doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009

# 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析

方会敏[1]　姬长英[1]　Ahmed Ali Tagar[2]　张庆怡[1]　郭　俊[1]

(1.南京农业大学工学院，南京 210031；2.信德农业大学农业工程学院，坦杜阿拉亚 70060)

**摘要**：秸秆-土壤-旋耕刀之间的相互作用机理对于分析耕作过程有着重要作用。为研究秸秆-土壤-旋耕刀的宏观及微观相互作用，对系统中的秸秆位移进行了仿真分析。首先建立了秸秆-土壤-旋耕刀相互作用的三维离散元模型；其次，对仿真结果与室内土槽实验结果进行对比分析，在土槽实验中采用示踪器方法测量秸秆位移；仿真中导出每个时刻的秸秆位置用来描述秸秆仿真位移；最后，利用仿真数据对秸秆位移进行三维分析。实验和仿真都在恒定前进速度0.222 m/s和耕深100 mm及4种转速(77、100、123、146 r/min)下进行。实验与仿真结果皆显示秸秆位移随着转速增加呈现增加的趋势；秸秆的水平运动位移总是大于同转速下的侧向位移；高转速下的实验与仿真位移误差约为40%，低转速下为70%。利用拟合的误差方程和仿真值可以估算秸秆的水平和侧向位移值，估算值与实验值误差为8.7%和9.3%。通过追踪不同位置的秸秆颗粒发现：初始位置不同的秸秆颗粒具有不同的运动：位于正切刃内侧的秸秆在刀刃切开土壤时，沿正切刃边缘滑出；而位于侧切刃下方的秸秆在开始时被侧切刃挤压随刀刃一起运动，而后随土壤一起被抛起；远离旋耕刀工作范围的秸秆，则因受土壤扰动影响而仅有微小的位移。紧靠侧切刃及过渡刃周围的秸秆颗粒在考察时间段内被直接旋耕入土。可以利用秸秆的垂直方向受力情况，优化旋耕刀刃口曲线提高秸秆在旋耕过程中直接入土的比例；还可以整合秸秆水平和侧向位移及分布，寻找最优工作参数使秸秆在3个方向都能均匀分散，从而提高秸秆分布均匀度。

**关键词**：旋耕刀；秸秆运动；离散元仿真；微观分析

**中图分类号**：S222.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2016)01-0060-08

# Simulation Analysis of Straw Movement in Straw－Soil－Rotary Blade System

Fang Huimin[1]　Ji Changying[1]　Ahmed Ali Tagar[2]　Zhang Qingyi[1]　Guo Jun[1]

(1. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*

2. *Faculty of Agricultural Engineering*, *Sindh Agriculture University*, *Tandojam* 70060, *Pakistan*)

**Abstract**: The straw-soil-rotary tool interaction plays a pivotal role in the field of crop production. The simulation of straw-soil-rotary blade interaction using distinct element method (DEM) could be hypothesized to provide a better understanding of the straw movement. Firstly, DEM model of straw-soil-rotary blade interaction was established. Secondly, indoor soil bin experiments were conducted to verify simulation model, positions of straw particle at every moment were used to study straw displacement in simulation and tracer method was employed to measure straw displacement in experiments. Both simulation and experiment were performed with four rotational blade speeds (77 r/min, 100 r/min, 123 r/min, 146 r/min) at constant forward speed of 0.222 m/s and depth of 100 mm. The straw displacement both in soil bin and simulation increased with increasing rotational speed of blade. Moreover, the displacement in forward direction was larger than that of side direction at all rotational speeds in both experiment and simulation. The average error of straw displacement between simulated results and experimental results was about 40% for higher rotational speed while 70% for lower ones. The

收稿日期：2015－08－27　修回日期：2015－11－07

**基金项目**：国家自然科学基金项目(51275250)和江苏省2013年度普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ13_0282)

**作者简介**：方会敏(1989—)，女，博士生，主要从事农业机械化研究，E-mail：hdldl@126.com

**通信作者**：姬长英(1957—)，男，教授，博士生导师，主要从事农业机械化研究，E-mail：chyji@njau.edu.cn

relation equation between relative error and rotational speed can be used to predict the experimental values, and the error between the predicted ones and experimental ones were 8.7% and 9.3% for forward and side displacements. Microscopic movements of straws were analyzed by tracing three specific straw particles. The movement of straw near sidelong edge or lengthwise edge was affected by cutting edges, the straw located at inner side of sidelong edge slipped off along the border of sidelong edge when rotary blade started to cut the soil while the straw near lengthwise edge was pushed to move along the lengthwise edge at the initial stage of soil cutting and later was tossed upward. The movement of straw away from cutting range was only affected by soil disturbance. The straw particles near lengthwise edge or transition edge could be buried directly during tillage. It is recommended to increase the ration of straw burial during tillage by optimizing edge curve and improve dispersed homogeneous degree by selecting the optimal operational parameters of rotary blade.

