

## 两种驱动力作用下植被调控堆积体坡面减水减沙效益

李建明<sup>1,2,3,4</sup>, 牛俊<sup>3,4</sup>, 孙蓓<sup>3,4</sup>, 杨贺菲<sup>3,4</sup>, 王文龙<sup>1,5\*</sup>, 黄金权<sup>3,4</sup>,  
聂慧莹<sup>5</sup>, 蒲坚<sup>1,2,3,4</sup>, 孙宝洋<sup>3,4</sup>, 陈卓鑫<sup>5</sup>, 何玺泓<sup>5</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 4. 水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心, 武汉 430010; 5. 西北农林科技大学水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100)

**摘要:** 定量分析侵蚀驱动力的变化对于植被调控堆积体坡面水文和产沙过程的影响, 对于深刻理解植被防护堆积体侵蚀及其水土保持效益具有重要作用。该研究以陡坡工程堆积体(30°)作为研究对象, 采用野外模拟降雨和降雨+上方汇水试验研究苜蓿对工程堆积体侵蚀过程的影响及其减水减沙效益。结果表明: 1) 两种驱动力下苜蓿对工程堆积体坡面减沙和减流效益分别为 57.28%~98.51%和 13.17%~83.11%, 加入上方汇水后减沙和减流效益分别减少 17.01%和 68.74%; 2) 降雨条件下苜蓿对堆积体坡面减流减沙效益随降雨强度增大降低, 而加入上方汇水后减沙效益随降雨强度增大而增大, 但减流效益减小。显著性差异分析表明降雨强度对裸坡和苜蓿堆积体的径流和产沙均有显著影响( $P<0.01$ ), 且上方汇水的作用大于降雨; 3) 两种驱动力下裸坡堆积体侵蚀速率总体随产流历时减少, 而苜蓿堆积体在降雨条件下侵蚀速率总体增大。加入上方汇水后裸坡及苜蓿堆积体坡面侵蚀和径流随产流历时的波动性显著增强; 4) 裸坡堆积体在降雨和降雨+上方汇水条件下产流前期的平均侵蚀速率是后期的 1.06~2.90 倍, 苜蓿堆积体在降雨条件下产流前期平均侵蚀速率小于后期。研究成果可为生产建设项目工程堆积体水土流失防治和植被措施布设提供科学指导, 具有显著的科学意义和工程实践指导价值。

**关键词:** 土壤; 泥沙; 径流; 降雨; 堆积体; 苜蓿; 上方汇水

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.11.009

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-11-0076-09

李建明, 牛俊, 孙蓓, 等. 两种驱动力作用下植被调控堆积体坡面减水减沙效益[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 76-84.  
doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.11.009 <http://www.tcsae.org>

Li Jianming, Niu Jun, Sun Bei, et al. Benefits of soil and water reduction on spoil heaps by vegetation under two driving forces[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(11): 76-84. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.11.009 <http://www.tcsae.org>

### 0 引言

随着经济的快速发展, 在人为生产活动加之极端气候影响下, 土壤侵蚀已成为世界上主要的环境问题之一, 直接威胁有限土地资源的可持续利用<sup>[1-4]</sup>。据统计, 中国“十五”至“十三五”期间每 5 a 的弃土弃渣总量均接近百亿吨, 由于未能有效实现弃土弃渣的资源化利用, 现有弃土弃渣存量已成为新增人为水土流失主要策源地<sup>[5]</sup>。生产建设项目工程堆积体是弃土弃渣堆积形成且发生土壤侵蚀的主要人为扰动地貌单元, 是由项目施工过程中开挖和回填后产生的多余土壤及砾石等混合堆积形成的高陡边坡<sup>[6]</sup>, 其主要特征是物质成分不均, 分散性大, 结构疏松, 平均摩擦角、内聚力及有机质含量低等<sup>[7]</sup>, 不仅破坏了原有土体结构<sup>[8]</sup>, 更严重的会造成坍塌、滑坡甚至泥石流等地质灾害<sup>[9-11]</sup>。

目前, 关于生产建设项目工程堆积体水土流失规律已开展较多研究, 但主要是从其属性特征、堆置形态以及不同因素对堆积体侵蚀影响等方面展开。基于对 368 座工程堆积体调查统计, 将堆积体堆置形态概括为散乱锥状堆置、依坡倾倒堆置、分层碾压坡顶散乱堆置、线型垅岗式堆置、坡顶平台有车辆碾压的倾倒堆置 5 类<sup>[8]</sup>, 相对于传统二维坡面, 锥状立体堆积体的侵蚀过程有其独特规律<sup>[12]</sup>。降雨和上方汇水是堆积体坡面侵蚀的主要驱动力, 且随着降雨强度和汇流强度的增大, 侵蚀量显著增加<sup>[3,11]</sup>。坡度和坡长是影响堆积体坡面侵蚀的主要地形因子, 侵蚀量随着坡度增大而递增<sup>[13]</sup>, 但也有研究认为侵蚀量随坡度的变化存在临界值<sup>[14]</sup>; 随着坡长增大, 侵蚀量递增, 但现有的研究受试验条件、场所等限制, 坡长一般小于 20 m<sup>[11]</sup>。近十年, 针对不同区域不同土壤质地工程堆积体的水土流失规律特征研究表明, 土壤质地是影响堆积体坡面水文和侵蚀过程的重要因素, 是表征堆积体坡面抗蚀抗冲的主要指标, 且砂土堆积体相较于壤土和黏土堆积体更易发生流失<sup>[5-6]</sup>。堆积体中砾石是导致其侵蚀和水文特性改变的另一个重要因素, 一方面砾石改变堆积体表面粗糙度进而影响产沙过程, 另一方面改变了堆积体的理化性质, 进而影响水文过程<sup>[15]</sup>。现有研究认为, 砾石对堆积体侵蚀过程影响主要包括砾石

收稿日期: 2021-01-14 修订日期: 2021-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(41701316、42077062、41877082); 长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费(CKSF2021447/TB、CKSF2019179/TB、CKSF2019292/TB)

作者简介: 李建明, 博士生, 工程师, 研究方向为工程土壤侵蚀过程及生态修复研究。Email: hahalijianming@126.com

\*通信作者: 王文龙, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。Email: wlwang@nwsuaf.edu.cn

含量、大小、类型、分布等方面<sup>[4,12,16]</sup>，且砾石含量对侵蚀的影响并非是简单的线性函数关系，而是存在一个临界值，在砾石质量分数 10%左右<sup>[17]</sup>。已有研究对于降雨强度、地形（坡度、坡长）、物质组成（土质、砾石含量）等因素对堆积体侵蚀过程的影响已取得丰硕成果，并出版导则用于指导生产实践<sup>[18]</sup>。

