

# 中型拖拉机压实对测试截面土壤坚实度和含水率的影响

乔金友<sup>1</sup>, 霍东旭<sup>1</sup>, 张险峰<sup>2</sup>, 刘立意<sup>1</sup>, 孙健<sup>1</sup>, 陈海涛<sup>1</sup>

(1. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学向阳实验实习与示范基地, 哈尔滨 150039)

**摘要:**以黑龙江省黑土区垄作旱田为研究对象,采用中型拖拉机开展压实试验,提出一种农业机械压实后土壤坚实度和含水率试验数据测试创新方法,对科学合理使用农业机械、保持和提升黑土区耕地生产能力具有重要理论和实际意义。设压实1~5次及对照(CK)6种处理,测试时,在压实辙印垂直方向以辙印中点为中心取7个测点(每测点间隔10 cm),测量0~40 cm土层土壤坚实度和0~20 cm土层土壤含水率。结果表明,中型拖拉机压实对压实辙印下方及两侧土壤均产生影响,拖拉机压实后测试截面明显形成土壤坚实度较大影响区域,其影响范围和程度随压实次数增加而增加;在0~20 cm土层,连续压实2~5次后测试截面土壤坚实度超过1 000 kPa,影响作物根系生长发育;中型拖拉机压实对辙印下方5~20 cm土层土壤坚实度影响最大,压实5次处理土壤坚实度与对照相比增加107.4%,且各压实处理土壤坚实度随测试深度增加均呈类似“鼻形”曲线;土层深度、压实次数、测点位置及各因素交互作用均为影响土壤坚实度显著因素( $P<0.01$ ),其中土层深度和压实次数为最重要因素;中型拖拉机压实致使辙印下方0~20 cm土层土壤含水率增高,与两侧测点相比增加11.3%~27.6%,与对照相比增加25.8%~36.7%。

**关键词:**农业机械化;压实;土壤坚实度;土壤含水率;测试截面

中图分类号: S232 文献标志码: A 文章编号: 1005-9369(2021)06-0087-10

乔金友, 霍东旭, 张险峰, 等. 中型拖拉机压实对测试截面土壤坚实度和含水率的影响[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(6): 87-96. DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2021.06.0010.

Qiao Jinyou, Huo Dongxu, Zhang Xianfeng, et al. Effects of medium tractor compaction on soil penetration resistance and moisture content of testing cross section[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(6): 87-96. (in Chinese with English abstract) DOI: 10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2021.06.0010.

**Effects of medium tractor compaction on soil penetration resistance and moisture content of testing cross section/QIAO Jinyou<sup>1</sup>, HUO Dongxu<sup>1</sup>, ZHANG Xianfeng<sup>2</sup>, LIU Liyi<sup>1</sup>, SUN Jian<sup>1</sup>, CHEN Haitao<sup>1</sup>(1. School of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Xiangyang Experimental Practice and Demonstration Base, Northeast Agricultural University, Harbin 150039, China)**

**Abstract:** Took typical upland black soil area in Heilongjiang province as the research object, adopt medium tractor implement compaction test, this article proposed an innovative method for testing soil penetration resistance and moisture content after agricultural machinery compaction. Study the influence of agricultural machinery compaction on the soil physical properties had important theoretical and practical significance for the scientific use of agricultural machinery, maintaining and improving the productivity of cultivated land in the black soil area. A total of six treatments for compaction 1-5 times and uncompacted contrast (CK), took seven measuring points in the vertical direction of the compacted rut with the midpoint of the rut as the center (each measuring point interval of 10 cm), measured soil penetration resistance of 0-40 cm soil layer and soil moisture content of 0-20 cm soil layer. The research results showed that, with the increase of compaction times by the medium-sized tractor, the soil penetration resistance of the testing cross section increased, and the soil penetration resistance under the compaction trace increased most obviously; At the 5-20 cm soil layer and the testing points of

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项项目(201503119-6); 国家大豆产业技术体系岗位科学家任务(CARS-04-PS24)

作者简介: 乔金友(1969-), 男, 教授, 博士, 研究方向为农业机械化生产与管理。E-mail: qiaojinyou@163.com

10-50 cm, after compaction the test cross section obviously formed a compaction affected area with larger soil penetration resistance, and its impact range and extent increased with the increase of compaction times; In the soil layer of 0-20 cm, the soil penetration resistance of the contrast treatment was less than 800 kPa, but after continuous compaction for 2-5 times, the soil penetration resistance exceeded 1 000 kPa, which affect the growth and development of crop roots; Below the rut, the area of with larger soil penetration resistance increased with the increase of compaction times, and the area with little soil penetration resistance decreased with the increase of compaction times. The soil penetration resistance of the 0-20 cm soil layer changed the most and the soil penetration resistance of each compaction treatment showed a "nose-shaped" curve as the testing depth increased, and with the increase of the compaction times, the nose-shaped area became more and more obvious; Soil layer, compaction times, testing points and the interaction of various factors were all significant factors affecting soil penetration resistance ( $P < 0.01$ ), of which the soil layer and compaction times were the most important factors; The medium-sized tractor compaction, resulting in an increase in the soil moisture content of the 0-20 cm soil layer below the rut, which increased by 11.3%-27.6% compared with the testing points on both sides. Compared with the contrast treatment, the soil moisture content of each compaction treatment increased by 25.8%-36.7%.

