

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.006

基于 EDEM 的凿式犁铲土壤扰动仿真分析与试验

张冲 范旭辉 李明森 李光 赵春凯 孙文良

(吉林省农业机械研究院, 长春 130022)

摘要: 为探究凿式犁铲(以下简称凿铲)的土壤扰动机理并构建适用于东北地区黏重黑土与耕作部件之间的仿真模型,结合 EDEM 仿真分析与土槽试验,与深松铲作业效果进行对比,研究凿铲对土壤的微观扰动机理和宏观扰动状态,并建立适宜东北地区土壤的耕作仿真模型。仿真与试验结果表明,深松铲对土壤进行剪切破坏,将耕作层和犁底层抬升、下落,对土壤松而不翻,不破坏原有的耕层土壤结构,土壤膨松度试验值为 12.4%,土壤扰动系数试验值为 59.4%,纵向截面扰动面积为 52 586 mm²,俯视视图扰动面积为 116 779 mm²;凿铲对土壤进行挤压破坏,将犁底层土壤翻耕到地表,破坏原有耕层土壤结构,土壤膨松度试验值为 14.1%,土壤扰动系数试验值为 64.1%,纵向截面扰动面积为 54 128 mm²,俯视视图扰动面积为 233 061 mm²,通过与深松铲作业后数据相比可知,凿铲可以实现更为明显的土壤扰动效果。同时,建立东北地区黏重黑土条件下的离散元土壤耕作模型,选用 Hertz - Mindlin with JKR Cohesion 模型作为土壤接触模型,确定仿真模型的各项技术参数,仿真与试验得到的土壤扰动截面轮廓基本拟合,土壤膨松度、土壤扰动系数的仿真值与试验值的相对误差为 17%、4.4%,模拟仿真的数据误差范围满足要求,研究可为东北地区的土壤耕作部件离散元模拟仿真分析提供基础数据。

关键词: 凿铲; EDEM 仿真分析; 土壤耕作模型; 土槽试验; 微观扰动机理; 宏观扰动状态

中图分类号: S222.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S2-0052-08

Simulation Analysis and Experiment of Soil Disturbance by Chisel Plow Based on EDEM

ZHANG Chong FAN Xuhui LI Mingsen LI Guang ZHAO Chunkai SUN Wenliang

(Jilin Provincial Academy of Agricultural Machinery, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to explore the soil disturbance mechanism of the chisel plow and build a simulation model between viscous black soil and the tillage components, the operation effect was compared with subsoiling shovel and the micro disturbance mechanism and macro disturbance state of chisel plow on soil was studied, and a farming simulation model suitable for the soil in Northeast China was established. The simulation and test results showed that the subsoiling shovel sheared and destroyed the soil, lifted and fell the tillage layer and plow bottom layer, loosened the soil without turning over, and did not damage the original topsoil soil structure. The test value of soil swelling was 12.4%, the test value of soil disturbance coefficient was 59.4%, the disturbance area of longitudinal section was 52 586 mm², and the disturbance area of top view was 116 779 mm², the chisel plow compressed and destroyed the soil, ploughs the bottom soil to the surface, and destroyed the original plough soil structure. The test value of soil swelling was 14.1%, the test value of soil disturbance coefficient was 64.1%, the disturbance area of longitudinal section was 54 128 mm², and the disturbance area of top view was 233 061 mm². Compared with the data after subsoiling shovel operation, chisel plow can achieve more obvious soil disturbance effect. At the same time, the discrete element soil tillage model under the condition of heavy black soil in Northeast China was established. The Hertz - Mindlin with JKR Cohesion model was selected as the soil contact model, and the technical parameters of the simulation model were determined. The simulation and the soil disturbance cross-sectional profile obtained from the test were basically fitted. The relative errors between the simulation value and the test value of soil bulkiness and soil disturbance coefficient were

收稿日期: 2022-06-03 修回日期: 2022-07-30

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA28080202)和吉林省科技发展计划项目(20210202026NC)

作者简介: 张冲(1995—),男,助理研究员,主要从事土壤耕作部件基础性试验研究,E-mail: zc4266078@163.com

通信作者: 范旭辉(1973—),男,研究员,主要从事农业耕整地技术及装备研究,E-mail: cchkbjomfan@163.com

17% and 4.4%, which can meet the data error range of simulation and simulation, which provided basic data for discrete element simulation analysis of soil tillage components in Northeast China.

