模拟暴雨条件下植被混凝土坡面侵蚀的水动力学特征

余 飞[1,2], 夏 栋[1,3], 刘文景[1,2], 夏 露[1,4], 许文年[1,4]

(1.三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2.三峡大学 生物与制药学院, 湖北 宜昌 443002; 3.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 4.三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘　要: [目的] 探究不同外掺料对暴雨条件下植被混凝土坡面侵蚀水动力学特征的影响,在降雨侵蚀方面为植被混凝土的配方改进提供科学依据。[方法] 通过室外模拟降雨试验,在 60°坡度、3 种雨强(60,90,120 mm/h)下研究 4 种外掺条件(无添加、聚丙烯酰胺、生物炭、棕榈纤维)的植被混凝土坡面侵蚀状况,并分析坡面水动力学参数与土壤侵蚀量之间的关系。[结果] 坡面雷诺数始终小于 500,坡面流为层流;未添加外掺料的坡面弗劳德数始终小于 1,坡面流为缓流,添加外掺料的坡面弗劳德数始终大于 1,坡面流为急流。添加外掺料的坡面具有较大的坡面流速、水流功率,较小的水流剪切力、径流深度和阻力系数。添加生物炭的坡面土壤侵蚀量显著高于无添加坡面,添加聚丙烯酰胺和棕榈纤维的坡面土壤侵蚀量显著低于无添加坡面。[结论] 外掺料对植被混凝土坡面水动力学参数影响显著。土壤侵蚀量与雷诺数、水流功率呈极显著正相关关系。添加聚丙烯酰胺和棕榈纤维能有效降低植被混凝土边坡土壤侵蚀量,可在高陡边坡生态恢复工作中进行应用。

关键词: 模拟暴雨; 植被混凝土; 水动力学; 土壤侵蚀; 外掺料

文献标识码: A　　**文章编号:** 1000-288X(2021)03-0152-07　　**中图分类号:** S157.1

文献参数: 余飞, 夏栋, 刘文景, 等.模拟暴雨条件下植被混凝土坡面侵蚀的水动力学特征[J].水土保持通报,2021,41(3):152-158.DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.021; Yu Fei, Xia Dong, Liu Wenjing, et al. Hydrodynamic characteristics in vegetation concrete slope erosion under simulated rainstorm experiments [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021,41(3):152-158.

Hydrodynamic Characteristics in Vegetation Concrete Slope Erosion Under Simulated Rainstorm Experiments

Yu Fei[1,2], Xia Dong[1,3], Liu Wenjing[1,2], Xia Lu[1,4], Xu Wennian[1,4]

(1.*Engineering Research of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region*, *Ministry of Education*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*; 2.*College of Biological & Pharmaceutical Sciences*, *China Three Gorges University*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*; 3.*College of Hydraulic & Environmental Engineering*, *China Three Gorges University*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*; 4.*College of Civil Engineering & Architecture*, *China Three Gorges University*, *Yichang*, *Hubei* 443002, *China*)

Abstract: [Objective] The influence of different admixtures on the hydrodynamic characteristics of vegetation concrete slope erosion under rainstorm conditions was analyzed to provide a scientific basis for the improvement of vegetation concrete formulations. [Methods] The erosion status of vegetation concrete slopes under four admixed conditions (no additives, polyacrylamide, biochar, palm fiber) with 60° slope and three rainfall intensities (60, 90, 120 mm/h) were analyzed by using outdoor simulated rainfall experiments. The relationship between slope hydrodynamic parameters and soil erosion was analyzed. [Results] The slope Reynolds number was always less than 500, and the slope flow was laminar. The slope Froude number without admixtures was always less than 1 and the slope flow was slow. The slope Froude number with admixtures was always greater than 1 and the slope flow was rapid. The slope surface with external admixture had a larger slope velocity and water flow power, and smaller water flow shear force, runoff depth, and resistance coefficient.

收稿日期: 2021-01-17　　**修回日期:** 2021-03-07

资助项目: 国家重点研发计划项目"工程创面生态修复防冲刷技术"(2017YFC0504902-04)

第一作者: 余飞(1996—),男(汉族),湖北省襄阳市人,硕士研究生,研究方向为边坡生态恢复与生态防护工程技术。Email:yufeictgu@126.com。

通信作者: 夏栋(1985—),男(汉族),湖北省黄冈市人,博士,副教授,主要从事土壤生态学研究。Email:xiadong2015@ctgu.edu.cn。

The amount of soil erosion on the slope with biochar addition was significantly higher than without biochar addition. The amount of soil erosion on the slope with addition of polyacrylamide and palm fiber was significantly lower than that without addition. [Conclusion] Use of admixtures had a significant effect on the hydrodynamic parameters of a vegetation concrete slope. The amount of soil erosion was very significantly and positively correlated with Reynolds number and water flow power. Adding polyacrylamide and palm fiber can effectively reduce the amount of soil erosion on vegetation concrete slopes, and can be used in the ecological restoration of high and steep slopes.

