

DOI: 10.11766/trxb201304190189

# 少免耕土壤结构与导水能力的季节变化及其水保效果\*

陈 强<sup>1,3</sup> Yuriy S Kravchenko<sup>1,2</sup> 陈 渊<sup>1</sup> 李续峰<sup>1</sup> 李 浩<sup>1,3</sup>  
宋春雨<sup>1</sup> 张兴义<sup>1†</sup>

(1 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态重点实验室, 哈尔滨 150081)

(2 Soil Science and Soil Conservation Department, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 03041, Ukraine)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要** 通过对黑土坡耕地免耕、少耕与传统耕作土壤物理性状全生育期观测, 比较研究土壤结构和导水性状季节变化差异及其与水土流失的关系。结果表明, 表层 0~20 cm 土壤, 免耕土壤容重全生育期维持在 1.20~1.30 g cm<sup>-3</sup>, 变化小, 大于 0.25 mm 的水稳性团聚体含量 (WR<sub>0.25</sub>) 和平均重量直径 (MWD) 高于传统耕作, 初始和稳定入渗速率均高于少耕和传统耕作, 土壤含水量分别较少耕和传统耕作高 4.7 和 4.4 个百分点, 较传统耕作分别减少地表径流和土壤流失量 86% 和 100%; 少耕除夏季各项性状均介于免耕和传统耕作之间, 夏季垄沟深松后, 垄沟土壤容重显著降低, 较免耕和传统耕作降低 0.15 g cm<sup>-3</sup> 以上, 提高土壤初始入渗速率 30% 以上, 较传统耕作减少水和土壤流失量 20% 和 40%。传统耕作土壤容重, 垄台由播种时的 0.91 g cm<sup>-3</sup> 增加至收获时的 1.23 g cm<sup>-3</sup>, 垄沟一直维持在 1.30 g cm<sup>-3</sup> 左右, WR<sub>0.25</sub>、MWD、土壤稳定入渗速率、含水量均较低, 全生育期 10% 的雨水流失, 土壤流失量 615 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>。免耕土壤结构稳定, 蓄水保水最佳, 为效果显著的水土保持耕作措施, 少耕也有一定的保水保土作用; 免耕和少耕均能够改善土壤物理性状。

**关键词** 免耕; 少耕; 土壤结构; 导水性状; 季节变化; 保水保土

**中图分类号** S157 **文献标识码** A

东北黑土区是我国最大的商品粮基地, 年上交国家的商品粮占全国总量的 1/3<sup>[1]</sup>。黑土区耕地 60% 以上为坡耕地, 典型地貌为漫川漫岗, 坡度较缓, 95% 以上耕地坡度小于 7°, 但坡面长, 汇水区面积大; 表层土壤疏松而底土黏重, 抗侵蚀力弱; 同时, 降雨主要集中在夏季且雨量较大, 再加上人类高强度不合理的开发利用导致植被盖度降低<sup>[2-4]</sup>, 这些因素导致该地区的水土流失严重, 严重威胁着黑土区的粮食和生态安全。东北黑土区水土流失已引起了国家和地方政府高度重视, 近 10 年来投入 20 亿元的资金开展水土保持工程建设, 但只完成需治理的不足 3%。以少耕和免耕为代表, 以保水保土保肥为主要目的且能够提高农业生产水土保持耕作措施, 成为降低黑土区坡耕地水土流失的重要途径<sup>[5]</sup>。

以少免耕为代表的保护性耕作被国内外证明

是能够维持或提高土壤质量、增加作物产量、有利于土壤可持续利用的有效措施, 在全球得以广泛应用<sup>[6]</sup>。少免耕主要通过改善土壤物理性状及增加地表覆盖来实现坡耕地保水保土<sup>[7]</sup>。许多研究发现, 经过较长时间的免耕, 土壤大粒径团粒含量增多, 大孔隙数量增加, 农田土壤结构改善, 土壤的入渗性能和蓄水能力极大提高, 从而达到涵养水源、减少水土流失的作用<sup>[8-11]</sup>。也有研究指出, 少免耕减少耕作次数, 秋后留茬或秸秆残茬覆盖能够避免土壤结构的破坏和土壤板结的形成, 秸秆覆盖地表还可以降低水分蒸发, 减少雨滴击溅, 减轻土壤侵蚀, 起到保水保土功效<sup>[13-15]</sup>。由于土壤物理性状的变化势必影响水土流失, 农田中土壤物理性状在整个生育期随时间推移又呈现动态变化, 因此研究不同耕作方式下土壤物理性状的动态变化, 有助于揭示水土保持耕作的保水保土作用。东北黑土

\* 国家自然科学基金资助项目(41171230)和国家科技支撑计划项目(2012BAD14B0602)资助

† 通讯作者: 张兴义(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事黑土生态研究。E-mail: zhangxy@neigaehrb.ac.cn

作者简介: 陈 强(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事保护性耕作的研究。E-mail: chenqiang11@mails.gucas.ac.cn

收稿日期: 2013-04-19; 收到修改稿日期: 2013-08-26

区保护性耕作近十年才开始研究,主要集中在平地对土壤质量和作物产量的研究,而对土壤性状全生育期的影响和坡耕地上的保水保土效益研究较少<sup>[13,16]</sup>。本试验通过田间定位试验观测,通过对土壤容重、土壤水稳定性团聚体含量、土壤含水量和土壤水分入渗速率及径流量、侵蚀量的测定,分析少免耕土壤结构和导水性状季节变化及其保水保土功效,以期为黑土坡耕地的田间管理和水土保持提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地设在水利部水土保持网络骨干站点海伦坡面水土保持监测场,位于黑龙江省海伦市前进乡光荣村,地理位置 N 47° 21', E 126° 50', 海拔 210 m,地形为黑土区典型的漫川漫岗。冬季寒冷干燥,夏季炎热多雨,多年平均降雨量为 530 mm,平均气温 1.5 °C,年均日照时数为 2 600 ~ 2 800 h,年均总辐射为 113 MJ cm<sup>-2</sup>,全年有效积温(≥10 °C)为 2 450 °C,地下水位埋深 90 m。土壤的一些基本理化性状见表 1。

表 1 试验地土壤基本理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of the test soil

土层深度 Soil depth (cm)	饱和含水量 Saturated content (v/v, %)	田间持水量 Field capacity (v/v, %)	砂粒 Sand (%)	粉粒 Silt (%)	黏粒 Clay (%)	有机质 OM (g kg <sup>-1</sup> )
0 ~ 20	56.2	44.5	31.6	30.8	37.6	42.1
20 ~ 40	55.7	43.2	30.7	29.3	40.0	28.4

### 1.3 测定项目与方法

土壤容重:环刀法。试验所用环刀高 5 cm,体积为 100 cm<sup>3</sup>,分别于 5 月、6 月、8 月和 10 月的垄沟和垄台中部土层 0 ~ 5 cm 和 10 ~ 15 cm 处取样。

水稳性团聚体:于 5 月、6 月、8 月和 10 月分别采集 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 深度垄台土壤样品。采用湿筛法进行测定,具体操作为:称取风干土壤样品 50 g,真空蒸馏水慢速浸润土壤样品,充分浸润 2 ~ 4 min 后,样品转移至团聚体分析仪套筛顶部(套筛孔径自上而下为 5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm 和 0.25 mm),蒸馏水浸泡 8 min,竖直震荡 2 min,每分钟循环 30 次,振动幅度 3 cm。50 °C 烘干 48 h 至恒重,称重,计算团聚体的质量分数。