Key words: chisel plow; EDEM simulation analysis; soil tillage model; soil trough test; micro disturbance mechanism; macroscopic disturbance state

0 引言

识别土壤耕作部件对土壤的扰动行为有助于理解部件与土壤之间的互作规律,从而为设计和优化土壤耕作部件奠定基础^[1-7]。土壤耕作部件的扰动过程和作业机理十分复杂,受耕作土壤动力学、土壤空间分布差异性、土壤运动过程复杂性等诸多因素的影响,采用传统测量方法难以测定土壤的微观运动情况和作业机理^[8-10]。

随着离散元仿真分析技术的发展,国内外研究学者陆续将离散元仿真技术应用到土壤扰动分析的研究中,近年来更强调借助离散元仿真软件进行数值化模拟分析土壤扰动的耕作过程。方会敏等^[11]建立了旋耕作业过程中的离散元模型,研究旋耕作业过程中不同深度土壤的运移情况,并且应用离散元方法研究了秸秆-土壤-旋耕刀模型中秸秆的位移情况;邓佳玉等^[12]应用离散元分析方法研究不同牵引速度、作业深度、入土角条件下的土壤颗粒受力变化情况;王学振^[13]以翼铲为主要研究对象,运用离散元方法与土槽试验相结合,探究深松土壤的扰动行为;丁启朔等^[14]利用离散元软件,建立适用于粘性水稻土的深松耕作离散元模型,分析湿粘水稻土深松过程及其内在相互作用机理。现有研究工作表明,离散元分析软件可以成为研究土壤耕作力学、微观土壤扰动过程的有效技术手段。

凿式犁是美国保护性耕作技术中“覆混耕作技术(Mulch-tillage)”的主要配套机具之一,主要用于秋季初耕作业^[15]。典型的凿式犁耕作(简称凿耕)流程为:秋季凿耕→春季采用圆盘耙或耕耘机进行一次或两次的整地作业→播种→中耕。在全量玉米秸秆覆盖还田的地表进行凿耕后,有50%~70%的秸秆覆盖留在地表,其余秸秆混拌在耕层土壤中^[16]。覆盖在地表的秸秆能保持土壤水分,防止土壤风蚀、水蚀;混拌在土壤耕层秸秆能快速提升耕层内有机质含量^[17]。

凿铲是凿式犁的基本土壤耕作部件,它与深松铲结构形式类似,其功能也有共同之处:打破犁底层,以促使雨水渗透^[18]。不同之处在于:深松铲对土壤的作用是松而不翻,凿铲的作用是能够条带松动并翻动土壤。为此,本文以凿铲为研究对象,利用离散元分析软件研究土壤扰动效果,并与深松铲作

业对比,重点探究凿铲对土壤的微观扰动机理及宏观扰动状态,为凿铲的参数化设计与结构优化提供决策依据。

1 凿铲结构与工作原理

1.1 凿铲组成

凿铲的结构主要由铲柄、起土铲尖(以下简称铲尖)和条形翻土板(以下简称翻土板)组成,如图1所示。其中,凿铲总体高度 h_1 为847 mm,铲柄宽度 b 为90 mm,铲柄厚度为25 mm,铲尖和翻土板的宽度均为60 mm,厚度为15 mm,铲尖外廓线分为曲线段和直线段,曲线段的曲率半径 R_2 与翻土板曲率半径 R_1 均为320 mm,构成一段连续光滑曲线,直线段与曲线段相切,入土角 α 为 30° ,凿铲结构参数示意图如图2所示。

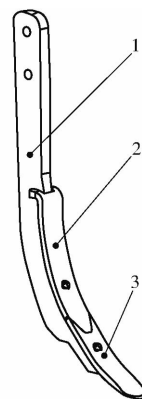


图1 凿铲结构简图

Fig. 1 Structural diagram of chisel plow

1. 铲柄 2. 翻土板 3. 铲尖

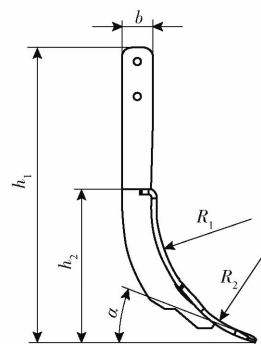


图2 凿铲结构参数示意图

Fig. 2 Structural parameters of chisel plow

1.2 工作原理

凿铲与土壤相互作用过程中,对土壤产生切削、挤压等作用引起土壤破碎失效,不仅会松动土壤,而且

会将深层土壤翻动,形成条状的土堡翻扣到地表,破坏土壤原有的层次结构,如图3所示。凿铲对土壤的扰动效果与深松铲的作业机理相似,王学振等^[19]、杭程光^[20]针对深松铲与土壤的交互机理展开了较为深入的研究,根据深松作业评定指标,确定深松铲作业后的土壤膨松度和土壤扰动系数。

