

坡面产流产沙过程对植被过滤带响应的试验研究

陈倩¹, 傅瑜², 余冬立¹, 冯晓红³, 罗和文²

(1. 河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室, 南京 210098;

2. 溧阳市国土资源局, 江苏 溧阳 213300; 3. 扬州市勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225007)

摘要: 为探讨植被过滤带在坡面产流产沙过程中对水沙的拦截效果及其水动力学机理, 通过在室内土槽上设置模拟植被过滤带并进行浑水冲刷试验, 得到有无模拟植被过滤带情况下的产流产沙情况及相关水动力学参数, 定量分析了植被过滤带对径流、泥沙的拦截效果并探讨了坡面产沙率与水动力学参数之间的关系。结果表明, 植被过滤带在放水冲刷试验中能有效拦截径流和泥沙, 且在较小流量下, 径流和泥沙的拦截效果更好, 在 200 L/h 流量下, 拦截率分别可达 33.2% 和 96.9%; 在冲刷过程中, 有无模拟植被过滤带产沙率与水流剪切力、水流功率都具有显著的相关关系, 分别呈指数函数 ($R^2=0.67$, $R^2=0.83$) 和幂函数 ($R^2=0.70$, $R^2=0.87$) 增大关系; 采用含水流剪切力和水流功率的非线性回归方程 $R_s=1.184 \times 10^{-6} \tau^{-4.114} \omega^{3.839}$ ($R^2=0.73$) 预测产沙率效果较好。

关键词: 植被过滤带; 径流拦截率; 产沙率; 水动力学参数

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2017)06-0104-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.06.018

Experimental Study on the Response of Slope Runoff and Erosion Process to Vegetative Filter Strip

CHEN Qian¹, FU Yu², SHE Dongli¹, FENG Xiaohong³, LUO Hewen²

(1. Key Laboratory of Efficient Irrigation-Drainage and Agricultural Soil-Water Environment in Southern China, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098; 2. Liyang Bureau of Land and Resources, Liyang, Jiangsu 213300; 3. Yangzhou Survey Design Research Institute Co., Ltd, Yangzhou, Jiangsu 225007)

Abstract: In order to study the interception effect and hydrodynamic mechanism of vegetative filter strips (VFS) during runoff and sediment yield progress on slope surface, a simulated vegetation filter belt was set up on the inner soil trough, and the muddy water erosion tests were carried out. After getting the runoff and sediment yield and related hydrodynamic parameters under the situation of with or without vegetative filter strip through the tests, the vegetation filter intercepting effect of runoff and sediment was quantitatively analyzed and the relationship between sediment production rate and hydrodynamic parameters was explored. The results showed that VFS could effectively intercept runoff and sediments during the tests, and the interception rate was better under smaller flow. When the flow was 200 L/h, the interception rate was 33.2% for runoff and 96.9% for sediments. During the scouring process, the sediment yield rate had significant correlation with flow shear stress and stream power under the situation of with or without VFS, which were positive exponential function relationships ($R^2=0.67$, $R^2=0.83$) with flow shear stress and power function relationships ($R^2=0.70$, $R^2=0.87$) with flow power, respectively. Using a nonlinear regression equation $R_s=1.184 \times 10^{-6} \tau^{-4.114} \omega^{3.839}$ ($R^2=0.73$) with flow shear force and stream power to predict the sediment yield rate could get a better effect.

Keywords: vegetative filter strip; interception rate of runoff; sediment yield rate; hydraulic parameters

水土流失是世界性的生态环境问题之一, 其对土地退化与生产力下降、生态环境恶化以及人类社会可持续发展均构成了严重威胁, 如何控制或减缓水土流失一直是人们关注的焦点。目前, 水土流失的控制措施较多,

而生物措施尤其植被护坡方法受到广泛关注^[1]。

植被过滤带又称植被缓冲带, 是位于水土流失污染源和水体之间的带状植被区域, 它可沉降、过滤、稀释、下渗和吸收地表径流中的污染物, 在防治水体遭

受泥沙淤积和面源污染等方面效果显著。植被过滤带成本低廉且富有成效^[2],已被欧美国家推荐为流域治理的有效措施^[3-6]。李怀恩等^[4]在对植被过滤带的定量计算进行研究分析时,介绍了植被过滤带的概念和植被过滤带的应用;邓娜等^[7]利用野外小区试验,探讨了植被过滤带非点源污染的产生及其对净化效果的影响;Wilson等^[8]的研究结果表明,植被过滤带宽度与沉积物量、沉积物颗粒粒径成负相关关系。

