

工程堆积体典型生态修复措施对土壤侵蚀水动力过程的影响

周涛^{1,2}, 苏正安^{1*}, 刘刚才¹, 王俊杰^{1,2}, 刘翊涵^{1,3}, 伍佐^{1,4}, 王丽娟^{1,2}

(1.中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041;
2.中国科学院大学, 北京 100049; 3. 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610100;
4. 四川农业大学水利水电学院, 雅安 625014)

摘要: 为探究龙门山断裂带工程堆积体典型生态修复措施下土壤侵蚀产沙和水动力的时间变化特征, 并筛选出水土保持效益最佳的生态修复措施, 该研究以成兰铁路杨家坪隧道 2 号横洞弃渣场为研究对象, 选取该区典型的生态修复植物(苜蓿 (*Medicago sativa*)、燕麦 (*Avena sativa*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)) 和生态修复材料(羊粪、PVAc (聚醋酸乙烯酯, Polyvinyl Acetate)) 进行交互搭配, 利用模拟放水冲刷试验, 研究不同生态修复措施下工程堆积体坡面的径流含沙量和水动力学参数(径流流态、径流流速、径流阻力系数和径流功率等)的变化。结果表明: 1) 试验条件下, 工程堆积体坡面径流含沙量随冲刷时间的增加呈前期波动变化, 后期逐渐稳定的趋势; 径流流态始终处于紊流状态, 径流流速、径流功率随冲刷时间的增加呈逐渐增加—趋于稳定的趋势, 径流阻力系数则呈逐渐减小—趋于稳定的趋势; 2) 各生态修复措施在放水冲刷试验初始阶段的减沙效应最大, 且苜蓿、燕麦、燕麦+PVAc 和刺槐+苜蓿+羊粪处理能够显著增加径流阻力系数, 降低径流流速和径流功率 ($P \leq 0.05$); 3) 在工程堆积体生态修复 1~2 a 后, 草本层的水土保持效果最优, 乔木的保土效应难以得到有效体现, 羊粪和 PVAc 等的添加并不能发挥有效的增幅效果。该研究区工程堆积体在生态修复初期宜采用黄壤+紫苜蓿、黄壤+燕麦的修复措施。

关键词: 侵蚀; 径流; 修复; 工程堆积体; 川西生态屏障区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.09.010

中图分类号: S157.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2022)-09-0091-10

周涛, 苏正安, 刘刚才, 等. 工程堆积体典型生态修复措施对土壤侵蚀水动力过程的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 91-100. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.09.010 <http://www.tcsae.org>

Zhou Tao, Su Zheng'an, Liu Gangcai, et al. Effects of typical ecological restoration measures for engineering accumulation on sediment yield and hydrodynamic process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(9): 91-100. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2022.09.010 <http://www.tcsae.org>

0 引言

工程堆积体作为生产建设项目的副产物, 通常也伴随着一系列的环境问题。生产建设活动中难免人为地对原始岩层和物质进行扰动和重塑, 受限于弃土弃渣的临时性、量大且难以调配, 工程堆积体常存在生境破坏、非点源污染以及滑坡泥石流等次生灾害^[1]。此外, 工程堆积体是中国现阶段水土流失的一个重要来源, 据 2006—2015 年《中国水土保持公报》显示, 中国在“十一五”和“十二五”期间共审批生产建设项目的水土保持方案多达 26.14 万个, 所产生的弃土弃渣量也不低于 450 亿 m^3 ^[2], 生产建设活动中每年所产生的水土流失量约为 8 亿 t, 松散新堆积体的土壤流失量则更大, 侵蚀模数高达 14 000~18 000 $t/(km^2 \cdot a)$ ^[3], 水土流失的严重程度已不容忽视, 且在降雨和径流冲刷的作用下极易产生剧烈水土流失和堆积体失稳等次生灾

害, 工程堆积体的生态修复刻不容缓。

川西生态屏障区生产建设活动中产生的工程堆积体岩土结构、立地条件等均具有明显的地域性。中国川西生态屏障区地质环境复杂, 深切河谷纵横, 各类浅表生时效变形现象发育, 区域内广泛发育和分布着第四纪松散堆积地层, 具有岩层破碎、组分复杂和结构无序等特点, 易衍生随机性、复发性和多发性的地质灾害^[4-5], 据报道显示, 在建成兰铁路约 70% 的段落岩体为千枚岩、板岩等软弱岩层, 且在建设过程中多处隧道出现了不同程度的软岩变形破坏现象, 尤其是处于成都至川主寺段的松潘隧道、榴桐寨隧道和杨家坪隧道等。西部大开发战略实施以来, 受地质和地形的影响, 该区域生产建设工程中常涉及隧道开挖, 隧道开挖后形成的大型工程堆积体具有与原生下垫面显著不同的岩土和生境条件: 1) 岩土组成中以破碎砾石和岩石为主; 2) 岩土结构差, 养分、水分匮乏, 生境恶劣, 植被成活率低; 3) 高陡边坡(坡度一般在 37°左右)导致水土流失严重, 植被难以成活^[6]。相关研究表明, 位于川西生态屏障区的龙门山断裂带广泛发育着糜棱岩和千枚岩等软弱岩层, 岩层具有明显的破碎带^[7], 且该区域高速公路、铁路建设等的工程形式以隧道为主, 产生的弃渣量大且可利用性低, 在重力和降雨的作用下

收稿日期: 2022-02-15 修订日期: 2022-03-25

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0307); 四川省科技计划项目(2022YFS0500, 2018SZDZX0034)

作者简介: 周涛, 博士, 研究方向为水土保持与生态修复。

Email: zhoutao@imde.ac.cn

*通信作者: 苏正安, 博士, 副研究员, 研究方向为土壤侵蚀和水土保持。

Email: suzhengan@imde.ac.cn

易产生滑坡、崩塌等地质灾害^[8], 调查显示, 汶马高速公路汶川至理县段共有 27 处厚度达 25 m 以上的千枚岩堆积体, 在 2016 年雨季期间共发生 4 处滑坡、1 处泥石流、13 处溜坍^[9]。近年来, 川西生态屏障区的基础设施建设水平和公共服务能力不断提高, 出于该区域的生态屏障价值和建设安全等方面考虑, 工程堆积体的生态修复工作具有极大的必要性和迫切性。

工程堆积体的生态修复需协同考虑植被重建、基质改良和生境恢复等, 相关的生态修复技术已颇为广泛和成熟。工程堆积体的生态修复理论可追溯到恢复生态学, 认为恢复是破坏过程的逆向演替, 可通过生态系统的自然演替或人工诱导实现^[10]。相关研究表明, 砾石为主的工程堆积体自然恢复的时间大约需要 100~1 000 年^[11], 适当的人为诱导和支持对工程堆积体生态恢复极为重要。目前关于工程堆积体的生态修复方法主要涉及生境改良(客土覆盖, 土壤改良, 生态工程材料的应用)和植被选择(乡土植物、耐受植物)两方面。Li 等^[12]对煤矸石堆积体的生态恢复研究发现, 历经 9 年的生态修复期后, 不同先锋植物群落的生长发育可在不同程度上显著改善堆积体表层土壤(0~10 cm)的质量, 增加土壤持水能力和土壤肥力; Zheng 等^[13]研发了一种新型改良剂: 聚丙烯酰胺-磁铁矿(PAM-MAG), 并通过人工降雨模拟试验测试其在矿区堆积体生态修复中的作用, 结果表明在土壤中施加 5.985 g/m²的 PAM-MAG 后, 径流的土壤累积损失量降低 90.8%, 径流浊度降低 79.9%。目前关于工程堆积体的生态修复实际应用技术均建立在长期生态系统修复的基础上, 且关于工程堆积体的生态修复时限和质量并没有严格规定和标准^[14], 而新生工程堆积体初期水土流失防治及短期快速的生态修复也非常重要, 关于此方面的研究则鲜有报道。

