

香根草植物篱带宽对紫色土坡地产流产沙的影响

刘泉宏¹, 李铁¹, 谌芸¹, 向明辉², 陈怡³, 唐菡¹

(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;3.贵州省毕节市建筑工程施工安全监督站,贵州 毕节 551700)

摘要:为研究植物篱带宽对紫色土坡地产流产沙过程的影响,寻求有效控制水土流失的最优植物篱带宽,采用人工模拟降雨试验对3种篱带宽(20,30,40 cm)、不同雨强(30,60,90 mm/h)下的紫色土坡地产流产沙过程进行研究。结果表明:(1)植物篱能有效延缓紫色土坡面产流时间,坡面产流量与篱带宽能拟合为二次方程($R^2=0.99$)。随篱带宽度的增大,流速减小,且篱带内部的流速下降最明显,流速变化曲线波动幅度变小。(2)植物篱在产沙过程前期有效抑制坡面产沙量的增长,坡面产沙量随篱带宽度的增大而减少,且当雨强为30,90 mm/h时,二者拟合的二次方程 R^2 达到0.99。(3)篱带宽对产流、产沙量的影响均为极显著。30 mm/h雨强下、宽度为30 cm的篱带可达到显著的减流减沙效益,是能有效控制水土流失的最优植物篱带宽。

关键词:植物篱;人工模拟降雨;雨强;流速;产沙

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2019)04-0093-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.04.014

Effects of *Vetiveria zizanioides* L. Hedgerow Width on Runoff and Sediment Yield on Purple Soil Slope

LIU Xiaohong¹, LI Tie¹, CHEN Yun¹, XIANG Minghui², CHEN Yi³, TANG Han¹

(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; 3.Construction Safety Supervision Station of Bijie, Bijie, Guizhou 551700)

Abstract: In order to study the effects of hedgerow width on runoff and sediment yield process of purple soil slope and explore the critical hedgerow width for effective control of soil erosion, three hedgerow with different width (20, 30, 40 cm) were set up to analyze the runoff and sediment yield of purple soil slope land under different rainfall intensities (30, 60, 90 mm/h). The results showed that: (1) Hedgerow could effectively delay runoff generation time on purple soil slope, and the relationship between the runoff yield and the hedgerow width could be fitted into a quadratic equation ($R^2=0.99$). With the increase of hedgerow width, the flow rate decreased, and the flow rate inside the hedgerow decreased most obviously, and the fluctuation range of the flow rate curve decreased. (2) Hedgerow could effectively restrain the increase of sediment yield on the slope in the early stage of sediment yield process, and the sediment yield on the slope decreased with the increase of hedgerow width. When the rainfall intensity was 30 mm/h and 90 mm/h, the R^2 of quadratic equation between the sediment yield and the hedgerow width was 0.99. (3) The hedgerow width caused an extremely significant effect on runoff and sediment yield. Under 30 mm/h rainfall intensity, the hedgerow with a width of 30 cm could achieve a remarkable benefit of reducing runoff and sediment yield.

Keywords: hedgerow; artificial simulated rainfall; rain intensity; flow rate; sediment yield

紫色土成土快但易遭侵蚀,紫色土坡地的水土流失尤为严重^[1-3]。植物篱是一种在长期的农耕实践中产生的水土保持技术,在紫色土坡地能够发挥良好的减沙减流效益^[3-5],适宜的植物篱空间结构能在获得

较高的水土保持收益的同时付出较低的成本,将土地利用效率最大化^[6-7]。有学者^[8]在仅考虑坡度情况下提出植物篱带间最大坡面距离的经验公式,也有学者^[9]在泥沙被植物篱拦截形成梯田的前提下确定了带间距的

收稿日期:2019-01-26

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);中央高校基本业务费专项(XDJK2018B044);岩溶环境重庆重点实验开放课题项目(Cqk201803)

第一作者:刘泉宏(1997—),男,硕士研究生,主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail:631361269@qq.com

通信作者:谌芸(1981—),女,副教授,主要从事土壤侵蚀和流域治理研究。E-mail:sy22478@126.com

理论公式,从防止细沟侵蚀、土地利用、植物篱与作物的竞争关系等几个方面,探讨了等高植物篱的带间距确定技术,并推导了适用于当地的估算公式^[10]。通过对不同坡长径流小区的试验比较得出植物篱种植间距应 $<10\text{ m}$,为有效发挥植物篱的水土保持作用,带间距应控制在发生细沟侵蚀的临界坡长以内^[11-12]。

国内外已有较多关于植物篱带间距的研究,现有研究^[13]发现,麦冬和黄花菜双行植物篱的减沙减流效益较优。相较黄花菜、香根草、百喜草 3 种单一植物篱模式,2 种相同植物并排种植的植物篱可达到更显著的水土保持效益^[14]。可见,篱带宽度与植物篱的减流减沙效益密切相关。然而涉及到篱带宽度的研究相对较少,有待进一步研究;且相关的研究地点多为室外,鲜有进行室内试验,室内试验一方面可以更精准地控制试验条件,减少干扰因素,便于观测;另一方面,可以和室外的研究结果进行对比,看其结果是否能相互验证,以便进行更深入的探讨。为此,本研究选取香根草植物篱为研究对象,进行室内模拟研究的尝试。根据紫色土坡地常见的植物篱种植情况设置 3 种篱带宽度(20, 30, 40 cm),在 3 种雨强下(30, 60, 90 mm/h)进行人工模拟降雨试验,通过测定初始产流时间、产流量、产沙量及地表径流流速等指标,对比分析不同雨强、不同篱带宽度下坡地产流产沙的差异,探讨植物篱带宽度对坡地产流产沙的影响,以期为紫色土区坡耕地的水土流失防治和植物篱技术的改进提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验土壤采自四川省遂宁水土保持试验站(30°21'51"N, 105°28'37"E),该区属亚热带湿润季风气候区,气候温和,雨量充足,日照偏少,海拔 288.0~330.6 m,年均气温 18.2℃,年均降水量 933.3 mm,5—9 月集中降水量可占全年降水量的 72.6%;年均蒸发量 897.2 mm,平均无霜期 296 d。该区紫色土由侏罗系遂宁组岩层发育而成,结构性差,土壤 pH 呈中性至微碱性,土壤抗蚀能力较弱^[30]。

1.2 试验设计

1.2.1 降雨器及降雨车的设置 本试验在西南大学资源环境学院人工降雨大厅完成。采用诺顿侧喷式降雨模拟器作为人工降雨装置,有效降雨面积为 3 m×5 m。试验土槽长 5.0 m,宽 1.0 m,深 0.3 m,在出口断面处设置集水槽,用于收集地表径流。

