doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.012

三七超窄行气吸式精密排种器设计与试验

赖庆辉　于庆旭　苏　微　孙　凯
（昆明理工大学现代农业工程学院，昆明 650500）

摘要：三七播种行株距均为 50 mm 左右，属于密集型精密播种。为实现三七超窄行精密播种，设计一种超窄行气吸式精密排种器。通过理论计算与数值模拟，确定主要结构参数；以云南文山三七种子为播种对象，基于 EDEM 离散元软件，对水滴形窝眼孔加工倾角影响充种性能进行仿真模拟试验，得出较佳加工倾角为 50°；以吸孔负压、排种轮转速和种层高度为影响因素，以合格指数、重播指数、漏播指数和各行排量一致性变异系数为试验指标，进行三因素二次回归正交旋转组合试验。试验结果表明：影响合格指数的主次顺序为吸孔负压、排种轮转速、种层高度；当种层高度为 50 mm、排种轮转速为 34 ~ 48 r/min、吸孔负压为 560 ~ 660 Pa 时，合格指数大于 93.0%，重播指数小于 3.5%，漏播指数小于 3.5%，各行排量一致性变异系数小于 3.0%，满足三七播种要求。

关键词：三七；超窄行；气吸式精密排种器；离散元法；试验
中图分类号：S223.2　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2019)04-0102-11

Design and Experiment of Air-suction Ultra-narrow-row Device for Precise *Panax notoginseng* Seed Metering

LAI Qinghui　YU Qingxu　SU Wei　SUN Kai
(*College of Modern Agricultural Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: *Panax notoginseng* is mainly grown in Yunnan Province. The planting area of *Panax notoginseng* has reached 672 km^2 until December 2017. The row spacing and plant spacing of the seedlings of *Panax notoginseng* are only 50 mm. In order to achieve high-density precision seeding of *Panax notoginseng*, an air-suction ultra-narrow-row device was designed for precise seed metering. Based on mechanical-pneumatic seed filling technology, the seed metering wheel had water drop-shaped holes on both sides. The seed metering device was compact. Compared with the air-suction cylinder seed metering device, the air chamber was smaller, which had lower requirements for air volume and wind pressure stability. The Wenshan *Panax notoginseng* seeds were chosen for seeding object. The simulation test of mechanical filling performance was based on the discrete element method, and the machining angle of water drop-shaped hole was taken as the single experimental factor. And the optimum of processing angle was obtained as 50°. Based on the three-factor quadratic orthogonal rotating combination test method, the influences of rotation speed of seed metering wheel, negative pressure of sucking hole and height of seed layer on seeding performance were explored. The experimental results showed that the affecting order of the qualified index was negative pressure of sucking hole, rotation speed of seed metering wheel and height of seed layer. Based on the results of examination, it was found that the fitting of the equations was good, the best parameter combination was pricking height of seed layer of 50 mm, rotation speed of seed metering wheel of 34 ~ 48 r/min and negative pressure of sucking hole of 560 ~ 660 Pa, and under the optimal condition, the qualified index was greater than 93.0%, the missing index was less than 3.5%, the multiple index was less than 3.5% and variation coefficient of each row displacement consistency was less than 3.0%. The air-suction ultra-narrow-row device for precise seed metering met the standard and requirements by comparing the results with the national standard and

收稿日期：2019-01-02　修回日期：2019-01-29
基金项目：国家自然科学基金项目(51305187)、国家重点研发计划项目(2017YFD0700600-2017YFD0700604)、云南省重大科技专项(2016ZF001、2017ZF001、2018ZC001-3、2018ZC001-4、2018ZC001-5)、云南省教育厅项目(2016ZZX048)、云南省高校工程研究中心建设计划项目和云南省科技厅创新团队计划项目
作者简介：赖庆辉(1980—)，男，副教授，主要从事农业机械装备与计算机测控研究，E-mail：laiqinghui007@163.com

Panax notoginseng planting requirements. The approach of research was suitable for the exploitation of *Panax notoginseng* seed-metering device.

Key words: *Panax notoginseng*; ultra-narrow-row; precision air-suction seed-metering device; discrete element method; test

0　引言

三七是中国名贵中药材，在云南省广泛种植。三七播种的株距和行距均为 50 mm 左右，属于密集型精密播种[1-2]。精密排种器是播种机的核心部件，其作业精度决定播种质量，按其工作原理，精密排种器通常分为机械式和气力式两大类[3-10]。气吸式排种器[11-17]具有伤种率低、通用性好、作业稳定等特点，适合三七等密集型精密播种作物。

国外对气吸式排种器研究较早，目前已经广泛应用。GUARELLA 等[18]研究分析气吸式蔬菜精密排种器型孔直径、型孔形状和种子距离对排种器吸种的影响，并建立数学模型。BARUT 等[19]以玉米精密排种器为研究对象，研究吸孔形状、吸室真空度、吸孔面积、排种轮线速度等因素对排种性能的影响，得出吸种率随排种轮线速度的增加而降低、随吸室真空度的升高而升高的结论。SINGH 等[20]对播种机气吸式排种器进行优化，对排种孔的孔径及其形状进行试验研究，得到优化后的孔径参数，并确定了最合适的排种孔形状。GAIKWARD 等[21]用洋葱种子和辣椒种子对气吸式精密排种器进行性能测试，得出适合播种洋葱和辣椒的排种器吸孔吸力及喷嘴直径。

融合机械气力组合充种技术，可进一步提高气吸式排种器的充种性能，目前许多学者对机械气力组合式排种器进行了研究。史嵩等[22]设计了一种气压组合孔式玉米精量排种器，通过正压气流与导槽相结合，为研制播种精度更高的排种器提供了参考。贾洪雷等[23]设计了一种气吸机械复合式大豆精密排种器，在排种轮上同时设有吸孔、导种槽和取种槽，通过回归分析和多因素试验得出排种器最优结构。殷德峰[24]设计了一种气力窝眼轮式小粒径种子排种器，结合气力式排种器和窝眼轮式排种器的特点，解决了由于小粒径蔬菜种子外形不规则造成的充种难度大的问题。

按照三七特性和种植农艺要求，融合机械气力组合充种技术，本文设计一种超窄行气吸式精密排种器。通过理论计算、仿真试验和台架试验，得到主要结构参数，并分析吸孔负压、排种轮转速和种层高度对排种性能的影响规律。

1　结构与工作原理

1.1　排种器结构

超窄行气吸式三七精密排种器主要由机架、种箱、导种器机构和排种轮机构组成，其结构如图 1 所示。排种轮机构由排种轮、负压导气管、密封隔板和空心连接轴等组成。

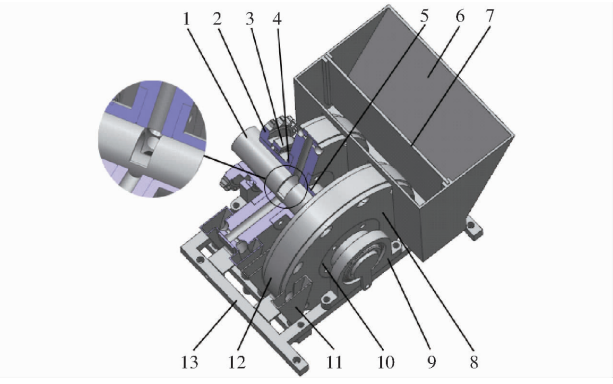

图 1　排种器结构示意图

Fig. 1　Structural diagram of seeding metering device

1. 负压导气管　2. 链轮　3. 轴承　4. 左侧空心连接轴　5. 中间空心连接轴　6. 种箱　7. 种层高度调节板　8. 排种轮　9. 轴承座　10. 右侧空心连接轴　11. 导种器机构　12. 密封隔板　13. 机架

