

藏东南施工便道植被恢复对坡面水土流失的影响

冉心昊, 王冠, 李亚桐, 肖辉杰

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 明晰施工便道上、下边坡在植被恢复条件下的坡面产流产沙过程, 揭示施工便道建设扰动后植被恢复对藏东南生态脆弱的亚高山森林灌丛区坡面尺度水土流失的影响, 为施工便道工程扰动后水土流失防治和植被恢复提供理论依据。[方法] 选取施工便道上、下边坡扰动后不同植被恢复条件下的典型坡面, 进行室内模拟降雨试验, 研究工程扰动后上、下边坡4种植被覆盖度(0%, 30%, 60%, 90%), 3种坡度(15°, 30°, 45°), 2种雨强(30, 60 mm/h)条件下的坡面产流产沙过程, 明确施工便道植被恢复对水土流失的影响。[结果] ①施工便道工程扰动后, 在上、下边坡裸土坡面进行植被恢复能有效延缓初始产流时间, 随着植被覆盖度增加, 延缓初始产流时间的效果增强, 且植被的延缓产流效应在上边坡更为明显。②在0%~60%植被覆盖度范围内, 上、下边坡稳定产流速率随植被覆盖度的增加而显著降低, 60%与90%植被覆盖度的稳定产流速率接近。相比裸土坡面, 60%, 90%植被覆盖度的减流效益分别为59%~75%, 58%~77%, 表明减流作用的植被临界覆盖度为60%。③植被覆盖度为30%, 60%时, 减沙效益分别达到29%~82%, 86%~96%。植被覆盖度在60%以下, 当覆盖度增加, 减沙作用显著增强, 超过此临界覆盖度, 即使增加覆盖度, 其减沙效益也变化不大。④在相同植被覆盖度、坡度和雨强条件下, 挖方形成的上边坡总产流量总是高于填方形成的下边坡, 而下边坡总产沙量始终高于上边坡, 反映出施工便道扰动后, 挖方、填方边坡在坡面土壤侵蚀方面的显著差异。[结论] 在藏东南施工便道扰动区的水土流失防治中, 60%植被恢复率兼具较好的防治效益和经济可行性, 且在水土保持措施布设时, 挖方边坡更需要“控水”而填方边坡应偏重“阻沙”, 只有充分考虑其差异才能在施工便道扰动区达到更好的水土保持效果。

关键词: 产流产沙过程; 植被覆盖度; 减流减沙效益; 亚高山森林灌丛; 施工便道

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0020-13

中图分类号: S157.1

文献参数: 冉心昊, 王冠, 李亚桐, 等. 藏东南施工便道植被恢复对坡面水土流失的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 20-32. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240715.002; Ran Xinhao, Wang Guan, Li Yatong, et al. Influence of vegetation restoration in construction access roads on soil and water loss in Southeastern Xizang Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 20-32.

Influence of Vegetation Restoration in Construction Access Roads on Soil and Water Loss in Southeastern Xizang Autonomous Region

Ran Xinhao, Wang Guan, Li Yatong, Xiao Huijie

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] We aimed to elucidate the process of runoff and sediment production on the upper and lower slopes of construction access roads under vegetation recovery conditions, reveal the impact of vegetation recovery on soil and water loss at the slope scale after the disturbance caused by the construction of access roads in an ecologically fragile subalpine forest and shrubland area of Southeastern Xizang Autonomous Region, in order to provide a theoretical basis for the prevention and control of soil and water loss and vegetation restoration after the disturbance caused by the construction road project. [Methods] Typical slopes under different vegetation recovery conditions after disturbances on the upper and lower slopes of construction access roads were selected for indoor simulated rainfall experiments. In this study, we

收稿日期: 2023-12-04

修回日期: 2024-03-19

资助项目: 国家重点研发计划项目“西南高山峡谷区水土流失综合防治技术与示范”(2022YFF1302901); 国铁集团科研项目“铁路建设项目水土流失智能监测技术及应用效果研究”(J2022Z001)

第一作者: 冉心昊(1996—), 男(汉族), 重庆市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: ranxinhao1996@qq.com。

通信作者: 王冠(1990—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 讲师, 主要从事水土保持方面的研究。Email: wanggbjfu@bjfu.edu.cn。

investigated the processes of runoff and sediment production under four types of vegetation coverage (0%, 30%, 60%, and 90%), three slopes (15°, 30°, and 45°), and two rainfall intensities (30, 60 mm/h) after engineering disturbance to determine the impact of vegetation recovery in construction access roads on soil and water loss. [Results] ① After the engineering disturbance of the construction access roads, vegetation recovery on the bare upper and lower slopes effectively delayed the initial runoff time, and this effect became more pronounced with increasing vegetation coverage, especially on the upper slopes. ② When the vegetation coverage was within the range of 0 to 60%, the stable runoff rate on both the upper and lower slopes significantly decreased with increasing vegetation coverage, wherein the stable runoff rates under 60% and 90% vegetation coverage were similar. Compared with bare slopes, the benefits of runoff reduction under 60% and 90% vegetation coverage were 59%—75% and 58%—77% respectively, indicating that the critical vegetation coverage value for runoff reduction was 60%. ③ Sediment reduction benefits under 30% and 60% vegetation coverage reached 29%—82% and 86%—96% respectively. Below a vegetation coverage of 60%, the sediment reduction effect significantly increased with increasing coverage; beyond this critical threshold, even with increased coverage, the sediment reduction benefits showed slight change. ④ Under the same vegetation coverage, slope, and rainfall intensity conditions, the total runoff volume from the upper slopes formed by excavation was always higher than that from the lower slopes formed by filling, whereas the total sediment yield from the lower slopes was always higher than that from the upper slopes, indicating significant differences in soil erosion on the slope surface after the disturbance of the construction of access roads between the excavation and filling slopes. [Conclusion] For the prevention and control of soil and water loss in areas disturbed by the construction of access roads in Southeastern Xizang Autonomous Region, a vegetation recovery rate of 60% offers good control benefits and economic feasibility. When designing soil and water conservation measures, more emphasis should be placed on ‘controlling water’ for excavation slopes and ‘blocking sediment’ for filling slopes. Only by fully considering these differences can better soil and water conservation be achieved in disturbed areas on access roads.

Keywords: process of runoff and sediment; vegetation coverage; benefit of runoff and sediment reduction; subalpine forest shrubland; construction road

作为地质环境复杂多变、生态群落敏感度高的雪域高原,西藏地区的生态系统稳定对于保持水土功能、维护生态平衡等具有重要价值,是中国重要的生态安全屏障区^[1],同时也是当地农牧业经济发展的基础^[2]。近年来,随着川藏铁路、滇藏铁路等工程建设的陆续开展,工程沿线建设了大量的施工便道。施工便道是与铁路、公路线并行的纵向便道,为方便西藏高海拔山区铁路、公路等桥梁建设,将山体一侧开挖形成路面—坡面相结合的山区道路^[3],上边坡为挖方边坡,通过机械开挖,心土层暴露于地表,形成裸土坡面^[4];下边坡为填方边坡,土质较上边坡松软,表土层较厚,裸土坡面若不及时进行植被恢复,在雨水作用下易发生面蚀、沟蚀等土壤侵蚀,威胁区域生态安全和下游水质^[5]。明晰藏东南地区广泛分布的亚高山森林灌丛在便道工程扰动后植被恢复条件下的坡面产流产沙规律,能够为藏区水土保持综合防治提供依据,有助于促进地区生态修复与环境保护。

对于道路建设扰动引起的水土流失及植被恢复,

国内外开展了大量研究。Ziegler 等^[6]研究发现,道路建设引起的水土流失是区域水土流失的重要组成部分。Forman 等^[7]通过研究降雨对道路侵蚀影响发现,山区道路建设改变土壤结构,加剧水土流失,引发各类地质灾害。中国对道路建设土壤侵蚀的研究集中在影响因素的分析,沈海鸥等^[8]研究表明,引起黑土区施工便道工程扰动水土流失的主要因子为降雨强度和坡度,在地表采取相关措施可减少水土流失。植被作为重要的水土保持措施,对坡面产流产沙及水沙关系有重要影响,植被通过减弱径流动能和降低径流搬运能力,可有效抵御水蚀^[9]。植被覆盖度的增加是降低土壤侵蚀的主要因素,影响地表径流和土壤流失^[10]。植被对降雨的截留、消耗作用随覆盖度的升高而增大,提高植被覆盖度可以削弱雨滴击溅动能,有效减少土壤侵蚀量^[11]。随着中国多项重大战略工程的推进,在藏东南地区已有诸多铁路、公路工程开工建设。然而,因受地理位置偏远、交通不便以及研究资源不足等多重限制,针对这一区域工程建设对坡面水土流失影响的研究薄弱,无法满足扰动区水

