doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.014

基于 HSCM 和 LCM 的分层砂土与触土部件互作参数标定与试验

谭好超　沈聪聪　马俊龙　李德宇　徐丽明　马　帅
（中国农业大学工学院，北京 100083）

摘要：为探究北方露地葡萄砂性土在纵深方向上的性质差异及其与开沟触土部件的互作机理，本文针对砂性土上、中、下 3 层土壤建立了离散元仿真模型，并选用滞后弹性模型（Hysteretic spring contact model，HSCM）和线性粘聚力模型（Liner cohesion model，LCM）作为接触模型。通过圆筒提升试验及图像处理技术测得各层土壤堆积角。利用小球滚动和碰撞反弹试验测定了滚动摩擦因数和恢复系数。以土壤颗粒间接触参数为试验因素，以堆积角为试验指标，进行三因素三水平试验，建立土壤堆积角回归预测模型，得到 3 层土壤滚动摩擦因数为 0.07、0.17 和 0.21，恢复系数为 0.47、0.52 和 0.62，粘聚能量密度为 2 694、4 266、4 432 J/m^3。通过对土壤屈服试验和斜面试验，测得各层土壤屈服强度和滑动摩擦角，并进行通用旋转中心组合模拟试验，确定各层土壤与触土部件静摩擦因数、滚动摩擦因数和恢复系数。在标定参数下，3 层土壤堆积角仿真与物理试验误差分别为 1.7%、2.6%、5.0%。为验证土壤与触土部件标定参数准确性，在开沟装置后方增设半边罩壳（一侧有罩壳一侧无罩壳），进行田间抛土试验。试验结果表明，有罩壳和无罩壳一侧土壤抛掷距离分别为 101.4、235.3 mm，与仿真值误差仅 3.34% 和 8.73%，表明仿真模型准确可靠。研究结果可为后续土壤与触土部件互作分析提供理论基础。

关键词：滞后弹性模型；线性粘聚力模型；离散元；分层砂土；参数标定
中图分类号：S152.9；S220.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)07-0158-12　　**OSID**：

Calibration and Experiment of Interaction Parameters between Layered Sandy Soil and Contact Components Based on HSCM and LCM

TAN Haochao　SHEN Congcong　MA Junlong　LI Deyu　XU Liming　MA Shuai
(*College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: To accurately represent the property differences in the vertical direction of sandy soil in northern open-field vineyards and address the lack of reliable discrete element simulation parameters in the study of interaction mechanisms with soil-touching components, simulation models for the upper, middle, and lower layers of sandy soil in open-field vineyards were established. The hysteretic spring contact model (HSCM) and linear cohesion model (LCM) were used as the contact models between soil particles. Firstly, the pile angle of each soil layer was obtained through cylindrical uplift tests combined with image processing technology. The rolling friction coefficients and restitution coefficients were measured by using rolling ball and collision rebound tests. With soil particle contact parameters as experimental factors and stacking angle as the indicator, a three-factor three-level experimental design was conducted to establish a regression prediction model for the soil stacking angle. The rolling friction coefficients for the three layers of soil were found to be 0.07, 0.17, and 0.21, respectively, with restitution coefficients of 0.47, 0.52, and 0.62, and cohesion energy densities of 2 694 J/m^3, 4 266 J/m^3, and 4 432 J/m^3. Yield strengths of each soil layer were measured through soil yield tests. Secondly, the contact parameters between the soil and soil-touching components were calibrated. The sliding friction angles of each soil layer were determined through slope tests. With soil particle and soil-touching component contact parameters as experimental factors and sliding friction angle as the indicator, a general

收稿日期：2024-11-01　修回日期：2024-12-02
基金项目：国家自然科学基金项目（32301710）和财政部和农业农村部：国家现代农业产业技术体系项目（CARS-29）
作者简介：谭好超（1996—），男，博士生，主要从事生物生产自动化研究，E-mail：3540115585@qq.com
通信作者：马帅（1993—），男，副教授，主要从事生物生产自动化研究，E-mail：mashuaicoe@cau.edu.cn

rotational center combination simulation test was conducted. Under the calibrated parameters, the errors between the simulated and actual stacking angles for the three soil layers were 1.7%, 2.6%, and 5.0%, respectively. To validate the accuracy of the calibrated parameters, field soil throwing tests were conducted, showing that the throwing distances for covered and uncovered sides of the soil were 101.4 mm and 235.3 mm, respectively, with errors of 3.34% and 8.73% compared with the simulation values. The relatively small errors indicated that the simulation model was accurate and reliable. The results can provide a theoretical basis for subsequent interaction analysis between soil and soil-touching components.

Key words: hysteretic spring contact model; liner cohesion modle; discrete element; layered sandy soil; parameter calibration

0　引言

在北方露地葡萄园区，由于长期的农业机械作业，土壤结构发生了显著变化，土壤板结和压实现象导致土壤性质在不同深度上存在较大差异。葡萄等的深根系作物开沟施肥深度多为 600 mm，为评估土壤对深根作业的影响，研究土壤与触土部件互作关系，需依据土壤性质分层建立土壤仿真模型。

农机具触土部件与土壤互作时，由于土壤类型不同，所得数据也不相同，因此在对土壤进行建模时，需根据土壤质地选取合适的仿真模型，以确保离散元仿真的准确性[1]。国内外诸多学者针对不同物料特性，应用不同模型确定了该物料离散元仿真参数。张彪等[2]采用 JKR 模型对华南宿根甘蔗耕地重黏土进行离散元参数标定，在标定参数下，阻力仿真值与实测值误差为 8.3%，表明所建模型准确有效；HAJIVAND 等[3]提出一种基于基本物理测试（堆积密度、表面摩擦和堆积角）的简化参数校准方法，有效降低了计算复杂性，误差为 12%，验证了测试结果准确性。QIU 等[4]为得到肉桂土与触土部件的离散元模拟参数，以 Plackett－Burman 试验、最陡爬坡试验和 Box－Behnken 试验对最优离散元参数组合并进行验证试验，结果表明，堆积角仿真值与实际值误差为 0.25%，阻力误差为 10.32%，标定参数精度较高；周华等[5]采用 Hertz－Mindlin（no slip）模型，建立了玉米田耕层土壤离散元仿真模型，试验表明，仿真值与实际值相对误差小于 10%，表明标定模型准确可靠；MUDARISOV 等[6]选用 JKR 模型建立土壤与犁体互作的离散元仿真模型，标定了表面能、泊松比、颗粒间的动静摩擦因数，并分析了表面能对犁体耕作时横向和水平方向的阻力变化规律，标定结果为高黏着力的土壤建模提供了参考。

上述学者对不同土壤类型进行了参数标定，但土壤取样相对较浅，未能全面体现深层土壤特性，仍缺乏不同深度土壤离散元参数，难以分析深层土壤与触土部件互作机理。本文以我国北方露地葡萄园区砂性土为研究对象，土壤由浅到深可分为耕作层（0～20 cm）、犁底层（20～30 cm）和心土层（30～60 cm）[7-8]，简称为上、中、下层土壤。根据各层土壤特性，分层建立离散元仿真模型，采用物理与仿真试验相结合的方法，对机具触土部件常用材料（65Mn 钢）与各层土壤接触参数进行标定，采用 EDEM－RecurDyn 耦合仿真试验，对作业过程中抛掷行为进行分析，以验证离散元参数的准确性。

1　土壤颗粒仿真模型参数标定

1.1　土壤接触模型选择

1.1.1　试验样品与参数确定

所选土壤来自北京市房山区波龙堡酒庄赤霞珠葡萄园区，使用螺旋取土器在葡萄行间取 0～20 cm 作为上层土，取 20～30 cm 为中层土，取 30～60 cm 为下层土，每个位置取 3 个样本，共采集 7 个位置，得到 21 个样本。利用土壤水分测量仪测得上、中、下层土壤样本含水率平均值分别为 15.56%、17.26% 和 19.45%，利用土壤紧实度测量仪测得葡萄行间不同深度土壤紧实度如图 1 所示。由图 1 可得，在深度 25～35 cm 处土壤紧实度曲线更加突出，表明了在深度方向上分层校准土壤参数的重要性。

