

# 工程堆积体坡面不同植被格局的控蚀效果研究

杨树云<sup>1</sup>, 张铁钢<sup>2</sup>, 张展<sup>3</sup>, 孙贯芳<sup>1</sup>, 李永红<sup>1,4</sup>,  
高照良<sup>1,4</sup>, 娄永才<sup>1</sup>, 齐星圆<sup>5</sup>, 赵莼<sup>1</sup>, 吴彤<sup>4</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2.国家管网西部管道公司, 乌鲁木齐 830011; 3.黄河水文水资源科学研究院, 郑州 450004;

4.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 5.中兵勘察设计研究院有限公司, 北京 100000)

**摘要:**为探明不同植被格局对工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀的影响,采用10,20,30 L/min 3种放水流量,对黄土区不同格局(裸坡、坡顶、坡中、坡底、条带)下的高陡边坡(32°, 20 m×1 m)进行模拟放水试验,选取径流率、产沙率、减流效益、减沙效益等因子对堆积体坡面植被的控蚀效果进行分析。结果表明:3种放水流量下,条带、坡顶、坡中、坡底的平均径流率较裸坡分别减小57.33%,61.17%,41.62%,24.78%,平均产沙率较裸坡分别减小74.99%,61.10%,55.01%,46.43%,且径流率与产沙率的线性关系( $R^2=0.57\sim 0.80$ ,  $p<0.01$ )整体上弱于裸坡( $R^2=0.71$ ,  $p<0.01$ )。不同植被格局中,条带及坡顶格局的减流效益分别是65.97%,60.52%,减沙效益分别为71.44%,57.22%,二者的控蚀效果远高于其他格局。产沙率与径流功率的线性相关性( $R^2=0.61\sim 0.83$ ,  $p<0.01$ )高于径流剪切力( $R^2=0.29\sim 0.76$ ,  $p<0.01$ ),径流功率能更好地反映堆积体坡面土壤侵蚀机制。

**关键词:**工程堆积体; 植被格局; 减流效益; 减沙效益; 径流功率

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)04-0121-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.016

## Study on Erosion Control Effect of Different Vegetation Patterns on Slope Surface of Engineering Accumulation

YANG Shuyun<sup>1</sup>, ZHANG Tiegang<sup>2</sup>, ZHANG Zhan<sup>3</sup>, SUN Guanfang<sup>1</sup>, LI Yonghong<sup>1,4</sup>,  
GAO Zhaoliang<sup>1,4</sup>, LOU Yongcai<sup>1</sup>, QI Xingyuan<sup>5</sup>, ZHAO Chun<sup>1</sup>, WU Tong<sup>4</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Pipe China West Pipeline Company, Urumqi 830011; 3. Yellow River Hydrology and Water Resources Research Institute, Zhengzhou 450004; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 5. China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co., LTD., Beijing 100000)

**Abstract:** In order to explore the soil erosion control effect of different vegetation patterns on the slope surface of engineering accumulation, the high and steep slopes (32°, 20 m×1 m) with different patterns (bare slope, top slope, middle slope, bottom slope and strip slope) in the loess region were simulated with three water discharge rates of 10, 20 and 30 L/min. The runoff rate, sediment yield rate, flow and sediment reduction benefit were selected to analyze the erosion control effect of vegetation patterns on the slopes of engineering accumulation. The results showed that the average runoff rates of strip, slope top, slope middle and slope bottom were 57.33%, 61.17%, 41.62%, 24.78% lower than that of bare slope, and the average sediment yield rates were 74.99%, 61.10%, 55.01%, 46.43% lower than that of bare slope. The linear relationship between runoff rate and sediment yield rate ( $R^2$  was 0.57 to 0.80,  $p<0.01$ ) was weaker than that of bare slope ( $R^2=0.71$ ,  $p<0.01$ ). In different vegetation patterns, the flow reduction benefits of strip pattern and slope top pattern were 65.97% and 60.52%, respectively, and the sediment reduction benefits were 71.44% and 57.22%, respectively. The erosion control effects of strip pattern and slope top pattern

收稿日期:2021-11-26

资助项目:国家自然科学基金项目(41671283)

第一作者:杨树云(1996—),女,硕士研究生,主要从事工程建设区土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: ysynwafu@163.com

通信作者:高照良(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程和荒漠化防治研究。E-mail: gzl@ms.iswc.ac.cn

were much higher than other patterns. The linear correlation between sediment yield and runoff power ( $R^2$  was 0.61 to 0.83,  $p < 0.01$ ) was higher than that of runoff shear force ( $R^2$  was 0.29 to 0.76,  $p < 0.01$ ). Runoff power could better reflect the mechanism of soil erosion on the slope of accumulation.

