

郑文鑫, 刘昊, 陈献勇, 等. 福建烟区不同含水率红壤离散元参数标定[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(3): 323-333.

ZHENG Wenxin, LIU Hao, CHEN Xianyong, et al. Discrete element parameter calibration for red soil with different moisture contents in Fujian tobacco-growing areas[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(3): 323-333.

福建烟区不同含水率红壤离散元参数标定

郑文鑫¹, 刘昊¹, 陈献勇², 钱勤智¹, 彭宇峰¹, 罗浩¹, 何金成¹

(1. 福建农林大学机电工程学院/现代农业装备福建省高校工程研究中心, 福州 350100;

2. 中国烟草总公司福建省公司, 福州 350003)

摘要:旨在建立不同含水率下红壤的离散元参数模型, 探讨适用于不同含水率红壤的标定方法。首先, 利用圆筒提升法对不同含水率的红壤进行物理试验, 测定其堆积角, 建立含水率与堆积角的回归方程; 其次, 采用 EDEM 离散元软件, 模拟不同含水率红壤的堆积角; 再次, 以堆积角为响应值, 运用 Plackett-Burman 试验从 10 个因素中筛选出 3 个显著因素, 并通过最陡爬坡试验确定其最优区间; 最后, 使用 Box-Behnken 试验建立堆积角与显著因素的二次回归模型, 从而得到含水率与离散元参数的关系模型。为了验证模型的有效性, 采用朗氏法试验进行对比分析。结果表明: 建立了 10%~35% 范围内红壤含水率—堆积角模型, 模型相关系数为 0.992。显著因素及其最优区间: 红壤剪切模量为 4.6~8.2 MPa、红壤—红壤静摩擦系数为 0.52~0.84、动摩擦系数为 0.13~0.29。红壤堆积角—离散元参数的关系模型 p 值为 0.002, 仿真试验与物理试验的堆积角相对误差不超过 2.13%。含水率—离散元参数的关系模型经试验验证, 仿真试验与物理试验结果的相对误差不超过 4.25%, 说明模型与实际情况相符, 模型标定的离散元参数可靠有效, 可为福建烟区红壤地质条件下的烟草机械研发和仿真优化提供理论支持。

关键词:红壤; 含水率; 离散元; 堆积角

中图分类号: TS432

文章编号: 1000-1700(2024)03-0323-11

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Discrete Element Parameter Calibration for Red Soil with Different Moisture Contents in Fujian Tobacco-growing Areas

ZHENG Wenxin¹, LIU Hao¹, CHEN Xianyong², QIAN Qinzhi¹,
PENG Yufeng¹, LUO Hao¹, HE Jincheng¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering/Fujian Provincial Engineering Research Center for Modern Agricultural Equipment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350100, China; 2. China Tobacco Fujian Provincial Corporation, Fuzhou 350003, China)

Abstract: This paper aims to establish a discrete element parameter model of red soil with different moisture contents, and explore the calibration methods suitable for red soil with different moisture contents. Firstly, the physical experiments of red soil with different moisture contents were carried out by using the cylinder lifting method, the repose angle were measured and the regression equation of moisture content and repose angle was established. Secondly, the EDEM discrete element software was used to simulate the repose angle of red soil with different moisture contents. Then, taking the repose angle as the response value, the Plackett-Burman experiment was used to screen out 3 significant factors from 10, and the optimal ranges of the significant factors was determined by the steepest ascent experiment. Finally, the Box-Behnken experiment was used to establish the quadratic regression model of repose angle and significant factors, and the relationship model of

收稿日期: 2023-12-28

基金项目: 中国烟草总公司福建省公司科技计划项目(2022350000240086); 福建农林大学优势特色学科(机电)项目(722022012)

第一作者: 郑文鑫(1986-), 男, 博士, 讲师, 从事南方丘陵山地农业机械与装备研究, E-mail: zheng_wenxin@fafu.edu.cn

moisture content and discrete element parameters was obtained. In order to verify the validity of the model, comparative analysis was carried out using the Lang method experiment. The model of moisture content-repose angle of red soil in the range of 10%-35% was established, and the correlation coefficient of the model was 0.992. The significant factors and their optimal ranges are: red soil shear modulus of 4.6-8.2 MPa, red soil-red soil static friction coefficient of 0.52-0.84, dynamic friction coefficient of 0.13-0.29. The P-value of the relationship model of repose angle and discrete element parameters of red soil is 0.002, and the relative error of repose angle between simulation experiment and physical experiment is not more than 2.13%. The relationship model of moisture content and discrete element parameters was verified by experiment, and the relative error between the simulation experiment and the physical experiment results was not more than 4.25%, indicating that the model is consistent with the actual situation, and the discrete element parameters calibrated by the model are reliable and effective, which can provide theoretical support for the research and development and simulation optimization of tobacco machinery under the red soil geological conditions in Fujian tobacco area.