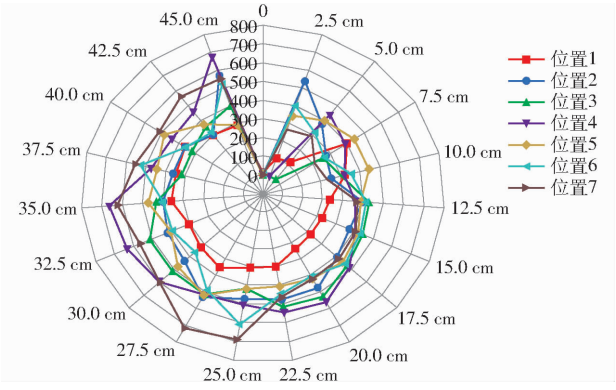


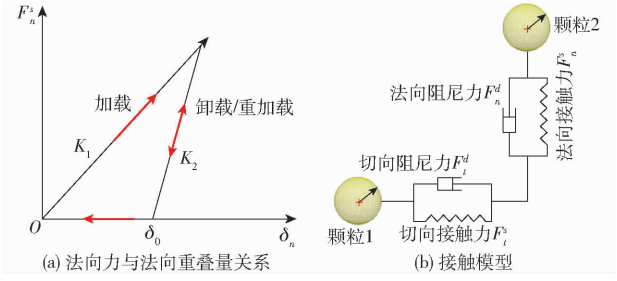
图 1　土壤紧实度测量

Fig. 1　Soil firmness measurement

1.1.2　仿真模型选取

在 EDEM 中，使用最多的模型为 JKR 模型、no slip 模型和 Bonding 模型[9]。露地葡萄园土壤受到

外力压缩时，会产生塑性变形[10]，为真实反映不同层间砂土宏观特性，选取滞后弹性模型（Hysteretic sping contact modle，HSCM）为土壤基本仿真模型，该模型将塑性变形加入到接触力中，当外力达到预设应力时，颗粒执行塑性方程，当外力未超过预设应力时，颗粒间执行弹性方程，以此表征土壤弹塑性变形行为。同时为体现不同含水率和紧实度对土壤黏着特征，额外添加线性粘聚力模型（Liner cohesion modle，LCM）以表征颗粒间的粘聚作用。HSCM 模型中颗粒间法向力与法向重叠量关系[11]如图 2a 所示。



(a) 法向力与法向重叠量关系 (b) 接触模型

图 2 滞后弹性模型原理

Fig. 2 Principle of hysteresis elastic model

在选用模型中，将线性粘附力添加到法向接触力中，粘附力 F_{co} 计算式为

$$F_{co}=\pi k_{co}\left(\frac{3R^*F_n^s}{4E^*}\right)^{\frac{2}{3}} \tag{1}$$

其中

$$F_n^s=-\begin{cases}K_1\delta_n & (K_1\delta_n<K_2(\delta_n-\delta_0))\\ K_2(\delta_n-\delta_0) & (\delta_n>\delta_0)\\ 0 & (\delta_n\leqslant\delta_0)\end{cases} \tag{2}$$

式中 F_{co}——粘附作用力，N

k_{co}——颗粒间粘聚能量密度，J/m^3

R^*——接触颗粒等效半径，m

E^*——等效杨氏模量，MPa

F_n^s——法向接触力，N

K_1——加载刚度，N/m

K_2——卸载刚度，N/m

δ_n——颗粒间法向重叠量，m

δ_0——颗粒间残余重叠量，m

实际上仿真颗粒同时存在切向力和法向力，如图 2b 所示，假设 HSCM 模型限制粒子切向运动[10]，因此只关注法向力，两个颗粒在相互碰撞接触，其法向力合力 F_n 应为法向阻尼力 F_n^d、法向接触力 F_n^s 和线性粘附力 F_{co} 之和，即

$$F_n=-b_n\sqrt{\frac{4m^*K_1}{1+\left(\frac{\pi}{\ln e}\right)^2}}\dot{\delta}_n+F_n^s+F_{co} \tag{3}$$

式中 b_n——阻尼系数

m^*——等效质量，kg

$\dot{\delta}_n$——法向重叠量对时间的导数，m/s

e——恢复系数

1.2 土壤基本参数确定

1.2.1 本征参数确定

离散元模型仿真参数包括本征参数、接触参数、接触模型参数[12-14]，其中本征参数包括密度、泊松比和弹性模量，可通过试验测定或查阅文献确定。选用无顶盖立方盒（10 cm × 10 cm × 10 cm）和电子秤（量程为 3 000 g，精度为 0.01 g）测量所取样本密度，每层土壤测量 3 次取均值，泊松比和剪切模量参照文献[7,15]，得到本征参数如表 1 所示。

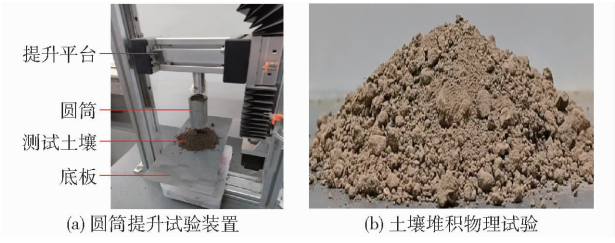
表 1 本征参数

Tab. 1 Intrinsic parameters

项目	参数	数值
上层土壤	密度/(g·cm^{-3})	1.59
	泊松比	0.36
	剪切模量/MPa	1.04
中层土壤	密度/(g·cm^{-3})	1.66
	泊松比	0.40
	剪切模量/MPa	1.46
下层土壤	密度/(g·cm^{-3})	1.78
	泊松比	0.42
	剪切模量/MPa	1.52
65Mn钢	密度/(g·cm^{-3})	7.82
	泊松比	0.29
	剪切模量/MPa	8.19×10^4

1.2.2 土壤堆积角试验

参数标定通常以土壤堆积角为响应值，标定前采用圆筒提升法测量 3 层土壤堆积角，试验装置如图 3 所示，主要由提升平台，圆筒（直径为 80 mm，长度为 100 mm）、底板组成。各层土壤分别取 80 g，将土壤填满圆筒，匀速抬升平台，土壤从圆筒底部滑落，在底板上堆积稳定后，将土壤连同底板移动至白色背景处。



(a) 圆筒提升试验装置 (b) 土壤堆积物理试验

图 3 土壤堆积角测定试验

Fig. 3 Soil angle of repose measurement test

为准确获取土壤堆积角，减少人工误差，利用 Matlab R2018a 对土壤堆积角进行图像采集并处理，以中层土为例（图 4），读取图像并进行去噪声、灰度化、二值化[16-17]、提取轮廓，并选取右侧边界作为感

兴趣区域[18-20]，得到堆积土壤单侧边缘曲线。利用 Curve Fitting 工具箱，通过多形式逼近函数（Polynomial），得到感兴趣区域的拟合直线，拟合直线斜率正切即为所求堆积角。由此求得上、中、下 3 层土壤堆积角分别为 31.76°、37.83°和 44.48°，与文献[7]所得结论一致。