**Key words**: rotary blade; straw movement; discrete element modeling; microscopic analysis

## 引言

中国是世界粮食生产大国,其中小麦是主要粮食作物,其秸秆产量占农作物秸秆总产量的12.7%[1],收获后大量的秸秆遗留在田里。秸秆还田无论是在保护环境、改善土壤结构,还是减轻农民负担方面,都有着不可估量的作用[2-3]。

耕作过程的能量消耗几乎占到整个农业生产能耗的一半,必须对生产过程加以优化[4]。但由于土壤的空间差异性、耕作机械的动力学因素及土壤本身的运动及破碎等原因,导致土壤耕作过程复杂。而当土壤表面有作物残茬覆盖时,秸秆-土壤-机具相互作用将更复杂。国内外学者对秸秆-土壤-机具的相互作用进行了相关研究,如 Liu 等[5]研究了特定情况下残茬与土壤、机具的作用。Mari 等[6]对圆盘犁作用下秸秆的掩埋情况进行了分析。陈青春等[7]对正、反转旋耕条件下秸秆混埋进行了对比。但迄今为止,秸秆-土壤-机具的相互作用还未得到充分的理解,尤其是秸秆受到来自机具和土壤共同作用后的运动,这将直接关系到机械的作业效率。而且,旋耕刀在江苏省的使用率占到了所有耕整地机械的 75.8%,但是尚未有人进行秸秆-土壤-旋耕刀的相互作用研究。

近年来在信息技术领域出现了一些研究土壤-耕作部件相互作用过程的软件。其中有限元方法(FEM)和离散元方法(DEM)是两种广泛使用的数值研究方法。FEM 是将物体材料视作连续物质的研究方法,已被很多学者用来研究土壤和耕作部件间的相互作用[8-10]。FEM 能研究作用于耕作部件的作用力和土壤失效,但是不能模拟耕作过程中土壤的大变形。离散元方法可用来模拟颗粒材料和研究材料间的微观宏观变形,允许颗粒材料间存在接触的形成和破坏,也适合仿真土壤和刚性体弹性体间的相互作用。在过去的 15 年里,学者基于 DEM 对土壤-机具相互作用过程进行了广泛研究[11-17]。这些研究都证实离散元仿真能够模拟土壤-机具相互作用,但是鲜有考虑到秸秆。而秸秆含量的多少、秸秆本身的力学性质等都会影响耕作过程,并使耕作阻力增加[18-19]。耕作过程中秸秆在外力作用下发生位移,而秸秆的位移又会反过来影响土壤位移,继而影响农业机械的工作效率和能耗。因此,本研究旨在利用离散元方法对秸秆-土壤-旋耕刀相互作用系统进行研究。通过对耕作的微观过程进行分析来探究秸秆在旋耕刀和土壤综合作用下的运动情况,明确作用过程和机理,为旋耕机械设计寻求合理的依据。

## 1　室内旋耕实验

实验在南京农业大学工学院的土壤动力学实验室内进行。

### 1.1　实验装置

土槽内土壤为粘土(47% 淤泥、42% 粘土和 11% 沙),取自南京市永宁镇。土壤经干燥、筛分等工序后填入土槽,并进行压实等工序直至土壤密度为 1.25 g/cm$^3$。实验过程中保持含水率恒定。土槽长×宽×高为 6 m×2.5 m×0.5 m,本研究选择旋耕刀 IT225 作为研究对象。旋耕刀安装在自制的台架结构上,并由 11 kW 电动机驱动旋转,构成旋耕刀总成;旋耕刀总成安装在原有的土槽行走机构上,由 7.5 kW 的电动机驱动前进,在 Pro/E 中绘制的系统结构图见图 1。

### 1.2　秸秆位移测量

秸秆运动用图 2a 所示的示踪器方法进行追踪,方法见文献[5]。秸秆长度对秸秆的水平和侧向位移都无显著影响,故选取 150 mm 长的麦秸秆标记并着色后摆放在土壤表面作为秸秆运动的追踪器。

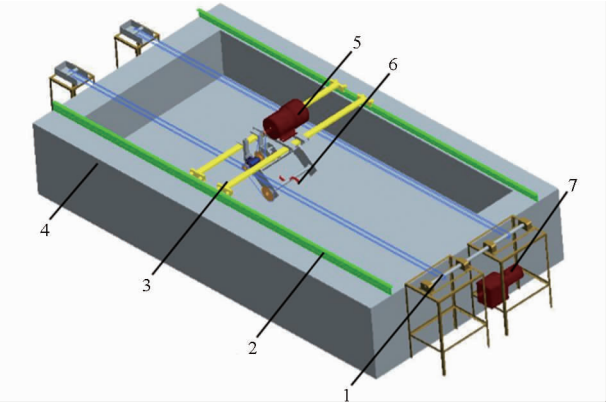


图 1 土槽及实验装置结构图

Fig. 1 Schematic view of soil bin and testing equipment

1. 齿轮和链条 2. 导轨 3. 横轨 4. 土槽 5. 11 kW 电动机 6. 旋耕刀 7. 7.5 kW 电动机

红色秸秆摆放位置与机具前进方向垂直,黄色秸秆与机具前进方向平行。然后再摆放 200 根秸秆模拟田间秸秆状况。图 2b 中的 2 根垂直安装并装有标尺的标杆用来定位和测量秸秆耕作前后的位置。秸秆的运动位移则为示踪器在耕作前后的初始和末了位置之差,其中所有红黄秸秆示踪器水平位移的平均值作为秸秆水平位移量,而全部黄色秸秆示踪器的侧向位移作为秸秆侧向位移量。

