doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.10.010

黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定

田辛亮[1,2]　丛　旭[1,2]　齐江涛[1,2]　郭　慧[1,2]　李　茂[1,2]　范旭辉[3]

(1. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022;
3. 吉林省农业机械研究院, 长春 130022)

摘要: 由于黑土区保护性耕作中关键农机部件设计优化过程中缺乏准确的离散元仿真模型参数,在一定程度上制约了机具的优化改进。以黑土区玉米秸秆-土壤混料为研究对象,构建玉米秸秆-土壤混料离散元仿真模型,采用物理试验与 EDEM 仿真试验相结合的方法,选用 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型进行离散元仿真接触参数标定。首先,采用圆筒提升的方法确定玉米秸秆-土壤混料的实际堆积角,利用 Design-Expert 软件中 Plackett - Burman 试验筛选出对堆积角有显著影响的参数为:土壤-土壤滚动摩擦因数、土壤-钢静摩擦因数、秸秆-土壤滚动摩擦因数、土壤 JKR 表面能;进一步通过最陡爬坡试验确定 4 个参数的最优取值范围,根据 Box - Behnken 试验原理以堆积角为响应值,建立堆积角与显著参数的二次回归模型;以实际堆积角为目标,利用软件寻优功能对显著参数进行优化并得到最优参数组合:秸秆-土壤滚动摩擦因数 0.16、土壤-土壤滚动摩擦因数 0.24、土壤-钢静摩擦因数 0.75、土壤 JKR 表面能 0.67 J/m^2。通过仿真试验对最优参数组合进行对比验证,仿真堆积角与物理试验堆积角相对误差为 1.64%。研究结果表明标定的参数真实可靠,可为黑土区玉米秸秆-土壤混料的离散元仿真提供理论参考。

关键词: 保护性耕作; 黑土区; 玉米秸秆-土壤混料; 参数标定; 堆积角; 离散元

中图分类号: S347.7　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)10-0100-09　　**OSID**:

Parameter Calibration of Discrete Element Model for Corn Straw - Soil Mixture in Black Soil Areas

TIAN Xinliang[1,2]　CONG Xu[1,2]　QI Jiangtao[1,2]　GUO Hui[1,2]　LI Mao[1,2]　FAN Xuhui[3]

(1. *Key Laboratory of Bionic Engineering*, *Ministry of Education*, *Jilin University*, *Changchun* 130022, *China*
2. *College of Biological and Agricultural Engineering*, *Jilin University*, *Changchun* 130022, *China*
3. *Jilin Province Academy of Agricultural Machinery*, *Changchun* 130022, *China*)

Abstract: Due to the lack of accurate discrete element simulation model parameters in the design optimization process of key agricultural machinery components under conservation tillage in black soil area, the optimization improvement of the machinery and tools is restricted to a certain extent. In order to obtain the accurate discrete element simulation contact parameters of the corn straw - soil mixture in the black soil area, the discrete element simulation model of the corn straw - soil mixture was constructed. The physical test and the EDEM simulation test were combined and the Hertz - Mindlin with JKR contact model was used for discrete simulation contact parameter calibration. Using the Plackett - Burman test in the Design-Expert software, the parameters that had a significant impact on the repose angle were selected as follows: soil - soil rolling friction coefficient, soil - steel static friction coefficient, straw - soil rolling friction coefficient, soil JKR surface energy; and the optimal value range of the four parameters were further determined through the steepest climbing test. According to the Box - Behnken test principle, the repose angle was used as the response value to establish a quadratic regression model between the repose angle and the significant parameters; the actual repose angle was used as the target, and the software was used to optimize. The function optimized the significant parameters and the optimal parameter combination was obtained as follows: straw - soil rolling friction coefficient was 0.16, soil - soil rolling friction coefficient was 0.24, soil - steel static friction coefficient was 0.75, and soil JKR surface energy

收稿日期: 2021-08-03　修回日期: 2021-08-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31971783)

作者简介: 田辛亮(1991—),男,博士生,主要从事保护性耕作及其智能装备研究,E-mail: 1139287905@qq.com

通信作者: 齐江涛(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事精准农业与智能农业装备研究,E-mail: qijiangtao@jlu.edu.cn

was 0.67 J/m^2. The optimal parameter combination was compared and verified through simulation experiments, and the relative error between the simulated repose angle and the physical test repose angle was 1.64%. The research results showed that the calibrated parameters were true and reliable, which can provide a theoretical reference for the discrete element simulation of the corn straw – soil mixture in the black soil area.

Key words: conservation tillage; black soil area; corn straw – soil mixture; parameter calibration; repose angle; discrete element

0　引言

保护性耕作技术是以机械化为手段,利用秸秆或残茬覆盖于地表,对于提高土壤有机质含量及降低土壤风蚀水蚀具有重要作用[1-2]。玉米秸秆是一种重要的资源,对提高土壤肥力具有重要作用[3]。秸秆还田是一项有效的保护性耕作措施,可提高土壤的蓄水保墒能力,改善土壤结构,降低秸秆焚烧对环境的危害[4-5]。采用松耙联合整地机将玉米秸秆切断,部分玉米秸秆混入耕层,可达到加速秸秆腐烂、培肥地力的目的[6]。玉米秸秆–土壤混料特性复杂,采用常规方法难以准确获得相关接触参数,故利用离散元仿真模拟的方法研究土壤及玉米秸秆的相互作用规律,对秸秆还田及黑土区土壤保护具有重要意义[7]。

