

正负气压组合管针式西洋参集排器设计与试验

廖宜涛^{1,2} 郑娟¹ 廖庆喜^{1,2} 丁幼春^{1,2} 高丽萍¹

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对西洋参种植农艺要求窄行距单粒精密播种,但缺乏适用精密播种技术与装备的问题,设计一种采用负压吸种、正压卸种的管针式集排器。分析了集排器的工作原理,确定了主要结构参数,开展了集排器并联各行气流分配均匀性仿真分析,构建了排种器吸种和卸种环节力学模型,通过台架试验测试了集排器性能。仿真分析表明,各行排种针末端种子吸附面气流流速的变异系数为 2.923%,集排器并联各行排种针流场分配较均匀;台架试验表明,集排器的单行合格指数可达 90% 以上;二次回归正交旋转组合试验结合响应曲面分析表明,影响合格指数的因素主次顺序为排种轴转速、吸种负压、卸种正压,集排器最佳性能工作参数组合为排种轴转速 13.10 ~ 17.70 r/min、吸种负压 4.25 ~ 4.50 kPa 及卸种正压 2.90 kPa 时,集排器单行的排种合格指数大于 88.50%、漏播指数小于 5.00%、重播指数小于 7.50%;选取该范围内不同工况条件进行集排器整体排种性能测试,结果表明,集排器各行排种合格指数均大于 86.30%,行间合格指数一致性变异系数小于 1.80%,各行合格指数稳定性变异系数均小于 6.20%,排种器工作性能稳定,满足西洋参精密播种要求。

关键词: 西洋参; 播种机; 正负气压组合; 集排器

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)03-0046-12

Design and Experiment of Positive and Negative Pressure Combined Tube – Needle Centralized Seeding Device for American Ginseng

LIAO Yitao^{1,2} ZHENG Juan¹ LIAO Qingxi^{1,2} DING Youchun^{1,2} GAO Liping¹

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Existing agronomy of American ginseng cultivated in China, which uses narrow row spacing and precision seeding, has persistent challenges that employ a seeder to improve efficiency and guarantee precision, highlighting a need for narrow row spacing precision sowing technology and equipment. The object was to explore an innovated prototype of multi narrow rows parallel tube-needle centralized seeding device to address the challenge, which combined positive and negative air pressure to suck and discharge the seed respectively. The working principle of the prototype device was introduced and main structural parameters were confirmed. The uniformity of airflow field distribution between rows of the prototype device was estimated by employing the simulation analysis. The mechanical model for seed sucking and discharging during the seeding process was constructed. Finally, the seeding performance of the prototype device was tested by bench test and the influence law of the seeding performance was investigated. The result of airflow field simulation analysis showed that the coefficient of variation on the airflow average velocity value of each seeding needle at the end adsorption surface was 2.923%, which proved that the airflow field of the centralized seeding device designed was evenly distributed. The bench test results showed that the seeding qualified index of the prototype device reached more than 90%. Combined with the quadratic regression rotation orthogonal combination test and response surface analysis, it was showed that the primary and secondary factors affecting seeding qualified index and missing index were rotating speed of the seed meter shaft, the negative pressure and the positive pressure successively. The optimal working parameters combination was optimized as the row axis speed of 13.10 ~ 17.70 r/min, the

收稿日期: 2018-12-28 修回日期: 2019-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51875229,51405180)和国家重点研发计划项目(2017YFD0700702)

作者简介: 廖宜涛(1982—),男,副教授,博士,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: liaoyitao@mail.hzau.edu.cn

negative pressure of 4.25 ~ 4.50 kPa, and the positive pressure of 2.90 kPa. Within the optimal condition range, the qualified index of a single row was greater than 88.50%, the missing index was less than 5.00% and the multiple index was less than 7.50%. The difference working conditions in the optimal condition range were selected to estimate the overall performance of the prototype device. The result showed that each row qualified index of centralized seeding device was greater than 86.30%, the consistency coefficient of variation for each row was less than 1.80% and the stability coefficient of variation for each row was less than 6.20%, which confirmed that the seed metering device worked stably and achieved the precision seed metering requirements for American ginseng sowing. The research result provided the core device for further developing American ginseng seeder adapted to the precision planting agronomic requirements.

Key words: American ginseng; seeder; positive and negative pressure combined; centralized seeding device

0 引言

国内西洋参有播种-采收或播种-移栽-采收两种种植方式,为提高商品化率,两种模式播种密度都较大,农艺要求行距 50 ~ 60 mm、株距 50 ~ 100 mm,采用精细耕整,做畦后播种,畦宽 1.2 ~ 1.5 m,播深约 25 mm,每畦播种 20 行以上,要求行株距均匀、播深一致,属窄行距密植精密播种^[1]。西洋参种子呈扁平状,形状不规则,播种前经过催芽后有裂口,机械化播种难度大。目前主要采用人工压穴点播,存在劳动力消耗大、效率低、生产成本低、播种质量差等问题^[2],生产实际中迫切需要西洋参播种机,其中排种技术是播种机设计的关键。

气吸式排种技术利用负压吸附种子,具有种子形状适用性强、易实现单粒吸种等优点,且吸种过程种子无剪切载荷、损伤率低,已成为国内外先进播种机采用的主要排种技术^[3-8],广泛应用于玉米、大豆、胡萝卜、三七等种子形状不规则的作物精量排种^[9-13]。采用滚筒式排种元件的气吸式排种器,集中装种、多行排种,可用于三七^[14]、滇重楼^[15]等窄行距作物精密直播;在滚筒上设置穴距匹配型孔,可用于蔬菜穴盘苗播种^[16-17]。因滚筒转动对种子群扰动小,对西洋参、水稻等流动性差的种子,需采用辅助供种装置或针式吸嘴来保证排种效果^[18-19]。气吸式排种器采用隔断负压或刮种装置强制卸种,存在卸种延迟、强制卸种损伤种子等问题,在气吸式排种器的卸种区设计与负压气室隔离的正压气室,利用正压气吹适时卸种,可解决上述问题,实现 6 ~ 8 行并联集排^[20-23]。但气室分隔板与滚筒壁为轴向线性接触,气室分隔密封要求高,难以实现 20 行以上并联排种。

针对我国西洋参种植采用窄行距单粒精密播种的农艺要求,本文设计一种负压吸种、正压卸种、一器 24 行并联管针式集排器,分析确定其主要结构参数,建立吸种、卸种力学模型,确定影响排种性能的

因素和影响规律,开展并联各行气流场分配均匀性仿真试验,并通过二次回归正交旋转组合试验建立回归模型,结合响应曲面对各因素交互作用进行分析,寻求最佳的工作参数组合。

1 集排器结构与工作原理

正负气压组合管针式西洋参集排器主要由种箱、机架、气室、管针旋转件、充种室、落种组件等组成,其结构如图 1 所示。集排器呈左右对称分布,如图 1a,气室由外侧气室和中间气室组成,外侧气室和中间气室通气端设有旋转盘;旋转盘与气室接触面设计成阶梯状,如图 1b,以保证气室气密性;旋转盘上固定连有排种轴,且同侧旋转盘上均布多组气流分配管,每根气流分配管上按播种行距轴向均布排种针,组成管针旋转件;气室隔板将气室内腔分为正压区和负压区,如图 1d,其中正压区设计在右侧水平线下的 45° 夹角区域内,对应图 1e 的卸种区,保证种子顺利投入落种口,避免落种过程发生干涉;气室其余区域为负压区,为排种器提供吸种、携种负压,对应图 1e 的吸种与携种区;负压区和正压区的气室外壁上分别设计正压进气口和负压进气口,通过管道与旋涡泵风机的正负压供气端口相连。集排器工作时,种箱的种子在自重作用下经充种管流入充种室,左右排种轴上的链轮在动力作用下带动排种轴转动,从而带动气室旋转盘和与之相连的管针旋转件转动,当气室旋转盘上的通孔旋转至负压吸种区时,管针旋转件在负压吸附力下单粒吸种后进入携种区再旋转至正压卸种区,种子在自重、正压的吹力等作用下卸种,进入落种口。集排器连续工作,将种子群转变为多行并联有序单粒种子流,实现单粒精密排种。

