doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S1.016

湿黏地播后镇压过程土壤-小麦交互模型参数标定

罗伟文　申海洋　顾　满　凌　洁　顾峰玮　吴　峰　胡志超
（农业农村部南京农业机械化研究所，南京 210014）

摘要：离散元仿真是研究播后镇压过程中土下种子受力特性与移位规律的有效途径，土壤-种子离散元模型及其参数显著影响仿真结果。但长江中下游湿黏地土壤含水率高、黏性强，常规土壤参数无法与其物理性质相匹配，缺乏准确的土壤-小麦离散元模型参数。本研究对播后镇压过程中湿黏土与小麦交互模型的接触参数进行标定。基于物理实测试验与显著性分析试验，初步获取参数取值范围，筛选出对自然堆积坡度系数影响显著的参数；通过响应面试验，获取各关键参数与坡度系数的回归模型和多组较优土壤-土壤参数、土壤-小麦参数组合方案，对比实际压缩试验与仿真试验的位移-力曲线误差，筛选出最佳参数组合方案；通过对比准静态压缩试验、滚动压缩试验及田间试验的模拟值与实际值，评估参数模型的准确性。结果表明：土壤-土壤恢复系数（C_{R1}）、土壤-土壤滚动摩擦因数（R_{F1}）、土壤-土壤表面能（S_{E1}）对湿黏土自然堆积坡度系数（C_{S1}）有显著影响；土壤-小麦静摩擦因数（S_{F2}）、土壤-小麦滚动摩擦因数（R_{F2}）、土壤-小麦表面能（S_{E2}）对土壤-小麦混合物坍塌堆积坡度系数（C_{S2}）有显著影响；获得最优参数组合方案：C_{R1}为0.12、R_{F1}为0.35、S_{E1}为3.90 J/m^2、S_{F2}为0.48、R_{F2}为0.29、S_{E2}为1.69 J/m^2；优化模型下各验证试验的相对误差分别为7.16%（准静态压缩试验）、10.41%（滚动压缩试验）、14.42%（田间试验）。研究结果可为镇压过程中土壤-种子互作特性研究和湿黏地小麦播种机设计提供参考。

关键词：湿黏地；小麦播种；离散元方法；参数标定；试验验证
中图分类号：S223　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-1298(2024)S1-0147-09

Parameter Calibration of Discrete Element Model for Wet Clay Soil-Wheat Mixture for Simulating Compaction Process

LUO Weiwen　SHEN Haiyang　GU Man　LING Jie　GU Fengwei　WU Feng　HU Zhichao
(*Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing* 210014, *China*)

Abstract: Numerical simulations utilizing the discrete element method (DEM) represent a robust approach for investigating the dynamic properties and displacement behaviors of subsoil seeds during the process of post-sowing suppression. The parameters associated with the soil-seed discrete element model played a crucial role in determining the accuracy of the simulation outcomes. However, the wet clay prevalent in the middle and lower reaches of the Yangtze River exhibited elevated water content and significant viscosity. Consequently, conventional soil parameters failed to adequately represent the physical characteristics of this wet clay, resulting in a lack of precise parameters for the discrete element model of wet clay-wheat interactions. The contact parameters of the wet clay-wheat interaction model during post-sowing suppression were calibrated. Initially, based on physical tests and significance analysis, the initial range of parameter values was determined, followed by the identification of parameters that exerted a significant influence on the natural accumulation slope coefficient. Subsequently, a regression model was developed to establish the relationship between each key parameter and the slope coefficient by using response surface methodology. This process yielded multiple superior combinations of soil-soil and soil-wheat parameters. Thereafter, the discrepancies in the force-displacement curves between actual compression tests and simulation tests were analyzed to select the optimal parameter combination. Finally, the accuracy of the parameter model was assessed by comparing the simulated values with the actual results from quasi-static compression tests, rolling compression tests, and field tests. The results indicated that the soil-soil restitution coefficient (C_{R1}), soil-soil rolling friction coefficient

收稿日期：2024-06-18　修回日期：2024-08-18
基金项目：江苏省自然科学基金项目(BK20221187)和中国农业科学院创新工程项目
作者简介：罗伟文(1994—)，男，博士生，主要从事农业机械化及其自动化研究，E-mail: luoweiwen@caas.cn
通信作者：胡志超(1963—)，男，研究员，博士生导师，主要从事农作物收获及产后加工技术装备研究，E-mail: huzhichao@caas.cn

(R_{F1}), and soil-soil interfacial surface energy (S_{E1}) significantly influenced the natural accumulation slope coefficient of wet clay (C_{S1}). Moreover, the soil-wheat static friction coefficient (S_{F2}), soil-wheat rolling friction coefficient (R_{F2}), and soil-wheat interfacial surface energy (S_{E2}) also had a significant impact on the natural accumulation slope coefficient of wet clay-wheat mixture (C_{S2}). The optimal parameter combination was identified as follows: C_{R1} was 0.12, R_{F1} was 0.35, S_{E1} was 3.90 J/m^2, S_{F2} was 0.48, R_{F2} was 0.29, and S_{E2} was 1.69 J/m^2. Additionally, the relative errors for each validation test under the optimized model were 7.16% for the quasi-static compression test, 10.41% for the rolling compression test, and 14.42% for the field test.

