doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.029

基于屈服阻力的苏打盐碱土离散元模型参数标定

王宇星[1,2]　王晓燕[1,2]　李洪文[1,2]　吴正阳[1,2]　高世杰[1,2]　刘　迪[1,2]
(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 农业农村部河北北部耕地保育农业科学观测试验站, 北京 100083)

摘要: 松嫩平原作为世界三大盐碱地区之一,其特有的苏打盐碱土因其粘重特性显著,在设计和优化针对该类型土质的作业机具时,必须考虑土壤耕作阻力。离散元法(Discrete element method, DEM)在预测土壤耕作阻力时更加精确快速,成为耕作机具设计优化的重要工具。本研究构建苏打盐碱土 DEM 模型并进行参数标定,选择 Hertz - Mindlin with Bonding V2 模型作为 DEM 仿真模型。通过文献查阅获取土壤与机具的本征参数,使用倾斜平面试验确定土壤间、土壤与机具间的接触参数。进一步采用锥刺和单轴压缩试验,结合中心复合设计(Central composite design,CCD)获取 Bond 键参数的最优组合。最后通过田间试验验证参数标定的准确性。试验结果表明,锥刺和单轴压缩试验土壤屈服阻力分别为 153.3 N 和 331.4 N;在深 40 cm 土层,开沟铲作业阻力为 11 907.5 N;Bond 键最优参数组合:单位面积法向刚度 K_n 为 3.68×10^7 N/m^3、单位面积切向刚度 K_s 为 2.97×10^7 N/m^3、法向应力 σ 为 197 374 Pa 和切向应力 τ 为 96 285.5 Pa。通过对比锥刺试验、单轴压缩试验及田间试验的阻力预测值与实测值,相对误差分别为 -0.95%、0.78% 和 -8.61%,证明了 DEM 模型的可靠性,展示了该模型准确预测苏打盐碱土耕作阻力的能力。

关键词: 苏打盐碱土; 屈服阻力; 离散元法; 参数标定; 锥刺试验; 单轴压缩试验
中图分类号: S224.29　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0301-10　　**OSID**:

Calibration of Parameters for Sodic Saline-alkali Soil Discrete Element Model Based on Yield Resistance

WANG Yuxing[1,2]　WANG Xiaoyan[1,2]　LI Hongwen[1,2]　WU Zhengyang[1,2]　GAO Shijie[1,2]　LIU Di[1,2]
(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Scientific Observing and Experiment Station of Arable Land Conservation* (*North Hebei*), *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: As one of the three major saline-alkali regions worldwide, the Songnen Plain is characterized by heavy soda saline-alkali soil. When designing and optimizing agricultural implements for this unique soil type, it is essential to consider soil tillage resistance. The discrete element method (DEM) has become a crucial tool for optimizing tillage machinery due to its precision and efficiency in predicting soil tillage resistance. A DEM model specific to soda saline-alkali soil and performs parameter calibration was established, laying the foundation for the development of equipment for the improvement and utilization of saline-alkali soil. The Hertz - Mindlin with Bonding V2 model was selected as the DEM simulation framework. Intrinsic parameters for soil and implements were derived from the literature, while an inclined plane test was used to determine contact parameters between soil particles and between soil and implements. Further, the optimal Bond parameters were identified through cone penetration and uniaxial compression tests, combined with central composite design (CCD). Finally, field tests validated the accuracy of the calibrated parameters. Results showed that the yield resistance of soil in cone penetration and uniaxial compression tests was 153.3 N and 331.4 N, respectively, while tillage resistance of the furrow opener at depth of 40 cm was 11 907.5 N. The optimal Bond parameter combination was determined to be normal stiffness per unit area $K_n = 3.68\times10^7$ N/m^3, tangential stiffness per unit area $K_s = 2.97\times10^7$ N/m^3, normal stress σ = 197 374 Pa, and tangential stress τ = 96 285.5 Pa. By

收稿日期: 2024-04-01　修回日期: 2024-04-28
基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFD1500602-03)
作者简介: 王宇星(1992—),男,博士生,主要从事机械设计及理论研究,E-mail: b20213070563@cau.edu.cn
通信作者: 王晓燕(1973—),女,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作技术与装备研究,E-mail: xywang@cau.edu.cn

comparing the predicted and actual resistance values from cone penetration tests, uniaxial compression tests, and field tests, discrepancies of −0.95%, 0.78% and −8.61% were observed, respectively. The reliability of the DEM model was confirmed, demonstrating its proficiency in accurately predicting the tillage resistance of sodic saline-alkali soils.

Key words: sodic saline-alkali soil; yield resistance; discrete element method; parameter calibration; cone penetration test; uniaxial compression test

0 引言

盐碱地改良与利用是农业科学和环境工程领域的一项重要议题。在中国,盐碱地作为一种潜在的耕地资源,其高效开发与利用对于提升粮食产量、保障粮食安全具有极其重要的作用[1]。其中,松嫩平原作为世界三大盐碱地区之一,拥有超过 3.2×10^6 hm^2盐碱土[2]。该地区气候寒冷,冻结期长,春季冻土融化时的水分滞留导致了土壤盐分累积,进而形成了粘重的苏打盐碱土[3]。这种土壤透水性和透气性极差,对农作物生长产生有害影响,对农业可持续发展及生态环境造成了一定的破坏[4]。

为解决这一问题,在农业生产和土壤改良中常采用深松和深翻等方法改良土壤条件[5]。这些作业方法对于降低机械耕作阻力提出了更高要求。然而,土壤与机具之间的相互作用机制非常复杂,这使得通过传统方法直接测量耕作阻力变得困难。离散元法(Discrete element method, DEM)作为一种模拟土壤力学特性的有效方法,近年来得到了广泛应用。张智泓等[6]通过 DEM 分析 3 种仿生铲尖,发现砂鱼蜥头部仿生曲线特殊的曲率变化对破土阻力有明显影响,可以有效降低牵引阻力。王金武等[7]通过 DEM 建立部件-土壤-作物多元仿真模型,并对狗獾爪趾仿生减阻铲尖进行优化,降低作业阻力 5.79%。邹亮亮等[8]通过 DEM 分析揭示了深松铲与土壤颗粒间的互作特性,确定了铲体的最大摩擦接触面。并将其作为主动润滑减阻面开展后续研究。何晓宁等[9]通过 DEM 对油莎豆旋耕挖掘方式进行分析,确定影响旋耕刀工作阻力和刀轴扭矩的结构参数和取值范围。优化后旋耕刀埋果率降低 1.2 个百分点,土壤破碎率提高 1.3 个百分点。

由于盐碱土的机械组成具有显著差异[3],导致现有模型无法准确预测苏打盐碱土的耕作阻力。因此,开发专用于苏打盐碱土的模型以预测耕作阻力十分必要。

DEM 模拟中土壤颗粒具备形态多样、尺寸不一和颗粒度分布复杂的物理特性,为模拟带来了误差,可能导致模拟结果与实际物理特性之间存在差异[10]。为了使 DEM 模拟能更准确地反映研究对象的实际物理状况,需通过参数标定来获取合适的 DEM 参数。在 DEM 模拟中,部分参数无法直接通过试验获取,需通过校准试验,借助一个可直接测量且具有代表性的因素作为中介间接获取。屈服强度是指土壤从弹性形变过渡到塑性形变的应力水平,屈服强度可以有效反映土壤的物理特性。并且,土壤屈服强度可以直接通过试验测定获取[11]。通过无侧限压缩试验[12]、单轴限制压缩试验与无侧限抗压强度试验[13]、锥刺试验[14]和压缩试验[15]等方法可以完成对模型的参数标定。

