doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.008

气力槽轮组合式蔬菜精密排种器吸嘴型孔设计与试验

尹文庆[1,2]　赵　璐[1,2]　李　骅[1,2]　胡　飞[1,2]　於海明[1]

(1.南京农业大学工学院,南京 210031;2.江苏省智能化农业装备重点实验室,南京 210031)

摘要:针对蔬菜品种多、种子差异大的特点,设计了一种气力槽轮组合式精密排种器,以满足多种蔬菜种子类型精密播种的需求。设计的精密排种器采用二级排种方式,第一级采用小结构槽轮排种器进行排种,第二级采用负压吸种、正压投种的气力排种器进行排种;运用三维激光扫描及三维点云计算方法,测量了青菜、萝卜和茄子种子的三轴尺寸,并以此为依据,设计了直孔、锥形孔、圆柱孔、腰圆孔等多种吸嘴型孔;以气室真空度、排种盘转速及吸嘴型孔类型为变量进行了 3 种种子的排种性能试验。对气室真空度采用单因素试验,试验结果表明:适宜青菜、萝卜、茄子排种的气室真空度分别为 4、5、3 kPa;对排种盘转速及吸嘴型孔类型采用完全组合试验,试验结果表明:排种盘转速为 17.5 ~ 22.5 r/min 时 3 种种子的排种性能较好,尤其在 20 r/min 时 3 种种子的排种合格率均达到最高。适宜青菜、萝卜、茄子排种的吸嘴型孔分别为:锥形孔、腰圆孔和直孔,在最优真空度及转速条件下排种合格率分别达到 97.0%、95.4%、93.7%,满足播种指标要求。

关键词:蔬菜种子;精密排种器;吸嘴型孔;试验

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2019)04-0068-09

Design and Experiment on Suction Nozzle Type Hole of Pneumatic-sheave Combined Vegetable Precision Metering Device

YIN Wenqing[1,2]　ZHAO Lu[1,2]　LI Hua[1,2]　HU Fei[1,2]　YU Haiming[1]

(1. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*

2. *Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province*, *Nanjing* 210031, *China*)

Abstract: Precise seeding technology has become an important direction of vegetable seeder development. Considering the characteristics of multi-varieties and large differences in vegetable seeds, the requirements for sowing are also different. According to the above practical problems, a pneumatic-sheave combined precision metering device was designed which owned advantages such as simple structure and suitable for various vegetable seeds. The precision metering device adopted a two-stage seeding mode. The small grooved wheel seeding device adopted for the first part, negative pressure to adsorb seeds and positive pressure to remove seeds were adopted for the second part. Three-dimensional laser scanning and three-dimensional point cloud calculation method were used to measure the three-axis size of pakchoi, radish and eggplant seeds. Based on these data, several shapes of suction nozzles such as through hole, conical hole, cylindrical hole and kidney ellipsoid hole were designed. The single-factor test was used to obtain the best chamber vacuum for seeder. By applying the single factor text for vacuum degree, optimal result showed that most suitable vacuum degrees for pakchoi, radish and eggplant were 4 kPa, 5 kPa and 3 kPa, respectively. The optimal metering tray speed and suction nozzle type hole were obtained by the complete combination test. The result showed that when the rotational speed of the metering tray was 17.5 ~ 22.5 r/min, the metering device qualified rate was high, especially at 20 r/min. The suction nozzle type holes suitable for pakchoi, radish and eggplant were conical holes, kidney ellipsoid hole and through hole, respectively. Under the optimal suction nozzle, vacuum and rotational speed conditions, the qualified rates of pakchoi, radish and eggplant were 97.0%, 95.4% and 93.7%, respectively, which could completely meet the requirement of seeding index.

Key words: vegetable seed; precision metering device; suction nozzle type hole; experiment

收稿日期:2019-01-03　修回日期:2019-01-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0701300)

作者简介:尹文庆(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事种植收获机械设计理论及监控技术研究,E-mail:yinwq@njau.edu.cn

通信作者:胡飞(1975—),男,副教授,主要从事智能农业装备技术研究,E-mail:hufei@njau.edu.cn

0　引言

蔬菜机械化播种成为近年来研究的热点问题，精密播种保证种子在规定的穴距、行距下能够实现每穴一粒，保证种子高效利用与合理分布[1-4]。排种器是实现精密播种的关键部件，主要分为机械式和气力式[5]。蔬菜种子籽粒小、质量轻，气力式精密排种器不易伤种且易保证每穴一粒，可满足蔬菜播种需求[6-7]。国外对于小颗粒种子的精密播种技术研究已经比较成熟，多采用气力式结构[8]，具有代表性的产品有美国满胜公司的 MONOSEM 气吸式播种机、英国 StanHay 公司生产的 S-780 蔬菜气吸式直播机等。国内廖庆喜等[9]针对油菜等小籽粒种子设计了气力式油菜精量排种器，夏红梅等[10]研制了气力板式排种器，符耀明等[11]设计了气力滚筒式排种器等，获得了良好的排种效果。吸嘴型孔是气力式排种器的关键要素之一[12]，近年来研究人员开始着眼于吸嘴设计。如为气力式水稻精量排种器设计了锥形、球形和圆柱形等窝眼，证明了影响排种性能的最主要因素是窝眼形状[13]。再如设计四棱台结构吸嘴，解决谷子气吸式排种盘播种时伤种、堵塞及成穴性差的问题[14]。还有相关人员采用 ANSYS 对吸孔的气流场进行分析，得到吸嘴形状、尺寸及导程对排种效果的影响规律[15]。而目前针对异形蔬菜种子吸嘴型孔的研究相对较少。

本文设计一种气力槽轮组合式蔬菜精密排种器，以实现多种类型蔬菜种子的精密排种。选取青菜、萝卜及茄子 3 种形状具有代表性的种子，以种子的三轴尺寸为依据设计多种吸嘴型孔，进行不同气室真空度与排种盘转速下的排种性能试验，以合格率、重播率和漏播率为试验指标，得出各类种子的最优排种吸嘴型孔，为不同类型蔬菜种子的高效、精密播种提供相关依据。

1　气力槽轮组合式蔬菜精密排种器设计

1.1　排种器结构与工作原理

气力槽轮组合式蔬菜精密排种器主要由排种盘、定盘、吸嘴、种箱、清种刷、排种槽轮和投种装置组成，如图 1 所示。动力通过联轴器、排种轴驱动排种盘转动。排种盘、定盘及排种轴三者形成负压气室，在定盘上安装有负压和正压接口，负压及正压接口通过气压缓冲箱与风机进出口相接。在排种盘与定盘之间、定盘与排种轴之间、正压口与排种盘之间均安装有密封圈，保障气室负压稳定。吸嘴与排种盘通过螺纹连接，根据种子情况进行更换。排种槽轮安装在排种盘右下方。

