

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.006

豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验

李玉环¹ 杨丽^{1,2} 张东兴^{1,2} 崔涛^{1,2} 丁力¹ 魏亚男¹

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部土壤-机器-植物系统技术重点实验室, 北京 100083)

摘要:为解决豆类作物窄行密植种植模式下高速精量播种的问题,设计了一种一器双行气吸式高速精量排种器,采用单风道单排种盘实现双行播种作业。阐述了其基本结构与工作原理,对关键参数进行了理论分析,确定了工作区域,明确了排种盘的结构形式,建立了主要结构参数的数学模型。以影响排种器工作性能的主要因素吸孔直径、真空度和机器前进速度为试验因素,进行了三因素三水平的 Box - Behnken 旋转正交试验。试验结果表明:吸孔直径 4.5 mm、真空度 4.5 kPa、前进速度 10 km/h 为最优组合,在最优参数组合条件下,内圈合格率为 97.83%,内圈漏播率为 0.62%,外圈合格率为 98.24%,外圈漏播率为 0.47%,满足设计要求。为考察排种器的速度适应性,进行了速度单因素试验,结果表明,速度在 14 km/h 以内时,内、外圈合格率大于 93%,内、外圈漏播率小于 5%,内、外圈重播率小于 2%。为验证排种器对不同豆类品种的适应性,选取豌豆、小豆和绿豆为试验材料,根据豆类外形尺寸选取不同吸孔尺寸种盘,进行了品种适应性试验,结果表明,内、外圈合格率大于 97%,内、外圈漏播率小于 1%,内、外圈重播率小于 3%,均优于国家标准要求,具有良好的品种适应性。

关键词: 精量播种; 豆类排种器; 一器双行; 窄行密植

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0061-13

Design and Experiment of Pneumatic Precision Seed-metering Device with Single Seed-metering Plate for Double-row

LI Yuhuan¹ YANG Li^{1,2} ZHANG Dongxing^{1,2} CUI Tao^{1,2} DING Li¹ WEI Ya'nan¹

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Soil - Machine - Plant System Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100083, China)

Abstract: Under the narrow-row-dense planting mode of beans, it is difficult to achieve high-speed precision seeding. However, a pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row was developed, which used single-channel and single-row seeding tray to realize double-row seeding operation. The basic structure and working principle were expounded. The working area of the seeding device was divided, the structural form of the seeding tray was determined, the key parameters of the main structure were analyzed and the mathematical model was determined. The experiment was employed through the method of Box - Behnken orthogonal rotating center combination of three factors and three levels according to the GB 6973—2005 national standard. In test, soybean seed Zhonghuang 37 was selected as experimental material. Combining with extensive pre-experiment and theoretical analysis, hole diameter, vacuum degree, forward speed were taken as main influencing factors, the seed qualified index and missing index were taken as response index. The results showed that the order of contribution rates on the effect of inner qualified index was the vacuum degree, hole diameter and forward speed, the order of contribution rates on the effect of inner missing rate was vacuum degree, forward speed and hole diameter, the order of contribution rates on the effect of outer eligible rate was vacuum degree, forward speed and hole diameter, the order of contribution rates on the effect of outer qualified index was hole diameter, vacuum degree and forward speed. The optimal combination of parameters was as follows: the hole diameter was 4.5 mm, the vacuum degree was 4.5 kPa, the working speed was 10 km/h, and under the optimal combinations, the inner eligible rate was 97.83%, the inner

收稿日期: 2018-12-30 修回日期: 2019-01-22

基金项目: 国家食用豆产业技术体系建设项目(CARS-08)和国家重点研发计划项目(2017YFD0700703)

作者简介: 李玉环(1991—),男,博士生,主要从事农业装备设计与理论研究,E-mail: 18612897966@163.com

通信作者: 杨丽(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业装备及其智能化研究,E-mail: yangli@cau.edu.cn

missing index was 0.62%, the outer eligible rate was 98.24%, the outer missing rate was 0.47%. The verification test was repeated 10 times, the results indicated that the actual test results were in agreement with the optimization results. Then, a speed single factor test was carried out. The results showed that the inner and outer eligible rate were more than 93%, the inner and outer missing rate were not more than 5%, and the inner and outer multiple rate were not more than 2%. At last, the adaptation tests of peas, mung beans and adzuki beans were carried out. The results showed that the inner and outer circle eligible rate were more than 97%, the inner and outer missing rate were not more than 1%, and the inner and outer multiple rate were not more than 3%. The results of the research laid a foundation for the development of pneumatic precision seed-metering device for bean, and provided a reference for the research of bean narrow-row and flat-dense planter.

Key words: precision seeding; bean seed-metering device; single seed-metering plate for double-row; narrow-row-dense planting

0 引言

大豆、豌豆、绿豆、小豆等豆类作物具有形状规则、粒径较小、球形度较大的特点,对精量排种器的适应性较好,但其种植密度要求较高,多采用窄行密植栽培技术,每平方米保苗量在22.5株以上^[1-6],因此株距和行距要求均较小,在高速作业下对排种器要求较高,实现高速精量播种作业存在一定的难度^[7-8]。

高速精量排种器是实现高速精量播种作业的核心部件,其排种性能是影响播种机作业质量的重要因素之一。其中,气力式排种器因具有种子适应性、排种精度、作业效率等方面的优势而逐渐被认可^[9-11]。国内外关于气力式排种器的研究逐渐深入,发现在排种器作业速度升高时,排种器性能呈下降趋势。豆类作物种植密度较大,在高速作业情况下,排种器的转速更高,因此采用气吸式精量播种机进行高速精量播种作业时,对排种器结构、吸附性能以及排种器转速等方面要求较高^[12-21]。现有大豆气力式精量排种器多集中在功能实现上,在高速作业条件下播种效果较差,且对不同豆类种子的适应性不足。

为满足豆类作物窄行、窄距、密植的高速作业,设计一种结构简单、适应性强、播种效果好、可实现高速播种作业的一器双行高速精量排种器。

1 排种器结构和工作原理

一器双行气吸式高速精量排种器整体结构如图1所示。主要包括后壳体、前壳体、上清种机构、下清种调节装置、双排孔种盘、吸道、下清种分流清种机构、双叉分流机构、传动轴等。双排孔种盘作为保证排种质量的核心部件,沿周向开有双排充种孔,固定在传动轴上,与后壳体紧密贴合,吸道固定安装在后壳体上,与后壳体、双排孔种盘形成气室,贯穿充种区、清种区以及携种区,在气流作用下与外界形成负压气流,随着种盘的转动完成种子的吸附运移

过程。上清种机构一端固定在前壳体定位孔上,另一端安装在前壳体滑槽中,通过上清种调节装置固定在前壳体上,可调节上清种调节装置实现外侧吸孔清种作业;分流清种装置安装在前壳体上,前端为双弧形清种机构,实现内侧种子的清种作业,后端为导流装置,将双排种子流导入双叉分流机构中,实现窄距双行顺畅投种,其中双叉分流机构可根据不同行距要求进行调整。

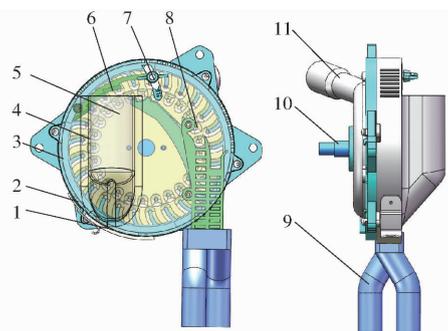


图1 一器双行气吸式高速精量排种器结构图
Fig.1 Structure diagram of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row

1. 卸种口 2. 卡扣 3. 后壳体 4. 前壳体 5. 双排孔种盘 6. 上清种机构 7. 上清种调节装置 8. 下清种分流卸种机构 9. 双叉分流机构 10. 传动轴 11. 吸道

工作时,风机在拖拉机动力输出轴带动下转动,抽取密闭气室空气,使得吸孔处形成负压状态,传动轴在地轮或者其他动力源的驱动下顺时针转动,带动双排孔种盘转动;经过充种区在负压的作用下将种子吸附在吸孔上,经过清种区,在上下清种机构的作用下将内外两侧多余的种子清除,携带单粒种子进入携种区,继而在分流机构的作用下将双排种子流导入双叉分流机构进行双行窄距播种作业。

