

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.012

# 蔬菜育苗播种机清种装置设计与试验

刘云强<sup>1</sup> 刘立晶<sup>1,2</sup> 赵郑斌<sup>3</sup> 赵金辉<sup>4</sup> 崔巍<sup>3</sup>

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128;

3. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083; 4. 土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 为了解决蔬菜穴盘育苗精密播种机播种非球形种子重播率较高的问题,设计了一种清种装置,并通过对清种装置内流场仿真模拟优化了清种装置结构参数。对吸种阶段种子受力及运动状态进行分析,得到非球形种子在重播时,吸嘴通常会吸附两粒种子,其中一粒种子受主要吸力,另一粒种子受次要吸力。以茄子种子为播种对象,采用二次旋转正交组合试验方法,对播种机进行播种性能试验研究。通过方差分析,得到各因素对重播率的影响由大到小为:吸种气压、清种气压、振动频率,对空穴率的影响由大到小为:清种气压、吸种气压、振动频率,对合格率的影响由大到小为:吸种气压、清种气压、振动频率。建立了吸种气压、清种气压、振动频率3个主要因素与重播率、空穴率和合格率的数学模型。分析了吸种气压、清种气压、振动频率对重播率、空穴率、合格率的影响规律,并进行了参数优化与验证试验。得到了最优参数组合,即吸种气压为15.7 kPa,清种气压为3.3 kPa,振动频率为50 Hz时,重播率为1.26%,空穴率为1.75%,合格率为96.99%。在相同试验条件下进行试验验证,得到重播率为1.4%,空穴率为1.7%,合格率为96.9%。

**关键词:** 蔬菜育苗; 清种装置; 仿真分析; 回归分析; 参数优化

**中图分类号:** S233.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2018)S0-0083-09

## Design and Experiment on Plant Seedling Device for Vegetable Seedling Seeder

LIU Yunqiang<sup>1</sup> LIU Lijing<sup>1,2</sup> ZHAO Zhengbin<sup>3</sup> ZHAO Jinhui<sup>4</sup> CUI Wei<sup>3</sup>

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410128, China

3. Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China

4. State Key Laboratory of Soil Plant Machinery System Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of high reseeded rate of sowing non-spherical seeds in vegetable seedling precision seeder, a kind of clearing device was designed, and the structural parameters of the clearing device were optimized through the simulation of flow field in the seed cleaning device. The stress and movement state of seed at the stage of seed absorption were analyzed. Through analysis, two seeds were usually adsorbed when the non-spherical seed was replanted, one of which was mainly sucked and the other seed was the secondary. Eggplant seeds were used as sowing seeds, and the seedling performance of the sowing machine was tested through the quadratic rotation orthogonal combination experiment. By means of variance analysis, the influence of each factor on the re-seeding rate was obtained from big to small as suction pressure, clearing pressure and vibration frequency, the influence of each factor on the leak seeding rate was obtained from big to small as clearing pressure, suction pressure and vibration frequency, the influence of each factor on the qualified rate was obtained from big to small as suction pressure, clearing pressure and vibration frequency. The mathematical model between three factors and the indexes was built. The law between three factors and the indexes was analyzed and optimized parameters were tested. Parameters optimization and verification tests were performed. The optimal combination of parameters were as following: suction pressure was 15.7 kPa, clearing pressure

收稿日期: 2018-07-10 修回日期: 2018-08-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0701303)和公益性行业(农业)科研专项(201303014)

作者简介: 刘云强(1991—),男,硕士生,主要从事种植机械关键技术及装备研究,E-mail: liuyunqiang91@163.com

通信作者: 刘立晶(1976—),女,研究员,博士生导师,主要从事种植机械关键技术及装备研究,E-mail: xyliulj@sina.com

was 3.3 kPa, vibration frequency was 50 Hz, and the re-seeding rate was 1.26%, the leak seeding rate was 1.75%, and the qualified rate was 96.99%. Under the same experimental conditions, the test results showed that the re-seeding rate was 1.4%, the leak seeding rate was 1.7%, and the qualified rate was 96.9%.

**Key words:** vegetable seedling; seed-clearing device; simulation analysis; regression analysis; parameter optimization

## 0 引言

育苗是蔬菜移栽生产的第一个环节,也是最为重要的环节之一。所育秧苗质量直接影响蔬菜的产量和品质。随着技术的发展,传统的人工育苗逐渐被机械化育苗所代替。机械化育苗可以降低劳动强度,降低人工成本,提高生产率;机械化所育的秧苗比传统人工所育秧苗成活率高20%以上,可提高作物品质,实现增产<sup>[1-2]</sup>。

排种器工作原理主要分为机械式和气吸式。机械式排种器结构简单,但是对种子的形状和尺寸要求严格,对种子损伤大,播种效率较低<sup>[3-4]</sup>;而气吸式排种器对种子几乎没有损伤,播种效率高。目前,国内外先进的播种机主要采用气吸式工作原理<sup>[5-10]</sup>。气吸式播种机在播种球形种子时,播种合格率高。但在播种非球形种子时重播率明显高于球形种子,播种合格率较差。目前,在播种非球形种子时为了满足播种合格率,采取的措施一般是对非球形种子进行丸粒化处理<sup>[11]</sup>。但是,这使得生产成本增加,影响生产效益。许多大众蔬菜的种子为非球形种子,如:番茄、茄子、辣椒、黄瓜等。因此,对气吸式育苗播种机播种非球形蔬菜种子性能的研究有现实意义。

本文通过对球形种子和非球形种子在吸种过程受力及运动对比分析,得出非球形种子重播率较高的原因。为了降低重播率,设计改进清种装置,对其清种性能进行仿真模拟,优化清种装置的结构参数。并通过试验优化蔬菜育苗播种机工作参数,以期提高蔬菜育苗播种机的播种性能。