Keywords: simulated rainstorm; vegetation concrete; hydrodynamics; soil erosion; admixture

工程建设中经常会形成大量裸露边坡,这些裸露边坡因其环境恶劣,缺乏维持植被生长的必要条件,难以恢复到原有生态水平[1]。随着人们对环境保护重视程度的逐渐提高,岩质边坡护坡技术也在不断完善,传统护坡技术(如喷混凝土、水泥抹面、浆砌片石等),生态环境效益较差[2],已无法满足人们的生态景观需要。因此,植被混凝土生态防护技术应时而生,现已发展为生态护坡技术的一个重要组成部分。

植被混凝土生态防护技术是采用特定的混凝土配方和种子配方,对边坡进行防护和绿化的一项综合环保技术,其技术核心是生态改良剂,该技术根据边坡特点来确定水泥、土、有机质、保水剂、长效肥、生态改良剂及植物种子的配比,将以上各组分混合搅拌均匀即为植被混凝土,通过喷播机将拌和好的植被混凝土喷射到边坡上,形成植被混凝土坡面,既能达到力学防护要求,又能营造良好的植物生长环境,自发明以来,已被广泛用于各类植被恢复工程中[3-4]。目前,对植被混凝土的研究主要在基材配比[5-6]、力学特征[7-8]、养分等[9-10]方面,对其侵蚀方面的研究还比较少。土壤侵蚀是在土壤和降雨径流共同作用下发生的侵蚀—搬运—输移—再搬运的过程[11]。杨奇等[12]通过制作含有不同比例水泥的植被混凝土试块,从基材配比角度研究不同降雨强度下植被混凝土抗冲刷性能;李灿等[13]通过模拟真实的植被混凝土坡面,构筑边坡模型进行室内冲刷试验,发现植被混凝土坡面侵蚀主要为层状面蚀,局部为细沟侵蚀,侵蚀量与降雨强度、坡率呈线性关系,各因素对植被混凝土边坡侵蚀模数影响的显著性高低为:降雨强度>降雨历时>坡率[14]。关于土壤侵蚀,国内外研究者已做过大量研究,并且在坡面产流产沙及侵蚀动力过程等方面取得了丰硕的成果[15-17]。本试验参考土壤改良剂、纤维加筋在防治水土流失方面的应用,选取外掺料聚丙烯酰胺(PAM)、生物炭、棕榈纤维,对植被混凝土坡面流水动力学特征与侵蚀模数进行研究。

开展人工模拟降雨条件下植被混凝土坡面流水动力学特征的研究,既可以帮助人们了解植被混凝土坡面侵蚀过程的内在机制,同时对高陡岩质边坡地区植被混凝土外掺料的选用具有重要指导意义。考虑到工程所在地区气候存在差异,本试验设置 60,90,120 mm/h 这 3 种降雨强度,模拟植被混凝土边坡养护初期遭遇不同强度暴雨的工况。植被混凝土生态防护技术主要针对 45°以上高陡边坡,本试验以 60°边坡为例,不针对某一具体工程,根据不同降雨强度、外掺料条件下的产流产沙及水动力学参数,研究植被混凝土坡面流水动力学特征及其与侵蚀模数的关系,了解各因素对植被混凝土抗蚀能力的影响,以期在降雨侵蚀方面为植被混凝土的推广使用及配方改进提供一定的理论基础。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验所用种植土为宜昌市郊区的黄棕壤,采于 2019 年 7 月;水泥为普通硅酸盐水泥(P.O 42.5);锯末为木材厂白杨树锯末,试验前已晒干;植被混凝土生态改良剂为湖北润智生态科技公司专利产品,呈粉末状;有机肥为助邦生物有机肥,呈粉末状;聚丙烯酰胺(PAM)为阴离子型,其分子量为 1.50×10^7;生物炭过 200 目筛;棕榈纤维在试验前已剪为 3 cm 长的小段。

1.2　试验方法

试验在三峡大学土木与建筑学院模拟降雨场地进行,试验时间为 2019 年 8—9 月。实际工程中是整个边坡受到雨水冲刷,边坡较高,坡度较陡,不利于直接对边坡侵蚀过程进行研究,因此构筑模型进行模拟降雨试验十分必要,能够详细观测坡面泥沙侵蚀。试验模型见图 1。箱体内尺寸为:长 150 cm×宽 67 cm×高 20 cm,箱体坡度可调节范围为 0°～70°,汇水槽为活动连接式。试验采用 NLJY-09-2 型组合侧喷式人工模拟降雨装置,喷头高 6 m,雨滴实际降落高度为 4.5 m,达到和自然降雨类似的直径与终点速度,降雨均匀度在 90%以上。本次试验以 60°边坡为例,探究植被混凝土边坡在养护初期遭遇暴雨时坡面水动力学及侵蚀特征,共设有 4 组试验,1 组为无任何外掺料的现有基材(对照组),基材配比见表 1。其余 3 组分别在现有基材中掺入 PAM、生物炭和棕榈纤