本研究针对松嫩平原苏打盐碱土特性,选择土壤屈服强度作为中介,通过参数标定,建立苏打盐碱土 DEM 仿真模型,以提高农业机械在该土壤中耕作阻力预测准确性,实现优化机械设计,提升作业效率,为苏打盐碱土改良与利用装备研究提供基础。

1 材料与方法

1.1 DEM 仿真模型选择

选择 Hertz − Mindlin with Bonding V2 模型作为 DEM 仿真模型。通过在 EDEM 软件默认模型 Hertz − Mindlin 模型的基础上,引入 Bonding V2 作为附加模型,来模拟苏打盐碱土颗粒间的复杂相互作用。

Hertz − Mindlin 模型是建立在 HERTZ[16] 于 1882 年提出的接触理论上,该理论主要描述两个弹性体在法向接触时产生的正向接触力。MINDLIN[17-18]对 Hertz 理论进行了进一步拓展,引入切向力计算,以综合摩擦力及滑动潜力的影响。

为了模拟苏打盐碱土粘性特征,本研究引入 Bonding V2 模型作为附加模型。如图 1 所示,通过在两个颗粒间增加 Bond 键来增加颗粒间的粘结特性和摩擦作用,可以更好地还原土壤颗粒之间接触的真实状态[19]。由于 Bond 键的存在,使得土壤颗粒能够紧密粘结在一起,并抵抗切向和法向运动[20]。

Hertz − Mindlin with Bonding V2 模型中,需要标定的参数包括:本征参数、接触参数和 Bond 键参数。本征参数包括:颗粒物理半径 R_p、颗粒接触半径 R_C、密度、剪切模量、泊松比等。接触参数包括:土壤之间、土壤与机具之间的恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数。Bond 键参数包括:单位面积法向刚度 K_n、单位面积切向刚度 K_s、法向应力 σ、切向应力 τ、

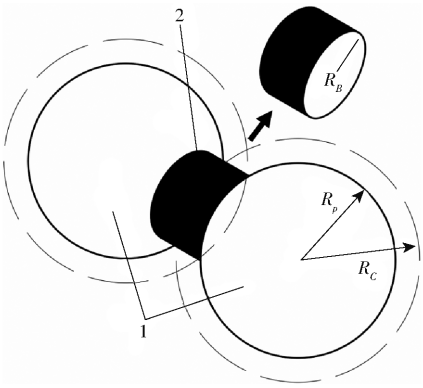


图 1　Bond 键示意图

Fig. 1　Bond schematic

1. 颗粒　2. Bond 键

Bond 键底面半径系数 S_b。

Bond 键生成后，颗粒法向力 F_n、切向力 F_t 和法向力矩 M_n、切向力矩 M_t 初始值为 0，在随后的每个时间步长中，这些力和力矩将进行调整，公式为

$$\begin{cases}\delta F_n = -v_n S_n A \delta t \\ \delta F_t = -v_t S_t A \delta t\end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{cases}\delta M_n = -\omega_n S_t J \delta t \\ \delta M_t = -\dfrac{1}{2}\omega_t S_n J \delta t\end{cases} \tag{2}$$

其中

$$A = \pi R_B^2 \tag{3}$$

$$J = \frac{1}{2}\pi R_B^4 \tag{4}$$

$$R_B = R_p S_b \tag{5}$$

式中　S_n、S_t——法向和切向刚度，N/m

A——Bond 键截面面积，m^2

J——Bond 键圆柱的极惯性矩，m^4

δt——仿真时间步长，s

v_n、v_t——颗粒法向和切向速度，m/s

ω_n、ω_t——颗粒法向和切向角速度，rad/s

R_B——颗粒粘结半径，m

为简化模型，粘结半径 R_B 设定为等于 R_p，即 S_b 等于 1[21]。当所受到的应力达到最大法向应力或切向剪切应力时，Bond 键断裂，从而模拟了土壤颗粒间的实际相互作用过程[22-23]。最大法向应力和切向剪切应力表达式为

$$\begin{cases}\tau_{\max} < \dfrac{-F_n}{A} + \dfrac{2M_t}{J}R_B \\ \sigma_{\max} < \dfrac{-F_n}{A} + \dfrac{M_t}{J}R_B\end{cases} \tag{6}$$

1.2　DEM 模型本征参数

1.2.1　苏打盐碱土含水率

在东北松嫩平原苏打盐碱土区采集土壤样本，具体位于黑龙江省哈尔滨市西北方，地理坐标为东经 125.5°，北纬 46.7°。

含水率是影响土壤力学行为的重要因素，当苏打盐碱土含水率较高时，土壤胶溶分散，变得泥泞；而当含水率较低时，土壤则变得坚硬[3]。为确保后续建立的 DEM 模型能够准确模拟并预测秋季整地时期的土壤耕作阻力，土壤采集选在秋收结束后 7 d 左右，该时间安排与实际整地作业时段相同。

在深度 5、10、20、30、40 cm 土层处，分别采集适量土壤样本，测定整体含水率，并比较各土层间的含水率差异。土壤样本在采集后立即称量其湿质量，并通过反复干燥至恒定质量确定其干质量。计算不同深度土壤含水率，计算公式为

$$W = \frac{M_w - M_d}{M_d} \times 100\% \tag{7}$$

式中　W——土壤含水率，%

M_w——土壤湿质量，g

M_d——土壤干质量，g

分析结果表明，在深度 10 cm 处，苏打盐碱土含水率最高，为 35.1%。随后，含水率随深度增加而逐步降低。在深度 10 ~ 40 cm，土壤含水率大致维持在 32.4%，表明在这一范围内深度对土壤含水率的影响相对有限。图 2 为土壤含水率变化曲线。

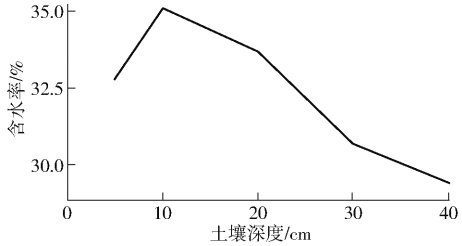


图 2　不同深度土壤含水率变化曲线

Fig. 2　Soil moisture content variation with depth

1.2.2　苏打盐碱土粒径分布和土层结构

使用 DIK - 2012 型恒温式土壤团粒结构分析仪，对土壤粒径分布进行测试，记录试验数据并绘制土壤颗粒直径分布占比图。试验结果如图 3 所示，其中 70% 土壤颗粒直径小于 71 μm，85% 颗粒直径小于 160 μm，说明苏打盐碱土颗粒直径普遍较小。

