doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.08.005

基于 Rocky Dem 的宁前胡排种器设计与试验

曹成茂[1,2]　丁武阳[1,2]　刘忠滨[1,2]　安敏慧[1,2]　张雪晨[1,2]　秦　宽[1,2]

(1.安徽农业大学工学院,合肥 230036;2.安徽省智能农机装备工程实验室,合肥 230036)

摘要:针对轻质、异形不规则的宁前胡种子存在流动性差、易破损等难题,基于宁前胡的种子物性参数和种植农艺要求,设计了一种马蹄形轮式"条播"排种器。通过充种过程的分析,得知马蹄形型孔可提高种子流动性、减少种子损伤。利用 Rocky Dem 离散元仿真软件进行单因素试验,由 Particles Energy Spectra 模块分析种子与排种轮的碰撞能量预测种子破损情况。以排种轮转速和导种槽倾角为试验因素进行二次回归正交旋转组合试验,并利用回归模型进行参数优化。结果表明:当排种轮转速为 31.75 r/min、导种槽倾角为 31.05°时,排种性能最优,排种均匀性变异系数为 11.37%、排量稳定性变异系数为 1.02%。通过台架试验验证了不同型孔圆角半径对种子破损情况的变化趋势与仿真试验结果一致,证明了该方法的可行性。马蹄形轮式宁前胡"条播"排种器田间试验与台架试验结果基本一致,能满足宁前胡种植农艺要求。

关键词:宁前胡;马蹄形轮式"条播"排种器;Rocky Dem;种子破损预测

中图分类号:S223.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)08-0053-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Seed Disperser for Ning-guo *Radix peucedani* Based on Rocky Dem

CAO Chengmao[1,2]　DING Wuyang[1,2]　LIU Zhongbin[1,2]　AN Minhui[1,2]　ZHANG Xuechen[1,2]　QIN Kuan[1,2]

(1. *School of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*

2. *Anhui Province Engineering Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery and Equipment*, *Hefei* 230036, *China*)

Abstract: The seeds of Ning-guo *Radix peucedani* are light, heterogeneous and irregular with problems of poor mobility and easy breakage. Based on the seed physical parameters and agronomic requirements of Ning-guo *Radix peucedani* seeds, a horseshoe wheel strip planter was designed. Analysis of the seed filling process showed that horseshoe holes can improve seed mobility and reduce seed damage. Single factor test was done by using Rocky Dem discrete element simulation software. Analysis of collision energy between seeds and seed dispenser wheels was carried out by using the Particle Energy Spectra module to predict seed breakage. A quadratic regression orthogonal rotational combination test was carried out with seed discharge wheel speed and seed guide tilt as test factors. Parameters were optimized by using regression models. The results showed that when the seed discharge wheel speed was 31.75 r/min and the seed guide tilt was 31.05°, the seed discharge performance was optimal with a coefficient of variation of 11.37% for seed discharge uniformity and 1.02% for discharge stability. Bench experiments were conducted to verify the effect of different rounding radii of the type hole on seed breakage. The results were in agreement with the simulation test results, which proved the feasibility of the method. The results of the field test of the seed disperser were consistent with the bench tests and met the agronomic requirements for growing Ning-guo *Radix peucedani*. A prediction method was proposed for the effect of different factors on seed breakage.

Key words: Ning-guo *Radix peucedani*; horseshoe wheel strip planter; Rocky Dem; seed breakage prediction

收稿日期:2023-02-28　修回日期:2023-05-31

基金项目:国家自然科学基金项目(52105239)和安徽省农业竞争力提升科技行动项目(AHSJXY202034060014)

作者简介:曹成茂(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail:ccm@ahau.edu.cn

0 引言

宁前胡是一种药用价值很广的中药材[1-2]。宁前胡种植主要为人工播种,播种时散布较大,行间生长前胡苗,影响中耕除草与收获。轻质、异形不规则的宁前胡种子存在流动性差、易破损等问题。

排种器是影响播种效果的最关键部件,一种高效可靠的排种器是保证播种机工作质量和效率的关键[3-6]。根据工作原理,排种器分为机械式和气力式两种类型[7-9]。气力式排种器对种子的适应性好,单粒精度高,种子损伤率低,但其结构复杂、能耗高,对工作环境要求严格[10-15]。机械式排种器具有结构简单、通用性强、易于实现播种等优点[16-18],已成为丘陵山区宁前胡机械化播种的首选。苏微等[19]设计了轮勺式半夏精密排种器,以特殊的种勺克服半夏种子形状不规则的播种难题;赖庆辉等[20]设计了一种链勺翻转清种式蚕豆精密排种器,通过种勺翻转清除多余种子,从而解决重播指数高的难题;陈玉龙等[21]在投种位置设计组合式导种管能适配多种工作速度,保证粒距均匀性。赖庆辉等[22]在排种轮上增加凸包结构,增加对种群的扰动,从而提高排种性能。此外文献[23-24]针对形状不规则的种子也提出了不同的方法,以提高排种效果。以上研究通过不同方法提高排种性能,但忽略了排种过程中种子的破损情况(种子的破损会导致作物出苗率降低)。

本文基于农艺要求和宁前胡种子的物性参数,提出一种马蹄形轮式宁前胡"条播"排种器,通过理论分析和仿真试验确定排种轮结构参数,并提出一种预测种子破损情况的方法,进行台架试验和田间试验对其验证,以期解决宁前胡种子流动性差、易破损的难题。

1 宁前胡种植农艺

宁前胡垄作种植农艺要求如图 1 所示,前胡播种方式为"条播"(要求在每一段之间都保留一小段间隔,如图 1b 所示),因此选用窝眼轮式排种器,图中 γ 为充种区角度,φ 为间隔区角度,S_1 为种带长度,S_2 为间隔长度。播种时间分为冬播(12 月上旬)和春播(2 月上旬至清明节期间)[25],采用 3 行播种,行距为 250 mm,种带宽度为 50 mm,播种深度为 30 mm,播种量为 22.5~37.5 kg/hm^2。其播种量为型孔参数的设计提供依据,其他参数为整机设计提供依据。

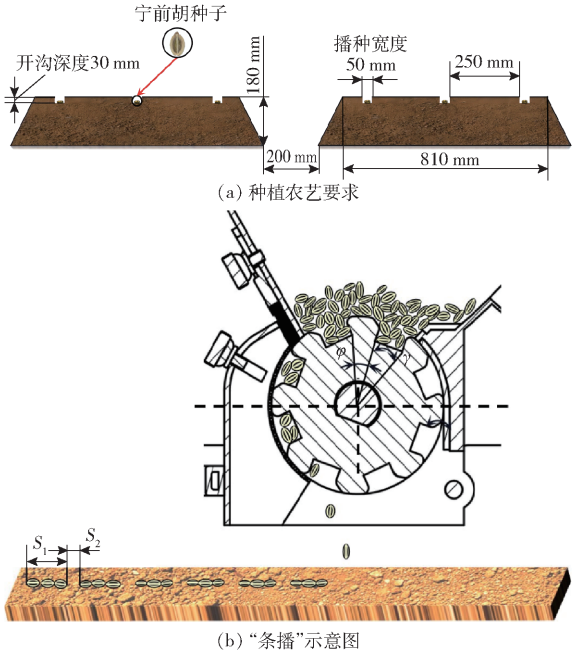


图 1 宁前胡种植农艺示意图

Fig. 1 Agronomic diagram of Ning-guo *Radix peucedani* cultivation

2 播种装置结构和工作原理

2.1 宁前胡播种机

宁前胡播种机主要由排种装置、汽油机、开沟器、变速箱等部分组成,机器结构紧凑,质量轻,转弯半径小,如图 2 所示。作业时,将排种装置之间间距调整为 250 mm,开沟深度调为 30 mm,由汽油机提供前进动力,通过从动地轮驱动排种装置工作,种子通过排种装置输送至开沟器开出的种沟内,完成播种。

