

马仁明, 付娟, 贾燕锋, 等. 不同机械压实条件下黑土性质及入渗特征变化研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(1): 54-65.

MA Renming, FU Juan, JIA Yanfeng, et al. Characterization of black soil infiltration under different mechanical compaction conditions[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(1): 54-65.

不同机械压实条件下黑土性质及入渗特征变化研究

马仁明, 付娟, 贾燕锋, 范昊明, 张博翔, 李爽, 张茜,
于茗耀, 杨明春, 李梦缘

(沈阳农业大学水利学院/辽宁省水土流失防控与生态修复重点实验室, 沈阳110161)

摘要:为探究不同机械压实条件对黑土土壤性质入渗特征的影响,以克山县典型黑土为研究对象,设置3种不同型号机械(华夏HX2104-C:154 kW、约翰迪尔554:40 kW、中国海山:19 kW)和不同压实次数(0,1,3,5,7,9次)对秋收后大豆耕地垄沟开展模拟压实,通过测定土壤容重、含水率、孔隙及土壤入渗特征,分析不同机械压实条件对土壤物理性质及土壤入渗特征的影响。结果表明:在0~10 cm土层,大型、中型、小型机械压实后土壤容重分别增加54.17%、56.25%、46.88%;总孔隙度分别减小31.58%、28.07%、29.82%;含水率分别下降19.35%、16.13%、9.68%。首次压实对土壤性质的影响最显著,容重均增加32.29%以上,土壤总孔隙度均减小15.8%以上,只有大型机械使土壤含水率显著减小9.6%。随压实次数增加,各机械压实后10~20 cm土层土壤容重从1.25 g·cm⁻³增加至1.58 g·cm⁻³,总孔隙度从52.16%减小至38.22%,土壤含水率从27.33%下降至20.67%,其中,大型机械在首次压实使容重及孔隙特征产生显著影响,而中型及小型机械对土壤物理性质的影响主要依靠压实次数的增加对土壤起到压实的累积作用。首次压实,中型及小型机械使2 h累计入渗量分别减少87.16%、50.81%,初渗速率分别减少87.59%、70.93%,中型机械使稳渗速率显著减少92.90%;3次压实,大型机械使2 h累计入渗量、初渗速率分别显著减小73.29%、75.67%,大型及小型机械使稳渗速率分别显著减少74.07%、66.97%;至5次压实后土壤各入渗特征无显著差异。0~20 cm土层土壤容重及土壤孔隙特征均影响机械压实土壤入渗特征,其中,0~10 cm土层土壤容重是影响综合土壤入渗特征的主导因素。

关键词:农业机械;压实作用;土壤性质;水分入渗

中图分类号:S152.4

文章编号:1000-1700(2024)01-0054-12

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Characterization of Black Soil Infiltration under Different Mechanical Compaction Conditions

MA Renming, FU Juan, JIA Yanfeng, FAN Haoming, ZHANG Boxiang, LI Shuang,
ZHANG Xi, YU Mingyao, YANG Mingchun, LI Mengyuan

(College of Water Conservancy/Key Laboratory of Soil Erosion Control and Ecological Restoration in Liaoning Province,
Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: To explore the soil properties and soil infiltration characteristics of black soil under different mechanical compaction conditions, taking the typical black soil of Keshan County as the research object, three types of machinery (Huaxia HX2104-C:154 kW, John Deere 554:40 kW, and China Haishan:19 kW) were set up in Keshan County to carry out 0, 1, 3, 5, 7 and 9 simulated compactions on the furrow of soybean land after autumn harvest. The effects of different mechanical compaction conditions on soil physical properties and infiltration characteristics were analyzed by measuring the

收稿日期:2023-11-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1500700)

第一作者:马仁明(1986-),男,博士,副教授,从事农田土壤侵蚀研究,E-mail:marenming@syau.edu.cn

soil density, water content, porosity, and soil infiltration characteristics. The results showed that in the 0–10 cm soil layer, large machinery, medium machinery and small machinery compaction bulk density increased 54.17%, 56.25%, 46.88%; total porosity decreased 31.58%, 28.07%, 29.82%; water content decreased 19.35%, 16.13%, 9.68%. After the first compaction, all the machinery had the most significant effect on soil properties, which increased the bulk density by more than 32.29% and reduced the porosity by more than 15.8%, while only the large machinery significantly reduced the soil water content by 9.6%. With the increase of compaction time, the soil bulk density of the 10–20 cm soil layer after mechanical compaction increased from $1.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ to $1.58 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, the total porosity decreased from 52.16% to 38.22%, and the water content decreased from 27.33% to 20.67%. Among all the machines, the bulk density and porosity of soil were significantly affected by the first compaction of large machinery, while the influence of medium and small machinery on the physical properties of soil was mainly due to the cumulative pressure effect. For the first compaction, the cumulative infiltration volume of 2 h was reduced by 87.16% and 50.81% by medium and small machinery. The initial infiltration rate was reduced by 87.59% and 70.93%. The stable infiltration rate was significantly reduced by 92.90% by medium machinery. After three times of compaction, the cumulative infiltration volume of 2 h and initial infiltration rate were significantly reduced by 73.29% and 75.67% by large machinery, while the stable infiltration rate was significantly reduced by 74.07% and 66.97% by large and small machinery. There was no significant difference in soil infiltration characteristics after five times of compaction. Both soil bulk density and soil pore characteristics of the 0–20 cm soil layer affect the infiltration characteristics of mechanically compacted soil, with soil bulk density of the 0–10 cm soil layer being the dominant factor affecting the integrated soil infiltration characteristics.

Key words: agricultural machinery; compaction; soil properties; water infiltration

东北黑土区作为我国重要商品粮生产基地,年均粮食总产量占全国25%以上,是国家粮食安全的“压舱石”。早在1959年,东北地区就开始推进农业机械化,至2019年黑龙江省、吉林省、辽宁省综合机械化率分别达到97%、81%和85%^[1]。农业机械水平的提高不但大幅提高了农田作业效率,同时也使农田土壤遭受严重的机械碾压,甚至导致作物减产、土壤退化等^[2]。研究发现,当机械接地压力大于50 kPa就会发生土壤压实^[3],但进行农田机械作业时接地压力通常超过70 kPa^[4],即大部分的农田机械作业活动均使农田土壤遭受压实影响,尤其黑土土壤质地黏重,更易遭受压实影响^[5]。

土壤入渗是指地表水渗入土壤剖面的过程^[6]。一方面,土壤入渗将地表水转化为土壤水。土壤水作为植被作物可吸收利用水分的唯一途径^[7],是土壤水分循环的重要环节,即土壤入渗对植被作物生长及农田管理具有重要意义。另一方面,土壤入渗将地表水转化为地下水,对于调节地表径流、涵养水源及防治农田土壤侵蚀具有重要意义^[8]。目前,众多学者开展了关于农田土壤入渗影响因素的研究。研究表明,影响土壤入渗的因素包括土壤性质及外部因素。土壤性质,如土壤质地、结构、容重和有机质等,外部因素如土壤含水量、降雨强度、植被覆盖和人为活动等^[9–11]。区域农田范围内气候环境及土壤性质相似,因此人为活动导致的不同的农田管理措施是影响农田土壤入渗的主要因素。以东北地区为例,即使以种植单季作物为主,农田土壤经历耕、种、收及田间管理后,机械作业仍可达8~15次^[12],压实面积占比高达85%~90%,其中10%~80%的面积更要遭受多次机械碾压^[13]。因此,研究农田机械压实对黑土土壤入渗特征的影响对指导黑土耕作过程的农业机械的使用管理及防治因农田机械耕作而导致的土壤侵蚀具有重要参考意义。

