

旋耕还田秸秆空间分布质量离散元分析

何瑞银^{1,2} 段庆飞^{1,2} 陈信信³ 徐高明^{1,2} 丁启朔^{1,2}

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 江苏省智能化农业装备实验室, 南京 210031;
3. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

摘要: 秸秆在土壤中的空间分布质量会对秸秆腐解速率、土壤养分分布等产生显著影响。为了探究不同旋耕作业参数对秸秆空间分布质量的影响,本文基于离散元法构建旋耕仿真模型,模拟秸秆旋耕还田作业过程,并结合田间试验对不同前进速度和刀辊转速下的秸秆空间分布质量进行对比验证。对仿真及田间试验区域进行垂直分层和水平划分的空间分割处理,计算各区域内秸秆数量并以秸秆占比变异系数为指标评价不同旋耕作业参数下的秸秆空间分布质量。结果表明,在垂直分层处理中,刀辊转速的增加会使得各层秸秆占比变异系数呈递增的趋势,其中 240 r/min 时最小,仿真值与试验值分别为 60.09% 和 80.65%,而随着前进速度的增加,变异系数呈先减少后增加的规律,其中 0.50 m/s 时变异系数最小,仿真值与试验值分别为 61.00% 和 79.90%;在水平划分处理中,刀辊转速的增加对各层秸秆占比变异系数无明显规律性影响,但前进速度的增加可以减小纵向划分区域内的变异系数,最小值为 0.75 m/s 时的 11.36% 和 20.12%,仿真值与试验值变化趋势基本一致。垂直分布和水平分布秸秆占比变异系数仿真值与试验值间差值平均最大分别为 22.13% 和 12.23%,误差在可接受范围内。离散元仿真能够模拟不同旋耕作业参数下的秸秆空间分布状态,可以为旋耕秸秆还田作业质量的快速预测评价研究提供支持,也可为旋耕机械的作业参数选择提供理论依据。

关键词: 秸秆还田; 旋耕; 作业参数; 空间分布; 离散元仿真

中图分类号: S222.3; S233.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)06-0044-10 OSID: 

DEM Analysis of Spatial Distribution Quality of Rotary Tillage
Straw Returning

HE Ruiyin^{1,2} DUAN Qingfei^{1,2} CHEN Xinxin³ XU Gaoming^{1,2} DING Qishuo^{1,2}

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China
2. Jiangsu Province Intelligent Agricultural Equipment Laboratory, Nanjing 210031, China
3. College of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The spatial distribution quality of straw in the soil has a significant effect on the decomposition rate of straw and the distribution of soil nutrients. To explore different rotary tillage operation parameters on the quality of the straw spatial distribution, simulation model of rotary tillage straw returning rotary tillage operation simulation process was built based on the discrete element method, and combined with field experiment with different speeds and qualities of straw spatial distribution of the knife roller speed comparison to test and verify. The simulation and field experiment areas were divided vertically and horizontally, the number of straw in each area was calculated, and the spatial distribution quality of straw under different rotary tillage operation parameters was evaluated using the coefficient of variation of straw ratio as the index. The results showed that in vertical stratification, the variation coefficient of straw ratio in each layer was increased with the increase of cutter roll rotation speed, and the minimum value was at 240 r/min, and the simulation value and test value were 60.09% and 80.65%, respectively. However, with the increase of advancing speed, the coefficient of variation was decreased at first and then increased, and the coefficient of variation was the smallest at 0.50 m/s, and the simulation value and

收稿日期: 2021-06-24 修回日期: 2021-07-21
基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(31901455)、江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20180534)和国家重点研发计划项目(2016YFD0300908)
作者简介: 何瑞银(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事耕作机械设计原理研究,E-mail: ryhe@njau.edu.cn

experimental value were 61.00% and 79.90% , respectively. In the horizontal division treatment, the increase of cutter roll speed had no obvious regular effect on the variation coefficient of straw proportion in each layer, but the increase of advance speed could reduce the variation coefficient in the longitudinal division area, and the minimum value was 11.36% and 20.12% at 0.75 m/s. The variation trend of simulation value and field value was basically consistent. The maximum mean difference between simulation and test values of vertical distribution and horizontal distribution was 22.13% and 12.23% , respectively, and the error was within the acceptable range. The discrete element simulation can simulate the spatial distribution of straw under different rotary tillage operation parameters, which can provide support for the rapid prediction and evaluation of straw returning operation quality. It can also provide a theoretical basis for the selection of operation parameters of rotary tiller.

Key words: straw returning; rotary tillage; work parameters; spatial distribution; discrete element simulation

0 引言

秸秆还田作为作物秸秆最有效的利用方法之一^[1],不仅可以避免秸秆焚烧造成的环境污染问题,而且还田后秸秆的腐解能够释放作物生长所必需的氮磷钾及其他微量元素,可以有效协调土壤的水肥气热关系,增强土壤的固碳能力。此外,秸秆还田对土壤结构、作物根系生长、化肥投入及作物产量等方面也有积极作用^[2-4]。

目前机械化秸秆还田作业方式主要分为免耕覆盖还田、犁耕深翻还田、沟埋还田及旋耕还田等,其中免耕覆盖还田可蓄水保墒,改善土壤结构,但作业后秸秆覆盖在地表,腐解速率缓慢;犁耕深翻还田及沟埋还田能够将秸秆埋入较深土层,但会造成秸秆团聚,大幅降低秸秆的腐解速率,且犁耕及沟埋还田作业能耗大,作业后地表平整度较差;相比其他还田方式,旋耕还田作业后秸秆在土壤中的分布更加均匀,有效提升了秸秆的腐解速率,同时旋耕还田还具有能耗低、效率高等优点,故在我国长江中下游的稻麦轮作区,农户普遍采用旋耕的方式进行秸秆还田^[5-7]。而经旋耕还田后秸秆在土壤中的空间分布质量会影响秸秆的腐解速率,秸秆在土壤中的空间分布质量越好则秸秆分布越均匀,其与土壤的接触面积越大,有利于土壤中微生物与秸秆的充分接触,进而大大加快了秸秆的腐解速率^[5,8]。

近些年来,国内外学者针对还田作业后秸秆在土壤中的空间分布状况进行了相关研究^[9-15]。目前主要集中研究了秸秆长度、作业方式及还田机具类型等对秸秆在土壤中空间分布状况的影响,但迄今为止,尚缺乏旋耕机具作业参数对秸秆空间分布状况影响的研究。离散元法适用于模拟不同颗粒在静态或动态条件下发生的接触变形,随着近些年来国内外学者的研究和试验发现,利用离散元仿真不仅可以模拟土壤颗粒间的相互作用,而且可以模拟农业机械的田间作业过程^[16-21]。