综上, 本研究选取成兰铁路中铁五局杨家坪隧道 2 号横洞渣场为研究对象, 选择乡土植物、羊粪和 PVAc 等进行典型生态修复措施的构建, 采用径流小区原位放水冲刷模拟试验, 测定其坡面的产流产沙特征, 分析不同修复措施、不同材料的水土保持作用差异, 以查明工程堆积体的水沙变化特征, 筛选工程堆积体快速生态修复的适宜措施, 以期为西南山区工程堆积体的生态修复提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省阿坝藏族羌族自治州茂县土门镇(31°45'20.15" N, 104°2'27.50" E, 海拔 1 223 m), 属涪江流域, 气候类型为温暖湿润季风气候区, 年均气温 11~13.7 °C, 全年降雨量 703~800 mm, 土壤类型以山地黄壤为主。研究区地处青藏高原与四川盆地的过渡地带, 构造单元属龙门山构造断裂带, 具有“四极三高”的特点(即地形切割极为强烈、构造条件极为复杂活跃、岩性条件极为软弱破碎、汶川地震效应极为显著; 高地壳应力、高地震烈度和高地质灾害风险)^[15], 围岩岩性以绿泥石千枚岩为主, 具有弱风化、片理极其发育等特点,

岩质较软且破碎, 围岩稳定性较差, 是青藏高原、长江上游地区生态环境脆弱的高山峡谷区的典型代表^[16]。富顺渣场系成兰铁路中铁五局杨家坪隧道 2 号横洞渣场, 杨家坪隧道于 2012 年 12 月开始施工, 并按规划就近堆置弃渣, 堆置方式主要为沟道倾倒堆积, 区域内工程堆积体上的植被类型以灌草为主, 附带少量的乔木, 优势物种包括刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、栎栎(*Quercus serrata*)、大籽蒿(*Artemisia sieversiana*)、千里光(*Senecio scandens*)、燕麦(*Avena sativa*)、苜蓿(*Medicago sativa*)等。

1.2 研究方法

工程堆积体生态修复模拟试验于成兰铁路中铁五局杨家坪隧道 2 号横洞渣场进行, 堆积体主要由隧道修建所产生的碎石渣组成, 试验平台选择原位渣场边坡, 坡度为 20°左右。2019 年 4 月, 将试验平台划分为 13 个径流小区, 每个小区规格相同: 长×宽(斜面长度) 8 m×2 m, 坡度 20°, 在每个小区内部进行均匀的人工覆土, 覆土厚度为 40 cm, 且静置待土层自然压实。通过前期植被调查, 选择该区域具有经济价值和水土保持价值的优势乡土植物: 紫苜蓿(*Medicago sativa*)、燕麦(*Avena sativa*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*), 以及经济实惠且无环境危害的土壤改良材料: 羊粪、PVAc(聚醋酸乙烯酯, Polyvinyl Acetate)作为该区域工程堆积体生态修复的主要材料。将不同生态修复材料进行混合搭配以配置草本措施、乔草措施以及复合措施共 12 种处理, 并设计裸地措施作为空白对照处理, 具体措施配置情况如表 1 所示。通过当地调查和研究考证, 确定不同材料的具体布设方法: 刺槐的布设采用苗木移栽法, 在径流小区坡面上以 2 m 为间隔进行等间距种植, 每个径流小区坡面共 4 棵; 紫苜蓿和燕麦的布设采用播种法, 以 40 g/m²为标准进行均匀播撒; PVAc 的布设采用液施法, 将浓度为 2%的 PVAc 溶液以 1 L/m²为标准进行均匀喷洒; 羊粪的布设按 5 kg/m²进行均匀铺设。措施布设后, 静待植被 1~2 a 的生长期后, 通过放水冲刷试验探究不同生态修复措施的水土保持效果。

表 1 工程堆积体径流小区生态修复措施
Table 1 Ecological restoration measures in different runoff plots on engineering accumulation

编号 No.	土地利用方式 Land use type	处理 Treatments
CK	裸地	黄壤
MM	草本	黄壤+紫苜蓿+羊粪
MP		黄壤+紫苜蓿+保土剂
M		黄壤+紫苜蓿
AM		黄壤+燕麦+羊粪
AP		黄壤+燕麦+保土剂
A		黄壤+燕麦
RMM	乔草 (草本+刺槐)	黄壤+紫苜蓿+羊粪
RMP		黄壤+紫苜蓿+保土剂
RM		黄壤+紫苜蓿
RAM		黄壤+燕麦+羊粪
RAP		黄壤+燕麦+保土剂
RA		黄壤+燕麦

2020年10月,通过放水冲刷试验探究不同措施的生态修复效果,流量设定为60 L/min,单次试验从坡面产生连续径流开始共持续60 min。试验开始前,将水流通过流量计以均匀流量通入小区上部稳流池内,使水流以均匀稳定的流量和流态进入小区,保证试验的进行。于坡面径流到达径流小区下部出水口时开始计时,试验过程中每隔10 min于坡面由上至下0~2、2~4、4~6、6~8 m处重复3次测定坡面径流水动力参数(径流深、径流宽、径流流速等)。坡面产沙特征的测定通过在径流小区底部的集流池中收集径流泥沙混合样进行,试验前10 min内,分别于第1、3、5、7、10 min时进行径流泥沙混合样的采集,10 min后,每隔5 min采集一次径流泥沙混合样,单次试验共计15个样品。径流流速测定采用颜料示踪法;径流深和径流宽的测定采用直尺直接量测法;泥沙样品测定采用烘干法^[17]。

1.3 数据处理

依据放水冲刷模拟试验所测得的各个断面的径流参数(径流深、径流宽和流速等),计算径流的各个水力参数,以表征不同植被措施和生态材料措施对堆积体坡面径流过程的影响程度。雷诺数、弗劳德数、阻尼系数、径流功率的计算式如下^[18-19]:

$$Re = vR/\eta \quad (1)$$

$$Fr = v/\sqrt{gR} \quad (2)$$

$$f = 8gRJ/v^2 \quad (3)$$

$$\omega = \gamma RJv \quad (4)$$

式中 Re 为径流雷诺数; v 为径流的平均流速, m/s; R 为水力半径, m; η 为水的粘滞系数, cm^2/s , $\eta = 0.01775/(1+0.0337t+0.000221t^2)$, t 为水温, $^{\circ}\text{C}$; g 为重力加速度, m/s^2 ; Fr 为弗劳德数; f 为径流 Darcy-Weisbach 阻力系数; J 为水力能坡,取坡面坡度的正弦值或正切值; ω 为径流功率, $\text{N}/(\text{m}\cdot\text{s})$; γ 为水的容重, kg/m^3 。

采用 Shapiro-Wilk 检验对试验数据进行正态性检验,符合正态分布的数据采用单因素方差分析(方差齐性采用 LSD 法,方差不齐采用 Tamhane's T2 法)、多因素方差分析(主效应、交互效应)等进行数据差异显著性检

验;不符合正态分布的数据采用独立样本 Kruskal-Wallis 的非参数检验进行数据差异显著性检验^[20]。试验数据的统计分析通过 SPSS 20.0 软件进行,图表绘制通过 Origin 2017 软件进行。

