

正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器设计与试验

衣淑娟 陈 涛 李衣菲 陶桂香 毛 欣

(黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

摘要: 针对现有谷子穴播排种器播种时存在堵孔、排种盘高转速时充种率低及排种均匀性差等问题,结合谷子穴播农艺要求,设计了一种正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器。对排种器关键部件参数进行设计计算,通过理论分析建立了种子在流场中和充种区的力学模型。为了获得最佳的排种器性能参数,以型孔轮转速、真空度、吸孔直径为试验因素,以合格率、重播率、漏播率为评价指标,进行了三因素五水平二次正交旋转组合试验,采用多目标优化方法,确定了当吸孔直径为 1.04 mm、真空度为 2.10 kPa、型孔轮转速为 22.46 r/min 时,合格率为 93.14%,重播率为 3.48%,漏播率为 3.38%。对优化结果进行验证试验,验证结果与优化结果基本一致。田间播种试验表明,该排种器合格率为 88.2%、重播率为 4.9%、漏播率为 6.9%,各项指标均满足谷子穴播农艺要求。

关键词: 谷子; 穴播; 排种器; 正负气压; 型孔轮

中图分类号: S223.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)06-0083-12 OSID: 

Design and Test of Millet Hill-drop Seed-metering Device with Combination of Positive-negative Pressure and Hole Wheel

YI Shujuan CHEN Tao LI Yifei TAO Guixiang MAO Xin

(College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: Aiming at the problems of small size, light weight and pityriasis in millet seed sowing and seed-metering device, such as hole blocking, poor seed uniformity and low seed filling rate at high rotating speed of seed-metering plate, a combined type of positive and negative air pressure and hole wheel seed sowing and seed-metering device was designed according to the agronomic requirements of millet seed sowing. The parameters of key parts of seed sorter were designed and calculated, and the mechanical model of seed in the flow field and filling area was established through theoretical analysis. It was found that the main factors affecting the airflow force on seeds were the diameter of suction hole and the vacuum degree inside the type hole. The vacuum degree required by seed sorter during seed filling was 1.13 ~ 3.21 kPa. Through single factor test, it was determined that the optimal hole of the seed metering device was cylindrical conical composite hole, and the optimal hole diameter was 1 mm, and it was verified that the pass rate of the hole metering device under the condition of negative pressure at high speed was significantly higher than that without negative pressure. In order to get the best performance parameters of the metering device, with hole type wheel speed, vacuum degree, and suction diameter as the test factors, percent of pass, replanting rate, sowing rate as the evaluation index, the three factors five levels quadratic orthogonal rotation combination test was taken, and multi-objective optimization method was used, and the best parameter combination was determined as follows: when the suction diameter was 1.04 mm, the vacuum degree was 2.10 kPa, hole type wheel speed was 22.46 r/min, the percent of pass was 93.14%, the replanting rate was 3.48%, the leakage rate was 3.38%. The verification results were basically consistent with the optimized results. In order to investigate the actual sowing performance of seed metering device, field seeding experiments were carried out. The field test results showed that the pass rate was 88.2%, the replanting rate was 4.9%, and the leakage rate was 6.9%. All the indexes met the requirements of hill seeding agronomy of millet.

Key words: millet; hill-hrop; seed-metering device; positive-negative pressure; hole wheel

收稿日期: 2020-08-05 修回日期: 2020-09-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701800-02)和黑龙江八一农垦大学三纵三横项目(TDJH201803)

作者简介: 衣淑娟(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事农业机械研究,E-mail: yishujuan_2005@126.com

0 引言

我国传统的谷子播种方式主要为撒播和条播,存在播量高、水肥施用量大等问题,这大大增加了投入成本。穴播技术是一种先进的农作物种植方法,改变了传统条播堆积的作业方式,精确控制种子播量、穴距和田间分布均匀性,不但降低了投入成本,还省去了齐苗后的间苗环节^[1]。但是,谷子种子体积小、质量轻,且含有糠皮,现有的谷子穴播排种器仍无法完全适应谷子穴播种植模式^[2]。

国外谷子种植面积相对较小,因此对谷子穴播排种器的研究内容较少^[3]。国内学者根据谷子穴播农艺要求,研制了不同形式的谷子穴播排种器,排种器按工作原理可分为气力式和机械式两大类^[3-6]。机械式排种器结构简单,但存在伤种、对不同种子适应性差的问题;气力式排种器对种子适应性较好,对种子损伤程度较低,但存在结构复杂和易堵孔的问题。相关研究虽在一定程度上改善了谷子穴播的效果,但仍存在堵孔、排种均匀性差、排种盘高转速时充种率低等问题。

本文设计一种正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器,利用负压辅助充种,以解决排种盘高转速时充种率低的问题,利用正压强制投种和清除吸孔内杂质,以解决堵孔、排种均匀性差的问题。

1 结构与工作原理

1.1 排种器结构

正负压-型孔轮组合式谷子穴播排种器主要包括左壳体、右壳体、机械充排机构以及气力辅助充排机构。机械充排机构包括种箱、型孔轮、排种轴、清种毛刷、护种板、导种管;气力辅助充排种结构包括负压风管、负压室和投种气嘴。型孔轮和排种轴同心连接,型孔轮纵向安装在左右壳体之间,型孔轮周向均匀排布有多个型孔,负压风管、投种气嘴安装在左壳体上,护种板、负压室安装在右壳体上,护种板位于型孔轮的侧部,为与型孔轮同心的弧形,负压室位于型孔轮内部充种区正下方,并与负压风管相通,投种气嘴的出气口正对型孔刚好完全脱离护种板时型孔所在的位置。清种毛刷、种箱、导种管安装在左右壳体之间,清种毛刷处于护种板起始处,导种管处于护种板终止处,种箱处于充种区型孔轮正上方。排种器结构如图1所示。

1.2 排种器工作原理

工作时,种子在充种区依靠自身重力以及负压室在型孔处产生的吸力进入型孔内,完成充种;种子在型孔内随型孔轮在排种轴驱动下逆时针转动到达

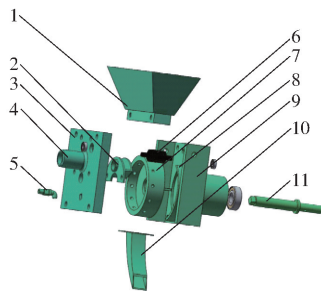


图1 排种器结构图

Fig.1 Structure diagram of seed sowing device

1. 种箱 2. 负压室 3. 左壳体 4. 负压风管 5. 投种气嘴 6. 清种毛刷 7. 型孔轮 8. 护种板 9. 右壳体 10. 导种管 11. 排种轴

清种区,清种毛刷在型孔轮转动所产生的摩擦力的带动下转动,将型孔外种子清除,完成清种;在护种区,型孔内种子在护种板保护下,随型孔轮继续逆时针转动,直至型孔脱离护种板到达投种区,完成护种;在投种区,种子依靠自身重力和投种气嘴产生的正压吹力脱离型孔,经导种管落入种沟内,完成投种。型孔轮经过过渡区后再次到达充种区,进行下一个播种循环。排种器工作示意图如图2所示。

