

不同耕种模式下遂宁组紫色土坡耕地产流产沙特征

任雨之¹, 郑江坤¹, 付滢¹, 王文武¹, 曾倩婷¹, 向明辉², 陈鑫²

(1. 四川农业大学林学院, 水土保持与荒漠化防治四川省高校重点实验室, 成都 611130;

2. 遂宁水土保持试验站, 四川 遂宁 629006)

摘要: 基于遂宁水土保持试验站 1989—2016 年次降雨数据, 划分出 I (小雨强长历时)、II (中雨强长历时)、III (中雨强中历时)、IV (大雨强短历时) 4 种雨型, 依据耕种模式划分出 4 个时段, 分析坡耕地产流产沙规律。结果表明: (1) 1991—1992 年, 等高沟垄两端加档方式保水保土作用最佳, 且在各雨型间差异不显著 ($P>0.05$), 斜坡沟垄随角度增加保土保水作用逐渐减弱。 (2) 2004—2005 年, 农耕地顺坡垄作的产沙量为横坡垄作的 10~20 倍, 而产流量为横坡垄作的 1~3 倍, 说明横坡垄作减沙效应优于减流效应, 且种植黄花较种植玉米水土保持作用更强。 (3) 2006—2008 年, 农耕地栽植新银合欢植物篱初期地表扰动大, 产流产沙量较对照小区大; 各小区产流量在不同雨型间差异不显著 ($P>0.05$); II 雨型下横坡红苕/玉米—小麦小区产沙量显著大于其余雨型 ($P<0.05$), 为其余雨型的 4.4~26.7 倍。 (4) 2013—2016 年, 植物篱已定植 3 年, 植物篱小区水土保持效果均优于对照小区, 减沙效应优于减流效应, 且香根草植物篱水土保持效果整体优于新银合欢植物篱, III 雨型下各小区产沙量呈极显著差异 ($P<0.01$)。整体来看, 等高沟垄耕作两端加档方式最佳, 利于农耕地保土蓄水; 植物篱减沙效果明显, 但定植初期产沙量增加, 且存在占用农田和影响机耕等问题, 故应结合实际选择适宜的耕种方式。

关键词: 紫色土; 耕种模式; 雨强; 产沙量; 径流系数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0030-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.005

Characteristics of Runoff and Sediment Yield in Purple Soil Sloping Farmland Under Different Tillage Patterns in Suining Formation

REN Yuzhi¹, ZHENG Jiangkun¹, FU Yan¹, WANG Wenwu¹,

ZENG Qianting¹, XIANG Minghui², CHEN Xin²

(1. University Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130; 2. Suining Soil and Water Conservation Experimental Station, Suining, Sichuan 629006)

Abstract: Based on the rainfall data from 1989 to 2016 in Suining Soil and Water Conservation Experimental Station, four rainfall patterns were classified, which were rainfall pattern I (long duration and light rainfall intensity), rainfall pattern II (long duration and moderate rainfall intensity), rainfall pattern III (short duration and moderate rainfall intensity) and rainfall pattern IV (short duration and heavy rainfall intensity). Meanwhile, four periods were selected according to the tillage patterns to analyze the yield law of runoff and sediment on sloping farmland. The results showed that: (1) During 1991—1992, contour ridge and furrow treatment closed at both ends was the best pattern to preserve soil and water, and there was no significant difference among the rainfall patterns ($P>0.05$). The effect of slope furrow ridge treatment on soil and water conservation decreased with the increasing of the angle between ridge and furrow. (2) During 2004—2005, sediment yield of sloping ridge plots was 10~20 times that of cross ridge plots, while runoff yield was 1~3 times, which indicated that the reducing sediment effect of the cross ridge was better than its reducing runoff effect, and the soil and water conservation effect of planting *Hemerocallis citrine* Baroni was better than that of planting *Zea mays*. (3) During 2006—2008, planting hedgerow of *Leucaena leucocephala* disturbed the surface soil of the farmland at the initial stage, therefore the runoff and sediment yields of hedgerow plots were larger than that of the control plots, and

收稿日期: 2018-09-07

资助项目: 中国博士后科学基金面上项目(2012M511938); 国家自然科学基金项目(41601028); 水利部公益性行业科研专项(201501045); 四川省高校“水土保持与荒漠化防治重点实验室”建设项目

第一作者: 任雨之(1996—), 女, 本科生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 373632768@qq.com

通信作者: 郑江坤(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事生态水文和水土保持研究。E-mail: jiangkunzheng@126.com

there was no significant difference in runoff yield among different rainfall patterns($P>0.05$). The sediment yield of *Z. mays*/*Ipomoea batatas* and *Triticumaestivum* plot on the cross slope under rain pattern II was significantly higher than that of other rain patterns ($P<0.05$), which was 4.4~26.7 times that of other rain patterns. (4) During 2013—2016, the hedgerow had been colonized for three years, the soil and water conservation effect of hedgerow plots were better than that of control plots, and the sediment reduction effect was better than runoff reduction effect, and the soil and water conservation effect of *Vetiveria zizanioides* hedgerow was better than that of *L. leucocephala* hedgerow. Under rainfall pattern III, there was very significant difference in sediment yield among the plots ($P<0.01$). On the whole, contour ridge and furrow treatment closed at both ends was the best way for soil and water conservation. Hedgerow had obvious effect on reducing sediment yield, but it increased sediment yield at the initial stage, and occupying farmland and affecting machine ploughing were also weak points. Therefore, suitable tillage and cropping patterns should be selected in combination with natural economic conditions.

