

植物篱措施下工程堆积体坡面减流减沙效益研究

袁普金¹, 张翔², 王万君³, 郭超颖³, 程复³, 孔东莲³, 高照良⁴

(1. 水利部水土保持监测中心, 北京 100055; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨陵 712100;
3. 北京水保生态工程咨询有限公司, 北京 100055; 4. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

摘要:为探讨植物篱措施下工程堆积体坡面不同坡段的减流减沙效益,选取了 35,45,55 L/min 放水流量,模拟 0.3, 0.4,0.5 mm/min 的雨强条件,对 24°坡度的堆积体边坡进行模拟径流冲刷试验。结果表明:植物篱可以很好地阻延坡面径流,且产流时间随着放水流量的增加呈线性递减趋势;对照坡面的平均产流量沿着水流方向呈先增后减的趋势,而植物篱坡面呈相反趋势;根据产流产沙量在不同坡段上的对比情况可知,植物篱措施的合理配置应着重加强中间坡段的防治;55 L/min 流量下的累计减沙量显著大于另外两个流量的累计减沙量,累计减沙量与时间呈三次函数关系;时段产沙量随着时段产流量的增大而增大,二者呈幂函数关系;累计产沙量与累计径流量呈二次函数关系,累计产沙量存在最大值,且二者的函数关系存在定义域。该研究可为工程堆积体坡面防治措施的优化配置提供一定的理论支持。

关键词:植物篱;工程堆积体;放水冲刷;减流减沙效益

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)06-0374-07

Conservation Benefit of Hedgerow Measures on Engineering Accumulation Slope

YUAN Pujin¹, ZHANG Xiang², WANG Wanjun³, GUO Chaoying³,
CHENG Fu³, KONG Donglian³, GAO Zhaoliang⁴

(1. Monitor Center of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources, Beijing 100055, China; 2. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;
3. Beijing Soil and Water Conservation Eco-engineering Consultation Co., Ltd, Beijing 100055, China; 4. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The contributions of different types of plant measures and different spatial patterns to efficiency about runoff and sediment reduction are different. In order to investigate effect of hedgerow measure on the engineering accumulation slope of different slope segments of runoff and sediment reduction benefits, the flow rates of 35, 45 and 55 L/min were selected to simulate the rainfall intensity of 0.3, 0.4 and 0.5 mm/min, and the simulation of the 24 degree slope of the accumulation body slope was carried out. The results show that the hedgerow can delay runoff and runoff-yielding time with the flow discharge increase which presents linearly decreasing trend. The average runoff on control slope along the flow direction increased firstly and then decreased, hedgerow slope presents the opposite trend. According to the runoff and sediment yield in different slope sections, the rational allocation of hedgerow measure should focus on strengthening the prevention and control measures for slope of the middle section. The cumulative sediment reduction under 55 L/min flow was much higher than those of the other two flows, the cumulative sediment reduction and time follow the cubic functional relationships. The sediment yield increases along with the increase of the flow rate in the period of time, and the two had a power function relationship. Cumulative sediment yield and cumulative runoff follow quadratic function relationships. The total sediment yield include maximum value,

收稿日期:2015-11-20

修回日期:2015-12-14

资助项目:“十二五”国家科技支撑计划课题“农田水土保持关键技术研究与示范”(2011BAD31B01)

第一作者:袁普金(1975—),男,江西省余江县人,工学硕士,高级工程师,主要从事开发建设项目水土保持方案技术审查与管理工作。

E-mail: yuanpujin@163.com

通信作者:高照良(1969—),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。E-mail: gzl@ms.iswc.ac.cn

and the function relation is defined. This study can provide theoretical basis for the optimized allocation of control measures on the engineering accumulation body slope.

Keywords: hedgerows; engineering accumulation; runoff and sediment yield; effects of runoff and sediment reduction

20 世纪 80 年代中期以来,我国的城市化、工业化、现代化进程逐年加快,开发建设项目急剧增加,由于在建设活动中严重破坏了原本处于平衡状态的原地貌、植被和水系条件,并产生大量的弃土弃渣堆积形成工程堆积体,造成严重的水土流失,甚至引发地质灾害、破坏水土资源、恶化生态环境,导致土地生产力急剧降或丧失^[1-2]。由于工程堆积体边坡陡、无植被、结构体破坏、表层土壤疏松、地面组成物质复杂等特点,比原地貌更易发生水土流失。水土保持防治措施的合理布置便显得尤为重要。