土流失防治的需求。例如,川藏铁路雅—林段于 2020 年开工建设,预计工期超 10 a,全长 1 011 km,桥隧比高达 94.8%,沿线地势起伏大,地形坡度陡,亚高山森林灌丛是沿线重要的植被类型区。同时,西藏地区施工地点与道路通常存在较大高差,需修建施工便道盘山而行,加之降雨充沛,暴雨频发,导致便道边坡水力侵蚀严重,科学治理势在必行。因此,该区域施工便道植被恢复引起的水土流失响应亟待开展深入研究,从而指导国家级重大工程建设背景下的水土流失预防和治理。藏东南地区地域宽广,人口密度较高,是西藏农牧业利用最为发达的地区之一^[12],林芝作为西藏第 5 大城市,其周边是铁路、公路建设的密集区^[3,13]。因此,本研究选取林芝地区典型亚高山森林灌丛,以施工便道上、下边坡扰动坡面为研究对象,设置不同坡度、不同植被覆盖度坡面,以扰动后裸土坡面为对照,进行室内人工降雨模拟试验,明晰施工便道上、下边坡在植被恢复条件下的坡面产流产沙过程,探讨植被覆盖度、雨强、坡度对产流产沙过程的影响,为施工便道工程扰动后水土流失防治和植被恢复提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

本研究以西藏自治区林芝市巴宜区东九曲施工便道为研究区(29°21′—30°15′N,93°27′—95°17′E),平均海拔 3 000 m。研究区年平均气温为 8.7 °C,多年平均降水量为 692.5 mm,雨季主要集中在 5—9 月,期间降水量占全年的 90% 以上^[13]。区内物种组成丰富,坡面植被群落组成主要包括披碱草(*Elymus dahuricus*)、格桑花(*Dasiphora fruticosa*)、雪层杜鹃(*Rhododendron nivale*)、扫帚岩须(*Cassiope fastigiata*)和小叶金露梅(*Dasiphora parvifolia*)等。施工便道上、下边坡示意图如图 1 所示,施工便道为硬化路面,且与上、下边坡间有排水沟。上、下边坡在扰动后,多采取播撒草种、花种的方式进行植被恢复,常用披碱草、格桑花等,兼具保持水土的功能和较高的观赏性。区内坡度较陡,大于 15°的坡面占坡面总面积的 85% 以上,最高可达 45°~50°。土壤为山地棕壤,用湿筛法测得上、下边坡土壤团聚体组成如图 2 所示,土壤容重、团聚体平均质量直径(MWD)、土壤有机碳含量(SOC)详见表 1。

1.2 试验装置

试验于 2023 年 7—9 月在西藏农牧学院人工模拟降雨大厅进行。模拟降雨装置由蓄水池、水泵、水管、喷头、计算机控制系统 5 部分组成,降雨强度通过

计算机控制系统调节。有效降雨覆盖范围 15 m×18 m,降雨高度 15 m,该降雨高度能达到自然降雨的雨滴终速,降雨均匀度>90%,满足人工模拟降雨要求^[14],模拟降雨的雨滴直径及分布满足天然降雨特性。参考试验区侵蚀性降雨标准和主要雨强分布特征,试验设计雨强为 30 mm/h,60 mm/h。试验所用小型变坡钢槽规格为 1.0 m(长)×0.5 m(宽)×0.4 m(高),钢槽可调节坡度 0°~50°,径流和泥沙从钢槽下端集流槽流出,钢槽除集流槽外的 3 边均有 10 cm 高挡板,防止因击溅侵蚀造成泥沙量损失,钢槽底部均匀布设直径 5 mm 透水孔,使土壤水自由下渗。

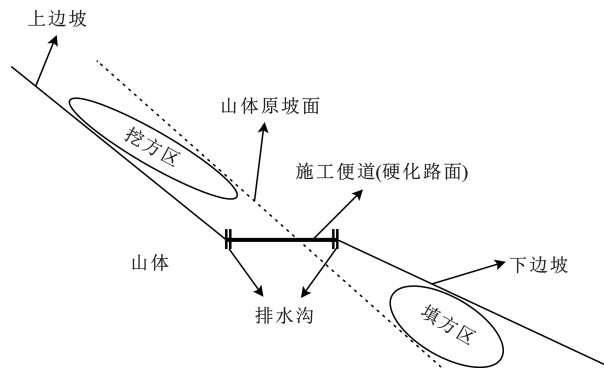


图 1 施工便道上、下边坡断面示意图

Fig.1 Schematic diagram of upper and lower slope sections of construction road

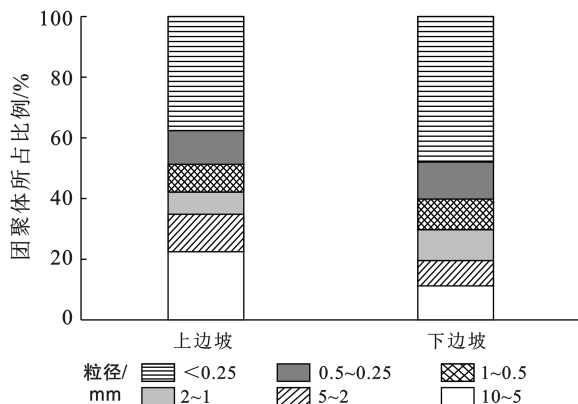


图 2 施工便道上、下边坡水稳性团聚体组成状况

Fig.2 Composition of water stable soil aggregates on upper and lower slopes of construction road

表 1 施工便道上、下边坡土壤容重、团聚体平均质量直径(MWD)、土壤有机碳含量(SOC)

Table 1 Soil bulk density, average mass diameter of soil aggregate, and soil organic carbon content on upper and lower slopes of construction access roads

位置	容重/(g·cm ⁻³)	MWD/mm	SOC/(g·kg ⁻¹)
上边坡	1.44±0.09 ^a	1.82±0.09 ^a	34.32±2.38 ^a
下边坡	1.21±0.05 ^b	1.18±0.12 ^b	46.46±1.96 ^b

注:同列不同字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

1.3 试验设计

根据野外调查结果,设置钢槽坡度为 15°, 30°, 45°。试验以施工便道工程扰动后裸土坡面为对照,分别研究施工便道上、下边坡扰动后,3 种植被覆盖度下的坡面产流产沙特征。恢复植被选取当地灌丛优势种披碱草,根据其草种种类及发芽率确定各坡面的播种量并均匀播种,确保充足的阳光和水分,植被覆盖度设定为 30%, 60%, 90% 共 3 个等级,待披碱草的长势稳定后可进行试验。每次降雨试验前用数码相机对钢槽坡面垂直拍照,用 ImageJ 软件根据照片得到准确的植被覆盖度,如不符合设计覆盖度,则要对草冠进行适当修剪,以保证试验覆盖度与设计覆盖度一致,各植被覆盖度条件下,披碱草在钢槽坡面均匀分布。为减小试验误差,同一雨强条件下,上、下边坡各 4 种植被覆盖度的土槽相隔 0.5 m 并排放置,同时进行降雨试验,并安排 4 组人员进行记录。每场降雨试验重复 3 次,且每次重复试验间隔至少 2 d。试验设计详见表 2。

表 2 人工模拟降雨试验设计

Table 2 Design of artificial simulated rainfall experiment

边坡类型	植被覆盖度/%	坡度/(°)	处理编号
上边坡—扰动后裸土	0	15,30,45	UR 0%
上边坡—扰动后恢复	30	15,30,45	UR 30%
上边坡—扰动后恢复	60	15,30,45	UR 60%
上边坡—扰动后恢复	90	15,30,45	UR 90%
下边坡—扰动后裸土	0	15,30,45	LR 0%
下边坡—扰动后恢复	30	15,30,45	LR 30%
下边坡—扰动后恢复	60	15,30,45	LR 60%
下边坡—扰动后恢复	90	15,30,45	LR 90%

注:UR 为上边坡;LR 为下边坡。下同。

1.4 试验步骤

供试土壤取自施工便道上、下边坡表层约 30 cm,分层取样,每 10 cm 为 1 层,在施工便道上、下边坡 0%, 30%, 60%, 90% 植被覆盖度坡面,用环刀各取 3 个土样,测定土壤容重。将采集的土样自然风干,过 10 mm 筛以去除石块和杂草。填土前,在钢槽底部放置 3 层纱布,纱布上平铺 5 cm 厚细砂。按照各坡面测定的土壤容重填装土槽,采用分层填土法,每 10 cm 装填 1 层供试土壤,为防止出现分层现象,每 1 层装填前,打毛下层土壤表面^[15]。装填每层后,土槽四周边壁均匀压实,以减小边界效应影响^[16]。上、下边坡各植被覆盖度土槽填土完毕后,对坡面进行预降雨至坡面产流为止,静置 24 h,测定土壤含水量为 25.3%~28.7%,保证每次降雨前各坡面土壤含水量基本一致^[17]。正式降雨前,土槽上方覆盖防雨布,待降雨均匀度稳定后,进行降雨强度率定。雨强达到试验要求后,掀开防雨布,开始降雨试验。试验中记录

初始产流时间,产流开始后,每 2 min 用取样瓶取一次径流和泥沙样品,每场降雨收集 15 次样品。降雨历时 1 h,降雨结束后,取样瓶静置 12 h,分离上清液和底部泥沙,将上清液称重并计算产流速率,底部泥沙烘干并称重,得到泥沙质量,换算为产沙速率。

