

耕作措施对坡耕地红壤地表径流氮磷流失的影响

毛妍婷¹, 刘宏斌², 郭树芳¹, 杜彩艳¹, 杨艳鲜¹,
金桂梅¹, 陈安强¹, 雷宝坤¹, 刘晓冰³

(1. 云南省农业科学院农业环境资源研究所, 昆明 650205;

2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 云南农业大学烟草学院, 昆明 650000)

摘要: 云南山地面积约占全省土地总面积的 94%, 特殊的地形特征, 极易引发坡面土壤侵蚀和养分流失, 严重影响了农业可持续生产。采取有效的农艺措施来减少坡耕地土壤养分流失是十分有必要的。为此, 通过 4 年定位试验对顺坡(2 组处理)、横坡(2 组处理)2 种耕作方向的复合农艺措施处理进行研究。结果表明: 云南坡地红壤的径流时间主要集中在 6—9 月, 且产流雨量占年降雨量的 65.62%~75.82%。产流雨量与年降雨量呈现一致趋势。径流量和产流雨量呈线性关系($R_{\text{NVF}}^2 = 0.5977$, $R_{\text{OVF}}^2 = 0.4151$, $R_{\text{OHF}}^2 = 0.3782$, $R_{\text{OHFR}}^2 = 0.3355$), 其相关性大小顺序为顺坡处理 > 横坡处理, 不施肥处理 > 施肥处理, 覆膜处理 > 揭膜处理 ($P < 0.01$)。大雨(25~49.9 mm)和暴雨(≥ 50 mm)造成了年度大部分径流和养分的流失。横坡垄作组处理产生地表径流(177.13 ± 28.87)~(182.28 ± 33.75) mm, 径流中总氮流失量(7.66 ± 2.51)~(7.85 ± 1.92) kg/hm², 总磷流失量为(0.91 ± 0.26)~(1.09 ± 0.27) kg/hm², 与顺坡垄作 OVF(常规处理)相比径流和养分极显著减少了 49.57%~52.13%, 33.16%~53.88% ($P < 0.01$)。不同耕作措施下, 复合耕作模式(优化施肥+横坡垄作+旺长期揭膜)拦截径流和养分流失的效果最好。RDA 分析结果发现, 与降雨量相比较, 径流量是影响氮磷养分变化的主要环境因子 ($P < 0.01$)。径流量与氮养分(NH₄⁺-N 除外)流失量的相关性高于与磷的相关性, 表明氮比磷更容易随径流流失。顺坡处理 NVF 和 OVF 与环境因子径流量和氮磷养分流失量 TN、TDN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、TP、TDP 呈正相关, 横坡处理 OHF 和 OHFR 与其呈负相关。

关键词: 耕作措施; 坡耕地; 地表径流; 氮磷流失; 红壤

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2020)05-0026-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.05.004

Effects of Tillage Measures on Nitrogen and Phosphorus Loss from Surface Runoff in Red Soil on Slope Farmland

MAO Yanting¹, LIU Hongbin², GUO Shufang¹, DU Caiyan¹,

YANG Yanxian¹, JIN Guimei¹, CHEN Anqiang¹, LEI Baokun¹, LIU Xiaobin³

(1. Agricultural Environment and Resources Institute of Yunnan Academy of Agricultural Sciences,

Kunming 650205; 2. Agricultural Resources and Regional Planning Institute of Chinese Academy of

Agricultural Sciences, Beijing 100081; 3. College of Tobacco, Yunnan Agricultural University, Kunming 650000)

Abstract: Mountainous area accounts for about 94% total land area of Yunnan province. The special topographical characteristics can easily cause slope soil erosion and nutrient loss, which seriously affects agricultural sustainable production. It is necessary to take effective agronomic measures to reduce soil nutrient loss in sloping land. Based on the 4-year experiment, compound agronomic measures for two tillage directions, vertical ridge (VR) group (2 treatments) and horizontal ridge (HR) group (2 treatments) were in location monitoring. Results showed that runoff generation time of red soil on slope land in Yunnan was mainly from June to September, and the rainfall of producing runoff accounted for 65.62% ~ 75.82% of the annual precipitation. The rainfall of producing runoff had same trend with annual precipitation. The relationship between rainfall of producing runoff and runoff depth were linear ($R_{\text{NVF}}^2 = 0.5977$, $R_{\text{OVF}}^2 = 0.4151$, $R_{\text{OHF}}^2 =$

收稿日期: 2020-02-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(31560583, 31760610, 31960635); 云南省自然科学基金面上项目(2019); 农业农村部面源污染管控监测网

