

# 气力式谷子精量排种器结构设计及性能试验

李大鹏 刘飞 赵满全\* 岳瑶 张涛 林震

(内蒙古农业大学 机电工程学院,呼和浩特 010018)

**摘要** 针对现有气力式排种器对谷子等小粒径种子难以实现精量播种问题,根据谷子形状等物理特性,通过优化排种器结构,设计一种舀勺-气吸组合式谷子精量排种器,研究排种器关键部件结构与参数对谷子精量排种性能的影响。应用 JPS-12 排种器性能检测试验台,以排种轴转速、舀种勺位置夹角和舀种勺圆心角为试验因素,以穴粒数合格指数、穴距合格指数、空穴指数及穴距变异系数为试验指标,进行三因素三水平正交试验,分析各试验因素对于性能指标影响的显著性。结果表明:排种器较优的工作参数为,舀种勺圆心角  $45^\circ$ 、舀种勺位置夹角  $-15^\circ$ 、排种轴转速 10 r/min;优化定型后舀勺-气吸组合式谷子精量排种器综合性能试验指标为,穴粒数合格指数 88.7%,穴距合格指数 87.7%,空穴指数 1.3%,穴距变异系数 12.3%。该排种器作业性能满足小粒径作物精量播种和农艺要求。

**关键词** 气力式排种器; 谷子; 精量播种; 结构设计; 性能试验

**中图分类号** S223.2

**文章编号** 1007-4333(2019)11-0141-11

**文献标志码** A

## Structural design and performance test of one pneumatic millet precision seed metering device

LI Dapeng, LIU Fei, ZHAO Manquan\*, YUE Yao, ZHANG Tao, LIN Zhen

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

**Abstract** Aiming at the problem that the existing pneumatic seed metering device is difficult to achieve fine seeding for small-sized seeds such as millet, and according to the physical characteristics of millet shape, a spoon-aspiration combination millet precision metering device was designed by optimizing the structure of the metering device to study on the influence of the structure and parameters of the key components of the seed metering device on the seeding performance of millet. Using the JPS-12 seed metering device performance test bench, three-factor and three-level orthogonal experiments were carried out. The rotation speed of the seed metering axis, the spoon position angle and the central angle of seed spoon were considered as test factors. The qualification index of hole seed number, the qualified index of the distance between holes, the void index and the coefficient of variation of the distance between holes were taken as the test indexes. The significant effects of various experimental factors on the performance indicators were analyzed. The results show that the optimal working parameters of spoon-aspiration combined small-size seed precision metering device were central angle of seed spoon  $45^\circ$ , spoon position angle  $-15^\circ$  and rotation speed of the seed metering axis 10 r/min. The comprehensive performance test index of optimized seed metering device was 88.7% of the qualified index of hole number, 87.7% of the qualified index of hole spacing, 1.3% of the hole index and 12.3% of the variation coefficient of hole spacing. In conclusion, the seed metering device meets the precision seeding and agronomic requirements of small grain crops.

**Keywords** pneumatic metering device; millet; precision seeding; structural design; performance test

收稿日期: 2019-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51365034);内蒙古自治区硕士研究生科研创新项目(S2018111986Z)

第一作者: 李大鹏, 硕士研究生, E-mail: 1038451541@qq.com

通讯作者: 赵满全, 教授, 博士生导师, 主要从事高寒干旱地区农业装备工程与技术研究, E-mail: nmgzhaomq@163.com

小粒径作物种子平均直径 $<3$  mm,主要包括谷子、藜麦、油菜、苜蓿、芝麻以及部分蔬菜花卉和林业种子等<sup>[1]</sup>。2017年我国谷子播种面积约146.67万 $\text{hm}^2$ ,主产区中,内蒙古、山西、河北等种植面积较往年增加20%<sup>[2]</sup>。小粒径种子传统的播种方法为条播或穴播,存在生产效率低、劳动强度大、种子浪费严重、人工管理成本高等问题。研究高效、精确的小粒径种子排种器有利于提高播种的效率和质量<sup>[3]</sup>。精密排种器按工作原理主要分为机械式和气力式两大类,机械式精密排种器的优点是结构简单、维护方便并且成本低;缺点是对种子尺寸要求严格,作业速度较低,故常用于中小型播种机上。与机械式排种器相比气力式排种器具有节约种子、种子损伤小、对种子外形尺寸要求不严、适应性强、易实现单粒或多粒精播和高速度作业等优点。目前,气力式排种器较机械式排种器使用更广泛,是国内外精密排种器研究的重点<sup>[4]</sup>。

气力式排种器有气吸式、气吹式、气压式和气送式等结构型式。为防止吸种孔堵塞,气力式排种器常用气吹清种方式,但存在结构复杂,成本较高等问题<sup>[5]</sup>。国外已有针对排种盘存在的一些具体问题采用不同的解决方法、试验手段进行的试验研究及进一步优化:1)利用计算机视觉测量系统研究排种盘上吸孔数对排种一致性的影响及排种器性能,试验并得出最优的吸孔数参数<sup>[6]</sup>;2)利用 $120^\circ$ 入口锥角的气力式播种机排种装置并使用其对排种盘转速、真空压力和种子孔入口形状对排种装置性能的影响

