

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2024.04.039

甄子云, 赵洋, 姜群鸥, 等. 野外模拟降雨条件下高寒草甸区植被退化和人工植被恢复坡面的产流产沙过程[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 153-161.

ZHEN Ziyun, ZHAO Yang, JIANG Qun'ou, et al. Field simulation of runoff and sand production on degraded and revegetated slopes in alpine meadows under rainfall conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 153-161.

野外模拟降雨条件下高寒草甸区植被退化和人工植被恢复坡面的产流产沙过程

甄子云^{1,2}, 赵洋³, 姜群鸥^{1,2}, 解晨¹, 赵伟航¹,
刘兰华⁴, 周铁军⁴, 何财松⁴, 周扬⁴

(1.北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2.北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;
3.西藏农牧学院资源与环境学院, 拉萨 860000; 4.中国铁道科学研究院集团有限公司节能环保劳工卫研究所, 北京 100081)

摘要: [目的] 青藏高原是我国重要生态屏障, 高寒草甸是其重要组成部分, 水土保持功能是高寒草甸重要生态服务功能。开展青藏高原高寒草甸区水土流失过程研究对减少人为扰动水土流失、保障西南地区生态安全具有重要意义。[方法] 选取青藏高原高寒草甸未退化、轻度退化、中度退化、裸坡与人工植被恢复 5 种不同类型坡面, 通过野外模拟降雨试验, 分析不同雨强条件下, 不同植被退化与恢复坡面产流产沙过程, 揭示植被退化与人工植被恢复坡面土壤侵蚀机理与水沙关系。[结果] (1) 高寒草甸未退化坡面与人工植被恢复坡面因其根系较为致密, 其水分下渗能力相对较弱, 故初始产流时间相对较短; 而对于轻度退化坡面, 侧流与纵向入渗能力相对较强, 初始产流时间相对较长。(2) 在常规降雨条件下 (30, 60 mm/h), 轻度退化坡面产流量最小, 减流效益最高, 达到 77.13%; 人工恢复坡面产流量与未退化坡面接近, 略高于轻度退化坡面; 而裸土坡面累计产流量最大, 且显著高于其他坡面; 极端降雨条件下 (90 mm/h) 未退化坡面产流量激增, 仅低于裸坡并明显高于人工植被恢复坡面。(3) 在常规降雨条件下 (30, 60 mm/h), 人工恢复植被坡面减沙效益最高, 分别达到 81.97% 和 89.82%, 其次是未退化坡面, 且随着植被退化程度增大, 减沙效益逐渐降低; 但在极端降雨条件下, 人工恢复植被和未退化坡面减沙效益几乎相同, 而中度退化坡面产沙量是未退化坡面的 4.59 倍; 轻度退化坡面虽然具有较好的减流效益, 但是减沙效益相对较差。[结论] 研究结果可为高寒草甸区植被恢复与生态安全提供重要科学依据。

关键词: 高寒草甸; 退化草甸; 水土流失; 减流减沙效益

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)04-0153-09

Field Simulation of Runoff and Sand Production on Degraded and Revegetated Slopes in Alpine Meadows Under Rainfall Conditions

ZHEN Ziyun^{1,2}, ZHAO Yang³, JIANG Qun'ou^{1,2}, XIE Chen¹, ZHAO Weihang¹,
LIU Lanhua⁴, ZHOU Tiejun⁴, HE Caisong⁴, ZHOU Yang⁴

(1.School of Soil and Water, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2.Key Laboratory of Soil and Water and Desertification Combating, Ministry of Education Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
3. College of Resources and Environment, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Lhasa 860000, China;
4.Energy Saving and Environmental Protection and Occupational Safety and Health Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: [Objective] The Qinghai-Tibetan Plateau is an important ecological barrier in China, and alpine meadows are an important part of it, and the function of soil and water conservation is an important ecological service function of alpine meadows. Therefore, it is of great significance to carry out the study of

收稿日期: 2024-03-24

修回日期: 2024-05-08

录用日期: 2024-05-15

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-06-18

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42371291, 51909052); 铁路建设项目水土流失智能监测技术及应用效果研究项目 (J2022Z001); 国家重点研发计划项目 (2019YFE0116500, 2023YFF1304204)

第一作者: 甄子云 (1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事 3S 技术在资源环境中应用研究。E-mail: ziyunzhen@bjfu.edu.cn

通信作者: 赵洋 (1990—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: zhaoyang@xza.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

soil erosion process in alpine meadows on the Tibetan Plateau to reduce anthropogenic disturbance of soil erosion and to safeguard the ecological security of the southwest region. [Methods] In this study, five different types of slopes, namely, undegraded, mildly degraded, moderately degraded, bare slopes and artificially restored slopes in alpine meadows of the Tibetan Plateau, were selected to analyze the process of flow and sand production on degraded and restored slopes under different rainfall intensities, and to reveal the relationship between the erosion mechanism and water-sand relationship between degraded slopes and restored slopes with artificial vegetation through the simulated rainfall test in the field. [Results] (1) The initial flow production time is relatively short on the undegraded slopes of alpine meadows and the restored slopes with artificial vegetation because of their dense root system, and the water infiltration ability is relatively weak; while on the mildly degraded slopes, the lateral flow and vertical infiltration ability are relatively strong, and the initial flow production time is relatively long. (2) Under regular rainfall conditions (30 and 60 mm/h), the flow rate of mildly degraded slopes is the smallest, and the flow reduction benefit is the highest, reaching 77.13%, the flow rate of artificially restored slopes is close to that of undegraded slopes and is slightly higher than that of mildly degraded slopes; the cumulative flow rate of bare soil slopes is the largest, and it is significantly higher than other slopes; the flow rate of undegraded slopes under extreme rainfall conditions (90 mm/h) is surging, only lower than that of bare slopes and significantly higher than other slopes. Under extreme rainfall conditions (90 mm/h), the flow rate of undegraded slopes increased, which was only lower than that of bare slopes and significantly higher than that of artificially restored slopes. (3) Under regular rainfall conditions (30 and 60 mm/h), the sand reduction benefit of the artificially restored vegetated slopes was the highest, reaching 81.97% and 89.82%, followed by the undegraded slopes, and with the increase of the degradation degree of the vegetation, the sand reduction benefit was gradually reduced; however, under extreme rainfall conditions, the sand reduction benefit of the artificially restored vegetation and the undegraded slopes was almost the same, and the sand production of the moderately degraded slopes was higher than the undegraded slopes, which is significantly higher than the other slopes. However, under extreme rainfall conditions, the sand reduction benefits of artificially restored vegetation and undegraded slopes are almost the same, while the sand production of moderately degraded slopes is 4.59 times of that of undegraded slopes. [Conclusion] The results of these studies can provide important scientific basis for vegetation restoration and ecological security in alpine meadow area.