1.5 数据处理与分析

应用 Excel 和 SPSS Statistics 26 软件进行数据处理与方差分析,对 3 次重复试验的数据计算平均值和标准差,使用 Origin 2023 进行制图。

采用减流效益(R_r)和减沙效益(R_s)来评价减流减沙效果,计算公式为:

$$R_r = \frac{R_0 - R_i}{R_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_s = \frac{S_0 - S_i}{S_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_0 表示裸土坡面的径流量(ml); R_i 表示植被恢复坡面的径流量(ml); S_0 表示裸土坡面的产沙量(g); S_i 表示植被恢复坡面的产沙量(g)。

2 结果与分析

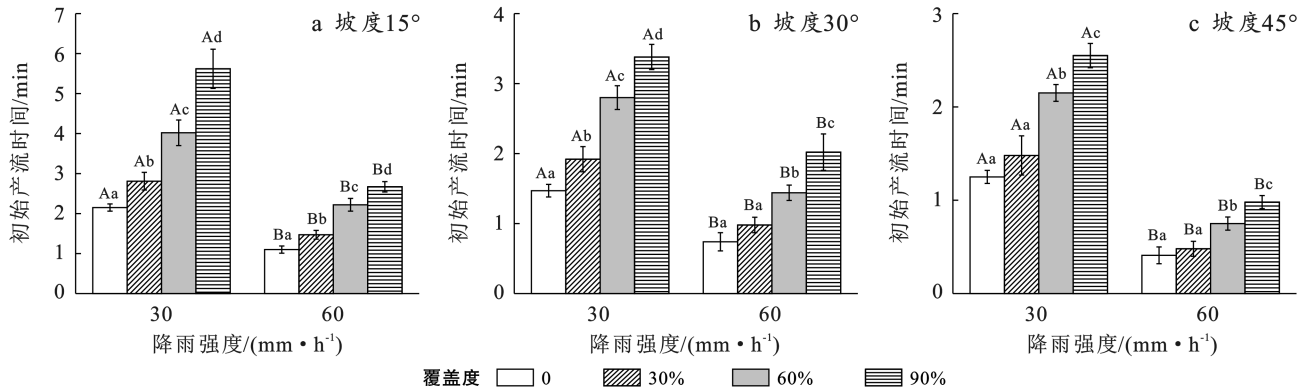
2.1 不同覆盖度植被恢复坡面产流过程

在 30, 60 mm/h 降雨强度时,上、下边坡植被恢复坡面的初始产流时间均大于裸土坡面。上边坡在 3 种坡度(15°, 30°, 45°)条件下,当雨强为 30 mm/h 时,裸土坡面初始产流时间为 1.3~2.2 min, 30%, 60%, 90% 植被覆盖度坡面初始产流时间相比裸土坡面分别延长 19%~30%, 72%~89%, 104%~160%;当雨强为 60 mm/h 时,裸土坡面初始产流时间为 0.4~1.1 min, 30%, 60%, 90% 植被覆盖度坡面相比裸土坡面分别延长 21%~42%, 99%~111%, 147%~175%(图 3)。下边坡在 3 种坡度条件下,当雨强为 30 mm/h 时,裸土坡面初始产流时间为 2.9~3.7 min, 30%, 60%, 90% 植被覆盖度坡面初始产流时间相比裸土坡面分别延长 14%~30%, 49%~63%, 61%~97%;当雨强为 60 mm/h 时,裸土坡面初始产流时间为 1.1~2.0 min, 30%, 60%, 90% 植被覆盖度坡面相比裸土坡面分别延长 13%~18%, 40%~82%, 72%~112%(图 4)。上、下边坡坡面植被覆盖度越大,对初始产流时间延长作用越大,初始产流时间随雨强的增大而明显缩短($p < 0.05$)。在坡度、植被覆盖度、雨强一致条件下,上边坡初始产流时间短于下边坡。

上、下边坡在不同雨强条件下的产流速率均在初始产流后先增大再趋于稳定。产流时间越长,产流速率波动幅度越小。上边坡在 3 个坡度条件下,当雨强为 30 mm/h 时,0%, 30%, 60%, 90% 植被覆盖度坡

面最终稳定产流速率分别为 382~673, 283~354, 138~205, 95~163 ml/(min·m²); 当雨强为 60 mm/h 时, 0%, 30%, 60%, 90% 植被覆盖度坡面最终稳定产流速率分别为 807~1 139, 598~927, 311~562, 255~595 ml/(min·m²)。下边坡在 3 个坡度条件下, 当雨强为 30 mm/h 时, 0%, 30%, 60%, 90% 植被覆盖度坡面最终稳定产流速率分别为 313~538, 277~340, 119~181, 102~140 ml/(min·m²); 当雨强

为 60 mm/h 时, 0%, 30%, 60%, 90% 植被覆盖度坡面最终稳定产流速率分别为 728~1 030, 534~705, 217~335, 231~342 ml/(min·m²)。植被覆盖度在 0%~60% 范围内, 上、下边坡最终稳定产流速率随植被覆盖度的增加而逐渐降低, 60% 与 90% 植被覆盖度的最终稳定产流速率范围接近。最终稳定产流速率随坡度、雨强的增大而增加, 且上边坡最终稳定产流速率在相同条件下大于下边坡(图 5—6)。



注: 图中不同小写字母表示在同一坡度、雨强条件下, 坡面初始产流时间在不同植被覆盖度间差异显著 ($p < 0.05$); 图中不同大写字母表示在同一坡度、植被覆盖度条件下, 坡面初始产流时间在不同雨强间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

图 3 上边坡不同覆盖度植被恢复坡面的初始产流时间

Fig.3 Initial runoff generation time of vegetation restoration with different coverage on upper slope

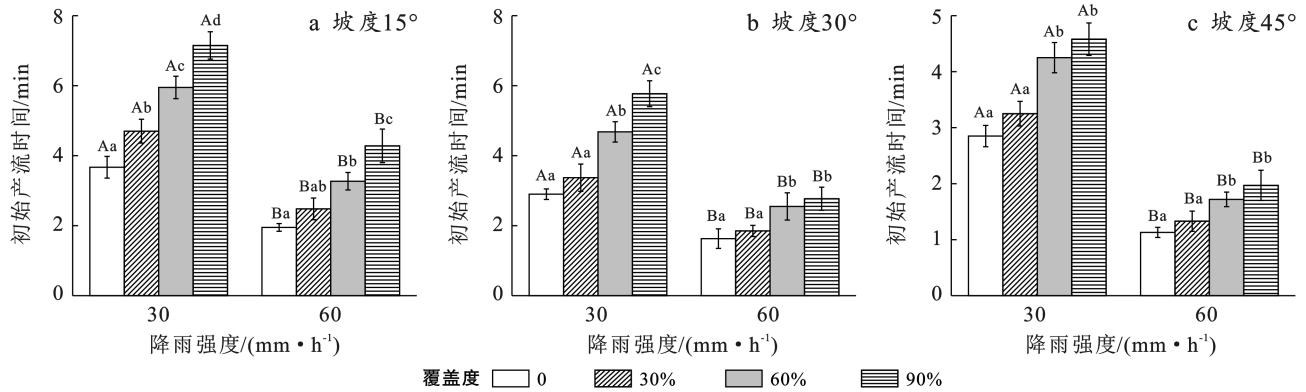


图 4 下边坡不同覆盖度植被恢复坡面的初始产流时间

Fig.4 Initial runoff generation time of vegetation restoration with different coverage on lower slope

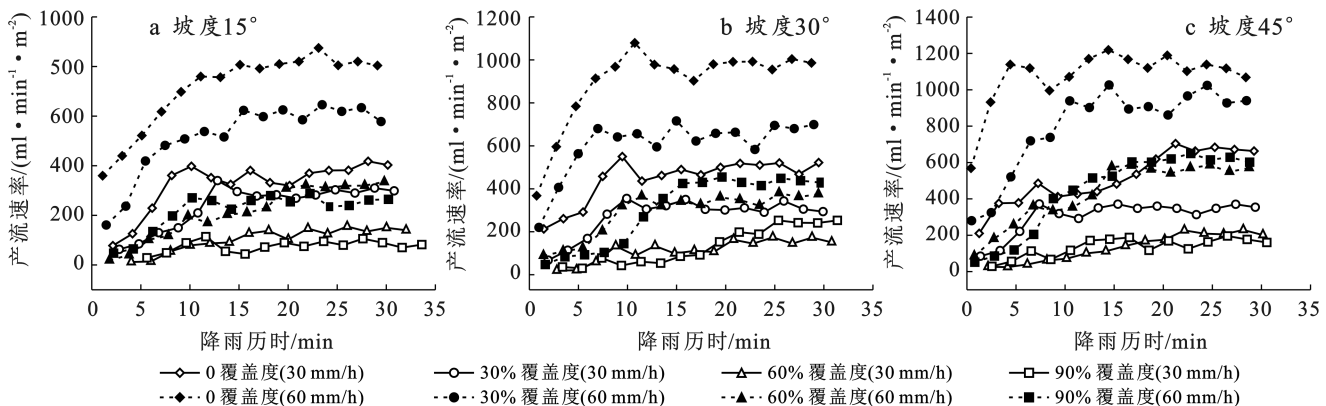


图 5 上边坡不同覆盖度植被恢复坡面的产流速率

Fig.5 Runoff rate of vegetation restoration with different coverage on upper slope