因此,本研究利用离散元法对不同旋耕作业参数下秸秆的空间分布质量进行研究,进一步结合田间试验验证,通过评价分析不同作业参数下秸秆在土壤中的空间分布质量,以期对旋耕秸秆还田作业质量的快速预测研究提供支持,同时为旋耕机具的作业参数选择提供理论依据。

1 田间旋耕试验

1.1 试验地点

2020 年 11 月在南京市六合区八百桥村试验田(118°55'E,32°25'N)进行田间旋耕试验,该地区为稻麦轮作区,土壤为壤质粘土,其中壤粒、砂粒、粘粒及有机物的质量分数分别为 39.67%、21.20%、38.96% 和 3.02%。试验开始前,利用五点取样法对试验田块 0~40 cm 土层土壤的坚实度、含水率、孔隙度等进行测量,具体参数如表 1 所示。并利用 50 cm×50 cm 的钢制取样框对秸秆进行称量,测得田间秸秆量为 749.62 g/m²。试验开始前对地表进行人工清茬。

表 1 试验前 0~40 cm 土层土壤参数
Tab.1 Soil parameters in 0~40 cm soil layer before test

土层/cm	坚实度/kPa	含水率/%	孔隙度/%
0~5	264.35	30.25	56.16
5~10	356.48	29.65	52.58
10~15	620.58	26.42	51.36
15~20	1 203.28	25.13	43.12
20~25	1 156.80	26.54	40.56
25~30	1 352.46	24.68	41.39
30~35	1 298.65	24.36	40.98
35~40	1 412.35	23.35	41.08

1.2 试验方法

1.2.1 试验装备及材料

试验装备采用课题组自主研发的田间原位耕作试验台^[22],其主要组成结构如图 1 所示,该试验台适用于牵引型和驱动型耕作部件的试验机理研究,

其刀轴转速在 150 ~ 400 r/min 范围可调,前进速度在 0.1 ~ 1.0 m/s 范围可调。试验选用 IT225C 型旋耕刀,旋转半径为 225 mm。试验材料为秋季水稻秸秆,为排除秸秆长度及秸秆质量等因素的影响,试验对象仅选择秸秆的茎秆部分,并将秸秆按 30 mm 长度切碎后进行喷漆处理。

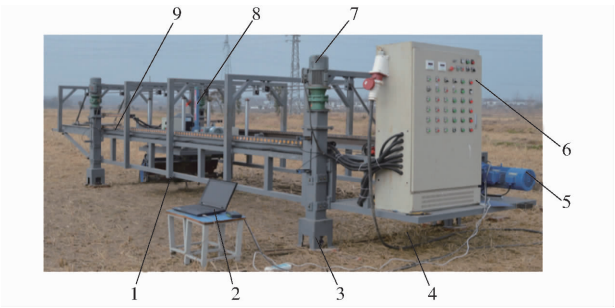


图 1 田间原位综合耕作试验台

Fig.1 Field in situ integrated tillage test rig

1. 旋耕机具 2. 计算机终端 3. 伸缩立柱 4. 地面导轨 5. 牵引电机 6. 控制箱 7. 立柱升降电机 8. 机具升降电机 9. 悬架导轨

1.2.2 试验方案

试验分别测试不同刀辊转速及前进速度对旋耕还田后秸秆空间分布质量的影响。试验开始前按照 749.62 g/m² 的秸秆量将处理好的秸秆均铺在大小为 500 mm × 2 400 mm 的试验小区内。由田间原位综合耕作试验台带动旋耕刀组进行固定耕深为 100 mm、幅宽为 500 mm 的旋耕作业。通过全面试验的方法,研究 5 种刀辊转速 (240、260、280、300、320 r/min) 及 3 种前进速度 (0.25、0.50、0.75 m/s) 旋耕作业后秸秆在土壤中的空间分布质量,每组试验重复 3 次。

1.2.3 取样及测量方法

试验采用如图 2 所示特制取样框 (500 mm × 300 mm × 50 mm) 进行取样,依照水平划分的要求将样框内部均分为 4 部分区域。旋耕试验后,将取样框放置于作业后的试验小区内,将其压入土壤,将钢制隔板从侧面插入,之后将取样框周围土壤清除,筛选计算各区域内秸秆数量。分别取 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm、10 ~ 15 cm 3 层土样。将取样框内秸秆-土壤筛分后计算各区域秸秆数量。



图 2 特制取样框

Fig.2 Special sampling frame

2 离散元仿真

2.1 旋耕装备模型建立

仿真旋耕装备选用江苏地区常规旋耕机,刀具类型为 IT225C 型弯刀。利用 Pro/E 5.0 对选用的旋耕装备的触土部件按照 1:1 的比例进行三维建模,并以 .igs 格式将旋耕模型导入 EDEM 2018 仿真软件中,同时构建尺寸 (长 × 宽 × 高) 为 5 000 mm × 1 000 mm × 400 mm 的仿真虚拟土槽 (图 3)。通过更改运动参数来模拟 5 种刀辊转速 (240、260、280、300、320 r/min)、3 种前进速度 (0.25、0.50、0.75 m/s) 下的旋耕还田作业过程。

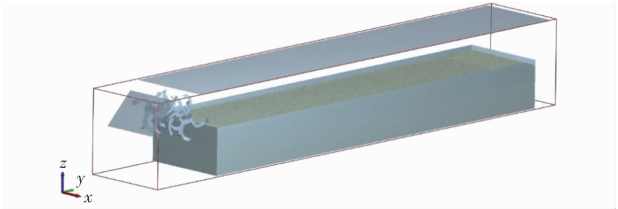


图 3 旋耕秸秆还田离散元仿真模型

Fig.3 Discrete element simulation model of rotary cultivation straw returning to field