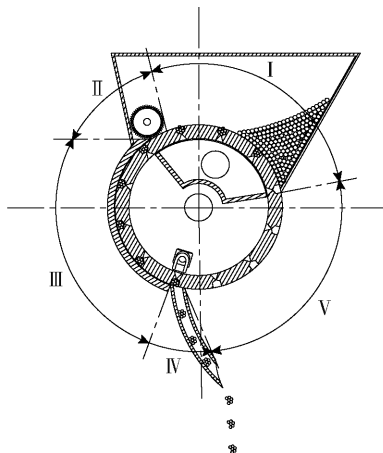


图2 排种器工作示意图

Fig.2 Working diagram of seed metering device

I. 充种区 II. 清种区 III. 护种区 IV. 投种区 V. 过渡区

2 关键部件设计与参数分析

谷子穴播要求将谷子种子以一定的穴粒数、穴距、行距、播深播在土壤里,使每一粒种子在田间拥有足够的空间吸收土壤中的养分,提高对水分、养分和阳光的利用率^[7]。本文以谷子三轴尺寸为基础,进行正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器的设计。

2.1 谷子三轴尺寸

谷子种子的三轴尺寸是型孔和吸孔等结构参数设计的重要参考依据^[8],本文以黑龙江地区种植面积较大的大穗金谷种子为研究对象,随机选取100

粒对其长、宽、厚外形尺寸进行测量,测量结果如表1所示。

表1 谷子三轴尺寸

Tab.1 Three axis dimension of millet

参数	平均值/mm	标准差/mm	变异系数/%
长度	2.4	0.24	10.9
宽度	1.9	0.21	11.7
厚度	1.4	0.19	15.8

经过测量,谷子种子的长度范围2.2~2.6 mm,宽度范围1.7~2.1 mm,厚度范围1.2~1.6 mm,通过外形尺寸特征可以简化为半椭球体^[9],以便于体积的计算,为型孔尺寸的设计提供参考。椭球体的结构如图3所示。

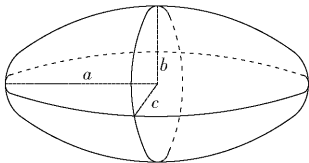


图3 椭球体结构示意图

Fig.3 Schematic of ellipsoid structure

简化后的谷子体积模型如图3的左半部分所示,结合椭球体的体积计算公式,单粒谷子种子的体积计算公式为

$$V=\frac{1}{2}\times\frac{4\pi abc}{3}\tag{1}$$

式中 a ——椭球体长轴长度的一半,即谷子种子长度的一半,mm
 b ——椭球体中轴长度的一半,即谷子种子宽度的一半,mm
 c ——椭球体短轴长度的一半,即谷子种子厚度的一半,mm

经计算,单粒谷子种子体积约为3.3 mm³。

2.2 穴距计算

谷子进行穴播时,在行距、播深、穴粒数确定的情况下,谷子穴播穴距取决于谷子的播量^[10]。谷子的穴距是指相邻两穴种子间的距离,计算公式为

$$L=\frac{l}{N}=\frac{\frac{10\,000}{d_a}\frac{m}{m_1}}{1\,000\frac{m}{m_1}}=\frac{10m_1}{d_a m}\tag{2}$$

式中 L ——播种穴距,cm
 l ——每公顷播种长度,m/hm²
 N ——每公顷播种穴数,穴/hm²
 d_a ——行距,mm
 m ——每公顷播种量,kg/hm²
 m_1 ——千粒质量,kg

根据谷子穴播农艺要求, m 取5.5~7.5 kg/hm²,行

距0.2 m,每穴4~9粒,千粒质量3.1 g,计算可得谷子播种穴距为10~13 cm。谷子穴播穴距的计算结果,为后续型孔数以及分布的设计提供了参考。谷子穴播的穴径 $D\leq 4$ cm最为适宜,谷子穴播示意图如图4所示。 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 为各穴的穴径。

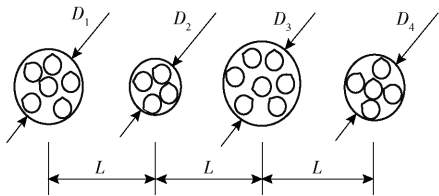


图4 谷子穴播示意图

Fig.4 Schematic of millet drilling

2.3 型孔轮设计

型孔轮是排种器的核心部件,其结构与参数设计的合理性直接影响整个排种器的播种效果^[11-13]。型孔轮的主要参数包括型孔轮直径与宽度、型孔的形状与分布、型孔轮的转速等,这些参数是保证排种器顺利充种、清种、护种、投种的关键。

2.3.1 型孔轮尺寸

型孔轮直径作为排种器重要的结构参数之一,直接决定排种器结构布置和其它零部件的结构参数。型孔经过充种区的时间越长,与种子接触越充分,充种效果就越好^[14-15]。为了确定型孔轮各参数与充种时间的关系,建立关于充种时间 T 的方程

$$T=\frac{\pi\beta}{180\omega}\tag{3}$$

其中 $\omega=\frac{2\pi n_p}{60}$ $n_p=\frac{60v_a}{ZL}$

式中 β ——充种角,(°)
 ω ——型孔轮角速度,rad/s
 n_p ——型孔轮转速,r/min
 v_a ——播种机前进速度,m/s
 Z ——型孔数量

由式(3)整理得

$$T=\frac{\beta ZL}{360v_a}\tag{4}$$

由式(4)可知,在播种机前进速度 v_a 、穴距 L 和充种角 β 固定的条件下,型孔在充种区停留时间 T 只与型孔数量 Z 有关,因此,型孔轮直径对充种效果没有影响,但随着型孔轮直径增大,型孔分布的数量增多,即可增加型孔在充种区停留时间,从而提高充种质量,但是为了保证充足的吸附力,型孔数量增多的同时负压室体积也需增大,风机提供的动力就要提高,这样就增加了能量消耗。

型孔轮直径一般选取80~200 mm^[16],根据谷

子穴播农艺要求,本着在保证播种质量的前提下尽可能减少动力消耗的原则,将型孔轮直径设计为120 mm,宽度35 mm。并将内部设计为直径为100 mm的中空区,用于安装负压室和投种气嘴,如图5所示。

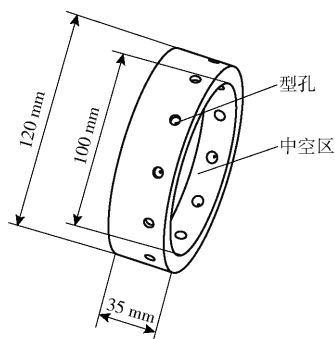


图5 型孔轮结构示意图

Fig.5 Diagram of hole wheel structure

2.3.2 型孔轮转速

型孔轮转速对排种器的播种质量有重要影响^[17-19],在机组前进速度一定时,随着型孔轮转速增大,投种频率会增加,但转速过高时,会由于型孔经过充种区时间过短而使充种率降低。根据农业机械设计手册,型孔轮线速度不能超过0.35 m/s^[20]。若没有辅助装置,线速度高于这个值,工作性能将会大大下降。在实际田间播种作业过程中,由于外界环境因素的干扰,有必要对排种器进行适当的改进,改进后的线速度达到0.5~0.8 m/s。型孔轮转速与

充种时间的对应关系为

$$T = \frac{C_r}{v_p} = \frac{\beta \left(\frac{d_p}{2} - r_k \right)}{\frac{\pi n_p}{30} \left(\frac{d_p}{2} - r_k \right)} = \frac{30\beta}{\pi n_p} \quad (5)$$

