

翼型深松铲铲间距对土壤扰动的仿真与试验^①

石志鸣¹, 于昭洋^{1,2}, 杨玲¹, 杨明金¹

1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014

摘要: 土壤扰动是深松作业的重要性能指标, 翼型深松铲铲间距对土壤扰动特性有重要影响, 是深松机设计的关键结构参数之一. 本文采用离散元法 (DEM) 建立了土壤深松 03 试验模型, 研究了翼型深松铲 5 种不同铲间距 (350, 400, 450, 500, 550 mm) 在恒定工作速度 (0.83 m/s) 和恒定工作深度 (300 mm) 下对土壤扰动特性的影响. 仿真与试验表明, 铲间距越大, 土壤膨松度越小, 而土壤扰动系数先减小后增大; 两翼铲间未扰动土壤高度、横向扰动宽度随翼铲铲间距的增加而变大, 铲间距的大小对土壤深松效果将产生重大影响, 而且离散元法能够较准确地模拟土壤深松过程中的扰动行为; 离散单元法仿真试验与室外田间试验获得的土壤扰动轮廓大致吻合, 不同翼铲铲间距深松作业下土壤膨松度、扰动系数的 EDEM 仿真值和田间试验值平均误差分别是 11.2% 和 13.5%.

关键词: 翼型深松铲; 铲间距; 离散单元法; 土壤扰动; 田间试验

中图分类号: S222

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2021)04-0038-07

深松是保护性耕作的核心技术之一^[1], 在旱地保护性耕作技术体系中, 土壤深松被定为是一项少耕措施, 深松可有效改善土壤结构、打破犁底层、提高土壤中营养成分的利用率, 改善作物根系生长环境, 进而提高产量^[2-6].

无论使用何种耕作设备, 都必须考虑土壤的扰动状态, 以确保耕作的有效性. 影响土壤扰动行为的因素主要有: 触土部件结构、作业条件以及土壤物化性质^[5]. Spoor 等^[7]研究指出, 增加翼型深松铲的长度可以明显减小深松比阻, 增大土壤扰动系数; 夏雷^[8]基于离散单元法和土槽试验研究了翼型深松铲的安装高度、入土角等对土壤垄形与表面轮廓的影响; 王学振等^[2]分析了不同铲翼安装高度对土壤的扰动特性; Hang 等^[5]研究了凿型深松铲不同铲间距对土壤的扰动行为, 其研究表明, 铲间距为 400 mm 时对中下层土壤颗粒扰动影响最为明显. 现有大量研究主要在深松铲的几何结构形式、后倾角、工作运行速度以及振动等因素对土壤扰动状态的影响方面, 而关于翼型结构深松铲铲间距对土壤的扰动却鲜有报道.

弧形深松铲因其生产方便、破碎能力强, 并且在纵深比不大的条件下, 弧形铲柄与直线形相比具有优良的耕作性能^[9-11], 这些优点使其广泛被采用. 基于此, 本文以弧形铲柄翼型深松铲为研究对象, 采用离散单元法和田间试验, 分析不同铲间距对深松土壤扰动行为的影响, 希望为研究翼型深松铲不同铲间距对土壤的扰动行为提供一些参考.

1 田间试验

1.1 试验场地及材料

试验场地选择在原西南大学工程训练中心旁的试验田地, 该试验田长 15 m, 宽 6.5 m, 并且试验田土

① 收稿日期: 2020-03-29

基金项目: 重庆市科技局科技计划项目 (CSTC2016SHMSZX80037).

作者简介: 石志鸣, 硕士研究生, 主要从事土壤耕作扰动机理研究.

通信作者: 杨明金, 教授, 博士生导师.

质主要为紫色土, 该土质是重庆当地占耕作地面积最大的土壤, 是全市主要的耕作用土资源.

依照 JB/T9788—1999 的要求选择试验用深松铲具, 该铲具由弧状铲柄与凿形铲尖组成, 翼铲装配到弧形铲柄上. 如图 1 所示.

1.2 试验过程

试验前对试验田进行了简单处理, 清除了草根、石块等土壤杂物并进行了平整处理, 按相关要求完成对试验田土壤基本参数的测量, 结果汇于表 1.