现阶段，对于植被防护坡面侵蚀的研究已形成较完整的体系，主要针对植被盖度及植被类型等方面开展了系列研究<sup>[19]</sup>。然而，生产建设项目由于人为扰动强烈、坡度陡、下垫面物质组成复杂、侵蚀形式多样，使得其水土流失形式与传统水土流失有较大差异<sup>[20]</sup>。现有针对植被防护扰动坡面的研究主要是通过野外调查<sup>[21]</sup>，自然观测<sup>[22]</sup>，采用模拟试验定量化分析。目前仅有少量研究且是采用植物篱防护<sup>[23]</sup>或者通过鱼鳞坑、水平阶等工程措施<sup>[24]</sup>。相对于全坡面植被防护，植物篱防护受其规格影响较大，能够取得的水土流失防护效益也不尽相同<sup>[25]</sup>；而工程措施虽能够在短期内实现减少水土流失，但其生态效益较低。进一步的，已有研究采用的是单独降雨或冲刷试验，然而，现实中短期内形成的堆积体，往往由机械运输倾倒形成，会在堆积体边坡上方形成一个平台，用于机械作业，碾压密实的汇水平台为堆积体边坡上方雨水汇集提供了一定的汇水面积，水流汇集后沿坡面向下流动，加剧了侵蚀的发生，这使得堆积体边坡的侵蚀驱动力由单独的降雨转变为降雨+上方汇水的共同作用。在实际调查中发现，有汇水影响的工程堆积体占总量的绝大多数，即导致堆积体侵蚀的外营力不仅包括降雨还包含了上方汇水。当坡面加入上方汇水后，各侵蚀方式演变速度明显加快，侵蚀产沙量迅速增大，上方汇水对坡面侵蚀的影响甚至超过降雨<sup>[26]</sup>，但针对该方面的定量研究目前仍较欠缺。

综上，目前对于生产建设项目工程堆积体侵蚀机制已有较多研究，对于堆积体的防护有少量报道。然而，对于有上方汇水条件下植被防护堆积体侵蚀的定量研究较少，对于侵蚀驱动力的变化是否改变了植被防护堆积体坡面水文和侵蚀过程特性尚不清晰。因此，本研究在基于野外调查的基础上，通过野外模拟降雨和降雨+上方汇水的试验方法模拟无上方汇水和有上方汇水 2 种条件下植被对堆积体坡面水文和侵蚀过程的调控作用及差异

性，以期为建设项目建设项目工程堆积体水土流失防治及植被防护提供科学指导。

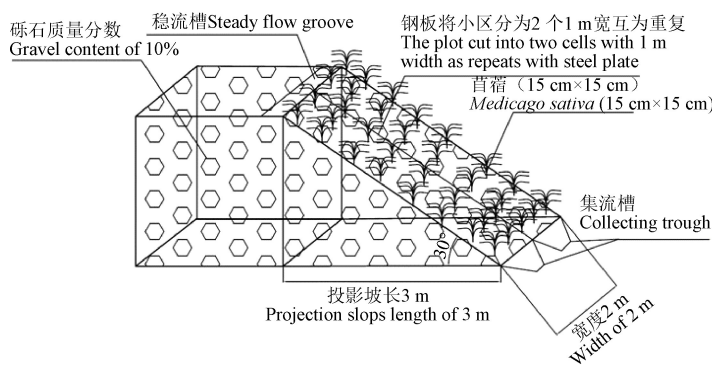
## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

试验在中国科学院水利部水土保持研究所陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站进行（35°14'23.97"N，107°41'20.27"E）。研究区域属于温带大陆性季风气候，年平均气温为 9.1℃，降雨量为 560 mm，大部分降雨介于 5—9 月并且以短历时高强度降雨为主，研究区的土壤属于黄土土质<sup>[23]</sup>。

### 1.2 试验设计

将 2010—2012 年对全国 368 座工程堆积体的野外实地调查结果和 2019 年对黄土高原区域典型堆积体植被防护野外调查结果作为本试验工程堆积体相关参数设计依据<sup>[5,8]</sup>。模拟工程堆积体小区长×宽×高为 3.46 m×2 m×0.6 m，小区的投影坡长为 3 m，坡度设计为 30°。利用薄钢板将小区分为 2 个 1 m 宽的试验区域，互为重复。工程堆积体是将土石按照砾石质量分数 10%通过人工堆填形成，如图 1 所示。使用的土壤来源于修建 G312 国道长武县域堆弃土，根据国际土壤质地分类标准，归为粉壤土，其砂粒、粉粒、黏粒的占比分别为 9.90%、66.69%和 23.41%，有机质质量分数为 12.07%。试验土壤首先风干后过 10 mm 网筛，剔除石粒、根系等杂质。使用的砾石为工程常用的破口石，依据前期调查结果，选用的砾石粒径为 15~25 mm。将砾石与经过风干过筛的土壤按照质量比为 1:9 的比例进行均匀混合。随后将混合后的土石混合物填进小区，在底层装填 5 cm 的细沙，保证底部排水通畅。因此，堆积体实际土石混合物的装填深度为 55 cm，由下至上分为 4 层进行装填，底部 3 层各 15 cm 厚按照容重 1.35 g/cm<sup>3</sup> 进行填筑，表层 10 cm 容重 1.30 g/cm<sup>3</sup>，其中底部 3 层装填过程中需要压实，装填完一层后表层打毛，防止 2 层之间粘贴松散，发生整体滑动，表层 10 cm 装填后用木板拍实并打毛，模拟现实中堆积体表层松散的状态。小区的边界及中间分割的钢板埋入地下 20 cm，表面出露 15 cm 用于消除边界效应。在小区出口处采用砖块及水泥砌筑三角堰，作为接样口。



a. 堆积体示意图  
a. Schematic diagram of spoil heaps



b. 试验小区图  
b. Diagram of experiment plot

图 1 堆积体示意图及试验小区布设图

Fig.1 Schematic diagram of spoil heaps and diagram of experiment plot

根据现场和文献调研,采用紫花苜蓿 (*Medicago sativa*, 简称苜蓿) 作为防护堆积体的植被, 不仅能够起到防护坡面水土流失效果, 另一方面也有经济效益, 是常见的坡面防护植被类型<sup>[27]</sup>。2019 年 3 月, 按照行间距为 15 cm×15 cm 进行穴播, 期间对植被进行养护。8 月时, 通过拍照后软件计算得到苜蓿的覆盖率为 76%, 高度为 20~30 cm, 达到植被防护坡面的效果。另一个小区作为对照, 所有处理均一样, 不种植植被。开始降雨试验前 (植被生长 6 个月后) 采样分析, 苜蓿和裸坡堆积体的容重分别为 (1.19±0.06) 和 (1.33±0.03) g/cm<sup>3</sup>, 初始含水率分别为 25.67%±2.62% 和 19.92%±1.65%。裸坡堆积体经过 6 个月自然沉降后的容重 (1.33 g/cm<sup>3</sup>) 大于初始设计的 1.30 g/cm<sup>3</sup>, 而苜蓿堆积体由于植被生长根系的穿插作用大于自然沉降效果, 导致苜蓿堆积体容重 (1.19 g/cm<sup>3</sup>) 较初始设计小。

### 1.3 野外试验装置

野外试验包括模拟降雨和降雨+上方汇水 2 种方法, 分别模拟无上方汇水和有上方汇水 2 种驱动力作用下植被防护堆积体侵蚀研究。其中降雨试验所用的装置为中国科学院水土保持研究所生产的 SR 型侧喷式野外人工模拟降雨机, 包含 2 个可调整位置的降雨模拟器, 2 个降雨器的水来源于同一根管子分流。通过进水口阀门、降雨器流量计及喷头垫片尺寸来调节降雨强度及均匀度。该套降雨装置的喷头为由喷头体、出水孔板和碎流挡板等部件组成的变孔式喷头。降雨机高度为 6 m, 加上小区高度落差雨滴能够达到终点速度, 降雨均匀系数在 85% 以上。

