

鄱阳湖区典型堤防不同植草护坡 产流产沙特征试验研究

肖胜生^{1,2}, 胡志坚³, 张继松⁴, 汤崇军^{1,2}, 杨洁^{1,2}

(1. 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 江西 南昌 330029; 2. 江西省水土保持科学研究院, 江西 南昌 330029;
3. 江西省峡江水利枢纽工程管理局, 江西 南昌 330046; 4. 江西省河道湖泊管理局, 江西 南昌 330009)

摘要: [目的] 对鄱阳湖区典型堤防不同植草护坡产流产沙特征进行试验研究, 为该区植草护坡草种筛选以及护坡技术构建提供一定的科学依据。[方法] 采用人工模拟降雨的手段, 利用水土流失移动监测车选取鄱阳湖区典型堤防——九江市永修县九合联圩为研究对象, 对裸露坡面(BL)、自然恢复坡面(NRS)、狗牙根护坡坡面(CDS)、中华结缕草护坡坡面(ZSS)和假俭草护坡坡面(EOS)等 5 种护坡模式进行了水土流失监测, 量化不同护坡模式的水土保持效益。[结果] 裸地具有最短的初始产流时间和最大的径流流速, 植草后能较大幅度延长初始产流时间, 降低径流流速, 并且假俭草坡面减缓坡面流速的效果最为明显。20 mm/h雨强下, 4 种植草坡面与裸露坡面之间的径流系数没有明显差异, 但是随着雨强的增大, 植草坡面对径流的抑制作用就越来越明显。各处理土壤流失量均随着雨强增大而增大。[结论] 植草护坡能有效减少堤防土壤流失量, 并且堤防植草护坡的减沙效益在大雨强下表现得更为明显。

关键词: 径流; 泥沙; 鄱阳湖区堤防; 植草护坡; 模拟降雨

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)02-0010-06

中图分类号: S157.1

文献参数: 肖胜生, 胡志坚, 张继松, 等. 鄱阳湖区典型堤防不同植草护坡产流产沙特征试验研究[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 10-15. DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2019. 02. 002; Xiao Shengsheng, Hu Zhijian, Zhang Jisong, et al. Experimental study on surface runoff and sediment yield characteristics under different slope protection modes of a typical dike in Poyang Lake district[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2): 10-15.

Experimental Study on Surface Runoff and Sediment Yield Characteristics Under Different Slope Protection Modes of a Typical Dike in Poyang Lake District

XIAO Shengsheng^{1,2}, HU Zhijian³, ZHANG Jisong⁴, TANG Chongjun^{1,2}, YANG Jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention of Jiangxi Province, Nanchang, Jiangxi 330029, China;

2. Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang, Jiangxi 330029, China; 3. Jiangxi Xiajiang Hydroproject Authority, Nanchang, Jiangxi 330046, China; 4. Jiangxi River and Lake Management Bureau, Nanchang, Jiangxi 330009, China)

Abstract: [Objective] Runoff and sediment yield characteristics of different grass-planting slope protection in typical dikes of Poyang Lake were studied in order to provide a scientific basis for the selection of grass species and the guiding of dike slope protection. [Methods] Responses of soil and water loss characteristics to different rainfall intensities were studied using rainfall simulation under 5 dike slope types, which are bare land(BL), natural restoration slope(NRS), *Cynodon dactylon* sowing in drill slope(CDS), *Zoysia sinca* sowing in drill slope(ZSS), *Eremochloa ophiuroides* and-stem planting slope(EOS), in Jiuhe Dike of Yongxiu County, a typical dike of Poyang Lake. [Results] As compared with BL, other four slope protection models played positive effect in prolonging initial runoff times and reducing flow velocities, and there was the lowest flow velocity under EOS treatment. There were no significant difference of runoff coefficient between BL and

收稿日期: 2018-07-10

修回日期: 2018-10-09

资助项目: 江西省水利科技项目“江西省堤防植草护坡技术体系构建及效益评价”(KT201313), “峡江水利枢纽工程临江土质边坡生态防护技术研究示范”(KT201523), “优良水土保持植物假俭草关键繁殖技术研究”(KT201621), “优良堤防护坡草种假俭草撒播技术推广应用”(TG201702)