2.2 土壤-秸秆模型建立

2.2.1 土壤-秸秆颗粒模型

本文选用球形颗粒模拟土壤。在离散元仿真中,颗粒模型尺寸越小,则仿真速度越慢,耗时越长,因此仿真中土壤颗粒尺寸一般远大于其实际尺寸,本文仿真土壤颗粒半径选为 8 mm^[23-25],同时根据表 1 测量的田间实际土壤类型与状态,用不同参数土壤模型来模拟实际耕层土壤 (0 ~ 150 mm) 与犁底层土壤 (150 ~ 400 mm)。由于水稻秸秆具有易弯折性、中空性和含水率动态变化性,所以秸秆仿真一直是一项具有难度的研究课题。CHANDIO^[26] 在研究中发现,使用简化刚性秸秆模型进行仿真试验其结果与田间试验基本一致,故为了减少仿真工作时间,同时为了避免因秸秆弯曲或折断对田间试验结果造成的不利影响^[27],本文采用秸秆刚性模型,用 9 个直径为 6 mm、球心间距为 3 mm 组成的总长度为 30 mm 的线性模型来模拟实际水稻秸秆。

2.2.2 土壤接触模型

选择合适的颗粒间接触模型是离散元仿真成功的首要条件,接触模型表示的是颗粒固体在准静止情况下的弹塑性分析结果。颗粒间所受力及力矩大小由接触模型的分析计算所决定。因此需要建立不同的接触模型来模拟不同的仿真对象^[28]。本文田间试验土壤类型为壤质粘土,并且土壤间存在粘附力,故选用适用于粘性土壤的 Hertz - Mindlin with Bonding 模型,相比其他模型,该模型对颗粒间粘结

作用及破碎程度的模拟较为可靠^[29]。采用该模型仿真时,土壤颗粒间存在的抵抗法向及切向运动的作用力使得颗粒间产生粘结作用,而随着时间步长的增加,颗粒所受外界作用力逐渐增加,当外界作用力超过临界值后,粘结作用被破坏,此后土壤颗粒间不再受粘结作用的影响。

Hertz – Mindlin with Bonding 模型的细观参数主要包括:颗粒粘结半径、粘结刚度和粘结临界应力。其中颗粒粘结半径可以反映湿颗粒含水率的大小,其在颗粒半径一定的情况下可以通过材料密度、含水率计算得到^[30],本文耕层土壤与犁底层土壤颗粒粘结半径分别为 9.5 mm 和 9.15 mm。而据已有研究可知,粘结刚度对颗粒的运动并不会产生明显影响,因此可取粘结刚度为固定值 $5 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ ^[24]。临界应力决定了颗粒间的粘结强度,可以反映土壤的破碎程度以及耕作阻力的大小。本文引用丁启朔等^[29]的方法,采用单轴土壤压缩试验获得田间不同土层土壤的最大应力级别,而后利用秸秆旋耕还田

离散元仿真模型,进行不同临界应力下的旋耕作业仿真试验,将不同临界应力对应的耕作阻力与田间实测的耕作阻力进行误差分析对比,确定耕层与犁底层土壤颗粒模型的临界应力取值分别为 $3 \times 10^5 \text{ Pa}$ 与 $5 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

2.2.3 颗粒模型参数

仿真所需要的模型参数主要分为材料参数与接触参数。其中材料参数包括土壤、秸秆、旋耕刀的泊松比、剪切模量和密度,而接触参数是指材料间的恢复系数、摩擦因数。材料参数可以通过查阅文献[21,31]以及实地测量获得,接触参数则主要通过引用文献[32–34]、实地测量及仿真标定获得,其中土壤与土壤间静、动摩擦因数通过仿真标定方法,利用离散元仿真进行休止角试验及贯入试验获得,土壤–旋耕刀静摩擦因数利用直剪试验测量获取^[35];土壤–旋耕刀、秸秆–旋耕刀滚动摩擦因数通过斜板试验测量获取^[36],其他接触参数则通过查阅相关文献获得。本文仿真试验所有参数如表 2 所示。

表 2 仿真模型参数
Tab.2 Simulation model parameters

参数	数值	参数	数值
土槽长 × 宽 × 高/(mm × mm × mm)	5 000 × 1 000 × 400	耕层土壤粘结半径/mm	9.5
旋耕刀棍转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	240、260、280、300、320	犁底层土壤粘结半径/mm	9.15
旋耕前进速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	0.25、0.50、0.75	耕层土壤临界应力/Pa	3×10^5
耕深 h/mm	100	犁底层土壤临界应力/Pa	5×10^5
旋耕刀泊松比 ν_1	0.25	土壤–土壤恢复系数 e_1	0.6
旋耕刀剪切模量/Pa	7.9×10^{10}	土壤–旋耕刀恢复系数 e_2	0.6
旋耕刀密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	7 860	土壤–秸秆恢复系数 e_3	0.5
耕层土壤泊松比 ν_2	0.38	秸秆–旋耕刀恢复系数 e_5	0.3
耕层土壤剪切模量/Pa	6×10^7	土壤–土壤静摩擦因数 f_{s1}	0.5
耕层土壤密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 280	土壤–旋耕刀静摩擦因数 f_{s2}	0.6
耕层土壤含水率/%	30	土壤–秸秆静摩擦因数 f_{s3}	0.5
犁底层土壤泊松比 ν_3	0.3	秸秆–旋耕刀静摩擦因数 f_{s5}	0.3
犁底层土壤剪切模量/Pa	1×10^8	耕层土壤–耕层土壤动摩擦因数 f_{d1}	0.6
犁底层土壤密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 500	耕层土壤–犁底层土壤动摩擦因数 f_{d2}	0.42
犁底层土壤含水率/%	25	耕层土壤–旋耕刀动摩擦因数 f_{d3}	0.35
秸秆泊松比 ν_4	0.4	犁底层土壤–犁底层土壤动摩擦因数 f_{d4}	0.24
秸秆剪切模量/Pa	1×10^6	犁底层土壤–旋耕刀动摩擦因数 f_{d5}	0.13
秸秆密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	241	秸秆–土壤动摩擦因数 f_{d6}	0.05
土壤粘结刚度/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	5×10^7	秸秆–旋耕刀动摩擦因数 f_{d7}	0.01

2.3 仿真过程

仿真作业前 0 ~ 15.0 s 先在虚拟土槽深度 150 ~ 400 mm 空间内生成 497 359 个犁底层土壤颗粒,犁底层土壤颗粒的土壤孔隙度约为 40%, 15.0 ~ 17.0 s 在土槽深度 0 ~ 150 mm 区间内生成 254 993 个耕层土壤颗粒,耕层土壤颗粒的土壤孔隙度约为 50%, 17.0 ~ 23.1 s 时间段内在耕层土壤表层生成均匀平铺的 25 383 个秸秆颗粒,秸秆颗粒生成区域大小为