2 关键参数设计

2.1 工作区域划分

考虑种子是在种盘和前壳体之间完成充种、清

种、携种和分流投种过程,该过程主要通过吸道、壳体、种盘以及清种装置之间配合作用完成,为了保证各关键部件的作用效果,准确适时实现充种、清种、携种和分流投种过程,达到最佳的作业效果,须对工作区域进行划分^[22-23]。如图 2 所示,其中 δ 表示充种区范围, α 表示清种区范围(包括自清种区①和强制清种区②), β 表示携种区范围, γ 表示投种区范围。

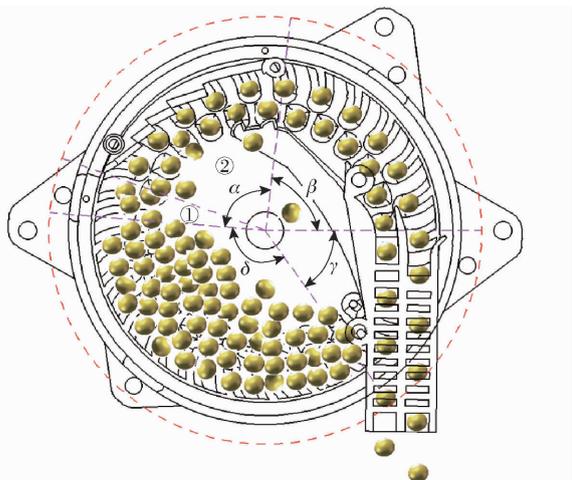


图 2 种盘划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of disc division

充种区设计:双排播种为相邻两排吸孔同时作业完成种子的吸附,因此对充种区的种子量要求更高,为保证内侧吸孔的充种性能,使得内侧具有充足的种子量,在区域划分时要尽量扩大充种区域范围,同时兼顾分流投种的顺畅性,最终确定充种作用范围为 $[325^\circ, 360^\circ] \cup [0^\circ, 95^\circ]$ 。

清种区设计:为保证两行种子的单粒精度,要确定合适的清种区域,将吸种口多余的种子清掉,保证内外侧吸孔均匀吸附单粒种子。清种区主要分为自清种区和强制清种区。充入吸孔内的种子随着排种盘的转动离开充种区,首先进入自清种区域。位于吸孔边缘未能稳定吸附的种子在重力和离心力的作用下下落回充种区。通过试验发现,当吸孔上的种子离开充种区距离大于 3 个种子长度时,未占据压力优势的种子滑落至充种区,即 $h_4 \geq 3l$,如图 3 所示,选取自清种区域 $\alpha_1 = 15^\circ$ 。

上下侧清种机构通过挤压吸孔处的种子,将不占据压力优势的多余种子清除,保证单粒播种,为保证内外圈彻底清种,在不影响投种的情况下尽量扩大清种区范围,但清种范围不能过大,过大会导致清落的种子进入投种区,导致重播增加。为确定合适的清种区范围,采用运动学方法对清种区末端位置进行分析,如图 3 所示,种子 B 在下清种机构的作用下脱离种盘,沿吸孔切线做初速度为 v 的抛物线

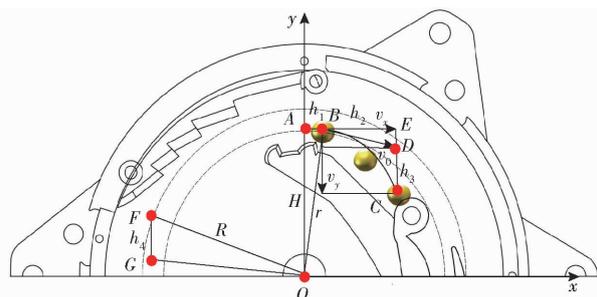


图 3 清种区划分

Fig.3 Partition of seed-metering device clearing area

运动,当种子由 B 运动到 C 点时,种子在分流机构的阻挡下落入充种区,当清种位置滞后时,清落的种子会进入分流卸种装置,造成排种质量下降,由几何关系知 $\angle AOB = \angle EBD = \alpha_0$,该位置由动力学和几何关系有

$$\begin{cases} h = h_1 + h_2 \\ h_1 = v_x t \\ h_3 = \frac{1}{2}gt^2 + v_y t \\ v_0 = \omega r \\ v_x = v_0 \cos \alpha_0 \\ v_y = v_0 \sin \alpha_0 \\ \sin \alpha_0 = \frac{h_1}{r} \\ \cos \alpha_0 = \frac{H}{r} \end{cases} \quad (1)$$

- 式中 r ——内侧孔半径, mm
 α_0 ——OB 连线与竖直中心线之间夹角, ($^\circ$)
 v_0 ——清落种子的初速度, m/s
 v_x ——清落种子在 x 方向的分速度, m/s
 v_y ——清落种子在 y 方向的分速度, m/s
 ω ——排种盘角速度, rad/s
 H ——A 点到 O 点的距离, mm
 h ——中心竖直线与分流挡板之间的距离, mm
 h_1 ——A 点到 B 点的距离, mm
 h_2 ——种子下落点与挡板竖直位置的距离, mm
 h_3 ——内侧吸孔到分流挡板竖直距离, mm
 g ——重力加速度, m/s^2
 t ——时间, s

由式(1)可得

$$h_3 = \frac{h_1 h - h_1^2}{H} + \frac{g(h^2 + h_1^2 - 2hh_1)}{2\omega^2 H^2} \quad (2)$$

其中 H, h_3, h, r 的值在设计时确定,当作业速度在 16 km/h 以下时,通过式(1)、(2)解得 $h_1 \approx 8.29 \text{ mm}, \alpha_0 \approx 7.07^\circ$ 。

为了避免清落的种子进入分流卸种区,在清种区划分时要保证 α_0 小于 7.07° ,选取 α_0 为 6° ,因此

清种区主要分为自清种区 $[95^\circ, 110^\circ]$ 和强制清种区 $[110^\circ, 186^\circ]$,最终确定清种区为 $[95^\circ, 186^\circ]$ 。

携种区设计:吸附在吸孔上的单粒种子在越过清种区之后进入携种区。吸孔处开有凹槽,对吸附的种子具有托附作用,有效地避免了气压不稳或振动造成吸附在吸孔上的种子掉落问题。携种区从清种区结束位置开始到卸种开始位置结束, β 设置为 $[186^\circ, 270^\circ]$ 。

分流投种区设计:种盘运动到分流投种区,在分流清种装置的作用下将两排种子流均匀分开,气流隔断,在重力和离心力的作用下脱离种盘,均匀地进入双叉投种管,完成播种作业。分流投种区为 $[270^\circ, 325^\circ]$ 。

种盘进入投种区气流阻断,种子落入投种管,该区域为密封区,要求密闭性好,避免气流干扰种子的运动轨迹,在气道设计时综合考虑种子吸附的稳定性、投种的顺畅性,气道需贯穿整个充种区、清种区和携种区^[24],其范围角度 $\lambda = 305^\circ$ 。

2.2 排种盘设计

2.2.1 排种盘结构形式

排种盘是将种子从种群分离并运移至投种区的关键部件,排种盘形式对充分充种、有效清种和顺利投种有重要意义。双排种盘沿周向均匀布置充种吸孔,相比于单排孔吸孔数增加了一倍,给种子的充分充种带来困难,合理利用有限的空间完成两排吸孔的稳定充种,是实现双排播种的关键,外侧吸孔种层较高,种子间的阻力较大,需增加扰动性以增加种子流动性,提高充种性能;内侧吸孔处种子种层较低,种子间阻力较小,在不断流动的种子流下即可稳定吸附。为了满足内外侧充种条件,采用外侧拨指吸孔增加种子的扰动,形成不间断的种子流,内侧采用凹型圆孔,提高种子吸附的稳定性,如图4所示。充种区的种子在外侧拨指的带动下形成循环种子流,底层的种子顺着拨指上升,脱离充种区后流向种层内侧,种子群不断从充种区由下向上翻动,减少了充种区种群内部阻力,降低种子架空难以充种的几率,同时也保证了内侧吸孔处的种子量,提高了内外侧充种性能。

2.2.2 充种过程受力分析

种子经过充种区,在负压作用下,吸附在型孔处,完成充种,吸附力大小对稳定充种具有重要作用,为保证内外侧吸孔的稳定吸附作用,需探明种子在充种区的受力特性。在不考虑播种过程中机器振动的条件下,将大豆种子近似看作球体,以外圈种子为原点建立 x_1y_1z 三维坐标系,其中在坐标系 x_1y_1 中进行受力分析,如图5a所示, x_1 轴正向为种子受到