植物篱作为一种水土保持措施已在热带、亚热带、温带的坡耕地中得到广泛应用。已有的大量研究表明,植物篱措施的布设对坡面水土流失的防治具有显著的效果^[3-5]。武菊英^[6]等在华北地区对狼尾草属和野古草属的两种植物篱研究结果显示植物篱的减流作用可以达到 36%~72%,减沙效益可以达到 65%~94%。Cullum 等^[7]研究得出植物篱的减沙效益可以达到 90%。Donjadee 等^[8]研究得出了植物篱影响下的产流产沙回归方程,取得了较好的预测效果。Rachman 等^[9]认为植物篱提高了土壤入渗能力、导水率,进而促进减流减沙。卜崇峰等^[10]认为植物篱改变了坡面径流流速分布进而影响了径流侵蚀量。袁久芹^[11-12]等研究表明,植物篱具有明显的减流减沙效益,且在大降雨强度条件下更显著,其对不同植物篱配置模式的研究发现,各植物篱模式均不同程度地改善了土壤理化性质,减少了水土流失量,组合植物篱模式的减流减沙效益优于单一植物篱模式。可以看出,已有研究主要集中于缓坡条件下的坡耕地坡面,而对工程堆积体坡面植物篱应用方法、植物篱的减流减沙过程及其机理鲜有研究。

本文在工程堆积体坡面布置植物篱,通过野外放水冲刷试验,模拟不同雨强条件下汇水径流对堆积体坡面冲刷过程,分析植物篱措施下堆积体坡面不同坡段产流产沙过程及其减流减沙效益,以期工程堆积体坡面防治措施的优化配置提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验地位于陕西省长武县王东沟小流域内(N35°14'34";E107°41'31"),属暖温带半湿润、大陆性季风气候,年均降水量 583.9 mm,年均气温 9.1℃^[13]。

地带性土壤为黑垆土,土壤母质为深厚的中壤质马兰黄土,重力侵蚀严重,土壤侵蚀模数 1 860 t/km²,降水多集中在 7—9 月份,占全年降水总量的 55%。试验小区建在人工开挖坡面上,开挖面达到土壤母质层,小区所填土壤来自附近边坡开挖产生的废弃黄土,事先清除杂草和有机残落物层,经现场机械开挖后进行人工回填,小区弃土为当年回填,坡面无任何植被覆盖,小区坡面投影长度 20 m,宽 5 m。堆积体表层土壤类型为黑垆土,土石比超过 9:1,粒径多在 1 mm 以下,土壤颗粒粒径 0.2~0.1,0.1~0.05,0.05~0.02,0.02~0.01,0.01~0.005,0.005~0.002,<0.002 mm 含量依次为 0.3%,6.47%,32.95%,24.56%,10.57%,6.50%和 18.65%。采用人工模拟径流试验,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。

1.2 试验设计与方法

试验小区布设见图 1,每个小区设置 5 个测量断面,分别距坡顶 2,6,10,14,18 m 处。选取两个 24° 坡度,其中一个为裸坡作为对照小区,另一个采用植物篱措施。在植物篱小区内布置 4 道植物篱,从距离坡顶 3 m 处开始布设,篱间距 4 m。植物篱带栽植平均株距为 20 cm 的紫穗槐幼苗,以 67 kg/hm² 的密度种植紫花苜蓿,直至试验前篱带内覆盖率达到 90% 以上,植物篱带宽约 60 cm。在各断面处测定土壤容重、土壤含水量等。试验开始前,为控制土壤容重和含水率,对坡面进行平整,人工压实,并在试验开始前 24 h 对坡面进行均匀洒水,直到坡面即将产流为止并用塑料薄膜覆盖至试验开始,试验前土壤容重在 1.30~1.40 g/cm³ 范围内,土壤含水率在 10.5%~18.85%。按照试验区一年中发生的最大暴雨等级,设置放水流量梯度为 35,45,55 L/min,分别相当于 0.3,0.4,0.5 mm/min 的降雨强度下产生的坡面径流量,产流后每场次冲刷历时为 39 min。试验开始后,通过阀门和精密流量计控制流量,泥沙样在产流开始后 6 min 内每隔 2 min 取一次,其后每隔 3 min 取一次,径流桶接收全部泥沙和径流,同时于测量断面处测流宽及流速,流速采用高锰酸钾示踪法测定,测距为 1.5 m^[14],通过计算 5 个断面的流速,求其平均值,并乘以修正系数 0.75 作为水流断面平均流速^[15];流宽的测量采用自制的彩色测尺,精度为 1 cm,通过观测有水流的彩色测尺进行准确的读数,然

