中国农业大学学报 2026,31(12):235-247
Journal of China Agricultural University http://zgnydxxb.ijournals.cn

闫建国,李垚泰,郭庚龙,王利娟. 农用轮胎-土壤耦合作用对土壤压实变形的影响[J]. 中国农业大学学报,2026,31(12):235-247.
YAN Jianguo, LI Yaotai, GUO Genglong, WANG Lijuan. Effects of agricultural tire-soil coupling on soil compaction and deformation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2026, 31(12): 235-247.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2026.12.18

农用轮胎-土壤耦合作用对土壤压实变形的影响

闫建国 李垚泰 郭庚龙 王利娟*
(内蒙古农业大学 机电工程学院,呼和浩特 010018)

摘 要 农用人字形轮胎滚动过程中,土壤压实响应难以准确表征,现有耦合模型对区域性土壤参数的适应性也显不足。本研究以内蒙古呼和浩特黄河流域砂壤土为对象,通过休止角试验标定Edinburgh elasto-plastic adhesion(EEPA)模型的关键参数,构建了12.4 R24人字形轮胎-砂壤土的多柔体动力学-离散元法双向耦合模型,并经土槽试验验证,实现了轮胎动力学响应、土壤参数演化与压实行为的统一描述。结果表明:1)标定所得适用于砂壤土轮胎-土壤互作仿真的离散元参数集,休止角仿真值与实测值相对误差仅为2.22%;2)所建12.4 R24农用人字形轮胎-土壤双向MFBD-DEM耦合模型,仿真结果与土槽试验结果变化趋势一致,能够较准确地表征轮胎滚动条件下的土壤应力传递与轮胎沉陷过程;3)响应回归分析显示,平均土壤应力增量和轮胎沉陷量两个回归模型均达到极显著水平($P<0.000\,1$),决定系数分别为0.928 3和0.951 2;垂向载荷与通过次数为影响压实和沉陷的主导因素;提高行驶速度可明显减弱压实效应,升高胎压则主要加剧浅层应力集中。本研究结果可为农用轮胎花纹参数优化与农田土壤压实调控提供参考。

关键词 土壤压实;参数标定;双向耦合分析;农用人字形轮胎;沉陷量
中图分类号 S220.3 **文章编号** 1007-4333(2026)12-0235-13 **文献标志码** A

Effects of agricultural tire-soil coupling on soil compaction and deformation

YAN Jianguo, LI Yaotai, GUO Genglong, WANG Lijuan*
(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China)

Abstract Accurately characterizing soil compaction responses during the rolling of agricultural herringbone tires remains challenging, and existing coupled models often lack adaptability to region-specific soil parameters. To address this issue, this study focused on sandy loam from the Yellow River Basin in Hohhot, Inner Mongolia. Key parameters of the Edinburgh elasto-plastic adhesion(EEPA) contact model were calibrated through angle-of-repose tests, and a multibody flexible dynamics-discrete element method coupled model for a 12.4 R24 herringbone-tread tire-sandy loam system was constructed and validated through soil-bin tests. The results showed that: 1) the calibrated discrete element parameter set was applicable to tire-soil interaction simulations in sandy loam, with a relative error of only 2.22% between the simulated and measured angles of repose; 2) the established bidirectional MFBD-DEM coupled model for the 12.4 R24 agricultural herringbone-tread tire-soil system produced simulation results consistent with the trends observed in the soil-bin tests, and could accurately characterize soil stress transmission and tire sinkage during tire rolling; 3) response regression

收稿日期:2026-04-19;接受日期:2026-07-15
基金项目:国家自然科学基金项目(52362056);内蒙古自然科学基金项目(2023LHMS05006,2025MS05131);内蒙古农业大学青年教师科研能力提升计划项目(BR230126);内蒙古自治区"一流学科研究专项"(YLXKZX-NND-046)
第一作者:闫建国(ORCID:0009-0009-1951-9252),副教授,主要从事农业车辆地面力学研究,E-mail:yanyjg@imau.edu.cn
通讯作者:王利娟(ORCID:0009-0003-7888-8847),副教授,主要从事农业车辆地面力学研究,E-mail:wanglijuan@imau.edu.cn

analysis revealed that both the level ($P<0.000\ 1$), with coefficients of determination of 0.928 3 and 0.951 2, respectively; vertical load and pass number were identified as the dominant factors affecting compaction and sinkage; increased travel speed significantly mitigated the soil compaction effect, whereas elevated tire inflation pressure primarily intensified stress concentration in the shallow soil layer. These findings offer a basis for the optimization of agricultural tire tread parameters and the regulation of farmland soil compaction.

Keywords soil compaction; parameter calibration; bidirectional coupled analysis; agricultural lug tire; sinkage

土壤机械压实是制约农业可持续发展的重要因素,与农机具反复进地作业密切相关[1-3]。农机多次进地碾压会破坏土壤结构,影响作物根系生长和耕层质量。明确农用轮胎与土壤相互作用机理,对优化行走系统、减轻耕层压实具有重要意义。

农用轮胎几何形状复杂,所接触的松散土壤具有大变形、破坏和运移的特征,使其作用机理研究面临诸多挑战。人字形轮胎花纹凸块显著,滚动时引发的轮胎-土壤接触行为及非均匀应力分布进一步增加了压实过程表征与分析的难度。传统土槽试验虽可直接获取土壤应力和轮胎沉陷等宏观量,但周期长、工况扩展困难,且难以观察颗粒尺度运动。离散元法(Discrete element method,DEM)能够描述土壤颗粒的接触、堆积和流动行为,多体动力学(Multibody dynamics,MBD)适于表征轮胎结构及其运动响应,二者耦合为轮胎-土壤互作研究提供了新的手段[4-5]。

在DEM建模中,接触参数标定直接决定仿真结果的可靠性。休止角对静摩擦因数、滚动摩擦因数等较为敏感,可灵敏反映颗粒材料宏观堆积特性,试验简便、重复性较好,因而常作为土壤离散元参数标定的依据[6-8]。对于具有一定黏聚性和弹塑性的砂壤土,休止角不仅与颗粒堆积形态有关,也与颗粒间接触、滑移和重排过程密切相关,适合作为Edinburgh elasto-plastic adhesion(EEPA)接触模型参数标定的基础宏观响应指标。

近年来,动力学-离散元耦合方法已逐步应用于农业过程模拟和土壤机械互作研究[9-12],但在农用轮胎-土壤相互作用领域,区域性土壤参数仍缺乏系统标定,参数标定与耦合仿真之间的适应性不足,模型试验验证不充分,削弱了模型的针对性和预测精度。

本研究以内蒙古呼和浩特黄河流域砂壤土为对象,采用休止角试验和多阶段优化方法标定EEPA接触模型关键参数,在此基础上建立12.4 R24农用人字形轮胎-土壤、Multi-flexible-body dynamics-discrete element method(MFBD-DEM)双向耦合模型并加以验证,进而分析载荷、行驶速度、轮胎胎压和通过次数对土壤平均应力增量及轮胎沉陷量的影响,旨在为农用轮胎参数优化以及农田土壤压实调控提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤基本性质

1.1.1 土壤类型鉴定

供试土壤采自中国内蒙古自治区呼和浩特市黄河流域农田(40°51′ N,111°42′ E),经5.000、0.200和0.075 mm套筛测定粒径组成。取1 000 g新鲜土样自然风干后振筛,粒径≥5 mm、5.0～0.2 mm、0.200～0.075 mm和<0.075 mm颗粒的质量分数分别为2.8%、38.7%、40.7%和17.7%。依据国际制土壤质地三角图判定,该土壤为砂壤土。

