

## 油菜精量气压式集排器排种性能试验

李兆东, 李姗姗, 曹秀英, 雷小龙, 廖宜涛, 韦跃培, 廖庆喜\*

(华中农业大学工学院, 武汉 430070)

**摘要:** 为提高油菜精量气压式集排器的排种性能, 该文通过对充种和清种 2 个基础过程解析, 明确了影响排种性能的主要因素, 确定了相关试验因素的范围, 并以华油杂 62 种子为对象, 采用  $L_{27}(3^{13})$  正交试验设计研究了清种气嘴口截面形状、充填高度、清种气流流速和排种滚筒转速对集排器排种性能的影响。结果表明, 清种气嘴口截面形状、充填高度、清种气流流速和排种滚筒转速对排种均匀性影响显著, 清种气嘴口截面形状、充填高度和排种滚筒转速对各行排量一致性有显著影响, 并确定了其较优参数组合。优化组合试验得出选择矩形截面形状的清种气嘴, 充填高度 27 mm, 清种气流流速 10 m/s, 排种滚筒转速 20 r/min 的最佳参数条件下, 排种均匀性变异系数为 8.07%, 各行排量一致性变异系数为 1.95%, 种子破损率低于 0.1%。该研究为油菜精量气压式集排器结构优化与排种性能的提升提供了参考。

**关键词:** 农业机械; 种子; 优化; 排种器; 充种; 清种; 气压式; 油菜

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.004

中图分类号: S223.2<sup>+</sup>3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-18-0017-09

李兆东, 李姗姗, 曹秀英, 雷小龙, 廖宜涛, 韦跃培, 廖庆喜. 油菜精量气压式集排器排种性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 17-25. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.004 http://www.tcsae.org

Li Zhaodong, Li Shanshan, Cao Xiuying, Lei Xiaolong, Liao Yitao, Wei Yuepei, Liao Qingxi. Seeding performance experiment of pneumatic-typed precision centralized metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 17-25. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.004 http://www.tcsae.org

### 0 引言

油菜精量直播具有省工、省时、节本增效等优点, 同时机械化直播油菜成熟度相对一致, 适合机械化收获<sup>[1-4]</sup>。中国油菜种植开展适合油菜机械化精量直播技术是实现油菜产业可持续发展的重要途径之一<sup>[5-7]</sup>。

排种器作为机械化直播技术的核心工作部件, 其排种性能直接影响播种质量。Yazgi A 等<sup>[8]</sup>对吸室真空度、排种盘型孔大小及排种盘圆周线速度等因素对提高气吸式棉籽排种器株距均匀性进行了试验研究。Prasanna Kumar 等<sup>[9]</sup>利用相似原理对排种滚筒排种口处种子流动性进行理论分析, 应用神经网络对相关参数作了优化, 并建立了数学模型。左春桢等<sup>[10]</sup>利用高速摄像技术对气力轮式排种器动压充种机理进行了研究。李成华等<sup>[11]</sup>为保证倾斜圆盘勺式排种器的清种性能, 对排种盘速度、清种起始角和清种结束角等因素进行了研究。陶桂香等<sup>[12-13]</sup>为提高水稻钵盘精量播种机的充种性能, 对型孔直径、型孔厚度和种箱速度开展试验研究并得出了较优参数组合,

同时对投种过程机理进行相关研究。于建群等<sup>[14]</sup>借助二维离散元法和自主开发的集成分析软件, 对组合式内窝孔排种器清种过程进行了仿真分析。丛锦玲等<sup>[15]</sup>提出了一种内嵌入导种条式排种盘, 解决了油菜、小麦 2 种作物机械物理特性差异较大的兼用性问题。赵湛等<sup>[16]</sup>运用 Fluent 软件和中心差分法相结合的方法, 研究了工作参数对吸种性能的影响。王朝辉等<sup>[17]</sup>以超级稻精密育秧排种器为对象, 以种层厚度、双孔孔距以及振动频率为试验因素对其吸种性能进行了试验研究。为提高排种器的排种性能, 上述研究结合理论分析、高速摄像或仿真软件对机械式、气吸式以及正负气压组合式等排种器充种、清种等单一环节对排种性能影响进行研究, 研究结果对气压式小粒径排种器排种性能提供了参考。

型孔轮式排种器结构简单、田间适应性好, 易于实现集中排种作业<sup>[18-20]</sup>, 但用于小粒径油菜排种时, 传统机械式清种、护种易剪切破坏种子, 李兆东等<sup>[21]</sup>中采用气压清种与气压护种组合技术设计了一种应用于小粒径油菜“一器多行”集排器, 其核心工作部件为具有“倒正方锥”型孔的排种滚筒, 实现了型孔轮式排种器用于小粒径油菜一器多行有效排种, 但其整体排种性能还有待提高。

为提高油菜精量气压式集排器的排种性能, 实现油菜籽粒成行且均匀分布于田间的农艺种植要求, 以华油杂 62 种子为对象, 进行了充种和清种过程的排种性能试验, 开展了清种气嘴截面形状、充填高度、清种气流流速以及排种滚筒转速等因素对排种性能影响的试验研究, 旨在为油菜精量气压式集排器结构优化设计及排种性能的提升提供参考。

收稿日期: 2015-06-23 修订日期: 2015-08-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51275197、51405180); 国家油菜产业体系专项资助项目 (CARS-13); “十二五”国家科技支撑计划资助项目 (2013BAD08B02)

作者简介: 李兆东, 男, 江苏沛县人, 博士生, 主要从事现代农业装备设计与测控研究。武汉 华中农业大学工学院, 430070。

Email: HRlzd@163.com

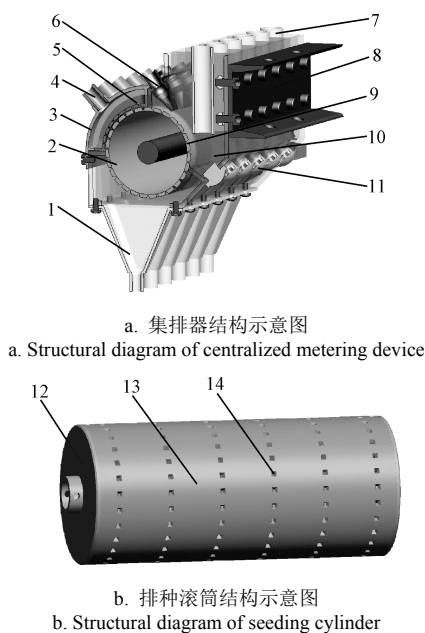
\*通信作者: 廖庆喜, 男, 湖北江陵人, 教授, 博士生导师, 主要从事油菜机械化生产技术与装备等方面的研究。武汉 华中农业大学工学院, 430070。

Email: liaoxq@mail.hzau.edu.cn

## 1 工作原理

### 1.1 集排器组成及工作原理

油菜精量气压式集排器主要由充种室、排种滚筒、排种轴、进种支管、清种气嘴、护室板、护垫和护种气嘴等部件组成,如图 1 所示。其中排种滚筒为核心工作部件,直径为 100 mm,轴向均匀分布 6 排型孔,每排型孔沿排种滚筒径向均匀分布 27 个型孔,型孔为“倒正方锥”结构形状,其上部边长为 4 mm,下部边长为 1.2 mm,型孔深度为 2.7 mm<sup>[21]</sup>。