**Keywords:** engineering accumulation; vegetation pattern; flow sediment reduction benefits; sediment reduction benefits; runoff power

工程堆积体是人类生产建设活动中形成的一种非永久性的特殊人工地貌,具有“平台—陡坡”的结构<sup>[1]</sup>,其下垫面物质组成复杂、土壤抗冲性差<sup>[2]</sup>,在平台汇集的径流条件下极易引起坡面冲刷侵蚀和加速工程地貌水土流失<sup>[3]</sup>,甚至引发滑坡、泥石流等灾害<sup>[4]</sup>,不仅影响自然生态环境,更对周边居民的生命安全造成威胁。生产建设项目诱发的水土流失成为如今水土保持治理难点,亟需通过科学方式进行解决。

植物措施在改善坡面立地条件、削弱径流、拦截泥沙等方面发挥重要的作用,它是防治水土流失最行之有效的方法<sup>[5]</sup>。植被的空间配置格局通过影响坡面径流的汇集和挟沙能力,进而影响坡面土壤侵蚀<sup>[6]</sup>。然而不同的植被格局其坡面土壤侵蚀具有较大差异<sup>[7]</sup>,合理的植被配置可以有效地防蚀减沙<sup>[8]</sup>,但不合理的植被格局可能加剧土壤侵蚀的发生<sup>[9]</sup>。因此,如何科学合理布设堆积体坡面植被,有效地控制水土流失是当前水土保持研究的重点。陈鹏等<sup>[10]</sup>和任何蒙等<sup>[11]</sup>研究认为,植被分布在自然坡面下部时坡面土壤流失量最小;李强等<sup>[12]</sup>研究发现,黄土区随机格局的植被配置水土保持效果较好;王恒星等<sup>[13]</sup>研究提出,在黄土地区不同植被布设方式中,块状镶嵌格局的水土保持效益明显高于其他格局。由此可见,何种植被格局能够更好地防治水土流失目前还没有统一论。坡面径流是土壤侵蚀的主要动力,径流剪切力和径流功率通常被用来衡量产生侵蚀的临界水动力条件<sup>[14]</sup>。关于植被对土壤侵蚀动力的调控,当前研究主要集中于植被盖度<sup>[15]</sup>、植被密度<sup>[16]</sup>、植被结构<sup>[17]</sup>对流速、雷诺数、弗劳德数、阻力系数等水动力学参数的影响,而对于不同植被格局下径流剪切力、径流功率的响应仍有待进一步研究。另外,由于工程堆积体的陡坡土壤侵蚀机理也与一般天然缓坡的坡面具有很大不同,植被配置方式对陡坡工程堆积体边坡产流产沙的影响目前尚不清楚。

基于此,本文在野外采用放水冲刷试验,来探讨不同植被布设方式对工程堆积体陡坡坡面产流产沙的影响,从而更深入阐明高陡坡度下工程堆积体不同植被格局坡面水土流失过程和侵蚀机制,以便于科学合理地优化配置植物措施,为工程堆积体水土保持提供理论依据。

## 1 材料与方法

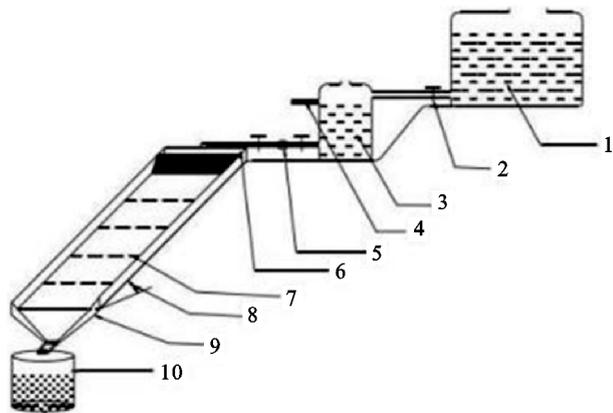
### 1.1 试验区概况

试验在陕西省西南部的杨凌水土保持野外科学试验站(34°19'N,107°59'E)进行。该站地处三级阶地,地形呈西北高东南低,海拔 435~563 m,属暖温带半湿润半干旱季风气候,四季分明,多年平均降水量 637.6 mm,平均蒸发量 993.2 mm,平均气温 12.9 °C,无霜期 211 天,塋土为该区最主要的土壤类型,其次为黄土,暖温带落叶阔叶林分布广泛。

### 1.2 试验设计与观测方法

本研究采用野外人工模拟径流的方法。试验的放水装置由蓄水池、水阀、溢流槽等组成,试验时为了出流稳定,利用恒压桶供水,并配合水阀率定流量,试验装置见图 1。为模拟黄土高原雨强 0.5,1.0,1.5 mm/min,冲刷流量设计为 10,20,30 L/min,时长 45 min。

试验小区由试验站周边生产建设项目工程开挖的黄土填充,覆土前清除杂物及大颗粒(>2 mm)砾石,覆土厚约 50 cm,土壤颗粒机械组成为:黏粒(<0.002 mm)33.15%,粉粒(0.002~0.05 mm)60.07%,砂粒(0.05~2.0 mm)6.78%。并用铝塑板(埋深 45 cm,高于坡面 15 cm)拼接围成。平均土壤容重为 1.25 g/cm<sup>3</sup>,土壤含水率为 26.25%。



注:1为蓄水池;2为水阀;3为恒压桶;4为溢流口;5为水表;6为溢流槽;7为观测断面;8为坡度;9为试验小区;10为集流装置。

图 1 试验小区及放水试验装置

赵暄<sup>[18]</sup>通过野外调查发现,工程堆积体坡度多集中在 26°~35°。因此,试验小区坡度采用 32°,同时坡面长、宽分别为 20,1 m 进行试验。焦菊英等<sup>[19]</sup>、刘斌等<sup>[20]</sup>研究表明,黄土高原地区植被有效盖度为 50%。因此,本试验植被覆盖度设计为 50%,植被面