1.1.2 土壤基本物理参数测定

采用烘干法测定土壤含水率。称取3份100 g土芯样品,于(100±3)℃下烘干6 h,烘后质量分别为90.3、90.5和90.3 g,平均含水率为10.67%,计算见式(1):

$$H_t=\frac{W_{ts}-W_{tg}}{W_{tg}}\times 100 \tag{1}$$

式中:H_t为土壤含水率,%;W_{ts}为烘干前质量,g;W_{tg}为烘干后质量,g。

采用ST-MXZ-1型动态摩擦系数测试仪测定土壤-土壤和土壤-橡胶静摩擦系数(图1),滚动摩擦系数结合试验结果与文献范围确定[6]。测试时分别设置上、下颗粒板模拟不同接触条件:上、下颗粒板分别为固定在滑块上的上接触板和固定在仪器平台上的下接触板。测定土壤-土壤摩擦系数时,两块接触板表面均黏附并压实供试砂壤土颗粒;测定土壤-橡胶摩擦系数时,将下接触板替换为

轮胎橡胶材料板，以模拟土壤颗粒与橡胶表面的相对滑移接触。设定滑移行程为40 mm，每组重复8次，测得砂壤土-土壤静摩擦系数和滚动摩擦系数范围分别为0.2～0.8和0.05～0.20，土壤-橡胶静摩擦系数和滚动摩擦系数范围分别为0.20～0.85和0.05～0.20。

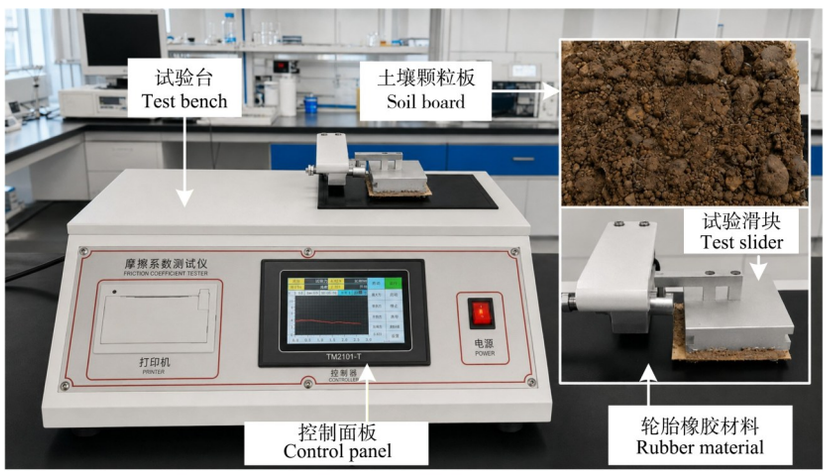


图1　动态摩擦系数测试仪

Fig. 1　Dynamic friction coefficient tester

采用漏斗法测定休止角[6-8]。称取1 000 g新鲜土样倒入底部封闭的漏斗中，颗粒稳定后打开挡板，使土壤自由落于水平板上，形成稳定锥体。重复5次，测得平均休止角为36.98°。

1.2　土壤接触模型确定

本研究采用EDEM-RecurDyn双向耦合方法模拟轮胎-土壤相互作用，其中EDEM用于描述砂壤土颗粒体系，RecurDyn描述轮胎及轮轴系统的运动与变形。考虑供试土壤具有黏聚性和弹塑性特征，选用EEPA模型作为DEM接触模型。该模型通过

$$f_n=\begin{cases}f_0+k_1\delta^n & if\\ f_0+k_2(\delta^n-\delta_p^n) & if\\ f_0-k_{adh}\delta^n & if\end{cases}$$

$$f_{nd}=\beta_n V_n \tag{4}$$

式中：k_1为原始加载刚度参数；k_2为卸载和重新加载刚度参数；k_a为黏附支路刚度参数；f_0为初始接触力，N；$k_{adh}\delta^n$为衰减刚度参数；n为刚度指数；f_{hys}为滞回弹簧力，N；f_{nd}为法向阻尼力，N；u为单位法向量；V_n为相对法向速度，m/s；β_n为法向缓冲系数；δ^n为法向重叠指数；δ_p^n为n次幂的塑性重叠指数。

休止角能较好反映颗粒材料的宏观堆积特征，且对关键接触参数较为敏感，因此将其作为EEPA接触模型参数的初始标定指标。轮胎压实过程涉及土壤颗粒的剪切滑移、重排和竖向压缩变形，仅非线性滞回加载-卸载路径与黏附作用的耦合，能够描述黏性颗粒材料的历史相关变形行为[8]，已广泛用于土壤等黏性散体介质仿真。

在EEPA模型中，法向接触力与法向重叠量之间的关系由k_1、k_2和k_a3条路径共同控制。计算见式(2)～(4)。除基础接触参数外，还需设置初始接触力、微观接触表面能、接触塑性比等，以表征颗粒间的黏附、塑性变形及切向接触特性。

$$f_n=(f_{hys}+f_{nd})u \tag{2}$$

$$\begin{aligned}&k_2(\delta^n-\delta_p^n)\geqslant k_1\delta^n\\ &k_1\delta^n>(\delta^n-\delta_p^n)>-k_{adh}\delta^n\\ &-k_{adh}\delta^n\geqslant k_2(\delta^n-\delta_p^n)\end{aligned} \tag{3}$$

凭休止角难以完全评价参数组在实际压实工况下的适用性。为此，在休止角标定的基础上，进一步利用土槽试验测得的土壤应力增量和轮胎沉陷量对耦合模型进行验证。

土壤参数标定按照“Plackett-Burman筛选-最陡爬坡逼近-响应面优化”三步进行。根据前期实测结果[10]，待定参数范围设定为：土壤-土壤静摩擦系数0.2～1.0，土壤-土壤滚动摩擦系数0.05～0.20，土壤-橡胶静摩擦系数0.2～0.8，土壤-橡胶滚动摩擦系数0.05～0.20，土壤泊松比0.2～0.5，微观接触表面能2～14 J/m^2，接触塑性比0.1～0.4，土壤剪

切模量2×10^6～5×10^7 Pa，土壤恢复系数0.2～0.8。

1.3 人字形轮胎-土壤耦合模型建立

1.3.1 轮胎选型

以12.4 R24农用人字形轮胎为对象，主要结构尺寸和气压-负荷范围参照GB/T 2979—2017《农业轮胎规格、尺寸、气压与负荷》[13]确定。轮胎外直径为114 5 mm，断面宽为315 mm，材料为橡胶，泊松比为0.49，密度为1.14 g/cm^3[14]。

1.3.2 模型建立

依据《橡胶工业设计手册》和《现代轮胎结构设计》中的轮胎断面轮廓设计原则[15]，确定12.4 R24轮胎截面轮廓曲线，并将轮胎划分为胎面、带束层、胎体帘布层、轮辋和胎圈等5个组成部分，在RecurDyn中完成有限元网格划分。经网格优化后，共计89 595个单元。花纹深度按三维模型实测值约26 mm；轮辋（rim）设为刚体，胎面、胎体帘布层和胎圈等橡胶结构以柔性体参与多体系统求解。柔性体变形由RecurDyn求解，通过耦合接口影响轮胎-土壤接触面积、接触压力分布和浅层应力集中。

