doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.010

气吸式三七育苗播种精密排种器设计与试验

杨文彩[1]　阚成龙[1]　张效伟[1]　吴　翀[1]　杜　迁[2]　潘吴建[1]

(1. 云南农业大学机电工程学院, 昆明 650201; 2. 芒市农业农村局农机技术推广站, 芒市 678400)

摘要: 针对机械式三七育苗播种排种器种子破损率高、需对种子进行预先分级处理等问题,基于负压吸种、毛刷滚清种、正压排种的工作原理设计了一种气吸滚筒式排种器。对充种阶段、清种阶段、携种阶段、投种阶段进行力学分析,研究排种器的主要结构参数,分析影响排种性能的主要因素;结合单因素试验,选取真空度、播种机作业速度、充种室种子质量为试验因素,以合格指数、漏播指数、重播指数为试验指标,进行了三因素五水平二次正交旋转试验,建立了试验指标与试验因素间的回归方程。借助 Design-Expert 10.0 软件,采用响应曲面法分析得出,影响充种性能的各因素主次顺序为:播种机作业速度、真空度、充种室种子质量。通过参数优化,得到最佳参数组合为:播种机作业速度 0.18 m/s、真空度 9.6 kPa、充种室种子质量 1.2 kg,此时合格指数 95.6%,重播指数 0.4%,漏播指数 4.0%,满足三七播种的农艺要求。

关键词: 三七育苗播种; 气吸滚筒式排种器; 播种机; 正交试验

中图分类号: S223.2⁺6　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)06-0095-11　　**OSID**:

Design and Test of Precision Seed Metering Device for *Panax notoginseng* Seedling and Seeding by Air Suction

YANG Wencai[1]　KAN Chenglong[1]　ZHANG Xiaowei[1]　WU Chong[1]　DU Qian[2]　PAN Wujian[1]

(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Yunnan Agricultural University*, *Kunming* 650201, *China*
2. *Agricultural Machinery Technology Promotion Station*, *Mangshi Agriculture and Rural Bureau*, *Mangshi* 678400, *China*)

Abstract: Aiming at the problems such as high seed damage rate and the requirement about seed grading pre-treatment of the mechanical *Panax notoginseng* seedling seeding device, a kind of air suction roller sowing seed device was designed by using the working principle of negative pressure seed suction, brush rolling and clean seed, and positive pressure throwing seeds. Through the mechanical analysis of the filling stage, the clearing stage, the carrying stage and the sowing stage, the main structural parameters of the seed-arrangement were studied and the main influencing factors of the performance of the seed-arrangement were analyzed. In combination with single factor test results, vacuum degree, drill speed, filling indoor seed quality as test factors, taking the qualified index, the missed seeding index, and seeding replant index as test indexes, three factors five levels quadratic orthogonal rotating test was carried out, to establish the regression equation between the test indexes and test factors, using the Design-Expert 10.0 software, by using the response surface method, all the factors affecting the filling performance of primary and secondary sequences were analyzed as follows: working speed of the seeder, degree of vacuum, and seed quality. Through parameter optimization, it was concluded that the optimal combination of parameters was as follows: the working speed of the seeder was 0.18 m/s, the vacuum degree was 9.6 kPa and the seed quality of the filling chamber was 1.2 kg. At this time, the qualified index was 95.6%, the seeding replant index was 0.4% and the missed seeding index was 4.0%, which can meet the agronomic requirements of *Panax notoginseng* sowing.

Key words: *Panax notoginseng* seeds; air suction drum type seed metering device; seeder; orthogonal test

收稿日期: 2020-06-28　修回日期: 2021-02-07

基金项目: 云南省科技计划农业联合专项重点项目(2018FG 001-007)和云南省科技厅重大科技专项(2017ZF001、2018ZC001-4-3)

作者简介: 杨文彩(1973—),女,教授,博士,主要从事农业机械化与装备工程研究,E-mail: yangwencai2005@126.com

0 引言

目前,三七育苗播种以人工点播为主,其劳动强度大、用工成本高,且效率低。采用机械化播种不仅可以提高效率,还可以有效降低播种成本、提高播种质量。然而,三七育苗播种行、株距均为 50 mm[1],对排种器精度要求较高,目前尚无适宜的三七育苗播种排种器。

根据播种对象的不同,生产上使用的排种器有机械式和气力式。机械式排种器存在伤种率高、落种时机不精确等问题[2-3],机械式三七排种器需要在播种前对种子进行分级处理[4]。气力式排种器伤种率低、不需对种子进行分级处理,采用正压投种可以准确把握投种时机[5-8],但气压均匀性控制难度较大,易使单个气孔吸附多颗种子而造成重播,或者因未吸附种子而造成漏播[9-13]。从简化分级农艺和减少种子损伤的角度考虑,选用气力式排种器进行三七育苗播种,还需通过结构设计和系统工作参数的优化,以解决气压均匀性问题。

本文基于负压吸种、正压排种原理设计气吸滚筒式三七精密排种器,通过力学分析研究主要结构参数,分析影响排种性能的关键因素,通过试验确定影响排种器性能的最佳参数组合,借助高速摄像仪通过土槽试验验证排种器的排种性能。

1 结构与工作原理

气吸式三七精密排种器主要由滚筒、左右配气盘、左右端盖、导气管、气孔塞、毛刷滚、充种室等组成,如图 1。该排种器设计效率为 0.1 hm^2/h 左右,用于 1.4 ~ 1.5 m 宽的三七育苗槽播种。其中,导气管、左右端盖、气孔塞、滚筒随半空心轴转动;左右配气盘固定于机架;气孔塞固定于滚筒表面。

气吸式三七精密排种器工作原理:采用负压力充种,毛刷滚清种,正压力投种。利用真空泵向负气压槽抽气,提供负压,利用空压机向正气压槽提供正压;导气管与负压力槽相连,导气管和气孔内的气体与大气压之间形成负压力差,多根导气管由负压力槽统一配气,可以保证气压均匀性;种子在该负压作用下,被吸附到滚筒壁面的气孔塞上,并随滚筒一起转动;毛刷滚清理吸附在气孔塞上的多余种子;种子随滚筒继续转动;导气管与正气压槽相连,气孔产生正气压,在正气压和种子重力的作用下,种子脱离滚筒表面,完成一次排种,滚筒继续转动。

