坡度和植被模式对干热河谷水土保持效益的影响

黄 顺[1], 何光熊[2,3,4], 张斌艳[2,3,4], 廖周瑜[5], 孙晓媛[1], 方海东[2,3,4]
(1.西南林业大学 水土保持学院,云南 昆明 650000; 2.云南省农业科学院热区生态农业研究所, 云南 元谋 651300; 3.云南省水土流失防治与绿色发展重点实验室, 云南 元谋 651300; 4.云南元谋金雷国家水土保持科技示范园, 云南 元谋 651300; 5.西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650000)

摘 要: [目的]评估干热河谷不同坡度和植被模式的水土保持效益,为元谋干热河谷的水土保持模式选择提供参考。[方法]设置5°和10°坡度试验小区,进行黄茅、黄茅+余甘子、黄茅+车桑子3种植被模式的原位径流泥沙监测,比较不同坡度和植被模式的产流产沙差异。[结果]①5°和10°坡度下3种植被模式及裸地的降雨径流分配均以地表径流为主(80.94%~99.11%);②3种植被模式通过调控径流在不同土层中的分配从而显著减少地表径流(73.13%~86.87%)和土壤流失量(69.29%~94.47%),50 cm和100 cm壤中流分别增加107.14%~980.00%和47.17%~225.00%;③5°和10°坡度下,与裸地相比,黄茅+余甘子在100 cm处壤中流的增幅最大,分别为225.00%和181.13%,土壤流失量分别降低70.06%和92.27%,固土保水能力强;④各项降雨特征中,降雨量与地表径流的关系最为密切,相关系数为0.665($p<0.05$),其中暴雨会明显增加地表径流,5°和10°坡面年均地表径流较大雨分别增加339.45%和148.30%。[结论]干热河谷水土流失主要受到降雨量和地表径流的综合影响,5°和10°坡度下3种植被模式通过调控径流在不同土层中的分配从而达到固土保水的目的,其中黄茅+余甘子既能有效减少地表径流,还能将降雨有效的导入深层土壤并减少径流中泥沙含量,是区域固土保水的优势植被模式。

关键词: 坡度; 植被模式; 径流分配; 壤中流; 土壤流失量
文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2025)06-0050-09 **中图分类号:** S157.1

文献参数: 黄顺, 何光熊, 张斌艳, 等.坡度和植被模式对干热河谷水土保持效益的影响[J].水土保持通报,2025,45(6):50-58. Huang Shun, He Guangxiong, Zhang Binyan, et al. Effects of slope gradients and vegetation patterns on soil and water conservation benefits in dry-hot valleys [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2025,45(6):50-58.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.003 **CSTR:32312.14.stbctb.2025.06.003**

Effects of slope gradients and vegetation patterns on soil and water conservation benefits in dry-hot valleys

Huang Shun[1], He Guangxiong[2,3,4], Zhang Binyan[2,3,4], Liao Zhouyu[5], Sun Xiaoyuan[1], Fang Haidong[2,3,4]
(1.*College of Soil and Water Conservation, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan* 650000, *China*; 2.*Tropical Eco-Agriculture Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yuanmou, Yunnan* 651300, *China*; 3.*Yunnan Key Laboratory of Soil Erosion Prevention and Green Development, Yuanmou, Yunnan* 651300, *China*; 4.*Yunnan Yuanmou Jinlei National Water and Soil Conservation Science and Technology Demonstration Park, Yuanmou, Yunnan* 651300, *China*; 5.*College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan* 650000, *China*)

Abstract: [Objective] The soil and water conservation benefits of different slope gradients and vegetation patterns in dry-hot valleys were analyzed in order to provide a reference for selecting soil and water conservation patterns in the Yuanmou dry-hot valley. [Methods] Experimental plots with slopes of 5° and 10° were established to conduct in-situ monitoring of runoff and sediment under three typical vegetation patterns: *Heteropogon contortus*, *H. contortus* + *Phyllanthus emblica*, and *H. contortus* + *Dodonaea viscosa*. The differences in runoff and sediment

收稿日期:2025-04-09 **修回日期:**2025-07-21 **采用日期:**2025-07-22
资助项目:云南省水土流失与绿色发展重点实验室项目"云南省水土流失防治技术研发"(202205AK070026-01);云南省创新引导与科技型企业培育计划"建设元谋乡村振兴科技创新县"项目(202304BT090025-04);金沙江干热河谷植被生态站监测项目(2025-YN-18)
第一作者:黄顺(1999—),男(汉族),安徽省合肥市人,硕士研究生,研究方向为水土保持。Email:15155915703@163.com。
通信作者:方海东(1979—),男(汉族),黑龙江省海伦市人,硕士,研究员,主要从事干热区生态治理与农业可持续发展研究。Email:rqsfhd@163.com。

yield under different slope gradients and vegetation patterns were then compared. [Results] ① The rainfall-runoff distribution for the three vegetation patterns and bare land under slope gradients of 5° and 10° was dominated by surface runoff (80.94%—99.11%). ② The three vegetation patterns significantly reduced surface runoff (73.13%—86.87%) and soil loss (69.29%—94.47%) by regulating runoff distribution across different soil layers, while correspondingly increasing interflow at depths of 50 cm and 100 cm (107.14%—980.00% and 47.17%—225.00%, respectively). ③ At slope gradients of 5° and 10°, compared with bare land, *H. contortus* + *P. emblica* showed the greatest increase in interflow at 100 cm depth (225.00% and 181.13%, respectively) and effectively reduced soil loss (70.06% and 92.27%, respectively). This pattern simultaneously demonstrated the functions of soil stabilization and water retention. ④ Among all rainfall characteristics, rainfall amount was most closely related to surface runoff, with a correlation coefficient of $r = 0.665$ ($p < 0.05$). Specifically, rainstorms significantly increased surface runoff, causing the annual average surface runoff on 5° and 10° slopes to increase by 339.45% and 148.30%, respectively, compared with relatively heavy rain. [Conclusion] Soil erosion in dry-hot valleys is mainly affected by the combined effects of rainfall amount and surface runoff. The three vegetation patterns at the slope gradients of 5° and 10°achieve the goal of soil stabilization and water retention by regulating runoff distribution across different soil layers. Among them, *H. contortus* + *P. emblica* not only effectively reduce surface runoff but also effectively direct rainfall into deeper soil layers and reduce the sediment content in runoff. It is identified as the dominant vegetation pattern for regional soil and water conservation.