在轮胎有限元模型基础上，进一步构建RecurDyn-EDEM双向耦合模型以模拟滚动过程中的轮胎-土壤相互作用。在RecurDyn中，对轮胎模型施加重力、垂向载荷和驱动函数，以重现实验工况。轮轴定义为沿车轴方向的转动副，其余子系统分别设置为轴向、行驶方向和竖直方向的移动副。在参考工况（3 kN，2 km/h）下，轮胎依次经历自由下落、短时加速和稳定滚动阶段；通过调整驱动函数，还可模拟其他工况下的往复滚动。

在EDEM中建立2 000 mm×600 mm×450 mm土槽模型，土壤颗粒采用半径4 mm的单球颗粒近似，颗粒密度取2 650 kg/m^3；采用雨淋法以60 000粒/s的速率生成900 000个颗粒，沉降稳定后形成有效土层高度约400 mm。随后将RecurDyn中的轮胎表面导出为Wall文件，经耦合接口导入EDEM，并协调两求解器的计算时间和步长比，完成双向耦合计算（图2）。

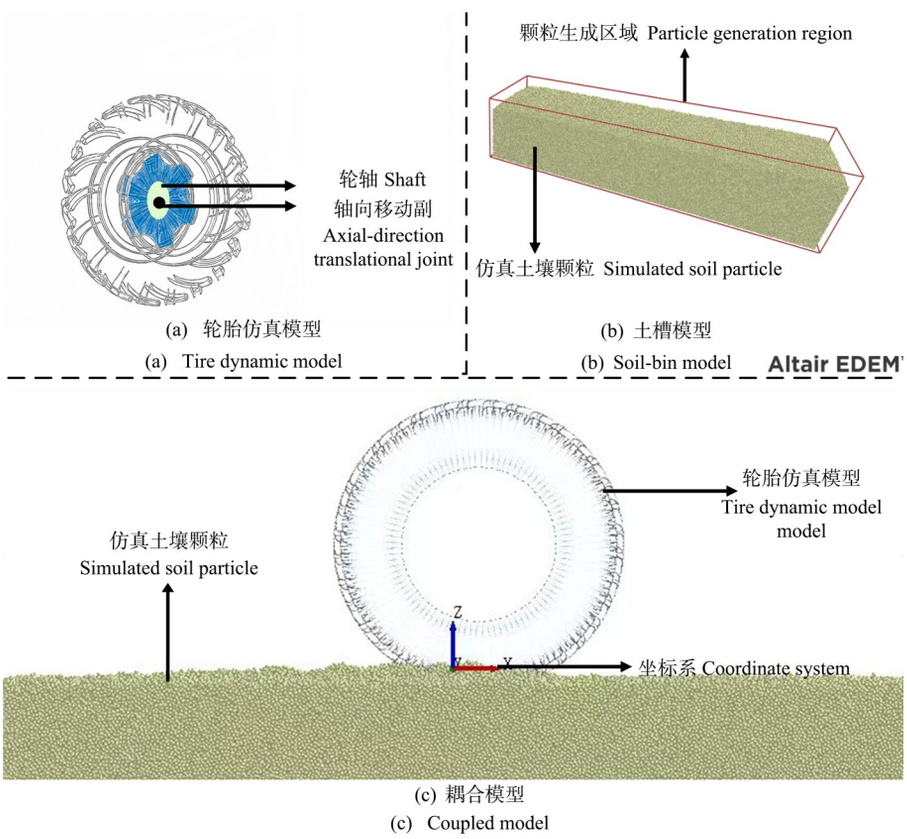


图2 轮胎-土壤耦合模型建立

Fig. 2 Development of the coupled tire-soil model

1.4　单因素及响应面试验设计

为分析载荷、轮胎胎压、行驶速度和通过次数对土壤应力及沉陷的影响，首先设计单因素试验。速度水平设为2、4、6和8 km/h，胎压水平为60、80、100和120 kPa，载荷设置为3、4、5和6 kN，通过次数为1、3、5和7次。各因素水平分别依据农业拖拉机典型轴载、推荐胎压范围、常见田间作业速度及重复交通工况确定[16]，初始工况设为垂向载荷3 kN、胎压120 kPa、行驶速度2 km/h、通过次数为1次。

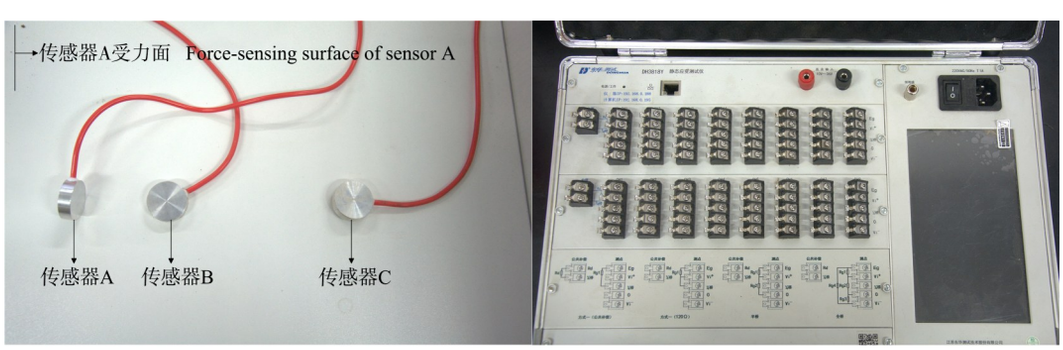
在单因素试验基础上，为定量评价各因素的影响程度，速度、胎压、载荷和通过次数的编码范围分别取2～8 km/h、60～120 kPa、3～6 kN和1～7次，并设置5个中心点以提高试验精度。

1.5　模型验证指标及土槽试验方法

模型验证以土壤应力和轮胎沉陷量为指标。土壤应力采用土压力传感器和DH3818Y数据采集系统测定。传感器A置于轮胎行驶印迹边缘，用于测量土壤的侧向应力；传感器B、C测力面朝上，分别置于轮胎行驶轨迹中轴线以及轮胎边缘、平行于地表，用于测量土壤竖直方向的应力。考虑到多数农田土壤压实集中在0～35 cm土层，传感器在10、20和30 cm深度处分层布置，每层设置A、B、C 3类测点各1个，共计9个土压力传感器测量3个深度处的应力。

传感器埋设采用分层开槽、定位安装和原土回填的方法。沿轮胎行驶轨迹开挖宽度略大于传感器外形尺寸的窄槽，将传感器放置于预定深度并校正测力面方向，再以原槽土分层回填、轻压整平并静置，使传感器周围土体尽可能恢复至试验前状态。测量前将传感器示数置零，轮胎通过过程中记录各测点应力变化曲线，以轮胎通过前后的应力差值表征土壤应力增量；同一工况下各测点结果取平均值，即为该工况下的平均土壤应力增量。虽然传感器埋设不可避免会造成局部土体扰动，但所有测点均采用相同埋设工艺，并通过试验前归零、多点平均及试验-仿真趋势对比等方式，降低局部扰动对测量结果的影响。

轮胎沉陷量采用示踪块法测定。在轮胎行进路径上埋设与土壤密度相近的8 mm×8 mm×8 mm PVC立方体，以土槽测试段起点和侧壁基准线建立纵向、横向和高程坐标系；轮胎通过前后分别测量示踪块顶部中心点坐标，垂向坐标差值即为该测点沉陷量。每一工况沿轮胎行驶方向布置多个示踪块，剔除明显受扰动的异常点后取平均值作为轮胎沉陷量，如图3和图4所示。