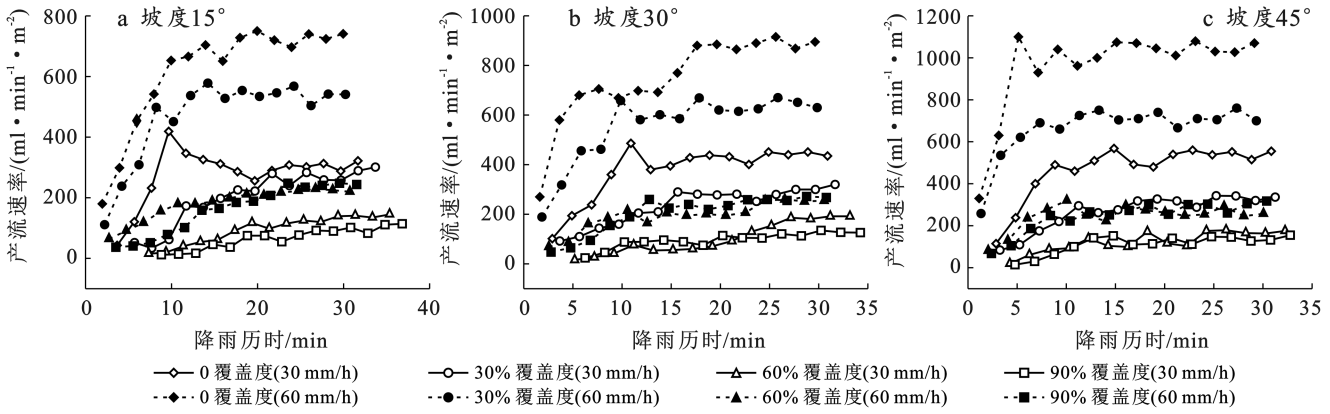


图 6 下边坡不同覆盖度植被恢复坡面的产流速率

Fig.6 Runoff rate of vegetation restoration with different coverage on lower slope

与裸土坡面相比,植被覆盖能有效减少径流量。上边坡在 3 个坡度条件下,当雨强为 30 mm/h 时,裸土坡面径流量为 4 856~7 752 ml,30%,60%,90% 植被覆盖度坡面相比裸土坡面减流效益在 26%~

41%,68%~74%,70%~77%;当雨强为 60 mm/h 时,裸土坡面径流量为 10 688~16 119 ml,30%,60%,90% 植被覆盖度坡面相比裸土坡面减流效益在 25%~32%,59%~70%,58%~69%(表 3—4)。

表 3 上边坡不同覆盖度植被恢复坡面的径流量

Table 3 Runoff of vegetation restoration with different coverage on upper slope

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/(°)	不同植被覆盖度坡面径流量/ml			
		0%覆盖度	30%覆盖度	60%覆盖度	90%覆盖度
30	15	4 856±217 ^a	3 588±143 ^b	1 558±105 ^c	1 140±59 ^d
	30	6 665±316 ^a	4 113±172 ^b	1 722±213 ^c	2 009±307 ^c
	45	7 752±514 ^a	4 567±513 ^b	1 989±145 ^c	2 026±145 ^c
60	15	10 688±712 ^a	7 769±703 ^b	3 204±217 ^c	3 287±279 ^c
	30	13 455±1 524 ^a	9 077±896 ^b	4 336±255 ^c	4 570±367 ^c
	45	16 119±1 397 ^a	11 968±978 ^b	6 514±613 ^c	6 673±378 ^c

注:同行数据后标不同小写字母表示同一雨强、坡度条件下,不同植被覆盖度间差异显著(单因素方差分析, $p<0.05$)。下同。

表 4 上边坡不同覆盖度植被恢复坡面的减流效益

Table 4 Reducing benefits of vegetation restoration with different coverage on upper slope

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	不同植被覆盖度坡面减流效益/%		
		30%覆盖度	60%覆盖度	90%覆盖度
30	15	26±6 ^a	68±4 ^b	77±1 ^c
	30	38±5 ^a	74±4 ^b	70±3 ^b
	45	41±7 ^a	74±3 ^b	74±1 ^b
60	15	27±11 ^a	70±4 ^b	69±3 ^b
	30	32±7 ^a	67±5 ^b	66±3 ^b
	45	25±12 ^a	59±5 ^b	58±5 ^b

下边坡在 3 个坡度条件下,当雨强为 30 mm/h 时,裸土坡面径流量为 4 165~7 013 ml,30%,60%,90% 植被覆盖度坡面相比裸土坡面减流效益在 27%~43%,66%~74%,74%~76%;当雨强为 60 mm/h 时,裸土坡面径流量为 9 249~14 398 ml,30%,60%,90% 植被覆盖度坡面相比裸土坡面减流效益在 24%~31%,71%~75%,73%~75%(表 5—6)。当植被覆盖度为 0%~60%时,上、下边坡径流量随覆盖度的增加而显著减小($p<0.05$),减流效益随覆盖度的增加而显著提升($p<0.05$),60% 植被覆盖度的径流量和减流效益与 90% 植被覆盖度差异不明显($p>0.05$)。

表 5 下边坡不同覆盖度植被恢复坡面的径流量

Table 5 Runoff of vegetation restoration with different coverage on lower slope

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/(°)	不同植被覆盖度坡面径流量/ml			
		0%覆盖度	30%覆盖度	60%覆盖度	90%覆盖度
30	15	4 165±512 ^a	3 045±317 ^b	1 416±167 ^c	1 007±145 ^c
	30	5 631±479 ^a	3 503±412 ^b	1 529±245 ^c	1 452±277 ^c
	45	7 013±764 ^a	4 013±625 ^b	1 849±312 ^c	1 686±274 ^c
60	15	9 249±567 ^a	7 039±823 ^b	2 702±253 ^c	2 433±312 ^c
	30	11 262±934 ^a	8 330±632 ^b	2 906±375 ^c	3 048±217 ^c
	45	14 398±1 216 ^a	9 934±689 ^b	3 641±417 ^c	3 665±455 ^c

同时,随着雨强增加,上边坡植被减流效益有一定幅度的减小。对比表 3 和表 5 可以发现,在坡度、植被覆盖度、雨强条件一致时,上边坡径流量大于下边坡。

表 6 下边坡不同覆盖度植被恢复坡面的减流效益

Table 6 Reducing benefits of vegetation restoration with different coverage on lower slope

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	不同植被覆盖度坡面减流效益/%		
		30%覆盖度	60%覆盖度	90%覆盖度
30	15	27±7 ^a	66±1 ^b	76±3 ^c
	30	37±13 ^a	73±4 ^b	74±6 ^b
	45	43±8 ^a	74±8 ^b	76±4 ^b
60	15	24±9 ^a	71±1 ^b	74±3 ^b
	30	26±10 ^a	74±5 ^b	73±4 ^b
	45	31±2 ^a	75±5 ^b	75±3 ^b

2.2 不同覆盖度植被恢复坡面产沙过程

上边坡产沙速率曲线基本表现为“单峰”形,随着降雨历时的推移,产沙速率急速上升达到峰值后降低

并趋于稳定(图 7)。上边坡在 3 个坡度条件下,当雨强为 30 mm/h 时,0%,30%,60%,90%植被覆盖度坡面最终稳定产沙速率分别为 0.32~3.01,0.19~0.58,0.10~0.21,0.06~0.11 g/(min·m²);当雨强为 60 mm/h 时,0%,30%,60%,90%植被覆盖度坡面最终稳定产沙速率分别为 2.27~11.17,1.50~4.42,0.26~0.73,0.15~0.72 g/(min·m²)。上边坡稳定产沙速率随植被覆盖度的增加而降低,雨强增大,坡面稳定产沙速率增大。下边坡产沙速率随降雨历时的变化呈“多峰多谷”的趋势,产沙速率剧烈波动(图 8)。下边坡在 3 个坡度条件下,当雨强为 30 mm/h 时,0%,30%,60%,90%植被覆盖度坡面产沙速率分别为 0.28~9.83,0.16~2.13,0.05~0.53,0.03~0.34 g/(min·m²);当雨强为 60 mm/h 时,0%,30%,60%,90%植被覆盖度坡面产沙速率分别为 0.50~23.83,0.18~7.46,0.14~0.92,0.13~0.59 g/(min·m²)。由此可以看出,下边坡产沙速率随植被覆盖度增加而降低,雨强增大,坡面产沙速率增大。