Key words: red soil; moisture content; discrete element; repose angle

红壤是福建占比最大的土壤类型,广泛分布于福建中部和北部^[1]。红壤区为福建主要植烟区^[2],种植烟草类型为烤烟,占全省植烟面积的88%。近年来,随着农村青年人口向城市转移,农村劳动力外流和老龄化趋势不可逆转,已成为福建烟叶产业稳定与发展的限制性因素,烟草种植收获等环节亟需机械化作业。目前福建烟区的烟叶产业机械化程度不足,主要受到地形多变和红壤黏滞效应的影响,中大型机械设备难以施展,机具作业效率和效果不理想,机械化作业面临着较大的挑战。研究红壤与触土部件之间的相互作用,通常采用数值模拟的方法,这需要建立一个比较精确的土壤模型。

麻芳兰等^[3]对广西主要蔗区的赤红壤在3种含水率情况下的接触参数分别进行了试验研究,并在此基础上结合土壤堆积角的仿真试验完成离散元标定,标定结果误差较小。李俊伟等^[4]对2种含水率的黑土进行了离散元参数标定,并以此分析了东北黑土含水率对土壤黏附性的影响。TIENAN等^[5]利用多指标综合评价归一化方法对常规土壤离散元标定方法进行优化,降低了黑土在特定含水率条件下的接触参数标定的误差。周华等^[6]利用中心组合试验设计方法对特定含水率玉米田耕层土壤进行离散元参数标定,再通过土壤直剪试验进行验证,标定的土壤仿真结果与实际试验结果误差低于10%。宋占华等^[7]依照实际土壤粒度分布,构造特殊的含水量条件下的桑树土壤粒径颗粒模型,在此基础上,进行桑树土壤的离散元标定,取得良好的结果。

针对福建烟草种植区红壤与接触材料的参数研究较少、缺乏参考、田间土壤含水率变化范围较大等问题,本研究以南方丘陵地区典型的植烟红壤为研究对象,考虑在EDEM软件中采用圆筒提升法模拟植烟红壤颗粒堆积过程,以堆积角为评价指标,建立不同含水率下离散元模型,为不同含水率条件下植烟红壤颗粒离散元参数的标定提供参考,便于后续开展福建植烟红壤与触土部件相互作用研究,可为福建烟区红壤地质条件的烟草机械研发和仿真优化提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

土壤样品采自位于福建省南平市建阳区回潭村的福建省烟草公司烟田(北纬23°33'44",东经118°10'44"),为南方丘陵山区典型植烟红壤。

试验仪器包括DHG-9140A电热恒温鼓风干燥箱、标准环刀(规格:直径61.8 mm,高20 mm)、JJ623BF型电子天平(量程:620 g,精度:1 mg)、标准检验筛GB/T6003-1997(筛网由上至下孔径规格为3,2,1,0.5,0.25,0.075 mm)、定制漏斗(出口直径10 mm)、定制圆筒(内径50 mm,高200 mm,材质为304不锈钢)、ZT-XL-969S型电动拉力试验机、200型标准检验筛分机、铝盒、相机、食品保鲜袋等。

1.2 方法

1.2.1 本征参数测定

1.2.1.1 测定土壤含水率和密度 采用环刀法测土壤密度。在烟田中,土壤表面铺平压实,用环刀取土,将环刀放置于铝盒和食品保鲜袋中保存土样。挑出土壤中的石块等杂质后,用电子天平测定环刀

与环土的总质量记为 m_1 ,测定空环刀的质量记为 m_0 ,重复试验5次。

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{V} \quad (1)$$

式中: ρ 为土壤密度($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); V 为环刀的体积(cm^3); m_1 为环刀和土壤的质量(g); m_0 为环刀的质量(g)。

采用烘干法测定土壤含水率。用电子天平测定铝盒的质量 m' ,放入待测土壤,测定铝盒与土壤的总质量 m'_1 ,将铝盒放入预热到 $(105\pm 2)^\circ\text{C}$ 的烘箱内,烘烤6 h后取出,放入干燥器中冷却到室温,然后进行称重,记录此时的质量为 m'_2 。

$$\omega = \frac{m'_1 - m'_2}{m'_1 - m'} \quad (2)$$

式中: ω 为土壤的含水率(%); m'_1 为铝盒与土壤的质量(g); m'_2 为铝盒与干土的质量(g); m' 为铝盒的质量(g)。

1.2.1.2 测定土壤粒径分布 使用筛分法测量土壤的粒径分布。先将田间收集的土壤风干,去除杂质,破碎,然后用标准检验筛和振荡筛分仪进行筛分,测量不同粒级的土壤质量,计算其百分比。

1.2.1.3 测定土壤堆积角 由文献^[8-10]可知,在晴天,红壤表层(0~100 mm)含水率为10%~25%,降雨后,当红壤表层无明显积水时,其含水率一般在30%~35%范围内,因此选择10%~35%区间制备土壤样品进行试验。

采用自然风干法和添加纯净水的方法在范围内制备6个含水率梯度(10%、15%、20%、25%、30%、35%)进行堆积角试验。取质量为 m_0'' 的自然风干土壤样品,用烘干法测定其含水率为 ω_0 ,向其中添加质量为 m_s'' 的纯净水,充分搅拌后静置24 h,使用烘干法测定并记录其实际含水率 ω_x 。计算方法为:

$$m_s'' = \frac{m_0''}{1 - \omega_1} (\omega_1 - \omega_0) \quad (3)$$

式中: m_0'' 为样品质量(g); m_s'' 为配置样品所需添水质量(g); ω_1 为配置样品的目标含水率(%); ω_0 为样品原始含水率(%)。

采用圆筒提升法测定土壤堆积角^[8,11]。在拉力试验机平台上水平摆放304不锈钢板,然后将圆筒竖直放在钢板上并装入300 g的试验土壤,接着将圆筒顶端与拉力试验机相连,开启拉力试验机,以 $80\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度均匀抬起圆筒,最后用相机记录土壤堆积的状况,对每个含水率的土壤重复做3次试验。实际堆积角测定试验装置如图1。