维(试验组),掺量均为 0.4%。每次降雨试验重复 3 次,单次降雨历时 30 min,设定 3 种降雨强度(60,90,120 mm/h),总计降雨 36 场。在箱体底部按照规范喷射已经拌和好的植被混凝土生态基材[18],其中基层厚度为 8 cm,面层厚度为 2 cm,喷射完成后覆盖无纺布养护 24 h,开始正式试验。正式降雨之前进行降雨强度的率定,降雨过程中测定水流温度、流速。坡面产流后,收集降雨产生的全部径流样,对径流样进行称重并分离出其中的泥沙样,泥沙样烘干后的重量作为土壤侵蚀量,径流样减去泥沙干重后即为径流量。

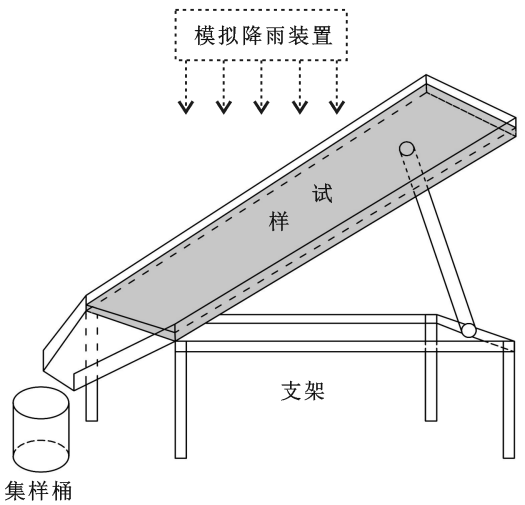


图 1 试验装置示意图

表 1 植被混凝土基材配比

基材	种植土	水泥	锯末	生态改良剂	有机肥
基层	100	6	5	3	2
面层	100	3	5	1.5	2

注:表中各成分配比为质量比,以种植土质量为计算基数。

1.3 水动力学参数计算方式

(1) 流速。

表层流速需要乘以修正系数才能得出坡面平均流速[19],计算公式为:

$$V_{平均}=\alpha V_{表层} \tag{1}$$

式中:$V_{平均}$ 为坡面水流平均速度(m/s);α 为修正系数,取 0.67;$V_{表层}$ 为坡面表层水流速度(m/s)。

(2) 水深。

$$h=Q/(T\cdot V_{平均}\cdot d) \tag{2}$$

式中:h 为坡面水深(m);Q 为降雨过程中的总径流量(m^3);T 为降雨总历时(s);d 为过水断面宽度(m)。

(3) 雷诺数。

$$R_e=V_{平均}R/\gamma \tag{3}$$

式中:R_e 为雷诺数;R 为水力半径,约等于坡面水深(h/m);γ 为运动粘滞系数(m^2/s),$\gamma=0.017\ 75/(1+0.033\ 7\ t+0.000\ 221\ t^2)$;$t$ 为水温(℃)。

(4) 弗劳德数。

$$F_r=V_{平均}/\sqrt{gh} \tag{4}$$

式中:F_r 为弗劳德数;g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2。

(5) 阻力系数。

本试验采用 Darcy-Weisbach 阻力系数对坡面阻力进行计算,公式为:

