

DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2017.02.009

植被缓流效果试验研究

杨帆¹ 张宽地^{1,2} 杨明义² 杨婕¹

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 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, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为深入研究植被减流减沙特征及对流域水土保持效益的影响, 本文通过5个覆盖度、6个坡度和7个流量的组合条件下的室内放水试验, 系统研究了植被对坡面水流的缓流特征。结果表明: 随着植被覆盖度增加, 植被对坡面水流的阻滞作用逐渐凸显, 即缓流系数减小, 缓流效果增强, 当植被覆盖度大于4.650%时, 缓流效果趋于稳定。在试验流量范围内, 缓流系数随流量的增加呈现逐渐减少的趋势, 而随坡度的增加略有增加。缓流系数随水深和雷诺数增加而减小, 而与弗劳德数呈反C型分布。最后, 建立了基于试验控制变量(植被覆盖度、流量和坡度)的缓流系数预测公式。

关键词: 坡面流; 模拟植被覆盖度; 缓流系数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 0468-155X(2017)02-0054-07

黄土高原是我国土壤侵蚀最为严重的区域之一, 坡面径流是造成土壤侵蚀的主导因子, 坡面流流速直接影响土壤分离以及泥沙的运移和沉积。为有效抑制水土流失, 国家在黄土高原地区先后实施了一系列生态建设工程。植被作为生态修复工程中的重要手段, 其抑制坡面水土流失的效果备受关注^[1]。因此, 研究植被的减流特征对指导流域综合治理和生态修复工程建设均具有重要的理论意义。由于坡面水流运动机理的复杂性, 目前对于地形因子和流量等对坡面流流速的贡献率具有一定的争议。在仅有流量和坡度两种影响因子时, 普遍认为流量是影响流速的主要因素, 坡度对其贡献较小^[2]。当包含地表覆盖影响时, 曹颖^[3]认为植被覆盖度比坡度和流量对流速的影响更大, 而Abrahams^[4]等研究发现流量对流速的影响优于糙率和坡度。目前对于植被减流减沙特性的研究多集中于阻力的影响^[5], 或以径流系数等参数分析植被的减流效果^[6-13], 定量分析其对缓流效果的影响尚不充分。因此, 本文引入缓流系数^[14], 定量研究植被覆盖度、流量、坡度和水动力学基本参数对缓流系数的响应机制, 更加深入认识植被的缓流特征, 研究结果对深入开展黄土高原地区的水土保持效益研究具有一定参考价值。

1 试验设计与方法

(1) 为避免床面形态等边界条件对试验结果的扰动, 试验采用定床阻力试验。设备由供水装置、稳流装置、试验水槽、回水装置组成(图1)。水槽由有机玻璃制成, 长6.0m, 宽0.3m, 深0.25m, 通过滑轮装置及制动系统控制水槽坡度, 试验坡度取2°、4°、6°、8°、10°和12°。

(2) 采用棕榈树的棕衣模拟植被特征, 模拟植被平均高度为25mm, 直径为6mm, 梅花形布置, 植被覆盖度(植被总横截面积与水槽试验段面积的比值)分别为9.300%、6.975%、4.650%、2.325%和0.000%。根据黄土高原临界侵蚀雨强, 设计流量 q 取3.65、4.92、8.13、11.78、15.47、19.12和27.26 L/min, 相应水深范围为2.1mm到22.0mm之间, 植被处于非淹没状态。

(3) 沿水槽纵向设6个观测断面, 分别为(0+0.5)m、(0+1.5)m、(0+2.5)m、(0+3.5)m、(0+

收稿日期: 2016-07-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51579214; 41001159); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放基金(IWHR-SKL-2014); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室主任基金(A314021402-1619)

作者简介: 杨帆(1991-), 女, 吉林白城人, 硕士研究生, 主要从事水土保持及植被水流研究。E-mail: yangfan199126@163.com

通讯作者: 张宽地。E-mail: zhangkuandi428@126.com

4.5) m、(0+5.5) m。待流量稳定后,观测横断面的 3 个测点的优势流速(KMnO₄ 染色示踪法测流速)和水深;水深的测定采用重庆水文仪器厂生产的 SX402 数显测针仪。横向测点位置选在两簇植被之间,每次试验持续时间为 30 分钟。