后计算出流宽。用烘干法测定泥样瓶中的含沙量,试验土采用激光粒度分析仪分析。试验供水引自王东沟民用泉水井,经自流到蓄水桶。

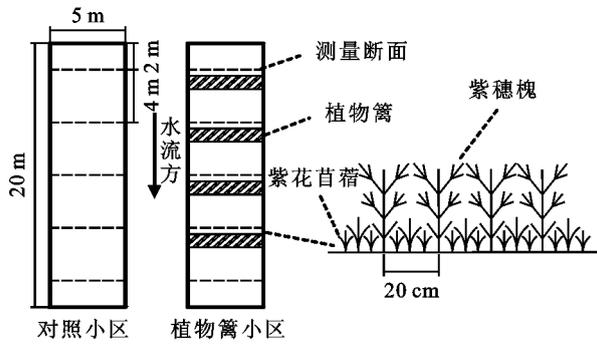


图1 试验小区布设

1.3 数据分析方法

(1) 不同坡段断面产流量(Q_i)。单位距离内不同坡段的平均径流量。

$$Q_i = \frac{Mt_i}{TL} \quad (1)$$

式中: Q_i 为不同坡段断面产流量(L); M 为观测时段内的产流量(L); t_i 为水流流经不同测量断面的时间(s); T 为取样的时间间隔(s); L 为观测断面长度(m)。

(2) 不同坡段断面产沙量(S_i)。单位距离内不同坡段的平均产沙量。

$$S_i = \frac{M\omega t_i}{TL} \quad (2)$$

式中: S_i 为不同坡段断面产沙量(kg); ω 为观测时段内的平均含沙量(kg/L)。

(3) 累计减沙量(M_r)。不同时段内植物篱坡面相比对照坡面的累计减沙量。

$$M_r = M_c(t) - M_h(t) \quad (3)$$

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); $M_h(t)$ 冲刷历时 t 时刻时植物篱小区的累积产沙量(kg)。

2 结果与分析

2.1 植物篱措施下不同坡段产流过程分析

2.1.1 植物篱措施对坡面产流时间的阻延作用 产流时间指坡面径流漫流至小区出口所需要的时间,在野外人工模拟放水冲刷试验中,影响产流时间的因素主要包括植被类型(空间格局)、放水流量、坡度、坡长、下垫面以及土壤初始含水量等。在试验前对坡面取土样测量土壤含水量,以确保坡面土壤初始含水量一致。在 24° 坡度下,对照坡面在35,45,55 L/min放水流量条件下的产流时间分别为2.623,2.434,2.383 min,植物篱坡面对应的产流时间分别为5.059,4.709,4.449 min。对比不同措施下坡面的产

流时间,3个流量条件下植物篱小区的产流时间分别是对照小区的1.929,1.935,1.867倍,表明植物篱措施对阻延坡面径流的产生贡献率较大,且随着放水流量的增加,坡面产流时间呈现线性递减趋势。