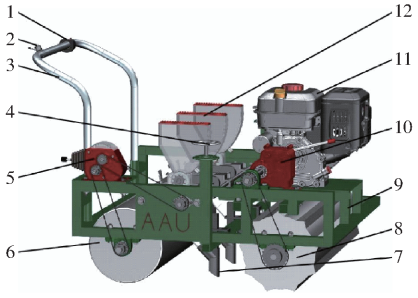


图 2 宁前胡播种机三维结构图

Fig. 2 3D structure of Ning-guo *Radix peucedani* seeder

1. 汽油机启动开关 2. 油门控制器 3. 扶手 4. 开沟器深度调节装置 5. 变速箱 6. 地轮 1 7. 开沟器 8. 地轮 2 9. 机架 10. 汽油机减速器 11. 汽油机 12. 排种装置

2.2 排种器工作原理

宁前胡排种器主要由排种盒、排种轮、柔性护种装置、软质刮种毛刷和传动装置等组成,如图 3 所示。

如图 4 所示,当排种器工作时,轻质异形的宁前

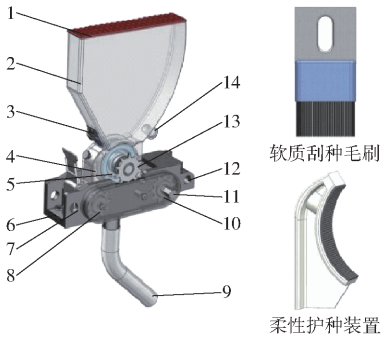


图 3　排种器示意图

Fig. 3　Diagram of seed dispenser

1. 种盒盖子　2. 种盒　3. 软质刮种毛刷　4. 柔性护种装置　5. 排种轮　6. 固定装置　7. 固定孔 1　8. 传动轮 1　9. 排种管　10. 传动轮 2　11. 传动轴　12. 固定孔 2　13. 排种轴　14. 泄种孔

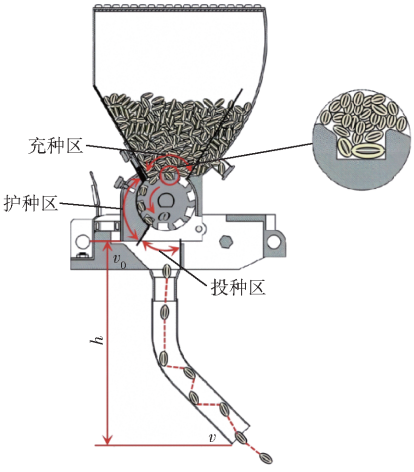


图 4　排种器工作示意图

Fig. 4　Work diagram of seed-metering device

胡种子在充种区通过排种轮导种槽的扰动，使种群处于离散状态从而避免“结拱”的发生，在重力、种群间作用力和排种轮扰动携带的共同作用下种子充入异形孔，在软质刮种毛刷的作用下将多余的种子刮去，然后充入异形孔的种子在柔性护种装置的保护下进入投种区，在重力和离心力的共同作用下种子全部进入投种区。为了降低种子破损率，柔性护种装置由 3D 打印的护种壳体和柔性皮毛组成，柔性皮毛可以更好地保护种子，起到缓冲种子受到的力，又可以保证排种轮的通过性。宁前胡种子在弧形排种管内经过一系列的碰撞，从而调节下落种子速度，种子以较低速度和动能落到沟中，避免了种子弹跳或滚动而发生位移的情况，提高了排种均匀性。

2.3　排种器充种过程

排种器充种过程是影响播种精度的关键因素，充种过程是种群间作用力、种子重力、种子与排种轮间等多种作用力所组成的动力学系统。在排种器工作时，种子受到排种轮的作用力，使种子产生滑移和滚动，使种子脱离种群进入型孔。为解决宁前胡种子流动性差的难题，将型孔设计为带导种槽的异形孔，拥有导种槽的型孔可以增加排种轮对种群的扰动范围，使种子更加容易流入型孔，从而提高排种性能，如图 5 所示。

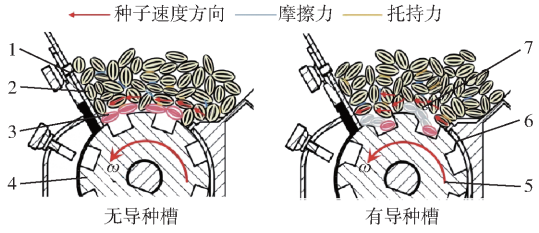


图 5　有无导种槽情况下种子的充种状态

Fig. 5　Seed filling status with and without seed guide grooves

1. 壳体　2. 宁前胡种子　3. 目标种子　4. 排种轮　5. 排种轮转动方向　6. 导种槽　7. 目标种子运动轨迹

相同孔径的型孔，在单位时间内排量因孔型而定，型孔表面呈圆角，流动性最好，说明种子通过型孔时阻力减小，速度增大，因为种子在流向型孔时，其长轴轴心线与型孔中心线的夹角因种子沿圆角斜面滑动而变小，种子流紧缩系数却增大，所以排量增大[26]。由此可知，当型孔表面呈圆角时，种子与型孔表面的接触面积增大，种子与型孔圆角之间的摩擦力减小，提高了种子流入型孔的速度，使种子进入型孔时更加顺畅。同时型孔孔壁的锋利度降低，避免孔壁刮擦或损坏种子的表面，达到降低种子破损的效果，如图 6 所示。

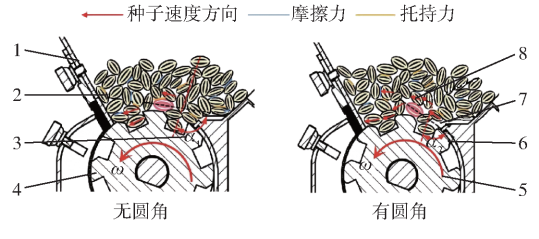


图 6　有无圆角情况下种子进入型孔的状态

Fig. 6　State of seeds entering type hole with or without rounded corners

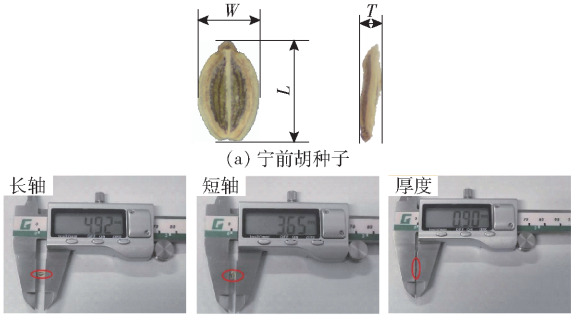
1. 壳体　2. 宁前胡种子　3. 无圆角时种子长轴轴心线与型孔中心线的夹角　4. 排种轮　5. 排种轮转动方向　6. 有圆角时种子长轴轴心线与型孔中心线的夹角　7. 型孔圆角　8. 目标种子

