

赵玉清, 李诗沫, 谢钰, 等. 基于离散元的云南红壤仿真参数标定[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(4): 465-473.

ZHAO Yuqing, LI Shimo, XIE Yu, et al. Calibration of Yunnan red soil simulation parameters based on discrete element method[J].

Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(4): 465-473.

## 基于离散元的云南红壤仿真参数标定

赵玉清<sup>1a,2,3</sup>, 李诗沫<sup>1a,3</sup>, 谢钰<sup>4</sup>, 赵伟<sup>1a,3</sup>, 陈再兴<sup>1a,3</sup>, 张悦<sup>1b,3</sup>

(1. 云南农业大学 a. 机电工程学院, b. 大数据学院, 昆明 650201; 2. 昆明理工大学 交通工程学院, 昆明 650093;

3. 云南省作物生产与智慧农业重点实验室, 昆明 650201; 4. 云南开放大学 机电工程学院, 昆明 650500)

**摘要:** 为给云南红壤作业条件下的触土部件设计与优化提供更精准的参数, 选用EDEM中Hertz-Mindlin with JKR Cohesion接触模型标定云南地区红壤数值模拟参数。首先, 采用物理试验测定红壤的基本物性参数以及接触参数, 以物理试验结果为基础, 确定仿真试验参数范围, 开展Plackett-Burman试验, 对仿真试验进行显著性筛选, 得到对堆积角影响显著的3个参数: 红壤-红壤静摩擦因数、红壤-45°钢板间恢复系数和JKR表面能。随之设计最陡爬坡试验, 优化显著性参数的最优取值范围。之后开展Box-Behnken试验, 以红壤在45°钢板上的堆积角为响应值, 对二阶回归方程进行优化, 获得最优接触参数组合: 红壤-红壤静摩擦系数为0.502、红壤-45°钢板恢复系数0.464、JKR表面能4.938 J·m<sup>-2</sup>。最后以最优接触参数组合进行仿真试验, 得出结果与物理试验误差为1.7%, 无明显差异。此结果表明标定的云南红壤的离散元仿真参数可靠度较高, 可为云南地区红壤作业条件下的触土部件的设计与优化提供基础参数。

**关键词:** 离散元法; 参数标定; 红壤; 堆积角

中图分类号: S224.2

文章编号: 1000-1700(2024)04-0465-09

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Calibration of Yunnan Red Soil Simulation Parameters Based on Discrete Element Method

ZHAO Yuqing<sup>1a,2,3</sup>, LI Shimo<sup>1a,3</sup>, XIE Yu<sup>4</sup>, ZHAO Wei<sup>1a,3</sup>, CHEN Zaixing<sup>1a,3</sup>, ZHANG Yue<sup>1b,3</sup>

(1. a.College of Electrical and Mechanical Engineering, b.College of Big Data, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. School of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 3. Yunnan Key Laboratory

of Crop Production and Intelligent Agriculture, Kunming 650201, China; 4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Open

University, Kunming 650500, China)

**Abstract:** In order to provide more accurate parameters for the design and optimization of soil contact components in red soil of Yunnan, the Hertz-mindlin with JKR Cohesion contact model in EDEM was used to calibrate the numerical simulation parameters of red soil in Yunnan. Firstly, the basic physical properties and contact parameters of red soil were determined by physical tests, and the parameters of simulation tests were determined based on the results of physical tests. The Plackett-burman test was carried out to screen the significant factors affecting repose angle of simulation tests, three parameters, the static friction coefficient between red soil and red soil, the recovery coefficient between red soil-45° steel plates and the surface energy of JKR, were obtained. Then the steepest climbing test was designed to optimize the optimal value range of significance parameters. And the Box-Behnken experiment was carried out to optimize the second-order regression equation by taking the repose angle of red soil on 45° steel plate as the response value, the optimal combination of contact parameters was obtained: the static friction coefficient of red soil-red soil was 0.502, the recovery coefficient of

收稿日期: 2023-12-29

基金项目: 云南省重大科技专项-绿色食品国际合作研究中心项目(2019ZG009); 云南省教育厅科学研究基金项目(2020Y198)

第一作者: 赵玉清(1975-), 男, 硕士, 教授, 从事智能农业机械装备研究, E-mail: 331863839@qq.com

red soil-45° steel plate was 0.464, and the surface energy of JKR was  $4.938 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ . Finally, the optimal combination of contact parameters is used to carry out the simulation experiment, and the result shows that the error between the simulation result and the physical experiment is 1.7%, and there is no obvious difference. This result indicates that the reliability of the discrete element simulation parameters for the calibrated Yunnan red soil is relatively high, and it can provide basic parameters for the design and optimization of soil-engaging parts under the condition of red soil operation in Yunnan.

