

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.10.006

封顶浩, 孙新平, 齐新丹, 等. 一器三行小青菜精量排种器设计与优化[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(10): 39-47

Feng Dinghao, Sun Xinping, Qi Xindan, et al. Design and optimization of a three-row precision seed-metering device for Bok Choy [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(10): 39-47

一器三行小青菜精量排种器设计与优化*

封顶浩^{1, 2}, 孙新平^{1, 2}, 齐新丹¹, 李骅^{2, 3}, 张笑语⁴, 王永健^{2, 3}

- (1. 南京工业大学机械与动力工程学院, 南京市, 211816; 2. 南京农业大学江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京市, 210031; 3. 南京农业大学工学院, 南京市, 210031; 4. 徐州市交通规划设计研究院, 徐州市, 221000)

摘要:为改善我国传统的单行和双行播种模式所面临的播种效率低下的问题,以“上海矮箕”小青菜种子为研究对象,设计一种新型的一器三行精量排种器,并对排种器的工作原理进行分析。通过相关数学理论计算出所设计排种器关键部件的相关参数。利用FLUENT软件对排种器内部气流场进行分析,确定最佳的吸孔数目。将负压、排种盘角速度以及吸孔锥角作为试验因素,以排种器进行排种时的合格率以及漏播率作为性能指标,开展CCD二次旋转正交组合试验。当负压为-2.16 kPa,排种盘角速度为29.43 r/min,吸孔锥角为61.51°时,内圈合格率为95.12%,漏播率为3.67%,中圈合格率为94.68%,漏播率为3.12%,外圈合格率为94.24%,漏播率为2.58%。进行台架试验和田间试验验证所得最佳组合参数的合理性。

关键词:小青菜;一器三行精量排种器;气流场;台架试验;田间试验

中图分类号:S223.2+3 文献标识码:A 文章编号:2095-5553(2024)10-0039-09

Design and optimization of a three-row precision seed-metering device for Bok Choy

Feng Dinghao^{1, 2}, Sun Xinping^{1, 2}, Qi Xindan¹, Li Hua^{2, 3}, Zhang Xiaoyu⁴, Wang Yongjian^{2, 3}

- (1. College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, 211816, China; 2. Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment in Jiangsu Province, Nanjing Agricultural University, Nanjing, 210031, China; 3. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing, 210031, China; 4. Xuzhou Institute of Transportation Planning and Design, Xuzhou, 221000, China)

Abstract: In order to improve the low sowing efficiency of the traditional single-row and double-row sowing patterns in China, this paper designed a novel three-row precision seed-metering device with the “Shanghai Aiji” Bok Choy seeds as the research object, and analyzed the working principle of the seed-metering device. The relevant parameters of the key components of the designed seed-metering device were calculated using relevant mathematical theory. The internal airflow field of the seed-metering device was analyzed using FLUENT software and the optimum number of suction holes was determined. The negative pressure, the angular speed of the seeding plate and the cone angle of the suction hole were used as experiment factors, and the performance indicators of the seed-metering device were the qualified rate and missed seeding rate when seeding. When the negative pressure was -2.16 kPa, the angular speed of the seeding plate was 29.43 r/min and the cone angle of the suction hole was 61.51°, the qualified rate of the inner ring was 95.12% and the missed seeding rate was 3.67%, the qualified rate of the middle ring was 94.68% and the missed seeding rate was 3.12%, and the qualified rate of the outer ring was 94.24% and the missed seeding rate was 2.58%. Finally, bench and field experiments were conducted to verify the reasonableness of the best combination of parameters obtained.

Keywords: Bok Choy; three-row precision seed-metering device; airflow field; bench experiments; field experiments

收稿日期:2023年6月5日 修回日期:2023年9月5日

* 基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0701300)

第一作者:封顶浩,男,1998年生,江苏盐城人,硕士研究生;研究方向为智能种收装备。E-mail: dinghaofeng@njtech.edu.cn

通讯作者:齐新丹,女,1971年生,山东德州人,硕士,副教授;研究方向为精准种植及智能种收装备。E-mail: xindanqi@njtech.edu.cn

0 引言

小青菜(Bok Choy),也被称为中国白菜,具有易于种植、高营养、味道优美、抗病性较强以及高产量等优点,已成为亚洲流行的低廉蔬菜。小青菜种子属于小粒径种子,其平均直径一般为1.67 mm,平均生长周期在80天左右,生长周期较短,种植方式主要采取传统人工撒播,无法形成机械化作业。我国蔬菜种植面积广、产量高,但整体机械化水平仅为种植粮食作物的20%^[1]。

机械化精量播种根据小青菜种子的农艺要求能够保证其在土壤里的深度和合理的株距及行距,提高小青菜的单产量,降低了劳动力使用度和生产成本。目前的排种设备根据工作原理大致分为机械式和气动式两种。前者包括指夹式、槽轮式、窝眼轮式等,后者有气吸式、气吹式、气压式三种,它们各自具有不同的特点,可以满足不同的应用播种需求^[2]。欧美地区的发达国家从20世纪中期以来,一直致力于播种机的研究^[3]。Mohammed^[4]建立气力排种器模型,分析了转速与负压对播种机播种效果的交互作用,运用田间试验验证此排种器性能完全满足播种需求。Anantachar等^[5]利用神经网络对盘式排种器关键参数进行观测,结果显示,此模型相对统计模型能够更好地对排种器性能进行参数预设。Singh等^[6]设计了一种棉花排种器,通过优化排种盘的运行速度、真空压力和吸孔的入口形状来实现间距的精确。

我国于20世纪70年代末陆续开始研究气力式的播种机,大量学者对研发气力式播种机提供了较大贡献。李明等^[7]以合格率、漏播率和重播率等作为评价指标,对关键影响因素开展了单因素以及正交试验,最后确定了播种机的最佳参数组合。陈学庚等^[8]通过研究并设计带式导种装置,得出了带式导种装置相关的结构参数。确定相关性能指标,并对影响排种器性能参数的因素进行探究,同时确定了最优的工作组合参数。雷小龙等^[9]以油菜和小麦为研究对象,研制了一款油麦气送式集排器,同时对给机构自身进行理论研究,并基于CFD-DEM双向耦合探究工作参数及关键因素对排种质量的影响。张明华等^[10]以蔬菜为研究对象,提出一种基于扰种条辅助充种的蔬菜气吸轮式精量排种器,设计了一种带有坡度的扰种条结构。选取菜心、萝卜和辣椒种子为试验对象,利用台架试验获得扰种条倾角和厚度的较优值。李玉道等^[11]以棉花种子为研究对象以离散元法为基础,运用EDEM软件对气吸式排种器的排种过程进行仿真,并对仿真数据进行分析,得出最优的播种方案来

