

干热河谷不同植被修复模式减流减沙效应及其影响因素

季顺川¹, 顾天蕊¹, 冷鹏², 贺金喜¹, 何光熊^{3,4},

曾涛¹, 蔡雨锡¹, 李顺宇¹, 王冠雄¹, 徐翔¹

(1. 云南师范大学地理学部, 云南省高原地理过程与环境变化重点实验室, 昆明 650500; 2. 云南省水土保持生态环境监测总站, 昆明 650224; 3. 云南省农业科学院热区生态农业研究所, 云南元谋 651300; 4. 云南省水土流失防治与绿色发展重点实验室, 云南元谋 651300)

摘要: [目的] 探究干热河谷区不同植被修复模式的减流减沙效应并分析其影响机理, 为干热河谷水土保持功能型植被修复提供科学依据。[方法] 以云南省元谋干热河谷为研究区, 于2019—2022年开展原位监测试验, 以裸地为对照, 设置耕作地、灌草地、乔灌草地、自然恢复地1、自然恢复地2等植被修复模式, 比较不同植被修复模式的减流减沙效益, 探究不同植被修复模式下降雨、土壤、植被因子对土壤流失量及径流量的影响机理。[结果] 以裸地为对照, 耕作地、灌草地、乔灌草地、自然恢复地1、自然恢复地2径流量分别减少64.25%、89.08%、91.81%、87.20%、84.79%, 土壤流失量分别降低92.16%、99.45%、99.92%、99.37%、97.26%, 减流减沙效果为乔灌草地>灌草地>自然恢复地1>自然恢复地2>耕作地>裸地。降雨侵蚀力为径流量的主要驱动因素, 总效应21.90%~70.73%, 而土壤流失量的主要驱动因素为径流量, 总效应26.94%~97.81%。在裸地及人为干扰强烈的耕作地中, 水沙过程主要由降雨因子(降雨侵蚀力)主导; 而在灌草、乔灌草等修复模式下, 系统则转向以“地表水文过程”为主导, 植被与土壤因子通过削减径流规模, 从根本上减少径流量和土壤流失的发生。[结论] 木棉+羊蹄甲+扭黄茅+孔颖草组合的乔灌草模式减流减沙效果最佳, 该模式通过土壤与植被因子共同调控抑制径流量和土壤流失量的产生, 达到较好的水土保持效益。

关键词: 植被修复模式; 降雨; 土壤水分; 土壤流失量; 径流量

中图分类号: S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)04-0023-12

Effects and Influencing Factors of Runoff and Sediment Reduction under Different Vegetation Restoration Models in Dry-Hot Valleys

Ji Shunchuan¹, Gu Tianrui¹, Leng Peng², He Jinxi¹, He Guangxiong^{3,4},

Zeng Tao¹, Cai Yuxi¹, Li Shunyu¹, Wang Guanxiong¹, Xu Xiang¹

(1. Yunnan Key Laboratory of Plateau Geographical Processes and Environmental Changes, Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. Yunnan General Station for Soil and Water Conservation and Ecological Environment Monitoring, Kunming 650224, China; 3. Tropical Eco-Agriculture Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Yuanmou, Yunnan 651300, China; 4. Yunnan Key Laboratory of Soil Erosion Prevention and Green Development, Yuanmou, Yunnan 651300, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of different vegetation restoration models on runoff and sediment reduction in dry-hot valleys and to analyze their underlying mechanisms, thereby providing a scientific basis for functional vegetation restoration for soil and water conservation in these areas. [Methods] Taking the Yuanmou dry-hot valley in Yunnan Province as the study area, an in-situ monitoring experiment was conducted

收稿日期: 2025-11-02

修回日期: 2026-02-19

录用日期: 2026-03-18

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-04-14

资助项目: 云南省基础研究专项面上项目(202301AT070063); 云南省农业科学院科研预研项目(2024KYZX-16, 2024KYZX-15); 建设元谋县乡村振兴科技创新县项目(202304BT090025-04)

第一作者: 季顺川(1987—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事增强岩石风化的固碳效应研究。E-mail: shunchuanji@sina.com

通信作者: 何光熊(1987—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事干热河谷退化生态系统恢复与重建研究。E-mail: 360183327@qq.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

from 2019 to 2022. Bare land was used as the control, and vegetation restoration models including cultivated land, shrub-grassland, tree-shrub-grassland, naturally restored land 1 and naturally restored land 2 were established. The runoff and sediment reduction benefits under different vegetation restoration models were compared, and the influence mechanisms of rainfall, soil, and vegetation factors on soil loss and runoff under different models were explored. [Results] Compared with bare land, runoff decreased by 64.25%, 89.08%, 91.81%, 87.20% and 84.79%, and soil loss decreased by 92.16%, 99.45%, 99.92%, 99.37% and 97.26% in cultivated land, shrub-grassland, tree-shrub-grassland, naturally restored land 1, and naturally restored land 2, respectively. The effectiveness of runoff and sediment reduction followed the order: tree-shrub-grassland > shrub-grassland > naturally restored land 1 > naturally restored land 2 > cultivated land > bare land. Rainfall erosivity was the major driving factor of runoff, with a total effect ranging from 21.90% to 70.73%, while runoff was the primary driving factor of soil loss, with a total effect ranging from 26.94% to 97.81%. In bare land and intensively disturbed cultivated land, the water and sediment processes were mainly dominated by rainfall factors (rainfall erosivity). In contrast, under restoration models such as shrub-grassland and tree-shrub-grassland, the system shifted to being dominated by "surface hydrological processes", where vegetation and soil factors fundamentally reduced the occurrence of runoff and soil loss by curbing runoff volume. [Conclusion] The tree-shrub-grass model combining *Bombax ceiba*, *Bauhinia purpurea*, *Heteropogon contortus*, and *Bothriochloa pertusa* was the most effective in reducing runoff and sediment. This model achieves significant soil and water conservation benefits by jointly regulating soil and vegetation factors to suppress the generation of runoff and soil loss.

Keywords: vegetation restoration model; rainfall; soil water content; soil loss; runoff

Received: 2025-11-02

Revised: 2026-02-19

Accepted: 2026-03-18

Online(www.cnki.net): 2026-04-14

金沙江干热河谷位于长江上游,流经横断山区,高山峡谷地貌发育显著,地形落差大,是长江上游重要的生态屏障,兼负水源涵养、水土保持、碳固定等生态功能^[1]。元谋干热河谷面积 1 130 km²,是金沙江干热河谷的典型代表,区域气候炎热干燥,水热失衡问题突出,生态环境质量退化明显,其中,水土流失是干热河谷生态环境退化的主要形式之一。据测算^[2],元谋干热河谷水土流失面积达 1 080.8 km²,占该区面积的 53.5%,其中中度以上侵蚀面积达 512.34 km²,占总侵蚀土地面积的 47.4%,水土保持形势严峻。

实施植被修复是防治水土流失、改善区域生态的重要举措。植被修复能有效提升植被多样性,增加林冠截留量和枯落物蓄积量,从而减少地表径流,增强蓄水保土功能^[3]。植被修复抑制径流与土壤流失的机制主要体现在:1)茎叶对降雨的拦截;2)枯落物层对雨滴击溅的缓冲;3)根系对水分入渗的促进作用^[4]。干热河谷作为典型的生态脆弱区,具有显著的恢复潜力,科学的生态修复措施能实现生态效益和经济效益的协同提升^[2]。

当前,针对不同植被修复模式的生态环境效应,国内外学者^[5-11]开展大量研究,主要包括不同植被修复模式对微生物^[12]、群落结构与持水效应^[13]、地表径

流^[14]、土壤养分^[15]和土壤理化性质的影响^[16]等。然而,聚焦于干热河谷地区的研究仍存在不足:1)多数研究局限于少数几种典型模式的对比,缺乏在同一基准下系统涵盖自然恢复序列与传统农业用地等多种类型的长期平行观测试验^[14,17],导致难以对不同模式的综合效益进行科学排序与优化筛选;2)研究多侧重于减流减沙效益的静态对比,对降雨驱动-植被调控-土壤响应动态过程的定量机理解析不足^[11,17]。