Keywords: slope gradient; vegetation pattern; runoff distribution; interflow; soil loss

水土保持是保护生态环境的重要手段,而坡度作为地形因子之一,对水土保持具有重要的影响[1]。植被覆盖是实施水土保持的重要措施之一,植物的根系能够深入土壤形成网状结构,增强土壤的抗侵蚀能力;同时植物可以降低地表径流速度,促进土壤入渗,从而减少水分流失[2]。坡度决定了地表径流的形成和土壤侵蚀的程度,植被则是防止土壤侵蚀和保持水土的关键因素,因此,坡度与植被模式的相互适应对提高水土保持效益有重要作用。一般来说,相同坡度条件下,草灌混合模式比单种草本的水土保持效益更好,可以有效减少泥沙流失,提高土壤抗侵蚀能力[3]。然而,不同植被模式在不同坡度下的表现存在差异[4],因此,依据坡度筛选适宜的植被模式依然是水土流失治理的重要环节。

中国的干热河谷主要分布于横断山区的怒江、金沙江、澜沧江等河流沿岸及其支流流域,其气候环境及植被受深切河谷的地形效应影响呈现鲜明的特殊性[5]。一方面,深切河谷地势陡峭,风化作用显著,地表径流速度快,降水难以下渗,加剧了水土流失的风险[6];另一方面,干热河谷焚风效应明显,降雨稀少、持续高温、土壤贫瘠等环境条件限制了植物生长,形成了类似"稀树草原"的萨瓦纳植被[7]。地形、植被及其相互作用共同影响了干热河谷区域的水土保持格局。然而,当前干热河谷相关研究主要集中于不同植被对土壤理化性质、入渗性能、抗侵蚀能力及微生物群落结构的影响[8-9],对不同坡度和不同植被模式水土保持效益的长期观测及比较研究较少。坡度15°以下的区域是干热河谷经济发展和生产生活中的核心地带,有研究表明,金沙江干热河谷坡度15°以下的河谷区面积占比47.7%,区域内人口大量聚集,农业生产活动频繁,已造成严重的土壤肥力下降,水土流失问题频发[10]。

当前,针对干热河谷该坡度范围内的水土流失问题已有部分研究,结果表明,10°及以下坡度的坡面产沙率和产流率之间存在显著指数相关关系[11];10°坡度果草复合的间作模式水土保持效益更好[12];10°坡度休闲地的土壤侵蚀模数多高于坡耕地[13]。但未见对10°及以下坡度典型植被模式的水土保持效益研究的相关报道。

元谋干热河谷是金沙江流域典型的生态脆弱区和长江上游重要的生态屏障区,该区域内的水土流失治理成效对长江流域生态环境治理有重要影响[14]。元谋干热河谷形成以草本层为优势层,灌木层为次优层的植被分布格局,其中,以黄茅(*Heteropogon contortus*)为代表的多年生草本和以车桑子(*Dodonaea viscosa*)、余甘子(*Phyllanthus emblica*)为代表的灌木[15]相互组合形成区域代表性的"稀树灌草丛"群落,显著影响该区域的水土保持效益。本研究采用小区模拟及监测试验法,对影响水土流失的主要因素进行探究,分析较低坡度下不同植被模式的水土保持效益,以期为干热河谷的水土保持模式选择提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为元谋干热河谷，位于金沙江中下游，是中国西南干热河谷典型代表区，属典型的干热季风气候，年平均气温21.4 ℃，5月或6月为全年最热月份，平均气温26.4 ℃，12月为全年最冷月份，平均气温13.8 ℃；年降水量656.8 mm，主要集中于5—10月，占全年降水量的85%；区域内年蒸发量1 657.5 mm，为年均降水量的260%[16]。平均海拔1 210 m，年日照时数为2 670.4 h，无霜期350 d[12]。地形整体呈现南北向盆地地形，四周被群山环绕，海拔898～2 836 m，相对高差1 938 m，以小起伏斜坡和缓坡丘陵为主，部分区域坡度较陡。土壤以紫色土为主，结构差，土层浅。pH值6.2～7.0，肥力低，易板结[17]。植被分布不均匀且物种多样性偏低，多为耐旱、耐高温且适应贫瘠土壤的植物，旱季植物生长缓慢，部分草本植物枯萎，雨季则迅速生长。植物种类有以黄茅和孔颖草（*Bothriochloa pertusa*）等为主的草本和以余甘子、车桑子、华西小石积（*Osteomeles schweriniae*）等为主的中小型灌木，少有乔木，为典型的干热河谷稀树草原植被[18]。

1.2 研究方法

1.2.1 试验小区设置

试验小区设置于元谋县金雷国家水土保持科技示范园中（101°35′—102°06′E，25°23′—26°06′N）。试验设置5°和10° 2个坡度，每个坡度设试验小区4个，各小区相互毗邻且坡向相同。为确保土层构造稳定及试验所需坡度与小区实际坡度一致，按刘刚才等[19]的方法建造宽2.5 m长10.0 m的小区，监测降雨过程中地表径流和壤中流的流量。在示范园内选择坡度为5°和10°区域，小区建造前，移去深度1 m以上原有土层，用搅拌机将其完全混合均匀后，装填到小区内以供控制试验使用。小区底部及四周围墙均以厚度为10 cm的钢筋混凝土浇筑，硬化后形成收集雨水入渗的密闭装置，并在小区底端设置高出坡面35 cm的挡土墙，同时为避免雨水溅入小区造成数据误差，围墙顶部向外一侧为斜切面。小区分别于地表、深入土层50 cm和100 cm处设置出水口，用于收集地表径流、50 cm和100 cm壤中流。在小区坡底内侧分别于50 cm和100 cm处修建集流槽，50 cm处外部使用防水布覆盖的碎石墙防护，100 cm处填充碎石并盖上防水布。于小区坡底外墙处设置集水池并通过水管用于收集地表径流、50 cm和100 cm壤中流。