采用图像处理方式获取土壤堆积角数值^[8,12]。通过Origin软件的图像数字化功能,提取堆积角边界的坐标信息(图2a),然后对每组坐标进行线性拟合,画出散点图和拟合直线,获得拟合方程^[8]。最后,利用拟合方程的斜率求出堆积角的值(图2b),即斜率的反正切值换算为角度。对每幅图像的两侧堆积角分别取平均值,作为最终结果。过程和结果如图2。

1.2.2 仿真设置

1.2.2.1 土壤颗粒模型的设计 以实际测定土壤的粒径分布为依据,同时考虑模型合理的简化,以多种不同粒径(1,4,7.5,10 mm)的球形颗粒模拟土壤。

1.2.2.2 土壤接触模型的选取 Hertz-Mindlin with JKR模型作为颗粒接触模型,该模型适用于模拟容易出现黏结和团聚效应的颗粒物料。福建属于南方丘陵地区,该地区气候湿润,每年烟草收获季节属于雨季,红壤因含水率较高而具有较高的黏性。因此,本研究采用Hertz-Mindlin with JKR模型来模拟红壤颗粒之间的接触行为。



1. 拉力试验机;2. 不锈钢圆筒;3. 玻璃底板;4. 控制机构
1. Tensile testing machine;2. Stainless steel cylinder;3. Glass base plate;
4. Control mechanism

图1 实际堆积角测定试验装置

Figure 1 A device for determining real repose angle of particulate materials

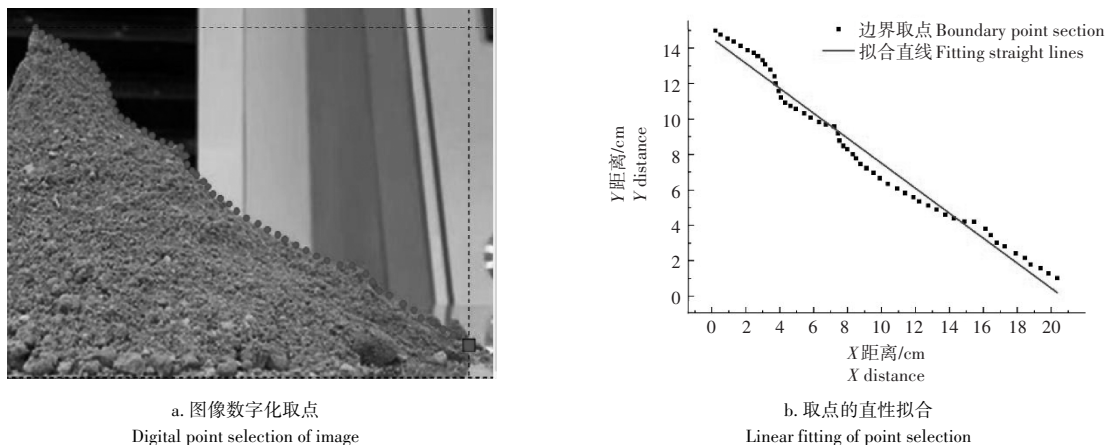


图2 图像数字化工具处理过程与结果

Figure 2 Process and results of image digitization tool

1.2.2.3 模型参数的选取 通过预试验和广泛查阅文献^[3-8,13-27],考虑含水率对土壤接触参数的影响以及JKR表面能值与模型选取的颗粒粒径的关系^[28],土壤和304不锈钢的本征参数如表1,接触参数和JKR参数的取值区间如表2。

表1 红壤和304不锈钢的本征参数

Table 1 The intrinsic parameters of red soil and 304 stainless steel

材料 Material	密度/(kg·m ⁻³) Density	泊松比 Poisson's ratio	剪切模量/MPa Shear modulus
红壤 Red soil	(1.3~2)×10 ³	0.2~0.5	1~10
304钢 304 stainless steel	7.93×10 ³	0.3	7.72 × 10 ⁴

表2 红壤与304不锈钢接触参数及JKR模型参数范围

Table 2 The contact parameters and JKR model parameters range of soil and 304 stainless steel

参数 Parameters	数值 Numerical value
红壤-红壤碰撞恢复系数 <i>D</i> Red soil-red soil collision coefficient of restitution	0.15~0.75
红壤-红壤静摩擦系数 <i>E</i> Static friction coefficient of red soil-red soil	0.2~1.0
红壤-红壤动摩擦系数 <i>F</i> Dynamic friction coefficient of red soil-red soil	0.05~0.45
红壤-304钢碰撞恢复系数 <i>G</i> Coefficient of restitution of red soil-304 stainless steel collision	0.3~0.6
红壤-304钢静摩擦系数 <i>H</i> Static friction coefficient of red soil-304 stainless steel	0.5~1.2
红壤-304钢动摩擦系数 <i>I</i> Dynamic friction coefficient of red soil-304 stainless steel	0.05~0.35
红壤JKR表面能 <i>J</i> /(J·m ⁻²) JKR surface energy of red soil	0.1~1.0

