

长期不同耕作方式下的土壤硬度变化特征

郑洪兵^{1,2,3}, 郑金玉^{2,3}, 罗洋^{2,3}, 李瑞平^{2,3}, 李伟堂^{2,3}, 王浩^{2,3},
任红¹, 齐华¹, 刘武仁^{2,3*}

(1. 沈阳农业大学农学院, 沈阳 110866; 2. 农业部东北作物生理生态与耕作重点实验室, 北京 100081;
3. 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033)

摘要:为探明不同耕作方式下土壤硬度变化特征,以始于1983年长期定位不同耕作方式土壤为研究对象,采用土壤硬度仪观测免耕(no-tillage, NT)、翻耕(plow tillage, PT)、间隔深松(spacing tillage, ST)和传统耕作(conventional tillage, CT)不同年份、季节、土壤剖面及冻融前后土壤硬度,研究不同耕作方式对土壤硬度的影响。结果表明:免耕增加了耕层0~25 cm土壤硬度,而土层>25~45 cm免耕硬度显著降低($P<0.05$),但传统耕作硬度有增加趋势,间隔深松和翻耕硬度明显低于免耕和传统耕作($P<0.05$);不同耕作方式土壤硬度随季节的推移呈波动性变化,0~25和>25~45 cm变化趋势基本一致;土壤硬度随土壤深度的增加而增加,上层明显低于下层($P<0.05$),不同时期变化不同,前期随深度增加到20 cm处呈垂直变化,而后期随深度增加呈反“S”型曲线变化;冻融交替作用可以有效降低土壤硬度,缓解冻融后土壤硬度,间隔深松降幅最大为148.97%,其次为免耕和翻耕,降幅分别为41.96%和58.44%,传统耕作降幅最小仅为3.38%。综合分析认为,间隔深松耕作是改善土壤硬度,提高土壤宜耕性的有效耕作方法。该研究可为东北雨养农业区构建合理耕层和确定适宜的耕作技术提供科学依据。

关键词:土壤; 硬度; 冻; 融; 间隔深松; 耕作方式

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.09.011

中图分类号: S152.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0063-08

郑洪兵, 郑金玉, 罗洋, 等. 长期不同耕作方式下的土壤硬度变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 63—70.
Zheng Hongbing, Zheng Jinyu, Luo Yang, et al. Change characteristic of soil compaction of long-term different tillage methods in cropland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 63—70.
(in Chinese with English abstract)

0 引言

农田土壤是农业发展的物质基础,土壤的质量直接影响农产品产量和质量^[1]。土壤耕作是获取作物高产的必要条件之一,但不同耕作方式必然引起土壤理化性质的变化^[2]。随着土壤被犁翻次数的增多导致土壤结构退化^[3],而传统耕作长期浅层作业形成坚硬的犁底层^[4]。与传统耕作相比,免耕可以改善土壤结构,控制土壤侵蚀,增加土壤抗侵蚀能力^[5],但长期实施免耕引起土壤板结,从而影响作物生长发育^[6]。据报道,土壤硬度对耕作方式的响应研究存在差异,Soane等^[7]研究认为,土壤耕作对土壤紧实性有一定的缓解作用,但也有一定的负面影响。陈学文等^[6]研究认为免耕增加了土壤硬度,主要表现在2.5~17.5 cm的土层。免耕能够增加土壤硬度^[8],主要作用于0~7.5 cm土层^[9],对作物的生长不利,并影响作物

产量^[10]。但也有研究认为,由于保护性耕作中大量秸秆还田,为土壤动物提供了丰富的食物来源,几年后,土壤动物,如蚯蚓的频繁挖洞能够改善土壤硬度^[11]。

土壤紧实是土地恶化的综合表征,与土壤侵蚀、有机质下降并称为农业生产的三大威胁^[12]。土壤紧实是影响农田土壤质量和作物生长的关键障碍因子之一^[13]。长期集约化农作带来的土壤紧实化,耕层薄层化问题逐渐凸显,成为制约作物健康生长的关键问题^[14]。大量研究表明,土壤压实后土壤紧实度增加,容重增加^[15],孔隙度降低^[16],阻碍了土层内水、气、热的传输,破坏了土壤结构功能,进而影响了作物生长和产量^[17-19]。

东北是中国重要粮食生产基地,农业机械化水平也高于全国其他省份,由于大型机械作业导致耕作方式的变革,必然引起土壤紧实。目前,关于东北农田不同耕作方式对土壤硬度的影响报道较少,特别是不同耕作方式土壤硬度剖面特征、季节变化、冻融前后差异及多年变化系统研究鲜见报道。因此,本文以吉林省农业科学院始于1983年长期定位不同耕作方式土壤为研究对象,对比研究了免耕、翻耕、间隔深松和传统耕作方式对土壤硬度的影响,为明确适于东北推广应用的合理耕作技术提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省公主岭市吉林省农业科学院院内

收稿日期: 2015-02-11 修订日期: 2015-04-17

基金项目: 农业部公益性行业科研专项资金项目(201103001); 国家科技支撑计划项目(2012BAD04B02), (2012BAB14B05)

作者简介: 郑洪兵,男,蒙古族,吉林白城人,助理研究员,博士,主要从事土壤耕作制度与保护性耕作研究。长春 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所,130033。Email: hongbingzheng@126.com

*通信作者: 刘武仁,男,汉,吉林公主岭人,研究员,博士生导师,主要从事保护性耕作与农作制度研究。长春 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所,130033。liuwuren571212@163.com

试验区(43°45'N, 125°01'E)。该区气候属于中温带大陆性季风气候, 年均气温 4.5℃, 年均太阳有效辐射 4 800 MJ/m², 日照时数为 2 800 h, ≥10℃有效积温为 2 860℃·d, 无霜期 140d, 年降雨量 567mm, 主要集中在 6~8 月。2011 年、2012 年和 2013 年 4~9 月份总降雨量分别 366.2、595.5 和 642.9 mm, 降雨均集中在 6 月、7 月和 8 月 3 个月份(图 1)。土壤类型为典型中层黑土、壤质黏土, 全氮、全磷、全钾质量分数分别为 0.15%、0.05% 和 2.26%; 碱解氮、速效磷、有效钾质量分数分别为 146.36、13.50 和 152.32 mg/kg, 0~20 cm 表层土壤 pH 值 6.5。

