

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.018

基于 FRIDA 模型的轮胎-土壤接触特性研究

王宪良 王庆杰 李洪文 何进 张翼夫

(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 利用喷涂法与土壤传感器埋设法测试了不同胎压条件下轮胎-土壤接触特性,旨在研究轮胎气压对轮胎-土壤接触特性影响,对 FRIDA 模型在华北一年两熟区壤土区适用性进行评价并优化,结果表明,轮胎-土壤接触面面积 A 的均方根误差(RMSE)从 0.022 m^2 降低到 0.013 m^2 ,标准偏差(Bias)的变化范围为 $-0.19 \sim 0.019 \text{ m}^2$,模拟值与实测值的回归线决定系数为 0.948;轮胎-土壤接触面平均应力及最大应力的模拟值与实测值的相对误差(R_E)均小于 0.1,参数优化及验证后的 FRIDA 模型能够模拟华北一年两熟壤土区轮胎-土壤接触特性。通过田间试验结合优化的 FRIDA 模型,分析轮胎气压、轴载对轮胎-土壤接触特性影响的结果表明,随着轮胎气压增大,接触面形状由矩形到椭圆形再到圆形的变化过程,接触面积减小,应力分布由 M 型应力集中到凸型应力集中变化;随着轴载增大,轮胎-土壤接触面形状由类椭圆形变为矩形,面积增大,应力分布出现严重 M 型应力集中现象,且应力逐渐增大。该研究为合理选择拖拉机胎压及配套农机具提供了理论依据。

关键词: 土壤压实; 轮胎; FRIDA 模型; 土壤应力

中图分类号: S154.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)09-0121-07

Research on Contact Properties of Soil – Tyre Based on FRIDA Model

Wang Xianliang Wang Qingjie Li Hongwen He Jin Zhang Yifu

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A lot of study has shown that the distribution of vertical stress in soil just below a loaded tyre is not uniform, and the stress distribution as well as the size and form of the tyre – soil interface are decisive for the topsoil compaction. The distribution of vertical stress was measured in the contact area for three different tyre inflation pressures (85, 100, 120 kPa) and load of 21 kN. The study took place on a sandy soil in Zhuozhou city, Hebei province. The effects of three different inflation pressures were tested in a randomized block design with three replicates. The vertical stress was measured with load cells located in about 0.1 m soil depth. The collected data in the experiment was used to calibrate and validate the FRIDA model. The validated FRIDA was used to predict soil – tyre contact area and the stress distribution across soil – tyre interface. The validation results showed that the RMSE (root mean square errors) and Bias (standard deviation) for soil – tyre contact area were ranged from 0.022 m^2 to 0.013 m^2 and from -0.19 m^2 to 0.019 m^2 , respectively. The decision coefficient of contact-area between the tested and simulated values was 0.948. The relative errors (R_E) of measured and predicted values of peak stress and mean stress were generally less than 0.1. Results showed that the FRIDA model could predict the soil compaction problems in sandy soil of north China. The FRIDA model was used to simulate the soil – tyre contact properties and stress distribution at different tyre inflation pressures. At the recommended inflation pressure, tyre displayed a stress distribution across the width of the wheel that could be evaluated as optimal with regard to a minimized topsoil compaction. The FRIDA model seems

收稿日期: 2016-04-06 修回日期: 2016-05-13

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503136)

作者简介: 王宪良(1990—),男,博士生,主要从事保护性耕作及土壤压实相关研究,E-mail: 13126728942@126.com

通信作者: 李洪文(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事保护性耕作研究,E-mail: lhwen@cau.edu.cn

very well suited for describing the stress distribution at soil - tyre interface, but should be validated with other soil conditions.

Key words: soil compaction; tyre; FRIDA model; soil stress

引言

随着土地流转和农机购置补贴政策的大力实施,我国农业机械化进程速度加快,大中型农业机械数量迅速增加^[1]。大中型农业机械的田间作业,在提高劳动效率的同时,也会对田间土壤造成持久的压实效应,长期积累导致严重的深层土壤压实,影响农业可持续发展^[2]。研究表明,轮胎-土壤接触特性不仅直接影响表层土壤压实程度,还对土壤应力传递过程有重要影响。深入研究轮胎气压、轴载对轮胎-土壤接触面面积及接触面应力分布特性影响,阐明表层土壤压实机理,对缓解轮胎造成的表层土壤压实具有重要意义^[3-4]。

