

# 不同耕作处理下冻融对农田黑土硬度的影响

陈学文<sup>1</sup>, 王农<sup>2</sup>, 刘亚军<sup>3</sup>, 张晓平<sup>1</sup>,  
梁爱珍<sup>1</sup>, 贾淑霞<sup>1</sup>, 时秀焕<sup>1,4</sup>, 范如芹<sup>1,4</sup>

(1. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 吉林 长春 130102; 2. 吉林省国土规划研究室, 吉林 长春 130051; 3. 梨树县农业技术推广总站, 吉林 梨树 136500; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为探讨冻融作用对农田黑土硬度的影响, 在吉林省德惠市中层黑土小区上进行了 9 a 的田间定位试验, 对不同耕作方式下冻融前后的土壤硬度以及土壤硬度与土壤含水量之间的关系进行了对比分析。结果表明, 土壤硬度与土壤水分呈对数显著性负相关关系 ( $R^2=0.8388$ )。冻融前免耕较秋翻显著增加了土壤硬度 ( $p<0.05$ ), 主要表现在 2.5—17.5 cm 深度之间。冻融后免耕较秋翻降低了 2.5—17.5 cm 的土壤硬度, 并且在 2.5—10 cm 达到差异显著性水平 ( $p<0.05$ )。冻融后土壤硬度明显低于冻融前, 冻融前后两种处理下玉米连作的土壤硬度均高于玉米—大豆轮作, 但最大土壤硬度均对作物的生长没有限制作用。

**关键词:** 冻融; 土壤硬度; 土壤含水量; 犁底层; 黑土

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)06-0055-06

中图分类号: S152

## Impacts of Freezing—Thawing Cycle on Soil Penetration Resistance Under Different Tillage Practices in Black Soil

CHEN Xue-wen<sup>1</sup>, WANG Nong<sup>2</sup>, LIU Ya-jun<sup>3</sup>, ZHANG Xiao-ping<sup>1</sup>,  
LIANG Ai-zhen<sup>1</sup>, JIA Shu-xia<sup>1</sup>, SHI Xiu-huan<sup>1,4</sup>, FAN Ru-qin<sup>1,4</sup>

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130102, China; 2. Jilin Province Land Planning Research Laboratory, Changchun, Jilin 130051, China; 3. Lishu County Agricultural Technology Extension Station, Lishu, Jilin 136500, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The effects of freezing—thawing cycle on soil penetration resistance were studied on a black soil in Northeast China. The tillage experiment was established in Dehui City, Jilin Province since 2001. We compared soil penetration resistance before and after the freezing—thawing cycle under both no tillage (NT) and mouldboard plow (MP) treatments. Furthermore, we analyzed the relationship between soil penetration resistance and soil moisture content. The results showed that there was a significantly negative logarithmical correlation between soil penetration resistance and soil moisture content ( $R^2=0.8388$ ). Compared with MP treatment, NT led to a significant increase of soil penetration resistance before the freezing—thawing cycle, especially in the layer of 2.5—17.5 cm ( $p<0.05$ ), while resulted in reduction of soil penetration resistance of 2.5—17.5 cm after the freezing—thawing cycle, especially in the layer of 2.5—10 cm ( $p<0.05$ ). Soil penetration resistance was obviously less after the freezing—thawing cycle than before ( $p<0.05$ ). Soil penetration resistance was greater under continuous corn system than under corn—soybean rotation system. However, even with the maximum soil penetration resistance, no restriction was found on the crop growth before and after freezing—thawing cycle of both NT and MP.

**Keywords:** freezing—thawing; soil penetration resistance; soil moisture content; plough pan; black soil

收稿日期: 2011-12-08

修回日期: 2012-01-19

资助项目: 国家自然科学基金项目“保护性耕作下农田黑土紧实度对碳固定的影响”(41201217); 国家自然科学基金项目“保护性耕作下黑土团聚体在土壤固碳过程中的物理作用研究”(31170483); 国家自然科学基金项目“土壤微生物在保护性耕作黑土有机碳固定中的作用”(41101241)

作者简介: 陈学文(1982—), 男(朝鲜族), 吉林省磐石市人, 博士, 从事保护性耕作和土壤环境研究。E-mail: chenxuewen@yahoo.com.cn.