2 试验成果分析与讨论

采用缓流系数概念分析试验成果。植被的缓流系数 ϕ 是指有无植被两种工况下,断面平均流速的比值,用公式(1)计算

$$\phi = v_{\text{有植被}} / v_{\text{无植被}} \quad (1)$$

式中 $v_{\text{有植被}}$ 为植被不同覆盖度下的平均流速, $\mu\text{m/s}$; $v_{\text{无植被}}$ 为裸坡条件下的平均流速, $\mu\text{m/s}$ 。

2.1 覆盖度对缓流系数的影响

流速决定坡面流的侵蚀力,而植被的存在改变了坡面流的流速,进而影响坡面水土流失过程及泥沙输移规律。前人^[15-17]曾探讨了植被覆盖度、配置和植被刚度等对平均流速和阻力系数的影响,认为植被具有减缓坡面流流速,削弱径流侵蚀的效果,而植被覆盖度对植被缓流效果影响的研究较少。因此,研究缓流系数随覆盖度的变化规律,以期探讨覆盖度对缓流系数的影响机制。

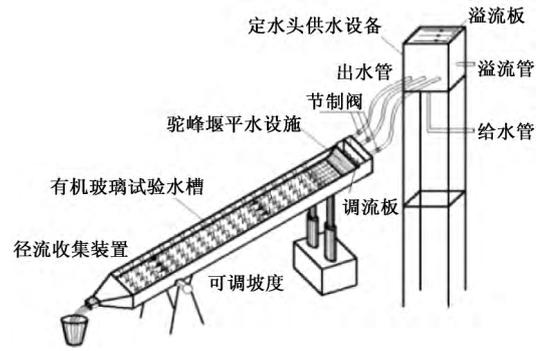


图 1 试验装置布置

Fig. 1 Experimental equipment system

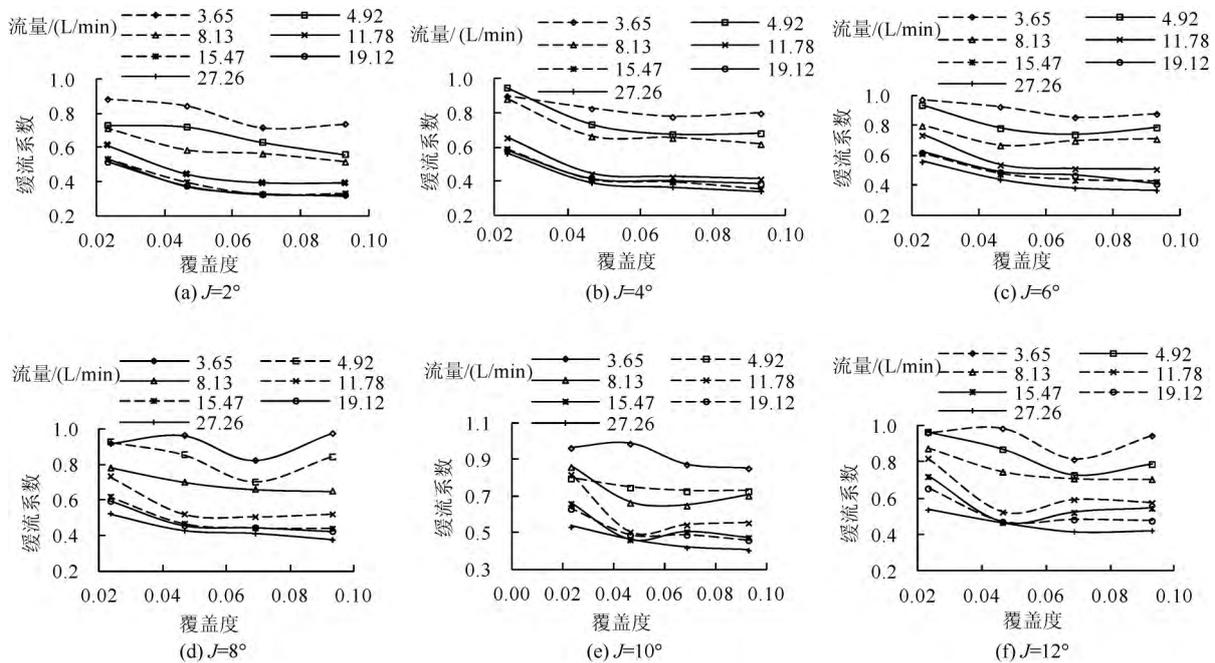


图 2 覆盖度对植被缓流系数的影响

Fig. 2 Influence of vegetation rate on flow detention coefficient

在坡度和流量一定的情况下,随植被覆盖度增加,缓流系数呈现先逐渐减小,最终趋于稳定的变化规律(图 2)。当覆盖度为 2.325% 时,平均缓流系数是 0.75,即有植被坡面平均流速比无植被工况减少了 25%;当覆盖度增加至 4.650% 缓流系数减少到 0.58,即覆盖度对减流效果贡献继续增加;而当覆盖度增加至 6.875% 和 9.300% 缓流系数均值为 0.56 和 0.55,其值基本保持不变,缓流效果的增强程度甚微,即覆盖度在 4.650% 之后,缓流系数趋于常数。其原因可从阻力机制来进行分析,当坡面植被覆盖度为 2.325% 时,水流综合阻力平均值为 2.11,比无植被情况增长了 1.11,随覆盖度继续增加至 4.650% 阻力系数比覆盖度为 2.325% 时增幅变为 2.38。当覆盖度由 4.650% 增加到 6.875% 及

6.875% 增加至 9.300% 时,阻力系数的增加幅度仅为 0.5,远小于低覆盖度工况。经定量分析植被不同覆盖度的缓流效果,可以认为植被恢复最佳覆盖度为 4.650%,即植被覆盖要达到一定程度,植被效益才会凸显,而植被覆盖度过大,植被效益不会继续增加^[18]。

2.2 流量和坡度对植被缓流效果的影响