1.2　工作原理

负压导气管上加工有固定角度的通气开口。在充种区和携种区，排种轮的通气孔与负压导气管的负压腔相通；在投种区通气孔与负压腔隔绝。密封隔板保证排种轮外部的气密性。排种器的工作示意图如图 2 所示。

排种轮两侧端面加工有水滴形窝眼孔，窝眼孔底部加工有吸孔，吸孔与通气孔相通。链条带动排种轮转动工作，在充种区，通气孔与负压腔相通，吸孔产生吸附力，三七种子在吸附力和重力共同作用下进入窝眼孔，并且吸附力将种子吸附在窝眼孔内，完成充种；在携种区，吸附在窝眼孔内的种子，随着排种轮一起转动，实现携种；在投种区，通气孔与负压腔隔绝，吸孔吸附力消失，种子在自身重力作用下投种，完成投种过程。

2　关键部件设计及参数确定

2.1　三七种子参数

三七种子含水率 ω' 为 20% ~ 60%，密度 ρ 为

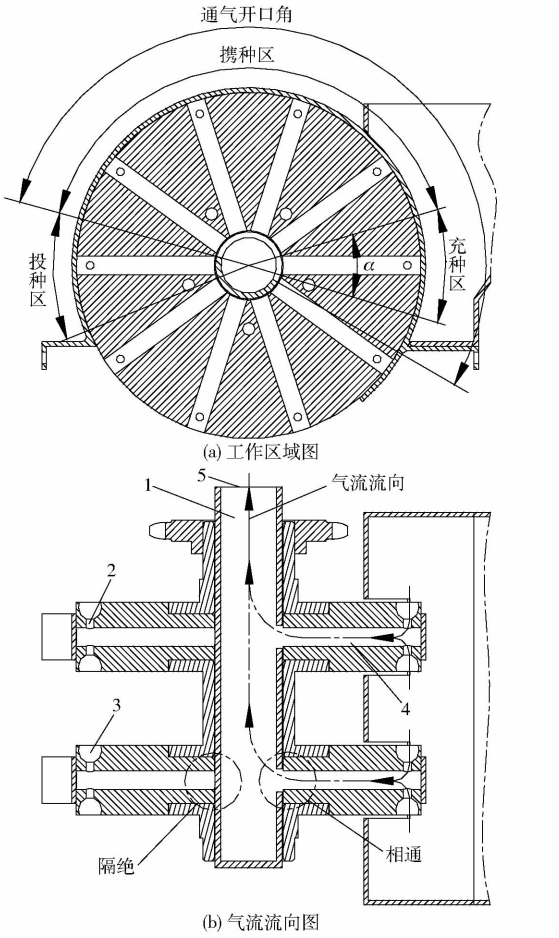

图 2 排种器工作示意图

Fig. 2 Working structural diagram of seeding metering device

1. 负压腔 2. 吸孔 3. 窝眼孔 4. 通气孔 5. 负压接口

929 ~ 1 132 kg/m^3,长度 L 为 5.2 ~ 7.2 mm,宽度 W 为 4.8 ~ 6.8 mm,高度 H 为 4.0 ~ 6.0 mm,平均直径 D 为 5.62 mm,球度 S 为 90.86%,可近似为球体[25],特征参数如表 1 所示。

表 1 三七种子特征参数

Tab. 1 Material parameters of *Panax notoginseng* seed

参数	数值
泊松比	0.4
剪切模量/Pa	1.3×10^7
密度/(kg·m^{-3})	1 132
种子间恢复系数	0.48
种子间静摩擦因数	0.32
种子间滚动摩擦因数	0.085

2.2 排种轮设计

排种轮的主要结构参数包括排种轮直径、窝眼孔数量及尺寸、吸孔直径和排种轮厚度。排种轮结构示意图如图 3 所示,图中 d_1 为排种轮直径,d_2 为吸孔分布圆直径,d_3 为负压导管安装孔直径,d_4 为通气孔直径,d_5 为吸孔直径。

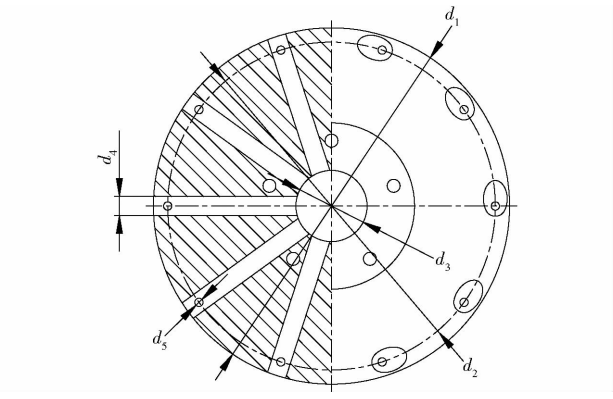

图 3 排种轮结构示意图

Fig. 3 Structural diagram of seeding disc

2.2.1 排种轮直径

排种轮直径是排种器基本结构特征参数之一,决定排种器的结构布置,以及其他部件的结构尺寸。当窝眼孔和吸孔停留在充种区的时间越长,越有利于充种,充种性能通常越好。为研究排种轮各参数对充种时间的影响,建立影响充种时间 t 的方程

$$\begin{cases} t = \dfrac{\pi\alpha}{180\omega} \\ \omega = \dfrac{2\pi n}{60} \\ \dfrac{v}{L'} = \dfrac{Zn}{60} \end{cases} \tag{1}$$

式中 α——充种区域角,(°)

ω——排种轮角速度,rad/s

n——排种轮转速,r/min

v——播种机作业速度,m/s

L'——粒距,mm

Z——窝眼孔数量

由式(1)整理可得

$$t = \frac{\alpha Z L'}{360 v} \tag{2}$$

由式(2)可知,在作业速度 v、粒距 L' 和充种区域角 α 固定的情况下,吸孔在充种区停留时间 t 只与窝眼孔数量 Z 有关,但随着排种轮直径增大,窝眼轮的排布数量可以增多,即可增加充种区停留时间 t,从而可增加合格指数,同时负压腔的空间也会增大,需要风机提供的空气流量也相应增加,能耗增加。

型孔轮直径一般选取 80 ~ 200 mm[26],综合考虑排种器的整体结构,最终选取排种轮直径 d_1 = 150 mm。根据排种轮直径和种箱尺寸布置,选取种层高度范围为 20 ~ 80 mm。