## 1 气吸滚筒式播种机结构和工作原理

### 1.1 结构组成

气吸滚筒式播种机相比气吸针式播种机播种效率更高。气吸滚筒式播种机主要由传送带、清种装置、播种滚筒、供种盒、振动装置等组成,其整体结构如图1所示。播种滚筒即排种器:母线方向分布有多排吸嘴,吸嘴为播种滚筒的主要工作部件,吸嘴在供种盒中吸取种子然后将种子释放到穴盘中;清种装置:将吸嘴吸附多余的种子清除;传送带:负责运送穴盘,使穴盘与其他作业环节相连;供种盒:为播

种滚筒提供种子;振动装置:使供种盒中的种子处于“沸腾”状态,增加种子的流动性,利于吸嘴吸附种子<sup>[12-17]</sup>。

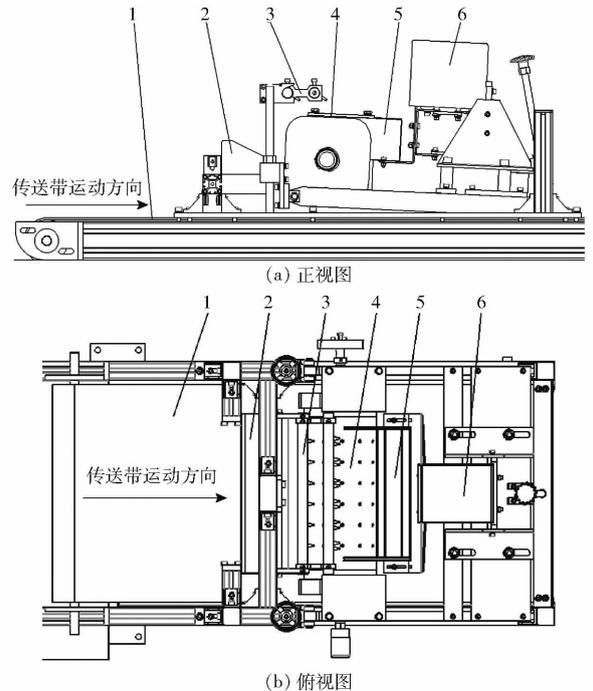


图1 气吸滚筒式播种机

Fig.1 Air suction cylinder-seeders

1. 传送带 2. 接种盒 3. 清种装置 4. 播种滚筒 5. 供种盒
6. 振动装置

### 1.2 工作原理

传送带将穴盘输送到播种滚筒下方,穴盘触发播种开关,播种滚筒开始工作。以滚筒最下面一排的吸嘴作为分析对象,随着滚筒的转动,吸嘴首先经过供种盒,将种子吸附在吸嘴上。随后吸嘴到达上方的清种装置,清种装置喷射出正压气流,作用在吸嘴处,将吸嘴上吸附的多余种子清除掉。随后吸附种子的吸嘴运动到最下方的穴盘处,此时吸嘴连接正压气流将种子投放到穴盘中,完成整个播种环节。

### 1.3 播种滚筒结构及工作原理

播种滚筒主要由滚筒、左右端盖、吸嘴、压簧、压紧螺母、胶带传动轮、中心传动轴等组成。播种滚筒整体结构如图2所示。

左右端盖在压簧的作用下紧贴贴在滚筒两侧,左端盖上有负压吸种区、正压排种区和正压清孔区3个区域,如图3所示。由于左端盖与滚筒吸嘴通孔

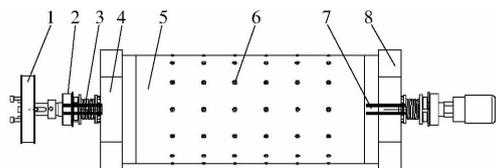


图2 播种滚筒

Fig.2 Sowing roller

1. 胶带传动轮 2. 压紧螺母 3. 压簧 4. 左端盖 5. 滚筒 6. 吸嘴 7. 中心传动轴 8. 右端盖

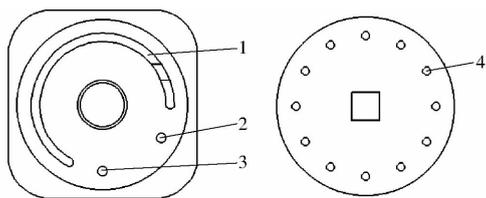


图3 左端盖和滚筒右视图

Fig.3 Right side cover and right view of roller

1. 负压吸种区 2. 正压排种区 3. 正压清孔区 4. 吸嘴通孔

相连,因此播种滚筒分为负压吸种区、正压排种区和正压清孔区。工作时,电机通过胶带带动滚筒转动,而左右端盖不随滚筒转动,因此吸种区、排种区和清孔区的位置固定,不随滚筒转动而改变。滚筒外部沿母线方向分布有多排吸嘴,吸嘴随滚筒一起转动,每排吸嘴依次经过吸种区、排种区和清孔区,完成一个完整的排种过程。当吸嘴运动至吸种区时,吸种区为吸嘴提供负压,吸嘴经过供种盒时,将种子吸附在吸嘴上;当种子到达穴盘上方的排种区时,吸嘴与排种区接通,此时种子受到正压气流的作用,落入下方的穴盘中;最后,吸嘴运动到清孔区,清孔区提供更强的正压气流,将吸嘴孔中可能存在的杂质冲洗掉,准备进入下一个周期的工作。

## 2 蔬菜种子受力及运动分析

根据蔬菜种子的形状特点,蔬菜种子可分为球形种子和非球形种子两大类。在实际生产和试验中发现不同形状的种子对气吸式播种机的工作性能影响较大,比如球形种子(如油菜)的播种效果明显优于非球形种子(如茄子)。为了便于对球形种子和非球形种子在吸种过程中的状态进行受力分析,将标准球体作为球形种子的理想模型进行受力分析,非球形种子选取与茄子种子外形特点相似的圆饼状几何体作为受力分析模型。