国内外科研工作者用多种方法对土壤压实进行过研究,国内科研工作者主要集中在土壤特性研究,如李汝苾等^[5]测量了拖拉机压过后的种床土壤物理特性变化,研究了小型四轮拖拉机对土壤的压实。也有部分学者利用模型进行研究,如付晓莉等^[6]以一种改进模型研究了土壤压实过程。国外研究人员主要借助模型研究土壤压实,如 KELLER 等^[7]利用 Soilflex 模型输入农机及土壤参数,输出土壤应力-应变关系来反映土壤压实; HALLONBORG 等^[8]在 1996 年根据轮胎与不同硬度土壤接触第一次提出利用椭圆系列表达轮胎-土壤接触面形状; KELLER 等^[9]在 2005 年第一次提出利用幂函数表示接触面应力分布; JOHNSON 等^[10]利用数学模型表达了土壤应力传递规律,并通过试验验证; SCHJØNNING 等^[11]提出 FRIDA 模型,该模型在 Thomas 模型的基础上,用独立系数 α 、 β 代替 α 、 δ ,使应力分布系数 α 、 β 不受轮胎形状影响,提高了模型应用范围,但没有介绍模型在不同土壤条件下的适应性。

本文通过田间试验,结合轮胎气压对轮胎-土壤接触特性研究,验证 FRIDA 模型在我国北方一年两熟区壤土条件下的适应性,并应用模型研究轴载对轮胎-土壤接触特性的影响,通过土壤应力的方式揭示轮胎气压和轴载对土壤压实的影响,为拖拉机轮胎气压及配套农机具选择提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 FRIDA 模型

FRIDA 模型包括行走装置-土壤接触面形状、行走装置-土壤接触面垂直应力分布、土壤应力传递

规律 3 部分内容^[11]。轮胎-土壤接触面上建立数学坐标系,接触面形状边界用超椭圆曲线模拟,在接触面形状上建立数学坐标系,接触面边界方程主要包括参数如下:接触面短半轴 a ;接触面长半轴 b ;超椭圆系数 n 。参数 a 、 b 决定接触面大小;参数 n 决定接触面形状,参数受轮胎类型及土壤硬度影响^[12]。轮胎-土壤接触面应力分布模型参数包括:沿着轮胎行走方向应力分布影响系数 α ;垂直于轮胎行走方向应力分布影响系数 β 。参数 α 、 β 决定接触面应力分布规律,受轮胎气压、轴载相互作用影响较大^[13]。

模型的创建及试验验证条件为粘聚力较小的砂质土壤。因此为保证研究准确性,必须在我国北方典型壤土条件下对模型进行适用性验证。

1.2 模型优化及验证

模型所需输入初始数据如表 1 所示,其中 $K_r = \ln\left(\frac{p_A}{p_e}\right)$,式中 p_A 为实际气压; p_e 为额定气压。 V_T 为轮胎体积。参数优化采用迭代法,优化过程采用 HANSON 等^[14]描述的模型优化方法。应用均方根误差(RMSE)、标准偏差(Bias)、一致性指标(d)和相对误差(R_E)统计检验标准评估模型模拟效果^[15]。

$$R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (p_i - o_i)^2} \quad (1)$$

$$R_{\text{Bias}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (p_i - o_i) \quad (2)$$

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (o_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^m (|p_i - o_{\text{ave}}| + |o_i - o_{\text{ave}}|)^2} \quad (3)$$

$$R_E = \frac{p_i - o_i}{o_i} \times 100\% \quad (4)$$

式中 R_{RMSE} ——均方根误差 RMSE

R_{Bias} ——标准偏差 Bias

p_i 、 o_i ——第 i 个模拟值、实测值

m ——试验重复次数

o_{ave} ——平均值

1.3 田间试验

1.3.1 试验条件

试验于 2015 年 10 月份在河北省涿州市中国农业科技园农业部耕地保育科学观测实验站进行,地处东经 $115^{\circ}44'$ 、北纬 $39^{\circ}36'$,年平均温度

11.6℃,年降雨量约450 mm,属于暖温带半湿润大陆性季风气候。试验地地势平坦,土壤质地为壤土,pH值7.8,有机质质量分数为1%~1.9%,试验地2011年进行深松,之后实施免耕秸秆覆盖。试验时间是冬小麦免耕播种之后两周,田间土壤含水率为

