

草带宽度对紫色土坡面细沟形态及水土流失特征的影响

甘凤玲^{1,2}, 苟俊菲^{1,2}, 刘春红^{1,2}, 唐小九^{1,2}, 王迦南^{1,2}

(1.重庆师范大学地理与旅游学院,重庆 401331;2.三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室,重庆 401331)

摘要: 为了解不同草带宽度对紫色土坡耕地水土流失的影响,以铺设四季青草带的紫色土坡面为研究对象,采用放水冲刷模拟试验,以裸坡为对照组,研究不同放水冲刷流量和草带宽度条件下坡面细沟形态变化和减沙减流效应。结果表明:(1)沟深随草带宽度增大呈先减小后增大趋势,而沟宽、沟长和沟宽深比均随草带宽度呈先增加后减小趋势;此外,沟宽、沟深和沟长随流量的增大而增大,而宽深比随流量的变化不明显;(2)当流量较小时(4 L/min),各坡面产流率和产沙率随着草带宽度的增大而减少,100 cm 草带宽度的减流效益最高,为 48.41%;当流量较大时(8 L/min),75 cm 草带宽度的减流减沙效益最高,分别为 20.07%和 58.11%。(3)有草带的坡面产流产沙率、土壤侵蚀速率与沟宽、沟深呈极显著相关关系,相对于减流效益而言,草带对减沙效益更为显著。综上可知,草带能有效降低径流泥沙量,对紫色土坡耕地的水土流失具有较好的防治效果。

关键词: 紫色土;草带宽度;放水冲刷;细沟形态;水土流失

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)02-0025-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.02.003

Effect of Grass Strip Width on Rill Erosion Morphology, Soil and Water Loss Characteristics on Purple Soil Slope

GAN Fengling^{1,2}, GOU Junfei^{1,2}, LIU Chunhong^{1,2}, TANG Xiaojiao^{1,2}, WANG Jianan^{1,2}

(1.School of Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331; 2.Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331)

Abstract: In order to understand the impacts of different grass strip widths on the soil and water loss of in purple soil sloping farmland, taking the *Agrostis stolonifera* grass strips paved on purple soil slope as the research objects, and through the indoor simulated scouring, we study the impacts of different grass strip widths and drainage scouring flows on the slope rill erosion morphology and the effects of sediment and flow reduction. The bare slope was used as the control group. The results showed that: (1) With the increasing of grass strip width, the rill depth decreased first and then increased, while the rill width, rill length and width-depth ratio showed a contrary tendency. In addition, the rill width, rill length and rill depth increased with the increasing of discharge, but the change of width-depth ratio was not obvious. (2) When the discharge flow was small (4 L/min), the runoff and sediment yield rate decreased with the increasing of grass strip width, and the outflow runoff decreased by 48.41% by for the 100 cm grass strip, which was the greatest. When the discharge was large (8 L/min), the 75 cm grass strip had the minimum runoff and sediment yield rate, which had the maximum reduction rate of runoff (20.07%) and sediment (58.11%). (3) Under interception of the grass strip, the runoff and sediment yield rate and soil erosion rate had significant correlation with rill width and rill depth. Compared with runoff interception and reduction, the grass strip had more significant impact on sediment interception and reduction. From these results we concluded that the grass strip was very efficient in reducing the runoff and sediment, and had a good control effect on water and soil loss of purple soil sloping farmland.

Keywords: purple soil; grass strip width; drainage and scouring; rill morphology; water and soil loss

收稿日期:2021-09-14

资助项目:国家青年科学基金项目(42107355);重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0489);重庆市教委科技项目(KJQN201800531,KJQN202100518);重庆师范大学(人才引进/博士启动)基金项目(20XLB021)

第一作者:甘凤玲(1989—),女,讲师,博士,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:359140315@qq.com

通信作者:刘春红(1979—),女,副教授,博士,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:20131490@cqnu.edu.cn

草带可通过物理、生物、化学等作用将坡面径流泥沙拦截、吸收和过滤,具有减缓径流流速、减少地表坡面水土流失量和增加土壤抗侵蚀能力的功效^[1-2]。长江上游紫色土丘陵区,土壤长期遭受高频率的暴雨以及人类活动的破坏,土壤退化十分严重,建立草带是保护和提高生态环境质量的有效措施之一^[3-4]。因此,深化草带调控地表坡面水土流失的研究,对揭示草带减流减沙的机理,准确提出适宜的草带优化配置具有重要的科学和现实意义。

草带种植成本低,成活率高,水土保持效果较好,是农耕实践中能得以广泛推广的水土保持措施之一^[5-7]。草带生长十分密集,并且交错覆盖在地表坡面上,在减流减沙方面发挥着十分重要的作用,主要体现在:(1)径流通过草带的拦截,径流流速变缓,水流冲刷力和挟沙能力减弱^[8];(2)随着水流冲刷力的下降,坡面泥沙在草带上沉积,削减了地表径流中的悬浮颗粒^[9];(3)草带增加了地表粗糙率和径流下渗量,而地表径流量随之减少^[10]。此外,草带对地表坡面减流减沙效益主要受降雨强度、草带空间分布、草带宽度、坡度等因素的影响^[11-13]。针对草带调控坡面土壤侵蚀的研究,国内外学者已取得不少成果。如张霞等^[14]研究不同位置的草带布设对地表坡面泥沙拦截效果发现,位于坡面中下部的草带水土保持功效显著高于坡面中上部分,坡面地表产沙量与草带位置指标参数呈幂函数相关;陈旭飞等^[15]通过人工模拟降雨试验,研究不同降雨强度、坡度和宽度条件下香根草过滤带减沙减流率,结果表明,雨强对径流泥沙拦截量贡献最大,其次为带宽,最后为坡度;Wanyama 等^[16]研究不同草带长度(2.5, 5, 10 m)对坡面产流产沙的影响发现,草带越长,坡面的产流产沙越少,减流减沙效益越高。