$$f=8\ gRJ/V_{平均}^2 \tag{5}$$

式中:f 为阻力系数;J 为径流能坡,其值为 $J=\sin\theta$,θ 为坡度。

(6) 水流剪切力。

$$\tau=\rho RJ \tag{6}$$

式中:τ 为水流剪切力(Pa);ρ 为水流容重,取值 10 000 N/m^3。

(7) 水流功率。

$$\omega=\tau V_{平均} \tag{7}$$

式中:ω 为水流功(W/m^2)。

2 结果与分析

2.1 坡面土壤侵蚀量与水流剪切力

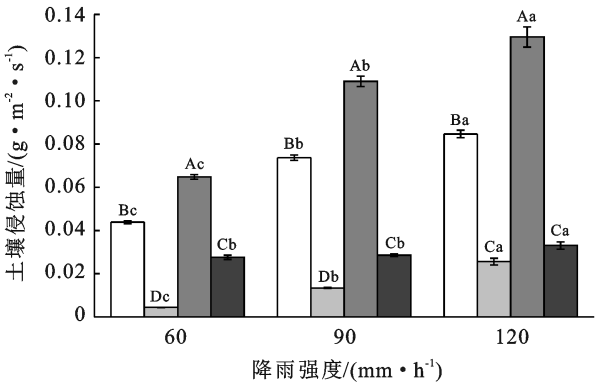
如图 2 所示,随着降雨强度增加,土壤侵蚀量增大。在 3 种降雨强度下,各坡面土壤侵蚀量大小均为:生物炭>无添加>棕榈纤维>PAM。降雨强度为 60 mm/h 和 90 mm/h 时,4 种坡面土壤侵蚀量差异显著,降雨强度为 120 mm/h 时,添加生物炭的坡面土壤侵蚀量显著高于其他 3 种坡面,添加 PAM 与棕榈纤维的坡面土壤侵蚀量差异不显著,且均显著低于无添加坡面。添加棕榈纤维的坡面在雨强为 120 mm/h 时土壤侵蚀量显著高于雨强为 60 mm/h 和 90 mm/h 时,后两者差异不显著,其他 3 种坡面在不同降雨强度下,各自的土壤侵蚀量差异均显著。在处理组中,添加 PAM 的植被混凝土坡面抗侵蚀能力最强,可以减少侵蚀泥沙量 69.7%~90.0%。

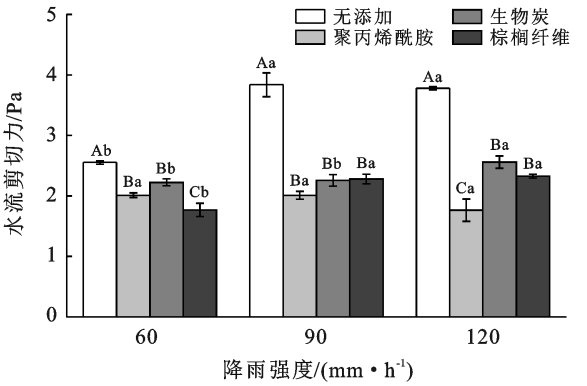
坡面流在运动过程中沿坡面梯度方向上产生的作用力即为水流剪切力,由公式(6)可知,τ 与 R 成正比,本试验中产生的坡面薄层流水力半径 R 近似等于径流深度 h,因此水流剪切力呈现出与径流水深相同的规律,即处理组水流剪切力较对照组减少 12.9%~53.3%,与对照组水流剪切力差异显著。

2.2 坡面流流态

对各试验条件下植被混凝土坡面流雷诺数与弗劳德数进行计算,以此来分析坡面流流态,结果见表 2。随着降雨强度增大,添加不同外掺料的 4 组试验

雷诺数均呈增大趋势,在相同降雨强度下,添加PAM、生物炭、棕榈纤维的 3 个处理组雷诺数分别是对照组的 0.97～1.57,1.15～1.55,1.16～1.52 倍,且各试验条件下雷诺数均小于 500,说明坡面流为层流;随着降雨强度增大,无添加处理组与添加棕榈纤维处理组弗劳德数呈先减小再增大的趋势,添加聚丙烯酰胺与添加生物炭的处理组呈逐渐增大的趋势,对照组弗劳德数均小于 1,说明对照组坡面流为缓流,处理组弗劳德数均大于 1,说明处理组坡面流为急流。由此可见,添加外掺料对坡面流流态有显著影响,外掺料减小了坡面表层粗糙度,从而使坡面流紊动程度随之降低。





注:采用单因素 ANOVA 分析,不同大写字母表示同一降雨强度、不同外掺料条件下差异显著($\alpha=0.05$),不同小写字母表示同一外掺料、不同降雨强度条件下差异显著($\alpha=0.05$),下同。

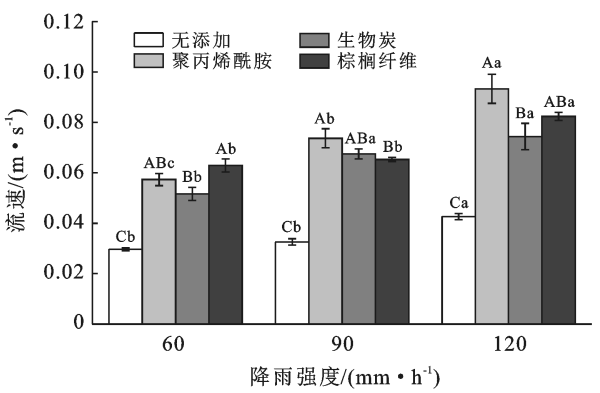
图 2　不同降雨强度及外掺料条件下的土壤侵蚀量与水流剪切力

表 2　不同降雨强度及外掺料条件下坡面流雷诺数 R_e 与弗劳德数 F_r

项 目	外掺料	降雨强度/(mm·h⁻¹)		
		60	90	120
R_e	无添加	6.49	10.90	13.94
	聚丙烯酰胺	10.18	12.59	13.52
	生物炭	10.13	12.95	16.01
	棕榈纤维	9.85	12.64	16.70
F_r	无添加	0.55	0.50	0.65
	聚丙烯酰胺	1.20	1.55	2.12
	生物炭	1.03	1.34	1.39
	棕榈纤维	1.41	1.29	1.61

