

滨海盐碱地耕作层土壤离散元仿真参数标定方法

王东伟^{1,2} 路通¹ 赵壮³ 尚书旗^{1,2} 郑帅¹ 刘杰¹

(1. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109; 2. 黄三角智能农机装备产业研究院, 东营 257345;

3. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018)

摘要: 为获取滨海盐碱地土壤离散元仿真参数,以黄三角农高区土壤为例,采用试验与离散元仿真相结合的方法,选取 EDEM 中 Hertz - Mindlin with JKR 作为仿真实接触模型,对土壤离散元参数进行标定。通过 Plackett - Burman 试验进行显著性分析,探寻对土壤堆积角有显著影响的因素,采用最陡爬坡法进一步确定因素取值范围,应用 Box - Behnken 试验建立 3 个显著性因素与土壤仿真堆积角的二次多项式回归模型,以实测土壤堆积角 33.6° 为目标对回归模型进行寻优,得到最优组合:土壤-土壤静摩擦因数为 0.546、土壤-土壤恢复系数为 0.358、JKR 模型土壤表面能为 3.207 J/m²。在最优参数组合条件下,孔顶外径和穴孔纵深仿真结果与试验结果误差分别为 4.04% 和 3.47%,验证了土壤参数标定的准确性。本文提出的盐碱地土壤离散元参数标定方法及参数值,可为盐碱地作业条件下触土部件与土壤互作的离散元仿真及盐碱地专用农具研发设计提供理论基础与支撑。

关键词: 盐碱地; 土壤; 离散元; 参数标定; 堆积角

中图分类号: S222.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2024)11-0240-10

OSID:



Calibration of Discrete Element Simulation Parameters for Cultivated Soil Layer in Coastal Saline Alkali Soil

WANG Dongwei^{1,2} LU Tong¹ ZHAO Zhuang³ SHANG Shuqi^{1,2} ZHENG Shuai¹ LIU Jie¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

2. Yellow River Delta Intelligent Agricultural Machinery Equipment Industry Academy, Dongying 257345, China

3. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: In order to obtain the discrete element simulation parameters of coastal saline soils, the soil discrete element parameters were calibrated by combining the experiment and discrete element simulation using the soil of the Yellow River Delta Agricultural Highland Area as an example, and Hertz - Mindlin with JKR in EDEM was selected as the simulation contact model. The significance analysis was carried out through the Plackett - Burman test to explore the factors that had a significant effect on the soil stacking angle, the steepest climb method was used to further determine the range of factor values, the Box - Behnken test was applied to establish a quadratic polynomial regression model of the three significance factors and the simulated stacking angle of the soil, and the regression model was performed with the measured soil stacking angle of 33.6° as the target. The optimal combination of soil - soil static friction factor of 0.546, soil - soil recovery coefficient of 0.358, and soil surface energy of 3.207 J/m² in the JKR model was obtained. Under the conditions of the optimal parameter combination, the simulation results of the outer diameter of the top of the hole and the longitudinal depth of the hole had an error of 4.04% and 3.47% from the test, respectively, which verified the accuracy of the soil parameter calibration. The discrete element parameter calibration method and parameter values proposed for saline alkali soil can provide theoretical basis and support for the discrete element simulation of the interaction between soil contact components and soil under saline alkali working conditions, as well as the research and design of specialized agricultural machinery for saline alkali soil.

Key words: saline-alkali soil; soil; discrete element; parameter calibration; stacking angle

收稿日期: 2024-08-01 修回日期: 2024-08-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2300089)和山东省重点研发计划项目(2021CXGC010813)

作者简介: 王东伟(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究, E-mail: w88030661@163.com

0 引言

滨海盐碱地是我国重要的土地资源区,土壤受到长期盐渍化影响,导致土壤板结严重,触土部件在作业过程中存在耕作阻力大、功耗高等问题,严重影响盐碱地综合改良与利用进程,因此开展触土部件与盐碱地土壤间相互运动以及力学特性分析成为研究盐碱地专用农机装备重点。

离散元法是一种数值方法,用于分析、求解复杂离散系统动力学问题以及模拟颗粒结构^[1]。触土部件工作时,不同类型土壤对触土部件的影响差异显著,精准的土壤离散元模型为触土部件结构和工作参数设计与优化提供理论参考,建立精确的 DEM 模型是获得精确的土体固有参数、材料接触参数及接触模型参数的关键^[2-5]。因此,在应用离散元法探究触土部件与土壤相互作用前,需对土壤颗粒与触土部件及两者之间的相关仿真参数进行标定。

目前,已有研究学者对不同类型土壤、作物残茬等进行了离散元参数标定。向伟等^[6]构建了南方黏壤土精准的离散元仿真模型;YANG 等^[7]以中国红寺堡土壤为例,建立了离散元土壤模型,为不同类型土壤模型建立提供了参考;赵智豪等^[8]采用 EDEM 软件对土壤-水稻前茬混合物内部各物质的物理与接触参数进行离散元仿真标定;宋少龙等^[9]针对新疆棉田耕后土壤采用堆积试验和滑落试验方法,对土壤间、土壤与分层施肥装置间的参数进行优化标定;宋占华等^[10]以桑园土壤为例,以非等直径球形颗粒作为土壤颗粒模型进行标定。张锐等^[11]借助 Hertz - Mindlin Deresiewicz(无滑动)接触模型,通过堆积角试验进行参数标定,构建了沙土离散元模型。

国内外学者在砂壤土、黏壤土等土壤离散元仿真参数标定方面进行了大量研究^[12-15],但对于滨海盐碱地仿真参数标定研究仍相对较少,滨海盐碱地土壤土层包括耕作层、板结层和富盐层,其中,耕作层垂直深度为 300mm 左右。在盐碱地深耕改良过程中,需满足耕整地部件不破坏盐碱地土壤犁底层,同时阻挡盐分通过板结层向上运移的进程。

