

党参种子的离散元仿真参数标定与试验验证

田剑锋¹,石林榕¹,杨小平¹,陈垣²,柏永祥¹,臧金¹

(1.甘肃农业大学机电工程学院,甘肃兰州730070;2.甘肃农业大学农学院,甘肃兰州730070)

摘要:为设计及优化党参机械化播种设备,提供基础仿真参数,本文对甘肃省种植的两种党参种子(渭党1号和甘党2号)通过试验法确定其基本物理参数(形状尺寸、质量密度、体积密度、千粒重、含水率)和接触力学参数(恢复系数、静摩擦系数);通过斜面滚动试验结合 EDEM 仿真,预测党参种子与 ABS 塑料板间的滚动摩擦系数;通过调整党参种子模型间的滚动摩擦系数,使仿真形成的种子堆积角逼近种子实际堆积角,预测党参种子间的滚动摩擦系数。结果表明:渭党1号、甘党2号党参种子与 ABS 塑料板的静摩擦系数分别为 0.368 和 0.341,其种间的静摩擦系数分别为 0.389 和 0.495,与 ABS 塑料板的碰撞恢复系数分别为 0.591 和 0.518;其种间的碰撞恢复系数分别为 0.387 和 0.346,与 ABS 塑料板间的滚动摩擦系数分别为 0.163 和 0.168,其种间的滚动摩擦系数分别为 0.0153 和 0.0156。并将得到的仿真参数进行异型窝眼轮排种器试验及验证,仿真与台架试验对比结果显示,两者相对误差为 3.16%。表明本试验所建立的离散元模型及基础仿真数据可以用于党参播种机的设计及优化。

关键词:党参种子;机械化播种;离散元模型;仿真排种

中图分类号:S567;S223 **文献标志码:**A

Calibration and experimental validation of discrete element simulation parameters for *Codonopsis pilosula* seed

TIAN Jianfeng¹, SHI Linrong¹, YANG Xiaoping¹, CHEN Yuan², BAI Yongxiang¹, ZANG Jin¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: This study intended to provide basic simulation parameters for design and optimization of *Codonopsis pilosula* seed mechanized seeding equipment, including basic physical parameters of shape and size, mass density, bulk density, thousand grain weight and water content and the contact mechanics parameters of recovery coefficient, static friction coefficient for two types of *Codonopsis pilosula* seed (Weidang 1 and Gandang 2) grown in Gansu Province through experimental methods. The rolling friction coefficient between *Codonopsis pilosula* seed and ABS plastic plates was predicted by inclined rolling test combining with EDEM simulation. The rolling friction coefficient of *Codonopsis pilosula* seed was calibrated by adjusting the rolling friction coefficient between *Codonopsis pilosula* seed to make sure the seed stacking angle formed by the simulation similar to the actual stacking angle. The results showed that the static friction coefficients of Weidang 1 and Gandang 2 *Codonopsis pilosula* seed and ABS plastic plates were 0.368 and 0.341, respectively, and their interspecies static friction coefficients were 0.389 and 0.495, respectively. The collision recovery coefficients with ABS plastic plates were 0.591 and 0.518, respectively, and their interspecies collision recovery coefficients were 0.387 and 0.346. The rolling friction coefficients with ABS plastics were 0.163 and 0.168, and their interspecies rolling friction coefficients were 0.0153 and 0.0156, respectively. The simulated parameters were tested and verified for the shaped nest-eye wheel seed rower, and the comparison results between simulation and bench test showed that the relative error was 3.16%. The study suggested that the discrete element model and underlying simulation data developed in this experiment could be used for the

design and optimization of the *Codonopsis pilosula* seeder.

Keywords: *Codonopsis pilosula* seed; mechanized seeding; discrete element model; simulated seeding

党参主产于甘肃东部、四川西部、陕西南部、宁夏、山西等地区,为补气常用药材,兼能养血。党参入药历史悠久,其作为传统的补药被国民所认可,常用于替代人参^[1]。甘肃是我国中药材种植大省,党参为甘肃的五大药材之一,主要分布在定西市的渭源县、陇西县等地,对甘肃地方经济发展有提升作用^[2-3]。据测算,2019年定西全市党参种植面积达 $3 \times 10^4 \text{ hm}^2$,占国内流通量的80%以上,其主产区渭源县也被中国农学会特产之乡组委会命名为“中国党参之乡”。近年来,党参种植面积逐年增长,但机械化作业程度不高,党参栽培的人工劳动成本占其产值的50%以上,加上种苗价格上涨因素,使党参的种植成本居高不下,严重阻碍了党参产业的发展。因此,要提高党参的栽培效益及农户收入,需加快党参机械化栽培技术的研究和应用,以提高其作业效率、降低劳动力成本^[4-5]。

党参机械化生产过程中的首要环节是播种。实现党参机械化播种的关键在于精密排种器的设计,而明确党参种子的各项物理参数能够为党参精量播种机的研究提供可靠的数据支撑^[6]。目前,发达国家机械化精密播种研究已成熟,中国尚处于发展阶段^[7]。国内学者已对胡麻^[8]、大豆^[9]、油菜^[10]、马铃薯^[11]等农作物种子以及三七^[12]、前胡^[13]等中药材种子进行了大量的物理特性研究,但对党参小粒种子的物理特性研究还鲜有报道。

本文通过试验测量了党参种子的尺寸、质量密度、体积密度、含水率等各项物理参数以及种子与材料之间、种子自身之间的静摩擦系数、碰撞恢复系数等接触参数。由于党参种子尺寸较小,难以准确通过仪器测定其与材料之间及种间的滚动摩擦系数,故采用仿真试验逼近真实试验的方法,通过改变仿真试验中与材料间滚动摩擦系数,与真实斜面试验情况对比间接预测;之后通过堆积角仿真试验预测其种间滚动摩擦系数。并进行了排种试验验证,以期对党参精密播种机具中相关工作部件的设计优化提供参考。

1 试验材料及其测量方法

党参种子含水率较低,与接触材料之间不发生黏结,因此采用 EDEM 软件默认无滑动接触模型 Hertz-Mindlin 作为党参种子间及其与接触材料之

间的接触模型。依据该模型需确定党参种子物理特性参数和接触模型参数。物理特性参数包括党参种子形状尺寸及体积分布、质量和体积密度、弹性模量、泊松比、含水率,接触模型参数有恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数^[14]。

