

轮勺式半夏精密排种器设计与试验

苏微 陈子威 赖庆辉 贾广鑫 吕勤 田保宁
(昆明理工大学农业与食品学院, 昆明 650500)

摘要: 针对半夏种子形状不规则、表皮易破损造成播种中充种困难、易伤种等问题,在测定半夏种子物料特性的基础上,设计一种轮勺式半夏精密排种器,分析了半夏种子在充种区和清种区的受力情况,阐述了轮勺式精密排种器的工作原理。通过离散元单因素仿真试验,对排种器的种勺数量、取种轮转速、种层高度以及种勺型孔半径进行分析,并以取种轮转速、种层高度和种勺型孔半径为试验因素,以合格指数、重充指数、漏充指数为试验指标,进行了二次回归正交旋转组合台架试验,建立3个指标的回归模型,并利用回归模型进行排种器的设计参数优化。试验结果表明:影响合格指数的主次顺序为取种轮转速、种层高度、种勺型孔半径;当种勺型孔半径为7.5 mm,取种轮转速为17.0~19.0 r/min、种层高度为123.0~133.0 mm,合格指数大于95.5%、漏充指数小于1.0%、重充指数小于3.5%,满足中药材半夏种植要求。

关键词: 半夏;精密排种器;轮勺式

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)09-0060-12 OSID: 

Design and Test of Wheel-spoon Type Precision Seed-metering Device for Chinese Herbal Medicine *Pinellia ternata*

SU Wei CHEN Ziwei LAI Qinghui JIA Guangxin LÜ Qin TIAN Baoning
(College of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: To solve the problems of seed filling difficulty and seed damage caused by the irregular shape and damaged epidermis of *Pinellia ternata* seeds, based on determining the physical properties of *Pinellia ternata* seeds, a kind of wheel-spoon type precision seed-metering device for Chinese herbal medicine *Pinellia ternata* with was designed, through the force analysis of seeds in the seed filling area and the seed clearing area, the working principle of the wheel-spoon type precision seed-metering device was expounded. The number of spoons, the rotation speed of seed wheel, the seed layer height, and the seed spoon hole radius of the seed-metering device were analyzed for the discrete element single factor simulation test. For the quadratic regression orthogonal rotation combined bench test, the rotation speed of seed wheel, the seed layer height, and the seed spoon hole radius were chosen as the test factors, and the qualified index, multiple index, and the missing index were taken as the test indexes. Regression models of three test indexes were established during the experiment. Experimental results showed that the primary and secondary factors affecting the qualified index was the rotation speed of seed wheel, the seed layer height, and the seed spoon hole radius. For the seed spoon hole radius of 7.5 mm, the rotation speed of seed wheel of 17.0~19.0 r/min, and the seed layer height of 123.0~133.0 mm, the qualified index was more than 95.5%, and the missing index, the multiple index were less than 1.0% and 3.5%, respectively. The experiment results further proved that the wheel-spoon type precision seed-metering device for Chinese herbal medicine *Pinellia ternata* could fully meet the requirements of *Pinellia ternata* planting.

Key words: *Pinellias ternata*; precision seed-metering device; wheel-spoon type

收稿日期: 2021-09-13 修回日期: 2021-10-13
基金项目: 国家自然科学基金项目(52165031)、国家重点研发计划项目(2017YFD0700600-2017YFD0700604)、云南省重大科技专项(2016ZF001、2017ZF001、2018ZC001-3、2018ZC001-4、2018ZC001-5)和云南省高校工程研究中心建设计划项目
作者简介: 苏微(1979—),女,副教授,主要从事农业机械装备研究,E-mail: laisubo@163.com
通信作者: 赖庆辉(1980—),男,教授,主要从事农业机械装备与计算机测控研究,E-mail: laiqinghui007@163.com

0 引言

近年来,随着半夏的需求量逐年增高,野生半夏的产量远达不到需求,因此急需人工种植以提高半夏产量。目前半夏种植多以传统人工点播或撒播为主,而传统人工点播或撒播劳动强度大、成本高、生产效率低,因此研制一种针对半夏人工种植的精密播种机对于实现半夏种植产业化和规模化发展具有重大意义。

精密排种器是精密播种机的核心部件,其中精密排种器又分为气力式和机械式。气力式排种器排种精度高但动力配备大、结构复杂、生产成本过高^[1-4],而机械式排种器以结构简单、生产成本低、适用于窄行播种等优点而得到广泛应用,传统的机械式排种器主要有窝眼轮式、链勾式、勾轮式等,其中窝眼轮式排种器结构简单,动力配备适应性强可实现密集精密播种,多用于大豆、油菜等球度相对较高的种子,但在工作过程中种子易受剪切载荷作用而导致伤种现象,对种子适应性差^[5-10];链勾式排种器利用链条带动种勾取种,对种子的适应性强,具有不伤种、易充种、易实现单粒排种等优点,多用于马铃薯、甘蔗、大蒜等形状不规则的大颗粒种子,但是结构相对复杂且在中高速作业时链条抖动显著,易造成漏播^[11-17];勾轮式排种器通过勾轮盘上的舀勾在种箱内取种,对于种子要求较高,适合于大蒜、玉米等形状较为不规则的种子播种^[18-20]。综合而言,以上几类排种器均不适用于半夏这类形状不规则、大小不均匀、表皮易破损等特点的种子。因

此有必要研究一种可实现半夏精密播种要求的新型排种器。

为此本文设计一种轮勾式半夏精密排种器,该排种器在结构上继承勾轮式排种器结构简单、可实现单体播种的优势,结合链勾式排种器不伤种、易充种等优点^[21],通过理论分析设计排种器结构,利用离散元仿真试验确定排种器结构参数和工作参数,通过台架试验对轮勾式排种器的充种性能进行验证,以期为轮勾式排种器设计提供理论指导和依据,从而实现半夏精密播种。

1 半夏种子物理特性参数测定

1.1 试验材料

半夏种子属于散粒物料,其基本物理特性参数包括半夏种子三轴尺寸、千粒质量、泊松比、弹性模量和剪切模量,本文选用河北早半夏种子作为试验对象,在昆明理工大学农业与物料实验室通过游标卡尺、电子天平、量筒以及食品物性分析仪等仪器分别对半夏种子的物理特性参数进行测量。

1.2 物理特性参数测定

1.2.1 三轴尺寸测定

半夏种子的长度 L 、宽度 W 、厚度 H 对种勾的型孔尺寸设计影响很大,本文以河北早半夏为参考对象,先经过分级处理筛选长度在 10.0 ~ 11.0 mm 的半夏种子,选取分级后 500 粒饱满的半夏种子,测量半夏种子长度平均值为 10.5 mm,宽度平均值为 8.2 mm,厚度平均值为 7.9 mm,其三轴尺寸范围如图 1 所示。

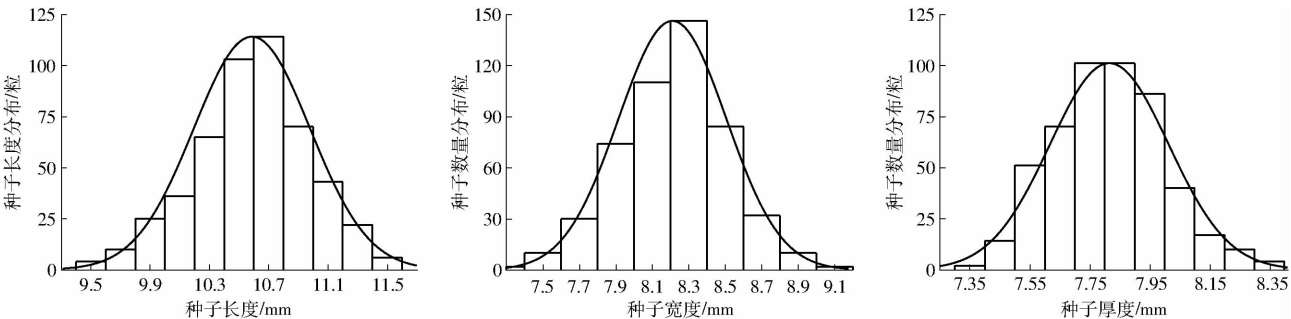


图 1 半夏种子三轴尺寸分布图

Fig. 1 Triaxial size distribution of *Pinellia ternata* seeds

1.2.2 千粒质量与密度测定

分别通过精度为 0.01 g 的电子天平和精度为 0.01 mm 的数显游标卡尺以及量程为 50 mL、精度为 0.1 mL 的量筒对半夏种子的千粒质量及其密度进行测量,测得的千粒质量为 0.65 kg,密度平均值为 1.03 g/cm³。

