

气吸滚筒式油菜穴盘育苗精密排种器设计与试验

曹秀龙^{1,3}, 马旭^{1,3}, 李宏伟^{1,3}, 温志成^{1,3}, 李泽华^{2*}, 王曦成¹

(1. 华南农业大学工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学数学与信息学院, 广州 510642; 3. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 为满足油菜穴盘育苗移栽作业要求, 解决油菜机械化种植茬口紧张难题, 该研究设计了一种气吸滚筒式穴盘育苗精密排种器, 利用光电传感器和正压投种机构实现同步整排投种。阐述了排种器基本结构与工作原理, 对关键部件结构进行设计, 应用 Fluent 软件模拟分析了 3 种不同正压进气孔间距条件下滚筒内壁和吸种孔与正压气室的流场特征; 采用二次旋转正交组合试验方法, 对排种器作业性能的主要影响因素(吸种负压、投种正压和吸种孔直径)与播种指标(单粒合格指数、漏播指数和重播指数)的关系进行研究, 分析了各因素及其交互作用对各指标的影响规律, 并采用多目标优化方法进行参数优化; 在优化参数条件下, 设定排种器生产率分别为 600、700 和 800 盘/h 时, 对 3 个品种油菜种子和 1 个蔬菜种子(茄子)进行排种性能试验。结果表明: 当正压进气孔间距为 144 mm 时, 整个正压气室无回流情况, 各吸种孔处气流速度相对均匀; 影响单粒合格指数的因素主次顺序为投种正压、吸种孔直径和吸种负压, 最优参数组合为吸种负压 3.73 kPa, 投种正压 0.23 MPa, 吸种孔直径 1.28 mm, 此时单粒合格指数、漏播指数和重播指数分别为 95.13%、2.80%和 2.07%。生产率为 600~800 盘/h 时, 油菜种子的单粒合格指数均高于 93%, 漏播指数和重播指数均小于 5%; 茄子的单粒合格指数高于 90%, 漏播指数和重播指数均低于 5%。该排种器的排种性能适应性较好且精准高效, 能够满足油菜及部分蔬菜穴盘育苗播种作业要求。研究结果可为油菜等穴盘育苗播种机研发提供参考。

关键词: 农业机械; 设计; 油菜; 穴盘育苗; 气吸滚筒; 排种器; 排种性能

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.007

中图分类号: S223.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-2-0051-10

曹秀龙, 马旭, 李宏伟, 等. 气吸滚筒式油菜穴盘育苗精密排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 51-60.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.007 <http://www.tcsae.org>

Cao Xiulong, Ma Xu, Li Hongwei, et al. Design and experiments of pneumatic roller type precision seed-metering device for rapeseed plug seedlings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(2): 51-60. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.007 <http://www.tcsae.org>

0 引言

油菜是中国播种面积最大的油料作物, 主要分为冬油菜和春油菜。冬油菜种植区域主要分布于长江流域^[1], 以直播和育苗移栽种植方式为主。虽然机械直播可以省工节本, 但由于该区域多熟制轮作, 前后两季作物茬口矛盾, 在晚稻收获后采用直播方式种植油菜, 将错过油菜最佳播种期, 导致油菜生长缓慢、植株瘦小而减产^[2]。育苗移栽能有效缓解由于茬口矛盾导致油菜生长期不足和抗逆能力差等问题, 但长期以来, 由于油菜机械化育苗和移栽技术尚不成熟, 主要采用人工育苗移栽方式进行生产^[3], 费时费力, 既造成种子浪费, 也为后期移栽机械化作业增加了难度^[4]。为此, 亟需突破油菜机械化育苗移栽技术瓶颈, 而机械化精密播种是其难点之一。

由于气吸式排种器对种子大小适应性强、不易伤种和播种精度高等优点^[5-7], 近年来, 在国内外播种机上得

到了大力发展和广泛应用^[8-12]。气吸式精密排种器通过负压吸种, 隔压板隔绝负压, 然后依靠种子自身重力进行投种, 主要应用于大粒径和中粒径种子, 如三七^[13]、水稻^[14]、玉米^[15]、马铃薯^[16]和棉花^[17]等。对于质量比较轻的小粒径种子, 若仅依靠其自身重力进行投种, 投种速度和位置波动较大, 无法满足同步投种而影响单粒精密播种的质量。油菜种子是一种典型的小粒径种子, 实现油菜单粒精密播种, 对解决油菜育苗移栽技术难题和丰富气力式排种器应用领域具有重要的理论和实际应用价值。

围绕油菜气力式精密播种技术, 华中农业大学廖庆喜团队先后设计了气吸圆盘式^[18]、气吸滚筒式^[19]和气压集排式^[20]等油菜精密排种器。其中气吸圆盘式精密排种器通过设置独立吸种区和正压投种区, 解决了吸种孔堵塞和籽粒破碎等问题; 气吸滚筒式排种器通过在气吸滚筒上增设多排吸种孔, 实现一器多行精密排种; 气压集排式排种器采用气流清种与气压护种组合技术, 能有效解决清种和护种环节种子易剪切破坏问题。但这些精密排种器主要用于油菜直播, 单体结构较大, 不适于油菜穴盘育苗对行对穴精密单粒播种。

油菜育苗使用的穴盘和蔬菜育苗穴盘相似或通用, 并且油菜种子和部分蔬菜种子形态相似, 所以蔬菜穴盘育苗

收稿日期: 2020-08-06 修订日期: 2021-01-05

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0700703)

作者简介: 曹秀龙, 博士生, 研究方向为现代农业装备设计及自动化。

Email: xiulongcao@163.com

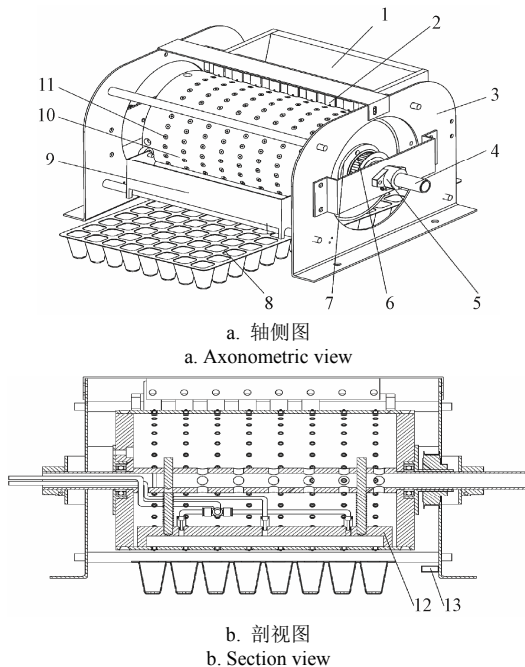
*通信作者: 李泽华, 博士, 副教授, 研究方向为现代农业装备设计及技术经济分析。Email: lzhjl@scau.edu.cn