## 2 离散元仿真

采用 EDEM 2.3 软件进行旋耕刀作用下秸秆运动的建模仿真。EDEM 中的基本元素——球用来仿真土壤颗粒和秸秆颗粒。多数研究者使用大于

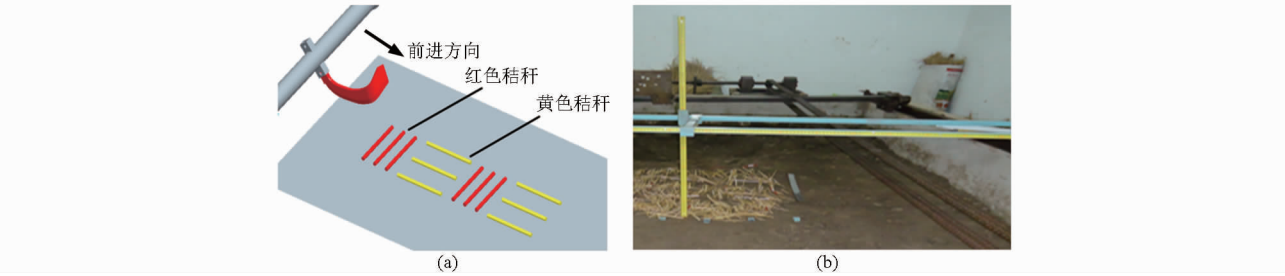


图 2 秸秆示踪器和秸秆位移测量装置

Fig. 2 Schematic view of straw tracers and device used for arranging the tracers and measuring displacement

10 mm 的球体作为土壤模型[20-24]。为了平衡计算机的计算能力和仿真时间,本研究采用的土壤颗粒大小为 10 mm。Hertz - Mindlin 粘结模型用来模拟土壤颗粒间的相互作用。仿真开始前土壤颗粒之间存在抵抗正向和切向运动的粘结;当正向和切向的应力达到临界值时,粘结破坏;此后土壤颗粒像硬球一样运动。由于秸秆的高长径比及性质的各向异性,故仿真秸秆是一件很有难度的研究[25]。至今未见有运用商业离散元软件建立可弯折秸秆模型的相关研究,本文使用 5 个直径为 16 mm、球心间隔为 10 mm组成的长为 56 mm 的长线性模型作为秸秆颗粒。旋耕刀和土槽模型在 Pro/E 中建立后导入到 EDEM;然后在土槽内部生成 24 000 个土壤颗粒和 50 个秸秆颗粒。在仿真开始前,旋耕刀位于土槽的一端,见图 3。在 EDEM 软件中,可以对旋耕刀的转动速度和平移速度分别加以定义。

研究中涉及到的离散元参数主要分为材料参数和接触参数两类,材料参数包括秸秆、土壤、刀的密度、泊松比和剪切模量等,此参数主要通过采用文献[23,25-26]中的参数及实地测量获得(表 1);接触参数包括土壤-土壤、土壤-刀、秸秆-刀间的静、滚动摩擦因数和恢复系数等,此数据通过引用文献中参数和实验测量及仿真标定方法获得。其中,土壤-土壤和土壤-刀的恢复系数引自文献[27],秸秆-刀的恢复系数和静摩擦因数引用文献[25]的数据;土壤-刀的静摩擦因数采用类似直剪实验的方法测得[28];土壤-刀、秸秆-刀的滚动摩擦因数采用斜板实验测得[29];土壤-土壤的静、动摩擦因数则通过标定得到:用离散元方法仿真贯入实验和休止角实验,当调整参数得到与实验一致的结果时,则使用此参数。仿真时选取的材料参数和接触参数如表 1 所示。