1.导种管 2.排种滚筒 3.护室板 4.护种气嘴 5.护垫 6.清种气嘴 7.进种支管 8.联接板 9.排种轴 10.充种室 11.卸种塞 12.滚筒端盖 13.滚筒壳体 14.型孔  
1.Guiding seed tube 2.Seeding cylinder 3.Protecting chamber plate 4.Protecting seed air cock 5.Protecting cushion 6.Clearing seed air cock 7.Inlet seed branch pipe 8.Connection plate 9.Seeding shaft 10.Filling seed room 11.Unloading seed stopper 12.Cylinder cover 13.Cylinder shell 14.Type hole

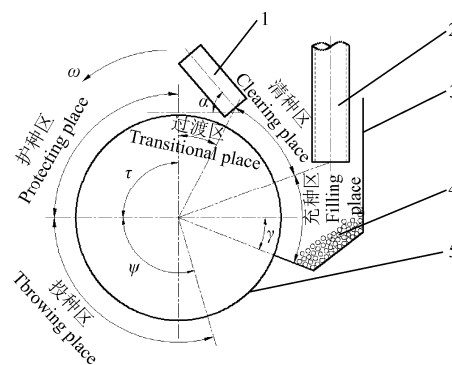
图 1 油菜精量气压式集排器组成简图

Fig.1 Structural figure of pneumatic-typed precision centralized metering device for rapeseed

工作时,种子在重力作用下经进种支管 7 流入至充种室 10,充种室 10 内的种子在种群侧向压力、排种滚筒 2 摩擦力及惯性离心力等合力作用下充入型孔 14 中,当携有种子的型孔 14 转动至清种区,利用清种气嘴 6 喷出的气流将部分种子吹入充种室 10,型孔 14 中只留下定量种子进入护种区,护种气嘴 4 喷出的气流经护垫 5 形成持续稳定的气流将种子压附于型孔 14 内;携有种子的型孔 14 转动至投种区时,护种气流被切断,型孔 14 中的种子在重力、离心力等合力作用下进入导种管 1,完成一个排种周期。

### 1.2 充种和清种过程解析

油菜精量气压式集排器工作过程可分为充种、清种、护种和投种 4 个过程,如图 2 所示。其中充种和清种过程作为集排器工作的两个基础过程,对气压式排种器排种性能的影响至关重要<sup>[22]</sup>。



1.清种气嘴 2.进种支管 3.充种室 4.油菜籽 5.排种滚筒  
1.Clearing seed air cock 2.Inlet seed branch pipe 3.Filling seed room 4.Rapeseed 5.Seeding cylinder

注:  $\gamma$  为卸种角, ( $^{\circ}$ );  $\alpha$  为清种角, ( $^{\circ}$ );  $\tau$  为护种角, ( $^{\circ}$ );  $\psi$  为投种角, ( $^{\circ}$ );  $\omega$  为排种滚筒的角速度,  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

Note:  $\gamma$  is unloading seed angle, ( $^{\circ}$ );  $\alpha$  is clearing seed angle, ( $^{\circ}$ );  $\tau$  is protecting seed angle, ( $^{\circ}$ );  $\psi$  is releasing seed angle, ( $^{\circ}$ );  $\omega$  is angular velocity of seeding cylinder,  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图 2 集排器工作过程示意图

Fig.2 Working process diagram of pneumatic-typed precision centralized metering device for rapeseed

### 1.2.1 充种过程

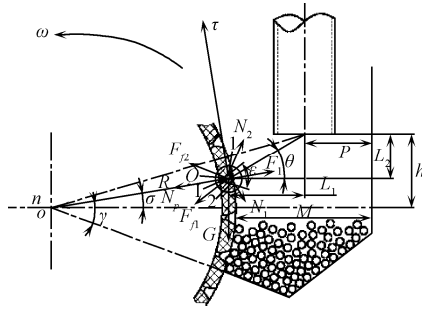
改善种子充填性能是提高排种器排种精度及其作业效率的重要手段之一<sup>[23]</sup>。充种过程作为集排器其他工作过程的基础,探究充种区种子充填机理尤为重要。

对于依据侧向充填原理的型孔轮式排种器,种子主要依靠排种滚筒对种子摩擦拖带完成充种过程<sup>[24]</sup>。以单粒种子  $Q$  充入型孔后的临界条件为研究对象,为便于分析此时种子的受力情况,假设种子为均匀材质的圆球刚体,不考虑振动及研究对象  $Q$  与种群间摩擦力,受力分析如图 3 所示。沿种子运动的切向和法向建立辅助坐标系,建立种子的受力方程。

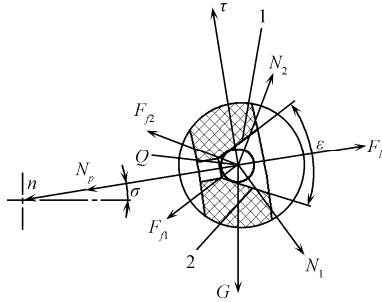
$$\begin{cases} N_p + G \sin \sigma + F_{f1} \cos \frac{\varepsilon}{2} + F_{f2} \cos \frac{\varepsilon}{2} \geq F_l + N_1 \sin \frac{\varepsilon}{2} + N_2 \sin \frac{\varepsilon}{2} \\ G \cos \sigma + N_1 \cos \frac{\varepsilon}{2} + F_{f1} \sin \frac{\varepsilon}{2} = N_2 \cos \frac{\varepsilon}{2} + F_{f2} \sin \frac{\varepsilon}{2} \\ F_l = m \omega^2 R \\ F_{f1} = \mu N_1 \\ F_{f2} = \mu N_2 \\ G = mg \\ \omega = \pi n_p / 30 \\ R \approx (d_p - d_a) / 2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $N_p$  为种子群对充入型孔种子的侧向挤压力, N;  $N_1$  为型孔侧壁 1 对种子支撑力, N;  $N_2$  为型孔侧壁 2 对种子支撑力, N;  $F_l$  为惯性离心力, N;  $F_{f1}$  为种子与型孔侧壁 1 间的摩擦力, N;  $F_{f2}$  为种子与型孔侧壁 2 间的摩擦力, N;  $G$  为单粒种子重力, N;  $\mu$  为种子与排种滚筒表面间摩擦系数,  $\mu$  的取值范围为 0.3~0.5,  $\mu$  取 0.4<sup>[21]</sup>;  $\varepsilon$  为型孔锥角, ( $^{\circ}$ ), 根据上述型孔结构参数, 确定  $\varepsilon=55^{\circ}$ ;  $\sigma$  为充填角, ( $^{\circ}$ );  $m$  为单粒种子质量, kg;  $\omega$  为排种滚筒的角速度,  $\text{rad/s}$ ;  $n_p$  为排种滚筒转速,  $\text{r/min}$ ;  $R$  为排种

