

刘素, 赖庆辉, 董家宇, 等. 气吹式三七精密排种器充填性能的仿真与试验 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(3): 125-132.
LIU Su, LAI Qinghui, DONG Jiayu, et al. Simulation and experiment of air-blowing precision seed-metering device for *Panax notoginseng*[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(3): 125-132.

气吹式三七精密排种器充填性能的仿真与试验

刘 素, 赖庆辉, 董家宇, 曹秀龙

(昆明理工大学 现代农业工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要:【目的】为了满足三七 *Panax notoginseng* 的机械化种植需求, 减少机械式清种过程中对种子造成的损伤, 设计了一种适用于播种三七种子的气吹式精密排种器。【方法】确定了排种器的主要结构参数, 并建立了清种过程中的力学模型。通过建立排种器内部流场模型, 运用 Fluent 软件对不同清种风压条件下流场进行仿真分析, 验证了清种风压范围。为了检验仿真确定的风压范围的可行性并寻求最佳工作参数组合, 选取合格指数、漏播指数和重播指数作为试验指标, 作业速度、种层高度、清种风压作为试验影响因素, 采用正交试验方法, 对排种器进行了台架试验研究。【结果】最优参数组合: 作业速度为 0.6 m/s、种层高度为 90 mm、清种风压为 0.5 kPa, 此时试验合格指数为 90.48, 漏播指数为 4.24, 重播指数为 5.28。【结论】该气吹式排种器能够满足三七的播种要求, 为进行排种器的田间试验提供了参考。通过试验结果与之前仿真分析的过程对比, 清种风压变化对于排种器充填性能的影响一致, 验证了利用 Fluent 模拟确定清种风压的可行性。

关键词: 三七种子; 排种器; 风压; Fluent 模拟
中图分类号: S223.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2019)03-0125-08

Simulation and experiment of air-blowing precision seed-metering device for *Panax notoginseng*

LIU Su, LAI Qinghui, DONG Jiayu, CAO Xiulong

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: 【Objective】 A novel kind of air-blowing precision seed-metering device was designed in order to fulfill the mechanized planting needs of *Panax notoginseng* and reduce seed damage in the process of mechanical seeding. 【Method】 The main structural parameters of the seed-metering device were determined. The mechanical model in seed clearing process was established. The internal flow field model of the seed-metering device was established, Fluent software was used to simulate the flow field under different air-blowing pressure, and the range of air-blowing pressure for seed clearing was verified. We used orthogonal design and performed bench test to further examine the feasibility of the range of air-blowing pressure and find out the optimal combination of working parameters. Eligible index, leakage sowing index and repeat sowing index were selected as experimental indexes. Operating speed, seed layer height and air-blowing pressure were selected as the influencing factors in the test. 【Result】 The optimal combination of parameters was the operating speed of 0.6 m/s, seed layer height of 90 mm and air-blowing pressure of 0.5 kPa. Under these conditions, the qualified index was 90.48, the leakage sowing index was 4.24, and the repeat sowing index was 5.28.

收稿日期: 2018-06-18 网络首发时间: 2019-04-16 09:11:00
网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20190412.1740.002.html>
作者简介: 刘 素 (1991—), 女, 硕士研究生, E-mail: 1390103954@qq.com; 通信作者: 赖庆辉 (1980—), 男, 副教授, 博士, E-mail: laiqinghui007@163.com
基金项目: 国家自然科学基金 (51305187); 云南省重大科技专项 (2016ZF001, 2017ZF001); 国家重点研发计划项目 (2017YFD0700600, 2017YFD0700604); 云南省重大科技专项计划 (2018ZC001-3, 2018ZC001-4, 2018ZC001-5)

【Conclusion】 The air-blowing seed-metering device can meet the requirements of *Panax notoginseng* seeding. This study provides a theoretical basis for the field experiment of the seed-metering device. Comparison between the test results and the simulation analysis indicates that the influence of air-blowing pressure changes on the filling performance of the seed-metering device is consistent, and Fluent simulation is feasible for determining the air-blowing pressure for seed clearing.

Key words: *Panax notoginseng* seed; seed-metering device; air-blowing pressure; Fluent simulation

三七 *Panax notoginseng* 是中国的名贵中药材,在药材市场需求量大,截止 2017 年云南省三七种植面积已达到 3 万 hm^2 ^[1]。三七播种主要依靠人工完成,播种量为 270~300 万粒/ hm^2 ,种植成本高。现有的机械式三七播种机在播种作业前需要对种子进行筛分,播种机对种子大小的适用性不好。其次,由于三七种子的表皮容易破损,在一定程度上机械式清种装置会造成种子的破损,因此研制气力式三七精密排种器很有必要。