通信作者: 张晓平(1957—), 男(汉族), 吉林省长春市人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为土壤化学与土壤管理。E-mail: zhangxiaoping@neigae.ac.cn.

土壤硬度是土壤对外界垂直穿透力的反抗力,这种反抗力的大小反映了土壤孔隙状况及土粒间结持力的大小,它直接关系到耕作阻力、作物出苗及根系生长发育,对土壤水分入渗、保持和供应以及土壤通气性也有影响,同时也是间接影响土壤养分转化、运输和土壤热特性指标<sup>[1]</sup>,因此土壤硬度对作物生长、发育和产量具有重要影响。冻融作用作为中、高纬度及高海拔地区的一种气候变化现象,对土壤理化性质、微生物活性与群落组成、温室气体  $N_2O$  排放具有重要影响,并且在农田土壤生态系统的各种生物地球化学循环过程中发挥着重要的作用,冻融对土壤各种性质的影响以对物理性质最为直观<sup>[2]</sup>。以往冻融对土壤物理性质影响的研究多围绕土壤容重<sup>[3]</sup>、土壤孔隙度<sup>[4]</sup>等方面展开的,这些土壤物理性质的变化都与土壤硬度关系密切,然而冻融作用特别是在不同耕作方式下对土壤硬度影响的研究还不多见。

已有的研究表明<sup>[5]</sup>,保护性耕作增加了土壤硬度,这样将影响作物的生长和发育,阻碍保护性耕作的推广。同时也有研究指出<sup>[6]</sup>冻融可以显著降低耕作区的土壤硬度。因此,如果冻融作用能减缓保护性耕作造成的土壤硬度增加,将更有利于保护性耕作在黑土区的推广。本研究通过中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土保护性耕作长期定位试验平台,对比分析冻融作用对不同耕作处理下土壤硬度的动态变化,并对土壤硬度与土壤含水量之间的关系进行深入研究,旨在为进一步在东北黑土区推广保护性耕作提供理论和实践参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究地点位于吉林省德惠市米沙子乡( $44^{\circ}12'N$ ,  $125^{\circ}33'E$ )中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土农业试验示范基地。试验区土壤类型为中层典型黑土,壤质黏土,表层 0—20 cm 土壤的 pH 值在 6.5 左右,属中性或微酸性。试验区气候属于中温带大陆性季风气候,年平均气温  $4.4^{\circ}C$ ,年降水量为 520 mm,且主要集中在 6—8 月。试验区土壤理化性质详见文献<sup>[7]</sup>。

### 1.2 试验设计

1.2.1 田间试验设计 黑土保护性耕作长期定位试验始于 2001 年 9 月,试验小区采取单因素裂区设计,4 次重复,共 48 个小区,每个小区的面积为  $5.2 m \times 20 m$ 。主区耕作处理包括免耕、垄作、秋翻,本研究主要讨论免耕、秋翻两种处理的试验结果。副区处理为玉米连作,玉米—大豆和大豆—玉米轮作。每个处

理每年都有玉米和大豆种植。免耕处理,收获后至播种前不搅动土壤,利用前作残留物覆盖地表,借以减轻风侵水蚀。采用可以联合作业的牵引式免耕播种机(KINZE3000)播种。应用广谱性除草剂于播种前、后进行土壤处理和苗期喷洒。秋翻处理,作物残留物秋翻时翻于地表之下,人工除草和中耕起垄。所有处理垄宽约为 75 cm,秋翻和中耕处理的垄高约为 16 cm。选择在 2009 年秋季和 2010 年春季时测定土壤硬度。测定土壤硬度的同时采用土壤时域反射仪(TDR)测定土壤含水量。

