

不同农用轮胎对东北黑土区土壤压实的影响

杨敏丽^{1,2} 彭健^{1,2} 金剑³ 杨晓¹ 宋正河¹ 李栋³

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学中国农业机械化发展研究中心, 北京 100083;
3. 米其林(中国)投资有限公司, 上海 200335)

摘要: 为探究不同农用轮胎对东北黑土区土壤压实的影响,探索减少土壤压实、改善农田生态、保护黑土地的有效路径,本文以东北地区典型黑土耕地为对象,在玉米播种环节开展基于不同农用轮胎的田间作业对比试验。试验设置超低压子午线和普通子午线轮胎2种农用轮胎类型,采用科学取样法统计土壤紧实度、土壤含水率、土壤容重及土壤孔隙度4个关键土壤物性参数。在此基础上,基于CRITIC-熵权法构建土壤压实综合评价模型,并对普通子午线轮胎(CK)、超低压子午线轮胎(VF)在深度5、10、15、20 cm处的土壤压实状况进行统计学评价。试验结果表明,在土壤深度0~20 cm内,相对于普通子午线轮胎,超低压子午线轮胎使土壤紧实度降低11.38%、7.97%、5.36%、4.55%,土壤含水率提高11.06%、10.07%、7.37%、5.95%,土壤容重降低3.71%、3.81%、3.12%、2.73%,土壤孔隙度提高11.13%、12.25%、8.92%、5.86%。不同处理的土壤综合评价得分由大到小排序为VF5、VF10、CK5、VF15、CK10、VF20、CK15、CK20,说明在同等条件下,相对普通子午线轮胎,超低压子午线轮胎压实后土壤综合状况更好。说明超低压子午线轮胎对于降低黑土压实、维护土壤物理环境具有积极作用,有助于保护黑土地、保障国家粮食安全。

关键词: 农用轮胎; 土壤压实; 土壤物理特性; CRITIC-熵权法; 压实模型

中图分类号: S12; S23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)06-0085-09

OSID:



Influence of Agricultural Tire Technology Innovation on Soil Compaction in Black Soil Region Northeast China

YANG Minli^{1,2} PENG Jian^{1,2} JIN Jian³ YANG Xiao¹ SONG Zhenghe¹ LI Dong³

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. China Agricultural Mechanization Development Research Center, China Agricultural University, Beijing 100083, China
3. Michelin (China) Investment Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: In order to explore the influence of different agricultural tires on soil compaction in northeast black soil area, explore effective ways to reduce soil compaction, improve farmland ecology and protect black land, typical black soil cultivated land in northeast China was taken as object, and field operation comparative experiments were carried out based on different agricultural tires in the link of corn seeding. Two types of agricultural tires, ultra-low pressure radial tire and ordinary radial tire, were set up in the experiment. Four key soil physical property parameters, namely soil compactness, soil moisture content, soil bulk density and soil porosity, were calculated by scientific sampling method. On this basis, a comprehensive evaluation model of soil compaction was established based on CRITIC-Entropy weight method, and the soil compaction status of ordinary radial tire (CK) and ultra-low pressure radial tire (VF) at depth of 5 cm, 10 cm, 15 cm and 20 cm was evaluated statistically. The test results showed that in 0~20 cm soil depth, compared with radial tire, ultra-low pressure radial tire reduced soil compactness by 11.38%, 7.97%, 5.36% and 4.55%, and increased soil moisture content by 11.06%, 10.07%, 7.37% and 5.95%, respectively. Soil bulk density was reduced by 3.71%, 3.81%, 3.12% and 2.73%, and soil porosity was increased by 11.13%, 12.25%, 8.92% and 5.86%, respectively. The soil comprehensive evaluation scores of different treatments in descending order were VF5, VF10, CK5, VF15, CK10, VF20, CK15, CK20, indicating that under the same conditions, the soil comprehensive

condition of compacting ultra-low pressure radial tire was better than that of ordinary radial tire. The results showed that ultra-low pressure radial tire had positive effects on reducing compaction of black soil and maintaining soil physical environment, which was helpful to protect black soil and ensure national food security.

Key words: agricultural tyre; soil compaction; soil physical characteristics; CRITIC – Entropy weight method; compaction model

0 引言

东北黑土地是我国珍贵的土壤资源和不可再生的自然资源,是肥力最高、最适宜耕作和最具生产力的土壤。近年来,黑土地保护问题备受关注^[1-3]。农业机械化在提升农业生产力、提高作业质量、促进农业增产增收同时,东北地区大型农业机械在生产实际中应用越来越多,由于大型农机作业时牵引力大,一定程度上将会造成农田土壤压实,导致土壤孔隙度降低、土壤颗粒排列紧密、土壤紧实度升高^[4]。

目前,国内外学者对于轮胎压实的研究主要集中在于轮胎压实次数^[5-6]、不同耕作方式^[7-10]、轮胎载荷^[11-14]对于土壤物理特性的影响。SMITH等^[15]研究表明,轮胎承载重量不同对土壤压实的影响不一致,地面压力的增加会显著增加土壤表面附近的容重,但在较大深度时影响较小。TOBIAS等^[16]提出一种田间实地监测土壤垂直运动的方法,研究表明采用大型机械作业,会造成土壤紧实度明显增大,并且履带载荷和轮载荷所引起的压实程度不同,轮载荷会使得深度60~70 cm的土层产生形变。SHAHGHOLI等^[17]利用应变传感器测量轮胎压实后的土壤密实度,得到在未达到土壤的临界水分前,土壤压实度随着土壤含水率的增加呈线性增加。张兴义等^[18]研究表明,随着碾压次数的增加,压实较前一次略有加剧,同时被压实深度有所增加,但增加幅度都变小。乔金友等^[19]采用大、中、小3种型号拖拉机开展试验,得出各机型压实后土壤坚实度均随压实次数增加递增,在深度0~30 cm土层出现明显压实核,压实核内土壤坚实度随压实次数增加逐渐增大。