Key words: wet clay; wheat sowing; discrete element method; parameter calibration; verification trial

0 引言

研究播后镇压过程中土下小麦受力与移位规律对提高机播质量具有重要意义,但直接测量难度较大[1-2]。离散元法(DEM)仿真是研究土-种耦合运动特性的重要方法,准确的离散元参数是利用DEM仿真研究土壤-种子-机具互作特性的基础[3-4]。长江中下游湿黏地稻麦轮作农艺模式在我国应用广泛,由于土壤湿黏度大,常规土壤参数无法与其物理性质相匹配,因此有必要研究湿黏地小麦播后镇压环节土壤与小麦种子的交互模型参数。

目前,国际上对黏湿型物料离散元参数的研究取得了一定进展。Hertz-Mindlin with JKR模型常用于对散装有机肥[5]、蚯蚓堆肥基质[6]、粘性黑土[7]等含水率高、黏性强的颗粒进行参数标定,主要方法为通过分析参数对休止角的影响规律进行参数筛选和优化。基于hysteretic spring接触模型,UCGUL等[8-9]通过堆积角和贯入试验探明了模拟土壤耕作的关键性离散元参数,并对土壤压溃和深松过程进行离散元模拟[10-11]。BAHRAMI等[12]采用hysteretic spring-linear cohesion接触模型,对不同含水率黏性土的平板沉降试验进行DEM仿真,探明了关键参数对沉降特性的影响关系。丁启朔等[13]通过单轴压缩试验建立了未耕稻田土的黏结模型,并对湿黏稻土的深松过程进行了DEM仿真分析。GONG等[14]模拟了油菜幼苗出苗的动态过程,分析了幼苗与土壤颗粒相互作用的动力学过程。卢琦等[15]建立了土壤-种子-覆土装置离散元模型,以种子在土壤表面形成的堆积角(抽板法)为评价指标,对土壤-种子互作参数进行了标定。田辛亮等[16]基于Hertz-Mindlin with JKR接触模型,构建了玉米碎秸-土壤混合物离散元模型,以混合物堆积角(圆筒提升法)为指标,对关键参数进行了标定。颜丙新等[17]通过三维扫描、正向测量和逆向验证等方式标定了土壤-种子接触参数,并对种子着床偏移量的影响规律进行了仿真研究。周龙[18]通过质构仪压缩和提升试验研究了土壤-种子法向粘附力,通过圆筒提升法、土面斜坡滑落试验等对土壤-种子混合物接触参数进行了标定。当前,国内外学者对种子、土壤等单一物料,混合均匀度高的混合物料(如低黏性土壤-种子混合物)离散元模型与参数有较多研究,但对高含水率、高黏度的湿黏土与麦种混合物料离散元参数研究较少。

本研究对播后镇压过程中湿黏土与小麦交互模型的接触参数进行标定。通过物理测定试验初步确定接触参数取值范围,基于显著性分析试验筛选对自然堆积坡度系数影响显著的参数,通过响应面试验和压缩对比试验获取关键参数最佳组合方案,通过准静态压缩试验、动态镇压试验和田间试验评估离散元模型参数误差,以期为土壤-种子交互效应研究和湿黏地小麦播种机设计提供参考。

1 材料与方法

1.1 离散元模型构建

1.1.1 接触模型

湿黏土含水率高,黏性强,土壤颗粒彼此接近时逐渐融合形成稳定液桥,使颗粒黏粘而改变其机械性能。Hertz-Mindlin JKR V2模型适用于模拟不同颗粒间的动态黏附,可对播后镇压过程中湿黏土颗粒间、土壤-小麦颗粒间的黏附团聚特性进行准确的数值模拟[19-20]。

1.1.2 物料离散元模型

在稻麦轮作试验基地对湿黏土壤(含水率32.71%)采样,参考湿黏土小麦播种农艺要求,采样深度为100 mm。目前,基于DEM仿真的土壤颗粒模型尚无统一标准,多为粒径4~6 mm球体[21-22]。本研究土壤颗粒离散元模型采用粒径为5 mm的球形颗粒,粒径分布范围为0.95~1.05倍[10]。“扬麦23号”小麦在长江中下游地区广泛种植,随机选取“扬麦23号”小麦种子进行三维尺寸测量,使用圆球颗粒堆叠形成通用型小麦模型[23],如图1所示。

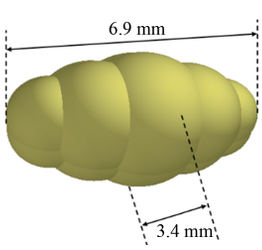


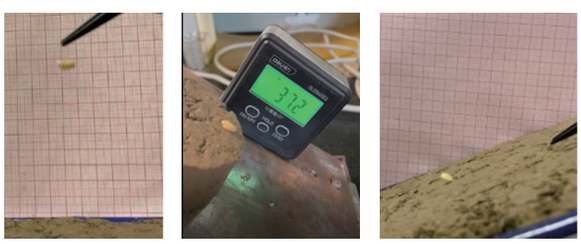
图1 小麦种子DEM模型

Fig. 1 DEM model of wheat kernels

1.2　接触参数物理试验测定

小麦在土壤中的受力特性与运动规律主要直接体现在土壤-土壤、土壤-小麦参数上，因此通过物理试验初步测定这些参数。

恢复系数(C_R)通过自由落体碰撞法进行测量(图2a)。具体方法为：将待测物料从固定高度h_0处释放，通过高速摄像仪记录碰撞前后法向相对速度；计算碰撞前后物料在接触点处的法向相对分离速度与法向相对接近速度比，即为碰撞恢复系数。



(a) 恢复系数　(b) 静摩擦因数　(c) 滚动摩擦因数

图 2　接触参数物理测定

Fig. 2　Physical determination of contact parameters

静摩擦因数(S_F)使用自制角度测量装置通过斜面法测量(图2b)。具体方法为：材料固定在自制角度测量装置上，并将待测物料放置其上，使斜板从水平位置开始缓慢旋转；当物料有滑动趋势时立即停止，记录角度，计算静摩擦因数。

动摩擦因数(R_F)使用自制角度测量装置通过能量守恒方法测量(图2c)，其计算方法参考文献[24]。具体方法为：试验前将材料固定在自制测量装置上，并倾斜一定角度；将待测物料缓慢放置在倾斜材料上，高速摄像仪记录被测材料的滚动过程，计算滚动摩擦因数。