整理得

$$n_p = \frac{30\beta}{\pi T} = \frac{30\omega}{\pi} \quad (6)$$

式中 C_r ——充种区弧长,mm

v_p ——型孔轮线速度,m/s

d_p ——型孔轮直径,mm

r_k ——型孔中心与型孔轮边缘的距离,mm

为了保证排种器较好的充种效果,经式(6)计算得型孔轮转速的最佳范围是8~40 r/min。

2.4 型孔设计

合适的型孔形状可以提高充种和护种效果^[21],充种区的充种过程因谷子种子质量较轻且含有包衣糠皮而复杂多变,因此型孔的形状直接影响排种器的播种质量。

通过参考农业机械设计手册^[20],本文设计圆柱锥形组合孔、圆柱球形组合孔、锥形孔3种型孔,通过试验确定最优型孔作为排种器的最终型孔。型孔由充种型孔、吸孔和反向锥孔组成。充种型孔的作用是充填与携带种子,吸孔的作用是在充种区通过负压室产生的吸附力进行辅助充种,反向锥孔的作用是提充种区和投种区的气流利用率,防止气流散失。3种型孔结构如图6所示。

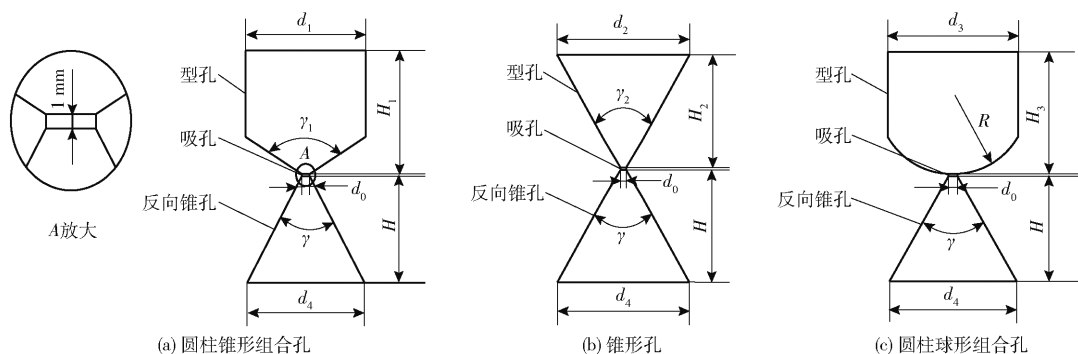


图6 不同形状型孔

Fig.6 Different shapes of hole

图中: d_1 为型孔直径,mm; H_1 为型孔深度,mm; γ_1 为型孔圆锥部分锥度,(°); d_2 为型孔直径,mm; H_2 为型孔深度,mm; γ_2 为型孔锥度,(°); d_3 为型孔直径,mm; H_3 为型孔深度,mm; R 为型孔球形部分半径,mm; d_4 为反向锥孔锥底直径,mm; H 为反向锥孔深度,mm; γ 为反向锥孔锥度,(°); d_0 为吸孔直径。

由于谷子种子的孔隙率较小,可忽略不计,在设计型孔的尺寸时假设种子间无缝隙^[22]。因为谷子穴播时每穴4~9粒,所以充种型孔的体积等于或略大于9粒谷子种子的体积即可。因此3种型孔的尺

寸设计如下: d_1 为5 mm, H_1 为4.5 mm, γ_1 为95°~100°; d_2 为6 mm, H_2 为4.5 mm, γ_2 为60°; d_3 为4.5 mm, H_3 为4.5 mm, R 为5 mm; d_4 为6 mm, H 为5 mm, γ 为60°。3种型孔的吸孔和反向锥孔结构尺寸均相同。吸孔直径过大,会导致种子穿过型孔进入负压室内,型孔直径过小,会因吸力不足而影响充种效果,本文将设计4个不同直径的吸孔,分别为0.8、1.0、1.2、1.4 mm,通过试验确定最优吸孔直径,吸孔厚度设计为1 mm。

在播种量相同的条件下,型孔轮上分布的型孔

数量越多,型孔轮转速越低,充种效果就越好,但型孔数量受到型孔轮直径和穴距的限制^[23]。型孔数量计算公式为

$$Z = \frac{\pi d v_a}{L v_p} = \frac{60 \pi d v_a}{L \pi n_p d} = \frac{60 v_a}{L n_p} \quad (7)$$

式中 d ——型孔轮直径,mm

由式(7)可知,型孔数量与播种机前进速度成正比,与型孔轮线速度以及转速成反比,适当增加型孔数量既可以降低型孔轮转速,又可以提高作业速度,有利于使播种质量得到改善和提高播种作业效率。根据式(2)计算可知谷子穴播穴距为10~13 cm, v_a 取0.8 m/s, n_p 取15~25 r/min。经计算,型孔数量取9.3~12.1个,综合考虑,取12个。

2.5 护种板设计

护种板采用与型孔轮同心的圆弧形,起始于清种毛刷下方,在投种区结束,所经区域圆心角为125°,护种板与型孔轮的配合间隙直接影响排种器的护种质量,无论间隙过大或过小均会对排种效果与排种器的使用寿命产生不利影响。如果间隙过大,会使型孔内的种子脱离型孔,被型孔轮外表面刮带至投种区,加大对种子的机械损伤,导致穴粒数不准确,同时会使种子成穴效果变差;如果间隙过小,会增大型孔轮与护种板间的摩擦力,加剧零部件的磨损,减短排种器使用寿命。综上所述,设计护种板半径为60.5 mm,宽度和型孔轮相等,与型孔轮间隙为0.5 mm,小于谷子种子三轴尺寸中的最小尺寸,种子不会脱离型孔进入护种板与型孔轮之间。护种板与型孔轮配合示意图如图7所示。

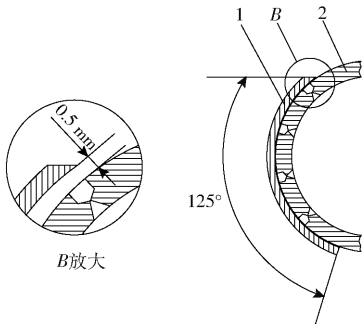


图7 护种板与型孔轮配合示意图

Fig.7 Matching diagram of seed guard plate and type hole wheel
1. 护种板 2. 型孔轮

2.6 负压室设计

负压室在位于充种区型孔的吸孔处产生吸力,其结构直接影响着充种效果^[24-25],本文将负压室设计为圆心角为120°,宽度为20 mm,深度为30 mm,壁厚3 mm,半径为49.5 mm的圆弧形。负压室侧面设有安装在左壳体上的安装孔和与负压风管相连接

的排气口,风机通过排气口将负压室内空气全部排出,在负压室内部产生负压区,以此在吸孔处对种子产生吸附力。负压室的结构如图8所示。

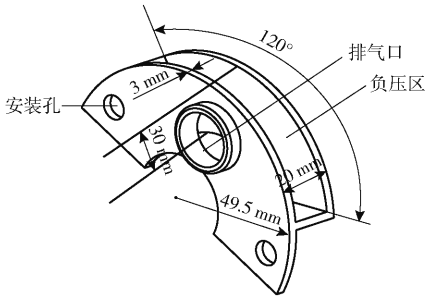


图8 负压室结构示意图

Fig.8 Schematic of vacuum chamber structure

2.7 投种气嘴设计

投种气嘴作为强制投种和清除吸孔内杂质的关键部件,必须保证通过气嘴内部的气流均匀稳定,才能够有效清除吸孔内杂质的同时使种子在投种区顺利脱离型孔,均匀播在垄沟中。如果通过的气流过小,就会使种子在投种区不能顺利脱离型孔,而且吸孔内的杂质不能及时清除,从而使漏播率升高;如果通过的气流过大,由于谷子种子较轻,就会使种子脱离型孔后被吹散,成穴性变差,降低播种质量^[26]。