1.2.2 土样采集及装填 2017 年 12 月上旬于遂宁水土保持试验站采集散土,采样条件为雨后放晴 3 天以上,采样前测定其容重、含水率等物理性质,采样时清除地表植被残落物及固体杂块,采样土层深度最深不超过

地下 30 cm。然后将采集的紫色土装运至西南大学人工降雨大厅,对土样做简单筛捡处理,清除采样时未除尽的固体杂块和植物残枝等。为使填充土壤保持均匀,采用分层填土的方式,土槽填土深度 30 cm,每 5 cm 填装土样 1 次,共 6 层。填土前,根据遂宁水保站的土壤容重计算出每一层所需土的重量。填土时在土槽边缘每隔 5 cm 画 1 条标记线,然后加入计算好的散土量。分层填土过程中用钢刷打毛后再进行下一层填土工作,同时将边界处压实,以消除边界效应的影响。填土时控制土壤容重和含水率,以保证和遂宁水土保持试验站的土壤结构大致相同。

1.2.3 篱带布设 于 2017 年 9 月上旬在降雨大厅闲置土槽内种植香根草,植物培育 3 个月后整体移栽至试验土槽,于 2017 年 1 月上旬至 2018 年 2 月中旬模拟香根草植物篱进行降雨试验,将培育好的香根草带土整体移栽至土槽底部和土槽中部(图 1),并于植物篱土体与填装土体缝隙处填土,用铁片压实,使移栽后的土体与填装土体连为一体。待植物篱移栽 7 天后,模拟香根草植物篱进行降雨试验。正式降雨前先润湿小区土样,使土壤水分含量基本达到饱和,用塑料薄膜遮盖,静置 24 h。

1.2.4 试验处理设置 本试验共设置 3 种降雨强度:30, 60, 90 mm/h;3 种篱带宽度:20, 30, 40 cm(各处理用 V-20/30/40-30/60/90 表示,第 1 个 20/30/40 表示篱带宽度分别为 20, 30, 40 cm;第 2 个 30/60/90 表示降雨强度为 30, 60, 90 mm/h),以及对对照(CK)。土槽坡度均为 10°,每个处理设置 3 次重复(因条件所限,3 次重复试验均在同一土槽内进行。为最大限度减小因此带来的误差,降雨前测定土样含水率和容重,降雨期间降雨器气压稳定,喷嘴固定,保证降水和土壤水分分布等条件大致相同),共进行 36 场降雨试验。图 1 为篱带布设示意。

1.3 指标测定与计算

1.3.1 产流、产沙量测定与计算 开始降雨至土槽坡面有径流产生为止,这段时间计为初始产流时间。产流开始后,每隔 5 min 收集 1 次径流,并把这 5 min 内平均每 1 min 的产流量作为产流强度,产沙强度也用相同方法计算。径流收集好后采用 500 mL 空矿泉水瓶装取泥沙混合均匀的水样。降雨试验结束后,将所有瓶中的水样摇匀,再分别倒入 50 mL 烧杯中静置 24 h,倒掉上清液,采用烘干法(105℃, 12 h)得到泥沙含量,进而计算产沙量。

1.3.2 径流流速测定与计算 采用高锰酸钾染色法测定流速。首先布设测量点,图 1 为篱带上方测量点,按同样的方式在篱带内部和篱带下方布设测量点。从测量开始点处滴入高锰酸钾溶液(紫红色),同时计时,

于测量结束点观察到带紫红色径流时停止计时,计算出高锰酸钾溶液随径流从测量开始点到结束点处所用的时间,每个位置 3 次重复,每隔 5 min 测量 1 次,计算每个测量点的径流流速,以便分析其动态变化。

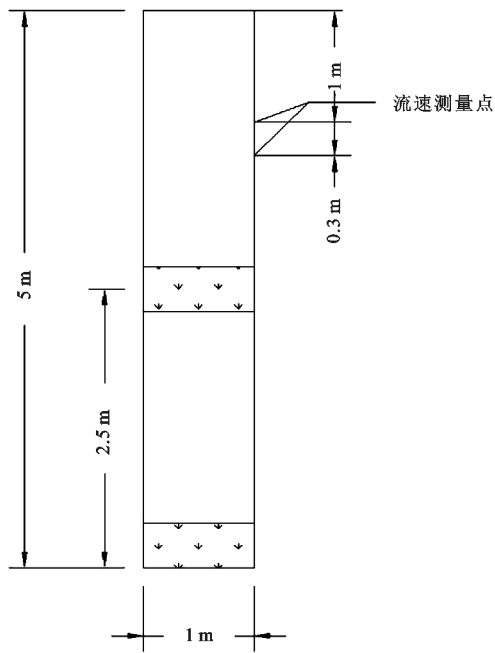


图 1 篱带布设示意

1.4 数据处理与分析

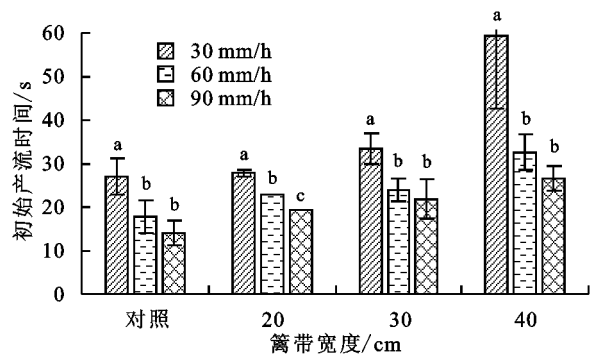
采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据及图表处理,SPSS 20.0 统计软件进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 篱带宽度对产流过程的影响

2.1.1 篱带宽度对初始产流时间的影响 降雨时雨水大量渗入土壤,产生径流需要一定的缓冲时间,称为初始产流时间。对比不同处理的初始产流时间(图 2)可知,当篱带宽度一致时,初始产流时间随降雨强度的增加而呈变短趋势,且在较宽的篱带宽度下这种趋势更加明显。在同一雨强不同篱带宽度下,篱带宽度越宽,初始产流时间越长,对照产流时间最短。雨强 30 mm/h、篱带宽度 20 cm 下,坡面初始产流时间与对照相近,从 30 cm 篱带宽度开始出现较明显差异,40 cm 篱带宽度下的初始产流时间明显高于前者,增加 78.25%;60 mm/h 雨强时,20、30 cm 篱带宽度下的初始产流时间相差不大,且高于对照,而 40 cm 篱带宽度下的初始产流时间明显滞后于前两者,产流时间增加 35.88%;雨强 90 mm/h,40 cm 篱带宽度下初始产流时间仍为最长,但相较篱带宽度为 30 cm 时只增加 21.78%,其增长幅度明显低于 30、60 mm/h 雨强下的初始产流时间。总体来看,布设植物篱的坡地产生产流时间滞后于对照,说明植物篱具有延缓径流产生的能力,并且随着篱带宽度的增加,产流滞后越明显;篱带宽度为 40 cm 时,坡面的初始产流时间最