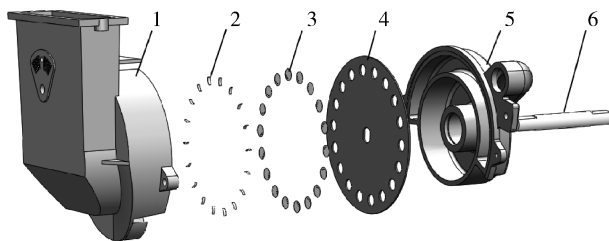
进行研究,优化棉花排种各参数<sup>[7]</sup>;3)利用效率高成本低且适合当地工作的气力式穴盘播种机,得到吸孔尺寸和气压值气力式穴盘排种器的影响并实现不同参数下番茄、辣椒等作物的播种<sup>[8]</sup>。我国现阶段对气力式排种器研究较多,但仍存在一些问题:1)采用气力式油菜、小麦兼用型精量排种器,但充种与清种过程仍为机械结构的形式,存在易伤种的问题<sup>[9]</sup>;2)采用气吸分离、气吹清堵的适于谷子精量播种机的气吸式排种器,其不足在于结构复杂、制造成本高<sup>[10-11]</sup>;3)在气吸式排种装置的排种盘上设计了圆柱孔、倒角截顶圆锥体孔、截顶圆锥体孔和四棱台孔4种结构,但只初步实现气吸式排种装置的谷子精少量穴播<sup>[12-13]</sup>。

针对小粒径种子具有粒径小、质量轻、易堵孔且不易实现精量播种的问题,本研究拟设计一种舀勺-气吸组合式的谷子精量排种器,以解决种子破损、堵孔等问题,实现精量播种。

## 1 排种器整体结构与工作原理

### 1.1 整体结构

本研究所设计的排种器主要由排种盘、舀种勺、吸种片、气吸室、种子室和传动轴等结构组成(图1)。舀种勺和吸种片位于排种盘上,排种盘的一侧为种子室,用于盛放播种所需的种子;排种盘另一侧为气吸室,提供负压将种子吸附在排种盘吸孔上;传动轴安装在排种盘中心孔上并带动排种盘转动;种子室与气吸室通过螺栓连接,将排种盘夹在之间起到密封作用。



1. Seed chamber; 2. Seed spoon; 3. Sheet sucking the seed; 4. Seed tray; 5. Suction chamber; 6. Transmission shaft

图1 舀勺-气吸组合谷子精量排种器结构示意图

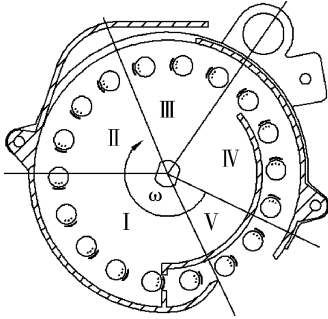
Fig. 1 Structure schematic of spoon-aspiration combination millet precision metering device

### 1.2 工作原理

驱动传动轴使排种盘转动,种子依次经过舀种区、吸种区、清种区、携种区和投种区。舀种区错开气吸室,吸种区、清种区和携种区均经过气吸室,投

种区位于气吸室和种子室壳体之外。舀种勺在舀种区舀取种子;舀种勺到达吸种区时,气吸室内负压将舀种勺上种子吸附在吸孔上,种子与舀种勺分离;舀种勺上多余的种子依靠重力落入种子室,吸孔吸附

种子较多时,由于吸附压力分布不均,受吸力较小的种子脱离吸孔,实现清种目的;吸孔上种子由携种区到达投种区时,种子不再被吸附而落下投种,至此完成舀种-吸种-清种-携种-投种环节(图 2),实现精量、稳定播种<sup>[14]</sup>。



I. 舀种区; II. 吸种区; III. 清种区; IV. 携种区; V. 投种区  
I. Seed spooning area; II. Seed sucking area; III. Clean up seed area; IV. Carrier seed area; V. Throwing seed area  
 $\omega$  为排种盘角速度, rad/s.  
 $\omega$  is the angular speed of the seed tray, rad/s.

图 2 排种器工作原理简图

Fig. 2 Schematic diagram of working principle of seed metering device

## 2 气力式排种器排种过程种子力学分析

为明确排种器结构对排种性能的影响,需要对排种过程中种子受力情况进行分析。为简化分析,对排种过程作如下假设:

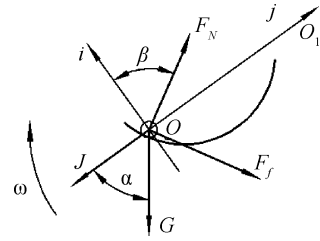
- 1) 谷子种子外形相似,将种子假设为均匀一致的椭圆形刚体,均无弹性变形;
- 2) 排种盘匀速转动,无速度波动。每个吸孔吸附一粒种子,吸孔附近气流稳定。

### 2.1 舀种区种子受力分析

舀种目的是在种群中舀取满足播种要求的种粒数,再通过气流负压将舀取的种子吸附在吸种孔上,舀种与气流负压相结合为了获得良好的充种性能。

舀种区的种子在排种盘转动及机器振动的作用下运动,种群静止状态被打破,排种盘上舀种勺推动种子分离种群。以舀种勺上种子为研究对象,研究单粒种子受力情况,忽略种子与排种盘间摩擦力,假设所有力均作用于种子质心,以种子质心为原点  $o$ ,线速度方向为切向( $oi$ ),质心指向排种盘圆心方向为法向( $oj$ ),建立自然坐标系(图 3)。种子受自身重力  $G$ 、舀种勺对种子的支持力  $F_N$ (指向舀种勺圆心)、种子与舀种勺之间的摩擦力  $F_f$  以及排种盘转

动所产生的离心力  $J$ 。



$F_N$  为种子所需的支持力(指向舀种勺圆心方向),  $N; F_f$  为种子与舀种勺之间的摩擦力,  $N; G$  为种子重力,  $N; J$  为离心力,  $N; \alpha$  为  $oj$  方向与竖直方向的夹角, ( $^\circ$ );  $\beta$  为  $oi$  方向与支持力方向的夹角, ( $^\circ$ );  $o$  为坐标原点,  $oi$  为切向(线速度方向),  $oj$  为法向(质心指向排种盘圆心方向),  $o_1$  为排种盘圆心。其他量符号同图 2。

$F_N$  is the supporting force required for seeds (pointing to the center of the spoon),  $N; F_f$  is the friction between the seed and the spoon,  $N; G$  is seed gravity,  $N; J$  is centrifugal force,  $N; \alpha$  the Angle between  $oj$  direction and vertical direction, ( $^\circ$ );  $\beta$  is the angle between  $oi$  direction and supporting force direction, ( $^\circ$ );  $o$  is the origin of coordinates;  $oi$  is the tangential direction (linear velocity direction);  $oj$  is the normal direction (the center of mass points to the direction of the center of the seed tray);  $o_1$  is the center of the seed tray. Other quantity symbols are the same as in Fig. 2.