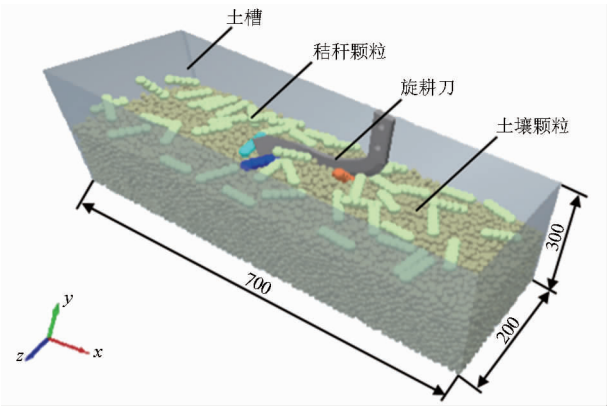


图 3 仿真模型

Fig. 3 Schematic of soil bin with rotary blade in simulation

## 3 结果与讨论

### 3.1 仿真与实验结果对比

实验中,旋耕刀转速为77、100、123、146r/min

**表 1　仿真参数**

**Tab. 1　Parameters used in simulation**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 土槽长 × 宽 × 高/mm × mm × mm | 700 × 200 × 300 |
| 转速 $n$/(r·min$^{-1}$) | 77、100、123、146 |
| 前进速度 $v$/(m·s$^{-1}$) | 0.222 |
| 耕深 $h$/mm | 100 |
| 土壤密度 $\rho_1$/(kg·m$^{-3}$) | 1 850 |
| 土壤泊松比 $\nu_1$ | 0.38 |
| 土壤剪切模量 $G_1$/Pa | $1\times10^6$ |
| 秸秆密度 $\rho_2$/(kg·m$^{-3}$) | 241 |
| 秸秆泊松比 $\nu_2$ | 0.4 |
| 秸秆剪切模量 $G_2$/Pa | $1\times10^6$ |
| 铁密度 $\rho_3$/(kg·m$^{-3}$) | 7 865 |
| 铁泊松比 $\nu_3$ | 0.3 |
| 铁剪切模量 $G_3$/Pa | $7.9\times10^{10}$ |
| 土壤-土壤恢复系数 $e_1$ | 0.6 |
| 土壤-铁恢复系数 $e_2$ | 0.6 |
| 秸秆-铁恢复系数 $e_3$ | 0.3 |
| 土壤-土壤静摩擦因数 $f_{s1}$ | 0.6 |
| 土壤-铁静摩擦因数 $f_{s2}$ | 0.6 |
| 秸秆-铁静摩擦因数 $f_{s3}$ | 0.3 |
| 土壤-土壤滚动摩擦因数 $f_{d1}$ | 0.4 |
| 土壤-铁滚动摩擦因数 $f_{d2}$ | 0.05 |
| 秸秆-铁滚动摩擦因数 $f_{d3}$ | 0.01 |

时水平位移分别为 160.8、272.5、383.3、415.0 mm，侧向位移为 56.7、106.7、104.2、121.7 mm；而仿真中各转速下的水平位移为 62.4、71.5、202.4、243.1 mm，侧向位移为 14.9、34.0、53.1、78.6 mm（图 4）。实验的秸秆位移结果总是大于仿真结果，类似结果的研究见文献[22,30－31]。定义仿真与实验结果值的绝对差值与实验值的百分比为实验误差，并将其作为衡量仿真可行性的指标。旋耕刀转速为 123 r/min 或 146 r/min 时，水平位移和侧向位移的实验误差分别为 45% 和 40% 左右；而转速为 77 r/min 或 100 r/min 时，水平位移和侧向位移的实验误差分别为 65% 和 70%。仿真与实验结果误差较大的原因可能是 0.3 s 的仿真时间不足以让秸秆落下，从而造成测量出的仿真位移偏小，这在旋耕刀转速较低情况下尤为明显。例如，把仿真时间从 0.3 s 延长至 0.32 s，转速为 77 r/min 或 100 r/min 时的水平位移误差和侧向位移误差分别降至 60% 和 45%。但另一方面，仿真时间为 0.3 s 时，高转速情况时的秸秆已经运动出仿真边界。故较长的仿真时间会造成高转速时秸秆位移不准确。另外，仿真中并未考虑重复耕作的情况，而重复耕作在机具实际工作中是常态。

将水平和侧向位移的实验误差随转速的变化拟合成曲线（图 5），并利用拟合的方程和仿真值估算秸秆的水平和侧向位移，并与测量出的实验值对比。发现此时水平位移和侧向位移的估算值与实验值误差为 8.7% 和 9.3%。所以，虽然仿真结果与实验结果相差较大，但是仿真与实验值的误差趋势一致，仿真值可以用来预测实验值。

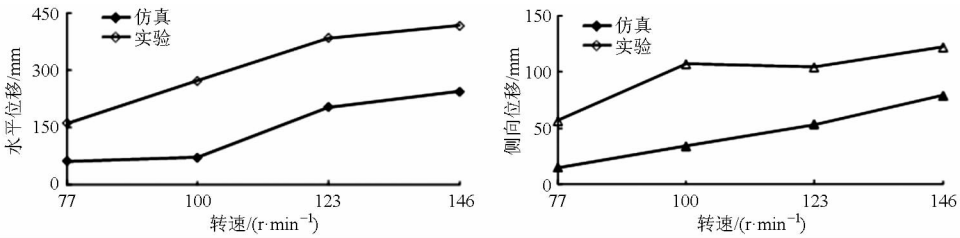


图 4　秸秆位移仿真与实验结果对比

Fig. 4　Comparisons of straw displacement between simulated and experimental results

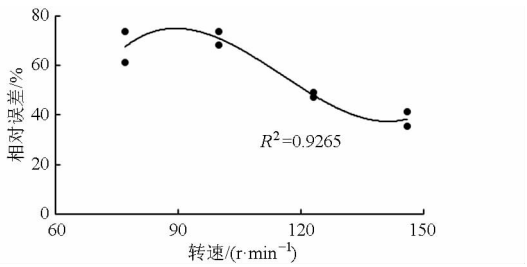


图 5　秸秆位移相对误差随转速的变化曲线

Fig. 5　Relative errors of straw displacement as influenced by rotational speed

此外，实验中秸秆位移随着转速增加呈现增加趋势；同样的趋势也见于仿真结果中。而且在实验和仿真结果中，秸秆的水平运动位移总是大于同转速下的侧向位移。Liu 等的研究发现秸秆位移随机具速度的增加而增加，而且前进方向的位移大于侧向位移[5]。类似的结论也见于 Chandio 的研究中，他指出随着圆盘犁速度的增加，秸秆的横向与纵向位移增加[32]。因此，本文中建立的仿真模型在分析旋耕刀耕作过程和秸秆运动方面是可行的。

### 3.2　秸秆微观运动

每个时刻秸秆位置的 DEM 仿真结果可以用来研究耕作过程中的秸秆运动轨迹。为此，本研究追踪 3 个秸秆颗粒（24004 号、24018 号、24021 号）在旋耕刀及土壤共同作用下的运动，旋耕刀工作参数为转速 146 r/min、前进速度 0.222 m/s、耕深