长,且在 30、60 mm/h 雨强下,滞后现象更明显,植物篱带能更好地发挥其延缓径流产生的能力。



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 2 不同篱带宽度下的初始产流时间

2.1.2 篱带宽度对产流量的影响 从图 3 可以看出,同一篱带宽度下,随着雨强的增大,其产流量不断增大;同一雨强、不同篱带宽度下,地表产流量随篱带宽度的增加而呈减少趋势,各雨强下地表产流量随篱带宽度的变化有所不同。30 mm/h 雨强、40 cm 篱带宽度下产流量达到最低值 302.5 L,略低于 30 cm 篱带宽度下的产流量,而 20 cm 篱带宽度下地表产流量明显高于前 2 者,40 cm 篱带宽度下地表产流量较 20 cm 减少 13.50%;60 mm/h 雨强,比较不同篱带宽度的产流量发现,40 cm 篱带宽度下地表产流量较 20 cm 减小 18.43%,较 30 cm 篱带宽度减小 11.08%,减流效益明显。90 mm/h 雨强,40 cm 篱带宽度下地表产流量较 20 cm 减小 9.18%,较 30 cm 篱带宽度减小 4.05%。30、60 mm/h 雨强下,随植物篱带宽度的增加,其地表产流量减少幅度更高,说明植物篱的减流效益在较低雨强条件下表现得更为明显;不同篱带宽度减流效益不同,篱带需达到一定的宽度,才能充分发挥其减流效益,篱带宽度为 20 cm 地表产流量与 30 cm 存在明显差异,说明 30 cm 的篱带宽度可产生明显的减流效益,同时篱带宽度为 30 cm 的地表产流量与 40 cm 差异不明显,说明 30 cm 的篱带宽度即已达到较优的减流效果,是节约经济成本且有水土保持效益的较优选择。

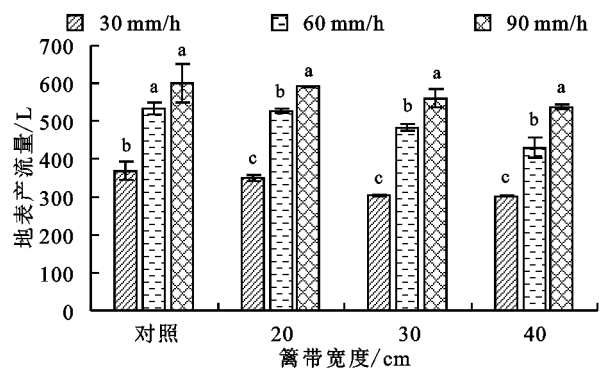


图 3 不同篱带宽度下的地表产流量

2.1.3 篱带宽度对产流强度的影响 人工室内模拟

降雨的产流过程符合超渗产流的特征。从图 4 可以看出,随着产流时间的增长,产流强度逐渐变大,最终趋于稳定,总体产流过程较平稳。在产流初期,尤其是产流开始后的前 10 min,产流强度迅速增加,随着时间推移,产流强度增速放缓,最终维持在较稳定的水平上。比较分析同一篱带宽度、不同雨强条件下的产流强度变化规律发现,在篱带宽度相同时,雨强越大,产流强度相应提高。而同一雨强下,对比不同篱带宽度产流强度的规律发现,随篱带宽度的增加,产流强度逐渐减小;产流 5~10 min 内 40 cm 篱带宽度下坡面的产流强度最小,而其产流强度的增幅最大。在 30 mm/h 雨强下,随篱带宽度的增加,30 cm 篱带宽度的产流强度较 20 cm 篱带宽度明显下降,40 cm 篱带宽度下较 30 cm 变化不明显;在 60 mm/h 雨强下,各篱带宽度对应的产流强度差异明显,第 10 min 产流曲线基本稳定后,30 cm 篱带宽度下产流强度较 20 cm 减少 0.98 L/min,40 cm 篱带宽度下产流强度较 20 cm 减少 1.94 L/min。在 90 mm/h 雨强下,随篱带宽度的增加,产流强度变化较小。说明 30 mm/h 雨强下 30 cm 篱带宽度有明显的减流效益。

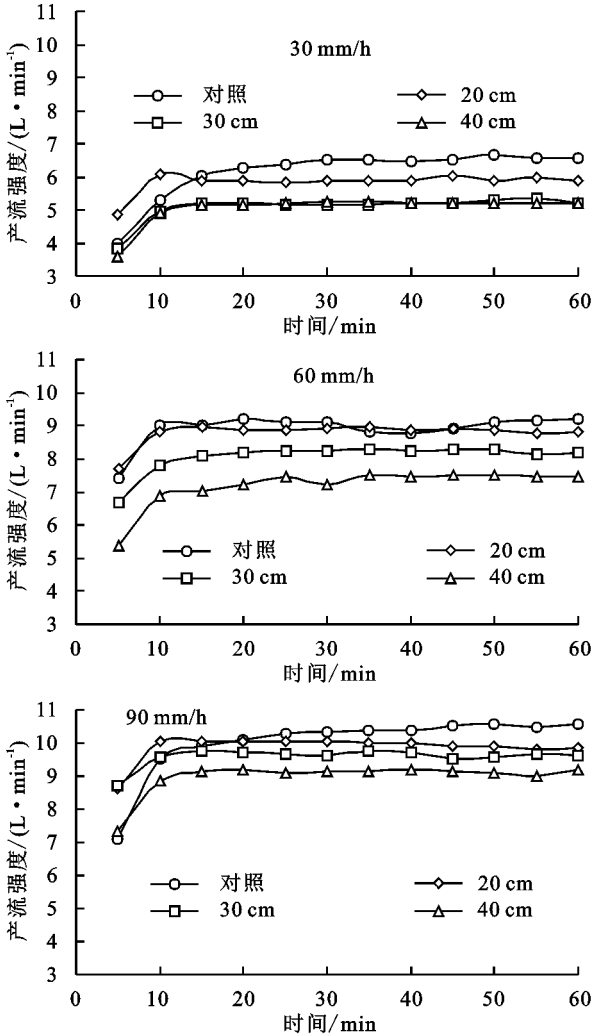


图 4 不同篱带宽度下的产流强度

2.1.4 篱带宽度对流速的影响 取篱带上方、篱带中部和篱带下方所测流速的平均值作为坡面的平均流速。从图 5 可以看出,坡面平均流速随雨强的增大而增大;不同篱带宽度下,坡面平均流速总体趋势表现为 40 cm<30 cm<20 cm。在 30,60 mm/h 雨强条件下,不同篱带宽度对应的坡面平均流速变化量较大,而在 90 mm/h 雨强条件下,坡面平均流速差距较小。20 cm 篱带宽度下坡面平均流速较大,30 cm 篱带宽度下坡面平均流速明显降低,而 40 cm 篱带宽度下坡面平均流速与 30 cm 相差较小,可见宽度为 30 cm 的植物篱带可明显减小坡面径流的平均流速。因此 30 cm 的植物篱带具有显著的减流效益。