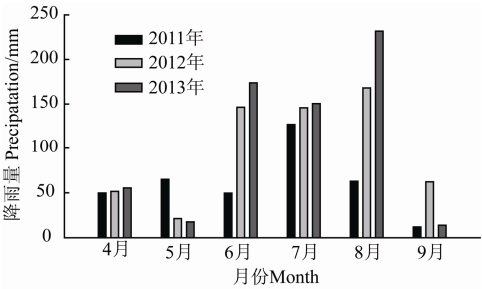


图 1 试验区 2011—2013 年 4~9 月份的降雨量

Fig.1 Precipitation of different months from 2011 to 2013 in experimental zone

1.2 试验设计

试验始于 1983 年, 设免耕(no-tillage, NT)、翻耕(plow tillage, PT)、间隔深松(spacing tillage, ST)和传统耕作(conventional tillage, CT)4 个处理, 随机区组试验设计, 每个小区面积为 150 m×8 m (1 200 m²), 3 次重复, 试验区总面积为 15 000 m²。种植作物为玉米多年连作, 一年一熟, 供试品种为郑单 958, 保苗密度为 6 万株/hm², 行距为 65 cm, 株距为 25 cm。肥料用量为 N 243 kg/hm², P₂O₅ 92 kg/hm² 和 K₂O 80 kg/hm²。每年 5 月 1 日左右播种, 10 月 1 日左右收获。每种耕法具体田间操作方法详见表 1。

表 1 不同耕作方式田间操作方法

Table 1 Operation methods of different tillage modes in field

代码 Codes	处理 Treatments	操作方法 Operation methods
ST	间隔深松	将传统 65 cm 的垄改成宽行 90 cm(作为深松带), 窄行 40 cm(作为苗带), 春季在上一年度的宽行机械播种, 结合播种施入种肥, 播后用镇压器镇压。在玉米拔节期结合追肥进行深松(30~35 cm)。玉米收获后, 留茬高度约 45 cm, 其余秸秆运出田外, 用旋耕机对上一年度的苗带进行旋耕, 作下一年种床
NT	免耕耕作	春季用免耕播种机开沟播种, 种肥侧深施, 种肥隔离, 然后用镇压器镇压。在玉米拔节期进行施肥, 肥料施于玉米根部附近, 秋季收获后留茬 35~40 cm, 其余秸秆运出田外
PT	翻耕耕作	春季采用常规播种机播种, 在玉米拔节期结合中耕进行追肥。秋季玉米收获后, 秸秆全部运出田外, 然而用翻转犁翻地, 茬子翻入土壤中, 翻地深度为 20~25 cm
CT	传统耕作	春季采用常规播种机播种, 结合播种进行侧施种肥, 在玉米拔节期结合中耕进行追肥。秋季玉米收获后, 秸秆全部运出田外, 然后用旋耕机进行浅旋整地(深度为 20~25 cm), 以备翌年春季播种

1.3 土壤硬度测定

采用 SC-900 土壤硬度计, 2009 年于收获后(10 月 22 日), 2010 年于收获后(10 月 18 日), 2011 年于收获后(10 月 21 日), 2012 年于成熟期(9 月 13 日), 2013 年于播种前(5 月 3 日)、6 展叶(6 月 4 日)、8 展叶(6 月 14 日)、14 展叶(7 月 6 日)、开花期(7 月 21 日)、吐丝期(7 月 23 日)、灌浆初期(8 月 10 日)、灌浆中期(8 月 20 日)、成熟期(9 月 4 日)、收获后(10 月 9 日)和 2014 年于播种前(4 月 21 日)测定 0~45 cm 土壤硬度(kg/cm²), 土壤硬度仪随土壤深度的变化自动计数, 每隔 2.5 cm 读取一个数值, 水平间距 10 cm, 5 次重复。

1.4 数据处理

采用 Excell2003 处理数据和 SPSS13.0 统计软件中最小显著性差异检验法(LSD)进行方差分析和多重比较(α=0.05)。用 Sigmaplot11.0 进行绘图。