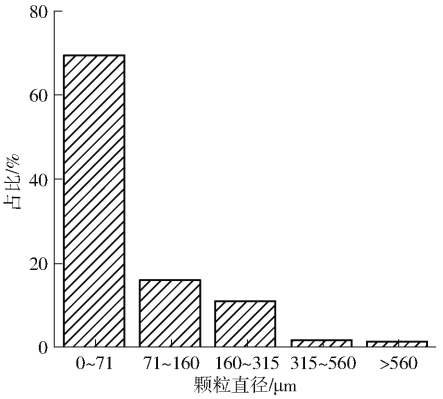


图 3　颗粒直径占比

Fig. 3　Soil aggregate distribution graph

根据王尊亲等[3]研究,黑龙江省安达市苏打盐碱土深度 1 ~36 cm 的颗粒直径 0 ~50 μm 占比均为 70% 左右,苏打盐碱土分层特征并不明显,颗粒间差异较小。因此,在建立 DEM 模型时,可以采用统一直径的圆形颗粒来模拟土槽中的颗粒,且无需对不同土层进行区分,简化了模型的构建过程。

仿真中使用的 R_p 往往大于实际 R_p,这是因为使用较大颗粒可以显著减少仿真所需处理的颗粒总数,从而提高计算效率;其次,本研究重点在于土壤的宏观力学行为分析,而不是微观结构的细节模拟。因此,根据文献[24 -25],土壤 R_p 取 5 mm。

在 Bonding V2 模型中,R_C 决定 Bond 键生成数量,且无法通过计算获得。R_C 越大,生成的 Bond 键越多,但是 Bond 键强度越弱;相反,较小 R_C 生成较少 Bond 键,但是每个 Bond 键强度较强。因此 R_C 具体取值对于最终标定的结果都是合理的。本研究中 R_C 略大于 R_p,取 6 mm。

1.2.3 其他本征参数

通过文献[26 -27]发现,可塑状态黏土泊松比一般大于粉质黏土和沙土,因此选取土壤泊松比为 0.38。根据谢方平等[12]在应力应变测试中,使用三轴剪切仪测量的结果,土壤剪切模量设定为 1×10^6 Pa。通过在苏打盐碱土深 30 ~40 cm 土层使用环刀法采集样本,并测量其质量,根据土壤样本质量除以环刀体积的方法计算得到土壤样本密度为 1 680 kg/m^3。

钢材泊松比、剪切模量和密度通过文献[28]获取,其中泊松比为 0.29、剪切模量为 8×10^{10} Pa、密度为 7 860 kg/m^3。

1.3 DEM 模型接触参数

通过倾斜平面试验方法获取土壤间以及土壤与机具的接触参数,包括静摩擦因数和滚动摩擦因数。倾斜平面试验常被用来确定土壤-土壤或土壤-机具之间的静摩擦因数和滚动摩擦因数[29],而土壤-土壤或土壤-机具之间的恢复系数则通过文献[26]获取。

采用钢和土 2 种材料制成的滑块和滚子,以及钢板和土质板作为试验平面。试验过程中,将滑块或滚子置于平面上,逐步增加平面倾角,直至观察到滚子或滑块即将开始移动,此时记录临界倾斜角 θ。为确保试验结果的可靠性,每组试验重复 3 次,以 3 次试验平均值作为最终 θ。共进行 6 组试验,如图 4 所示,以获取不同材料组合下的临界倾斜角 θ,具体包括:土滚子与钢板、钢滚子与土质板、土滚子与土质板、土滑块与钢板、钢滑块与土质板以及土滑块与土质板的组合。通过计算土滚子-钢板和钢滚子-土质板试验的 θ 平均值,确定土壤与钢材的滚动摩擦因数;土滚子-土质板试验得出的 θ 直接用于计算土壤与土壤间滚动摩擦因数;土滑块-钢板和钢滑块-土质板的 θ 平均值用于确定土壤与钢材滑动摩擦因数;土滑块-土质板试验得出的 θ 则用于计算土壤间滑动摩擦因数。

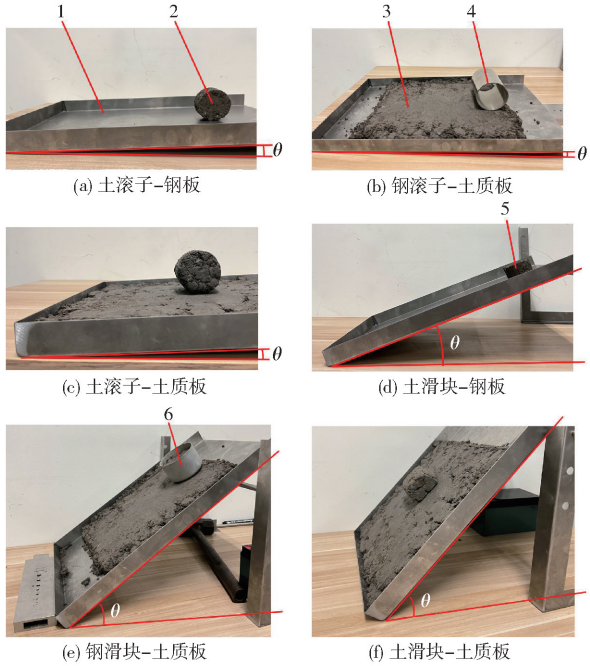


图 4 倾斜平面试验

Fig. 4 Inclined plane experiment

1. 钢板 2. 土滚子 3. 土质板 4. 钢滚子 5. 土滑块 6. 钢滑块

基于倾斜角 θ 计算摩擦因数 μ,即摩擦因数等于倾斜角正切值。倾斜平面试验结果如表 1 所示。但在图 4f 试验中,由于苏打盐碱土的粘性导致土滑块无法顺利下滑,无法测定 θ。因此,土壤间滑动摩擦因数设定为 0.990。DEM 模型接触参数如表 2 所示。

表 1 倾斜平面试验结果

Tab. 1 Inclined plane experiment result

类型	试验组	倾斜角/(°)	摩擦因数
滚动	图 4a	5	0.087
	图 4b	5	0.087
	图 4c	7	0.123
滑动	图 4d	38	0.966
	图 4e	50	0.966
	图 4f		0.990

表 2 接触参数

Tab. 2 Contact parameters

参数	土壤-土壤	土壤-钢材
恢复系数	0.50	0.61
静摩擦因数	0.990	0.966
滚动摩擦因数	0.123	0.087

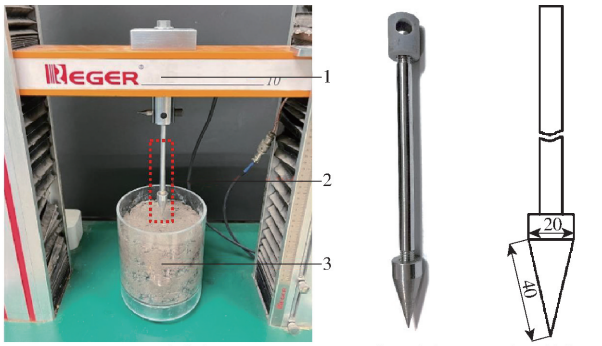
1.4　校准试验

校准试验分为实验室试验和模拟试验。实验室试验在受控的实验室环境中进行，包括锥刺试验和单轴压缩试验两种常见的标定方法[29]，以锥刺试验的屈服阻力 Y_p 和单轴压缩试验土壤样本屈服阻力 Y_c 为参考，通过模拟试验对 Hertz－Mindlin with Bonding V2 模型中 Bond 键参数进行校准，包括 K_n、K_s、σ、τ。