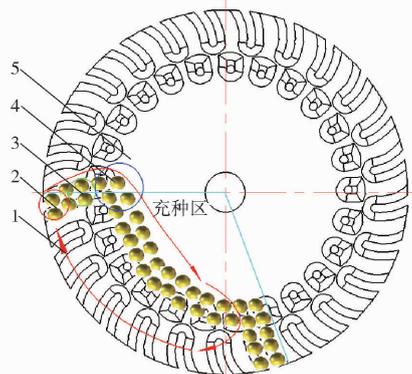


图4 种盘结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of seed-metering plate

1. 种子环流 2. 内侧种子 3. 内侧吸孔处种子 4. 外侧吸孔处种子 5. 种盘

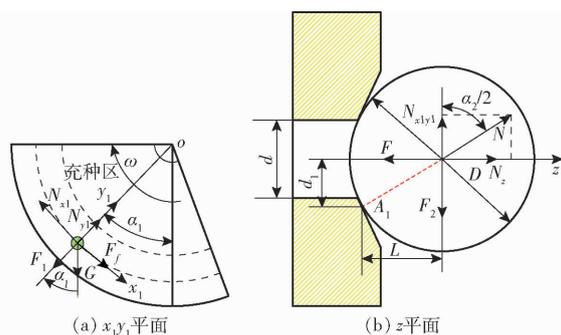


图5 充种过程受力分析

Fig. 5 Force analysis of suction seed course

阻力方向, y_1 轴正向为种子受到离心力的反向,指向排种盘中心。对 z 平面进行受力分析,如图5b所示,在充种区内,种子吸附在型孔处,随着种盘以角速度 ω 顺时针转动,种子与吸孔切点 A 处受到吸孔的支持力 N ,受到吸孔吸附力 F ,以及受到 F_1 、 G 、 F_f 的合力 F_2 。由大豆种子在充种区受力平衡有

$$\begin{cases} \sum F_{x_1} = 0 \Rightarrow N_{x_1} - F_f - G \sin \alpha_1 = 0 \\ \sum F_{y_1} = 0 \Rightarrow N_{y_1} - F_1 - G \cos \alpha_1 = 0 \\ \sum F_z = 0 \Rightarrow N_z - F = 0 \\ \sum M_{A1} = 0 \Rightarrow F d_1 - F_2 L = 0 \end{cases} \quad (3)$$

在 x_1y_1 平面内 $N_{x_1y_1}$ 为 N_{x_1} 和 N_{y_1} 的合力,结合式(3)可知

$$N_{x_1y_1} = \sqrt{N_{x_1}^2 + N_{y_1}^2} =$$

$$\sqrt{F_f^2 + G^2 + F_1^2 + 2G(F_f \sin \alpha_1 + F_1 \cos \alpha_1)} \quad (4)$$

种子在 z 平面内受力平衡,则有

$$F_2 = N_{x_1y_1} \quad (5)$$

由式(3)~(5)可得

$$F = \frac{F_2 L}{d_1} = \frac{L}{d_1} \sqrt{F_f^2 + G^2 + F_1^2 + 2G(F_f \sin \alpha_1 + F_1 \cos \alpha_1)} = \sqrt{F_f^2 + G^2 + F_1^2 + 2G(F_f \sin \alpha_1 + F_1 \cos \alpha_1)} \tan(\alpha_2/2) \quad (6)$$

式中 F_1 ——种子受到的离心力, N
 F_f ——种子间阻力, N
 G ——种子重力, N
 N_{x1} ——种子支持力在 x_1 方向上的分力, N
 N_{y1} ——种子支持力在 y_1 方向上的分力, N
 N_{x1y1} ——种子支持力在 x_1y_1 平面内的合力, N
 N_z ——种子支持力在 z 方向上的分力, N
 d_1 ——吸孔中线到 A 点的距离, mm
 L ——合力 F_2 到 A 点的距离, mm
 α_1 ——种子重心与排种盘中心的连线与竖直方向的夹角, ($^\circ$)
 α_2 ——型孔锥角, ($^\circ$)

由式(6)可知, 充种过程中, 吸孔处所需吸附力 F 与吸种孔锥角、种子间阻力、种子离心力等有关, 内侧型孔相对外侧型孔种层高度较低, 种子受到的种间阻力较小, 且内侧型孔相对于外侧型孔的线速度较小, 排种器同一转速条件下离心力较小, 因此同等负压条件下外侧型孔充种难度要大于内侧型孔, 为保证内外侧型孔吸附的稳定性, 在设计时外侧型孔采用拨指型孔增加扰动性, 减小种间阻力, 同时还需使得外侧吸孔吸附力大于内侧吸附力。

2.2.3 吸孔直径

为了保证内外侧吸孔对种子吸附的稳定性, 克服种间阻力, 外侧吸孔的吸附力应大于内侧, 有

$$F_3 > F_4 \quad (7)$$

其中 $F_3 = (p_0 - p_1) S_1 \quad (8)$

$$F_4 = (p_0 - p_1) S_2 \quad (9)$$

式中 F_3 ——外侧吸孔吸附力, N
 F_4 ——内侧吸孔吸附力, N
 p_0 ——种盘内侧压力, kPa
 p_1 ——种盘外侧大气压力, kPa
 S_1 ——外侧吸孔面积, m^2
 S_2 ——内侧吸孔面积, m^2

通过式(7)~(9)可知

$$S_1 > S_2 \quad (10)$$

如图 6 所示, 圆周外侧均匀布置拨指, 拨指导槽与后壳体之间形成组合吸孔, 内侧均匀布置具有凹槽的圆孔。内侧圆孔直径 $d = (0.64 \sim 0.66)b^{[25]}$, 内侧吸孔面积为 $S_2 = \pi d^2/4$, 其中 b 为豆类种子的平均粒径。外侧吸孔由两部分组成, 直径为 d 的半圆和不规则四边形 $CFED$, 其中 $S_{CFED} > S_2/2$, 因此 $S_1 = S_2/2 + S_{CFED} > S_2$, 满足外侧吸孔吸附能力大于内侧吸孔的要求, 外侧型孔不规则四边形 $CFED$ 可通过确定拨指弧线来确定。

2.2.4 拨指吸孔弧线

外侧拨指吸孔对种层扰动和种子流形成具有重

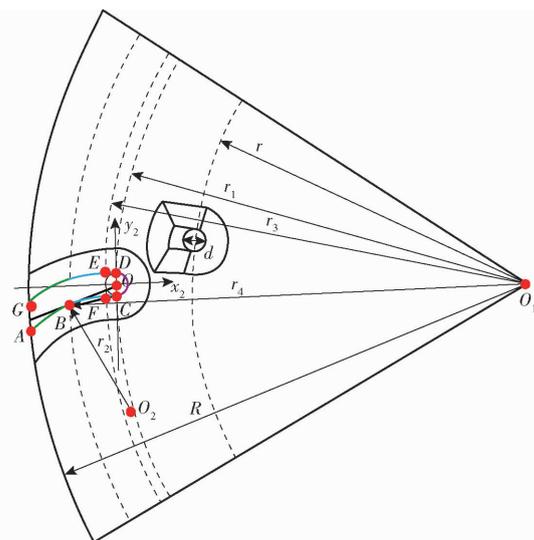


图 6 吸孔参数确定示意图

Fig. 6 Schematic diagram of hole type parameters

要作用, 其中拨指吸孔由两条平行弧线 \widehat{AC} 和 \widehat{GD} 组成, \widehat{AC} 由扰动段弧线 \widehat{AB} 和导流段弧线 \widehat{BC} 组成, 弧线 \widehat{AB} 段起到扰动种盘底层种子的作用, 避免充种区内种子架空, 弧线 \widehat{BC} 段起到带动种子形成循环种子流的作用, 为满足上述要求, 以 B 为分界点, 弧线 \widehat{AB} 与水平轴 x 的夹角应大于豆类种子与种盘的摩擦角 θ , 弧线 \widehat{BC} 与水平轴的夹角应小于 θ 。连接 OB , 直线 OB 与 x 轴的夹角等于豆类种子的摩擦角, 过 B 点做弧线 \widehat{AC} 与直线 OB 相切, 则弧线 \widehat{AB} 和弧线 \widehat{BC} 满足设计要求。以 O 为中心建立直角坐标系, 则 $O(0, 0)$ 、 $C(0, -2.25)$ 、 $O_1(r_1, 0)$ 、 $B(x_1, y_1)$ 如图 6 所示, 根据几何关系可得

$$\begin{cases} y_1 = x_1 \tan \theta \\ (x_1 - r_1)^2 + y_1^2 = r_4^2 \end{cases} \quad (11)$$