综上所述,轮胎压实对土壤物理特性的改变有较为显著的影响,已有较多与轮胎压实相关的研究,但不同农用轮胎对土壤物理特性影响的对比研究未见报道。农业子午线轮胎的胎体帘线呈0°角排列,胎侧和胎面相对独立结构,在滚动过程中,胎侧曲绕、胎面接地面积可始终保持稳定^[20]。超低压子午线轮胎的胎面采用独特的胎面结构设计和橡胶配方,使其能以极低的气压承担更高的负载。因此,在相同载荷下,超低压子午线轮胎可以降低其胎压来获得更大的接地面积。本文基于超低压子午线轮胎的技

术特点,从轮胎技术改进的角度入手,开展不同轮胎的田间对比试验,通过测量土壤紧实度和土壤含水率来研究大型拖拉机轮胎技术对土壤物理特性的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于2021年4—5月在黑龙江省嫩江市尖山农场第三管理区(125°26′ E,48°52′ N)进行,试验地属于寒带大陆性气候,年平均气温-0.1~0.5℃,活动积温2 000~2 200℃,无霜期110~120 d。年降水量500 mm左右,年日照2 550~2 750 h,土壤类型以黑土为主。试验地以垄作为主,种植制度为玉米-大豆轮作,一年一熟。

1.2 试验设计

田间试验采取对比试验的方法,设置试验区 and 对照区,试验区由配置超低压子午线轮胎(VF)的拖拉机作业,对照区由配置普通子午线轮胎(CK)的拖拉机作业。

试验地长为1 450 m,宽475 m,沿东西方向共分为4个测试小区,自西向东依次为CK1、VF1、CK2、VF2。每个测试小区长为1 450 m,宽为118.75 m。为减小土壤空间变异性及其他因素对试验结果的干扰,试验中对地势起伏或由于其他因素影响破坏的轮辙进行剔除,采用等距取样法进行取样。测试各个样点土壤紧实度、土壤含水率、土壤容重、土壤孔隙度。考虑到土壤环境较为复杂,为增强测试数据的准确性,每个样点取3次测试的平均值作为该点的数值。测试时,均选择在轮胎碾压过的中心位置,避免轮胎中心与两侧位置受力不同对结果产生干扰。试验分区如图1所示。

试验选择JD7830型拖拉机为试验机型,拖拉机功率为155.78 kW,播种环节挂接1006NT型免耕播种机进行作业,使用相同机型的拖拉机分别配置超低压子午线轮胎和普通子午线轮胎进行对比试验,图2为拖拉机实际作业图。根据实际作业的负载需求及拖拉机机型的适配性选择试验用轮胎规格,轮胎参数如表1所示。

1.3 数据采集方法

1.3.1 土壤紧实度和土壤含水率

播种作业后,采集试验区和对照区各测试小区土

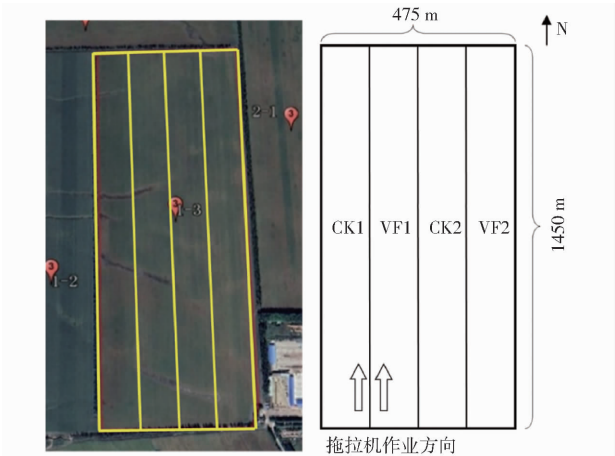


图 1 田间试验分区示意图

Fig. 1 Schematic of field trial zoning

壤紧实度和土壤含水率(图 3a、3b)。使用手持 GPS



图 2 田间对比试验拖拉机作业图

Fig. 2 Field comparison test tractor operation diagram

定位测量样点,记录测试位置,使用 SYS – TJS100S 型土壤紧实度测定仪(精度 0.1 kPa)测量土壤紧实度。使用 SK – 100 型便携式土壤水分测定仪(精度 0.01%)测量土壤含水率,将土壤水分测定仪垂直插入指定深度后,静置 5 ~ 10 s 待仪器示数稳定后,记录该样点数据。土壤深度选择为 5、10、15、20 cm。

表 1 试验用农用轮胎主要参数

Tab. 1 Comparison of parameters of agricultural tires with different technologies

轮胎类型		轮胎规格	轮胎气压/kPa	接地面积/cm ²	负载/kg
普通子午线轮胎	前轮	420/90 R30 147A8/147B	240	2 099	2 550
	后轮	480/80 R46 166A8/159B	340	2 527	5 500
超低压子午线轮胎	前轮	420/90 R30 147A8/147B TL	140	2 522	2 550
	后轮	480/80 R46 164A8/164B TL	200	3 234	5 500



(a) 土壤紧实度测试



(b) 土壤含水率测试



(c) 土壤容重和土壤孔隙度测试

图 3 土壤物理性质测试过程

Fig. 3 Testing procedures for soil physical properties

1.3.2 土壤容重和土壤孔隙度

使用 AKR – J600 型土壤密度计测量土壤容重和土壤孔隙度,取土深度为 0 ~ 5 cm、5 ~ 10 cm、10 ~ 15 cm 和 15 ~ 20 cm(图 3c)。安装好测试仪后,首先利用砝码进行校正。将土壤样品按照顺序放在测量台上进行称量并存储,先后称量 3 次,仪器可以计算并显示出土壤容重、土壤孔隙度、样品体积等。

