

小白菜正负气压组合式精量排种器设计与试验

刘 海^{1,2} 廖宜涛^{1,3} 王 磊^{1,3} 王宝山^{1,3} 杜 铮^{1,2} 廖庆喜^{1,3}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 武汉市农业科学院, 武汉 430065;
3. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对小白菜精量复式播种机采用单体排种器播种时传动系统复杂、各行出苗效果差异明显等不足, 设计了2个排种盘可同时播8行的小白菜正负气压组合式排种器, 阐明了排种器的工作过程、原理及主要结构参数, 理论分析确定了排种盘和排种口结构参数及其种子迁移轨迹。利用DEM-CFD气固耦合动网格模型分析了排种盘转速、气室负压和气室正压对排种性能的影响, 试验结果表明: 负压对排种器合格指数、重播指数及漏播指数均有显著影响, 负压为-3 000 Pa、正压为300 Pa、转速为30 r/min、品种为中箕青605时, 各行平均合格指数为93.12%、重播指数为3.59%、漏播指数为3.29%。利用JPS-12型排种器检测试验台开展了台架试验, 试验结果表明: 排种盘转速为30 r/min、负压为-3 000 Pa、正压为300 Pa时, 各行平均合格指数为91.32%、平均重播指数为6.19%、平均漏播指数为2.49%。以较优因素水平组合开展了田间试验, 试验结果表明: 小白菜平均苗数为10株/m、株距平均值为100.48 mm, 各行苗数一致性变异系数为8.05%, 满足小白菜种植农艺要求。

关键词: 小白菜; 精量播种; 正负气压组合式排种器

中图分类号: S223.2⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)10-0054-12 OSID: 

Design and Experiment of Positive and Negative Pressure Combination Precision Metering Device for Pakchoi

LIU Hai^{1,2} LIAO Yitao^{1,3} WANG Lei^{1,3} WANG Baoshan^{1,3} DU Zheng^{1,2} LIAO Qingxi^{1,3}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China
2. Wuhan Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430065, China
3. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: In view of the disadvantages of complex transmission system and obvious difference in seedling emergence effect of each row when single metering device is used in precision compound seeder for Pakchoi, a positive and negative pressure combination metering device for Pakchoi with two plates which can simultaneously sow eight rows was designed. The working process and principle of the metering device and the main structural parameters of the metering device were described. The structural parameters of seed tray and seed metering port and the seed migration trajectory were determined by theoretical analysis. By using DEM-CFD gas-solid coupling dynamic grid model, the effects of seed metering disc speed, air chamber negative pressure and air chamber positive pressure on seed metering performance were analyzed. The results showed that negative pressure had a significant impact on seed metering device qualified index, multiple index and missing index. When the seed metering disc speed was 30 r/min, the negative pressure was -3 000 Pa, the positive pressure was 300 Pa, the average qualified index of each row was 93.12%, the average multiple index was 3.59%, and the average missing seeding index was 3.29%. The bench test was carried out by using JPS-12 seed metering device detection test-bed. The results showed that when the rotation speed of seed metering disc was 30 r/min, the negative pressure was -3 000 Pa, the positive pressure was 300 Pa, the average qualified index of each row was 91.32%, the average multiple index was 6.19%, and the missing seeding index

收稿日期: 2021-10-03 修回日期: 2021-11-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(51875229)和财政部和农业农村部:国家现代农业产业体系项目(CARS-12)
作者简介: 刘海(1982—),男,博士生,武汉市农业科学院工程师,主要从事农业装备设计与测控研究,E-mail: lh@whiam.cn
通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaoxq@mail.hzau.edu.cn

was 2.49%. The field experiment was carried out with a better combination of factors. The results showed that the average number of seedlings of Pakchoi was 10 in each meter, the average plant spacing was 100.48 mm, and the uniformity coefficient of variation of the number of seedlings in each row was 8.05%, which met the agronomic requirements of Pakchoi planting, and the research result can provide a reference for the optimization of the structure of precision metering device.

Key words: Pakchoi; precision seeding; positive and negative pressure combination metering device

0 引言

小白菜属十字花科,是长江中下游地区广泛种植的叶类菜^[1],其种植方式主要以人工为主,劳动强度大、效率低,制约了小白菜的规模化生产,小白菜机械化精量播种技术是提高小白菜直播作业水平的主要手段^[2]。排种器是播种机的关键部件之一,其工作性能直接影响播种机的播种质量^[3-4]。气力式排种器具有低伤种、速度适应性广、粒径适应范围大等优点,是现阶段精量排种技术的主要研究方向^[5-7]。

目前国内外学者对精量排种技术进行了深入研究^[8-11]。ANANTACHAR 等^[12]为提高排种器充种性能,采用遗传算法和神经网络优化了排种器结构,提高了排种性能。GAIKWAD 等^[13]为提高蔬菜播种机排种性能,采用激振扰动结合负压吸附方式设计了一种气力式排种器。ARZU 等^[14]研究了气力式排种器负压、排种盘转速、型孔直径、型孔数量对排种性能的影响,建立了不同参数的数学模型。李兆东等^[15]设计了一种油菜精量气压式集排器,该集排器利用气流清种和气压护种技术实现精量排种。崔涛等^[16]利用气吹清种原理设计了一种内充气吹式精量排种器,可实现玉米单粒精量排种。李玉环等^[17]设计了一种一器双行气吸式精量排种器,该排种器采用单风道实现了双行排种,适用于类球型种子精量排种。尹文庆等^[18]采用二级排种方式开展气力组合式精密排种器的设计,试验表明蔬菜种子在最优真空度下排种合格指数高于 93%。上述研究表明气力式排种器通用性好,对种子适应性较强^[19-24],可实现不同形状、粒径种子的精量排种。而适应于长江中下游地区小白菜精量多行集中排种的排种器研究较少,制约了小白菜精量播种的发展。

针对小白菜精量复式播种机采用单体排种器播种 8 行时需配置 8 个单行排种器,导致传动系统复杂、各行出苗效果差异明显等不足,本文基于小白菜种植农艺要求,设计一种负压吸种、携种,正压投种的小白菜正负气压组合式精量排种器,采用双排种盘共用同一气室,实现 2 个排种盘可同时播种 8 行,通过仿真和台架试验获取排种器较优作业参数,并通过田间试验验证排种器的实际作业效果。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

小白菜精量复式播种机主要由开沟器、排种器、传动系统、气力系统、施肥系统、机架和开沟起垄装置等组成,其结构如图 1 所示,主要技术参数如表 1 所示。

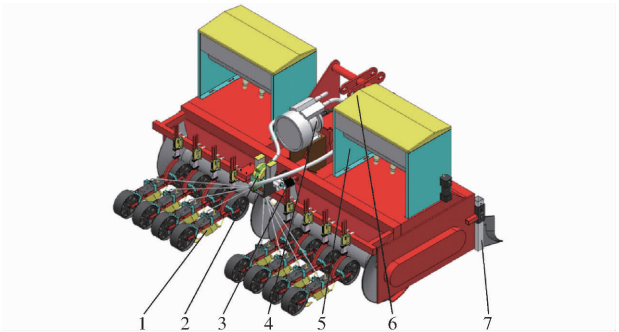


图 1 小白菜精量复式播种机结构示意图
Fig.1 Structure diagram of precision combined seeder for Pakchoi