2 结果与分析

2.1 不同处理坡面径流含沙量的时间变化特征

各处理的坡面产沙过程基本均表现为随冲刷时间的增加,径流含沙量先呈波动减小后趋于稳定的趋势,但各处理径流含沙量在冲刷历时中的波动特征差异性较大(图1)。CK处理中,径流含沙量的波动性主要集中于前20 min内,呈现出先增加后减小的趋势,由73.16 g/L急剧增加到579.36 g/L,再波动降低至5.46 g/L;20 min后,坡面径流含沙量呈现为稳定状态,稳定状态的平均径流含沙量为15.57 g/L。相较于CK处理,草本措施处理下坡面径流含沙量基本均呈现出先波动减小后趋于稳定的变化趋势,且M、MM和A处理均可显著降低径流含沙量(图2a)。其中,种植紫苜蓿的小区在冲刷初始阶段,径流含沙量呈现出波动减小的趋势,30 min后,径流含沙量呈现出稳定趋势,MM、MP和M处理稳定状态的平均径流含沙量分别为4.51、9.84、1.09 g/L,相较于CK处理,径流含沙量降低71.01%、36.77%、93.02%;而种植燕麦的小区在初始阶段呈现出减小-波动增加-减小的趋势,45 min后,径流含沙量呈现出稳定趋势,AM、AP和A处理稳定状态的平均径流含沙量分别为4.37、2.55、2.07 g/L,相较于CK处理,径流含沙量降低71.95%、83.64%、86.72%。此外,种植燕麦小区的径流含沙量在放水冲刷过程中的波动性小于种植紫苜蓿小区。乔草措施中,RMP和RAM处理的坡面径流含沙量在冲刷前30 min内呈现出波动变化趋势,30 min后则呈现出稳定趋势,而其他处理的坡面径流含沙量则在冲刷过程中始终保持相对稳定的趋势,RMM、RMP、RM、RAM、RAP、RA处理稳定状态的平均径流含沙量分别为9.84、15.93、6.91、6.28、7.06、6.39 g/L。相较于CK处理,仅RM、RAP和RA处理可显著降低径流含沙量。

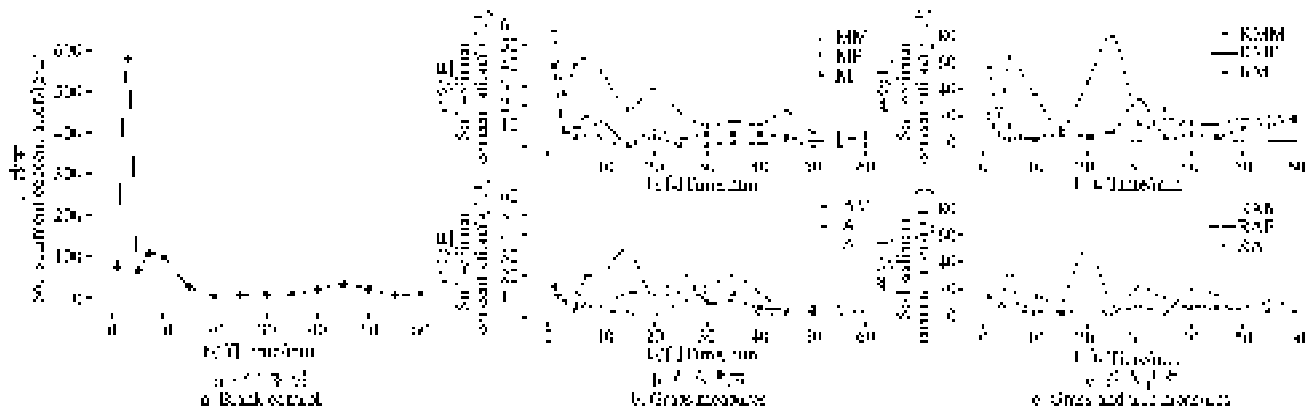


图1 不同处理坡面的径流产沙过程

Fig.1 Temporal variations of soil sediment concentrations in different treatments

