

# 黑土坡耕地横坡垄作对减少径流及土壤有机碳流失的作用

盖浩<sup>1</sup>, 刘平奇<sup>1</sup>, 张梦璇<sup>1</sup>, 陈柏旭<sup>1</sup>, 王迎春<sup>2</sup>, 王立刚<sup>1</sup>

(1.中国农业科学院农业资源与农业区划研究所,北京 100081;2.农业农村部科技发展中心,北京 100122)

**摘要:** 东北黑土坡耕地受土壤侵蚀和习惯顺坡耕作措施的影响,水土流失严重,土壤有机碳含量呈逐年下降趋势。针对东北黑土坡耕地不同垄作措施水土流失及土壤有机碳变化特征不明确的问题,采用田间定位试验的方法,探究了顺坡垄作和横坡垄作对坡耕地水土流失及土壤有机碳变化的影响。结果表明:(1)横坡垄作相对于顺坡垄作能显著减少径流总量 97.1%,减少泥沙总量 93.1%,表现出较强的拦截地表径流和泥沙的作用。(2)横坡垄作对比顺坡垄作可减少 99.9%的 SOC 及 99.3%的 DOC 流出耕地,坡肩和坡背是拦截迁移土壤有机碳的主要坡位,其中 98.8%的 SOC 和 94.4%的 DOC 被拦截在坡肩和坡背位置。(3)经过 3 年的改垄耕种,横坡垄作相对于顺坡垄作显著提高了玉米产量,且主要体现在坡肩和坡背位置(分别显著提高 21.2%,19.4% ( $p < 0.05$ ))。因此,横坡垄作对比农民习惯的顺坡垄作具有明显的保水固土、减少有机碳流失和增加产量的多赢效果,可以作为东北黑土坡耕地土壤保护性耕作的推荐措施。

**关键词:** 坡耕地; 横坡垄作; 顺坡垄作; 土壤有机碳; 玉米产量

中图分类号: S153.6+21

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)02-0300-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.02.038

## Effects of Ridge Planting on Reducing Runoff and Soil Organic Carbon Loss in Black Soil Slope

GAI Hao<sup>1</sup>, LIU Pingqi<sup>1</sup>, ZHANG Mengxuan<sup>1</sup>, CHEN Baixu<sup>1</sup>, WANG Yingchun<sup>2</sup>, WANG Ligang<sup>1</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081;

2. Development Center for Science and Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100122)

**Abstract:** Losses of nutrients, water and soil was serious in black soil sloping farmlands in Northeast China, and the soil organic carbon (SOC) decreased year by year due to soil erosion and conventional longitudinal ridge-tillage. However, the characteristics of water and soil losses, and the changes in soil organic carbon under different tillage methods remain unclear. This study explored the impact of longitudinal ridge-tillage and cross-ridge tillage practices on losses of water and soil, and the changes in SOC from sloping farmland based on field experiments. Results showed that: (1) Compared with the longitudinal ridge-tillage, cross-ridge tillage significantly reduced the surface runoff and sediment losses by 97.1% and 93.1%, respectively, showing a strong interception of surface runoff and sediment. (2) The cross-ridge tillage could reduce the losses of SOC and dissolved organic carbon (DOC) from the sloping farmland by 99.9% and 99.3%, respectively, and shoulder and back of the slope were two main positions of SOC sequestration, where 98.8% of SOC and 94.4% of DOC were sequestered. (3) The cross-ridge tillage significantly increased the yield of spring maize, especially at the shoulder (by 21.2%) and back (by 19.4%) positions (both  $p < 0.05$ ), based on a 3-year cross-ridge tillage. Therefore, compared with the conventional longitudinal ridge-tillage, the cross-ridge tillage is a multi-win practice to reduce soil erosion and SOC losses, and increase the productivity, which can serve as a conservation measure for the protection of black soil sloping farmlands in Northeast China.