2 管针旋转件结构设计

2.1 结构参数设计

采用山东省文登市西洋参种子,通过对其物料

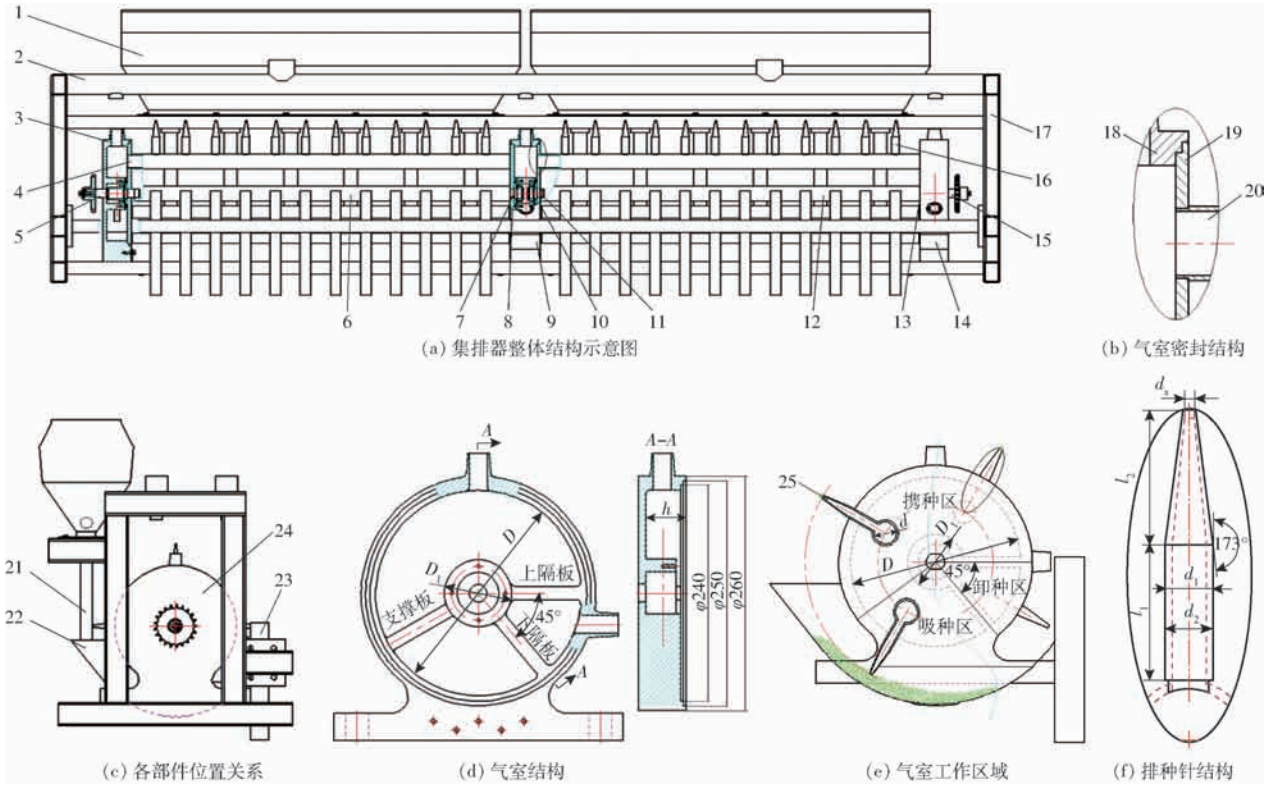


图1 正负气压组合管针式西洋参集排器结构简图

Fig.1 Schematics of positive and negative pressure combined tube-needle centralized seeding device and key components

1. 种箱 2. 输气管 3. 左外侧气室 4. 左外侧气室旋转盘 5. 左侧排种轴 6. 左侧气流分配管 7. 左旋转盘轴 8. 左内侧气室旋转盘 9. 中间气室 10. 右内侧气室旋转盘 11. 右旋转盘轴 12. 右侧气流分配管 13. 右外侧气室旋转盘 14. 右外侧气室 15. 右侧排种轴 16. 排种针 17. 机架 18. 气室 19. 气室旋转盘 20. 气流分配管 21. 充种管 22. 充种室 23. 落种组件 24. 气室组合 25. 管针旋转件

特性研究,得到其平均三轴尺寸为 6.24 mm × 5.04 mm × 3.35 mm,计算可得西洋参种子几何平均宽度为 4.72 mm。排种针直接参与排种器工作过程,其结构对吸种和卸种等有重要影响,为保证排种针结构强度和加工安装,以及排种针与充种室的合理距离,并避免出现急剧收缩壁面影响气流稳定性,设计排种针结构如图 1f。其中排种针下端为外螺纹,便于与气流分配管相连,下端直管内径 d_1 为 10 mm,长度 l_1 为 40 mm,上端设计为锥形管状,以减小排种针吸种时与种群的接触面积、降低阻力,锥角为 173° ,长度 l_2 为 40 mm,直管与锥形管壁厚均为 2 mm;排种器工作时排种针末端种子吸附面与种子直接接触,其直径 d_x 可表示为^[24]

$$d_x = ab \tag{1}$$

式中 a ——系数,取 0.64 ~ 0.66
 b ——几何平均宽度,mm

计算可得排种针末端种子吸附面直径为 3.02 ~ 3.11 mm,取 3.00 mm;为延长排种针与种群面的有效接触时间以提高吸种率,排种针末端运动半径取 175 mm,为避开排种针的旋转轨迹并保证吸种后种子的顺利回流和填充,充种室底板圆弧半径取

180 mm。

根据农艺要求设计集排器工作幅宽 1.5 m,集排器旋转一周播种 4 次,一次播种 24 行,集排器左右两侧对称均布 4 组管针旋转件,每个气流分配管上等间距布置 12 个排种针,间距为 56 mm,共计 96 个排种针。考虑到管道流量损失和机械结构强度等,气流分配管内径和气室进气口内径一致,设计为 30 mm,外径为 35 mm,气流分配管内径、排种针下端直管内径、排种针末端种子吸附面内径比为 30:10:3,满足气流分配管内径大于全部排种针末端种子吸附面过流面积的要求。

由图 1d 气室结构可知,负压区容积为

$$V = \frac{\sigma}{360} \pi \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_1}{2} \right)^2 \right] h \tag{2}$$

式中 σ ——气室负压区圆心角,取 315°
 D ——气室外筒内径,取 0.228 m
 D_1 ——气室内筒外径,取 0.075 m
 h ——气室厚度,取 0.045 m

计算可得负压区容积为 $V = 1.434 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,能保证足够大的负压区,使 96 个排种针正常工作。

忽略气室组合各部件安装处的漏气量,根据质

量守恒原理可知

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} \Rightarrow \begin{cases} Q_0 = Q_1 \\ Q_1 = Q_2 \\ Q_2 = Q_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中 $\sum Q_{in}$ ——入口总流量