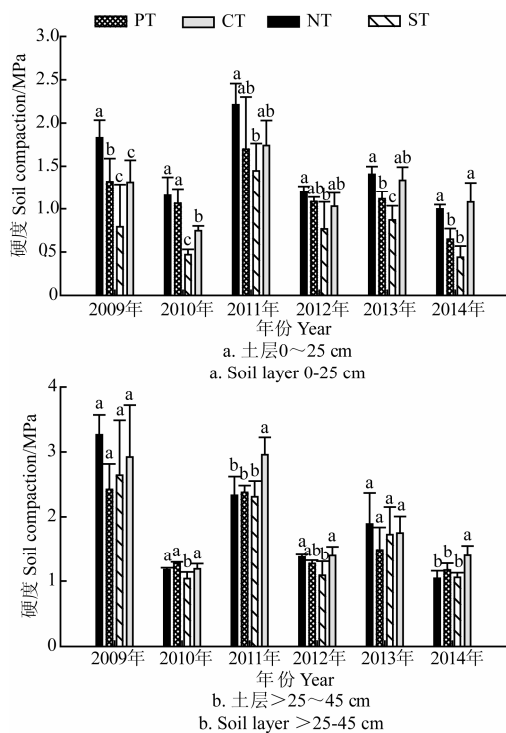
2 结果与分析

2.1 不同耕作方式土壤硬度比较

土壤硬度是表征土壤质量的指标之一, 影响作物生长的重要因素, 合理的耕作管理是调控土壤硬度的有效手段^[20], 而不同耕作方式对土壤硬度影响不同(图 2)。土层 0~25 cm 不同年份土壤硬度处理间差异较大(图 2a), NT 处理土壤硬度变幅为 1.00~2.21 MPa, PT 处理土壤硬度变幅为 0.65~1.70 MPa, ST 处理土壤硬度变幅为 0.44~1.45 MPa, CT 处理土壤硬度为 0.75~1.74 MPa。从不同年份比较来看, 2009 年 PT、ST 和 CT 与 NT 比较差异均显著(P<0.05), 土壤硬度分别降低了 38.6%、131.6% 和 39.6%; 2010 年 ST 和 CT 与 NT 处理比较差异均显著(P<0.05), 土壤硬度分别降低了 146.8%和 54.6%, PT 与 NT 处理差异不显著(P>0.05); 2011 年 PT、ST 和 CT 与 NT 处理品比较差异均显著(P<0.05), 土壤硬度分别降低了 30.0%、52.41%和 27.01%; 2012 年 PT、ST 和 CT 与 NT 处理比较差异均显著(P<0.05), 土壤硬度分别降低了 11.1%、55.8%和 16.5%; 2013 年 PT 和 ST 与 NT 处理比较差异均显著(P<0.05), 土壤硬度分别降低了 25.8%和 62.0%, CT 与 NT 处理差异不显著(P>0.05); 2014 年 PT 和 ST 与 NT 处理比较差异均显著(P<0.05), 土壤硬度分别降低了 53.8%和 127.2%, CT 和 NT 差异不显著(P<0.05)。

由图 2b 可知, >25~45 cm 土壤硬度受耕作方式的影响没有 0~25 cm 明显, NT 处理土壤硬度变幅为 1.04~3.27 MPa, PT 处理土壤硬度变幅为 1.17~2.42 MPa, ST 处理土壤硬度变幅为 1.04~2.64 MPa, CT 处理土壤硬度变幅为 1.19~2.96 MPa, 总体来看处理间差异不大, 而且 NT 处理土壤硬度有所下降, CT 处理土壤硬度有增加趋势, PT 和 ST 处理土壤硬度差异不明显。从不同年份比较来看, 2009 年和 2013 年处理间差异不显著(P>0.05); 2010 年 ST 与 NT 处理比较差异显著(P<0.05), 土壤硬度降低了 13.46%, PT 和 CT 与 NT 差异不显著(P>0.05); 2011 年 CT 与 NT 处理比较差异显著(P<0.05), 土壤硬度增加了 27.03%, PT 和 ST 与 NT 差异不显著(P>0.05);

2012年ST与NT处理比较差异显著($P<0.05$), 土壤硬度降低了25.68%, PT和CT与NT差异不显著($P>0.05$); 2014年CT与NT比较差异显著($P<0.05$), 土壤硬度增加了34.61%, PT和CT与NT差异不显著($P>0.05$)。综上分析表明, 间隔深松和翻耕降低了0~45 cm土壤硬度其原因主要是机械深松、深翻的结果, 间隔深松耕作通过深松打破犁底层, 持续的深松后效实现了土壤硬度的降低, 虽然翻耕暂时降低了春季土壤硬度, 但由于机械全面翻转土壤, 破坏了大团粒结构, 使土壤结构稳定性变差, 秋季硬度容易恢复到翻耕前的状态。免耕增加了耕层0~25 cm土壤硬度主要原因是由于机械作业次数少, 土壤扰动减小, 降雨、冻融等自然因素导致土壤沉积, 增加表层土壤的紧实性, 而>25~45 cm下层硬度降低其原因主要是长期实施免耕未形成坚硬的犁底层, 而且增加了蚯蚓等土壤动物的数量, 促进了土壤大孔隙数量的增加, 一定程度上缓解了土壤硬度。传统耕作土层0~25 cm土壤硬度小, 而>25~45 cm土层硬度较高其原因主要是长期小型动力作业耕作范围仅局限在耕层>10~15 cm内, 导致15 cm以下形成坚硬层。



注: 误差线表示均值±标准误差, 相同小写字母表示在5%水平没有显著差异。NT为免耕; PT为翻耕; ST为间隔耕作; CT为传统耕作。下同。

Note: Error bar represents mean ± standard error; the same lowercase means no significant difference at 0.05 levels. NT is no tillage; PT is plow tillage; ST is spacing tillage; CT is conventional tillage; The same as below.

图2 不同年份不同耕作方式下土壤硬度比较 ($n=5$)

Fig.2 Comparison of soil compaction of different tillage in different years ($n=5$)

2.2 土壤硬度季节性变化特征

土壤硬度季节性变化特征受降雨影响较大, 降水增多土壤硬度下降, 反之则增加^[21]。土层0~25 cm NT、PT、ST和CT处理土壤硬度季节变化趋势基本一致(图3a), 5月3日到7月6日均呈先增加后降低的变化趋势, 8月20

日到10月9日呈直线增加趋势变化, 但7月6日到8月10日不同耕作方式土壤硬度存在差异, ST和CT处理呈先增加后降低趋势变化, 而NT处理呈增加趋势变化, PT处理先小幅降低然后增加, NT和PT处理变化趋势基本一致。从不同测定日期来看, 除6月4日, 6月14日, 8月10日不同耕作方式土壤硬度差异不显著, 其余日期差异均达显著水平($P<0.05$)。通过对整个生育期土壤硬度的平均值来看, NT处理最高为1.12 MPa, 其次CT处理为1.09 MPa, PT和ST处理最低分别为1.01和0.91 MPa。土层>25~45 cm NT、PT、ST和CT处理土壤硬度季节变化与0~25 cm趋势基一致(3b), 随时间推移土壤硬度呈波动变化, 除ST处理在7月21日表现较高的硬度值外, 其余处理均在8月10日表现较高的土壤硬度值。从不同测定日期来看, 除6月4日, 6月14日, 8月10日和10月9日不同耕作方式土壤硬度差异不显著, 其余日期差异均达显著水平($P<0.05$)。通过对整个生育期土壤硬度的平均值来看, CT处理最高为1.38 MPa, 其次PT和ST处理均为1.34 MPa, NT处理最低为1.28 MPa。可见, 随土层深度的增加, NT处理硬度有所下降, 而CT处理则明显增加。结果表明, 不同耕作方式土层0~25 cm和>25~45 cm土壤硬度变化趋势一致的原因主要受降水影响, 随着降水增加土壤硬度降低, 而降水减少时土壤硬度增加, 而这种变化趋势土层>25~45 cm比0~25 cm更明显, 说明土层0~25 cm土壤硬度受耕作影响大于降水因素, 而>25~45 cm降水因素大于耕作因素对土壤硬度的影响, 这与Lopez^[22]研究结果一致。另外, 8月10日之前半月内降水较少, 这可能是导致8月10日土壤硬度明显高于其他时期的一个重要原因。