已有研究表明,在植被覆盖情况下,流量是影响流速的主要因素,坡度对流速的影响相对较弱^[3],故研究坡度对植被缓流效果的影响。表 1 给出了不同覆盖度 Cr 条件下,缓流系数与流量和坡度的关系,以期研究流量和坡度对缓流效果的贡献。

表 1 不同流量和坡度下缓流系数值
Table 1 Detention coefficient under different flow discharge and slope

覆盖度 $Cr/\%$	$J/^\circ$	$q/(L/min)$						
		3.65	4.92	8.13	11.78	15.47	19.13	27.26
2.325	2	0.88	0.73	0.71	0.61	0.53	0.51	0.54
	4	0.90	0.95	0.88	0.66	0.59	0.58	0.56
	6	0.98	0.94	0.80	0.74	0.62	0.62	0.56
	8	0.92	0.93	0.78	0.73	0.62	0.59	0.52
	10	0.97	0.80	0.86	0.82	0.66	0.63	0.54
	12	0.96	0.97	0.87	0.82	0.72	0.65	0.54
4.650	2	0.84	0.72	0.58	0.44	0.40	0.37	0.37
	4	0.83	0.74	0.66	0.44	0.41	0.42	0.39
	6	0.93	0.79	0.67	0.54	0.48	0.49	0.44
	8	0.96	0.86	0.70	0.52	0.47	0.45	0.43
	10	0.99	0.75	0.67	0.51	0.47	0.49	0.46
	12	0.98	0.87	0.75	0.52	0.47	0.47	0.47
6.975	2	0.72	0.63	0.56	0.39	0.33	0.32	0.33
	4	0.78	0.68	0.66	0.43	0.40	0.40	0.37
	6	0.86	0.74	0.70	0.52	0.44	0.47	0.39
	8	0.82	0.70	0.66	0.50	0.44	0.44	0.41
	10	0.88	0.73	0.65	0.55	0.51	0.49	0.42
	12	0.81	0.73	0.71	0.59	0.52	0.48	0.42
9.300	2	0.74	0.56	0.51	0.39	0.33	0.32	0.32
	4	0.80	0.68	0.62	0.41	0.36	0.39	0.34
	6	0.88	0.79	0.71	0.51	0.43	0.41	0.37
	8	0.97	0.84	0.65	0.52	0.44	0.42	0.37
	10	0.85	0.73	0.71	0.56	0.48	0.46	0.41
	12	0.94	0.79	0.71	0.58	0.55	0.48	0.42