Keywords: purple soil; tillage patterns; rainfall intensity; sediment yield; runoff coefficient

土壤侵蚀是全球性环境问题,可导致农业生产力低下,自然灾害抵御能力削弱,生态环境严重恶化。四川是我国农业大省,坡耕地占耕地总面积 83.07%^[1],以紫色土为主^[2],集中分布在盆地丘陵区,因而紫色土坡耕地在四川农业生产中占据重要地位^[3]。紫色土土层浅薄、抗蚀性差,水土流失严重程度仅次于黄土^[4]。国内外学者针对坡耕地水土流失问题提出多种耕作方式和种植模式^[5-9]。其中沟垄种植在农业生产中应用较广泛^[10-12],该技术既能有效减少径流,增加土壤水分^[13],减轻水分亏缺^[14],减少土壤流失,改善土壤环境,又是增产增收的有效措施^[15]。横坡耕作作为简便易行的水土保持措施被广泛采用,其效益和机制已得到广泛证实^[16-18]。采用不同间作方式能有效减少土壤侵蚀,保护土地资源,减少养分流失,提高作物产量,故筛选出经济效益好、能有效降低水土及养分流失且又适宜水源保护区的种植模式是农业可持续发展的必要途径^[19-21]。植物篱作为一种坡耕地保护措施得到广泛应用^[22],近年来植物篱的研究主要集中在长江中上游干旱河谷区、三峡库区和黄土高原水土流失严重地区,内容包括土壤水分、土壤结构及理化性质、土壤养分、土壤肥力和植物篱种类选择等^[23-26]。以往研究多集中在某种耕种模式的水土保持效应方面,对多种种植模式的比较研究相对较少。本文通过对遂宁水土保持试验站长期的观测数据研究不同耕种模式的水土保持效应,可为该区水土流失防治和评价提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于遂宁水土保持试验站(30°21′51″N, 105°28′51″E),地处川中丘陵区,属涪江水系的一级支流琼江流域,海拔 288~331 m。气候类型为亚热带湿润季风气候,年均气温 18.2℃,多年平均降水量 902 mm,其中 5—9 月的降水量约占全年降水量的

73%。年均蒸发量 897.2 mm,年均无霜期 296 d。母岩为侏罗系遂宁组岩层发育而成的紫色土,土壤松散,大多是砂、页、泥岩风化形成的幼年土,结构性差,土壤 pH 呈中性到微碱性,土壤抗冲刷和抗蚀能力弱^[27]。种植作物主要为玉米(*Zea mays*)、红苕(*Ipomoea batatas*)、小麦(*Triticumaestivum*)和胡豆(*Vicia faba*),个别时段种植黄花(*Heremacallis citrina-Baroni*)和油桃(*Amygdalus persica*)。

2 材料与方法

2.1 试验区布设

选取 6 个标准径流小区,其水平投影长 20 m,宽 5 m,为正南坡向,土壤为红棕紫色土,母质为泥页岩,质地中壤,小区四周均砌有水泥围墙。其中 10°小区 4 个,15°小区 2 个。小区下端设集流槽,各小区设有径流观测池,池内用水标尺和三角堰测流,并安装自记水位记。

2.2 降雨类型划分

结合降雨过程线计算次降雨量和降雨强度,根据降雨强度和降雨历时划分雨型。将引起产流产沙的每场降雨分为 I、II、III、IV 4 类进行统计^[28](表 1)。

表 1 降雨类型划分

降雨类型	降雨强度/(mm·h ⁻¹)	降雨历时/h
I	小雨强(0~5)	长历时(>10)
II	中雨强(5~10)	长历时(>10)
III	中雨强(5~10)	中历时(5~10)
IV	大雨强(>10)	短历时(0~5)

2.3 不同耕作种植模式划分

1989—2016 年期间,根据耕作种植模式选取 4 个时段。2006—2008 年,新银合欢(*Leucaena leucocephala*)植物篱于 2006 年栽植,在小区中、下方各设置 2 排植物篱,间隔 6 m,每排 2 行,行距 0.4 m,株距 0.2 m,株高 0.7 m,每年春季修剪,高度为 1 m。2013—2016 年,新银合欢(*Leucaena leucocephala*)

和香根草(*Vetiveria zizanioides*)植物篱各布设在小
0.5 m,株行距 0.2 m,平均株(丛)高 0.8 m,均于
区上、中、下坡,间隔 6.5 m,每组植物篱宽 0.4 m 或
2010 年 4 月移栽,已定植 3 年。具体情况见表 2。

表 2 不同时段耕作种植模式对比

时段	小区编号	坡度/(°)	耕作方式	种植作物
1991—1992 年	R1	10	横坡等高沟垄两端加档	玉米红苕小麦胡豆
	R2	10	沟垄夹角(30°)一端加档	玉米红苕小麦胡豆
	R3	10	沟垄夹角(20°)一端加档	玉米红苕小麦胡豆
	R4	10	横坡等高沟垄一端加档	玉米红苕小麦胡豆
	R5	15	横坡等高沟垄两端加档	玉米红苕小麦胡豆
	R6	15	横坡等高沟垄一端加档	玉米红苕小麦胡豆
2004—2005 年	T1	10	横坡垄作	黄花
	T2	10	顺坡垄作	黄花
	T3	10	横坡垄作	玉米红苕小麦胡豆
	T4	10	顺坡垄作	玉米红苕小麦胡豆
	T5	15	横坡垄作	玉米红苕小麦胡豆
	T6	15	顺坡垄作	玉米红苕小麦胡豆
2006—2008 年	P1	10	横坡	玉米红苕小麦
	P2	10	顺坡新银合欢植物篱	玉米红苕小麦
	P3	10	横坡	油桃
	P4	10	顺坡新银合欢植物篱	油桃
	P5	15	横坡	玉米红苕小麦
	P6	15	顺坡新银合欢植物篱	玉米红苕小麦
2013—2016 年	H1	10	横坡	玉米
	H2	10	顺坡新银合欢植物篱	玉米
	H3	10	休闲地	休闲地
	H4	10	顺坡香根草植物篱	玉米
	H5	15	横坡香根草植物篱	玉米
	H6	15	顺坡	玉米

2.4 数据分析与方法

按水土保持试验规程(SL 419—2007)进行观测,包括降雨场次、降雨日期、降雨量、降雨历时、径流量和含沙量等^[29]。根据降雨强度和降雨历时划分为 4 种雨型,用含沙量(kg/m³)、产沙量(t/km²)、径流深(mm)和径流系数来讨论在不同耕作种植模式下产流产沙的特征规律。径流深为径流总量与径流小区占地面积之比,取样分析径流中泥沙含量计算泥沙量,取浑水值。一次降雨过程结束后,将截流池中水搅拌后取浑水水样 3~5 瓶,称重—过滤—烘干—称重;放干池内水,测得淤泥体积,然后取定量体积的泥沙样品,称重、烘干再称重,求得样品干容重;求得小区泥沙流失量和产沙量(t/km²),合计每次降雨的径流泥沙量即得土壤流失量。含沙量指单位体积浑水中所含泥沙的干质量,表征径流携沙能力。径流系数表示降雨中转化成径流的比例。用 SW40 型水位计记录降雨过程,并用雨量筒辅助测定降雨量,根据降雨历时计算出平均雨强。数据采用 Excel 和 SPSS 20.0 软件进行分析。