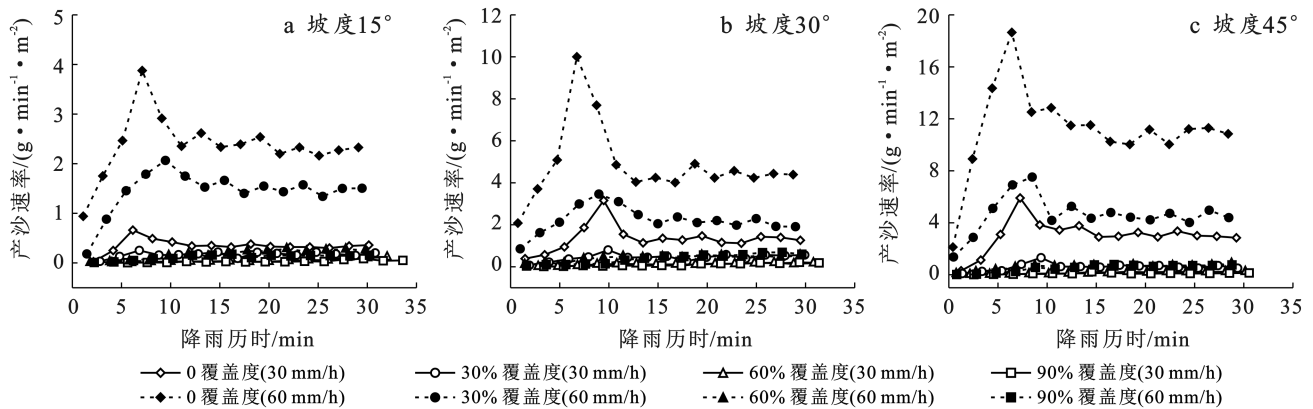


图 7 上边坡不同覆盖度植被恢复坡面的产沙速率

Fig.7 Sediment production rate of vegetation restoration with different coverage on upper slope

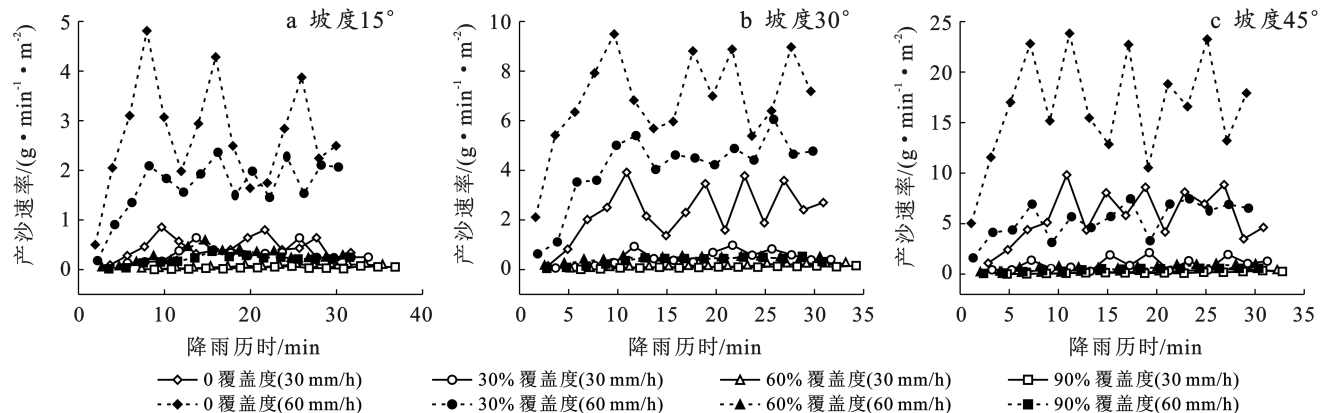


图 8 下边坡不同覆盖度植被恢复坡面的产沙速率

Fig.8 Sediment production rate of vegetation restoration with different coverage on lower slope

与裸土坡面相比,植被覆盖能有效减少产沙量。上边坡在 3 个坡度条件下,当雨强为 30 mm/h 时,裸

土坡面产沙量为 5.22~45.72 g,30%,60%,90%植被覆盖度坡面相比裸土坡面减沙效益分别为 51%~

80%,87%~95%,91%~97%;当雨强为 60 mm/h 时,裸土坡面产沙量为 35.48~167.29 g,30%,60%,90%植被覆盖度坡面相比裸土坡面减沙效益分别为 39%~59%,91%~95%,92%~95%(表 7—8)。

表 7 上边坡不同覆盖度植被恢复坡面的产沙量

Table 7 Sediment yield of vegetation restoration with different coverage on upper slope

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	不同植被覆盖度坡面减沙量/g			
		0%覆盖度	30%覆盖度	60%覆盖度	90%覆盖度
30	15	5.22±0.39 ^a	2.55±0.27 ^b	0.69±0.04 ^c	0.48±0.05 ^c
	30	20.08±2.20 ^a	6.66±0.45 ^b	1.72±0.15 ^c	1.52±0.12 ^c
	45	45.72±4.32 ^a	9.04±1.23 ^b	2.11±0.14 ^c	1.45±0.16 ^c
60	15	35.48±2.15 ^a	21.62±1.45 ^b	2.55±0.26 ^c	1.77±0.11 ^c
	30	72.50±5.33 ^a	33.46±2.45 ^b	6.15±0.63 ^c	5.89±0.47 ^c
	45	167.29±13.42 ^a	69.10±3.16 ^b	8.76±0.66 ^c	7.90±0.52 ^c

表 8 上边坡不同覆盖度植被恢复坡面的减沙效益

Table 8 Sediment reduction benefits of vegetation restoration with different coverage on upper slope

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	不同植被覆盖度坡面减流效益/%		
		30%覆盖度	60%覆盖度	90%覆盖度
30	15	51±9 ^a	87±2 ^b	91±1 ^b
	30	67±2 ^a	91±1 ^b	92±1 ^b
	45	80±4 ^a	95±1 ^b	97±1 ^b
60	15	39±3 ^a	93±1 ^b	95±1 ^b
	30	54±1 ^a	91±2 ^b	92±1 ^b
	45	59±4 ^a	95±1 ^b	95±1 ^b

下边坡在 3 个坡度条件下,当雨强为 30 mm/h 时,裸土坡面产沙量为 6.75~85.95 g,30%,60%,90%

植被覆盖度坡面相比裸土坡面减沙效益分别为 29%~82%,86%~96%,92%~97%;当雨强为 60 mm/h 时,裸土坡面产沙量为 40.07~246.77 g,30%,60%,90%植被覆盖度坡面相比裸土坡面减沙效益分别为 37%~67%,90%~96%,92%~97%(表 9—10)。植被覆盖对减沙效益的影响比对减流效益的影响更为显著,植被覆盖度为 0%~60%时,减沙效益随植被覆盖度的增加而大幅上升($p<0.05$),当植被覆盖度 $>60%$ 时,植被覆盖度的增加不再引起减沙效益的明显升高($p>0.05$),在不同坡度、不同雨强条件下,当植被覆盖为 60%时,上、下边坡的减沙效益分别为 87%~95%,86%~96%。对比表 7 和表 9 可以看出,下边坡产沙量在坡度、覆盖度、雨强条件一致时大于上边坡。

表 9 下边坡不同覆盖度植被恢复坡面的产沙量

Table 9 Sediment yield of vegetation restoration with different coverage on lower slope

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	不同植被覆盖度坡面减沙量/g			
		0%覆盖度	30%覆盖度	60%覆盖度	90%覆盖度
30	15	6.75±0.32 ^a	4.78±0.51 ^b	0.95±0.07 ^c	0.51±0.05 ^c
	30	34.66±2.76 ^a	7.12±0.57 ^b	1.93±0.16 ^c	1.37±0.18 ^c
	45	85.95±8.11 ^a	15.06±0.90 ^b	3.55±0.20 ^c	2.16±0.27 ^c
60	15	40.07±3.27 ^a	25.13±3.11 ^b	4.00±0.03 ^c	3.05±0.17 ^c
	30	102.39±11.23 ^a	61.43±0.42 ^b	6.21±0.32 ^c	5.44±0.36 ^c
	45	246.77±21.33 ^a	81.01±5.16 ^b	9.20±0.67 ^c	6.68±0.21 ^c

表 10 下边坡不同覆盖度植被恢复坡面的减沙效益

Table 10 Sediment reduction benefits of vegetation restoration with different coverage on lower slope

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/ (°)	不同植被覆盖度坡面减流效益/%		
		30%覆盖度	60%覆盖度	90%覆盖度
30	15	29±10 ^a	86±1 ^b	92±1 ^b
	30	79±3 ^a	94±1 ^b	96±1 ^b
	45	82±1 ^a	96±1 ^b	97±1 ^b
60	15	37±12 ^a	90±1 ^b	92±1 ^b
	30	40±7 ^a	94±1 ^b	95±1 ^b
	45	67±1 ^a	96±1 ^b	97±1 ^b

2.3 不同植被覆盖度对径流含沙量影响

上、下边坡在同一坡度、雨强条件下的裸土坡面径流含沙率显著大于植被覆盖坡面。上边坡 0%,30%植被覆盖度坡面径流含沙率曲线随时间延续先快速上升至峰值后逐渐降低,60%,90%植被覆盖度坡面径流含沙率曲线波动范围很小(图 9)。下边坡 0%,30%植被覆盖度坡面径流含沙率曲线随时间延续呈现上下波动特征,60%,90%植被覆盖度坡面径流含沙率曲线波动较为稳定(图 10)。上、下边坡在同一坡度、雨强条件下,60%和 90%的径流含沙率接近且均显著低于 30%植被覆盖时的径流含沙率。