与机械式排种器相比,气吹式排种器充种效果好,对种子的外形尺寸适应性好,利用气流清种可以减少对种子的损伤,并且能够在较高速度下作业,播种效率比较高^[2]。在国外,英国 Ferguson 公司研发的 MF543 型气吹式播种机利用机械式侧充型孔囊种,在清种区多余的种子被低压气流吹掉,可以播种多种作物^[3];瑞典 Vaderstand 公司设计的气力圆盘式排种器通过气流完成种子的充填,效果良好;Kongskilde 公司为了减少种子堵塞窝眼,改良了气吹式排种器的结构^[4];Zulin 等^[5]对气力式排种器进行了改进,考察了排种盘速度和气流速度等与排种性能之间的关系。

国内的研究大多借鉴了 Aeromat-II 型气吹式排种器^[6-8]。早期马成林等^[9]和胡树荣等^[10]通过量纲理论的分析,对气吹式排种器的锥孔模型进行了试验研究,设计了一种新的型孔结构;刘佳等^[11]和崔涛等^[12]仿真分析了清种气嘴截面倾角,通过试验找出了气吹压力的最佳范围,并利用单因素试验考察了气吹压力对于排种效果的影响,设计了一种适用高速作业的机械气力组合式排种器;孙裕晶等^[13]采用均匀设计方法进行了大豆的播种,考察了充种角、清种角和排种性能参数的关系;廖庆喜等^[14]和雷小龙等^[15]对不同条件下的气室流场进行仿真,运用 EDEM-CFD 耦合仿真方法分析了油麦在输种管道中的迁移规律;李成华等^[16]利用三维软件对气吹排种器进行结构设计,找出影响排种器排种性能的主要因素是型孔结构参数;胡靖明等^[17]通过对比有无平衡气孔 2 种模式,设计了一种适用于小粒种子的

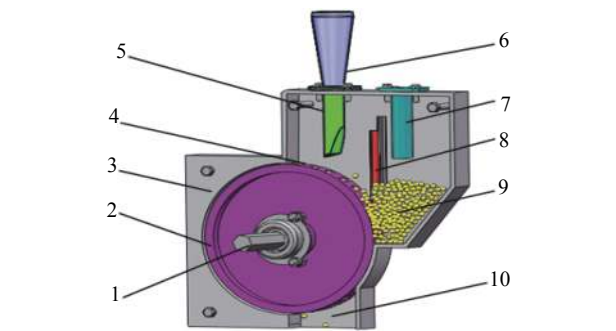
排种器气室模型。

以上研究表明,现阶段气吹式排种器已经被应用到多种粮食作物的播种过程中,但是将其应用到三七的种植上的研究较少。本文设计一种播种三七的气吹式排种器,通过理论分析与数值模拟,确定排种器的结构和工作参数,利用正交试验方法,进行排种性能试验,寻求可以提高排种性能的最优参数组合。

1 气吹式排种器总体结构及工作原理

气吹式三七排种器由排种轮、清种气嘴、进种管、排种轴、壳体等组成,其结构如图 1 所示。

充种室下端设计成斜面,其角度大于种子的休止角,便于充种时种子流动。充种室内的种层高度调节板,可以随着种子的流动情况进行种层高度的调节。排种器工作时,排种器由地轮带动转动,当充种室内的种子充入到排种轮的型孔时,根据所设计的型孔直径和深度大小,一般在充种过程中会充入 2~3 粒三七种子。排种轮转动进入清种区,在气流作用下型孔上端多余的种子被吹出,型孔底部的种子在气流压力下会保留在型孔中,完成单粒充种过程。清种气嘴轴线与水平面垂直,竖直向下,气吹压力由风机提供,可以根据需要进行调节。随着排种



1: 排种轴, 2: 排种轮, 3: 壳体, 4: 型孔, 5: 清种气嘴, 6: 风管接口, 7: 进种管, 8: 种层高度调节板, 9: 充种室, 10: 投种口

1: Seeding shaft, 2: Seeding wheel, 3: Shell, 4: Type hole, 5: Seed clearing nozzle, 6: Duct interface, 7: Seed tube, 8: Seed height adjustment plate, 9: Seed filling room, 10: Seeding port

图 1 三七气吹式排种器结构示意图

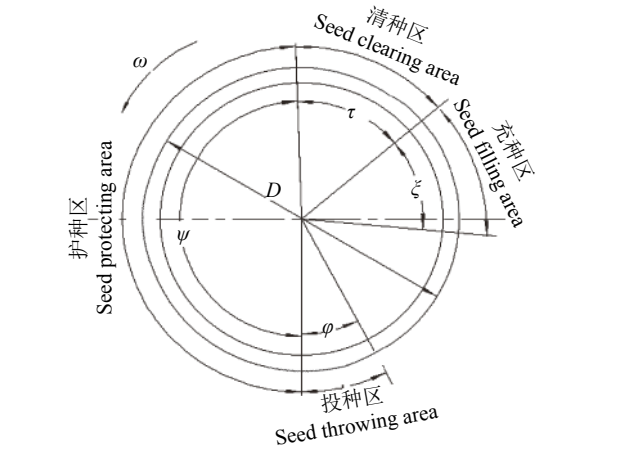
Fig. 1 Structure diagram of air-blowing seed-metering device for *Panax notoginseng*