1.2.2 土壤硬度与土壤含水量关系的试验设计 由于土壤硬度受到土壤含水量的影响,因此应在相同土壤含水量水平下比较不同耕作方式下冻融对农田黑土硬度的影响,所以在 2010 年秋季在玉米—大豆轮作和玉米连作的免耕和秋翻 4 个小区共埋设 8 个直径为 60 cm,高 30 cm 的不锈钢环(每个小区埋设 2 个环),在每个环正中间位置埋入 1 根 TDR 专用 PVC 管,向环中倒水,待环中水完全饱和(土壤含水量数值稳定)后(2 h 左右),开始用 TDR 测得土壤含水量数值,同时测定对应的土壤硬度,为防止每次测定的位置不相互干扰,点与点之间保持约 10 cm 左右的距离,每隔 1 d 进行一次测定,直至土壤体积含水量降到 15%左右,试验历时 25 d。

### 1.3 田间土壤硬度的测定

使用 SC-900(spectrum technologies USA Inc.)土壤硬度计直接在田间垂直和平行垄向测量,仪器随土壤深度的变化自动计数,每间隔 2.5 cm 记录 1 次,测定深度为 2.5—30 cm(SC-900 的最小测定深度为 2.5 cm),每个小区在 1 m 距离内水平间距 10 cm 测定 1 次,本次试验选择对玉米连作和玉米—大豆轮作的免耕、秋翻处理小区苗眼处的土壤硬度进行测定。

### 1.4 数据处理

采用 SPSS 13.0 统计软件中的 LSD 显著性差异检验进行均值比较和分析,土壤硬度和土壤水分的相关分析采用 Pearson 相关系数分析,试验数据采用 Excel 软件绘图分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤硬度与土壤含水量之间的关系

从图 1 可以看出,土壤水分与土壤硬度之间呈显著对数型负相关( $R^2=0.8388$ ),即土壤含水量越高,土壤硬度数值越低。为了检验土壤水分与土壤硬度关系方程的有效性,将实测土壤硬度时测得的土壤水分,代入关系方程中计算得到土壤硬度值,并与实测土壤硬度值比较,分析表明实测值与计算值线性回归

方程的决定系数 ( $R^2$ ) 为 0.912 7, 斜率为 0.968 7。这说明该对数关系式可以很好地表达土壤硬度与土壤含水量之间的关系。

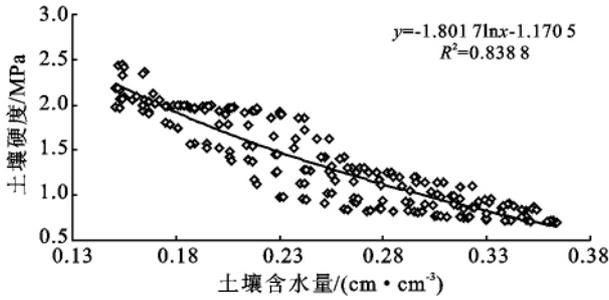


图 1 土壤硬度与土壤水分关系

### 2.2 冻融作用对土壤硬度的影响

秋季冻融前, 土壤含水量在 23%~25% 之间 (2009 年 10 月 7 日测定), 无论是玉米连作还是玉米大豆轮作下, 免耕土壤的硬度值都明显高于秋翻处理, 主要表现在 2.5—17.5 cm 土层, 随着土层深度的增加, 土壤硬度显著增加, 而免耕与秋翻处理间的硬度差异逐渐减小。玉米连作下: 免耕小区 2.5—17.5 cm 土层的土壤硬度值分别比秋翻高出 93.0%, 72.5%, 76.1%, 46.0%, 29.3%, 15.6%, 15.3%; 玉米—大豆轮作小区土壤硬度值则分别高出 49.6%, 67.5%, 60.1%, 55.6%, 41.4%, 21.0%, 8.2% ( $p < 0.05$ )。而在 20—30 cm 土层内免耕和秋翻处理的土壤硬度差异不明显, 且土层间的差异也未达到显著性