第一作者: 肖胜生(1981—), 男(汉族), 湖北省黄冈市人, 博士, 高级工程师, 主要从事水土保持生态恢复方面的研究。E-mail: xss19811213@163.com。

other four slopes under 20 mm/h rainfall intensity, but with the increase of the rainfall intensity, the inhibition of vegetation protection to surface runoff were becoming more and more obvious. Sediment yields increased with the increase of rainfall intensity under 5 treatments. [Conclusion] Compared with BL, vegetation protection slopes could effectively reduce dike sediment loss, especially under high rainfall intensity.

Keywords: runoff; sediment; dike in Poyang Lake district; slope protection with grass planting; simulated rainfall

堤防工程是防洪体系的基础和主体,肩负着保护人民生命财产安全的重要任务。据第一次水利普查公报,全国堤防总长度为 4.14×10^5 km^[1],江西省各类堤防总长度达到 1.30×10^4 km^[2],鄱阳湖区堤线总长也达到 2 500 km^[3]。堤防边坡防护是堤防安全的重要保障,也是堤防除险加固工程建设的重要组成部分。随着经济社会的发展,水生态文明建设成为当今水利改革发展的重要课题。因此,堤防工程不仅需要具备防洪安保的基本功能,同时需要兼顾环境与生态效益及其景观美学等功能。但以往的堤防护坡形式主要采用混凝土或六角块等硬质护坡,造成生态功能缺失,视觉单一;而土质护坡则存在大量侵蚀沟、水土流失严重并且危害堤防稳定性;在土质边坡基础上自然恢复的植物护坡则存在灌木杂草丛生、影响堤防岸线景观,严重影响到汛期堤防查险除险^[4]。在水生态文明建设的大背景下,在不影响堤防安全稳定的前提下(如 3 级以下堤防或者堤防背水面),植草护坡等生态护坡形式逐渐成为研究热点^[5-6]。狗牙根(*Cynodon dactylon*)、中华结缕草(*Zoysia sinca*)和假俭草(*Eremochloa ophiuroides*)作为鄱阳湖区乡土草种,在湖区广泛分布^[7]。这 3 种草种的建植草皮也在逐步得到应用。但之前的研究主要关注优良护坡草种筛选和草皮建植技术^[8]以及堤防结构稳定性^[9]等方面,而植草护坡堤防水土保持效益监测评价的研究鲜见报道。堤防边坡的水土保持效益是堤防生态护坡建设的重要目标之一。生态堤防建设后坡面产流产沙特征及其对降雨特征(如雨强和降雨历时等)的响应可以为堤防生态护坡形式的筛选提供更为针对性的科学依据。人工模拟降雨试验是小尺度水土流失监测研究的常用手段,可以方便、准确地测定不同降雨条件下不同土地利用类型的径流、泥沙变化规律^[10-11]。本研究以人工模拟降雨为手段,鄱阳湖区典型堤

防——永修县九合联圩为研究对象,对裸露坡面〔以下简称“裸地(BL)”〕、自然恢复坡面〔以下简称“自然恢复(NRS)”〕、狗牙根草籽条播坡面〔以下简称“狗牙根地(CDS)”〕、结缕草草籽条播坡面〔以下简称“结缕草地(ZSS)”〕和假俭草护坡坡面〔以下简称“假俭草地(EOS)”〕等 5 种坡面类型在不同降雨条件下的径流、泥沙的流失特征进行研究,为后期植草护坡草种筛选以及护坡技术构建提供一定的科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