1.3　接触参数显著性分析试验

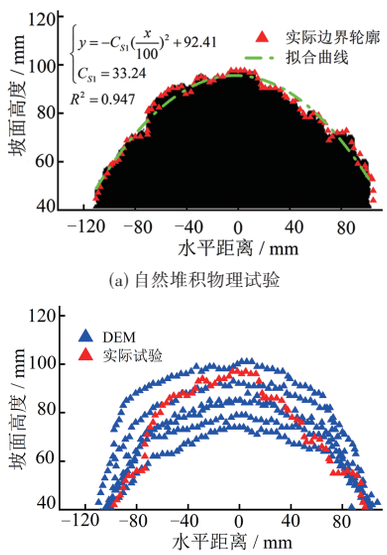
DEM仿真土壤-小麦交互过程的接触参数包括C_R、S_F、R_F和物料间表面能(S_E)。以湿黏土自然堆积坡度系数(C_{S1})为指标，对比实际试验和仿真试验结果，分析土壤-土壤恢复系数(C_{R1})、土壤-土壤静摩擦因数(S_{F1})、土壤-土壤动摩擦因数(R_{F1})和土壤-土壤表面能(S_{E1})对响应值的影响关系。各参数取值范围由物理试验测得和参考文献[13,25-27]确定，如表1所示。湿黏土颗粒间黏附力强，难以形成易测量的自然坡角，但坡面外轮廓倾向于二次函数曲线，对堆积图像进行去噪、灰度、二值化，提取图像边界点并进行曲线拟合，以拟合曲线二次项系数绝对值为指标，如图3所示。

获得土壤-土壤参数优化方案后，以土壤-小麦混合物自然坍塌坡度系数(C_{S2})为试验指标，分析土壤-小麦恢复系数(C_{R2})、土壤-小麦静摩擦因数(S_{F2})、土壤-小麦动摩擦因数(R_{F2})和土壤-小麦表面能(S_{E2})对响应值的影响关系。仿真参数通过物理试验和文献[13,23,28-31]确定，如表1所示，由于土壤-小麦黏附力弱于土壤-土壤黏附力，因此设置S_{E2}小于5 J/m^2[32]。此外，由于土壤湿黏度高，土壤和小麦均匀混合难度大，无法确保每次试验时混合物均匀性相同。因此，试验时将土壤和小麦分层匀铺，以确保每次试验时初始状态相同。打开底部抽板，在重力作用下自然坍塌流动，待混合物稳定后测量C_{S2}，如图4所示。

表 1　接触参数显著性分析仿真试验参数设置

Tab. 1　Parameter setting of contact parameter significance analysis simulation test

参数	土壤	小麦
密度/(kg·m^{-3})	2 600	1 350
剪切模量/Pa	1×10^6	5.08×10^8
泊松比	0.30	0.29
恢复系数(与土壤)	0.05~0.50	0.05~0.50
静摩擦因数(与土壤)	0.30~1.00	0.30~0.90
滚动摩擦因数(与土壤)	0.05~0.65	0.05~0.50
表面能(与土壤)/(J·m^{-2})	1.00~5.00	0.10~3.00

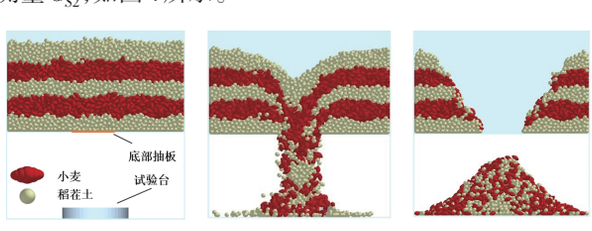


(a) 自然堆积物理试验

(b) 自然堆积试验DEM数值模拟

图 3　自然堆积试验结果

Fig. 3　Dome-like soil pile obtained in natural slope angle test



(a) 土壤和小麦均匀层铺　(b) 坍塌自流　(c) 混合物稳定堆积

图 4　混合物料形成自然坡角过程

Fig. 4　Forming natural slope angle with mixture

1.4　土壤-土壤接触参数标定试验

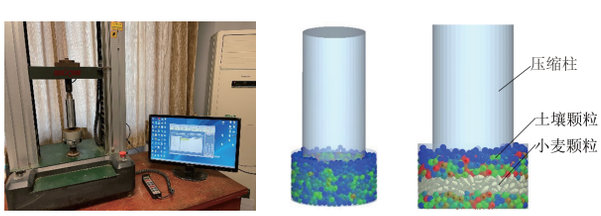
采用Box-Behnken试验设计方法，对土壤-土壤显著性参数进行仿真试验。以C_{S1}为响应值，因素(C_{R1}、R_{F1}、S_{E1})取值范围通过显著性分析试验得出，其他参数根据相关文献和物理试验确定，参考表1，试验方案和结果如表2所示。利用Design-Expert软件对仿真结果进行方差分析，建立响应值与各因素的回归模型方程。

表 2 土壤-土壤参数标定试验方案与结果

Tab. 2 Results for soil-soil parameters calibration

序号	C_{R1}	R_{F1}	S_{E1}/(J·m^{-2})	C_{S1}
1	0.275	0.35	3	32.78
2	0.050	0.35	5	35.73
3	0.500	0.35	5	32.05
4	0.050	0.65	3	30.24
5	0.275	0.35	3	28.87
6	0.275	0.35	3	30.54
7	0.500	0.35	1	18.66
8	0.500	0.05	3	24.09
9	0.050	0.05	3	28.30
10	0.275	0.65	1	26.65
11	0.275	0.35	3	31.67
12	0.500	0.65	3	34.97
13	0.275	0.35	3	31.32
14	0.050	0.35	1	22.91
15	0.275	0.65	5	38.93
16	0.275	0.05	5	34.05
17	0.275	0.05	1	20.53

以 C_{S1} 实测值(33.24)为指标,通过回归模型获取多组土壤-土壤参数较优组合,基于各较优组合参数进行有侧限压缩仿真试验,以土壤压缩实际试验中压缩力为指标,分析各参数组合方案误差。试验方法为:试验时,试验盒内全部填满土壤颗粒,压缩速度设定为 60 mm/min,压缩距离设定为 15 mm,如图 5 所示;试验结束后,通过万能试验机获取位移-力曲线,在位移-力曲线图上每隔 3 mm 取值,对比仿真值与实测值,计算相对误差,得出最佳参数组合方案。



(a) 压缩试验台 (b) 土壤压缩仿真 (c) 土壤-小麦压缩仿真

图 5 压缩对比试验

Fig. 5 Compression contrast test

1.5 土壤-小麦接触参数标定试验

获得土壤-土壤显著性参数最佳组合方案后,采用 Box-Behnken 试验设计方法,对土壤-小麦显著性参数进行仿真试验。以 C_{S2} 为响应值,因素(S_{F2}、R_{F2} 和 S_{E2})取值范围通过显著性分析试验得出,其他参数根据相关文献和物理试验确定(表 1),试验方案和结果如表 3 所示。试验结果的分析方法与土壤-土壤接触参数标定试验中方法相同。