1.4 评价方法

为了衡量不同轮胎技术对土壤压实的影响,构建土壤压实综合评价模型。以土壤紧实度、土壤含水率、土壤容重、土壤孔隙度作为指标,对使用不同轮胎技术造成的土壤压实状况进行综合分析评价。其中,土壤紧实度、土壤容重为负向指标,土壤含水率、土壤孔隙度为正向指标。

针对土壤性质时空变化较大的特点,本文采取 CRITIC 法和熵权法综合评价的方法对土壤压实状况进行评价。CRITIC 法是通过综合衡量评价指标间的冲突性,以及指标本身对比强度来实现评价指标客观赋权的一种方法,而熵权法是依据评价信息中的不确定性进而实现指标属性赋权的一种方法^[21]。在土壤压实的过程中,各指标之间的冲突性会随着压实程度而发生变化,且与土壤状况联系更加紧密的指标会发生更大程度的影响。但是单一的 CRITIC 赋权法未能考虑到指标之间的离散性,熵权法则可有效弥补这一不足^[22]。因此,本文将两种赋权相融合,构建基于 CRITIC 法和熵权法的组合赋权模型。

对各项指标的重要数据进行标准化处理,以消

除各指标之间含义、量纲的差别。

对于正向指标,标准化公式为

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj})}{\max(x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj})} \tag{1}$$

对于负向指标,标准化公式为

$$x'_{ij} = \frac{\max(x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj}) - x_{ij}}{\max(x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj}) - \min(x_{1j}, x_{2j}, \cdots, x_{nj})} \tag{2}$$

使用 CRITIC 赋权法,计算各指标对应的权重 W_{j1} ,计算公式为

$$W_{j1} = \frac{\sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij})}{\sum_{j=1}^n \sigma_j \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij})} \tag{3}$$

式中 σ_j ——第 j 项指标数据的标准差
 r_{ij} ——第 i 项与第 j 项指标的相关系数

根据熵权法原理,计算各项指标对应的信息熵 E_j ,计算公式为

$$E_j = -\frac{n}{10} \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij} \tag{4}$$

其中

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}$$

计算各指标对应的熵权法权重 W_{j2} ,计算公式为

$$W_{j2} = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \tag{5}$$

在充分考虑指标对比强度及数据间的关联性,同时从离散程度间接反映指标重要性两个方面,使用乘法合成归一法确定综合指标权重 W_j ,计算公式为

$$W_j = \frac{W_{j1} W_{j2}}{\sum W_{j1} W_{j2}} \tag{6}$$

基于指标选择和权重分配,构建基于 CRITIC 和熵权法的土壤压实综合评价模型,对不同压实后的土壤进行综合评价,评价得分计算公式为

$$S_j = \sum_{i=1}^n 100 W_j x'_{ij} \tag{7}$$

1.5 数据处理

将试验采集的原始数据按照测试时间、轮胎类型等因素分别归类整理数据。为了消除试验数据的随机误差及由于人为因素影响造成的误差,提高数据可靠性,根据正态分布的 3σ 原则剔除异常数据。使用 SPSS 22.0 统计软件进行方差分析和显著性检验,利用 Origin 2019 软件拟合模型曲线并绘制变化趋势图。通过 Matlab 2016 编程计算土壤压实综合

评价模型中各指标对应权重及最终得分。

2 结果与分析

2.1 土壤紧实度

土壤紧实度为测度土壤压实重要指标,能够反映作物根系穿透土壤阻力^[23]。按照前述试验方案及测试方法测试各小区土壤紧实度,使用 Origin 2019 软件绘制不同分区测试的土壤紧实度等值线图(图 4),通过等值线图分析不同农用轮胎的使用对土壤紧实度影响规律。

由图 4 可知,对照区和试验区在同一深度处的颜色分布差异较为显著。随着测试深度的增加,对照区土壤紧实度整体高于试验区。深度 5 cm 时,CK 区土壤紧实度集中于 1 200 ~ 1 600 kPa, VF 区土壤紧实度集中于 800 ~ 1 200 kPa,相较于 CK 区减小 400 kPa 左右;深度 10 cm 时,CK 区土壤紧实度集中于 2 200 ~ 2 600 kPa, VF 区土壤紧实度集中于 1 600 ~ 2 200 kPa,相较于 CK 区减小 400 ~ 600 kPa;深度 15 cm 时,CK 区土壤紧实度集中于 3 000 ~ 3 600 kPa, VF 区土壤紧实度集中于 2 800 ~ 3 200 kPa,相较于 CK 区减小 200 ~ 400 kPa;深度 20 cm 时,CK 区土壤紧实度集中于 4 300 ~ 4 600 kPa, VF 区土壤紧实度集中于 4 000 ~ 4 400 kPa,相较于 CK 区减小 200 ~ 300 kPa。因此,试验区各深度处土壤紧实度均小于对照区,随着深度增加,试验区与对照区间的土壤紧实度差异逐渐减小。轮胎压实后,土壤紧实度变化主要受不同轮胎与土壤接地面积的影响。大型拖拉机配置不同轮胎进行播种作业之后,超低压子午线轮胎和普通子午线轮胎压实后的土壤紧实度差异明显。