第一作者: 毛妍婷(1982-), 女, 副研究员, 主要从事植物营养和农业环境保护研究。E-mail: ytmaokm@163.com

通信作者: 雷宝坤(1976-), 男, 研究员, 主要从事土壤碳氮养分循环和农业环境保护研究。E-mail: bklei@163.com

0.378 2, $R_{\text{OHFR}}^2 = 0.335 5$). The correlation order was that vertical ridge (VR) group was greater than horizontal ridge (HR) group, non-fertilizer application treatment was greater than fertilizer application treatment, and mulching treatment was greater than the mulching removal treatment ($P < 0.01$). Heavy rain and rainstorm caused most of the annual runoff and nutrient loss. Surface runoff produced by HR tillage was (177.13 ± 28.87) to (182.28 ± 33.75) mm, TN (7.66 ± 2.51) to (7.85 ± 1.92) kg/hm², TP (0.91 ± 0.26) to (1.09 ± 0.27) kg/hm². Average reduction rate (ARR, %) of runoff and nutrients were 49.57% to 52.13% and 33.16% to 53.88% significantly, compared with conventional treatment (OVF) of VR tillage group ($P < 0.01$). Under different tillage measures, OHFR had best effect of intercepting runoff and nutrient losses. The results of RDA analysis show that compared with rainfall, runoff was the main environmental factor affecting the change of nitrogen and phosphorus nutrient ($P < 0.01$). The correlation between runoff and the nitrogen nutrient loss (except $\text{NH}_4^+ - \text{N}$) was higher than that of phosphorus, which indicating nitrogen was more easily loss with runoff than phosphorus. NVF and OVF treatments of vertical ridge (VR) group were positively correlation with environmental factor runoff and nutrient losses of TN, TDN, $\text{NO}_3^- - \text{N}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TP, TDP, while OHF and OHFR treatments of horizontal ridge (HR) group were negatively correlation with it.

Keywords: tillage measures; sloping farmland; surface runoff; nitrogen and phosphorus loss; red soil

云南地形地势复杂,坡耕地面积比重大,耕地资源稀缺。山地面积约占全省土地总面积(38.32 万 km²)的 94%,坡耕地占耕地面积(8.20 万 km²)的 80.61%,可供耕作的土地资源相对不足^[1]。由于云南地形的特殊性,使得坡地成为作物种植的“主战场”。据统计^[2],云南省 57.4%的种植发生在坡地上。农户通过种植烟草、甘蔗、香蕉等经济作物来增加收益。然而,2015 年土壤侵蚀调查^[1]结果显示,云南省中度以上水土流失面积主要分布在坡耕地上。特殊的地形特征,加之降雨强度大、分布集中、密集的人类活动和不合理的生产方式,极易引发坡面土壤侵蚀和养分流失,严重影响了农业可持续发展。同时,因降雨引发的径流进入接纳水体造成水体氮、磷富集^[3],使得农业氮、磷养分流失成为最大的面源污染物来源^[4]。

径流、泥沙形成和养分的损失通常归因于降雨、土壤性质、土地利用/土地覆盖和耕作方式等。已有研究^[4]表明,降雨是引发径流的关键因素,而不同强度等级的降雨严重影响土壤侵蚀和养分流失。通过选择合适的耕作方式,如改变起垄方向、设置生物屏障、添加覆盖物等,可在较大程度上改善土壤理化性质,有效控制土壤侵蚀^[5-8]。其中,耕作措施的横向起垄种植是最有效的方法之一^[9]。因此,通过以起垄方向为主导,复合其他耕作措施,最大化综合农艺措施效果,减少土壤退化是保护坡耕地的主旨。然而,大多数相关研究^[5-8,10]只关注单一措施的作用(如栽培措施、覆盖措施或施肥管理),较少报道结合起垄方向、覆盖措施和施肥管理的综合耕作措施对红壤坡地径流及养分流失的影响。因此,2014—2017 年本试验连续对云南省曲靖市马龙县红壤坡耕地进行了定位监测,量化了烤烟综合耕作措施对红壤坡耕地径流

量及氮、磷的流失。以期找到优化坡地作物的耕作措施,减少农业面源污染,保障坡耕地农业可持续发展。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

小区选址为典型的云南山原红壤坡耕地,地址位于云南曲靖马龙市旧县,气候属低纬度高原季风气候,年平均气温 13.6 °C,年均降水量 1 001.8 mm(65%~75%的降雨量集中在 6—9 月)。当地主要种植模式为烤烟绿肥轮作,烤烟种植季恰好是水土流失严重的雨季,因此采样时间主要集中在这个时段。0—25 cm 土壤耕层,容重为 1.19 g/cm³,pH 为 5.64,有机质、全氮、全磷和全钾含量分别为 20.18,1.14,0.60,18.20 g/kg。

1.2 试验设计

根据当地种植习惯选择经济作物烟草,品种为“云烟 85”,设置 6 种处理,3 次重复,共 18 个小区,小区坡向东南,坡度为 8.5°。每个小区长 8 m × 宽 4 m = 32 m²,试验地四周由水泥砖块砌成,小区下部连接径流/泥沙收集池(尺寸为 2 m × 1 m × 0.75 m),收集整个雨季每个小区流失的径流和泥沙。4 种处理(图 1)分别为:处理 1 不施肥+顺坡垄作+覆膜(NVF),处理 2 优化施肥+顺坡垄作+覆膜(OVF),处理 3 优化施肥+横坡垄作+覆膜(OHF),处理 4 优化施肥+横坡垄作+揭膜(OHFR)。烟草种植密度为 12 000 株/hm²,种植方式为行距 133 cm,株距 65 cm,即每个小区种植烟草 36 株。前 3 个处理为顺坡组(VR),3 列 12 株;后 3 个处理为横坡组(HR),6 列 6 株。5 月中旬烟草移栽后,垄台覆盖黑色塑料薄膜。45 天后进入旺长期,OHFR 处理将膜揭开,田间管理按照当地常规管理进行,试验始于每年 5 月中旬,9 月下旬结束,适时收获,试验时间

2014—2017 年。

肥料(N-P₂O₅-K₂O)由牛粪(1-0.5-1)、烟草专用的复合肥料(18-5-22)、过磷酸钙(0-16-0)和硝酸钾(13.5-0-44.5)组成,具体见表 1。各处理各小区肥料称量混匀后以底肥一次性穴施于烟草植株的根部周围。

