

# 天然降雨下川中丘陵区不同年限植物篱水土保持效用

李铁<sup>1</sup>, 谌芸<sup>1</sup>, 何丙辉<sup>1</sup>, 向明辉<sup>2</sup>, 唐菡<sup>1</sup>, 刘泉宏<sup>1</sup>, 王润泽<sup>1</sup>

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715;

2. 遂宁市水土保持试验站, 四川 遂宁 629006)

**摘要:** 通过对遂宁水土保持试验站内不同坡度(10°和15°)植物篱小区及对应对照小区为期7年的水土流失定位观测, 探究了天然降雨条件下香根草植物篱和新银合欢植物篱在其生长年限增长过程中对紫色土坡耕地水土流失的影响。结果表明:(1)当植物篱开始发挥其水土保持作用时, 减流率(年均)达10.5%~20.0%, 减沙率(年均)达53.5%~54.5%, 减流作用随年限增长波动较大, 减沙作用逐渐趋稳;(2)10°香根草植物篱水土保持效果最优, 其减流和减沙作用均在生长年限为1年时开始发挥, 10°新银合欢植物篱次之, 其减沙作用较减流作用提前约1年凸显, 15°香根草植物篱最弱, 其布设小区多数次降雨减流率均明显低于10°植物篱小区;(3)总体上植物篱能够降低坡度对坡耕地水土流失的加剧作用, 其中径流流失减少28.9%, 泥沙流失减少11.3%, 并削弱降雨量与径流泥沙的相关程度;(4)平均径流系数和降雨引发泥沙量随植物篱年限增长逐渐趋稳, 其中10°小区香根草植物篱和新银合欢植物篱对特大暴雨(12 h降水总量>140.0 mm)和大暴雨(12 h降水总量为70~140 mm)下产生的径流系数消减明显, 达15.0%~34.4%, 各植物篱对所有降雨等级平均单位降雨所产生泥沙量均有明显消减作用, 达34.1%~48.5%。

**关键词:** 等高植物篱; 减流率; 减沙率; 降雨量; 水土保持

**中图分类号:** S157.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-2242(2019)03-0027-09

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.03.005

## Study on Soil and Water Conservation Effects of *Vetiveria zizanioides* and *Leucaena leucocephala* Hedgerows with Different Planting Years in Central Hill Region of Sichuan Basin

LI Tie<sup>1</sup>, CHEN Yun<sup>1</sup>, HE Binghui<sup>1</sup>, XIANG Minghui<sup>2</sup>, TANG Han<sup>1</sup>, LIU Xiaohong<sup>1</sup>, WANG Runze<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environment, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Southwest University, Chongqing 400715; 2. Soil and Water Conservation Experimental Station in Suining, Suining, Sichuan 629006)

**Abstract:** By analyzing the soil and water loss monitoring observation data (2010—2016) of the Suining Soil and Water Conservation Experimental Station, this article studied the effects of *Vetiveria zizanioides* and *Leucaena leucocephala* hedgerows with different planting years which were layout in purple sloping farmland under natural rainfall conditions. The results showed that: (1) During the study period, when the hedgerows began to play its soil and water conservation role, the average annual runoff reduction rate reached 10.5% ~ 20.0%, and the average annual sediment reduction rate reached 53.5% ~ 54.5%. The reduction rates of hedgerows on average annual runoff fluctuated in different planting years, but its effect on reducing sediment gradually stabilized. (2) The *Vetiveria zizanioides* hedgerow (10°) showed the best influence on soil and water conservation, giving its reduction effects on runoff and sediment in its first planting year. *Leucaena leucocephala* hedgerows (10°) gave the inferior effectiveness on soil and water conservation, which sediment-reducing effect was one-year earlier than the runoff-reducing effect. The effects of *Vetiveria zizanioides* hedgerows (15°) were the worst, showing the lower runoff reduction rates than others. (3) In general, hedgerows could weaken the effects of slope gradients on soil and water loss on sloping farmland, in which runoff loss was decreased by 28.9%, sediment loss by 11.3%, and could also weaken the correlation

收稿日期: 2018-11-08

资助项目: 国家自然科学基金项目(41501288); 重庆市基础科学与前沿技术研究一般项目(cstc2017jcyjAX0472); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2017D206)

第一作者: 李铁(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事城市水土保持研究。E-mail: 1805745558@qq.com

通信作者: 谌芸(1981—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水土保持、农业水利工程研究。E-mail: sy22478@126.com

between rainfall and runoff and sediment. (4) The runoff coefficient and sediment loss caused by the rainfall in hedgerow plots gradually stabilized with the increasing planting years. Torrential rain (12 hours precipitation over 140.0 mm) caused the highest runoff coefficient, followed by heavy rain (12 hours precipitation between 70 ~ 140 mm), the runoff coefficient caused by torrential rain and heavy rain were reduced by 15.0% ~ 34.4% in the *Vetiveria zizanioides* hedgerow (10°) and *Leucaena leucocephala* hedgerow (10°) plots. The average sediment loss per millimeter of rainfall, was decreased by 34.1% ~ 48.5% in hedgerow plots.

**Keywords:** contour hedgerow; surface runoff reduction rate; sediment reduction rate; rainfall amount; soil and water conservation

等高植物篱是沿坡地等高线按一定间距栽植单行或多行植物逐渐形成的植物篱笆<sup>[1]</sup>,通常具有改良土壤、拦截径流、保土蓄水等功能,且布设成本经济低廉,被认为是一种有效防治坡耕地水土流失的水土保持措施<sup>[2-3]</sup>。一般而言,从布设初到真正形成具有良好水土保持作用的完整植物篱生长时间较长,Kiepe<sup>[4]</sup>在肯尼亚 Machakos 研究了铁刀木植物篱 4 年间对坡耕地水分入渗率的影响;Lenka 等<sup>[5]</sup> 2001—2006 年在印度东部的研究表明植物篱减少了 33% 径流量和 35% 泥沙量;Adhikary 等<sup>[6]</sup> 通过连续 4 年观测探究了新银合欢和墨西哥丁香植物篱对印度东部高原山区坡耕地的基本理化性质和减流减沙的综合影响;国内也有不少学者探究了不同年限植物篱水土保持作用,周洋等<sup>[7]</sup> 利用 1 年降雨场次的径流泥沙数据探究了湘中丘陵区紫色土坡耕地水土保持措施效益,得出植物篱的保水保沙作用均明显强于顺坡耕作,并认为待植物篱生长成熟后,其减流效果与土坎梯田接近;胡晚枚等<sup>[8]</sup> 对喀斯特高原山地植物篱观测了 2 年后认为随着生长年限延长,其截流拦沙作用逐渐增长;何丙辉等<sup>[9]</sup> 研究了不同生长年限(1, 2 年生)植物篱对坡耕地土壤侵蚀及土壤有机质的影响;程冬兵等<sup>[10]</sup> 分析了新银合欢、黄荆和马桑植物篱 10 年间对坡耕地坡度减缓、有机质提高、土壤结构改善等方面的作用;马星等<sup>[11]</sup> 定量分析了 2012—2016 年自然降雨下植物篱对坡耕地产流产沙和微地形的影响;Lin 等<sup>[12]</sup> 在长江上游紫色土区通过 8 年定位观测试验研究了紫穗槐和香根草植物篱的减流减沙作用。