**Keywords:** sloping farmland; cross-ridge tillage; longitudinal ridge tillage; soil organic carbon; maize yield

收稿日期: 2021-09-16

资助项目: 国家自然科学基金项目(31770486); 国家重点研发计划项目(2017YFD0201801); 中国农业科学院科技创新工程项目(CAAS-ZDRW202202)

第一作者: 盖浩(1996—), 男, 硕士, 主要从事土壤侵蚀与土壤质量研究。E-mail: 18611324452@163.com

通信作者: 王立刚(1974—), 男, 博士, 研究员, 主要从事农业生态系统碳氮循环研究。E-mail: wangligang@caas.cn

东北黑土区作为国家重要的商品粮基地<sup>[1]</sup>,承担着粮食安全“稳压器”的角色,同时也是重要的生态屏障<sup>[2]</sup>。目前东北坡耕地土壤侵蚀日益加重<sup>[3]</sup>,其水土流失面积占东北黑土区水土流失总面积的 80.3%<sup>[4]</sup>。据研究<sup>[5]</sup>表明,东北黑土区水土流失导致土壤有机碳(SOC)以每年 0.1% 的速度递减,由于漫川漫岗地形的特点,农民多采用顺坡垄作的耕作模式,进一步加剧水土流失,增加土壤有机碳的损失<sup>[6]</sup>。

针对东北黑土坡耕地土壤侵蚀及有机碳流失的问题,近年来诸多学者<sup>[7]</sup>探索实践了一系列保护性耕作措施,以缓解坡耕地土壤侵蚀越发严重的现状,在众多的保护性措施中,横坡垄作被认为是应用范围最广,且最有效的保护性耕作措施<sup>[8]</sup>,其主要通过改变坡面局部地形和垄台与坡面夹角有效拦截地表径流,增加土壤入渗,防止土壤侵蚀引起的碳流失,最终实现固土保水的功能<sup>[9]</sup>,同时横坡垄作可有效提高作物产量,增产幅度为 10%~30%<sup>[10-11]</sup>。

东北黑土坡耕地在侵蚀作用下土壤有机碳以泥沙结合态和径流溶解态 2 种形式流失<sup>[12-14]</sup>,通过土壤侵蚀作用搬运、堆积埋藏及输出流域等过程对坡耕地土壤有机碳产生影响<sup>[15]</sup>,以往对黑土区土壤有机碳的研究主要集中于碳素空间分布格局、固碳潜力<sup>[16]</sup>和保护性耕作措施的可行性上<sup>[17]</sup>,对于坡耕地土壤有机碳流失特征的研究则多基于模拟降雨等室内试验<sup>[18]</sup>,缺乏野外田间条件下坡耕地水土流失和土壤有机碳变化特征的探究。因此,本试验选择东北黑土典型坡耕地,探究横坡垄作和顺坡垄作在自然降雨驱

动下水土流失和土壤有机碳变化特征,为明确横坡垄作保水固土,减少土壤有机碳损失的效应提供科学依据,为东北黑土坡耕地的保护提供技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验地点设在黑龙江省绥化市青冈县民政镇进化村(126°11'3.14"N,46°42'42.11"E)。该地处于松嫩平原腹地,是典型东北黑土区域,温带大陆性季风气候,平均海拔 457 m,2018 年最高气温 22.1℃,最低气温 -20.9℃,全年无霜期 130 天左右,年平均降水量约为 477 mm。试验开始于 2017 年 4 月,供试土壤为黏壤质黑钙土。供试坡耕地坡度约为 7°,长为 85 m,宽为 16 m,总面积 1 360 m<sup>2</sup>。本试验实施期为 2017—2019 年,日平均温度和降雨量见图 1。不同坡位土壤基础理化性状见表 1。