2.3　坡面流平均流速和平均径流深度

对各试验条件下植被混凝土坡面平均流速和平均径流深度进行分析(图 3),结果表明,随着降雨强度增大,4 种不同外掺料条件的坡面流速均有增加。不同降雨强度下,添加聚丙烯酰胺、生物炭、棕榈纤维的坡面(处理组)流速较无添加坡面增加 73.4%～126.1%,与无添加坡面(对照组)流速差异显著,处理组径流深度较对照组减少 12.9%～53.3%,与对照组径流深度差异显著。处理组坡面在外掺料与基材共同作用下,表面粗糙度较低,受雨滴击溅及上方来水共同影响,表面大颗粒团聚体被进一步打散,坡面光滑程度高于对照组,水流受到的阻力较小,因而坡面流流速较大,而径流深度较小。



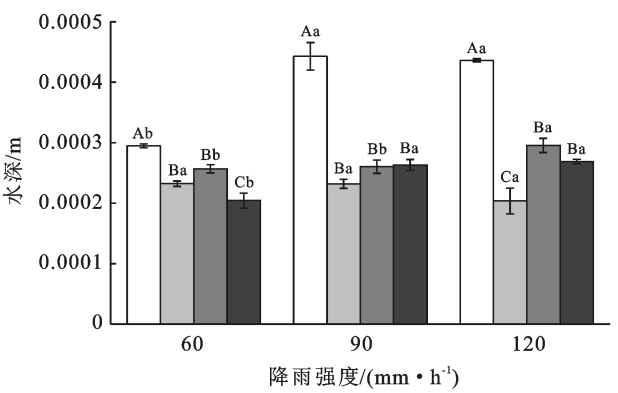


图 3　不同降雨强度及外掺料条件下的坡面流流速与径流深度

2.4　不同处理下坡面阻力系数与水流功率

各试验条件下植被混凝土坡面阻力系数分析结果见图 4。对照组无添加坡面阻力系数显著高于试验组阻力系数,是试验组的 3.4～9.8 倍。坡面流阻力

反映的是外界影响因素对坡面薄层水流阻滞能力的大小，影响因素包括土壤颗粒、降雨、砾石、植被等[20]。在处理组中受外掺料影响，表层基材颗粒较细，坡面整体较为光滑，对坡面流产生的阻力较小，显著低于对照组坡面阻力。水流功率指单位面积水体势能随着时间的变化率，由水流功率分析结果可知，随着降雨强度增加，试验组与对照组坡面流水流功率也逐渐增大，对照组水流功率始终低于试验组，且差异显著，仅在降雨强度为 120 mm/h 时，出现添加聚丙烯酰胺的处理组坡面水流功率与对照组无显著差异。添加外掺料导致试验组坡面流流速较大，因而水体势能随时间变化较快，导致试验组水流功率高于对照组。

