

工程堆积体坡面植物篱的控蚀效果及其机制研究

杨 帅^{1,2}, 高照良^{1,3*}, 李永红³, 牛耀彬^{1,3},
王 凯¹, 白 皓³, 齐星圆³, 李玉婷婷³

(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. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘 要: 工程堆积体极易产生水土流失, 是生产建设项目水土流失防治的重点。为探明工程堆积体植物篱控蚀效果和机理, 通过野外模拟径流冲刷试验, 该文采用 35、45、55 L/min 3 种放水流量, 对 24°、28°、32° 三种坡度的植物篱 (H) 及裸露对照小区 (C) 堆积体边坡 (20 m×5 m 标准监测小区) 进行模拟放水冲刷试验, 选取产沙率、径流含沙量、减沙量、径流挟沙力、剪切力、剥蚀率和径流功率等因子对堆积体坡面植物篱的控蚀效果及其机理进行分析。结果表明: 堆积体侵蚀时间段集中在产流中后期 (10~32 min), 侵蚀位置主要在坡面中上段 (0~10 m), 植物篱具有 10%~45% 的减沙效益, 其控蚀能力与冲刷历时之间存在二次函数的关系, 临界时间随坡度和流量的增加而提前; 植物篱坡面产流后期径流含沙量超过裸坡, 这与其在侵蚀过程中的“源-汇”转变有关; 植物篱可降低坡面土壤剥蚀率, 提高坡面的临界剪切力和临界径流功率, 能抑制细沟向坡面下部的发育, 基于径流功率, 其可蚀性参数 (3.58 g/(N·m)) 大于对照坡面的可蚀性参数 (2.83 g/(N·m))。研究结果可为坡面植物篱的合理利用提供一定的理论支撑, 也能为工程堆积体措施条件下土壤侵蚀预报模型的建立提供部分参数支持。

关键词: 土壤; 侵蚀; 径流; 工程堆积体; 植物篱; 放水流量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.15.019

中图分类号: S157.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-15-0147-08

杨 帅, 高照良, 李永红, 牛耀彬, 王 凯, 白 皓, 齐星圆, 李玉婷婷. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.15.019 http://www.tcsae.org
Yang Shuai, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, Niu Yaobin, Wang Kai, Bai Hao, Qi Xingyuan, Li Yutingting. Erosion resistance effects and mechanism of hedgerows in slope of engineering accumulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(15): 147—154. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.15.019 http://www.tcsae.org

0 引 言

采矿工程、交通工程、水电工程等生产建设项目在施工及生产过程中会产生排土场、排矸场、尾矿库等各类工程堆积体^[1], 而堆积体的土壤侵蚀模数远高于自然坡面, 实验表明其侵蚀产沙量可以达到自然裸露荒坡的 10.08~12.20 倍^[2], 因而, 工程堆积体的水土流失防控成为生产建设项目水土保持工作的重点^[3]。植物措施通常被认为是防治土壤侵蚀的最根本措施, 而植物篱作为一种有效的水土保持措施已在各类坡耕地中得到广泛应用^[4]。大量研究表明, 植物篱有明显的减流减沙效益^[5-8], 魏忠义等^[9]针对工程堆积体提出的“径流分散”控蚀模

式中, 将等高植物篱作为径流分散单元的重要组成部分。Donjatee 等^[10]研究植物篱影响下的产流产沙回归方程, 已取得了较好的预测效果。此外, 国内外许多学者对植物篱控蚀保水的机理也进行了有益的探索, Rachman 等^[11]认为植物篱能提高土壤导水率及入渗能力; 卜崇峰等^[12]认为植物篱通过改变坡面径流流速分布从而影响了径流侵蚀量; 许峰等^[4]认为经过较长时间, 植物篱对微地貌的改变进而对其减沙效果有一定贡献; Akram 等^[13]从水动力学角度, 研究了植物篱对坡面流的径流功率、地表糙率和阻力系数的影响。目前, 已有研究主要集中于以缓坡耕地为下垫面, 探究植物篱措施的合理配置模式及其减流减沙过程和机制, 且大多试验研究集中在缓坡模拟冲刷和室内装填土槽中, 而对野外陡坡原位小区的侵蚀研究相对较少, 对于陡坡工程堆积体坡面植物篱的应用方法、防治效果及其控蚀机制研究也少有报道。

本文对野外工程堆积体陡坡径流小区植物篱措施下的径流冲刷过程进行放水冲刷试验, 探究植物篱措施对工程堆积体陡坡坡面的控蚀效果及机制, 以期为建设项目的实践过程中植物篱措施的合理选择和配置利用提供理论及技术依据。

收稿日期: 2017-03-29 修订日期: 2017-07-25

基金项目: 国家自然科学基金: 工程堆积体陡坡坡面径流侵蚀输沙动力过程试验研究 (41671283); “十三五”重点研发计划: 高塬沟壑区固沟保塬生态防护与苹果产业提质增效技术及示范 (2016YFC0501706-02)

作者简介: 杨 帅, 男, 山东潍坊人, 主要从事工程建设区土壤侵蚀与水土保持。杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所, 712100。

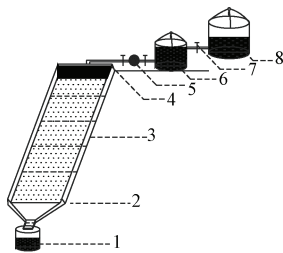
Email: ys930125@163.com

*通信作者: 高照良, 男, 河南灵宝人, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为农业水土工程和荒漠化防治。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。Email: gzl@ms.iswc.ac.cn