### 2.1 非球形种子受力及运动状态分析

当吸嘴运动到供种盒,在吸嘴吸力的作用下,种子被吸起与吸嘴发生碰撞,然后沿着吸嘴壁面向吸孔中心滑移<sup>[13]</sup>。

种子刚接触到吸嘴时,对种子进行受力分析,如图4a所示。以种子的重心为原点 $O$ ,水平方向为 $X$

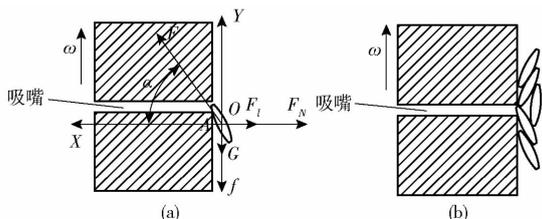


图4 非球形种子吸附阶段受力分析

Fig.4 Non-spherical seeds force analyses of absorbing stage

轴,垂直方向为 $Y$ 轴建立直角坐标系,吸力 $F$ 方向与 $X$ 轴的夹角为 $\alpha$ ,可得

$$F \cos \alpha = F_l + F_N \quad (1)$$

$$F_y = F \sin \alpha - f - mg \quad (2)$$

$$\text{其中} \quad f = \mu F_N = \mu (F \cos \alpha - F_l) \quad (3)$$

$$F_l = m \omega^2 r \quad (4)$$

式中  $F$ ——种子所受吸嘴吸附力

$F_l$ ——种子所受离心力

$F_N$ ——吸嘴对种子的支持力

$f$ ——吸嘴对种子的摩擦力

$F_y$ ——种子受到沿 $Y$ 轴方向的合力

$\mu$ ——种子与吸嘴间的摩擦因数

$m$ ——单粒种子质量

$r$ ——播种滚筒半径

$\omega$ ——滚筒转动角速度

在吸嘴吸力作用下种子向吸嘴中心运动, $\alpha$ 逐渐减小。由于此过程时间很短,滚筒转动角度很小,可默认吸嘴仍处于水平方向。则由式(1)、(4)可知,随着 $\alpha$ 逐渐减小, $F_N$ 不断增大。由式(2)、(3)可知, $f$ 会不断增大, $F_y$ 会不断减小。当 $F_y = 0$ 时,种子受力达到平衡,不再向吸嘴中心继续移动。在种子表面粗糙摩擦因数较大的情况下,种子在向吸嘴中心运动过程中,还没有将吸嘴完全堵死就达到受力平衡状态。这样,其余的种子会继续受到吸嘴气流的作用,由于此类非球形种子边缘部分比较扁平,很容易被吸附在吸嘴上,造成了吸附多粒种子的现象,如图4b所示;另一种情况,在吸嘴进入供种箱时,恰巧吸嘴周围的种子离吸嘴中心的距离非常接近,这些种子(一般为2粒)会同时向吸嘴中心移动,同时被吸附在吸嘴上,种子达到受力平衡状态。同样会造成吸附多粒的现象,但是这种情况发生的概率很小。吸嘴出现吸附多粒种子(多为2粒)多为第1种情况,即一粒种子受吸嘴气流主要吸力,另一粒种子受缝隙处气流较小的吸力。

### 2.2 球形种子受力及运动状态分析

球形种子与非球形种子在吸嘴附近的受力情况相同,如图5a所示,种子向吸嘴中心运动的过程中所受到的摩擦力 $f$ 也会逐渐增大,当 $F_y = 0$ 时,种子

将不再滑动。但是球形种子和非球形种子的形状不同,它们的运动状态也不同。球形种子与非球形种子相比,除了滑动还有滚动。因此,当种子受到的摩擦力 $f$ 不断增大,球形种子在 $F_y = 0$ 时,种子不会达到平衡状态,而是以与吸嘴的接触点 $A$ 为支点,向吸嘴中心滚动,直到球形种子把吸嘴口完全堵住。

虽然实际中球形种子并不是理想的球体,种子与吸嘴之间也会存在较小的间隙,但是球形种子没有非球形种子扁平的边缘。如图5b所示,由于吸附在吸嘴上的种子对其余种子的阻挡,其余的种子很难被吸附在吸嘴间隙处。因此,球形种子不仅受力稳定,也减小了吸附多粒的概率。

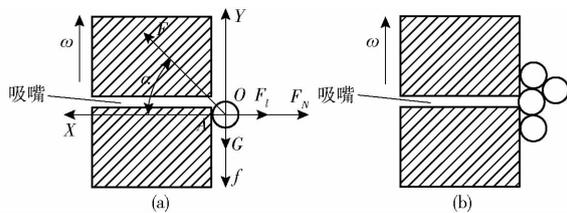


图5 球形种子吸附阶段受力分析

Fig.5 Spherical seeds force analyses of absorbing stage

### 3 清种装置设计与结构优化

针对非球形种子重播率高的问题,为播种机设计了清种装置。并对清种装置清种性能仿真模拟,优化其结构参数。

#### 3.1 清种装置结构及工作原理

清种装置主要由喷嘴、气管、支架组成(图6),清种装置一共有2排喷嘴,前面1排喷嘴有6组喷嘴,每组2个,6组喷嘴分别对应滚筒上每1排的6个吸嘴。后1排有6个喷嘴,每组1个,同样分别对应滚筒上每一排的6个吸嘴。