综上所述,草带宽度与草带的减流减沙密切相关。被草带拦截过后的径流泥沙在坡面重新汇集形成细沟,随着径流的不断汇集,从而加速细沟的发育。这三者之间相互作用,关系极其复杂,已有不少学者针对细沟形态发育与土壤侵蚀之间的关系做了不少研究,并取得丰硕的成果^[17-20]。然而大多数研究主要集中在某一特定土壤的细沟形态发育,较少研究草带宽度对坡面细沟形态参数的影响,即草带宽度对坡面细沟形态参数与土壤侵蚀之间关系的影响尚不明确,解决该问题不仅有利于建立紫色土土壤侵蚀模型,还可以促进指导当地坡耕地实施适宜的水土保持措施,因此亟需在紫色土上开展关于草带宽度对细沟形态参数及其与土壤侵蚀关系的影响研究。为此,本研究选取紫色土常见的四季青草带为研究对象,进行室内模拟放水冲刷试验,根据紫色土常见的草带宽度设置 3 种宽度(50, 75, 100 cm),在 3 种放水冲刷流量下(4, 6, 8 L/min)进

行试验,通过测定地表径流流速、细沟沟宽、沟深、沟长、产流率及产沙率等指标,对比分析不同草带宽度和放水流量下细沟形态特征参数和产流产沙的差异,探讨草带宽度对坡面细沟形成和土壤侵蚀的影响,为紫色土的水土流失治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验土壤采自重庆师范大学气象园试验站(106°18′10.5″E, 29°36′46.2″N),该区属中亚热带季风性湿润气候区,四季分明,日照偏少,年日照率 25%~35%,年均气温 16~18℃,年均降水量 1 000~1 350 mm,降雨多集中在 5—9 月,年均相对湿度 70%~80%,平均雾日为 104 天。该区紫色土是紫色砂、页岩、泥岩风化物,土壤 pH 高于 7.5,属微碱性,有机质含量较低,磷、钾等矿质元素丰富,土质肥沃,结构良好,但其发育较浅,保水保土能力较弱。在夏季经常发生短历时强暴雨,极易发生水土流失,其中坡耕地土壤水土流失量占整体水土流失量的 60%以上^[19]。

1.2 试验材料

本试验于 2021 年 3—7 月进行,在研究区域内挖掘原状土成散土,然后搬至阴凉地方自然风干,风干过后去除土壤中的石块、草根等杂物,随后研磨 10 mm 过筛。供试土壤类型为粉(砂)壤土,其颗粒组成为砂粒 16.98%,粉粒 72.83%,黏粒 10.19%,土壤容重 1.31 g/cm³,有机质含量 10.69 g/kg。经野外调查可知,四季青为多年生植被,不受试验时间的影响,耐淹,是常见的用于保水保土的多年生草本植物,因此本试验草带选择四季青作为研究对象。根据试验需要,提前在土槽中种植符合要求的四季青草带,试验前 1 个月在裸坡上播种,播种量为 1.21 g/m²,根系长约为 6 cm,长势较好。

试验装置包括放水冲刷装置和钢制土槽 2 个部分(图 1)。其中,土槽为钢制的可移动钢槽,规格为 6.0 m(长)×1.2 m(宽)×0.4 m(深),且坡度在 0~25°范围内可调,土槽底端设置集流槽,以便收集径流泥沙样。本试验将土槽中间用 PVC 隔板隔开,即实际试验坡面宽度为 0.6 m。放水冲刷装置由蓄水桶和稳流槽 2 部分组成。供水桶直径约为 0.7 m,高为 1.0 m。稳流槽位于土槽前 20 cm,并在其下方铺设透水纱布,保证试验过程径流可以均匀平稳溢出。

1.3 试验设计

本试验采用双因素试验设计,经野外调查重庆市沙坪坝区紫色土坡耕地坡度,外加考虑到室内试验土槽坡面状况和可操作性等因素,本试验所选坡度为 15°。结合研究区平均降雨量和暴雨量,并对室内放水冲刷的单宽流量进行标定,设定放水冲刷流量为 4, 6, 8 L/min。根据野外调查和室内土槽坡面的实