投种气嘴气流通道采用圆形管道,且管道直径与型孔直径相适应,所以,为提高气流利用率,圆形管道直径设计为与反向锥孔直径相等的6 mm。投种气嘴分别设有凹槽和台肩,凹槽上安装轴用弹性挡圈,防止投种气嘴在左壳体上窜动,投种气嘴中间部位用长方体取代圆柱体,防止在左壳体上发生轴向转动。投种气嘴结构如图9所示。

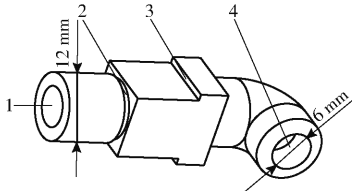


图9 投种气嘴结构示意图

Fig.9 Schematic of air nozzle structure
1. 进气口 2. 凹槽 3. 台肩 4. 出气口

3 充种过程力学分析

充种过程可分为2个阶段,第1阶段是种子在重力和吸力的作用下运动到型孔轮外壁,第2阶段是种子充入到型孔内随型孔轮一起转动。

3.1 种子在流场中受力分析

在充种时为使充种区型孔轮内部的负压室能将型孔内的空气全部吸出,在型孔附近产生一定的压力差,使气流产生扰动,所以在型孔处存在流场。以单粒谷子种子为研究对象,分析种子在流场中受到

的气流作用力,确定影响种子所受气流作用力的因素。种子在流场中的受力情况如图 10 所示。

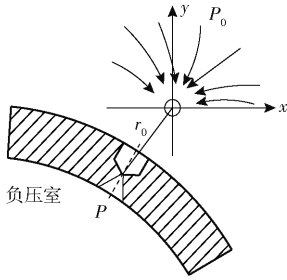


图 10 种子在流场中受力示意图

Fig. 10 Diagram of force of seed in fluid

负压室产生的负压为 P , 外部为标准大气压 P_0 , 根据伯努利原理可得

$$\begin{cases} P_0 - P = \frac{1}{2} v_0^2 \\ v_0^2 = \frac{S}{4} \left[\frac{-6r_0}{(l_0^2 + r_0^2)^2} + \frac{8r_0^3}{(l_0^2 + r_0^2)^3} + 2(l_0^2 + r_0^2)^{-\frac{3}{2}} \right] \\ S = (c_1 - c_2) \frac{2q}{\pi R_a} \end{cases} \quad (8)$$

式中 v_0 ——空气流动速度, m/s
 r_0 ——种子中心与吸孔距离, m
 S ——有效吸附面积, m^2
 l_0 ——种子与吸孔中心偏移横向距离, m
 q ——空气流量, m^3/s
 R_a ——吸孔半径, m
 c_1 ——常数, 随 q 增大而减小
 c_2 ——常数, 取 0.2 ~ 0.3

气流场作用力为

$$F_p = \iint_S (P_0 - P) dS = \int_0^{2\pi} \int_0^r \frac{1}{2} \rho \frac{S^2}{2} \cdot \left[\frac{-3r_0}{(r^2 + r_0^2)^2} + \frac{4r_0^3}{(r^2 + r_0^2)^3} + (r^2 + r_0^2)^{-\frac{3}{2}} \right] R dR d\varphi \quad (9)$$

式中 r ——谷子种子半径, mm
 R ——种子受到气流作用力截面半径
 ρ ——空气密度, kg/m^3

通过单个吸孔的空气流量计算公式为

$$q = \frac{\pi d_0^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \xi}} \quad (10)$$

式中 d_0 ——吸孔直径, mm
 ΔP ——型孔内真空度, Pa
 ξ ——型孔阻力系数

将谷子种子在平面上的投影简化为球形, 对其受力在平面上进行积分, 结合式 (10) 计算可得种子在流场中受到的气流场作用力 F_p 为

$$F_p = (c_1 - c_2)^2 \frac{\pi d_0^2 \Delta P}{8 \xi} \cdot \left[\frac{3r_0}{r^2 + r_0^2} - \frac{2r_0^3}{(r^2 + r_0^2)^2} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + r_0^2}} + \frac{1}{r_0} \right] \quad (11)$$

种子在流场中受到的气流作用力影响充种效果, 由式 (11) 可知, 种子在流场中所受的气流作用力 F_p 受吸孔直径 d_0 、型孔内真空度 ΔP 和种子中心型孔距离 r_0 的影响。由于此排种器种箱中的种子紧贴型孔轮外壁, 使吸种距离保持较小值, 因此种子所受到的气流作用力的主要影响因素为吸孔直径和型孔内真空度。

3.2 种子吸附过程力学分析

作用在种子上的合力作用点位于种子质心, 负压室内气流为定常流, 在充种过程中种子在重力、负压室内气流作用力和种群内部作用力下随型孔轮一起转动, 以型孔轮径向为 y 轴, 切向为 x 轴, 建立平面直角坐标系, 分析种子吸附过程中的受力情况, 此过程种子的受力与运动情况如图 11 所示。

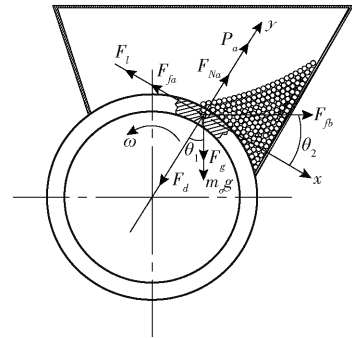


图 11 种子吸附阶段受力示意图

Fig. 11 Force diagram of seed adsorption stage

根据图 11 可得到受力平衡方程

$$\begin{cases} F_d + m_0 g \cos \theta_1 - F_{Na} - P_a - F_{fb} \sin \theta_2 = 0 \\ F_l + F_{fa} - m_0 g \sin \theta_1 - F_{fb} \cos \theta_2 = 0 \\ F_{fa} = F_{Na} \tan \varphi_1 \\ F_{fb} = F_g \tan \varphi_2 \\ P_a = m_0 \omega^2 R \\ \omega = \frac{\pi n_p}{30} \end{cases} \quad (12)$$

式中 F_d ——吸孔处气流对谷子种子绕流阻力, N
 F_l ——吸孔处气流对谷子种子绕流升力, N
 F_{fa} ——型孔轮对谷子种子的摩擦力, N
 F_{fb} ——种间摩擦力, N
 F_{Na} ——型孔轮对谷子种子支持力, N
 F_g ——种子群压力, N
 φ_1 ——谷子种子与型孔轮间摩擦角, ($^\circ$)
 φ_2 ——谷子种子内摩擦角, ($^\circ$)
 θ_1 ——重力与 y 轴方向夹角, ($^\circ$)

θ_2 —— F_b 与 x 轴夹角, ($^{\circ}$)
 m_0 ——谷子种子质量, kg
 P_a ——离心力, N

$$\begin{cases} F_l = \frac{1}{2} C_l \rho v_a^2 S_D \\ F_d = \frac{1}{2} C_d \rho v_a^2 S_D \\ S_D = \frac{\pi d_5^2}{4} \\ \xi = \frac{2 \Delta P}{\rho v_a^2} \end{cases} \quad (13)$$