1.2.3 半夏种子特性试验与泊松比测定

种子的特性试验可以反映出种子在受到挤压或

剪切时所承受的力学状态,为排种器结构设计与伤种受力分析等提供理论依据,本文采用英国 Stable Micro System 公司研制的检测精度为 0.000 2%、最大检测力为 1 000 N 的专业食品物性分析仪对半夏种子进行压缩、剪切试验,得到种子弹性模量 E 为 2.822×10^7 Pa、剪切模量 G 为 1.03×10^7 Pa,并根据剪切模量和弹性模量的线性关系得到半夏种子的泊松比 λ 为 0.37。

求得的基本参数如表 1 所示,为后续轮勺式中
草药半夏精密排种器模型仿真提供依据。

表 1 半夏种子物理参数

Tab.1 Physical property parameters of <i>Pinellia ternata</i>	
参数	数值
千粒质量/kg	0.65
密度/(g·cm ⁻³)	1.03
弹性模量/MPa	28.22
剪切模量/MPa	10.30
泊松比	0.37

2 排种器工作原理与充种过程分析

2.1 排种器结构

在测定半夏种子物理特性参数基础上,结合传统机械式排种器结构,创新设计了一种轮勺式精密排种器,排种器的种勺周围充满种子,有利于充种,种勺转动到取种轮上部时,实现清种,在结构上省去导种机构和清种机构,可直接通过取种轮上的种勺取种,经过清种区、护种区,在投种区实现排种。其结构如图 2 所示。排种器主要由种勺、取种轮、回流板、种勺安装板、种箱隔板、种箱、挡种毛刷、外壳、轴承、排种轴套以及护种板等组成。

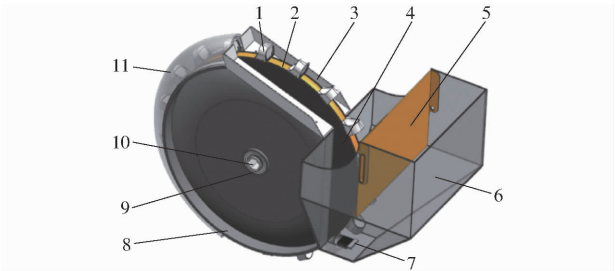


图 2 轮勺式中草药半夏精密排种器结构示意图
Fig.2 Structure sketch of wheel-spoon type precision seed-metering device for Chinese herbal medicine *Pinellia ternata*
1. 种勺 2. 取种轮 3. 回流板 4. 种勺安装板 5. 种箱隔板
6. 种箱 7. 挡种毛刷 8. 外壳 9. 轴承 10. 排种轴套 11. 护种板

2.2 排种器工作原理

排种器工作时,动力由排种轴输入,带动取种轮转动,种勺在取种轮的带动下进入种箱的充种区,充种区的目标种子在重力与种间相互作用力的共同作用下流入到种勺的型孔内,完成充种的种勺跟随取种轮继续旋转,在离开种群后,种勺与取种轮间的多余种子随着种勺进入到清种区,型孔外的其他种子在离心力和重力的共同作用下脱离种勺落在取种轮两边的回流板上,并滚落到种箱内,而型孔内的目标种子会继续随取种轮的转动进入到护种区;在护种区,目标种子在离心力和重力的共同作用下,落到前一个种勺的背部,相邻的两种勺与护种板间形成独立的空

间,独立空间内的种子随取种轮的转动到达投种区,种子在重力的作用下完成投种。种勺随取种轮继续转动,完成下一次排种,以此循环,轮勺式排种器实现半夏播种作业,排种器工作原理如图 3 所示。

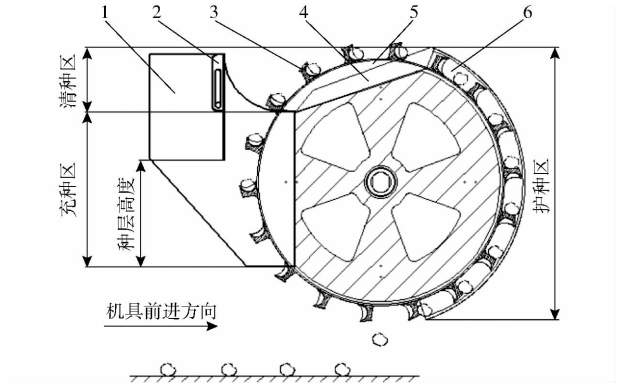
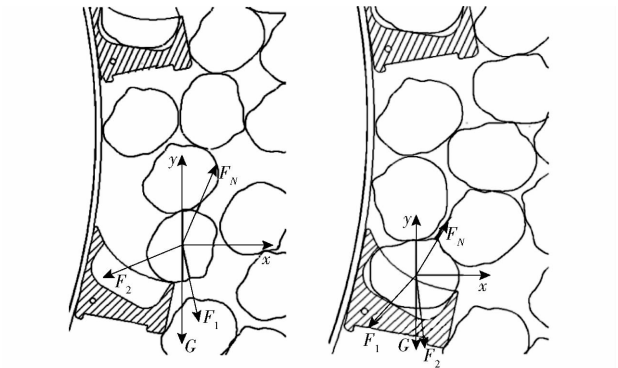


图 3 排种器工作原理图
Fig.3 Work diagram of seed-metering device
1. 种箱 2. 种箱隔板 3. 种勺 4. 回流板 5. 种勺安装板 6. 护种板

轮勺式排种器同链勺式排种器取种原理基本一致,从充种区开始取种,经过清种区、护种区,在排种区进行排种,整个充种过程种子不受剪切力或挤压力的作用,不会造成伤种现象,同时克服了链勺式排种器因链条抖动造成的漏播问题。

2.3 充种过程分析

排种器充种过程是一种复杂过程,该过程决定了排种器的播种精度;在充种区内,种子会受到种群及种勺施加的多种作用力,充种过程中,根据目标种子的相对位置将充种过程分为种勺内有半夏种子和种勺内无半夏种子两种情况,如图 4 所示。



(a) 种勺内无半夏种子 (b) 种勺内有半夏种子
图 4 取种过程不同状态下目标种子受力分析
Fig.4 Stress analysis of target seed under different conditions during seed collection

在充种过程中对目标种子进行受力分析,其受力公式为

$$\begin{cases} mg + \sum_{i=1}^n F_i + F_N = ma \\ \sum_{i=1}^n M_o(F_i) + M_o(mg) + M_o(N) = I\omega \end{cases} \quad (1)$$

式中 F_i ——周边半夏对待取半夏的作用力, N
 m ——半夏种子质量, kg
 F_N ——种勺对目标种子的支持力, N
 a ——目标种子加速度, m/s^2
 g ——重力加速度, 取 9.8 m/s^2
 ω ——目标种子角加速度, rad/s^2
 M_o ——种子所受力对支撑点的力矩, $\text{N}\cdot\text{m}$
 I ——转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$