表 1 所示,在覆盖度和坡度一定时,缓流系数随流量的增加而减小。究其原因,流量(3.65~8.13 L/min)较小时,水层较薄,水流损失能量主要来源于颗粒阻力,植被绕流阻力贡献较小,此时植被覆盖情况下与无植被覆盖情况下的能量损失来源基本一致,故小流量时缓流系数在 0.8~0.9 之间;随着流量的增加(8.13~27.26 L/min),水层加厚,水流能量增加,颗粒阻力占总阻力的比重消减,植被绕流阻力作用凸显,致使壁面产生的阻力远小于植被绕流阻力,植被绕流耗能增加,流速的增加退居其次,缓流效果增强。缓流系数随坡度的增加而略有增大,缓流效果逐渐减弱,说明坡度对缓流系数影响较小,究其原因,随坡度增加,水流重力沿坡面分力增加,其携带的能量增加,而植被阻力损耗能量的作用退居其次,故植被缓流效果减弱。

2.3 水深对缓流效果的影响

水深亦是坡面流体力学特性的一个重要方面,平均水深与阻力关系密切^[19-21],而植被淹没程度影响着坡面流流速分布^[22],因此,研究其对缓流系数的影响,将对水土保持措施中植被高度的选择具有借鉴意义。

不同覆盖度和坡度下,随水深增加,植被缓流系数逐渐减小,且 $d\phi/dh$ 逐渐趋于 0(图 3)。当覆盖度为 2.325%,水深在 2.1~7.5mm 范围内时,随着水深增加,缓流系数下降明显,而在 7.5~12.3mm 范

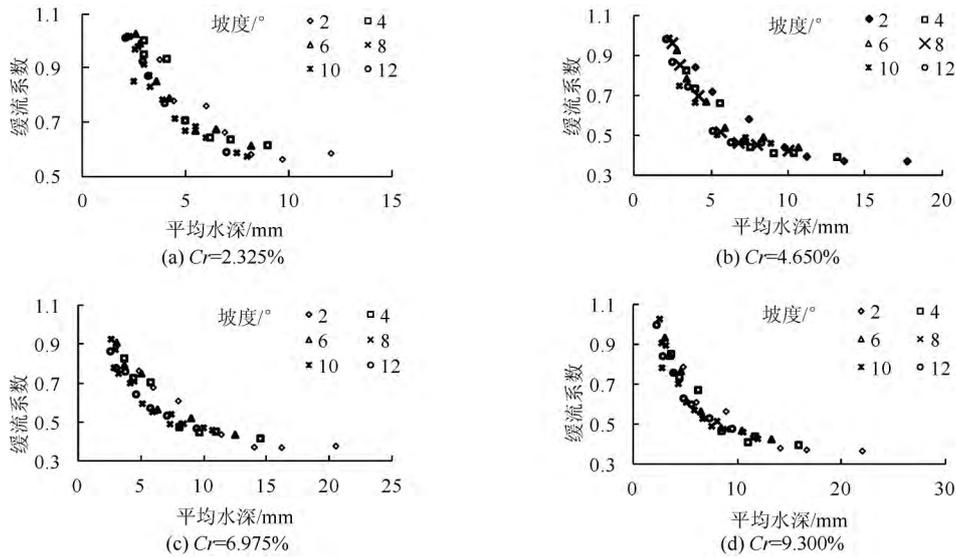


图 3 不同覆盖度下平均水深对缓流效果的影响

Fig. 3 Influence of depth on flow slowing coefficient with different vegetation coverage rate