积为  $10 \text{ m}^2$ 。设计裸坡(未布设植被)、坡顶(植被块状分布在距坡顶  $0 \sim 10 \text{ m}$  的范围内)、坡中(植被块状分布在距坡顶  $5 \sim 15 \text{ m}$  的范围内)、坡底(植被块状分布在距坡底  $0 \sim 10 \text{ m}$  的范围内)、条带(植被条带状均匀分布在整个坡面,共 10 个条带)5 种植被配置格局,具体布设方式见图 2 和表 1。试验准备期,在堆积体植被格局坡面铺设  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  人工草皮 10 个,定期浇水养护,控制株高  $10 \text{ cm}$ ,待草皮完全适应堆积体坡面时,开始试验。

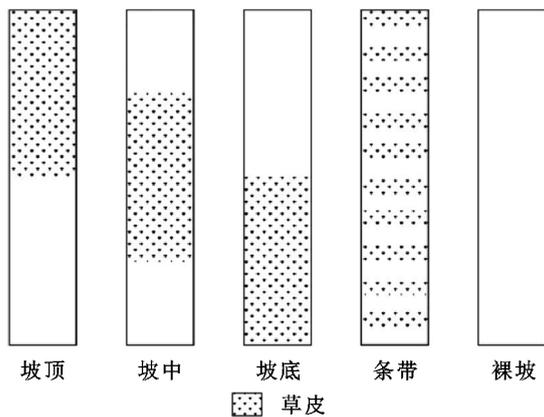


图 2 试验小区植被布设

表 1 不同植被格局布设情况

植被格局	布设情况
裸坡	无植被布设
坡顶	植被面积 $10 \text{ m}^2$ ( $10 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1$ 块), 距离坡顶 $0 \sim 10 \text{ m}$
坡中	植被面积 $10 \text{ m}^2$ ( $10 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1$ 块), 距离坡顶 $5 \sim 15 \text{ m}$
坡底	植被面积 $10 \text{ m}^2$ ( $10 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1$ 块), 距离坡底 $0 \sim 10 \text{ m}$
条带	植被面积 $10 \text{ m}^2$ ( $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 10$ 块), 均匀分布, 间隔 $1 \text{ m}$

本试验集中于 2018 年 7—8 月进行。试验重复 2 次,共 30 场。为控制试验小区初始试验条件,试验前 1 天采用工具平整压实坡面,均匀洒水至坡面即将产流,并用苫布苫盖起来。试验小区每隔  $2.5 \text{ m}$  设有观测断面(8 个),试验开始前,在坡顶、坡中、坡底采集土样,用于测土壤容重和含水率。为准确控制放水量,试验前多次采用体积法率定,误差控制在  $5\%$  以内,同时将水温计置于溢流槽测量水温。待小区下方集流槽出流后记录产流时间,然后重新开始计时,冲刷时长  $45 \text{ min}$ 。前  $6 \text{ min}$  内每隔  $2 \text{ min}$  测量 1 次流速、径流宽,同时用塑料瓶收集浑水泥样并计时, $6 \text{ min}$  后每隔  $3 \text{ min}$  测量 1 次,共 16 次。采用钢尺人工测量径流宽,高锰酸钾示踪法测定流速,所测的流速乘以校正系数  $0.75$ ,作为各观测断面的平均流速<sup>[21]</sup>。试验结束后记录水温,对泥样进行称重、烘干等,并计算径流率、产沙率等指标。

### 1.3 数据分析方法

径流深( $h$ )为观测时段内坡面平均径流深度( $\text{m}$ )。

$$h = \frac{q}{Vbt} \quad (1)$$

式中: $q$  为产流量( $\text{m}^3$ ); $V$  为断面流速( $\text{m/s}$ ); $b$  为径

流宽( $\text{m}$ ); $t$  为接样时间( $\text{s}$ )。

径流率( $Q$ )为单位时间内径流体积( $\text{L/min}$ )。

$$Q = \frac{M' - M}{6 \times 10^4 \rho t} \quad (2)$$

式中: $M'$  为浑水质量( $\text{g}$ ); $M$  为泥样干重( $\text{g}$ ); $\rho$  为水的密度( $\text{kg/m}^3$ ); $t$  为接样时间( $\text{s}$ )。

产沙率( $SL$ )为单位时间单位面积内泥沙输移质量( $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ )。

$$SL = \frac{M}{bLt} \quad (3)$$

式中: $M$  为泥样干重( $\text{g}$ ); $b$  为径流宽( $\text{m}$ ); $t$  为接样时间( $\text{s}$ ); $L$  为坡长( $\text{m}$ )。

减流效益( $C_q$ )、减沙效益( $C_m$ )为布设有植被的坡面与对照裸坡的产流量、产沙量的比值。

$$C_q = \frac{q_1 - q_2}{q_1} \times 100\% \quad (4)$$

$$C_m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中: $q_1$  为对照裸坡产生径流量( $\text{L/m}^2$ ); $q_2$  为植被坡面产生径流量( $\text{L/m}^2$ ); $m_1$  为对照裸坡产沙量( $\text{g/m}^2$ ); $m_2$  为植被坡面产沙量( $\text{g/m}^2$ )。

