

基于离散元法的间隔深松机作业性能仿真与试验

王铁军 于中鑫 孟繁博文 陈玉文 王瑞丽

(沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866)

摘要: 针对保护性耕作深松作业机具土壤扰动大的问题,设计了一种间隔深松机直注深松铲。利用离散元法和田间试验研究了不同铲体幅宽对土壤扰动行为的影响。以耕作比阻、土壤膨松度和土壤扰动系数为试验指标,对比不同铲体幅宽条件下土壤运动状态及各方向微观运动情况,分析直注深松铲土壤扰动效果。结果表明,当铲体幅宽为 350 mm 时,耕作阻力最小;当铲体幅宽为 450 mm 时,耕作比阻最小;土壤扰动随铲体幅宽增加而增大,铲体幅宽主要影响土壤侧向扰动、土壤回落及土垄高度,适当减小幅宽有利于减小土壤侧向扰动、增加土壤回落、降低垄高;铲体幅宽对土壤膨松度和土壤扰动系数有重要影响,当铲体幅宽为 350 mm 时,土壤膨松度相对较小,土壤扰动系数相对较大;不同铲体幅宽对耕作阻力和扰动面积均有一定的影响,铲体幅宽对扰动面积影响大于对耕作阻力的影响;试验范围内土壤膨松度和扰动系数试验值和仿真值平均误差分别为 6.36% 和 6.84%,耕作阻力和比阻试验值和仿真值平均误差分别为 9.02% 和 12.41%。间隔深松机降低土壤扰动效果明显,可为深松机优化设计提供参考。

关键词: 保护性耕作; 间隔深松; 直注深松铲; 土壤扰动; 离散元

中图分类号: S226.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)04-0098-09

OSID:



Simulation Analysis and Experiment for Operation Performance of Interval Subsoiler Based on Discrete Element Method

WANG Tiejun YU Zhongxin MENG Fanbowen CHEN Yuwen WANG Ruili

(College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: In order to solve the problem of soil disturbance caused by straw returning interval deep sowing combined operation machine in conservation tillage, an interval subsoiler with direct injection deep sowing shovel was designed. The discrete element simulation and field experiment method were used to study the different shovel body width affect the behavior of soil disturbance. Taking tillage specific resistance, soil swelling degree and soil disturbance coefficient as experimental indexes, the soil movement state and micro-movement in all directions under different shovel width conditions were compared, and the soil disturbance effect of direct injection deep loose shovel was analyzed. The results showed that tillage resistance was the minimum when the width of shovel was 350 mm, and tillage specific resistance was the minimum when the width of shovel was 450 mm. Soil disturbance was increased with the increase of shovel width, and the shovel width mainly affected soil lateral disturbance, soil retreat and ridge height. Reducing the width appropriately was beneficial to reduce soil lateral disturbance, increase soil retreat and reduce ridge height. The width of the shovel had an important effect on soil fluffiness and soil disturbance coefficient. When the width of the shovel was 350 mm, the soil fluffiness was relatively small and the soil disturbance coefficient was relatively large. Different shovel width had certain influence on tillage resistance and disturbed area, and the influence degree of shovel width on disturbed area was greater than that of tillage resistance. Within the design parameters of shovel width, the average errors of test and simulation results of soil bulk degree and disturbance coefficient were 6.36% and 6.84%, respectively. The average errors of test and simulation values of tillage resistance and specific resistance were 9.02% and 12.41%, respectively. The effect of interval subsoiling machine on reducing soil

收稿日期: 2024-12-30 修回日期: 2025-02-18

基金项目: 沈阳市科学技术计划项目黑土地专项(24-216-2-10)和辽宁省“揭榜挂帅”科技攻关专项(2022JH1/10400017-04)

作者简介: 王铁军(1991—),男,副教授,博士,主要从事农业机械设计与优化研究,E-mail: tiejunwang@syau.edu.cn

通信作者: 王瑞丽(1970—),女,教授,博士,主要从事农业机械化及智能化装备研究,E-mail: wangruili@syau.edu.cn

disturbance was obvious, which can provide reference for the optimal design of subsoiling machine.

Key words: conservation tillage; interval subsoiling; direct injection subsoiling shovel; soil disturbance; discrete element

0 引言

深松作业是保护性耕作的主要农艺环节,能够打破土壤犁底层,提升土壤蓄水保墒能力,实现防止风蚀水蚀效果^[1-4]。深松铲是深松机具最重要的工作部件,合理设计深松铲可降低土壤扰动,进一步减小作业阻力^[5-7]。

减小深松作业阻力主要物理方式有分层深松、切振共作以及结构优化等^[8-11]。分层深松与振动深松作业功耗随振动频率升高进一步增大^[12-14]。WEI 等^[15]采用离散元法优化了一种适用于黏性土壤作业的深松铲,降低了耕作阻力和土壤扰动,显著提高了深松性能。张喜瑞等^[16]设计一种斜柄折翼式深松铲,基于 3 层土壤颗粒土槽模型进行深松铲作业性能试验,并通过田间试验验证了离散元法仿真结果具有较高的可靠性。朱惠斌等^[17]基于乌干达花金龟挖掘前足足趾轮廓曲线结构,设计了一种分层深松分类施肥装置,采用离散元法得出深松装置最优参数组合,提升了犁底层土壤破碎效果与施肥效率。研究表明,从结构上对深松铲进行优化,通过改变深松铲结构形式与结构参数可以通过减少土壤扰动的方式实现耕作阻力降低,进一步减少能量损耗^[18-21]。

结合辽宁省旱区保护性耕作技术需求,本文以保护性耕作秸秆还田间隔深松机直注深松铲为研究对象,设计一种直注深松铲,将粉碎秸秆埋入犁底层的同时降低耕作阻力,为播种等后续作业提供良好的土壤条件^[22-25],通过离散元仿真和田间试验,研究直注深松铲不同铲体幅宽条件下,秸秆直注深松作业对土壤扰动效果的理论仿真与田间试验差异,基于离散元法分层建立土槽颗粒模型对作业过程进行数值模拟,对比分析土壤微观运动,并进行田间试验分析其作业性能,以期推动东北地区保护性耕作技术推广和应用。