(a) 传感器布置　　(b) DH3818Y数据采集系统

(a) Sensor configuration　　(b) DH3818Y Data acquisition system

A：侧向应力传感器，位于轮胎行驶印迹边缘；B：竖向应力传感器，平行于地表，位于轮胎行驶轨迹中轴线；C：竖向应力传感器，平行于地表，位于轮胎边缘

A: Lateral stress sensor, located at the edge of the tire contact imprint; B: Vertical stress sensor, parallel to the ground surface, located along the centerline of the tire path; C: Vertical stress sensor, parallel to the ground surface, located at the edge of the tire imprint

图3　土壤应力测量装置

Fig. 3　Instruments used for soil-stress measurement

土槽试验在农业轮胎测试台架上开展。该系统由机架、动力系统、驱动轮、从动轮机构、转向机构、牵引机构、加载装置和数据采集系统组成（图5）。通过柴油发动机-液压传动系统向驱动轮提供可调节动力。转向轮配备负载传感器，动力输出轴与驱动轮轴之间安装扭矩传感器。该平台由



(a) 试验前
(a) Before the test

(b) 试验后
(b) After the test

图 4 轮胎通过前后示踪块布置情况

Fig. 4 Tracer arrangement before and after tire passage

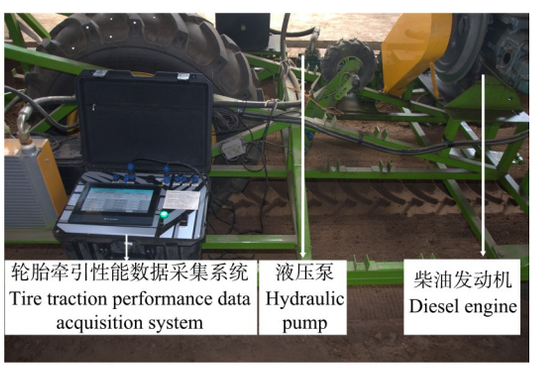


图 5 土槽验证试验用农业轮胎测试台架

Fig. 5 Agricultural tire testing rig used in soil-bin validation

本研究团队前期开发，户外试验证实其运行稳定、符合设计规范[17]。

试验前，利用深松器对土槽内土壤进行松碎和均匀混拌，按目标含水率分层均匀喷水后自然静置 2 周，使水分在土层内充分运移，接近田间含水状态。试验前再次松土并覆盖塑料薄膜保湿；每组试验前后分别在测试段不同位置及 10、20 和 30 cm 深度处采集土样，用烘干法测定含水率，以检查土层水分分布的一致性。若不同深度含水率差异较大，则重新进行喷水、混拌和静置。试验过程中仅对表层失水进行少量补水，补水后静置，以减小表层喷水对深层含水率分布的影响[18-20]。

土槽有效作业段总长 25 m，划分为 8 m 加速段、12 m 测试段和 5 m 减速段。试验过程中，台架在加速段达到目标速度，在测试段以设定载荷和恒定速度通过，并按需要沿同一路径重复碾压，最后在减速段停车。

2 结果与分析

2.1 土壤参数标定结果

2.1.1 Plackett-Burman 试验与最陡爬坡试验

方差分析表明，土壤-土壤静摩擦系数、土壤-土壤滚动摩擦系数和土壤泊松比对休止角具有显著影响（$P<0.05$），其余因素影响不显著，因此，后续优化仅保留上述 3 个关键因素。以此三因素为试验因素、休止角为响应值，开展最陡爬坡试验，为响应面精确寻优提供参数中心。

2.1.2 Box-Behnken 响应面试验

基于上述中心点范围，进一步采用 Box-Behnken 设计进行精确优化。回归分析结果表明，模型极显著（$P<0.000\ 1$），失拟项不显著（$P=0.198\ 2>0.050\ 0$），决定系数 $R^2=0.94$，调整决定系数为 0.88，变异系数为 7.8%，*Adeq Precision* 为 16.84，表明模型拟合度较高、预测能力良好。由式(5)优化得到砂壤土关键参数：土壤-土壤静摩擦系数 0.65，土壤-土壤滚动摩擦系数 0.08，土壤泊松比 0.45。结果表明，砂壤土宏观响应主要受颗粒间摩擦特性和接触变形特性共同控制。最终土壤参数见表 1。

$$\begin{aligned}\theta_{\text{Sandy loam soil}} = {} & 36.99 - 0.76X_1 - 0.58X_2 + \\ & 0.71X_5 - 1.2X_1^{\,2} - 0.90X_2^{\,2} - \\ & 0.80X_5^{\,2} - 0.40X_1X_2 + \\ & 0.30X_1X_5 - 0.20X_2X_5\end{aligned} \tag{5}$$

式中：X_1 为土壤-土壤静摩擦系数；X_2 为土壤-土壤滚动摩擦系数；X_5 为土壤泊松比。

2.1.3 标定验证

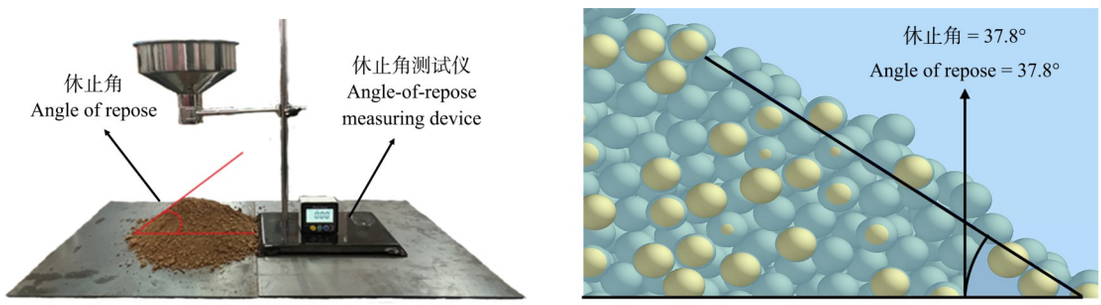
砂壤土实测休止角为 36.98°，仿真值为 37.80°，

表 1　最终土壤参数

Table 1　Key soil parameters used in the simulation

参数 Factors	砂壤土 Sandy loam soil	参数 Factors	砂壤土 Sandy loam soil
土壤-土壤静摩擦系数 Soil-soil static friction coefficient	0.65	微观接触表面能/(J/m²) Microscopic contact surface energy	13.0
土壤-土壤滚动摩擦系数 Soil-soil rolling friction coefficient	0.08	接触塑性比 Contact plasticity ratio	0.40
土壤-橡胶静摩擦系数 Soil-rubber static friction coefficient	0.80	土壤剪切模量/Pa Soil shear modulus	5×10^7
土壤-橡胶滚动摩擦系数 Soil-rubber rolling friction coefficient	0.20	土壤恢复系数 Soil restitution coefficient	0.40
土壤泊松比 Soil Poisson's ratio	0.45		

相对误差为 2.22%(图 6),说明标定参数能够较好地再现实测土体宏观堆积状态。随后将该参数组用于轮胎-土壤耦合仿真,并以土槽试验中不同深度土壤应力增量和轮胎沉陷量为验证指标,进一步评价其对轮胎压实工况下土体变形与沉陷响应的表征能力。



(a) 休止角实测　(a) Measured angle of repose　　(b) 休止角仿真　(b) Simulated angle of repose

图 6　休止角实测与仿真对比

Fig. 6　Comparison between measured and simulated angles of repose

2.2　耦合模型验证与响应分析

2.2.1　平均土壤应力增量的试验与仿真结果

图 7 为单因素条件下不同深度平均土壤应力增量的试验与仿真结果,图 8 给出了试验车辙与仿真车辙形貌对比。10、20 和 30 cm 处响应分别表示对应深度处的平均应力增量。总体而言,仿真与试验变化趋势一致。