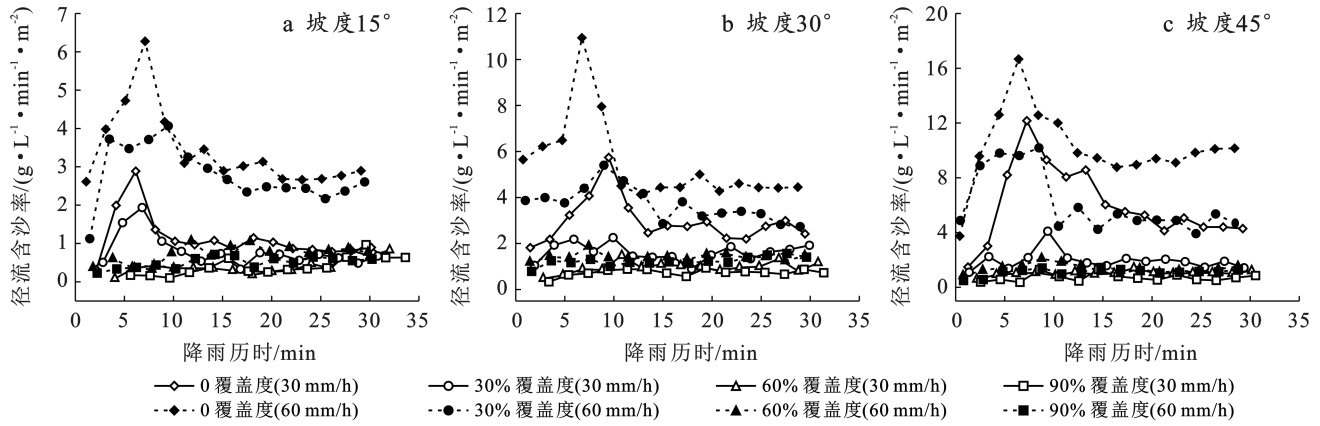


图9 上边坡不同覆盖度植被恢复坡面的径流含沙率

Fig.9 Runoff sediment concentration of vegetation restoration slope with different coverage on upper slope

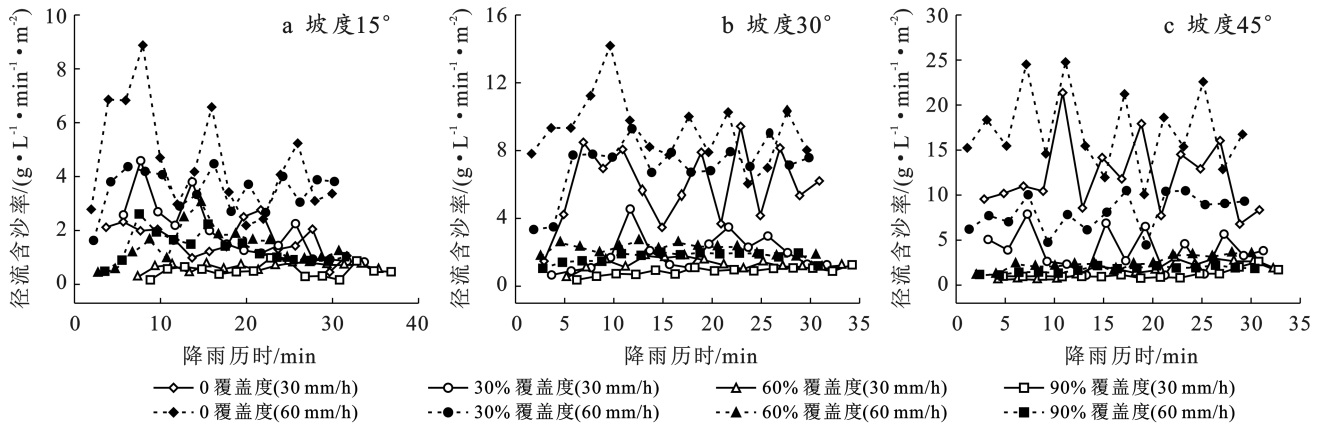


图10 下边坡不同覆盖度植被恢复坡面的径流含沙率

Fig.10 Runoff sediment concentration of vegetation restoration slope with different coverage on lower slope

径流含沙量变化能有效衡量水土流失严重性,是评价不同程度植被恢复坡面产流和产沙的交互演变过程特征的重要指标^[18]。

由表 11—12 可以看出,上、下边坡 0%, 30%, 60%, 90% 植被覆盖度坡面的径流含沙量均随降雨强度、坡度的增大而增大。上边坡在 3 种坡度下,当雨强为 30 mm/h 时,30%, 60%, 90% 植被覆盖度的径流含沙量分别为裸土坡面的 34%~66%, 18%~41%, 12%~39%; 当雨强为 60 mm/h 时,30%, 60%, 90% 植被覆盖度的径流含沙量分别为裸土坡面

的 55%~84%, 13%~26%, 11%~24%。下边坡在 3 种坡度下,当雨强为 30 mm/h 时,30%, 60%, 90% 植被覆盖度的径流含沙量分别为裸土坡面的 31%~97%, 16%~42%, 10%~32%; 当雨强为 60 mm/h 时,30%, 60%, 90% 植被覆盖度的径流含沙量分别为裸土坡面的 48%~83%, 15%~34%, 11%~29%。上、下边坡 60% 与 90% 植被覆盖度的径流含沙量接近,显著降低至裸土坡面的 10%~42% ($p < 0.05$)。值得注意的是,在坡度、植被覆盖度、雨强一致的条件下,下边坡径流含沙量总是高于上边坡。

表 11 上边坡不同覆盖度植被恢复坡面的径流含沙量

Table 11 Runoff sediment concentration of vegetation restoration slope with different coverage on upper slope

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/(°)	不同植被覆盖度坡面径流含沙量/(g·L ⁻¹)			
		0%覆盖度	30%覆盖度	60%覆盖度	90%覆盖度
30	15	1.08±0.07 ^a	0.71±0.05 ^b	0.44±0.01 ^c	0.42±0.05 ^c
	30	3.03±0.46 ^a	1.62±0.07 ^b	1.00±0.06 ^c	0.77±0.11 ^c
	45	5.94±0.98 ^a	2.01±0.49 ^b	1.07±0.12 ^{bc}	0.72±0.12 ^c
60	15	3.33±0.35 ^a	2.80±0.34 ^b	0.80±0.12 ^c	0.54±0.07 ^c
	30	5.41±0.48 ^a	3.72±0.51 ^b	1.42±0.06 ^c	1.30±0.19 ^c
	45	10.43±1.19 ^a	5.78±0.25 ^b	1.36±0.21 ^c	1.18±0.05 ^c

表 12 下边坡不同覆盖度植被恢复坡面的径流含沙量

Table 12 Runoff sediment concentration of vegetation restoration slope with different coverage on lower slope

降雨强度/ (mm · h ⁻¹)	坡度/ (°)	不同植被覆盖度坡面径流含沙量/(g · L ⁻¹)			
		0%覆盖度	30%覆盖度	60%覆盖度	90%覆盖度
30	15	1.64 ± 0.25 ^a	1.59 ± 0.32 ^a	0.68 ± 0.13 ^b	0.52 ± 0.10 ^b
	30	6.18 ± 0.63 ^a	2.06 ± 0.34 ^b	1.29 ± 0.28 ^c	0.97 ± 0.23 ^c
	45	12.38 ± 2.05 ^a	3.81 ± 0.62 ^b	1.96 ± 0.37 ^{bc}	1.30 ± 0.22 ^c
60	15	4.33 ± 0.21 ^a	3.59 ± 0.50 ^b	1.49 ± 0.14 ^c	1.27 ± 0.21 ^c
	30	9.18 ± 1.68 ^a	7.40 ± 0.57 ^b	2.17 ± 0.36 ^c	1.80 ± 0.24 ^c
	45	17.18 ± 1.60 ^a	8.17 ± 0.50 ^b	2.54 ± 0.26 ^c	1.84 ± 0.18 ^c

3 讨论

3.1 便道工程植被恢复对坡面产流的影响

施工便道工程扰动后未进行植被恢复的上、下边坡分别在 0.4~2.2 min, 1.1~3.7 min 内快速产流,这是由于裸土坡面在降雨开始后,很快出现沟蚀,因细沟流的存在,极大促进坡面产流,缩短了坡面的初始产流时间^[19]。同时,我们观察到上、下边坡植被恢复坡面初始产流时间均大于裸土坡面,植被覆盖度越大,对初始产流时间延长作用越大,这可能是由于随着覆盖度的增加,减轻雨水溅蚀和提高径流入渗的程度越大^[11],因此初始产流时间延长。随着坡度的增加,初始产流时间均缩短;雨强增大,初始产流时间提前,这与陈泽勋等^[20]对栗钙土坡面野外模拟降雨的研究结果一致。