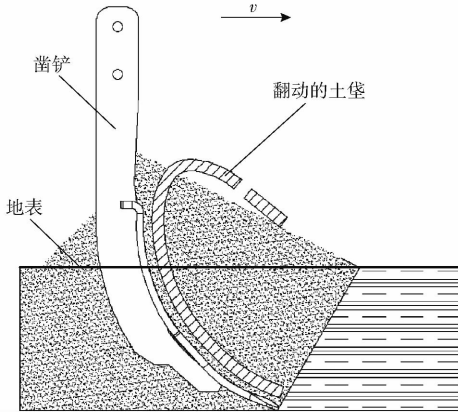


图3 凿铲扰动土壤的原理分析

Fig. 3 Principle analysis of chisel plow disturbed soil

2 土槽试验

2.1 试验条件及设备

凿铲和深松铲的土槽试验场地在吉林省农业机械研究院农机综合实验室,室内土槽长80 m、宽3 m,如图4所示。试验采用黑钙土,试验前对土壤进行旋耕、镇压,保证土槽内的土壤条件符合大田土壤环境。将纵向土壤分成耕作层(地表以下0~200 mm)和犁底层(地表以下200~300 mm),采用干燥法测定耕作层土壤含水率为16.31%,测定犁底层土壤含水率为21.37%,采用手摇式土壤坚实度测量仪测定耕作层土壤坚实度为475 kPa,犁底层土壤坚实度为1 243.5 kPa,采用环刀取样法测定耕作层土壤容重为1.30 g/cm³,犁底层土壤容重为1.72 g/cm³。

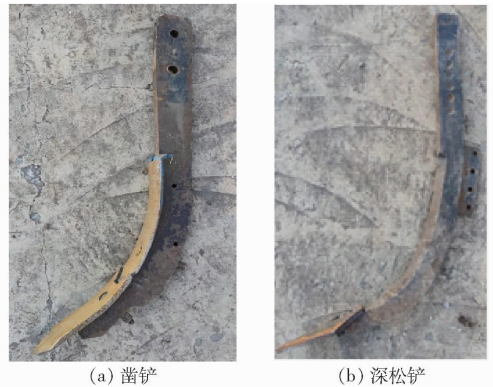


图4 室内土槽试验平台

Fig. 4 Indoor soil trough test platform

试验以凿铲和深松铲为研究对象,凿铲结构参数如图2所示,凿铲实物如图5a所示。深松铲结构参数根据《农业机械设计手册》^[21]中的技术标准,铲

柄高度600 mm,铲柄宽度60 mm,铲柄厚度25 mm,铲柄曲率半径300 mm,铲尖长度165 mm,铲尖宽度60 mm,铲尖厚度10 mm,入土角23°,深松铲实物如图5b所示。



(a) 凿铲

(b) 深松铲

图5 凿铲和深松铲实物图

Fig. 5 Physical drawings of chisel plow and subsoiler

2.2 试验过程

凿铲和深松铲分别装卡在试验台架上进行土槽试验,试验在耕作深度为300 mm、速度为5 km/h的作业条件下进行,为了保证试验结果的准确性,取前10 m为土槽车加速试验区,后10 m为土槽车减速试验区,中间20 m为数据采集区域。部件作业前,使用自制的耕层土壤轮廓测量设备(主要由铝型材支架、水平尺和激光测距仪组成)测定耕前地表轮廓曲线,如图6所示;部件作业后,测定耕后地表轮廓曲线;将被扰动的土壤移除后,测定沟底轮廓曲线。



图6 耕层土壤轮廓测量设备

Fig. 6 Soil profile measuring equipment

3 EDEM 仿真分析

3.1 凿铲与深松铲建模

本试验为探究凿铲与土壤的交互机理,与深松铲进行对比分析研究。为保证仿真分析的准确性,采用SolidWorks软件对试验用的凿铲和深松铲按1:1的比例建立三维结构模型,并保存为.stl格式导入Altair EDEM软件。

3.2 土壤颗粒及土壤接触模型

准确的土壤颗粒形状是保证模型仿真运算结果准确性的基础,现有研究表明,土壤颗粒的结构形式

有球形颗粒、柱状颗粒、核状颗粒^[8]。现有 EDEM 2021 软件中就有这 3 种颗粒结构,为仿真分析提供了方便的条件,如图 7 所示。为了准确描述耕作部件与土壤的相互作用过程,本文选用土壤颗粒单元的半径为 5 mm。