采用 SPSS 23.0 软件进行各测试分区的方差分析与多重性比较,不同轮胎压实处理下土壤紧实度的显著性分析结果如表 2 所示。

由表 2 可知,使用超低压子午线轮胎和普通子午线轮胎进行作业,轮胎压实对土壤紧实度变化的影响有较大差异。随着土壤深度的不断增加,各个测试分区土壤紧实度总体均呈上升趋势。深度 0 ~ 20 cm 处,试验区 VF1、VF2 土壤紧实度平均值均小于对照区 CK1、CK2,且随着深度的增加,试验区土壤紧实度降低的幅度逐渐减小。测试深度为 5、10、15、20 cm 时,试验区平均土壤紧实度比对照区分别减小 11.38%、7.97%、5.36%、4.55%。试验区拖拉机配置超低压子午线轮胎进行作业,相比于普通子午线轮胎,超低压子午线轮胎可获得更大的接地面积。在相同负载条件下,超低压子午线轮胎传递到土壤的压应力相对更小,从而导致压实后土壤紧

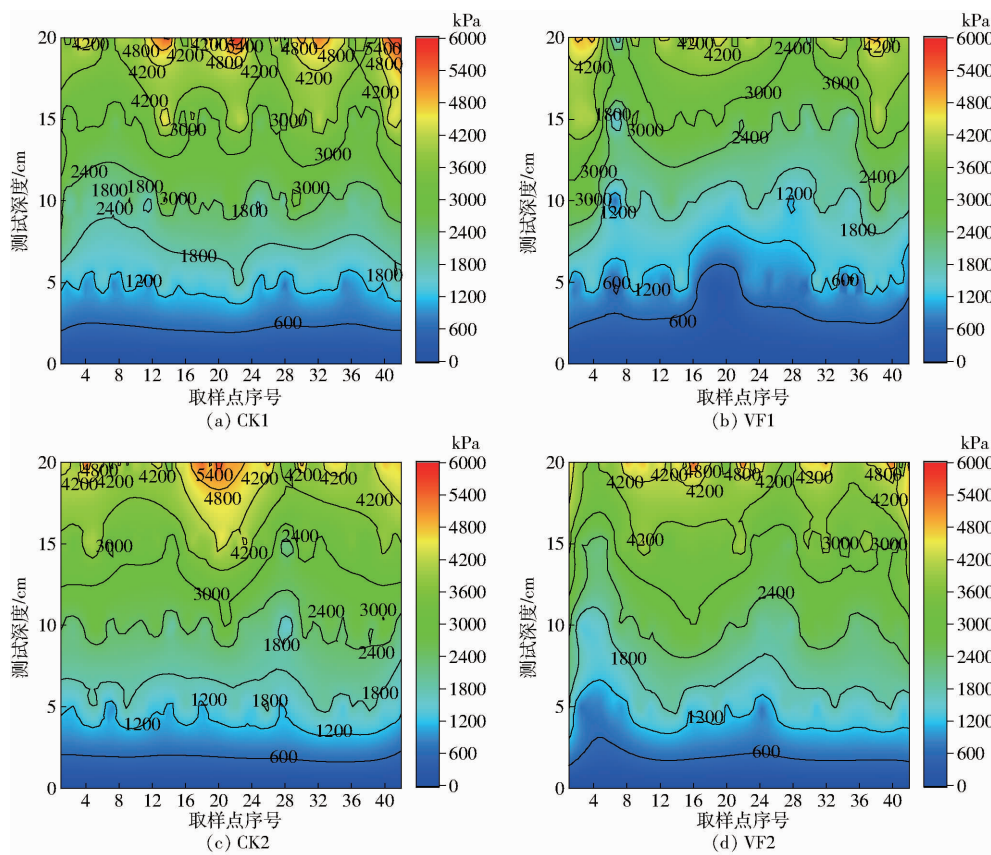


图 4 不同分区土壤紧实度等值线图

Fig.4 Contour maps of soil compactness in different zones

表 2 不同测试分区平均土壤紧实度

Tab.2 Average soil compactness in different

test subdivisions		kPa			
土壤深度/cm	CK1	VF1	CK2	VF2	
5	1 341.37 ^a	1 152.11 ^b	1 316.51 ^a	1 197.18 ^b	
10	2 311.22 ^a	2 095.34 ^b	2 342.03 ^a	2 187.20 ^a	
15	3 215.93 ^a	3 021.43 ^a	3 240.68 ^a	3 088.95 ^a	
20	4 132.44 ^a	3 978.83 ^a	4 219.27 ^a	3 992.69 ^a	

注:数据为 3 次重复测试的平均值,同行数据后不同字母表示处理间差异显著($p < 0.05$)。

实度升高的幅度会相应减小。随着土壤深度的增加,由轮胎传递到土壤接触面的应力在土壤内部的传递过程中,会随着土壤颗粒运动逐渐消耗,更深层的土壤受到的应力会更小,土壤紧实度受到的影响也减小。由此说明在同种工作环境下,超低压子午线轮胎比普通子午线轮胎造成的土壤紧实度更低,超低压技术应用可以降低土壤的压实效果。

2.2 土壤含水率

土壤含水率是影响土壤压实的重要因素之一^[24]。按照前述试验方案及测试方法测试各试验区土壤含水率,图 5 为不同测试分区的土壤含水率变化曲线。由图 5 可知,随着测试深度的增加,土壤含水率总体呈上升趋势,0 ~ 10 cm 处土壤含水率随着深度增加而提高的幅度较大,10 ~ 20 cm 处土

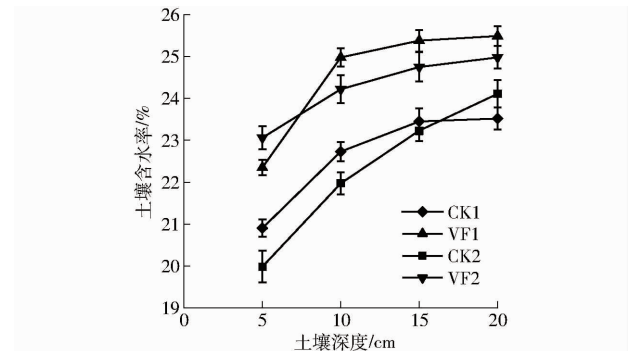


图 5 不同测试分区土壤含水率变化曲线

Fig.5 Diagram of variation of soil moisture content in different test plots

壤含水率随深度的增加而提高的幅度较小。测试深度 0 ~ 20 cm 处,试验区 VF1、VF2 平均土壤含水率均大于对照区的 CK1、CK2 平均土壤含水率。测试深度为 5、10、15、20 cm 时,试验区平均土壤含水率比对照区分别提高 11.06%、10.07%、7.37%、5.95%。表明在同种工作环境下,相比于普通子午线轮胎,超低压子午线轮胎压实之后土壤含水率相对更高,有助于实现蓄水保墒。