按照上述工作原理,气吸式三七精密排种工作过程可划分为 5 个阶段,即充种阶段、清种阶段、携种阶段、投种阶段和过渡阶段,如图 2 所示。其中,

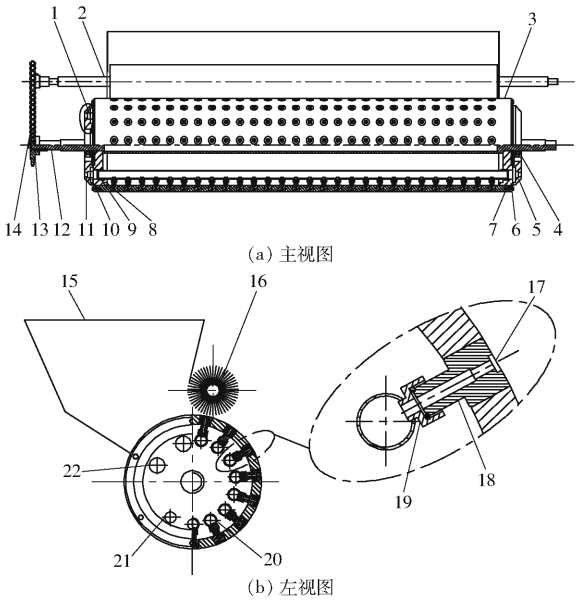

图 1 排种器结构示意图

Fig. 1 Schematics of seed metering device structure

1. 负气压槽 2. 毛刷滚轴 3. 滚筒 4. 轴承组件 5. 右配气盘 6. 右端盖 7. 螺栓组件 8. 左端盖 9. 密封圈 10. 正气压槽 11. 左配气盘 12. 半空心轴 13. 链轮组 14. 链 15. 充种室 16. 毛刷滚 17. 气孔 18. 气孔塞 19. 密封座 20. 导气管 21. 正气压孔 22. 负气压孔

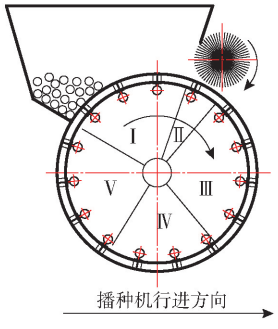

图 2 排种器工作过程示意图

Fig. 2 Schematic of working process of seed metering device

Ⅰ. 充种阶段 Ⅱ. 清种阶段 Ⅲ. 携种阶段 Ⅳ. 投种阶段 Ⅴ. 过渡阶段

充种阶段分为两个过程:种子从静止状态被吸附至气孔处的运动过程;种子被气孔完全吸附随滚筒运动的过程。

2 力学分析及主要部件设计

由于过渡阶段不涉及种子运动,这里仅对充种阶段、清种阶段、携种阶段以及投种阶段进行力学分析。

2.1 三七种子物理特性

三七播种前一般需要做包衣处理,包衣后三七种子直径主要在 4.99 ~ 7.21 mm 之间,三轴平均尺寸分别为:长度 6.20 mm、宽度 5.82 mm、高度 5.46 mm,千粒质量 165.86 g,休止角 22.4°。三七种子的球度 S_p 为 93.55%,可将三七种子近似作为

球体[14]。

2.2　力学分析

2.2.1　充种阶段

充种阶段第 1 过程中，种子在气孔附近，处于气体流场中，假设种子为均匀球体，并且忽略种子的自身重力，种子将受到绕流阻力对种子产生的吸附力，此时只有吸附力改变种子的运动状态[15]，种子的受力如图 3 所示。

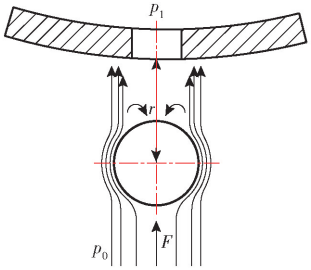

图 3　种子在流体中的受力图

Fig. 3　Forces on seeds in fluid

设种子负压面所受压力为 p_1，正压面所受压力为大气压力 p_0，那么推动种子移动的压力为 p_0-p_1。根据伯努利方程可得

$$p_0-p_1=\frac{1}{2}\rho q^2 \tag{1}$$

其中

$$q^2=\frac{A^2}{4}\left[\frac{-6r}{(y^2+r^2)^2}+\frac{8r^3}{(y^2+r^2)^3}+2(y^2+r^2)^{-\frac{3}{2}}\right] \tag{2}$$

$$A=(k_2-k_1)\frac{2Q}{\pi c} \tag{3}$$

式中　ρ——空气密度，kg/m^3

q——空气流速，m/s

r——种子中心与气孔距离，m

y——种子偏离气孔中心的横向距离，m

A——有效吸附面积，m^2

k_1——常数，随 Q 增大而减小

k_2——常数，取 0.2

Q——空气流量，m^3/s

c——气孔半径，m

计算可得

$$F=\iint_S(p_0-p_1)\mathrm{d}S=\int_0^{2\pi}\int_0^a\frac{1}{2}\rho\frac{A^2}{2}\left[\frac{-3r}{(a^2+r^2)^2}+\frac{4r^3}{(a^2+r^2)^3}+(a^2+r^2)^{-\frac{3}{2}}\right]\cdot a\mathrm{d}a\mathrm{d}Q \tag{4}$$

式中　a——种子半径，m

F——种子受到的气流场作用力，N

S——种子受到作用力的面积，m^2

将其在受力平面上积分，得种子受力方程

$$F=(k_2-k_1)^2\frac{\rho Q^2}{\pi c^2}\left[\frac{3r}{a^2+r^2}-\frac{2r^2}{(a^2+r^2)^2}-\frac{1}{\sqrt{a^2+r^2}}+\frac{1}{r}\right] \tag{5}$$

由式(5)可知，种子受到气流场中力 F 的作用，F 与空气流量 Q 成正比，与种子和气孔间的距离 r 存在密切关系，该排种器种群直接接触滚筒表面，不考虑距离 r，可以通过增加气孔的空气流量增加充种吸附力。

充种阶段第 2 过程中，种子被气孔吸附并随滚筒一起转动脱离种群状态[16]，其受力如图 4 所示。

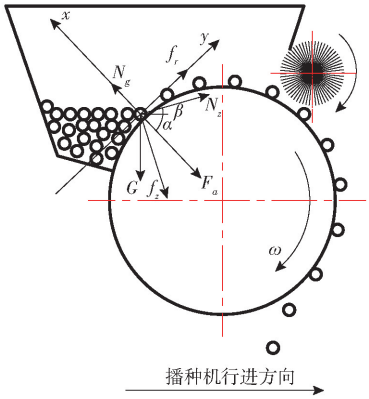

图 4　充种过程种子受力图

Fig. 4　Force diagram of seed in suction process

种子受力方程为

$$\begin{cases}\sum F_x=F_a+N_z\cos(\alpha+\beta)+f_z\sin(\alpha+\beta)+G\sin\alpha-N_g-m\omega^2R_g=0\\ \sum F_y=G\cos\alpha+f_z\cos(\alpha+\beta)-f_r-N_z\sin(\alpha+\beta)=0\end{cases} \tag{6}$$

其中

$$\begin{cases}f_r=N_g\tan\varphi_g\\ f_z=N_z\tan\varphi_z\\ v_g=\omega R_g\end{cases} \tag{7}$$

式中　F_a——充种第 2 过程气孔对种子吸附力，N

N_z——运动种群对种子的压力，N

f_z——充种室内种群对种子摩擦力，N

N_g——滚筒对种子支持力，N

m——种子质量，kg

f_r——滚筒对种子摩擦力，N

φ_g——滚筒与种子间滑动摩擦角，(°)

φ_z——休止角，(°)

α——气流作用力与 x 轴夹角，(°)

β——N_z 与 x 轴夹角，(°)

R_g——滚筒半径，100 ~ 150 mm[17]

