

# 保护性耕作对黄壤坡耕地水土流失及作物产量的影响

白怡婧<sup>1</sup>, 李渝<sup>2,3</sup>, 黄兴成<sup>2,3</sup>, 刘彦伶<sup>2,3</sup>, 张雅蓉<sup>2,3</sup>, 蒋太明<sup>3,4</sup>, 秦松<sup>2</sup>

(1. 贵州大学农学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵州 贵阳 550006;

3. 农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测试验站, 贵州 贵阳 550006; 4. 贵州省农业科学院茶叶研究所, 贵州 贵阳 550006)

**摘要:** [目的] 分析保护性耕作对黄壤坡耕地水土流失及作物产量的影响, 为贵州省坡耕地水土流失治理及农业可持续发展提供科学依据。[方法] 在西南地区典型黄壤坡耕地设置不施肥+顺坡平作( $TR_1$ )、常规施肥+顺坡平作( $TR_2$ )、优化施肥+顺坡平作( $TR_3$ )、优化施肥+横坡垄作( $TR_4$ )、优化施肥+横坡垄作+秸秆覆盖( $TR_5$ )、优化施肥+横坡垄作+秸秆覆盖+等高植物篱( $TR_6$ )共 6 个不同试验处理的监测小区, 于 2017—2018 年监测了不同处理间作物产量、地表径流量、氮磷流失量、土壤养分含量的差异, 并分析其相关性。[结果] ① $TR_1, TR_5, TR_6$  较  $TR_3$  的径流量分别减少了 59.72%, 74.13% 和 89.18%, 氮磷流失总量与径流量趋势相同; ② $TR_5, TR_6$  对全量养分含量影响最大, 其中全氮比  $TR_1$  作高 20.00%, 23.67%, 比  $TR_3$  高 23.53%, 27.31%; ③ $TR_1, TR_5, TR_6$  处理下的玉米在保持较高产量的同时, 作物产量稳定性(SD)和可持续性(SYD)最好; ④玉米、油菜产量与全氮、全磷、有效磷、有机质呈极显著正相关( $p < 0.01$ ), 与速效氮呈显著正相关( $p < 0.05$ ); 玉米产量与氮素流失量、磷素流失量、径流量呈极显著负相关( $p < 0.01$ )。[结论] 在坡耕地实施保护性耕作能有效降低地表径流发生, 减少氮磷流失, 保持土壤养分肥力的同时促进作物高产, 并实现稳产及可持续生产, 且实施综合保护性耕作的效能大于单项保护性耕作。

**关键词:** 保护性耕作; 横坡垄作; 径流量; 养分; 作物产量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)06-0016-05

中图分类号: S157.2

**文献参数:** 白怡婧, 李渝, 黄兴成, 等. 保护性耕作对黄壤坡耕地水土流失及作物产量的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 16-20. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.06.003; Bai Yijing, Li Yu, Huang Xingcheng, et al. Effects of conservation tillage on crop yield and soil erosion in sloping land of yellow soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 16-20.

## Effects of Conservation Tillage on Crop Yield and Soil Erosion in Sloping Land of Yellow Soil

Bai Yijing<sup>1</sup>, Li Yu<sup>2,3</sup>, Huang Xingcheng<sup>2,3</sup>, Liu Yanling<sup>2,3</sup>, Zhang Yarong<sup>2,3</sup>, Jiang Taiming<sup>3,4</sup>, Qin Song<sup>2</sup>

[1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Institute of Soil and

Fertilizer, Guizhou Academy of Agriculture Science, Guiyang, Guizhou 550006, China; 3. Scientific Observing

and Experimental Station of Arable Land Conservation and Agricultural Environment (Guizhou), Ministry of Agriculture, Guiyang, Guizhou 550006, China; 4. Institute of Tea, Guizhou Academy of Agricultural Science, Guiyang, Guizhou 550006, China]

**Abstract:** [Objective] The effects of conservation tillage on crop yield and soil erosion in sloping land of yellow soil were analyzed in order to provide scientific basis for soil and water loss control and agricultural sustainable development in Guizhou Province. [Methods] In the typical sloping land of yellow soil in southwest China, nitrogen and phosphorus loss, surface runoff and soil nutrient content were investigated under different tillage systems from 2017 to 2018. Six monitoring plots were set up, including no fertilization + downslope

收稿日期: 2019-05-13

修回日期: 2019-07-19

资助项目: 贵州省科技支撑计划项目(黔科合支撑[2017]2852号; 黔科合支撑[2018]2340号; 黔科合支撑[2019]2266号); 贵州省科技基础条件平台专项计划(黔科合平台人才[2016]5704号); 贵州省科技平台及人才团队计划(黔科合平台人才项目[2018]5604号); 贵州省农科院科技创新专项(黔农科院科技创新[2017]06号)