际情况,设定草带宽度为 50,75,100 cm,并设计 1 个无草带的坡面(裸坡)为对照组。每个试验设计 3 个重复,共计 36 场次。

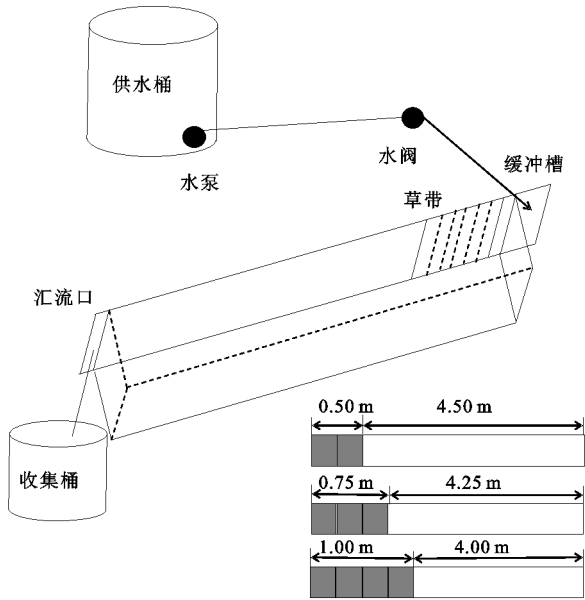


图1 试验装置示意

试验初期,在土槽底部铺设透水纱布,确保水分均匀下渗。试验土壤分 3 层,每层 10 cm 进行夯实,确保土壤容重在 1.31 g/cm^3 左右,并用水壶对土壤进行均匀喷水,保证土壤初始含水量相同($(20 \pm 2.0)\%$),土层厚度为 30 cm,上层 10 cm 是草带生长部分,可使草带与坡面紧密连接。在试验前 1 周,将草带移至土槽自然生长。考虑到不同草带宽度条件下的细沟侵蚀阶段时间不一致,结合前期预试验,本试验设计为坡面出现细沟和有产流产沙开始,前 6 min 每隔 1 min 进行收集径流泥沙样,后 10 min 每隔 2 min 进行收集,冲刷历时设置为 16 min。当场测定径流量,然后将采集桶静置 24 h 后将上清液倒掉,并将采集桶中的泥沙样在 105°C 进行烘干,随后测量产沙量。本研究主要测量草带下方坡面所形成的侵蚀沟形态特征,产流产沙结束之后,在草带下部所形成的侵蚀沟的沟头、沟尾、最大值、最小值、坡长每隔 1 m 处测定细沟宽度和深度,并量取整个侵蚀沟长。试验结束后,更换表层 10 cm 的土壤,重新压实打磨,并填装草带,隔下周将土壤含水率达到了设定值后开始下一场试验。

1.4 数据分析处理

细沟宽深比(R)指细沟宽度和对应沟深的比值,可以反映细沟产生的形态变化,计算式为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (1)$$

式中: W_i 为第 i 个监测点的细沟沟宽(cm); D_i 为第 i 个监测点的细沟深度(cm)。

草带减沙效益(R_I)是评价草带对坡面产沙的减蚀效果,计算式为:

$$R_I = \frac{L-S}{L} \times 100\% \quad (2)$$

式中: L 为裸坡累计产沙量(g); S 为有草带拦截后的产沙量(g)。

细沟土壤侵蚀速率(d)指细沟在放水冲刷作用下单位面积、单位时间的产沙量,计算公式为:

$$d = \frac{s_{um}}{blt} \quad (3)$$

式中: s_{um} 为累计产沙量(kg); b 为细沟沟宽(cm); l 为细沟沟长(cm); t 为冲刷时间(min)。

本研究采用决定系数(R^2)、纳什效率系数(N_{SE})和均方根误差(RMSE)来评价拟合方程的有效性,筛选最佳决定因素,其计算公式为:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})(P_i - \bar{P})]^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (4)$$

$$N_{ES} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - P_i)^2}{n}} \quad (6)$$

式中: M_i 为第 i 个试验所测值; P_i 为第 i 个模型模拟值; i 为试验所测值得数目, $i=1,2,\dots,n$, n 为试验所测值得总数; $\bar{M}$ 为试验所测值的平均值。决定系数(R^2)和纳什效率系数(N_{SE})越接近 1,说明模型有效性越高。

数据分析与制图通过 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件来完成。

2 结果与分析

2.1 草带宽度对细沟形态特征的影响

细沟形态特征基本参数(细沟长度、宽度、深度、宽深比等)在一定程度上可以反映坡面土壤的侵蚀程度^[20]。从图 2 可以看出,不同草带宽度条件下,细沟宽度在距草带下部坡顶距离的 0.5~2.0 m 处为最大值,随着距坡顶距离越大,沟宽呈逐渐减小的趋势。在中小放水冲刷流量下,沟宽的变化趋势较为稳定,即在距坡顶距离 0.5~2.0 m 处迅速减小并波动趋于稳定,在坡下部分沟宽值最小;但在流量较大条件下(8 L/min),沟宽波动程度相对较大,即先波动变化后迅速下降在距坡顶距离的 2~3.5 m 达到最小值后又波动变大,在坡中部沟宽最小;而沟深相对于沟宽变化更为复杂,在坡长上的变化更为波动。在流量较小时(4,6 L/min),大部分沟深沿坡面呈先迅速减小后波动减小的趋势,其在距坡顶距离 3 m 处沟深最