载荷对平均土壤应力的影响最为显著。当载荷由 3 kN 增至 6 kN 时,10、20 和 30 cm 深度处土壤应力分别增加 96.6%、96.7% 和 42.4%,表明较大载荷主要强化了浅层和中层土壤的应力传递。通过次数对土壤应力也具有明显累积效应。从 1 次增至 7 次时,10、20 和 30 cm 深度土壤应力分别增加 34.5%、37.0% 和 99.4%。浅层土壤在快速初始压实后趋于饱和,而深层土壤表现出较明显的滞后增长。随着行驶速度由 2 km/h 增至 8 km/h,10、20 和 30 cm 深度土壤应力分别降低 68.5%、51.1% 和 38.2%,说明速度升高缩短了轮胎与土壤接触时间,从而削弱了应力传递,且浅层响应更为敏感。轮胎胎压增大主要增强浅层土壤应力。当胎压由 60 kPa 提高至 120 kPa 时,10 cm 深度应力增加 33.8%,而 20 cm 和 30 cm 深度仅分别增加 14.8% 和 2.7%,表明高胎压使接触应力更集中于近地表区域。综上,载荷和通过次数是控制土壤应力的关键因素,提高速度和降低胎压有利于减小应力。

2.2.2　轮胎沉陷量的试验与仿真结果

不同载荷、胎压、通过次数和速度条件下轮胎沉陷量的试验与仿真结果如图 9 所示。载荷由 3 kN

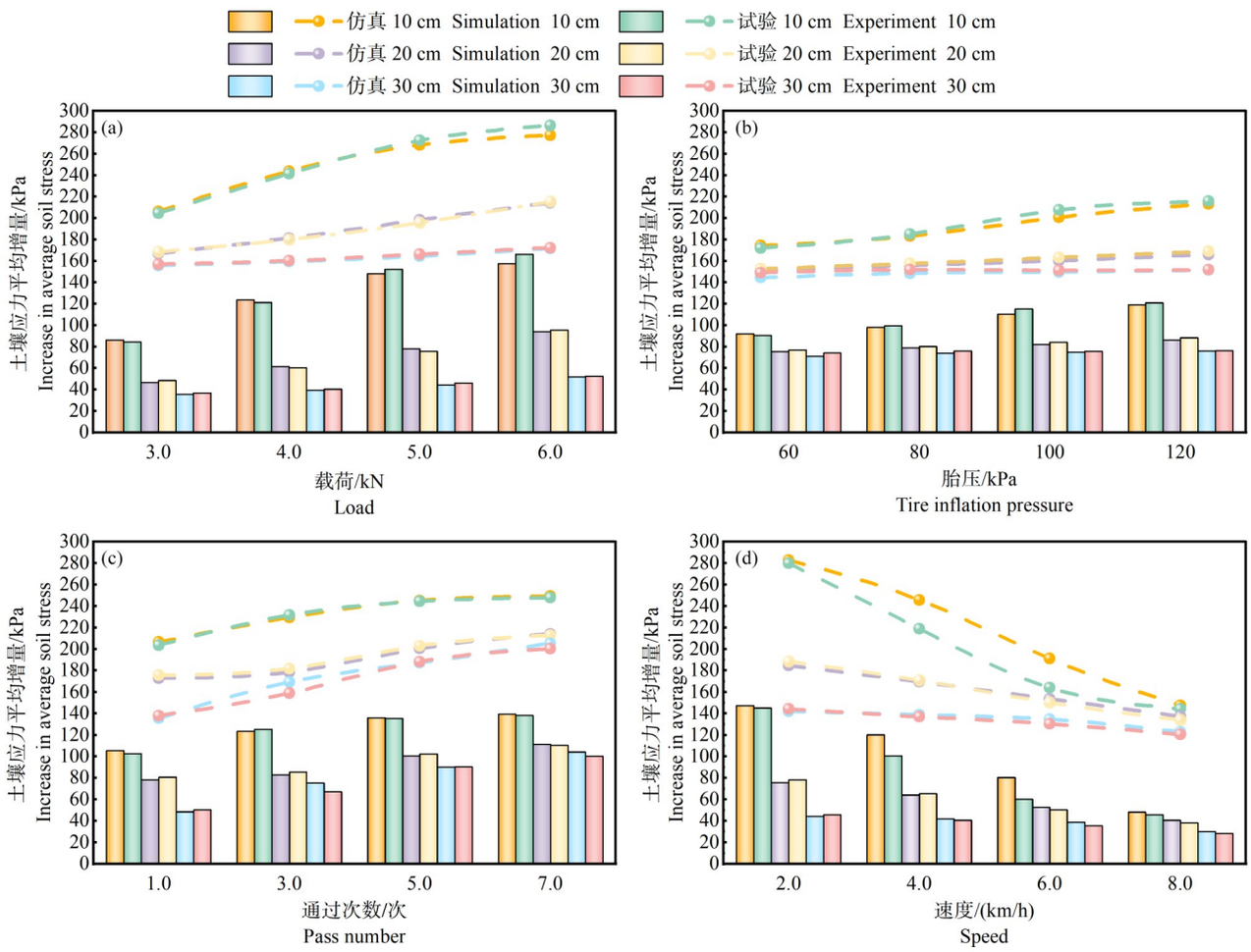
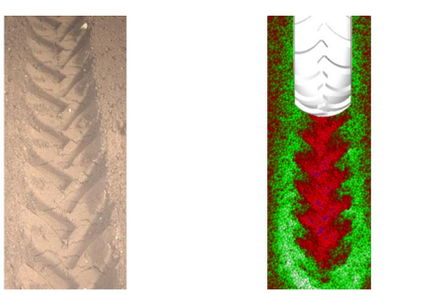


图 7 不同载荷(a)、胎压(b)、通过次数(c)和行驶速度(d)下 10、20、30 cm 深度土壤平均应力增量的试验与仿真结果

Fig. 7 Experimental and simulation results of average soil stress increment at depths of 10, 20 and 30 cm under different loads (a), tire inflation pressures(b), pass numbers(c) and travelling speeds(d)



(a) 实测车辙 (a) Measured rut

(b) 仿真车辙及颗粒扰动分布 (b) Simulated rut and particle disturbance distribution

图 8 试验与仿真车辙形态对比

Fig. 8 Comparison of rut morphology between the experiment and simulation

增至 6 kN 时，轮胎沉陷量增加 25.1%；随着通过次数由 1 次增至 7 次，沉陷量增加 32.6%，说明载荷和通过次数是控制沉陷的主要因素。相比之下，速度由 2 km/h 升至 8 km/h 时，沉陷量降低 18.7%；胎压由 60 kPa 增至 120 kPa 时，沉陷量增加 23.7%，其原因在于轮胎垂向刚度增大后接地面积减小，单位面积压力增大。总体来看，载荷和通过次数是影响轮胎沉陷量的主导因素，而速度和轮胎胎压主要通过改变轮胎-土壤接触状态影响沉陷响应。

2.2.3 响应面回归分析结果

依据 Box-Behnken 试验结果，建立平均土壤应力增量 R_1 和轮胎沉陷量 R_2 关于速度(A)、胎压(B)、载荷(C)和通过次数(D)的二次回归方程，见式(6)和式(7)。

$$\begin{aligned} R_1^2 = {} & 104.1 + 10.03A + 9.31B + 16.22C + \\ & 8.76D + 1.25AB - 0.82AC + 0.94AD + \\ & 0.67BC + 0.56BD + 1.03CD - \\ & 0.48A^2 + 0.35B^2 - 0.22C^2 + 0.41D^2 \end{aligned} \tag{6}$$