第一作者: 白怡婧(1994—), 女(土家族), 贵州省江口县人, 硕士研究生, 研究方向为耕地保育。E-mail: baiyijing7@163.com。

通讯作者: 秦松(1967—), 男(汉族), 贵州省安顺市人, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事土壤肥料方面的研究。E-mail: qs3761735@163.com。

conventional tillage (TR<sub>1</sub>), conventional fertilization + downslope conventional tillage (TR<sub>2</sub>), optimized fertilization + downslope conventional tillage (TR<sub>3</sub>), optimized fertilization + cross ridge tillage (TR<sub>4</sub>), optimized fertilization + cross ridge tillage + straw mulching (TR<sub>5</sub>), optimized fertilization + cross ridge tillage + straw mulching + contour hedgerow (TR<sub>6</sub>). [Results] ① Compared with TR<sub>3</sub>, the runoff of TR<sub>4</sub>, TR<sub>5</sub>, TR<sub>6</sub> were reduced by 59.72%, 74.13% and 89.18% respectively, and the total loss of nitrogen and phosphorus showed a same varying trend. ② TR<sub>5</sub> and TR<sub>6</sub> had the greatest impact on total nutrient content, of which total nitrogen was 20.00% and 23.67% higher than TR<sub>4</sub>, 23.53% and 27.31% higher than TR<sub>3</sub>, respectively. ③ Maize yield stability (SI) and sustainability (SYI) were the best with TR<sub>4</sub>, TR<sub>5</sub> and TR<sub>6</sub> treatments while maintaining a high yield. ④ The yield of maize and rape was significantly and positively correlated with total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus and organic matter ( $p < 0.01$ ), and positively correlated with available nitrogen ( $p < 0.05$ ), while negatively correlated with nitrogen loss, phosphorus loss and runoff ( $p < 0.01$ ). [Conclusion] Conservation tillage in sloping land could effectively reduce surface runoff, the loss of nitrogen and phosphorus, maintain the soil nutrient fertility and promote high yield of crops, and achieve a stable and sustainable production, and the effect of comprehensive conservation tillage measure is greater than that of single conservation tillage measure.

**Keywords:** conservation tillage; cross ridge tillage; runoff; nutrients; crop yield

贵州省地处云贵高原东大斜坡地带,  $6^{\circ} \sim 25^{\circ}$  坡耕地共  $2.91 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>, 占该省耕地总面积的 61.0%<sup>[1]</sup>。受亚热带季风气候影响, 夏季降雨量大。当降雨强度超过地面下渗能力时, 则形成地表径流<sup>[2]</sup>。地表径流作为土壤养分流失的驱动力<sup>[3]</sup>, 其溶解和携带的养分物质随径流而迁移, 当径流量过大时, 被携带流失的养分也随之增加。坡耕地易发生水土流失, 导致土壤肥力降低、土地退化严重、作物产量削减等问题<sup>[4]</sup>, 严重制约了贵州省农业可持续发展。同时, 部分区域化肥施用过量, 导致肥料利用率降低, 作物产量不稳定性及不可持续性增加<sup>[5]</sup>。横坡垄作<sup>[6]</sup>、秸秆覆盖<sup>[7]</sup>、等高植物篱<sup>[8]</sup>等保护性耕作措施可降低地表径流, 减少氮磷养分流失, 保持土壤肥力, 为作物高产稳产及可持续生产提供技术保障<sup>[9]</sup>。有研究<sup>[10]</sup>表明, 单施化肥横坡耕作处理稳定性高于单施化肥顺坡处理, 说明耕作措施改变了土壤生态系统的稳定性。以往针对坡耕地的保护性耕作研究中<sup>[6-8]</sup>, 将土壤养分、地表径流、氮磷流失与作物产量稳定性及可持续性相结合的研究并不多见。随着粮食生产成本不断增加<sup>[11]</sup>, 全球气候和环境等问题日益凸显, 粮食生产的可持续性越来越受到人们的关注。如何提高耕地质量使作物高产稳产<sup>[12]</sup>, 是当前解决粮食安全、生态发展等重大社会挑战的关键<sup>[13]</sup>。本研究利用贵州省农业面源污染长期定位监测平台, 探究黄壤坡耕地地区玉米—油菜种植模式下保护性耕作对土壤养分、氮磷流失量及作物产量的影响, 可为贵州坡耕地水土流失治理及农业可持续发展提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于贵安新区湖潮乡湖潮村 ( $106^{\circ}31'52''$  E,  $26^{\circ}28'17''$  N), 地处黔中丘陵区, 属亚热带季风气候, 平均海拔 1 100 m, 年均气温  $14.9^{\circ}\text{C}$ , 2017 和 2018 年平均降水量分别为 920.2 和 852.1 mm, 降雨主要集中于每年 4—9 月份。试验地坡度  $15.1^{\circ}$ , 坡向西南, 土壤类型为黄壤土类黄黏泥土。该试验地为贵州省农业面源污染长期定位监测点, 2007 年开始基础设施建设和匀地, 2008 年开始连续监测。本论文数据为 2016 年 10 月至 2018 年 10 月监测数据。耕层 (0—20 cm) 基础土样有机质 22.37 g/kg, 全氮 1.21 g/kg, 全磷 0.68 g/kg, 有效磷 13.33 g/kg, 有效钾 94.80 g/kg, pH 值为 6.25。