国内外关于机械压实对土壤物理性质的影响研究已较为全面^[6,14]。张兴义等^[15]指出,机械压实会打破适宜作物生长的农田土壤三相比,即固、液、气比为5:3:2的状态。SMITH等^[16]通过研究不同机械对砂壤土的压实得出地压更大的机械对0~30 cm容重的影响也更显著。周艳丽等^[17]发现随压实程度的增加,不同深度土层含水量均下降,且表层土壤比深层土壤水分下降更显著。SOLGI等^[18]发现,压实可致使森林土壤孔隙减小50%~60%。机械压实通过影响土壤物理性质从而影响土壤入渗,现有研究明确了机械压实对土壤入渗起到消极作用。王晓燕等^[19]在观测拖拉机压实后径流小区土壤的入渗过程中发现压实显著减小土壤产流时间,且使土壤稳渗速率减小86%。AL-ESAWI等^[20]通过对比不同质

地土壤压实后入渗速率,发现压实使砂壤土和黏土入渗速率分别降低 86% 和 73%。这些试验均明确了压实致使土壤入渗能力减弱。由于室内试验条件较为理想,现有研究多为室内模拟试验,室内研究已基本明确压实对土壤各项物理性质的影响机制及单一压实条件下土壤入渗的作用因素。然而,实际田间机械压实受气候地域限制、机械型号及压实次数等影响,压实过程及对土壤的作用过程复杂,室内研究并不能完全解释实际情况中机械压实对土壤物理性质及土壤入渗的作用机制。

因此,本研究选取东北黑土区黑龙江省齐齐哈尔市克山县典型黑土作为研究对象,根据当地农作物耕种收机械类型及进地次数选取机械及确定压实次数,在当地农作物秋收后进行田间模拟机械压实,力求与实际田间机械压实一致。在田间进行 3 种不同马力机械在 0, 1, 3, 5, 7, 9 次压实后的模拟机械压实,通过室内土壤物理性质测定及双环入渗试验,分析黑土农田在不同机械压实条件下土壤物理性质及土壤入渗规律的变化,探讨农田机械压实对黑土物理性质及土壤入渗的作用机制,研究将为黑土区农田作业机械的合理使用提供指导,为缓解因机械压实导致的农田土壤生态系统的健康问题提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验地位于黑龙江省齐齐哈尔市克山县英民村(东经 $126^{\circ}01' \sim 126^{\circ}41'$, 北纬 $47^{\circ}43' \sim 48^{\circ}18'$)。克山县属温带大陆性季风气候,寒暑变化明显。年平均气温 2.4°C ,年平均风速 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,年无霜期 122 d 左右,年平均降水量约 500 mm。年内降水分布不均匀,雨热同季,降雨集中在 6-8 月份,主要土壤类型为黑土,黑土层厚度 $>60\text{ cm}$,属典型厚层黑土区。研究区种植作物以大豆玉米轮作为主。

1.2 试验设计

2022 年 9 月,选取英民村秋收后坡度基本一致($3^{\circ} \sim 4^{\circ}$)的大豆耕地,沿垄向设置 $25\text{ m} \times 5\text{ m}$ 的 16 块样地,每块样地内含 4 条可用垄沟。使用不同马力农机(华夏 HX2104-C: 154 kW、约翰迪尔 554: 40 kW、中国海山: 19 kW)沿垄沟进行不同次数(1, 3, 5, 7, 9 次)碾压,以未经压实处理的垄沟作为对照,在处理后的垄沟处进行采样及测定。为增加研究的适用性及方便区分对比,按照赵明宇等^[21-22]对于大型拖拉机及小型拖拉机的划分,将本研究所使用的农业机械进行归类,华夏 HX2104-C 为大型机械、约翰迪尔 554 为中型机械、中国海山改装车为小型机械。各机械参数具体如表 1。

表 1 试验用农机参数

Table 1 Parameters of experimental agricultural machinery

农机名称 Name of machinery	农机类型 Agricultural machinery type	质量/kg Weight	功率/kW Power	轮距/m Wheel track		轮胎宽/m Tire width		花纹深度/m Tyre pattern depth
				前轮 Front wheel	后轮 Rear wheel	前轮 Front wheel	后轮 Rear wheel	
				华夏 HX2104-C Huaxia HX2104-C	大型机械 Large machinery	5 400	154.00	
约翰迪尔 554 John Deere 554	中型机械 Medium machinery	2 750	40.03	1.450	1.450	0.210	0.315	0.067
改装车(中国海山) Conversion vehicle (China Haishan)	小型机械 Small machinery	950	19.02	1.270	1.30	0.130	0.170	0.040

1.3 双环入渗试验

由于双环入渗法准确性高且适用于异质性较强的土壤^[23-24],因此采用双环入渗法测定土壤入渗。双环内环直径 30 cm,高 20 cm;外环直径 50 cm,高 40 cm。入渗试验前先将待测样地表面的枯落物清除并整平地面,把双环放置在同一圆心的位置上,垂直均匀打入土中 20 cm;同时向内外环供水并保持环内水层高度 3 cm,每隔一定时间记录 1 次内环加水量。土壤入渗速率先快后慢,所以记录时间间隔

由快变慢,分别在 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 30 min 后每间隔 15 min 记录。试验后期,若出现 3 个相同时间间隔内内环加水量基本相等,可结束试验。入渗总历时 2 h。入渗试验装置如图 1。

参考前人研究,设置初始入渗速率为 0~3 min^[25-26]。稳定入渗速率为连续 3 个相同时间间隔内内环加水量基本相等时的平均入渗速率。入渗总历时 120 min,故取 120 min 的渗透总量作为累计入渗量。入渗速率计算公式为:

$$V_i = \frac{10Q_i}{AT_i} \quad (1)$$

式中: V_i 为第*i*次测量时的入渗速率($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); Q_i 为第*i*次测量时量筒加入的水量(mL); A 为内环横截面积(cm^2); T_i 为第*i*次测量的时间间隔(min)。

第*n*次测量时的累计入渗量为:

$$I_n = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i}{A} \quad (2)$$

式中: n 为总加水次数。

1.4 土壤理化性质测定

通过预试验可知,土壤双环入渗的水分入渗深度在 20 cm 以内,因此采集 0~20 cm 土层土样测定土壤物理性质。用 100 cm³标准环刀在各地垂直方向每 10 cm 分层采集土壤表层 20 cm 的原状土样,每层 3 个重复,共 96 个样品。

土壤容重、土壤含水率、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度采用环刀法测定^[27-28];土壤机械组成采用比重计法进行测定^[29];土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定^[30]。试验地土壤基本理化性质如表 2。

表 2 试验地土壤基本理化性质

Table 2 Basic physical and chemical properties of soil in the test site

土层/cm Soil depth	容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) Bulk density	黏粒/% Clay	粉粒/% Silt	砂粒/% Sandy	土壤质地 Soil texture	有机质/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Organic matter
0~10	0.96	34.00	46.67	19.33	粉质黏壤土 Silty clay	49.18
10~20	1.25	25.00	40.33	34.67	壤土 Loam	45.55

1.5 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2021 和 Origin 2021b 对数据处理和统计分析;用单因素方差分析(One-way ANOVA)进行显著性检验($p < 0.05$);以 Spearman 法进行相关性分析。运用 Canaco 5 对土壤入渗特征与土壤物理性质进行冗余分析(redundancy analysis, RDA)。