Keywords: alpine meadow; degraded meadow; water and soil loss erosion; benefit of runoff and sediment reduction

Received: 2024-03-24

Revised: 2024-05-08

Accepted: 2024-05-15

Online(www.cnki.net): 2024-06-18

高寒草甸是青藏高原广泛分布且具有代表性植被类型,约占青藏高原草地面积 46.7%^[1],故高寒草甸健康对青藏高原生态安全和持续发展有着重要影响。在全球气候变化及人类活动影响下,高寒草甸面临着日趋严重植被退化问题,退化面积约 4.5×10^7 hm²。草甸植被退化导致土壤侵蚀加剧与土壤理化情况恶化^[2],而土壤侵蚀也是全球所面临严峻生态问题,并已成为威胁可持续发展重要原因之一。在自然和人类活动双重作用下,土壤侵蚀影响范围覆盖全球 84%陆地面积,导致 33%土地有不同程度退化^[3-4]。土壤侵蚀还引发一系列连锁效应,包括土体结构破坏、养分缺失、碳储量减少、生物多样性下降及生态系

统稳定性破坏等问题^[5]。因此,研究高寒草甸区不同退化与恢复植被土壤侵蚀过程对保障我国西南地区生态安全具有重要意义。

因青藏高原地质条件复杂多样,以往研究较多通过遥感手段或通用水土流失方程对青藏高原水土流失量进行模拟与评估。其中,TIAN 等^[6]研究发现,藏东南地区和周边高山区处于土壤侵蚀高风险区,且其土壤侵蚀潜在风险逐渐上升,并主要集中在青藏高原南部、东部、中部和北部地区。地表植被覆盖可有效控制水土流失。国内外学者^[7]已在黄土高原、黑土区等水土流失易发区开展大量研究。藏东南高寒草甸区植被与土壤形成不同于其他地区二元复合体,

WANG等^[8]于青藏高原东北部通过野外观测表明植被覆盖变化对水文过程有着一定影响;LIU等^[9]在青海地区通过野外原位试验探究了该地区坡面水文过程与土壤侵蚀过程;NIU等^[10]以田间试验补充了青海天然降雨条件下的研究。然而因试验区环境条件因素差异,导致出现对植被坡面水土流失过程不同的观测和研究结果,有些甚至是矛盾的^[9,11-13]。草甸退化过程中裸露土壤缝隙的形成和扩大使得下垫面水热交换不均,影响坡面产流产沙过程。以往这些研究大多采用模型模拟或者针对天然降雨开展水土流失过程研究,而针对不同降雨条件下不同植被退化坡面产流产沙过程开展原位试验研究相对较少。

鉴于此,本研究选取藏东南高寒草甸为研究区,选取高寒草甸未退化、轻度退化、中度退化、裸坡与人工植被恢复5种不同类型坡面,通过野外人工模拟降雨试验,研究不同降雨条件下,不同植被退化与人工恢复植被坡面产流产沙过程,揭示高寒草甸植被退化与人工植被恢复坡面土壤侵蚀机理与水沙关系。该项研究可为区域生态恢复与水土保持提供重要科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于西藏自治区东南部昌都市八宿县境内邦达草原(30°09′00″N, 96°52′12″E),海拔4 200~4 500 m。邦达草原长80 km,宽20 km,是分隔澜沧江与怒江的山源盆地,地势平坦,草原肥沃。怒江东支玉曲上游河段蜿蜒曲折于其间,并带来较多

降水。研究区为高原寒温带气候,年平均气温0.4℃,年平均降水量499 mm,降水主要集中在7—8月。植被类型以高寒草甸为主伴有稀疏灌丛,低湿滩地生长着茂密低矮嵩草、苔草等草甸植物,优势植物有高山杜鹃、高山嵩草、矮嵩草和金露梅等。在现场挖取土壤剖面50 cm,并随机取3个不同位置表土(15—20 cm)样本进行测验。研究区土壤属黑毡土亚类,黑毡紫泥土土属,母质为紫色砂、页岩风化的残坡积物。土样为屑粒状结构,平均黏粒含量为18.2%,质地均为黏壤土,草毡层平均厚度为10 cm,各样本均处于腐殖质层内,色泽较黑,平均有机质含量6.63%。