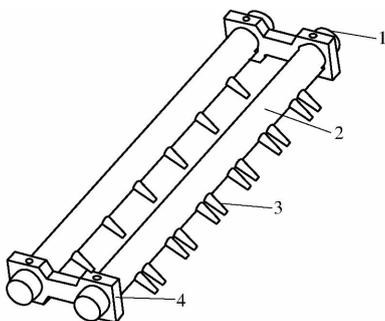


图6 清种装置

Fig.6 Seed clearing device

1. 进气口 2. 气管 3. 喷嘴 4. 支架

播种滚筒工作时,吸嘴会从供种盒中将种子吸附在吸嘴上并转离供种盒,在这一过程中有吸嘴不仅会吸附多粒种子,还会有种子恰好处于吸嘴和被吸附种子的上方,一起被带离供种盒。前排喷嘴的作用就是将气流对准吸嘴四周区域,将那些夹带上

来的种子及时清理掉,使其重新落回供种盒。第2排喷嘴将气流对准吸嘴上的种子,通过对吸种过程种子的受力及运动分析可知,吸嘴上被吸附的多余的种子(一般为2粒),其中一粒种子受主要吸力,而另一粒种子所受吸力较小,在合适流速气流的作用下受吸力较小的种子会被吹离吸嘴落回供种盒。

#### 3.2 清种装置设计与参数分析

清种装置是减小播种重播率的关键部件,尤其第2排喷嘴工作性能,直接影响播种机的播种效果。为了保证清种装置的性能,对其主要结构参数进行设计优化。

喷嘴射出的气流具有气体射流的特性,射流大约以 $13^\circ$ 的半角向后扩张,且流速随距离的增大越来越小。根据射流分布特性,画喷嘴出口气流分布示意图,如图7所示。

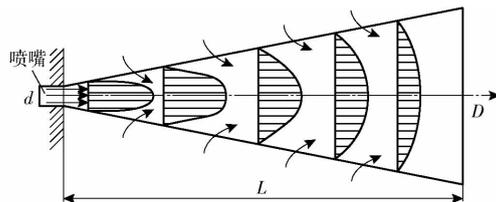


图7 喷嘴处气流分布

Fig.7 Air distribution of nozzle

根据图7可得

$$D = 2L \tan 13^\circ + d \quad (5)$$

式中  $D$ ——吸嘴处气流作用直径

$d$ ——喷嘴直径

$L$ ——喷嘴与吸嘴距离

由于气流流速随距离增大而逐渐减小,喷嘴离吸嘴的距离不易过大,取 $L = 20 \text{ mm}$ 。由于气流会作用在吸嘴的种子上,因此此处气流作用范围需要大于种子在吸嘴上可能分布的最大范围。对几类非球形种子几何尺寸的测定,如表1所示。可知气流作用范围半径需大于茄子种子最大尺寸 $3.86 \text{ mm}$ ,考虑到气流流速随离中心线的距离增大而不断减小,取 $D > 10 \text{ mm}$ ,以保证有效作用范围大于种子分布范围。由式(5)可知,喷嘴直径应满足 $d$ 大于 $1 \text{ mm}$ 。本文取喷嘴直径 $1.5$ 、 $2 \text{ mm}$  2个水平进行仿真分析。

表1 蔬菜种子几何尺寸

Tab.1 Geometry of vegetable seeds mm

品种	长	宽	厚
番茄	2.93	2.28	0.78
辣椒	3.31	2.78	0.88
茄子	3.86	3.10	1.11

气管与气泵连接,气泵为其提供恒压气流,在气管内部形成一个恒压腔,气管与外界存在压差,气流

从喷嘴喷射出去。为了保证各喷嘴出口气流一致性,应使得气管腔内各处气压尽量保持一致。根据伯努利方程  $p + 1/2\rho v^2 + \rho gh = C$  可知,等高流动时,流速大,压力小。因此,为了减小气管内腔的压力差,各处流速应保持基本一致。气管进口总流量等于6个喷嘴的流量,气流依次经过6个喷嘴,为了使气流到达最远端喷嘴时有足够的流量,气管直径相对于喷嘴直径应该足够大,这样才能保证气管内流速不会因为沿程喷嘴气流的流失而导致气管内气体流速产生较大变化。本文选取15、20 mm两个管径水平进行仿真分析。

为研究气管直径和喷嘴出口直径对各个气嘴气流稳定性和一致性的影响,本文采用CFD模拟不同气管直径和喷嘴出口直径条件下清种装置内部流场情况,并分析得出气管直径和喷嘴出口直径对流场的影响。由于第2排喷嘴直接作用于吸嘴上的种子,其性能要求要比第1排更加严格,因此本文主要对第2排单喷嘴清种部件进行建模分析。

清种装置内气流流动状态通常用雷诺数  $Re$  进行判断,雷诺数公式为

$$Re = \frac{\rho ul}{\mu} \quad (5)$$

式中  $\rho$ ——流体密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 $u$ ——流速,  $\text{m}/\text{s}$      $l$ ——特征长度,  $\text{m}$   
 $\mu$ ——动力粘度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$

对于内部流动,通常认为雷诺数  $Re > 2\,300$  为湍流,  $Re < 2\,300$  为层流<sup>[18]</sup>。常温下,空气密度  $\rho = 1.205 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,流速  $u = 10 \text{ m}/\text{s}$ ,特征长度  $l = 0.4 \text{ m}$ ,动力粘度  $\mu = 1.79 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。代入式(5)计算得  $Re = 2.69 \times 10^5$  远大于临界值 2 300,因此气流在清种装置中的流动状态为湍流。采用  $k-\varepsilon$  模型,选取进气口为压力进口边界条件,喷嘴出口为压力出口边界条件,壁面采用无滑移边界条件。