以 C_{S2} 实测值(62.52)为指标,通过回归模型获取多组土壤-小麦参数较优组合,基于各较优组合参数进行有侧限压缩仿真试验,分析与实际试验的相对误差,得出最佳参数组合方案。在进行土壤-小麦有侧限压缩试验时,方法与土壤-土壤接触参数标定试验中所述相同,但以土壤-小麦混合物为试验材料,且土壤和小麦等高交错匀铺,如图 5 所示。

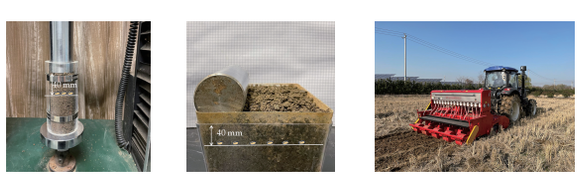
表 3 土壤-小麦接触参数标定试验方案与结果

Tab. 3 Results for soil-wheat parameter calibration

序号	S_{F2}	R_{F2}	S_{E2}/(J·m^{-2})	C_{S2}
1	0.60	0.050	0.10	31.34
2	0.60	0.275	1.55	63.51
3	0.60	0.275	1.55	57.88
4	0.60	0.050	3.00	63.76
5	0.60	0.275	1.55	63.35
6	0.90	0.050	1.55	39.99
7	0.90	0.275	3.00	92.07
8	0.30	0.275	0.10	42.60
9	0.60	0.275	1.55	56.07
10	0.90	0.275	0.10	53.73
11	0.60	0.500	0.10	70.83
12	0.60	0.275	1.55	60.57
13	0.30	0.050	1.55	43.24
14	0.90	0.500	1.55	90.14
15	0.30	0.275	3.00	88.56
16	0.30	0.500	1.55	71.05
17	0.60	0.500	3.00	120.36

1.6 验证试验

仿真与实际试验的相对误差是评价离散元模型及参数准确性的重要标准。该模型主要用于模拟播后土壤-种子交互效应,为使试验环境可控,采用准静态压缩试验(图 6a)和滚动压缩试验(图 6b)来评估离散元模型参数的准确性。小麦播种深度为 30~50 mm,因此试验设置小麦种子距地表 40 mm。准静态压缩试验中压头移动速度设置为 40 mm/min,当压力达到 400 N 时停止试验;滚动压缩试验中将镇压辊缓慢放置在试验土表面,随后使镇压辊匀速缓慢向前移动,模拟播后地表镇压过程。分别在准静态压缩试验和滚动镇压试验结束后测量种子在土壤中的位置。



(a) 准静态压缩试验 (b) 滚动压缩试验 (c) 田间试验

图 6 模型精度验证试验

Fig. 6 Verification test of model accuracy

此外,为进一步分析该模型参数的仿真结果与实际作业的相对误差,采用全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦宽幅播种机,进行仿真与田间试验(图 6c)结果对比[33]。试验地点为农业农村部南京农业机械化研究所稻麦轮作试验基地,前进速度为 1 m/s,旋耕刀转速为 300 r/min。田间试验和仿真试验结束后,随机统计播种深度,计算相对误差。

2　结果与分析

2.1　接触参数测定试验结果

接触参数测量结果如图 7 所示。从图 7 可知，C_{R1}、S_{F1} 和 R_{F1} 分别为 0.03~0.24、0.42~1.12 和 0.15~0.65，其平均值分别为 0.10、0.65 和 0.42。C_{R2}、S_{F2} 和 R_{F2} 分别为 0.03~0.33、0.35~0.94、0.11~0.55，其平均值分别为 0.14、0.58 和 0.36。由于湿黏土壤含水率高、黏性强的特点，土壤-土壤、土壤-种子间均有较强黏粘力。因此，实际试验测得的数值受土粒黏粘力影响，可能导致恢复系数测量值比实际小，而静摩擦因数和动摩擦因数的测量值比实际值大，因此在仿真试验中适当增大恢复系数和减小动静摩擦因数。此外，根据物料特性和跌落姿态的差异，测量值存在一定差异。

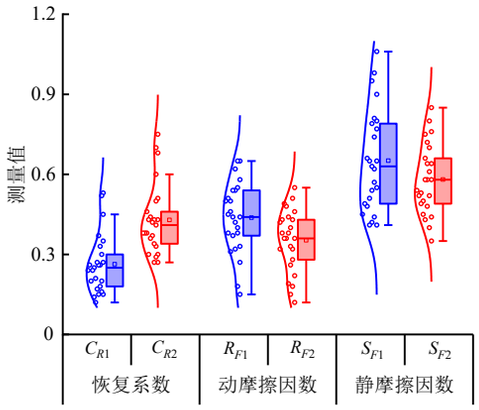


图 7　接触参数物理试验结果统计

Fig. 7　Physical test measurements of contact parameters

2.2　接触参数显著性分析试验结果

C_R 对 C_S 的影响关系如图 8a 所示。随 C_R 的增加，C_{S1} 和 C_{S2} 均呈现先小幅上升后下降的趋势（图 9a）；当 C_{R1} 为 0.16 和 0.49 时，C_{S1} 分别为最大值 35.32 和最小值 24.28，变化幅值为 11.04；当 C_{R2} 为 0.16 和 0.49 时，C_{S2} 分别为最大值 58.56 和最小值 46.18，变化幅值为 12.38。

随 S_F 的增加，C_S 呈现增加趋势（图 8b）。当 S_{F1} 为 0.40 和 1.00 时，C_{S1} 分别为最小值 31.86 和最大值 36.13，变化幅值为 4.27；当 S_{F2} 为 0.30 和 0.90 时，C_{S2} 分别为最小值 59.15 和最大值 75.88，变化幅值为 16.73。