植被过滤带的地上部分是其截留径流和泥沙的关键,即植物茎秆密度直接关系到其拦截径流和泥沙能力^[9-11],然而对于植被茎秆过滤带拦截径流及泥沙的机理还有待深入研究。因此,为了提高试验处理的可控性并侧重考虑植被过滤带的物理阻滞和机械过滤作用,本研究借鉴“Kentucky model”试验设计的思路,采用锈蚀铁丝代替草本植物茎秆来模拟植被过滤带,从而更好地揭示植被过滤带的阻滞效应^[12-13]。通过比较裸坡和植被过滤带坡面的产流产沙结果,研究泥沙流失量与水动力学参数之间的关系,分析植被过滤带拦截泥沙的水动力学机理,旨在为植被过滤带拦截效果研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2016年9—12月在河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室进行。实验室地处江苏省南京市江宁区(北纬30°38′—32°13′,东经118°31′—119°04′),该试验区属亚热带湿润气候,冬冷夏热、四季分明,年平均降水量为1 021.3 mm,年平均蒸发量为900 mm,年平均气温15.7℃,最热月平均温度28.1℃,年无霜期237 d,年均日照时数2 212.8 h。试验供试土壤为粘土,土壤黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2 mm)含量依次为49.56%,30.90%,19.48%;有机碳含量3.73 g/kg,全氮含量0.52 g/kg,阳离子交换量为10.64 cmol/kg。供试土壤经自然风干,去除杂草、石块等杂质后过2 mm筛备用。

1.2 试验设计

试验装置由土槽和上方来水系统两部分组成(图1)。试验在长150 cm、宽30 cm、深45 cm的可在0~45°调节的有机玻璃土槽内进行,土槽底部钻孔以保证试验边坡底部的排水状况接近天然边坡。上方来水系统采用定水头控制流量,利用水泵抽水 and 阀门调节控制流量。试验设置铁丝模拟植被过滤带坡面与裸表坡面,坡度固定在10°,选取200,400,600 L/h 3个流量分别进行冲刷试验,每个流量处理重复6次。

试验过程中,先将过筛后的土样按每5 cm分层装入试验土槽,边填边用力压实,两层之间通过打

毛形成良好结合,土槽的四周边部尽量压实。填土完成后使试验土槽内土壤干容重控制在1.40~1.45 g/cm³。装填完成后,用平尺将表土刮平。为保证每次试验的初始条件基本一致,试验开始前用喷壶在土样表面均匀洒水,控制每次喷洒水量一致,使槽内土样含水率接近天然土壤的含水率。配置模拟植被过滤带时,在装填完毕后,从坡面入口口处开始,垂直于土槽表面插入直径为3 mm锈蚀铁丝(用浓度为18%的盐酸对铁丝浸泡12 h后,于阴暗潮湿处放置10 d),每行密度为70根(参照真实植被过滤带的平均茎秆密度),行距均为10 cm,总行数为15行。试验开始后,记录每次径流进入土槽坡面到其流出的时间,待坡面水流平稳后,开始测量土槽坡面径流流速和水深。流速采用染色示踪法测定,其方法是利用摄像机拍摄整个试验过程的坡面状况,利用KMPlayer和Image-Pro Plus软件处理分析图像,得到染色水流通过固定坡面的路程和时间,计算得出坡面优势流流速。在测量坡面径流流速的同时,在水槽出水口每隔1 min收集泥沙水样,经称量、摇匀、取样、烘干后得到泥沙质量,整个试验过程历时30 min,每个处理收集15个水样。