放水装置为自制的冲刷装备, 包括储水桶 (2.5 m<sup>3</sup>)、流量计、稳流槽、开关阀门和管道等部件。其中, 流量计可调节放水流量范围为 2~18 L/min, 稳流槽长×宽×深为 1.0 m×0.4 m×0.6 m, 其中宽度隔成 2 个 0.2 m, 底部联通。试验装置见图 2 所示<sup>[11,28]</sup>。

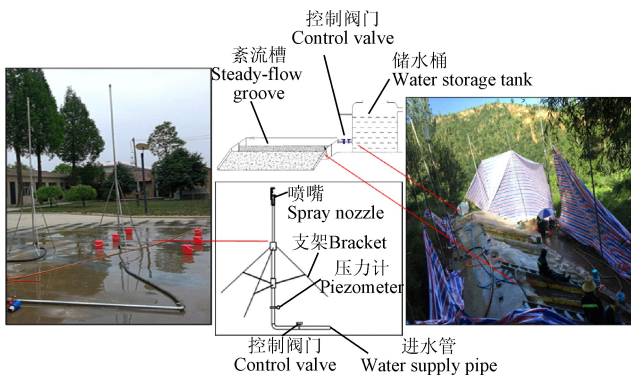


图 2 降雨及冲刷试验装置

Fig.2 Device of rainfall and scouring experiment

基于大量野外调查及观测结果, 造成工程堆积体侵蚀的大部分是短历时高强度暴雨降雨事件, 加之前期大量室内人工模拟降雨试验研究, 降雨强度设计为 0.8、1.2 和 1.8 mm/min 共 3 个<sup>[3,12]</sup>。按照设计的 3 种降雨强度与堆积体上方汇水面积、径流系数计算得到单宽放水流量, 设计放水流量为 15 L/min<sup>[11,27]</sup>。模拟有上方汇水条件下的试验是在降雨试验基础上加入汇水流量, 其中单独降雨

试验用  $R_{0.8}$ 、 $R_{1.2}$ 、 $R_{1.8}$  表示, 降雨+上方汇水用  $R_{0.8}S$ 、 $R_{1.2}S$ 、 $R_{1.8}S$  为标记。为了避免风对试验造成影响, 在整个小区外围建立一个高 8 m 的防风棚。试验开始前, 将小区用遮雨布遮盖, 在小区四周布设雨量筒用于率定降雨强度, 直至误差在 5% 内。待降雨强度率定完毕后, 迅速揭开遮雨布, 开始试验, 从揭开遮雨布开始至坡面形成连续且明显股流, 并在集流槽出口处收集到径流泥沙样作为试验开始计时时间, 将从降雨开始至产流开始计时时段的时间记为产流起始时间, 从接第 1 个样品开始至试验结束的总时间设计为 30 min。为了消除初始含水率对试验结果的影响, 每次试验前 1 d 先采用 0.5 mm/min 的降雨强度进行预降雨。每分钟接 2 个混合样, 一个作为浑水样采用 2 L 的量筒记录体积及质量用于含沙量测算, 另一个作为径流及泥沙样用 5 L 的桶接取后, 静置 10 h, 待泥沙沉淀后倒去上层清水液, 将泥沙转移至铝盒, 带到室内放进 105 °C 烘箱烘干 24 h 后称质量 (放水冲刷侵蚀量大, 烘干时间延长至 48 h)。其中径流率的计算是采用浑水样质量扣除泥沙质量后与纯水密度 (1.0 g/cm<sup>3</sup>) 推求体积, 除以接样时间获得径流率。模拟降雨+上方汇水试验的试验流程与单独降雨试验一致, 但在调试降雨强度前先率定放水流量, 并保证稳流槽是满的, 待降雨强度率定完成后, 同时开始降雨和放水。所有指标是 2 个分割小区测定的平均值, 如 2 个小区的数据差异较大, 则舍弃该组试验, 重新进行试验, 需要对小区进行平整并放置 3 d 自然沉降。为了消除各场次降雨之间堆积体表面的差异性, 根据上一场次试验侵蚀量重新补充填土, 将小区放置 3 d 然后进行下一场试验。

### 1.4 数据分析

#### 1) 侵蚀速率

$$SLR = \frac{M_s}{dLt} \quad (1)$$

式中 SLR 为侵蚀速率, g/(m<sup>2</sup>·min);  $M_s$  为给定时段内的侵蚀量, g;  $d$  为坡面宽度, m;  $L$  为坡面长度, m;  $t$  为给定时间长, min。

#### 2) 减流减沙效益

苜蓿对堆积体坡面减流和减沙效益计算如下:

$$CR = \frac{R_b - R_m}{R_b} \times 100\% \quad (2)$$

$$CS = \frac{S_b - S_m}{S_b} \times 100\% \quad (3)$$

式中 CR 和 CS 分别是减流和减沙效益, %;  $R_b$  和  $S_b$  分别是裸坡的径流率 (L/min) 和侵蚀速率 (g/(m<sup>2</sup>·min));  $R_m$ 、 $S_m$  分别是苜蓿堆积体的径流率 (L/min) 和侵蚀速率 (g/(m<sup>2</sup>·min))。

采用 Excel 2016 和 SPSS 16.0 进行数据处理和统计分析, 采用 Origin 8.5 进行数据绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 植被减水减沙效益

不同试验条件下裸坡和苜蓿堆积体坡面平均侵蚀速

率、径流率及苜蓿的减流减沙效益如表 1 所示。显著性差异分析结果表明，降雨和降雨+上方汇水 2 种驱动力条件下，3 种降雨强度下裸坡的平均侵蚀速率（径流率）均存在显著差异 ( $P<0.05$ )，苜蓿的平均径流率在 2 种驱动力下也存在显著差异 ( $P<0.05$ )，苜蓿平均侵蚀速率在降雨+上方汇水时呈显著差异 ( $P<0.05$ )，而在降雨时  $R_{0.8}$  和  $R_{1.2}$  之间无显著差异 ( $P>0.05$ )， $R_{0.8}$  和  $R_{1.8}$ 、 $R_{1.2}$  和  $R_{1.8}$  之间也呈显著差异 ( $P<0.05$ )。总体而言，无论有无上方汇水，降雨强度对于裸坡及苜蓿堆积体的水文过程和产沙过程均有显著影响。

降雨条件下，苜蓿的减沙效益和减流效益分别是 77.73%~98.51%和 36.32%~83.11%，减沙效益是减流效

益的 1.19~2.14 倍。降雨强度为 0.8 和 1.2 mm/min 时的减流减沙效益大于降雨强度 1.8 mm/min，减沙效益超过 94%，减流效益也达到 60%以上，随着降雨强度增大，苜蓿对堆积体坡面减流减沙效益呈递减趋势，降雨强度由 0.8 mm/min 增大至 1.8 mm/min 时减沙和减流效益分别减少 4.32%~21.10%和 26.85%~56.30%。裸坡堆积体在  $R_{1.2}$  和  $R_{1.8}$  条件下的平均侵蚀速率是  $R_{0.8}$  的 1.79 倍和 3.17 倍，平均径流率分别是 1.68 倍和 2.62 倍；相同条件下苜蓿堆积体  $R_{1.2}$  和  $R_{1.8}$  条件下平均侵蚀速率和径流率分别是  $R_{0.8}$  的 7.00 倍、48.00 倍和 3.83 倍、9.65 倍。即有植被防护堆积体坡面的径流和产沙随降雨强度的变化比裸坡更显著。