1. 开沟器 2. 排种器 3. 传动系统 4. 气力系统 5. 施肥系统
6. 机架 7. 开沟起垄装置

表 1 排种器主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of metering device	
参数	数值/类型
排种器类型	正、负气压组合
风机功率/kW	2.2
作业幅宽/mm	2 200
作业速度/(km·h ⁻¹)	2.0~5.0
播量/(kg·hm ⁻²)	3.75~7.50
播种行数	8
排种器转速/(r·min ⁻¹)	10~50
株距/mm	100~200
行距/mm	100~250

1.2 工作原理

小白菜正负气压组合式精量排种器主要由排种口、种箱、罩壳、排种盘和气室等组成,如图 2 所示。排种器关键部件采用对称布局形式,两个排种盘共用同一气室,每个排种盘上分布有 4 圈型孔,每圈型孔实现 1 行排种,排种器工作原理如图 3 所示。

排种器工作过程主要包括吸种、携种和投种 3 个阶段。工作时,排种盘上型孔依次经过充种区、携

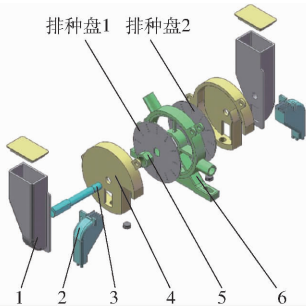


图2 排种器结构示意图

Fig.2 Structure diagram of metering device

1. 种箱 2. 排种口 3. 排种轴 4. 罩壳 5. 锁紧螺母 6. 气室

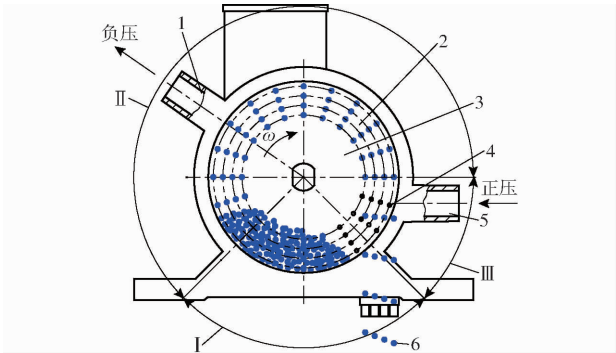


图3 排种器工作原理图

Fig.3 Working principle of metering device

1. 负压口 2. 排种盘 3. 气室 4. 型孔 5. 正压口 6. 种子

I. 充种区 II. 携种区 III. 投种区

种区和投种区。种子因自重及种箱结构而堆积于罩壳的充种区,外界与气室相连通并依靠气力系统的风机提供一定负压,单粒种子吸附于经过充种区的型孔上并随型孔同步绕排种轴转动至投种区,在正

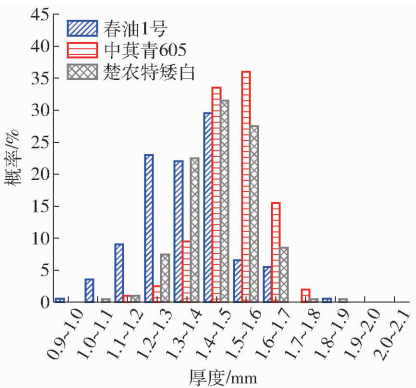
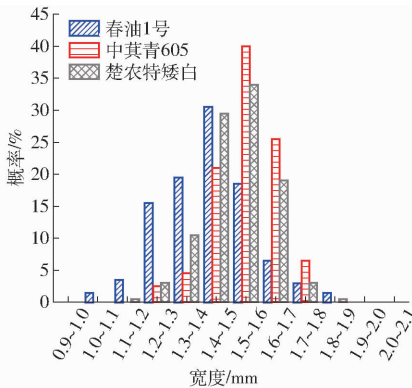
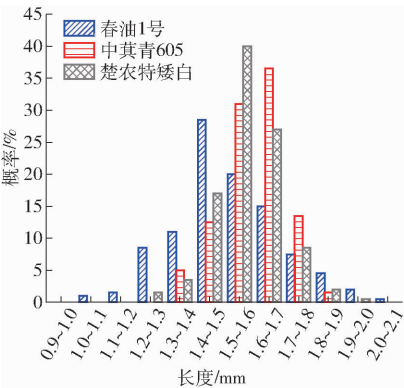


图4 种子尺寸的概率分布

Fig.4 Probability distributions of seeds' size

2.1 排种盘设计与分析

2.1.1 排种盘直径

排种盘是保证小白菜正负气压组合式精量排种器实现精量排种的关键部件,种子在排种器内的运移主要由排种盘吸附种子并同步转动完成,其中排种盘型孔结构与类球形种子直径密切相关^[26],根据排种器结构和几何关系得到排种盘直径关系

压及自重作用下,种子脱离排种盘,通过排种口排出完成排种过程。

2 排种器关键部件设计

排种器关键部件设计以种子的机械物理特性为依据。小白菜种子类型为小粒径类球型,流动性好、球形度高^[25]。本文以春油1号、中苣青605及楚农特矮白3种小白菜种子为排种对象,机械物理特性参数如表2所示。

表2 小白菜种子机械物理特性参数

Tab.2 Mechanical and physical properties of Pakchoi seeds

参数	品种			均值
	春油1号	中苣青605	楚农特矮白	
长度/mm	1.52 ± 0.53	1.60 ± 0.29	1.58 ± 0.31	1.59
宽度/mm	1.44 ± 0.44	1.56 ± 0.27	1.52 ± 0.34	1.51
厚度/mm	1.36 ± 0.42	1.51 ± 0.28	1.46 ± 0.37	1.44
当量直径/mm	1.44	1.56	1.52	1.51
球形度/%	94.77	97.18	96.38	96.11
千粒质量/g	1.93	1.99	1.96	1.96
容重/(kg·m ⁻³)	686.50	689.75	704.81	693.68
含水率/%	7.01	8.12	8.47	7.86

由表2可知,小白菜种子的当量直径范围为1.44~1.56mm,球形度均高于94%。小白菜种子粒径变化范围大,为实现排种器的精量排种,确保排种盘每一型孔对应一粒种子,需根据种子机械物理特性参数确定排种盘结构参数。种子尺寸的概率分布如图4所示。

式为

$$\begin{cases} v = \frac{\pi n D_p}{60} \\ vt_x = l_x \\ \omega = \frac{\theta_x \pi n}{360} \end{cases} \quad (1)$$

式中 n ——排种盘转速,r/min

ω ——排种盘回转角速度, rad/s
 v ——排种盘外圈线速度, m/s
 D_p ——排种盘直径, mm
 t_x ——携种时间, s
 l_x ——携种区弧长, mm
 θ_x ——携种区转角, ($^\circ$)

由式(1)得出

$$t_x = \frac{\theta_x}{6n} \quad (2)$$

根据式(2)可知,携种时间 t_x 与排种盘转速 n 及携种区转角 θ_x 有关,基于排种器气室结构,确定其携种区转角 θ_x 为 225° ,则可判断种子在携种过程中吸附于型孔的携种时间 t_x 与排种盘转速 n 成反比。根据排种器气室结构及文献[27],确定排种盘直径 D_p 为 140 mm。

2.1.2 排种盘型孔数

排种盘型孔参数是影响排种效率的重要因素,根据小白菜精量直播农艺,设计排种盘转速 n 取值范围为 $10 \sim 50 \text{ r/min}$ [28],根据播种机的传动机构有

$$\begin{cases} v_m t = sN \\ N = \frac{Znt}{60} \\ N\theta_i = 360^\circ \end{cases} \quad (3)$$

式中 N ——单位时间内每圈理想排种粒数

Z ——排种盘每圈型孔数

t ——播种机作业时间, s

v_m ——机组前进速度, m/s

s ——小白菜株距, mm

θ_i ——相邻型孔中心角, ($^\circ$)