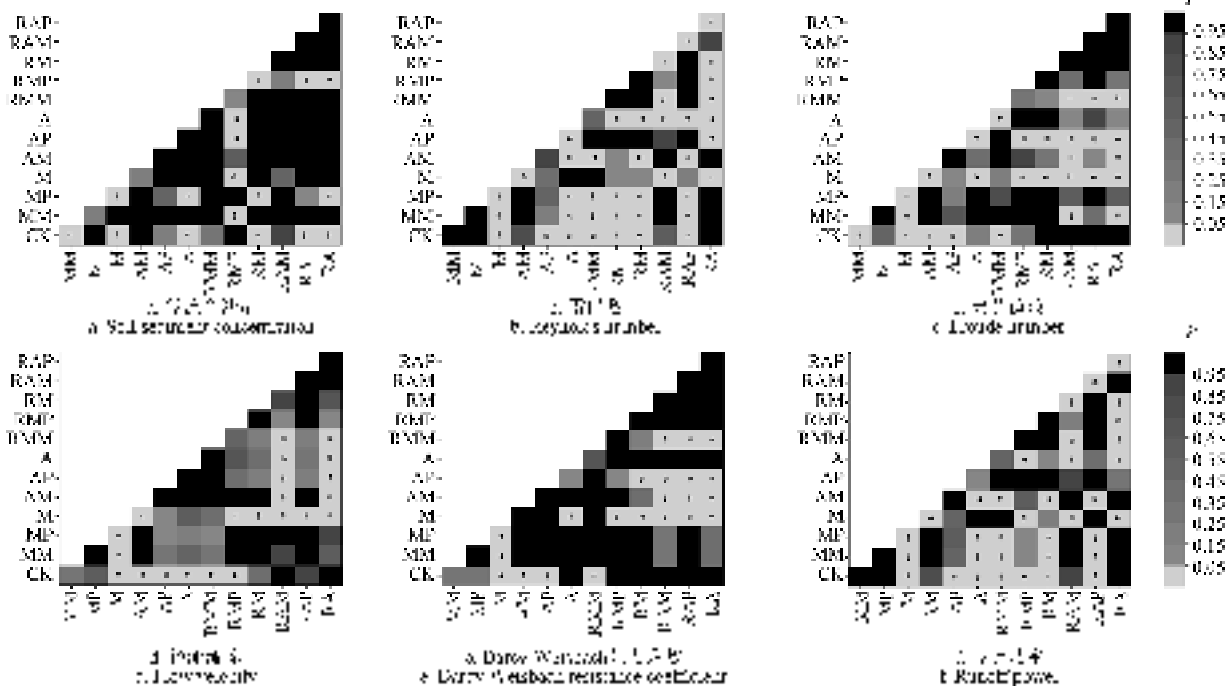
2.2 不同处理坡面径流水动力参数的时间变化特征

雷诺数和弗劳德数是水力学中判定水流流态的重要

参数,不同水流流态的区分主要依据临界雷诺数和临界弗劳德数。根据明渠水流理论,水流可分为层流

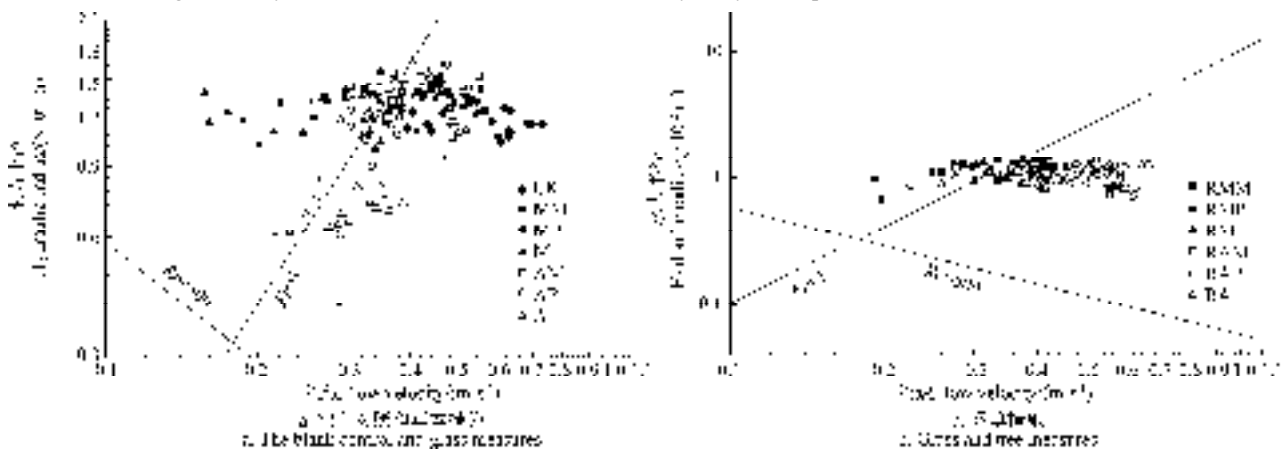
($Re < 500$)、紊流 ($Re > 500$)、缓流 ($Fr < 1$) 和急流 ($Fr > 1$) 等^[21]。不同处理中水力半径和流速的关系表示在图 3 的 log-log 关系图中, 此外, 通过绘制 $Re=500$ 和 $Fr=1$ 两条函数进行水流流态的四区分区^[22]。由图 2b 和图 3 可知, 虽然部分处理的 Re 在冲刷过程中具有显著差异性, 但各处理坡面径流流态均处于紊流区, 表明工程堆积体在陡坡条件下, 坡面径流均以紊流的形式存在。此外, 各处理坡面径流在冲刷历时中不同程度地分布于缓流区和急流区。CK 处理中, 坡面径流在冲刷历时过程中均处于急流区, Fr 处于 1.08~2.17 之间; 草本措施处理的坡面径流在 12.50%~66.67% 的情况下处于缓流状态, MM、MP、

M、AM、AP、A 处理的坡面径流平均 Fr 值分别为 1.18、1.25、0.85、1.10、1.02 和 1.26, 相较于 CK 处理, 各处理坡面径流平均 Fr 分别降低了 22.66%、17.61%、43.76%、27.88%、32.95% 和 16.88%; 而乔木处理的坡面径流在 0~37.50% 的情况下处于缓流状态, RMM、RMP、RM、RAM、RAP、RA 处理的坡面径流平均 Fr 值分别为 1.05、1.26、1.39、1.47、1.49 和 1.49, 相较于 CK 处理, 各处理坡面径流平均 Fr 分别降低了 30.79%、17.07%、8.41%、3.02%、1.72% 和 1.96%。此外, 由图 2c 和表 2 可知, 植被措施对降低坡面径流弗劳德数具有较大的显著效应, 其中草本的效用可达到 0.16, 乔木的效用可达到 0.15。



注: 图中 “*” 表示对应 2 组数据在 $P=0.05$ 水平上具有显著差异。
Note: The “*” indicates a significantly difference ($P=0.05$) between different treatments.

图 2 不同处理坡面径流含沙量、水动力参数的差异性分析
Fig.2 Analysis on soil sediment concentrations and hydrodynamic parameters in different treatments



注: Re 为径流雷诺数; Fr 为弗劳德数。
Note: Re is runoff Reynolds number; Fr is Froude number.

图 3 不同处理坡面的径流流态
Fig.3 Flow regime zones of the slope flows in different treatments

径流流速可直接影响坡面的土壤侵蚀过程, 其变化特征与细沟的发育过程息息相关^[23]。本研究中, 不同措

施之间坡面径流流速随冲刷时间的增加均呈现出波动增加一趋于稳定的趋势, 但试验过程中径流流速的增幅较

小(图 4)，且不同修复措施对坡面径流过程的影响不显著。CK 处理中，坡面径流流速在冲刷过程中由 0.48 m/s 增加至 0.56 m/s，平均径流流速为 0.52 m/s。相较于 CK 处理，各处理均能在冲刷过程中不同程度地降低径流流速，同时 M、AM、AP、A、RMM 和 RMP 处理与 CK 处理具有显著性差异(图 2d)。草本措施中，MM、MP、M、AM、AP、A 处理在冲刷过程中的坡面径流平均流速分别为 0.43、0.44、0.29、0.40、0.36、0.35 m/s，相较于 CK 处理，坡面平均径流流速分别降低了 17.42%、15.02%、

43.63%、23.46%、31.36%、32.01%；乔木措施中，RMM、RMP、RM、RAM、RAP、RA 处理在冲刷过程中的坡面径流平均流速分别为 0.35、0.41、0.43、0.49、0.45、0.50 m/s，相较于 CK 处理，坡面平均径流流速分别降低了 32.08%、20.54%、16.83%、6.05%、14.21%、3.21%。此外，由多因素方差分析可知，除工程材料主效应，不同措施类别的主效应及其交互效应均可显著影响坡面径流流速 ($P \leq 0.01$)，其中草本措施的效用最大，效用用量可达 0.22。

表 2 不同措施类别作用效应分析
Table 2 MANOVA of different factors

参数 Parameter	雷诺数 Reynolds number		弗劳德数 Froude number		流速 Flow velocity		阻力系数 Resistance coefficient		径流功率 Runoff power	
	<i>P</i>	η_p^2	<i>P</i>	η_p^2	<i>P</i>	η_p^2	<i>P</i>	η_p^2	<i>P</i>	η_p^2
检验量 Statistic										
草 Grass	<0.01	0.28	<0.01	0.16	<0.01	0.22	<0.01	0.16	<0.01	0.25
乔 Tree	0.44	0.00	<0.01	0.15	<0.01	0.10	<0.01	0.10	0.58	<0.01
工程材料 Material	<0.01	0.10	0.33	0.01	0.19	0.01	0.19	0.01	<0.01	0.11
草×乔 Grass×Tree	<0.01	0.12	<0.01	0.03	<0.01	0.07	0.95	<0.01	<0.01	0.09
草×工程材料 Grass×Material	<0.01	0.05	<0.01	0.03	<0.01	0.05	<0.01	0.08	<0.01	0.06
乔×工程材料 Tree×Material	<0.01	0.25	0.01	0.03	<0.01	0.10	<0.01	0.05	<0.01	0.21
草×乔×工程材料 Grass×Tree×Material	0.08	0.02	<0.01	0.09	<0.01	0.03	<0.01	0.10	0.06	0.02

注：*P* 表示各因素对因变量的影响是否具有显著性差异， η_p^2 表示各因素影响因变量的效用大小。
Note: *P* indicates whether there is a significant difference in the effect of each factor on the variable, and η_p^2 indicates the utility of each factor in influencing the variable.

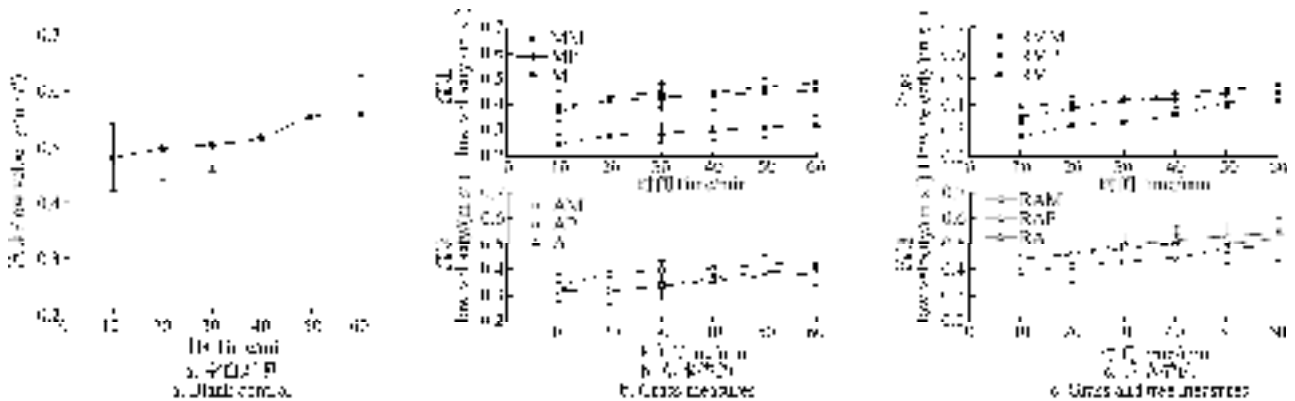


图 4 不同处理坡面径流流速随冲刷时间的变化
Fig.4 Temporal variations of flow velocity in different treatments