3 结果与分析

3.1 不同沟垄耕作措施下坡面产流产沙效应

由表 3 可知,同一雨型下各小区平均径流深、平均径流系数、平均含沙量和平均产沙量总体规律为:

R2>R3>R6>R4>R5>R1。R2 小区在Ⅱ雨型平均径流深最大,为 34.8 mm,是 R4、R6 和 R3 小区的 1.7,1.6,1.3 倍;Ⅱ雨型下 R2 小区平均径流系数为 0.38,是 R4、R6 和 R3 小区的 1.6,1.5,1.3 倍;Ⅱ雨型下 R2 小区平均含沙量为 25.8 kg/m³,是 R4、R6 和 R3 小区的 1.6,1.5,1.4 倍;Ⅱ雨型下 R2 小区平均产沙量为 897.0 t/km²,是 R4、R6 和 R3 小区的 4.0,3.7,2.1 倍。说明在相同雨型下,横坡等高沟垄能有效减少水土流失,斜坡沟垄随角度增加保水保土能力减弱。R4 和 R5 小区同为等高沟垄,且坡度 R5>R4,但产流产沙为 R5<R4,可见两端加档形成的水平沟能有效控制较大坡度的产流产沙量。

径流深在Ⅰ雨型下 R1 与 R2 小区差异显著($P<0.05$),Ⅱ雨型下 R1 和 R5 小区与 R2 小区差异显著,Ⅳ雨型下 R1 和 R5 小区与 R2 和 R3 小区均差异显著。径流系数仅在Ⅳ雨型下 R1 和 R5 小区与 R2 小区区间差异显著。含沙量在Ⅰ雨型下各小区区间差异不显著($P>0.05$),Ⅱ雨型下 R1 和 R5 小区与 R2 小区差异显著,Ⅳ雨型下 R1 和 R5 小区与 R2 和 R3 小区差异显著。产沙量在Ⅰ雨型下 R1 和 R5 小区与 R6 小区差异显著,Ⅱ雨型下 R2 小区与各小区差异显著,R1 与 R3 小区差异显著,R5 与 R3 小区差异显著;Ⅳ雨型下 R1 和 R5 小区与 R2 小区区间差异显著。

总体来看,降雨强度较小时,土壤中水分尚未饱和,降雨因素为产流主要因子,各小区产流产沙差异较小。随雨强的增加,单位时间内单位面积所承雨量较多,且雨滴变大,速度加快,土壤表层结构破坏,降雨入渗减少,增加降雨转化成径流的比例。在大雨强下等高沟垄耕作两端加档相比其余耕作措施作用效果明显。

同一沟垄措施下平均径流深、平均径流系数和平均产沙量整体趋势均表现为:Ⅱ雨型>Ⅳ雨型>Ⅰ雨型,产沙量在 R2、R3、R4 和 R6 小区中表现为Ⅱ雨型与Ⅰ和Ⅳ雨型差异显著,在 R2 和 R3 小区中呈现Ⅱ

雨型>Ⅳ雨型>Ⅰ雨型,R4 和 R6 小区中为:Ⅱ雨型>Ⅰ雨型>Ⅳ雨型。Ⅱ雨型是导致坡耕地产流输沙的主要雨型。R1 小区的平均径流深、平均径流系数、平均含沙量和平均产沙量在各雨型下均近为 0。R5 小区的平均径流深和径流系数表现为:Ⅰ雨型>Ⅱ雨型,其余雨型为 0;平均含沙量和平均产沙量最大值在Ⅰ雨型,其余雨型为 0,R5 小区在Ⅰ雨型下水土流失最严重。径流深在 R2 小区中各雨型间差异显著。径流系数在 R2 小区中Ⅰ雨型与Ⅱ和Ⅳ雨型差异显著,Ⅱ和Ⅳ雨型为Ⅰ雨型的 12 倍。R2 小区该措施下作用效果较小,不同降雨类型形成不同的产流效果。

表 3 1991—1992 年不同降雨类型下各小区产流产沙特征

径流小区	降雨类型	径流深/ mm	径流系数	含沙量/ (kg·m ⁻³)	产沙量/ (t·km ⁻²)
R1	Ⅰ	0bB	0aA	0aA	0aB
	Ⅱ	0.05±0.07aB	0aA	0aB	0aC
	Ⅲ	0	0	0	0
	Ⅳ	0bB	0aB	0aB	0aB
R2	Ⅰ	0.78±0.85cA	0.03±0.03bA	10.39±13.29aA	2.67±2.08bAB
	Ⅱ	34.76±0.06aA	0.38±0.03aA	25.80±5.12aA	897.00±179.61aA
	Ⅲ	0.88	0.02	2.27	2.00
	Ⅳ	8.50±4.85bA	0.35±0.22aA	10.47±5.85aA	102.50±87.33bA
R3	Ⅰ	0.49±0.10bAB	0.02±0.01aA	3.63±1.75aA	1.67±0.58bAB
	Ⅱ	26.46±8.27aAB	0.29±0.11aA	16.25±2.90aAB	417.95±57.63aB
	Ⅲ	0.69	0.01	5.83	4.00
	Ⅳ	6.81±6.83bA	0.29±0.31aAB	10.64±9.42aA	71.83±64.24bAB
R4	Ⅰ	0.29±0.20bAB	0.01±0.01aA	5.22±7.34aA	1.67±2.08bAB
	Ⅱ	20.25±21.84aAB	0.23±0.26aA	17.94±12.93aAB	222.00±130.11aBC
	Ⅲ	0	0	0	0
	Ⅳ	2.95±4.85bAB	0.13±0.22aAB	3.99±6.14aAB	34.00±64.71bAB
R5	Ⅰ	0.26±0.37aAB	0.01±0.02aA	0.48±0.83aA	0.33±0.58aB
	Ⅱ	0.15±0.21aB	0.00±0.00aA	0aB	0aC
	Ⅲ	0	0	0	0
	Ⅳ	0aB	0aB	0aB	0aB
R6	Ⅰ	0.50±0.34bAB	0.02±0.01aA	9.56±8.28aA	5.83±6.60bA
	Ⅱ	22.05±23.54aAB	0.25±0.28aA	17.05±11.50aAB	240.50±147.79aBC
	Ⅲ	0	0	0	0
	Ⅳ	3.25±5.32bAB	0.14±0.24aAB	4.43±5.88aAB	37.00±67.50bAB

