孔适配性差,依然存在充种性能差、播种效率低等问题。为了提高三七精密播种性能、降低成本和损失,本文使用离散元软件 EDEM 模拟分析各级种子在不同型孔尺寸窝眼轮排种器中的充种情况和性能,并通过台架试验探究各分级三七种子与其适配窝眼轮排种器型孔尺寸之间的规律,为三七精密播种机排种器的设计提供理论依据。

## 1 三七种子状况与分级

### 1.1 种子状况

选取云南省文山州七丹药业种植基地的三七种子,如图 1 所示。所选三七种子密度为 1 100 kg/m<sup>3</sup>,其球度为 90.86%,近似球体,未分级时种子的长轴、宽轴和高轴尺寸集中分布范围为 5.2~7.2、4.8~



图 1 三七种子外观

Fig. 1 Appearance of *Panax notoginseng* seeds

6.8 和 4.0~6.0 mm, 含水率 ( $w$ ) 为 60%, 休止角为 34.8°, 内摩擦角为 27.9°<sup>[9]</sup>。

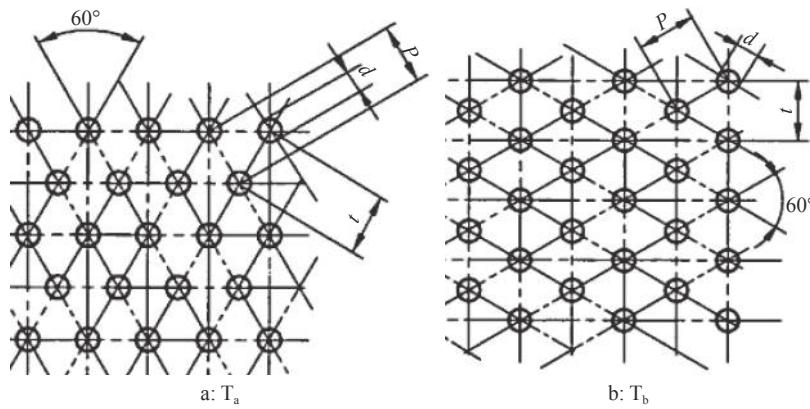
### 1.2 种子分级

试验仪器: 标准振筛机(型号 XSB-88、筛机振幅为 8 mm、回转半径 12.5 mm、电机功率 0.37 kW), 电子游标卡尺(精度为 0.01 mm), 圆孔筛等。

本研究主要目的是探究分级三七种子与窝眼轮排种器型孔尺寸的适配性对充种性能的影响,确定各级种子的适配型孔尺寸并找出三七种子与适配型孔尺寸间的关系规律,因此首先需采用分级设备对三七种子进行分级,以保证分级后同级三七种子形状规则、尺寸范围一致,使排种器试验时达到最佳充种效果。

种子等物料分级由标准振筛机与分样筛等设备完成。根据 GB/T 12620—2008<sup>[10]</sup> 可知,当前对谷物、油料、饲料以及种子清选分级的筛孔形状不一,综合而言主要分为长圆孔、长方孔、圆孔 3 类。三七种子近似球体,可采用圆孔筛。如图 2 所示,圆孔筛片分为 T<sub>a</sub>、T<sub>b</sub> 型 2 类,前者用于种子直径 ( $D$ )>3 mm 物料的筛分,后者用于种子  $D$ <3 mm 物料的筛分。三七种子  $D$  平均为 5.62 mm<sup>[9]</sup>,因此选用圆孔 T<sub>a</sub> 型筛片对三七种子进行清选分级。

对三七种子进行分级时,圆孔筛上层筛孔孔径为 7.5 mm、下层筛孔孔径为 4.5 mm,上下相邻两层分样筛孔径差为 0.5 mm,共 7 层,当种子直径处在上层筛片圆孔孔径与下层筛片圆孔孔径之间时,即可按筛片尺寸区间对种子进行分级。利用圆孔筛对三七种子进行分级时,筛分面积为筛面上筛片的总