1 试验材料与方法

1.1 试验小区概况

本试验区位于中国科学院长武黄土高原农业生态试验站王东沟小流域(35°14'24.5"N, 107°40'21.2"E), 海拔1107 m, 属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均降水量584 mm, 降雨季节分布不均匀, 多集中于7—9月, 年均气温9.1℃, 光照资源充沛, 昼夜温差大, 地下水位50~80 m, 无霜期171 d。该区属典型黄土高原沟壑区, 地带性土壤为黑垆土, 土壤母质为中壤质马兰黄土。试验小区在人工开挖面上构建, 开挖面达到了土壤母质层。试验小区经现场机械开挖后进行人工回填, 回填土壤来自周边高陡边坡开挖产生的弃土, 回填前清除弃土中杂草和有机残落物层, 使其更接近工程堆积体真实情况并避免土壤中根系影响试验效果。试验小区为标准径流小区(坡面投影长20 m, 宽5 m), 覆土厚度0.5 m。堆积体土壤质地为砂壤, 土石比超过9:1, 粒径多在1 mm以下。对回填弃土进行土壤粒径分析, 首先对>0.25 mm的颗粒进行干筛, 取孔径0.25、1、2、5 mm 4个土筛, 对各筛中土样称质量, 将<0.25 mm的土壤样在实验室用吸管法进行测量, 其土壤机械组成为: >5、5~2、2~1、1~0.25、0.25~0.1、0.1~0.05、0.05~0.02、0.02~0.01、0.01~0.005、0.005~0.002、0.002~0.001和<0.001 mm质量分数依次为0.04%、0.11%、0.13%、0.21%、0.30%、6.83%、34.35%、24.52%、10.06%、6.10%、5.02%和12.33%。本试验采用径流冲刷方式, 用稳压水箱保持放水流量恒定, 调节阀与水表配合进行率定流量, 通过稳流槽获得平稳、恒定的出流。试验小区及模拟径流放水装置示意图见图1, 试验供水用王东沟民用水井。



1.集流桶 2.集流槽 3.试验小区 4.稳流槽 5.流量计 6.恒压桶 7.阀门 8.蓄水桶
1. Collecting barrels 2. Collecting trough 3. Experimental plot 4. Steady flow groove 5. Flowmeter 6. Constant pressure barrel 7. Valve 8. Storage tank

图1 试验设备示意图
Fig.1 Device sketch for experiments

1.2 试验设计与过程

根据试验区1a中发生的最大暴雨强度, 并结合前期放水试验的研究成果, 设置35、45、55 L/min共3个放水流量梯度(对应雨强分别为24、31、38 mm/h)。由前期野外调查发现工程堆积体边坡坡度集中在23°~40°, 因此试验设计边坡坡度为24°、28°和32°, 每个坡度设置一个植物篱小区(H)并同时设置裸坡小区作为对照(C), 每个小区在其他相同条件下依次按3个放水流量梯度进行冲刷, 共计18场试验。

试验小区布设见图2, 植物篱小区内布置4道植物篱, 篱间距4 m, 从距离坡顶3 m处开始布设。从坡顶到坡底按照6、4、4、6 m的长度将坡面分为4个区段, 从上至下编号为1~4, 使植物篱小区每个区段内均包含一道植物篱, 以便于对比分析对照坡面和植物篱小区细沟侵蚀分布的差异。每场试验结束后, 通过测量细沟尺寸计算细沟体积, 以此反映细沟侵蚀量。

依据黄土高原植被建设经验, 本试验选取紫穗槐和紫花苜蓿构建植物篱带。为给植物提供较好的生长条件并利于前期种植, 试验以水平平整地, 构建植物篱宽60 cm。试验前1 a以株距20 cm栽植紫穗槐幼苗, 试验当年以67 kg/hm²的密度播种紫花苜蓿, 以保证至试验前篱带内覆盖率达到90%; 每次试验前对坡面进行重新平整, 并控制土壤容重和含水率(分别选取5个观测断面0~20 cm土壤容重和含水率, 土壤容重介于1.30~1.40 g/cm³, 均值1.33 g/cm³, 变异系数为4.52%; 土壤质量含水率介于15.22%~17.88%, 均值16.52%, 变异系数5.98%)。每小区设置5个测量断面, 分别为距坡顶2、6、10、14、18 m的位置。试验从有径流流出小区时开始计时, 持续39 min, 最初6 min内每隔2 min, 其后每隔3 min测定1次浑水总量并收集径流泥沙样, 同时在每个测量断面处测定对应时刻的水宽及流速。烘干法测定样品中的含沙量, 高锰酸钾示踪法测定流速(染色剂法测定流速为径流表层流速, 实测流速乘以0.75作为断面平均流速)。

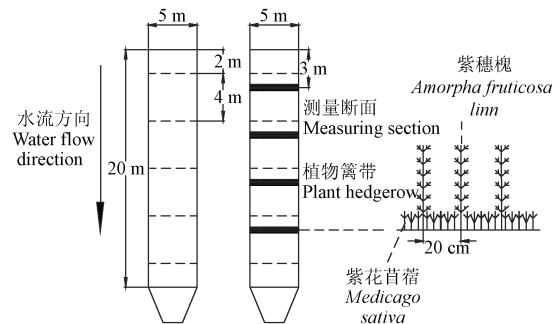


图2 径流小区布置示意图
Fig.2 Schematic diagram of runoff plot

1.3 数据分析方法

1) 减沙效益 η 利用无量纲的坡面径流、减沙效益, 可更方便对不同调控措施进行对比, 更客观反映出不同措施对坡面降雨径流、产沙的调控作用^[14]。本文采用减沙效益来表征不同坡度及流量下植物篱的控蚀效果

$$\eta = (M_c - M_h) / M_c \quad (1)$$

式中 η 为减沙效益; M_c 为对照小区累积产沙量, kg; M_h 为植物篱小区累积产沙量, kg。

2) 累积减沙量 M_r 指相对于对照坡面, 植物篱坡面的减沙量随放水历时延长的变化。累积减沙量可反映随着放水历时的延长, 植物篱减沙能力的动态变化。

$$M_r = M_c(t) - M_h(t) \quad (2)$$

式中 M_r 为累积减沙量, kg; $M_c(t)$ 为冲刷历时 t 时刻时对照小区的累积产沙量, kg; $M_h(t)$ 冲刷 t 时刻时植物篱坡面的累积产沙量, kg。

3) 径流挟沙力 ρ 反映了单位体积径流可以挟带的最大泥沙量, 可用 M·A·雅里加诺夫公式计算^[15]:

$$F = \alpha \cdot \frac{v^3}{gh\omega} \quad (3)$$

式中 F 为水流挟沙能力, kg/m^3 ; h 为径流水深, m ; v 为径流速度, m/s ; α 为降雨紊动系数, ω 为泥沙沉速, m/s 。本试验因无降雨影响, α 取值为 1, 同一堆积体的泥沙性质一致, 因此试验中 ω 为定值; 为简化计算, 以 $\beta = v^3/h$ 表征径流挟沙能力, 用 q/β (q 为径流含沙量) 反映坡面可蚀性的大小。