3　关键结构设计

3.1　宁前胡种子基本参数

种子物性参数是设计排种器的重要因素，随机选择 200 颗宁前胡种子为试验对象，测得宁前胡种子的三轴尺寸平均值，为 4.32、2.67、0.64 mm，三轴尺寸的最大值为 L_{max} = 6.30 mm、W_{max} = 4.02 mm、T_{max} = 1.48 mm，最小值为 L_{min} = 2.80 mm、W_{min} = 1.40 mm、T_{min} = 0.2 mm，含水率 9.44%，千粒质量 3.34 g，种子密度 0.299 g/cm^3，呈“瓜子形”扁平状，

如图 7 所示。



(a) 宁前胡种子

(b) 宁前胡种子尺寸测量

图 7 宁前胡种子物性参数测定

Fig. 7 Determination of physical parameters of seeds of Ning-guo *Radix peucedani*

3.2 排种轮直径

排种轮直径是影响排种效果的显著因素,是确定型孔数、排种轮线速度等参数的重要依据[27]。排种轮直径与充种时间的关系为

$$\begin{cases} t = l/v_1 \\ l = \theta(R - C) \\ v_1 = 2\pi n(R - C) \end{cases} \tag{1}$$

式中 t——充种时间,s

l——充种区弧长,mm

v_1——排种轮线速度,m/s

θ——充种区弧度,rad

R——排种轮半径,mm

C——型孔深度,mm

n——排种轮转速,r/min

由式(1)可得

$$t = \frac{\theta}{2\pi n} \tag{2}$$

由式(2)得出,充种时间与排种轮直径无关。根据文献[27-28]可知,排种轮直径为 50~80 mm。前胡主要种植于丘陵山区,整机结构设计需小型化。综上所述,选择排种轮直径为 60 mm。

3.3 异形孔设计

型孔的设计基于种子物性参数,在型孔长度方向和宽度方向都应能充入长轴尺寸最大的种子,考虑到充种过程中种子可能呈竖立姿态,因此型孔深度应大于种子长轴最大值。设计排种器孔型时需考虑调整系数,所以型孔长度、宽度、深度应满足

$$\begin{cases} L_{\max} \leqslant A \leqslant L_{\max} + k_a L_{\max} \\ L_{\max} \leqslant B \leqslant L_{\max} + k_b W_{\max} \\ L_{\max} \leqslant C \leqslant L_{\max} + k_c T_{\max} \\ C < B < A \end{cases} \tag{3}$$

式中 A——型孔长度,mm

B——型孔宽度,mm

k_a——长度调整系数,取 1

k_b——宽度调整系数,取 0.8

k_c——深度调整系数,取 0.6

结合宁前胡的种子物性参数和播种量要求,型孔长度 A、宽度 B、深度 C 分别为 10、8、6.5 mm。

针对轻质、异形不规则的宁前胡种子,需要导种槽对种群进行扰动,进而提高流动性,导种槽倾角应大于种子与排种轮材料的最大静摩擦角才能起到扰种的作用(种子与排种轮材料的最大静摩擦角 α 为 24.9°)。由图 8 可得

$$\begin{cases} D = \dfrac{C}{\tan\alpha} - \dfrac{1}{2}A \\ E = C - D\tan\alpha \end{cases} \tag{4}$$

式中 D——导种槽长度,mm

E——导种槽深度,mm

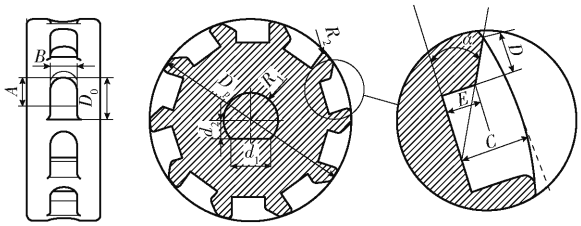


图 8 排种轮结构示意图

Fig. 8 Diagram of seed discharge wheel structure

当 $\alpha > 45°$时,导种槽长度开始减小,导种槽深度开始增大,导种槽的扰动能力和充种能力开始下降,不利于排种均匀性的提高,初步选定导种槽倾角为 35°,则 $D = 4.28$ mm,$E = 3.51$ mm。排种轮采用 3D 打印技术制造,型孔类似马蹄形。

对充种过程的分析可得,当排种轮的型孔表面呈倒圆角时,可提高种子流动性,提高充种效果,降低种子破损率。由于当倒圆角半径大于 2 mm 时,面导圆重叠,导致型孔表面无法导圆,初步选定倒圆角半径 R_2 为 1 mm。

3.4 型孔数量

为保证排种器播量能满足农业技术要求,排种轮每一转的排种量 q_1 和农业技术要求的排种量 q_2 应相等,由此得出两者的关系为

$$\begin{cases} q_1 = q_2 \\ q_1 = ZV\rho a_0 \\ q_2 = \dfrac{\pi D_1 bQ(1+\sigma)}{10i} \\ \sigma = \dfrac{S - 2\pi R_1 n_1}{2\pi R_1 n_1} \times 100\% \\ V = \left\{ \left[\left(A - \dfrac{1}{2}B \right) B + \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{1}{2}B \right)^2 \pi \right] C + \right. \\ \qquad \left. \dfrac{1}{2}BD(C - E) \right\} \times 10^{-3} \end{cases} \tag{5}$$

式中　Z——孔数，个

V——型孔体积，cm^3

ρ——种子密度，g/cm^3

a_0——型孔内种子充满系数，取 0.8

D_1——地轮直径，取 0.25 m

b——行距，m

Q——农业技术要求播种量，kg/hm^2

σ——地轮滑移系数

i——传动比，排种轮转速与地轮转速之比，取 0.4

S——地轮走过的实际距离，取 50 m

n_1——在行程 S 内地轮的转数，取 62

R_1——地轮半径，取 0.25 m

由式(5)可得

$$Z=\frac{\pi DbQ(1+\sigma)}{10V\rho a_0 i} \tag{6}$$

由式(6)取整得 $6<Z<11$。

3.5　充种过程力学分析

充种过程中多粒宁前胡种子同时充入型孔中，可将充入型孔的种子群视为一个整体，对其质心进行力学分析。以排种轮切线方向为 x 轴，垂直于切线方向为 y 轴，如图 9 所示，种子在平衡状态下的受力方程为

$$\begin{cases} f_1+F_1\cos\varepsilon=F_2\sin\beta+G\sin\beta+f_2\cos\beta \\ F_r+F_1\sin\varepsilon+f_2\sin\beta=G\cos\beta+F_2\cos\beta \\ f_1=u_1F_1\sin\varepsilon \\ f_2=u_2F_2 \\ F_r=m\omega^2R \\ G=mg \\ \omega=\dfrac{2\pi n}{60} \end{cases} \tag{7}$$