图 3 舀种过程种子受力分析

Fig. 3 Force analysis of spooning seed process

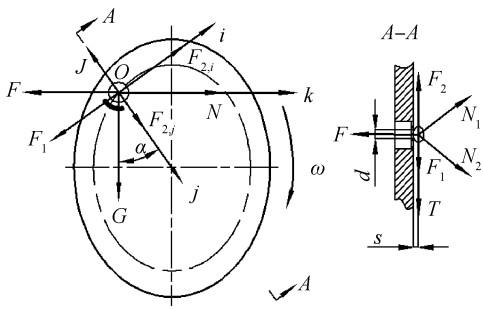
### 2.2 吸种区种子受力分析

舀种勺上种子进入吸种区,种子被吸附在吸孔上,脱离舀种勺。排种器的吸种质量对排种性能起着决定性作用,由于种子粒径较小受负压影响严重,当负压低于吸附临界值会发生种子滑落吸孔的现象。因此,分析种子在吸种区受力,以防止种子发生滑动。

以种子质心为原点  $o$ ,线速度方向为切向( $oi$ ),质心指向排种盘圆心方向为法向( $oj$ ),与排种盘平面垂直方向为副法向( $ok$ ),建立自然坐标系(图 4)。假设所以外力均作用于种子质心,对种子进入吸种区进行受力分析,根据达朗贝尔原理,列平衡方程:

$$\begin{cases} F_{2,i} - F_1 - G\sin\alpha = 0 \\ F_{2,j} - J + G\cos\alpha = 0 \\ J = mR\omega^2 \\ F = P \frac{\pi d^2}{4} \\ F_1 = mgf_1 \\ F_2 = \sqrt{F_{2,i}^2 + F_{2,j}^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $F$  为吸附压力,  $N; P$  为吸附压力,  $kPa; m$  为种子质量,  $kg; G = mg; J$  为离心力,  $N; F_1$  为种子间的摩擦力,假设其方向为  $oi$  负方向,  $N; F_2$  为种子与排种盘之间的摩擦力,  $N; F_{2,i}$  为种子与排种盘之间摩



$F$ 为吸附种子所需的吸力, $N$ ; $N_1$ 和 $N_2$ 为吸孔对种子的支持力, $N$ ; $N$ 为 $N_1$ 和 $N_2$ 的合力(副法向方向), $N$ ; $T$ 为 $G$ 、 $J$ 的合力, $N$ ; $F_1$ 为种子间的摩擦力,假设其方向为 $oi$ 负方向, $N$ ; $F_2$ 为种子与排种盘之间的摩擦力, $N$ ; $F_{2,i}$ 为种子与排种盘之间摩擦力在 $oi$ 方向的分力, $N$ ; $F_{2,j}$ 为种子与排种盘之间摩擦力在 $oj$ 方向的分力, $N$ ; $ok$ 为副法向(与排种盘平面垂直方向); $d$ 为吸孔直径, $m$ ; $s$ 为种子质心与排种盘之间的距离, $m$ 。其他量符号同图3。

$F$  is the suction required to adsorb seeds,  $N$ ;  $N_1$  and  $N_2$  are the supporting force of suction hole to seeds,  $N$ ;  $N$  is the resultant force of  $N_1$  and  $N_2$  (vice normal direction) ( $N$  is the resultant force of  $N_1$  and  $N_2$ ),  $N$ ;  $T$  is the resultant force of  $G$  and  $J$ ,  $N$ ;  $F_1$  is the friction between seeds, assuming that its direction is  $oi$  negative direction,  $N$ ;  $F_2$  is the friction force between seed and seed tray,  $N$ ;  $F_{2,i}$  is the component of friction force in  $oi$  direction between seed and seed tray,  $N$ ;  $F_{2,j}$  is the component of friction force in  $oj$  direction between seed and seed tray,  $N$ ;  $ok$  is the vice normal direction (perpendicular to the plane of the seed tray).  $d$  is the diameter of suction hole,  $m$ ;  $s$  is the distance between the seed center of mass and the seed platter,  $m$ . Other quantity symbols are the same as in Fig. 3.