**Key words:** discrete element method; parameter calibration; red soil; repose angle

红壤是中国分布面积最广泛的土壤类型之一,也是云南省境内分布较为典型的土壤类型。红壤具有高含水率、黏性重、易结块等特性<sup>[1-2]</sup>。但红壤受耕作影响具有较强的压实作用,存在深松阻力大、土壤黏附严重、效率低等问题<sup>[3-4]</sup>,严重影响农机具机械化作业效率。因此,分析土壤与触土农机具的相互作用对研发适用于云南地区红壤的高性能、低能耗的农业机械触土装备十分必要<sup>[5-7]</sup>。据研究表明,离散元法可用于模拟分析农业散体材料与机械设备之间的相互作用,与传统的田间试验相比,省时省力,且可视度、精准度高,可为农机具的设计提供更为精准的数据<sup>[8-11]</sup>。

目前,国内外专家学者基于离散元法在不同类型土壤与农机具相互作用关系方面做了大量的可靠性研究。QIU等<sup>[12]</sup>将褐土作为研究对象,采用EDEM仿真软件标定了褐土的相关模型参数,研究结果对土壤耕作部件的节能降耗设计具有重要的参考价值,为褐土触土部件的切削阻力仿真研究提供基础数据。孙景彬等<sup>[13]</sup>为了解决关于黄土高原坡地专用旋耕机具设计缺乏可靠度高的离散元仿真参数以及土壤与旋耕部件互作机理研究的问题,以黏壤土为研究对象,采用EDEM软件中的Hertz Mindlin with JKR(Johnson-Kendall-Roberts) Cohesion接触模型标定了仿真参数。李俊伟等<sup>[14]</sup>为了获得可用于东北地区黏重黑土与触土部件相互作用的离散元仿真模拟参数,对两种不同含水率的东北地区黏重黑土进行相关参数标定,为东北黏重黑土作业条件下的农业机械触土部件仿生减阻设计与优化提供了仿真参数。夏春龙等<sup>[15]</sup>为降低板蓝根挖掘铲阻力,确定挖掘铲的最佳结构参数,对根茎与土壤的离散元模型进行了参数标定。

将离散单元法应用于颗粒动力学研究已成为一种发展趋势<sup>[16-18]</sup>,但针对云南地区红壤的仿真参数系统标定研究却极少。因此,本研究根据云南地区红壤特性,基于土壤堆积试验,结合试验测定,选用EDEM软件构建土壤仿真模型,以堆积角为评价指标,采用Design Expert软件,设计了Plackett-Burman试验、最陡爬坡试验和Box-Behnken试验确定土壤仿真参数的最优值,为进一步研究云南地区红壤与触土部件之间的相互作用提供离散元仿真所需的基础参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 接触模型的选取

Hertz-Mindlin with JKR Cohesion接触模型适用于粉体颗粒、农作物、泥土等含湿物料,颗粒间因静电力、含湿水分等原因发生明显黏结和团聚<sup>[19-20]</sup>。云南地区雨水较多,土壤含水率较大,颗粒间存在黏结力,因此选用Hertz-Mindlin with JKR接触模型模拟较为湿润的红壤颗粒。

### 1.2 模型物理参数测定

1.2.1 试验材料及本征参数 试验所用土壤样品为云南红壤,采自云南农业大学后山试验基地,通过烘干法测得土壤含水率为18.76%,通过环刀法测得土壤密度为 $1.34 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,通过三轴压缩试验测得土壤泊松比为0.47,通过土壤粒径筛分法获得土壤的粒径分布情况及所占百分比,粒径分布 $\geq 2 \text{ mm}$ 、 $2 \sim 0.5 \text{ mm}$ 、 $< 0.5 \text{ mm}$ 分别占15.98%、40.66%和43.66%。

1.2.2 红壤堆积角试验 堆积角测定试验台选用的圆筒直径100 mm,高100 mm,圆筒下出口距离钢板高度为200 mm,将其固定于铁架台一侧。首先将圆筒下出口关闭,然后将试验土壤置于圆筒中,最后将圆筒下出口打开,待土壤全部落于45°钢板上且静置后,对试验所获得的土壤堆进行拍照(图1),利用Origin软件对土壤堆轮廓进行手动取点,对取出的点进行线性拟合,以此获得堆积角的角度(图2)。试验重复10次,通过计算得到堆积角的平均值为 $32.62^\circ$ 。