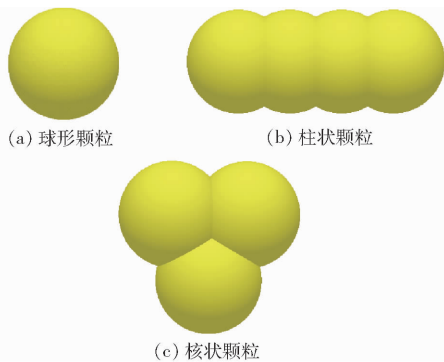


图 7 土壤颗粒模型

Fig. 7 Soil particle model

赵淑红等^[22]、丁启朔等^[23]均使用 Hertz - Mindlin with Bonding 模型作为土壤颗粒间的接触模型,EDEM 中的 Hertz - Mindlin with Bonding 模型土壤颗粒间存在粘性连接键,可以更好地还原土壤颗粒之间接触的真实状态。对于东北地区的黏重黑土,土壤的含水率较高,土壤与耕作部件之间的粘附力较大,更适合使用 Hertz - Mindlin with JKR Cohesion 模型,该接触模型是一个凝聚力接触模型,在 Hertz 接触理论的基础上结合 JKR 理论,考虑黏重土壤颗粒之间的粘结力对颗粒运动状态的影响,能够更好地展现粘性土壤与耕作部件之间的运动状态^[24]。本文选用 Hertz - Mindlin with JKR Cohesion 模型作为土壤接触模型。

3.3 土壤模型参数

EDEM 软件仿真模型参数分为材料参数和接触参数。材料参数选取材料类型固有的技术参数,主要由密度、泊松比和剪切模量组成,其中深松铲和凿铲的材料都是 65Mn,65Mn 的密度、泊松比和剪切模量参考文献^[8]的数据,土壤密度通过田间试验环刀取样方法测定,土壤泊松比通过测量土壤内摩擦角后计算得出,土壤内摩擦角可以利用直剪试验测定,土壤泊松比计算公式为

$$\mu = \frac{K_0}{1 + K_0} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad K_0 = 1 - \sin\phi \quad (2)$$

式中 μ ——泊松比

K_0 ——土壤侧压力系数

ϕ ——土壤内摩擦角, (°)

接触参数主要包括材料之间的恢复系数、静摩擦因数和动摩擦因数。本次试验共设置耕作层、犁

底层和心土层 3 种土壤结构类型,土壤之间的接触参数在 EDEM 2021 软件内置的 Soil starter park 模块选取,土壤与 65Mn 的接触参数参考文献^[24]的数据。

在 Hertz - Mindlin with JKR Cohesion 模型中,用表面能表示颗粒与触土部件材料之间的粘结力,土壤与 65Mn 间的 JKR 表面能参考文献^[24]中的试验结论进行标定。

离散元仿真模型的基本参数如表 1 所示。

表 1 离散元仿真模型的基本参数
Tab. 1 Basic parameters of discrete element simulation model

参数	数值
65Mn 密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 830
65Mn 泊松比	0.35
65Mn 剪切模量/Pa	7.27×10^{10}
耕作层土壤含水率/%	16.31
耕作层土壤密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 304
耕作层土壤泊松比	0.42
耕作层土壤剪切模量/Pa	1×10^6
犁底层土壤含水率/%	21.37
犁底层土壤密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 716
犁底层土壤泊松比	0.47
犁底层土壤剪切模量/Pa	5.7×10^6
心土层土壤含水率/%	23.46
心土层土壤密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 877
心土层土壤泊松比	0.48
心土层土壤剪切模量/Pa	7.3×10^6
土壤-土壤间恢复系数	0.5
土壤-土壤间静摩擦因数	0.8
土壤-土壤间动摩擦因数	0.23
土壤-65Mn 间恢复系数	0.61
土壤-65Mn 间静摩擦因数	0.57
土壤-65Mn 间动摩擦因数	0.056
土壤-65Mn 间表面能/($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)	5.5
土壤-土壤间表面能/($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)	7.46

3.4 EDEM 耕作模型

为了完整显示凿铲和深松铲的仿真作业效果,本文建立的虚拟土槽模型尺寸(长×宽×高)为 1 000 mm×1 200 mm×400 mm,如图 8 所示。其中地表以下 0~200 mm 为耕作层,地表以下 200~300 mm 为犁底层(蓝色区域),300~400 mm 为心土层(紫色区域)。为了更加清楚描述耕作层土壤的扰动情况,将耕作层分为浅耕作层(灰色区域)和深耕作层(粉色区域),浅耕作层为地表以下 0~100 mm,深耕作层为地表以下 100~200 mm。其中,浅耕作层充填球状颗粒,深耕作层充填球状颗粒和核状颗粒,犁底层和心土层均充填核状颗粒和柱状颗粒。