本文通过密度、含水率、筛分、三轴试验、三轴剪切、堆积试验等测定样品土壤本征参数;选用 Hertz - Mindlin with JKR 作为接触模型,根据试验测定参数构建土壤仿真模型,应用 Design-Expert 软件分别开展 Plackett - Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box - Behnken 试验,以堆积角为目标值,探寻回归模型最优参数组合,并通过田间试验进行参数验证,对比分析试验结果相对误差,以验证离散元模型准确性,旨

在建立滨海盐碱地耕作层土壤精准离散元模型,为土壤与触土部件互作过程的离散元仿真模型建立提供参考。

1 土壤基本参数测量

1.1 土壤试验样本

土壤试验样本于 2024 年 5 月 25 日取自山东省东营市黄三角农高区盐碱地农业试验示范基地(37.297°N,118.648°E),pH 值为 8.2。

1.2 基本特性参数测量方法

1.2.1 土壤密度试验

依据 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》^[16],选用体积为 200 cm³的环刀进行取样,试验前先称取环刀质量为 163.4 g,采用五点取样法在压实土层取耕作层 0~300 mm 土层土壤试验样本,用密封性能良好的包装袋封好后加以编号待用,使用电子天平称量环刀及土样总质量,试验重复 5 次取平均值。土壤密度 ρ 计算式为

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{V}$$

(1)

式中 m_1 ——环刀及土样总质量,kg
 m_0 ——环刀质量,kg
 V ——环刀体积,cm³

1.2.2 土壤含水率试验

环刀法取土获得试验样本后,将环刀中的试样放入铝盒,称取铝盒和铝盒加湿土总质量,准确至 0.01 g。将铝盒置于鼓风干燥箱中,在 105℃ 恒温下干燥 8 h,干燥后放入容器内冷却至室温并称量总质量,试验重复进行 5 次,取每组试验平均值作为土壤含水率。含水率 ω 计算式为

$$\omega = \frac{m_3 - m_4}{m_4 - m_2} \times 100\%$$

(2)

式中 m_2 ——铝盒质量,kg
 m_3 ——铝盒加湿土总质量,kg
 m_4 ——铝盒加干土总质量,kg

1.2.3 土壤筛分试验

取干燥后土壤样本 2 kg,用四分法选取 500 g 试样,准确至 0.1 g,利用孔径为 3、2、1、0.5、0.25 mm 的标准试验筛进行筛分试验,均匀振筛时间为 10 min。振筛结束后,对留在各筛盘上不同粒径的土壤颗粒进行称量,试验重复进行 3 次,准确至 0.1 g。筛分后土壤颗粒见图 1。

1.2.4 土壤三轴剪切试验

如图 2 所示,采用 TSZ-1 型全自动三轴仪对土壤进行三轴试验,采用固结快剪的试验方式,选择试验围压 100、150、200 kPa,剪切速率为 1.5 mm/min,



图 1 筛分后的土壤颗粒

Fig.1 Sieved soil particles

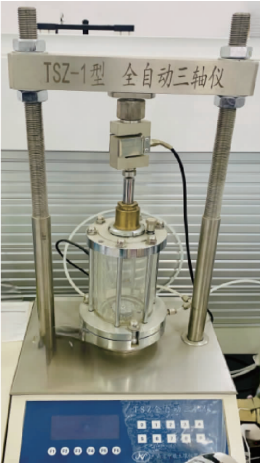


图 2 TSZ-1 型全自动三轴仪

Fig.2 TSZ-1 automatic triaxial gauge

当土壤发生破坏或仪器测得轴向应变达 30% 时停止试验。

图 3 为土壤主应力差与轴向应变关系曲线,即图中线性变化段(*OA*、*OB*、*OC* 段)的斜率近似为土壤弹性模量^[17],取 3 个线性变化段斜率平均值为土壤弹性模量,弹性模量 *E* 计算式为

$$E = \frac{\Delta \sigma_{\alpha}}{\Delta \varepsilon_{\alpha}}$$

(3)

式中 $\Delta \sigma_{\alpha}$ ——主应力差, kPa
 $\Delta \varepsilon_{\alpha}$ ——轴向应变, %

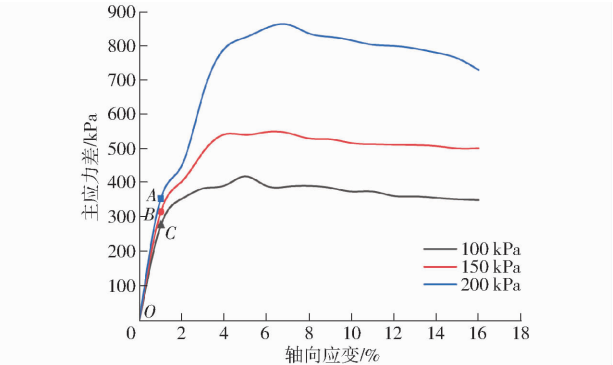


图 3 土壤主应力差-轴向应变关系曲线

Fig.3 Relationship curves between principal stress difference and axial strain

由式(3)计算得出弹性模量为 3.168×10^3 kPa。泊松比 ν 计算式为

$$\nu = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \varepsilon_{\alpha}} \right)$$

(4)

式中 $\Delta \varepsilon_v$ ——体积应变

1.2.5 土壤堆积试验

农机具作业过程中,触土部件与土壤相互作用会导致土壤产生形变,而堆积角是影响土壤应变的重要参数之一,因此采用堆积角作为试验关键参数并进行测量^[18]。采用漏斗法测定土壤的堆积角,试验装置如图 4 所示,主要由三角铁架、漏斗和挡土片组成。使土壤从漏斗中自然下落到水平面上,当漏斗中不再有土壤落下后,测量圆锥母线和水平面夹角 θ ,原理如图 5 所示,图中 θ 为堆积角。