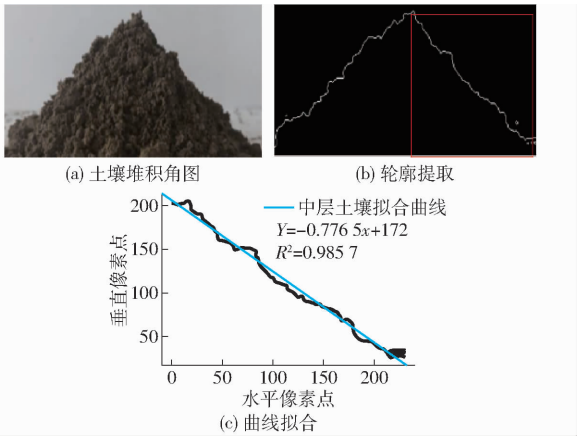


图 4　土壤堆积角图像处理

Fig. 4　Soil angle of repose image processing

1.3　土壤仿真参数标定

1.3.1　模型参数确定

使用贯入轴压缩试验测量各层土壤屈服强度（图 5a），该试验主要包括无盖盒、供试土壤、贯入轴和万能试验机。贯入轴以速度 150 mm/s 压入土壤，压力传感器记录实时力，并生成载荷位置曲线，通过数据处理，得到压应力与压缩位移曲线（图 5b）。从图 5b 可知，随着压缩位移增加，压缩应力也随之增大，上层和下层土壤有明显的屈服强度点，中层屈服强度点不明显，因此选取中层屈服强度曲线中斜率相对较小的点作为屈服点，得到 3 层土壤屈服强度分别为 0.027、0.025 9、0.025 MPa。

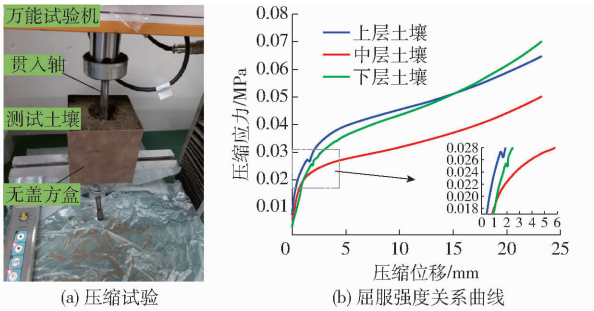


图 5　屈服强度测量及关系曲线

Fig. 5　Yield strength measuring and relationship curves

1.3.2　接触参数标定

离散元仿真中，选取恢复系数 A、滚动摩擦因数 B 和 LCM 模型中的粘聚能量密度 C 作为试验因素，以上、中、下 3 层土壤堆积角 Y 作为试验指标，进行三因素三水平通用旋转中心组合模拟试验，试验前需合理确定因素取值范围。

1.3.2.1　恢复系数测定

恢复系数为碰撞后相互远离的两物体质心速度模量与碰撞前两者相互接近时的速度模量在两表面接触点的共同法线上的投影比，是表征碰撞特性的力学参数。参照文献[21]，使用粘结剂将土壤粘附在斜板上，形成颗粒板，从而进行砂性土及与触土部件恢复系数测量，原理如图 6 所示。测量时将土壤颗粒距离斜面固定高度，然后释放，被测颗粒做自由落体，在点 O 与斜面发生碰撞接触并反弹，随后继续做抛物线运动，直至落地。

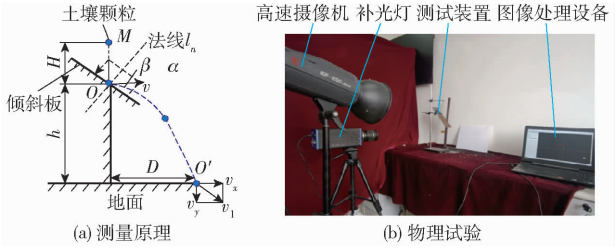


图 6　恢复系数测定试验

Fig. 6　Recovery coefficient measurement test

根据运动学关系，忽略空气阻力，被测颗粒自由落体落至点 O 时速度为

$$v_2 = \sqrt{2gH} \tag{4}$$

式中　v_2——颗粒与点 O 接触瞬时速度，m/s

g——重力加速度，m/s²

H——自由落体高度，m

土壤颗粒从点 O 反弹继续做抛物线运动，直至落地，其速度变化关系为

$$\frac{1}{2}Mv_1^2 - \frac{1}{2}Mv^2 = Mgh \tag{5}$$

其中

$$v_1 = \sqrt{\frac{D^2 + h^2}{t^2} + \frac{g^2 t^2}{4} - hg} \tag{6}$$

式中　v_1——运动至点 O' 合速度，m/s

v——经斜面碰撞反弹后瞬时速度，m/s

M——测试颗质量，kg

D——从点 O 运动至点 O' 的水平距离，m

h——接触点 O 距离地面的高度，m

t——土壤颗粒自碰撞反弹后落地时间，s

土壤恢复系数计算式为

$$E = \frac{v\cos\alpha}{v_2 \sin\beta} \tag{7}$$

式中　E——土壤之间恢复系数

α——碰撞反弹瞬间速度方向与碰撞点法线方向的夹角，(°)

β——斜面倾斜角，(°)

联立式(4)～(7)可得恢复系数为

$$E = \frac{\sqrt{4(D^2 + h^2) + gt^4 - 12ght^2}\cos\alpha}{2t\sqrt{2gh}\sin\beta} \tag{8}$$

利用高速摄影技术(图 6b),及时捕捉运动轨迹,使用目标跟踪软件进行运动轨迹后处理操作,得到 α、β、t,重复试验多次,测得土壤间恢复系数为 0.221 ~ 0.627,更换 65Mn 钢倾斜板,再次试验,得土壤与触土部件间恢复系数为 0.23 ~ 0.656,由于结果相差较小,因此取 0.221 ~ 0.656。

1.3.2.2 滚动摩擦因数测定

滚动摩擦因数测量原理如图 7 所示,使用土壤粘结剂将各层土壤分别粘接在长度为 L 的倾斜导轨上,将质量为 m 的土壤小球轻轻放置倾斜导轨位置 A_1,使小球沿导轨滑落,当滑至位置 B_1 时开始做斜下抛运动。

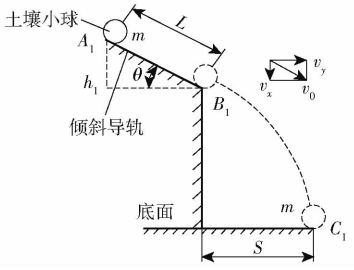


图 7 滚动摩擦系数测定原理

Fig. 7 Measuring principle of rolling friction coefficient

此过程中,忽略空气阻力并假设土壤小球沿斜面做纯滚动,则运动至点 B 速度 v_0 为

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = mgh_1 - \gamma mgL\cos\theta \tag{9}$$

式中 m——土壤小球质量,kg

v_0——小球滚落至点 B 速度,m/s

h_1——倾斜轨道垂直高度,m

L——倾斜轨道长度,m

θ——轨道倾斜角,(°)

γ——滚动摩擦因数

在点 B_1 斜下抛速度可分解为水平方向 v_x 和竖直方向 v_y,前进距离 S 为

$$S = v_x T \tag{10}$$

其中

$$v_x = v_0\cos\theta \tag{11}$$

式中 T——从点 B_1 运动至地面点 C_1 的时间,s

S——前进距离,m

联立式(9) ~ (11)得滚动摩擦因数为

$$\gamma = \tan\theta - \frac{S^2}{2gLT^2\cos^3\theta} \tag{12}$$

由式(12)可知,滚动摩擦因数与倾斜角、前进距离、下落时间、轨道长度有关,试验中通过高速摄像机获取前进距离和下落时间,更换土壤小球及倾斜轨道上土壤类型,测量各层土壤滚动摩擦因数,为减少系统误差,对各层土壤测定的取值范围取并集,得到土壤间滚动摩擦因数为 0.06 ~ 0.25,土壤与触土部件间滚动摩擦因数为 0.06 ~ 0.4。