根据排种器主要技术参数,小白菜株距 s 范围为 $100 \sim 250 \text{ mm}$,结合圆周均布孔组要求,将排种盘转速 n 、机组前进速度 v_m 以及小白菜株距 s 代入式(3)得到排种盘每圈型孔数 Z 为 $4 \sim 36$,综合考虑小白菜播量要求设计排种盘每圈型孔数 Z 为 20,相邻型孔中心角 θ_i 为 18° 。

2.1.3 排种盘型孔直径

排种器工作时,排种盘对种子有扰动作用,同时由于排种器携种区的负压作用,小白菜种子以单粒迁移方式吸附于排种盘各行型孔上,其稳定状态取决于型孔大小及气室中的负压。排种器采用垂直圆盘结构,双排种盘为对称分布形式,型孔为“沉头”通孔,种子被吸附于型孔时受力分析如图 5 所示。

根据达朗贝尔原理 [29],建立排种盘单粒种子的受力方程为

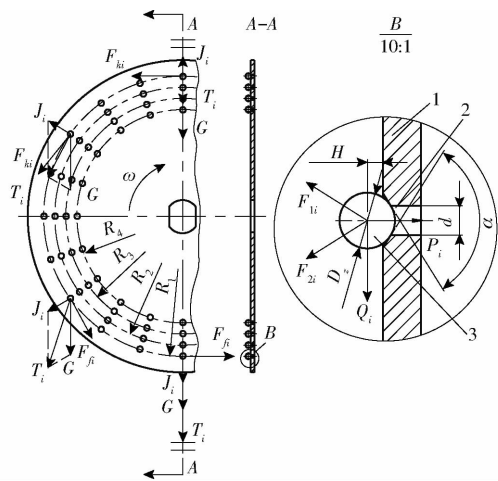


图 5 被吸附种子受力分析图

Fig. 5 Force analysis of seed in carrying process

1. 排种盘 2. 型孔 3. 种子

$$\begin{cases} S = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \\ v_i = \omega R_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \\ J_i = \frac{mv_i^2}{R_i} \\ G = mg \\ HQ_i = P_i \frac{d}{2} \\ Z_i = \frac{P_i}{S} \\ T_i = \sqrt{G^2 + J_i^2 + 2GJ_i \cos \theta_{GJ}} \\ Q_i = \sqrt{T_i^2 + F_{fi}^2 + 2T_i F_{fi} \cos \theta_{TF}} \end{cases} \quad (4)$$

式中 G ——单粒种子重力, N

R_i ——各行型孔回转半径, mm

F_{fi} ——被吸附种子的内摩擦力, N

J_i ——种子离心力, N

T_i —— G 与 J_i 的合力, N

Q_i —— T_i 与 F_{fi} 的合力, N

P_i ——负压下各行单个型孔对种子的吸附力, N

H ——种子重心到排种盘平面的距离, mm

d ——型孔直径, mm

m ——单粒种子质量, g

θ_{GJ} —— G 与 J_i 之间的夹角, ($^\circ$)

θ_{TF} —— T_i 与 F_{fi} 之间的夹角, ($^\circ$)

Z_i ——气室负压, Pa

v_i ——各行种子回转线速度, m/s

S ——型孔吸附种子截面处面积, m^2

排种器工作时,被吸附种子在携种区有空气阻力作用,而在充种区有种子间的相互作用,其种子间的内摩擦力在最底部位置型孔处最大,此时 $\theta_{GJ} =$

$\theta_{TF} = 0^\circ$, 根据式(4)可得

$$Z_i = \frac{8mgH}{\pi d^3} \left(1 + \lambda + \frac{R_i \omega^2}{g} \right) \quad (5)$$

其中

$$6 \tan \theta_z < \lambda < 10 \tan \theta_z$$

式中 λ ——种子的摩擦阻力综合系数

θ_z ——种子自然休止角^[30]

考虑到排种器工作时种子间相互碰撞及机组振动等因素,代入外界条件系数 K_1 (1.6~2.0) 和吸种可靠性系数 K_2 (1.8~2.0), 结合式(5)得到气室内通过单个型孔瞬时最大吸附压强为

$$Z_{i\max} = \frac{8mgHK_1K_2}{\pi d^3} \left(1 + \lambda + \frac{R_i \omega^2}{g} \right) \quad (6)$$

式中 $Z_{i\max}$ ——气室临界负压最大值, Pa

由式(6)可知, 充种区种子吸附于型孔时, 气室临界负压最大值 $Z_{i\max}$ 与排种盘回转角速度 ω 的平方成正比, 与型孔直径的3次方成反比。

结合小白菜种子三轴尺寸, 取种子平均宽度 b 为 1.50 mm, 代入型孔直径公式 $d = (0.64 \sim 0.66)b$, 得到 d 的范围为 0.96~1.00 mm, 为便于型孔加工, 取型孔直径 d 为 1.00 mm。

2.1.4 排种盘型孔分布形式与种子迁移轨迹分析

型孔的分布形式根据播种方式确定, 根据小白菜正负气压组合式精量排种器的结构特点, 每圈型孔绕排种盘中心均布, 如图6所示。

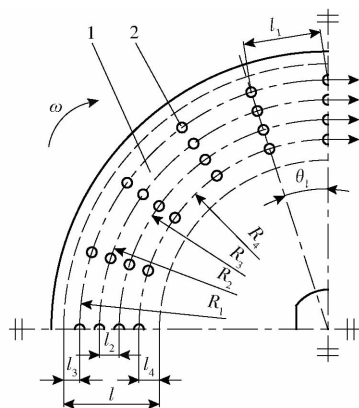


图6 排种盘型孔分布形式

Fig. 6 Distribution of suction holes in metering plate

1. 排种盘 2. 型孔

根据排种盘单型孔分布形式, 得到相邻两行型孔中心距的计算式为

$$\begin{cases} l_1 = \frac{\theta_i \pi R_1}{180} \\ l = 3l_2 + l_3 + l_4 \\ R_i + l_2 = R_{i+1} \\ v_{ki} = \frac{10^{-4}}{3} \pi n R_i \end{cases} \quad (7)$$

式中 l ——气室边界水平投影方向距离, mm

l_1 ——最外行相邻两型孔距的弧长, mm

l_2 ——相邻两行型孔中心距, mm

l_3 ——最内行型孔与气室边界距离, mm

l_4 ——最外行型孔与气室边界距离, mm

v_{ki} ——各行型孔回转线速度, m/s

现有气室边界水平投影方向距离 $l = 36$ mm, 考虑到型孔均匀分布于排种盘, 为满足正负压能完全通过型孔作用于种子, 可取 $l_3 = l_4 \geq l_2/2 > D_z/2$, 其中种子直径 D_z 为 0.99~2.09 mm, 代入式(7)可得 l_2 取值范围为 2.09~9.00 mm。根据式(7)可知, 各行回转线速度关系为 $v_{ki} > v_{ki+1}$, 为缩小各行型孔吸附种子概率的差异, 本研究取相邻两行型孔中心距 l_2 为 5.55 mm。

如图7所示, 播种机以速度 v_m 作业, 排种盘做回转运动的同时随播种机前进, 排种盘上任意一行型孔绕回转中心点 C 旋转。当点 C 运动到点 C' 时, 点 M 的运动方程为

$$\begin{cases} l_{OP} = l_{M'P} \\ \theta = \frac{l_{M'P}}{R_1} = \frac{v_m t}{R_1} \\ x_M = l_{OP} - l_{M'B} = \theta R_1 - R_1 \sin \theta \\ y_M = l_{C'P} - l_{BC'} = R_1 - R_1 \cos \theta \end{cases} \quad (8)$$

