

不同植被密度下坡面径流能量变化试验研究

张璐,雷孝章,孙林博,孙菊英,赵璐

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川成都610065)

摘要:为了解坡面水蚀规律,从根本上研究水土保持机理,通过室内水槽试验模拟在不同种植密度下坡面径流在坡面上的能量变化。分析了自然种植密度下5个坡位处径流断面能量随坡长、流量、坡度的变化规律。对比了不同断面能量在4种坡度、3种植植密度及种植方式下(单排行带式、加密平均分布行带式及加密间隔分布行带式)的变化特点,得出不同坡度、流量条件下合理的种植方式。为水土侵蚀防护和保护工作提供理论依据。

关键词:坡面流;断面能量;种植密度;水土保持

中图法分类号:S157

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.10.016

土壤侵蚀实质上是降雨、坡面径流能量在土壤及植被间传递和转化时引起的一种失衡现象,径流能量与径流挟沙能力转化传递有明显关系,研究其能量规律可以了解坡面水蚀规律,从根本上研究水土保持机理。由于影响坡面径流的因素很多,如径流水深、径流能量、坡长、下垫面因素等,坡面流能量变化呈现复杂的规律。近年来,基于不同的地表糙度条件,众多研究者研究了坡面径流能量变化规律,并建立了径流能量计算的模型与公式。R·拉尔通过模型简化得出水流能量的计算公式^[1];赵鸿雁提出水土流失系统物质和能量容量的概念,通过理论分析提出径流势能、坡面系统物质势能的计算公式^[2];吴发启等通过黄土高原南部土壤入渗水文模型,得出坡面径流平均单位面积上的径流能量^[3];雷孝章等结合森林生态系统功能,分析了坡面流的局部损失和总阻力^[4];李占斌等通过能量守恒,分析水流自坡面顶端到坡面上任一断面间的能量及损耗^[5];孙三祥在假设水深沿表面波传播方向变化缓慢,忽略降雨对波动影响的基础上,建立了坡面能量的微分表达式^[6];Hsieh, Li, Shen在矩形河道中,通过分析圆柱后波来研究植被对水流的阻力作用,得出流速的减小受植物密度和排列模式的影响。以往研究对于植被覆盖下坡面流径流能量变化规律涉及甚

少,本文通过水槽试验,对乔灌木等植被覆盖下不同坡度坡面流径流能量随水动力参数的变化进行了系统试验,探寻不同种植密度下植被对坡面径流能量变化的影响,得出适合的植物配置方式,为水土侵蚀防治和保护工作提供理论依据。

1 试验装置及坡面流参数测定

由四川省水土保持实验观测遂宁站、都江堰灵岩山、升钟站等水土保持站的观测资料可知^[7],四川省土壤侵蚀主要来自暴雨、大暴雨及特大暴雨,且大暴雨、特大暴雨情况下侵蚀严重危害大。本文模拟大暴雨及特大暴雨产生坡面径流的能量消耗,在0.1~2.6 L/s范围内,选取6个流量进行放水试验^[8]。天然状态下木本植物茎秆为刚性,选取PVC管进模拟,且由于植被茎秆对于坡面来水的分流作用较为明显,从能量消散角度,水流有了一定混掺长度,所以能量消散与植物沿坡长方向径距有紧密关系,设置水平向沿坡面3次加密,探讨植被密度增加时坡面能量是否消减。

本试验在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室水力学实验室进行,试验设备包括有机玻璃水槽、水箱、以及放水设备(见图1)。水槽坡度可在0°~20°之间调整,水槽长5.5 m,宽0.5 m,选取3