滚筒旋转中心  $O$  到种子几何中心的距离,  $m$ ;  $d_p$  为排种滚筒直径,  $m$ ;  $d_a$  为种子平均粒径,  $m$ 。



a. 充种区种子受力简图  
a. Force diagram of rapeseed at filling place



b. 1 处放大图  
b. Enlarged drawing of 1

注:  $O$  为排种滚筒转动中心;  $Q$  为油菜种子; 1 为型孔上侧壁; 2 为型孔下侧壁,  $G$  为种子  $Q$  的重力,  $N$ ;  $N_p$  为种群对充入型孔种子  $Q$  的侧向挤压力,  $N$ ;  $N_1$  为型孔侧壁 1 对种子的支撑力,  $N$ ;  $N_2$  为型孔侧壁 2 对种子的支撑力,  $N$ ;  $F_{f1}$  为种子与型孔侧壁 1 间的摩擦力,  $N$ ;  $F_{f2}$  为种子与型孔侧壁 2 间的摩擦力,  $N$ ;  $F_i$  为惯性离心力,  $N$ ;  $\epsilon$  为型孔锥角,  $(^\circ)$ ;  $\sigma$  为充填角,  $(^\circ)$ ;  $\theta$  为种子堆放角,  $(^\circ)$ ;  $R$  为排种滚筒旋转中心  $O$  到种子质心的距离,  $m$ ;  $h$  为充填高度,  $m$ ;  $M$  为充种室侧向宽度,  $m$ ;  $P$  为进种支管中心与充种室侧壁的水平距离,  $m$ ;  $L_1$  为种子几何中心与进种支管圆心水平距离,  $m$ ;  $L_2$  为进种支管底部与种子  $Q$  质心间的铅垂距离,  $m$ 。

Note:  $O$  is rotation center of seeding cylinder;  $Q$  is rapeseed; 1 is upper lateral wall of type hole; 2 is under lateral wall of type hole;  $G$  is gravity of rapeseed,  $N$ ;  $N_p$  is side extrusion pressure which rapeseeds act on seeds of filling into type hole and,  $N$ ;  $N_1$  is braced force which type hole lateral wall 1 acts on rapeseed,  $N$ ;  $N_2$  is braced force which type hole lateral wall 2 acts on rapeseed,  $N$ ;  $F_{f1}$  is friction force which rapeseed and type hole lateral wall 1,  $N$ ;  $F_{f2}$  is friction force which rapeseed and type hole lateral wall 2,  $N$ ;  $F_i$  is inertial centrifugal force,  $N$ ;  $\epsilon$  is cone angle of hole,  $(^\circ)$ ;  $\sigma$  is filling angle,  $(^\circ)$ ;  $\theta$  is seed cone angle,  $(^\circ)$ ;  $R$  is distance between which rapeseed mass center and rotation center of seeding cylinder,  $m$ ;  $h$  is filling height,  $m$ ;  $M$  is seed chamber lateral width,  $m$ ;  $P$  is horizontal distance between pipe center and rapeseed chamber lateral wall,  $m$ ;  $L_1$  is horizontal distance between rapeseed geometric center and pipe center,  $m$ ;  $L_2$  is vertical distance between pipe bottom and rapeseed mass center,  $m$ 。

图 3 充种区种子受力简化模型

Fig.3 Force simplified model of rapeseed at filling place

由式 (1), 得:

$$\sigma \geq -\varphi + \arcsin \frac{a \cdot m \cdot \omega^2 \cdot R + 2a \cdot b \cdot N_1 - b \cdot N_p}{m \cdot g \sqrt{a^2 + b^2}} \quad (2)$$

其中:  $a = \mu \sin \frac{\epsilon}{2} + \cos \frac{\epsilon}{2}$ ;  $b = \sin \frac{\epsilon}{2} - \mu \cos \frac{\epsilon}{2}$ ;  $\tan \varphi = -\frac{b}{a}$

若忽略种子间作用力及型孔侧壁 1 对种子的支撑力, 由式 (2) 则有:

$$\sigma \geq \arctan \frac{\cos \frac{\epsilon}{2} - \mu \sin \frac{\epsilon}{2}}{\sin \frac{\epsilon}{2} + \mu \cos \frac{\epsilon}{2}} + \arccos \frac{(\cos \frac{\epsilon}{2} - \mu \sin \frac{\epsilon}{2}) \omega^2 \cdot R}{g \sqrt{1 + \mu^2}} \quad (3)$$

由式 (3) 可知: 种子充填角  $\sigma$  与种子物料特性 ( $d_a$ 、 $\mu$ )、排种滚筒相关结构参数 ( $d_p$ 、 $\epsilon$ ) 和排种滚筒转速  $n_p$  有关。当排种滚筒结构参数确定时, 种子充填角  $\sigma$  与滚筒转速的平方呈正比例变化。

集排器田间作业依靠地轮提供动力, 以机组前进速度 2.1 km/h (东方红 LX-954 慢 I 档) 为例, 测定集排器平均转速为 18 r/min, 由式 (3) 可推算出种子充入型孔的最小充填角 (又称起始充填角)  $\sigma_{\min} \approx 7^\circ$ 。由图 3 可得:

$$\begin{cases} L_1 = R(1 - \cos \sigma_{\min}) + M - P \\ \tan \theta = \frac{L_2}{L_1} \\ L_2 = h - R \sin \sigma_{\min} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_{\min}$  为起始充填角,  $(^\circ)$ ;  $\theta$  为种子自然休止角,  $(^\circ)$ , 经试验得出  $\theta < 30^\circ$ ;  $L_1$  为种子几何中心与进种支管圆心水平距离,  $m$ ;  $L_2$  为进种支管底部与种子  $Q$  质心间的铅垂距离,  $m$ ;  $M$  为充种室侧向宽度,  $m$ ;  $P$  为进种支管中心与充种室侧壁的水平距离,  $m$ ;  $h$  为充填高度,  $m$ 。

由式 (4), 得出:

$$h = \frac{R}{\cos \theta} \sin(\sigma_{\min} - \theta) + (R + M - P) \tan \theta \quad (5)$$

由式 (5) 可知: 当种子物料特性 ( $\theta$ 、 $d_a$ )、排种滚筒直径  $d_p$  以及其他相关参数 ( $M$ 、 $P$ ) 确定时, 充填高度  $h$  与起始充填角  $\sigma_{\min}$  呈正相关变化。本文中充种室侧向宽度  $M$  为 40 mm, 进种支管中心与充种室侧壁的水平距离  $P$  为 25 mm。以华油杂 62 种子为例,  $\theta = 26.7^\circ$ ,  $d_a = 1.83$  mm, 由式 (5) 可推算出最小充填高度  $h_{\min} \approx 13.7$  mm。