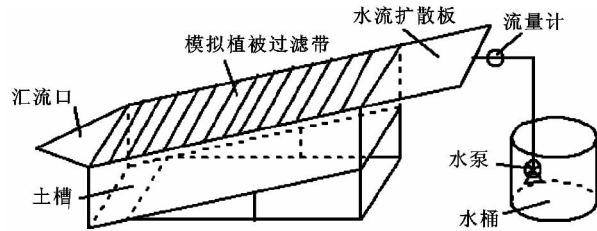


图1 试验装置

1.3 数据处理方法

染色示踪法测定流速为坡面优势流流速(V_m),实测流速乘以修正系数 α 作为径流流速(V)^[13]。层流 α 取为0.67,过渡流为0.7,紊流为0.8^[14]:

$$V = \alpha V_m \quad (1)$$

由于坡面水流很薄且坡面水深沿坡面方向动态变化,很难用钢尺准确测定,因此假定坡面水流沿坡面均匀分布,径流平均水深计算公式为^[15]:

$$h = q/V \quad (2)$$

式中: h 为坡面径流平均水深(m); q 为断面平均单宽流量(m²/s); V 为断面平均流速(m/s)。

弗劳德数 Fr 在判断急、缓流方面是一个很重要的参数,可理解为惯性力与重力之比;当 $Fr < 1$ 呈缓流状态;反之,呈急流状态。 Fr 的计算公式为^[15]:

$$Fr = V/\sqrt{gh} \quad (3)$$

式中: R 为水力半径(m),取 $R = h$; ν 为运动黏度(10⁻⁶ m²/s); g 为重力加速度。

径流在流动过程中受到阻力作用,坡面流阻力常用

Darcy-Weisbach 阻力系数 f 来表示,其计算公式为^[15]:

$$f = 8ghJ/V^2 \quad (4)$$

水流剪切力 τ 是径流冲刷的动力,其计算公式为^[15]:

$$\tau = \gamma RJ = \rho gh \quad (5)$$

式中: τ 为水流剪切力 ($\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}^2)$); γ 为水流容重 (N/m^3); J 为水流能坡,采用坡面比降近似代替,即 $J = \tan \theta$, θ 为水槽坡度 ($^\circ$); ρ 为水的密度 (g/m^3)。

国际上,对于几种主流的土壤侵蚀过程模型,在模拟径流冲刷引起的土壤分离过程时使用了不同的水动力学参数(水流剪切力 τ 、单位水流功率 P 、水流功率 ω 等)^[16]。美国的 WEEP 模型使用水流剪切力 τ 表征土壤侵蚀过程,而澳大利亚的 GUEST 模型则使用水流功率 ω 来模拟土壤侵蚀过程。水流功率定义为单位面积水体的水流功率,计算公式为^[17]:

$$\omega = \tau V = \rho ghJ \quad (6)$$

式中: ω 为水流功率 (g/s^3)。

2 结果与分析

2.1 模拟植被过滤带对径流的拦截效果

在 3 种不同入流流量下,无论有无植被过滤带出流径流量随时间变化均呈显著对数增加趋势(图 2),即出流量先增大后基本保持稳定。原因可能在于冲刷浑水刚进入土槽表面时,土壤含水率较低,土壤初始入渗速率较大,水流易于入渗,最终导致出流径流量较少;随着土壤含水率增加,土壤入渗速率由土壤本身导水特性决定,土壤入渗速率降低,出流径流量增加并维持在一个较为稳定的水平。

无植被过滤带坡面的出流量均高于模拟植被过滤带坡面的出流量,植被过滤带能有效拦截径流;3 个流量下的平均拦截率分别为 33.2%,28.1%,30.5%。200 L/h 流量下的植被过滤带平均径流拦截率大于 400 L/h 和 600 L/h 流量下的径流拦截率。在本试验中,每次试验的土壤体积含水率约为 4.5%,每次处理的土壤初始含水率之间无显著差异($P > 0.05$),因此可排除土壤初始含水率对结果的影响。试验中 200,400,600 L/h 流量下初始的出流时间在增加植被过滤带后分别增加了 2.1,0.6,0.6 min。从出流时间的增加幅度可以发现,在较低流量下,出流时间增加幅度更大,极大地增加了土壤与径流的接触时间,从而滞缓径流,最终使入渗量增加。

2.2 模拟植被过滤带对泥沙的拦截效果

在 3 种流量下,模拟植被过滤带坡面的产沙率量级显著低于无植被过滤带坡面产沙($P < 0.05$)。在无植被过滤带条件下,200 L/h 流量时坡面产沙率随时间递增线性增加($R^2 = 0.73$)(图 3(a)),流量为 400 L/h 和 600 L/h 时,产沙率与时间呈显著的线性负相