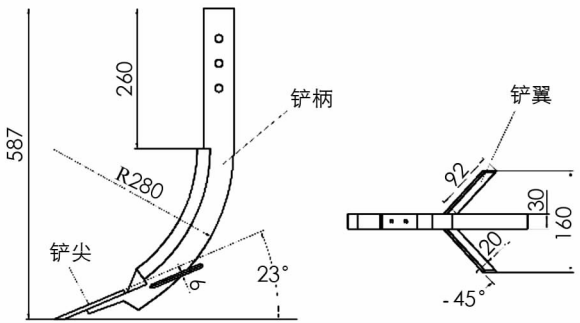


图 1 翼型铲结构图

表 1 试验田土壤参数

参数	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	含水率/%	坚实度/kPa
数值	1 920	36.5	642.7

土壤参数测量完成后依次使用 5 种不同铲间距(350,400,450,500,550 mm)的深松铲机具(图 2)进行深松试验, 试验选择的牵引动力为国产东方红 LX2004 拖拉机. 根据重庆市农用耕作土壤深松作业习惯要求, 选定翼铲运动速度 0.83 m/s, 作业深度 300 mm. 试验结束后, 利用自制简易土壤截面轮廓测量仪器(图 3)等设备分别测量不同铲间距深松后的土壤轮廓线, 为保证测量结果的准确性, 每种铲间距作用下的土壤轮廓分 3 个不同位置测量, 间距 1.5 m, 并记录不同翼铲铲间距深松后的土壤数据.



图 2 田间试验用深松机具

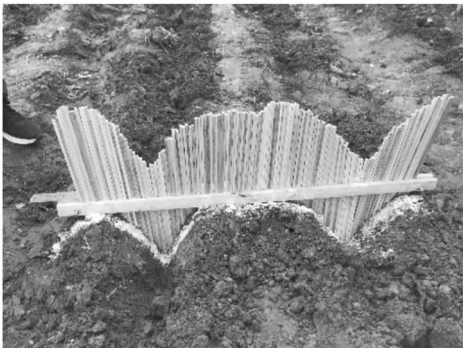


图 3 测量土壤扰动轮廓仪器

2 EDEM 仿真试验

2.1 试验方法

本文采用离散元法进行仿真试验, 结合重庆丘陵山区土壤土质及物理化学性质, 在 EDEM 软件中建立土槽模型, 把已创建的翼铲几何模型输入, 待一切准备工作完成后开始模拟土槽试验, 待完成后将结果导出并对其分析.

2.2 深松铲建模

为了确保仿真分析的准确性, 按照 1 : 1 的比例采用 CREO3.0 制图软件建立仿真用翼型深松铲的三维结构模型, 并保存为 .igs 格式文件.

2.3 土壤颗粒和土壤接触模型

为使 EDEM 仿真试验可靠, 需要创建较为精确的虚拟土壤模型. 查阅相关资料了解到土壤颗粒主要分为块状、核状以及柱状^[12], 用 EDEM 软件中自带颗粒(直径 3 mm)为基本结构单元, 创建块状、核状与柱状土壤颗粒模型, 如图 4 所示. 考虑到重庆丘陵山地的紫色土壤类型, 利用 EDEM2.7 中的 Hertz-Mindlin with Bonding 模型创建土壤颗粒间的接触模型^[2], 这种模型使颗粒间具有类似田间实际土壤液桥力的粘结键(图 5), 能承受一定大小的力和力矩^[2].