排种器对油菜育苗排种器的设计具有一定的参考价值。蔬菜育苗排种器研发方面,美国 Blackmore 公司、意大利 Mosa 公司和荷兰 Visser 公司等设计的精密排种器都采用真空吸附原理^[21-22],以气针、盖板和气吸滚筒式为主;中国的台州赛得林公司、宝鸡鼎铎机械公司和江苏云马农机制造有限公司等引进国外先进技术,通过对穴盘育苗播种技术研究,改制了一批穴盘育苗精密排种器^[23-24],其原理与国外类似。总体上,国外蔬菜育苗技术和设备相对完善,智能化程度和生产率相对较高,但产品价格昂贵。国内蔬菜育苗排种器对不同规格穴盘和不同类型种子的适应性较差,播种精度较低,限制了相关设备的推广使用。

本文采用负压吸种与正压投种组合作用原理,设计一种气吸滚筒式油菜穴盘育苗精密排种器。由于正负压组合式排种器的内部流场极易出现气流紊乱,无法保证吸种和投种的稳定性,影响排种性能。为此,本文设计一种卸压及正压气吹投种装置,应用 Fluent 软件模拟分析滚筒内壁和吸种孔与正压气室的流场特征,进而优选正压进气孔间距等参数;为提高单粒播种率,设计了一种带凸起的吸种帽和倒 U 型清种结构,并搭建穴孔与吸种孔同步精准对位及投种控制系统。

1 排种器结构与工作原理

本文研制的穴盘育苗精密排种器主要由种箱、清种机构、侧板、空心轴、空心轴固定夹、同步带轮、滚筒端盖、接种盒、滚筒、吸种帽、卸压及正压气吹投种装置和穴盘位置传感器等组成,如图 1 所示。



1.种箱 2.清种机构 3.侧板 4.空心轴 5.空心轴固定夹 6.同步带轮 7.滚筒端盖 8.穴盘 9.接种盒 10.气吸滚筒 11.吸种帽 12.卸压投种装置 13.穴盘位置传感器
1.Seed box 2.Seed cleaning mechanism 3.Side plate 4.Hollow shaft 5.Fixing clip of hollow shaft 6.Synchronous belt pulley 7.End cover of roller 8.Tray 9.Seed collecting box 10.Pneumatic roller 11.Seed suction cap 12.Pressure releasing and seed charging device 13.Tray position sensor

图 1 排种器结构示意图

Fig.1 Structure diagram of seed metering

排种器滚筒内部设置有空心轴和卸压及正压气吹投种装置,空心轴通过固定夹固定在排种器侧板,其一端通负压,另一端通正压;正压气室通过压缩弹簧紧密贴合滚筒内壁,堵住吸种孔,隔绝负压,并提供投种正压。图 2 为穴盘穴孔与吸种孔对位投种过程示意图。排种器工作时,穴盘通过输送带运送到穴盘位置传感器处,穴盘位置传感器发出脉冲信号,PLC 接收到脉冲信号控制伺服电机转动,伺服电机通过同步带带动滚筒转动。此时吸种孔处的种子在滚筒内外压力差作用下被吸附到吸种帽上,并随着滚筒一起转动。当种子转动至清种机构时,吸种帽上多吸的种子被清种机构清除并回流至种箱,吸种帽上只吸附一粒种子。如果因气吸滚筒黏连导致种子没有回流至种箱,多余的种子会依靠自身重力落入另一侧的接种盒内。当吸附的种子转动到投种位置时,吸种孔处的压力差被卸除,种子在正压气吹作用下与吸种帽分离,落入下方的穴孔中,完成精准同步投种。

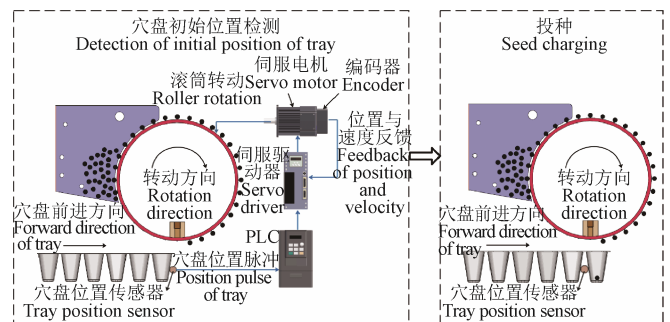


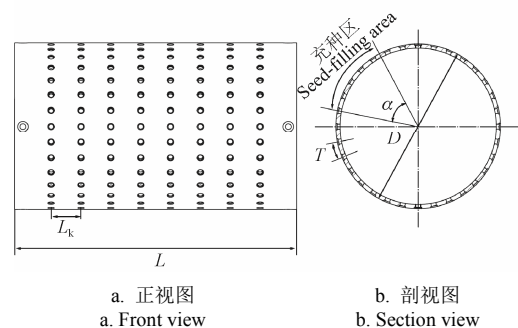
图 2 对位投种过程

Fig.2 Counterpoint seed charging process

2 关键部件设计

2.1 气吸滚筒

气吸滚筒是排种器的核心部件之一,其他各部件的尺寸设计都依赖于气吸滚筒的外形尺寸。图 3 为气吸滚筒结构简图。



注: L_k 为孔距, mm; L 为气吸滚筒长度, mm; α 为充种区弧度, rad; D 为气吸滚筒直径, mm; T 为相邻型孔间的弧长, mm。

Note: L_k is hole spacing, mm; L is the length of pneumatic roller, mm; α is the radian of seed-filling, rad; D is diameter of pneumatic roller, mm; T is arc length between adjacent type hole, mm.

图 3 气吸滚筒结构图

Fig.3 Structure diagram of pneumatic roller

气吸滚筒直径与充种时间的关系式如下:

$$\begin{cases} t = \frac{l}{v} \\ l = \alpha \cdot \frac{D}{2} \\ v = \frac{\pi n D}{60} \end{cases} \quad (1)$$

式中 t 为充种时间, s; l 为充种区弧长, mm; v 为气吸滚筒线速度, mm/s; n 为气吸滚筒转速, r/min。

由式 (1) 可得:

$$t = \frac{30\alpha}{\pi n} \quad (2)$$

由式 (2) 可知, t 与 n 成反比, 与 α 成正比, 与直径 D 无关。现有滚筒式精密排种器直径通常为 140~260 mm^[25]。在满足充种弧长的条件下, 直径 D 越大, 圆周方向可设置的型孔数量越多, 气吸滚筒转速越低, 有利于提高充种性能, 但整机结构增大, 并且负压风机功率增加, 能耗增加, 同时也会使负压气室密封要求过高; 若气吸滚筒直径太小, 圆周方向可设置的型孔数量较少, 滚筒转速较高, 不利于充种, 播种合格指数降低。综合考虑, 本文选取气吸滚筒直径 D 为 200 mm, 材料为 5 mm 厚铝合金无缝管。

现有油菜育苗穴盘的标准规格为 128 孔 (8 穴/行×16 行) 软盘, 长×宽×高为 590×300×45 (mm), 穴距为 36 mm。根据穴盘规格, 确定气吸滚筒轴向型孔数为 8 个, 孔距 L_k 为 36 mm, 两端对称预留 44 mm 的端盖固定位置, 气吸滚筒长度 L 为 340 mm。