收稿日期:2015-03-20

作者简介:张璐,女,硕士研究生,研究方向为水土保持。E-mail:471870413@qq.com

通讯作者:雷孝章,男,副教授,研究方向为水土保持。E-mail:3141293368@qq.com

m 为试验段,乔木采用管径为 25 mm 的 PVC 管模拟,高度 10 cm,垂直粘于水槽平面上。

方案 1 采用单排行带式布置,4 排圆管平均布置于 3 m 的试验段,每两根圆管中心间距为 0.6 m,每排两根圆管中心距为 10 cm。方案 2 为加密平均分布行带式布置,各排间距 0.3 m,共计 32 根圆管。方案 3 为再次加密间隔分布行带式布置,各排间距 0.15 m,共计 56 根管,见图 2。放水设备通过进水管阀门调节流量,流量范围为 0.1~2.6 L/s,水箱出水处装有卵石以使水流均匀流下,水箱中水位不变,水流为恒定流。

试验测试了 5°,10°,15°,20°共 4 组坡度的坡面流水动力变量,在不同坡度下各要素共测 5 次。主要测试变量包括流量、水温及水深。流量通过在水槽尾部设置的集水装置采用体积法来测量,并多次测量取平均值,水深利用钢尺测量读数(可精确到 0.5 mm),基于流量 q 和水深 h 可得断面流速。水深测点布置于坡长为 0.3,1.0,1.5,2.0 m 和 2.7 m 的 5 个点测量。

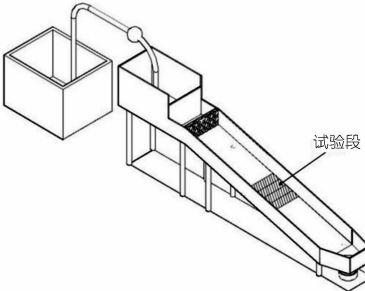


图 1 试验装置

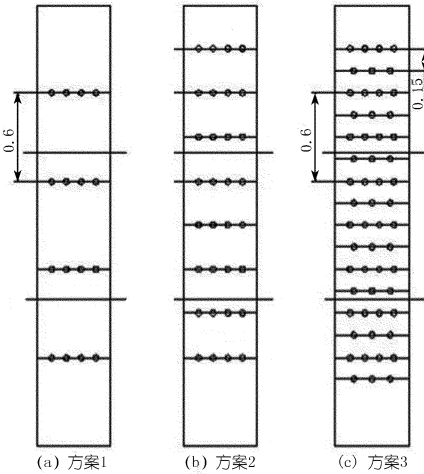


图 2 植被及分布(尺寸单位:m)

2 试验结果分析

2.1 径流能量的计算

由于试验模拟的坡度、流量以及试验方式与吴发启(3°~15°坡面,暴雨型坡面径流量)和李占斌(25°以下坡面,室内放水实验)的试验条件相似,且吴发

启、李占斌能量公式都是径流能量与径流深、坡度、坡长的函数,为了便于试验数据的测量,本文势能计算采用吴发启坡面径流势能公式^[4]

$$E_{势} = (\frac{\rho g}{4}) L \sin 2\theta \cdot h \tag{1}$$

式中, $E_{势}$ 为坡面径流能, J/m²; ρ 为径流密度, kg/m³; g 为重力加速, m/s²; L 为坡面长度, m; θ 为坡度, (°); h 为坡面径流深, m。

坡面动能采用李占斌提出的实际径流的动能公式^[5]

$$E_{动} = (\frac{1}{2}) \rho q_x u_x^2 \tag{2}$$

式中, $E_{动}$ 为坡面径流能, J/m²; q_x 为距顶 x 位置处断面流量, m³/s; u_x 为坡顶 x 断面处流速, m/s。

能量计算公式

$$E = E_{势} + E_{动} = (\frac{\rho g}{4}) L \sin 2\theta \cdot h + (\frac{1}{2}) \rho q_x u_x^2 \tag{3}$$