图 4 土壤堆积角试验及测量

Fig.4 Soil angle of repose tests and measurements

1. 三角铁架 2. 漏斗 3. 挡土片

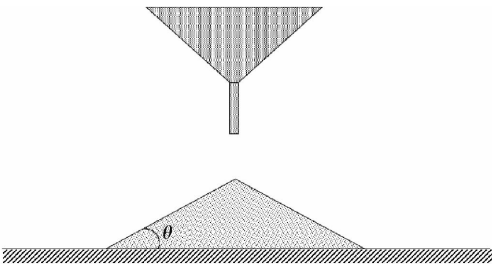


图 5 堆积角测量原理

Fig.5 Principle of angle of repose measurement

试验装置漏斗锥角为 120°,漏斗底孔内径为 10 mm,底孔下沿与试验台水平面垂直距离为 80 mm,接土盘直径为 200 mm。试验时,将土壤试样从漏斗顶部缓慢倒入,拔出挡土片,使土壤逐渐从漏斗底孔流出,待漏斗内土壤全部落下后,取走漏斗,使用高精度万向水平仪测量堆积后锥体母线与水平面夹角。土壤堆积试验重复 5 次,取平均值记为试验土壤堆积角,准确至 0.01°。

1.3 接触参数测定方法

1.3.1 碰撞恢复系数测定试验

通过自由落体试验测量土壤与土壤、土壤与 65Mn 钢间的碰撞恢复系数^[19]。试验装置及原理图如图 6 所示,试验选用土壤板、65Mn 钢平板作为碰撞板,将裁剪后的预制土壤块从距离碰撞板竖直高度 200 mm 的位置自由落下,当土壤块与碰撞板发

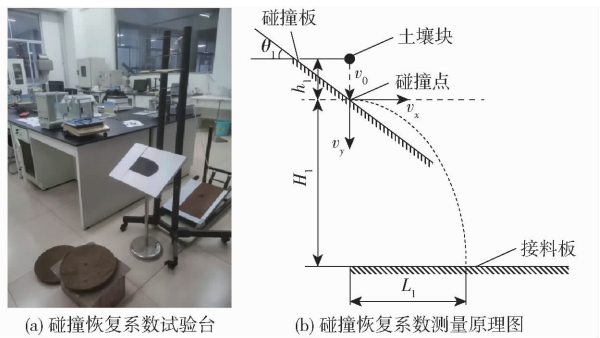


图 6 碰撞恢复系数测定试验

Fig. 6 Crash recovery coefficient measurement test

生碰撞后作斜抛运动,最终落在接料板上,用高速摄像机记录接触起弹高度,当土壤下落前,利用高速摄像机进行拍摄,当土壤块落至接料板后,关闭高速摄像机。

高速摄像机为日本 Nikon 公司生产的 Z6 II 型高速摄像机,配备 2 420 万像素镜头,图像处理程序为 Camera raw 软件。试验拍摄帧率为 240 f/s,采集域为 1 920 mm × 1 080 mm,快门速度为 1/2 000 s。

碰撞恢复系数计算式为

$$C_r = \frac{v_n}{v'_n} \quad (5)$$

其中 $v_n = v_1 \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 + \arctan \frac{v_y}{v_x} \right)$ (6)

$$v'_n = v_0 \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_1 \right) \quad (7)$$

$$v_1 = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \quad (8)$$

$$v_0 = \sqrt{2gh_1} \quad (9)$$

式中 C_r ——碰撞恢复系数

v_n ——土壤块与碰撞板碰撞前法向速度, m/s

v'_n ——土壤块与碰撞板碰撞后法向速度, m/s

v_0 ——土壤块到达碰撞点时速度, m/s

h_1 ——土壤块初始位置与碰撞板竖直距离, mm

当土壤块与碰撞板发生碰撞进行斜抛运动后, 可得

$$H_1 = v_y t + \frac{1}{2} g t^2 \quad (10)$$

$$L_1 = v_x t \quad (11)$$

式中 H_1 ——土壤块碰撞点与接料板竖直距离, mm

L_1 ——土壤块碰撞点与接料板落点水平距离, mm

经过反复试验测定, 根据式 (5) 计算得出, 土壤-土壤间碰撞恢复系数为 0.15 ~ 0.65, 土壤-65Mn 钢间碰撞恢复系数为 0.05 ~ 0.55。

1.3.2 静摩擦因数测定试验

采用斜面法进行土壤-土壤、土壤-65Mn 钢两

者间静摩擦因数测量^[20], 试验装置及原理图如图 7 所示。

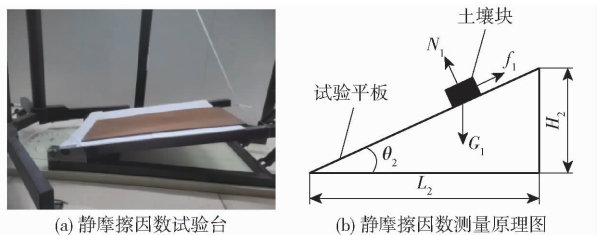


图 7 静摩擦因数测定试验

Fig. 7 Static friction coefficient measurement test

测量土壤-土壤、土壤-65Mn 钢间的静摩擦因数时, 在试验平板上均匀铺满研磨筛分后充分湿润土壤, 将表面平整凝固晾干备用, 在另一块斜面上粘结 65Mn 钢板备用。试验时分别将土壤板、钢板水平放置, 土壤块放置在接触平板一端, 匀速抬高平板使平板与水平面形成夹角, 当被测物质沿平板斜面滑动瞬间, 停止角度调节并读取角度仪记录倾角^[21]。计算土壤-土壤间静摩擦因数, 试验重复 10 次。静摩擦因数 μ_1 计算式为

$$\mu_1 = \frac{f_1}{N_1} = \frac{G_1 \sin \theta_2}{G_1 \cos \theta_2} = \tan \theta_2 \quad (12)$$

式中 f_1 ——滑动摩擦力, N

N_1 ——平板对土壤块支撑力, N

G_1 ——土壤块重力, N

θ_2 ——土壤块开始运动瞬间平板倾斜角, (°)