500 mm × 2 400 mm,仿真秸秆量与田间实测秸秆量相同,控制在 749.62 g/m²。后将三维旋耕装备模型导入,控制耕作深度为 100 mm,耕后耕层深度约 150 mm^[11],23.1 s 后改变旋耕装备刀辊转速及前进速度并设定仿真时间、步长、网格大小等值后开始旋耕还田仿真作业。仿真作业过程中,0 ~ 23.1 s 为颗粒生成及稳定时间,23.1 s 后为旋耕装备运动与颗粒沉降阶段。

仿真结束后,利用后处理模块中的 Grid Bin Group 设置相应计算区域测算耕后土壤中不同区域的秸秆数量,于土槽中心点设置整体计算区域大小为 500 mm×2 400 mm,并以 125 mm 为单位长度沿旋耕装备幅宽方向进行如图 4a 所示的纵向划分,以 300 mm 为单位长度沿旋耕装备前进方向进行如图 4b 所示的横向划分,共计形成 32 个计算区域。

通过设置后处理模块 Grid Bin Group 中 Z 轴的

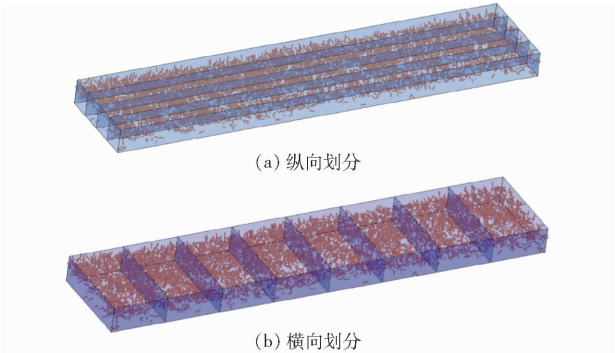


图 4 水平区域划分示意图

Fig. 4 Schematics of horizontal area division

坐标值,来对应耕后 0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm 的垂直分层处理。并且通过设置显示秸秆颗粒数量来统计不同土层及区域内的秸秆数量。为便于区分,计算区域秸秆颜色为橙色,其他区域秸秆颜色为绿色,显示效果及各区域秸秆数量统计如图 5 所示。

3 结果与分析

将 5 种刀辊转速与 3 种前进速度下旋耕作业后各区域秸秆数量的仿真试验值与田间试验值进行测量统计,并以各区域的秸秆占比变异系数为评价指标评价秸秆在土壤中的垂直分布及水平分布质量,变异系数表示秸秆空间分布质量,数值越小,质量越优,反之则越差。

3.1 秸秆在土壤中的垂直分布

本文以 5 cm 为分割尺度对耕后 0~15 cm 土层进行垂直分层处理,结合 0~5 cm、5~10 cm 和 10~15 cm 土层的秸秆占比及其变异系数评价秸秆的垂直分布质量。

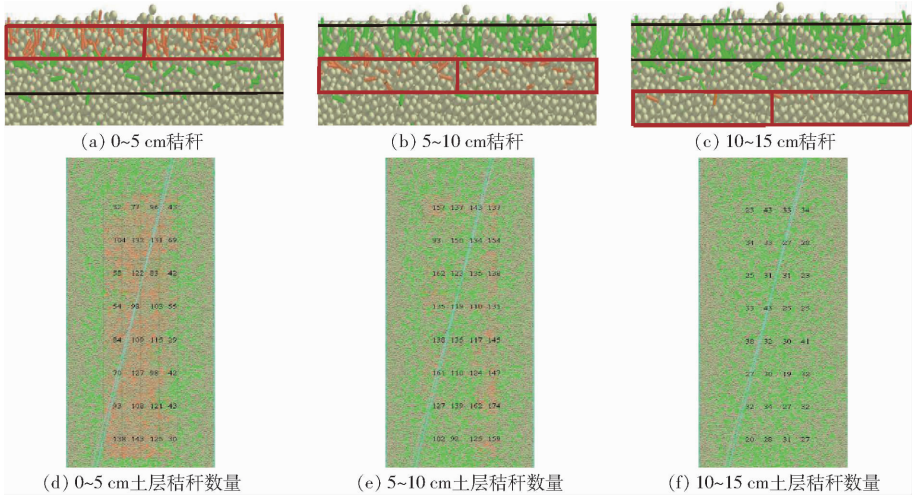


图 5 秸秆显示效果及各层秸秆数量统计示意图

Fig. 5 Straw display effects and statistical schematics of number of straw in each layer

3.1.1 刀辊转速对秸秆垂直分布的影响

通过测量统计垂直分层处理后的各层秸秆数量,可以确定各层秸秆占比。5 种刀辊转速下旋耕还田作业后各层秸秆占比的仿真试验值与田间试验值如表 3 所示。由表 3 可知,随着转速的增加,仿真与试验值的变化趋势基本一致,0~5 cm 土层的秸秆占比基本呈现递减的趋势,转速从 240 r/min 增加到 320 r/min,0~5 cm 土层的仿真试验秸秆占比减少 7.3 个百分点,田间试验秸秆占比减少 4.3 个百分点;5~10 cm 土层的秸秆占比基本呈现递增的趋势,转速从 240 r/min 增加到 320 r/min,仿真试验及田间试验秸秆占比分别增加 6.1 个百分点和 6 个百分点;而随着转速的增加,10~15 cm 土层仿真试验

秸秆占比增加 1.2 个百分点,田间试验秸秆占比减少 1.7 个百分点,秸秆占比变化量较小。总体趋势表明,转速的增加可以显著增加 5~10 cm 土层的秸秆数量,同时减少 0~5 cm 土层的秸秆数量。这可能是因为转速的增加会导致秸秆与土壤的切向加速度增加,使得秸秆沿垂直方向的位移增加,进而改变了各层秸秆的占比。并且由表 3 可知,秸秆主要集中在 5~10 cm,这是因为正转旋耕工作过程中是将秸秆以挤压的形式埋入土壤的,这种形式会造成秸秆在垂直方向上的分布不均匀,大多数秸秆集中在 5~10 cm 的中层土壤中,这与陈青春等^[11]得出的结论一致。

图 6 为 5 种刀辊转速作业后各层秸秆占比的变

表 3 5 种刀辊转速作业后各层秸秆占比

Tab.3 Proportion of straw in each layer after operationat five kinds of knife roller speeds