1.1 试验材料

本试验所选取的党参种子来源于甘肃省定西市,为储存 1 a 的渭党 1 号、甘党 2 号两个党参品种,通过人工筛选,挑出破损种子。大部分物料的泊松比在 0.2~0.5 范围内,当物料的性质趋近于橡胶或液体时,泊松比 μ 趋近于 0.5,当水果和蔬菜等物料中空气含量增加,即密度减小时,泊松比值减小^[15]。结合相关文献^[16],以及 EDEM 的材料数据库^[17]取党参种子泊松比为 0.35。一般地讲,对弹性体施加一个外界作用力,弹性体会发生形状的改变,弹性模量可视为衡量材料产生弹性变形难易程度的指标,其值越大,使材料发生一定弹性变形的应力也越大,即材料刚度越大,亦即在一定应力作用下发生弹性变形越小。弹性模量 E 是指材料在外力作用下产生单位弹性变形所需要的应力。它是反映材料抵抗弹性变形能力的指标,对党参种子堆积角影响不显著^[18-19]。结合软件内部数据库资料和其他籽粒物料^[20-23],本研究设置党参种子弹性模量为 432.87 MPa,剪切模量为 153.721 MPa。

1.2 党参种子尺寸及体积分布

随机取两种党参种子各 500 粒,由于党参种子颗粒较小,宽度及厚度近似,使用常规游标卡尺测量困难,故使用 USB 显微镜(UMO12C,深圳恒好电子)拍照上传至计算机测量其长度、宽度。

通过对测量种子进行统计,发现党参种子尺寸基本呈正态分布,其尺寸分布如图 1 所示。渭党 1 号种子长度平均值为 1.22 mm,标准差为 0.128;宽度为 0.68 mm,标准差为 0.062。甘党 2 号种子长度平均值为 1.26 mm,标准差为 0.117;宽度为 0.67 mm,标准差为 0.061。两者相比较,后者略长,前者略宽,前者局部尺寸更为分散,后者更为集中。

1.3 党参种子的千粒重、密度及含水率

千粒重不仅能体现种子的饱满程度,还能计算实际所需的播种量。采用精度为 0.01g 电子天平(启东友铭衡器有限公司,BM-120),分别测量 300、500、700、1 000 粒党参种子质量并记录数据,计算并取平均值。测得渭党 1 号与甘党 2 号千粒重均为 0.31 g。

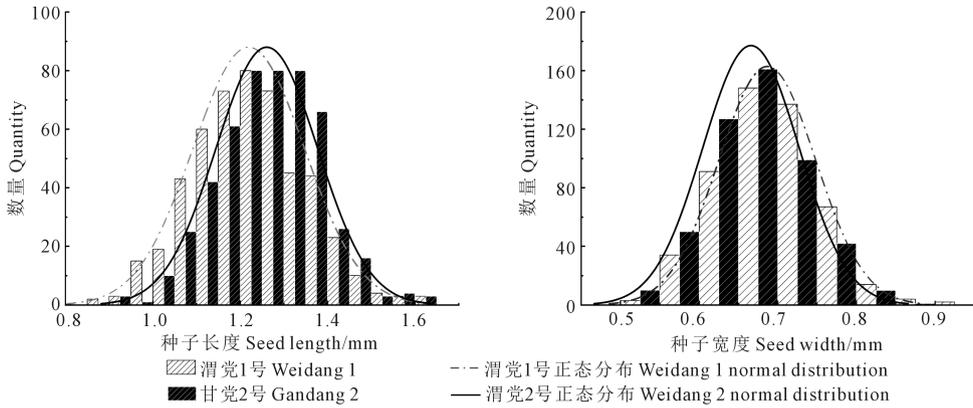


图 1 党参种子尺寸分布

Fig.1 *Codonopsis pilosula* seed size distribution

种子密度分为质量密度和体积密度,质量密度是材料之间没有空隙时的密度,体积密度是包含材料间孔洞或缝隙的密度。质量密度采用容积法^[15]测定,取适量种子称重后,将其置入装有酒精的量筒中(酒精密度小于党参种子),量筒内液面上升高度即为种子体积。重复 5 次,取平均值。测得渭党 1 号和甘党 2 号种子质量密度分别为 $1.02 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.075 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。体积密度测量方法为:用量筒量取 3 ml 党参种子,称取其质量并计算出单位体积的密度,试验重复 5 次,取其平均值,计算得渭党 1 号体积密度为 $0.63 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,甘党 2 号体积密度为 $0.67 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。党参种子含水率使用水分仪测量(华科仪器仪表有限公司, HKSF-2 型快速水分仪),测得渭党 1 号和甘党 2 号种子含水率分别为 6.31% 和 5.95%。

1.4 静摩擦系数

1.4.1 党参种子与其他材料之间的静摩擦系数

本文使用自制的静摩擦系数试验台测量党参种子的静摩擦系数,如图 2 所示。该试验台工作原理为将难以直观测量的摩擦力转换为容易测量的水桶重力,即向水桶中注水,当其重力刚好等于被测物与被测板间摩擦力时,被测物有向前运动的趋势并挡住光电开关。停止向水桶注水,此时仅需测量被测物与水桶的质量即可通过公式(1)~(4)计算出被测对象的静摩擦系数。

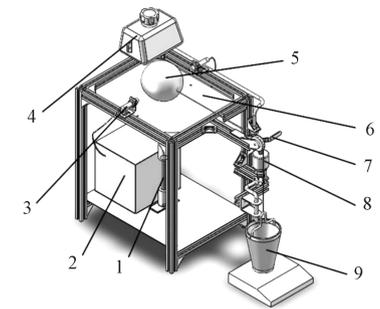
$$F_f = \mu F_n = \mu mg \quad (1)$$

$$F_{\text{拉}} = Mg \quad (2)$$

$$F_{\text{拉}} = F_f \quad (3)$$

$$\mu = M/m \quad (4)$$

式中, g 为重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; F_f 为被测材料的摩擦力, N ; μ 为被测材料的静摩擦系数; F_n 为被测材料的支持力, N ; $F_{\text{拉}}$ 为被测材料所受的拉力, N ; M 为水桶及水的总质量, g ; m 为被测材料的质量, g 。



1.升降杆;2.电源箱;3.光电开关;4.水箱;5.被测物;
6.被测板;7.开关;8.电磁阀;9.水桶
1. Lift rod; 2. Power box; 3. Photoelectric switch; 4. Water tank;
5. Measured object; 6. Measured plate; 7. Switch;
8. Solenoid valve; 9. Water bucket