1 装置结构及间隔深松工作原理

1.1 间隔深松保护性耕作模式

如图 1 所示,根据辽宁省旱区保护性耕作技术需求建立秸秆还田间隔深松少耕模式,在春玉米收获后或春季播种前采用秸秆还田间隔深松机将幅宽为 L_1 的地表秸秆粉碎收集并通过直注深松铲埋到 30 ~ 35 cm 的土层,并平整深埋条带的地表土壤,同

时幅宽为 L_2 的地表秸秆保持覆盖。动土率(即 L_1 与 L_2 之比)不大于 30%,秸秆覆盖率不小于 70%。结合实际情况,可每两年进行一次,并依次改变秸秆立体还田和深松位置。

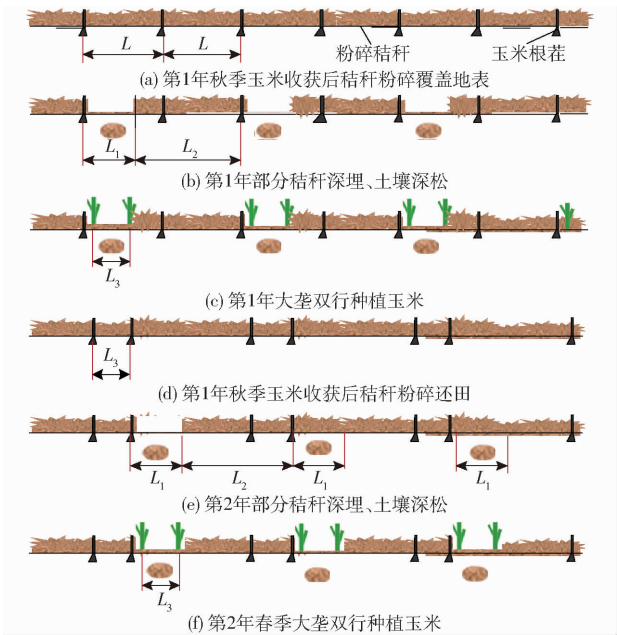


图 1 保护性耕作秸秆还田间隔深松少耕模式示意图
Fig. 1 Schematics of conservation tillage straw returning to field at intervals of deep loosening and less tillage

1.2 直注深松铲结构与技术参数

如图 2 所示,土壤耕作层深度一般为 400 mm,地表以下 0 ~ 170 mm 一般为耕作层,170 ~ 300 mm 一般为犁底层,300 ~ 400 mm 一般为心土层,间隔深松机作业深度为 300 mm^[26]。如图 3 所示,直注深松铲由铲尖、铲柄和铲体组成,铲尖为箭形铲尖^[27]。铲柄为轻型深松铲柄,用于连接铲尖和铲体并提供主要支撑力。铲体参照文献^[28]和秸秆还田需要进行设计。作业时,铲尖深入到土壤犁底层底端,切底打破犁底层土壤,铲体部分作用于耕作层,开出深

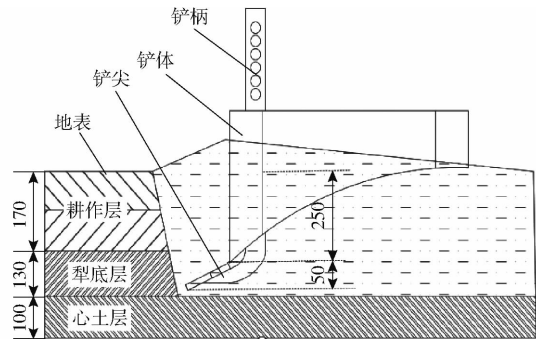


图 2 直注深松铲耕作情况

Fig. 2 Tillage condition of direct injection shovel

浅一致、大小均匀的沟使秸秆通过铲体落入。铲体入土部分为 250 mm, 铲尖位置在 250 ~ 300 mm 之间。铲体幅宽设计 300、350、400、450、500 mm 5 个水平。

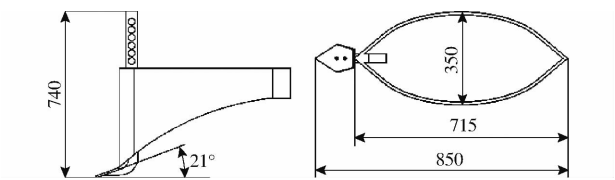


图 3 直注深松铲结构示意图

Fig. 3 Direct injection shovel structure diagram

2 直注深松铲性能仿真

2.1 离散元建模

2.1.1 直注深松铲建模

为提高仿真结果准确性, 采用 Solidworks 对直注深松铲进行 1:1 建模, 并保存为 stl 格式。

2.1.2 土壤颗粒及接触模型

根据试验农田土壤类型和特点, 选择 EDEM 软件中 Hertz - Mindlin with Bonding 模型作为土壤颗粒间接触模型^[29]。为准确模拟耕作部件与土壤相互作用过程, 确定土壤颗粒半径为 10 mm, 土壤颗粒单元采用基本球形^[30]。相邻颗粒间由圆柱形链接(图 4), 代替真实情况下土壤颗粒中相互链接的液桥, 在受力时承受一部分作用力和扭矩。土壤颗粒模型基本参数如表 1 所示。

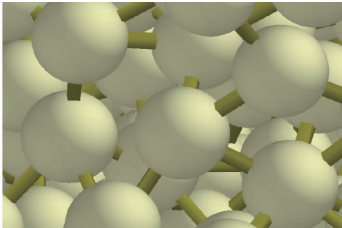


图 4 土壤间链接键

Fig. 4 Soil - soil linkage

表 1 土壤颗粒模型基本参数

Tab. 1 Basic parameters of soil particle model						
土壤类型	对应形状	颗粒组合序号	半径/mm	坐标轴位置/mm		
				x	y	z
粒状	单球	颗粒 1	10	0	0	0
		颗粒 2	10	-5	0	0
块状	双球组合	颗粒 3	10	5	0	0
		颗粒 4	10	-10	0	0
片状	三球组合	颗粒 5	10	10	0	0
		颗粒 6	10	-10	0	0
核状	四球组合	颗粒 7	10	5	0	0
		颗粒 8	10	0	9	0
		颗粒 9	10	0	3	5