随着信息技术的发展,离散元法在农业装备研究中应用越来越广泛[8-9]。构建离散元仿真模型,本征参数可通过试验测出,由于颗粒间接触力学特性复杂,部分接触物理参数难以通过常规试验获取,因此近几年国内外学者针对部分接触物理参数难以准确获取的问题,提出了基于离散元法对颗粒物料进行虚拟标定的方法[10-11]。目前,研究人员针对土壤[12-14]、种子[15-16]、秸秆[17]、肥料[18-19]等利用离散元模型进行了仿真参数标定。文献[20]提出了一种通过试验与模拟相结合系统地标定沙土颗粒相互作用参数的方法;文献[21]利用试验测定及仿真模拟相结合的方法对微型薯颗粒离散元参数进行了标定和校准;文献[16]结合台架试验和仿真试验,对三七种子进行仿真参数标定,并选取三七精密排种器进行了验证试验;文献[17]利用离散元软件对玉米秸秆的接触物理参数进行仿真标定;文献[18]对4种不同测试方法进行筛选试验,提出了一种基于颗粒物料整体特性的摩擦因数标定方法;文献[22]将非线性弹性和线性滞回弹簧(塑性)接触模型的模拟结果与扫描式耕作工具的试验结果进行比较,得到了土壤接触物理参数的变化规律。综上所述,国内外研究人员的离散元仿真参数研究对象主要是单独的土壤、种子、秸秆、肥料等,但对玉米秸秆–土壤混料的研究却鲜有报道。黑土区保护性耕作模式中玉米秸秆–土壤混料没有明显规律可寻,且有限元玉米秸秆–土壤混料模型不能模拟土壤及秸秆的运动过程,因此有必要对其展开研究。

本文以黑土区保护性耕作模式中玉米秸秆–土壤混料为研究对象,结合物理试验与仿真试验,应用EDEM软件对玉米秸秆–土壤混料的接触参数进行标定。以堆积角为响应值,采用图像处理方法测量混料堆积角,依次通过Plackett – Burman筛选试验、爬坡试验和Box – Behnken试验对玉米秸秆–土壤混料堆积角进行离散元仿真和校准,以确定较优的玉米秸秆–土壤混料离散元仿真参数值。

1　材料与方法

1.1　试验材料

本文研究对象为玉米秸秆–土壤混料,来源于长春市农安县开安镇试验基地(44°10′N,120°10′E),该基地种植作物为玉米,土壤类型为黑钙土,土壤pH值为7.01,年降水量535 mm。试验样品取自2020年秋季松耙联合整地机作业后,经田间取样检测,玉米秸秆在土壤中的混入深度主要为0 ~ 20 cm,故本文取样深度为0 ~ 20 cm。取样测量利用S型法按照“随机、等量和多点”的原则进行[23],选取500 g玉米秸秆–土壤混料为样品,将样品中的土壤与秸秆进行分离,分别测量土壤与秸秆的密度;依据机具作业后秸秆实际形状,秸秆密度按照文献[17]的方法进行测量。采用干燥法测量土壤与秸秆的含水率;将采集土样进行干燥,使用不同孔径的细筛进行筛分,结果表明土壤粒径分布范围为2 ~ 4 mm。样品的基本性质如表1所示。

表1　样品基本性质

Tab.1　Basic properties of sample

材料	密度/(kg·m^{-3})	含水率/%
土壤	1 300.0	18.65
秸秆	115.5	24.37

1.2　试验方法

运用堆积角物理试验与EDEM仿真试验相结合的方法对玉米秸秆–土壤混料的离散元模型参数进行标定,采用圆筒提升法[24]进行玉米秸秆–土壤

混料堆积角试验,测量玉米秸秆-土壤混料堆积角的实际均值。基于 EDEM 软件进行仿真试验,应用 Design-Expert 软件进行 Plackett - Burman 筛选试验设计,并进行多因素显著性分析筛选出对玉米秸秆-土壤混料有显著影响的参数;利用最陡爬坡试验确定显著性影响参数最优区间,根据 Box - Behnken 试验建立并优化玉米秸秆-土壤混料堆积角与显著性参数的回归模型,并对参数进行综合优化得到最优参数组合。最后利用最优参数组合进行仿真试验,对比玉米秸秆-土壤混料仿真堆积角与实际堆积角的差异,验证标定模型参数的准确性。

1.3 玉米秸秆-土壤混料堆积角物理试验

玉米秸秆-土壤混料堆积角物理试验装置如图 1 所示,由 WDW - 20 型万能试验机、钢制圆筒、钢板组成。钢制圆筒高度与直径比为 3∶1[25-26],圆筒高度为 210 mm,直径为 70 mm,圆筒底部与钢板(300 mm × 300 mm)接触,圆筒内装填玉米秸秆-土壤混料。利用 WDW - 20 型万能试验机以 0.05 m/s 的速度匀速提升圆筒[27],混料经圆筒底部落于钢板上,待混料堆稳定后利用相机垂直拍照,相机镜头与万能试验机正面平行,相机底面与万能试验机正面垂直,得到混料堆的正视图像。应用 Matlab 软件进行灰度处理,提取边缘轮廓并进行线性拟合以获得玉米秸秆-土壤混料的堆积角。重复试验 5 次求平均值,得到玉米秸秆-土壤混料的堆积角为 40.17°。