式中 r_1 ——经过外侧吸孔 O 点的圆弧半径, mm

r_4 ——经过 B 点的圆弧半径, mm

由式(11)可得

$$\begin{cases} x_1 = \frac{r_1 - \sqrt{r_1^2 + (1 + \tan^2 \theta)(r_4^2 - r_1^2)}}{1 + \tan^2 \theta} \\ y_1 = \tan \theta \frac{r_1 - \sqrt{r_1^2 + (1 + \tan^2 \theta)(r_4^2 - r_1^2)}}{1 + \tan^2 \theta} \end{cases} \quad (12)$$

为了保证足够的种子回流至内侧吸孔, 形成稳定的种子流, 结合整个排种器的结构尺寸, 合理布置吸孔位置, 选取 $r_1 = 82.5$ mm, $r_4 = 92$ mm, 既而结合种盘与豆类(以大豆种子为例)品种之间的摩擦角, 最终确定 B 点坐标为 $(-9.4$ mm, -4.8 mm)。

\widehat{AC} 是以 O_2 点为圆心、 r_2 为半径的圆弧, 已知 B 、

C点坐标以及切线BO的方程,设 $O_2(a, c)$,可得

$$\begin{cases} a^2 + (-2.25 - c)^2 = r_2^2 \\ (x_1 - a)^2 + (y_1 - c)^2 = r_2^2 \\ (c - y_1)/(a - x_1) = -1/\tan\theta \end{cases} \quad (13)$$

式中 r_2 ——圆弧 \widehat{AC} 的半径,mm

将式(12)求得的点 $B(-9.4 \text{ mm}, -4.8 \text{ mm})$ 代入式(13),可求得 $O_2(1.37 \text{ mm}, -29.55 \text{ mm})$, $r_2 \approx 27.33 \text{ mm}$,可确定弧线 \widehat{AC} 的方程为

$$(x - 1.37)^2 + (y + 29.55)^2 = 27.33^2 \quad (14)$$

由上述方程,结合种盘尺寸,可确定A点位置,既而确定弧线 \widehat{AC} 、弧线 \widehat{GD} 与弧线 \widehat{AC} 为同心弧线,结合吸孔直径,可确定两弧线方程,最终确定整个拨指弧线参数。

外侧型孔是由直径为 d 的半圆和不规则四边形 $CFED$ 组成,其中不规则四边形 $CFED$ 由弧线 \widehat{CF} 、 \widehat{FE} 、 \widehat{ED} 、直线 CD 组成,弧线 \widehat{CF} 和弧线 \widehat{ED} 分别为弧线 \widehat{AC} 和弧线 \widehat{GD} 中的弧段,弧线 \widehat{FE} 为以 O_1 为圆心、半径为 r_3 的圆上的弧段,有

$$(x - 82.5)^2 + y^2 = r_3^2 \quad (15)$$

式中 r_3 ——弧线 \widehat{FE} 的半径,mm

式(15)为坐标系 xy 中圆心 O_1 、半径 r_4 的圆的方程,其中点 F 为弧线 \widehat{AC} 和半径 r_3 圆的交点,点 E 为弧线 \widehat{GD} 与半径 r_3 圆的交点,半径 r_3 直接影响不规则四边形 $CFED$ 的面积,半径 r_3 确定时要保证外侧型孔具有足够的吸附力,并兼顾作物外形尺寸参数,结合试验情况选取 $r_3 = 85 \text{ mm}$,则有

$$(x - 82.5)^2 + y^2 = 85^2 \quad (16)$$

点 F 可由式(14)和式(16)联立求得,点 E 也可由弧线 \widehat{GD} 的方程和式(16)联立求得,结合前文求出点 C 、 D 的坐标,最终确定不规则四边形 $CFED$ 的具体形状。

2.2.5 两排孔间距

内外侧吸孔间距直接影响两排种子运移过程的稳定性,间距过大种子流难以覆盖内侧吸孔,导致内侧充种效果变差,影响播种质量,过小时两侧种子容易产生碰撞,导致吸附的种子脱落,造成漏播增加。排种器工作时,两排吸孔吸附的种子在运移过程中互不干涉,即保证内外侧吸孔吸附的多粒种子经过清种区时在清种装置的作用下将多余的种子清除,并不会产生相互碰撞。如图7所示, A_1 点为外侧吸孔的中心, A_2 、 A_3 为内侧相邻两吸孔中心, A_4 点为 A_2A_3 的中点, O_1 为排种盘的中心,根据各点的位置关

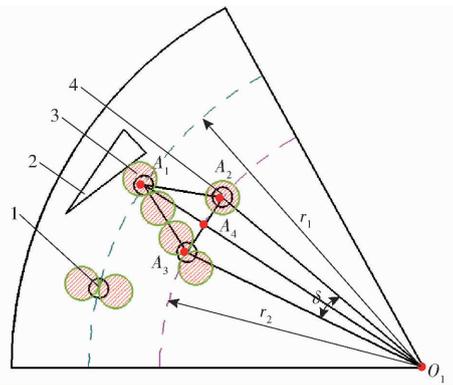


图7 吸孔间距确定示意图

Fig.7 Schematic diagram of hole spacing determination

1. 外侧吸孔 2. 上清种机构 3. 种子 4. 内侧吸孔

系有

$$l_{A_1A_3} = l_{A_1A_2} \quad (17)$$

$$l_{O_1A_3} = l_{O_1A_2} = r_2 \quad (18)$$

$$l_{O_1A_1} = r_1 \quad (19)$$

由上述几何关系可知 $\triangle A_1A_2A_3$ 和 $\triangle A_2A_3O_1$ 为等腰三角形, A_4 点为 A_2A_3 的中点,则有

$$\begin{cases} l_{A_1A_4}^2 + l_{A_3A_4}^2 = l_{A_1A_3}^2 \\ l_{A_3A_4} = l_{O_1A_3} \tan \frac{\delta}{2} \end{cases} \quad (20)$$

式中 δ ——两吸孔之间夹角, ($^\circ$)

双排孔的间距要满足互不干涉条件,有

$$l_{A_1A_3} > 2b + \frac{1}{2}d \quad (21)$$

由式(17)~(21)可得 $l_{A_1A_4}$ 的限定条件为

$$l_{A_1A_4} > \sqrt{\left(2b + \frac{1}{2}d\right)^2 - r_2^2 \tan^2 \delta} \quad (22)$$

另外 $l_{A_1A_4}$ 与 r_1 、 r_2 的关系为

$$r_2 = r_1 - l_{A_1A_4} \quad (23)$$

将式(23)代入(22)可得

$$l_{A_1A_4} > \sqrt{\left(2b + \frac{1}{2}d\right)^2 - (r_1 - l_{A_1A_4})^2 \tan^2 \delta} \quad (24)$$

其中 $d = (0.64 \sim 0.66)b$, $r_1 = 82.5 \text{ mm}$, $\delta = 7.2^\circ$,代入式(24)可得

$$1.016l_{A_1A_4}^2 - 2.64l_{A_1A_4} + 108.9 - (2.32 \sim 2.33)^2 b^2 > 0 \quad (25)$$

对上述一元二次方程求解可得

$$l_{A_1A_4} > \frac{2.64 + \sqrt{2.64^2 - 4 \times 1.016 \times (108.9 - (2.32 \sim 2.33)^2 b^2)}}{2 \times 1.016} = \frac{2.64 + \sqrt{6.97 - 442.57 + (21.87 \sim 22.06)b^2}}{2.032} \quad (26)$$

由式(26)可知两孔间距与豆类种子平均粒径 b 有关,平均粒径越大,两孔间距就越大,以中黄37大

豆为例,经测量种子平均粒径为 (7 ± 0.26) mm,可知两孔间距 $l_{A_1A_4} > 13.8$ mm,结合前期试验确定两排孔间距为15 mm,则内圈半径 $r_2 = 67.5$ mm。

2.3 清种装置

清种装置主要分为上侧清种机构和下侧清种机构两部分,如图8所示,上侧清种机构位于排种盘外侧,对外侧吸孔进行清种作业,采用锯齿状刮种工作面,对种子形成连续4次由外到内碰撞,逐步清除未占据压力优势的多余种子,上侧清种机构可调,可绕 B_1 点旋转,以适应不同品种作物的清种作业,调整范围为 $\theta = 10^\circ$ 。下侧清种刀采用2次弧线刮种面,对内侧种子形成连续的2次碰撞,结合试验发现,内侧孔吸附多粒种子情况较少,多为单粒种子,采用弧线刮种面覆盖吸孔直径的 $1/3$,对种子进行2次碰撞即可实现清种作业。