18.3%。

试验选用拖拉机型号为雷沃欧豹904,后轮轮胎类型为16.9-34,轴载为21 kN,分别设置85、100、120 kPa 3种气压。拖拉机轮胎参数及试验设计如表1所示。

表1 轮胎参数及试验设计

Tab.1 Tyre parameters and experimental design

轮胎气压/ kPa	轮胎外径/ mm	断面宽/ mm	K_r	轮胎变形/ %	V_T / m^3	轴载/ kN	a / m	b / m	n	α	β
85	1485	430	-0.1625	30.7	0.586	21	0.433	0.240	3.256	1.011	0.859
100	1485	430	0	21.3	0.586	21	0.367	0.237	3.140	0.734	0.451
120	1485	430	0.1823	14.8	0.586	21	0.281	0.208	3.000	0.921	0.412

1.3.2 传感器

试验应用的土壤应力传感器为山东科技大学洛赛尔传感技术有限公司生产的TGH型振弦式土压力盒,准确度为0.5% FS,分辨率为0.01% FS,传感器外部为圆柱形,尺寸为 $\phi 90\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ 。传感器采集数据频率为40 ms/次,传感器通过特制数据传输线与DQ-8数据接收站连接,通过WM-201E型数据转换装置将数据导入计算机。

1.3.3 测试方法

采用喷涂法测量轮胎-土壤接触面积。对于轮胎-土壤接触面应力分布,在选定试验地点,将宽度为50 cm、长度为100 cm区域的表层10 cm土壤进行清除,制作100 cm \times 50 cm \times 10 cm土槽。测量沿着轮胎行走方向垂直方向应力分布情况时,将8个传感器平铺安装在土槽中的轴线上;测量垂直于轮胎行走方向应力分布情况时,将5个传感器与中轴线呈30°在土槽中轴线到土槽边缘空间平铺。图1为应力测量过程。



图1 应力测量

Fig.1 Soil stress measurement

1. 数据接收站 2. 数据传输线 3. 数据显示计算机

2 结果与讨论

2.1 轮胎-土壤接触面特性

2.1.1 模型参数 a 、 b 、 n

表2为模型参数优化和验证过程中不同轮胎气压条件下,模型参数 a 、 b 和 A 实测值和模拟值的误差检验。图2为模型参数优化和验证过程中不同轮

胎气压条件下,模型参数 a 、 b 和 A 的实测值和模拟值。由表2可知,模型参数优化验证过程中参数 a 的RMSE从0.013 m降低到0.007 m,Bias的变化范围为-0.012~-0.003 m;参数 b 的RMSE从0.026 m降低到0.021 m,Bias的变化范围为-0.023~0.017 m;面积 A 的RMSE从0.022 m²降低到0.013 m²,Bias的变化范围为-0.019~0.019 m²;各参数一致性指标(d)均在0.77以上。这说明不同气压下,模型参数及模拟计算轮胎-土壤接触面积值与实测值拟合程度较好。图2表明模型参数优化验证过程中,各参数及面积模拟值与实测值的点均匀分布在1:1线附近, a 、 b 和 A 模拟值与实测值的回归线决定系数分别为0.793、0.960和0.948,回归线斜率大都接近于1(分别为0.9011、0.9861和0.9793),说明该模型能够很好地模拟我国华北一年两熟区轮胎-土壤接触面积。不同轮胎气压条件下,模型中的参数优化结果见表3。

表2 率定和验证过程中不同胎压下模型参数的RMSE、Bias和 d 值

Tab.2 RMSE、Bias and d values of model parameters with different inflation pressures during calibration and validation processes

模型参数	轮胎气压/kPa								
	85			100			120		
	RMSE	Bias	d	RMSE	Bias	d	RMSE	Bias	d
a	0.013 m	-0.003 m	0.88	0.008 m	-0.012 m	0.84	0.007 m	-0.007 m	0.87
b	0.026 m	0.008 m	0.79	0.021 m	0.017 m	0.78	0.024 m	-0.023 m	0.77
A	0.022 m ²	-0.004 m ²	0.82	0.016 m ²	-0.019 m ²	0.81	0.013 m ²	0.019 m ²	0.86