**Key words:** agriculture mechanization; compaction; soil penetration resistance; soil moisture content; testing cross section

东北黑土区为世界三大黑土带之一,黑土有机质含量高、土壤肥沃,是宝贵的土壤资源。2020年2月,农业农村部以及财政部印发《东北黑土地保护性耕作行动计划》指出,要运用机械化手段解决东北黑土地保护问题<sup>[1]</sup>。2020年7月,习近平总书记在吉林省考察时强调,要采取有效措施保护好黑土地这一“耕地中的大熊猫”<sup>[2]</sup>,可见保护黑土、促进黑土区可持续发展在农业发展中占重要地位。但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,带来的土壤压实问题也日趋严重<sup>[3]</sup>,成为影响黑土区耕地生产能力重要因素。土壤压实是因土壤表面受到压力使土壤孔隙度降低、土壤颗粒排列紧密,导致土壤坚实度、土壤容重增加的过程<sup>[4]</sup>。土壤压实影响作物根系生长发育,降低养分吸收及水分利用能力,最终影响作物产量<sup>[5-6]</sup>。同时,土壤压实后,蓄水能力下降,非毛细孔隙减少,造成地表径流,水土流失,养分流失,生产能力降低,直接威胁农业生产及粮食安全<sup>[7-8]</sup>。

在全程机械化农业生产中耕整地、种植、田间管理、收获、秸秆处理等各作业环节,均造成土壤压实,有些作业环节使机组短时间反复多次进地作业,严重压实土壤。农业生产中土壤压实程度受多种因素影响,包括轮胎接地压力<sup>[9-10]</sup>、车轮载荷<sup>[11]</sup>、压实次数<sup>[12-13]</sup>、土壤含水量<sup>[14]</sup>及土壤质

地<sup>[15-16]</sup>等。研究表明,农业机械压实改变土壤坚实度、土壤含水率等土壤物理特性。张兴义等试验发现,小型拖拉机压实1次,土壤坚实度明显增加,随压实次数增加,土壤坚实度增幅变小<sup>[17]</sup>。Taghavifar等试验得出增大轮胎载荷、增加机械作业次数均增大黏土区土壤坚实度<sup>[18]</sup>。周艳丽等研究表明,拖拉机压实1次使土壤容重增加13.3%,土壤含水率降低1.4%,压实1~3次后土壤坚实度增幅变小,土壤含水量降幅减缓<sup>[19]</sup>。乔金友等采用大、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<sup>[20]</sup>。土壤压实还会对作物生长及产量产生间接影响。Buttrey等发现,作物根系无法穿过压实后土壤获得养分,导致产量降低<sup>[21]</sup>。Reintam等研究表明,即使重量较小的拖拉机多次压实同样导致作物产量大幅降低<sup>[22]</sup>。Morales等研究发现,压实和过度松弛的土壤均导致大豆产量下降,在压实土壤中,根系生长受到明显影响<sup>[23]</sup>。

综上所述,国内外学者在农业机械压实对土壤坚实度、容重等土壤物理性状以及对不同作物产量影响等方面开展大量研究,但关于农业机械压实次数对不同压实测点和不同深度土壤物理指标的影响规律研究较少。本文以黑土区垄作旱田为研究对象,采用中型拖拉机实施压实试验,研

究不同测点和不同土层构成的测试截面土壤坚实度及土壤含水率随不同拖拉机压实次数变化规律, 揭示农业机械与土壤相互作用机理, 为科学合理使用农业机械、保持和提升黑土区耕地生产能力提供理论和技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验于东北农业大学向阳实验实习与示范基地(44°04' N, 125°42'E)开展, 试验基地位于第一积温带, 年平均温度3.5~4.5℃, 有效积温(>10℃)2 600~2 700℃, 年均降雨量400~600 mm, 无霜期135~145 d。试验基地土壤类型为典型黑土, 土壤质地为粉壤土(砂粒5.3%, 粉粒68.5%, 黏粒28.9%)。试验区前茬作物为玉米, 收获后采用深翻耙地起垄(翻地深度25 cm)方式整地, 在春季播种前实施压实试验。

### 1.2 试验方案设计

依据试验地区农业机械化实际生产情况, 采用具有广泛代表性的中型拖拉机约翰迪尔904(John Deere 904)模拟农业机组作业过程压实土壤, 供试拖拉机基本技术参数为: 功率66.18 kW, 外形尺寸4 217×1 890×2 782 mm, 使用质量4 150 kg, 轮距1 950 mm, 轴距2 310 mm, 轮胎规格前轮: 12.4~24, 后轮: 16.9~34, 接地比压55 481 Pa。试验共设置压实1~5次及未压实对照(CK)6种处理,

各压实处理均设置3次重复, 分别错位排列在3个测试列区中, 共18个试验小区。试验小区长20 m, 小区间及列区两端地头均设有6 m缓冲区, 为拖拉机压实准备、转弯或转移区域, 试验区总长度162 m; 拖拉机压实轮辙与测试列区边界间设置1.3 m(2垄)保护行, 故测试列区宽度为4.55 m(7垄), 试验区总宽度为13.65 m(21垄)。为保证测试结果准确, 试验实施过程中控制拖拉机行驶速度为3 km·h<sup>-1</sup>, 且沿同方向行走压实。

### 1.3 测试设备及试验数据测试方法

采用SC-900土壤坚实度仪(美国Spectrum)测量不同压实处理土壤坚实度, 该仪器每隔2.5 cm自动测量并记录土壤坚实度数值, 一次测试可获取0~40 cm土层17个等距土壤坚实度数据。采用TDR-300土壤水分仪(美国Spectrum)测定不同压实处理0~20 cm土层土壤体积含水率。

测试时, 在与压实辙印垂直方向以辙印中点为中心取7个测点(每测点间隔10 cm), 测量0~40 cm土层土壤坚实度和0~20 cm土层土壤含水率。构成60 cm×40 cm土壤坚实度测试截面和60 cm×20 cm土壤含水率测试截面, 测点分布如图1所示。拖拉机前轮压过的点为第20~40 cm测点, 后轮压过的点为第10~50 cm测点。为保证试验数据客观性和准确性, 在各压实小区压实轮辙处随机选取3个截面测取土壤坚实度, 各测试截面重复9次。