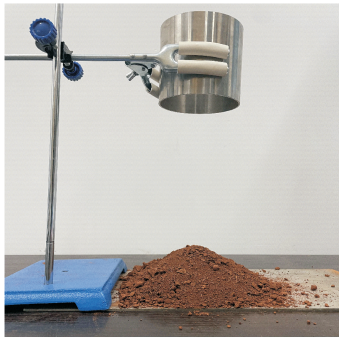


图1 红壤堆积角物理试验

Figure 1 Physical test of red soil repose angle

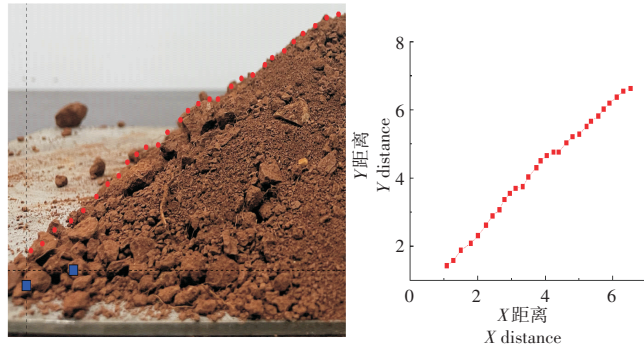


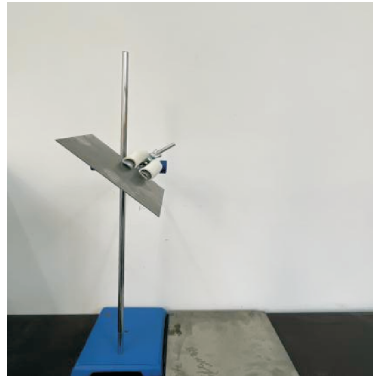
图2 红壤堆积角角度提取

Figure 2 Extraction of repose angle of red soil

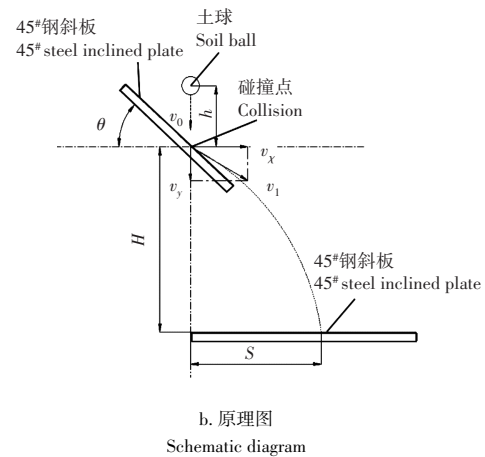
1.2.3 恢复系数测定试验 在耕作过程中,红壤与触土部件45°钢之间相互接触,存在碰撞、挤压、摩擦等。一般将恢复系数定义为:物料碰撞前后,物体沿接触处法线方向上的分离速度与接近速度之比<sup>[21-22]</sup>,通常进行自由落体试验来测得恢复系数,但土壤颗粒较小,且大小、形状不均匀,采用自由落体试验时,碰撞后很难测得垂直方向上的回弹数据。因此,本试验采用斜板碰撞试验装置测定恢复系数(图3)。同理,将45°钢上黏贴红壤,可测得红壤与红壤间的恢复系数。可根据式(1)求得恢复系数。

$$C_r = \frac{v_1}{v_0} \quad (1)$$

式中: $C_r$ 为土壤与45°钢间的恢复系数; $v_0$ 为土球与45°钢碰撞前的法向速度( $m \cdot s^{-1}$ ); $v_1$ 为土球与45°钢碰撞后的法向速度( $m \cdot s^{-1}$ )。



a. 实物图  
Physical test



b. 原理图  
Schematic diagram

图3 斜板碰撞试验

Figure 3 Inclined plate impact test

最终通过红壤土球撞击45°钢斜板测得红壤与触土部件间的恢复系数为0.05~0.65;通过红壤土球撞击上述颗粒斜板测得红壤与红壤间的恢复系数为0.15~0.75。

1.2.4 静摩擦因数测定试验 斜板试验如图4,将红壤土块置于45°钢板上,改变斜板与底座间的夹角,当土块开始滑落时,测量此时斜板与底座间的夹角 $\theta_1$ ,根据式(2)计算出静摩擦因数,试验重复10次,取平均值。同理,将45°钢板上黏贴红壤,可测得红壤与红壤间的静摩擦因数。

$$\begin{cases} f = G \sin \theta_1 \\ N = G \cos \theta_1 \\ f = \mu N \\ \mu = \tan \theta_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f$ 为土块所受摩擦力(N); $G$ 为土块重力(N); $\theta_1$ 为斜板与水平面夹角( $^\circ$ ); $N$ 为土块所受支持力