图 2 静摩擦系数试验台

Fig.2 Static friction coefficient test bench

试验接触材料为 ABS 塑料板(9 cm×7 cm)作为图 2 中的被测板 6。首先将被测种子黏在一个铁板上,铁板前端固定一挡板,将其作为图 2 中的被测物 5。使用天平称取处理过铁板的总质量记作 m ,将其与细线一端连接,细线另外一端穿过滑轮与水桶连接。打开总开关,打开升降装置开关,调节铁板放置的位置,使其前端挡板刚刚接触光电传感器所发出的光线,调节高度,观察细线使其处于水平位置。将手动开关关闭,水箱加满水,并将电磁阀(常开)一端所引出的软管置于水桶正上方,电子秤置于水桶正下方。打开手动开关,水箱中的水在重力的作用下经软管先后流过手动开关、电磁阀,最后注入水桶。当水桶中水的重力等于党参种子与 ABS 塑料板的静摩擦力时,水桶在重力作用下经细线带动铁板向前移动,从而使挡片阻挡光线,同时光电开关发出信号,电磁阀(常开)接收到光电开关信号从而关闭,进而使水流停止。此时将水桶取下称重,记作 M 。水桶和水的总重力即为党参种子与 ABS 塑料板的静摩擦力。静摩擦系数计算结果如表 1 所示。

1.4.2 党参种子之间的静摩擦系数 党参种子之间的静摩擦系数也采用上述方法测量,将 ABS 塑料板上粘一层种子,尽可能减小种子间的空隙,之后固定在试验台上。将粘有种子的铁板放置其上进行试验,重复 5 次取平均值。静摩擦系数计算结果如表 2 所示。

1.5 碰撞恢复系数

碰撞恢复系数是表征物体在接触碰撞变形后恢复能力的参数,采用碰撞弹跳试验^[24]测量党参种子与 ABS 塑料板和粘有党参种子的测量板之间的碰撞恢复系数。将 ABS 塑料板水平放置,将党参种子从高度 $H=100\text{ mm}$ 处自由下落,与 ABS 塑料板发生碰撞,通过高速摄像记录党参种子最高弹起高度,拍摄背景处放有钢板尺,碰撞前 ABS 塑料板静止,即速度 v_0 为 0;碰撞后 ABS 塑料板静止,即速度 v'_0 为 0。党参种子在与塑料板发生碰撞前,其速度 v_1 为 $-\sqrt{2gh}$;党参种子在与塑料板发生碰撞后,其速度 v'_1 为 $-\sqrt{2gh'}$ 。如图 3 所示,并将视频传入电脑中借助视频播放软件查看并标记党参种子弹跳高度,重复 5 次取平均值,通过式(5)计算碰撞恢复系数,恢复系数测量结果如表 3 所示。

$$e = \frac{|v'_1 - v'_0|}{|v_1 - v_0|} = \frac{|v'_1|}{|v_1|} = \sqrt{\frac{h'}{h}} \quad (5)$$

式中, v_0 为碰撞前 ABS 塑料板的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v_1 为碰撞前党参种子的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v'_0 为碰撞后 ABS 塑料板的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; v'_1 为碰撞后党参种子的速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; h 为碰撞前党参种子的高度, mm ; h' 为碰撞后党参种子弹起的高度, mm 。

1.6 滚动摩擦系数

滚动摩擦包括党参种子与 ABS 塑料之间的摩擦和党参种子之间的摩擦,是指当种子在 ABS 塑料板表面或党参种子与种子表面作无滑动的滚动或有滚动的趋势时,两者在接触部分受压发生变形而产生阻碍滚动的的作用,滚动摩擦力的大小与物体的性质、表面形状以及滚动物体的质量有关^[25]。

1.6.1 党参种子与 ABS 塑料板间的滚动摩擦系数 党参种子在 ABS 塑料板上的滚动会产生滚动摩擦,利用斜面滚动试验及仿真标定其滚动摩擦系数。试验原理如图 4 所示。随机选取种子作为试验材料,为提高试验的可靠性及准确性,通过大量预试验,选取 ABS 塑料板的倾斜角度 $\beta=30^\circ$,种子在斜面上滚动距离为 $S=100\text{ mm}$,种子从固定位置 S 以初速度为 0 沿斜面向下滚动,并在水平 ABS 塑料板上滚动一定距离直到完全静止,测量其在水平板上滚动距离并记为 L 。斜面滚动试验重复 10 次,计算其平均值,得渭党 1 号在水平板上滚动距离 $L_1=63.37\text{ mm}$,甘党 2 号在水平板上滚动距离 $L_2=54.71\text{ mm}$ 。

表 1 党参与 ABS 塑料板的摩擦系数

Table 1 Friction coefficient between *Codonopsis pilosula* seed and ABS plastic sheet

品种 Variety	经处理铁板的总质量/g Total mass of treated iron plate	水和水桶质量/g Water and bucket mass	摩擦系数 Friction coefficient
渭党 1 号 Weidang 1	115.9	42.6	0.368
甘党 2 号 Gandang 2	120.9	41.3	0.341

表 2 党参种子间静摩擦系数

Table 2 Static friction coefficient between *Codonopsis pilosula* seed

品种 Variety	经处理铁板的总质量/g Total mass of treated iron plate	水和水桶质量/g Water and bucket mass	摩擦系数 Friction coefficient
渭党 1 号 Weidang 1	115.9	45.8	0.389
甘党 2 号 Gandang 2	120.9	59.8	0.495

表 3 党参种子碰撞恢复系数

Table 3 *Codonopsis pilosula* seed collision recovery factor

材料 Material	渭党 1 号 Weidang 1	甘党 2 号 Gandang 2
党参种子 <i>Codonopsis pilosula</i> seed	0.387	0.346
ABS 塑料板 ABS plastic sheet	0.591	0.518