径流剪切力( $\tau$ )反映径流对坡面土壤的分离能力( $\text{N/m}^2$ )。

$$\tau = \rho g R J \quad (6)$$

式中: $\rho$  为浑水密度( $\text{kg/m}^3$ ); $g$  为重力加速度( $\text{m/s}^2$ ); $R$  为水力半径( $\text{m}$ ); $J$  为水力能坡,用坡度正切值近似代替。

径流功率( $\omega$ )表征单位面积水流所消耗的功率( $\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$ )。

$$\omega = \tau V \quad (7)$$

式中: $\tau$  为径流剪切力( $\text{N/m}^2$ ); $V$  为断面流速( $\text{m/s}$ )。

应用 Excel 2016 进行基本指标统计分析,SPSS 24.0 软件进行方差分析和回归分析等,并使用 Origin 2016 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同植被格局堆积体坡面产流产沙

2.1.1 堆积体坡面径流率和产沙率 试验条件下,将不同格局的径流率和产沙率作差异性检验(表 2),随时间的推移,径流率、产沙率的动态变化见图 3。从表 2 和图 3 可知,径流率在不同格局之间差异普遍显著( $p < 0.05$ ),不同格局下堆积体坡面径流率随时间先波动上升、后趋于稳定。裸坡的径流率远大于布设有植被的坡面,而坡顶和条带远小于其他格局,从植被布设位置上看,径流率由坡底到坡顶逐渐减小。在 3 种放水流量下,坡顶、条带、坡中、坡底植被格局堆积体坡面相较于裸坡平均径流率分别降低  $61.17\%$ ,  $57.33\%$ ,  $41.62\%$ ,  $24.78\%$ 。流量为  $10 \text{ L/min}$  时,裸坡和坡中格局与另外 3

种格局径流率差异显著 ( $p < 0.05$ ), 坡顶格局径流率最小, 仅为  $0.27 \text{ L/min}$ , 在产流后期变化较平稳。流量为  $20 \text{ L/min}$  时, 条带格局径流率稳定, 总体处在  $0.87 \sim 1.30 \text{ L/min}$ , 与其他格局差异显著 ( $p < 0.05$ )。流量为  $30 \text{ L/min}$  时, 径流率在不同格局之间均差异显著 ( $p < 0.05$ ), 坡顶 ( $2.13 \text{ L/min}$ ), 条带 ( $3.29 \text{ L/min}$ ) 小于其他格局。

结合图 3 和表 2 可知, 不同植被格局堆积体坡面的产沙率随产流时间的变化有所不同。总体来看, 裸坡产沙率随时间的延长较另外 4 种植被格局变化更为剧烈, 呈现“多峰多谷”的态势。在所有流量下裸坡产沙率显著高于其他格局堆积体坡面。在 3 种放水流量下, 条带、坡顶、坡中、坡底植被格局堆积体坡面与裸坡相比, 平均产沙率分别下降  $74.99\%$ ,  $61.10\%$ ,  $55.01\%$ ,  $46.43\%$ 。流量为  $10 \text{ L/min}$  时, 除裸坡和坡底格局外, 其他格局的堆积体坡面产沙率波动较小。流量为  $20 \text{ L/min}$  时, 条带的产沙率变化最稳定, 与其余格局差异显著 ( $p < 0.05$ )。而裸坡变化剧烈, 远高于其他格局坡面。流量为  $30 \text{ L/min}$  时, 5 种格局坡面产沙率规律性差, 条带和坡顶格局与其他格局的产沙率相比差异显著 ( $p < 0.05$ )。