图4 吸种区种子受力分析

Fig. 4 Force analysis of seed adsorption process

摩擦力在 $oi$ 方向的分力, $N$ ; $F_{2,j}$ 为种子与排种盘之间摩擦力在 $oj$ 方向的分力, $N$ ; $f_1$ 为种子间摩擦系数; $f_2$ 为种子与排种盘之间的摩擦系数; $\alpha$ 为 $oj$ 方向与竖直方向的夹角, $(^\circ)$ ; $\omega$ 为排种盘的角速度; $\text{rad/s}$ ; $d$ 为吸孔直径, $\text{mm}$ ; $R$ 为排种盘吸孔中心的转动半径, $\text{mm}$ 。由式(1)得到种子被吸附、且无滑动的最小吸附真空度:

$$P = \frac{4m}{\pi d^2 f_2} \cdot \sqrt{g^2 f_1^2 + g^2 + R^2 \omega^4 + 2g(gf_1 \sin \alpha - R\omega^2 \cos \alpha)} \quad (2)$$

可知,种子进入吸种区被吸附无滑动的最小吸附真空度与种子间摩擦系数 $f_1$ 、种子与排种盘之间的摩擦系数 $f_2$ 、 $oj$ 方向与竖直方向的夹角 $\alpha$ 、排种盘的角速度 $\omega$ 、种子质量 $m$ 、排种盘吸孔中心的转动半径 $R$ 、吸孔直径 $d$ 有关。

### 2.3 清种区种子受力分析

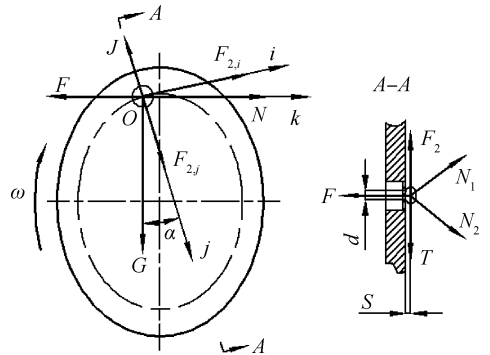
当种子进入清种区,舀种勺上多余的种子依靠重力落入种子室;吸孔吸附种子较多时,由于吸附压力分

布不均,受吸力较小的种子脱离吸孔,实现清种目的。

以种子质心为原点 $o$ ,线速度方向为切向( $oi$ ),质心指向排种盘圆心方向为法向( $oj$ ),与排种盘平面垂直方向为副法向( $ok$ ),建立自然坐标系(图5)。进入清种区的种子与种群分离,故不考虑种间摩擦力的作用。为保证清种区种子不脱离吸孔,对种子清种阶段进行受力分析,种子无滑动的最小吸附真空度为:

$$P = \frac{4m}{\pi d^2 f_2} \sqrt{g^2 + R^2 \omega^4 - 2gR\omega^2 \cos \alpha} \quad (3)$$

在清种区种子被吸附无滑动的最小吸附真空度与排种盘的角速度 $\omega$ 、竖直方向与 $oj$ 方向的夹角 $\alpha$ 、种子与排种盘之间的摩擦系数 $f_2$ 、种子质量 $m$ 、排种盘吸孔中心的转动半径 $R$ 、吸孔直径 $d$ 有关。



量符号解释同图4。

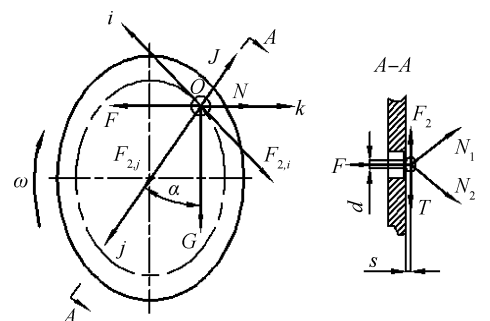
The symbol of the quantity is the same as in Fig. 4.

图5 清种区种子受力分析

Fig. 5 Force analysis of seed in clearing planting area

### 2.4 携种区种子受力分析

当种子进入携种区,吸附压力要维持稳定,并且要避免机器振动导致吸孔吸附的种子发生滑落现象,故吸附压力可以适当增大,保证种子的吸附稳定性。携种区种子受力情况与清种区相同(图6)。



量符号解释同图4。

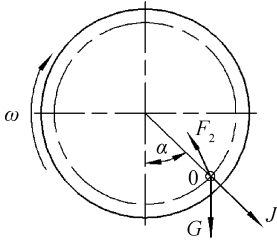
The symbol of the quantity is the same as in Fig. 4.

图6 携种区种子受力分析

Fig. 6 Force analysis of seeds in seed-carrying area

### 2.5 投种区种子受力分析

当排种盘转至投种区,种子不受吸附力作用,由重力作用脱离吸孔。因种子质量小,排种盘转速低,故不考虑空气阻力的影响。种子在投种区受重力  $G$ 、离心力  $J$ 、种子与排种盘之间的摩擦力  $F_2$ (图 7)。



量符号解释同图 4。

The symbol of the quantity is the same as in Fig. 4.

图 7 投种区种子受力分析

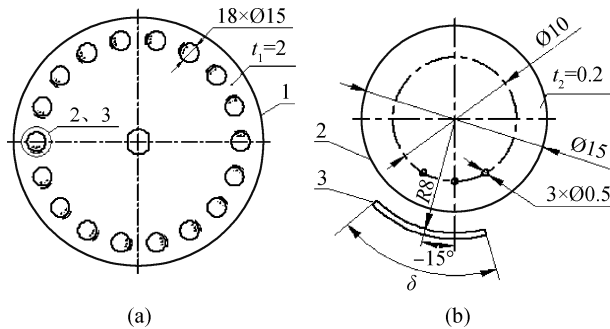
Fig. 7 Force analysis of seeds in throwing process

## 3 关键部件结构设计

### 3.1 排种盘设计

对气吸式排种装置排种性能影响显著的结构参数主要是吸种孔直径、结构形式以及吸孔数量<sup>[15]</sup>。若种子在吸附过程中不考虑摩擦力作用,根据种子的受力情况(图 4~图 6),为保证种子不脱离吸孔,必须满足:

$$(F - N) \frac{d}{2} = T \cdot s \quad (4)$$



1. 盘体;2. 吸种片;3. 舀种勺

1. Body of seed tray;2. Sheet sucking the seed;3. Seed spoon

$t_1$  为排种盘厚度,mm; $t_2$  为吸种片厚度,mm; $\delta$  为舀种勺圆心角, $^\circ$ 。

$t_1$  is the thickness of the seed tray,mm; $t_2$  is the thickness of the sheet sucking the seed,mm; $\delta$  is central angle of seed spoon, $^\circ$ 。