水平 ( $p > 0.05$ ) (图 2)。

春季冻融后, 研究区土壤含水量在 28%~30% 之间 (2010 年 4 月 25 日测定), 两种轮作方式下 2.5—17.5 cm 土层内免耕土壤硬度值低于秋翻处理, 但只在 2.5—10 cm 内表现出显著的差异 ( $p < 0.05$ ), 与冻融前一样免耕和秋翻处理间 20—30 cm 土层的土壤硬度值没有显著性差异 ( $p > 0.05$ )。免耕和秋翻处理下, 玉米连作 2.5—22.5 cm 间的土壤硬度均存在显著差异 (除秋翻 10 与 12.5 cm 外), 而玉米—大豆轮作的土壤硬度土层差异只出现在 2.5—10 cm 之间 ( $p < 0.05$ ); 并且免耕与秋翻处理间的土壤硬度差异并未随土层变化而表现出显著的变化。玉米连作下, 免耕小区 2.5—10 cm 土层土壤硬度值分别比秋翻小区土壤低 29.1%, 16.1%, 16.0%, 22.0% ( $p < 0.05$ ); 玉米—大豆轮作下, 土壤硬度值则分别降低了 23.0%, 41.1%, 40.4%, 41.9% ( $p < 0.05$ ) (图 2)。

值得注意的是, 冻融前后无论是免耕, 还是秋翻, 玉米连作各深度的土壤硬度数值整体而言高于玉米—大豆轮作, 冻融前玉米连作小区 0—30 cm 土层土壤硬度值平均高出玉米—大豆轮作小区 98.8%, 而冻融后连作处理 0—30 cm 土层较轮作处理平均高出 57.9% (图 3)。冻融前两种轮作方式下免耕处理的最大土壤硬度为 2 816 kPa, 秋翻处理则为 2 615 kPa, 冻融后两种耕作处理的最大土壤硬度分别为 1 231 和 1 177 kPa (图 2)。