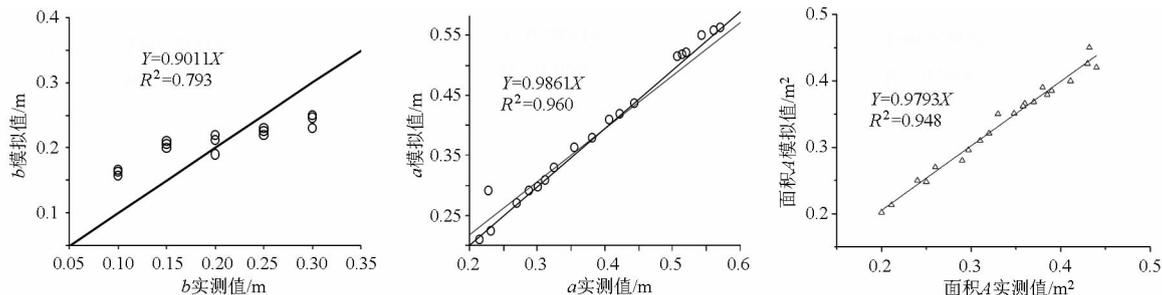


图2 轮胎-土壤接触模型参数 a 、 b 、 A 实测值与模拟值

Fig.2 Measured and simulated model parameters a , b , A related to soil - tyre contact model

表3 不同气压条件下模型参数优化值

Tab.3 Optimized model parameters at different inflation pressures

轮胎气压/ kPa	a / m	b / m	n	α	β
85	0.435	0.240	3.331	1.012	0.880
100	0.364	0.233	3.150	0.732	0.462
120	0.280	0.200	3.020	0.925	0.410

2.1.2 轮胎气压对接触面影响

接触面形状及大小决定着接触面应力分

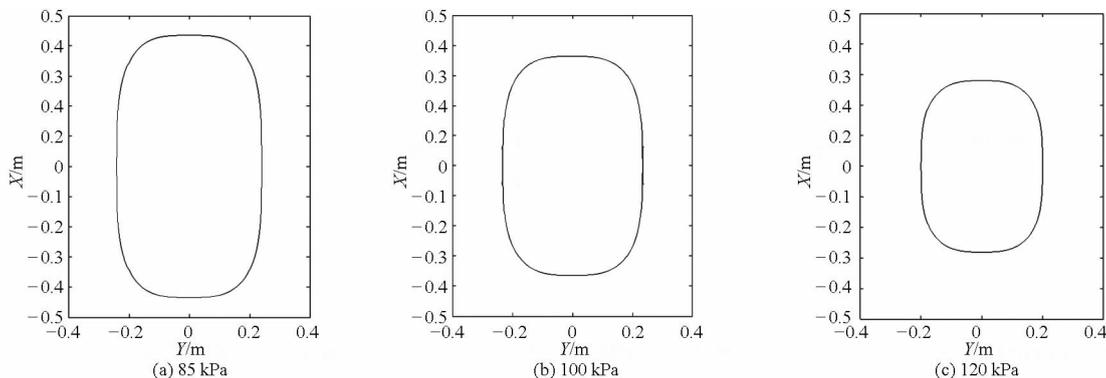


图3 模型模拟不同气压条件下轮胎-土壤接触面形状

Fig.3 Model fitted periphery of soil - tyre contact area at three inflation pressures

2.2 轮胎-土壤接触面应力影响

图4表示轮胎-土壤接触面应力分布实测图以及 Matlab 运算模型模拟图。从图中可以得出,沿着轮胎行走方向,85 kPa 条件下接触面应力呈 M 型分布,气压低导致轮胎两侧接触地面受力较大,而轮胎中间受力较小;100 kPa 条件下接触面应力无明显应力集中现象,呈锯齿状均匀分布,且从数值上来看最大应力比 85 kPa 小 11.2%;120 kPa 应力呈凸型分布,轮胎-土壤接触面中心位置土壤应力最大,向两边逐渐减小,最大应力比 100 kPa 最大应力大 21.1%;实测轮胎-土壤接触面应力变化趋势与模型模拟接触面应力变化趋势一致,且在不同气压条件下模拟值与实测值应力大小无明显差异(应力分布模型参数见表3)。