100 mm。为便于分析,将所有秸秆颗粒的初始位置都转换至坐标原点。

24004 号秸秆位于旋耕刀侧切刃下方,24018 号秸秆在正切刃内侧靠近过渡刃的位置,而 24021 号秸秆则位于正切刃外侧偏远的地方。3 个秸秆颗粒由于初始位置不同,故在旋耕刀作用下的运动也不尽相同。24021 号秸秆远离旋耕刀的工作范围,所以它的运动很小;而 24004 和 24018 号受刀刃影响运动较复杂。为了分析秸秆颗粒的微观运动,本研究作如下假设:

①秸秆颗粒开始时在旋耕刀和土壤共同作用下运动,后来的运动只是由于自身惯性。

②秸秆运动的分析基于位移-时间图和力-时间图,且某个方向上的运动并不影响其它方向的秸秆运动。

③秸秆可以在受力情况下运动,但是暂不考虑秸秆切断的情况。

④本研究只考察旋耕刀开始切土到秸秆飞出边界这段时间的秸秆位移,即时间为 0 ~ 0.3 s。

**3.2.1** 水平方向运动

3 个秸秆颗粒在水平方向的位移和受力如图 6 所示。旋耕刀刚开始切土时,侧切刃的动态滑切作用使 24004 号秸秆沿着刀片向后运动。从力-时间曲线也可以看出开始时秸秆所受合力方向向后,故秸秆向后运动。在位移-时间图中看到 0.2 s 左右时,秸秆位移发生突减,这是由于秸秆此时受到来自抛起土壤的阻力,即力-时间图中 0.2 s 时向前的阻力。位于正切刃内侧的 24018 号秸秆,开始时被正切刃向后挤压,后来正切刃切土时秸秆颗粒从刀刃边缘滑出。位移-时间图表明 24018 号颗粒先向后运动,随后变为持续的向前运动。24021 号秸秆受旋耕刀工作的影响很小,它的运动主要受土壤扰动影响,故在整个旋耕刀工作过程中几乎保持在原位置。

为了更好地理解旋耕刀片对秸秆运动的影响,将 0 ~ 0.03 s 期间的位移-时间图和力-时间图放大,如图 6b、6d。24004 号秸秆比 24018 号、24021 号秸秆运动得早,主要是它位于侧切刃下方,所以其先于其他颗粒与刀刃接触;后来在 0.02 s 后秸秆位移有所减小是因为此时秸秆颗粒没有受到持续的向后作用力维持其向后运动。24018 号颗粒在 0.01 ~ 0.02 s 间受到向后的作用力,所以开始时向后运动;后来向前的作用力又使秸秆颗粒的运动方向转至旋耕刀前进方向,正如秸秆位移-时间整体图上的运动趋势所示。而 24021 号秸秆向前运动了很小的距离,可能是因为刀片入土引起其周围的土壤运动,故土壤扰动造成 24021 号秸秆的微小运动。

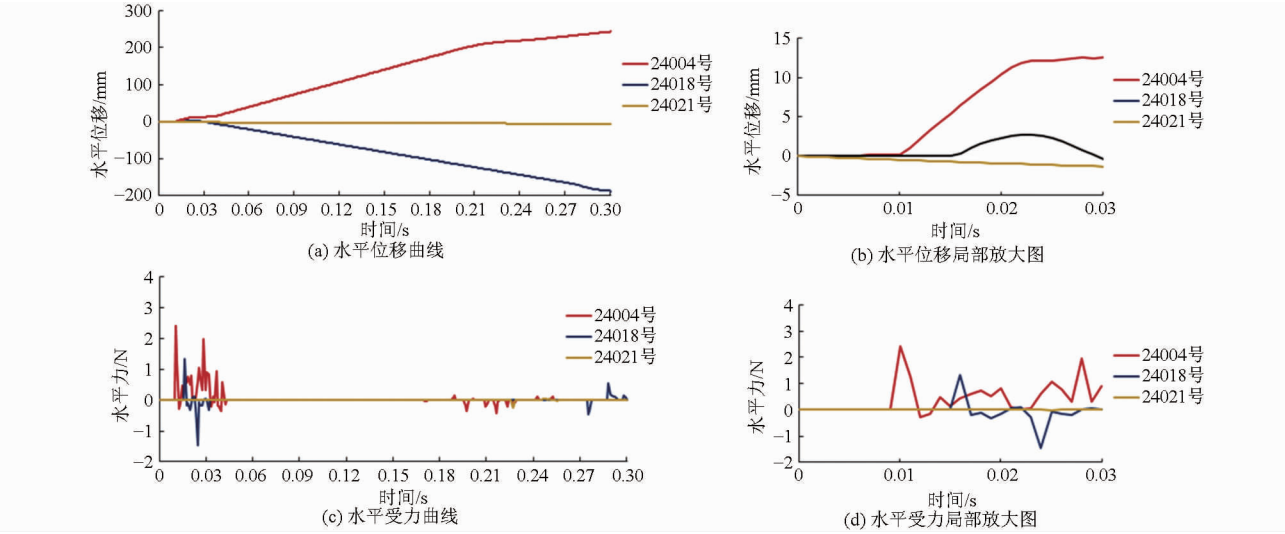


图 6 耕作过程中秸秆颗粒的水平位移和受力随时间的变化曲线

Fig. 6 Forward displacement and force with time for specific straw particles during tillage process