2.2.2 窝眼孔数量及尺寸

(1)窝眼孔数量

根据排种器整体结构布置,负压导管安装孔直

径 d_3为 30 mm，排种轮的通气孔直径 d_4为 8 mm，通气孔不能互相干涉，因此根据通气孔和负压导管安装孔直径布置可知

$$Z \leqslant \frac{180}{\arcsin\dfrac{d_4}{d_3}} \tag{3}$$

由式(3)可确定窝眼孔数量 $Z \leqslant 11.6$，通气孔夹角尽量选取整数，便于加工，所以确定窝眼孔数量 $Z=10$。

(2)窝眼孔尺寸

三七种子近似为球体，播种属于单粒点播，因此窝眼孔底部形状为半球型；加工窝眼孔的球头铣刀与排种轮端面法线的夹角为加工倾角 δ，加工出来的窝眼孔类似水滴形，这有利于充种和投种。图 4 为水滴形窝眼孔结构示意图，图中 w 为窝眼孔开口宽度，h 为窝眼孔深度，r 为窝眼孔底部球半径。

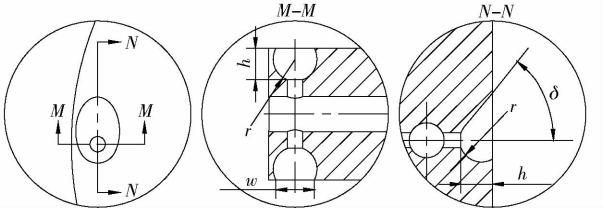

图 4　水滴形窝眼孔结构示意图

Fig. 4　Structural diagram of water drop-shaped hole

为提高窝眼孔机械充种效果，窝眼孔开口宽度 w、窝眼孔深度 h 和窝眼孔底部球半径 r 需根据三七种子的最大长度 L_{max} 而定[27]，即

$$\begin{cases} w \geqslant L_{max}+1.5 \\ h = L_{max} \\ \dfrac{w^2}{4}+(h-r)^2=r^2 \end{cases} \tag{4}$$

由式(4)整理可得

$$r=\frac{w^2}{8h}+\frac{h}{2} \geqslant \frac{(L_{max}+1.5)^2}{8L_{max}}+\frac{L_{max}}{2} \tag{5}$$

已知三七种子的最大长度 $L_{max}=7.2$ mm，由式(5)可得窝眼孔底部球半径 $r \geqslant 4.91$ mm，本文选取窝眼孔底部球半径 $r=5$ mm，窝眼孔深度 $h=7.5$ mm，窝眼孔开口宽度 $w=8.67$ mm。

窝眼孔与排种轮圆周的壁厚为 2 ~ 5 mm，所以吸孔分布圆直径 $d_2=135$ mm。

(3)窝眼孔加工倾角

排种轮材质选取丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(简称 ABS 塑料)，三七种子与 ABS 塑料最大静滑动摩擦角 φ 为 26.5°[25]，所以窝眼孔加工倾角 δ 必须大于 26.5°，本文选取加工倾角为 30°、40°、50°、60°、70°进行单因素五水平试验。采用离散元软件 EDEM 进行仿真试验[28-29]，种子颗粒选取直径 6 mm 的圆球，种层高度为 50 mm，排种轮转速为 24 r/min，吸孔无吸附力，其他试验条件均一致，分析窝眼孔加工倾角对机械充种性能的影响，仿真试验如图 5 所示。

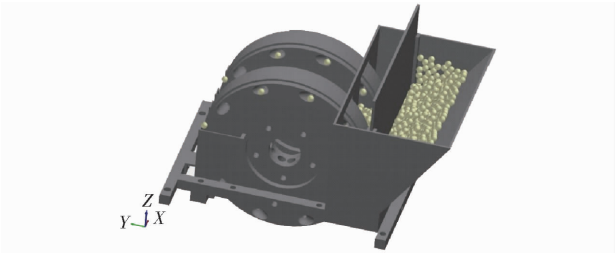

图 5　仿真试验

Fig. 5　Simulation test

只验证机械充种效果，窝眼孔充入 1 粒种子即为充种合格。参照 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》进行试验，以合格指数、漏播指数和重播指数作为试验指标，每组试验统计 4 行，每行连续测量 200 个窝眼孔，每组试验重复 3 次，取平均值，仿真结果如图 6 所示。

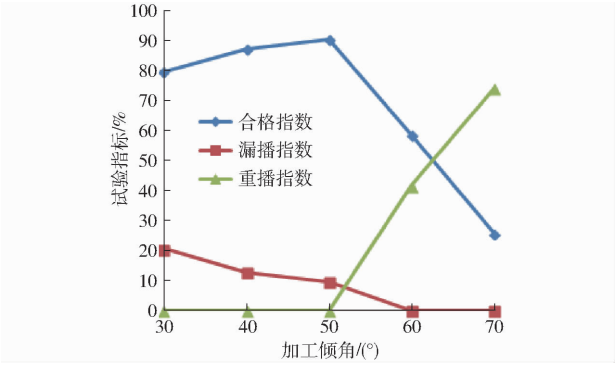

图 6　加工倾角与试验指标关系

Fig. 6　Relationship curves of machining angle and reference index

随着加工倾角增大，窝眼孔容积急剧增加。窝眼孔可充入多颗种子，由图 6 可知，当加工倾角大于 50°时，重播指数急剧加大，漏播指数降低至 0，导致合格指数先增大后急剧减小。基于仿真结果，加工倾角 δ 选取为 50°。

2.2.3　吸孔直径与吸孔压差

(1)吸孔直径

排种轮吸孔直径 d_5经验公式[27]为

$$d_5=(0.6 \sim 0.7)D \tag{6}$$

三七种子平均直径 $D=5.62$ mm，由式(6)可得吸孔直径范围为 3.37 ~ 3.93 mm，本文选择吸孔直径 $d_5=3.5$ mm。

(2)吸孔理论压差

假设种子为均匀球体，合力作用于质心，气室内负压腔为稳定气流，种子受力如图 7 所示，此时种子受到自身重力 G、吸孔吸附力 F、支撑力 N 和摩擦力 f 作用。

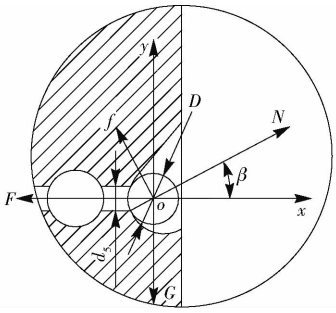

图 7 种子受力分析图

Fig. 7 Force analysis of seed

对三七种子在窝眼孔内时进行受力分析，沿着吸孔吸附力 F 和重力 G 方向建立 xoy 坐标系，建立种子受力平衡方程

$$\begin{cases} F + f\sin\beta = N\cos\beta \\ G = f\cos\beta + N\sin\beta \\ f = N\tan\varphi \end{cases} \tag{7}$$