基于此,本文在元谋干热河谷地区开展不同植被修复模式径流小区监测试验,以裸地为对照,平行设置耕作地、灌草地、乔灌草地及 2 种自然恢复地,共 5 种植被修复模式,开展长期定位监测,旨在解决 2 个核心问题:1)定量比较不同植被修复模式对径流量和土壤流失量的影响,明确其减流减沙效益及水土保持功能的优劣次序,为模式优选提供直接依据;2)深入探究降雨、植被及土壤因子对水沙过程的影响,利用多元回归模型识别关键驱动因素,定量解析各因子的贡献率,阐明不同模式下植被-土壤系统调控水土流失的关键机制。本研究期望从过程与机理层面深化对干热河谷土壤侵蚀规律的认识,为该地区以水土保持为核心的植被修复模式精准选择与优化配置提供科学依据,并为相关区域的生态治理与生态文明建设提供实践参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

元谋干热河谷地处云南省中北部,金沙江干热河谷下游地段(25°38'42"N,101°53'26"E)(图1),属于典型的南亚热带季风河谷干热气候区。该区域气候炎热干燥,年平均气温21.6℃,最热月平均气温27.1℃,年日照时间2 670.4 h,年平均太阳总辐射量203 W/m²,全年基本无霜,年平均降水量637.5 mm,年平均潜在蒸发量3 847.8 mm。从地貌上看,元谋干热河谷地形深切,呈南北向狭长盆地,属深切河谷低山丘陵地貌^[18];土壤类型多样,以燥红土和变性土为主^[19],土层浅薄、结构差、保水性差、有效养分缺乏,土壤侵蚀严重;自然植被以稀树灌草丛为主,主要种类包括黄茅(*Heteropogon contortus*)、旱茅(*Schizachyrium delavayi*)、铁橡栎(*Quercus cocciferoides*)和余甘子(*Phyllanthus emblica*)等。



图1 元谋干热河谷研究区

Fig.1 Yuanmou dry-hot valley study area

1.2 径流小区设置

本研究基于“时间替代空间”的思路,通过对同一径流小区内多次侵蚀性降雨事件(即“场降雨”)进行连续观测,以时间序列上的重复数据替代空间上的小区重复数据,从而有效评估植被修复模式的长期水土保持效应。

本试验于云南省元谋县金雷水土保持科技示范园那能小流域坡面径流场的同一小流域、同一坡面原位布设6个相邻的径流小区,以确保气候、地形、土壤类型及其初期理化性质基本一致。径流小区面积均为20 m×5 m,周围用15~30 cm高的水泥墙围住,防止径流小区内的水漏失,并在底部设置收集径流的装置。径流小区坡度均设置为10°,因为10°是土壤侵蚀模数分布特征存在显著差异的临界坡度,在<10°范围明显呈聚集性分布特征,在>10°范围呈正相关^[20]。

本研究共设置6种径流小区,分别设置不同植被

修复模式,具体包括裸地、耕地、灌草地、乔灌草地、自然恢复地1、自然恢复地2,参考何光熊等^[21]和邵方丽^[22]的研究,选取扭黄茅(*Heteropogon contortus*)、孔颖草(*Bothriochloa pertusa*)、拟金茅(*Eulaliopsis binata*)、车桑子(*Dodonaea viscosa*)、木棉(*Bombax ceiba*)、银合欢(*Leucaena leucocephala*)和羊蹄甲(*Bauhinia purpurea*)等适宜元谋干热河谷生态修复的典型物种进行径流小区植被配置,依次对6种模式进行处理。1)裸地:彻底清除植被与枯落物,定期维护使盖度持续低于5%,无植被结构;2)耕地:清除原生植被后,进行马铃薯-玉米轮作,规则条播,具季节性冠层,根系浅且集中,收获期地表近裸露;3)灌草地:车桑子+扭黄茅+拟金茅+孔颖草组合,定期清除乔木幼苗,形成灌草复合层片,冠层低矮中度郁闭,草本层密集,根系以浅-中层为主;4)乔灌草地:木棉+羊蹄甲+扭黄茅+孔颖草组合,乔灌草复层结构,乔木冠层稀疏高大,草本层连续覆盖,根系为深根与浅根系统结合;5)自然恢复地1:银合欢+扭黄茅+孔颖草组合,初期清除植被后,连续3年补播当地优势种(含自然扩散进入的银合欢),形成银合欢与草本的斑块状群落,冠层中等高度且较密集;6)自然恢复地2:扭黄茅+拟金茅+孔颖草组合,初期清除植被后,连续3 a补播扭黄茅、拟金茅与孔颖草,不引入乔木,形成单一且连续致密的草本层,根系密集于表层。

1.3 数据获取

1.3.1 水沙数据计算 基于2019—2022年径流小区连续监测的数据进行计算。径流小区底部设置有集流桶,且设有水标尺,每次降雨事件所产生的径流及泥沙在重力作用下汇集到集流桶中,降雨事件产生后次日8:00采用人工取样法进行样品采集,并直接测量集流桶内水体的深度,结合集流桶底面积计算径流量:

$$R_r = h \times S \quad (1)$$

式中: R_r 为径流量,m³; h 为集流桶内水体深度,m; S 为集流桶底面积,m²。

通过计算获得的径流量,结合径流小区面积可求得径流深,进而计算径流系数:

$$R_d = \frac{R_r \times 1000}{A} \quad (2)$$

式中: R_d 为径流深,mm; R_r 为径流量,m³; A 为流域面积,m²。

$$\alpha = \frac{R_r \times 1000}{P_c \times A} \quad (3)$$

式中: α 为径流系数; R_r 为径流量,m³; P_c 为降水量,mm; A 为流域面积,m²。

泥沙含量采用搅拌舀水取样法进行取样,将采集的样品全部放入 1 个已知重量的蒸发皿中,先静置沉淀并小心倒去上清液,然后放入烘箱烘干至恒重,称重。泥沙含量计算公式为:

$$W = \text{烘干后总重} - (\text{滤纸重} + \text{桶重}), C = W/V$$

式中: W 为样品泥沙干重, g ; C 为泥沙含量, g/L ; V 为样品体积, L 。

土壤流失量计算公式为:

$$S_{er} = \frac{G \times 10}{S} \quad (4)$$

式中: S_{er} 为土壤流失量, t/hm^2 ; G 为泥沙总量, kg ; S 为监测小区面积, m^2 。

1.3.2 降雨、土壤、植被因子测定 降雨数据包括降雨量、降雨历时、平均雨强、 I_{30} 、降雨侵蚀力等,降雨量、降雨历时由园内全自动气象站进行采集,平均雨强、 I_{30} 、降雨侵蚀力^[23]计算公式为:

$$P_i = \frac{P_c \times 60}{P_d} \quad (5)$$

式中: P_i 为平均雨强, mm/h ; P_c 为降雨量, mm ; P_d 为降雨历时, min 。

$$I_{30} = \frac{P_{30}}{0.5} \quad (6)$$

式中: I_{30} 为最大 30 min 雨强, mm/h ; P_{30} 为任意连续 30 min 内的最大降雨量, mm 。

$$R = 1.811 \times (E \times I_{60}) \quad (7)$$

$$E = \sum_{r=1}^l (e_r \times \Delta V_r) \quad (8)$$

$$e_r = 0.29 [1 - 0.72 \exp(-0.082 i_r)] \quad (9)$$

式中: R 为单次降雨事件的降雨侵蚀力, $MJ/(mm \cdot hm^2 \cdot h)$; E 为 1 次降雨事件的总动能, MJ/hm^2 ; I_{60} 为该次降雨过程中最大 60 min 降雨强度, mm/h ; e_r 为第 r 个时段的单位降雨动能, $MJ/(hm^2 \cdot mm)$; ΔV_r 为第 r 个时段的降雨量, mm ; l 为该次降雨事件的持续时段数, h ; i_r 为第 r 个时段的降雨强度, mm/h 。

