

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2025.10.037

郭俊, 孙恩慧, 杨跃, 等. 模拟秸秆还田条件下土壤力学特性研究[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(10): 284–291

Guo Jun, Sun Enhui, Yang Yue, et al. Research on the mechanical properties of soil under the condition of simulated straw returning [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(10): 284–291

模拟秸秆还田条件下土壤力学特性研究*

郭俊¹, 孙恩慧¹, 杨跃¹, 陆俊¹, 秦宽²

(1. 盐城工学院汽车工程学院, 江苏盐城, 224051; 2. 安徽农业大学工学院, 合肥市, 230000)

摘要:为缓解农业车辆对田间土壤的压实, 研究在土壤内部加入小麦秸秆减轻轮胎对土壤深处传递的应力。建立轮胎仿真模型, 并利用离散元软件(EDEM)建立纯土壤模型和含秸秆土壤模型。将轮胎模型导入 EDEM 中建立轮胎—土壤的仿真模型, 在其他仿真条件不变的情况下, 将轮胎速度分别设为 1 m/s、3 m/s、5 m/s, 进行不同速度工况下轮胎在两种土壤模型上的行驶过程模拟。通过土壤固结仪对纯土壤和含秸秆土壤试样施加 50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa、800 kPa 的压力进行室内土壤压实试验, 结果表明: 含秸秆土壤在受到垂直载荷加载时, 其应力变化增加量明显小于纯土壤应力变化增加量。将在 EDEM 中得到的仿真结果与土壤压实试验结果进行对比, 含秸秆土壤模型沉陷量与纯土壤模型沉陷量降低 10%, 证明仿真模型的有效性, 并验证加入秸秆后可以达到缓解土壤压实的效果。

关键词: 土壤力学特性; 秸秆还田; 离散元模型; 应力应变; 土壤孔隙比

中图分类号: U463.34 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2025) 10-0284-08

Research on the mechanical properties of soil under the condition of simulated straw returning

Guo Jun¹, Sun Enhui¹, Yang Yue¹, Lu Jun¹, Qin Kuan²

(1. School of Automotive Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng, 224051, China;

2. College of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei, 230000, China)

Abstract: To alleviate the compaction of field soil by agricultural vehicles, a study was conducted to add wheat straw inside the soil to reduce the stress transferred by tires to the deep soil. Firstly, a tire simulation model was established, and pure soil model and soil model containing straw were established by using the discrete element software (EDEM). The tire model was imported into EDEM to establish the simulation model of tire-soil. With other simulation conditions unchanged, the tire speeds were set at 1 m/s, 3 m/s, and 5 m/s respectively to simulate the driving process of tires on the two soil models under different speed conditions. The indoor soil compaction experiment was carried out by applying pressures of 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa, 400 kPa and 800 kPa to the pure soil and the soil sample containing straw through the soil consolidometer. The results show that when the soil containing straw is subjected to vertical load loading, the increment of stress change is significantly less than that of the pure soil stress change increment. By comparing the simulation results obtained in EDEM with the results of the soil compaction experiment, the subsidence amount of the soil model containing straw and the subsidence amount of the pure soil model are reduced by 10%, which proves the validity of the simulation model and verifies that the addition of straw can achieve the effect of alleviating soil compaction.

Keywords: mechanical properties of soil; straw returning; discrete element model; stress-strain; soil void ratio

0 引言

农业车辆作业过程中, 有限元方法可以有效地模

拟轮胎在行驶过程中的挤压变形情况, 但大多数农业材料(如土壤颗粒和秸秆颗粒)都具有离散特性, 有限元方法难以准确描述土壤被局部破坏以及轮胎压实后

收稿日期: 2024 年 6 月 26 日 修回日期: 2024 年 8 月 20 日

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52105239)

第一作者(通讯作者): 郭俊, 男, 1986 年生, 安徽安庆人, 博士, 副教授; 研究方向为农业机械与零部件优化设计。E-mail: gj_njau@163.com

土壤颗粒流动的情形。对于土壤和秸秆扰动,EDEM 软件可以监测单个颗粒的运动和破碎,并在宏观和微观上分析其在不同工作深度和转速下的动态特征^[1, 2]。轮胎在农田土壤上行驶时是瞬态运动,将离散元方法应用到描述土壤和秸秆颗粒上能够更好地研究轮胎—土壤相互作用。