2 结果与分析

2.1 机械压实对土壤容重的影响

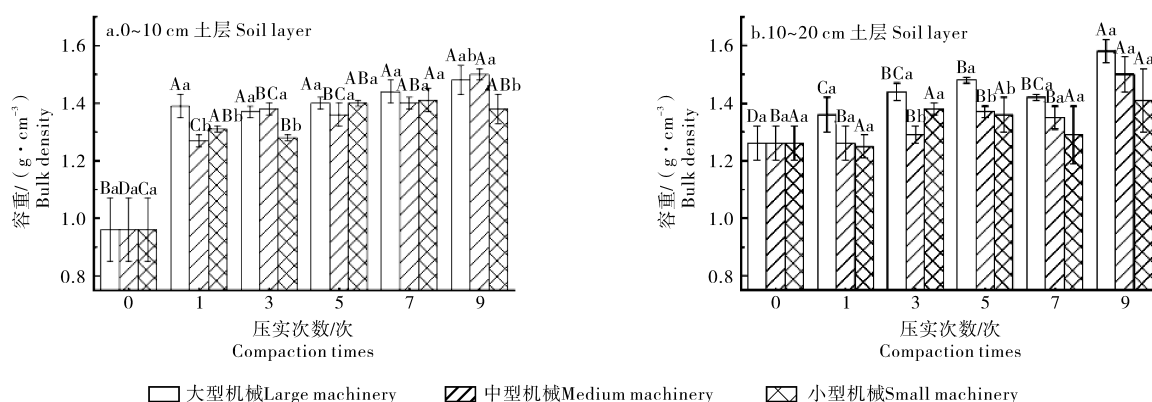
由图 2 可知,在 0~10 cm 土层,土壤容重变化范围为 0.96~1.50 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。随压实次数增加,土壤容重增加,大型、中型及小型机械压实后土壤容重增加范围分别为 42.71%~54.17%、32.29%~56.25% 和 33.33%~46.88%。大型机械压实后土壤容重增加趋势较其他两机械更为明显。首次压实,土壤容重增加最为显著,大型、中型、小型机械压实后土壤容重相比未压实土壤分别显著增加 44.79%、32.29%、36.46%。此时,大型机械相比小型及中型机械压实后土壤容重增加更为显著。大型机械首次压实后



图 1 入渗试验装置

Figure 1 Infiltration test setup

随压实次数增加土壤容重不再有显著差异;而中型、小型机械至5次压实后,随压实次数增加土壤容重不再产生显著差异。此时,中型、小型机械与大型机械相比无显著差异。说明压实次数的增加可以使压实作用累积,多次压实后,这种累积作用会减小不同马力机械对土壤容重的影响差异。在10~20 cm土层,土壤容重变化范围为1.25~1.58 g·cm⁻³。随压实次数增加,土壤容重总体呈增加趋势,但相比0~10 cm土层土壤容重,其增幅变缓,大型、中型、小型机械压实后土壤容重增加范围分别为7.94%~25.4%、0.00%~19.05%和0.79%~11.90%。首次压实,大型机械压实土壤容重相比未压实土壤显著增加7.94%,而中型、小型机械压实后土壤容重与未压实土壤相比无显著差异。此时,各机械压实后土壤容重无显著差异。3次压实,大型机械压实后土壤容重相比中型、小型机械差异显著,至7次压实,机械间无显著差异。说明大型机械在少次压实就对深层土壤产生影响,而中型、小型机械要随着压实次数增加产生的累积作用对较深层土壤产生影响。



不同大写字母表示相同机械不同压实次数之间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示相同压实次数不同机械之间差异显著($p<0.05$)。下同

Different capital letters indicate significant differences between different compaction times for the same machinery ($p<0.05$); different lower case letters indicate significant differences between different machinery for the same compaction times ($p<0.05$). The same below

图2 机械压实对土壤容重的影响

Figure 2 Effect of mechanical compaction on soil bulk density

2.2 机械压实对土壤孔隙特征的影响

由表3可知,0~10 cm土层,土壤总孔隙度变化范围为39.62%~57.43%。随压实次数增加,土壤总孔隙度呈下降趋势,大型、中型及小型机械压实后土壤总孔隙度分别减小22.81%~31.58%、15.79%~28.07%和19.30%~29.82%,中型机械相比大型及小型机械,其土壤总孔隙度下降较小。大型、中型、小型机械首次压实后土壤总孔隙度相比未压实土壤均显著降低,降幅分别为22.55%、16.68%和20.18%。此时,大型机械相比中型及小型机械差异显著。随压实次数增加,各机械压实后土壤总孔隙度降幅减缓,至7次压实,各机械压实后土壤总孔隙度无显著差异。10~20 cm土层,土壤总孔隙度变化范围为38.22%~52.16%,随压实次数增加,土壤总孔隙度呈逐渐减小趋势,大型、中型、小型机械压实后土壤孔隙减小范围分别为10.35%~26.73%、3.95%~15.82%和2.88%~20.61%。大型、中型机械首次压实后土壤总孔隙度与未压实土壤相比分别显著减少10.35%和8.03%,而小型机械无显著差异;至3次压实,小型机械与未压实土壤相比显著减小13.86%,此后,随压实次数增加,土壤总孔隙度均表现为中型机械>小型机械>大型机械;至9次压实,大型、中型、小型机械压实对土壤孔隙度的影响均达到最大,大型机械与中型机械之间存在显著差异。0~10 cm土层,土壤毛管孔隙度变化范围为38.91%~48.55%。随压实次数增加,土壤毛管孔隙度总体呈下降趋势,大型、中型、小型机械压实后土壤毛管孔隙度降幅分别为8.94%~19.86%、3.91%~15.65%和8.69%~18.35%。各机械首次压实后土壤毛管孔隙度与未压实土壤相比均无显著差异;至3次压实,大型及小型机械压实后土壤毛管孔隙度与未压实土壤相比分别显著减小11.64%和11.43%,中型机械差异不显著;至7次压实,中型机械压实后土壤毛管

孔隙度才与未压实土壤相比显著减小 12.15%。值得注意的是,中型机械与大型、小型机械在首次压实土壤毛管孔隙度差异显著,但 3 次压实后,各机械间土壤毛管孔隙度再无显著差异。10~20 cm 土层,土壤毛管孔隙度变化范围为 38.01%~49.01%。随压实次数增加,毛管孔隙度总体呈下降趋势,大型、中型、小型机械压实后土壤毛管孔隙度变化范围分别为 10.69%~22.44%、1.71%~14.26% 和 5.22%~20.04%,中型机械相比大型及小型机械总体降幅较缓。大型及小型机械首次压实,毛管孔隙度相比未压实土壤分别显著降低 10.69% 和 5.22%;至 5 次压实,中型机械压实后土壤毛管孔隙度与未压实土壤相比显著减小 10.30%。0~10 cm 土层,土壤非毛管孔隙度变化范围为 0.01%~8.88%。各机械首次压实后土壤非毛管孔隙度相比未压实土壤均显著减小,大型、中型及小型机械分别减小 81.64%、86.49% 和 98.31%。随压实次数增加,土壤非毛管孔隙度无显著变化,且各机械间土壤非毛管孔隙度也无显著差异。10~20 cm 土层,土壤非毛管孔隙度变化范围为 0.21%~4.21%。随压实次数增加,土壤非毛管孔隙度总体呈下降趋势,大型、中型、小型机械压实后土壤非毛管孔隙度降幅为 5.08%~93.33%、24.44%~68.89% 和 33.65%~55.78%,大型压实后非毛管孔隙下降最大。各机械首次压实后土壤非毛管孔隙度与未压实土壤无显著差异;至 3 次压实,大型机械压实后土壤毛管孔隙度与未压实土壤相比显著减小 84.13%,而中型及小型机械压实随压实次数增加土壤非毛管孔隙与未压实土壤无显著差异,各机械间也无显著差异。