2014 年,结合鄱阳湖区重点圩堤第六个单项建设工程,在永修县九合联圩(29°03'N, 115°49'E)背水面进行了不同植草护坡的试验示范工作。项目区年均气温 16.9 ℃,多年平均降雨 1 423 mm。降雨年内分配不均,4—7 月降雨量占总降雨量的 50%~60%。九合联圩在除险加固过程中,采取附近山体第四季红黏土心土层进行分层碾压。坡长均为 20 m,坡比 1:3(坡度约为 18.5°)。其中,狗牙根地实施面积达到 2.40×10^4 m²,结缕草地和假俭草地实施面积均为 4 000 m²,并保留了一定面积的裸露坡面和自然恢复坡面对比。

1.2 下垫面设计

每种植草模式各选取 3 块坡度一致的样地设置为试验区(共计 15 块样地),规格均为 2 m(堤防岸线方向)×3 m(顺坡方向)。每块样地中间用不锈钢挡板隔开,作为样地内的一次重复,分隔后的径流小区面积为 1 m×3 m。每个径流小区出口处挖一直径为 0.5 m,深为 0.5 m 的坑以便收集径流泥沙样品。模拟降雨前调查了每块样地草本层的平均高度和覆盖度;并在每块样地上坡、中坡和下坡各采集 2 个土壤样品进行混合,分析样地土壤基础性质(表 1)。

表 1 鄱阳湖区样地基本特征

植草模式	平均高度/cm	覆盖度/%	20 cm 土壤容重/(g·cm ⁻³)	最大入渗率/(mm·min ⁻¹)	pH 值	总有机碳/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)
BL		2±1	1.64±0.06	0.26±0.03	6.65±0.77	1.74±0.31	0.34±0.02	0.22±0.01
NRS	64.4±8.9	48±6	1.62±0.05	0.29±0.02	5.49±0.39	5.85±1.37	0.48±0.10	0.23±0.03
CDS	37.2±2.2	86±4	1.57±0.05	0.35±0.03	4.74±0.02	5.21±0.02	0.71±0.07	0.27±0.02
ZSS	19.5±1.5	64±5	1.61±0.04	0.33±0.03	4.83±0.00	3.90±0.00	0.49±0.01	0.36±0.04
EOS	15.8±2.1	72±4	1.60±0.05	0.31±0.04	4.88±0.05	2.39±0.15	0.35±0.04	0.22±0.00

注:调查时间为 2015 年 9 月 7 日;数据为平均值±标准误(n=3);植草模式 BL 为裸地,NRS 为自然坡面,CDS 为狗牙根地,ZSS 为结缕草地,EOS 为假俭草地,下同。

1.3 人工模拟降雨设计

人工模拟降雨设备由运输设备和降雨监测系统两部分组成。运输设备为江西省水土保持科学研究院自主研发的水土流失移动监测车,车上配备 1.5 m³ 的水箱,2 kW 的发电机,1.1 kW 的水泵、操作平台等

配套设施。降雨监测系统主要特征详见表 2。在选择好的试验小区搭设人工降雨支架(高度 5 m,长宽均为 4 m)。放好主控制器和雨量计。根据实时风向用帆布搭建好挡风棚。模拟降雨时间为 2015 年 9 月中旬,天气晴好没有天然降水。

表 2 人工模拟降雨监测系统参数

序号	设备名称	型号	监测系统参数
1	降雨器	QYJY-501	雨强在 10~200 mm/h 范围调节;降雨均匀度 > 0.8;雨滴大小 0.5~0.58 mm;精度 7 mm/h;高度 6 m;降误差 ≤ 2%
2	雨量计	SL3-1	承水口径 φ200 mm;测量降水强度 < 4 mm/min;测量最小分度 0.1 mm;准确度 4%
3	主控制器	SC-101	电压 AC 220V/50 Hz;工作环境温度 0~60 ℃;工作环境湿度 ≤ 95%;数据存储容量 ≥ 32000 条;采样间隔 10~9999 s;通讯接口 RS232
4	数据采集器	QYCY-2	电压 AC 220 V/50Hz;DC 24V;工作湿度 ≤ 90%;工作温度 -10~50 ℃;数据容量 ≥ 32 000 条;通讯接口 RS232