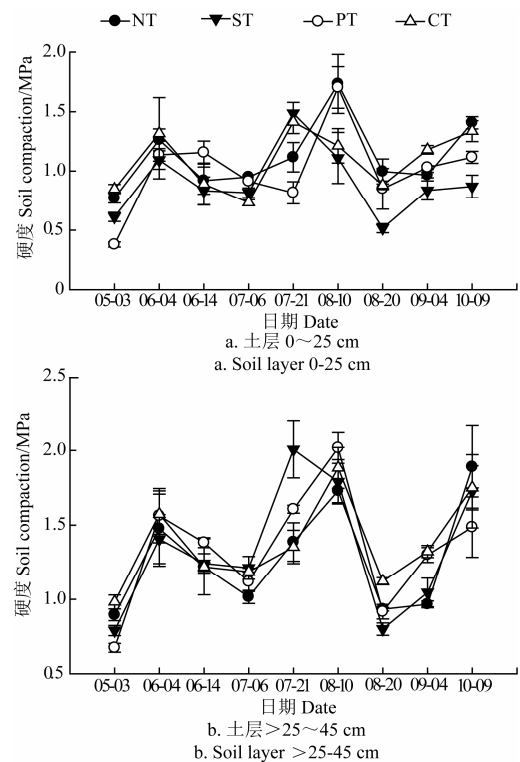


图3 不同耕作方式土壤硬度季节性变化特征 ($n=5$)

Fig.3 Seasonal change of soil compaction of different tillage ($n=5$)

2.3 土壤硬度剖面尺度变化特征

由于耕作方式不同导致田间作业机械不同,而机械在结构质量、功率和作业深度等性能上的差异,导致土壤硬度垂直变化特征表现出明显的不同规律性(图4)。播种前(5月3日)土层0~15 cm不同耕作方式土壤硬度随深度增加而降低,而>15~45 cm随深度增加呈垂直变化,硬度增加不明显,且不同处理间>2.5~45 cm均值差异显著($P<0.05$)(图4a);苗期(6月4日)土层0~22.5 cm不同耕作方式土壤硬度随深度增加而增加,且0~7.5 cm NT处理明显小于其他处理,而>7.5~17.5 cm NT处理明显高于其他处理,>20~45 cm处理间土壤硬度差异不明显,但不同处理间>2.5~45 cm均值差异不显著($P>0.05$)(图4b);抽雄吐丝期(7月21日)土层>2.5~17.5 cm NT和PT处理土壤硬度均高于ST和CT处理,但随土壤深度增加而下降,而且NT处理下降较明显,>25~35 cm明显低于其他处理,但不同处理间>2.5~45 cm均值差异不显著($P>0.05$)(图4c);灌浆期(8月10日)土壤硬度随深度增加而增加,>2.5~5 cm NT和PT处理增加较大,>5~45 cm呈垂直变化,

硬度增加不明显,而>2.5~20 cm ST和CT处理呈反“S”型曲线变化,>20~45 cm变化趋势与NT和PT处理一致,但不同处理间>2.5~45 cm均值差异不显著($P>0.05$)(图4d);成熟期(9月4日)土层>2.5~10 cm不同耕作方式土壤硬度随深度增加而增加,处理间差异不明显,而>10~45 cm PT和CT处理土壤硬度明显高于NT和ST处理,其中CT处理硬度增加最大,且不同处理间差异显著($P<0.05$)(图4e);收获后(10月9日)不同耕作方式土壤硬度随深度增加而增加,>2.5~25 cm均呈反“S”型曲线变化,>25~45 cm NT、ST和PT处理随深度变化趋势一致,但CT处理随深度呈垂直变化,>15~32.5 cm明显高于其他处理,且不同处理间>2.5~45 cm均值差异显著($P<0.05$)(图4f)。结果表明,播种前土壤硬度剖面变化趋势一致,随着田间机械操作,不同耕作方式土壤硬度剖面变化表现出现差异,说明播种前土壤硬度剖面变化主要受冻融作用影响,处理间剖面变化小,而随田间生产作业的进行土壤硬度剖面变化受作业机械质量、作业次数和作业深度影响较大而表现出较大变化趋势^[21]。