式中 (x_M, y_M) ——点 M 的坐标

θ ——各行型孔转角, ($^\circ$)

l_{OP} ——点 O 到点 P 的位移, mm

$l_{M'P}$ ——点 M' 到点 P 的弧长, mm

$l_{C'P}$ ——点 C' 到点 P 的位移, mm

$l_{BC'}$ ——点 B 到点 C' 的位移, mm

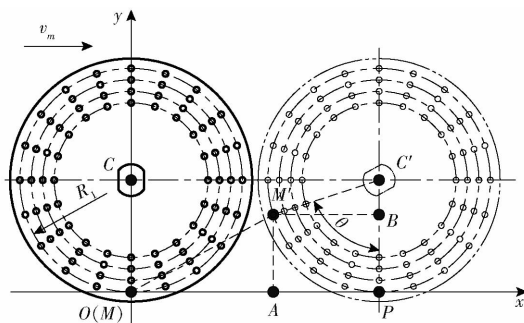


图7 型孔处单粒种子迁移示意图

Fig. 7 Schematic diagram of seed motion in suction hole

式(8)消去 θ 得点 M 的轨迹方程为

$$x_M = R \arccos \left(1 - \frac{y_M}{R} \right) - \sqrt{2Ry_M - y_M^2} \quad (9)$$

根据式(9)可知点 M 的运动轨迹为旋轮线, 基于该线绘制各行型孔的轨迹如图8所示。

2.2 排种口设计与分析

2.2.1 护种腔宽度

排种口是保证小白菜正负气压组合式精量排种

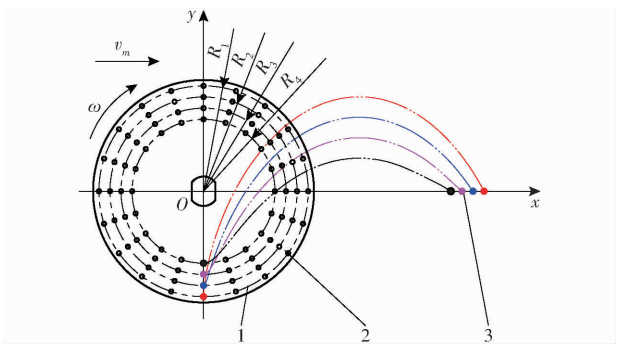


图 8 型孔处种子轨迹示意图

Fig. 8 Schematic diagram of seed trajectory in suction hole

1. 排种盘 2. 型孔 3. 种子

器投种时精准分配有序种子流的关键部件,其结构主要包含护种弧板、分种栅板和出种管,如图 9 所示。

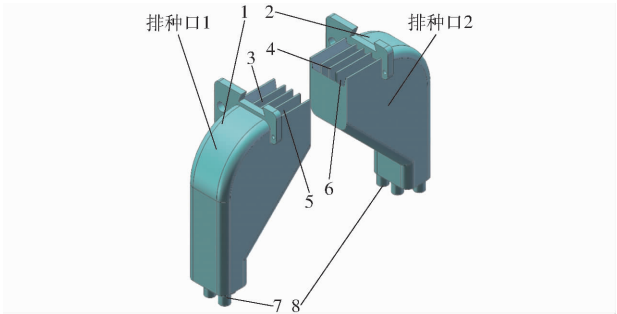


图 9 排种口结构示意图

Fig. 9 Structure diagram of seed outlet

1、2. 护种弧板 3、4. 分种栅板 5、6. 护种腔 7、8. 出种管

排种器工作时,种子随排种盘转动从携种区进入投种区,在正压气流作用下,小白菜种子脱离型孔进入排种口,经由出种管进入导种管。排种口位于种子进入投种区的初始位置,其结构如图 10 所示。

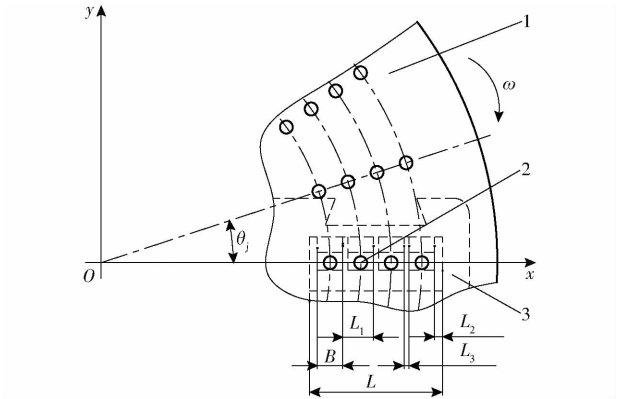


图 10 排种口与排种盘型孔的位置关系

Fig. 10 Relative position of seed outlet and suction hole

1. 排种盘 2. 型孔 3. 排种口

为保证种子顺利分流,护种腔宽度应保证种子顺利通过且不堵塞,根据小白菜种子三轴尺寸及护种腔结构得出护种腔宽度范围为

$$4.5L_0 > B > 1.2W_0 \tag{10}$$

式中 B ——护种腔宽度,mm
 W_0 ——种子平均宽度,mm
 L_0 ——种子平均长度,mm

根据式(10)设计护种腔宽度 B 的范围为 1.8 ~ 7.16 mm。基于排种口结构及排种盘型孔分布形式,排种口护种腔宽度满足关系式

$$\begin{cases} L = 4B + 3L_3 + 2L_2 \\ B + L_3 = L_1 \end{cases} \tag{11}$$

式中 L ——排种口安装宽度,mm
 L_1 ——分种栅板间隔,mm
 L_2 ——护种腔外壁厚度,mm
 L_3 ——分种栅板厚度,mm

根据现有罩壳结构参数,可知排种口安装宽度 $L = 28$ mm。为便于排种口结构优化及降低加工成本,该排种口采用 3D 打印加工而成,材料为工程塑料 ABS,根据材料成型厚度最小值,确定分种栅板厚度 $L_3 = 1$ mm,代入式(11)可得 $L_1 = 6$ mm、 $B = 5$ mm,护种腔宽度 B 满足设计原则。

2.2.2 护种弧板结构

为保证排种器投种作业时种子顺利进入导种管,种子进入投种区后,因投种区气室结构变化,种子受到正压气流作用落入排种口,当种子进入排种口后,其运动轨迹为抛物线^[27],如图 11 所示。

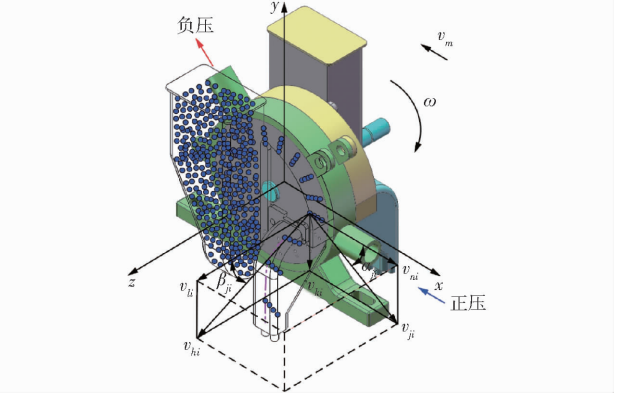


图 11 排种器内种子迁移运动规律

Fig. 11 Schematic of seeds movement law

排种器投种过程从种子随排种盘进入投种区开始,此时种子在正压气流作用下沿气流方向产生一定速度,种子脱离排种盘后仅受重力影响,因此投种阶段种子脱离型孔的速度为

$$\begin{cases} v_{li} = v_{hi} \cos \beta_{ji} \\ v_{ki} = v_{hi} \sin \beta_{ji} \\ v_{ni} = v_{ji} \cos \alpha_{ji} \end{cases} \tag{12}$$