小;在流量较大时(8 L/min),除草带宽为 50 cm 的变化趋势不同外,沟深均表现为先增大后减小再增大

的趋势,同样在距坡顶距离 3~3.5 m 处为最小值,由此可知,坡顶上部是细沟沟深最大的阶段。

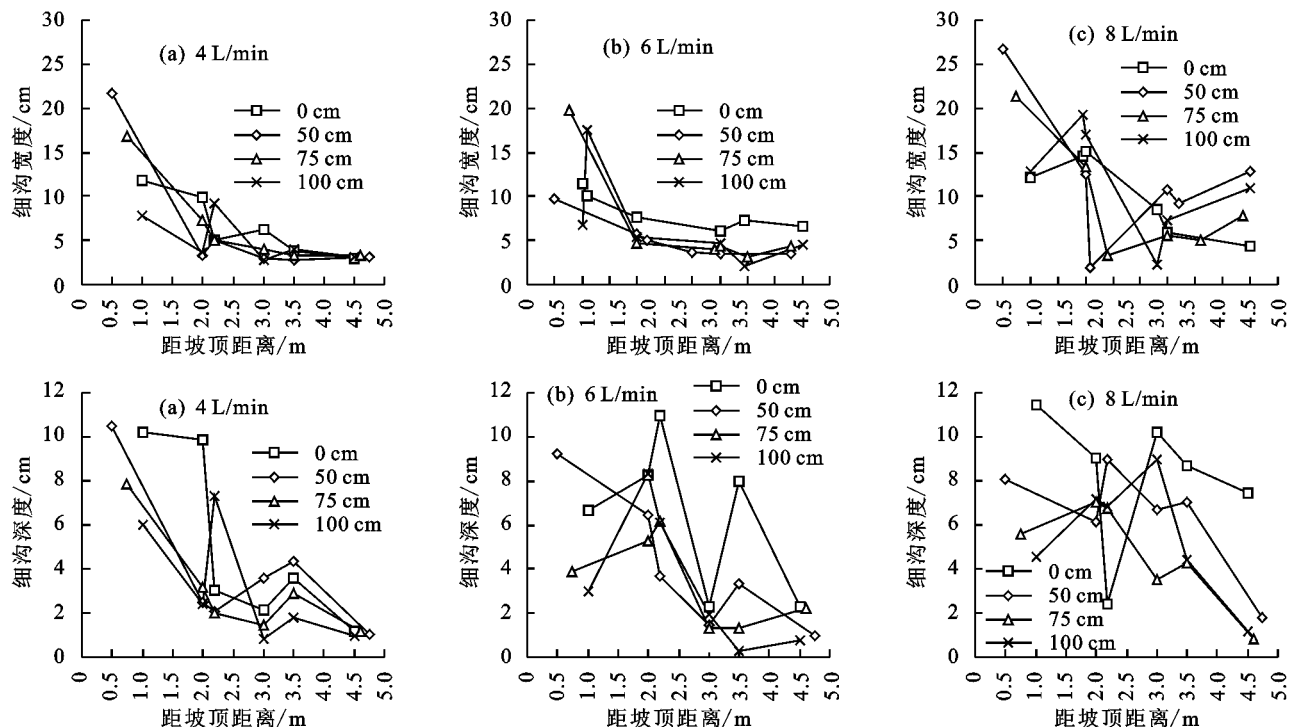


图 2 不同草带宽度条件下细沟沟深和沟宽随坡长的变化

由图 3 可知,细沟的平均沟宽、沟深、沟长和宽深比均随着流量的增加而增加,放水冲刷流量从 4 L/min 增至 8 L/min 时,不同草带宽度下的细沟平均沟宽、沟深、沟长和宽深比分别增加 89.69%~127.51%,50.81%~71.65%, -78.01%~21.75% 和 -6.13%~32.54%,其中 8 L/min 条件下的平均沟宽、沟深、沟长和宽深比较 4 L/min 条件下分别增大 0.83,0.61,0.08,0.13 倍。由此可知,在大流量条件下,沟宽和沟深的增加幅度远高于沟长,说明在有草带的条件下,沟宽和沟深更容易受放水流量的影响。随着流量的增大,侵蚀细沟在放水冲刷作用下拓宽程度比下切程度更为明显,细沟更容易横向发展,说明草带能够进一步阻止侵蚀沟向底层发展的趋势。

通过对比不同草带宽度条件下细沟形态特征基本参数值可知,当放水流量为 4 L/min 时,100 cm 草带宽度下所产生的平均沟宽、沟长和沟宽深比明显小于 50,75 cm 的草带宽度条件下的沟宽、沟长和沟宽深比,即分别为 50,75 cm 草带宽度条件下平均沟宽、沟长和沟宽深比的 0.78,0.77 倍、0.80,0.69 倍和 0.98,0.74 倍,说明在小流量条件下,100 cm 草带宽度能够有效阻止细沟发育程度。而当放水流量为 8 L/min,不同草带宽度条件下的沟宽深比均无显著差异,75 cm 草带宽度下所产生的平均细沟宽度和细沟深度最小,细沟沟长最大,其次为 100,50 cm 的草带宽度,最后才是 0 cm 的草带宽度(裸坡)。相比于 100 cm 的草带宽度,75 cm 草带宽度下的平均沟宽

和沟深分别降低 18.91% 和 18.22%,说明在极端降雨条件下,75 cm 的草带宽度比 100 cm 的草带宽度更能够阻止细沟发育,其细沟整体表现为纵向发育。

2.2 草带宽度对坡面产流特征的影响

由图 4 可知,随着冲刷时间的延长,产流率呈现先迅速增加后缓慢增加并逐渐趋于稳定的变化趋势。在流量较低时(4 L/min),不同草带宽度条件下的产流率变化均比较平缓,呈缓慢增加的趋势。产流率随着不同草带宽度的变化为 0 cm>50 cm>75 cm>100 cm,75,100 cm 的草带宽度产流率显著低于 0,50 cm 的草带宽度。在流量中等时(6 L/min),产流率在冲刷时间 0~5 min 内迅速增加,然后逐渐平稳或缓慢增加。75 cm 草带宽度的产流率显著低于其他组别草带宽度的产流率。当流量为 8 L/min 时,不同组别的稳定产流率差异较小,均在 7 L/min 上下波动,说明冲刷流量越大,草带宽度对产流率的变化影响逐渐减小。比较不同冲刷流量下产流率的增长变化可知,裸坡的平均产流率为 2.15 L/min,随着冲刷流量的增加,其产流平均增长率为 57.67% 和 206.98%。50,75,100 cm 草带宽度在低冲刷流量下的平均产流率为 1.99,1.31,1.11 L/min,在高流量条件下其平均产流率分别增加 201.33%,280.09% 和 452.29%。

整体而言,裸坡在不同放水冲刷流量下平均产流率最大,有草带的坡面在冲刷流量较小时,100 cm 草带宽度的减流效果较大,随着冲刷流量的增大,75

cm 草带宽度减流效果最大,说明草带宽度对坡面的

减流效益随着放水流量的变化有所改变。

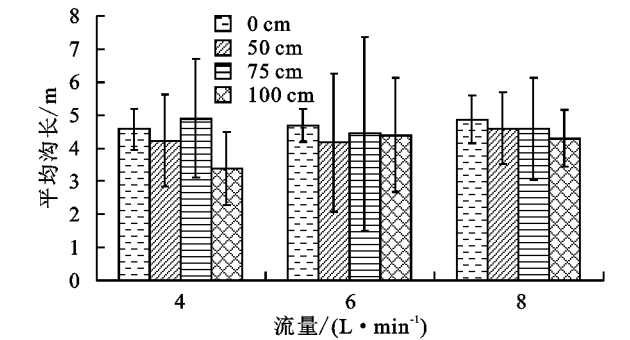
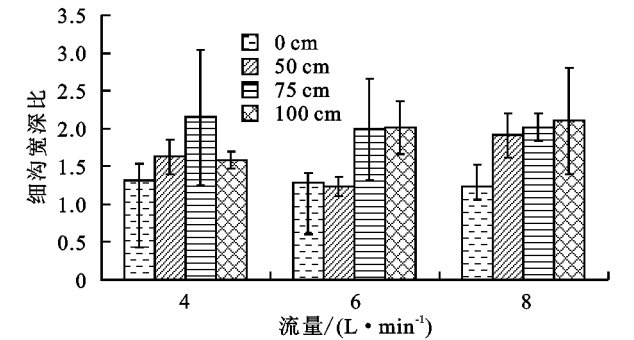