根据试验区域历史资料以及实际情况,每种下垫面设置 4 场降雨,雨强分别为 20,40,90 和 150 mm/h。每场降雨历时 30 min。两场降雨之间间隔 1 h。每次变换雨强之前,都进行预降雨使土壤含水量饱和和以降低下垫面差异对径流泥沙的影响。

1.4 试验过程与数据采集处理

试验前用遮雨布遮盖小区,降雨器启动后先率定雨强,当雨强与设计值误差控制在 5% 以内、均匀度在 80% 以上即满足要求^[12]。雨强符合要求后,快速掀起小区上方的遮雨布,用秒表记录初始产流时间。在集流槽出口处用径流桶收集径流样,同时记录接样时间。降雨过程中,每 5 min 收集 1 次径流样,并在收集的径流样中搅拌均匀取 500 ml 用于测定相应径流样的泥沙浓度,采用烘干法确定泥沙重量。在此过程中同时采用高锰酸钾失踪法测定径流流速,取 2 个断面的平均值作为流速,将所测流速乘以 0.75 得到较为理想的径流流速^[13]。采用 SPSS 17.0 和 Excel 进行数据统计分析和作图。

2 结果与分析

2.1 初始产流时间

初始产流时间反映着不同管理措施下坡面土壤对降雨强度的响应。监测结果表明,雨强相同时,裸地初始产流时间最短,其次分别是自然恢复、结缕草地、假俭草地和狗牙根地。当坡面存在植被覆盖时,不同雨强条件下坡面产流时间较裸露坡面均有较大幅度的延长(图 1)。4 种植草坡面与裸地均存在显著性差异($p < 0.05$),但 4 种植草护坡之间不存在显著差异($p > 0.05$)。随着雨强增大,5 种下垫面初始产流时间都有所降低,并且裸地初始产流时间减小的幅度较小,而存在草本覆盖情况下初始产流时间下降的

幅度较大。

分析起来,主要是因为初始产流时间的响应与坡面覆盖度存在密切联系,因为初始产流时间的排序与实际情况中的不同坡面覆盖度排序完全一致,均表现为:CDS(86%) > EOS(72%) > ZSS(64%) > NRS(48%) > BL(2%),即随着覆盖度的增加,初始产流时间逐步降低。这与相关研究结果一致,如张翼夫等^[14]研究表明自然降雨过程中当雨强为 10~80 mm/h 时,与裸露坡面相比,15%,30%,60%和 90% 的秸秆覆盖度坡面推迟产流时间分别为 1.0~15.4 min,2.1~22.1 min,3.4~48.2 min 和 5.9~73.6 min。钱婧^[15]也认为影响初始产流时间最大的因素是植被覆盖度,植被的介入可削弱坡长对初始产流时间的影响。

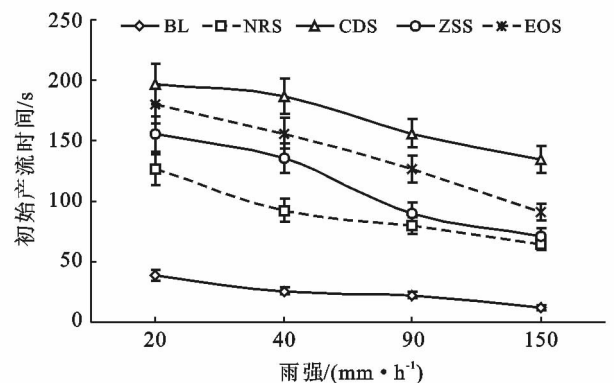


图 1 不同雨强下不同植草坡面的初始产流时间

2.2 径流流速

监测表明,相同雨强下,与 BL 相比,其他 4 种下垫面下径流流速显著降低($p < 0.05$)。这说明存在草本覆盖护坡处理都具有降低坡面流速的作用,减小了径流动能,从而可以削弱径流的剥蚀地表能力,有效