根据中国气象局降水强度等级划分标准(内陆版),可将降雨划分为小雨、中雨、大雨、暴雨 4 个等级,其对应小时降雨量分别为 $P_c < 10/10 \leq P_c < 25/25 \leq P_c < 49.9/P_c \geq 50$ ^[14]。并非所有降雨事件均引发土壤侵蚀,只有当降雨强度或量级达到特定条件时,才可能产生侵蚀量,该条件对应的降雨阈值即为侵蚀性降雨标准,不同植被修复模式下其侵蚀性降雨标准不同。本研究通过每次降雨事件后是否产生土壤流失量来判断其是否为侵蚀性降雨,产生土壤侵蚀量的降雨事件即为侵蚀性降雨,最终将所有的侵蚀性降雨进行汇总分析。

10 cm 土壤含水量利用 TDR2 水分测量仪进行测量,在每个径流小区内,按“S”形布点,测量 0~10 cm 层土壤的体积含水量,每隔 15 d 测量 1 次,以获得土壤水分动态变化数据。

植被盖度利用无人机搭载高清相机进行拍摄,获取覆盖整个小区的高分辨率影像,通过 Adobe Photoshop 软件,基于色彩索引对影像进行分类,区分植被与非植被像元,采用投影面积法自动计算植被冠层的垂直投影面积占小区总面积的比例,即植被盖度。植被平均高度则通过无人机进行倾斜摄影生成三维模型,结合实地抽样测量,获取小区内植被的平均高度值,测量时间间隔为 15 d。

1.4 数据处理与分析

1.4.1 减流减沙效益计算 径流量和土壤流失量减少率的计算以对照地为基准。计算公式为:

$$R_{re} = \frac{R_{re} - R_{rt}}{R_{re}} \times 100\% \quad (10)$$

$$E_{re} = \frac{E_{re} - E_{rt}}{E_{re}} \times 100\% \quad (11)$$

式中: R_{re} 、 E_{re} 分别为径流和侵蚀减少效率, $\%$; R_{re} 、 E_{re} 分别为对照地块的径流和侵蚀率, m^3/hm^2 、 t/hm^2 ; R_{rt} 、 E_{rt} 分别为有植物措施地块的径流和侵蚀率, m^3/hm^2 、 t/hm^2 。

1.4.2 回归分析和通径分析 一般的回归模型为:

$$Y = a + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_i X_i + \epsilon \quad (12)$$

式中: Y 为因变量; X_1 、 X_2 、 $\dots$ 、 X_i 为潜在解释变量; a 、 b_1 、 b_2 、 $\dots$ 、 b_i 为参数项; ϵ 为误差项。

回归方程^[24]为:

$$R_t = b + b_{P_d} P_d + b_{P_c} P_c + b_{P_i} P_i + b_{I_{30}} I_{30} + b_R R + b_{A_{sm}} A_{sm} + b_{C_c} C_c + b_{H_v} H_v + \epsilon \quad (13)$$

$$S_{er} = b + b_{P_d} P_d + b_{P_c} P_c + b_{P_i} P_i + b_{I_{30}} I_{30} + b_R R + b_{A_{sm}} A_{sm} + b_{C_c} C_c + b_{H_v} H_v + b_{R_t} R_t + \epsilon \quad (14)$$

式中: P_d 为降雨历时, h ; P_c 为降雨量, mm ; P_i 为平均雨强, mm/h ; I_{30} 为最大 30 min 雨强, mm/h ; R 为降雨侵蚀力, $MJ/(mm \cdot hm^2 \cdot h)$; A_{sm} 为 10 cm 土壤含水量, $\%$; C_c 为植被盖度, $\%$; H_v 为植被平均高度, m ; R_t 为径流量, m^3 ; S_{er} 为土壤流失量, t/hm^2 ; b 、 b_{P_d} 、 b_{P_c} 、 b_{P_i} 、 $b_{I_{30}}$ 、 b_R 、 $b_{A_{sm}}$ 、 b_{C_c} 、 b_{H_v} 、 b_{R_t} 为参数项; ϵ 为误差项。

直接路径系数为相关路径系数,间接路径系数为从中间变量到结果变量的相关系数与路径系数的乘积。

$$r_{30r} = p_{30r} \quad (15)$$

$$r_{dr} = p_{dr} + r_{d30} p_{30r} + p_{dc} p_{cr} \quad (16)$$

$$r_{cr} = p_{cr} \quad (17)$$

$$r_{smr} = p_{smr} + r_{smc} p_{cr} + p_{smd} p_{dr} \quad (18)$$

$$r_{Sr} = p_{Sr} \quad (19)$$

直接效应为直接路径系数的平方,即为 d ;间接

效应是中间变量对结果变量的相关系数与路径系数乘积的2倍。总效应是直接效应和间接效应的总和。

$$d_{30r} = p_{30r}^2 \quad (20)$$

$$d_{dr} = p_{dr}^2 + 2p_{dr}r_{d30}p_{30r} + 2p_{dr}r_{dc}p_{cr} \quad (21)$$

$$d_{cr} = p_{cr}^2 \quad (22)$$

$$d_{smr} = p_{smr}^2 + 2p_{smr}r_{smr}p_{cr} + 2p_{smr}r_{smd}p_{dr} \quad (23)$$

$$d_{sr} = p_{sr}^2 \quad (24)$$

式中: p_{30r} 、 p_{dr} 、 p_{cr} 、 p_{smr} 、 p_{sr} 为回归系数,即路径系数,通过标准回归方程即可获得; r_{30r} 、 r_{dr} 、 r_{cr} 、 r_{smr} 、 r_{sr} 为相关系数。

采用 Excel 2018 软件进行数据整理,运用 Rstudio 软件进行显著性、相关性以及多元回归分析,利用 Origin 2024 软件绘制相关图形。

2 结果与分析

2.1 试验小区径流量和土壤流失量变化特征

不同植被修复模式下径流量和土壤流失量的对比发现,监测期内裸地的径流量和土壤流失量最高(年平均值分别为 13.57 m^3 、 28.79 t/hm^2),耕地地次之(年平均值分别为 4.85 m^3 、 2.26 t/hm^2),灌草地、乔灌草地和自然恢复地的径流量和土壤流失量均显著低于裸地和耕地(图2)。以裸地为对照,耕地、灌草地、乔灌草地、自然恢复地1、自然恢复地2的年均径流量分别降低 64.25%、89.08%、91.81%、87.20% 和 84.79%。土壤流失量的年平均值显示,耕地、灌草地、乔灌草地、自然恢复地1、自然恢复地2土壤流失量分别降低 92.16%、99.45%、99.92%、99.37%、97.26%。因此,不同植被修复模式的减流减沙效果排序为乔灌草地>灌草地>自然恢复地1>自然恢复地2>耕地>裸地。

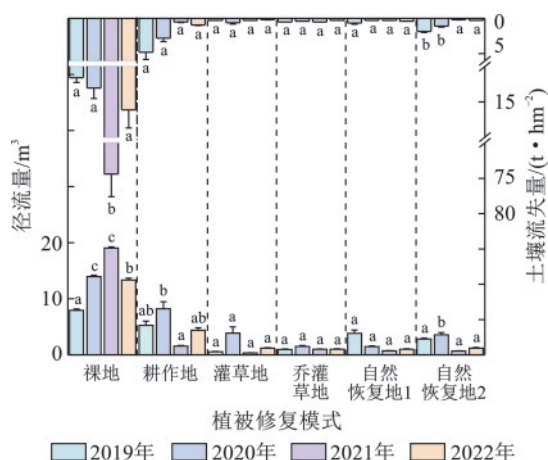


图2 不同植被修复模式径流量和土壤流失量变化特性

Fig.2 Variation characteristics of runoff and soil loss under different vegetation restoration models