式中 β——支撑力方向角

种子所受吸附力由吸孔内外压差所形成，压差 ΔP 则决定三七种子能否吸附在窝眼孔内，吸附力 F 和重力 G 方程式为

$$\begin{cases} F = \dfrac{1}{4}\pi d_5^2 \Delta P \\ G = \dfrac{1}{6}\pi D^3 \rho g \end{cases} \tag{8}$$

式中 g——重力加速度，m/s^2

由式(7)、(8)整理得

$$\Delta P = \frac{16D^3\rho g(1 - \tan\varphi\tan\beta)}{3d_5^2(\tan\varphi + \tan\beta)} \tag{9}$$

由图 7 可得支撑力方向角 β 为

$$\tan\beta = \frac{d_5}{\sqrt{D^2 - d_5^2}} \tag{10}$$

已知三七种子平均直径 $D = 5.62$ mm，选取最大密度 $\rho = 1\,132$ kg/m^3，最大静滑动摩擦角 $\varphi = 26.5°$，由式(9)、(10)计算得吸孔理论压差 $\Delta P = 50$ Pa。

2.2.4 排种轮厚度及气室内部流场分析

(1)排种轮厚度

根据三七种植技术规程，本文播种密度采用 5 cm × 5 cm[1]，即粒距 $L' = 50$ mm，按照播种密度对排种轮和导种器进行结构布置，如图 8 所示。

导种器宽度 $l_1 \geqslant 12$ mm，安装间隙 $l_2 \geqslant 1$ mm，由图 8 可得排种轮厚度范围为

$$2h + d_4 < l < L' - l_1 - 2l_2 \tag{11}$$

式中 l——排种轮厚度，mm

由式(11)得排种轮厚度范围为 23 mm < l < 36 mm。

(2)气室内部流场分析

为进一步确定排种轮厚度，本文采用 Fluent 软件分别对厚度为 25、30、35 mm 的排种轮进行内部流场模拟分析，选取吸孔端面处的流速作为评价指标，吸孔端面为吸孔与窝眼孔底部交汇面，吸孔端面处的流速越大表明吸种能力越强，同时各个吸孔处的流速及空气运动轨迹基本一致，说明各个吸孔差异不大，流场分布均匀，利于充种和携种[30-31]。

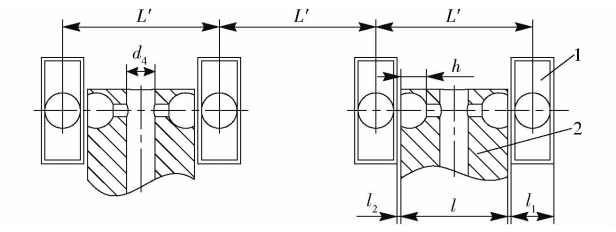

图 8 排种轮和导种器结构布置图

Fig. 8 Structural arrangement diagram of seed-metering wheel and guiding device

1. 导种器 2. 排种轮

在 UG 软件中建立排种器的气室模型，如图 9 所示。该排种器气室模型包括窝眼孔、吸孔、通气孔和负压腔，在吸种区和携种区通气孔数量共计 6 个，30 mm 厚度排种轮的气室体积约为 132 856 mm^3，仅为同行数气吸滚筒式排种器气室体积的 5% 左右。

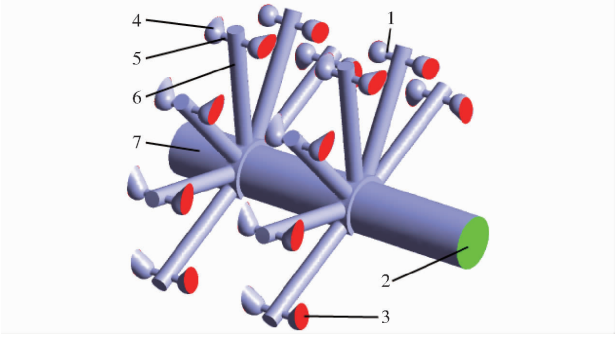

图 9 排种器的气室模型

Fig. 9 Seed-metering air chamber model

1. 吸孔端面 2. 压力出口 3. 压力入口 4. 窝眼孔 5. 吸孔 6. 通气孔 7. 负压腔

模拟过程采用 $k-\varepsilon$ 模型，选取窝眼孔端面为压力入口边界条件，入口压力设置为 0 Pa，负压接口为压力出口边界条件，出口压力设置为 −1 000 Pa，壁面采用无滑移边界条件。不同厚度排种轮吸孔端面的速度云图如图 10 所示。

本文吸孔采用直孔形式，由图 10 可知，排种轮厚度为 30 mm 时，吸孔端面处流速最大达到 31.43 m/s，表明吸种能力最强，同时各个吸孔处的流速及空气运动轨迹基本一致，说明各个吸孔差异不大，流场分布均匀，有利于充种和携种。

厚度 30 mm 排种轮的速度云图和压力云图如图 11 所示。由图 11a 可知，腔体内未出现较大局部

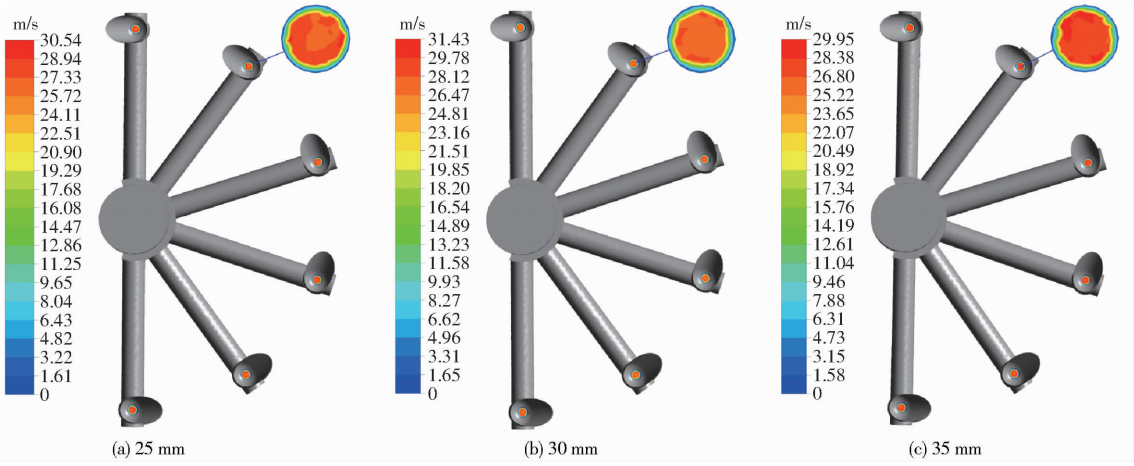

图 10　不同厚度排种轮吸孔端面的速度云图

Fig. 10　Velocity contours of suction hole end face with different thickness seed-metering wheel

涡流和回流现象，整体流场分布均匀。由图 11b 可知，气室内部压降较小，压力分布较均匀，且吸孔端面处的最小压差为 417.12 Pa，大于吸孔理论压差 $\Delta P = 50$ Pa，进一步验证排种轮厚度为 30 mm 时气室布置最为合理。