轮转到护种区, 气压消失, 由排种器的壳体完成护种, 到达投种口上方时, 种子在重力的作用下掉落, 实现整个排种过程。

2 排种器关键部件设计与参数分析

2.1 排种轮的直径

排种轮作为排种器的关键部件, 其直径会受到排种器的整体结构、型孔数量、制造成本等因素^[18-20]的影响。排种轮结构参数如图 2 所示。



D: 排种轮直径, ω: 排种轮角速度, ζ: 充种角, τ: 清种角, ψ: 护种角, φ: 投种角
D: Diameter of the seeding wheel, ω: Angular velocity of the seeding wheel, ζ: Seed filling angle, τ: Seed clearing angle, ψ: Seed protecting angle, φ: Seed throwing angle

图 2 排种轮结构参数示意图
Fig. 2 Schematic of structural parameters of seeding disc

为了研究排种轮直径与型孔充种时间的关系, 由公式得:

$$t = \frac{l_c}{v_p}, \tag{1}$$

$$l_c = \theta \frac{D-h}{2}, \tag{2}$$

$$v_p = \pi n_p \frac{D-h}{60}, \tag{3}$$

式中 t 为型孔充种时间, s; l_c 为充种区弧长, mm; v_p 为排种轮的线速度, m/s; D 为排种轮直径, mm; n_p 为排种轮转速, r/min; h 为型孔深度, mm; θ 为型孔充种区弧度, rad。

由式 (1)~(3) 得出:

$$t = \frac{30\theta}{\pi n_p}, \tag{4}$$

由式 (4) 可知, 型孔充种时间 t 只与排种轮转速和型孔充种区弧度有关, 但排种轮的直径过小, 充种区弧长也会变小, 当排种轮上型孔数量一定

时, 为了保证达到所要求的株距, 就必须提高排种轮的转速, 这样便不利于充种、清种, 会影响排种器的作业质量。根据播种作业速度以及排种器的整体尺寸等因素, 选取排种轮直径 $D=200\text{ mm}$, 材料为聚乳酸 (Polylactide acid), 简称 PLA 塑料, 利用 3D 打印制作。

2.2 型孔的结构参数设计

2.2.1 型孔形状及尺寸设计 型孔的形状尺寸会直接影响排种效果。根据已有研究^[21], 将型孔设计成圆锥形, 如图 3 所示。

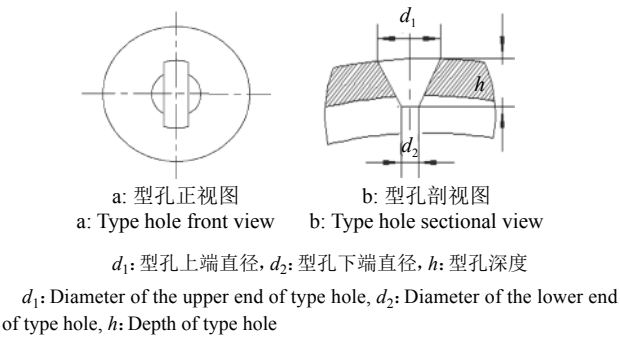


图 3 型孔结构示意图
Fig. 3 Structure diagram of type hole

为了便于充种, 保证良好的充种性能, 则型孔上端直径 (d_1) 为:

$$d_1 \geq d + (1.0 \sim 1.5)。 \tag{5}$$

根据文献 [22] 可知三七种子长度为 5.2~7.2 mm, 宽度为 4.8~6.8 mm, 高度为 4.0~6.0 mm, 种子平均直径 (d) 为 5.6 mm。同时, 由于三七种子可能以自身任一状态随机充入型孔, 为了保证充种质量, 型孔的上端直径应大于 2 倍的种子直径, 从而确定型孔上端直径为 12 mm。

加大型孔底部直径可能造成充种易清种难的情况产生, 一般选取型孔下端直径 (d_2) 在 4~5 mm 范围内比较合适。由

$$d_2 < d, \tag{6}$$

确定型孔下端直径为 4 mm。

由于三七种子大小不均匀, 且形状不规则, 型孔底部开有宽为 2 mm, 深为 4 mm 的环形内槽, 正压气流通过内槽形成压差, 保证了单粒充种。型孔深度 (h) 应保证可以将最大粒径的种子囊入, 并且当有多余种子充入时, 可以利用气流将其清除出来, 由

$$d < h \leq 1.5d, \tag{7}$$

确定型孔深度为 8 mm。

2.2.2 排种轮上型孔数量 在相同的作业速度和

株距下,同一直径的排种轮,型孔数越多,排种轮线速度越低,型孔的充填性能越好。而型孔数量的多少又受到排种轮直径的制约。根据排种轮上型孔数的计算公式:

$$Z = \frac{\pi(D-h)v_m}{sv_p(1-c)}, \quad (8)$$

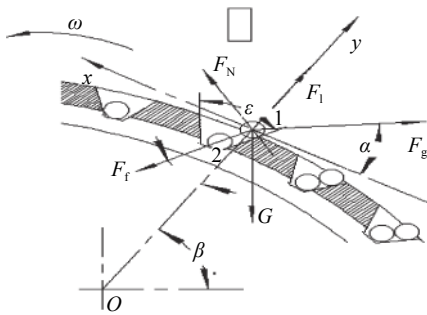
式中, Z 为型孔数; v_m 为机具的作业速度, 取 0.5 m/s; s 为播种株距, mm; c 为滑移系数。