尽管也有学者探究了多年生植物篱水土保持作用,但少有涉及从植物篱布设初到生长成熟形成完整植物篱的整个周期内其所发挥水土保持作用动态变化的研究,缺乏对植物篱水土保持作用由弱到强动态变化的连续性认识。新银合欢(*Leucaena leucocephala*)属含羞草科,常绿乔木,具有速生固氮的作用<sup>[13]</sup>;香根草(*Vetiveria zizanioides* L.)属禾本科,多年生草属,须根发达,且与农作物争水争肥不强烈,固土作用突出<sup>[14]</sup>,二者均具有良好的水土保持功能,

易于管理推广。2010—2016 年,本文通过对遂宁水土保持试验站内不同坡度(10°和 15°)新银合欢和香根草植物篱小区及对应对照小区水土流失定位观测,统计分析了共计 50 场次降雨植物篱小区减沙率和减流率变化趋势,以及不同雨强等级下各小区水土流失变化情况,初步探究了新银合欢植物篱和香根草植物篱不同生长年限减流拦沙作用的变化特征,以为紫色土坡耕地水土流失治理工作提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省遂宁市安居区水土保持试验站(东经 105°28'37", 北纬 30°21'51"),地处川中丘陵区,该区紫色土分布集中,当地农民习惯顺坡种植,坡耕地水土流失严重。海拔 288~331 m,属亚热带季风性气候。雨量充沛,日照偏少,平均无霜期 296 d,年均气温 18.2 °C,年均蒸发量为 897.2 mm,研究期间年均降雨时间 106.5 d,年均降水量 907.8 mm,以水力侵蚀为主。该区土壤多为侏罗系遂宁组岩层发育而成的红棕紫色土,pH 呈中性到微碱性,有机质和氮素含量低,结构性较差,抗冲抗蚀能力较弱<sup>[15-16]</sup>。

### 1.2 径流小区布设

于 2010—2016 年选取研究区内 5 个标准径流小区(T1、T2、T3、T4、T5)展开水土流失定位观测,小区土壤均为红棕紫色土,中壤,土层厚度约为 0.70 m,坡向均朝南,其中 T1、T2、T3 小区坡度为 10°,T1 小区为对照小区,T4 和 T5 小区坡度为 15°,T5 小区为对照小区。观测期间,各小区均为顺坡耕作,种植作物为玉米(*Zea mays* L.),当年 4 月种植,9 月左右收割,此外 T2 小区布设了 3 带新银合欢植物篱,T3 和 T4 小区分别布设了 3 带香根草植物篱,布设时间均为 2010 年 4 月(即定植初,2011—2016 年植物篱年限分别为 1, 2, 3, 4, 5, 6 年),位置均为小区上、中、下坡位,每带 2 行植株,行距 0.20 m,株距 0.20 m,定植时株高约为 0.30 m,带宽约为 0.50 m,篱带前与农作物的隔离带宽约 1.00 m<sup>[17]</sup>。径流小区具体情况见表 1。

表1 径流小区概况

小区编号	坡向	坡度/(°)	坡长(水平/斜)/m	面积(水平/斜)/m <sup>2</sup>	多年平均被覆盖率/%	种植模式
T1	南	10	20.00/20.31	100.00/101.55	46.9	玉米
T2					47.7	玉米+3带新银合欢
T3					47.5	玉米+3带香根草
T4	南	15	20.00/20.71	100.00/103.55	46.9	玉米+3带香根草
T5					44.3	玉米

### 1.3 指标观测与计算

依据 SL 419—2007《水土保持试验规程》<sup>[18]</sup>对研究区 2010—2016 年降雨场次、降雨日期、降雨量、降雨历时以及对应降雨场次下各小区径流深和产沙量等进行观测,并选取能够引起水土流失的降雨场次进行计算和分析(共 50 场次)。具体观测过程为:于径流小区四周修筑 30 cm 水泥挡水墙,以防小区之间径流渗漏,使用 PVC 管连接小区下部出水口将坡面径流导入小区下方观测房量水池。利用 SW40 型日记水位计观测水位并结合 45°三角堰流量查算表计算地表径流量,将量水池中水充分搅匀后取出 500 mL 测定泥沙含量,测算历次降雨泥沙量;利用自记式雨量计记录降雨历时,结合降雨过程线计算次降雨量和降雨强度<sup>[19-20]</sup>。利用减流率来表示植物篱蓄水减流效应<sup>[21]</sup>:

$$\eta_w = \frac{\Delta w}{w} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\eta_w$ 为减流率(%); $\Delta w$ 为径流小区布设植物篱后径流变化量(m<sup>3</sup>); $w$ 为对照小区产生的径流量(m<sup>3</sup>)。

利用减沙率来表示植物篱保土减沙效应:

$$\eta_s = \frac{\Delta s}{s} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $\eta_s$ 为减沙率(%); $\Delta s$ 为径流小区布设植物篱后径流变化量(kg); $s$ 为对照小区产生的径流量(kg)。

### 1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2016 软件对数据进行统计分析和图表处理,使用 SPSS 23.0 统计软件进行双变量 Pearson 法相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物篱小区次降雨减流率和减沙率变化特征

分别以 T1 和 T5 小区为对照计算各植物篱小区(T2、T3、T4)每场次降雨的减流率。由图 1 可知,植物篱年限少于 2 年(包括 2 年)时,10°新银合欢植物篱小区(T2)历年减流率分别为-5.1%,-58.0%,-14.5%;10°香根草植物篱小区(T3)的分别为-14.1%,-54.2%,0;15°香根草植物篱小区(T4)的分别为9.8%,9.8%,8.3%;植物篱年限大于 2 年时,T2 小区历年减流率平均为 20.0%,T3 小区的平均为 17.5%,T4 小区(除年限为 6 年时减流率为-57.8%外)历年减流率平均为 10.5%。可见,当植物篱年限少于 2 年(包括 2 年)时,10°新银合欢植物篱小区减流率多为负值,10°

