doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.022

基于坍落度试验的扰动饱和水田土壤离散元参数标定

王洪昌[1,2] 丁凯权[1] 夏经久[1] 张国忠[1,2] 王 雨[1] 康启新[1] 唐楠锐[1] 刘婉茹[1]

（1. 华中农业大学工学院，武汉 430070；2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室，武汉 430070）

摘要：针对扰动饱和水田土壤环境下触土工作部件与土壤间相互作用关系需要，对高含水率、高流变性和高粘附性的扰动饱和水田土壤离散元仿真模型开展了研究。基于坍落度试验，利用EDEM软件中的Hertz-Mindlin with JKR接触模型构建了土壤颗粒和水颗粒二相混合模型，对扰动饱和水田土壤进行离散元仿真参数标定。以坍落拓展度w为试验指标，利用Plackett-Burman试验从8个相关参数中筛选出对拓展度影响显著的3个参数，其中土壤-水间JKR表面能和土壤-土壤间滚动摩擦因数对拓展度影响极显著，土壤-土壤间恢复系数对拓展度影响显著。根据Box-Behnken试验建立并优化拓展度与显著性参数的二阶回归模型，获得最优参数组合为：土壤-土壤间恢复系数为0.402，土壤-土壤间滚动摩擦因数为0.136，土壤-水颗粒间JKR表面能为0.920 J/m^2。基于标定后的参数组合，以滑板牵引阻力为指标，进行水稻直播机播种滑板模型与扰动饱和水田土壤间互作关系仿真模拟及土槽试验验证，结果表明仿真与试验获得的滑板模型阻力误差为6.46%，扰动饱和水田土壤离散元仿真模拟与试验一致，表明本研究参数标定方法准确可行。研究可为该类型土壤下的农业机械及触土部件的相关研究奠定基础与提供支撑。

关键词：水田土壤；扰动饱和；坍落度试验；参数标定；离散元

中图分类号：S220.1 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S2-0222-09

Calibration of Disturbed-Saturated Paddy Soil Discrete Element Parameters Based on Slump Test

WANG Hongchang[1,2] DING Kaiquan[1] XIA Jingjiu[1] ZHANG Guozhong[1,2] WANG Yu[1] KANG Qixin[1] TANG Nanrui[1] LIU Wanru[1]

(1. *College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan* 430070, *China*
2. *Key Laboratory of Agriculture Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan* 430070, *China*)

Abstract: In response to the lack of effective discrete element model for the simulation analysis of the interaction between soil-engaging components and soil in disturbed saturated paddy soil environment, the disturbed saturated paddy soil with high moisture content, high rheology and high adhesion was taken as the research object. A two-phase mixing model of soil particles and water particles was established by using the Hertz Mindlin with JKR contact model in EDEM software. The discrete element parameters of the disturbed saturated paddy soil model was calibrated through slump tests and soil bin tests. With the slump flow w as the experimental indicator, the Plackett-Burman experiment was used to screen out three parameters from eight relevant parameters, namely, the soil-water JKR surface energy, the soil-soil rolling friction coefficient and the soil-soil recovery coefficient. The soil-water JKR surface energy and the soil-soil rolling friction coefficient had a highly significant influence on the slump flow, and the soil-soil recovery coefficient had a significant influence on the slump flow. A second-order regression model of the slump flow and significance parameters was established and optimized based on the Box-Behnken experiment. The results of variance analysis of single factor showed that the soil-water JKR surface energy had a highly significant influence on the slump flow, and the soil-soil rolling friction coefficient had a significant influence on the slump flow. The interaction between the soil-soil recovery coefficient and the soil-soil rolling friction coefficient had a significant influence on the slump flow. Furthermore, the optimal

收稿日期：2024-07-10 修回日期：2024-08-26

基金项目：国家自然科学基金项目(51775220)和国家特色蔬菜产业技术体系专项(CARS-24-D-02)

作者简介：王洪昌(1984—)，男，讲师，博士，主要从事现代农业装备设计与测控研究，E-mail: wanghc84@mail.hzau.edu.cn

通信作者：张国忠(1971—)，男，教授，博士生导师，主要从事现代农业装备设计与测控研究，E-mail: zhanggz@mail.hzau.edu.cn

parameter combination was obtained as follows: the soil-soil recovery coefficient was 0.402, the soil-soil rolling friction coefficient was 0.136, and soil-water particles JKR surface energy was 0.920 J/m^2. The traction resistance of sliding plate of the rice seeder during its movement in disturbed saturated paddy soil as the indicator, a simulation of the interaction between the sliding plate of the rice seeder and the disturbed saturated paddy soil was conducted based on the calibrated parameter combination, and verified by the soil bin test. The results showed that the average value of traction resistance of the sliding plate in the simulation was 130.239 N, and the average value of traction resistance in the soil bin test was 139.231 N. The resistance value error of the sliding plate model obtained from the simulation and test was 6.46%. The discrete element simulation of the disturbed saturated paddy soil was consistent with the test, indicating that the parameter calibration method was accurate and feasible. The discrete element model of disturbed saturated paddy field soil established can provide technical support for the study of the interaction between soil and soil-engaging components.