从图 8a 和图 8b 可以看出,当吸嘴直径同为 1.5 mm 时,直径大的气管内部流场稳定;从图 8c 和图 8d 同样可以看出,管径较大的气管内部流场更加稳定。从图 8a 和图 8c 可以看出,当管径同为 15 mm 时,嘴径较小的气管内部流场更加稳定;从图 8b 和图 8d 同样可以看出,嘴径较小的气管内部流场更为稳定。

从图 8 可看出,嘴径为 1.5 mm、管径为 20 mm 的清种装置内部流场更加稳定。清种装置各喷嘴出口气流一致性,对清种装置的性能影响很大。因此对不同嘴径和管径的清种装置模拟完成后,又分别对 4 种不同结果参数的清种装置的喷嘴出口流速进行测量。经测量嘴径为 1.5 mm、管径为 20 mm 的清种装置各喷嘴流速变异系数最小,为 1.2%。即该结构参数的清种装置各喷嘴流速一致性最优,清种性能最优。因此,将清种装置的嘴径和管径分别定为 1.5、20 mm。

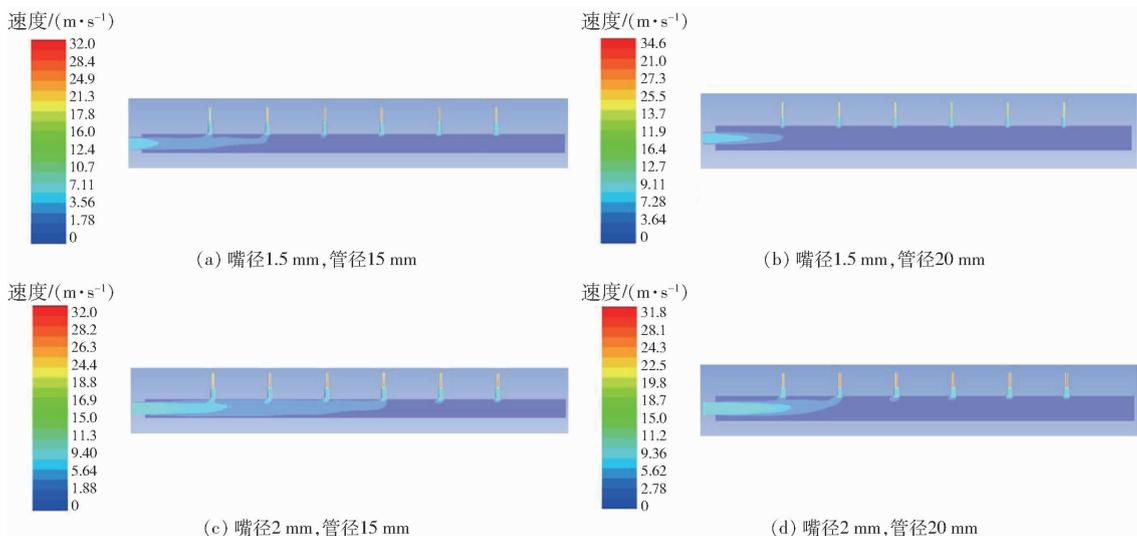


图 8 不同清种装置内部流场速度云图

Fig. 8 Velocity contours of different seeds clearing devices

## 4 试验

### 4.1 试验设备及材料

蔬菜育苗播种机(图 9),滚筒规格为  $6 \times 12$  个;气压检测装置(图 10),对吸种、落种、清孔、清种气压进行实时检测,精度 0.01 kPa;茄子种子:长  $\times$

宽  $\times$  厚为  $3.86 \text{ mm} \times 3.10 \text{ mm} \times 1.11 \text{ mm}$ ;千粒质量为 4.5 g;网筛 16 目;穴盘规格为  $6 \times 12$ 。

### 4.2 二次旋转正交组合试验

根据试验研究,在播种效率一定的情况下,对播种性能影响较大的因素主要有吸种气压、清种气压和供种盒振动频率。因此在播种效率为 600 盘/h,



图9 育苗播种机

Fig.9 Seedling seeder



图10 气压检测装置

Fig.10 Air pressure detection device

吸嘴直径为 0.4 mm 时,选取吸种气压  $x_1$ 、清种气压  $x_2$  和供种盒振动频率  $x_3$  为试验因素,试验依据《温室蔬菜穴盘精密播种机技术条件》(NY/T 1823—2009),选用重播率、空穴率和合格率作为衡量播种机工作质量的性能指标<sup>[19]</sup>,设计二次旋转正交组合试验,借助数据处理软件进行分析,得到多个因素的最佳组合及其变化趋势。

通过前期大量单因素试验确定了吸种气压范围为 14.3 ~ 17.7 kPa,清种气压范围为 1.3 ~ 4.7 kPa,振动频率范围为 42 ~ 58 Hz。各因素及编码如表 2 所示。其中吸种气压为负压,为了便于分析气压差对各指标的影响,本文各水平均取其绝对值。根据三因素二次旋转正交组合试验表进行试验,播种过程中随机抽取 5 盘作为一组试验,每组试验重复 2 次取平均值。试验方案与试验结果如表 3 所示。

表2 试验因素编码

Tab.2 Factors and levels of test

编码	因素		
	吸种气压	清种气压	振动频率
	$x_1$ /kPa	$x_2$ /kPa	$x_3$ /Hz
-1.682	14.3	1.3	42
-1	15.0	2.0	45
0	16.0	3.0	50
1	17.0	4.0	55
1.682	17.7	4.7	58

#### 4.3 回归模型的建立与显著性检验

使用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行处理,并对试验结果进行回归分析,得到重播率  $Y_1$ 、空穴率  $Y_2$  和合格率  $Y_3$  的回归方程。