图 3 不同流量和草带宽度条件下细沟沟长和宽深比变化特征

由表 1 可知,放水流量×草带宽度交互项对平均径流率、稳定径流率、稳定流速和产流系数影响极为显著($R^2\geq 0.782, P<0.01$),说明产流参数特征主要受放水流量和草带宽度交互作用的影响。其中,放水流量对稳定流速的影响较小,控制草带宽度,对放水流量与稳定流速进行偏相关分析可知,放水流量与稳定流速呈显著



正相关关系($P<0.05$),说明草带宽度对稳定流速的影响显著高于放水流量,而在剔除草带宽度影响后,放水流量也对稳定流速存在显著影响。此外,草带宽度对平均径流率和稳定径流率的影响均远低于放水流量,只对稳定流速和产流系数的影响较大($P<0.01$),由此可知,草带宽度主要影响径流流速的快慢变化。

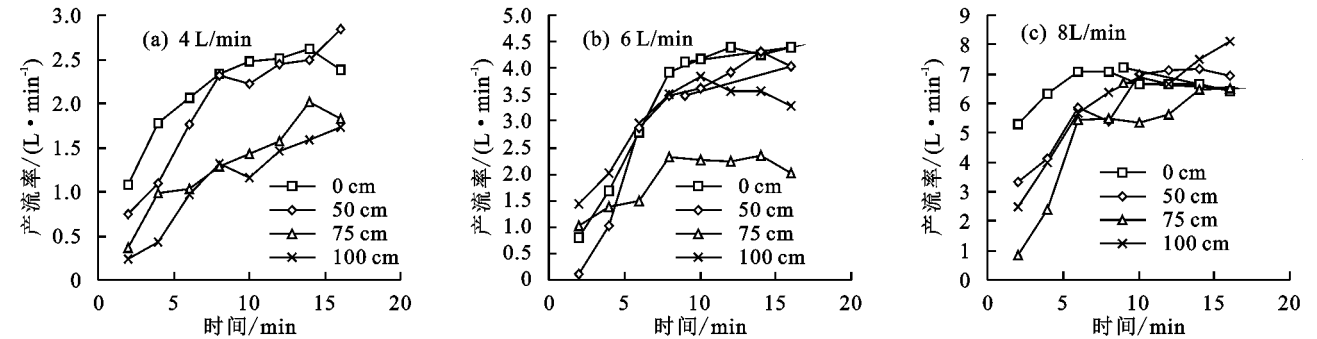


图 4 不同流量和草带宽度条件下产流率变化过程

表 1 细沟产流参数与放水流量、草带宽度及其交互项相关性分析

变量	平均径流率	稳定径流率	稳定流速	产流系数
放水流量	0.886 **	0.828 **	0.122	0.676 **
草带宽度	-0.161	0.093	-0.847 **	-0.525 *
放水流量×草带宽度	0.912 **	0.837 **	-0.862 **	0.782 **

注: * 表示相关系数在 5% 水平显著; ** 表示相关系数在 1% 水平显著。

2.3 草带宽度对坡面产沙特征的影响

不同草带宽度和放水流量条件下的产沙率变化特征均有所不同(图 5)。随着放水冲刷时间的增加,产沙率的变化过程主要呈现出逐渐增加和先增加并逐渐趋于稳定型。在冲刷流量较低时(4 L/min),产沙率均随着冲刷时间的延长而逐渐增加,整体的变化趋势基本一致。在中高冲刷流量条件下,除裸坡的产流率呈现出先增加后逐渐减小的趋势,有草带坡面的产流率均表现为先增加后趋于稳定的趋势。不同冲刷流量条件下,裸坡和有草带坡面的产沙率差异较大,且裸坡产沙率均高于有草带坡面的产沙率。

虽然坡面产沙率随着冲刷流量的增加而增加,但不同草带宽度对产沙率特征的响应程度也有所不

同(表 2)。主要表现为:(1)各草带宽度下的平均产沙率变化范围为 123.79~1 665.94 g/min,其中无草带宽度(裸坡)放水流量最大时,产沙率最大;在草带宽度为 75 cm 放水流量最小时,产沙率最小,减小 92.57%;(2)随着草带宽度和放水流量的增加,产沙率最大值出现的时间逐渐提前,且放水流量越大,产沙率最大值也越大,其变化范围为 233.29~2 134.59 g/min;(3)有草带宽度的泥沙拦截率变化范围 1.78%~58.11%,其中 75 cm 的草带宽度在各个放水流量下均为最大值,分别是 50,100 cm 草带宽度的 2.26,1.29 倍;(4)各处理下的变异系数变化范围为 0.27~0.70,均小于 1,属于中等变异程度,其中 100 cm 草带宽度放水流量最小时变异系数最大,流量小的变异系数高于流量大的变异系数。