Key words: paddy soil; disturbed saturated; slump test; parameter calibration; discrete element

0　引言

我国水田面积约占耕地总面积的四分之一[1]，在水稻播种和插秧时，田块经过浸泡、翻耕、旋耕、耙整、沉淀等处理[2-3]，形成了含水率高、流变性强、粘附性强、机械强度低的扰动饱和水田土壤[4]，易引起在其上工作的水田机械或触土部件发生沉陷、滑转、偏移、黏附、壅堵等一系列问题[5-6]。基于扰动饱和水田土壤自身物理机械性质，设计优化与之相互作用的触土部件，进而开发出性能优良、能耗比高的水田作业机械十分必要。

土壤与触土部件或农业机械的互作仿真研究中，需要根据土壤条件选择合适的接触模型，并对模型内相关参数的准确性进行标定，以确保离散元仿真模拟的准确性和真实性[7-8]。文献[9-13]利用EDEM仿真软件中Hertz-Mindlin with JKR接触模型对黏壤土、黏重黑土以及砖红壤等土壤进行了离散元仿真模型参数标定。GRIMA等[14]基于崩塌试验中颗粒堆休止角分别对干、湿颗粒在离散元仿真中所需滚动摩擦因数进行了标定。石林榕等[15-16]整合延迟弹性模型和线性内聚力模型，建立了西北旱区农田土壤离散元模型。谢方平等[17]通过单轴密闭压缩试验和无侧限抗压强度试验，标定了基于EEPA（Edinburgh elasto-plastic adhesion）模型的土壤离散元参数。王宪良等[18]基于DEM扩展的EEPA非线性弹塑性接触模型开展常年免耕农田土壤离散元仿真模型参数标定研究，验证了免耕土壤参数标定的准确可靠。ZHANG等[19]针对耕作机械在我国长江中下游团聚和黏结的土壤环境上仿真模拟准确度不高的问题，采用Hertz Mindlin与JKR粘性接触模型和线性粘性接触模型，开展圆锥贯入和单轴无侧限压缩试验进行模型的相关参数标定，得到的仿真模型能准确地模拟土壤在深松铲田间试验中的实际情况。

上述土壤建模参数标定的研究多集中在含水率较低且黏性不高的沙土、旱土，而对于高含水率、强流变性、强黏附性的扰动饱和水田土壤研究较少，且利用传统测量堆积角方法存在较大误差。在工程实践中，坍落度试验被广泛应用于测试水泥基材料的流动性[20]，如混凝土的坍落度、拓展度测试和水泥浆的拓展度测试等，这些方法能够模拟工程中材料的流动特征[21]。坍落拓展试验的形式虽然很简单，但涉及力学、流变学、表面科学、胶体科学、颗粒物质等多个学科，其应用范围也并不局限于水泥基材料，在矿物加工[22]、尾矿治理[23]、泥石流[24]等领域也有广泛应用。扰动饱和水田土壤和混凝土拌合物性质存在相似性，且该方法能够方便快捷地表征水田土壤的流动性，因此，本文选用坍落度试验测量水田土壤的流变参数。

综上，本文以扰动饱和水田土壤为研究对象，以EDEM中Hertz-Mindlin with JKR（JKR）接触模型为基础，构建土壤颗粒和水颗粒二相复合的离散元仿真模型，通过坍落度试验和土槽试验，开展扰动饱和水田土壤模型的参数标定研究，以期为相关水田触土部件和农业机械研究提供基础。

1　材料与方法

1.1　坍落度试验

1.1.1　扰动饱和水田土壤基本参数

土壤样品取自华中农业大学水稻田（30.463 74°N，114.358 83°E），属于长江中下游流域典型水稻田土壤（图1）。使用快干卤素水分测试仪测得其含水率，根据GB/T 50123-2019[25]采用筛析法和移液管法（图2a）测量其土壤质地组成；使用LP-100D型数显式土壤塑液限联合测定仪（图2b）对其塑限和液限进行测量；使用框式饱和器法测量土样饱和含水率，同时采用环刀法测得该含水率下的土样密度。

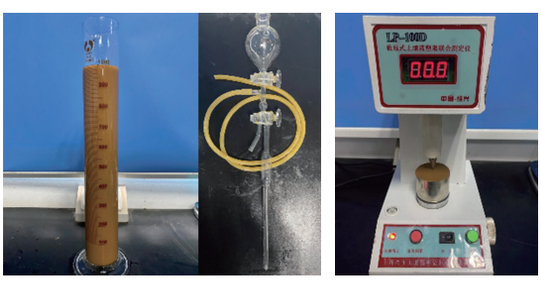
1.1.2　坍落度试验原理

诸葛茜等[26]通过大量试验证明水田土壤属于Bingham流体，该模型形式简单，应用广泛[27-28]，表达



图1 扰动饱和水田土壤

Fig. 1 Disturbed-saturated paddy soil



(a) 移液管试验 (b) 液塑限联合测定

图2 土壤基本参数测定

Fig. 2 Determination of basic soil parameters

式为

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma} \tag{1}$$

式中 τ——剪切应力,Pa

$\dot{\gamma}$——剪切速率,s^{-1}

τ_0——屈服应力,Pa

η——塑性黏度,Pa·s

由式(1)可知,水田土壤流动性与其屈服应力、黏度等流变参数密切相关,在Bingham流体中,当剪切应力小于某个阈值时,浆体不发生流动,只有当剪切应力超过屈服应力时,浆体才会发生流动[29]。浆体屈服应力是浆体流动状态的转折点,因此通过对坍落拓展试验中浆体变形的临界状态进行分析,可以得到水泥基材料浆体的屈服应力。

COUSSOT等[30]认为浆体在坍落停止时,其扩展形状由其自身屈服应力决定。ROUSSEL等[31-32]分别推导出纯剪切流动和纯拉伸流动的浆体屈服应力计算公式,分别为

$$\tau_0 = \frac{225\rho g V^2}{128\pi^2 R^5} \tag{2}$$

$$\tau_0 = \frac{\rho g H}{\sqrt{3}} = \frac{\rho g V}{\sqrt{3}\,\pi R^2} \tag{3}$$