由图 6 可知,人工室内模拟降雨条件下,各处理坡面呈现出相似的规律:随着产流时间的延长,径流流速先逐渐变大,后在一稳定流速值周围上下浮动。该规律在 30 mm/h 雨强下更为明显。同一篱带宽度、不同雨强条件下,篱带后的流速始终最大,随着雨强的增大,地表径流流经篱带间和篱带后流速对应的曲线趋于接近,流速差值趋于减小。对于 20 cm 篱带宽度、30 mm/h 雨强下,产流开始时篱带间的流速大于篱带前的流速,产流第 10 min,篱带间流速低于篱带前流速,产流第 20 min 时,两者流速曲线再次交叉,篱带间流速大于篱带前流速,产流第 40 min 开始,篱带间流速低于篱带前流速,直至试验结束;此规律同样出现在 60,90 mm/h 雨强对应的流速曲线中,其中不同之处是 90 mm/h 雨强下前 40 min 篱带间和篱带前对应的流速曲线并未出现交叉,产流第 40 min 篱带间流速才开始低于篱带前流速;对于 30 cm 篱带宽度,30 mm/h 雨强下前 40 min 篱带间的流速始终比篱带前低,40 min 后两者流速相近。60 mm/h 雨强下,篱带间流速与篱带前流速相近,流速上下波动,总体来看,篱带间流速略低于篱带前流速。90 mm/h 雨强下,两者流速曲线十分接近;对于 40 cm 篱带宽度,30 mm/h 雨强下,篱带前流速始终最小。60 mm/h 雨强下,以产流第 30 min 为分界点,前 30 min 篱带间流速较高,后 30 min 篱带前流速较高。90 mm/h 雨强下,篱带间流速总体低于篱带前流速。可见 30~40 min 内各个篱带宽度下,篱带前和篱带间流速随时间的变化曲线均会出现“交叉点”,缩小篱带前和篱带间流速的差距,甚至使篱带前和篱带间流速的大小关系发生变化。对比同一雨强、不同篱带宽度下,坡面不同位置的流速随时间的变化曲线发现,在 30 mm/h 雨强条件及 3 种篱带宽度下,篱带间流速相近,20,30 cm 篱带宽度下,径流流经篱带时的流

速与流经篱带前的流速变化不大。40 cm 篱带宽度下篱带前、后的流速低于 20, 30 cm 篱带宽度下的流速; 60 mm/h 雨强下, 随篱带宽度的增加, 篱带前与篱带后的流速差异逐渐变小。90 mm/h 雨强下, 20 cm 篱带宽度下的篱带间的流速整体高于篱带前, 30,

40 cm 篱带宽度下, 篱带间流速整体低于篱带前, 且 2 条流速曲线趋于重合。说明当径流进入植物篱带时, 篱带能减小坡面径流流速, 甚至使径流流速低于初始流速; 随着篱带宽度的增加, 篱带减缓径流流速的能力明显增强。