抑制泥沙流失,保护堤防坡面。另外,各处理下地表径流流速都随着雨强的增大而增大(图 2)。方差分析进一步表明,在 20,40 和 90 mm/h 这 3 种雨强下,几种存在植物覆盖的护坡之间径流流速没有明显差异($p < 0.05$);当雨强增大到 150 mm/h 时,则存在较大差异,表现为:EOS < CDS < NRS < ZSS < BL。与 BL 相比,NRS,CDS,ZSS 和 EOS 流速分别降低了 65.9%,69.4%,56.4% 和 81.2%,说明堤防坡面植草后可以有效降低大雨强下的坡面流速,并且 EOS 护坡模式减缓坡面流速的效果最为明显。不同处理之间坡面流速的差异主要是坡面糙率决定的,糙率越大流速越小,而坡面糙率又与草本层高度、排列格局、覆盖度等密切相关^[16-18]。尽管 EOS 坡面覆盖度不是最高,但由于是草茎穴状栽植方式,坡面差异性较大,因此具备较低的径流流速。流速的大小决定着水流对泥沙的搬运强度。因此,坡面植草能明显延缓坡面水流速度,从而降低水流对坡面的侵蚀力,起到保持水土和保护堤防坡面的作用。

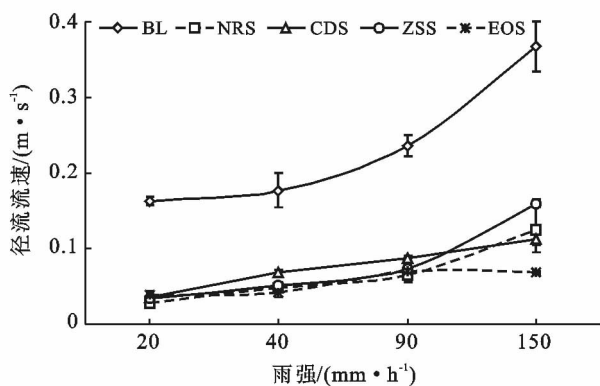


图 2 不同雨强下不同植草坡面的径流流速

2.3 径流系数

不同植草堤防坡面径流系数对雨强的响应具有较大差异(图 3)。BL 和 NRS 径流系数均随雨强增加而逐步增大,20 mm/h 雨强下分别为 0.25 和 0.23,150 mm/h 雨强下则增大至 0.90 和 0.72。这主要是因为 BL 和 NRS 植被覆盖度较低,坡度较缓并且堤防坡面压实度较高,土壤入渗能力小造成大部分降雨都转换成地表径流。随着雨强增加,CDS 径流系数呈现先减小后增大的趋势(图 3)。在 20 mm/h 的降雨条件下径流系数最大(0.51),而后迅速减小,在 40 和 90 mm/h 的降雨条件下,径流系数分别为 0.38 和 0.31,而到 150 mm/h 的降雨条件下,其径流系数增加到 0.48。这可能因为狗牙根成坪处理覆盖度高,在小雨强下,降雨径流还没有达到土壤表面,就从草面形成径流流走;但随着雨强增大,降雨径流沿茎根到达土

壤地面,形成土壤入渗,径流系数下降,然而雨强的继续增大,超过土壤入渗能力时,径流系数开始增大。ZSS 和 EOS 两种植草模式堤防坡面径流系数对雨强的响应没有明显规律,分别在 0.42~0.54 和 0.35~0.54 之间变动。这可能因为这两种植草模式坡面覆盖度较低,初始径流系数较大,同时堤防坡面经过平整压实,土壤孔隙小,降雨很快形成径流,径流系数较高,但随着雨强增大,地表被剥蚀、搬运侵蚀后,地表糙率增大,土壤入渗增加,所以径流系数维持在一个相对稳定的水平。总体而言,小雨强下(20 mm/h),4 种存在植被覆盖的堤防坡面与 BL 的径流系数差别不明显。但在另 3 种雨强条件下,4 种植草坡面的径流系数都低于 BL。说明堤防进行植草防护后都能够有效抑制地表径流的产生。而且随着雨强的增大,植草坡面与 BL 径流系数的差异越来越大(图 3)。