种勺内无半夏种子如图 4a: 充种过程中, 种勺经过挡种毛刷开始进入种群, 目标种子在周围的半夏种子的作用力以及种勺支持力等多种作用力的作用下使得合力方向趋于种勺型孔位置, 从而使得还未进入到型孔的目标种子可以顺利地落入到种勺内。

种勺内有半夏种子如图 4b: 种勺进入种群后, 目标种子填入种勺型孔, 型孔内的目标种子在周围半夏种子的作用力以及种勺支持力等多种作用力下趋于稳定状态, 这种状态下可以避免在种勺脱离种群前保证种勺内的目标种子不会从型孔中滑出。

综上分析, 本文设计的轮勺式排种器在工作过程中经过充种区时, 目标种子充入型孔后基本处于稳定状态, 并且离开种群后目标种子不易脱离种勺。

3 关键部件设计

半夏种子的物理特性是设计排种器的重要参考依据, 因此, 本文以半夏种子三轴尺寸为参考, 充种条件为依据, 通过理论计算及运动学分析确定轮勺式半夏精密排种器关键部件结构参数。

3.1 种勺结构参数设计

种勺是轮勺式半夏精密排种器的核心部件, 其结构参数直接影响排种器的充种效果。

3.1.1 种勺外形设计

为避免种勺在取种过程中存在托种的现象, 并能保证种勺在进入护种区时种勺能与护种板之间形成一定的相对独立的空间, 因此种勺结构设计为“下宽上窄”, 并且其背部设计一定弧度以保证在种勺安装时可以与取种轮紧密贴合, 如图 5 所示。

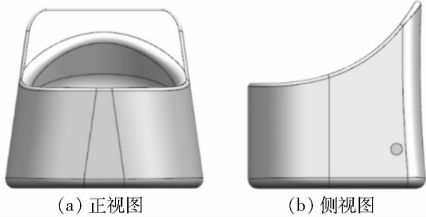


图 5 种勺结构示意图

Fig. 5 Schematics of seed spoon structure

3.1.2 种勺型孔尺寸

半夏种子球度 S_p 计算公式为

$$S_p = \frac{\sqrt[3]{LWH}}{L} \times 100\% \quad (2)$$

根据 1.2.1 节中测量的半夏三轴平均尺寸计算可得半夏球度 S_p 为 84%, 为保证目标种子可以顺利进入种勺内, 故将型孔形状设计为圆形, 型孔尺寸应满足

$$\begin{cases} L_{\max} < d_r < L_{\text{ave}} + H_{\min} \\ H_{\text{ave}} > d > \frac{1}{2} H_{\text{ave}} \end{cases} \quad (3)$$

式中 $L_{\max}$ ——半夏种子长度最大值, mm
 L_{ave} ——半夏种子长度平均值, mm
 $H_{\min}$ ——半夏种子厚度最小值, mm
 H_{ave} ——半夏种子厚度平均值, mm
 d_r ——种勺型孔直径, mm
 d ——种勺型孔深度, mm

结合半夏种子的三轴尺寸及球度, 为使在充种过程中更加顺利, 将种勺型孔设计为“圆柱孔”的结构, 如图 6 所示。

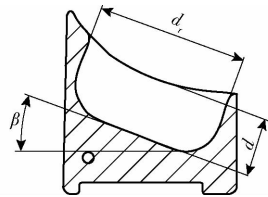


图 6 种勺型孔结构示意图

Fig. 6 Schematic of seed spoon hole structure

根据公式(3)和 1.2.1 节的三轴尺寸计算得到种勺型孔深度 d 的范围为 $4 \sim 8 \text{ mm}$, 型孔直径 d_r 的范围为 $10.5 \sim 18 \text{ mm}$, 为满足要求, 将种勺型孔半径 r 范围确定为 $5.5 \sim 9 \text{ mm}$, 由于半夏种子呈椭球状, 种子进入型孔的不同姿态会对充种有一定的影响, 而种勺型孔半径对半夏种子进入型孔起到重要作用, 在半夏种子进入型孔后, 型孔的深度在上述范围内均不易滑落, 因此, 为便于简化分析, 结合实际的试验, 将种勺型孔深度 d 确定为 5.5 mm , 而型孔半径 r 则作为试验因素进行进一步分析。

3.1.3 种勺型孔倾角

种勺型孔倾角为种勺型孔底部的切线与种勺底部的夹角。种勺型孔倾角有利于种勺经过充种区时取种并携带种子离开种群时防止携带多余种子, 为满足种勺单粒取种, 在种勺通过种群时, 对型孔外的种子进行静力学分析, 如图 7 所示。

种勺随取种轮做圆周运动, 当种勺位于某一位置时, 种勺及型孔内的目标种子有随取种轮沿切向方向的运动趋势, 通过运动学分析, 种勺携带除目标种子

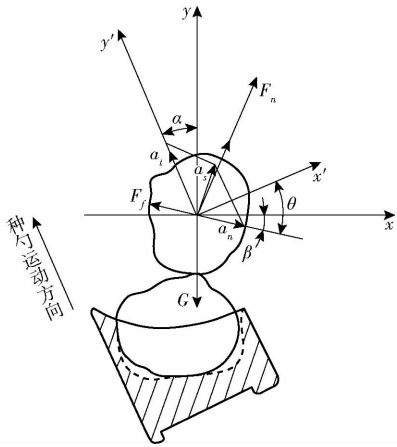


图 7 型孔外种子静力学分析

Fig. 7 Static analysis of seeds outside hole

外的其他种子会产生沿运动方向加速度 a_t 以及运动方向切线方向加速度 a_n , 而这两种加速度均和种勺倾角相关。保证种勺型孔倾角可以起到清种的作用, 需要种勺型孔外的种子的合加速度位于 oxy 坐标系的第一象限内。因此, 型孔外的种子受力应满足

$$\begin{cases} a_n > 0 \\ \beta < \varphi_s \\ F_n = mg \cos \beta \\ F_f = F_n \mu_s \\ ma_n = mg \sin \beta - F_f \end{cases} \quad (4)$$

式中 φ_s ——半夏种间最大摩擦角, ($^\circ$)
 F_n ——型孔外种子所受支持力, N
 F_f ——型孔外种子所受摩擦力, N
 μ_s ——半夏种间动摩擦因数
 β ——种勺型孔倾角, ($^\circ$)

通过对半夏种子的物理特性测量得到, 半夏种子间的最大摩擦角 φ_s 为 22.8° , 半夏种子间的动摩擦因数 μ_s 为 0.086, 因此, 计算得到种勺型孔倾角 β 在 $4.92^\circ \sim 22.8^\circ$ 之间。后续通过仿真分析和实际试验确定种勺型孔倾角 β 为 20° 。

3.2 取种轮参数设计

为使得种勺所携带型孔外的其他种子更易掉落到取种轮两侧的回流板上, 在取种轮的外缘设计棱角, 此棱角可以避免种勺和取种轮之间的“托种”现象, 如图 8 所示。

离开充种区的种勺随取种轮做圆周运动, 在经过取种轮的最高点时, 如果种勺型孔内的种子所受惯性力过大, 将会脱离型孔, 无法进入护种区而造成漏播, 因此对处于取种轮运动过程中的半夏种子进行力学分析, 如图 9 所示。