根据元谋干热河谷 2019—2022 年侵蚀性降雨记录,2019—2022 年侵蚀性降雨共 51 场,其中以中雨为

主(24 场),其次为大雨(18 场)。中雨类型下,径流量和土壤流失量分别达到 8.63 m^3 和 13.38 t/hm^2 ,分别占总年平均量的 35% 和 42%;大雨类型下,径流量和土壤流失量则分别达到 9.38 m^3 和 13.38 t/hm^2 ,分别占总年平均量的 38% 和 42%;暴雨条件下,虽降雨次数少(3 场),但产生的径流量和土壤流失量占比分别为 23% 和 13%。不同降雨类型下,裸地径流量和土壤流失量在中雨条件下达到峰值,分别达到 6.34 m^3 和 12.87 t/hm^2 ,其余植被修复模式径流量和土壤流失量大幅降低,耕地由于人类活动的影响,径流量和土壤流失量较大,分别为 0.88 m^3 和 0.24 t/hm^2 (图3)。

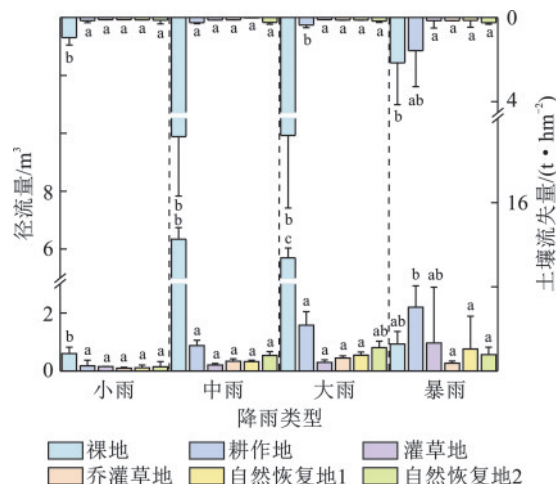


图3 不同降雨类型下不同植被修复模式径流量和土壤流失量变化特性

Fig.3 Variation characteristics of runoff and soil loss under different vegetation restoration models for different rainfall types

2.2 试验小区降雨、土壤及植被因子变化特征

监测期内,元谋干热河谷区降雨呈明显的干湿季变化特征,降雨主要集中在夏季,占比可达 70%~87%,冬季降雨量很少,几乎接近于 0 mm。降雨日数也主要集中在夏季,夏季降雨日数明显增多,月降雨日数可达到 16 d,与降雨量呈一致的变化趋势。降雨集中期也存在变化,2019—2020 年降雨主要集中在 6—8 月,2021—2022 年雨季则主要集中在 6—9 月,雨季呈延长趋势(图4)。

所有降雨因子在 2019—2022 年均表现为显著的、无一致的变化趋势(图5)。土壤流失量和径流量与降雨历时(图5a)、平均雨强(图5c)无显著相关,与降雨量(图5b)、 I_{30} (图5d)、降雨侵蚀力(图5e)表现出非线性正相关,随着降雨量、 I_{30} 、降雨侵蚀力的增大,土壤流失量和径流量也随之增大;反之,则逐渐减小。2021 年,侵蚀性降雨量、 I_{30} 均达到最大值,侵蚀性降雨达到 337.2 mm , I_{30} 达到 250.7 mm/h ,径流量和土壤流失量也达到最大值,分别为 19.03 m^3 和 74.38 t/hm^2 。

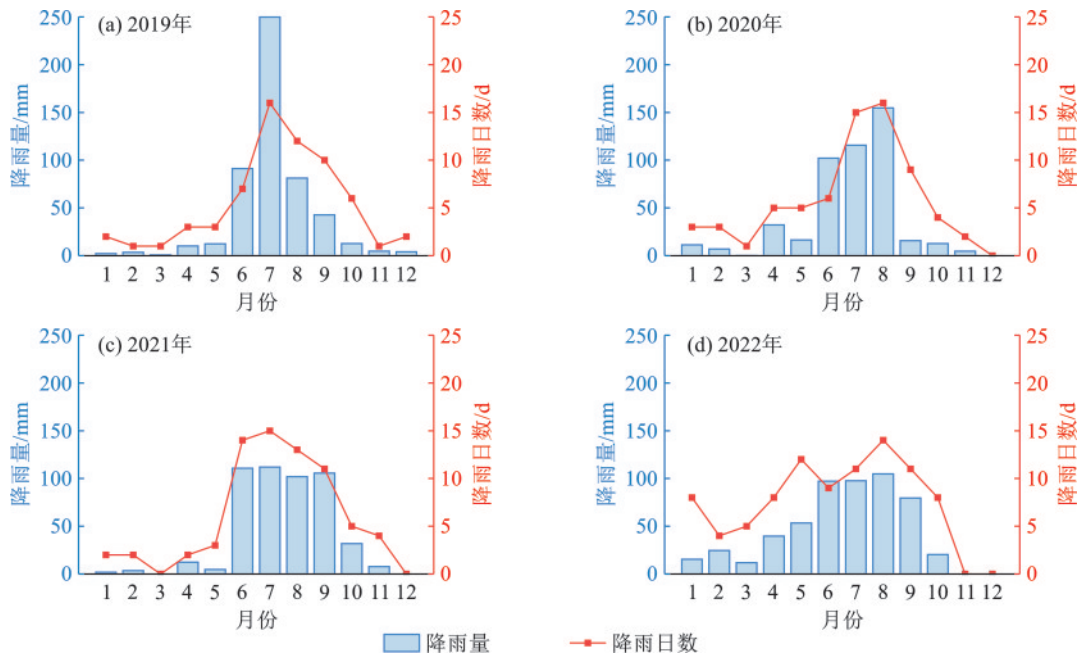


Fig.4 Variation characteristics of rainfall amount and rainfall days in Yuanmou dry-hot valley (2019–2022)