香根草植物篱小区则在年限为 2 年时其减流率开始多次出现正值;当植物篱年限大于 2 年时,10°植物篱小区减流率绝大多数均为正值,15°小区香根草植物篱减流作用总体较不稳定。

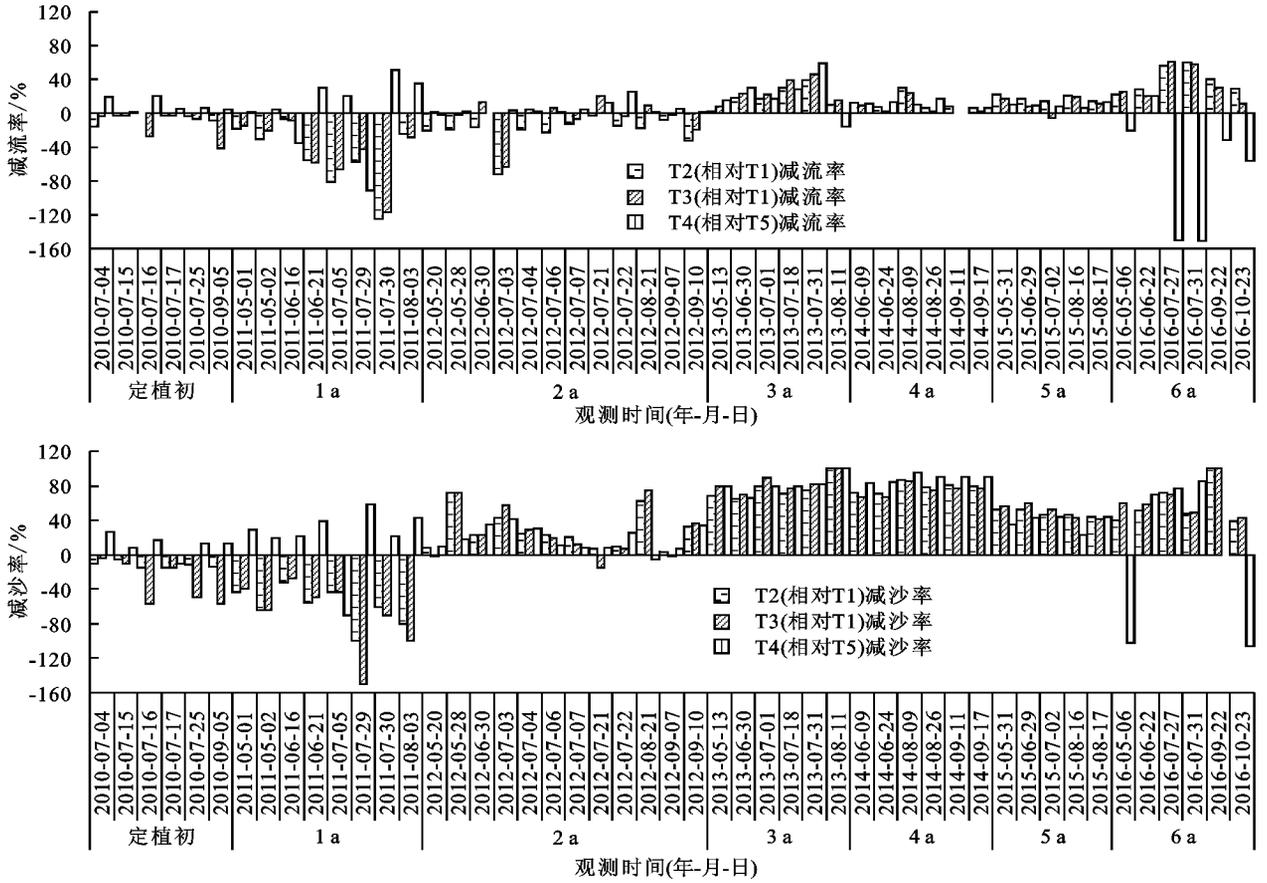
由图 1 可知,植物篱年限少于 1 年(包括 1 年)时,T2 小区历年减沙率分别为-12.1%和-66.5%,T3 小区的分别为-32.6%和-76.6%,而 T4 小区历年减沙率则分别为 10.9%和 18.7%;植物篱年限大于 1 年时,T2 和 T3 小区变化基本一致,其中 T2 小区历年减沙率平均为 53.9%,T3 小区的平均为 54.5%;T4 小区(除年限为 6 年时减沙率为-44.9%外)历年减沙率平均为 53.5%。显然,10°植物篱小区减沙率在植物篱生长年限为 1 年时发生明显转折,在年限为 2 年时 10°新银合欢植物篱保土减沙作用凸显,其蓄水减流作用则迟 1 年发挥,10°香根草植物篱则在年限为 1 年时同时表现出了减流减沙作用,此外 15°植物篱小区减沙率除年限为 6 年时表现不佳外,其余年限表现良好。

### 2.2 不同坡度小区次降雨水土流失差异

由图 2 可知,2010—2016 年,绝大多数次降雨过程中,15°对照小区(T5)较 10°对照小区(T1)历年径流流失量平均多出 56.3%,泥沙流失量平均多出 83.6%;15°香根草植物篱小区(T4)较 10°香根草植物篱小区(T3)历年径流流失量平均多出 27.4%,泥沙流失量平均多出 72.3%。可见,在研究期间,15°小区水土流失均较 10°小区严重,但不同坡度植物篱小区之间的径流流失差异和泥沙流失差异均少于单纯种植作物(玉米)的对照小区之间的差异(分别少 28.9%和 11.3%),表明植物篱能够抑制坡度对坡耕地水土流失的加剧作用。