式中 v_{ji} —— v_{ni} 、 v_{ki} 的合速度,m/s
 v_{hi} —— v_{ji} 、 v_{li} 的合速度,m/s
 α_{ji} ——投种区转角,(°)
 β_{ji} —— v_{li} 与 v_{hi} 的夹角,(°)

种子沿投种轨迹曲线的落点为正态分布^[27],结合现有罩壳结构设计护种弧板,护种弧板结构如图 12 所示。

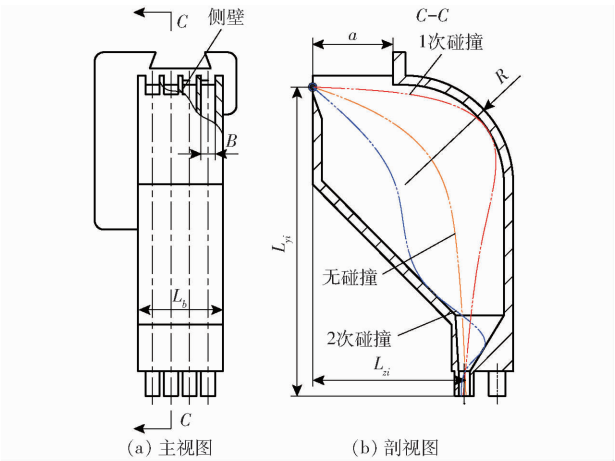


图 12 护种弧板结构示意图

Fig. 12 Structure diagrams of guard board

为减小种子碰撞护种弧板内壁对各行株距的影响,排种口护种弧板应以种子投种轨迹为基准。当 $\alpha_{ji}=0^\circ$ 时,为临界投种位置,假设种子不碰撞排种口内壁离开出种管,则种子脱离型孔到出种管的位移为

$$\begin{cases} L_{xi} = \int_0^t (v_m - v_{ni}) dt \\ L_{yi} = \int_0^t (v_{ki} + gt) dt \\ L_{zi} = \int_0^t v_{li} dt \end{cases} \quad (13)$$

式中 L_{xi} ——各行种子沿 x 方向位移,mm
 L_{yi} ——各行种子沿 y 方向位移,mm
 L_{zi} ——各行种子沿 z 方向位移,mm

为使种子不碰撞排种口侧壁,可令 $v_m = v_{ni}$,则种子离开出种管的分速度为

$$\begin{cases} v_y = v_{ki} + gt_z \\ v_z = v_{li} \end{cases} \quad (14)$$

式中 t_z ——种子脱离型孔到出种管终点的时间,s
 g ——重力加速度, m/s^2

种子离开出种管的总速度为

$$V = \frac{1}{30} \sqrt{\pi^2 n^2 R_i^2 \cot^2 \beta_{ji} + (\pi n R_i + 30 g t_z)^2} \quad (15)$$

由式(13)、(15)可知,理想状态下种子离开出种管的总速度与排种盘转速、各行型孔回转半径及种子脱离型孔到出种管终点的时间成正比,种子碰壁现象越严重,则种子着床株距变异系数越大;种子总速度越大,则种子着床时弹跳越严重。为降低种子着床时的影响,选择排种口圆角半径 R 为35 mm,排种口限位深度 a 为26 mm即可满足要求。

3 仿真试验

3.1 试验设计与方法

利用 DEM - CFD 开展排种器仿真试验,其中 EDEM 的仿真几何模型主要包括:种箱、流体域、罩壳、排种盘、排种口和种子颗粒,几何体中的流体域和颗粒工厂设为虚拟,EDEM 中的仿真模型如图 13 所示。

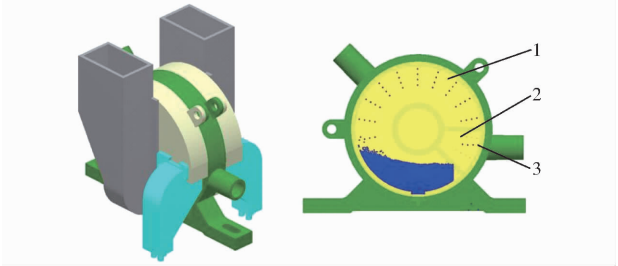


图 13 排种器仿真模型

Fig. 13 Simulation model of metering device in EDEM

1. 排种盘 2. 型孔 3. 种子

EDEM 软件中设置接触模型为 Hertz - Mindlin,仿真环境重力加速度为 $9.81 m/s^2$,颗粒工厂1 s内生成 1×10^5 颗小白菜种子,颗粒总数为 2×10^4 ,种子直径分别为1.44、1.56、1.52 mm,排种盘转速为10~50 r/min,时间步长为 5×10^{-6} s。以排种器实际加工材料为依据,排种盘设定为不锈钢材料,种箱、罩壳、排种口和气室设定为工程塑料 ABS,EDEM 中仿真模型的材料特性参数如表 3 所示。

表 3 材料特性参数

Tab. 3 Material properties in EDEM

项目	参数	数值
种子颗粒	泊松比	0.25
	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	1 050
	剪切模量/Pa	1.1×10^7
不锈钢材料	泊松比	0.30
	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	7 850
	剪切模量/Pa	1.0×10^{10}
ABS 材料	泊松比	0.39
	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$	1 100
	剪切模量/Pa	8.9×10^8
颗粒-颗粒	恢复系数	0.60
	静摩擦因数	0.50
	动摩擦因数	0.01
颗粒-不锈钢	恢复系数	0.60
	静摩擦因数	0.30
	动摩擦因数	0.01
颗粒-ABS	恢复系数	0.75
	静摩擦因数	0.30
	动摩擦因数	0.01

Fluent 软件中采用滑移网格法划分流体域,仅

将型孔结构设置为动区域,其余结构设为静区域。耦合计算需加载流体域 mesh 文件及耦合接口文件,设置分析类型时间为 Transient, Viscous 设置 $k-\epsilon$ 接口,选择湍流模型的 Realizable,时间步长为 5×10^{-4} s,时间步数为 2×10^4 步,迭代次数为 20 次。

综合考虑小白菜种植农艺要求,设置排种盘转速为 10 ~ 50 r/min,负压为 - 5 000 ~ - 1 000 Pa,正压为 100 ~ 300 Pa。转速每间隔 20 r/min 设一个水平,负压每隔 - 2 000 Pa 设一个水平,正压每隔 100 Pa 设一个水平,因素水平如表 4 所示。

表 4 试验因素水平
Tab.4 Test factors and levels

水平	因素			
	转速/(r·min ⁻¹)	负压/Pa	正压/Pa	品种
1	10	- 1 000	100	中箕青 605
2	30	- 3 000	200	春油 1 号
3	50	- 5 000	300	楚农特矮白

根据文献[15]中试验方法,以各行型孔所吸附种子颗粒的合格指数、重播指数和漏播指数为评价指标,利用 EDEM 后处理模块直接获取排种器排种过程中的种子颗粒数量,开展排种器仿真试验。