4) 土壤剥蚀率 D_r 表示单位时间内单位面积上被剥蚀土壤的质量, 是反映土壤侵蚀量化和土壤侵蚀预报研究的重要指标^[16], 其计算公式为:

$$D_r = \frac{M}{b \cdot L \cdot T} \quad (4)$$

式中 D_r 为土壤剥蚀率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; M 为时段内的产沙量, kg ; b 为过水断面宽, m ; L 为坡长, m ; T 为取样的时间间隔, s 。

5) 径流剪切力 τ 表征径流冲刷动力, 反映了径流对土壤颗粒的推动力, 可从动力学角度揭示坡面产流产沙的变化规律, 其计算公式为^[17]:

$$\tau = \rho \cdot g \cdot R \cdot J \quad (5)$$

式中 τ 为水流剪切应力, Pa ; ρ 为浑水密度, kg/m^3 ; R 为水力半径, m , 由于坡面水流为薄层水流, 可以用平均水深 h 代替。

6) 平均水深 h 由于整个试验过程中全部为面蚀和细沟侵蚀阶段, 断面水深较小, 直接测定误差较大, 因此采用计算公式为^[18]:

$$h = \frac{Q_1 - Q_2}{V \cdot b \cdot T} \quad (6)$$

式中 Q_1 、 Q_2 分别为 T 时间段内进入该断面以上区域的水量和入渗量, m^3 ; V 为水流平均流速, m/s , 其他符号意义同前。

7) 径流功率 P 由 Bagnold 提出, 表征径流损失能量而做功的速率, 是影响土壤侵蚀的重要水力学参数, 能准确预测径流的分离能力^[18], 其表达式为:

$$P = \tau v \quad (7)$$

式中 P 为水流功率, $\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$, 其他符号意义同前。

2 试验结果及分析

2.1 不同流量、坡度下植物篱对减沙效益的影响

将不同坡度、流量下植物篱的减沙效益情况点绘于图 3, 由图可知, 3 个坡度的减沙效益均在 15%~45% 之间, 且植物篱的减沙能力随坡度的增大而减弱。而植物篱在单一坡度下, 其在放水流量为 35 L/min 时减沙效果最好, 在单一流量下, 其减沙效益随着坡度的增加而明显减小。综上所述: 在不同流量、坡度条件下植物篱对坡面径流泥沙都有明显的控蚀作用, 且其控蚀效果随坡度、放水流量的减小而增强(放水流量 55 L/min 时除外, 其植物篱的减沙能力较 45 L/min 时的减沙能力整体要强,

表明植物篱的控蚀能力可能存在于一个临界放水流量, 本试验 3 个放水流量中 45 L/min 可近似看作其临界放水流量, 具体临界放水流量还需进一步试验分析)。在堆积体坡面植物篱措施布设时要综合考虑流量和坡度的影响, 以发挥植物篱对坡面侵蚀泥沙最大的控蚀效果。

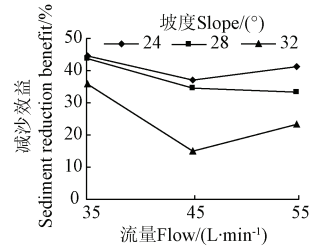


图 3 不同流量、坡度下植物篱的减沙效益

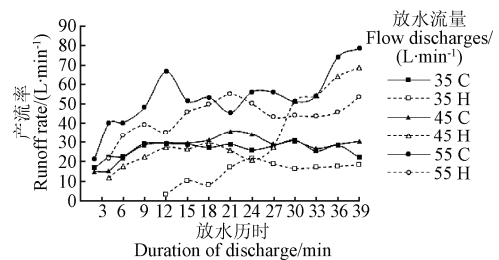
Fig.3 Sediment reduction benefit of hedgerow under different runoff discharge and gradient

2.2 植物篱对坡面径流泥沙过程的影响

2.2.1 植物篱对坡面产流、产沙过程的影响

模拟降雨下的上方来水是坡面径流形成的主要因素, 不同放水流量影响着径流及产沙的强弱, 而径流产流率和含沙量是表征径流随冲刷时间变化的直观变量。将 32°植物篱和对照坡面在不同放水强度下产流率和含沙量随时间的变化情况点绘于图 4 和图 5。

图 4 为 32°植物篱和对照坡面在不同放水流量下产流率随放水历时的变化情况, 在产流前 10 min 产流率增长较快, 随冲刷历时的推移, 坡面产流过程趋于稳定, 植物篱坡面初始产流时间均滞后于对应流量的对照坡面, 且其产流率始终小于对照坡面。这是因为植物篱带机械拦挡作用可以拦截部分水沙, 同时其对土壤性质的改良可使土壤入渗能力增强, 坡面蓄满产流所需的水量增加, 致使植物篱坡面初始产流时刻较对照小区要滞后 2~10 min, 这种滞后现象是植物篱控蚀能力的重要组成部分^[19], 但植物篱和对照坡面的产流率之差不能解释累积减沙量出现临界值的现象。



注: C, H 分别代表对照小区和植物篱小区。
Note: C, H represent control plot and hedgerow plot.