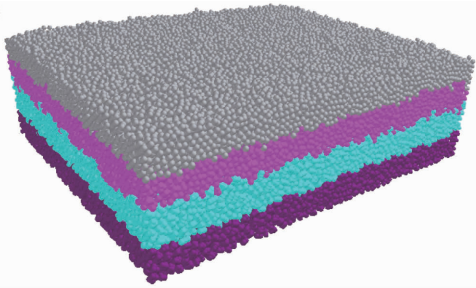


图8 仿真土壤模型

Fig. 8 Simulated soil model

参数设定完成后,通过颗粒工厂分时段进行自然下落、堆积粘结,并将深松铲和耢铲的三维模型分别导入进行仿真分析,深松铲和耢铲以 y 轴方向为作业方向,以速度 1.38 m/s 运行,耕深 300 mm ,仿真过程总用时 10 s , $0 \sim 9 \text{ s}$ 为土壤颗粒沉降稳定阶段, $9 \sim 10 \text{ s}$ 为土壤耕作部件模拟仿真运动阶段。

4 结果与分析

4.1 土壤扰动过程对比分析

传统试验方法难以分析土壤扰动的作业过程,为探究深松铲、耢铲对土壤的扰动机理,利用离散元仿真分析方法,以铲柄的中心平面为剖面,对不同时刻扰动过程进行纵向剖视。深松铲在 9.3 s 时铲柄完全进入土壤, 9.5 s 与 9.7 s 时深松铲位于作业过程的中间段,如图 9 所示;耢铲在 9.2 s 时铲柄完全进入土壤, 9.4 s 与 9.6 s 时耢铲位于作业过程中间段,如图 10 所示。

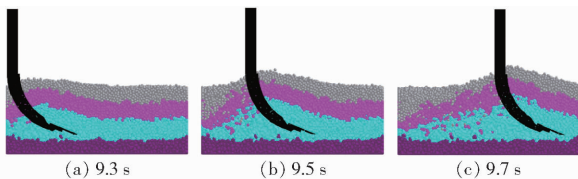


图9 深松铲土壤扰动过程分析

Fig. 9 Analysis of soil disturbance process with subsoiler

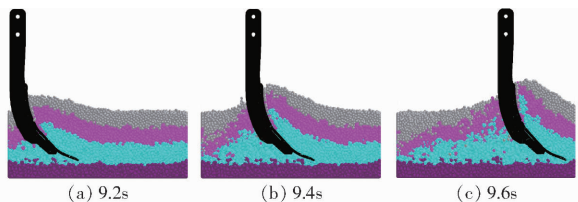


图10 耢铲土壤扰动过程分析

Fig. 10 Analysis of soil disturbance process with chisel plow

当深松铲完全进入土壤时(图 9a),受到深松铲尖的剪切力和挤压力作用将犁底层土壤向上抬起,并同时作用力传递到深耕作层和浅耕作层,深松铲作业前位置出现轻微的土壤隆起;随着深松铲作业过程的持续(图 9b),土壤主要发生剪切破坏,仅实现土壤的抬起、下落,不破坏原有耕层土壤结构;

当深松铲扰动一定区域后(图 9c),在重力的作用下土壤回填深松作业形成的坑形扰动区域。

当耢铲完全进入土壤时(图 10a),耢铲铲尖对耕作层和犁底层的土壤进行剪切破坏,土壤被铲尖上表面挤压并沿翻土板表面向上滑移,耢铲作业前位置出现较明显的土壤隆起;随着耢铲作业过程的持续(图 10b),土壤继续沿翻土板向上滑移至距地表一定高度(图 10c),受重力作用翻扣在耢铲两侧的地表,其余土壤受重力作用回填耢铲作业形成的坑形扰动区域,对土壤造成强烈扰动,并破坏了耢铲耕作区内的原有耕层结构。

通过对深松铲与耢铲的扰动过程对比分析可知,耢铲重新构建耕层土壤分布状态,将犁底层土壤翻耕到地表,而深松铲仅对耕作层土壤进行扰动,不改变原有的耕层土壤结构分布。

4.2 土壤扰动效果对比分析

4.2.1 土壤扰动区域

通过对耢铲与深松铲作业过程的运动状态对比分析,采用临界速度分割法^[13],计算耢铲和深松铲对土壤的扰动面积。按照运动速度从大到小粒子依次为红色、绿色、蓝色,红色区域表示颗粒运动速度最大,蓝色区域表示颗粒运动速度为零。通过粒子是否具有运动速度为区分原则,提取耢铲和深松铲在纵向截面和俯视视图上的扰动面积,纵向截面扰动面积 A_s 是指耕前地表至实际沟底的横截面面积,俯视视图扰动面积 A_d 是指用土壤颗粒速度等于零来划分临界曲面区域得到的面积,如表 2 所示。