1.2.2.4 堆积角仿真方式 设置模拟过程与物理试验基本相同,首先,将圆筒上升速度设定为80 mm·s⁻¹,并以600 g·s⁻¹的速度产生土壤颗粒,总量为300 g。然后,使用GPU CUDA Solver进行模拟,模拟固定时间步长为Rayleigh时间步长的20%。在模拟过程中,每隔0.1 s保存1次数据,模拟时长为12 s。试验的整体效果如图3。

1.2.3 试验设计

1.2.3.1 Plackett-Burman试验 根据实际试验和文献资料设计Plackett-Burman试验。应用Design-expert软件试验,以堆积角作为响应值,从土壤的本征参数和接触参数中筛选出对堆积角有显著影响的3

个参数。各参数分别以1,0,-1代表高、中、低水平,具体数值如表3。

1.2.3.2 最陡爬坡试验 在Plackett-Burman试验结果的基础上,进行最陡爬坡试验,进一步确定显著因子的取值范围。根据因子的正负效应,选择爬坡的方向,通过堆积角大小,找出与含水率为20%的土壤堆积角最相近的一组,作为Box-Behnken试验的中心水平。

1.2.3.3 Box-Behnken试验 在最陡爬坡试验结果的基础上,进行Box-Behnken试验,建立各因子与

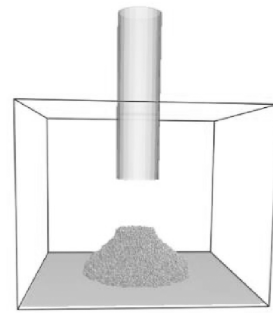


图3 仿真试验设置

Figure 3 Simulation experiment setup

表3 Plackett-Burman试验因素编码

Table 3 The factor coding of Plackett-Burman experiment

参数 Parameters	编码 Code		
	-1	0	1
红壤泊松比A Poisson's ratio of red soil	0.2	0.35	0.5
红壤剪切模量B/MPa Shear modulus of red soil	1	5.5	10
红壤密度C/(kg·m ⁻³) Density of red soil	1 300	1 650	2 000
红壤-红壤碰撞恢复系数D Red soil-red soil collision coefficient of restitution	0.15	0.45	0.75
红壤-红壤静摩擦系数E Static friction coefficient of red soil-red soil	0.2	0.6	1
红壤-红壤动摩擦系数F Dynamic friction coefficient of red soil-red soil	0.05	0.25	0.45
红壤-304钢碰撞恢复系数G Coefficient of restitution of red soil-304 stainless steel	0.3	0.45	0.6
红壤-304钢静摩擦系数H Static friction coefficient of red soil-304 stainless steel	0.5	0.85	1.2
红壤-304钢动摩擦系数I Dynamic friction coefficient of red soil-304 stainless steel	0.05	0.2	0.35
红壤JKR表面能J/(J·m ⁻²) JKR surface energy of red soil	0.1	0.55	1

评价指标的拟合模型。选取B(红壤剪切模量)、E(红壤-红壤静摩擦系数)、F(红壤-红壤动摩擦系数)作为因子,以堆积角作为评价指标,使用Design-Expert软件进行试验设计,因子水平如表4。

表4 Box-Behnken试验设计因子水平

Table 4 The factor level of Box-Behnken experimental design

水平 Level	B	E	F
-1	4.6	0.52	0.13
0	6.4	0.68	0.21
1	8.2	0.84	0.29

1.2.4 验证试验 对试验结果进行验证^[16, 29]。将定制漏斗固定在拉力试验机上,将待测土壤导入漏斗中,使土壤自由落体掉到底部的接料盒中形成堆积角,用相机记录堆积角。同时设计对应的仿真与实际试验结果进行比对。

2 结果与分析

2.1 本征参数测定试验结果

2.1.1 土壤的密度与对应含水率 通过烘干法和环刀法测量从田间采集的土壤的含水率和密度,结

果如表5。由表5可知,田间采集的土壤平均含水率为27.5%,对应密度为1.629 g·cm⁻³,在23.6%~31.2%范围内,含水率越高,密度越大。

表5 测定的红壤的含水率与密度数据

Table 5 Determination of the moisture content and density data of the red soil

项目 Item	样本序号 Sample number					平均值 Average
	1	2	3	4	5	
含水率/% Moisture content	27.6	25.8	31.2	29.2	23.6	27.5
密度/(g·cm ⁻³) Density	1.632	1.598	1.711	1.617	1.587	1.629

2.1.2 土壤的含水率与堆积角 通过物理试验测量了不同含水率的土壤样本的堆积角,结果如表6。由表6可知,当含水率在10%~35%之间时,土壤堆积角会随着含水率的升高而增大。土壤是一种散粒体物料,含水率越高,土壤颗粒间的黏度越大,流动性越差,因此堆积角也越大。

表6 不同含水率红壤的堆积角

Table 6 The repose angle of red soil with different moisture contents

项目 Item	样本序号 Sample number					
	1	2	3	4	5	6
含水率/% Moisture content	10	15	20	25	30	35
堆积角/(°) Repose angle	35.953	37.933	39.073	40.203	41.157	42.078
堆积角标准差 Standard deviation of repose angle	1.483	1.191	1.187	0.496	2.827	1.631