图 4 32°小区产流率随时间变化

Fig.4 Changes of runoff rate with time in 32°plot

图 5 为 32°植物篱和对照坡面在不同放水流量下含沙量随时间的变化情况, 在坡面的产流初期, 植物篱较对照坡面的径流含沙量整体上要小, 但在产流末期, 前者反而超过后者。因此, 在后期产流率稳定的条件下, 2 种坡面径流含沙量差异的变化引起了植物篱减沙能力的减

弱, 导致累积减沙量降低。因此, 对于堆积体不同坡度和当地降雨条件, 在植物篱的实际运用中, 要达到一定的控蚀减沙效果, 需要按具体条件配置不同规格的植物篱, 结合 Donjadee 等的研究成果^[10,20], 在大坡度大雨强的情况下, 需要通过减少植物篱布设间距方式以提高植物种植密度来增强控蚀效果。

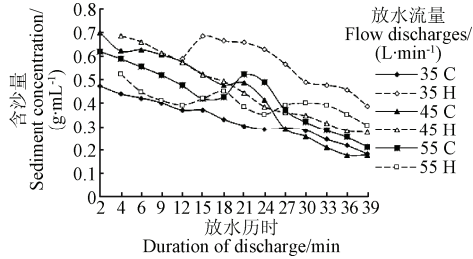


图5 32°小区径流含沙量随时间变化

Fig.5 Changes of sediment concentration with time in 32°plot

2.2.2 植物篱累积减沙量与冲刷历时的关系

将不同坡度、不同流量条件下, 植物篱坡面累积减沙量随时间的变化状况点绘于图6。

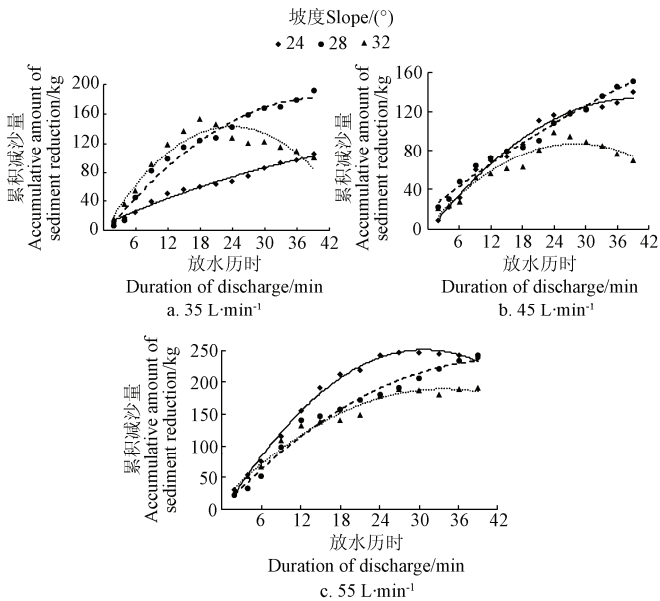


图6 累积减沙量与冲刷历时的关系

Fig.6 Relationship between sediment reduction amounts and duration of discharge

由图6可知, 植物篱坡面的累积减沙量随放水历时的变化整体呈现出前期迅速增加, 而后逐渐减小或渐趋稳定的过程。从放水流量因子分析, 植物篱累积减沙量随放水流量增加整体呈现先降低后增加趋势, 表明植物篱减沙效果随流量因子具有一定的变异性, 其累积减沙量存在一个临界放水流量, 在本试验中临界放水流量为45 L/min; 而从坡度因子分析, 植物篱累积减沙量随放水流量增加其变化趋势存在差异, 其存在临界坡度, 本试验中临界坡度为28°, 同时, 在大坡度条件下的产流末期, 植物篱小区的减沙效果有所下降, 这主要是由于大坡度条件下, 植物篱后期“汇源”机制转变明显及可能存在的水毁现象所致, 进一步验证了减缓边坡坡度是减少水

土流失的重要策略。拟合不同流量、坡度条件下累积减沙量与冲刷历时的关系, 得出累积减沙量与冲刷历时之间存在较好的二次函数关系, 见表1, 表明植物篱的累积减沙量在时间尺度上可能存在临界值, 这与石生新等对坡面水土保持措施的研究结果类似^[21]。

表1 不同流量、坡度下累积减沙量 (M_r) 与冲刷历时 (t) 的关系

Table 1 Relationship between accumulated amount of sediment reduction and time

流量 Flow/(L·min ⁻¹)	坡度 Slope/(°)	拟合公式 Fitting equation	决定系数 R ²	计算临界值时刻 Calculative critical moment/min
35	24	$M_r = -0.021t^2 + 3.241t + 8.027$	0.982	77
35	28	$M_r = -0.114t^2 + 9.303t - 7.670$	0.980	41
35	32	$M_r = -0.218t^2 + 11.381t + 1.064$	0.916	26
45	24	$M_r = -0.088t^2 + 6.958t - 3.982$	0.985	40
45	28	$M_r = -0.022t^2 + 4.232t + 19.111$	0.986	96
45	32	$M_r = -0.109t^2 + 6.107t + 1.586$	0.927	28
55	24	$M_r = -0.299t^2 + 16.753t - 7.071$	0.991	28
55	28	$M_r = -0.128t^2 + 10.906t + 2.291$	0.978	43
55	32	$M_r = -0.155t^2 + 10.405t + 14.238$	0.973	34

2.3 径流含沙量与挟沙力的关系

径流含沙量与挟沙力的比值可反映坡面径流从坡面实际分离的泥沙与理论挟沙能力之间的相对大小, 从而体现坡面可蚀性的大小。由图6可知, 在32°坡面, 植物篱坡面的累积减沙量在产流末期出现明显下降, 故以该坡度为例。图7为32°坡面3种放水流量下产流结束前15 min内 q/β 的变化状况。

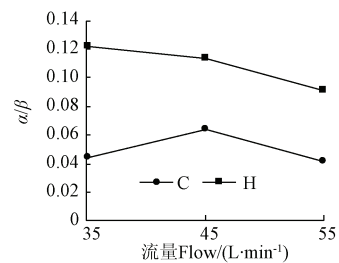


图7 32°小区产流结束前15 min平均 q/β 值对比

Fig.7 Average of q/β in 15 min before runoff end in 32°plot

由7图可知, 植物篱的 q/β 值要明显大于对照坡面, 表明植物篱的坡面径流可以获得相对更多的泥沙补充。其原因可总结为植物篱坡面在侵蚀过程中的“汇-源”转变机制: 在产流初期, 坡面径流经过植物篱带时, 由于土壤渗透能力与坡面阻力的陡增, 泥沙的运动载体(水)及其能量(动能)发生较大损耗, 径流挟沙力下降, 致使分离土壤能力减弱, 导致泥沙发生沉积, 成为侵蚀过程的“汇”区; 而随放水历时的推移, 植物篱带内土壤水分渐趋饱和, 增加径流水分入渗的能力逐渐变弱, 径流经过时不再发生水量的损耗, 随着侵蚀的持续发展, 特别是随着坡面上部细沟的发育逐渐完善, 试验中可见径流变清, 径流含沙量下降, 当坡面径流经过植物篱时, 前期淤积的泥沙颗粒与对照坡面泥沙颗粒相比更为松散, 抗蚀能力差, 反而提供了充足的泥沙来源, 转变为