本研究在5°和10°坡度下，以分别种植黄茅、黄茅＋余甘子和黄茅＋车桑子的试验小区为试验组，以完全不种植任何植物的裸地小区为对照组，采用移栽法均匀种植黄茅、余甘子和车桑子。试验期内，黄茅小区植被盖度为80%～90%，平均高度为60～80 cm；黄茅＋余甘子和黄茅＋车桑子小区内黄茅盖度为50%～60%，余甘子和车桑子盖度均为40%～50%，平均高度80～120 cm；裸地小区不栽植植物，并进行定期清理，保持地面盖度小于5%；全年各植被小区平均盖度60%～90%。经历3 a自然生长后开始采集数据。

1.2.2 数据采集

试验小区于2017年布设完毕，从2020年开始收集小区水沙数据。每次降雨结束后的次日上午，采取人工法对不同小区的地表径流，50 cm壤中流，100 cm壤中流集水池中水深及泥沙含量进行测量，泥沙含量通过将集水池中的水充分搅拌后取样并通过烘干法测定。气象数据由园内配备的全自动气象站实时采集和记录。

径流深计算公式为

$$R=\frac{h\times A\times 10}{S} \tag{1}$$

土壤流失量计算公式为

$$Q=\frac{G\times 10}{S} \tag{2}$$

式中：R为径流深（mm）；h为水深（cm）；A为桶底面积（m^2）；S为小区面积（m^2）；Q为土壤流失量（t/hm^2）；G为泥沙总量（kg）。

1.2.3 数据处理

采用Excel 2021进行数据分析，使用Origin 2021绘图，运用SPSS 27.0进行显著性和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 试验区降雨特征

试验区2020—2022年共有27个月发生降雨，月均降雨量41.4 mm，累计降雨量1 491.3 mm。有降雨的月份中，2020年8月累计降雨量最多（187.7 mm），占总降雨量的12.6%，2020年3月累计降雨量最少（0.2 mm）。降雨多集中于6—8月，其累计降雨量占总降雨量的63.7%。试验结果（图1）表明，3 a内共有188场降雨，其中小区有34场产生径流，占总降雨场数的18.1%，侵蚀性降雨总量866.7 mm，占总降雨量的58.1%。2020年6月15日降雨量最多（69.2 mm），2021年9月3日降雨量最少（10.2 mm）；3 a内侵蚀性降雨平均雨强3.59 mm/h，平均降雨历时12.09 h，平

均I_{30}(最大 30 min降雨强度)18.47 mm/h;依据中国气象局 2017 年发布的《降雨过程强度等级》,试验区 2020—2022 年 34 场侵蚀性降雨中共有中雨 19 场,大雨 12 场,暴雨 3 场。

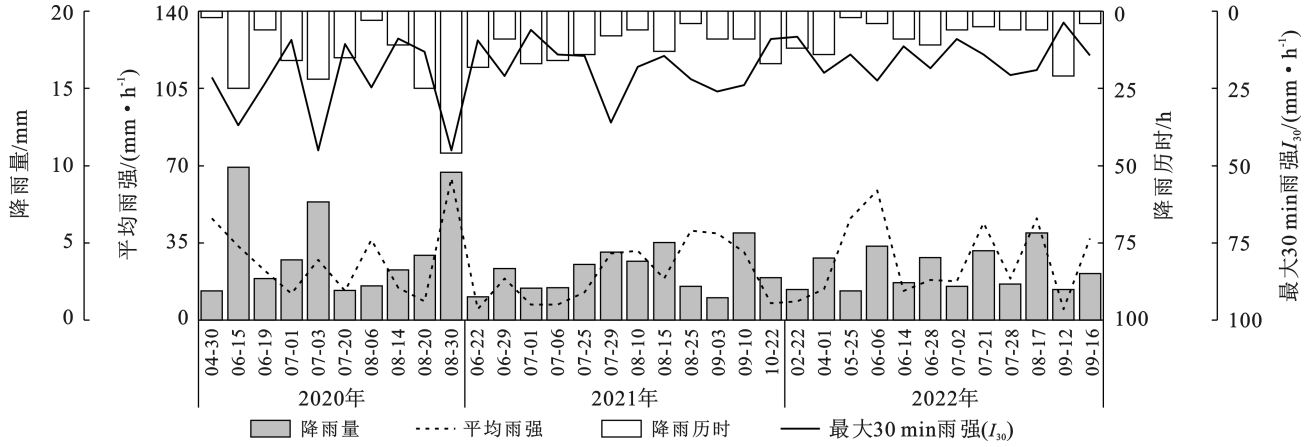


图 1　试验区 2020—2022 年侵蚀性降雨特征值

Fig.1　Characteristic values of erosive rainfall in experimental area (2020—2022)

2.2　不同坡度和植被模式对降雨径流分配的影响

2.2.1　不同坡度和植被模式对降雨径流垂向输出比例的影响

图 2 表明,不同坡度 3 种植被模式及裸地的垂向输出径流组成特征相似,均以地表径流为主,地表径流占总径流量的比例均达到 75% 以上,其中裸地的地表径流占比最高,5°和 10°坡度下分别为 99.11% 和 98.29%。不同坡度下 3 种植被模式均能减少地表径流并增加 50 cm 和 100 cm 壤中流,与裸地相比,5°坡度下地表径流降低了 77.24%～79.42%,50 cm 和 100 cm 壤中流分别增加了 490.00%～980.00% 和 103.00%～225.00%;10°坡度下地表径流降低了 73.13%～86.87%,50 cm 和 100 cm 壤中流分别增加了 107.14%～196.43% 和 47.17%～181.13%。在不同坡度下黄茅的地表径流占比均最低,而 50 cm 和 100 cm 壤中流占比均最高,地表径流、50 cm 和 100 cm 处的壤中流占比在 5°坡度下分别为 79.08%,12.41%,8.51%,10°坡度下分别为 80.95%,7.67% 和 11.38%。