2.1.2 不同坡段断面产流量对比及其减流效益 在试验过程中,每个小区设置5个测量断面,分别距坡顶2,6,10,14,18 m处,每个断面的测距1.5 m。

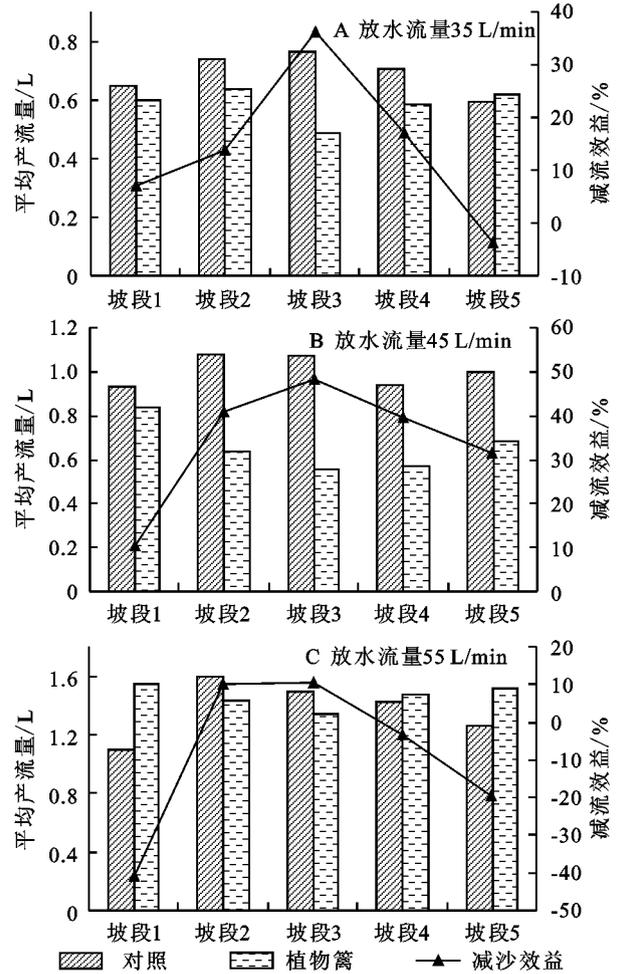


图2 植物篱与对照坡面不同坡段的平均产流量对比及减流效益

通过描绘植物篱与对照坡面的平均产流量在不同坡段上的对比以及减流效益在坡面的分布情况,见图2。由图2可知,在三个流量条件下,对照坡面的平均产流量沿着水流方向呈现先增加后减小的趋势,而植物篱坡面下的平均产流量沿着上坡到下坡方向呈先减小再增加的相反趋势。这是因为在裸坡条件下,上坡面的水流主要受到重力沿坡面向下的分力作用以及坡面微地形和跌坎的阻力作用,在上坡面重力的分力大于阻力作用,使得水流流速一直处于加速状态,流过单位距离断面的流量逐渐增加,到达中间坡段时重力与阻力相等,达到最大流速,而后在下坡面,阻力不断加大以致大于重力作用,导致坡面水流处于

减速状态,所以下坡面的单位距离断面的产流量不断减小。植物篱措施下,随着上坡面的水流流速越大,植物篱的阻流作用越大,此阶段阻力大于重力作用,以致在中间坡段时出现最小流速,单位距离的产流量达到最小,而下坡面刚好相反,流速较小,植物篱的阻流作用不明显,此阶段重力作用大于阻力作用,因此流速逐渐增大,产流量也就呈增加趋势。

在 35 L/min 流量下,对照坡面在坡段 5 处的平均产流量小于植物篱措施下坡面,45 L/min 流量下,对照坡面不同坡段的平均产流量均大于植物篱措施坡面,而在 55 L/min 放水流量下,对照坡面只是在坡段 2,3 处的平均产流量大于植物篱措施下的产流量,并且随着流量的增加,坡面平均减流效益呈先增加后减小的趋势,表明随着放水流量的增大,植物篱措施的减流效益并不是呈简单的减弱趋势,而是存在最佳放水流量,因此坡面植物篱措施在此放水强度下可发挥最大的减流效益。

通过分析不同坡段的减流效益分布趋势可知,顺着坡面水流方向,减流效益呈先增加后减小的趋势,在坡段 3 处即中间坡段处达到最大的减流效益。由此表明,植物篱措施的合理配置应着重加强中间坡段的防治措施,根据裸坡坡面的产流量分布也可知,措施应该主要布置在 2,3,4 坡段处。