2.1.3 土壤模型参数标定

参照文献[31], 将法向最大刚度近似等于切向

最大刚度, 法向最大应力等于切向最大应力。不同土层土壤密度通过实际测量获取, 土壤离散元模型相关参数如表 2 所示。

表 2 离散元仿真基本参数

Tab. 2 Basic parameters of discrete element simulation	
参数	数值
耕深/mm	300
65Mn 钢泊松比	0.35
65Mn 钢密度/(kg·m ⁻³)	7 800
耕作层土壤密度/(kg·m ⁻³)	1 210
耕作层土壤泊松比	0.25
耕作层土壤含水率/%	17
耕作层土壤粘接刚度/(N·m ⁻³)	5 × 10 ⁷
耕作层土壤粘接临界应力/Pa	3 × 10 ⁴
耕作层土壤剪切模量/Pa	1 × 10 ⁶
耕作层土壤间动摩擦因数	0.27
耕作层土壤与 65Mn 钢间动摩擦因数	0.34
耕速/(m·s ⁻¹)	0.83
重力加速度/(m·s ⁻²)	9.81
65Mn 钢剪切模量/Pa	7.27 × 10 ¹⁰
犁底层土壤密度/(kg·m ⁻³)	1 480
犁底层土壤泊松比	0.34
犁底层土壤含水率/%	20
犁底层土壤粘接半径/mm	8.4
犁底层土壤粘接刚度/(N·m ⁻³)	5 × 10 ⁷
犁底层土壤临界应力/Pa	4 × 10 ⁴
犁底层土壤剪切模量/Pa	1.2 × 10 ⁶
犁底层土壤间动摩擦因数	0.25
犁底层与 65Mn 钢间动摩擦因数	0.14

2.1.4 EDEM 耕作模型

根据秸秆深埋还田要求和直注深松铲作业幅宽, 在模型中建立尺寸(长 × 宽 × 高)为 2 300 mm × 1 600 mm × 400 mm 的虚拟土槽, 其中地表以下 0 ~ 170 mm 为耕作层土壤, 地表以下 170 ~ 300 mm 为犁底层土壤, 300 ~ 400 mm 为心土层土壤; 参数设定完成后, 通过 EDEM 动态颗粒工厂在土槽中先生成下层土壤颗粒, 逐步生成上层土壤颗粒, 颗粒生成完成后设置 Hertz - Mindlin with Bonding 模型参数进行链接键的生成, 并将直注深松铲 3D 模型导入 EDEM 软件(图 5)。

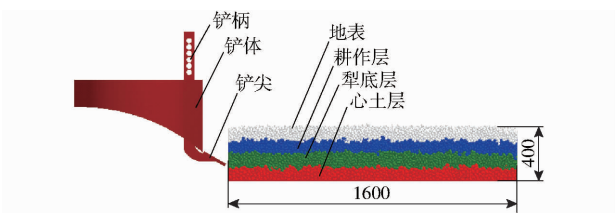


图 5 EDEM 耕作模型

Fig. 5 EDEM tillage model

为分析不同铲体幅宽对各层土壤在不同方向上

最大位移的影响,在耕作模型中选择直注深松铲铲尖、铲体下端、铲体中间位置及地表具有代表性的颗粒,如图 6 所示。

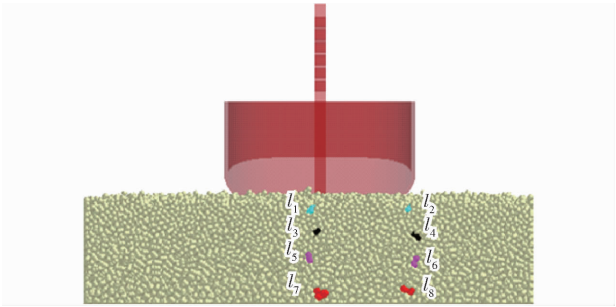


图 6 耕作模型中选定颗粒位置

Fig. 6 Selected particle position in tillage model

为研究其不同铲体幅宽耕作情况下运动规律,在耕作模型中选择点 l_1 、 l_2 为地表中间位置的土壤,点 l_3 、 l_4 为耕作层中间位置土壤,点 l_5 、 l_6 为犁底层中间位置土壤,点 l_7 、 l_8 为心土层中间位置土壤。统计选定颗粒在耕作时的不同坐标,计算出选定颗粒位移,通过对比筛选出耕作过程中选定颗粒在 x 、 y 、 z 方向最大位移^[12]。

2.2 土壤运动状态

在直注深松铲位于匀速运动区域阶段对耕作模型进行耕作方向和垂直于耕作方向(侧向)的剖析,剖视处为直注深松铲的耕作方向和侧向中心,根据铲体幅宽及直注深松铲对土壤的耕作方向扰动情况,选择垂直耕作方向(侧向)的剖面为铲尖、铲体

前端、铲体中间、铲体末端,耕作方向的剖面为铲体中间、铲柄中间和铲体边缘,不同铲体幅宽下侧向(垂直于耕作方向)和耕作方向剖面分别如图 7、8 所示。

由图 7 可知,直注深松铲在不同铲体幅宽下作业机理相似,即在铲尖、铲柄、铲体协同作用下,使土壤受挤压、剪切等作用力,土壤间连接作用力失效破碎,在前进方向上两侧和竖直方向均发生相对位移,表现为地表上产生的土垄,作业后一部分土壤回落沟内。

铲体幅宽对耕作层土壤(灰色和蓝色颗粒)侧向扰动影响显著,对犁底层土壤(绿色颗粒)侧向扰动影响不显著,对心土层(红色颗粒)扰动影响最小;随着铲体幅宽的增加,耕作层土壤扰动不断增加,铲尖位置对土壤扰动也不断增加(图 7a),但铲尖部分对土壤耕作层扰动幅度较小,铲体幅宽对铲柄前端土壤扰动显著,当铲体幅宽为 300 mm 时,土壤隆起范围较小,且较低,说明铲柄前端对土壤影响较小;当铲体幅宽为 350 mm 时,铲柄前端耕作层土壤隆起和两侧范围较铲体幅宽为 300 mm 时稍大,说明 300 ~ 350 mm 范围内,铲体幅宽增加对土壤扰动范围增加影响不显著,但当铲体幅宽由 350 mm 增加到 400 mm 时,铲体前端耕作层、犁底层土壤及铲体两侧土壤扰动影响显著增加;当铲体幅宽为 400、450、500 mm 时,铲柄前端的隆起和两侧土壤扰动区域明显增加,且随着幅宽的增大而增加;当铲体