表4为平均应力及最大应力的实测值和模拟值之间的相对误差。本文相对误差表示模型模拟的绝

布,对土壤压实具有重要意义^[16]。图3为根据不同气压条件下优化的模型参数,用 Matlab 绘制 FRIDA 模型模拟的轮胎-土壤接触面形状并计算其面积,胎压为 85 kPa 时实际测量的接触面积 (A_{mea}) 及模拟面积 (A_{sim}) 分别为 0.417、0.415 m^2 , 100 kPa 时分别为 0.348、0.339 m^2 , 120 kPa 时分别为 0.234、0.230 m^2 。轮胎-土壤接触面形状,85 kPa 时类似于矩形,100 kPa 时类似于椭圆形,而 120 kPa 时接近于圆形。

对误差与测量值之间的比值,一般来说,相对误差反映参数可信程度^[17]。由表4可知,模拟值与实测值相对误差均小于 0.1,总体上该模型可以模拟预测轮胎-土壤接触面应力分布。

2.3 模型应用

利用验证并优化后的 FRIDA 模型,轮胎气压为 100 kPa 时,模拟不同载荷作用下轮胎-土壤接触面形状及应力分布均匀性。模型确定参数分别为: 30 kN, (a, b, n, α, β) = (0.37, 0.24, 3.14, 1.5, 1.1); 50 kN, (a, b, n, α, β) = (0.45, 0.245, 3.5, 3.3, 2.8); 70 kN, (a, b, n, α, β) = (0.5, 0.25, 3.7, 5.4, 3.9); 如图5所示,随着轮胎轴载增大轮胎-土壤接触面形状由类椭圆形逐渐变化为矩形,面积增大,50 kN 轴载条件下轮胎土壤接触面积比 30 kN 大 24.5%, 70 kN 轴载条件下轮胎土壤接触面积比 50 kN 大 1%。不同轴载条件下轮胎-土壤接触面应

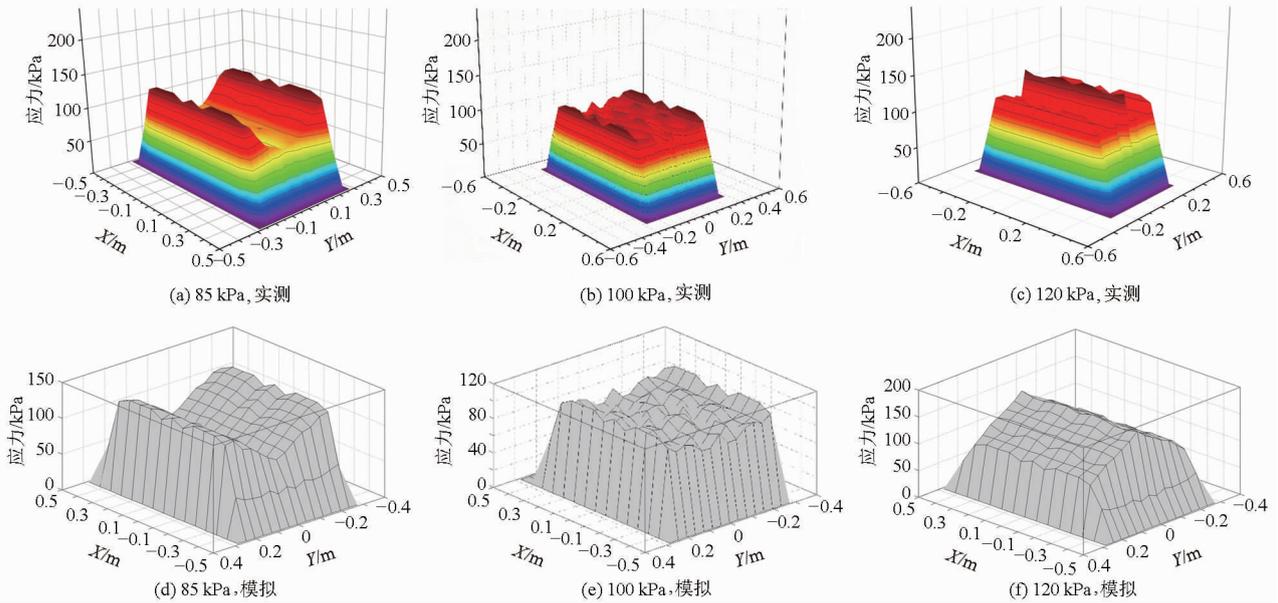


图4 在不同轮胎气压条件下轮胎-土壤接触面应力分布实测和模拟结果

Fig. 4 Examples of measured and model-fitted stress distribution across the contact area with different inflation pressures