坡面侵蚀过程中，由于水土界面的摩擦作用和径流内部质点的无序运动等均会对径流的运移产生阻碍作用，从而直接影响径流流速、运移路径和有效侵蚀力等^[24]。与径流流速相反，各处理坡面径流阻力系数在冲刷过程呈现出减小一趋于稳定的趋势，但试验过程中径流阻力系数的变化幅度较小(图 5)。CK 处理中，坡面径流阻力系数在冲刷过程中由 1.65 减小至 1.32，平均径流阻力系数为 1.44。相较于 CK，各处理均能在试验过程中不同程度地增加径流阻力系数，同时 M、AM、AP 和 RMM 处理与 CK 处理具有显著性差异(图 2e)。草本措施中，MM、MP、M、AM、AP、A 处理在冲刷过程中的坡面径流平均阻力系数分别为 2.64、2.18、5.14、2.72、2.89、1.94，为 CK 处理的 1.84、1.52、3.58、1.89、2.01、1.35 倍。乔木措施中，RMM、RMP、RM、RAM、RAP、RA 处理在冲刷过程中的坡面径流平均阻力系数分别为 3.00、2.12、1.92、1.46、1.78、1.46，分别为 CK 处理的 2.09、

1.48、1.34、1.02、1.24、1.02 倍。由多因素方差分析可知，草本、乔木、草×工程材料、乔×工程材料和草×乔×工程材料均可显著影响坡面径流阻力系数 ($P \leq 0.01$)，其中草本措施的效用最大，效用用量可达 0.16。

径流功率从能量的角度表征了坡面径流运移过程中所具有的能量大小，径流功率越大，径流的土壤侵蚀能力越强，挟沙能力越强^[25]。与径流流速类似，各处理的径流功率在坡面冲刷过程中同样呈现出先增加后趋于稳定的趋势，但试验过程中径流功率的增幅较小(图 6)。CK 处理中，坡面径流功率在冲刷过程中由 2.03 增加到 2.54 N/(m·s)，平均径流功率为 2.26 N/(m·s)。相较于 CK 处理，各处理均能在冲刷过程中不同程度地降低径流功率，同时 M、AP、A、RMM、RMP、RM 和 RAP 处理与 CK 处理具有显著性差异(图 2f)。草本措施中，MM、MP、M、AM、AP、A 处理在冲刷过程中的坡面径流平均径流功率分别为 2.12、1.74、1.28、

1.96、1.67、1.09 N/(m·s)，相较于CK处理，分别降低了6.10%、9.20%、43.11%、13.36%、25.86%、51.90%。乔草措施中，RMM、RMP、RM、RAM、RAP、RA处理在冲刷过程中的坡面径流平均径流功率分别为1.49、1.66、1.57、2.00、1.49、2.13 N/(m·s)，相较于CK处理，

分别降低了34.02%、26.27%、30.35%、11.58%、33.94%、5.80%。由多因素方差分析可知，草本、工程材料、草×乔、草×工程材料和乔×工程材料均可显著影响坡面径流功率 ($P \leq 0.01$)，其中草本措施的效用最大，效用量可达0.25。

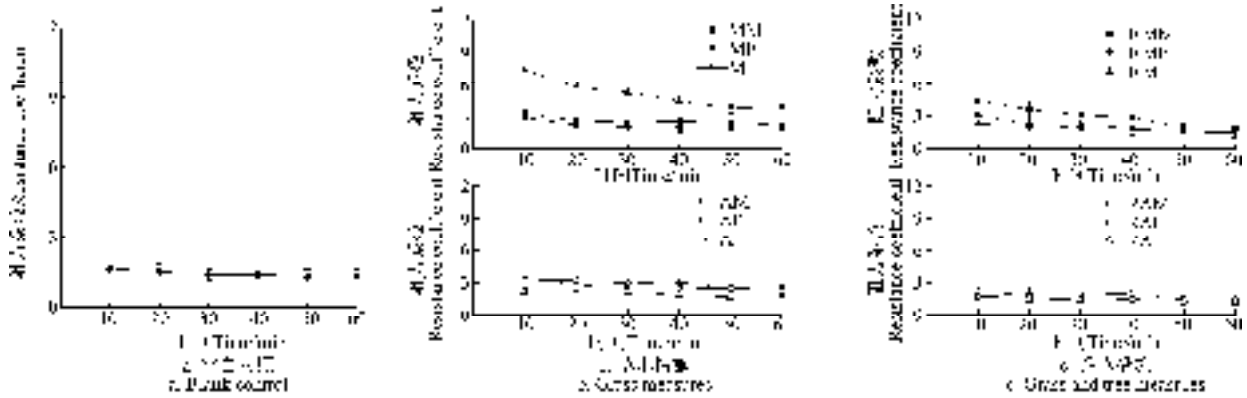


图5 不同处理坡面径流阻力系数随冲刷时间的变化

Fig.5 Temporal variations of resistance coefficient in different treatments

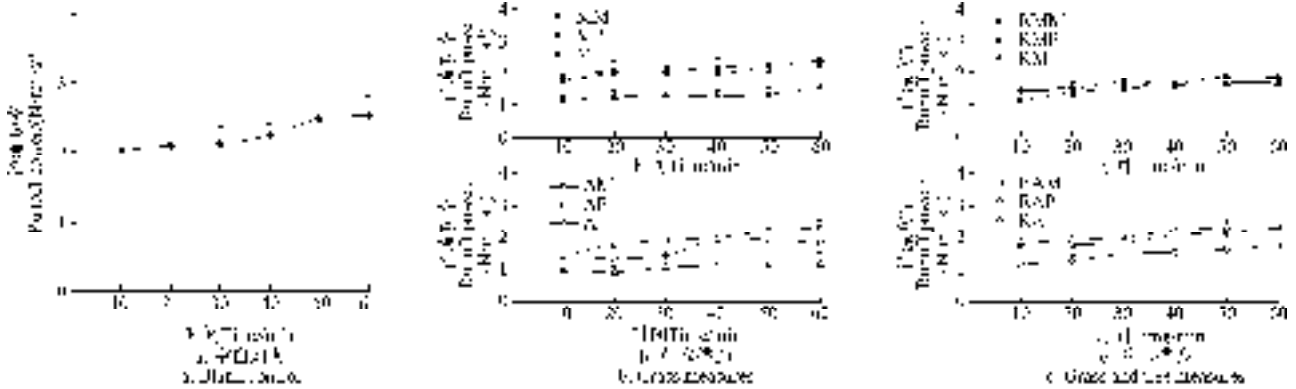


图6 不同处理坡面径流功率随冲刷时间的变化

Fig.6 Temporal variations of flow power in different treatments

3 讨论

3.1 径流含沙量和径流水动力参数的时间变化规律

植被类型、格局等可通过改变径流和泥沙输移路径的连通度从而影响坡面的侵蚀过程^[26]。本研究发现，工程堆积体陡坡上植被的存在可明显改变坡面的径流产沙过程，且作用效果主要分布在坡面侵蚀初期。本研究中，CK对照处理的坡面径流含沙量随径流冲刷的延续呈现出先急剧增加后减小再趋于稳定的趋势，而植被措施处理基本均呈现出先波动减小后趋于稳定的趋势。径流冲刷初期，由于工程堆积体坡度较陡，裸露坡面上松散的土壤颗粒在径流冲刷过程中极易被搬运流失^[27]；而植被作为径流、泥沙等物质的“汇”景观深度影响着坡面的产沙输沙过程，从而减少坡面径流的含沙量^[28]。李建明等^[29]的研究表明，植被的存在改变了坡面的粗糙度，可对泥沙进行有效地拦蓄，同时被植被拦蓄的泥沙会在拦蓄-溃决的过程中造成径流含沙量跳跃性增加或减少，致使产沙过程中的多峰多谷现象。