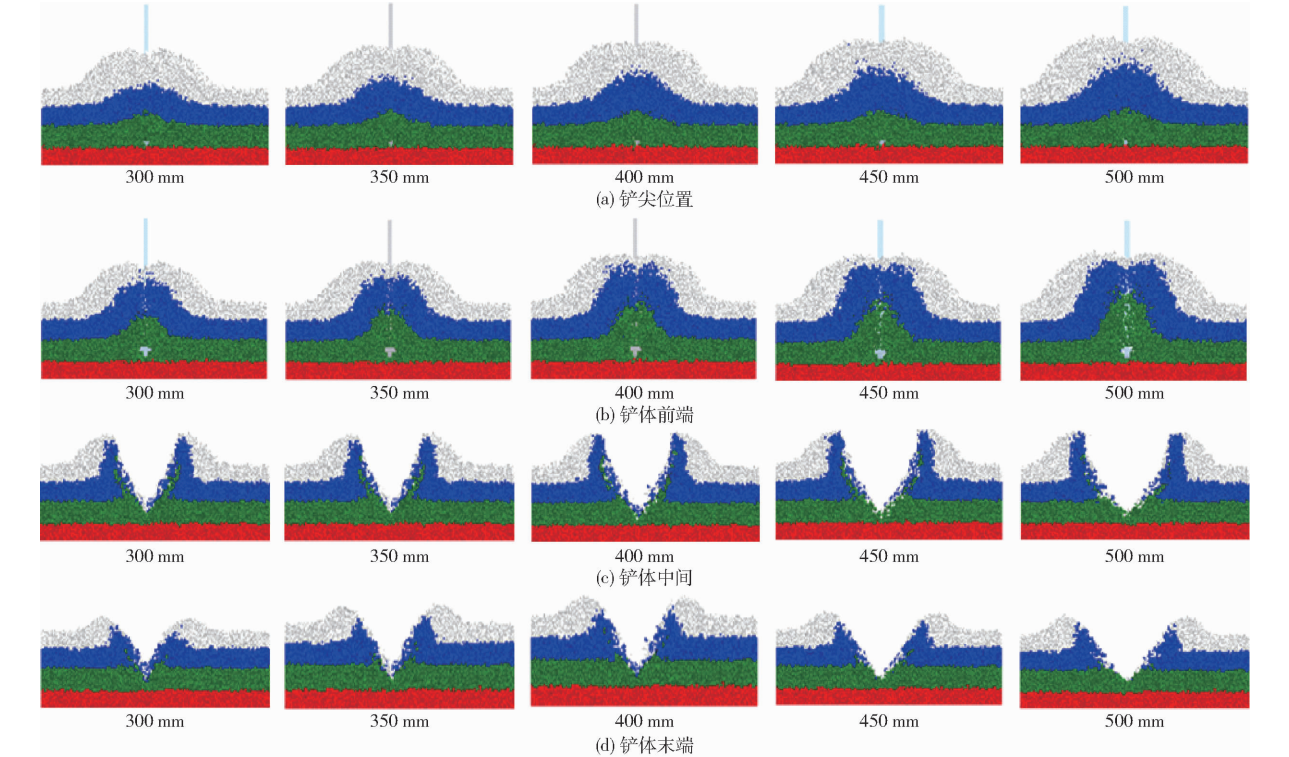


图 7 铲体幅宽对土壤侧向扰动状态的影响

Fig. 7 Influence of spade width on lateral disturbance of soil

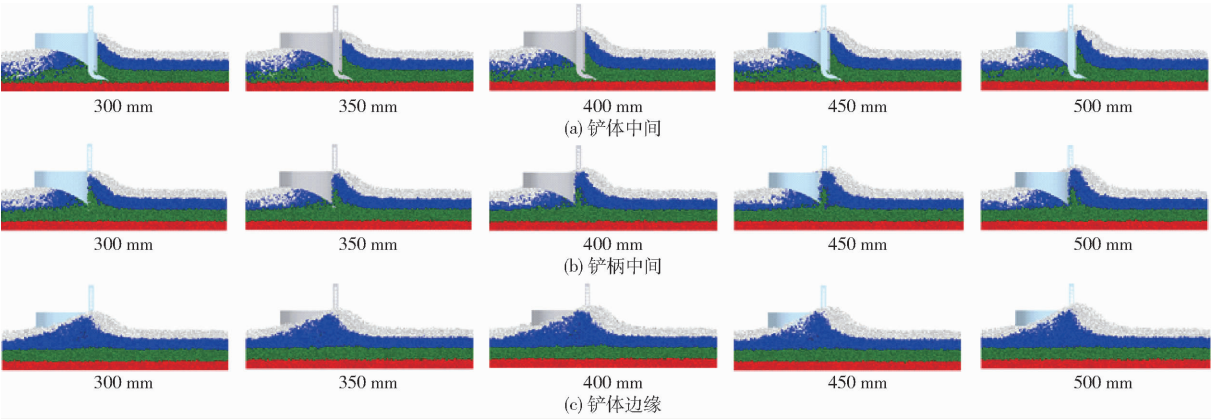


图 8 铲体幅宽对土壤耕作方向扰动状态的影响

Fig. 8 Influence of spade width on disturbed state of soil tillage disturbance

幅宽为 500 mm 时,铲体前端和两侧土壤扰动达到最大。

由图 8 可知,铲体幅宽对土壤表层的耕作方向的扰动影响比较明显,土壤犁底层(绿色颗粒)和心土层(红色颗粒)主要受到铲尖的影响,铲体部分对其影响较小。虽然铲体幅宽在不断增大,但土壤犁底层和心土层前进方向扰动范围和幅度都比较小。铲体部分主要作用于地表及耕作层,所以铲体幅宽对耕作层土壤前进方向扰动有直接关系。耕作层土壤在铲体作用下扰动越来越大,其中顶层土壤(灰色颗粒)扰动表现最明显,其次为耕作层土壤(蓝色颗粒),铲体幅宽对地表耕作层土壤扰动都比较大,对地表的扰动大于耕作层,铲体对犁底层扰动与耕作层相比明显减弱,主要原因是只有铲体下端尖部对土壤有直接作用,铲体对心土层土壤没有直接作用力,因此对其影响最小。