指导生产。李博竑^[12]以小青菜种子为研究对象,设计出一款一器双行气吸排种器,并对其运动过程进行了仿真,分析了种子在运动过程中的运动情况。白明超^[13]以胡萝卜种子为研究对象,设计了一种气嘴式气吸排种器,并利用CFD-DEM耦合仿真研究了种子的运动规律。

当前播种“小粒径种子”的排种器单体主要是一器一行,利用率和播种效率较低,为进一步提高小青菜精量排种器的排种性能,本文基于小青菜种子的物理特性设计一种一器三行小青菜精量排种器,研究吸孔数目和结构对流场的影响,探索最适合小青菜种子的吸孔参数。通过自行搭建的排种器试验台进行试验验证参数范围的合理性。

1 排种器总体结构和工作原理

一器三行小青菜精量排种器主要由前壳、后壳、排种盘、导种管、种箱、上清种机构、下清种机构、种盘等组成,如图1所示。排种器的运行过程分为六个区:充种区、清种区、携种区、投种区、正压清堵区、空闲区。

排种盘是排种器的关键部件。外力传递给传动轴,带动排种盘逆时针方向旋转,上清种器一端固定在前壳定位孔内,另一端限位活动,清种力度通过调节滑块和转动件的角度来控制,相对较低的清种装置固定在前壳的直槽内。种子通过重力、离心力、气流和种子搅拌轮的扰动从种群中分离出来。风机产生的真空压力将种子吸附在吸孔上,种子随排种盘同步运动至清种区,最后进入导种管进行三行窄距播种作业。

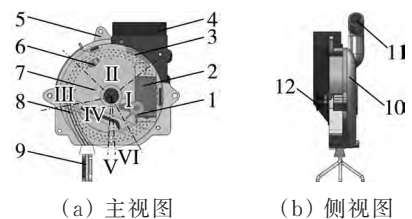


图1 一器三行小青菜精量排种器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of a three-row pneumatic precision seed-metering device

1. 搅种轮 2. 挡板 3. 上清种机构 4. 种箱 5. 前壳 6. 下清种机构
7. 排种盘 8. 导流槽 9. 导种管 10. 后壳 11. 负压出口 12. 链轮

2 排种器关键部件参数设计

2.1 吸孔锥角的分析

小青菜种子的三轴尺寸很小,用游标卡尺多次测量了三轴尺寸的范围,参数如表1所示。根据式(1)计算出种子的平均等效直径约为1.67 mm^[14],适用于窄行、窄距、密植模式。

$$D_s = \sqrt[3]{LWT} \quad (1)$$

式中： D_s ——种子的平均等效直径，mm；
 L ——种子的长度，mm；
 W ——种子的宽度，mm；
 T ——种子的厚度，mm。

$$d = (0.64 \sim 0.66)W \quad (2)$$

式中： d ——吸孔直径，mm。

$$d + 2 \tan \frac{\theta_1}{2} \geq W_{\max} \quad (3)$$

式中： θ_1 ——吸孔锥角，(°)；

W_{\max} ——最大种子宽度，mm。

表 1 小青菜种子的三轴尺寸

Tab. 1 Triaxial size of Bok Choy seeds

| 参数 | 范围/mm | 平均值/mm | 标准差 |
|--------|-----------|--------|------|
| 长度 L | 1.37~2.08 | 1.77 | 0.15 |
| 宽度 W | 1.33~1.91 | 1.68 | 0.13 |
| 厚度 T | 1.32~1.98 | 1.66 | 0.16 |

根据预试验可知，吸孔的最佳形状为锥形孔，其结构如图 2 所示。根据式(2)可得吸孔的直径范围为 1.07~1.1 mm。较大的锥角需要较大的真空压力，而这又容易造成漏种的问题。因此，根据式(3)可得吸孔锥角要大于 34°。

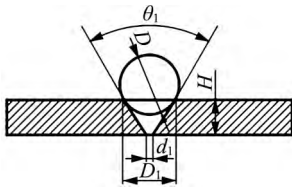


图 2 吸孔的结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the structure of the suction hole

注： D_1 是吸孔的入口直径； H 是排种盘的厚度； d_1 是吸孔的出口直径； D 是平均种子直径。

2.2 吸孔数目范围与排种盘直径的确定

根据农业机械设计手册可知排种盘的直径应在 80~240 mm 之间，吸孔中心线速度 V_c 不大于 0.35 m/s^[15]。吸孔中心线速度与直径之间的关系如式(4)所示。

$$V_c = \frac{n\pi}{30} \left(\frac{D}{2} - d_c \right) \quad (4)$$

式中： V_c ——吸孔中心绕排种盘的线速度，m/s；

D ——排种盘直径，mm；

d_c ——吸孔中心至排种盘边缘的直线距离，m；

n ——排种盘转速，r/min。

d_c 大小参考文献[12]可知为 13~25 mm，因此排种盘转速 $n \leq 39.34$ r/min。排种器的整体结构尺寸受排种盘直径大小以及吸孔结构的影响，直径的大小决定了内、中和外圈吸孔所在圆的直径、三圈吸孔的中心线速度以及吸孔数目。

$$Z = \frac{60V_m}{nl} \quad (5)$$

式中： Z ——吸孔数目；

V_m ——播种机前进速度，m/s；

l ——小青菜种子株距，mm。

本文研制的一器三行小青菜精密排种器为高速播种，因此配备的播种机前进速度应大于 6 km/h 且小于 18 km/h。小青菜的株距要求为 4~5 cm，由式(5)计算出排种盘上的吸孔数目范围为 50~150。考虑到排种盘上相邻吸孔之间的距离 S 不能过近，因此进一步确定吸孔范围为 50~100，即两个吸孔之间的角度为 3.6°~7.2°，具体设定的吸孔数由 2.5 节流体仿真分析可确定。排种盘直径与吸孔数与吸孔相邻的距离相关，如式(6)所示。

$$\begin{cases} D = \frac{ZS}{\pi} + 2d_c \\ S > d + 2.5L_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中： S ——相邻吸孔之间的距离，mm；