关关系, R^2 分别是 0.20 和 0.80。而模拟植被过滤带坡面,3 种流量上方来水冲刷下,坡面产沙率均保持较低水平,且随时间的变化较小(图 3)。

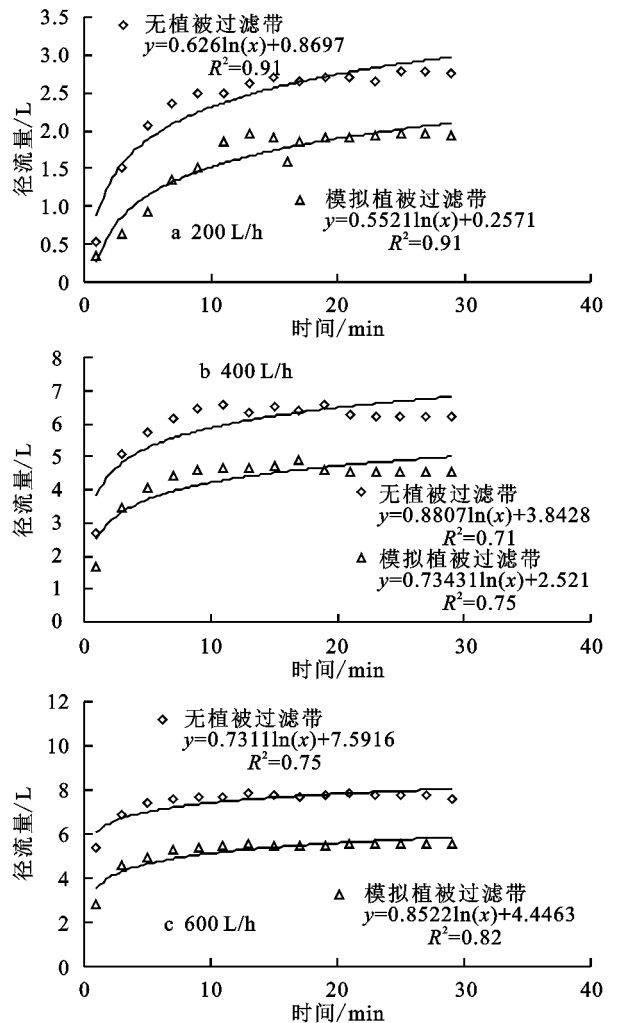


图 2 径流量随时间变化的关系

无论有无植被过滤带,平均产沙率均随流量递增而增大(表 1)。在 200,400,600 L/h 的流量下,植被过滤带平均泥沙拦截率均达到 94% 以上,且较小流量下泥沙拦截率更大,200 L/h 流量下,泥沙拦截率高达 96.9%(表 1)。模拟植被过滤带在本试验中的泥沙拦截率极高,但在实际情况中,真实植被过滤带的泥沙拦截水平低于本试验锈蚀铁丝模拟植被过滤带的作用,在申小波等^[18]的研究中,宽度为 1 m 的真实草本植被过滤带泥沙拦截率为 78%,其泥沙拦截效果较本试验铁丝模拟植被过滤带差一些,但还是非常显著的。可见,植被过滤带能有效调控坡面产沙率,因而带植被过滤带的坡面不易发生由于泥沙大量流失而引起的坡面凹陷、坍塌。