利用表6中的土壤样本的含水率和堆积角,进行多项式拟合,建立含水率—堆积角模型:

$$R_1 = -0.004x^2 + 0.433x + 32.164 \quad (4)$$

式中: x 为土壤含水率; R_1 为土壤堆积角。

建立的模型的相关系数达到0.992,拟合曲线的形状如图4。由图4可知,随着含水率增加,堆积角也逐渐增加。

2.1.3 土壤的粒径分布与仿真设计 经统计计算后的实际测定土壤的粒径分布如表7。由表7可知,质量分数最大的颗粒直径为0~0.25 mm,占比超过40%,在0~1 mm的颗粒占比超过80%,符合一般红壤的粒径分布^[30]。

基于仿真实际条件限制,土壤颗粒离散元模型参数标定的通用做法是用等直径的球形颗粒代替真实的土壤颗粒,球形颗粒直径取真实的土壤颗粒直径的10~50倍^[7, 14-15]。本研究选择球形颗粒作为土壤颗粒的模型,根据进行的实际试验测得的土壤的粒径分级和质量分数,约取实际土壤颗粒算术平均粒径的10倍作为仿真的颗粒直径,具体仿真土壤颗粒直径和质量分数如表8。

2.2 Plackett-Burman试验结果与分析

基于Design-Expert软件设计试验, $A \sim J$ 为因素编码值,试验方案与结果如表9,显著性分析结果如表10。由表9可知,仿真试验的堆积角结果范围在9.75~50.38°之间,仿真堆积角结果小于25°的试验组其红壤剪切模量 B 参数均选用-1水平,红壤剪切模量 B 参数选用0水平的试验组其仿真堆积角结果都大于45°。

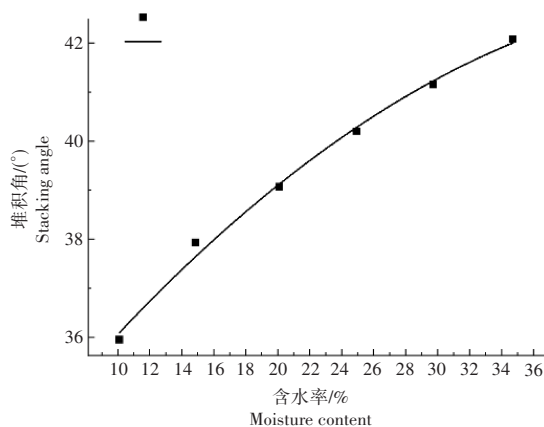


图4 红壤含水率与堆积角关系曲线

Figure 4 The relationship curve between moisture content and repose angle of red soil

表7 颗粒粒径分布

Table 7 Particle size distribution

颗粒直径/mm Particle size	质量分数/% Mass fraction
≤ 0.25	43.11
0.25~0.5	20.50
0.5~1	17.32
1~2	8.97
≥ 2	10.10

表8 红壤颗粒模型

Table 8 The particle model of red soil

仿真粒径/mm Simulation particle size	实际粒径范围/mm Actual particle size range	质量分数/% Mass fraction
1	0~0.25	43.11
4	0.25~0.5	20.50
7.5	0.5~1	17.32
10	≥ 1	19.07

表 9 Plackett-Burman试验方案与结果

Table 9 The scheme and results of Plackett-Burman experiment

试验序号 Experiment number	因素 Parameters										堆积角/(°) Repose angle
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	34.45
2	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	48.42
3	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	44.84
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50.22
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47.33
6	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	24.25
7	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	19.34
8	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	9.75
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50.38
10	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	48.14
11	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	42.44
12	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	13.25
13	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	50.08
14	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	45.03
15	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	48.49

由表 10 可知,依据 10 个因素对应的 p 值由小到大进行排序, B (红壤剪切模量)、 E (红壤—红壤静摩擦系数)、 F (红壤—红壤动摩擦系数)对试验结果的影响排在前 3 位,对此的解释为:(1)土壤剪切模量越大,表示土壤抵抗形变的能力越强,导致土壤的堆积角变大;(2)土壤间动摩擦系数越大,表明两层土壤在有相对运动时所需的水平剪应力越大,土壤滑动越困难,因此土壤堆积角越大;(3)仿真试验的结果中,静摩擦系数与堆积角的大小成反比例关系,JKR 表面能对堆积角的影响不显著,可能的原因是在本次试验中引入了含水率的变化,含水率对堆积角的影响主要通过剪切模量、密度、动静摩擦系数、JKR 表面能等综合呈现,对剪切模量的影响最大,且含水率越大剪切越小,故仿真试验中,剪切模量增大的影响覆盖了含水率对 JKR 表面能的影响,同时也覆盖了静摩擦系数的效果,使得静摩擦系数对堆积角的影响系数为负且 JKR 表面能影响不显著。为了简化进一步试验,在后续试验中,重点考虑 B 、 E 、 F 对试验的影响,其余因素均取中间水平,即: A 取 0.35、 C 取 1 650、 D 取 0.45、 G 取 0.45、 H 取

表10 Plackett-Burman试验结果显著性分析

Table 10 The significance analysis of Plackett-Burman experimental results

方差来源 Sources of variance	效应 Effect	均方和 Mean sum of squares	P	显著性序号 Significance rank
A	0.137	0.22	0.967	10
B	9.020	976.74	0.043*	1
C	-0.200	0.48	0.951	9
D	5.220	326.37	0.166	4
E	-7.090	603.17	0.083	2
F	5.980	428.74	0.125	3
G	1.790	38.63	0.592	6
H	-2.530	77.03	0.458	5
I	-1.310	20.59	0.693	7
J	-0.348	1.45	0.916	8

注:*表示差异显著($p < 0.05$),**表示差异极显著($p < 0.01$)。下同。

Note: * indicates significant difference ($p < 0.05$), ** indicates extremely significant difference ($p < 0.01$). The same below.