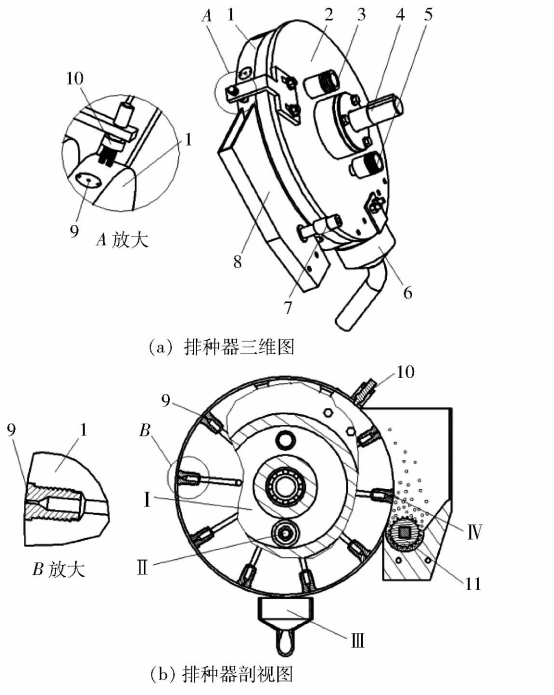


图 1　排种器结构示意图

Fig. 1　Structure diagrams of metering device

1. 排种盘　2. 定盘　3. 负压口　4. 排种轴　5. 正压口　6. 投种装置　7. 搅种轴　8. 种箱　9. 吸嘴　10. 清种刷　11. 排种槽轮　Ⅰ. 负压区　Ⅱ. 正压区　Ⅲ. 投种区　Ⅳ. 吸种区

排种器工作时，启动风机，形成稳定的气压，同时在吸嘴处形成气流吸附种子。排种槽轮顺时针转动，将种箱内的种子排向吸种区，在吸种区形成少量种子，排种轴带动排种盘逆时针旋转，由于排种盘及排种槽轮的转动，使吸种区的种子处于运动状态，有利于吸种。排种盘的吸种量小于排种槽轮的排种量，排种槽轮可将多余种子回排到种箱，保证吸种区的种量不会积累过多。吸附的种子随着排种盘转动到投种区域时，吸嘴气流通道与气流正压口接通，在正压气流的作用下将种子排出。

1.2　蔬菜种子三轴尺寸的测量

试验选用种植范围较广且形状不同的青菜、萝卜、茄子种子，品种分别为“矮箕苏州青”、“意大利马耳甜中萝卜”、“杭茄一号”。青菜种子类似球形；萝卜种子类似椭圆或卵圆形，厚度稍扁；茄子种子类似圆形薄片。为保证排种器吸嘴每次只能吸附一粒种子，吸嘴需要根据每种种子的实际尺寸进行设计，因此需要测量种子的长度、宽度、厚度及球度。运用三维激光扫描测量平台得到蔬菜种子的三维点云数据，通过算法进行处理后获取三轴尺寸，具体步骤为：点云获取；点云预处理（点云滤波、平滑、坐标系标准化）；种子的长、宽、厚计算（采用方向包围盒算法（Oriented bounding box, OBB））；球度计算。OBB 计算方法为：在所有点云数据中寻找到 X、Y、Z 三维

坐标的最大点和最小点，得到 x_{max}、x_{min}、y_{max}、y_{min}、z_{max}、z_{min}6 个坐标值，计算长度、宽度、厚度及球度，公式为

$$l = x_{max} - x_{min} \tag{1}$$

$$b = y_{max} - y_{min} \tag{2}$$

$$h = z_{max} - z_{min} \tag{3}$$

$$S_p = \frac{(lbh)^{\frac{1}{3}}}{l} \tag{4}$$

式中 l——种子长度，mm

b——种子宽度，mm

h——种子厚度，mm

S_p——种子球度[16]，球体的球度为 1，测量物体与球体外形差距越大球度越小

3 种蔬菜种子分别随机选取 100 粒进行测量，测量结果如表 1 所示。3 种种子三轴尺寸及球度的统计值均近似符合正态分布。青菜种子尺寸较小且三轴差别也小，球度最大，变异系数最小；萝卜种子尺寸较大且三轴均有一定差别，球度稍小，变异系数最大；茄子种子的长宽较大、厚度小，球度最小，为圆形薄片。

表 1 蔬菜种子三轴尺寸测量结果

Tab. 1 Triaxial size measurement results of vegetable seeds

种子种类	长度			宽度			厚度			球度		
	均值/mm	标准差/mm	变异系数/%	均值/mm	标准差/mm	变异系数/%	均值/mm	标准差/mm	变异系数/%	均值	标准差	变异系数/%
青菜	1.64	0.095	5.79	1.56	0.093	5.96	1.49	0.091	6.11	0.96	0.017	1.77
萝卜	3.24	0.239	7.38	2.48	0.216	8.71	1.77	0.151	8.53	0.75	0.022	2.93
茄子	2.99	0.192	6.42	2.50	0.161	6.44	0.90	0.055	6.11	0.63	0.017	2.70

由图 2 的三轴尺寸频数分布情况及累计百分比可得，85% 以上的青菜种子长度、宽度及厚度在 1.5 ~ 1.8 mm、1.4 ~ 1.7 mm、1.3 ~ 1.6 mm 范围内；85% 以上的萝卜种子长度、宽度及厚度在 2.8 ~ 3.7 mm、1.9 ~ 2.8 mm、1.3 ~ 2.2 mm 范围内；85% 以上的茄子种子长度、宽度及厚度在 2.7 ~ 3.3 mm、2.1 ~ 2.7 mm、0.6 ~ 1.2 mm 范围内。由图 3 可知，85% 以上的青菜、萝卜、茄子种子的球度范围在 0.93 ~ 0.99、0.69 ~ 0.78、0.60 ~ 0.66。

