

林翩, 廖庆喜, 王磊, 等. 芝麻精量穴播排种器吸种性能分析与试验[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 195-206.
DOI: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.05.024

芝麻精量穴播排种器吸种性能分析与试验

林翩, 廖庆喜, 王磊, 王宝山, 刘海

华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070

摘要 针对芝麻人工种植效率低、出苗后间苗定苗费工费时且劳动强度大、缺乏适用的精量穴播排种器等生产实际问题, 采用负压吸种、正压投种的正负气压组合排种原理, 构建了排种器吸种过程临界负压模型, 分析了种子吸附的不同姿态及其与型孔接触面积的关系, 采用多目标优化方法, 得到了型孔吸附1~4粒种子的临界负压, 确定实现芝麻精量穴播的较优型孔直径范围为0.8~1.1 mm。吸种运移状态图像拍摄试验结果表明: 芝麻不同吸附姿态及概率为横卧: 侧卧: 直立 $\approx 3.5: 1: 1$, 排种器不同吸种数目所需负压变化规律与临界负压模型一致。通过基于响应面优化试验考察排种盘型孔直径、排种轴转速和气室负压真空度对穴粒数合格率、漏播率和重播率的影响规律, 试验结果表明: 型孔直径为1.0 mm、气室负压为-800 Pa、排种轴转速为8.66 r/min时, 穴粒数合格率为96.04%、漏播率为0.21%、重播率为3.75%, 满足芝麻种植农艺要求。

关键词 芝麻; 精量穴播; 排种器; 临界负压; 吸种数目; 气吸式排种器; 正负气压组合

中图分类号 S 233.2⁺3 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)05-0195-12

芝麻是中国生产高品质食用油的重要油料作物, 也是种植广泛的特色农产品, 近年来需求量持续扩大, 但受机械化种植水平低下影响, 生产成本低, 芝麻种植规模难以扩大^[1]。芝麻种子属于小粒径异形种子, 质量轻, 易破损, 机械化精量播种难度大, 目前主要采用人工撒播、点播和机械条播, 存在用种量大, 排种不均匀等问题。以传统人工点播为例, 通常每穴播种5~8粒^[2], 后期人工间苗定苗, 每穴留苗1~2株, 工作量大, 成苗率低。芝麻机械化精量穴播可实现每穴播种1~3粒^[3-4], 播种精度高, 田间分布均匀, 有利于提高芝麻产量。

气吸式排种器利用负压吸附种子, 具有种子形状适应性强、伤种率低、排种量精确可控等特点^[5-6]。张静等^[7]构建气力式排种器型孔吸附边界模型, 确定种子形状和几何尺寸对排种器型孔吸附性能影响较大。廖宜涛等^[8]开展吸种运移状态图像拍摄试验, 发现小粒径种子对吸种负压变化敏感, 在工作负压较高情况下型孔会吸附4~6粒种子。张国忠等^[9]分析水稻被吸附姿态概率, 得到型孔处吸附力由种子形态、工作负压和型孔结构决定。研究^[10-11]

表明, 吸附力小, 种子流动性差, 容易发生漏吸; 吸附力过大容易导致重播指数增大。Nai等^[12]开展气力式排种器吸室真空度、吸孔直径等因素对排种性能影响试验, 建立参数之间的数学模型, 优化得到适合异形种子的最佳参数组合。综上, 国内外学者针对气吸式排种器在小粒径种子适应性方面展开了大量研究, 吸种数目易受气室负压影响^[13-15], 对于芝麻等小粒径异形种子, 种子形状也会对排种器吸种性能造成影响, 排种器精量穴播有待进一步研究。

针对芝麻种植人工效率低, 出苗后间苗工作量大, 缺乏适用的芝麻精量穴播要求等实际问题, 本研究基于负压吸种、正压投种的排种原理^[16], 构建排种器吸种过程临界负压模型, 确定型孔吸附芝麻临界负压值及精量穴播的型孔直径较优范围, 开展单因素试验分析排种过程因素影响规律, 结合响应面试验优化分析各因素交互作用, 确定最佳参数组合, 以期为芝麻精量穴播排种器的结构改进提供参考。

收稿日期: 2021-04-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875229)

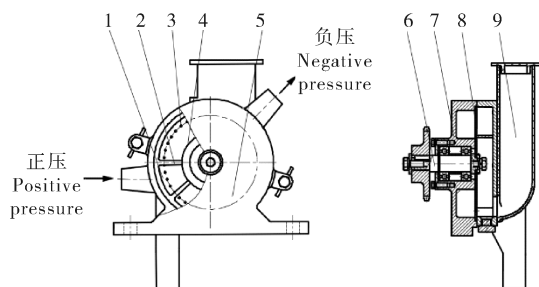
林翩, E-mail: 15327320002@163.com

通信作者: 廖庆喜, E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

1 材料与方法

1.1 芝麻精量穴播排种器结构及工作原理

芝麻精量穴播排种器基于负压气流吸种、正压气流投种的工作原理,主要由气室、排种盘、罩壳等零部件组成(图1)。气室通过隔板分为正压区与负压区,芝麻精量穴播排种器工作过程分为充种、吸种、携种和投种4个环节。排种器工作时,种箱中的芝麻种子由进种口进入排种器充种腔形成堆积,利用负压区气流在排种盘型孔内外侧形成的压差,种子在吸种区被吸附在型孔上随排种盘转动,脱离种群,型孔吸附种子数目及姿态具有随机性。种子运移过程中位移、速度、受载等随机变量的变化,少部分种子吸附不稳定,在自身重力作用下滑落至充种区。当型孔吸附的种子随排种盘转至正压区后,在气流及自身重力作用下从型孔上脱落,进入导种管,实现排种过程。其中,排种器的吸种环节是保证播种质量的核心。



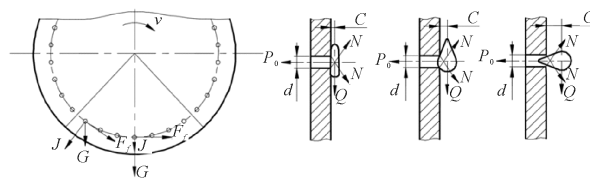
1.正压气室 Positive pressure chamber; 2.气室隔板 Air chamber baffle; 3.型孔 Hole; 4.负压气室 Negative pressure chamber; 5.罩壳 Seed metering device shell; 6.排种轴 Sowing axle; 7.气室壳体 Air chamber; 8.排种盘 Planter plate; 9.种箱 Seed box.