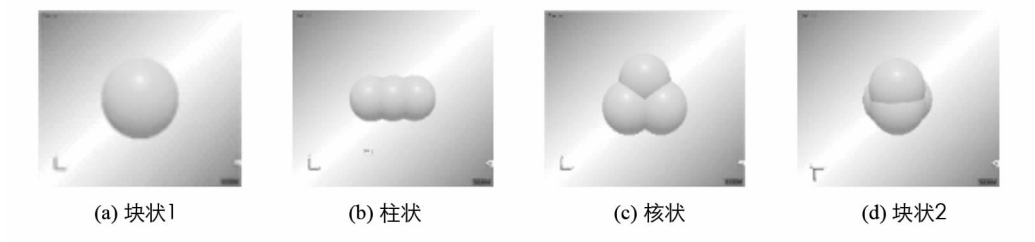


图 4 土壤颗粒模型

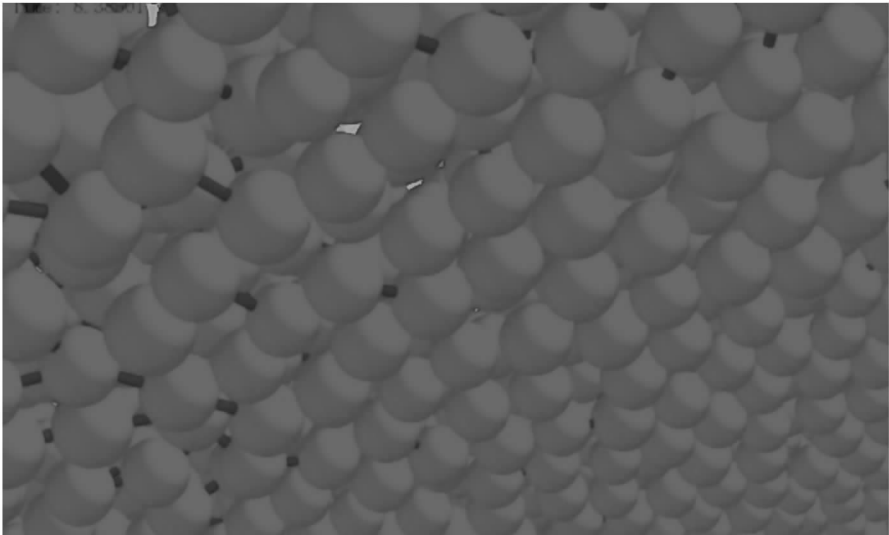


图 5 颗粒间的粘结键

2.4 土壤模型参数

选用的土壤接触模型主要参数包括土壤与土壤、土壤与翼铲间的恢复以及动静摩擦系数，其中土壤与土壤、土壤与铲间的恢复、动静摩擦系数主要参考文献[13-14]中的数据. 离散单元法试验模型主要参数数据如表 2.

表 2 离散元模型基本参数

参 数	数 值	参 数	数 值
土槽尺寸(长×宽×高)/mm	1000×1200×400	土壤—土壤间动摩擦因数(f_1)	0.4
深松铲速度(v)/(m·s ⁻¹)	0.83	土壤—土壤间静摩擦因数(f_2)	0.5
耕深(h)/mm	300	土壤—65 Mn 间恢复系数(e_2)	0.3
土壤颗粒密度(ρ_1)/(kg·m ⁻³)	1 920	土壤—65 Mn 间动摩擦因数(f_3)	0.08
土壤颗粒泊松比(ν_1)	0.4	土壤—65 Mn 间静摩擦因数(f_4)	0.58
土壤颗粒剪切模量(G_1)/Pa	1×10 ⁷	填充单元半径(r)/mm	3
65 Mn 密度(ρ_2)/(kg·m ⁻³)	7 830	土壤颗粒数目(n)	650 000
65 Mn 泊松比(ν_2)	0.35	重力加速度(g)/(m·s ⁻²)	9.81
65 Mn 剪切模量(G_2)/Pa	7.27×10 ¹⁰	仿真时间(t)/s	10
土壤—土壤间恢复系数(e_1)	0.2		

2.5 EDEM 建模

为了确保仿真与田间试验的一致性，依据耕作深度和翼铲铲间距以及宽度在 EDEM 中创建尺寸(长×宽×高)为 1 000 mm×1 200 mm×400 mm 的土槽模型，如图 6 所示. 仿真参数设定完成后，通过 EDEM 软件中颗粒工厂动态生成土壤颗粒，颗粒生成完成后进行沉降、粘结以形成颗粒间的粘结键. 现实土壤颗粒中，每种类型的土壤颗粒大小并非完全相同，为了使仿真土壤与现实土壤更接近，设置每种土壤颗粒大

小呈正态分布. 然后依次将不同铲间距(350,400,450,500,550 mm)的翼型深松铲 3D 模型导入 EDEM 软件中, 设定耕深为 300 mm. 开始前, 使深松铲位于模拟土槽的一端, 以预设的速度运动, 仿真结束后, 保存不同铲间距的试验数据.

2.6 仿真土壤分布状态

为便于了解不同结构土壤颗粒深松过程中的扰动规律, 模拟土槽由 4 层结构组成, 从上到下依次为表层、中层、下层以及底层, 并在不同土层设置特定的土壤颗粒, 从上至下的土壤颗粒类型依次为块状 2 颗粒、核状颗粒、柱状颗粒、块状 1 颗粒^[12], 如图 6 所示. 为便于分析翼铲对 4 个层次土壤作用情况, 使用 EDEM 软件中的切片功能对土槽沿纵向、横向剖视, 如图 7 所示.