%

土层深度/ cm	刀辊转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)									
	240		260		280		300		320	
	仿真值	试验值	仿真值	试验值	仿真值	试验值	仿真值	试验值	仿真值	试验值
0 ~ 5	27.3 ^a	19.3 ^a	22.2 ^c	19.5 ^a	26.6 ^b	15.4 ^c	21.7 ^c	16.8 ^b	20.0 ^d	15.0 ^c
5 ~ 10	55.7 ^c	64.3 ^c	59.3 ^b	68.4 ^c	55.9 ^c	65.5 ^d	60.2 ^b	69.2 ^b	61.8 ^a	70.3 ^a
10 ~ 15	17.0 ^b	16.4 ^b	18.5 ^a	12.1 ^d	17.5 ^b	19.1 ^a	18.1 ^a	14.0 ^c	18.2 ^a	14.7 ^c

注:同行不同字母表示同一类型不同转速间的秸秆占比差异显著。下同。

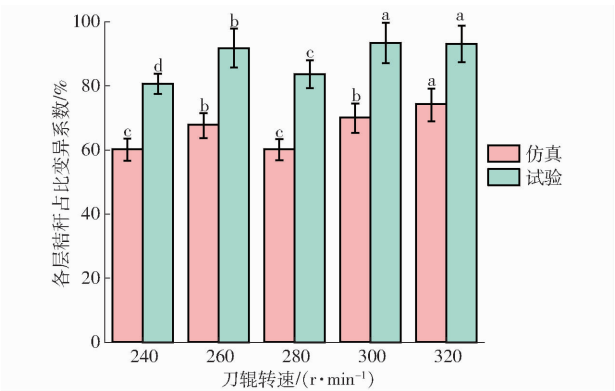


图 6 5 种刀辊转速作业后各层秸秆占比的变异系数

Fig.6 Variation coefficient of proportion of straw in each layer after five kinds of knife roll speed operation

异系数,图中不同字母表示同一类型不同转速间的变异系数差异显著。由图 6 可知,随着刀辊转速的增加,旋耕作业后仿真与田间试验各层秸秆占比的变异系数基本呈现递增的趋势。其中仿真及田间试验在转速 240 r/min 时变异系数最小,分别为 60.09% 和 80.65%,在转速 320 r/min 下变异系数最大,分别为 74.11% 和 93.11%。这表明,无论是仿真还是田间试验,刀辊转速的增加总会使得秸秆在土壤中的垂直分布质量下降。其主要原因是由于增加转速会造成秸秆各层占比变化,导致各层秸秆占比相差较大,从而使得变异系数增大,秸秆在土壤中的垂直分布质量下降。5 种刀辊转速下仿真值及试验值的差值分别为 20.56%、24.12%、23.51%、23.46% 和 19%,平均值为 22.13%。

3.1.2 前进速度对秸秆垂直分布的影响

3 种前进速度(0.25、0.50、0.75 m/s)旋耕作业后仿真与田间试验的各层秸秆占比如表 4 所示。仿真与田间试验对比数据具有一定差别,但其规律趋势基本一致,即随着前进速度的不断增加,0~5 cm 土层的秸秆占比基本呈现递增的趋势,前进速度从 0.25 m/s 增加到 0.75 m/s,仿真与田间试验秸秆占比分别增加 11.9 个百分点和 12.3 个百分点;5~10 cm 土层的秸秆占比呈现减少的趋势,随着前进速度的增加,仿真与田间试验秸秆占比分别减少 4.2 个百分点和 1.3 个百分点,秸秆占比变化不显

著;10~15 cm 土层的秸秆占比呈现递减趋势,随着前进速度的增加,仿真与田间试验秸秆占比分别减少 7.7 个百分点和 11.0 个百分点。这表明,前进速度的增加可以显著增加 0~5 cm 土层的秸秆占比,同时减少 10~15 cm 土层的秸秆占比,这是因为旋耕装备前进速度的增加会降低旋耕碎土性能,导致被挤压至下层土壤的秸秆量变少,更多的秸秆停留在上层土壤中。

表 4 3 种前进速度作业后各层秸秆占比

Tab.4 Proportion of straw in each layer after operation at three forward speeds

%

土层深 度/cm	前进速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)					
	0.25		0.50		0.75	
	仿真值	试验值	仿真值	试验值	仿真值	试验值
0 ~ 5	16.9 ^c	10.5 ^b	24.9 ^b	21.4 ^a	28.8 ^a	22.8 ^a
5 ~ 10	61.7 ^a	66.8 ^a	56.5 ^a	63.9 ^b	57.5 ^b	65.5 ^a
10 ~ 15	21.4 ^a	22.7 ^a	18.6 ^b	14.7 ^b	13.7 ^c	11.7 ^c

3 种前进速度下旋耕还田后各层秸秆占比的变异系数如图 7 所示。由图 7 可知,3 种前进速度旋耕作业后的仿真与田间试验各层秸秆占比的变异系数均呈先减小后增大的趋势,其中前进速度 0.25 m/s 条件下变异系数最大,仿真值与试验值分别为 73.99% 和 88.89%,而前进速度 0.50 m/s 下变异系数最小,仿真值与试验值分别为 61.00% 和 79.90%,前进速度增加至 0.75 m/s 后,仿真与试验各层秸秆占比的变异系数分别为 66.74% 和 85.09%。这说明,随着前进速度的增加,秸秆在土壤中的垂直分布质量呈现先升高后下降的趋势,这一现象可能是因为前进速度的增加导致旋耕作业碎土效果降低,从而影响秸秆入土效果,使得各层秸秆比例发生了变化,从而影响了秸秆在垂直方向上的空间分布质量。3 种前进速度下仿真值及试验值的差值分别为 14.90%、18.90% 和 18.35%,平均值为 17.38%。

将仿真值与试验值进行对比,得出不同转速下仿真与试验各层秸秆占比变异系数间的平均差值为 22.13%,不同前进速度下仿真与试验各层秸秆占比变异系数间的平均差值为 17.38%,这是由于 EDEM

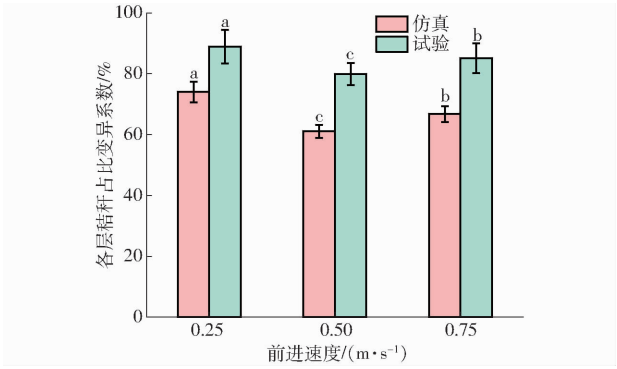


图 7 3 种前进速度作业后各层秸秆占比的变异系数

Fig. 7 Variation coefficient of proportion of straw in each layer after operation at three forward speeds