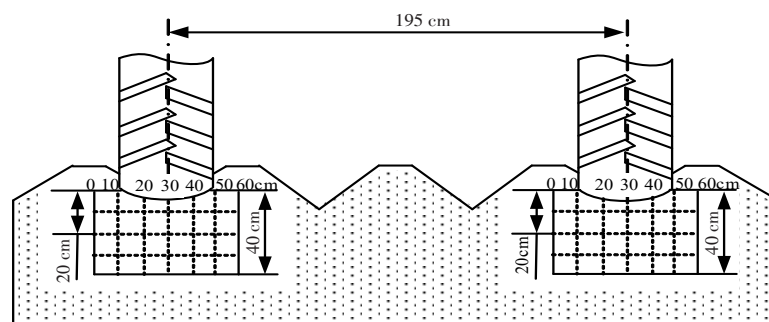


图1 测试截面测点分布

Fig. 1 Distribution of testing points in testing cross section

### 1.4 数据处理与分析方法

为减少测量过程中人为或环境因素引起的误差, 需对数据作粗大误差剔除。将各处理土壤的坚实度、土壤含水率9个截面数据整合为相同处理、相同测点和相同深度的同质数据, 依据罗曼

诺夫斯基准则<sup>[24]</sup>, 依次剔除各处理同质数据中粗大误差。首先选择同质数据中一个可疑测量值(极值), 然后按 $t$ 分布检验该可疑值, 如果是粗大误差, 则剔除数据, 并检验剩余数据, 直至数据中无粗大误差。采用Matlab 2020(b)编制相应程序,

依次整理、检验和剔除各压实处理测取的6 804个土壤坚实度和土壤含水率数据。选取压实1、3、5次处理第30 cm测点数据作剔除粗大误差前后对比

比,如图2所示,可看出剔除粗大误差数据前后,各压实处理数据总体变化趋势不变,但数据标准偏差变小。

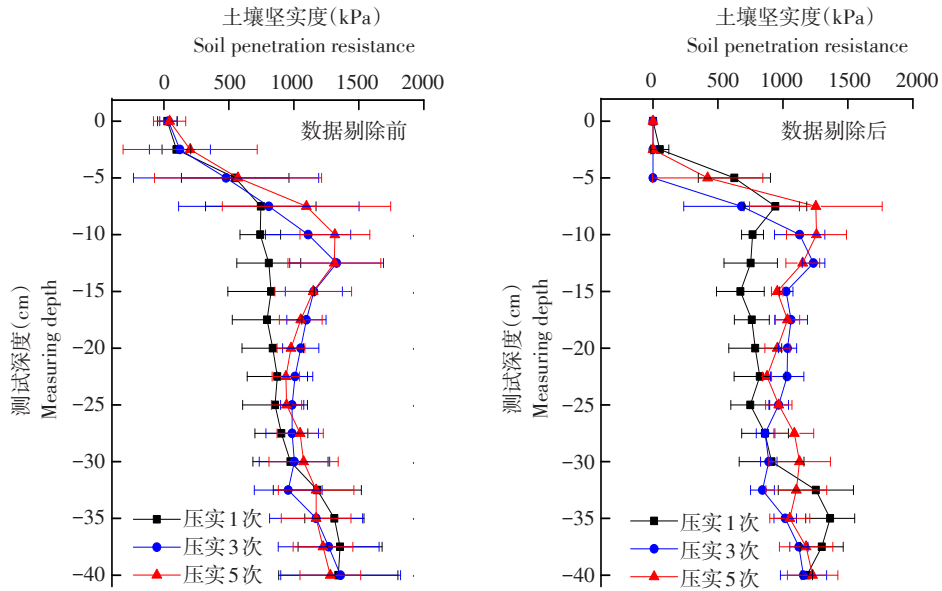


图2 粗大误差数据剔除前后对比

Fig. 2 Comparison before and after error data removal

剔除粗大误差数据后,采用SPSS 23.0统计软件作方差分析,并采用最小显著性差异检验法(Least significant difference, LSD)作多重比较( $P=0.05$ ),使用Surfer 12.0、Origin 2016软件绘制不同压实处理土壤坚实度等值线图及压实辙印下方不同压实处理土壤坚实度、含水率曲线图,以分析不同压实次数、不同土层、不同测点土壤坚实度和土壤含水率变化规律。