### 1.2 试验设计

本试验为长期定位试验,始于 2007 年,试验设两种水土保持耕作措施:少耕和免耕,以传统顺坡垄作为对照,每项措施 3 次重复,共 9 个小区。小区坡度均为 5°,面积 20 m × 4.5 m,玉米—大豆两年轮作。本试验田间观测为 2011 年,种植作物为玉米,5 月 3 日人工播种,播种后立即喷施乙草胺(acetochlor)封闭除草。(1)免耕(NT):除播种外不进行任何耕作,除草剂控制杂草,秋季收获后秸秆采用直接覆盖方式全部还田,次年原垄种植。(2)少耕(RT):顺坡垄作,在玉米生长苗期人工锄草两次,中耕起垄两次,雨季之前(6 月末)垄沟深松,深松深度 > 20 cm,秋季收获后留茬越冬,秸秆移除,次年原垄种植。(3)传统耕作(CT):顺坡垄作,苗期人工锄草两次,中耕起垄两次,秋季收获后旋耕起垄,为当地农民通用耕作方式。试验所用玉米为海伦区域内广泛种植的海伦 6 号,播种位置为垄中,深度为 5 cm,苗间距为 25 cm,垄间距为 70 cm,每公顷约 47 000 株。播种时施入氮肥 N 69 kg hm<sup>-2</sup>、磷肥 P 51.75 kg hm<sup>-2</sup>、钾肥 K 15 kg hm<sup>-2</sup>。此外在 6 月末,即玉米处于三叶期时追施氮肥 N 69 kg hm<sup>-2</sup>。

稳定入渗速率:双环定水龙头法测定。双环入渗仪,水头高度 5 cm。前 5 min 为每 1 min 记录入渗水量,5 ~ 20 min 为每隔 3 min 记录一次,20 min 后则为每隔 5 min 记录一次入渗水量,分别于 6 月、8 月和 10 月测定垄沟和垄台的土壤入渗速率。

土壤水分:采用 TDR(Trase300,美国)测定 0 ~ 20 cm 土壤体积含水量,分别于 4 月末至 10 月初测定垄沟和垄台中部的土壤含水量,每个小区取中部三点,三次重复。雨季(7 月和 8 月)平均每 7 天测定一次,非雨季则 14 天测定一次。

径流量和侵蚀量:采用分流桶和集流桶装置,人工观测每次降雨产生的径流总量,取样测定泥沙含量。

降雨量:人工降雨器和自动降雨器配合使用,相互矫正,测定4月末至10月初降雨量。

#### 1.4 数据分析与处理

平均重量直径(MWD)计算方法为,每一粒级团聚体的重量百分数(各级团聚体在样品总重量中所占重量百分数)乘以该粒级的平均直径,然后将其相加,MWD的上限为7.15 mm,下限为0.1375 mm<sup>[17]</sup>。

用SPSS 18.0软件对试验数据进行统计分析,方差分析检验处理间的效应,用LSD法检验平均数之间的差异性。利用SigmaPlot 10.0完成绘图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤容重季节性变化

图1a所示为不同深度垄台土壤容重季节性变化。免耕垄台土壤容重季节变化最小,变化范围为1.20~1.23 g cm<sup>-3</sup>。少耕5月土壤容重显著低于其他月份,而其他月份之间差异则不显著。传统耕作垄台土壤容重季节性变化最大,表层0~5 cm土壤,5月土壤容重最小,仅为0.91 g cm<sup>-3</sup>,6月份土壤容重增加,但与5月份的差异未达到显著水平;8月份土壤容重分别是5月和6月的1.21倍和1.13

倍,达到了显著差异水平,表明容重在此期间增加幅度较大,8月与10月容重差异不显著。在10~15 cm土层土壤容重表现为与0~5 cm土层相似的变化规律,垄台5月容重仍为最小,与其他月份差异均达到显著水平。传统耕作垄台土壤容重变化最大并且较播前增加,其原因是前茬作物收获后进行旋松土壤,对土壤扰动最大,之后又经过冻融交替,故春播时容重较低,耕层土壤容重降至1.00 g cm<sup>-3</sup>以下,之后由于雨水直接冲击使其孔隙度减少,土壤逐渐回实,紧实度增加<sup>[18]</sup>。少耕除不进行秋整地外,中耕与传统耕作相同,对土壤扰动程度及土壤容重变化均处于免耕和传统耕作之间。免耕除种植时对播种位置进行很小的动土外,未对土壤扰动,土壤容重仅受冻融和干湿交替影响,故土壤容重变化最小。同一月份各处理之间垄台土壤容重大小均表现为:NT > RT > CT,5月差异最大,传统耕作的土壤容重在0~5 cm和10~15 cm土层分别较少耕低0.17 g cm<sup>-3</sup>和0.18 g cm<sup>-3</sup>,较免耕分别低0.33 g cm<sup>-3</sup>和0.34 g cm<sup>-3</sup>,达到5%差异显著水平,少耕与免耕土壤容重差异也达到显著。各处理10~15 cm土层土壤容重较0~5 cm土层大。

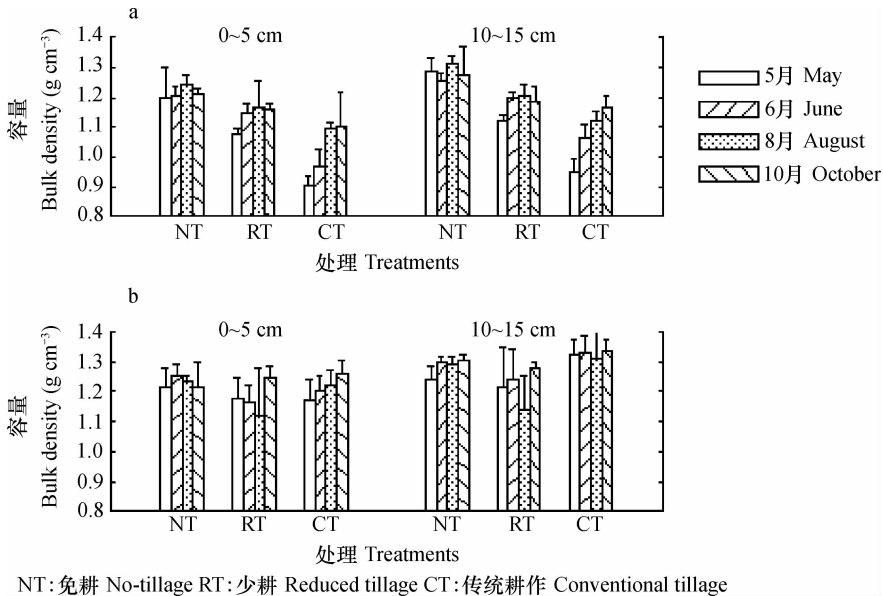


图1 不同耕作方式下土壤容重的季节变化(a. 垄台;b. 垄沟)

Fig. 1 Seasonal variation of soil bulk density in different tillage treatments (a. ridge; b. furrow)

图1b显示不同深度垄沟土壤容重季节性变化。在0~5 cm和10~15 cm土层,免耕和传统耕作土壤容重值均高于少耕,且季节变化也较少耕小。主要是由于少耕苗期最后一次中耕后实施垄沟深松作业,疏松土壤,免耕全年未进行耕翻土壤,传统耕

作机械作业时于垄沟行走,压实土壤,且最后一次中耕起垄将浮土全部起到垄上,垄底为接近犁底层的紧实土壤。0~5 cm土层,8月少耕垄沟土壤容重最小,免耕和传统耕作垄沟容重分别是少耕容重1.18倍和1.17倍,均与少耕土壤容重达到显著差