式中　F_1——型孔对种群支持力，N

F_2——种群对质心挤压力，N

F_r——种群质心离心力，N

G——种群重力，N

m——种群质量，kg

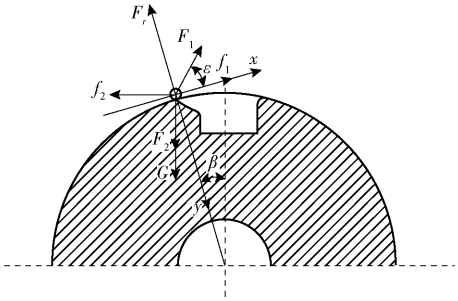


图 9　种群充种过程力学分析

Fig. 9　Mechanical analysis diagram of population seed filling process

f_1——种群质心与型孔的摩擦力，N

f_2——种群质心与种群的摩擦力，N

u_1——种子与型孔表面摩擦因数

u_2——种子之间的摩擦因数

ω——排种轮角速度，rad/s

β——起始充种角，(°)

ε——F_1 方向与 x 轴方向的夹角，(°)

由式(7)可得

$$\beta=\arcsin\frac{f_1(F_2+G)+F_1(F_2+G)\cos\varepsilon-f_2F_r-F_1f_2\sin\varepsilon}{(F_2+G)^2+f_2^2} \tag{8}$$

由式(8)可知，当其他参数一定时，随着排种轮转速的增加起始填充角减小，但起始填充角过小会使充种处于不稳定状态，由此可知排种轮极限转速受到填充角的影响。现有研究表明[13]，排种轮极限转速与填充角的关系式为

$$n_{\max}=\frac{30}{\pi}\sqrt{\frac{g\sin\beta_{\max}}{R}} \tag{9}$$

基于现有研究设计最大填充角 $\beta_{\max}$ 为 35°，由此得出排种轮极限转速为 130.78 r/min。

4　Rocky Dem 离散元仿真

4.1　模型建立

以宁前胡种子作为建模对象，在 NX. 中以种子三轴平均值创建模型，并导出 STL 文件。由于宁前胡种子呈异形扁平状，在 EDEM 软件中生成的种子模型与实际不符并且需要大量颗粒填充(图 10)，导致仿真计算量过大(通过预试验发现，由于种子模型与实际种子不同，仿真试验数据与台架试验数据差距较大)，而 Rocky Dem 软件利用 Custom Polyhedron 功能，可以得到与 NX. 中一样的模型，无需使用颗粒填充，更加贴近现实。选用 Linear Spring Coulomb Limit 模型，并开启 Particles Energy Spectra 模块分析种子与排种轮的碰撞能量。通过 NX. 创建排种器模型和土壤模型，导入 Rocky Dem 中，如图 11 所示。

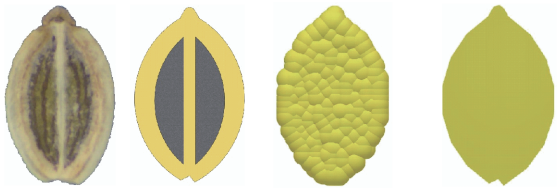


图 10　宁前胡种子实物图与仿真模型

Fig. 10　Physical drawing and simulation model of Ning-guo *Radix peucedani* seeds

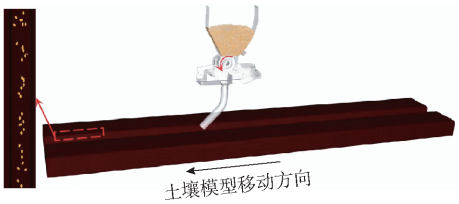


图 11 排种器仿真模型

Fig. 11 Simulation models of seed-metering device

排种器工作时,主要是排种轮、排种盒、土壤与种子接触,其中排种轮和排种盒为 PLA 热塑性塑料,宁前胡种子、PLA 热塑性塑料和土壤的参数及相互之间的接触参数如表 1 所示[29]。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

参数	宁前胡种子	PLA 热塑性塑料	土壤
泊松比	0.3	0.35	0.2
剪切模量/Pa	5.025×10^8	3×10^9	1×10^6
密度/(g·cm^{-3})	0.129	1.24	1.30
碰撞恢复系数(与宁前胡种子)	0.50	0.45	0.50
静摩擦因数(与宁前胡种子)	0.53	0.51	0.50
滚动摩擦因数(与宁前胡种子)	0.05	0.054	0.01
杨氏模量/Pa	$1.306\,5\times10^9$	8.1×10^9	2.4×10^6

4.2 单因素仿真试验

为验证理论分析的合理性,对其进行单因素仿真试验分析,以异形孔数、型孔圆角半径、导种槽倾角和排种轮转速为试验因素,各因素的固定值为 8、1 mm、35°和 30 r/min,土壤平移速度设为 0.32 m/s,以排种均匀性变异系数 Y_1 和排量稳定性变异系数 Y_2 为试验指标。

仿真试验时间设置为 4 s,0 ~ 1 s 生成颗粒,然后排种轮与土壤开始运动。仿真结束后,在土壤上随机选择一段 50 cm 的种带,并将其划分为 5 段,通过 Rocky Dem 后处理添加 Cube 统计每段上种子数量,用来计算排种均匀性,并将排种管口添加 Cube 用来统计排种量。

4.2.1 异形孔数

异形孔数分别为 6、8、10、11 时排种性能如表 2 所示。通过表 2 可知,试验指标 Y_1 和 Y_2 都呈先降低后升高的趋势,分析原因为孔数较大时,型孔充种时间较短,排种性能下降。为了进一步分析不同孔数对排种性能的影响,通过 Rocky Dem 后处理导出种子与种子的法向力和种子与排种轮产生的碰撞能量,如图 12 所示。

通过图 12a 可知,当孔数较大时,法向力波动较大,说明此时种群不稳定,不利于充种。孔数为 6 和 8 时法向力波动较为稳定,而孔数为 6 时型孔间距过大,导致排种性能不佳。由图 12b 可知,随着孔数增加,种子与排种轮产生的碰撞能量越大,而种子破损主要是因为排种轮与种子产生碰撞导致的,由此可以通过种子与排种轮产生的碰撞能量来预测种子破损情况,而孔数 8 的碰撞能量较小,说明孔数 8 的种子破损率较低。综上所述,选择孔数为 8。

表 2 不同异形孔数的排种性能

Tab. 2 Seeding performance with different numbers of profiled holes

异形孔数	试验序号	排种均匀性变异系数/%	排量稳定性变异系数/%	排种均匀性变异系数平均值/%	排量稳定性变异系数平均值/%
6	1	22.07	2.91	23.25	2.95
	2	24.99	3.12		
	3	22.70	2.83		
8	1	12.65	1.07	13.33	1.35
	2	13.52	1.61		
	3	13.89	1.38		
10	1	15.94	2.54	16.56	2.79
	2	16.31	3.15		
	3	17.43	2.68		
11	1	18.95	3.67	18.56	4.37
	2	18.60	4.57		
	3	18.12	4.86		