以半夏种子的质心作为坐标轴原点, x 轴的正方向垂直于半夏种子与种勺接触面向外, y 轴正方向垂直于 x 轴并指向种勺运动趋势方向, 由此建立

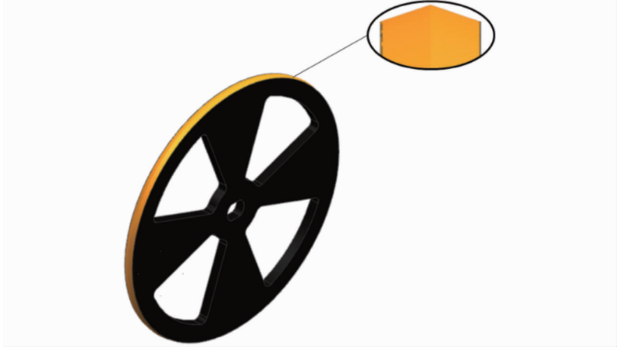


图 8 取种轮结构示意图

Fig. 8 Schematic of seed wheel structure

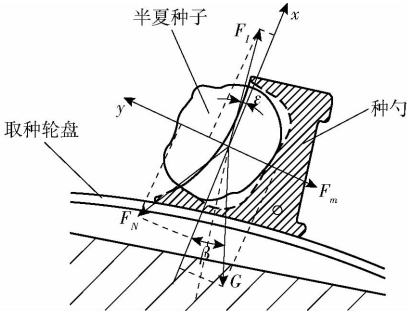


图 9 最高点型孔内半夏种子受力分析

Fig. 9 Stress analysis of *Pinellia ternata* seeds in the highest point hole

直角坐标系, 对种子进行受力分析, 得

$$\begin{cases} \sum F_x = F_l \cos \varepsilon - F_n - mg \cos \beta = 0 \\ \sum F_y = F_l \sin \varepsilon - F_m - mg \sin \beta \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} F_l = m \frac{2v_w^2}{D} \\ F_m = \mu F \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\sum F_x$ ——种子在 x 方向所受合力, N
 $\sum F_y$ ——种子在 y 方向所受合力, N
 F_l ——转动惯性力, N
 F_m ——种子与种勺间的摩擦力, N
 ε ——转动惯性力与 x 轴正向夹角, ($^\circ$)
 μ ——种子与种勺间的摩擦因数
 v_w ——取种轮线速度, m/s
 D ——取种轮直径, mm

种勺随着取种轮作圆周运动, 运动过程中, y 方向的合力沿着 y 轴的负方向可以保证型孔内的半夏种子不被甩出, 联立公式(5)、(6)得到

$$D \geq \frac{2v_w^2 (\sin \varepsilon - \mu \cos \varepsilon)}{g (\sin \beta - \mu \sin \beta)} \quad (7)$$

当取种轮转动的线速度在 0.3 m/s 时, 在 F_l 与 x 轴正向夹角 ε 为 0° 时, 根据 3.1.3 节, 种勺倾角 β 为 20° , 种勺与半夏种子间的摩擦因数 μ 为 0.457, 计算得到 $D \geq 97.7$ mm, 取种轮直径越大, 种勺数量越多, 充种性能越好, 但是取种轮直径也不宜过大,

参考《农业机械设计手册》结合实际试验,确定取种轮直径 D 为 220 mm。

3.3 种勺分布

轮勺式排种器的充种频率取决于取种轮上的种勺数量与取种轮的线速度。当取种轮转速一定时,种勺数量越多,排种器的充种频率越高;当种勺数量一定时,取种轮转速越快,排种器的充种频率越高,而充种频率越高排种器的充种性能越好。而种勺的数量 z 需要满足

$$z = \frac{\pi D v_m}{S v_w}$$

(8)

式中 v_m ——播种机作业速度, m/s

S ——半夏播种株距, mm

半夏株距为 5 cm 左右,播种机作业速度为 1.00 km/h,结合 3.2 节,取种轮直径为 220 mm,而取种轮线速度过快会出现充种、清种不及时等现象从而导致重播以及漏播严重,取种轮线速度过低会出现清种时间过长的现象从而导致漏播。参考《农业机械设计手册》,当取种轮的线速度不超过 0.3 m/s 时,经计算种勺的数量 $z \geq 13$,后续通过试验确定种勺的个数,其安装如图 10 所示。

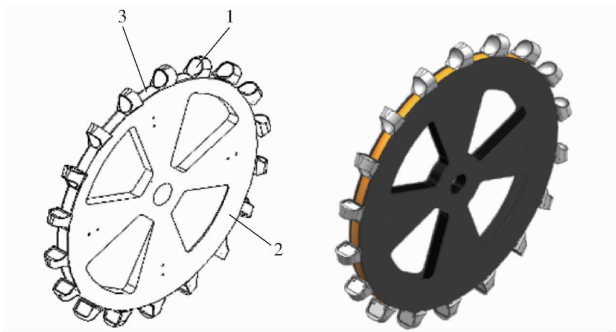


图 10 种勺装配图

Fig. 10 Assembly drawing of planting spoon

1. 种勺 2. 种勺安装板 3. 取种轮

3.4 回流板参数设计

离开充种区后,种勺随取种轮做圆周运动,除目标种子外的其他种子依托在种勺与取种轮之间并跟随一起运动,当种勺经过清种区时,除型孔内的其他种子在重力和离心力的作用下掉落到取种轮两侧的回流板上,并回流到种箱内,如图 11 所示,为保证种子可以在自身重力的作用下回流到种箱内,对回流板上的种子受力分析得

$$\begin{cases} mg\cos\theta = F_z \\ F_c = F_z\tan\theta \\ \theta \geq \varphi \\ ma = mg\sin\theta - F_c \end{cases}$$

(9)

式中 θ ——回流板倾角, (°)

φ ——半夏与回流板材料最大摩擦角, (°)

F_z ——回流板对半夏种子的支持力, N

F_c ——回流板对半夏种子的摩擦力, N

经过测量得到种子与回流板材料静摩擦角 φ 为 24.8°,根据种箱以及外壳的结构,并结合试验,确定回流板倾角 θ 为 25°。

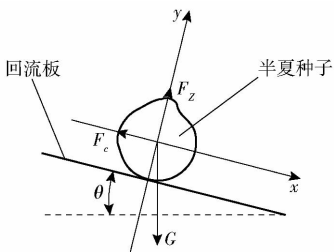


图 11 种子在回流板上受力示意图

Fig. 11 Schematic of stress analysis of seeds on reflux plate

4 EDEM 离散元模拟仿真

4.1 仿真模型建立及仿真参数确定

4.1.1 仿真模型建立

本文以河北省早半夏种子为对象进行建模,选取与平均三轴尺寸相近的半夏种子,通过三维扫描仪对选取的半夏种子扫描得到其三维点云数据,在 Geomagic-Studio 软件中利用逆向工程技术将获得的三维点云数据拟合成半夏种子的三维网格几何模型,并导入到 EDEM 软件中,通过非球形颗粒的快速填充功能,得到多球面聚合颗粒模型,如图 12 所示。

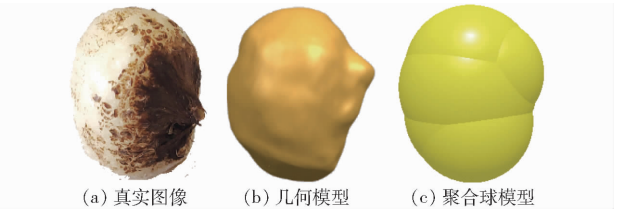


图 12 半夏种子实物图与仿真模型

Fig. 12 Graph and simulation model of *Pinellia ternata* seeds

通过 NX 三维绘图软件建立排种器三维模型,为提高仿真效率,简化或省略三维模型中不参与仿真的部件,导出 STL 格式文件并导入到 EDEM 软件中,如图 13 所示。