## 2 结果与分析

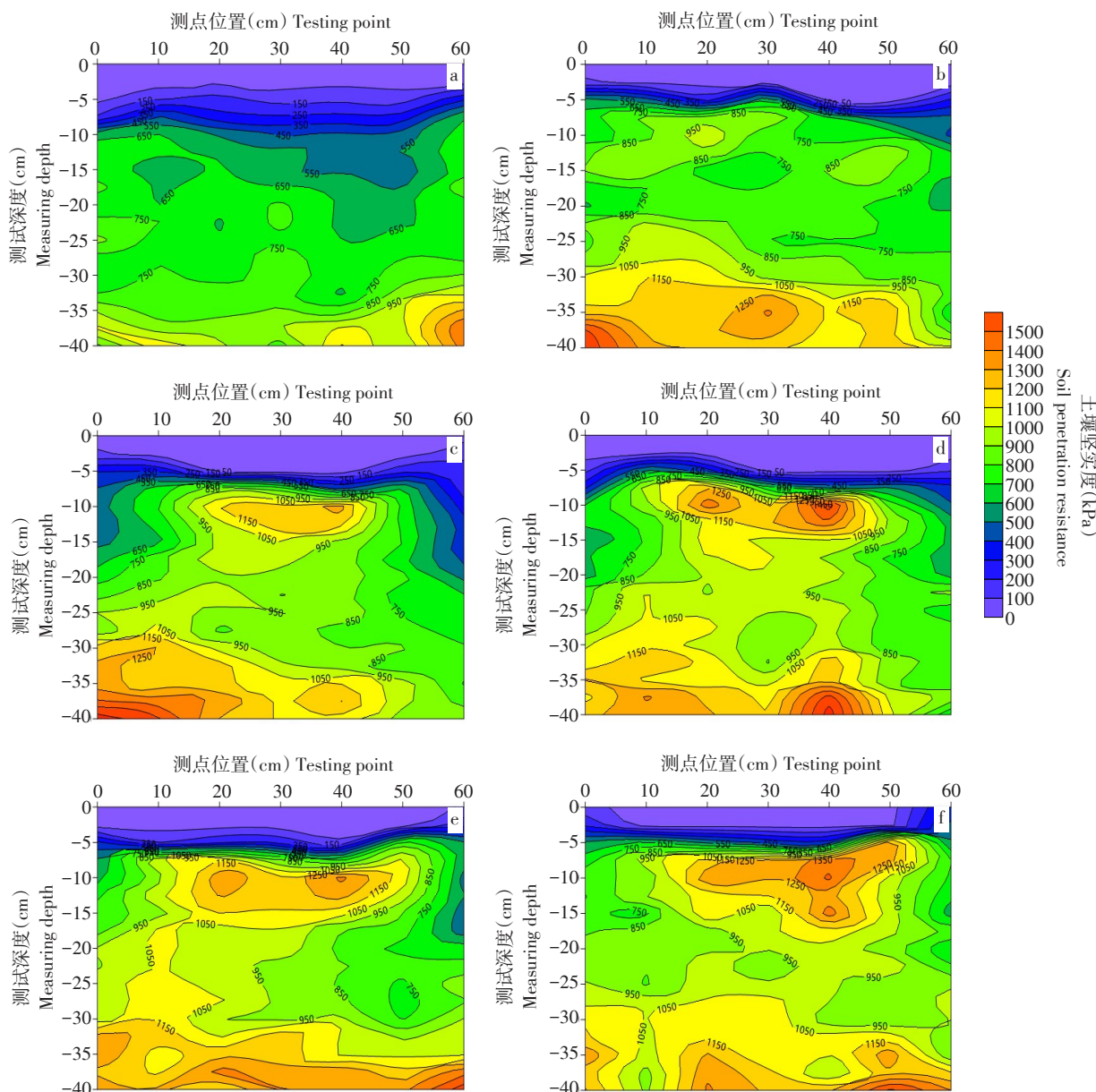
### 2.1 拖拉机压实对测试截面土壤坚实度影响分析

采用Surfer 12.0软件绘制不同压实处理、不同深度、不同测点土壤坚实度等值线图,直观表达不同压实处理测试截面土壤坚实度变化规律,如图3所示。

由图3可知,在0~5 cm表层各处理土壤坚实度均较小;随压实次数增加,拖拉机压实对测试截面土壤影响区域和程度增加,主要体现在10~50 cm测点在5~20 cm土层土壤坚实度变化;而在30~40 cm土层,拖拉机压实1次土壤坚实度明显增加,压实2~5次,该土层压实影响区域和土壤坚实度未提升。

由图3a可知,对照处理测试截面各测点同土

层土壤坚实度差异较小,且土壤坚实度总体上不超过1 000 kPa。由于车轮压实作用,拖拉机压实1次测试截面土壤坚实度增加(见图3b),与对照处理相比,压实1次致使5~10 cm土层土壤坚实度增加300~400 kPa、30~40 cm土层土壤坚实度增加200 kPa。压实2次测试截面土壤坚实度如图3c所示,在第20~40 cm测点位置5~15 cm土层形成较为明显压实影响区域,该区域土壤坚实度最大值达1 150 kPa;与对照处理相比,5~15 cm土层土壤坚实度增加600 kPa,30~40 cm土层土壤坚实度增加200~250 kPa。压实3次(见图3d),影响区域的宽度增加为10~50 cm测点,与压实轮胎宽度相符,且5~17.5 cm土层压实影响区域土壤坚实度最大值达1 250 kPa;与对照处理相比,5~17.5 cm土层土壤坚实度增加750 kPa,30~40 cm土层土壤坚实度增加250~350 kPa。压实4次测试,截面土壤坚实度如图3e所示,与压实3次相比,压实4次影响区域面积、位置及土壤坚实度变化较小。压实5次(见图3f),影响区域深度扩大至5~20 cm土层,该区域土壤坚实度为1 050~1 350 kPa,与对照处理相比,5~20 cm土层土壤坚实度增加550~850 kPa、30~40 cm土层土壤坚实度增加200~300 kPa。



a-对照CK; b-压实1次; c-压实2次; d-压实3次; e-压实4次; f-压实5次。测点位置中30 cm测点为拖拉机压实辙印中心位置。  
 a-CK; b-Compaction one time; c-Compaction two times; d-Compaction three times; e-Compaction four times; f-Compaction five times. The "30 cm point" in the testing point position is the center of tractor compaction trace.