设计气吸滚筒周向型孔数量时, 理论上最少可设计成 1 个, 最多可根据种子的尺寸大小布满整个滚筒。但是, 实际相邻型孔间的弧长至少需要大于种子最大尺寸的 2 倍, 并且气吸滚筒线速度 $v \leq 350$ mm/s^[26]。考虑到实际生产中, 连续 2 个育苗穴盘难以实现无缝连接, 前一个穴盘的最后一穴和后一个穴盘第一穴之间的距离与同一穴盘中两穴之间的距离不同, 因此每播种一盘都需要通过穴盘位置传感器检测穴孔位置实现对穴精准投种。本文所用穴盘每列穴孔数为 16 个, 为方便伺服电机调控滚筒转速, 满足气吸滚筒线速度与不同生产率下穴盘运动速度的协调性, 设计气吸滚筒周向型孔数 Z 为育苗穴盘每列穴数的 2 倍, 即 $Z=32$ 。此时相邻型孔间的弧长 $T=19.625$ mm, 大于油菜种子最大尺寸的 2 倍 (油菜种子粒径为 1.45~2.68 mm, 见 2.2 节), 且当生产率为 500 盘/h, 气吸滚筒线速度 $v=44.67$ mm/s < 350 mm/s。

2.2 吸种孔直径与吸种帽

吸种孔直径大小取决于种子的几何特性。为提高排种器对品种的适应性, 选取长江流域常用的中双 11 号、湘杂油 787 和华油杂 9 号 3 个品种油菜种子为对象, 每个品种随机选取 100 粒, 用精度为 0.01 mm 数显游标卡尺测量每粒油菜种子 3 次, 取平均值作为油菜种子的粒径。测得 3 个品种油菜种子的平均粒径分别为 2.05、1.96 和 1.87 mm, 粒径范围为 1.45~2.68 mm, 图 4 为油菜种子粒径分布。

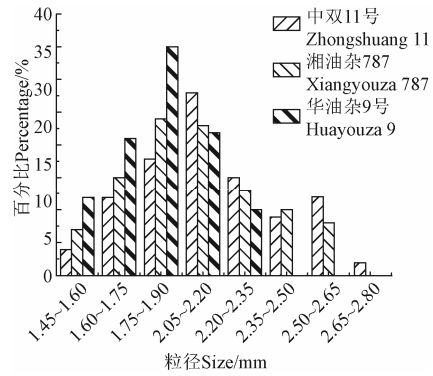


图 4 油菜种子粒径分布

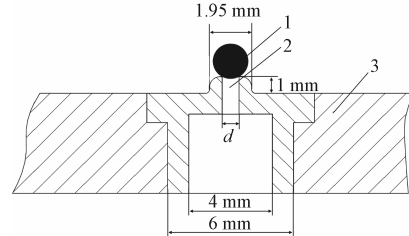
Fig.4 Seed size distribution of rapeseed

一般地, 吸种孔直径 d (mm) 与种子粒径的关系^[27]为

$$d=(0.6\sim 0.7)d_k \quad (3)$$

式中 d_k 为种子粒径, mm。由式 (3) 可知, 吸种孔直径 d 取值为 0.87~1.88 mm。

由于油菜种子近似球形, 种子间存在一定的空隙, 传统的气吸滚筒采用光滑表面, 滚筒转动对种子的扰动不足, 影响种子吸附性能。为此, 本文设计一种带凸起的吸种帽, 如图 5 所示。根据油菜种子粒径大小, 为便于加工, 取凸台直径为 1.95 mm。为保证滚筒转动时顺利通过种箱底板, 并且种箱中的种子不会从种箱底部掉落, 设定凸台高度为 1 mm, 凸台顶端倒圆角, 圆角与吸种孔的顶端相切。



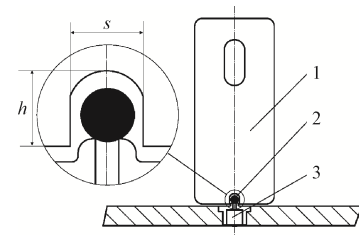
1.种子 2.吸种帽 3.气吸滚筒
1.Seed 2.Seed suction cap 3.Pneumatic roller

图 5 吸种帽结构示意图

Fig.5 Structure diagram of seed suction cap

2.3 清种装置

为保证投种时吸种孔上只保留 1 粒种子, 本文设计一种倒 U 形刮板式清种装置。采用 2 mm 厚的尼龙板, 清种口为光滑倒 U 形结构, 如图 6 所示。



1.清种片 2.种子 3.吸种帽
1.Seed clearing 2.Seed 3.Seed suction cap

注: h 为倒 U 形开口高度, mm; s 为倒 U 形开口宽度, mm。

Note: h is inverted U-shaped opening height, mm; s is inverted U-shaped opening width, mm.

图 6 清种装置结构示意图

Fig.6 Structure diagram of seed clearing device

根据 3 个品种油菜种子粒径数据和统计学中“ 3σ 原则”，得到 3 个品种油菜种子的粒径上限分别为 2.67、2.51 和 2.23 mm。为保证最大粒径的油菜种子能通过清种口，且不能有 2 粒及以上的种子同时通过清种口，倒 U 形开口宽度 s 的取值范围为 2.70~2.90 mm。为确定最优倒 U 形开口宽度 s 的值，分别取开口宽度为 2.70、2.80 和 2.90 mm 进行清种试验，试验时，连续统计清种前后各 1 000 个吸种帽上的种子数，计算清种前后的单粒合格指数、多粒重吸指数和 0 粒指数：

$$\begin{cases} \text{单粒合格指数} = \frac{\text{吸 1 粒种的吸种帽数}}{\text{总吸种帽数}} \times 100\% \\ \text{多粒重吸指数} = \frac{\text{吸 2 粒及以上的吸种帽数}}{\text{总吸种帽数}} \times 100\% \\ \text{0 粒指数} = \frac{\text{吸 0 粒的吸种帽数}}{\text{总吸种帽数}} \times 100\% \end{cases} \quad (4)$$

试验重复 3 次取平均值，结果见表 1。

表 1 清种试验结果

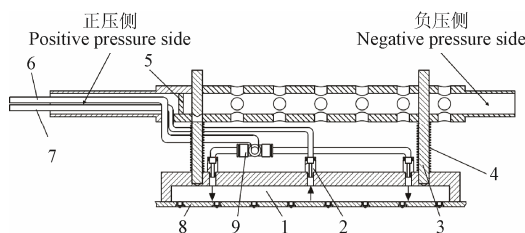
Table 1 Results of seed cleaning test

U 型开口 宽度 U-shaped opening width s/mm	单粒合格指数 Single seed qualified index/%		多粒重吸指数 Multiple seeds repeated suction index/%		0 粒指数 0-seed index/%	
	清种前 Before seed cleaning	清种后 After seed cleaning	清种前 Before seed cleaning	清种后 After seed cleaning	清种前 Before seed cleaning	清种后 After seed cleaning
2.70	89.67	97.63	9.84	1.86	0.49	0.51
2.80	89.67	96.28	9.84	3.22	0.49	0.50
2.90	89.67	93.63	9.84	5.87	0.49	0.50