2.2 不同种植面积下坡面能量

2.2.1 断面能量随坡长变化

图 3 为 4 种坡度情况下断面能量的变化,从图中可以看出,在小坡度情况下,即坡度为 5°时,在 6 个不同流量下,断面能量随坡长增大而减小,且基本为线性变化。当坡度逐渐增加为 10°、且流量较小(0.2 L/s)时,断面能量变化与坡度为 5°的情况基本一致;当流量大于 0.2 L/s 时,断面能量在坡位为 0.5~2 m 之间沿程减小,但在坡位 1~1.5 m 处减幅变小,在 1.5~2 m 减幅又再次增大。当坡度为 15°时,能量变化与 10°基本一致。当坡度为 20°时,断面能量沿程减小。当流量较小(0.22 L/s)时,断面能量与 10°,15°的变化一致,当流量增大为 0.5~1.78 L/s 时,断面能量在 1~1.5 m 处减小趋势变缓,在 1.5~2 m 处趋势增大,即在小坡度或小流量时,断面能量沿坡长线性减小,呈现出与断面势能一致的规律;在坡度较大时,断面能量随坡长减小,并且减小趋势呈“先减小、再增大、又减小”的规律。

这是因为,坡度较小或流量较小时,径流深较小,床面对径流的阻碍是能量损失的主要原因,则单位长度下能量损失基本相同,呈线性变化。而且,由于径流流速小,断面动能占断面总能量的比例小,断面能量的损失主要为势能损失,所以断面能量呈现与势能一致的变化规律。径流动能由势能转化而来,而断面动能的变化引起总能量的变化不明显,则说明势能的损失主要是由于摩擦造成。表 1 为动能占断面总能量的百分比范围,在流量较小,流经坡长较短时动能占断面能

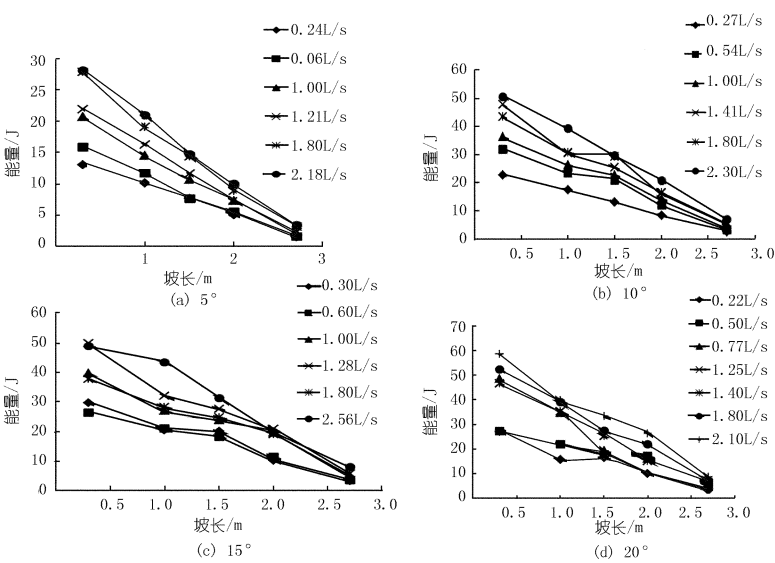


图 3 不同流量下坡面流能量随坡长变化

量的百分比小于 1;当流量较大,流经坡长较长时动能的百分比增大到 10% ~ 30%。在大坡度情况下,坡面开始汇流时,坡面水深较浅,床面及植被对径流摩擦作用明显,所以能量损失较大,但当一定位置边界层发展至整个断面,水深增大,床面对水流的阻碍减小,断面动能增加。同时,水深增大也使断面势能相比小坡度下有所增加,所以,单位长度断面能量的减少量减小,即 1 ~ 1.5 m 处斜率增大,随水流继续沿坡长流下,水流流速增加,水流紊动越剧烈,损失加剧,因此单位长度下断面能量的减少又呈现出增加趋势,即 1.5 ~ 2 m 处斜率减小。

表 1 断面动能占断面能量百分比

坡度/ (°)	流量范围/ (L · s ⁻¹)	断面动能占总 能量百分比/%	坡度/ (°)	流量范围/ (L · s ⁻¹)	断面动能占总 能量百分比/%
5	0.24 ~ 2.18	0.26 ~ 20.03	15	0.3 ~ 2.55	0.35 ~ 22.82
10	0.27 ~ 2.3	0.27 ~ 18.03	20	0.22 ~ 2.1	0.03 ~ 14.81