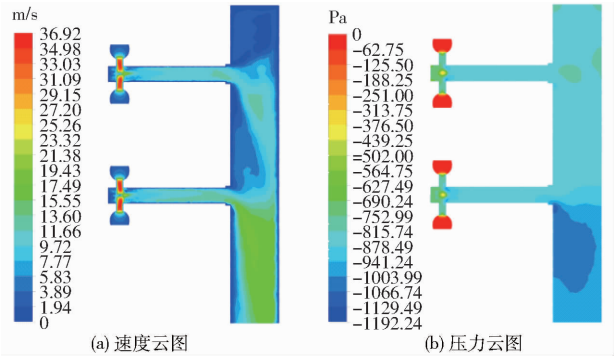

图 11　厚度 30 mm 排种轮的速度云图和压力云图

Fig. 11　Velocity contour and pressure contour of seed-metering wheel in 30 mm thickness

2.3　排种轮转速

本文排种器的作业速度 $v = 0.9 \sim 1.8$ km/h，粒距 $L' = 50$ mm，窝眼孔数量 $Z = 10$，由式(1)可得排种轮转速方程为

$$n = \frac{60v}{ZL'} \tag{12}$$

由式(12)得排种轮转速 $n = 30 \sim 60$ r/min。

3　排种性能试验

3.1　试验材料与仪器设备

选取文山三七种子，含水率为 60%，在 JPS－12 型计算机视觉排种器性能检测试验台上进行试验，利用加野麦克斯 KANOMAX6036 型热式风速风量仪(精度 0.01 kPa)测量吸孔端面气压，U 型测压管监测气压稳定性，排种性能试验如图 12 所示。

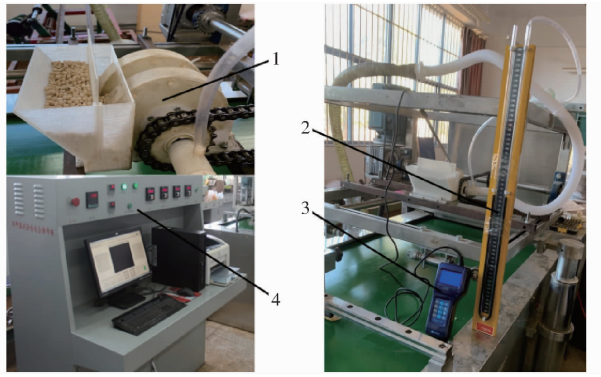

图 12　排种性能试验

Fig. 12　Seed-metering performance test

1. 排种器　2. U 型测压管　3. KANOMAX6036 型热式风速风量仪　4. JPS－12 型计算机视觉排种器性能检测试验台

3.2　试验方法

根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》实施，选取对排种器工作性能影响较大的排种轮转速、吸孔负压和种层高度作为试验因素，为寻求最佳参数组合，进行三因素二次回归正交旋转组合试验，以排种合格指数 Y_1、重播指数 Y_2、漏播指数 Y_3 和各行排量一致性变异系数 Y_4 为评价指标，每组试验统计 4 行，每行连续测量 200 粒种子，每组试验重复 3 次，取平均值。

3.3　二次回归正交旋转组合试验

通过前期单因素试验，确定吸孔负压为 450 ~ 750 Pa，排种轮转速为 30 ~ 60 r/min，种层高度为 20 ~ 80 mm。试验因素编码如表 2 所示，试验设计方案与结果如表 3 所示，表中 X_1、X_2、X_3 为吸孔负压、排种轮转速、种层高度的编码值。

3.4　回归数学模型的建立与显著性检验

采用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行多元回归拟合，对试验结果进行回归分析，可以得到合格指数 Y_1、重播指数 Y_2、漏播指数 Y_3 和各行排量一致性变异系数 Y_4 的回归方程。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Experimental factors and codes

编码	因素		
	吸孔负压/Pa	排种轮转速/(r·min^{-1})	种层高度/mm
-1.682	450	30	20
-1	511	36	32
0	600	45	50
1	689	54	68
1.682	750	60	80

表 3 试验方案设计与结果

Tab. 3 Experiment design and results

序号	因素			试验结果			
	X_1	X_2	X_3	Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%	Y_4/%
1	-1	-1	-1	89.7	3.8	6.5	5.4
2	1	-1	-1	91.4	6.8	1.8	3.7
3	-1	1	-1	89.3	2.8	7.9	6.7
4	1	1	-1	91.2	3.2	5.6	3.9
5	-1	-1	1	89.1	6.5	4.4	3.4
6	1	-1	1	91.6	7.2	1.2	2.1
7	-1	1	1	87.2	4.7	8.1	8.3
8	1	1	1	89.8	4.9	5.3	4.7
9	-1.682	0	0	88.1	2.5	9.4	7.2
10	1.682	0	0	90.2	8.3	1.5	3.5
11	0	-1.682	0	94.3	3.8	1.9	1.7
12	0	1.682	0	90.4	2.1	7.5	8.9
13	0	0	-1.682	92.2	2.2	5.6	3.8
14	0	0	1.682	89.3	8.7	2.0	3.5
15	0	0	0	93.5	2.7	3.8	2.2
16	0	0	0	92.7	2.9	4.4	2.7
17	0	0	0	94.2	1.5	4.3	2.6
18	0	0	0	93.5	2.5	4.0	1.5
19	0	0	0	94.6	1.6	3.8	2.6
20	0	0	0	93.4	3.4	3.2	4.4
21	0	0	0	93.2	3.9	2.9	2.9
22	0	0	0	93.7	2.6	3.7	3.2
23	0	0	0	94.0	2.8	3.2	2.7

3.4.1 合格指数 Y_1

通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合，得到各因素对排种合格指数 Y_1 影响的回归模型为

$$Y_1 = 93.66 + 0.9X_1 - 0.8X_2 - 0.64X_3 + 0.038X_1X_2 + 0.19X_1X_3 - 0.39X_2X_3 - 1.73X_1^2 - 0.59X_2^2 - 1.16X_3^2 \quad (13)$$

回归方程的显著性检验如表 4 所示。根据表 4 可知，模型的拟合度极显著（$P < 0.01$）。但吸孔负压和排种轮转速的交互项（X_1X_2）、吸孔负压和种层高度的交互项（X_1X_3）以及排种轮转速和种层高度的交互项（X_2X_3）的 P 值均大于 0.1，说明以上各项对排种合格指数的影响不显著，其他各项的 P 检验均极显著，说明相关试验因素对响应值影响不是简单的线性关系，存在二次关系。失拟项 $P = 0.1269$，不显著，说明无其他影响指标的主要因素。回归方程的决定系数 $R^2 = 0.94$，说明回归方程的预测值与实际值拟合良好。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_1 = 93.66 + 0.9X_1 - 0.8X_2 - 0.64X_3 - 1.73X_1^2 - 0.59X_2^2 - 1.16X_3^2 \quad (14)$$

通过对式(14)回归系数的检验得出，影响排种合格指数的因素主次顺序为吸孔负压、排种轮转速、种层高度。

3.4.2 重播指数 Y_2

通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合，得到各因素对重播指数 Y_2 影响的回归模型为

$$Y_2 = 2.65 + 1.03X_1 - 0.85X_2 + 1.29X_3 - 0.39X_1X_2 - 0.31X_1X_3 + 0.063X_2X_3 + 1.03X_1^2 + 0.16X_2^2 + 1.04X_3^2 \quad (15)$$