由表 1 可知，当倒 U 形开口宽度 s 为 2.70 mm 时，清种后单粒合格指数为 97.63%。由于倒 U 形开口的高度只要求大于种子的最大粒径，本文设计倒 U 形开口的宽度 s 为 2.70 mm，高度 h 为 3.00 mm。

2.4 卸压投种装置

卸压投种装置是气吸式排种器的关键部件。为确保同步整排投种，并减少吸种孔堵塞的情况，本文设计一种可隔绝负压和增加正压辅助气吹投种装置，其结构如图 7 所示。



1. 正压气室 2. 快速接头 3. 正压气室固定杆 4. 压缩弹簧 5. 空心轴隔板
6. 正压进气管 7. 正压卸气管 8. 气吸滚筒 9. 三通快速接头
1. Positive pressure chamber 2. Quick connector 3. Positive pressure chamber
fixing rod 4. Compression spring 5. Hollow shaft partition 6. Positive pressure
inlet pipe 7. Positive pressure outlet pipe 8. Pneumatic roller 9. Three-way
quick connector

图 7 卸压投种装置结构示意图

Fig.7 Structure diagram of pressure releasing and seed charging device

正压气室采用具有一定压缩变形和强度好的优力胶板，下弧面直径与滚筒内径相同，在压缩弹簧作用下与滚筒内壁紧密贴合，保证正压气室的密封性。为增加空

心轴正压侧的密封性，采用可拆卸的热熔胶进行密封处理，保证负压气室的密封性。正压气室上增设一条正压卸气管连接大气，当正压气室处在非吸种孔位置时，连续供给的正压气流通过正压卸气管排放到外界，保证滚筒内部流场稳定。

为确定正压气室内部气体的流动特征，需对其雷诺数 R_e 进行求解，计算公式为

$$R_e = \frac{\rho v_k L_z}{1\,000\mu} \quad (5)$$

式中 R_e 为雷诺数； ρ 为空气密度， g/mm^3 ； μ 为空气动力黏度， g/mms ； v_k 为空气平均流速， mm/s ； L_z 为正压气室宽度， mm 。

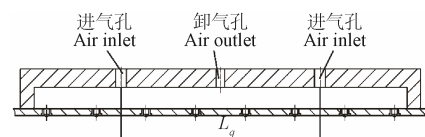
为使正压气室完全覆盖吸种帽的下端，本文正压气室宽度取 8 mm。利用风速仪测得正压气室空气平均流速大于 5 000 mm/s，由式 (5) 得出 $R_e=2\,873.33$ ，大于空气的湍流临界值 2 300，故正压气室中空气的运动为湍流。

湍流时正压气室内必然出现压降，压降公式为

$$H_{\text{loss}} = f \frac{C \cdot v_k^2}{2j \cdot g} \quad (6)$$

式中 H_{loss} 为压降，Pa； f 为摩擦系数； C 为正压进气孔间距， mm ； j 为正压进气孔直径， mm ； g 为重力加速度， m/s^2 。

由式 (6) 可知，压降的产生主要与正压进气孔间距和正压进气孔直径有关。为减小压降和保证正压气室流场的均匀性，本文采用 Fluent 软件模拟 3 种不同正压进气孔间距条件下，滚筒内壁和吸种孔与正压气室接触的流场特征。设定正压进气孔直径为 8 mm（与正压气室宽度匹配），基于等距设计原则，以正压卸气孔为中心，对称设置 2 个正压进气孔。3 种不同正压进气孔间距分别为 72、144 和 216 mm，图 8 为正压气室结构示意图。



注： L_q 为正压进气孔间距， mm 。

Note: L_q is positive pressure inlet spacing, mm .

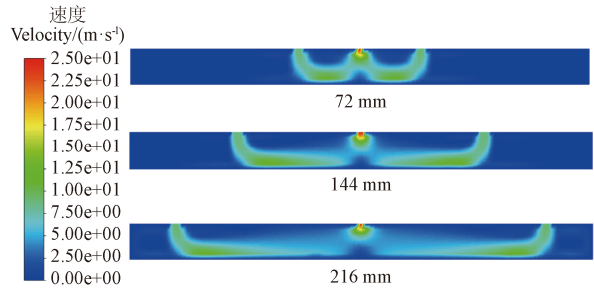
图 8 正压气室结构示意图

Fig.8 Schematic diagram of positive pressure chamber structure

模拟过程采用 $k-\varepsilon$ 模型，选取正压进气孔为速度进口边界条件，根据获取的正压气室平均流速，设定进气速度为 5 000 mm/s，正压卸气孔和吸种孔为压力出口边界，壁面采用无滑移边界条件。将模拟结果导入 EnSight 软件进行正压气室流场分析，结果如图 9 所示，其中图 9a 为正压气室与滚筒接触处的速度云图，图 9b 为正压气室与吸种孔接触处的速度云图。

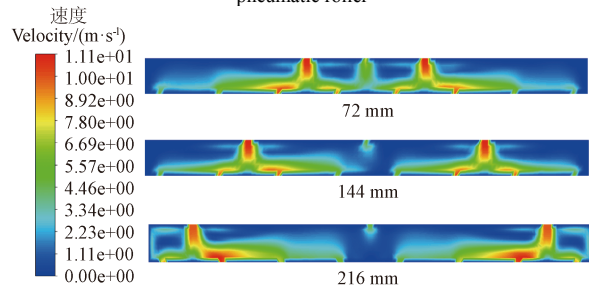
由图 9a 可知，随着正压进气孔间距的增加，正压气室内流场的稳定性变差。当正压进气孔间距为 72 mm 时，进气孔气流很快从卸气孔排出，正压气室内流场相对稳定。由图 9b 可知，当进正压气孔间距为 72 mm 时，两端吸种孔处的气流速度明显低于滚筒中间吸种孔处的气流

速度, 并且正压卸气孔处出现了较大的压降, 气流损失较大; 当正压进气孔间距为 216 mm 时, 两端倒数第二孔处的气流速度明显高于其他吸种孔处的气流速度, 并且滚筒两端出现漩涡和回流现象。总体上, 当正压进气孔间距为 144 mm 时, 各吸种孔处的气流速度差异较小, 并且正压气室内流场分布均匀, 无回流和漩涡现象。因此, 本文选取正压进气孔间距为 144 mm。



a. 正压气室与滚筒接触处的速度云图

a. Velocity contour of the contact between positive pressure chamber and pneumatic roller



b. 正压气室与吸种孔接触时的速度云图

b. Velocity contour of positive pressure chamber in contact with seed suction hole

图 9 不同正压进气孔间距的正压气室速度云图

Fig.9 Velocity contour of cavity in positive pressure chamber with different positive pressure inlet spacing

3 排种性能试验

为优化排种器核心部件结构参数与工作参数, 以中双 11 号油菜种子为材料进行排种性能试验, 采用二次旋转正交组合试验方法, 分析排种器性能的主要影响因素(吸种负压、投种正压和吸种孔直径)与播种指标(单粒合格指数、漏播指数和重播指数)的关系, 应用回归分析、响应曲面和多目标变量优化方法, 优化排种器的结构参数和工作参数。为评价其排种性能, 在优化参数条件下, 选用 3 个品种油菜种子和 1 个蔬菜类种子(茄子), 设定生产率分别为 600、700 和 800 盘/h 进行排种试验, 验证排种器的品种适应性。