后续侵蚀中的“源”区。综上所述，侵蚀过程中的“源-汇”转变机制使得植物篱在产流后期控蚀减沙效果减弱，甚至出现植物篱的产沙量大于对照坡面的情况，导致其累积减沙量下降。因此在植物篱带的实际应用中，可考虑在与其紧邻的下边缘布置一道拦沙坝，提高水沙的过水断面，使植物篱拦蓄的泥沙有更大的沉积空间，避免植物篱由“汇”向“源”的转变。

2.4 植物篱对侵蚀动力调控过程的影响

2.4.1 剥蚀率与径流剪切力的关系

将试验过程中径流剪切力与坡面剥蚀率的关系变化情况点绘于图 8，由图可知，植物篱坡面的剥蚀率和径流剪切力分别集中在 1.5~8 g/(m²·s)和 2.5~6 N/m²之间，而对照坡面的剥蚀率和径流剪切力分别集中在 3~10 g/m²·s 和 4~8 N/m²之间，表明植物篱减少了侵蚀动力，进而降低了坡面的侵蚀程度，这与肖培青等对植草坡面的研究结果相符^[22]。

将剥蚀率与剪切力进行回归分析可知二者之间具有较好的线性关系，见图 8，这与 Foster 等提出的径流分散能力表达式 $M=k(\tau-\tau_0)$ 的拟合公式^[23]相类似，反映出当坡面径流剪切力达到一定值时，坡面土壤才会产生剥蚀，即临界剪切力。植物篱坡面的小区临界剪切力达到 1.22 N/m²，而对照坡面的临界剪切力只有 0.98 N/m²，表明植物篱提高了堆积体坡面的抗蚀性；同时，由拟合关系可知，植物篱剥蚀率随剪切力的变化率要大于对照坡面，即植物篱小区的可蚀性参数 (1.46 g/(N·s)) 大于对照小区 (1.33 g/(N·s))，表明随着剪切力的增大，同样的径流剪切力对植物篱和对照坡面的剥蚀能力越来越接近，在超过一定的剪切力时，植物篱坡面径流的剥蚀能力超过了对照坡面，由 2 个拟合公式 (图 8) 可求得，该剪切力大小在 3.68 N/m² 左右。

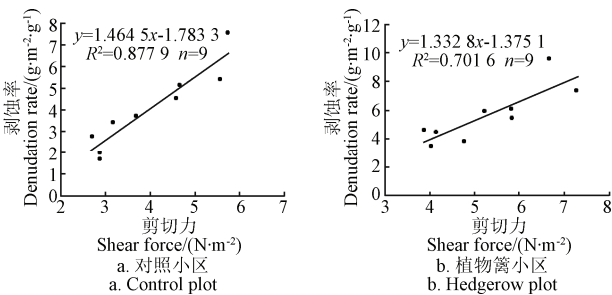


图 8 剥蚀率与剪切力之间的关系

Fig.8 Relationship between soil detachment rate and runoff shear stress

2.4.2 剥蚀率与水流功率的关系

王瑄、黄茹等在不同下垫面下分别用幂函数和一次函数对水流功率和剥蚀率进行拟合，得到了较好拟合效果^[24-25]。将试验过程中剥蚀率与水流功率关系的变化情况点绘于图 9，由图可知，植物篱将坡面径流功率由 1.2~3.1 N/(m·s)降低到 0.8~2.1 N/(m·s)。拟合植物篱和对照坡面的剥蚀率和径流功率之间的关系，得到剥蚀率和径流功率之间具有较好的线性关系，见图 9，其体现了坡面的临界水流功率，植物篱坡面的临界功率 (0.19 N/(m·s))

大于对照坡面的临界功率 (0.03 N/m·s)，同剥蚀率和剪切力的拟合结果类似，植物篱坡面的可蚀性参数 (3.58 g/N·m) 较对照 (2.83 g/N·m) 大，表明随着径流功率的增大，同样的径流功率对植物篱和对照坡面的剥蚀能力越来越接近，在超过一定的径流功率时，植物篱径流的剥蚀能力超过了对照坡面，由 2 个拟合公式 (图 9) 可以求得，该径流功率大小在 0.79 N/m·s 左右。

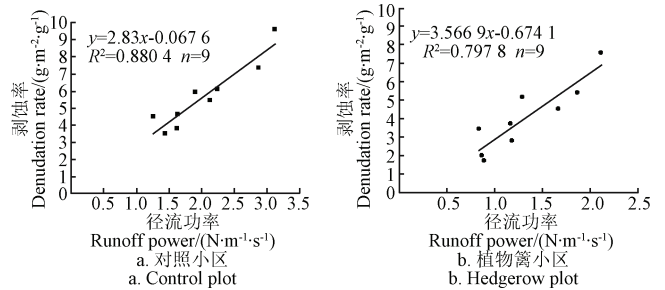


图 9 剥蚀率与径流功率之间的关系

Fig.9 Relationship between soil denudation rate and runoff power

2.5 植物篱对坡面细沟分布的影响

将 32°坡面 4 个区段细沟所占比例绘于图 10，由图可知，在各放水流量下区段 1 内产生的细沟侵蚀量所占比例最高，均达到 60%以上，这与李鹏等在冲刷下得到的结果相符^[26]，王瑄等利用 REE 示踪法对坡面细沟侵蚀的空间分布进行分析后也得到了类似结果^[27]，但与郑良勇等^[28]在降雨条件下的所得试验结果不同。原因可能是在冲刷试验中，水流在坡面顶部进入坡面时的流量最大，而非单独的降雨过程需要一定的汇流坡长，故冲刷试验沟头出现在坡面顶部，随着径流的入渗及受到的沿程阻力，坡面径流能量逐渐消耗，并且径流含沙量的增加使其分离能力减弱。