1.3.2.3 试验设计与参数确定

为了获取准确的标定结果,进行了三因素三水平响应面试验设计,试验前需准确选取合适的因素水平取值范围。前文已确定滚动摩擦因数 A 和恢复系数 B。为确定合适的粘聚能量密度 C,进行了仿真预试验,设置粘聚能量密度为 0 ~ 13 500 J/m^3 5 个水平(图 8),试验结果显示,当粘聚能量密度为 13 500 J/m^3 时,土壤颗粒粘结成块,流动性减弱,难以形成堆积角,而其余 4 个水平均可形成。测量结果为:0 J/m^3 时堆积角为 20.3°,2 159 J/m^3 时堆积角为 26.7°,11 450 J/m^3 时堆积角为 48.1°,最终确定粘聚能量密度为 2 159 ~ 11 450 J/m^3,由此确定试验因素编码如表 2 所示。

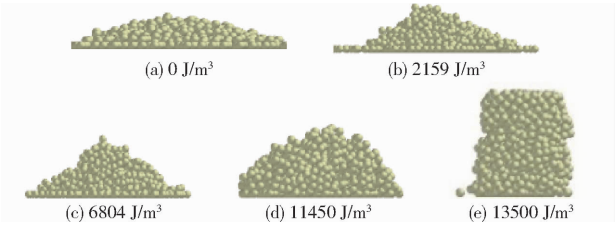


图 8 粘聚能量密度预试验

Fig. 8 Preliminary test of cohesive energy density

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Coding of test factors

编码	因素		
	土壤间滚动摩擦因数	土壤间恢复系数	粘聚能量密度/(J·m^{-3})
-1	0.06	0.22	2 159.0
0	0.16	0.44	6 804.5
1	0.26	0.66	11 450.0

在 EDEM 中建立的仿真模型如图 9 所示,设置土壤粒径为 5 mm[5],同时对 3 层土壤堆积角进行试验,圆筒以速度 0.1 m/s 提升,直至土壤颗粒稳定堆积,共 17 组试验,5 组中心点重复试验。结束后,在 EDEM 中的 Analyst 模块中利用 Protractor 工具测量土壤在 XY 平面上堆积角,如表 3 所示,A、B、C 为因素编码。

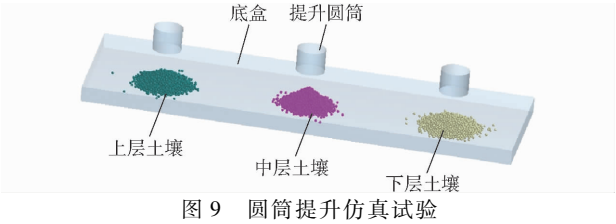


图 9 圆筒提升仿真试验

Fig. 9 Cylinder lifting simulation test

表 3 中,Y_1、Y_2、Y_3 分别表示上、中、下 3 层土壤堆积角。应用 Design-Expert 8.0 软件对试验结果进行分析[22-24],得到响应指标的二次回归模型,方差分析如表 4 所示。由表 4 可知,各层土壤模型均为

表 3　土壤堆积角仿真试验结果

Tab. 3　Simulation test results of soil angle of repose

序号	因素			Y_1/(°)	Y_2/(°)	Y_3/(°)
	A	*B*	*C*			
1	0	0	0	44.33	48.58	58.78
2	−1	0	−1	30.43	33.69	37.23
3	0	0	0	42.61	51.34	53.13
4	0	1	−1	30.96	34.7	36.44
5	0	1	1	60.67	70.77	69.59
6	−1	0	1	61.82	72.9	74.44
7	0	−1	−1	34.61	38.16	43.75
8	1	−1	0	50.91	53.13	59.46
9	1	0	−1	35.75	38.85	41.89
10	−1	−1	0	38.66	42.2	53.75
11	0	−1	1	63.43	74.48	75.69
12	1	0	1	64.54	68.96	68.74
13	0	0	0	43.03	48.65	53.13
14	0	0	0	45.83	46.46	56.62
15	0	0	0	41.73	43.15	58.96
16	1	1	0	36.25	39.69	50.62
17	−1	1	0	39.64	42.88	49.4

极显著类型，失拟项均为不显著，回归有效，其中 *B*、*C* 对各层土壤的影响均显著，*A* 在上层土壤影响极为显著，对中层和下层土壤影响不显著，在二次项和交互项作用中，AB、C^2对上层和中层影响显著，对下层影响不显著，其余影响均不显著。

在保证模型有效性的前提下，得到 3 个响应值回归方程为

$$Y_1 = 42.55 + 2.11A - 2.51B + 14.84C - 3.91AB + 5.22C^2 \quad (13)$$

$$Y_2 = 46.23 - 2.49B + 17.71C - 3.53AB + 7.83C^2 \quad (14)$$

$$Y_3 = 55.39 - 3.32B + 16.14C \quad (15)$$

对有显著影响的交互项进行分析，由表 4 可知，滚动摩擦因数和恢复系数对上层和中层的堆积角有显著影响。以中层土壤为例进行分析，由图 10 可知，当滚动摩擦因数处于较高水平时，堆积角随着恢复系数的降低大幅升高，响应面坡度相对陡峭，但当处于降低水平时，恢复系数对堆积角的影响作用减弱，响应面变化相对平缓，表明由于摩擦因数的存在，改变了原来恢复系数对堆积角的影响规律，两者之间存在明显的交互关系。沿恢复系数方向的等高线明显大于沿摩擦因素方向移动的密度，说明恢复系数对堆积角的影响较摩擦因素更加显著。

利用 Optimization 模块中的 Numerical 选项对参数寻优，各试验因素在选定范围内取值，以各层土壤实际堆积角为目标，得到上、中、下 3 层土壤滚动摩擦因数分别为 0.07、0.17、0.21，恢复系数分别为

表 4　回归模型显著性分析

Tab. 4　Significance analysis of regression model

土壤类型	方差源	平方和	自由度	*F*	*P*
上层土壤	模型	2 037.4	9	91.63	<0.000 1 **
	A	35.7	1	14.45	0.006 7 **
	B	50.45	1	20.42	0.002 7 **
	C	1 761.5	1	712.98	<0.000 1 **
	AB	61.15	1	24.75	0.001 6 **
	AC	1.69	1	0.68	0.435 5
	BC	0.2	1	0.08	0.785 3
	A^2	2.13	1	0.86	0.383 7
	B^2	8.6	1	3.48	0.104 3
	C^2	120.1	1	48.61	0.000 2 **
中层土壤	模型	2 924.2	9	47.84	<0.000 1 **
	A	10.04	1	1.48	0.263 6
	B	49.65	1	7.31	0.030 5 *
	C	2 510.2	1	369.58	<0.000 1 **
	AB	49.84	1	7.34	0.030 2 *
	AC	20.70	1	3.05	0.124 3
	BC	0.016	1	0.002 3	0.963 1
	A^2	17.60	1	2.59	0.151 5
	B^2	5.25	1	0.77	0.408 4
	C^2	270.03	1	39.76	0.000 4 **
下层土壤	模型	2 233.9	9	42.02	<0.000 1 **
	A	4.34	1	0.73	0.419 9
	B	88.44	1	14.97	0.006 1 **
	C	2 084.9	1	352.96	<0.000 1 **
	AB	5.04	1	0.85	0.386 4
	AC	26.83	1	4.54	0.070 5
	BC	0.37	1	0.062	0.810 6
	A^2	13.71	1	2.32	0.171 5
	B^2	4.31	1	0.73	0.421 2
	C^2	6.64	1	1.12	0.324 4