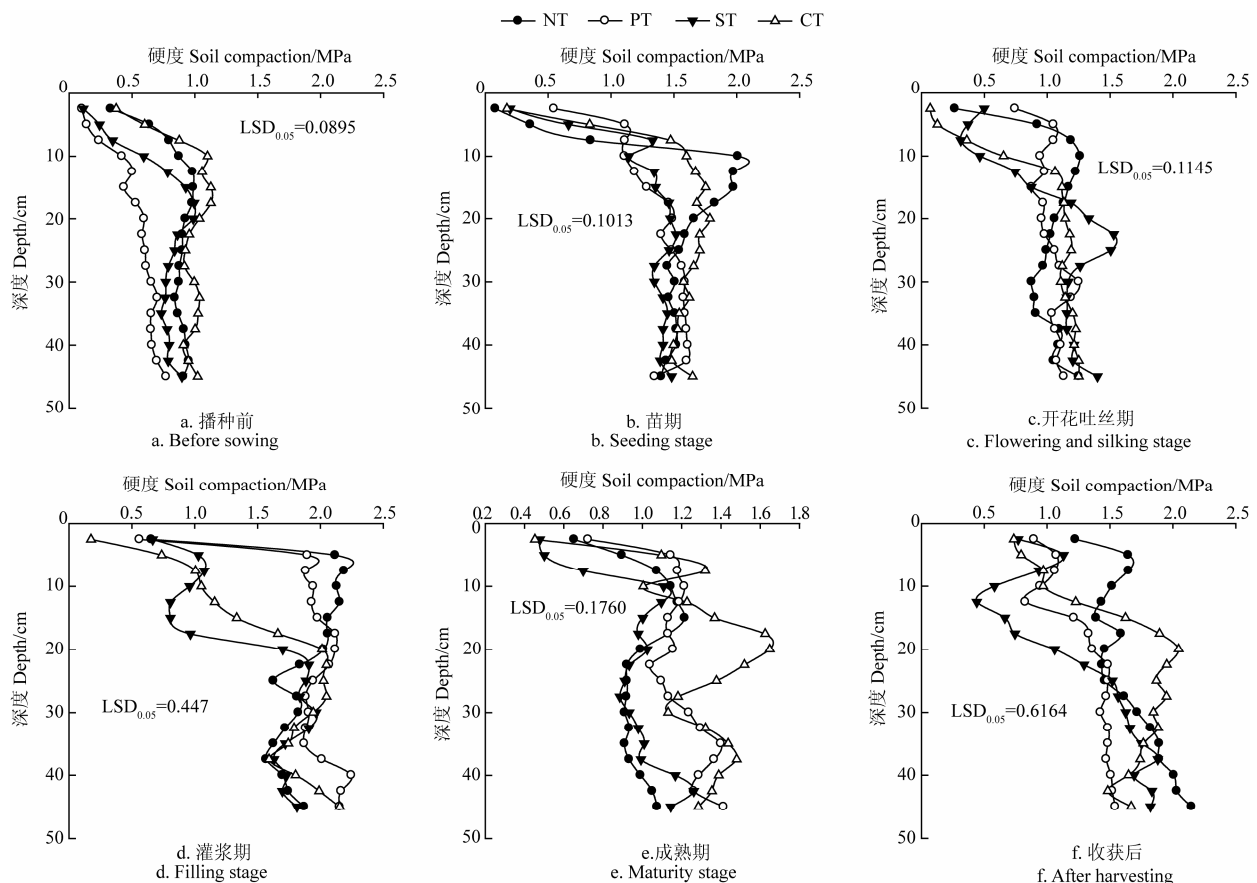


图4 不同耕作方式土壤硬度剖面变化($n=5$)

Fig.4 Profile change of soil compaction of different tillage methods in 2013 ($n=5$)

2.4 冻融前后土壤硬度变化

冻融交替可较为强烈地影响土壤物理和化学性质,会改变土壤结构及土体构造,进而影响土壤硬度的变化。不同耕作方式冻融前后土壤硬度变化不同(表2),冻融作用影响NT、PT、ST和CT各土层硬度,各土层硬度冻

融后均小于冻融前。NT处理冻融前土壤硬度变幅为1.21~2.15 MPa,均值为1.59 MPa,冻融后土壤硬度变幅为0.48~1.38 MPa,均值为1.12 MPa,冻融后土壤硬度平均降幅为41.9%;PT处理冻融前土壤硬度变幅为0.83~1.54 MPa,均值为1.22 MPa,冻融后土壤硬度变幅为

0.07~1.20 MPa，均值为 0.77 MPa，冻融后土壤硬度平均降幅为 58.4%；ST 处理冻融前土壤硬度变幅为 0.44~1.82 MPa，均值为 1.22 MPa，冻融后土壤硬度变幅 0.04~1.10 MPa，均值为 0.49 MPa，冻融后土壤硬度平均降幅为 148.9%；CT 处理冻融前土壤硬度变幅为 0.74~2.05MPa，均值为 1.22 MPa，冻融后土壤硬度变幅为 0.23~1.47 MPa，均值为 1.18 MPa，冻融后土壤硬度平均降幅为 3.38%。冻融作用会改变土壤容重和孔隙度，降低

土壤密度，起到缓解土壤紧实性的作用^[23]，本研究与前人研究一致，不考虑耕作因素，冻融作用显著降低土壤硬度，间隔深松降幅最大，其次为免耕和翻耕，传统耕作降幅最小。陈浩等^[24]研究表明，冬前灌溉条件下，冻融作用使压实区 0~15 cm 土层压实降低，总孔隙度提高，有利于减轻土壤压实。可见，冻融后间隔深松土壤硬度降幅最大其原因可能是与通过深松蓄水保墒有较高的土壤含水量有关^[25]，解冻后导致土壤疏松硬度降低。

表 2 冻融前后不同耕作方式土壤硬度变化(n=5)
Table 2 Change of soil compaction of different tillage after seasonal freezing-thawing (n=5)

处理 Treatments	时期 Periods	深度 Depth/cm												MPa
		2.5	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	30	37.5	45	
NT	冻融前 Before freezing thawing	1.23a	1.65a	1.65a	1.65a	1.52a	1.43a	1.39abc	1.59bc	1.46bc	1.44bcd	1.72ab	2.15a	
	冻融后 After freezing thawing	0.48cde	1.15±b	1.38ab	1.38ab	1.34ab	1.24ab	1.19bcd	1.13de	1.05efg	0.92f	0.96e	1.23de	
PT	冻融前 Before freezing thawing	0.90ab	1.07bcd	1.06bc	1.06bc	0.94cde	0.83c	1.21bcd	1.33cd	1.36cd	1.48bc	1.42bcd	1.54bcd	
	冻融后 After freezing thawing	0.07f	0.08f	0.94c	0.35fg	0.60ef	0.94bc	0.97de	0.98ef	0.99efg	1.04f	1.20de	1.18de	
ST	冻融前 Before freezing thawing	0.77bcd	1.13bc	0.94c	0.94cd	0.58ef	0.44d	0.669ef	0.74fg	1.06efg	1.29cde	1.62abc	1.82ab	
	冻融后 After freezing thawing	0.04f	0.09f	0.11e	0.11g	0.16g	0.37d	0.57f	0.57g	0.79g	1.05ef	1.01e	1.10e	
CT	冻融前 Before freezing thawing	0.74bcd	0.79cde	0.97 c	0.97cd	0.97bcde	1.23ab	1.62a	1.89a	2.05a	1.95a	1.85a	1.67bc	
	冻融后 After freezing thawing	0.23ef	0.74de	1.15bc	1.15bc	1.31abc	1.31a	1.35abc	1.37bcd	1.44cd	1.43bcd	1.47bcd	1.31cde	