图 8 排种盘结构(a)和舀种勺与吸种片位置(b)示意图

Fig. 8 Schematic diagram of structure of metering tray (a) and position of seed spoon and sheet sucking the seed (b)

### 3.2 气吸室设计

对气吸室设计时,考虑种子在吸附各环节所需吸附真空度的大小。为避免气吸压力在气道传递过程中损失,将进气口设计在清种区与携种区之间

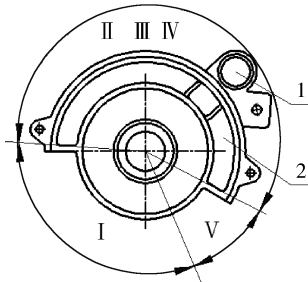
式中: $s$  为种子质心到排种盘的距离,mm。可知,吸附力增大,吸孔直径减小,空穴率降低,排种性能提高;当孔径减小到一定值时,漏气量增大,排种性能降低。小粒径种子漂浮速度小,对真空负压波动敏感,排种盘厚度比种子尺寸大,在小粒径种子播种过程中存在吸孔堵塞与伤种等问题。本试验用铜片为吸种片材料,减小吸种片厚度和吸孔直径,可保证材料强度和吸种稳定,从而降低小粒径种子堵塞吸孔与伤种的现象。设计吸种片厚 0.2 mm,吸种片开有 3 个直径为 0.5 mm 呈弧线分布的吸孔(图 8)。

机器作业速度不变,吸孔组数量增多,排种盘的转速降低,排种性能提高。吸孔组数量过多,吸孔组之间产生干涉,影响排种性能。根据小粒径精量穴播农机和农艺要求,设计排种盘开设 18 组孔,满足穴距要求。

由图 3 可知,当舀种勺转至水平位置时,种子所需支持力与种子重力相等。舀种勺舀取面积对舀种能力影响显著,舀种勺面积较大时,每勺舀取种子多,导致穴粒数增多;舀种勺面积较小时,每勺舀取种子少,导致空穴率升高。为不影响舀种勺舀取种子和吸孔吸附种子,舀种勺宽度和舀种勺与吸孔距离大于种子最大直径,设计舀种勺圆弧半径为 8 mm。将盘体、吸种片和舀种勺用粘接方法连接。

(图 9),若吸种区达到稳定吸种,即保障了清种区与携种区稳定吸种。舀种结束后进入气吸区,气吸区包含吸种区、清种区和携种区,气道结束后进入投种区。由于密封性问题,吸附压力传递会有损失,风机

工作时会出现压力波动现象,故在作业中可适当加大吸附压力。本研究中,由于吸孔较小,吸附真空度设置为较大的固定值,故未将负压作为试验因素。



1. 进气口; 2. 气道 1. Intake port; 2. Airway

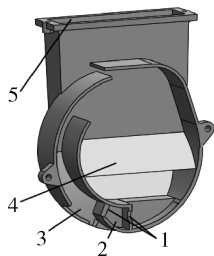
I、II、III、IV、V意义同图2。I, II, III, IV and V are the same as in Fig. 2.

图9 气吸室结构示意图

Fig. 9 Schematic diagram of suction chamber structure

### 3.3 种子室的设计

舀种勺随排种盘在种子室转动,种子室设置舀种勺通路,通路之间有密闭腔,密闭腔储存由通路流出的种子。种子室设置挡种板,挡种板防止种子室种子进入吸种区,出现未经舀种直接吸种的现象。排种盘转至投种区,种子经投种口脱离排种盘(图10)。根据投种区受力分析,投种口设置在排种器下方投种更稳定。排种器应靠近地面放置,可减小种子与地面高度和投种时间,从而减小种子位移,保证粒距均匀稳定。



1. 舀种勺通路; 2. 密闭腔; 3. 投种口; 4. 挡种板; 5. 入种口

1. Seed spoon access; 2. Closed chamber; 3. Throwing seed exit; 4. Seed retaining plate; 5. Seed entrance

图10 种子室结构示意图

Fig. 10 Schematic diagram of seed chamber structure

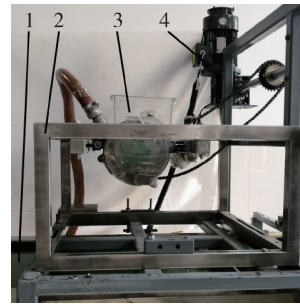
## 4 试验与结果分析

### 4.1 试验条件与方法

#### 4.1.1 试验材料及设备

以冀谷22种子为试验材料,其三轴尺寸分别为:

长1.98 mm、宽1.65 mm、高1.29 mm,球形度81.6%<sup>[16]</sup>。试验设备由JPS-12排种器性能检测试验台、舀勺-气吸组合式谷子精量排种器等组成(图11)。



1. 种床; 2. 台架; 3. 排种器; 4. 电机

1. Seed bed; 2. Platform; 3. Seed metering device; 4. Motor

图11 排种器性能检测试验台

Fig. 11 Seed metering device performance test bench

#### 4.1.2 试验因素

通过舀种区种子受力分析和预试验发现,舀勺-气吸组合式的谷子精量排种器进行舀种作业时,舀种勺圆心角( $\delta$ )、舀种勺弦长中垂线与竖直方向夹角(简称:舀种勺位置夹角)和排种盘转速对充种性能具有重要的影响,故设计排种盘上不同舀种勺圆心角和位置夹角的试验装置9套。设计三因素三水平正交试验,通过极差和方差试验分析试验因素对于性能指标的影响显著性,以期得到较优参数组合。