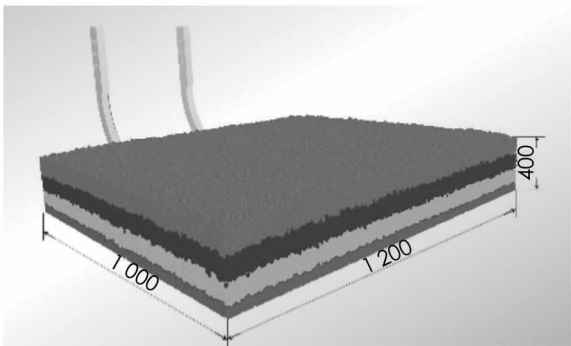


图 6 EDEM 仿真土壤模型

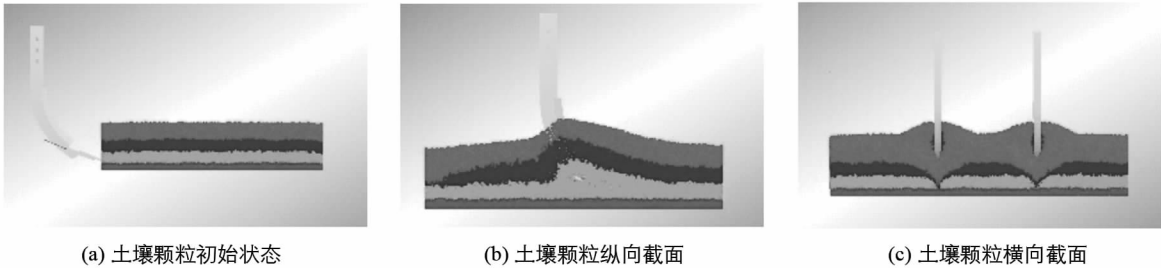


图 7 土壤分布状态

3 结果分析与评价

3.1 土壤扰动状态分析

为便于分析 4 种层次结构土壤颗粒随翼铲深松过程的扰动, 以模拟土槽的纵横向剖面图对不同层次土壤颗粒的扰动行为进行研究分析. 为研究深松铲位于不同位置时的土壤扰动状态, 以 400 mm 铲间距为例进行分析, 如图 8 所示, 由图中可以看出, 8.7 s 时翼铲铲尖已完整地接触模拟土槽, 8.9 s 时翼铲已完全接触模拟土槽, 9.1 s 与 9.3 s 时翼铲处于土壤深松过程的中段.