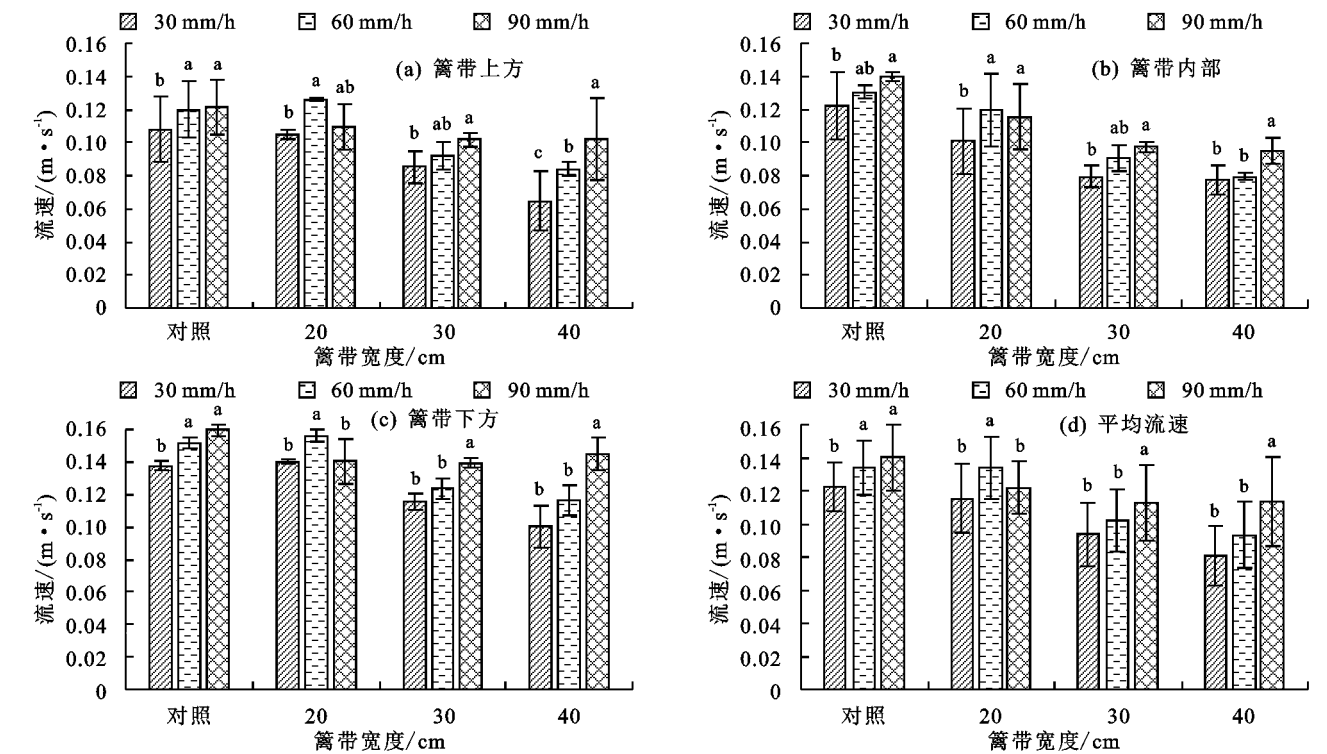


图 5 不同篱带宽度下的坡面流速

2.2 篱带宽度对产沙过程的影响

2.2.1 篱带宽度对产沙量的影响 同一雨强、不同篱带宽度下, 地表产沙量随篱带宽度的增加而呈减少趋势, 两者呈显著负相关关系(图 7), 各雨强下地表产沙量随篱带宽度的变化不同。由图 8 可知, 当雨强为 30 mm/h 时, 篱带组均有明显的减沙效益, 20, 30 cm 篱带宽度下地表的产沙量较对照分别降低 41.2%, 57.8%, 40 cm 篱带宽度下地表产沙量取得最小值 37.9 g; 当雨强为 60 mm/h 时, 20, 30 cm 篱带宽度下的地表产沙量较对照分别降低 14.6%, 29.4%, 40 cm 篱带宽度下的地表产沙量与 30 cm 差异不明显; 当雨强为 90 mm/h 时, 20, 30 cm 篱带宽度下的地表产沙量较对照分别降低 15.0%, 28.6%, 40 cm 篱带宽度下产沙量较对照降低 40.7%。植物篱在 30 mm/h 雨强下减沙效益最明显, 宽度为 20 cm 的篱带可大幅降低地表产沙量, 而随着雨强的增大, 到 60 mm/h 时, 宽度为 30 cm 的篱带才能大幅降低地表产沙量, 且与 40 cm 篱带宽度下的地表产沙量差异不大, 90 mm/h 时宽度为 40 cm 的篱带才具有明显的减沙效益。可见雨强越大, 要想达到一定程度的减沙效益, 需要的篱带宽度就越宽。植物篱在较小的雨强下减沙效益

更明显。宽度为 30 cm 的篱带在各雨强下均有明显的减沙效益, 且与 40 cm 篱带宽度下的减沙效益差异不大。

2.2.2 篱带宽度对累积产沙量的影响 从图 9 可以看出, 对照在雨强为 30 mm/h 地表产沙量时取得最小值 142.6 g, 60 mm/h 雨强下地表产沙量较 30 mm/h 下增加 35.0%, 在雨强为 90 mm/h 时地表产沙量取得最大值 260.5 g, 较 60 mm/h 增加 35.3%, 同时也是所有产沙数据中的最大值; 在篱带组中, 当篱带宽度为 20 cm 时, 60 mm/h 雨强下地表产沙量较 30 mm/h 雨强下增加 96.2%, 其增长幅度较对照明显增加, 90 mm/h 下的地表产沙量较 60 mm/h 增加 34.7%, 增长幅度与对照相近; 当篱带宽度为 30 cm 时, 60 mm/h 雨强下地表产沙量较 30 mm/h 下增加 125.7%, 90 mm/h 雨强下的地表产沙量较 60 mm/h 增加 36.8%, 增长幅度与 20 cm 差距不大; 当篱带宽度为 40 cm 时, 60 mm/h 雨强下地表产沙量较 30 mm/h 下增加 262.0%, 而 90 mm/h 雨强下的地表产沙量较 60 mm/h 只增加 12.5%, 增长幅度与前 3 组相比有明显下降, 在雨强为 30 mm/h 时, 地表产沙量达到最小值 37.9 g。

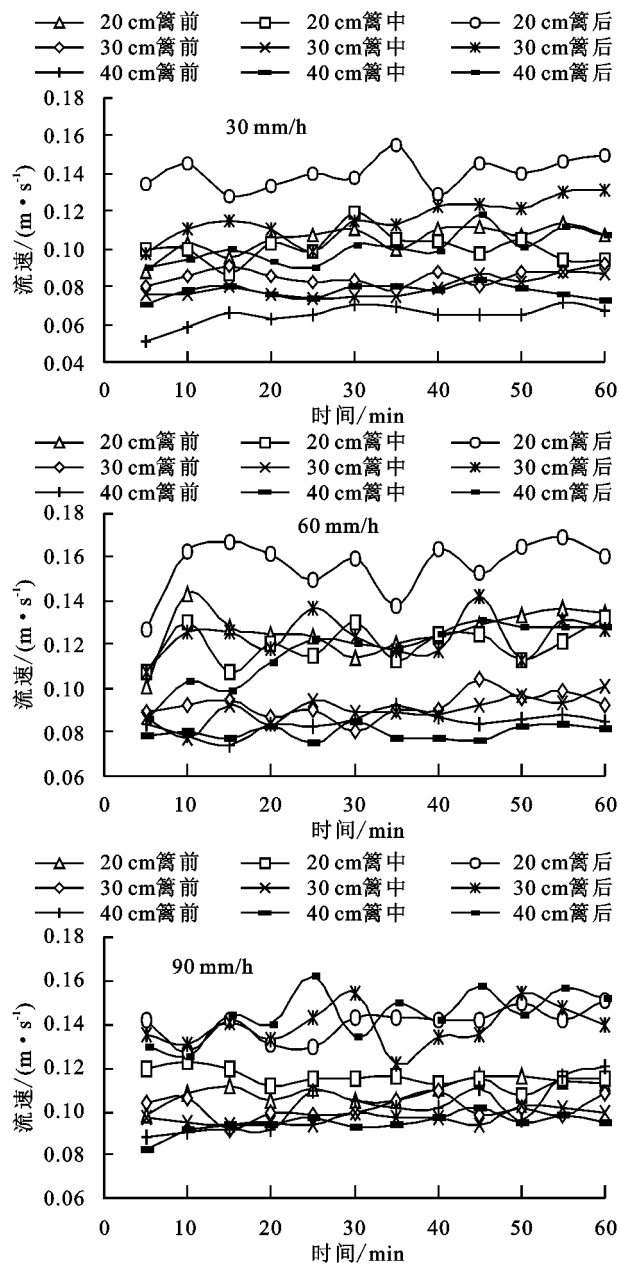


图 6 不同篱带宽度下的流速过程线

而对于同一篱带宽度、不同雨强条件下累积产沙量的变化规律主要表现为在篱带宽度相同时,雨强越大,其对应的累积产沙强度就越大。在对照中,90 mm/h 雨强的初始产沙量最大,60 mm/h 雨强次之,30 mm/h 雨强最小,5~10 min 产沙量增幅为 30 mm/h 雨强>90 mm/h 雨强>60 mm/h 雨强;当篱带宽度为 30 cm 时,30 mm/h 雨强对应的产沙曲线与 60 mm/h 雨强对应的产沙曲线差距继续扩大;当篱带宽度为 40 cm 时,90 mm/h 雨强对应的产沙曲线整体下移,60 mm/h 雨强对应的产沙曲线与 90 mm/h 雨强对应的产沙曲线差距大幅减小,而与 30 mm/h 雨强对应的产沙曲线差距进一步扩大,30 mm/h 雨强对应的产沙曲线明显低于前 2 者。可见,植物篱在 30 mm/h 雨强下的减沙效益更加明显,更宽的篱带才能使较大雨强下坡面的产沙量明显下降。