表3 试验设计方案与结果

Tab.3 Experiment design and results

试验 序号	因素			响应值		
	吸种 气压	清种 气压	振动 频率	重播 率	空穴 率	合格 率
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
1	-1	-1	-1	4.4	2.9	92.7
2	1	-1	-1	6.1	1.1	92.8
3	-1	1	-1	1.1	3.6	95.3
4	1	1	-1	5.1	2.4	92.5
5	-1	-1	1	3.3	3.8	92.9
6	1	-1	1	4.9	1.7	93.4
7	-1	1	1	0.3	4.8	94.9
8	1	1	1	3.8	3.3	92.9
9	-1.682	0	0	1.9	3.6	94.5
10	1.682	0	0	6.5	2.4	91.1
11	0	-1.682	0	5.3	1.1	93.6
12	0	1.682	0	1.4	3.8	94.8
13	0	0	-1.682	2.8	1.7	95.5
14	0	0	1.682	1.1	2.6	96.3
15	0	0	0	2.2	1.3	96.5
16	0	0	0	1.7	1.1	97.2
17	0	0	0	1.1	1.9	97.0
18	0	0	0	1.5	0.8	97.7
19	0	0	0	2.8	1.4	95.8
20	0	0	0	1.5	1.8	96.7
21	0	0	0	1.3	1.1	97.6
22	0	0	0	2.9	1.5	95.6
23	0	0	0	2.1	0.7	97.2

##### (1) 重播率

对试验得到的数据进行多元回归拟合,得到重播率  $Y_1$  回归模型为

$$Y_1 = 1.89 + 1.36X_1 - 1.10X_2 - 0.53X_3 + 0.89X_1^2 + 0.59X_2^2 + 0.097X_3^2 + 0.52X_1X_2 - 0.075X_1X_3 + 0.025X_2X_3 \quad (7)$$

回归模型的显著性检验如表 4 所示。

由表 4 可知,此模型的拟合度是极显著的 ( $P < 0.01$ )。但是,吸种气压和振动频率的交互项 ( $X_1X_3$ ) 的  $P$ 、清种气压和振动频率的交互项 ( $X_2X_3$ ) 的  $P$  以及振动频率的二次方项 ( $X_3^2$ ) 的  $P$  均大于 0.1,说明吸种气压和振动频率的交互项、清种气压和振动频率的交互项和振动频率的二次项对重播率的影响不显著,其余各项的  $F$  检验均极显著或显著。失拟项  $P = 0.9238$ ,可以判断失拟项不显著,这表明没有其他影响性能指标的主要因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_1 = 1.95 + 1.36X_1 - 1.10X_2 - 0.53X_3 + 0.89X_1^2 + 0.59X_2^2 + 0.52X_1X_2 \quad (8)$$

通过对式(8)回归系数的检验得出,影响播种

重播率的因素由大到小为吸种气压、清种气压和振动频率。

(2) 空穴率

对试验得到的数据进行多元回归拟合, 得到空穴率  $Y_2$  回归模型为

$$Y_2 = 1.28 - 0.63X_1 + 0.67X_2 + 0.37X_3 + 0.68X_1^2 + 0.48X_2^2 + 0.38X_3^2 + 0.15X_1X_2 - 0.075X_1X_3 + 0.075X_2X_3 \quad (9)$$

回归模型的显著性检验如表 4 所示。

由表 4 可知, 此模型的拟合度是极显著的 ( $P < 0.01$ )。但是, 吸种气压和清种气压的交互项 ( $X_1X_2$ ) 的  $P$ 、吸种气压和振动频率的交互项 ( $X_2X_3$ ) 的  $P$  和吸种气压和振动频率的交互项 ( $X_1X_3$ ) 的  $P$  均大于 0.1, 据此可以判断吸种气压和清种气压的交互项、吸种气压和振动频率的交互项和吸种气压和振动频率的交互项对空穴率的影响是不显著

的, 其余各项的  $F$  检验均极显著。失拟项  $P = 0.2547$ , 可以得知其不显著, 这表明没有其他影响性能指标的主要因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_2 = 1.28 - 0.63X_1 + 0.67X_2 + 0.37X_3 + 0.68X_1^2 + 0.48X_2^2 + 0.38X_3^2 \quad (10)$$

通过对式 (10) 回归系数的检验得出, 影响播种空穴率的因素由大到小为清种气压、吸种气压和振动频率。

(3) 合格率

对试验得到的数据进行多元回归拟合, 得到合格率  $Y_3$  回归模型为

$$Y_3 = 96.83 - 0.73X_1 + 0.43X_2 + 0.16X_3 - 1.57X_1^2 - 1.07X_2^2 - 0.47X_3^2 - 0.67X_1X_2 + 0.15X_1X_3 - 0.100X_2X_3 \quad (11)$$

回归模型的显著性检验如表 4 所示。

表 4 回归方程方差分析  
Tab. 4 Variance analysis of regression equation

方差来源	重播率				空穴率				合格率			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	65.88	9	24.83	<0.0001**	26.75	9	14.16	<0.0001**	74.19	9	15.47	<0.0001**
$X_1$	25.16	1	85.34	<0.0001**	5.44	1	25.90	0.0002**	7.20	1	13.51	0.0028**
$X_2$	16.39	1	55.58	<0.0001**	6.12	1	29.14	0.0001**	2.48	1	4.65	0.0504
$X_3$	3.86	1	13.09	0.0031**	1.91	1	9.12	0.0099**	0.34	1	0.63	0.4408
$X_1X_2$	2.20	1	7.48	0.0170*	0.18	1	0.86	0.3714	3.64	1	6.84	0.0214*
$X_1X_3$	0.045	1	0.15	0.7023	0.045	1	0.21	0.6511	0.18	1	0.34	0.5711
$X_2X_3$	0.005	1	0.017	0.8984	0.045	1	0.21	0.6511	0.080	1	0.15	0.7047
$X_1^2$	12.65	1	42.91	<0.0001**	7.25	1	34.55	<0.0001**	39.07	1	73.29	<0.0001**
$X_2^2$	5.56	1	18.87	0.0008**	3.68	1	17.53	0.0011**	18.29	1	34.32	<0.0001**
$X_3^2$	0.15	1	0.50	0.4899	2.24	1	10.65	0.0062**	3.54	1	6.64	0.0230
残差	3.83	13			2.73	13			6.93	13		
失拟	0.53	5	0.26	0.9238	1.38	5	1.64	0.2547	2.58	5	0.95	0.4995
误差	3.30	8			1.35	8			4.35	8		
总和	69.71	22			29.48	22			81.12	22		

