

花生气吸滚筒式穴播器分种盘设计与试验

张春艳¹ 康建明¹ 张宁宁¹ 彭强吉¹ 张惠² 王小瑜¹

(1. 山东省农业机械科学研究院, 济南 250010; 2. 绿洲特色经济作物生产机械化教育部工程研究中心, 石河子 832061)

摘要: 针对花生气吸滚筒式穴播器因一次投种性能不稳定造成单粒率低的问题,通过在气吸滚筒式穴播器的取种盘和二次投种机构之间增设分种盘,将种子限定在一个较小的齿形空间内,并拨动种子沿着预定轨道运动,提高了气吸滚筒式穴播器投种的准确性和精度。设计并分析了分种盘的分种齿齿形和分种盘与取种盘的位置关系,确定了分种盘结构和位置参数。借助 DEM-CFD 耦合方法研究了气吸滚筒式穴播器的工作过程,分析了携种区种子的运动轨迹,阐明了漏播和重播产生机理。以单粒率、漏播率和重播率为评价指标进行三因素二次旋转正交组合试验,分析了齿形方向角、安装角、作业速度对投种性能的影响,结果表明:当齿形方向角为 -4.55° 、安装角为 14.99° 和作业速度为 4.01 km/h 时,气吸滚筒式穴播器的排种性能最优,此时单粒率为 94.99% ,漏播率为 2.49% ,重播率为 2.52% 。以最优组合为基础进行田间试验,当作业速度为 $3.51\sim 4.51\text{ km/h}$ 时,试验结果满足花生单粒精量播种机械技术要求,且安装分种盘比未安装分种盘的单粒率提升超过 1.46 个百分点,排种优势明显。

关键词: 花生; 气吸滚筒式穴播器; 分种盘; DEM-CFD

中图分类号: S223.2⁺3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)06-0028-10 OSID: 

Design and Experiment of Seed Separation Tray of Air-suction Roller Dibbler for Peanut

ZHANG Chunyan¹ KANG Jianming¹ ZHANG Ningning¹ PENG Qiangji¹ ZHANG Hui² WANG Xiaoyu¹

(1. Shandong Academy of Agricultural Machinery Sciences, Jinan 250010, China

2. Engineering Research Center for Production Mechanization of Oasis Special Economic Crop, Ministry of Education, Shihezi 832061, China)

Abstract: In order to solve the problem of low single seed rate caused by air-suction roller dibbler for peanut decreases due to the unstable performance of the first seed feeding, the seed separation tray was added between the seed collecting tray and the secondary seed feeding mechanism of the air-suction roller dibbler for peanut. The seeds were limited in a small tooth shaped space, and the seeds were moved along a predetermined track to improve the accuracy and precision of seed delivery of the air-suction roller dibbler for peanut. The tooth shape of seed separation tray and the position relationship between seed separation tray and seed collecting tray were designed and analyzed, and the structure and position parameters of seed separation tray were determined. The working process of air-suction roller dibbler for peanut was studied, the movement track of seeds in seed carrying area was analyzed, and the mechanism of missed seeding and replanting was clarified by using DEM-CFD coupling method. Three factors quadratic rotation orthogonal combination test was conducted with qualification index, missed seeding index and replaying index as evaluation indexes. The effects of tooth shape direction angle, installation angle and operation speed on seed delivery performance were analyzed. The results showed that when the direction angle of the tooth shape was -4.55° , the installation angle was 14.99° and the operating speed was 4.01 km/h , the seed metering performance of the air-suction roller dibbler for peanut was the best. The qualification index was 94.99% , the missed seeding index was 2.49% , and the replanting index was 2.52% . Based on the optimal combination, the field contrast test was conducted, and the test results met the technical requirements of single seed precision sowing machine for peanut.

Key words: peanut; air-suction roller dibbler; seed separation tray; DEM-CFD

收稿日期: 2022-10-24 修回日期: 2023-01-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1000902)、绿洲特色经济作物生产机械化教育部工程研究中心开放课题(PMOC2021A04)和山东省农业科学院国际科技合作专项(CXGC2022F29)

作者简介: 张春艳(1988—),女,工程师,主要从事农业机械装备研究,E-mail: sdnjyzcy@163.com

通信作者: 张惠(1992—),女,讲师,博士,主要从事农业机械装备研究,E-mail: shzuzhanghui@163.com

0 引言

花生单粒精播可促进个体发育,优化群体质量,有效解除株间竞争对产量的制约效应,大幅度提高花生单产水平^[1-2]。而膜上打孔穴播具有对土壤扰动小、单粒率高、免放苗的优势,在花生种植区被广泛应用。穴播器是花生膜上打孔穴播的关键部件,分为气吸滚筒式和机械滚筒式两大类,机械滚筒式穴播器结构简单,但穴粒数不稳定;气吸滚筒式穴播器结构虽然复杂、但不伤种且穴粒数合格率高,种子可按照规定的播量、穴距和播深投入成穴部件开出的种穴内,可以提高播种质量,实现全苗、壮苗^[3-6]。

气吸滚筒式穴播器是靠压差吸附种子,压差消失后种子依次落入分种盘、二次投种机构、鸭嘴中,完成排种^[7-9]。陈学庚等^[10-11]明确了气室充种负压和取种盘吸孔线速度对排种性能的影响规律,优化作业参数,提高了排种单粒率;陈付东等^[12]改进了排种盘吸种孔,并增设了具有夹持功能的携种器进行辅助携种,降低漏播率;刘兵等^[13]针对花生气吸式排种器采用 EDEM 和 Fluent 分析了种子的运动轨迹,并得到排种器最佳性能参数;文献[14-18]研究表明排种机构的投种环节是优化排种性能的重要手段,文献[19-22]基于 DEM-CFD 气固耦合方法对排种器进行数值模拟,优化作业参数和排种性能,论证了采用 DEM-CFD 气固耦合方法可以进一步优化排种器工作参数。目前对气吸滚筒式穴播器的研究主要运用离散元法,未见运用 DEM-CFD 气固耦合方法的相关研究^[5,23]。由前期研究可知,种子进入二次投种机构之后的运动不再是影响单粒率的主要因素,而种子从吸种到进入二次投种机构的运动过程将直接影响单粒率,因此,研究一次投种性能对保证气吸滚筒式穴播器作业质量尤为重要。

针对气吸滚筒式穴播器一次投种性能不稳定的问题,本文设计一种适用于气吸滚筒式穴播器的分种盘,并借助 DEM-CFD 气固耦合计算方法,模拟吸种和一次投种过程,分析携种区种子运动轨迹及排种性能,开展三因素二次旋转正交组合台架试验,优化分种盘结构和位置参数,并进行田间验证试验。