利用 EDEM 建立土壤和秸秆混合模型是离散元模型最新进展,初期的研究主要集中在刚性秸秆模型,可用于分析土壤耕作操作中秸秆的移动、埋藏和分布^[3, 4]。对于秸秆切割行为,郭茜^[5]、张李娴^[6]分别对藤秆和玉米秸秆外皮的切割过程进行了建模。张锋伟等^[7]通过 EDEM 软件建立秸秆模型,并分析了秸秆粉碎后的参数变化。Michael 等^[8]开发并成功使用一种用来描述轮胎胎面和土壤颗粒之间相互作用的 DEM—FEM 仿真技术,该仿真技术可以准确预测轮胎胎面—土壤相互作用的牵引行为。Muir 等^[9]采用 2D—DEM 来评估级配变化形式的侵蚀后果以及对土壤临界状态行为的相关影响。Acquah 等^[10]使用离散元法开发了土壤—轮胎相互作用模型来模拟轮胎重复通过次数影响下的动力学,能够充分响应土壤变形,并模拟表土层的最大土壤压力。郑祖美等^[11-14]为研究车轮在沙土路面上的行驶性能,通过有限元与离散元耦合建立轮胎—路面相互作用模型,并通过 ORV—SAND 软件仿真分析行驶参数以及滑转率对轮胎行驶参数的影响,结果表明,耦合模型以及仿真方法具有有效性。Lü 等^[15]利用离散元法研究了不同波形多级循环荷载作用下土壤的宏观动力学响应,分析了应力在土壤内部传递的滞后效应。黄元昊等^[16]利用 EDEM 中的 Hertz—Mindlin with JKR Cohesion 模型研究不同含水率的土壤与多种材料的黏附情况以及接触参数标定,并通过设计四因素三水平试验得到了不同含水率的土壤与多种材料的接触参数。

本文根据土壤和秸秆力学参数,运用离散元方法建立与田间实际接近的农用车轮胎—纯土壤相互作用模型和农用车轮胎—含秸秆土壤相互作用模型;通过在 2 种仿真模型中对轮胎施加相同行驶参数,实现轮胎在田间土壤上的加载仿真分析,得到相同工况方法下 2 种土壤受到轮胎加载时的应力变化;通过土壤固结仪进行室内土壤压缩试验,得到土壤被压缩后的特性变化。将仿真结果与室内土壤压实试验结果进行对比,验证本研究的可行性和合理性。

1 理论分析与模型建立

1.1 土壤应力传递理论

在以往的应力研究中,计算土壤应力传递的方法

以仿真法和模型法为主。现有的分析模型都是假设土壤是均质、弹性、各向同性的介质^[17]。将土壤视作弹塑性材料^[18],对弹性土壤内部集中载荷任意一点的应力公式进行推导

$$\lambda_z = \frac{3Pz^3}{2\pi R^5} = \frac{3P}{2\pi R^2} \cos^3 \theta$$
 (1)

式中： λ_z ——土壤接触面正下方处垂直应力,kPa;
 P ——土壤表面加载载荷,kPa;
 z ——加载点与任意一点的竖向直线距离,mm;
 R ——加载点与任意一点的直线距离,mm;
 θ ——加载点和任意一点连线与竖直方向的夹角。

从式(1)可以看出,土壤内部应力的大小不仅与土壤表面加载载荷有关,还与加载面大小有关。在额定载荷下加载时,加载面越大,应力传递随深度的增加逐渐减弱。

1.2 试验设计

利用离散元软件建立土壤和小麦秸秆,并建立土壤—秸秆模型和纯土壤模型,并将轮胎模型放置在 2 种土壤模型上,建立轮胎—土壤模型。根据农业轮胎实际作业情况,为轮胎设置平动和转动运动仿真参数,分别在 2 种土壤模型上进行轮胎行驶运动模拟仿真。

1.3 轮胎模型

本文的研究对象为某农用车斜交轮胎,轮胎规格为 11.2—24,层级为 10 层,依据《橡胶设计手册》^[19]和轮胎设计的要求来确定轮胎的相关结构参数^[20],如表 1 所示。

表 1 轮胎结构参数
Tab. 1 Tire structure parameters

外直径/mm	断面宽度/mm	额定气压/kPa	额定载荷/kg
1 105	285	240	1 200

农用轮胎具有复杂的几何结构和材料属性,在进行三维建模时要考虑建立模型的可靠性,将不影响准确建立模型的几何特征去除,并将轮胎上一些尖角结构进行圆滑处理,最终建立的轮胎模型如图 1 所示。