P: 孔距; d: 筛孔直径; t: 上下层筛片距离

P: Hole distance; d: Diameter of sieve hole; t: Distance between upper and lower levels of sieves

图 2 T<sub>a</sub> 和 T<sub>b</sub> 2 种圆孔筛片结构示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of two kinds (T<sub>a</sub> and T<sub>b</sub>) of round - hole sieves

面积与整个有效工作总面积(冲孔部分面积)之比<sup>[11]</sup>。任意选取图 2a 中由圆孔组成的六边形, 则分样筛分面积可由下式导出:

$$S = \frac{\frac{3\pi}{4}d^2}{\frac{3\sqrt{3}}{2}D^2} \times 100\% = \frac{d^2}{D^2} \times 90.7\%, \quad (1)$$

式中, S 为筛分面积, d 为筛孔直径, D 为正六边形边长。

取 d 为 7.5 mm、D 为 10 mm 时, 根据公式(1)可以计算出最小筛分面积( $S_{\min}$ )为 51.01%。利用标准振筛机与圆孔分样筛对三七种子进行分级, 筛分后的三七种子分为 6 级, 即种子直径 4.5~5.0、5.0~5.5、5.5~6.0、6.0~6.5、6.5~7.0 和 7.0~7.5 mm。参照 GB/T3543.6—1995<sup>[12]</sup> 测得分级后三七种子的含水率(w)为 59.39%。统计各分级段种子数量, 结果表明, 5.0~7.0 mm 粒径分级段的种子占所筛分种子总数的 95% 左右。故采用 5.0~7.0 mm 之间 4 个分级段的种子进行试验。

在各分级段种子中随机抽取 200 粒种子, 采用电子游标卡尺对种子长轴、宽轴和高轴进行测量, 使用 SPSS 软件统计分析测量的数据, 去掉 5% 的特大粒和 5% 的极小粒后<sup>[13]</sup>, 结果见表 1。

表 1 各级三七种子的三轴尺寸

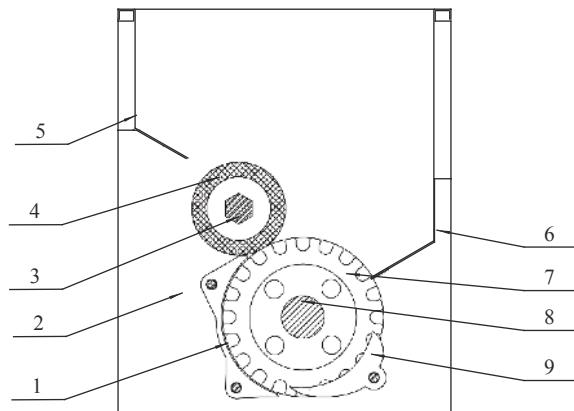
Table 1 Three-axis size of *Panax notoginseng* seeds for each grading section

种子直径/mm Seed diameter	长轴/mm Long axis	宽轴/mm Wide axis	高轴/mm High axis
5.0~5.5	5.07~6.36	4.50~5.30	4.41~5.28
5.5~6.0	5.42~7.24	4.79~5.83	4.44~5.72
6.0~6.5	6.16~7.55	5.08~6.33	4.88~6.32
6.5~7.0	6.54~8.00	5.50~6.79	5.15~6.62

## 2 排种器结构及工作原理

### 2.1 排种器结构

采用窝眼轮排种器, 其结构示意图如图 3 所示, 主要由护种板、种箱侧板、毛刷轴、清种毛刷、种箱前侧板、种箱后侧板、窝眼轮、排种轴、投种片等组成, 其中窝眼轮、护种板采用 3D 打印技术加工。



1: 护种板; 2: 种箱侧板; 3: 毛刷轴; 4: 清种毛刷; 5: 种箱前侧板;  
6: 种箱后侧板; 7: 窝眼轮; 8: 排种轴; 9: 投种片

1: Seed guard plate; 2: Seed box side panel; 3: Brush shaft;  
4: Seed-clearing brush; 5: Front side panel of seed box; 6: Back side panel of seed box; 7: Nest hole wheel; 8: Seeding shaft; 9: Seeding iron sheet