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示同一径流小区不同降雨类型达显著性差异($P<0.05$);同列不同大写字母表示同一降雨类型不同径流小区达显著性差异($P<0.05$)。下同。

3.2 横(顺)坡垄作的水土保持效应

由表 4 可知,平均径流深、平均径流系数和平均产沙量在农耕地表现为顺坡垄作>横坡垄作。平均径流深在 4 种雨型下 T2 为 T1 的 1.2~1.9 倍,T4 为 T3 的 1.7~3.0 倍,T6 为 T5 小区的 1.7~2.0。Ⅲ雨型下 T5 与 T6、T4 与 T6 小区间显著差异,该雨型下横坡垄作的拦蓄径流作用较明显。平均径流系数在相同雨型下各小区间差异均不显著。该时段横坡垄作对径流有一定拦蓄作用,随着雨强的增加,径

流集聚到一定程度,溢满后沿横垄翻过,同样形成坡面径流,拦蓄效果减弱。影响降雨转化为径流比例的主要因素是降雨因子,径流系数大小随着雨型的改变而变化。平均含沙量在种植黄花的 T1 与 T2 小区为横坡垄作>顺坡垄作。这可能是由于黄花地下部分有肥大根系,细微根须系统拓展范围可达 50 cm,具有良好的固持土壤的作用,可有效控制径流携带泥沙量,其作用强于横坡垄作的影响,使 2 个小区含沙量趋于一致,甚至横坡高于顺坡。平均含沙量在Ⅱ雨型

下达最大值,以Ⅱ雨型为例:T3 与 T4 小区、T5 与 T6 小区间显著差异,T1 与 T2 小区间差异不显著,T2 与 T4 小区显著差异,T4 是 T2 小区的 13 倍,而 T3 为 T1 小区的 1 倍;在Ⅳ雨型下,T5 与 T6 小区间差异显著,随着坡度增加含沙量 T5 小区比 T3 小区反而减少 1.84 kg/m³。平均产沙量在 4 种雨型下顺坡垄作 T2、T4 和 T6 分别为对应横坡耕作 T1、T3 和 T5 的 1.4~1.7 倍、14~20 倍和 10~16 倍,且随着降雨强度增加呈先减小后增大倍数的变化关系。综上所述,横坡垄作对种植玉米等农作物保土效果明显,能有效拦截农耕地翻耕破坏的表层流土,形成水平状沟垄,对径流携带泥沙形成拦蓄作用。大雨强下横坡垄作对 15°小区保土作用更明显。此外相比种植玉米,种植黄花能更有效地固持土壤,防止土壤流失。整体来看,横坡垄作减沙效应优于减流效应。

同一小区径流深、径流系数、含沙量和产沙量在Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ雨型间差异不显著,各小区产沙受雨型的影响较小,各种植模式均有一定的减流拦沙作用。平均径流深在 T1、T2、T3、T6 小区Ⅱ雨型下达最大值,整体趋势为Ⅱ雨型>Ⅰ雨型>Ⅳ雨型>Ⅲ雨型,而种植黄花 T1 和 T2 小区为Ⅲ雨型>Ⅳ雨型。T4 和 T5 小区在Ⅰ雨型为最大值。总体来说,长历时降雨随着时间增加土壤水分达到饱和,降雨无法入渗产生径流,顺坡种植玉米加剧水分流失。Ⅳ雨型下,农耕地对土壤破坏使土壤保水作用降低,径流深略高于Ⅲ雨型。平均径流系数在 T1 小区Ⅱ雨型为最大值,T2、T3、T4、T5 和 T6 小区最大径流系数均出现在Ⅰ雨型,但Ⅰ雨型下仅有 1 场降雨,该雨型是否是降雨转化为产生径流的主要类型有待进一步研究。平均含沙量和平均产沙量在各小区最大值均出现在Ⅱ雨型,该雨型下产沙最严重。

表 4 2004—2005 年不同降雨类型下各小区产流产沙特征

径流小区	降雨类型	径流深/ mm	径流系数	含沙量/ (kg·m ⁻³)	产沙量/ (t·km ⁻²)
T1	I	3.28	0.08	0	0
	II	6.72±6.39aA	0.10±0.13aA	3.76±3.93aB	20.91±32.53aC
	III	3.66±1.21aC	0.07±0.03aA	1.82±3.73aA	8.19±11.58aA
	IV	2.39±3.64aA	0.05±0.08aA	2.37±2.57aBC	2.25±2.02aB
T2	I	6.53	0.17	0.29	1.86
	II	9.22±7.99aA	0.12±0.14aA	2.63±3.98aB	35.47±53.38aBC
	III	4.90±2.67aBC	0.09±0.02aA	1.81±1.67aA	11.66±15.13aA
	IV	2.84±3.44aA	0.06±0.07aA	1.28±2.11aC	3.43±3.06aB
T3	I	6.57	0.17	0.79	5.18
	II	7.25±6.66aA	0.11±0.14aA	4.41±3.86aB	26.20±25.01aC
	III	4.53±1.56aBC	0.11±0.11aA	2.35±4.88aA	8.63±8.01aA
	IV	4.77±7.27aA	0.10±0.15aA	5.28±2.57aABC	6.66±6.34aB
T4	I	19.71	0.50	4.75	93.60
	II	17.29±13.86aA	0.26±0.30aA	33.57±23.12aA	460.27±344.93aAB
	III	7.86±0.09aB	0.17±0.12aA	15.53±12.71aA	122.77±129.35aA
	IV	11.57±14.01aA	0.24±0.29aA	15.91±16.28aAB	134.00±106.07aA
T5	I	11.45	0.29	0.61	7.03
	II	11.73±11.61aA	0.19±0.24aA	5.39±4.04aB	40.80±36.785aBC
	III	5.95±1.06aBC	0.12±0.07aA	2.52±2.64aA	16.35±18.24aA
	IV	7.30±10.12aA	0.15±0.21aA	3.44±2.62aBC	10.21±6.25aB
T6	I	20.07	0.51	5.49	110.20
	II	22.09±16.60aA	0.32±0.34aA	32.81±18.72aA	582.07±470.56aA
	III	12.13±1.86aA	0.28±0.24aA	15.66±12.99aA	173.54±183.47aA
	IV	13.50±16.53aA	0.28±0.34aA	18.23±17.54aA	166.71A±127.67aA