3.2 试验结果与分析

不同因素对排种性能的影响程度如表 5 所示, A 、 B 、 C 、 D 分别表示转速、负压、正压和小白菜品种水平值,其中负压对合格指数和漏播指数的影响显著。

表 5 仿真试验结果与显著性分析
Tab.5 Results and significance analysis of simulation test

序号	因素				合格指数/%	重播指数/%	漏播指数/%
	A	B	C	D			
1	1	1	1	1	85.36	3.21	11.43
2	1	2	2	2	92.14	3.61	4.25
3	1	3	3	3	88.93	9.28	1.79
4	2	1	2	3	87.86	1.78	10.36
5	2	2	3	1	93.12	3.59	3.29
6	2	3	1	2	89.29	8.21	2.50
7	3	1	3	2	88.71	3.58	7.71
8	3	2	1	3	91.07	7.50	1.43
9	3	3	2	1	89.93	6.79	3.28
F	A				3.04	1.00	1.25
	B				36.85 *	13.49	27.54 *
	C				5.16	2.50	1.19
	D				1.00	1.36	1.00

注: * 表示影响显著 ($P < 0.05$),下同。

表 6 为仿真试验极差分析结果,影响合格指数、

重播指数和漏播指数的主次顺序为负压、正压、转速和品种,以因素水平组合 $A_2B_2C_3D_1$ 为较优选择,即转速为 30 r/min、负压为 - 3 000 Pa、正压为 300 Pa、品种为中箕青 605,对应的各行平均合格指数为 93.12%、平均重播指数为 3.59%、平均漏播指数为 3.29%。

表 6 仿真试验极差分析结果

Tab.6 Result of range analysis in simulation test

评价指标	分析项	A	B	C	D
合格指数	k_1	44.41	43.66	44.29	44.74
	k_2	45.05	46.06	44.99	45.02
	k_3	44.95	44.69	45.13	44.64
	R	0.64	2.40	0.84	0.38
重播指数	k_1	2.68	1.43	3.15	2.27
	k_2	2.26	2.45	2.03	2.57
	k_3	2.98	4.05	2.74	3.09
	R	0.72	2.62	1.12	0.82
漏播指数	k_1	2.91	4.92	2.56	3.00
	k_2	2.69	1.50	2.98	2.41
	k_3	2.07	1.26	2.13	2.26
	R	0.84	3.66	0.85	0.74

3.3 种子运动速度分析

为分析各行种子的运动速度,采用 EDEM 后处理模块选取同一行程同一转角的 8 粒种子,以排种轴为转动中心,排种盘 1 和排种盘 2 分别对应排种口 1 和排种口 2。各行种子进入投种区受正压气流作用脱离排种盘后以自重下落,因种子机械物理特性和速度不同,种子运动轨迹有一定差异。由前述分析可知,同一转速下,排种盘外圈种子速度大于内圈种子速度,但因各行型孔中心距较小,这种速度差异可以忽略。种子脱离排种盘后,因种子三轴尺寸不同,受正压气流作用,部分种子与排种口护种腔内壁碰撞,当种子从出种管排出后达到稳定状态。

为分析各行种子投种过程中从脱离排种盘到出种口的速度,采用 EDEM 后处理模块选取同一行程同一携种转角的 8 粒种子,其速度变化曲线如图 14

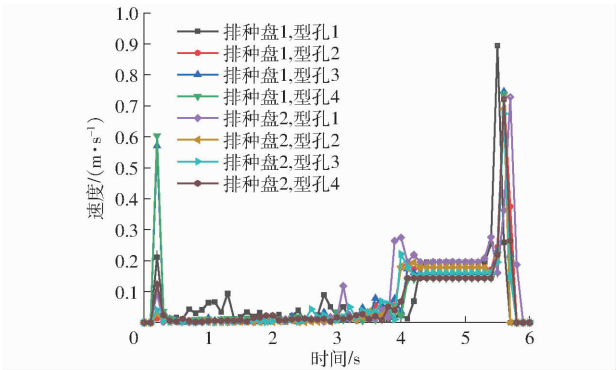


图 14 种子沿垂直方向速度变化曲线

Fig.14 Variation curves of seed velocity in vertical direction

所示。

图 14 为 8 粒种子从生成至排出排种口的速度变化曲线,由图可知种子落入种箱内达到稳定状态之前,种子速度先增大后减小;种盘转动后,受种盘扰动及种间摩擦作用,种子进入小幅波动状态,其中靠近种盘的种子速度比远离种盘的速度大,各行种子速度变化差异小;充种时,种子受负压作用吸附于型孔,不同吸附位置和姿态导致种子速度差异变大,种子的速度增大,直至种子完全固定于型孔并随型孔绕排种轴转动,进入携种区的种子速度稳定不变,外圈种子速度大于内圈种子;种子进入投种区,受正压气流作用,种子速度先增大后减小,达到峰值后减小直至离开排种器,完成排种器排种过程。

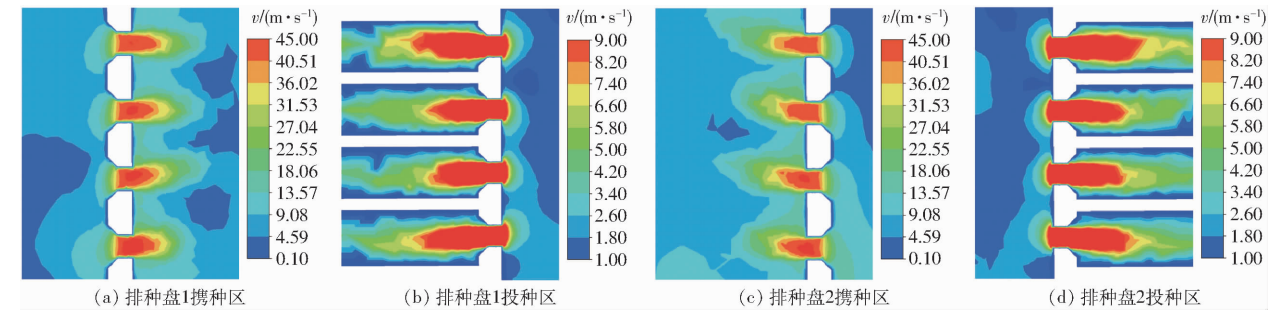


图 15 排种盘型孔内气流速度分布图
Fig. 15 Diagrams of airflow velocity distribution in suction hole

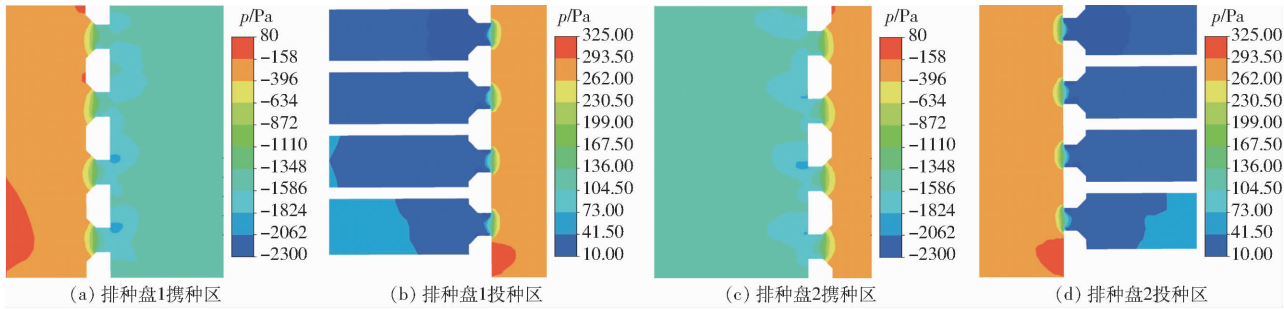


图 16 排种盘型孔内气流压力分布图
Fig. 16 Diagrams of airflow pressure distribution in suction hole