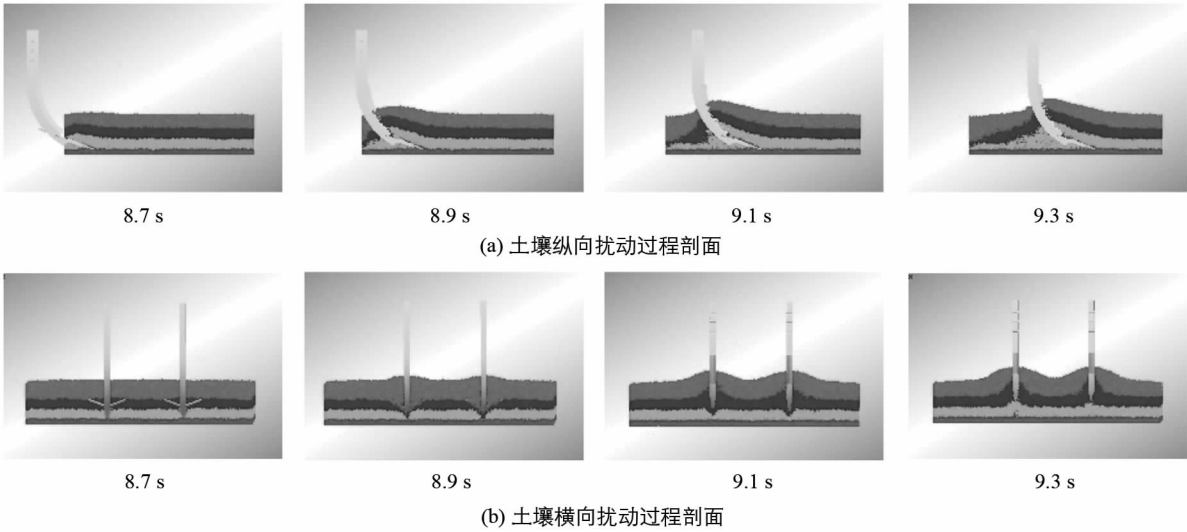


图 8 土壤扰动过程分析

从图 8 看出, 在深松的整个阶段, 表层土壤扰动的范围都是最大, 中间层以及下层居中, 底层最小. 当

翼铲铲尖进入土壤颗粒时(8.7 s),底层土壤颗粒受到来自铲尖的作用力从而向上隆起,并对其他层产生挤压,使中上层土壤产生位移,从而在地表产生隆起变形.随着深松过程的进行,下层、中层、表层土壤向上位移量不断增加,地表隆起变形更加显著.

当翼铲完整进入土壤模型时(8.9 s),在翼铲的作用下,部分表层土壤沿耕作方向发生位移,使表层土壤的纵向扰动范围增加;此外,在铲翼与铲柄刃口的剪切、导流作用下,表层、中层、下层及底层土壤向深松铲两侧移动,表层土壤的横向扰动显著.

随着深松过程的进行(9.1 s 与 9.3 s),由于土壤受到深松铲的剪切、挤压等作用力影响,导致土壤颗粒间黏结力失效,颗粒发生相对位移,形成中间凹陷两侧隆起的表面垄形,表层的土壤颗粒由于自身重力的作用相对翼铲向后下方移动,最终回填至深松后的垄沟.

3.2 土壤扰动效果分析

常常用膨松度以及扰动系数来作为评价土壤颗粒扰动效果的指标^[15].土壤膨松度与扰动系数的公式如下

$$p = \frac{A_h - A_q}{A_q} \times 100\%$$

$$y = \frac{A_s}{A_q} \times 100\%$$

式中 p —土壤膨松度, %

A_q, A_h —耕作前后地表面至理论沟底的横断面积, mm^2

y —土壤扰动系数, %

A_s —耕作前地表面至实际深松后沟底的横断面积, mm^2

为了研究分析翼铲铲间距对土壤颗粒扰动行为的影响,试验得到了不同铲间距深松下的土壤颗粒扰动范围以及扰动规律(如图 9、图 10 所示).图 9 显示了在不同铲间距深松下由两个翼型深松铲扰动的土壤横截面,在土壤表面测量土壤横向扰动宽度,并将其定义为两个深松铲扰动土壤的距离,垄高是从原始土壤表面到土垄顶部的垂直距离.当铲间距为 350,400,450,500,550 mm 时,两深松铲的土壤扰动宽度仿真值分别为 748.4,803.5,845.8,910.7,978.4 mm,垄高仿真值分别为 101.9,96.8,98.2,95.7,94.2 mm.仿真试验结果表明,铲间距越大,土壤横向扰动宽度就越大,垄高反映了土壤在地表的累积量,由于铲间距越小,两铲间土壤相互作用越大^[3],即铲间距越小,地表累积量越大,这也解释了在最小铲间距(350 mm)处观测到最大垄高.以上信息有助于选择合适的翼铲铲间距以获得最优的深松效果.由图 10 可知,当铲间距为 350,400,450,500,550 mm 时,铲间未扰动土高度分别为 -233.4,-208.1,-184.6,-161.5,-130.7 mm,即随着翼型深松铲铲间距的逐渐增大,两铲之间未扰动土高度逐渐增大.