ω——角速度，rad/s　　G——种子重力，N

v_g——滚筒表面线速度，m/s

由式(6)、(7)可得

$$F_a = m\frac{v_g^2}{R_g} - \frac{N_z\cos(\varphi_z+\varphi_g-\alpha-\beta)+mg\cos\varphi_z\sin(\beta-\varphi_g)}{\cos\varphi_z\cos\varphi_g} \tag{8}$$

由式(8)知,本过程气孔对种子吸附力 F_a 与滚筒半径 R_g 成反比,与转速 v_g 成正比。因此,滚筒转速增加时,需相应增加吸附力。

2.2.2 清种阶段

清种阶段,种子受到毛刷滚给予的外力,即与毛刷滚接触的过程,需保证气孔正中央处的种子不被毛刷滚清除。不计重力,种子的受力如图 5 所示。

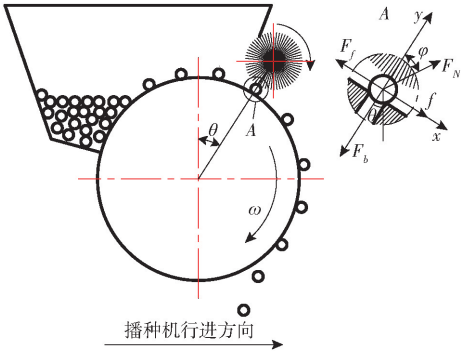

图 5 清种过程种子受力图

Fig. 5 Force diagram of seed during seed cleaning

种子受力方程为

$$\begin{cases}\sum F_y = F_b - F_N\cos\varphi = 0\\ \sum F_x = F_f - f - F_N\sin\varphi = 0\end{cases} \tag{9}$$

由式(9)得

$$F_b = (F_f - f)\cot\varphi \tag{10}$$

式中 F_b——清种阶段气孔对种子吸附力,N

F_N——气孔外沿对种子支持力,N

F_f——毛刷滚对种子摩擦力,N

f——滚筒对种子摩擦力,N

φ——F_N 与 y 轴夹角

由式(10)知,清种阶段气孔对种子吸附力 F_b 与角 φ 成反比。因此,可以通过增加气孔外沿直径的方法增加角 φ,以减小该阶段所需吸附力 F_b。

2.2.3 携种阶段

携种阶段,种子随滚筒转动,不计空气阻力,种子的受力如图 6 所示。

种子受力方程为

$$\begin{cases}\sum F_x = F_c - N_g + G\cos\varphi_g = m\omega^2 R_g\\ \sum F_y = mg\sin\varphi_g - f_{r0} = 0\\ v_g = \omega R_g\end{cases} \tag{11}$$

式中 F_c——携种阶段气孔对种子吸附力,N

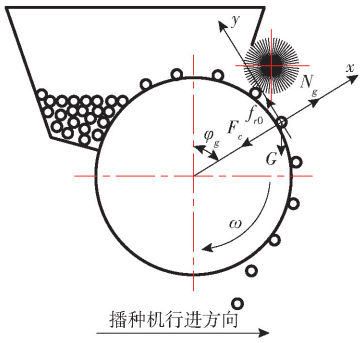

图 6 携种过程种子受力图

Fig. 6 Stress diagram of seeds during seed-carrying process

f_{r0}——携种阶段滚筒对种子摩擦力,N

φ_g——吸附角,(°)

计算可得

$$F_c = m\frac{v_g^2}{R_g} + N_g - F_r\cot\varphi_g \tag{12}$$

由式(12)知,该阶段气孔对种子吸附力 F_c 与滚筒半径 R_g 成反比,与滚筒表面线速度 v_g 成正比。

2.2.4 投种阶段

投种阶段,气孔处产生正压力,种子受到正压力和重力作用下落,种子受力如图 7 所示。

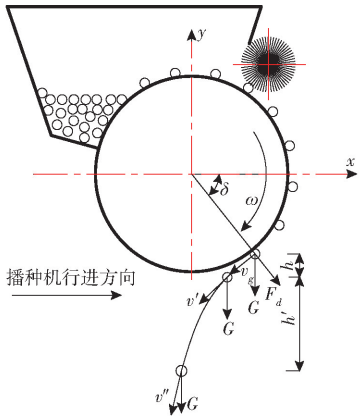

图 7 投种阶段运动分析图

Fig. 7 Analysis diagram of movement in seed stage

种子运动分为两个时间段:t_1 时间段内,种子离开滚筒,下落高度为 h,此时种子受到正压力、重力的作用;t_2 时间段内,种子下落高度为 h',此时种子仅受到重力作用。为方便分析,简化受力过程,设 t_1 为定值,且该时间段内种子受到正压力 F 恒定不变,种子受到的空气阻力不计。

对 t_1、t_2 时间段进行受力分析,得出方程组

$$\begin{cases}\sum F_{x1} = F_d\cos\delta\\ \sum F_{y1} = G + F_d\sin\delta\end{cases} \tag{13}$$

$$\begin{cases}\sum F_{x2} = 0\\ \sum F_{y2} = G\end{cases} \tag{14}$$

对 t_1、t_2 时间段进行运动分析,得出方程组

$$\begin{cases} v_x' = v_g\sin\delta - \dfrac{t_1\sum F_{x1}}{m} \\ v_y' = v_g\cos\delta + \dfrac{t_1\sum F_{y1}}{m} \end{cases} \tag{15}$$

$$\begin{cases} v_x'' = v_x' \\ v_y''^2 - v_y'^2 = \dfrac{2h'\sum F_{y2}}{m} \end{cases} \tag{16}$$

由方程组(13)～(16)得

$$\begin{cases} v_x' = v_g\sin\delta - \dfrac{t_1F_d\cos\delta}{m} \\ v_y' = v_g\cos\delta + \dfrac{Gt_1 + t_1F_d\sin\delta}{m} \end{cases} \tag{17}$$

$$\begin{cases} v_x'' = v_g\sin\delta - \dfrac{t_1F_d\cos\delta}{m} \\ v_y'' = \sqrt{2gh' + \left(v_g\cos\delta + \dfrac{Gt_1 + t_1F_d\sin\delta}{m}\right)^2} \end{cases} \tag{18}$$

式中　F_d——气孔对种子正压力，N

v_x'——t_1时间段种子水平方向分速度，m/s

δ——投种角，取 60°

v_y'——t_1时间段种子竖直方向分速度，m/s

v_x''——t_2时间段种子水平方向分速度，m/s

v_y''——t_2时间段种子竖直方向分速度，m/s

由式(17)、(18)知，v_x''、v_y''均与滚筒表面线速度v_g成正比，为了减小种子下落的接触速度，滚筒表面线速度v_g不宜过大；为了保证种子水平方向分速度v_x''为正值，滚筒表面线速度v_g不宜过小。

2.3　排种滚筒设计及气孔分布

由于三七种子与大豆种子三轴尺寸接近，根据以上力学分析可知，种子围绕滚筒的圆周运动中，种子质量越小所需吸附力越小，更有利于完成排种，三七种子质量(千粒质量 165.86 g)小于大豆种子(千粒质量 230.40 g)，因此，参考大豆排种器的设计标准，排种滚筒直径一般为 200～300 mm[18-19]，同时，考虑到三七育苗播种的密集性，滚筒直径选取为 300 mm。