式中 C_l ——绕流升力系数
 d_5 ——谷子种子算术平均直径, mm
 C_d ——绕流阻力系数
 S_D ——谷子绕流阻力特征面积, m^2
联立式(12)、(13)可得型孔内真空度 ΔP 为

$$\Delta P = \frac{4 \xi}{\pi d_5^2 (C_d - C_l)} \left[\frac{m_0 \pi^2 n_p^2 R}{900} - \frac{F_{Na} \sin(\varphi_2 - \theta_1 - \varphi_1)}{\cos \varphi_1 \sin(\varphi_2 - \theta_2)} + \frac{m_0 g \sin(\theta_1 + \theta_2 - \varphi_1)}{\sin(\varphi_2 - \theta_1)} \right] \quad (14)$$

由式(14)可知,在种子吸附过程中的真空度受型孔轮转速、充种角、种子质量和种子内摩擦角等因素的影响。在种子成功被吸附的条件下,型孔轮转速越高,所需要的真空度就越大。取播种机前进速度 2~6 km/h,即型孔轮角速度 2.1~6.3 rad/s,通过试验测得谷子种子千粒质量 2.5 g, φ_1 为 25.3°, φ_2 为 21.1°,取 θ_1 为 30°, θ_2 为 40°,经计算排种器在充种时所需真空度 ΔP 为 1.13~3.21 kPa。因为排种器在进行实际播种作业时条件较为复杂,本文在进行排种器性能试验时,真空度取 1.5~3.5 kPa。

4 排种器性能试验

4.1 试验材料与仪器设备

制作出排种器样机进行台架性能试验,试验材料选用大穗金谷种子,试验在黑龙江八一农垦大学播种实验室 JPS-12 型播种性能检测试验台上进行,风机使用 2BQS-2 型播种机上配置的液压马达风机,该风机的优点是可以同时进行吸气和吹气两项工作。利用麦赛福格森 1204 型拖拉机的液压系统驱动风机,通过负压力表测量负压室内的真空度。试验设备如图 12 所示。试验过程中采用 Seeder Test 软件进行数据的采集,观察穴粒数。

试验时输送带的运行速度由所模拟的播种机前进速度来确定,在田间播种作业过程中,播种机的前进速度由型孔轮转速和谷子穴播穴距农艺要求来确

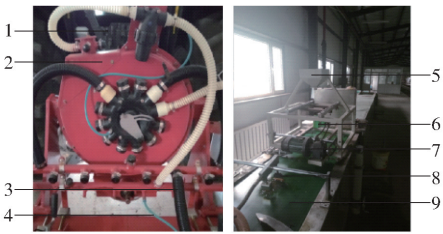


图 12 排种器试验台

Fig. 12 Test bed of seed-metering device

1. 拖拉机 2. 风机 3. 负压气管 4. 正压气管 5. 种箱 6. 排种器 7. 电机 8. 油刷 9. 输送带

定,即

$$v_b = \frac{30 n_p ZL}{50} \quad (15)$$

式中 v_b ——输送带运行速度, km/h

4.2 评价指标

参照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》和《蔬菜穴播播种机技术条件》,将合格率、重播率、漏播率作为试验的评价指标。每穴 0~3 粒为漏播,大于 9 粒为重播,介于 4~9 粒之间为合格。

4.3 单因素试验

4.3.1 对比试验

为验证排种器充种区负压室的辅助充种作用,分别在有负压和无负压条件下进行台架对比试验,有负压时将真空度设置为 2 kPa,将型孔轮转速依次设置为 10、15、20、25、30 r/min 进行试验,根据式(15),对应的输送带速度依次为 2、3、4、5、6 km/h,计算其平均值作为最终结果。试验结果如图 13 所示。

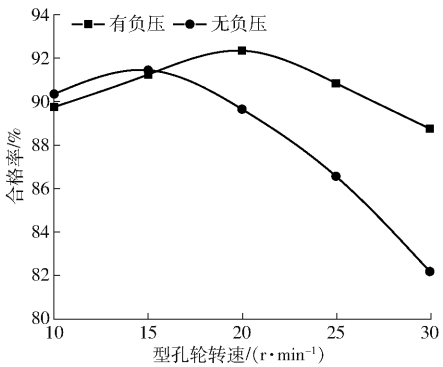


图 13 有无负压时合格率对比试验曲线

Fig. 13 Contrast test curves of pass rate with or without negative pressure

由图 13 可知,型孔轮在低转速时,有负压和无负压条件下播种合格率无明显差异,当转速超过 15 r/min 时,有负压的播种合格率明显高于无负压时,证明充种区安装负压室可以起到辅助充种作用,改善型孔轮高转速时的播种效果。

4.3.2 型孔轮转速和型孔形状对播种质量的影响

分别加工带有锥形孔、圆柱锥形组合孔、圆柱球

形组合孔的型孔轮,研究3种型孔随型孔轮转速变化的播种质量,将真空度设置为2 kPa,型孔轮转速依次设置为10、15、20、25、30 r/min,对应的输送带速度依次为2、3、4、5、6 km/h,将播种质量最优的型孔作为排种器的最终型孔,进行3次重复试验计算平均值。试验结果如图14所示。

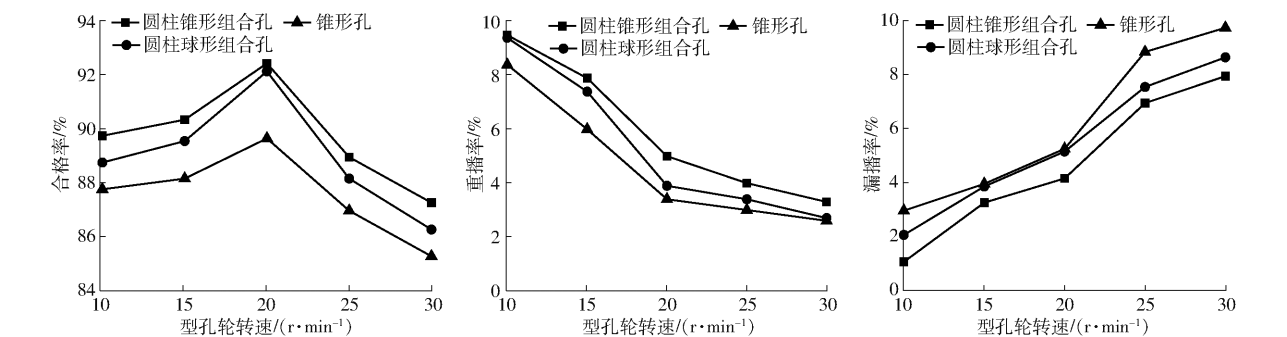


图14 3种型孔下型孔轮转速与播种质量的关系曲线

Fig. 14 Relationships between shape of type hole and rotation speed of type hole wheel and seeding quality

由图14可知,3种型孔的合格率都随着型孔轮转速的升高呈现先升高后下降的趋势,重播率逐渐下降且趋势较缓慢,漏播率逐渐上升且在20 r/min后急剧上升。合格率在转速为15~25 r/min时较大,尤其在20 r/min时,合格率均达到最大。当型孔轮转速较低时,型孔在充种区经过时间较长,与种子接触过于充分而引起充种过多;当转速逐渐升高后,型孔与种子达到较为适宜的接触时间,此时各项指标较优;当转速升高到一定范围后,型孔在充种区经过时间过短,型孔与种子的接触不充分,使得漏播率急剧上升,导致合格率降低。