2.3 土壤容重和土壤孔隙度

土壤容重和土壤孔隙度是土壤的重要物理性质,与土壤的结构及土壤松紧状况有关,同时也影响着土壤中水、肥、气、热等因素的变化与供应状

况^[25-26]。图 6、7 分别为试验区(VF)、对照区(CK)的土壤容重与土壤孔隙度分布情况。由图 6 可以看出,深度 0~20 cm VF 区土壤容重均低于 CK 区,分别低 3.71%、3.81%、3.12%、2.73%;由图 7 得出,深度 0~20 cm VF 区土壤孔隙度均高于 CK 区,分别高 0.697、0.773、0.798、0.562 个百分点,可相对提高 11.13%、12.25%、8.92%、5.86%。由此可表明,超低压子午线轮胎相对可降低土壤容重、提高土壤孔隙度。

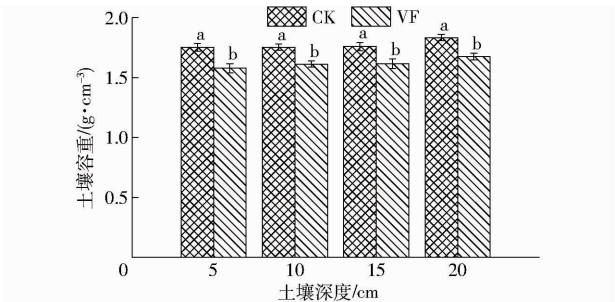


图 6 不同处理下土壤容重变化

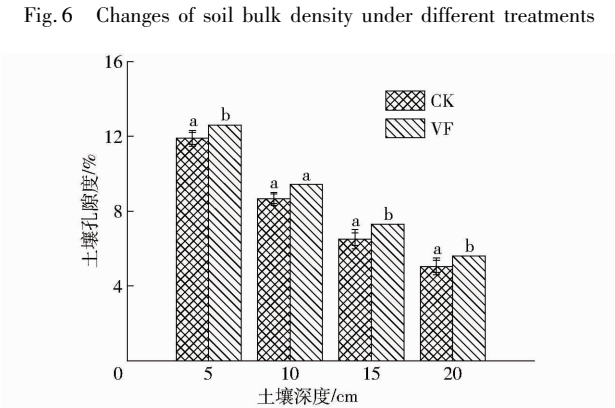


图 7 不同处理下土壤孔隙度变化

Fig. 6 Changes of soil bulk density under different treatments

2.4 土壤压实综合评价

基于前述评价方法,以土壤紧实度、含水率、容重、孔隙度为指标,构建土壤压实综合评价模型。利用 CRITIC 法和熵权法来确定指标权重,通过 Matlab 编程计算 CRITIC 法和熵权法对应的权重及综合权重。结果如表 3 所示。

表 3 不同方法计算的权重

Tab.3 Weight results calculated by different methods			
参数	W_{j1}	W_{j2}	W_j
土壤紧实度	0.201	0.343	0.299
土壤含水率	0.147	0.242	0.154
土壤容重	0.476	0.176	0.364
土壤孔隙度	0.176	0.239	0.183

根据综合赋权法确立的各指标权重,对超低压子午线轮胎和普通子午线轮胎压实后各深度处的土壤状况进行评价。按照土壤深度和农用轮胎种类,

一共分为 8 组。评价结果如表 4 所示。结果表明,综合得分由大到小为:VF5、VF10、CK5、VF15、CK10、VF20、CK15、CK20。轮胎压实之后,超低压子午线轮胎压实区深度 5 cm 处的土壤状况最优,普通子午线轮胎压实区深度 20 cm 处的土壤状况最差。同等深度处,超低压子午线轮胎作业区得分均高于普通子午线轮胎,说明在同等条件下,超低压子午线轮胎压实后的土壤状况整体相对较好。同种农业轮胎作业后,随着深度的增加,土壤压实综合得分越低,土壤状况越差。

表 4 不同轮胎压实后土壤综合得分

Tab.4 Comprehensive soil scores after different tires compacted						
组别	土壤紧实度标准值	土壤含水率标准值	土壤容重标准值	土壤孔隙度标准值	综合得分	排名
CK5	0.896	0	0.702	0.908	66.08	3
CK10	0.628	0.398	0.435	0.479	48.94	5
CK15	0.310	0.604	0.226	0.194	31.56	7
CK20	0	0.704	0	0	13.70	8
VF5	1.000	0.473	1.000	1.000	89.75	1
VF10	0.731	0.867	0.750	0.581	73.27	2
VF15	0.462	0.965	0.491	0.299	53.55	4
VF20	0.193	1.000	0.238	0.075	34.01	6