异,而免耕与传统耕作差异未达到显著水平;少耕8月与10月土壤容重差异达到显著水平,表明土壤回实。在10~15 cm土层,8月份少耕的土壤容重分别较5月、6月和10月减少了 $0.08 \text{ g cm}^{-3}$ 、 $0.10 \text{ g cm}^{-3}$ 和 $0.14 \text{ g cm}^{-3}$ ,与6月和10月差异达到显著;在5月、6月和8月,少耕垄沟土壤容重与免耕和传统耕作差异均达到显著水平,8月差异最大,少耕容重较免耕和传统耕作分别小 $0.15 \text{ g cm}^{-3}$ 和 $0.17 \text{ g cm}^{-3}$ 。少耕8月份垄沟容重小,主要是夏季(7月2日)多一次苗期垄沟深松,对垄沟进行了大于20 cm的深松,缓解土壤紧实状态,增加土壤中大孔隙数量,降低了垄沟土壤容重。

综上所述研究表明,免耕除播种外未扰动土壤,土壤容重最大,季节性变化差异不显著,垄台和垄沟差异也不显著,土壤容重基本维持在 $1.20 \sim 1.30 \text{ g cm}^{-3}$ ,表明连续5年免耕后土壤容重仍较大且保持稳定;少耕未实施秋整地,仅实施中耕,垄台土壤容重季节性变化较小,而垄沟由于进行深松,其容重显著降低;传统耕作在作物收获后进行旋耕,垄台容重小且季节变化较大,垄沟容重较大。

## 2.2 土壤水稳性团聚体含量季节变化

大量研究表明少耕和免耕可增加土壤水稳性团聚体数量,改变其大小和比例,影响土壤结构和功能<sup>[11,19]</sup>,同时土壤中水稳性团粒含量组成也是反

映土壤抗蚀力的重要参数,大于0.25 mm水稳性团粒含量( $WR_{0.25}$ )与单位降雨侵蚀力引起的侵蚀量的关系最密切,对土壤侵蚀的影响作用最大<sup>[20-22]</sup>。在0~10 cm土层,5月份,免耕和传统耕作的 $WR_{0.25}$ 含量最大,随时间推移逐渐减少,其他三个月与5月份的差异均达到显著,少耕 $WR_{0.25}$ 含量季节变化则不显著,但与免耕和传统耕作差异显著;6月份和8月份, $WR_{0.25}$ 大小表现为 $NT > RT > CT$ ,其中免耕与少耕差异不显著,但二者与传统耕作差异达到5%显著水平;10月份,少耕 $WR_{0.25}$ 含量显著大于免耕和传统耕作。在10~20 cm土层,三种处理方式下 $WR_{0.25}$ 含量均呈现降低趋势,主要是由于降雨导致的干湿交替,“气爆”破碎了部分水稳性团聚体。各处理在8月份 $WR_{0.25}$ 含量与5月份的差异达到显著水平。5月、6月和8月免耕 $WR_{0.25}$ 分别较传统耕作高2.84%、0.08%和2.57%,5月和8月差异达到显著,免耕在此期间 $WR_{0.25}$ 含量显著高于少耕,10月份三种耕作 $WR_{0.25}$ 表现为差异不显著。在20~40 cm土层,5月少耕中 $WR_{0.25}$ 含量分别较免耕和传统耕作高4.92%和3.82%,达到5%水平显著差异。8月免耕 $WR_{0.25}$ 含量显著低于少耕和传统耕作,其他月份差异不显著(表2)。综上所述,在0~20 cm土层,三种耕作方式 $WR_{0.25}$ 含量季节变化呈现减少的趋势,免耕的 $WR_{0.25}$ 高于少耕和传统耕作,其原因是

表2 不同耕作措施下各土层>0.25 mm粒径水稳性团聚体质量百分数及平均重量直径

Table 2 Contents of and mean weight diameters of soil water stable aggregate (>0.25 mm) in various soil layers of farmlands under different tillage treatments

土层深度 Soil depth (cm)	处理 Treatments	> 0.25 mm 水稳定团聚体百分数 Water stable aggregate content (> 0.25 mm) (%)				平均重量直径 Mean weight diameter (mm)			
		5月 May	6月 June	8月 August	10月 October	5月 May	6月 June	8月 August	10月 October
		0~10	NT <sup>1)</sup>	93.28aA	87.28aB	89.87aB	82.26bC	2.35aB	2.33aB
	RT <sup>2)</sup>	87.37bA	86.75bA	88.02bA	86.12aA	2.31aB	2.34bC	2.45bA	2.46aA
	CT <sup>3)</sup>	91.98aA	81.83bB	82.46bB	82.97bB	2.23bB	2.35aA	2.36cA	2.12bB
10~20	NT	94.40aA	91.75aAB	90.55aB	86.67aC	2.58aB	2.56aB	3.36bA	2.49aB
	RT	91.56bA	88.46bB	87.13bB	86.33aB	2.57aB	2.20bC	3.51aA	2.51aB
	CT	90.32bA	91.67aA	87.98bB	85.51aB	1.84bB	1.63cC	2.10cA	1.88bB
20~40	NT	85.75bB	88.52aA	84.11bB	81.59aC	2.47aA	2.22bB	2.57bA	2.00bC
	RT	90.62aA	89.45aA	88.29aA	79.61aB	2.49aC	2.65aB	3.01sA	2.54aBC
	CT	86.80bA	87.75aA	87.39aA	80.16aB	1.55bC	1.62cC	2.03cA	1.91bB

1)NT:免耕;2)RT:少耕;3)CT:传统耕作。注:表中同一列同一深度,数据后面不同小写字母表示差异显著( $p < 0.05$ );同一行同一处理,数据后面不同大写字母表示差异显著( $p < 0.05$ )。Note: Data followed by different lowercase letters in the same column and the same soil depth are significant in difference ( $p < 0.05$ ). Data followed by different uppercase letters in the same row and the same treatment are significant in difference ( $p < 0.05$ )

免耕采用秸秆覆盖提高表层土壤有机质含量,而土壤有机质含量增加和胶结物质改变可提升团聚体含量<sup>[23-24]</sup>,说明免耕0~20 cm 土层土壤抗蚀性能力优于少耕和传统耕作。在20~40 cm,少耕WR<sub>0.25</sub>含量较高,说明少耕能够改善底层土壤。平均重量直径(MWD)反映团聚体大小分布,其值越大表示团聚体的团聚度越高,稳定性越大<sup>[25]</sup>。在0~40 cm 土层,整个生长季免耕和少耕土壤团聚体的MWD均显著大于传统耕作,说明免耕和少耕土壤团聚体稳定状况优于传统耕作,在0~10 cm、10~20 cm 和20~40 cm 土层各处理间的MWD差异一致,而姜学兵等<sup>[26]</sup>研究结果为20~40 cm 土层免耕MWD与传统耕作差异不显著。研究还发现,各处理土壤团聚体的MWD季节变化表现为8月份数值大于其他月份,其原因可能是“气爆”导致大团聚体破碎为中小型团聚体,团聚体稳定性增加,而秸秆分解和施用肥料提高有机质含量,以及玉米根系分泌物增多也影响着团聚体的稳定性<sup>[16]</sup>。

### 2.3 土壤水分入渗速率季节变化

通常用初始入渗速率和稳定入渗速率反映土壤入渗能力的强弱,其值越大表明土壤入渗能力越强,二者均决定着地表径流的产生。土壤稳定入渗速率高,有利于雨水快速直接渗入至土壤中,减少瞬间暴雨土壤表层产生的积水,不易形成径流;当长时间雨强小于土壤稳定入渗速率时,地表也不形成径