表2 耢铲和深松铲对土壤的扰动面积

Tab. 2 Disturbed area of soil by chisel plow and

参数	subsoiler		面积差值
	耢铲的扰动面积	深松铲的扰动面积	
纵向截面扰动面积 A_s	54 128	52 586	1 542
俯视视图扰动面积 A_d	233 061	116 779	116 282

通过纵向截面视图结合表 2 数据分析得出,耢铲在前进方向对土壤的扰动区域面积(图 11a)大于深松铲扰动区域面积(图 11b),面积差值为 $1 542 \text{ mm}^2$,而且耢铲翻动土壤造成铲尖和翻土板前侧的土壤具有较高的运动速度,耢铲作用下土壤具有的最大运动速度为 3.64 m/s ,扰动区域平均速度为 1.24 m/s ,深松铲作用下土壤具有的最大运动速度为 2.03 m/s ,扰动区域平均速度为 0.8 m/s ,扰动过程中耢铲的土壤运动速度大于深松铲的土壤运动速度。

通过俯视视图结合表 2 数据分析得出,耢铲在对俯视平面土壤的扰动区域面积(图 12a)大于深松铲扰动区域面积(图 12b),面积差值为 $116 282 \text{ mm}^2$,耢

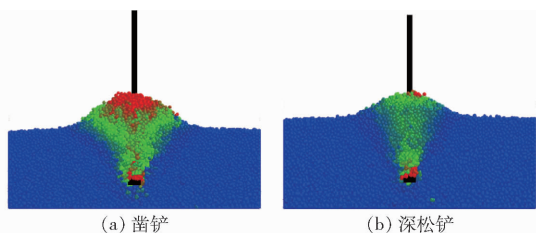


图 11 纵向截面颗粒运动

Fig. 11 Longitudinal section particle motion

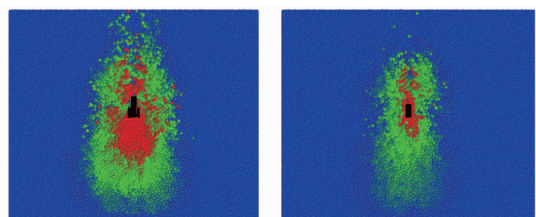


图 12 俯视图颗粒运动

Fig. 12 Top view particle motion

铲对周边的土壤结构进行大面积的区域扰动,而深松铲仅对前进方向土壤进行剪切破坏,形成了扇形的土壤破碎轮廓,深松铲的作业区域面积明显小于凿铲的作业区域面积。

4.2.2 土壤膨松度和扰动系数

本文以土壤颗粒是否具有速度为区分原则,研究凿铲和深松铲作业后的土壤扰动效果,绘制仿真土壤颗粒的运动速度临界曲线作为土壤扰动的坑形轮廓,将仿真颗粒在地表的堆积轮廓作为土壤扰动的垄形轮廓,将仿真起始颗粒沉降后的表面作为地表轮廓。同时,绘制出通过土槽试验测定出的耕前地表、耕后地表和沟底 3 条曲线,沟底曲线作为土壤扰动的坑形轮廓,耕后地表曲线作为土壤扰动的垄形轮廓,耕前地表曲线作为地表轮廓,如图 13、14 所示。

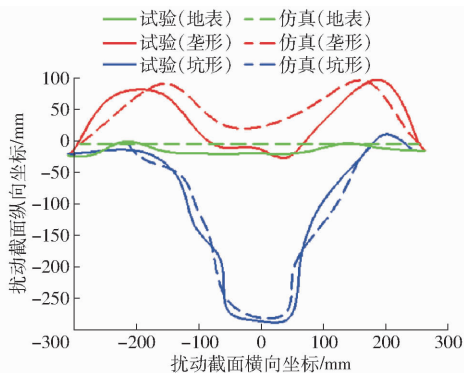


图 13 凿铲仿真与土槽试验作业曲线轮廓

Fig. 13 Chisel plow simulation and soil trough test operation curves contour

土壤膨松度和土壤扰动系数可以作为衡量深松扰动效果的评级指标,这两项指标同样适用于评价凿铲对土壤扰动的作业效果^[8]。根据深松作业质量国家标准的评定指标^[25],深松作业后的土壤膨松