同一篱带宽度下,随着雨强的增大,其产沙量不断增大。篱带宽度越宽,当雨强由 30 mm/h 增至为 60 mm/h 时,其产沙量的增长幅度增大,而当雨强由 60 mm/h 变为 90 mm/h 时,其产沙量的增长幅度随篱带宽度的增加变化不明显,直至篱带宽度达到 40 cm 时,产沙量的增长幅度才明显下降。可能的原因是在 30 mm/h 下,篱带组的减沙效益最为明显,使其产沙量相较对照更低,产沙量的增长幅度也相应提高;随着雨强的增大,植物篱的减沙效益逐渐减弱,当篱带宽度达到一定宽度才能起到明显的作用。

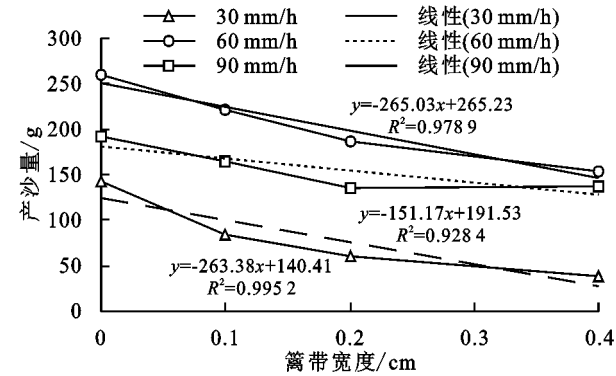


图 7 产沙量随篱带宽度的变化特征

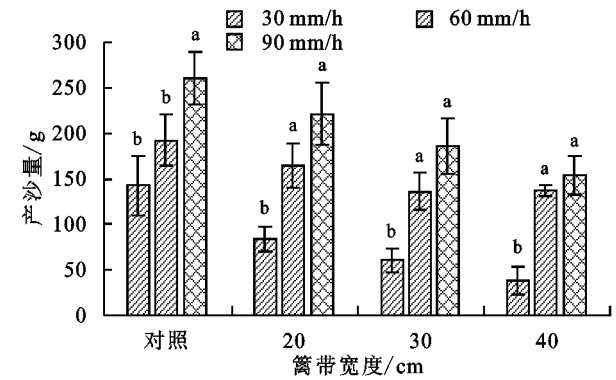


图 8 不同篱带宽度下的产沙量

2.2.3 篱带宽度对产沙强度的影响 从图 10 可以看出,比较同一雨强、不同篱带宽度条件下产沙强度的变化规律发现,在雨强相同时,篱带宽度越宽,产沙强度越小。当雨强为 30 mm/h 时,随着降雨时间的增长,对照对应的产沙强度曲线先增加,于 10 min 时取得最大值,后逐渐减小,40 min 后开始趋于平稳。而篱带组对应的产沙强度随时间的变化曲线则表现为先减小,于 10 min 时取得最小值,其中 40 cm 篱带宽度下产沙强度值最小,为 0.24 g/min,后在一稳定值范围内上下浮动,而 40 cm 篱带宽度下曲线的波动幅度也最小。篱带组曲线整体在对照曲线的下方,且 30,40 cm 篱带宽度下的产沙强度曲线更为接近,明显低于 20 cm 篱带宽度下的产流强度曲线;当雨强为 60 mm/h 时,对照对应的曲线先缓慢增长,从 30 min 开始围绕一稳定值上下波动。篱带组中 30 cm 篱带

宽度对应的产沙强度变化曲线最为平稳,且与 40 cm 篱带宽度对应的产沙强度变化曲线最为接近,20 cm 篱带宽度下的产沙强度变化曲线整体高于 30 cm 篱带宽度对应的产沙强度变化曲线,且 20 cm 篱带宽度对应的产沙强度变化曲线较 30 mm/h 变化幅度变小;当雨强为 90 mm/h 时,对照最大值出现在 10 min,然后从 15 min 开始趋于平稳。20 cm 篱带宽度下的产沙强度变化曲线相较 30,60 mm/h 下的曲线更加平稳。30 cm 篱带宽度对应的产沙强度变化曲线在产沙过程的开始阶段(0~15 min)与 40 cm 篱带宽度下的曲线更加接近。对照的产沙强度在前 10 min 均有较明显的上升过程,而篱带组的产沙强度则是在 5~10 min 时有明显的下降过程,在雨强为 30 mm/h 时,30,40 cm 篱带宽度下的这种下降过程体现得更为明显。可见,植物篱在产沙过程的前期可以有效抑制坡面产沙强度的增长过程,避免达到过高的峰值使坡面水土流失更加严重。