L_{\max} ——小青菜种子的最大长度，mm。

根据式(6)计算出排种盘上相邻吸孔之间的距离 S 应大于 6.3 mm，并且排种盘的直径范围应为 200~226 mm，故本研究将设计的一器三行排种盘直径选定为 220 mm。

2.3 三圈吸孔分布圆直径的确定

内、中和外圈吸孔间距直接影响排种器吸种、携种过程的稳定性，间距过大种群基本难以覆盖内圈和中圈吸孔，吸孔不易吸附种子，排种器播种性能较差；间距过小时相邻种子容易发生碰撞，吸孔中吸附的种子容易脱落，排种器漏播率大^[16]。内、中和外圈吸孔间距如图 3 所示。

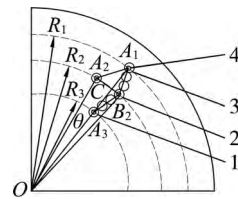


图 3 内、中和外圈吸孔间距图

Fig. 3 Suction hole spacing diagram of Inner, middle and outer circle

1. 内圈吸孔 2. 中圈吸孔 3. 外圈吸孔 4. 外圈吸孔种子

注： A_1 是外圈吸孔中心； A_2 是中圈吸孔中心； B_2 是中圈吸孔相邻中心； A_3 是内圈吸孔中心； C 是 A_2 、 B_2 连线中点，位于弦上。

通过对图 3 各点位置分析，可得式(7)、式(8)。

$$L_{B_2C} = R_2 \sin \frac{\theta}{2} \quad (7)$$

$$\begin{cases} L_{A_1C}^2 + L_{B_2C}^2 = L_{A_1B_2}^2 \\ L_{A_1B_2} > 2D_s + \frac{1}{2}d \\ L_{A_2B_2} > 2.5L_{\max} + d \\ L_{A_1C} > R_1 - R_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中： θ ——相邻吸孔之间的角度，即 $\angle A_2OB_2$ ，(°)；

R_1 ——外圈吸孔分布圆半径，mm；

R_2 ——中圈吸孔分布圆半径，mm；

R_3 ——内圈吸孔分布圆半径，mm。

由上可知，相邻吸孔之间的距离应大于6.3 mm，相邻吸孔角度为 $3.6^\circ \sim 7.2^\circ$ ，结合式(7)得出 R_2 数值范围为50~100 mm，考虑到要充分利用三排吸孔间的距离，最终确定中圈吸孔所在的分布圆直径 R_2 为92 mm。

为保证各圈型孔工作时互不干涉，中外圈型孔间距的理论值较实际值应略大，上文中 $L_{A,C}$ 略大于中外圈型孔间距，且为了便于计算，本文以 $L_{A,C}$ 表示中外圈型孔间距。通过对式(8)进行归纳总结得出中外圈相邻吸孔间距 $L_{A,C}$

$$L_{A,C} = \sqrt{(2D_s + \frac{1}{2}d)^2 - (R_2 \sin \frac{\theta}{2})^2} \quad (9)$$

将上述已知参数代入可以得到，中外圈型孔间距应大于2.32 mm。结合预试验确定三圈吸孔间距为5~7 mm，则外圈吸孔分布圆半径 R_1 为97 mm，内圈分布圆半径 R_3 为85 mm。内中圈吸孔间距较中外圈大一些，主要是因为内圈吸孔不易吸附种子，间距大些可以增大内中圈之间的种子流便于吸孔吸附种子。

2.4 导种管结构设计

导种管需要保证内中外圈的种子从外圈掉落的种子进入外部分种管，从中圈掉落的种子进入中部分种管，从内圈掉落的种子进入内部分种管，从而形成三行分流落种。导种管结构如图4所示。

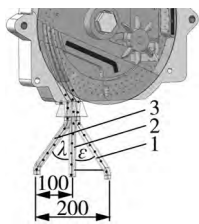


图4 导种管结构图

Fig. 4 Seed tube structure diagram

1.后部分种管 2.中部分种管 3.前部分种管

小青菜种子的农艺要求行距为100~130 mm，本文设计的导种管每相邻两侧之间的距离分别为100 mm来进行窄行、窄距播种。由于种子极小，容易在导种管里发生阻塞。对种子的投种阶段进行分析，并以此为依据确定导种管的关键结构参数。小青菜种子的静摩擦角为 $28^\circ \sim 40^\circ$ ，为了保证种子不在导种管里发生堵塞并且能以较为均匀的速度通过导种管完成投种，且结合预试验可知前中部分种管与后中部分种管之间的夹角应满足式(10)。

$$\begin{cases} 100^\circ \leq \lambda + \epsilon \leq 150^\circ \\ \lambda = \epsilon \end{cases} \quad (10)$$

式中： λ ——前部分种管与中部分种管的夹角，(°)；

ϵ ——后部分种管与中部分种管的夹角，(°)。

由式(10)以及结合种子在导种管里的流动预试验可知， λ 角取 60° 时流动性最好。

2.5 吸孔数目的确定

气吸式排种器进行工作时，排种器内部的气流场会受排种盘上的吸孔数目增加的影响，同时会导致吸孔吸种面的气流负压与速度降低，需采用较大功率的风机；吸孔的数量减少时，对风机功率要求低，但播种效率降低。因此有必要对所排种盘上的吸孔数目进行仿真研究。本节对吸孔数目为60、75和90的种盘进行仿真分析，所对应的相邻吸孔之间的加工角度分别为 6° 、 4.8° 和 4° ，排种器上的吸孔编号如图5所示。