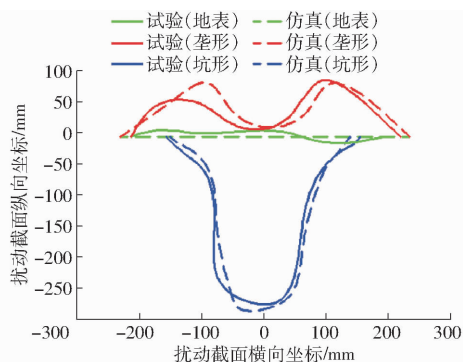


图 14 深松铲仿真与土槽试验作业曲线轮廓

Fig. 14 Subsoiler simulation and soil trough test operation curves contour

度范围应为 10% ~ 40%,土壤扰动系数应不小于 50%。其计算方程式分别为

$$P = \frac{A_h - A_q}{A_q} \times 100\% \quad (3)$$

$$y = \frac{A_s}{A_q} \times 100\% \quad (4)$$

式中 P ——土壤膨松度,%

A_h ——耕后地表至理论深松沟底的横断面积, mm^2

A_q ——耕前地表至理论深松沟底的横断面积, mm^2

y ——土壤扰动系数,%

A_s ——耕前地表至实际深松沟底的横断面积, mm^2

由式(3)、(4)计算得到土壤膨松度和土壤扰动系数,如表 3、4 所示。

表 3 深松铲和凿铲的土壤膨松度仿真与试验结果

Tab.3 Simulation and experimental results of soil bulkiness of subsoiler and chisel plow %			
铲型	仿真值	试验值	相对误差
凿铲	17.3	14.1	22.7
深松铲	13.8	12.4	11.3

表 4 深松铲和凿铲的土壤扰动系数仿真与试验结果

Tab.4 Simulation and experimental results of soil disturbance coefficient of subsoiler and chisel plow %			
铲型	仿真值	试验值	相对误差
凿铲	67.4	64.1	5.1
深松铲	61.6	59.4	3.7

由表 3、4 可知,凿铲作业后的土壤膨松度仿真值为 17.3%,试验值为 14.1%,深松铲作业后的土壤膨松度仿真值为 13.8%,试验值为 12.4%,表明凿铲作业后的土壤膨松度大于深松铲作业;凿铲作业后的土壤扰动系数仿真值为 67.4%,试验值为

64.1%,深松铲作业后的土壤扰动系数仿真值为61.6%,试验值为59.4%,表明凿铲作业后的土壤扰动系数大于深松铲作业。

根据表3、4数据,通过计算仿真值与试验值相对误差的平均值,得到土壤膨松度的仿真值与试验值的相对误差为17%,土壤扰动系数的仿真值与试验值的相对误差为4.4%。通过表3、4可以看出,土壤膨松度的相对误差明显大于土壤扰动系数,凿铲数据的相对误差大于深松铲,该试验结果主要由于EDEM仿真分析球形颗粒粘结强度与实际土壤粘结仍然存在差距,深松铲作业松而不翻,不破坏原有的耕层结构,颗粒位移和运动速度较小,使得仿真结果与试验结果较为一致。而凿铲翻耕土壤,重新构建土壤耕层结构,颗粒位移和运动速度较大,无法还原土槽试验作业后地表形成的土堡和大土块,导致土壤膨松度数值出现较大的相对误差,但数据结果仍旧可以满足模拟仿真的误差范围,可为土壤耕作部件的微观扰动分析提供参考。

5 结论

(1)通过EDEM仿真分析与土槽试验结合,分析凿铲对东北地区黏重土壤的扰动情况,与深松铲作业进行对比试验,研究凿铲作业的土壤微观扰动机理和宏观扰动状态,并根据东北地区黏重黑土的

土壤情况,构建适用于黏重土壤与耕作部件之间的EDEM土壤耕作模型。

(2)凿铲和深松铲的土壤微观扰动机理对比研究表明,深松铲主要对耕作层和犁底层进行剪切破坏,将耕作层和犁底层土壤抬起、下落,使土壤松动但不翻扣,基本不破坏原有耕层土壤结构;凿铲铲尖对耕作层和犁底层的土壤进行剪切破坏,土壤被铲尖上表面挤压并沿翻土板表面向上滑移,将犁底层土壤翻扣到地表,从而改变凿铲耕作区内的耕层土壤结构。

(3)凿铲和深松铲的宏观扰动状态对比研究表明,凿铲作业后的土壤膨松度仿真值为17.3%,试验值为14.1%,凿铲作业后的土壤扰动系数仿真值为67.4%,试验值为64.1%,凿铲纵向截面扰动面积、俯视视图扰动面积分别大于深松铲1542、116282 mm²,说明与深松铲作业相比,凿铲作业可以增强土壤扰动的效果。

(4)建立东北地区黏重土壤的EDEM仿真模型,为不同类型土壤耕作部件的离散元仿真分析提供技术方法。土壤膨松度的仿真值与试验值的相对误差为17%,土壤扰动系数的仿真值与试验值的相对误差为4.4%,可以满足模拟仿真的数据误差范围,仿真分析与土槽试验得到的垄形、坑形曲线轮廓较为拟合,为东北地区的土壤耕作部件离散元模拟仿真分析提供基础数据支撑。