式中 R——浆体停止流动时拓展半径,m

V——浆体总体积,m^3

H——浆体深度,m

ρ——浆体密度,kg/m^3

g——重力常数,N/kg

1.1.3 坍落度试验方法

本研究的扰动饱和水田土壤和普通混凝土拌合物性质存在相似性,因此参照文献[33],采用标准坍落度筒开展坍落扩展试验。

坍落度试验在1 000 mm×1 000 mm铁板上进行,试验开始前按要求用水清洗筒内壁和铁板,如图3所示,将坍落度筒放置在铁板上,将准备好的扰动饱和水田土壤倒入坍落度筒(实测含水率为39.97%,与田间水田土壤状态一致),用捣棒捣实,保证坍落度筒内部被水田土壤充满,最后刮平坍落度筒上口土壤;清除筒底边的泥土后,用5 s垂直平稳地提起坍落度筒,水田土壤在自身重力作用下平稳坍落,当坍落后的水田土壤不再产生明显流动时,测量稳定后的泥浆堆,水田土壤扩展后底面直径即为该次试验拓展度w,上述试验重复10次,取平均值。



图3 坍落度试验

Fig. 3 Slump test

1.2 扰动饱和水田土壤参数标定

1.2.1 接触模型选取

扰动饱和水田土壤含水率高、流变性强且存在严重的粘附现象,常用的Hertz-Mindlin接触模型仅考虑弹性变形,不考虑颗粒模型间的粘结力,不符合本研究中的土壤性质;Hertz-Mindlin with Bonding接触模型虽然可用来模拟粘结颗粒,但该模型是利用有限大小的“胶粘剂”粘结,适用于模拟混凝土和岩石等较坚硬介质[28];而Hertz-Mindlin with JKR接触模型是一种建立在Hertz理论上的粘结性颗粒接触模型,采用了Hertz-Mindlin模型相同的计算方法计算切向弹性力、法向耗散力和切向耗散力,法向弹性力的实现基于Johnson-Kendall-Roberts理论[34],考虑到湿颗粒间粘结力对颗粒运动的影响,适用于模拟颗粒间因静电、水分等原因发生明显粘结和团聚的物料,如农作物和泥土等[35]。Hertz-Mindlin with JKR接触模型契合扰动饱和水田土壤的粘弹性,因此本研究选择该接触模型进行建模。使用该模型时的法向弹性力由法向重叠量和表面能确定,即

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

$$\delta = \frac{\alpha^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha}{E^*}} \tag{5}$$

式中　F_{JKR}——JKR模型法向弹性力，N

δ——两接触颗粒间法向重叠量，m

α——两接触颗粒间切向重叠量，m

γ——表面能，N/m

E^*——等效杨氏模量，Pa

R^*——等效接触半径，m

法向力作为法向重叠量中的一个应变量，将Hertz-Mindlin with JKR黏结模型结果与Hertz-Mindlin无滑动接触模型结果进行比较，负重叠量是两个分离颗粒之间的间隙。无论是在加载阶段还是卸载阶段，离散元软件EDEM中，JKR接触模型关于法向力的计算都是通过式(1)计算得出。

当表面能γ等于0时，F_{JKR}与Hertz-Mindlin接触模型的法向力F_n相等，即

$$F_{JKR}=F_n=\frac{4}{3}E^*\sqrt{R^*}\,\delta^{\frac{3}{2}} \tag{6}$$

JKR模型提供的吸引凝聚力可用于描述并不直接接触的湿颗粒间相互作用，但若颗粒的间隙超过一定值后，吸引凝聚力将消失，颗粒间存在非零凝聚力最大间隙为

$$\delta_c=\frac{{\alpha_c}^2}{R^*}-\sqrt{\frac{4\pi\gamma\alpha_c}{E^*}} \tag{7}$$

其中

$$\alpha_c=\left[\frac{9\pi\gamma{R^*}^2}{2E^*}\left(\frac{3}{4}-\frac{1}{\sqrt{2}}\right)\right]^{\frac{1}{3}} \tag{8}$$

式中　δ_c——颗粒间具有非零凝聚力时法向最大间隙，m

α_c——颗粒间具有非零凝聚力时切向最大间隙，m

在颗粒没有直接接触并且间隔小于δ_c时，凝聚力达到最大值$F_{cohesion}$，为

$$F_{cohesion}=-\frac{3}{2}\pi\gamma R^* \tag{9}$$

对于扰动饱和水田土壤，JKR模型可以用于模拟湿颗粒，将两个湿颗粒分开所需要的分离力取决于液体表面张力γ_s和湿润角θ，可由

$$F_{pullout}=-2\pi\gamma_s\sqrt{R_iR_j}\cos\theta \tag{10}$$

式中　$F_{pullout}$——将2个颗粒分开所需的分离力，N

R_i、R_j——颗粒半径，m

得出。

1.2.2　仿真模型建立

由于扰动饱和水田土壤中只有土壤和水两相存在，因此建立土壤颗粒和水颗粒二者同时存在的水田土壤离散元模型，如图4所示。在Solidworks 2019软件中绘制坍落度筒和铁板的三维模型，并保存为igs格式文件导入到EDEM 2020软件中，在坍落度筒上口位置设置颗粒工厂，随机1∶1生成土壤颗粒和水颗粒各12 000个且刚好将坍落度筒填满。