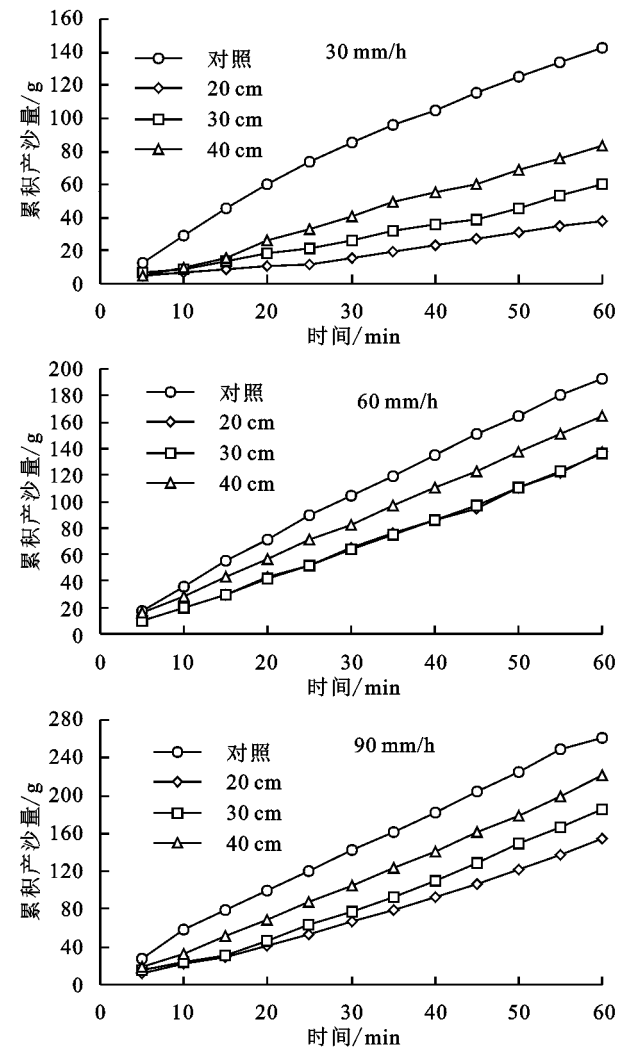


图9 不同篱带宽度下的累积产沙量

2.3 篱带宽度对产流、产沙影响的统计分析

通过单因子分析拟合,篱带宽度对产流、产沙量

的影响均呈极显著差异($P<0.01$),说明随着篱带宽度的增加,坡面的产流、产沙量不断减小。对篱带宽度与产流量、产沙量之间进行方程拟合(表1),发现篱带宽度与产流、产沙量多项式拟合效果均优于线性拟合效果。对于产流量,60,90 mm/h 雨强下的拟合效果优于 30 mm/h,雨强为 60 mm/h 时拟合方程 R^2 达到 0.99;而对于产沙量,雨强为 60 mm/h 时,拟合效果较差,雨强为 30,90 mm/h 时拟合方程 R^2 达到 0.99。可见,篱带宽度与产流、产沙之间具有显著的相关性。

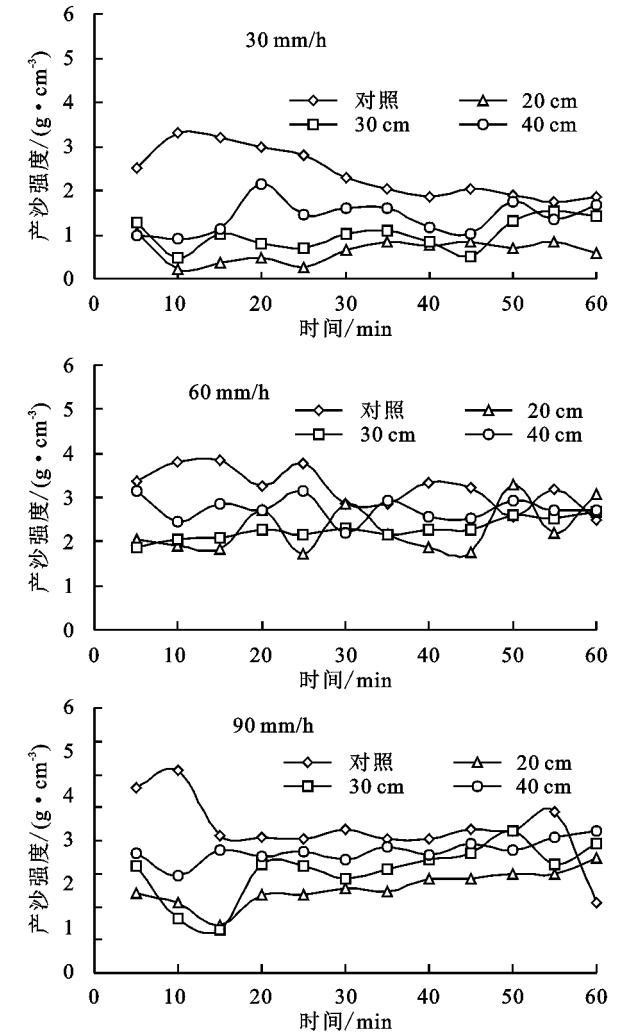


图10 不同篱带宽度下的产沙强度

3 讨论

本研究发现,植物篱处理坡地的产流时间滞后于对照,并且随着篱带宽度的增加,产流时间滞后越明显,这与袁久芹等^[15]的研究结果相似。植物篱地上部分有机机械阻挡作用,拦蓄径流,减流减沙;地下部分的根系固持土壤,改良土壤理化性质^[16-18]。本研究采用人工模拟降雨的形式,植物篱带布设时间较短,地下根系固持土壤能力较弱,起到减流效益的主要为地上部分,位于地表的植物篱带越宽,雨滴在地表的聚

集受到的影响越大,汇集时间越长,使产生径流的时间延长。同时,较宽的植物篱带,对径流的拦蓄作用更强,也会造成产流时间的延后^[19]。初始产流时间随降雨强度的增加而呈现变短趋势,且其减少的程度随篱带宽度变宽而呈增加趋势。可能的原因是:30 mm/h 雨强时植物篱更能延缓径流产生的时间,雨强变大,植物篱延缓径流产生的能力相应减弱,而篱带宽度越大,对 30 mm/h 雨强下径流的初始产流时间影响明显,即随篱带宽度的增加,30 mm/h 雨强下初始产流时间增加的量大于较大雨强下增加的量。坡面平均流速随篱带宽度的增加而减少,该规律在 30 mm/h 雨强条件下表现得更为明显。出现这种现象的原因是:在大雨强条件下,坡面流会更快达到较稳定的流速。由于 90 mm/h 雨强条件下降雨量大于土壤入渗能力,而植物篱带对径流的拦截有限,因此即使在降雨初期坡面流速仍然较高;而在 30 mm/h 雨强条件下,地表覆盖对径流的拦截能力相对较高,降雨前期土壤入渗率较大,产流较少,因而流速较小^[20-22]。

表 1 不同篱带宽度下的产流量、产沙量拟合方程

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	拟合方程	R ²
30	$Y_1 = -118.75x^2 - 136.45x + 370.42$	0.88
60	$Y_1 = -1067.50x^2 + 161.66x + 534.71$	0.99
90	$Y_1 = -477.70x^2 + 26.063x + 601.16$	0.97
30	$Y_2 = 152.02x^2 - 322.01x + 142.58$	0.99
60	$Y_2 = 144.46x^2 - 206.89x + 193.59$	0.94
90	$Y_2 = -303.10x^2 - 148.12x + 260.90$	0.99

注: x 为篱带宽度(m); Y_1 为产流量(L); Y_2 为产沙量(g)。

本研究还发现,坡面产沙量随篱带宽度的增大而减小,由于篱带宽度的增加,坡面径流流速减少,导致径流搬运土壤大颗粒的能力下降,径流携带泥沙的能力被削弱,坡面产沙量下降。在产沙过程中产沙强度下降,降雨持续一段时间后土壤形成封闭层,土壤表层受到雨滴的溅蚀作用逐渐减弱,土壤大颗粒被堆积,而随着降雨的持续,径流汇集,冲刷能力提高,土壤大颗粒被径流携带走,产沙强度再次上升^[23-25],这可能是产沙强度随时间变化呈现多峰多谷的原因,具体机理还需深入研究。本研究发现,对照的产沙强度在前 10 min 均有较明显的上升过程,而篱带组的产沙强度则在 5~10 min 时有明显的下降过程,在雨强为 30 mm/h 时,30,40 cm 篱带宽度下的这种下降过程体现得更为明显,出现这种现象的原因可能是:降雨前期(0~5 min)坡面松散的土粒较多,坡面径流较小,首先冲走较小土粒,随着时间的推移,较大的土粒吸水润湿后崩解为较小土粒,坡面径流流量增大,径