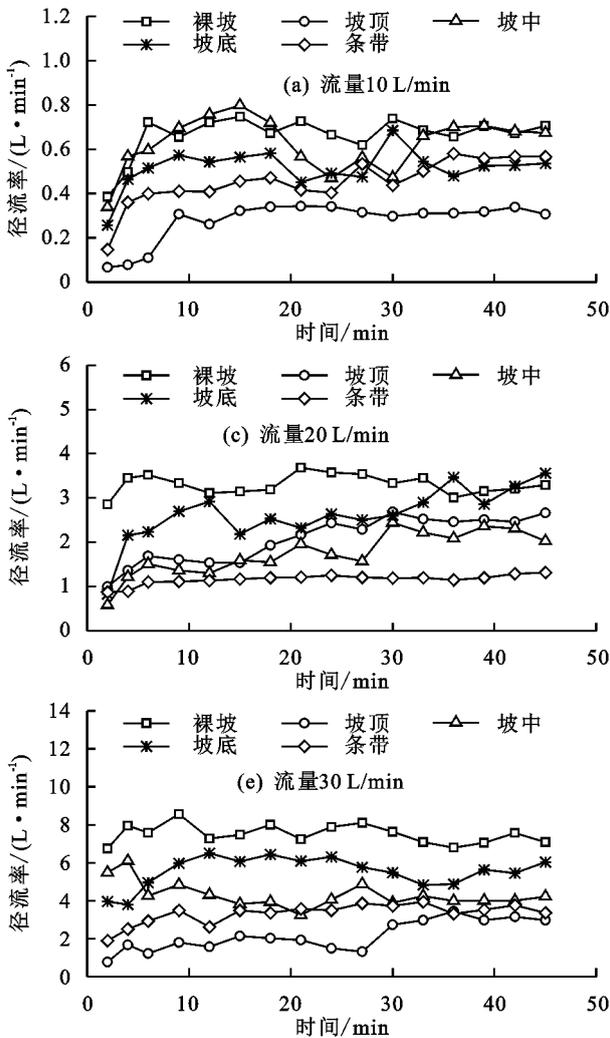


表 2 不同植被格局下堆积体坡面径流率、产沙率

流量/ ( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	植被 格局	径流率/ ( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	产沙率/ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
10	裸坡	$0.66 \pm 0.02\text{Aa}$	$2.65 \pm 0.23\text{Aa}$
	坡顶	$0.27 \pm 0.02\text{Ba}$	$0.08 \pm 0.01\text{Ba}$
	坡中	$0.62 \pm 0.03\text{Aa}$	$0.19 \pm 0.02\text{Ba}$
	坡底	$0.51 \pm 0.02\text{Ca}$	$0.62 \pm 0.09\text{Ca}$
	条带	$0.45 \pm 0.03\text{Ca}$	$0.34 \pm 0.03\text{BCa}$
20	裸坡	$3.30 \pm 0.05\text{Ab}$	$13.76 \pm 0.75\text{Ab}$
	坡顶	$2.05 \pm 0.13\text{Bb}$	$6.87 \pm 0.66\text{Bb}$
	坡中	$1.74 \pm 0.12\text{Bb}$	$5.91 \pm 0.67\text{BCb}$
	坡底	$2.60 \pm 0.15\text{Cb}$	$4.80 \pm 0.46\text{Cb}$
	条带	$1.15 \pm 0.03\text{Db}$	$1.37 \pm 0.09\text{Db}$
30	裸坡	$7.50 \pm 0.12\text{Ac}$	$20.53 \pm 1.38\text{Ac}$
	坡顶	$2.13 \pm 0.20\text{Bb}$	$7.42 \pm 0.67\text{Bb}$
	坡中	$4.33 \pm 0.17\text{Cc}$	$10.52 \pm 1.04\text{Cc}$
	坡底	$5.51 \pm 0.20\text{Dc}$	$14.37 \pm 1.31\text{Dc}$
	条带	$3.29 \pm 0.13\text{Ec}$	$7.53 \pm 0.38\text{Bc}$

注: 表中数据为平均值  $\pm$  标准差; 不同大写字母表示相同流量不同格局径流率(产沙率)差异显著 ( $p < 0.05$ ); 不同小写字母表示相同格局不同流量径流率(产沙率)差异显著 ( $p < 0.05$ )。