2.2.2　不同坡度和植被模式对垂向输出径流特征的影响

不同坡度下,3 种植被模式的地表径流和径流系数均显著($p<0.05$)低于裸地,50 cm 和 100 cm 壤中流均显著($p<0.05$)高于裸地,但地表径流的减少程度及壤中流的增加程度在不同坡度和植被模式之间存在差异(图 3)。在 5°坡度下,黄茅、黄茅＋余甘子和黄茅＋车桑子的地表径流和径流系数虽存在一定的差异,但并不显著($p>0.05$);与裸地相比,50 cm 处壤中流以黄茅增流的幅度最大(980.00%),黄茅＋余甘子次之(850.00%),而 100 cm 处壤中流以黄茅＋余甘子增流的幅度最大(225.00%),黄茅次之(170.00%),黄茅＋车桑子在 50 cm 和 100 cm 处壤中流的增流幅度与另外两种植被模式相比均最低(490.00% 和 103.00%),表明在此坡度条件下,黄茅将降雨更多地导入浅层土壤中,而黄茅＋余甘子可以将降雨更多地导入深层土壤中,更利于土壤深层保水。在 10°坡度下,黄茅的地表径流、径流系数显著($p<0.05$)低于裸地及另外两种植被模式,说明黄茅在 10°坡度下减少地表径流的效果最佳;3 种植被模式的 50 cm 和 100 cm 壤中流均与裸地有显著差异($p<0.05$),与裸地相比,50 cm 处壤中流以黄茅＋车桑子增流幅度最大(196.43%),且黄茅与黄茅＋余甘子的差异不显著($p>0.05$),在 100 cm 处壤中流中以黄茅＋余甘子增流幅度最大(181.13%),且黄茅与黄茅＋车桑子的差异不显著($p>0.05$),表明在此坡度条件下,黄茅＋余甘子依然可以将降雨更多地导入深层土壤中。

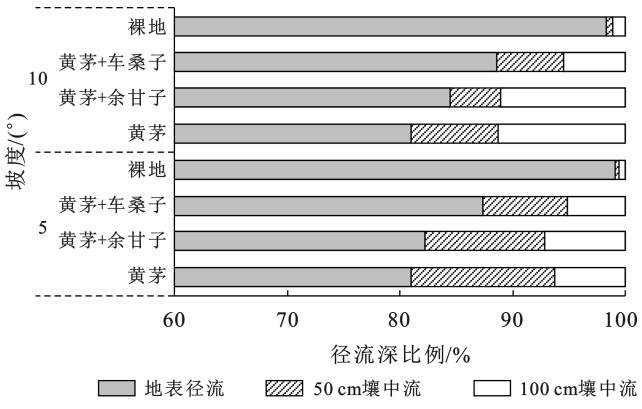
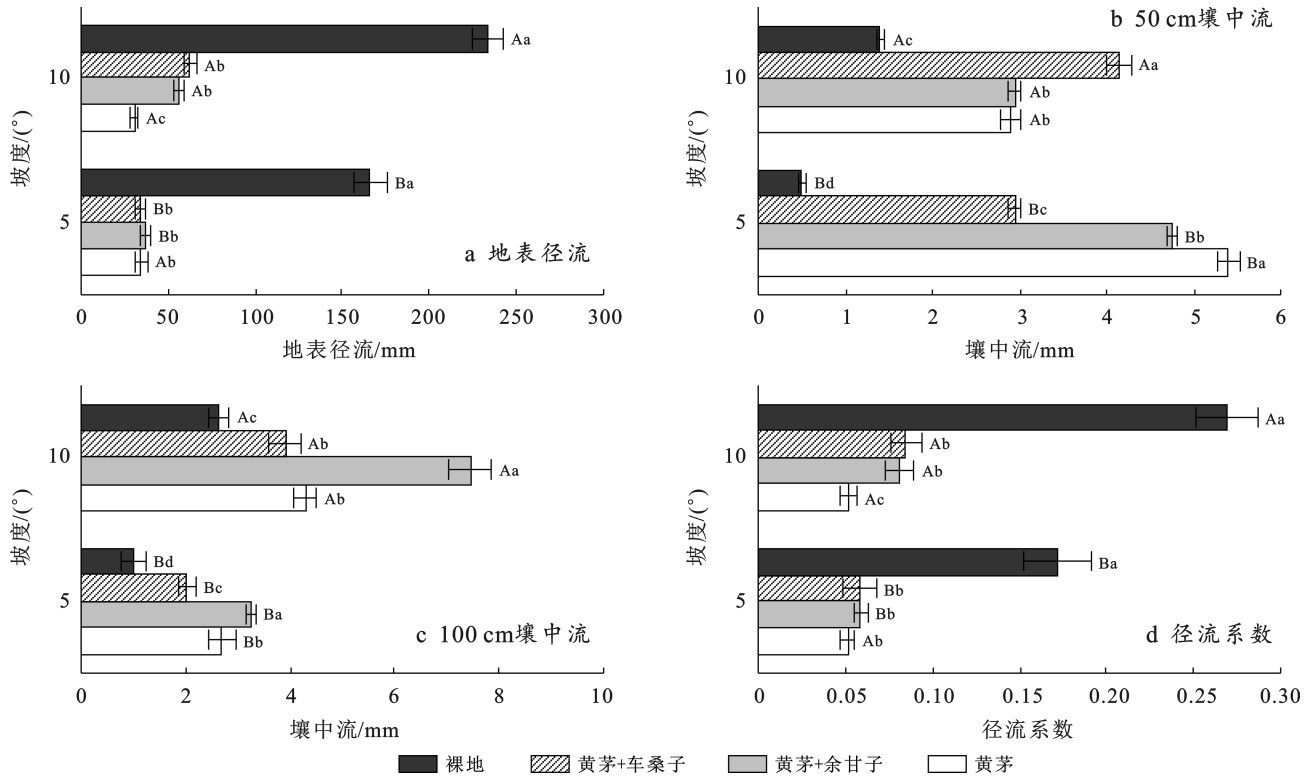


图 2　不同坡度和植被模式下降雨径流垂向输出比例

Fig.2　Vertical output ratio of rainfall runoff under different slope gradients and vegetation patterns