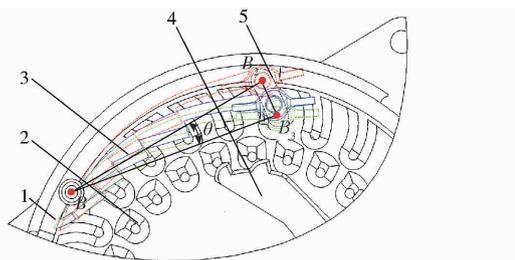


图8 清种装置示意图

Fig. 8 Structure diagram of scraping device

1. 后壳体 2. 排种盘 3. 上清种机构 4. 下清种机构 5. 上清种调节装置

3 排种性能试验

3.1 试验材料与设备

本试验选用大豆品种中黄37为样本,千粒质量为270.3 g。排种检测装置选用中国农业大学自主研发的排种器性能检测仪^[26],如图9所示。

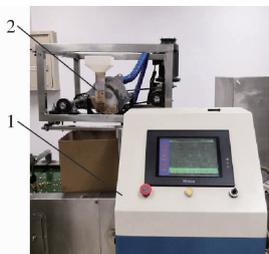


图9 排种器性能试验装置

Fig. 9 Test of seeding performance experiments

1. 排种器性能检测仪 2. 一器双行高速精量排种器

3.2 试验方法与指标

为保证作物产量,豆类要求高密度种植,一般要保证每平方米播量22.4株以上^[1],一器双行高速精量排种器可实现8~10 cm的窄行播种,配合精量播种机可实现宽窄行播种作业,即窄行距8~10 cm,

宽行距30~40 cm种植模式的播种作业,排种器单行株距设置为16 cm,窄双行株距为8 cm,满足密植要求,试验时均采用单行株距16 cm,即小双行株距8 cm进行。

根据前期试验研究影响排种性能的主要参数为内外圈吸孔直径、真空度以及前进速度,因此选取吸孔直径、真空度、前进速度作为试验主要因素。通过前期试验发现,在单行理论株距为16 cm,即窄双行株距为8 cm,前进速度小于14 km/h时,各项指标均满足设计要求,为了考察排种器对高速作业工况的适应性,选取作业速度取值范围为8~12 km/h;合适的真空度能保证种子被稳定吸附并减少一孔多粒的情况,采用单盘双排孔,对真空度要求增高^[21],通过试验选取真空度为4~5 kPa;内外圈吸孔直径 d 是影响吸附作用的主要因素,为确定最佳吸孔直径,选取吸孔直径 d 范围为4~5 mm。为探究上述3个影响因素对排种性能的影响规律及确定最佳参数组合,采用Box-Behnken试验方法开展三因素三水平旋转正交试验。各因素编码如表1所示。

表1 因素编码

Tab. 1 Factors and coding of experiment

编码	因素		
	吸孔直径 x_1 / mm	真空度 x_2 / kPa	前进速度 x_3 / ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)
-1	4.0	4.0	8
0	4.5	4.5	10
1	5.0	5.0	12

每组试验重复3次取平均值。主要考察该排种器内外圈的合格率和漏播率,根据国家标准GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》确定合格率和漏播率。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 试验结果

根据Design-Expert软件中的Box-Behnken响应曲面法进行试验方案设计与数据分析,以合格率、漏播率为考核指标^[27], X_1 、 X_2 、 X_3 为因素吸孔直径、真空度和前进速度的编码值。试验方案和结果如表2所示。

3.3.2 回归数学模型建立和显著性检验

对试验结果进行方差分析,如表3所示,采用Design-Expert 8.0.6.1软件对试验数据进行多元回归拟合,可以得到内圈合格率 Y_1 、内圈漏播率 Y_2 和外圈合格率 Y_3 、外圈漏播率 Y_4 的回归方程。

(1)内圈合格率回归模型建立和显著性检验

根据表3可知,在信度 α 为0.05的条件下,模

表2 试验方案与结果

Tab.2 Test design scheme and results

序号	因素			内圈指标/%		外圈指标/%	
	X_1	X_2	X_3	合格率	漏播率	合格率	漏播率
				Y_1	Y_2	Y_3	Y_4
1	-1	-1	0	82.53	15.10	82.93	12.93
2	1	-1	0	83.10	8.77	83.33	4.93
3	-1	1	0	82.63	5.87	83.63	5.63
4	1	1	0	88.03	2.73	86.73	2.17
5	-1	0	-1	86.17	4.17	85.03	3.60
6	1	0	-1	83.20	2.50	82.63	2.77
7	-1	0	1	82.60	11.90	83.77	13.77
8	1	0	1	87.30	6.97	85.27	3.17
9	0	-1	-1	90.30	4.87	92.63	5.13
10	0	1	-1	90.67	1.57	91.07	1.87
11	0	-1	1	85.60	14.07	89.10	10.37
12	0	1	1	96.20	3.07	96.23	3.40
13	0	0	0	96.67	0.67	98.13	0.53
14	0	0	0	97.73	1.27	97.40	0.83
15	0	0	0	98.10	0.23	98.37	1.10
16	0	0	0	97.23	0.97	97.63	0.13
17	0	0	0	98.27	1.13	98.27	0.33

型的拟合度为极显著 ($P < 0.01$), 回归模型失拟项 $P = 0.0733$, 表现为不显著, 说明不存在其他影响指标的主要因素。其中前进速度 X_3 的 P 值、吸孔直径和真空度的交互项 (X_1X_2) 的 P 值均大于 0.05, 对排种合格率的影响不显著, 剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_1 = -803.28 + 310.21x_1 + 94.38x_2 + 1.92x_1x_3 + 2.56x_2x_3 - 38.80x_1^2 - 15.30x_2^2 - 0.77x_3^2 \quad (27)$$

通过对式(27)回归系数的检验得出, 影响内圈合格率的主次因素顺序为真空度、吸孔直径和前进速度。

(2) 内圈漏播率回归模型建立和显著性检验

根据表3可知, 在信度 α 为 0.05 的条件下, 模型的拟合度为极显著 ($P < 0.01$), 回归模型失拟项 $P = 0.1735$, 表现为不显著, 说明不存在其他影响指标的主要因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_2 = 608.95 - 149.84x_1 - 124.43x_2 + 5.51x_3 + 3.20x_1x_2 - 0.82x_1x_3 - 1.93x_2x_3 + 15.51x_1^2 + 13.54x_2^2 + 0.41x_3^2 \quad (28)$$

通过对式(28)回归系数的检验得出, 影响内圈漏播率的主次因素顺序为真空度、前进速度和吸孔直径。

(3) 外圈合格率回归模型建立和显著性检验

根据表3可知, 在信度 α 为 0.05 的条件下, 模型的拟合度为极显著 ($P < 0.01$), 回归模型失拟项 $P = 0.0755$, 表现为不显著, 说明不存在其他影响指

表3 方差分析

Tab.3 Variance analysis result

评价指标	方差来源	平方和	自由度	F	p	显著性
内圈合格率	模型	624.17	9	58.00	<0.0001	**
	X_1	7.41	1	6.20	0.0416	*
	X_2	32.00	1	26.76	0.0013	**
	X_3	0.23	1	0.20	0.6719	
	X_1X_2	5.84	1	4.88	0.0628	
	X_1X_3	14.69	1	12.29	0.0099	**
	X_2X_3	26.18	1	21.90	0.0023	**
	X_1^2	396.17	1	331.33	<0.0001	**
	X_2^2	61.60	1	51.52	0.0002	**
	X_3^2	40.03	1	33.48	0.0007	**
	残差	8.37	7			
	失拟	6.65	3	5.16	0.0733	
	误差	1.72	4			
总和	632.54	16				
内圈漏播率	模型	362.77	9	133.94	<0.0001	**
	X_1	32.27	1	107.22	<0.0001	**
	X_2	109.27	1	363.10	<0.0001	**
	X_3	65.55	1	217.82	<0.0001	**
	X_1X_2	2.56	1	8.51	0.0224	*
	X_1X_3	2.67	1	8.86	0.0206	*
	X_2X_3	14.82	1	49.25	0.0002	**
	X_1^2	63.31	1	210.35	<0.0001	**
	X_2^2	48.27	1	160.39	<0.0001	**
	X_3^2	11.50	1	38.21	0.0005	**
	残差	2.11	7			
	失拟	1.43	3	2.79	0.1735	
	误差	0.68	4			
总和	364.87	16				
外圈合格率	模型	647.35	9	147.76	<0.0001	**
	X_1	0.85	1	1.74	0.2291	
	X_2	11.68	1	23.99	0.0018	**
	X_3	1.13	1	2.31	0.1722	
	X_1X_2	1.82	1	3.74	0.0942	
	X_1X_3	3.80	1	7.81	0.0267	*
	X_2X_3	18.92	1	38.87	0.0004	**
	X_1^2	504.16	1	1035.68	<0.0001	**
	X_2^2	34.42	1	70.71	<0.0001	**
	X_3^2	34.02	1	69.89	<0.0001	**
	残差	3.41	7			
	失拟	2.70	3	5.07	0.0755	
	误差	0.71	4			
总和	650.76	16				
外圈漏播率	模型	286.36	9	92.59	<0.0001	**
	X_1	65.55	1	190.75	<0.0001	**
	X_2	51.51	1	149.90	<0.0001	**
	X_3	37.56	1	109.29	<0.0001	**
	X_1X_2	5.14	1	14.95	0.0062	**
	X_1X_3	23.85	1	69.39	<0.0001	**
	X_2X_3	3.42	1	9.96	0.0160	*
	X_1^2	43.97	1	127.96	<0.0001	**
	X_2^2	28.43	1	82.72	<0.0001	**
	X_3^2	16.95	1	49.34	0.0002	**
	残差	2.41	7			
	失拟	1.81	3	4.04	0.1054	
	误差	0.60	4			
总和	288.77	16				