随 R_F 的增加，C_S 呈现增加趋势（图 8c）。当 R_{F1} 为 0.05 和 0.65 时，C_{S1} 分别为最小值 22.43 和最大值 34.88，变化幅值为 12.45；当 R_{F2} 为 0.05 和 0.50 时，C_{S2} 分别为最小值 41.93 和最大值 83.30，变化幅值为 41.37。

随 S_E 的增加，C_S 呈现增加趋势（图 8d）；当 S_{E1} 为 1.00、5.00 J/m^2 时，C_{S1} 分别为最小值 20.53 和最大值 37.07，变化幅值为 16.54；当 S_{E2} 为 0.10、3.00 J/m^2 时，C_{S2} 分别为最小值 51.47 和最大值 104.78，变化幅值为 53.31。

综上分析，C_{R1}、R_{F1}、S_{E1} 对 C_{S1} 影响显著，S_{F2}、R_{F2}、S_{E2} 对 C_{S2} 影响显著。

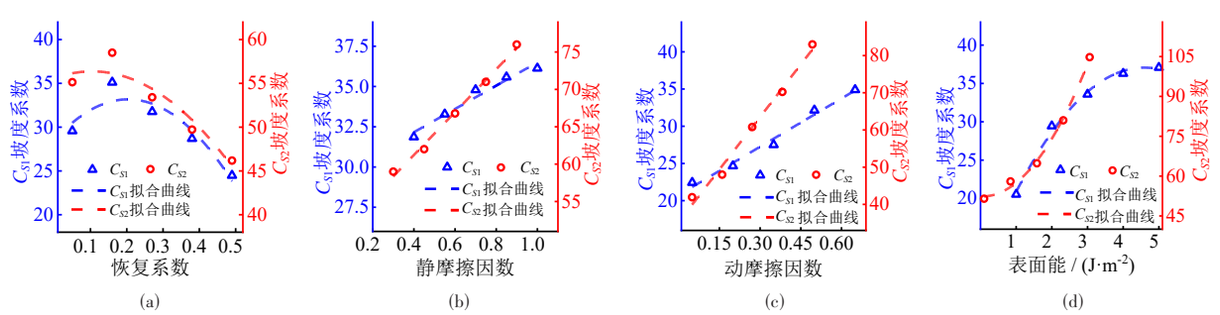


图 8　接触参数对自然坡度系数的影响

Fig. 8　Influence of parameters on natural slope angle

2.3　土壤-土壤接触参数标定试验结果

2.3.1　土壤-土壤接触参数响应面试验结果

对土壤-土壤接触参数的 Box-Behnken 试验结果进行方差分析，结果如表 4 所示。回归模型 $P < 0.01$，$R^2 = 0.963$，失拟项 $P > 0.1$，表明回归模型极显著，模型可靠度高。由表 4 可知，R_{F1} 和 S_{E1} 对 C_{S1} 有极显著影响，$C_{R1}R_{F1}$ 和 C_{R1}^2 对模型影响显著，S_{E1}^2 对模型影响较显著，排序为 $S_{E1} > R_{F1} > C_{R1}$。建立 C_{S1} 和因素的二次回归模型为

$$\begin{aligned} C_{S1} = {} & 15.89 + 6.90C_{R1} - 1.79R_{F1} + 5.64S_{E1} + \\ & 33.09C_{R1}R_{F1} + 0.32C_{R1}S_{E1} - 0.51R_{F1}S_{E1} - \\ & 42.86C_{R1}^2 + 5.94R_{F1}^2 - 0.38S_{E1}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

方差分析结果表明，C_{R1} 和 R_{F1} 之间存在显著交互效应，当 S_{E1} 取中间值（3.00 J/m^2）时，C_{R1} 和 R_{F1} 对 C_{S1} 的交互关系如图 9 所示。随着 C_{R1} 增大，C_{S1} 先略微增大后减小，而随着 R_{F1} 增加，C_{S1} 始终呈现增加趋势。C_{R1} 对 C_{S1} 影响的原因可能是随着 C_{R1} 的增加，土壤颗粒碰撞后的能量损失减少，导致碰撞后颗粒的运动能力增加。R_{F1} 对 C_{S1} 影响显著的原因可能是当 R_{F1} 增大时，颗粒间运动的阻尼增大，相互接触后速度迅速下降。

2.3.2　土壤-土壤接触参数优化结果

表 5 为回归模型预测的土壤-土壤参数较优组合方案，基于其参数组合方案进行有侧限压缩试验数值模拟，结果如图 10 所示。从图 10a 可知，参数组 S1、S2 和 S3 的仿真结果更接近实际压缩力。当压缩位移超过 10 mm 时，S4、S5、S6 和 S7 的抗压强度与实际值相差较大，且随着压缩距离的增加，两者的差异进一步增大。从图 10b 可知，相对误差从小到大依次为 S2、S3、S1、S4、S5、S6、S7，结合位移-力曲线和平均相对误差可知，试验组 S2 的位移-力曲线更接近实际曲线。因此，最佳参数

表 4 土壤-土壤参数标定试验方差分析

Tab. 4 Variance analysis of regression equation for soil-soil parameters calibration

方差来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	468.30	9	52.03	20.37	0.000 3***
C_{R1}	6.91	1	6.91	2.71	0.143 9
R_{F1}	70.91	1	70.91	27.76	0.001 2***
S_{E1}	338.36	1	338.36	132.46	< 0.000 1***
$C_{R1}R_{F1}$	19.95	1	19.95	7.81	0.026 7**
$C_{R1}S_{E1}$	0.083 2	1	0.083 2	0.032 6	0.861 9
$R_{F1}S_{E1}$	0.381 1	1	0.381 1	0.149 2	0.710 8
C^2_{R1}	19.82	1	19.82	7.76	0.027 1**
R^2_{F1}	1.20	1	1.20	0.471 7	0.514 3
S^2_{E1}	9.86	1	9.86	3.86	0.090 2*
失拟项	9.40	3	3.13	1.48	0.348 0
总和	486.18	16			

注：***表示极显著（$P < 0.01$）；**表示显著（$0.01 \leqslant P < 0.05$）；*表示较显著（$0.05 \leqslant P < 0.1$），下同。