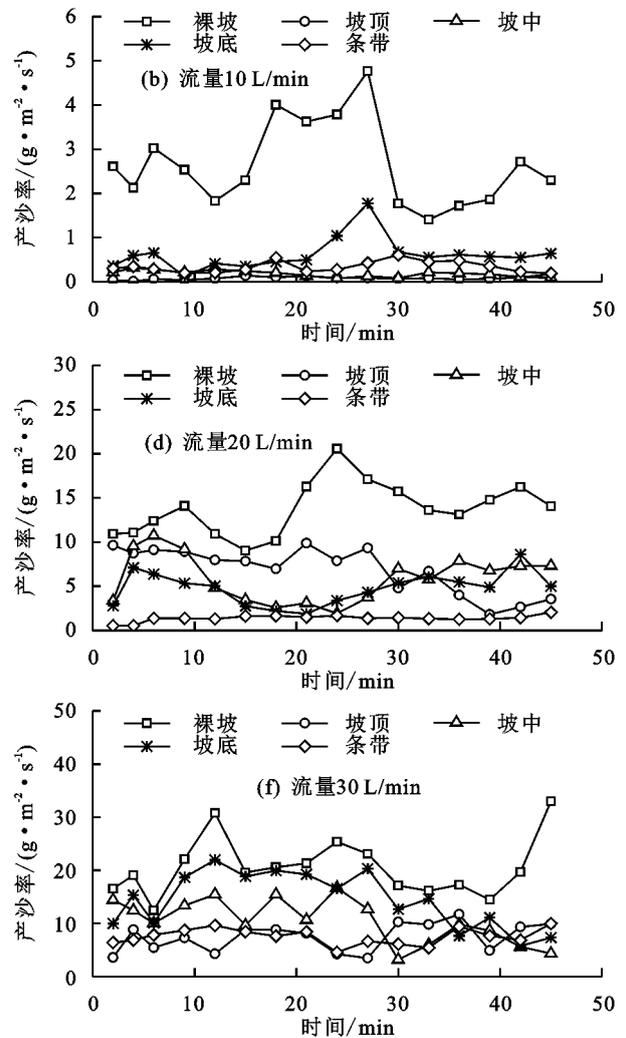


图 3 不同植被格局下坡面径流率和产沙率

2.1.2 不同植被格局堆积体坡面侵蚀水沙关系 径流是重要的坡面侵蚀动力和泥沙输移载体<sup>[22]</sup>,探讨径流率与产沙率之间的关系对揭示不同植被格局堆积体的减沙机制尤为重要。为探明不同植被格局下工程堆积体坡面产流与产沙的关系,选取径流率和产沙率进行回归分析(表 3)。结果表明,不同格局下径流率与产沙率均呈极显著线性关系( $p < 0.01$ ),产沙率随径流率的增大而增大,决定系数表现为  $R^2_{\text{条带}} (0.80) > R^2_{\text{裸坡}} (0.71) > R^2_{\text{坡中}} (0.70) > R^2_{\text{坡底}} (0.59) > R^2_{\text{坡顶}} (0.57)$ ,除条带格局,其他植被格局的决定系数均比裸坡低,表明坡面措施减弱坡面径流率和产沙率之间的线性关系。植被的地上部分能有效地拦蓄径流,削弱径流的侵蚀动能<sup>[23]</sup>,因此在同一径流率下配置植被的坡面土壤流失量远小于裸坡。

表 3 不同植被格局下产沙率(y)与径流率(x)的关系

植被格局	拟合方程	$R^2$
裸坡	$y = 2.37x + 2.91$	0.71**
坡顶	$y = 3.39x + 0.16$	0.57**
坡中	$y = 3.12x - 0.87$	0.70**
坡底	$y = 4.36x - 2.98$	0.59**
条带	$y = 2.45x - 0.39$	0.80**

注: \*\* 表示相关性极显著( $p < 0.01$ );  $n = 48$ 。

### 2.2 不同植被格局堆积体坡面减流减沙

为了分析堆积体坡面不同植被格局下的减流效益与减沙效益,选取产流时间、流速、土壤流失量做对比分析,并根据径流量和产沙量,得出 4 种植被格局的减流效益、减沙效益(表 4)。从表 4 可知,在放水 4.88 min 时,裸坡开始产流,而植被格局堆积体坡面产流时间在 5.08~10.91 min,坡顶、坡中、坡底、条带格局下的产流时间分别是裸坡的 1.83, 1.21, 1.04, 2.34 倍,表明植被能有效延缓产流。不同格局下坡面的平均流速表现为裸坡(0.62) > 坡中(0.39) > 坡底(0.34) > 坡顶(0.30) > 条带(0.27),植被格局堆积体坡面的流速均小于裸坡。4 种植被格局下的土壤流失量相较于裸坡,减小幅度分别为 71.69%(条带), 56.10%(坡顶), 50.91%(坡中), 38.18%(坡底)。黄土堆积体坡面减流、减沙效益表现为条带(65.97%, 71.44%)减流减沙效果最好,坡顶(60.52%, 57.22%)次之,随后为坡中(44.45%, 52.11%),坡底(29.86%, 37.70%)。整体上看,不同格局黄土堆积体坡面减沙效益(37.70%~71.44%)优于减流效益(29.86%~65.97%)。由此可以得到,各配置植被坡面的格局中,条带和坡顶格局延缓产流时间,降低坡面流速,大幅度减少土壤流失量,蓄水减沙效果优于其他格局。

表 4 不同植被格局下堆积体坡面的减流减沙效益

植被格局	产流时间/min	流速/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	土壤流失量/ ( $g \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )	减流 效益/%	减沙 效益/%
裸坡	4.88	0.62	3.85		
坡顶	8.96	0.30	1.69	60.52	57.22
坡中	5.90	0.39	1.89	44.45	52.11
坡底	5.08	0.34	2.38	29.86	37.70
条带	10.91	0.27	1.09	65.97	71.44

### 2.3 不同植被格局下侵蚀产沙与径流剪切力、径流功率的关系

将试验条件下不同格局的产沙率分别与径流剪切力、径流功率进行回归分析(表 5)。由表 5 可知,产沙率与径流剪切力、径流功率在 5 种格局下均存在极显著线性关系( $R^2 = 0.29 \sim 0.83, p < 0.01$ ),表明产沙率随着径流剪切力、径流功率的增大而增大。除坡中格局外,产沙率与径流功率的决定系数( $R^2 = 0.61 \sim 0.83$ )均高于径流剪切力( $R^2 = 0.29 \sim 0.76$ ),用径流功率预测不同格局下工程堆积体坡面产沙率更为合理。裸坡格局下的产沙率对径流剪切力、径流功率的敏感度(拟合斜率)分别达到 0.91, 1.95, 均高于 4 种植被格局(0.18~0.83, 1.29~1.69),说明植被覆盖在一定程度上降低工程堆积体坡面的产沙率。

由表 5 可知,裸坡、坡顶、坡中、坡底、条带格局下坡面径流开始搬运泥沙颗粒的临界径流剪切力分别为 -3.42, -14.61, 1.46, -3.39, -0.91  $N/m^2$ 。临界径流功率分别为 -0.24, -0.30, -0.67, 0.19, -0.39  $N/(m \cdot s)$ 。这表明植被覆盖影响土壤侵蚀,整体提高临界径流剪切力(坡顶格局除外),而对临界径流功率的影响有所不同,不同格局之间临界径流功率差异不大,除坡底格局为正值外,其余格局均为负值,坡顶、坡中、条带格局的临界径流功率略小于裸坡,三者坡面径流的剥蚀能力甚至超过裸坡。