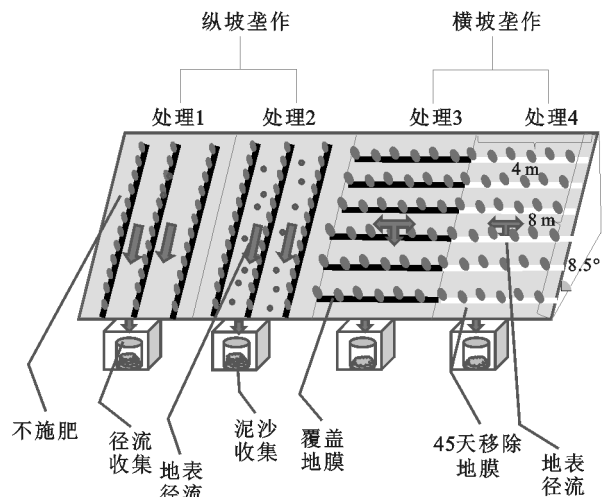


图 1 试验处理示意

表 1 试验处理

处理	处理组	处理描述	肥料投入/(kg·hm ⁻²)		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
NVF	VR	不施肥+顺坡垄作+覆膜	0	0	0
OVF	VR	优化施肥+顺坡垄作+覆膜	122	131	240
OHF	HR	优化施肥+横坡垄作+覆膜	122	131	240
OHFR	HR	优化施肥+横坡垄作+旺长期揭膜	122	131	240

1.3 降水量观测

用雨量器测量降水量,降雨时,以前日 9:00 至监测当日 9:00 为 24 h 降水量,做好记录后将雨量器中的雨水倒掉放回原位,同时结合参考当地气象观测站的降雨资料。试验区 2014—2017 年各月降水量分布见图 2。

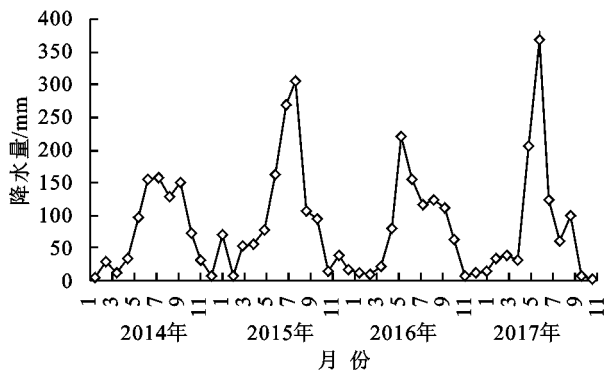


图 2 2014—2017 年各月降水量分布

1.4 样品采集与分析

将降雨后收集的 12 个地表径流样品密封在标记的塑料瓶中,立即冷冻于 7 天内进行分析。排干径流池中的水,称重清理泥沙,为下次样品收集作准备,直至 9 月下旬烟草采收结束。将径流水中的颗粒物过滤,过滤后的径流水用于测定总氮(TN)、总磷(TP)

的浓度,再经 0.45 μm 滤膜过滤后用 AA3 流动分析仪测定硝氮(NO₃⁻-N)、铵氮(NH₄⁺-N)、可溶态氮(TDN)和可溶态磷(TDP)的浓度。颗粒态氮(PN)和磷(PP)的浓度则由径流中总氮(TN)、总磷(TP)的浓度减去可溶态氮(TDN)和可溶态磷(TDP)的浓度求得。对地表径流进行总氮(碱性过硫酸钾消解紫外分光光度计法)、可溶性总氮(碱性过硫酸钾消解紫外分光光度计法)、硝态氮(紫外分光光度计法)、铵态氮(纳氏试剂分光光度法)、总磷(钼酸盐比色法)、可溶性总磷(钼酸盐比色法)^[11]的测定。

将每次收集的地表径流体积分别乘以氮和磷的浓度除以小区面积,以确定每次径流带走的氮磷养分流失量,对每次流失量进行加和计算得到整个年度周期的氮磷流失量。径流、养分平均减少率(%)=(平均值_{对照}-平均值_{其他试验处理})/平均值_{对照}×100%。采用单因素方差分析来检验 4 种处理年产流雨量下平均径流量,养分流失量是否存在显著性差异(P<0.05),平均径流量,养分流失量减少率是否存在显著性差异(P<0.05),RDA 用于揭示主要环境因子对养分流失影响的解释度,数据分析使用 SPSS 18 和 Canoco 5 软件。

2 结果与分析

2.1 试验区降雨特征分析

由图 2 和表 2 可知,云南坡地红壤的径流时间主要集中在 6—9 月,且产流雨量占年降雨量的 65.62%~75.82%。径流降雨量与年降雨量呈现一致的趋势,即年降雨量大产流雨量大。2015 年年降雨量 1 257 mm(产流降雨量 738.8 mm)高于 2017 年 1 000.3 mm(产流降雨量 706.5 mm)。通过对 4 年 32 次产流降雨量进行等级划分,可以折算出不同等级雨量在产流雨量中的占比。4 年中小雨的降雨次数为 177 次,占总降雨量次数的 69%,占产流雨量为 19%;中雨的降雨次数为 48 次,占总降雨量次数的 19%,占产流雨量为 30%;大雨的降雨次数为 29 次,占总降雨量次数的 11%,占产流雨量为 41%;暴雨的降雨次数为 4 次,占总降雨量次数的 2%,占产流雨量为 10%。由此看出,大雨占产流雨量 41%最高,暴雨占产流雨量 10%最低;小雨占总降雨量次数 69%最高,暴雨占总降雨量次数 2%最低。