流。如图3所示,三种耕作方式的全生育期初始入渗速率均较大,均达到了16 mm min<sup>-1</sup>以上,免耕、少耕与传统耕作相比,6月和10月份垄台和垄沟的初始入渗速率,免耕与少耕均大于传统耕作。6月份以垄沟的差异大,免耕和少耕的初始入渗速率分别为传统耕作的1.90倍和1.54倍;8月份传统耕作垄台的初始入渗速率分别为免耕和少耕的1.35倍和1.64倍,由于垄沟深松,少耕垄沟的初始入渗速率分别为免耕和传统耕作1.29倍和1.33倍,说明少耕垄沟深松具有减缓地表径流形成的作用。10月份垄台的差异大,免耕垄台的初始入渗速率值达到30.72 mm min<sup>-1</sup>,是少耕的1.66倍、传统耕作的1.76倍,传统耕作垄沟的初始入渗速率最低,仅为16.38 mm min<sup>-1</sup>,远小于少耕的19.57 mm min<sup>-1</sup>和免耕的24.21 mm min<sup>-1</sup>。三种耕作方式下土壤稳定入渗速率的差异垄沟大于垄台。6月份各处理垄台稳定入渗速率差异小,垄沟的差异则较大,免耕垄沟稳定入渗速率为4.37 mm min<sup>-1</sup>,低于少耕的5.06 mm min<sup>-1</sup>,但高于传统耕作的3.16 mm min<sup>-1</sup>,可见,6月份少耕和免耕土壤入渗性能优于传统耕作;8月份垄台稳定入渗速率表现为NT > RT > CT,而垄沟的差异小;10月份免耕垄台土壤稳定入渗速率分别为少耕和传统的1.78倍和1.6倍,垄沟差异小,免耕入渗性能优于少耕与传统耕作。

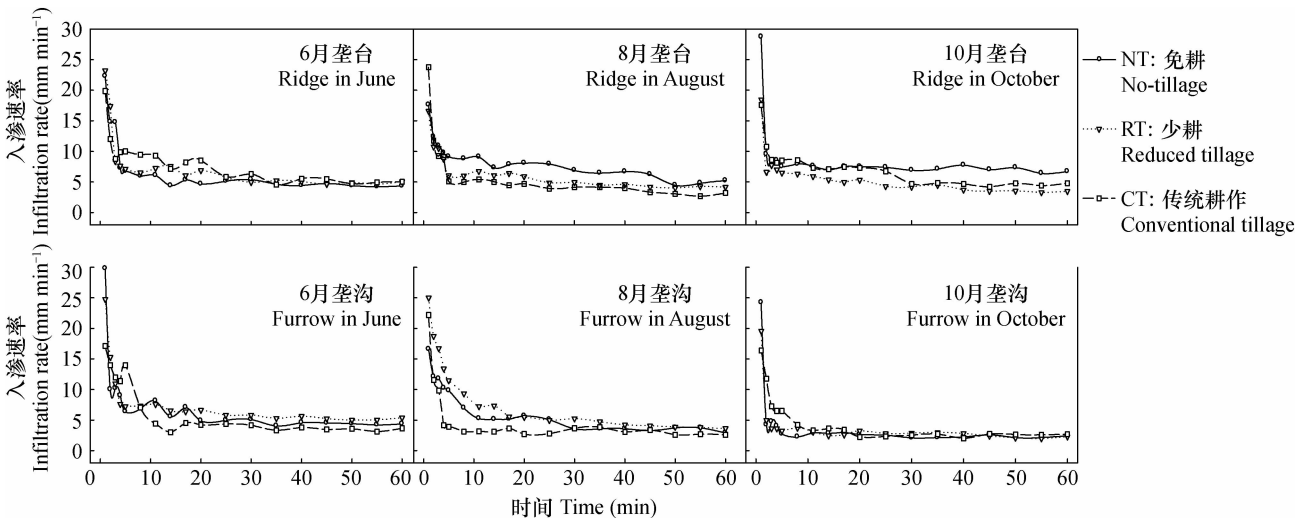


图2 不同月份不同耕作方式下土壤水分入渗速率

Fig. 2 Infiltration rate under different tillage treatments in different months

东北黑土区坡耕地水土流失的发生主要集中在7—8月份,因此,该时期的土壤水入渗性能极其关键,当雨强大于入渗速率时即产生地表径流,发

生土壤侵蚀。测定结果显示免耕、少耕和传统耕作在此期间的土壤稳定入渗速率垄台分别为6.56、4.89和4.14 mm min<sup>-1</sup>,垄沟分别为4.13、4.83和

3.  $12 \text{ mm min}^{-1}$ , 说明免耕和少耕土壤入渗性能优于传统耕作, 二者产生径流量与侵蚀量少于传统耕作, 这与监测结果相近, 表明免耕和少耕水土保持效益大于传统耕作。各处理的土壤入渗速率变化, 主要受表层土壤物理性状的控制。在不同月份, 各耕作方式的管理措施不同, 对土壤的扰动程度存在差异。传统耕作对土壤扰动程度大、次数多, 尤其是秋季进行了旋松起垄作业, 前期土壤入渗速率较大, 但后期随着土壤回实, 入渗速率减小; 而免耕扰动次数少, 甚至不扰动土壤, 土壤大孔隙结构破坏小, 土壤稳定入渗速率大于传统耕作, 这与 Radcliffe 等<sup>[27]</sup> 研究结果一致。由于未对每个小区进行重复测定, 因此对各处理间数据未进行统计分析, 不能确定差异是否显著。

## 2.4 土壤含水量季节性变化

土壤物理性状决定着土壤蓄水保水能力, 如李卓等<sup>[28]</sup> 研究发现, 土壤水分蓄持能力、土壤饱和含水量及田间含水量均随容重增大递减, 而土壤水的变化对水分循环和作物需水耗水产生重要影响<sup>[29]</sup>。本试验中所测定的土壤含水量为 0~20 cm 土层体积含水量。土壤耕层含水量的变化可划分为四个阶段(图 3)。第一阶段为 4 月末至 6 月中旬, 此期间随着降雨量的增大, 三种耕作方式下的土壤含水量均表现出升高的趋势, 且免耕土壤含水量高于少耕和传统耕作。其中 5 月 10 日测定结果的差异最大, 免耕垄台土壤含水量分别为少耕和传统耕作的

1.39 倍和 1.60 倍, 垄沟含水量则分别较少耕和传统耕作多 9.37 和 10.53 个百分点。少耕土壤含水量在 4 月末至 5 月中旬大于传统耕作, 此后两者差异变小。第二阶段为 6 月中旬至 6 月末, 此期间没有降雨, 三种耕作措施土壤含水量均表现出下降的趋势, 免耕垄台和垄沟土壤含水量下降至一定数值后, 趋势有所缓和, 而少耕和传统耕作地表裸露, 土壤蒸发量大, 含水量则表现出一一直下降的趋势。6 月 28 日测定的免耕土壤含水量分别为少耕和传统耕作的 1.45 倍和 1.35 倍, 差异最大达到显著水平。第三阶段为 7 月初至 8 月末, 在此期间降雨比较集中。7 月初开始的连续降雨, 各处理的土壤含水量表现为持续增大的趋势。7 月 11 日测定结果为全年最大值, 其中免耕 0~20 cm 垄台体积含水量为 54%, 接近土壤饱和含水量, 较少耕和传统耕作增加 6.27 和 5.90 个百分点, 但三种耕作方式垄沟含水量差异小。7 月中旬至 8 月初, 各处理土壤含水量变化趋势与降雨量的变化相同, 少耕和传统耕作垄台土壤含水量变化幅度较大, 而免耕土壤含水量变化幅度较小, 基本维持在 40%~42%。进入 8 月, 三种耕作方式垄台和垄沟土壤含水量较 7 月份略有下降, 受降雨量大小变化影响变小, 各处理间差异不显著, 主要是 8 月份玉米耗水量大, 植被盖度也达到最大, 水土流失明显降低<sup>[30]</sup>。少耕垄沟进行深松(深松深度 >20 cm), 垄沟土壤含水量大于免耕和传统耕作, 但差异不显著。第四阶段为 9 月初至 10 月中旬,