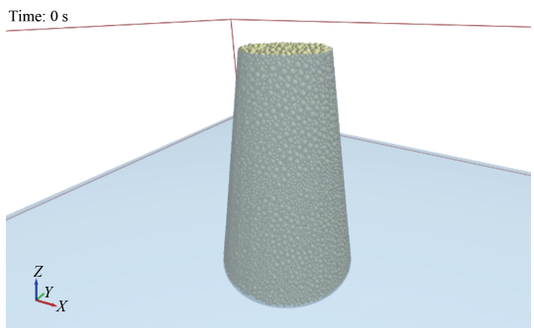


图4　仿真模型

Fig. 4　Simulation model

首先根据文献[36-38]确定离散元模型中的相关参数，坍落度筒和铁板材料为钢材，密度7.85×10³ kg/m³，泊松比0.3，剪切模量7.0×10¹⁰ Pa；土壤密度1 636 kg/m³，泊松比0.38，剪切模量1.0×10⁸ Pa；水密度1 000 kg/m³，泊松比0.5，剪切模量1.0×10⁶ Pa。土壤颗粒设置为半径4 mm的球体，水颗粒设置为半径1 mm的球体。

根据文献[8,36,38]确定土壤-钢材间恢复系数为0.1，土壤-钢材间静摩擦因数为0.2，土壤-钢材间滚动摩擦因数为0.2；水-钢材间恢复系数为0.05，水-钢材间静摩擦因数为0.05，水-钢材间动摩擦因数为0.01；水-水间恢复系数为0.01，水-水间静摩擦因数为0.01，水-水间动摩擦因数为0.01，水颗粒间JKR表面能取0.073 J/m²，其他待标定接触参数取值范围为：土壤-土壤间恢复系数0.15~0.75，土壤-土壤间静摩擦因数0.44~1.16，土壤-土壤间滚动摩擦因数0.05~0.2，土壤-水间恢复系数0.1~1.0，土壤-水间静摩擦因数0.1~1.0，土壤-水间滚动摩擦因数0.1~1.0，土壤-土壤间JKR表面能0.1~2.0 J/m²，土壤-水间JKR表面能0.1~2.0 J/m²。

1.2.3　参数标定方法

目前关于扰动饱和水田土壤离散元参数标定的相关研究较少，上述的模型参数只是根据类似或接近的文献进行初步确定，还需要根据实际情况进行标定。

使用Design-Expert12软件设计Plackett-Burman试验，以拓展度w为响应值，开展坍落扩展仿真试验，筛选出影响显著的参数。仿真模拟试验共8个真实参数X_1~X_8以及3个虚拟参数X_9~X_{11}，每个参数根据相关文献均取低、高2个水平，如表1所示。仿真试验中设定1个中心点，共进行13组试验，每组仿真模拟试验重复3次，取平均值记为单组试验的拓展度w。

针对Plackett-Burman试验筛选出的显著性因素，设计最陡爬坡试验，进一步缩小显著性参数的范围，以准确迅速探索到最优值的附近区域。仿真试验时，非显著性因素取低水平，计算仿真试验拓展度与实际试验拓展度的相对误差，相对误差最小时则可以确定最优水平属于其对应参数组的左右两侧区间。

根据最陡爬坡试验结果，采用Design-Expert 12软件进行Box-Behnken试验设计，显著性参数取低(-1)、中

表1 Plackett-Burman试验参数

Tab. 1 Parameters of Plackett-Burman test

参数	低水平	高水平
土壤-土壤间恢复系数X_1	0.15	0.75
土壤-土壤间静摩擦因数X_2	0.44	1.16
土壤-土壤间滚动摩擦因数X_3	0.05	0.20
土壤-水间恢复系数X_4	0.1	1
土壤-水间静摩擦因数X_5	0.1	1
土壤-水间滚动摩擦因数X_6	0.05	0.50
土壤-土壤间JKR表面能X_7/(J·m^{-2})	0.1	2
土壤-水间JKR表面能X_8/(J·m^{-2})	0.1	2

(0)、高(1)3个水平,非显著性参数取值同上一步最陡爬坡试验,中心点设置3个重复,每组重复3次,取平均值记为单组仿真坍落度试验拓展度数值结果。

1.3 水田土槽试验验证

为了验证参数标定优化得到的扰动饱和水田土壤离散元模型是否符合其实际的力学特性情况,开展水稻直播机播种滑板模型与扰动饱和水田土壤互作过程的离散元仿真模拟与土槽试验,以滑板模型的牵引阻力为试验指标,将仿真模拟与土槽试验结果进行对比,从而验证扰动饱和水田土壤离散元模型的准确性。

1.3.1 离散元仿真试验

根据参数标定得到的优化参数组合,在EDEM 2020软件中以土壤和水颗粒比例1∶1各2 000 000个生成2 000 mm×500 mm×100 mm颗粒床。利用Solidworks 2019软件,构建滑板三维模型,保存为igs格式并导入EDEM 2020软件中,滑板材料设置为钢材,密度为7.85×10^3 kg/m^3,泊松比为0.3,剪切模量为7.0×10^{10} Pa。离散元仿真模拟试验初始状态如图5所示。

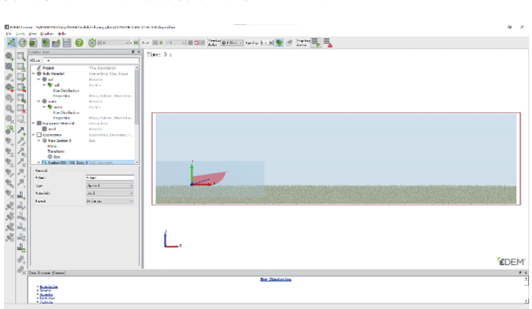


图5 离散元仿真试验界面

Fig. 5 Discrete element simulation test

首先设置滑板以一定速度沿负z方向运动达到入土深度20 mm后,开始以速度0.3 m/s向x正方向运动1 200 mm,同时设置以滑板模型为母体的动态计算域,共进行5次离散元仿真模拟试验,通过EDEM 2020软件中分析模块导出滑板模型所受的x方向牵引阻力与时间的关系曲线。