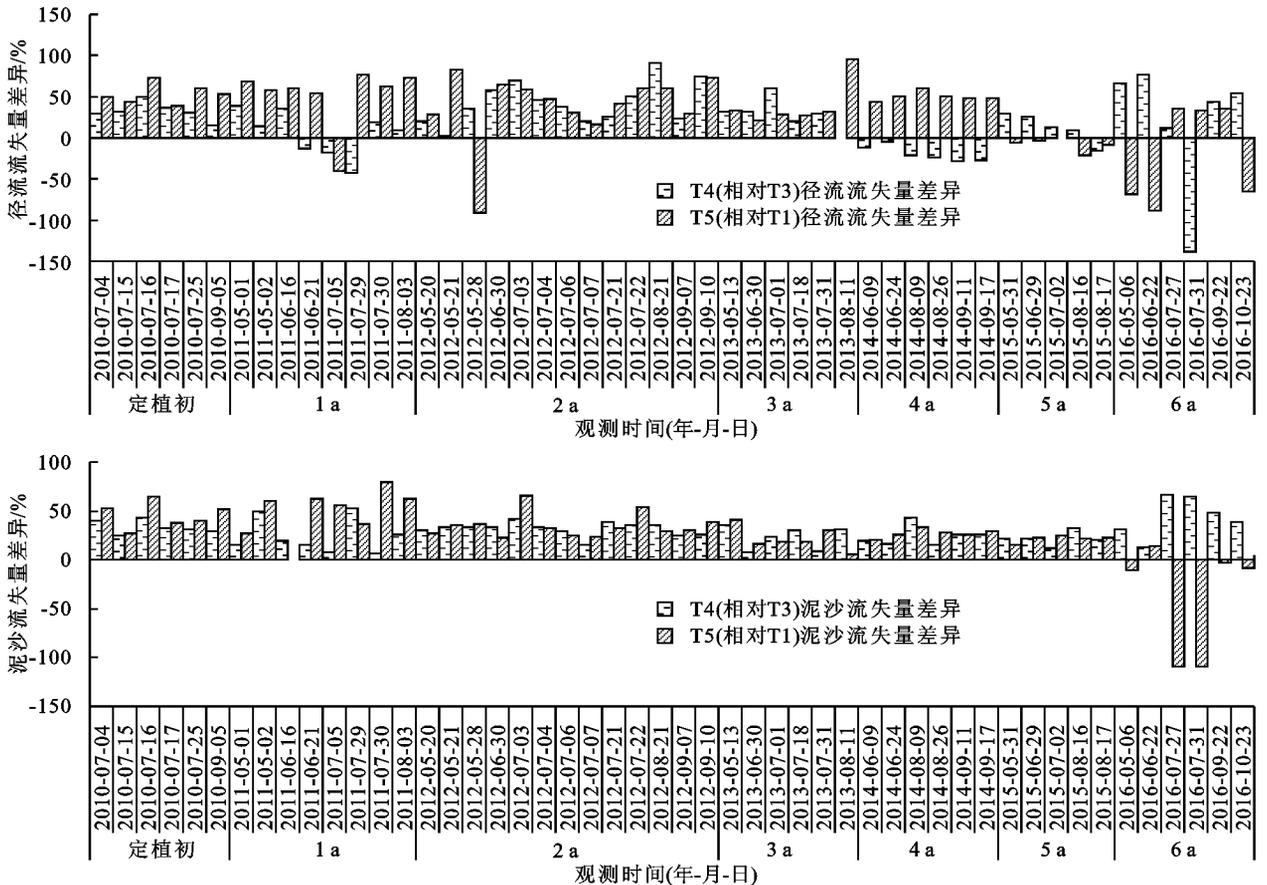
### 2.3 不同雨强等级下各小区水土流失变化特征

根据我国(内陆部分)降雨强度(12 h 降水总量,mm)等级划分标准<sup>[22]</sup>对 2010—2016 年期间共计 50 场次降雨进行统计(表 2)。研究期间引起各小区水土流失次数较多的降雨强度主要为暴雨、大暴雨和大雨。将研究期间所有场次降雨 12 h 降水总量按照 <30.0,30.0~70.0,70.0~140.0,>140.0 mm 4 个强度等级划分,并统计各小区径流系数和降雨所引发泥沙流失量(降雨引发泥沙量为 1 mm 降雨所产生泥沙量,g/mm)。



注: T1、T5 为对照小区。

图 1 植物篱小区次降雨减流率和减沙率



注: T1、T5 为对照小区。

图 2 不同坡度小区水土流失差异

表 2 降雨强度等级划分标准(内陆部分)及 2010—2016 年各等级降雨次数

降雨强度等级	12 h 降雨总量/mm	降雨次数/次
小雨	≤4.9	0
中雨	5.0~14.9	1
大雨	15.0~29.9	8
暴雨	30.0~69.9	23
大暴雨	70.0~139.9	14
特大暴雨	≥140.0	4

由图 3 可知,同一雨强等级下,T2 和 T3 小区径流系数均低于其他小区,且 T3 小区低于 T2 小区。当降雨等级为 <30.0 mm, T2 和 T3 小区平均径流系数分别较 T1 小区低 5.8% 和 9.7%, T4 小区较 T5 小区高 2.4%; 当降雨等级为 30.0~70.0 mm, T2 和 T3 小区分别较 T1 小区低 1.4% 和 3.3%, T4 小区较 T5 小区低 6.1%; 当降雨等级为 70.0~140.0 mm,

T2 和 T3 小区平均径流系数分别较 T1 小区低 28.1% 和 34.4%, T4 小区较 T5 小区高 8.0%; 当降雨等级 >140.0 mm, T2 和 T3 小区分别较 T1 小区低 15.0% 和 17.9%, T4 小区较 T5 小区低 5.9%。不同降雨等级平均径流系数排序为 (>140.0 mm, 19.68 dm<sup>3</sup>/mm) > (70.0~140.0 mm, 13.99 dm<sup>3</sup>/mm) > (<30.0 mm, 12.47 dm<sup>3</sup>/mm) > (30.0~70.0 mm, 10.18 dm<sup>3</sup>/mm), 而累积径流系数排序为 (>140.0 mm, 393.66 dm<sup>3</sup>/mm) > (30.0~70.0 mm, 356.18 dm<sup>3</sup>/mm) > (70.0~140.0 mm, 279.89 dm<sup>3</sup>/mm) > (<30.0 mm, 249.33 dm<sup>3</sup>/mm)。显然,从平均径流系数来看,特大暴雨 (>140.0 mm) 时坡耕地径流流失最多,其次为大暴雨 (70.0~140.0 mm), 发生次数最多的暴雨 (30.0~70.0 mm) 每次次降雨径流流失最少,但从累积径流系数角度讲,暴雨条件下坡耕地径流流失凸显,但特大暴雨条件下径流流失依然最大。