整体而言,各处理下平均产沙率随着放水流量的增大而增大,而随着草带宽度的增加呈现出先减少后增加的趋势。75 cm 草带宽度在放水流量为 4 L/min 时产沙率最小,其减沙效益最大,为 58.11%,是 100,50 cm 草带宽度条件下减沙效益的 1.01~32.59 倍。可见,在本试验条件下,75 cm 草带宽度减沙效益最大,产沙率和最大产沙率最小。

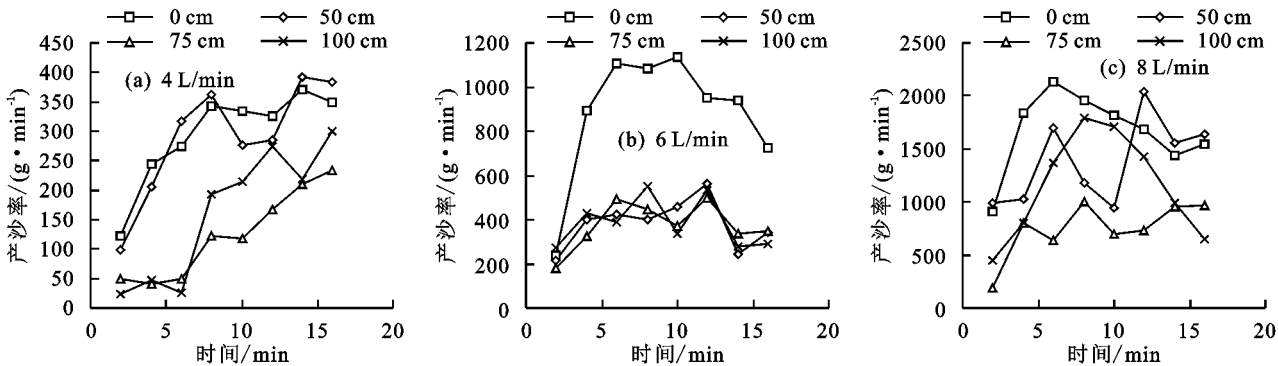


图 5 不同流量和草带宽度条件下产沙率变化过程

表 2 不同草带宽度和放水流量下细沟产沙率基本特征

草带 宽度/cm	放水流量/ (L · min ⁻¹)	平均值/ (g · min ⁻¹)	最大值/ (g · min ⁻¹)	最大值出现 时间/min	减沙 效益/%	变异 系数
0	4	295.50	371.46	14	0	0.27
	6	884.32	1136.79	10	0	0.33
	8	1665.94	2134.59	6	0	0.23
50	4	290.23	391.39	14	1.78	0.34
	6	380.82	563.81	12	56.94	0.30
	8	1384.16	2037.46	12	16.91	0.29
75	4	123.79	233.29	16	58.11	0.61
	6	374.51	498.21	12	57.65	0.28
	8	746.90	1002.98	8	55.17	0.35
100	4	162.30	300.78	16	45.08	0.70
	6	385.48	553.08	8	56.41	0.29
	8	1146.44	1795.38	8	31.18	0.44

2.4 草带宽度条件下细沟形态特征与产流产沙关系

由表 3 可知,坡面产流产沙率、土壤侵蚀速率与沟宽、沟深呈极显著相关关系,相关系数均高于0.718,说明沟宽和沟深是表征坡面产流产沙的最佳细沟形态特征指标,能够较好地反映坡面土壤侵蚀程度。其中平均沟长和宽深比与坡面产流产沙的关系不显著,是因为平均沟长基本在 3.38~4.86 m,平均宽深比为 1.23~2.14,数值的变化程度并不明显。坡面产流产沙率、土壤侵蚀速率与沟宽、沟深的回归分析结果(表 4)表明,沟宽对累计产沙量最敏感($R^2=0.774, P<0.01, N_{ES}=1.000$),函数符合预报精度要求。

有草带的细沟形态特征与其产流产沙相互作用,两者之间的关系较为复杂,仅 1 个指标无法说明其预报的土壤侵蚀率,需要进行多因素的综合分析。因此,为了确定有草带拦截条件下细沟形态对坡面产流产沙的综合影响,对土壤侵蚀率 S_e 与沟宽 d_a 、沟深 W_a 进行回归分析,结果见公式(1)。

$$S_e=0.485W_a+4.275d_a-7.785 \quad R^2=0.839$$
$$RMSE=3.828, NES=0.941 \quad (1)$$

公式(1)中可得出沟宽的系数 4.275 高于沟深系数 0.485,由此可判断沟宽对土壤侵蚀率的影响高于沟深。对比综合化的方程可知,新方程的拟合程度更高,预测效果良好。进一步分析草带宽度对减沙效益的关系可

知,减沙效益与草带宽度、沟深呈极显著相关关系,表明减沙效益主要受草带宽度与沟深的影响,比较相关系数可知,草带宽度与减沙效益的关系更为显著。

3 讨论

西南地区气候湿润,其降雨多为短历时、高强度暴雨型,在强降雨季节下,坡面蓄满产流,产生的地表径流对坡面进行冲刷形成细沟侵蚀,水土流失严重,土壤退化加剧^[21];而草带具有减缓径流速度和减少泥沙迁移的作用,能够在径流冲刷下发挥拦截径流泥沙的作用^[22]。因此,本文通过室内径流冲刷试验,从产生的细沟形态参数入手,探讨分析草带宽度对坡面细沟侵蚀过程的影响,以期为治理紫色土水土流失的最优草带宽度提供参考依据。

3.1 细沟形态特征变化

不同草带宽度条件下所形成细沟的沟宽、沟深和沟长均随着流量的增大而增大,这与崔志强等^[23]研究植被措施下的细沟发育特征结果相一致。同时,本文还发现,在较小放水流量条件下(4, 6 L/min), 100 cm 的草带宽度产生的沟宽和沟长最小,但沟深却比 75 cm 的草带宽度大,在放水流量大的条件下(8 L/min)则发生变化, 75 cm 的草带宽度下沟宽和沟深最小,但沟长比 100 cm 的草带宽度长,说明 75 cm 的草带宽度的坡面相对于