2.3 模拟植被过滤带对坡面水动力学参数与产沙率关系的影响

坡面特征及径流水动力学参数是影响径流冲刷过程最重要的两个因素^[14]。产沙率是一个能直观显示坡面侵蚀程度的物理量,与各水动力学参数之间存

在诸多联系,特别是水流功率 ω 是影响侵蚀的重要水力学参数,能准确预测径流的分离能力^[19]。

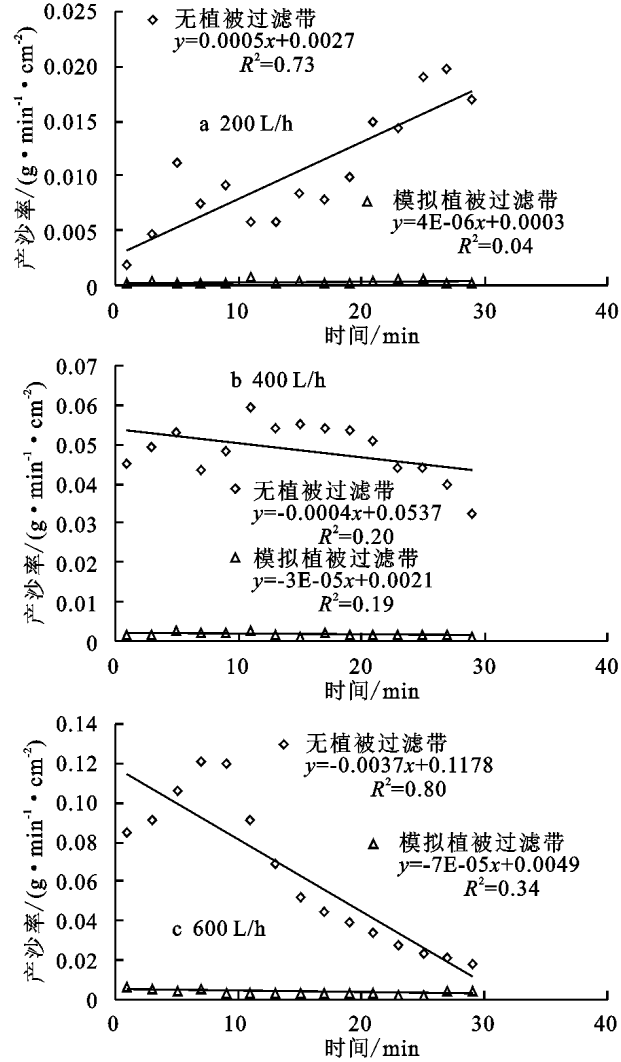


图 3 产沙率随时间变化关系

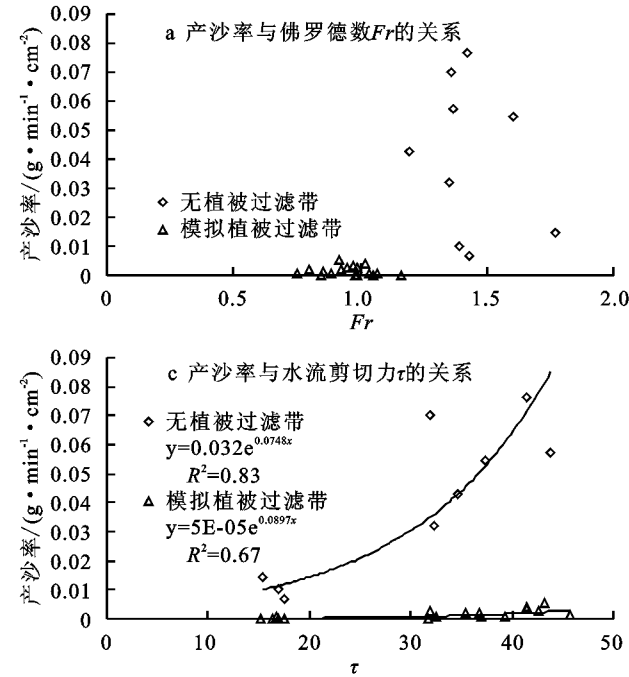


图 4 产沙率与各水力学参数的关系

表 1 不同流量下平均产沙率与泥沙拦截率

流量/ ($\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$)	平均产沙率/($\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)		泥沙 拦截率/%
	无植被过滤带	有植被过滤带	
200	0.0104	0.0003	96.9
400	0.0484	0.0017	96.5
600	0.0629	0.0038	93.9

佛罗德数 Fr 、阻力系数 f 与产沙率无显著相关关系(图 4)。一方面,裸坡冲刷的各组试验中,佛罗德数 Fr 始终保持在 1.5 左右,阻力系数 f 保持在 0.75 左右,而产沙率却变化明显;另一方面,铁丝模拟植被过滤带坡面冲刷过程中,佛罗德数 Fr 在 0.75~1.25 之间变化,阻力系数 f 在 1.25~2.75 之间变化,而产沙率始终保持在一个较低水平,无显著变化。由此可知,无论有无植被过滤带,冲刷侵蚀产沙率与佛罗德数 Fr 、阻力系数 f 均未达到显著相关。