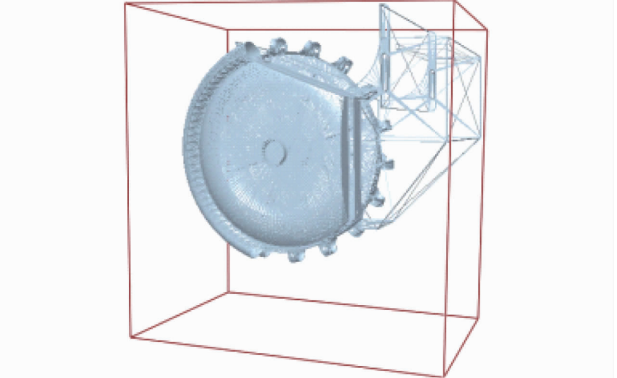


图 13 排种器 EDEM 仿真模型

Fig. 13 Import seed-metering device model in EDEM

4.1.2 仿真参数确定

在排种器工作过程中,种子将会接触种勺、回流板、取种轮,其中取种轮及种勺的材料为 ABS 塑料,回流板材料为不锈钢材料。选择 Hertz – Mindlin (no slip) 模型作为颗粒间及颗粒与排种器间的接触模型。试验前进行参数标定,确定颗粒-颗粒、颗粒-材料的接触参数以及 ABS 塑料、半夏种子和不锈钢材料的各基础参数及相互间的接触参数,如表 2 所示。

表 2 离散元仿真参数

Tab.2 Simulation parameters of EDEM

参数	半夏颗粒	不锈钢	ABS 塑料
泊松比	0.37	0.30	0.34
剪切模量/Pa	1.03×10^7	7.0×10^{10}	3.0×10^9
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.03	7.80	1.25
碰撞恢复系数(与半夏种子)	0.452	0.504	0.391
静摩擦因数(与半夏种子)	0.421	0.453	0.416
滚动摩擦因数(与半夏种子)	0.086	0.046	0.057

4.2 单因素仿真试验

为进一步确定轮勺式排种器的主要结构参数和工作参数,通过 EDEM 软件对排种器的充种性能进行单因素仿真试验,以合格指数(1 粒/勺)、漏充指数(0 粒/勺)和重充指数(≥ 2 粒/勺)为试验指标,如图 14 所示。通过试验对各影响因素进行分析。每组试验重复进行 3 次,从排种器稳定工作时开始记录 10 s 内的数据,每次统计 100 个种勺的取种情况。

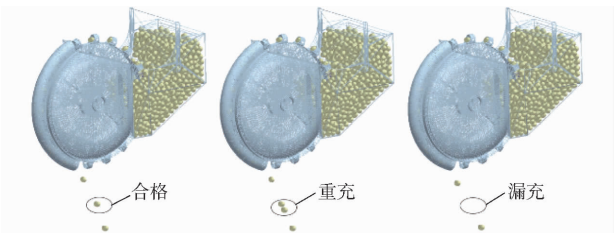


图 14 EDEM 仿真试验指标
Fig.14 EDEM simulation test index

4.2.1 种勺数量

按照 3.3 节计算的种勺数量,通过预试验,在仿真试验时设定取种轮转速为 20.0 r/min、种层高度为 140.0 mm、种勺型孔半径为 7.5 mm,分析种勺数量为 14、16、18、20 个时对充种过程的影响,其试验结果如表 3 所示。

通过试验分析可知,随着种勺数量的增加,排种器充种过程中的合格指数先升高后降低,漏充指数先降低后升高,其中在种勺数量为 14 个时,两相邻种勺间距过大,种群流动不稳定,不利于充种,从而导致合格指数降低,而在种勺数量为 18 个时,种勺

表 3 不同种勺数量时仿真结果

Tab.3 Simulation results of different numbers of seed spoon

%

种勺数量/个	试验序号	合格指数	漏充指数	重充指数	平均合格指数	平均漏充指数	平均重充指数
14	1	89	5	6	89.67	4.67	5.67
	2	87	6	7			
	3	93	3	4			
16	1	94	2	4	93.00	3.00	4.33
	2	91	4	5			
	3	94	3	3			
18	1	95	2	3	95.33	1.67	3.00
	2	95	2	3			
	3	96	1	3			
20	1	92	6	2	91.67	6.00	2.33
	2	93	5	2			
	3	90	7	3			

间距较合适,两种勺间的种群流动相对稳定,合格指数最高,随着种勺数量的增加,种勺间距过小导致充种不及时,此时合格指数下降,由此,将种勺数量选定为 18 个。

4.2.2 种层高度

排种器工作过程中种箱内的种层高度对其充种效果起一定的影响作用,由于实际加工的种箱总高度为 160.0 mm,试验中种层高度需稍低于种箱的总高度以防止取种过程中种箱内上层的种子流出种箱,同时为保证一定的充种区域,将种层高度范围定为 80.0 ~ 150.0 mm。为探究种层高度对轮勺式排种器充种性能的影响,通过预试验,仿真试验时设定种勺数量为 18 个、取种轮转速为 20.0 r/min、种勺型孔半径为 7.5 mm,分析种箱内种层高度为 80.0、100.0、120.0、140.0、150.0 mm 时对排种器充种过程中合格指数、漏充指数以及重充指数的影响,为保证种箱内充种区的种层高度不变,通过调节种箱隔板的高度,使隔板外侧的种群填充到充种区,其试验结果如表 4 所示。

通过试验分析可知,随着种层高度的增加,排种器充种过程中的合格指数先升高后降低,漏充指数降低,重充指数升高,其中在种层高度为 120.0 mm 时合格指数达到最高,而在种层高度为 80.0 mm 时,合格指数最低,说明当种层高度较低时种间力过小使得种子无法落入到种勺型孔内,致使漏充指数升高,当种层高度过高时,充种区内种间力较大,导致种勺更易携带型孔外其他种子进入清种区使得重充指数升高,合格指数降低。考虑到后续试验中各因素间的交互作用,将种层高度确定为 100.0 ~ 150.0 mm。

表 4 不同种层高度时仿真结果

Tab.4 Simulation results of different seed heights

		%					
种层高 度/mm	试验 序号	合格 指数	漏充 指数	重充 指数	平均合 格指数	平均漏 充指数	平均重 充指数
80.0	1	90	9	1			
	2	90	9	1	89.67	9.00	1.33
	3	89	9	2			
100.0	1	91	6	3			
	2	93	5	2	92.33	5.00	2.67
	3	93	4	3			
120.0	1	94	2	4			
	2	95	2	3	95.00	1.67	3.33
	3	96	1	3			
140.0	1	94	2	4			
	2	96	1	3	94.33	1.33	4.33
	3	93	1	6			
150.0	1	92	1	7			
	2	91	1	8	92.00	0.67	7.33
	3	93	0	7			

4.2.3 取种轮转速

取种轮转速对排种器的充种效果有很重要的影响,为研究取种轮转速对排种器作业过程中充种过程的影响程度,通过预试验,在仿真试验中设定种勺数量为 18 个、种层高度为 140.0 mm、种勺型孔半径为 7.5 mm,分析取种轮转速为 10.0、15.0、20.0、25.0、30.0 r/min 时对排种器充种性能的影响,其试验结果如表 5 所示。

表 5 不同取种轮转速时仿真结果

Tab.5 Simulation results under different

		%					
rotational seed wheel speeds							
取种轮 转速/ (r·min ⁻¹)	试验 序号	合格 指数	漏充 指数	重充 指数	平均合 格指数	平均漏 充指数	平均重 充指数
10.0	1	89	1	10			
	2	88	0	12	88.67	0.33	11.00
	3	89	0	11			
15.0	1	94	1	5			
	2	93	1	6	93.00	0.67	6.33
	3	92	0	8			
20.0	1	94	1	5			
	2	95	1	4	95.00	1.33	3.67
	3	96	2	2			
25.0	1	94	4	2			
	2	93	4	3	93.67	3.67	2.67
	3	94	3	3			
30.0	1	91	8	1			
	2	91	7	2	92.00	6.33	1.67
	3	94	5	1			