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

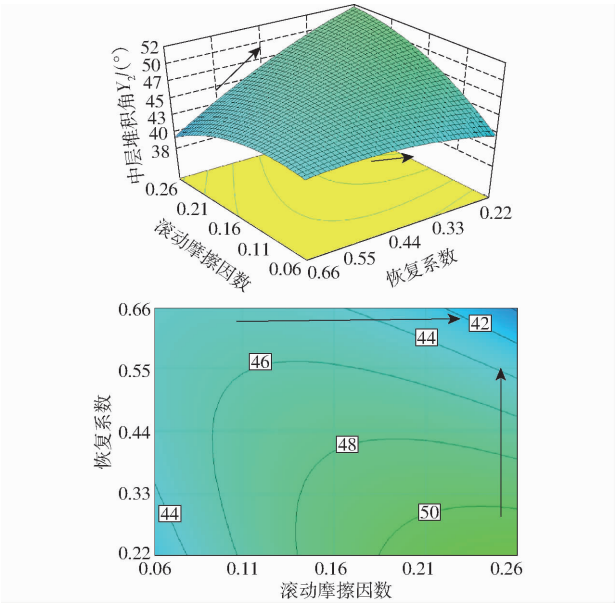


图 10　交互作用对堆积角的响应

Fig. 10　Interaction response to stacking angle

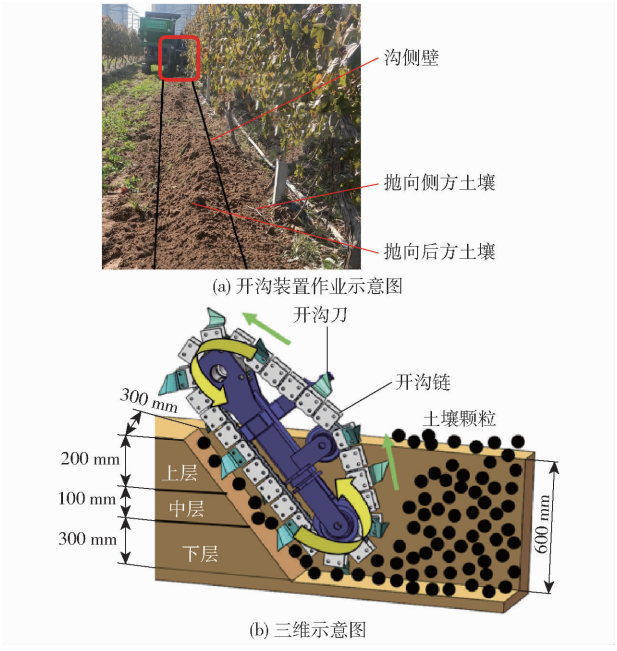
0.47、0.52、0.62，粘聚能量密度分别为 2 694、4 266、4 432 J/m^3。

2 土壤与触土部件仿真参数标定

在触土部件开沟过程中，随开沟深度增加，触土部件与 3 层土壤均会发生接触，因此需准确标定触土部件与土壤的接触参数。触土部件与各层土壤之间选择常用 Hertz－Mindlin(no slip)接触模型。

2.1 触土部件组成

使用的农机具是链式开沟深施机，触土部件主要是开沟刀与开沟链等，开沟深度为 600 mm，开沟宽度为 300 mm，材料为 65Mn 钢。触土部件反向旋转实现破土作业，土层原始结构被破坏，土壤颗粒顺势被带入沟内，并从后方以及侧方抛出(图 11)，实现土壤回填。



(a) 开沟装置作业示意图

(b) 三维示意图

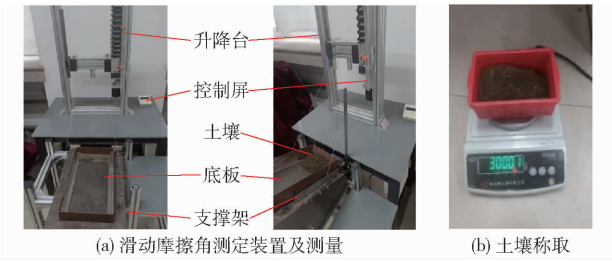
图 11 触土部件作业过程

Fig. 11 Soil-touching components operation process

2.2 滑动摩擦角测定

选用滑动摩擦角作为评价指标，对各层土壤接触参数进行标定。滑动摩擦角测试装置(图 12)主要由支撑架、升降台、底板、控制屏组成，其中底板通过铁丝与升降台连接，可由升降台带动倾斜板绕轴旋转，底板为 65Mn 材质制成。控制屏用于控制升降台运动速度，提升速度取 200 mm/s。

滑动摩擦角是土壤与部件的固有特性，其角度与土壤质量选取无关[10]，依据倾斜板，每层土壤选取 300 g 供试土壤试验。试验前，将供试土壤置于底板一端，通过控制屏调整提升速度并开始提升试验。试验时，底板缓慢提升，直至全部土壤滑落至底部，关停升降台。利用倾角仪(分辨率：0.05°，精度：±0.2°)



(a) 滑动摩擦角测定装置及测量

(b) 土壤称取

图 12 滑动摩擦角测定

Fig. 12 Sliding friction angle measuring

测量底板倾斜角，每层土壤试验 3 次，3 次试验结果取均值作为实际角度，试验后测得上、中、下 3 层土壤滑动摩擦角分别为 27.33°、32.63°、35.77°。

2.3 试验设计与分析

为保证仿真与物理试验一致，在 EDEM 中建立和物理试验相同的仿真模型(图 13)，在颗粒工厂中以速度 0.15 kg/s 分别静态生成土壤，生成时间 1 s，待颗粒稳定后，以相同的速度匀速抬升底板，直至土壤颗粒全部堆积，停止仿真。通过 PicPick 中的 Protractor 功能测量底板倾斜角。

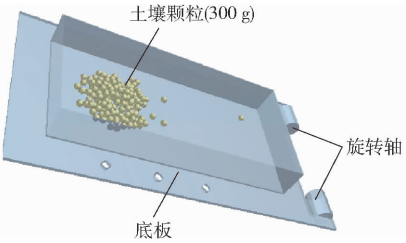


图 13 滑动摩擦角仿真试验

Fig. 13 Sliding friction angle simulation test

2.3.1 试验设计

以 3 层土壤与 65Mn 钢的恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数为试验因素，滑动摩擦角 Z 为试验指标，进行三因素通用旋转中心组合模拟试验。参考文献[10]并根据前文结果，确定 3 个试验因素编码如表 5 所示。

表 5 试验因素编码

Tab. 5 Codes of interaction test factors

编码	因素		
	恢复系数	滚动摩擦因数	静摩擦因数
－1.682	0.22	0.06	0.41
－1	0.32	0.13	0.52
0	0.44	0.23	0.68
1	0.56	0.33	0.84
1.682	0.66	0.40	0.95

依据上述试验设计进行离散元仿真试验，每层土壤分别进行 20 组试验，6 组中心点重复试验，试验方案与结果如表 6 所示，G、I、F 为因素编码。

Z_1、Z_2、Z_3 表示上、中、下 3 层土与 65Mn 钢滑动摩擦角。对仿真结果进行方差分析，得到二次回归

表 6　土壤堆积角仿真试验结果

Tab. 6　Simulation test results of soil angle of repose

序号	因素			Z_1/(°)	Z_2/(°)	Z_3/(°)
	G	I	F			
1	0	0	0	25.19	31.5	35.57
2	−1	1	−1	26.51	28.91	29.23
3	1	−1	1	17.19	29.83	34.09
4	−1.682	0	0	25.54	31.21	34.43
5	0	1.682	0	27.59	36.29	35.48
6	0	0	0	25.29	32.75	35.72
7	1	−1	−1	15.57	28.56	27.16
8	0	0	0	20.38	35.33	34.36
9	−1	−1	1	23.78	31.43	33.54
10	−1	−1	−1	20.26	25.76	29.07
11	0	0	0	20.57	34.60	33.00
12	0	0	−1.682	24.02	23.52	24.3
13	0	−1.682	0	15.39	29.93	28.49
14	1	1	−1	28.19	29.33	29.07
15	1	1	1	28.29	37.13	37.66
16	−1	1	1	25.88	37.47	40.86
17	0	0	0	26.10	33.82	33.30
18	0	0	1.682	26.83	34.45	31.76
19	1.682	0	0	24.72	35.39	32.83
20	0	0	0	24.15	35.09	31.10