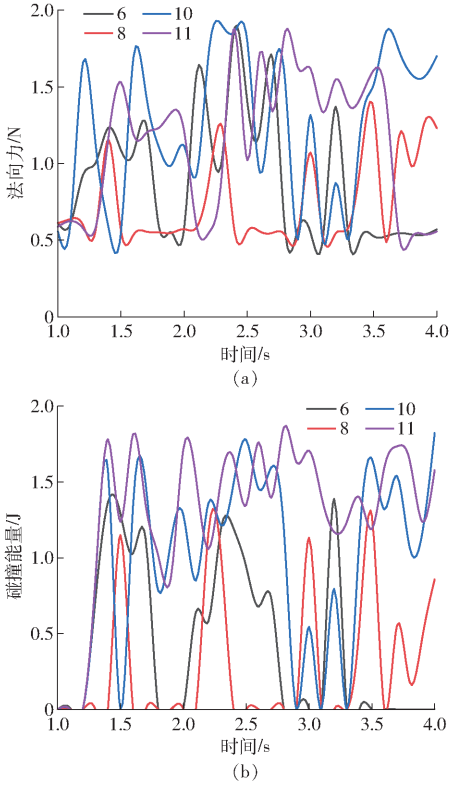


图 12 不同异形孔数对种群的影响

Fig. 12 Effect of different numbers of profiled holes on population

4.2.2　型孔圆角半径

型孔圆角半径分别为 0、0.5、1、1.5 mm 时排种性能如表 3 所示。由表 3 可知，当型孔从无圆角到圆角半径为 1.5 mm 的过程中，试验指标 Y_1 和 Y_2 都呈先降低后升高的趋势。

表 3　不同型孔圆角半径的排种性能

Tab.3　Seeding performance of different rounding radii of type hole

型孔圆角半径/mm	试验序号	排种均匀性变异系数/%	排量稳定性变异系数/%	排种均匀性变异系数平均值/%	排量稳定性变异系数平均值/%
0	1	14.62	5.73	16.45	4.94
	2	14.93	3.99		
	3	15.53	5.10		
0.5	1	14.30	2.82	14.62	3.28
	2	14.59	3.79		
	3	14.96	3.22		
1.0	1	13.74	1.23	13.76	1.46
	2	14.12	1.43		
	3	13.41	1.72		
1.5	1	16.77	1.02	16.17	1.61
	2	15.86	1.72		
	3	15.88	2.09		

通过图 13a 可知，圆角半径为 0 和 0.5 mm 时法向力波动较大，种群不稳定不利于充种，而圆角半径为 1.5 mm 时法向力非常平稳，分析原因为圆角半径过大导致扰种效果下降，使种群处于过于平稳状态，容易造成“卡种”现象。由图 13b 可知，无圆角时碰撞能量波动较大，出现多个波峰，种子受到排种轮力的作用下破损率增加，随着圆角半径的增加碰撞能量波动逐渐减小。分析原因为随着圆角半径的增加型孔孔壁锋利度降低，种子与型孔产生的碰撞能量也逐渐降低。圆角半径为 1 mm 时法向力和碰撞能量都较为稳定，因此选择型孔圆角半径为 1 mm。

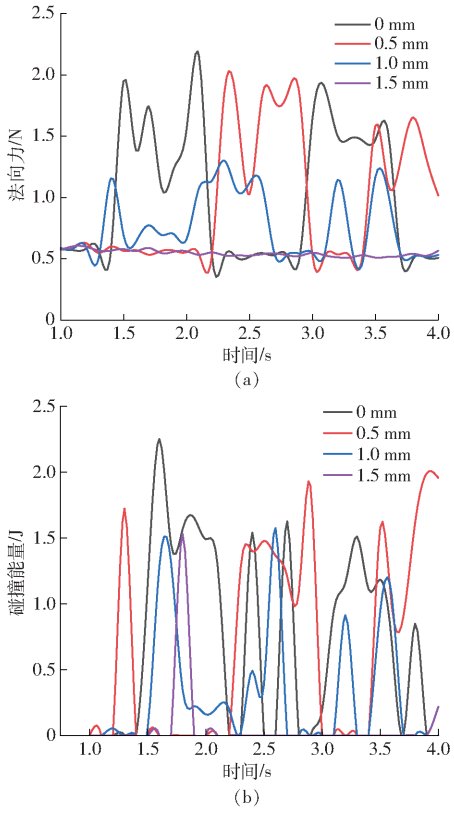


图 13　不同型孔圆角半径对种群的影响

Fig. 13　Effect of different rounding radii of the type hole on population

4.2.3　导种槽倾角

导种槽倾角分别为 25°、35°、45°、90°时排种性能如表 4 所示。由表 4 可知，随着导种槽倾角的增大，试验指标 Y_1 和 Y_2 都呈先降低后升高的趋势。由图 14a 可知，随着导种槽倾角的增大，种群的法向力趋向稳定，说明随着导种槽倾角的增加，导种槽长度 D 逐渐降低，导致扰种效果逐渐降低，而导种槽倾角为 25°时型孔体积过大，充种数量过多，导致排种均匀性较差。当导种槽倾角到达 90°时已经无导种槽，所以导种槽倾角为 90°时排种性能最差。由图 14b 可知，随着导种槽倾角的增加，碰撞能量的波峰逐渐降低。分析原因，当导种槽倾角增加，型孔面积逐渐降低，型孔与种子的接触范围降低，即种子与排种轮型孔的碰撞次数降低。为考虑到后续试验中因素之间的交互作用，将导种倾角确定为 25°～45°。

表 4　不同导种槽倾角的排种性能

Tab.4　Performance of seed discharge with different seed guide tilt

导种槽倾角/(°)	试验序号	排种均匀性变异系数/%	排量稳定性变异系数/%	排种均匀性变异系数平均值/%	排量稳定性变异系数平均值/%
25	1	15.37	1.78	15.00	1.73
	2	15.02	1.63		
	3	14.60	1.77		
35	1	12.65	1.58	13.52	1.59
	2	14.24	1.54		
	3	13.67	1.66		
45	1	19.60	11.07	19.67	10.52
	2	20.71	10.33		
	3	18.69	10.15		
90	1	24.25	14.77	25.32	13.83
	2	25.16	15.19		
	3	26.54	11.54		

4.2.4　排种轮转速

由表 5 可知，转速为 10 r/min 时排种均匀性最差，但排量稳定性最优，说明当排种轮转速过慢时，导致两个相邻型孔中种子落下时间隔时间过大，导致排种均匀性变异系数过大，而排量稳定性最优

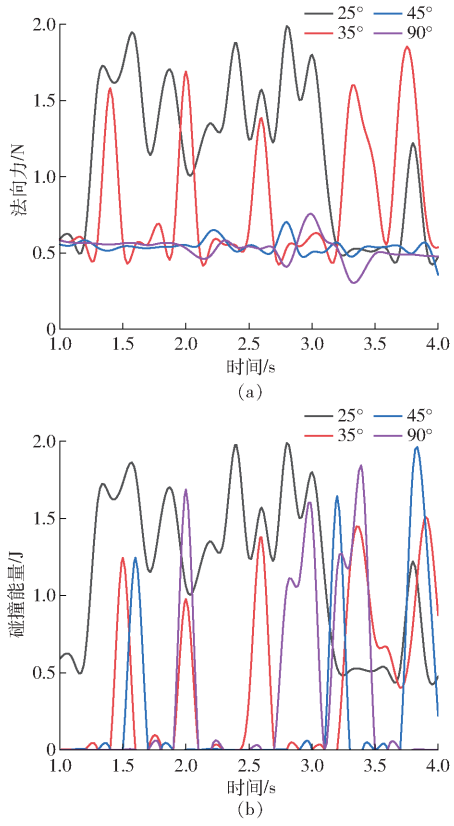


图 14 不同导种槽倾角对种群的影响

Fig. 14 Effects of different seed guide tilt on populations

表 5 不同排种轮转速的排种性能

Tab. 5 Seed discharge performance with different seed discharge wheel speeds

转速/(r·min^{-1})	试验序号	排种均匀性变异系数/%	排量稳定性变异系数/%	排种均匀性变异系数平均值/%	排量稳定性变异系数平均值/%
10	1	75.65	1.20	74.09	1.40
	2	73.23	1.39		
	3	73.38	1.60		
20	1	38.09	1.76	38.60	1.73
	2	39.64	1.68		
	3	38.07	1.75		
30	1	12.83	1.53	13.50	1.81
	2	13.88	1.88		
	3	13.78	2.03		
40	1	17.12	4.29	17.99	4.34
	2	18.04	4.33		
	3	18.80	4.41		