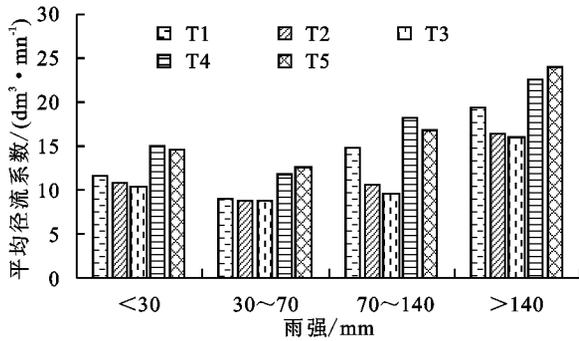
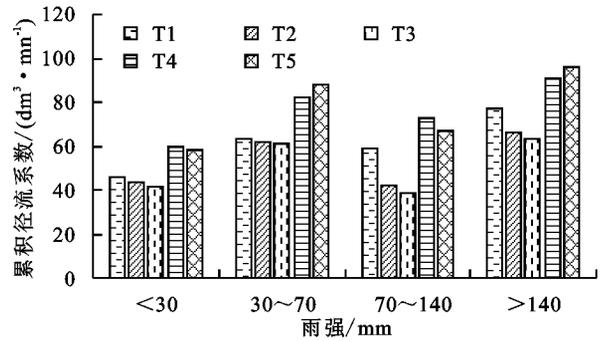


图 3 不同雨强等级下各小区径流系数变化特征



由图 4 可知,各小区平均降雨所产生泥沙量均随着雨强等级提高而增加,最大雨强等级 (>140.0 mm) 产生的平均单位泥沙量比其他雨强等级的总和还多;植物篱小区中 T2 和 T3 小区降雨所产生泥沙量较对照小区(T1)分别平均低 48.5% 和 48.4%, T4 小区较对照小区(T5)平均低 34.1%。另外,不同雨强等级各小区平均降雨所产生泥沙总量排序为 (>140.0 mm, 80.13 g/mm) > (70.0~140.0 mm, 32.43 g/mm) > (30.0~

70.0 mm, 14.48 g/mm) > (<30.0 mm, 12.35 g/mm), 所有小区累积降雨所产生泥沙量排序为 (>140.0 mm, 1602.57 g/mm) > (70.0~140.0 mm, 648.66 g/mm) > (30.0~70.0 mm, 506.81 g/mm) > (<30.0 mm, 246.91 g/mm), 同样,最大雨强等级 (>140.0 mm) 产生的累积降雨所产生泥沙量远高于其他雨强等级的总和,这表明特大暴雨对坡耕地泥沙流失同样危害最大,其次为大暴雨和暴雨。

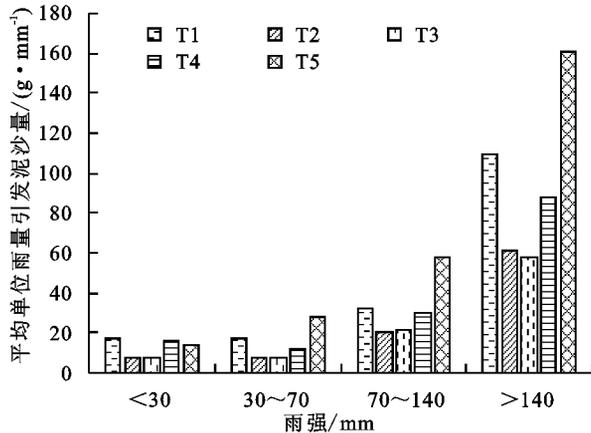
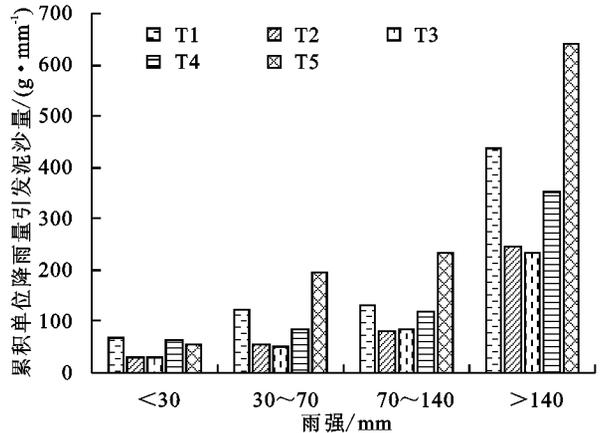


图 4 不同雨强等级下各小区累积降雨引发泥沙量变化特征



此外,对同一年限同一小区所有次降雨引发径流系数和降雨引发泥沙量加和取均值得到各小区在不

同年限内平均径流系数和降雨引发泥沙量变化情况。由图 5 可知,不同年限各小区平均径流系数变化趋势

总体保持一致,均表现为先增加后降低最后趋于稳定,15°小区(T4、T5)径流系数高于10°小区,植物篱小区(T2、T3、T4)低于对应对照小区(T1、T5),其中10°对照小区(T1)在年限少于2年时最低,随后呈逐渐增加趋势,10°新银合欢植物篱小区(T2)和香根草植物篱小区(T3)差异较小,15°香根草植物篱小区(T4)除了年限为6年时较高于15°对照小区(T5)外,

其余年限均较之低;植物篱小区(T2、T3、T4)平均降雨所引发泥沙量变化基本一致,亦均表现为先增加后降低最后趋于稳定,且植物篱小区之间差异均较小,而对照小区(T1、T5)在年限为2年后均保持在较高水平,后2年虽有所降低仍高于各植物篱小区(T2、T3、T4),且15°对照小区多数情况下显著高于10°对照小区。

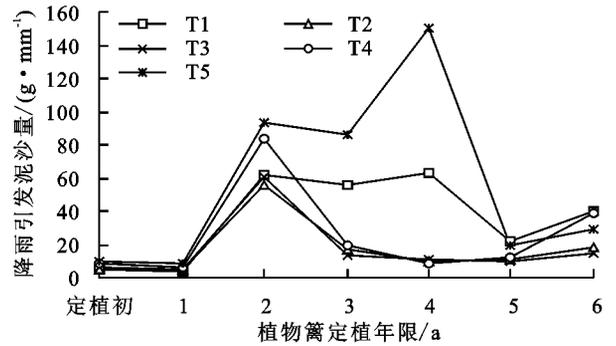
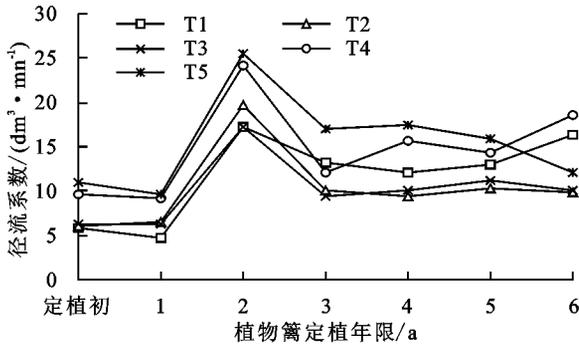