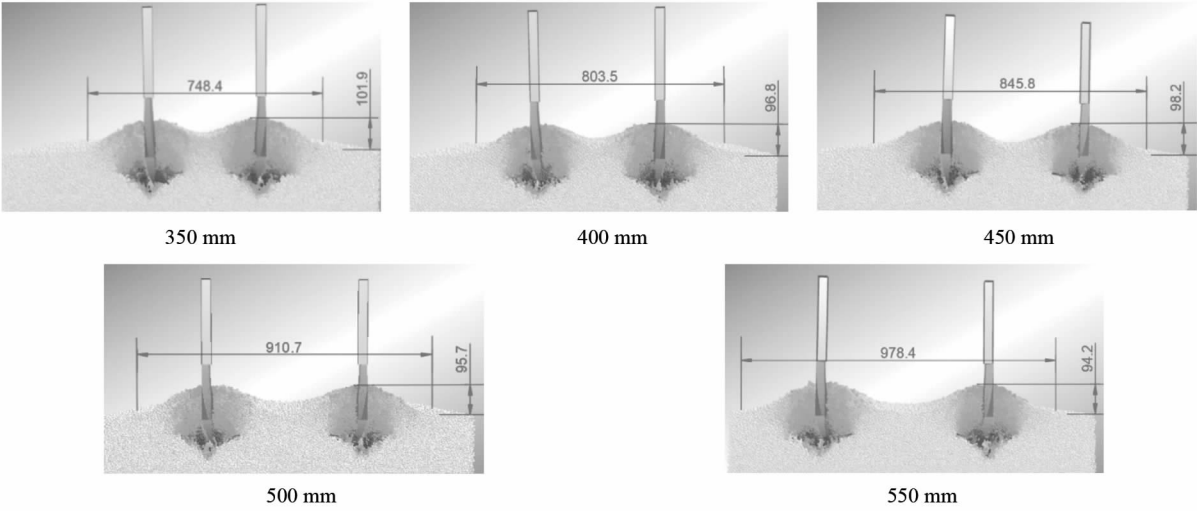


图 9 不同铲间距对土壤扰动状态的影响

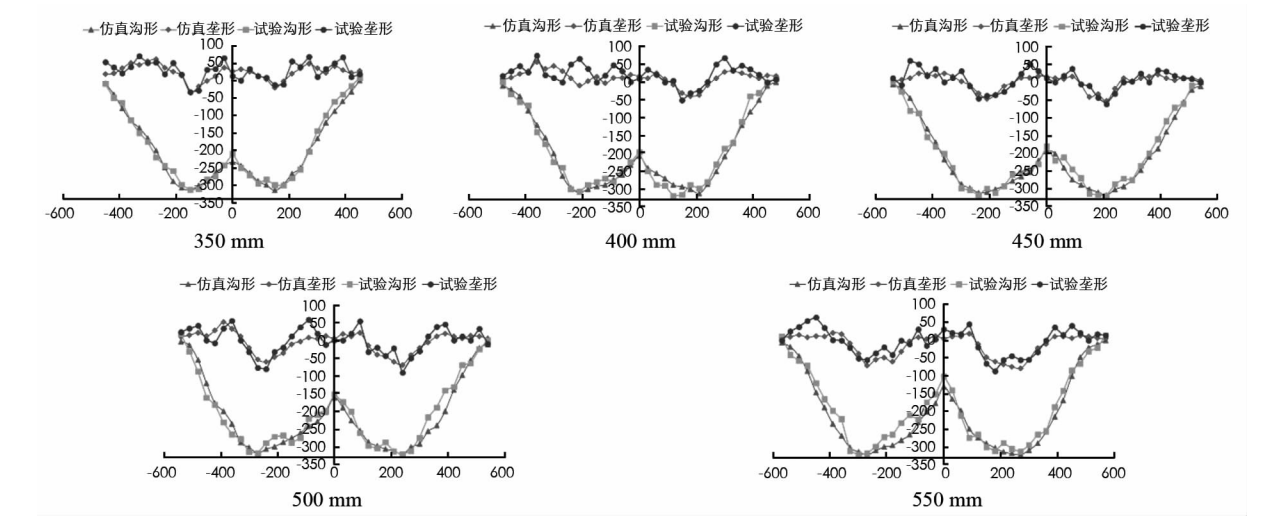


图 10 不同铲间距对土壤扰动轮廓的影响

按式(1)、式(2)分别计算出 5 个不同铲间距深松后的土壤膨松度、土壤扰动系数及其相对误差, 将其计算结果汇总于表 3 中。从表 3 可知, 铲间距越大, 土壤膨松度越小, 而扰动系数则是先降低后略微升高。5 种间距下土壤膨松度以及扰动系数的 EDEM 仿真值和田间试验值的相对平均误差为 11.2% 和 13.5%, 结果说明该土壤结构模型能够较好地模拟土壤颗粒深松中扰动情况。

表 3 仿真与试验结果对比分析

铲间距/mm	土壤膨松度/%			土壤扰动系数/%		
	仿真值	试验值	相对误差	仿真值	试验值	相对误差
350	28.7	24.9	15.3	82.6	72.8	13.5
400	27.3	24.5	11.4	78.4	68.2	15.0
450	25.5	23.1	10.4	75.8	66.3	14.3
500	25.1	22.5	11.6	73.3	65.1	12.6
550	24.2	22.5	7.6	73.5	65.4	12.4