表 5 不同植被格局下产沙率与径流剪切力、径流功率的关系

植被格局	产沙率(y)与径流剪切力(x)		产沙率(y)与径流功率(x)	
	拟合方程	$R^2$	拟合方程	$R^2$
裸坡	$y = 0.91x + 3.11$	0.62**	$y = 1.95x + 0.47$	0.83**
坡顶	$y = 0.18x + 2.63$	0.29**	$y = 1.69x + 0.51$	0.66**
坡中	$y = 0.83x - 1.21$	0.72**	$y = 1.29x + 0.87$	0.61**
坡底	$y = 0.36x + 1.22$	0.39**	$y = 1.54x - 0.30$	0.83**
条带	$y = 0.54x + 0.49$	0.76**	$y = 1.57x + 0.61$	0.82**

注: \*\* 表示相关性极显著( $p < 0.01$ );  $n = 48$ 。

## 3 讨论

不同植被格局中,裸坡的径流率和产沙率波动均最大,而布设有植被的坡面波动小且更稳定。这是由于植被覆盖条件下裸露坡面和草皮交替分布,一方面

植被物理拦截径流,增加水分入渗,也削弱径流侵蚀能力;另一方面,植被覆盖降低水文连通性,切断并缩短水沙的流动路径,极大地限制侵蚀沟的发育,进而减缓或抑制坡面水土流失<sup>[24]</sup>。与裸坡相比较,布设有植被的堆积体坡面均具有较好的减流减沙效益,条带格局水土保持效果最好,坡底格局效果最差。而有学者<sup>[25-26]</sup>研究发现,植被布设于中下部时水土保持效果更好,究其原因是本文研究对象为工程堆积体,其土体结构跟自然坡面不同,表现为土质松散、抗蚀性差。位于坡面中下部的植被很难拦截从上方来的大部分径流泥沙,所以坡中和坡底格局蓄水减沙效果不及其他格局。在堆积体坡面的不同坡位中,坡顶部土壤侵蚀最为严重<sup>[27]</sup>,在坡的上部布设植被,拦截和分散径流,降低流速,可有效地拦截径流泥沙;而条带格局则均匀地配置植被,形成一道道拦截,极大地削弱了径流的挟沙能力。植被条带格局较集中分布的格局(坡顶、坡中、坡底)更利于减轻土壤侵蚀。

本试验条件下,不同格局堆积体坡面的产沙率与径流功率的线性相关性高于产沙率与径流剪切力,径流功率可以较好地预测工程堆积体坡面径流搬运泥沙的能力,这与聂慧莹等<sup>[28]</sup>、丁文斌等<sup>[29]</sup>对工程堆积体坡面侵蚀动力的研究结果一致。朱冰冰等<sup>[30]</sup>也指出,草本植被覆盖对侵蚀动力有很大影响,径流侵蚀功率能更好地预测土壤侵蚀。本研究临界径流剪切力、临界径流功率有负值,实施植被措施的坡面与对照坡面差异不明显,这与肖培青等<sup>[31]</sup>研究发现的草本和灌木覆盖明显提高了坡面的临界径流剪切力、临界径流功率不一致,这是由于其试验坡度为 $20^\circ$ ,相对本试验所设计的 $32^\circ$ 较缓,而且工程堆积体自身结构松散,试验坡度为陡坡,水力侵蚀的同时也伴随着自身重力侵蚀,加上产流后期坡面措施的作用减弱,“源—汇”转变机制使得植被覆盖的坡面侵蚀加剧<sup>[32]</sup>。也有学者<sup>[33]</sup>研究发现,实施工程措施的工程堆积体坡面,其临界径流剪切力、临界径流功率也有呈现负值的情况,说明坡面措施的控蚀效果具有时效性。

分析不同植被格局下工程堆积体坡面控蚀效果对坡面合理布设植被进行水土保持具有重要意义。但由于野外试验天气、时间、人力等各种条件的限制,试验在布设的植被上只采用了单一的草皮布设,且只研究了不同格局下的产流产沙过程及侵蚀动力调控,并未把植被格局的控蚀效果与其水文、泥沙连通性联系起来,并用连通性指数来定量描述不同植被格局对土壤侵蚀的影响。在今后的研究中,应考虑布设植被的多样化,可选择不同的草灌相结合,并与水文连通

性和泥沙连通性联系起来,探讨其对工程堆积体坡面水土流失的影响。

## 4 结论

(1)不同流量下,4种植被格局堆积体坡面的径流率和产沙率与裸坡差异显著( $p < 0.05$ ),平均径流率、产沙率较裸坡分别降低 $24.78\% \sim 61.17\%$ , $46.43\% \sim 74.99\%$ ,不同植被格局堆积体坡面径流率和产沙率表现为裸坡 $>$ 坡底 $>$ 坡中 $>$ 坡顶 $>$ 条带,且裸坡的径流率和产沙率变化最为剧烈,条带格局变化最平缓;不同格局的水沙关系为极显著线性相关( $R^2 = 0.57 \sim 0.80$ ,  $p < 0.01$ ),植被格局的水沙决定系数普遍小于裸坡。