1.4.1　实验室试验

1.4.1.1　实验室锥刺试验

采用 REGER 万能材料试验机进行锥刺试验，试验中使用的刺针针头为钢质圆锥，底面直径为 20 mm，侧面斜高为 40 mm。使用的土壤样本容器为直径 150 mm 的圆柱形透明亚克力桶。将土壤样本分次填充至亚克力容器中并不断镇压，使土壤样本均匀且密度为 1 680 kg/m^3。最后对样本表面进行平整处理。实验室锥刺试验如图 5 所示。



(a) 试验装备　(b) 刺针实物图　(c) 刺针结构图

图 5　实验室锥刺试验

Fig. 5　Laboratory cone penetration test

1. 万能材料试验机　2. 刺针　3. 土壤样本

试验过程中，刺针以恒定速度 1 000 mm/min 垂直刺入土壤样本。试验持续进行直至刺针完全穿透土壤或者图像出现明显的变化趋势为止。选取 3 个不同点位进行 3 次试验，并记录数据。对这 3 组数据进行平均值处理，绘制时间-载荷曲线。

对锥刺试验时间-载荷曲线（图 6）进行分析，曲线初期快速上升，然后逐渐趋于平缓。上升趋势开始减缓的转折点，就是土壤样本材料的屈服点。通过分析单位时间内载荷的变化量确定屈服点的具体位置。

由图 6 中时间-变化率曲线可知，曲线首先振荡上行，到达 4.177 s 时，变化率达到峰值 64.7 N/s，随后曲线迅速下降。据此确定 4.177 s 处为土壤屈服点，该点所对应的载荷 153.3 N 作为 Y_p。

1.4.1.2　实验室单轴压缩试验

采用 REGER 万能材料试验机进行单轴压缩试验，试验前，使用圆柱形模具制备直径为 60 mm、高度为 100 mm 圆柱形土柱。制备过程中，通过连续向模具中添加土壤样本并不断压实，以确保土柱密度均匀且密度为 1 680 kg/m^3。使用直径为 100 mm 的压盘和最大量程为 1 000 N 传感器，设置压缩速率为 1 000 mm/min。试验如图 7 所示。

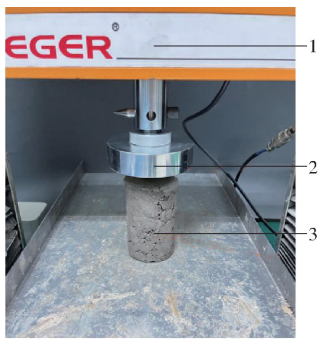


图 6　锥刺试验时间-载荷/变化率曲线

Fig. 6　Cone penetration test time－load/rate of change curve

图 7　实验室单轴压缩试验

Fig. 7　Laboratory uniaxial compression test

1. 万能材料试验机　2. 圆形压盘　3. 土柱

在试验过程中，万能材料试验机持续对土柱施加压力，直到位移-载荷曲线出现明显变化趋势或施加力接近传感器最大量程时停止。记录试验数据，并绘制位移-载荷曲线。

依据 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》[30] 规定，在无侧限抗压强度测试时，若读数无稳定值，试验应进行到轴向应变达 20% 时停止。由于土柱高 100 mm，因此，选取土柱被压缩 20 mm，即轴向位移达到 20 mm 的点作为数据采集点，如图 8 所示。

分析试验数据发现，土柱被压缩 19.971 mm 时，载荷为 331.208 N；当被压缩 20.056 mm 时，载荷为 331.625 N。采用插值法获取 20 mm 时所对应的载荷为 331.4 N，该数值即为 Y_c。

1.4.2　DEM 模拟试验

1.4.2.1　DEM 模拟锥刺试验

使用 EDEM 软件，进行锥刺试验的 DEM 仿真模拟。DEM 模拟锥刺试验需尽可能还原实验室锥刺试验，具体步骤如下：建立一个直径 150 mm、高

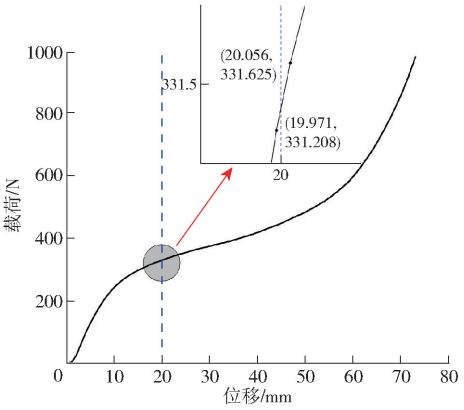


图 8 单轴压缩试验位移–载荷曲线

Fig. 8 Uniaxial compression test displacement – load curve

200 mm 的圆柱形容器代替透明亚克力容器,设置土壤颗粒密度为 1 680 kg/m^3,填充土壤颗粒并生成 Bond 键以模拟苏打盐碱土粘性特征。导入与实验室试验中同样尺寸形状的刺针并同样以速度 1 000 mm/min垂直刺入模拟土壤中,如图 9 所示。为确保仿真过程中的数值稳定,仿真时间步长设定为 0.000 1 s。

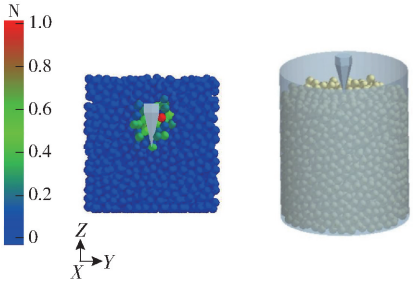


图 9 锥刺试验 DEM 模拟

Fig. 9 Cone penetration test DEM simulation

通过分析刺针受力情况并生成时间–载荷曲线(图 10),在曲线中阻力上升过程中首次明显下降或趋于平缓的转折点位置即为屈服点,记录该点阻力。

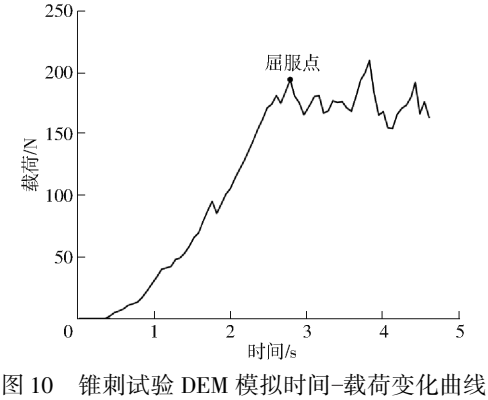


图 10 锥刺试验 DEM 模拟时间–载荷变化曲线

Fig. 10 Cone penetration test DEM simulation time – load curve

1.4.2.2 DEM 模拟单轴压缩试验

同理,使用 EDEM 软件,进行单轴压缩试验的 DEM 仿真模拟。首先构建一个直径 60 mm、高 100 mm 的圆柱形盒子作为土壤颗粒容器。在盒子中填充颗粒并生成 Bond 键,然后移除容器形成土柱。使用直径 100 mm 圆形压盘以速度 1 000 mm/min 向下压土柱,仿真时间步长设定为 0.000 1 s。通过分析压盘受力情况并生成时间–载荷曲线,观察曲线中阻力曲线由上升转为下降的转折点即为屈服点,记录该点阻力。试验过程如图 11 所示,时间–载荷曲线如图 12 所示。