表4 实测和模拟的应力指标相对误差 R_E

Tab. 4 R_E of measured and simulated stress indexes for calibration and validation processes

轮胎气压/kPa	85	100	120
平均应力误差	-0.048	0.056	0.094
最大应力误差	0.072	0.033	0.075

力分布如图6所示。随着轴载增大,轮胎-土壤接触面应力由平均分布到集中两端分布,50 kN轴载条件下轮胎土壤最大接触应力比30 kN轴载时大31.6%,70 kN轴载条件下轮胎土壤最大接触应力比50 kN轴载时大10.3%。

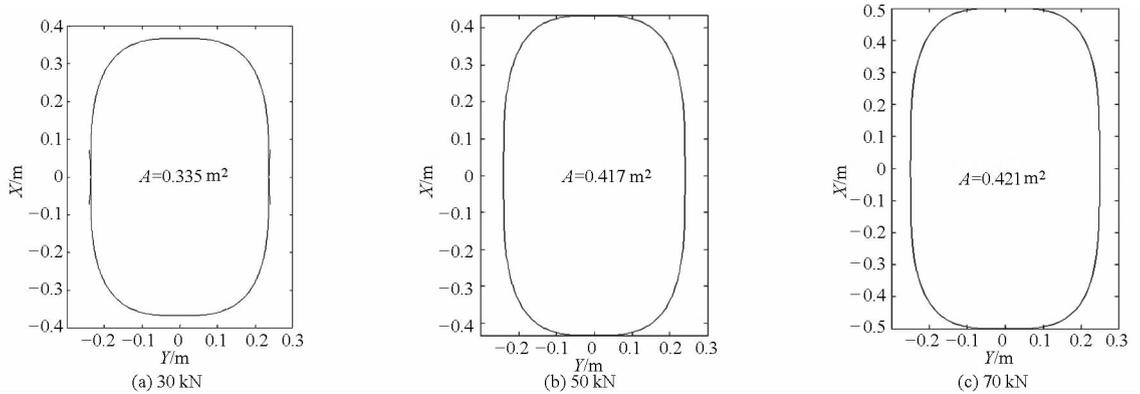


图5 不同轴载条件下轮胎-土壤接触面形状模拟结果

Fig. 5 Results of model-fitted stress distribution across the contact area with different tyre loads

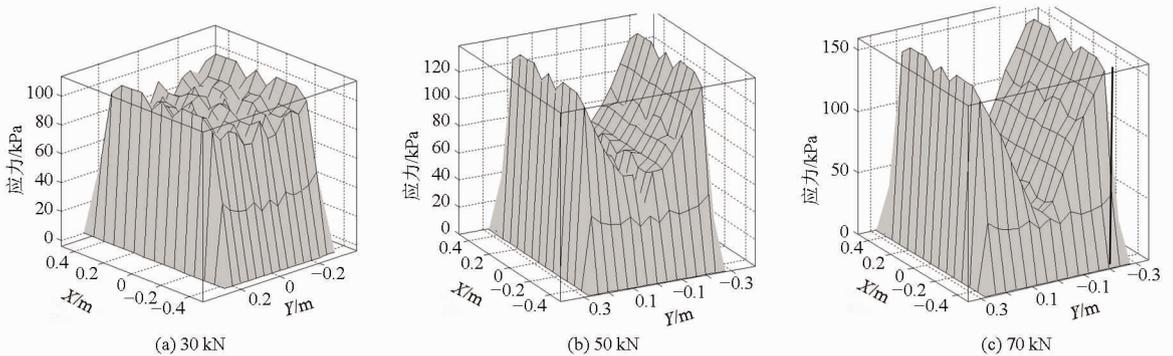


图6 在不同轮胎轴载条件下轮胎-土壤接触面应力分布模拟结果

Fig. 6 Results of model-fitted stress distribution across the contact area with different tyre loads