(N); $\mu$ 为静摩擦因数。

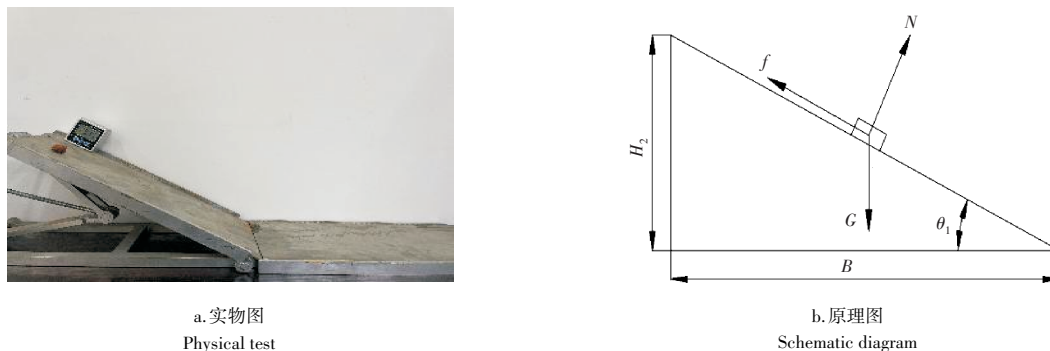


图4 静摩擦系数试验

Figure 4 Static friction coefficient test

最终通过红壤在45#钢板滑动试验测得红壤与触土部件45#钢板间的静摩擦因数为0.5~0.8;通过红壤与上述颗粒板滑动试验测得红壤与红壤间的静摩擦因数为0.3~0.6。

1.2.5 动摩擦因数测定试验 斜面试验台如图5,斜板与水平板均为45#钢板,将土球放置在斜面上,通过改变斜板与底座夹角,让土球滚动。同理,将45#钢板上黏贴红壤,可测得红壤与红壤间的动摩擦因数。试验重复10次,取平均值。根据能量守恒定律,土球重力势能转换为摩擦能耗,可根据式(3)求得动摩擦因数。

$$G_1 H_2 = \mu G_1 (L \cos \theta_2 + S_1) \tag{3}$$

式中: $G_1$ 为土球重力(N); $H_2$ 为土球在斜面上的高度(mm); $L$ 为土球在斜面上的滚动距离(mm); $\theta_2$ 为斜板倾角,(°); $S_1$ 为土球在平面上滚动距离(mm)。

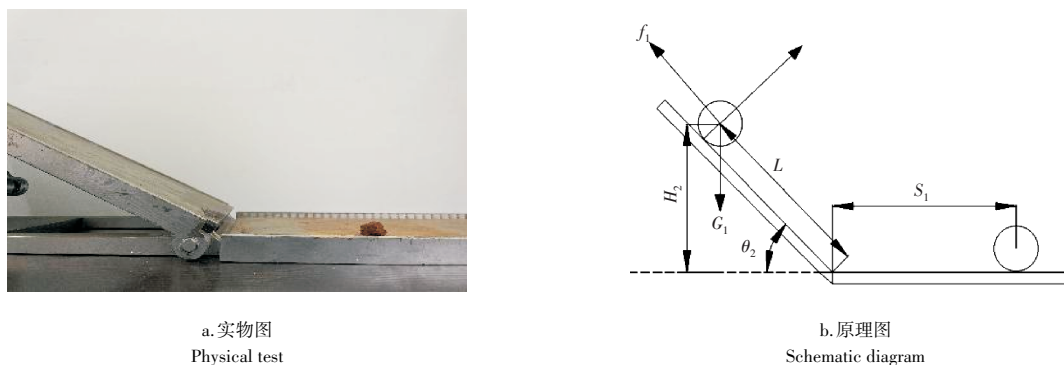


图5 滚动摩擦系数试验

Figure 5 Rolling friction coefficient test

最终通过土球的滚动试验测得红壤与触土部件材料45#钢之间的滚动摩擦因数0.05~0.45,通过红壤与上述颗粒板滚动试验测得红壤与红壤间的滚动摩擦因数0.03~0.1。

### 1.3 离散元仿真参数标定

1.3.1 土壤堆积角仿真试验 将已建立完成的圆筒模型导入到EDEM中,圆筒直径、高度为100 mm,圆筒距钢板200 mm(图6),圆筒与接板材料为45#钢,根据上述实测的土壤粒径分布比,将颗粒直径分别设置为2.5,1.5,0.5 mm,采用固定比例生成颗粒分别为15.98%、40.66%和43.36%。土壤颗粒的