不同雨强条件下,上、下边坡各植被覆盖度坡面产流速率随时间呈相同规律,即产流初期,产流速率迅速增加,随着降雨时间的持续,产流速率缓慢增加并趋于稳定。出现这样的产流曲线原因,主要是由于降雨初期土壤含水量较低,土壤处于非饱和状态,下垫面入渗强度较大,降雨能够实现快速入渗,无地表径流产生^[21]。随着降雨历时的延长,土体快速湿润,土壤含水量上升,伴随细颗粒物堵塞土壤孔隙,土壤入渗率快速减小,坡面迅速形成径流,且产流速率急速增大。随着降雨的延续,土壤含水量变幅减小,土壤表面孔隙状况趋于稳定,入渗率波动幅度减小,进入稳渗阶段,产流速率变化趋于平稳^[22]。在 0%~60%植被覆盖度范围内,30%,60%植被覆盖度的稳定产流速率分别为裸土坡面的 69%~76%,35%~38%,上、下边坡稳定产流速率随植被覆盖度的增加而降低,这可能是由于生长密集的植被能够阻碍径流流动,削弱径流动能和单位水流功率,且这一结果与朱慧鑫等^[23]对不同植株密度下褐土坡面的土壤侵蚀研究结果一致,60%与 90%植被覆盖度的稳定产流速率接近,这与朱冰冰等^[24]在宁夏对黄土坡面草本

植被覆盖条件下降雨侵蚀的研究结论一致。当植被覆盖度在 0%~60%时,上、下边坡植被减流效益随覆盖度的增加而增加,60%覆盖度的减流效益(59%~75%)与 90%覆盖度(58%~77%)接近,因此我们判断对于该地区的施工便道扰动坡面,在进行植被恢复时,减流效益的植被临界覆盖度为 60%,大于这一覆盖度能够达到较好的减流效果,Liu Yifan 等^[25]基于以往学者的研究,同样认为植被覆盖度达到 60%以上时,森林和草地的水土流失治理效率最高。

3.2 便道工程植被恢复对坡面产沙的影响

随着坡面径流的产生,水流会挟带地表泥沙,引起坡面土壤流失。李宏伟等^[26]的研究中,将产沙速率随降雨历时的变化曲线分为 3 种:平缓型、单峰型和多峰型。在本研究中,发现上边坡产沙速率整体呈现出单峰型曲线,这可能与地表易侵蚀的物质被快速剥离,细颗粒物被水流带走后,侵蚀速率逐步下降有关^[27]。下边坡产沙速率呈多峰型曲线,这主要由于产流前期,坡面表层松散颗粒物较多,径流挟沙引起产沙速率升高,随着降雨延续,细沟的形成伴随着沟岸坍塌,产沙速率出现“多峰多谷”的现象^[18]。产沙速率随植被覆盖度的增加而减小,30%,60%,90%植被覆盖度的产沙速率分别为裸土坡面的 31%~60%,5%~16%,4%~11%,指示植被对坡面产沙起到抑制和拦截作用^[24]。增加植被覆盖度能显著减小坡面产沙量,这显示随着植被生长,冠层和根系对土壤表层形成保护,对坡面产沙的抑制作用增强^[11]。此外,我们还发现植被覆盖度变化对减沙的作用强于减流作用,当植被覆盖度 30%时,植被通过机械阻挡、固结松散土体等对泥沙截留沉积,减沙效益达到 29%~82%;当覆盖度 60%时,减沙效益为 86%~96%,且不再随覆盖度增加而明显增加,这与刘纪根等^[28]对紫色土坡面植被覆盖度与产流产沙关系的研究中得到的草地减流效益明显低于减沙效益的结论一致。

上边坡 0%,30%植被覆盖度径流含沙率曲线先

快速增加后逐步减小,这可能是由于上边坡开挖削坡使地表结构受到扰动,剥离了原有抗蚀能力强的地表,表土失去植被保护,加速土壤侵蚀,在降雨条件下短时间内径流含沙率快速上升,而后细颗粒物被水流带走,侵蚀速率逐步下降^[29]。下边坡0%,30%覆盖度径流含沙率曲线上下连续波动,这可能是由于下边坡为填方坡面,细沟侵蚀伴随着重力侵蚀使细沟变宽^[30],沟内流速增大而径流挟沙力增大,从而径流含沙率增大。上、下边坡裸土坡面径流含沙率曲线较高,随着植被恢复而降低,说明植被固土蓄水、拦截泥沙输移的作用明显^[31]。60%植被覆盖度坡面的径流含沙率曲线,相比裸土坡面及30%植被覆盖度坡面显著降低,表明较为密集的植被分布能够明显减缓侵蚀,降低坡面径流的挟沙能力^[32]。上、下边坡径流含沙量随植被覆盖度的增加而大幅降低,60%与90%植被覆盖度的径流含沙量接近,显著降低至裸土坡面的10%~42%。60%,90%覆盖度拦截径流及泥沙的效果接近,因此,我们判断上、下边坡减流减沙效益的有效植被覆盖度为60%,高于此覆盖度时植被恢复能够达到较好的水土保持效果。在白中科等^[33]对黄土区露天煤矿扰动形成的排土场边坡试验中,控制煤矿剧烈扰动后形成的人工松散堆积体水土流失的有效植被覆盖度在80%以上,有效植被覆盖度高于本研究,其原因可能与该煤矿排土场边坡土壤有机质含量低而容重高有关,本研究中当植被覆盖度恢复到60%左右时,植被的改土效应更为明显。

3.3 上、下边坡的产流产沙差异分析

本试验观察到,在坡度、植被覆盖度、雨强一致的情况下,上边坡初始产流时间短于下边坡,且上边坡稳定产流速率、径流量均大于下边坡;下边坡产沙量及径流含沙量在相同条件下总是大于上边坡。产流方面的差异,可能是由于上边坡为挖方坡面,机械开挖表土,导致松散的表土被剥离,出露的是质地更为紧密的下层土壤,孔隙度低,水分不易保存,导致降雨后产流快、入渗速率低,因此稳定产流速率及径流量相比填方形成的下边坡更大^[34]。产沙形成差异的原因,一方面可能是挖方形成的上边坡与填方形成的下边坡相比,容重较大,水稳性团聚体组成中,粒径 $>0.25\text{ mm}$ 的大团聚体比例较高,上边坡土壤抗蚀性强于下边坡,进而导致下边坡产沙量高于上边坡;另一方面,可能由于填方形成的下边坡土体较为松散,土壤颗粒间的黏聚力较小,易形成细沟侵蚀,随着降雨历时的延长,形成的细沟增多,坡面侵蚀产沙量随之显著增加^[5]。

4 结论

(1) 施工便道工程扰动后,随着边坡植被恢复程度的增加,延缓初始产流时间的效果增强,且植被的延缓产流效应在上边坡更为明显。

(2) 在0%~60%植被覆盖度范围内,减流效益和减沙效益均随植被覆盖度的增加而增大,当覆盖度大于60%时,减流效益稳定在58%~77%,减沙效益稳定在86%~97%,说明60%植被覆盖度已能达到较好的减流减沙效果。

(3) 植被覆盖度在60%以下时,径流含沙量随植被覆盖度的增加而大幅降低,超过此临界覆盖度,覆盖度的增加对径流含沙量的影响不再显著,稳定至裸土坡面的10%~42%,表明60%植被覆盖度具有较好的保土效果。

(4) 在相同植被覆盖度、坡度和雨强条件下,上边坡总产流量高于下边坡,而下边坡总产沙量高于上边坡,这反映出挖方形成的上边坡更需要“控水”,填方形成的下边坡要偏重“阻沙”,充分考虑其差异才能在施工便道扰动区达到更好的水土保持效果。

致谢:感谢中国铁道科学研究院集团有限公司节能环保劳卫研究所刘兰华、何财松和周杨对试验的大力支持和帮助,谨在此致以诚挚的谢意!