围内时 缓流系数变化不显著; 在其他三个覆盖度下, 当水深小于 10mm 时 缓流系数随水深的增加迅速减小, 超过 10mm 后 缓流系数随水深变化不明显。究其原因 植被处于非淹没情况下, 水流均处于植被层, 水深较小时, 水流能量损耗主要来自于坡面 植被缓流效果较弱; 随着水深增加 植被淹没程度增大, 有效迎水面积增加 摩擦阻力增大; 植被迎水面壅水区和植被后的漩涡区的压力差也相应增加, 故形状阻力增加 植被阻力增加 缓流能力增强, 但当植被淹没度超过一定范围时 植被顶部较为尖细, 有效迎水面积增加程度减小 故缓流系数下降不明显。

2.4 雷诺数对缓流效果的影响

雷诺数是水流惯性和黏滞力之比, 是衡量水体紊动程度的主要指标。植被降低了水流的紊动性^[23]。分析植被的缓流系数随雷诺数的变化规律, 旨在研究紊动特性对植被缓流效果的影响。

缓流系数随雷诺数的增加而减小(图 4)。覆盖度为 2.325% Re 在 200 ~ 300 之间时, 缓流系数值为 0.8 ~ 1.0 坡面流处于由层流向过渡流的转变区, 缓流系数下降趋势递增。当坡面流处于过渡流阶段, 缓流系数基本稳定在 0.5 ~ 0.8; 覆盖度增加至 4.650% 时, 当 Re 在 200 ~ 300 之间, 缓流系数值降为 0.7 ~ 0.9, 随雷诺数增加, 缓流系数最后稳定与 0.3 ~ 0.5 之间; 而其他两个覆盖度下(6.875% 和 9.300%) 当 Re 在 200 ~ 300 之间, 缓流系数值为 0.7 ~ 0.9, 当坡面流处于过渡流阶段, 缓流系数基本稳定在 0.28 ~ 0.43。究其原因 坡面流处于层流状态时, 流量较小, 水流流经植被发生圆柱绕流, 水流从相邻植株之间的空隙流出, 水流未发生边界层分离, 植被对坡面流影响较弱; 随着流量增加, 水流由层流进入过渡流阶段, 水流绕流时边界层分离, 在植株后形成尾水漩涡, 同时, 水流紊动加剧, 表层失稳, 与植被碰撞的机率增加, 产生掺混消能效应, 故植被绕流阻力增加, 与裸坡情况对比, 植被阻滞作用增强, 说明水流紊动加剧后, 增强了植被的减流效果。

2.5 弗劳德数对缓流效果的影响

在流量相同时, 弗劳德数越大, 说明坡面径流的平均流速越大, 径流侵蚀能力越强, 水深越浅, 坡面的径流剪切力越小。定量分析弗劳德数对缓流系数的影响, 探明径流的泥沙搬运能力和径流切应力与缓流特征的互馈机制。

缓流系数与弗劳德数两者呈现出反 C 形的变化趋势(图 5), 随坡度增加, 曲线曲率越大, 坡度较小时, 同一坡度下, 弗劳德数基本不变, 故对缓流系数影响较小, 而坡度增大时, 缓流系数与弗劳德数呈现较为明显的反 C 形变化趋势, 即小流量(3.65 ~ 11.78L/min) 时, 缓流系数随着弗劳德数的增加而减小, 而大流量(11.78 ~ 27.25L/min) 时, 缓流系数随弗劳德数递减而减小。究其原因, 小流量时, 水深和平