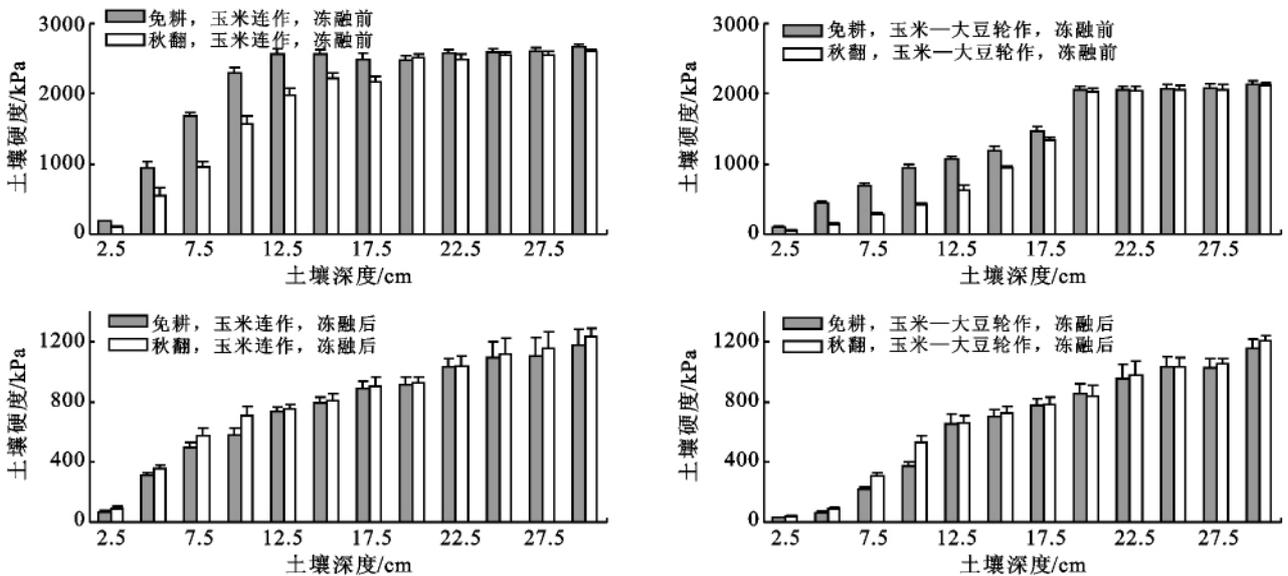


图 2 冻融前后不同耕作方式下的土壤硬度

根据图 3 可以看出, 相同含水量条件下冻融前后不同耕作方式和轮作方式下土壤硬度差异较大。冻

融作用明显降低了各土层的土壤硬度, 免耕和秋翻处理在整个测定土层深度内的土壤硬度平均分别降低

了 100.9%(连作), 65.5%(轮作)和 78.0%(连作)、47.2%(轮作)。免耕处理的玉米连作和玉米—大豆轮作方式下土壤硬度降低最大的土层为 10 和 7.5 cm, 分别降低 148.7%和 105.6%; 秋翻处理为 15 和 20 cm, 分别降低 115.7%和 97.7%(图 3)。

### 3 结果讨论

#### 3.1 土壤硬度与土壤含水量之间的关系

以往耕作方式对土壤硬度影响的研究中大多忽略了土壤含水量因素, 即在没有分析土壤含水量之前就进行土壤硬度之间的比较, 缺乏现实的科学意义。因为在不同土壤含水量条件下, 土壤硬度的变化差异较大, 所以在比较土壤硬度时首先应考虑是否在土壤

含水量相近或差异不显著( $p > 0.05$ )时比较, 才能真实地反映科学问题。

本研究结果表明, 冻融前后土壤硬度变化显著, 说明土壤水分在土壤硬度变化过程中起着重要的作用, 由此可见在分析比较土壤硬度变化时土壤水分是一个不可或缺的先决因素。国内关于土壤含水量与土壤硬度之间关系方面的研究也仅局限在黄土高原<sup>[8]</sup>、内蒙古草原<sup>[9]</sup>和关中地区<sup>[10]</sup>。

本研究得出了黑土土壤含水量与土壤硬度之间的关系方程, 并用土壤硬度实测值对该方程进行了验证, 建立了以土壤含水量为自变量计算土壤硬度的方程, 这对分析土壤硬度变化具有重要的作用, 该研究结论与国外许多研究结果相似<sup>[11-12]</sup>。