0.85、 I 取0.2、 J 取0.55。

2.3 最陡爬坡试验结果与分析

根据表10的结果, B (红壤剪切模量)、 F (红壤—红壤动摩擦系数)因子对堆积角有正向影响,因此将爬坡试验参数设置为逐步增加, E (红壤—红壤静摩擦系数)因子对堆积角有负向影响,因此将爬坡试验参数设置为逐步减少。以此因素变化进行堆积角的仿真实验,测定仿真堆积角的试验值和中心0水平(20%含水率土壤堆积角)的相对误差。详细的试验参数和结果如表11。由表11可知,仿真试验与实际试验的误差呈先减小后增大趋势,且第4组试验的相对误差最低(2%),因此后续试验以第4组试验的参数数值为中心点, B 、 E 、 F 对应最优区间分别为[4.6,8.2]、[0.52,0.84]和[0.13,0.29]。

表11 爬坡试验方案与结果

Table 11 The scheme and results of climbing test

试验序号 Experiment number	因素 Parameters			仿真堆积角/ $^{\circ}$ Simulated repose angle	误差/% Error
	B	E	F		
1	1	0.2	0.45	50.488	29
2	2.8	0.36	0.37	46.768	20
3	4.6	0.52	0.29	39.198	3
4	6.4	0.68	0.21	38.310	2
5	8.2	0.84	0.13	36.034	8
6	10	1	0.05	24.449	37

2.4 Box-Behnken试验结果与分析

按照 Box-Behnken 的因子水平表设计试验,0水平重复5次,共进行17组仿真试验,试验设计与结果如表12。由表12可知,仿真试验堆积角结果在35.015~44.156 $^{\circ}$ 之间。

表12 Box-Behnken试验方案与结果

Table 12 The scheme and results of Box-Behnken experimental

试验序号 Experiment number	因素 Parameters			仿真堆积角/ $^{\circ}$ Simulated repose angle
	B	E	F	
1	0	1	1	40.646
2	1	-1	0	41.596
3	0	0	0	42.524
4	-1	-1	0	41.069
5	-1	0	-1	40.659
6	-1	0	1	41.779
7	0	0	0	41.063
8	0	0	0	42.755
9	-1	1	0	41.957
10	1	1	0	42.425
11	0	0	0	44.156
12	1	0	1	42.159
13	0	0	0	42.930
14	0	-1	-1	39.300
15	0	1	-1	36.730
16	1	0	-1	35.015
17	0	-1	1	41.167

对表12中的数据进行回归分析,优化得到了堆积角—离散元参数模型的多元二次回归方程如式(5),其方差分析结果如表13。

$$R_1 = 42.27 - 0.534B - 0.171E + 1.75F + 1.51BF - 2.59F^2 \quad (5)$$

由表13可知,模型 F 值为8.49, p 值为0.002, p 值远小于0.01,表示模型差异性极显著,模型的设计较为合理。失拟项 p 值为0.395,大于0.05,说明模型拟合较好,各因素间交互性好。 F 、 F^2 表现极显著($p < 0.01$), BF 表现显著($p < 0.05$),其余项不显著。模型信噪比(Adeq Precosion)为9.669,大于3,表明模型信号强,可以有效进行预测。

表13 Box-Behnken试验模型方差分析
Table 13 ANOVA for Box-Behnken model

方差来源 Sources of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	<i>F</i>	<i>p</i>	显著性 Significance
模型 Model	64.66	5	8.49	0.002	**
<i>B</i>	2.28	1	1.50	0.247	
<i>E</i>	0.233	1	0.153	0.703	
<i>F</i>	24.62	1	16.16	0.002	**
<i>BF</i>	9.07	1	5.95	0.033	*
<i>F</i> ²	28.45	1	18.67	0.001	**
残差 Residual	16.76	11			
失拟项 Lack of fit	11.88	7	1.39	0.395	不显著 Not significant
纯误差 Pure error	4.88	4			
总和 Cor total	81.42	16			

模型的残差正态关系如图5,图中各点分布在直线附近,表明残差的实际累积概率与理论正态分布的累积概率之间是线性关系,残差的分布形状与正态分布的分布形状相一致,残差的分布服从正态分布,模型的拟合效果良好。

红壤剪切模量*B*、红壤—红壤动摩擦系数*F*的响应曲面如图6,随着*B*和*F*的增加,响应面逐渐增高且呈凸型,等高线图趋于椭圆,表明*B*和*F*对堆积角有正的影响,*B*和*F*越大,响应值越大;*B*和*F*之间有显著的交互作用,*B*和*F*的组合效应存在一定的相互增强;*B*和*F*的交互作用对响应值的影响较大且交互作用是非线性的。