注:CK 表示普通子午线轮胎作业区,VF 表示超低压子午线轮胎作业区,数字表示深度。CK5 即为普通子午线轮胎作业区深度 5 cm 处。

3 讨论

3.1 轮胎技术对土壤紧实度和土壤容重的影响

土壤的压实破坏程度取决于由轮胎与土壤接触面传递到土壤内部压实应力^[27]。相对于普通子午线轮胎,超低压子午线轮胎依靠胎面接地压力均衡设计及独特的人字花纹深度、角度设计,进一步保证轮胎滚动过程中胎面的稳定,增大接地面积^[28]。在实际农田作业中,农用轮胎气压需要根据相关标准来进行设定。胎压设定过高会降低轮胎的接地面积、增加轮胎中心线区域的快速磨损,进而降低轮胎的使用寿命;胎压设定过低会造成胎面磨损严重、难以承受负载^[29]。超低压子午线轮胎采用特殊的橡胶配方,提高胎面强度,同时优化了胎体内部结构,提高胎侧耐曲绕能力。在受到相同负载时,超低压子午线轮胎可以通过大幅降低胎压来获得更大的接地面积。当负载一定时,接地面积更大,轮胎与土壤接触面的垂直应力会减小。当土壤应力过大时,土壤紧实度、土壤容重会急剧升高。因此,超低压子午线轮胎可相对降低土壤的压实破坏程度。根据试验

结果,轮胎压实会导致土壤紧实度升高,不同轮胎压实后导致土壤紧实度升高的变化不同。超低压子午线轮胎使土壤紧实度降低 11.38%、7.97%、5.36%、4.55%,土壤容重降低 3.71%、3.81%、3.12%、2.73%。在土壤深度 0~20 cm 内,超低压子午线轮胎相对可降低土壤紧实度、土壤容重。随着深度的增加,不同农用轮胎压实对土壤紧实度和土壤容重影响的差距逐渐减小。

3.2 轮胎技术对土壤含水率和土壤孔隙度的影响

在自然条件下,表层土壤水分蒸发作用较强,水分因蒸发而损失,同时表层土壤中作物根系更加发达,根系对土壤水分的吸收更多。因此,随着深度增加土壤体积含水率出现明显回升的趋势。但压实降低了土壤入渗和持水能力,尤其影响土壤水分、养分储存和供应^[30]。土壤孔隙度是土壤结构的反映^[31],良好的土壤孔隙有助于调节土壤中水分和养分的分布,促进作物根系的良好生长。试验表明,在深度 0~20 cm 范围内,超低压子午线轮胎压实后土壤孔隙度可相对提高 11.13%、12.25%、8.92%、5.86%,平均土壤含水率分别提高 11.06%、10.07%、7.37%、5.95%。土壤孔隙度提高使得土壤蓄水能力得到提升,从而使得土壤含水率提高,这与现有研究结果一致。王浩^[32]研究发现压实会导致土壤总孔隙度降低,在土壤深度 10~15 cm 处土壤孔隙度会降低 7.76%,土壤含水率降低 5.52%。压实使土壤变得更加紧密,土壤水分难以下渗,蓄水保墒能力下降。因此,在保护土壤墒情、维持土壤水分能力方面,超低压子午线轮胎明显优于普通子午线轮胎。在深度 0~10 cm 处,超低压子午线轮胎对土壤含水率的影响程度随深度增加而缓慢降低,在深度 10~20 cm 处,超低压子午线轮胎对土壤含水率的影响程度逐渐降低。因此,超低压子午线技术的应用可提高土壤含水率和土壤孔隙度,增强土壤

的蓄水保墒能力,维持土壤环境。

3.3 土壤压实综合评价模型分析

基于试验测得的 4 个土壤物理性质,构建土壤压实状况综合评价模型,利用 CRITIC 和熵权法组合赋权方法确定指标权重,综合评价两种技术的轮胎压实后土壤的状况。通过得分结果较为直观地发现,超低压子午线轮胎压实后土壤状况相对更优,且随着深度的增加,土壤的状况越差。

土壤内部环境是一个较为复杂的系统,而且同一类型的土壤也会受到地域、地形等影响,因此难以用一个统一的经验模型去衡量。本文通过筛选指标构建评价模型的方法来对土壤压实的状况进行评价,对后续研究有一定启发性。考虑到影响土壤的指标众多,仅考虑土壤紧实度、土壤含水率、土壤容重、土壤孔隙度 4 个指标具有一定的局限性。可拓宽土壤性质指标,构建更加全面、综合的体系。

4 结论

(1)通过超低压子午线轮胎技术与普通子午线轮胎技术的田间对比试验,采集了土壤紧实度、土壤含水率、土壤容重、土壤孔隙度,发现不同轮胎技术对土壤紧实度和土壤含水率的影响差异显著。在深度 0~20 cm 范围内,超低压子午线轮胎技术可相对降低土壤紧实度和土壤容重、提高土壤含水率和土壤孔隙度。且随着土壤深度的增加,超低压子午线轮胎技术降低土壤压实影响的效果逐渐减弱。

(2)基于 CRITIC-熵权法,以土壤紧实度、土壤含水率、土壤容重、土壤孔隙度为指标,构建了土壤压实综合评价模型。经过模型测算,各深度处超低压子午线轮胎压实后的土壤状况均优于普通子午线轮胎,且同种农用轮胎技术下,表层土壤压实状况优于下层土壤。

参 考 文 献

[1] 农业农村部,国家发展改革委,财政部,国土资源部,环境保护部,水利部. 关于印发《东北黑土地保护规划纲要(2017—2030 年)》的通知[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2017/dqq/201801/t20180103_6133926.htm.

[2] 人民网. 采取有效措施把黑土地保护好利用好[EB/OL]. <http://country.people.com.cn/n1/2020/0729/c419842-31801724.html>.

[3] 农业农村部,国家发展和改革委员会,财政部,水利部,科学技术部,中国科学院,国家林业和草原局. 关于印发《国家黑土地保护工程实施方案(2021—2025 年)》的通知[EB/OL]. http://www.moa.gov.cn/nybg/2021/202109/202112/t20211207_6384018.htm.