3.3 果园和农作物下定植初期新银合欢植物篱的水土保持效应

3.3.1 同一雨型下新银合欢植物篱对坡耕地产流产沙的影响 由表 5 可知,同种雨型下农耕地平均径流深、平均径流系数、平均含沙量和平均产沙量均表现为新银合欢植物篱小区>无植物篱小区。其中 P6 小区水土流失最严重,平均径流深、平均径流系数、平

均含沙量和平均产沙量均为最大值。

径流深在同雨型各小区间差异不显著。径流系数在Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ雨型下各小区差异不显著,Ⅰ雨型下 P6 小区与 P1、P3、P4、P5 小区差异显著,以Ⅰ雨型为例:平均径流系数 P2 为 P1 小区的 2.5 倍,P6 为 P5 小区的 3.6 倍。可能是由于Ⅰ雨型降雨时间长,土壤水分易饱和,较易转化为径流,且植物篱枝、叶不发

达,难以拦蓄降雨,加剧降雨的转化比例。含沙量在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ雨型下各小区间差异均不显著;Ⅳ雨型下 P6 小区与 P1、P3、P4、P5 小区差异显著,P2 小区与 P1、P3、P4 小区间差异显著。以Ⅳ雨型为例:平均含沙量 P2 为 P1 小区的 10.0 倍,P6 为 P5 小区的 4.7 倍,而 P6 为 P2 小区的 1.4 倍。产沙量在Ⅱ雨型下 P6 与 P2 小区差异显著,在Ⅳ雨型下 P6 小区与 P1、P3、P4、P5 小区差异显著。总体来说,2006 年种植植物篱时地表扰动较大,人工破坏表层土壤结构,不利于对水分吸收下渗,且植物篱处于生长初期,根系尚未稳固,对土壤的固结作用较小,拦截作用不明显,短期内水土保持效应难以发挥,植物篱小区产沙量较大。

油桃—植物篱顺坡小区平均含沙量、平均产沙量、平均径流深和平均径流系数均大于横坡对照小区,说明尽管植物篱具有一定保持水土的作用,但栽植初期拦截泥沙效果较差,相比横坡耕种效果不明显。油桃林冠层大,对降雨具有拦截作用,枯枝落叶层深厚,避免雨滴直接击溅土壤,根系较农作物发达,

对土壤有较好的固持及保土蓄水作用。

3.3.2 不同雨型下新银合欢植物篱对坡耕地产流产沙的影响 径流深和径流系数在各小区 4 种雨型间均差异不显著,各小区种植模式对径流的影响强于降雨类型的影响。含沙量在 P1、P3、P4、P5 小区中Ⅱ雨型与Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ雨型之间差异显著。产沙量在 P1、P5 小区Ⅱ雨型与Ⅰ、Ⅲ、Ⅳ雨型间差异显著。P1、P3、P4、P5 小区的平均含沙量和平均产沙量在Ⅱ雨型最大。Ⅱ雨型下平均含沙量分别是Ⅰ雨型 4 个小区的 11.7,11.6,8.5,9.9 倍,是Ⅲ雨型的 6.2,2.7,2.1,4.5 倍,是Ⅳ雨型的 14.8,16.3,11.9,6.2 倍;平均产沙量Ⅱ雨型是Ⅰ雨型 P1、P3、P4、P5 小区的 17.7,16.3,9.7,15.3 倍,是Ⅲ雨型 8.3,1.8,1.7,4.4 倍,是Ⅳ雨型的 23.5,23.6,14.3,10.5 倍。而 P2 和 P6 小区最大平均含沙量和平均产沙量出现在Ⅲ雨型下。总体来说,无植物篱农耕地小区以及油桃经济林小区,产沙情况主要受降雨因素的影响,Ⅱ雨型为其产沙的主要雨型,而其余小区植物篱的影响作用强于降雨因子的影响,在Ⅲ雨型产沙情况较严重。

表 5 2006—2008 年不同降雨类型下各小区产流产沙特征

径流小区	降雨类型	径流深/ mm	径流系数	含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	产沙量/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)
P1	Ⅰ	2.04±2.39aA	0.04±0.04aB	1.34±1.57bA	5.53±6.74bA
	Ⅱ	5.76±1.29aA	0.07±0.01aA	15.67±12.04aA	98.06±89.58aA
	Ⅲ	3.11±2.70aA	0.06±0.05aA	2.52±2.21bA	11.79±10.51bA
	Ⅳ	1.31±2.26aA	0.03±0.05aA	1.06±1.84bB	4.17±7.22bB
P2	Ⅰ	4.30±1.14aA	0.09±0.02aAB	42.56±74.56aA	231.92±421.66aA
	Ⅱ	9.95±6.03aA	0.12±0.07aA	20.59±12.41aA	242.22±247.60aA
	Ⅲ	8.12±8.39aA	0.15±0.14aA	50.29±72.73aA	302.09±334.51aA
	Ⅳ	5.43±4.33aA	0.15±0.14aA	11.11±6.12aAC	45.93±29.25aAB
P3	Ⅰ	2.18±2.53aA	0.04±0.05aB	1.47±1.70bA	6.40±7.43aA
	Ⅱ	5.82±1.01aA	0.07±0.01aA	17.00±10.30aA	104.03±76.75aA
	Ⅲ	4.74±4.86aA	0.09±0.09aA	6.28±8.67abA	56.43±87.55aA
	Ⅳ	1.40±2.43aA	0.03±0.05aA	1.04±1.81bB	4.40±7.62aB
P4	Ⅰ	2.06±2.40aA	0.04±0.05aB	1.47±1.70bA	6.05±7.08aA
	Ⅱ	4.61±0.28aA	0.06±0.00aA	12.46±7.94aA	58.46±39.95aA
	Ⅲ	3.63±3.25aA	0.07±0.06aA	5.82±7.87abA	35.00±50.27aA
	Ⅳ	1.31±2.26aA	0.03±0.05aA	1.05±1.81bB	4.10±7.10aB
P5	Ⅰ	2.13±2.49aA	0.04±0.05aB	2.06±2.38bA	8.78±10.20bA
	Ⅱ	6.48±0.48aA	0.08±0.00aA	20.36±10.07aA	134.29±74.98aA
	Ⅲ	4.34±3.77aA	0.08±0.07aA	4.55±5.50bA	30.55±38.11bA
	Ⅳ	2.61±2.27aA	0.07±0.06aA	3.26±2.91bBC	12.74±11.25bB
P6	Ⅰ	6.45±1.24aA	0.14±0.03aA	35.60±59.22aA	281.49±492.19aA
	Ⅱ	15.60±12.62aA	0.18±0.14aA	23.35±1.80aA	375.51±322.72aA
	Ⅲ	12.56±13.40aA	0.24±0.23aA	41.53±57.98aA	380.95±377.40aA
	Ⅳ	7.98±7.31aA	0.22±0.23aA	15.42±10.85aA	82.92±61.07aA