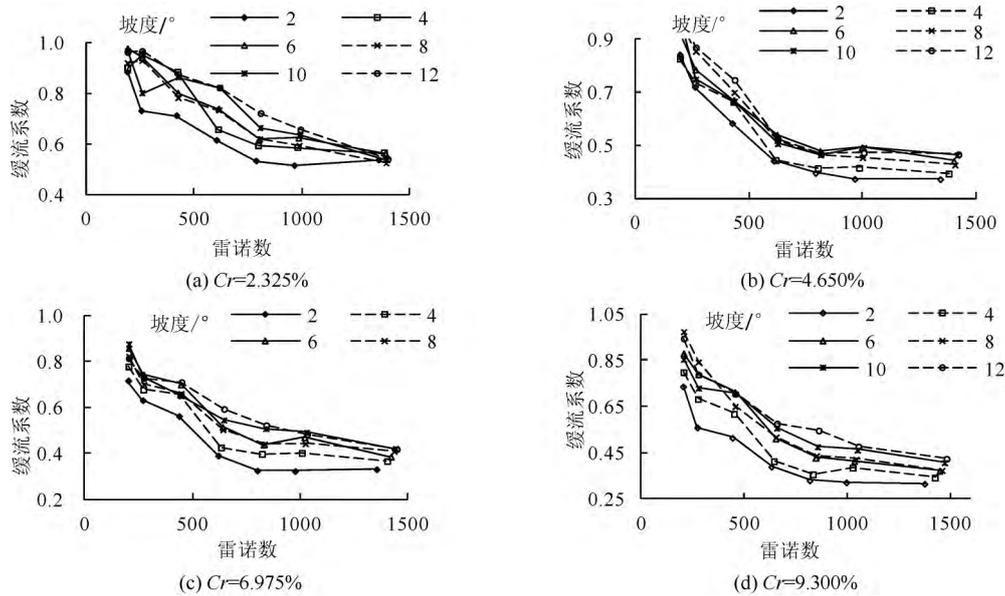


图 4 不同覆盖度下雷诺数对缓流效果的影响

Fig. 4 Influence of the Reynolds number on flow slowing coefficient with different vegetation coverage rate

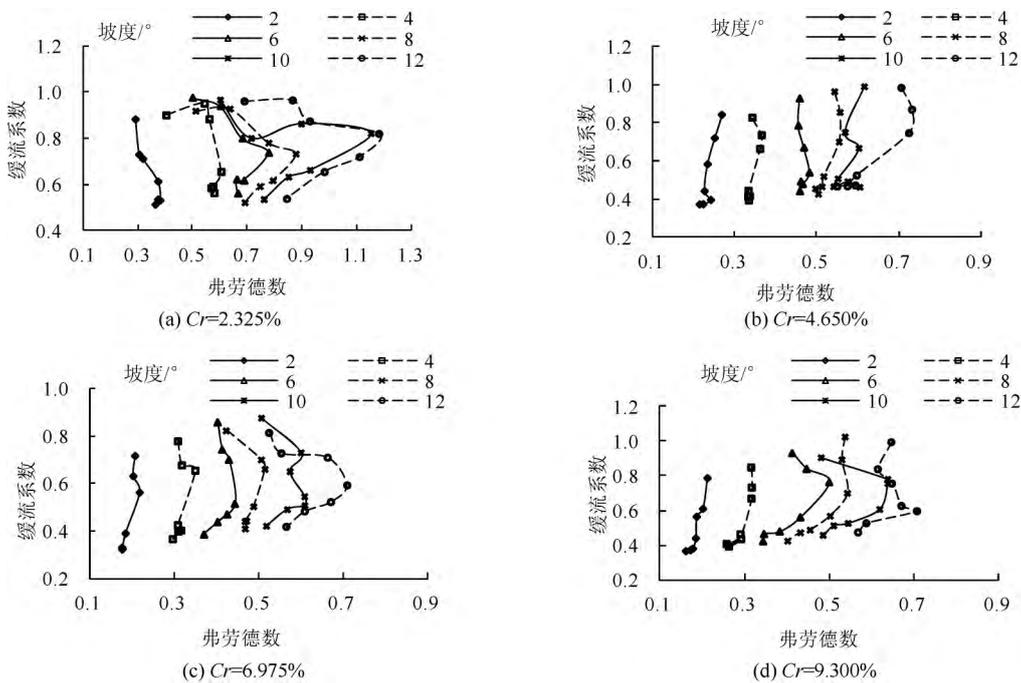


图 5 不同覆盖度下弗劳德数对缓流效果的影响

Fig. 5 Influence of Froude number on flow slowing coefficient with different vegetation coverage rate