4 结 论

本文采用 EDEM 建立了土壤深松模型并结合室外田间试验, 研究分析了翼型深松铲不同铲间距对土壤扰动行为的影响, 得出如下结论:

- 1) 土壤深松各个阶段, 表层土壤颗粒扰动量都是最大的, 中层及下层居中, 底层最小。
- 2) 随着翼型深松铲铲间距的增大, 土壤横向扰动宽度增大, 两铲之间未扰动土高度也增大, 铲间距越大, 土壤膨松度越小, 而扰动系数则先降低后略微升高。
- 3) 离散单元法能够较为准确地模拟土壤深松作业过程中的扰动行为, 离散单元法仿真与田间试验获得的土壤扰动数据大致相同, 5 种铲间距下土壤膨松度以及扰动系数的 EDEM 仿真值和田间试验值的平均误差为 11.2% 和 13.5%。

参考文献:

[1] 何 进, 李洪文, 高焕文. 中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究 [J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 60-67.

[2] 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.

[3] 杭程光, 黄玉祥, 高喜杰, 等. 深松铲铲尖对土壤扰动过程及效果的试验与分析 [J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 285-291.

[4] 李 博, 李清荣, 何培祥, 等. 微耕机耕深自动控制系统 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(4): 74-77.

[5] HANG C G, GAO X J, YUAN M C, et al. Discrete Element Simulations and Experiments of Soil Disturbance as Affect-

ed by the Tine Spacing of Subsoiler [J]. Biosystems Engineering, 2017, 168(4): 73-82.

[6] 陈浩, 李云伍, 罗超平, 等. 丘陵山区烟草种植机械配置策略研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017, 42(4): 113-118.

[7] SPOOR G, GODWIN R J. An Experimental Investigation into the Deep Loosening of Soil by Rigid Tines [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1978, 23(3): 243-258.

[8] 夏雷. 基于离散元法的深松铲铲翼参数优化及试验研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.

[9] 郭志军, 佟金, 周志立, 等. 深松技术研究现状与展望 [J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 169-174.

[10] 陈坤, 胡晓丽, 赵新子, 等. 国内外深松铲研究现状与展望 [J]. 农业与技术, 2010, 30(3): 33-34.

[11] 郭志军, 周志立, 张毅, 等. 土壤耕作部件仿生优化设计研究 [J]. 中国科学(技术科学), 2009, 39(4): 720-728.

[12] 王燕. 基于离散元法的深松铲结构与松土效果研究 [D]. 长春: 吉林农业大学, 2014.

[13] 邓佳玉. 基于离散元法的深松铲耕作阻力的仿真与试验研究 [D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.

[14] 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.

[15] 李霞, 张东兴, 王维新, 等. 受迫振动深松机性能参数优化与试验 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 17-24.

On Simulation and Experiment of Soil Disturbance Caused by Airfoil Subsoil Shovel Spacing

SHI Zhi-ming¹, YU Zhao-yang^{1,2}, YANG Ling¹, YANG Ming-jin¹
1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;
2. Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China

Abstract: Soil disturbance is an important performance index for subsoil operations. The airfoil subsoil shovel spacing has an important effect on soil disturbance characteristics, which is one of the key structural parameters of subsoiling machine design. In this paper, the DEM method has been used to establish the soil subsoiling test model, and the effects of 5 different shovel spacing (350, 400, 450, 500, 550mm) of airfoil subsoiling shovels on the soil disturbance characteristics under the constant working speed (0.83 m/s) and constant working depth (300 mm) are studied. The results show that with the increase of spade spacing, the soil swelling degree decreased gradually, the soil disturbance coefficient decreased first and then increased; the height of undisturbed soil between two deep spades increased gradually; the larger the spade spacing, the greater the width of soil lateral disturbance. The size of the shovel spacing has a significant impact on the effect of soil subsoil, and the discrete element method can more accurately simulate the disturbance behavior in the process of soil subsoil; the simulation of the discrete element method is basically consistent with the contour of the soil disturbance obtained from outdoor field experiments. The average errors of the simulated and experimental values of soil bulk and disturbance coefficient at the shovel spacing were 11.2% and 13.5%, respectively.

Key words: airfoil subsoiler; shovel spacing; discrete element method; soil disturbance; field trial

责任编辑 汤振金