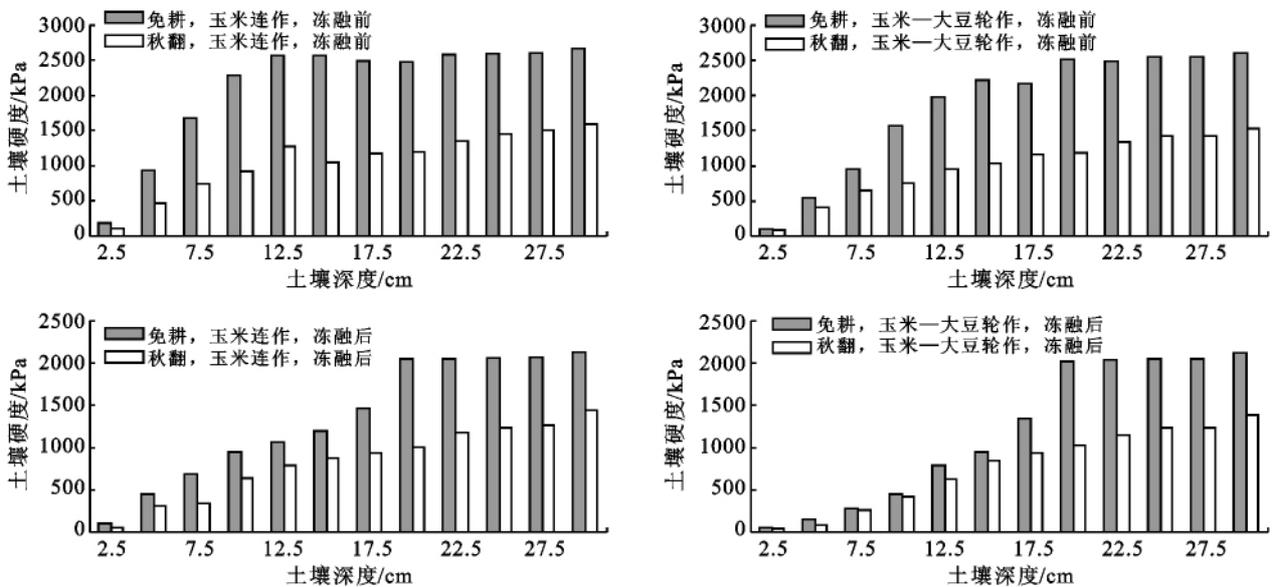


图 3 相同含水量条件下冻融前后的土壤硬度

注: 根据土壤硬度和土壤含水量关系式将春季的土壤硬度换算为与秋季相同含水量的土壤硬度值。

#### 3.2 冻融作用对土壤硬度的影响

冻融作用对土壤硬度的影响反映了其对土壤物理结构特性的重要影响。土壤硬度作为一种重要的土壤物理性质对冻融作用的响应更为直观。本研究结果表明冻融前免耕增加了 2.5—17.5 cm 土层的土壤硬度, 这与 Lapen 等<sup>[5]</sup>的研究结论一致。出现这种情况的原因应归结为免耕减少了机械作业的次数, 对土壤不进行扰动, 土壤自身下沉而引起土壤颗粒之间排列比较紧实, 而秋翻处理每年对土壤进行翻耕, 使得上层土壤较松, 故硬度较小。从土壤水分的观点来看, 冻融前该层中孔隙和微孔隙免耕小于秋翻<sup>[13]</sup>, 导致免耕持水能力低于秋翻, 而中孔隙和微孔隙对保持和运行土壤水分和养分有重要影响, 另一方面免耕不进行土壤翻耕, 作物秸秆难以进入土壤腐烂分解,

5 cm 以下土壤有机质持续矿化而得不到新的有机物质输入, 影响了土壤结构, 土壤结构又部分地决定了土壤含水量。

冻融后 2.5—17.5 cm 土层的土壤硬度免耕小于秋翻是由于免耕具有较好的保墒作用, 耕层免耕土壤含水量高于秋翻的缘故, 2.5—10 cm 土层出现显著性差异的原因是经过冻融交替循环, 表层积雪融化, 表层土壤水分含量显著提高, 疏松了土壤, 对土壤物理性质的改善才具有显著作用。从土壤硬度与土壤水分关系方程来看, 该层土壤水分免耕显著高于秋翻, 导致土壤硬度前者显著低于后者。土壤融化时经过两个阶段, 第一阶段是从表层开始融化, 而其下层的冻结层阻碍上层融水的下渗即冰冻阻碍水的排放, 导致表层含水量显著提高; 第二阶段是表层融化结

束,下层土壤开始融化,冻融水开始向上层提升<sup>[3]</sup>。根据李文凤<sup>[13]</sup>的研究结论,免耕处理的土壤入渗率大约是秋翻处理的两倍,说明免耕条件下土壤孔隙连通性较好,其储水和抗水蚀能力要比常规耕作高出许多,利于蓄水和保水,可以推断出土壤完全融化后免耕处理 12.5—17.5 cm 土层的土壤含水量大于秋翻,结合土壤硬度与土壤水分呈负相关关系的结论得出该深度免耕的土壤硬度小于秋翻处理。

不同轮作方式对土壤硬度的影响也不同,玉米连作下的土壤硬度高于玉米—大豆轮作,这可能是与种植大豆下蚯蚓数量明显大于种植玉米下的蚯蚓数量有关<sup>[13]</sup>。大豆秸秆还田土壤可能为蚯蚓提供更丰富的食物和能量来源,同时大豆与玉米相比,能够减少土壤水分蒸发,为土壤动物尤其是蚯蚓提供潮湿的生存环境,增加了蚯蚓的数量和活动性<sup>[13]</sup>。Smith等<sup>[14]</sup>对美国密歇根州南部的玉米、大豆和小麦轮作中杂草和种子分布的关系研究得出大豆轮作利于增加蚯蚓活动性,且增加的蚯蚓数量最多的结论。这对减小土壤硬度也起到了一定的作用。