### 1.2 试验设计

本试验种植模式为玉米—油菜, 油菜品种为芥菜型油菜, 玉米品种为金玉 838。试验共设 6 个处理, 3 次重复, 共 18 个小区, 随机区组排列, 小区面积为  $6\text{ m} \times 3.5\text{ m} = 21\text{ m}^2$ 。秸秆覆盖使用前茬作物秸秆; 等高植物篱为沿等高线种植两带黄花菜植物篱, 3 m 一带, 每带两行, 行宽 25 cm, 株距 15 cm, 每穴两株。供试化肥为尿素 (含 N 46.0%)、过磷酸钙 (含  $\text{P}_2\text{O}_5$  12.0%) 和氯化钾 (含  $\text{K}_2\text{O}$  60%); 有机肥为圈肥, 含水率 30%, 含 N 1.29%, 含  $\text{P}_2\text{O}_5$  0.44%,  $\text{K}_2\text{O}$  1.54%, 不同施肥量详见表 1。

### 1.3 样品采集与测定

1.3.1 径流水样 于每次降雨产流后, 记录地表径

流量(mm),并采集水样与泥沙的混合径流样置于塑料瓶速冻密闭保存。采样后抽干并清洗径流池,避免与下次径流样品混合污染。水样测定总氮、总磷,具体方法参照《水和废水监测分析方法》(第 4 版)<sup>[14]</sup>。

表 1 试验处理及施肥量

处理	有机肥/ (t·hm <sup>-2</sup> )	N/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / (kg·hm <sup>-2</sup> )	K <sub>2</sub> O/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
TR <sub>1</sub>	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0	0.0/0.0
TR <sub>2</sub>	5.25/11.3	121.5/228.0	67.5/135.0	30.0/37.5
TR <sub>3</sub>	5.25/11.3	121.5/181.5	45.0/90.0	60.0/88.5
TR <sub>4</sub>	5.25/11.3	121.5/181.5	45.0/90.0	60.0/88.5
TR <sub>5</sub>	5.25/11.3	121.5/181.5	45.0/90.0	60.0/88.5
TR <sub>6</sub>	5.25/11.3	121.5/181.5	45.0/90.0	60.0/88.5

注:种植模式为玉米—油菜;TR<sub>1</sub>:不施肥+顺坡平作;TR<sub>2</sub>:常规施肥+顺坡平作;TR<sub>3</sub>:优化施肥+顺坡平作;TR<sub>4</sub>:优化施肥+横坡垄作;TR<sub>5</sub>:优化施肥+横坡垄作+秸秆覆盖;TR<sub>6</sub>:优化施肥+横坡垄作+秸秆覆盖+等高植物篱。其中,P,K肥作底肥1次施用;玉米N肥分3次施用,底肥20%,第1次追肥30%,第2次追肥50%;油菜N肥分3次施用,底肥20%,第1次追肥40%,第2次追肥40%。

1.3.2 土壤样品 在玉米收获后用梅花法采集0—20 cm多点混合样,每个样品采集量为1 kg,去除根系、石块带回室内风干,研磨并过0.25 mm尼龙筛,待测。共测定全氮、全磷、速效氮、有效磷和有机质5项指标,测试方法均参照《土壤农化分析》(第3版)<sup>[15]</sup>。

1.3.3 作物产量 油菜和玉米于各自收获季将各试验小区作物全部收获,脱粒、晒干后称取风干样品质量,并分别测定含水率,进而计算不同作物各小区地上部分干物质产量。

#### 1.4 计算方法及数据处理

氮、磷素年流失量为累计加和经流水中某形态氮、磷的年流失总量,它等于整个监测周期(一周年)每次经流水中某形态氮、磷浓度与经流水体积乘积之和,其计算公式<sup>[16]</sup>为:

$$P = \sum_{i=1}^n C_i \cdot V_i \quad (1)$$

式中:P——氮素流失量(kg/hm<sup>2</sup>);C<sub>i</sub>——第*i*次经流水中氮的浓度;V<sub>i</sub>——第*i*次经流水的体积;n——经流水样次数。磷素流失量计算方法相同。