图1 排种器结构

Fig.1 Structure of seed metering device

1.2 吸种环节种子力学分析

吸种环节中种子受到气流场、种群作用力和重力的交互作用^[17],气流场中压力梯度力是型孔吸附种子的主要作用力^[18]。排种器负压(相对大气压)大小影响种子吸附性能,根据芝麻种子与型孔接触情况可将吸种姿态分为3种,即横卧、侧卧和直立姿态^[19](图2)。为保证种子能被顺利吸附,应满足受力平衡条件^[20]:



J 为芝麻被排种盘带动旋转所引起的离心力, $N;G$ 为种子重力, $N;N$ 为型孔对芝麻的反力, $N;P_0$ 为型孔吸力, $N;F_f$ 为芝麻的内摩擦力, $N;Q$ 为 G, J, F_f 的合力, $N;C$ 为芝麻种子重心与排种盘的垂直距离,mm; d 为型孔直径,mm; v 为排种盘吸种孔中心处的线速度,m/s。 J is the centrifugal force caused by the rotation of sesame driven by the seed metering plate, $N;G$ is the seed gravity, $N;N$ is the reaction force of the shaped hole on sesame, $N;P_0$ is the suction force of the shaped hole, $N;F_f$ is the internal friction force of sesame, $N;Q$ is the resultant force of G, J and F_f , $N;C$ is the vertical distance between the center of gravity of sesame seed and the seed metering plate,mm; d is the diameter of the shaped hole,mm; v is the linear velocity at the center of the seed suction hole of the seed metering plate,m/s.

图2 吸种环节芝麻力学分析图

Fig.2 Mechanical analysis of sesame seed suction

$$P_0 \frac{d}{2} = QC \quad (1)$$

得到负压真空度为:

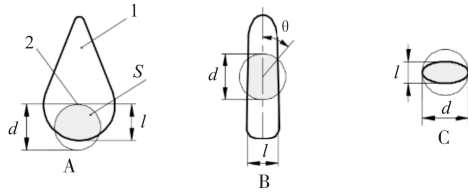
$$H = -\frac{2K_1K_2mgC}{Sd} \left(1 + \lambda + \frac{v^2}{gr}\right) \quad (2)$$

式(1)~(2)中, H 为气吸室所需负压,Pa; C 为种子重心与排种盘间距,mm; m 为单粒种子的质量,kg; S 为种子与吸种孔的接触面积,mm²; d 为型孔直径,mm; r 为排种盘吸种孔处的转动半径,m; g 为重力加速度,m/s²; λ 为种子的摩擦阻力综合系数; K_1 为吸种可靠性系数; K_2 为工作稳定可靠性系数。由式(2)可知,种子被吸附的负压 H 受种子重心与排种盘间距 C 以及种子与吸种孔接触面积 S 、型孔直径 d 等因素的影响,负压 H 绝对值与间距 C 成正相关关系,与接触面积 S 、型孔直径 d 成负相关。对于类球形种子,种子重心与排种盘间距 C 以及种子与吸种孔接触面积 S 值仅与种子尺寸有关,而对于异形种子,还与种子被吸附状态有关,定义吸种状态影响系数 $K=C/S$,得到气室负压真空度为:

$$H = -\frac{2K_1K_2mg}{d} \left(1 + \lambda + \frac{v^2}{gr}\right) \cdot K \quad (3)$$

为建立芝麻吸附姿态模型,种子重心与排种盘间距 C 近似为 $c/2, b/2$ 和 $a/2$,简化种子与吸种孔接触面积 S 近似为种子与吸种孔交界面处截面积,

3种姿态下接触面积示意图如图3所示。种子覆盖型孔区域(沿型孔直径方向)的长度 l 与型孔直径的比值^[21]为 $k=l/d$ ($0 < k \leq 1$)。



A:横卧 Horizontal; B:侧卧 Lateral; C:直立 Vertical. 1.种子 Seed; 2.型孔 Hole.

图3 芝麻被吸附占据型孔面积示意图

Fig.3 Schematics of sesame adsorption occupation holes

不同姿态种子吸种状态影响系数为：

$$\begin{cases} K_h = \frac{2c}{\pi k d^2} \\ K_l = \frac{b}{d^2 (\sin^{-1} k + k \sqrt{1-k^2})} \\ K_v = \frac{2a}{\pi k d^2} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, K_h 为种子横卧姿态时吸种状态影响参数值, mm^{-1} ; K_l 为种子侧卧姿态时吸种状态影响参数值, mm^{-1} ; K_v 为种子直立姿态时吸种状态影响参数值, mm^{-1} 。 c 为种子高度, mm ; b 为种子宽度, mm ; a 为种子长度, mm 。由式(4)可知,当单粒种子以横卧姿态被吸附,种子重心离排种盘最近,与型孔接触面积最大,参数 k 取最大值为1,吸种状态影响参数 K 最小,理论吸附所需负压绝对值最小;直立姿态种子重心较远,接触面积较小,吸附所需负压绝对值理论值较大。当气室负压绝对值处于横卧姿态与直立姿态临界负压绝对值之间时,型孔能吸附种群中横卧姿态的种子,如果型孔吸附范围内均为直立姿态的种子,则会超出型孔吸种能力,出现漏吸现象。为降低芝麻排种器漏播率,气室负压绝对值必须高于3种姿态吸附所需负压绝对值中的最大值。

芝麻被吸附姿态影响型孔的实际吸附边界^[22-23],型孔吸附边界中出现多粒种子时,气室负压绝对值需高于多粒种子各姿态组合所需负压绝对值最大值,才能实现多粒种子稳定吸附。

1.3 吸种负压临界值分析

选择湖北地区常见的芝麻品种(航白芝)为研究对象,随机选取种子50粒,利用游标卡尺(精度0.02 mm)对芝麻三轴尺寸(长度 a 、宽度 b 、高度 c)

进行测量,由电子分析天平(精度0.001 g)测量芝麻千粒质量,得到芝麻种子长、宽、高分别为 3.12 ± 0.18 、 1.83 ± 0.13 、 0.90 ± 0.09 mm,千粒质量为3.09 g。根据农业机械设计手册可知,型孔直径 d 与种子平均宽度 b 满足下式关系:

$$d = (0.64 \sim 0.66) b \quad (5)$$

其中,种子宽度 b 为球形种子的平均直径,芝麻种子形状并非球形,种子宽度 b 分别取芝麻三轴尺寸,得到型孔直径分别为 $1.88 \sim 2.18$ mm、 $1.09 \sim 1.29$ mm、 $0.52 \sim 0.65$ mm。若型孔直径取 $1.88 \sim 2.18$ mm,高于芝麻宽度和高度,立吸姿态种子会进入气室,因此取型孔直径为 $0.60 \sim 1.30$ mm,分析时取孔径增量为0.1 mm(表1)。

吸附单粒种子时,假定3种姿态被吸附时与型孔接触面积均为该种姿态下的最大接触面积, $K_1 = K_2 = 1$, $m = 3.09$, $g = 9.8$, $d = 0.6 \sim 1.3$, $c = 0.9$, $b = 1.83$, $a = 3.12$, $k = 1$ 。由式(3)、(4)计算可得不同型孔直径下各姿态所需最小负压绝对值。

表1 不同型孔直径下芝麻种子3种姿态吸附负压

Table 1 Negative pressure of seed adsorption in three postures under different pore diameter Pa

型孔直径/mm Hole diameter	横卧姿态 HP	侧卧姿态 LP	直立姿态 VP
0.6	-984	-2 001	-2 275
0.7	-620	-1 260	-1 671
0.8	-415	-844	-1 279
0.9	-292	-593	-1 011
1.0	-213	-449	-819
1.1	-160	-357	-677
1.2	-123	-292	-569
1.3	-97	-245	-485

注:HP为横卧姿态 HP is horizontal position; LP为侧卧姿态 LP is lateral position; VP为直立姿态 VP is vertical posture;下同 The same as below.