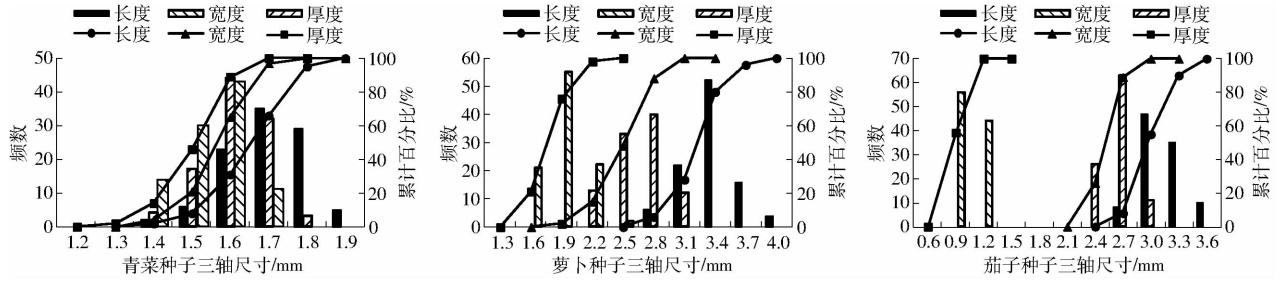


图 2 蔬菜种子三轴尺寸分布图

Fig. 2 Triaxial size distribution diagram of vegetable seeds

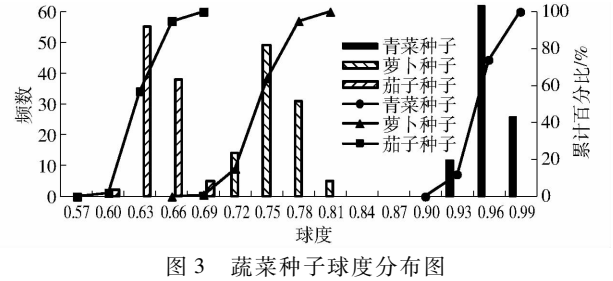


图 3 蔬菜种子球度分布图

Fig. 3 Sphericity distribution diagram of vegetable seeds

1.3 吸嘴型孔设计

蔬菜种子质量较轻且形状不规则，排种过程中吸嘴吸附单粒种子后将留有一些间隙，即使气流较小也可能引起多吸，需要设计合理的结构及尺寸来改善这种现象，因此所设计的吸嘴应与种子的外形贴合度较高。吸嘴的内孔连接至排种盘内部气室，内孔直径过大种子易进入气室造成堵塞，过小则影响吸附能力。据相关试验证明，对于类球形种子来说，吸嘴内孔直径与种子的平均宽度相关[14]，其范围为

$$d = (0.64 \sim 0.66) b_z \tag{5}$$

式中 d——吸嘴内孔直径，mm

b_z——种子平均宽度，mm

青菜种子籽粒饱和，球度较高，内孔直径的取值可采用上述方法，计算得到平均宽度为 1.56 mm，根据式(5)得出吸嘴内孔直径的范围为 0.998 ~ 1.030 mm，综合各方面因素考虑取 1.0 mm。吸嘴型孔设计为直孔、锥形孔、圆柱孔，如图 4 所示。直孔孔径即吸嘴内孔直径 $d = 1.0$ mm。锥形孔入口直径以最小青菜种子的球心处于吸嘴外端面来设计，图 4b 中半径为 r 的圆代表最小青菜种子，r 取最小宽度的一半即

0.67 mm，锥角为 90°，由几何关系可得

$$H_1 = l_{OA} = \sqrt{l_{OB}^2 - l_{AB}^2} = \sqrt{r^2 - 0.25d^2} \quad (6)$$

$$D_1 = 2H_1 + d \quad (7)$$

式中　H_1——锥形孔深度，mm

D_1——锥形孔入口直径，mm

因此 $H_1 = 0.45$ mm，$D_1 = 1.9$ mm。为防止吸入 2 粒种子，圆柱孔入口直径 D_2 应满足 $l_{pmax} < D_2 < 2h_{pmin}$，其中 l_{pmax}、h_{pmin} 分别为青菜种子的最大长度和最小厚度，即 1.81 mm $< D_2 <$ 2.44 mm，取 $D_2 = 2.0$ mm。由于种子完全进入吸嘴易引起卡种，因此吸嘴深度以种子平均宽度为直径的球的球心处于吸嘴外端面来设计，图 4c 中 R 为二分之一的种子平均宽度，即 0.78 mm，根据几何关系可得 $H_2 = \sqrt{l_{CF}^2 - l_{EF}^2} = \sqrt{R^2 - 0.25d^2}$，因此 $H_2 = 0.6$ mm。

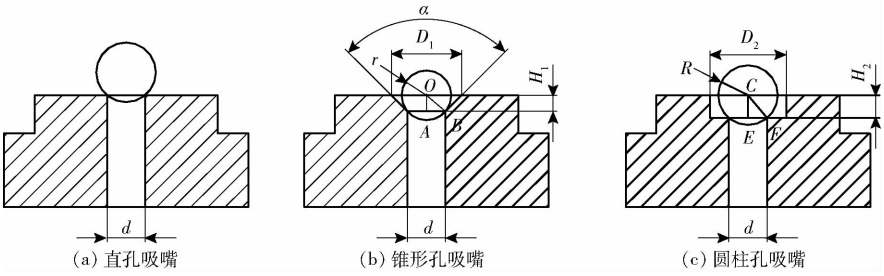


图 4　青菜种子吸嘴结构示意图

Fig. 4　Structure diagrams of three suction nozzles of pakchoi seed

萝卜种子三轴有一定的差别，球度稍小，计算得到种子的平均宽度为 2.48 mm，根据式(5)得出吸嘴内孔直径的范围为 1.587 ~ 1.639 mm，取 $d = 1.6$ mm。吸嘴型孔设计为直孔、锥形孔、圆柱孔、腰圆孔，如图 5 所示。直孔孔径 $d = 1.6$ mm。由于萝卜种子长宽有一定差别，锥形孔入口直径以种子平均宽度为直径的球的球心处于吸嘴外端面来设计，图 5b中 R 为二分之一的种子平均宽度，锥角为 90°，根据上述几何关系可得深度 $H_1 = 0.95$ mm，入口直径 $D_1 = 3.5$ mm。圆柱孔入口直径 $D_2 = l_{rz} + \Delta l < l_{rmax}$[17]，$\Delta l$ 为种槽间隙，萝卜种子平均长度 $l_{rz} = 3.24$ mm，最大长度 $l_{rmax} = 3.93$ mm，因而种槽间隙 Δl 为 0 ~ 0.69 mm，得 3.24 mm $< D_2 <$ 3.93 mm，取 $D_2 = 3.8$ mm，深度为种子平均厚度的一半，即 $H_2 = 0.9$ mm。腰圆孔较符合萝卜种子的形状特征，型孔长度等于圆柱孔直径 L_k(3.8 mm)，为防止两粒种子侧卧进入吸嘴，型孔宽度需满足 $b_{rmax} < B_k < 2h_{rmin}$，其中 b_{rmax}、h_{rmin} 分别为萝卜种子的最大宽度和最小厚度，即 2.89 mm $< B_k <$ 3.04 mm，取 $B_k = 3$ mm，型孔深度 H_3 为种子平均厚度的一半，即 $H_3 = 0.9$ mm。图 5a、5c、5d 中椭圆代表萝卜种子在吸嘴中的各种理想姿态。