舀种勺圆心角:舀种勺圆心角较小时,舀取种子能力低,导致空穴率升高;舀种勺圆心角较大时,舀取种子多,导致吸种重复率升高。本研究选择舀种勺圆心角分别为 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 进行试验。

舀种勺位置夹角:舀种勺位置夹角对于舀取种子数量,以及对舀取种子后吸附种子性能有一定的影响,本研究选择舀种勺位置夹角为 $-15^\circ$ 、 $0^\circ$ 、 $15^\circ$ 进行试验。

排种盘转速:舀种勺具有搅种功能,排种盘转速较低时,种群流动性差,部分区域种子堆积,导致吸种过多;排种盘转速较高时,种子容易被舀种勺抛出,充种性能下降。综合选择排种盘转速10、12.5、15 r/min进行试验。

#### 4.1.3 试验指标

本研究以穴粒数合格指数、穴距合格指数、空穴指数及穴距变异系数为试验评价指标,试验根据农业标准进行计算并分析各个因素对于排种器工作性能的影响规律<sup>[17-18]</sup>。每穴穴距以 $X_i \pm 15$  mm为合格,若 $>1.5X_i$ ,则为空穴。根据农艺要求,每穴2~

6 粒种子合格, <2 或 >6 粒为不合格, 每次测量不少于 20 个穴距。

本试验中, 设定种床带运行速度 2.7~4.1 km/h, 播种距离较长时, 理论穴距  $X_r$  采用式(5)计算:

$$X_r = \frac{1\ 000V_m}{60nN} \quad (5)$$

式中:  $N$  为排种盘吸种孔数,  $N=18$ ;  $n$  为排种盘转速, r/min;  $V_m$  为种床带运行速度, km/h。

## 4.2 正交试验

### 4.2.1 正交试验设计与结果分析

以舀种勺圆心角、舀种勺位置夹角和排种轴转

速为试验因素, 按照  $L^9(3^4)$  正交表设计三因素三水平正交试验<sup>[19-20]</sup>。排种器性能正交试验因素与水平见表 1, 试验结果见表 2。

由极差分析试验结果(表 3)知, 空列中极差比其他因素极差都小, 说明因素间无交互作用。极差越大说明试验因素水平的改变对于试验指标的影响越大, 即舀种勺圆心角对穴粒数合格指数、穴距合格指数和穴距变异系数影响最大, 舀种勺位置夹角影响次之, 排种盘转速影响较小; 对于空穴指数, 影响试验指标的主要顺序依次是舀种勺圆心角 > 舀种勺位置夹角 = 排种盘转速。

表 1 排种器性能正交试验因素与水平

Table 1 Orthogonal test factor and level of seed metering device performance

水平 Level	因素 Factor		
	A, 舀种勺圆心角/(°)	B, 排种盘转速/(r/min)	C, 舀种勺位置夹角/(°)
	Central angle of seed spoon	Speed of seed tray	Seed spoon position angle
1	60	15.0	-15
2	45	12.5	0
3	30	10.0	15

表 2 排种器性能正交试验结果

Table 2 Orthogonal test results of seed metering device performance

试验号 Test number	因素水平值 Factor level				穴粒数合格 指数/% Qualification index of hole seed number	穴距合格 指数/% Hole spacing qualification index	空穴指数/ % Empty hole index	穴距变异 系数/% Hole spacing variation index	综合加权 评分值 Comprehensive weighted score
	A	B	空列 Null column	C					
1	1	1	1	1	73	73	3	19.78	21.12
2	1	2	2	2	41	79	0	10.65	18.78
3	1	3	3	3	76	71	1	15.74	20.16
4	2	1	2	3	87	85	6	18.11	12.42
5	2	2	3	1	85	94	4	13.89	5.08
6	2	3	1	2	76	91	2	11.33	6.88
7	3	1	3	2	38	67	15	35.40	39.42
8	3	2	1	3	21	63	17	38.12	46.12
9	3	3	2	1	46	66	14	35.62	38.39

注: A、B、C 为试验因素, 具体见表 1, 下表同。空列用于误差分析。

Note: A, B and C are test factors. See Table 1 for details, the same as in the following table. Null column for error analysis.

表3 排种器性能极差分析结果

Table 3 Results of range analysis of seed metering device performance

试验指标 Test index	分析项 Analysis item	A	B	误差 Error	C
穴粒数合格指数/% Qualification index of hole seed Number	$K_1$	191	191	171	209
	$K_2$	248	147	178	147
	$K_3$	101	202	191	184
	极差 $R$	147	55	20	62
	因素主次	$A > C > B$			
	较优组合	$A_2 C_1 B_3$			
穴距合格指数/% Hole spacing qualification index	$K_1$	223	225	227	233
	$K_2$	273	236	230	237
	$K_3$	195	228	232	219
	极差 $R$	78	11	5	18
	因素主次	$A > C > B$			
	较优组合	$A_2 C_2 B_2$			
空穴指数/% Empty hole index	$K_1$	4	24	22	21
	$K_2$	12	21	20	17
	$K_3$	46	17	20	24
	极差 $R$	42	7	2	7
	因素主次	$A > C = B$			
	较优组合	$A_1 C_2 B_3 / A_1 B_3 C_2$			
穴距变异系数/% Hole spacing variation index	$K_1$	46.17	73.29	69.23	69.29
	$K_2$	43.33	62.66	64.38	57.38
	$K_3$	109.14	62.69	65.03	71.97
	极差 $R$	65.81	10.63	4.85	14.59
	因素主次	$A > C > B$			
	较优组合	$A_2 C_2 B_2$			

注:  $K_i$  为任一列水平号为  $i$  时所对应的结果之和,  $i=1,2,3$ 。

Note:  $K_i$  is the sum of the corresponding results when the level number on any column is  $i$  ( $i=1,2,3$ ).