图3 不同压实处理测试截面土壤坚实度等值线图

Fig. 3 Contour maps of soil penetration resistance under different treatments

2.2 压实辙印下方测试截面土壤坚实度规律分析

由上述分析可知，拖拉机压实使第10~50 cm测点土壤坚实度数值变化最大，此宽度与轮胎压实辙印大致相同，因此研究拖拉机压实辙印下方不同压实处理随深度变化规律更具代表性。绘制不同压实处理下不同深度土壤坚实度变化折线如图4所示、不同土层不同压实处理土壤坚实度差异显著性如表1所示，以分析不同压实处理压实辙印下方测试截面各测点土壤坚实度均值随测试深度

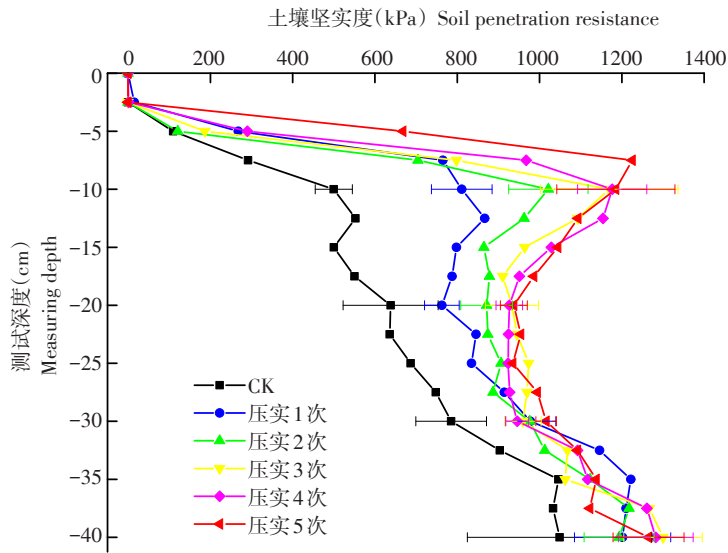
变化规律。

由图4可知，压实辙印下方各处理土壤坚实度均随测试深度增加而增加，同测试深度土壤坚实度随压实次数增加呈增加趋势，具有累积效果。拖拉机压实1次使土壤坚实度明显增加，压实2~5次时单次压实土壤坚实度增加缓慢。拖拉机压实后各压实处理均出现类似鼻形曲线<sup>[6]</sup>，且“鼻形曲线”峰值对应土层随压实次数增加上移。

由表1可知，压实辙印下方不同压实次数对不

同土层土壤坚实度影响不同。在0~5 cm土层，压实5次土壤坚实度显著高于压实1、2次以及对照处理，除压实5次处理外其他处理土壤坚实度差异均不显著。在5~20 cm土层，各压实处理土壤坚实度随深度增加呈先快速增加再下降趋势，并在10 cm土层达到峰值(见图4)。压实1~5次土壤坚实度显著高于对照处理，相比增加47.1%~107.4%；压实5次土壤坚实度最大达1 018 kPa。压实1、2次处理间，压实3、4、5次处理间土壤坚实度差异均不显著，且压实3、4、5次土壤坚实度显著高于压实1、2次处理，相比增加27.1%。在20~30 cm土层，各压实处理土壤坚实度随深度增加缓慢增

加。各压实处理土壤坚实度均显著高于对照，相比增加23.1%~39.5%，而压实1~5次处理间土壤坚实度差异均不显著。在30~40 cm土层，各压实处理土壤坚实度随深度增加呈波动增加，增加速率较小。拖拉机压实1~5次土壤坚实度差异不显著，但显著高于对照处理，相比增加27.0%~31.6%。综合来看，对照和压实1次处理各土层间土壤坚实度差异均显著；压实2、3、4次处理30~40 cm土层土壤坚实度显著高于20~30 cm土层，20~30 cm土层与5~20 cm土层土壤坚实度差异均不显著；压实5次处理，5~20 cm土层与20~40 cm各土层土壤坚实度差异均不显著。



图中误差线分别表示0~10、10~20、20~30和30~40 cm土层不同处理土壤坚实度标准差。

The error bars in the figure represent the standard deviations of soil penetration resistance of 0-10, 10-20, 20-30 and 30-40 cm soil layers under different treatments.

图4 各处理压实辙印下方土壤坚实度折线图

Fig. 4 Soil penetration resistance of different treatments below the rut

表1 不同土层不同压实处理辙印下方土壤坚实度

Table 1 Soil penetration resistance of different soil layers under different compaction treatments below the rut

土层 Soil layers	CK	压实1次 Compaction one time	压实2次 Compaction two times	压实3次 Compaction three times	压实4次 Compaction four times	压实5次 Compaction five times
0~5 cm	51.2Aa	94.4Aab	81.2Aa	103.4Aab	97.0Aab	167.4Ab
5~20 cm	491.2Ba	722.6Bb	776.4Bb	912.2Bc	927.7Bc	1 018.9BCc
20~30 cm	704.4Ca	867.0Cb	903.0Bb	956.2Bb	929.5Bb	982.3Bb
30~40 cm	874.8 Da	1151.6 Db	1110.6Cb	1131.4Cb	1139.7Cb	1126.9Cb

注：大写字母表示同压实处理不同土层深度土壤坚实度差异显著性，小写字母表示同土层不同压实处理间土壤坚实度差异显著性 ( $P<0.05$ )。下同。

Note: In the same treatment, different capital letters indicate the 5% difference of soil penetration resistance among different soil depths, In the same soil depth, different lowercase letters indicate the 5% difference of soil penetration resistance among different treatments ( $P<0.05$ ). The same as below.