表 1 两种驱动力作用下裸坡和苜蓿堆积体平均径流率、侵蚀速率及苜蓿对堆积体的减流减沙效益

Table 1 Runoff rate, soil loss rate, and benefits of soil and water reductions of spoil heaps by *Artemisia gmelinii* under two driving forces

侵蚀驱动力 Erosion driving force	降雨强度 Rainfall intensity/ (mm·min <sup>-1</sup> )	平均径流率 Average runoff rate/(L·min <sup>-1</sup> )		平均侵蚀速率 Average soil loss rate/(g·m <sup>-2</sup> ·min <sup>-1</sup> )		减流效益 Runoff reduction benefits/%	减沙效益 Soil loss reduction benefits/%
		裸坡 Bare slope	苜蓿 <i>Artemisia gmelinii</i> slope	裸坡 Bare slope	苜蓿 <i>Artemisia gmelinii</i> slope		
		降雨 Rainfall	0.8	1.33±0.35c	0.23±0.05c		
	1.2	2.24±0.40b	0.88±0.24b	19.50±6.55b	1.12±0.62b	60.79	94.25
	1.8	3.49±0.86a	2.22±0.79a	34.48±18.06a	7.68±3.73a	36.32	77.73
降雨+上方汇水 Rainfall with scouring	0.8	14.38±0.75c	10.13±2.20c	72.22±13.38c	30.85±16.35b	29.61	57.28
	1.2	15.79±0.45b	13.65±2.40b	139.39±114.47b	22.54±8.64c	13.56	83.83
	1.8	17.31±1.17a	15.03±2.14a	227.31±59.75a	37.79±10.72a	13.17	83.37

注：同一列不同小写字母代表差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant difference ( $P<0.05$ ). Same below.

当侵蚀驱动力由降雨转变为降雨+上方汇水时，苜蓿对堆积体坡面的减沙效益为 57.28%~83.83%，减流效益为 13.17%~29.61%，减沙效益是减流效益的 1.93~6.33 倍（表 1）。随降雨强度增大，减沙效益提高 45.55%~46.35%，而减流效益减少 54.21%~55.54%。除了苜蓿的平均侵蚀速率出现  $R_{1.2}S<R_{0.8}S<R_{1.8}S$  外，裸坡堆积体的平均侵蚀速率和径流率以及苜蓿堆积体的平均径流率都表现为  $R_{0.8}S<R_{1.2}S<R_{1.8}S$ 。加入上方汇水后，裸坡堆积体在  $R_{1.2}S$ 、 $R_{1.8}S$  平均侵蚀速率是  $R_{0.8}S$  条件下的 1.93 倍和 3.15 倍，平均径流率在  $R_{1.2}S$ 、 $R_{1.8}S$  条件下是  $R_{0.8}S$  的 1.10 倍和 1.20 倍；相同条件下苜蓿堆积体平均侵蚀速率在  $R_{1.2}S$ 、 $R_{1.8}S$  条件下是  $R_{0.8}S$  的 0.73 倍和 1.22 倍，平均径流率分别是 1.35 倍和 1.48 倍。

由表 1 可知，侵蚀驱动力的改变，导致裸坡和苜蓿堆积体坡面的径流和产沙过程也发生改变。裸坡堆积体在降雨时的平均侵蚀速率为 10.89~34.48 g/(m<sup>2</sup>·min)，而在降雨+上方汇水时为 72.22~227.31 g/(m<sup>2</sup>·min)。当降雨强度同时加入一个 15 L/min（相当于降雨强度 4.33 mm/min）的上方汇水时，裸坡堆积体在  $R_{0.8}S$ 、 $R_{1.2}S$ 、 $R_{1.8}S$  的平均侵蚀速率分别是  $R_{0.8}$ 、 $R_{1.2}$ 、 $R_{1.8}$  条件下的 6.63、7.15 和 6.59 倍；相同条件下，苜蓿堆积体在  $R_{0.8}S$ 、 $R_{1.2}S$ 、 $R_{1.8}S$  的平均侵蚀速率分别是  $R_{0.8}$ 、 $R_{1.2}$ 、 $R_{1.8}$  条件下的 192.81、20.13 和 4.92 倍。对平均径流率而言，裸坡堆积体在降雨+上方汇水条件下是降雨条件下的 10.81、7.05 和 4.96 倍，苜蓿堆积体是 44.04、15.51 和 6.77 倍。分析 3 场次试验减流减沙效益均值，加入上方汇水后苜蓿对堆

积体的平均减沙和减流效益分别减少 17.01%和 68.74%。因此，当堆积体坡面上方存在一个汇水平台，径流在平台汇集后沿堆积体坡面顺流而下，加剧了对坡面的冲刷，进而导致更加严重的侵蚀。

## 2.2 堆积体坡面水文产沙过程特征

### 2.2.1 侵蚀速率随产流历时变化

不同驱动力下裸坡和苜蓿堆积体坡面侵蚀速率变化如图 3 所示。总体上，在不同驱动力作用下，裸坡堆积体侵蚀速率在产流 10 min 以后随产流历时呈递减趋势，在 0~10 min 呈波动变化，在降雨+上方汇水条件下侵蚀速率在侵蚀过程中的波动变化趋势较降雨条件下显著。当坡面种植苜蓿后，不同驱动力作用下，侵蚀速率变化趋势不同：在降雨条件下，侵蚀速率随产流历时逐渐增大，而在降雨+上方汇水条件下，侵蚀速率变化还与降雨强度有关， $R_{0.8}S$  侵蚀速率呈先递减—相对稳定—再增加—最后递减变化，而  $R_{1.2}S$  和  $R_{1.8}S$  的侵蚀速率呈波动递增—相对稳定变化。

根据图中裸坡和苜蓿堆积体侵蚀速率曲线在产流 10 min 前后变化趋势差异，可将侵蚀速率划分为产流前期（1~10 min）和产流后期（11~30 min）两个阶段分析：裸坡堆积体  $R_{0.8}$ 、 $R_{1.2}$ 、 $R_{1.8}$  产流前期的平均侵蚀速率分别是 15.85、24.43 和 41.88 g/(m<sup>2</sup>·min)，分别是后期的 1.89、1.43 和 1.36 倍，当侵蚀驱动力转变为降雨+上方汇水后，裸坡堆积体前期平均侵蚀速率是后期的 1.06~2.90 倍；而苜蓿堆积体  $R_{0.8}$ 、 $R_{1.2}$ 、 $R_{1.8}$  产流前期的平均侵蚀速率仅占后期的 59.30%、35.21%和 35.64%，但在降雨+上