1 气吸滚筒式穴播器结构与技术特点

1.1 气吸滚筒式穴播器结构

气吸滚筒式穴播器结构如图 1 所示,主要由中空穴播器轴、取种盘、分种盘、腰带、鸭嘴、底盘等组成。工作时,在风机作用下形成真空气室,种子被气流产生的压差吸附在取种盘上,并随取种盘运动至一次投种位置,在断气块作用下,负压消失,同时刮

种器接触种子,种子从吸种孔脱离,落入分种盘齿形空间内,由分种齿携种至外壳开口处,拨入二次投种机构中,经过二次投种机构的外种道、内种道后到达鸭嘴底部,随着动鸭嘴打开,种子落入种穴内,完成穴播。

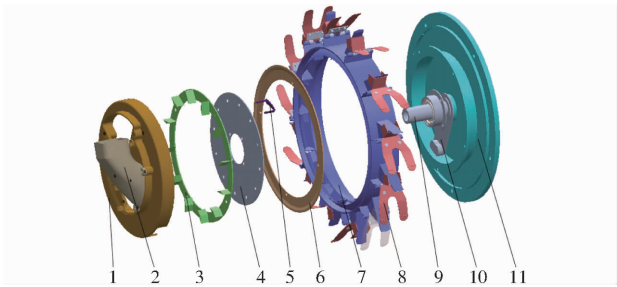


图 1 气吸滚筒式穴播器爆炸图

Fig. 1 Structure diagram of air-suction roller dibbler

1. 外壳 2. 输种管 3. 分种盘 4. 取种盘 5. 清种器 6. 挡种盘 7. 腰带 8. 鸭嘴 9. 穴播器轴 10. 断气块 11. 底盘

1.2 技术特点

花生单粒精播种植模式对播种的单粒率要求较高,按照此设计要求,气吸滚筒式穴播器工作过程中,除了要保证吸种孔能够吸附单粒种子外,也要保证吸附的该粒种子能够准确的被投入种穴中,由于种子是在断气块和刮种器相互配合下完成一次投种,投种的位置不尽相同,下落的时间和轨迹差异较大,影响了投种的准确性,降低了投种精度,造成漏重播现象,影响单粒率。为提高投种的准确性和精度,在取种盘和二次投种机构之间设置分种盘,种子从取种盘直接落入分种盘中,经分种盘拨动,从外壳开口落入二次投种机构,进而进入鸭嘴等待排种。分种盘将脱离吸种孔的种子限定在一个较小的齿形空间内,并拨动种子沿着预定轨道移动至外壳开口,提高了投种的准确性和精度,进而提高播种单粒率。

2 分种盘设计

2.1 分种齿数量

分种盘是提高播种质量的重要部件,如图 2 所示,主要包括分种齿和分种圆环,分种圆环上开有安装孔。分种齿均匀分布于分种圆环面上,将投种空间分割成独立的种子运动空间,且每个种子运动空间与取种孔、二次投种机构以及鸭嘴一一对应,因此,分种齿的数量 Z 应与取种孔数量 M 和鸭嘴数量 N 相等。

鸭嘴数量 N 与穴距 γ 和播种深度 H 的关系满足公式

$$N = \frac{(D + 2H) \pi}{\gamma} \tag{1}$$

式中 D ——穴播器滚筒直径,mm

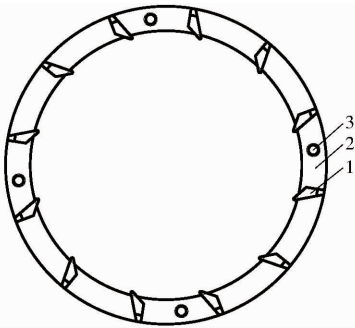


图2 分种盘主视图

Fig.2 Front view of seed separation tray

1. 分种齿 2. 分种圆环 3. 安装孔

花生单粒精播要求合理密植,穴距 γ 应满足 $90\text{ mm}<\gamma<120\text{ mm}$,且播种深度 H 应满足 $30\text{ mm}<H<40\text{ mm}$,实际穴播器直径 $D=370\text{ mm}$ ^[6],代入公式(1)可得 $11.3<Z<15.7$ 。分种齿数量应取整数,并结合前期试验结果,本文 Z 取12。

2.2 分种齿齿形

分种齿呈三棱柱形状,如图3所示,截面为钝角三角形 DEF ,其中 $\angle FED$ 为钝角, D 、 F 所在圆的半径分别为 R 、 R' 。为与外壳配合,在三棱柱 D 端上部设有倒角,且倒角的相关参数由外壳尺寸决定。

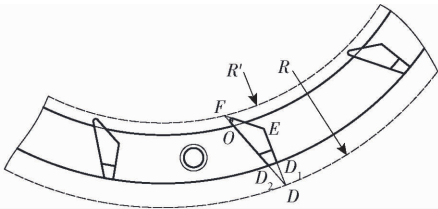


图3 分种齿齿形示意图

Fig.3 Seed separation tooth profile

齿尖 F 采用圆弧过渡,可增加分种齿强度,避免应力集中,且圆弧直径越小,对种子落入齿间的影响越小,但过小又会影响分种齿强度。因此,本文中分种齿齿尖圆弧直径取 1 mm ,圆心为 O 。 D 端需与外壳配合,其圆弧 D_1D_2 所在圆半径与外壳半径相等。

经前期研究得知,分种齿 D_1E 面为携种面,当种子落入齿形空间时,携种面推动种子运动到穴播器开口处,并拨进二次投种机构中,因此 D_1E 的长度 L_{D_1E} 应满足

$$\frac{L_{\max}}{2} \leq L_{D_1E} \leq R_1 - R_2 \tag{2}$$

式中 $L_{\max}$ ——花生种子长度最大值,mm
 R_1 ——分种圆环外圈半径,mm
 R_2 ——分种圆环内圈半径,mm

本文花生种子选用山东省花生研究所选育的鲁花14号,由文献[5]可知,种子长度 L 介于 $13\sim20\text{ mm}$ 之间,分种圆环内圈与吸种盘配合,外圆与外

壳配合,因此 $R_1=130\text{ mm}$, $R_2=110\text{ mm}$,代入公式(2)得 $10\text{ mm}\leq L_{D_1E}\leq 20\text{ mm}$ 。结合前期试验结果,本文 L_{D_1E} 取 15 mm 。