1.2 试验设计与方法

本研究于2023年7月15日至9月2日在八宿县境内开展试验。依据研究区地形坡度状况,选取有代表性的30°坡面,基于高寒草甸植被覆盖度,分别选取50%,75%和95%以上植被覆盖度坡面,建立中度退化、轻度退化和未退化径流小区,选取人为扰动后无植被覆盖的坡面为裸坡。裸坡、中度退化、轻度退化、未退化坡面均选用人为施工扰动导致退化的天然草甸坡面,无额外人为影响。径流小区为1.0 m×2.0 m×0.4 m(宽×长×高)(图1)。用不锈钢挡板与坡面分离,挡板高出地面20 cm,土槽下方径流收集口采用“V”形结构连接集流桶收集产流产沙并覆盖金属板。本研究基于试验区多年7—9月降雨强度数据,设置了区域出现频率相对较多的30,60 mm/h雨强。考虑到研究区极端降雨情况,本研究还设置90 mm/h降雨强度。

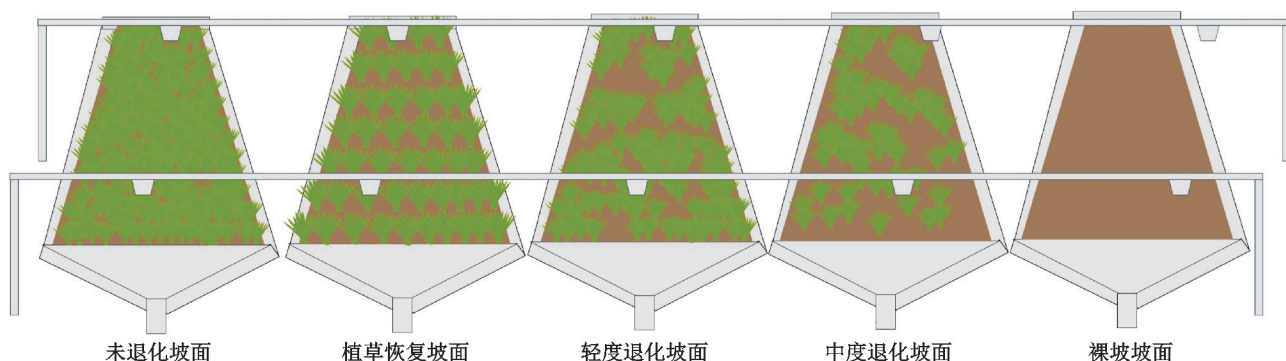


图1 试验径流小区示意

Fig. 1 Schematic of test runoff plots

模拟降雨器采用ELS-RS3人工模拟降雨系统,模拟不同雨强下雨滴大小和动能,降雨均匀度≥90%。模拟降雨试验选择无风条件下进行。各坡面每组试验进行3次重复,15场次试验。记录产流量并取平均值,每组水样取500 mL。因邦达草原气候多变,晴天与阴天温度湿度差异较大,土壤含水率数据将7—9月多云日观测数据取平均值为35%。

每次试验前,采用便携式土壤水分测定仪,测得径流小区上、中、下3个位置土壤含水量使其达到35%±5%,以保证每次降雨试验前土壤含水量与自然状态下土壤含水量相同。记录模拟降雨开始至坡面产生明显径流至集水槽出口所用时间为产流时间,而后重新记录降雨历时30 min。因降雨前7 min内产流产沙变化较大,在降雨前7 min内每隔2 min取样1

次,每次取样 500 mL;后续每隔 2~3 min 取 1 次样,直至降雨结束;降雨结束 5 min 后,取样 1 次。径流量采用体积法测定,泥沙量采用烘干称重法测定。

2 结果与分析

2.1 植被退化和人工植被恢复坡面的产流过程与减流效益

本研究对比分析高寒草甸不同程度植被退化坡面与人工植被恢复坡面产流过程。由图 2 可知,不同类型坡面初始产流时间受雨强影响较为显著。随降雨强度增大,坡面初始产流时间逐渐缩短,且减少速率不断加大。其中,裸坡在 30 mm/h 雨强下初始产流时间为 157 s,在 60 mm/h 雨强下为 140 s,而在 90 mm/h 雨强下比 60 mm/h 雨强快 71 s。在相同雨强条件下,不同类型坡面初始产流时间差异性显著。其中,高寒草甸轻度退化坡面初始产流时间最长,其次为中度退化坡面。在 30 mm/h 雨强条件下,轻度退化坡面初始产流时间为 250 s,相较于裸土坡面初始产流时间延长比例为 59.23%。然而,人工恢复植被坡面初始产流速率最快,其次为裸坡与未退化坡面。人工植被恢复坡面初始产流时间在 30 mm/h 雨强条件下为 150 s,与裸坡比较相似,而到 60,90 mm/h 时,迅速降低为 79,53 s。高寒草甸植被覆盖度并未有效降低初始产流速率。而对于轻度和中度退化坡面,因草甸中间缝隙增大而导致产流速率降低。

本研究还对比分析高寒草甸植被退化与人工植

被恢复坡面产流速率。由图 3 可知,在不同雨强条件下,不同类型坡面产流速率变化存在明显差异,不同类型坡面产流速率均随降雨历时呈现出阶段性变化特征。其中,第 1 阶段是初始产流之后至 7 min 左右,其产流速率快速增加。而到第 2 阶段,12 min 前后,增长速度明显放缓,然后趋于平稳,达到稳定产流阶段。然而,不同类型坡面产流速率增长变化幅度差异较大。相较于裸坡,不同退化程度坡面与人工植草恢复坡面产流速率与产流量远小于裸土坡面。对比不同程度退化坡面可发现,轻度退化坡面产流速率与产流量明显小于未退化坡面,而人工恢复植被与未退化坡面比较相似,产流量相对也比较大,尤其是在 30,60 mm/h 雨强条件下,其坡面产流速率平稳状态下基本吻合;而当雨强为 90 mm/h 雨强条件下,人工恢复植被坡面与轻度退化坡面产流速率在平稳状态下更加吻合,产流量相对较低。