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

标的主要因素。其中吸孔直径、前进速度以及吸孔直径和真空度的交互项的 P 值均大于 0.05, 对外圈合格率的影响不显著, 剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_1 = -910.29 + 71.45x_2 + 0.98x_1x_3 + 2.17x_2x_3 - 43.77x_1^2 - 11.44x_2^2 - 0.71x_3^2 \quad (29)$$

通过对式(29)回归系数的检验得出, 影响外圈合格率的主次因素顺序为真空度、前进速度和吸孔直径。

(4) 外圈漏播率回归模型建立和显著性检验

根据表 3 可知, 在信度 α 为 0.05 的条件下, 模型的拟合度为极显著 ($P < 0.01$), 回归模型失拟项 $P = 0.1054$, 表现为不显著, 说明不存在其他影响指

标的主要因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_4 = 501.05 - 118.05x_1 - 109.76x_2 + 6.20x_3 + 4.53x_1x_2 - 2.44x_1x_3 - 0.93x_2x_3 + 12.93x_1^2 + 10.39x_2^2 + 0.50x_3^2 \quad (30)$$

通过对式(30)回归系数的检验得出, 影响外圈漏播率的主次因素顺序为吸孔直径、真空度和前进速度。

3.3.3 各因素对性能指标影响效应分析

采用降维法将吸孔直径、前进速度和真空度中任意一项调至零水平^[20], 绘制出每组显著的交互作用分别对内圈合格率、内圈漏播率、外圈合格率和外圈漏播率影响的响应曲面图, 如图 10 ~ 13 所示。

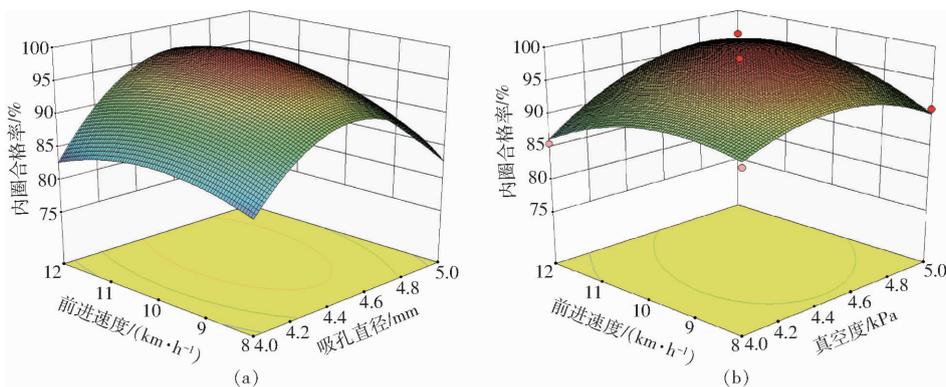


图 10 交互作用对内圈合格率的影响

Fig. 10 Effects of interactive factors on inner eligible rate

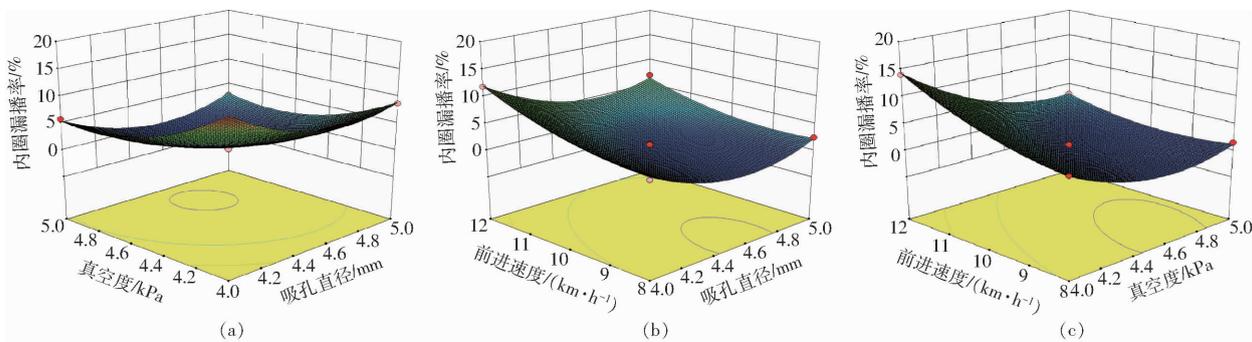


图 11 交互作用对内圈漏播率的影响

Fig. 11 Effects of interactive factors on inner missing rate

由图 10a 可知, 当真空度为 4.5 kPa 时, 在同一前进速度下, 随着吸孔直径的增加, 内圈合格率呈现先升后降趋势, 且变化幅度较大, 同样真空度下, 吸孔直径较小时, 对种子的吸附力较小, 易产生种子未吸附或吸附稳定性差的情况, 导致漏播率较高, 合格率较低; 吸孔直径过大时, 吸附力较大, 易出现吸附多粒种子的情况, 导致重播率升高, 合格率降低。在吸孔直径一定的情况下内圈合格率随前进速度的增加先高后低, 且变化幅度较小, 在同一真空度和吸孔直径下, 前进速度较低时, 排种盘转速较小, 充种时间较大, 重播情况较多, 速度过快, 排种盘转速过高,

充种时间较少, 漏播率较高, 速度过低或过高时合格率都有所降低。由图 10b 可知, 当吸孔直径为 4.5 mm 时, 在同一真空度下, 随着前进速度的增加, 内圈合格率呈现小幅度先升后降趋势, 在同一真空度和吸孔直径下, 前进速度增加时, 排种盘转速提高, 充种时间降低, 重播情况减小, 漏播情况增加, 导致内圈合格率呈现小幅度先升后降趋势。在同一作业速度下, 内圈合格率随真空度的增加先高后低, 且变化幅度较小, 真空度较低时, 对种子的吸附力较小, 易产生种子未吸附或吸附稳定性差的情况, 导致漏播升高, 合格率降低; 真空度过大时, 吸附力较大,