图 3 窝眼轮排种器结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the nest hole wheels seed-meting device

### 2.2 排种器的工作原理

窝眼轮排种器的工作原理: 窝眼轮转动时, 种子与窝眼轮之间形成速度差使种子滚入窝眼轮型孔内, 经清种毛刷刷去多余种子, 而后种子随窝眼轮沿护种板转到下方, 在自身重力或投种片强制作用下投入种沟, 完成排种过程。

### 2.3 窝眼轮型孔参数

窝眼轮排种器工作时,其型孔尺寸和形状直接影响种子在种箱中的充种性能。为提高各级三七种子在窝眼轮型孔中的单粒率,窝眼轮型孔尺寸与三七种子尺寸的适配度十分重要。为使容纳单粒种子的型孔内不同时滚入2粒及以上种子,其型孔直径和深度必须满足以下条件<sup>[14-16]</sup>:

$$l_{\max} \leq L < 2l_{\min}, \quad (2)$$

$$h_{\max} \leq H < 2h_{\min}, \quad (3)$$

式中,  $l$ 、 $h$  分别为三七种子长轴尺寸和高轴尺寸,  $L$ 、 $H$  分别为窝眼轮型孔的直径和深度。

将表1数据代入式(2)和式(3),确定4类型孔参数,如表2所示。

表2 窝眼轮4种型孔参数

Table 2 Four kinds of hole parameters of nest hole wheels

型号 Model	孔径( $L$ )/mm Aperture	孔深( $H$ )/mm Hole depth
1	7.0	7.0
2	7.5	7.5
3	8.0	8.0
4	8.5	8.5

地轮与排种器之间传动比( $i$ )的计算公式如下:

$$i = \frac{zA}{\pi d'(1+\delta)}, \quad (4)$$

式中,  $z$  为三七之间的株距,  $\delta$  为地轮滑移率,  $A$  为窝眼轮型孔数,  $d'$  为地轮的直径。

三七播种农艺要求行距和株距均为 50 mm,本试验中窝眼轮排种器直径为 120 mm,三七精密播种机地轮直径为 275 mm,地轮与排种器之间传动比为 1.1。根据前期试验并结合云南文山州三七种植区域土壤状况,得到地轮滑移率( $\delta$ )为 5.27%,将上述数据代入式(4)中计算后,确定出窝眼轮型孔数为 20。

## 3 试验与结果分析

### 3.1 仿真实验与结果

采用离散元软件 EDEM 进行模拟分析。离散元法是一种处理非连续介质问题的数值模拟方法<sup>[17]</sup>,可用于进行离散颗粒体的仿真运动分析,目前已广泛应用于离心式排种器<sup>[18]</sup>、水平圆盘式排种器<sup>[19]</sup>、指夹式排种器<sup>[20]</sup>等研究之中。与传统试验方法相比,该方法具有试验周期短、成本低等特点。

#### 3.1.1 窝眼轮排种器模型的建立 使用三维建模

软件 SolidWorks 建立窝眼轮排种器的三维模型,将其保存为“.stp”格式后导入 EDEM 软件。在 EDEM 软件中,定义种箱侧板与投种片为不锈钢材料、毛刷为猪鬃材料、窝眼轮与护种板为尼龙材料,将此模型在 EDEM 软件中网格化,结果如图4所示。