茄子种子长宽较大，厚度很小，球度较小，类似圆盘状。由于吸扁平种子时吸嘴内孔直径应比式(5)计算结果稍小一些[18]，内孔直径取种子的平均厚度，即 0.9 mm。吸嘴型孔设计成直孔、锥形孔、圆柱孔，如图 6 所示。直孔孔径为吸嘴内孔直径，即 $d = 0.9$ mm。为防止吸多粒种子，锥形孔及圆柱孔入口直径应小于最小长度及宽度。锥形孔入口直径取 $D_1 = 1.3$ mm，锥角为 90°，由几何关系得到深度 $H_1 = 0.2$ mm。圆柱孔入口直径 $D_2 = 1.3$ mm，深度 $H_2 = 0.2$ mm。

2　试验结果与分析

2.1　试验装置

试验台由气力槽轮组合式排种器、传送带、变频调速器(型号 BT40D1.5KWT，功率 1.5 kW)、高压旋涡风机(型号 HG－1500S，功率 1.5 kW，最大风压 27 kPa)、风机变频器(LK350 － 2.2G3，功率 2.2 kW)、负压表(膜盒压力表，范围 －10 ~ 0 kPa)、正压表(膜盒压力表，范围 0 ~ 1 kPa)、主电机(型号 AM－370L－B/BL2－104L，功率 370 W)、小电机

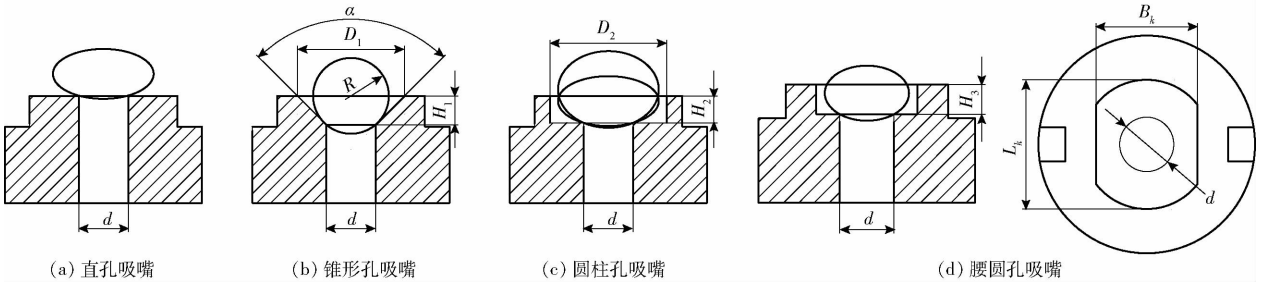
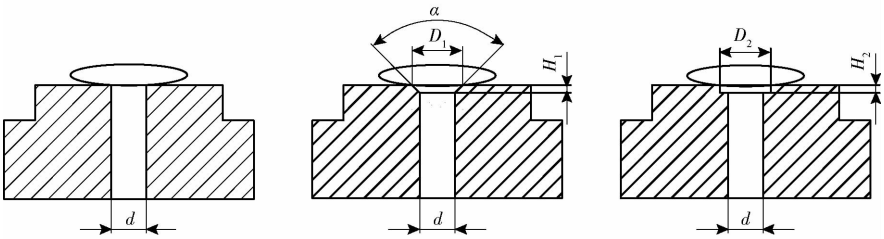


图 5　萝卜种子吸嘴结构示意图

Fig. 5　Structure diagrams of four suction nozzles of radish seed



(a) 直孔吸嘴 (b)锥形孔吸嘴 (c)圆柱孔吸嘴

图 6 茄子种子吸嘴结构示意图

Fig. 6 Structure diagrams of three suction nozzles of eggplant seed

(型号 ZGB37RG47.5i,功率 10 W)、电机支架等组成,如图 7 所示。其中调节变频调速器可以改变传送带的速度,从而模拟拖拉机不同的田间行驶状态。风机为排种器提供正负压,通过调节风机变频器改变真空度,小电机控制种箱内排种槽轮的转动,电机变频器控制主电机转速,经由减速器降速带动排种轴低速旋转,从而带动排种盘转动。

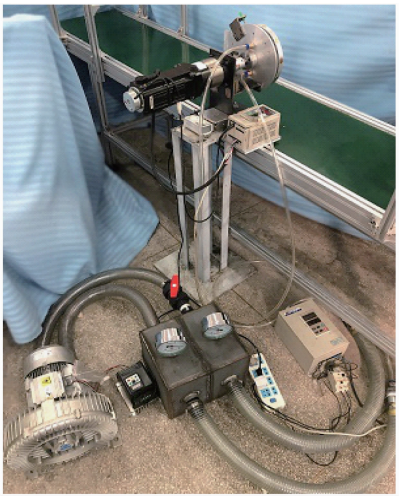


图 7 试验装置

Fig. 7 Test device

2.2 试验因素与指标

为了获取最优排种性能,选取气室真空度、排种盘转速及吸嘴型孔类型 3 项关键因素进行排种试验[19],因素水平如表 2 所示。根据农艺要求,青菜及萝卜播种采取穴播方式,穴距分别为 15、20 cm。茄子属于果菜类蔬菜,播种方式多为育苗移植[20],穴距为 5 cm。负压气室真空度设定为 2、3、4、5、6、7 kPa 6 个水平。排种盘转速、传送带速度及理论粒距的关系为

$$v = \frac{3.6nZs}{60} \tag{8}$$

式中 v——传送带速度,km/h

Z——排种盘吸嘴个数,为 10

s——理论粒距,m

n——排种盘转速,r/min

选取排种盘转速为 15.0、17.5、20.0、22.5、25.0、27.5 r/min,青菜、萝卜、茄子种子排种试验对应的传送带速度为:1.35 ~ 2.48 km/h、1.80 ~ 3.30 km/h、0.45 ~ 0.83 km/h。

表 2 因素水平

Tab. 2 Levels of test factors

水平	因素			
	种子类型	吸嘴型孔类型	排种盘转速/(r·min^{-1})	气室真空度/kPa
1	青菜种子	直孔	15.0	2
2	萝卜种子	锥形孔	17.5	3
3	茄子种子	圆柱孔	20.0	4
4		腰圆孔(萝卜种子)	22.5	5
5			25.0	6
6			27.5	7