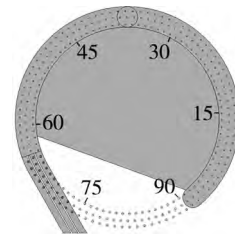
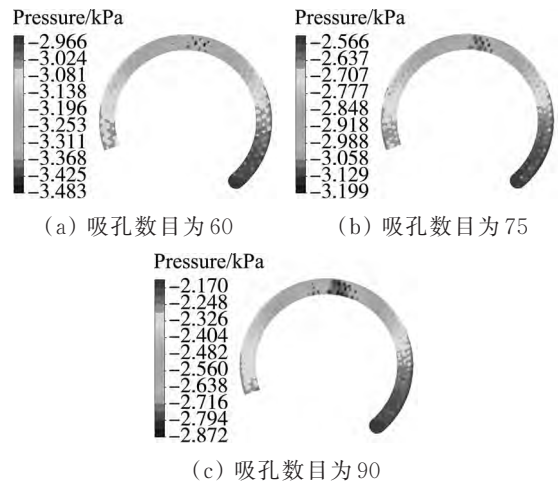


图5 吸孔位置编号

Fig. 5 Suction hole position number

设定负压为-4 kPa、转速为20 r/min进行仿真，通过ANSYS软件中的CFD-Post后处理导出分别是60、75和90个吸孔时负压气室整体压力云图进行分析，仿真结果如图5所示。



(a) 吸孔数目为60

(b) 吸孔数目为75

(c) 吸孔数目为90

图6 不同吸孔数目时负压气室整体压力云图

Fig. 6 Overall pressure cloud diagram of the negative pressure chamber at different numbers of suction holes

从图6可以看出，3种不同吸孔数的负压气室整体压力云图在整体上有着相同的分布规律，即从中间往两边递减。吸孔编号35~38范围处为负压出口，靠近负压软管，因此负压最大。当吸孔数为90时，四个时间下压力场分布不均匀，上下压差大；当吸孔数为75时，上下压差相对吸孔数为90时较小，压力场分布

也相比均匀一些；当吸孔数为 60 时，压力场分布相比前两个吸孔数的较为均匀，上下压差也较小。因此可以推断出减少一定的吸孔数目可以有效的减少流场扰动，增加流场稳定性。

设置出口压力 -4 kPa、转速 20 r/min 对不同吸孔数进行流场仿真，得到不同吸孔数的外圈压力和速度分布云图如图 7 和图 8 所示。

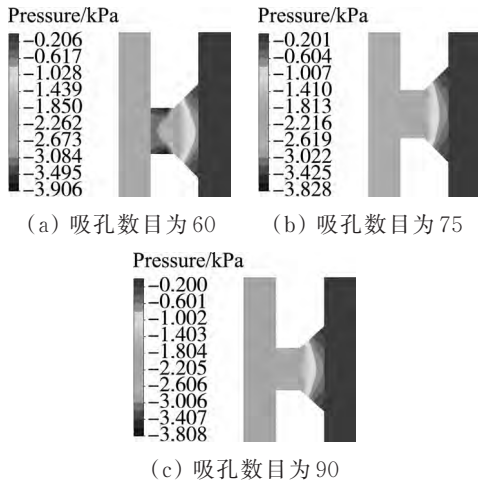


图 7 不同吸孔数目的压力分布轴向云图

Fig. 7 Axial cloud diagram of pressure distribution with different number of suction holes

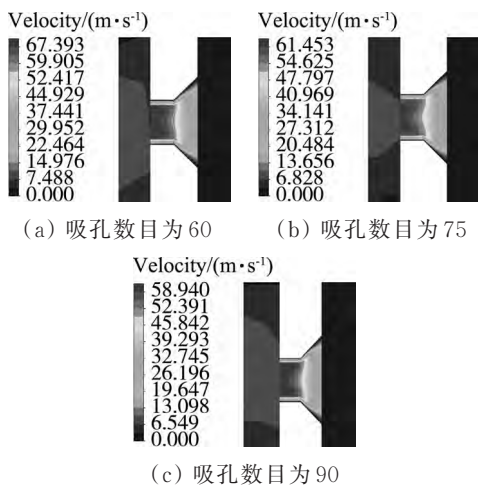


图 8 不同吸孔数目的速度分布轴向云图

Fig. 8 Axial cloud diagram of velocity distribution with different number of suction holes

从图 7 和图 8 可以看出，不同吸孔数的压力和速度云图在整体上分布相似，压力沿着吸孔轴线方向呈环状型，且离负压气室越远，压力分布越小，与气室相连的位置压力最大；速度分布在吸孔吸嘴部分分布较为均匀，越靠近负压气室，速度越大，吸孔数目增加只是改变了速度大小，对速度分布云图并未有明显的改变。从三种不同吸孔数的压力和速度分布云图可以得知，吸孔数越多，吸孔压力损耗越大，速度越小，其中吸孔内壁压力最大、速度最小。

综合分析不同吸孔数对流场的负压与速度的影响可知，相同条件下，排种盘上的吸孔数越少吸孔压力和速度就越大，对风机要求低；吸孔数越多，可以提高排种效率，但吸孔压力和速度就越大，对风机要求很高。因此，本文结合吸孔压力和气流速度分析，将单圈吸孔数设定为 60，总吸孔数为 180。

3 台架试验

3.1 试验方案

选用的试验材料为“上海矮箕”的种子。1 000 粒种子重量为 2.52 g，休止角为 24.1°，平均含水量为 5.67%，密度为 0.918 g/cm³。考虑到成本和现场因素，本研究采用台架试验代替现场试验。利用自行搭建的试验台，研究了一器三行气动精量排种器对小青菜的播种性能。测试设备主要由排种器、输送带、变频电机、真空管、正压管、U 型压力计、输送带变频器、风压检测系统、风机和风机变频器等组成。排种器和传送带之间的相对运动被用来模拟播种机在田间的运动。通过调节变频器来改变传送带的速度，以模拟播种机的不同田间驱动状态^[17]，如图 9 所示。