方汇水条件下,产流前期平均侵蚀速率是后期的 1.43、0.69 和 1.05 倍。结果表明:在单独降雨条件下,裸坡堆积体产流初期侵蚀较严重,但种植苜蓿后,后期侵蚀较前期更大,即苜蓿延缓了堆积体坡面严重侵蚀发生时间;但在降雨+上方汇水条件下,裸坡堆积体前期侵蚀仍较严重,种植苜蓿的堆积体在降雨强度 0.8 和 1.8 mm/min 下也是前期侵蚀较后期严重。但无论在降雨还是降雨+上方汇水条件下,与裸坡相比,苜蓿堆积体侵蚀速率的变化范围均小于裸坡,即种植苜蓿可以有效减缓堆积体坡面侵蚀。因此,在布设水土保持措施时,针对裸坡堆积体尤其要注重对初期坡面的防护,而对于植被防护小区,

需要注意措施发挥效益的持久性。

驱动力为降雨时,裸坡堆积体在 3 种降雨强度下,瞬时侵蚀速率(每分钟测定的侵蚀速率,对应于图中的单个点)为 4.06~99.71 g/(m<sup>2</sup>·min),而当驱动力转为降雨+上方汇水时,波动范围为 43.59~535.31 g/(m<sup>2</sup>·min),增加幅度达到 436.87%~973.65%;苜蓿堆积体在降雨+上方汇水下的瞬时侵蚀速率较降雨下增大 559.96%~8633.33%。结果表明,上方汇水对于加剧裸坡和苜蓿堆积体坡面侵蚀的作用要比降雨强度更大。无论侵蚀驱动力是降雨或是降雨+上方汇水,种植苜蓿能够在产流全过程实现减沙效果,效益均在 80%以上。

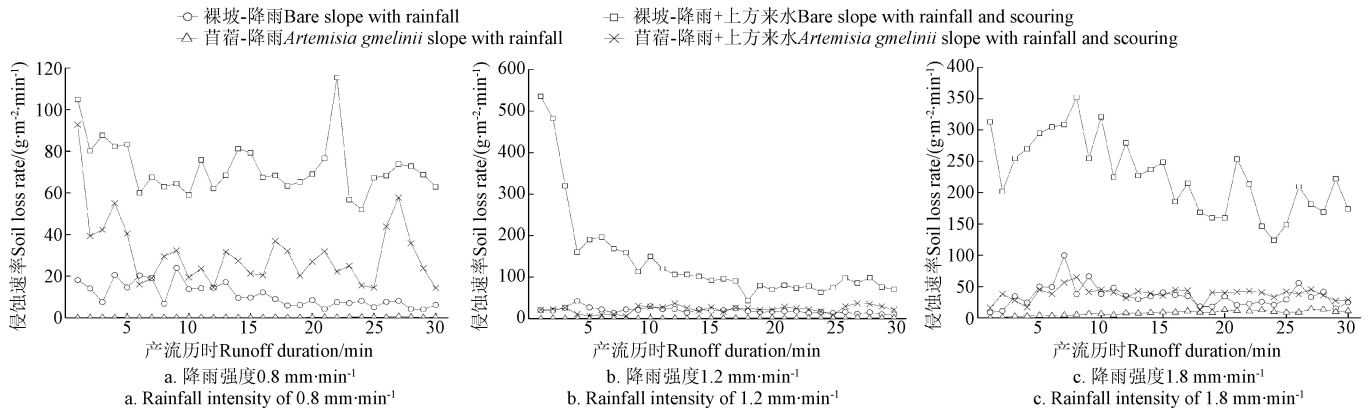


图3 两种驱动力作用下植被对堆积体坡面侵蚀速率的影响  
 Fig.3 Influence of vegetation on soil loss rate of spoil heaps under two driving forces

### 2.2.2 径流率随产流历时变化

相对于侵蚀速率,裸坡和苜蓿堆积体的径流率随产

流历时的变化幅度较小且相近。不同驱动力下裸坡和苜蓿堆积体坡面径流率变化如图4所示。

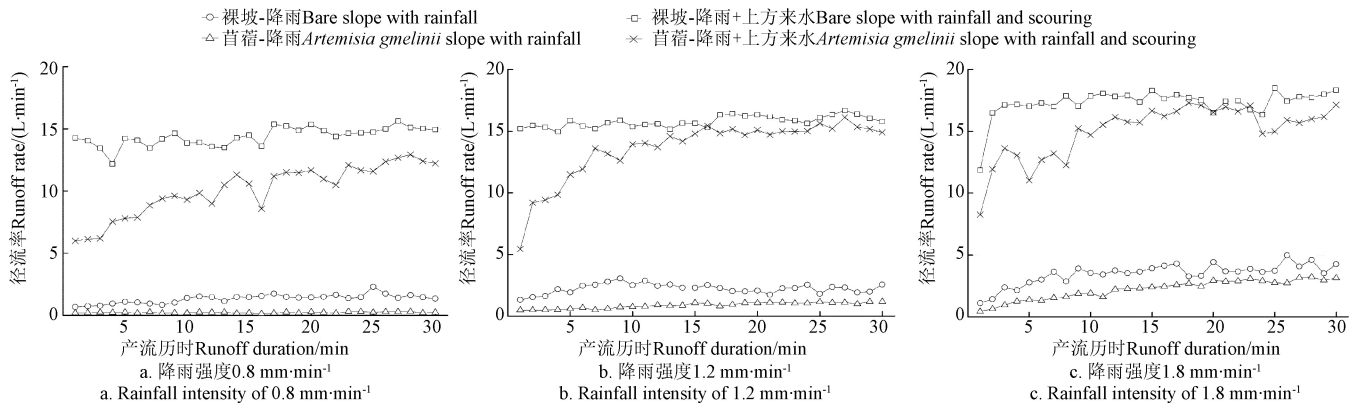


图4 两种驱动力作用下植被对堆积体坡面径流率的影响  
 Fig.4 Influence of vegetation on runoff rate of spoil heaps under two driving forces

驱动力为降雨时,裸坡堆积体径流率随产流历时呈先增大后趋于相对稳定变化, R<sub>0.8</sub>、R<sub>1.2</sub>、R<sub>1.8</sub> 瞬时径流率分别为 0.67~2.30、1.32~3.06、1.12~4.97 L/min。苜蓿堆积体径流率在 R<sub>0.8</sub> 时总体较稳定,瞬时径流率小于 0.32 L/min, R<sub>1.2</sub>、R<sub>1.8</sub> 径流率随产流历时持续递增,变化范围分别为 0.49~1.18 和 0.43~3.21 L/min。3 种降雨强度下苜蓿堆积体的瞬时径流率均小于裸坡,即植被防护可有效增加堆积体坡面入渗,减少径流。产流过程中,苜蓿在 R<sub>0.8</sub>、R<sub>1.2</sub>、R<sub>1.8</sub> 对堆积体坡面的减流效益分别是

69.54%~91.67%、36.03%~80.66%和 15.92%~61.20%,即随降雨强度增大,苜蓿对堆积体坡面减流效益在降低。

侵蚀驱动力转变为降雨+上方汇水时,堆积体坡面的水文过程也发生改变。体现在裸坡堆积体的瞬时径流率随产流历时变化幅度增大, R<sub>0.8</sub>S、R<sub>1.2</sub>S、R<sub>1.8</sub>S 的变化范围在 12.18~15.63、14.95~16.69、11.87~18.49 L/min。而苜蓿堆积体的瞬时径流率随产流历时在产流初期快速增加,随后缓慢增加,相对于降雨条件,有上方汇水条件下苜蓿堆积体坡面瞬时径流率的变化幅度更大,其变