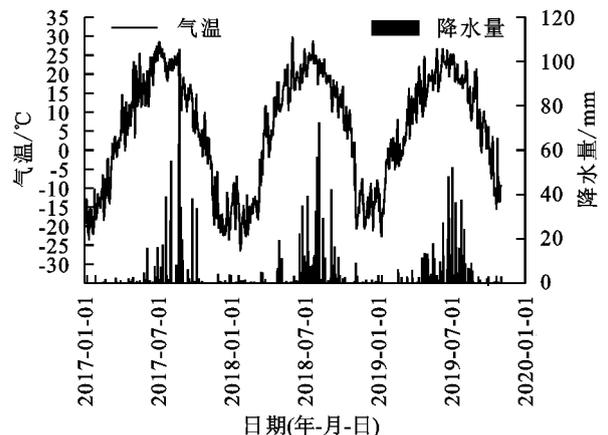


图 1 试验点 2017—2019 年日均气温和降水量

表 1 坡耕地土壤基础理化性状

坡位	土层深度/cm	土壤有机碳/%	全氮/%	全磷/%	全钾/%	pH	容重/(g·cm <sup>-3</sup> )
坡顶	0—20	1.89	0.185	0.053	2.35	6.6	1.32
	20—40	1.49	0.128	0.042	2.42	6.8	1.25
坡肩	0—20	1.47	0.136	0.042	2.29	6.6	1.46
	20—40	0.42	0.044	0.030	2.39	7.0	1.42
坡背	0—20	2.07	0.192	0.048	2.33	6.9	1.28
	20—40	1.46	0.150	0.042	2.42	7.0	1.22
坡趾	0—20	1.89	0.220	0.052	2.44	7.0	1.28
	20—40	2.20	0.195	0.059	2.43	7.4	1.23

### 1.2 试验设计

试验坡耕地设置为农民习惯的顺坡垄作与保护性耕作措施的横坡垄作 2 种耕作措施,根据试验地坡度变化,将长为 85 m,宽为 16 m,总面积 1 360 m<sup>2</sup> 的试验坡耕地从坡上到坡下划分为坡顶、坡肩、坡背和坡趾 4 个坡位,其中坡顶长 15 m,坡肩长 25 m,坡背长 30 m,坡趾长 15 m,在坡顶至坡肩位置、坡肩至坡背位置和坡趾外安装翻斗式径流装置(图 2),用来收集从坡顶到坡肩、坡顶到坡背、坡顶流出坡趾的径流样品。

### 1.3 样品采集与数据处理

(1) 水土流失监测:本试验采用的翻斗式径流仪翻斗大小为 1.5 L,并连接降雨驱动的径流水事件计数器,按照计数器记录翻斗反转次数与翻斗体积计算径流量;在翻斗计下方安装带滤网的水桶收集泥沙及径流水样,按次降雨事件收集泥沙合为每年总产沙量<sup>[19]</sup>。在 2017—2019 年为期 3 年的实时监测中,仅有 2018 年获得了完整降雨驱动下的水土流失监测数据。因此,本文选取 2018 年的实时监测数据进行分析。

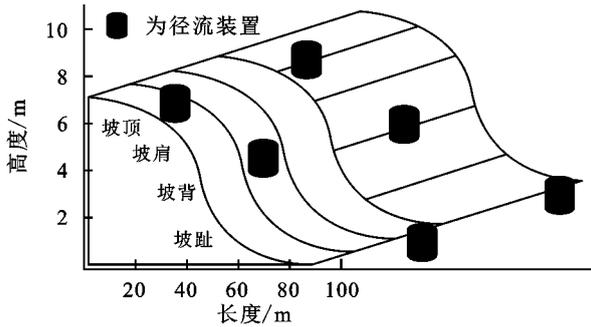


图 2 坡耕地试验示意

$$\text{径流量}(L) = V \times N$$

式中:  $V$  为翻斗仪的体积(1.5 L);  $N$  为计数器储存的翻斗翻动次数。

(2) 泥沙中有机碳含量和径流水中可溶性有机碳碳(DOC)的测定: 每次降雨后立即取回装置中收集的泥沙及径流水样。将泥沙风干后, 过 100 目筛, 采用重铬酸钾容量法测定泥沙中有机碳含量。将径流水样品摇匀以 5 000 r/min 的速度用离心机离心 1 h, 上层清液过 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜抽滤, 滤液用于测定 DOC 含量<sup>[20]</sup>。

(3) 玉米产量及土壤有机碳含量测定: 秋收后采用五点取样法, 用土钻分 0—20, 20—40 cm 土层取土, 晒干过 100 目筛, 采用重铬酸钾容量法测定土壤有机碳含量<sup>[21]</sup>。

(4) 玉米产量测定: 作物成熟期后在每个坡位随机采集玉米 10 株, 计算平均穗粒数后, 105  $^{\circ}\text{C}$  杀青 30 min, 55  $^{\circ}\text{C}$  恒温烘干测干重, 并通过各坡位面积估算每公顷产量。

采用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析、多重比较(Duncan 法), Excel 2019 和 OriginPro 2019 软件进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同垄作措施地表径流量及泥沙流失量

通过监测显示, 坡耕地地表径流主要集中产生于 6—8 月的雨季(图 3), 顺坡垄作地表径流总量为 8 479.7 L, 横坡垄作的地表径流总量仅为顺坡垄作的 3.2%, 为 274.5 L。顺坡垄作迁移泥沙总量为 8 455.1  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 横坡垄作迁移泥沙总量为 587.1  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 仅为顺坡垄作的 6.9%。说明横坡垄作对比农民习惯的顺坡垄作可以有效减少东北黑土坡耕地的地表产流量及迁移泥沙量。