2.2 植物篱措施下不同坡段产沙过程分析

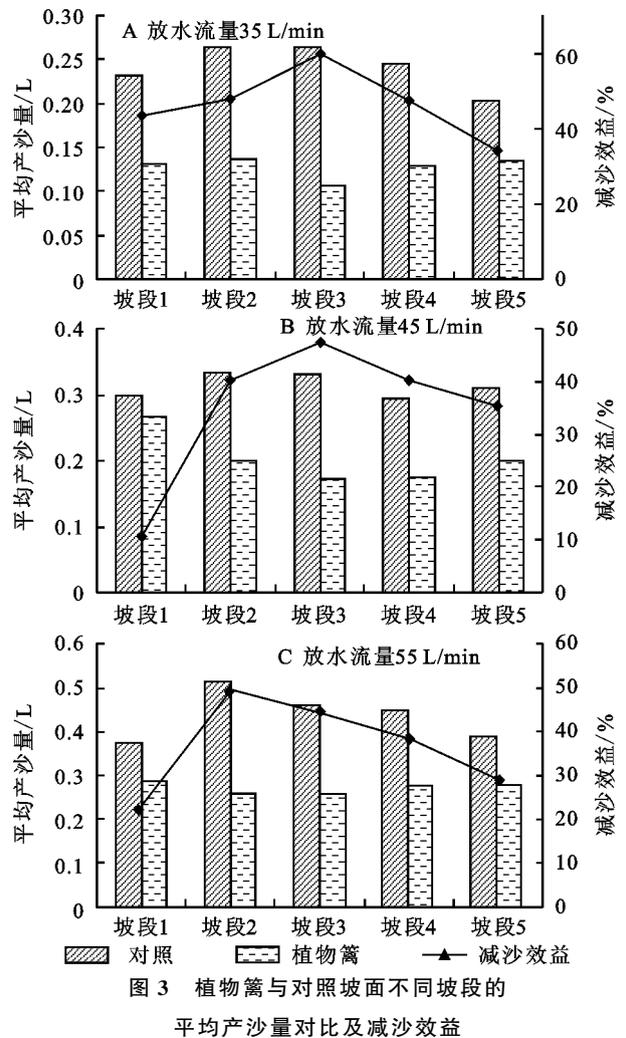
2.2.1 不同坡段断面产沙量对比以及不同坡段的减沙效益

探讨坡面不同坡段的产沙量分布规律,能为工程堆积体坡面植物措施、工程措施等的优化配置提供科学依据。

通过描绘植物篱与对照坡面的平均产沙量在不同坡段上的对比以及减沙效益在坡面的分布情况,见图 3。由图 3 可知,不同流量条件下,对照坡面的不同坡段处的产沙量均大于植物篱措施下的坡面,可以看出,植物篱措施起到了很好的减沙效果,但不同流量下植物篱措施的平均减沙效益却不尽相同,对应三个流量的平均减沙效益依次是 46.47%,34.75%,36.85%。可知,在低流量情况下,植物篱措施能发挥更好的减沙效益。

根据不同坡段的减沙效益曲线可知,不同流量条件下,沿着坡面水流方向,减沙效益均呈先增加后减小的趋势,在 35 L/min 和 45 L/min 放水流量下,坡段 3 处即中间坡段达到最大减沙效益,而在 55 L/min 流量下,最大减沙效益提前到坡段 2 处即中间偏上坡段。这是因为在大流量下,在坡段 2 到坡段 3 之间的水流动能最大,由于植物篱的作用,流速越大阻流作用也就越强,因此

水流在此阶段侵蚀的泥沙大大减少。由减沙效益在坡面的分布趋势可以得出,坡面措施的优化配置应主要集中在中间坡段,即图中的 2,3,4 坡段处。



2.2.2 植物篱累计减沙量与冲刷历时的关系

累计减沙量可以反映随着放水历时的延长,植物篱减沙能力的动态变化。通过点绘累计减沙量与冲刷时间的关系,见图 4,拟合二者之间的关系,见表 1。图 4 体现了不同流量条件下,在 24° 坡度下植物篱小区累积减沙量随时间的动态变化。在前 9 min 的时候,35 L/min 和 45 L/min 两流量的累计减沙量,相差不大,甚至小流量的累计减沙量稍大于 45 L/min 的累计减沙量,而后,大流量较小流量的累计减沙量要大,但在 55 L/min 流量下,累计减沙量显著大于另外两个流量的累计减沙量。这是因为,随着流量的增大,累计产沙量也在明显增加,由图 3 可知,三个流量分布对应的平均减沙效益依次是 46.47%,34.75%,36.85%,流量在 35 L/min 时的平均减沙效益最好,而 45 L/min 的平均减沙效益最差,因此前者的累计减沙量增加的幅度会比较大,而后者增加幅度比较平缓,二者会越

来越接近,这也与图 4 曲线走向一致;而在 55 L/min 流量下,减沙效益较好,加上本身条件下的累计产沙量较大,因此与另外两个流量的累计减沙量存在明显差距。由表 1 可见,各个流量条件下的累计减沙量与时间的动态变化均能用三次函数进行很好的拟合,各种情况下的决定系数在 0.98 以上,且 F 检验 Sig. < 0.001,说明回归方程均达到极显著水平。

2.3 坡面流的水沙关系

2.3.1 时段产沙量与时段产流量的关系 通过整合两个坡面时段产流量与时段产沙量的数据,建立二者之间的关系,见图 5,各时段内的产沙量与径流量存在显著的相关关系,时段产沙量随着时段产流量的增大而增大,对二者之间的相互关系进行回归分析,结果表明用幂函数方程对时段产沙量与时段径流量拟合效果最佳,建立经验公式如下,

表 1 不同流量下累计减沙量(M_t)与冲刷历时(t)的关系

流量/(L·min ⁻¹)	拟合公式	样本数	决定系数 R^2
35	$M_t = -0.0018t^3 - 0.095t^2 + 12.133t - 1.419$	$N=15$	0.996**
45	$M_t = -0.0005t^3 - 0.0024t^2 + 4.164t - 3.433$	$N=15$	0.984**
55	$M_t = -0.0032t^3 - 0.179t^2 + 4.823t - 0.234$	$N=15$	0.994**