作物产量的稳定性和可持续性反映粮食安全的重要指标。作物产量的稳定性高低用稳定性指数(stability index, SI)衡量,SI值越低表明产量越稳定,其计算公式<sup>[5]</sup>为:

$$SI = \sigma / \bar{Y} \quad (2)$$

式中:σ,  $\bar{Y}$ ——不同处理下作物产量的标准差和平均值。下同。

产量可持续性指数(sustainable yield index,

SYI)是衡量系统是否能持续生产的一个重要参数,SYI越大,产量的可持续性越好,其计算公式<sup>[5]</sup>为:

$$SYI = (\bar{Y} - \sigma) / Y_{\max} \quad (3)$$

式中: $\bar{Y}$ ——不同处理下作物产量的最大值。

数据的处理与分析使用Excel和SPSS 17.0,其中差异性采用邓肯新复极差法(Duncan)检验,显著性水平设置为α=0.05。

## 2 结果与分析

### 2.1 径流量及氮、磷流失量分析

同等施肥条件下,保护性耕作TR<sub>4</sub>, TR<sub>5</sub>, TR<sub>6</sub>地表径流量比顺坡平作TR<sub>3</sub>减少59.72%,74.13%,89.18%。其中,TR<sub>6</sub>减少幅率最大,为缓冲径流的最优处理。随着径流量的减少,被携带流失的养分也显著降低。氮流失量方面,横坡垄作TR<sub>4</sub>, TR<sub>5</sub>, TR<sub>6</sub>远小于顺坡平作TR<sub>3</sub>, TR<sub>2</sub>, TR<sub>1</sub>,呈显著差异,TR<sub>6</sub>尤为明显,较TR<sub>5</sub>, TR<sub>4</sub>, TR<sub>3</sub>, TR<sub>2</sub>, TR<sub>1</sub>降低了43.48%,59.38%,82.43%,79.03%,91.77%;磷流失量方面差异不显著,整体表现出横坡垄作流失量小于顺坡平作。表明保护性耕作可减少径流量及氮磷流失量,其中横坡垄作、秸秆覆盖、等高植物篱相结合的综合保护性耕作措施效果最明显(表2)。

表 2 不同处理下径流量及总氮、总磷流失量

处理	径流量/ mm	总氮流失量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	总磷流失量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )
TR <sub>1</sub>	52.46±8.07 <sup>a</sup>	1.58±0.23 <sup>a</sup>	0.59±0.24 <sup>a</sup>
TR <sub>2</sub>	17.07±4.23 <sup>b</sup>	0.62±0.06 <sup>b</sup>	0.26±0.04 <sup>bc</sup>
TR <sub>3</sub>	23.19±1.63 <sup>b</sup>	0.74±0.13 <sup>b</sup>	0.33±0.09 <sup>b</sup>
TR <sub>4</sub>	9.34±3.44 <sup>c</sup>	0.32±0.17 <sup>c</sup>	0.18±0.10 <sup>bc</sup>
TR <sub>5</sub>	6.00±1.35 <sup>c</sup>	0.23±0.06 <sup>c</sup>	0.11±0.04 <sup>bc</sup>
TR <sub>6</sub>	2.51±1.13 <sup>c</sup>	0.13±0.09 <sup>c</sup>	0.05±0.01 <sup>c</sup>

注:表中数据为平均值±标准误差;同列不同字母表示在α=0.05下差异达显著水平。下同。

### 2.2 土壤养分分析

保护性耕作对土壤有机质、氮、磷含量及碱解氮、有效磷含量具有不同程度的提高作用(表3)。同等施肥条件下,尤以TR<sub>5</sub>, TR<sub>6</sub>对全氮含量影响最大,且显著高于其他4个处理,其中,比TR<sub>4</sub>高20.00%,23.67%,比TR<sub>3</sub>高23.53%,27.31%;全磷含量差异不显著,保护性耕作处理TR<sub>4</sub>, TR<sub>5</sub>, TR<sub>6</sub>的全磷含量较顺坡平作TR<sub>3</sub>都略微增加。可见,保护性耕作能有效提高土壤养分,其中横坡垄作、秸秆覆盖、等高植物篱种植相结合的综合保护性耕作措施效果较为明显。