注:  $P < 0.01$  (极显著, \*\*),  $P < 0.05$  (显著, \*)。

由表 4 可知, 此模型的拟合度是极显著的 ( $P < 0.01$ )。但是, 振动频率的 ( $X_3$ ) 的  $P$ 、吸种气压和振动频率的交互项 ( $X_1X_3$ ) 的  $P$ 、清种气压和振动频率的交互项 ( $X_2X_3$ ) 的  $P$  都大于 0.1, 这一情况说明振动频率、吸种气压和振动频率的交互项、清种气压和振动频率的交互项对合格率的影响是不显著的, 其余各项的  $F$  检验均极显著或显著。失拟项  $P = 0.4995$ , 可以得知其不显著, 这说明没有其他影响性能指标的主要因素。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_3 = 96.83 - 0.73X_1 + 0.43X_2 - 1.57X_1^2 - 1.07X_2^2 - 0.47X_3^2 - 0.68X_1X_2 \quad (12)$$

通过对式 (12) 回归系数的检验得出, 影响播种合格率的由大到小为吸种气压、清种气压和振动频率。

4.4 各因素对播种合格率的影响

通过 Design-Expert 8.0.6 软件对数据进行处理, 可以得到吸种气压  $X_1$ 、清种气压  $X_2$  和供种盒振动频率  $X_3$  对合格率的影响, 影响响应面如图 11 所示。

4.4.1 吸种气压和清种气压对播种合格率的影响

由图 11a 可知, 吸种气压在 15.5 ~ 16.0 kPa, 清种气压在 3.0 ~ 3.5 kPa 时播种合格率较高。在清种气压固定时, 播种合格率随吸种气压的增

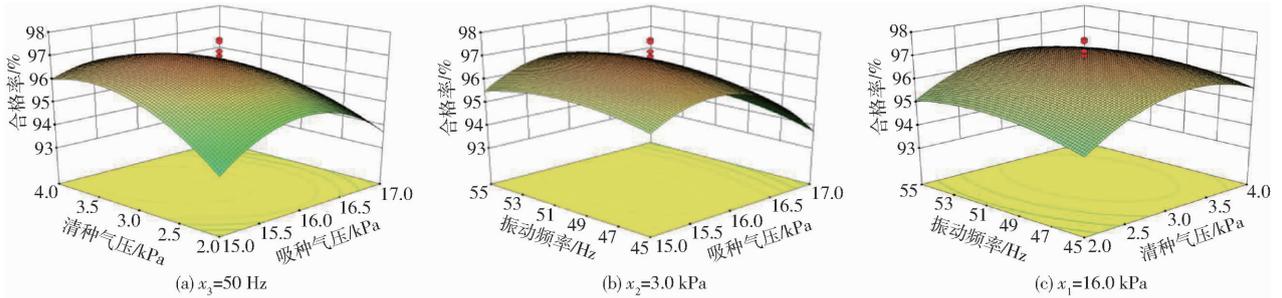


图 11 交互因素对合格率的影响

Fig. 11 Effects of interactive factors on eligible rate

大,会先升高后降低。在吸种气压固定时,播种合格率随清种气压的增大,同样是先升高后降低。

#### 4.4.2 吸种气压和振动频率对播种合格率的影响

由图 11b 可知,吸种气压在 15.5 ~ 16.0 kPa,供种盒振动频率在 47 ~ 55 Hz 时播种合格率较高。在吸种气压固定时,播种合格率随供种盒振动频率的增大,会先升高后降低。在供种盒振动频率固定时,播种合格率随吸种气压的增大,同样是先升高后降低。

#### 4.4.3 清种气压和振动频率对播种合格率的影响

由图 11c 可知,清种气压在 2.7 ~ 3.7 kPa,供种盒振动频率在 47 ~ 55 Hz 时播种合格率较高。在清种气压固定时,播种合格率随供种盒振动频率的增大,会先升高后降低。在供种盒振动频率固定时,播种合格率随清种气压的增大,同样是先升高后降低。

#### 4.5 最佳参数优化

根据建立的回归模型,可以得到各因素的最优参数组合,实现最佳的播种效果。利用 Design-Expert 8.0.6 软件的优化求解模块,以播种合格率为评价指标,建立数学模型

目标函数为

$$\begin{cases} Y_1 \leq 5\% \\ Y_2 \leq 5\% \\ \max Y_3(x_1, x_2, x_3) \end{cases}$$

约束条件为

$$\begin{cases} 14.3 \text{ kPa} \leq x_1 \leq 17.7 \text{ kPa} \\ 1.3 \text{ kPa} \leq x_2 \leq 4.7 \text{ kPa} \\ 42 \text{ Hz} \leq x_3 \leq 58 \text{ Hz} \end{cases}$$

求得满足约束条件最大合格率的最优参数组合为:吸种气压 15.7 kPa、清种气压 3.3 kPa、振动频率 50 Hz,最优参数组合下重播率为 1.26%、空穴率为 1.75%、合格率为 96.99%。