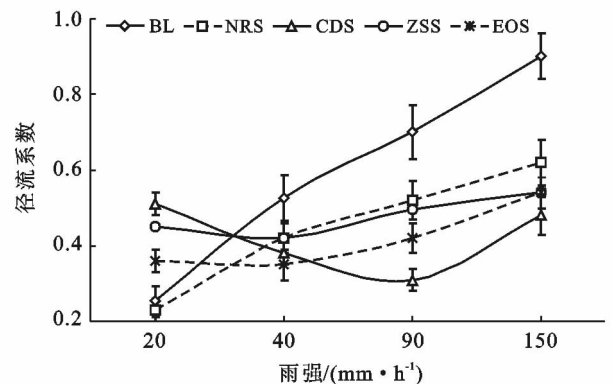


图 3 不同雨强下不同植草坡面的径流系数

2.4 土壤流失量

各处理土壤流失量基本上随着降雨强度的增强而增大,但不同植草模式下土壤流失量的变化对雨强变化的响应存在较大差异,特别是植草堤防坡面与 BL 堤防的差异较为明显(表 3)。如当雨强由 20 mm/h 增加到 150 mm/h 时,BL 土壤流失量从 132.8 g 增加到 4 747.6 g,增加了近 35 倍,而 NRS,BS,ZSS 和 EOS 植草模式下土壤流失量则分别增加了 3.2,7 和 13 倍,说明与 BL 相比,植草护坡能有效减少堤防土壤侵蚀。

表 3 不同植草模式对土壤流失量的抑制效应(以裸地为参照)

植草模式	不同雨强土壤流失量/g			
	20 mm/h	40 mm/h	90 mm/h	150 mm/h
BL	400.0±34.4	318.5±23.4	1 496.9±145.4	4 747.6±275.4
NRS	49.8±5.6	55.0±6.7	62.2±12.4	200.6±12.8
CDS	17.1±3.5	27.6±4.3	47.7±9.5	57.5±5.0
ZSS	23.5±6.7	36.4±4.6	75.8±6.6	185.1±23.2
EOS	36.7±5.5	87.4±12.4	141.9±23.3	525.4±34.3

另外,各降雨条件下不同植草模式之间的土壤流失量也存在明显差异。以 BL 为核算基数,比较了不同植草模式对土壤流失量的抑制效应(表 4)。在 20 mm/h 的降雨条件下,几种植草模式的减沙顺序表现为:CDS>ZSS>EOS>NRS;在 40 mm/h 的降雨条件下,减沙顺序为:CDS>ZSS>NRS>EOS;在 90 mm/h 的降雨条件下,减沙顺序为:CDS>NRS>ZSS>EOS;在 150 mm/h 的降雨条件下,减沙顺序表现为:CDS>ZSS>NRS>EOS。这说明随着雨强的增大,4 种堤防护坡模式对泥沙流失的抑制作用越来越强。

表 4 不同植草模式对土壤流失量的抑制效应(以裸地为参照)

植草模式	不同雨强土壤流失量/g			
	20 mm/h	40 mm/h	90 mm/h	150 mm/h
NRS	37.5%	17.3%	4.2%	4.2%
CDS	12.9%	8.7%	3.2%	1.2%
ZSS	17.7%	11.4%	5.1%	3.9%
EOS	27.6%	27.4%	9.5%	11.1%