经过反复试验测定, 根据式 (12) 计算得出: 土壤-土壤间静摩擦因数为 0.20 ~ 0.85, 土壤-65Mn 钢间静摩擦因数为 0.35 ~ 0.65。

1.3.3 滚动摩擦因数测定试验

土壤-土壤、土壤-65Mn 钢间的滚动摩擦因数测量装置如图 8 所示, 将土壤球放置在试验平板上, 平板与水平板夹角设定为 θ_3 , 在距离水平板一定竖直高度处自由滚下至静止在水平板上, 平板与水平板材料相同(制作方法与静摩擦因数测定试验相同), 且水平板连接处尽量光滑^[22]。试验结束后, 测量土壤球在水平板上的滚动距离, 试验重复 10 次。

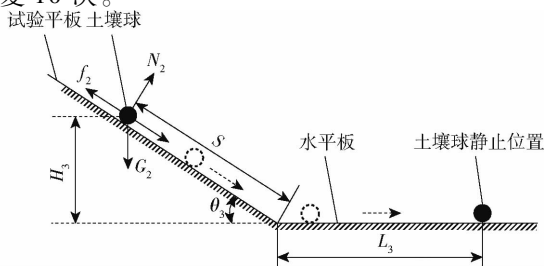


图 8 滚动摩擦因数测定试验

Fig. 8 Rolling friction coefficient measurement test

根据能量守恒定律,滚动摩擦因数 μ_2 计算式为

$$G_2H_3=\mu_2G_2(G_2\cos\theta_3+L_3)\tag{13}$$

式中 G_2 ——土壤球重力,N
 H_3 ——土壤球与水平板竖直距离,N
 θ_3 ——试验平板与水平板夹角,(°)
 L_3 ——土壤球在水平板上滚动距离,mm

经过反复试验测定,根据式(13)计算得出土壤-土壤间滚动摩擦因数为 0.05~0.25,土壤-65Mn 钢间滚动摩擦因数为 0.05~0.25。

1.4 试验结果

1.4.1 基本物理参数

土壤密度、含水率和堆积角试验结果如表 1 所示,采用环刀法测得土壤平均密度为 $2.27\times10^3\text{ kg/m}^3$,标准干燥法测得土壤平均含水率为 12.39%,漏斗法测得土壤堆积角为 33.6°,土壤三轴试验得出试验土壤泊松比为 0.32。

表 1 土壤密度、含水率及堆积角试验结果
Tab.1 Soil density, water content and heap angle test results

试验号	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水率/%	堆积角/(°)
1	2.21×10^3	11.85	35.23
2	2.29×10^3	12.27	31.48
3	2.31×10^3	12.55	32.54
4	2.26×10^3	12.93	34.22
5	2.26×10^3	12.35	34.53
平均值	2.27×10^3	12.39	33.60

筛分法测定的土壤粒径分布如表 2 所示,可以得出,粒径小于 0.25 mm 的土壤占比最少,粒径大于 3 mm 的土壤占比最多,表明土壤颗粒较大。

表 2 土壤粒径分布
Tab.2 Soil particle size distribution

粒径/mm	质量分数/%
0~0.25	5.00
0.25~0.50	7.96
0.5~1.0	10.26
1.0~2.0	24.91
2.0~3.0	23.18
≥ 3.0	28.69

1.4.2 接触参数

土壤-土壤、土壤-65Mn 钢间的接触参数测定结果如表 3 所示。

表 3 接触参数测定结果
Tab.3 Measurement ranges of exposure parameters

参数	土壤-土壤	土壤-65Mn 钢
碰撞恢复系数	0.15~0.65	0.05~0.55
静摩擦因数	0.20~0.85	0.35~0.65
滚动摩擦因数	0.05~0.25	0.05~0.25

2 土壤接触参数仿真标定

以实测堆积角为目标值,利用 Design-Expert 软件分别设计 Plackett-Burman、最陡爬坡试验和 Box-Behnken 试验,并对试验结果进行分析,通过方差分析和显著性检验,确定对土壤堆积角影响显著的 3 个试验因素,并建立因素与目标值的关系,明确盐碱地土壤离散元模型的最优参数组合。

2.1 土壤离散元仿真模型建立

2.1.1 土壤颗粒模型

DEM 是一种检测颗粒介质动力学行为^[23]的数值方法。根据土壤粒径分布及质量分数,选定仿真所用土壤颗粒直径,在对土壤颗粒工厂参数进行设置时,按上述实测粒径生成不同粒径范围的土壤颗粒。以每个区间的中间尺寸为颗粒半径,根据均匀分布生成相同粒径范围内的土壤颗粒工厂,使得仿真土壤颗粒分布更接近实际土壤颗粒^[24]。为了平衡计算时间和模拟结果真实性^[25],实际土壤颗粒平均粒径 5 倍为仿真粒径,对应的质量分数如表 4 所示。

表 4 EDEM 土壤仿真颗粒直径及质量分数
Tab.4 EDEM soil simulation particle diameter and mass fraction

实际粒径/mm	仿真颗粒直径/mm	质量分数/%
0~0.25	0.625	5.00
0.25~0.50	1.875	7.96
0.5~1.0	3.250	10.26
1.0~2.0	7.500	24.91
2.0~3.0	12.500	23.18
≥ 3.0	15.000	28.69

2.1.2 土壤接触模型选择

在 EDEM 软件中,Hertz-Mindlin with JKR 模型赋予颗粒表面可以模拟黏质土粘结与团聚效应^[26],还能模拟颗粒受力条件下土壤应力应变特征^[27],选择Hertz-Mindlin with JKR 模型为土壤仿真接触模型。

2.2 仿真参数

材料参数主要包括土壤和 65Mn 钢密度、泊松比、剪切模量等,通过试验测定及参考文献[28]获得,如表 5 所示。

表 5 土壤与 65Mn 钢的本征参数
Tab.5 Intrinsic parameters of soil and 65Mn steel

参数	土壤	65Mn 钢
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	2.270×10^3	7.865×10^3
泊松比	0.32	0.30
剪切模量/Pa	1.20×10^9	7.90×10^9