冻融后土壤硬度明显低于冻融前,这与王恩姮等<sup>[6]</sup>的研究结论一致,即在典型黑土耕作区季节性冻融前后土壤硬度变化显著,主要体现 0—10 cm 的土壤深度上。出现这种情况的原因应归因于冻融交替对土壤结构的破坏性作用,在土壤冻结过程中,土壤水冻结成冰晶体导致土体膨胀,冻结土壤中土粒与固态水—冰共存,充满膨胀土体土壤孔隙的冰晶体打破了土壤颗粒之间的联结,破坏了土壤团聚结构,迫使土壤颗粒发生位移;融化时,土壤水分发生明显的迁移和再分布过程,这种过程会继续加速土粒之间的移动速度<sup>[3]</sup>。因此,冻融交替循环改变了土壤结构,导致土壤孔隙度增大,土壤变得疏松多孔,进而降低了土壤硬度。

值得关注的是同一土壤含水量条件下冻融后免耕处理 20—30 cm 土层的土壤硬度明显低于冻融前,说明免耕不存在打破犁底层的问题,且免耕下大量秸秆还田一定程度上促进了冻融水的提升,为作物出苗提供了可靠的保障。这能够有效促进大气降水的入渗,提高土壤的蓄水能力和作物对大气降水的利用,这对于东北地区“早春地温低,十春九旱”的极端恶劣气候条件下增加作物对土壤中储存水分的利用,缓解由干旱带来的作物减产具有重要的现实意义。

目前报道较多的使根系停止伸展的土壤硬度临界值为 2 000 kPa<sup>[15]</sup>,而 Lapen 等<sup>[5]</sup>和 Da Silva 等<sup>[16]</sup>都曾质疑 2 000 kPa 作为临界值的有效性,并且均指出当土壤硬度为 2 000 kPa 时不一定限制作物生长。

本研究中冻融前两种轮作方式下苗眼处免耕处理的最大土壤硬度为 2 816 kPa,秋翻处理则为 2 615 kPa,但是结合对作物生长期的观测和历年的产量分析<sup>[17]</sup>,多年产量平均值免耕和秋翻之间并没有显著性差异,且由于冻融后不同轮作方式不同处理下的土壤硬度均未超过 2 000 kPa。因此,可以认为冻融前后免耕和秋翻这两种耕作方式下的最大土壤硬度对玉米和大豆的生长都没有明显的抑制作用。

## 4 结论

(1) 土壤硬度与土壤水分呈对数型显著性负相关关系 ( $R^2 = 0.8388$ ),利用该关系得到的土壤硬度值与实测值拟合度很好 ( $R^2 = 0.9127$ )。

(2) 冻融前免耕处理的土壤硬度 (2.5—17.5 cm) 较秋翻增加,冻融后免耕与秋翻相比降低了 2.5—17.5 cm 土层的土壤硬度,并且在 2.5—10 cm 土层深度达到显著性差异水平 ( $p < 0.05$ )。

(3) 冻融前后土壤硬度变化差异较大,特别是免耕处理 20—30 cm 土层的土壤硬度冻融前后变化显著,表明免耕处理不存在打破犁底层的问题。

(4) 不同轮作方式对土壤硬度的响应程度不同,冻融前后两种处理下玉米连作的土壤硬度均高于玉米—大豆轮作。冻融前后免耕和秋翻两种耕作方式的最大土壤硬度均对作物的生长没有限制作用。

## [参考文献]

- [1] 杨晓娟,李春俭.机械压实对土壤质量、作物生长、土壤生物及环境的影响[J].中国农业科学,2008,41(7):2008-2015.
- [2] 王连峰,蔡延江,解宏图.冻融作用下土壤物理和微生物性状变化与氧化亚氮排放的关系[J].应用生态学报,2007,18(10):2361-2366.
- [3] 王娇月,宋长春,王宪伟,等.冻融作用对土壤有机碳库及微生物的影响研究进展[J].冰川冻土,2011,33(2):442-452.
- [4] Edwards L M. The effect of alternate freezing and thawing on aggregate stability and aggregate size distribution of some prince Edward Island soil[J]. Journal of Soil Science, 1991, 42(2):193-204.
- [5] Lapen D R, Topp G C, Edwards M E, et al. Combination cone penetration resistance/water content instrumentation to evaluate cone penetration-water content relationships in tillage research[J]. Soil & Tillage Research, 2004, 79(1):51-62.
- [6] 王恩姮,赵雨森,陈祥伟.典型黑土耕作区土壤结构对季节性冻融的响应[J].应用生态学报,2010,21(7):1744-1750.