化范围在 5.99~12.94、5.45~16.13 和 8.26~17.30 L/min。产流过程中，苜蓿在  $R_{0.8}S$ 、 $R_{1.2}S$ 、 $R_{1.8}S$  的减流效益分别是 14.41%~58.02%、-1.01%~64.19% 和 -1.98%~35.16%。在降雨加入上方汇水后，植被防护堆积体的瞬时径流率在产流中后期( $R_{1.2}S$ -16 min、 $R_{1.8}S$ -20 和 23 min)的瞬时径流率接近甚至超过裸坡。但总体而言，植被仍可有效减少堆积体坡面径流损失，增加堆积体入渗。

对比分析驱动力为降雨和降雨+上方汇水两种条件下径流率变化过程可知，降雨条件下裸坡和苜蓿堆积体入渗是逐渐向饱和状态发展（径流率持续增大）。但加入上方汇水改变了堆积体入渗过程，其中裸坡堆积体迅速达到饱和（产流全过程总体较稳定），但苜蓿堆积体前期径流持续增加后期达到相对稳定（即入渗是逐步达到饱和），也进一步证明了植被能够有效调控堆积体坡面水文过程，增加入渗，减少径流。

### 3 讨论

生产建设项目弃土弃渣侵占有限的土地资源及其造成的水土流失危害已受到广泛关注<sup>[1-2]</sup>，而采用植被防护坡面侵蚀已有丰富研究<sup>[19]</sup>，但定量分析植被对工程堆积体坡面防护效益的研究较少，尤其是堆积体平台汇水是否改变了植被对堆积体边坡侵蚀的防护尚不清晰。本项研究对比分析有无上方汇水条件下苜蓿对陡坡堆积体坡面水文和侵蚀过程的影响。结果表明，加入上方汇水后裸坡堆积体侵蚀速率随产流历时的变化由波动增加后递减转变为整体波动递减趋势，而苜蓿堆积体在大降雨强度条件下侵蚀速率由持续增加趋势变为相对稳定（图 3）；上方汇水使裸坡堆积体径流率随产流历时波动幅度增大，而苜蓿堆积体径流率也在初期呈现快速递增的变化趋势（图 4）。总体而言，堆积体平台汇水会改变边坡侵蚀和水文特征，使得植被调控堆积体促渗减蚀效益降低，还改变了降雨过程的侵蚀形式。上方汇水造成边坡侵蚀和水文过程发生改变的原因主要是坡面接受上方汇水后，侵蚀形式演变速度明显加快，侵蚀产沙量也迅速增加，上方汇水对坡面侵蚀的作用甚至超过降雨<sup>[26]</sup>。张乐涛等<sup>[24]</sup>通过冲刷试验也表明汇流作为坡面径流侵蚀驱动力和水流能量的传递纽带以及泥沙输移载体，影响并参与与坡面侵蚀的各个环节，加速了坡面侵蚀发生发展，其本质是汇流改变了坡面下部的水文输入条件，径流侵蚀力进行了重新分配。牛耀彬等<sup>[11]</sup>通过野外模拟试验分析降雨和降雨+上方汇水条件下堆积体侵蚀特征研究，表明加入上方汇水后堆积体坡面均出现侵蚀沟，甚至发生滑塌，且侵蚀形态由单独降雨条件下的溅蚀→面蚀→沟蚀发展为面蚀→沟蚀→重力侵蚀。由于本研究的投影坡长仅为 3 m，外加苜蓿防护，并未出现明显侵蚀沟，但侵蚀形态也发生了改变。因此，加入上方汇水后会显著增加堆积体坡面侵蚀，本研究结果表明相同降雨条件下，加入一个固定的上方汇水，裸坡和苜蓿堆积体在降雨+上方汇水条件下的平均侵蚀速率和径流率分别是降雨条件下的 4.92~192.81 倍和 4.96~44.04 倍，加入上方汇水后苜蓿堆积体平均侵蚀速率和径流率的增大幅度大于裸坡

（表 1）。在工程实际中，对于含有汇水平台的堆积体坡面，尤其要注重其水土流失防护，避免发生严重的侵蚀。

本研究结果表明，2 种驱动力下苜蓿减沙效益为 57.28%~98.51%，与现有研究结果植被减沙效益有差异，已有研究表明植被对坡面侵蚀的减沙效益可达到 19.50%~43.60%<sup>[29]</sup>、45.00%~85.00%<sup>[30]</sup>、62.93%<sup>[31]</sup>、80.20%<sup>[32]</sup>、93.60%~99.20%<sup>[33]</sup>，造成以上差异的原因可能是植被特性（类型、覆盖度、恢复时间等）或下垫面特征（地形、物质组成、人为扰动程度等）差异引起的。苜蓿不仅能够减少堆积体侵蚀速率，而且延缓了堆积体坡面严重侵蚀发生的时间，在降雨条件下裸坡前期平均侵蚀速率是后期的 1.36~1.89 倍，而苜蓿在前期平均侵蚀速率仅是后期的 35.21%~59.30%，即裸坡的严重侵蚀发生在产流前期，而植被条件下侵蚀总体后期大于前期；但在加入上方汇水后，裸坡和苜蓿堆积体的侵蚀均表现为前期大于后期。针对工程扰动边坡进行植被防护时，对于裸坡堆积体尤其要注重其初期防护，可以采用工程措施和临时措施作为植物措施的辅助，待植被达到一定生长周期能够发挥效益后在拆除，最大限度发挥水保措施的防护效益。而植被防护堆积体也需要注重发挥植被防护效益的持续性。

关于植被防护工程堆积体侵蚀机制方面，还需要从植被特性方面进行深入研究，阐明植被地上茎叶和地下根系在防护堆积体侵蚀方面的贡献，并考虑加入上方汇水后是否改变了植被防护堆积体侵蚀的动力机制，在后续研究中需要拓展分析，为生产建设项目工程堆积体植被防护侵蚀过程中植被类型选取、配置模拟优化，以及为侵蚀预报模型的建立提供科学依据。

### 4 结论

本文采用野外模拟降雨+上方汇水和降雨试验定量研究有、无上方汇水条件下植被对陡坡工程堆积体坡面减流减沙效益、水文和侵蚀过程特性影响，得出主要结论是：

- 1) 苜蓿能够减少工程堆积体坡面平均侵蚀速率达 57.28%~98.51%，减少平均径流率为 13.17%~83.11%，加入上方汇水后苜蓿对堆积体的平均减沙效益和减流效益分别减少 17.01%和 68.74%。植被不仅能够减少堆积体坡面侵蚀，也使得堆积体坡面的侵蚀过程趋于平缓；
- 2) 3 种雨强在加入一个固定上方汇水后，裸坡和苜蓿堆积体在降雨+上方汇水条件下的平均侵蚀速率分别降雨条件下的 6.59~7.15 倍和 4.92~192.81 倍，平均径流率分别是 4.96~10.81 倍和 6.77~44.04 倍。侵蚀驱动力的变化对苜蓿堆积体的影响比裸坡更大；
- 3) 降雨条件下苜蓿对堆积体坡面减流减沙效益随降雨强度增大降低，而当堆积体边坡加入上方汇水后苜蓿的减沙效益随降雨强度增大而增大，但减流效益在减小。对于容易发生高强度、短历时暴雨等极端气候的区域，尤其要做好堆积体边坡的防护措施。裸坡堆积体在布设植被措施时可以辅以工程或者临时措施，达到良好的防护效果，植被措施需要注重措施发挥效益的持久性。