从不同坡位分析, 顺坡垄作产流量的 92.5% 和产沙量的 81.0% 流经坡顶至坡趾的整个坡面区域(图 4), 说明农民习惯的顺坡垄作无法对集中降雨时产生的径流进行有效拦截, 大部分径流及其所裹挟的泥沙迁移至坡趾部位甚至流出耕地, 长此以往造成坡耕地坡上部位侵蚀、坡下部位沉积的空间格局<sup>[16]</sup>。横坡垄作 94.7% 的

产流量和 99% 的产沙量流经坡顶至坡肩和坡顶至坡背位置, 而流出坡趾部位的产流、产沙量分别占总量的 0.5% 和 1.0%, 说明横坡垄作坡肩与坡背位置体现出对地表径流及坡面产沙的主要拦截功能。

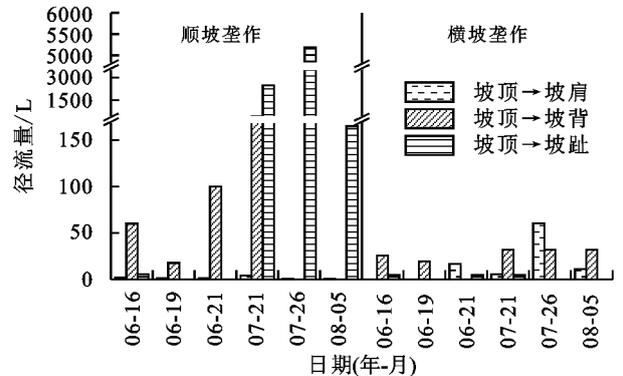


图 3 2 种垄作措施流经各坡位地表径流量

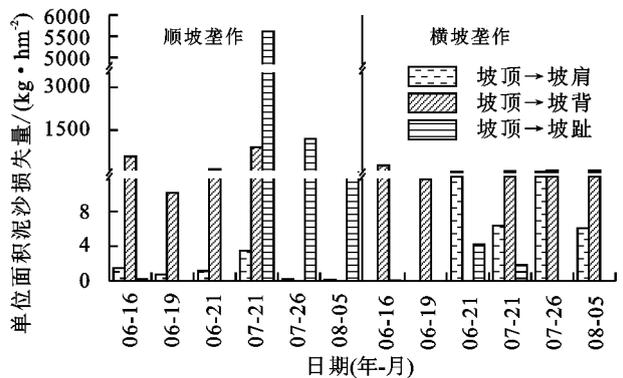


图 4 2 种垄作措施各坡位单位面积泥沙迁移量

### 2.2 不同垄作措施土壤有机碳及可溶性有机碳的迁移流失

不同垄作措施下土壤有机碳(SOC)及可溶性有机碳(DOC)迁移流失量差别显著, 横坡垄作 SOC 迁移总量为 25.0  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 仅为顺坡垄作 SOC 迁移总量 354.3  $\text{kg}/\text{hm}^2$  的 0.7%(图 5); 横坡垄作随水体迁移的 DOC 总量为 1.6  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 仅为顺坡垄作随水体迁移 DOC 总量 13.2  $\text{kg}/\text{hm}^2$  的 12.1%(图 6), 表明横坡垄作相对于顺坡垄作可明显减少 SOC 与 DOC 的迁移总量。

按不同坡位分析, 顺坡垄作由坡顶流经坡趾, 最终从耕地流失的 SOC 量为 283.2  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 占顺坡垄作 SOC 迁移总量的 79.9%, DOC 流失量为 12.4  $\text{kg}/\text{hm}^2$  占 DOC 迁移总量的 94.0%; 而横坡垄作措施下仅有 SOC 迁移量 1.2% 的和 DOC 迁移量 5.6% 流失出耕地, 迁移总量 98.8% 的 SOC 和 94.4% 的 DOC 则被拦截在坡肩和坡背区域, 表明横坡垄作相对于农民习惯的顺坡垄作, 在坡肩和坡背位置能有效防止因集中降雨导致的 SOC 及 DOC 的迁移流失。