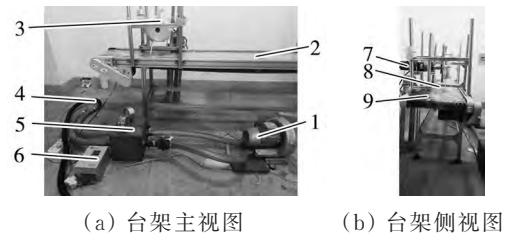


图 9 台架试验

Fig. 9 Bench experiment

- 1. 风机 2. 输送带 3. 排种器 4. 负压软管 5. 风压检测系统
- 6. 输送带变频器 7. 变频电机 8. 导种管 9. 糯米胶

研制的一器三行气动精量排种器可实现高速、窄排、窄距离播种。根据种植小白菜的农艺要求，行距约为 100 mm，种子间距约为 40~50 mm。考虑到先前试验的分析，选择负压、排种盘的角速度和吸孔的锥角作为试验因素^[18]。适当的负压确保了种子被稳定地吸附在吸孔中，并减少了一个孔中出现多个种子的概率。排种器使用具有三行孔的单个排种盘，这需要比单行和双行孔相对高的负压。根据理论分析，吸附一个种子所需的临界最小负压计算为 -342.41 Pa。考虑到压力损失，负压范围确定为 -3.5~-0.5 kPa。根据预试验发现，当角速度超过 40 r/min 时，漏播现象严重。当角速度小于 10 r/min 时，由于种子的流动性差，种子很难被吸附在吸孔中。为了确定最佳角速度，从预试验中选择了 10~40 r/min 的角速度。

通过理论计算，吸孔锥角大于 34°。吸孔锥角是影响吸附效果的主要因素。结合预试验，锥角的可调范

围选择为 $45^{\circ}\sim 75^{\circ}$ 。对三个不同锥角的排种盘进行了加工,研究了上述三个因素对排种能力的影响,并确定了最佳参数。使用 Box—Behnken 设计进行了试验,试验水平如表 2 所示。

表 2 试验水平表

Tab. 2 Table of experimental levels

| 水平 | 因素 | | |
|----|--------|-------------------------------|----------|
| | 负压/kPa | 排种盘角速度/(r·min ⁻¹) | 吸孔锥角/(°) |
| -1 | 0.5 | 10 | 45 |
| 0 | 2 | 25 | 60 |
| 1 | 3.5 | 40 | 75 |

在每组数据下重复测量装置的性能三次,并将平均值用作试验结果。根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,选择漏播率和合格率作为评

表 3 试验结果

Tab. 3 Experimental results

| 编号 | 试验因素 | | | 试验指标 | | | | | |
|----|----------------|----------------|----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | X ₁ | X ₂ | X ₃ | Y ₁ /% | Y ₂ /% | Y ₃ /% | Y ₄ /% | Y ₅ /% | Y ₆ /% |
| 1 | -1 | -1 | 0 | 82.88 | 13.21 | 84.02 | 13.12 | 83.33 | 13.31 |
| 2 | 1 | -1 | 0 | 83.21 | 4.86 | 90.56 | 4.13 | 89.98 | 3.96 |
| 3 | -1 | 1 | 0 | 83.56 | 5.56 | 86.32 | 2.84 | 86.68 | 2.68 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 86.65 | 2.26 | 83.37 | 3.36 | 82.84 | 3.42 |
| 5 | -1 | 0 | -1 | 85.12 | 3.56 | 98.64 | 0.37 | 98.43 | 0.41 |
| 6 | 1 | 0 | -1 | 82.45 | 2.68 | 85.46 | 4.33 | 87.41 | 4.56 |
| 7 | -1 | 0 | 1 | 83.45 | 12.89 | 98.13 | 0.82 | 98.11 | 0.75 |
| 8 | 1 | 0 | 1 | 90.32 | 4.24 | 98.73 | 0.94 | 98.25 | 1.03 |
| 9 | 0 | -1 | -1 | 92.85 | 4.98 | 83.32 | 5.68 | 83.45 | 5.43 |
| 10 | 0 | 1 | -1 | 91.21 | 2.12 | 97.96 | 0.35 | 98.14 | 0.29 |
| 11 | 0 | -1 | 1 | 89.12 | 10.12 | 92.56 | 5.11 | 93.01 | 5.36 |
| 12 | 0 | 1 | 1 | 96.12 | 3.12 | 84.12 | 3.89 | 84.33 | 3.95 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 98.25 | 0.46 | 82.56 | 12.65 | 82.69 | 12.35 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 98.46 | 0.82 | 88.91 | 12.43 | 89.46 | 12.37 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 97.38 | 1.2 | 95.82 | 3.53 | 96.38 | 3.61 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 98.25 | 0.24 | 90.68 | 2.63 | 91.46 | 2.57 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 98.12 | 0.21 | 97.45 | 0.51 | 96.69 | 0.48 |

注: Y₁为内圈合格率; Y₂为内圈漏播率; Y₃为中圈合格率; Y₄是中圈漏播率; Y₅为外圈合格率; Y₆是外圈漏播率。

根据表 4 可知,回归模型非常显著,因为内圈合格率模型的 p 值小于 0.01。此外,回归项 X₁、X₂、X₃、X₁X₃、X₂X₃、X₁²、X₂²和 X₃²的 p 值都小于 0.05,具有显著影响。由于不匹配项中的 p 大于 0.05,回归方程具有很好的拟合效果,表明不存在其他因素会影响合格率模型。模型中 X₁X₂项的 p 值为 0.114 8,表明该项对内圈合格率没有显著影响。R²值为 0.990 7,表明该模型与数据拟合良好。去除不重要因素后获得的内圈合格率的回归模型如式(13)所示。可以看出,影响内圈合格率的因素顺序为 X₂>X₁>X₃。从表 4 可以看出,回归模型对内

价指标^[19],计算如式(11)、式(12)所示。

$$M = \frac{N_1}{N} \times 100\% \quad (11)$$

$$Q = \frac{N_2}{N} \times 100\% \quad (12)$$

式中: M——漏播率;

Q——合格率;

N₁——无种子的吸孔数量;

N₂——只吸附一粒种子,并正常掉落的吸孔数量;

N——经过投种区的吸孔数总数。

3.2 试验结果

使用 Design—Expert 13 软件的 Box—Behnken 设计方法进行了三因素三级试验。试验结果如表 3 所示。内圈合格率和漏播率的方差分析如表 4 所示。