2.3 分种齿齿向

分种齿齿形的 D_1E 面作为携种面,需推动种子运动,当 D_1E 面与径向的夹角 α (即分种齿齿形方向角)数值过大时, D_1E 面会脱离种子或者使种子发生弹跳,造成携种失效,本文中将花生种子简化成椭圆结构,如图4所示,此时需满足

$$\begin{cases} |L_{PT}| = \sqrt{\left(x_0 - \frac{a^2}{x_0}\right)^2 + y_0^2} \leq L_{CF} - \frac{L}{2} \\ \frac{x_0^2}{a^2} + \frac{y_0^2}{b^2} = 1 \\ k = -\frac{b^2 x_0}{a^2 y_0} = \tan\theta \\ \alpha + \theta = 90^\circ \end{cases} \tag{3}$$

式中 (x_0, y_0) ——点 P 坐标,mm
 a ——椭圆长轴长度,mm
 b ——椭圆短轴长度,mm
 k ——切线斜率
 θ —— D_1E 面与法向的夹角, $(^\circ)$

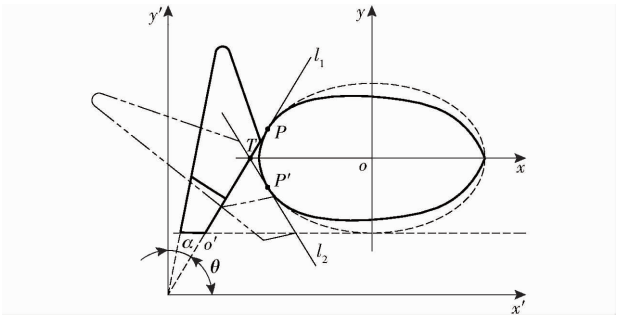


图4 分种齿齿形与种子位置关系示意图

Fig.4 Relationship between seed separation tooth shape and seed position

由公式(3)可得

$$\tan\theta \geq \frac{y_0^2}{\left(L_{CF} - \frac{L}{2\sin\theta}\right)^2 - y_0^2} \tag{4}$$

将 $L_{D_1E}=15\text{ mm}$ 、 $L=20\text{ mm}$ 、 $y_0=4\text{ mm}$ 代入公式(3)、(4),得分种齿齿形方向角满足 $-16.68^\circ\leq\alpha\leq 16.68^\circ$ 。

2.4 分种盘安装位置

吸种孔压差消失,种子从取种盘吸口处落下,运动轨迹如图5所示,种子初始运动方向垂直于吸种孔与旋转中心连线,初始速度 v_0 满足

$$v_0 = \omega R_4 \tag{5}$$

式中 ω ——角速度,rad/s
 R_4 ——吸种孔圆心所在圆的半径,mm

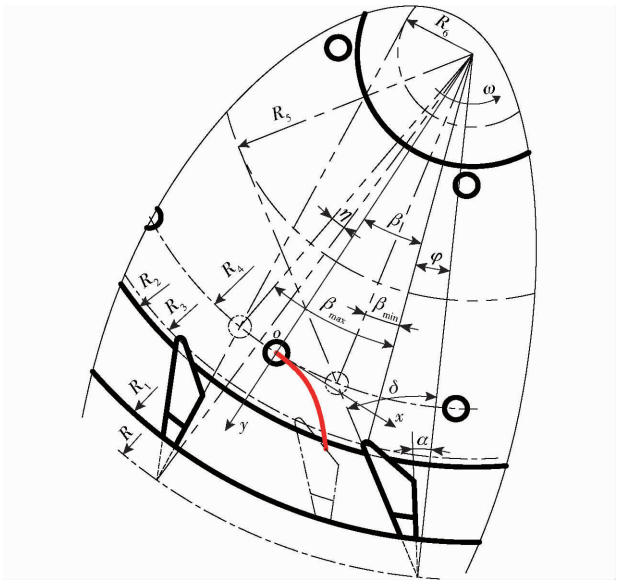


图 5 分种盘安装位置示意图

Fig. 5 Installation position diagram of seed separation tray

种子抛出后在径线方向和切线方向上做加速运动,若忽略种子半径,其径线和切线方向运动轨迹方程为

$$\begin{cases} x = \omega R_4 t + \frac{1}{2} g t^2 \sin \beta \\ y = \frac{1}{2} g t^2 \cos \beta \end{cases} \quad (6)$$

式中 β ——安装角,即吸种孔中心点与旋转中心连线和分种齿点 C 与旋转中心连线的夹角, ($^\circ$)

g ——重力加速度, m/s^2

t ——种子下落时间, s

在径线方向上当种子运动到分种齿齿尖所在圆弧时,种子在切向运动的位移需大于分种齿转过的位移,此时种子能够准确落入分种盘内,即

$$\begin{cases} x \leq \omega R_3 t \\ y = R_3 - R_4 \end{cases} \quad (7)$$

式中 R_3 ——分种齿齿尖圆弧中心点 C 所在圆的半径, mm

将公式(6)代入公式(7)可得

$$\cos \beta \geq \frac{\sqrt{\omega^4 (R_3 - R_4)^2 + g^2} - \omega^2 (R_3 - R_4)}{g} \quad (8)$$

分种盘的安装角与穴播器角速度成反比。本文在满足公式(8)的前提下,当取种孔中心点在分种齿 DF 面的延长线上时, β 取最小值,需满足

$$\begin{cases} \sin \delta = \frac{R_5}{R} \\ \sin(\beta_{\min} + \varphi + \delta) = \frac{R_5}{R_4} \\ \alpha + \delta = 20^\circ \end{cases} \quad (9)$$

式中 R_5 ——与分种齿 DF 面相切的同心圆半径, mm

δ ——分种齿 DF 面和分种齿点 D 与旋转中心连线的夹角, ($^\circ$)

φ ——分种齿点 C 与旋转中心连线和分种齿点 D 与旋转中心连线之间的夹角, ($^\circ$)

当取种孔中心点在后一个分种齿 D_1E 面的延长线上时, β 取最大值,需满足

$$\begin{cases} \sin \alpha = \frac{R_6}{R} \\ \sin(\alpha + \eta) = \frac{R_6}{R_4} \\ \beta_{\max} + \varphi + \eta = \frac{360^\circ}{Z} \end{cases} \quad (10)$$

式中 R_6 ——与分种齿 D_1E 面相切的同心圆半径, mm

η ——吸种孔中心点与旋转中心连线和分种齿点 D 与旋转中心连线之间的夹角, ($^\circ$)