2.5 模型的验证

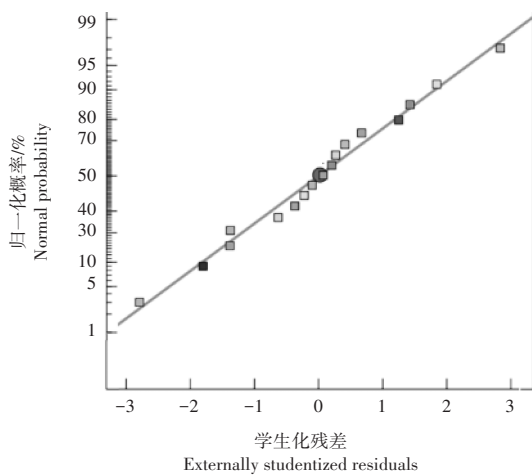


图5 残差正态关系

Figure 5 Normal probability of residuals

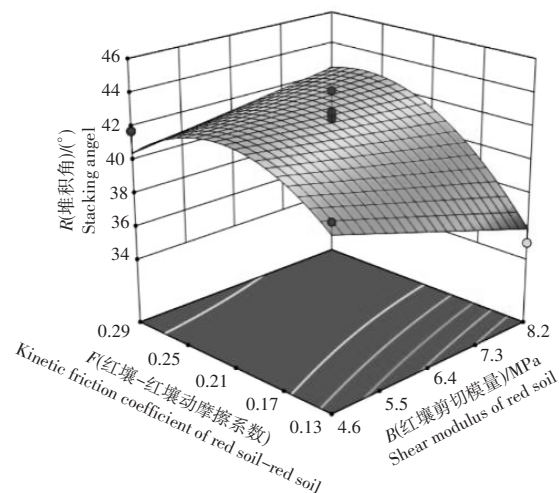


图6 *B*、*F*与堆积角响应曲面

Figure 6 Response surface of *B*, *F* and repose angle

2.5.1 堆积角—离散元参数模型验证 利用Design-Expert软件,以6个含水率的红壤样本的物理试验堆积角为优化目标,求解出6组离散元参数(剪切模量、颗粒间静摩擦因数和动摩擦因数)的最佳组合,以此进行仿真试验,仿真结果如表14。由表14可知,不同含水率的仿真堆积角与物理试验堆积角的相对误差都不超过2.13%,说明该模型适用于离散元仿真参数的确定。

2.5.2 含水率—离散元参数模型验证 为了准确和快速地确定离散元参数,利用含水率—堆积角模型和堆积角—离散元参数模型,根据式(4)和式(5)推导出含水率和离散元参数的关系模型:

$$42.27-0.534B-0.171E+1.75F+1.51BF-2.59F^2=-0.004x^2+0.433x+32.164 \quad (6)$$

利用式(6)的含水率—离散元参数模型,针对不同含水率,可通过 Design-expert 软件的模型目标值

表 14 不同含水率红壤离散元参数最优值及验证试验结果

Table 14 Optimal values and verification test results of discrete element parameters for red soil with different moisture contents

含水率/% Moisture content	剪切模量/MPa Shear modulus	静摩擦系数 Coefficient of static friction	动摩擦系数 Coefficient of dynamic friction	仿真堆积角/(°) Simulated repose angle	误差/% Error
10	8.114	0.832	0.139	36.341	1.08
15	5.690	0.836	0.131	37.770	0.43
20	7.839	0.649	0.157	39.518	1.14
25	7.655	0.550	0.172	39.881	0.80
30	6.138	0.552	0.288	41.923	1.86
35	6.614	0.673	0.288	42.974	2.13

寻优功能,找出离散元参数组合。依据上述模型,得到3组不同含水率的红壤离散元参数最佳组合,用朗氏法进行物理和仿真试验,测量对应的堆积角。每组试验做3遍,取均值,结果如表15。由表15可知,试验得到的仿真和物理试验堆积角间的相对误差不超过4.25%,这证明了模型的可靠性。由于验证试验使用朗氏法而非圆筒提升法进行验证,含水率—离散元参数模型的相对误差稍微高于堆积角—离散元参数模型。两个模型的相对误差都很小,表明建立的模型可以预测离散元参数。

表 15 朗氏法验证试验结果

Table 15 Verification test results of lang's method

含水率/% Moisture content	剪切模量/MPa Shear modulus	静摩擦系数 Coefficient of static friction	动摩擦系数 Coefficient of dynamic friction	仿真堆积角/(°) Simulated repose angle	实际堆积角/(°) Simulated repose angle	误差/% Error
16.38	6.646	0.718	0.132	36.11	37.26	3.09
22.98	4.722	0.521	0.289	43.18	41.42	4.25
28.76	8.091	0.524	0.198	41.96	43.17	2.8

3 讨论与结论

烟叶生产全过程机械化是大势所趋,目前福建烟区的烟叶产业机械化程度不足,主要受制于福建的丘陵地形及红壤的黏滞效应,中大型机械设备难以施展,机具作业效率和效果不理想,需要进一步深入研究红壤与触土部件之间的相互作用。这通常采用离散元法进行数值模拟,需要建立一个比较精确的土壤模型,关键在于接触参数的设计。目前已有不少学者对赤红壤、黑土、桑园土壤等土壤的参数标定进行了深入研究,但少有针对烟草种植区红壤与接触材料的参数的研究。