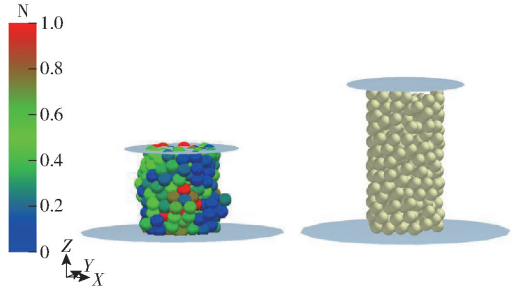


图 11 单轴压缩试验 DEM 模拟

Fig. 11 Uniaxial compression test DEM simulation

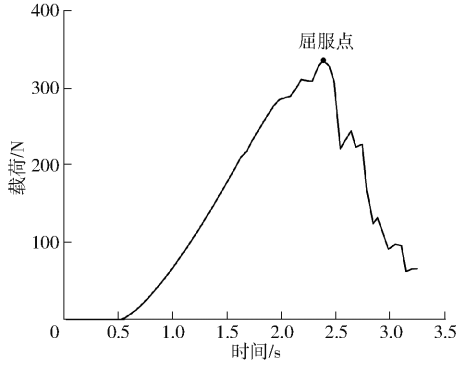


图 12 单轴压缩试验 DEM 模拟时间–载荷变化曲线

Fig. 12 Uniaxial compression test DEM simulation time – load curve

1.4.2.3 DEM 模型 Bond 键参数

根据文献[31 – 35],获取 Bonding V2 模型中 Bond 键参数值的大概范围。MAK 等[31]通过计算发现单位面积法向刚度与单位面积切向刚度比值介于 1 ~ 1.5 之间。在文献[32]中,细土壤单位面积法向刚度为 3.9×10^6 N/m^3。此外,文献[33]中粗土壤和水稻土的单位面积法向刚度均为 5×10^7 N/m^3。文献[34]研究表明,耕层和犁底层单位面积法向切向刚度均为 5×10^7 N/m^3,而法向切向应力分别为 3×10^4 Pa 和 4×10^4 Pa。丁启朔等[35]对粘性水稻土进行标定时得出,耕层、底层土壤颗粒粘结强度的临界应力分别为 3×10^5 Pa 和 5×10^5 Pa。

通过中心复合设计(Central composite design, CCD),使用方差分析和回归分析确定 Bond 键参数具体取值。待标定参数 K_n、K_s、σ、τ 作为影响因子,Y_p、Y_c 选为响应变量。根据前文所述与预试验,K_n、K_s 取值范围设定为 5×10^6 ~ 5×10^7 N/m^3,σ、τ 取值

范围设定在 30 000 ~ 300 000 Pa 之间。试验因素编码如表 3 所示。

表 3　CCD 试验因素编码

Tab. 3　CCD experiment factors and coding

编码	因素			
	K_n/(N·m^{-3})	K_s/(N·m^{-3})	σ/Pa	τ/Pa
1.682	5.00×10^{7}	5.00×10^{7}	300 000.0	300 000.0
1	4.09×10^{7}	4.09×10^{7}	245 271.5	245 271.5
0	2.75×10^{7}	2.75×10^{7}	165 000.0	165 000.0
−1	1.41×10^{7}	1.41×10^{7}	84 728.5	84 728.5
−1.682	5.00×10^{6}	5.00×10^{6}	30 000.0	30 000.0

2　试验与结果分析

2.1　CCD 方法结果与分析

根据表 4，利用 Design-Expert 10 得到 Y_p、Y_c 回归方程为

$$Y_p = 9 - 6.73\times10^{-6}K_n + 5.10\times10^{-6}K_s + 3.71\times10^{-4}\sigma + 2.55\times10^{-5}\tau + 1.17\times10^{-13}K_nK_s + 3.26\times10^{-11}K_n\sigma + 1.97\times10^{-11}K_n\tau - 2.17\times10^{-11}K_s\sigma + 9.36\times10^{-12}K_s\tau + 3.88\times10^{-9}\sigma\tau - 4.51\times10^{-14}K_n^2 - 9.38\times10^{-14}K_s^2 - 2.25\times10^{-9}\sigma^2 - 1.28\times10^{-9}\tau^2 \quad (8)$$

$$Y_c = -140.24 + 4.14\times10^{-6}K_n + 2.53\times10^{-6}K_s + 6.44\times10^{-4}\sigma + 1.22\times10^{-3}\tau \quad (9)$$

表 4　CCD 试验方案与结果

Tab. 4　CCD experiment plan and results

序号	因素				Y_p/N	Y_c/N
	K_n/(N·m^{-3})	K_s/(N·m^{-3})	σ/Pa	τ/Pa		
1	4.09×10^{7}	4.09×10^{7}	245 271.5	84 728.5	139.2	335.8
2	4.09×10^{7}	4.09×10^{7}	84 728.5	84 728.5	87.2	248.5
3	4.09×10^{7}	1.41×10^{7}	245 271.5	245 271.5	374.1	428.5
4	1.41×10^{7}	4.09×10^{7}	84 728.5	245 271.5	182.5	389.5
5	4.09×10^{7}	1.41×10^{7}	84 728.5	245 271.5	128.8	372.3
6	1.41×10^{7}	1.41×10^{7}	245 271.5	84 728.5	77.5	203.5
7	1.41×10^{7}	4.09×10^{7}	245 271.5	245 271.5	194.4	435.6
8	1.41×10^{7}	1.41×10^{7}	84 728.5	84 728.5	72.5	203.5
9	5.00×10^{6}	2.75×10^{7}	165 000.0	165 000.0	121.5	207.7
10	5.00×10^{7}	2.75×10^{7}	165 000.0	165 000.0	240.5	566.6
11	2.75×10^{7}	5.00×10^{6}	165 000.0	165 000.0	131.1	222.1
12	2.75×10^{7}	5.00×10^{7}	165 000.0	165 000.0	181.5	377.1
13	2.75×10^{7}	2.75×10^{7}	30 000.0	165 000.0	70.5	200.9
14	2.75×10^{7}	2.75×10^{7}	300 000.0	165 000.0	255.2	508.0
15	2.75×10^{7}	2.75×10^{7}	165 000.0	30 000.0	39.6	97.1
16	2.75×10^{7}	2.75×10^{7}	165 000.0	300 000.0	321.6	514.9
17	2.75×10^{7}	2.75×10^{7}	165 000.0	165 000.0	204.4	395.9
18	2.75×10^{7}	2.75×10^{7}	165 000.0	165 000.0	201.9	418.6
19	2.75×10^{7}	2.75×10^{7}	165 000.0	165 000.0	197.6	417.1
20	2.75×10^{7}	2.75×10^{7}	165 000.0	165 000.0	204.0	403.2
21	2.75×10^{7}	2.75×10^{7}	165 000.0	165 000.0	214.6	419.9

根据表 5、6，回归方程(8)的二次多项式模型 $P<0.0001$($P<0.01$)和回归方程(9)的线性模型 $P=0.0002$($P<0.01$)。2 个模型的回归方程均极显著，说明标定 Bonding V2 中的参数各指标拟合模型均极显著，拟合模型能够准确描述因变量与对应响应之间的变化规律。