圈漏播率极显著。此外,回归项 X₁、X₂、X₃、X₁X₃、X₁X₂、X₂X₃、X₁²、X₂²和 X₃²的 p 值都小于 0.05,表明这些对模型具有显著的影响。所获得的内圈漏播率的回归模型如式(14)所示。影响内圈漏播率的因素顺序为 X₁>X₂>X₃。R²值为 0.984 9,表明该模型与数据拟合良好。

$$Y_1 = 98.09 + 0.9525X_1 + 1.19X_2 + 0.9225X_3 + 2.38X_1X_3 + 2.16X_2X_3 - 10.5X_1^2 - 3.51X_2^2 - 2.25X_3^2 \quad (13)$$

$$Y_2 = 29.32 - 3.89X_1 - 0.57X_2 - 0.61X_3 + 0.06X_1X_2 + 0.09X_1X_3 - 0.01X_2X_3 + 1.48X_1^2 + 0.01X_2^2 + 0.01X_3^2 \quad (14)$$

表 4 内圈排种性能测试的方差分析结果

Tab. 4 Variance analysis result of inner ring seed-metering performance test

| 评价指标 | 来源 | 平方和 | 均方根 | F 值 | p 值 |
|-------|-------------------------------|--------|--------|--------|------------|
| 内圈合格率 | 模型 | 641.89 | 71.32 | 121.43 | <0.000 1** |
| | X ₁ | 7.26 | 7.26 | 12.36 | 0.009 8** |
| | X ₂ | 11.23 | 11.23 | 19.13 | 0.003 3** |
| | X ₃ | 6.81 | 6.81 | 11.59 | 0.011 4* |
| | X ₁ X ₂ | 1.90 | 1.90 | 3.24 | 0.114 8 |
| | X ₁ X ₃ | 22.75 | 22.75 | 38.74 | 0.000 4** |
| | X ₂ X ₃ | 18.66 | 18.66 | 31.77 | 0.000 8** |
| | X ₁ ² | 464.52 | 464.52 | 790.89 | <0.000 1** |
| | X ₂ ² | 51.98 | 51.98 | 88.50 | <0.000 1** |
| | X ₃ ² | 21.38 | 21.38 | 36.41 | 0.000 5** |
| | 残差 | 4.11 | 0.5873 | | |
| | 失拟 | 3.42 | 1.14 | 6.58 | 0.050 2 |
| | 误差 | 0.6931 | 0.1733 | | |
| | 总和 | 646.01 | | | |
| 内圈漏播率 | 模型 | 268.44 | 29.83 | 50.80 | <0.000 1** |
| | X ₁ | 56.07 | 56.07 | 95.51 | <0.000 1** |
| | X ₂ | 50.55 | 50.55 | 86.10 | <0.000 1** |
| | X ₃ | 36.25 | 36.25 | 61.75 | 0.000 1** |
| | X ₁ X ₂ | 6.38 | 6.38 | 10.86 | 0.013 2* |
| | X ₁ X ₃ | 15.09 | 15.09 | 25.71 | 0.001 4** |
| | X ₂ X ₃ | 4.28 | 4.28 | 7.30 | 0.030 6* |
| | X ₁ ² | 46.47 | 46.47 | 79.14 | <0.000 1** |
| | X ₂ ² | 27.69 | 27.69 | 47.16 | 0.000 2** |
| | X ₃ ² | 15.76 | 15.76 | 26.84 | 0.001 3** |
| | 残差 | 4.11 | 0.5871 | | |
| | 失拟 | 3.40 | 1.13 | 6.40 | 0.052 4 |
| | 误差 | 0.7087 | 0.1772 | | |
| | 总和 | 272.55 | | | |

注：*代表显著性差异(0.01<p<0.05)，**代表极显著差异(p<0.01)。下同。

中圈合格率和漏播率的方差分析如表 5 所示。中圈的合格率模型的 p 值小于 0.01, 该模型具有极其重要的意义。失拟项中的 p 值为 0.149 9, 表明式(15)得到很好的拟合。模型中 X₁X₂ 项的 p 值为 0.353 3, 表明该项没有显著影响。R² 值为 0.994 1。去除不重要因素后获得的中圈合格率的响应回归模型如式(15)所示。影响中圈合格率的顺序为 X₂>X₁>X₃。该模型对中圈漏播率极显著。所获得的中圈漏播率的响应回归模型如式(16)所示。影响中圈漏播率的顺序为 X₂>X₁>X₃。R² 值为 0.996 6, 表明该模型与数据拟合良好。

$$Y_3 = 99.18 + 0.93X_1 + 1.2X_2 + 0.91X_3 + 2.16X_1X_3 + 2.20X_2X_3 - 10.12X_1^2 - 3.98X_2^2 - 2.21X_3^2 \quad (15)$$

$$Y_4 = 0.59 - 2.25X_1 - 2.87X_2 + 2.22X_3 + 1.48X_1X_2 - 2.01X_1X_3 - 1.61X_2X_3 + 2.99X_1^2 + 2.68X_2^2 + 2.65X_3^2 \quad (16)$$