根据三七种植的农艺要求, 株距为 50 mm 左右较为理想, 属于密集型播种模式; 地轮的滑移系数 (c) 一般在 0.05~0.12 之间, 取 0.1; 排种轮转速 (n_p) 取 20 r/min, 联立式 (3)、(8), 确定型孔数量 $Z=34$ 。

2.3 清种风压

2.3.1 清种风压力学模型 清种风压的选取直接影响到排种质量。气吹式排种器为了满足种子不分级播种的要求, 排种轮上的型孔比一般播种三七种子所用的窝眼轮式排种器上的型孔大。为了达到精密播种的目的, 在清种区则需要清除多余的种子。选取适宜的风压, 才可以压附接近型孔底部的种子, 同时, 正压气流在型孔壁面上形成逸出的分流, 将型孔上端的种子进行清除^[23]。

以型孔上端将被清除的种子作为研究对象, 具体的受力如图 4 所示。



F_q : 种子受到的清种压力, F_l : 惯性离心力, F_N : 型孔侧面对种子的支持力, F_f : 种子与型孔侧面的摩擦力, α : 压力 F_q 与 x 轴的夹角, β : y 轴与水平面夹角, δ : 摩擦力 F_f 与 y 轴的夹角, ϵ : 型孔锥角, ω : 排种轮角速度, G : 种子的重力, O : 排种轮转动中心, 1, 2: 种子

F_q : Air-blowing force on the seed, F_l : Inertial centrifugal force, F_N : Supporting force on the side of type hole, F_f : Friction force between the seed and the side of type hole, α : Angle between F_q and x -axis, β : Angle between y -axis and the horizontal plane, δ : Angle between F_f and y -axis, ϵ : Cone angle of the type hole, ω : Angular velocity of the seeding wheel, G : Seed gravity, O : Rotation center of the seeding wheel, 1 and 2: Seed

图 4 清种区种子受力简化模型

Fig. 4 Simplified model of force on the seed in seed clearing zone

为了便于分析, 将被清除的种子标记为种子 1, 型孔底部的种子标记为种子 2, 并将其简化为刚性小球, 其几何中心为种子的质心。假设种子 2 被压附在型孔底部不发生移动, 以种子 1 在气流作用下

即将被吹出的临界状态为条件, 沿型孔弧面的切向和法向建立坐标系, 型孔中的 2 粒种子之间没有相互影响, 建立受力方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x : F_N \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\epsilon}{2}\right) + F_f \sin \delta = \\ \quad G \cos \beta + F_q \cos \alpha \\ \sum F_y : F_l + F_q \sin \alpha + F_N \cos\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\epsilon}{2}\right) = \\ \quad G \sin \beta + F_f \cos \delta \\ F_l = mr\omega^2 \\ F_f = \mu F_N \\ G = mg \\ \omega = \frac{\pi n_p}{30} \end{array} \right., \quad (9)$$

式中, F_l 为惯性离心力, N ; F_q 为种子受到的清种压力, N ; F_N 为型孔侧面对种子的支持力, N ; F_f 为种子与型孔侧面的摩擦力, N ; α 为压力 F_q 与 x 轴的夹角, ($^\circ$); β 为 y 轴与水平面夹角, ($^\circ$); δ 为摩擦力 F_f 与 y 轴的夹角, ($^\circ$); μ 为排种轮与种子间的摩擦系数, $\mu=0.3$; ϵ 为型孔锥角, ($^\circ$); m 为单粒三七种子质量, kg; r 为种子质心与传动轴中心间距离, mm; ω 为排种轮的角速度, rad/s; g 为重力加速度, m/s^2 。

根据图 3 和型孔的结构参数, 可以得到:

$$\delta = \frac{\epsilon}{2}, \quad (10)$$

由型孔的结构参数计算可得型孔锥角 ϵ 为 52° 。联立式 (9)、(10), 得出种子被吹出型孔的临界条件为:

$$F_q \geq \left\{ \sqrt{2}mg \sin\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right) + mg \cos \beta \cos \frac{\epsilon}{2} \right. \\ \left. \left[(\mu - 1) \cos \frac{\epsilon}{2} - (\mu + 1) \sin \frac{\epsilon}{2} \right] - mr\omega^2 \right\} / \sqrt{2} \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{4}\right). \quad (11)$$