由公式(9)、(10)可知,当 $\alpha = 16.68^\circ$ 时,分种盘的安装角 β 满足 $12^\circ \leq \beta \leq 24.4^\circ$ 。

3 穴播器工作过程 DEM - CFD 耦合仿真分析

气吸滚筒式穴播器在工作过程中,种子被气流产生的压差吸附在取种盘上,种子随取种盘转动至投种位置时,落入分种盘内,在这个过程中,种子与流场存在相互作用,而传统的 EDEM 在模拟气吸滚筒式穴播器时,由于不存在气流场,充种过程无法模拟,且种子脱离吸种孔的时刻与位置不能被准确定义,影响工作过程分析,需采用 DEM - CFD 气固耦合方法,其中 Fluent 模拟气流场, EDEM 模拟颗粒场,两者耦合可以解决种子与流场的交互作用问题,进而完整的模拟气吸滚筒式穴播器工作过程,着重分析携种区种子运动轨迹和排种性能。

3.1 模型建立

以山东省花生研究所培育的鲁花 14 号为建模对象,选取与种子平均三轴尺寸相接近的鲁花 14 号花生种子,创建几何模型^[5],将模型导入 EDEM 软件,并利用非球颗粒快速填充功能,获得花生种子离散元模型。根据对分种盘的设计结果,在 SolidWorks 中建立分种盘三维模型,连同气吸滚筒式穴播器简化模型一起导入 EDEM 中,同时,将气室三维模型导入 ANSYS 软件中,进行网格划分和参数设定, Fluent 采用 $k - \varepsilon$ 模型,设置压力出入口,吸种孔处压力为 -5 kPa ,获得气室流场数据,导入

EDEM 中,设置作业速度为 3.46 km/h,分种齿齿形方向角为 0°,安装角为 18°,仿真过程中,种子颗粒由颗粒工厂动态生成,产生数量为 200 粒;时间步长为 3.74×10^{-5} s,计算时长 15 s,每 0.02 s 保存一次数据。DEM-CFD 简化模型如图 6 所示,仿真所需的种子-种子和种子-气吸滚筒式穴播器模型的接触参数如表 1 所示^[5]。

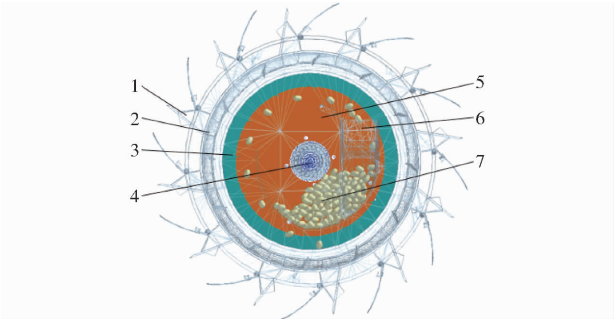


图 6 DEM-CFD 简化模型

Fig. 6 DEM-CFD simplified model

1. 鸭嘴 2. 二次投种机构 3. 分种盘 4. 负压流场区域 5. 取种盘 6. 颗粒工厂 7. 花生种子颗粒

表 1 仿真所需物理和力学特性参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters required for simulation		
参数	花生颗粒	气吸滚筒式穴播器
泊松比	0.300	0.394
剪切模量/MPa	5.72	790.00
密度/(kg·m ⁻³)	1 030	2 050
碰撞恢复系数(与颗粒)	0.60	0.50
静摩擦因数(与颗粒)	0.42	0.30
动摩擦因数(与颗粒)	0.06	0.03

由图 6 可知,DEM-CFD 耦合仿真方法可以模拟气吸滚筒式穴播器的工作过程,为气吸滚筒式穴播器的优化设计提供理论支撑。

3.2 种子运动轨迹分析

为便于查看种子的运动轨迹,将气吸滚筒式穴播器的显示模式设置为 Mesh 状态,不透明度设置为 0.3,选取其中一个种子颗粒,得到该种子颗粒从种箱下落到排出的轨迹曲线,如图 7 所示。该过程中种子跟随气吸滚筒式穴播器旋转两周后排出。

该曲线共分为 5 个阶段:落种区 I、吸种区 II、一次投种区 III、携种区 IV、二次投种区 V。其中第 I

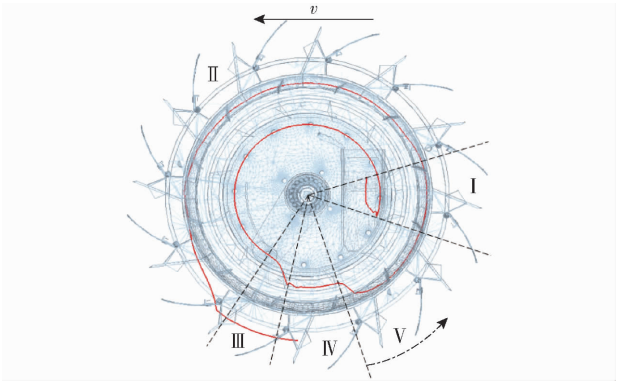


图 7 种子运动轨迹曲线

Fig. 7 Seed motion track curve

阶段种子从种箱中落下,进入气吸滚筒式穴播器种子群内,等待吸种,当种子到达吸种孔位置时,进入第 II 阶段,在负压作用下吸附在吸孔处,并随取种盘运动至一次投种区,此时在组合式投种装置的作用下,种子从吸孔掉落,进入第 III 阶段,种子下落初速度为该点切线方向,在重力和摩擦力的作用下落入分种齿齿形空间内,进入第 IV 阶段,种子与外壳接触后弹起,分种齿携种面接触并推动种子运动至外壳开口处,落入二次投种机构中,进入第 V 阶段,种子之后的运动轨迹在文献[24]中已有详尽说明,本文不再赘述。

3.3 携种区种子运动轨迹分析

分别对安装角的极限值和中间值进行耦合仿真,分析安装角为 12°、18°和 24.4° 3 种状态下种子颗粒在携种区的运动轨迹曲线,如图 8 所示,种子运动轨迹的主要差别表现在种子从吸种孔落入齿形空间的过程中,而进入齿形空间后,运动轨迹基本相同。图 8a 中运动轨迹曲线 A₁ 段的曲率半径较大,接近直线,分析原因可知,在种子下落过程中受到分种齿 EF 面的作用,如图 9a 所示,形成了垂直于 EF 面的作用力,改变了重力作用下的运动方向。图 8b 中运动轨迹曲线的 A₂ 段存在滞留,且滞留段运动曲线与吸种孔所在圆同心,发生该现象是因为种子下落过程中触碰到分种齿齿尖,如图 9b 所示,种子在齿尖位置翻滚并随齿尖运动一段时间后落入齿形空间内。图 8c 中运动轨迹的 A₃ 段为抛物线,在运动过程中受到重力作用,未触碰到分种齿,直接落入齿形空间内。