由方差分析结果(表4)知,各参数对穴粒数合格指数影响如下:舀种勺圆心角具有非常显著的影响,舀种勺位置夹角具有显著的影响,排种盘转速无显著的影响;对穴距合格指数和穴距变异系数影响如下:舀种勺圆心角具有高度显著的影响,舀种勺位置夹角具有显著的影响,排种盘转速无显著的影响;对空穴指数影响如下:舀种勺圆心角具有非常显著的影响,舀种勺位置夹角和排种盘转速具有显著的影响。穴粒数合格指数的较优组合  $A_2 C_1 B_3$ ,穴距合格指数和穴距变异系数较优组合  $A_2 C_2 B_2$ ,空穴指数

较优组合  $A_1 C_2 B_3$  或  $A_1 B_3 C_2$ 。

由于各指标最佳工况不同,采用综合加权评分法以兼顾各指标得失。根据经验和农业技术要求,认为空穴指数指标最重要,赋予权值 0.5,穴距合格指数和穴距变异系数赋予权值 0.2,穴粒数合格指数赋予权值 0.1,统一各指标值的变化趋势,将合格指数指标值变化趋势转化为“越小越好”<sup>[21-22]</sup>。根据综合加权评分值对试验结果进行极差分析(表5)。该排种器较优作业参数为舀种勺圆心角  $45^\circ$ 、舀种勺位置夹角  $-15^\circ$ 、排种轴转速 10 r/min。



表 4 排种器性能方差分析结果

Table 4 Results of variance analysis of seed metering device performance

试验指标 Test index	方差来源 Source of variance	平方和 Quadratic sum	自由度 Free degree	均方 Mean square	F 值 Variance ratio	显著性 Saliency
穴粒数合格指数/% Qualification index of hole seed Number	A	3 362	2	1 831	53.31	**
	B	565	2	283	8.22	—
	误差	68	2	34		
穴距合格指数/% Hole spacing qualification index	C	649	2	325	9.44	*
	A	1 347	2	674	336.75	***
	B	21	2	11	5.25	—
空穴指数/% Empty hole index	误差	4	2	2		
	C	59	2	30	14.75	*
	A	332	2	166	368.44	***
穴距变异系数/% Hole spacing variation index	B	8	2	4	9.11	*
	误差	1	2	0.5		
	C	8	2	4	9.11	*
穴距变异系数/% Hole spacing variation index	A	923	2	461	192.27	***
	B	25	2	13	5.25	—
	误差	5	2	2		
	C	67	2	34	14.85	*

注： $F > 99$ ，具有高度显著的影响，用“\*\*\*”表示； $19 < F \leq 99$ ，具有非常显著的影响，用“\*\*”表示； $9 < F \leq 19$ ，具有显著的影响，用“\*”表示； $F \leq 9$ ，无显著的影响，用“—”表示。

Note:  $F > 99$ , with a highly significant impact, expressed by “\*\*\*”;  $19 < F \leq 99$ , with a very significant impact, expressed by “\*\*”;  $9 < F \leq 19$ , with a significant impact, expressed by “\*”;  $F \leq 9$ , without a significant impact, expressed by “—”.

表 5 综合加权评分值极差分析结果

Table 5 Comprehensive weighted score range analysis results

分析项 Analysis item	试验因素 Text factor		
	A	B	C
$k_1$	20.02	24.32	21.53
$k_2$	8.13	23.33	21.69
$k_3$	41.31	21.81	26.23
较优组合 Better decision	$A_2 C_1 B_3$		

注： $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  分别表示各因素各水平下综合评分的平均值。

Noties:  $k_1$ ,  $k_2$  and  $k_3$  are respectively average values of the results of levels.

#### 4.2.2 试验验证

在较优作业参数条件下,对排种器性能进行验证试验,结果见表6:穴粒数合格指数88.7%,穴距

合格指数87.7%,空穴指数1.3%,穴距变异系数12.3%,满足行业标准及农艺要求。

表6 排种器性能验证试验结果

Table 6 Verification test results of seed metering device performance

%

试验指标 Test index	试验号 Text number			平均值 Average value	标准值 Standard value
	1	2	3		
穴粒数合格指数 Qualification index of hole seed number	88	86	92	88.7	$\geq 80$
穴距合格指数 Hole spacing qualification index	86	87	90	87.7	$\geq 80$
空穴指数 Empty hole index	2	1	1	1.3	$\leq 2$
穴距变异系数 Hole spacing variation index	15	10	12	12.3	$\leq 40$

## 5 结论

1)本研究对排种过程中谷子进行了受力分析和试验,得出舀种勺圆心角、舀种勺位置夹角和排种盘转速对排种性能影响显著。

2)利用所设计气力式谷子精量排种器进行了正交试验,得出影响排种器性能的主次因素为:舀种勺圆心角>舀种勺位置夹角>排种盘转速。

3)排种器较优工作参数为舀种勺圆心角45°、舀种勺位置夹角-15°、排种轴转速10 r/min,此时穴粒数合格指数为88.7%,穴距合格指数87.7%,空穴指数1.3%,穴距变异系数12.3%,满足小粒径作物精量播种要求。

## 参考文献 References

[1] 张宁,廖庆喜.我国小粒径种子播种技术与装备的应用与研究进展[J].中国农机化,2012(1):93-96,103  
Zhang N, Liao Q X. Research progress of seeding technology and equipment for small seeds in China[J]. *Chinese Agricultural Mechanization*, 2012(1):93-96,103 (in Chinese)