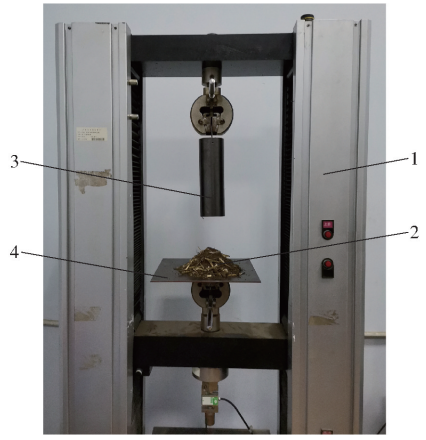


图 1 堆积角物理试验

Fig. 1 Physical test of repose angle

1. 万能试验机 2. 玉米秸秆-土壤混料堆 3. 钢制圆筒 4. 钢板

2 堆积角仿真试验

2.1 接触模型选取

玉米秸秆-土壤混料因其本身具有一定的湿度,故颗粒间存在着粘附现象。Hertz - Mindlin with JKR 接触模型是一种凝聚力接触模型,该模型用表面能代表颗粒间的相互吸引力,适用于模拟湿粘性颗粒和团聚的物料[28],模型的法向弹性力的实现基于 Johnson - Kendall - Roberts(JKR)理论,基于法向重叠量、表面能及相互作用,计算公式为

$$F_{JKR} = -4\sqrt{\pi\gamma E^*}\alpha^{\frac{3}{2}} + \frac{4E^*}{3R^*}\alpha^3 \tag{1}$$

$$\delta = \frac{\alpha^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha}{E^*}} \tag{2}$$

其中

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \tag{3}$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \tag{4}$$

式中 F_{JKR}——JKR 法向弹性力,N

E^*——等效弹性模量,Pa

δ——两接触颗粒之间法向重叠量,m

α——两接触颗粒间的接触圆半径,m

γ——表面能,N/m

R^*——等效接触半径,m

R_1、R_2——两颗粒的接触半径,m

ν_1、ν_2——两接触颗粒泊松比

E_1、E_2——两接触颗粒弹性模量,Pa

当 γ 为 0 时,JKR 法向力与 Hertz - Mindlin 法向力 F_{Hertz} 相同,即

$$F_{JKR} = F_{Hertz} = \frac{4}{3}E^*\sqrt{R^*}\delta^{\frac{3}{2}} \tag{5}$$

若颗粒不是直接接触,该模型也可以提供吸引凝聚力,颗粒间的非零凝聚力最大间隙为

$$\delta_c = \frac{\alpha_c^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha_c}{E^*}} \tag{6}$$

$$\alpha_c = \left[\frac{9\pi\gamma R^*}{2E^*} - \left(\frac{3}{4} - \frac{1}{\sqrt{2}}\right)\right]^{\frac{1}{3}} \tag{7}$$

式中 δ_c——颗粒间有非零凝聚力时的法向最大间隙,m

α_c——颗粒间有非零凝聚力时的切向最大间隙,m

当颗粒并非实际接触且间隙小于 δ_c 时,凝聚力达到最大值,即

$$F_{pullout} = -\frac{3}{2}\pi\gamma R^* \tag{8}$$

当选用 JKR 模型模拟含水率较高的颗粒时,2 个颗粒分开所需要的力取决于表面能和接触角,计算公式为

$$F_{pullout} = -2\pi\gamma\cos\theta\sqrt{R_1R_2} \tag{9}$$

式中 θ——两颗粒的接触角

玉米秸秆-土壤混料本身含水率相对较高,混料颗粒间受水分子影响存在着粘附现象,而 JKR 模型

中表面能可较好模拟颗粒之间的粘结力，故本文选用 Hertz－Mindlin with JKR 接触模型，并依此进行参数标定。

2.2　仿真模型建立

应用离散元仿真软件及 EDEM 建立仿真模型，土壤颗粒采用随机分布的方法生成[12]，以球体作为仿真颗粒模型，使用不同孔径的细筛进行筛分后确定土壤粒径为 2～4 mm。玉米秸秆形状近似于长条状，松耙联合整地机对全量秸秆覆盖的耕地进行作业，秸秆在作业过程中经过 2 次切断，依据随机多点的原则对作业后的秸秆长度进行测量，确定秸秆长度为 40 mm[4]。目前玉米秸秆在离散元软件中建模时被认为刚性体，通过球面堆积的方法组合形成玉米秸秆，故离散元模型设置秸秆长度为 40 mm，由半径为 3 mm 的 12 个基本球体相连接组合而成。在 SolidWorks 软件中建立三维钢制圆筒模型，把模型另存为 IGS 格式，导入 EDEM 软件中；钢板模型由 EDEM 软件生成，材料属性设置为钢，仿真试验中物料的本征参数如表 2 所示。

表 2　物料本征参数

Tab. 2　Material intrinsic parameters

参数	数值	来源
土壤泊松比 ν_1	0.46	文献[12]
土壤剪切模量 G_1/MPa	1	文献[12]
秸秆泊松比 ν_2	0.4	文献[17]
秸秆剪切模量 G_2/MPa	1	文献[17]
钢材泊松比 ν_3	0.3	文献[20]
钢材剪切模量 G_3/MPa	79 000	文献[20]
钢材密度 ρ/(kg·m^{-3})	7 850	文献[20]