滚筒表面气孔分布包括径向分布和轴向分布，其中轴向的气孔间距与气孔数量由三七育苗槽的宽度和行距决定，农艺上三七育苗槽的宽度一般在 1.4～1.5 m 之间，播种行距、株距为 50 mm，因此，轴向气孔数量设计为 28 个。径向气孔间弧长为[13]

$$\Delta l \geqslant 2D_{\max} \tag{19}$$

式中　Δl——两气孔间弧长，mm

$D_{\max}$——种子最大尺寸，mm

三七种子最大尺寸为 7.21 mm，同时考虑滚筒材质的强度，选取径向均匀分布 15 个气孔，两气孔间的距离弧长 Δl 为 62.8 mm。

研究表明排种器的转速 n 为 0.17～0.50 r/s 时，排种效果较好[4]，转速 n 求解方程组为[13]

$$\begin{cases} v_g = 2nR_g\pi \\ i = \dfrac{v_g}{v_j} = \dfrac{\Delta l}{l_z} \end{cases} \tag{20}$$

式中　i——播种机行走轮与滚筒传动比

v_j——播种机作业速度，m/s

l_z——播种株距，mm

根据方程组(20)得

$$n = \frac{v_j\Delta l}{2\pi R_g l_z} \tag{21}$$

该排种器设计效率为 0.1 hm^2/h 左右，用于 1.4～1.5 m 宽三七育苗槽播种，计算得 $n \approx 14.80$ r/min，经换算 0.17 r/s$\leqslant n \leqslant$0.50 r/s，滚筒直径合理。

2.4　气孔设计

根据清种阶段的分析和三七种子包衣后的直径主要集中在 4.99～7.21 mm 之间，三轴尺寸平均直径为 5.70 mm，因此添加直径为 6 mm、深度 2 mm 的圆柱型沉孔，增加气孔外沿直径。

气孔内径应满足经验公式[17]

$$\Phi = (0.6 \sim 0.7)D_g \tag{22}$$

式中　Φ——气孔内孔直径，mm

D_g——种子平均直径，mm

根据三七种子包衣后的三轴尺寸平均直径，气孔直径取整为 3 mm。为了防止三七种子的包衣粉尘堵塞气孔的通孔导程，扩大通孔导程直径，确定为 4 mm，导程长度由滚筒壁与导气管相对位置确定，如图 8 所示。

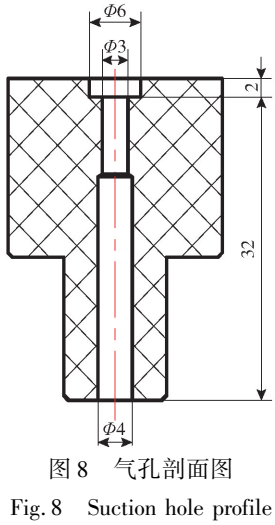

图 8　气孔剖面图

Fig. 8　Suction hole profile

2.5　充种角设计

充种角大于种子的休止角才有利于充种，根据三七包衣种子的休止角为 22.4°，兼顾增加三七种子的流动性，为便于加工取整数，选取 $\varepsilon = 30°$，如图 9 所示。

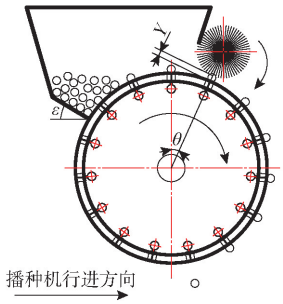

图 9 充种室结构示意图

Fig. 9 Schematic of planting box structure

2.6 毛刷滚设计

尼龙材质具有良好的机械性能,并且耐磨损、尺寸稳定性好、具有弹性和自润滑性[20],并且,材质具有弹性,可以产生弹性形变,为三轴尺寸各异的种子施加清种摩擦力,实现精准清种,所以,选用 0.2 mm 的尼龙材质。

毛刷滚安装角应满足经验公式[3]

$$\theta \geq \theta_1 - \theta_2 \tag{23}$$

式中 θ_1——种子之间的滑动摩擦角,取 5.7°~8°

θ_2——毛刷滚与种子间滑动摩擦角,取 26.5°~27.9°

综上计算,选定 $\theta = 22.0°$。清种高度 Y 应小于种子的最小直径,根据包衣后三七种子直径范围,选定 $Y = 3$ mm,如图 9 所示。

3 排种性能试验

3.1 影响因素分析

本播种机行走轮与排种器滚筒之间的传动比固定不变,播种机作业速度决定了排种滚筒转速,作业速度越大,滚筒转速越大,则使充种时间变短,影响充种性能,反之,则降低播种效率。因此,将播种机作业速度(简称“作业速度”)作为影响因素进行试验分析[21]。

由充种阶段、携种阶段力学分析可知,气孔的吸附力取决于真空度,吸附力过大,气孔将携带多余种子,反之,气孔对种子的向心力不足,因此,真空度对排种器的充种、携种性能均有影响。

由于充种室的充种角为确定值,种箱其余部分尺寸、形状对充种性能的影响较小,不予考虑。种子质量影响种子内摩擦因数,从而影响种间作用力,种子质量增加,内摩擦因数增加,种子较难离散,种子质量减小,内摩擦因数过小,可能使气孔吸附多粒种子,影响气孔的充种性能[22]。

投种正压力决定了种子离开滚筒瞬间受到的外力,由于包衣种子表面存在粘性,正压力过小时,种子易粘粘在气孔处,不能顺利投种,反之,将使种子运动角度产生偏差。同时,可以清除排种器内部残留的包衣粉尘,正压力也影响滚筒内部积攒粉尘的厚度。

播种机作业速度、真空度、种子质量、投种正压力对排种器各个工作阶段均有不同程度的影响,其取值范围的适宜性决定了排种器的性能,因此,选取气吸式三七精密排种器性能的影响因素:播种机作业速度、真空度、种子总质量、投种正压力进行试验研究。

3.2 试验条件

试验选用包衣后的文山三七种子。将设计好的排种器试制后安装在播种机上,采用高速摄像机获得试验数据,在云南农业大学校内的土槽上进行试验,该土槽的宽度、土壤厚度与生产实际一致,如图 10 所示。



图 10 气吸式播种机试验装置

Fig. 10 Air suction seeder prototype

1. 充种室 2. 毛刷滚 3. 高速摄像机 4. 排种滚筒 5. 电动机 6. 土槽 7. 真空泵 8. 空压机

3.3 评价指标的确定

一般试验以排种性能作为排种器的性能指标[19],台架试验以运转输送带模拟机器前进,种子离开排种器落入输送带上,会产生滚动和弹跳,对排种性能有影响;样机试验中,样机在土槽上作业,会出现种子触土弹跳,导种管材质的弹性、倾斜角度、断面形状、长度及粗糙度等多种因素对排种性能均有影响[23-25],因此,不采用台架试验。

本研究采用样机试验模拟作业过程,由于本文主要研究对象为排种器,因此,为了排除带、导种管等干扰因素,以充种性能代替排种性能来衡量排种器的排种能力,即以每个气孔成功吸取一颗三七种子并顺利通过清种阶段、携种阶段,脱离排种口,判定为一次合格的充种,用高速摄像机从投种口处获取试验数据,判断排种器是否成功充种,并投种,若每个吸孔上吸取的种子数大于等于 2,判定为重播,吸孔没有吸取种子判定为漏播,用充种合格指数 y_1、重播指数 y_2 及漏播指数 y_3 为试验评价指标。每组试验重复 5 次取平均值。