2.2 产流雨量对不同处理径流量的影响

由图 3 可知,2014—2017 年不同处理产流雨量的变化范围为 575~738.8 mm。在各处理中,优化施肥+横坡垄作+旺长期揭膜(OHFR)在不同年份径流量均为最低,其变化范围为(177.13±28.87) mm。与其他各处理 NVF、OVF、OHF 相比,其年均径流量分别减少了 2.83%,51.00%,52.59%,通过对横坡组和顺坡组的径流量进行方差分析发现,与 OVF(常

规处理)相比,横坡组处理极显著降低了 49.57%~ 52.13%年径流量的产生($P<0.01$)。

表 2 2014—2017 年不同等级产流雨量及年降雨量

年份	产流 雨量/mm	小雨 (<10 mm)		中雨 ($10\sim24.9$ mm)		大雨 ($25\sim49.9$ mm)		暴雨 (≥ 50 mm)		年降 雨量/mm
		次数/ 次	产流 雨量/mm	次数/ 次	产流 雨量/mm	次数/ 次	产流 雨量/mm	次数/ 次	产流 雨量/mm	
		2014	39.0	2	4.0			1	35.0	
	36.0	6	10.4			1	25.6			
	74.9	8	14.9	1	23.4	1	36.6			
	40.2	4	13.4	2	26.8					
	84.5	6	11.9			2	72.6			877.3
	36.7	4	18.5	1	18.2					
	85.7	7	27.9	2	26.8	1	31.0			
合计	178.0	14	34.3	3	64.8	2	78.9	0	0	
	575.0	51	135.3	9	160.0	8	279.7			
	85.9	3	6.1	1	11.0	2	68.8			
	58.5	3	3.5					1	55.0	
	138.9	2	11.9	2	30.5	1	38.5	1	58.0	
2015	7.0	2	7.0							
	83.4	6	11.8					1	71.6	1257.0
	112.5	4	7.4	5	76.3	1	28.8			
	131.1	7	27.5	3	37.7			1	65.9	
	121.5	4	4.3	2	33.8	3	83.4			
合计	738.8	31	79.5	13	189.3	7	219.5	4	250.5	
	27.1	2	4.4	1	22.7					
	140.4	4	10.2	1	17.6	3	112.6			
	68.4	5	11.4	3	57.0					
2016	64.8	4	27.0			1	37.8			
	66.3	6	25.1	2	41.2					938.3
	24.8	11	24.8							
	47.3	8	20.4	2	26.9					
	166.9	9	28.2	3	45.3	2	93.4			
合计	606.0	49	151.5	12	210.7	6	243.8	0	0	
	93.1	6	22.3	3	44.3	1	26.5			
	90.6	5	18.5	2	35.8	1	36.3			
	116.1	5	15.1	3	52.5	1	48.5			
2017	183.7	5	16.6	1	15.6	3	151.5			
	39.9	5	16.8	2	23.1					1000.3
	21.7	6	21.7							
	39.3	6	3.4	2	35.9					
	122.1	8	24.4	1	18.3	2	79.4			
合计	706.5	46	138.8	14	225.5	8	342.2	0	0	

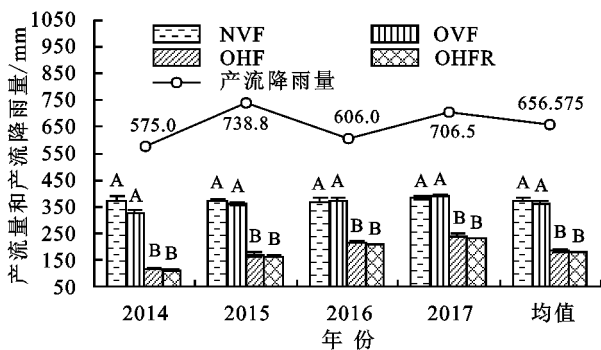


图 3 2014—2017 年不同处理径流量

由图 4 可知,4 年试验中观测到产生径流的降雨量(产流雨量)共有 32 次。通过对比产生径流的累计降雨量发现,径流量和产流雨量呈线性关系,顺坡组 2 个处理的拟合方程分别为 $y_{NVF} = 0.1368x + 35.479$ ($R^2 = 0.5977, P < 0.01$), $y_{OVF} = 0.1179x + 35.51$ ($R^2 = 0.4151, P < 0.01$);横坡组 2 个处理的拟合方程分别为 $y_{OHF} = 0.1477x + 10.659$ ($R^2 = 0.3782, P < 0.01$), $y_{OHFR} = 0.1328x + 11.246$ ($R^2 = 0.3355, P < 0.01$)。产流期间,顺坡组 78%~84%径流量均集中在 40~55 mm 区域范围;横坡组 78%~88%的

径流量均集中在 10~30 mm 区域范围。顺坡组径流比横坡组径流集中范围高出 25~30 mm。在相同产流雨量下,组内处理径流无显著性差异,组间差异极显著($P<0.01$)。通过相关性系数 R^2 值比较可看出,产流雨量与径流量的相关性为处理 NVF>OVF>OHF>OHFR,即顺坡处理大于横坡处理,不施肥处理大于施肥处理,覆膜处理大于揭膜处理。