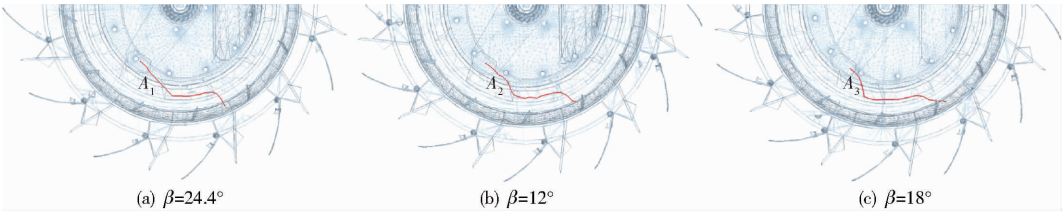


图 8 携种区种子运动轨迹曲线

Fig. 8 Seed motion track curves in seed carrying area

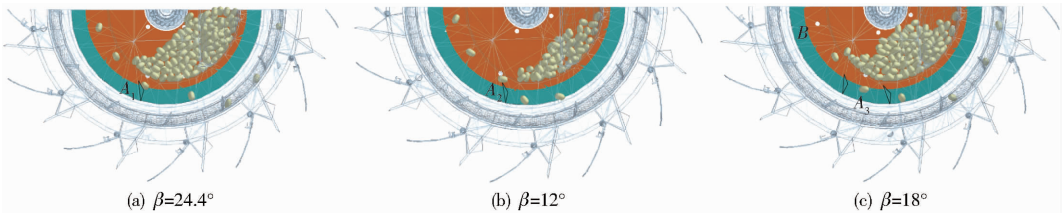


图 9 携种区种子运动位置

Fig. 9 Seed movement position in seed carrying area

3.4 性能分析

根据不同安装角时携种区种子的运动轨迹,分析气吸滚筒式穴播器的排种性能。当安装角度过大时,种子下落过程中会触碰该齿形空间的后分种齿,当安装角度过小时,种子下落则会触碰该齿形空间的前分种齿。因此,若安装角度过大,种子颗粒可能落入该齿形空间的后面一个齿形空间内,若安装角度过小,种子颗粒可能落入对应齿形空间的前一个齿形空间内,都会造成该齿形空间对应的位置漏播,前一个或者后一个齿形空间对应的位置重播。

另外,气吸滚筒式穴播器的排种性能还受吸种区吸种效果的影响,如图 9c 所示,吸种孔 B 因未能成功吸种或清种时碰撞等原因,导致排种合格率降低。

4 台架试验

4.1 试验方案

为进一步确定气吸滚筒式穴播器在不同条件下排种效果,对影响排种质量的主要因素进行台架试验分析与验证,在山东省农业机械科学研究院实验室进行台架试验,如图 10 所示。试验选用鲁花 14 号花生种子作为试验样本,其百粒质量为 274 g。根据 GB/T 6973—2005《单粒(精密)播种机试验方法》,以齿形方向角、安装角和作业速度为试验因素,以单粒率、重播率、漏播率为排种性能评价指标,进行三因素二次旋转正交组合试验,以理论分析和仿真分析结果为依据,将齿形方向角、安装角和作业速度极限值的编码值设为 1 和 -1,为避免在交互作

用下试验因素范围外存在优值,用 1.682 和 -1.682 编码值来拓展试验因素区间,以保证试验的完整性,试验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Codes of testing factors

编码	因素		
	齿形方向角	安装角	作业速度
	$x_1/(^{\circ})$	$x_2/(^{\circ})$	$x_3/(km \cdot h^{-1})$
-1.682	-28.05	7.77	0.98
-1	-16.68	12.00	2.00
0	0	18.20	3.50
1	16.68	24.40	5.00
1.682	28.05	28.63	6.02

通过 Design-Expert 数据处理软件进行三因素二次旋转正交组合试验设计,如表 3 所示(X_1 、 X_2 、

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Plans and results of test

试验 编号	因素			单粒率	漏播率	重播率
	X_1	X_2	X_3	$Y_1/\%$	$Y_2/\%$	$Y_3/\%$
1	-1	-1	-1	94.44	2.74	2.82
2	1	-1	-1	93.89	3.03	3.08
3	-1	1	-1	94.31	2.80	2.89
4	1	1	-1	94.09	2.79	3.12
5	-1	-1	1	94.73	2.51	2.76
6	1	-1	1	94.57	2.75	2.68
7	-1	1	1	94.11	2.97	2.92
8	1	1	1	94.29	2.98	2.73
9	-1.682	0	0	94.46	2.77	2.77
10	1.682	0	0	93.78	3.17	3.05
11	0	-1.682	0	94.62	2.60	2.78
12	0	1.682	0	94.17	2.87	2.96
13	0	0	-1.682	94.09	3.04	2.87
14	0	0	1.682	94.43	2.80	2.77
15	0	0	0	94.83	2.62	2.55
16	0	0	0	94.90	2.58	2.54
17	0	0	0	95.02	2.48	2.50
18	0	0	0	94.91	2.57	2.52
19	0	0	0	94.93	2.53	2.54
20	0	0	0	94.95	2.56	2.49
21	0	0	0	94.99	2.58	2.43
22	0	0	0	94.85	2.62	2.53
23	0	0	0	94.92	2.50	2.58

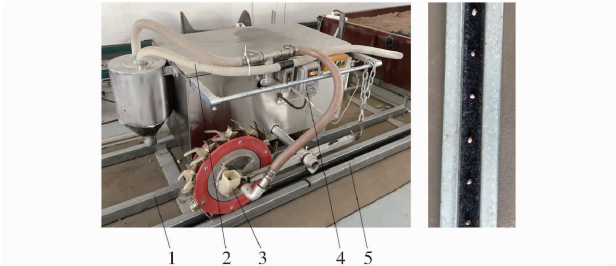


图 10 试验台架及效果

Fig. 10 Bench test and experimental results

1. 台架导轨 2. 穴播器试验台 3. 气吸滚筒式穴播器 4. 控制系统 5. 穴播器导轨

X_3 为因素编码值)。试验过程中按照每个试验序号的参数要求,调整齿形方向角、安装角和作业速度,并分别记录 23 组试验数据,每组试验选取 4 个测量段进行数据采集,每段连续测量 20 个种子,每两段相距 1 m,每组试验进行 3 次,取平均值,计算出单粒率、漏播率和重播率,记入试验结果,如表 3 所示。