不同生态修复措施下，工程堆积体坡面各水动力参

数的过程特征均呈现为前期波动变化，后期趋于稳定的趋势。坡面径流冲刷初期，工程堆积体坡面侵蚀逐渐进入细沟侵蚀阶段，径流基本沿着侵蚀沟道向下运移，径流深度增加，径流量相对增加，从而径流流速和径流功率增加、径流阻力系数减小；随径流冲刷的持续，土体逐渐饱和而达到稳定入渗率，各水动力参数逐渐趋于稳定状态^[17]。此外，不同于前人研究^[30]，本研究中植被对工程堆积体坡面的径流过程特征没有显著的影响，各处理之间坡面径流的水动力特征均呈现相似的时间变化趋势。李建明等^[31]通过人工降雨试验探究不同植被类型对堆积体坡面水动力特征的影响，结果表明植被的存在可显著降低产流历时中径流流速、阻力系数、径流功率等水动力参数的变化幅度，并改变其变化特征。而本研究中不同处理之间坡面径流流速、径流功率和径流阻力系数的时间变化趋势则没有显著差异，可能与堆积体坡面坡度较陡、土壤渗透性较高有关。径流在向下运移过程中其自身重力沿坡面上的分力较大，致使径流向下运动的惯性增大，一定程度上减弱了植被对径流的分散作用，从而难以发挥植被对坡面径流过程的影响；山地黄壤具

有粗骨性、渗透性较高,粘聚力较弱等特点^[32],致使其在坡面初始产流后很快就达到了相对饱和的状态,后续冲刷过程中,坡面产流量基本维持在相对稳定的状态,植被对径流过程特征的影响不大。

3.2 植被措施对工程堆积体坡面侵蚀特征的影响

植被措施在工程堆积体坡面上的水土保持效果主要表现为植被本身的减流减沙效益、根土复合体协同抗蚀作用、以及间接改良土壤环境提高土壤的抗蚀能力等。本研究中发现,植被的存在可显著降低工程堆积体的径流含沙量、径流流速、径流功率,增加径流阻力系数,并促进坡面径流由急流向缓流转变(图2、表2)。一方面,植被可以通过其在坡面上的空间结构、分布及排列等格局特征直接影响土壤侵蚀过程,可直接改变了坡面的水文连通性,实现了对径流的分流和拦截,是坡面水土流失泥沙汇集的重要因素^[33],并且植被所拦截的泥沙一定程度上改变了坡面微地形,对径流运移产生相应的阻力^[34]从而增加径流阻力系数,减小径流流速和径流功率;另一方面,根土复合体的存在可显著增加土体的抗冲能力,从而增大径流运移阻力^[35-36];再者,土壤中纵横交错的根系可显著增加土壤的孔隙度进而增加土壤入渗能力,起到减流的作用。王伦江等^[37]的研究认为,植被的各组织器官在不同的侵蚀阶段对径流水动力特征的影响不同:面蚀阶段,坡面径流水动力特征的变化主要归因于草本茎秆间距,且径流阻力系数随间距的增加而减小;细沟侵蚀阶段,径流基本均在沟道内运移,此时的径流水动力特征的变化主要归因于细沟内根系的出露分布情况。

虽然M、AP、A、RMM、RAP等措施可不同程度上发挥出显著的水土保持效果,但措施之间并无显著的差异性。研究结果表明,相较于草本处理,乔草措施并未发挥出更大的减流减沙优势,此现象可能与两类措施中草本层生长状况的差异、不同物种之间物候期的差异等因素有关。本研究中,草本措施和乔草措施草本层的生长状况具有明显差异,表现为草本措施小区中的草本层生长状况优于乔草措施小区中的草本层生长状况,主要归因于乔草措施小区中植被生长过程中存在的竞争关系,高大的刺槐在生长过程中会汲取更多的光照条件和养分条件等,从而对草本层的生长产生相对不利的影 响。在短时期内,植被对坡面径流水文状态的影响主要通过近地表植被层来实现,即草本层发挥着主要作用^[14]。杨春霞等^[38]通过对植被建设初期不同植被类型坡面的水土流失差异进行研究,结果表明相较于农地和灌木林地,草地的减流减沙效益最明显,可延缓坡面上跌坎和细沟的形成。不可否认地,刺槐在减少土壤侵蚀和改变坡面水文条件方面同样具有不可忽略的作用,但刺槐的土壤的改良作用是随其生长年限的增加逐渐体现出来的^[39],短期的生态修复中,刺槐的生态修复效益难以较好的发挥,且乔木对土壤侵蚀的控制作用很大程度上与冠幅的截留消能作用有关^[40],但本研究所采用的放水冲刷试验无法考虑到此部分作用,仍需后续更深入的补充、研究

和探索。

3.3 羊粪和PVAc对工程堆积体坡面侵蚀特征的影响

一般情况下,有机肥和PVAc等土壤改良剂均可促进土壤颗粒的团聚而增加土壤的抗蚀能力。Liu等^[41]通过在沙土上喷洒3L/m²不同浓度的聚醋酸乙烯酯乳液(PVIN)探究其固沙抗蚀能力,结果表明当PVIN浓度在5%时就足以起到固沙效果。Gholami等^[42]研究表明在土壤中施加0.3kg/m²的有机肥可有效降低土壤溅蚀、径流含沙量并延长产流时间,此外,在不同降雨强度下有机肥的水土保持效果不同。不同于前人研究,本研究中增加羊粪和PVAc的施用,并不能在降低坡面产沙、改善坡面水动力条件上产生显著的增效作用,分析其原因,可能由于因羊粪和PVAc而形成的团聚体在水的浸泡下发生崩解而不能提高土壤抗蚀强度有关。本研究中生态修复持续的时间较短,有机肥的腐化率较低,因有机肥而产生的团聚体含量也偏低,此外,通过调查,本研究区山地黄壤的土壤粘聚力低、入渗能力强,在水流冲击下易分散,因此,在径流的作用下,因羊粪和PVAc而形成的团聚体极易发生崩解,其减流减沙效益不能得到有效体现。

4 结 论

1) 试验条件下,工程堆积体坡面的水沙特征呈现出不同的时间变化趋势。随冲刷历时的延续,对照处理的坡面径流含沙量呈现出急剧增加-减小-稳定的趋势,而其他处理则基本均呈现出波动减小-稳定的趋势;各处理的坡面径流流态始终处于紊流状态,径流流速和径流功率均呈现出缓慢增加一趋于稳定的趋势,径流阻力系数则呈现出缓慢降低一趋于稳定状态。

2) 植被措施可显著降低工程堆积体坡面的产流产沙。相较于对照处理,黄壤+紫苜蓿+羊粪、黄壤+紫苜蓿(M)、黄壤+燕麦(A)、黄壤+刺槐+紫苜蓿、黄壤+刺槐+燕麦+保土剂和黄壤+刺槐+燕麦处理均能显著降低坡面径流含沙量,且放水冲刷试验初始阶段,各生态修复措施的减沙效果最显著。此外,M、A、黄壤+燕麦+保土剂和黄壤+刺槐+紫苜蓿+羊粪处理基本均可显著改善径流流型、降低径流流速和径流功率、增加径流阻力系数。