3 讨论

众多学者^[19-22]的研究表明,影响地表产流产沙的因素较多,其中内在因素主要有土壤质地、入渗速率,外在因素主要有降雨强度、降雨量、植被、坡度等。植被覆盖和降雨强度是影响初始产流时间和产流速度的关键因素。该研究裸露堤防护坡面初始产流时间最短且随降雨强度增大而减小,这与裸地无植被覆盖,单位时间和面积内坡面的承雨面积随降雨强度的增大而变大,产流时间相应缩短的观点一致^[23]。堤防护坡植草后,初始产流时间都有所降低,表明草被层能够重新分配降雨,削弱降雨动能,地下根系可以固定土壤颗粒和稳定土壤结构,增加降雨就地入渗,减少径流^[24]。不同下垫面径流流速的差异也说明草本覆盖护坡处理具有降低坡面流速的作用,减小了径流动能,从而可以削弱径流的剥蚀地表能力,有效抑制泥沙流失,保护堤防护坡面。本研究结果表明,小雨强下堤防护坡植草抑制径流效果不明显,但随着雨强的增大,植草坡面与裸露坡面径流系数的差异越来越大,表明植草后对地表径流的抑制作用在大雨强下表现得更明显。土壤管理措施改变土壤质地结构,引起初始产流时间和径流速率的变化,导致减流效果的差异^[25]。杨春霞等^[24]在黄河堤防的研究也指出尽管自然恢复对低强度降雨时的径流拦蓄率可达 90% 以上,但对高强度降雨的拦蓄作用有限,需要采取其他植草措施才能有效抑制产流,进而保护堤防护坡面。地表土壤对

降雨强度等外在因素的响应机制最终反映在调控效果的差异方面,主要原因在于不同措施改变了原有地表侵蚀形态和微地貌形态,阻碍泥沙的搬运、沉积和输移等。本研究得到与裸露坡面相比,植草护坡能有效减少堤防护坡面土壤流失量。随雨强增大,四种植草堤防护坡模式对泥沙流失的抑制作用越来越强。这与裸露堤防护坡径流调节能力差、经常出现侵蚀沟的实际情况相符,也与刘晓燕等^[26]和于国强等^[21]的相关研究结果一致。张锐波等^[27]研究指出,就雨强和植被覆盖度两要素而言,雨强对径流量的影响显著,植被覆盖度对产沙量的影响大于雨强。从坡地水力侵蚀产沙的机理来看,坡面侵蚀的外动力是降水,内抗力是土壤的抗蚀性,再就是地表植被覆盖度。在雨强大于 1.7 mm/min 时,植被对侵蚀产沙的缓冲作用减弱,只有在植被覆盖度大于 80% 以上时,对侵蚀产沙的减轻作用显得明显。植被覆盖度对坡面水力侵蚀产沙的影响存在着一个上下限,但植被覆盖度小于 15% 时对阻止侵蚀是无效的。但植被覆盖度大于 80% 时,植被覆盖度的再增加,不能引起产流产沙的大幅度下降^[28-29]。下一步计划加强植草不同阶段(不同覆盖度)情况下土壤侵蚀的监测研究,进一步明确堤防护坡植草的效益。

4 结论

(1) 雨强相同时,BL 初始产流时间最短,其次分别是 NRS,ZSS,EOS 和 CDS。植草后能较大幅度延长初始产流时间。不同下垫面之间初始产流时间的差异与坡面植被覆盖度密切相关。随着雨强增大初始产流时间都有所降低。

(2) 与 BL 相比,堤防护坡面存在植被覆盖时径流流速都显著降低。随着雨强增大,径流流速都增大,并且 EOS 护坡模式减缓坡面流速的效果最为明显。

(3) 随雨强增加,BL 和 NRS 坡面径流系数均逐步增大,CDS 植草坡面径流系数呈现先减小后增大的趋势,ZSS 和 EOS 两种植草模式堤防护坡面径流系数径流系数维持在一个相对稳定的水平。随着雨强的增大,植草坡面与 BL 径流系数的差异越来越大。

(4) 各下垫面土壤流失量均随着雨强的增强而增大。与 BL 相比,植草护坡能有效减少堤防护坡土壤侵蚀。随着雨强的增大,4 种植草护坡模式对坡面土壤流失的抑制作用越来越强。

[参 考 文 献]

- [1] 中华人民共和国水利部. 第一次全国水利普查公报[J]. 中国水利,2013(7):1-3.