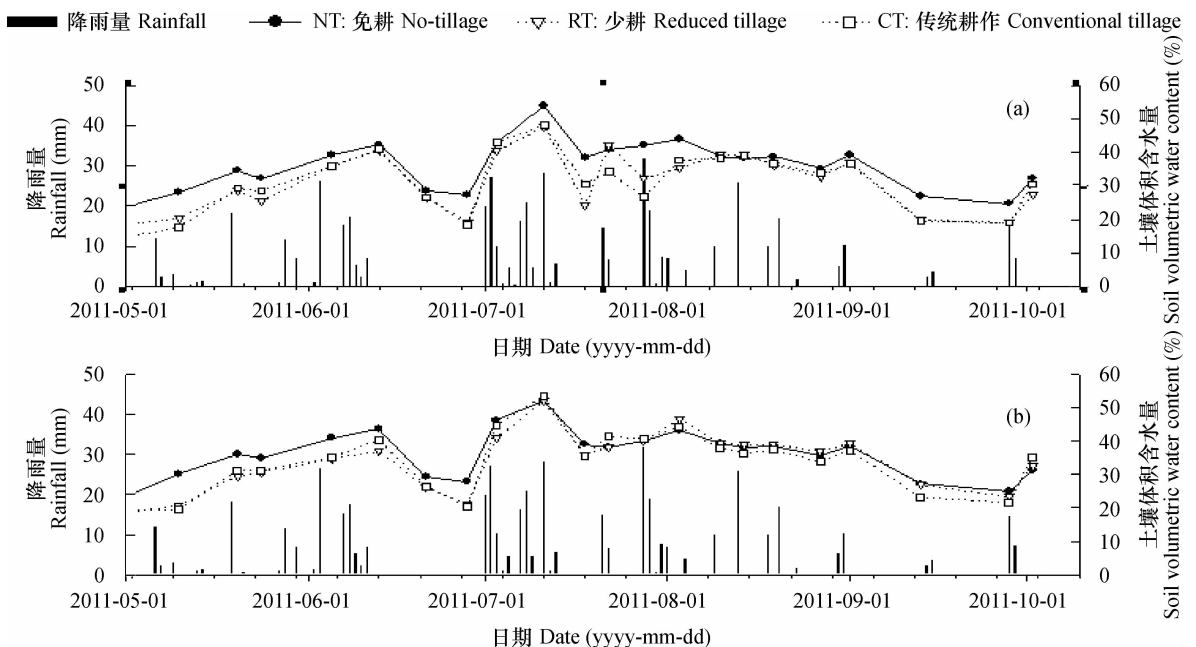


图 3 不同耕作方式下土壤含水量的季节性变化(a. 垄台; b. 垄沟)

Fig. 3 Seasonal variation of soil water content as affected by tillage practice (a. ridge; b. furrow)

9 月份随着降雨量的减少和作物耗水,各处理土壤含水量也随之下降,免耕下降趋势幅度小,少耕和传统耕作变化幅度较大,尤其在垄台,免耕土壤含水量在 9 月 13 日、9 月 28 日测定结果分别为少耕和传统耕作的 1.30 倍和 1.35 倍,差异达到显著水平。10 月份作物收获后,尽管降雨量较低,但各处理土壤含水量呈现增大的趋势。主要原因是无作物耗水,各处理秋收后进行相应的整地处理,如免耕地的秸秆覆盖、传统耕作进行了旋松整地增加了土壤中大孔隙的数量,各处理垄台和垄沟含水量较 9 月末提高 4.43 和 8.72 个百分点。

水分是东北雨养农业生产的主要限制因子之一<sup>[30]</sup>,降雨又是土壤水的唯一来源,因此降雨量的大小决定着土壤含水量高低。本研究表明,在 0 ~ 20 cm 耕层深度,土壤体积含水量变化与降雨量的增减趋势相同。耕作措施通过对土壤结构的作用,能够影响黑土坡耕地土壤蓄水和保水能力。免耕能够提高土壤含水量,其主要原因是免耕地表覆盖秸秆,能够在降雨过程中有效的蓄水,减少地表土壤水分蒸发,同时显著降低地表径流的发生,因此免耕土壤含水量变化幅度相对较小。在降雨量较少的年份,免耕保墒性能和增加幼苗出苗率效果尤为明显<sup>[31-32]</sup>。

### 2.5 少免耕的保水保土效益

试验区土壤侵蚀的主要形式是水力侵蚀<sup>[33]</sup>,主

要影响因素是降雨。试验年 4 ~ 10 月的降雨量为 521 mm,属于平水年。如图 4a 所示,3 月中旬至四月初由于融雪引起的径流大小表现为 RT > CT > NT,免耕径流少是其地表秸秆覆盖可以有效阻挡径流,传统耕作由于上一年秋后旋松整地,土壤结构优于少耕,因此其径流量也小于少耕。进入 6 月,随着降雨量的增大,传统耕作和少耕径流量逐渐增大。7 月初连续降雨传统和少耕径流量更是呈直线增加。少耕径流量在 7 月中旬开始降低,主要是进行垄沟深松,改善垄沟土壤结构,增大土壤蓄水保水功效,产生径流减少。免耕径流量季节变化幅度最小,统计结果表明,免耕总径流量较少耕和传统耕作分别少 84.0% 和 86.0%。免耕产流次数较少耕和传统耕作分别少 17 次和 19 次(表 2),说明免耕可显著阻止地表径流的发生。径流系数是径流量占降雨量比例,可用于描述不同耕作措施在降雨过程中的保水作用,径流系数越小,表明该耕作方式土壤保水效果好<sup>[34]</sup>。试验结果表明,传统耕作径流系数为 9.95%,即生育期中有 46 mm 的降雨随地表径流流出农田,如能进入土壤,转化为土壤有效水部分,则有利于农业生产。与传统耕作相比,免耕和少耕可分别降低水流失量 86.0% 和 18.7%。综上可知,免耕能够显著地减少地表径流发生及其数量,保水功效最佳,少耕能够降低水流失 20% 左右。