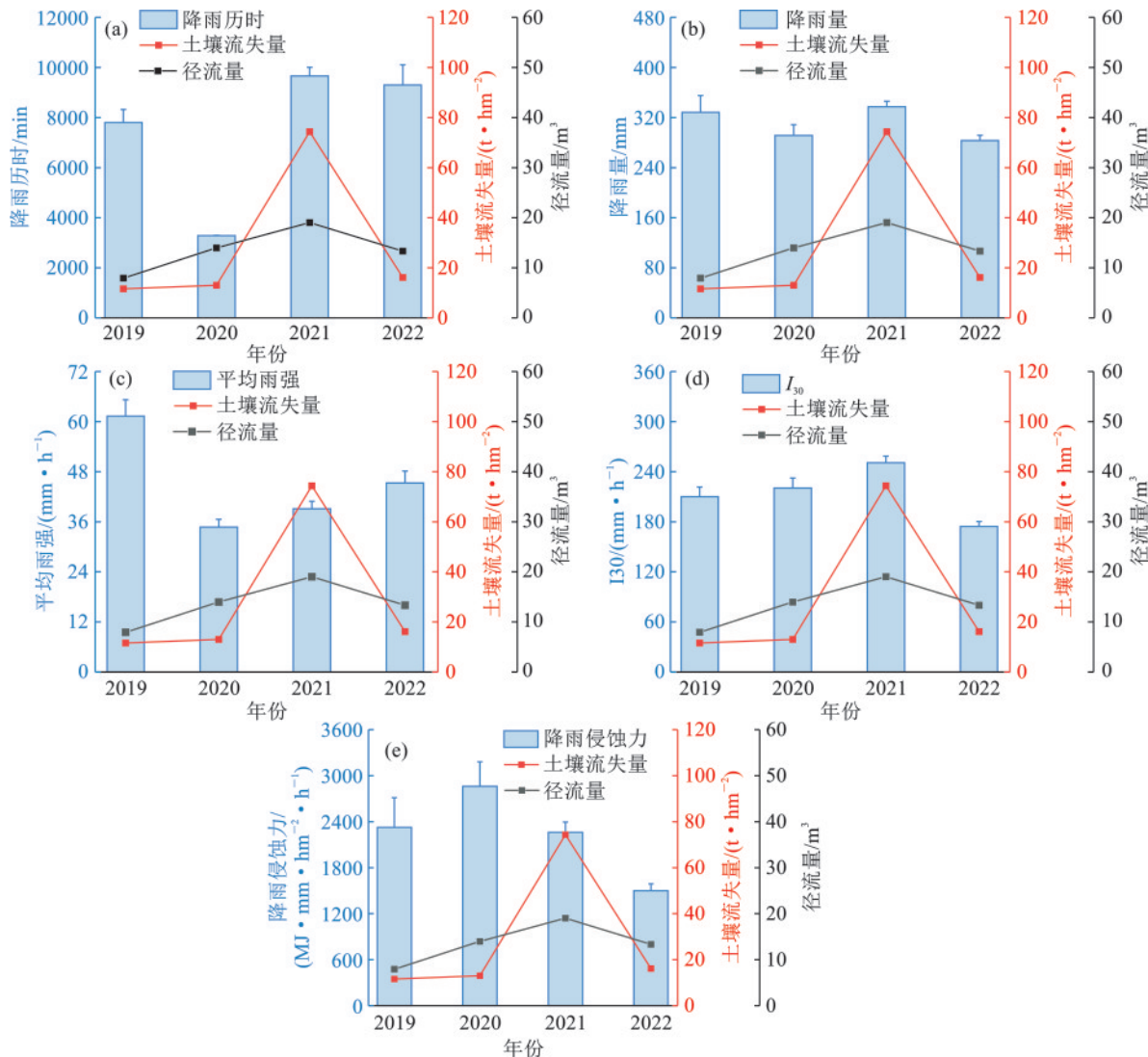


Fig.5 Variation characteristics of rainfall factors in Yuanmou dry-hot valley (2019–2022)

土壤因子方面,从裸地到自然恢复地,土壤含水量呈缓慢增加趋势,2021年和2022年较为显著,2019年和2022年略有降低(图6)。裸地的10 cm土壤含水量相对较低,年际平均值达到18.62%;耕地、灌草地和乔灌草地变化不大,2019—2022年都维持在15%~20%,年际平均值分别为21.42%、20.18%、22.86%;自然恢复地1在15%~25%波动,年际平均值为20.70%;而自然恢复地2变化最为显著,从15%到30%不等,年际平均值为22.88%。

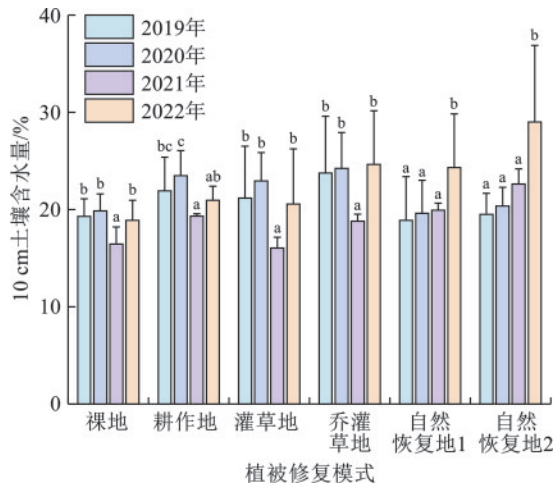


图6 不同植被修复模式10 cm土壤含水量变化特性
Fig.6 Variation characteristics of soil water content at 10 cm depth under different vegetation restoration models

植被因子方面,裸地植被盖度始终控制在5%以下,植被平均高度年际平均值可达到0.22 m(图7);耕地受人为影响较大,植被盖度和植被平均高度相对较低,但植被盖度可达到20.60%,植被平均高度

可达到0.28 m;灌草地的整体效果最好,植被盖度和植被平均高度可分别达到40.73%和0.66 m;乔灌草地、自然恢复地的植被盖度分别为25%~35%,植被平均高度为0.5~0.6 m。

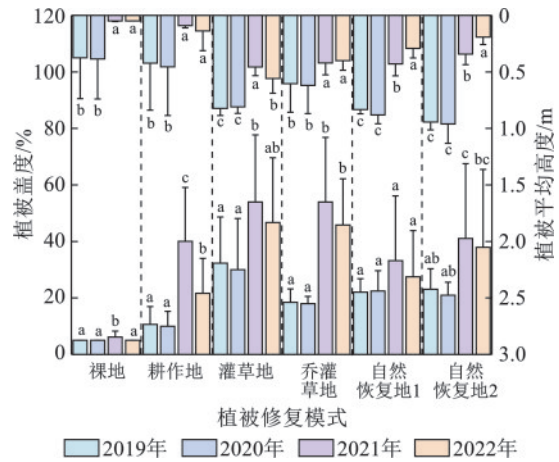


图7 不同植被修复模式植被因子变化特性
Fig.7 Variation characteristics of vegetation factors under different vegetation restoration models

2.3 不同植被修复模式减流减沙效应

对不同植被修复模式下径流量和土壤流失量的影响因素进行相关性及显著性分析(表1)发现,整体上,降雨因子(降雨量、 I_{30} 、降雨侵蚀力等)是影响径流与土壤流失的主要正向因子,而土壤含水量与植被高度则在某些模式下(裸地、耕地、自然恢复地)呈显著的负向调节作用。土壤流失量除受降雨、土壤、植被因子影响外,受径流量的影响最大,所有植被修复模式下,径流量均与土壤流失量呈极显著正相关, r 可达0.846($p<0.01$)。

表1 不同植被修复模式水沙指标影响因素相关性
Table 1 Correlation analysis of influencing factors on runoff and sediment indicators under different vegetation restoration models

植被修复模式	水沙指标	降雨量	平均雨强	最大30 min雨强	降雨侵蚀力	10 cm土壤含水量	植被盖度	植被平均高度	径流量
裸地	径流量	0.571**	0.063	0.509**	0.607**	-0.327*	0.232	-0.286*	1.000
	土壤流失量	0.280*	0.019	0.429**	0.383**	-0.556**	0.289*	-0.260	0.534**
耕地	径流量	0.600**	0.338*	0.443**	0.526**	-0.118	-0.179	-0.347*	1.000
	土壤流失量	0.386**	0.382**	0.502**	0.476**	-0.036	-0.189	-0.231	0.846**
灌草地	径流量	0.512**	0.204	0.386**	0.472**	0.189	0.149	-0.101	1.000
	土壤流失量	0.319*	0.153	0.369*	0.376*	0.045	0.266	0.011	0.432**
乔灌草地	径流量	0.645**	0.222	0.585**	0.671**	-0.072	0.141	0.030	1.000
	土壤流失量	0.381**	0.153	0.428**	0.427**	-0.137	0.011	0.053	0.460**
自然恢复地1	径流量	0.496**	0.208	0.512**	0.529**	-0.368**	-0.139	0.382**	1.000
	土壤流失量	0.155	0.145	0.116	0.105	-0.481**	0.008	0.205	0.575**
自然恢复地2	径流量	0.566**	0.263	0.400**	0.484**	0.098	0.242	0.364**	1.000
	土壤流失量	0.097	0.065	0.248	0.173	-0.440**	-0.209	0.758**	0.572**

注:*,**分别表示 $p<0.05$ 、 $p<0.01$ 。

本研究以时间尺度代替空间尺度,进行长期监测,旨在分析不同植被修复模式的减流减沙效应,以植被修复模式和时间(年份)作为固定变量,进行双因素方差分析(表2)。相较于时间,植被修复模式是影响水土流失最主要的因素,其对径流量和土壤流失量的效应量分别高达0.449、0.426;年份的主

效应虽显著($p<0.001$),但效应量相对较小,径流量和土壤流失量的效应量分别为0.076、0.083;修复模式年份间的交互作用极显著且效应量较高(径流量和土壤流失量分别为0.145、0.380),表明不同修复模式的水土保持效果随年份不同呈显著的动态变化。

表2 植被修复模式与年份对径流量的双因素方差分析
Table 2 Results of two-way ANOVA on the effects of vegetation restoration model and year on runoff