表 3 机械压实对土壤孔隙特征的影响

Table 3 Effect of mechanical compaction on soil pore characteristics

土壤孔隙特征 Soil pore characteristics	压实次数/次 Compaction times	0~10 cm 土层 Soil layer			10~20 cm 土层 Soil layer		
		大型机械 Large machinery	中型机械 Medium machinery	小型机械 Small machinery	大型机械 Large machinery	中型机械 Medium machinery	小型机械 Small machinery
总孔隙度/% Total porosity	0	57.43±0.03 ^{Aa}	57.43±0.03 ^{Aa}	57.43±0.03 ^{Aa}	52.16±0.01 ^{Aa}	52.16±0.01 ^{Aa}	52.16±0.01 ^{Aa}
	1	45.84±0.02 ^{Bab}	47.85±0.01 ^{Ba}	44.48±0.01 ^{Bb}	46.76±0.02 ^{Ba}	47.97±0.02 ^{Bca}	50.66±0.01 ^{Aa}
	3	43.51±0.02 ^{Bca}	44.31±0.01 ^{BCDa}	43.87±0.01 ^{Ba}	42.53±0.01 ^{cb}	50.10±0.01 ^{ABa}	44.93±0.01 ^{Bb}
	5	41.85±0.01 ^{CDb}	45.52±0.02 ^{Bca}	42.83±0.01 ^{BCab}	42.07±0.01 ^{cb}	46.34±0.01 ^{CDa}	43.59±0.02 ^{Bb}
	7	42.40±0.01 ^{Bca}	43.06±0.01 ^{CDa}	39.87±0.02 ^{Ca}	43.47±0.01 ^{Ca}	48.11±0.02 ^{Bca}	42.58±0.01 ^{Bb}
	9	39.62±0.01 ^{Da}	41.20±0.01 ^{Da}	42.74±0.01 ^{Ca}	38.22±0.02 ^{Db}	43.91±0.01 ^{Da}	41.41±0.04 ^{Bab}
毛管孔隙度/% Capillary porosity	0	48.55±0.05 ^{Aa}	48.55±0.05 ^{Aa}	48.55±0.05 ^{Aa}	49.01±0.01 ^{Aa}	49.01±0.01 ^{Aa}	49.01±0.01 ^{Aa}
	1	44.21±0.01 ^{ABb}	46.65±0.01 ^{ABa}	44.33±0.01 ^{ABb}	43.77±0.01 ^{Bb}	47.18±0.01 ^{ABb}	46.45±0.01 ^{Ba}
	3	42.90±0.01 ^{Bca}	43.82±0.01 ^{ABca}	43.00±0.01 ^{Bca}	42.03±0.01 ^{Cc}	48.17±0.01 ^{Aa}	43.57±0.01 ^{cb}
	5	41.51±0.01 ^{Bca}	44.93±0.02 ^{ABca}	42.15±0.01 ^{Bca}	41.55±0.01 ^{cb}	43.96±0.01 ^{Ca}	40.54±0.01 ^{Db}
	7	41.92±0.01 ^{Bca}	42.65±0.01 ^{Bca}	39.64±0.03 ^{Ca}	40.89±0.01 ^{cb}	45.99±0.01 ^{Ba}	41.25±0.01 ^{Db}
	9	38.91±0.01 ^{Ca}	40.95±0.01 ^{Ca}	42.37±0.03 ^{BCa}	38.01±0.01 ^{Db}	42.02±0.01 ^{Da}	39.19±0.02 ^{Ea}
非毛管孔隙度/% Non-capillary porosity	0	8.88±0.04 ^{Aa}	8.88±0.04 ^{Aa}	8.88±0.04 ^{Aa}	3.15±0.01 ^{Aa}	3.15±0.01 ^{Aa}	3.15±0.01 ^{Aa}
	1	1.63±0.01 ^{Ba}	1.20±0.01 ^{Ba}	0.15±0.01 ^{Bb}	2.99±0.02 ^{Aa}	0.98±0.01 ^{Aa}	4.21±0.01 ^{Aa}
	3	0.61±0.01 ^{Ba}	0.49±0.01 ^{Ba}	0.87±0.01 ^{Ba}	0.50±0.01 ^{Bb}	1.93±0.01 ^{Aa}	1.36±0.01 ^{ABab}
	5	0.34±0.01 ^{Ba}	0.59±0.01 ^{Ba}	0.68±0.01 ^{Ba}	0.52±0.01 ^{Ba}	2.38±0.01 ^{Aa}	3.05±0.01 ^{ABa}
	7	0.48±0.01 ^{Ba}	0.41±0.01 ^{Ba}	0.23±0.01 ^{Ba}	2.58±0.01 ^{ABa}	2.12±0.01 ^{Aa}	1.33±0.01 ^{Ba}
	9	0.01±0.01 ^{Ba}	0.25±0.01 ^{Ba}	0.37±0.01 ^{Ba}	0.21±0.01 ^{Ba}	1.89±0.01 ^{Aa}	2.22±0.02 ^{ABa}

注:不同大写字母表示相同机械不同压实次数之间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示相同压实次数不同机械之间差异显著($p<0.05$)。表中数据为平均值±标准差($n=3$)。

Note: Different capital letters indicate significant differences between different compaction times of the same machinery ($p<0.05$); different lower case letters indicate significant differences between different machinery for the same compaction times ($p<0.05$). Data in the table are mean±standard deviation ($n=3$).

2.3 机械压实对土壤含水率影响

由图 3 可知,0~10 cm 土层,各机械压实后土壤含水率变化范围为 25.00%~32.00%。随压实次数增加,土壤含水率呈下降趋势,大型、中型、小型机械压实后土壤含水率分别下降 9.68%~19.35%、5.38%~16.13% 和 3.23%~9.68%。大型机械首次压实土壤含水率相比未压实显著下降 9.68%,而中型、小型机械压实后土壤含水率略有增加,但差异不显著;至 3 次压实,大型、中型、小型机械压实后土壤含水率

与未压实土壤相比均显著减少,分别减少 12.90%、5.38% 和 3.23%。值得注意的是,第 1、第 3 次压实时,大型机械压实后土壤含水率相比中型、小型机械具有显著差异,而 7 次压实后,表现为大型机械与中型机械差异显著,至 9 次压实,大型机械与小型机械差异显著。10~20 cm 土层范围内,各机械压实后土壤含水率变化范围为 20.67%~27.33%。随压实次数增加,土壤含水率波动变化但总体呈下降趋势,大型、中型及小型机械压实后土壤含水率分别下降 1.23%~23.46%、3.70%~17.29% 和 3.70%~16.05%。3 次压实时,中型机械压实后土壤含水率与未压实土壤产生显著差异,减少 8.64%;而至 5 次压实,小型机械压实后土壤含水率与未压实土壤相比显著减少 16.05%;直至 9 次压实,大型机械压实后土壤含水率与未压实土壤相比才产生显著差异,使土壤含水率减少 23.46%。