图 7 和图 8 表明,对于直注深松铲铲体幅宽变化,土壤在侧向和耕作方向的扰动状态也在不断变化,侧向扰动明显大于耕作方向扰动,说明铲体幅宽增大容易导致土壤扰动增大,减小直注深松铲铲体幅宽利于减小土壤侧向和纵向扰动及土壤耕作保护。

2.3 土壤微观运动对比

为探究不同直注深松铲铲体幅宽对土壤扰动的影响,利用 EDEM 进行仿真,得到直注深松铲铲柄纵向中心位置和铲体边缘位置土壤颗粒在耕作过程中的耕作方向 x 、侧向 y 和竖直方向 z 位移,统计选定不同位置颗粒在 x 、 y 、 z 方向最大位移 $X_{\max}$ 、 $Y_{\max}$ 和 $Z_{\max}$,以揭示铲体幅宽变化对耕作过程中相对位置土壤在各方向实际临界运动状态。

2.3.1 铲体幅宽对土壤在耕作方向 x 运动影响

由图 9 可知,铲体幅宽不断增大时,不同土层在前进方向位移均不断增大,且铲柄位置土壤位移大

于铲体边缘部分土壤位移,主要原因是铲柄部位土壤受到的直注深松铲直接作用力大,耕作层土壤同时受到表层土壤及土壤之间的作用力,导致表层土壤位移大于耕作层土壤位移。当铲体幅宽为 300 mm 时,铲柄部分和铲体边缘部分土壤位移最小,分别为 87.70、20.88 mm;当铲体幅宽为 350 mm 时,前进方向上土壤位移在铲柄部分和铲体边缘部分分别为 97.44、24.36 mm;当铲体幅宽为 500 mm 时,铲柄部分和铲体边缘部分土壤位移最大,分别为 126.98、32.86 mm。

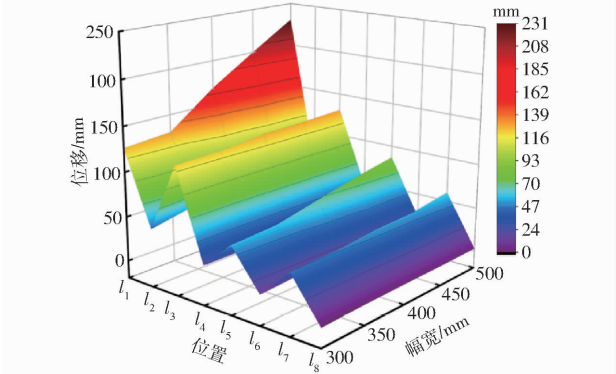


图 9 前进方向土壤最大位移

Fig. 9 Maximum displacement of soil in moving direction

2.3.2 铲体幅宽对土壤在侧向 y 运动影响

由图 10 可知,随着铲体幅宽不断增大,在侧向不同层土壤位移均增加,且铲柄部分土壤位移大于铲体边缘部分土壤位移,土壤侧向扰动随深度增加不断减小,当铲体幅宽为 300 mm 时,铲柄位置和铲体边缘位置土壤平均位移分别为 123.56、48.93 mm;当铲体幅宽为 350 mm 时,铲柄位置和铲体边缘位置土壤平均位移分别为 142.14、50.58 mm;当铲体幅宽为 500 mm 时,土壤位移在铲柄位置和铲体边缘位置均达到最大值,分别为 198.73、61.46 mm。铲体幅宽对土壤在侧向的扰动影响较显著。

2.3.3 铲体幅宽对土壤在耕作方向 z 运动影响

由图 11 可知,耕作后,铲柄位置一部分土壤回

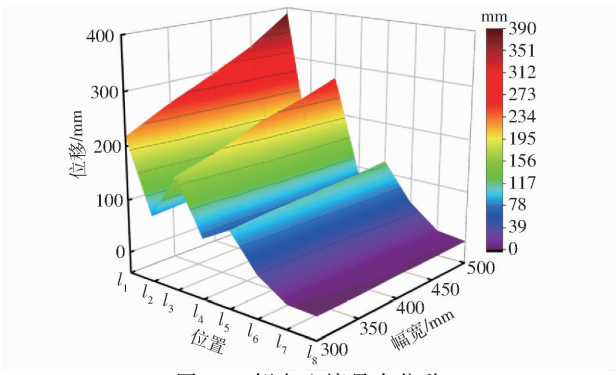


图 10 侧向土壤最大位移

Fig. 10 Maximum lateral displacement of soil

落沟内,另一部分和铲体边缘部土壤在地表形成堆积轮廓;随着铲体幅宽增加,铲柄位置和铲体边缘位置的土壤在竖直方向的运动也在不断增加,铲体幅宽越大回落越明显,铲体边缘位置的土壤在竖直方向不断增加。当铲体幅宽为 300 mm 时,铲柄位置土壤位移在回落方向达到最大值 126.02 mm,当铲体幅宽为 300 mm 时,铲体边缘位置土壤位移在竖直方向取得最小值 48.70 mm;当铲体幅宽为 350 mm 时,铲柄位置土壤位移平均回落值为 124.97 mm,铲体边缘位置土壤位移在竖直方向平均值为 51.25 mm;当铲体幅宽为 500 mm 时,铲体边缘位置土壤位移在竖直方向达到最大值 63.84 mm,铲柄位置土壤位移在回落方向取得最小值 120.94 mm。