图 1 轮胎三维模型
Fig. 1 3D tire model

1.4 土壤—秸秆模型

借鉴文献中关于离散元仿真土壤和秸秆颗粒的材料参数^[21],设置土壤颗粒之间、土壤与秸秆之间、秸秆颗粒之间的接触参数,如表 2 所示。

表 2 仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

参数	数值
土壤密度 $\rho_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 850
土壤剪切模量 G_1/MPa	1
秸秆密度 $\rho_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	241
秸秆剪切模量 G_2/MPa	1
土壤—土壤恢复系数 e_1	0.6
土壤—秸秆恢复系数 e_2	0.3
土壤泊松比 ν_1	0.38
秸秆泊松比 ν_2	0.4
秸秆—秸秆恢复系数 e_3	0.3
土壤—土壤静摩擦因数 f_{s1}	0.6
土壤—秸秆静摩擦因数 f_{s2}	0.6
秸秆—秸秆静摩擦因数 f_{s3}	0.1
土壤—土壤滚动摩擦因数 f_{d1}	0.4
土壤—秸秆滚动摩擦因数 f_{d2}	0.05
秸秆—秸秆滚动摩擦因数 f_{d3}	0.02

1.4.1 土壤模型

均匀的粒径通常会提供有关散粒材料响应的适当信息。因此,将粒径分布设置为 2.5~5.0 mm。由于 EDEM 软件计算效率以及计算机性能的限制,为节省计算机存储空间,多数研究采用的仿真颗粒大于实际土壤颗粒。为了不影响模拟的真实性并达到较好的仿真效果,参考相关文献[22-26],将仿真土壤颗粒半径大小设置为 4 mm,如图 2 所示。



图 2 土壤颗粒

Fig. 2 Soil particles

1.4.2 秸秆模型

农业车辆的轮胎和带有小麦秸秆的农田土壤发生接触时,主要受力过程是轮胎压过土壤和秸秆,根据郭俊^[21]的研究得知,小麦秸秆在压缩过程中,秸秆含水率越大,其抗弯强度越大,并且其抗弯强度随加载速率增加呈现先递减后递增的趋势,剪切强度随加载速率增加先减小后增加。

由于小麦秸秆为长条状,需要与土壤颗粒离散元模型有所区别,本文采用球面堆积的方式建立多个相同大小但处于不同位置的球面,即在离散元中将秸秆设置为多颗粒拼接模型。采用 Hertz—Mindlin(no slip)的接触模型描述小麦秸秆粉碎后的力学特性。本研究小麦秸秆仿真模型由 8 个半径为 5 mm 的颗粒堆积而成,长度为 24 mm,如图 3 所示。秸秆其他材料参

数参考相关文献[21]。



图 3 秸秆颗粒

Fig. 3 Straw particles

1.4.3 土壤离散元模型

在进行土壤离散元模型建模时,首先要建立离散元模型外部密闭的几何边界,土壤离散元模型在生成后没有进行完全紧实,土壤颗粒之间并不紧密,所以建立的几何边界的体积要稍大于土壤离散元模型的体积,考虑到本研究中轮胎大小,将几何边界尺寸设置长度为 500 mm、宽度为 1 200 mm 和高度为 400 mm。

农业机械车辆在田间行驶时,由于轮胎与土壤接触面较大以及土壤变形迅速,所以土壤被压实后的下陷量一般小于 40 cm。本研究在建立土壤模型时不考虑深层土壤的力学性质。根据表 2 的仿真参数,在 EDEM 前处理中设定土壤和秸秆的泊松比、密度、弹性模量以及土壤与土壤之间、土壤与秸秆之间、秸秆颗粒之间的接触参数,设置颗粒工厂并选择颗粒数量生成填充。研究发现,时间步越长,计算精度越高,但同时也会导致整体响应出错,所以根据所建立的模型颗粒设置合适的时间步为 20%,仿真时间设置为 20 s,在 EDEM 中处理时点击 Create 按钮,土壤颗粒在指定的密闭空间区域内迅速下落至建立的几何边界内并生成离散元模型。初始生成的离散元土壤模型排列是松散的,需要施加重力使得土壤颗粒压实达到自然密实状态,图 4 为自然状态的土壤模型。



图 4 土壤离散元模型

Fig. 4 Soil discrete element model

建立含秸秆土壤模型需要结合田间土壤实际压实的情况,秸秆还田后,由于耕地深度分布在较浅的土层,秸秆并不会到达土壤较深的土层,所以根据秸秆还田实际情况将含秸秆土壤整体模型分为两层,上层厚度 300 mm 为含秸秆土壤,下层 100 mm 为纯土壤颗粒。根据所需的秸秆含量,采用颗粒随机动态生成的方式,建立秸秆含量为 30% 的含秸秆土壤离散元模型,如图 5 所示。