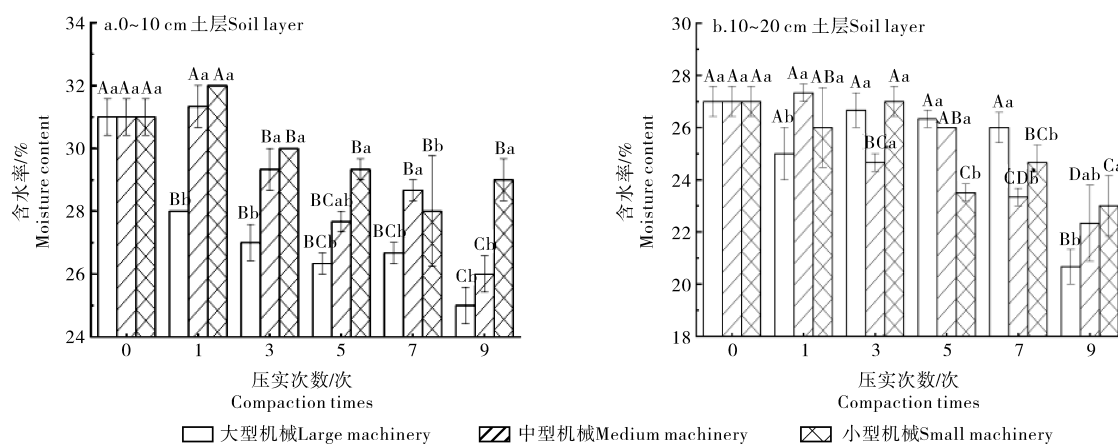


图3 机械压实对土壤含水率的影响

Figure 3 Effect of mechanical compaction on soil moisture content

2.4 压实次数与土壤各物理性质的变化关系

为深入探究压实次数对 0~20 cm 土层土壤各物理性质的影响,构建压实次数与容重、孔隙特征及含水率的定量关系拟合方程(表 4)。0~10 cm 土层,土壤容重与压实次数呈指数增加,而土壤总孔隙度、非毛细孔隙与毛细孔隙度则与压实次数呈指数减小。除中型机械压实后土壤含水率与压实次数存在线性递减关系,大型、小型机械压实后土壤含水率与压实次数间也呈现指数减小关系。说明压实次数的增加可以导致土壤孔隙特征及土壤含水率下降,导致土壤容重增加,但当压实达到一定次数,0~10 cm 土层土壤性质最终趋于稳定。10~20 cm 土层,大型及中型机械压实后土壤容重与压实次数呈指数增加。随压实次数增加,土壤总孔隙度及毛细孔隙度呈减小趋势,除中型机械压实后总孔隙度与压实次数呈线性递减关系外,中型及小型机械压实后土壤总孔隙度及毛细孔隙度随压实次数增加呈指数减小关系。大型机械压实后非毛细孔隙度与压实次数呈线性递减关系,而中型、小型机械压实后非毛细孔隙度与压实次数无明显关系。大型、中型机械压实土壤含水率与压实次数可以用线性相关函数表示,随压实次数增加土壤含水率减小,但小型机械压实土壤含水率与压实次数则无明显关系。说明在 10~20 cm 土层,相比于中型及小型机械,大型机械压实条件下土壤性质对压实次数的响应更为敏感。

2.5 机械压实对土壤入渗特征的影响

不同机械压实处理下,土壤入渗特征如图 4。除大型机械 1 次压实外,各机械压实后土壤各入渗参数及与未压实土壤相比均显著减小。中型及小型机械首次压实 2 h 累计入渗量及初渗速率与未压实土壤产生显著差异,中型机械压实使 2 h 累计入渗量及初渗速率分别减少 87.16% 和 87.59%,小型机械压实使 2 h 累计入渗量及初渗速率分别减少 50.81% 和 70.93%。至 3 次压实,大型机械压实后 2 h 累计入渗量与初渗速率相比未压实土壤分别显著减小 73.29% 和 75.67%。此后,随压实次数增加,2 h 累计入渗量及初渗速率虽然呈现逐渐减小趋势,但无显著变化。中型机械首次压实后土壤稳渗速率相比未压实土壤显著降低 92.90%,至 3 次压实,大型及小型机械压实土壤稳渗速率与未压实土壤相比分

表4 压实次数与土壤物理性质的关系拟合

Table 4 Relationship between the number of compaction and various soil properties

	0~10 cm 土层 Soil layer				10~20 cm 土层 Soil layer		
	机械类型 Agricultural machinery type	拟合方程 Simultaneous equations	R ²	p	拟合方程 Simultaneous equations	R ²	p
容重 Bulk density	大型机械 Large machinery	$y=-0.46\exp(-x/0.38)+1.42$	0.94	<0.001**	$y=-0.27\exp(-x/3.57)+1.54$	0.67	<0.001**
	中型机械 Medium machinery	$y=-0.45\exp(-x/0.95)+1.42$	0.90	<0.001**	$y=0.03\exp(-x/-3.95)+1.24$	0.86	0.003**
	小型机械 Small machinery	$y=-0.41\exp(-x/0.55)+1.37$	0.88	<0.001**	$y=-0.12\exp(-x/2.35)+1.37$	0.19	0.262
总孔隙度 Total porosity	大型机械 Large machinery	$y=15.69\exp(-x/0.81)+41.66$	0.94	<0.001**	$y=11.18\exp(-x/1.76)+40.79$	0.80	<0.001**
	中型机械 Medium machinery	$y=14.05\exp(-x/0.94)+43.3$	0.91	<0.001**	$y=50.87-0.67x$	0.57	<0.001**
	小型机械 Small machinery	$y=15.13\exp(-x/0.53)+42.29$	0.92	<0.001**	$y=12.06\exp(-x/3.58)+40.55$	0.97	0.01**
毛管孔隙度 Capillary porosity	大型机械 Large machinery	$y=7.83\exp(-x/2.49)+40.14$	0.82	0.007**	$y=8.75\exp(-x/1.98)+39.71$	0.82	<0.001**
	中型机械 Medium machinery	$y=10.32\exp(-x/8.78)+37.75$	0.82	0.04*	$y=-3.65\exp(-x/-9.28)+52.11$	0.58	<0.001**
	小型机械 Small machinery	$y=6.96\exp(-x/1.43)+41.42$	0.80	0.026*	$y=10.25\exp(-x/3.67)+38.74$	0.95	<0.001**
非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	大型机械 Large machinery	$y=8.53\exp(-x/0.53)+0.35$	0.99	0.002**	$y=2.65-0.24x$	0.20	0.001**
	中型机械 Medium machinery	$y=8.45\exp(-x/0.42)+0.43$	0.99	0.002**	$y=2.52-0.07x$	0.06	0.181
	小型机械 Small machinery	$y=7.51\exp(-x/0.02)+0.78$	0.97	0.003**	$y=3.31-0.18x$	0.14	0.782
含水率 Moisture content	大型机械 Large machinery	$y=4.86\exp(x/1.32)+26.03$	0.82	<0.001**	$y=27.14-0.43x$	0.31	<0.001**
	中型机械 Medium machinery	$y=31.05-0.49x$	0.78	<0.001**	$y=27.33-0.56x$	0.83	0.001**
	小型机械 Small machinery	$y=4.18\exp(-x/5.84)+27.48$	0.63	0.001**	$y=27.00-0.40x$	0.66	0.15