在相同转速条件下,合格率由大到小的型孔类型分别为圆柱锥形组合孔、圆柱球形组合孔、锥形孔,重播率由大到小的型孔类型分别为圆柱锥形组合孔、圆柱球形组合孔、锥形孔,漏播率由大到小的型孔类型为锥形孔、圆柱球形组合孔、圆柱锥形组合孔。这是因为圆柱锥形组合孔与圆柱球形组合孔的圆柱部分为直立的壁面,有较好的护种效果,种子在清种区不会从型孔中被清出,而锥形孔为倾斜壁面,种子在清种区容易从型孔中被清出,导致漏播率升高,所以圆柱锥形组合孔和圆柱球形组合孔的合格率高于锥形孔,圆柱锥形组合孔的锥形部分更有利于气流的聚集,产生更好的吸附效果,所以圆柱锥形组合孔的合格率优于圆柱球形组合孔,因此,将圆柱锥形组合孔确定为排种器最终的型孔型式。

4.4 多因素试验

以吸孔直径、型孔轮转速、真空度为试验因素,进行三因素五水平二次回归正交旋转组合试验^[27]。选取吸孔直径为0.6~1.4 mm,真空度为1.5~3.5 kPa,型孔轮转速为10~30 r/min,试验因素编码如表2所示,每组试验重复3次,将其平均值作为最终试验结果。采用Design-Expert 8.0.6软件进行数据处理和统计分析。试验结果如表3所示。

表2 试验因素编码

Tab. 2 Factors and levels of test

编码	因素		
	吸孔直径 X_1/mm	真空度 X_2/kPa	型孔轮转速 $X_3/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
1. 682	1.4	3.5	30
1	1.2	3.1	26
0	1.0	2.5	20
-1	0.8	1.9	14
-1. 682	0.6	1.5	10

表3 试验设计与结果

Tab. 3 Test design and result

试验 序号	试验因素			评价指标		
	X_1/mm	X_2/kPa	$X_3/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	合格率 $Y_1/\%$	重播率 $Y_2/\%$	漏播率 $Y_3/\%$
1	1.2	1.9	14	87.31	5.39	7.30
2	0.8	1.9	14	89.43	9.26	1.31
3	1.2	3.1	14	86.52	3.51	9.97
4	0.8	3.1	14	85.51	8.27	6.22
5	1.2	1.9	26	88.36	5.35	6.29
6	0.8	1.9	26	91.31	6.32	2.37
7	1.2	3.1	26	86.21	4.64	9.15
8	0.8	3.1	26	87.34	4.25	8.41
9	1.4	2.5	20	87.36	4.43	8.21
10	0.6	2.5	20	86.52	10.82	2.66
11	1.0	3.5	20	92.15	4.42	3.43
12	1.0	1.5	20	86.21	4.35	9.44
13	1.0	2.5	30	89.19	6.3	4.51
14	1.0	2.5	10	91.46	2.54	6.00
15	1.0	2.5	20	92.37	2.45	5.18
16	1.0	2.5	20	92.23	2.43	5.34
17	1.0	2.5	20	91.36	3.64	5.00
18	1.0	2.5	20	92.65	2.51	4.84
19	1.0	2.5	20	92.02	3.34	4.64
20	1.0	2.5	20	93.32	2.68	4.00
21	1.0	2.5	20	92.21	2.76	5.03
22	1.0	2.5	20	93.65	2.75	3.60
23	1.0	2.5	20	92.52	3.38	4.10

4.5 回归模型建立与显著性检验

对试验结果进行方差分析,分析结果如表 4 所示。

表 4 方差分析
Tab.4 Variance analysis

评价 指标	方差 来源	平方 和	自由 度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>	显著 性
合格率	模型	155.82	9	17.31	23.71	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₁	1.04	1	1.04	1.43	0.000 3	**
	<i>X</i> ₂	31.74	1	31.74	43.46	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₃	5.01	1	5.01	6.85	0.021 3	*
	<i>X</i> ₁ ²	72.36	1	72.36	99.09	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₂ ²	28.62	1	28.62	39.19	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₃ ²	13.96	1	13.96	19.11	0.000 8	**
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	3.06	1	3.06	4.19	0.061 3	
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	1.10	1	1.10	1.51	0.240 9	
	<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	0.25	1	0.25	0.34	0.569 6	
	残差	9.49	13	0.73			
	失拟	5.78	5	1.16	2.48	0.121 2	
	误差	3.72	8	0.46			
重播率	总和	165.31	22				
	模型	108.43	9	12.05	24.65	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₁	29.16	1	29.16	59.67	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₂	2.44	1	2.44	4.98	0.003 8	**
	<i>X</i> ₃	10.89	1	10.89	22.28	0.000 4	**
	<i>X</i> ₁ ²	47.36	1	47.36	96.91	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₂ ²	5.36	1	5.36	10.98	0.005 6	**
	<i>X</i> ₃ ²	5.59	1	5.59	11.45	0.004 9	**
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	0.028	1	0.028	0.056	0.815 8	
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	8.10	1	8.10	16.57	0.001 3	**
	<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	1.013	1	1.013	2.072	0.964 4	
	残差	6.35	13	0.49			
	失拟	4.72	5	0.94	4.62	0.280	
	误差	1.63	8	0.20			
漏播率	总和	114.78	22				
	模型	114.82	9	12.76	35.15	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₁	41.25	1	41.25	113.64	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₂	51.76	1	51.76	142.61	<0.000 1	**
	<i>X</i> ₃	1.13	1	1.13	3.11	0.021 3	*
	<i>X</i> ₁ ²	2.64	1	2.64	32.22	0.018 3	*
	<i>X</i> ₂ ²	9.20	1	9.20	24.11	0.000 2	**
	<i>X</i> ₃ ²	1.88	1	1.88	2.44	0.040 5	*
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	3.67	1	3.67	10.12	0.007 2	**
	<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	3.23	1	3.23	8.89	0.010 6	*
	<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	0.22	1	0.22	0.60	0.452 4	
	残差	4.72	13	0.36			
	失拟	1.83	5	0.37	1.02	0.467 3	
	误差	2.89	8	0.36			
	总和	119.54	22				

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

(1) 合格率回归模型

根据表 4 可知,在显著水平 $\alpha=0.05$ 的条件下,

播种合格率的二次回归模型 $P<0.01$, 表现为极显著,回归方程的决定系数 R^2 为 0.942 6,说明回归方程的预测值与通过对试验结果分析所得到的实际值拟合度较高。其中 X_1X_2 、 X_1X_3 与 X_2X_3 的 P 值都大于 0.05,其交互作用对合格率影响不显著,将这 3 项剔除后得到的回归方程为

$$Y_1 = -0.77 + 114.79X_1 + 22.23X_2 + 0.96X_3 - 53.35X_1^2 - 3.73X_2^2 - 0.03X_3^2 \quad (16)$$

通过对式(16)回归系数的检验得出,影响合格率的_{因素}主次顺序为吸孔直径、真空度、型孔轮转速。

(2) 重播率回归模型

根据表 4 可知,在显著水平 $\alpha=0.05$ 的条件下,重播率的二次回归模型 $P<0.01$,表现为极显著,回归方程的决定系数 R^2 为 0.944 6,说明回归方程的预测值与通过对试验结果分析所得到的实际值拟合度较高。其中 X_1X_2 与 X_2X_3 的 P 值大于 0.05,其交互作用对重播率影响不显著,将这 2 项剔除后得到的回归方程为

$$Y_2 = 42.31 - 61.03X_1 - 8.35X_2 + 0.02X_3 - 0.84X_1X_3 + 43.16X_1^2 + 1.61X_2^2 + 0.02X_3^2 \quad (17)$$