### 2.3 不同垄作措施土壤有机碳的空间分布

经过 3 年的不同垄作措施试验可以看出, 横坡垄作和顺坡垄作 1 m 土体 SOC 含量均呈现随土层加深而逐渐降低的态势(图 7)。2019 年秋收后测得 4 个

坡位 SOC 含量为坡趾>坡顶>坡背>坡肩的空间分布特征,0—20 cm 土层,横坡垄作在坡顶、坡肩和坡趾土壤有机碳含量分别高于顺坡垄作 2.1%,4.3%和 10.0%( $p>0.05$ ),而在坡背区域显著高于顺坡垄作 12.4%( $p<0.05$ )(图 8),表明横坡垄作相对于顺坡垄作在坡背区域表现出一定的固碳能力。

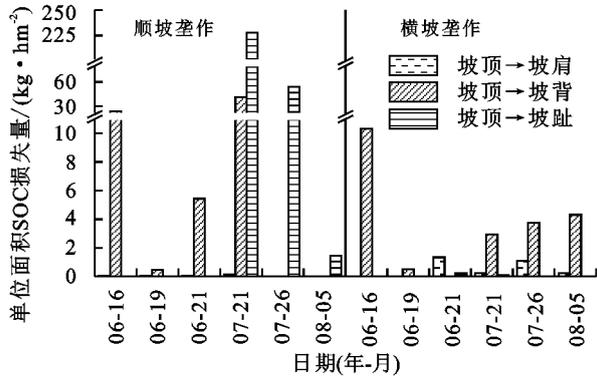


图 5 2 种垄作措施各坡位单位面积 SOC 流失量

#### 2.4 不同垄作措施黑土坡耕地玉米产量

横坡垄作 3 年玉米的平均产量高于顺坡垄作 12.7%。

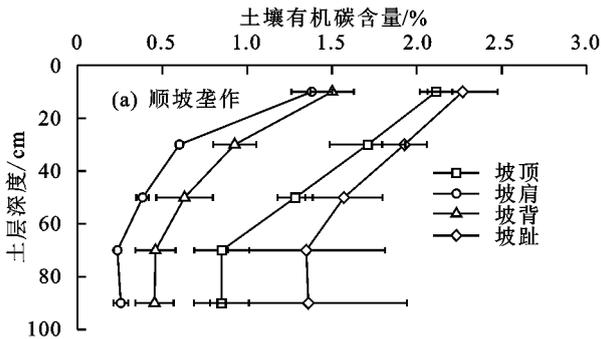
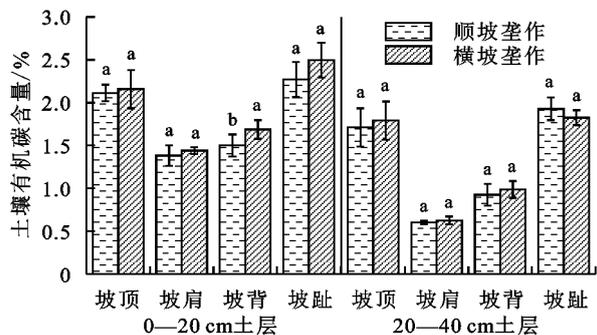


图 7 2019 年 2 种垄作措施有机碳空间分布



注:图中不同字母表示不同垄作措施间差异显著( $p<0.05$ )。下同。

图 8 2019 年 2 种垄作措施 0—40 cm 有机碳含量

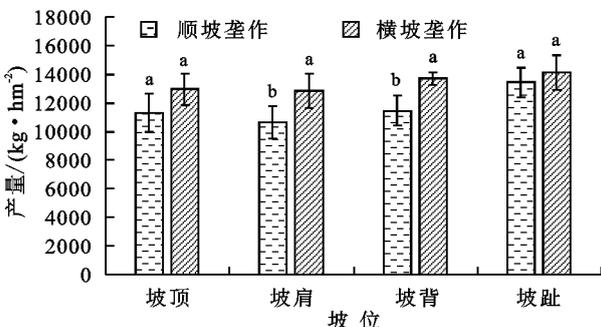


图 9 2017—2020 年 2 种垄作措施各坡位平均产量

表明将农民习惯的顺坡垄作改为横坡垄作可以提高产量。横坡垄作相较于顺坡垄作玉米产量的提高主要体现在坡肩与坡背区域(图 9),分别显著提高 21.2%, 19.4%( $p<0.05$ )。在 3 年试验过程中,产量并不随改垄年限的增加而呈逐渐增高的态势,每年的产量均有所波动,尤其是改垄后第 1 年横坡垄作坡趾的产量低于顺坡垄作,第 2 年和第 3 年横坡垄作高于顺坡垄作产量的幅度也不相同。