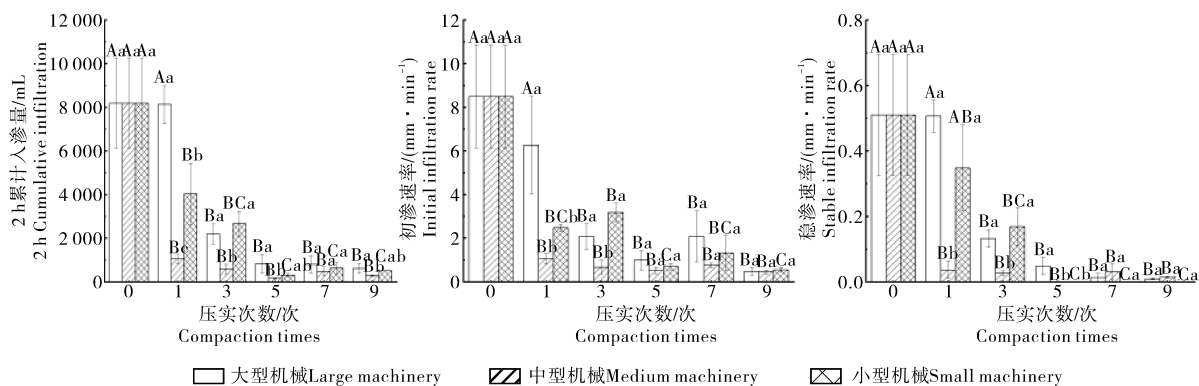


图4 不同机械压实土壤入渗特征

Figure 4 Infiltration characteristics of different mechanically compacted soils

别显著减小 74.07% 和 66.97%, 此后, 随压实次数增加土壤稳渗速率减小, 但变化不显著。值得注意的是, 第 1、第 3 次压实, 各机械间压实后土壤入渗指标存在显著差异, 但随压实次数增加, 机械间差异减小, 至 7 次压实, 各机械间土壤各入渗特征均无显著差异。

2.6 0~20 cm 土层压实土壤性质对土壤入渗特征的影响

为进一步探究压实对土壤入渗特征的作用机理, 分析不同压实处理后 0~20 cm 土层土壤物理性质与土壤 2 h 累计入渗量、初渗速率和稳渗速率之间的关系。由表 5 可知, 0~10 cm 土层, 土壤各入渗

特征与容重均呈极显著负相关,与土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度极显著正相关;而非毛管孔隙度与 2 h 累计入渗量显著正相关,与初渗速率及稳渗速率极显著正相关。10~20 cm 土层,土壤各入渗特征与容重均显著负相关;土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度均与土壤 2 h 累计入渗量、初渗速率显著正相

表5 土壤入渗特征与物理性质Spearman相关系数

Table 5 Spearman's correlation coefficient between soil infiltration characteristics and physical properties

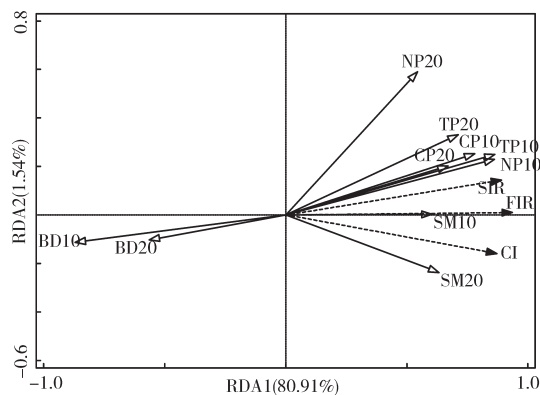
入渗特征值 Infiltration characteristics	0~10 cm 土层 Soil layer					10~20 cm 土层 Soil layer				
	容重 Bulk density	含水率 Moisture content	总孔隙度 Total porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity	容重 Bulk density	含水率 Moisture content	总孔隙度 Total porosity	毛管孔隙度 Capillary porosity	非毛管孔隙度 Non-capillary porosity
2 h 累计入渗量 2 h Cumulative infiltration	-0.66**	0.33	0.62**	0.59**	0.56*	-0.5*	0.32	0.49*	0.55*	0.35
初渗速率 Initial infiltration rate	-0.65**	0.37	0.65**	0.62**	0.65**	-0.59*	0.34	0.58*	0.57*	0.52*
稳渗速率 Stable infiltration rate	-0.66**	0.30	0.71**	0.68**	0.59**	-0.47*	0.38	0.67**	0.73**	0.38

注:*和**分别表示相关系数显著性达0.05和0.01水平。

Note:* and ** indicate correlation coefficients significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

关,与土壤稳渗速率极显著正相关;非毛管孔隙度与初渗速率显著正相关。说明 0~20 cm 土层土壤容重及土壤孔隙特征均影响机械压实土壤入渗特征,但 0~10 cm 土层土壤性质是影响入渗特征的主要因素。土壤容重增加、土壤孔隙度减小使土壤入渗能力减弱已被众多学者证实^[8,31]。土壤容重的变化体现了土壤中孔隙状况的变化,压实使土壤颗粒排列更为紧密,土壤孔隙结构变差,土壤容重增加,土壤水分入渗特征就越差。

对 0~20 cm 土层土壤容重、含水率及孔隙度特征与土壤入渗特征进行冗余分析(RDA)。由图 5 可知,第 1 排序轴和第 2 排序轴的解释率分别为 80.91% 和 1.54%,累积解释了 82.45% 的土壤入渗变化,可以基本反应土壤物理性质与土壤入渗特征的关系。0~10 cm 土层土壤容重(61.1%, $F=25.1, p=0.002$)是影响综合土壤入渗特征的主导因素,这与云慧雅等^[32]的研究结果一致。这是因为土壤容重综合反映土壤结构状况,容重越大说明土壤孔隙度越小,而土壤孔隙是影响土壤入渗过程的重要因素。



BD10.0~10 cm 土层土壤容重 ($g \cdot cm^{-3}$); BD20.10~20 cm 土层土壤容重 ($g \cdot cm^{-3}$); TP10.0~10 cm 土层土壤总孔隙度 (%); TP20.10~20 cm 土层土壤总孔隙度 (%); CP10.0~10 cm 土层土壤毛管孔隙度 (%); CP20.10~20 cm 土层土壤毛管孔隙度 (%); NP10.0~10 cm 土层土壤非毛管孔隙度 (%); NP20.10~20 cm 土层土壤非毛管孔隙度 (%); SM10.0~10 cm 土层土壤含水率 (%); SM20.10~20 cm 土层土壤含水率 (%); SIR. 土壤稳渗速率 ($mm \cdot min^{-1}$); FIR. 土壤初渗速率 ($mm \cdot min^{-1}$); CI. 2 h 累积入渗量 (mL)
BD10 refers to soil bulk density ($g \cdot cm^{-3}$) in the 0~10 cm soil layer; BD20 refers to soil bulk density ($g \cdot cm^{-3}$) in the 10~20 cm soil layer; TP10 refers to total soil porosity (%) in the 0~10 cm soil layer; TP20 refers to total soil porosity (%) in the 10~20 cm soil layer; CP10 refers to soil capillary porosity (%) in the 0~10 cm soil layer; CP20 refers to 10~20 cm soil layer soil capillary porosity (%); NP10 refers to 0~10 cm soil layer soil non-capillary porosity (%); NP20 refers to 10~20 cm soil layer soil non-capillary porosity (%); SM10 refers to 0~10 cm soil layer soil moisture content (%); SM20 refers to 10~20 cm soil layer soil moisture content (%); SIR refers to soil steady infiltration rate ($mm \cdot min^{-1}$); FIR refers to soil infiltration rate ($mm \cdot min^{-1}$); CI is the 2 h cumulative infiltration volume (mL)