[4] 石彦琴,陈源泉,隋鹏,等. 农田土壤紧实的发生、影响及其改良[J]. 生态学杂志,2010,29(10):2057-2064. SHI Yanqin, CHEN Yuanquan, SUI Peng, et al. Cropland soil compaction: its causes, influences, and improvement[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(10): 2057-2064. (in Chinese)

[5] 张兴义,隋跃宇,孟凯. 农田黑土机械压实及其对作物产量的影响[J]. 农机化研究,2002,24(4):64-67. ZHANG Xingyi, SUI Yueyu, MENG Kai. The press hard of field black soil and it's influence on the yield of grain[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2002, 24(4): 64-67. (in Chinese)

[6] 高爱民,韩正晟. 小麦收割机对免耕地土壤压实的试验研究[J]. 甘肃农业大学学报,2006,41(6):142-145.

- GAO Aimin, HAN Zhengsheng. Experimental research of soil compaction by wheat reaping machine in no-tillage field[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2006, 41(6): 142–145. (in Chinese)
- [7] SALINAS-GARCIA J R, MATOCHA J E, HONS F M. Long-term tillage and nitrogen fertilization effects on soil properties of an Alfisol under dry land corn/cotton production[J]. Soil and Tillage Research, 1997, 42(1): 79–93.
- [8] 迟仁立,左淑珍,夏平,等. 不同程度压实对土壤理化性状及作物生育产量的影响[J]. 农业工程学报,2001,17(6):39–43.
CHI Renli, ZUO Shuzhen, XIA Ping, et al. Effects of different level compaction on the physicochemical characteristics of soil and crop growth[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(6): 39–43. (in Chinese)
- [9] 焦彩强,王益权,刘军,等. 关中地区耕作方法与土壤紧实度时空变异及其效应分析[J]. 干旱地区农业研究,2009, 27(3):7–12.
JIAO Caiqiang, WANG Yiquan, LIU Jun, et al. Spatial-temporal variability of soil hardness and effect of soil hardness on other soil properties in rotary tillage in Guanzhong farmland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(3): 7–12. (in Chinese)
- [10] 王宪良,王庆杰,李洪文,等. 免耕条件下轮胎压实对土壤物理特性和作物根系的影响[J]. 农业机械学报,2017, 48(6):168–175.
WANG Xianliang, WANG Qingjie, LI Hongwen, et al. Effect of tyre induced soil compaction on soil properties and crop root growth under no-tillage system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 168–175. (in Chinese)
- [11] TAGHAVIFAR H, MARDANI A. Effect of velocity, wheel load and multi pass on soil compaction[J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2013, 13(1): 57–66.
- [12] SIVARAJAN S, MAHARLOOEI M, BAJWA S G, et al. Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 175(1): 234–243.
- [13] 刘宁,李新举,郭斌,等. 机械压实过程中复垦土壤紧实度影响因素的模拟分析[J]. 农业工程学报,2014,30(1):183–190.
LIU Ning, LI Xinju, GUO Bin, et al. Simulation analysis on influencing factors of reclamation soil compaction in mechanical compaction process[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(1): 183–190. (in Chinese)
- [14] 孙景彬,褚宏丽,刘琪,等. 山地履带拖拉机坡地等高线作业土壤压实应力研究[J]. 农业机械学报,2022,53(7):30–42.
SUN Jingbin, CHU Hongli, LIU Qi, et al. Distribution of soil compaction stress during contour line operation of hillside crawler tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 30–42. (in Chinese)
- [15] SMITH D L O, DICKSON J W. Contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1990, 46(1): 13–29.
- [16] TOBIAS S, HENNES M, MEIER E, et al. Estimating soil resilience to compaction by measuring changes in surface and subsurface levels[J]. Soil Use and Management, 2001, 17(4): 229–234.
- [17] SHAHGOLI G, ABUALI M. Measuring soil compaction and soil behavior under the tractor tire using strain transducer[J]. Journal of Terramechanics, 2015, 59(6): 19–25.
- [18] 张兴义,孟凯,隋跃宇. 黑土区机械对玉米和大豆地压实作用的研究[J]. 耕作与栽培,2001, 21(5):13–14.
- [19] 乔金友,张丹,张宏彬,等. 大中小型拖拉机压实对土壤紧实度和大豆产量的影响[J]. 农业工程学报,2019,35(21): 26–33.
QIAO Jinyou, ZHANG Dan, ZHANG Hongbin, et al. Effects of soil compaction by various tractors on soil penetration resistance and soybean yields[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 26–33. (in Chinese)
- [20] 桂飏芳. 农业子午线轮胎市场概况和技术发展特点[J]. 中国橡胶, 2014, 30(3):17–18.
- [21] 马立强,王良羽,王丞. 城市工业废弃地再利用项目的溢出效应评价——基于改进的 CRITIC-熵权赋权法[J]. 南京林业大学学报(人文社会科学版),2022, 22(4): 68–79.
MA Liqiang, WANG Liangyu, WANG Cheng. Evaluation of spillover effects of urban industrial wasteland reuse projects based on improved CRITIC-Entropy weighting approach[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Humanities and Social Sciences Edition), 2022, 22(4): 68–79. (in Chinese)
- [22] 吴忠,关娇,何江. 最低工资标准测算实证研究——基于 CRITIC-熵权法客观赋权的动态组合测算[J]. 当代经济科学,2019, 41(3): 103–117.
WU Zhong, GUAN Jiao, HE Jiang. An empirical study on the calculation of minimum wage wtdandard dynamic combination calculation based on objective weight of CRITIC-Entropy weight method[J]. Modern Economic Science, 2019, 41(3): 103–117. (in Chinese)
- [23] 卢秉福,周艳丽,耿贵. 土壤机械压实与甜菜生长研究进展[J]. 中国农学通报, 2014, 30(21):35–39.
LU Bingfu, ZHOU Yanli, GENG Gui. Research evolvement on mechanized compaction and sugar beet growth[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(21): 35–39. (in Chinese)
- [24] 周艳丽,卢秉福. 农田机械压实对土壤物理特性的影响[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(9):66–70.
ZHOU Yanli, LU Bingfu. Influence on soil physical properties for farmland mechanical compaction[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(9): 66–70. (in Chinese)
- [25] 劳秀荣,吴子一,高燕春. 长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J]. 农业工程学报, 2002, 18(2): 49–52.
LAO Xiurong, WU Ziyi, GAO Yanchun. Effect of long-term returning straw to soil on soil fertility[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 49–52. (in Chinese)