参考文献 (References)

- [1] 王小丹,程根伟,赵涛,等.西藏生态安全屏障保护与建设成效评估[J].中国科学院院刊,2017,32(1):29-34.
Wang Xiaodan, Cheng Genwei, Zhao Tao, et al. Assessment on protection and construction of ecological safety shelter for Tibet [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017,32(1):29-34.
- [2] 陈佳锐,李佳洛,马仁锋,等.青藏高原区域开发强度与生态安全的时空耦合演进[J].生态学报,2023,43(10):4039-4053.
Chen Jiarui, Li Jiaming, Ma Renfeng, et al. Spatio-temporal coupling between regional development intensity and ecological security on the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(10):4039-4053.
- [3] 许益国.浅谈高原山区铁路施工便道设计原则与建设要点[J].铁路工程技术与经济,2020,35(1):29-32.
Xu Yiguo. Discussion on the design principle and construction key points of railway construction road in plateau mountainous areas [J]. Railway Engineering Technology and Economy, 2020,35(1):29-32.
- [4] Olagunju A O, Gunn J A E. Selection of valued ecosystem components in cumulative effects assessment: Les-

- sons from Canadian Road construction projects [J]. Impact Assessment and Project Appraisal, 2015, 33(3): 207-219.
- [5] 曹鹏会. 新建崇礼铁路施工期水力侵蚀规律研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Cao Penghui. Study on hydraulic erosion law of new Chongli Railway during construction period [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [6] Ziegler A D, Giambelluca T W. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand [J]. Journal of Hydrology, 1997, 196(1/2/3/4): 204-229.
- [7] Forman R T T, Sperling D, Bissonette J A, et al. Road Ecology: Science and Solutions [M]. Washington D C: Island Press, 2003: 128-190.
- [8] 沈海鸥, 刘健, 王宇, 等. 降雨强度和坡度对黑土区土质道路路面侵蚀特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(6): 123-126.
Shen Haiou, Liu Jian, Wang Yu, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion characteristics of farmland unpaved road in black soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(6): 123-126.
- [9] 苗连朋, 温仲明, 张莉. 植被变化与水沙响应关系研究: 以延河流域为例[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(5): 75-81.
Miao Lianpeng, Wen Zhongming, Zhang Li. Study on the relationship between vegetation change and runoff-sediment: A case of the Yanhe Basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(5): 75-81.
- [10] Sun Dan, Zhang Weixin, Lin Yongbiao, et al. Soil erosion and water retention varies with plantation type and age [J]. Forest Ecology and Management, 2018, 422: 1-10.
- [11] Zhao Chunhong, Gao Jian'en, Huang Yuefei, et al. The contribution of astragalus adsurgens roots and canopy to water erosion control in the water-wind crisscrossed erosion region of the Loess Plateau, China [J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(1): 265-273.
- [12] 张华国, 汤晓玉. 西藏现代农牧业循环发展模式探讨[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(8): 1275-1283.
Zhang Huaguo, Tang Xiaoyu. Circular development modes of modern agriculture and animal husbandry in Tibet [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(8): 1275-1283.
- [13] 王明涛, 高国荣, 苗彦军, 等. 拉林公路生态袋护坡植被和土壤现状及关联性研究[J]. 中国草地学报, 2023, 45(4): 67-73.
Wang Mingtao, Gao Guorong, Miao Yanjun, et al. Study on the current situation and correlation between vegetation and soil of ecological bag slope protection in lalin highway [J]. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(4): 67-73.
- [14] 苏激娜, 田一梅, 高波, 等. 人工模拟降雨装置的设计及其参数率定[J]. 水土保持通报, 2015, 35(6): 120-123.
Su Weina, Tian Yimei, Gao Bo, et al. Design and calibration of an artificial rainfall simulator [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(6): 120-123.
- [15] 盛贺伟, 郑粉莉, 蔡强国, 等. 降雨强度和坡度对粘黄土坡面片蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(6): 13-17.
Sheng Hewei, Zheng Fenli, Cai Qiangguo, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on sheet erosion at the clay loess hillslope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(6): 13-17.
- [16] 彭旭东, 戴全厚, 李昌兰, 等. 模拟雨强和地下裂隙对喀斯特地区坡耕地养分流失的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 131-140.
Peng Xudong, Dai Quanhou, Li Changlan, et al. Effect of simulated rainfall intensities and underground pore fissure degrees on soil nutrient loss from slope farmlands in Karst Region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 131-140.
- [17] 姜义亮, 郑粉莉, 温磊磊, 等. 降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀的影响试验研究[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8207-8215.
Jiang Yiliang, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. An experimental study on the impacts of rainfall and inflow on hillslope soil erosion in typical black soil regions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8207-8215.
- [18] 崔钦凯, 刘俊娥, 陈浩, 等. 草被覆盖、雨强和坡度对黄土坡面径流含沙量的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(5): 40-47.
Cui Qinkai, Liu June, Chen Hao, et al. Influence of grass coverage, rain intensity and slope on sediment concentration of runoff on loess slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 40-47.
- [19] 王振龙, 杜明成, 姜翠玲, 等. 基于人工降雨试验的淮东北地区产流产沙差异性研究[J]. 水科学进展, 2019, 30(4): 507-514.
Wang Zhenlong, Du Mingcheng, Jiang Cuiling, et al. Difference of runoff and sediment yield under various experimental conditions for the Huaibei Area based on artificial rainfall simulations [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(4): 507-514.
- [20] 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 Zexun, Liu Tingxi, Wang Yixuan, et al. Quanti-

- tative 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.
- [21] 魏小燕, 毕华兴, 霍云梅. 不同土壤坡面产流产沙特征对比分析[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4):44-48.
Wei Xiaoyan, Bi Huaxing, Huo Yunmei. Comparative analysis of the features of runoff and sediment yield on the different soil slopes [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4):44-48.
- [22] 奚成刚, 杨成永, 许兆义. 铁路工程施工工期路堑边坡面产流产沙规律研究[J]. *中国环境科学*, 2002, 22(2):174-178.
Xi Chenggang, Yang Chengyong, Xu Zhaoyi. Studies on rules of runoff and sediment yield on the road cutting slope during construction of the railway [J]. *China Environmental Science*, 2002, 22(2):174-178.
- [23] 朱慧鑫, 胡晓静, 程金花, 等. 草被覆盖下坡面流土土壤侵蚀水动力学特征[J]. *东北农业大学学报*, 2018, 49(7):48-57.
Zhu Huixin, Hu Xiaojing, Cheng Jinhua, et al. Hydrodynamic characteristics of soil erosion in overland flow under grass coverage [J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2018, 49(7):48-57.
- [24] 朱冰冰, 李占斌, 李鹏, 等. 草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J]. *土壤学报*, 2010, 47(3):401-407.
Zhu Bingbing, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Effect of grass coverage on sediment yield of rain on slope [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(3):401-407.
- [25] Liu Yifan, Liu Yu, Shi Zhihua, et al. Effectiveness of re-vegetated forest and grassland on soil erosion control in the semi-arid Loess Plateau [J]. *CATENA*, 2020, 195:104787.
- [26] 李宏伟, 王文龙, 王贞, 等. 神东煤田原地面侵蚀产沙规律野外降雨试验[J]. *中国农业大学学报*, 2013, 18(2):195-201.
Li Hongwei, Wang Wenlong, Wang Zhen, et al. Effect of simulated rainfall experiments on soil erosion and sediment yield of the undisturbed lands in Shendong Coalfield [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(2):195-201.
- [27] 夏晓平, 信忠保, 赵云杰, 等. 北京山区河岸植被的水土保持效益[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5):71-77.
Xia Xiaoping, Xin Zhongbao, Zhao Yunjie, et al. Soil and water conservation benefits of riparian vegetation in Beijing mountainous area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5):71-77.
- [28] 刘纪根, 张昕川, 李力, 等. 紫色土坡面植被覆盖度对水土流失影响研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3):16-20.
Liu Jigen, Zhang Xinchuan, Li Li, et al. Research of effect of vegetation coverage on soil and water loss in purple soil slope land [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3):16-20.
- [29] 王伦江, 张兴昌, 苜蓿影响砒砂岩陡坡侵蚀的水动力学机理研究[J]. *土壤学报*, 2020, 57(2):284-295.
Wang Lunjiang, Zhang Xingchang. Hydraulic mechanism of alfalfa controlling soil erosion on steep slopes of pisha-sandstone [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2):284-295.
- [30] 丁文斌, 史东梅, 何文健, 等. 放水冲刷条件下工程堆积体边坡径流侵蚀水动力学特性[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(18):153-161.
Ding Wenbin, Shi Dongmei, He Wenjian, et al. Hydrodynamic characteristics of engineering accumulation erosion under side slope runoff erosion process in field scouring experiment [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(18):153-161.
- [31] 任柯蒙, 卫伟, 赵西宁, 等. 黄土丘陵区坡面植被盖度及其配置格局的水蚀效应模拟[J]. *生态学报*, 2018, 38(22):8031-8039.
Ren Kemeng, Wei Wei, Zhao Xining, et al. Simulation of the effect of slope vegetation cover and allocation pattern on water erosion in the Loess Hilly Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(22):8031-8039.
- [32] 张琪琳, 王占礼, 王栋栋, 等. 黄土高原草地植被对土壤侵蚀影响研究进展[J]. *地球科学进展*, 2017, 32(10):1093-1101.
Zhang Qilin, Wang Zhanli, Wang Dongdong, et al. Advances in researches of the effects of grassland vegetation on soil erosion in Loess Plateau [J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(10):1093-1101.
- [33] 白中科, 王文英, 李晋川, 等. 黄土区大型露天煤矿剧烈扰动土地生态重建研究[J]. *应用生态学报*, 1998, 9(6):621-626.
Bai Zhongke, Wang Wenying, Li Jinchuan, et al. Ecological rehabilitation of drastically disturbed land at large opencut coal mine in loess area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(6):621-626.
- [34] 刘乐, 孙宏义, 蔡忠兰, 等. 兰州新区黄土工程开挖边坡植被重建初期土壤水分初步研究[J]. *冰川冻土*, 2020, 42(3):1007-1016.
Liu Le, Sun Hongyi, Cai Zhonglan, et al. Preliminary study on the soil moisture of slopes of loess in Lanzhou New Area formed by engineering excavation in the early stage of revegetation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2020, 42(3):1007-1016.