注:图中不同大写字母表示相同植被模式在不同坡度下的差异显著($p<0.05$),不同小写字母表示相同坡度下不同植被模式间的差异显著($p<0.05$),下同。

图3 不同坡度和植被模式下垂向输出径流特征

Fig.3 Characteristics of vertical output runoff under different slope gradients and vegetation patterns

2.3 不同坡度和植被模式对泥沙垂向输出特征的影响

研究结果(图4)表明,5°坡度下裸地的地表径流泥沙含量与黄茅差异不显著($p>0.05$),与黄茅+余甘子和黄茅+车桑子差异显著($p<0.05$),其中黄茅+余甘子的地表径流泥沙含量最低(0.40 g/L);在壤中流泥沙含量方面,50 cm处黄茅与裸地差异不显著,黄茅+余甘子泥沙含量最低(0.29 g/L),黄茅+车桑子次之(0.44 g/L),100 cm处3种植被模式均与裸地有显著差异($p<0.05$),且各种植被模式之间差异不显著($p>0.05$),表现为:黄茅(0.53 g/L)>黄茅+余甘子(0.52 g/L)>黄茅+车桑子(0.45 g/L)。综合地表径流泥沙含量、土壤流失量、50 cm和100 cm壤中流泥沙含量特点,可以看出,黄茅+余甘子对于降低地表径流泥沙含量和壤中流泥沙含量的效果最好,黄茅+车桑子次之。10°坡度下3种植被模式的地表径流泥沙含量均与裸地间差异显著($p<0.05$),3种植被模式之间差异不显著($p>0.05$),其中黄茅的地表径流泥沙含量最低(0.36 g/L),黄茅+余甘子次之(0.43 g/L);50 cm处3种植被模式的壤中流泥沙含量差异不显著($p>0.05$),表现为黄茅+车桑子(0.18 g/L)>黄茅+余甘子(0.16 g/L)>黄茅(0.12 g/L);在100 cm处,黄茅+车桑子的壤中流泥沙含量显著($p<0.05$)高于其他植被模式和裸地,黄茅+余甘子和黄茅与裸地间差异不显著($p>0.05$),3种植被模式的泥沙含量表现为:黄茅+车桑子(0.61 g/L)>黄茅+余甘子(0.42 g/L)>黄茅(0.41 g/L)。综合地表径流泥沙含量、土壤流失量、50 cm和100 cm壤中流泥沙含量特点,可知黄茅对于降低地表径流泥沙含量和壤中流泥沙含量的效果最好,黄茅+余甘子次之。

2.4 不同坡度对植被模式的产流产沙因素分析

不同坡度和植被模式下,水沙指标与降雨特征参数相关性存在差异(表1)。裸地上,不同坡度下径流量与各项降雨特征存在极强的正相关($p<0.01$),而土壤流失量与径流量呈显著($p<0.05$)或极显著($p<0.01$)的正相关,说明降雨通过对裸地径流产生影响,从而造成土壤流失;坡度从5°增至10°后,裸地的径流量和土壤流失量与各项降雨特征的相关性增强。有植被覆盖的小区径流量与各项降雨特征的相关性、土壤流失量与径流量的相关性减弱,表明植被模式可以减少水土流失。总体上,无论裸地还是植被模式的各小区,径流量与降雨量的关系最为显著,平均相关系数为$r=0.665$($p<0.05$),土壤流失量与各项降雨特征的相关性不明显。

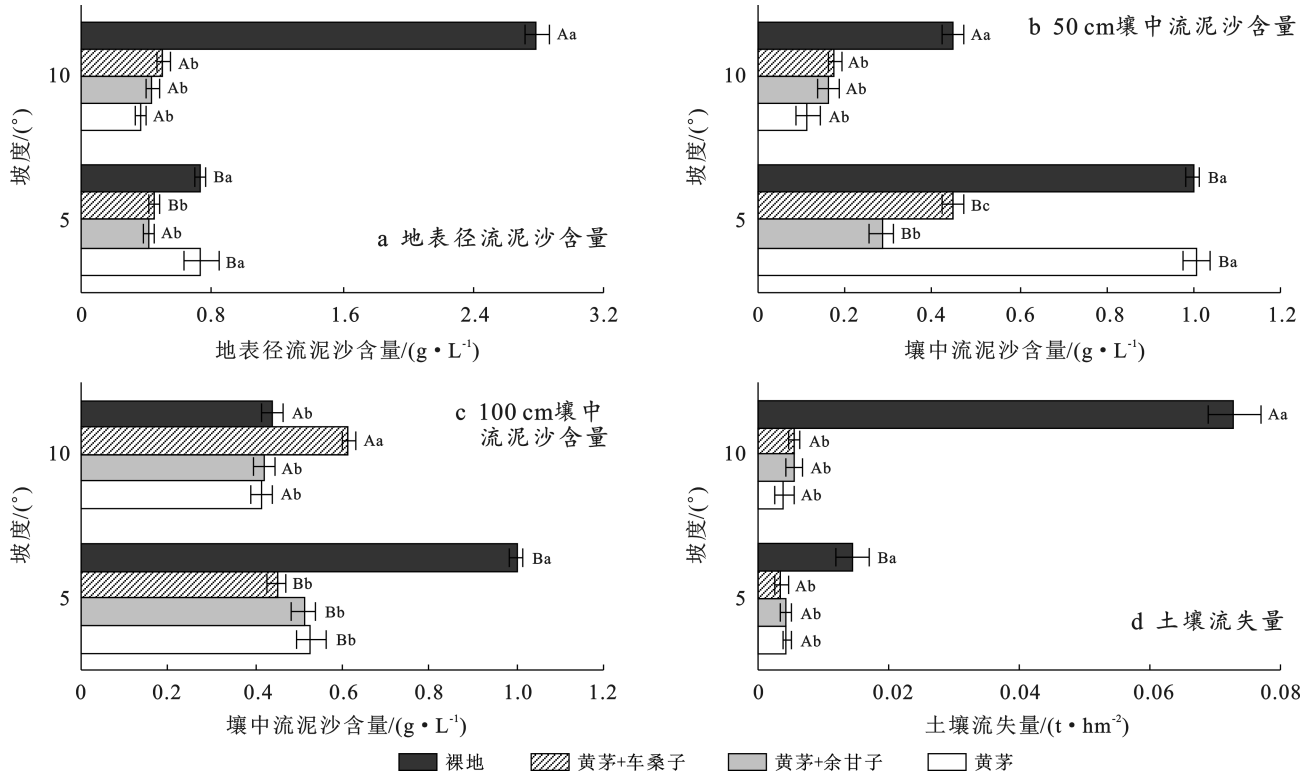


图 4　不同坡度和植被模式下坡面泥沙输出特征

Fig.4　Characteristics of surface sediment output under different slope gradients and vegetation patterns