3.1 试验材料与仪器设备

试验材料为中双 11 号油菜种子, 含杂率 $\leq 0.1\%$, 含水率 $\leq 5\%$ 。试验在自主设计的油菜育秧生产线上进行, 试验台配置格标生产的型号为 GB-370S 型高压漩涡气泵, 中国红旗牌 YZ-100 压力真空表和 Y-60 压力表, 试验装置如图 10 所示。

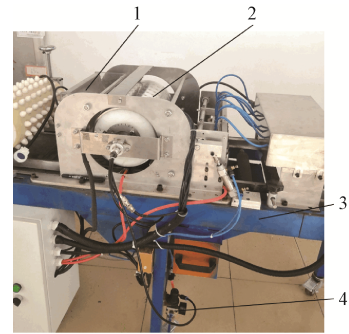
3.2 试验方案与方法

试验依据国家标准《单粒(精密)播种机试验方法》(GB/T6973—2005)实施^[28], 选取单粒合格指数 Y_1 、漏

播指数 Y_2 和重播指数 Y_3 为评价指标, 计算公式如下:

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{n_1}{N'} \times 100\% \\ Y_2 = \frac{n_0}{N'} \times 100\% \\ Y_3 = \frac{n_2}{N'} \times 100\% \end{cases} \quad (7)$$

式中 n_0 为漏播穴数; n_1 为单粒合格穴数; n_2 为重播穴数; N' 为理论排种穴数。统计每个穴孔中种子数, 只有 1 粒种子为合格, 大于等于 2 粒为重播, 没有种子为漏播。每次连续播种 10 盘, 重复 3 次, 取平均值作为试验结果。



1.种箱 2.排种器 3.穴盘输送台架 4.压力表
1.Seed box 2.Precision seed-metering device 3.Potted plug conveying stand 4.Pressure gage

图 10 排种器试验台

Fig.10 Test bed of seed-metering device

根据前期试验研究, 选择吸种负压 X_1 、投种正压 X_2 和吸种孔直径 X_3 为试验因素, 每个因素考察 5 个水平, 因素编码水平如表 2 所示。采用 Design-Expert11.0 软件进行数据处理和统计分析。试验方案与结果如表 3 所示。

表 2 试验因素和水平

Table 2 Factors and levels of test

水平 Levels	吸种负压 Negative pressure of seed suction X_1 /kPa	投种正压 Positive pressure of seed charging X_2 /MPa	吸种孔直径 Diameter of seed suction hole X_3 /mm
-1.682	2.00	0.15	0.80
-1	2.61	0.18	0.96
0	3.50	0.23	1.20
1	4.39	0.27	1.44
1.682	5.00	0.30	1.60

3.3 回归模型建立与显著性检验

运用 Design-Expert11.0 软件, 分别建立单粒合格指数 Y_1 、漏播指数 Y_2 和重播指数 Y_3 关于吸种负压 X_1 、投种正压 X_2 和吸种孔直径 X_3 的多元非线性回归模型, 并进行模型和系数的显著性检验, 分析与结果如下:

1) 单粒合格指数 Y_1 回归模型与显著性检验

单粒合格指数 Y_1 的回归方程为

$$\begin{aligned} Y_1 = & -93.43 + 32.78X_1 + 558.34X_2 \\ & + 101.19X_3 - 29.29X_1X_2 - 3.63X_1^2 \\ & - 959.29X_2^2 - 39.79X_3^2 \end{aligned} \quad (8)$$

其方差分析结果如表 4 所示。

表 3 试验方案与结果
Table 3 Experiment scheme and results

序号 No.	吸种负压 Negative pressure of seed suction X_1/kPa	投种正压 Positive pressure of seed charging X_2/MPa	吸种孔 直径 Diameter of seed suction hole X_3/mm	单粒合格指数 Single seed qualified index $Y_1/\%$	漏播指数 Missing seeding index $Y_2/\%$	重播指数 Multiple seeding index $Y_3/\%$
1	2.61	0.18	0.96	83.85	5.91	10.24
2	4.39	0.18	0.96	86.65	1.40	11.95
3	2.61	0.27	0.96	89.83	7.46	2.71
4	4.39	0.27	0.96	88.05	2.15	9.80
5	2.61	0.18	1.44	87.12	3.36	9.52
6	4.39	0.18	1.44	90.79	1.16	8.05
7	2.61	0.27	1.44	91.05	6.32	2.63
8	4.39	0.27	1.44	89.98	4.04	5.98
9	2.00	0.23	1.20	84.31	9.19	6.50
10	5.00	0.23	1.20	87.72	1.09	11.19
11	3.50	0.15	1.20	87.54	1.02	11.44
12	3.50	0.30	1.20	90.04	6.01	3.95
13	3.50	0.23	0.80	85.46	9.13	5.41
14	3.50	0.23	1.60	90.18	3.63	6.19
15	3.50	0.23	1.20	96.57	2.35	1.08
16	3.50	0.23	1.20	94.75	3.07	2.18
17	3.50	0.23	1.20	95.24	3.65	1.11
18	3.50	0.23	1.20	94.42	4.56	1.02
19	3.50	0.23	1.20	94.96	3.81	1.23
20	3.50	0.23	1.20	94.01	4.58	1.41
21	3.50	0.23	1.20	94.83	4.01	1.16
22	3.50	0.23	1.20	94.95	2.25	2.80
23	3.50	0.23	1.20	94.93	2.37	2.70

表 4 单粒合格指数回归模型的方差分析表
Table 4 Variance analysis of single seed qualified index regression model

变异来源 Variation source	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	F 值 F values	P 值 P values
模型 Model	325.55	7	48.96	<0.000 1**
X_1	6.41	1	6.75	0.020 2*
X_2	15.83	1	16.67	0.001 0**
X_3	25.06	1	26.38	0.000 1**
X_1X_2	10.86	1	11.43	0.004 1**
X_1^2	132.61	1	139.60	<0.000 1**
X_2^2	57.83	1	60.88	<0.000 1**
X_3^2	80.49	1	84.74	<0.000 1**
残差 Residuals	14.25	15		
失拟项 Lack of fit	10.32	7	3.00	0.073 1
误差 Errors	3.93	8		
总和 Total	339.80	22		

注: *和**分别表示在 5%和 1%水平上差异显著。下同。
Note: * and ** means significantly differences at 5% and 1% levels, respectively. The same below.