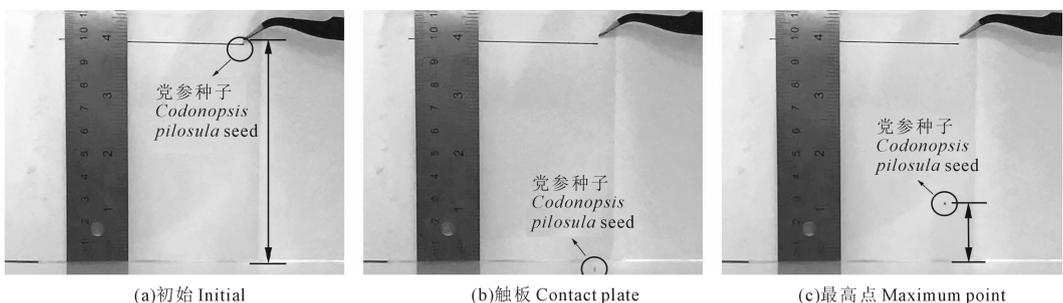
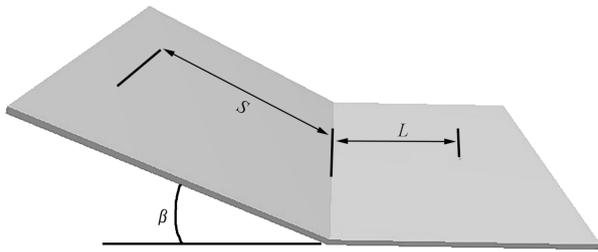


图 3 党参种子恢复系数测定

Fig.3 *Codonopsis pilosula* seed recovery coefficient determination

由于斜面滚动试验中党参种子间没有接触,因此在 EDEM 仿真试验中将其种间的碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数均设置为 0,以消除这些参数对党参种子水平滚动距离的影响。由于党参种子呈扁平状且尺寸较小,在实际试验中会受到静摩擦的影响。在仿真试验中应考虑其影响,与 ABS 的接触参数采用上述试验得出的数值,弹性恢复系数分别取 0.591 与 0.518;静摩擦系数分别取 0.368 与 0.341。经过预仿真试验,取党参种子与 ABS 塑料板之间滚动摩擦系数 μ_r 的范围为 0.16~0.17,取步长 0.02,进行 5 组仿真试验,每组 5 次,为减小误差及提高效率,每次从斜板固定位置横向生成 5 颗种子,取其平均值。试验设计方案与结果如表 4 所示。



注: β 为 ABS 塑料板的倾斜角度; S 、 L 分别为种子在斜面和水平面上的滚动距离。

Note: β is the inclination angle of ABS plastic plate; S and L are the rolling distance of seeds on the inclined plane and horizontal plane, respectively.

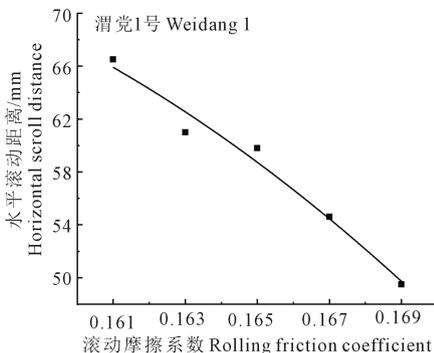
图 4 斜面仿真试验

Fig.4 Slope simulation test

表 4 党参种子间滚动摩擦系数(μ_r)

Table 4 *Codonopsis pilosula* seed inter-seed dynamic friction coefficient

序号 Number	μ_r	水平滚动距离 Horizontal scroll distance/mm	
		渭党 1 号 Weidang 1	甘党 2 号 Gandang 2
1	0.161	66.5	67.2
2	0.163	61.0	64.8
3	0.165	59.8	61.3
4	0.167	54.6	55.2
5	0.169	49.5	52.6



为得到仿真试验中党参种子与 ABS 塑料的滚动摩擦系数与水平面滚动距离的关系,对表 4 中的试验数据进行曲线拟合,得到 2 次多项式拟合曲线如图 5 所示,曲线方程为:

$$l_1 = -57143x_1^2 + 16837x_1 - 1163.7 \quad (6)$$

$$l_2 = -53571x_2^2 + 15739x_2 - 1077.7 \quad (7)$$

式中, l_1 、 l_2 分别为渭党 1 号和甘党 2 号的种子水平滚动距离,mm; x_1 、 x_2 分别为上述两品种的滚动摩擦系数。

式(6)的决定系数 $R^2 = 0.9764$,式(7)的决定系数 $R^2 = 0.9809$,均接近 1,表明其拟合的可靠度高。将斜面测定试验测定的 L 分别代入式(6),求得 $x_1 = 0.163$;代入式(7),求得 $x_2 = 0.168$ 。将其输入 EDEM 中进行验证,每品种试验重复 3 次,取平均值,仿真测得渭党 1 号种子水平滚动距离仿真值为 64.9 mm,与实测值的相对误差为 2.36%;甘党 2 号种子水平滚动距离仿真值为 56.5 mm,与实测值的相对误差为 3.17%,由此表明仿真标定结果可靠。取党参种子与 ABS 塑料之间滚动摩擦系数分别为 μ_{r1} (渭党 1 号)=0.163、 μ_{r2} (甘党 2 号)=0.168。

1.6.2 种间滚动摩擦系数的标定 党参种子呈扁平状,类似椭球体,且尺寸较小,试验测量其种间滚动摩擦系数比较困难。本文通过 EDEM 仿真,通过逼近预测法^[26]标定党参种间滚动摩擦系数。通过试验得出党参种子实际堆积角,结合资料及上文试验得出的各项参数,在与上述试验同等条件下,进行党参种子仿真堆积角试验;通过逐步调整党参种子的滚动摩擦系数使党参种子堆积角的仿真值与实际值基本相等,得到各品种党参种子的滚动摩擦系数。

1.6.3 堆积角的测定 堆积角是种子从一定高度自由滑落到水平面上所形成的圆锥体的斜面与底部直径所构成的夹角,与种子摩擦特性有关,主要用于确定种箱结构。本文采用 ABS 塑料圆筒进行

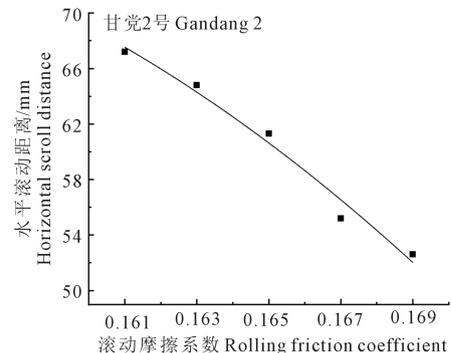


图 5 仿真试验滚动摩擦因数与水平滚动距离的拟合曲线

Fig.5 Simulation test rolling friction factor and horizontal rolling distance fitting curve