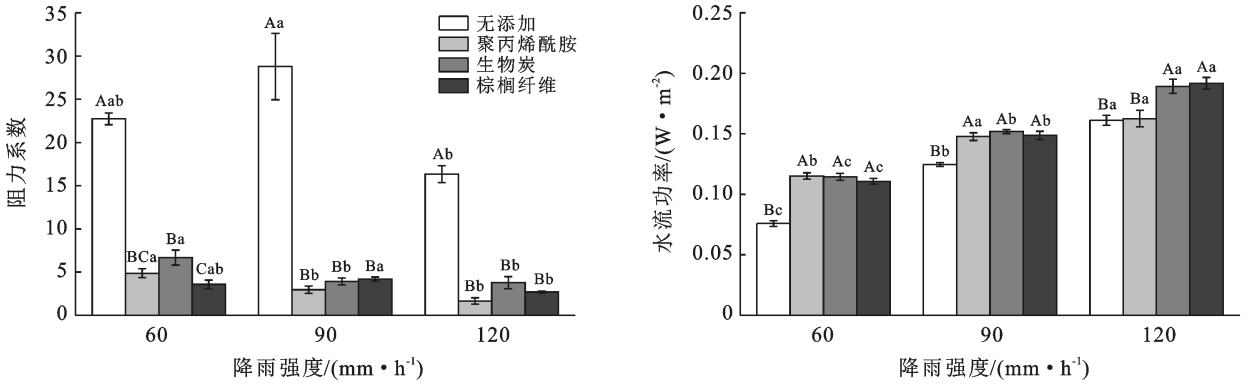


图 4 不同降雨强度及外掺料条件下的坡面流阻力系数与水流功率

2.5 植被混凝土坡面土壤侵蚀量与水动力学参数的关系

基于本研究前面 4 种不同坡面水动力学参数及土壤侵蚀量间的差异，若将添加 4 种外掺料的不同坡面放在一起，它们的某些特殊属性可能被掩盖，因此按照外掺料类型对土壤侵蚀量和水动力学参数进行拟合(表 3)，3 种降雨强度下各有 3 个重复，共 9 个样本。结果表明，在 4 种坡面上，流速、雷诺数、水流功率与土壤侵蚀量始终呈显著的正相关关系($p<0.05$)，且除了添加棕榈纤维的坡面上流速与土壤侵蚀量的相关关系，其他均呈极显著正相关($p<0.01$)。有研究者认为水流剪切力可以很好的评价坡面流的侵蚀能力[21-22]，然而本次试验中 4 种坡面上水流剪切力与土壤侵蚀量的相关性差异规律各不相同，无添加坡面上水流剪切力与土壤侵蚀量呈极显著正相关，在添加棕榈纤维的坡面上呈显著正相关，在添加生物炭的坡面上虽呈正相关却无显著性，而在添加聚丙烯酰胺的坡面上则呈负相关，因此本次试验中水流剪切力无法作为评价植被混凝土坡面流侵蚀能力的指标。4 种坡面上阻力系数与土壤侵蚀量始终呈负相关，且在添加聚丙烯酰胺与添加生物炭的坡面上呈极显著负相关。

表中雷诺数、水流功率与土壤侵蚀量始终呈极显著正相关，可作为判别人工暴雨条件下植被混凝土坡面土壤侵蚀量的指标，这与许多学者的研究结果类似，郭太龙等[17]通过对黄土坡面水力学特征参数与土壤侵蚀量间关系进行研究，认为雷诺数是可判别黄土坡面土壤侵蚀累计泥沙总量的一个较好的指标；Abrahams 等[23]，Zhang 等[24]中都有将水流功率作为评价坡面流侵蚀能力的指标。

3 讨论

本文针对添加不同外掺料的植被混凝土坡面，分析在模拟降雨条件下植被混凝土坡面水动力学特征以及各个水动力学参数与土壤侵蚀量之间的关系，研究发现可以通过水动力学参数的变化来解释外掺料对植被混凝土侵蚀的影响。

聚丙烯酰胺在土壤中溶解后，会形成丝状黏絮物质，具有较强的黏结力，可以连接多个土壤颗粒，形成稳定的结构[25]。在降雨初期，雨滴会对表层土壤颗粒进行打击，使团聚体崩解，产生一些细小颗粒，这些细小颗粒被聚丙烯酰胺捕获之后会填充堵塞在土壤表面的空隙，使得土壤表面粗糙度降低，坡面相比对照组较为光滑，阻力系数小。所以，添加聚丙烯酰胺的坡面流速较大，并且在降雨强度相同时，径流深度相对小，而水流剪切力是径流深度和坡度的函数，受径流深度的影响，水流剪切力也较小。由于土壤侵蚀量与水流剪切力呈正相关，聚丙烯酰胺的存在，减小了水流剪切力，同时增加了土壤稳定性，进而使得土壤侵蚀量减小。

生物炭具有降低土壤容重、吸附性强等特性，作为土壤改良剂已有许多研究[26]，添加到植被混凝土之后，在降雨初期雨滴击溅产生的细小颗粒被生物炭吸附之后，会堵塞土壤表层的孔隙，使得表层较为光

滑,阻力系数变小,因而流速较大,而径流深度较小,水流剪切力也呈现出与添加聚丙烯酰胺的坡面相似的结果。但生物炭会使土壤结构更为疏松,在降雨的作用下土壤崩解为较小的单元,被径流带走,造成更大的侵蚀,这与叶丽丽等[27]添加生物炭没有提高土壤抗破碎能力的研究结果相符。