2.3　EDEM 软件仿真设置

仿真过程中，在钢制圆筒上设置颗粒工厂，颗粒的生成方式设置为 static，数据保存间隔为 0.01 s，重力加速度为 9.81 m/s^2。根据田间筛分实测结果，土壤与秸秆质量比为 99∶1。土壤和秸秆按照质量比采用分层交错生成的方式，各生成 7 层。为保证土壤与秸秆混合的均匀性，参照文献[25]的试验方法，采用旋转圆筒的方法实现土壤与秸秆的均匀混合。经多次重复试验结果对比，颗粒生成后设置圆筒转速为 60 r/min，圆筒内物料均匀混合时间为 10 s。待颗粒达到稳定状态后，圆筒以 0.05 m/s 的速度匀速竖直向上运动，颗粒在重力作用下滑落在钢板上，直至所有颗粒停止运动并形成稳定颗粒堆并测量堆积角，如图 2、3 所示。

在前期反复试验的基础上，参照文献[12,17,21,23,25]的参数选取范围，确定玉米秸秆-土壤混料接触物理参数范围如表 3 所示。

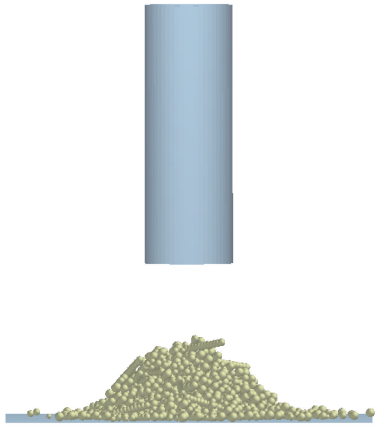


图 2　堆积角仿真试验

Fig. 2　Simulation test of repose angle

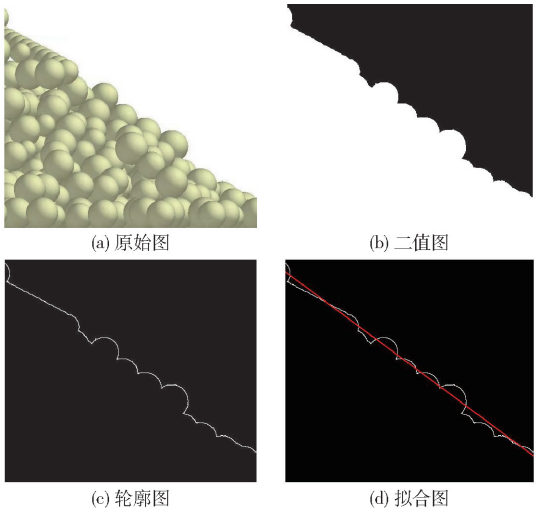


图 3　Matlab 软件线性拟合

Fig. 3　Linear fitting of Matlab software

表 3　离散元仿真参数与水平

Tab. 3　Parameters and level required in DEM simulation

参数	水平		
	－1	0	1
秸秆-土壤恢复系数	0.2	0.4	0.6
秸秆-土壤静摩擦因数	0.3	0.5	0.7
秸秆-土壤滚动摩擦因数	0.05	0.15	0.25
土壤-土壤恢复系数	0.2	0.4	0.6
土壤-土壤静摩擦因数	0.2	0.6	1.0
土壤-土壤滚动摩擦因数	0.05	0.15	0.25
土壤-钢静摩擦因数	0.4	0.6	0.8
土壤-钢滚动摩擦因数	0.05	0.15	0.25
土壤 JKR 表面能/(J·m^{-2})	0.2	0.5	0.8
秸秆-土壤 JKR 表面能/(J·m^{-2})	0.3	0.5	0.7

3　结果与分析

3.1　Plackett－Burman 筛选试验及显著性分析

利用 Design-Expert 软件进行 Plackett－Burman 筛选试验设计，以玉米秸秆-土壤混料堆积角为试验指标，筛选出对指标存在显著性影响的参数。筛选

试验共计 12 组，$a \sim j$ 分别为秸秆-土壤恢复系数、秸秆-土壤静摩擦因数、秸秆-土壤滚动摩擦因数、土壤-土壤恢复系数、土壤-土壤静摩擦因数、土壤-土壤滚动摩擦因数、土壤-钢静摩擦因数、土壤-钢滚动摩擦因数、土壤 JKR 表面能、秸秆-土壤 JKR 表面能的参数水平值，k 为虚拟空白列。

Plackett - Burman 筛选试验设计如表 4 和图 4 所示，利用 Design-Expert 软件对表 4 中数据进行处理，得到各参数对堆积角影响显著性顺序如表 5 所示。由表 5 可知，显著性由大到小排序为：土壤-土壤滚动摩擦因数、土壤-钢静摩擦因数、秸秆-土壤滚动摩擦因数、土壤 JKR 表面能、土壤-土壤恢复系数、秸秆-土壤 JKR 表面能、土壤-钢滚动摩擦因数、秸秆-土壤静摩擦因数、秸秆-土壤恢复系数、土壤-土壤静摩擦因数。其中对堆积角贡献度较大的 4 个因素分别为：土壤-土壤滚动摩擦因数、土壤-钢静摩擦因数、秸秆-土壤滚动摩擦因数、土壤 JKR 表面能，合计贡献度 93.45%，其他 6 个因素对堆积角贡献度较小，均小于 5%。因此，结合贡献度和显著性顺序，选取土壤-土壤滚动摩擦因数、土壤-钢静摩擦因数、秸秆-土壤滚动摩擦因数、土壤 JKR 表面能这 4 个因素进行后续最陡爬坡试验。