回归方程的显著性检验如表 4 所示。根据表 4 可知，模型的拟合度极显著（$P < 0.01$）。但吸孔负压和排种轮转速的交互项（X_1X_2）、吸孔负压和种层高度的交互项（X_1X_3）、排种轮转速和种层高度的交互项（X_2X_3）以及排种轮转速的二次项（X_2^2）的 P 值均大于 0.1，说明以上各项对排种重播指数的影响不显著，其他各项的 P 检验均极显著或显著，说明相关试验因素对响应值的影响不是简单的线性关系，存在二次关系。失拟项 $P = 0.0523$，不显著，说明无其他影响指标的主要因素。回归方程的决定系数 $R^2 = 0.8454$，说明回归方程的预测值与实际值拟合良好。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_2 = 2.75 + 1.03X_1 - 0.85X_2 + 1.29X_3 + 1.03X_1^2 + 1.04X_3^2 \quad (16)$$

通过对式(16)回归系数的检验得出，影响重播指数的因素主次顺序为种层高度、吸孔负压、排种轮转速。

3.4.3 漏播指数 Y_3

通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合，得到各因素对漏播指数 Y_3 影响的回归模型为

$$Y_3 = 3.69 - 1.92X_1 + 1.64X_2 - 0.65X_3 + 0.35X_1X_2 + 0.13X_1X_3 + 0.32X_2X_3 + 0.7X_1^2 + 0.43X_2^2 + 0.12X_3^2 \quad (17)$$

回归方程的显著性检验如表 4 所示。根据表 4 可知，模型的拟合度极显著（$P < 0.01$）。但吸孔负压和排种轮转速的交互项（X_1X_2）、吸孔负压和种层高度的交互项（X_1X_3）、排种轮转速和种层高度的交互项（X_2X_3）以及种层高度的二次项（X_3^2）的 P 值均大于 0.1，说明以上各项对排种漏播指数的影响不显著，其他各项的 P 检验均极显著或显著，说明相

关试验因素对响应值的影响不是简单的线性关系，存在二次关系。失拟项 $P=0.061\,2$，不显著，说明无其他影响指标的主要因素。回归方程的决定系数 $R^2=0.941\,8$，说明回归方程的预测值与实际值拟合良好。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_3=3.76-1.92X_1+1.64X_2-0.65X_3+0.7X_1^2+0.43X_2^2 \quad (18)$$

通过对式(18)回归系数的检验得出，影响漏播指数的因素主次顺序为吸孔负压、排种轮转速、种层高度。

3.4.4　各行排量一致性变异系数 Y_4

通过试验以及对试验数据进行多元回归拟合，得到各因素对各行排量一致性变异系数 Y_4 影响的回归模型为

$$Y_4=2.76-1.14X_1+1.55X_2-0.12X_3-0.43X_1X_2-0.05X_1X_3+0.75X_2X_3+0.89X_1^2+0.88X_2^2+0.29X_3^2 \quad (19)$$

回归方程的显著性检验如表 4 所示。根据表 4 可知，模型的拟合度极显著($P<0.01$)。但种层高度(X_3)、吸孔负压和排种轮转速的交互项(X_1X_2)、吸孔负压和种层高度的交互项(X_1X_3)以及种层高度的二次项(X_3^2)的 P 值均大于 0.1，说明以上各项对各行排量一致性变异系数的影响不显著，其他各项的 P 检验均极显著或显著，说明相关试验因素对响应值的影响不是简单的线性关系，存在二次关系。失拟项 $P=0.386\,0$，不显著，说明无其他影响指标的主要因素。回归方程的决定系数 $R^2=0.906\,4$，说明回归方程的预测值与实际值拟合良好。剔除不显著因素后的回归模型为

$$Y_4=2.93-1.14X_1+1.55X_2+0.75X_2X_3+0.89X_1^2+0.87X_2^2 \quad (20)$$

通过对式(20)回归系数的检验得出，影响各行排量一致性变异系数的因素主次顺序为排种轮转速、吸孔负压、种层高度。

表 4　回归方程方差分析

Tab. 4　Variance analysis of regression equation

方差来源	合格指数				重播指数				漏播指数				各行排量一致性变异系数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	100.30	9	22.63	<0.000 1 **	83.18	9	7.90	0.000 5 **	106.00	9	23.37	<0.000 1 **	82.64	9	13.99	<0.000 1 **
X_1	10.96	1	22.25	0.000 4 **	14.46	1	12.36	0.003 8 **	50.59	1	100.39	<0.000 1 **	17.87	1	27.23	0.000 2 **
X_2	8.63	1	17.53	0.001 1 **	9.78	1	8.36	0.012 6 *	36.80	1	73.02	<0.000 1 **	32.63	1	49.71	<0.000 1 **
X_3	5.64	1	11.46	0.004 9 **	22.76	1	19.46	0.000 7 **	5.74	1	11.39	0.005 0 **	0.21	1	0.32	0.578 8
X_1X_2	0.011	1	0.02	0.882 2	1.20	1	1.03	0.329 4	0.98	1	1.94	0.186 6	1.45	1	2.20	0.161 7
X_1X_3	0.28	1	0.57	0.463 3	0.78	1	0.67	0.428 6	0.13	1	0.25	0.626 8	0.02	1	0.03	0.864 1
X_2X_3	1.20	1	2.44	0.142 3	0.03	1	0.03	0.872 7	0.85	1	1.68	0.217 9	4.50	1	6.86	0.021 2 *
X_1^2	47.35	1	96.16	<0.000 1 **	16.73	1	14.30	0.002 3 **	7.79	1	15.45	0.001 7 **	12.69	1	19.34	0.000 7 **
X_2^2	5.62	1	11.42	0.004 9 **	0.41	1	0.35	0.565 5	3.01	1	5.96	0.029 7 *	12.19	1	18.58	0.000 8 **
X_3^2	21.40	1	43.46	<0.000 1 **	17.31	1	14.80	0.002 0 **	0.22	1	0.43	0.523 7	1.36	1	2.07	0.173 5
残差	6.40	13			15.21	13			6.55	13			8.53	13		
失拟	3.86	5	2.43	0.126 9	10.55	5	3.62	0.052 3	4.45	5	3.39	0.061 2	3.67	5	1.21	0.386 0
误差	2.54	8			4.66	8			2.10	8			4.86	8		
总和	106.70	22			98.38	22			112.55	22			91.17	22		

注：* 表示影响显著($P<0.05$)，** 表示影响极显著($P<0.01$)。

3.5　各因素对排种合格指数的影响

通过 Design-Expert 8.0.6 对数据进行处理，可得到吸孔负压、排种轮转速和种层高度对合格指数的影响，其响应曲面如图 13 所示。任意固定某个因素的水平，根据响应曲面图，分析其余 2 个因素间的交互作用对排种合格指数的影响。