对应型孔的气流速度和压力分布差异较小,确保排种器 8 行排种的总排量一致性。

4 台架试验

4.1 试验设计与方法

为验证小白菜正负压气组合式精量排种器的排种性能,在华中农业大学现代农业装备工程研究中心开展排种性能试验。主要试验装置有:小白菜正负压气组合式精量排种器、12 V 100 W 永磁直流电机、自制电机驱动控制装置、PVC 透明钢丝气力管、JPS-12 型排种器检测试验台、U 型压力计、HG-220 型高压漩涡吹吸风机,试验装置如图 17 所示。

将排种器固定于试验台输送带上部,利用试验

3.4 各行型孔气流速度和压力分布的影响

图 15、16 分别为 2 个排种盘型孔在携种区和投种区内的气流速度和压力分布仿真结果。由图可知垂直对称双圆盘各型孔平均速度和压力差异不大。携种区同一排种盘上各行型孔内气流速度和压力与各行型孔回转半径成正比,从远离负压口的型孔到靠近负压口的型孔内气流为梯度增加;投种区同一排种盘上各行型孔内气流速度和压力与各行型孔回转半径成正比,从远离负压口的型孔到靠近负压口的型孔内气流为梯度增加。由于同一排种盘上的相邻两行型孔的中心距较小,导致相邻两型孔之间的速度和压力变化较小,同时最外圈型孔和最内圈型孔的差异较小,保证了各行排种一致性。双盘各行

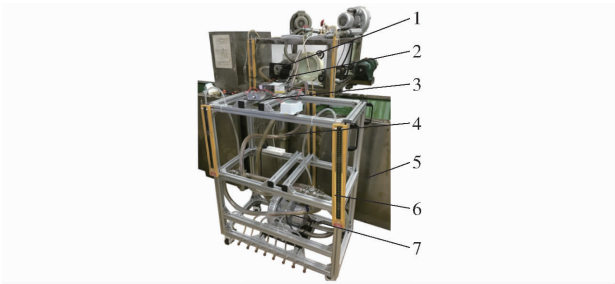


图 17 排种性能试验装置
Fig. 17 Experiment device of seeding performance
1. 排种器 2. 电机 3. 控制装置 4. 气力管 5. 试验台 6. 压力计 7. 风机

台油带缓冲种子下落势能的同时,模拟种子在种床带的分布便于观测种子定位情况。为减少导种管长度对种子着床过程的影响,降低排种器高度。

试验材料品种分别为春油 1 号、中箕青 605 及楚农特矮白;负压设为 $-5\,000\sim-1\,000\text{ Pa}$,每隔 $-2\,000\text{ Pa}$ 设一个水平;正压设为 $100\sim300\text{ Pa}$,每隔 100 Pa 设一个水平。为获取一次行程最大样本量,试验台种床带速度设定为 0.6 m/s ,排种盘转速设定为 30 r/min ,每组试验重复 5 次取平均值。根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,以合格指数、重播指数和漏播指数为评价指标,开展小白菜种子品种优选及排种性能试验。

4.2 试验结果与分析

图 18 为台架试验小白菜种子分布情况,表 7 为台架试验设计结果与显著性分析,结果显示负压对合格指数的影响显著。

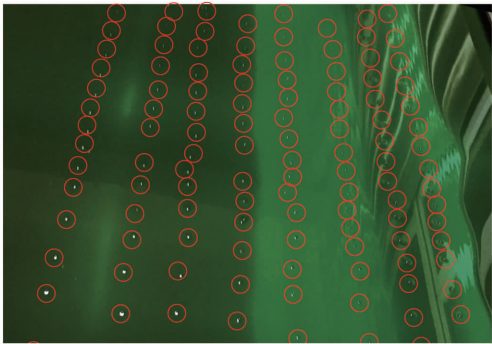


图 18 小白菜种子分布

Fig. 18 Distributions of Pakchoi seeds on oil belt

表 7 台架试验结果与显著性分析

Tab. 7 Results and significance analysis of bench test

序号	因素				合格指数/%	重播指数/%	漏播指数/%
	A	B	C	D			
1	1	1	1	1	86.45	6.35	7.20
2	1	2	2	2	89.78	5.00	5.22
3	1	3	3	3	88.81	8.22	2.97
4	2	1	2	3	87.95	5.21	6.84
5	2	2	3	1	91.32	6.19	2.49
6	2	3	1	2	88.67	8.14	3.19
7	3	1	3	2	87.89	5.02	7.09
8	3	2	1	3	88.39	8.74	2.87
9	3	3	2	1	90.21	6.20	3.59
F	A				1.04	1.00	1.00
	B				6.95	163.63 **	19.04 *
	C				3.30	212.73 **	1.25
	D				1.00	85.55 *	1.04

注: ** 表示影响极显著($P<0.01$)。

表 8 为台架试验极差分析结果,影响合格指数、重播指数和漏播指数的主次因素依次为:负压、正压、转速和品种,与仿真试验一致。综合考虑各评价指标,以因素水平组合 $A_2B_2C_3D_1$ 为较优选择,即转速为 30 r/min 、负压为 $-3\,000\text{ Pa}$ 、正压为 300 Pa 、品种为中箕青 605,对应的各行平均合格指数为

91.32%、平均重播指数为 6.19%、平均漏播指数为 2.49%。

表 8 台架试验极差分析结果

Tab. 8 Result of range analysis in bench test

评价指标	分析项	A	B	C	D
合格指数	k_1	44.17	43.72	43.92	44.66
	k_2	44.66	44.92	44.66	44.39
	k_3	44.42	44.62	44.67	44.19
	R	0.49	1.20	0.75	0.47
重播指数	k_1	3.26	2.76	3.87	3.12
	k_2	3.26	3.32	2.74	3.03
	k_3	3.33	3.76	3.24	3.70
	R	0.07	1.00	1.13	0.67
漏播指数	k_1	2.57	3.52	2.21	2.21
	k_2	2.09	1.76	2.61	2.58
	k_3	2.26	1.63	2.09	2.11
	R	0.48	1.89	0.52	0.47

5 田间试验

为进一步检验台架试验结果,考察小白菜正负气压组合式精量排种器的排种性能,于 2020 年 9 月 9 日在湖北省武汉市农业科学院农业机械化研究所蔬菜机械化展示区示范田开展小白菜田间播种试验,如图 19 所示。



图 19 田间播种试验

Fig. 19 Field seeding experiment

田间试验的配套动力为东风井关 T954 型拖拉机,经预试验确定拖拉机液压手柄挡位与机具作业高度之间的关系,按照台架试验较优因素水平组合调节排种盘转速为 30 r/min 、负压为 $-3\,000\text{ Pa}$ 、正压为 300 Pa 。试验机组确保直线方向前进,作业距离为 30 m ,作业速度为 0.6 m/s 。

试验以中箕青 605 为排种对象,每一行程播种 8 行,行距为 180 mm 。出苗后,根据小白菜田间分布情况,每个行程各行随机测 5 段,每段以 1 m 内长度测定小白菜苗数和株距。田间试验结果表明:小白菜平均苗数为 10 株/m 、株距平均值为 100.48 mm ,各行苗数一致性变异系数为 8.05% ,满足小白菜田间种植要求。