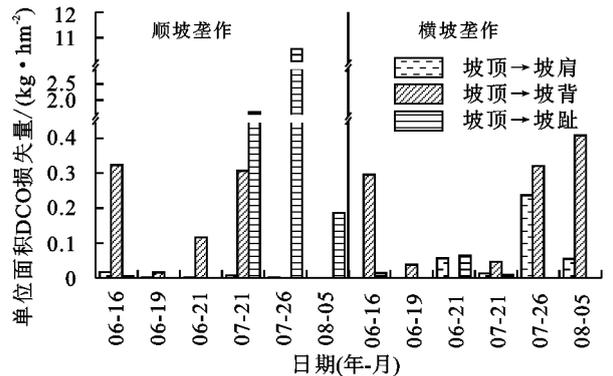
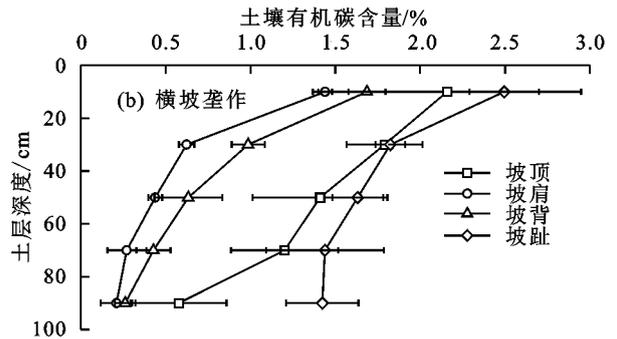


图 6 2 种垄作措施各坡位单位面积 DOC 流失量



### 3 讨论

方华军等<sup>[22]</sup>利用<sup>137</sup>Cs 技术探究黑土坡耕地侵蚀特征的结果表明,顺坡垄作坡肩和坡背区域<sup>137</sup>Cs 含量最低侵蚀最为强烈;魏守才<sup>[20]</sup>通过野外定位试验发现,坡耕地 0—30 cm 土层中坡肩部位 SOC 含量最低,且与其他坡位有显著性差异,这与本试验顺坡垄作坡肩和坡背部位侵蚀最为强烈、SOC 含量最低的结果基本一致。不同学者基于室内模拟或小区试验探究东北黑土坡耕地不同雨强下横顺坡垄作土壤侵蚀特征时表明,在<50 mm/h(保证横坡垄作不断垄)的雨强下试验结果与本试验基本相同,均说明横坡垄作对比顺坡垄作可以极显著减少坡面产流产沙量<sup>[23-26]</sup>及土壤有机碳和可溶性有机碳的流失<sup>[27]</sup>,但由于室内模拟及小区试验面积的限制,无法在较短长度的模拟降雨装置和小面积的区试验上体现出 2 种垄作方式坡位间的差异,尤其是无法确定横坡垄作对水土流失的主要拦截区域。而本研究结果发现,在田间试验条件下,横坡垄作对径流、泥沙及二者所裹挟

SOC 和 DOC 的主要拦截坡位是坡肩和坡背区域,经过 3 年的改垄试验,从横坡垄作坡肩和坡背位置 SOC 变化中也证实了这一点。试验进行的 3 年中,横坡垄作对比顺坡垄作玉米的产量也在坡肩和坡背 2 个区域有显著提升,坡肩部位提升 9.7%~23.5%,坡背部位提升 10.1%~28.0%,说明横坡垄作对比顺坡垄作,减少土壤侵蚀、有机碳流失和提升耕地生产力的主要作用部位是坡肩和坡背。