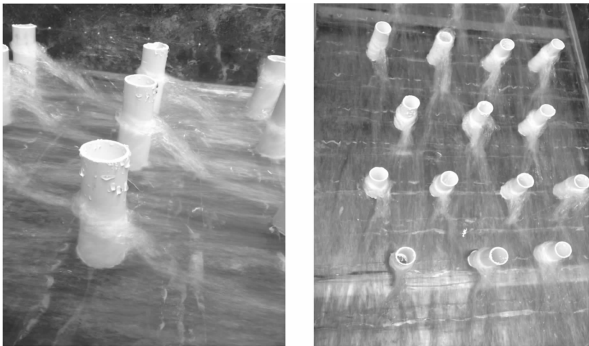
2.2.2 断面能量随流量变化

如图 3 所示,以坡度 5°为例,在 5 个不同的坡位处,随流量逐渐增大(0.24 ~ 2.18 L/s),在坡面同一位置下,断面能量随之增大。这是因为,当流量增大时径流深度也增大,断面势能大,且同一坡位断面处流量增大、动能增大,所以断面总能量随流量增大而增大。除此之外,从图 3 还可以看出,曲线斜率随流量增大而增大,即单位坡长下能量损失随流量增大而增大。这是由于当水流量量较小时,水流流经植被发生圆柱绕流,但由于流量、流速较小,水流在管后不发生边界层分离,为层流状态。当水流流量增加,水流流速增大,水流在绕流时边界层分离,下游液体随即补充到主流空出区域,形成漩涡而导致水流的能量损失增大。同时,单位坡长下,流量越大坡面水深越大,过水断面湿周越

大,与边壁接触越多,摩擦越大,导致水头损失越大。

2.3 不同种植密度下断面能量

由图 4、5 知,在坡度为 5°、10°时,方案 1 的相同位置断面能量最大,方案 3 次之,方案 2 最小。当坡度为 5°时,方案 1 中坡面植被密度小,对水流阻碍小,所以相同流量下断面能量较方案 2、方案 3 大。随植被密度增大,水流遇到障碍物阻挡消耗能量,发生摩擦和碰撞概率也增大,所以消耗更多能量。断面能量不断减少,即方案 2 小于方案 1,但当植被密度增大到某个值,断面能量再次增大,即方案 3 大于方案 2。这是由于种植密度大时,水流绕过圆柱时会产生分流作用,水流主流离开植被曲面扩散,圆柱后水流填补主流空出区域产生漩涡,能量散失,但相邻两根圆柱产生的扩散水流至下游一定位置叠加,叠加后的水流在坡面上流量及流速增加,流经相同坡长时间短,且局部水深增大减弱了床面的黏滞力作用,使流经相同坡长时的水流损失较小,所以能量较方案 2 大。



(a) 植被阻水引起的水流脱离 (b) 植被挡水面掺混

图 4 植被阻水照片

由图 5(e)、(f)可知,在坡度为坡度为 15°、坡长小于 2 m 时,3 种密度下能量大小为方案 1 > 方案 3 > 方案 2,呈现与 5°、10°一致的规律;坡长大于 2 m 时,3 种密度下断面能量基本相同。这是因为,水流刚开始汇流时水深较浅,植被对水流阻碍作用显著,体现出与小坡度相同的规律。

由图 5(g)、(h)可知,在坡度为 20°时,方案 3 断面能量最大,方案 1 次之,方案 2 最小。植被密度越大断面能量反而越大,因为坡度越大,相同流量下、相同位置处的断面流量越大,植物密度增大使水流壅水水深明显增大,床面对水流黏滞力产生的阻力越小,而且由于圆管对水流的阻碍,水流不能及时沿床面流向下游,圆管上游壅水与下游水位差产生压差,使水流动能增大,从而增大了断面的能量。所以,在坡度为