表 4 筛选试验设计及结果

Tab. 4 Results of Plackett - Burman design (P - BD) test

试验序号	因素											堆积角/(°)
	a	*b*	*c*	*d*	*e*	*f*	*g*	*h*	*i*	*j*	*k*	
1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	39.82
2	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	34.16
3	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	42.08
4	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	40.65
5	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	41.38
6	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	36.23
7	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	35.01
8	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	33.98
9	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	34.27
10	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	40.56
11	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	33.14
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	30.21

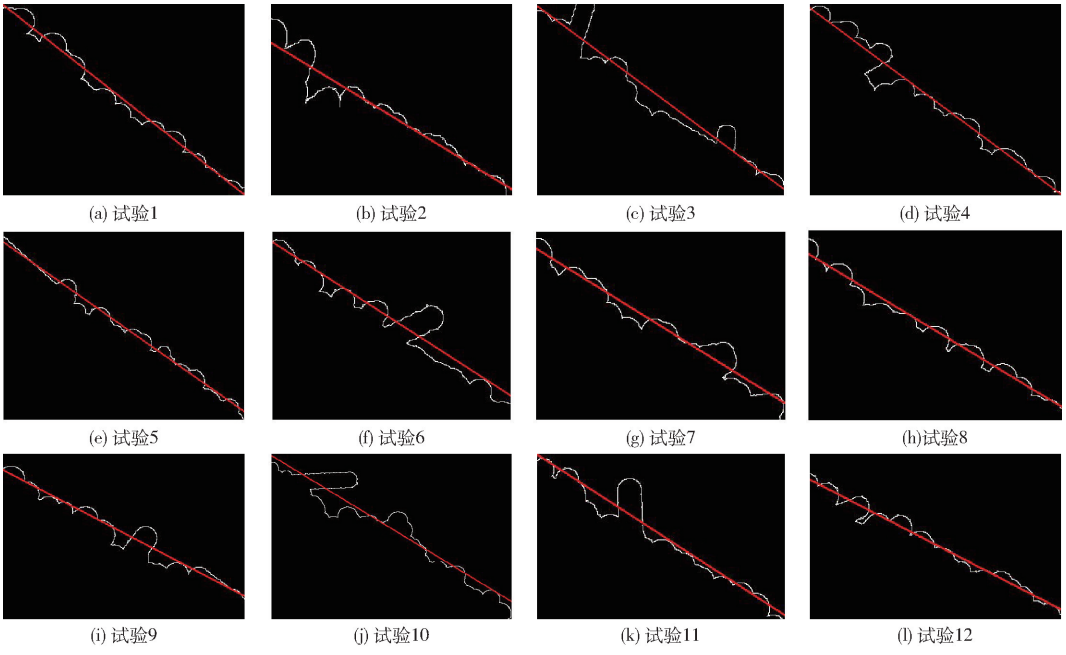


图 4 堆积角线性拟合结果

Fig. 4 Linear fitting of repose angle

3.2 最陡爬坡试验分析

在分析 Plackett - Burman 试验结果的基础上，对筛选出的 4 个贡献度较大的因素（土壤-土壤滚动摩擦因数、土壤-钢静摩擦因数、秸秆-土壤滚动摩擦因数、土壤 JKR 表面能）进行最陡爬坡试验，计算实际堆积角与仿真堆积角的相对误差，以确定仿真

表 5　Plackett－Burman 筛选试验结果分析

Tab. 5　Analysis of Plackett－Burman design test results

试验因素	均方和	贡献度/%	P	显著性排序
a	0.27	0.16	0.206 9	9
b	0.39	0.23	0.176 0	8
c	36.65	21.73	0.018 5	3
d	5.54	3.28	0.047 6	5
e	0.12	0.07	0.301 6	10
f	52.71	31.26	0.015 4	1
g	51.05	30.08	0.015 7	2
h	0.88	0.52	0.118 1	7
i	17.50	10.38	0.026 8	4
j	3.49	2.07	0.059 8	6

参数较优范围区间。仿真过程中，对堆积角贡献度较小的参数取中间水平值，即秸秆-土壤恢复系数 0.4、秸秆-土壤静摩擦因数 0.5、土壤-土壤恢复系数 0.4、土壤-土壤静摩擦因数 0.6、土壤-钢滚动摩擦因数 0.15、秸秆-土壤 JKR 表面能 0.5 J/m^2。最陡爬坡试验设计及结果如表 6 所示，结果显示，在第 4 组试验中，堆积角相对误差最小，可以确定最优区间在第 4 组参数值附近，因此将第 4 组参数值作为中间水平，第 3 组和第 5 组参数值分别作为低水平和高水平进行后续 Box－Behnken 试验。

表 6　最陡爬坡试验设计及结果

Tab. 6　Design and results of climbing test

试验序号	秸秆-土壤滚动摩擦因数	土壤-土壤滚动摩擦因数	土壤-钢静摩擦因数	土壤 JKR 表面能/(J·m^{-2})	堆积角/(°)	相对误差/%
1	0.05	0.05	0.40	0.20	23.58	41.30
2	0.10	0.10	0.50	0.35	29.74	25.96
3	0.15	0.15	0.60	0.50	35.25	12.25
4	0.20	0.20	0.70	0.65	41.97	4.48
5	0.25	0.25	0.80	0.80	47.51	18.27