3 讨论

3.1 不同耕作方式对土壤硬度的影响

长期单一耕作可能导致土壤紧实，耕作形成的紧实比较复杂，时空变异也比较大^[13]。一般来说，旋耕能使表层土壤疏松，增加扩散率，但同时也能使耕作区以下形成坚硬的紧实层，而且随着耕作年限的增加，心土层紧实也变的更加严重，其紧实层厚度可达 30~60 cm^[20]。本研究表明，长期采用免耕作业增加了 0~25 cm 土层硬度，但>25~45 cm 土层硬度呈下降趋势，传统耕作耕层 25 cm 以下土壤硬度有增加趋势，而间隔深松和翻耕土壤硬度均显著小于免耕和传统耕作，这可能是由于免耕表层作业减少表现紧实，而下层硬度降低是由于免耕能够增加蚯蚓的数量通过孔洞来改善紧实^[11]，传统耕作采取浅旋耕作表层硬度有所降低，但耕作区以下形成坚硬的紧实层，导致硬度增加，而间隔深松可有效降低土壤硬度，起到翻耕同样的效果，这与 Kooistra 等^[21]研究结果一致。另外，间隔深松耕作留高茬 45 cm 实现秸秆总量

的 1/3 还田，3 a 全量还田一次，研究表明 6 a 有机质提高 3.37 g/kg^[26]，深松后根茬与土壤接触经微生物的作用当季可以腐解，增加土壤有机质培肥土壤，促进土壤大团粒形成，增强土壤结构稳定性，提高土壤土壤缓冲能力，也是降低土壤硬度一个重要原因^[27]，但其深层原因有待进一步研究。

3.2 土壤硬度季节性变化特征

刘爽等^[28]研究认为随着生育时期的延续，土壤紧实度升高，但生育后期深松处理土壤紧实度仍小于不深松处理。本研究表明不同耕作方式 0~25 cm 和>25~45 cm 土壤硬度随生育进程延续呈波动变化，但变化趋势一致，而且 0~25 cm 比>25~45 cm 变化明显，0~25 cm 土壤硬度的 3 个峰值 NT 和 PT 处理分别出现在 6 月 4 日、8 月 10 日和 10 月 9 日，而 ST 和 CT 处理第 1 个峰值出现在 7 月 21 日，其余 2 个峰值与其出现时间相同。>25~45 cm 土壤硬度的 3 个峰值 NT、PT、CT 处理分别出现在 6 月 4 日、8 月 10 日和 10 月 9 日，而 ST 处理第 2 个峰值出现在 7 月 21 日。其原因是不同耕作方式下土壤硬

度随作物生育期变化,在前期受耕作因素影响较大^[29],但随生育进程的推进呈现出的变化可能受降雨影响更大^[22],降雨量增多,提高土壤含水量,土壤硬度下降,而降雨量减少土壤硬度增加,但间隔深松土壤硬度在生育中后期较低,其原因是深松后效发挥作用,另一个原因是通过深松积蓄降水,增加了土壤含水量,因此在一定程度上缓解了土壤硬度的增加^[30]。

3.3 土壤硬度剖面变化特征

土壤硬度随土壤深度增加而增大,土层 0~20 cm 随土壤深度增加较明显,并且差异较大,21~45 cm 土壤硬度随土壤深度增加趋于平缓,差异不明显^[31]。而王恩姮等^[32]研究认为在 0~80 cm 土层范围内,大机械作业的土壤硬度在垂直梯度上存在 3 个明显交替变化的层面,自上而下依次为耕作区(0~40 cm)、压实积累区(41~60 cm)和无影响区(>60 cm)。本研究表明,不同生育时期土壤硬度均随土层深度的增加而增加,但不同时期随深度变化表现不同,在生育前期 0~20 cm 土硬度随深度变化增加明显,而 20 cm 以下土壤硬度基本稳定增加不明显,在生育中后期土壤硬度随深度呈反“S”型曲线变化。这与刘爽等^[28]的研究结果基本一致,随着土层深度增加,土壤紧实度逐渐增加,在 15~30 cm 土层紧实度均较表层土壤明显增高。生育前期土壤硬度主要受耕作措施的影响随深度增加而增加,一定深度后趋于稳定,规律性比较明显,而生育后期土壤紧实度受到多种因素的影响,特别是土层内水分的运移与分布,导致土壤硬度不同土层内呈波动变化趋势^[33]。

3.4 冻融前后土壤硬度变化

冻融作用影响土壤硬度,从而影响土壤的可耕性^[34]。而且,硬度是土壤对冻融交替作用反应最为敏感的指标,即使容重没有发生变化,硬度也会因冻融交替而降低,而且黏土降低幅度比壤土更为明显^[35]。冻融作用会改变土壤容重和孔隙度,降低土壤密度,缓解土壤紧实性^[23]。王恩姮等^[21]研究表明,季节性冻融能够降低土壤硬度,整个耕作区域范围内平均土壤硬度较冻融前相对低了 15.45%。本研究也表明,冻融交替作用显著降低土壤硬度,ST 处理降幅最大为 148.9%,其次 NT 和 PT 处理分别降低为 41.96% 和 58.44%,CT 处理降幅最小仅为 3.38%。可见,冻融交替作用对改善土壤环境起着积极作用,能够调节土壤紧实度^[36]。另外,ST 处理土壤硬度降低幅度明显高于其他耕作方式的原因可能是由于深松耕作增加土壤含水量^[25],冻融过程分散土壤团聚体,改变土壤结构,从而降低土壤硬度,但是否会破坏大团聚体增加土壤侵蚀有待进一步研究。

4 结 论

免耕增加了 0~25 cm 土壤硬度,而显著降低>25~45 cm 土壤硬度,但传统耕作硬度有增加趋势,间隔深松和翻耕硬度明显低于免耕和传统耕作。不同耕作方式土壤硬度随季节的推移呈波动性变化,0~25 cm 和>25~45 cm 变化趋势基本一致。土壤硬度随土壤深度的增加而增加,上层明显高于下层,不同时期变化不同,前期随

深度增加到 20 cm 处呈垂直变化,而后期随深度增呈反“S”型曲线变化。冻融交替作用可以有效降低土壤硬度,缓解冻融后土壤硬度,间隔深松降幅最大,传统耕作降幅最小。基于此,间隔深松耕作改善土壤硬度,提高土壤宜耕性,是解决土壤紧实问题的有效耕作方法。