[参 考 文 献]

- [1] 史志华, 刘前进, 张含玉, 等. 近十年土壤侵蚀与水土保持研究进展与展望[J]. 土壤学报, 2020, 57(5): 1117-1127. Shi Zhihua, Liu Qianjin, Zhang Hanyu, et al. Study on soil erosion and conservation in the past 10 years: Progress and prospects[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5): 1117-1127. (in Chinese with English abstract)
- [2] Viola F, Francipane A, Caracciolo D, et al. Co-evolution of hydrological components under climate change scenarios in the Mediterranean area[J]. Science of the Total Environment, 2016, 544: 515-524.
- [3] 李建明, 牛俊, 王文龙, 等. 不同土质工程堆积体径流产沙差异[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 187-194. Li Jianming, Niu Jun, Wang Wenlong, et al. Differences in characteristics of runoff and sediment yielding from engineering accumulations with different soil textures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(14): 187-194. (in Chinese with English abstract)
- [4] Lv J R, Luo H, Xie Y S. Effects of rock fragment content, size and cover on soil erosion dynamics of spoil heaps through multiple rainfall events[J]. Catena, 2019, 172: 179-189.
- [5] 李建明, 王志刚, 张长伟, 等. 生产建设项目弃土弃渣特性及资源化利用潜力评价[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 1-8. Li Jianming, Wang Zhigang, Zhang Changwei, et al. Evaluation of characteristics and resource utilization potential of residues in production and construction projects[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(2): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [6] 康宏亮, 王文龙, 薛智德, 等. 北方风沙区砾石对堆积体坡面径流及侵蚀特征的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 125-134. Kang Hongliang, Wang Wenlong, Xue Zhide, et al. Effect of gravel on runoff and erosion characteristics on engineering accumulation slope in windy and sandy area, northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(3): 125-134. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王治国, 李文银, 蔡继清. 开发建设项目水土保持与传统水土保持比较[J]. 中国水土保持, 1998(10): 16-17, 42. Wang Zhiguo, Li Wenyin, Cai Jiqing. Comparison of soil and water conservation in development projects with normal soil and water conservation[J]. Soil and Water Conservation in China, 1998(10): 16-17, 42. (in Chinese with English abstract)
- [8] 赵暄, 谢永生, 景民晓, 等. 生产建设项目弃土堆置体下垫面仿真模拟标准化参数[J]. 水土保持学报, 2012, 26(5): 229-234. Zhao Xuan, Xie Yongsheng, Jing Mingxiao, et al. Standardization parameter for spoilbank underlying surface simulation of development construction project[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(5): 229-234. (in Chinese with English abstract)
- [9] 常鸣, 窦向阳, 唐川, 等. 降雨驱动泥石流危险性评价[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2794-2802. Chang Ming, Dou Xiangyang, Tang Chuan, et al. Hazard assessment of typical debris flow induced by rainfall intensity[J]. Earth Science, 2019, 44(8): 2794-2802. (in Chinese with English abstract)
- [10] 郭子正, 殷坤龙, 刘庆丽, 等. 基于位移比模型的三峡库区云阳县域内蠕变型滑坡降雨预警[J]. 地球科学, 2020, 45(2): 672-684. Guo Zizheng, Yin Kunlong, Liu Qingli, et al. Rainfall warning of creeping landslide in Yunyang County of Three Gorges Reservoir region based on displacement ratio model[J]. Earth Science, 2020, 45(2): 672-684. (in Chinese with English abstract)
- [11] 牛耀彬, 吴旭, 高照良, 等. 降雨和上方来水条件下工程堆积体坡面土壤侵蚀特征[J]. 农业工程学报, 2020, 36(8): 69-77. Niu Yaobin, Wu Xu, Gao Zhaoliang, et al. Characteristics of soil erosion on engineering accumulation slope under the rainfall and inflow conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(8): 69-77. (in Chinese with English abstract)
- [12] Luo H, Rong Y B, Lv J R, et al. Runoff erosion processes on artificially constructed conically-shaped overburdened stockpiles with different gravel contents: Laboratory experiments with simulated rainfall[J]. Catena, 2019, 175: 93-100.
- [13] 景峰, 张学培, 郭汉清, 等. 山西省葛铺煤矿弃土弃渣径流泥沙研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(4): 61-64, 73. Jing Feng, Zhang Xuepei, Guo Hanqing, et al. The study of runoff and sediment by artificial rainfall in Gepu Coal Mine of Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(4): 61-64, 73. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李建明, 王文龙, 黄鹏飞, 等. 黄土区生产建设工程堆积体石砾对侵蚀产沙影响[J]. 泥沙研究, 2014(4): 10-17. Li Jianming, Wang Wenlong, Huang Pengfei, et al. Impact on erosion and sediment yield by gravel in pile body of development construction in Loess Area[J]. Journal of Sediment Research, 2014(4): 10-17. (in Chinese with English abstract)
- [15] Abrahams A D, Gao P, Aebly F A. Relation of sediment transport capacity to stone cover and size in rain-impacted interrill flow[J]. Earth Surface Processed and Landforms,