试验采用 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,试验指标为合格率(单粒率)Q、重播率 E、漏播率 M。

2.3 气室真空度试验结果与分析

试验前在传送带上涂一层糯米胶,使种子落下后可以粘在传送带上,方便统计数据,每组试验连续记录 180 穴种子的穴粒数。调节排种盘转速为 20 r/min,分别用青菜、萝卜、茄子种子对应的直孔吸嘴进行气室真空度的单因素试验,每类种子试验时将真空度调节为 2、3、4、5、6、7 kPa,每组试验重复 3 次取平均,试验结果如图 8 所示。

由图 8 可知,3 种种子的重播率都随着气室真空度的增大而上升,在 5 ~ 7 kPa 时剧增;漏播率随着真空度的增大逐渐下降,在 2 ~ 4 kPa 时,青菜与萝卜排种漏播率急剧下降,茄子种子在 2 ~ 3 kPa 时下降明显;合格率呈现先上升后下降的趋势。青菜、萝卜和茄子排种合格率大于 90% 的气室真空度范围为:3 ~ 5 kPa、4 ~ 5 kPa、2 ~ 5 kPa,且在真空度为 4、5、3 kPa 时,青菜、萝卜和茄子的排种合格率达到最大,分别为 93.9%、91.3%、93.7%。这是由于当气室真空度较低时,吸种孔气流不足,排种盘经过吸种区后种子不易吸附到吸嘴上,即使吸附也易在转动过程中掉落至种箱,使得漏播率较大;当真空度达到适宜范围时,气流对种子的吸附力度较为合适,此

时的漏播与重播都较小，合格率较大；随着真空度的持续增大，吸附气流过强，导致多粒种子挤进吸嘴，且清种刷无法清除多余种子，引起重播率大增，导致合格率降低。由表 3 的单因素方差分析结果可知，气室真空度对 3 种种子的合格率、重播率、漏播率均具有显著影响。

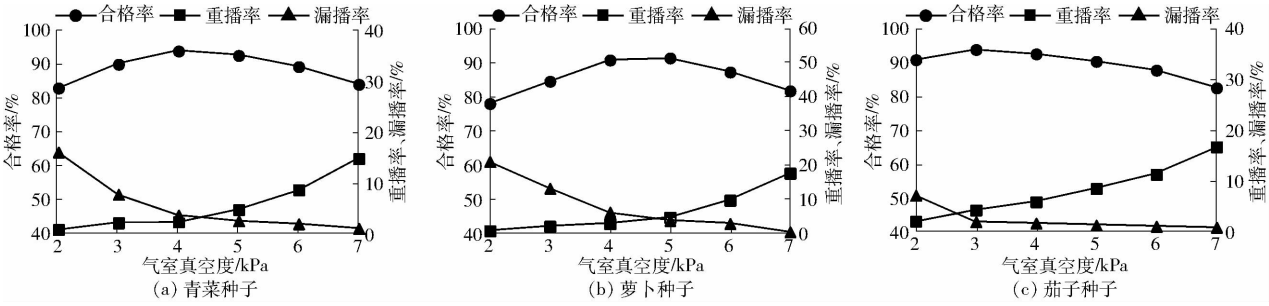


图 8　气室真空度与排种性能的关系

Fig. 8　Relationship between vacuum degree and seeding performance

表 3　气室真空度方差分析

Tab. 3　Variance analysis of vacuum degree

种子类型	分析项	差异源	平方和	自由度	均方	*F*	*P*
青菜种子	合格率	组间	295.01	5	59.00	85.51	5.66×10^{-9}
		组内	8.23	12	0.69		
		总计	303.24	17			
	重播率	组间	415.79	5	83.16	118.80	8.84×10^{-10}
		组内	8.44	12	0.70		
		总计	424.23	17			
	漏播率	组间	482.10	5	96.42	267.83	7.12×10^{-12}
		组内	4.32	12	0.36		
		总计	486.42	17			
萝卜种子	合格率	组间	409.88	5	81.98	160.75	1.53×10^{-10}
		组内	6.17	12	0.51		
		总计	416.05	17			
	重播率	组间	608.57	5	121.71	229.64	1.80×10^{-11}
		组内	6.39	12	0.53		
		总计	614.96	17			
	漏播率	组间	902.81	5	180.56	328.29	2.09×10^{-12}
		组内	6.58	12	0.55		
		总计	909.39	17			
茄子种子	合格率	组间	246.23	5	49.25	40.04	4.55×10^{-7}
		组内	14.81	12	1.23		
		总计	261.04	17			
	重播率	组间	420.04	5	84.01	87.51	5.13×10^{-9}
		组内	11.52	12	0.96		
		总计	431.56	17			
	漏播率	组间	86.92	5	17.38	82.76	6.28×10^{-9}
		组内	2.47	12	0.21		
		总计	89.39	17			

2.4　吸嘴型孔类型与排种盘转速试验结果与分析

调节真空度为 4、5、3 kPa，分别进行青菜、萝卜和茄子种子的吸嘴型孔类型及排种盘转速的完全组合试验。每类种子试验时更换对应的几种吸嘴，每种吸嘴试验过程中将排种盘转速调至 15.0、17.5、20.0、22.5、25.0、27.5 r/min，每组试验重复 3 次取平均，试验结果如图 9 所示。

图 9 表明 3 种吸嘴的合格率都随着排种盘转速的增加呈现出先上升后下降的趋势，重播率逐渐下降且趋势较缓慢，漏播率逐渐上升且在 25.0 r/min 后急剧上升。合格率在转速为 17.5 ~ 22.5 r/min 时较大，尤其在 20.0 r/min 时，合格率均达到最大。当排种盘转速较低时，吸嘴到达吸种区后，与种子接触过于充分而引起多吸；转速逐渐增大后，吸嘴与种子