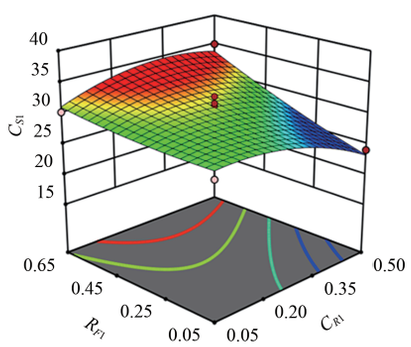


图 9 R_{F1}与C_{R1}对C_{S1}影响的响应曲面

Fig. 9 Response surface for effects of R_{F1} and C_{R1} on C_{S1}

表 5 回归模型预测的土壤-土壤参数优化组合方案

Tab. 5 Soil-soil parameter combination schemes predicted by regression model

方案	C_{R1}	R_{F1}	S_{E1}/(J·m^{-2})
S1	0.083	0.325	4.107
S2	0.124	0.348	3.898
S3	0.149	0.279	3.952
S4	0.235	0.580	2.942
S5	0.327	0.378	3.743
S6	0.397	0.592	2.882
S7	0.460	0.413	4.210

组合为C_{R1} = 0.12、R_{F1} = 0.35 和S_{E1} = 3.90 J/m^2（取 2 位小数点），对应C_{S1}的仿真结果为 31.79。

2.4 土壤-小麦接触参数标定试验结果

2.4.1 土壤-小麦接触参数响应面试验结果

对土壤-小麦接触参数的 Box-Behnken 试验结果进行方差分析，结果如表 6 所示。回归模型$P < 0.01$，R^2 = 0.989，失拟项$P > 0.1$，表明回归模型可靠度高。由表 6 可知，R_{F2}、S_{E2}、S^2_{E2}均对C_{S2}模型影响极显著；S_{F2}、$S_{F2}R_{F2}$和$R_{F2}S_{E2}$对模型影响显著，排序为$R_{F2} > S_{E2} > S_{F2}$。建立C_{S2}与各因素的二次回归模型为

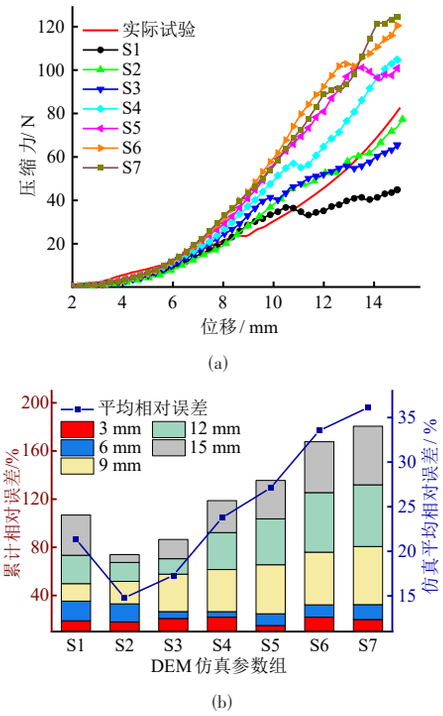


图 10 不同土壤-土壤参数方案压缩对比试验

Fig. 10 Compression contrast test of different soil-soil parameters schemes

表 6 土壤-小麦接触参数标定试验方差分析

Tab. 6 Variance analysis of regression equation for soil-wheat parameter calibration

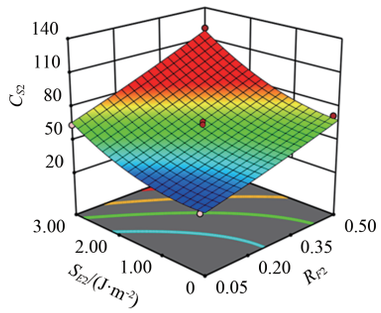
来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	7 986.16	9	887.35	72.75	< 0.000 1***
S_{F2}	116.13	1	116.13	9.52	0.017 7**
R_{F2}	3 786.68	1	3 786.68	310.44	< 0.000 1***
S_{E2}	3 454.88	1	3 454.88	283.24	< 0.000 1***
$S_{F2}R_{F2}$	124.77	1	124.77	10.23	0.015 1**
$S_{F2}S_{E2}$	14.52	1	14.52	1.19	0.311 4
$R_{F2}S_{E2}$	73.19	1	73.19	6.00	0.044 1**
S^2_{F2}	2.38	1	2.38	0.195 1	0.672 0
R^2_{F2}	10.52	1	10.52	0.862 6	0.383 9
S^2_{E2}	397.46	1	397.46	32.58	0.000 7***
失拟项	41.96	3	13.99	1.29	0.392 7
总和	8 071.54	16			

$$C_{S2} = 29.48 + 6.76S_{F2} + 9.55R_{F2} - 0.97S_{E2} + 82.74S_{F2}R_{F2} - 4.38S_{F2}S_{E2} + 13.11R_{F2}S_{E2} - 8.35S^2_{F2} + 31.22R^2_{F2} + 4.62S^2_{E2} \quad (2)$$

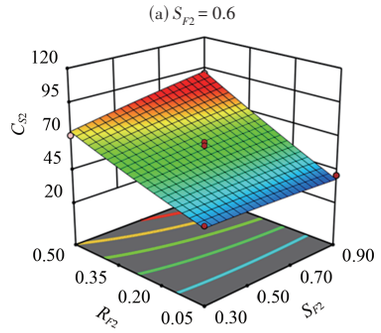
方差分析结果表明因素间存在明显交互效应。当S_{F2}取中间值（0.60）时，C_{S2}随R_{F2}或S_{E2}增加而呈现增加趋势，如图 11a 所示；当S_{E2}取中间值（1.55 J/m^2）时，C_{S2}随S_{F2}或R_{F2}增加而呈现增加趋势，如图 11b 所示。R_{F2}对C_{S2}的影响比S_{F2}更显著，可能是由于颗粒离散元模型比实际形状规整，仿真时颗粒间相互嵌合减少，颗粒滚动更明显。