在清种过程中, 根据力的相互作用原理, 可知作用在种子上的清种压力与种子在清种过程中受到的绕流阻力相等, 根据流体力学中绕流阻力公式:

$$F_q = kA \frac{\rho v_0^2}{2}, \quad (12)$$

式中, k 为与种子形状和雷诺数有关的无因次系数; A 为种子在垂直气流方向的投影面积, mm^2 ; ρ 为空气密度, 常态下 $\rho=1.21 \text{ kg/m}^3$; v_0 为气流的流速, m/s 。

假设种子为刚性球体, 可得:

$$A = \frac{\pi d^2}{4}. \quad (13)$$

气嘴出口处清种风压与流速的关系有:

$$P = \frac{1}{2} \rho v_0^2, \quad (14)$$

式中, P 为清种风压, kPa 。联立式 (12)~(14), 可得:

$$F_q = \frac{k\pi d^2 P}{4} \tag{15}$$

将式 (15) 代入式 (11), 可得:

$$\frac{k\pi d^2 P}{4} \geq \left\{ \sqrt{2}mg \sin\left(\beta + \frac{\pi}{4}\right) + mg \cos\beta \cos\frac{\varepsilon}{2} \right. \\ \left. \left[(\mu-1)\cos\frac{\varepsilon}{2} - (\mu+1)\sin\frac{\varepsilon}{2} \right] - mr\omega^2 \right\} / \sqrt{2} \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{4}\right), \tag{16}$$

由式 (16) 得出: 型孔中多余种子能否被吹出与型孔的锥角 ε , 排种轮转速 n_p , 清种风压 P 等诸多因素有关。经过前期试验, 选取清种风压 P 应大于 0.4 kPa 。

2.3.2 清种风压数值模拟 1) 假设及初始条件: 为了确定清种风压的最佳范围, 减少试验次数, 对清种风压进行了仿真分析。将排种器模型简化为排种轮、外壳、气嘴和挡种板 4 个部分, 利用 ICEM 对排种器壳体划分网格, 并导入 Fluent 中进行压力模拟。假设流场气体为不可压缩气体, 排种器壳体边界不漏气, 进气口压力均匀。设置流体为空气, 密度为 1.205 kg/m^3 , 黏度为 $1.83 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 模拟过程采用 $\kappa-\varepsilon$ 模型, 将气嘴风压出口设为速度入口, 投种口为压力出口边界条件, 压力值为 0。选择进入气嘴风压分别为 0.4 、 0.5 、 0.6 、 0.7 kPa , 对排种器内压力分布云图进行分析。图 5 为不同风压条件下排种器内部压力云图。

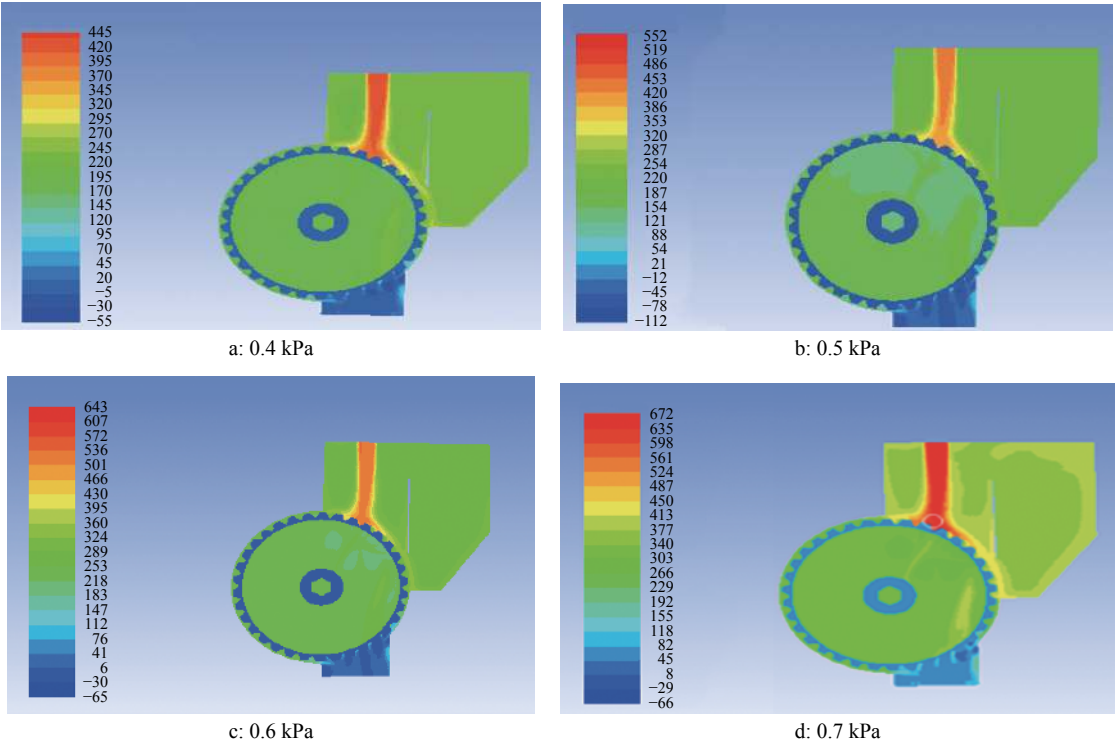


图 5 不同清种风压下排种器内部流场模拟

Fig. 5 Simulation of internal flow field in the seed-metering device under different air-blowing pressure