在土壤和刀片的双重作用下,位于侧切刃下方的秸秆,会在侧切刃作用下向后运动;而正切刃周围的秸秆运动方向则主要与旋耕方向一致。且侧切刃下方的秸秆位移较大,这主要是由于侧切刃的滑切作用,所以滑切对秸秆水平运动的影响大于刀片摩擦对其的影响。前述结果表明转速越高,秸秆水平位移也越大,即秸秆耕作后越分散,故可以提高刀轴转速使秸秆在耕作后尽可能分布在较长的土壤范围内。

**3.2.2** 侧向运动

在旋耕刀刚开始运动时,24004 号秸秆因侧切刃的影响最先开始运动(图 7)。开始时秸秆沿侧切刃向左运动,后来从侧切刃边缘滑出后变为向右运动。而接近 0.3 s 时秸秆突然改变运动方向,是仿真中设置的周期性边界所致。24018 号秸秆,受到向左的作用力,所以向左运动。秸秆周围的土壤被

刀刃切开，所以秸秆在正切刃作用下发生转动。但是来自土壤和刀片的向左合力使秸秆维持向左的运动。后来 24018 号秸秆由于惯性一直向左运动。24021 号秸秆远离旋耕刀工作范围，所以旋耕刀并不直接施加力给秸秆。24021 号秸秆的运动仅仅是因为其相邻土壤的扰动，因此它向左边有微小的位移。当来自土壤的扰动消失后，秸秆保持静止。

在局部放大图 7b、7d 中可以看出，24004 号秸秆的侧向运动依旧比 24018 和 24021 号秸秆早；后来在 0.02 s 后 24004 号秸秆位移有所减小是因为此时其受到向右的阻力。24018 号颗粒受到向左的作用力，所以开始向左运动；后来反向作用力使秸秆向左位移有所减小，但是正如秸秆位移-时间整体图上所示，24018 号颗粒仍一直向左运动。图中显示 24021 号秸秆沿正切刃朝向方向运动了很小的距离，可能是因为刀片运动引起其周围的土壤运动。

不同初始位置的秸秆，其侧向位移方向不同。所以旋耕刀工作时，秸秆在侧向得到分散。前述结果表明转速越高，秸秆侧向位移也越大，即秸秆越分散，故提高刀轴转速同时也可使秸秆在耕作后尽可能分布在较宽的土壤范围内。

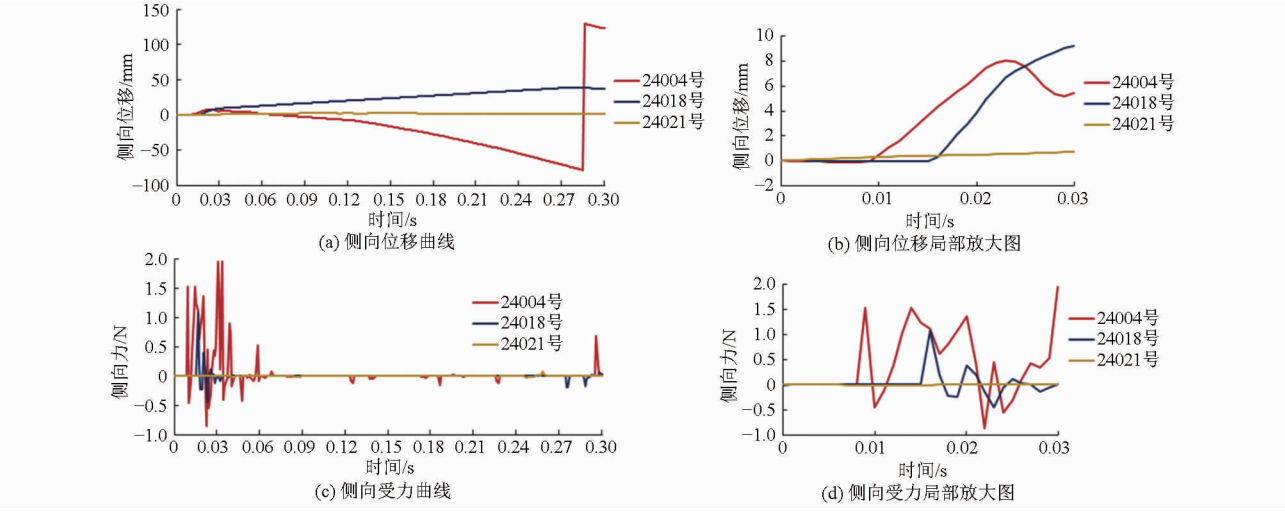


图 7　耕作过程中秸秆颗粒的侧向位移和受力随时间的变化曲线

Fig. 7　Side displacement and force with time for specific straw particles during tillage process

### 3.3　秸秆掩埋

秸秆与刀刃接触时，便在刀刃作用下向下运动；后在土壤的阻力下秸秆位移减小，直至向下位移减为零。之后部分秸秆随土壤一起被抛起；部分秸秆被遗留在土里。一直以来，垂直方向秸秆的运动情况鲜有学者研究，而是通过掩埋率来表征：如 Chandio 等研究了圆盘犁作用下秸秆水平和侧向位移的同时，考察了秸秆的掩埋[32]；Sirisak 等[33]研究旋耕刀作用下秸秆的掩埋率。但是掩埋率只能反映秸秆埋于土壤下的比例，很难分析出秸秆在土壤下的深度状况，这对旋耕刀片等的设计而言还是缺少垂直方向秸秆受力与响应的依据。