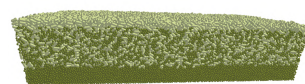


图 5 含秸秆土壤混合模型

Fig. 5 Soil-straw mixed model

1.4.4 整体模型

将轮胎模型以 .step 的文件格式导入 EDEM 中,

在 EDEM 中调整好轮胎模型在 2 种土壤模型上的初始位置,使农业车辆轮胎仿真模型与田间土壤离散元模型刚好接触并为轮胎模型各组成部分设置材料参数,材料参数参考表 2,从而构建可用于农业车辆轮胎与田间土壤的仿真模型,如图 6 所示。土壤表面颗粒未与轮胎发生接触时,由于重力存在的原因,所有静止的土壤颗粒和秸秆有向下运动的趋势。

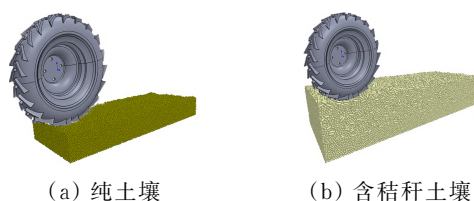


图 6 仿真模型

Fig. 6 Simulation model

对整个模型施加重力,为轮胎设置平动和转动运动仿真参数。考虑到农业车辆轮胎实际作业情况,将轮胎行驶速度设为 1 m/s,转动角速度为 360 deg/s。时间步长为 10%,仿真时间为 5 s。按照上述运动参数设置,分别在 2 种土壤模型上进行轮胎行驶运动模拟仿真。在轮胎滚动结束后,在 EDEM 后处理中对仿真结果进行查看处理,得到轮胎在 2 种土壤上运动后的土壤颗粒运动变化图和土壤应力变化曲线。

由图 7 和图 8 可知,随着轮胎接触土壤,接触面积逐渐增大,土壤垂直位移从土壤表面逐渐向土壤内部延续,轮胎在垂直加载过后的土壤模型上留下了清晰的行驶轨迹。行驶时间越久,部分土壤和秸秆颗粒开始进行横向移动。经过轮胎行驶加压后的土壤和秸秆离散元颗粒发生了沉陷以及移动,轮胎下方的土壤和秸秆颗粒受到轮胎与土槽边界的挤压会向其他方向进行移动。

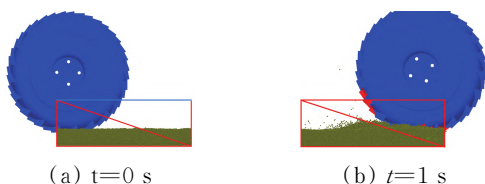


图 7 纯土壤—轮胎运动仿真

Fig. 7 Tire motion simulation straw

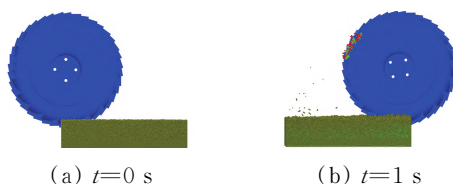


图 8 含秸秆土壤—轮胎运动仿真

Fig. 8 Simulation of soil tire motion with straw

车辆行驶速度的快慢会影响轮胎运动时与地面的接触面面积,进而影响土壤的下陷量。为研究轮胎不同速度工况下土壤变形量以及土壤应力变化,保持其他

仿真条件不变,并考虑农业车辆实际作业时的行驶速度,将轮胎速度分别设为 1 m/s、3 m/s、5 m/s,进行不同速度工况下轮胎在 2 种土壤模型上的行驶过程模拟。

图 9 和图 10 为 2 种土壤模型分别在轮胎行驶速度为 1 m/s、3 m/s、5 m/s 时的应力仿真变化结果。通过土壤和秸秆颗粒的变化云图描述可知,随着轮胎行驶速度的提高,土壤的横向位移和侧向位移也逐渐增大,土壤颗粒和秸秆颗粒飞溅的可能性增大,其位移变化也较大;随着轮胎不断前进,土壤和秸秆颗粒逐渐堆积,与实际农业车辆进行作业时的土壤聚集现象一致。由图 9 和图 10 可知,在相同速度下,含秸秆土壤位移变化小于纯土壤位移变化,在土壤内部加入秸秆后,土壤应力传递深度降低。

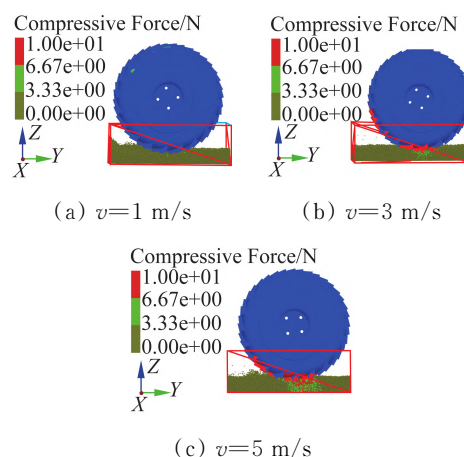


图 9 纯土壤不同速度条件下应力变化云图

Fig. 9 Cloud map of stress changes in pure soil under different velocity conditions