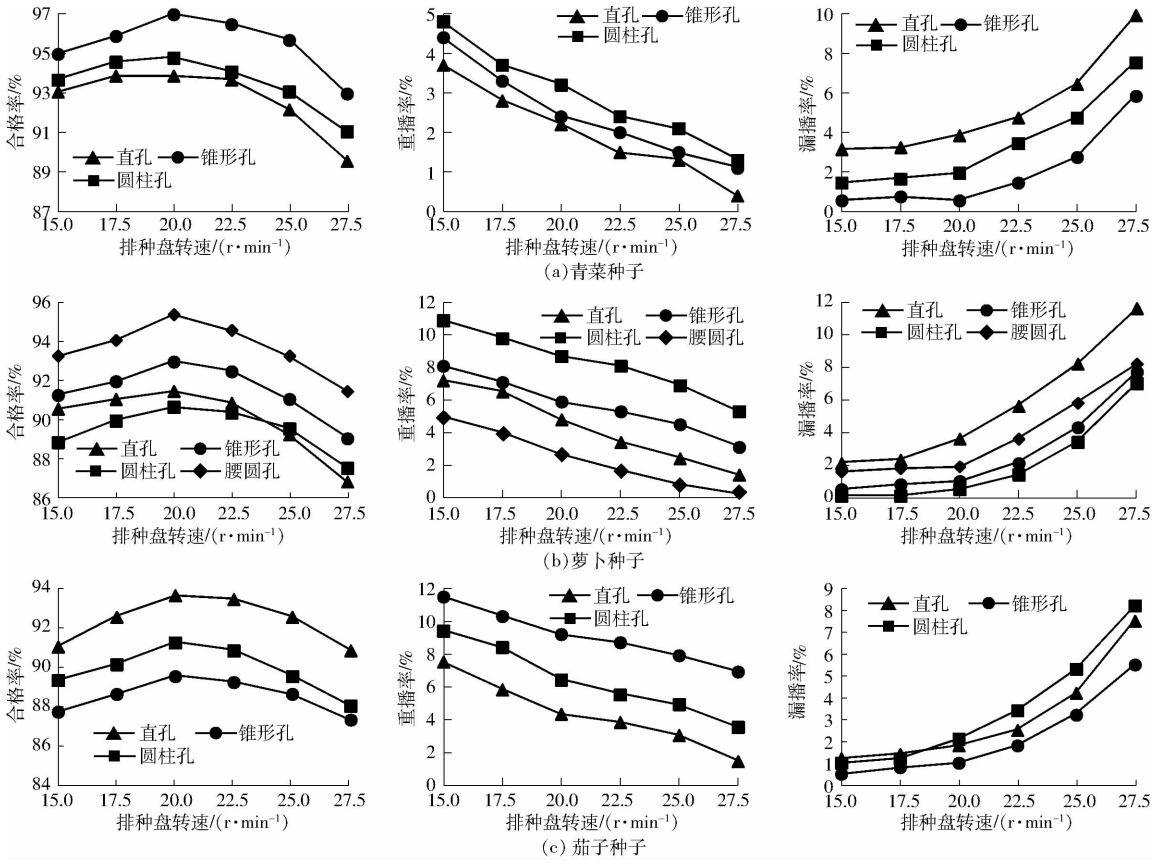


图 9 3 种种子吸嘴型孔及排种盘转速与排种性能的关系

Fig. 9 Relationship between suction nozzles of three kinds of seeds and rotational speeds of seeding tray and seeding performance

达到较为适宜的接触时间[21],此时各项指标较优;增大到一定范围后,吸嘴与种子的接触不充分,并对吸附的种子产生冲击力,而且种子转动过程中受到的离心力过大,这些因素易引起种子掉落[22],使得漏播急剧增加,导致合格率降低。

影响排种效果的另一个因素是吸嘴型孔类型,在相同的转速条件下,青菜种子合格率由大到小的吸嘴型孔类型为锥形孔、圆柱孔、直孔,重播率由大到小的吸嘴型孔类型为圆柱孔、锥形孔、直孔,漏播率由大到小的吸嘴型孔类型为直孔、圆柱孔、锥形孔。青菜种子球度很大,流动性较好,而直孔护种能力差,因此直孔的漏播率整体大于其他两种吸嘴,且直孔入口处横截面积最小,因此吸附范围最小,使得重播率较低。锥形孔及圆柱孔与种子的接触范围较大,易重吸,锥形孔与球形种子贴合度较高,吸附一粒种子后,间隙气流不易吸附其他种子,重播率小于圆柱孔,而且锥形孔气流较圆柱孔稳定,对于球形种子来说,种子表面受到的负压大[23],因此漏播率稍小。直孔、锥形孔、圆柱孔均在排种盘转速为 20.0 r/min 时合格率最高,分别为 93.9%、97.0%、94.8%,因此锥形孔对于青菜种子的排种性能优于圆柱孔和直孔。

萝卜种子排种合格率由大到小的吸嘴型孔类型为腰圆孔、锥形孔、直孔、圆柱孔,重播率由大到小的吸嘴型孔类型为圆柱孔、锥形孔、直孔、腰圆孔,漏播率由大到小的吸嘴型孔类型为直孔、腰圆孔、锥形孔、圆柱孔。萝卜种子尺寸较大,质量稍大且形状不规则,直孔的吸附范围最小,与种子接触时易漏吸且携种不稳,因此漏播率整体大于其他几种吸嘴;锥形孔与圆柱孔入口大,萝卜种子类似椭球,易使多个种子尖头插入,但锥角结构增大了种子与吸嘴的贴合面,多余气流吸附其他种子的能力稍差,因而重播率稍小,由于萝卜种子宽度及厚度小,可能出现多个种子侧卧于圆柱孔吸嘴,因而圆柱孔更容易重播;腰圆孔由于方向固定,易使单个种子从吸种区分离出来,且吸种后第 2 个种子不易进入,因此单粒率较高,但由于方向固定使得漏播稍多,然整体而言,腰圆孔的排种性能最优。转速为 20.0 r/min 时,直孔、锥形孔、圆柱孔、腰圆孔的合格率分别为 91.5%、93.0%、90.7%、95.4%。

茄子种子排种合格率由大到小的吸嘴型孔类型为直孔、圆柱孔、锥形孔,重播率由大到小的吸嘴型孔类型为锥形孔、圆柱孔、直孔,漏播率由大到小的吸嘴型孔类型为圆柱孔、直孔、锥形孔。茄子种子厚度很小,为薄片形,吸种时易使多个种子立着插入,因此重播率整体较大[24]。锥形

孔及圆柱孔口径大易多吸，且相同入口直径下，锥形孔的吸附性优于圆柱孔使得锥形孔的重播率更高；直孔的吸附范围虽小，吸附气流较圆柱孔气流稳定[25]，且种子因流动性差不易掉落，使得漏播率小于圆柱孔。因此对于茄子种子来说，直孔的排种效果最好。转速为 20.0 r/min 时，直孔、锥形孔、圆柱孔的合格率分别为 93.7%、89.6%、91.3%。

由表 4 可知，3 种种子吸嘴型孔及排种盘转速试验结果对应的各项 P 值均小于 0.05，因此吸嘴型孔及排种盘转速对 3 种种子的重播率、漏播率及合格率都具有显著影响。