6 结论

(1) 基于小白菜种子的机械物理特性和精量直

播农艺要求,设计了一种小白菜正负气压组合式精量排种器,阐明了排种器的工作过程、原理及主要结构参数,理论分析确定了排种盘和排种口结构参数及其种子迁移轨迹。

(2)应用 EDEM 软件构建了仿真几何模型,利用 DEM-CFD 耦合仿真试验分析了转速、负压和正压对排种性能的影响规律,分析发现负压对评价指标合格指数和漏播指数影响显著,负压为 $-3\ 000\text{ Pa}$ 、正压为 300 Pa 、转速为 30 r/min 、品种为中箕青 605 时,各行平均合格指数为 93.12% 、平均重播指数为

3.59% 、平均漏播指数为 3.29% ,指标均优于行业标准。

(3)台架试验结果表明,负压对评价指标合格指数的影响显著,以较优因素水平组合开展试验后的各行平均合格指数为 91.32% 、平均重播指数为 6.19% 、平均漏播指数为 2.49% 。田间试验结果表明,排种盘转速为 30 r/min 时,小白菜平均苗数为 10 株/m 、株距平均值为 100.48 mm ,各行苗数一致性变异系数为 8.05% ,满足小白菜田间种植要求。

参 考 文 献

- [1] 别之龙.长江流域冬季蔬菜栽培技术[M].上海:金盾出版社,2009.
- [2] 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.
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)
- [3] 戴亿政,罗锡文,张明华,等.气吹集排式水稻旱直播机关键部件设计与试验[J].农业工程学报,2020,36(10):1-8.
DAI Yizheng, LUO Xiwen, ZHANG Minghua, et al. Design and experiments of the key components for centralized pneumatic rice dry direct seeding machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 1-8. (in Chinese)
- [4] JIANG Xinlu, LI Xuyi, CHI Zhongzhi, et al. Research on potted-tray grown rice seedling transplanting by machine[J]. Agricultural Science & Technology, 2014, 15(11): 1923-1927.
- [5] 李玉环,杨丽,张东兴,等.气吸式玉米高速精量排种器直线投种过程分析与试验[J].农业工程学报,2020,36(9):26-35.
LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Analysis and test of linear seeding process of maize high speed precision metering device with air suction[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 26-35. (in Chinese)
- [6] 颜秋艳.气力式一器双行精量排种器气室流场的仿真与试验[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2016,42(5):567-572.
YAN Qiuyan. Simulation and experiment of flow field in the chamber of pneumatic double-row precision metering device[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2016, 42(5): 567-572. (in Chinese)
- [7] KAMGAR S, NOEI-KHODABADI F, SHAFAEI S M. Design, development and field assessment of a controlled seed metering unit to be used in grain drills for direct seeding of wheat[J]. Information Processing in Agriculture, 2015, 2(3): 169-176.
- [8] 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].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 75-86, 139. (in Chinese)
- [9] YATSKUL A, LEMIERE J P, COINTAULT F. Influence of the divider head functioning conditions and geometry on the seed's distribution accuracy of the air-seeder[J]. Biosystems Engineering, 2017, 161(9): 120-134.
- [10] YATSKUL A, LEMIERE J P. Establishing the conveying parameters required for the air-seeders[J]. Biosystems Engineering, 2018, 166(2): 1-12.
- [11] KUMAR V F, DURAIRAJ C D. Influence of head geometry on the distributive performance of air-assisted seed drills[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2000, 75(1): 81-95.
- [12] ANANTACHAR M, PRASANNA K V, GURUSWAMY T. Development of artificial neural network models for the performance prediction of an inclined plate seed metering device[J]. Applied Soft Computing Journal, 2011, 11(4): 3753-3763.
- [13] GAIKWAD B B, SIROHI N S. Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays[J]. Biosystems Engineering, 2008, 99(3): 322-329.
- [14] 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, 56: 128-135.
- [15] 李兆东,杨文超,张甜,等.油菜高速精量排种器槽齿组式吸种盘设计与吸附性能试验[J].农业工程学报,2019,35(1):12-22.
LI Zhaodong, YANG Wenchao, ZHANG Tian, et al. Design and suction performance test of sucking-seed plate combined with groove-tooth structure on high speed precision metering device of rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(1): 12-22. (in Chinese)
- [16] 崔涛,韩丹丹,殷小伟,等.内充气吹式玉米精量排种器设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(1):8-16.
CUI Tao, HAN Dandan, YIN Xiaowei, et al. Design and experiment of inside-filling air-blowing maize precision seed metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 8-16. (in Chinese)
- [17] 李玉环,杨丽,张东兴,等.豆类作物一器双行气吸式高速精量排种器设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(7):61-73.

- LI Yuhuan, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of pneumatic precision seed-metering device with single seed-metering plate for double-row[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 61 – 73. (in Chinese)
- [18] 尹文庆, 赵璐, 李骅, 等. 气力槽轮组合式蔬菜精密排种器吸嘴型孔设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 68 – 76, 136.
- YIN Wenqing, ZHAO Lu, LI Hua, et al. Design and experiment on suction nozzle type hole of pneumatic-sheave combined vegetable precision metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 68 – 76, 136. (in Chinese)
- [19] WANG Baolong, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and field evaluation of hill-drop pneumatic central cylinder direct-seeding machine for hybrid rice[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(6): 33 – 40.
- [20] 廖宜涛, 郑娟, 廖庆喜, 等. 正负气压组合管针式西洋参集排器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 46 – 57.
- LIAO Yitao, ZHENG Juan, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of positive and negative pressure combined tube-needle centralized seeding device for American ginseng[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 46 – 57. (in Chinese)
- [21] 戴亿政, 罗锡文, 王在满, 等. 气力集排式水稻分种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 36 – 42.
- DAI Yizheng, LUO Xiwen, WANG Zaiman, et al. Design and experiment of rice pneumatic centralized seed distributor[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(24): 36 – 42. (in Chinese)
- [22] 杨文彩, 阚成龙, 张效伟, 等. 气吸式三七育苗播种精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 95 – 105.
- YANG Wencai, KAN Chenglong, ZHANG Xiaowei, et al. Design and test of precision seed metering device for *Panax notoginseng* seedling and seeding by air suction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 95 – 105. (in Chinese)
- [23] 衣淑娟, 陈涛, 李衣菲, 等. 正负气压-型孔轮组合式谷子穴播排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 83 – 94.
- YI Shujuan, CHEN Tao, LI Yifei, et al. Design and test of millet hill-drop seed-metering device with combination of positive-negative pressure and hole wheel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 83 – 94. (in Chinese)
- [24] WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Optimization design and experiment on ripple surface type pickup finger of precision maize seed metering device[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(1): 61 – 71.
- [25] WANG Lei, LIAO Yitao, LIAO Qingxi. Design and experiment of remote control precision planter for Pakchoi vegetable[J]. International Journal of Robotics & Automation, 2018, 33(2): 208 – 214.
- [26] 刘云强, 刘立晶, 赵郑斌, 等. 蔬菜育苗播种机清种装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊): 83 – 91.
- LIU Yunqiang, LIU Lijing, ZHAO Zhengbin, et al. Design and experiment on plant seedling device for vegetable seedling seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 83 – 91. (in Chinese)
- [27] LI Xu, LIAO Qingxi, YU Jiajia, et al. Dynamic analysis and simulation on sucking process of pneumatic precision metering device for rapeseed[J]. Journal of Food, Agriculture and Environment, 2012, 10(1): 450 – 454.
- [28] 李旭. 气力式油菜精量排种器工作机理与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
- LI Xu. Experimental study & working mechanism of pneumatic precision metering device for rapeseed[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [29] 崔红光, 张本华. 理论力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017.
- [30] 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.