### 2.3 拖拉机压实土壤坚实度影响因素分析

将试验所测各压实处理测试截面土壤坚实度数据导入 SPSS 23.0 软件，通过正态性检验证实其符合正态分布。将压实次数(压实 0~5 次)、测点位置(0~60 cm 测点位置)和土层深度(0~10、10~20、20~30、30~40 cm)作为固定因子，运用多因素方差分析方法评判这 3 个因素对土壤坚实度影响程度。

结果如表 2 所示。

由表 2 可见，中型拖拉机压实后，3 个因素对土壤坚实度均有极显著影响( $P < 0.01$ )，影响程度为：土层深度( $F = 321.726$ ) > 压实次数( $F = 53.756$ ) > 测点位置( $F = 42.278$ )。各因素交互作用也对土壤坚实度有极显著影响( $P < 0.01$ )，其中“压实次数×土层深度”对土壤坚实度影响最大( $F = 7.812$ )。

表 2 土壤坚实度方差分析

Table 2 Soil penetration resistance of variance analysis

因素 Factors	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
压实次数 Compaction times	5	1 676 065.81	53.756	$P < 0.01$
测点位置 Testing points	6	1 318 185.82	42.278	$P < 0.01$
土层深度 Soil layers depth	3	10 031 203.51	321.726	$P < 0.01$
压实次数×测点位置 Compaction times × testing points	30	166 227.32	5.331	$P < 0.01$
压实次数×土层深度 Compaction times × soil layers depth	15	243 580.43	7.812	$P < 0.01$
测点位置×土层深度 Testing points × soil layers depth	18	227 291.97	7.290	$P < 0.01$
压实次数×测点位置×土层深度 Compaction times × testing points × soil layers depth	90	58 796.97	1.886	$P < 0.01$

### 2.4 不同压实次数不同测点土壤含水率变化规律分析

不同压实处理不同测点土壤含水率及其差异显著性如表 3 所示。可知，在整个测试截面，对照处理各测点土壤含水率变化较小，且差异不显著。压实 1、2 次时，第 10 cm 与第 50 cm 测点土壤含水率差异不显著，第 20、30 cm 测点土壤含水率差异不显著，但显著高于第 60 cm 测点。压实 3 次处理第 10~40 cm 测点土壤含水率差异不显著，第 0、50、60 cm 测点土壤含水率差异不显著。压实 4、5

次处理第 10~50 cm 测点土壤含水率差异不显著，但显著高于第 0 cm 测点，相比增加 14.5%~25.7%。

在压实辙印中间第 30 cm 测点，压实 1~4 次土壤含水率显著高于对照处理( $P < 0.05$ )，增加 20.5%~28.5%，压实 2 次处理土壤含水率显著高于其他处理，且除压实 2 次外其他压实处理间土壤含水率差异均不显著。在第 10、20、40 cm 测点，除对照处理外，其他处理土壤含水率差异均不显著。在第 0、50、60 cm 测点，各处理间土壤含水率差异均不显著。

表 3 不同测点不同压实处理土壤含水率

Table 3 Soil moisture content of different testing points under different compaction treatments

测点位置 Testing points	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm	40 cm	50 cm	60 cm
CK	38.6Aa	35.0Aa	31.6Aa	37.1Aa	34.8Aa	34.0Aa	36.9ABa
压实 1 次 Compaction one time	37.6Aab	41.8ABb	50.1Bc	47.0Bbc	44.0Bbc	39.7Ab	32.2Aa
压实 2 次 Compaction two times	39.6Aab	44.3Bb	51.9Bc	51.9Cc	45.7Bbc	42.0Aab	37.6ABa
压实 3 次 Compaction three times	37.9Aabc	44.6Bcd	47.8Bd	45.5Bd	40.5ABbcd	35.7Aab	32.9Aa
压实 4 次 Compaction four times	34.9Aa	45.0Bc	46.4Bc	44.7Bc	42.5Bbc	41.5Abc	36.8ABab
压实 5 次 Compaction five times	39.1Aa	43.8Bab	47.3Bb	46.0Bb	44.8Bab	42.0Aab	41.4Bab

综合看,除对照处理外,在压实辙印下方各压实处理第10~50 cm测点各土壤含水率高于第0、60 cm测点,且两侧第0、60 cm测点各处理间土壤含水率差异均不显著。可见,压实对辙印下方测点土壤含水率影响最大,尤其是对压实辙印中间测点。故绘制不同压实次数压实辙印中间测点土壤含水率、压实辙印下方测点土壤含水率均值和全部测试截面测点土壤含水率均值变化曲线如图5所示,以进一步分析压实对土壤含水率影响规律。

由图5可知,在压实辙印中间测点、压实辙印下方测点和全部测试截面测点的土壤含水率均随压实次数增加呈先增后减趋势,在压实2次时达到最大,但在全部测试截面测点随压实次数增

加,土壤含水率变化趋势平滑,各处理差异较小。各压实处理辙印中间测点土壤含水率>压实辙印下方测点土壤含水率>全部测试截面测点土壤含水率,同样表明拖拉机压实对辙印下方测点土壤含水率影响最大。在压实辙印下方测试截面,各压实处理0~20 cm土层土壤含水率高于对照处理,压实2次土壤含水率平均为47.2%,与对照相比增加36.7%,而其他压实处理土壤含水率为43.4%~44.8%,与对照相比增加25.8%~29.8%,且差异均不显著(见表4)。压实辙印下方0~20 cm土层土壤含水率高于两侧其他测点,相比增加11.3%~27.6%,各处理间两侧测点均差异不显著,且从两侧测点到压实辙印中间测点各压实处理土壤含水率逐渐提高。