[2] 李顺国,刘斐,刘猛,赵宇,龚瑞平,杨振立.近期中国谷子高粱产业发展形势与未来趋势[J].农业展望,2018,14(10):37-40  
Li S G, Liu F, Liu M, Zhao Y, Gong R P, Yang Z L. Recent development situation and future trends of China's foxtail millet and sorghum industries[J]. *Agricultural Outlook*, 2018, 14(10):37-40 (in Chinese)

[3] 赵晓顺,郭超龙,桑永英,于华丽,徐鹏云,杜雄.负压式谷子穴播排种器设计及正交试验研究[J].农机化研究,2018,40(8):134-140  
Zhao X S, Guo C L, Sang Y Y, Yu L H, Xu P Y, Du X. Design and orthogonal test of vacuum millet hill-drop seed-metering device[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(8):134-140 (in Chinese)

[4] 赵丽平,那晓雁.精密排种器的研发现状[J].农业科技与装备,2014(6):30-31  
Zhao L P, Na X Y. Present situation of research and development of precision seed metering device[J]. *Agricultural Science & Technology and Equipment*, 2014(6):30-31 (in Chinese)

[5] 许剑平,谢宇峰,徐涛.国内外播种机械的技术现状及发展趋势[J].农机化研究,2011,33(2):234-237  
Xu J P, Xie Y F, Xu T. The present technic status and developing tendency of the domestic and abroad drill [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2011(2):234-237 (in Chinese)

[6] 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

[7] Singh R C, Singh G, Saraswat D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cottonseeds [J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 92(4):429-438

[8] Gaikwad B B, Sirohi N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays [J]. *Biosystems Engineering*,

- 2008,99(3):322-329
- [9] 杨波,廖庆喜,李旭,张宁. 气力式油菜、小麦兼用精量排种器设计及排种分析[J]. 农业工程,2011,1(1):97-101,96  
Yang B, Liao Q X, Li X, Zhang N. Design of pneumatic precision seed-metering device and analysis of seeding process for rape and wheat[J]. *Agricultural Engineering*, 2011,1(1): 97-101,96 (in Chinese)
- [10] 田聪,刘占良,陈林. 谷子精量播种机的研究现状与开发设想[J]. 农机化研究,2013,35(1):10-13  
Tian C, Liu Z L, Chen L. Millet precision seeder research and development [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013,35(1):10-13 (in Chinese)
- [11] 田聪. 气吸式谷子精量播种机的研究[D]. 保定:河北农业大学,2013  
Tian C. Study on the pneumatic precise seeder of millet[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [12] 吕冰. 气吸式谷子排种装置气流场模拟与试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2016  
Lv B. Airflow field simulation and experimental study air-suction millet feed mechanism of seed [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016 (in Chinese)
- [13] 王芳,吕冰,王洪明,赵满全. 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 F, Lv B, Wang H M, Zhao M Q. Structural design and test of seed-suction hole of air-sucking seed-metering device for millet[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017,33(8):30-36 (in Chinese)
- [14] 刘飞. 一种气吸-舀勺组合的小粒径精量排种器: 中国, 21719479. X[P]. 2018-08-21  
Liu F. A small-particle size precision seed metering device combining air suction and scoop; China, 21719479. X[P]. 2018-08-21 (in Chinese)
- [15] 刘文忠,赵满全,王文明,赵士杰. 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 W Z, Zhao M Q, Wang W M, Zhao S J,. Theoretical analysis and experiments of metering performance of the pneumatic seed metering device [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(9): 133-138 (in Chinese)
- [16] 师志刚,程汝宏,刘正理,夏雪岩. 高产抗旱谷子新品种“冀谷 22”的选育[J]. 河北农业科学,2007,11(1):95-96  
Shi Z G, Cheng R H, Liu Z L, Xia X Y. Development of foxtail millet cultivar Jigu 22 [J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2007,11(1):95-96 (in Chinese)
- [17] NY/T987—2006 铺膜穴播机作业质量[S]. 北京:中国标准出版社,2006  
NY/T987—2006 Operating quality grain film-covering hill-drop drill[s]. Beijing: China Standard Press, 2006 (in Chinese)
- [18] NY/T 1823—2009 温室蔬菜穴盘精密播种机技术条件[S]. 北京:中国标准出版社,2010  
NY/T 1823—2009 Specifications for hole disk type precise seeder of greenhouse vegetable [S]. Beijing: China Standard Press, 2010 (in Chinese)
- [19] 邱铁兵. 试验设计与数据处理[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2008  
Qiu Y B. *Test Design and Data Processing* [M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2008 (in Chinese)
- [20] 王伯凯,胡良龙,王少康,王冰,于昭洋,王公仆. 甘薯双垄旋耕起垄覆膜机的设计及试验研究[J]. 中国农业大学学报,2018, 23(7):116-125  
Wang B K, Hu L L, Wang S K, Wang B, Yu Z Y, Wang G P, Wu J E. Design and experiment of sweet potato transplanting operation machine with rotary tillage, ridging and covering film functions [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2018,23(7):116-125 (in Chinese)
- [21] 吕金庆,杨颖,李紫辉,田忠恩,尚琴琴,吴金娥. 舀勺式马铃薯播种机排种器的设计与试验[J]. 农业工程学报,2016,32(16): 17-25  
Lv J Q, Yang Y, Li Z H, Tian Z E, Shang Q Q, Wu J E. Design and experiment of cup-belt type potato seed-metering device [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016,32(16):17-25 (in Chinese)
- [22] 吴建民. 综合加权评分法的研究[J]. 农业机械学报,1993,24(2):66-70  
Wu J M. Study on synthetical weighted mark method [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 1993,24(2):66-70 (in Chinese)

责任编辑:刘迎春