表 1　不同坡度和植被模式下水沙指标与降雨特征参数的相关分析

Table 1　Correlation analysis between water and sediment indicators and rainfall characteristic parameters under different slope gradients and vegetation patterns

坡度	小区	水沙指标	降雨量	平均雨强	降雨历时	最大 30 min 雨强 I_{30}	土壤流失量
5°	裸地	径流量	0.683**	0.356*	0.543**	0.561**	0.392*
		土壤流失量	0.127	0.042	−0.028	0.045	
	黄茅	径流量	0.770**	0.189	0.654**	0.509**	0.003
		土壤流失量	0.111	0.046	−0.049	−0.001	
	黄茅＋余甘子	径流量	0.810**	0.423*	0.699**	0.538**	0.508*
		土壤流失量	0.371	0.576**	0.231	0.214	
	黄茅＋车桑子	径流量	0.482*	0.294	0.243	0.367	0.125
		土壤流失量	−0.174	0.021	−0.229	−0.199	
10°	裸地	径流量	0.712**	0.366*	0.500**	0.584**	0.467**
		土壤流失量	0.294	0.286	−0.058	0.514**	
	黄茅	径流量	0.622**	0.100	0.337	0.455*	0.277
		土壤流失量	−0.174	−0.109	−0.290	−0.083	
	黄茅＋余甘子	径流量	0.569**	0.322	0.441*	0.175	0.183
		土壤流失量	−0.061	0.130	−0.162	−0.055	
	黄茅＋车桑子	径流量	0.672**	0.338	0.518**	0.342	0.366
		土壤流失量	0.372*	0.460*	0.310	0.352	

注:*表示显著相关($p<0.05$);**表示极显著相关($p<0.01$)。

2.5　不同坡度下降雨强度对产流产沙的影响

表 2 表明,当坡度由 5°上升到 10°,在中雨和大雨强度下,地表径流、100 cm 壤中流、径流系数和泥沙含量均呈现明显增加趋势,地表径流分别增加了 63.55% 和 69.44%,100 cm 壤中流分别增加了 5.00% 和 47.21%,径流系数分别增加了 56.30% 和 67.06%,

含沙量分别增加了49.75%和59.65%;不同坡度条件下地表径流随降雨强度增大而逐渐增多,当降雨强度由中雨增大到大雨和由大雨增大到暴雨时,5°坡度下分别增长了25.76%和339.45%,10°坡度下分别增长了30.29%和148.30%,其中暴雨下地表径流增加极为明显;产流降雨场次中中雨比例最高(55.89%),大雨次之(35.29%),暴雨比例最低(8.82%),但暴雨下的地表径流、50 cm和100 cm壤中流明显高于中雨和大雨。

表2 不同坡度和降雨强度下的产流产沙量

Table 2 Runoff and sediment yield under different slope gradients and rainfall intensities

坡度/(°)	雨强分级	地表径流/(mm·场$^{-1}$)	50 cm壤中流/(mm·场$^{-1}$)	100 cm壤中流/(mm·场$^{-1}$)	径流系数	泥沙含量/(g·L^{-1})
5	中雨	1.49	0.80	0.50	0.09	0.80
	大雨	1.87	0.56	0.52	0.06	0.62
	暴雨	8.22	1.00	0.67	0.12	0.50
10	中雨	2.43	0.53	0.53	0.15	1.19
	大雨	3.17	0.70	0.76	0.10	0.99
	暴雨	7.87	0.79	0.70	0.12	1.38

3 讨 论

在5°和10°坡度下各小区垂向径流中,均以地表径流的比例最高,占80.94%~99.11%,这与张宇恒等[20]关于紫色土区坡面径流的研究差异较大,可能受到土壤性质方面的影响。紫色土的土层薄、孔隙大,有利于降雨下渗和水分保持,故能够将地表径流及时转换为壤中流,但由于干热河谷降雨稀少、蒸发量高,植被覆盖度低,土壤易于板结,地表径流增强,壤中流减弱,致使该区域内水土流失日益严重[21]。总体上5°坡度下各小区的50 cm壤中流比例大于100 cm处,而10°坡度下100 cm壤中流比例却大于50 cm处。推测5°坡度土壤的水平入渗面较大,水分更容易在浅层土壤中形成壤中流,而随着坡度增加,水分受重力影响更显著,导致水分更容易向深层渗透[22]。

本次试验中,5°和10°坡度下各种植被模式均能显著降低地表径流和土壤流失量,这与张斌艳等[12]和何光熊等[23]关于干热河谷不同种植模式的水土保持研究结果一致,表明植被覆盖可拦截降雨对地表的直接冲击,减缓地表径流速度与流量,而裸地因降雨直接冲击地表,破坏土壤结构,使降雨难以渗入,易形成地表径流,冲刷表土并带走有机质。在地表径流减流效果上,坡度从5°增至10°,黄茅+余甘子和黄茅+车桑子的地表径流分别增加52.97%和83.04%,黄茅却下降11.05%,这可能是余甘子和车桑子根系主要集中在深土层,对浅层土壤固定弱,而黄茅的浅层根系能在坡度增大时继续减少地表径流[24]。在50 cm和100 cm处壤中流增流效果上,5°坡度下的壤中流增流幅度大于10°坡度,表明在较缓坡度下雨水可能有更多时间渗透到土壤中,进而增加壤中流,而坡度增加后水流加快,雨水渗透时间减少,导致壤中流形成较少,此外植被模式和根系也有影响[25]。