是因为充种时间充足。当排种轮转速过大时,充种时间减少,导致排种性能下降。

由图 15a 可知,转速为 20、30 r/min 时,种群法向力较为平稳,当转速为 40 r/min 时,种群处于不稳定状态,不利于充种。由图 15b 可知,当转速为 40 r/min 时碰撞能量产生多个波峰,说明当转速过高时种子破损率会提高。为考虑到后续试验中因素之间的交互作用,将排种轮转速确定为 20 ~ 30 r/min。

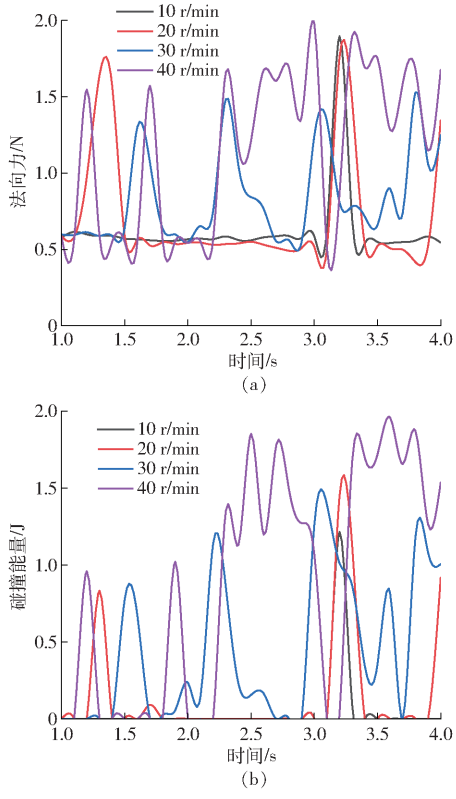


图 15 不同排种轮转速对种群的影响

Fig. 15 Effect of different seeding wheel speeds on population

4.3 二次回归正交旋转组合仿真试验

4.3.1 试验方案与结果

以排种轮转速、导种槽倾角为试验因素,进行二次回归正交旋转组合试验。因素编码如表 6 所示,试验方案及试验结果见表 7,其中 X_1、X_2 为因素的编码值,试验指标分别为排种均匀性变异系数 Y_1、排量稳定性变异系数 Y_2。

表 6 试验因素编码

Tab. 6 Test factors and codes

编码	因素	
	排种轮转速/(r·min^{-1})	导种槽倾角/(°)
-1.414	20.00	25.00
-1	22.93	27.93
0	30.00	35.00
1	37.07	42.07
1.414	40.00	45.00

4.3.2 试验结果分析

利用 Design-Expert 11 软件对本次试验结果进行方差分析,其回归模型方差分析结果如表 8 所示。试验因素与试验指标的回归方程分别为

$$Y_1 = 12.69 - 6.28X_1 + 1.51X_2 + 0.999\,50X_1X_2 + 7.64X_1^2 + 2.41X_2^2 \quad (10)$$

表 7　试验方案与结果

Tab. 7　Experimental protocol and results

序号	因素		指标	
	X_1	X_2	Y_1/%	Y_2/%
1	-1	-1	27.89	1.73
2	1	-1	14.36	2.76
3	-1	1	29.34	6.22
4	1	1	19.79	9.56
5	-1.414	0	37.48	2.49
6	1.414	0	18.26	4.62
7	0	-1.414	15.56	2.31
8	0	1.414	19.24	10.34
9	0	0	13.24	1.32
10	0	0	12.81	1.65
11	0	0	12.57	1.73
12	0	0	12.69	1.66
13	0	0	12.13	1.93

$$Y_2 = 1.66 + 0.922\,8X_1 + 2.83X_2 + 0.577\,5X_1X_2 + 0.980\,4X_1^2 + 2.37X_2^2 \tag{11}$$

由表 8 可知，Y_1、Y_2的回归模型均为极显著，影响排种均匀性变异系数的因素由大到小为排种轮转速、导种槽倾角，影响排量稳定性变异系数的因素由大到小为导种槽倾角、排种轮转速，排种轮转速和导种槽倾角间的交互作用不可忽视。

由图 16 可知，当排种轮转速一定时，随着导种槽倾角的增加，排种均匀性变异系数呈先降低后升高的趋势，当导种槽倾角固定时，随着排种轮转速的增加，排种均匀性变异系数呈先快速下降后缓慢增长的趋势。当排种轮转速一定时，随着导种槽倾角的增加，排量稳定性变异系数呈缓慢降低后迅速增加的趋势，当导种槽倾角固定时，随着排种轮转速的增加，排量稳定性变异系数呈缓慢增加的趋势。

表 8　回归模型方差分析

Tab. 8　Regression model analysis of variance

方差来源	排种均匀性变异系数				排量稳定性变异系数			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	758.51	5	333.25	<0.000 1	114.37	5	350.39	<0.000 1
X_1	315.77	1	693.67	<0.000 1	6.81	1	104.35	<0.000 1
X_2	18.25	1	40.10	0.000 4	64.11	1	982.00	<0.000 1
X_1X_2	3.96	1	8.70	0.021 4	1.33	1	20.44	0.002 7
X_1^2	406.42	1	892.80	<0.000 1	6.69	1	102.42	<0.000 1
X_2^2	40.35	1	88.65	<0.000 1	38.92	1	596.22	<0.000 1
残差	3.19	7			0.457 0	7		
失拟	2.54	3	5.26	0.071 4	0.263 5	3	1.82	0.284 1
误差	0.644 9	4			0.193 5	4		
总和	761.70	12			114.83	12		

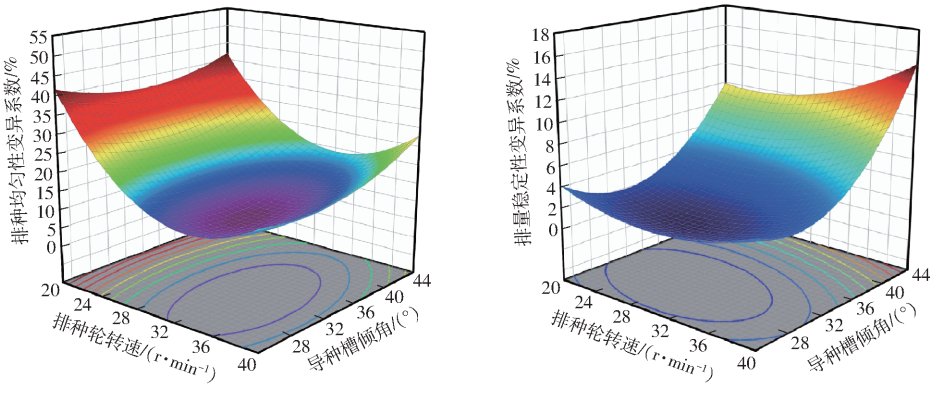


图 16　排种轮转速和导种槽倾角对排种性能指标影响的响应曲面

Fig. 16　Response surfaces of effect of seed discharge wheel speed and seed guide tilting angle on seed discharge performance index