室内试验结果表明,在 >75 mm/h 强降雨下,横坡垄作会发生“断垄”现象,并出现十分剧烈的水土流失,加大泥沙损失量<sup>[23]</sup>。但本试验在田间监测的条件下,横坡垄作未出现断垄现象,这是由于室内模拟试验未充分考虑实际耕作中作物对雨水的拦截作用<sup>[28-29]</sup>,由于东北地区强降雨事件多集中于 7,8 月,而此时东北地区玉米正值大喇叭口期,玉米叶面积指数(LAI)达到 5~6<sup>[30]</sup>,地表土壤的透光率仅为叶片上层的 14%<sup>[31-32]</sup>,作物叶片有效拦截降雨避免雨滴直接冲击土壤表层,削弱雨滴对土壤的剪切力<sup>[33]</sup>,因此在实际耕作过程中未出现断垄现象。未来气候变化下,极端降雨事件频率和降雨量都将增加<sup>[34]</sup>,这种降雨变化对东北地区坡耕地土壤侵蚀及土壤有机碳迁移流失特征的影响还有待于长时间的持续监测研究。

## 4 结论

(1)横坡垄作相对于顺坡垄作可有效减少黑土坡耕地产生地表径流和泥沙总量,减少 SOC 和 DOC 损失。横坡垄作相对于顺坡垄作能显著减少年径流总量 97.1%,泥沙总量 93.1%,SOC 损失总量 99.9%和 DOC 损失总量 99.3%。

(2)横坡垄作相比于顺坡垄作,坡肩与坡背是拦截 SOC 和 DOC 的主要坡位,分别拦截两者迁移量的 98.8%和 94.4%。

(3)横坡垄作相对于顺坡垄作提高玉米产量,突出表现在坡肩与坡背部位,分别显著提高 21.2%,19.4%( $p < 0.05$ )。

### 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[J].中国水土保持,2009(1):17-19.

[2] 邱建军,王立刚,李虎,等.农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J].中国农业科学,2009,42(1):154-161.

[3] An J, Zheng F L, Lu J, et al. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions[J]. Soil Science, 2012, 177(8): 517-526.

[4] 陈雪,蔡强国,王学强.典型黑土区坡耕地水土保持措施

适宜性分析[J].中国水土保持科学,2008,6(5):44-49.

- [5] 水利部.中国水土流失防治与生态安全:东北黑土区卷[M].北京:科学出版社,2010.
- [6] 霍军力,王永成,董斌.东北黑土区坡耕地地表径流的影响因素分析:兼谈水土流失对策[J].黑龙江水利科技,2008(5):93-94.
- [7] 张典,高雄哲.东北黑土区坡耕地综合治理措施探讨[J].吉林水利,2010(8):58-60.
- [8] 王宝桐.黑土区水土流失危害及其防治对策[J].水利天地,2005(11):19-20.
- [9] 王鹏飞,郑子成,张锡洲.玉米苗期横垄坡面地表糙度的变化及其对细沟侵蚀的影响[J].水土保持学报,2015,29(2):30-34.
- [10] 齐智娟,张忠学,杨爱峥.黑土坡耕地不同水土保持措施的土壤水蚀特征研究[J].水土保持通报,2012,32(1):89-92,97.
- [11] 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[J].水土保持学报,2009,23(3):11-15.
- [12] 陈磊,李占斌,李鹏,等.野外模拟降雨条件下水土流失与养分流失耦合研究[J].应用基础与工程科学学报,2011,19(增刊 1):170-176.
- [13] 魏守才,张晓平,陈学文.土壤水蚀对土壤有机碳动态及全球碳循环平衡的影响[J].土壤与作物,2015,4(4):156-162.
- [14] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3-22.
- [15] Vandenbygaert A J, Kay B D. Persistence of soil organic carbon after plowing a long-term no-till field in Southern Ontario, Canada[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(4): e1394.
- [16] 张玉斌,王昱程,郭晋.水土保持措施适宜性评价的理论与方法初探[J].水土保持研究,2014,21(1):47-55.
- [17] 房含.垄作黑土坡面水土流失的农业防治措施研究[D].长春:吉林农业大学,2016.
- [18] 郑粉莉,张加琼,刘刚,等.东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J].水土保持通报,2019,39(4):314-319.
- [19] 范亚琳,刘贤赵,高磊,等.不同培肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J].土壤学报,2019,56(3):638-649.
- [20] 魏守才.水土流失对黑土坡耕地土壤有机碳的影响[D].长春:中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所),2015.
- [21] 于玲玲,郭强,赵贵元.保护性耕作对华北地区玉米产量及水分利用效率的影响[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2017,38(3):19-23.