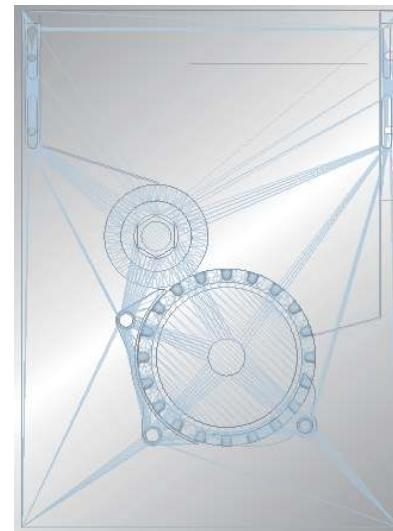
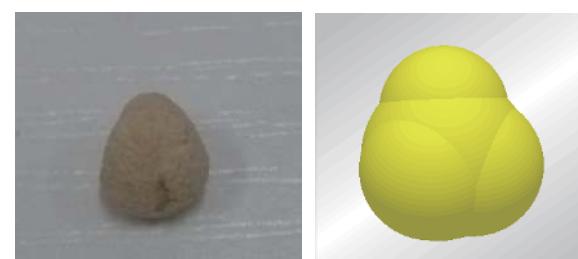


图4 EDEM 中的排种器模型

Fig. 4 EDEM model of seed-metering device

3.1.2 三七种子模型的建立 确定三七种子在排种器中的充种过程十分重要,利用离散元软件 EDEM 可以观察种子的充种过程和运动状态。为最大限度得到真实的仿真结果,采用组合球法建立三七种子离散元颗粒模型,建成后的种子模型如图5所示。



a: 种子  
Seed

b: 种子组合球模型  
Combination ball model of seed

图5 三七种子及颗粒模型

Fig. 5 Panax notoginseng seed and particle model

3.1.3 模型变量参数的设定 由于三七种子、猪鬃、尼龙材料及不锈钢之间无黏附性,因此种子与种子、种子与窝眼轮、种子与种箱侧板、种子与毛刷之间均选用 Hertz-Mindlin(no slip) 接触模型<sup>[17,21]</sup>,模型参数见表3。

3.1.4 仿真结果分析 建立 EDEM 颗粒工厂,根据表3数据设置材料数据及颗粒间接触参数,根据表1 数据导入种子颗粒模型并设置其产生方式为静态填

表 3 仿真模型材料参数和接触参数  
Table 3 Material and contact parameters of the simulation model

材料 <sup>1)</sup> Material	泊松比 Poisson ratio	剪切模量/MP Shear modulus	密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) Density	接触材料 <sup>1)</sup> Contacted material	碰撞恢复系数 Coefficient of restitution	静摩擦因数 Coefficient of static friction	动摩擦因数 Coefficient of roll friction
					1+1	0.48	0.085
1	0.40	13	1 100				
2	0.28	102	1 150				
3	0.30	79 400	7 930				
4	0.40	100	1 150				

1) 1: 三七种子; 2: 尼龙材料; 3: 不锈钢材料; 4: 毛刷

1) 1: *Panax notoginseng* seed; 2: Nylon material; 3: Stainless steel material; 4: Brush

充, 产生数量为 5 000 粒; 添加窝眼轮和清种毛刷的运动参数, 设置窝眼轮转速为 35.2 r·min<sup>-1</sup>, 清种毛刷转速为 105.5 r·min<sup>-1</sup>, 转动方向相同; 仿真 Rayleight 时间步长百分比为 10%, 输出时间步长为 0.01 s, 总时间为 6 s(其中 0~1 s 为颗粒生成时间段, 其余为充种时间段), 网格尺寸为最小颗粒半径的 2.5 倍。

仿真时, 种子在种箱充种区充种作业时会出现单粒充种、漏播、2 粒及多粒以上重复充种等现象, 如图 6 所示。窝眼孔最大限度地实现单粒充种是播种器进行精密播种的重要环节。因此, 在仿真时, 三七种子在窝眼轮排种器中实现单粒充种是考察种子与窝眼轮排种器型孔适配程度的重要指标。