通过试验结果可知,随着取种轮转速的提高,试

验的合格指数先升高后降低,漏充指数逐渐升高,其中在取种轮转速为 20.0 r/min 时,合格指数最高,而在取种轮转速为 10.0 r/min 时,合格指数最低,说明当取种轮转速过慢,种勺与取种轮间更易形成种子堆积,当取种轮转速越快,处于充种区的两相邻种勺之间的种群回填不及时使得漏充指数升高从而导致合格指数降低。考虑到后续试验中各因素间的交互作用,将取种轮转速确定为 15.0 ~ 30.0 r/min。

4.2.4 种勺型孔半径

种勺型孔大小决定着排种器在充种过程中单粒取种的成功率,为研究种勺型孔对排种器充种性能的影响程度,根据 3.1.2 节对种勺型孔的理论设计,通过预试验,在仿真分析中设定种勺数量为 18 个、取种轮转速为 20.0 r/min、种层高度为 140.0 mm,分析型孔半径为 5.5、6.0、7.0、8.0、9.0 mm 时对排种器充种性能的影响,试验结果如表 6 所示。

表 6 不同种勺型孔半径时仿真结果

Tab.6 Simulation results under different seed

		%					
spoon hole radius							
种勺型孔 半径/mm	试验 序号	合格 指数	漏充 指数	重充 指数	平均合 格指数	平均漏 充指数	平均重 充指数
5.5	1	88	12	0			
	2	87	13	0	88.00	11.67	0.33
	3	89	10	1			
6.0	1	90	8	2			
	2	90	9	1	90.67	7.33	2.00
	3	92	5	3			
7.0	1	93	3	4			
	2	93	4	3	92.67	4.00	3.67
	3	91	5	4			
8.0	1	93	2	5			
	2	95	1	4	93.67	1.67	4.67
	3	93	2	5			
9.0	1	92	1	7			
	2	91	1	8	91.33	1.33	7.33
	3	91	2	7			

由表 6 可知,随着种勺型孔半径的增大,试验中的合格指数先升高后降低,漏充指数逐渐降低。当种勺型孔半径为 5.5 mm 时,合格指数最低,当种勺型孔半径为 8.0 mm 时,合格指数最高,说明在取种过程中,种勺经过充种区种群时,种勺型孔半径过小,目标种子无法稳定地“躺”在种勺的型孔内,随着取种轮的转动,型孔内的目标种子更易脱离种勺型孔,导致漏充指数升高,合格指数降低;当种勺型孔过大时,种勺更易携带型孔外的其他种子随取种轮一起运动,此时重充指数会逐渐升高,合格指数下降,考虑到后续试验中各因素间的交互作用,将种勺型孔半径确定为 6.0 ~ 9.0 mm。

5 排种器台架试验

5.1 台架试验材料

台架试验所需的材料包括排种器外壳、护种板、种勺、取种轮、种勺安装板、种箱、轴套,其中取种轮、种勺、护种板和轴套均使用 ABS 材料,排种器外壳、种箱通过激光下料不锈钢材料,经折弯和焊接等工艺加工而成。本次台架试验所使用的种子为人工筛选后的相对饱满的河北旱半夏种子,台架试验于 2021 年 6 月 20 日在昆明理工大学农业机械装备实验室的 JPS-12 型视觉排种器性能试验台上进行,试验装置如图 15 所示,利用合肥富煌君达高科信息技术有限公司生产的千眼狼 5F01 高速摄像机拍摄轮勺式排种器在充种过程中的情况,参考 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,记录排种器稳定工作状态下 200 个种勺的充种情况,每组试验进行 3 次并取结果的平均值。

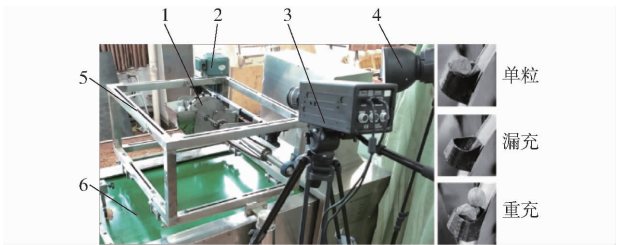


图 15 轮勺式中草药半夏精密排种器试验台
Fig. 15 Test bench of wheel-spoon type precision seed-metering device for Chinese herbal medicine *Pinellia ternata*

1. 轮勺式半夏精密排种器 2. 电机 3. 高速摄像机 4. 补光灯
5. 台架 6. 排种带

5.2 试验方法与结果

基于对单因素试验结果的分析,确定取种轮转速、种层高度、种勺型孔半径的水平范围,为进一步研究这 3 种试验因素是否存在交互影响及 3 个因素交互作用对轮勺式排种器工作性能的影响,采用二次旋转正交组合试验确定排种器的最佳作业性能参数,其中试验因素编码如表 7 所示,试验设计方案与

表 7 试验因素编码			
Tab. 7 Experimental factors codes			
编码	因素		
	种层高度/ mm	取种轮转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	种勺型孔 半径/mm
-1.682	100.0	15.0	6.0
-1	110.0	18.0	6.6
0	125.0	22.5	7.5
1	140.0	27.0	8.4
1.682	150.0	30.0	9.0

试验结果如表 8 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 分别为种层高度、取种轮转速、种勺型孔半径的编码值, Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分别为合格指数(1 粒/勺)、漏充指数(0 粒/勺)、重充指数(≥ 2 粒/勺)。

表 8 试验方案与结果						
Tab. 8 Experiment design and results						
序号	因素			指标		
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
1	-1	-1	-1	93.00	2.33	4.67
2	1	-1	-1	94.00	2.00	4.00
3	-1	1	-1	89.67	2.67	7.67
4	1	1	-1	92.67	2.33	5.00
5	-1	-1	1	94.00	0.33	5.67
6	1	-1	1	93.67	1.67	4.67
7	-1	1	1	90.33	0.33	9.33
8	1	1	1	92.00	2.67	5.33
9	-1.682	0	0	91.67	0.33	8.00
10	1.682	0	0	93.67	2.33	4.00
11	0	-1.682	0	95.67	0.33	4.00
12	0	1.682	0	91.67	2.67	5.67
13	0	0	-1.682	90.67	5.67	3.67
14	0	0	1.682	93.33	1.33	5.33
15	0	0	0	94.67	2.00	3.33
16	0	0	0	95.33	1.00	3.67
17	0	0	0	95.67	1.67	2.67
18	0	0	0	94.67	1.00	4.33
19	0	0	0	93.67	1.00	5.33
20	0	0	0	94.67	0.67	4.67
21	0	0	0	95.67	1.33	3.00
22	0	0	0	95.33	1.67	3.00
23	0	0	0	95.33	1.00	3.67

5.3 试验结果分析

利用 Design-Expert 软件对本次台架试验中排种器工作时的合格指数、漏充指数和重充指数进行方差分析,其显著性检验结果如表 9 所示。

5.3.1 合格指数 Y_1

从表 9 中可得,合格指数模型的拟合度极显著($P < 0.01$),其失拟项 $P = 0.527 1$,不显著($P > 0.05$),说明不存在其他影响合格指数的主要因素,其回归方程不失拟。影响排种器合格指数的主次顺序为取种轮转速 X_2 、种层高度 X_1 、种勺型孔半径 X_3 。 X_1 、 X_2 、 X_2^2 、 X_1^2 、 X_3^2 影响极显著,剔除交互项中不显著因素后的回归模型方程为

$$Y_1 = 95.01 + 0.64X_1 - 1.22X_2 + 0.38X_3 + 0.5X_1X_2 - 0.87X_1^2 - 0.52X_2^2 - 1.11X_3^2 \quad (10)$$

5.3.2 漏充指数 Y_2

通过 Design-Expert 软件对试验数据进行方差分析,其中漏充指数模型的拟合度极显著($P < 0.01$),其失拟项 $P = 0.053 9$,不显著($P > 0.05$),说