3 讨论

轮胎-土壤接触面形状、大小是影响轮胎动力性能及表层土壤压实重要因素^[18]。轮胎气压通过影响轮胎-土壤接触面积间接影响接触面应力大小及分布,轴载 21 kN 轮胎气压 85 kPa 及气压 100 kPa 轴载 50、70 kN 条件下接触面应力分布呈 M 型,应力主要集中于接触面两侧。主要原因可能是轮胎处于低气压或高轴载状态下,轮胎载荷主要由胎体层承受且应力峰值位于轮胎边缘,轴载 21 kN 轮胎气压 120 kPa 条件下应力呈现凸型分布,主要原因可能是气压强度大于轴载,应力主要分布在轮胎-土壤接触面中心^[19]。21 kN 轴载下,轮胎气压 100 kPa 条件下接触面应力分布均匀,且 100 kPa 时最大应力比 85、120 kPa 时分别小 11.2%、13.1%,主要原因可能是由于气压过大或过小的原因导致轮胎-土壤接触面出现规律性应力集中现象,导致局部应力变大。轮胎造成的土壤压实效应主要取决于轴载、轮胎参数、土壤特性,试验表明,轮胎气压引起的应力变化主要影响表层土壤压实,轴载决定深层土壤压实程度^[20-21]。100 kPa 条件下,随着轴载增大轮胎土壤接触面形状由类椭圆形逐渐变为类矩形,接地宽度和接地长度都不同程度增加,50 kN 轴载条件下轮胎土壤接触面积比 30 kN 轴载时大 24.5%,70 kN

轴载时比 50 kN 轴载时大 1%。主要原因可能是轴载增大导致轮胎挠曲量变大,改变轮胎-土壤接触面形状增大了接触面积^[22];50 kN 轴载条件下轮胎土壤最大接触应力比 30 kN 轴载时大 31.6%,70 kN 轴载时比 50 kN 轴载时大 10.3%,轴载对土壤应力集中现象影响较轮胎气压更为显著,轮胎轴载主要影响深层土壤压实,随着轴载增大轮胎产生的应力由轮胎-土壤接触面应力集中处向深层土壤传递^[23]。

4 结论

(1) 模型验证时,接触面积的 RMSE 和 Bias 分别在 0.013 ~ 0.022 m² 和 -0.19 ~ 0.19 m² 之间变化,实测值与模拟值的决定系数为 0.948,趋势线斜率接近于 1,实测与模拟值一致性均在 0.8 以上。接触面应力模拟中,平均应力及最大应力的实测值与模拟值相对误差在 0.1 以下。因此 FRIDA 模型可以模拟华北地区壤土条件下轮胎-土壤接触特性。

(2) 轮胎气压、轴载对轮胎-土壤接触面特性及应力分布影响较大。农业机械选择合适气压和轴载,能够使轮胎-土壤接触面应力分布更均匀,避免产生接触面应力集中现象,有助于提高农机性能,减少土壤压实。研究结果表明,应综合轮胎型号及农机质量,选择合适轮胎气压与农机具匹配。

参 考 文 献

- 1 王宪良,王庆杰,李洪文. 农业机械土壤压实方法研究现状[J]. 热带农业科学,2015,35(6):72-76.
WANG Xianliang, WANG Qingjie, LI Hongwen. Current research status of soil compaction by agricultural machinery[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture,2015,35(6):72-76. (in Chinese)
- 2 赵振家,薛龙,邹猛. 压实对土壤应力分布的影响仿真分析[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊1):311-314.
ZHAO Zhenjia, XUE Long, ZOU Meng. Simulation analysis of effect of compaction on soil stress distribution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2012,43(Supp.1):311-314. (in Chinese)
- 3 张兴义,隋跃宇. 土壤压实对农作物影响概述[J]. 农业机械学报,2005,36(10):161-164.
ZHANG Xingyi, SUI Yueyu. Summarization on the effect of soil compaction on crops[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2005,36(10):161-164. (in Chinese)
- 4 陈溢,郑亭,樊高琼,等. 不同土壤水分条件下拖拉机行走对四川丘陵旱地土壤特性及小麦生长的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(6):147-151.
CHEN Yi, ZHENG Ting, FAN Gaoqiong, et al. Effects of tractor traffic on soil properties and wheat growth in Sichuan Hilly Areas under different soil moisture content[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2013,27(6):147-151. (in Chinese)
- 5 李汝莘,林成厚,高焕文,等. 小四轮拖拉机土壤压实的研究[J]. 农业机械学报,2002,33(1):126-129.
LI Rushen, LIN Chenghou, GAO Huanwen, et al. The research of soil compaction caused by tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2002,33(1):126-129. (in Chinese)
- 6 付晓莉,邵明安. 一种改进的土壤压实模型及试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(4):1-5.
FU Xiaoli, SHAO Ming'an. Improved soil compaction model and experiment study[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(4):1-5. (in Chinese)
- 7 KELLER T, DÉFOSSEZ P, WEISSKOPF P, et al. SoilFlex: a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches[J]. Soil and Tillage Research,2007,93(2):391-411.
- 8 HALLONBORG U. Super ellipse as tyre-ground contact area[J]. Journal of Terramechanics,1996,33(3):125-132.
- 9 KELLER T. A model for the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters[J]. Biosystems Engineering,2005,92(1):85-96.