吸附2粒种子时,存在6种姿态组合,分别是横卧+横卧、横卧+侧卧、横卧+直立、侧卧+侧卧、侧卧+直立、直立+直立。以种子覆盖型孔的长度 l 为设计变量,姿态组合中种子所需吸附负压绝对值的较大值最小为优化目标,利用Matlab软件进行多目标优化,其目标函数如式(6)所示:

$$\min \{H_1(l_1), H_2(l_2)\} \quad (6)$$

约束条件如式(7)所示:

$$\begin{cases} S_1 + S_2 \leq \frac{\pi d^2}{4} \\ 0 \leq l_1 \leq d \\ 0 \leq l_2 \leq d \end{cases} \quad (7)$$

式(6)~(7)中, H_1 和 H_2 分别为第 1、2 粒种子被吸附所需负压,Pa; l_1 、 l_2 分别为第 1、2 粒种子与型孔接触长度,mm; S_1 和 S_2 分别为第 1、2 粒种子与型孔接触面积,mm²。通过迭代得到不同型孔直径下 6 种吸附姿态组合所需负压绝对值最小值。

表 2 不同型孔直径下 2 粒芝麻种子吸附负压

Table 2 Negative pressure of adsorbing two seeds under different pore diameters						Pa
型孔直径/mm Hole diameter	横卧+横卧 HP+HP	横卧+侧卧 HP+LP	横卧+直立 HP+VP	侧卧+侧卧 LP+LP	侧卧+直立 LP+ VP	直立+直立 VP+ VP
0.6	-1 966	-2 982	-4 392	-3 998	-5 408	-6 817
0.7	-1 238	-1 878	-2 766	-2 518	-3 405	-4 293
0.8	-830	-1 259	-1 853	-1 687	-2 281	-2 876
0.9	-583	-884	-1 301	-1 185	-1 602	-2 020
1.0	-425	-644	-949	-864	-1 168	-1 472
1.1	-319	-484	-713	-649	-878	-1 106
1.2	-246	-372	-549	-500	-676	-852
1.3	-193	-293	-432	-393	-532	-670

随着型孔直径的增大,吸附不同姿态组合的 2 粒种子所需负压绝对值均呈现下降趋势(表 2)。比较相同直径时不同姿态组合所需负压可知,种子均以横卧姿态被吸附所需负压绝对值最小,均以直立姿态被吸附时所需负压绝对值最大。当气室负压绝对值达到 2 粒种子吸附所需负压绝对值最小值时,型孔具备吸附 2 粒横卧姿态种子的能力,2 粒种子被吸附概率增大。当气室负压绝对值持续增大,逐渐满足其他组合姿态所需吸附条件时,型孔吸附 2 粒种子概率会持续上升,直至 2 粒种子被吸附概率达到最大值。同一型孔直径下,均以横卧姿态被吸附和均以直立姿态被吸附所需临界负压绝对值构成该型孔直径可吸附 2 粒种子负压绝对值范围的上下限。

吸附 3 粒种子,存在 18 种组合姿态,均以横卧吸附姿态和均以直立姿态被吸附时所需临界负压绝对值组成该型孔直径下 3 粒种子吸附所需负压绝对值范围上下限。多目标优化得到 3 粒种子在不同型孔直径下均为横卧吸附或直立吸附时所需负压(表 3)。

表 3 不同型孔直径下 3 粒种子吸附负压

Table 3 Negative pressure of adsorbing 3 seeds under different pore diameters			Pa
型孔直径/mm Hole diameter	横卧 HP	直立 VP	
0.6	-2 950	-10 225	
0.7	-1 857	-6 439	
0.8	-1 244	-4 314	
0.9	-874	-3 030	
1.0	-637	-2 209	
1.1	-479	-1 659	
1.2	-369	-1 278	
1.3	-290	-1 005	

为实现每穴排种 1~3 粒,既要保证漏吸概率最低,也要尽量减小重吸(≥ 4 粒/穴)情况的发生。计算吸附 4 粒种子所需的最小负压绝对值,即 4 粒种子均以横卧姿态被吸附时的临界负压绝对值。控制气室负压绝对值小于该临界负压绝对值能有效降低重吸概率,提升吸种质量。4 粒横卧姿态种子在型孔直径 0.6~1.3 mm 的临界吸附负压分别为-3 933、-2 477、-1 659、-1 165、-849、-638、-492 和-387 Pa。

由图 4 可知,随型孔直径的增大,满足单粒吸附、2 粒吸附及 3 粒吸附所需负压绝对值范围及最小值均呈下降趋势;随型孔吸种数目的减少,型孔吸附种子所需负压绝对值范围减小;不同吸种数目所需负压绝对值范围存在重叠情况,导致型孔直径以及气室负压绝对值相同时吸种数目不同。

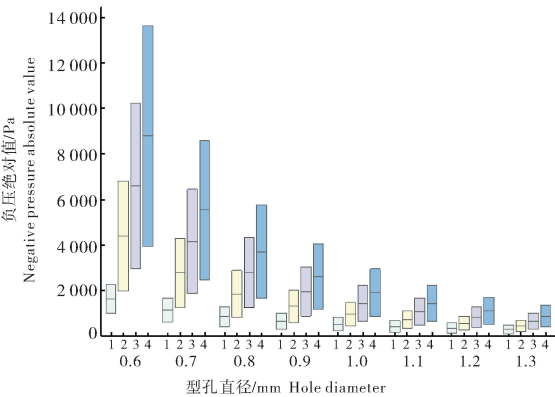


图 4 不同型孔直径下吸种临界负压绝对值
Fig.4 Critical negative pressure absolute value of seed suction under different hole diameter

种子被型孔实际吸附长度 l 受型孔吸种数目影响,型孔吸种数目较少,则每粒种子的吸附长度偏大。随吸附长度 l 增大,型孔直径增大,种子以不同姿态被吸附时所需负压绝对值降低,种子漏吸概率减小。当试验负压绝对值达到多粒种子被吸附条件,重吸概率增大,型孔吸种数目增加。吸种数目过多影响携种过程中芝麻的吸附稳定性,导致投种过程成穴性差。

为满足精量穴播吸种粒数要求,气室实际负压选择在单粒吸种所需负压绝对值的最大值与4粒吸种所需负压绝对值的最小值之间,保证漏吸发生概率最小的同时降低吸附3粒以上种子的概率。考虑负压调节范围不宜过大,芝麻精量穴播的型孔直径范围0.8~1.1 mm,气室负压大小为-1 600~-600 Pa较优。

2 结果与分析

2.1 吸种状态试验

吸种状态试验在JPS-16型排种试验台上进行,所用排种器为正负气压组合式小粒径种子精量排种器,采用数码相机拍摄排种器吸种运移状态图像(图5)。分别分析型孔直径、气室负压对吸种数目概率的影响,设置气室负压大小为-1 400 Pa、排种盘型孔直径0.6~1.3 mm、试验水平间隔0.1 mm;设置型孔直径为0.9 mm、气室负压大小为-500~-1 700 Pa、试验水平间隔300 Pa。



图5 排种性能试验台

Fig.5 Seed metering performance test device

试验用相机型号为Canon EOD 7D,拍摄参数为ISO-1600,0曝光补偿,无闪光模式,图像分辨率为1 800万像素(5 184×3 456 pixel)。每次试验后检查型孔堵塞情况,每组试验重复3次,每次连续拍摄256孔,获得拍摄图像,统计分析各型孔吸附芝麻