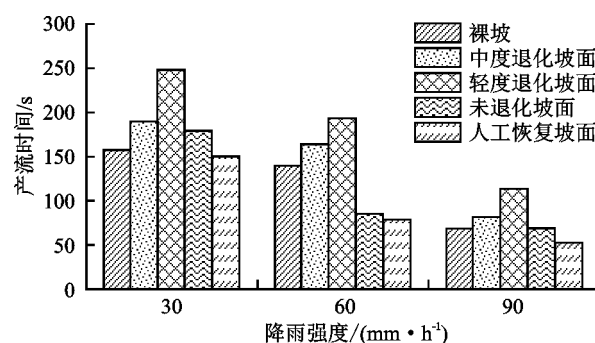


图 2 不同类型坡面初始产流时间对比分析

Fig. 2 Comparative analysis of initial flow production time on different types of slopes

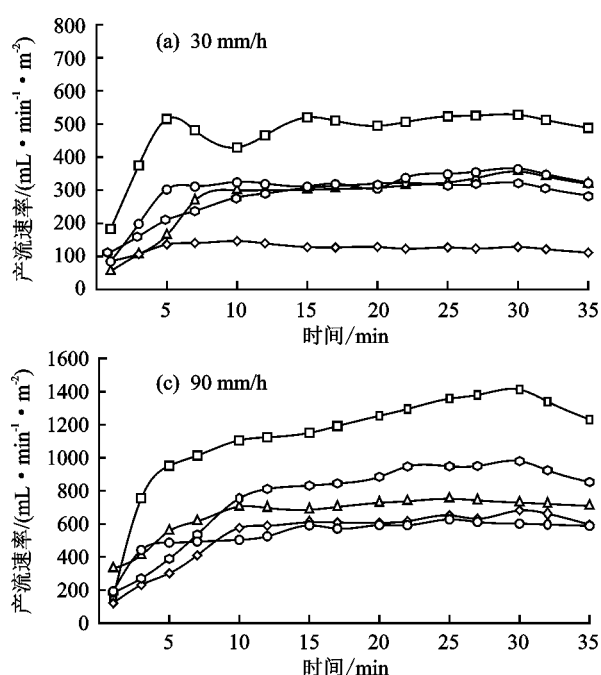


图 3 不同雨强条件下植被退化与人工恢复植被坡面产流速率

Fig. 3 Flow production rates on degraded and restored vegetated slopes under different rainfall intensities

本研究还估算不同雨强条件下植被退化与人工植被恢复坡面累计产流量和减流效益(表 1)。整体来看,与裸土坡面相比,即使是退化草甸坡面也因植被存在具有较好减流效果。其中,轻度退化坡面表现出最佳减流效果,其减流效益在 30,60,90 mm/h 雨强下分别为 77.13%,74.66%和 51.62%。随雨强增加,其减流效益逐渐降低,在 90 mm/h 雨强条件下,其

减流效益降低幅度最大。而未退化坡面在 30 mm/h 与 60 mm/h 雨强下累计产流量分别为 19 860,25 410 mL,其减流效益却相对较低,分别为 41.91%和 60.66%。对于人工植草恢复坡面,在 30 mm/h 雨强条件下,其减流效益为仅为 34.34%,但在 60 mm/h 与 90 mm/h 雨强下减流效益均稳定保持在 50%以上,尤其是在 90 mm/h 雨强下减流效果最佳。

表 1 不同类型坡面累计产流量和减流效益

Table 1 Cumulative flow production and flow reduction benefits for different types of slopes

降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	降雨历时/ min	30 min 累计产流量/mL					减流效益%			
		裸土坡面	中度退化 坡面	轻度退化 坡面	未退化 坡面	人工恢复 植被坡面	中度退化 坡面	轻度退化 坡面	未退化 坡面	人工恢复 植被坡面
30	30	34 190	22 340	7 820	19 860	22 450	34.66	77.13	41.91	34.34
60	30	64 590	30 330	16 370	25 410	26 680	53.04	74.66	60.66	58.69
90	30	86 210	49 600	41 710	59 730	41 150	42.47	51.62	30.72	52.27

2.2 植被退化和人工植被恢复坡面的产沙过程与减沙效益

在初始产流阶段,产沙速率与速率变化趋势相似,均表现为在 0~7 min 呈快速增长趋势,而后有一定程度降低,最终达到稳定水平(图 4)。整体来看,裸坡产沙速率最高。相比其他坡面,虽初始阶段产沙速率差异不大,但是随着降雨历时增加,差异逐渐变大。在 30 mm/h 雨强下,裸坡产沙速率稳定在 4.8~5.3 g/(min · m²),而在 60 mm/h 雨强下,其产沙速率大幅度增加,达到 10~12 g/(min · m²),到 90 mm/h 雨强条件下,其产沙速率增加为 14~16 g/(min · m²)。

对比不同植被退化和人工植被恢复坡面,高寒草甸中度退化坡面产沙速率高于轻度退化和人工植草恢复坡面,也显著小于裸土坡面。在 30 mm/h 雨强下,中度退化坡面产沙速率变化趋势与其他退化坡面差异较小,整体变化更加稳定;而在 60,90 mm/h 雨强下,与其他退化坡面差异变大。人工植草恢复坡面产沙速率基本处于最低水平,基本保持在 1 g/(min · m²)以下水平,且其变化始终较为稳定,无明显产沙速率增加情况,这表明人工植草恢复坡面在防治土壤侵蚀方面效益显著。