$\sum Q_{out}$ ——出口总流量

Q_0 ——气室进气口处总流量

Q_1 ——气室截面总流量

Q_2 ——气流分配管两端总流量

Q_3 ——排种针末端种子吸附处总流量

设在负压区的管针旋转件为 n 个,将空气视为不可压缩流体,由不可压缩流体的连续性方程可知

$$Q = Sv \Rightarrow \begin{cases} \frac{v_0}{v_2} = \frac{nd^2}{d_0^2} \\ \frac{v_1}{v_2} = \frac{nd^2}{D^2} \\ \frac{v_3}{v_2} = \frac{2nd^2}{12nd_x^2} = \frac{d^2}{6d_x^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中 Q ——流量

S ——管道截面面积

v ——流速

d_0 ——气室进气口内径,为 0.03 m

d ——气流分配管内径,为 0.03 m

v_0 ——气室进气口流速, m/s

v_1 ——气室截面流速, m/s

v_2 ——气流分配管管道端面流速, m/s

v_3 ——排种针末端种子吸附面流速, m/s

n ——在负压区的管针旋转件个数,取 3 个

由理想气体的伯努利方程可知

$$\begin{cases} \frac{p_3}{\rho g} + \frac{v_3^2}{2g} = \frac{p_0}{\rho g} + \frac{v_0^2}{2g} \\ p_3 - p_0 = \Delta p \end{cases} \quad (5)$$

式中 Δp ——负压差,为保证顺利吸种,取 4 500 Pa

p_0 ——气室进气口处压强

p_3 ——排种针末端种子吸附处压强

ρ ——空气密度,取 1.169 kg/m³

联合式(3)~(5)计算可得

$$v_2 = \frac{6d_x^2 d_0^2}{d^2} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho(d_0^4 - 36n^2 d_x^4)}} \quad (6)$$

计算可知:气流分配管管道端面流速 $v_2 = 5.352$ m/s,结合式(4)得 $v_0 = 16.056$ m/s, $v_1 = 0.278$ m/s, $v_3 = 89.200$ m/s。

2.2 结构参数验证

管针旋转件是集排器的关键组成部分,为验证其结构参数的合理性,运用 ANSYS 中的 ICEM - CFD 和 Fluent 软件进行管针旋转件气流场仿真试

验。将进气口设为速度入口边界条件,针对将模型 12 个排种针末端种子吸附面设置为气流场入口面时,需要设定排种针末端种子吸附面处流速 v_3 ,从而无法进行并联各行排种针气流场分布均匀性分析的问题,将入口面设置为气流分配管两端端面,同时将流速矢量设定为反向负值,即 -5.352 m/s,保证仿真模型中气流由排种针向气流分配管方向流动,使管针旋转件模型内形成负压,匹配实际工作情况。将出口面设置为 12 个排种针末端种子吸附面,采用压力出口边界条件,模拟排种针末端种子吸附面外部条件为大气压^[25-26]。在后处理中提取各行排种针末端种子吸附面气流流速平均值,用于验证并联各行排种针气流场分配均匀性。

管针旋转件内气流流动状态用雷诺数 Re 进行判断,雷诺数计算公式为

$$Re = \frac{\rho v_2 d}{\mu} = \frac{v_2 d}{\gamma} \quad (7)$$

式中 μ ——空气动力粘度,取 1.79×10^{-5} Pa·s

γ ——空气运动粘度,取 1.48×10^{-5} m²/s

计算得 $Re = 1.085 \times 10^4$,远大于湍流流动的临界值 2 300,则集排器工作时空气运动形态为不可压缩湍流运动,采用湍流标准 $k - \varepsilon$ 两方程模型进行数值计算。

仿真计算获得管针旋转件的气流场速度云图如图 2 所示。图中 A、C 两区域气体流动矢量分布对称一致,B 区域矢量分布中间对称,结合总体气流场分布可知管针旋转件内气流场呈中间对称分布。在靠近管道两端的 A、C 区域,气体流动矢量方向一致性较好、能量损失较小;中间部位 B 区域的气流存在向两端流出的情况,矢量分布较杂,出现涡流现象,能量损失较大。

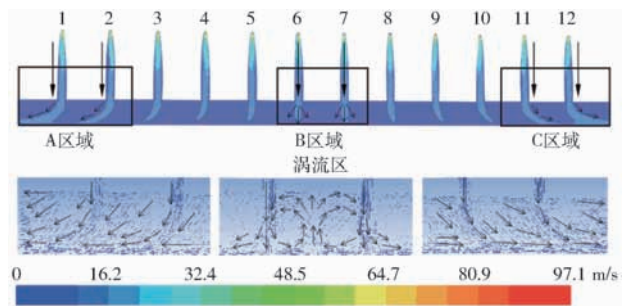


图 2 管针旋转件内气流场速度云图

Fig. 2 Air flow velocity map of tube needle rotating unit

由于气流分配管内径与排种针下端直管内径、排种针末端种子吸附面直径比为 30:10:3,因此在流量恒定条件下,随着过流截面的减小,由分配管至排种针末端,流速呈上升趋势。并联各行排种针内部流速变化相似,均为排种针末端处流速最大,排种针锥形管内气体流速随着内径扩大流速降低,下端

直管内流速保持稳定。后处理提取的 1~12 行排种针末端种子吸附面气流流速为 84.948、90.772、92.244、90.339、91.654、92.285、88.454、91.122、90.042、93.610、86.984、93.926 m/s, 平均值为 90.532 m/s, 与理论计算 v_3 值接近, 表明模型参数设计合理; 统计分析可知, 其变异系数为 2.923%, 表明设计的集排器并联各行排种针流场分配均匀性较好。

3 集排器工作过程分析

3.1 吸种过程分析

吸种过程中, 种子先受到吸力作用, 再与排种针接触并随之转动, 有以下情况: 种子未被吸附在排种针上或吸附后在种群摩擦挤压阻力作用下掉落, 造成漏吸; 多粒种子被吸附在排种针上离开种群, 形成多粒重吸; 单粒种子被吸附在排种针上顺利运移离开种群, 为理想吸种状态。种子受力分析见图 3。

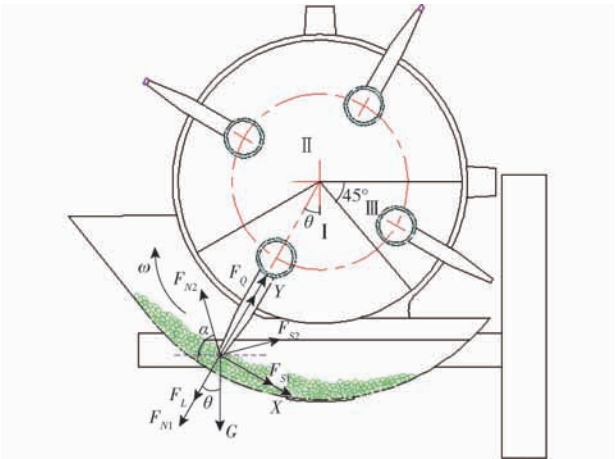


图 3 理想吸种过程种子受力分析
Fig. 3 Force analysis of ideal sucking seed progress
I. 吸种区 II. 携种区 III. 卸种区

吸种区种子受到负压差产生的吸附力作用将吸附到排种针上, 此瞬时种子未与排种针接触并随之转动, 无惯性力 F_L 和 F_{N1} , 此时种子的受力应满足条件

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = F_{s2} \sin(\alpha - \theta) + G \sin \theta - F_{N2} \cos(\alpha - \theta) = 0 \\ \sum F_y = F_{Q1} + F_{s2} \cos(\alpha - \theta) - G \cos \theta + F_{N2} \sin(\alpha - \theta) = m a_x \\ F_{s1} = F_{N1} \tan \varphi_1 \\ F_{s2} = F_{N2} \tan \varphi_2 \\ G = mg \end{array} \right. \quad (8)$$