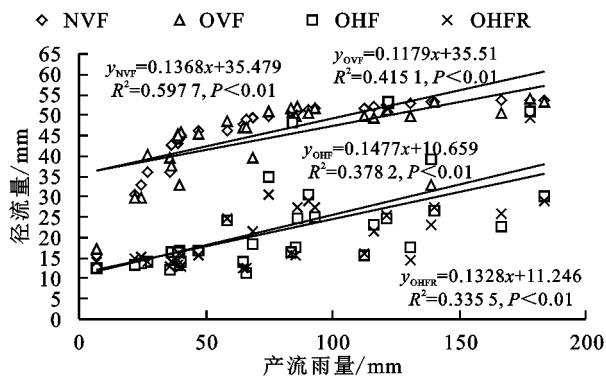


图 4 产流雨量与径流量的关系

表 3 2014—2017 年不同处理地表径流量及径流中氮磷流失浓度

处理组	处理	径流量/ mm	TN 流失浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TDN 流失浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 流失浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP 流失浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TDP 流失浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
VR	NVF	$373.64 \pm 5.43\text{A}$	$4.84 \pm 2.43\text{A}$	$3.50 \pm 1.84\text{A}$	$2.28 \pm 1.63\text{A}$	$0.52 \pm 0.45\text{A}$	$0.64 \pm 0.32\text{A}$	$0.35 \pm 0.14\text{A}$
	OVF	$361.47 \pm 10.05\text{A}$	$4.04 \pm 1.06\text{A}$	$3.07 \pm 0.76\text{A}$	$2.03 \pm 0.53\text{A}$	$0.38 \pm 0.22\text{A}$	$0.56 \pm 0.24\text{A}$	$0.27 \pm 0.11\text{A}$
HR	OHF	$182.28 \pm 33.75\text{B}$	$4.15 \pm 1.27\text{A}$	$3.06 \pm 0.64\text{A}$	$1.89 \pm 0.51\text{A}$	$0.42 \pm 0.23\text{A}$	$0.59 \pm 0.21\text{A}$	$0.35 \pm 0.11\text{A}$
	OHFR	$177.13 \pm 28.87\text{B}$	$4.18 \pm 1.74\text{A}$	$3.14 \pm 0.96\text{A}$	$1.85 \pm 0.57\text{A}$	$0.50 \pm 0.41\text{A}$	$0.59 \pm 0.28\text{A}$	$0.33 \pm 0.12\text{A}$

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同大写字母表示不同处理之间在 0.01 水平的差异显著性($P<0.01$);NVF 为对照处理。下同。

2.4 不同处理径流量对氮磷流失量的影响

由表 4 可知,4 年间,顺坡组种植产生地表径流(361.47 ± 10.05)~(373.64 ± 5.43) mm,而横坡组种植产生地表径流(177.13 ± 28.87)~(182.28 ± 33.75) mm,2 组氮磷养分流失情况和径流类似,即高径流情况下养分流失高,顺坡组养分流失量约是横坡组的 2 倍。不同耕作方式下径流中磷的流失量都低于氮。与 NVF 相比,顺坡组径流减少了 3.25%,养分流失

表 4 2014—2017 年不同处理地表径流及径流中氮磷流失量

处理组	处理	径流量/ mm	TN 流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	TDN 流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	TP 流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	TDP 流失量/ ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
VR	NVF	$373.64 \pm 5.43\text{A}$	$18.03 \pm 3.11\text{A}$	$12.85 \pm 1.53\text{A}$	$8.36 \pm 1.44\text{A}$	$1.73 \pm 0.79\text{A}$	$2.39 \pm 0.74\text{A}$	$1.30 \pm 0.47\text{A}$
	OVF	$361.47 \pm 10.05\text{A}$	$14.47 \pm 2.41\text{A}$	$10.98 \pm 1.11\text{A}$	$6.97 \pm 1.23\text{A}$	$1.31 \pm 0.51\text{A}$	$1.98 \pm 0.56\text{A}$	$0.96 \pm 0.29\text{A}$
HR	OHF	$182.28 \pm 33.75\text{B}$	$7.85 \pm 1.92\text{B}$	$5.79 \pm 1.52\text{B}$	$3.63 \pm 1.27\text{B}$	$0.66 \pm 0.24\text{B}$	$1.09 \pm 0.27\text{B}$	$0.64 \pm 0.14\text{B}$
	OHFR	$177.13 \pm 28.87\text{B}$	$7.66 \pm 2.51\text{B}$	$5.71 \pm 1.56\text{B}$	$3.46 \pm 1.15\text{B}$	$0.74 \pm 0.15\text{B}$	$0.91 \pm 0.26\text{B}$	$0.59 \pm 0.01\text{B}$

2.5 环境因子与氮磷流失量的关系

选取 2014—2017 年雨季径流产生时期,不同处理下流失的各种形态氮磷养分数据进行冗余分析(RDA)。冗余分析是一种基于排序技术的线性分析

2.3 不同处理径流中氮磷流失浓度的变化

4 年间,顺坡组种植产生地表径流(361.47 ± 10.05)~(373.64 ± 5.43) mm,而横坡组种植产生地表径流(177.13 ± 28.87)~(182.28 ± 33.75) mm,顺坡组径流量约是横坡组的 2 倍(表 3)。在 2 组径流量变化极显著($P<0.01$)的情况下,2 组氮磷流失浓度的变化则不显著($P>0.01$)。流失养分浓度范围分别为 TN (4.04 ± 1.06)~(4.84 ± 2.43) mg/L ,TDN (3.06 ± 0.64)~(3.50 ± 1.84) mg/L , $\text{NO}_3^- - \text{N}$ (1.85 ± 0.57)~(2.28 ± 1.63) mg/L , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ (0.38 ± 0.22)~(0.52 ± 0.45) mg/L ,TP (0.56 ± 0.24)~(0.64 ± 0.32) mg/L 和 TDP (0.27 ± 0.11)~(0.35 ± 0.14) mg/L 。与 NVF 相比,径流减少了 3.25%~52.65%,不同形态氮浓度减少了 2.74%~25.51%,磷浓度减少了 4.63%~22.12%。与 OVF(常规处理)相比,横坡组径流极显著减少了 49.57%~52.13%($P<0.01$),除 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度有所降低,其他处理各形态氮磷浓度都有所增加。