2) 仿真结果与分析: 在排种过程中, 气体与种子彼此会产生相互作用力, 气流较高的速度将会对种子产生曳力, 而种子又会对气流产生阻力^[24]。由图 5 中可以看出, 充种区内气流形成的旋涡会在一定程度上扰动种子, 提高了排种器的充种性能。沿排种轮轮廓外部分布的气流可以清除多余的种子, 轮廓内的气流形成压差, 对型孔内的种子进行压附, 防止种子被气流吹出, 造成漏播。

如图 5a 所示, 当清种风压为 0.4 kPa 时, 由于气嘴出口处压力较小, 气流自气嘴流出分散到排种器腔体与排种轮的清种区域, 型孔上端由于气流作

用, 在排种轮轮廓边缘形成的高速气流对于多余的种子可以进行及时清除, 同时, 型孔下端泄出的压力又可以保留住单粒种子; 如图 5b 所示, 当清种风压为 0.5 kPa 时, 气流作用较之前更为明显, 排种器腔体内部的流场对于充种更为有利, 在充种区形成的涡流可以增大对于种子的扰动, 提高充种性能; 如图 5c 所示, 当清种风压为 0.6 kPa 时, 排种器内部流场情况与 0.5 kPa 时类似。如图 5d 所示, 当清种风压为 0.7 kPa 时, 在型孔边缘形成较大涡流, 排种器内部气流回流较大, 对于充入的种子作用力较大, 可能将型孔内部的种子全部吹出, 增大了漏播

的可能性,在一定程度上会影响充种。实际工作过程中,考虑到振动、排种器壳体泄气等因素影响,实际所需要的风压应大于 0.4 kPa。结合仿真结果,选取清种风压为 0.4~0.7 kPa。

3 气吹式排种器排种性能试验

3.1 试验条件

利用台架试验验证气吹式排种器的排种性能^[25],以便得到较优的工作参数组合。试验装置由气吹式三七精密排种器、气力管道、KANOMAX6036 型热式风速风压测试仪和 JPS-12 计算机视觉排种器性能检测试验台组成。KANOMAX6036 型热式风速风压测试仪的风压测量范围为 0~5 kPa,精度为读数的±3%。排种器的作业速度可以通过试验台上的控制柜进行调控;清种风压的调节由控制柜对试验台上配套风机的控制来完成,利用风速风压测试仪测定压力值。试验装置组成如图 6 所示。

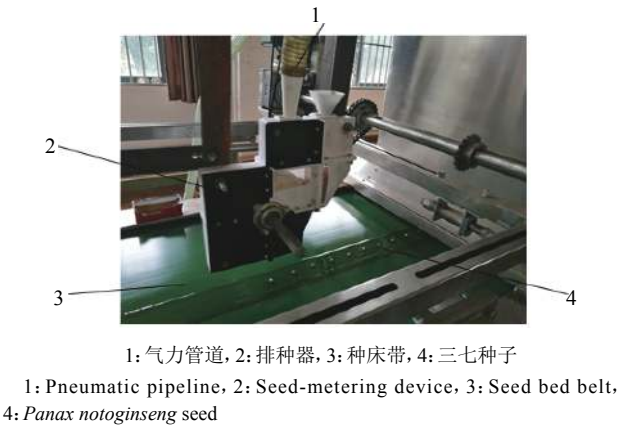


图 6 试验装置组成图

Fig. 6 Composition diagram of experimental device

3.2 试验方法

根据国家标准 GB/T6973—2005^[26],选用正交表 $L_{16}(4^3)$ 进行正交试验。选用云南文山优质三七种子作为试验对象,选取粒距的合格指数、漏播指数、重播指数为试验指标,在 JPS-12 排种器性能检测试验台上进行排种性能试验。排种器在试验时保持不动,种床带进行移动,通过将三七种子排落在涂有油层的种床带上,完成近似于田间播种的过程。通过图像采集处理系统完成实时检测种子的粒距情况^[27],每次试验测量 200 粒种子,并重复 5 次取平均值。根据前期试验,选取作业速度范围为 0.4~1.0 m/s,种层高度记为 H ,范围为 50~110 mm,清种风压为 0.4~0.7 kPa,因素水平表如表 1 所示。