[26] 李勇,赵云泽,勾宇轩,等. 黄淮海旱作区农田耕层土壤结构特征与其影响因素[J]. 农业机械学报,2022,53(3):321–330.
LI Yong, ZHAO Yunze, GOU Yuxuan, et al. Characteristics and influencing factors of topsoil structure of farmland in dry farming region of Huang–Huai–Hai[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(3):321–330. (in Chinese)

[27] 丁肇,李耀明,唐忠. 轮式和履带式车辆行走对农田土壤的压实作用分析[J]. 农业工程学报, 2020, 36(5): 10–18.
DING Zhao, LI Yaoming, TANG Zhong. Compaction effects of wheeled vehicles and tracked on farmland soil [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5):10–18. (in Chinese)

[28] 刘婵韬,徐岚俊,李小龙,等. 超低压子午线农用轮胎试验应用与推广前景[J]. 农业工程,2016,6(增刊2):39–41,44.
LIU Xingtao, XU Lanjun, LI Xiaolong, et al. Test application and promotion prospects of ultra-low pressure radial agricultural tire[J]. Agricultural Engineering, 2016, 6(Supp.2): 39–41, 44. (in Chinese)

[29] 杨瑞. 轮胎气压解决方案[J]. 物流技术与应用(货运车辆), 2011, 34(10):33.

[30] 王宪良. 农机作业土壤压实评价及组合铲松土技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2018.
WANG Xianliang. Study on the evaluation of soil compaction by agricultural tire and combination shovel loose soil technology [D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[31] 安晶,张玉龙,邹洪涛,等. 深松和压实对旱地棕壤硬度和水分入渗性能的影响[J]. 土壤通报,2016,47(5):1107–1112.
AN Jing, ZHANG Yulong, ZOU Hongtao, et al. Quantifying the influence of deep ripping and compaction on soil strength and water infiltration of brown earth[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(5): 1107–1112. (in Chinese)

[32] 王浩. 稻麦轮作下收割机械对土壤机械压实的研究[D]. 南京:南京农业大学, 2018.
WANG Hao. Study on soil mechanical compaction by harvesting machinery under rice-wheat rotation [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018. (in Chinese)

(上接第 84 页)

[16] PIRE T, FISCHER T, CASTRO G, et al. S–PTAM: stereo parallel tracking and mapping[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2017,93: 27–42.

[17] ZHANG Z, ZHANG J, TANG Q. Mask R–CNN based semantic RGB–D SLAM for dynamic scenes[C]//2019 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2019: 1151–1156.

[18] ZHAO X, ZUO T, HU X. OFM–SLAM: a visual semantic SLAM for dynamic indoor environments[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021,2021: 1–16.

[19] BESCOS B, FACIL J M, CIVERA J, et al. DynaSLAM: tracking, mapping, and inpainting in dynamic scenes[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018,3(4): 4076–4083.

[20] BLOCH V, LEVIT H, HALACHMI I. Assessing the potential of photogrammetry to monitor feed intake of dairy cows[J]. Journal of Dairy Research, 2019,86(1): 34–39.

[21] SHELLEY A N, LAU D L, STONE A E, et al. Short communication: measuring feed volume and weight by machine vision [J]. Journal of Dairy Science, 2016,99(1): 386–391.

[22] BEZEN R, EDAN Y, HALACHMI I. Computer vision system for measuring individual cow feed intake using RGB–D camera and deep learning algorithms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020,172: 105345.

[23] 杨存志,李源源,杨旭,等. FR–200 型奶牛智能化精确饲喂机器人的研制[J]. 农机化研究, 2014,36(2): 120–122.
YANG Cunzhi, LI Yuanyuan, YANG Xu, et al. The development of cow intelligent precise feeding robot of FR–200[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014,36(2): 120–122. (in Chinese)

[24] 万畅,谭戡,郑永军,等. 饲草推送机器人磁条导航自动充电研究[J]. 农业机械学报, 2018,49(增刊): 1–7.
WAN Chang, TAN Yu, ZHENG Yongjun, et al. Automatic charging of forage pushing robot by magnetic stripe navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(Supp.): 1–7. (in Chinese)

[25] 韩振浩,李佳,苑严伟,等. 基于 U–Net 网络的果园视觉导航路径识别方法[J]. 农业机械学报, 2021,52(1): 30–39.
HAN Zhenhao, LI Jia, YUAN Yanwei, et al. Path recognition of orchard visual navigation based on U–Net[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(1): 30–39. (in Chinese)

[26] 孟庆宽,张漫,仇瑞承,等. 基于改进遗传算法的农机具视觉导航航线检测[J]. 农业机械学报, 2014,45(10): 39–46.
MENG Qingkuan, ZHANG Man, QIU Ruicheng, et al. Navigation line detection for farm machinery based on improved genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(10): 39–46. (in Chinese)

[27] BOLYA D, ZHOU C, XIAO F, et al. YOLACT: real-time instance segmentation [C] // Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision, 2019: 9157–9166.

[28] STURM J, ENGELHARD N, ENDRES F, et al. A benchmark for the evaluation of RGB–D SLAM systems[C] // 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2012: 573–580.