裸土坡面产沙率与水流剪切力 τ 、水流功率 ω 分别存在显著指数和幂函数增大关系($R^2=0.83$, $R^2=0.87$),而植被过滤带存在条件下削弱了产沙率与 τ 、 ω 之间的相关系数($R^2=0.67$, $R^2=0.70$)。在无植被过滤带条件下,径流产沙速率受径流剪切力和径流功率控制,径流剪切力和径流功率越大,径流产沙率越大;然而,当植被过滤带存在时,表层土壤受到植被茎秆或根系的“保护”,较小地受径流冲刷、剥蚀和迁移作用,植被覆盖的“保护”效应极大地削弱了径流对土壤的侵蚀作用,因此有无植被过滤带下的产沙率变化范围差异显著。值得注意的是, τ 和 ω 变化范围无明显改变,原因可能在于植被过滤带的存在对坡面径流特征参数的量级并无显著影响,而更多的受土壤种类、土壤容重和边坡坡度的影响^[10,12]。

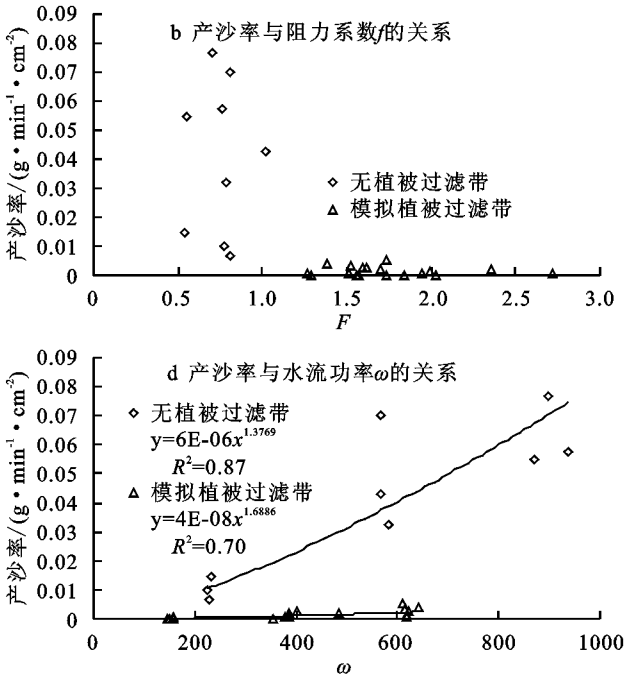


图 4 产沙率与各水力学参数的关系

2.4 预测产沙率公式

以上结论表明水流剪切力和水流功率对产沙率有正向耦合效应。因此,通过多元非线性回归分析产沙率与水流剪切力、水流功率之间的关系:

$$R_s = 1.184 \times 10^{-6} \tau^{-4.114} \omega^{3.839} \quad R^2 = 0.73 \quad (7)$$

式中: R_s 为产沙率($\text{g}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2)$); τ 为水流剪切力($\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s}^2)$); ω 为水流功率(g/s^3)。

公式(7)较好的描述了两种坡面特征情况下产沙率与水流剪切力、水流功率的关系。将公式(7)预测的两种不同坡面特征条件下的产沙率与实测产沙率关系绘于图 5,结果表明,无植被过滤带坡面条件下的预测产沙率低估了实测产沙率,而模拟植被过滤带坡面条件下的预测产沙率高估了实测产沙率。一方面,公式(7)仅考虑了水流剪切力和水流功率两种水动力学参数,忽视了坡面冲刷过程中土壤团聚体崩解、熟化等加剧侵蚀作用的过程,因而公式(7)低估了无植被过滤带时的产沙速率;另一方面,由 2.3 节结论可知,植被过滤带存在时产沙率与水流剪切力 τ 、水流功率 ω 之间的相关系数变小了,产沙率由植被过滤带覆盖条件控制,而公式(7)是仅关于 τ 、 ω 的函数关系式,未能考虑植被过滤带对坡面的保护效应,因而公式(7)高估了植被过滤带存在时的产沙速率。