表 1 排种性能试验因素与水平

Table 1 Factors and levels of seeding performance test

水平 Level	作业速度/(m·s ⁻¹) Operating speed	种层高度/mm Seed layer height	清种风压/kPa Air-blowing pressure
1	0.4	50	0.4
2	0.6	70	0.5
3	0.8	90	0.6
4	1.0	110	0.7

3.3 试验结果与分析

因素在不同水平下极差大小与该因素对试验指标的影响程度有直接关系。根据表 2,对试验结果进行极差分析,通过表 3 试验结果分析表明,影响合格指数的因素主次顺序为 B、A、C,较优的因素组合为 $B_3A_2C_2$;影响漏播指数的因素主次顺序为 B、C、A,较优的因素组合为 $B_3C_2A_2$;影响重播指数的因素主次顺序为 B、A、C,较优的因素组合为 $B_2A_2C_3$ 。

利用 Design-Expert 8.061 软件对试验结果进行方差分析,进一步分析因素对试验指标影响的显著性。如表 4 所示。可知作业速度、种层高度和清种风压都能显著影响各项指标。作业速度越小,型孔通过充种区时间越长,种子充入型孔的机会增大,随着作业速度的增大,型孔在充种区的时间变短,漏播指数会增大。种层高度较低时,充种角度小于型孔的锥角,种子不易保留在型孔中,会造成漏播指数增大;种层高度较大时,型孔中会充入多颗种子,增加了清种的难度,一定程度上造成重播指数增大。清种风压较小时,对于充入型孔中多余的种子不能及时清除,会造成重播;清种风压较大时,气流有可能将型孔中的种子全部吹出,从而造成漏播。结合试验结果,发现前期合格指数随清种风压的增大而增大,但是当清种风压增大为 0.7 kPa 时,合格指数会减小,与之前仿真分析的过程一致,验证了利用 Fluent 模拟确定清种风压的可行性。综上,为了保证排种器良好的排种性能,便需要对这 3 个因素选取合适的参数组合。

通过上述分析,综合 3 个因素对试验指标的影响,在保证合格指数最大,漏播指数和重播指数较小的原则下,确定较优组合为 $B_3A_2C_2$,即种层高度为 90 mm、作业速度为 0.6 m/s、清种风压为 0.5 kPa。对较优组合进行试验验证,在相同的试验条件下重复 5 次验证试验,得到粒距合格指数为 90.48,漏播指数为 4.24,重播指数为 5.28。

表 2 排种性能试验设计与结果

Table 2 Design and result of seeding performance test

试验序号 Test No.	因素 Factor			指标 Index		
	作业速度	种层高度	清种风压	合格指数 Eligible index	漏播指数 Leakage sowing index	重播指数 Repeat sowing index
	(A)	(B)	(C)			
1	1	1	1	57.23	37.03	5.74
2	1	2	2	76.49	18.52	4.99
3	1	3	3	87.91	3.42	8.67
4	1	4	4	68.63	12.16	19.21
5	2	1	2	79.37	13.56	7.07
6	2	2	1	79.43	14.74	5.83
7	2	3	4	89.34	4.24	6.42
8	2	4	3	82.52	3.53	13.95
9	3	1	3	66.71	28.16	5.13
10	3	2	4	70.45	27.32	2.23
11	3	3	1	76.37	7.95	15.68
12	3	4	2	69.72	3.34	26.94
13	4	1	4	49.67	36.83	13.5
14	4	2	3	67.52	23.95	8.53
15	4	3	2	79.47	3.39	17.14
16	4	4	1	55.45	8.12	36.43

表 3 排种性能试验结果的极差分析¹⁾

Table 3 Range analysis of seeding performance test result

指标 Index	项目 Item	A	B	C
合格指数 Eligible index	k_1	72.565	63.245	67.120
	k_2	82.665	73.472	76.263
	k_3	70.813	83.273	76.165
	k_4	63.028	69.080	69.523
	R	19.637	20.028	9.143
漏播指数 Leakage sowing index	k_1	17.782	28.895	16.960
	k_2	9.018	21.133	9.703
	k_3	16.693	4.750	14.765
	k_4	18.073	6.787	20.137
	R	9.055	24.145	10.434
重播指数 Repeat sowing index	k_1	9.652	7.860	15.920
	k_2	8.317	5.395	14.035
	k_3	12.495	11.977	9.070
	k_4	18.900	24.133	10.340
	R	10.583	18.738	6.850

1) A、B 和 C 分别表示作业速度、种层高度和清种风压

1) A, B and C represent operating speed, seed layer height and air blowing pressure, respectively

表 4 排种性能试验结果的方差分析¹⁾

Table 4 Variance analysis of seeding performance test result

指标 Index	变异来源			
	Variation source	SS	DF	F
合格指数 Eligible index	A	782.77	3	61.151**
	B	856.51	3	66.912**
	C	260.73	3	20.369**
	R	25.60	6	
漏播指数 Leakage sowing index	A	220.90	3	5.959*
	B	1 610.30	3	43.437**
	C	230.97	3	6.230*
	R	74.14	6	
重播指数 Repeat sowing index	A	265.84	3	11.454**
	B	829.99	3	35.762**
	C	121.53	3	5.236*
	R	46.42	6	