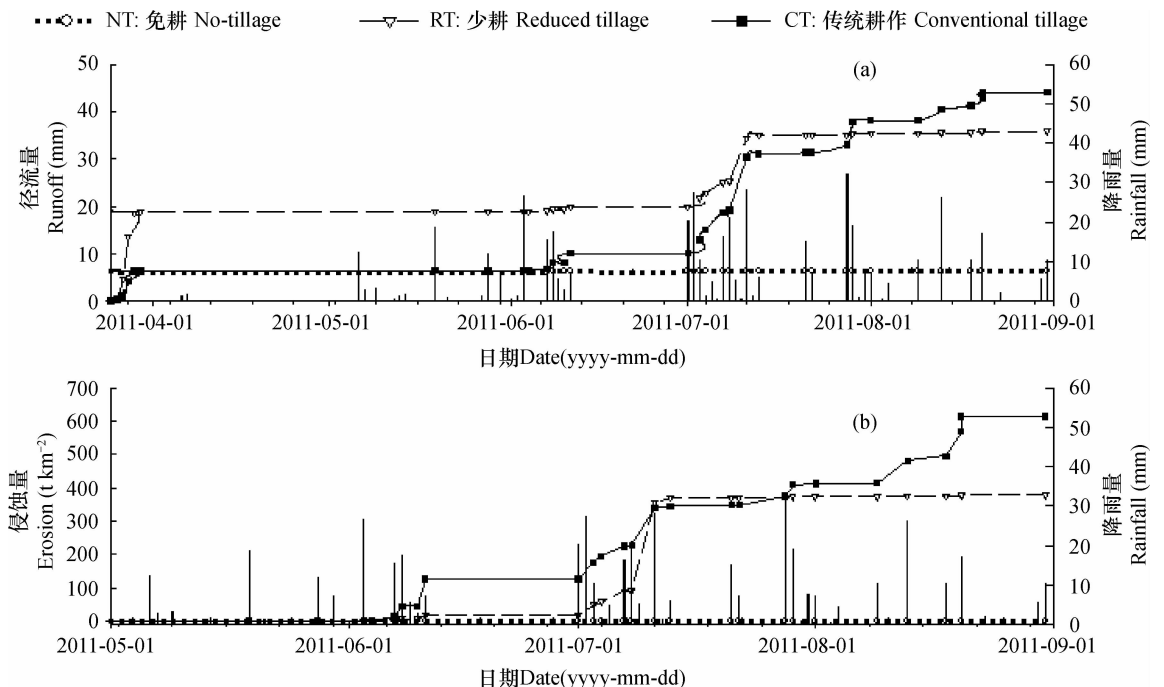


图 4 不同耕作下的土壤累积径流量与侵蚀量的变化(a. 径流;b. 侵蚀量)

Fig. 4 Cumulative runoff and soil-water loss as affected by tillage practice (a. runoff; b. erosion)

试验采用输沙次数与侵蚀模数来比较不同耕作方式的保土效益。侵蚀模数是指年单面积上的土壤流失量  $t km^{-2} a^{-1}$ , 是衡量土壤侵蚀程度的一个量化指标。由图 4b 可知, 进入 6 月后, 随着降雨量增大, 径流量逐渐增加, 传统耕作下土壤侵蚀量也随之增加。少耕侵蚀量初始较小, 直至 7 月初连续的降雨引起侵蚀量的增大, 而 7 月中旬径流量开始减少, 其侵蚀量增加幅度也较小。免耕处理基本未产生土壤侵蚀。传统耕作的输沙次数为 20 次, 少耕为 16 次, 而免耕仅为 1 次(表 3), 可见免耕发生侵蚀的次数最少, 保土效果最好, 而少耕的保土效果又稍好于传统耕作。从侵蚀模数来看, 少耕的侵蚀模数为  $378 t km^{-2} a^{-1}$ , 为传统耕作的 61.4%, 具有一定的保土作用。免耕措施下的侵蚀模数仅为  $0.5 t km^{-2} a^{-1}$ , 土壤侵蚀量最低。综上可知, 免耕是保土效果最好的耕作方式, 可有效地遏止水土流失, 少耕具有降低水土流失的作用, 这与金柯等<sup>[35]</sup>的研究结果一致。

本研究表明, 与少耕和传统耕作相比, 免耕发生径流和侵蚀次数最少, 径流量和侵蚀量也显著低于后两者, 少耕降低水和土壤流失量分别为 20% 和 40%。究其原因可划分为三个方面: 首先, 免耕只在播种时对土壤进行微小扰动, 土壤容重较大, 基本维持在  $1.2 \sim 1.3 g cm^{-3}$ , 但土壤结构稳定, 尤其是连续的大孔隙未被破坏, 土壤渗透速率高, 导水性好, 有利于雨水入渗。降雨过程中产生地表径流和土壤侵蚀量最小, 与郑世清和周佩华<sup>[36]</sup>研究结果一致; 少耕未实施传统耕作的秋旋耕整地, 原垄越冬, 苗期只对表土进行了铲蹚, 对土壤结构的破坏性也较小, 加之雨季前对垄沟进行了 20 cm 的深松作业, 打破垄沟处的犁底层, 促进了雨水的渗入和存储, 其水土保持效果也优于传统耕作; 而传统耕作年年进行旋耕起垄作业, 春季垄体疏松, 利于播种, 但破坏土壤中连续大孔隙, 夏季回实为耕前的土壤状态, 整体土壤结构和导水性能不佳。其次, 与国内外其他研究结果相近<sup>[11-12, 37]</sup>, 黑土坡耕地上实施少免耕, 能够提高 0~20 cm 土壤中大于 0.25 mm 水稳定性团聚体总含量 ( $WR_{0.25}$ ), 其平均重量直径 WMD 也大于传统耕作, 有利于良好土壤结构的形成, 改善土壤蓄水和保水能力, 降低水土流失。再次, 免耕实现作物秸秆收获后全量还田地表覆盖, 增加土壤有机质含量, 减少地表蒸发, 还能有效地降低雨水溅蚀, 研究发现东北黑土区溅蚀对黑土侵蚀的作用占 80%<sup>[5]</sup>; 东北黑土区多采取垄作, 降雨后雨水

汇集于垄沟, 垄沟为农机行走的道路, 严重压实, 渗透速率低, 易积水, 当存在坡降时, 易产生地表径流, 这是黑土坡耕地顺坡垄作易发生侵蚀并严重的主要原因<sup>[1]</sup>, 少耕最后一次中耕是在雨季到来前实施垄沟深松, 打破犁底层, 显著增加土壤入渗能力, 又增加垄沟土壤表面的粗糙度, 能够减少地表径流。土壤的产流和输沙与降雨强度紧密相关, 雨强对径流影响大于坡度对其影响<sup>[38]</sup>。对于黑土区坡耕地通常用  $I_{60}$  分析降雨与径流量的关系<sup>[39]</sup>。 $I_{60}$  小于  $40 mm h^{-1}$ , 免耕产生径流较少, 且  $I_{60}$  较大时, 少耕较传统耕作减少径流效果好。试验年强降雨次数较少,  $I_{60}$  基本小于  $40 mm h^{-1}$ , 免耕土壤侵蚀量少。虽然雨季前少耕垄沟深松目的是打破犁底层, 提高土壤蓄水保墒能力, 减少径流量和侵蚀量, 但由于试验年 7 月初连续降雨和少耕地表缺少一定覆盖物且为顺坡垄作, 雨水汇集于垄沟, 垄沟土壤疏松, 抗冲击能力低, 当雨量和雨强较大时, 沿坡向垄沟产生径流, 加剧了土壤侵蚀, 最终导致少耕水土保持功效降低。后期 8 月份土壤团聚体稳定性高, 径流量和侵蚀量增加幅度减小。

表 3 不同耕作下年径流量和侵蚀量

Table 3 Annual runoff and soil loss as affected by tillage practice

处理 Treatments	降雨量 Rainfall (mm)	产流次数 Number of runoff	径流系数 Runoff coefficient (%)	输沙次数 Sediment transport	侵蚀模数 Erosion modulus ( $t km^{-2} a^{-1}$ )
NT <sup>1)</sup>	458.4	6	1.39	1	0.5
RT <sup>2)</sup>	458.4	23	8.09	16	378
CT <sup>3)</sup>	458.4	25	9.95	20	615.1