试验,测量时将 ABS 塑料圆筒(内径 10 mm×高度 80 mm)垂直置于水平桌面,圆筒中注入 3 g 党参种子,以 $0.025 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度匀速提升圆筒,以降低装置抖动造成的误差,此时党参种子在重力作用下自然下落堆积,对党参堆积角进行图像采集,导入 AotoCAD 2019 中,标注圆锥体底角并进行堆积角的测量。每品种试验 10 次,取其平均值。2 种党参种子实际堆积角测量结果分别为 22.16° 、 22.86° 。

1.6.4 党参种子离散元模型的建立 根据上述测量的两个品种党参种子的三维尺寸和形状,使用 SolidWorks 软件对党参种子进行三维实体建模,并将三维模型导入 EDEM 软件,利用软件 Generate Particle 功能对模型进行自动填充,离散元模型由不等直径的球体填充而成。渭党 1 号种子采用 5 颗半径为 $0.27 \sim 0.32 \text{ mm}$ 球状颗粒填充,长度方向分布为 $-0.048 \sim 0.087 \text{ mm}$ 、宽度方向分布为 $-0.05 \sim 0.05 \text{ mm}$ 、高度方向分布为 $-0.03 \sim 0.018 \text{ mm}$,甘党 2 号种子采用 7 颗半径为 $0.20 \sim 0.23 \text{ mm}$ 球状颗粒填充,长度方向分布为 $-0.03 \sim 0.01 \text{ mm}$ 、宽度方向分布为 $-0.15 \sim 0.17 \text{ mm}$ 、高度方向分布为 $-0.02 \sim 0.02 \text{ mm}$ 。党参种子的三维模型及离散元模型如图 6 所示(见 246 页)。设置 ABS 塑料圆筒直径 10 mm、高度 80 mm 用于形成堆积角,当容器内填充 3 g 党参种子后,以 $0.025 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 提升圆筒,使圆筒内党参种子自然下落堆积。

1.6.5 仿真参数设置及结果分析 党参种子堆积仿真过程时间步长选择关系到仿真效率,步长选择过长会造成发散,选择过短会使计算时间增长,效率降低^[27]。考虑到时间及计算机性能的限制,设置 Rayleigh 时间步长为 20%,网格尺寸取 2.5 倍最小颗粒单元半径。通过堆积角预仿真工作确定党参种间滚动摩擦系数在 0.01~0.02 之间,进一步调整种间滚动摩擦系数进行堆积角仿真寻找较优值,缩小取

值范围为 0.015~0.018,分别在不同滚动摩擦系数下进行堆积角仿真试验,每个品种重复 3 次,结果取平均值。仿真党参种子堆积角如表 5 所示。

为确保党参种子间滚动摩擦系数选取的科学性,对表 5 中的试验数据进行曲线拟合,得到二次多项式拟合曲线如图 7 所示,曲线方程为:

$$y_3 = -50000x_3^2 + 2010x_3 + 3.12 \quad (8)$$

$$y_4 = -25000x_4^2 + 1085x_4 + 12.035 \quad (9)$$

式中, y_3 、 y_4 分别为渭党 1 号和甘党 2 号堆积角数值; x_3 、 x_4 分别为渭党 1 号和甘党 2 号的滚动摩擦系数。

式(8)的决定系数 $R^2 = 0.9970$ 与式(9)的决定系数 $R^2 = 0.9329$ 均接近 1,表明拟合曲线的可靠度高。将实际试验中测得的堆积角数值分别对应带入到式(8)与式(9)中,求得 $x_3 = 0.0153$ 、 $x_4 = 0.0156$ 。分析仿真结果,渭党 1 号在滚动摩擦系数为 0.015 时,形成的堆积角平均值为 22.1° ,接近实际堆积角 22.16° ,两者相对误差为 0.27%,滚动摩擦系数为 0.016 时,形成的堆积角平均值为 22.6° ,与实际堆积角相对误差为 1.98%;甘党 2 号在滚动摩擦系数为 0.015 时,形成的堆积角平均值为 22.65° ,接近其实际堆积角 22.86° ,两者相对误差为 0.92%,滚动摩擦系数为 0.016 时,形成的堆积角平均值为 23.1° ,与实际堆积角相对误差为 1.04%。通过综合考虑,设定渭党 1 号滚动摩擦系数为 0.0153;甘党 2 号党参种子的滚动摩擦系数为 0.0156。

表 5 党参种子堆积角仿真

Table 5 Simulation of *Codonopsis pilosula* seed stacking angle

序号 Number	滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient	渭党 1 号堆积角 平均值/ $^\circ$ Weidang 1 stacking angle average	甘党 2 号堆积角 平均值/ $^\circ$ Gandang 2 stacking angle average
1	0.015	22.10	22.65
2	0.016	22.60	23.10
3	0.017	22.90	23.15
4	0.018	23.20	23.50

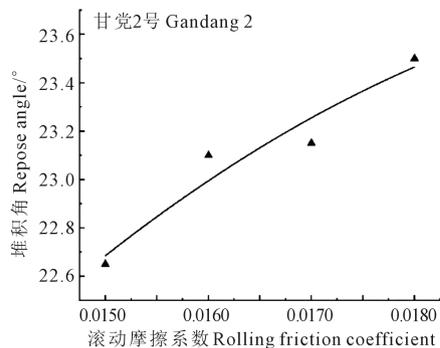
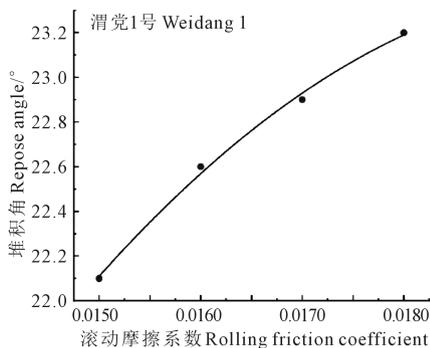


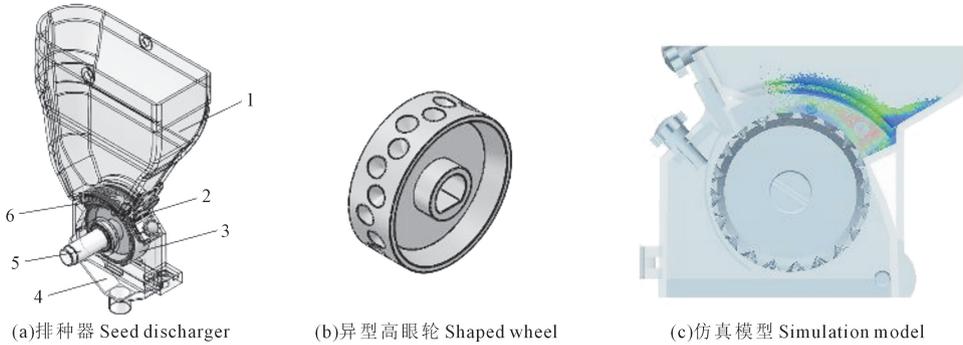
图 7 仿真试验滚动摩擦系数与堆积角拟合曲线

Fig.7 Simulation test rolling friction factor and horizontal rolling distance fitting curve