通过对式(17)回归系数的检验得出,影响重播率的_{因素}主次顺序为吸孔直径、真空度、型孔轮转速。

(3) 漏播率回归模型

根据表 4 可知,在显著水平 $\alpha=0.05$ 的条件下,漏播率的二次回归模型 $P<0.01$,表现为极显著,回归方程的决定系数 R^2 为 0.960 5,说明回归方程的预测值与通过对试验结果分析所得到的实际值拟合度较高。其中 X_2X_3 的 P 值大于 0.05,其交互作用对漏播率影响不显著,将这项剔除后得到的回归方程为

$$Y_3 = 58.46 - 53.76X_1 - 13.89X_2 - 0.98X_3 + 5.65X_1X_2 + 0.53X_1X_3 + 10.19X_1^2 + 2.11X_2^2 + 9.55X_3^2 \quad (18)$$

通过对式(18)回归系数的检验得出,影响漏播率的_{因素}主次顺序为吸孔直径、真空度、型孔轮转速。

4.6 各因素对合格率的影响分析

因为合格率是排种器播种性能的重要评价指标,所以本文重点分析各因素的交互作用对合格率的影响,响应曲面如图 15 所示。

(1) 吸孔直径和真空度的交互作用

图 15a 为当型孔轮转速为 20 r/min 时,吸孔直径和真空度的交互作用对合格率的影响。由图可知,固定吸孔直径不变,随着真空度的增大,合格率先逐渐升高,然后逐渐降低。固定真空度不变,随着

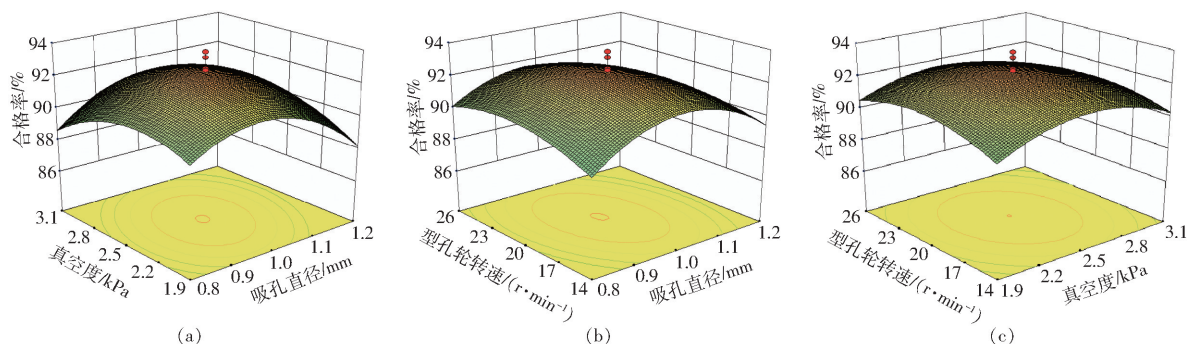


图 15 交互作用对合格率影响的响应曲面

Fig. 15 Influence of interactive factors on eligibility index

吸孔直径的增大,合格率逐渐升高,到达最高点后,逐渐降低。在吸孔直径为 0.9 ~ 1.1 mm,真空度为 2.2 ~ 2.5 kPa 时,合格率最高。

(2) 吸孔直径和型孔轮转速的交互作用

图 15b 为真空度为 2.5 kPa 时,吸孔直径和型孔轮转速的交互作用对合格率的影响。由图可知,固定吸孔直径不变,随着型孔轮转速的增大,合格率先逐渐升高,然后逐渐降低。固定型孔轮转速不变,随着吸孔直径的增大,合格率逐渐升高,到达最高点后,逐渐降低。在吸孔直径为 0.9 ~ 1.1 mm,型孔轮转速为 20 ~ 23 r/min 时,合格率最高。

(3) 真空度和型孔轮转速的交互作用

图 15c 为吸孔直径为 1 mm 时,真空度和型孔轮转速的交互作用对合格率的影响。由图可知,固定真空度不变,随着型孔轮转速的增大,合格率先逐渐升高,然后逐渐降低。固定型孔轮转速不变,随着真空度的增大,合格率逐渐升高,到达最高点后,逐渐降低。在真空度为 2.2 ~ 2.5 kPa,型孔轮转速为 20 ~ 23 r/min 时,合格率最高。

4.7 参数优化

为了获得最佳参数组合,采用 Design-Expert 8.0.6 软件数据优化模块,需要设置边界条件并建立数学模型,通过分析得到数学模型

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \min Y_3 \\ 0.6 \text{ mm} \leq X_1 \leq 1.4 \text{ mm} \\ 1.5 \text{ kPa} \leq X_2 \leq 3.5 \text{ kPa} \\ 10 \text{ r/min} \leq X_3 \leq 30 \text{ r/min} \\ 0 \leq Y_1(X_1, X_2, X_3) \leq 1 \\ 0 \leq Y_2(X_1, X_2, X_3) \leq 1 \\ 0 \leq Y_3(X_1, X_2, X_3) \leq 1 \end{cases} \quad (19)$$

利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化模块完成各参数优化,当吸孔直径 1.04 mm、真空度 2.10 kPa、型孔轮转速 22.46 r/min 时,作业性能最

好。此时合格率 93.14%、重播率 3.48%、漏播率为 3.38%。

4.8 验证试验

为了验证优化结果的可信度,在其它条件不变情况下,选取吸孔直径 1 mm、真空度 2.10 kPa、型孔轮转速 22.5 r/min 进行 5 次重复试验,计算其试验结果平均值作为最终试验结果,所得到的实际结果为合格率 92.66%、重播率 3.02%、漏播率 4.32%,实际结果与优化结果差异较小,优化结果准确可信。

5 田间试验

为检验正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器的田间实际播种性能,将排种器安装在 2BQS-2 型小籽粒精量播种机上,采用迈赛弗格森 1204 型拖拉机为牵引动力,在黑龙江八一农垦大学试验田进行试验。

为了使土壤能够满足谷子种植需求,试验前使用旋耕机对田地进行了旋耕,使土壤细碎平整。平均耕深 80 mm,耕深稳定性系数 90.36%,土壤平均坚实度为 408.4 kPa。试验时,参照台架试验的最优参数组合,选取吸孔直径为 1 mm,真空度设置为 2.1 kPa,播种机前进速度设置为 4.5 km/h,对应的型孔轮转速为 22.5 r/min。将机组匀速前进的 50 m 作为取样长度,统计每穴内的种子粒数,每组试验重复 3 次,计算平均值作为最终结果。田间试验结果为:合格率 88.2%,重播率 4.9%,漏播率 6.9%。

田间试验结果与室内台架试验结果有所差异,原因可能为:由于谷子种子较轻,田间播种作业时机组前进会产生振动,对充种的粒数和投种的轨迹会有一定的影响;风机转速不稳定,致使负压室内真空度和投种气嘴内正压产生波动,影响充种、投种和清出吸孔内杂质的效果,降低了播种合格率。