当坡度由5°增加到10°,不同降雨强度下的地表径流、100 cm壤中流、径流系数和泥沙含量均呈现增加趋势,这与阚晓晴等[26]的研究结果一致,坡度越大,越有利于土壤孔隙中水流的下渗和侧向运移。除坡度外,降雨强度对产流产沙过程也有着显著影响,随着降雨强度的增加,不同坡度下的地表径流、50 cm和100 cm壤中流整体呈现增加趋势,且50 cm壤中流略大于100 cm处,这与王祥等[22]的研究结果一致;整体上,径流量与各项降雨参数普遍呈正相关,但降雨量依然是影响径流量的最显著因素;径流量与土壤流失量存在极显著相关,说明以降雨量为主的各项降雨指标通过影响坡面产流和降雨入渗从而对土壤流失产生极大的影响。随坡度的增加,裸地的径流量和土壤流失量与降雨量、平均雨强、I_{30}的相关性增强,而植被模式小区的相关性减弱,表明坡度的增加会加剧降雨对裸地的侵蚀,而各种植被模式措施均能不同程度地发挥拦截径流、改良土壤的作用[27]。

在5°和10°坡度条件下,3种植被模式中黄茅+余甘子在100 cm处壤中流的增幅最大,能将降雨有效的导入深层土壤;在5°坡度下黄茅+余甘子对于降低地表径流泥沙含量和壤中流泥沙含量的效果最好,而在10°坡度虽然单种黄茅对于降低地表径流泥沙含量和壤中流泥沙含量的效果最好,但黄茅与黄茅+余甘子在地表径流泥沙含量、土壤流失量、50 cm和100 cm壤中流泥沙含量中的差异均不显著,表明黄茅+余甘子是一种利于固水保土的区域优势植被模式,这与黄少平等[1]的研究结论相一致,即草灌混合模式比单种草本的水土保持效益更好。

在干热河谷地带,降雨稀少且分布不均,土壤贫

瘠,植被覆盖可以有效防止水土流失。本研究设置不同植被模式和不同坡度的试验小区,分析了3种植被模式对水土保持功能的影响,但没有分析植被生长动态对水土保持效益的影响,且坡度设置较少,后续将增加坡度等级,分析不同坡度下的水土保持效益,定期监测植被生长动态指标并将这些指标与水土保持效益进行分析,以期为干热河谷水土保持研究提供更加全面的理论支撑。

4　结　论

干热河谷水土流失主要受降雨量和地表径流的综合影响,5°和10°坡度下黄茅、黄茅+余甘子与黄茅+车桑子3种植被模式通过调控径流在不同土层中的分配从而达到固土保水的目的。3种植被模式均能显著减少地表径流(73.13%～86.87%)和土壤流失量(69.29%～94.47%),并增加50 cm和100 cm壤中流(107.14%～980.00% 和 47.17%～225.00%),其中,黄茅+余甘子既能有效减少地表径流,还能将降雨有效导入深层土壤并减少径流中泥沙含量,是区域固土保水的优势植被模式。

参考文献(References)

[1] 黄少平,陈俊毅,肖衡林,等.不同坡度植被边坡降雨入渗和径流侵蚀规律的试验研究[J].岩土力学,2023,44(12):3435-3447.
Huang Shaoping, Chen Junyi, Xiao Henglin, et al. Test on rules of rainfall infiltration and runoff erosion on vegetated slopes with different gradients [J]. Rock and Soil Mechanics, 2023,44(12):3435-3447.

[2] Liu Xiru, Feng Tianjiao, Zhang Yufei, et al. Vegetation restoration affects soil hydrological processes in typical natural and planted forests on the Loess plateau [J]. Journal of Hydrology, 2025,650:132465.

[3] Sun Haoze, Luo Li, Guo Wenzhao, et al. Exploring rational vegetation configuration to relative increase runoff, reduce erosion and soil organic carbon loss in gully-slopes on the Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2024,640:131678.

[4] Olinic T, Olinic E D, Butcaru A C. Integrating geosynthetics and vegetation for sustainable erosion control applications [J]. Sustainability, 2024,16(23):10621.

[5] 明庆忠,史正涛.三江并流区干热河谷成因新探析[J].中国沙漠,2007,27(1):99-104.
Ming Qingzhong, Shi Zhengtao. New discussion on dry-hot valley formation in the three parallel rivers region [J]. Journal of Desert Research, 2007,27(1):99-104.

[6] 朱华,谭运洪,杨永平.中国西南干热河谷萨王纳植被综述[J].植物科学学报,2024,42(5):682-696.
Zhu Hua, Tan Yunhong, Yang Yongping. Review on savanna vegetation in the dry-hot valley valleys of southwestern China [J]. Plant Science Journal, 2024,42(5):682-696.

[7] 马焕成,伍建榕,郑艳玲,等.干热河谷的形成特征与植被恢复相关问题探析[J].西南林业大学学报(自然科学),2020,40(3):1-8.
Ma Huancheng, Wu Jianrong, Zheng Yanling, et al. Discussion on the formation characteristics of dry-hot valley and related problems of revegetation [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2020,40(3):1-8.

[8] 张珉瑞,王立娜,李盼,等.金沙江干热河谷区5种植被土壤入渗性能影响因素评价[J].水土保持研究,2024,31(6):37-45.
Zhang Minrui, Wang Lina, Li Pan, et al. Influencing factors of soil infiltration performance of five types of vegetation in dry-hot valley area of Jinsha River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(6):37-45.

[9] 邓翔尹,王克勤,王振超,等.金沙江干热河谷不同植被类型的土壤微生物群落结构特征[J].四川农业大学学报,2024,42(6):1328-1338.
Deng Xiangyin, Wang Keqin, Wang Zhenchao, et al. Soil microbial community structure of different vegetation types in the dry-hot valley of Jinsha River [J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2024,42(6):1328-1338.

[10] 储小院,朱仕荣,胡多才,等.云南金沙江干热河谷热作产业开发利用研究[J].林业建设,2024(4):64-71.
Chu Xiaoyuan, Zhu Shirong, Hu Duocai, et al. Study on development and utilization of tropical crop industry in dry-hot valley of Jinsha River in Yunnan [J]. Forestry Construction, 2024(4):64-71.