根据已有试验结果并参考文献 [23] 可知: 当转速、清种气流流速等条件一定时, 充填高度越低, 起始充填角越小, 充填性能越差, 当充填高度  $h < 19$  mm 时, 难以保证持续有效供种, 致使排种稳定性较差; 充填高度越高, 起始充填角越大, 种群被拖带的弧段越大, 其越有利于提高充填性能, 此时气压清种越困难, 当充填高度  $h > 27$  mm 时, 其排种稳定性急剧下降, 同时种子破损率明显升高。本文选取充填高度  $h$  为 19~27 mm 进行试验。

### 1. 2. 2 清种过程

在充种过程, 不仅多颗种子在合力作用下充入型孔并随滚筒一起运动, 贴近滚筒的种群在摩擦作用下随滚筒也一起运动。滚筒转速越高, 其充填角越大, 提高了种子的充填能力, 若充填角过大, 种群被拖带的弧段也越大, 则有效清种越困难。根据前期试验并结合油菜种植农艺要求, 本文选择排种滚筒转速为 20~40 r/min。

由文献 [21] 清种过程力学分析可知, 携有种子的型孔进入清种区内, 种子一直处在一定流速的气流场中, 正压气流对囊入型孔中的种子具有稳定压附和推送作用, 即稳定压附位于型孔底部的种子, 推送型孔上部的种子。由绕流阻力的基本原理可知, 种子对流体流体的阻力为流体对种子的推力 (即清种正压力) [25-26]。根据绕流阻力公式:

$$F_D = C_d \cdot s \cdot \frac{\rho \cdot \mu_0^2}{2} \quad (6)$$

式中:  $F_D$  为清种正压力,  $N$ ;  $C_d$  为无因次的阻力系数,

与籽粒形状、表面特征及雷诺数有关;  $s$  为籽粒在垂直于清种气流方向上的投影面积,  $\text{m}^2$ ;  $\rho$  为空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\mu_0$  为气流速度,  $\text{m}/\text{s}$ 。

根据前述假设种子为圆球刚体:

$$s = \frac{\pi d_a^2}{4} \quad (7)$$

由清种气嘴处的气流量与气流速度关系:

$$Q_k = \frac{S}{4} \mu_0 \quad (8)$$

式中:  $Q_k$  为清种气嘴处的气流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $S$  为清种气嘴口截面积,  $\text{m}^2$ 。

联立式 (6) 一式 (8), 得式 (9)。由式 (9) 并结合文献[21], 清除籽粒所需的正压力与种子物料特性 ( $C_d$ 、 $d_a$ ), 排种滚筒主要参数 ( $\varepsilon$ 、 $n_p$ ), 流体参数 ( $\rho$ 、 $\mu_0$ 、 $Q_k$ ) 和清种气嘴口截面形状等因素有关。

$$F_D = \frac{\pi \rho \cdot d_a^2 \cdot C_d \cdot \mu_0 \cdot Q_k}{2S} \quad (9)$$

结合式 (8) 和式 (9), 还可推算出:

$$F_D = \frac{1}{8} \pi \rho \cdot C_d \cdot d_a^2 \cdot \mu_0^2 \quad (10)$$

为较好的研究清种过程对排种性能的影响, 根据前期试验, 本文优选圆柱型和鸭嘴型两种结构形式的清种气嘴进行试验。其中: 圆柱型清种气嘴口截面形状为圆形, 其直径为 8 mm; 鸭嘴型清种气嘴口截面形状为矩形, 其边长为 25 mm×2 mm。当油菜品种及清种气嘴口截面面积一定时, 结合式 (10) 可知, 清种正压力  $F_D$  与清种气流流速  $\mu_0$  的二次方成正比关系, 因此清种气流流速过大易将型孔底部的种子吹出, 从而影响各行排种的稳定性, 清种气流流速过小易增加种子的破损率。根据前期试验, 本文选取清种气嘴口处气流流速 8~10 m/s 进行试验。

## 2 材料与方法

### 2.1 试验材料

根据前期对华杂 3 号、华杂 4 号、华协一号和华油杂 62 等多个华中地区常用油菜品种物料特性研究<sup>[27-28]</sup>, 其粒径范围多分布在 1.5~2.5 mm 之间且呈正态分布, 均属小粒径种子。油菜机械化直播直接选用在安全储藏期内的商品化种子, 其含水率对排种性能影响不大<sup>[29]</sup>, 本文选用湖北国科高新技术有限公司生产且在安全储藏期的成品华油杂 62 油菜品种进行试验, 其物料特性如表 1 所示。

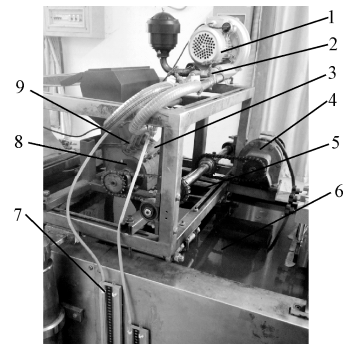
表 1 华油杂 62 物料特性

Table 1 Characteristic of experiment material for rapeseed varieties of HuaYouZa 62

项目 Item	参数 Parameters
平均三轴尺寸 (长×宽×厚) Average triaxial size (length × width × thickness)/ (mm×mm×mm)	2.01×1.84×1.67
球形度 Sphericity/%	91.25
自然休止角 Natural repose angle/(°)	26.7
滑动摩擦角 Sliding friction angle/(°)	22.7
千粒质量 Thousand-seed mass/g	4.45

### 2.2 试验装置

试验装置由油菜精量气压式集排器、驱动电机、风泵、气力管道、风压调节阀、U 形压力计、CTV210 多功能风量风速测试仪和 JPS-12 排种器试验台组成, 其整体布置如图 4 所示。其中 YS7144 型驱动电机由常州市武进马杭电机厂提供, 功率 0.75 kW; HG-550 型风泵由森森集团股份有限公司提供, 功率 2.2 kW, 最大风压 15 kPa; CTV210 型风量风速测试仪由法国 KIMO 测量仪器公司提供, 其量程为 3.1~30 m/s, 精度为 0.1 m/s; U 形压力计由盐城万阳仪器有限公司提供, 量程为 0~2 kPa; ZY-403C 型风压调节阀由台州振宇阀门有限公司提供, 公称压力为 1.6 MPa。工作时, 驱动电机经传动链带动集排器工作, 风泵产生的正压气流通过分管管分别传递给清种管道和护种管道, 清种气流流速大小由 CTV210 多功能风量风速测试仪实时测量, 气流流速通过风压调节阀控制。



1.风泵 2.风压调节阀 3.护种管道 4.驱动电机 5.传动链 6.JPS-12 排种器试验台 7.U 形压力计 8.气压式集排器 9.清种管道  
1.Air pump 2.Control valve of wind pressure 3.Protecting seed tube 4.Driving Motor 5.Transmission chain 6.JPS-12 experimental platform of metering device 7.U-shaped manometer 8.Pneumatic-typed precision centralized metering device 9.Cleaning seed tube