接触参数包括 JKR 模型土壤表面能以及土壤-土壤、土壤-65Mn 钢之间的恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数。利用表 2 试验测量范围与仿真标定相结合的方法获得,表 6 为仿真接触参数取值,JKR 模型土壤表面能为 EDEM 软件 GEMM 数据库参考值^[29]。

表 6 仿真接触参数

Tab.6 Simulation contact parameter range

参数	编码	
	-1	1
土壤-土壤恢复系数 X_1	0.15	0.65
土壤-土壤静摩擦因数 X_2	0.25	0.85
土壤-土壤滚动摩擦因数 X_3	0.05	0.25
JKR 模型土壤表面能 $X_4/(J \cdot m^{-2})$	2.00	8.00
土壤-钢材恢复系数 X_5	0.05	0.55
土壤-钢材静摩擦因数 X_6	0.35	0.65
土壤-钢材滚动摩擦因数 X_7	0.05	0.25

2.3 仿真参数标定方法

2.3.1 Plackett – Burman 方法设计

在得到接触参数取值范围后,通过堆积角仿真试验(图 9),以堆积角为评价指标,采用 Design-Expert 软件设计 12 组 Plackett – Burman 试验以分析影响显著的接触参数,试验中 $x_1 \sim x_7$ 和 4 个空白参数 $x_8 \sim x_{11}$,每个参数均设定两个水平,分别用 -1 和 1 表示,每组试验重复 4 次,取平均值作为单组试验的堆积角。



图 9 堆积角仿真模拟试验

Fig.9 Angle of repose simulation mock-up test

2.3.2 最陡爬坡法设计

通过 Plackett – Burman 试验筛选出显著性参数,采用最陡爬坡法进一步缩小参数取值范围,而非显著性参数取实测试验参数范围中间水平值^[30],显著性参数按照设定步长逐步增加^[31],分别记录仿真试验的堆积角,计算仿真试验结果与实测结果相对误差^[32]。

2.3.3 Box – Behnken 方法设计

基于最陡爬坡法得到的各组参数,进一步分析不同参数组合对堆积角、粘聚力和内摩擦角的影响。每个显著因子设置为低、中和高水平^[33],共有 17 组测试,其中 5 组为 0 级。

2.4 结果与分析

2.4.1 Plackett – Burman 试验

表 7 为 Plackett – Burman 的试验设计和结果, $x_1 \sim x_7$ 为编码值。采用 Design-Expert 软件对结果进行方差分析^[34],得出各参数显著性影响如表 8 所示。

表 7 Plackett – Burman 试验设计和结果

Tab.7 Design and results of Plackett – Burman test

序号	因素											堆积角/ (°)
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	
1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	30.38
2	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	33.44
3	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	38.11
4	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	35.11
5	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	36.24
6	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	38.47
7	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	31.54
8	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	28.44
9	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	33.47
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	37.54
11	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	37.68
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	38.47

表 8 基于堆积角的参数显著性分析

Tab.8 Significance analysis of parameters based on angle of repose

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	125.03	7	17.86	14.49	0.010 6 *
X_1	32.18	1	32.18	26.11	0.006 9 **
X_2	40.81	1	40.81	33.12	0.004 5 **
X_3	16.50	1	16.50	13.39	0.021 6 *
X_4	20.51	1	20.51	16.65	0.015 1 *
X_5	8.52	1	8.52	6.91	0.058 2
X_6	6.35	1	6.35	5.15	0.085 7
X_7	0.161 0	1	0.161 0	0.130 7	0.736 0
残差	4.93	4	1.23		
总和	129.96	11			

注: ** 表示极显著 ($P < 0.01$); * 表示显著 ($P < 0.05$),下同。

由表 8 可知,该模型显著。 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 对土壤颗粒堆积角影响显著,显著因素影响由大到小为: X_2 、 X_1 、 X_4 、 X_3 ,其他因素均不显著。

2.4.2 最陡爬坡法

表 9 为最陡爬坡法设计方案及结果,结果显示:随着 X_1 、 X_2 、 X_4 增加,仿真试验得出的堆积角逐渐增大,而仿真与实测试验得出的土壤颗粒堆积角的

表 9 最陡爬坡法设计方案及结果

Tab.9 Design and results of the steepest ascent test

序号	因素			堆积角 $\theta/(\text{°})$	相对误差/ %
	X_1	X_2	$X_4/(\text{J}\cdot\text{m}^{-2})$		
1	0.15	0.25	2.0	31.57	6.04
2	0.25	0.37	3.2	31.83	5.27
3	0.35	0.49	4.4	32.21	4.14
4	0.45	0.61	5.6	35.06	4.35
5	0.55	0.73	6.8	38.13	13.48
6	0.65	0.85	8.0	41.37	23.13

相对误差呈先减小后增加的趋势;在 3 号试验时,堆积角的相对误差达到最小值,因此,可以确定试验变量的最优区间位于 3 号试验水平附近。因此,选择 3 号水平为中心点,设为中心水平,2 号、4 号水平分别作为低、高水平进行后续的 Box - Behnken 试验和回归模型分析; X_1 、 X_2 、 X_4 的 -1、0、1 水平分别为:0.25、0.35、0.45;0.37、0.49、0.61;3.2、4.4、5.6 J/m²。

2.4.3 Box - Behnken 试验

表 10 为 Box - Behnken 试验设计方案及结果,A、B、C 分别为土壤-土壤静摩擦因数、土壤-土壤恢复系数、JKR 模型土壤表面能编码值。根据试验结果,采用 Design-Expert 软件建立土壤颗粒堆积角 θ 与 3 个自变量(编码值)的二阶回归模型,其回归模型为

$$\theta = 36.05 - 0.0012A - 0.0562B - 0.0350C + 0.0100AB + 0.0475AC + 0.8875BC - 2.32A^2 - 1.64B^2 - 1.73C^2$$