表 5　屈服阻力 Y_p 方差分析

Tab. 5　ANOVA for Y_p

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1.41×10^{5}	14	10 069.24	62.40	<0.0001
K_n	7 075.86	1	7 075.86	43.85	0.0006
K_s	1 271.29	1	1 271.29	7.88	0.0309
σ	28 585.98	1	28 585.98	177.16	<0.0001
τ	39 758.36	1	39 758.36	246.40	<0.0001
K_nK_s	1 448.52	1	1 448.52	8.98	0.0241
$K_n\sigma$	9 819.48	1	9 819.48	60.86	0.0002
$K_n\tau$	1 486.33	1	1 486.33	9.21	0.0229
$K_s\sigma$	4 343.02	1	4 343.02	26.92	0.0020
$K_s\tau$	335.09	1	335.09	2.08	0.1996
$\sigma\tau$	5 006.22	1	5 006.22	31.03	0.0014
K_n^2	971.68	1	971.68	6.02	0.0495
K_s^2	4 214.29	1	4 214.29	26.12	0.0022
σ^2	3 135.58	1	3 135.58	19.43	0.0045
τ^2	1 012.06	1	1 012.06	6.27	0.0463
残差	968.14	6	161.36		
总和	1.419×10^{5}	20			

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

表 6　屈服阻力 Y_c 方差分析

Tab. 6　ANOVA for Y_c

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2.25×10^{5}	4	56 253.80	10.52	0.0002
K_n	41 912.72	1	41 912.72	7.83	0.0129
K_s	15 653.01	1	15 653.01	2.93	0.1065
σ	36 505.26	1	36 505.26	6.82	0.0189
τ	1.309×10^{5}	1	1.309×10^{5}	24.48	0.0001
残差	85 594.36	16	5 349.65		
总和	3.106×10^{5}	20			

如表 5 所示，锥刺试验中，K_n、σ、τ 对 Y_p 的影响极显著，K_s 影响显著。此外，交互项除 $K_s\tau$ 外均表现出显著性，其中与 σ 交互的交互项均为极显著。二次项对 Y_p 的影响中 K_s^2、σ^2 极显著，其余为显著。

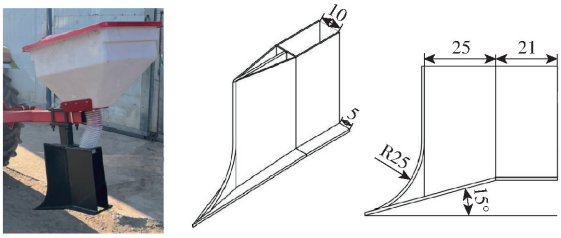
根据表 6，单轴压缩试验中，单一因素中除 K_s 不显著外，其余均表现出显著性，其中 τ 极显著，其余均为显著。

以校准试验中的实测结果 $Y_p=153.3$ N 和 $Y_c=331.4$ N 为目标，求解方程组(8)、(9)。获得 100 组解，所有解的 Desirability 均为 1，表明可靠性非常高。根据文献[31]的结论，K_n 与 K_s 比值通常在 1 ~ 1.5 之间。因此，选择 $K_n>K_s$、$\sigma>\tau$ 的参数组合为最优解。确定最优参数组合为：$K_n=3.68\times10^{7}$ N/m^3、$K_s=2.97\times10^{7}$ N/m^3、$\sigma=197\,374$ Pa 和 $\tau=96\,285.5$ Pa。

2.2 标定结果验证

2.2.1 田间验证试验

田间验证试验所使用的开沟铲是一款专为苏打盐碱土设计的深层开沟滤料填充工具。其前部设计可以切削土壤,下部两侧配备抬土板,抬升破碎土壤。开沟铲整体尺寸为:总长 71 cm、高 52 cm、入土角 15°(图 13)。其最大挖掘深度为 50 cm、开沟宽度为 10 cm。整个铲子由坚固的钢材焊接而成。



(a) 实物图 (b) 结构图

图 13 开沟铲结构尺寸示意图

Fig. 13 Trenching shovel structural dimension diagrams

田间试验在秋收后 7 d 左右,2023 年 10 月 28 日 10:00 进行,地点在哈尔滨市西北方向(45°N,126°E),气温约为 10℃。

为测定开沟铲的作业阻力,根据团体标准 T/CAMDA 17—2023《悬挂式耕整地机械田间作业功耗试验方法》[36],采用 2 台拖拉机,1 台用于牵引并提供动力,另 1 台负责挂载开沟铲及调节作业深度。如图 14 所示,试验中,通过艾德堡拉力传感器连接 2 台拖拉机,传感器两端分别通过牵引绳与拖拉机相连,且连接至读数显示器。

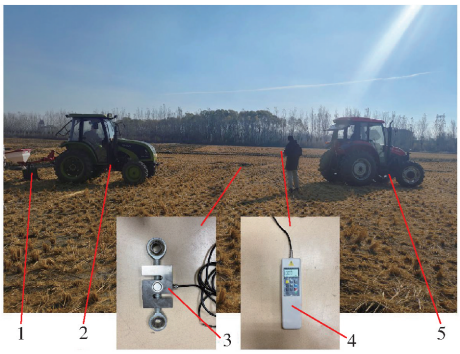


图 14 田间试验

Fig. 14 Field test

1. 开沟铲 2. 后拖拉机 3. 艾德堡拉力传感器 4. 读数显示器 5. 前拖拉机

试验过程中,牵引拖拉机以速度 3 km/h 牵引挂载开沟铲的拖拉机前进。首先,开沟铲保持不接触土壤的状态,目的是获取拖拉机与开沟铲在非作业状态下的阻力。随后,将开沟铲切入土壤至深度 40 cm,并在达到稳定状态后,进行作业状态下拖拉机及开沟铲的阻力测定。最后,通过计算非作业状态与作业状态下拖拉机和开沟铲的阻力差值,来获取开沟铲的作业阻力。

试验结果表明,在非作业状态下,拖拉机与开沟铲的阻力分别为 3 730、3 810、2 960、2 790 N,计算得出平均阻力为 3 322.5 N。在作业状态下,记录的阻力分别为 15 620、16 230、16 520、12 550 N,计算得到平均阻力为 15 230 N。通过计算作业状态与非作业状态下的平均阻力差值,确定开沟铲作业阻力为 11 907.5 N。

2.2.2 田间验证 DEM 模拟试验

使用 EDEM 软件,构建虚拟土槽模型,用来模拟开沟铲在实际田间条件下的作业环境。根据农机作业幅宽及前进距离,土槽尺寸设定为长度 2 000 mm、宽度 1 500 mm、高度 800 mm,如图 15 所示。随后,填充颗粒至土槽模型中并生成 Bond 键,采用最优参数组合来配置 Bond 键。时间步长同样设定为 0.000 1 s。

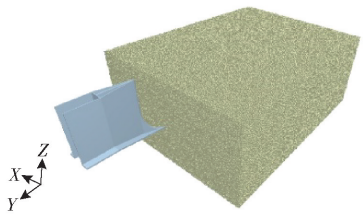


图 15 DEM 土槽模型

Fig. 15 DEM trough model

将开沟铲的三维模型导入 DEM 仿真中,并以速度 3 km/h 进行模拟作业,其中作业深度设定为 40 cm,如图 16 所示。通过分析开沟铲的受力情况,生成时间-载荷曲线,如图 17 所示。观察曲线变化趋势,并在出现明显趋势后记录阻力。通过计算稳定区间阻力平均值,获取开沟铲 DEM 预测田间作业阻力为 10 882 N。