由式(8)可得

$$F_{Q1} = m \left(a_x + \frac{g \cos(\varphi_2 + \alpha)}{\cos(\varphi_2 + \alpha - \theta)} \right) \quad (9)$$

式中 F_{Q1} ——吸种第一阶段种子所需吸附力
 G ——种子重力

F_{N1} ——种子受到排种针的支持力
 F_{N2} ——种子受到种群的支持力
 a_x ——种子受吸附力作用产生的加速度
 F_{s1} ——种子受到排种针的摩擦力
 F_{s2} ——种子受到种群的摩擦力
 F_L ——惯性离心力
 θ ——吸种角
 φ_1 ——西洋参种子与排种针之间的滑动摩擦角
 φ_2 ——西洋参种子自然休止角

种子被成功吸附并随排种针转动, 此时种子受力应满足条件

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = F_{s1} + F_{s2} \sin(\alpha - \theta) + G \sin \theta - F_{N2} \cos(\alpha - \theta) = 0 \\ \sum F_y = F_{Q2} + F_{s2} \cos(\alpha - \theta) - G \cos \theta + F_{N2} \sin(\alpha - \theta) - F_L - F_{N1} = 0 \\ F_{s1} = F_{N1} \tan \varphi_1 \\ F_{s2} = F_{N2} \tan \varphi_2 \\ F_L = m \omega^2 r \\ G = mg \end{array} \right. \quad (10)$$

式中 F_{Q2} ——吸种第二阶段种子所需吸附力
 ω ——排种轴角速度
 r ——排种针末端种子运动半径

由式(10)可得

$$F_{Q2} = m \omega^2 r + \frac{F_{N2} \cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \alpha - \theta)}{\sin \varphi_1 \cos \varphi_2} + \frac{mg \cos \varphi_2 \sin(\varphi_1 - \theta)}{\sin \varphi_1 \cos \varphi_2} \quad (11)$$

排种针末端种子吸附处内外压差产生的吸附力 F_Q 为

$$F_Q = \frac{\pi}{4} k \Delta p d_x^2 \quad (12)$$

式中 k ——各因素比例系数
为了种子能顺利被吸附, 吸附力至少大于第二阶段种子所需吸附力, 即: $F_Q \geq F_{Q2}$, 当 $\alpha = 90^\circ$ 时, $F_{N2} = G$, 此时

$$F_Q \geq m \left(\omega^2 r + g \frac{\cos(\varphi_1 + \varphi_2 + \alpha - \theta) + \cos \varphi_2 \sin(\varphi_1 - \theta)}{\sin \varphi_1 \cos \varphi_2} \right) \quad (13)$$

由式(13)可知, 单粒种子被吸附在排种针上并顺利随之旋转离开充种室所需吸附力 F_Q , 与负压差 Δp 、排种针末端种子吸附面直径 d_x 、种子物料特性 ($k, m, \varphi_1, \varphi_2$)、排种轴角速度 ω 、排种针末端种子运动半径 r 和吸种角 θ 等有关。

3.2 携种过程分析

携种过程中,被吸附的种子随排种针转动直至落种区,种子的受力分析见图4。

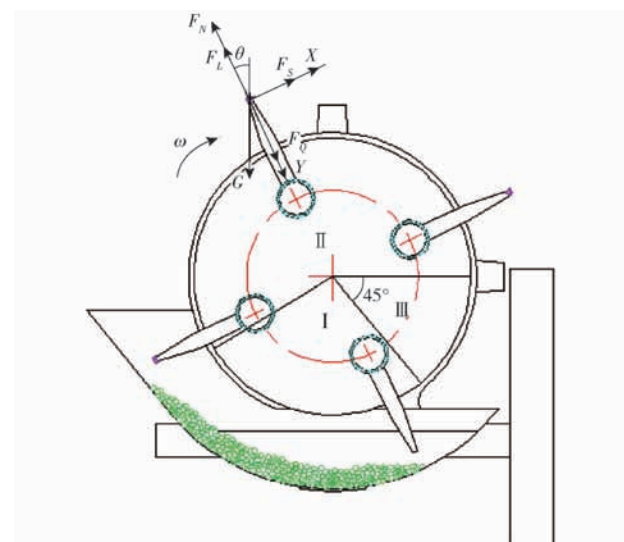


图4 携种过程受力分析

Fig.4 Force analysis of carrying seed progress

单粒种子被吸附在排种针上,保证不会中途掉落所需吸附力需满足

$$\begin{cases} \sum F_x = F_s - G \sin \theta = 0 \\ \sum F_y = F_{Q3} + G \cos \theta - F_N - F_L = 0 \\ F_s = F_N \tan \varphi_1 \\ F_{Q0} = \frac{\pi}{4} k \Delta p d_x^2 \geq F_{Q3} \\ G = mg \end{cases} \quad (14)$$

计算可得

$$F_{Q0} = \frac{\pi}{4} k \Delta p d_x^2 \geq m \left(\frac{g \sin(\theta - \varphi_1)}{\sin \varphi_1} + \omega^2 r \right) \quad (15)$$

式中 F_{Q0} ——种子顺利通过携种区不掉落所需吸附力

F_{Q3} ——卸种过程种子所受吸附力

F_N ——种子受到排种针的支持力

F_s ——种子受到排种针的摩擦力

由式(15)可知,种子始终单粒吸附在排种针上并顺利到达卸种区所需的吸附力 F_{Q0} ,与种子物料特性参数(k 、 m 、 φ_1)、排种针末端种子吸附面直径 d_x 、排种轴角速度 ω 、排种针末端种子运动半径 r 和吸种角 θ 有关。

3.3 卸种过程分析

当种子随排种针旋转至卸种区,负压吸附力转变为正压气吹力,种子受自重和正压吹力作用脱离排种针掉入落种管,此过程种子受力分析见图5。

卸种需要的压差作用力需满足

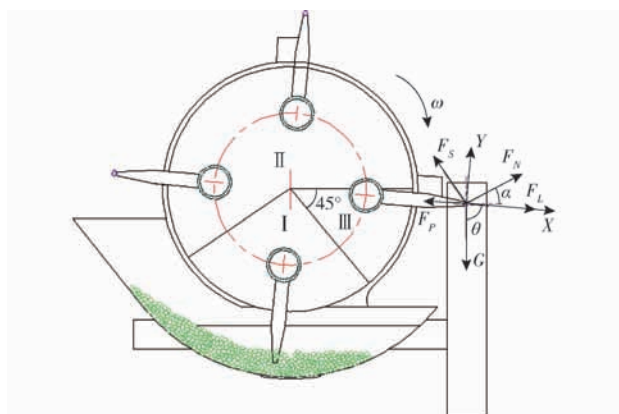


图5 卸种过程受力分析

Fig.5 Force analysis of unloading progress

$$\begin{cases} \sum F_x = F_p + F_s \cos(\theta - \alpha) - G \cos \theta - F_N \sin(\theta - \alpha) - F_L = 0 \\ \sum F_y = G \sin \theta - F_s \sin(\theta - \alpha) - F_N \cos(\theta - \alpha) = 0 \\ F_s = \tan \varphi_1 F_N \\ F_L = m \omega^2 r \\ G = mg \\ F \geq F_p \end{cases} \quad (16)$$

式中 F_p ——种子临近落种时所受压差作用力

F ——种子通过携种区不掉落所需压差作用力

由式(16)可得,卸种所需压差作用力

$$F \geq m \left(g \cos \theta + \omega^2 r + \frac{g \sin \theta \sin(\varphi_1 - \theta + \alpha)}{\cos(\varphi_1 + \theta - \alpha)} \right)$$