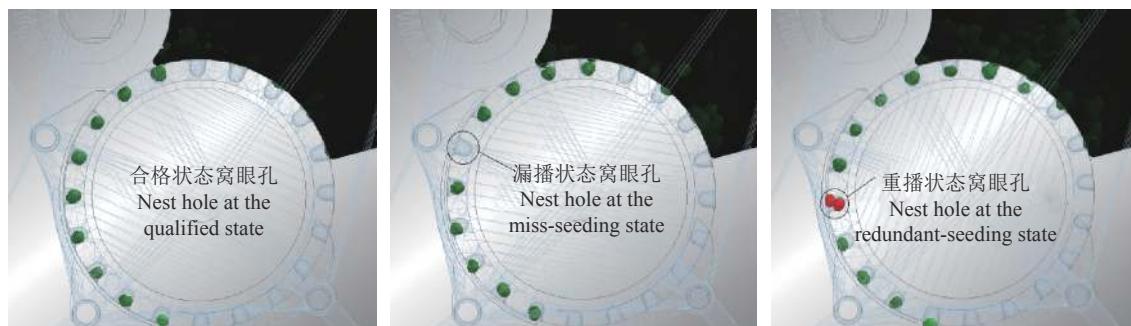


图 6 三七种子充种状态

Fig. 6 Seed-filling states of *Panax notoginseng* seeds

各级三七种子在不同型孔尺寸窝眼轮中进行 3 次仿真试验后, 分别统计出 200 粒各级种子在窝眼轮中充种时的合格粒数、漏播粒数与重播粒数, 取 3 次试验平均值, 按文献 [22] 计算出种子合格指数、漏播指数与重播指数, 各级种子在不同型孔尺寸窝眼轮排种器中具体充种情况及相应变化趋势

如图 7 所示。由图 7 可知, 就同级种子充种情况而言, 其在各型孔尺寸窝眼轮中差异显著, 5.0~5.5 mm 分级段种子在各型孔尺寸窝眼轮中充种时, 合格指数由高到低为 7.5 mm 轮>8.5 mm 轮>8.0 mm 轮>7.0 mm 轮, 漏播指数由低到高为 8.0 mm 轮<8.5 mm 轮<7.5 mm 轮<7.0 mm 轮, 重播指数由低到高为

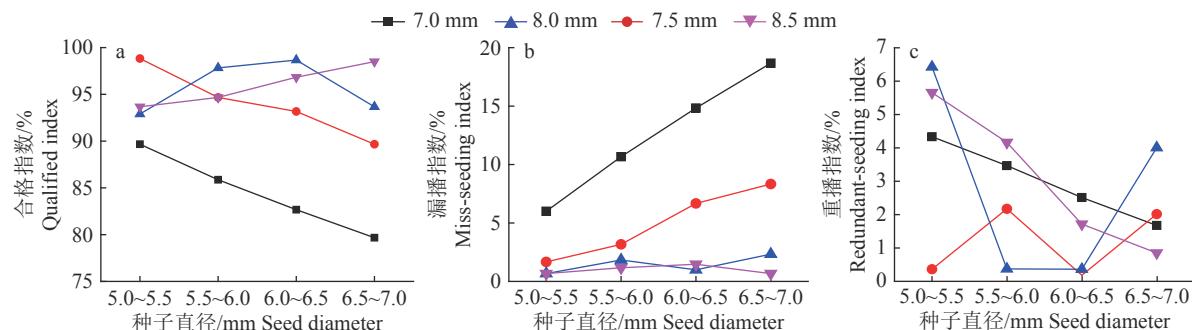


图 7 不同孔型尺寸窝眼轮中三七种子排种仿真试验充种情况

Fig. 7 Seed filling situation of simulation test of *Panax notoginseng* seed metering in nest hole wheels with different hole sizes