源	径流量						土壤流失量					
	Ⅲ 类平方和	自由度	均方	<i>F</i>	显著性	偏 η^2	Ⅲ 类平方和	自由度	均方	<i>F</i>	显著性	偏 η^2
修正模型	47.893	23	2.082	12.754	<0.001	0.510	389.463	23	16.933	18.204	<0.001	0.607
截距	34.697	1	34.697	212.519	<0.001	0.430	47.599	1	47.599	51.171	<0.001	0.159
修复类型	37.582	5	7.516	46.038	<0.001	0.449	187.143	5	37.429	40.237	<0.001	0.426
年份	3.761	3	1.254	7.678	<0.001	0.076	22.854	3	7.618	8.190	<0.001	0.083
修复类型年份	7.839	15	0.523	3.201	<0.001	0.145	154.649	15	10.310	11.084	<0.001	0.380
误差	46.041	282	0.163				252.084	271	0.930			
总计	126.118	306					697.774	295				
修正后总计	93.935	305					641.548	294				
R^2	0.510(调整后0.470)						0.607(调整后0.574)					

注:偏 η^2 =主体间效应量。

对不同植被修复模式进行逐步多元回归分析(表3),剔除不显著的潜在解释变量($p>0.05$)及存在显著共线性的驱动因素($VIF>5$),确定径流量和土壤流失量的最优回归模型,结果显示,可通过引入 I_{30} 、

降雨侵蚀力、土壤含水量、植被平均高度等作为解释变量构建径流量模型。土壤流失量模型则包括 I_{30} 、降雨侵蚀力、土壤含水量、植被平均高度、径流量等共5个变量。

表3 不同修复模式水土保持因子标准化多元回归方程
Table 3 Standardized multiple regression equations for soil and water conservation factors under different restoration models

修复模式	标准化多元回归方程	<i>r</i>	r^2	<i>F</i>	Sig.
裸地	$R_t=2.007+0.387I_{30}-0.331A_{sm}$	0.521	0.271	8.923	<0.001
	$S_{er}=15.412+0.265I_{30}-0.595A_{sm}$	0.663	0.439	18.798	<0.001
耕地	$R_t=-0.031+0.841R$	0.841	0.707	118.006	<0.001
	$S_{er}=-0.178+0.893R$	0.893	0.797	192.793	<0.001
灌草地	$R_t=-0.036+0.468R$	0.468	0.219	13.739	<0.001
	$S_{er}=-0.009+0.989R_t$	0.989	0.979	1 866.758	<0.001
乔灌草地	$R_t=0.040+0.674R$	0.674	0.540	40.705	<0.001
	$S_{er}=9.987E-5+0.519R_t$	0.519	0.269	17.706	<0.001
自然恢复地1	$R_t=-0.042+0.819R$	0.819	0.670	99.485	<0.001
	$S_{er}=-0.017+0.958R_t$	0.958	0.917	532.334	<0.001
自然恢复地2	$R_t=-0.065+0.534R+0.369H_v$	0.708	0.481	24.168	<0.001
	$S_{er}=-0.037+0.246H_v+0.668R_t$	0.814	0.662	46.103	<0.001

注: I_{30} 、 R 、 A_{sm} 、 H_v 、 R_t 、 S_{er} 、 r 、 r^2 、 F 、Sig. 分别为最大30 min雨强、降雨侵蚀力、10 cm土壤含水量、植被平均高度、径流量、土壤流失量、相关系数、调整后的决定系数、 F 检验值和显著性。下同。

径流量模型中(表4),裸地最大30 min雨强表现为正向驱动,总效应为21.74%;平均雨强呈负向效应,总效应为3.06%。耕地、灌草地、乔灌草地和自然恢复地1的径流量主要受降雨侵蚀力的直接驱动,贡献率分

别为70.73%、21.90%、45.43%和67.08%。自然恢复地2的径流量同时受降雨侵蚀力(直接贡献28.52%)和植被平均高度(直接贡献13.62%)的正向驱动。整体上,除裸地外,降雨侵蚀力是径流量最主要的主导因

素,在植被修复较好的模式中(自然恢复地 2),植被高度也有一定的正向驱动作用。

土壤流失量模型中(表 5),在裸地中,土壤含水量表现为强负向驱动,总效应达 30.00%;最大 30 min 雨强的总效应为 19.16%。耕作地的土壤流失主要由降雨侵蚀力主导,其直接贡献率高达 79.74%。在灌草地、乔灌草地和自然恢复地 1 中,径流量是土壤流

失的单一主控因子,其总效应分别达到 97.81%、26.94% 和 91.78%。自然恢复地 2 由径流量、降雨侵蚀力与植被平均高度共同作用:径流量的总效应为 62.53%,植被平均高度的总效应为 54.68%。综合分析,径流量是土壤流失最主要的驱动因子(最高贡献率可达 97.81%),其次为降雨侵蚀力(最高贡献率达 79.74%)。

表 4 不同修复模式径流量主要驱动因素贡献度
Table 4 Contribution of major driving factors to runoff under different restoration models

修复模式	驱动因素	r	P_d	P_{id}	$D_d/\%$	$D_{id}/\%$	总效应/ $\%$
裸地	I_{30}	0.51	0.39	0.03	14.98	6.76	21.74
	A_{sm}	-0.33	-0.33	-0.04	10.96	-7.90	3.06
耕作地	R	0.53	0.84	0	70.73	0	70.73
灌草地	R	0.47	0.47	0	21.90	0	21.90
乔灌草地	R	0.67	0.67	0	45.43	0	45.43
自然恢复地 1	R	0.53	0.82	0	67.08	0	67.08
自然恢复地 2	R	0.48	0.53	0	28.52	0	28.52
	H_v	0.36	0.37	0	13.62	0	13.62

注: P_d 、 P_{id} 、 D_d 、 D_{id} 分别为直接路径系数、间接路径系数、直接贡献、间接贡献。下同。

表 5 不同修复模式土壤流失量主要驱动因素贡献度
Table 5 Contribution of major driving factors to soil loss under different restoration models

修复模式	驱动因素	r	P_d	P_{id}	$D_d/\%$	$D_{id}/\%$	总效应/ $\%$
裸地	I_{30}	0.43	0.27	0.06	7.02	12.14	19.16
	A_{sm}	-0.56	-0.60	-0.03	35.40	-5.41	30.00
耕作地	R	0.48	0.89	0	79.74	0	79.74
灌草地	R_r	0.43	0.99	0	97.81	0	97.81
乔灌草地	R_r	0.46	0.52	0	26.94	0	26.94
自然恢复地 1	R_r	0.58	0.96	0	91.78	0	91.78
自然恢复地 2	R_r	0.57	0.67	0.09	44.62	17.91	62.53
	H_v	0.76	0.25	0.24	6.05	48.63	54.68

3 讨论

3.1 不同植被修复模式减流减沙效果比较

干热河谷气候炎热干燥,生态脆弱,水土流失严重,对不同植被修复模式下减水减沙效应进行长期监测并分析其影响因素,可探究最有利于干热河谷减流减沙的植被修复生态模式。本研究于 2019—2022 年,基于元谋干热河谷径流小区开展不同植被修复模式下径流量、土壤流失量及降雨、土壤、植被因子的系统监测发现,除裸地外的所有植被修复模式均能有效降低径流量和土壤流失量(图 2),以裸地为对照,乔灌草地、灌草地、自然恢复地 1、自然恢复地 2 和耕作地的年均径流量减少率分别为 91.81%、89.08%、87.20%、84.79% 和 64.25%,土壤流失量减少率分别为 99.92%、99.45%、99.37%、97.26% 和 92.16%。因此,乔灌草地减流减沙效果最佳,是干热