1.3.2 水田土槽试验

水田土槽试验台架主要由水田土槽试验系统、大洋三维力传感器、东华DH3820N型信号测试系统等组成。试验前需将水田土槽的环境调整为实际扰动饱和水田土壤环境,具体做法为:水田土槽内土壤取自与第1节土壤相关试验的相同地点,然后向土槽内灌入适量水,静置待土壤充分吸收水分,用微耕机进行旋耕,使土壤与水分充分混合,随后使用平土耙修整土壤表面使其平整。通过快速卤素水分测试仪测定土壤含水率为39.77%,十分接近水田土壤的饱和含水率,可以认为与实际扰动饱和水田土壤环境一致。

开展水田土槽试验,如图6所示,设置滑板入土深度为20 mm,结合水稻直播机实际工作速度,设置滑板运动速度为0.3 m/s,从滑板开始运动计时,运动距离设置为1 200 mm,以保证滑板与水田土壤互作过程达到稳定,共进行5次重复试验,通过信号测试系统实时测得三维力传感器的输出信号,得到滑板所受牵引阻力与时间的关系。



图6 水田土槽验证试验

Fig. 6 Verification test in paddy soil bin

1. 播种滑板模型 2. 三维力传感器 3. 水田土槽 4. DH3820N型信号测试系统 5. 计算机

2 结果与分析

2.1 坍落度试验

测得所取土壤样品含水率为41.15%,土壤质地组成为:砂粒质量分数为34.52%、粉粒质量分数为40.28%、黏粒质量分数为25.20%,根据美国土壤质地三角图可知试验土壤属于壤土;测得土样塑限为20.06%,液限为34.27%,塑性指数为14.18%;使土样饱和含水率为40.02%,该含水率下土样密度为1 636.0 kg/m^3。

根据坍落度试验方法和步骤,重复10次,取平均值,获得扰动饱和水田土壤拓展度w为460.28 mm。

2.2 水田土壤参数标定结果与分析

2.2.1 Placket-Burman试验

表2(表中x_1~x_8为因素编码值)为Plackett-Burman试验设计方案及结果,采用Design-Expert软件对仿真模拟试验结果进行方差分析,得到各个因素的显著性如表3所示。

由表3可知,x_3、x_8对拓展度影响极显著(P<0.01),x_1对拓展度影响显著(P<0.05);其余参数影响较小,对拓展度的影响不显著。因此后续的最陡爬坡试验和Box-Behnken试验只需对上述3个显著性影响的参数开展标定和优化。

2.2.2 最陡爬坡试验

最陡爬坡试验方案与结果如表4所示。由表4可知,随着x_1、x_3、x_8逐步加大,拓展度逐步增大,仿真值与实测值的相对误差先减小后增大,在4号试验水平时,拓

表 2　Plackett-Burman试验方案与结果

Tab. 2　Design and results of Plackett-Burman test

序号	因素								拓展度/mm
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	
1	1	−1	−1	−1	1	−1	1	1	502.575
2	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	−1	590.714
3	1	1	−1	1	1	1	−1	−1	542.035
4	1	−1	1	1	1	−1	−1	−1	484.340
5	1	1	1	−1	−1	−1	1	−1	475.580
6	1	1	−1	−1	−1	1	−1	1	421.411
7	−1	1	1	1	−1	−1	−1	1	425.723
8	1	−1	1	1	−1	1	1	1	392.146
9	0	0	0	0	0	0	0	0	461.893
10	−1	−1	1	−1	1	1	−1	1	450.589
11	−1	1	1	−1	1	1	1	−1	501.805
12	−1	−1	−1	1	−1	1	1	−1	625.003
13	−1	1	−1	1	1	−1	1	1	509.602

表 3　Plackett-Burman试验参数显著性分析

Tab. 3　Significance analysis of Plackett-Burman test

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	50 578.58	8	6 322.32	11.7	0.015 5*
x_1	6 785.39	1	6 785.39	12.56	0.023 9*
x_2	2 386.03	1	2 386.03	4.42	0.103 5
x_3	17 722.3	1	17 722.3	32.81	0.004 6**
x_4	109.05	1	109.05	0.201 9	0.676 5
x_5	303.69	1	303.69	0.562 2	0.495 1
x_6	257.11	1	257.11	0.475 9	0.528 2
x_7	703.77	1	703.77	1.3	0.317 4
x_8	22 311.24	1	22 311.24	41.3	0.003**
残差	2 160.85	4	540.21		
总和	52 739.43	12			

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

展度相对误差达到最小值，可以确定参数最优组合在4号试验水平附近。因此选择4号试验水平为中心点，选取3号、5号试验水平分别为低、高水平进行后续的Box-Behnken试验及回归模型分析；x_1、x_3、x_8 3个参数低、中、高水平分别取：0.39、0.51、0.63；0.11、0.14、0.17；0.86、1.24、1.62 J/m^2。

表 4　最陡爬坡试验方案与结果

Tab. 4　Design and results of steepest ascent test

序号	因素			拓展度/mm	相对误差/%
	X_1	X_3	X_8/(J·m^{-2})		
1	0.15	0.05	0.10	548.041	19.07
2	0.27	0.08	0.48	492.999	7.11
3	0.39	0.11	0.86	471.119	2.36
4	0.51	0.14	1.24	453.652	1.44
5	0.63	0.17	1.62	414.299	9.99
6	0.75	0.20	2.00	403.433	12.35