离散元仿真的颗粒参数及作业参数值只能接近真实值,但无法与真实值保持一致,因此这些仿真参数会造成最终试验结果与田间实际试验结果有一定偏差,但产生的相对误差在可接受范围内,并且仿真与试验的数据变化趋势基本相符。

3.2 秸秆在土壤中的水平分布

为了探究转速及前进速度对秸秆在土壤中水平分布质量的影响,本文将耕后区域按纵向与横向进行空间分割处理。

3.2.1 刀辊转速对秸秆水平分布的影响

5 种刀辊转速下各区域秸秆占比变异系数如图 8 所示。由图 8 可知,随着刀辊转速的变化,仿真与田间试验水平纵向划分及横向划分后的各区域秸秆占比变异系数没有明显变化规律,但刀辊转速对横向划分区域变异系数的影响大于其对纵向划分区域变异系数的影响,这是因为方会敏等^[38]研究发现,随着转速的增加,秸秆沿机具前进方向的水平位移总是会大于同转速下的侧向位移。因此,刀辊转速的改变对秸秆在土壤中的水平分布质量并无规律性影响。5 种刀辊转速下纵向划分后仿真值及试验值的差值分别为 13.12%、13.91%、9.88%、10.38% 和 13.85%,平均值为 12.23%;横向划分后仿真值及试验值的差值分别为 11.47%、1.66%、15.71%、9.40% 和 15.86%,平均值为 10.82%。

3.2.2 前进速度对秸秆水平分布的影响

图 9 为 3 种前进速度作业后各区域秸秆占比变异系数,由图 9 可知,随着前进速度的增加,纵向划分的各区域秸秆占比变异系数逐渐减小,仿真值与试验值分别由 0.25 m/s 时的 17.26% 和 30.63% 减小至 0.75 m/s 时的 11.36% 和 20.12%,而与此同时横向划分的各区域秸秆占比变异系数整体增大,仿真值与试验值分别由 0.25 m/s 时的 2.57% 和 11.37% 增大至 0.75 m/s 时的 3.79% 和 14.32%,但就整体而言,前进速度的增加可以适当优化秸秆在

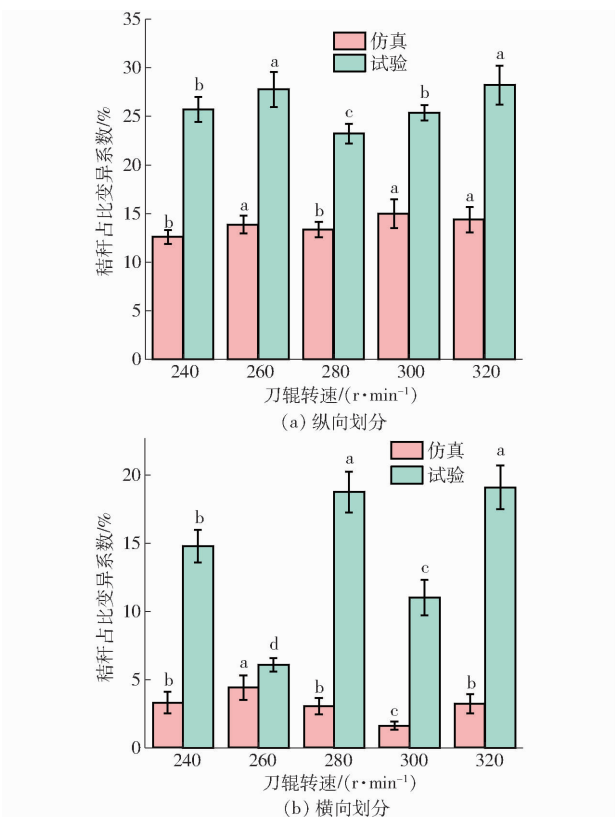


图 8 5 种刀辊转速作业后各区域秸秆占比变异系数

Fig. 8 Variation coefficient of proportion of straw in each area after five kinds of knife roll speed operation

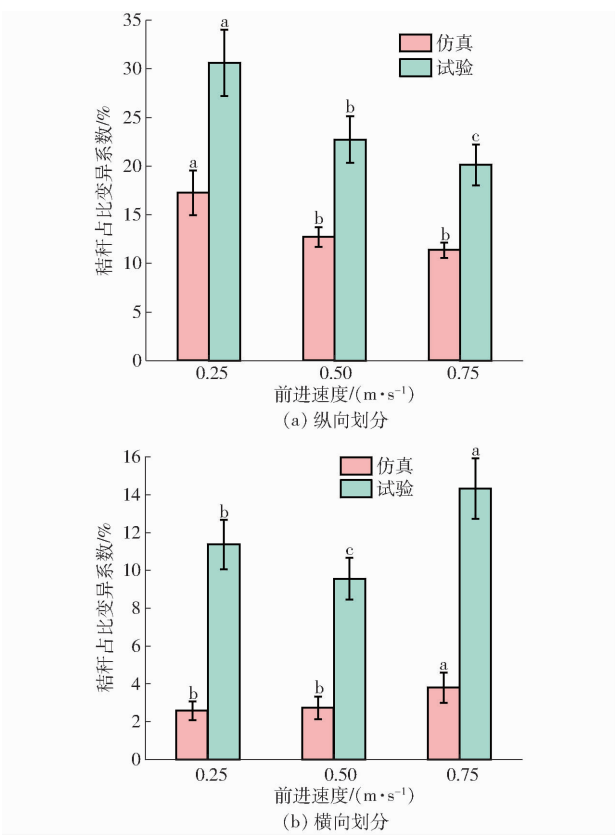


图 9 3 种前进速度作业后各区域秸秆占比变异系数

Fig. 9 Variation coefficient of proportion of straw in each area after three forward speeds

土壤中的水平分布质量。3 种前进速度下纵向划分后仿真值及试验值的差值分别为 13.37%、10.02% 和 8.76%，平均值为 10.72%；横向划分后仿真值与试验值间的差值分别为 11.37%、9.56% 和 14.32%，平均值为 8.72%。