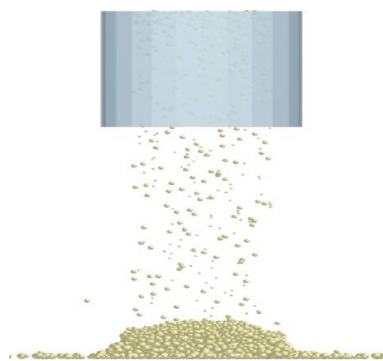


图6 堆积角仿真试验

Figure 6 Simulation test of repose angle

生成速度为 $0.2 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ,生成重量为 $0.1 \text{ kg}$ ,仿真时间设为 $3 \text{ s}$ 。表1为测定与参考的土壤本征参数、45#钢的本征参数。

表1 土壤、45#钢本征参数  
Table 1 Soil and 45# steel intrinsic parameters

材料 Materials	参数 Parameter	数值 Value
土壤 Soil	密度 Density/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1 340
	泊松比 Poisson's ratio	0.47
	剪切模量 Shear modulus/MPa	1.308
45#钢 45# steel	密度 Density/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	7 865
	泊松比 Poisson's ratio	0.3
	剪切模量 Shear modulus/MPa	79 000

1.3.2 参数标定试验设计 设计Plackett-Burman试验、最陡爬坡试验和Box-Behnken试验进行参数标定。综上可知,设定红壤间的恢复系数为 $0.15 \sim 0.75$ 、静摩擦系数为 $0.3 \sim 0.6$ 、滚动摩擦系数为 $0.03 \sim 0.1$ ,红壤与45#钢间恢复系数为 $0.05 \sim 0.65$ 、静摩擦系数 $0.5 \sim 0.8$ 、滚动摩擦系数 $0.05 \sim 0.45$ ,JKR表面能 $2 \sim 8$ 。以堆积角为试验指标,筛选出影响显著的物理参数。共设置7个试验因素,确定各因素水平如表2。

表2 仿真试验因素  
Table 2 Simulation test factors

因素 Factors	水平 Level	
	低水平 Low Level	高水平 High level
红壤-红壤恢复系数(A) Red soil-red soil restoration coefficient	0.15	0.75
红壤-红壤静摩擦因数(B) Red soil-red soil static friction coefficient	0.30	0.60
红壤-红壤滚动摩擦因数(C) Red soil-red soil rolling friction factor	0.03	0.10
红壤-45#钢板恢复系数(D) Red soil-45# steel plate restoration coefficient	0.05	0.65
红壤-45#钢板静摩擦因数(E) Red soil-45# steel static friction coefficient	0.50	0.80
红壤-45#钢板滚动摩擦因数(F) Red soil-45# steel rolling friction factor	0.05	0.45
JKR表面能(G)/( $\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$ ) JKR surface energy	2	8

## 2 结果与分析

### 2.1 Plackett-Burman试验设计确定关键影响因素

通过设计Plackett-Burman试验来确定影响堆积角的显著性因素,以土壤堆积角为响应值,试验因素共11个,其中A-G为表2中的7个因素,H-K为4个虚拟因素。试验方案及结果如表3,试验共进行了12次。

对试验结果进行分析,得到的7个因素对堆积角显著性排序如表4。其中该模型的 $p$ 值为 $0.0067 < 0.05$ ,表明模型对堆积角的影响显著。由表4可知,对堆积角影响较为显著的3个因素依次为:B(红壤-红壤静摩擦因数)、D(红壤-45#钢板间恢复系数)、G(JKR表面能)。

### 2.2 最陡爬坡仿真试验结果

基于Plackett-Burman试验筛选出3个显著性参数:B(红壤-红壤间静摩擦参数)、D(红壤-45#钢板间恢复系数)、G(JKR表面能),将3个显著性参数作为最陡爬坡试验的试验因素,以此来确定显著性参数的最优区间。试验因素及结果如表5。由表5可知,第3组的相对误差值最小,且当以第3组试验水平为标准时,B、D、G 3个显著性参数减小,误差增大,B、D、G 3个显著性参数增大,误差同样增大,由

此可知,在第 3 组试验水平附近的试验变量为最优区间。

表3 Plackett-Burman 试验方案及结果  
Table 3 Plackett-burman test plan and results

序号 Test number	试验因素 Test factors											堆积角/(°) Angle of accumulation
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	32.38
2	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	34.56
3	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	36.58
4	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	37.58
5	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	39.64
6	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	36.34
7	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	31.45
8	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	29.45
9	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	33.07
10	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	34.63
11	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	35.16
12	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	34.56