图5 机械压实土壤入渗特征与土壤物理性质RDA分析
Figure 5 RDA analysis of infiltration characteristics and soil physical properties of mechanically compacted soil

3 讨论与结论

本研究发现,各机械在首次压实就对0~10 cm表层土壤性质产生显著影响,使容重均增加32.29%以上,土壤总孔隙度均减小15.8%以上。而对10~20 cm土层土壤性质的影响依靠压实次数的增加实现。除大型机械在首次压实就使土壤容重显著增加7.94%,中型及小型机械在3次压实后土壤容重才显著增加,大型、中小及小型机械分别使容重最大分别增加25.4%、9.05%和11.90%;大型及中型机械在首次压实使土壤总孔隙度分别显著减小10.35%和8.03%,小型机械在3次压实后总孔隙度显著减小13.86%。各机械对土壤含水率的影响均在3次压实后达显著水平。试验结果与前人研究相似^[33-34]。这是由于机械对土壤的应力是从表层向深层传导,表层土壤遭受机械直接碾压,所受应力较大,对土壤的扰动也更大,因此即使少次压实对土壤性质的影响程度也更明显,而深层土壤受机械施加应力通过表层土壤层层传递,所受应力逐级削弱,对土壤的扰动也较小,因此其对土壤性质的影响主要依靠压实次数的累计作用实现^[35]。

压实次数的累积能够减小不同机械对表层及深层土壤容重、孔隙及含水率的差异。对于表层土壤,各机械首次压实后对土壤的影响效果最为显著。这是由于本试验中,收获作业时期土壤含水率较高,达25%以上,即使质量较小的机械在少次压实时也能对表层土壤造成较严重的压实^[36]。此外,首次压实后土壤颗粒排列就较为紧密,此后,随压实次数增加,土壤颗粒可排列的范围也越来越小,因此,土壤各物理性质变化幅度也变缓^[37]。对于较深层土壤,机械压实对土壤的影响则主要靠压实次数的累积。首次压实,机械对土壤施加的应力主要作用于表层土壤,而对深层土壤颗粒的排列影响较小^[35],随压实次数增加,表层土壤颗粒排列愈加紧密,此时,机械对深层土壤施加应力变大^[38-39],压实次数对深层土壤容重影响的累积效应也愈发明显。

机械压实对土壤孔隙状况的改变影响土壤持水及入渗产流能力,与土壤侵蚀、作物生长密切相关^[40]。总孔隙度较大的土壤水分入渗较快,因此贮存水分、涵养水源的能力强;而总孔隙度小的土壤则不利于水分入渗,地表径流因此增加,土壤遭受侵蚀的可能也增加。LUXMOORE^[41]指出,土壤孔隙中非毛管孔隙是土壤通气透水的主要通道,孔隙中的水分流动主要受重力势的支配迁移运动;李华等^[42]通过对比压实后土壤的孔隙分布曲线和渗透性曲线也证明孔隙分布较大时土壤渗透系数也更大,即压实导致的非毛管孔隙的减小会减小土壤的入渗能力,从而增加土壤侵蚀发生的可能性。土壤中毛管孔隙度主要功能是蓄水和供水,可以表征土壤的田间持水量。田间持水量不但代表农田土壤可利用的有效水上限,它是衡量土壤保水性的重要指标,对农田灌溉、作物水管理具有重要意义^[43-44]。机械压实使土壤毛管孔隙度减弱,使土壤的保水性能及作物生长可利用的有效水也随之减少,抑制了作物生长及土壤的抗侵蚀能力。

无论对于表层土壤或深层土壤,大型机械相比中型、小型机械对土壤容重、孔隙及含水的影响都更明显。这是因为机械质量是影响压实程度的重要因素之一^[35,45],对于表层土壤,大型机械由于较大的质量在少次压实时对土壤性质的影响强于中小型机械。而对于深层土壤,由于大型机械的质量优势,少次压实时大型机械相比中小型机械其在土壤中传递的应力也更深^[46],因此对土壤物理性质的影响也更大,但随着压实次数的增加,土壤压实的累积效应越明显,机械质量对深层土壤容重的影响优势被削弱。有研究表明,3次压实后土壤容重增幅减缓^[17],这就是因为压实次数对土壤影响的累积作用。可见,质量较小的机械随压实次数增加其对土壤的影响也可依靠累积效应的增加与质量较大的机械接近。

本研究中,中型及小型机械在首次压实就使土壤各入渗特征与未压实土壤相比显著下降,而大型机械至3次压实土壤入渗特征与未压实土壤相比显著下降。首次压实,中型及小型机械使2 h累计入渗量分别减少87.16%和50.81%;初渗速率分别减少87.59%和70.93%;中型机械使稳渗速率显著减少92.90%。3次压实,大型机械使2 h累计入渗量、初渗速率显著减小73.29%和75.67%;至5次压实后各机械间土壤各入渗特征无显著差异。说明少次压实时,中型机械入渗能力受影响最大,大型机械受影响最小,这应当与机械本身及机械与土壤之间的接触有关。大型机械与中型机械相比拥有更大的质量,因此对土壤的压实作用也更强烈,这在压实对土壤的容重、孔隙特征方面有所体现,但大型机械也

拥有更强的发动机马力及更深的轮胎的花纹深度。在机械行驶过程与土壤接触面的摩擦力也更大,因此对表层土壤的扰动作用相比中型机械也更大。有研究表明,大型机械在少次压实土壤变形较中型机械更大^[47],表层土壤状态更为松散,而松散土壤吸收径流的能力更好,其入渗能力也就更好。至 5 次压实后,各机械压实后土壤入渗能力土壤各项入渗指标变化不再显著。一方面是由于主压实次数增加,压实作用的累积效应显现导致土壤入渗性能逐渐减弱;另一方面,机械对土壤入渗特征的影响存在阈值,当土壤受压实作用到阈值以后,土壤各项物理性质不再明显变化,这在周艳丽等^[17]的研究中也被证明。

综合来看,0~20 cm 土层土壤容重及土壤孔隙特征均影响机械压实土壤入渗特征,0~10 cm 土层土壤容重是影响综合土壤入渗特征的主导因素。土壤容重增加、土壤孔隙度减小使土壤入渗能力减弱已被众多学者证实^[7,31]。土壤容重的变化体现了土壤中孔隙状况的变化,压实使土壤颗粒排列更为紧密,土壤孔隙结构变差,土壤容重增加,土壤水分入渗就越差。土壤入渗过程可分为渗润阶段、渗漏阶段和渗透阶段。渗润阶段,水分在土粒分子力作用下被土粒吸附形成吸湿水,进而形成薄膜水,水分继续入渗至渗漏阶段,毛管力和重力成为影响土壤水分下渗的主要作用力,在毛管力和重力的共同作用下,水分在土壤非毛管孔隙中不稳定运动,并逐步填充土壤孔隙并逐渐达到饱和状态,随后入渗过程进行至渗透阶段,水分在重力作用下沿土壤非毛管孔隙继续向深层运动。即在土壤入渗过程中,土壤中孔隙结构主要影响水分入渗。而容重作为综合反映土壤孔隙结构的指标,与土壤渗透能力极显著负相关,能够表征机械压实对土壤入渗特征的影响。