当 $\alpha = 90^\circ$,排种针对种子支持力与种子自重相等,即 $F_N = G$,此时压差作用力需满足: $F \geq m(\omega^2 r - g \tan \varphi_1)$ 。

4 排种性能试验

4.1 试验装置与方法

试验用经催芽处理后的山东省文登市西洋参种子,含水率为 29.94% ~ 37.90%;试验依据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,以合格指数、漏播指数、重播指数为排种性能指标。排种性能试验包括单因素试验、二次回归正交旋转试验,并在较优参数组合下以各行合格指数稳定性变异系数和行间合格指数一致性变异系数为指标进行各行稳定性及行间一致性验证试验,每次试验重复 5 次。

试验装置如图6所示。其中排种性能采用自制检测装置进行测定,检测装置包括压电薄膜式种子流传感器^[27]和监测显示终端^[28],检测时压电薄膜式种子流传感器利用种子下落过程中撞击压电薄膜产生的微弱电压信号,经信号调理电路处理后形成

与排种种子流序列相对应的排种脉冲序列信号,由单片机系统捕获中断程序及定时计数程序获得种子流的排种频率、排种总数和排种时间间隔序列,发送给监测显示终端装置,终端装置对排种时间间隔序列进行分析得到排种的合格指数和漏播指数。具体分析算法为:检测装置连续记录排种器连续排出的 251 粒种子,获得连续 250 个脉冲信号时间间隔序列;对比检测装置获得的时间间隔序列与单粒排种的理论时间间隔,若排种器排出的相邻两粒种子的时间间隔大于 1.5 倍理论时间间隔,则判断为漏播;时间间隔为 0.5 ~ 1.5 倍理论时间间隔,判断为单粒合格;时间间隔为 0.5 倍理论时间间隔,判断为重播;统计 250 个脉冲信号时间间隔序列中单粒合格、漏播与重播,即获得排种器排种的合格指数、漏播指数和重播指数。

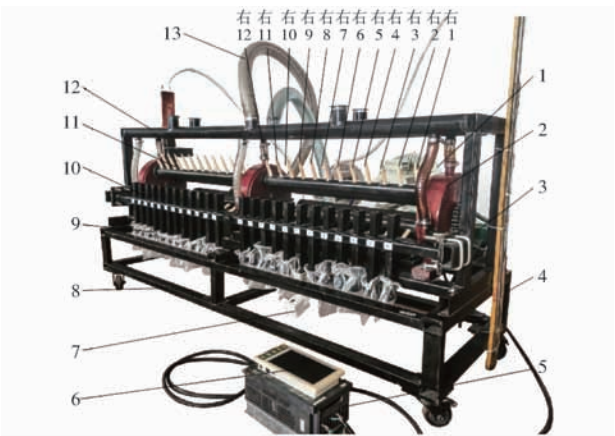
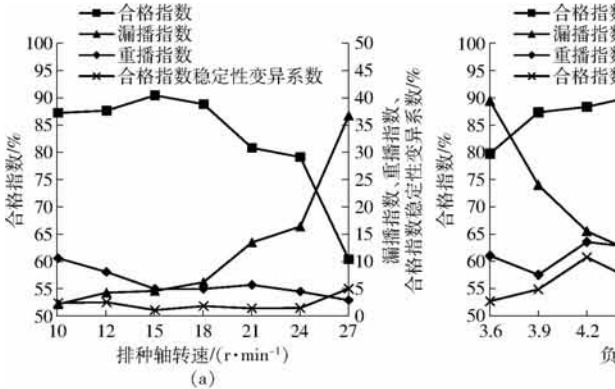


图 6 排种性能试验装置实物图

Fig. 6 Physical map of seeding performance test device
1. 风机 2. 气室组合 3. 电机 4. U 型压差计 5. 变频器 6. 监测显示终端装置 7. 压电薄膜式种子流传感器 8. 机架 9. 种子袋 10. 落种组件 11. 排种针 12. 输气管 13. 风管

检测前先在监测显示终端设定排种器的工作转速和每转排种次数(试验的集排器单行排种次数为 4 次/r),由监测显示终端装置计算其理论间隔时间作为单粒合格、漏播和重播的判断标准。排种器由



A07134 三相异步电机带动,转速由三菱 FR - A700 变频器控制,并通过 VICTOR DM6235P 智能型数字转速表进行校准。

4.2 单因素试验

由集排器工作过程分析可知,影响集排器排种性能的主要工作参数有排种轴转速、吸种负压和卸种正压,为探明这 3 个因素对集排器排种性能的影响,分别对其开展单因素试验。根据预试验效果,设定正负气压组合管针式西洋参集排器负压为 4.5 kPa,正压为 3.0 kPa,选取排种轴转速为 10、12、15、18、21、24、27 r/min 共 7 个水平开展排种轴转速对集排器排种性能影响试验,试验结果见图 7a;设定集排器排种轴转速为 15 r/min,正压为 3.0 kPa,选取负压为 3.6、3.9、4.2、4.5、4.8、5.1、5.4 kPa 共 7 个水平开展吸种负压对集排器排种性能影响试验,试验结果见图 7b;设定集排器排种轴转速为 15 r/min,负压为 4.5 kPa,选取正压为 2.4、2.7、3.0、3.3、3.6、3.9、4.2 kPa 共 7 个水平开展卸种正压对集排器排种性能影响试验,试验结果见图 7c。

由图 7a 可知,负压 4.5 kPa,正压 3.0 kPa 时,随着排种轴转速增大,合格指数呈先增后减趋势,漏播指数呈上升趋势,重播指数呈下降趋势,合格指数稳定性变异系数先升后降,分析原因是西洋参种子粒径大,在负压 4.5 kPa 条件下,当排种轴转速增加时,排种针未能与种子充分接触,造成漏播现象增加,合格指数降低;当转速在 15 r/min 时,集排器合格指数达到 90.4%,漏播指数和重播指数均控制在 5.0% 以内,合格指数稳定性变异系数为 1.11%,排种性能较好,当转速超过 24 r/min 后合格指数低于 80.0%,漏播指数大于 15.0%,合格指数稳定性变异系数大于 5.00%,排种性能大幅度降低。

由图 7b 可知,排种轴转速 15 r/min,正压 3.0 kPa 时,随着负压增加,合格指数呈先升后降趋势,漏播指数呈下降趋势,重播指数呈先降后升趋势,合格指数稳定性变异系数呈先增后降趋势,主要

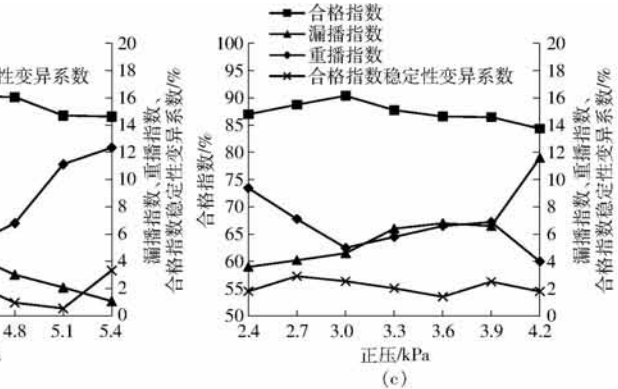


图 7 排种轴转速、负压和正压与排种性能指标关系曲线

Fig. 7 Relationship curves of row axis speed, negative pressure and positive pressure with seeding performance indicators

原因是负压偏小时,种子受到负压提供的吸附力较小,易发生漏播或吸种不稳定、种子中途掉落情况,随着负压的增加,种子所受吸附力增大,使漏播指数降低,重播指数增大。负压为 4.5 ~ 4.8 kPa 时合格指数大于 90.0%,漏播指数低于 5.0%,合格指数稳定性变异系数低于 2.53%,排种性能较优且稳定性较好。