3.4　单因素试验

分析各因素对充种性能的影响规律，并获得正交试验的因素水平范围。

3.4.1　试验设计与结果

随机选取 4 列气孔作为观察对象，采用高速摄像机获取图像，借助 phantom 软件进行图像处理。

参考前期预试验结果，选取播种机作业速度 0.08、0.12、0.15、0.18、0.22 m/s 共 5 个水平进行单因素试验，设定真空度为 11 kPa，种子质量为 1.0 kg，正压力为 100 kPa，试验结果如图 11a 所示。

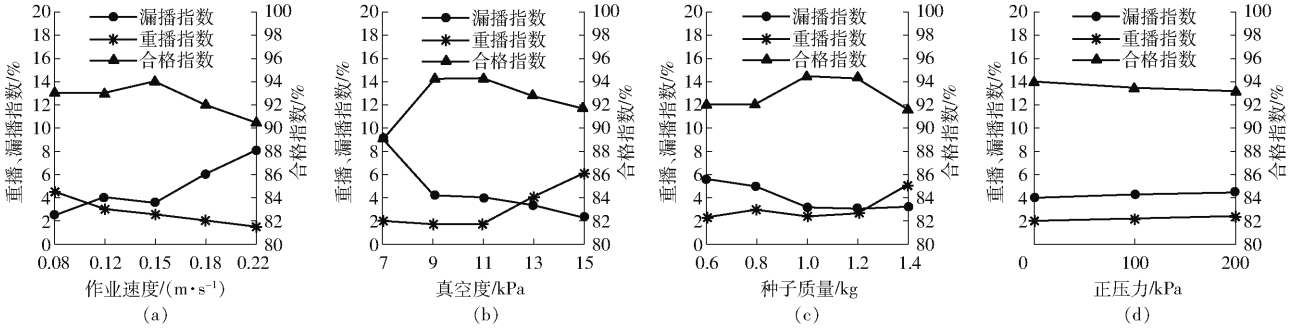

图 11　播种机作业速度、真空度、种子质量、正压力对充种性能影响曲线

Fig. 11　Influence curves of velocity, vacuum, seed quality and positive air pressure on seed filling performance

参考前期预试验结果，选取真空度为 7、9、11、13、15 kPa 共 5 个水平进行单因素试验，设定作业速度为 0.15 m/s，种子质量为 1.0 kg，正压力为 100 kPa，试验结果如图 11b 所示。

根据种子流动性较好的范围，参考前期预试验结果，选取种子质量为 0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 kg 共 5 个水平进行单因素试验，设定作业速度为 0.15 m/s，真空度为 11 kPa，正压力为 100 kPa，试验结果如图 11c 所示。

根据空压机提供正气压范围，并参考前期预试验结果，选取正压力为 0、100、200 kPa 共 3 个水平进行单因素试验，设定作业速度为 0.15 m/s、真空度为 11 kPa、种子质量为 1.0 kg，试验结果如图 11d 所示。

3.4.2　结果分析

由图 11a 可知，真空度为 11 kPa，种子质量为 1.0 kg，正压力为 100 kPa 时，随着作业速度的增加，合格指数先升高后下降，漏播指数先升高，当作业速度为 0.12 ~ 0.15 m/s 时，漏播指数略微下降，当作业速度大于 0.15 m/s 后，漏播指数逐渐升高。作业速度处在 0.15 m/s 时合格指数最高，为 94%。作业速度为 0.22 m/s 时合格指数为 91%，漏播指数较高，原因是滚筒转速变快，气孔经过充种弧长的时间变短，充种成功率降低。合格指数均在 90% 以上，作业速度合理取值范围为 0.08 ~ 0.22 m/s。

由图 11b 可知，作业速度为 0.15 m/s，种子质量为 1.0 kg，正压力为 100 kPa 时，真空度由 7 kPa 上升至 9 kPa，合格指数显著上升，漏播指数下降；真空度继续升高为 11 ~ 15 kPa 时，合格指数呈下降趋势，重播指数上升，原因是真空度增加，气孔吸附种子能力增强。合格指数均在 85% 以上，真空度合理取值范围为 7 ~ 15 kPa。

由图 11c 可知，作业速度为 0.15 m/s，真空度为 11 kPa，正压力为 100 kPa 时，随着种子质量的增加，合格指数呈先上升后下降趋势，种子质量在 1.0 kg 时合格指数最高，为 95%，当种子质量为 1.4 kg 时，合格指数最低，重播指数最高，原因是种子质量增加，增加了充种弧长，气孔吸附的种子数量增加。合格指数均在 90% 以上。种子质量合理取值范围为 0.6 ~ 1.4 kg。

由图 11d 可知，作业速度为 0.15 m/s、真空度为 11 kPa、种子质量为 1.0 kg 时，随着正压力的变化合格指数均大于 93%，合格指数、漏播指数、重播指数的变化均不足 0.5%，正压力在 0 ~ 200 kPa 范围内时，其对于各指标的影响均非常小，可以忽略。

单因素试验结果表明，作业速度、真空度、充种室内种子质量对充种性能有明显影响。

3.5　二次正交旋转组合试验

开展三因素五水平的二次正交旋转组合试验，优选排种性能最佳的参数组合。

3.5.1　试验设计

本试验的因变量为气吸式三七精密排种器的充种合格指数、重播指数和漏播指数，自变量为播种机的作业速度、充种室内的种子质量、排种器滚筒的真空度。根据单因素试验确定播种机作业速度为 0.08 ~ 0.22 m/s，真空度为 7.0 ~ 15.0 kPa，种子质量为 0.6 ~ 1.4 kg。二次正交旋转组合试验的因素编码如表 1 所示。

试验次数计算式为

$$N_s = m_c + m_y + m_0 = 2^{m'} + 2m' + m_0 \qquad (24)$$

其中 $m' = 3$，$m_0 = 9$，经计算 $N_s = 23$，共进行 23 次试验。

表 1 排种器试验因素编码

Tab. 1 Seeder test factors and codes

编码	因素		
	作业速度 x_1/(m·s^{-1})	真空度 x_2/kPa	种子质量 x_3/kg
-1.682	0.08	7.0	0.60
-1	0.11	8.6	0.76
0	0.15	11.0	1.00
1	0.19	13.4	1.24
1.682	0.22	15.0	1.40

3.5.2 试验结果与分析

将目标函数:合格指数、重播指数、漏播指数分别用 Y_1、Y_2、Y_3 表示,影响因素:作业速度、真空度、种子质量编码值分别用 X_1、X_2、X_3 表示,试验设计与结果如表 2 所示。