3.4 植物篱定植 3 年后坡耕地产流产沙效应

3.4.1 同一雨型不同植物篱下坡耕地产流产沙规律 由表 6 可知,4 种雨型下平均径流量、平均径流系数、平均含沙量和平均产沙量在 10°小区下整体表现为 H1>H2>H4;15°小区表现为 H6>H5。植物篱均起到了较

好的保持水土作用,且香根草植物篱效果优于新银合欢植物篱,这可能与 2 种植物不同的生态学特性有关,由于香根草为草本植物,相比新银合欢植物篱为灌木植被能在短期之内生长更茂盛,且地下根茎更丰富,近地面枝叶更为密集,拦截泥沙、蓄水作用更强。

径流深在Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ雨型下各小区间差异均不显著;在Ⅲ雨型下 10°小区中,对照小区无显著差异,15°小区间显著差异,植物篱对降雨径流的拦蓄,在Ⅲ雨型下、坡度较大的小区作用较明显。径流系数在 4 种雨型下各植物篱对照小区间均差异不显著,不同植物篱小区差异也不显著,植物篱控制降雨转化为地表径流比率的效果不明显。含沙量在Ⅰ雨型仅 15°小区间差异显著,10°对照小区差异不显著;在Ⅱ、Ⅲ雨型下,植物篱小区与无植物篱小区差异显著,不同植物篱间差异不显著;而在Ⅳ雨型下各小区之间差异不显著。产沙量在Ⅰ、Ⅳ雨型下各小区间差异不显著;Ⅱ雨型下 H1 与 H2、H4 小区差异显著,H5 与 H6 小区差异显著;在Ⅲ雨型下各对照小区间达到极显著差异($P<0.01$)。小雨强下降雨对土壤表层击溅作用较小,降雨因子影响小,坡度影响较大,植物篱形成篱坎降低坡面坡度,使坡地自然梯化,有效控制泥沙流失,效果对坡度较大的小区较明显。随着降雨强度的增加,降雨对土壤表层击打、冲刷作用增加,植物篱覆盖对表层泥沙流失具有显著阻拦作用,根系对土壤有较好固持作用,在Ⅲ雨型下拦截泥沙效果最为明显,但随降雨强度进一步增加,降雨对地表土壤破坏程度剧烈,甚至加剧土壤流失。可见植物篱对土壤拦截作用有一定限度。产沙量在一定的降雨强度范围内,植物篱的

减沙作用优于其减流作用。

3.4.2 同一植物篱不同降雨类型下坡耕地产流产沙规律 整体来看,Ⅱ雨型条件下,平均径流量、径流系数、含沙量和产沙量最大,水土流失严重,Ⅱ雨型为该地产流产沙的主要雨型。径流深在同小区中Ⅱ与Ⅳ雨型间差异显著;Ⅱ雨型与Ⅰ、Ⅲ雨型间达到极显著差异,6 个小区下Ⅱ雨型平均径流深依次为Ⅰ雨型的 5.3、4.4、6.0、4.4、4.1、5.1 倍,为Ⅲ雨型的 6.5、5.6、6.0、5.5、4.7、5.5 倍,可知Ⅱ雨型是造成坡面产流最严重的雨型。径流系数在 H1、H6 小区Ⅰ雨型与Ⅱ雨型差异显著,与Ⅳ雨型呈极显著差异;H1 小区下Ⅲ雨型与Ⅳ雨型差异显著;H3 小区下Ⅰ雨型与Ⅱ、Ⅳ雨型呈极显著差异,而其余植物篱的 H2、H4 和 H5 小区各雨型间差异不显著。可见,植物篱的作用效果明显,能有效减少降雨因素对产流产沙的影响。10°小区平均含沙量在Ⅲ雨型下植物篱作用效果最佳,H1 是 H4 的 5.1 倍,H1 是 H2 的 3.4 倍,H6 是 H5 的 4.1 倍。平均产沙量在 10°小区Ⅳ雨型下植物篱拦截效果最佳,H1 是 H2、H4 小区的 7.1、7.44 倍。15°小区在Ⅳ雨型下植物篱小区的平均含沙量和平均产沙量比无植物篱大,坡度较大时大雨强对植物篱打击,致使倒塌加剧土壤流失。

表 6 2013—2016 年不同降雨类型下各小区产流产沙特征

径流小区	降雨类型	径流深/ mm	径流系数	含沙量/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	产沙量/ ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2}$)
H1	Ⅰ	6.31±7.36bA	0.11±0.04BC	6.27±13.63aAB	128.63±440.64aA
	Ⅱ	33.32±7.27aA	0.18±0.07acA	6.91±0.47aA	231.75±65.83aAB
	Ⅲ	5.12±0.87bCD	0.10±0.03bcABC	3.59±1.30aA	17.81±3.54aA
	Ⅳ	10.15±8.67bA	0.21±0.08aA	6.01±6.13aA	87.61±114.38aA
H2	Ⅰ	5.86±7.56bA	0.09±0.03aC	3.02±8.29aB	56.07±204.10aA
	Ⅱ	25.51±8.16aA	0.13±0.04aA	2.94±0.31aB	76.15±31.89aC
	Ⅲ	4.56±0.21bD	0.09±0.02aBC	1.05±0.55aB	4.71±2.27aB
	Ⅳ	5.18±2.88bA	0.12±0.00aA	2.00±1.38aA	12.33±12.90aA
H3	Ⅰ	6.44±6.85bA	0.11±0.04bcABC	4.29±5.59aAB	61.11±166.81aA
	Ⅱ	38.86±9.59aA	0.21±0.07aA	7.64±0.43aA	298.80±90.09aA
	Ⅲ	6.47±0.36bAB	0.13±0.02abAB	3.51±0.39aA	22.60±1.27aA
	Ⅳ	8.91±5.81bA	0.20±0.02aA	3.29±2.17aA	35.64±38.49aA
H4	Ⅰ	5.29±5.41bA	0.09±0.03aC	2.31±5.57aB	38.51±134.92aA
	Ⅱ	23.44±8.76aA	0.12±0.03aA	2.61±0.28aB	62.40±29.42aC
	Ⅲ	4.26±0.21bD	0.09±0.01aC	0.70±0.45aB	2.950±1.77aB
	Ⅳ	4.87±2.18bA	0.12±0.02aA	2.05±1.65aA	11.78±12.52aA
H5	Ⅰ	6.99±6.97bA	0.12±0.04aAB	2.83±8.27aB	65.06 ±238.21aA
	Ⅱ	28.39±5.13aA	0.16±0.06aA	2.95±1.19aB	86.90±48.93aBC
	Ⅲ	6.11±0.40bBC	0.12±0.01aABC	0.86±0.17aB	5.250±1.34aB
	Ⅳ	6.00±2.57bA	0.15±0.03aA	8.53±10.67aA	64.86±85.90aA
H6	Ⅰ	7.86±8.33bA	0.13±0.05bA	10.87±15.57aA	180.34±574.47aA
	Ⅱ	40.37±8.30aA	0.22±0.08aA	7.48±0.18aA	302.65±69.37aA
	Ⅲ	7.29±0.39bA	0.15±0.01abA	3.53±0.72aA	25.85±6.58aA
	Ⅳ	12.13±10.47bA	0.26±0.10aA	2.50±1.64aA	38.87±46.04aA