均流速均较小,弗劳德数也相对较小。随流量的增加,弗劳德数增大,水流紊动加剧,植被的存在相对于裸坡的缓流作用逐渐增强。随着流量的增加,弗劳德数增加至一定程度,坡面流发生水跃和水流混掺现象,植被阻水能力增强,弗劳德数逐渐减小,植被缓流效果增强。

2.6 缓流系数计算公式的建立

目前基于不同地表覆盖情况,前人^[3,4]经过回归分析,已经建立了不同的流速经验公式。一般在试验过程中,试验控制变量是植被覆盖度(或者糙率)、流量和坡度,基本水动力学参数(平均流速、水深和阻力系数等)亦是受这三个试验变量控制,故分析缓流系数与这三者的关系,通过对影响因子进行回归

分析,并研究了覆盖度、流量和坡度对植被缓流效果的影响程度

$$\phi = 0.66q^{-0.34}Cr^{-0.29}J^{0.15} \quad R^2 = 0.86 \quad (2)$$

根据参数贡献率,分别分析流量 q 、覆盖度 Cr 和坡度 J 对缓流系数的影响程度

$$\phi = 1.22q^{-0.34} \quad R^2 = 0.54 \quad (3)$$

$$\phi = 0.21Cr^{-0.29} \quad R^2 = 0.24 \quad (4)$$

$$\phi = 0.77J^{0.148} \quad R^2 = 0.08 \quad (5)$$

根据公式(3)(4)(5)可知,从解释方差角度分析,流量的解释方差占 54%,覆盖度占 24%,而坡度对其影响最小,仅占 8%;从贡献率角度分析,流量的贡献率最大,覆盖度次之,坡度对其影响最小。

通过 Nash-Sutcliffe 系数(NSE)来检验阻力系数计算公式(2)的模拟效果,计算公式为

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \right] \quad (6)$$

式中 P_i 为模拟值; O_i 为实测值; \bar{O} 为实测值的平均值; n 是样本个数; NSE 值越接近 1 模型模拟效果越好。经计算 NSE 均高达 0.86,因此公式(2)可以较好地模拟植被覆盖下坡面流的缓流特征。

3 结论

为深入研究植被的水土保持效益,通过 5 个覆盖度、6 个坡度和 7 个流量的组合条件下室内水槽试验,引入缓流系数定量研究非淹没状态下植被的缓流效果:

(1) 植被覆盖具有较好的缓流效益,随植被覆盖度增加,坡面流的缓流系数减小,缓流效果增强,缓流最佳覆盖度为 4.650%,此覆盖度达到最佳效果;本试验流量范围内,缓流系数随流量的增加而减小,而随坡度的增加略有增大,说明植被可以减轻一定流量范围内水流的冲刷。

(2) 缓流系数随水深增加而减小,这与植被阻水面积有关;缓流系数随雷诺数增加而减小,而与弗劳德数则呈反 C 型分布,曲线曲率与坡度有关。

(3) 建立了基于试验控制变量(植被覆盖度、流量和坡度)的缓流系数预测公式,公式表明,流量是影响植被缓流系数的主要因素,覆盖度次之,坡度对其影响可以忽略。

参考文献:

- [1] 李勉,姚文艺,李占斌. 黄土高原草本植被水土保持作用研究进展[J]. 地球科学进展,2005,20(1): 74-80.
- [2] 张光辉. 坡面薄层水流水动力学特性的实验研究[J]. 水科学进展,2002,13(2): 159-165.
- [3] 曹颖,张光辉,唐科明,等. 地表覆盖对坡面流流速影响的模拟试验[J]. 山地学报,2011,29(6): 654-659.
- [4] Abahams A D, Li G, Parsons A J. Rill hydraulics a semiarid hillslope, southern Arizona[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21(1), 35-47.
- [5] 肖培青,姚文艺,李莉,等. 植被影响下坡面流阻力变化特征研究[J]. 泥沙研究,2013(3): 1-5.
- [6] 李瀚之,余新晓,樊登星,等. 模拟降雨条件下黑麦草覆盖度对褐土坡面径流流速的影响[J]. 北京林业大学学报,2014,36(5): 94-98.
- [7] Zhao Chun-hong, Gao Jian-en, Zhang Meng-jie, et al. Sediment deposition and overland flow hydraulics in simulated vegetative filter strips under varying vegetation covers[J]. Hydrological Processes, 2015, 30(2): 163-175.
- [8] 李勉,姚文艺,陈江南,等. 草被覆盖对坡面流流速影响的人工模拟试验研究[J]. 农业工程学报,2005,21(12): 43-47.
- [9] Pan C, Shangguan Z. Runoff hydraulic characteristics and sediment generation in sloped grassplots under simulated rainfall conditions[J]. Journal of Hydrology, 2006, 331(1-2): 178-185.
- [10] Al-Hamdan O Z, Pierson F B, Nearing M A, et al. Risk assessment of erosion from concentrated flow on rangelands using overland flow distribution and shear stress partitioning[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(2): 539-548.
- [11] 郭雨华,赵廷宁,孙保平,等. 草地坡面水动力学特性及其阻延地表径流机制研究[J]. 水土保持研究,2006,13(4): 264-267.
- [12] 肖培青,姚文艺,王国庆,等. 植被作用下土壤抗剪强度和径流侵蚀力的耦合效应[J]. 水科学进展,2016,27

- (2) : 224 – 230.
- [13] 吴淑芳, 吴普特, 原立峰. 坡面径流调控薄层水流水力学特性试验 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(3) : 14 – 19.
- [14] 陈德春, 周家苞. 人工水草缓流和消波研究 [J]. 河海大学学报, 1998, 26(5) : 102 – 106.
- [15] 孙佳美, 余新晓, 樊登星, 等. 模拟降雨下植被盖度对坡面流水动力学特性的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35(8) : 2574 – 2580.
- [16] Noarayanan L, Murali K, Sundar V. Manning's 'n' co-efficient for flexible emergent vegetation in tandem configuration [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2012, 6(1) : 51 – 62.
- [17] Juha Jarvela. Flow resistance of flexible and stiff vegetation: a flume study with natural plants [J]. Journal of Hydrology, 2002, 269(1 – 2) : 44 – 54.
- [18] 王光谦, 张长春, 刘家宏, 等. 黄河流域多沙粗沙区植被覆盖变化与减水减沙效益分析 [J]. 泥沙研究, 2006(2) : 10 – 16.
- [19] Musleh F A, Cruise J F. Functional relationships of resistance in wide flood plains with rigid unsubmerged vegetation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(2) : 163 – 171.
- [20] Fanth – Maghadam M, Kouwen N. Nonrigid, nonsubmerged, vegetation roughness on floodplains [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(1) : 51 – 57.
- [21] Gu Fengfeng, Ni Hangen, Qi Dingman. Roughness coefficient for unsubmerged or submerged reed [J]. Journal of Hydrodynamics, 2007, 19(4) : 421 – 428.
- [22] 刘春晶, 李丹勋, 王兴奎. 明渠均匀流的摩阻流速及流速分布 [J]. 水利学报, 2005, 36(8) : 950 – 955.
- [23] 潘成忠, 上官周平. 牧草对坡面侵蚀动力参数的影响 [J]. 水利学报, 2005, 36(3) : 371 – 377.

Experiment study on flow slowing characteristics under vegetation coverage

YANG Fan¹, ZHANG Kuan-di^{1, 2}, YANG Ming-yi², YANG Jie¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Flow slowing characteristics of vegetation are studied under 6 slopes, 7 flow discharges and 5 vegetation coverages. Results show that influence of flow slowing coefficient decreases, and flow slowing effects are enhanced, when vegetation coverage is more than 4.650%, flow slowing effects tend to stable; it decreases with the increases of the flow, but increases while slope increases. The flow slowing coefficient decreases with the depth and the Reynolds number increasing, however, it negatively correlates with the Froude Number, with positively correlation relationships. Based on control variables of the experiment (vegetation coverage, flow discharge and slope), the equation of current slowing coefficient is set up.

Key words: overland flow; vegetation coverage simulation; flow slowing coefficient

(责任编辑: 刘 峡)