模型(表 7),3 个模型 P 值均小于 0.01,失拟项均大于 0.05,表明回归模型显著,在 3 个接触参数中,土壤与触土部件间的滚动摩擦因数均为极显著影响,静摩擦因数在上层土壤与 65Mn 钢作用模型中不显著,在其余两个模型中极为显著。上层土壤与 65Mn 钢模型中,恢复系数和滚动摩擦因数对滑动摩擦角有显著交互作用,中层与 65Mn 钢模型中,滚动摩擦因数和静摩擦因数对滑动摩擦角有显著交互作用,其余交互项影响不显著。剔除不显著项,得到优化后回归方程为

$$Z_1 = 23.57 - 0.63G + 3.85I + 1.92GI \quad (16)$$

$$Z_2 = 33.33 + 2.05I + 3.05F + 1.18IF - 1.79F^2 \quad (17)$$

$$Z_3 = 33.73 + 1.81I + 3.23 - 1.72F^2 \quad (18)$$

2.3.2　交互作用

根据回归方程,对影响显著的交互作用项进行分析,得到响应曲面,如图 14 所示。从图 14a 可以看到,无论恢复系数取何值,滑动摩擦角 Z_1 都会随滚动摩擦因数的增大而增大,但当恢复系数较高时,Z_1 的增大趋势比恢复系数较低时更为明显。相反,当滚动摩擦因数大于 0.23 时,Z_1 会随恢复系数增大而略有增加,但当滚动摩擦因数小于 0.23 时,Z_1 会随恢复系数的增大出现下降趋势,这表明动摩擦因数和恢复系数对 Z_1 的影响之间存在着明显的相互作用。从图 14b 可知,Z_2 随着静摩擦因数和滚动摩擦因数的增加而逐渐增大。当滚动摩擦因数为 0.33 和静摩擦因数 为 0.84 时,Z_2 达到最大值 38°。滚动摩擦因数为 0.13 和静摩擦因数为 0.51 时,Z_2 达到最小值。

以实际滑动摩擦角为目标值,应用 Design-Expert 8.0 软件对回归模型寻求最优解,得到上层

表 7　滑动摩擦角方差分析

Tab. 7　ANOVA of sliding friction angle

类型	方差源	平方和	自由度	F	P
65Mn 钢−上层土壤	模型	267.23	9	8.09	0.001 5 **
	G	5.38	1	1.47	0.253 8
	I	202.5	1	55.21	<0.000 1 **
	F	6.38	1	1.74	0.216 6
	GI	29.35	1	8.05	0.017 6 **
	GF	0.17	1	0.047	0.833 3
	IF	4.02	1	1.10	0.319 9
	G^2	1.88	1	0.51	0.490 7
	I^2	12.36	1	3.37	0.096 3
	F^2	3.12	1	0.85	0.378 1
	残差	36.68	10		
	失拟项	5.19	5	0	0.965 0
	纯误差	31.48	5		
	总值	303.91	19		
65Mn 钢−中层土壤	模型	254.29	9	15.35	<0.000 1 **
	G	5.06	1	2.75	0.128 5
	I	57.23	1	31.08	0.000 2 **
	F	127.22	1	69.10	<0.000 1 **
	GI	0	1	0.085	0.776 4
	GF	3.33	1	1.81	0.208 5
	IF	11.09	1	6.02	0.034 0 *
	G^2	1.52	1	0.83	0.384 6
	I^2	2.22	1	1.20	0.298 2
	F^2	49.35	1	26.81	0.000 4 **
	残差	18.41	10		
	失拟项	7.39	5	0.67	0.664 5
	纯误差	11.02	5		
	总值	272.70	19		
65Mn 钢−下层土壤	模型	248.23	9	7.4	0.002 2 **
	G	4.02	1	1.08	0.323 3
	I	44.73	1	12.00	0.006 1 **
	F	142.83	1	38.33	<0.000 1 **
	GI	0.50	1	0.13	0.721 8
	GF	0.042	1	0.13	0.721 8
	IF	9.72	1	2.61	0.137 3
	G^2	0.89	1	0.24	0.636 4
	I^2	1.60	1	0.43	0.526 5
	F^2	43.23	1	11.60	0.006 7 **
	残差	37.26	10	5.91	
	失拟项	31.96	5	1.44	0.350 7
	纯误差	15.30	5		
	总值	285.50	19		

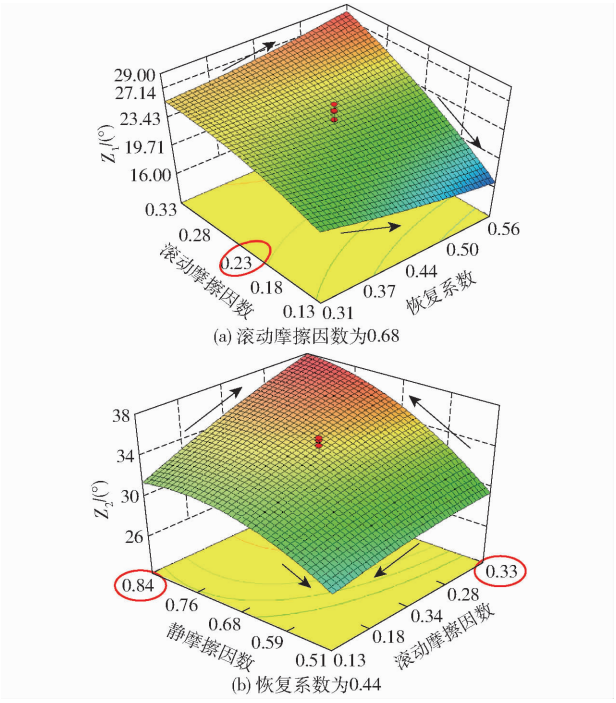


图 14 交互因素对滑动摩擦角的响应面

Fig. 14 Response surface plots of interaction effects on sliding friction angle

土壤与触土部件材质恢复系数、滚动摩擦因数、静摩擦因数为 0.44、0.33、0.72，中层土壤为 0.54、0.16、0.8，下层土壤为 0.51、0.32、0.70。

3 试验验证

3.1 土壤离散元参数验证试验

为验证标定参数准确性，将 1.3.2.3 节得到的最优解进行仿真试验（图 15），得到 3 层土壤仿真堆积角分别为 31.22°、38.82° 和 42.27°，与实际堆积角相对误差分别为 1.7%、2.6% 和 5.0%。优化后参数得到的堆积角与实际土壤堆积角相似度较高，表明参数标定数值准确可靠。

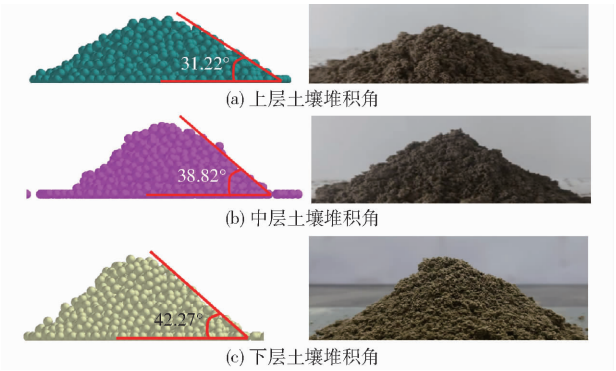


图 15 仿真与物理试验对比

Fig. 15 Comparison of simulation vs. physical tests

3.2 土壤与触土部件仿真参数验证

3.2.1 仿真模型建立与试验

在 EDEM 仿真环境中，建立长 1 700 mm、宽 400 mm、高 650 mm 的无顶盖土槽用于存放生成的土壤颗粒，土槽两侧延伸 0.5 m 仿真域，用于观察土壤颗粒位移。采用 EDEM 中 Block 区块功能批量生成仿真颗粒，先后在距离区块底面 300、400、600 mm 位置处建立颗粒工厂，生成下、中和上层土壤颗粒，得到 3 层土壤离散元仿真模型，如图 16a 所示。在 Solidworks 通过设置三重轴参数，对触土部件进行建模，并将模型保存为 .x_t 文件，导入到 RecurDyn 软件中，通过仿真软件中的 chain 系统建立传动装置，通过 Fixed Connector 实现开沟刀与开沟链固定，建立多体动力学仿真模型，并与 EDEM 离散元仿真软件进行耦合，如图 16b 所示。