由图 7c 可知,排种轴转速 15 r/min,负压 4.5 kPa 时,随着正压增加,合格指数呈小范围上升后下降趋势,漏播指数呈上升趋势,重播指数先降后升,合格指数稳定性变异系数小范围内波动。

4.3 二次回归正交旋转组合试验

4.3.1 试验设计

试验采用三因素五水平正交旋转组合优化设计,以合格指数、漏播指数和重播指数为响应指标,根据单因素试验确定排种轴转速范围为 12.00 ~ 24.00 r/min,负压范围为 3.90 ~ 5.10 kPa,正压范围为 2.70 ~ 3.90 kPa,因素编码如表 1 所示,试验方案及结果见表 2 所示, Z_1 、 Z_2 、 Z_3 为因素编码值。

表 1 因素编码			
Tab.1 Cording of factors			
编码	因素		
	排种轴转速 X_1 / ($r \cdot min^{-1}$)	负压 X_2 / kPa	正压 X_3 / kPa
1.682	24.00	5.10	3.90
1	21.57	4.86	3.66
0	18.00	4.50	3.30
-1	14.43	4.14	2.94
-1.682	12.00	3.90	2.70

4.3.2 回归模型方程的建立与显著性检验

运用数据处理软件 Design-Expert 8.0.6 对试验数据进行多元回归拟合,建立合格指数 Y_1 、漏播指数 Y_2 、重播指数 Y_3 与排种轴转速 Z_1 、负压 Z_2 、正压 Z_3 之间的回归方程,并对试验结果和回归方程进行方差分析,结果见表 3。

响应指标 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 回归模型方程为

$$Y_1 = 87.76 - 4.20Z_1 + 2.14Z_2 - 0.61Z_3 + 1.19Z_1Z_2 - 0.24Z_1Z_3 + 0.71Z_2Z_3 - 2.70Z_1^2 - 0.99Z_2^2 - 0.21Z_3^2 \quad (17)$$

$$Y_2 = 5.41 + 5.71Z_1 - 3.51Z_2 + 1.45Z_3 - 0.42Z_1Z_2 + 0.43Z_1Z_3 - 0.95Z_2Z_3 + 3.47Z_1^2 + 1.30Z_2^2 + 0.52Z_3^2 \quad (18)$$

$$Y_3 = 6.83 - 1.51Z_1 + 1.36Z_2 - 0.84Z_3 - 0.76Z_1Z_2 - 0.19Z_1Z_3 + 0.24Z_2Z_3 - 0.77Z_1^2 - 0.31Z_2^2 - 0.31Z_3^2 \quad (19)$$

由表 3 可知,各因素对合格指数 Y_1 、漏播指数

表 2 二次正交旋转组合试验方案与结果						
Tab.2 Test scheme and result of experiment of quadratic rotation-orthogonal combination						
试验号	因素			合格指数	漏播指数	重播指数
	Z_1	Z_2	Z_3	$Y_1/\%$	数 $Y_2/\%$	$Y_3/\%$
1	-1	-1	-1	87.8	7.2	5.0
2	1	-1	-1	79.8	15.9	4.3
3	-1	1	-1	90.1	1.6	8.3
4	1	1	-1	84.5	10.1	5.4
5	-1	-1	1	86.5	10.5	3.0
6	1	-1	1	75.2	22.4	2.4
7	-1	1	1	89.3	2.6	8.1
8	1	1	1	85.1	11.3	3.6
9	-1.682	0	0	87.2	4.0	8.8
10	1.682	0	0	70.4	27.9	1.7
11	0	-1.682	0	80.8	15.0	4.2
12	0	1.682	0	86.5	4.6	8.9
13	0	0	-1.682	86.5	5.3	8.2
14	0	0	1.682	85.2	9.9	4.9
15	0	0	0	88.1	5.8	6.1
16	0	0	0	90.8	3.6	5.6
17	0	0	0	86.2	4.2	9.6
18	0	0	0	85.2	8.0	6.8
19	0	0	0	90.1	4.2	5.7
20	0	0	0	86.6	6.4	7.0

Y_2 影响的回归模型极显著($P < 0.01$),对重播指数 Y_3 影响的回归模型显著($P < 0.05$);3 种响应指标失拟项 P 均大于 0.05,回归方程失拟不显著,在试验范围内模型与实际情况拟合较好。由表 3 分析各因素对合格指数的影响可知,排种轴转速 Z_1 、负压 Z_2 、排种轴转速二次方项 Z_1^2 的显著性水平 $P < 0.01$,其余项的显著性水平 $P > 0.1$,说明 Z_1 、 Z_2 、 Z_1^2 对排种器合格指数影响极显著,其余项对合格指数影响不显著;同样对漏播指数排种轴转速 Z_1 、负压 Z_2 、排种轴转速二次方项 Z_1^2 的显著性水平 $P < 0.01$,正压 Z_3 、负压二次方项 Z_2^2 的显著性水平 $P < 0.05$,其余项的显著性水平 $P > 0.1$,说明 Z_1 、 Z_2 、 Z_1^2 对漏播指数影响极显著, Z_3 、 Z_2^2 对漏播指数影响显著,其余项对漏播指数影响不显著;对重播指数排种轴转速 Z_1 、负压 Z_2 的显著性水平 $P < 0.01$,正压 Z_3 的显著性水平 $P < 0.05$,其余项的显著性水平 $P > 0.1$,说明 Z_1 、 Z_2 对重播指数的影响极显著, Z_3 对重播指数的影响显著,其余项对重播指数的影响不显著。

对式(17) ~ (19)剔除不显著因素后的回归模型方程为

$$Y_1 = 86.87 - 4.20Z_1 + 2.14Z_2 - 2.59Z_1^2 \quad (20)$$

$$Y_2 = 5.84 + 5.71Z_1 - 3.51Z_2 + 1.45Z_3 + 3.42Z_1^2 + 1.25Z_2^2 \quad (21)$$

表 3 回归方程方差分析

Tab.3 Variance analysis of regression equation

方差来源	合格指数				漏播指数				重播指数			
	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	437.52	9	9.05	0.001 0 **	839.43	9	22.89	<0.000 1 **	81.60	9	4.86	0.010 6 *
Z ₁	240.87	1	44.84	<0.000 1 **	445.44	1	109.31	<0.000 1 **	31.20	1	16.71	0.002 2 **
Z ₂	62.80	1	11.69	0.006 6 **	167.94	1	41.21	<0.000 1 **	25.34	1	13.58	0.004 2 **
Z ₃	5.03	1	0.94	0.356 1	28.52	1	7.00	0.024 5 *	9.60	1	5.14	0.046 8 *
Z ₁ Z ₂	11.28	1	2.10	0.177 9	1.45	1	0.35	0.564 8	4.65	1	2.49	0.145 5
Z ₁ Z ₃	0.45	1	0.084	0.777 9	1.45	1	0.35	0.564 8	0.28	1	0.15	0.706 0
Z ₂ Z ₃	4.06	1	0.76	0.404 9	7.22	1	1.77	0.212 7	0.45	1	0.24	0.633 6
Z ₁ ²	105.26	1	19.60	0.001 3 **	174.01	1	42.70	<0.000 1 **	8.59	1	4.60	0.057 5
Z ₂ ²	14.07	1	2.62	0.136 7	24.38	1	5.98	0.034 5 *	1.41	1	0.75	0.405 4
Z ₃ ²	0.64	1	0.12	0.737 7	3.94	1	0.97	0.348 6	1.41	1	0.75	0.405 4
残差	53.71	10			40.75	10			18.67	10		
失拟	28.58	5			26.72	5			7.65	5		
误差	25.13	5	1.14	0.445 6	14.03	5	1.90	0.248 4	11.02	5	0.69	0.650 9
总和	491.23	19			880.18	19			100.27	19		