100 cm 的草带宽度更容易形成细沟,但是 100 cm 的草带宽度的细沟一旦形成,其径流冲刷下的细沟发展比 75 cm 的草带宽度的坡面更大,这可能是由不同草带宽度对细沟形态特征参数的阻控作用不同所引起,即径流在不同草带宽度上发生水流分散汇集的方式不同。75 cm 的草带宽度能够均匀分散径流的冲刷能力,在小流量条件下,通过草带均匀分散的径流在坡面容易形成宽浅

的细沟;而对于 100 cm 的草带宽度,由于草带过宽,水流在草带上先均匀分散后又形成支流并变成集中流,在小流量条件下,通过草带形成的集中流主要发生纵向细沟,随着流量的增大,水流冲刷力变大,径流下切深度和宽度随之增大,细沟主要的发育形态是窄深式,所以在放水冲刷流量较大条件下,100 cm 草带宽度的细沟尺寸大于 75 cm 的草带宽度。

表 3 细沟形态与土壤侵蚀参数相关性分析

变量	草带 宽度(W_g)	放水 流量(Q)	平均 沟宽(W_a)	平均 沟深(d_a)	平均 沟长(L_a)	平均宽 深比($RA_{w/d}$)	累计 产流量(C_r)	累计 产沙率(C_s)	减沙 效益(S_r)	土壤侵蚀 速率(S_e)
W_g	1									
Q	ns	1								
W_a	-0.094	0.824 **	1							
d_a	-0.674 **	0.637 **	0.713 **	1						
L_a	-0.503 *	0.333	0.440	0.464	1					
$RA_{w/d}$	0.537 *	0.289	0.451	-0.168	0.341	1				
C_r	-0.161	0.941 **	0.901 **	0.794 **	0.375	0.209	1			
C_s	-0.348	0.850 **	0.880 **	0.917 **	0.412	0.114	0.936 **	1		
S_r	0.771 **	-0.007	-0.327	-0.706 *	-0.238	0.363	-0.268	-0.460	1	
S_e	-0.413	0.828 **	0.718 **	0.911 **	0.304	-0.128	0.886 **	0.950 **	-0.442	1

注: * 表示相关系数在 5%水平显著; ** 表示相关系数在 1%水平显著。

表 4 细沟形态参数与土壤侵蚀的函数关系

参数	回归函数	R^2	P	RMSE	N_{ES}
W_a, C_r	$C_r = 12.222W_a - 39.306$	0.811	<0.01	13.564	0.986
W_a, C_s	$C_s = 2991.05W_a - 13255.2$	0.774	<0.01	3720.305	1.000
W_a, S_e	$S_e = 2.505W_a - 3.321$	0.515	<0.01	5.592	0.913
d_a, C_r	$C_r = 83.205\ln d_a - 68.836$	0.652	<0.01	48.523	0.950
d_a, C_s	$C_s = 137.287d_a^2 + 3223.708d_a - 8456.726$	0.842	<0.01	3111.559	1.000
d_a, S_e	$S_e = 0.142d_a^2 + 3.261d_a - 2.682$	0.831	<0.01	3.302	0.949

细沟宽深比在不同草带宽度条件下随着放水冲刷流量的增大呈现出先减小后增大的趋势。整体而言,无草带的细沟发育的宽深比明显低于有草带的细沟,表明裸坡形成的细沟发育为“窄深式”,而有草带的坡面因草带可以分散草带上部的径流,使径流宽变大,流速减缓,径流挟沙能力变弱,则有草带拦截的坡面所形成的细沟发展为“宽浅式”。

3.2 产流产沙特征变化

探讨草带对坡面细沟产流产沙的影响变化对评价草带在水土保持上的利用是否合理具有重要参考依据^[24-25]。本试验结果表明,坡面上的草带减少了整个冲刷过程的累计产流产沙量,相对无草带的坡面,减水、减沙分别最大减少 48.41%和 58.11%。说明草带对减流减沙具有显著影响,主要是因为有草带的坡面,草带增加坡面的粗糙率,降低放水冲刷能力并减缓径流流速,从而降低径流搬运泥沙的能力,从而减少坡面的产流产沙量,而无草带的坡面水土流失量最高。由此可知,在坡面种植草带具有较好的水土保持效益,且草带在拦截径流的同时削弱径流的挟沙能力,能够提高土壤的生产力。

草带宽度是影响草带拦截径流泥沙的关键因素之一^[26-27]。本研究表明,当草带宽度为 50 cm 时,草带减流减沙效益最高分别可达 43.24%和 58.11%,而当草带宽度为 100 cm 时,草带减沙效益均低于 75 cm 的草带宽度。说明在本试验中,75 cm 草带的减流减沙效益较好,当草带宽度为 50 cm 时,上方径流经过草带时被均匀分散,流速显著降低,草带调节径流泥沙作用逐渐加强,进而土壤侵蚀强度降低,产流产沙量显著降低;当草带宽度为 100 cm 时,草带过宽,将上方径流所携带的泥沙过滤充分,水流变得清澈,导致径流通过草带后挟沙能力变大,并且径流在草带上汇集形成集中流增大径流对草带下方的剥蚀率,因此继续增加草带宽度并不能再次显著降低产流产沙量。此外,本研究指出,细沟宽、沟深与土壤侵蚀率之间存在显著相关关系,径流在经过草带后,其产生的细沟对产流产沙有着重要的关联关系。

综上,针对不同宽度的草带拦截径流泥沙率的差异,在防控坡耕地坡面水土保持治理措施方面,不仅要考虑当地降雨对土壤侵蚀的影响,还要考虑草带宽度设计的合理性,本研究结果主要为紫色土坡面水土