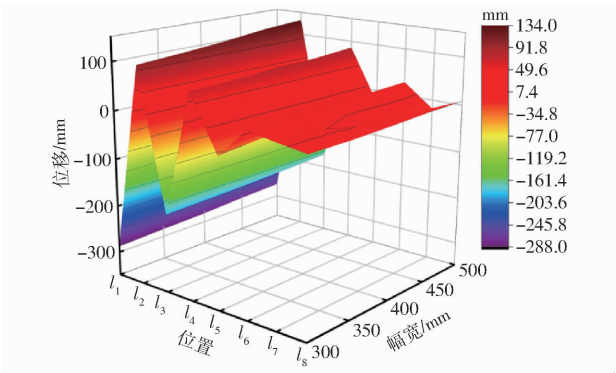


图 11 竖直方向土壤最大位移

Fig. 11 Maximum displacement of soil in vertical direction

综上所述,铲体幅宽主要影响土壤侧向扰动。不同土层土壤扰动随铲体幅宽增大而增大,同一铲体幅宽时,土壤扰动随深度增加而减小。铲体幅宽过大会增加土壤侧向位移,增加垄高,适当减小铲体幅宽有利于土壤回落,减小垄高,有利于间隔深松作业后地表平整。

3 田间试验

3.1 耕作绩效评价指标

试验前对选用的地块进行参数测定,不同深度下土壤含水率、密度和坚实度如表 3 所示。

表 3 土壤物理参数
Tab.3 Soil physical parameters

深度/mm	含水率/%	密度/(kg·m ⁻³)	坚实度/kPa
0 ~ 100	15.52	1 410	761.98
100 ~ 200	16.67	1 500	921.83
200 ~ 300	19.00	1 570	1 108.32

在辽宁省阜新市阜蒙县大固本镇进行试验,土质为沙壤土。在试验田依次对 5 个铲体幅宽进行保护性耕作间隔深松秸秆直注还田试验。试验用东方红 LG1504 型拖拉机牵引间隔深松机作业,试验过程如图 12 所示。为保证试验条件一致性,5 次试验距离及机器前进速度、加速、加速时间、入土深度等均保持一致。根据实际要求,试验速度为 0.83 m/s^[32],拖拉机和间隔深松机采用三点悬挂的方式连接,直注深松铲通过螺栓连接。为测量耕作阻力,将阻力传感器安装在直注深松铲铲柄上部,通过无线设备将耕作阻力信号实时发送至计算机。



图 12 间隔深松机作业过程及效果

Fig. 12 Operation process and effect of interval subsoiler

耕作比阻 (Specific draft force, SDF) S_{DF} 直接反映作业过程中能耗利用情况,是评价作业效果的重要指标之一^[33],计算式为

$$S_{DF} = \frac{F}{A}$$

式中 F ——耕作阻力, N

A ——作业后土壤横截面扰动面积, mm²

在作业后使用卷尺、量角器等量取耕深、耕宽和相应的倾斜角等,根据所得数据绘制土壤扰动轮廓。为保证结果准确性,在每个测量点测量 3 次,取其平均值作为扰动轮廓值^[34]。

土壤膨松度和土壤扰动系数可以直接作为评价土壤扰动效果指标^[34]。

3.2 土壤扰动效果

在仿真试验后以土壤是否具有运动速度为条件,绘制土壤颗粒运动速度临界区曲线作为仿真试验土壤坑形轮廓,以土壤地表堆积轮廓作为土壤扰动垄形轮廓^[17];田间试验与仿真试验坑形和垄形轮廓如图 13 所示。计算土壤膨松度和土壤扰动系数仿真值和试验值及其相对误差,如表 4 所示。

由表 4 可知,铲体幅宽对土壤膨松度有重要影响,当铲体幅宽为 350 mm 时,土壤膨松度相对

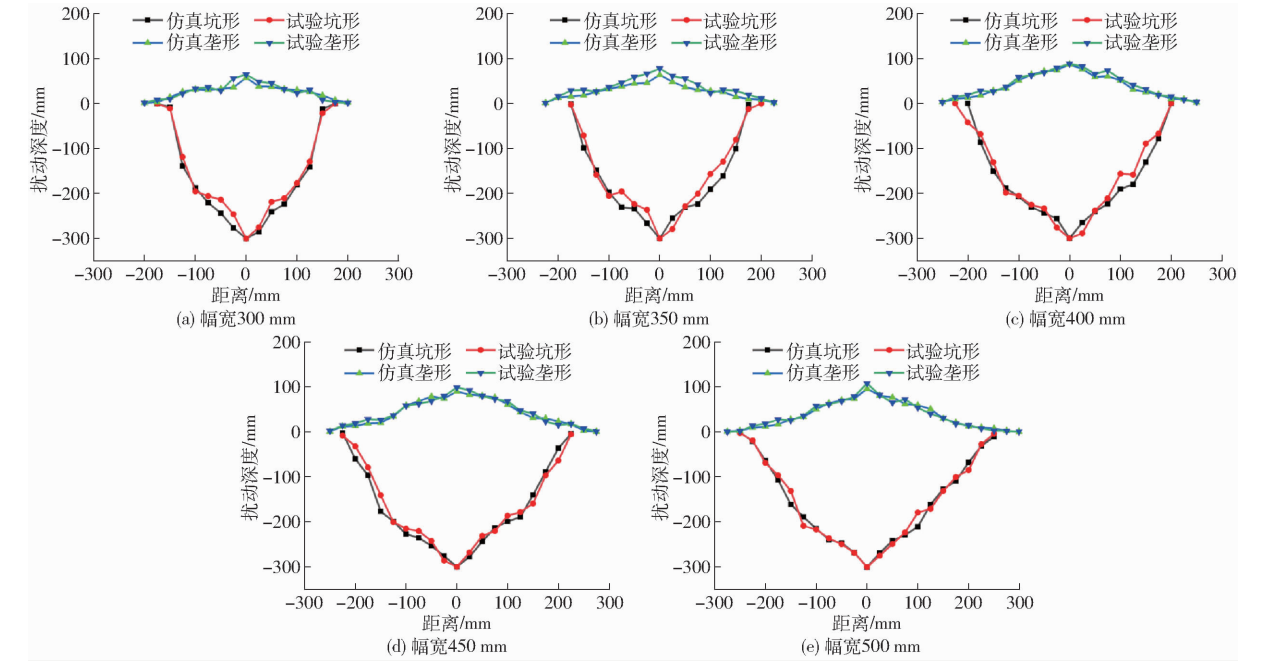


图 13 铲体幅宽对土壤扰动轮廓的影响

Fig. 13 Influence of spade width on soil disturbance profile

表 4 土壤膨松度和土壤扰动系数仿真值与试验值
Tab.4 Simulation and test values of soil fluidity and
soil disturbance coefficient %