4.2 试验结果与分析

通过 Design-Expert 软件对台架试验结果进行二次回归分析,结果如表 4 所示。由方差和显著性分析结果可知,单粒率、漏播率和重播率的模型拟合度极显著($P < 0.01$),且回归方程失拟不显著($P > 0.05$),齿形方向角、安装角和作业速度对 3 个指标的影响显著,且部分二次项以及交互项也影响显著,

剔除交互项中不显著因素后的回归方程为

$$Y_1 = 94.92 - 0.14X_1 - 0.12X_2 + 0.11X_3 + 0.084X_1X_2 + 0.099X_1X_3 - 0.12X_2X_3 - 0.27X_1^2 - 0.17X_2^2 - 0.22X_3^2 \quad (11)$$

$$Y_2 = 2.56 + 0.088X_1 + 0.071X_2 - 0.041X_3 - 0.066X_1X_2 + 0.11X_2X_3 + 0.13X_1^2 + 0.047X_2^2 + 0.11X_3^2 \quad (12)$$

$$Y_3 = 2.52 + 0.051X_1 + 0.046X_2 - 0.072X_3 - 0.095X_1X_3 + 0.14X_1^2 + 0.12X_2^2 + 0.1X_3^2 \quad (13)$$

通过 Design-Expert 软件对数据进行处理,得到齿形方向角、安装角和作业速度之间极显著和显著的交互作用对 3 个指标影响的响应曲面,如图 11 所示。

表 4 方差分析
Tab.4 Analysis of variance

方差来源	单粒率				漏播率				重播率			
	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	3.16	9	47.51	<0.000 1 **	0.82	9	21.29	<0.000 1 **	0.90	9	29.58	<0.000 1 **
X_1	0.26	1	35.51	<0.000 1 **	0.11	1	24.66	0.000 3 **	0.035	1	10.30	0.006 9 **
X_2	0.18	1	24.94	0.000 2 **	0.068	1	15.84	0.001 6 **	0.028	1	8.36	0.012 6 *
X_3	0.17	1	23.54	0.000 3 **	0.022	1	5.22	0.039 7 *	0.072	1	21.06	0.000 5 **
X_1X_2	0.056	1	7.59	0.016 4 *	0.035	1	8.17	0.013 4 *	2.45×10^{-3}	1	0.72	0.411 0
X_1X_3	0.078	1	10.55	0.006 3 **	1.13×10^{-4}	1	0.026	0.837 9	0.072	1	21.27	0.000 5 **
X_2X_3	0.12	1	15.91	0.001 5 **	0.095	1	22.03	0.000 4 **	1.25×10^{-3}	1	0.37	0.554 4
X_1^2	1.12	1	151.90	<0.000 1 **	0.27	1	62.37	<0.000 1 **	0.29	1	86.59	<0.000 1 **
X_2^2	0.45	1	61.11	<0.000 1 **	0.035	1	8.09	0.013 8 *	0.24	1	69.52	<0.000 1 **
X_3^2	0.74	1	100.60	<0.000 1 **	0.20	1	46.54	<0.000 1 **	0.17	1	50.81	<0.000 1 **
残差	0.096	13			0.056	13			0.044	13		
失拟	0.067	5	3.64	0.051 7	0.037	5	3.10	0.075 2	0.030	5	3.32	0.064 4
误差	0.029	8			0.019	8			0.014	8		
总和	3.26	22			0.88	22			0.95	22		

注: * 表示差异显著(0.01 < P < 0.05), ** 表示差异极显著(P ≤ 0.01)。

由图 11a 可知,当安装角一定时,单粒率随齿形方向角呈稍升高后降低的趋势,当齿形方向角一定时,单粒率随安装角同样呈先升高后降低的趋势,是因为安装角度过大时种子下落位置与后侧分种齿较近,同时受速度的影响,种子落入后侧齿形空间内的概率增大,导致漏播增加,造成单粒率降低。从图 11d 同样可知,安装角取较大值时,漏播率亦较大,单粒率则会降低。由图 11b 可知,当齿形方向角一定时,随着作业速度的增加,单粒率呈先升高后降低的趋势,反之亦然,速度较小、齿形方向角较大时单粒率较低(同图 11f)。由图 11c 可知,当作业速度一定时,单粒率随安装角增大而减小,当安装角一定时,单粒率随作业速度增大呈先增大后稍降低的趋势,作业速度和安装角同时较小或较大时,单粒率

均较低,是因为当作业速度和安装角同时较小时,种子脱离吸种孔的速度较低,同时距离前侧分种齿较近,种子落入前侧齿形空间内的概率增大,当作业速度和安装角同时较大时,种子则落入后侧齿形空间内的概率增大,均导致漏播增加,造成单粒率降低。从图 11e 同样可知,作业速度和安装角同时较小或较大时,漏播率增大,单粒率则降低,与仿真分析结果吻合。

4.3 参数优化

为确定最佳取值,以单粒率最大、漏播率和重播率最小为优化目标,对齿形方向角、安装角和作业速度进行多目标优化分析,得到齿形方向角为 -4.55°、安装角为 14.99°和作业速度为 4.01 km/h 时,单粒率为 94.99%,漏播率为 2.49%,重播率为