表 2 试验设计与试验结果

Tab. 2 Experimental design and results

试验序号	因素			合格指数 Y_1/%	重播指数 Y_2/%	漏播指数 Y_3/%
	X_1	X_2	X_3			
1	-1	-1	-1	89.2	10.6	0.2
2	1	-1	-1	93.5	3.9	2.6
3	-1	1	-1	89.4	8.9	1.7
4	1	1	-1	91.2	3.0	5.8
5	-1	-1	1	97.0	1.7	0.5
6	1	-1	1	95.1	0.9	4.0
7	-1	1	1	89.1	9.3	1.6
8	1	1	1	89.8	8.2	2.0
9	-1.682	0	0	88.3	9.2	2.5
10	1.682	0	0	92.5	0.7	6.8
11	0	-1.682	0	95.1	2.5	2.4
12	0	1.682	0	90.9	7.1	2.0
13	0	0	-1.682	91.6	4.2	4.2
14	0	0	1.682	92.1	7.5	0.4
15	0	0	0	95.1	2.7	2.2
16	0	0	0	95.6	2.4	2.0
17	0	0	0	96.4	0	3.6
18	0	0	0	98.5	0.5	1.0
19	0	0	0	96.4	0	3.6
20	0	0	0	95.9	2.1	2.0
21	0	0	0	95.1	4.5	0.4
22	0	0	0	95.8	4.0	0.2
23	0	0	0	94.8	3.9	1.3

应用 Design-Expert 10.0 软件对数据进行多元回归拟合。建立合格指数 Y_1、重播指数 Y_2、漏播指数 Y_3 与播种机作业速度 x_1、真空度 x_2、充种室内种子的质量 x_3 之间的回归方程

$$Y_1 = -15.84 + 478.8x_1 + 5.52x_2 + 92.68x_3 + 0.148x_1x_2 - 96x_1x_3 - 2.43x_2x_3 - 1\,224x_1^2 - 0.17x_2^2 - 24.46x_3^2 \quad (25)$$

$$Y_2 = 128.23 - 400.2x_1 - 7.17x_2 - 111.7x_3 + 0.6x_1x_2 + 140.4x_1x_3 + 3.83x_2x_3 + 648x_1^2 + 0.18x_2^2 + 24.11x_3^2 \quad (26)$$

$$Y_3 = -11.99 - 72x_1 + 1.73x_2 + 16.02x_3 - 1.8x_1x_2 - 34.2x_1x_3 - 1.23x_2x_3 + 504x_1^2 + 6.03\times10^{-3}x_2^2 - 0.027x_3^2 \quad (27)$$

由回归方程的方差分析结果(表 3)可知,3 个指数的失拟项均 $P>0.05$,方程的失拟项不显著,种子质量、真空度与播种机作业速度之外的影响因素对于指标的影响较小,模型与实际情况拟合较好;各因素对于合格指数 Y_1、重播指数 Y_2 影响的回归模型 $P<0.01$,影响极显著,对于漏播指数 Y_3 影响的回归模型 $P<0.05$,影响显著。分析各因素对于合格指数的影响,x_1、x_1x_3 的 P 值均小于 0.05,说明 x_1、x_1x_3 对于合格指数的影响显著,x_2、x_3、x_2x_3、x_1^2、x_2^2、x_3^2 的 P 值均小于 0.01,说明其对合格指数的影响极显著,其余项的 P 值大于 0.05,对于合格指数的影响不显著。

分析各因素对于重播指数的影响,x_1、x_1x_3 的 P 值均小于 0.05,证明 x_1、x_1x_3 对于重播指数的影响显著,x_2、x_3、x_2x_3、x_1^2、x_2^2、x_3^2 的 P 值均小于 0.01,说明其对于重播指数的影响极显著,其余项的 P 值大于 0.05,对于重播指数的影响不显著。

分析各因素对于漏播指数的影响,x_1^2 的 P 值小于 0.05,说明 x_1^2 对于漏播指数的影响显著,其余项的 P 值大于 0.05,对于漏播指数的影响不显著。排除不显著项得出的回归方程为

$$Y_1 = -15.84 + 478.8x_1 + 5.52x_2 + 92.68x_3 - 96x_1x_3 - 2.43x_2x_3 - 1\,224x_1^2 - 0.17x_2^2 - 24.46x_3^2 \quad (28)$$

$$Y_2 = 128.23 - 400.2x_1 - 7.17x_2 - 111.7x_3 + 140.4x_1x_3 + 3.83x_2x_3 + 648x_1^2 + 0.18x_2^2 + 24.11x_3^2 \quad (29)$$

$$Y_3 = -11.99 + 504x_1^2 \quad (30)$$

3.5.3 各因素交互作用对排种器充种性能的影响

排种性能可以根据合格指数和重播指数进行评价[15]。借助 Design-Expert 10.0 软件,生成合格指数和重播指数的响应曲面和等高线图,如图 12、13 所示。

由图 12a、13a 可知,种子质量处于零水平(1.0 kg),真空度一定时,随着作业速度的增加,合格指数呈先上升后下降趋势,重播指数呈下降趋势;播种机作业速度一定时,随着真空度增加,合格指数呈先上升后下降趋势,重播指数呈上升趋势;作业速度为 0.15 ~ 0.19 m/s、真空度为 7.0 ~ 10.0 kPa 时合格指数较

表 3　回归方程方差分析

Tab. 3　Analysis of variance of regression equation

方差来源	合格指数				重播指数				漏播指数			
	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	176.88	9	13.89	<0.000 1 **	205.08	9	7.98	0.000 5 **	44.89	9	3.12	0.031 2 *
x_1	6.68	1	4.72	0.048 8 *	14.33	1	5.02	0.043 2 *	0.84	1	0.53	0.481 2
x_2	15.43	1	10.91	0.005 7 **	38.32	1	13.42	0.002 9 **	3.92	1	2.45	0.141 8
x_3	30.64	1	21.66	0.000 5 **	29.79	1	10.43	0.006 6 **	4.0×10^{-5}	1	2.5×10^{-5}	0.996 1
x_1x_2	1.6×10^{-3}	1	1.1×10^{-3}	0.974 1	0.030	1	0.011	0.919 6	0.25	1	0.15	0.701 4
x_1x_3	6.69	1	4.73	0.048 8 *	14.34	1	5.02	0.043 1 *	0.84	1	0.53	0.480 8
x_2x_3	15.42	1	10.90	0.005 7 **	38.31	1	13.42	0.002 9 **	3.92	1	2.45	0.141 7
x_1^2	57.21	1	40.44	<0.000 1 **	17.34	1	6.07	0.028 5 *	11.01	1	6.87	0.021 1 *
x_2^2	15.21	1	10.75	0.006 0 **	15.63	1	5.47	0.035 9 *	0.018	1	0.012	0.916 1
x_3^2	30.64	1	21.66	0.000 5 **	29.79	1	10.43	0.006 6 **	3.7×10^{-5}	1	2.3×10^{-5}	0.996 3
残差	142.81	13			37.12	13			36.86	13		
失拟	113.61	7	6.67	0.237 8	8.74	7	3.97	0.170 8	11.39	7	0.77	0.625 5
误差	29.20	12			45.86	12			25.47	12		
总和	195.28	22			242.20	22			65.71	22		