3.5.1　吸孔负压和排种轮转速的交互作用

图 13a 为种层高度为 50 mm 时，吸孔负压和排种轮转速对排种合格指数交互作用的响应曲面图。由图可知，在吸孔负压为 600 ~ 640 Pa，排种轮转速为 35 ~ 42 r/min 时，排种合格指数较高。吸孔负压一定时，随着排种轮转速的增大，排种合格指数先上升后下降。排种轮转速一定时，随着吸孔负压的增大，排种合格指数先上升后下降。

3.5.2　吸孔负压和种层高度的交互作用

图 13b 为排种轮转速为 45 r/min 时，吸孔负压和种层高度对排种合格指数交互作用的响应曲面图。由图可知，在吸孔负压为 600 ~ 640 Pa，种层高度为 40 ~ 50 mm 时，排种合格指数较高。吸孔负压一定时，随着种层高度的增大，排种合格指数先上升后下降。种层高度一定时，随着吸孔负压的增大，排种合格指数先上升后下降。

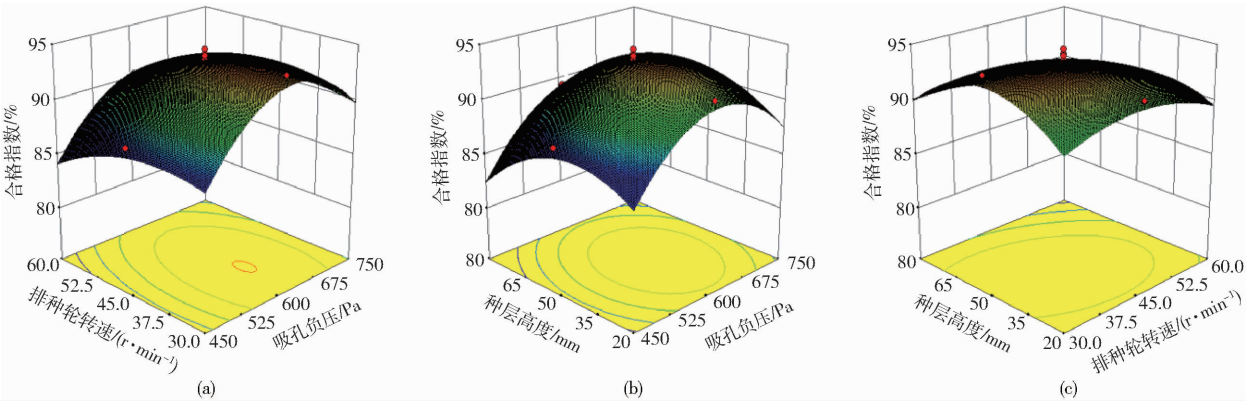

图 13 交互因素对合格指数的影响

Fig. 13 Effects of interactive factors on qualified index

3.5.3 排种轮转速和种层高度的交互作用

图 13c 为吸孔负压为 600 Pa 时,排种轮转速和种层高度对排种合格指数交互作用的响应曲面图。由图可知,在排种轮转速为 38 ~ 41 r/min,种层高度为 44 ~ 50 mm 时,排种合格指数较高。排种轮转速一定时,随着种层高度的增大,排种合格指数先上升后下降。种层高度一定时,随着排种轮转速的增大,排种合格指数先上升后下降。

3.6 最佳参数优化

设定合格指数大于 93.0%,漏播指数小于 3.5%,重播指数小于 3.5%,各行排量一致性变异系数小于 3.0%,优化得到最佳参数范围如图 14 所示。在种层高度为 50 mm 时,黄色区域为最佳参数优化区域,即吸孔负压 560 ~ 660 Pa,排种轮转速 34 ~ 48 r/min 时,合格指数大于 93.0%,漏播指数小于 3.5%,重播指数小于 3.5%,各行排量一致性变异系数小于 3.0%。

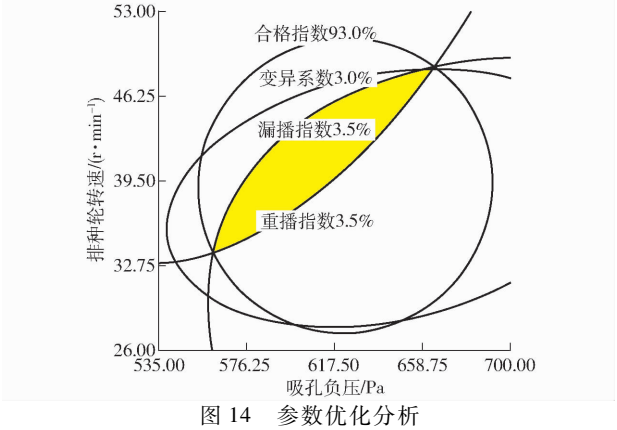

图 14 参数优化分析

Fig. 14 Parameters optimization and analysis

对优化得到的结果进行验证。在相同的试验条件下选取吸孔负压为 650 Pa,排种轮转速为 40 r/min,种层高度为 50 mm,进行 3 次重复验证试验,得到排种器合格指数平均值为 94.1%,且均大于 93.0%;漏播指数平均值为 3.1%,且均小于 3.5%;重播指数平均值为 2.8%,且均小于 3.5%;各行排量一致性变异系数平均值为 2.7%,且均小于 3.0%;试验结果与优化结果相符。

4 结论

(1)设计的超窄行气吸式三七精密排种器,融合机械气力组合充种技术,排种轮两侧加工有水滴形窝眼孔,可进行“一轮双行、多轮串联”播种作业。该排种器结构紧凑,相对于气吸滚筒式排种器气室更小,对风量和风压稳定要求低。可进行超窄行播种作业,适应三七等密集型精密播种作物。

(2)基于离散元法,利用 EDEM 软件,以水滴形窝眼孔加工倾角为试验因素,以合格指数、重播指数和漏播指数为试验指标,进行单因素仿真试验,验证水滴形窝眼孔机械充种性能,得出较佳加工倾角为 50°。

(3)采用二次回归正交旋转组合试验方法进行试验,以吸孔负压、排种轮转速和种层高度作为试验因素,以合格指数、重播指数、漏播指数和各行排量一致性变异系数为试验指标,对试验结果进行回归分析,建立回归方程,得出影响合格指数的主次顺序为吸孔负压、排种轮转速、种层高度。

(4)利用 Design-Expert 8.0.6 软件进行数据优化处理,当种层高度为 50 mm、吸孔负压为 560 ~ 660 Pa、排种轮转速为 34 ~ 48 r/min 时,合格指数大于 93.0%,重播指数小于 3.5%,漏播指数小于 3.5%,各行排量一致性变异系数小于 3.0%。对优化结果进行验证试验,得到的试验结果与优化结果基本一致。

参 考 文 献

[1] 刘树林. 滇中三七优质种苗繁育技术[J]. 现代园艺, 2014(24):52 - 53.

[2] 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 CSAE，2016，32(2)：20－28.（in Chinese）

[3] 张德文，李林，王惠民. 精密播种机械[M]. 北京：农业出版社，1982.