2 仿真排种及其试验验证

2.1 排种模型建立

为了进一步验证党参种子离散元模型和仿真参数的可靠性,开展异型窝眼轮排种仿真试验,选用甘党 2 号种子为仿真模型,以不同转速下仿真和试验结果排种数量流率为指标,验证上文标定的党参种子参数。由于过大的转速会使种子排出速度过快,速率不稳定,导致误差较大,因此通过预试验确定转速为 $50\sim 80\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。通过 solidworks 软件建立排种器模型。排种器的异型窝眼排种轮直径 59 mm,



1. 排种器壳体; 2. 种刷; 3. 异型窝眼轮; 4. 排种盒; 5. 传动轴; 6. 挡板

1. Seed metering device shell; 2. Seed brush; 3. Heterosexual socket eye wheel; 4. Seed displacement box; 5. Drive shaft; 6. Baffle

图 8 异型窝眼轮排种器及窝眼轮

Fig.8 Shaped nesting wheel seed dispenser and nesting wheel

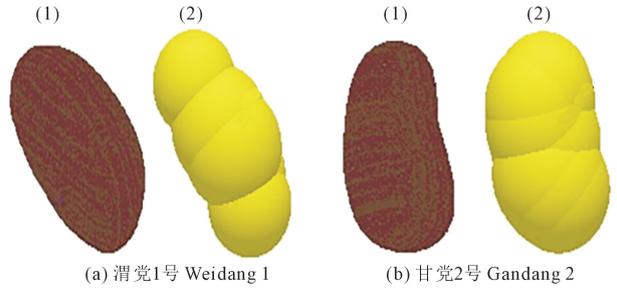
宽 20 mm, 排种轮轴向 2 排共 20 个异型窝眼,其形状为圆锥形。异型窝眼轮排种器及窝眼轮结构如图 8 所示。通过查阅相关文献及上述试验方法确定仿真排种过程中与党参种子接触材料的相关参数,如表 6 所示。

2.2 排种仿真过程

观察排种过程,将党参异型窝眼轮排种器模型及上述试验得出的参数导入离散元软件 EDEM 中进行排种仿真。其排种仿真过程如图 9 所示。由图 9 可知,党参种子受重力落下,填进逆时针旋转的窝眼轮的窝眼中(图 9a);种子随窝眼轮旋转达种刷位置时,窝眼外多余的种子被种刷挡住(图 9b);当窝眼轮继续旋转,窝眼中的党参种子在重力作用下脱离掉落(图 9c);掉落的种子按一定速度从排种器中排出(图 9d)。

2.3 试验验证

排种台架试验时,首先在种箱中加入适量甘党 2 号种子,打开电机的电源,调节电机转速为 $50\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,种子下落至排种器下方的传送带上,待种子均匀排出时,记录 3 s 内传送带上掉落种子的数量,



(a) 渭党1号 Weidang 1

(b) 甘党2号 Gandang 2

注: (1) 三维模型; (2) 离散元模型。

Note: (1) 3D model; (2) Discrete element model.

图 6 党参种子的三维模型和离散元模型

Fig.6 3D model and discrete element model of *Codonopsis pilosula* seed



(c) 仿真模型 Simulation model

表 6 排种器组成材料参数

Table 6 Property parameters of seed-metering device

参数 Parameter	数值 Value
党参种子泊松比 Poisson's ratio of <i>Codonopsis pilosula</i> seed	0.35
党参种子剪切模量/Pa Shear modulus of <i>Codonopsis pilosula</i> seed	1.537×10^8
党参种子密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ Density of <i>Codonopsis pilosula</i> seed	1075
ABS 塑料泊松比 ^[17] Poisson ratio of ABS plastic	0.394
ABS 塑料剪切模量/Pa ^[17] Shear modulus of ABS plastic	7.891×10^8
ABS 塑料密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ ^[17] Density of ABS plastic	1115
党参种子与 ABS 塑料间的恢复系数 Recovery coefficient between <i>Codonopsis pilosula</i> seed and ABS plastic	0.518
党参种子与 ABS 塑料间的静摩擦系数 Coefficient of static friction between <i>Codonopsis pilosula</i> seed and ABS plastic	0.495
党参种子与 ABS 塑料间的滚动摩擦系数 Coefficient of rolling friction between <i>Codonopsis pilosula</i> seed and ABS plastic	0.168

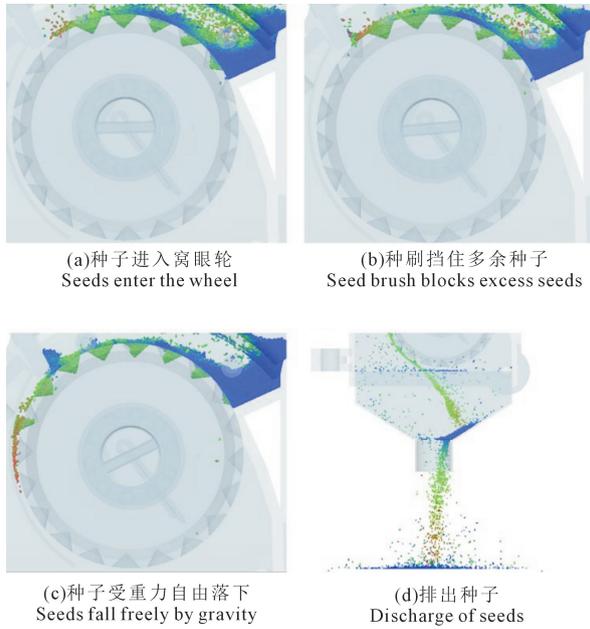


图 9 党参种子异型窝眼轮排种仿真过程

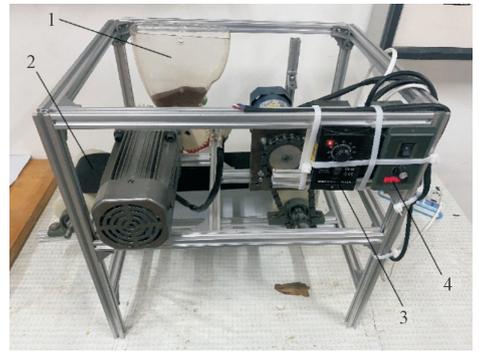
Fig.9 Simulation process of *Codonopsis pilosula* seed heterogeneous nest-eye wheel seeding row