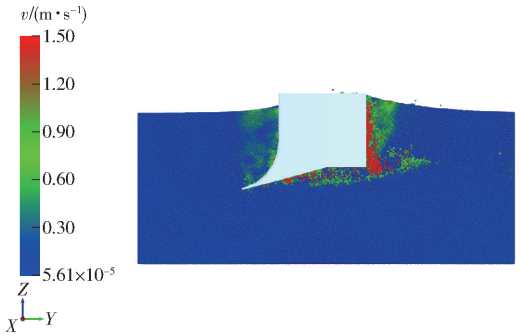


图 16 DEM 模拟田间试验

Fig. 16 DEM simulation of field test

2.2.3 DEM 标定结果与分析

使用最优参数组合设置粘结键,重新进行锥刺试验和单轴压缩试验的 DEM 仿真模拟,获取土壤预测屈服阻力为 Y_p = 151.85 N、Y_c = 333.99 N。

表 7 为 Y_p、Y_c 和田间试验阻力实测值、预测值和

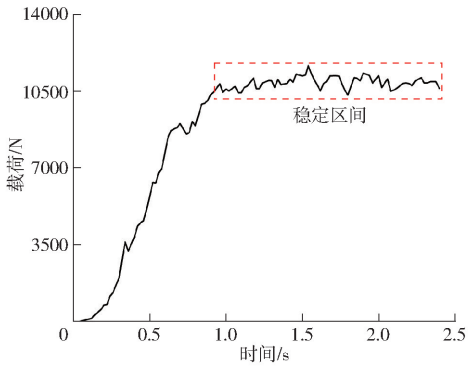


图 17　DEM 模拟田间试验时间-载荷变化曲线

Fig. 17　DEM simulation of field test time－load curve

表 7　验证试验及结果

Tab. 7　Verification test of interaction parameter results

项目	实测值/N	预测值/N	相对误差/%
锥刺试验	153. 30	151. 85	－0. 95
单轴压缩试验	331. 40	333. 99	0. 78
田间试验	11 907. 5	10 882. 0	－8. 61

相对误差，证实了 DEM 模型具有较高的可靠性。

在实际田间作业过程中，观察到苏打盐碱土在开沟铲的作用下出现撕裂现象，如图 18 所示。这一现象在 DEM 仿真模拟中同样得到复现。说明该模型精确地模拟了苏打盐碱土在机械作用下的动态行为，进一步证明了该模型的可靠性，为苏打盐碱土改良与利用装备研发提供了科学依据。



(a) 田间试验　　(b) DEM仿真

图 18　土体撕裂现象

Fig. 18　Soil rupture phenomenon

3　结论

(1)锥刺试验中，测定苏打盐碱土屈服阻力为 153. 3 N；单轴压缩试验中，苏打盐碱土屈服阻力为 331. 4 N；田间试验中，深度 40 cm 开沟铲作业阻力为 11 907. 5 N。

(2)参数标定试验结果表明，锥刺试验模型为二次模型，而单轴压缩试验模型为线性模型。锥刺试验中，单一因素、交互项(除 $K_s\tau$ 外)、二次项均显著，尤其是与 σ 相关项表现为极显著。单轴试验中 K_s 不显著，其他均显著。对回归模型求解，得到最优参数：$K_n = 3.68 \times 10^7$ N/m^3、$K_s = 2.97 \times 10^7$ N/m^3、$\sigma = 197\,374$ Pa 和 $\tau = 96\,285.5$ Pa。

(3)标定结果表明，锥刺试验屈服阻力、单轴压缩试验屈服阻力、田间试验阻力实测值与仿真预测值相对误差为 －0. 95%、0. 78%、－8. 61%。说明参数标定准确，模型可以准确反映苏打盐碱土的作业阻力。

(4)实际田间作业和 DEM 仿真模拟中均观察到苏打盐碱土在机械开沟作用下发生的撕裂现象，这表明所采用的仿真模型能够准确捕捉并再现苏打盐碱土在受力时的复杂力学响应，进一步证明该模型的可靠性。

参　考　文　献

[1] 刘淼，王志春，杨福，等. 生物炭在盐碱地改良中的应用进展[J]. 水土保持学报，2021，35(3)：1－8.
LIU Miao，WANG Zhichun，YANG Fu，et al. Application progress of biochar in amelioration of saline-alkaline soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2021，35(3)：1－8.（in Chinese）

[2] WANG L，SEKI K，MIYAZAKI T，et al. The causes of soil alkalinization in the Songnen Plain of Northeast China[J]. Paddy and Water Environment，2009，7(3)：259－270.

[3] 王遵亲，祝寿泉，俞仁培，等. 中国盐渍土[M]. 北京：科学出版社，1993.

[4] 周慧，史海滨，徐昭，等. 有机无机肥配施对盐渍土供氮特性与作物水氮利用的影响[J]. 农业机械学报，2020，51(4)：299－307.
ZHOU Hui，SHI Haibin，XU Zhao，et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on nitrogen supply and crop water and nitrogen utilization in salinized soils[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(4)：299－307.（in Chinese）

[5] 赵朋成，李佩东，王烨，等. 大庆地区盐碱地改良及研究进展综述[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报，2016，29(5)：4－6.
ZHAO Pengcheng，LI Peidong，WANG Ye，et al. Review and research progress on improvement of saline-alkaline land in Daqing region[J]. Journal of Heilongjiang Vocational Institute of Ecological Engineering，2016，29(5)：4－6.（in Chinese）

[6] 张智泓，甘帅汇，左国标，等. 以砂鱼蜥头部为原型的仿生深松铲尖设计与离散元仿真[J]. 农业机械学报，2021，52(9)：33－42.
ZHANG Zhihong，GAN Shuaihui，ZUO Guobiao，et al. Bionic design and performance experiment of sandfish head inspired subsoiler tine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(9)：33－42.（in Chinese）

[7] 王金武，李响，高鹏翔，等. 胡萝卜联合收获机高效减阻松土铲设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(6)：93－103.
WANG Jinwu，LI Xiang，GAO Pengxiang，et al. Design and experiment of high efficiency drag reducing shovel for carrot combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(6)：93－103.（in Chinese）