表 10 Box - Behnken 试验设计方案及结果

Tab.10 Design and results of Box - Behnken test

序号	因素			堆积角 $\theta/$ (°)
	A	B	C	
1	-1	-1	0	32.14
2	1	-1	0	32.24
3	-1	1	0	31.93
4	1	1	0	32.07
5	-1	0	-1	32.11
6	1	0	-1	31.85
7	-1	0	1	32.05
8	1	0	1	31.98
9	0	-1	-1	33.67
10	0	1	-1	31.86
11	0	-1	1	31.72
12	0	1	1	33.46
13	0	0	0	35.98
14	0	0	0	35.55
15	0	0	0	36.78
16	0	0	0	36.12
17	0	0	0	35.81

表 11 为二次多项式回归模型的方差分析结果。结果表明,该模型 P 小于 0.000 1,表明该模型具有极显著性^[35]。决定系数 R^2 为 0.983 5、矫正决定系数 R^2_{adj} 为 0.962 2,二者均接近 1,结果表明,该拟合模型有意义、可靠度高,能够准确地分析和预测土壤的关键参数^[36]。

表 11 Box - Behnken 试验二次多项式模型方差分析

Tab.11 Box - Behnken test quadratic polynomial model ANOVA

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	55.01	9	6.11	46.26	<0.000 1**
A	0.001 0	1	0.001 0	0.007 7	0.932 7
B	0.025 3	1	0.025 3	0.191 6	0.674 8
C	0.009 8	1	0.009 8	0.074 2	0.793 2
AB	0.000 4	1	0.000 4	0.003 0	0.957 7
AC	0.009 0	1	0.009 0	0.068 3	0.801 3
BC	3.15	1	3.15	23.84	0.001 8**
A ²	22.59	1	22.59	170.99	<0.000 1**
B ²	11.28	1	11.28	85.34	<0.000 1**
C ²	12.66	1	12.66	95.81	<0.000 1**
残差	0.925 0	7	0.132 1		
失拟	0.074 7	3	0.024 9	0.117 1	0.945 4
纯误差	0.850 3	4	0.212 6		
总计	55.94	16			

由表 11 可知,二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 均对评价指标影响极显著。对单因素结果分析,各因素对堆积角的影响由大到小为:B、C、A;在交互作用中,BC 对评价指标影响极显著,AB 和 AC 影响不显著,说明土壤-土壤恢复系数 B 和 JKR 模型土壤表面能 C 之间的交互作用非常明显。交互作用对堆积角影响由大到小:BC、AC、AB。

2.5 最优参数组合及仿真验证

采用 Design-Expert 软件对模型数据进行二次多元回归拟合,得到目标函数堆积角参数间相互作用的响应面如图 10 所示。

通过 Design-Expert 软件的优化功能,基于实测试验得出土壤堆积角 33.6°为目标对回归模型进行优化求解,采用得出的优化解进行土壤堆积仿真试验,选择与实测试验结果最接近的组作为最优解,最优解为:土壤-土壤静摩擦因数为 0.546、土壤-土壤恢复系数为 0.358、JKR 模型土壤表面能为 3.207 J/m²,非显著性因素取实测试验参数范围中间水平值:土壤-土壤滚动摩擦因数为 0.15、土壤-钢材恢复系数为 0.3、土壤-钢材静摩擦因数为 0.5、土壤-钢材滚动摩擦因数为 0.1。

优化解下堆积角仿真试验结果与实测试验结果对比如图 11 所示。通过对比发现,仿真与实测试验

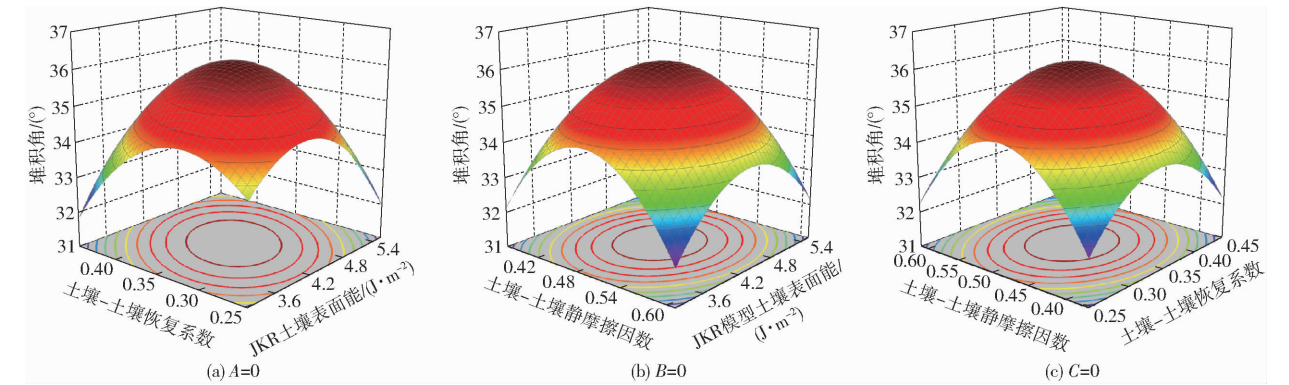


图 10 影响堆积角参数间的交互作用

Fig. 10 Interaction between parameters affecting repose angle



图 11 堆积试验结果

Fig. 11 Results of stacking test

得到的土壤颗粒在形状和相关数值上均无显著差异 ($P > 0.05$), 6 次重复仿真试验得到土壤堆积角为 34.5° 、 33.2° 、 32.7° 、 34.1° 、 33.5° 、 32.6° , 标准偏差为 0.61° 。结果表明基于实测试验和仿真试验, 应用显著性分析和响应面法相结合的方法优化得出的土壤颗粒仿真参数可行。

3 田间试验

3.1 田间镇压试验

如图 12 所示, 当镇压辊尺寸为长 460 cm、辊轴直径为 40 cm、辊齿高度为 7 cm、辊齿入土倾角为 45° 时进行田间镇压试验, 机具前进速度为 3 km/h, 镇压辊将土壤进行压实。试验结束后, 随机选取镇压穴孔测量孔顶端外径 x 及穴孔纵深 y , 试验重复 5 次, 取平均值作为测量结果。