3) 相较于对照处理,黄壤+紫苜蓿、黄壤+燕麦、黄壤+燕麦+保土剂和黄壤+刺槐+紫苜蓿+羊粪等处理虽然均可显著减少工程堆积体的水土流失,但措施之间基本没有显著的差异性,表明短期生态修复条件下,乔木、羊粪和PVAc等的添加并未在工程堆积体水土保持方面发挥有效的增效作用。

4) 在工程堆积体生态修复初期,本研究区宜采用黄壤+紫苜蓿或黄壤+燕麦的修复措施。

[参 考 文 献]

- [1] 张志华, 聂文婷, 许文盛, 等. 不同水土保持临时措施下工程堆积体坡面减流减沙效应[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 141-150.
Zhang Zhihua, Nie Wenting, Xu Wensheng, et al. Effects of runoff and sediment reduction on engineering accumulation

- slopes under different soil and water conservation temporary measures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(1): 141-150. (in Chinese with English abstract)
- [2] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报[R]. 2006—2015.
- [3] 陈健. 公路建设项目水土流失特征及防治对策[J]. 亚热带水土保持, 2006, 18(1): 58-59.
- [4] 王自高. 西南地区深切河谷大型堆积体工程地质研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
Wang Zigao. Engineering Geological Study on Large Quaternary Deposits in the Deeply Valley Southwestern China[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [5] 谢亦朋, 杨秀竹, 阳军生, 等. 松散堆积体隧道围岩变形破坏细观特征研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4925-4934.
Xie Yipeng, Yang Xiuzhu, Yang Junsheng, et al. Mesoscopic characteristics of deformation and failure on surrounding rocks of tunnel through loose deposits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4925-4934. (in Chinese with English abstract)
- [6] 苏正安, 陈茜, 熊东红, 等. 攀枝花矿山排土场土壤侵蚀特征和生态恢复对策[J]. 世界科技研究与发展, 2015, 37(4): 457-460.
Su Zheng'an, Chen Qian, Xiong Donghong, et al. Research progress in soil erosion characteristics and ecological restoration measures of mineland waste dump in Panzhihua, Sichuan, China[J]. World SCI-Tech R&D, 2015, 37(4): 457-460. (in Chinese with English abstract)
- [7] 廖炳勇, 何晓飞, 曾强, 等. 龙门山构造带茂汶断裂在茂县、汶川一带构造特征[J]. 四川地质学报, 2019, 39(3): 374-378.
Liao Bingyong, He Xiaofei, Zeng Qiang, et al. Characteristics of the Maowen fault in the Longmenshan structural belt[J]. Acta Geologica Sichuan, 2019, 39(3): 374-378. (in Chinese with English abstract)
- [8] 石杨子. 成兰铁路弃渣场生态修复技术方案初步研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
Shi Yangzi. A Preliminary Study Spoil Ground Ecological Restoration of Cheng-Lan Railway Technology Program[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张肖兵. 汶马高速某千枚岩堆积体暴雨失稳机理及土拱效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
Zhang Xiaobing. Study on the Mechanism of Rainstorm Instability and the Soil Arching Effect of a Phyllite Accumulation in Wen-Ma highway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [10] 彭少麟. 恢复生态学[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [11] Bradshaw A. Restoration of mined lands-using natural processes[J]. Ecological Engineering, 1997, 8(4): 255-269.
- [12] Li S, Liber K. Influence of different revegetation choices on plant community and soil development nine years after initial planting on a reclaimed coal gob pile in the Shanxi mining area, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 618: 1314-1323.
- [13] Zheng M, Huang Z, Ji H, et al. Simultaneous control of soil erosion and arsenic leaching at disturbed land using polyacrylamide modified magnetite nanoparticles[J]. Science of the Total Environment, 2020, 702: 134997.
- [14] 刘云, 李均辉, 王梦春. 矿山恢复的过程及前期恢复时限分析[J]. 地球与环境, 2006, 34(4): 47-52.
Liu Yun, Li Junhui, Wang Mengchun. Analysis of the process of mine restoration and time limitation of its ex-period restoration[J]. Earth and Environment, 2006, 34(4): 47-52. (in Chinese with English abstract)
- [15] 杜宇本, 袁传保, 王彦东, 等. 成兰铁路主要地质灾害与地质选线[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(8): 11-15.
Du Yuben, Yuan Chuanbao, Wang Yandong, et al. Major geological hazard and geological alignment of Chengdu-Lanzhou railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012, 29(8): 11-15. (in Chinese with English abstract)
- [16] 宋章, 杜宇本, 袁传保, 等. 兰渝铁路杨家坪隧道1号横洞工区大变形成因机制探析[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(12): 79-83.
Song Zhang, Du Yuben, Yuan Chuanbao, et al. Analysis of cause and mechanism of large deformation in No.1 cross-tunnel area of Yangjiaping tunnel of Lanzhou-Chongqing railway[J]. Railway Standard Design, 2015, 59(12): 79-83. (in Chinese with English abstract)
- [17] Su Z, He Z, Zhou T, et al. Impacts of native vegetation on the hydraulic properties of the concentrated flows in bank gullies[J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(4): 907-922.
- [18] 吕春娟, 张徐, 毕如田, 等. 间歇降雨对铁尾砂重构坡面侵蚀水动力学特性的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(11): 74-85.
Lyu Chunjuan, Zhang Xu, Bi Rutian, et al. Effects of intermittent rainfall on hydrodynamics characteristics of erosion on reconstructed slopes of iron tailings[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(11): 74-85. (in Chinese with English abstract)
- [19] 张宽地, 王光谦, 孙晓敏, 等. 坡面薄层水流水动力学特性试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 182-189.
Zhang Kuandi, Wang Guangqian, Sun Xiaomin, et al. Experiment on hydraulic characteristics of shallow open channel flow on slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(15): 182-189. (in Chinese with English abstract)
- [20] 吕振通, 张凌云. SPSS 统计分析与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [21] 吴持恭. 水力学-上册[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [22] Guo M, Wang W, Li J, et al. Runoff characteristics and soil erosion dynamic processes on four typical engineered landforms of coalfields: An in-situ simulated rainfall experimental study[J]. Geomorphology, 2020, 349: 106896.