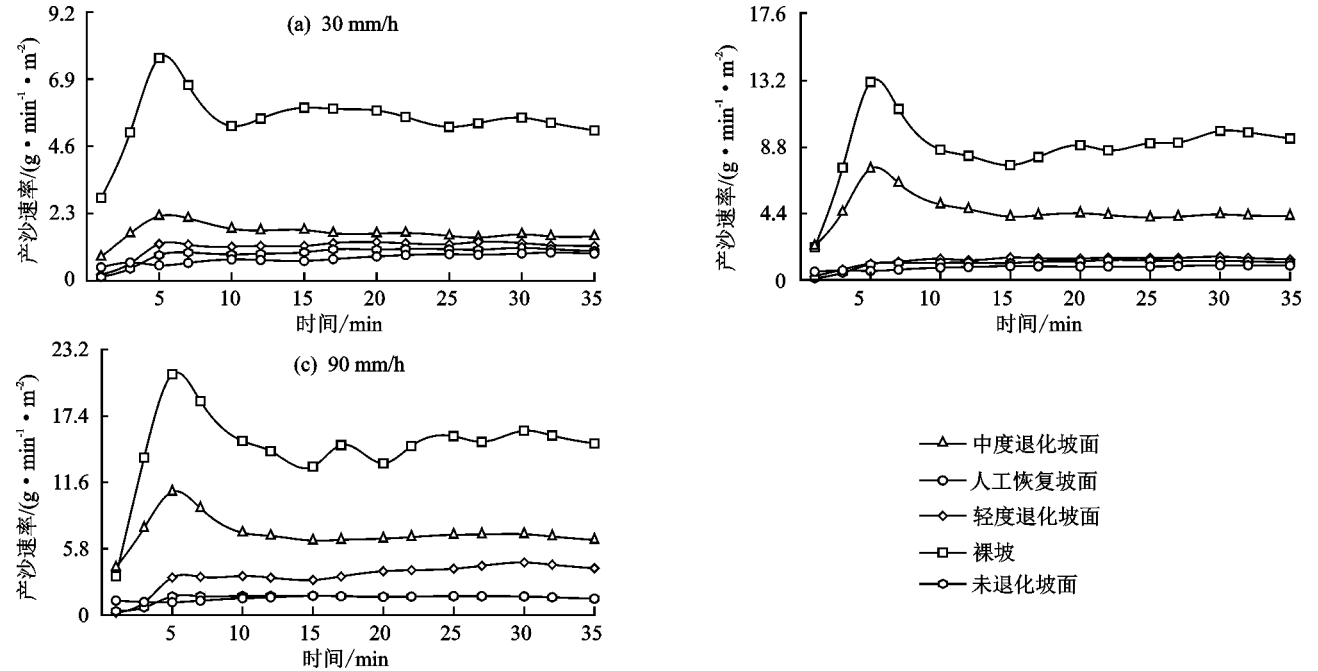


图 4 不同雨强条件下植被退化与人工恢复植被坡面产沙速率

Fig. 4 Sand production rates on degraded and restored vegetated slopes under different rainfall intensities

本研究还对比分析不同类型坡面 30 min 累计产沙量和相较于裸土坡面减沙效益(表 2)。结果显示,与裸坡相比,不同程度退化坡面与人工恢复植被坡面均有超过 50% 减沙效益,这也表明高寒草甸植被重要性。其中,人工植草恢复坡面减沙效益最高,在 30, 60, 90 mm/h 雨强下其减沙效益分别达到

81.79%, 89.82% 和 90.44%。随着高寒草甸退化程度增加,减沙效益逐渐降低。其中,中度退化坡面减沙效益最低,在 30, 60, 90 mm/h 雨强下,减沙效益分别为 76.89%, 85.45% 和 72.77%。而未退化坡面减沙效益与人工植草恢复坡面基本接近,这表明人工植草恢复防沙效益较高。

表 2 不同类型坡面累计产沙量和减沙效益

降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	降雨历时/ min	30 min 累计产沙量/mL					减沙效益%			
		裸土坡面	中度退化 坡面	轻度退化 坡面	未退化 坡面	人工恢复 植被坡面	中度退化 坡面	轻度退化 坡面	未退化 坡面	人工恢复 植被坡面
30	30	360.43	106.03	83.30	71.11	64.99	70.58	76.89	80.27	81.97
60	30	790.87	357.80	115.04	97.88	80.53	54.76	85.45	87.62	89.82
90	30	1 050.53	459.66	286.11	100.39	100.46	56.24	72.77	90.44	90.44

2.3 植被退化和人工植被恢复坡面的水沙关系

本研究基于径流泥沙含量数据,分析了模拟降雨过程中水沙关系变化趋势(图 5)。

结果显示,不同类型坡面径流含沙率均呈现倒“J”形,其径流含沙率大多在初始产流时就达到最大,随后径流含沙率随降雨历时增加而逐渐变小最终趋于平稳状态,且径流含沙率与草甸退化程度呈现显著

的负相关关系。这可能是由于坡面植被退化越严重,土壤可蚀性越高^[14]。未退化坡面与轻度退化坡面其径流含沙率变化幅度较小,且与相同雨强下裸土坡相比,其径流含沙率较小。人工植草恢复坡面径流含沙率在初始产流时径流含沙率相对较高,而后随降雨历时增加,其径流含沙率持续下降趋势直至达到稳定状态。