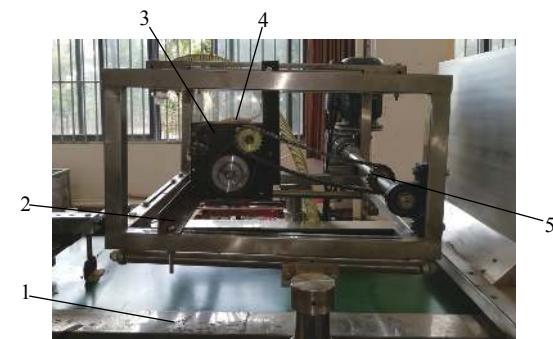
7.5 mm 轮<7.0 mm 轮<8.5 mm 轮<8.0 mm 轮。以合格指数最优指标确定最佳充种性能,综合比较分析,5.0~5.5 mm 分级段种子在窝眼轮型孔尺寸为 7.5 mm 时充种性能最佳,其合格指数、漏播指数、重播指数分别达到 97.99%、1.67% 和 0.34%。当型孔尺寸为 7.0 mm 时,型孔尺寸的限制使得该级粒径较大的种子在充种过程中滚入相应型孔的概率降低,造成漏充,进而使该级种子在该型号窝眼轮中合格指数下降,充种性能降低;当型孔尺寸>7.5 mm 时,随着型孔尺寸的增加,充种过程中每粒种子滚入型孔的机会增加,使得漏播指数降到很低的水平,但重播现象亦会随着种子充种概率的增大而增加,造成重播指数升高,导致合格指数随之下降。5.5~6.0、6.0~6.5 mm 分级段种子在窝眼轮型孔尺寸为 8.0 mm 时充种性能最佳,5.5~6.0 mm 分级段种子的合格指数、漏播指数和重播指数分别为 97.83%、1.83% 和 0.34%,6.0~6.5 mm 分级段种子则分别为 98.67%、0.99% 和 0.34%;6.5~7.0 mm 分级段种子在窝眼轮型孔尺寸为 8.5 mm 时充种性能最佳,其合格指数、漏播指数、重播指数分别为 98.5%、0.67% 和 0.83%。

综上所述,在窝眼轮与清种毛刷转速相同的情况下进行排种仿真试验,对于同级三七种子,窝眼轮型孔尺寸是影响充种性能的重要因素,窝眼轮排种器型孔尺寸为 7.0 mm 时,各级种子在其种箱内充种性能较差,进而影响排种性能,窝眼轮型孔尺寸>7.5 mm 时,各级种子均有适配型号的窝眼轮排

种器,其在种箱内充种性能良好,合格指数高。

### 3.2 验证试验与结果

在昆明理工大学农业与食品学院农机实验室进行排种性能验证试验,如图 8 所示。验证试验中设置窝眼轮转速为 35.2 r·min<sup>-1</sup>、清种毛刷转速为 105.5 r·min<sup>-1</sup>(窝眼轮与清种毛刷之间为链传动,两者传动比为 1:3),与仿真参数设置相同,随机选取各级三七种子 5 000 粒,并分别进行 3 次试验验证,统计 200 粒种子在窝眼轮排种器中充种后的合格粒数、漏播粒数以及重播粒数,并取 3 次试验平均值,依此数据分别计算出其合格指数、漏播指数与重播指数,分析后可得三七种子在窝眼轮中的充种情况如图 9 所示。



1: 试验台; 2: 安装架; 3: 排种器; 4: 三七种子; 5: 传动机构  
1: Test bench; 2: Mounting rack; 3: Seed-metering device; 4: Panax notoginseng seed; 5: Transmission mechanism