幅宽/ 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
300	10.51	10.11	3.99	65.32	59.54	9.70
350	10.47	11.50	8.95	65.78	56.45	16.52
400	12.43	14.33	13.25	63.07	60.40	4.41
450	16.26	15.85	2.57	59.62	58.05	2.71
500	13.88	14.31	3.02	54.35	53.90	0.83

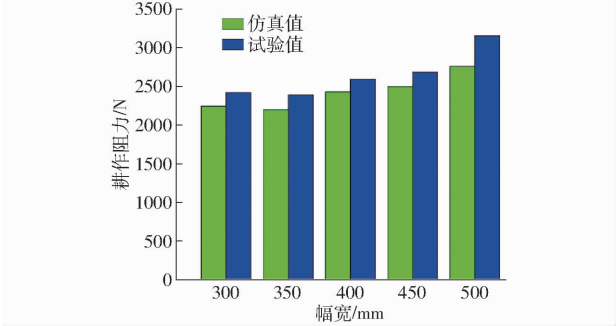


图 14 铲体幅宽对耕作阻力的影响

Fig. 14 Influence of shovel width on tillage resistance

较小,为 10.47%,扰动系数相对较大,为 65.78%,说明适当减小铲体幅宽有利于减小土壤膨松度,提高土壤的扰动系数,改善作业质量。试验范围内土壤膨松度和扰动系数试验值、仿真值平均误差分别为 6.36% 和 6.84%,表明建立的仿真模型具有较好的准确性^[35]。

3.3 铲体幅宽对耕作阻力及耕作比阻影响

由图 14 可知,在不同铲体幅宽下,直注深松铲的作业阻力在 2 000 ~ 3 500 N 之间变化,铲体幅宽为 500 mm 时耕作阻力最大;直注深松铲不同铲体幅宽下耕作阻力仿真值与试验值平均误差为 9.02%。

耕作后,耕作比阻仿真值和试验值变化曲线如图 15 所示。由图 15 可知,直注深松铲铲体幅宽显著影响耕作比阻,其主要影响土壤扰动面积。试验条件下耕作比阻仿真值与试验值平均误差为 12.41%。对比图 14、15 可知,铲体幅宽对土壤扰动的影响大于对耕作阻力的影响。

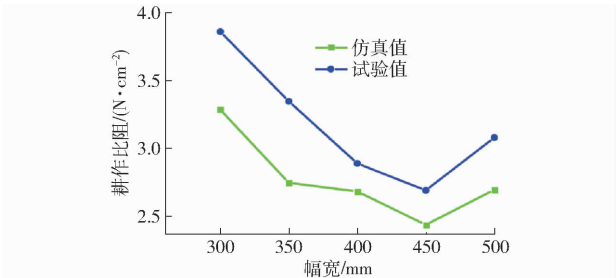


图 15 铲体幅宽对耕作比阻的影响

Fig. 15 Influence of shovel width on SDF

4 结论

(1)离散元仿真可以较为准确地模拟间隔深松作业效果。试验范围内土壤膨松度和扰动系数试验值和仿真值平均误差分别为 6.36% 和 6.84%,表明仿真试验与田间试验结果基本一致,所建立的仿真模型具有较好的准确性,能够分析间隔深松作业关键部件及其对土壤扰动。

(2)通过仿真得出间隔深松关键部件直注深松

铲在不同铲体幅宽下对土壤的扰动机理。在直注深松铲作用下,土壤间连接作用力失效,土壤在耕作方向、侧向和竖直方向上发生一定的位移,形成不同的扰动轮廓。分析土壤在耕作方向、侧向和竖直方向上位移可知,铲体幅宽主要影响土壤在侧向扰动;铲体幅宽过大会增加土壤侧向位移,导致垄高提升,而适当减小铲体幅宽有利于土壤回落,进而更适合于辽宁地区保护性耕作间隔深松模式。

(3)直注深松铲铲体幅宽对耕作阻力和耕作比阻有重要影响。铲体幅宽对扰动面积的影响比对耕作阻力的影响明显。不同铲体幅宽下耕作阻力在2 000~3 500 N之间,耕作比阻在2.5~4.0 N/cm²之间,当铲体幅宽为350 mm时耕作阻力最小,铲体幅宽为450 mm时耕作比阻最小。耕作阻力和比阻试验值和仿真值平均误差分别为9.02%和12.41%。

参 考 文 献

[1] 王庆杰,曹鑫鹏,王超,等.东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究进展[J].农业机械学报,2021,52(10):1-15.
WANG Qingjie, CAO Xinpeng, WANG Chao, et al. Research progress of no/minimum tillage corn seeding technology and machine in northeast black land of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 1-15. (in Chinese)

[2] 王金武,唐汉,王金峰.东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J].农业机械学报,2017,48(5):1-21.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in northeast China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5): 1-21. (in Chinese)

[3] ZHANG Le, SU Xunya, MENG Hao, et al. Long-term cotton stubble return and subsoiling improve soil organic carbon by changing the stability and organic carbon of soil aggregates in coastal saline fields[J]. Soil & Tillage Research, 2024, 241: 106127.

[4] CHEN Guibin, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Monitoring of farmland dust during tillage and sowing operations and comparative analysis of cultivation modes in the suburban areas of Beijing[J]. Soil & Tillage Research, 2024, 237: 105991.

[5] 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)

[6] LEI Zhang, ZHAI Yibin, WU Chuanyu, et al. Modeling the interaction between a new four-bar subsoiling mechanism and red soil using the improved differential evolution algorithm and DEM[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 208: 107783.