保持措施的草带设计优化提供理论与数据支撑。而坡度、气候、坡向和植被类型等因素对草带措施拦截径流泥沙的影响还需要进一步完善;同时,本试验为室内试验,存在一定的局限性,今后研究需将加入室外人工降雨措施,以期使研究结果更加科学合理。

4 结论

(1)细沟沟宽、沟深、沟长和宽深比均随着流量的增加而增加,在小流量条件下,100 cm 草带宽度下所产生的平均沟宽、沟长和沟宽深比最小,而在大流量条件下,75 cm 草带宽度下的沟宽和沟深最小,说明在极端降雨条件下,75 cm 的草带宽度比 100 cm 的草带宽度更能够阻止细沟发育,其细沟整体表现为纵向发育。

(2)草带宽度可有效降低整个坡面的水土流失量。相对于无草带的坡面,50,75,100 cm 草带宽度下的产流率分别减少 3.52%~48.41%,产沙率分别减少 1.78%~58.11%,而 75 cm 草带宽度的减沙效益最大,是其他草带宽度条件下减沙效益的 1.01~32.59 倍。此外,有草带拦截坡面的产流产沙率、土壤侵蚀速率与沟宽、沟深呈极显著相关关系。

(3)与沟深相比,草带宽度和沟宽是表征坡面产流产沙的最佳特征指标,能够较好地反映坡面土壤侵蚀程度。

本研究证实,草带能有效减流减沙,对紫色土坡耕地的水土流失具有较好的防治效果。

参考文献:

[1] 宇涛,张霞,李占斌,等.不同草带覆盖位置条件下坡沟系统侵蚀产沙差异性[J].水土保持学报,2018,32(6):22-27.

[2] Mohammad A G, Adam M A. The impact of vegetative cover type on runoff and soil erosion under different land uses[J].Catena,2010,81:97-103.

[3] 刘泉宏,李铁,湛芸,等.香根草植物篱带宽对紫色土坡地产流产沙的影响[J].水土保持学报,2019,33(4):93-101.

[4] 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.

[5] Pan D L, Yang S W, Song Y Q, et al. The tradeoff between soil erosion protection and water consumption in revegetation: Evaluation of new indicators and influencing factors[J].Geoderma,2019,347:32-39.

[6] Zhang X C, Wang Z L. Interrill soil erosion processes on steep slopes[J].Journal of Hydrology,2017,548:652-664.

[7] 马勇勇,李占斌,任宗萍,等.草带布设位置对坡沟系统水文连通性的影响[J].农业工程学报,2018,34(8):170-176.

[8] 丁文峰,李勉.不同坡面植被空间布局对坡沟系统产流产沙影响的实验[J].地理研究,2010,29(10):1870-1878.

[9] 曹梓豪,赵清贺,左宪禹,等.基于坡面水文连通性的黄河下游河岸缓冲带植被格局优化[J].应用生态学报,2018,29(3):739-747.

[10] 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.

[11] 张金阁,马岚,张栋,等.华北土石山区草地过滤带布设方式对坡面产流产沙的影响[J].水土保持学报,2020,34(5):76-80.

[12] 高军,尤迎华,谈晓珊,等.植被过滤带阻控径流污染的机制及研究进展[J].环境科学与技术,2019,42(9):91-97.

[13] 赵清贺,冀晓玉,徐珊珊,等.河岸植被对坡面径流侵蚀产沙的阻控效果[J].农业工程学报,2018,34(13):170-178.

[14] 张霞,李鹏,李占斌,等.坡面草带分布对坡沟水土流失的防控作用及其优化配置[J].农业工程学报,2019,35(7):122-128.

[15] 陈旭飞,刘通,程炯,等.华南地区草被过滤带对菜地径流、泥沙和磷阻控效果及影响因素[J].水土保持研究,2019,26(2):377-383.

[16] Wanyama J, Herremans K, Maetens W, et al. Effectiveness of tropical grass species as sediment filters in the riparian zone of Lake Victoria[J]. Soil Use and Management,2012,28(3):409-418.

[17] 郭利刚.构建“山水林田湖草”生态保护与修复的内生机制[J].中国资源综合利用,2019,37(11):133-135.

[18] 张泽,丘海红,胡宝清.山水林田湖草空间格局与生态变化分析:以桂西南喀斯特—北部湾海陆交互关键带为例[J].中国科技论文,2021,16(1):65-70.

[19] 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.

[20] 倪世民,冯舒悦,王军光,等.不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力特性及产沙的关系[J].农业工程学报,2018,34(15):149-156.

[21] 翟婷婷,湛芸,李铁,等.植物篱篱前淤积带与篱下土坎土壤水库和抗剪性能对比研究[J].生态学报,2020,40(2):599-607.

[22] 陈义君,彭石磊,湛芸,等.紫色土坡耕地香根草根系的固土抗蚀效应[J].草业科学,2015,32(4):485-491.

[23] 崔志强,王文龙,郭明明,等.不同植被措施下排土场边坡细沟发育时空特征[J].土壤学报,2020,57(5):1155-1165.

[24] Appels W M, Bogaart P W, Sjoerd E A T M van der Zee. Surface runoff in flat terrain: How field topography and runoff generating processes control hydrological connectivity[J].Journal of Hydrology,2016,534:493-504.

[25] Panagos P, Borrelli P, Meusburger K. Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale[J].Environmental Science and Policy,2015,51:23-34.

[26] 黄荣珍,朱丽琴,王赫,等.红壤退化地森林恢复后土壤有机碳对土壤水库库容的影响[J].生态学报,2017,37(1):238-248.

[27] Abu-Zreig M, Rudra R P, Lalonde M N, et al. Experimental investigation of runoff reduction and sediment removal by vegetated filter strips[J]. Hydrological Process,2004,18(11):2029-2037.