情况,计算不同试验条件下型孔漏吸、1粒、2粒、3粒、4粒及以上种子概率。根据试验确定芝麻种子存在横卧、侧卧和直立3种吸附姿态(图6)。试验条件为型孔直径0.9 mm、气室负压大小为-1 400 Pa,试验统计得单粒芝麻以横卧、侧卧和直立被吸附姿态概率分别为0.64、0.18和0.17,3种姿态比例近似为3.5:1:1。

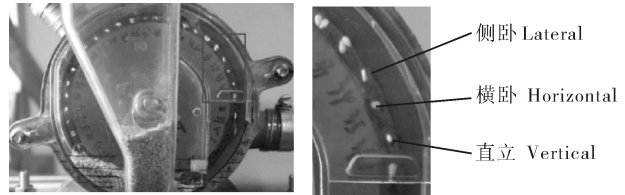
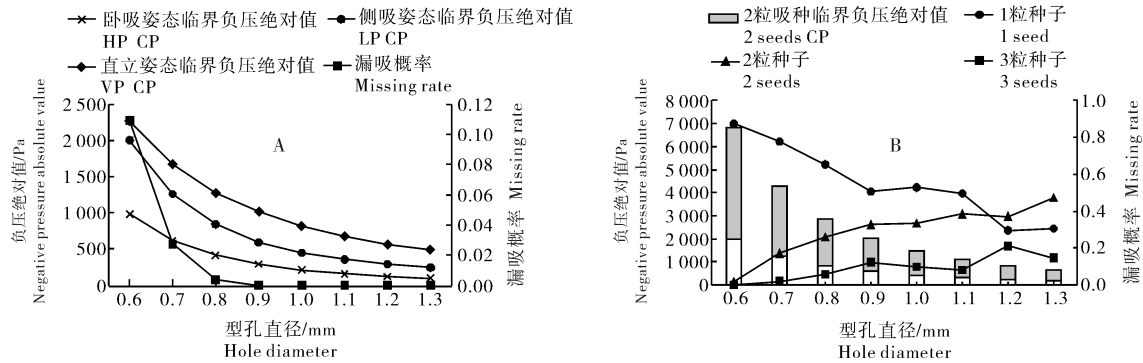


图6 芝麻吸附姿态图

Fig.6 Sesame adsorption posture diagram

试验得到排种盘型孔漏吸概率随型孔直径(0.6~1.3 mm)的变化情况如图7A所示,排种盘型孔吸种粒数概率随型孔直径的变化情况如图7B所示,随气室负压变化情况如图8所示。由图7可知,当型孔直径为0.6 mm时,试验负压绝对值(1 400 Pa)高于卧吸姿态负压绝对值,低于侧卧或直立姿态负压绝对值,试验结果表明,此时漏吸概率较高,为10.94%。随型孔直径的增大,型孔漏吸概率逐渐下降,当型孔直径高于0.8 mm后,试验负压绝对值高于3种姿态所需负压绝对值,此时型孔具备单粒种子吸附条件,无漏吸,与试验结果一致。由图7B可知,当型孔直径为0.6 mm时,试验负压绝对值(1 400 Pa)低于2粒种子吸附临界负压绝对值,型孔理论上无法吸附2粒种子,试验结果表明吸附2粒种子概率近似为0;当型孔直径为0.7 mm时,试验负压绝对值达到型孔吸附2粒种子所需负压绝对值的最小值,此时发现型孔吸附2粒种子概率明显提升,为17.19%;随型孔直径增大,型孔吸种能力增强,型孔吸附2粒种子概率不断增大。当型孔直径继续增大至1.1 mm,试验负压绝对值高于型孔吸附2粒种子6种姿态组合临界负压绝对值,型孔具备吸附2粒种子的能力,吸种概率逐渐稳定,为38.5%。当型孔直径为0.8 mm,试验负压绝对值达到3粒吸附所需临界负压绝对值,试验结果表明3粒种子被吸附概率开始增长,与理论分析结果一致。

由图8可知,随着气室负压绝对值增大,种子漏吸不断下降,单粒种子吸附概率先稳定后下降,2粒



A:漏吸概率变化图 Variation of zero-seed probability; B:吸种1~3粒概率变化图 Variation of 1-3 seed probability. CP为临界负压绝对值。下同。CP is critical negative pressure absolute value. The same as below.

图 7 不同型孔直径下吸种数目概率变化图

Fig.7 Probability variation of seed number under different hole diameters

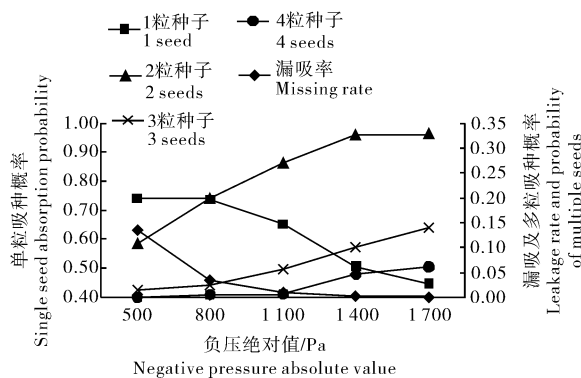


图 8 型孔吸种数目概率随气室负压变化情况

Fig.8 Variation of seed number probability with negative pressure of air chamber

种子吸附概率先升后降,3粒及以上种子吸附概率逐渐上升。1~3粒种子吸种概率均存在先增后减的趋势,负压绝对值在500~800 Pa之间时,存在某个条件使得单粒种子被吸附概率最大,在1400 Pa左右双粒吸附概率最大,负压绝对值高于1700 Pa使得3粒种子吸附概率最大。在型孔直径为0.9 mm、试验气室负压绝对值为1100 Pa时,试验负压绝对值处于单粒种子被吸附所需最大负压绝对值与4粒种子被吸附所需最小负压绝对值之间,此时漏吸概率与4粒种子被吸附概率均近似为0,与理论计算规律一致,调节气室负压能够影响型孔吸种数目,改善型孔吸种质量。

2.2 单因素试验

吸种过程理论分析及试验表明,型孔直径为0.8~1.1 mm、气室负压为-600~-1600 Pa、排种器吸种性能较优。排种轴转速为:

$$n_p = \frac{1000 v_m}{60nM} \quad (8)$$

式(8)中, n_p 为排种轴转速,r/min; v_m 为播种机前进速度,km/h; n 为排种盘型孔数目,个; M 为播种穴距,m。根据播种机配套拖拉机东方红 LX854 前进速度为1.64~11.45 km/h,计算得排种轴转速为4.50~31.81 r/min,排种轴转速范围取5~40 r/min。