图5 不同年限各小区径流系数和降雨引发泥沙量

## 2.4 产流产沙与降雨因子相关性分析

通过将2010—2016年各场次降雨中降雨量(mm)和降雨强度(mm/h)、径流(m<sup>3</sup>)、泥沙(kg)数据进行相关分析(表3)发现,同一小区历年径流量与泥沙量之间绝大多数均呈极显著相关,2010—2016年总体相关系数为0.854~0.937,对照小区(T1、T5)

相关系数略高于植物篱小区(T2、T3、T4);历年径流量与泥沙量均与降雨量呈极显著相关,2010—2016年总体相关系数表现为对照小区高于植物篱小区,这种现象在各小区泥沙量与降雨量相关系数之间更明显,但二者与降雨强度均不相关,历次降雨量与对应场次降雨强度亦不相关。

表3 2010—2016年降雨因子与径流量、泥沙量相关分析

降雨因子	年份	n	降雨量	径流量					泥沙量				
				T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
降雨量	2010	6	1	0.532	0.507	0.717	0.858*	0.908*	0.357	0.426	0.654	0.818*	0.827*
	2011	8	1	0.978**	0.959**	0.971**	0.993**	0.703	0.758*	0.766*	0.759*	0.762*	0.792*
	2012	13	1	0.942**	0.941**	0.925**	0.945**	0.937**	0.935**	0.917**	0.926**	0.921**	0.913**
	2013	6	1	0.930**	0.966**	0.978**	0.920**	0.920**	0.941**	0.970**	0.978**	0.988**	0.927**
	2014	6	1	0.907*	0.934**	0.938**	0.929**	0.912*	0.974**	0.993**	0.997**	0.991**	0.953**
	2015	5	1	0.690	0.835	0.741	0.839	0.858	0.481	0.588	0.729	0.432	0.398
	2016	6	1	0.967**	0.995**	0.994**	0.954**	0.994**	0.980**	0.967**	0.969**	0.957**	0.926**
	2010—2016	50	1	0.853**	0.831**	0.855**	0.786**	0.872**	0.873**	0.672**	0.592**	0.634**	0.814**
降雨强度	2010	6	0.927**	0.644	0.625	0.800	0.911*	0.948**	0.425	0.491	0.739	0.881*	0.913*
	2011	8	-0.016	-0.053	0.195	0.183	-0.035	0.380	0.099	0.090	0.095	0.061	-0.025
	2012	13	0.080	-0.038	-0.038	-0.033	-0.041	-0.065	-0.082	-0.121	-0.112	-0.115	-0.121
	2013	6	0.029	0.013	-0.041	-0.039	-0.121	0.088	-0.090	-0.075	-0.070	-0.056	-0.136
	2014	6	0.146	0.058	0.057	0.086	0.088	0.041	0.100	0.103	0.146	0.136	0.082
	2015	5	-0.734	-0.020	-0.250	-0.358	-0.289	-0.294	0.102	-0.020	-0.098	0.205	0.094
	2016	6	0.142	0.320	0.105	0.066	0.365	0.068	-0.005	-0.092	-0.056	-0.128	0.281
	2010—2016	50	0.168	0.197	0.109	0.096	0.207	0.134	0.036	0.019	0.019	0.012	0.021
径流量	2010	6							0.910*	0.939**	0.962**	0.991**	0.984**
	2011	8							0.845**	0.781*	0.783*	0.800*	0.274
	2012	13							0.982**	0.979**	0.983**	0.990**	0.989**
	2013	6							0.984**	0.995**	0.997**	0.957*	0.976**
	2014	6							0.977**	0.953**	0.945**	0.955**	0.993**
	2015	5							0.798	0.875	0.867	0.785	0.651
	2016	6							0.943**	0.979**	0.986**	0.846*	0.919**
	2010—2016	50							0.937**	0.919**	0.854**	0.877**	0.921**

注: \*表示在 $P<0.05$ 水平(双侧)上显著相关; \*\*表示在 $P<0.01$ 水平(双侧)上极显著相关。下同。

## 3 讨论

### 3.1 不同年限植物篱水土保持作用变化特征及其机理

植物篱对川中丘陵区紫色土坡耕地具有很好的水土保持作用。较对照而言,植物篱小区径流量下降10.5%~20.0%,泥沙量下降53.5%~54.5%,减沙作用较减流作用更优异,这与黄传伟等<sup>[23]</sup>、李新平等<sup>[24]</sup>部分研究结论类似。同时发现,各植物篱中10°新银合欢植物篱并非同时发挥出明显的减流作用和减沙作用,减沙作用较减流作用提前约1年凸显,而10°香根草植物篱减流、减沙作用基本上是在同一年明显表现,且减流作用波动较大,减沙作用随着年限增长逐渐趋稳(生长年限大于3年后),这基本符合湛芸等<sup>[17]</sup>的推论。首先,植物篱定植初生长尚未成熟,枝叶稀疏,蔽合度较低,加上在布设时篱带前与农作物间留有1.00 m隔离带,使得植物篱小区被覆率始终较对照小区少近15.0%,再加上定植初植物篱所占面积(近7.5%,因蔽合度低,截流拦沙作用微弱,可以等同于隔离带),单个植物篱小区约22.5%(甚至更多)的地表处于空闲裸露状态;其次,研究区暴雨、大暴雨引发径流小区坡地水土流失次数最多,其雨滴动能大、历时短,对坡地紫色土孔隙系统破坏迅速,导致降雨下渗不畅<sup>[25]</sup>,坡面径流产生时间缩短,径流流速流量加大,大量大团聚体被裹挟搬运,加上植物篱布设时翻挖表土、随机踩踏、移栽补栽等因素影响,加大了水土流失较大波动风险;再次,植物篱布设后从生长期到成熟期过渡期间,香根草作为禾本科草本植物,分蘖繁殖,花果期8—10月<sup>[26]</sup>,枝叶细长,株身较高,生长较为快速,在其生长过程中不断增生新的植株填充原本空缺地带,植株蔽合度不断提高,从而可在较早年限同一时期内起到一定的承接、缓冲降水动能和拦截部分泥沙的作用,新银合欢作为豆科灌木(或小乔木),主要通过主干增粗和地上部分分枝开权,相互交叉形成一定的郁闭度,生长速度较慢,早期叶片碎小,枝条稀疏,不能够很好地承接减弱降雨冲击力,故其减流作用较为推后,但由于布设时植株密度较高,各个植株只能通过不断分权和伸长枝节来获取足够的阳光进行光合作用,相较拥有充足阳光和养分的单个植株,其生物学形态发生异化,植株枝身更加细长繁密,使得其拦截泥沙作用较为突出;最后,随着植物篱生长年限增长,根系不断横向增粗和纵向向地下深入扩张,使得距离地面较近枝干分裂根周土体,形成众多裂隙并整体微微隆起,加上经过前期拦沙截流,使得坡耕地逐渐梯化,其周围坡度逐渐减小,减缓了径流流速<sup>[27]</sup>,一方面可直接将坡面上方径流拦截导入