1) NT: 免耕 No-tillage; 2) RT: 少耕 Reduced tillage; 3) CT: 传统耕作 Conventional tillage

### 3 结 论

全生育期, 免耕垄台和垄沟土壤容重几无变化。在 0~20 cm 土层, 免耕土壤中  $WR_{0.25}$  高于传统耕作和少耕, 免耕土壤 WMD 显著大于传统耕作, 免耕能够维持稳定土壤结构, 受干湿交替影响小。免耕垄台与垄沟土壤含水量均最高, 土壤稳定入渗速率也高于少耕和传统耕作。在雨量较少的时候, 免耕土壤含水量降低的趋势小于少耕和传统耕作, 免耕土壤持水保水能力强。免耕土壤地表产流次数、输沙次数、土壤径流量及土壤侵蚀模数均小于少耕和传统耕作, 免耕水土保持效果最好。少耕垄沟进



行深松后,其土壤容重显著降低,少耕土壤 WMD 也大于传统耕作,其垄沟土壤入渗速率和稳定入渗速率大于其他耕作方式,表明少耕土壤结构优于传统耕作。少耕的产流次数、输沙次数、土壤径流量和土壤侵蚀模数小于传统耕作,少耕具有一定水土保持功效。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 刘兴土, 阎百兴. 东北黑土区水土流失与粮食安全. 中国水土保持, 2009(1):17—19. Liu X T, Yan B X. Soil and water loss and grain security of black soil region in northeast of China (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 2009(1): 17—19
- [ 2 ] 杨文文, 张学培, 王洪英. 东北黑土区坡耕地水土流失及防治技术研究进展. 水土保持研究, 2005, 12(5):232—236. Yang W W, Zhang X P, Wang H Y. Study on soil and water loss and prevention technology of sloping land in blackland in the northeast (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5):232—236
- [ 3 ] 李发鹏, 李景玉, 徐宗学. 东北黑土区土壤退化及水土流失研究现状. 水土保持研究, 2006, 13(3):50—54. Li F P, Li J Y, Xu Z X, The status quo of black soil degradation and water and soil loss in northeast China (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(3):50—54
- [ 4 ] 杨瑞珍. 我国耕地水土流失及其防治措施. 水土保持通报, 1994, 14(2):32—36. Yang R Z. Cultivated land soil and water loss for our country and control measures (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1994, 14(2):32—36
- [ 5 ] 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策. 中国水土保持科学, 2008, 6(1):1—8. Liu B Y, Yan B X, Shen B, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China (In Chinese). Science of Soil and Water Conservation, 2008, 6(1):1—8
- [ 6 ] Toyakawa H, Triplett G B, Dick W A. No-tillage crop production: A revolution in agriculture. Agronomy Journal, 2008, 100: 153—165
- [ 7 ] 卢宗凡, 苏敏. 水土保持耕作措施述评. 水土保持通报, 1983, 6:86—93. Lu Z F, Su M. Review of soil and water conservation tillage (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1983, 6:86—93
- [ 8 ] 刘世平, 庄恒扬, 陈建飞, 等. 免耕法对土壤结构影响的研究. 土壤学报, 1998, 35(1):33—37. Liu S P, Zhuang H Y, Chen J F, et al. Influence of no-tillage on soil structure (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(1):33—37
- [ 9 ] Cunha Medeiros J, Espejo Serrano R, Hernanz Martos J L, et al. Effect of various soil tillage systems on structure development in a Haploxeralf of central Spain. Soil Technology, 1996, 11:197—204
- [ 10 ] 吴婕, 朱钟麟, 郑家国, 等. 秸秆覆盖还田对土壤理化性质及作物产量的影响. 西南农业学报, 2006, 19(2):192—195. Wu J, Zhu Z L, Zheng J G, et al. Influences of straw mulching treatment on soil physical and chemical properties and crop yields (In Chinese). Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2006, 19(2):192—195
- [ 11 ] Fernandez Ugalde O, Virto I, Bescansa P, et al. No-tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation-prone semiarid soils. Soil and Tillage Research, 2009, 106(1): 29—35
- [ 12 ] Hill R L. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54:161—166
- [ 13 ] 张志国, 徐琪. 长期秸秆覆盖免耕对土壤默写理化性质及玉米产量的影响. 土壤学报, 1998, 35(3):384—391. Zhang Z G, Xu Q. Influences of long-term mulched no-tillage treatment on some soil physical and chemical properties and corn yields (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(3):384—391
- [ 14 ] 孙传生, 黄长海, 朱大为, 等. 东北黑土区水土保持保护性耕作措施探究. 水土保持研究, 2006, 13(5):132—133, 136. Sun C S, Huang C H, Zhu D W, et al. Discussion on soil and water conservation protective cultivation for northeast blackland area (In Chinese). Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(5):132—133, 136
- [ 15 ] 沈裕虎, 黄相国, 王海庆. 秸秆覆盖的农田效应. 干旱地区农业研究, 1998, 16(1):45—50. Shen Y H, Huang X G, Wang H Q. Field effects of straw mulching (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 1998, 16(1):45—50
- [ 16 ] 宋日, 刘利, 马丽艳, 等. 作物根系分泌物对土壤团聚体大小及其稳定性的影响. 南京农业大学学报, 2009, 32(3): 93—97. Song R, Liu L, Ma L Y, et al. Effect of crop root exudates on the size and stability of soil aggregate (In Chinese). Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32(3): 93—97
- [ 17 ] 刘晓利, 何园球, 李成亮, 等. 不同利用方式和肥力红壤中水稳性团聚体分布及物理性质特征. 土壤学报, 2008, 45(3):459—464. Liu X L, He Y Q, Li C L, et al. Distribution and physical properties of soil water-stable aggregates in red soils different in land use and soil fertility (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(3):459—464
- [ 18 ] 李洪文, 陈君达, 高焕文. 旱地农业三种耕作措施的对比研究. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1):7—11. Li H W, Chen J D, Gao H W. A comparison of three tillage methods in dryland farming (In Chinese). Agricultural Research in the Arid Areas, 1997, 15(1):7—11
- [ 19 ] Six J, Elliott E T, Paustian K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63: 1350—1358
- [ 20 ] 查轩, 唐克丽. 植被对土壤特性及土壤侵蚀的影响. 水土保持通报, 1992, 12(2):52—58. Zha X, Tang K L. The impact of vegetation on soil characteristics and soil erosion (In Chinese). Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992, 12(2): 52—58
- [ 21 ] 郭培才, 张振中. 黄土区土壤抗蚀性预报及评价方法研究. 水土保持学报, 1992, 6(3):48—51, 58. Guo P C, Zhang Z Z. A study on soil anti-erodibility prediction and evaluation meth-