2.2.3　Box-Behnken试验设计

采用Design-Expert软件，Box-Behnken试验方案和结果如表5所示，根据试验结果建立扰动饱和水田土壤拓展度w与x_1、x_3、x_8的二阶回归模型为

$$w = 452.25 + 2.68x_1 - 6.49x_3 - 9.91x_8 - 7.37x_1x_3 - 3.31x_1x_8 - 0.89x_3x_8 + 1.68x_1^2 - 0.63x_3^2 + 4.73x_8^2 \quad (11)$$

表 5　Box-Behnken试验设计方案与结果

Tab. 5　Design and results of Box-Behnken test

序号	因素			拓展度/mm
	x_1	x_3	x_8	
1	−1	1	0	452.087 0
2	1	1	0	446.787 0
3	1	0	−1	471.195 5
4	0	0	0	451.010 5
5	0	−1	−1	475.799 0
6	0	1	−1	459.345 5
7	0	0	0	450.518 0
8	−1	0	−1	463.308 0
9	0	1	1	435.125 5
10	0	0	0	455.233 5
11	1	0	1	447.385 5
12	1	−1	0	469.246 5
13	−1	−1	0	445.065 0
14	−1	0	1	452.749 5
15	0	−1	1	455.127 5

对表5的试验模型进行方差分析，结果如表6所示，结果表明：w方程模型P为0.020 3，呈显著性（P<0.05），在统计学上是有意义的；该模型因变量拓展度w与因素x_3呈现显著性、与因素x_8呈极显著性（P<0.01）；失拟项不显著，表明采用此模型进行结果分析，虽存在一定的失误概率，但该方程的模拟可信；决定系数R^2=0.929 9、校正决定系数R_{adj}^2=0.803 6，二者均接近1，表明拟合方程有意义，其可靠度高；变异系数为1.06%、精密度（Adeq precision）达到9.025 6，表明该模型具有良好的可信度和精确度。

表6结果表明，模拟的一次项x_3对拓展度影响显著，x_8

表 6　Box-Behnken试验二次多项式模型方差分析

Tab. 6　ANOVA of quadratic polynomial model of Box-Behnken test

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 536.92	9	170.77	7.36	0.020 3*
x_1	57.27	1	57.27	2.47	0.176 9
x_3	336.61	1	336.61	14.52	0.012 5*
x_8	785.27	1	785.27	33.86	0.002 1**
x_1x_3	217.29	1	217.29	9.37	0.028 1*
x_1x_8	43.9	1	43.9	1.89	0.227 3
x_3x_8	3.15	1	3.15	0.135 8	0.727 6
x_1^2	10.38	1	10.38	0.447 4	0.533 2
x_3^2	1.48	1	1.48	0.064	0.810 4
x_8^2	82.58	1	82.58	3.56	0.117 8
残差	115.95	5	23.19		
失拟项	102.51	3	34.17	5.09	0.168 7
纯误差	13.44	2	6.72		
总和	1 652.87	14			

对拓展度影响极显著，交互作用项x_1x_3对拓展度影响显著。从单因素水平分析，各因素对拓展度的影响顺序为$x_8>x_3>x_1$。

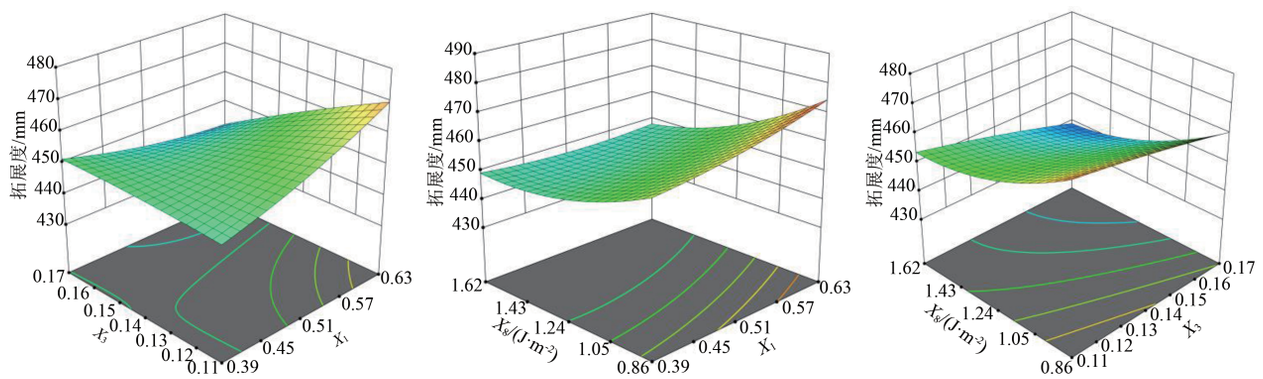
2.2.4 回归模型交互作用分析

以拓展度w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二次多元回归拟合，得出图7所示的影响目标函数拓展度的参数间相互作用的响应面和等高线分布图。

由图7a可知，当x_3较大时，拓展度w随着x_1的增大而减小，当x_3较小时，拓展度w随着x_1的增大而增大；当x_1较大时，拓展度w随着x_3的增大而减小，当x_1较小时，拓展度w随着x_3的增大而增大。

图7b可知，当x_1一定时，拓展度w随着x_8的增大而减小；当x_8一定时，拓展度w随着x_1的增大而增大。

图7c可知，当x_3一定时，拓展度w随着x_8的增大而减小；当x_8一定时，拓展度w随着x_3的增大而减小。



(a) x_8=0 (b) x_3=0 (c) x_1=0

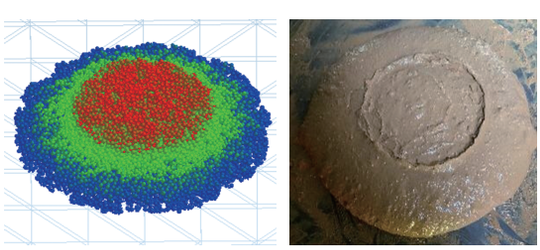
图7 因素间交互作用对拓展度w影响响应曲面

Fig. 7 Response surfaces of interaction between factors affects of slump-flow w

2.2.5 最优参数组合验证

利用Design-Expert软件对回归模型进行优化分析，设置拓展度w=460.28 mm为求解目标，得到若干组最优解，分别采用这些最优解进行坍落度试验的仿真验证，选取与实际试验中情况最为接近的一组为最优解：土壤-土壤间恢复系数为0.402，土壤-土壤间滚动摩擦因数为0.136，土壤-水间JKR表面能为0.920 J/m^2。