流流速明显提高,携沙能力大大提高,冲刷较大的土粒及其崩解土粒,导致坡面的产沙强度逐渐增加^[25-26]。但当有植物篱存在时,多数较小土粒随径流穿过植物篱植株间隙,此时拦截作用相对较弱,只能抑制产沙强度的增长速度,而对于较大的土粒,植物篱的地上部分能有效拦截,所以出现 5~10 min 产沙强度曲线下降的现象,这有效降低了产沙强度的峰值,避免更严重的水土流失。

结合环境条件布设植物篱,在考虑经济成本的前提下获得最大的生态效益是最优的植物篱配置的方法。本研究发现,30 mm/h 雨强、30 cm 篱带宽度下,坡面的产流量、产沙量和地表径流流速均明显减小,且当篱带宽度继续扩大至 40 cm 时,其减流效益增加不明显。可见,当篱带宽度为 30 cm 时,植物篱有较显著的减流效益,是本研究中使经济效益和生态效益最大化的植物篱带宽度。可能的原因是:植物篱的减流效益会受到外界环境的影响,随着雨强、坡度等的变化,同一篱带宽度下的减流效益也有所不同^[27-30]。30 mm/h 雨强下,坡面的产流量、产沙量和地表径流流速相对 90 mm/h 雨强下较小,植物篱更容易起到减流减沙的效果。同样,一定环境条件下,植物篱带越宽,其减流减沙效益也有所差异。开始时,随篱带宽度的增加,减流减沙效益加强,当篱带到达一定宽度时,由于雨强较小,能形成的坡面径流强度相应较小,其携带的泥沙量也较少,此时的篱带宽度已经足以拦蓄坡面径流,减缓其流速,减小其产流量和产沙量。所以继续增加篱带宽度,减流减沙效益也难以有显著的提高。试验中发现,大雨强下篱带宽度为 20,30 cm 的产流、产沙强度差异较小,可能是人工室内模拟种植的植物篱种植时间短、根系小且扎根浅,涵蓄水源能力弱。也有可能是本研究仅使用 1 个土槽进行重复试验,导致土壤的抗蚀性发生变化。在今后的研究中,可以设置 3 个平行土槽分别进行重复试验,以此进一步减少试验误差。

4 结论

(1)植物篱能有效延缓紫色土坡面径流产生的时间,坡面产流量随篱带宽度的增大而减小,二者之间呈现二次项相关,雨强为 60 mm/h 时, R^2 达到 0.99。产流强度随产流时间的延长呈先增加后趋于稳定。随篱带宽度的增加,坡面流速的变化趋势均表现为 40 cm<30 cm<20 cm,且篱带内部的流速下降最明显,流速变化曲线波动幅度变小。

(2)坡面产沙量随篱带宽度的增大而减小,二者之间呈现二次项相关,与产流不同的是,雨强为 30,

90 mm/h 时, R^2 达到 0.99。产沙强度随时间变化呈“多峰多谷”的特点,有植物篱存在的坡地,在降雨初期其产沙量的增幅较对照明显降低,且篱带宽度越大,这种趋势越明显。

(3)由统计分析可知,篱带宽度对产流、产沙量的影响均呈极显著性差异。雨强为 30 mm/h 时,40 cm 带宽的减沙减流效益最明显,但与 30 cm 带宽无显著性差异。宽度为 30 cm 的篱带可在 30 mm/h 雨强下达到显著的减流减沙效益,是本研究中使土地利用面积最大化的最优植物篱带宽度。

参考文献:

[1] 陈蝶,卫伟.植物篱的生态效应研究进展[J].应用生态学报,2016,27(2):656-658.

[2] 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.

[3] 刘月娇.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.

[4] 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.

[5] 蒲玉琳,谢德体,丁恩俊.坡地植物篱技术的效应及其评价研究综述[J].土壤,2012,44(3):374-380.

[6] 刘定辉.紫色丘陵区蓑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.

[7] Seitz S, Goebes P, Zumstein P, et al. The influence of leaf litter diversity and soil fauna on initial soil erosion in subtropical forests [J]. Earth Surface Processes and Landforms,2015,40(11):1439-1447.

[8] Sun J M, Yu X X, Li H Z, et al. Simulated erosion using soils from vegetated slopes in the Jiufeng Mountains, China[J].Catena,2016,136:128-134.

[9] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J].农业工程学报,2018,34(17):143-150.

[10] 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.

[11] 戴金梅,查轩,黄少燕,等.不同植被覆盖度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2017,31(3):33-38.

[12] 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.

[13] Sudhishri S, Dass A, Lenka N K. Efficacy of vegetative barriers for rehabilitation of degraded hill slopes in eastern India[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 99

(1):98-107.

[14] 张梦璇,郭建英,董智,等.不同放牧强度荒漠草原产流产沙过程模拟[J].水土保持学报,2018,32(5):41-46.

[15] 袁久芹,梁音,曹龙熹,等.红壤坡地香根草植物篱产流产沙过程模拟[J].中国水土保持科学,2014,12(4):15-19.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 湛芸,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.

[19] 李洋洋,樊吉,张庆国,等.麦冬与黄花菜在南方丘陵区坡耕地保育土壤作用研究[J].土壤通报,2011,42(5):1070-1075.

[20] 耿晓东,郑粉莉,刘力.降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J].泥沙研究,2010(6):50-55.

[21] 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.

[22] 湛芸.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.

[23] 樊才睿,李畅游,孙标,等.不同放牧制度草场产流产沙过程模拟试验[J].水土保持学报,2016,30(1):47-53.

[24] 张洋,张辉,李占斌,等.不同降雨强度下黄土区冻土坡面产流产沙过程及水沙关系[J].农业工程学报,2018,34(11):136-142.

[25] 王蕙,胡秀君,山成菊.雨强和坡度对嵌套砾石红壤坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2018,32(4):24-29.

[26] 谢哲芳,张光辉,刘如心,等.人工模拟降雨供水水质对坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):18-23.

[27] 何丙辉,何联君,王仁新,等.基于 CA-Markov 模型的植物篱坡面土壤侵蚀状况的动态模拟研究[J].南昌工程学院学报,2014,33(4):5-10.

[28] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):18-23.

[29] 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.

[30] 郭甜.紫色土区植物篱对坡面土壤微生物特性影响研究[D].重庆:西南大学,2012.