3.3　Box－Behnken 试验设计

为寻求仿真试验中土壤-土壤滚动摩擦因数、土壤-钢静摩擦因数、秸秆-土壤滚动摩擦因数、土壤 JKR 表面能的最优参数组合，基于爬坡试验结果，以堆积角为试验指标，根据 Box－Behnken 试验原理[29-30]进行四因素三水平试验设计，共进行 29 次试验，试验方案如表 7 所示。

利用 Design-Expert 软件对试验结果进行多元拟合分析，建立堆积角与 4 个自变量间的二阶回归模型，其二次回归方程为

$$\begin{aligned}Y = {} & 41.48 - 0.21c + 1.80f + 3.24g - 1.56i + \\ & 0.90cf - 0.72cg - 0.50ci - 1.85fg - \\ & 2.20fi - 1.19gi - 2.46c^2 - 0.22f^2 - \\ & 1.51g^2 - 1.68i^2 \end{aligned} \tag{10}$$

表 7　试验方案及结果

Tab. 7　Test scheme and results

试验序号	因素				堆积角
	c	f	g	i	Y/(°)
1	－1	1	0	0	40.32
2	0	－1	0	－1	35.78
3	－1	0	0	1	36.17
4	0	0	－1	－1	36.43
5	0	1	1	0	43.15
6	1	－1	0	0	36.86
7	0	－1	0	1	37.54
8	0	0	0	0	42.03
9	－1	－1	0	0	39.42
10	0	－1	1	0	43.37
11	0	1	－1	0	39.68
12	0	1	0	－1	44.79
13	0	0	1	－1	45.16
14	1	0	－1	0	34.35
15	－1	0	－1	0	33.52
16	0	0	－1	1	35.21
17	0	0	0	0	42.48
18	－1	0	1	0	40.89
19	0	0	0	0	40.53
20	0	－1	－1	0	32.51
21	0	1	0	1	37.74
22	0	0	1	1	39.16
23	1	0	0	1	35.29
24	1	0	1	0	38.82
25	1	1	0	0	41.36
26	0	0	0	0	40.71
27	1	0	0	－1	39.38
28	－1	0	0	－1	38.25
29	0	0	0	0	41.67

回归模型方差分析结果如表 8 所示，该回归模型 $P < 0.000\,1$，失拟项 $P = 0.375\,5 > 0.05$，决定系数 $R^2 = 0.956\,8$，校正决定系数 $R^2_{adj} = 0.913\,7$，均大于 0.9，试验精密度为 17.481，模型具有良好的精确度，表明模型可较好反映堆积角与土壤-土壤滚动摩擦因数、土壤-钢静摩擦因数、秸秆-土壤滚动摩擦因数、土壤 JKR 表面能之间的关系。由模型 F 值可知，4 个因素对堆积角影响由大到小为土壤-钢静摩擦因数、土壤-土壤滚动摩擦因数、土壤 JKR 表面能、秸秆-土壤滚动摩擦因数。f、g、i、fg、fi、c^2、g^2、i^2 对堆积角影响极显著；gi 对堆积角影响显著；c、cf、cg、ci、f^2 对堆积角影响不显著。

在保证模型显著的情况下，对模型进行优化，去除对堆积角影响不显著的项（c、cf、cg、ci、f^2），优化后方差分析结果如表 9 所示，试验精密度为20.095，提高了试验精密度，说明模型可较好预测堆积角与 4 个因素的关系。优化后二次回归方程为

表 8 回归模型方差分析

Tab. 8 ANOVA of quadratic model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	295.53	14	21.11	22.17	<0.000 1 **
c	0.53	1	0.53	0.55	0.470 1
f	38.74	1	38.74	40.68	<0.000 1 **
g	125.78	1	125.78	132.07	<0.000 1 **
i	29.08	1	29.08	30.53	<0.000 1 **
cf	3.24	1	3.24	3.40	0.086 4
cg	2.10	1	2.10	2.21	0.159 5
ci	1.01	1	1.01	1.06	0.320 5
fg	13.65	1	13.65	14.34	0.002 0 **
fi	19.40	1	19.40	20.38	0.000 5 **
gi	5.71	1	5.71	6.00	0.028 1 *
c^2	39.29	1	39.29	41.26	<0.000 1 **
f^2	0.33	1	0.33	0.34	0.566 6
g^2	14.76	1	14.76	15.50	0.001 5 **
i^2	18.25	1	18.25	19.16	0.000 6 **
残差	13.33	14	0.95		
失拟项	10.50	10	1.05	1.48	0.375 5
误差	2.83	4	0.71		
总和	308.86	28			

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

$$Y=41.34+1.80f+3.24g-1.56i-1.85fg-2.20fi-1.20gi-2.42c^2-1.47g^2-1.63i^2 \tag{11}$$

表 9 回归模型优化方差分析

Tab. 9 ANOVA of optimization quadratic model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	288.32	9	32.04	29.64	<0.000 1 **
f	38.74	1	38.74	35.84	<0.000 1 **
g	125.78	1	125.78	116.36	<0.000 1 **
i	29.08	1	29.08	26.90	<0.000 1 **
fg	13.65	1	13.65	12.63	0.002 1 **
fi	19.40	1	19.40	17.95	0.000 4 **
gi	5.71	1	5.71	5.28	0.033 0 *
c^2	39.35	1	39.35	36.41	<0.000 1 **
g^2	14.46	1	14.46	13.38	0.001 7 **
i^2	17.98	1	17.98	16.63	0.000 6 **
残差	20.54	19	1.08		
失拟项	17.70	15	1.18	1.67	0.331 8
误差	2.83	4	0.71		
总和	308.86	28			