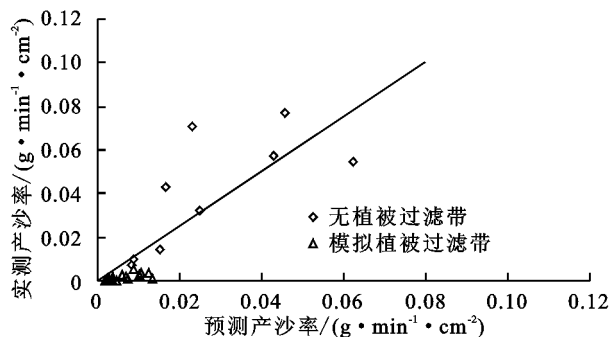


图 5 预测产沙率与实测产沙率关系

3 讨论

本研究通过浑水冲刷试验,对比了不同坡面特征及流量条件下的产流量和产沙率,并分析了产沙率与水动力学参数的关系。研究结果表明,模拟植被过滤带坡面能有效拦截径流和泥沙,且在较小流量下拦截效果更为显著,同时得到了用水流剪切力和水流功率表征产沙率的联合公式。在植被过滤带水土保持效果作用机理方面,通常认为植被过滤带拦截径流、泥沙及污染物是通过多种作用协同实现的^[20],拦截径流及泥沙主要的实现方式为:首先,植物茎秆能有效减小径流流速^[20]、滞缓径流,并过滤去除径流中的泥沙等颗粒态物质^[21];其次,植被过滤带中植物茎秆及根系对土壤的穿插固结作用能有效改善土壤结构,增加土壤渗透能力,从而增大坡面入渗。本研究模拟植

被过滤带能滞缓径流流速,从而影响一系列的水动力学参数,并极大地减少径流产沙的量级,因而从水动力学参数表征产沙率可有效预测植被过滤带坡面产沙过程。

值得注意的是,大多数坡面侵蚀产沙率研究集中在裸土坡面冲刷产沙预测^[22-25],而坡面特征例如植被覆盖或枯落层覆盖必定都对其产沙率预测有一定影响,因此,对于植被过滤带坡面侵蚀产沙方面的研究还有待进一步深入;另一方面,本研究主要模拟了植物茎秆的物理拦截作用,侧重于对于泥沙及径流的拦截作用,因而选用铁丝模拟植被过滤带,然而为了考虑真实植被过滤带植物的生物吸附作用^[3]以及植物根际微生物的生物分解过程^[26],相关研究有待进一步加深。

4 结论

本研究通过在土槽上模拟植被过滤带进行浑水冲刷试验,定量分析了植被过滤带对径流、泥沙的拦截效果,并探讨了坡面产沙率与水动力学参数之间的关系,主要结论为:

(1)植被过滤带能有效拦截径流,且在较低流量下拦截效果更明显;相比于裸坡,植被过滤带能有效调控坡面径流产沙率使之维持在一个较为稳定的低水平,泥沙拦截效果显著且流量越小泥沙拦截率越高。

(2)不同坡面特征条件下,产沙率与水流剪切力和水流功率具有显著相关性,与佛罗德数和阻力系数无显著相关性。

(3)不同坡面特征条件下水流剪切力和水流功率对产沙率具有正向耦合效应,可以联合水流剪切力和水流功率拟合得出多元非线性回归方程: $R_s = 1.184 \times 10^{-6} \tau^{-4.114} \omega^{3.839}$ ($R^2 = 0.73$),该公式较好地预测了上方来水冲刷条件下坡面产沙率。

参考文献:

- [1] 徐宪立,马克明,傅伯杰,等. 植被与水土流失关系研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(9): 3137-3143.
- [2] 张建春,彭补拙. 河岸带研究及其退化生态系统的恢复与重建[J]. 生态学报, 2003, 23(1): 56-63.
- [3] 王良民,王彦辉. 植被过滤带的研究和应用进展[J]. 应用生态学报, 2008, 19(9): 2074-2080.
- [4] 李怀恩,张亚平,蔡明,等. 植被过滤带的定量计算方法[J]. 生态学杂志, 2006, 25(1): 108-112.
- [5] Abu-Zreig M, Rudra R P, Whiteley H R, et al. Phosphorus removal in vegetated filter strips[J]. Journal of Environmental Quality, 2003, 32(2): 613-619.
- [6] Reed T, Carpenter S R. Comparisons of P-yield, riparian buffer strips, and land cover in six agricultural watersheds[J]. Ecosystems, 2002, 5(6): 568-577.
- [7] 邓娜,李怀恩,史冬庆,等. 径流流量对植被过滤带净化