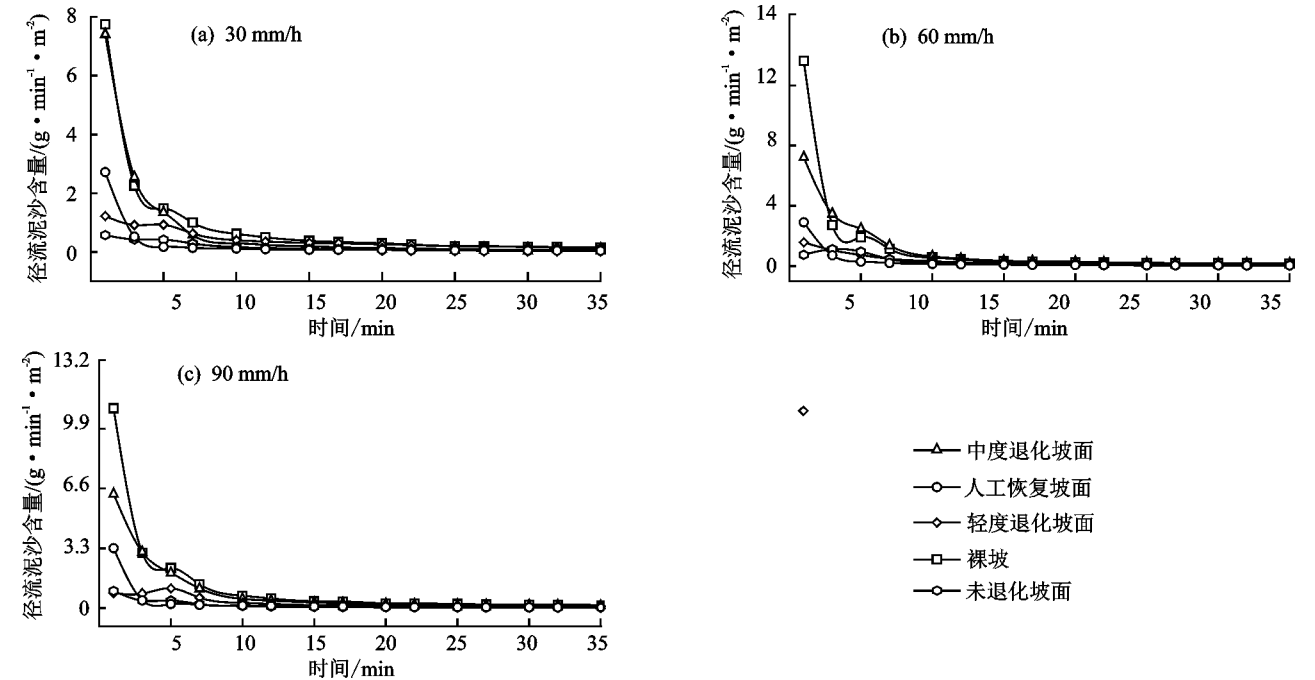


图 5 不同雨强条件下植被退化与人工恢复植被坡面径流泥沙含量

Fig. 5 Sediment content of runoff from degraded and restored vegetation slopes under different rainfall intensities

3 讨论

野外模拟降雨过程中初始产流时间受降雨强度与植被覆盖度等多因素综合影响^[15-16],呈现出高寒草甸轻度退化坡面初始产流时间最长,人工植被恢复与未退化坡面初始产流时间相对较短,裸坡初始产流时间也较短的现象。高寒草甸区初始产流结果与其他区域初始产流时间差异显著。原生高寒草甸在一定

退化后产流时间变长,是高寒草甸区独特生物土壤复合结构导致地表形成致密不透水层及草甸退化后裸露土体共同作用所致。整体来看,草甸与裸露土形成交错斑块,打破浅且密生矮嵩草表面不透水层,同时裸露土壤空隙成为水分主要入渗点^[17-19]。退化草甸形成斑块使得原本平整下垫面,形成错落且立体草甸土壤复合结构,这样的结构不仅使得径流汇聚阻力增

大,而且形成小股流蓄积空间并增大表面积,此外草甸斑块间的径流方向由原本单一下渗变为下渗与草甸侧向流同时作用,草甸斑块根系层疏松多孔有较好储水空间,松散裸土也增加坡面小股流下渗,延长初始产流形成。

产流开始后,不同类型坡面产流速率均表现为快速增长、缓慢增长、稳定产流3个阶段。这可能是由于高寒草甸植被根系紧密,入渗能力低,短时间内大量水分难以被土壤所吸收,形成超渗产流^[20],导致产流速率在降雨历时前7 min以较快速度增长。相较于裸坡,具有不同植被覆盖度坡面产流速率均显著减少,并且波动较为平稳。其主要原因为随着降雨历时增加,植被下垫面对水分的疏导作用逐渐显现。相较于土壤经溅蚀后产生物理结皮,草甸根系呈现出更好的贮存与下渗疏导效果^[21]。因此,高寒草甸可有效分散、阻拦地表径流形成,同时减少坡面径流量^[22-23]。然而,与以往研究不同的是产流速率与减流效益并不随植被覆盖度增加而减小和提升。这主要是由于高寒草甸区嵩草植物具有毡状根系^[13,17],其密度高分布浅,具有显著表聚现象,分布于土壤表层及下方10 cm处^[24-25];且因研究区地处海拔4 500 m地区,且年平均气温仅0.4℃,气候寒冷根系对环境适应性调节^[26],从而使得上述现象越发突出进而形成机械屏障,阻止水分向下迁移^[27],根系对于土壤固定作用强,持续缓慢入渗使产流速率在22~25 min才基本稳定。另外,退化草甸多形成较为分裂、均匀覆盖草甸斑块,斑块之间具有面积较小但数量较多空隙,这导致有较多径流被贮存在空隙之间,从退化草甸空隙中被横向与侧向疏导^[9,28],从而使其具有更好水分吸收能力。