6 结论

(1) 设计了正负气压-型孔轮组合式谷子穴播

排种器,采用负压辅助充种、正压强制投种方式,有效解决了谷子穴播存在的堵孔、排种均匀性差、排种盘高转速时充种率低的问题。

(2)单因素试验表明,当型孔轮转速较高时,有负压条件下的充种效果明显高于无负压条件下的充种效果,最优型孔形状为圆柱锥形组合孔。

(3)多因素试验及分析表明,影响合格率、重播率、漏播率的因素主次顺序均为吸孔直径、真空度、

型孔轮转速。最佳工作参数组合为:吸孔直径 1.04 mm、型孔轮转速 22.46 r/min、真空度 2.10 kPa,在此条件下,合格率 93.14%,重播率 3.48%,漏播率 3.38%。实际结果与优化值差异较小,优化值准确可靠。

(4)田间试验表明,正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器的播种性能满足谷子穴播农艺要求,合格率为 88.2%,重播率为 4.9%,漏播率为 6.9%。

参 考 文 献

- [1] YU J J, LIAO Y T, CONG J L, et al. Simulation analysis and match experiment on negative and positive pressures of pneumatic precision metering device for rapeseed [J]. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 2014, 7(3): 1-12.
- [2] 侯华铭, 崔清亮, 张燕青, 等. 2BZ-2 型谷子精少量播种机的研制[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(13): 16-22.
HOU Huaming, CUI Qingliang, ZHANG Yanqing, et al. Development of 2BZ-2 type fine and small-amount seeder for foxtail millet[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(13): 16-22. (in Chinese)
- [3] 王芳, 吕冰, 王洪明, 等. 气吸式谷子排种装置吸种孔的结构设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(8): 30-36.
WANG Fang, LÜ Bing, WANG Hongming, et al. Structural design and test of seed-suction hole of air-sucking seed-metering device for millet[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(8): 30-36. (in Chinese)
- [4] 裴进灵. 带清种槽窝眼轮式谷子排种器设计与试验[J]. *农业机械*, 2014, 20(3): 112-115.
PEI Jinling. Design and test of seed metering device with seed clearing grooves and holes[J]. *Agricultural Machinery*, 2014, 20(3): 112-115. (in Chinese)
- [5] 崔清亮, 侯华铭, 郑德聪, 等. 倾斜圆盘式谷子精少量排种器的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 17-23.
CUI Qingliang, HOU Huaming, ZHENG Decong, et al. Design and test of tilt disc-type fine and small-amount seed metering device for foxtail millet[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(12): 17-23. (in Chinese)
- [6] 王计新. 斜面重力清种型孔式小籽粒(谷子)精少量排种器设计研究[J]. *当代农机*, 2020, 35(3): 61-64.
WANG Jixin. Design and study of a small quantity seed discharge device for small grain (millet) with slant gravity seed clearing type hole[J]. *Contemporary Agricultural Machinery*, 2020, 35(3): 61-64. (in Chinese)
- [7] 王英, 刘景辉, 王俊英, 等. 全覆膜微沟穴播下不同谷子品种产量和品质比较[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(4): 4-9.
WANG Ying, LIU Jinghui, WU Junying, et al. The effect of the micro groove dibbling yield and quality under different millet varieties comparison[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2020, 41(4): 4-9. (in Chinese)
- [8] 孙静鑫, 杨作梅, 郭玉明, 等. 谷子籽粒压缩力学性质及损伤裂纹形成机理[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(18): 306-314.
SUN Jingxin, YANG Zuomei, GUO Yuming, et al. Compression mechanical properties and crack formation law of millet grain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(18): 306-314. (in Chinese)
- [9] 杨作梅, 孙静鑫, 郭玉明. 不同含水率对谷子籽粒压缩力学性质与摩擦特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 253-260.
YANG Zuomei, SUN Jingxin, GUO Yuming. Effect of moisture content on compression mechanical properties and frictional characteristics of millet grain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(23): 253-260. (in Chinese)
- [10] 张燕青, 崔清亮, 王丰, 等. 谷子精少量流体排种装置的设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(12): 20-27.
ZHANG Yanqing, CUI Qingliang, WANG Feng, et al. Design and test of fluid and small-amount seed metering device for foxtail millet[J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(12): 20-27. (in Chinese)
- [11] 殷德峰. 气力窝眼轮式小粒径种子排种器设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
YIN Defeng. Design and experimental study on pneumatic cell wheel seedmeter for small size seeds[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [12] 李明, 刘晓辉, 廖宜涛, 等. 气力滚筒式油菜精量集排器[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(12): 68-73.
LI Ming, LIU Xiaohui, LIAO Yitao, et al. Pneumatic cylinder-type centralized precision metering device for rapeseed[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(12): 68-73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131212&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.012. (in Chinese)
- [13] 张青松, 余琦, 王磊, 等. 油菜勺式精量穴播排种器设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2020, 51(6): 47-54, 64.
ZHANG Qingsong, YU Qi, WANG Lei, et al. Design and experiment of scoop-type precision hole metering device for rapeseed[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6): 47-54, 64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200605&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.005. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] 程修沛,卢彩云,孟志军,等.气吸型孔组合式小麦精密排种器设计与参数优化[J].农业工程学报,2018,34(24):1-9.
CHENG Xiupei,LU Caiyun,MENG Zhijun, et al. Design and parameter optimization on wheat precision seed meter with combination of pneumatic and type hole[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(24):1-9. (in Chinese)
- [17] 万霖,王洪超,车刚.嵌入旋转气腔式水稻穴直播排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(11):74-84.
WAN Lin,WANG Hongchao,CHE Gang. Design and test of rice hill-drop seed metering device embedded with rotating air cavity[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(11):74-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191108&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.008. (in Chinese)
- [18] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(1):75-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190108&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.008. (in Chinese)
- [19] 李玉环,杨丽,张东兴,等.豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(7):61-73.
LIN Yuhuan,YANG Li,ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):61-73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190706&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.006. (in Chinese)
- [20] 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册(上册)[M].北京:中国工业出版社,1971.
- [21] 尹文庆,赵璐,李骅,等.气力槽轮组合式蔬菜精密排种器吸嘴型孔设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(4):68-76,136.
YIN Wenqing,ZHAO Lu,LI Hua, et al. Design and experiment on suction nozzle type hole of pneumatic-sheave combined vegetable precision metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4):68-76,136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190408&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.008. (in Chinese)
- [22] 边胤,马永康,张振国.往复式排种器用于谷子精密播种机的初探[J].农业工程学报,2007,23(2):122-127.
BIAN Yin,MA Yongkang,ZHANG Zhenguo. Reciprocating feeder applied to precision seed-grain sowing machines[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(2):122-127. (in Chinese)
- [23] 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/OL].农业机械学报,2020,51(7):60-71.
LAI Qinghui,JIA Guangxin,SU Wei, et al. Design and test of ginseng precision special-hole type seed-metering device with convex hull[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(7):60-71. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200708&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.008. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] 张开兴,李金凤,宋正河,等.变粒径双圆盘气吸式精量排种器优化设计与试验[J/OL].农业机械学报,2019,50(6):52-63.
ZHANG Kaixing,LI Jinfeng,SONG Zhenghe, et al. Optimum design and test of variable diameter double disc air suction precision seeder[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(6):52-63. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190606&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.006. (in Chinese)
- [26] 张昆.气吸滚筒式玉米植钵盘精密播种装置机理与参数研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2018.
ZHANG Kun. Study on mechanism and parameters of air suction cylinder type precise seeding device for maize with plant material bowl-tray[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University,2018. (in Chinese)
- [27] 李云雁.试验设计与数据处理[M].北京:化学工业出版社,2008.