3.4 回归模型交互效应分析

本试验以堆积角为响应值，利用 Design-Expert 软件对数据进行多元回归拟合，生成响应面如图 5 所示，进一步分析各影响因素对响应值的交互作用。由图 5a 可知，土壤-土壤滚动摩擦因数 f 和土壤-钢静摩擦因数 g 响应面曲线走势相似，表明两个因素对堆积角影响基本相同；由图 5b 可知，相对于土壤 JKR 表面能 i，土壤-土壤滚动摩擦因数 f 的响应面曲线较陡，表明其对堆积角影响更为显著；由图 5c 可知，相对于土壤 JKR 表面能 i，土壤-钢静摩擦因数 g 的响应面坡度较大，表明其对堆积角影响较大。

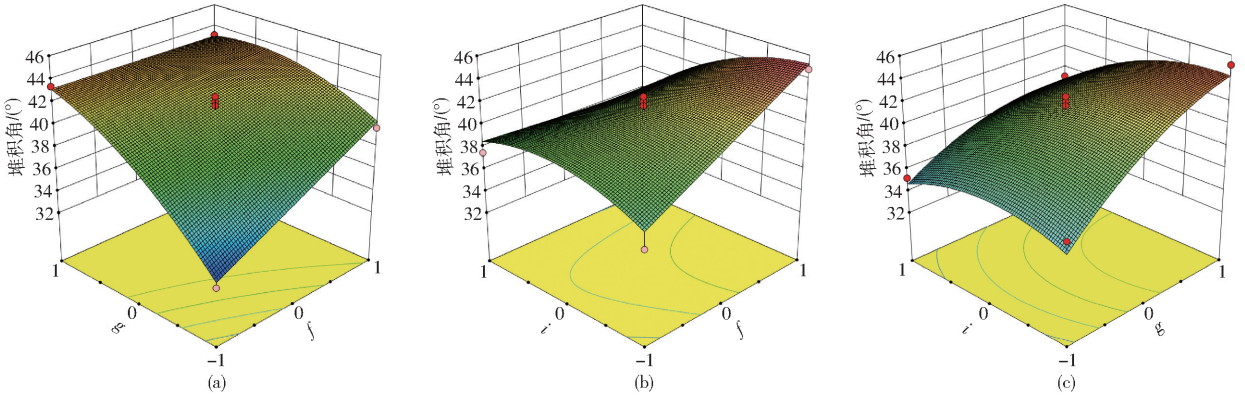
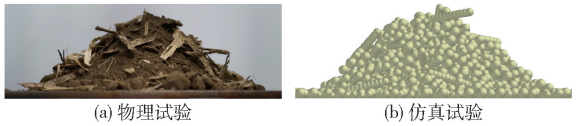


图 5 交互作用对堆积角的影响

Fig. 5 Effect of interaction on repose angle

3.5 参数优化及仿真验证

在因素水平范围内，利用 Design-Expert 软件寻优功能对参数进行优化，以目标值 40.17°对模型进行求解，对若干组解进行仿真验证，选取与物理试验形状最为接近的一组解，即秸秆-土壤滚动摩擦因数 0.16、土壤-土壤滚动摩擦因数 0.24、土壤-钢静摩擦因数 0.75、土壤 JKR 表面能 0.67 J/m^2，其他非显著性参数取中间水平值。利用优化后的参数进行 3 次重复仿真试验，得到仿真堆积角平均值为 40.83°，与实际物理堆积角的相对误差为 1.64%，试验对比见图 6，进一步证明了仿真试验的有效性。



(a) 物理试验 (b) 仿真试验

图 6 仿真试验与物理试验对比

Fig. 6 Comparison of simulation test and physical test

4　结论

(1)针对黑土区保护性耕作中的玉米秸秆-土壤混料,基于离散元 EDEM 仿真软件,选用 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型对玉米秸秆-土壤混料进行离散元仿真并标定相关参数。

(2)采用物理试验与仿真试验相结合的方法,利用 Design-Expert 软件,由 Plackett - Burman 试验筛选出对秸秆-土壤混料堆积角有显著影响的因素为土壤-土壤滚动摩擦因数、土壤-钢静摩擦因数、土壤-秸秆滚动摩擦因数、土壤 JKR 表面能。通过 Box - Behnken试验,建立堆积角与 4 个因素间的二阶回归模型并进行方差及回归模型交互效应分析。

(3)以玉米秸秆-土壤混料物理堆积角为目标,对影响参数进行优化,得到最优参数组合为秸秆-土壤滚动摩擦因数 0.16、土壤-土壤滚动摩擦因数 0.24、土壤-钢静摩擦因数 0.75、土壤 JKR 表面能 0.67 J/m^2。通过仿真试验对最优参数组合进行验证,最优参数组合堆积角与实际物理堆积角相对误差为 1.64%,验证了仿真模型参数的可靠性。

参　考　文　献

[1] 何进,李洪文,陆海涛,等. 保护性耕作技术与机具研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(4):1 - 19.
HE Jin, LI Hongwen, LU Haitao, et al. Research progress of conservation tillage technology and machine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 1 - 19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180401&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.001. (in Chinese)