图 4 试验装置组成图

Fig.4 Composition diagram of experimental device

### 2.3 试验条件

试验时, 清种角度  $\alpha$  为 53°, 护种区角度  $\tau$  为 90°, 投种区角度  $\psi$  为 110°, 护种压差为 150 Pa, 清种气嘴口截面形状为圆形和矩形, 截面面积分别为 50.26 和 50 mm<sup>2</sup>。清种气流流速 8~10 m/s (8、9、10) 3 个水平; 充填高度 19~27 mm (19、23、27) 3 个水平; 排种滚筒转速 20~40 r/min (20、30、40) 3 个水平。为满足油菜种植农艺要求, 试验台油带速度需与排种滚筒转速相匹配, 确定其在 2.1~4.0 km/h 范围变化。

### 2.4 评价指标和计算方法

#### 2.4.1 评价指标

参照“国家标准 GB/T 9748-2005”和“油菜直播机 质量评价技术规范”<sup>[30]</sup>, 确定本文试验研究的评价指标为排种均匀性变异系数  $H$  以及各行排量一致性变异系数  $K$ 。

#### 2.4.2 计算方法

##### 1) 排种均匀性变异系数

为满足油菜种植农艺要求, 在相同位置同时且连续记录各行排出种子的数量  $N_i$ , 选取长度为 5 m 的试验样本, 每 1 m 为 1 组, 共计为 5 组。排种均匀性变异系数

可由式 (10) 计算。

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^5 (\sum_{j=1}^6 x_{ij}) \\ \sigma = \sqrt{\frac{1}{n_1-1} \sum (x_{ij} - \bar{x})^2} \\ H = \frac{\sigma}{\bar{x}} \times 100\% \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $x_{ij}$  为各行每组种子数, 粒,  $i=1\sim 5$ ,  $j=1\sim 6$ ;  $\bar{x}$  为各行每组平均种子数, 粒;  $n_1$  为组数,  $n_1=30$ ;  $\sigma$  为  $n_1$  组的标准差;  $H$  为排种均匀性变异系数, %。

## 2) 各行排量一致性变异系数

用量杯收集各排种口排出的种子, 称出各排种口种子的净质量, 采集间隔为 1 min, 每组处理下重复 5 次, 计算出各行平均排量、各行间排量标准差及变异系数。各行排量一致性变异系数可由式 (11) 计算:

$$\begin{cases} \bar{m} = \frac{1}{30} \sum_{i=1}^5 (\sum_{j=1}^6 m_{ij}) \\ s = \sqrt{\frac{1}{n_2-1} \sum (m_{ij} - \bar{m})^2} \\ K = \frac{s}{\bar{m}} \times 100\% \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $m_{ij}$  为各行每次排量, g;  $\bar{m}$  为各行平均排量, g;

$n_2$  为测定行数,  $n_2=30$ ;  $s$  为  $n_2$  组的标准差;  $K$  为各行排量一致性变异系数, %。

## 2.5 试验设计

根据前述对充种和清种过程分析和已有试验结果, 选取清种气嘴口截面形状、充填高度、清种气流流速以及排种滚筒转速为试验因素, 结合前期研究进展<sup>[22,31-33]</sup>, 本文着重考察清种气嘴结构形式与其他各因素间的交互作用, 采用  $L_{27}(3^3)$  正交试验表进行了油菜精量气压式集排器充种和清种环节对排种质量影响的性能试验研究<sup>[34]</sup>。各试验因素及对应试验水平如表 2 所示。

表 2 正交试验因素水平表

Table 2 Factors and levels in orthogonal experiment

水平 Levels	因素 Factors			
	清种气嘴口 截面形状 Section shape of clearing seed air tap <i>A</i>	充填高度 Filling height <i>B/mm</i>	清种气流流速 Air velocity of clearing seed <i>C/(m·s<sup>-1</sup>)</i>	滚筒转速 Rotational speed of seeding cylinder <i>D/(r·min<sup>-1</sup>)</i>
1	圆形 Circular	19	8	20
2	矩形 Rectangular	23	9	30
3	矩形 Rectangular	27	10	40

## 3 试验结果与分析

根据上述试验方案及评价指标, 对上述试验因素对气压式小粒径油菜精量集排器排种质量的影响进行了分析研究, 得出了相应的试验结果及方差分析, 见表 3 和表 4。

表 3 试验方案与试验结果

Table 3 Experimental scheme and test results

试验序号 NO.	因素及水平 Factors and levels										试验指标 Test indexes	
	A	B	(A×B) <sub>1</sub>	(A×B) <sub>2</sub>	C	(A×C) <sub>1</sub>	(A×C) <sub>2</sub>	(A×D) <sub>2</sub>	D	(A×D) <sub>1</sub>	H/%	K/%
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15.43	9.61
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	15.80	10.19
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	16.21	13.02
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	14.12	3.71
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	13.90	3.49
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	17.96	7.88
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	15.04	4.69
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	14.35	12.31
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	12.06	8.99
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	22.89	9.84
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	20.54	14.30
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	12.76	8.38
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	13.76	5.71
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	10.70	1.87
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	12.13	3.86
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	10.77	3.72
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	11.19	4.24
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	9.79	7.44
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	22.81	14.58
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	12.38	4.40
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	14.00	6.56
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	12.18	5.13
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	13.94	6.33
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	13.41	4.95
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	9.65	4.56
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	9.59	4.27
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	8.07	1.95
<i>H</i>	<i>k</i> <sub>1</sub>	14.986	16.980	13.191	12.371	15.183	12.798	13.611	15.529	12.733	14.380	
	<i>k</i> <sub>2</sub>	13.365	13.567	14.387	14.102	13.599	14.106	13.708	13.189	13.976	13.558	
	<i>k</i> <sub>3</sub>		11.168	14.137	15.241	12.932	14.811	14.396	12.997	15.006	13.777	
	<i>R</i>	1.622	5.812	1.196	2.870	2.251	2.013	0.785	2.532	2.273	0.822	
<i>K</i>	<i>k</i> <sub>1</sub>	8.210	10.098	7.181	6.116	6.839	5.854	5.764	7.949	6.139	8.300	
	<i>k</i> <sub>2</sub>	6.228	4.770	6.487	6.224	6.822	6.524	7.771	6.869	6.476	6.740	
	<i>k</i> <sub>3</sub>		5.797	6.997	8.324	7.003	8.286	7.129	5.847	8.05	5.624	
	<i>R</i>	1.982	5.328	0.694	2.208	0.181	2.432	2.007	2.102	1.911	2.676	

注:  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  依次为清种气嘴截面形状、充填高度、清种气流流速和排种滚筒转速。 $H$ 、 $K$  分别为排种均匀性变异系数和各行排量一致性变异系数, 下同。  
Note:  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  are section shape of clearing seed air cock, filling height, flowing of clearing seed and rotational speed, respectively.  $H$  and  $K$  are coefficient of variation of uniformity of metering, apiece row consistency variability coefficient of seeding quantity, respectively, the same as below.