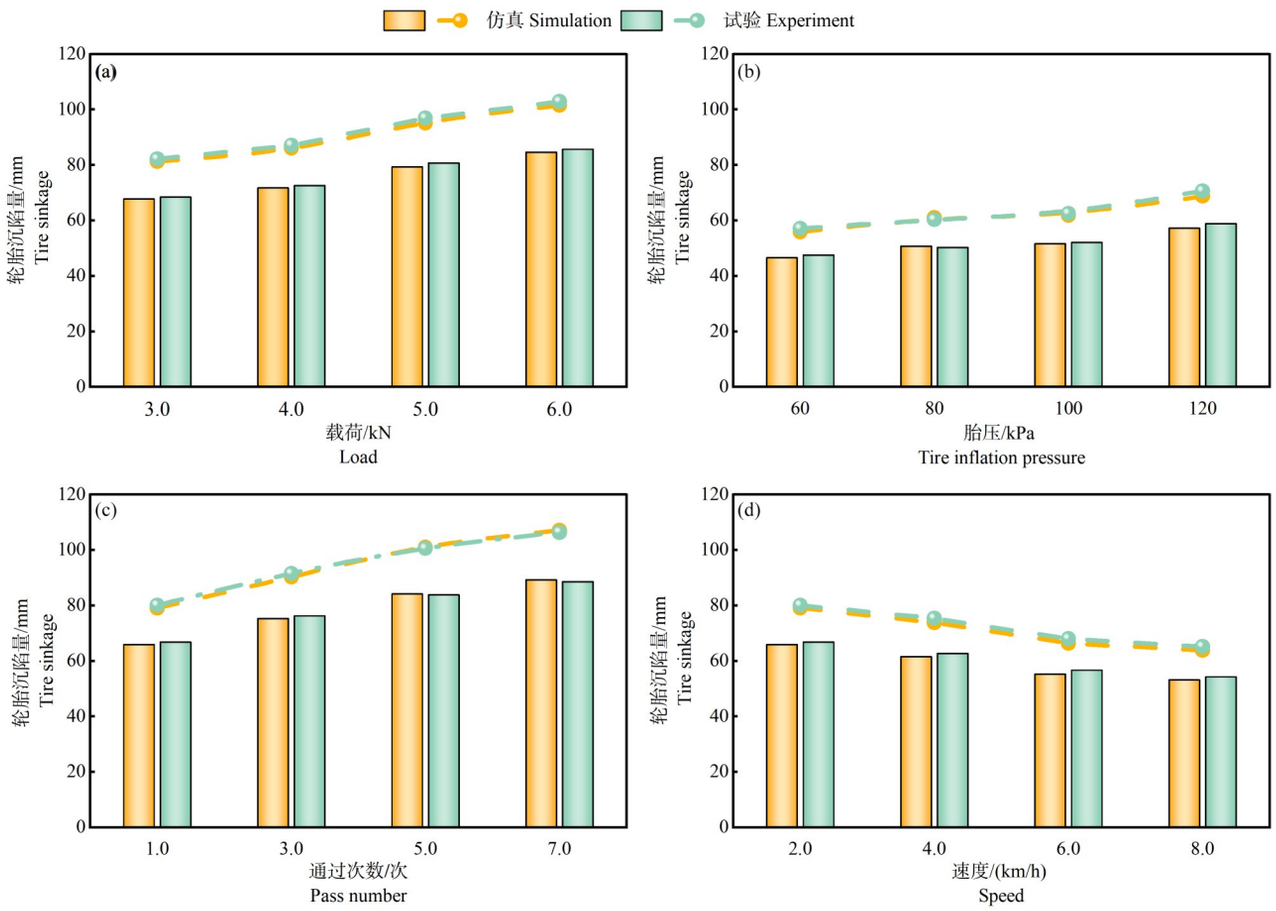


图 9　不同载荷(a)、胎压(b)、通过次数(c)和行驶速度(d)下轮胎沉陷量的试验与仿真结果

Fig. 9　Experimental and simulation results of tire sinkage under different loads(a), tire inflation pressures(b), pass numbers(c), and travelling speeds(d)

$$R_2^2 = 61.8 - 4.90A + 5.72B + 6.22C + 7.54D - 0.73AB + 0.58AC - 0.45AD + 0.36BC + 0.52BD - 0.28CD - 0.62A^2 + 0.43B^2 + 0.19C^2 - 0.54D^2 \quad (7)$$

式中：A 为行驶速度因素；B 为轮胎胎压因素；C 为垂向载荷因素；D 为轮胎通过次数因素；AB、AC、AD、BC、BD 和 CD 为两因素交互项；A^2、B^2、C^2 和 D^2 为二次项；R_1 为平均土壤应力增量，R_2 为轮胎沉陷量。

表 2 表明，R_1 和 R_2 回归模型的模型项 P 值均小于 0.000 1，达到极显著水平，说明响应值与因素间存在显著回归关系。R_1 和 R_2 的决定系数分别为 0.928 3 和 0.951 2，调整决定系数分别为 0.853 6 和 0.902 4，表明模型拟合良好；其变异系数分别为 7.25% 和 3.92%，*Adeq Precision* 分别为 14.102 和 17.923，均远大于 4；失拟项 P 值分别为 0.215 3 和 0.178 4，均大于 0.05，说明模型失拟不显著，拟合合理。

一次项中载荷 C 和通过次数 D 对 2 个响应值均具有极显著影响，而速度 A 和胎压 B 未达到显著水平。对平均土壤应力增量的影响顺序为载荷＞通过次数＞速度＞轮胎胎压；对轮胎沉陷量的影响顺序为通过次数＞载荷＞轮胎胎压＞速度。

3　讨　论

3.1　作业参数对土壤应力传递的影响

本研究中，垂向载荷对平均土壤应力增量的影响最为明显。载荷由 3 kN 增至 6 kN 时，10、20 和 30 cm 深度土壤应力分别增加 96.6%、96.7% 和 42.4%，表明载荷增大后，轮胎传递到土体内部的压力明显增强，且这种影响不仅集中于表层，也能传递至 20 cm 土层。胎压由 60 kPa 提高至 120 kPa 时，10 cm 深度土壤应力增加 33.8%，而 20 和 30 cm 深度仅分别增加 14.8% 和 2.7%，说明胎压主要改

表2 因素方差分析结果

Table 2 Analysis of variance of the factors

方差来源 Source of variance	R_1均方 R_1 mean square	R_1 F值 R_1 F-value	R_1 P值 R_1 P-value	R_2均方 R_2 mean square	R_2 F值 R_2 F-value	R_2 P值 R_2 P-value
模型 Model	982.3	11.26	<0.000 1	188.5	18.23	<0.000 1
A	135.2	1.55	0.232 6	23.8	2.30	0.150 2
B	246.5	2.83	0.113 5	31.6	3.06	0.100 5
C	1872.6	21.47	0.000 3	392.4	37.94	<0.000 1
D	1240.8	14.23	0.001 8	528.7	51.13	<0.000 1
AB	28.6	0.33	0.575 2	5.2	0.50	0.490 1
AC	91.8	1.05	0.322 0	12.4	1.20	0.291 0
AD	15.2	0.17	0.683 6	3.6	0.35	0.564 2
BC	42.3	0.48	0.497 5	8.1	0.78	0.390 2
BD	9.6	0.11	0.744 2	2.3	0.22	0.645 1
CD	67.5	0.77	0.393 1	14.6	1.41	0.254 0
A^2	8.2	0.09	0.763 5	1.5	0.15	0.707 3
B^2	12.4	0.14	0.712 2	3.2	0.31	0.586 5
C^2	4.7	0.05	0.821 0	1.8	0.17	0.683 1
D^2	18.9	0.22	0.649 1	5.4	0.52	0.481 5
残差 Residual	87.2			10.3		
失拟项 Lack of fit		1.86	0.215 3		2.12	0.178 4

注：A表示行驶速度因素；B表示轮胎胎压因素；C表示垂向载荷因素；D表示轮胎通过次数因素；AB、AC、AD、BC、BD和CD表示两因素交互项；A^2、B^2、C^2和D^2表示二次项；R_1表示平均土壤应力增量，R_2表示轮胎沉陷量。

Note: A denotes the travel speed factor; B denotes the tire inflation pressure factor; C denotes the vertical load factor; and D denotes the tire pass number factor; AB, AC, AD, BC, BD, and CD denote two-factor interaction terms; A^2, B^2, C^2, and D^2 denote quadratic terms; R_1 denotes the average soil stress increment, and R_2 denotes tire sinkage.