[参 考 文 献]

- [1] Lal R. Soil structure and sustainability[J]. *Journal of Sustainable Agriculture*, 1991, 1(4): 67-92.
- [2] 黄丽芬, 庄恒扬, 刘世平, 等. 长期少免耕对稻麦产量与土壤肥力的影响[J]. *扬州大学学报: 自然科学版*, 1999, 2(1): 48-52.
Huang Lifeng, Zhuang Hengyang, Liu Shiping, et al. Effect of long-term minimal and no tillage on rice and wheat yields and soil fertility[J]. *Journal of Yangzhou University: Natural Science Editio*, 1999, 2(1): 48-52. (in Chinese with English Abstract)
- [3] 张国盛, Chan K Y, Heenan D P, 等. 长期保护性耕种方式对农田表层土壤性质的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(6): 2722-2728.
Zhang Guosheng, Chan K Y, Heenan D P, et al. Long-term effects of tillage systems and rotation on selected soil properties in cropping zone of southern NSW, Australia[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(6): 2722-2728. (in Chinese with English Abstract)
- [4] 郑洪兵, 郑金玉, 罗洋, 等. 黑土农田不同耕层对玉米生长发育及产量的影响[J]. *耕作与栽培*, 2014(4): 7-9.
Zheng Hongbing, Zheng Jingyu, Luo Yang, et al. Effect of different tillage layer structures on growth and yield of maize in black cropland zone of northeast of china[J]. *Tillage and Cultivation*, 2014(4): 7-9. (in Chinese with English Abstract)
- [5] 杨学明, 张晓平, 方华军, 等. 北美保护性耕作及对中国的意义[J]. *应用生态学报*, 2004, 5(2): 335-340.
Yang Xueming, Zhang Xiaoping, Fang Huajun, et al. Conservation tillage systems in North America and their significance for China(In Chinese)[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 5(2): 335-340. (in Chinese with English Abstract)
- [6] 陈学文, 张晓平, 梁爱珍, 等. 耕作方式对黑土硬度和容重的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(2): 439-444.
Chen Xuwen, Zhang Xiaoping, Liang Aizhen, et al. Effects of tillage mode on black soil's penetration resistance and bulk density[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2): 439-444. (in Chinese with English Abstract)
- [7] Soane B D, Ouwerkerk V C. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 1995(35): 5-22.
- [8] Mahboubi A A, Lal R. Long-term tillage effects on changes in structural properties of two soils in central Ohio[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998(45): 107-108.
- [9] Liebig M A, Tanaka D L, Wienhol B J. Tillage and cropping effects on soil quality indicators in the northern Great Plains[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004(78): 131-141.

- [10] 李华兴, 卢维盛, 刘远金, 等. 不同耕作方法对水稻生长和土壤生态的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 553—556. Li Huaxing, Lu Weisheng, Liu Yuajing, et al. Effect of different tillage methods on rice growth and soil ecology[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 553—556. (in Chinese with English Abstract)
- [11] McGarry D, Bridge B J, Radford B J. Contrasting soil physical properties after zero and traditional tillage of an alluvial soil in these miarid tropics[J]. Soil and Tillage Research, 2000, 53(2): 105—115.
- [12] Veenstra J, Horwath W, Mitchell J, et al. Conservation tillage and cover cropping influence soil properties in San Joaquin Valley cotton-tomato crop[J]. California Agriculture, 2006, 60(3): 145—153.
- [13] 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 and soil compaction its causes, influences, and improvement[J]. Chinese Journal of Ecology, 2010, 29(10): 2057—2064. (in Chinese with English Abstract)
- [14] Batey T, McKenzie D C. Soil compaction: Identification directly in the field[J]. Soil Use and Management, 2006(22): 123—131.
- [15] 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): 121—145.
- [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. 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2001, 17(6): 39—43. (in Chinese with English Abstract)
- [17] 刘晚苟, 山仑, 邓西平. 植物对土壤紧实度的反应[J]. 植物生理学通讯, 2001, 37(3): 254—260. Liu Wangou, Shan Lun, Deng Xiping. Responses of plant to soil compaction[J]. Plant Physiology Journal, 2001, 37(3): 254—260. (in Chinese with English Abstract)
- [18] 李汝莘, 高焕文, 苏元升. 小四轮拖拉机播前压地对土壤物理性质及作物生长的影响[J]. 中国农业大学学报, 1998, 3(2): 65—68. Li Ruxin, Gao Huanwen, Su Yuansheng. Effects on soil physical properties and crop growth by small wheeled tractor compaction before winter wheat sowing[J]. Journal of China Agricultural University, 1998, 3(2): 65—68. (in Chinese with English Abstract)
- [19] 张家励, 傅潍坊, 马虹. 土壤压实特性及其在农业生产中的应用[J]. 农业工程学报, 1995, 11(2): 17—20. Zhang Jiali, Fu Weifang, Ma Hong. The soil compactive characteristics and their application in agricultural production[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1995, 11(2): 17—20. (in Chinese with English Abstract)
- [20] 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 with English Abstract)
- [21] 王恩娟, 赵雨森, 陈祥伟. 前期含水量对机械压实土壤结构特征的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 159—163. Wang Enheng, Zhao Yusen, Chen Xiangwei. Effect of antecedent moisture content on soil structure compacted by machinery[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2009, 23(1): 159—163. (in Chinese with English Abstract)
- [22] Lopez M V, Arrue J L, Sanchez-Giron V A. Comparison between seasonal changes in soil water storage and penetration resistance under conventional and conservation tillage systems in Aragon[J]. Soil and Tillage Research, 1996(37): 251—271.
- [23] 邓西民, 王坚, 朱文珊, 等. 冻融作用对犁底层土壤物理性状的影响[J]. 科学通报, 1998, 43(23): 2538—2541.
- [24] 陈浩, 杨亚莉. 冬前灌溉条件下冻融作用对土壤压实的影响[J]. 农机化研究, 2010(10): 133—135. Chen Hao, Yang Yali. Effect of freezing and thawing on soil compaction under pre-winter irrigation in northern China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(10): 133—135. (in Chinese with English Abstract)
- [25] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等. 不同耕作方式土壤水分动态变化[J]. 吉林农业科学, 2014, 39(4): 1—5, 11. Liu Wuren, Zheng Jingyu, Luo Yang, et al. Dynamic changes of soil water content under different tillage methods[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2014, 39(4): 1—5, 11. (in Chinese with English Abstract)
- [26] 刘武仁, 边少锋, 郑金玉, 等. 玉米宽窄行种植的环境变化研究[J]. 玉米科学, 2002, 10(4): 52—55. Liu Wuren, Bian Shaofeng, Zheng Jinyu, et al. Study on the changes to soil environment in maize planted in narrow/wide form[J]. Journal of Maize Science, 2002, 10(4): 52—55. (in Chinese with English Abstract)
- [27] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等. 秸秆循环还田土壤环境效应变化研究[J]. 吉林农业科学, 2015, 40(1): 32—36. Liu Wuren, Zheng Jinyu, Luo Yang, et al. Studies on soil environment changes of straws returned into field[J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2015, 40(1): 32—36. (in Chinese with English Abstract)
- [28] 刘爽, 何文清, 严昌荣, 等. 不同耕作措施对旱地农田土壤物理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 65—70. Liu Shuang, He Wenqing, Yan Changrong, et al. Effects of different tillage managements on soil physical properties in dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(2): 65—70. (in Chinese with English Abstract)
- [29] Chen Y, Cavers C, Tessier S, et al. Short term tillage effects on soil cone index and plant development in a poorly drained, heavy clay soil[J]. Soil Tillage Research, 2005(82): 161—171.
- [30] Hill. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties[J]. Soil Sci Soc Am J, 1990(54): 161—166.