- 10 JOHNSON C E, BURT E C. A method of predicting soil stress state under tires[J]. Transactions of the ASAE,1990,33(3):713-717.
- 11 SCHJØNNING Per, LAMANDÉ Mathieu, TØGERSEN Frede A, et al. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil-tyre interface[J]. Biosystems Engineering, 2008,99(1):119-133.
- 12 STETTLER M, KELLER T, WEISSKOPF P, et al. Terranimator-a Web-based tool for evaluating soil compaction [J]. Landtechnik, 2014,69(3):132-138.
- 13 ARVIDSSON J, KELLER T. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure[J]. Soil and Tillage Research, 2007,96(1-2):284-291.
- 14 HANSON J D, ROJAS K W, SHAFFER M J. Calibrating the root zone water quality model[J]. Agronomy Journal, 1999,91(2):171-177.
- 15 李艳,刘海军,黄冠华. 基于 RZWQM 模型的冬小麦夏玉米水氮管理评价[J]. 农业机械学报,2015,46(6):111-120.
LI Yan, LIU Haijun, HUANG Guanhua. Evaluation of nitrogen and water management in winter wheat summer maize cropping system in North China Plain using RZWQM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(6):111-120. (in Chinese)
- 16 LAMANDE M, SCHJØNNING P, TØGERSEN F A. Mechanical behaviour of an undisturbed soil subjected to loadings: effects of load and contact area[J]. Soil & Tillage Research,2007,97(1):91-106.
- 17 张小娜,冯杰,张东辉,等. 坡面流格子 Boltzmann 方法与 Preissmann 隐式差分法模拟[J]. 农业机械学报,2014,45(10):132-139.
ZHANG Xiaona, FENG Jie, ZHANG Donghui, et al. Comparison of lattice Boltzmann method and Preissmann implicit difference method in application to overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(10):132-139. (in Chinese)
- 18 CUI Kai, PAULINE Défossez, GUY Richard. A new approach for modelling vertical stress distribution at the soil/tyre interface to predict the compaction of cultivated soils by using the PLAXIS code[J]. Soil and Tillage Research, 2007,95(1-2):277-287.
- 19 OMAR González Cueto, CIRO E. Iglesias Coronel, ELVIS López Bravo, et al. Modelling in FEM the soil pressures distribution caused by a tyre on a Rhodic Ferralsol soil[J]. Journal of Terramechanics,2016,63:61-67.
- 20 王宪良,王庆杰,张祥彩,等. 田间土壤压实研究现状[J]. 农机化研究,2016(9):264-268.
WANG Xianliang, WANG Qingjie, ZHANG Xiangcai, et al. The soil compaction forms and research status [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016(9):264-268. (in Chinese)
- 21 李汝莘,史岩,迟淑筠,等. 机器轮胎引起的土壤压实及其耕作能量消耗[J]. 农业机械学报,1999,30(2):13-17.
LI Rushen, SHI Yan, CHI Shuyun, et al. Soil compaction and tillage energy consumption caused by tires of agricultural machines [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999,30(2):13-17. (in Chinese)
- 22 臧利国,赵又群,李波,等. 机械弹性车轮提高轮胎耐磨性和抓地性分析[J]. 农业工程学报,2014,30(12):56-63.
ZANG Liguó, ZHAO Youqun, LI Bo, et al. Mechanical elastic wheel improving road holding and wear resistance of tire [J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(12):56-63. (in Chinese)
- 23 BOTTA G F, TOLON-Becerra A, RIVERO D, et al. Compaction produced by combine harvest traffic: effect on soil and soybean (*Glycine max* L.) yields under direct sowing in Argentinean Pampas [J]. European Journal of Agronomy, 2016,74:155-163.