- [7] 梁爱珍, 张晓平, 杨学明, 等. 耕作方式对耕层黑土有机碳库储量的短期影响[J]. 中国农业科学, 2006, 39(6): 1287-1293.
- [8] 辛平, 黄高宝, 张国盛, 等. 耕作方式对表层土壤饱和导水率及紧实度的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2005, 40(2): 203-207.
- [9] 李素英, 李晓兵, 符娜, 等. 内蒙古典型草原区土壤硬度与土壤水分的空间变化分析: 以锡林浩特为例[J]. 干旱区地理, 2007, 30(2): 196-202.
- [10] 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.
- [11] Carlos M P, Luis H B, Jan W H. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe [J]. Soil & Tillage Research, 2001, 60(1): 35-42.
- [12] Usowicz B, Lipiec J, Ferrero A. Prediction of soil thermal conductivity based on penetration resistance and water content or air-filled porosity [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(25/26): 5010-5017.
- [13] 李文凤. 免耕与秋翻对黑土肥力的对比研究[D]. 吉林长春: 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 2008.
- [14] Smith R G, Januchowski S, Gross K L. Earthworms and weed seed distribution in annual crops [J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2005, 108(4): 363-367.
- [15] Bengough A G, Mullins C E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses [J]. Journal of Soil Science, 1990, 41(3): 341-358.
- [16] Da Silva A P, Imhoff S, Kay B D. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no-tillage system [J]. Scientia Agricola, 2004, 61(4): 451-456.
- [17] 张晓平, 李文凤, 梁爱珍, 等. 中层黑土不同耕作方式下玉米和大豆产量及经济效益分析[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(4): 858-864.

(上接第 54 页)

(4) 渭河干流污染与其汇入的支流污染程度密切相关, 排污口污染次之。渭河干流排污口污染负荷以西安和咸阳地区为主。

(5) 污染减排是促进渭河流域 COD 浓度下降和水质改善的主要原因, 而渭河水量变小、规模化畜禽养殖业和农业生产等非点源排放增多使渭河 COD 和  $\text{NH}_3\text{-N}$  污染压力增加。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 陕西省人民政府. 陕西省渭河流域综合治理五年规划(2008—2012年)[R]. 陕西 西安: 陕西省人民政府, 2008.
- [2] 刘秀花, 黄兴国, 周春华. 渭河陕西段水环境污染历时分析研究[J]. 水资源保护, 2005, 21(5): 70-72.
- [3] 刘燕, 胡安焱, 邓亚芝. 陕西省渭河流域水质时空演化特性[J]. 水资源保护, 2007, 23(3): 11-13.
- [4] 魏学东, 高飞, 刘鹏, 等. 渭河干流宝鸡至咸阳段氨氮污染现状分析[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2011, 41(5): 913-916.
- [5] 李孝廉, 杜新黎, 王安林. 渭河干流(陕西段)水污染现状及控制对策研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2008, 38(5): 823-827.
- [6] 周璐红, 刘秀花. 渭河陕西段水质评价及变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(9): 169-172.
- [7] 范拴喜. 渭河流域陕西段农业面源污染与防治对策[J]. 农业环境与发展, 2010(1): 68-73.
- [8] 熊良虎, 王永杰, 沈炳岗. 渭河“十二五”水污染治理思考[C]// 陕西环境保护厅. 陕西省环保系统环境管理优秀调研报告选集. 西安: 陕西省环保保护厅, 2010: 78-98.