注：* 表示差异显著（$P<0.05$），** 表示差异极显著（$P<0.01$）。

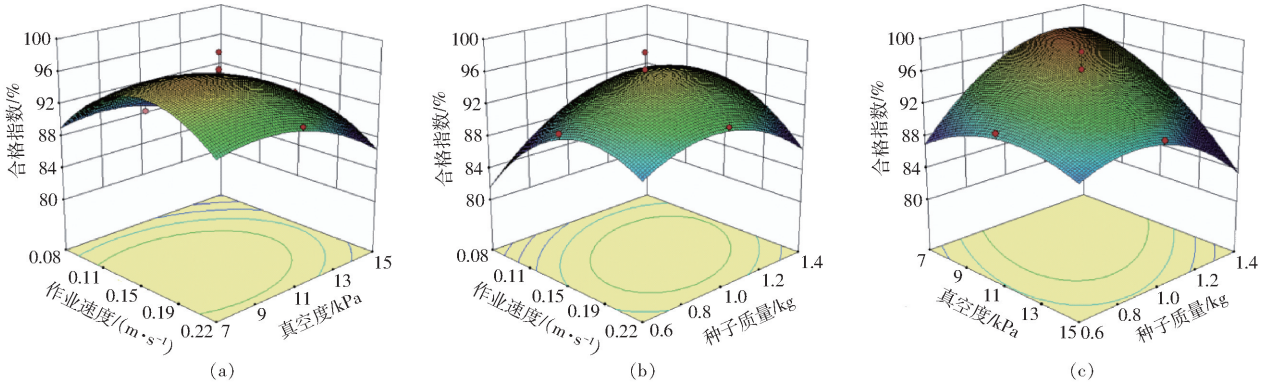

图 12　合格指数的响应曲面和等高线图

Fig. 12　Response surfaces and contour maps of qualified exponent

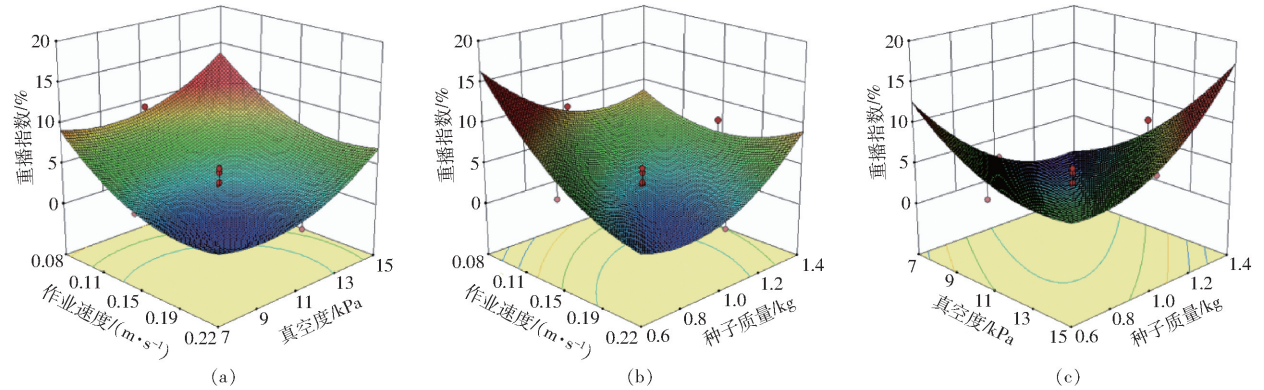

图 13　重播指数的响应曲面和等高线图

Fig. 13　Response surfaces and contour maps of replant index

高，重播指数较低。

由图 12b、13b 可知，真空度处于零水平（11.0 kPa），种子质量一定时，随着作业速度的增加，合格指数呈先上升后下降趋势，重播指数呈下降趋势；播种机作业速度 0.08 ~ 0.15 m/s 范围内变化时，随着种子质量增加，合格指数呈先上升后下降趋势，重播指数呈下降趋势，播种机作业速度 0.15 ~ 0.22 m/s 范围内变化时，随着种子质量增加，合格指数呈先上升后下降趋势，重播指数呈上升趋势；作业速度为 0.15 ~ 0.19 m/s、种子质量为 0.8 ~ 1.2 kg 时合格指数较高，重播指数较低。

由图 12c、13c 可知，作业速度处于零水平（0.15 m/s），真空度在 7.0 ~ 11.0 kPa 范围内变化时，随着种子质量的增加，合格指数呈上升趋势，重

播指数呈下降趋势;真空度在 11.0 ~ 15.0 kPa 范围内变化时,随着种子质量的增加,合格指数呈下降趋势,重播指数呈上升趋势;种子质量在 0.6 ~ 0.8 kg 范围内变化时,随着真空度的增加,合格指数呈先上升后下降趋势,重播指数呈下降趋势,种子质量在 0.8 ~ 1.4 kg 范围内变化时,随着真空度的增加,合格指数呈先下降趋势,重播指数呈上升趋势。真空度在 7.0 ~ 11.0 kPa、种子质量在 1.0 ~ 1.4 kg 时合格指数较高、重播指数较低。

结合回归方程(28) ~ (30)以及各因素交互作用可知,影响合格指数、重播指数的各因素主次顺序为:充种室种子质量、真空度、播种机作业速度,影响漏播指数的主要因素为播种机作业速度。

3.5.4 参数优化

为获得试验因素的最优组合,以播种机作业速度、真空度、充种室种子质量为自变量,以合格指数、重播指数、漏播指数为目标,根据上述响应曲面分析,结合 3.5.2 节中得到的回归方程,建立数学模型

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \min Y_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} 0.11\ \text{m/s} \leqslant x_1 \leqslant 0.19\ \text{m/s} \\ 8.6\ \text{kPa} \leqslant x_2 \leqslant 13.4\ \text{kPa} \\ 0.76\ \text{kg} \leqslant x_3 \leqslant 1.24\ \text{kg} \end{cases} \end{cases} \tag{31}$$

借助 Design-Expert 10.0 软件的 Optimization 模块求解,得到充种性能最佳参数组合为播种机作业速度 0.18 m/s、真空度 9.6 kPa、种子质量 1.2 kg,此时合格指数 Y_1 = 95.0%,重播指数 Y_2 = 0.1%,漏播指数 Y_3 = 4.3%。

3.6 验证试验

为了验证最佳参数组合,以包衣三七种子为试验对象,用试制的播种机在云南农业大学校内的土槽上进行验证。随机选取 4 列气孔作为观察对象,采用高速摄像机获取图像,借助 phantom 软件进行图像处理,选取播种机作业速度为 0.18 m/s、真空度 9.6 kPa、种子质量 1.2 kg,进行 5 次重复试验,试验现场如图 14 所示。试验结果如表 4 所示,合格指数为 95.6%,重播指数为 0.4%,漏播指数为 4.0%,与上述优化结果基本一致,满足三七育苗播种的生产需要。

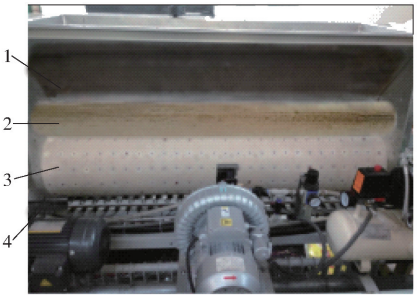

图 14 验证试验

Fig. 14 Verification test

1. 充种室 2. 毛刷滚 3. 滚筒 4. 高速摄像机

表 4 验证试验结果

Tab. 4 Test verification results %

试验序号	合格指数	重播指数	漏播指数
1	97.0	0	3.0
2	94.0	0	6.0
3	96.0	0	4.0
4	95.0	1.5	3.5
5	96.0	0.5	3.5