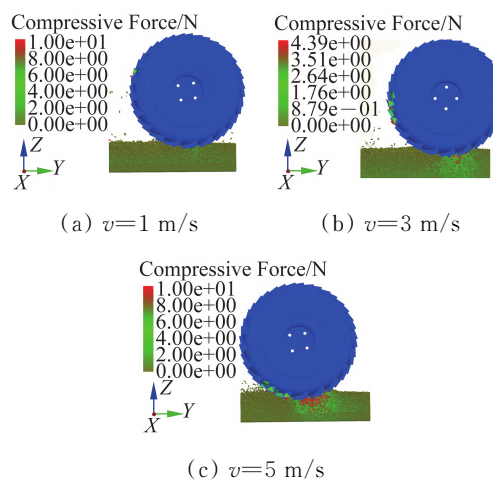


图 10 含秸秆土壤不同速度条件下应力变化云图

Fig. 10 Cloud map of stress changes in soil containing straw under different velocity conditions

图 11 和图 12 分别是轮胎行驶速度为 1 m/s、3 m/s 和 5 m/s 时,2 种土壤模型中全部颗粒的总应力与不同速度的关系变化曲线。由图 11 和图 12 对比可知,轮胎正下方土壤因轮胎前进迅速聚集在一起,在轮胎

速度较小时,土壤和秸秆颗粒随着轮胎不断行驶而逐渐增大,随着轮胎继续前进至某一时刻,颗粒应力迅速减小。这与实际农业车辆作业时,轮胎行驶过后土壤压力回弹的现象相符。随着轮胎速度增大,2种土壤模型的颗粒应力变化趋势相似,即先迅速增长后进入平稳状态。当轮胎速度为3 m/s时,2种土壤模型的总应力与速度的关系对比曲线如图13所示。由曲线变化趋势可知,当轮胎速度相同时,含秸秆土壤模型的颗粒应力变化明显小于纯土壤模型的颗粒应力变化,加入秸秆后,深层土壤所受压力减小。

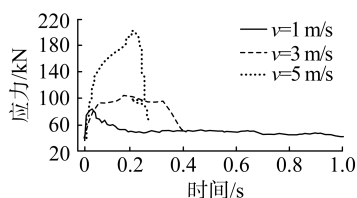


图 11 不同速度下纯土壤模型颗粒应力变化

Fig. 11 Compressive force change of pure soil model particles at different velocities

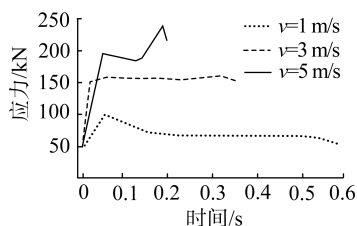


图 12 不同速度下含秸秆土壤模型颗粒应力变化

Fig. 12 Compressive force change of straw-inclusive soil model particles at different velocities

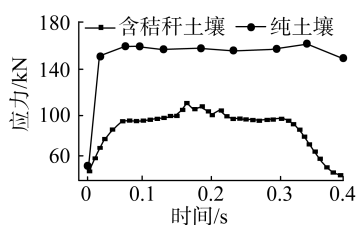


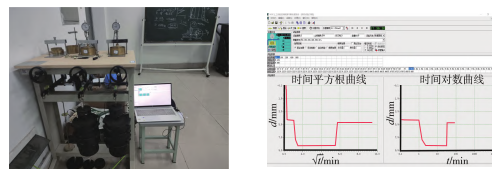
图 13 相同速度下2种土壤模型颗粒总应力变化对比曲线

Fig. 13 Comparison curve of total stress change of particles in two soil models at the same velocity

2 土壤压缩试验

试验样本土壤为湿地土壤,使用WG型单杠杆固结仪(中、低压)对取回的土壤样品进行快速单轴压缩试验,同时利用NSIF土工试验控制数据采集处理系统监测土壤因压实产生的变化,测定土的变形和压力,对土壤压缩后孔隙比与加载压力的关系以及试样高度变化进行评价。

试验装置如图14所示,主要有WG型单杠杆固结仪、NSIF土工试验控制数据采集处理系统、百分表(2个)、数据采集器、各级砝码。



(a) WG 型单杠杆固结仪 (b) 数据采集系统

图 14 试验装置

Fig. 14 Experimental setup

分别对纯土壤试样和含秸秆土壤试样施加50 kPa、100 kPa、200 kPa、400 kPa、800 kPa的载荷,观察土壤内部应力变化。试验数据如表3和表4所示。随着外界载荷的增加,土壤初期被快速压缩,压缩模量在200 kPa加载以后迅速增大。压缩系数随着加载载荷的增大而逐渐减小。压缩模量越大,土壤的压缩性越小。