- 米楮林土壤水解酶活性及其化学计量比的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):313-320.
- [20] Rajala T, Peltoniemi M, Pennanen T, et al. Fungal community dynamics in relation to substrate quality of decaying Norway spruce (*Piceaabies* [L.] Karst.) logs in boreal forests [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2012,81:494-505.
- [21] Kaiser C, Franklin O, Dieckmann U, et al. Microbial community dynamics alleviate stoichiometric constraints during litter decay[J]. Ecology Letters, 2014, 17:680-690.
- [22] 胡宗达,刘世荣,史作民,等.川滇高山栎林土壤氮素和微生物量碳氮随海拔变化的特征[J].林业科学研究, 2012,25(3):261-268.
- [23] 孔涛,刘紫薇,沈海鸥,等.辽西北沙地苹果-大豆间作对土壤养分和微生物量分布的影响[J].生态学杂志, 2021,40(2):340-351.
- [24] Kardol P, Cregger M A, Campy C E, et al. Soil ecosystem functioning under climate change: Plant species and community effects[J]. Ecology, 2010,91(3):767-781.
- [25] Sinsabaugh R L, Hill B H, Shah J J F. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment[J]. Nature, 2009,462(7274):795.
- [26] 郭新送,张娟,巩有才,等.生草不同条件还田对桃园土壤微生物、酶活性及养分供应的影响[J].水土保持学报,2021,35(4):307-312,320.
- [27] Yin R, Deng H, Wang H L, et al. Vegetation type affects soil enzyme activities and microbial functional diversity following revegetation of a severely eroded red soil in sub-tropical China[J]. Catena, 2014,115:96-103.
- [28] Razavi B S, Blagodatskaya E, Kuzyakov Y. Temperature selects for static soil enzyme systems to maintain high catalytic efficiency[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016,97:15-22.
- [29] Bell T H, Klironomos J N, Henry H A L. Seasonal responses of extracellular enzyme activity and microbial biomass to warming and nitrogen addition[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010,74(3):820-828.
- [30] Stark S, Männistö M K, Eskelinen A. Nutrient availability and pH jointly constrain microbial extracellular enzyme activities in nutrient-poor tundra soils[J]. Plant and Soil, 2014,383(1/2):373-385.
- [31] 林雅超,高广磊,丁国栋,等.沙地樟子松人工林土壤理化性质与微生物生物量的动态变化[J].生态学杂志, 2020,39(5):1445-1454.
- [32] 李旺霞,陈彦云,陈科元,等.不同降雨量对雨养农业区土壤酶活性和土壤微生物的影响[J].南方农业学报, 2015,46(9):1579-1583.
- (上接第304页)
- [22] 方华军,杨学明,张晓平,等.利用<sup>137</sup>Cs技术研究黑土坡耕地土壤再分布特征[J].应用生态学报,2005,16(3):464-468.
- [23] 边锋,郑粉莉,徐锡蒙,等.东北黑土区顺坡垄作和无垄作坡面侵蚀过程对比[J].水土保持通报,2016,36(1):11-16.
- [24] 何超,王磊,郑粉莉,等.垄作方式对薄层黑土区坡面土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):24-28.
- [25] 王磊.模拟降雨条件下黑土流失的研究[D].长春:吉林农业大学,2008.
- [26] 翟国庆,韩明钊,李永江,等.黑土坡耕地有机碳变化及固碳潜力分析[J].生态学报,2020,40(16):304-313.
- [27] 姜义亮.黑土区坡耕地土壤侵蚀对土壤有机碳流失的影响研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [28] 桑琦明,王磊,郑粉莉,等.东北黑土区坡耕地斜坡垄作与顺坡垄作土壤侵蚀对比分析[J].水土保持学报, 2020,34(3):75-80.
- [29] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等.雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J].农业机械学报,2016,47(2):90-97.
- [30] 柯奇画,张科利.我国人工降雨侵蚀相关试验的研究进展回顾[J].中国水土保持科学,2018,16(2):134-143.
- [31] 高莹.小麦/玉米间作系统生产力与养分光热资源利用研究[D].陕西杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2015.
- [32] 徐丽娜,闫艳,梅沛沛,等.不同玉米品种冠层光分布和湿度比较研究[J].华北农学报,2020,35(6):106-112.
- [33] 李桂芳.典型黑土区坡面土壤侵蚀影响因素与动力学机理研究[D].陕西杨凌:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.
- [34] 陈星任.中国持续极端降水时空变化特征及其未来预估[D].长春:东北师范大学,2021.