4 结论

(1)设计并试制了气吸式三七精密排种器,该排种器通过滚筒与配气盘的正、负气压槽交替连通,实现负压充种、正压投种,满足 50 mm 行、株距三七育苗精密播种,适用于 1.4 ~ 1.5 m 宽的三七育苗槽播种。

(2)分析了作业速度、真空度、充种室内种子质量、投种正压力对排种器充种性能的影响,通过单因素试验确定了各因素的合理变化范围:作业速度为 0.08 ~ 0.22 m/s,真空度为 7 ~ 15 kPa,种子质量为 0.6 ~ 1.4 kg。

(3)通过三因素五水平二次正交旋转组合试验,得到播种效果较好的最佳参数组合为:播种机作业速度 0.18 m/s、真空度 9.6 kPa、种子质量 1.2 kg。通过土槽试验对其进行了验证,结果表明,最优参数组合下的合格指数为 95.6%、重播指数为 0.4%、漏播指数为 4.0%,满足农艺要求。

参 考 文 献

[1] 杨文彩,朱有勇,杜迁,等. 基于农机农艺融合的三七机械化精密播种系统研究[J]. 广东农业科学,2014(2):175 - 180.

[2] 梁素钰,封俊,曾爱军,等. 新型组合吸孔式小麦精密排种器性能的试验研究[J]. 农业工程学报,2001,17(2):84 - 87.
LIANG Suyu, FENG Jun, ZENG Aijun, et al. Performance experiments of the seed-meter device with combined suckers[J]. Transactions of the CSAE,2001,17(2):84 - 87. (in Chinese)

[3] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(1):85 - 95. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190109&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.009. (in Chinese)

[4] 周金华,赖庆辉,高筱钧. 滚轮圆刷式三七精密排种器的仿真分析与试验验证[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),

2016,42(4):509 - 516.
ZHOU Jinhua, LAI Qinghui, GAO Xiaojun. Simulation analysis and experiment of roller-round brush precise seed-metering device for *Panax notoginseng*[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences),2016,42(4):509 - 516. (in Chinese)
[5] GAIKWAD B B, SIROHI N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(3): 322 - 329.
[6] ARZU Y, ADNAN D. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering,2007,97(3):347 - 356.
[7] GAIKWAD B B, SIROHI N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. Biosystems Engineering, 2008,99(3):322 - 329.
[8] 陈进,李耀明,王希强,等. 气吸式排种器吸孔气流场的有限元分析[J]. 农业机械学报,2007, 38(9):59 - 62.
CHEN Jin, LI Yaoming, WANG Xiqiang, et al. Finite element analysis for the sucking nozzle air field of air-suction seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(9):59 - 62. (in Chinese)
[9] 廖庆喜,张猛,余佳佳,等. 气力集排式油菜精量排种器[J]. 农业机械学报,2011,42(8):30 - 34.
LIAO Qingxi, ZHANG Meng, YU Jiajia, et al. Pneumatic centralized metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(8):30 - 34. (in Chinese)
[10] 廖宜涛,廖庆喜,王磊,等. 气力式小粒径种子精量排种器吸种效果影响因素研究[J]. 农业工程学报,2018,34(24):10 - 17.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, WANG Lei, et al. Investigation on vacuum singulating effect in fluencing factors of pneumatic precision seed metering device for small particle size of seeds[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 10 - 17. (in Chinese)
[11] 张昆,衣淑娟. 气吸滚筒式玉米排种器充种性能仿真与试验优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(7):78 - 86.
ZHANG Kun, YI Shujuan. Simulation and experimental optimization on filling seeds performance of seed metering device with roller of air-suction[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7):78 - 86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170710&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.010. (in Chinese)
[12] 翟建波,夏俊芳,周勇. 气力式杂交稻精量穴直播排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(1):75 - 82.
ZHAI Jianbo, XIA Junfang, ZHOU Yong. Design and experiment of pneumatic precision hill-drop drilling seed metering device for hybrid rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):75 - 82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.011. (in Chinese)
[13] 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)
[14] 杨航,杨文彩,李超群,等. 2BQ - 27 型三七精密播种机排种性能试验研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(2):33 - 38.
YANG Hang, YANG Wencai, LI Chaoqun, et al. Experimental study on the seeding performance of the 2BQ - 27 notoginseng precision metering device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016,37(2):33 - 38. (in Chinese)
[15] 廖宜涛,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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3):46 - 57. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190305&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.005. (in Chinese)
[16] 颜丙新,张东兴,杨丽,等. 重力辅助充种盘室同步气吸式排种器性能分析[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):117 - 124.
YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Performance analysis of gravity assist filling precision seed-metering device with synchronously rotating seed plate and vacuum chamber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(Supp.):117 - 124. (in Chinese)
[17] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4):102 - 112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20190412&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.012. (in Chinese)
[18] 王业成,靳亚东,罗嗣博,等. 集排式大豆精量排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6):112 - 118.
WANG Yecheng, JIN Yadong, LUO Sibo, et al. Design and experiment of centralized precision soybean seed-metering device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6):112 - 118. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180613&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.013. (in Chinese)
[19] 陈美舟,刁培松,张银平,等. 大豆窄行密植播种机单盘双行气吸式排种器设计[J]. 农业工程学报,2018,34(21):8 - 16.
CHEN Meizhou, DIAO Peisong, ZHANG Yinping, et al. Design of pneumatic seed-metering device with single seed-metering plate for double-row in soybean narrow-row-dense-planting seeder[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(21):8 - 16. (in Chinese)
[20] 杨冬,黄朱才,袁李明,等. 耐高温尼龙材料的研究进展[J]. 广州化工,2019,47(2):31 - 33,77.
YANG Dong, HUANG Zhucai, YUAN Liming, et al. Research progress on high temperature resistance nylon[J]. Guangzhou Chemical,2019,47(2):31 - 33,77. (in Chinese)
[21] LI Ming, LIAO Qingxi, LIAO Yitao, et al. Analysis on seeding process of pneumatic cylinder-type centralized rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 17 - 27.
[22] PRASANNA K G V, SRIVASTAVA B. Modeling and optimization of parameters of flow rate of paddy rice grains through the horizontal rotating cylindrical drum of drum seeder [J]. Computers and Electronics in Agriculture,2009,65(1):26 - 35.
[23] ENDRERUD H C. Influence of tube configuration on seed delivery to a coulter[J]. J. Agric. Engng. Res.,1999,74:177 - 184.
[24] 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/OL]. 农业机械学报,2016,47(5):27 - 37.
LAI Qinghui, GAO Xiaojun, ZHANG Zhihong. Simulation and experiment of seed-filling performance of pneumatic cylinder seed-metering device for *Panax notoginseng*[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5):27 - 37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160505&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.005. (in Chinese)
[25] 丁建华,郑学宝,徐海峰,等. 气力式小粒种子排种器台架试验研究[J]. 现代农业装备,2020,41(6):33 - 40,75.