地下,另一方面植物篱地上部分承接的降水通过枝干导入地下根周裂隙及更深处,起到减少径流作用,待其完全成熟后,由于外部养分供应限制,植株自身变化变缓,最终发挥出稳定的水土保持作用。

### 3.2 植物篱对降雨、坡度与坡耕地产流产沙影响的削弱作用

研究期间绝大多数次降雨过程中,各小区平均径流系数和平均降雨所产生泥沙量均随着雨强等级提高而增加,其中最大雨强等级(>140.0 mm)产生的平均泥沙量和累积泥沙量均比其他雨强等级之和还多,而无论是不同坡度(10°和15°)单纯种植作物(玉米)的对照小区还是不同坡度植物篱小区,15°小区水土流失现象更为严重。但10°小区香根草植物篱和新银合欢植物篱对特大暴雨(>140.0 mm)和大暴雨(70~140 mm)下产生的径流系数消减达15.0%~34.4%,对其余雨强等级下产生的径流系数消减达1.4%~9.7%,所有植物篱小区(T2、T3和T4)对各雨强等级平均降雨所产生泥沙量的消减达34.1%~48.5%。进一步分析可知,研究期间,历年径流量与泥沙量多呈极显著相关,二者与降雨量均呈极显著相关,但与降雨强度均不相关,降雨量与降雨强度亦不相关,2010—2016年总体相关系数中对照小区高于植物篱小区,尤其是各小区泥沙量与降雨量相关系数之间更明显,这说明对照小区与降雨量联系密切程度高于降雨量与植物篱小区。此外,不同坡度植物篱小区之间的径流流失差异和泥沙流失差异均少于单纯种植作物(玉米)的对照小区之间的差异(分别减少28.9%和11.3%),这也表明植物篱能够收窄和消减坡度变陡对坡耕地水土流失的加剧作用。林锦阁等<sup>[28]</sup>对沂蒙山区自然荒坡和荞麦、野生牧草和花生径流小区两两对照进行了3年定位观测后认为,降雨量与各径流小区产流量相关性显著,与部分小区产沙量相关性显著,平均降雨强度与各径流小区的产流量和产沙量的相关性均不显著,与本研究部分结论类似。高磊等<sup>[29]</sup>通过对太行山土石山区5年定位观测后认为,径流量与降雨量、产沙量呈显著相关,并认为径流量、产沙量与最大30 min降雨强度 $I_{30}$ 呈显著相关;也有众多室内模拟试验<sup>[30-31]</sup>得出结论认为,降雨强度与坡面产流产沙密切相关。此外,湛芸<sup>[32]</sup>在分析了与本文相同研究条件下2010—2011年降雨因素和径流量、泥沙量的相关性认为,降雨强度与径流量、泥沙量呈显著相关。本文通过对2010—2011年期间历年降雨量(mm)和径流量(m<sup>3</sup>)、泥沙量(kg)等的相关性分析(表4)后发现,2010年和2010—2011年部分小区径流量、泥沙

量确实与对应降雨强度显著相关,但结合表 3 可知,由于其余年份三者并没有显著相关性,随着降雨场次和年份增多,这种显著性被快速“湮没”。可见,由于

研究区域、土地利用方式、观测方式、室内模拟与野外观测复杂度不同等多方面的制约,天然降雨下降雨强度与径流量、泥沙量的相关关系还有待进一步探究。

表 4 2010—2011 年降雨因子与径流量、泥沙量相关分析

降雨因子	年份	n	降雨量	径流量					泥沙量				
				T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
降雨量	2010	6	0.927**	0.644	0.625	0.800	0.911*	0.948**	0.425	0.491	0.739	0.881*	0.913*
	2011	8	-0.016	-0.053	0.195	0.183	-0.035	0.380	0.099	0.090	0.095	0.061	-0.025
	2010—2011	14	0.722**	0.341	0.395	0.503	0.602*	0.765**	0.340	0.333	0.494	0.574*	0.531

## 4 结论

(1)植物篱能够明显降低坡耕地水土流失,其减沙作用较减流作用发挥更为突出和稳定。研究期间,当植物篱开始发挥其水土保持作用时,减流率(年均)为 10.5%~20.0%,减沙率(年均)为 53.5%~54.5%,同一植物篱小区次降雨减流率波动均较大,而减沙率在生长年限大于 3 年后趋于稳定。

(2)10°香根草植物篱(水土保持效果最优)减流作用和减沙作用均在生长年限为 1 年时开始发挥,10°新银合欢植物篱减沙作用较减流作用(在生长年限为 2 年时凸显)提前约 1 年发挥,而 15°小区香根草植物篱定植当年便开始发挥其蓄水减流作用,但多数次降雨减流率均明显低于 10°植物篱小区。

(3)植物篱能够部分抵消坡度对坡耕地水土流失的加剧作用,削弱降雨量与径流泥沙的相关程度。总体上,不同坡度植物篱小区之间历年径流流失差异和泥沙流失差异分别平均比不同坡度对照小区之间的低 28.9%和 11.3%,2010—2016 年总体相关系数表现为对照小区高于植物篱小区,各小区泥沙量与降雨量之间更明显。

(4)不同年限植物篱小区平均径流系数和平均降雨所引发泥沙量均表现为先增加后降低最后趋于稳定趋势,其中 10°小区香根草植物篱和新银合欢植物篱对特大暴雨(>140.0 mm)和大暴雨(70~140 mm)下产生的径流系数消减明显,达 15.0%~34.4%,各植物篱对所有雨强等级平均降雨所产生泥沙量均有明显消减作用,达 34.1%~48.5%。

### 参考文献:

[1] 刘定辉. 紫色丘陵区菘草植物篱防治水土流失的效应及机理[D]. 北京:中国农业科学院,2006.