2.4.2 土壤-小麦接触参数优化结果

获得的较优参数组合方案如表 7 所示。有侧限抗压



(a) S_{F2} = 0.6



(b) S_{E2} = 1.55 J/m^2

图 11　因素相互作用对 C_{S2} 影响的响应曲面

Fig. 11　Response surfaces for effect of factor interactions on C_{S2}

试验结果如图 12 所示。从图 12a 可知，试验的位移-力曲线存在差异，但差异不显著；这可能是由于在准静态压缩试验中土壤-小麦接触面积较小，因此参数对试验结果影响较小；从图 12b 可知，相对误差从小到大依次为 S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7，其中试验组 S1、S2 和 S3 的误差相近，结合曲线末端变化趋势，位移大于 14 mm 后 S3 的位移-力曲线后续趋势更接近实际曲线。因此，S3 为最佳参数组合，即 S_{F2} = 0.48、R_{F2} = 0.29 和 S_{E2} = 1.69 J/m^2（取 2 位小数点），对应 C_{S2} 的仿真结果为 59.74。

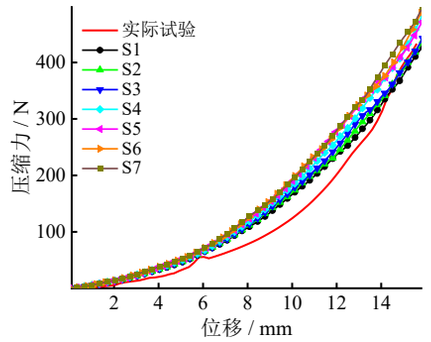
表 7　回归模型预测的土壤-小麦参数组合方案

Tab. 7　Soil-wheat parameter combination scheme predicted by regression model

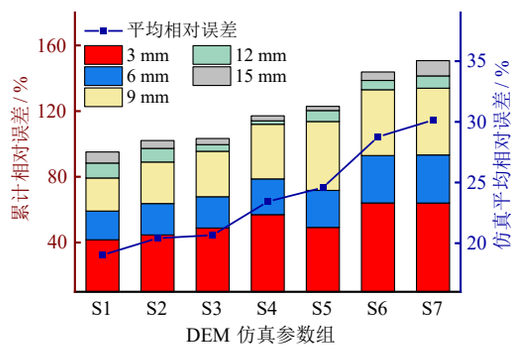
方案	S_{F2}	R_{F2}	S_{E2}/(J·m^{-2})
S1	0.379	0.116	2.521
S2	0.430	0.266	1.877
S3	0.483	0.293	1.693
S4	0.552	0.355	1.212
S5	0.617	0.356	1.086
S6	0.753	0.287	1.491
S7	0.859	0.328	0.937

2.5　验证试验结果

验证试验的仿真过程如图 13 所示，试验结果如图 14 所示。由图 14 可知，准静态压缩模拟测试中，种子平均移动距离为 31.25 mm，对比实际试验值 33.66 mm，相对误差为 7.16%；滚动镇压试验中，种子平均移动距离为 10.93 mm，对比实际试验值 12.20 mm，相对误差为 10.41%；播种仿真试验中，种子平均播种深度为 34.43 mm，对比实际播种深度 40.23 mm，相对误差为 14.42%。



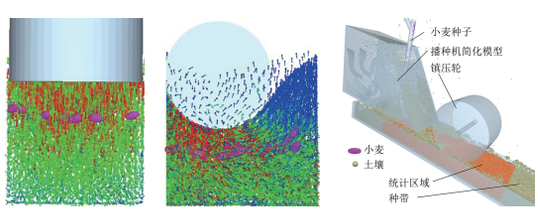
(a)



(b)

图 12　不同土壤-小麦相互作用参数方案压缩对比试验

Fig. 12　Compression contrast test of different soil-wheat interaction parameter schemes



(a) 准静态压缩　(b) 滚动压缩　(c) 播种镇压过程

图 13　离散元模型验证试验仿真

Fig. 13　Model accuracy verification test simulation process

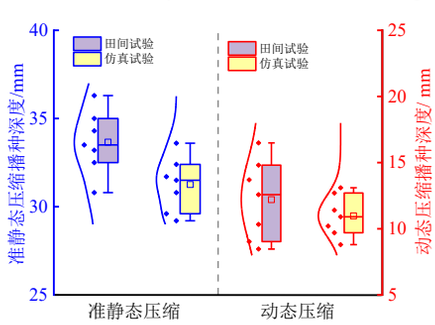


图 14　验证试验结果对比

Fig. 14　Data analysis for validation tests

从试验结果可知，种子实际位移比仿真试验中位移变化大，准静态压缩误差较滚动压缩误差小。可能的原因是实际土粒规则性较差，实际物料较仿真物料间空隙大；在准静态压缩过程中较大的压力使颗粒间摩擦力的影响不明显，种子和土壤倾向于同步运动；在滚动镇压过程中镇压力较小，产生的影响效应相对较小，使种子与土壤间的互作力影响较明显，增加了仿真误差；田间

试验时地面平整度与仿真存在一定差异，产生了一定的误差，但误差在合理范围内，表明了参数组合的准确性。

3 结论

（1）通过物理测定试验初步确定了各参数取值范围，通过显著性分析明确了各因素对指标的影响关系，因素C_{R1}、R_{F1}、S_{E1}对C_{S1}有显著影响，S_{F2}、R_{F2}、S_{E2}对C_{S2}有显著影响。

（2）以自然坡度堆积系数为指标，分别对C_{S1}和C_{S2}的显著参数进行响应面试验，对较优参数组合进行了压缩试验误差分析，获取了最佳参数组合方案，分别为：C_{R1}=0.12、R_{F1}=0.35、S_{E1}=3.90 J/m^2、S_{F2}=0.48、R_{F2}=0.29、S_{E2}=1.69 J/m^2。

（3）通过准静态压缩试验、滚动压缩试验及田间试验，对参数模型准确性进行了评估，各验证试验的相对误差分别为7.16%、10.41%和14.42%，验证了土壤-小麦交互模型离散元参数的准确性。

参 考 文 献

[1] GU F, ZHAO Y, WU F, et al. Simulation analysis and experimental validation of conveying device in uniform rushed straw throwing and seed-sowing machines using CFD-DEM coupled approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106720.