以排种器穴粒数合格率(1~3粒/穴)、漏播率和重播率为性能指标,以型孔直径 x_1 、排种轴转速 x_2 、气室负压 x_3 、种层高度 x_4 为影响因素,开展单因素试验^[22]。型孔直径0.6~1.3 mm,试验水平间隔0.1 mm;排种轴转速5~40 r/min,试验水平间隔5 r/min;气室负压-500~-1700 Pa,试验水平间隔300 Pa;种层高度7~47 mm,试验水平间隔5 mm,试验卸种正压设置为200 Pa。每次试验重复3次取平均值,得到单因素多个水平之间的排种器排种效果(图9)。由图9A可知,当种层高度过低,型孔与种子接触不完全时,漏播率较高,穴粒数合格率偏低,当型孔与种子能够充分接触,种层高度变化对穴粒数合格率、漏播率和重播率影响并无明显规律。由图9B-D可知,随排种盘型孔直径增大、排种轴转速减小、气室负压绝对值增大,型孔穴粒数合格率先增后减。从整体趋势看,漏播率随转速减小、型孔直径增大、负压绝对值增大呈下降趋势,漏播率降为0后保持不变,重播率则不断上升,但重播率与三因素并非单调函数关系,说明重播率存在随机性波动。排种轴转速、排种盘型孔直径与气室负压三因素对排种性能影响显著。由排种性能指标均值可知,当排种轴转速在5~15 r/min、型孔直径在0.9~1.1 mm、气室负压在-800~-1400 Pa范围时,排种器吸种效果较优。

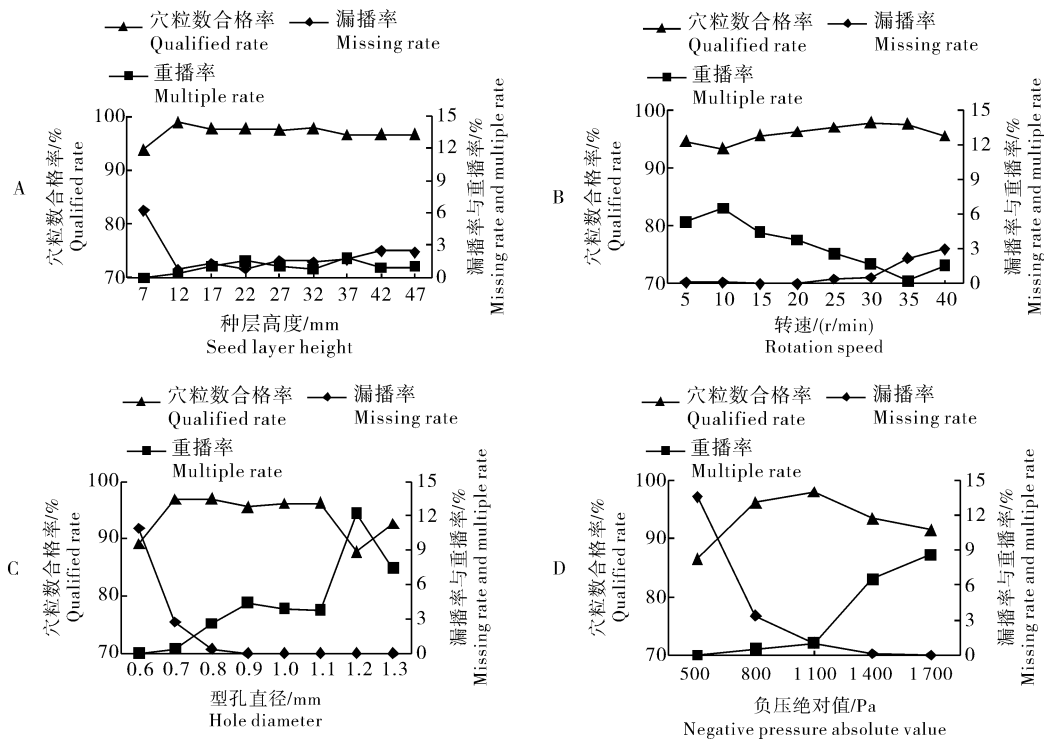


图 9 排种盘型孔直径、排种轴转速、负压和种层高度与试验评价指标关系曲线

Fig.9 Curve of relationship between seed metering performance index and diameter,rotational speed, negative pressure and seed layer height of seed tray

2.3 基于 BBD 响应面的性能试验 漏播率 Y_2 和重播率 Y_3 为试验指标,开展响应面 BBD^[23] (Box-Behnken design) 试验(表 4),各试验及确定最佳参数组合,选取排种盘型孔直径、气室负重复 3 次,计算穴粒数合格率、漏播率和重播率压和排种轴转速为试验因素,以穴粒数合格率 Y_1 、(表 5)。试验结果方差分析见表 6。

表 4 Box-Behnken 试验因素编码表
Table 4 Experiment factor code table

编码 Code	型孔直径/mm X_1 Hole diameter	负压/Pa X_2 Vacuum pressure	排种轴转速/(r/min) X_3 Rotation speed of seed metering device
−1	0.9	−800	5
0	1.0	−1 100	10
1	1.1	−1 400	15

表 5 Box-Behnken 试验方案和结果
Table 5 Test design scheme and results

编号 No.	X_1	X_2	X_3	穴粒数合格率/% Qualified rate Y_1	漏播率/% Missing rate Y_2	重播率/% Multiple rate Y_3
1	−1	−1	0	97.87	1.60	0.53
2	1	−1	0	96.20	0.63	3.17
3	−1	1	0	96.27	0.43	3.30
4	1	1	0	90.07	0.00	9.93
5	−1	0	−1	97.53	1.70	0.77
6	1	0	−1	91.60	0.53	7.87
7	−1	0	1	93.10	4.07	2.83
8	1	0	1	91.40	2.43	6.17
9	0	−1	−1	96.17	0.40	3.43

续表 5 Continued Table 5

编号 No.	X_1	X_2	X_3	穴粒数合格率/% Qualified rate Y_1	漏播率/% Missing rate Y_2	重播率/% Multiple rate Y_3
10	0	1	-1	91.63	0.00	8.37
11	0	-1	1	94.53	2.10	3.37
12	0	1	1	86.53	2.10	11.37
13	0	0	0	94.70	0.93	4.37
14	0	0	0	95.63	0.00	4.37
15	0	0	0	95.80	0.87	3.33
16	0	0	0	94.90	0.47	4.63
17	0	0	0	95.93	0.47	3.60

表 6 Box-Behnken 试验方差分析

Table 6 Variance analysis result of Box-Behnken test

方差来源 Variation source	穴粒数合格率 Qualified rate Y_1				漏播率 Missing rate Y_2				重播率 Multiple rate Y_3			
	SS	DF	F	P	SS	DF	F	P	SS	DF	F	P
模型 Model	138.62	9	23.02	0.000 2**	18.10	9	13.01	0.001 4**	140.96	9	29.61	<0.000 1**
X_1	30.03	1	44.89	0.000 3**	2.21	1	14.28	0.006 9**	48.53	1	91.73	<0.000 1**
X_2	51.36	1	76.78	<0.000 1**	0.60	1	3.91	0.088 4	63.11	1	119.30	<0.000 1**
X_3	16.16	1	24.16	0.001 7**	8.14	1	52.65	0.000 2**	1.36	1	2.57	0.152 7
$X_1 X_2$	5.14	1	7.68	0.027 6*	0.071	1	0.46	0.519 4	4.00	1	7.56	0.028 5*
$X_1 X_3$	4.48	1	6.70	0.036 0*	0.054	1	0.35	0.574 3	3.55	1	6.72	0.035 9*
$X_2 X_3$	3.00	1	4.48	0.072 0	0.04	1	0.26	0.626 6	2.35	1	4.43	0.073 2
X_1^2	0.85	1	1.27	0.297 3	1.40	1	9.04	0.019 7*	4.42	1	8.36	0.023 3*
X_2^2	2.32	1	3.47	0.104 9	0.88	1	5.67	0.048 8*	6.05	1	11.43	0.011 7*
X_3^2	24.94	1	37.28	0.000 5**	4.73	1	30.57	0.000 9**	7.95	1	15.03	0.006 1**
残差 Residual	4.68	7			1.08	7			3.70	7		
失拟 Lack of fit	3.44	3	3.71	0.119 0	0.52	3	1.23	0.409 0	2.45	3	2.60	0.189 6
误差 Error	1.24	4			0.56	4			1.26	4		
总合 Total	143.30	16			19.18	16			144.67	16		