表4 Plackett-Burman 试验结果分析  
Table 4 Plackett-Burman test results analysis

试验因素 Test factors	自由度 Degree of freedom	均方和 Mean Square sum	F	P	显著性排序 Significance order
A	1	2.54	4	0.116 2	5
B	1	49.29	77.57	0.000 9	1
C	1	0.381 6	0.600 6	0.481 6	7
D	1	14.08	22.17	0.009 3	2
E	1	0.986 1	1.55	0.280 8	6
F	1	2.71	4.26	0.107 9	4
G	1	12.73	20.04	0.011 0	3

表5 最陡爬坡试验及结果  
Table 5 The steepest climbing test and results

试验序号 Test number	B	D	G	堆积角/(°) Repose angle	相对误差/% Relative error
1	0.3	0.05	2	27.69	15.1
2	0.37	0.2	3.5	30.56	6.3
3	0.44	0.35	5	33.78	3.6
4	0.51	0.5	6.5	36.44	11.7
5	0.58	0.65	8	42.67	30.8

2.3 Box-Behnken正交试验结果

基于最陡爬坡试验结果,以 B(红壤-红壤间静摩擦参数)、D(红壤-45°钢板间恢复系数)、G(JKR 表面能)表面能 3 个参数为试验因素,以第 3 组水平设为标准水平,将第 2 组设为低水平,第 4 组设为高水平设计 Box-Behnken 试验,堆积角为试验指标,试验方案及结果如表 6。

对试验结果进行多元回归拟合分析,可得堆积角回归模型方程:

$$Y=30.47-1.75B+0.53D+1.52G+2.3BD-2.21BG+DG+1.74B^2+0.67D^2-0.13G^2 \quad (4)$$

该回归方程的决定系数  $R^2=0.9627$ , 决定系数校正值  $adj R^2=0.9148$ , 变异系数  $CV=2.42%$ 、精密密度  $Adeq Precision$  为 15.841, 表明该模型拟合度较好, 较为真实可靠。对该模型试验结果进行二次回归方差分析, 分析结果如表 7。由表 7 可知, 方程模型  $p$  值为 0.000 3,  $p$  小于 0.01, 说明堆积角回归模型极显著。另外,  $B$ (红壤-红壤静摩擦因数)、 $G$ (JKR 表面能)对堆积角影响极为显著;  $BD$ (红壤-红壤静摩擦因数与红壤-45°钢板间恢复系数的交互项)、 $BG$ (红壤-红壤静摩擦因数与 JKR 表面能的交互项)对堆积角的影响极为显著;  $B^2$ (红壤-红壤静摩擦因数的二次项)的影响也均为极显著, 其余因素不显著。

表6 Box-Behnken 试验方案及结果  
Table 6 Box-Behnken test plan and results

序号 Test number	B	D	G	堆积角/(°) Repose angle
1	0.44	0.35	5	30.99
2	0.51	0.2	5	28.46
3	0.37	0.5	5	32.69
4	0.44	0.2	6.5	31.27
5	0.44	0.35	5	29.56
6	0.44	0.35	5	29.66
7	0.37	0.35	3.5	30.53
8	0.44	0.5	3.5	28.74
9	0.44	0.2	3.5	29.39
10	0.51	0.5	5	33.82
11	0.51	0.35	6.5	29.21
12	0.44	0.35	5	30.96
13	0.44	0.5	6.5	34.62
14	0.37	0.35	6.5	37.16
15	0.51	0.35	3.5	31.42
16	0.44	0.35	5	31.18
17	0.37	0.2	5	36.54

表7 Box-Behnken Design 二次回归模型方差分析  
Table 7 Box-behnken Design quadratic regression model analysis of variance

方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	p
模型 Model	105.23	9	11.69	20.10	0.000 3
B	24.54	1	24.54	42.18	0.000 3
D	2.22	1	2.22	3.81	0.091 9
G	18.54	1	18.54	31.88	0.000 8
BD	21.21	1	21.21	36.46	0.000 5
BG	19.54	1	19.54	33.59	0.000 7
DG	4.00	1	4.00	6.88	0.034 3
B <sup>2</sup>	12.77	1	12.77	21.95	0.002 2
D <sup>2</sup>	1.87	1	1.87	3.21	0.116 1
G <sup>2</sup>	0.072 5	1	0.072 5	0.124 7	0.734 4
残差 Residuals	4.07	7	0.581 7		
失拟项 Lack of fit	1.57	3	0.524 3	0.839 3	0.538 9
自然误差 Natural error	2.50	4	0.624 7		
总数 Total	109.30	16			