表 3 不含秸秆土壤压实试验数据

Tab. 3 Soil compaction data without straw

承压板面积 /cm ²	施加载荷 /kPa	压缩模量 /MPa	压缩系数 /MPa ⁻¹
40.24	0	0	0
40.24	50	0.275	7.142
40.24	100	2.880	0.682
40.24	200	4.754	0.413
40.24	400	8.541	0.230
40.24	800	15.243	0.129

表 4 含秸秆土壤压实试验数据

Tab. 4 Compaction test data of soil containing straw

承压板面积 /cm ²	施加载荷 /kPa	压缩模量 /MPa	压缩系数 /MPa ⁻¹
40.24	0	0	0
40.24	50	0.227	8.707
40.24	100	2.134	0.920
40.24	200	3.411	0.528
40.24	400	6.949	0.275
40.24	800	13.614	0.144

根据NSIF数据采集系统得到2种土壤的孔隙比与外界载荷的压缩曲线以及试样土的试样高度变化,如图15和图16所示。

由图15可知,在不同垂直载荷下,含秸秆土壤在受到压实时,孔隙比的变化比不含秸秆的土壤孔隙比变化较小,含秸秆土壤在受到压实时,孔隙比较大,表明在土壤内部加入秸秆后,土壤内部疏松,压实变化小。由图16可知,随着加载载荷的增大,2组试样土壤高度逐渐减小,在400 kPa之后,高度变化减缓。在相同载荷加载时,含秸秆土壤试验高度减小程度小于对照组的高度变化。综上所述,在土壤内部加入秸秆可以缓解因机械压实造成的土壤压缩。

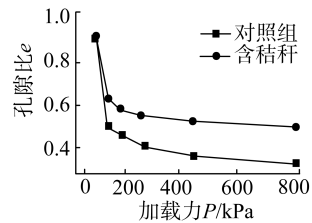


图 15 孔隙比与加载力之间的关系曲线

Fig. 15 Relationship curve between porosity and loading force

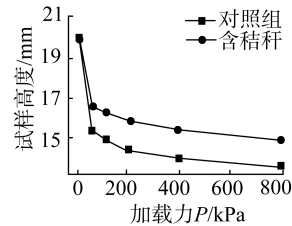


图 16 试样高度变化

Fig. 16 Height variation of the sample

3 结果对比分析

将真实土壤压缩试验结果与仿真结果中的土壤被压缩后变化参数进行对比分析。利用 EDEM 后处理模块中 Tool 工具测量 2 种土壤离散元模型在轮胎行驶前后截面的颗粒位移变化,如图 17 所示。

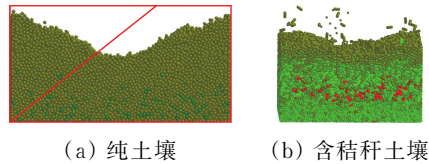


图 17 离散元模型

Fig. 17 Discrete element model

为减少测量误差,分别在 2 种土壤离散元模型上找到五点进行位移测量,如表 5 所示。取 5 次数据平均值得出 2 种土壤离散元模型压实后高度分别为 273.25 mm、313.31 mm,含秸秆土壤下沉量降低 10%。由结果可知,在土壤内部加入秸秆以后,土壤被压实后压缩量明显减小,说明在土壤内部加入秸秆可以缓解土壤压实。

表 5 土壤离散颗粒位移变化

Tab. 5 Changes in discrete particle displacement in soil

序号	位移/mm	
	纯土壤	含秸秆土壤
0	400	400
1	277.26	312.13
2	270.32	314.21
3	273.60	313.58
4	273.28	312.14
5	271.44	314.47

图 18 为 2 种土壤离散元模型经过压实仿真、轮

胎滚动加载后在土壤模型表面上形成的土壤压实应力变化对比。可以看出,轮胎在土壤表面通过后,2 种土壤垂直方向应力变化量,随着时间变化,相同深度的土壤应力变化量随之增加,载荷越大,土壤压实效果越明显。施加相同载荷时,含秸秆土壤的应力变化趋势与纯土壤的应力变化趋势类似,但含秸秆土壤在受到垂直载荷加载时,其应力变化明显小于纯土壤应力变化,表明在土壤内部加入秸秆可以缓解土壤压实。土壤—轮胎相互作用模型生成的土壤压力—时间曲线与室内土壤压实试验生成的土壤压力—时间曲线变化趋势相似,表明轮胎—土壤相互作用仿真结果与试验结果具有良好的一致性。