表 9 各指数方差分析
Tab.9 Variance analysis of each index

方差来源	合格指数				漏充指数				重充指数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	66.32	9	18.50	<0.000 1 **	25.86	9	7.66	0.000 6 **	52.11	9	8.88	0.000 3 **
X ₁	5.55	1	13.93	0.002 5 **	2.97	1	7.93	0.014 6 *	16.62	1	25.48	0.000 2 **
X ₂	20.49	1	51.43	<0.000 1 **	2.30	1	6.13	0.027 8 *	9.07	1	13.90	0.002 5 **
X ₃	1.93	1	4.84	0.046 4 *	9.90	1	26.40	0.000 2 **	3.05	1	4.67	0.049 9 *
X ₁ X ₂	2.00	1	5.02	0.043 1 *	0.12	1	0.33	0.577 4	3.12	1	4.79	0.047 5 *
X ₁ X ₃	0.88	1	2.22	0.160 1	2.37	1	6.31	0.026 0 *	0.34	1	0.53	0.480 3
X ₂ X ₃	0.058	1	0.15	0.709 4	0.014	1	0.036	0.851 9	0.013	1	0.020	0.890 7
X ₁ ²	12.07	1	30.29	0.000 1 **	0.043	1	0.11	0.740 2	13.52	1	20.73	0.000 5 **
X ₂ ²	4.26	1	10.70	0.006 1 **	0.001	1	0.003	0.958 9	4.14	1	6.35	0.025 6 *
X ₃ ²	19.52	1	49.00	<0.000 1 **	8.13	1	21.67	0.000 5 **	2.44	1	3.75	0.074 9
残差	5.18	13			4.88	13			8.48	13		
失拟	1.86	5	0.90	0.527 1	3.37	5	3.58	0.053 9	2.32	5	0.60	0.700 6
误差	3.32	8			1.51	8			6.16	8		
总和	71.50	22			30.73	22			60.59	22		

注：* 表示影响显著(0.01 < P < 0.05)，** 表示影响极显著(P < 0.01)。

明不存在其他影响漏充指数的主要因素,影响排种器漏充指数的主次顺序为种勺型孔半径 X₃、种层高度 X₁、取种轮转速 X₂。X₁X₃影响显著,X₃²影响极显著,剔除交互项中不显著因素后的回归方程为

$$Y_2 = 1.27 + 0.47X_1 + 0.41X_2 - 0.85X_3 + 0.54X_1X_3 + 0.72X_3^2 \tag{11}$$

5.3.3 重充指数 Y₃

通过 Design-Expert 软件对试验结果进行方差分析,其中重充指数模型的拟合度极显著(P < 0.01),其失拟项 P = 0.700 6,不显著(P > 0.05),说

明不存在其他影响重充指数的主要因素,影响排种器重充指数的主次顺序为种层高度 X₁、取种轮转速 X₂、种勺型孔半径 X₃。X₁X₂和 X₂²影响显著,X₁²影响极显著,剔除交互项中不显著因素后的回归方程为

$$Y_3 = 3.73 - 1.10X_1 + 0.81X_2 + 0.47X_3 - 0.63X_1X_2 + 0.92X_1^2 + 0.51X_2^2 \tag{12}$$

5.4 交互项对合格指数的影响

通过对试验结果的数据处理可以得到取种轮转速、种层高度、种勺型孔半径之间的交互作用对合格指数 Y₁的影响,其响应曲面如图 16 所示。

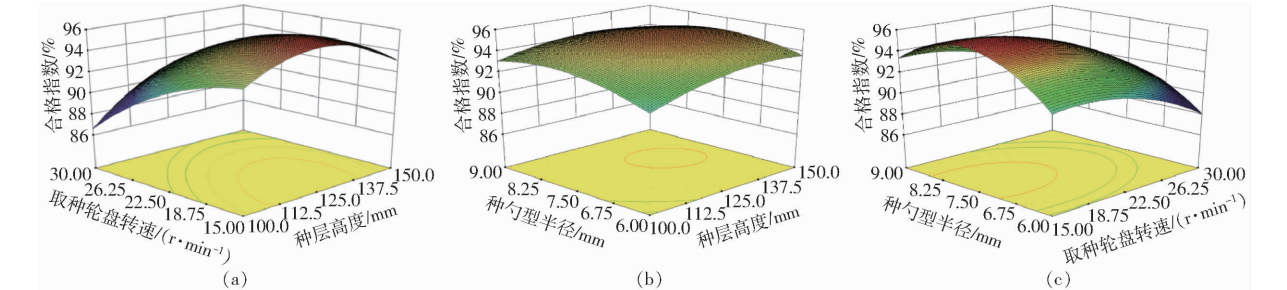


图 16 因素交互作用对合格指数的影响响应曲面

Fig.16 Effects of interaction factors on eligible rate

在排种器种勺型孔半径为 7.5 mm 时,取种轮转速和种层高度交互作用对合格指数 Y₁的影响响应曲面如图 16a 所示。轮勺式排种器取种轮转速为 15.0 ~ 22.0 r/min,种层高度为 120.0 ~ 140.0 mm,排种器的合格指数较大,当取种轮转速一定时,随着种层高度的增加,充种区内种间力逐渐增大,有利于充种,漏充指数逐渐下降,合格指数逐渐上升,种层高度过大时,种间力过大,重充指数逐渐上升,合格指数逐渐下降;当种层高度一定时,随着取种轮转速的逐渐加快,排种器自身的振动也随之增大,有利于

提升排种器的清种效果,重充指数下降,合格指数逐渐上升,当取种轮转速过快,充种区的种群回填不及时导致漏充指数逐渐上升,合格指数逐渐下降。

图 16b 为取种轮转速为 22.5 r/min 时,种层高度和种勺型孔半径交互作用对合格指数 Y₁影响的响应曲面。轮勺式排种器的种勺型孔半径为 7.4 ~ 7.8 mm,种层高度为 123.0 ~ 146.0 mm,排种器的合格指数较高,在作业速度一定时,随着种层高度的增大,充种区内种间力逐渐增加,有利于充种,漏充指数逐渐下降,合格指数逐渐增大,种层高度较高时,

充种区内种间力过高导致重充指数逐渐上升,合格指数逐渐下降;当种层高度一定时,随着种勺型孔半径的增大,充种区内的目标种子在种间力的作用下更易进入到型孔,漏充指数逐渐下降,合格指数逐渐上升,当种勺型孔半径过大时,重充指数逐渐上升,合格指数逐渐下降。

图 16c 为种层高度 125.0 mm 时,种勺型孔半径和取种轮转速交互作用对合格指数 Y_1 影响的响应曲面。轮勺式排种器的种勺型孔半径为 7.4 ~ 7.7 mm,取种轮转速为 15.0 ~ 18.0 r/min,排种器的合格指数较高,在种勺型孔半径一定时,随着取种轮转速逐渐加快,排种器自身的振动也随之增大,有利于提升排种器的清种效果,重充指数逐渐下降,合格指数逐渐上升,当取种轮转速过大,充种区的种群回填不及时导致漏充指数增大,合格指数逐渐下降;在取种轮转速一定时,随着种勺型孔半径的增加,种群内的目标种子更易充入到型孔中,漏充指数逐渐下降,合格指数逐渐上升,当种勺型孔半径过大时,重充指数逐渐上升,合格指数逐渐下降。

5.5 最佳参数优化

为确定最佳参数取值范围,设定合格指数大于 95.5%、重充指数小于 3.5% 以及漏充指数小于 1.0%,结合 5.3.1 节中得到影响合格指数的重要性依次为取种轮转速、种层高度、种勺型孔半径,所以将影响程度相对最小的种勺型孔半径作为参数优化固定值,设置种勺型孔半径为 7.5 mm,通过优化后所得最佳参数区域如图 17 所示,其中取种轮转速取值范围为 17.0 ~ 19.0 r/min、种层高度取值范围为 123.0 ~ 133.0 mm。