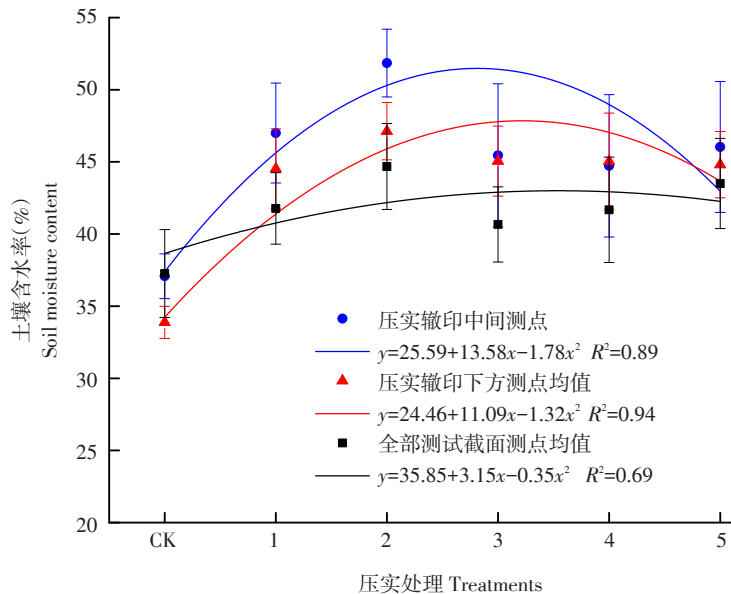


图5 不同压实处理土壤含水率变化

Fig. 5 Change of soil moisture content of different compaction treatments

### 3 讨论与结论

#### 3.1 拖拉机压实对土壤坚实度影响

土壤压实程度可由土壤坚实度、容重、孔隙度等指标表征,且压实后土壤坚实度和容重增加,土壤孔隙度降低<sup>[30]</sup>,其中土壤坚实度是衡量土壤压实程度重要指标。在0~30 cm土层,当土壤坚实度大于1 000 kPa时,农作物根系生长速度减慢;当土壤坚实度大于2 000 kPa时,会限制作物根系生长发育,甚至停止生长<sup>[25-26]</sup>。本试验中,在0~20 cm土层,对照处理土壤坚实度小于800 kPa,但连续

压实2次后,该土层土壤坚实度达到1 000 kPa,连续压实5次后土壤坚实度最高达到1 500 kPa(见图3),可知,中型拖拉机连续压实对作物生长影响不容忽视,为保护土壤,不影响作物生长,应尽量减少拖拉机连续进地作业次数。研究表明,中型拖拉机压实后测试截面土壤坚实度随压实次数增加而递增,且压实影响区域和程度也随压实次数增加而增加,这与乔金友等研究大中型拖拉机压实试验对黑土影响规律一致<sup>[20]</sup>,而本试验仅采用中型拖拉机实施压实试验,后续试验研究应完善拖拉机类型。本试验中,拖拉机压实对辙印

下方区域土壤坚实度影响最显著, 未受车轮碾轧测点位置土壤坚实度也有所增加, 是因压实垂直应力峰值发生在轮胎中心处, 且此应力由压实辙印下方中心处逐渐向两侧扩散, 使两侧土壤受到中间压实土壤侧向挤压所致<sup>[27]</sup>。

本试验中, 与其他土层相比, 拖拉机压实辙印下方 5~20 cm 土层土壤坚实度变化幅度最大, 与对照相比压实 1~5 次处理土壤坚实度增加 47.1%~107.4%, 这与杨荣等通过小型拖拉机压实 5 次试验得到规律相近, 而本试验选用中型拖拉机试验, 各压实处理土壤坚实度增加幅度相比较<sup>[28]</sup>; 20~30 cm 土层各压实处理土壤坚实度增加幅度小, 拖拉机压实对该土层影响较小; 30~40 cm 土层在压实 1 次后各处理土壤坚实度无明显增加。压实辙印下方, 对照处理土壤坚实度随测试深度增加而增加, 而各压实处理土壤坚实度随测试深度增加呈类似“鼻形”带有峰值的曲线, 随压实次数增加, 0~20 cm 土层鼻形区越来越明显, 与 Sivarajan 和高爱民等研究结果一致<sup>[6, 29]</sup>, 但本试验中未分析压实后单一测点土壤坚实度, 而对压实辙印下方 10~50 cm 测点平均分析, 结果更有代表性。研究表明, 各处理 0~5 cm 土壤坚实度较小且显著低于其他土层, 是因车轮碾压剪切作用, 表层土壤变疏松。在本试验中, 对照以及压实 1 次处理, 各土层间土壤坚实度均有显著差异; 而压实 2~4 次处理 5~20 cm 土层与 20~30 cm 土层土壤坚实度无显著差异; 压实 5 次处理 5~20 cm 土层土壤坚实度与 20~40 cm 各土层土壤坚实度差异均不显著, 其原因是压实对 5~20 cm 土层土壤坚实度影响最大, 连续 5 次压实使 5~20 cm 土层土壤坚实度逐渐累积<sup>[19]</sup>, 与深层土壤坚实度差异逐渐减小。

试验表明, 压实次数、土层深度、测点位置及其交互作用均为影响土壤坚实度显著因素, 其中土层深度和压实次数为影响土壤坚实度最主要因素, 与岳龙凯研究黑土区田间机械压实试验结果一致, 但其测试时期为大豆播种后<sup>[30]</sup>, 有关不同作物类型以及测试时期下土壤坚实度影响因素变化需进一步验证。测点位置对土壤坚实度影响相对较小, 因拖拉机压实致使辙印下方第 10~50 cm 测点土壤坚实度显著增加, 压实轮辙两侧测点土壤坚实度增加较小, 各测点间土壤坚实度相差相对较小。

综上所述可知, 中型拖拉机压实不仅对测试截面土壤坚实度有影响, 还显著影响压实辙印下方土壤。且随压实次数增加, 压实影响范围和影响程度增加, 对作物根系生长和产量影响也变大。