(2)植被格局堆积体坡面具有较好的减流减沙效益,减流效益变化范围为 $29.86\% \sim 65.97\%$ ,减沙效益变化范围为 $37.70\% \sim 71.44\%$ ,减沙效益高于减流效益。条带和坡顶格局的减流减沙效益优于其他格局,条带格局减流、减沙效益分别达到 $65.97\%$ , $71.44\%$ ,坡顶格局分别为 $60.52\%$ , $57.22\%$ ,因此在进行堆积体坡面植被治理时可优先选择条带进行,其次也可选择将植被布设在坡顶位置以求得到最大效益。

(3)不同格局产沙率与径流剪切力呈极显著线性正相关( $R^2 = 0.29 \sim 0.76$ ,  $p < 0.01$ ),与径流功率也为极显著线性相关( $R^2 = 0.61 \sim 0.83$ ,  $p < 0.01$ ),径流功率与产沙率的相关性更高,径流功率能更好地预测不同格局下工程堆积体坡面土壤侵蚀。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 李永红,牛耀彬,王正中,等.工程堆积体坡面径流水动力学参数及其相互关系[J].农业工程学报,2015,31(22):83-88.
- [3] Zhang L T, Gao Z L, Li Z B, et al. Downslope runoff and erosion response of typical engineered landform to variable inflow rate patterns from upslope[J]. Natural Hazards, 2016, 80(2): 775-796.
- [4] 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.
- [5] 蒋静,张超波,张雪彪,等.土壤水分对植物根系固土力学性能的影响综述[J].中国农学通报,2015,31(11): 253-261.
- [6] 高光耀,傅伯杰,吕一河,等.干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J].生态学报,2013,33(1): 12-22.
- [7] 沈中原.坡面植被格局对水土流失影响的实验研究[D].西安:西安理工大学,2006.

- [8] 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.
- [9] Youssef F, Visser S M, Karssenber D, et al. The effect of vegetation patterns on wind-blown mass transport at the regional scale: A wind tunnel experiment[J]. *Geomorphology*, 2012, 159/160: 178-188.
- [10] 陈鹏,张铁钢,董智,等.灌草格局对砒砂岩区产流产沙特征的影响[J].干旱区资源与环境,2020,34(9):116-121.
- [11] 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.
- [12] 李强,李占斌,尤洋,等.植被格局对坡面产流产沙影响的试验研究[J].水资源与水工程学报,2007,18(5):31-34.
- [13] 王恒星,张建军,孙若修,等.晋西黄土区不同植被格局坡面产流产沙特征[J].北京林业大学学报,2021,43(3):85-95.
- [14] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A, et al. Hydraulics and erosion in eroding rills [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(4): 865-876.
- [15] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.模拟植被覆盖条件下坡面流水动力学特性[J].水科学进展,2014,25(6):825-834.
- [16] 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.
- [17] 杨春霞,姚文艺,肖培青,等.植被覆盖结构对坡面产流产沙的影响及调控机制分析[J].水利学报,2019,50(9):1078-1085.
- [18] 赵暄.生产建设项目弃土堆置体下垫面概化与水土流失特征研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2013.
- [19] 焦菊英,王万忠,李靖.黄土高原林草水土保持有效盖度分析[J].植物生态学报,2000,24(5):608-612.
- [20] 刘斌,罗全华,常文哲.不同林草植被覆盖度的水土保持效益及适宜植被覆盖度[J].中国水土保持科学,2008,6(6):68-73.
- [21] 雷廷武,张晴雯,闫丽娟.细沟侵蚀物理模型[M].北京:科学出版社,2009:117-129.
- [22] 张乐涛,高照良,田红卫.工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J].农业工程学报,2013,29(24):94-102.
- [23] Nadal-Romero E, Lasanta T, Regüés D, et al. Hydrological response and sediment production under different land cover in abandoned farmland fields in a Mediterranean mountain environment [J]. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 2011, 201(55): 303-323.
- [24] Cristina F, José M F, José A. V. Exploring the effect of hydrological connectivity and soil burn severity on sediment yield after wildfire and mulching [J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 31(13): 1611-1621.
- [25] 张霞,李鹏,李占斌,等.坡面草带分布对坡沟水土流失的防控作用及优化配置[J].农业工程学报,2019,35(7):122-128.
- [26] 于国强,贾莲莲,朱冰冰,等.不同植被格局对梁峁坡一沟坡的侵蚀动力作用机制[J].水土保持通报,2020,40(4):10-16.
- [27] 杨帅,高照良,李永红,等.工程堆积体坡面植物篱的控蚀效果及其机制研究[J].农业工程学报,2017,33(15):147-154.
- [28] 聂慧莹,王文龙,郭明明,等.降雨条件下两种土壤类型工程堆积体坡面水沙关系与侵蚀动力特征[J].应用生态学报,2020,31(9):3141-3153.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.植被影响下坡面侵蚀临界水流能量试验研究[J].水科学进展,2011,22(2):229-234.
- [32] 姜永才,高照良,李永红,等.不同上方来水模式下工程堆积体坡面的植被调控[J].农业工程学报,2019,35(24):144-153.
- [33] 牛耀彬,高照良,刘子壮,等.工程措施条件下堆积体坡面土壤侵蚀水动力学特性[J].中国水土保持科学,2015,13(6):105-111.