图 12 田间镇压试验

Fig. 12 Field suppression test

3.2 仿真镇压试验

基于 EDEM 软件采用离散元法进行仿真镇压试验。如图 13 所示, 在 EDEM 软件中建立仿真土

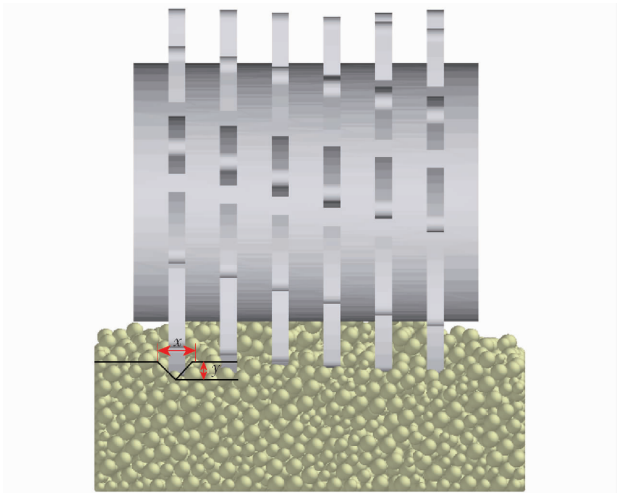


图 13 仿真镇压试验

Fig. 13 Simulated ballast test

槽, 土槽尺寸为 $6\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 1\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。仿真过程中土槽选取的土壤参数均为最优参数组合。

3.3 结果与分析

田间试验与仿真试验结果对比如表 12 所示。结果表明, 镇压穴孔孔顶外径和穴孔纵深误差分别为 4.04% 和 3.47%, 误差在可接受范围内。表明仿真试验土壤特性参数与田间试验土壤基本一致, 针对滨海盐碱地土壤的离散元仿真参数标定方法具有可靠性、准确性。

表 12 田间试验与仿真试验的结果对比

Tab. 12 Comparison of results between field and simulation tests

参数	实测值/mm	仿真值/mm	误差/%
孔顶外径	29.7	28.5	4.04
穴孔纵深	25.9	25.0	3.47

4 结论

(1) 根据接触参数的取值范围, 以堆积角为评价指标, 利用 Design-Expert 软件对 Plackett – Burman

试验进行了设计。结果表明:土壤-土壤静摩擦因数、土壤-土壤恢复系数和 JKR 模型土壤表面能对评价指标的影响最显著。最陡爬坡试验得到了显著性因素的最优水平,分别为:土壤-土壤静摩擦因数为 0.37~0.61、土壤-土壤恢复系数为 0.25~0.45、JKR 模型土壤表面能为 3.2~5.6 J/m²。

(2) Box - Behnken 试验结果表明:3 个显著参数的二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 均对评价指标(堆积角)有极显著影响,且交互项 BC (土壤-土壤恢复系数与 JKR 模型土壤表面能)之间也存在极显著的交互作用。通过回归模型求解得出的显著性参数最优组合:土

壤-土壤静摩擦因数为 0.546、土壤-土壤恢复系数为 0.358、JKR 模型土壤表面能为 3.207 J/m²,非显著性参数取实测试验参数范围中间水平值:土壤-土壤滚动摩擦因数为 0.15、土壤-钢材恢复系数为 0.3、土壤-钢材静摩擦因数为 0.5、土壤-钢材滚动摩擦因数为 0.1。

(3) 田间镇压试验与仿真试验结果验证了仿真参数标定的准确性。结果表明,孔顶外径和孔穴纵深仿真试验结果与实际试验结果误差分别为 4.04% 和 3.47%,误差在可接受范围内。表明针对滨海盐碱地土壤的离散元仿真参数标定方法可行。

参 考 文 献

[1] JAEGER H M, NAGEL S R, BEHRINGER R P. The physics of granular materials[J]. Physics Today, 1996, 49(4): 32 - 38.

[2] LI B, CHEN Y, CHEN J. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM)[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 158: 177 - 185.

[3] TAMAS K, JORI I J, MOUAZEN A M. Modelling soil-sweep interaction with discrete element method[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 134: 223 - 231.

[4] SMITH W, PENG H. Modeling of wheel-soil interaction over rough terrain using the discrete element method[J]. Journal of Terramechanics, 2013, 50(5 - 6): 277 - 287.

[5] BRIEND R. Modelling wheel-soil interactions using the discrete element method for tread shape optimization[D]. Montreal: McGill University, 2010.

[6] 向伟,吴明亮,吕江南,等. 基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(12): 116 - 123.
XIANG Wei, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(12): 116 - 123. (in Chinese)

[7] YANG Q, SHI L, SHI A, et al. Determination of key soil characteristic parameters using angle of repose and direct shear stress test[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023, 16(3): 143 - 150.

[8] 赵智豪,吴明亮,谢双鹏,等. 土壤-水稻前茬离散元仿真参数标定及其旋耕轨迹分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(7): 72 - 82.
ZHAO Zhihao, WU Mingliang, XIE Shuangpeng, et al. Parameter calibration for the discrete element simulation of soil preceding rice stubble and its rotary tillage trajectory[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(7): 72 - 82. (in Chinese)

[9] 宋少龙,汤智辉,郑炫,等. 新疆棉田耕后土壤模型离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 63 - 70.
SONG Shaolong, TANG Zhihui, ZHENG Xuan, et al. Calibration of the discrete element parameters for the soil model of cotton field after plowing in Xinjiang of China[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 63 - 70. (in Chinese)

[10] 宋占华,李浩,闫银发,等. 桑园土壤非等径颗粒离散元仿真模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(6): 21 - 33.
SONG Zhanhua, LI Hao, YAN Yinfa, et al. Calibration method of contact characteristic parameters of soil in mulberry field based on unequal-diameter particles dem theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 21 - 33. (in Chinese)

[11] 张锐,韩佃雷,吉巧丽,等. 离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 49 - 56.
ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49 - 56. (in Chinese)

[12] SUN J, WANG Y, MA Y, et al. DEM simulation of bionic subsoilers (tillage depth 40 cm) with drag reduction and lower soil disturbance characteristics[J]. Advances in Engineering Software, 2018, 119: 30 - 37.