率降低了 13.73%~25.47%;横坡组径流极显著减少了 51.29%~52.65%($P<0.01$),养分流失率极显著降低了 38.63%~56.63%($P<0.01$)。与 OVF(常规处理)相比,横坡组径流极显著减少了 49.57%~52.13%($P<0.01$),养分流失率极显著降低了 33.16%~53.88%($P<0.01$)。在所有处理中 OHFR 处理减少径流和养分($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 除外)流失幅度最大,径流减少了 51.00%,其中 TP 流失量最高减少为 53.88%。

方法,能够从统计学角度评价一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系,其优势在于能够独立保持各个环境变量因子对养分流失量的贡献率,能有效地对多个解释变量进行统计检验^[12],其二维排序图直

观地展现了流失的各种形态养分与环境变量构成之间的关系。因此本研究采用冗余分析法来研究环境影响因子与氮磷养分流失量的关系。

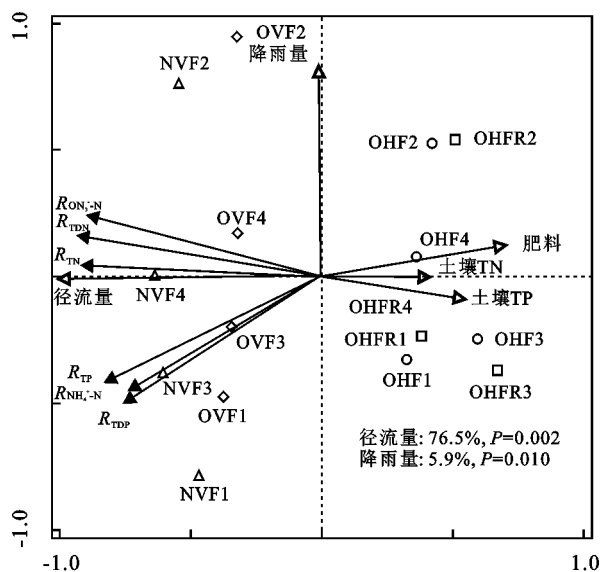
对 6 种氮磷养分流失量及 5 个环境因子进行 DCA 分析,结果中 Lengths of gradient 第 1 轴均小于 3.0,适合进行 RDA 分析。Monte Carlo 置换检验所有排序轴均达到显著水平($P < 0.05$),说明排序效果理想。表明排序轴与环境因子间线性结合的程度,较好地反映了处理与环境之间的关系。由表 5 可知,轴 1、轴 2、轴 3、轴 4 的特征值分别为 0.784 9,0.077 3,0.019 0,0.005 7,环境因子轴与处理排序轴间的相关系数为 0.954 8,0.945 6,0.825 6,0.588 4,所选择的 5 个环境因子(径流量、降雨量、肥料、土壤氮和土壤磷的含量)共解释了 88.70% 的处理变化信息。前 2 轴累计解释了 86.22% 的处理变化信息和 97.12% 的处理与环境因子变化关系信息。利用向前引入法对环境因子进行逐步筛选,结果显示径流和降雨是影响氮磷养分变化的显著环境因子($P < 0.05$),其他环境因子肥料、土壤氮和土壤磷的含量不显著($P > 0.05$)。

表 5 不同处理 RDA 分析的统计特征

轴	特征值	处理与环境因子相关性	处理变化累积百分比/%	处理与环境因子变化累积百分比/%	总体特征值
1	0.7849	0.9548	78.49	88.41	0.8869
2	0.0773	0.9456	86.22	97.12	
3	0.0190	0.8256	88.12	99.26	
4	0.0057	0.5884	88.70	99.90	

不同处理的径流量主要在轴 1 影响了 TN、TDN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP、TDP 的分布(图 5)。径流量与氮养分($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 除外)流失量的相关性高于与磷的相关性。顺坡组处理 NVF 和 OVF 与环境因子径流量和氮磷养分流失量 TN、TDN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP、TDP 呈正相关,横坡组处理 OHF 和 OHFR 与环境因子径流量和氮磷养分流失量 TN、TDN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP、TDP 呈负相关;降雨量对不同处理的径流量主要在轴 2 影响了氮磷的分布,即降雨量较高的 2 年(2015 年、2017 年)所对应的处理(NVF2、OVF2、OHF2、OHFR2、NVF4、OVF4、OHF4、OHFR4)呈正相关,降雨量较低的 2 年(2014 年、2016 年)所对应的处理(NVF1、OVF1、OHF1、OHFR1、NVF3、OVF3、OHF3、OHFR3)呈负相关。根据 Effects 重分析,在选择的 5 个因子共同作用下,径流量对处理养分变化的解释度是 76.5%,降雨对处理养分变化的解释度是 5.9%,可以看出径流量是影响氮磷养分变化的主导环境因子,其