表 4　吸嘴型孔及排种盘转速方差分析

Tab.4　Variance analysis of hole shape and rotational speed of metering tray

类别	种子类型	分析项	平方和	自由度	均方	F	P
吸嘴型孔	青菜种子	重播率	2.61	2	1.31	75.38	9.31×10^{-7}
		漏播率	31.77	2	15.88	123.56	8.90×10^{-8}
		合格率	24.49	2	12.24	79.22	7.38×10^{-7}
	萝卜种子	重播率	110.94	3	36.98	363.44	3.18×10^{-14}
		漏播率	41.74	3	13.91	38.13	2.94×10^{-7}
		合格率	64.64	3	20.88	132.08	5.23×10^{-11}
	茄子种子	重播率	69.11	2	34.55	291.46	1.36×10^{-9}
		漏播率	6.16	2	3.08	13.12	1.60×10^{-3}
		合格率	45.02	2	22.51	269.06	2.02×10^{-9}
排种盘转速	青菜种子	重播率	21.94	5	4.39	253.13	3.44×10^{-10}
		漏播率	82.30	5	16.46	128.04	9.90×10^{-9}
		合格率	31.49	5	6.30	40.75	2.48×10^{-6}
	萝卜种子	重播率	78.33	5	15.67	153.97	2.44×10^{-12}
		漏播率	176.27	5	35.25	96.62	7.28×10^{-11}
		合格率	37.30	5	7.46	47.19	1.20×10^{-8}
	茄子种子	重播率	59.76	5	11.95	100.81	3.19×10^{-8}
		漏播率	83.92	5	16.78	71.45	1.70×10^{-7}
		合格率	16.30	5	3.26	38.96	3.06×10^{-6}

2.5　3 类种子最优排种参数

由气室真空度、排种盘转速及吸嘴型孔类型 3 种因素的排种试验得出：青菜种子的锥形孔吸嘴在排种盘转速为 20.0 r/min、气室真空度为 4 kPa 时排种性能最好，合格率、重播率及漏播率分别为 97.0%、2.4%、0.6%；萝卜种子的腰圆孔吸嘴在排种盘转速为 20.0 r/min、气室真空度为 5 kPa 时排种性能最好，合格率、重播率及漏播率分别为 95.4%、2.6%、2.0%；茄子种子的直孔吸嘴在排种盘转速为 20.0 r/min、气室真空度为 3 kPa 时排种性能最好，合格率、重播率及漏播率分别为 93.7%、4.4%、1.9%。3 类种子在最优排种参数下均取得了较好的排种效果，满足精密播种指标。

3　结论

（1）运用二级排种原理，研制了一种气力槽轮组合式精密排种器。槽轮排种器作为第一级排种器，在气力排种器吸种区形成循环流动的种群，气力排种器作为第二级排种器，通过负压吸种、正压投种的方式进行排种。

（2）基于蔬菜种子的三轴尺寸特性，设计了直孔、锥形孔、圆柱孔、腰圆孔等多种吸嘴型孔。吸嘴安装于排种盘上，并且可以拆卸，便于根据种子情况进行更换。采用三维激光扫描测量方法，获得了青菜、萝卜和茄子种子的三轴尺寸及其分布规律。

（3）气室真空度单因素试验结果表明：青菜、萝卜、茄子的适宜气室真空度分别为 4、5、3 kPa；排种盘转速及吸嘴型孔的完全组合试验结果表明：青菜、萝卜、茄子 3 种蔬菜种子的适宜吸嘴型孔分别为锥形孔、腰圆孔、直孔；排种盘转速为 17.5～22.5 r/min 时 3 种种子的排种性能较好，在 20.0 r/min 时，各类种子排种合格率最高。在最优转速、真空度及吸嘴情况下，青菜、萝卜、茄子的排种合格率分别为 97.0%、95.4%、93.7%，重播率为 2.4%、2.6%、4.4%，漏播率为 0.6%、2.0%、1.9%，满足精密播种指标要求。

参　考　文　献

[1]　张宁，廖庆喜. 我国小粒径种子播种技术与装备的应用与研究进展[J]. 中国农机化，2012，33(1)：93－96，103.

ZHANG Ning, LIAO Qingxi. Research progress of seeding technology and equipment for small seeds in China[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012,33(1):93 - 96,103. (in Chinese)

[2] WANG L, LIAO Y T, LIAO Q X. Design and experiment of remote control precision planter for Chinese cabbage vegetable[J]. International Journal of Robotics & Automation,2018, 33(2):208 - 214.

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

[4] 杨丽,史嵩,崔涛, 等.气吸与机械辅助附种结合式玉米精量排种器[J/OL].农业机械学报,2012,43(增刊):48 - 53.
YANG Li, SHI Song, CUI Tao, et al. Air-suction corn precision metering device with mechanical supporting plate to assist carrying seed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(Supp.):48 - 53. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2012s10&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.010. (in Chinese)

[5] 贾洪雷,陈玉龙,赵佳乐, 等.气吸机械复合式大豆精密排种器设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(4):75 - 86,139.
JIA Honglei, CHEN Yulong, ZHAO Jiale, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined precision metering device for soybean[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(4):75 - 86,139. http://www.j-csam.org/jcsam/hch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20180409flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.009. (in Chinese)

[6] 李娜,赵满全,刘飞, 等.气吸式谷子精量排种器性能试验研究[J].中国农业大学学报,2016, 21(5):122 - 128.
LI Na,ZHAO Manquan, LIU Fei, et al. Experimental study on the performance of pneumatic precision metering device for millet seeds[J]. Journal of China Agricultural University,2016, 21(5):122 - 128. (in Chinese)

[7] 廖庆喜,杨波,李旭, 等.内充气吹式油菜精量排种器气室流场仿真与试验[J/OL].农业机械学报,2012,43(4):51 - 54.
LIAO Qingxi, YANG Bo, LI Xu, et al. Simulation and experiment of inside-filling air-blow precision metering device for rapeseed [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(4):51 - 54. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20120411&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.04.011. (in Chinese)

[8] GUARELLA P, PELLERANO A, PASCUZZI S. Experimental and theoretical performance of a vacuum seeder nozzle for vegetable seeds[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996,64(1):29 - 36.