河谷区最为推荐的修复模式。冠层面,乔灌草地为木棉+羊蹄甲+扭黄茅+孔颖草组合,形成乔灌草复层结构,降雨过程中,乔木层(木棉、羊蹄甲等)形成稀疏高大的冠层,可有效拦截部分降雨,削弱雨滴的击溅动能;灌木层与草本层(扭黄茅、孔颖草等)进一步增加冠层郁闭度,延长降雨入渗时间,显著降低地表径流产生量,进而减少土壤流失量。地表覆盖层面,乔灌草地模式能积累枯落物,形成较厚的地表覆盖层,缓冲雨滴击溅,防止土壤结皮,同时,增加地表粗糙度,减缓径流流速,促进泥沙沉积。根系与土壤层面,乔木的深根系与灌草的中浅根系形成网络,显著增强土壤团聚体稳定性、提高水分入渗能力,减轻表层土壤的径流冲刷。土壤含水量数据(图 6)显示,乔灌草模式在干早期仍能维持较高的表层水分,说明其根系系统具有较强的水分调控能力。该结论与既有研究形成有力的相互印证与深化,谭莹莹

等^[25]以乔灌草立体恢复台地、自然恢复地及自然恢复灌木草丛为研究对象,重点考察乔灌草地的抗干旱能力;周琴等^[26]设置鱼鳞坑+阔叶树补植、草灌乔立体混交、条沟播草+阔叶树补植、密穴播草和等高草灌带5种植被恢复措施研究表明,沟播草+阔叶树补植效果最佳,草灌乔立体混交次之,虽都为红土,但所在地区气候不同,也可能是植被修复模式设置不同引起的差别。

3.2 径流量、土壤流失量对不同植被修复模式下降雨、植被等因子的响应

降雨、土壤、植被因子^[14]共同构成影响径流与土壤流失的核心驱动力系统,基于此,本文深入探讨元谋干热河谷不同植被修复模式各因子对径流及土壤流失的响应机制。中雨、大雨和暴雨等强降雨事件为径流与土壤流失提供水分来源及动力,元谋干热河谷地区降雨以中雨为主,中雨贡献35%的径流量和42%的土壤流失量,大雨贡献38%的径流量和42%的土壤流失量,暴雨贡献23%的径流量和13%的土壤流失量。此外,研究区的降雨主要集中在夏季,2019—2020年集中期为6—8月,2021—2022年延长至6—9月,最高占比达87%,降雨集中期呈现延长趋势(图4)。在降雨因子与水土流失的相关性方面(图5、表1),本研究发现,径流量和土壤流失量与降雨量、 I_{30} 及降雨侵蚀力呈显著正相关,与魏总等^[27]和张明忠等^[28]分别从降雨量与 I_{30} 、降雨侵蚀力角度所得结论一致;相比之下,径流量与土壤流失量与降雨历时和平均雨强无显著相关性。而张斌艳等^[14]研究指出,在某些植被模式下降雨历时和平均雨强与水土流失呈显著正相关,可能与不同植被类型对降雨过程的调控作用有关。从裸地到自然恢复地,土壤含水量呈缓慢上升趋势,年际平均值为18.62%~22.88%(图6);植被盖度和植被平均高度也呈缓慢的上升趋势(图7),较高含水量有助于增强土壤结构稳定性并减少水土流失,植被可通过冠层截留消减降雨动能、枯落物覆盖抑制击溅分散、根系固土增强抗冲能力的三重机制,协同降低地表径流生成与土壤侵蚀产沙^[4]。

3.3 不同植被修复模式减流减沙效应

基于对不同植被修复模式下径流量与土壤流失量的相关性分析和多元回归分析结果(表1、表3、表4、表5),深入研究不同植被修复模式下径流量与土壤流失量的主要驱动因素及其作用机制。相关性分析表明,降雨量、降雨侵蚀力和 I_{30} 与各模式下的径流量均呈极显著正相关($p < 0.01$)^[27](表1)。土壤流失量与径流量的相关性在灌草地、乔灌草地及自然恢

复地等植被修复模式下均达到极显著水平(r 最高达0.989)。张斌艳等^[14]研究发现,同种植模式下径流量均与土壤流失量呈显著正相关,表明在不同植被修复模式下土壤流失量主要与地表径流过程直接耦合。贡献度分析结果(表4、表5)显示,裸地中径流量主要受 I_{30} 正向驱动(总效应21.74%),而土壤流失量则主要受10 cm土壤含水量的负向调控(总效应30.00%)。耕作地由于地表植被覆盖低且受人为扰动,径流与土壤流失均高度依赖于降雨侵蚀力,其贡献率分别达到70.73%和79.74%,反映在人类活动下地表缺乏有效拦截时降雨的主导作用,戴佳栋等^[29]也证实该结论。灌草地、乔灌草地、自然恢复地1径流量的贡献均来自降雨侵蚀力,贡献率分别为21.90%、45.43%、67.08%。自然恢复地2中,植被平均高度对径流量也有一定的驱动作用,表现为降雨侵蚀力和植被平均高度共同驱动,贡献率分别为28.52%和13.62%(表4)。对于土壤流失量(表5),径流量对土壤流失量的直接解释作用显著增强(贡献率介于26.94%~97.81%),尤其在灌草地中,径流量对土壤流失的贡献高达97.81%,自然恢复地2中除径流量的核心驱动作用外(62.53%),还存在植被平均高度(54.68%)的影响,说明土壤流失主要经由地表径流过程发生,植被的结构特征及土壤结构特征^[11]则通过影响径流形成间接调控侵蚀。整体上,在裸地及人为干扰强烈的耕作地中,水沙过程主要由气候因子(降雨侵蚀力)主导;而灌草、乔灌草等修复模式下,系统则转向以“地表水文过程”为主导,植被与土壤因子通过削减径流规模,从根本上减少径流量和土壤流失的发生。

4 结论

耕作地、灌草地、乔灌草地、自然恢复地1、自然恢复地2较裸地径流量分别减少64.25%、89.08%、91.81%、87.20%和84.79%,土壤流失量分别降低92.16%、99.45%、99.92%、99.37%、97.26%。不同植被修复模式减流减沙效果排序为乔灌草地>灌草地>自然恢复地1>自然恢复地2>耕作地>裸地。对影响因素的综合分析指出,不同植被修复模式下土壤流失量的核心驱动力是径流量;径流量的核心驱动因素是降雨侵蚀力,但受土壤因子、植被因子共同调控,使得不同植被修复模式土壤流失量和径流量的响应机制发生改变,由降雨主导逐渐转向地表水文过程主导。因此,乔灌草修复模式能显著抑制以降雨侵蚀力为主要驱动因素所产生的径流量及由径流量主导的土壤流失量,达到较好的减流减沙的水土保持效应。

参考文献:

- [1] 孙永玉,欧朝蓉,邓志华.加强金沙江干热河谷区生态保护与修复工作的思考[J].社会主义论坛,2023(10):34-35.
Sun Yongyu, Ou Chaorong, Deng Zhihua. Thoughts on strengthening ecological protection and restoration in dry-hot valley of Jinsha River[J]. Journal of Socialist Forum, 2023(10):34-35.
- [2] Chen Yixian, De Geeter S, Poesen J, et al. Global patterns of gully occurrence and their sensitivity to environmental changes[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2026, 14(1):e100572.
- [3] 刘振稳,刘倩,肖潇,等.灌草覆盖:干热河谷区植被修复新路径探析[J].中国农学通报,2024,40(24):60-66.
Liu Zhenwen, Liu Qian, Xiao Xiao, et al. Shrub and grass covering: A new path for vegetation restoration in dry-hot valleys[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(24):60-66.
- [4] Zhang Xinyu, Zhang Shouhong, Zhang Fan, et al. Rain-fall amount shapes the soil erosion and vegetation protection effectiveness in soil conservation [J]. Journal of Hydrology, 2025, 663:e134219.
- [5] 荣浩,何京丽,张欣,等.荒漠草原不同植被恢复模式的水土保持生态效益[J].水土保持通报,2019,39(5):295-300.
Rong Hao, He Jingli, Zhang Xin, et al. Ecological benefits of soil and water conservation in different vegetation restoration patterns on desert steppe[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5):295-300.
- [6] 崔可.南方丘陵地区不同植被覆盖模式下水土保持效益的对比分析[J].水土保持应用技术,2019(4):19-22.
Cui Ke. Comparative analysis of soil and water conservation benefits under different vegetation coverage modes in hilly areas of southern China[J]. Technology of Soil and Water Conservation, 2019(4):19-22.
- [7] 孙从建,侯慧新,陈伟,等.典型黄土塬区不同植物措施水土保持效应分析[J].自然资源学报,2019,34(7):1405-1416.
Sun Congjian, Hou Huixin, Chen Wei, et al. Effects of different plant measures on soil and water conservation in typical tableland zones on the Loess Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(7):1405-1416.
- [8] 马少伟,胡慧,包维楷,等.岷江干旱河谷土石混合边坡不同种植处理下乡土植被的生态效益[J].生态学报,2024,44(4):1647-1661.
Ma Shaowei, Hu Hui, Bao Weikai, et al. Ecological benefits of different planting treatments using indigenous species on the road slope in the Minjiang dry valley [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4):1647-1661.
- [9] He Juan, Zhou Wei, Qian Mingjie, et al. Mechanisms of ecosystem function enhancement under land ecosystem restoration patterns and responses to multiple scenarios: A complex network approach[J]. Land Use Policy, 2025, 158:e107764.
- [10] Han Huiming, Fu Chun. Vegetation greenness and productivity recovery following the 2022 record-breaking compound soil moisture and atmospheric drought in Yangtze River basin[J]. Journal of Hydrology, 2026, 665:e134705.
- [11] 格桑曲珍,王玉婷,旦增尼玛,等.雅江河谷沙地不同植被恢复模式土壤改良效果[J].中国水土保持科学(中英文),2025,23(5):101-112.
Gesangquzhen, Wang Yuting, Dan Zengnima, et al. Soil improvement effects of different vegetation restoration modes in the sandy areas of the Yajiang River valley[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(5):101-112.
- [12] 田鑫.植被修复对草海湿地岸带土壤养分的影响及微生物的作用[D].贵阳:贵州民族大学,2023.
Tian Xin. Effects of vegetation restoration on soil nutrients and microbial functions in the coastal zone of Caohai wetland in Guizhou[D]. Guiyang: Guizhou Minzu University, 2023.
- [13] 窦沛彤,贺思腾,高成杰,等.干热河谷不同恢复群落对林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J].浙江农林大学学报,2022,39(3):616-624.
Dou Peitong, He Siteng, Gao Chengjie, et al. Effects of different restoration communities on understory species diversity and soil physical and chemical properties in dry-hot valley[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(3):616-624.
- [14] 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.
- [15] 阮长明,王猛,孙永玉,等.金沙江流域干热河谷土壤肥力特征及其影响因素[J].土壤通报,2024,55(1):93-101.
Ruan Changming, Wang Meng, Sun Yongyu, et al. Characteristics of soil fertility and the influencing factors in the hot-dry valley of Jinsha River[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(1):93-101.
- [16] 张珉瑞,朱少东,李盼,等.干热河谷区4种典型植被土壤抗剪性能影响因素探究[J].江西农业大学学报,2023(5):1285-1296.

- Zhang Minrui, Zhu Shaodong, Li Pan, et al. Influencing factors of soil shear performance of four typical vegetations in dry-hot valley area[J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2023(5): 1285-1296.
- [17] 胡月, 卢阳, 金可, 等. 干热河谷生态治理探讨[J]. *长江科学院院报*, 2021, 38(10): 69-75.
- Hu Yue, Lu Yang, Jin Ke, et al. Discussion on ecological restoration in dry-hot valley [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(10): 69-75.
- [18] 刘娇, 郎学东, 苏建荣, 等. 基于 InVEST 模型的金沙江流域干热河谷区水源涵养功能评估[J]. *生态学报*, 2021, 41(20): 8099-8111.
- Liu Jiao, Lang Xuedong, Su Jianrong, et al. Evaluation of water conservation function in the dry-hot valley area of Jinsha River basin based on InVEST model[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(20): 8099-8111.
- [19] 杨洪舟, 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*, 2021, 19(5): 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(5): 90-98.
- [20] 张洪达, 赵传普, 戴玉婷, 等. 群落尺度植被水土保持功能评价模型的构建: 以大别山北麓安徽省金寨县为例[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(1): 122-129.
- Zhang Hongda, Zhao Chuanpu, Dai Yuting, et al. Construction of evaluation model for soil and water conservation function of vegetation at community scale: Taking Jinzhai County, Anhui Province at northern foot of Dabie Mountains as an example[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(1): 122-129.
- [21] 何光熊, 闫帮国, 纪中华, 等. 元谋干热河谷 Savanna 草地优势植物的种间关系[J]. *草业学报*, 2018, 27(6): 62-71.
- He Guangxiong, Yan Bangguo, Ji Zhonghua, et al. Interspecific relationships in savanna grassland in Yuanmou, a dry-hot valley upstream of the Yangtze River[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(6): 62-71.
- [22] 邵方丽. 干热河谷典型地区植被恢复研究综述[J]. *林业建设*, 2017, 35(1): 22-27.
- Shao Fangli. Research overview on vegetation restoration in typical area of dry-hot valley [J]. *Forestry Construction*, 2017, 35(1): 22-27.
- [23] 谢乐, 侯鹏, 周涛, 等. 黄土高原降雨特征对降雨侵蚀力时空变化的影响[J]. *生态学报*, 2025, 45(10): 4940-4951.
- Xie Le, Hou Peng, Zhou Tao, et al. The rainfall characteristics effect spatiotemporal patterns of rainfall erosivity in the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, 45(10): 4940-4951.
- [24] Hu Yanting, Zhang Fu, Luo Zhuzhu, et al. Soil and water conservation effects of different types of vegetation cover on runoff and erosion driven by climate and underlying surface conditions[J]. *Catena*, 2023, 231: e107347.
- [25] 谭莹莹, 沈婷, 周绍齐, 等. 红河干热河谷不同恢复模式下植被对干旱的抵抗力[J]. *水土保持通报*, 2025, 45(4): 113-123.
- Tan Yingying, Shen Ting, Zhou Shaoqi, et al. Drought resistance of vegetation under different ecological restoration patterns in Honghe dry-hot valley[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45(4): 113-123.
- [26] 周琴, 吴洁玲, 刘梦莹, 等. 花岗岩红壤侵蚀退化地植被恢复措施的水土保持调控效应[J]. *水土保持学报*, 2026, 40(2): 175-185.
- Zhou Qin, Wu Jieling, Liu Mengying, et al. Regulation effects of soil and water conservation by vegetation restoration measures in granite red soil eroded degraded land [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2026, 40(2): 175-185.
- [27] 魏总, 杨朝磊, 田瑜峰, 等. 金沙江干热河谷区土壤侵蚀时空演变及其定量归因分析: 以云南楚雄元谋地区为例[J]. *现代地质*, 2024, 38(3): 683-693.
- Wei Zong, Yang Chaolei, Tian Yufeng, et al. Spatial-temporal variations of soil erosion and quantitative attribution analysis in the dry-hot valleys of the Jinsha River: A case study of Yuanmou County, Yunnan[J]. *Geoscience*, 2024, 38(3): 683-693.
- [28] 张明忠, 何光熊, 方海东, 等. 元谋干热河谷优势乡土草群落水土保持效益研究[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 101-104.
- Zhang Mingzhong, He Guangxiong, Fang Haidong, et al. Effects of dominant native grasses constructed communities on soil and water conservation in dry-hot valley of Yuanmou[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2): 101-104.
- [29] 戴佳栋, 张泽洪, 张建辉, 等. 干热河谷区耕作侵蚀作用下坡面水力侵蚀特性[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(1): 116-124.
- Dai Jiadong, Zhang Zehong, Zhang Jianhui, et al. Effect of tillage erosion on characteristics of hydraulic erosion in the dry-hot valley region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 116-124.