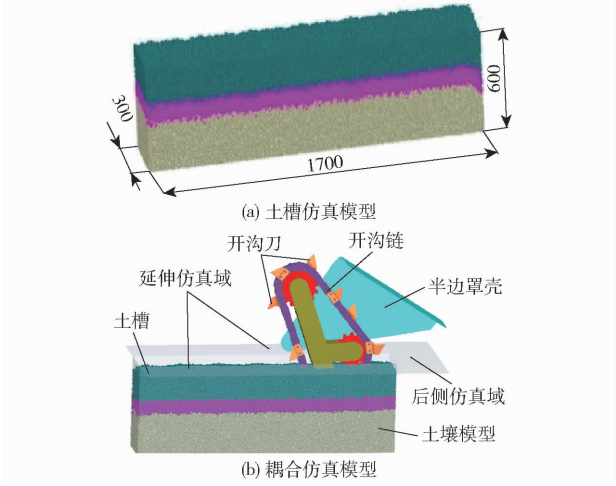


图 16 MBD－EDEM 耦合仿真模型

Fig. 16 Coupling simulation model of MBD－EDEM

在 RecurDyn 中触土部件以速度 0.4 km/h 前进，转速设为 300 r/min，在 EDEM 中设置固定时间步长为 1.14×10^{-4} s，仿真时间为 6 s，网格单元尺寸设置为颗粒平均半径的 2.5 倍。在触土部件开沟抛土作业过程中，触土部件将土壤抛送回沟内和侧方。这种位移是由于触土部件与土壤相互作用产生的，因此也最能反映部件与颗粒间的相互作用，为了验证土壤与触土部件接触参数的准确性，在触土部件后方设置由 65Mn 钢材质制成的半边罩壳（一侧有罩壳，一侧无罩壳），通过比较有罩壳和无罩壳条件下土壤侧向抛掷距离，来检验离散元参数标定准确性。

仿真结束，利用 EDEM 中的 Analyst 模块进行后处理分析（图 17）。分别在有罩壳和无罩壳一侧测量土壤抛掷距离，每次测量等间距取 10 个点，共仿真 2 次，结果如表 8 所示。从表 8 可知，无罩壳一侧的抛土距离明显大于有罩壳一侧；在有罩壳的一侧，平均抛土距离为 104.9 mm，最大抛土距离为 145 mm，最小抛土距离为 86 mm。在无罩壳的一侧，平均抛土距离为 257.8 mm，最大抛土距离为 283 mm，最小

抛土距离为 226 mm。

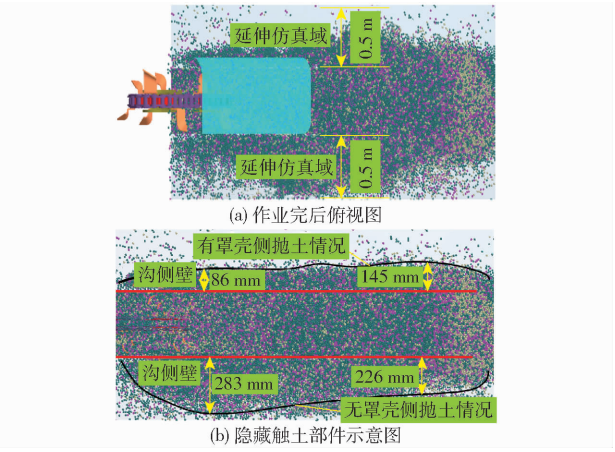


图 17　土壤位移俯视图

Fig. 17　Top views of soil displacement

表 8　抛土距离仿真结果

Tab. 8　Simulation results of soil throwing distance

mm

项目	试验序号	测量点 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
有罩壳	1	145	100	121	98	95	86	91	99	99	93	104.9
	2	137	120	97	115	93	103	95	99	113	98	
无罩壳	1	253	283	258	269	257	235	251	270	261	251	257.8
	2	257	243	226	249	269	265	276	259	260	263	

3.2.2　田间试验与结果分析

田间试验在山东省高密市益丰机械有限公司试验田内进行(图 18),试验田土壤类型与所取样本试验田相同。试验时,拖拉机为触土部件提供动力,作业深度为 600 mm,将挡位挂至爬行挡,以速度 0.4 km/h 前行。作业过程中,大部分土壤被回填到沟中,部分土壤抛向两侧,有罩壳侧的抛土距离明显大于无罩壳一侧(图 18b),与仿真现象一致。重复试验 2 次,作业完成后,选取中间稳定前阶段作为测试阶段,用卷尺分别测量有罩壳和无罩壳一侧抛土距离(图 18c),每隔 0.5 m 测量一次,每行测量 10 次,结果如表 9 所示。

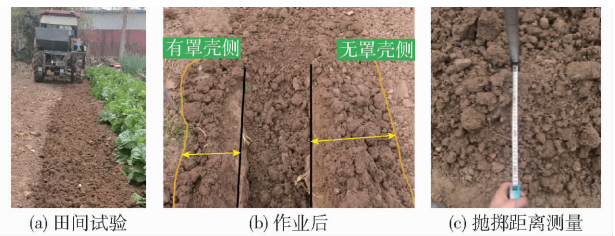


图 18　作业过程及作业现象

Fig. 18　Operation process and operation phenomenon

由表 9 可知,有罩壳一侧抛土距离最大值为 140 mm,最小值为 85 mm,平均抛掷距离为 101.4 mm,与仿真值相差 3.34%;无罩壳一侧抛土距离最大值为 260 mm,最小值为 200 mm,平均值为 235.3 mm,与仿真值相差 8.73%,田间与仿真试验误差较小,均在可接受范围内,表明标定的土壤与触土部件离散元参数准确可靠,标定的参数可用于后续触土部件与深层土壤互作研究。

表 9　田间测试数据

Tab. 9　Field results of soil throwing distance

mm

项目	试验序号	测量点 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	平均值
有罩壳侧	1	117	112	96	101	87	93	95	100	85	111	101.4
	2	119	101	98	89	103	113	110	107	99	91	
无罩壳侧	1	251	225	250	210	260	200	230	245	239	225	235.3
	2	229	244	245	234	223	229	235	254	247	230	

4　结论

(1)选取 HSCM 和 LCM 接触模型对北方露地葡萄园分层砂土模型进行参数标定与优化,通过小球滚动与碰撞反弹试验,测定了滚动摩擦因数和恢复系数,通过圆筒提升试验得到上、中、下 3 层土壤堆积角分别为 31.76°、37.83°和 44.48°。以土壤恢复系数、滚动摩擦因数和粘聚能量密度为试验因素,以各层土壤堆积角为试验指标,设计了通用旋转中心组合模拟试验,得到上、中、下层土壤接触参数的最优解为恢复系数 0.47、0.52 和 0.62,滚动摩擦因数为 0.07、0.17 和 0.21,粘聚能量密度为 2 694、4 266、4 432 J/m^3。该参数下堆积角仿真值与实际值相对误差分别 1.7%、2.6%、5.0%,仿真试验与实际结果基本一致。

(2)基于土壤滑落试验,测得各层土壤的滑动摩擦角为 27.33°、32.63°、35.77°。以土壤与触土部件材质(65Mn 钢)间的静摩擦因数、滚动摩擦因数、恢复系数为试验因素,以滑动摩擦角为试验指标,设计三因素通用旋转中心组合模拟试验,得到各层土壤的滑动摩擦角的回归模型,并对模型寻优,得到上、中、下 3 层土壤的静摩擦因数为 0.72、0.8 和 0.7,恢复系数为 0.44、0.54 和 0.51,滚动摩擦因数为 0.33、0.16 和 0.32。