[2] Narain P, Singh R K, Sindhwal N S, et al. Agroforestry for soil and water conservation in the western Himalayan Valley Region of India 1. Runoff, soil and nutrient losses [J]. *Agroforestry Systems*, 1997, 39(2): 175-189.

[3] 涂仕华,陈一兵,朱青,等. 经济植物篱在防治长江上游

坡耕地水土流失中的作用及效果[J]. *水土保持学报*, 2005,19(6):1-5.

- [4] Kiepe P. Effect of *cassia siamea* hedgerow barriers on soil physical properties [J]. *Geoderma*, 1995, 66(1): 113-120.
- [5] Lenka N K, Dass A, Sudhishri S, et al. Soil carbon sequestration and erosion control potential of hedgerows and grass filter strips in sloping agricultural lands of eastern India [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 158(6): 31-40.
- [6] 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(4): 757-771.
- [7] 周洋,姜敏,李梦雨,等. 湘中丘陵区紫色土坡耕地水土保持措施效益的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6):134-138.
- [8] 胡晚枚,熊康宁,向廷杰,等. 贵州喀斯特高原山地植物篱物种选择与试验示范[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2017, 31(5):445-451.
- [9] 何丙辉,陈晶晶,向明辉,等. 不同生长年限的植物篱对坡耕地紫色土土壤侵蚀和土壤有机质的影响[J]. *三峡生态环境监测*, 2016, 1(1):36-45.
- [10] 程冬兵,蔡崇法. 等高绿篱技术保水抗旱效益研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2008, 17(5):793-797.
- [11] 马星,王文武,郑江坤,等. 植物篱措施对紫色土坡耕地产流产沙及微地形的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6):85-89.
- [12] Lin C W, Tu S H, Huang J J, et al. The effect of plant hedgerows on the spatial distribution of soil erosion and soil fertility on sloping farmland in the purple soil area of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 105(2): 307-312.
- [13] 曾宪海,王真辉,谢贵水,等. 幼龄胶园间种新银合欢对胶树生长和土壤肥力影响[J]. *热带农业科学*, 2001(4):1-3.
- [14] 卜崇峰,蔡强国,袁再健. 三峡库区等高植物篱的控蚀效益及其机制[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(4):14-18.

- [15] 李建兴,何丙辉,梅雪梅,等.紫色土区坡耕地不同种植模式对土壤渗透性的影响[J].应用生态学报,2013,24(3):725-731.
- [16] 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.
- [17] 谌芸,何丙辉,向明辉,等.紫色土坡耕地植物篱的水土保持效应研究[J].水土保持学报,2013,27(2):47-52.
- [18] 中华人民共和国水利部.SL 419—2007 水土保持试验规程[S].北京:中国水利水电出版社,2008:15-21.
- [19] 常松果,胡雪琴,史东梅,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] Wallace B M, Krzic M, Newman R F, et al. Soil aggregate dynamics and plant community response after bio solids application in a semiarid grassland [J]. Journal of Environmental Quality, 2016, 45(5): 1663-1671.
- [21] 中华人民共和国水利部.GB/T 15774—2008 水土保持综合治理效益计算方法[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [22] 国家防汛抗旱总指挥部.国家气象局颁布的降水强度等级划分标准[EB/OL].(2008-10-07)[2018-09-03]. [http://www.gov.cn/ztl/2008tffy/content\\_1113935.htm](http://www.gov.cn/ztl/2008tffy/content_1113935.htm).
- [23] 黄传伟,牛德奎,黄顶,等.草篱对坡耕地水土流失的影响[J].水土保持学报,2008,22(6):40-43.
- [24] 李新平,王兆骞,陈欣,等.红壤坡耕地人工模拟降雨条件下植物篱笆水土保持效益及机理研究[J].水土保持学报,2002,16(2):36-40.
- [25] 邵明安,张兴昌.坡面土壤养分与降雨、径流的相互作用机理及模型[J].世界科技研究与发展,2001,23(2):7-12.
- [26] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志[M].北京:科学出版社,1997,10(2):132.
- [27] 尹迪信,唐华彬,朱青,等.植物篱逐步梯化技术试验研究[J].水土保持学报,2001,15(2):84-87.
- [28] 林锦阔,李子君,许海超,等.降雨因子对沂蒙山区不同土地利用方式径流小区产流产沙的影响[J].水土保持通报,2016,36(5):7-12.
- [29] 高磊,饶良懿,崔飞波,等.太行山土石山区侵蚀性降雨对典型植物措施产流产沙的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):5-11.
- [30] 刘月娇.不同降雨强度和纱网覆盖下紫色土坡耕地水土流失与养分输出特征[D].重庆:西南大学,2016.
- [31] 郑子成,李廷轩,张锡洲,等.模拟降雨条件下玉米植株对降雨再分配的作用[J].水土保持研究,2012,19(4):72-76.
- [32] 谌芸.植物篱对紫色土水土特性的效应及作用机理[D].重庆:西南大学,2012.
- (上接第26页)
- [11] 蒲玉琳,林超文,谢德体,等.植物篱—农作坡地土壤团聚体组成和稳定性特征[J].应用生态学报,2013,24(1):122-128.
- [12] Akram S, Yu B, Ghadiri H, et al. The links between water profile, net deposition and erosion in the design and performance of stiff grass hedges [J]. Journal of Hydrology, 2014, 510: 472-479.
- [13] 王润泽,谌芸,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.
- [14] 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[J].中国水土保持科学,2008,6(1):1-8.
- [15] 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.
- [16] 党汉瑾.半干旱区带状植物篱系统径流调控效应研究[D].北京:中国林业科学研究院,2013.
- [17] 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].北京: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.
- [18] 杜捷,高照良,王凯.布设植物篱条件下工程堆积体坡面产流产沙过程研究[J].水土保持学报,2016,30(2):102-106.
- [19] 水利部水土保持司.SL 190—2007.土壤侵蚀分类分级标准[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [20] Fan J, Yan L, 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(2): 107-116.