表 3　土壤侵蚀量(E)与水动力学参数的回归分析

基材表层外掺料	水动力学参数	拟合方程	R
无添加	平均流速 $V_{平均}$	$E=0.089\ 9\ \ln V_{平均}+0.369\ 9$	0.829**
	雷诺数 R_e	$E=0.053\ 8\ \ln R_e-0.056\ 1$	0.996**
	弗劳德数 F_r	$E=0.090\ 2\ F_r+0.016\ 2$	0.372
	水流剪切力 τ	$E=0.011\ 8\tau^{1.413\ 7}$	0.958**
	水流功率 ω	$E=0.054\ 9\ \ln \omega+0.186$	0.995**
	阻力系数 f	$E=0.165\ 2\ f^{-0.303}$	−0.276
聚丙烯酰胺	平均流速 $V_{平均}$	$E=44.671\ V_{平均}^{3.161\ 7}$	0.917**
	雷诺数 R_e	$E=1\ \mathrm{E}-08\ R_e^{5.456\ 1}$	0.956**
	弗劳德数 F_r	$E=0.003\ 8\ F_r^{2.434\ 1}$	0.853**
	水流剪切力 τ	$E=-0.034\ \ln \tau+0.036\ 4$	−0.431
	水流功率 ω	$E=115.14\omega^{4.691\ 2}$	0.973**
	阻力系数 f	$E=0.048\ \mathrm{e}^{-0.452\ f}$	−0.901**
生物炭	平均流速 $V_{平均}$	$E=0.148\ 8\ \ln V_{平均}+0.511$	0.929**
	雷诺数 R_e	$E=0.141\ 7\ \ln R_e-0.260\ 1$	0.984**
	弗劳德数 F_r	$E=0.070\ 9\ F_r^{1.483\ 2}$	0.826**
	水流剪切力 τ	$E=0.194\ 1\ \ln \tau-0.063\ 8$	0.576
	水流功率 ω	$E=0.129\ 8\ \ln \omega+0.348\ 5$	0.988**
	阻力系数 f	$E=0.199\ 1\ \mathrm{e}^{-0.15\ f}$	−0.831**
棕榈纤维	平均流速 $V_{平均}$	$E=0.250\ 9\ V_{平均}+0.012\ 1$	0.779*
	雷诺数 R_e	$E=0.020\ 3\ \mathrm{e}^{0.029\ Re}$	0.876**
	弗劳德数 F_r	$E=0.008\ 2\ F_r+0.017\ 9$	0.453
	水流剪切力 τ	$E=0.018\ \mathrm{e}^{0.234\ 9\tau}$	0.688*
	水流功率 ω	$E=0.020\ 6\ \mathrm{e}^{2.426\omega}$	0.860**
	阻力系数 f	$E=-0.006\ \ln f+0.036\ 7$	−0.437

注:**表示 0.01 水平(双侧)上显著相关,*表示 0.05 水平(双侧)上显著相关。

棕榈纤维加筋可以提高植被混凝土基材抗剪强度[7],本次试验添加的为 3 cm 的棕榈纤维小段,纤维过长会增大土体的孔隙率,降低土体强度[28],在基材中加入棕榈纤维之后,纤维均匀分布于基材中,基材与粗糙的纤维表面会产生较大的摩擦力,土粒与纤维之间会产生黏结力。当受到降雨打击时,对照组坡面土壤容易被打散,坡面破碎程度较高,而添加棕榈纤维的坡面强度高,不易被打散,受雨滴击溅及上方来水冲刷产生的土粒较少,侵蚀量低于对照组,坡面较对照组更为平整,因而坡面流速较大,径流深度较小,水流剪切力与试验组其他坡面结果相似。

在本研究中,用雷诺数与弗劳德数两个指标代替平均流速和平均径流深度的单独作用。从研究结果来看,各组坡面的径流流态始终是以层流的形式存在,紊动性较小,对照组坡面为缓层流,试验组坡面基本都为急层流。水流剪切力受流速与径流深度的共同影响,在结果上表现为试验组水流功率几乎都显著高于对照组,仅在降雨强度为 120 mm/h 时,出现添加聚丙烯酰胺的处理组坡面水流功率与对照组无显著差异,而对照组各处理之间的差异关系不明显。植被混凝土坡面在养护初期,生物炭尚未与基材结合形成稳定的团聚体结构,并且生物炭使土壤结构更为疏松,此时棕榈纤维已经起到了物理加筋的作用,聚丙烯酰胺在土壤水分作用下形成的丝状黏絮物质也已发挥其黏结作用,棕榈纤维与聚丙烯酰胺因自身物理化学性质的不同,在抗侵蚀能力大小上存在差异,最终 4 组试验土壤侵蚀量大小表现为:生物炭>无添加>棕榈纤维>聚丙烯酰胺。

4　结论

研究不同外掺料对暴雨条件下植被混凝土坡面侵蚀水动力学特征的影响,对高陡岩质边坡地区植被混凝土配方的改进提供理论依据。本次试验得出以下结论。

(1) 添加聚丙烯酰胺、生物炭、棕榈纤维可以降低植被混凝土坡面粗糙度,增大坡面流速,减小径流深度,并且水流剪切力、阻力系数也相对无外掺料坡面小,而水流功率较无外掺料坡面大。

(2) 随着降雨强度增加,添加不同外掺料的植被混凝土坡面土壤侵蚀量、流速、水流功率、雷诺数均呈增大的趋势。

(3) 雷诺数、水流功率与植被混凝土坡面土壤侵蚀量始终呈极显著正相关。

(4) 添加聚丙烯酰胺与棕榈纤维可以减少植被混凝土坡面土壤侵蚀量,且聚丙烯酰胺的效果优于棕榈纤维。

[参 考 文 献]

[1] Bradshaw A. Restoration of mined lands: using natural processes [J]. Ecological Engineering, 1997,8(4):255-269.