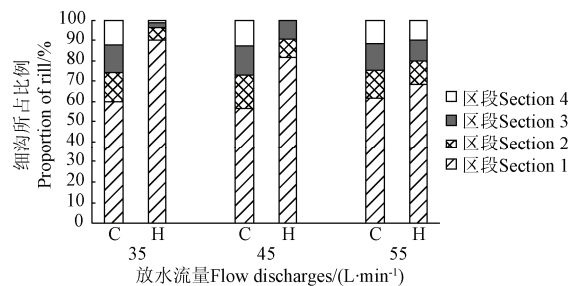


图 10 32°坡面细沟侵蚀分布状况

Fig.10 Distribution of 32° degrees of rill erosion

由图 10 可知，放水流量从 35 L/min 增加到 55 L/min，植物篱和对照坡面 2~4 区段内的细沟侵蚀所占比例整体呈增加趋势 (放水流量 55 L/min 除外)。原因为随着放水流量的提高，水流功率增大，在同样的放水冲刷历时下，坡面径流对土壤颗粒的能量输入增加，水流剪切力增大，细沟向下发育将愈加充分。植物篱较对照坡面区段 1 内的细沟侵蚀量所占比例更大。这是由于植物篱的拦挡作用使坡面径流受到的阻力瞬间增大，流速降低，侵蚀能力下降，抑制了细沟的沿程发育，进而使坡面下部的细沟侵蚀比例相应减少。综上所述，在植物篱实际运用中，可

以对植物篱采取非均匀布设方式以达到有针对性防治细沟侵蚀的目的,即相应提高坡面上部植物篱的设计标准,如缩小植物篱间距、增加宽度及植物的种植密度等,而坡面下部的标准可适当降低,在控制整体工程成本的前提下,提升植物篱的对堆积体坡面的控蚀效果。

3 讨论

生产建设项目数量的增加必然产生数量巨大的弃土弃渣,及时有效的拦蓄坡面径流是防治堆积体水土流失的关键,植物篱作为一种有效地防护措施是减少坡面侵蚀的重要举措。在放水冲刷过程中,各小区产流率表现出明显的波动性,特别是在裸露对照小区,产流后期波动更为明显,植物篱坡面产流量较少且较对照坡面更稳定,这与张乐涛^[29],郭建英等^[30]研究:放水冲刷试验较降雨试验产流过程波动性要大,裸露坡面入渗量在各雨强下均小于植物坡面。许多学者对植物篱的减流减沙效益进行了研究。Donjadee 等^[31]对缓坡地的研究表明,植物篱的减流减沙效益随坡度的增加而增加。而本试验在工程堆积体边坡研究发现,植物篱减沙效益随着坡度的增加而明显减小,这主要是由于堆积体坡度较陡,在坡面径流过程中重力作用随坡度增加而愈加剧烈,导致坡面细沟沟壁发生崩坍和通过拦蓄作用形成的植物篱前淤积带发生水毁的机率增加,这与杜捷等对堆积体的研究结果相似^[32];拟合不同流量、坡度条件下植物篱累积减沙量与冲刷历时的关系,得出累积减沙量与冲刷历时之间存在较好的二次函数关系,见表1,表明植物篱的累积减沙量在时间尺度上可能存在临界值,本试验中部分场次的二次函数关系曲线在冲刷历时内并未完全展现,这可能是由于本试验冲刷历时未达到部分冲刷场次的临界值,在后续试验中可延长冲刷历时对该结论做进一步验证;同时,植物篱的控蚀能力可能存在一个临界放水流量和临界坡度,本试验中45 L/min和28°可近似看做其临界放水流量及临界坡度,具体临界值还需进一步进行试验分析验证。

在试验坡度和流量条件下,本文用剥蚀率、径流功率和径流剪切力等水动力学参数的关系来分析植物篱对侵蚀动力调控过程影响。对于对照坡面,剥蚀率与径流功率的拟合效果要好于与剪切力的拟合效果,这与张乐涛等对工程堆积体的研究结果一致^[18];而对于植物篱坡面,径流功率理论的预测效果要弱于径流剪切力。这可能的原因是:根据径流功率的计算公式,径流功率理论相当于在剪切力的基础上强化了径流流速的影响因素,更能全面反应裸坡侵蚀的真实情况;但对植物篱小区而言由于对下垫面的局部改变,使得流速的沿程变化更加复杂,实际试验中的流速测量方法无法对局部的突变进行准确反应,从而降低了径流功率理论的有效性。

本文由于野外模拟冲刷试验,限于野外条件及时间、资金,试验存在一定不足,试验设置除部分场次做了重复外,大多场次是通过精密控制进行测量,放水冲刷时间偏短,植物篱措施的配置模式相对比较单一,细沟形态发育需进一步分析研究,后期研究可以从增加植物篱

配置模式着手,延长放水冲刷时间,进一步研究产流产沙、水动力学参数及细沟发育形态之间的关系,为工程堆积体植物篱措施的优化配置及侵蚀预报模型的建立提供理论参考。

4 结论

1) 综合来看,工程堆积体坡面产流产沙的时空变化规律为:坡面径流侵蚀时段主要集中在产流中后期(10~32 min),侵蚀的位置主要在坡面中上段(0~10 m),即本试验坡面的第1、2区段;而植物篱对坡面侵蚀泥沙过程的影响表现为:植物篱具有10%~45%的减沙效益,其控蚀能力随着径流冲刷历时的延长存在最大值,二者之间可用二次函数进行较好拟合。在本试验条件下,植物篱减沙效果随流量、坡度因子均具有一定的变异性,其临界坡度为28°,临界放水流量为45 L/min,该结论可以为不同坡度、雨强条件下工程堆积体植物篱的合理利用提供参考;

2) 径流含沙量的时序变化是植物篱控蚀能力存在时间限制的重要原因。从实际含沙量与径流挟沙能力的比值可以发现植物篱与坡面径流输沙的“汇-源”关系,在侵蚀过程中,这种“汇-源”转变机制使得植物篱在产流后期减沙效果减弱,为避免在径流冲刷的后期,植物篱淤积的泥沙成为坡面产沙的“源”区,可以考虑为植物篱下部加入拦沙埂等措施,该结论可以为坡面植物篱与其它措施的配置优化提供理论依据。