采用最优解参数进行仿真试验与实际试验结果对比，如图8所示，3次重复仿真试验结果取平均值得到拓展度w为450.17 mm，与实际值相对误差为2.20%。结果表明，通过上文采用的一系列方法进行扰动饱和水田土壤的参数标定是可行的，有着较好的准确度。



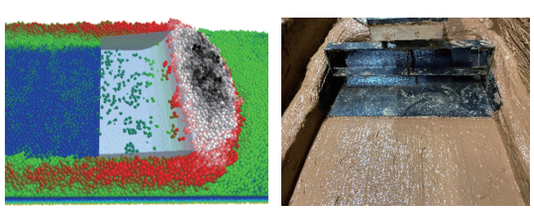
(a) 仿真试验 (b) 实际试验

图8 坍落度试验效果

Fig. 8 Slump test effect

2.3 水田土槽试验验证

离散元仿真试验结果如图9a所示，水田土槽试验结果如图9b所示，最终得到滑板与水田土壤互作试验的牵引阻力仿真试验平均值为130.239 N，土槽试验平均值为139.231 N，仿真与实际试验的相对误差为6.46%，参



(a) 仿真试验 (b) 实际试验

图9 试验效果

Fig. 9 Effects of test

数标定后的离散元模型能够较为准确反映触土部件与扰动饱和水田土壤互作过程中的受力情况，且能较为准确地表征扰动饱和水田土壤的流动性，同时也表明基于坍落度试验开展扰动饱和水田土壤的离散元参数标定研究方法准确可行，可为后续研究水田环境下的农业机械及其触土部件奠定基础。

3 结论

(1)Placket-Burman试验表明，8个参与筛选的物理参数中，土壤-水间JKR表面能和土壤-土壤间滚动摩擦因数对拓展度具有极显著性影响，土壤-土壤间恢复系数对拓展度的影响显著，而其余参数对拓展度的影响不显著。

(2)基于Box-Behnken试验建立了拓展度w与3个显著性参数的二阶回归模型，方差分析结果表明，土壤-水间JKR表面能对拓展度影响极显著，土壤-土壤间滚动摩擦因数对拓展度影响显著，土壤-土壤间恢复系数和土壤-土壤间滚动摩擦因数的交互作用对拓展度影响

显著。对二阶回归模型进行优化求解，得到扰动饱和水田土壤的最优参数组合为：土壤-土壤间恢复系数为0.402，土壤-土壤间滚动摩擦因数为0.136，土壤-水间JKR表面能为0.920 J/m^2，其余非显著性参数取低水平：土壤-土壤间静摩擦因数0.44，土壤-水间恢复系数0.1，土壤-水间静摩擦因数0.1，土壤-水间滚动摩擦因数0.05，土壤-土壤间JKR表面能0.1 J/m^2。

（3）开展了水稻直播机播种滑板与扰动饱和水田土壤互作过程的仿真模拟和水田土槽试验，以滑板在水田土壤中运动受到的牵引阻力为指标，在相同的试验条件下，牵引阻力仿真值与实际值的相对误差为6.46%，参数标定得到的水田土壤离散元模型能够较好地模拟水田土壤在滑板作用下的流动、变形、壅土情况，准确地反映出水田土壤的实际物理力学性质。

参　考　文　献

[1] GAO Y, ZHANG G, WANG H, et al. Measuring system design and experiment for ground pressure on seeding skateboard of rice direct seeding machine [J]. Applied Sciences, 2021,11(21):10024.

[2] 徐高明，丁启朔，汪小昱，等. 秸秆-土壤-旋耕机交互下秸秆位移与埋覆效果研究 [J]. 农业机械学报，2022，53(7)：23－29.
XU Gaoming, DING Qishuo, WANG Xiaochan, et al. Analysis of straw displacement and burying effect in straw-soil-rotary tiller interaction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(7):23－29. (in Chinese)

[3] 王金武，尹大庆，韩永俊，等. 水稻秸秆整株还田机的设计与试验 [J]. 农业机械学报，2007，38(10)：54－56.
WANG Jinwu, YIN Daqing, HAN Yongjun, et al. Design and experiment of whole rice straw returning machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(10):54－56. (in Chinese)

[4] ZHANG G Z, WANG H C, DU J, et al. Prominent problems and thoughts of paddy soil-terrain machine system based on disturbed saturated paddy soil conditions in South China [C]// Proceedings of the 11th Asia-Pacific Regional Conference of the ISTVS, 2022.

[5] 李建桥，黄晗，王颖，等. 松软地面机器系统研究进展 [J]. 农业机械学报，2015，46(5)：306－320.
LI Jianqiao, HUANG Han, WANG Ying, et al. Development on research of soft-terrain machine systems [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(5):306－320. (in Chinese)

[6] JIANG Q J, CAO M, WANG Y W, et.al. Quantification of the soil stiffness constants using physical properties of paddy soils in Yangtze Delta Plain [J]. Biosystems Engineering. 2020,200:89－100.

[7] 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.