本研究针对福建烟区的红壤,结合堆积角物理试验和仿真试验,建立不同含水率下红壤的离散元参数模型,探讨适用于不同含水率红壤的标定方法。首先通过圆筒提升法物理试验,构建起红壤在10%~35%含水率范围内的含水率 x 与堆积角 R_1 的关系式 $R_1 = -0.004x^2 + 0.433x + 32.164$,该模型的相关系数为0.992,具有良好的拟合度,基于此模型可求解出不同含水率时的红壤堆积角。其次,使用Plackett-Burman试验和爬坡试验,得到了含水率—红壤离散元参数的显著性参数和最优范围:红壤的剪切模量 B 在4.6~8.2MPa之间,红壤与红壤之间的静摩擦系数 E 在0.52~0.84之间,动摩擦系数 F 在0.13~0.29之间。最后,根据Box-Behnken试验,建立了红壤堆积角 R_1 和离散元参数之间的模型 $R_1 = 42.27 - 0.534B - 0.171E + 1.75F + 1.51BF - 2.59F^2$,模型的 p 值为0.002,相对误差不大于2.13%,基于此模型可求解出不同红壤堆积角时的红壤离散元显著性参数最优组合。再结合含水率—堆积角模型和堆积角—离散元参数模型,得到含水率—离散元参数模型 $42.27 - 0.534B - 0.171E + 1.75F + 1.51BF - 2.59F^2 = -0.004x^2 + 0.433x + 32.164$,并经朗氏法物理试验验证,红壤含水率—离散元参数模型仿真和物理试验结果的相对误差不超过4.25%,说明模型给出的离散元参数是准确可靠的,基于此模型可求解出不同含水率时的红壤离散元显著性参数最优组合。

参考文献:

- [1] 中国科学院南京土壤研究所. 中国土壤数据库[Z]. 2023-10-11.

- [2] 王彦亭,谢剑平,李志宏.中国烟草种植区划[M].北京:科学出版社,2010.
- [3] 麻芳兰,黄文波,李尚平,等.广西甘蔗赤红壤离散元模型参数标定[J].农机化研究,2023,45(11):18-26.
- [4] 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.
- [5] ZHOU T N,ZHOU H,JI J T,et al.Parameter calibration of the discrete element simulation model for soaking paddy loam soil based on the slump test[J].PloS One,2023,18(6):e0285428.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 林恒鑫,王琪,廖鹏,等.植烟沙壤土与触土部件相互作用的离散元仿真参数标定[J].中国农机化学报,2022,43(5):196-203.
- [9] 郑文鑫.烟草除秆清根机理论与试验研究[D].北京:中国农业大学,2018.
- [10] 金鑫,牛志强,王春振,等.小型红壤坡面土壤含水率时空特性研究[J].灌溉排水学报,2016,35(7):28-34,39.
- [11] 刘大为,段佳鹏,陈星宇,等.基于EDEM的稻种离散元摩擦参数标定[J].沈阳农业大学学报,2023,54(2):189-195.
- [12] 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.
- [13] 任德志,张露籍,官元娟,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.
- [14] 朱新华,伏胜康,李旭东,等.不同含水率羊粪离散元参数通用标定方法研究[J].农业机械学报,2022,53(8):34-41.
- [15] 聂晨旭,杨明金,李守太,等.西南区坡耕地紫色土离散元模型参数标定[J].山东农业大学学报(自然科学版),2022,53(3):454-463.
- [16] 孙景彬,刘琪,杨福增,等.黄土高原坡地土壤与旋耕部件互作离散元仿真参数标定[J].农业机械学报,2022,53(1):63-73.
- [17] 林嘉聪,罗帅,袁巧霞,等.不同含水率蚯蚓粪颗粒物料流动性研究[J].农业工程学报,2019,35(9):221-227.
- [18] 石林榕,赵武云,孙伟,基于离散元的西北旱区农田土壤颗粒接触模型和参数标定[J].农业工程学报,2017,33(21):181-187.
- [19] 范维,张富贵,闫建伟,等.黏土与松土部件互作的离散元仿真标定与试验[J].农机化研究,2024,46(1):177-182,190.
- [20] 侯俊铭,李金澎,姚恩超,等.典型蓖麻蒴果离散元参数标定与分析[J].沈阳农业大学学报,2019,50(5):565-575.
- [21] 朱惠斌,吴宪,白丽珍,等.基于EDEM-ADAMS仿真的稻茬地双轴破茬免耕装置研制[J].农业工程学报,2022,38(19):10-22.
- [22] 郑邵秋,张彩虹,王国强,等.基于ANSYS和EDEM的巨菌草茎秆力学特性试验研究[J].农机化研究,2023,45(10):151-158,165.
- [23] ZHOU J C,ZHANG L B,HU C,et al.Calibration of wet sand and gravel particles based on JKR contact model[J].Powder Technology,2022,397:117005.
- [24] HUANG S H,LU C Y,LI H W,et al.Calibration of acoustic-soil discrete element model and analysis of influencing factors on accuracy[J].Remote Sensing,2023,15(4):943.
- [25] WANG Z P,ZHU T,WANG Y Z,et al.Optimal discrete element parameters for black soil based on multi-objective total evaluation normalized-response surface method[J].Processes,2023,11(8):2422.
- [26] LIU L,WANG X L,ZHANG X C,et al.Determination and verification of parameters for the discrete element modelling of single disc covering of flexible straw with soil[J].Biosystems Engineering,2023,233:151-167.
- [27] 张冲,范旭辉,李明森,等.基于EDEM的凿式犁铲土壤扰动仿真分析与试验[J].农业机械学报,2022,53(增刊2):52-59.
- [28] 蔡国庆,刘少鹏,宋建正,等.非饱和土三维离散元计算中宏-细观参数关系探究[J].湖南大学学报(自然科学版),2018,45(增刊1):110-115.
- [29] 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.
- [30] 马仁明,蔡崇法,李朝霞,等.前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30(3):95-103.