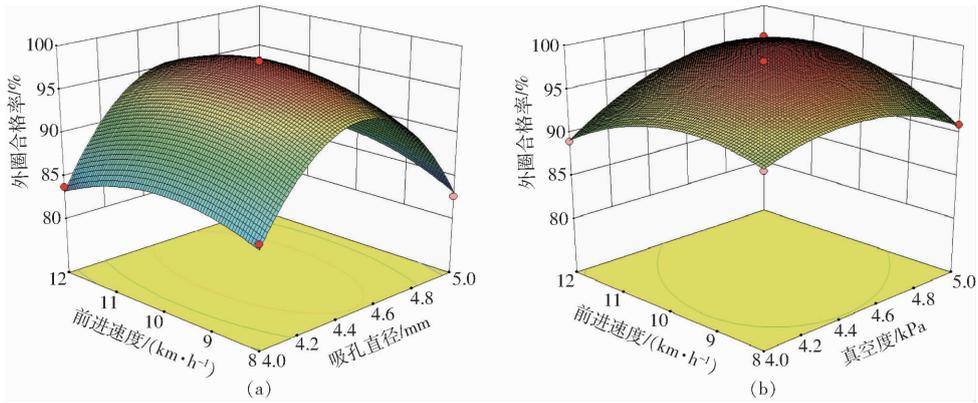


图12 交互作用对外圈合格率的影响

Fig.12 Effects of interactive factors on outer eligible rate

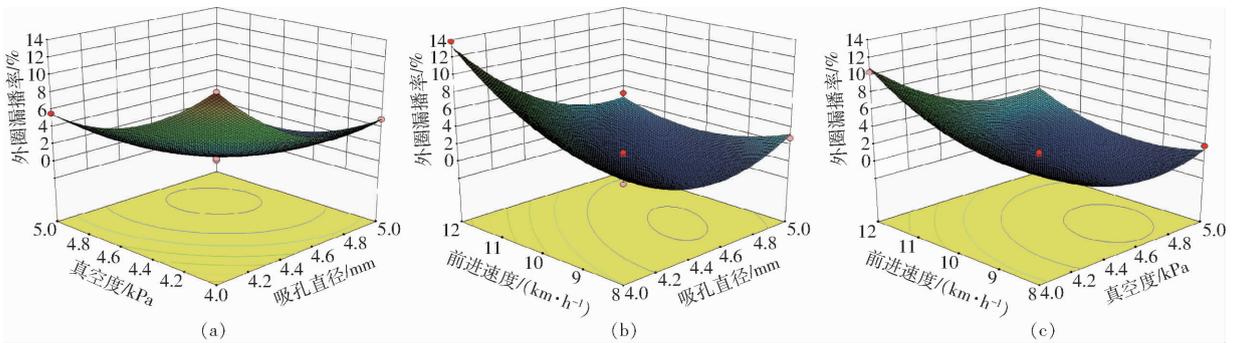


图13 交互作用对外圈漏播率的影响

Fig.13 Effects of interactive factors on outer missing rate

易出现吸附多粒种子的情况,导致重播率升高,合格率降低。

由图11a可知,当前进速度为10 km/h时,在同一吸孔直径下,随着真空度的增加,内圈漏播率逐渐降低,随着真空度的增加导致吸孔吸附能力增加,漏吸的情况降低,因此漏播率降低;在真空度一定的情况下内圈漏播率随吸孔直径的增加小幅降低,在真空度一定的情况下,吸孔直径增加,吸孔吸附力增加,吸附能力提高,漏吸情况减少,漏播率降低。由图11b可知,当真空度为4.5 kPa时,在同一吸孔直径下,随着前进速度的增加,内圈漏播率逐渐增加,在前进速度增加的情况下,排种盘转速增高,充种时间降低,吸附的稳定性下降,导致漏吸的情况增加,漏播率升高;在同一前进速度下,内圈漏播率随吸孔直径的增加逐渐降低,随着吸孔直径增加,吸附力提高,吸附稳定性增强,漏播减少,漏播率降低。由图11c可知,当吸孔直径为4.5 mm时,在同一前进速度下,随着真空度的增加,内圈漏播率小幅度下降,随着真空度增加,吸附能力提高,漏吸减少,导致漏播率降低;在同一真空度下,随着速度的增加,内圈漏播率增加,且上升幅度较大,随着前进速度的增加,排种盘转速增加,导致充种时间降低,充种稳定性下降,导致漏吸情况增加,漏播率升高。当真空度较低和吸孔直径较小时,吸附能力降低,吸附稳定性

下降,容易导致漏播增加;前进速度增加,导致排种盘转速升高,种子充种时间缩短,易产生未能吸附的情况,同样导致漏播升高。

由图12和图13的交互作用影响规律可知,各因素对外圈排种性能的影响规律与内圈相似,排种性能指标随因素的变化趋势大致相同。在同一真空度和前进速度下,当孔径过小时,吸孔的吸附力过小,对种子的吸附作用较低,种子的吸附稳定性较差,漏吸的情况较高,漏播率较大,导致合格率较低;吸孔直径过大时,吸附力较大,易出现吸附多粒种子的情况,导致重播升高,合格率也较低。在同一前进速度和吸孔直径下,真空度增大时,吸孔处产生的吸附力增大,吸附能力增强,漏吸情况减少,漏播率有所降低,但吸附多粒的情况增加,重播升高,在一定情况下增加真空度有助于提高合格率,但当真空度过大时重播大幅增加,导致合格率也下降。在同一吸孔直径和真空度下,当前进速度较低时,充种时间较长,充种效果增强,一孔吸附多粒的情况增加,导致重播较高,合格率较低;当前进速度升高时,随着前进速度的增加,排种盘转速增加,虽然减少了充种时间,但对种子的扰动性能增强,增加了种子的流动性,使得吸附效果更佳,因此在一定程度上提高了排种器性能;当前进速度上升到一定程度时,使得充种时间较短,增加了吸附的难度,导致漏播情况大幅增

加,漏播率上升,使得合格率降低,使得排种器工作性能下降。

3.3.4 参数优化与验证试验

依据国家标准 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机技术条件》,遵循高合格率、低漏播率优化原则,在吸孔直径为 4~5 mm,真空度为 4~5 kPa,前进速度 8~12 km/h 的约束条件下进行优化求解。得到吸孔直径为 4.5 mm,真空度为 4.5 kPa,前进速度为 10 km/h 的参数组合条件下最优解,在该条件下内圈合格率为 97.60%,内圈漏播率为 0.85%;外圈合格率为 97.96%,外圈漏播率为 0.59%。

为了验证优化分析结果的正确性,在最优解的条件下,以中黄 37 大豆种子为试验材料进行了验证试验,试验重复 10 次,取平均值,结果表明内圈合格率为 97.83%,内圈漏播率为 0.62%;外圈合格率为 98.24%,外圈漏播率为 0.47%。优化结果可信。

4 适应性试验

4.1 高速适应性试验

为了考察排种器对高速的适应性,在吸孔直径为 4.5 mm,真空度为 4.5 kPa,单行株距 16 cm,即窄双行株距为 8 cm 的条件下,采用中黄 37 大豆品种进行了速度验证试验,速度选取 8、10、12、14 km/h 4 个梯度进行试验,试验结果如表 4 所示,结果表明,速度在 14 km/h 内时内、外圈合格率大于 93%,内、外圈漏播率小于 5%,内、外圈重播率小于 2%,均能满足设计要求。

表 4 速度适应性试验结果

Tab.4 Results of speed adaptability test

前进速度/ (km·h ⁻¹)	评价指标/%					
	内圈合格 率	内圈漏 播率	内圈重 播率	外圈合格 率	外圈漏 播率	外圈重 播率
8	97.68	0.46	1.86	97.83	0.43	1.74
10	97.91	0.60	1.49	98.18	0.53	1.29
12	96.36	2.16	1.48	96.67	2.05	1.28
14	93.82	4.82	1.36	94.45	4.46	1.09

4.2 品种适应性试验

豌豆、小豆、绿豆与大豆品种在物理特性参数和种植模式上具有相似性,可采用同一排种器通过更换不同吸孔的排种盘实现高速精量播种作业。为了考察排种器对不同豆类品种的适应性,选取豌豆、小豆和绿豆进行了排种性能试验,每种豆类选取 2 个品种,对其外形尺寸进行测量,结合前述吸孔直径确定方法,根据不同作物的外形尺寸参数确定不同吸孔尺寸的排种盘进行播种适应性试验,具体参数如表 5 所示。对 3 个豆类品种,在前进速度为

10 km/h 下进行验证试验,其中单行株距设置为 16 cm,即窄双行株距为 8 cm,每组试验重复 5 次取平均值,结果如表 6 所示。

表 5 豆类品种外形尺寸和对应种盘吸孔直径

Tab.5 Geometric sizes of beans and seed disk

豆类	品种	suction pore diameter			吸孔直径 mm
		长度	宽度	厚度	
豌豆	定豌 6 号	6.36	5.68	5.78	4.0
	云豌 18 号	9.16	6.64	5.89	4.5
小豆	唐红 2010-23	7.29	5.96	5.68	4.0
	唐红 2010-12	6.80	5.59	5.24	4.0
绿豆	渝绿 1 号	5.14	3.90	3.93	2.5
	宛绿 2 号	5.17	4.02	3.86	2.5

表 6 品种适应性试验结果

Tab.6 Results of variety adaptability test %

豆类品种	评价指标					
	内圈合格 率	内圈漏 播率	内圈重 播率	外圈合格 率	外圈漏 播率	外圈重 播率
定豌 6 号	97.83	0.31	1.89	97.62	0.44	1.94
云豌 18 号	97.38	0.44	2.18	97.53	0.56	1.91
唐红 2010-23	97.31	0.63	2.06	98.23	0.38	1.39
唐红 2010-12	97.86	0.26	1.88	97.57	0.68	1.75
渝绿 1 号	97.82	0.62	1.56	98.26	0.46	1.28
宛绿 2 号	98.06	0.34	1.60	97.84	0.53	1.63