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

[9] 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)

[10] 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.
SUN Jingbin, LIU Qi, YANG Fuzeng, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of sloping soil on Loess Plateau and its interaction with rotary tillage components [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(1):63－73.(in Chinese)

[11] 武涛，黄伟凤，陈学深，等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定 [J]. 华南农业大学学报，2017，38(3)：93－98.
WU Tao, HUANG Weifeng, CHEN Xueshen, et al. Calibration of discrete element model parameters for cohesive soil considering the cohesion between particles [J]. Journal of South China Agricultural University, 2017,38(3):93－98. (in Chinese)

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

[13] 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)

[14] GRIMA A P, WYPYCH P W. Development and validation of calibration methods for discrete element modelling [J]. Granular Matter, 2011,13(2):127－132.

[15] 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.
SHI Linrong, ZHAO Wuyun, SUN Wei. Parameter calibration of soil particles contact model of farmland soil in northwest arid region based on discrete element method [J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(21):181－187. (in Chinese)

[16] 石林榕，吴建民，赵武云，等. 基于离散单元法农田土壤单轴压缩模型的建立及参数校核 [J]. 中国农业大学学报，2015，20(4)：174－182.
SHI Linrong, WU Jianmin, ZHAO Wuyun, et al. Establishment and parameter verification of farmland soil model in uniaxial compression based on discrete element method [J]. Journal of China Agricultural University, 2015,20(4):174－182. (in Chinese)

[17] 谢方平，吴正阳，王修善，等. 基于无侧限抗压强度试验的土壤离散元参数标定 [J]. 农业工程学报，2020，36(13)：39－47.

XIE Fangping, WU Zhengyang, WANG Xiushan, et al. Calibration of discrete element parameters of soils based on unconfined compressive strength test [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(13):39 - 47. (in Chinese)

[18] 王宪良,钟晓康,耿元乐,等.基于离散元非线性弹塑性接触模型的免耕土壤参数标定[J].农业工程学报,2021,37(23):100 - 107.
WANG Xianliang, ZHONG Xiaokang, GENG Yuanle, et al. Construction and parameter calibration of the nonlinear elastoplastic discrete element model for no-tillage soil compaction [J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(23):100 - 107. (in Chinese)

[19] ZHANG C, XU J, ZHENG Z, et al. Three-dimensional DEM tillage simulation: validation of a suitable contact model for a sweep tool operating in cohesion and adhesion soil [J]. Journal of Terramechanics, 2023,108:59 - 67.

[20] CHIDIAC S E, HABIBBEIGI F, CHAN D. Slump and slump flow for characterizing yield stress of fresh concrete [J]. ACI Materials Journal, 2006,103(6):413.

[21] MATOS D P R, PILAR R, CASAGRANDE C A, et al. Comparison between methods for determining the yield stress of cement pastes [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2020,42(1):24.

[22] TRAMPUS B C, FRANCA S C A. Performances of two flocculants and their mixtures for red mud dewatering and disposal based on mineral paste production [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,257:120534.

[23] GAO J, FOURIE A. Spread is better: an investigation of the mini-slump test [J]. Minerals Engineering, 2015,71:120 - 132.

[24] 杨愧,周振华,任喆,等.泥石流屈服应力测试的塌落度法[J].水文地质工程地质,2018,45(1):151 - 157.
YANG Kui, ZHOU Zhenhua, REN Zhe, et al. Application of the slump test method to measurement of the debris flow yield stress [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018,45(1):151 - 157. (in Chinese)

[25] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准GB/T 50123-2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.

[26] 诸葛茜,冉天麟,罗大海.水田土壤的切变速率与剪切应力关系的试验研究[J].武汉工学院学报,1984,12(3):65 - 79.
ZHUGE Qian, RAN Tianlin, LUO Dahai. Researches on relation between shear strain rate and shear stress of paddy soils [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1984, 12(3):65 - 79. (in Chinese)

[27] LU C, YANG H, MEI G. Relationship between slump flow and rheological properties of self compacting concrete with silica fume and its permeability [J]. Construction and Building Materials, 2015,75:157 - 162.

[28] LI Z, CAO G. Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state [J]. Cement and Concrete Research, 2019,120:217 - 226.

[29] LEI L, BERTEVAS E L, KHOO B C, et al. Many-body dissipative particle dynamics (MDPD) simulation of a pseudoplastic yield-stress fluid with surface tension in some flow processes [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2018,260:163 - 174.

[30] COUSSOT P, PROUST S, ANCEY C. Rheological interpretation of deposits of yield stress fluids [J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 1996,66(1):55 - 70.

[31] ROUSSEL N, STEFANI C, LEROY R. From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests [J]. Cement and Concrete Research, 2005,35(5):817 - 822.

[32] ROUSSEL N, COUSSOT P. "Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: from slump to spreading flow [J]. Journal of Rheology, 2005,49(3):705 - 718.

[33] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准GB/T 50080-2016[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2016.

[34] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and the contact of elastic solids [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A—Mathematical and Physical Sciences, 1971,324(1558):301 - 313.

[35] EDEM 2.5 Theory Reference Guide [R/OL]. (2014-12-05) [2015-06-07]. http://www.docin.com/p-980174717.html.

[36] WU Z, WANG X, LIU D, et al. Calibration of discrete element parameters and experimental verification for modelling subsurface soils [J]. Biosystems Engineering, 2021,212:215 - 227.

[37] TANG Z, GONG H, WU S, et al. Modelling of paddy soil using the CFD-DEM coupling method [J]. Soil and Tillage Research, 2023, 226:105591.

[38] TIAN L, CAO C, QIN K, et al. Design and test of post-seat weeding machine for paddy [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021,14(3):112 - 122.