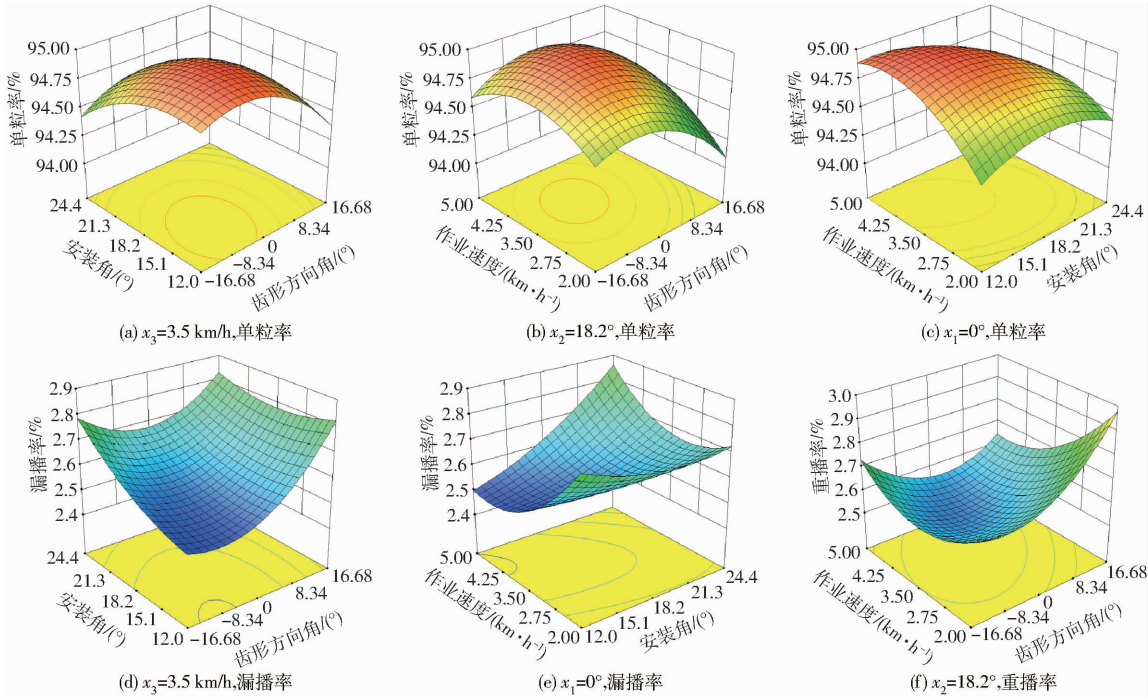


图 11 试验因素对指标影响的响应曲面
Fig. 11 Impacts of test factors on indicators

2.52%。

5 田间试验

为验证台架试验优化后参数的准确性,在山东省农业机械科学研究院章丘试验基地进行田间试验,如图 12 所示。试验用地满足花生播种农艺要求,种子仍选用鲁花 14 号,调节吸种孔风压至充分吸种,分种盘安装过程中,参考台架试验结果,齿形方向角为 -4.55° 、安装角为 14.99° ,机具作业速度依据回归分析,数值设置 3.51、3.77、4.01、4.26、4.51 km/h 5 个梯度,验证安装分种盘后气吸滚筒式穴播器的排种性能。同时设置不安装分种盘的试验组合,与安装分种盘的参数组合进行对比试验,以考证安装分种盘后气吸滚筒式穴播器排种性能的改善效果。田间试验效果如图 12 所示。



图 12 田间试验
Fig. 12 Field experiment

每个作业速度梯度试验选取播种行中段的 3 个测量区间,每个区间测量 20 个种穴,每两个区间间

隔 10 m,并重复试验 3 次,计算平均值,得到单粒率、漏播率和重播率,如表 5 所示。受外部条件影响单粒率较台架试验降低,安装分种盘的 5 组试验结果的单粒率均大于 91%、漏播率均小于 5%,重播率均小于 4%,满足花生单粒精量播种机械技术要求。未安装分种盘的 5 组试验结果的单粒率不稳定,变化范围较大,在前进速度为 3.51 ~ 4.51 km/h 的条件下,安装分种盘比未安装分种盘的单粒率提升超过 1.46 个百分点,排种优势更明显。

表 5 田间试验结果
Tab.5 Field experiment results

项目	前进速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	% 单粒率 漏播率 重播率		
		单粒率	漏播率	重播率
安装分种盘	3.51	92.87	4.08	3.05
	3.77	94.04	3.68	2.28
	4.01	94.63	2.36	3.01
	4.26	93.56	3.03	3.41
	4.51	91.65	4.46	3.89
未安装分种盘	3.51	90.96	5.11	3.93
	3.77	92.25	4.05	3.70
	4.01	93.17	3.48	3.35
	4.26	91.35	4.39	4.26
	4.51	87.78	6.26	5.96

6 结论

(1)设计了一种气吸滚筒式穴播器分种盘,通过理论计算分析了分种盘的结构和基本参数,确定了分种盘优化目标参数为齿形方向角、安装角和作

业速度。分种盘将脱离吸种孔的种子限定在一个较小的齿形空间内,并拨动种子沿着预定轨道移动至外壳开口,提高了投种的准确性和精度,进而提高播种单粒率。

(2)通过 DEM-CFD 模拟了气吸滚筒式穴播器的工作过程,分析了不同安装角度下携种区种子的运动轨迹,阐明了重播和漏播的产生原因。

(3)以齿形方向角、安装角和作业速度为试验因素,以单粒率、重播率、漏播率为排种性能评价指

标,进行三因素二次旋转正交组合台架试验,得到最优结果:齿形方向角为 -4.55° 、安装角为 14.99° 和作业速度为 4.01 km/h 时,单粒率为 94.99% ,漏播率为 2.49% ,重播率为 2.52% 。以最优结果为基础进行了田间试验,安装分种盘的试验结果的单粒率均大于 91% 、漏播率均小于 5% 、重播率均小于 4% ,满足花生单粒精量播种机械技术要求,且比未安装分种盘的单粒率提升超过 1.46 个百分点,排种优势更明显。