注:其中*表示($p < 0.05$),**表示($p < 0.01$)。

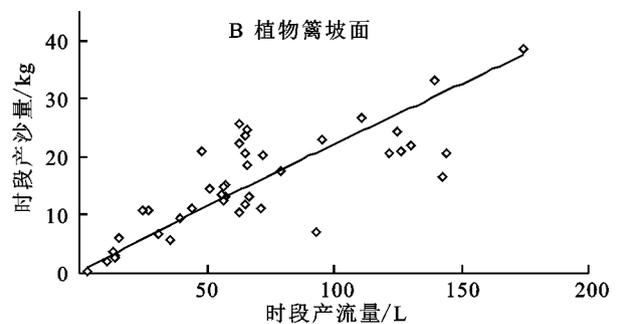
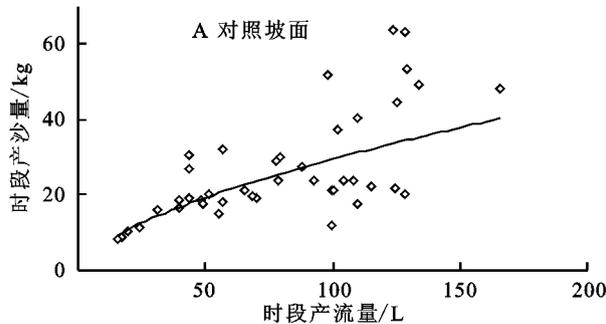


图 5 时段产沙量与时段产流量的关系

2.3.1 累计产沙量与累计产流量的关系 通过分析 24°坡度下,两种措施在不同流量条件下,累计产沙量和累计产流量的数据,建立二者的关系,见图 6。由图可知,在本试验条件下,累计产沙量均随着累计径流量的增加先迅速增加而后缓慢增加,且在相同径流量下,对照坡面的累计产沙量均大于植物篱坡面的累计产沙量,说明植物篱措施起到了很好的减沙效果,但不同流量下植物篱措施的减沙效益却不尽相同。

拟合不同流量条件下累计产沙量与累计产流量的变化过程(表 2)可知,不同措施坡面累计产沙量均与累计径流量呈二次函数关系,二次函数开口向下,表明累计产沙量随着累计产流量的增加存在最大值,而不是一味地增大,一旦累计产沙量到达最大值,而

对照坡面:

$$y = 1.757x^{0.613} \quad (R^2 = 0.534, N = 42) \quad (1)$$

植物篱坡面:

$$y = 0.288x^{0.944} \quad (R^2 = 0.817, N = 42) \quad (2)$$

分析数据发现式(1)、(2)的 F 检验 Sig. < 0.001,说明回归方程均达到极显著水平。

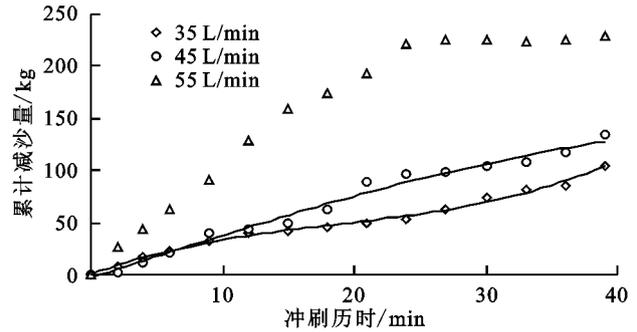


图 4 累计减沙量与冲刷历时的关系

后便会开始减小,但在实际试验过程中,累计产沙量一旦到达最大值,而后不可能减小,所以二者的关系函数是存在定义域的,只有当累计径流量在零到临界值的范围内,才可用此模型对坡面累计产沙量进行精确预测。由表 2 可知最大累计产沙量对应的临界累计产流量,在对照坡面下,累计产沙量最大值随着流量的增大先增大后稍微减小,对应的累计产流量分别为 1 202.5, 2 240, 1 565 L,在植物篱措施坡面下,累计产沙量最大值随着流量的增大而增大,对应的累计产流量分别为 1 465, 1 167.5, 2 266.7 L,综合来看,累计产沙量最大值在不同措施下,随流量的增大变化情况并不一致,由于试验条件下,累计产流量均未达到临界值,因此累计产沙量均未到达最大值。