增加的趋势。

4.3.3　试验结果优化

为确定最优工作参数，以排种均匀性变异系数和排量稳定性变异系数最低为优化目标进行优化，建立优化模型为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2) \\ \min Y_2(X_1, X_2) \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1.414 \leqslant X_1 \leqslant 1.414 \\ -1.414 \leqslant X_2 \leqslant 1.414 \end{cases} \end{cases} \tag{12}$$

通过 Design-Expert 11 求解得到排种轮转速为

31.75 r/min、导种槽倾角为 31.05°时性能最优，排种均匀性变异系数为 11.37%、排量稳定性变异系数为 1.02%。

5 排种性能试验

5.1 台架试验

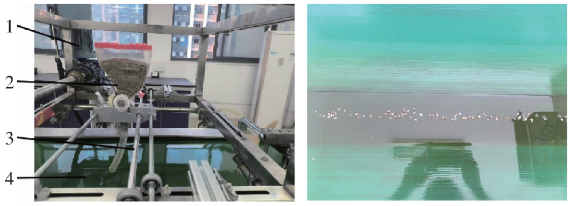
为验证仿真试验数据的可靠性，以宁前胡种子为试验样本，在 JPS－12 型排种器试验台上进行验证试验，如图 17 所示，主要试验器材：3D 打印的排种轮、卷尺、秒表、电子天平、烧杯等。种子破损率计算式为

$$p=\frac{m_1}{m_2}\times 100\% \tag{13}$$

式中 p——种子破损率，%

m_1——破损种子质量，g

m_2——种子总质量，g



(a) 试验台 (b) 试验效果

图 17 排种性能试验台

Fig. 17 Seeding performance test bench

1. 电机 2. 宁前胡排种器 3. 传动轴 4. 传送带

5.1.1 种子破损预测验证

通过 3D 打印机制作孔数为 8，导种槽倾角为 35°，型孔圆角半径为 0、0.5、1、1.5 mm 的排种轮，进行台架试验，试验结果如表 9 所示。由表 9 可知，种子破损率变化趋势与 4.2.2 节中通过碰撞能量预测的变化趋势相同，证明可以通过 Rocky Dem 中的 Particles Energy Spectra 模块来预测宁前胡种子破损情况。

5.1.2 充种性能试验

以排种轮转速为 31.75 r/min、导种槽倾角为 31.05°、其他试验因素不变进行重复试验，得到排种均匀性变异系数平均值为 11.29%、排量稳定性变异系数平均值为 1.05%，优化方案与台架试验具有极高的拟合程度，证明优化模型的可靠性。

5.2 田间试验

为了进一步研究宁前胡排种器的工作性能，在安徽省宁国市胡乐镇宁前胡生产机械化示范基地进行田间试验，如图 18 所示。机具前进速度为 0.32 m/s，播种结束后随机选择 5 个播种区域，以 100 mm 为一区段，连续取 30 段，测量得出排种均匀性变异系数平均值为 10.73%、排量稳定性变异系数平均值为 1.02%、各行排量一致性变异系数平均值为 2.91%、种子破损率为 0.1%，符合国家谷物条播机试验方法标准(GB/T 9478—2005)。田间试验结果表明，本文设计的马蹄形轮式宁前胡“条播”排种器满足宁前胡种植农艺要求。

表 9 不同型孔圆角半径的台架试验结果

Tab. 9 Bench test results for different rounding radii of the type hole

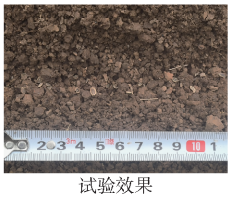
型孔圆角半径/mm	试验序号	排种均匀性变异系数/%	排量稳定性变异系数/%	种子破损率/%	排种均匀性变异系数平均值/%	排量稳定性变异系数平均值/%	种子破损率平均值/%
0	1	15.65	5.32	0.19	15.22	5.38	0.19
	2	15.23	4.97	0.21			
	3	14.78	5.86	0.18			
0.5	1	14.42	2.64	0.13	14.76	2.90	0.15
	2	14.67	2.95	0.15			
	3	15.20	3.12	0.17			
1.0	1	13.33	1.64	0.11	13.43	1.45	0.09
	2	12.97	1.28	0.08			
	3	13.98	1.43	0.09			
1.5	1	16.63	1.22	0.05	16.08	1.47	0.07
	2	16.05	1.05	0.07			
	3	15.55	2.13	0.09			

6 结论

(1)设计了马蹄形轮式宁前胡“条播”排种器，通过对排种器工作原理进行分析和理论计算，确定排种轮直径为 60 mm，型孔长度×宽度×深度为 10 mm×8 mm×6.5 mm。

(2)通过 Rocky Dem 的单因素仿真试验，进一步确定型孔数为 8、型孔圆角半径为 1 mm，并利用 Particles Energy Spectra 模块分析种子与排种轮的碰撞能量，预测种子破损情况。通过二次回归正交试验分析导种槽倾角、排种轮转速对排种性能的影响，试验结果表明，当排种轮转速为 31.75 r/min、导种槽倾角为 31.05°时，排种均匀性变异系数为 11.37%、排量稳定性变异系数为 1.02%，排种性能


试验现场


试验效果


出苗情况

图 18　田间试验

Fig. 18　Field test

最佳。

(3)通过台架试验验证了碰撞能量预测的变化趋势与实际种子破损率变化趋势相同,并对仿真试验的优化结果进行验证,得到排种均匀性变异系数的平均值为 11.29%、排量稳定性变异系数的平均值为 1.05%。田间试验结果为排种均匀性变异系数平均值为 10.73%、排量稳定性变异系数平均值为 1.02%、各行排量一致性变异系数平均值为 2.91%、种子破损率为 0.1%。马蹄形轮式宁前胡"条播"排种器排种性能较好,能满足宁前胡种植农艺要求。

参　考　文　献

[1] 黄莹莹. 宁前胡茎叶枯病菌分离鉴定及有效防治药剂筛选[D]. 合肥:安徽农业大学,2021.
HUANG Yingying. Isolation and identification of stem and leaf blight of *Peucedanum praeruptorum* and screening of effective prevention agents[D]. Hefei:Anhui Agricultural University,2021. (in Chinese)

[2] PARK H J,JEONG J H,PARK S H. Theroot extract of *Peucedanum praeruptorum* dunn exerts anticancer effects in human non-small-cell lung cancer cells with different EGFR mutation statuses by suppressing MET activity[J]. Molecules,2022,27(7):2360.

[3] KAMGAR S,NOEI K 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, 2:169 - 176.

[4] LI H, LIU H, ZHOU J, et al. Development and first results of a no-till pneumatic seeder for maize precise sowing in Huang-Huai-Hai plain of China[J]. Agriculture, 2021,11:1023.