模拟降雨过程中坡面产沙速率与高寒草甸植被覆盖度呈现出显著负相关关系,草甸植被覆盖度越高,产沙速率越低,减沙效益越好。裸土坡面产沙速率是具有植被覆盖坡面2~15倍,降雨过程中均呈现出明显“单峰”变化,而轻度退化坡面、未退化坡面与人工植草恢复坡面则变化较为平缓。这主要是由于草甸退化后表土粉粒砂粒增多^[14],在初始产流前3 min内坡面细粒被冲刷导致产沙速率有着较大提升,前3~5 min雨滴溅蚀导致土体表面被破坏,堵塞土壤孔隙形成物理结皮,裸坡迅速形成产流,在坡面表层逐渐形成细沟,同时使得更多成块土壤失稳,从而形成“单峰状”产沙速率变化。之后随降雨历时增加,表层土被大量剥蚀,坡面颗粒粗化,表层为较大石块与紧密土壤复合体,从而形成稳定产沙速率。就本研

究结果来看,人工植草恢复坡面在产沙速率、累计产沙量与减沙效益上与未扰动坡面十分接近,对坡面土壤侵蚀具有较好恢复效果。这表明高寒草甸区坡面除扰动后进行草皮回铺外,选择多种本地物种进行混播,结合轻度人为干扰,以自然力为主导进行近自然植被恢复,在高寒草甸脆弱敏感生境下是可行且具有较好效果。

总体来看,人工植草恢复坡面、轻度扰动坡面相较于裸土坡面均有80%以上减沙效益,中度退化坡面也有72%以上减沙效益。然而,这并不意味着草甸退化与生态修复可以忽视,随着草甸退化斑块数量增多,其水流特征紊乱,可能加速坡面植被退化和侵蚀^[29]。根据本研究上述结论与高寒草甸不同阶段退化情况,因产流速率随着植被覆盖率降低而降低,可对中度与轻度退化坡面采用多种本地物种进行混播补植,有助于生态系统快速恢复。针对裸坡,可采用部分草皮回铺与人工植草恢复相结合方法,使得高寒草甸生态功能快速恢复。

4 结论

本研究通过模拟降雨试验,研究高寒草甸区不同植被退化与人工植被恢复坡面水土流失过程,分析其水土流失防控效益。高寒草甸区独特根系土壤复合体是其产流产沙特征的重要影响因素。通过对比试验发现,未退化草甸坡面及植草恢复坡面根系致密有着较好固土能力,然而相较于其他研究区高寒草甸致密的根系层削弱了坡面下渗能力,轻度退化坡面在各雨强下产流时间最长。人工恢复坡面由于地上植被阻拦能力较弱,同时入渗速率缓慢、坡面平整,初始产流时间始终最短。未退化坡面初始产流时间和人工恢复坡面十分接近。在研究区域常见降雨条件下(30,60 mm/h),人工恢复坡面产流量与未退化坡面较为接近,产流量略小于中度退化坡面,但远小于裸土坡面。轻微退化坡面因土壤空隙纵向与横向渗透,减流效果最好。在极端降雨条件下(90 mm/h),各类坡面产流量激增。多年发育形成的植被更加完善,未退化坡面产流量仅小于裸土坡面30.72%,人工恢复坡面产流量明显小于未退化坡面,呈现出较大差异;虽然植被发育时长、地下生物量存在差异,但在各降雨情形下人工恢复植被坡面与未退化坡面产沙量十分接近,在极端雨强下和较大雨强下产沙量仅为裸土坡面的1/10。黑毡紫泥土淋溶层质地为粘壤土,细土粒疏松裸土坡面产沙量是中度退化坡面的2~3倍,且轻度退化坡面草甸斑块拦挡。常见雨强下导致

细土粒堆积,减沙效益与未退化坡面接近。本研究分析不同退化草甸以及人工恢复坡面的水蚀过程及差异,研究结论有助于了解藏东南草甸生态系统不同阶段退化特点,有助于快速修复并改善藏东南高寒草甸区水土保持能力。

参考文献:

- [1] 李军豪,杨国靖,王少平.青藏高原区退化高寒草甸植被和土壤特征[J].应用生态学报,2020,31(6):2109-2118.
LI J H, YANG G J, WANG S P. Vegetation and soil characteristics of degraded alpine meadows on the Qinghai-Tibet Plateau, China: A review[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(6): 2109-2118.
- [2] LIU X, ZHANG W, WU M, et al. Changes in soil nitrogen stocks following vegetation restoration in a typical Karst Catchment[J]. Land Degradation and Development, 2019, 30(1): 60-72.
- [3] BORRELLI P, ROBINSON D A, FLEISCHER L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion[J]. Nature Communications, 2017, 8: e2013.
- [4] BORRELLI P, ROBINSON D A, PANAGOS P, et al. Land use and climate change impacts on global soil erosion by water (2015—2070)[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(36): 21994-22001.
- [5] ROBINSON D A, PANAGOS P, BORRELLI P, et al. Soil natural capital in Europe: A framework for state and change assessment[J]. Scientific Reports, 2017, 7: e6706.
- [6] TIAN Q L, ZHANG X P, HE J, et al. Potential risk of soil erosion on the Tibetan Plateau during 1990—2020: Impact of climate change and human activities[J]. Ecological Indicators, 2023, 154: e110669.
- [7] TANG C J, LIU Y, LI Z W, et al. Effectiveness of vegetation cover pattern on regulating soil erosion and runoff generation in red soil environment, Southern China [J]. Ecological Indicators, 2021, 129: e107956.
- [8] WANG G X, LIU G S, LI C J. Effects of changes in alpine grassland vegetation cover on hillslope hydrological processes in a permafrost watershed[J]. Journal of Hydrology, 2012, 444/445: 22-33.
- [9] LIU Y, WANG D, CUI Z, et al. Alpine meadow patches unevenly regulate runoff and sediment yield generation on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2023, 623: e129848.
- [10] NIU Y L, LI S Y, LIU Y, et al. Regulation of alpine meadow patch coverage on runoff and sediment under natural rainfall on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2021, 603: e127101.
- [11] YANG K J, LU C H. Evaluation of land-use change effects on runoff and soil erosion of a hilly basin: The Yanhe River in the Chinese Loess Plateau[J]. Land Degradation and Development, 2018, 29(4): 1211-1221.
- [12] VALENTE M L, REICHERT J M, CAVALCANTE R B L, et al. Afforestation of degraded grasslands reduces sediment transport and may contribute to streamflow regulation in small catchments in the short-run[J]. Catena, 2021, 204: e105371.
- [13] MIEHE G, SCHLEUSS P M, SEEGER E, et al. The *Kobresia pygmaea* ecosystem of the Tibetan highlands—Origin, functioning and degradation of the world's largest pastoral alpine ecosystem[J]. Science of the Total Environment, 2019, 648: 754-771.
- [14] ZENG C, ZHANG F, WANG Q J, et al. Impact of alpine meadow degradation on soil hydraulic properties over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2013, 478: 148-156.
- [15] 蒋秋玲,信忠保,余新晓,等.北京山区侧柏林地坡面初始产流时间影响因素[J].中国水土保持科学,2019,17(4):1-8.
JIANG Q L, XIN Z B, YU X X, et al. Factors affecting the initial runoff time of *Platycladus orientalis* plantation hillslope in Beijing mountainous area[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019, 17(4): 1-8.
- [16] 陈泽勋,刘廷玺,王怡璇,等.模拟降雨条件下典型草原坡面初始产流时间及产流产沙量[J].生态学杂志,2022,41(7):1316-1323.
CHEN Z X, LIU T X, WANG Y X, et al. Quantitative analysis of the contribution of different rainfall conditions to runoff and sediment yield on typical grassland slope[J]. Chinese Journal of Ecology, 2022, 41(7): 1316-1323.
- [17] 林丽,张德罡,曹广民,等.高寒嵩草草甸植物群落数量特征对不同利用强度的短期响应[J].生态学报,2016,36(24):8034-8043.
LIN L, ZHANG D G, CAO G M, et al. Plant functional groups numerical characteristics responses to different grazing intensities under different community succession stages of *Alpine Kobresia* meadow in spring[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): 8034-8043.
- [18] 马海霞,张德罡,陈瑾,等.祁连山东段高寒草甸模拟放牧下的坡面土壤水蚀特征[J].草地学报,2019,27(5):

- 1347-1354.
- MA H X, ZHANG D G, CHEN J, et al. Soil erosion on slopes of alpine meadow in the eastern Qilian Mountains under simulated grazing[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(5):1347-1354.
- [19] 王彦龙, 马玉寿, 施建军, 等. 黄河源区高寒草甸不同植被生物量及土壤养分状况研究[J]. *草地学报*, 2011, 19(1):1-6.
- WANG Y L, MA Y S, SHI J J, et al. Investigation of biomass and soil nutrition of different vegetation type at alpine meadow in Yellow River headwater area[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2011, 19(1):1-6.
- [20] DENG L Z, SUN T Y, FEI K, et al. Effects of erosion degree, rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield for the bare soils from the weathered granite slopes of SE China[J]. *Geomorphology*, 2019, 352(11):e106997.
- [21] 王瑞红, 李明鑫, 张瀚, 等. 不同植被盖度对三峡库区边坡减蚀的室内模拟降雨研究[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(1):59-64.
- WANG R H, LI M X, ZHANG H, et al. Study on indoor simulated rainfall with different vegetation coverage on slope erosion reduction in the Three Gorges Reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(1):59-64.
- [22] CHEN H, ZHANG X P, ABLA M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2018, 170:141-149.
- [23] 王哈生, 刘国彬, 王青宁. 防蚀有效植被的结构特征探讨[J]. *中国生态农业学报*, 2001, 9(2):54-56.
- WANG H S, LIU G B, WANG Q N. Structural characteristics of effective vegetation for preventing soil erosion[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2001, 9(2):54-56.
- [24] 樊博, 林丽, 曹广民, 等. 不同演替状态下高寒草甸土壤物理性质与植物根系的相互关系[J]. *生态学报*, 2020, 40(7):2300-2309.
- FAN B, LIN L, CAO G M, et al. Relationship between plant roots and physical soil properties in alpine meadows at different degradation stages[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(7):2300-2309.
- [25] ZHANG G L, YANG F, LONG H. Save the life-sustaining mattic layer on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *The Innovation*, 2023, 4(3):e100418.
- [26] WANG C T, LONG R J, WANG Q J, et al. Effects of altitude on plant-species diversity and productivity in an alpine meadow, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Australian Journal of Botany*, 2007, 55(2):110-117.
- [27] BONNEAU J, FLETCHER T D, COSTELLOE J F, et al. Where does infiltrated stormwater go? Interactions with vegetation and subsurface anthropogenic features[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 567:121-132.
- [28] ASSOULINE S, MUALEM Y. Runoff from heterogeneous small bare catchments during soil surface sealing[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(12):W12405.
- [29] JIANG X J, ZHU X A, YUAN Z Q, et al. Lateral flow between bald and vegetation patches induces the degradation of alpine meadow in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751:e142338.