1) A、B、C 和 R 分别表示作业速度、种层高度、清种风压和残差;“*”和“**”分别影响显著和极显著

1) A, B, C and R represent operating speed, seed layer height, air blowing pressure and residual, respectively; “*” and “**” represent significant effects at 0.05 and 0.01 levels, respectively

4 结论

1) 根据三七种子的物理机械特性以及种植农艺要求,通过理论计算与分析,确定了主要结构参数,设计出了一种适用于播种三七的气吹式精密排种器。

2) 利用 Fluent 软件模拟不同风压条件下排种器内部流场,对比分析了流场内压力与排种性能参数的关系,确定了清种风压的范围为 0.4~0.7 kPa,为后期的试验提供了依据。

3) 通过三因素四水平的正交试验,确定了影响排种器排种性能因素的主次顺序,依次为种层高度、作业速度、清种风压。根据试验结果,优化参数组合,在种层高度为 90 mm、作业速度为 0.6 m/s、清种风压为 0.5 kPa 时,粒距合格指数为 90.48,漏播指数为 4.24,重播指数为 5.28。

参考文献:

[1] 崔秀明. 依靠科技进步促进三七产业创新发展 [J]. 中国现代中药, 2018, 20(3): 247-252.

[2] 张维. 气吹式大豆精量播种机的设计 [J]. 中国农机化学报, 2014, 35(4): 6-8.

[3] 李洪昌, 高芳, 赵湛. 国内外精密排种器研究现状与发展趋势 [J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2): 12-16.

[4] 史嵩. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2015.

[5] ZULIN Z, UPADHVA S K. Hydropneumatic seeder for primed seed[J]. *Trans ASABE*, 1998, 41(2): 307-314.

[6] 张泽平, 马成林. 精播排种器及排种理论研究进展 [J]. 吉林工业大学学报, 1995, 25(4): 112-117.

[7] 张守勤, 王成和. 气力轮式排种器型孔的流场及作用 [J]. 农业机械学报, 1991, 22(4): 26-31.

[8] 心男. 基于 EDEM-FLUENT 耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2013.

[9] 马成林. 气吹排种器充填原理的研究 [J]. 农业机械学报, 1981, 12(4): 1-13.

[10] 胡树荣, 马成林, 李慧珍, 等. 气吹式排种器的排种频率和气流速度对排种质量影响的研究 [J]. 吉林大学学报(工学版), 1981(4): 26-35.

[11] 刘佳, 崔涛, 张东兴, 等. 气吹式精密排种器工作压力试验研究 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(12): 18-22.

[12] 崔涛, 韩丹丹, 殷小伟, 等. 内充气吹式玉米精量排种器设计与试验 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(1): 8-16.

[13] 孙裕晶, 马成林, 张勇智. 基于均匀设计的精密排种器结构优化方法 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2004, 34(4): 569-572.

[14] 廖庆喜, 杨波, 李旭, 等. 内充气吹式油菜精量排种器气室流场仿真与试验 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43(4): 51-54.

[15] 雷小龙, 廖宜涛, 张闻宇, 等. 油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 57-68.

[16] 李成华, 高玉芝. 倾斜圆盘气吹式播种器设计及试验研究 [J]. *沈阳农业大学学报*, 2007, 38(6): 830-836.

[17] 胡靖明. 气吹式小粒种子精量排种器气室仿真 [J]. 林业机械与木工设备, 2016, 44(7): 12-14.

[18] 张波屏. 播种机械设计原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.

[19] ORTH R J, MARION S R, GRANGER S, et al. Evaluation of a mechanical seed planter for transplanting *Zostera marina* (eelgrass) seeds[J]. *Aquat Bot*, 2009, 90: 204-208.

[20] 张德文, 李林, 王惠民. 精密播种机械 [M]. 北京: 农业出版社, 1982.

[21] 胡树荣, 马成林, 李慧珍, 等. 气吹式排种器锥孔的结构参数对排种质量影响的研究 [J]. 农业机械学报, 1981, 12(3): 21-31.

[22] 任闯, 高筱钧, 苏微, 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.

[23] 左春桢, 马成林, 张守勤, 等. 新型气力精密排种器的空气动力学原理 [J]. *农业工程学报*, 1997, 13(3): 110-114.

[24] 欧阳洁, 李静海, 崔俊芝. 颗粒轨道模型中相间耦合关系及曳力计算的研究 [J]. *动力工程*, 2004, 24(6): 857-862.

[25] 刘素. 气吹式三七精密排种器设计与试验研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.

[26] 全国农业机械标准化技术委员会. GB/T6973-2005 单粒(精密)播种机试验方法 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.

[27] 袁志发, 周静芋. 试验设计与分析 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

【责任编辑 庄 延】