2.4 回归模型交互效应分析

以土壤堆积角作为土壤仿真模型参数标定的评价指标,采用 Design Expert 软件对模型数据进行拟合分析,得出各自变量的交互作用对堆积角的响应面分析(图 7)。由图 7a 可知,红壤-红壤静摩擦

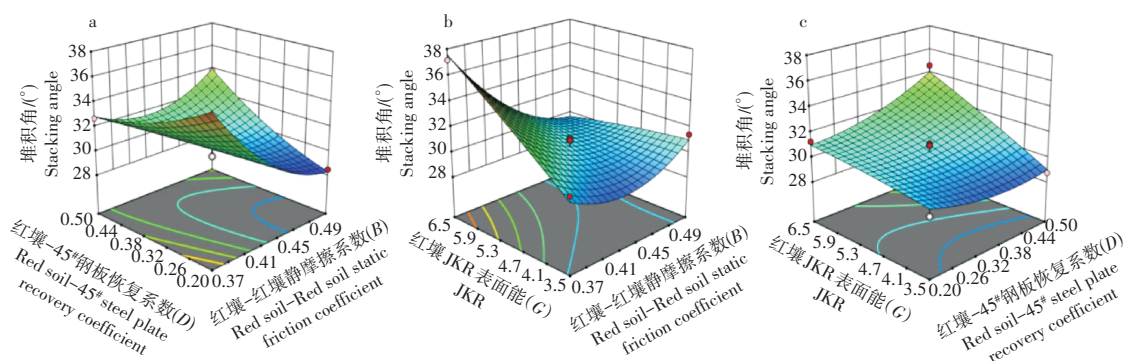


图7 交互项响应面

Figure 7 Interaction response surface

系数、红壤-45°钢板恢复系数两因素由小增大时,堆积角都呈下降趋势,红壤-红壤静摩擦系数下降幅度较大,对堆积角影响更显著。由图7b可知,红壤JKR表面能增大时,堆积角显著性增大,表明红壤JKR表面能对堆积角影响最为明显。由图7c可知,红壤-45°钢板恢复系数曲线与红壤JKR表面能走势方向一致,两因素增大时,堆积角都随之增大,表明两个因素对堆积影响基本相同。

### 2.5 仿真参数标定与试验验证

利用 Design-Expert 软件中的优化功能进行参数优化,以实测堆积角  $32.62^\circ$  为目标,得出多组优化解。将得出的优化解依次进行土壤堆积仿真试验验证,选取一组最接近实测数据的最优解:红壤-红壤静摩擦系数为 0.502、红壤-45°钢板恢复系数 0.464、红壤 JKR 表面能  $4.938 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

实测试验结果与最优参数组合下堆积仿真试验结果对比如图 8,多次仿真试验得到土壤堆积角的均值为  $33.18^\circ$ ,与实测堆积角相对误差为 1.7%,且堆积形状相似度较高,验证试验结果表明,以优化后的参数组合构建的离散元模型能够较为准确地模拟红壤的性状,进一步证明了仿真试验的有效性与可靠性。

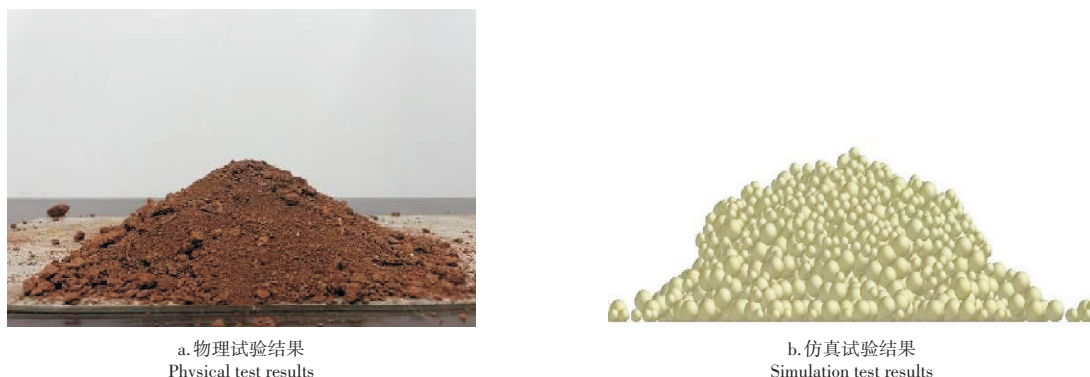


图8 物理试验与仿真试验对比

Figure 8 Comparison between physical test and simulation test

## 3 讨论与结论

云南丘陵山区的地形和气候都较为复杂,建立准确合理的农机具与土壤接触模型,深入研究分析农机具与土壤相互作用的问题,对农机具的优化设计具有一定意义。目前,针对东北黏重黑土、西南紫色土、新疆粉土等已有学者进行了详细的参数标定,且在选取颗粒模型时,都选用了 EDEM 中的 JKR 模型,云南红壤较为湿润,因此在建模时同样选用 JKR 模型。本研究结果表明所建的颗粒模型可靠度较高,说明 JKR 模型在部分地区土壤颗粒建模的适用度较高。