通过对仿真及田间试验数据分析发现，秸秆占比变异系数可以评价秸秆在土壤中的水平分布质量，并且不同转速下仿真与试验各区域秸秆占比变异系数间的差值平均为 12.23%（纵向）和 10.82%（横向）；不同前进速度下仿真与试验各区域秸秆占比变异系数间的差值平均为 10.72% 和 8.72%，产生的相对误差均在可接受范围内。

4 讨论

旋耕作业后秸秆的空间分布质量会对土壤的养分、结构以及作物的生长状况产生重要影响，而旋耕的作业方式、参数和机具类型以及秸秆的长度和类型等因素均会影响秸秆空间分布质量。目前现有的研究多集中在作业方式、机具类型、秸秆长度等方面，尚缺乏旋耕机具作业参数对秸秆空间分布质量影响的研究。本文利用离散元仿真结合田间试验的方法，研究评价了不同典型作业参数下秸秆的空间分布质量，为旋耕机械的作业参数优化和选择提供重要理论依据。

目前在利用离散元仿真模拟旋耕还田作业过程的研究中，大多采用刚性模型来模拟秸秆颗粒，虽然有部分学者研究了柔性秸秆颗粒的离散元仿真模型^[37-39]，但柔性秸秆颗粒模型建立较为困难且柔性秸秆弯曲断裂后其数量及分布状态都会发生相应变化，难以准确定位秸秆的空间位置，因此，本文选用刚性秸秆颗粒模型，并将仿真与田间试验秸秆长度定为 30 mm，可以避免秸秆因田间旋耕作业导致的断裂弯曲现象，提高作业后秸秆位置的准确性，便于统计耕后秸秆数量。此外本文田间试验采用的取样方法为田间原位取样统计，旋耕试验后在田间现场统计秸秆在各区域分布数量，无需将样本带回实验室统计测量，避免了土壤样本因运输搬运过程中产生振动而引发的秸秆位置偏移。

国内外已有学者利用离散元仿真对还田作业后秸秆在土壤中的分布状况进行了相应研究，MARI 等^[40]利用离散元仿真建立了秸秆-土壤-圆盘犁模型，研究分析了圆盘犁作业后秸秆的位移变化。方

会敏等^[34]利用建立的秸秆-土壤-旋耕刀仿真模型，模拟研究了旋耕作业后秸秆的位移大小变化。但以上只是探究了耕后秸秆在水平方向和侧向的运动位移情况，没有从秸秆空间分布均匀性层面进行秸秆还田质量的评价。本文利用离散元法建立的旋耕秸秆还田仿真模型及区域划分方法，还可以模拟研究不同刀具类型、不同耕深等其他因素对旋耕还田秸秆空间分布的影响，能够为旋耕秸秆还田作业质量的快速预测研究提供支持。

5 结论

(1) 利用离散元法建立了秸秆旋耕还田仿真模型，并通过更改刀辊转速及前进速度参数值来模拟不同关键作业参数下的秸秆旋耕还田作业。利用田间原位综合耕作试验台进行了与仿真试验相对应的田间试验，将仿真及田间试验区域进行垂直分层划分及水平横纵向划分，计算各区域秸秆数量并将结果进行分析对比。

(2) 在秸秆垂直分层处理中，仿真与田间试验结果表明刀辊转速的增加显著增加 5~10 cm 的秸秆占比，同时减少 0~5 cm 的秸秆占比，并且使得各层秸秆占比的变异系数总体呈现递增的趋势，总的来说，刀辊转速的增加降低了秸秆在土壤中的垂直分布质量；而前进速度的增加显著增加 0~5 cm 土层的秸秆占比，同时减少 10~15 cm 土层的秸秆占比，各层秸秆占比的变异系数呈先减小后增大的趋势，即前进速度的增加使得秸秆在土壤中的垂直分布质量呈现先提升后下降的趋势。在秸秆水平划分处理中，仿真与田间试验表明前进速度的增加可以有效减小纵向划分区域内的秸秆占比变异系数，同时前进速度的增加会小幅度增加横向划分区域内秸秆占比的变异系数，总体而言，前进速度的增加可以优化秸秆在土壤中的水平分布质量，而转速的增加对秸秆在土壤中的水平分布质量并没有规律性影响。

(3) 通过将仿真值与田间试验值进行对比，发现垂直分布与水平分布的秸秆占比变异系数差值平均最大分别为 22.13% 和 12.23%，仿真与试验误差在可接受范围内。研究发现，离散元仿真可以较好地模拟不同作业参数旋耕作业后秸秆的空间分布状态，可为旋耕秸秆还田作业质量的快速预测研究提供支持，也有助于为旋耕机械的作业参数选择提供理论依据。

参 考 文 献

[1] 李永磊,宋建农,康小军,等. 双辊秸秆还田旋耕机试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 45-49.
LI Yonglei, SONG Jiannong, KANG Xiaojun, et al. Experiment on twin-roller cultivator for straw returning [J]. Transactions