- od in loess region (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 1992, 6(3):48—51, 58
- [22] 查小春, 唐克丽. 黄土丘陵林区开垦地人为加速侵蚀与土壤物理力学性质的时间变化. *水土保持学报*, 2011, 5(3):20—23. Zha X C, Tang K L. Temporal change about man-made accelerated erosion and soil physical and force properties of reclaimed forest lands in loess hilly region (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 5(3):20—23
- [23] 刘恩科, 赵秉强, 梅旭荣, 等. 不同施肥处理对土壤水稳定性团聚体及有机碳分布的影响. *生态学报*, 2010, 30(4):1035—1041. Liu E K, Zhao B Q, Mei X R, et al. Distribution of water-stable aggregates and organic carbon of arable soils affected by different fertilizer application (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(4):1035—1041
- [24] 王海霞, 孙红霞, 韩青芳, 等. 免耕条件下秸秆覆盖对旱地小麦田土壤团聚体的影响. *应用生态学报*, 2012, 23(4):1025—1030. Wang H X, Sun H X, Han Q F, et al. Effects of straw mulching on the soil aggregates in dryland wheat field under no-tillage (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(4):1025—1030
- [25] Nimmo J R, Perkins K S. Aggregates stability and size distribution//Methods of soil analysis, Part 4-Physical methods. Soil Science Society of America, Inc. Madison, Wisconsin, USA, 2002:317—328
- [26] 姜学兵, 李云生, 欧阳竹, 等. 免耕对土壤团聚体特征以及有机碳储量的影响. *中国生态农业学报*, 2012, 20(3):270—278. Jiang X B, Li Y S, Ouyang Z, et al. Effect of no-tillage on soil aggregate and organic carbon storage (In Chinese). *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(3):270—278
- [27] Radcliffe D E, Tollner E W, Hargrove W L, et al. Effect of tillage practices on infiltration and soil strength of a typic Hapludult soil after ten years. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52:798—804
- [28] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究. *土壤学报*, 2010, 47(4):611—620. Li Z, Wu P T, Feng H, et al. Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(4):611—620
- [29] 刘爽, 张兴义. 不同耕作方式对黑土农田土壤水分及利用效率的影响. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(1):126—131. Liu S, Zhang X Y. Effects of tillage management on soil water dynamics, yield and water use efficiency in arable black soil cropping system in Northeast China (In Chinese). *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2012, 30(1):126—131
- [30] 孟凯, 张兴义, 随跃宇, 等. 黑龙江海龙农田黑土水分特征. *土壤通报*, 2003, 34(1):11—14. Meng K, Zhang X Y, Sui Y Y, et al. Black soil water characteristic in Hailun, Heilongjiang (In Chinese). *Chinese Journal of Soil Science*, 2003, 34(1):11—14
- [31] 付国占, 李朝海, 王俊忠, 等. 残茬覆盖与耕作方式对土壤性状及夏玉米水分利用效率的影响. *农业工程学报*, 2005, 21(1):52—56. Fu G Z, Li C H, Wang J Z, et al. Effects of stubble mulch and tillage managements on soil physical properties and water use efficiency of summer maize (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(1):52—56
- [32] 黄高宝, 郭清毅, 张仁陟, 等. 保护性耕作条件下旱地农田麦-豆双序列轮作体系的水分动态及产量效应. *生态学报*, 2006, 26(4):1176—1185. Huang G B, Guo Q Y, Zhang R Z, et al. Effects of conservation tillage on soil moisture and crop yield in a phased rotation system with spring wheat and field pea in dryland (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4):1176—1185
- [33] 赵军, 葛翠萍, 孟凯, 等. 海伦市土地利用与土壤侵蚀时空变化分析. *水土保持通报*, 2007, 27(2):67—71. Zhao J, Ge C P, Meng K, et al. Spatial and temporal variability of landuse and soil erosion at Hailun County (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(2):67—71
- [34] Sen Z, Altunkaynak A. A comparative fuzzy logic approach to runoff coefficient and runoff estimation. *Hydrological Process*, 2006, 20:1993—2009
- [35] 金柯, 蔡典雄, 吕军杰, 等. 耕作对坡耕地水土流失和冬小麦产量的影响. *水土保持学报*, 2006, 20(4):1—5, 49. Jin K, Cai D X, Lü J J, et al. Effects of tillage practices on erosion and winter wheat yield on sloping dryland (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(4):1—5, 49
- [36] 郑世清, 周佩华. 土壤容重和降雨强度与土壤侵蚀和入渗关系的定量分析. *中国科学院西北水土保持研究所集刊*, 1988, 6:53—56. Zheng S Q, Zhou P H. A quantitative study of relationship between soil density and soil erosion (In Chinese). *Memoir of the Northwestern Institute of Soil and Water Conservation Academia Sinica*, 1988, 6:53—56
- [37] Muukkonen P, Hartikainen H, Alakukku L. Effect of soil structure disturbance on erosion and phosphorus losses from Finnish clay soil. *Soil and Tillage Research*, 2009, 103(1):84—91
- [38] 刘俊娥, 王占礼, 高素娟, 等. 黄土坡面片流过程模拟研究. *土壤学报*, 2013, 50(2):268—274. Liu J E, Wang Z L, Gao S J, et al. Simulated-rainfall experimental study on runoff of sheet flow on loess hillslope (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(2):268—274
- [39] 张少良, 张兴义, 刘晓冰, 等. 典型黑土侵蚀区不同耕作措施的水土保持功效研究. *水土保持学报*, 2009, 23(3):11—15. Zhang S L, Zhang X Y, Liu X B, et al. Tillage effect on soil erosion in typical black soil region (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(3):11—15

## SEASONAL VARIATIONS OF SOIL STRUCTURES AND HYDRAULIC CONDUCTIVITIES AND THEIR EFFECTS ON SOIL AND WATER CONSERVATION UNDER NO-TILLAGE AND REDUCED TILLAGE

Chen Qiang<sup>1,3</sup> Yuriy S Kravchenko<sup>1,2</sup> Chen Yuan<sup>1</sup> Li Xufeng<sup>1</sup> Li Hao<sup>1,3</sup> Song Chunyu<sup>1</sup> Zhang Xingyi<sup>1\*</sup>

(1 Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Harbin 150081, China)

(2 Soil Science and Soil Conservation Department, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 03041, Ukraine)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** Changes in soil physical properties in the surface layer (0 ~ 20 cm) on a sloping farmland of Mollisols under no-tillage (NT), reduced tillage (RT) and conventional tillage (CT), separately, were monitored throughout the entire crop growing season for comparison to explore differences between soils under tillage patterns in seasonal variation of soil structure and hydraulic conductivity and relationships of the variations with soil-water loss. Results show that soil bulk density in NT varied slightly, remaining in the range of 1.20 ~ 1.30 g cm<sup>-3</sup>. NT was higher than CT in content of water stable soil aggregate > 0.25 mm size (WR<sub>0.25</sub>) and mean weight diameter (MWD), higher than RT and CT in initial and stable soil infiltration rate, 4.68% and 4.44% higher than RT and NT in mean soil water content, and 86% and 100% lower than CT in runoff and soil loss, respectively. RT ranged between NT and CT in all the measured properties, throughout the season except in summer. In RT, deep tillage of the furrows in summer significantly lowered soil bulk density in the furrow, at least 0.15 g cm<sup>-3</sup> lower than that in NT and CT, thus increasing the initial soil infiltration rate by 30% or more. RT was 20% and 40% lower than CT in soil and water loss, respectively. In CT, soil bulk density in ridge increased from 0.91 g cm<sup>-3</sup> at the seeding stage to 1.23 g cm<sup>-3</sup> at the harvesting stage, and that in furrow remained around 1.30 g cm<sup>-3</sup>. CT was lower than the other two in WR<sub>0.25</sub>, MWD, soil infiltration rate and soil water content. It lost 10% of the rainfall it had during the entire the crop growing season and soil at 615 t km<sup>-2</sup> a<sup>-1</sup>. NT was rather stable in soil structure and the best in soil-water conservation among the three. Hence, it is a tillage practice significant in soil-water conserving effect. RT is also a practice that has some soil-water conserving effect. And both of the practices help improve soil physical properties.

**Key words** No-tillage (NT); Reduced tillage (RT); Soil structure; Soil hydraulic conductivity; Seasonal variation; Soil-water conservation

(责任编辑:陈德明)