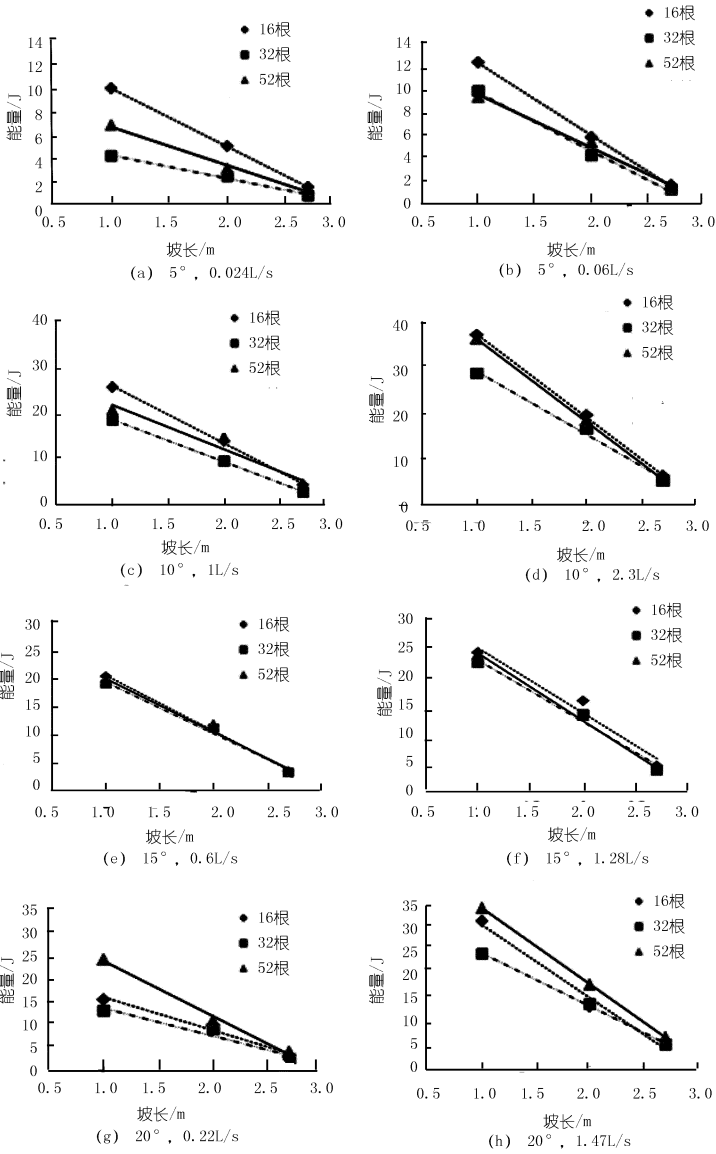


图5 不同种植密度下坡面流断面能量

20°时,方案3虽植被密度最大,但断面能量并非最小。

3 结论

通过试验研究了不同密度分布条件下坡面水流能量(随坡长、流量、种植密度、坡度等)的变化特性,主要结论如下。

(1) 在小坡度或小流量时,断面能量沿坡长线性减小,呈现出与断面势能一致的规律。在大坡度时,断面能量随坡长增大呈“先减小、再增大、又减小”的趋势。坡度为10°~15°,能量在1°~1.5°坡位处增长;20°时能量在1.5~2 m坡位处增长。

(2) 在同种植植密度下,坡面径流断面能量随流量增大而增大,而且单位坡长下能量损失随流量增大而增大。

(3) 在不同种植密度下,坡面为5°、10°、15°时,实际种植密度(方案1)下断面能量比52根和32根的情况要大,在20°坡度条件下,52根种植密度断面能量大于16根和32根的情况。坡面径流能量并不是随植被种植面积增大而减小。

利用光滑平直有机玻璃水槽模拟天然状态下坡面,考虑天然坡面有一定糙率,水流特性与实际坡面存在一定差别,且天然坡面流有入渗、汇流等情况,所以本文得到结果与实际状况下有一定差异,只适用于在自然情况下坡面范围较大,地面微小凸起或平整度较好且坡面径流为超渗径流,降雨强度与渗流强度稳定的条件。

参考文献:

[1] R. 拉尔. 黄河水利委员会宣传出版中心译. 土壤侵蚀研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
[2] 赵鸿雁. 水土流失系统物质与能量交换途径的探讨[J]. 水土保持学报, 1993, 7(1): 61-68.
[3] 吴发启, 赵晓光, 朱首军. 黄土高原南部侵蚀能量组成与分级特征[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, (4): 56-61.
[4] 雷孝章, 杨玉波, 赵文谦. 森林对坡面流的影响研究[J]. 四川水力发电, 2001, 增(20): 51-53.
[5] 李占斌, 鲁克新, 丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀力过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 5-7.
[6] 孙三祥. 考虑表面张力作用的坡面流运动方程[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 145-149.
[7] 四川森林编辑委员会. 四川森林[M]. 北京: 中国林业出版社, 2013.
[8] 四川省水土保持委员会办公室. 四川省水土保持实验观测成果汇编[R]. 成都: 四川省水土保持委员会办公室, 2010.

(编辑: 李慧)

(下转第86页)



正常运行的前提下,大大缩短了施工工期。

5 结 语

目前,深溪沟水电站安装间排水灌浆廊道施工已经完成,整个施工期内,爆破开挖未对电站机组的正常运行及其他水工建筑物的安全造成影响。实践表明,在邻近水工建筑物环境下进行爆破开挖,爆破振动现场监测十分必要,不仅可以通过前期的爆破振动监测和数据回归分析掌握爆破振动衰减的规律,确保现有水工建筑物安全和正常运行,还能及时指导修正和优化爆破施工参数,有效加快施工进度,节省投资,可为类似工程提供经验和借鉴。

参考文献:

[1] 张正宇,赵根.三峡三期碾压混凝土围堰拆除爆破研究[J].工程

爆破,2003,9(1):1-8.

- [2] 苗胜坤,赵峰.三峡工程建(构)筑物附近的控制爆破技术[J].人民长江,2001,32(10):27-28.
- [3] 宗琦,汪海波.岩石松动爆破振动效应对邻近建筑物影响的监控[C]//第九届全国工程爆破学术会议,2008.
- [4] 卢文波,李海波,陈明,等.水电工程爆破振动安全判据及应用中的几个关键问题[J].岩石力学与工程学报,2009,28(8):1513-1520.
- [5] 刘晓军,程黎,苏利军.机电设备的爆破振动安全控制标准研究[J].人民长江,2009,4(19):82-84.
- [6] 朱奎卫.复杂环境下施工爆破对已有建筑物振动影响的研究[J].水利水电技术,2008,39(6):56-58.
- [7] GB6722-2003 爆破安全规程[S].
- [8] GB5389-2007 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范[S].

(编辑:胡旭东)

Monitoring and analysis of influence of blasting vibration on adjacent hydraulic structures

ZHONG Quan¹, LI Jialiang¹, WANG Yichang²

(1. Powerchina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610072, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The blasting vibration monitoring is essential because of the negative effects on the adjacent hydraulic structures. Taking the drainage-grouting gallery excavation in the erecting bay of Shengxigou Hydropower Station as a case, the blasting vibration monitoring of powerhouse units and other key parts were analyzed. According to the regression analysis of monitoring data, the drilling and blasting parameters were revised and optimized. As a result, the powerhouse units operation and other hydraulic structures are protected from blasting vibration hazards, and the engineering construction progress is accelerated. The research achievement can provide reference for other similar projects.

Key words: blasting vibration; safety monitoring; parameter optimization; hydraulic structure

(上接第 70 页)

Experimental study of energy variation of slope flow under different planting densities

ZHANG Lu, LEI Xiaozhang, SUN Linbo, SUN Juying, ZHAO Lu

(State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: To understand the erosion laws of slope flow and explore the soil-water conservation mechanism, we study the energy variation of slope runoff under different planting densities by flume experiment. The variation laws of slope flow energy with the slope length, discharge and slope gradient under natural planting density are analyzed in 5 sections. The different sectional energy characteristics under 4 slopes and 3 planting densities and planting modes (single row arrangement, increasing the rows with the same number at each row and increasing the rows with alternate number at each row) are compared. The reasonable planting modes for different slope and flow conditions are achieved.

Key words: slope flow, sectional energy, planting density; soil-water conservation