- 效果的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 124-129.
- [8] Wilson L G, Wilson L G. Sediment removal from flood water by grass filtration[J]. Transactions of the ASAE, 1967, 10(1): 35-37.
- [9] Sabbagh G J, Fox G A, Kamanzi A, et al. Effectiveness of vegetative filter strips in reducing pesticide loading: Quantifying pesticide trapping efficiency[J]. Journal of Environmental Quality, 2009, 38(2): 762-771.
- [10] 聂军, 廖育林, 谢坚, 等. 自然降雨条件下香根草生物篱对菜地土壤地表径流和氮流失的影响[J]. 水土保持学报, 2009, 23(1): 12-16.
- [11] 丁光敏, 林福兴, 施悦忠, 等. 香根草草篱带促进侵蚀劣地生态自我修复初探[J]. 水土保持研究, 2003, 10(2): 116-118.
- [12] Deletic A. Modelling of water and sediment transport over grassed areas[J]. Journal of Hydrology, 2001, 248(1): 168-182.
- [13] Deletic A. Sediment transport in urban runoff over grassed areas[J]. Journal of Hydrology, 2005, 301(1): 108-122.
- [14] 余冬立, 刘冬冬, 彭世彰, 等. 海涂围垦区排灌工程边坡土壤侵蚀过程的水动力学特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 1-5.
- [15] Guo T L, Wang Q J, Li D Q, et al. Flow hydraulic characteristic effect on sediment and solute transport [J]. Catena, 2013, 107(8): 145-153.
- [16] 张光辉. 坡面水蚀过程水动力学研究进展[J]. 水科学进展, 2001, 12(3): 395-402.
- [17] 管新建, 李占斌, 王民, 等. 坡面径流水蚀动力参数室内试验及模糊贴近度分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 1-6.
- [18] 申小波, 陈传胜, 张章, 等. 不同宽度模拟植被过滤带对农田径流、泥沙以及氮磷的拦截效果[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(4): 721-729.
- [19] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 94-102.
- [20] 李怀恩, 庞敏, 杨寅群, 等. 植被过滤带对地表径流中悬浮固体净化效果的试验研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(6): 176-181.
- [21] 邓红兵, 王青春, 王庆礼, 等. 河岸植被缓冲带与河岸带管理[J]. 应用生态学报, 2001, 12(6): 951-954.
- [22] 陈倩, 余冬立, 章二子, 等. 海涂盐碱地工程边坡土壤抗冲刷性能试验研究[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(5): 964-971.
- [23] 李强, 刘国彬, 许明祥, 等. 黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J]. 农业工程学报, 2013, 29(10): 153-159.
- [24] 王丹丹, 张建军, 茹豪, 等. 晋西黄土高原不同地类土壤抗冲性研究[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 28-32.
- [25] 杨玉梅, 郑子成, 李廷轩. 不同土地利用方式下土壤抗冲性动态变化特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 64-68.
- [26] 顾笑迎, 黄沈发, 刘宝兴, 等. 东风港滨岸缓冲带对水生生物群落结构的影响[J]. 生态科学, 2006, 25(6): 521-525.
- (上接第 57 页)
- [10] 胡梓超, 周蓓蓓, 王全九. 模拟降雨条件下纳米碳对黄土坡面养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 1-6.
- [11] 周蓓蓓, 胡梓超, 王全九. 一种针孔式防堵塞人工野外模拟降雨装置: 中国, ZL201510069492.4[P]. 2016.
- [12] 南京农学院. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1980: 43-77.
- [13] 沈奕彤, 郭成久, 李海强, 等. 降雨历时对黑土坡面养分流失的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2): 97-101.
- [14] 王全九, 王文焰, 沈冰, 等. 降雨—地表径流—土壤溶质相互作用深度[J]. 水土保持学报, 1998, 4(2): 41-46.
- [15] Wallach R, Grigorin G, Rivlin J. A comprehensive mathematical model for transport of soil-dissolved chemicals by overland flow[J]. Journal of Hydrology, 2001, 247(1/2): 85-99.
- [16] 张亚丽, 李怀恩, 杨素勤, 等. 模拟降雨条件下黄土坡地土壤溶质迁移特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4): 113-117.
- [17] 张兴昌, 邵明安. 坡地土壤氮素与降雨、径流的相互作用机理及模型[J]. 地理科学进展, 2000, 19(2): 128-135.
- [18] 谭帅, 周蓓蓓, 王全九. 纳米碳对扰动黄绵土水分入渗过程的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 263-269.
- [19] 王全九, 赵光旭, 刘艳丽, 等. 植被类型对黄土坡地产生沙及氮磷流失的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 195-201.