[2] LI C, TANG Y, MCHUGH A D, et al. Development and performance evaluation of a wet-resistant strip-till seeder for sowing wheat following rice[J]. Biosystems Engineering, 2022, 220: 146 - 158.

[3] AIKINS K A, UCGUL M, BARR J B, et al. Determination of discrete element model parameters for a cohesive soil and validation through narrow point opener performance analysis[J]. Soil and Tillage Research, 2021, 213: 105123.

[4] 曾智伟，马旭，曹秀龙，等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报，2021，52(4)：1 - 20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52 (4):1 - 20. (in Chinese)

[5] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 101 - 108. (in Chinese)

[6] 罗帅，袁巧霞，GOUDA Shaban等. 基于JKR粘结模型的蚯蚓粪基质离散元法参数标定[J]. 农业机械学报，2018，49(4)：343 - 350.
LUO Shuai, YUAN Qiaoxia, GOUDA Shaban, et al. Parameters calibration of vermicomposting nursery substrate with discrete element method based on JKR contact model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 343 - 350. (in Chinese)

[7] 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)

[8] 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.

[9] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. 3D DEM tillage simulation: validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweep tool operating in a cohesionless soil[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 144: 220 - 227.

[10] UCGUL M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Discrete element modelling of top soil burial using a full scale mouldboard plough under field conditions[J]. Biosystems Engineering, 2017, 160: 140 - 153.

[11] UCGUL M, SAUNDERS C. Simulation of tillage forces and furrow profile during soil-mouldboard plough interaction using discrete element modelling[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190: 58 - 70.

[12] BAHRAMI M, NADERI-BOLDAJI M, GHANBARIAN D, et al. Simulation of plate sinkage in soil using discrete element modelling: calibration of model parameters and experimental validation[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 203: 104700.

[13] 丁启朔，任骏，BELAL Eisa Adam，等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. 农业机械学报，2017，48(3)：38 - 48.
DING Qishuo, REN Jun, BELAL Eisa Adam, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 38 - 48. (in Chinese)

[14] GONG H, CHEN Y, WU S, et al. Simulation of canola seedling emergence dynamics under different soil compaction levels using the discrete element method (DEM)[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 223: 105461.

[15] 卢琦，刘芳建，刘立晶，等. 种沟土壤-种子-覆土装置互作离散元模型建立与验证[J]. 农业机械学报，2023，54(10)：46 - 57.
LU Qi, LIU Fangjian, LIU Lijing, et al. Establishment and verification of discrete element model for seed furrow soil-seed-covering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(10): 46 - 57 (in Chinese)

[16] 田辛亮，丛旭，齐江涛，等. 黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报，2021，52(10)：100 - 108,242.
TIAN Xinliang, CONG Xu, QI Jiangtao, et al. Parameter calibration of discrete element model for corn straw-soil mixture in black soil areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 100 - 108, 242 (in Chinese)

[17] 颜丙新，武广伟，付卫强，等. 基于EDEM的玉米精播高位投种着床位置影响因素研究[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊2)：47 - 54.
YAN Bingxin, WU Guangwei, FU Weiqiang, et al. Influencing factors of corn implantation distribution for high-height planting based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 47 - 54 (in Chinese)

[18] 周龙. 基于离散元法的玉米种子建模及播种过程的仿真分析与试验研究[D]. 长春:吉林大学, 2022.
ZHOU Long. DEM-based modelling of maize seeds and the simulation analysis and experimental study of the seed-sowing [D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese)

[19] JOHNSON K L, KENDALL K, ROBERTS A D. Surface energy and contact of elastic solids[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1971, 324: 301 - 313.

[20] ZHOU J, ZHANG L, HU C, et al. Calibration of wet sand and gravel particles based on JKR contact model[J]. Powder Technology, 2022, 397: 117005.

[21] HANG C, GAO X, YUAn M, et al. Discrete element simulations and experiments of soil disturbance as affected by the tine spacing of subsoiler[J]. Biosystems Engineering, 2018, 168: 73 - 82.

[22] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Three-dimensional discrete element modelling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 298 - 306.

[23] SUN K, YU J, LIANG L, et al. A DEM-based general modelling method and experimental verification for wheat seeds [J]. Powder Technology, 2022, 401: 117353.

[24] 张荣芳, 周纪磊, 刘虎, 等. 玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊1): 69 - 77.
ZHANG Rongfang, ZHOU Jilei, LIU Hu, et al. Determination of interspecific contact parameters of corn and simulation calibration of discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 1): 69 - 77 (in Chinese)

[25] 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)

[26] 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)

[27] 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).

[28] 刘凡一. 清选装置中小麦颗粒和短茎秆离散元建模研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2018.
LIU Fanyi. Discrete element modelling of the wheat particles and short steaw in cleaning devices [D]. Yangling: Northwest A&F University,2018. (in Chinese)

[29] 姜萌, 刘彩玲, 魏丹, 等. 小麦宽苗带精量播种施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 53 - 62.
JIANG Meng, LIU Cailing, WEI Dan, et al. Design and test of wide seedling strip wheat precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 53 - 62. (in Chinese)

[30] 祝清震. 冬小麦宽苗带撒播与基肥分层精量施用联合作业关键技术研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2024.
ZHU Qingzhen. Key technology of combined wide-boundary sowing and base-fertilizer stratified precision application for winter wheat[D]. Yangling: Northwest A&F University,2024. (in Chinese)

[31] 郑侃, 刘国阳, 国立伟, 等. 土壤分流式宽苗带小麦少耕播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 128 - 138.
ZHENG Kan, LIU Guoyang, GUO Liwei, et al. Design and experiment of wide-boundary seldom-tillage wheat planter with soil-shunting function[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 128 - 138. (in Chinese)

[32] 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.

[33] 罗伟文, 顾峰玮, 吴峰, 等. 全秸硬茬地碎秸行间集覆小麦播种机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 42 - 52.
LUO Weiwen, GU Fengwei, WU Feng, et al. Design and experiment of wheat planter with straw crushing and inter-furrow collecting-mulching under full amount of straw and root stubble cropland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 42 - 52. (in Chinese)