- [31] 刘武仁, 郑金玉, 罗洋, 等. 不同耕层构造对土壤硬度和含水量的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(6): 76—80.
Liu Wuren, Zheng Jinyu, Luo Yang, et al. Effects of different tillage layer structures on soil compaction and soil water content[J]. Journal of Maize Science, 2013, 21(6): 76—80. (in Chinese with English Abstract)
- [32] 王恩姮, 柴亚凡, 陈祥伟. 大机械作业对黑土区耕地土壤结构性特征的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 351—356.
Wang Enheng, Chai Yafan, Chen Xiangwei. Effects of heavy machinery operation the structural characters of cultivated soils in black soil region of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(2): 351—356. (in Chinese with English Abstract)
- [33] Sidhu D, Duiker S W. Soil compaction in conservation tillage: Crop impacts[J]. Agronomy Journal, 2006(98): 1257—1263.
- [34] Vyn T J, Raimbault B A. Long-term effect of five tillage systems on corn response and soil structure[J]. Agronomy Journal, 1993(85): 1074—1079.
- [35] Ben J G. Freeze-thaw effects on penetrometer resistance and shear strength of two soils[C]. CSSA-SSSA International Annual Meeting, 2005: 6—10.
- [36] Unger P W, Jones O R. Long-term tillage and cropping systems affect bulk density and penetration resistance of soil cropped to dryland wheat and grain sorghum[J]. Soil and Tillage Research, 1998(45): 39—57.

Change characteristic of soil compaction of long-term different tillage methods in cropland

Zheng Hongbing^{1,2,3}, Zheng Jinyu^{2,3}, Luo Yang^{2,3}, Li Ruiping^{2,3}, Li Weitang^{2,3},
Wang Hao^{2,3}, Ren Hong¹, Qi Hua¹, Liu Wuren^{2,3*}

(1. Agronomy College, Agricultural University of Shenyang, Shenyang 110866, China; 2. Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Northeast China, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 3. Research Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Science, Changchun 130033, China)

Abstract: Soil tillage is closely related to creating favorable conditions for crop growth and ensuring crop yield. One of the main goals of soil tillage is influencing the physical, chemical and biological properties of soil. One of the basic soil properties affected by tillage is the soil compaction. The objective of this work was to evaluate the effects of no tillage (NT), plow tillage (PT), spacing tillage (ST) and conventional tillage (CT) on the soil compaction from annual and seasonal changes, soil profile characteristics and seasonal freezing-thawing for a productive soil. The field experiment was initiated in Gongzhuling County, Jilin Province in 1983, which was to determine the effects of various rotation and tillage combinations on crop yield and soil physical and chemical properties. The soil of the experimental site was silt loam, which was well-drained soil developed mainly from glacial tillage. The experiment design was a completely random block design with 3 replications. The plot was 150 m long and 8 m wide (1 200 m²). We measured the soil compaction change in different years and seasons with SC-900 soil compaction meter. The results showed that no tillage increased the soil compaction in 0-25 cm depth significantly ($P < 0.05$) compared with other tillage methods, and decreased the soil compaction in 25-45 cm depth significantly ($P < 0.05$) while conventional tillage increased the soil compaction in the depth of 25-45 cm. The soil compaction by spacing tillage and plow tillage were lower than no tillage and conventional tillage significantly ($P < 0.05$). The soil compaction of different tillage methods changed with different seasonal periods, the change trends of 0-25 and 25-45 cm were the same, and the soil compaction on August 10th was higher than other dates. The soil compaction of different tillage methods increased with the increase of soil depth, which meant the soil compaction of upper layer was less than lower layer significantly ($P < 0.05$). The profiles with different tillage methods changed with time. The change of soil compaction showed a linear increase with the depth under 20 cm in the early stage of crop growth, and the change was like reverse “S” shape in the mid-to-late stage of crop growth. The freezing-thawing decreased the soil compaction of different tillage methods significantly ($P < 0.05$). The decline of soil compaction was 148.97%, 41.96%, 58.44% and 3.38% under spacing tillage, no tillage, plow tillage and conventional tillage, individually. So, spacing tillage was an effective tillage method for decreasing the soil compaction. The adoption of spacing tillage in the semi-humid zone of Jilin Province could be beneficial to soil conservation by decreasing soil compaction, controlling erosion and improving soil structure, et al. Our study can be helpful to the promotion of the new tillage technology in northeast China for developing the sustainable agriculture.

Key words: soils; compaction; freezing; thawing; spacing tillage; tillage method