[11] 贾立志,张泽洪.不同逆坡耕作强度对干热河谷区坡耕地水蚀的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):14-19.
Jia Lizhi, Zhang Zehong. Effect of different upslope tillage intensity on water erosion on sloping farmland in the dry-hot valley of Jinsha River [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020,34(3):14-19.

[12] 张斌艳,何光熊,王艳丹,等.不同种植模式对干热河谷坡耕地水土流失的影响[J].水土保持通报,2025,45(1):49-57.
Zhang Binyan, He Guangxiong, Wang Yandan, et al. Effects of different planting patterns on soil and water loss of sloping cropland in dry-hot valley [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(1):49-57.

[13] 游翔,张闻多,张素,等.攀枝花干热河谷区坡面产流产沙研究[J].中国水土保持,2020,(06):28-30.
You Xiang, Zhang wendou, Zhang Su, et al. Characteristics of runoff and sediment yields on slopes of the panzhihua dry-hot valley region under different slopes and land use [J]. Soil and Water Conservation in China,

2020,(06):28-30.

[14] 刘琳,熊东红,张闻多,等.元谋干热河谷平沟建园土地治理工程效益及生态风险[J].农业工程学报,2020,36(4):251-258.
Liu Lin, Xiong Donghong, Zhang Wenduo, et al. Benefits and ecological risks of gully reclamation project in Yuanmou dry-hot valley region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4):251-258.

[15] 郭幸飞,廖洪剑,陈晓蓉,等.金沙江干热河谷区困难立地植物配置及群落建植技术[J].天津农业科学,2021,27(7):71-75.
Guo Xingfei, Liao Hongjian, Chen Xiaorong, et al. Plant configuration and community establishment techniques on difficult sites in the dry-hot valley of the Jinsha River [J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2021, 27(7):71-75.

[16] 鲁永新,田侯明,李宏波,等.元谋县干热气候评价及特征分析[J].中国农业资源与区划,2018,39(9):103-112.
Lu Yongxin, Tian Houming, Li Hongbo, et al. Evaluation of the dry-hot climate resource and analysis on it's characteristics in Yuanmou [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018,39(9):103-112.

[17] 杨淏舟,何光熊,王艳丹,等.干热河谷燥红土坡面水分时空分布特征及其对覆被类型的响应[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(05):90-98.
Yang Haozhou, He Guangxiong, Wang Yandan, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of moisture on dry red soil slope in dry-hot valley and its response to cover type[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2021,19(05):90-98.

[18] He Guangxiong, Shi Zhengtao, Fang Haidong, et al. Climate and soil stressed elevation patterns of plant species to determine the aboveground biomass distributions in a valley-type Savanna [J]. Frontiers in Plant Science, 2024,15:1324841.

[19] 刘刚才,李兰,周忠浩,等.紫色土容许侵蚀量的定位试验确定[J].水土保持通报,2008,28(6):90-94.
Liu Gangcai, Li Lan, Zhou Zhonghao, et al. Determination of soil loss tolerance for purplish soils [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008,28(6):90-94.

[20] 张宇恒,刘春,付智勇,等.坡面水文过程与土壤有机碳迁移研究进展[J].土壤通报,2023,54(3):730-738.
Zhang Yuheng, Liu Chun, Fu Zhiyong, et al. Research progress of hydrological process and soil organic carbon migration in slope field [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023,54(3):730-738.

[21] 徐露,张丹,向宇国,等.金沙江下游季节性干旱区紫色土坡耕地土壤水分变化特征[J].土壤通报,2021,52(3):585-593.
Xu Lu, Zhang Dan, Xiang Yuguo, et al. Moisture characteristics of purple soil in a seasonal arid area in the lower reaches of the Jinsha River [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021,52(3):585-593.

[22] 王祥,陈炜,黄国鲜,等.长江上游典型丘陵山区坡耕地径流及氮磷碳流失特征[J].环境工程技术学报,2024,14(05):1589-1598.
Wang Xiang, Chen Wei, Huang Guoxian, et al. Characteristics of runoff and nitrogen, phosphorus, and carbon loss in sloping cultivated lands in the typical hilly mountainous region of the upper Yangtze River basin [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024,14(05):1589-1598.

[23] 何光熊,易克贤,陈何龙,等.干热河谷雨养坡地剑麻和番麻的径流分配作用及水土保持效应[J].热带农业科学,2019,39(3):31-38.
He Guangxiong, Yi Kexian, Chen Helong, et al. Runoff distribution and soil and water conservation effects of *Agave sisalana* and *Agave americana* on slope land under natural rainfall in dry-hot valley [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2019,39(3):31-38.

[24] 赵宇寒,曹建生,朱春雨,等.壤中流形成机制及其生态水文效应研究进展[J].中国生态农业学报(中英文),2022,30(1):38-46.
Zhao Yuhan, Cao Jiansheng, Zhu Chunyu, et al. Research progress on the formation mechanism of subsurface flow and its ecohydrological effects [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022,30(1):38-46.

[25] 王照润,高建恩,周凡凡,等.坡度对降雨径流挟沙能力影响的模拟试验[J].水土保持学报,2023,37(1):97-102,113.
Wang Zhaorun, Gao Jianen, Zhou Fanfan, et al. Simulation experimental study on the impact of slope gradients on sediment carrying capacity of rainfall runoff [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023,37(1):97-102,113.

[26] 阚晓晴,程金花.基于工业CT扫描研究喀斯特地区土壤大孔隙结构特征[J].西南林业大学学报,2022,42(4):67-75.
Kan Xiaoqing, Cheng Jinhua. Study on characteristics of soil macropore structure in Karst area based on industrial CT scanning [J]. Journal of Southwest Forestry University(Natural Science), 2022,42(4):67-75.

[27] 翟婷,金鑫,郭攀,等.坡度及作物种类对红壤坡耕地水土流失的影响研究[J].节水灌溉,2024,(7):119-124.
Zhai Ting, Jin Xin, Guo Pan, et al. Study on the effects of slope and crop species on soil erosion in red soil slope farmland [J]. Water Saving Irrigation, 2024,(7):119-124.