表 3 不同处理下土壤养分含量

处理	全氮/(g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )
TR <sub>1</sub>	1.97±0.12 <sup>c</sup>	0.68±0.07 <sup>c</sup>	0.16±0.09 <sup>b</sup>	6.85±0.47 <sup>b</sup>	17.89±0.93 <sup>b</sup>
TR <sub>2</sub>	2.52±0.24 <sup>b</sup>	1.65±0.22 <sup>a</sup>	5.22±2.64 <sup>a</sup>	50.90±9.35 <sup>a</sup>	31.23±1.76 <sup>a</sup>
TR <sub>3</sub>	2.38±0.06 <sup>b</sup>	1.36±0.05 <sup>b</sup>	3.90±0.30 <sup>ab</sup>	37.81±6.16 <sup>a</sup>	30.29±4.47 <sup>a</sup>
TR <sub>4</sub>	2.45±0.12 <sup>b</sup>	1.43±0.13 <sup>ab</sup>	5.37±4.43 <sup>a</sup>	37.47±9.21 <sup>a</sup>	29.24±5.84 <sup>a</sup>
TR <sub>5</sub>	2.94±0.05 <sup>a</sup>	1.44±0.11 <sup>ab</sup>	3.15±1.61 <sup>ab</sup>	37.95±7.52 <sup>a</sup>	35.79±3.71 <sup>a</sup>
TR <sub>6</sub>	3.03±0.09 <sup>a</sup>	1.55±0.19 <sup>ab</sup>	6.14±3.08 <sup>a</sup>	41.31±4.95 <sup>a</sup>	35.56±1.46 <sup>a</sup>

### 2.3 作物产量及其稳定性、可持续性分析

不同处理下油菜和玉米的产量不同,其稳定性和可持续性也不同(表 4)。

保护性耕作处理与顺坡平作处理下的油菜平均产量差异不显著。各处理之间的玉米平均产量差异显著( $p<0.05$ ),其稳定性和可持续性指数存在明显差值,SI 平均值的大小顺序为:TR<sub>1</sub>>TR<sub>3</sub>>TR<sub>2</sub>>TR<sub>4</sub>>TR<sub>5</sub>>TR<sub>6</sub>,SYI 平均值的大小顺序为:TR<sub>6</sub>>

TR<sub>5</sub>>TR<sub>4</sub>>TR<sub>3</sub>>TR<sub>2</sub>>TR<sub>1</sub>。其中 TR<sub>4</sub>,TR<sub>5</sub> 和 TR<sub>6</sub> 的稳定性和可持续性良好,SI 值分别为 0.082,0.066 和 0.065,SYI 值分别为 0.831,0.838 和 0.854,其产量也较高(均大于 14 000 kg/hm<sup>2</sup>)。从稳产性和产量可持续性方面分析,同等施肥条件下,保护性耕作处理 TR<sub>4</sub>,TR<sub>5</sub>,TR<sub>6</sub> 在产量较高的同时 SI 值最低且 SYI 值最高,表明保护性耕作是实现稳产、可持续性生产的有效耕作方式。

表 4 不同处理下作物产量及其稳定性(SI)、可持续性指数(SYI)

处理	油菜产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )					玉米产量/(kg·hm <sup>-2</sup> )				
	2017 年	2018 年	平均	SI	SYI	2017 年	2018 年	平均	SI	SYI
TR <sub>1</sub>	1 164±339 <sup>b</sup>	152±73 <sup>b</sup>	658±596 <sup>b</sup>	0.906	0.040	2 828±1 134 <sup>a</sup>	3 376±1 096 <sup>a</sup>	3 102±1 042 <sup>a</sup>	0.336	0.457
TR <sub>2</sub>	4 037±589 <sup>a</sup>	3 606±380 <sup>a</sup>	3 822±502 <sup>a</sup>	0.131	0.704	11 339±623 <sup>b</sup>	11 755±2 084 <sup>b</sup>	11 547±1 395 <sup>b</sup>	0.121	0.717
TR <sub>3</sub>	4 090±202 <sup>a</sup>	4 038±398 <sup>a</sup>	4 064±283 <sup>a</sup>	0.070	0.875	14 396±2 353 <sup>a</sup>	16 485±1 218 <sup>a</sup>	15 441±2 029 <sup>a</sup>	0.131	0.767
TR <sub>4</sub>	4 064±277 <sup>a</sup>	4 186±316 <sup>a</sup>	4 125±274 <sup>a</sup>	0.066	0.851	15 578±1 155 <sup>a</sup>	15 032±1 543 <sup>a</sup>	15 305±1 255 <sup>a</sup>	0.082	0.831
TR <sub>5</sub>	4 233±604 <sup>a</sup>	3 650±388 <sup>a</sup>	3 941±555 <sup>a</sup>	0.141	0.709	14 339±779 <sup>a</sup>	14 911±1 227 <sup>a</sup>	14 625±971 <sup>a</sup>	0.066	0.838
TR <sub>6</sub>	3 845±461 <sup>a</sup>	3 695±425 <sup>a</sup>	3 770±405 <sup>a</sup>	0.108	0.814	14 324±840 <sup>a</sup>	14 333±1 221 <sup>a</sup>	14 328±937 <sup>a</sup>	0.065	0.854