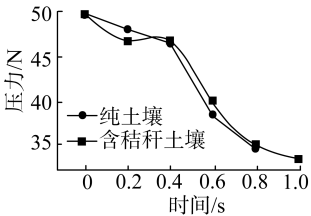


图 18 2 种土壤仿真应力—时间曲线

Fig. 18 Simulated stress-strain curves for two types of soils

4 结论

1) 根据土壤与秸秆的物理特性以及土壤与土壤、土壤与秸秆、秸秆颗粒之间的接触参数建立纯土壤离散元模型和含秸秆土壤模型。

2) 对轮胎—土壤模型上施加运动设置,使轮胎在两种土壤模型上进行滚动,得到轮胎—土壤模型仿真结果。通过分析得到,两种土壤模型受到压实后,轮胎下方土壤颗粒和秸秆有明显的下陷以及移动;含秸秆土壤模型沉陷量与纯土壤模型沉陷量降低 10%;随着车轮速度的增大,土壤的横向位移和侧向位移逐渐增大;在受到相同载荷条件时,含秸秆土壤模型应力变化小于纯土壤模型的应力变化。

3) 通过对田间土壤和小麦秸秆进行取样,分别进行含秸秆土壤和纯土壤压实试验。2 组试验结果表明,孔隙比随着加载载荷的增大逐渐减小,压缩模量随着加载载荷的增大而逐渐增大。由 2 组土壤孔隙比、压缩模量、压缩系数等参数的对比结果可知,在土壤内部加入秸秆,可以改变土壤的孔隙比,使土壤不易被压缩。在土壤固结仪中进行的土壤压缩试验数据与仿真数据结果进行对比具有良好的一致性。综合试验结果证明所提出在土壤内部加入秸秆可以缓解土壤压实的可行性,减少土壤的板结和硬化,也有利于资源循环利用。

参 考 文 献

- [1] Zeng Z, Ma X, Chen Y, et al. Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM) [J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197: 104505.
- [2] 宋禹莹, 郑炫, 刘进宝, 等. 土壤—耕作工具相互作用建模分析研究现状[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(4): 250—257.
- Song Yuying, Zheng Xuan, Liu Jinbao, et al. Research status of modeling analysis of soil-tillage tool interaction [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(4): 250—257.
- [3] Shi Y, Xin S, Wang X, et al. Numerical simulation and field tests of minimum-tillage planter with straw smashing and strip laying based on EDEM software [J]. Computers Electronics in Agriculture, 2019, 166: 105021.
- [4] Zeng Z, Chen Y. Simulation of straw movement by discrete element modelling of straw-sweep-soil interaction [J]. Biosystems Engineering, 2019, 180: 25—35.
- [5] 郭茜. 藤茎类秸秆切割机理与性能试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- Guo Qian. Experimental research on the cutting mechanism and performance of rattan straw [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017.
- [6] 张李嫻. 玉米秸秆力学特性的离散元建模方法研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- Zhang Lixian. Research on discrete element modeling method of corn stalk's mechanical characteristics [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [7] 张锋伟, 宋学锋, 张雪坤, 等. 玉米秸秆揉丝破碎过程力学特性仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 58—65.
- Zhang Fengwei, Song Xuefeng, Zhang Xuekun, et al. Simulation and experiment on mechanical characteristics of kneading and crushing process of corn straw [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(9): 58—65.
- [8] Michael M, Vogel F, Peters B. DEM—FEM coupling simulations of the interactions between a tire tread and granular terrain [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2015, 289: 227—248.
- [9] Muir Wood D, Diambra A, Ibraim E. Fibres and soils: A route towards modelling of root-soil systems [J]. Soils and Foundations, 2016, 56(5): 765—778.
- [10] Acquah K, Chen Y. Discrete element modelling of soil pressure under varying number of tire passes [J]. Journal of Terramechanics, 2023, 107: 23—33.
- [11] Zheng Z, Zang M, Chen S, et al. An improved 3D DEM—FEM contact detection algorithm for the interaction simulations between particles and structures [J]. Powder Technology, 2017, 305: 308—322.
- [12] Zheng Z, Zang M, Chen S, et al. A GPU—based DEM—FEM computational framework for tire-sand interaction simulations [J]. Computers & Structures, 2018, 209: 74—92.
- [13] 郑祖美, 臧孟炎, 曾海洋. 基于离散元与有限元耦合的充气轮胎沙土路面行驶性能仿真方法研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(9): 1822—1829.
- Zheng Zumei, Zang Mengyan, Zeng Haiyang. Analysis of travel performance of pneumatic tire on unpaved road by discrete-finite element method [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(9): 1822—1829.
- [14] 郑祖美. 基于GPU并行的DEM—FEM方法研究及其在越野轮胎沙地行驶性能分析中的应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- Zheng Zumei. Research on DEM—FEM method based on GPU parallel and its application in the analysis of off-road tire driving performance in sand [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [15] Lü Y, Yang S, He Y, et al. Macro-mesoscopic dynamic responses of turfy soil under multilevel cyclic loading with different waveforms based on the discrete element method [J]. Computers Geotechnics, 2022, 151: 104961.
- [16] 黄元昊, 全腊珍, 胡广发, 等. 多种材料与不同含水率土壤的离散元接触参数标定[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(3): 98—109.
- Huang Yuanhao, Quan Lazhen, Hu Guangfa, et al. Calibration of discrete element contact parameters for various materials and soils with different moisture content [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2024, 26(3): 98—109.
- [17] Van Den Akker J J H. SOCOMO: A soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity [J]. Soil and Tillage Research, 2004, 79(1): 113—127.
- [18] Smith R, Ellies A, Horn R. Modified Boussinesq's equations for nonuniform tire loading [J]. Journal of Terramechanics, 2000, 37(4): 207—222.
- [19] 梁守智, 张丹秋. 橡胶工业手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1993.
- [20] 尚莉丽. 大功率拖拉机轮胎与土壤相互作用研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2023.
- Shang Lili. Study on the interaction between high-power tractor tire and soil [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2023.
- [21] 郭俊. 秸秆还田机—锯齿刀和旋耕刀作业性能研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017.