(3)建立基于 RecurDyn - EDEM 耦合的仿真模型,以最优参数进行仿真与田间试验,得到有罩壳和无罩壳一侧抛土距离平均值分别为 101.4 mm 和 235.3 mm,与仿真误差分别为 3.34% 和 8.73%,误差较小,表明离散元标定参数结果准确。

参　考　文　献

[1]　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)
[2] 张彪, 杨鑫三, 王京云, 等. 基于甘蔗耕地黏土离散元参数标定的流变模型构建[J]. 农业工程学报, 2024,40(13):36 – 44.
ZHANG Biao, YANG Xinsan, WANG Jingyun, et al. Construction of a rheological model based on discrete element parameters calibration of clay from sugarcane cultivated land[J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(13):36 – 44. (in Chinese)
[3] HAJIVAND D R, MALINOWSKA A A. A simplified calibration procedure for DEM simulations of granular material flow[J]. Materials, 2024,17(19):4833.
[4] QIU Yiqing, GUO Zhijun, JIN Xin, et al. Calibration and verification test of cinnamon soil simulation parameters based on discrete element method[J]. Agriculture, 2022,12(8):1082.
[5] 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 Agricultural Machinery, 2023,54(11):49 – 60, 113. (in Chinese)
[6] MUDARISOV S, LOBACHEVSKY Y, FARKHUTDINOV I, et al. Justification of the soil DEM-model parameters for predicting the plow body resistance forces during plowing[J]. Journal of Terramechanics, 2023,109:37 – 44.
[7] 张宏建. 现代苹果园双行开沟施肥机关键技术及试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
ZHANG Hongjian. Research on key technologies and experiments of double row ditching-fertilizer machine for modern apple orchards[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2021. (in Chinese)
[8] 郑侃. 深松旋耕作业次序可调式联合作业机研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
ZHENG Kan. Study on subsoiling and rotary tillage operation adjustble combine machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[9] AIKINS K A, UCGUL M, BARR J B, et al. Review of discrete element method simulations of soil tillage and furrow opening [J]. Agriculture, 2023,13(3):541.
[10] 马帅, 徐丽明, 袁全春, 等. 葡萄藤防寒土与清土部件相互作用的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2020,36(1):40 – 49.
MA Shuai, XU Liming, YUAN Quanchun, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of grapevine antifreezing soil and its interaction with soil-cleaning components[J]. Transactions of the CSAE, 2020,36(1):40 – 49. (in Chinese)
[11] 董朋昆, 高政国. 颗粒滚动阻力本构参数标定试验研究[J]. 上海理工大学学报, 2023,45(6):574 – 583.
DONG Pengkun, GAO Zhengguo. Experimental study for identifying constitutive parameters of rolling resistance between particles[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2023,45(6):574 – 583. (in Chinese)
[12] BU Peng, LI Yanlong, ZHANG Xin, et al. A calibration method of discrete element contact model parameters for bulk materials based on experimental design method[J]. Powder Technology, 2023,425:118596.
[13] DU Chuanxing, HAN Dianlei, SONG Zhiqiang, et al. Calibration of contact parameters for complex shaped fruits based on discrete element method: the case of pod pepper (*Capsicum annuum*)[J]. Biosystems Engineering, 2023,226:43 – 54.
[14] MA Wenpeng, ZHANG Shining, YIN Xiang, et al. A calibration of the contact parameters of a sesbania seed discrete element model based on RSM[J]. Processes, 2023,11(12):3381.
[15] 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)
[16] ZHANG Xiongchu, CHEN Bingqi, ZHENG Zhian, et al. A novel method of automatic peeling for *Poria cocos* based on image processing[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2023,16(2):267 – 274.
[17] TAN Peng, WIJESURIYA H S, SITAR N. XRCT image processing for sand fabric reconstruction[J]. Granular Matter, 2024,26(1):15.
[18] 王小琴,俞高红,刘霓红, 等. 温室劣苗基质离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2023,54(12):359 – 366.
WANG Xiaoqin, YU Gaohong, LIU Nihong, et al. Calibration of discrete element simulation parameters for greenhouse inferior seedling substrate[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(12):359 – 366. (in Chinese)
[19] BAI Shenghe, YUAN Yanwei, NIU Kang, et al. Simulation parameter calibration and experimental study of a discrete element model of cotton precision seed metering[J]. Agriculture, 2022,12(6):870.
[20] LIU Yujie, GUO Yanchao, WANG Xiaole, et al. Crop root rows detection based on crop canopy image[J]. Agriculture, 2024,14(7):969.
[21] 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)

[22] 张宏建, 陈修波, 李宏立, 等. 控释肥颗粒群仿真接触参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(6):80 – 90.
ZHANG Hongjian, CHEN Xiubo, LI Hongli, et al. Simulated contact parameters calibration and experiment of controlled-release fertilizer particles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(6):80 – 90. (in Chinese)

[23] 顿国强, 郭娜, 纪欣鑫, 等. 红萝卜侧面悬置排种勺式精量排种器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024,55(5):77 – 86, 97.
DUN Guoqiang, GUO Na, JI Xinxin, et al. Design and experiment of side-hung seed-rowing spoon type precision seed metering device for radish[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(5):77 – 86, 97. (in Chinese)

[24] 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 Jiaxi, ZHANG Peng, ZHANG Hu, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(1):76 – 84, 108. (in Chinese)

(上接第 **157** 页)

[17] 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)

[18] LI S, HUAN X, WANG T, et al. Biomechanical properties and discrete element modeling of PSR stalks during silage harvest [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 217: 108644.

[19] REN J, LIU X, YANG W, et al. Rhizosphere soil properties, microbial community, and enzyme activities: short-term responses to partial substitution of chemical fertilizer with organic manure[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 299: 113650.

[20] 黄振华,陈海涛,房欣,等. 含水率对大豆秸秆流动力学性能的影响[J]. 大豆科学, 2011, 30(5): 847 – 850.
HUANG Zhenhua, CHEN Haitao, FANG Xin, et al. Flowability parameters for chopped soybean stalk[J]. Soybean Science, 2011, 30(5): 847 – 850. (in Chinese)

[21] 徐爽,朱浮声,张俊. 离散元法及其耦合算法的研究综述[J]. 力学与实践, 2013, 35(1): 8 – 20.
XU Shuang, ZHU Fusheng, ZHANG Jun. A overview of the discrete method and its coupling algorithms[J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(1): 8 – 20. (in Chinese)

[22] 李晖,王宝钢,史子昂,等. 基于 EDEM 的膨化饲料离散元参数标定及其破碎机制研究[J]. 中国饲料, 2024(7): 126 – 132.
LI Hui, WANG Baogang, SHI Ziang, et al. Calibration of discrete element parameters of extruded feed based on EDEM and study on its crushing mechanism[J]. China Feed, 2024(7): 126 – 132. (in Chinese)

[23] 郭菊叶,蒋芳玲,吴震,等. 不同品种薹用大蒜花薹发育进程及其形态和解剖学观察[J]. 上海农业学报, 2009, 25(3): 42 – 46.
GUO Juye, JIANG Fangling, WU Zheng, et al. The observation of organ development of different bolting garlic cultivars in morphology and anatomy[J]. Acta Agriculture Shanghai, 2009, 25(3): 42 – 46. (in Chinese)

[24] 孟杰,孟文俊. 影响 EDEM 仿真结果的因素分析[J]. 机械工程与自动化, 2014(6): 49 – 51.
MENG Jie, MENG Wenjun. Analysis of influencing factor on results of EDEM simulation[J]. Mechanical Engineering and Aotomation, 2014(6): 49 – 51. (in Chinese)

[25] 文恩杨,李玉华,牛子孺,等. 蒜种颗粒离散元模型参数标定[J]. 农机化研究, 2021, 43(5): 160 – 167.
WANG Enyang, LI Yuhua, NIU Ziru, et al. Parameters calibration of discrete element model for garlic particles[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(5): 160 – 167. (in Chinese)