4 讨论

本研究中1991—1992年,等高沟垄措施下径流深和产沙量的值最小,地表沟与垄交错分布,降水沿沟集中下渗被土壤吸收,并在沟垄两端加档,机械阻挡泥沙流失,减少了地表径流,具有良好的蓄水保土作用,这与李宜坪等^[30]的研究结果相似。2004—2005年,产流产沙表现为农耕地顺坡垄作>横坡垄作,农耕地>黄花小区,这与唐春霞^[31]的研究结果相似。相比顺坡垄作,横坡垄作可形成垄台和垄沟就地拦蓄雨水,也可暂存未能及时入渗的降雨,有效减缓降雨转化为径流。黄花强大的根系起到良好的保土培肥作用^[32],根系庞大固土范围大,且自身繁殖能力强,生长状况良好,能在短期内有效减轻水土流失。2006—2008年,产流产沙整体呈玉米农耕地>油桃经济林地,这与卜建霞等^[33]的研究结果一致。经济林地水土保持效应相比农耕地较好,这主要是由于经济林地在土地利用过程中枯枝落叶返回土壤,增加经济林地的有机碳含量^[34],经济林地林冠层和枯枝落叶层,层层拦截降雨避免直接打击地面,减轻溅蚀;而植物篱小区>非植物篱小区,这与杨帅等^[35]的研究结果不同,而与林超文等^[36]的研究结果类似,这是因为植物篱为2006年栽植,当年开始进行观测,地表扰动大,破坏表层土壤,短时间内难以恢复,且植物篱处于生长初期,植株矮小,难以机械阻拦径流携带的泥沙;地下根系不发达,篱坎尚未形成,水土保持效应难以发挥,而在2013—2016年,2种植物篱均为2010年栽植,经过3年生长,植株状态良好,能起到良好的水土保持作用,相比2006—2008年时段植物篱设置于坡面中、下两部分,2013—2016年设置为坡面上、中、下3部分,能更好地发挥植物篱作用。由于植物篱物种生态学特性不同,表现出香根草植物篱水土保持效益优于新银合欢,香根草植物篱属于草本植物,茎叶密度大,根系发达,能阻滞地表径流,对泥沙起到有效的机械拦截作用。

降雨类型是影响土壤侵蚀过程的重要因子之一,其影响效应与耕种措施密切相关^[37]。4个时期产流产沙主要雨型为Ⅱ雨型。不同沟垄耕作随降雨强度增加,其作用效果有一定差异。等高沟垄两端加档形式大于雨型的影响。横坡垄作效果在一定雨强范围内,随雨强的增大而增大,超过范围的大雨强作用不明显,在大雨强下沟垄会形成断垄,蓄水作用减弱,继续发展会形成冲刷沟,加大水土流失情况,这与孙芳媛等^[38]的研究结果类似。降雨是产流产沙的先决条件,径流量和侵蚀量的多少不仅取决于降雨强度和降

雨量,还取决于土地利用方式^[39],该研究中同种雨型下油桃植物篱小区有一定的减沙减流效果,而农耕地植物篱小区扰动地表较严重。植物篱对产流产沙影响作用在Ⅲ雨型下效果最明显,Ⅳ雨型下植物篱抗侵蚀及截留能力有限,通过增加孔隙度降低流速、减缓地表径流途径受阻,蓄水量逐渐饱和,进而产生径流,致使其拦截作用减小,这与袁久芹等^[40]的研究结果相似。该地区采用等高沟垄两端加档、横坡垄作、种植黄花、油桃和栽种植物篱等措施在一定程度范围内均有较好的保持水土作用。

5 结论

(1)1991—1992年,等高沟垄减流减沙作用最佳,斜坡沟垄随角度增加效果减弱。Ⅱ雨型是导致产流产沙的主要雨型,随雨强增大,减流减沙效果增加,不同沟垄措施作用效果不同。P1和P5小区耕作措施能有效减少降雨因素影响,其余小区Ⅱ雨型与Ⅰ、Ⅳ雨型差异显著。

(2)2004—2005年,横坡垄作对农耕地保土效果明显;有一定的拦蓄径流作用,但在大雨强下效果减弱。整体表现为减沙作用优于减流作用。相比农耕地,种植黄花能更有效防治水土流失。

(3)2006—2008年,农耕地产流产沙量表现为新银合欢植物篱小区大于无植物篱小区,植物篱栽植之初由于地表扰动增加土壤侵蚀量。

(4)2013—2016年,香根草植物篱水土保持效果优于新银合欢。减沙作用在Ⅲ雨型下最明显,各对照小区间呈极显著差异,植物篱在大雨强下作用有一定限制,总体上植物篱减沙作用大于减流作用。

参考文献:

- [1] 徐泰平,朱波,汪涛,等. 秸秆还田对紫色土坡耕地养分流失的影响[J]. 水土保持学报,2006,20(1):30-32.
- [2] 杨占彪,朱波,林立金,等. 川中丘陵区紫色土坡耕地土壤侵蚀特征[J]. 四川农业大学学报,2010,28(4):480-485.
- [3] 邓雯文,雷孝章,钟强,等. 川中丘陵区土壤侵蚀评价[J]. 安徽农业科学,2012,40(20):10426-10427.
- [4] 郑江坤. 紫色土区坡地植被水土保持效应及机理[M]. 北京:科学出版社,2017:69-70.
- [5] 吴昊,刘冬黎. 水土保持耕作措施与预防控制地下水污染的综合研究初探[J]. 中国水土保持,2018(2):48-50.
- [6] 李悦,郭李萍,谢立勇,等. 不同农作管理措施对东北地区农田土壤有机碳未来变化的模拟研究[J]. 中国农业科学,2015,48(3):501-513.
- [7] 王畅,李永梅,王自林,等. 稻草编织物覆盖对坡耕地红壤侵蚀及理化性质的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(5):68-72.