参 考 文 献

- [1] 丁启朔. 耕作力学研究的土壤结构及其评价方法[D]. 南京:南京农业大学,2006.
DING Qishuo. Assessment of soil structure for soil tillage research[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [2] 方会敏, 姬长英, FARMAN Ali Chandio, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22-28.
FANG Huimin, JI Changying, FARMAN Ali Chandio, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22-28. (in Chinese)
- [3] 张智泓, 甘帅汇, 左国标, 等. 以砂鱼鳃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)
- [4] 李宏, 张作刚, 薛金爱, 等. 不同耕作方式对土壤环境及玉米产量与效益的影响[J]. 玉米科学, 2021, 29(4): 70-77.
LI Hong, ZHANG Zuogang, XUE Jin'ai, et al. Effects of different tillage methods on soil environment, maize yield and economic benefit[J]. Journal of Maize Science, 2021, 29(4): 70-77. (in Chinese)
- [5] 郭志军, 佟金, 任露泉, 等. 耕作部件-土壤接触问题研究方法分析[J]. 农业机械学报, 2001, 32(4): 102-104, 112.
GUO Zhijun, TONG Jin, REN Luquan, et al. Research method on the interacting problem of tillage tool-soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4): 102-104, 112. (in Chinese)
- [6] 贾洪雷, 罗晓峰, 王文君, 等. 滑动耕作部件作业阻力测试装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 56-64.
JIA Honglei, LUO Xiaofeng, WANG Wenjun, et al. Design and experiment of tillage resistance testing device for sliding cultivate component[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 56-64. (in Chinese)
- [7] 贾洪雷, 王万鹏, 陈志, 等. 农业机械触土部件优化研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 1-13.
JIA Honglei, WANG Wanpeng, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 1-13. (in Chinese)

Chinese)

- [8] 黄玉祥, 杭程光, 苑梦婵, 等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80-88.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80-88. (in Chinese)
- [9] 丁启朔, 丁为民, 孟为国, 等. 耕作力学研究中的土壤结构表现与评价[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 62-66.
DING Qishuo, DING Weimin, MENG Weiguo, et al. Characteristics and quantifications of soil structure for soil tillage research[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 62-66. (in Chinese)
- [10] 郭志军, 杜干, 周志立, 等. 土壤耕作部件宏观触土曲面减阻性能研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 47-52.
GUO Zhijun, DU Gan, ZHOU Zhili, et al. Actuality analysis of resistance-reducing properties on soil cultivating components with different macroscopic soil-engaging surfaces[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 47-52. (in Chinese)
- [11] 方会敏, 姬长英, AHMED Ali Tagar, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60-67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED Ali Tagar, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60-67. (in Chinese)
- [12] 邓佳玉, 胡军, 李庆达, 等. 基于 EDEM 离散元法的深松铲仿真与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(4): 14-18.
DENG Jiayu, HU Jun, LI Qingda, et al. Simulation and experimental study on the subsoiler based on EDEM discrete element method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(4): 14-18. (in Chinese)
- [13] 王学振. 土壤-带翼深松铲互作关系及其效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
WANG Xuezheng. Soil-winged subsoiler interactions and their effects[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)
- [14] 丁启朔, 葛双洋, 任骏, 等. 水稻土深松阻力与土壤扰动效果研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(1): 47-56, 63.
DING Qishuo, GE Shuangyang, REN Jun, et al. Characteristics of subsoiler traction and soil disturbance in paddy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(1): 47-56, 63. (in Chinese)
- [15] KOMP M. CRM survey data[EB/OL]. (1982-01-01)[2022-06-10] <https://www.ctic.org/crm/>.
- [16] DALE F. Corn tillage systems[EB/OL]. (2014-02-23)[2022-06-10] <http://corn.agronomy.wisc.edu/Management/L007.aspx>.
- [17] ADAM H, DOUG A, ANDREW B, et al. Best management practices mulch tillage[EB/OL]. (2013-08-13)[2022-06-10] <http://www.omafra.gov.on.ca/english/environment/bmp/AF171.pdf>.
- [18] R. A. 凯普纳. 农业机械原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1978.
- [19] 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 Xuezheng, 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)
- [20] 杭程光. 基于离散元方法的深松土壤扰动行为研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
HANG Chengguang. Soil disturbance behavior of subsoiling based on discrete element method[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)
- [21] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [22] 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]. 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 field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 75-87. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] 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)
- [25] 全国农业机械标准化技术委员会. 保护性耕作机械 深松机: GB/T 24675.2—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.