计算排种器的质量流率(即每秒排出种子的质量),重复 5 次取平均值。重复上述试验,记录在不同转速下($50\sim 80\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)排出的种子的质量流率。排种试验台如图 10 所示。

为对比排种质量流率仿真值和真实值,在不同窝眼轮转速条件下($50\sim 80\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)进行异型窝眼轮排种器排种仿真。以甘党 2 号模型为仿真对象,将排种器的简化模型和标定的接触参数输入 EDEM 软件中,并记录排种器在单位时间内排出的种子质量,与真实排种台架试验结果对比。其结果如图 11 所示。通过对比仿真与台架试验结果,发现仿真值与实际值的质量流率都随着转速增加而增大,且趋势基本相同,其平均误差为 3.16%。表明该离散元模型和接触参数可用于离散元仿真试验。

3 结 论

1)通过试验法对渭党 1 号、甘党 2 号党参种子进行了基本物理力学参数测定。两种党参种子的三维体积基本上均呈正态分布,渭党 1 号、甘党 2 号与 ABS 塑料板的静摩擦系数分别为 0.368 和 0.341,党参种间的静摩擦系数分别为 0.389 和 0.495;党参种子与 ABS 塑料板的碰撞恢复系数分别为 0.591 和 0.518;党参种间的碰撞恢复系数分别为 0.387 和 0.346。采用仿真逼近预测法标定的渭党 1 号、甘党 2 号党参种子与 ABS 滚动摩擦系数分别为



1.排种器;2. 传送带;3.传送带速度控制器;4.排种轮速度控制器
1. Seed rower; 2. Conveyor belt; 3. Conveyor belt speed controller;
4. Seed rowing wheel speed controller

图 10 台架试验与仿真试验

Fig.10 Bench test and simulation experiment

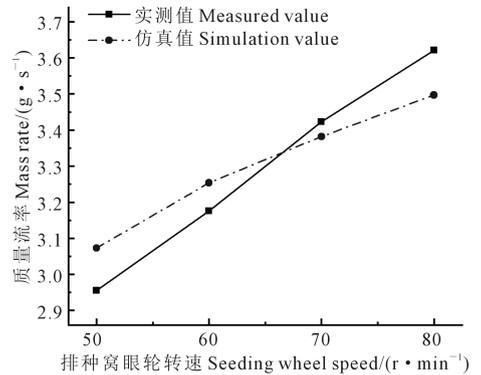


图 11 不同转速条件下质量流率的实测值和仿真值

Fig.11 Measured and simulated values of mass flow rate at different speed conditions

0.163 和 0.168;种间滚动摩擦系数分别为 0.0153 和 0.0156。

2)采用窝眼轮排种器进行试验验证,通过试验台架进行实际排种,并在 EDEM 软件中进行仿真对比。结果表明,党参种子质量流率的实测值和仿真值平均误差为 3.16%,本文标定的党参种子仿真参数对于设计与优化党参播种机具工作性能参数具有一定的指导意义。

参 考 文 献:

- [1] ZOU Y F, ZHANG Y Y, PAULSEN B S, et al. Structural features of pectic polysaccharides from stems of two species of *Radix Codonopsis* and their antioxidant activities [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 159: 704-713.
 - [2] 杨扶德,罗文蓉,李成义,等.党参野生品与栽培品的性状与显微特征研究[J].中药材,2007,30(10):1226-1230.
- YANG F D, LUO W R, LI C Y, et al. Study on the traits and microscopic characteristics of wild and cultivated *Radix Codonopsis*