表 5 中圈排种性能测试的方差分析结果

Tab. 5 Variance analysis result of middle ring seed-metering performance test

| 评价指标 | 来源 | 平方和 | 均方根 | F 值 | p 值 |
|-------|-------------------------------|---------|---------|---------|------------|
| 中圈合格率 | 模型 | 618.60 | 68.73 | 131.05 | <0.000 1** |
| | X ₁ | 6.86 | 6.86 | 13.09 | 0.008 5** |
| | X ₂ | 11.50 | 11.50 | 21.92 | 0.002 3** |
| | X ₃ | 6.55 | 6.55 | 12.49 | 0.009 5** |
| | X ₁ X ₂ | 0.518 4 | 0.518 4 | 0.988 4 | 0.353 3 |
| | X ₁ X ₃ | 18.62 | 18.62 | 35.50 | 0.000 6** |
| | X ₂ X ₃ | 19.32 | 19.32 | 36.83 | 0.000 5** |
| | X ₁ ² | 431.30 | 431.30 | 822.32 | <0.000 1** |
| | X ₂ ² | 66.73 | 66.73 | 127.23 | <0.000 1** |
| | X ₃ ² | 20.54 | 20.54 | 39.16 | 0.000 4** |
| | 残差 | 3.67 | 0.524 5 | | |
| | 失拟 | 2.57 | 0.857 9 | 3.13 | 0.149 9 |
| | 误差 | 1.10 | 0.274 5 | | |
| | 总和 | 622.27 | | | |
| 中圈漏播率 | 模型 | 289.83 | 32.20 | 228.06 | <0.000 1** |
| | X ₁ | 40.41 | 40.41 | 286.18 | <0.000 1** |
| | X ₂ | 66.01 | 66.01 | 467.48 | <0.000 1** |
| | X ₃ | 39.52 | 39.52 | 279.85 | <0.000 1** |
| | X ₁ X ₂ | 8.76 | 8.76 | 62.05 | 0.000 1** |
| | X ₁ X ₃ | 16.08 | 16.08 | 113.88 | <0.000 1** |
| | X ₂ X ₃ | 10.30 | 10.30 | 72.97 | <0.000 1** |
| | X ₁ ² | 37.60 | 37.60 | 266.31 | <0.000 1** |
| | X ₂ ² | 30.21 | 30.21 | 213.93 | <0.000 1** |
| | X ₃ ² | 29.53 | 29.53 | 209.16 | <0.000 1** |
| | 残差 | 0.988 4 | 0.141 2 | | |
| | 失拟 | 0.700 9 | 0.233 6 | 3.25 | 0.142 3 |
| | 误差 | 0.287 5 | 0.071 9 | | |
| | 总和 | 290.82 | | | |

外圈合格率和漏播率的方差分析如表 6 所示。该模型非常显著, 因为外圈合格率模型的 p 值小于 0.01。失拟项中的 p 值为 0.790 5, 表明式(17)是拟合的。R² 值为 0.995 9, 表明该模型与数据拟合良好。所获得的外圈合格率的响应回归模型如式(17)所示。影响外圈合格率的顺序为 X₂>X₁>X₃。外圈漏播率模型的 p 值小于 0.01, 该模型具有极其重要的意义。所获得的外圈漏播率的响应回归模型如式(18)所示。影响外圈漏播率的顺序为 X₂>X₁>X₃。R² 值为 0.995 8, 表明该模型与数据拟合良好。

$$Y_5 = 97.92 + 0.65X_1 + 1.28X_2 + 0.55X_3 + 2.8X_1X_3 + 2.12X_2X_3 - 10.16X_1^2 -$$

$$3.47X_2^2 - 1.87X_3^2 \quad (17)$$

$$Y_6 = 0.59 - 2.33X_1 - 2.84X_2 + 2.17X_3 + 1.41X_1X_2 - 2.05X_1X_3 - 1.49X_2X_3 + 2.92X_1^2 + 2.59X_2^2 + 2.80X_3^2 \quad (18)$$

表6 外圈排种性能测试的方差分析结果

Tab. 6 Variance analysis result of outer ring seed-metering performance test

| 评价指标 | 来源 | 平方和 | 均方根 | F值 | P值 |
|-------|----------|---------|---------|----------|------------|
| 外圈合格率 | 模型 | 600.93 | 66.77 | 187.92 | <0.000 1** |
| | X_1 | 3.37 | 3.37 | 9.48 | 0.017 9* |
| | X_2 | 13.11 | 13.11 | 36.89 | 0.000 5** |
| | X_3 | 2.45 | 2.45 | 6.90 | 0.034 0* |
| | X_1X_2 | 0.632 0 | 0.632 0 | 1.78 | 0.224 1 |
| | X_1X_3 | 31.47 | 31.47 | 88.58 | <0.000 1** |
| | X_2X_3 | 17.94 | 17.94 | 50.48 | 0.000 2** |
| | X_1^2 | 434.81 | 434.81 | 1 223.72 | <0.000 1** |
| | X_2^2 | 50.83 | 50.83 | 413.06 | <0.000 1** |
| | X_3^2 | 14.76 | 14.76 | 41.53 | 0.000 4** |
| | 残差 | 2.49 | 0.355 3 | | |
| | 失拟 | 0.520 9 | 0.173 6 | 0.353 2 | 0.790 5 |
| | 误差 | 1.97 | 0.491 6 | | |
| | 总和 | 603.42 | | | |
| 外圈漏播率 | 模型 | 287.86 | 31.98 | 182.45 | <0.000 1** |
| | X_1 | 43.62 | 43.62 | 248.81 | <0.000 1** |
| | X_2 | 64.41 | 64.41 | 367.43 | <0.000 1** |
| | X_3 | 37.58 | 37.58 | 214.40 | <0.000 1** |
| | X_1X_2 | 7.98 | 7.98 | 45.52 | 0.000 3** |
| | X_1X_3 | 16.85 | 16.85 | 96.12 | <0.000 1** |
| | X_2X_3 | 8.91 | 8.91 | 50.83 | 0.000 2** |
| | X_1^2 | 35.97 | 35.97 | 205.18 | <0.000 1** |
| | X_2^2 | 28.20 | 28.20 | 160.84 | <0.000 1** |
| | X_3^2 | 32.96 | 32.96 | 188.00 | <0.000 1** |
| | 残差 | 1.23 | 0.175 3 | | |
| | 失拟 | 0.873 5 | 0.291 2 | 3.29 | 0.139 9 |
| | 误差 | 0.353 7 | 0.088 4 | | |
| | 总和 | 289.09 | | | |

3.3 参数优化和试验验证

对上述三个试验因素进行了优化,以获得最佳的排种器工作参数组合,提高排种合格率。根据上述回归方程和每个因素的边界条件,构建参数模型,如式(19)所示。使用 Design-Expert 13 软件求解约束条件。最佳参数为负压 2.16 kPa,排种盘角速度 29.43 r/min,锥角 61.51°。在这些条件下,内圈合格率为 95.12%,漏播率为 3.67%,中圈合格率为 94.68%,漏播率为 3.12%,外圈合格率为 94.24%,漏播率为 2.58%。参数优化区如图 10 所示。

$$\begin{cases} \min(Y_1, Y_3, Y_5) \\ \max(Y_2, Y_4, Y_6) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 0.5 \text{ kPa} \leq X_1 \leq 3.5 \text{ kPa} \\ 10 \text{ r/min} \leq X_2 \leq 40 \text{ r/min} \\ X_3 = 60^\circ \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