注：* 表示影响显著 ($P<0.05$)；**表示影响极显著 ($P<0.01$)。

$Y_3=5.88-1.51Z_1+1.36Z_2-0.84Z_3$ (22)

分析式(20)~(22)的回归系数可知,影响排种合格指数、漏播指数、重播指数的因素主次顺序均为排种轴转速、吸种负压、卸种正压。

4.3.3 试验因素影响效应分析

合格指数和漏播指数是评价精密排种器排种性能

能的 2 个关键指标,借助 Design-Expert 8.0.6 软件,根据以上建立的排种器合格指数和漏播指数回归模型,绘制响应曲面和等值线图,如图 8、9 所示。

由图 8a、9a 可知,正压处于零水平(3.30 kPa),负压一定时,随着排种轴转速的增加,合格指数呈先升后降趋势,漏播指数呈上升趋势;排种轴转速一定

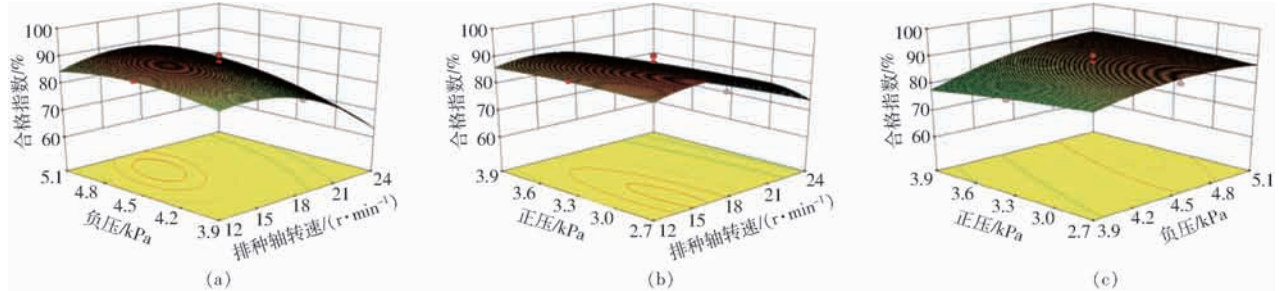


图 8 交互因素对合格指数的影响

Fig.8 Effects of interactive factors on qualified index

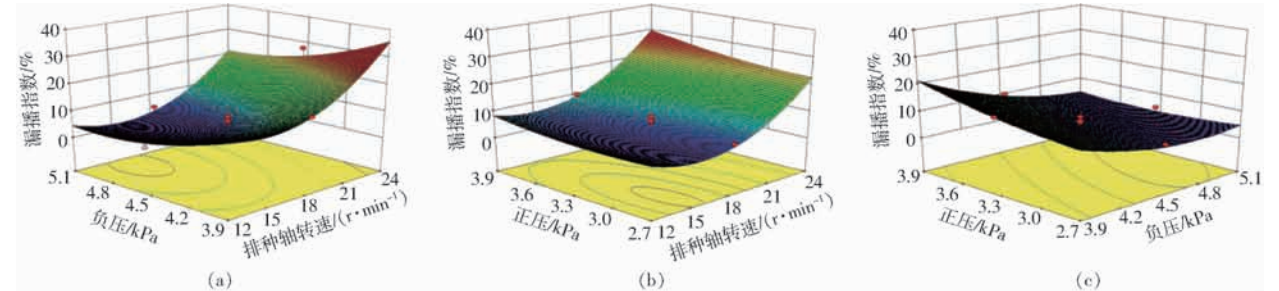


图 9 交互因素对漏播指数的影响

Fig.9 Effects of interactive factors on missing index

时,随着负压的增加,合格指数呈先升后降趋势,漏播指数呈下降趋势;排种轴转速为 12.00~18.00 r/min,负压为 4.50~4.80 kPa 时,排种器合格指数较高,漏播指数较小;由图 8b、9b 可知,负压处于零水平(4.50 kPa),正压一定时,随着排种轴转速的增加,合格指数先升后降,漏播指数先降后升;排种轴转速一定时,随着正压的增加,合格指数小幅度上升后呈下降趋势,漏播指数小幅度下降后呈上升趋势。在

正压为 2.90 kPa 时合格指数最高,漏播指数最低;排种轴转速为 14.43 ~ 18.00 r/min,正压为 2.70 ~ 3.30 kPa 时,排种器合格指数较高,漏播指数较小;由图 8c、9c 可知,排种轴转速处于零水平(18.00 r/min),正压一定时,随着负压的增加,合格指数先上升后基本稳定,漏播指数先降低后基本稳定;负压一定时,随着正压的增加,合格指数降低,漏播指数增加,负压为 4.50 ~ 4.86 kPa 时,合格指数较高,漏播指数较小。

4.4 参数优化与试验验证

合格指数和漏播指数是反映单粒(精密)播种机排种效果的重要指标,在试验范围内要求合格指数尽量偏高,漏播指数尽量降低,以合格指数、漏播指数、重播指数为性能指标函数,结合行业标准 NY/T 503—2015《单粒(精密)播种机作业质量》及西洋参实际生产要求,设定合格指数大于 88.50%,漏播指数小于 5.00%,重播指数小于 7.50%,通过图 8b、9b 可知,在正压为 2.90 kPa 时,合格指数最高,漏播指数最小,利用 Optimization – Graphical 模块优化得最佳参数范围如图 10 黄色区域所示($X_3 = 2.90$ kPa),即排种轴转速为 13.10 ~ 17.70 r/min,负压为 4.25 ~ 4.50 kPa。

对优化所得理论结果进行验证,选取排种轴转速 15 r/min 时,负压 4.40 kPa,正压 2.90 kPa,进行 5 次重复试验,试验测得排种器合格指数为 90.10%,漏播指数 3.40%,重播指数为 6.50%,试验结果与理论结果基本一致。

4.5 各行稳定性和行间一致性验证

为验证集排器各行稳定性和行间一致性,在优

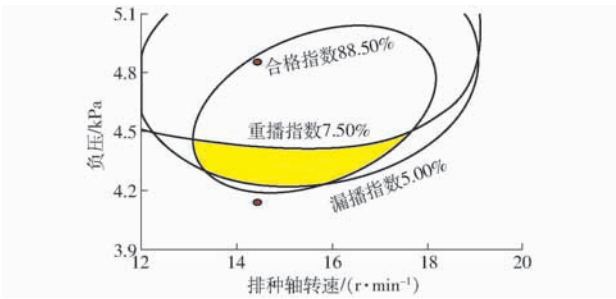


图 10 参数优化分析图

Fig. 10 Diagram of parameters optimization and analysis

化得最佳参数范围内选取 3 组工况组合,如表 4 所示,在这 3 种工况组合下测量同侧 12 行的合格指数,计算各行 5 次重复试验所得合格指数稳定性变异系数,验证集排器各行稳定性,试验结果如表 5。

表 4 工况组合

Tab.4 Combination of operating conditions

试验号	排种轴转速	负压	正压
	$X_1/(r \cdot min^{-1})$	X_2/kPa	X_3/kPa
1	14.00	4.30	2.90
2	15.00	4.40	2.90
3	16.00	4.50	2.90

由表 5 可知,在选取的 3 种工况组合下,集排器各行合格指数均大于 86.30%,各行稳定性变异系数均小于 6.20%,计算 12 行的行间合格指数一致性变异系数,验证集排器行间一致性。集排器行间合格指数一致性变异系数分别为 1.53%、1.78%、1.41%,各行稳定性和行间一致性较好,验证可得集排器整体排种性能良好,满足西洋参精密播种要求。