由表 4 可知, 单粒合格指数回归模型通过显著性检验 ($P<0.01$), 模型有效。其中交互项 X_1X_3 和 X_2X_3 的影响不显著, 其他各项均通过显著性检验。

由式 (8) 可知, 单粒合格指数 Y_1 与吸种负压 X_1 、投种正压 X_2 和吸种孔直径 X_3 都分别呈开口向下的二次函数关系, 表明存在吸种负压、投种正压和吸种孔直径的最优参数组合。

2) 漏播指数 Y_2 回归模型与显著性检验
漏播指数 Y_2 的回归方程为

$$Y_2 = 30.38 - 2.29X_1 + 27.15X_2 - 38.06X_3 + 14.41X_3^2 \quad (9)$$

其方差分析结果如表 5 所示。

表 5 漏播指数回归模型的方差分析表
Table 5 Variance analysis of missing seeding index regression model

变异来源 Variation source	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	F 值 F values	P 值 P values
模型 Model	97.00	4	15.85	<0.000 1**
X_1	57.09	1	37.30	<0.000 1**
X_2	20.01	1	13.08	0.002 0**
X_3	9.33	1	6.10	0.023 8*
X_3^2	10.56	1	6.90	0.017 1*
残差 Residuals	27.55	18		
失拟项 Lack of fit	20.61	10	2.38	0.116 3
误差 Errors	6.94	8		
总和 Total	124.54	22		

由表 5 可知, 漏播指数回归模型通过显著性检验 ($P<0.01$), 模型有效。其中交互项 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 和二次项 X_1^2 和 X_2^2 都不显著, 其他各项均通过显著性检验。

由式 (9) 可知, 吸种负压 X_1 对漏播指数 Y_2 的影响呈负线性相关关系, 表明吸种负压越大, 漏播指数将降低; 投种正压 X_2 对漏播指数 Y_2 的影响呈正线性相关关系, 表明投种正压越大, 漏播指数将增加; 漏播指数 Y_2 与吸种孔直径 X_3 呈开口向上的二次函数关系, 表明当固定吸种负压和投种正压时, 存在吸种孔直径的最优值, 使得漏播指数最小。

3) 重播指数 Y_3 回归模型与显著性检验

重播指数 Y_3 的回归方程为

$$Y_3 = 147.36 - 22.89X_1 - 639.62X_2 - 48.80X_3 + 32.06X_1X_2 - 4.08X_1X_3 + 3.16X_1^2 + 1058.08X_2^2 + 25.35X_3^2 \quad (10)$$

其方差分析结果如表 6 所示。

表 6 重播指数回归模型的方差分析表
Table 6 Variance analysis of multiple seeding index regression model

变异来源 Variation source	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	F 值 F values	P 值 P values
模型 Model	320.12	8	55.86	<0.000 1**
X_1	25.24	1	35.24	<0.000 1**
X_2	71.45	1	99.73	<0.000 1**
X_3	3.80	1	5.31	0.037 0*
X_1X_2	13.00	1	18.15	0.000 8**
X_1X_3	5.99	1	8.36	0.011 9*
X_1^2	100.17	1	139.83	<0.000 1**
X_2^2	70.36	1	98.21	<0.000 1**
X_3^2	32.69	1	45.63	<0.000 1**
残差 Residuals	10.03	14		
失拟项 Lack of fit	5.84	6	1.86	0.204 7
误差 Errors	4.19	8		
总和 Total	330.15	22		

由表 6 可知, 重播指数回归模型通过显著性检验 ($P<0.01$), 模型有效。其中交互项 X_2X_3 的影响不显著, 其他各项均通过显著性检验。

由式 (10) 可知, 重播指数 Y_3 与吸种负压 X_1 、投种正压 X_2 和吸种孔直径 X_3 都分别呈开口向上的二次函数关

系，表明存在吸种负压、投种正压和吸种孔直径的最优参数组合使得重播指数最小。

3.4 各因素间交互作用对试验指标的影响

由 3.3 节的结果可知，吸种负压 X_1 和投种正压 X_2 的交互项 X_1X_2 对单粒合格指数 Y_1 有显著影响，交互项 X_1X_2 和 X_1X_3 对重播指数 Y_3 有显著影响，表明各因素间存在交互效应。应用响应曲面分析方法，利用 Design-Expert11.0 软件生成各因素交互作用对单粒合格指数 Y_1 和重播指数 Y_3 的响应曲面图，如图 11 所示。

由图 11a 可知，固定吸种孔直径为 1.20 mm，当吸种负压为 3.32~3.68 kPa 和投种正压为 0.22~0.23 MPa 时，单粒合格指数存在最优值。固定投种正压，随着吸种负压的增大，单粒合格指数先增大后降低；固定吸种负压，随着投种正压的增大，单粒合格指数也呈现先增大后降低的趋势。

由图 11b 可知，固定吸种孔直径为 1.20 mm，当吸种负压为 3.32~3.68 kPa 和投种正压为 0.23~0.25 MPa 时，重播指数存在最小值。固定投种正压，随着吸种负压的增大，重播指数先降低后增加；固定吸种负压，随着投种正压的增大，重播指数也呈现先降低后增加的趋势。

由图 11c 可知，固定投种正压为 0.255 MPa，当吸种负压为 2.96~3.22 kPa 和吸种孔直径为 1.15~1.25 mm 时，重播指数存在最小值。固定吸种负压，随着吸种孔直径的增大，重播指数先降低后增加；固定吸种孔直径，随着吸种负压的增大，重播指数也呈现先降低后增加的趋势。

综上可得，当固定其中任何一个参数，其他 2 个因素对单粒合格指数 Y_1 的影响都呈现先增加后下降的趋势，对重播指数 Y_3 的影响都呈现先下降后增加的趋势。

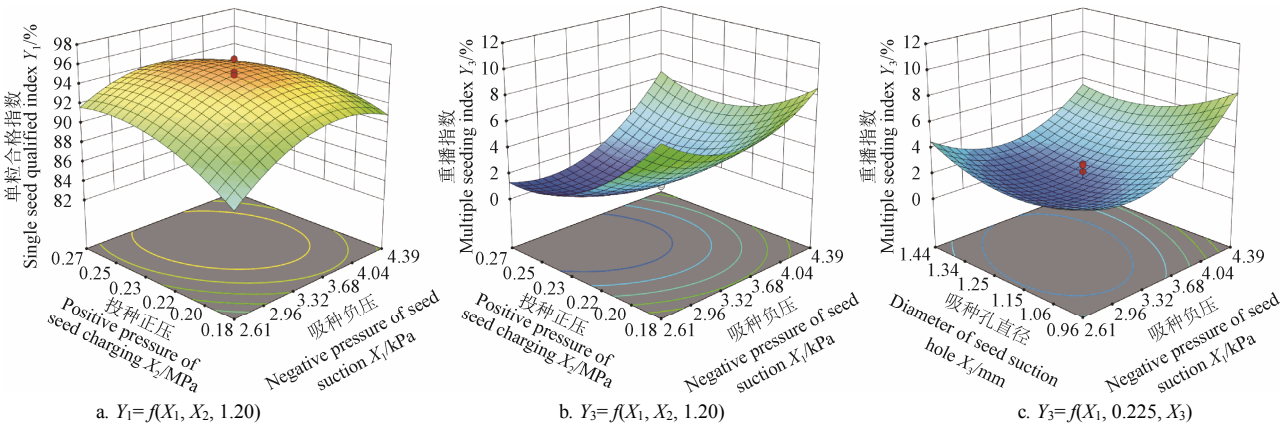


图 11 交互因素对单粒合格指数和重播指数的影响

Fig.11 Effects of interactive factors on single seed qualified index and multiple seeding index