选择旋耕刀作用范围的 13 颗秸秆进行 0.49 s 时长内的运动追踪（图 8a）。以秸秆终了位置和初始位置之差作图 8b，其中正值表示秸秆被抛起的高度、负值表示秸秆掩埋入土的深度。明显发现紧靠侧切刃的颗粒 24029 和 24039 号及过渡刃周围的颗粒 24034 和 24043 号在考查时间段内被掩埋入土，而其他颗粒都随土壤在上抛过程中。此时间内的秸秆掩埋比例约为 30.8%，其中掩埋最大深度达

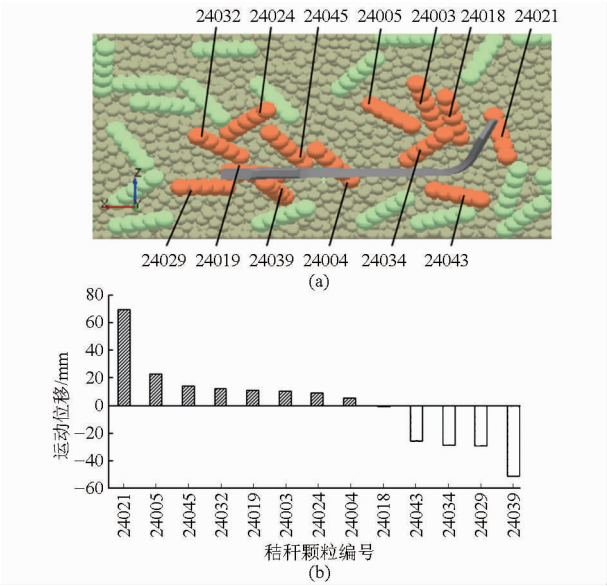


图 8　秸秆颗粒和秸秆垂直位移变化结果

Fig. 8　Straw particles and vertical displacement of straw particles

51.5 mm，这说明在耕作过程中即有一部分秸秆直接被旋耕入土。结合旋耕刀的刃口曲线，可以进一步利用秸秆的垂直方向受力情况，优化刀型提高秸

秆在旋耕过程中直接入土的比例,从而减少重复旋耕秸秆入土的能耗;可以整合秸秆水平和侧向位移及分布,优化刀型使秸秆在 3 个方向都能均匀分散,提高秸秆分布均匀度。

## 4 结论

(1)本文使用离散元方法进行了旋耕刀耕作下秸秆运动的模拟,同时建立了室内土槽实验系统和相应的离散元仿真模型。对于秸秆位移,实验结果与仿真结果变化趋势一致。但是位移的实验结果与位移的仿真结果间误差较大,尤其是在旋耕刀转速较低时。有以下几个原因可以解释:仿真时间不足以让秸秆完成下落过程;仿真时间延长,较高转速时秸秆会运动出仿真中建立的土槽边界;在仿真中,并未考虑重复耕作的情况。而且利用拟合的误差方程和仿真值可以估算秸秆的水平和侧向位移,估算值与实验值误差为 8.7% 和 9.3%。因此可以选取转动速度 146 r/min、前进速度 0.222 m/s、工作耕深 100 mm 的旋耕工作参数来分析秸秆在 0.3 s 内的微观运动。

(2)初始位置不同的秸秆颗粒具有不同的运动。与旋耕刀刀刃有直接接触的秸秆运动比较复杂:位于侧切刃下方的秸秆开始时被侧切刃挤压随刀刃一起入土,后从刃口滑出;位于正切刃内侧的秸秆在与正切刃的摩擦力影响下随刀刃有微小向下运动,后在刀刃切开土壤时沿正切刃边缘滑出。侧切刃下方的秸秆位移总是最大,这归因于侧切刃的滑切作用。距离旋耕刀工作范围较远的秸秆,因受土壤扰动影响而仅有微小的位移。不同位置的秸秆因受力不同,所以运动位移相异,故秸秆能够在耕作过程中分散在土壤表面;转速越高,秸秆位移越大,提高刀轴转速可使秸秆在耕作后尽可能均匀分散。

(3)紧靠侧切刃及过渡刃周围的颗粒在考查时间段内直接被旋耕入土。结合旋耕刀的刃口曲线,进一步利用秸秆的垂直方向受力情况,优化刀型提高秸秆在旋耕过程中直接入土的比例,从而减少重复旋耕秸秆入土的能耗;可以整合秸秆水平和侧向位移及分布,寻求最优工作参数使秸秆在 3 个方向都能均匀分散,提高秸秆分布均匀度。

(4)结果表明离散元方法在研究秸秆-土壤-旋耕刀相互作用方面是可行的,尤其在旋耕刀转速比较高的情况下。秸秆在耕作过程中的运动很复杂,DEM 的运用将有助于分析土壤和旋耕刀作用下秸秆的微观运动行为,为秸秆处理机械的设计与优化提供理论依据。

## 参 考 文 献


1 毕于运,高春雨,王亚静,等. 中国秸秆资源数量估算[J]. 农业工程学报,2009,25(12):211 - 217.
Bi Yuyun, Gao Chunyu, Wang Yajing, et al. Estimation of straw resources in China[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12):211 - 217. (in Chinese)

2 杜长征. 我国茎秆还田机械化的发展现状与思考[J]. 农机化研究, 2009(7): 234 - 236.
Du Changzheng. Present status and consideration about straw returning mechanization in China [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(7): 234 - 236. (in Chinese)

3 Zhang Peng, Wei Ting, Jia Zhikuan, et al. Effects of straw incorporation on soil organic matter and soil water - stable aggregates content in semiarid regions of northwest China[J]. PLoS ONE, 9(3):e92839.