[8] 邹亮亮, 刘功, 苑进, 等. 主动润滑减阻曲面深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(6):34 - 43.
ZOU Liangliang, LIU Gong, YUAN Jin, et al. Design and test of active lubrication and drag reduction curved subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(6):34 - 43. (in Chinese)
[9] 何晓宁, 张学军, 赵壮, 等. 基于离散元法的油莎豆降阻挖掘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021,52(12):124 - 133.
HE Xiaoning, ZHANG Xuejun, ZHAO Zhuang, et al. Design and test of resistance-reducing excavation device of *Cyperus edulis* based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(12):124 - 133. (in Chinese)
[10] CHEN Y, MUNKHOLM L J, NYORD T. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils[J]. Soil and Tillage Research, 2013,126:34 - 41.
[11] 刘文治. 结构性土的剪胀性及扰动状态本构模型试验研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2008.
LIU Wenzhi. Experimental study on the shear swelling behavior and constitutive model of structured soil under disturbed state [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2008. (in Chinese)
[12] 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)
[13] 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.
[14] 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.
[15] 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.
[16] HERTZ B H. On the contact of elastic solids[J]. J. Reine Angew. Math., 1882,92:156 - 171.
[17] MINDLIN R D. Compliance of elastic bodies in contact[J]. Journal of Applied Mechanics, 1949,16(3):259 - 268.
[18] MINDLIN R D, DERESIEWICZ H. Elastic spheres in contact under varying oblique forces[J]. Journal of Applied Mechanics, 1953,20(3):327 - 344.
[19] 张冲, 范旭辉, 李明森, 等. 基于 EDEM 的凿式犁铲土壤扰动仿真分析与试验[J]. 农业机械学报, 2022,53(增刊2):52 - 59.
ZHANG Chong, FAN Xuhui, LI Mingsen, et al. Simulation analysis and experiment of soil disturbance by chisel plow based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(Supp.2):52 - 59. (in Chinese)
[20] 曾百功, 李敏, 姚亮华, 等. 基于图像重建的黄连根系土壤复合体力学特性仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2023,39(19):75 - 84.
ZENG Baigong, LI Min, YAO Lianghua, et al. Simulation and experiment on the mechanical properties of *Coptis chinensis* root-soil composites based on image reconstruction[J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(19):75 - 84. (in Chinese)
[21] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Géotechnique, 1980,30(3):331 - 336.
[22] 王立宗, 廖庆喜, 张子龙, 等. 油菜高速直播机开畦沟装置刀组优化与试验[J]. 农业工程学报, 2024,40(3):50 - 62.
WANG Lizong, LIAO Qingxi, ZHANG Zilong, et al. Optimizing the blade group of ditching devices in rapeseed direct seeder [J]. Transactions of the CSAE, 2024,40(3):50 - 62. (in Chinese)
[23] 肖茂华, 钮约, 汪开鑫, 等. 自激振动旋耕刀设计与减扭降耗性能分析[J]. 农业机械学报, 2022,53(11):52 - 63.
XIAO Maohua, NIU Yue, WANG Kaixin, et al. Design of self-excited vibrating rotary tiller and analysis of its performance in reducing torsion and consumption[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(11):52 - 63. (in Chinese)
[24] 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.
[25] 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)
[26] 于建群, 钱立彬, 于文静, 等. 开沟器工作阻力的离散元法仿真分析[J]. 农业机械学报, 2009,40(6):53 - 57.
YU Jianqun, QIAN Libin, YU Wenjing, et al. DEM analysis of the resistances applied on furrow openers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(6):53 - 57. (in Chinese)
[27] 张锐, 李建桥, 周长海, 等. 推土板表面形态对土壤动态行为影响的离散元模拟[J]. 农业工程学报, 2007,23(9):13 - 19.
ZHANG Rui, LI Jianqiao, ZHOU Zhanghai, et al. Simulation of dynamic behavior of soil ahead of the bulldozing plates with different surface configurations by discrete element method[J]. Transactions of the CSAE, 2007,23(9):13 - 19. (in Chinese)

(下转第 365 页)

39(15):144 - 151.
ZHANG Xiyu, LI Sijia, WANG Xiang, et al. Quantitative inversion of soil total nitrogen in Suihua City of Heilongjiang in China using Sentinel - 2 remote sensing images[J]. Transactions of the CSAE,2023,39(15):144 - 151. (in Chinese)
[44] 周晓雪,李楠,潘耀忠,等. 人工蜂群算法优化 SVR 的叶面积指数反演[J]. 遥感学报,2022,26(4):766 - 780.
ZHOU Xiaoxue, LI Nan, PAN Yaozhong, et al. Optimized SVR based on artificial bee colony algorithm for leaf area index inversion[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(4): 766 - 780. (in Chinese)
[45] XU W, YANG W, WU J, et al. Canopy laser interception compensation mechanism—UAV LiDAR precise monitoring method for cotton height[J]. Agronomy,2023,13(10):2584.
[46] PAN F, LI W, LAN Y, et al. SPAD inversion of summer maize combined with multi-source remote sensing data[J]. International Journal of Precision Agricultural Aviation, 2021, 4(2): 45 - 52.
[47] XU H, LAN Y, ZHANG S, et al. Research on vegetation cover extraction method of summer maize based on UAV visible light image[J]. International Journal of Precision Agricultural Aviation, 2023, 6(1): 44 - 51.
[48] 李洋,彭道黎,袁钰娜. 应用 XGBoost 算法对森林地上生物量的机载 LiDAR 反演[J]. 东北林业大学学报,2023,51(5):106 - 112,129.
LI Yang, PENG Daoli, YUAN Yuna. Airborne LiDAR data inversion of forest aboveground biomass using XGBoost algorithm [J]. Journal of Northeast Forestry University,2023,51(5):106 - 112,129. (in Chinese)
[49] 杭艳红,苏欢,于滋洋,等. 结合无人机光谱与纹理特征和覆盖度的水稻叶面积指数估算[J]. 农业工程学报,2021,37(9):64 - 71
HANG Yanhong, SU Huan, YU Ziyang, et al. Estimation of rice leaf area index combining UAV spectrum, texture features and vegetation coverage[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 64 - 71. (in Chinese)
[50] 边明博,马彦鹏,樊意广,等. 融合无人机多源传感器的马铃薯叶绿素含量估算[J]. 农业机械学报,2023,54(8):240 - 248.
BIAN Mingbo, MA Yanpeng, FAN Yiguang, et al. Estimation of rice leaf area index combining UAV spectrum, texture features and vegetation coverage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(8):240 - 248. (in Chinese)
[51] 罗俊杰. 基于多源遥感数据的森林郁闭度反演[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.
LUO Junjie. Forest depression inversion based on multi-source remote sensing data[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University,2023. (in Chinese)
[52] CASTRO-VALDECANTOS P, APOLO-APOLO O E, PEREZ-RUIZ M, et al. Leaf area index estimations by deep learning models using RGB images and data fusion in maize[J]. Precision Agriculture,2022,23(6):1949 - 1966.

(上接第 310 页)

[28] 张航. 苏打盐碱地振动深松部件试验研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019.
ZHANG Hang. Experimental study on vibrating subsoiling components in soda saline alkali soil[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019. (in Chinese)
[29] 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.
[30] GBT 50123—2019　土工试验方法标准[S]. 2019.
[31] MAK J, CHEN Y, SADEK M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. Soil and Tillage Research, 2012,118:117 - 122.
[32] TEKESTE M Z, BALVANZ L R, HATFIELD J L, et al. Discrete element modeling of cultivator sweep-to-soil interaction: worn and hardened edges effects on soil-tool forces and soil flow[J]. Journal of Terramechanics, 2019,82:1 - 11.
[33] AHMAD F, QIU B, DING Q, et al. Discrete element method simulation of disc type furrow openers in paddy soil[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020,13(4):103 - 110.
[34] 王学振, 岳斌, 高喜杰, 等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018,49(10):124 - 136.
WANG Xuezhen, YUE Bin, GAO Xijie, et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10):124 - 136. (in Chinese)
[35] 丁启朔, 任骏, ADAM Belaleisa, 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, ADAM Belaleisa, 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)
[36] T/CAMDA 17—2023 悬挂式耕整地机械田间作业功耗试验方法[S]. 2023.