### 3.2 拖拉机压实对土壤含水率影响

压实不仅影响土壤坚实度, 也导致土壤非毛管体积度降低, 限制土壤水分蒸发和入渗, 影响土壤水分运移过程<sup>[31]</sup>。本研究结果表明, 各压实处理土壤含水率与对照相比增加 25.8%~36.7%, 且压实辙印下方测点土壤含水率与两侧测点相比增加 11.3%~27.6%。因为试验所测土壤含水率为体积含水率, 压实使土壤总体积变小, 而土壤中水体积不变, 造成各压实处理土壤体积含水率变大, 这与张世斌研究黄土压实后体积含水率变化规律一致<sup>[32]</sup>, 而本试验中土壤含水率增加幅度较大; 周艳丽等采用小型拖拉机实施压实试验得出, 拖拉机压实使 0~25 cm 土壤含水率降低<sup>[9]</sup>, 且随压实次数增加土壤含水率增加速率变小。本试验中由于设备限制, 土壤含水率测试深度仅为 0~20 cm, 关于压实对 20 cm 以下土层土壤含水率影响有待进一步试验。拖拉机不同压实次数对应土壤含水率差异不显著, 与张军昌等在西北地区开展压实模拟试验得出结果一致<sup>[33]</sup>。

虽然拖拉机压实后土壤体积含水率有所提高, 但压实降低土壤入渗和持水能力, 尤其影响土壤水分、养分储存和供应<sup>[3]</sup>, 影响作物生长、降低作物产量以及破坏生态环境。在实际生产中, 应结合农艺要求, 优化设计机械化作业模式, 减少拖拉机压实次数, 调控土壤坚实度和土壤含水率, 改善土壤结构, 提高耕层质量, 促进农业可持续发展。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 农业农村部, 财政部. 东北黑土地保护性耕作行动计划(2020-2025) [EB/OL]. [http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg\\_1/tz/202003/t20200318\\_6339304.html](http://www.moa.gov.cn/gk/tzgg_1/tz/202003/t20200318_6339304.html). 2020-02-25/2021-01-16.
- [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>. 2020-07-27/2021-01-16.
- [3] Hamza M A, Anderson W K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions[J]. Soil and

- Tillage Research, 2005, 82 (2): 121-145.
- [ 4 ] Batey T T. Soil compaction and soil management—A review[J]. Soil Use and Management, 2010, 25(4): 335-345.
- [ 5 ] Mari G R, 姬长英, 周俊. 拖拉机田间行走对土壤特性及冬小麦生长的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 132-140.
- [ 6 ] Sivarajan S, Mharlooei M, Bajwa S, 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: 234-243.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] Place G, Bowman D, Burton M, et al. Root penetration through a high bulk density soil layer: Differential response of a crop and weed species[J]. Plant and Soil, 2008, 307(1-2): 179-190.
- [ 9 ] 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.
- [10] Botta G F, Tolon-Becerra A, Tourn M, et al. Agricultural traffic: Motion resistance and soil compaction in relation to tractor design and different soil conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 120: 92-98.
- [11] Damme L T, Stettler M, Pinet F, et al. Construction of modern wide, low-inflation pressure tyres per se does not affect soil stress [J]. Soil and Tillage Research, 2020, 204: 104708.
- [12] Cambi M, Hoshika Y, Mariotti B, et al. Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field[J]. Forest Ecology and Management, 2017, 384: 406-414.
- [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.
- [14] Mordhorst A, Zimmermann I, Peth S, et al. Effect of hydraulic and mechanical stresses on cyclic deformation processes of a structured and homogenized silty Luvic Chernozem[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 125: 3-13.
- [15] Peng X H, Horn R, Zhang B, et al. Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompact ultisols[J]. Soil and Tillage Research, 2004, 76(2): 125-137.
- [16] 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.
- [17] 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(5): 13-14.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 乔金友, 张丹, 张宏彬, 等. 大中小型拖拉机压实对土壤坚实度和大豆产量的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21): 26-33.
- [21] Buttery B R, Tan C S, Drury C F, et al. The effects of soil compaction, soil moisture and soil type on growth and nodulation of soybean and common bean[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1998, 78(78): 571-576.
- [22] Reintam E, K Trükmann, Kuht J, et al. Soil compaction effects on soil bulk density and penetration resistance and growth of spring barley (*Hordeum vulgare* L.)[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, 2009, 59(3): 265-272.
- [23] Moraes M, Debiasi H, Franchini J C, et al. Soil compaction impacts soybean root growth in an oxisol from subtropical Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 200: 104611.
- [24] 盛骤. 概率论与数理统计[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2014.
- [25] Bengough A G, Mckenzie B M, Hallett P D, et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: A review of limiting stresses and beneficial root tip traits[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(1): 59-68.
- [26] 赵振家, 邹猛, 薛龙, 等. 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(S1): 311-313, 338.
- [27] 姜春霞, 鲁植雄, Upadhyaya S K, 等. 人字形花纹轮胎压实土壤垂直应力分布规律研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 80-87.
- [28] 杨荣, 黄高宝. 固定道压实对农田土壤物理性状的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 28(8): 133-137.
- [29] 高爱民, 韩正晟, 吴劲锋. 割草机对苜蓿地土壤压实的试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 101-105.
- [30] 岳龙凯. 作物类型和品种对黑土压实响应差异的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
- [31] 李洪文, 高焕文, 陈君达, 等. 固定道保护性耕作的试验研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(4): 73-77.
- [32] 张世斌. 压实黄土中水分迁移规律试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [33] 张军昌, 师帅兵, 朱瑞祥, 等. 轮式作业机械对农田土壤压实的模拟试验研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(1): 161-164.