[9] 廖庆喜,李继波,覃国良.气力式油菜精量排种器试验[J].农业机械学报,2009,40(8):44 - 48.
LIAO Qingxi, LI Jibo, QIN Guoliang. Experiment of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(8):44 - 48. (in Chinese)

[10] 夏红梅,李志伟,甄文斌.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. 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)

[11] 符耀明,张静,吴钢,等.气力滚筒式精密排种器结构设计及试验[J].农机化研究,2016,38(1):172 - 176.
FU Yaoming, ZHANG Jing, WU Gang, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder-type precision seed-metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(1):172 - 176. (in Chinese)

[12] 张顺,夏俊芳,翟建波,等.气力式水稻芽种直播精量排种器关键部件的设计与仿真[J].图学学报,2014,35(3):412 - 416.
ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHAI Jianbo, et al. Design and simulation on the key components of pneumatic precision metering device for direct sowing of rice bud-sowing[J]. Journal of Graphics,2014,35(3):412 - 416. (in Chinese)

[13] 张顺,夏俊芳,周勇, 等.气力滚筒式水稻直播精量排种器的设计与试验[J].农业工程学报,2015, 31(1):11 - 19.
ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device [J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(1):11 - 19. (in Chinese)

[14] 王芳,吕冰,王洪明, 等.气吸式谷子排种装置吸种孔的结构设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(8):30 - 36.
WANG Fang, LÜ Bing, WANG Hongming, et al. Structural design and test of seed-suction hole of air-sucking seed-metering device for millet[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(8):30 - 36. (in Chinese)

[15] 陈进,李耀明,王希强,等.气吸式排种器吸孔气流场的有限元分析[J].农业机械学报,2007,38(9):59 - 62.
CHEN Jin, LI Yaoming, WANG Xiqiang, et al. Finite element analysis for the sucking nozzle air field of air-suction seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(9):59 - 62. (in Chinese)

[16] 王磊.类球形蔬菜种子精量播种机设计与试验[D].武汉:华中农业大学,2015.
WANG Lei. Design and experiment of precision for quasi-spherical vegetable seed [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2015. (in Chinese)

[17] 刘艳芬,林静,李宝筏,等.玉米播种机水平圆盘排种器型孔设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(8):37 - 46.
LIU Yanfen, LIN Jing, LI Baofa, et al. Design and experiment of horizontal disc seed metering device for maize seeder[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(8): 37 - 46. (in Chinese)

[18] 李林.气吸式排种器理论及试验的初步研究[J].农业机械学报,1979,10(3):56 - 63.
LI Lin. A preliminary study on the theory and experimentation of the suction-type metering device for precision drill[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1979,10(3):56 - 63. (in Chinese)

[19] SU W, WANG F L, CHEN H T, et al. Vacuum and air flow for 2QXP - 1 vacuum precision seed metering[J]. Journal of Northeast Agricultural University (English Edition), 2013,20(2):61 - 64.

(下转第 136 页)

[18] 蔡维克. 质点在绕水平轴等速旋转一般柱面型叶片上运动的微分方程[J]. 四川工业学院学报,1984(2):71 - 76.
[19] 丁振军. 基于筛面运动特性的单颗粒运动规律理论研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2017.
DING Zhenjun. Theoretical research on motion law of a particle based on motion characteristics of screen[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2017. (in Chinese)
[20] 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD - DEM 数值模拟[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(2):79 - 84.
LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD-DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(2):79 - 84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120217&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.017. (in Chinese)
[21] 王立军,彭博,宋慧强. 玉米收获机聚氨酯橡胶筛筛分性能仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(7):90 - 96.
WANG Lijun, PENG Bo, SONG Huiqiang. Cleaning of maize mixture based on polyurethane rubber sieve[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(7):90 - 96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20180711&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.011. (in Chinese)
[22] 许振冻. 基于拨禾指式玉米收获机的行距适应性研究[D]. 淄博:山东理工大学,2014.
XU Zhendong. Research on adaptability of row spacing based on corn harvester with finger wheel[D]. Zibo: Shandong University of Technology,2014. (in Chinese)
[23] 江立凯. 覆草冬种马铃薯收获机的研制[D]. 广州:华南农业大学,2016.
JIANG Likai. The development of harvesting machine for straw mulching winter planting potato[D]. Guangzhou: South China Agricultural University,2016. (in Chinese)
[24] 冀牧野. 油菜联合收获机梳脱式割台设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2016.
JI Muye. Design and experimental on stripping cutting table of rape combine harvester[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University,2016. (in Chinese)
[25] 杨然兵,杨红光,尚书旗,等. 拨辊推送式马铃薯收获机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(7):119 - 126.
YANG Ranbing, YANG Hongguang, SHANG Shuqi, et al. Design and test of poking roller shoving type potato harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(7):119 - 126. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20160717&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.017. (in Chinese)
[26] 周文秀. 玉米籽粒的物理力学特性研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2015.
ZHOU Wenxiu. The physical and mechanical properties research of corn grain[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
[27] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.

(上接第 76 页)

[20] 胡童,齐新丹,李骅,等. 国内外蔬菜播种机的应用现状与研究进展[J]. 江西农业学报,2018,30(2):87 - 92.
HU Tong, QI Xindan, LI Hua, et al. Application status and research progress of vegetable seeder in China and foreign countries[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30(2):87 - 92. (in Chinese)
[21] 张顺,夏俊芳,周勇, 等. 气力滚筒式水稻直播精量排种器排种性能分析与田间试验[J]. 农业工程学报, 2017,33(3):14 - 23.
ZHANG Shun, XIA Junfang, ZHOU Yong, et al. Field experiment and seeding performance analysis of pneumatic cylinder-type precision direct seed-metering device for rice[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(3):14 - 23. (in Chinese)
[22] 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 CSAE, 2010, 26(9): 133 - 138. (in Chinese)
[23] 谢海军,李志伟,张静. 气力滚筒式小粒圆形种子排种器孔口结构仿真分析[J]. 农机化研究,2018,40(7):31 - 35,41.
XIE Haijun, LI Zhiwei, ZHANG Jing. Simulation analysis of suction hole of pneumatic roller-type seeder for small-size seed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018,40(7):31 - 35,41. (in Chinese)
[24] 刘佳,崔涛,张东兴,等. 玉米种子分级处理对气力式精量排种器播种效果的影响[J]. 农业工程学报,2010, 26(9):109 - 113.
LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Effects of maize seed grading on sowing quality by pneumatic precision seed-metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(9):109 - 113. (in Chinese)
[25] 张芙娴,郭占斌. 基于 CFD 的 2BM - 4 型气吸式排种器气流场分析[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2017,29(5):95 - 98.
ZHANG Fuxian, GUO Zhanbin. Analysis of 2BM - 4 gas suction seed metering device airflow field based on CFD[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University,2017,29(5):95 - 98. (in Chinese)