- 2020, 25: 497-504
- [16] Peng X D, Shi D M, Jiang D, et al. Runoff erosion process on different underlying surfaces from disturbed soils in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Catena*, 2014, 123: 215-224.
- [17] Li J M, Wang W L, Guo M M, et al. Effects of soil texture and gravel content on the infiltration and soil loss of spoil heaps under simulated rainfall[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20: 3896-3908.
- [18] 水利部水土保持司. 生产建设项目土壤流失量测算导则[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [19] Li C J, Pan C Z. The relative importance of different grass components in controlling runoff and erosion on a hillslope under simulated rainfall[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 558: 90-103.
- [20] Yuksek F, Yuksek T. Growth performance of Sainfoin and its effects on the runoff, soil loss and sediment concentration in a semi-arid region of Turkey[J]. *Catena*, 2015, 133: 309-317.
- [21] 吕钊, 王冬梅, 徐志友, 等. 生产建设项目弃渣(土)场水土流失特征与防治措施[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(3): 118-126.
- Lv Zhao, Wang Dongmei, Xu Zhiyou, et al. Soil erosion characteristic and prevention measures in abandoned dreg (soil) field of production and construction[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(3): 118-126. (in Chinese with English abstract)
- [22] 潘声旺, 杨秀云, 何茂萍, 等. 几种典型道路边坡植被配置模式的护坡效益研究[J]. *四川农业大学学报*, 2013, 31(2): 151-156.
- Pan Shengwang, Yang Xiuyun, He Maoping, et al. Capacity of soil and water conservation of five typical vegetations in highway side slope[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2013, 31(2): 151-156. (in Chinese with English abstract)
- [23] 牛耀彬, 高照良, 齐星圆, 等. 不同工程堆积体坡面治理措施对土壤抗冲刷侵蚀能力的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2): 134-143.
- Niu Yaobin, Gao Zhaoliang, Qi Xingyuan, et al. Effects of treatment measures on soil anti-scour erodibility in engineering accumulation slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(2): 134-143. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张乐涛, 董俊武, 袁琳, 等. 黄土区工程堆积体陡坡坡面径流调控工程措施的减沙效应[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(15): 101-109.
- Zhang Letao, Dong Junwu, Yuan Lin, et al. Sediment-reducing benefits by runoff regulation under engineering measures in steep slope of abandoned soil deposits in Chinese loessial region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(15): 101-109. (in Chinese with English abstract)
- [25] 杜捷, 高照良, 王凯. 布设植物篱条件下工程堆积体坡面产流产沙过程研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 102-106.
- Du Jie, Gao Zhaoliang, Wang Kai. Study on process of runoff and sediment on slopes of engineering accumulation with measurement of hedgerows[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(2): 102-106. (in Chinese with English abstract)
- [26] Tian P, Xu X Y, Pan C Z, et al. Impacts of rainfall and inflow on rill formation and erosion processes on steep hillslopes[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 548: 24-39.
- [27] Guo M M, Wang W L, Wang T C, Wet al. Impacts of different vegetation restoration options on gully head soil resistance and soil erosion in loess tablelands[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2020, 45(4): 1038-1050.
- [28] Wu Q J, Wang L H, Wu F Q. Tillage-impact on infiltration of the Loess Plateau of China[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2014, 64(4): 341-349.
- [29] 潘成忠, 上官周平. 不同坡度草地含沙水流水力学特性及其拦沙机理[J]. *水科学进展*, 2007, 18(4): 490-495.
- Pan Chengzhong, Shangguang Zhouping. Hydraulic characteristics of silt-laden flow on different gradient grassplots and its mechanism of sediment retention[J]. *Advance in Water Science*, 2007, 18(4): 490-495. (in Chinese with English abstract)
- [30] Pan C Z, Shangguang Z P, Lei T W. Influences of grass and moss on runoff and sediment yield on sloped loess surfaces under simulated rainfall[J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(18): 3815-3824.
- [31] Zhang X, Li P, Li Z B, et al. Effects of precipitation and different distributions of grass strips on runoff and sediment in the loess convex hillslope[J]. *Catena*, 2018, 162:130-140.
- [32] 刘窑军, 王天巍, 李朝霞, 等. 不同植被防护措施对三峡库区土质道路边坡侵蚀的影响[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(4): 896-902.
- Liu Yaojun, Wang Tianwei, Li Zhaoxia, et al. Effects of different vegetation protection measures on erosion prevention of unpaved roadside slopes in Three Gorges Reservoir Area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012 23(4): 896-902. (in Chinese with English abstract)
- [33] 肖培青, 姚文艺, 王国庆, 等. 植被作用下土壤抗剪强度和径流侵蚀力的耦合效应[J]. *水科学进展*, 2016, 27(2): 224-230.
- Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Wang Guoqing, et al. Effect of soil shear strength and runoff erosivity on slopes with different vegetation cover[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(2): 224-230. (in Chinese with English abstract)



## Benefits of soil and water reduction on spoil heaps by vegetation under two driving forces

Li Jianming<sup>1,2,3,4</sup>, Niu Jun<sup>3,4</sup>, Sun Bei<sup>3,4</sup>, Yang Hefei<sup>3,4</sup>, Wang Wenlong<sup>1,5\*</sup>, Huang Jinquan<sup>3,4</sup>,  
Nie Huiying<sup>5</sup>, Pu Jian<sup>1,2,3,4</sup>, Sun Baoyang<sup>3,4</sup>, Chen Zhuoxin<sup>5</sup>, He Xihong<sup>5</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Changjiang River Scientific Research Institute of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 4. Research Center on Mountain Torrent & Geologic Disaster Prevention of the Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China; 5. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Soil erosion on spoil heaps has become an important environmental issue and it causes serious soil erosion, geological disasters and even limits land resources. The influence of grass on soil loss on steep spoil heaps remains elusive. This study aimed to investigate the effects of *Artemisia gmelinii* on runoff and erosion processes of spoil heaps with silt loam soil. The effects of vegetation on runoff and sediment reduction benefits were quantified. Field rainfall experiment and rainfall with scouring experiment were performed. A series of rainfalls at three rainfall intensities (0.8, 1.2, and 1.8 mm/min) and fixed discharge flow rate (15 L/min) were simulated in four plots (3 m × 2 m, including repeats). The spoil heaps were characteristics with the gravel content of 10% and slope gradient degree of 30. The characteristics and differences of vegetation's regulation of hydrological and erosion processes of spoil heaps under two driving forces were analyzed. The results showed: 1) *Artemisia gmelinii* reduced average soil loss rate and runoff rate by 57.28%-98.51% and 13.17%-83.11%, respectively, under the two driving forces, and the benefits of soil reduction and runoff reduction were decreased by 17.01% and 68.74%, respectively after adding the upper catchment flow. The vegetation not only decreased the erosion of the spoil heaps, but also made the erosion process of the spoil heaps smoother. 2) The benefits of soil and water loss reductions were decreased by 4.32%-21.10% with the increase of rainfall intensity for *Artemisia gmelinii* spoil heaps under rainfall experiment, and it was 26.85%-56.30% for runoff reduction benefits. However, the benefits of soil loss reduction were increased by 45.55%-46.35% and runoff rate reduction was decreased by 54.21%-55.54%, respectively, under rainfall and scouring experiment. Significant difference analysis also showed that rainfall intensity had a significant impact on soil and water yield of bare and *Artemisia gmelinii* spoil heaps ( $P < 0.01$ ) under the two driving forces, and the effect of discharge flow was significant than rainfall. 3) The soil loss rate was decreased with runoff duration for bare spoil heaps under rainfall and rainfall with scouring experiment, while it was increased for *Artemisia gmelinii* spoil heaps only under rainfall condition. The fluctuation of erosion and runoff on bare and *Artemisia gmelinii* spoil heaps was increased significantly with time as the driving force changed from rainfall to rainfall with scouring. The average soil loss rate was increased by 6.63-7.15 times and 4.92-192.81 times for bare soil and *Artemisia gmelinii* spoil heaps, respectively, when a fixed discharge flow was added. They were 4.96-10.81 times and 6.77-44.04 times for the average runoff rate. The change of driving forces had greater impact on *Artemisia gmelinii* than bare spoil heaps. 4) The average soil loss rate for bare spoil heaps during the early stage was 1.06-2.90 times that of the later stage under both driving forces, while it was 35.21%-59.30% for *Artemisia gmelinii* spoil heaps under rainfall condition. However, the stage with serious soil loss changed with rainfall intensity under rainfall and scouring experiment for *Artemisia gmelinii* spoil heaps. The results can provide guidance for the prevention and control of soil erosion and runoff loss in the spoil heaps of production projects. These results have significant value for guiding engineering practice.

**Keywords:** soils; sediments; runoff; rainfall; spoil heaps; *Artemisia gmelinii*; upper catchment flow