### 2.4 作物产量、径流量、氮磷流失量和土壤养分的相关分析

因试验地降雨主要集中在发生于每年 4—9 月,油菜季几乎没有地表径流发生,故本研究对油菜产量与径流量、氮磷流失量的相关性不作分析。将不同处理下的玉米、油菜产量,径流量、氮磷流失量及各土壤养分进行相关分析(表 5)后得出,油菜产量与全氮、全磷、有效磷、有机质呈极显著正相关( $p<0.01$ ),与碱解氮呈显著正相关( $p<0.05$ ),说明油菜产量与 5 种养分因子呈同步增加趋势,碱解氮的增加趋势略低于其他 4 种;玉米产量与径流量、氮、磷流失量呈极显著负相关( $p<0.01$ ),即径流量、氮、磷流失量越小玉米产量越高,与全氮、全磷、有效磷、碱解氮、有机质之间的相关趋势与油菜产量一致。氮流失量与径流量成极显著正相关( $p<0.01$ ),表示径流量的产生伴随氮的流失,与全氮呈极显著负相关( $p<0.01$ ),与碱解氮呈显著负相关( $p<0.05$ ),这说明了氮流失量越大全氮、碱解氮含量越低;磷流失量与径流量成极显著正相关( $p<0.01$ ),相关系数达 0.928,与全磷、有效磷都呈极

显著负相关( $p<0.01$ ),相关系数为-0.753,-0.686。径流量与玉米产量、氮、磷流失量、全氮、有效磷、有机质都呈极显著相关( $p<0.01$ ),相关系数分别为-0.867,0.987,0.928,-0.838,-0.783,-0.865,表明了地表径流的发生对作物产量、氮磷流失量、各土壤养分都有显著影响。

## 3 讨论

贵州地处我国西南喀斯特地区生态脆弱带,由于先天不利的地形条件加上历经数代垦殖和不合理的耕作方式,导致水土流失,影响农业系统的生产功能和可持续发展能力。已有研究表明,保护性耕作可以显著降低坡耕地氮、磷流失量,并保持土壤养分,从而促进作物增产<sup>[10]</sup>。本研究中,顺坡平作处理 TR<sub>1</sub>,TR<sub>2</sub>,TR<sub>3</sub> 产生的径流显著高于保护性耕作处理 TR<sub>4</sub>,TR<sub>5</sub>,TR<sub>6</sub>,这是因为横坡垄作通过改变耕作方向在降雨量过大时促使雨水在横垄土壤中横向运移,增大坡耕地的储水,减小径流量。同等施肥条件下,在横坡垄作的基础上增加秸秆覆盖及等高植物篱等

措施更有利于减少地表径流,地表径流量表现为: $TR_6 < TR_5 < TR_4$ ,其原因是秸秆覆盖降低了降雨对表土的直接打击和分离作用,抑制了径流对土壤表层的直接冲刷,进而降低径流;坡耕地在布设植物篱后,

植物篱及基部前置茎秆的机械阻滞作用截断了连续坡面,削弱了水流的动能,提高了土壤抗蚀性与渗透性等抗蚀性能。可见,横坡垄作+秸秆覆盖+等高植物篱是贵州黄壤坡耕地地区降低地表径流最有效措施。

表 5 作物产量、径流量、总氮磷流失量与土壤养分的相关系数

项目	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$	$X_9$	$X_{10}$
$X_1$	1									
$X_2$	—	1								
$X_3$	—	-0.865**	1							
$X_4$	—	-0.733**	0.938**	1						
$X_5$	—	-0.867**	0.987**	0.928**	1					
$X_6$	0.647**	0.659**	-0.845**	-0.790**	-0.838**	1				
$X_7$	0.872**	0.783**	-0.803**	-0.753**	-0.846	-0.652**	1			
$X_8$	0.841**	0.735**	-0.752**	-0.686**	-0.783**	0.554*	0.944**	1		
$X_9$	0.581*	0.542*	-0.481*	-0.428	-0.565*	0.421	0.579*	0.536*	1	
$X_{10}$	0.789**	0.775**	-0.866**	-0.812**	-0.865**	0.780**	0.794**	0.811**	0.400	1