他因子对养分变化的作用不显著($P > 0.05$)。



注:2014 年标号 1;2015 年标号 2;2016 年标号 3;2017 年标号 4。

图 5 不同处理径流量与氮磷流失量的 RDA 分析

3 讨论

3.1 降雨量对坡耕地红壤径流量的影响

降雨作为雨养农业径流产生的主要驱动因素^[13],是造成氮磷养分输出的主要原因。降雨量对径流量有较大的影响,径流量随着降雨量的增加而增加^[14]。降雨强度作为一个重要因素可以用来预测径流和侵蚀^[15]。在不同的降雨事件中,短强降雨事件产生的年径流、泥沙和养分最多。当年际降雨变化较大时,不同处理的径流、泥沙与雨强的相关性不如单个降雨事件明显^[16]。中国三峡不同类型的降雨区试验^[17]表明,高雨强、高频率、持续时间短的坡地侵蚀明显高于低雨强、高降雨量、持续时间长的坡地侵蚀。本试验发现,径流量和产流雨量呈线性关系(图 4),2014 年,2015 年,2017 年大雨和暴雨约占产流雨量的 50% 以上,虽降雨次数不及小雨,却贡献了 4 年 32 次径流的大部分雨量。由此可见,大雨和暴雨是引起径流的主要原因,时长短而强度高的降雨造成了大部分年度径流的流失。

3.2 耕作措施对坡耕地红壤径流量和养分流失量的影响

影响径流量的原因很复杂,除降雨外还受到作物类型、起垄方向、起垄高度、坡度、地表覆盖等综合因素的影响^[18-19]。本研究表明,在相同的降雨量下,横坡垄作径流量显著低于顺坡径流量(图 4)。横坡垄作形成的生物屏障,不仅可缩短坡度,拦截径流,同时还提高了坡耕地综合抗侵蚀力(CAE)^[20]。通过垄高、植物叶片截留来减缓径流入渗土壤的速度,使径

流在土壤剖面重新分布,从而延长土壤饱和时间^[13]。类似研究^[5]也表明,横坡垄作可控制和减缓径流的速度,拦截水分和养分,增加径流在土壤中的渗透量,从而为增加作物产量提供了保障。对于顺坡垄作来说,由于没有生物屏障,通常会加速地表径流和土壤养分的流失,从而导致严重的坡耕地水土流失和土壤退化^[6]。本研究表明,径流量和养分流失量关系密切。径流量减少后养分流失量显著减少。与顺坡垄作常规处理(OVF)相比,横坡组径流极显著减少了49.57%~52.13% ($P < 0.01$),养分流失率极显著降低了33.16%~53.88% ($P < 0.01$)。

地表径流中的养分流失量受径流体积、土壤养分含量、肥料养分含量,以及径流与土壤表面接触时间等多种因素的影响^[13]。本研究表明,各种氮磷养分流失量与径流量呈正相关($P < 0.01$),与氮磷养分浓度无显著相关性(图5)。对于养分流失量来说,氮磷养分浓度的变化量与径流量的变化量相比显得微不足道。4年间TN、TP的养分浓度变化范围(表3)分别为 $(4.04 \pm 1.06) \sim (4.84 \pm 2.43)$, $(0.56 \pm 0.24) \sim (0.64 \pm 0.32)$ mg/L,而径流量的变化范围为 $(177.13 \pm 28.87) \sim (373.64 \pm 5.43)$ mm。本研究表明,不同耕作措施下,径流量而不是养分浓度的大小决定了养分流失量的多少。

优化施肥有利于提高作物生物量,增加地表覆盖度,从而减少径流的产生和氮磷养分的损失^[21]。顺坡组中优化施肥 OVF 与对照 NVF 不施肥处理相比,减少了 TN、TP 养分损失率分别为 18.58% 和 17.87%。由于土壤特性差异导致径流中养分流失的形态存在差异,红壤低阳离子(CEC)交换量,不易吸附 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,导致其易随径流流失^[22]。南方坡地红壤氮磷主要是通过吸附在土壤颗粒上而流失^[23],磷在径流中的含量远少于在泥沙中的含量,其在径流中主要是以颗粒态为主。而受肥料品种、土壤类型、作物等较多因素影响的氮在径流中的流失形态说法不一,在红壤径流中氮主要以可溶态氮为主。试验结果表明,顺坡组和横坡组地表径流中可溶性磷流失量占总磷的 48.5%~64.8%,略高于前人^[14] 研究结果,而可溶性氮的含量与其较为一致,可溶性氮素占总氮的 71.3%~75.9%,且在可溶性氮素中又以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ($(3.46 \pm 1.15) \sim (8.36 \pm 1.44)$ kg/hm²) 为主, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 $((0.66 \pm 0.24) \sim (1.73 \pm 0.79)$ kg/hm²)。覆膜对于前期作物需要的温度和水分具有很好的保持作用,但对于作物后期的生长,特别是肥料的吸收有一定的影响,且易造成作物早衰^[24]。45 天

后揭膜,作物正处于旺长期,揭膜减少了养分流失,增加作物养分吸收。揭膜处理 OHFR 与不揭膜处理 OHF 相比,除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 流失量高于 OHF 处理外,其他养分流失量揭膜处理 OHFR 均低于不揭膜处理 OHF,这可能是因为烤烟覆膜在旺长期可以增加 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸收,而揭膜减少了烤烟对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的吸收,从而导致其损失。因为 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 淋失量与其含量密切相关^[25]。本研究表明,优化施肥+横坡垄作+旺长期揭膜的复合耕作方式,不仅可以满足作物早期生长需要的温度和水分,同时可以增加作物对养分的吸收和利用,为优化坡地作物耕作方式、减少水土流失、持续发展坡地农业提供了有效保障。

4 结论

产流雨量与年降雨量呈现一致趋势,径流量和产流雨量呈线性关系,其相关性大小顺序为处理 NVF > OVF > OHF > OHFR ($P < 0.01$),即顺坡处理大于横坡处理,不施肥处理大于施肥处理,覆膜处理大于揭膜处理。大雨和暴雨占产流雨量的 50% 以上,且造成了年度大部分径流和养分的流失。