变近地表土层的接触应力。杨敏丽等[21]在东北黑土区研究中发现，超低压人字形轮胎较普通人字形轮胎可使5、10、15和20 cm土层紧实度分别降低11.38%、7.97%、5.36%和4.55%，压实减缓作用随土层加深逐渐减弱；Arvidsson等[22]也指出，胎压主要影响浅层土壤应力，而轮载对深层土壤应力的影响更明显。本研究结果与上述研究结论基本一致，但由于本研究采用轮胎通过前后的应力增量作为评价指标，其变化幅度高于土壤紧实度、容重等压实后指标，说明应力增量指标对轮胎-土壤接触过程中的受力变化具有更高的灵敏度。

速度和通过次数对应力传递的影响主要体现在作用时间和累积效应上。速度由2 km/h增至8 km/h时，10、20和30 cm深度土壤应力分别降低68.5%、51.1%和38.2%，说明轮胎与同一位置土体的接触时间缩短后，土壤颗粒持续受压和重排的时间减少，应力传递随之减弱。其中，8 km/h工况虽略高于常规田间作业速度，但该工况下土壤应力仍呈较明显的下降趋势，表明在较高行驶速度下轮胎对土壤的扰动程度可得到有效缓解，有助于在回归模型中更完整地描述速度因素的边际效应。通过次数由1次增至7次时，10、20和30 cm深度土壤应力分别增加34.5%、37.0%和99.4%，其中30 cm土层增幅最大。Farhadi等[23]研究认为，多次

通过会持续加深车辙，提高速度则可降低车辙深度。本研究与其变化趋势一致，但进一步表现出重复碾压对深层土壤应力的滞后累积作用。浅层土壤在前期碾压后较快压密，后续可压缩空间减小；深层土壤则在多次应力传递下逐步压密，因此30 cm土层应力增幅更为明显。

3.2　作业参数对轮胎沉陷量的影响

轮胎沉陷量与土壤应力增量总体呈相似变化趋势，但二者反映的压实过程并不完全相同。载荷由3 kN增至6 kN时，轮胎沉陷量增加25.1%；胎压由60 kPa增至120 kPa时，沉陷量增加23.7%；速度由2 km/h增至8 km/h时，沉陷量降低18.7%。这些变化幅度均小于对应因素对土壤应力增量的影响，说明沉陷量不是轮胎瞬时受力的直接反映，而是土体压缩、颗粒重排、侧向位移和轮胎接地状态共同作用后的综合变形结果。Alkhalifa等[24]发现，胎压降低37%可使轮胎接触长度增加26%～39%，载荷增加可使软土接地面积增加约14%，但车辙深度和土壤变形体积对载荷及胎压的响应并不显著。与其他结果相比，砂壤土工况下胎压和载荷变化均引起了轮胎沉陷量增加，说明人字形轮胎滚动作用下沉陷量对接地状态变化仍具有一定响应，这种差异可能与土壤类型、轮胎花纹形式及滚动压实测量方式有关。

通过次数对轮胎沉陷量的影响更为突出。通过次数由1次增至7次时，沉陷量增加32.6%，高于载荷和胎压的影响幅度，Farhadi等[23]研究发现，随着通过次数增加，车辙深度持续增大，且气胎轮在较高载荷下首遍通过对总车辙深度的贡献降低，这一结果表明，重复通过会持续促进土体变形累积。本研究中沉陷量随通过次数增加而增大，与其“多次通过促进车辙累积发展”的规律一致，说明轮胎沉陷量更能反映重复碾压下土体塑性变形的累积效应。

3.3　轮胎-土壤耦合模型适用性分析

基于砂壤土EEPA接触模型参数和12.4 R24农用人字形轮胎柔性模型构建的农用人字形轮胎-砂壤土MFBD-DEM双向耦合模型，可实现轮胎柔性变形、土壤颗粒运动、土壤应力传递和轮胎沉陷过程的同步表征。相比单独采用土槽试验，该模型既能获得轮胎沉陷、车辙形态和土壤应力等宏观响应，也能补充轮胎滚动过程中土体受压、扰动和压密等细观信息；相比单一DEM或刚性轮胎模型，该模型能够考虑胎体变形对接地面积、接触压力分布和土体压实响应的影响，可为不同作业参数下轮胎-土壤互作分析、轮胎花纹结构优化和土壤压实调控提供建模基础。

本研究仅针对内蒙古黄河流域砂壤土进行了标定与验证，所得参数体系与耦合模型对黏土、盐碱土等其他土类的适用性仍有待验证。同时模型将土壤视为均质介质，未考虑层化结构、根系、秸秆残留和含水率空间变异等田间复杂因素[25]。后续研究可在不同土类、不同含水率及非均质土层条件下进一步检验参数体系与耦合模型的适用范围，并将轮胎花纹结构、牵引性能和压实控制纳入统一分析框架，从而增强模型对实际农田作业场景的解释能力。

4　结　论

1）以内蒙古呼和浩特黄河流域砂壤土为研究对象，基于休止角试验和EDEM仿真对EEPA接触模型关键参数进行标定。经Plackett-Burman筛选、最陡爬坡试验和Box-Behnken优化，确定了适用于供试砂壤土的关键接触参数组合；仿真休止角与实测休止角相对误差为2.22%，表明标定参数能够较好地表征砂壤土的宏观堆积特性。

2）基于标定参数，建立了12.4 R24农用人字形轮胎-土壤MFBD-DEM双向耦合模型，并通过土槽试验进行验证。仿真结果与试验结果在土壤应力变化、轮胎沉陷和车辙形态方面趋势基本一致，表明该模型能够较好地描述农用人字形轮胎滚动作用下砂壤土的应力传递和压实变形过程。

3）载荷和通过次数是影响土壤压实和轮胎沉陷的主导因素：载荷主要增强浅层和中层土壤应力传递，通过次数表现出明显的累积压实效应；提高行驶速度可在一定程度上缓解压实，升高胎压则主要加剧浅层（10 cm以内）土壤应力集中。研究结果可为农用轮胎结构参数优化、低压通行作业策略、农机底盘载荷分配和牵引控制提供参考，并为降低农田土壤压实风险、提高农机在松软土壤条件下的通过性和作业稳定性提供依据。

参考文献　References

[1]　Frene J P, Pandey B K, Castrillo G. Under pressure: Elucidating soil

compaction and its effect on soil functions[J]. *Plant and Soil*, 2024, 502(1): 267-278

[2] Kulju S, Lindeman H, Tähtikarhu M, Nikama J, Kuva J, Ala-Ilomäki J, Hyväluoma J. Dynamics and consequences of compaction process in agricultural soil under vehicular loading-High-sampling-rate measurements and structural analyses[J]. *Soil and Tillage Research*, 2026, 260: 107139