- [23] 林敬兰. 土石混合崩积体坡面细沟径流流速试验研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5): 119-123.
Lin Jinglan. Experimental study on rill runoff velocity on the slope of soil-rock mixed colluvium[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(5): 119-123. (in Chinese with English abstract)
- [24] 申楠, 王占礼, 刘俊娥, 等. 黄土坡面细沟水流阻力的试验研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(6): 34-37.
Shen Nan, Wang Zhanli, Liu June, et al. Experimental study of rill flow resistance on Loess Hillslope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(6): 34-37. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王清源, 张乐涛, 魏仪媛, 等. 基于能量的坡面侵蚀性径流及其水沙传递关系[J]. 农业工程学报, 2022, 38(1): 151-157.
Wang Qingyuan, Zhang Letao, Wei Yiyuan, et al. Relationship between erosive runoff and flow-sediment on loess slope: An erosive energy perspective[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(1): 151-157. (in Chinese with English abstract)
- [26] 赵炯昌, 潘岱立, 卫伟, 等. 植被格局对土壤入渗和水沙过程影响的模拟试验研究[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1373-1380.
Zhao Jiongchang, Pan Daili, Wei Wei, et al. Simulation experiment on the influence of vegetation pattern on soil infiltration and water and sediment process[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1373-1380. (in Chinese with English abstract)
- [27] Lv J, Luo H, Hu J, et al. The effects of rock fragment content on the erosion processes of spoil heaps: A laboratory scouring experiment with two soils[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(4): 2089-2102.
- [28] 陈利顶, 贾福岩, 汪亚峰. 黄土丘陵区坡面形态和植被组合的土壤侵蚀效应研究[J]. 地理科学, 2015, 35(9): 1176-1182.
Chen Lidong, Jia Fuyan, Wang Yafeng. The effects of slope configuration and vegetation pattern on soil erosion in the Loess Hilly Area[J]. Science Geographica Sinica, 2015, 35(9): 1176-1182. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李建明, 王文龙, 王贞, 等. 神府东胜煤田弃土弃渣体径流产沙过程的野外试验[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12): 3537-3545.
Li Jianming, Wang Wenlong, Wang Zhen, et al. A field experiment of runoff and sediment yielding processes from residues in Shenfu-Dongsheng Coalfield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(12): 3537-3545. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李兆松, 王兵, 汪建芳, 等. 铁杆蒿与白羊草枯落物覆盖量对黄土坡面流水动力特性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(17): 151-157.
Li Zhaosong, Wang Bing, Wang Jianfang, et al. Effects of *Artemisia gmelinii* and *Bothriochloa ischcemum* litter mass coverage on hydrodynamic characteristics of loess overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(17): 151-157. (in Chinese with English abstract)
- [31] 李建明, 张长伟, 王志刚, 等. 不同植被类型对堆积体坡面径流特性的影响[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(10): 60-68.
Li Jianming, Zhang Changwei, Wang Zhigang, et al. Impact of different vegetation types on runoff characteristics of spoil heaps[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(10): 60-68. (in Chinese with English abstract)
- [32] 张凤荣. 土壤地理学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
- [33] Aksoy H, Unal N E, Cokgor S, et al. A rainfall simulator for laboratory-scale assessment of rainfall-runoff-sediment transport processes over a two-dimensional flume[J]. Catena, 2012, 98: 63-72.
- [34] 赵明, 杨晓楠, 陈攀宇, 等. 灌木斑块格局对产流及产沙过程的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 735-743.
Zhao Ming, Yang Xiaonan, Chen Panyu, et al. Effects of shrub patch pattern on runoff and sediment yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(3): 735-743. (in Chinese with English abstract)
- [35] 冯兰茜, 王文龙, 郭明明, 等. 根系密度对黄土塬沟头溯源侵蚀产沙和形态演化过程的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(6): 88-96.
Feng Lanqian, Wang Wenlong, Guo Mingming, et al. Effects of root density on gully headcut erosion and morphological evolution process in gully regions of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(6): 88-96. (in Chinese with English abstract)
- [36] De Baets S, Poesen J, Gyssels G, et al. Effects of grass roots on the erodibility of topsoils during concentrated flow[J]. Geomorphology, 2006, 76(1/2): 54-67.
- [37] 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. (in Chinese with English abstract)
- [38] 杨春霞, 姚文艺, 肖培青, 等. 不同立地条件下坡面水土流失的差异性试验研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 222-224.
Yang Chunxia, Yao Wenyi, Xiao Peiqing, et al. Differences of slope erosion under different site conditions by experimental study[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(1): 222-224. (in Chinese with English abstract)
- [39] 任璐璐, 张炳学, 韩凤朋, 等. 黄土高原不同年限刺槐土壤化学计量特征分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 339-344.
Ren Lulu, Zhang Bingxue, Han Fengpeng, et al. Ecological stoichiometric characteristics of soils in *Robinia pseudoacacia* forests of different ages on the Loess plateau[J].

- Journal of Soil and Water conservation, 2017, 31(2): 339-344. (in Chinese with English abstract)
- [40] 郑明国. 基于水沙关系框架的黄土区不同水土保持措施减沙贡献分割方法[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 173-183. Zheng Mingguo. Partition of reducing sediment for various soil and water conservation measures of Loess Plateau in China based on runoff-sediment relationship[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(7): 173-183. (in Chinese with English abstract)
- [41] Liu J, Shi B, Lu Y, et al. Effectiveness of a new organic polymer sand-fixing agent on sand fixation[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65(3): 589-595.
- [42] Gholami L, Sadeghi S H R, Homae M. Different effects of sheep manure conditioner on runoff and soil loss components in eroded soil[J]. Catena, 2016, 139: 99-104.

Effects of typical ecological restoration measures for engineering accumulation on sediment yield and hydrodynamic process

Zhou Tao^{1,2}, Su Zheng'an^{1*}, Liu Gangcai¹, Wang Junjie^{1,2}, Liu Yihan^{1,3}, Wu Zuo^{1,4}, Wang Lijuan^{1,2}

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation/Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China; 3. College of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610100, China; 4. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China)

Abstract: This study aims to explore the temporal variations in the sediment yield and hydraulic characteristics during soil erosion on steep slopes of engineering accumulation in the Longmenshan fault belt under different measures of typical ecological restoration. The optimal ecological restoration measures were utilized for the soil and water conservation on engineering accumulation. The steep slopes were selected in the engineering accumulation for the No.2 cross-tunnel area of the Yangjiaping tunnel of the Chengdu-Lanzhou railway in western China. The ecological measures were constructed using the ecological restoration plants (*Medicago sativa*, *Avena sativa*, *Robinia pseudoacacia*) and ecological restoration materials (sheep manure and PVAc (Polyvinyl Acetate)). The scouring tests were conducted with a flow discharge of 60 L/min, in order to investigate the temporal variations in the soil sediment concentration and hydraulic characteristics (runoff regime, flow velocity, Darcy-Weisbach resistance coefficient, and runoff power) on the steep slopes of engineering accumulation under different restoration measures. It was found that the soil sediment concentration showed a clear initial dynamic stage, followed by a relatively stable stage after a period of adjustment. The time-averaged steady-state concentration of soil sediment were 15.57, 4.51, 9.84, 1.09, 4.37, 2.55, 2.07, 9.84, 15.93, 6.91, 6.28, 7.06, and 6.39 g/L in treatments with the control (CK), *Medicago sativa* + sheep manure (MM), *Medicago sativa* + PVAc (MP), *Medicago sativa* (M), *Avena sativa* + sheep manure (AM), *Avena sativa* + PVAc (AP), *Avena sativa* (A), *Robinia pseudoacacia* + *Medicago sativa* + sheep manure (RMM), *Robinia pseudoacacia* + *Medicago sativa* + PVAc (RMP), *Robinia pseudoacacia* + *Medicago sativa* (RM), *Robinia pseudoacacia* + *Avena sativa* + sheep manure (RAM), *Robinia pseudoacacia* + *Avena sativa* + PVAc (RAP), *Robinia pseudoacacia* + *Avena sativa* (RA), respectively. There were increasing trends in the temporal variations of runoff velocity and runoff power at the initial stages of the scouring tests, while the decreasing trends were observed in the Darcy-Weisbach resistance coefficient. The steady-state runoff velocity, runoff power, and Darcy-Weisbach resistance coefficient were attained in the period of adjustment. The runoff remained still in the turbulent zone, during the whole experiment. Different ecological restoring measures were also utilized to effectively reduce the soil sediment concentrations. Notably, the measures of M, A, AP, or RMM significantly increased the Darcy-Weisbach resistance coefficient, but decreased the runoff velocity and runoff power ($P \leq 0.05$). The herb layer played an important role in the soil and water conservation after 1-2 a of ecological restoration on the steep slopes of engineering accumulation, while the trees, sheep manure, and PVAc needed more time to demonstrate the soil and water conservation capacity. Consequently, the trees cannot effectively realize the soil conservation in the process of short-term ecological restoration, due to the short planting period and species competition. Meanwhile, the organic matter in sheep manure cannot be fully decayed, resulting in the soil aggregates formed by sheep manure or PVAc being prone to disintegration under water immersion. Overall, the yellow soil + *Medicago sativa* and yellow soil + *Avena sativa* can be the most important ecological restoration modes for the soil and water conservation at the initial stages of ecological restoration for the steep slopes of engineering accumulation on the Longmenshan fault belt.

Keywords: erosion; runoff; restoration; engineering accumulation; ecological barrier area in western sichuan