- [8] Kurothe R S, Kumar G, Singh R, et al. Effect of tillage and cropping systems on runoff, soil loss and crop yields under semiarid rainfed agriculture in India[J]. Soil and Tillage Research, 2014, 140(5): 126-134.
- [9] Lal R. Soil degradative effects of slope length and tillage methods on alfisols in Western Nigeria. I. Runoff, erosion and crop response[J]. Land Degradation and Development, 2015, 8(3): 201-219.
- [10] Liu Q J, An J, Zhang G H, et al. The effect of row grade and length on soil erosion from concentrated flow in furrows of contouring ridge systems[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 160: 92-100.
- [11] 高世铭, 张绪成, 王亚宏. 旱地不同覆盖沟垄种植方式对马铃薯土壤水分和产量的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 249-251.
- [12] 肖继兵, 孙占祥, 蒋春光, 等. 辽西半干旱区垄膜沟种方式对春玉米水分利用和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(10): 1917-1928.
- [13] 李志军. 山坡地沟垄耕作蓄水保土效果研究[J]. 现代化农业, 2003(12): 8-10.
- [14] Wang Q, Zhang E, Li F, et al. Runoff efficiency and the technique of micro-water harvesting with ridges and furrows, for potato production in semi-arid areas[J]. Water Resources Management, 2008, 22(10): 1431-1443.
- [15] 胥凌霄, 段喜明, 刘瑞龙. 不同沟垄种植模式对土壤理化性状及水分利用效率的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2017, 37(2): 83-88.
- [16] 杨帅, 尹忠, 郑子成, 等. 四川黄壤区玉米季坡耕地自然降雨及其侵蚀产沙特征分析[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 7-12.
- [17] 胡雪琴, 蒋平, 彭旭东, 等. 紫色丘陵区不同土地利用类型径流泥沙及氮磷流失特征[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2): 35-39.
- [18] 张怡, 何丙辉, 王仁新, 等. 横坡和顺坡耕作对紫色土土壤团聚体稳定性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 192-198.
- [19] 常松果, 胡雪琴, 史冬梅, 等. 不同土壤管理措施下坡耕地产流产沙和氮磷流失特征[J]. 水土保持学报, 2016, 30(5): 34-40.
- [20] 朱青, 陈正刚, 李剑, 等. 贵州坡耕地 3 种种植模式的水土保持效果对比研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 21-25.
- [21] 肖波, 王慧芳, 王庆海, 等. 坡耕地上等高草篱的功能与效益综合分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(7): 1318-1329.
- [22] 王润泽, 湛芸, 李铁, 等. 紫色土区植物篱篱前淤积带土壤团聚体稳定性特征研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(2): 210-216.
- [23] 马廷, 周成虎, 蔡强国. 不同植物篱坡面的土壤侵蚀过程 CA 模拟[J]. 地理研究, 2006, 25(6): 959-966.
- [24] 马云, 何丙辉, 何建林, 等. 基于水动力学的紫色土区植物篱控制面源污染的临界带间距确定[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 60-64.
- [25] 郭甜, 何丙辉, 蒋先军, 等. 紫色土区植物篱对坡面土壤微生物特性的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 94-98.
- [26] 黄鑫, 蒲晓君, 郑江坤, 等. 不同植物篱对紫色土区坡耕地表层土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 173-177.
- [27] 黄巍, 何丙辉, 马云, 等. 植物篱对紫色土区坡地土壤可蚀性变化影响[J]. 亚热带水土保持, 2012, 24(1): 7-12.
- [28] 马星, 郑江坤, 王文武, 等. 不同雨型下紫色土区坡耕地产流产沙特征[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 17-21.
- [29] 谢颂华, 曾建玲, 杨洁, 等. 南方红壤坡地不同耕作措施的水土保持效应[J]. 农业工程学报, 2010, 26(9): 81-86.
- [30] 李宜坪, 郭慧莉, 吴淑芳, 等. 黄土坡面水沙过程及水流阻力变化试验研究[J]. 泥沙研究, 2017, 42(5): 36-43.
- [31] 唐春霞. “大横坡+小顺坡”耕作技术水土保持效益研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [32] 秦川, 何丙辉, 刘永鑫, 等. 生物埂护坡上黄花根系分布特征及其对土壤养分的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(5): 256-264.
- [33] 卜建霞, 叶功富, 尤龙辉, 等. 福建省长汀县不同土地利用方式降雨产流产沙特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(4): 1-5.
- [34] 刘正刚, 王勇军, 王宪帅. 岷江上游杂谷脑河流域不同土地利用类型土壤碳氮特征[J]. 浙江林业科技, 2011, 31(4): 1-5.
- [35] 杨帅, 李永红, 高照良, 等. 黄土堆积体植物篱减沙效益与泥沙颗粒分形特征研究[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 270-278.
- [36] 林超文, 涂仕华, 黄晶晶, 等. 植物篱对紫色土区坡耕地水土流失及土壤肥力的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(6): 2191-2198.
- [37] 安娟, 于妍, 吴元芝. 降雨类型对褐土横垄坡面土壤侵蚀过程的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 150-156.
- [38] 孙芳媛, 王宝龙, 王涛, 等. 不同耕作措施对南方壤粘土的侵蚀产流产沙影响[J]. 农机化研究, 2018, 40(8): 153-158.
- [39] 王国重, 李中原, 田颖超, 等. 雨强和土地利用类型对豫西南山区产流产沙的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2017, 50(2): 182-186.
- [40] 袁久芹, 梁音, 曹龙熹, 等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J]. 土壤, 2015, 47(2): 400-407.