注 Note:SS:平方和 Sum of squares; DF:自由度 Degree freedom; F : F 值 F values; P : P 值 P values; ** 表示影响极显著 ($P<0.01$); * 表示影响显著 ($P<0.05$)。* * is important significant ($P<0.01$), * is significant ($P<0.05$).

建立穴粒数合格率 Y_1 、漏播率 Y_2 和重播率 Y_3 轴转速 X_3 间的三元二次回归方程分别为：
与排种盘型孔直径 X_1 、气室负压真空度 X_2 和排种

$$\begin{cases} Y_1 = 95.39 - 1.94X_1 - 2.53X_2 - 1.42X_3 - 1.13X_1X_2 + 1.06X_1X_3 - 0.87X_2X_3 + 0.45X_1^2 - 0.74X_2^2 - 2.43X_3^2 \\ Y_2 = 0.55 - 0.53X_1 - 0.27X_2 + 1.01X_3 + 0.13X_1X_2 - 0.12X_1X_3 + 0.10X_2X_3 + 0.58X_1^2 - 0.46X_2^2 + 1.06X_3^2 \\ Y_3 = 4.06 + 2.46X_1 + 2.81X_2 + 0.41X_3 + 1.00X_1X_2 - 0.94X_1X_3 + 0.77X_2X_3 - 1.03X_1^2 + 1.20X_2^2 + 1.37X_3^2 \end{cases} \quad (9)$$

由表 6 可知,穴粒数合格率 Y_1 、漏播率 Y_2 和重播率 Y_3 回归模型的拟合度均极显著 ($P<0.01$),回归模型失拟项均表现为不显著 ($P>0.05$),在试验范围内模型与实际情况拟合较好。分析各因素对穴粒数合格率的影响可知,排种盘型孔直径 X_1 、负压真空度 X_2 、排种轴转速 X_3 和排种轴转速二次方项 X_3^2 的显著性水平 $P<0.01$,对穴粒数合格率影响极显著;型孔直径与负压真空度的交互项 X_1X_2 、型孔直径与排种轴转速的交互项 X_1X_3 的显著性水平 $P<0.05$,对穴粒数合格率影响显著;其余项显著性水平 $P>0.05$,对穴粒数合格率影响不显著。分析

对漏播率影响可知,排种盘型孔直径 X_1 、排种轴转速 X_3 和排种轴转速二次方项 X_3^2 对漏播率影响极显著;型孔直径二次方项 X_1^2 、负压真空度二次方项 X_2^2 对漏播率影响显著;其余项均不显著。型孔直径 X_1 、负压真空度 X_2 、排种轴转速二次方项 X_3^2 对重播率影响极显著;型孔直径与负压真空度的交互项 X_1X_2 、型孔直径与排种轴转速交互项 X_1X_3 、型孔直径二次方项 X_1^2 和负压真空度二次方项 X_2^2 对重播率影响显著;其余项不显著。剔除不显著因素后回归模型为:

$$\begin{cases} Y_1 = 95.26 - 1.94X_1 - 2.53X_2 - 1.42X_3 - 1.13X_1X_2 + 1.06X_1X_3 - 0.87X_2X_3 - 2.45X_3^2 \\ Y_2 = 0.55 - 0.53X_1 - 0.27X_2 + 1.01X_3 + 0.58X_1^2 - 0.46X_2^2 + 1.06X_3^2 \\ Y_3 = 4.06 + 2.46X_1 + 2.81X_2 + 1.00X_1X_2 - 0.94X_1X_3 + 0.77X_2X_3 - 1.03X_1^2 + 1.20X_2^2 + 1.37X_3^2 \end{cases} \quad (10)$$

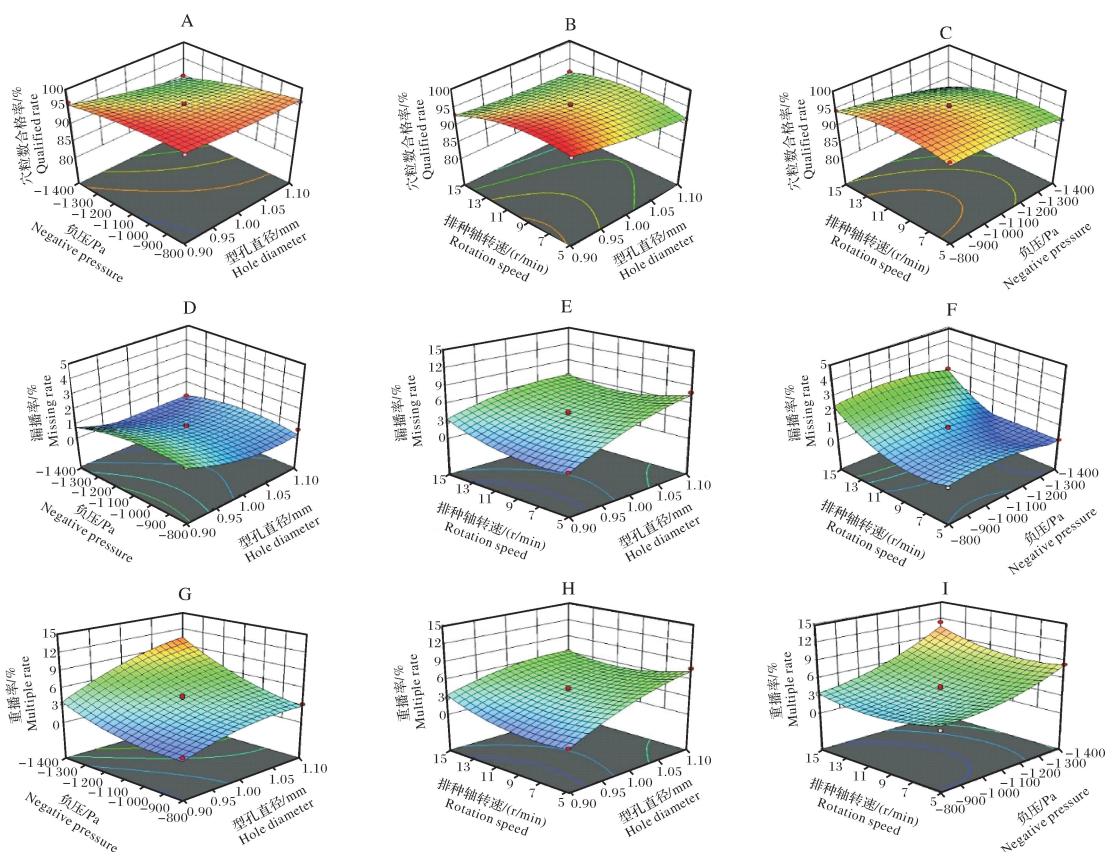


图10 交互作用对穴粒数合格率、漏播率和重播率的影响

Fig.10 Effects of interactive factors on eligible rate,missing rate and multiple rate