[7] 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 filed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 75-87. (in Chinese)

[8] LEI Zhang, ZHAI Yibin, CHEN Jianneng, et al. Optimization design and performance study of a subsoiler underlying the tea garden subsoiling mechanism based on bionics and EDEM[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 220: 105375.

[9] 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)

[10] ZHENG K, MCHUGH A D, LI H W, et al. Design and experiment of anti-vibrating and anti-wrapping rotary components for subsoiler cum rotary tiller[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2019, 12(4): 47-55.

[11] 刘俊安,王晓燕,李洪文,等.基于土壤扰动与牵引阻力的深松铲结构参数优化[J].农业机械学报,2017,48(2):60-67.
LIU Jun'an, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Optimization of structural parameters of subsoiler based on soil disturbance and traction resistance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 60-67. (in Chinese)

[12] ZHANG Xuening, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Soil failure characteristics and loosening effectivity of compacted grassland by subsoilers with different plough points[J]. Biosystems Engineering, 2024, 237: 170-181.

[13] 程红胜,张泽涵,沈玉君,等.分层近根式液体粪肥施肥铲设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(5):98-107.
CHENG Hongsheng, ZHANG Zehan, SHEN Yujun, et al. Design and experiment of layered near-root liquid manure fertilization shovel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 98-107. (in Chinese)

[14] WANG Y X, OSMAN A N, ZHANG D X, et al. Optimized design and field experiment of a staggered vibrating subsoiler for conservation tillage[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2019, 12(1): 59-65.

[15] WEI Lijiao, HUANG Weihua, LIU Jian, et al. DEM simulation of subsoiling in tropical sugarcane fields: effects of opposing subsoiler design and model parameters[J]. Smart Agricultural Technology, 2024, 9: 100593.

[16] 张喜瑞,曾望强,刘俊孝,等.基于离散元法的砖红壤斜柄折翼式深松铲设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(3):40-49.
ZHANG Xirui, ZENG Wangqiang, LIU Junxiao, et al. Design and experiment of iateritic soil inclined handle folding wing subsoiling shovel based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(3): 40-49. (in Chinese)

- [17] 朱惠斌, 刘祺, 白丽珍, 等. 基于仿生学的分层深松分类施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊2): 41–52.
ZHU Huibin, LIU Qi, BAI Lizhen, et al. Design and testing of bionic-based layered subsoiling and classified fertilization machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp.2): 41–52. (in Chinese)
- [18] WANG Y M, LU C J, CHEN J, et al. Effects of self-healing biomimetic subsoiler on tillage resistance, wear-corrosion performance and soil disturbance morphology under different soil types[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2023, 16(3): 7–14.
- [19] 卢琦, 刘立晶, 刘忠军, 等. 播种机星齿球面盘式覆土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(4): 23–31, 73.
LU Qi, LIU Lijing, LIU Zhongjun, et al. Design and experiment of star-tooth spherical disc soil-covering device for planter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(4): 23–31, 73. (in Chinese)
- [20] 周华, 张文良, 杨全军, 等. 滑切型自激振动减阻深松装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 71–78.
ZHOU Hua, ZHANG Wenliang, YANG Quanjun, et al. Design and experiment of sliding cutting self-excited vibration drag reduction subsoiling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 71–78. (in Chinese)
- [21] 王瑞丽, 柴佳佳, 许方剑, 等. 秸秆直注深埋还田机设计与试验[J]. 沈阳农业大学学报, 2019, 50(5): 634–640.
WANG Ruili, CHAI Jiajia, XU Fangjian, et al. Design and experiment of direct injection straw deep bury and returning machine[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2019, 50(5): 634–640. (in Chinese)
- [22] LICH H K, TUYEN T, NGUYEN T T, et al. Impact of human capital on technical efficiency in sustainable food crop production: a meta-analysis[J]. International Journal of Agricultural Sustainability, 2022, 20(4): 521–542.
- [23] 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)
- [24] HU H N, LU C Y, WANG Q J, et al. Influences of wide-narrow seeding on soil properties and winter wheat yields under conservation tillage in North China Plain[J]. Int. J. Agric. & Biol. Eng., 2018, 11(4): 74–80.
- [25] ZHANG Zhiqiang, QIANG Hongjun, ALLEN D M, et al. Effect of conservation farming practices on soil organic matter and stratification in a mono-cropping system of Northern China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 156: 173–181.
- [26] 王瑞丽, 杨鹏, RABIU Falalu Jahun, 等. 秸秆深埋还田开沟灭茬机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 40–47.
WANG Ruili, YANG Peng, RABIU Falalu Jahun, et al. Design and experiment of combine machine for deep furrowing, stubble chopping, returning and burying of chopped straw[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 40–47. (in Chinese)
- [27] 王东伟, 路通, 赵壮, 等. 滨海盐碱地耕作层土壤离散元仿真参数标定方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 240–249.
WANG Dongwei, LU Tong, ZHAO Zhuang, et al. Calibration of discrete element simulation parameters for cultivated soil layer in coastal saline alkali soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 240–249. (in Chinese)
- [28] 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.
- [29] 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)
- [30] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 62–72.
ZHENG Kan, HE Jin, LI Hongwen, et al. Research on polyline soil breaking blade subsoiler based on subsoiling soil model using discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62–72. (in Chinese)
- [31] YING Chen, LARS J, TAVS N. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 34–41.
- [32] HANG Chengguang, GAO Xijie, WANG Botao. Optimization of the wing parameters for a winged subsoiler[J]. Crossref, 2017, 33(3): 313–319.
- [33] 杭程光, 黄玉祥, 李伟, 等. 深松耕作阻力的影响因素分析与减阻策略[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(11): 202–208.
HANG Chengguang, HUANG Yuxiang, LI Wei, et al. Analysis factors and drag reduction strategies of subsoil tillage resistance[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(11): 202–208. (in Chinese)
- [34] 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)
- [35] 刘芳, 高筱钧, 贾宪, 等. 高速精量播种机阿基米德螺旋线型弧面双齿盘覆土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(6): 91–100, 120.
LIU Fang, GAO Xiaojun, JIA Xian, et al. Design and experiment of Archimedean spiral-type arc double-toothed disc soil-covering device for high-speed precision planter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(6): 91–100, 120. (in Chinese)