注:“+”表示正相关(省略)，“-”表示表示负相关; \* 和 \*\* 分别表示相关系数达显著水平( $p < 0.05$ )、极显著水平( $p < 0.01$ )。 $X_1$  表示油菜产量, $X_2$  表示玉米产量, $X_3$  表示氮流失量, $X_4$  表示磷流失量, $X_5$  表示径流量, $X_6$  表示全氮含量, $X_7$  表示全磷含量, $X_8$  表示有效磷含量, $X_9$  表示碱解氮含量, $X_{10}$  表示有机质含量。

保护性耕作能有效保持氮和磷等土壤养分。不同处理间氮流失量规律基本与径流量保持一致,横坡垄作下的氮流失量显著小于顺坡平作,随着径流量的减小,氮流失得到有效控制。不同处理对磷流失量的影响也基本表现为实施保护性耕作的处理流失量较小,但处理间的差异不如氮流失量显著,这与马琳琳等<sup>[17]</sup>的研究一致,原因是土壤对磷的固持能力较氮的强。本研究结果表明,同等施肥条件下,保护性耕作处理的全氮含量显著高于顺坡平作,尤其是实施了秸秆覆盖和等高植物篱种植技术的处理,这与前人研究结果相同<sup>[18]</sup>。

保护性耕作能促进作物高产和稳产<sup>[10]</sup>。优化施肥处理下玉米产量显著高于不施肥及常规施肥处理,而同等施肥条件下不同耕作处理之间玉米产量无显著差异,但从产量稳定指数及可持续性指数的表征系数来看,横坡垄作、横坡垄作+秸秆覆盖、横坡垄作+秸秆覆盖+等高植物篱处理的稳定性远远大于顺坡平作处理,可持续性指数也明显高于顺坡平作处理。说明优化施肥是提高作物产量最有效的方式,而秸秆覆盖、等高植物篱种植技术措施是影响作物产量稳定性和可持续性的主导因素。耕地是农业的基础,耕作技术与耕地质量是农业可持续发展的关键。秸秆覆盖条件下土壤养分含量增加,恒温保墒,能有效提高作物产量<sup>[19]</sup>。等高植物篱通过利用其根部缓减水流速度,增加径流入渗,提高土壤含水量,促进土壤养分良性循环,结合横坡垄作及秸秆覆盖,实现作物高产

稳产及可持续生产<sup>[8-9,19]</sup>。综上,横坡垄作、秸秆覆盖、等高植物篱种植相结合的综合保护性耕作措施对减少径流量、氮磷流失量、提高作物产量的效能大于单项保护性耕作措施,杨爱民等<sup>[20]</sup>的研究结果也表明垄作与植物篱相结合的处理对减小地表径流量和作物增产的效果优于无等高植物篱的处理。

## 4 结论

与顺坡平作相比,横坡垄作、秸秆覆盖、等高植物篱种植等保护性耕作能有效降低坡耕地地表径流、降低氮磷流失量,防治坡耕地水土流失,改善土壤肥力,提高作物产量,为稳定、持续增产奠定基础,其中横坡垄作+秸秆覆盖+等高植物篱效能最显著,是目前西南地区坡耕地农作物生产最适宜的耕作方式。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 林昌虎,解德蕴,涂成龙,等. 贵州山区坡耕地综合利用与整治[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 211-213.
- [2] 朱燕琴,赵志斌,齐广平. 黄土丘陵区植被类型和降雨对坡面侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 9-16.
- [3] Ramos M C, Martnez-Casasnovas J A. Nutrient losses by runoff in vineyards of the Mediterranean Alt Penedès region(NE Spain)[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2006, 113(1): 356-363.
- [4] 尹迪信,唐华彬,朱青,等. 坡耕地不同水土保持措施下的养分平衡和土壤肥力变化. 水土保持学报, 2002, 16(1): 72-75.