参考文献:

- [1] 匡兵,胡碧霞,韩璟,等.乡村振兴战略背景下我国农业机械投入强度差异与极化研究[J].中国农业资源与区划,2020,41(5):50-56.
- [2] 任利东,王丽,林琳,等.农田土壤机械压实研究进展与展望[J].土壤学报,2023,60(3):610-626.
- [3] KELLER T,LAMANDÉ M.Challenges in the development of analytical soil compaction models[J].Soil and Tillage Research,2010,111(1):54-64.
- [4] 李春林,丁启朔,陈青春.水稻土的先期固结压力测定与分析[J].农业工程学报,2010,26(8):141-144.
- [5] NAWAZ M F,BOURRIÉ G,TROLARD F.Soil compaction impact and modelling.A review[J].Agronomy for Sustainable Development,2013,33(2):291-309.
- [6] KASPER M,BUCHAN G D,MENTLER A,et al.Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions[J].Soil and Tillage Research,2009,105(2):192-199.
- [7] DE ALMEIDA W S,PANACHUKI E,DE OLIVEIRA P T S,et al.Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration[J].Soil and Tillage Research,2018,175:130-138.
- [8] 范承志,王梓文,杨兴超,等.基于地物高光谱和无人机多光谱的黄河三角洲土壤盐分机器学习反演模型[J].智慧农业(中英文),2022(4):61-73.
- [9] HAGHNAZARI F,SHAHGHOLI H,FEIZI M.Factors affecting the infiltration of agricultural soils:Review[J].International Journal of Agronomy and Agricultural Research,2015,6(5):21-35.
- [10] SPURGEON D J,KEITH A M,SCHMIDT O,et al.Land-use and land-management change:Relationships with earthworm and fungi communities and soil structural properties[J].BMC Ecology,2013,13:1-13.
- [11] 姜义宝,史东梅,江娜,等.土壤侵蚀对坡耕地土壤水分及入渗特性影响[J].土壤学报,2020,57(6):1399-1410.
- [12] 周艳丽.农田土壤机械压实修复研究[J].中国农机化学报,2019,40(1):141-144.
- [13] 孙忠英,李宝筏.农业机器行走装置对土壤压实作用的研究[J].农业机械学报,1998,29(3):172-174.
- [14] 侯贤清,贾志宽,韩清芳,等.不同轮耕模式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响[J].农业工程学报,2012,28(5):85-94.
- [15] 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.
- [16] SMITH D L O,DICKSON J W.Contributions of vehicle weight and ground pressure to soil compaction[J].Journal of Agricultural Engineering Research,1990,46:13-29.
- [17] 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.
- [18] SOLGI A,NAJAFI A.The impacts of ground-based logging equipment on forest soil[J].Journal of Forest Science,2014,60(1):28-34.

- [19] 王晓燕,高焕文,李玉霞,等.拖拉机轮胎压实对土壤水分入渗与地表径流的影响[J].干旱地区农业研究,2000,18(4):57-60.
- [20] AL-ESAWI J S E,WAYAYOK A,AL-OGAIDI A A M,et al.Effect of soil compaction and palm oil application on soil infiltration rate[J].Journal of Irrigation and Drainage Engineering,2021,147(3):04020044.
- [21] 赵明宇,李 华.我国小型拖拉机产品现状与发展趋势[J].农业机械化与电气化,2004(3):3-4.
- [22] 陈英超.我国大型拖拉机的现状与发展[J].农业机械,2001(4):13-15.
- [23] VANDERLINDEN K,GABRIELS D,GIRÁLDEZ J V.Evaluation of infiltration measurements under olive trees in Córdoba[J].Soil and Tillage Research,1998,48(4):303-315.
- [24] 印家旺,阿拉木萨,苏宇航,等.科尔沁沙地不同土地利用类型土壤入渗特征比较研究[J].水土保持通报,2022,42(4):90-98.
- [25] 刘 翔,周宏飞,刘 昊,等.不同类型生物土壤结皮覆盖下风沙土的入渗特征及模拟[J].生态学报,2016,36(18):5820-5826.
- [26] 李彦霏,邵明安,王 娇.蚯蚓粪施用方式及用量对土壤入渗的影响[J].土壤学报,2019,56(2):331-339.
- [27] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978.
- [28] 王 璐,仲启铖,陆 颖,等.群落配置对滨海围垦区土壤理化性质的影响[J].土壤学报,2014,51(3):638-647.
- [29] 李 媛,黄 婷,甘泉峰,等.生物基复合改良剂对耐盐紫花苜蓿根系生长的调控作用[J].南京农业大学学报,2022,45(6):1183-1193.
- [30] 吴志远,彭苏萍,杜文凤,等.干旱地区煤层开采对地表土壤理化性质的影响[J].水土保持研究,2019,26(5):75-80.
- [31] 张轩铭,戴翠婷,李朝霞,等.三峡库区紫色砂岩不同发育程度土壤入渗特征及其影响因素[J].水土保持学报,2022,36(4):92-98.
- [32] 云慧雅,毕华兴,王珊珊,等.不同林分类型土壤理化特征及其对土壤入渗过程的影响[J].水土保持学报,2021,35(6):183-189.
- [33] 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):12-16.
- [34] NAZARI M,ETEGHADIPUR M,ZAREBANADKOUKI M,et al.Impacts of logging-associated compaction on forest soils:A meta-analysis[J].Frontiers in Forests and Global Change,2021,4:1-15.
- [35] 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.
- [36] JAMSHIDI R,JAEGER D,RAAFATNIA N,et al.Influence of two ground-based skidding systems on soil compaction under different slope and gradient conditions[J]. International Journal of Forest Engineering,2008,19(1):9-16.
- [37] CAMBI M,GRIGOLATO S,NERI F,et al.Effects of forwarder operation on soil physical characteristics: a case study in the Italian alps[J].Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering,2016,37(2):233-239.
- [38] 赵瑞雪,杨晨雪,郑建华,等.农业智能知识服务研究现状及展望[J].智慧农业(中英文),2022,4(4):105-125.
- [39] 李博容,张志峰,倪 超,等.压实机械对土壤应力的影响试验[J].机械研究与应用,2020,33(5):77-81.
- [40] RABOT E,WIESMEIER M,SCHLÜTER S,et al.Soil structure as an indicator of soil functions:A review[J].Geoderma,2018,314:122-137.
- [41] LUXMOORE R J.Micro-,meso-,and macroporosity of soil[J].Soil Science Society of America Journal,1981,45(6):1246-1247.
- [42] 李 华,李同录,张亚国,等.不同干密度压实黄土的非饱和渗透性曲线特征及其与孔隙分布的关系[J].水利学报,2020,51(8):979-986.
- [44] 江学海,李刚华,陆 波,等.贵州山地杂交水稻区水分时空变化规律研究[J].南京农业大学学报,2022,45(3):453-464.
- [45] 张文瀚,杜克明,孙彦坤,等.基于探地雷达的田块尺度下不同深度土壤含水量监测[J].智慧农业(中英文),2022,4(1):84-96.
- [46] CAMBI M,CERTINI G,NERI F,et al.The impact of heavy traffic on forest soils:A review[J].Forest Ecology and Management,2015,338:124-138.
- [47] BARBOSA L A,MAGALHÃES P S.Tire tread pattern design trigger on the stress distribution over rigid surfaces and soil compaction[J].Journal of Terra Mechanics,2015,58:27-38.