3.5 参数优化

为了得到排种器的最优结构参数组合，采用多目标优化方法，同时优化单粒合格指数 Y_1 、漏播指数 Y_2 和重播指数 Y_3 的影响因素。依据提高单粒合格指数，降低漏播和重播指数的目标，结合各试验因素的边界条件，得到优化模型为

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \min Y_3 \end{cases}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} 2.00 \text{ kPa} \leq X_1 \leq 5.00 \text{ kPa} \\ 0.15 \text{ MPa} \leq X_2 \leq 0.30 \text{ MPa} \\ 0.80 \text{ mm} \leq X_3 \leq 1.60 \text{ mm} \end{cases}$$

(11)

利用 Design-Expert 软件中的 Optimization 模块进行参数优化并分析求解，结果表明，当吸种负压为 3.73 kPa、投种正压为 0.23 MPa 和吸种孔直径为 1.28 mm 时，排种器单粒合格指数达到 95.13%、漏播指数为 2.80%，重播指数为 2.07%。

为便于实际加工和参数调节，圆整吸种负压为 3.70 kPa，投种正压为 0.23 MPa 和吸种孔直径为 1.20 mm 进行验证试验，在相同的试验条件下重复 3 次，试验结果如表 7 所示。

结果表明，单粒合格指数平均值为 95.08%，漏播指数平均值为 2.72%，重播指数平均值为 2.20%，试验结果

与优化结果基本一致。

表 7 优化参数试验结果

Table 7 Test results of optimized parameters

序号 No.	单粒合格指数 Single seed qualified index/%	漏播指数 Missing seeding index/%	重播指数 Multiple seeding index/%
1	95.43	2.51	1.97
2	94.86	2.88	2.34
3	94.95	2.77	2.29
平均 Average	95.08	2.72	2.20

3.6 排种器的品种适应性与精准高效性试验

选取吸种负压为 3.70 kPa，投种正压为 0.23 MPa 和吸种孔直径为 1.20 mm，设定排种器生产率分别为 600、700 和 800 盘/h，选用 3 个品种的油菜种子分别为中双 11 号、湘杂油 787、中油杂 9 号，一个蔬菜类种子茄子天龙 8 号进行排种性能试验。每个试验连续播种 10 盘，试验结果如表 8。

由表 8 可知，当生产率为 600 盘/h，所有油菜品种的单粒合格指数都高于 94%，漏播指数和重播指数都小于 3%；茄子的单粒合格指数高于 91%，漏播指数和重播指数都小于 5%。当生产率为 700 和 800 盘/h 时，所有油菜品种单粒合格指数都高于 93%，漏播指数和重播指数都小于 5%；茄子的单粒合格指数高于 90%，漏播指数和重

播指数都小于 5%。说明该穴盘育苗精密排种器在不同生产率下对不同品种油菜种子和茄子种子具有较好的适应性。随着生产率增加,单粒合格指数虽略有下降,但下降幅度不超过 2 个百分点,满足高效和精准播种作业要求。由于茄子播种试验时未更换匹配的清种装置,播种质量稍有不足,通过更换匹配的清种装置,可提高播种质量。

表 8 品种适应性试验结果
Table 8 Results of variety adaptability test

生产率 Productivity (Plugs·h ⁻¹)	品种 Varieties	单粒合格指数 Single seed qualified index/%	漏播指数 Missing seeding index/%	重播指数 Multiple seeding index/%
600	蓉油 11 号	95.23	2.41	2.36
	湘杂油 787	94.86	2.33	2.81
	中油杂 9 号	95.55	2.31	2.14
	天龙 8 号	91.34	4.08	4.58
700	蓉油 11 号	94.12	2.54	3.34
	湘杂油 787	93.48	4.09	2.43
	中油杂 9 号	93.95	3.34	2.71
	天龙 8 号	90.69	5.26	4.05
800	蓉油 11 号	93.67	3.63	2.70
	湘杂油 787	93.14	4.23	2.63
	中油杂 9 号	93.36	4.10	2.54
	天龙 8 号	90.22	5.23	4.55

4 结 论

1) 采用负压吸种与正压投种组合作用技术,设计了一种气吸滚筒式穴盘育苗精密排种器。通过模拟分析正压气室分别与滚筒内壁和吸种孔的流场特征,确定最优正压进气孔间距为 144 mm;滚筒型孔中设置带凸起吸种帽,用倒 U 型结构清种装置进行清种,通过在卸压投种装置中增加辅助正压,配合穴孔与吸种孔同步精准对位及投种控制系统,实现同步整排精准投种。

2) 基于 Design-Expert11.0 软件中的 Optimizaiton 模块,应用多目标优化方法对排种性能影响因素进行优化,得到最优参数组合为:吸种负压 3.73 kPa、投种正压 0.23 MPa、吸种孔直径 1.28 mm,此时排种器单粒合格指数为 95.13%,漏播指数为 2.80%,重播指数为 2.07%。验证试验的单粒合格指数平均值为 95.08%,漏播指数平均值为 2.72%,重播指数平均值为 2.20%,与优化结果基本一致。

3) 当生产率分别为 600、700 和 800 盘/h 时,分别对 3 个品种油菜种子和 1 个蔬菜种子(茄子)进行排种性能的品种适应性和播种精准高效性试验,结果表明:油菜种子的单粒合格指数高于 93%,漏播指数和重播指数都小于 5%;茄子的单粒合格指数高于 90%,漏播指数和重播指数都小于 5%,说明该排种器能较好地满足油菜和部分蔬菜穴盘育苗精密播种农艺要求,具有较好的适应性。

【参 考 文 献】

- [1] 廖庆喜, 雷小龙, 廖宜涛, 等. 油菜精量播种技术研究进展[J]. 农业机械学报, 2017, 48(9): 1-16.
- [2] 冯云艳, 冷锁虎, 冯倩南, 等. 油菜毯苗移栽与直播对比研究[J]. 广东农业科学, 2019, 46(2): 9-15.
- [3] 吴崇友, 王积军, 廖庆喜, 等. 油菜生产现状与问题分析[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(1): 124-131.
- [4] 周广生, 左青松, 廖庆喜, 等. 我国油菜机械化生产现状、存在问题及对策[J]. 湖北农业科学, 2013, 52(9): 2153-2157.
- [5] 祁兵, 张东兴, 崔涛. 中央集排气送式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 8-15.
- [6] 雷小龙, 廖宜涛, 李兆东, 等. 油麦兼用型气送式集排器供种装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 10-18.
- [7] 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): 301-306.
- [8] 俞佳佳, 廖宜涛, 丛松, 等. Simulation analysis and match experiment on negative and positive pressures of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(3): 1-12.
- [9] Liao Qingxi, Lei Xiaolong, Liao Yitao, et al. Research progress of precision seeding for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 1-16. (in Chinese with English abstract)
- [10] Feng Yunyan, Leng Suohu, Feng Qiannan, et al. A comparative study on transplanting and direct seeding of rapeseed blanket seedling[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2019, 46(2): 9-15. (in Chinese with English abstract)
- [11] Wu Chongyou, Wang Jijun, Liao Qingxi, et al. Current status and problems of rapeseed production[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(1): 124-131. (in Chinese with English abstract)
- [12] Zhou Guangsheng, Zuo Qingsong, Liao Qingxi, et al. Mechanical production status, existing problems and strategy discussion of rapeseed in China[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013, 52(9): 2153-2157. (in Chinese with English abstract)
- [13] Qi Bing, Zhang Dongxing, Cui Tao. Design and experiment of centralized pneumatic metering device for maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(18): 8-15. (in Chinese with English abstract)
- [14] Lei Xiaolong, Liao Yitao, Li Zhaodong, et al. Design and experiment of seed feeding device in air-assisted centralized metering device for rapeseed and wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 10-18. (in Chinese with English abstract)
- [15] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(4): 301-306. (in Chinese with English abstract)
- [16] Yu Jiajia, Liao Yitao, Cong Song, et al. Simulation analysis and match experiment on negative and positive pressures of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2014, 7(3): 1-12.