- 石漠化等级植物群落物种组成和多样性特征[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2015, 37(6): 48-53.
- [15] 俞月凤, 何铁光, 杜虎, 等. 桂西北喀斯特地区不同退化程度植被群落物种组成及多样性特征[J]. 广西植物, 2019, 39(2): 178-188.
- [16] 李晓娜, 熊康宁, 陈浒, 等. 黔东南施秉白云岩喀斯特地区生物多样性与世界遗产价值[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版, 2010, 28(3): 13-18.
- [17] 汤晓辛, 张潮, 商传禹. 世界遗产地施秉云台山白云岩喀斯特野生种子植物的区系[J]. 分子植物育种, 2017, 15(5): 1986-1993.
- [18] 李世奇, 熊康宁, 苏孝良, 等. 世界自然遗产提名地施秉喀斯特地貌及其演化[J]. 贵州师范大学学报:自然科学版, 2012, 30(3): 12-17.
- [19] 马克平. 生物群落多样性的测度方法:  $\alpha$  多样性的测度方法(上)[J]. 生物多样性, 1994, 2(3): 162-168.
- [20] 马克平, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法:  $\alpha$  多样性的测度方法(下)[J]. 生物多样性, 1994, 2(4): 231-239.
- [21] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [22] 田迅, 高凯, 张丽娟, 等. 坡位对土壤水分及植被空间分布的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 12-16.
- [23] 彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等. 喀斯特常绿落叶阔叶混交林植物与土壤地形因子的耦合关系[J]. 生态学报, 2010, 30(13): 3472-3481.
- [24] 沈泽昊, 张新时, 金义兴. 三峡大老岭森林物种多样性的空间格局分析及其地形解释[J]. 植物学报, 2000, 42(6): 620-627.
- [25] Zhang Jintun, Zhang Feng. Ecological relations between forest communities and environmental variables in the Lishan Mountain Nature Reserve, China [J]. African Journal of Agricultural Research, 2011, 6(2): 248-259.
- [26] Tavili A, Jafari M. Interrelations between plants and environmental variables [J]. International Journal of Environmental Research, 2009, 3(2): 239-246.
- [27] 黄甫昭, 王斌, 丁涛, 等. 弄岗北热带喀斯特季节性雨林群丛数量分类及与环境的关系[J]. 生物多样性, 2014, 22(2): 157-166.
- [28] 王世雄, 王孝安, 李国庆, 等. 陕西子午岭植物群落演替过程中物种多样性变化与环境解释[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1638-1647.
- [29] 袁铁象, 张合平, 欧芷阳, 等. 地形对桂西南喀斯特山地森林地表植物多样性及分布格局的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2803-2810.
- [30] 欧芷阳, 苏志尧, 袁铁象, 等. 土壤肥力及地形因子对桂西南喀斯特山地木本植物群落的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3672-3681.
- [31] 熊斌梅, 雷耘, 汪正祥, 等. 地形对七姊妹山自然保护区植物丰富度及分布格局的影响[J]. 西北植物学报, 2016, 36(11): 2307-2313.

(上接第 20 页)

- [5] 黄兴成, 石孝均, 李渝, 等. 基础地力对黄壤区粮油高产、稳产和可持续生产的影响. 中国农业科学, 2017, 50(8): 1476-1485.
- [6] 彭石磊, 何丙辉, 王润泽, 等. 自然降雨条件下不同施肥模式和耕作方式对坡耕地紫色土肥力质量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(4): 318-326.
- [7] Shelton D P, Dickey E C, Kachman S D, et al. Corn residue cover on the soil surface after planting for various tillage and planting systems[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1995, 50(4): 399-404.
- [8] 朱青, 王兆骞, 尹迪信. 贵州坡耕地可持续管理研究[J]. 贵州科学, 2007, 25(S1): 494-501.
- [9] 胡岗, 秦松, 范成五, 等. 3 种不同管理措施黄壤坡耕地的有机碳与氮养分[J]. 西南农业学报, 2015, 28(6): 2630-2636.
- [10] 田太强. 施肥与耕作对紫色土坡耕地地表径流氮磷流失及作物产量的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [11] 付恭华. 中国粮食生产的多维成本研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [12] 徐明岗, 卢昌艾, 张文菊, 等. 我国耕地质量状况与提升对策[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(7): 8-14.
- [13] Ghimire R, Ghimire B, Mesbah A O, et al. Current status, opportunities, and challenges of cover cropping for sustainable dryland farming in the Southern Great Plains[J]. Journal of Crop Improvement, 2018, 32(4): 1-20.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 刘宏斌, 邹国元, 范先鹏, 等. 农田面源污染监测方法与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [17] 马琳琳, 安娟, 刘前进. 横坡垄作壤中流条件下垄高对径流态氮磷流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 56-60.
- [18] 彭石磊. 自然降雨条件下长期施肥和耕作对坡耕地紫色土壤肥力的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [19] 罗益. 不同耕作模式下黄壤坡耕地地表径流氮素流失特征研究[D]. 贵州 贵阳: 贵州大学, 2015.
- [20] 杨爱民, 沈昌蒲, 刘福, 等. 坡耕地垄作区田水土保持效益的研究[J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 52-58.