[4] 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.
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.（in Chinese）

[5] 杜佳伟，杨学军，刘立晶，等. 小粒种子精量播种机研究现状及发展趋势[J]. 农业工程，2017，7(6)：9－13.
DU Jiawei，YANG Xuejun，LIU Lijing，et al. Research status and development trend of precision seeder for small seeds[J]. Agricultural Engineering，2017，7(6)：9－13.（in Chinese）

[6] 胡子武，马文鹏，邢金龙，等. 基于响应曲面法的窝眼轮式三七精密排种器性能试验[J]. 华南农业大学学报，2016，37(5)：109－116.
HU Ziwu，MA Wenpeng，XING Jinlong，et al. Performance test of cell wheel notoginseng precision seeding apparatus based on response surface methodology[J]. Journal of South China Agricultural University，2016，37(5)：109－116.（in Chinese）

[7] 康建明，陈学庚，王士国，等. 超窄行棉花精量排种器设计与性能试验[J]. 甘肃农业大学学报，2016，51(2)：134－139.
KANG Jianming，CHEN Xuegeng，WANG Shiguo，et al. Design and experiment of precise metering device for cotton ultra narrow row [J]. Journal of Gansu Agricultural University，2016，51(2)：134－139.（in Chinese）

[8] 袁文胜，吴崇友，金诚谦. 异形孔窝眼轮式油菜排种器设计与试验[J]. 农业机械学报，2009，40(5)：72－75.
YUAN Wensheng，WU Chongyou，JIN Chengqian. Design and experiment on seed-metering device with special cells for cole seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2009，40(5)：72－75.（in Chinese）

[9] 张雷雨，毛欣，马跃，等. 新型窝眼轮式玉米排种装置的设计与试验研究[J]. 中国农机化学报，2017，38(6)：20－25.
ZHANG Leiyu，MAO Xin，MA Yue，et al. Design and test of new cellular wheel metering device for corn seed[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2017，38(6)：20－25.（in Chinese）

[10] 丁力，杨丽，刘守荣，等. 辅助充种种盘玉米气吸式高速精量排种器设计[J]. 农业工程学报，2018，34(22)：1－11.
DING Li，YANG Li，LIU Shourong，et al. Design of air suction high speed precision maize seed metering device with assistant seed filling plate [J]. Transactions of the CSAE，2018，34(22)：1－11.（in Chinese）

[11] 赖庆辉，高筱钧，张智泓. 三七气吸滚筒式排种器充种性能模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(5)：27－37.
LAI Qinghui，GAO Xiaojun，ZHANG Zhihong. Simulation and experiment of seed-filling performance of pneumatic cylinder seed-metering device for *Panax notoginseng*[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(5)：27－37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160505&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.005.（in Chinese）

[12] 赖庆辉，马文鹏，苏微，等. 气吸圆盘式微型薯排种器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(12)：30－37.
LAI Qinghui，MA Wenpeng，SU Wei，et al. Design and experiment of pneumatic disc seed-metering device for mini-tuber[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(12)：30－37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20161205&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.005.（in Chinese）

[13] 陈美舟，刁培松，张银平，等. 大豆窄行密植播种机单盘双行气吸式排种器设计[J]. 农业工程学报，2018，34(21)：8－16.
CHEN Meizhou，DIAO Peisong，ZHANG Yinping，et al. Design of pneumatic seed-metering device with single seed-metering plate for double-row in soybean narrow-row-dense-planting seeder[J]. Transactions of the CSAE，2018，34(21)：8－16.（in Chinese）

[14] 李杞超，陈海涛，纪文义. 大豆窄行密植平作高速气吸式精密播种机性能试验[J]. 农机化研究，2013，35(4)：163－167.
LI Qichao，CHEN Haitao，JI Wenyi. Experiment of high-speed vacuum precision planter matched with soybean narrow-row-flat-dense seeding technique[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2013，35(4)：163－167.（in Chinese）

[15] 项德响. 大豆窄行密植平作高速气吸式精密播种机关键部件的研究[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2010.
XIANG Dexiang. Research on key parts of high-speed vacuum precision planter matched with soybean narrow-row-flat-dense seeding technique[D]. Harbin：Northeast Agricultural University，2010.（in Chinese）

[16] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(12)：58－67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20171207&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.007.（in Chinese）

[17] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(7)：78－86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170710&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2017.07.010.（in Chinese）

[18] 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.

[19] BARUT Z B, ÖZMERZI A. Effect of different operating parameters on seed holding in the single seed metering unit of a pneumatic planter[J]. Turkish Journal of Agriculture & Forestry, 2004, 28(6):435 - 441.

[20] 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.

[21] GAIKWARD 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.

[22] 史嵩, 张东兴, 杨丽,等. 气压组合孔式玉米精量排种器设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(5):10 - 18.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Design and experiment of pneumatic maize precision seed-metering device with combined holes[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(5):10 - 18. (in Chinese)

[23] 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(5):75 - 86.
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(5):75 - 86. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180409&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.009. (in Chinese)

[24] 殷德峰. 气力窝眼轮式小粒径种子排种器设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
YIN Defeng. Design and experimental study on pneumatic cell wheel seedmeter for small size seeds [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[25] 任闯, 高筱钧, 苏微,等. 三七种子的物理机械特性试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2015, 41(1):109 - 112.
REN Chuang, GAO Xiaojun, SU Wei, et al. Experimental study on physical and mechanical characteristics of *Panax notoginseng* seeds[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2015, 41(1):109 - 112. (in Chinese)

[26] 张波屏. 播种机械设计原理[M]. 北京:机械工业出版社, 1982.

[27] 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.

[28] 鹿瑶, 吕钊钦, 郑文秀,等. 玉米窝眼轮排种器性能影响因素试验研究——基于 EDEM[J]. 农机化研究, 2018, 40(6):155 - 161.
LU Yao, LÜ Zhaoqin, ZHENG Wenxiu, et al. Research and experiment on nest hole wheel seed-metering device of maize—based on EDEM [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6):155 - 161. (in Chinese)

[29] 刘涛, 何瑞银, 陆静,等. 基于 EDEM 的窝眼轮式油菜排种器排种性能仿真与试验[J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(3):126 - 132.
LIU Tao, HE Ruiyin, LU Jing, et al. Simulation and verification on seeding performance of nest hole wheel seed-metering device base on EDEM[J]. Journal of South China Agricultural University, 2016, 37(3):126 - 132. (in Chinese)

[30] 高雄, 张震. 2BQM - 2 型播种机气吸式排种器气流场的分析与试验研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(5):60 - 64.
GAO Xiong, ZHANG Zhen. Research on the optimum design platform of corn bowl seedling seeder metering device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(5):60 - 64. (in Chinese)

[31] 任永飞, 林蜀云, 汤耿,等. 气吸式播种器排种盘结构参数分析及优化——基于 Fluent 软件[J]. 农机化研究, 2018, 40(6):24 - 28.
REN Yongfei, LIN Shuyun, TANG Geng, et al. Structural parameter analysis and optimization of metering disc in air-suction seed metering device—based on Fluent software[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6):24 - 28. (in Chinese)