图 8 排种性能台架试验

Fig. 8 Bench test of seed-metering performance

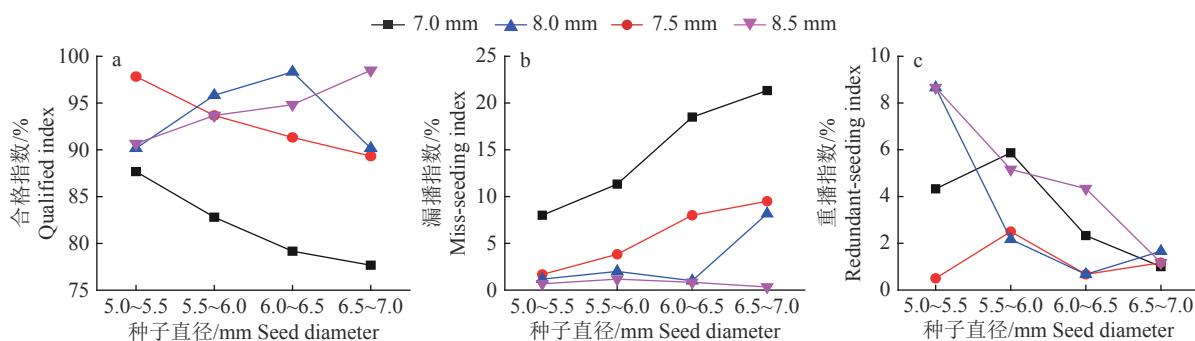


图 9 不同分级三七种子排种性能试验充种情况

Fig. 9 Seed filling situation of seed discharge performance test of *Panax notoginseng* seeds in nest hole wheels with different hole sizes

对比图 7 和图 9 发现,试验中各项性能指标与仿真结果相比均有所下降,但两者大致趋势走向一致。图 9 表明,窝眼轮型孔尺寸为 7.0 mm 时,各级种子在其种箱内充种性能较差,合格指数呈降低趋势,漏播指数、重播指数呈上升趋势。窝眼轮型孔尺寸为 7.5 mm 时最适于 5.0~5.5 mm 分级段种子充种,其合格指数、漏播指数、重播指数前者分别达到 95.83%、2.00%、2.17%,后者分别达到 98.33%、1.00%、0.67%;窝眼轮型孔尺寸为 8.5 mm 时最适于 6.5~7.0 mm 分级段种子充种,其合格指数、漏播指数、重播指数分别达到 98.50%、0.33% 和 1.17%。

97.83%、1.67% 和 0.50%;窝眼轮型孔尺寸为 8.0 mm 时最适于 5.5~6.0 和 6.0~6.5 mm 分级段种子充种,其合格指数、漏播指数、重播指数前者分别达到 98.33%、1.00%、0.67%;窝眼轮型孔尺寸为 8.5 mm 时最适于 6.5~7.0 mm 分级段种子充种,其合格指数、漏播指数、重播指数分别达到 98.50%、0.33% 和 1.17%。

以上结果虽与前述仿真结果有一定差异,但在反映种子粒径尺寸与窝眼轮型孔尺寸之间关系的结果是一致的。

综上所述,随着各级三七种子粒径的增加,适于其充种的窝眼轮型孔尺寸亦发生变化,因此,合理确定窝眼轮的型孔尺寸与种子粒径关系对于提高三七种子的充种性能和播种效率至关重要。对各分级段的三七种子与相应窝眼轮排种器的型孔尺寸之间的关系进行分析,可得如下等式:

$$L = 0.58l + 4.28, \quad (5)$$

$$H = 0.75h + 3.96, \quad (6)$$

式中,  $L$ : 窝眼轮排种器型孔直径;  $l$ : 不同分级段三七种子平均长轴;  $H$ : 窝眼轮排种器型孔深度;  $h$ : 不同分级段三七种子平均高轴。

计算可知窝眼轮排种器型孔尺寸与三七种子粒径之间呈线性关系,  $R_1=0.937\ 3$ ,  $R_2=0.878\ 1$ 。

## 4 结论

1) 采用标准振筛机与圆孔筛将三七种子分为4级,通过电子游标卡尺测量分级后三七种子的三轴尺寸,并依此数据进行窝眼轮排种器型孔参数设计。

2) 借助离散元软件 EDEM, 进行各级种子与不同型孔尺寸排种器充种过程仿真分析。按照仿真建模参数利用 3D 打印技术加工各型号排种器, 进行台架试验。综合仿真结果与台架试验结果, 在窝眼轮转速为  $35.2\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 、清种毛刷转速为  $105.5\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  时, 种子与窝眼轮型孔是否适配是影响充种性能的重要因素, 同级种子在适配型孔窝眼轮中充种时合格指数远远大于非适配型孔窝眼轮。以合格指数为最优指标, 分析各级种子在不同型孔尺寸排种器中的合格指数、漏播指数与重播指数, 得出各级种子充种时适配窝眼轮型孔尺寸:  $5.0\sim5.5$ 、 $6.5\sim7.0\text{ mm}$  分级段三七种子适配窝眼轮型孔尺寸分别为  $7.5$  和  $8.5\text{ mm}$ ,  $5.5\sim6.0$  和  $6.0\sim6.5\text{ mm}$  分级段三七种子适配窝眼轮型孔尺寸均为  $8.0\text{ mm}$ 。各级种子在其适配型孔窝眼轮中充种时, 其合格指数均大于  $95.83\%$ , 漏播指数和重播指数均分别小于  $2.00\%$  和  $2.17\%$ , 充种性能满足三七精密播种的农艺要求。