3) 本试验中,植物篱降低了坡面土壤剥蚀率、径流剪切力等侵蚀动力学参数,同时,将临界剪切力和临界功率分别提高了0.25倍和5倍;拟合剥蚀率与径流功率之间的关系得植物篱坡面的可蚀性参数(3.58 g/(N·m))较对照(2.83 g/(N·m))大;植物篱通过降低坡面径流能量,削弱径流侵蚀动力,提高了坡面的抗侵蚀能力,该结论可以为植物篱措施下工程堆积体土壤侵蚀预报模型的建立提供部分基础参数。

4) 在野外现场径流冲刷试验条件下,坡面细沟侵蚀泥沙来源主要集中于坡面上部,等距分布的均匀植物篱带对坡面下部细沟侵蚀的控制效果要大于坡面上部,因此,在实际应用时,可以将坡面上部作为重点防治部位,植物篱的种植密度或减小植物篱的间距,提高植物篱对坡面侵蚀的防护效果,该结论可以为植物篱的实际配置应用提供指导。

[参 考 文 献]

- [1] 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.
Lü 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)
- [2] 孙虎,甘枝茂.人为弃土的堆积与侵蚀过程的初步研究[J].西北地质,1998,19(1):61-66.
Sun Hu, Gan Zhimao. Study on erosion and sediment of man-dumped soil[J]. Northwestern Geology, 1998, 19(1): 61-

66. (in Chinese with English abstract)
- [3] 焦居仁. 开发项目水土保持[M]. 北京: 中国法制出版社, 1998: 67—93.
- [4] 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 等. 等高植物篱控制紫色土坡耕地侵蚀的特点[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 65—74. Xu Feng, Cai Qiangguo, Wu Shu'an, et al. Characteristics of erosion control by contour hedgerows on cultivated slope land of purplish soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(1): 65—74. (in Chinese with English abstract)
- [5] Wu J Y, Huang D, Teng W J, et al. Grass hedges to reduce overland flow and soil erosion[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(2): 481—485.
- [6] Cullum R F, Wilson G V, McGregor K C, et al. Runoff and soil loss from ultra-narrow row cotton plots with and without stiff-grass hedges[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 93(1): 56—63.
- [7] 彭熙, 李安定, 李苇洁, 等. 不同植物篱模式下土壤物理变化及其减流减沙效应研究[J]. 土壤, 2009, 41(1): 107—111. Peng Xi, Li Anding, Li Weijie, et al. Changes of soil physical properties, runoff and soil erosion under different hedgerow system[J]. Soils, 2009, 41(1): 107—111. (in Chinese with English abstract)
- [8] 陈明霞, 查轩. 生草覆盖和植物篱措施对红壤坡地土壤侵蚀调控效应研究[J]. 亚热带资源与环境学报, 2009, 4(1): 32—37. Chen Mingxia, Zha Xuan. Effects of perennial alfalfa and hedgerow system on the adjustment and control of soil erosion in the granite sloping fields[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2009, 4(1): 32—37. (in Chinese with English abstract)
- [9] 魏忠义, 白中科. 露天矿大型排土场水蚀控制的径流分散概念及其分散措施[J]. 煤炭学报, 2003, 28(5): 486—490. Wei Zhongyi, Bai Zhongke. The concept and measures of runoff-dispersing on water erosion control in the large dump of opencast mine[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(5): 486—490. (in Chinese with English abstract)
- [10] Donjatee S, Clemente R S, Tingsanchali T, et al. Effects of vertical hedge interval of vetiver grass on erosion on steep agricultural lands[J]. Land Degradation & Development, 2010, 21(3): 219—227.
- [11] Rachman A, Anderson S H, Gantzer C J, et al. Influence of Stiff-stemmed Grass Hedge Systems on Infiltration[M]. 2004, 68(6): 2000—2006.
- [12] 卜崇峰, 蔡强国, 袁再健. 三峡库区等高植物篱的控蚀效益及其机制[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 14—18. Bu Chongfeng, Cai Qiangguo, Yuan Zaijian. Mechanism and effect of different contour hedgerow types on runoff and sediment erosion in three gorges reservoir area[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2006, 4(4): 14—18. (in Chinese with English abstract)
- [13] Akram S, Yu B, Ghadiri H, et al. The links between water profile, net deposition and erosion in the design and performance of stiff grass hedges[J]. Journal of Hydrology, 2014, 510: 472—479.
- [14] 鞠伟, 高建恩, 吴普特. 不同复合措施的次降雨径流、产沙调控率和作物产量[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(5): 114—118. Ju Wei, Gao Jian'en, Wu Pute. Runoff and silt regulating rate in the times rainfall and the crop yield when used the different regulating measures[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(5): 114—118. (in Chinese with English abstract)
- [15] 刘秉正, 吴发启. 土壤侵蚀[M]. 西安: 陕西人民出版社. 1997: 32.
- [16] 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. Li Yonghong, Niu Yaobin, Wang Zhengzhong, et al. Hydrodynamic parameters and their relationships of runoff over engineering accumulation slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(22): 83—88. (in Chinese with English abstract)
- [17] 罗榕婷, 张光辉, 曹颖. 坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(4): 567—574. Luo Rongting, Zhang Guanghui, Cao Ying. Progress in the research of hydrodynamic characteristics of sediment-laden overland flow[J]. Progress in Geography, 2009, 28(4): 567—574. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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. Zhang Letao, Gao Zhaoliang, Tian Hongwei. Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(24): 94—102. (in Chinese with English abstract)
- [19] 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究[J]. 水利学报, 2010, 41(7): 870—875. Wu Shufang, Wu Pute, Song Weixiu, et al. Study on the outflow processes of slope regulated by works and its effects on overland flow and sediment reduction[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(7): 870—875. (in Chinese with English abstract)
- [20] 马云, 何丙辉, 何建林, 等. 三峡库区皇竹草植物篱对坡面土壤分形特征及可蚀性的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 79—82. Ma Yun, He Binghui, He Jianlin, et al. Effects of herba and rographit is hedgerow on soil fractal characteristics and erodibility on sloping cropland in Three Gorges Reservoir Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 79—82. (in Chinese with English abstract)
- [21] 石生新. 水平沟种植对坡面产流、产沙过程影响的试验研究[J]. 山西水利科技, 1996(1): 55—61. Shi Shengxin. Effect on runoff and sediment yield process by level trench planting[J]. Shanxi Hydraulics, 1996(1): 55—61. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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. Xiao Peiqing, Yao Wenyi, Shen Zhenzhou, et al. Experimental study of critical flow energy for slope erosion under the influence of vegetation cover[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 229—234. (in Chinese with English abstract)
- [23] Foster G R, Meyer L D, Onstad C A. An erosion equation derived from basic erosion principles[J]. Transactions of the ASAE [American Society of Agricultural Engineers] (USA), 1977, 20(4): 678—682.
- [24] 王瑄, 李占斌, 李雯, 等. 土壤剥蚀率与水流功率关系室内模拟实验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 185—187. Wang Xuan, Li Zhanbin, Li Wen, et al. Indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and stream power[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(2): 185—187. (in Chinese with English abstract)
- [25] 黄茹, 黄林, 何丙辉, 等. 三峡库区坡地林草植被阻止降雨径流侵蚀[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 70—76. Huang Ru, Huang Lin, He Binghui, et al. Effects of slope forest and grass vegetation on reducing rainfall-runoff erosivity in three gorges reservoir region[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(9): 70—76. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土陡坡径流侵蚀产沙特性室内实验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(7): 42—45. Li Peng, Li Zhanbin, Zheng Liangyong. Indoor experiment of characteristics of runoff erosion in loess steep slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural

- Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(7): 42—45. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王瑄, 李占斌, 尚佰晓. 利用 REE 示踪法分析坡面放水冲刷的侵蚀过程[J]. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(2): 218—222. Wang Xuan, Li Zhanbin, Shang Baixiao. Soil erosion process of the slope scouring with REE tracer method[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2008, 39(2): 218—222. (in Chinese with English abstract)
- [28] 郑良勇, 李占斌, 李鹏, 等. 坡面侵蚀泥沙来源立体分布研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 58—61. Zheng Liangyong, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Study on spatial distribution of sediment source of slope erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(3): 58—61. (in Chinese with English abstract)
- [29] 张乐涛, 高照良, 李永红, 等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 145—153. Zhang Letao, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope under simulated runoff conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 145—153. (in Chinese with English abstract)
- [30] 郭建英, 何京丽, 李锦荣, 等. 典型草原大型露天煤矿排土场边坡水蚀控制效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 296—303. Guo Jianying, He Jingli, Li Jinrong, et al. Effects of different measures on water erosion control of dump slope at opencast coal mine in typical steppe[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(3): 296—303. (in Chinese with English abstract)
- [31] Donjadee S, Tingsanchali T. Reduction of runoff and soil loss over steep slopes by using vetiver hedgerow systems[J]. Paddy and water environment, 2013, 11(1/2/3/4): 573—581.
- [32] 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 yield on slope of engineering accumulation with measurement of hedgerows[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 102—106. (in Chinese with English abstract)

Erosion resistance effects and mechanism of hedgerows in slope of engineering accumulation

Yang Shuai^{1,2}, Gao Zhaoliang^{1,3*}, Li Yonghong³, Niu Yaobin^{1,3},

Wang Kai¹, Bai Hao³, Qi Xingyuan³, Li Yutingting³

(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. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Engineering accumulation body generated during the process of engineering construction has a unique soil composition and complex underlying surface. This sort of deposit is characterized by weak anti-scour ability attributed to the surface structure of soil loss, loose soil, and plant roots and organic matter deficiency, which may result in the runoff conditions easily causing severe soil erosion. Engineering accumulation body is prone to soil and water loss, which is the emphasis of water and soil conservation in production and construction project. As an effective soil and water conservation measure, hedgerows have been widely used in various types of arable lands. In the present study, hedgerows are adopted to improve the erosion resistance of the slope by runoff scouring tests. The hydrodynamic characteristics are a premise and foundation to understand erosion processes on engineering accumulation body under the condition of hedgerow measure. Thus, a series of studies were conducted for the simulation of runoff erosion process in order to reveal the relationships of main hydrodynamic parameters, such as runoff velocity, depth, flow shear stress, stream power and other relevant parameters, and to explore the erosion control mechanisms of hedgerow on engineering accumulation slope. The study area is located at the Changwu Agricultural Ecological Experimental Station on the Loess Plateau (35°14'24.5"N, 107°40'21.2"E). The established plot was 20 m long and 5 m wide, with 0.5 m thickness of soil generated from slope excavation. There were 3 flow discharges (35, 45, 55 L/min) and 3 slopes (24°, 28°, 32°), and a hedgerow plot was set for each slope and at the same time a bare slope was set as the control; in the hedgerow plot, 4 hedgerows were uniformly arranged from top down. The distance between the highest hedgerow and the upper edge of the slope is 3 m, and the hedgerow spacing is 4 m. A total of 18 field trials were designed in this study. The results showed that the erosion time of the engineering accumulation body focused on the late period of runoff (10-32 min), and the main erosion position was in the middle-upper slope (0-10 m). The cumulative sediment yields of hedgerows plot are reduced by 10%-45% compared to control plot. The relationship between erosion control capability and scouring duration could be stated with quadratic function in which critical time became more early with the increase of slope and flow discharge. In later stage, the sediment concentration in runoff of hedgerows plot exceeded control plot, which could be related to transformation of hedgerows between source and sink. Hedgerows reduce soil detachment rate, increase critical shear stress and critical stream power, and curb rill evolution to develop toward the lower slope. Based on the runoff power, hedgerow slope erodibility (3.58 g/(N·m)) was higher than that of the control surface erodibility parameter (2.83 g/(N·m)). Different slopes and rainfall intensities under the condition of engineering accumulation of hedgerows have good runoff and sediment reduction effect, which may provide a theoretical reference for the rational use of slope protection measures. Meanwhile, fitting the relations between hydrodynamic parameters and soil erosion rate, rill erodibility and critical runoff power can also provide basic parameters for the study on soil erosion on engineering accumulation slope under hedgerow.

Keywords: soils; erosion; runoff; engineering accumulation; hedgerows; flow discharges