为验证优化结果的可靠性,通过台架试验进行验证。在保证试验条件不变的情况下选定种勺型孔半径为 7.5 mm,取种轮转速为 18.0 r/min,种层高度为 130.0 mm 进行试验并对试验结果进行分析,得到在这一条件下轮勺式排种器的合格指数平均值为 96.0%,漏充指数的平均值为 1.0%,重充指数的平

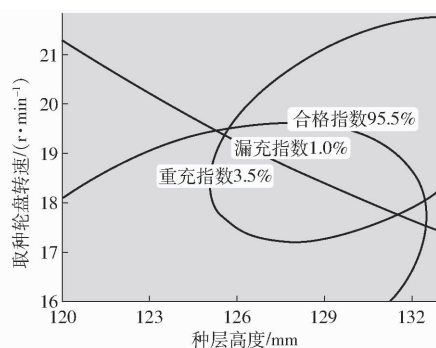


图 17 参数优化分析图

Fig. 17 Parameter optimization analysis chart

均值为 3.0%,试验结果与优化结果相符。

6 结论

(1)设计了一种新型结构的轮勺式半夏精密排种器,以充种条件为依据,通过理论计算和运动学分析,确定关键部件结构参数;种勺型孔深度为 5.5 mm、种勺型孔倾角为 20°、取种轮直径为 220 mm、回流板倾角为 25°。

(2)通过 EDEM 软件进行离散元单因素仿真试验,分析了不同种勺数量、取种轮转速、种层高度以及种勺型孔半径各因素对轮勺式排种器充种性能的影响,并确定种勺数量为 18 个、取种轮转速范围 15.0 ~ 30.0 r/min、种层高度范围 100.0 ~ 150.0 mm 以及种勺型孔半径范围 6.0 ~ 9.0 mm。

(3)以取种轮转速、种层高度和种勺型孔半径作为试验因素,搭建台架进行二次回归正交旋转组合试验,利用 Design-Expert 软件对试验结果进行分析,得到影响合格指数的主次顺序为取种轮转速、种层高度、种勺型孔半径,其中取种轮转速和种层高度的交互作用为极显著因素。通过参数优化,得到当种勺型孔半径为 7.5 mm,取种轮转速为 17.0 ~ 19.0 r/min、种层高度为 123.0 ~ 133.0 mm,合格指数大于 95.5%、漏充指数小于 1.0%、重充指数小于 3.5%,优化结果经台架试验验证可靠。

参 考 文 献

- [1] 赖庆辉,于庆旭,苏微,等.三七超窄行气吸式精密排种器设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(4): 102-112.
LAI Qinghui, YU Qingxu, SU Wei, et al. Design and experiment of air-suction ultra-narrow-row device for precise *Panax notoginseng* seed metering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 102-112. (in Chinese)
- [2] 廖彦涛,郑娟,廖庆喜,等.正负气压组合管针式西洋参集排器设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(3): 46-57.
LIAO Yitao, ZHENG Juan, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combined tube-needle centralized seeding device for American ginseng[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 46-57. (in Chinese)
- [3] 李兆东,杨文超,武尧尧,等.油菜气力盘式精量排种器槽齿辅助充种性能分析与试验[J].农业工程学报,2020,36(20): 57-66.
LI Zhaodong, YANG Wenchao, WU Yaoyao, et al. Performance analysis and experiments of seed filling assisted by groove-tooth

- of pneumatic disc precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 57–66. (in Chinese)
- [4] 胡梦杰, 夏俊芳, 郑侃, 等. 内充气力式棉花高速精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 73–85.
HU Mengjie, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of inside-filling pneumatic high speed precision seed-metering device for cotton[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 73–85. (in Chinese)
- [5] 赖庆辉, 贾广鑫, 苏微, 等. 凸包异形孔窝眼轮式人参精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 60–71.
LAI Qinghui, JIA Guangxin, SU Wei, et al. Design and experimental research of physical strength type seed-metering device for panax quinquefolius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 60–71. (in Chinese)
- [6] 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. (in Chinese)
- [7] 顿国强, 陈海涛, 查韶辉. 基于 EDEM 的大豆窝眼轮式排种盘型孔参数优化与验证[J]. 大豆科学, 2016, 35(5): 830–839.
DUN Guoqiang, CHEN Haitao, ZHA Shaohui. Parameter optimization and validation of soybean cell wheel seeding plate type-hole based on EDEM[J]. Soybean Science, 2016, 35(5): 830–839. (in Chinese)
- [8] 赖庆辉, 曹秀龙, 于庆旭, 等. 三七压穴精密排种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 85–95.
LAI Qinghui, CAO Xiulong, YU Qingxu, et al. Design and experiment of precision seeding device for hole-drop planter for *Panax notoginseng*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 85–95. (in Chinese)
- [9] 刘彩玲, 魏丹, 都鑫, 等. 宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 75–84.
LIU Cailing, WEI Dan, DU Xin, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision hook-hole type seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(1): 75–84. (in Chinese)
- [10] 刘娜. 窝眼轮式玉米精量排种器改进设计与试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
LIU Na. Improvement design and experimental study of corn precision seed-metering device[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. (in Chinese)
- [11] 王希英, 唐汉, 王金武, 等. 双列交错勺带式马铃薯精量排种器优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 82–90.
WANG Xiying, TANG Han, WANG Jinwu, et al. Optimized design and experiment on double-row cross spoon-belt potato precision seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 82–90. (in Chinese)
- [12] SZCZEPANIAK J. Parameter's identification of agricultural combination tractor-potato planter model[J]. Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 2008, 53(2): 16–20.
- [13] 牛康. 马铃薯整薯精密播种关键技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
NIU Kang. Study of key technologies on the whole potato seed precision sowing[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [14] GULATI S, SINGH M. Design and development of a manually drawn cup type potato planter[J]. Journal of Indian Potato Association, 2003, 30(1–2): 61–62.
- [15] 赖庆辉, 贾广鑫, 苏微, 等. 基于 DEM–MBD 耦合的链勺式人参精密排种器研究[J]. 农业机械学报, 2017, 39(2): 99–102, 107.
LAI Qinghui, JIA Guangxin, SU Wei, et al. Design and test of chain-spoon type precision seed-metering device for ginseng based on DEM–MBD coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 39(2): 99–102, 107. (in Chinese)
- [16] MOSLEM N, JALIL R. Development and evaluation of a new double-row sugarcane billet planter with overlap planting pattern[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America: AMA, 2014, 45(2): 57–64.
- [17] TITINAI T, KHWANTRI S, MASAMI U. Analysis of discharge consistency and performance of a sugarcane billet planter with side-conveyer concept[J]. KKK Engineering Journal, 2016, 43(1): 9–12.
- [18] 李玉华, 张智龙, 李天华, 等. 轮勺式大蒜单粒取种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 61–68.
LI Yuhua, ZHANG Zhilong, LI Tianhua, et al. Design and experiment of wheel-spoon type garlic precision seed-picking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 61–68. (in Chinese)
- [19] 冯晓静, 杨欣, 周剑, 等. 勺轮式玉米精密播种机的设计[J]. 农机化研究, 2012, 34(12): 108–110, 114.
FENG Xiaojing, YANG Xin, ZHOU Jian, et al. Design of spoon-wheel corn precision seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(12): 108–110, 114. (in Chinese)
- [20] 闻邦椿. 机械设计手册(第2卷)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [21] 苏微, 洪方伟, 赖庆辉, 等. 预切种甘蔗勺链式排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 87–97.
SU Wei, HONG Fangwei, LAI Qinghui, et al. Design and test of pre-cutting and spoon seed-metering device for sugarcane[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 87–97. (in Chinese)