[2] 位国建,荐世春,方会敏,等. 北方旱作区保护性耕作技术研究现状及展望[J]. 中国农机化学报,2019,40(3):195 - 200,211.
WEI Guojian, JIAN Shichun, FANG Huimin, et al. Current situation and prospect of conservation tillage technology in dry-farming areas of North China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(3): 195 - 200, 211. (in Chinese)

[3] 解占军,柳赟博,韩瑛祚,等. 秸秆还田条件下氮肥对玉米产量和土壤肥力的影响[J]. 辽宁农业科学,2021(2):31 - 33.
XIE Zhanjun, LIU Yunbo, HAN Yingzuo, et al. Effects of nitrogen fertilizer on maize yield and soil fertility with straw returning [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2021(2): 31 - 33. (in Chinese)

[4] 齐江涛,田辛亮,刘凯,等. 黑土区覆混耕作中玉米秸秆对土壤水分入渗性能的影响[J]. 农业工程学报,2021,37(1):141 - 147.
QI Jiangtao, TIAN Xinliang, LIU Kai, et al. Soil water infiltration under mulch tillage affected by maize stovers returning in black soil areas[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(1): 141 - 147. (in Chinese)

[5] 王韦韦,蔡丹艳,谢进杰,等. 玉米秸秆粉料致密成型离散元模型参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(3):127 - 134.
WANG Weiwei, CAI Danyan, XIE Jinjie, et al. Parameters calibration of discrete element model for corn stalk powder compression simulation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 127 - 134. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20210313&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.013. (in Chinese)

[6] 王莹,李光,刘鸿雁,等. 圆盘耙片偏角对秸秆与土壤混埋效果的影响[J]. 农业与技术,2021,41(5):32 - 34.
WANG Ying, LI Guang, LIU Hongyan, et al. Effect of deviation angle of disc rake on straw and soil mixture burying[J]. Agriculture and Technology, 2021, 41(5): 32 - 34. (in Chinese)

[7] 张海晶,王少杰,田春杰,等. 玉米秸秆及其生物炭对东北黑土溶解有机质特性的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(2):243 - 250.
ZHANG Haijing, WANG Shaojie, TIAN Chunjie, et al. Effects of maize straw and its biochar on the dissolved organic matter characteristics of black soil in Northeastern China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 243 - 250. (in Chinese)

[8] 王宪良,胡红,王庆杰,等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(12):78 - 85.
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78 - 85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20171209&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.009. (in Chinese)

[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/OL]. 农业机械学报,2021,52(4):1 - 20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1 - 20. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20210401&flag = 1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.001. (in Chinese)

[10] 张荣芳,焦伟,周纪磊,等. 不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊1):227 - 235.
ZHANG Rongfang, JIAO Wei, ZHOU Jilei, et al. Parameter calibration and experiment of rice seeds discrete element model with different filling particle radius[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp.1): 227 - 235. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2020s126&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.026. (in Chinese)

[11] LI Bo, CHEN Ying, CHEN Jun. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM)[J]. Soil and

Tillage Research, 2016, 158(4): 177 - 185.
[12] 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)
[13] LIANG R Q, CHEN X G, JIANG P, et al. Calibration of the simulation parameters of the particulate materials in film mixed materials[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(4): 29 - 36.
[14] 戴飞,宋学锋,赵武云,等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(2):49 - 56,77.
DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 49 - 56, 77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/create_pdf.aspx? file_no=20190206&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.006. (in Chinese)
[15] 马文鹏,尤泳,王德成,等. 基于 RSM 和 NSGA - Ⅱ的苜蓿种子离散元模型参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(8):136 - 144.
MA Wenpeng, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Parameter calibration of alfalfa seed discrete element model based on RSM and NSGA - Ⅱ[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 136 - 144. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20200815&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.08.015. (in Chinese)
[16] 于庆旭,刘燕,陈小兵,等. 基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(2):123 - 132.
YU Qingxu, LIU Yan, CHEN Xiaobing, et al. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 123 - 132. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2002014&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.014. (in Chinese)
[17] 张涛,刘飞,赵满全,等. 玉米秸秆接触物理参数测定与离散元仿真标定[J]. 中国农业大学学报,2018,23(4):120 - 127.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Determination of corn stalk contact parameters and calibration of discrete element method simulation[J]. Journal of China Agricultural University, 2018, 23(4): 120 - 127. (in Chinese)
[18] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 115 - 122, 142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20200213&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.013. (in Chinese)
[19] 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/OL]. 农业机械学报,2021,52(4):101 - 108.
HAN Shujie, QI Jiangtao, KAN Za, et al. Parameters calibration of discrete element for deep application of bulk manure in Xinjiang orchard[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 101 - 108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20210410&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.04.010. (in Chinese)
[20] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 49 - 56. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170306&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.006. (in Chinese)
[21] 刘文政,何进,李洪文,等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):125 - 135,142.
LIU Wenzheng, HE Jin, LI Hongwen, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125 - 135, 142. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180514&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.014. (in Chinese)
[22] 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.
[23] 赵淑红,刘汉朋,杨超,等. 玉米秸秆还田交互式分层深松铲设计与离散元仿真[J/OL]. 农业机械学报,2021,52(3):75 - 87.
ZHAO Shuhong, LIU Hanpeng, YANG Chao, et al. Design and discrete element simulation of interactive layered subsoiler with maize straw returned to filed[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 75 - 87. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20210308&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2021.03.008. (in Chinese)
[24] 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.
WEN 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)

(下转第 242 页)