表 4 方差分析结果  
Table 4 Results of variance analysis for rapeseed seeding quality

试验指标 Test indexes	方差来源 Variation source	离差平方和 Standard deviation square SS	自由度 <i>df</i> Degree of freedom	均方差 Mean square MS	<i>F</i> 值 <i>F</i> value	显著性 Sig.
排种均匀性变异系数 Coefficient of variation of uniformity of metering <i>H</i> /%	<i>A</i>	16.155	1	16.155	20.437	**
	<i>B</i>	153.688	2	76.844	97.212	**
	<i>C</i>	23.952	2	11.976	15.150	**
	<i>D</i>	23.456	2	11.728	14.837	**
	<i>AB</i>	44.783	2	22.392	28.326	**
	<i>AC</i>	22.355	2	11.178	14.140	**
	<i>AD</i>	39.310	2	19.655	24.865	**
各行排量一致性变异系数 Coefficient of apiece row consistency variability coefficient of seeding quantity <i>K</i> /%	<i>A</i>	23.763	1	23.763	10.651	**
	<i>B</i>	143.892	2	71.946	32.246	**
	<i>C</i>	0.125	2	0.062	0.028	
	<i>D</i>	18.798	2	9.399	4.213	*
	<i>AB</i>	30.231	2	15.116	6.775	**
	<i>AC</i>	47.205	2	23.602	10.579	**
	<i>AD</i>	52.422	2	26.211	11.748	**

注: \*\*表示极显著 ( $P<0.01$ ), \*表示显著 ( $P<0.05$ )。  
Note: \*\* is very significant ( $P<0.01$ ), \* is significant ( $P<0.05$ ).

3.1 极差与方差分析结果

排种均匀性变异系数和各行排量一致性变异系数均为越小越好。对其极差分析结果见表 3, 结果表明: 上述 4 个因素对排种均匀性变异系数影响顺序为充填高度  $B>$  滚筒转速  $D>$  清种气流流速  $C>$  清种气嘴截面形状  $A$ ; 对各行排量一致性变异系数影响顺序为充填高度  $B>$  清种气嘴截面形状  $A>$  滚筒转速  $D>$  清种气流流速  $C$ ; 对降低排种均匀性变异系数较优参数组合为  $B_3D_1C_3A_2$ ; 对降低各行排量一致性变异系数较优参数组合为  $B_2A_2D_1C_2$ 。

前述极差分析寻出了这 4 个因素对排种均匀性变异系数和各行排量一致性变异系数影响的主次顺序及较优水平组合。为进一步分析各因素对各评价指标的显著性, 进行了方差分析, 如表 4 所示。结果表明: 清种气嘴口截面形状  $A$ 、充填高度  $B$ 、清种气流流速  $C$  和排种滚筒转速  $D$  对排种均匀性变异系数  $H$  影响极显著; 对各行排量一致性变异系数, 清种气嘴口截面形状  $A$  和充填高度  $B$  表现极显著影响, 排种滚筒转速表现显著影响, 清种气流流速  $C$  影响不显著, 而其与清种气嘴口截面形状  $A$  的交互项 ( $A\times C$ ) 对其影响极显著; 清种气嘴口截面形状与其他上述各因素间的交互作用对排种均匀性变异系数和各行排量一致性变异系数有显著影响。

3.2 分析与讨论

根据正交试验结果可知: 截面形状为矩形的清种气嘴口优于截面形状为圆形的清种气嘴口, 其原因分析: 在排种滚筒与种群摩擦力作用下, 排种滚筒带动种群运动而形成“拖带层”, “拖带层”随排种滚筒转速的提高而升高<sup>[28]</sup>, 当排种滚筒转速在 20~40 r/min 范围内, 选取截面形状为圆形的清种气嘴进行试验时, 结合上述对清种过程理论分析可知, 由于其清种辐射区域较小, 则清种辐射区域以外的区域清种正压力较小, 在排种滚筒与种群间摩擦力作用下, 清种辐射区域以外的“拖带层”中部分种子会摆脱清种气流的约束, 运动至过渡区

再次充入型孔, 致使排种均匀性和各行排量一致性存在一定波动; 而矩形截面形状为矩形的清种气嘴比截面形状为圆形的清种气嘴清种辐射区域宽, 结合油菜籽粒小、质量轻等特点, 在试验范围内, 截面形状为矩形的清种气嘴产生的喷射气流可较好的将“拖带层”控制在清种区域, 确保了型孔中充入定量的种子, 进而保证了该集排器的排种均匀性和各行排量一致性。

正交试验结果表明: 充填高度对该集排器排种均匀性和各行排量一致性的影响较前述其他 3 个因素明显, 其原因分析: 充种质量是保证排种质量的前提, 结合上述对充种过程的理论分析, 当充填高度较低时, 其起始充填角较小, 种子难以被顺利充入型孔; 当充填高度较高时, 其起始充填角较大, 同时在排种滚筒转动下, 贴近排种滚筒表面的种群随着排种滚筒摩擦拖动下会形成“摩擦拖带层”<sup>[35]</sup>, 结合本文前期试验, 在排种滚筒转速不大于 40 r/min、辅助清种气流不小于 8 m/s 的条件下, 此时属于“安全拖带”且可以保证良好的充填能力, 该结果与已有研究结果一致<sup>[21]</sup>。

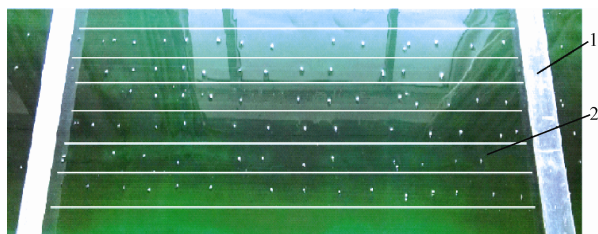
以各行排量一致性变异系数为评价指标的方差分析表明, 在清种气嘴结构形式、充填高度和滚筒转速一定时, 适当增加清种气流流速可提高各行排量一致性, 但其对各行排量一致性变异系数这一评价指标影响不显著, 而其与清种气嘴截面形状的交互作用对该评价指标影响显著, 其原因可能是: 在充填高度、清种角度、滚筒转速等条件一定时, 由上述清种过程理论分析得出, 该集排器的清种效果主要取决于作用在“拖带层”上清种正压力, 而清种正压力主要与种子物料特性、气流流速和清种辐射区域有关, 圆形清种气嘴清种辐射区域小, 当清种气流流速较低时, 其只能有效控制该区域内的种子群, 清种辐射区域外部的清种正压力相对较小, 而不能实施有效清种; 矩形清种气嘴的辐射区域较宽, 由于油菜籽粒小、质量轻, 在较低的辅助清种气流流速作用



下,也可将“拖带层”有效控制在清种区。清种气流流速影响程度不显著。

### 3.3 最佳参数选择

在各行排量一致性变异系数较低的情况下,以排种均匀性变异系数最低为考察重点,确定影响该集排器排种质量的主次因素依次为充填高度  $B$ 、排种滚筒转速  $D$ 、清种气流流速  $C$ 、清种气嘴口截面形状  $A$ 。由于 4 个因素对排种均匀性变异系数  $H$  影响均极显著,且较优水平为  $A_2B_3C_3D_1$ ,清种气嘴截面形状  $A$  和充填高度  $B$  和排种滚筒转速  $D$  对各行排量一致性变异系数  $K$  有显著影响,且较优水平为  $A_2B_3D_1$ ,故本文选择影响排器质量的较优参数组合为  $B_3D_1C_3A_2$ ,即充填高度 27 mm,清种气流流速 10 m/s,排种滚筒转速 20 r/min,采用矩形截面清种气嘴。在该组合条件下,排种均匀性变异系数为 8.07%,各行排量一致性变异系数为 1.95%,种子破损率低于 0.1%,排种效果如图 5。