4 Kushwaha R L, Zhang Z X. Evaluation of factors and current approaches related to computerized design of tillage tools: a review [J]. Journal of Terramechanics, 1998,35(2):69 - 86.

5 Liu J, Chen Y, Kushwaha R L. Effect of tillage speed and straw length on soil and straw movement by a sweep[J]. Soil & Tillage Research, 2010,109(1): 9 - 16.

6 Mari I A, Chandio F A, Ji Changying, et al. Performance and evaluation of disc tillage tool forces acting on straw incorporation soil [J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences,2014,51:1 - 6.

7 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)

8 Fielke J M. Finite element modeling of the interaction of the cutting edge of tillage implements with soil[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1999,74(1):91 - 101.

9 Abo-Elnor M, Hamilton R, Boyle J T. Simulation of soil-blade interaction for sandy soil using advanced 3D finite element analysis [J]. Soil & Tillage Research, 2004,75(1):61 - 73.

10 Tagar A A, Changying Ji, Jan A, et al. Finite element simulation of soil failure patterns under soil bin and field testing conditions [J]. Soil & Tillage Research, 2015,145:157 - 170.

11 Coetzee C J. Forced granular flow[D]. Cape Town: University of Stellenbosch, 2000.

12 Tanaka H, Momozu M, Oida A, et al. Simulation of soil deformation and resistance at bar peneration by the distinct element

method[J]. Journal of Terramechanics, 2000,37(1):41 - 56.

13 Momozu M, Oida A, Yamazaki M. et al. Simulation of a soil loosing process by means of the modified distinct element method [J]. Journal of Terramechanics, 2003, 39(4):207 - 220.

14 Zhang R, Li J. Simulation on mechanical behavior of cohesive soil by distinct element method[J]. Journal of Terramechanics, 2006,43(3):303 - 316.

15 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 resistance applied on furrow openers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(6):53 - 57. (in Chinese)

16 李艳洁,林剑辉,徐泳.圆锥指数仪贯入沙土试验的离散元法模拟[J].农业机械学报,2011,42(11):44 - 48.
Li Yanjie, Lin Jianhui, Xu Yong. Discrete element simulation of the cone penetration tests in sandy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(11):44 - 48. (in Chinese)

17 李艳洁,刘翼晨,林剑辉,等.圆锥指数仪贯入沙土过程的三维离散元法模拟[J].农业机械学报,2012,43(7):63 - 68.
Li Yanjie, Liu Yichen, Lin Jianhui, et al. 3D DEM simulations of the cone penetration tests in sandy soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(7): 63 - 68. (in Chinese)

18 Farid Eltom A E , 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, 133:385 - 393.

19 Kushwaha R L, Vaishnav A S, Zoerb G C. Soil bin evaluation of disc coulters under no-till crop residue conditions[J]. Transactions of the ASAE,1986, 29(1): 40 - 44.

20 Mak J, Chen Y, Sadek M A. Determining parameters of a discrete element model for soil-tool interaction[J]. Soil & Tillage Research, 2012,118:117 - 122.

21 Chen Y, Lars J M, Tavs N. A discrete element model for soil-sweep interaction in three different soils[J]. Soil & Tillage Research, 2013,126:34 - 41.

22 Ucgul M, John M F, Chris S. 3D DEM tillage simulation: validation of a hysteretic spring (plastic) contact model for a sweep tool operation in a cohesionless soil[J]. Soil & Tillage Research, 2014,144:220 - 227.

23 Ucgul M, John M F, Chris S. Three dimensional discrete element modeling of tillage: determination of a suitable contact model and parameters for a cohesionless soil[J]. Biosystems Engineering, 2014,121:105 - 117.

24 Ucgul M, John M F, Chris S. Three dimensional discrete element modeling (DEM) of tillage: accounting for soil cohesion and adhesion[J]. Biosystem Engineering, 2015,129:298 - 306.

25 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.

26 Korneí T, Istvań J J, Abdul M M. Modelling soil-sweep interaction with discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2013,134:223 - 231.

27 Das B M. Advanced soil mechanics[M]. Oxford: Taylor & Francis,1997.

28 Fielke J M. Interactions of the cutting edge of tillage implements with soil[J]. Adelaide: Adelaide University, 1994.

29 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.

30 Coetzee C J, Els D N J. Calibration of granular material parameters for DEM modeling and numerical verification by blade-granular material interaction[J]. Journal of Terramechanics, 2009,46(1):15 - 26.

31 Coetzee C J, Els D N J. The numerical modelling of excavator bucket filling using DEM[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(5):217 - 227.

32 Chandio F A. Interaction of straw-soil-disc tillage tool under controlled conditions[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.

33 Sirisak C, Tanya N, Wanwisa J. The performance of rotary power tiller using prototype rotary blades in dry-land field[J]. Maejo International Journal of Science and Technology, 2008,2(Special Issue): 17 - 26.