[2] 张季如,朱瑞赓,夏银飞,等.ZZLS绿色生态护坡材料的强度试验研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(9):1533-1537.

[3] 许文年,王铁桥,叶建军.岩石边坡护坡绿化技术应用研究[J].水利水电技术,2002,33(7):35-36.

[4] 许文年,夏振尧,周明涛,等.植被混凝土生态防护技术理论与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2012:55-65.

[5] 陈毅,梁永哲,刘大翔,等.植物纤维加筋对植被混凝土抗冻耐久性的影响[J].湖北农业科学,2015,54(19):4840-4844.

[6] Liu Daxiang, Zhang Baohua, Yang Yueshu, et al. Effect of organic material type and proportion on the physical and mechanical properties of vegetation-concrete [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018(6):1-8.

[7] 潘波,丁瑜,黄晓乐,等.棕榈纤维加筋植被混凝土三轴试验研究[J].硅酸盐通报,2020,39(4):1153-1159.

[8] 梁永哲,陈毅,刘大翔,等.外掺植物纤维对冻融作用下植被混凝土抗剪强度的影响[J].水土保持通报,2016,36(2):136-139,145.

[9] 夏栋,许文年,赵娟,等.植被混凝土护坡基材pH、有机质及其与速效养分的相关性分析[J].水土保持研究,2010,17(6):224-227.

[10] Cheng Hu, Xu Wennian, Luo Ting, et al. Microbial functional diversity as affected by different engineered eco-restoration methods at Xiangjiaba hydropower station [J]. Journal of Environmental Engineering, 2020,146(3):1943-7870.

[11] Hairsine P B, Rose C W. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles (1): Sheet flow [J]. Water Resources Research, 1992,28(1):237-243.

[12] 杨奇,丁瑜,许文年,等.植被混凝土抗雨水冲刷性能试验研究[J].中国水土保持,2013(1):54-56.

[13] 李灿,周海清,赵尚毅,等.植被混凝土边坡泥沙侵蚀室内试验研究[J].兵器装备工程学报,2019,40(8):231-236.

[14] 李灿,周海清,赵尚毅,等.考虑地形与降雨因素的植被混凝土边坡侵蚀量研究[J].水电能源科学,2019,37(8):96-99.

[15] 陈俊杰,孙莉英,蔡崇法,等.不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J].土壤学报,2013,50(2):281-288.

[16] Huang Yuhan, Li Fahu, Wang Wei, et al. Rill erosion processes on a constantly saturated slope [J]. Hydrological Processes, 2020,34(20):3955-3965.

[17] 郭太龙,王全九,王力,等.黄土坡面水力学特征参数与土壤侵蚀量间关系研究[J].中国水土保持科学,2008,6(4):7-11.

[18] 国家能源局.NB/T 35082—2016 水电工程陡边坡植被混凝土生态修复技术规范[S].北京:中国水利水电出版社,2016.

[19] Li Gang, Abrahams A D, Atkinson J F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996,21(6):509-515.

[20] 杨坪坪,王云琦,张会兰,等.降雨强度和单宽流量与地表粗糙度交互作用下坡面流阻力特征[J].农业工程学报,2018,34(6):145-151.

[21] Wang Shuyuan, Flanagan D C, Engel B A. Estimating sediment transport capacity for overland flow [J]. Journal of Hydrology, 2019,578:123985.

[22] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA: Water erosion prediction project technology [J]. Transactions of the ASAE, 1989,32(5):1587-1593.

[23] Abrahams A D, Li G, Krishnan C, et al. A sediment transport equation for interrill overland flow on rough surfaces [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2001,26(13): 1443-1459.

[24] Zhang Guanghui, Liu Yumei, Han Yanfeng, et al. Sediment transport and soil detachment on steep slopes (Ⅰ): Transport capacity estimation [J]. Soil Ence Society of America Journal, 2009,73(4):1291-1297.

[25] 陆绍娟,王占礼.土壤改良剂聚丙烯酰胺的研究进展[J].人民黄河,2016,38(7):73-77.

[26] Guo Xiaoxia, Liu Hongtao, Zhang Jun. The role of biochar in organic waste composting and soil improvement: A review [J]. Waste Management, 2020(102):884-899.

[27] 叶丽丽,王翠红,周虎,等.添加生物质黑炭对红壤结构稳定性的影响[J].土壤,2012,44(1):62-66.

[28] 黄晓如,璩继立.含水率和加筋条件对棕榈加筋土的影响[J].上海理工大学学报,2019,41(4):395-402.