1.组间划分尺 2.6行排种均匀性分布  
1.Dividing ruler between groups 2.Seeding uniformity distribution of 6 row

图 5 气压式集排器排种均匀性分布

Fig.5 Seeding uniformity distribution of pneumatic-typed precision centralized metering device

## 4 结论与讨论

1) 正交试验结果表明:清种气嘴口截面形状、充填高度、清种气流流速和排种滚筒转速对排种均匀性影响显著;清种气嘴截面形状、充填高度和排种滚筒转速对各行排量一致性产生显著影响;清种气嘴截面形状与充填高度、清种气流流速和排种滚筒转速的交互作用对排种均匀性和各行排量一致性均影响显著。

2) 根据正交试验结果,确定最佳参数组合为矩形截面形状的清种气嘴,充填高度 27 mm,清种气流流速 10 m/s,排种滚筒转速 20 r/min。在该组合条件下,排种均匀性变异系数为 8.07%,各行排量一致性变异系数为 1.95%,种子破损率低于 0.1%。

影响油菜精量气压式集排器排种性能的因素还很多,如型孔形状、型孔锥角、清种角、清种气嘴与型孔间相对位置以及振动等,针对所述因素及其各因素间交互作用对排种性能的影响有待进一步深入研究。

### 【参 考 文 献】

[1] 张春雷,李俊,余利平,等.油菜不同栽培方式的投入产出比较研究[J].中国油料作物学报,2010,32(1): 57—64. Zhang Chunlei, Li Jun, Yu Liping, et al. Input/output analysis on rapeseed production practices under different cultivation mode[J]. Chinese Journal of Oil Crop Science, 2010, 32(1): 57—64. (in Chinese with English abstract)

[2] 田波平,廖庆喜,黄海东,等.2BFQ-6型油菜精量联合直播机的设计[J].农业机械学报,2008,39(10): 211—213. Tian Boping, Liao Qingxi, Huang Haidong, et al. Design of 2BFQ-6 precision planter for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2008, 39(10): 211—213. (in Chinese with English abstract)

[3] 吴明亮,官春云,汤楚宙,等.2BYF-6型油菜免耕直播联合播种机田间试验研究[J].农业工程学报,2007,23(11): 172—175. Wu Mingliang, Guan Chunyun, Tang Chunzhou, et al. Experimental research on 2BYF-6 type no-tillage rape combine seeder in paddy stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(11): 172—175. (in Chinese with English abstract)

[4] 王寅.直播和移栽冬油菜氮磷钾肥施用效果的差异与机理研究[D].武汉:华中农业大学,2014. Wang Yin. Study on the Different Responses to Nitrogen, Phosphorus, and Potassium Fertilizers and the Mechanisms Between Direct Sown and Transplanted Winter Oilseed Rape[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)

[5] 官春云.改变冬油菜栽培方式,提高和发展油菜生产[J].中国油料作物学报,2006,28(1): 83—85. Guan Chunyun. The cultivation pattern change of winter rapeseed to increase and develop production[J]. Chinese journal of Oil Crop Science, 2006, 28(1): 83—85. (in Chinese with English abstract)

[6] 刘晓伟,鲁剑巍,李小坤,等.直播冬油菜干物质积累及氮磷钾养分的吸收利用[J].中国农业科学,2011,44(23): 4823—4832. Liu Xiaowei, Lu Jianwei, Li Xiaokun, et al. Dry matter accumulation and N, P, K absorption and utilization in direct seeding winter oilseed[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(23): 4823—4832. (in Chinese with English abstract)

[7] 曹曙明.中国农业机械化年鉴 2014[M].北京:中国农业科学技术出版社,2014.

[8] Yazgi A, Degirmencioglu A. Optimization of the seed spacing uniformity performance of a vacuum-type precision seeder using response surface methodology[J]. Biosystems Engineering, 2007, 97(3): 347—356.

[9] Prasanna K G V, Brijesh S, Nagesh D S. 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.

[10] 左春桢,马成林,张守勤.气力轮式排种器动压充种机理及试验研究[J].农业机械学报,1998,29(增刊1): 51—54. Zuo Chuncheng, Ma Chenglin, Zhang Shouqin. The experimental study on the aerodynamic filling principle of pneumatic wheel-type seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 1998, 29(Supp.1): 51—54. (in Chinese with English abstract)

[11] 李成华,夏建满,何波.倾斜圆盘勺式精密排种器清种过程分析与试验[J].农业机械学报,2004,35(3): 68—71. Li Chenghua, Xia Jianman, He Bo. Analysis and experiment of seed metering procedure in scoop metering device with declined disc[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2004, 35(3): 68—71. (in Chinese with English abstract)

[12] 陶桂香,衣淑娟,汪春,等.水稻钵盘精量播种机充种性能试验[J].农业工程学报,2013,29(8): 44—50. Tao Guixiang, Yi Shujuan, Wang Chun, et al. Performance experiments of bowl dish precision seeder for rice in filling processing[J]. Transactions of the Chinese Society of

- Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 44—50. (in Chinese with English abstract)
- [13] 陶桂香, 衣淑娟, 毛欣, 等. 水稻植质钵盘精量播种装置投种过程的动力学分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 33—39.  
Tao Guixiang, Yi Shujuan, Mao Xin, et al. Dynamic analysis on dropping processing of precision sowing device for seeding-growing tray made of paddy-straw in rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 33—39. (in Chinese with English abstract)
- [14] 于建群, 申燕芳, 牛序堂, 等. 组合内窝孔精密排种器清种过程的离散元法仿真分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 105—109.  
Yu Jianqun, Shen Yanfang, Niu Xutang, et al. DEM simulation and analysis of the clearing process in precision metering device with combination inner-cell[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(5): 105—109. (in Chinese with English abstract)
- [15] 丛锦玲, 余佳佳, 曹秀英, 等. 油菜小麦兼用型气力式精量排种器[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 46—52.  
Cong Jinling, Yu Jiajia, Cao Xiuying, et al. Design of dual-purpose pneumatic precision metering device for rape and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 46—52. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(7): 112—116. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王朝辉, 马旭, 贾瑞昌. 工作参数对超级稻育秧播种部件吸种性能的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 88—92.  
Wang Zhaohui, Ma Xu, Jia Ruichang. Effects of working parameters on seed suction performance of seeder device for super hybrid rice seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(8): 88—92. (in Chinese with English abstract)
- [18] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [19] 马成林, 王十周, 张守勤, 等. 气力轮式排种器试验研究[J]. 农业机械学报, 1990, 21(3): 28—34.  
Ma Chenglin, Wang Shizhou, Zhang Shouqin, et al. The study and design of pneumatic wheel-type seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1990, 21(3): 28—34. (in Chinese with English abstract)
- [20] 罗锡文, 蒋恩臣, 王在满, 等. 开沟起垄式水稻精量穴直播机的研制[J]. 农业工程学报, 2008, 24(12): 52—55.  
Luo Xiwen, Jiang Enchen, Wang Zaiman, et al. Precision rice hill-drop drilling machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(12): 52—55. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李兆东, 雷小龙, 曹秀英, 等. 油菜精量气压式集排器的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 9—17.  
Li Zhaodong, Lei Xiaolong, Cao Xiuying, et al. Design and experiment of pneumatic-typed precision centralized metering device for rapeseed [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(7): 9—17. (in Chinese with English abstract)
- [22] 马成林. 气吹排种器充填原理的研究[J]. 农业机械学报, 1981, 12(4): 1—13.  
Ma Chenglin. The study of the filling principle of air-blow type seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 1981, 12(4): 1—13. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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.
- [24] 王在满, 罗锡文, 黄世醒, 等. 型孔式水稻排种轮充种过程的高速摄像分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 56—61.  
Wang Zaiman, Luo Xiwen, Huang Shixing, et al. Rice seeds feeding process in cell wheel based on high-speed photography technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 56—61. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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 Jujie, et al. Dynamic model for metering process for pneumatic roller-type vegetable seeder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(1): 141—146. (in Chinese with English abstract)
- [26] 蔡增基, 龙天渝. 流体力学泵与风机[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [27] 吴福通. 正负气压组合式油菜籽精量直播排种器的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007.  
Wu Futong. Research on Positive and Negative Pressure Combination Precision Metering Device for Rape Seed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [28] 丛锦玲. 油菜小麦兼用型气力式精量排种系统及其机理研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.  
Cong Jinling. Study on Seeding System and Mechanism of Pneumatic Precision Metering Device for Wheat and Rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [29] 廖宜涛, 黄海东, 李旭, 等. 浸种预处理对油菜籽气力精量排种性能的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 1): 72—76.  
Liao Yitao, Huang Haidong, Li Xu, et al. Effects of seed pre-soaking on sowing performance by pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44 (Supp.1): 72—76. (in Chinese with English abstract)
- [30] 宋英. 农业机械化标准概要[M]. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [31] 胡树荣, 马成林, 李慧珍, 等. 气吹式排种器锥孔的结构参数对排种质量影响的研究[J]. 农业机械学报, 1981, 12(3): 21—31.  
Hu Shurong, Ma Chenglin, Li Huizhen, et al. Effects of conical hole design parameters on seed-metering performance: A study on the pneumatic seed-metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1981, 12(3): 21—31. (in Chinese with English abstract)
- [32] 汤楚宙, 向卫兵, 谢方平. 气吹式杂交水稻精量排种器型孔形式的试验研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(1): 241—243.  
Tang Chuzhou, Xiang Weibing, Xie Fangping. Experimental study on hole shape of air-blowing precision metering for hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1999, 15(1): 241—243. (in Chinese with English abstract)
- [33] 邢赫, 臧英, 王在满, 等. 水稻气力式排种器分层充种室



- 设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 42—48.
- Xing He, Zang Ying, Wang Zaiman, et al. Design and experiment of stratified seed-filling room on rice pneumatic metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(4): 42—48. (in Chinese with English abstract)
- [34] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [35] 丛锦玲, 廖庆喜, 曹秀英, 等. 油菜小麦兼用排种盘的排种器充种性能[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 30—39.
- Cong Jinling, Liao Qingxi, Cao Xiuying, et al. Seed filling performance of dual-purpose seed plate in metering device for both rapeseed and wheat seed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(8): 30—39. (in Chinese with English abstract)

## Seeding performance experiment of pneumatic-typed precision centralized metering device

Li Zhaodong, Li Shanshan, Cao Xiuying, Lei Xiaolong, Liao Yitao, Wei Yuepei, Liao Qingxi<sup>\*</sup>

(College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The rapeseed precision seeding has the advantages of saving labor, time and cost, and high productivity and so on, and the rapeseed under the precision seeding have relatively consistent maturity, which are suitable for mechanized harvest. The rapeseed direct seeding is an important technical way to realize the sustainable development of rapeseed industry. In order to improve the seeding performance of the rapeseed pneumatic-typed precision centralized metering device, the main influence factors and their ranges were determined by analyzing the filling seed and clearing seed process. “Huayouza 62” was taken as experimental subject, while the cleaning angle was  $53^\circ$ , the protecting area angle was  $90^\circ$ , the throwing area angle was  $110^\circ$ , the protecting pressure difference was 150 Pa, and the section shape of air tap for clearing seed was circular and rectangular with the section area of 50.26 and 50 mm<sup>2</sup>, respectively. Three levels (8, 9, 10 m/s) were selected for the air velocity of clearing seed, 3 levels (19, 23, 27 mm) were selected for the filling height, and three levels (20, 30, 40 r/min) for the rotational speed of seeding cylinder. The speed of oil belt was 2.1–4.0 km/h. The  $L_{27}3^{13}$  orthogonal experiment was conducted to study the influence of cleaning seed and filling seed link on the performance of the centralized metering device on test bench. The influence factors were section shape of air tap for clearing seed, filling height, air velocity of cleaning seed and rotational speed of seeding cylinder, and the evaluation indices were coefficient of variation for seeding uniformity and variability coefficient of each row seeding quantity consistency. Results showed the order of the coefficient of variation for seeding uniformity was filling height > rotational speed of seeding cylinder > air velocity of cleaning seed > section shape of air tap for clearing seed; the order of the variability coefficient of each row seeding quantity consistency was filling height > section shape of air tap for clearing seed > rotational speed of seeding cylinder > air velocity of cleaning seed. Filling height, air velocity of cleaning seed and rotational speed of seeding cylinder obviously affected the seeding uniformity; section shape of air tap for clearing seed, filling height and rotational speed of seeding cylinder obviously affected the variability coefficient of each row seeding quantity consistency. Under the best working conditions that are section shape of air tap for clearing seed being rectangular, filling height of 27 mm; air velocity of cleaning seed of 10 m/s, rotational speed of seeding cylinder of 20 r/min, the coefficient of variation for seeding uniformity was 8.07%, and the variability coefficient of each row seeding quantity consistency was 1.95%, the damage rate was less than 0.1%. Thus improving the seeding performance of the rapeseed pneumatic-typed precision centralized metering device can be realized by expanding filling height, reducing rotational speed of seeding cylinder and auxiliary air for clearing seed. Also the hole, cone angle, seed-cleaning angle, relative situation between cleaning mouth and holes, and vibration are all main influence factors to the seeding performance. Based on the above results, further research is in urgent need for this rapeseed seeding metering device. The results provide the basis for the structure optimization of the pneumatic-typed precision centralized metering device and the improvement of its seeding performance.

**Key words:** agricultural machinery; seed; optimization; metering device; filling; cleaning; pneumatic-typed; rapeseed