- [9] Arzu Y, Adnan D. Measurement of seed spacing uniformity performance of a precision metering unit as function of the number of holes on vacuum plate[J]. Measurement, 2014, 10(56): 128-135.
- [10] 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.
- [11] 韩豹, 杨亚楠, 孟繁超, 等. 气吸滚筒式自动清堵梗稻排种器的改进设计与性能试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 18-25.
- Han Bao, Yang Yanan, Meng Fanchao, et al. Improved design and performance experiment on air-suction drum-type seed metering device for rice with auto-cleaning block[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(19): 18-25.
- [12] 刘文忠, 赵满全, 王文明, 等. 气吸式排种装置排种性能理论分析与试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 133-138.
- Liu Wenzhong, Zhao Manquan, Wang Wenming, et al. Theoretical analysis and experiments of metering performance of the pneumatic seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(9): 133-138. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(2): 20-28. (in Chinese with English abstract)
- [14] 左彦军, 马旭, 齐龙, 等. 窝眼窄缝式气吸滚筒排种装置的试验[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 141-144.
- Zuo Yanjun, Ma Xu, Qi Long, et al. Seeding experiments of suction cylinder-seeder with socket-slot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(11): 141-144. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张昆, 衣淑娟. 气吸滚筒式玉米排种器充种性能仿真与试验优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 78-86.
- Zhang Kun, Yi Shujuan. Simulation and experimental optimization on filling seeds performance of seed metering device with roller of air-suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 78-86. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王凤花, 孙凯, 赖庆辉, 等. 单行气吸式微型薯精密播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 66-76.
- Wang Fenghua, Sun Kai, Lai Qinghui, et al. Design and experiment of minituber precision single-row air-suction planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 66-76. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 58-67. (in Chinese with English abstract)
- [18] 吴福通. 正负气压组合式油菜种子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)
- [19] 李明, 刘晓辉, 廖宜涛, 等. 气力滚筒式油菜精量集排器[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(12): 68-73. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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)
- [21] 陈永生, 李莉. 蔬菜生产机械化范例和机具选型[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.
- [22] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 185-194. (in Chinese with English abstract)
- [23] 辜松. 设施园艺现代生产装备与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2015.
- [24] 陈永生. 蔬菜生产机械化技术与模式[M]. 江苏: 江苏大学出版社, 2017.
- [25] 李兆东, 李姗姗, 曹秀英, 等. 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.
- Li Zhaodong, Li Shanshan, Cao Xiuying, et al. 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)
- [26] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [27] 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)

[28] 全国农业机械标准化技术委员会. 单粒(精密)播种机试

验方法: GB-T 6973-2005[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2005.

Design and experiments of pneumatic roller type precision seed-metering device for rapeseed plug seedlings

Cao Xiulong^{1,3}, Ma Xu^{1,3}, Li Hongwei^{1,3}, Wen Zhicheng^{1,3}, Li Zehua^{2*}, Wang Xicheng¹

(1. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. College of Mathematics and Information, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Engineering Research Center of Guangdong for Rice Transplanting Technology and Equipment, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Mechanized transplanting can contribute to increasing the crop yield with high efficiency in the Yangtze River Basin of Southeast China. In this study, a novel pneumatic seed-metering device was designed to precisely control the plug seedlings and mechanized transplanting with potted trays in rapeseed production. The specific structure of the seed-metering device with a pneumatic roller planter was optimized to obtain the suitable operating parameters for better rapeseed growth and yield. The performance of the seed-metering device was investigated under laboratory and field conditions for rapeseed planting. A new integrated optimization technique on the Fluent software was used to simulate the internal flow field under three types of distance between the holes of the air inlet, where the inner wall of the roller and the seed suction hole contacted with the positive pressure chamber. A systematic investigation was made on the key components in experiments to determine the optimal ranges of the principal factors affecting the seeding performance. A field test was conducted to evaluate the adaptability and precision of the seed-metering device for rapeseed plug seedlings. An orthogonal combination test was carried out to analyze the relationship between three main influencing factors(negative pressure, positive pressure and diameter of seed suction hole) and seed performance (single seed qualified index, miss seeding index, and multiple seed index). A response surface method was selected to obtain that the primary and secondary factors affecting the single qualification index were a positive pressure, the diameter of seed suction hole, and the negative pressure. The influence of the other two parameters on the single seed qualified index presented a trend of first rising and then falling when one of the parameters was fixed. The results showed that there was no backflow in the positive pressure chamber, where the spacing of the air inlet was 144 mm, and the airflow velocity was relatively uniform at each hole of the seed suction hole. The optimization of multiple objective variables was selected to obtain the optimal parameters in the Design-Expert software. Three primary influence factors were achieved, including the negative pressure(3.73 kPa), positive pressure(0.23 MPa), and diameter of the suction hole(1.28 mm). In this case, the single seed qualified index reached 95.13%, the seed missing index was 2.80%, and the multiple seeding index was 2.07%. Taking three varieties of rapeseed and an alien vegetable seed(eggplant) as the examples, the adaptability and metering performance of pneumatic seed-metering device were evaluated, when the productivities were 600, 700, or 800 trays/h, respectively, where the negative pressure, positive pressure and diameter of seed suction hole were set as 3.60 kPa, 0.23 MPa, and 1.20 mm, respectively. In rapeseeds, the single seed qualified index was higher than 93%, while the seed missing index, and multiple seeding index were less than 5%. In vegetable seeds, the single seed qualified index was higher than 90%, and the seed missing index and multiple seeding index were both less than 5%. It infers that the seed metering performance of the pneumatic seed-metering device was accurate, efficient and adaptable for rapeseeds and other vegetable potted tray raising seedlings. The findings can serve as a promising reference for the development of rapeseed tray raising seedling, and mechanized transplanting in most vegetables.

Keywords: agricultural machinery; design; rapeseed; plug seedling; pneumatic roller; seed-metering device; seeding performance