[5] 吴明亮,官春云,高晓燕,等. 偏心轮型孔轮式排种器排种油菜极限转速试验[J]. 农业工程学报,2010,26(6):119 - 123.
WU Mingliang, GUAN Chunyun, GAO Xiaoyan, et al. Test on limit turning speed of eccentric round hole-wheel seed meter for rape[J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(6):119 - 123. (in Chinese)

[6] 刘彩玲,魏丹,都鑫,等. 宽苗带勾型窝眼轮式小麦精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(1):75 - 84.
LIU Cailing,WEI Dan,DU Xin,et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision hook-hole type seed-metering device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(1):75 - 84. (in Chinese)

[7] 赖庆辉,贾广鑫,苏微,等. 基于 DEM - MBD 耦合的链勺式人参精密排种器研究[J]. 农业机械学报,2022,53(3):91 - 104.
LAI Qinghui, JIA Guangxin, SU Wei, et al. Design and test of chain-spoon type precision seed-metering device for ginseng based on DEM - MBD coupling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):91 - 104. (in Chinese)

[8] LIAO Y T,WANG L,LIAO Q X. Design and test of an inside-filling pneumatic precision centralized seed-metering device for rapeseed[J]. Int. J. Agric. Biol. Eng., 2017, 10:56 - 62.

[9] 伍皖闽,陈学庚,王士国,等. 组合型孔轮式玉米精量穴播器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(3):60 - 70.
WU Wanmin,CHEN Xuegeng,WANG Shiguo, et al. Design and experiment of combined-hole maize precision dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(3):60 - 70. (in Chinese)

[10] 赖庆辉,于庆旭,苏微,等. 三七超窄行气吸式精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(4):102 - 112.
LAI Qinghui, YU Qingxu, SU Wei, et al. Design and experiment of air-suction ultra-narrow-row device for precise *Panax notoginseng* seed metering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 102 - 112. (in Chinese)

[11] 黄康永,闫兆彬,王志豪,等. 气吸式人参排种器设计与试验[J]. 农业开发与装备, 2019(1): 107 - 108.
HUANG Kangyong, YAN Zhaobin, WANG Zhihao, et al. Design and test of air-sucking ginseng seed extractor[J]. Agricultural Development & Equipments, 2019(1): 107 - 108. (in Chinese)

[12] 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)

[13] 李兆东,王晴晴,张亚兰,等. 倾斜抛物线型孔轮式小麦供种装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):116 - 124.
LI Zhaodong,WANG Qingqing,ZHANG Yalan,et al. Design and experiment of inclined parabolic cell wheel in seed feeding device for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(5):116 - 124. (in Chinese)

[14] 李兆东,杨文超,武尧尧,等. 油菜气力盘式精量排种器槽齿辅助充种性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2020,

36(20):57 – 66.
LI Zhaodong, YANG Wenchao, WU Yaoyao, et al. Performance analysis and experiments of seed filling assisted by groove-tooth of pneumatic disc precision metering device for rapeseed[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(20): 57 – 66. (in Chinese)
[15] 王方艳,杨亮,王红提. 温室大棚电驱气力式胡萝卜播种机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):64 – 73,131.
WANG Fangyan, YANG Liang, WANG Hongti. Design and test of electric driving pneumatic carrot planter in greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 64 – 73, 131. (in Chinese)
[16] 李晓红,刘晓丽,刘龙,等. 基于响应面法的电控可调节窝眼轮式排种器的优化设计[J]. 大豆科学,2020,39(2):304 – 310.
LI Xiaohong, LIU Xiaoli, LIU Long, et al. Optimum design and experimental analysis of electronically controlled adjustable hole seed metering device based on response surface method[J]. Soybean Science, 2020, 39(2): 304 – 310. (in Chinese)
[17] 刘亚夫,吴志立,聂也之,等. 基于 EDEM 的双排型孔轮式油菜排种器的排种性能分析[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2019,45(5):554 – 559.
LIU Yafu, WU Zhili, NIE Yezhi, et al. Seeding performance of double hole-wheel seedmeter for rapeseed based on EDEM[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2019, 45(5): 554 – 559. (in Chinese)
[18] 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 of a special-shaped hole-and-eye wheel type rapeseed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 72 – 75. (in Chinese)
[19] 苏微,陈子威,赖庆辉,等. 轮勺式半夏精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(9):60 – 71.
SU Wei, CHEN Ziwei, LAI Qinghui, et al. Design and test of wheel-spoon type precision seed-metering device for Chinese herbal medicine *Pinellia ternata*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 60 – 71. (in Chinese)
[20] 赖庆辉,谢观福,苏微,等. 链勺翻转清种式蚕豆精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):82 – 92.
LAI Qinghui, XIE Guanfu, SU Wei, et al. Design and experiment of precision seed metering device for broad bean with chain spoon flipping seed cleaning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 82 – 92. (in Chinese)
[21] 陈玉龙,韩杰,兰玉彬,等. 精密排种器组合式导种管设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(24):14 – 24.
CHEN Yulong, HAN Jie, LAN Yubin, et al. Design and experiment of the combined seed guiding tube for precision metering device[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(24): 14 – 24. (in Chinese)
[22] 赖庆辉,贾广鑫,苏微,等. 凸包异形孔窝眼轮式人参精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(7):60 – 71.
LAI Qinghui, JIA Guangxin, SU Wei, et al. Design and test of ginseng precision special-hole type seed-metering device with convex hull[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 60 – 71. (in Chinese)
[23] 刘彩玲,王超,宋建农,等. 振动供种型孔轮式非圆种子精密排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(5):108 – 115.
LIU Cailing, WANG Chao, SONG Jiannong, et al. Design and seed-filling test of cell-type precision seed-metering device with vibration technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 108 – 115. (in Chinese)
[24] 袁昊,刘彩玲,宋建农,等. 超级杂交稻穴盘育苗精量排种器压电振动供种装置研究[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):31 – 40.
YUAN Hao, LIU Cailing, SONG Jiannong, et al. Piezoelectric vibration seed supply device of precision metering device for plug seedling of super hybrid rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 31 – 40. (in Chinese)
[25] 李健. 宁国市新造林地宁前胡套种技术[J]. 现代农业科技,2012(24):109.
LI Jian. Ningguo City new planting land Ning Qianhu set planting technology[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2012(24): 109. (in Chinese)
[26] 张波屏. 播种机械设计与原理[M]. 北京:机械工业出版社,1982.
[27] 方梁菲,曹成茂,秦宽,等. 导种环槽 U 型孔组合型轮式前胡排种器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(4):21 – 32,51.
FANG Liangfei, CAO Chengmao, QIN Kuan, et al. Design and experiment of wheel seed metering device with guide ring groove combining U-hole for *Radix peucedani*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 21 – 32, 51. (in Chinese)
[28] 吴佳胜. 前胡播种机械的研制与试验[D]. 合肥:安徽农业大学,2019.
WU Jiasheng. Development and experiment of seeding machinery for the *Radix peucedani*[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[29] 吴佳胜,曹成茂,谢承健,等. 前胡种子物性参数测定及其离散元仿真模型参数标定[J]. 甘肃农业大学学报,2019,54(4):180 – 189.
WU Jiasheng, CAO Chengmao, XIE Chengjian, et al. *Peucedanum praeruptorum* seed physical parameters determination and discrete element simulation model parameter calibration[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(4): 180 – 189. (in Chinese)