横坡垄作与顺坡垄作常规处理(OVF)相比,径流、养分流失量极显著减少了 49.57%~52.13% 和 33.16%~53.88% ($P < 0.01$)。复合耕作模式(优化施肥+横坡垄作+旺长期揭膜)拦截径流和养分流失的效果最好。

RDA 分析结果表明,径流量是影响养分流失的主要环境影响因子($P < 0.05$),径流量与氮养分($\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 除外)流失量的相关性高于与磷的相关性,表明氮比磷更容易随径流流失。顺坡处理 NVF 和 OVF 与环境因子径流量和氮磷养分流失量 TN、TDN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP、TDP 呈正相关,横坡处理 OHF 和 OHFR 与其呈负相关。

参考文献:

- [1] 王伟,贺莉莎.云南省坡耕地现状调查及分析[J].中国水土保持,2019(4):20-23.
- [2] 赵成,顾小华,姜宏雷,等.云南省坡耕地现状及水土流失综合治理探索[J].中国水土保持,2015(4):11-12.
- [3] Ma X, Li Y, Li B L, et al. Nitrogen and phosphorus losses by runoff erosion: Field data monitored under natural rainfall in Three Gorges Reservoir Area, China [J].Catena,2016,147:797-808.
- [4] Yang J L, Zhang G L, Shi X Z, et al. Dynamic changes of nitrogen and phosphorus losses in ephemeral runoff processes by typical storm events in Sichuan Basin, Southwest China[J].Soil and Tillage Research,2009,105

- (2): 292-299.
- [5] Fan J, Yan L J, Zhang P, et al. Effects of grass contour hedgerow systems on controlling soil erosion in red soil hilly areas, Southeast China[J]. International Journal of Sediment Research, 2015, 30: 107-116.
- [6] Sun H, Tang Y, Xie J S. Contour hedgerow intercropping in the mountains of China: A review[J]. Agroforestry Systems, 2008, 73: 65-76.
- [7] Vinten A J, Loades K, Addy S, et al. Assessment of the use of sediment fences for control of erosion and sediment phosphorus loss after potato harvesting on sloping land[J]. Science of the Total Environment, 2014, 468: 1234-1244.
- [8] Liu Y, Tao Y, Wan K Y, et al. Runoff and nutrient losses in citrus orchards on sloping land subjected to different surface mulching practices in the Danjiangkou Reservoir area of China[J]. Agricultural Water Management, 2012, 110: 34-40.
- [9] Adhikary P P, Hombegowda H C, Barman D, et al. Soil erosion control and carbon sequestration in shifting cultivated degraded highlands of eastern India: Performance of two contour hedgerow systems[J]. Agroforestry Systems, 2017, 91: 757-771.
- [10] Singh S, Brandenburg N, Ahiablame L, et al. Response of winter manure application on surface runoff water quantity and quality from small watersheds in south dakota[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2017, 228(10): e389.
- [11] 谢贤群, 王立军. 中国生态系统研究网络观测与分析标准方法: 水环境要素观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998: 219-282.
- [12] 蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 等. 南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究[J]. 环境科学, 2014, 35(8): 2920-2927.
- [13] Guo S F, Zhai L M, Liu J, et al. Cross-ridge tillage decreases nitrogen and phosphorus losses from sloping farmlands in southern hilly regions of China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191: 48-56.
- [14] 宋娅丽, 王克勤, 董莉, 等. 滇中烤烟坡耕地地表径流氮素的动态变化特征[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 7-11.
- [15] Zheng M G, Cai Q G, Cheng Q J. Modelling the runoff-sediment yield relationship using a proportional function in hilly areas of the Loess Plateau, North China[J]. Geomorphology, 2008, 93(3/4): 288-301.
- [16] Bouraima A K, He B, Tian T. Runoff, nitrogen (N) and phosphorus (P) losses from purple slope cropland soil under rating fertilization in Three Gorges Region [J]. Environmental Science Pollution Research, 2016, 23: 4541-4550.
- [17] Xu Q X, Wu P, Dai J F, et al. The effects of rainfall regimes and terracing on runoff and erosion in the Three Gorges area, China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 9474-9484.
- [18] Yang S Q, Han R Y, Xing L, et al. Effect of slope farmland soil and water and soil nitrogen and phosphorus loss based on different crop and straw applications and ridge patterns in the basin of the main stream of the Songhua River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 42-47.
- [19] Zhang Q W, Liu D H, Cheng S H, et al. Combined effects of runoff and soil erodibility on available nitrogen losses from sloping farmland affected by agricultural practices [J]. Agricultural Water Management, 2016, 176: 1-8.
- [20] 蒲玉琳, 谢德体, 林超文, 等. 植物篱—农作模式坡耕地土壤综合抗蚀性特征[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 125-135.
- [21] 王瑞宝, 时映, 夏开宝, 等. 氮肥形态及揭膜对烤烟生长及产量品质的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(10): 449-453.
- [22] He Z L, Wilson M J, Yang X. Constraints to crop production on the red soils of China: Synopsis and overview[M]. New York: Springer, 2004: 101-158.
- [23] 鲁耀, 胡万里, 雷宝坤, 等. 云南坡耕地红壤地表径流氮磷流失特征定位监测[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1544-1553.
- [24] 柳玉凤, 谢英荷, 李廷亮, 等. 地膜覆盖对旱地作物产量及土壤水分影响的研究概述[J]. 山西农业科学, 2018, 46(3): 461-465.
- [25] 任瑞. 覆膜方式对丹江口库区土壤氮素淋失的影响研究[D]. 武汉: 湖北大学, 2018.