根据最优参数组合,在相同的试验环境下以相同的试验方法进行试验,得到重播率为 1.4%、空穴率为 1.7%、合格率为 96.9%。试验结果与理论结果基本一致。

## 5 结论

(1) 探究了非球形种子重播率较高、播种效果较差的原因。为了解决这一问题,设计了改进的清种装置。并通过对清种性能仿真,优化了清种装置结构参数。

(2) 采用三因素五水平二次旋转正交组合试验方法进行试验,并对试验结果进行回归分析,得出了重播率、空穴率和合格率的回归模型。并通过响应面分析,得出了吸种气压、清种气压、振动频率对重播率、空穴率、合格率的影响规律。

(3) 利用 Design-Expert 8.0.6 软件进行数据处理,以重播率、空穴率、合格率为评价指标,得出最优参数组合为:吸种气压 15.7 kPa、清种气压 3.3 kPa、振动频率 50 Hz、此最优参数组合下重播率为 1.26%、空穴率为 1.75%、合格率为 96.99%。

## 参 考 文 献

- 辜松,杨艳丽,张跃峰,等. 荷兰蔬菜种苗生产装备系统发展现状及对中国的启示[J]. 农业工程学报,2013,29(14):185-194.  
GU Song, YANG Yanli, ZHANG Yuefeng, et al. Development status of automated equipment systems for greenhouse vegetable seedlings production in Netherlands and its inspiration for China [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(14):185-194. (in Chinese)
- 于亚波,伍萍辉,冯青春,等. 我国蔬菜育苗装备研究应用现状及发展对策[J]. 农机化研究,2017,39(6):1-6.  
YU Yabo, WU Pinghui, FENG Qingchun, et al. Situation and strategy of automatic seeding machine in China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(6):1-6. (in Chinese)
- 程欢庆,张祖立,张为政. 蔬菜穴盘播种装置的研究进展[J]. 农业科技与装备,2010(4):31-33.  
CHENG Huanqing, ZHANG Zuli, ZHANG Weizheng. Research progress in vegetable plug tray seeding device [J]. Agricultural

- Science & Technology and Equipment,2010(4):31-33. (in Chinese)
- 4 武广伟. 温室穴盘精密播种设备的研究进展[J]. 北方园艺,2010(15):37-41.  
WU Guangwei. Advances of research on precision seeding equipment with plug trays in greenhouse[J]. Northern Horticulture,2010(15):37-41. (in Chinese)
- 5 YAZGI A,DEGIRMENCIOGLU A. Optimisation of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering,2007,97(3):347-356.
- 6 BERKET B Z. Effect of different operating parameters on seed holding in the single seed metering unit of a pneumatic planter[J]. Turkish Journal of Agricultural Machinery,2004,28(6):435-441.
- 7 GAIKWAD B B,SIROHI N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. Biosystems Engineering,2008,99(3):322-329.
- 8 周海波,马旭,姚亚利. 水稻秧盘育秧播种技术与装备的研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报,2008,24(4):301-305.  
ZHOU Haibo,MA Xu,YAO Yali. Research advances and prospects in the seeding technology and equipment for tray nursing seedlings of rice[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(4):301-305. (in Chinese)
- 9 廖庆喜,李继波,覃国良. 气力式油菜精量排种器试验[J]. 农业机械学报,2009,40(8):44-48.  
LIAO Qingxi,LI Jibo,QIN Guoliang. Experiment of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(8):44-48. (in Chinese)
- 10 张晓慧,宋建农. 针吸滚筒式水稻排种器设计[J]. 农业机械学报,2009,40(3):69-71.  
ZHANG Xiaohui,SONG Jiannong. Design and research on rice precision needle-like vacuum seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(3):69-71. (in Chinese)
- 11 刘剑锋. 气吸滚筒式烟草包衣种子排种器设计与研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2012.  
LIU Jianfeng. Design and research on suction roller-type meter device for coated tobacco seed[D]. Changsha:Hunan Agricultural University,2012. (in Chinese)
- 12 胡建平,郑赛男,刘文东. 磁吸滚筒式精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(3):60-63.  
HU Jianping,ZHENG Sainan,LIU Wendong. Design and experiment of precision magnetic cylinder seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(3):60-63. (in Chinese)
- 13 赵湛,李耀明,陈进,等. 气吸滚筒式排种器吸种过程的动力学分析[J]. 农业工程学报,2011,27(7):112-116.  
ZHAO Zhan,LI Yaoming,CHEN Jin,et al. Dynamic analysis of seeds pick-up process for vacuum-cylinder seeder[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(7):112-116. (in Chinese)
- 14 张石平,夏静,陈进. 气吸振动式蔬菜穴盘育苗精密播种装置的研究[J]. 农机化研究,2007,29(8):80-83.  
ZHANG Shiping,XIA Jing,CHEN Jin. Study on equipment of vibration air-suction vegetable tray precise seeder[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007,29(8):80-83. (in Chinese)
- 15 王淑铭,魏天路,周海波. 气动振动式精密排种器工作参数的分析与仿真[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊):56-60.  
WANG Shuming,WEI Tianlu,ZHOU Haibo. Theoretical research and simulation analysis off operating parameters of pneumatic vibration precision seed-metering[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(Supp.):56-60. (in Chinese)
- 16 陈进,周韩,赵湛,等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报,2011,42(10):79-83.  
CHEN Jin,ZHOU Han,ZHAO Zhan,et al. Analysis of rice seeds motion on vibrating plate using EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(10):79-83. (in Chinese)
- 17 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 Lin. A preliminary study on the theory and experimentation of the suction-type metering device for precision drill[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1979,10(3):56-63. (in Chinese)
- 18 胡坤,李振北. CAE 分析大系 ANSYS ICEM CFD 工程实例详解[M]. 北京:人民邮电出版社,2014.
- 19 NY/T 1823—2009 温室蔬菜穴盘精密播种机技术条件[S]. 2009.