参 考 文 献

- [1] 万书波,张佳蕾,张智猛.花生种植技术的重大变革——单粒精播[J].中国油料作物学报,2020,42(6):927-933.
WAN Shubo, ZHANG Jialei, ZHANG Zhimeng. A major change in peanut planting technology—single seed precision sowing [J]. Chinese Journal of Oil Crops, 2020,42(6): 927-933. (in Chinese)
- [2] 张佳蕾,郭峰,苗昊翠,等.单粒精播对高产花生株间竞争缓解效应研究[J].花生学报,2018,47(2):52-58.
ZHANG Jialei, GUO Feng, MIAO Haocui, et al. Study on relieving inter-plant competition by single seed sowing of high yield peanut[J]. Journal of Peanut Science, 2018,47(2):52-58. (in Chinese)
- [3] 徐祝欣,田立忠,尚书旗,等.2BFD-4型花生覆膜播种机的设计与试验[J].农业工程学报,2012,28(增刊2):13-17.
XU Zhuxin, TIAN Lizhong, SHANG Shuqi, et al. Design and test of 2BFD-4 peanut laminated seeder[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(Supp.2): 13-17. (in Chinese)
- [4] 陈海涛,李桐辉,王洪飞,等.气吸滚筒式垄上三行大豆密植排种器设计与参数优化[J].农业工程学报,2018,34(17):16-24.
CHEN Haitao, LI Tonghui, WANG Hongfei, et al. Design and parameter optimization of pneumatic cylinder ridge three-row close-planting seed-metering device for soybean[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(17):16-24. (in Chinese)
- [5] 张宁宁,康建明,王小瑜,等.基于 EDEM 的滚筒式穴播器排种性能仿真与试验[J].中国农机化学报,2021,42(11):1-6,42.
ZHANG Ningning, KANG Jianming, WANG Xiaoyu, et al. Simulation and experiment on seeding performance of peanut roller type hill-drop planter based on EDEM[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(11): 1-6, 42. (in Chinese)
- [6] KANG Jianming, PENG Qiangji, ZHANG Chunyan, et al. Design and testing of a punching-on-film precision hole seeder for peanuts[J]. Transactions of the ASABE, 2020,63(6):1685-1696.
- [7] 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].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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):58-67. (in Chinese)
- [8] 康施为,倪向东,齐庆征,等.气吸滚筒式棉花精密排种器的设计与试验[J].农机化研究,2020,42(6):136-141.
KANG Shiwei, NI Xiangdong, QI Qingzheng, et al. Design and experiment of pneumatic cylinder precision seed-metering device for cotton[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(6):136-141. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 陈学庚,卢勇涛.气吸滚筒式棉花精量穴播器排种性能试验[J].农业机械学报,2010,41(8):35-38.
CHEN Xuegeng, LU Yongtao. Performance of air-suction cylindrical cotton precision dibbler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(8):35-38. (in Chinese)
- [11] 陈学庚,王敏.气吸鸭嘴滚筒式精密穴播器关键因素的研究[J].农机化研究,2011,33(3):130-133,137.
CHEN Xuegeng, WANG Min. Study on key factors of the duckbill punch roller-type pneumatic metering device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011,33(3): 130-133,137. (in Chinese)
- [12] 陈付东,江景涛,王东伟,等.基于夹持式的气吸式花生排种器的设计与试验[J].农机化研究,2021,43(10):158-166.
CHEN Fudong, JIANG Jingtao, WANG Dongwei, et al. Design and test of air-suction peanut seed metering device based on clamping[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(10):158-166. (in Chinese)
- [13] 刘兵,王东伟,李秀杰,等.基于 DEM-CFD 耦合的花生气吸式排种器仿真与试验[J].农机化研究,2022,44(11):166-172.
LIU Bing, WANG Dongwei, LI Xiujie, et al. Simulation and experiment of peanut air suction seed metering device based on DEM-CFD coupling method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022,44(11):166-172. (in Chinese)
- [14] 康建明,向阳,张春艳,等.气吸滚筒式花生穴播器投种性能分析与试验[J].农业工程学报,2022,38(14):1-11.
KANG Jianming, XIANG Yang, ZHANG Chunyan, et al. Analysis and experiments of the seed feeding performance of air-

- suction roller dibbler for peanuts[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(14):1-11. (in Chinese)
- [15] 丁力,杨丽,张东兴,等. 气吸式排种器卸种机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(1):37-46.
DING Li,YANG Li,ZHANG Dongxing,et al. Design and test of unloading mechanism of air-suction seed metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(1):37-46. (in Chinese)
- [16] ENDRERUD H C. Influence of tube configuration on seed delivery to a coulter[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999, 74(2):177-184.
- [17] SMITH J A,KACHMAN S D,KOCHER M F, et al. Corn seed spacing uniformity as affected by seed tube condition[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011, 27(2):177-183.
- [18] 丁力,杨丽,张东兴,等. 气吸式玉米排种器吸附姿态对投种性能的影响分析[J]. 农业机械学报,2021,52(7):40-50.
DING Li,YANG Li,ZHANG Dongxing,et al. Effect of adsorption attitude of air suction corn metering device on seed feeding performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(7):40-50. (in Chinese)
- [19] 孙舒畅. 基于 DEM-CFD 耦合的气吸式玉米精密排种器工作过程仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2016.
SUN Shuchang. Simulation analysis of working process of air suction corn precision seed-metering device based on DEM-CFD coupling method[D]. Changchun:Jilin University,2016. (in Chinese)
- [20] 丁力,杨丽,武德浩,等. 基于 DEM-CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(11):48-57.
DING Li,YANG Li,WU Dehao,et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM-CFD coupling method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(11):48-57. (in Chinese)
- [21] 史嵩,刘虎,位国建,等. 基于 DEM-CFD 的驱导辅助充种气吸式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(5):54-66.
SHI Song,LIU Hu,WEI Guojian,et al. Optimization and experiment of pneumatic seed metering device with guided assistant filling based on DEM-CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(5):54-66. (in Chinese)
- [22] 韩丹丹,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM-CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(11):43-51.
HAN Dandan,ZHANG Dongxing,YANG Li,et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM-CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(11):43-51. (in Chinese)
- [23] 王金武,唐汉,王奇,等. 基于 EDEM 软件的指夹式精量排种器排种性能数值模拟与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(21):43-50.
WANG Jinwu,TANG Han,WANG Qi,et al. Numerical simulation and experiment on seeding performance of pickup finger precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21):43-50. (in Chinese)
- [24] 张春艳,康建明,彭强吉,等. 棉花气吸滚筒式穴播器二次投种机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):106-116.
ZHANG Chunyan, KANG Jianming, PENG Qiangji, et al. Design and test of secondary seed feeding mechanism of cotton air suction drum hole planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(6):106-116. (in Chinese)

(上接第 27 页)

- [32] 赵淑红,杨罗罗,张鑫,等. 大豆垄上双行免耕播种机锯齿式开沟器设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(1):74-84.
ZHAO Shuhong,YANG Luoluo,ZHANG Xin,et al. Design and experiment of zigzag opener for double-row no-tillage seeding on soybean ridge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(1):74-84. (in Chinese)
- [33] 王学振,岳斌,高喜杰,等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(10):124-136.
WANG Xuezheng,YUE Bin,GAO Xijie,et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(10):124-136. (in Chinese)
- [34] 方会敏,姬长英,AHMED A T,等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报,2016,47(1):60-67.
FANG Huimin,JI Changying,AHMED A T,et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1):60-67. (in Chinese)
- [35] 武涛,江立凯,赖远宏,等. 玉米根茬根土分离过程数值模拟[J]. 河南农业科学,2016,45(7):132-136.
WU Tao,JIANG Likai,LAI Yuanhong,et al. Numerical simulation of roots-soil separation process of corn stubble[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2016,45(7):132-136. (in Chinese)
- [36] 王宪良,胡红,王庆杰,等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报,2017,48(12):78-85.
WANG Xianliang,HU Hong,WANG Qingjie,et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(12):78-85. (in Chinese)