[13] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121: 105 - 117.

[14] ADAJAR J B, ALFARO M, CHEN Y, et al. Calibration of discrete element parameters of crop residues and their interfaces with soil[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188: 106349.

[15] WANG X, ZHANG S, PAN H, et al. Effect of soil particle size on soil-subsoiler interactions using the discrete element method simulations[J]. Biosystems Engineering, 2019, 182: 138 - 150.

[16] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 2019.

[17] 祝英豪. 秸秆还田旋埋刀辊作业机理及降耗研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2020.
ZHU Yinghao. Research on the working mechanism and consumption reduction of rotary burial blade roller for straw returning [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[18] 周华,车海龙,耿端阳,等. 玉米田耕层典型土壤离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 49 - 60, 113.
ZHOU Hua, CHE Hailong, GENG Duanyang, et al. Discrete element modeling and parameter calibration of typical soil in maize field tillage layer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2023, 54(11): 49 - 60, 113. (in Chinese)

[19] 史瑞杰,戴飞,赵武云,等. 胡麻茎秆离散元柔性模型建立与接触参数试验验证[J]. 农业机械学报,2022,53(10):146–155.
SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Establishment of discrete element flexible model and verification of contact parameters of flax stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 146–155. (in Chinese)

[20] AIKINS K A, UCGUL M, BARR J B, et al. Determination of discrete element model parameters for a cohesive soil and validation through narrow point opener performance analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213:105123.

[21] 温翔宇,袁洪方,王刚,等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报,2020,51(2):115–122,142.
WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 115–122, 142. (in Chinese)

[22] 张荣芳,周纪磊,刘虎,等. 玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊1):69–77.
ZHANG Rongfang, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Determination of interspecific contact parameters of corn and simulation calibration of discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Suppl. 1): 69–77. (in Chinese)

[23] 李俊伟,佟金,胡斌,等. 不同含水率黏重黑土与触土部件互作的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报,2019,35(6):130–140.
LI Junwei, TONG Jin, HU Bin, et al. Calibration of parameters of interaction between clayey black soil with different moisture content and soil-engaging component in Northeast China[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(6): 130–140. (in Chinese)

[24] YAN D X, JIAN Q Y, YANG W, et al. Soil particle modeling and parameter calibration based on discrete element method[J]. Agriculture, 2022, 12(9):1421.

[25] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. 3D DEM tillage simulation: validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweep tool operating in a cohesionless soil[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 144: 220–227.

[26] 田辛亮,丛旭,齐江涛,等. 黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报,2021,52(10):100–108,242.
TIAN Xinliang, CONG Xu, QI Jiangtao, et al. Parameter calibration of discrete element model for corn straw soil mixture in black soil areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 100–108, 242. (in Chinese)

[27] 韩树杰,戚江涛,坎杂,等. 新疆果园深施散体厩肥离散元参数标定研究[J]. 农业机械学报,2021,52(4):101–108.
HAN Shujie, QI Jiangtao, KAN Za, et al. Parameters calibration of discrete element of deep application of bulk manure in Xinjiang orchard[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 101–108. (in Chinese)

[28] 孙景彬,刘琪,杨福增,等. 黄土高原坡地土壤与旋耕部件交互离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2022,53(1):63–73.
SUN Jingbin, LIU Qi, YANG Fuzeng, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of sloping soil on Loess Plateau and its interaction with rotary tillage components[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 63–73. (in Chinese)

[29] 邢洁洁,张锐,吴鹏,等. 海南热区砖红壤颗粒离散元仿真模型参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(5):158–166.
XING Jiejie, ZHANG Rui, WU Peng, et al. Parameter calibration of discrete element simulation model for latosol particles in hot areas of Hainan Province[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5): 158–166. (in Chinese)

[30] 廖宜涛,廖庆喜,周宇,等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2020,51(6):73–82.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73–82. (in Chinese)

[31] 张佳喜,张彭,张虎,等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报,2024,55(1):76–84,108.
ZHANG Jiayi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 76–84, 108. (in Chinese)

[32] 廖洋洋,尤泳,王德成,等. 燕麦和箭筈豌豆混合种子离散元模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):14–22.
LIAO Yangyang, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Parameter calibration and experiment of discrete element model for mixed seeds of oat and arrow pea[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 14–22. (in Chinese)

[33] 牛智有,孔宪锐,沈柏胜,等. 颗粒饲料破损离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报,2022,53(7):132–140,207.
NIU Zhiyou, KONG Xianrui, SHEN Bosheng, et al. Parameters calibration of discrete element model for pellet feed attrition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 132–140, 207. (in Chinese)

[34] 谢伟,彭磊,蒋蕻,等. 收获期油菜薹茎秆双层粘结离散元模型建立与优化[J]. 农业机械学报,2023,54(5):112–120.
XIE Wei, PENG Lei, JIANG Pin, et al. Discrete element model building and optimizing of double-layer bonding of rape shoots stems at harvest stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 112–120. (in Chinese)

[35] 申世龙,张佳喜,蒋永新,等. 基于离散元法的耕层残膜拉伸性能研究[J]. 农业机械学报,2024,55(7):132–141.
SHEN Shilong, ZHANG Jiayi, JIANG Yongxin, et al. Tensile properties of residual film in tillage layer based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 132–141. (in Chinese)

[36] 张兆国,徐红伟,薛浩田,等. 三七茎秆离散元参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(11):61–70,91.
ZHANG Zhaoguo, XU Hongwei, XUE Haotian, et al. Calibration and experiment of discrete element parameters of *Panax notoginseng* stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 61–70, 91. (in Chinese)