- Guo Jun. Research on working performance of serrated and rotary blades based on straw returning the operation performance of straw returning to field machine [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [22] 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.
- [23] 张锐, 李建桥, 李因武, 等. 部件复杂表面影响土壤扰动行为的离散元宏观分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(5): 1218—1223.
Zhang Rui, Li Jianqiao, Li Yinwu, et al. DEM macroscopic and mesoscopic analysis in disturbed behavior of soil acted by part with complex surface [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(5): 1218—1223.
- [24] 熊平原, 杨洲, 孙志全, 等. 基于离散元法的旋耕刀三向工作阻力仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 113—121.
Xiong Pingyuan, Yang Zhou, Sun Zhiqian, et al. Simulation analysis and experiment for three-axis working resistances of rotary blade based on discrete element method [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(18): 113—121.
- [25] 周华. 稻油轮作区秸秆还田深旋埋联合耕整机试验与仿真研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.
Zhou Hua. Experimental and simulation study on combined tillage machine for deep rotary burying of straw incorporation into soil in rice-rape rotation area [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.
- [26] 丁启朔, 任骏, Adam B E, 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, Adam B E, 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.
- (上接第 274 页)
- [12] 宗望远, 黄木昌, 肖洋铁, 等. 板栗收获拍打式落果装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 1—10.
Zong Wangyuan, Huang Muchang, Xiao Yangyi, et al. Design and experiment of the fruit-beating dropping device for chestnut harvesters [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(18): 1—10.
- [13] 王永昌. 饲料加工过程中水分变化及其控制[J]. 饲料工业, 2012, 33(19): 1—8.
- [14] 李洪成. 锤片式粉碎机工作性能影响机理与优化研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
Li Hongcheng. Study on influence mechanism and optimization of the hammer mill grinding performance [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.
- [15] GB/T 40976—2021, 灸用艾绒[S].
- [16] 何为, 唐斌, 薛卫东. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [17] 孙延成, 牟孝栋, 王志伟, 等. 构树收获机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(7): 26—32.
Sun Yancheng, Mou Xiaodong, Wang Zhiwei, et al. Design and experiment of Broussonetia papyrifera harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(7): 26—32.
- [18] 李明刚, 杨会清. 基于响应面法的棉秆粉碎还田试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(5): 10—18.
Li Minggang, Yang Huiqing. Cotton stalk chopping and returning to field based on response surface method [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(5): 10—18.
- [19] 王荣炎, 于慧爽, 陈安迪, 等. 气动翻转梳齿式菊花采摘装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 184—193.
Wang Rongyan, Yu Huishuang, Chen Andi, et al. Design and test of pneumatic flipping comb-type chrysanthemum picking device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 184—193.
- [20] 陈宇, 张涛, 林通, 等. 基于EDEM的废菌棒粉碎分离机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(9): 104—111.
Chen Yu, Zhang Tao, Lin Tong, et al. Design and test of waste bacteria stick crushing separator based on EDEM [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(9): 104—111.