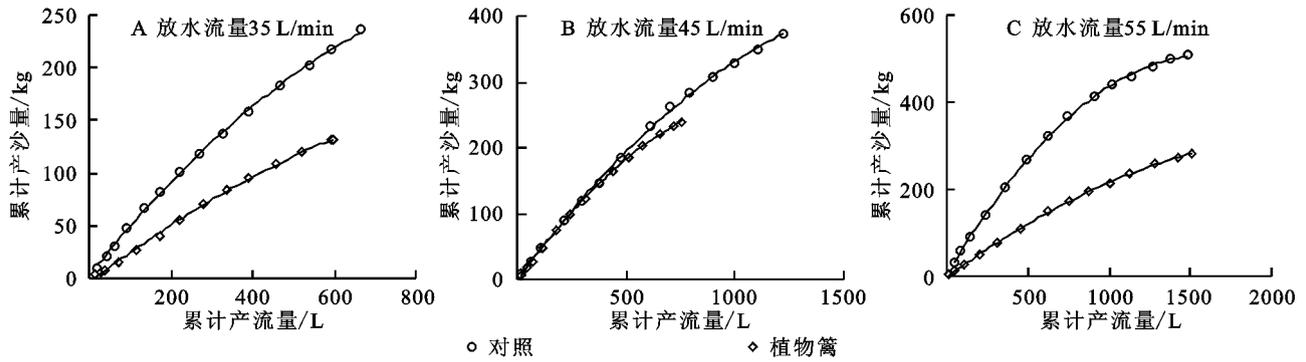


图 6 累计产沙量与累计产流量的关系

表 2 不同流量下累计产沙量 S 与累计产流量 Q 的关系

流量/ (L · min ⁻¹)	措施	拟合公式	样本数	决定 系数 R ²	Q 临界值	S 最大值
35	对照	$S = -2E^{-4}Q^2 + 0.481Q + 3.119$	N=14	R ² =0.999**	1202.5	292.32
35	植物篱	$S = -1E^{-4}Q^2 + 0.293Q - 3.653$	N=14	R ² =0.999**	1465	210.97
45	对照	$S = -1E^{-4}Q^2 + 0.448Q - 0.982$	N=14	R ² =0.999**	2240	500.78
45	植物篱	$S = -2E^{-4}Q^2 + 0.467Q - 2.902$	N=14	R ² =0.999**	1167.5	269.71
55	对照	$S = -2E^{-4}Q^2 + 0.626Q + 4.265$	N=14	R ² =0.999**	1565	494.11
55	植物篱	$S = -6E^{-5}Q^2 + 0.272Q - 1.652$	N=14	R ² =0.999**	2266.7	306.61

注:其中 * 表示 (p<0.05), ** 表示 (p<0.01)。

3 结论与讨论

3.1 讨论

不同流量条件下,不同措施坡面的产流产沙分布规律不尽相同,裸坡坡面的产流产沙分布规律均是沿着坡面水流方向先增后减,波动幅度不大,植物篱措施下坡面的产流产沙分布规律主要为沿着水流方向先减后增,与裸坡呈相反趋势。由裸坡坡面侵蚀产沙分布情况可知,坡面侵蚀产沙较严重坡段主要集中在中间位置,水土保持防治措施的布设也应主要集中在中间坡段,由植物篱坡面的分布规律也可知,植物篱措施能起到很好的减流减沙效果,尤其是针对中间坡段的防蚀作用。坡面流水沙关系往往较为复杂,加上测量精度的限制,二者之间的关系尚无定论。于国强等^[16]将累计产沙量与累计径流量进行回归分析,发现二者之间的关系均满足幂函数关系;吴淑芳等^[17]通过分析调控坡面水沙关系发现,侵蚀量与径流量呈线性关系;本试验条件下,时段产沙量与时段径流量呈幂函数关系,累计产沙量与累计径流量呈二次函数关系,此结果也可能是由于工程堆积体这个独特下垫面情况导致的。

3.2 结论

(1) 植物篱措施对阻延坡面径流的产生能起到很大的作用,随着放水流量的增加,两种坡面产流时间均呈现线性递减趋势;对照坡面的平均产流量沿着水流方向均呈先增后减的趋势,而植物篱坡面呈相反

趋势;随着放水流量的增大,植物篱措施下的平均减流效益并不是呈简单的减弱趋势,而是呈现先增加后减小的趋势,在 45 L/min 流量下达到最大减流效益;根据植物篱措施的减流效益和减沙效益在坡面的分布趋势可知,植物篱措施的合理配置应着重加强中间坡段的防治措施。

(2) 植物篱措施起到了很好的减沙效果,但不同流量下植物篱措施的平均减沙效益并不尽相同;在低流量情况下,植物篱措施能发挥更好的减沙效益;55 L/min 流量下的累计减沙量显著大于另外两个流量的累计减沙量,各个流量条件下的累计减沙量与时间的动态变化均能用三次函数进行很好的拟合。

(3) 时段产沙量随着时段产流量的增大而增大,用幂函数方程对时段产沙量与时段径流量进行拟合效果最佳;在本试验条件下,累计产沙量均随着累计径流量的增加先迅速增加而后缓慢增加,且在相同径流量下,对照坡面的累计产沙量均大于植物篱坡面的累计产沙量,不同措施坡面累计产沙量均与累计径流量呈二次函数关系,累计产沙量存在最大值,但二者的关系函数存在定义域,只有当累计径流量在零到临界值的范围内,才可用此模型对坡面累计产沙量进行精确预测。