分析回归系数可知,影响穴粒数合格率和重播率的因素主次顺序为气室负压真空度、排种盘型孔直径和排种轴转速;影响漏播率的因素主次顺序为排种轴转速、排种盘型孔直径和气室负压真空度。由图10A,D,G可知,排种轴转速处于零水平(10 r/min),气室负压真空度一定时,随着型孔直径的增加,穴粒数合格率和漏播率逐渐下降,重播率不断上升;排种盘型孔直径一定时,随着负压绝对值的增加,穴粒数合格率和漏播率呈下降趋势,重播率逐渐增长;由图10B,E,H可知,气室负压处于零水平(-1 100 Pa),型孔直径一定时,随排种轴转速的增加,穴粒数合格率先升后降,漏播率呈上升趋势,重播率呈下降趋势;排种轴转速一定时,随型孔直径的增加,穴粒数合格率先升后降,漏播率呈下降趋势,重播率呈上升趋势;由图10C,F,I可知,排种盘型孔直径处于零水平(1.0 mm),排种轴转速一定时,随负压绝对值的增加,穴粒数合格率先

升后降,漏播率先降低后基本稳定,重播率逐渐上升;负压一定时,随排种轴转速的增加,穴粒数合格率先升后降,漏播率增加,重播率逐渐下降。

为获得排种器较优工作参数组合,以穴粒数合格率 Y_1 、漏播率 Y_2 、重播率 Y_3 综合指标建立优化函数,排种器性能指标要求穴粒数合格率大于85%、漏播率小于5%、重播率小于10%,建立参数化数学模型,其目标函数和约束条件为:

$$\begin{aligned} F_{\max} &= Y_1 - Y_2 - Y_3 \\ \text{s.t.} &\begin{cases} Y_1 > 85\% \\ Y_2 < 5\% \\ Y_3 < 10\% \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

采用线性规划数学模型对目标函数进行优化求解,应用 Design-Expert 软件的 Optimization 优化模块,得到在型孔直径为 0.98 mm、气室负压真空度为 -800 Pa、排种轴转速在 8.66 r/min 时,穴粒数合格率为 97.41%、漏播率为 0.36%、重播率为 2.23%。

基于该工作参数组合,开展优化结果的台架验证试验(图 11),考虑加工因素,试验选择排种盘型孔直径 1.0 mm,重复 3 次(表 7),试验结果穴粒数合格率为

96.04%、漏播率为0.21%、重播率为 3.75%,表明最佳工作参数组合下的排种器作业性能满足芝麻田间精量穴播对穴粒数合格率、漏播率和重播率的要求。

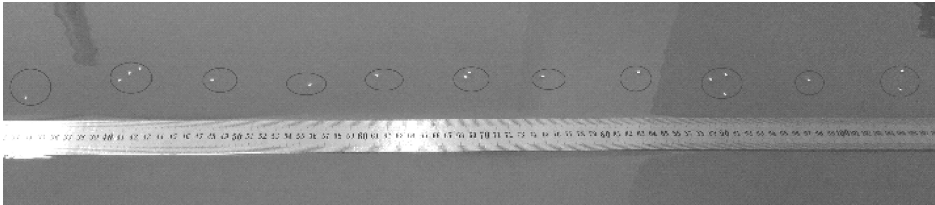


图 11 台架试验种子分布图

Fig.11 Seed distribution on oil belt

表 7 优化参数的排种性能

Table 7 Seed metering performance of optimized parameters

试验编号 Test No.	穴粒数 Number of grains					总穴粒数 Total number of grains	合格率/% Qualified rate	漏播率/% Missing rate	重播率/% Multiple rate
	0	1	2	3	4				
1	0	75	58	21	6	160	96.25	0	3.75
2	0	65	61	25	9	160	94.38	0	5.63
3	1	69	64	23	3	160	97.50	0.63	1.88
平均值 Average							96.04	0.21	3.75

3 讨 论

本研究以正负气压组合式精量排种器为研究对象,构建了排种器吸种过程临界负压模型。分析了种子吸附的不同姿态及其与型孔接触面积的关系,采用多目标优化方法,分析得到了不同直径型孔吸附 1~4 粒种子所需临界负压,确定了型孔直径为 0.8~1.1 mm、气室负压为-600~-1 600 Pa 时,可有效降低排种器漏吸率和重吸率,满足芝麻精量穴播(2±1 粒/穴)。通过种子运移状态图像拍摄试验,得到了芝麻被吸附姿态及概率为横卧:侧卧:直立≈3.5:1:1,结果表明,随气室负压绝对值增大,吸种数目概率均存在先增后减的趋势。台架试验确定随排种盘型孔直径增大、排种轴转速减小、气室负压绝对值增大,型孔穴粒数合格率先增大后减小,漏播率逐渐下降,重播率逐渐上升,排种轴转速为 5~15 r/min、型孔直径为 0.9~1.1 mm、气室负压为-800~-1 400 Pa 时,排种器排种质量较优。基于响应面优化试验建立了排种性能指标与各因素之间的回归模型,优化得出在型孔直径为 1.0 mm、气室负压为-800 Pa、排种轴转速在 8.66 r/min 时,穴粒数合格率为 96.04%、漏播率为 0.21%、重播率为 3.75%,排种性能较优,满足芝麻精量穴播播种要求。后续将开展排种器最优参数组合下的芝麻田间

播种试验,检验播种效果,研究振动、导种管碰撞等因素对穴粒数和成穴性能的影响规律,以进一步提高播种质量。

参考文献 References

[1] 张银萍,汪强,赵莉,等.芝麻生产机械化研究现状与发展趋势[J].中国农学通报,2020,36(15):152-159.ZHANG Y P,WANG Q,ZHAO L,et al.Sesame mechanized production:research status and development tendency[J].Chinese agricultural science bulletin,2020,36(15):152-159(in Chinese with English abstract).

[2] 巩宇芬.芝麻高产栽培新技术的应用[J].农业技术与装备,2013(14):54-55.GONG Y F.Application of new high yield cultivation techniques of sesame [J].Agricultural technology & e-quipment,2013(14):54-55(in Chinese).

[3] 魏林根,肖运萍,吕丰娟,等.芝麻耕种施肥一体化机械播种方式对芝麻出苗的影响[J].湖南农业科学,2016(3):28-29,33.WEI L G,XIAO Y P,LÜ F J,et al.Effects of integrated mechanical sowing mode of cultivation and fertilization on emergence of sesame seeds[J].Hunan agricultural sciences,2016(3):28-29,33(in Chinese with English abstract).