本研究基于 EDEM 离散元仿真软件对红壤进行了离散元仿真,通过物理试验测定了红壤-红壤间的恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数依次为  $0.15 \sim 0.75, 0.3 \sim 0.6, 0.03 \sim 0.1$ 。红壤-触土部件间的恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数依次为  $0.05 \sim 0.65, 0.5 \sim 0.8, 0.05 \sim 0.45$ 。通过 Plackett-Burman Design 试验确定了影响堆积角的关键因素:红壤-红壤间的静摩擦系数、红壤-钢板间的恢复系数及 JKR 表面能。随后通过最陡爬坡试验确定了显著性参数的最优区间。通过 Box-Behnken 试验设计确定了 3 个显著影响因素最优值:红壤-红壤静摩擦系数为 0.502、红壤-钢板恢复系数 0.464、红壤 JKR 表面能  $4.938 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$ 。以得到的最优参数组合对堆积角进行验证,结果表明,与实际物理堆积角的相对误差为 1.7%,表明标定的红壤离散元仿真模型参数准确性高、可靠性强。本研究建立了云南红壤离散元可靠度较高的模拟模型,为研究该类土壤与接触土壤部件的相互作用提供了基本参数支持。

### 参考文献:

[1] 张川. 基于土壤重构的云南红壤复合土力学特性及影响机制研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.  
 [2] 田俊,张祖莲,谢道春. 云南红土的工程特性研究综述[J]. 中国水运(下半月),2023,23(1):101-103.  
 [3] 刘明财,苏继龙. 基于南方红壤耕地气压深松铲的设计与深松仿真分析[J]. 中国农业大学学报,2019,24(4):119-123.  
 [4] 刘禹辰,张锋伟,宋学锋,等. 基于离散元法玉米秸秆双层粘结模型力学特性研究[J]. 东北农业大学学报,2022,53(1):

- 45-54.
- [5] 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.
- [6] 徐中华,王建华.有限元法分析土壤切削问题的研究进展[J].农业机械学报,2005,36(1):134-137.
- [7] ABO-ELNOR M,HAMILTON R,BOYLE J T.Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis[J].Soil and Tillage Research,2004,75(1):61-73.
- [8] 陈林涛,牟向伟,彭柱菁.离散元法在农业工程中的应用[J].农业工程,2021,11(8):29-34.
- [9] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等.离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J].农业机械学报,2021,52(4):1-20.
- [10] 于建群,付宏,李红,等.离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J].农业工程学报,2005,21(5):1-6.
- [11] TONG J,MOHAMMAD M A,ZHANG J B,et al.DEM numerical simulation of abrasive wear characteristics of a bioinspired ridged surface[J].Journal of Bionic Engineering,2010,7(2):175-181.
- [12] QIU Y Q,GUO Z J,JIN X,et al.Calibration and verification test of cinnamon soil Simulation parameters based on discrete element method[J].Agriculture,2022,12(8):1082-1082.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 夏春龙,陶桂香,衣淑娟,等.板蓝根挖掘装置的设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2022,53(4):414-422.
- [16] 张文洁,杨梅,张强林,等.沙棘物料离散元仿真参数标定与试验验证[J].东北农业大学学报,2023,54(10):59-69.
- [17] 戚江涛,蒙贺伟,坎杂,等.基于EDEM的双螺旋奶牛饲喂装置给料性能分析与试验[J].农业工程学报,2017,33(24):65-71.
- [18] 任德志,张露籍,宫元娟,等.生物炭基肥离散元模型参数标定与试验[J].沈阳农业大学学报,2023,54(4):447-455.
- [19] 朱德泉,李兰兰,文世昌,等.滑片型孔轮式水稻精量排种器排种性能数值模拟与试验[J].农业工程学报,2018,34(21):17-26.
- [20] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等.离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J].农业机械学报,2021,52(4):1-20.
- [21] 葛藤,贾智宏,周克栋.计算点接触碰撞恢复系数的一种理论模型[J].机械设计与研究,2007,23(3):14-15,22.
- [22] 杨明金,杨玲,李庆东.颗粒物料恢复系数简易测量方法及其应用[J].农机化研究,2009,31(10):25-27.

[责任编辑 亓国]