- [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2007, 30(10): 1226-1230.
- [3] 李成义, 刘书斌, 李硕, 等. 甘肃党参栽培现状调查分析[J]. 中国现代中药, 2016, 18(1): 102-105.
LI C Y, LIU S B, LI S, et al. Investigation and analysis of status cultivation of Gansu *Codonopsis radix* [J]. Modern Chinese Medicine, 2016, 18(1): 102-105.
- [4] 许世峰, 王国祥, 蔡子平, 等. 宕昌县党参育苗生产中存在的问题及对策[J]. 农业科技与信息, 2013(16): 57-58.
XU S F, WANG G X, CAI Z P, et al. Problems and countermeasures in seedling production of Dangchang county [J]. Agricultural Science-Technology and Information, 2013(16): 57-58.
- [5] 李参. 甘肃省二阴地区党参机械化栽培技术探讨与分析[J]. 农业机械, 2019, (5): 97-99.
LI C. Exploration and analysis of mechanized cultivation technology of *Codonopsis pilosula* in Eryin area of Gansu province [J]. Farm Machinery, 2019, (5): 97-99.
- [6] 白明超, 李骅, 齐新丹, 等. 两种胡萝卜种子物理特性的测定与分析[J]. 江西农业学报, 2019, 31(12): 18-22.
BAI M C, LI H, QI X D, et al. Determination and analysis of physical properties of two kinds of carrot seeds [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2019, 31(12): 18-22.
- [7] 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 J W, YANG X J, LIU L J, et al. Research status and development trend of precision seeder for small seeds [J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(6): 9-13.
- [8] 石林榕, 马周泰, 赵武云, 等. 胡麻籽粒离散元仿真参数标定与排种试验验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 25-33.
SHI L R, MA Z T, ZHAO W Y, et al. Calibration of simulation parameters of flax seeds using discrete element method and verification of seed-metering test [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20): 25-33.
- [9] 张涛, 刘飞, 赵满全, 等. 大豆种子与排种器接触物理参数的测定与离散元仿真标定[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(9): 86-92.
ZHANG T, LIU F, ZHAO M Q, et al. Measurement of physical parameters of contact between soybean seed and seed metering device and discrete element simulation calibration [J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(9): 86-92.
- [10] 黄小毛, 查显涛, 潘海兵, 等. 油菜籽粒点面接触碰撞中恢复系数的测定及分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(24): 22-29.
HUANG X M, ZHA X T, PAN H B, et al. Measurement and analysis of rapeseeds' restitution coefficient in point-to-plate collision model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(24): 22-29.
- [11] 石林榕, 孙伟, 赵武云, 等. 马铃薯种薯机械排种离散元仿真模型参数确定及验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 35-42.
SHI L R, SUN W, ZHAO W Y, et al. Parameter determination and validation of discrete element model of seed potato mechanical seeding [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(6): 35-42.
- [12] 于庆旭, 刘燕, 陈小兵, 等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 123-132.
YU Q X, LIU Y, CHEN X B, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123-132.
- [13] 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 J S, CAO C M, XIE C J, et al. Measurement of physical parameters of *Radix Peucedani* seeds and parameter calibration of discrete element simulation model [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(4): 180-189.
- [14] 鹿芳媛, 马旭, 谭德妍, 等. 水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 93-99.
LU F Y, MA X, TAN S Y, et al. Simulative calibration and experiment on main contact parameters of discrete elements for rice bud seeds [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 93-99.
- [15] 周祖饬. 农业物科学[M]. 北京: 农业出版社, 1994: 12-20, 40-44.
ZHOU Z E. Agricultural material science [M]. Beijing: Agricultural Press, 1994: 12-20, 40-44.
- [16] 刘凡一, 张舰, 李博, 等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247-253.
LIU F Y, ZHANG J, LI B, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 247-253.
- [17] EDEM. EDEM user guide [M]. Edinburgh: DEM Solutions, 2014: 5-14.
- [18] 唐福元, 冯家畅, 程绪铎. 大豆籽粒弹性模量的测定与研究[J]. 粮食储藏, 2015, 44(5): 6-9.
TANG F Y, FENG J C, CHENG X D. Determination and study on the elastic modulus of soybean seeds [J]. Grain Storage, 2015, 44(5): 6-9.
- [19] 夏蕊, 杨兆建, 李博, 等. 基于离散元法的煤散料堆积角试验研究[J]. 中国粉体技术, 2018, 24(6): 36-42.
XIA R, YANG Z J, LI B, et al. Experimental study for repose angle of coal bulk material based on discrete element method [J]. China Powder Science and Technology, 2018, 24(6): 36-42.
- [20] 马一铭, 杜文亮, 郭占斌, 等. 藜麦籽粒压缩力学特性的试验研究[J]. 农机化研究, 2021, 43(1): 131-137.
MA Y M, DU W L, GUO Z B, et al. Experiment and study on compression mechanical properties of quinoa grains [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(1): 131-137.
- [21] 王志鹏, 李永祥, 徐雪萌. 基于堆积实验的小米离散元参数标定[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(2): 115-120.
WANG Z P, LI Y X, XU X M. Parameter calibration of millet discrete element based on stacking experiment [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(2): 115-120.
- [22] 贺一鸣, 向伟, 吴明亮, 等. 基于堆积试验的壤土离散元参数的

- 标定[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(2):216-220.
- HE Y M, XIANG W, WU M L, et al. Parameters calibration of loam soil for discrete element simulation based on the repose angle of particle heap[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2018, 44(2): 216-220.
- [23] 许倩,唐福元,程绪铎.油菜籽籽粒压缩特性与含水率关系研究[J].粮食科技与经济,2017,42(1):32-35.
- XU Q, TANG F Y, CHENG X D. Experimental study on the relationship of compression properties of rapeseed and moisture content[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2017, 42(1): 32-35.
- [24] 高连兴,焦维鹏,杨德旭,等.含水率对大豆静压机机械特性的影响[J].农业工程学报,2012,28(15):40-44.
- GAO L X, JIAO W P, YANG D X, et al. Effect of moisture content on mechanical properties of soybean seed under static pressure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineer-
- ing, 2012, 28(15): 40-44.
- [25] 李大鹏.气力式藜麦精量排种器离散元分析与性能试验研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- LI D P. Discrete element analysis and performance test of pneumatic precision metering device for quinoa[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020.
- [26] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等.基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J].农业机械学报,2014,45(2):109-114.
- LIAO Q X, ZHANG P L, LIAO Y T, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109-114.
- [27] 王国强,郝万军,王继新.离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M].西安:西北工业大学出版社,2010:32-33.
- WANG G Q, HAO W J, WANG J X. The discrete unit method and its practice on EDEM[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010: 32-33.

(上接第 239 页)

- [24] WEBB J S, GIVSKOV M, KJELLEBERG S. Bacterial biofilms: prokaryotic adventures in multicellularity[J]. Current Opinion in Microbiology, 2003, 6(6): 578-585.
- [25] 方华军,杨学明,张晓平.农田土壤有机碳动态研究进展[J].土壤通报,2003,34(6):562-568.
- FANG H J, YANG X M, ZHANG X P. The progress of study on soil organic carbon dynamics in cropland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(6): 562-568.
- [26] 朱鸿杰,闫晓明,何成芳,等.秸秆还田条件下农田系统碳循环研究进展[J].生态环境学报,2014,23(2):344-351.
- ZHU H J, YAN X M, HE C F, et al. Effect of returning straw on soil carbon cycle in cropland ecosystem[J]. Ecology and Environment Sciences, 2014, 23(2): 344-351.
- [27] 王虎,王旭东,田宵鸿.秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J].应用生态学报,2014,25(12):3491-3498.
- WANG H, WANG X D, TIAN X H. Effect of straw-returning on the storage and distribution of different active fractions of soil organic carbon[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(12): 3491-3498.
- [28] 胡乃娟,韩新忠,杨敏芳,等.秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J].植物营养与肥料学报,2015,21(2):371-377.
- HU N J, HAN X Z, YANG M F, et al. Short-term influence of straw return on the contents of soil organic carbon fractions, enzyme activities and crop yields in rice-wheat rotation farmland[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 371-377.
- [29] 黄金花,刘军,杨志兰,等.秸秆还田下长期连作棉田土壤有机碳活性组分的变化特征[J].生态环境学报,2015,24(3):387-395.
- HUANG J H, LIU J, YANG Z L, et al. Changes of cotton straw incorporation on soil organic carbon activity matter of long-term continuous cropping cotton field[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(3): 387-395.
- [30] 张翰林,郑宪清,何七勇,等.不同秸秆还田年限对稻麦轮作土壤团聚体和有机碳的影响[J].水土保持学报,2016,30(4):216-220.
- ZHANG H L, ZHENG X Q, HE Q Y, et al. Effect of years of straw returning on soil aggregates and organic carbon in rice-wheat rotation systems[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(4): 216-220.