表 5 集排器稳定性和各行合格指数一致性验证结果

Tab.5 Validation results of stability and consistency of each row of centralized seeding device

试验号	性能指标	行序号(右侧)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	合格指数	86.83	90.83	88.67	90.67	88.67	88.83	90.50	89.17	87.00	89.50	89.00	87.33
	稳定性变异系数	3.67	2.13	2.33	2.28	1.84	4.90	3.11	4.56	5.24	3.44	3.41	4.08
2	合格指数	90.33	91.17	86.83	87.67	88.17	89.33	86.67	90.00	86.33	89.17	88.00	89.83
	稳定性变异系数	3.41	1.62	4.80	3.20	2.42	2.08	3.40	2.53	6.12	1.10	2.27	3.41
3	合格指数	88.33	90.17	87.50	89.83	87.83	87.00	89.33	88.83	87.33	86.67	86.83	86.83
	稳定性变异系数	4.57	3.93	2.68	1.78	4.16	3.71	1.69	2.30	3.29	1.74	3.29	4.85

5 结论

(1)设计了一种负压吸种与携种、正压卸种的管针式西洋参集排器,实现了一器 24 行并联单粒排种。对关键部件管针旋转件开展了并联各行气流分配均匀性仿真,仿真结果表明:各排种针末端种子吸附面平均流速变化较小,并联各行气流分配均匀性较好,集

排器工作时能实现并联各行均匀吸种;构建了各环节力学模型,确定了影响集排器排种性能的关键工作参数依次为:排种轴转速、吸种负压和卸种正压。

(2)通过台架试验对集排器排种性能进行了测试,确定了排种轴转速、吸种负压和卸种正压对集排器排种性能的影响规律,并通过二次回归正交旋转组合试验建立了排种性能指标与各因素之间的回归

模型,通过响应面分析得出各因素交互作用对排种性能的影响。采用多目标优化方法得到最佳工作参数范围,在优化的参数范围内取3种工况进行各行稳定性和行间一致性验证,集排器各行合格指数大

于86.30%,各行稳定性变异系数均小于6.20%,行间合格指数一致性变异系数小于1.80%,各行稳定性和行间一致性较好,集排器整体排种性能良好,满足西洋参精密播种要求。

参 考 文 献

- [1] 黄顺之,于志霞,鞠在华,等. 西洋参标准化栽培技术[J]. 中国农技推广,2009,25(6): 26-28.
- [2] 陈萍,权宜淑,梁俊. 人参与西洋参研究进展[J]. 基层中药杂志,2010,14(1): 58-60.
- [3] SINGH R C, SINGH G, SARASWAT D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting of groundnut (*Arachis hypogae*s) seeds[J]. Indian Journal of Agricultural Sciences,2007,77(1): 40-42.
- [4] 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)
- [5] PRASANNA K V, SRIVASTAVA B, NAGESH D S, et al. Modeling and optimization of parameters of flow rate of paddy rice grains through the horizontal rotating cylindrical drum of drum seeder[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2009, 65(1): 26-35.
- [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(10): 128-135.
- [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] GAIKWAD B B, SIROHI N P S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. Biosystems Engineering, 2008,99(4): 322-329.
- [9] 廖庆喜,雷小龙,廖宜涛,等. 油菜精量播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(9): 1-16.
LIAO Qingxi, LEI Xiaolong, LIAO Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(9): 1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170901&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.001. (in Chinese)
- [10] LI Y, BINGXIN Y, YIMING Y, et al. Global overview of research progress and development of precision maize planters[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2016,9(1): 9-26.
- [11] 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)
- [12] 赖庆辉,高筱钧,张智泓. 三七气吸滚筒式排种器充种性能模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(5): 27-37.
LAI Qinghui, GAO Xiaojun, ZHANG Zhihong. Simulation and experiment of seed-filling performance of pneumatic cylinder seed-metering device for *Panax notoginseng* [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016, 47(5): 27-37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160505&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.005. (in Chinese)
- [13] 赖庆辉,马文鹏,刘素,等. 气吸圆盘式微型薯排种器充种性能模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(5): 44-53.
LAI Qinghui, MA Wenpeng, LIU Su, et al. Simulation and experiment on seed-filling performance of pneumatic disc seed-metering device for mini-tuber [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017, 48(5): 44-53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170505&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.005. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 李莹莹. 气吸滚筒式滇重楼精密排种器设计与试验研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2016.
LI Yingying. The design and reserch on the air-suction roller precision metering device of *Paris polyphylla* var. *Yunnanensis* [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] 夏红梅,李志伟,甄文斌,等. 气力板式蔬菜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(6): 56-60.
XIA Hongmei, LI Zhiwei, ZHEN Wenbin, et al. Design and experiment of the vegetable seed metering device in pneumatic

- plate-type [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 56–60. (in Chinese)
- [17] 夏红梅,李志伟,牛菊菊,等. 气力滚筒式蔬菜穴盘播种机吸排种动力学模型的研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1): 141–146.
- XIA Hongmei, LI Zhiwei, NIU Juku, et al. Dynamic model for metering process for pneumatic roller-type vegetable seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(1): 141–146. (in Chinese)
- [18] 刘晓蛟,尚书旗,王东伟,等. 气力式西洋参排种装置的设计与试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(3): 213–217.
- LIU Xiaojiao, SHANG Shuqi, WANG Dongwei, et al. Design and experimental research of physical strength type seed-metering device for panax quinquefol [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(3): 213–217. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] LIAO Yitao, WANG Lei, LIAO Qingxi. Design and test of an inside-filling pneumatic precision centralized seed-metering device for rapeseed[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(2): 56–62.
- [21] 李明,刘晓辉,廖宜涛,等. 气力滚筒式油菜精量集排器[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 68–73.
- LI Ming, LIU Xiaohui, LIAO Yitao, et al. Pneumatic cylinder-type centralized precision metering device for rapeseed [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 68–73. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131212&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.012. (in Chinese)
- [22] 倪向东,徐国杰,王琦,等. 气吸滚筒阵列式棉花精密排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 58–67.
- NI Xiangdong, XU Guojie, WANG Qi, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder array precision seed-metering device for cotton [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 58–67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171207&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.007. (in Chinese)
- [23] 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/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 46–52.
- CONG Jinling, YU Jiajia, CAO Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic metering device for rape and wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 46–52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140108&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.01.008. (in Chinese)
- [24] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007.
- [25] 任海伟,李金平,刘增光,等. 太阳能干燥室内部气流场分布 CFD 数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 235–238.
- REN Haiwei, LI Jinping, LIU Zengguang, et al. Numerical simulation of airflow fields in solar drying chamber by CFD [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 235–238. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s48&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.048. (in Chinese)
- [26] 宋灿灿,周志艳,姜锐,等. 气力式无人机水稻撒播装置的设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 80–88, 307.
- SONG Cancan, ZHOU Zhiyan, JIANG Rui, et al. Design and parameter optimization of pneumatic rice sowing device for unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(6): 80–88, 307. (in Chinese)
- [27] 丁幼春,杨军强,朱凯,等. 油菜精量排种器种子流传感装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 29–36.
- DING Youchun, YANG Junqiang, ZHU Kai, et al. Design and experiment on seed flow sensing device for rapeseed precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 29–36. (in Chinese)
- [28] 丁幼春,张莉莉,杨军强,等. 油菜精量直播机播种监测系统传感装置改进及通信设计[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 19–26.
- DING Youchun, ZHANG Lili, YANG Junqiang, et al. Sensing device improvement and communication design on sowing monitoring system of precision planter for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 19–26. (in Chinese)