[4] 汪强,赵莉,张子福,等.芝麻种植机械调研及农机农艺配套技术研究[J].中国油料作物学报,2014,36(2):224-230.WANG Q,ZHAO L,ZHANG Z F,et al.Sesame mechanical planting techniques based on combination of agricultural machinery and agronomy[J].Chinese journal of oil crop sciences,2014,36(2):224-230(in Chinese with English abstract).

[5] 刘艳芬,林静,李宝筏,等.玉米播种机水平圆盘排种器型孔设

- 计与试验[J].农业工程学报,2017,33(8):37-46.LIU Y F, LIN J, LI B F, et al. Design and experiment of horizontal disc seed metering device for maize seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(8): 37-46 (in Chinese with English abstract).
- [6] 丁力, 杨丽, 刘守荣, 等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 1-11. DING L, YANG L, LIU S R, et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 1-11 (in Chinese with English abstract).
- [7] 张静, 李志伟, 刘啤春, 等. 气力滚筒式排种器种子吸附边界模型及验证[J]. 农业工程学报, 2016, 32(23): 12-20. ZHANG J, LI Z W, LIU H C, et al. Mathematical modeling and validation of seeder's suction-boundary on pneumatic-roller type metering [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23): 12-20 (in Chinese with English abstract).
- [8] 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 Y T, LIAO Q X, WANG L, et al. Investigation on vacuum singulating effect influencing 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 with English abstract).
- [9] 张国忠, 臧英, 罗锡文, 等. 水稻气力式排种器导向型搅种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 1-8. ZHANG G Z, ZANG Y, LUO X W, et al. Design and experiment of oriented seed churning device on pneumatic seed metering device for rice [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- [10] 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]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 52-63. ZHANG K X, LI J F, SONG Z H, et al. Optimum design and test of variable diameter double disc air suction precision seeder [J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50(6): 52-63 (in Chinese with English abstract).
- [11] 赵湛, 田春杰, 吴亚芳, 等. 盘吸式水稻排种器吸种动力学过程模拟及参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 38-44. ZHAO Z, TIAN C J, WU Y F, et al. Dynamic simulation of seed pick-up process and parameter optimization on vacuum plate seeder for rice [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(7): 38-44 (in Chinese with English abstract).
- [12] NAI I, DEIRMENCIOLU A, YAZGI A. An evaluation of seed spacing accuracy of a vacuum type precision metering unit based on theoretical considerations and experiments [J]. Turkish journal of agriculture & forestry, 2014, 36: 133-144.
- [13] YAZGI A, DEGIRMENCIOGLU A. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate [J]. Measurement, 2014, 56: 128-135.
- [14] LI Y T, WANG L, LIAO Q X. Design and test of an inside-filling pneumatic precision centralized seed-metering device for rapeseed [J]. Int J Agric & Biol Eng, 2017, 10(2): 56-62.
- [15] 丛锦玲, 余佳佳, 曹秀英, 等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 46-52. CONG J L, YU J J, CAO X Y, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat [J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45(1): 46-52 (in Chinese with English abstract).
- [16] 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]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 46-57. LIAO Y T, ZHENG J, LIAO Q X, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combined tube-needle centralized seeding device for American ginseng [J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50(3): 46-57 (in Chinese with English abstract).
- [17] 李耀明, 赵湛, 陈进, 等. 气吸振动式排种器种盘内种群运动的离散元分析 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 56-59, 76. LI Y M, ZHAO Z, CHEN J, et al. Discrete element method simulation of seeds motion in vibrated bed of precision vacuum seeder [J]. Transactions of the CSAM, 2009, 40(3): 56-59, 76 (in Chinese with English abstract).
- [18] 史嵩, 刘虎, 位国建, 等. 基于 DEM-CFD 的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 54-66. SHI S, LIU H, WEI G J, et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on EDEM-CFD [J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(5): 54-66 (in Chinese with English abstract).
- [19] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 基于 DEM-CFD 的玉米气吸式排种器种盘设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 50-60. DING L, YANG L, ZHANG D X, et al. Design and experiment of seed plate of corn air suction seed metering device based on DEM-CFD [J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50(5): 50-60 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李林. 气吸式排种器理论及试验的初步研究 [J]. 农业机械学报, 1979, 10(3): 56-63. LI L. A preliminary study on the theory and experimentation of the suction-type metering device for precision drill [J]. Transactions of the CSAM, 1979, 10(3): 56-63 (in Chinese with English abstract).
- [21] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 气吸式玉米排种器清种机构参数化设计与试验 [J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 47-56. DING L, YANG L, ZHANG D X, et al. Parametric design and test of seed cleaning mechanism of air-suction maize seed-metering device [J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50(9): 47-56 (in Chinese with English abstract).
- [22] 杜俊, 夏俊芳, 张居敏, 等. 稻麦兼用型气力滚筒式精量排种器设计与试验 [J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(3): 127-134. DU J, XIA J F, ZHANG J M, et al. Design and experiment of pneumatic drum type metering device for rice and wheat [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(3): 127-134 (in Chinese with English abstract).

- [23] 梅志雄,夏俊芳,张居敏,等.稻麦两用螺旋舀种式排种器排种性能试验[J].华中农业大学学报,2020,39(5):136-146.MEI Z X,XIA J F,ZHANG J M,et al.Seeding performance of seed metering device with spiral tube scooping for rice and wheat [J].Journal of Huazhong Agricultural University,2020,39(5): 136-146(in Chinese with English abstract).

Seed suction performance and experiment of sesame precision hole seeding metering device

LIN Pian,LIAO Qingxi,WANG Lei,WANG Baoshan,LIU Hai

College of Engineering,Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River,Ministry of Agriculture and Rural Affairs,Wuhan 430070,China

Abstract A critical negative pressure model of seed suction process of metering device was established with the principle of combined seeding with negative pressure suction and positive pressure injection to figure out the practical problems of sesame production including low efficiency of artificial planting,time-consuming and high labor intensity of thinning and setting seedlings after emergence,and lack of suitable precision hole metering device. The different posture of seed suction and the contacting area between seed and pore was analyzed. The critical negative pressure of 1-4 seeds adsorbed by the hole was obtained with the multi-objective optimization method. The optimal hole diameter range of sesame precision hole sowing was determined to be 0.8-1.1 mm. The results of the image shooting test of the seed suction and transporting state showed that the different adsorption posture and probabilities of sesame was horizontal lying : side lying : upright $\approx 3.5 : 1 : 1$. The variation of negative pressure required by different number of seed suction was consistent with the critical negative pressure model. The optimization test based on response surface was carried out to analyze the effects of the diameter of metering disc hole,rotation speed of seed metering device and negative pressure of air chamber on the seed metering performance including the rate of qualified number of seed in the hole,the rate of missed seeding and the rate of multiple seeding. The results showed that the rate of the qualified number of seeds in the hole,the rate of missing seeding,and the rate of multiple seeding was 96.04%,0.21%,and 3.75% when the diameter of metering disc hole,the negative pressure and vacuum degree of the air chamber,and the rotation speed of the metering shaft was 1.0 mm,-800 Pa,and 8.66 r/min,meeting the agronomic requirements of sesame planting. It will provide a reference for improving the structure of sesame precision hole seeding metering device.

Keywords sesame; precision hole sowing; seed metering device; critical negative pressure; number of seeds sucked; air suction seed metering device; combination of positive and negative pressure

(责任编辑:陆文昌)