参考文献:

[1] 杨健,高照良,李永红.国内外开展开发建设项目研究进展的初步分析[J].中外企业家,2010(7):6-9.
[2] 郭索彦,姜德文,赵永军,等.建设项目水土流失现状与综合

- 治理对策[J]. 中国水土保持科学, 2008, 6(1): 51-56.
- [3] 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①[J]. 土壤, 2009, 41(1): 107-111.
- [4] 刘定辉, 赵燮京, 曹均城, 等. 紫色丘陵区蓑草植物篱的减流减沙效应及其机理[J]. 西南农业学报, 2007, 20(3): 439-442.
- [5] 蒲玉琳, 谢德体, 林超文, 等. 植物篱—农作模式坡耕地土壤综合抗蚀性特征[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 125-135.
- [6] 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.
- [7] 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 and Tillage Research*, 2007, 93(1): 56-63.
- [8] Donjadee 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.
- [9] Rachman A, Anderson S H, Gantzer C J, et al. Influence of stiff-stemmed grass hedge systems on infiltration[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(6): 2000-2006.
- [10] 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.
- [11] 袁久芹, 梁音, 曹龙熹. 红壤坡地香根草植物篱产流产沙过程模拟[J]. 中国水土保持科学, 2014, 12(4): 14-20.
- [12] 袁久芹, 梁音, 曹龙熹, 等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比①[J]. 土壤, 2015, 47(2): 400-407.
- [13] 李晓春, 孟全省. 黄土高原沟壑区小流域生态与经济要素演变及相互作用: 以陕西省长武县王东沟小流域为例[J]. 西北农林科技大学学报: 社会科学版, 2008, 8(3): 9-13.
- [14] 谢云, 刘宝元. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [15] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面径流水动力学特性[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4): 34-38.
- [16] 于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 593-599.
- [17] 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.
- (上接第 373 页)
- [6] 杨坤, 李世荣. 北京市生态清洁小流域分类分级建设对策研究[J]. 中国水土保持, 2012(2): 7-9
- [7] 郝咪娜. 浙江省生态清洁小流域建设措施研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2013
- [8] 周萍, 文安邦, 贺秀斌, 等. 三峡库区生态清洁小流域综合治理模式探讨[J]. 人民长江, 2010, 41(21): 85-88.
- [9] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查水土保持情况公报[J]. 中国水土保持, 2013(10): 2-3, 11.
- [10] 桑连海, 黄薇, 廖志丹. 长江流域城市污水处理现状与节水效应浅析[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(4): 23-25.
- [11] 吕娟, 屈艳萍, 吴玉成. 重庆市干旱灾害脆弱性分析[J]. 中国水利, 2006(23): 30-32.
- [12] 张树华. 北京市生态清洁小流域综合治理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [13] 重庆市水利局. 重庆市 2012 年水资源公报[R]. 重庆: 重庆市水利局, 2013.
- [14] 周媛媛, 殷捷, 杨志敏, 等. 重庆市畜禽粪污的区域分布及其水环境响应特征分析[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3).
- [15] 刘坤, 陈治谏, 廖晓勇. 三峡库区紫色土坡地不同耕作措施的水土保持效应研究[J]. 水土保持研究, 2007, 15(1): 257-259.
- [16] 周璟. 涪陵区不同土地利用方式下土壤养分及侵蚀特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [17] 李培霞, 陈国建, 韦杰. 三峡库区典型坡改梯地土壤肥力质量评价: 以重庆市巫山县为例[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2013, 30(6): 55-62.
- [18] 廖晓勇, 罗承德, 陈治谏, 等. 三峡库区坡地果园间植草篱的水土保持效应[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(1): 152-156.
- [19] 吕文星, 张洪江, 程金花, 等. 三峡库区植物篱对土壤理化性质及抗蚀性的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 69-73.
- [20] 史东梅, 卢喜平, 刘立志. 三峡库区紫色土坡地桑基植物篱水土保持作用研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3): 75-79.
- [21] 蔚远中. 小安溪小流域治理突出生物过滤带建设效果好[J]. 中国水土保持, 2005(5): 27-27.
- [22] 李希希. 重庆地区农村分散型生活污水处理现状及其技术适宜性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.
- [23] 袁兴中, 熊森, 刘红, 等. 水位变动下的消落带湿地生态工程: 以三峡水库白夹溪为例[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2012, 29(3): 24-26.