- of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 45–49. (in Chinese)
- [2] ZHENG L, WU W, WEI Y, et al. Effects of straw return and regional factors on spatio-temporal variability of soil organic matter in a high-yielding area of northern China [J]. Soil & Tillage Research, 2015, 145: 78–86.
- [3] CHEN J, ZHENG M, PANG D, et al. Straw return and appropriate tillage method improve grain yield and nitrogen efficiency of winter wheat [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2017, 16(8): 1708–1719.
- [4] 田国成, 王钰, 孙路, 等. 秸秆焚烧对土壤有机质和氮磷钾含量的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(2): 387–393.
TIAN Guocheng, WANG Yu, SUN Lu, et al. Effects of wheat straw burning on content of soil organic matter, nitrogen, phosphorus, and potassium [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): 387–393. (in Chinese)
- [5] GOVAERTS B, MEZZALAMA M, UNNO Y, et al. Influence of tillage, residue management, and crop rotation on soil microbial biomass and catabolic diversity [J]. Applied Soil Ecology, 2007, 37(1–2): 18–30.
- [6] 张海晶, 王少杰, 罗莎莎, 等. 不同秸秆还田方式对土壤微生物影响的研究进展[J]. 土壤与作物, 2020, 9(2): 150–158.
ZHANG Haijing, WANG Shaojie, LUO Shasha, et al. Research advances in the impact of different straw returning ways on soil microorganisms [J]. Soils and Crops, 2020, 9(2): 150–158. (in Chinese)
- [7] 陈黎卿, 梁修天, 曹成茂. 基于多体动力学的秸秆还田机虚拟仿真与功耗测试[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 106–111.
CHEN Liqing, LIANG Xiutian, CAO Chengmao. Virtual simulation and power test of straw counters-field based on multi-body dynamics [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 106–111. (in Chinese)
- [8] BASTIAN F, BOUZIRI L, NICOLARDOT B, et al. Impact of wheat straw decomposition on successional patterns of soil microbial community structure [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 41(2): 262–275.
- [9] AKBOLAT D, EKINCI K. Rotary tiller velocity effects on the distribution of wheat (*Triticum aestivum*) residue in the soil profile [J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 2008, 36(4): 247–252.
- [10] ELTOM A E F, DING W, DING Q, et al. Field investigation of a trash-board, tillage depth and low speed effect on the displacement and burial of straw [J]. Catena, 2015, 133(2–3): 385–393.
- [11] 陈青春, 石勇, 丁启朔, 等. 正反转旋耕作业的秸秆混埋效果比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 13–18.
CHEN Qingchun, SHI Yong, DING Qishuo, et al. Comparison of straw incorporation effect with down-cut and up-cut rotary tillage [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 13–18. (in Chinese)
- [12] BELAL E, OKINDA C, DING Qishuo, et al. Mass-based image analysis for evaluating straw cover under high-residue farming conditions in rice-wheat cropping system [J]. Agricultural Research, 2017, 6(4): 359–367.
- [13] 周华, 李栋, 刘政源, 等. 秸秆旋埋还田后空间分布效果仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 69–77.
ZHOU Hua, LI Dong, LIU Zhengyuan, et al. Simulation and experiment of spatial distribution effect after straw incorporation into soil by rotary burial [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 69–77. (in Chinese)
- [14] SALOKHE V M, RAMALINGAM N. Effects of direction of rotation of a rotary tiller on properties of Bangkok clay soil [J]. Soil & Tillage Research, 2001, 63(1): 65–74.
- [15] 徐高明, 汪小昆, 何瑞银, 等. 基于复合指标与测试技术的旋耕秸秆还田质量评价研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(2): 58–67.
XU Gaoming, WANG Xiaochan, HE Ruiyin, et al. Performance evaluation of rotary tillage straw returning based on composite indicators and measurement techniques [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 58–67. (in Chinese)
- [16] MILKEVYCH V, MUNKHOLM L J, CHEN Y, et al. Modelling approach for soil displacement in tillage using discrete element method [J]. Soil & Tillage Research, 2018, 183(3–4): 60–71.
- [17] MOMOZU M, OIDA A, YAMAZAKI M, et al. Simulation of a soil loosening process by means of the modified distinct element method [J]. Journal of Terramechanics, 2002, 39(4): 207–220.
- [18] TANAKA H, MOMOZU M, OIDA A, et al. Simulation of soil deformation and resistance at bar penetration by the distinct element method [J]. Journal of Terramechanics, 2000, 37(1): 41–56.
- [19] 胡建平, 赵军, 潘浩然, 等. 基于离散元的双轴旋耕机功耗预测模型[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 9–16.
HU Jianping, ZHAO Jun, PAN Haoran, et al. Prediction model of double axis rotary power consumption based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Sup. 1): 9–16. (in Chinese)
- [20] 方会敏, 姬长英, FARMAN Alichandio, 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 Alichandio, 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)
- [21] 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)
- [22] 杨艳山,丁启朔,丁为民,等. 田间原位综合耕作试验台设计与应用[J]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 68–74.
YANG Yanshan, DING Qishuo, DING Weimin, et al. Design and application of multi-purpose in-situ tillage tool testing platform[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 68–74. (in Chinese)
- [23] 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 & Tillage Research, 2014, 144: 220–227.
- [24] MAK J, CHEN Y, SADEK M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. Soil & Tillage Research, 2011, 118:117–122.
- [25] 王宪良,胡红,王庆杰,等. 基于离散元的土壤模型参数标定方法[J]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 78–85.
WANG Xianliang, HU Hong, WANG Qingjie, et al. Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 78–85. (in Chinese)
- [26] CHANDIO F A. Interaction of straw-soil-disc tillage tool under controlled conditions[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [27] LENAERTS B, AERTSEN T, TIJSKENS E, et al. Simulation of grain-straw separation by discrete element modeling with bendable straw particles[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 101:24–33.
- [28] 胡建平,周春健,侯冲,等. 磁吸板式排种器充种性能离散元仿真[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 94–98.
HU Jianping, ZHOU Chunjian, HOU Chong, et al. Simulation analysis of seed-filling performance of magnetic plate seed-metering device by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 94–98. (in Chinese)
- [29] 丁启朔,任骏,BELAL Eisaadam,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 Eisaadam, 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)
- [30] 张永良. 基于离散元的逆转旋耕施肥播种机抛土性能仿真及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2012.
ZHANG Yongliang. Simulation and experimental study of soil throwing performance of reverse rotary tillage fertilization and seeder based on discrete element[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2012. (in Chinese)
- [31] TAMAS K, JORI I J, MOUAZEN A M. Modelling soil-sweep interaction with discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2013, 134(8):223–231.
- [32] AHMAD F. Performance evaluation of disc type furrow openers in no-till paddy soil environment[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [33] 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)
- [34] 方会敏,姬长英,AHMED Alitagar,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 Alitagar, 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)
- [35] FIELKE J M. Interactions of the cutting edge of tillage implements with soil[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63(1):61–71.
- [36] UCGUL M, FIELKE J M, SAUNDERS C. Defining the effect of sweep tillage tool cutting edge geometry on tillage forces using 3D discrete element modelling[J]. Information Processing in Agriculture, 2015, 2(2):130–141.
- [37] LIU F, ZHANG J, CHEN J. Modeling of flexible wheat straw by discrete element method and its parameter calibration[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(3): 42–46.
- [38] 王奇瑞,毛罕平,李青林. 基于离散元的柔性作物茎秆振动响应仿真[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 131–137.
WANG Qirui, MAO Hanping, LI Qinglin. Simulation of vibration response of flexible crop stem based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 131–137. (in Chinese)
- [39] 廖宜涛,廖庆喜,周宇,等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 73–82.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73–82. (in Chinese)
- [40] MARI I A, CHANDIO F A, JI C, et al. Performance and evaluation of disc tillage tool forces acting on straw incorporation soil[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2014, 51(4): 855–860.