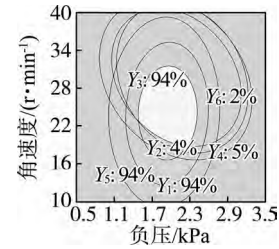


图10 参数优化区域

Fig. 10 Parameter optimization zone

为了评估优化排种器的排种性能,使用自制的台架在优化区内进行了排种性能测试,参数为负压-2 kPa,角速度 23 r/min,锥角 61°。记录 5 次重复测试的平均值,并将其与优化值进行比较,如表 7 所示。结果表明,在参数优化组合下,实际结果与优化结果相似。

表7 优化值与实际值的比较

Tab. 7 Comparison of the optimized value and actual value %

| 位置 | 合格率 | | 漏播率 | |
|----|-------|-------|------|------|
| | 优化值 | 真实值 | 优化值 | 真实值 |
| 内圈 | 95.12 | 95.05 | 3.67 | 4.12 |
| 中圈 | 94.68 | 93.98 | 3.12 | 3.56 |
| 外圈 | 94.24 | 92.73 | 2.58 | 2.86 |

3.4 田间试验

设计的一器三行排种器为高速精量式,故在播种机较高速下进行田间播种试验。每次试验测定 50 个小青菜种子间距,各组重复进行 3 次,取 3 次的平均值作为田间试验的最终结果,如表 8 所示。外中内圈合格率低于台架试验结果,可能是播种机在前进时出现了机具本身振动,但性能指标均优于国家最低标准。

表8 田间试验结果

Tab. 8 Field experiment results %

| 位置 | 合格率 | 漏播率 |
|----|-------|------|
| 外圈 | 88.21 | 9.39 |
| 中圈 | 89.18 | 6.92 |
| 内圈 | 91.63 | 4.12 |

4 结论

1) 为改善我国传统的单行和双行播种模式所面临的播种效率低下的问题,以“上海矮箕”小青菜种子为研究对象,设计一种新型的一器三行精量排种器,并对排种器的工作原理进行分析,通过相关数学理论计算出所设计排种器关键部件的相关参数。

2) 利用 FLUENT 软件探究排种器内部的气流场,对不同吸孔数目的气室整体压力云图、外圈压力和速度分布云图进行分析,确定单圈最佳的吸孔数目为 60,三圈总的吸孔数目为 180。

3) 将负压、排种盘的转速以及吸孔锥角作为试验因素,以排种器进行排种时的合格率以及漏播率作为性能指标开展 CCD 二次旋转正交组合试验。当负压为 -2.16 kPa ,排种盘角速度为 29.43 r/min ,吸孔锥角为 61.51° 时,内圈合格率为 95.12% ,漏播率为 3.67% ,中圈合格率为 94.68% ,漏播率为 3.12% ,外圈合格率为 94.24% ,漏播率为 2.58% 。最后进行台架试验和田间试验验证所得最佳组合参数的合理性。

参 考 文 献

- [1] 农业部南京农业机械化研究所. 2020 中国农业机械化年鉴[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2020.
- [2] 祁亚卓, 相姝楠. 国内外蔬菜播种机的研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(1): 205-208.
Qi Yazhuo, Xiang Shunan. Research status and development trend of vegetable seeder at home and abroad [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(1): 24-27.
- [3] 李洪昌, 高芳, 赵湛, 等. 国内外精密排种器研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2): 12-16, 56.
Li Hongchang, Gao Fang, Zhao Zhan, et al. Domestic and overseas research status and development trend of precision seed-metering device [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 12-16, 56.
- [4] Mohammed Y. Design and test design of a pneumatic precision metering device for wheat [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011.
- [5] Anantachar M, Kumar G V P, Guruswamy T. Development of artificial neural network models for the performance prediction of an inclined plate seed metering device [J]. Applied Soft Computing, 2011, 11(4): 3753-3763.
- [6] Singh R C, Singh G, Saraswat D C. Optimisation of design and operational parameters of a pneumatic seed metering device for planting cottonseeds [J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(4): 429-438.
- [7] 李明, 丁幼春, 廖庆喜, 等. 气力油菜精量排种器漏播检测系统的设计[J]. 沈阳农业大学学报, 2020, 51(2): 185-191.
- [8] 陈学庚, 钟陆明. 气吸式排种器带式导种装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 8-15.
Chen Xuegeng, Zhong Luming. Design and test on belt-type seed delivery of air-suction metering device [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(22): 8-15.
- [9] 雷小龙, 廖宜涛, 丛锦玲, 等. 油菜小麦兼用气送式直播机集排器参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(12): 16-26.
Lei Xiaolong, Liao Yitao, Cong Jinling, et al. Parameter optimization and experiment of air-assisted centralized seed-metering device of direct seeding machine for rape and wheat [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(12): 16-26.
- [10] 张明华, 姜有聪, 何思禹, 等. 蔬菜气吸轮式精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(7): 98-109.
Zhang Minghua, Jiang Youcong, He Siyu, et al. Design and experiment of the air suction wheel precision seed metering device for vegetables [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(7): 98-109.
- [11] 李玉道, 孙学振. 基于 EDEM 的气吸式排种器排种过程的仿真研究[J]. 现代农机, 2023(2): 71-74.
- [12] 李博竣. 一器双行精量排种器设计和运动过程仿真[D]. 南京: 南京工业大学, 2021.
- [13] 白明超. 胡萝卜精量排种器工作过程仿真与试验分析[D]. 南京: 南京工业大学, 2020.
- [14] Ding S, Bai L, Yao Y, et al. Discrete element modelling (DEM) of fertilizer dual-banding with adjustable rates [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 152: 32-39.
- [15] 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: 中国农业技术出版社, 2007.
- [16] 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.
- [17] 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.
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.
- [18] Mingfeng J, Yongqian D, Hongfeng Y, et al. Optimal structure design and performance tests of seed metering device with fluted rollers for precision wheat seeding machine [J]. IFAC-PapersOnline, 2018, 51(17): 509-514.
- [19] Jinqing L, Ying Y, Zihui L, et al. Design and experiment of an air-suction potato seed metering device [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(5): 33-42.