[3] Peters A, Germer K, Kraft M, Lorenz M. Assessing soil compaction risk: Identifying the optimal measure of effective load in multi-pass conditions[J]. *Journal of Terramechanics*, 2026, 123: 101125

[4] Vanderhasselt A, D'Hose T, Sneyders M, Cornelis W. Effects of road- *vs.* Field-recommended tyre inflation pressures and small variations in soil moisture content on traffic-induced soil compaction during seedbed preparation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2024, 241: 106109

[5] 庞靖, 林晓君, 陈松涛, 耿令新, 周浩, 金鑫. 离散元法中所用土壤参数测量及标定方法研究[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(18): 6-11
Pang J, Lin X J, Chen S T, Geng L X, Zhou H, Jin X. Study on measurement and calibration methods of soil parameters used in the discrete element method[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(18): 6-11 (in Chinese)

[6] Shokanbi A, Jasoliya D, Untaroiu C. Parameter identification of soil material model for soil compaction under tire loading: Laboratory *vs. in-situ* cone penetrometer test data[J]. *Agriculture*, 2025, 15(20): 2142

[7] Deng X, Wu W C, You J W, Jiang R, Li M L, Li J, Tao Y F, Cheng H, Zhou W, Deng F, Chen Y, Ren W J, Lei X L. Calibration of the Edinburgh Elasto-Plastic Adhesion contact model for modelling clay-moist soil with high moisture content[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, 237: 110518

[8] Maraveas C, Tsigkas N, Bartzanas T. Agricultural processes simulation using discrete element method: A review[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, 237: 110733

[9] Xie D B, He J X, Liu T, Liu C, Zhao G, Chen L Q. Establishment and validation the DEM-MBD coupling model of flexible straw-Shajiang black soil-walking mechanism interactions[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 224: 109203

[10] Weng X X, Xi X B, Shi Y J, Zhang R H. A tractor tyre rut depth model based on DEM-MBD coupling simulation for improved tillage depth measurement [J]. *Biosystems Engineering*, 2026, 262: 104361

[11] 宋禹莹, 郑炫, 刘进宝, 杨怀君, 李帆, 胡赫岩. 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 Y Y, Zheng X, Liu J B, Yang H J, Li F, Hu H Y. Research status of modeling analysis of soil-tillage tool interaction[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 45(4): 250-257 (in Chinese)

[12] 高照, 景元书, 高晨, 蒋一飞, 贾仁浩, 刘正国, 张子杰, 李晓鹏, 刘建立. 土壤压实曲线参数模型的对比研究[J]. 土壤, 2025, 57(1): 179-186
Gao Z, Jing Y S, Gao C, Jiang Y F, Jia R H, Liu Z G, Zhang Z J, Li X P, Liu J L. Comparative study of soil compaction curve parameter models[J]. *Soils*, 2025, 57(1): 179-186 (in Chinese)

[13] GB/T 2979—2017. 农业轮胎规格、尺寸、气压与负荷[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017
GB/T 2979—2017. Size designation, dimensions, inflation pressure and load capacity for agricultural tyres[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017 (in Chinese)

[14] 闫建国, 田涛, 王利娟. 基于有限元分析的农用轮胎-土壤耦合作用研究[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2024, 45(5): 47-57
Yan J G, Tian T, Wang L J. Coupling effect of agricultural tires and soil based on finite element analysis[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition*, 2024, 45(5): 47-57 (in Chinese)

[15] 机械电子工业部洛阳拖拉机研究所. 拖拉机设计手册-上册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994
Luoyang Tractor Research Institute, Ministry of Machine-Building and Electronics Industry. *Tractor Design Manual-Volume I*[M]. Beijing: China Machine Press, 1994 (in Chinese)

[16] 辛振祥, 邓涛, 王伟. 现代轮胎结构设计[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011
Xin Z X, Deng T, Wang W. *Modern Tire Structure Design*[M]. *Beijing: Chemical Industry Press*, 2011 (in Chinese)

[17] 李佳耀. 农用轮胎牵引性能测试装置设计与试验[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2024
Li J Y. Design and test of traction and performance test device for agricultural tire[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024 (in Chinese)

[18] 高晨, 李晓鹏, 刘毅仁, 贾仁浩, 张红霞, 刘建立. 农田土壤压实过程及模型研究进展[J]. 土壤, 2024, 56(1): 1-9
Gao C, Li X P, Liu Y R, Jia R H, Zhang H X, Liu J L. Processes and modelling of soil compaction in farmland: A review[J]. *Soils*, 2024, 56(1): 1-9 (in Chinese)

[19] Bai M Y, Wang X L, Zhuang H Y, Zhao W Q, Zhou W F. Influence of tire pass on soil stress transfer and particle cohesion *via* DEM simulation[J]. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 2025, 49: e0240198

[20] Fanigliulo R, Pochi D, Grilli R, Benigni S, Scutaru D, Fornaciari L. Comparative tests of two tire models for agricultural tractors: Soil compaction, tractive performance and energy requirements [J]. *Environments*, 2026, 13(3): 150

[21] 杨敏丽, 彭健, 金剑, 杨晓, 宋正河, 李栋. 不同农用轮胎对东北黑土区土壤压实的影响[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 85-93
Yang M L, Peng J, Jin J, Yang X, Song Z H, Li D. Influence of agricultural tire technology innovation on soil compaction in the black soil Region of Northeast China[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(6): 85-93 (in Chinese)

[22] Arvidsson J, Keller T. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1): 284-291

[23] Farhadi N, Mardani A, Hosainpour A, Golanbari B, Chamki A N. Impact of vertical load, multiple passes, and speed on rut depth in soil under pneumatic and track wheels[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 27890

[24] Alkhalifa N, Tekeste M Z, Jjagwe P, Way T R. Effects of vertical load and inflation pressure on tire-soil interaction on artificial soil[J]. *Journal of*

Terramechanics, 2024, 112: 19-34

[25] 赵运. 砂壤土环境下深松铲作业侧应力变化规律与土壤扰动关系研究[D]. 合肥：安徽农业大学, 2024

Zhao Y. Study on the relationship between lateral stress change law and soil disturbance of subsoiler operation in sandy loam soil environment[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2024 (in Chinese)

责任编辑：梁芷健



第一作者简介：闫建国，工学博士，副教授，硕士研究生导师。主要研究方向为农用车辆地面力学。入选内蒙古自治区“英才兴蒙”高层次人才、内蒙古自治区三区科技人才选派人员。兼任中国农业工程学会青年科技工作委员会委员、中国农业机械学会地面机器系统分会委员、中国农业机械学会耕作分会委员。担任国家自然科学基金函评专家、教育部学位与研究生教育发展中心评审专家。近年来，主持国家自然科学基金、内蒙古自然科学基金等科研课题9项。以第一或通讯作者发表论文30余篇；授权专利8项、软件著作权2项。



通讯作者简介：王利娟，工学硕士，副教授。主要从事农业智能化工程研究，方向包括农业无人系统与精准作业控制、作物—环境—机器协同建模等。近年来主持和参加国家自然科学基金项目、内蒙古自治区科技计划项目、内蒙古自然科学基金项目、内蒙古自治区直属高校科研项目、内蒙古自治区科技厅中央引导地方项目、内蒙古自然科学技术项目、鄂尔多斯市重点研发计划项目等10项课题。发表论文20余篇，出版专著1部；授权发明专利1项、实用新型专利13项、软件著作权3项。