- [2] 江西省水利厅,江西省统计局. 江西省第一次水利普查公报[J]. 江西水利科技, 2013, 39(2): 79-82.
- [3] 长江水利委员会. 鄱阳湖区综合治理规划[R]. 湖北武汉: 长江水利委员会, 2010.
- [4] 贾金生, 侯瑜京, 崔亦昊, 等. 中国的堤防除险加固技术[J]. 中国水利, 2005(22): 13-16.
- [5] 陈小华, 李小平. 河道生态护坡关键技术及其生态功能[J]. 生态学报, 2007, 27(3): 1168-1176.
- [6] 高强, 颜学恭. 假俭草生态学特性及在水利工程中的应用研究[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(11): 86-88.
- [7] 段剑, 黄浩智, 王凌云, 等. 鄱阳湖区堤防植物多样性特征与土壤种子库密度的关系[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(1): 45-49, 70.
- [8] 陶理志, 周英雄, 肖胜生. 优良堤防护坡植物假俭草草茎建植方式的比较研究[J]. 江西农业学报, 2016, 28(12): 23-27.
- [9] 朱建强, 欧光华, 言鸽. 长江中下游堤防渗流侵蚀机理及其治理[J]. 水土保持学报, 2001, 15(5): 6-9.
- [10] 王洁, 胡少伟, 周跃志. 人工模拟降雨装置在水土保持方面的应用[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 188-190.
- [11] 汪邦稳, 肖胜生, 张光辉, 等. 南方红壤区不同利用土地产流产沙特征试验研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 239-243.
- [12] 倪含斌, 张丽萍, 张登荣. 模拟降雨试验研究神东矿区不同阶段堆积弃土的水土流失[J]. 环境科学学报, 2006, 26(12): 2065-2071.
- [13] 雷廷武, 张晴雯, 赵军, 等. 确定侵蚀细沟集中水流剥离速率的解析方法[J]. 土壤学报, 2002, 39(39): 788-793.
- [14] 张翼夫, 李洪文, 何进, 等. 玉米秸秆覆盖对坡面产流产沙过程的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 118-124.
- [15] 钱婧. 模拟降雨条件下红壤坡面菜地侵蚀产沙及土壤养分流失特征研究[D]. 浙江 杭州: 浙江大学, 2015.
- [16] Jarvela J. Flow resistance of flexible and stiff vegetation: A flume study with natural plants [J]. Journal of Hydrology, 2002, 269(1/2): 44-54.
- [17] 张冠华, 刘国彬, 易亮. 植被格局对坡面流阻力影响的试验研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(4): 55-59, 109.
- [18] 张升堂, 梁博, 张楷. 植被分布对地表糙率的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(5): 45-48, 54.
- [19] Sun Wenyi, Shao Quanzin, Liu Jiyuan. Soil erosion and its response to the changes of precipitation and vegetation cover on the Loess Plateau [J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(6): 1091-1106.
- [20] Zhang Xia, Yu Guoqiang, Li Zhanbin, et al. Experimental study on slope runoff, erosion and sediment under different vegetation types [J]. Water Resource Manage, 2014, 28(9): 2415-2433.
- [21] 于国, 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, 40(5): 593-599.
- [22] 张旭昇, 薛天柱, 马灿, 等. 雨强和植被覆盖度对典型坡面产流产沙的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 66-70.
- [23] 霍云梅, 毕华兴, 朱永杰, 等. 模拟降雨条件下南方典型粘土坡面土壤侵蚀过程及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4): 23-26, 84.
- [24] 杨春霞, 李永丽, 李莉. 自然修复草被对坡面径流的阻滞作用研究[J]. 人民黄河, 2014, 36(8): 94-96.
- [25] 李静苑, 蒲晓君, 郑江坤, 等. 整地与植被调整对紫色土区坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 81-85.
- [26] 刘晓燕, 杨胜天, 李晓宇, 等. 黄河主要来沙区林草植被变化及对产流产沙的影响机制[J]. 中国科学, 2015, 45(10): 1052-1059.
- [27] 张锐波, 张丽萍, 钱婧, 等. 雨强和植被覆盖度对坡地侵蚀产沙影响强度研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(5): 206-212.
- [28] 康佩佩, 查轩, 刘家明, 等. 不同植被种植模式对红壤坡面侵蚀影响试验研究. 水土保持研究, 2016, 23(4): 15-22.
- [29] 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.