试验结果表明该排种器对豌豆、小豆和绿豆均具有良好的适应性,内、外圈合格率大于 97%,内、外圈漏播率小于 1%,内、外圈重播率小于 3%,满足国家标准要求。

5 结论

(1)针对豆类作物窄距高密度种植模式,结合气吸式排种器特点,研制了一种单风道单排种盘实现双行高速精量播种的排种器,实现了高速精量窄行密植作业。阐述了一器双行气吸式高速精量排种器主要结构和工作原理,建立了关键参数的数学模型。

(2)选取吸孔直径、真空度以及前进速度为主要因素,利用 Box-Behnken 试验方法开展了三因素三水平旋转正交试验,确定了最优组合为吸孔直径 4.5 mm、真空度 4.5 kPa、前进速度 10 km/h,并对最优参数组合进行了验证试验,试验结果表明,内圈合格率为 97.83%,内圈漏播率为 0.62%;外圈合格率为 98.24%,外圈漏播率为 0.47%。与优化结果基本一致。

(3)为了考察排种器对高速的适应性,在吸孔直径为 4.5 mm、真空度为 4.5 kPa 条件下进行了速度适应性试验,试验结果表明,在 14 km/h 之内时,内、外圈合格率大于 93%,内、外圈漏播率小于 5%,

内、外圈重播率小于2%，均满足国家标准要求。

内、外圈合格率大于97%，内、外圈漏播率小于1%，

(4)为考察排种器对豆类品种的适应性,选取豌豆、小豆和绿豆进行了验证试验,试验结果表明,

内、外圈重播率小于3%，满足国家标准要求,具有良好的品种适应性。

参 考 文 献

- [1] 丁乔,杨广林,杨悦乾,等. 大豆窄行平播密植栽培模式及配套机器系统的研究[J]. 东北农业大学学报,2005,36(2): 222-224.
DING Qiao, YANG Guanglin, YANG Yueqian, et al. Research on narrow path horizontal seed close planting mode and whole mechanize production system of soybean[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2005, 36(2): 222-224. (in Chinese)
- [2] 吴娜,刘吉利,徐洪海,等. 4种小杂粮适宜种植密度的研究[J]. 莱阳农学院学报,2006,23(1):47-50,53.
WU Na, LIU Jili, XU Honghai, et al. Studies on planting density in four minor food crops[J]. Journal of Laiyang Agricultural College (Natural Science), 2006, 23(1): 47-50, 53. (in Chinese)
- [3] 孙殿君,蒋洪蔚,胡国华. 大豆垄上三行“大垄密”栽培技术[J]. 大豆科技,2014,22(1):20-24.
SUN Dianjun, JIANG Hongwei, HU Guohua. Cultivation technique of “wide ridge dense planting” in soybean[J]. Soybean Science and Technology, 2014, 22(1): 20-24. (in Chinese)
- [4] 赵清华,许万同,张伟,等. 大豆大垄密植栽培技术模式及配套机械化系统研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2009, 21(3):46-48.
ZHAO Qinghua, XU Wantong, ZHANG Wei, et al. Grand ridge soybean planting and cultivation techniques of pattern matching system of mechanized research[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2009, 21(3): 46-48. (in Chinese)
- [5] 李杞超,纪文义,赵宇,等. 2BZJ-12型大豆窄行平作精密播种机设计与性能试验研究[J]. 东北农业大学学报,2013, 44(5):85-89.
LI Qichao, JI Wenyi, ZHAO Yu, et al. Design and experimental of 2BZJ-12 type of using for narrow-row, flat planting and close seeder of soybean[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2013, 44(5): 85-89. (in Chinese)
- [6] 张兵,李丹,张宁. 黄淮海地区大豆主要种植模式及效益分析[J]. 大豆科学,2011,30(6):987-992.
ZHANG Bing, LI Dan, ZHANG Ning. Soybean planting patterns and benefit analysis of Huang-Huai-Hai region[J]. Soybean Science, 2011, 30(6): 987-992. (in Chinese)
- [7] 杨丽,颜丙新,张东兴,等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(11):38-48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38-48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006. (in Chinese)
- [8] 刘文忠,赵满全,王文明,等. 气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J]. 农业工程学报,2010,26(9):133-138.
LIU Wenzhong, ZHAO Manquan, WANG Wenming, et al. Theoretical analysis and experiments of metering performance of the pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9): 133-138. (in Chinese)
- [9] 丁力,杨丽,刘守荣,等. 辅助充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 Li, YANG Li, LIU Shourong, 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)
- [10] 李玉环,杨丽,韩英,等. 勺夹式蚕豆精量排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):108-116.
LI Yuhuan, YANG Li, HAN Ying, et al. Design and experiment of spoon-clamping type metering device for faba beans [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 108-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2018s015&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.015. (in Chinese)
- [11] 颜丙新,张东兴,崔涛,等. 排种盘和负压腔室同步旋转气吸式玉米精量排种器设计[J]. 农业工程学报,2017,33(23): 15-23.
YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, CUI Tao, et al. Design of pneumatic maize precision seed-metering device with synchronous rotating seed plate and vacuum chamber[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23): 15-23. (in Chinese)
- [12] 孙裕晶,马成林,牛序堂,等. 基于离散元的大豆精密排种过程分析与动态模拟[J]. 农业机械学报,2006,37(11):45-48.
SUN Yujing, MA Chenglin, NIU Xutang, et al. Discrete element analysis and animation of soybean precision seeding process based on CAD boundary model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(11): 45-48. (in Chinese)
- [13] 张建平,李飞雄. 气吸式排种器排种均匀性的 Monte Carlo 模拟[J]. 农业工程学报,1994,10(1):56-62.
ZHANG Jianping, LI Feixiong. The Monte Carlo simulation on release homogeneity of suction-type metering device [J]. Transactions of the CSAE, 1994, 10(1): 56-62. (in Chinese)
- [14] ALI MUSA B. Seeding uniformity for vacuum precision seeders[J]. Scientia Agricola, 2008, 65(3): 318-322.

- [15] ESS D R, HAWKINS S E, YOUNG J C, et al. Evaluation of the performance of a belt metering system for soybeans planted with a grain drill[J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2005, 21(6): 965-969.
- [16] 赵佳乐, 贾洪雷, 姜铭鑫, 等. 大豆播种机偏置双圆盘气吸式排种器[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(8): 78-83. ZHAO Jiale, JIA Honglei, JIANG Mingxin, et al. Suction type offset double disc seed metering device of soybean seeder[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8): 78-83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130814&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.014. (in Chinese)
- [17] 陈玉龙, 贾洪雷, 王佳旭, 等. 大豆高速精密播种机凸勺排种器设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(8): 95-104. CHEN Yulong, JIA Honglei, WANG Jiaxu, et al. Design and experiment of scoop metering device for soybean high-speed and precision seeder[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(8): 95-104. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170810&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.010. (in Chinese)
- [18] 贾洪雷, 陈玉龙, 赵佳乐, 等. 气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 75-86, 139. JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 75-86, 139. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180409&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.009. (in Chinese)
- [19] 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 Sibao, 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)
- [20] 陈海涛, 李桐辉, 王洪飞, 等. 气吸滚筒式垄上三行大豆密植排种器设计与参数优化[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(17): 16-24. CHEN Haitao, LI Tonghui, WANG Hongfei, et al. Design and parameter optimization of pneumatic cylinder ridge three-row close-planting seed-metering device for soybean[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(17): 16-24. (in Chinese)
- [21] 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)
- [22] 史嵩. 气压组合孔式玉米精密排种器设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015. SHI Song. Design and experimental research of the pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [23] 史嵩, 张东兴, 杨丽, 等. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(5): 10-18. SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(5): 10-18. (in Chinese)
- [24] 杨丽, 史嵩, 崔涛, 等. 气吸与机械辅助附种结合式玉米精量排种器[J/OL]. *农业机械学报*, 2012, 43(增刊): 48-53. YANG Li, SHI Song, CUI Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate to assist carrying seed[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(Supp.): 48-53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s10&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.010. (in Chinese)
- [25] 耿端阳. 新编农业机械学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [26] 和贤桃, 郝永亮, 赵东岳, 等. 玉米精量排种器排种质量自动检测仪设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(10): 19-27. HE Xiantao, HAO Yongliang, ZHAO Dongyue, et al. Design and experiment of testing instrument for maize precision seedmeter's performance detection[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10): 19-27. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161003&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.003. (in Chinese)
- [27] 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)