3) 分析各级三七种子尺寸数据及其适配排种器型孔尺寸数据, 确定了种子长轴 ( $l$ ) 与型孔直径 ( $L$ ) 的线性关系式为  $L=0.58l+4.28$ , 种子高轴 ( $h$ ) 与型孔深度 ( $H$ ) 之间的线性关系式为  $H=0.75h+3.96$ , 为三七窝眼轮排种器型孔尺寸的设计提供了依据。

## 参考文献:

[1] 鹿瑶, 吕钊钦, 郑文秀, 等. 玉米窝眼轮排种器性能影响

因素试验研究: 基于 EDEM[J]. *农机化研究*, 2018, 40(6): 155-160.

- [2] 赖庆辉, 高筱钧, 张智泓. 三七气吸滚筒式排种器充种性能模拟与试验 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 27-36.
- [3] GRAVEN L M, CARTER P R. Seed size/shape and tillage system effect on corn growth and grain yield[J]. *J Prod Agric*, 1990, 3(4): 445-452.
- [4] PANNING J W, KOCHER M F. Laboratory and field testing of seed spacing uniformity for sugarbeet planters [J]. *Appl Eng Agric*, 2000, 16(1): 7-13.
- [5] 甘露, 鞠培鸿, 冷洪友. 大豆种子精选分级与精密播种 [J]. *农机化研究*, 2000, 22(2): 124-125.
- [6] 刘佳, 崔涛, 张东兴, 等. 玉米种子的分级处理对气力式精量播种器播种效果的影响 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 109-113.
- [7] 孙士明, 那晓雁, 靳晓燕, 等. 不同形态玉米种子分级单粒播种性能试验研究 [J]. *农机化研究*, 2015, 37(7): 171-175.
- [8] 张宇文. 机械式多功能精密排种器的设计 [J]. *农业机械学报*, 2005, 36(5): 50-53.
- [9] 任闯, 高筱钧, 苏薇, 等. 三七种子的物理机械特性试验 [J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2015, 41(1): 109-112.
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化委员会. 长圆孔、长方孔和圆孔筛板: GB/T 12620—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-9.
- [11] 林英伦. 圆孔和长孔筛片 [J]. *机械开发*, 1985(2): 32-36.
- [12] 中华人民共和国农业部. 农作物种子检验规程水分测定: GB/T3543. 6—1995[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995: 82-84.
- [13] 张波屏. 现代种植机械工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 26-30.
- [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, 1988: 289-291.
- [15] 丛锦玲, 廖庆喜, 曹秀英, 等. 油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(8): 30-39.
- [16] 涂金刚. 关于双低油菜精准直播窝眼轮式排种技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2006.
- [17] 王国强, 郝万军, 王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 16-26.
- [18] 廖庆喜, 张朋玲, 廖宜涛, 等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(2): 109-114.
- [19] 石林榕, 吴建民, 孙伟, 等. 基于离散元法的水平圆盘式精量排种器排种仿真试验 [J]. *农业工程学报*, 2014, 30(8): 40-48.
- [20] 王金武, 唐汉, 王奇, 等. 基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与分析 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(21): 43-50.
- [21] SHIMIZU Y, CUNDALL P. Three dimensional DEM simulation of bulk handing by screw conveyors[J]. *J Eng Mech-Asce*, 2001, 127(9): 864-872.
- [22] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化委员会. 单粒(精密)播种机试验方法: GB/T 6973—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005: 10-24.