

VFSMOD 模型对植被过滤带净化效果的模拟与适应性分析

杨寅群^{1,2}, 李怀恩^{1*}, 史冬庆¹

(1. 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 西安 710048; 2. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079)

摘要:在简述 Vegetative Filter Strips Model(VFSMOD)模型的功能和机制的基础上,通过野外小区试验资料检验该模型对国内植被过滤带净化效果的模拟情况,进而分析其适用性.结果表明,出流水量模拟值与实测值的偏差多在 $\pm 15\%$ 以内,出流 SS 浓度模拟值与实测值的偏差多在 $\pm 20\%$ 以内,出流水量和出流 SS 浓度模拟值与实测值的判定系数 R^2 分别为 0.995 和 0.889,模型具有较高的精度与较强的适应性,可用于植被过滤带的规划设计.

关键词:植被过滤带;VFSMOD 模型;非点源污染;净化效果

中图分类号:X522 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)11-2613-06

Study on Simulation of Clarification for Vegetative Filter Strips by VFSMOD Model

YANG Yin-qun^{1,2}, LI Huai-en¹, SHI Dong-qing¹

(1. Northwest Water Resources and Environment Ecology Key Laboratory of MOE, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 2. School of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract:The functions and mechanism of Vegetative Filter Strips Model (VFSMOD) had been introduced in this paper, and the applicability and performance ability of this model have been tested by plot experiment data. The results show that the relative deviations between simulated values and measured values of outflow quantity are within $\pm 15\%$, while with the concentration of SS, the relative deviations are within $\pm 20\%$, and the determination coefficients between simulated values and measured values for outflow and SS are 0.995 and 0.889 respectively. Therefore, the simulation precision of this model is satisfactory, the model can be used as a tool for the design of VFS.

Key words:vegetative filter strips; Vegetative Filter Strips Model(VFSMOD); non-point source pollution; purification effect

植被过滤带(vegetative filter strips, VFS)是位于污染源与水体之间的植被(乔木、灌木或草地)区域,可有效地拦截、滞留泥沙和有效削减氮、磷等污染物进入受纳水体的负荷量,显著降低非点源污染的影响^[1].数学模型是进行植被过滤带设计的重要工具,一些研究已初步建立了植被过滤带削减地表径流中污染物质的模型. Kentucky 大学的研究人员^[2~9]提出的 GRASSF 模型是一个计算人工草地过滤带对悬浮固体过滤效果的模型. Wilson 等^[10]改进了 GRASSF 模型并将其集成到 SEDIMEOT II 模型里,整合了一个计算出流曲线的简单算法并考虑了 3 种不同的过滤带坡度情况.不少学者使用 CREAMS (Chemical, Runoff, and Erosion for Agriculture Management Systems)模型^[11]估算了植被过滤带的净化效果,修正了坡面侵蚀参数反映过滤带中糙率的增大,然而其水文计算部分没有考虑过滤带引起的流量和峰值的变化.

VFSMOD 模型是一个用于预测植被过滤带对坡面地表径流中泥沙净化效果的田间尺度机制模型. 2005 年 VFSMOD 模型被美国环保局(US EPA)用来评价植被过滤带在最佳管理措施(best management practice, BMPs)中的效率. VFSMOD 作为一个计算植被过滤带对坡面地表径流中泥沙净化效果的数学模型,近年来在北美得到了检验和应用^[12,13],如 Muñoz-Carpena 等^[14]在北卡罗莱纳州的海岸平原, Gharabaghi 等^[15]和 Abu-Zreig 等^[16]在加拿大, Sabbagh 等^[17]和 Kuo 等^[18]在美国中西部等不同地域下,对不同宽度的植被过滤带对泥沙过滤效果进行了模拟,效果良好;Yang 等^[19]耦合了 AnnAGNPS 以成本效益为目标,在休耕土地上建立河岸缓冲区;

收稿日期:2009-12-13;修订日期:2010-05-09

基金项目:国家自然科学基金项目(50979090);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-002-005-002)

作者简介:杨寅群(1986~),男,博士研究生,主要研究方向为水资源保护.

* 通讯联系人, E-mail: Lhuaien@mail.xaut.edu.cn

Kuo 等^[18] 和 White 等^[20] 耦合了 SWAT (soil and water assessment tool) 模型在流域尺度上的模拟和应用. 因此, 本研究通过小区试验的方式, 根据野外试验数据检验 VFSMOD 模型对植被过滤带净化效果的模拟精度, 探讨该模型在我国的适用性, 以期为植被过滤带的规划设计提供依据.

1 VFSMOD 模型与研究方法

1.1 试验方法

小区试验在陕西省华县小华山水库左岸坡地上进行(北纬 34°28'08", 东经 109°41'28"). 试验场的土为砂壤土, 土壤有机质含量为 2.54% ~ 3.83%; pH 值在 8.16 ~ 8.23 之间, 呈弱碱性, 粒径 <5 mm 的土颗粒占 98.66%. 在试验场内设置 3 条植被过滤带, 过滤带植被采用灌木(西北地区常用的水土保持植物中国沙棘)和野生草本植物. 植被过滤带设计坡度均为 2%, 把过滤带按 1~3 号进行编号, 1 号、2 号过滤带尺寸为 10 m × 3 m; 1 号为灌草混合带, 在过滤带 2~6 m 段种植有 5 排沙棘; 2 号为灌草过滤带, 在过滤带 2~9 m 段种植有 8 排沙棘; 尺寸为 15 m × 3 m 的 3 号草地过滤带为自然草地过滤带. 种植沙棘的时间为 2006 年 5 月, 均采用行列交错的梅花型方式种植, 于 2007 实行封育. 过滤带前建有蓄水池, 用于向过滤带供水; 出口处建有集水池, 用于收集和量测过滤带地表出流. 植被过滤带布置情况如图 1 所示.

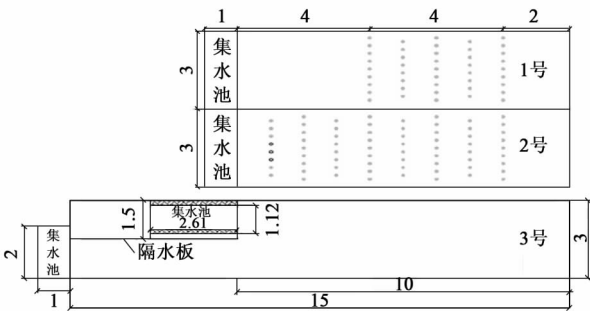


图 1 植被过滤带布置示意(单位:m)
Fig. 1 Disposal map of VFS

于 2008 年进行了 8 次放水试验(序号为 1~8). 试验前采集过滤带土样, 分析饱和导水率、土容重、土初始含水量、土饱和含水量等指标. 土样的采集和分析方法依据文献[21]. 向蓄水池中加入泥沙以模拟农田地表径流, 通过径流试验, 采集植被过滤带入流和出流水样. 使用美国 HACH 公司 DR2800 型便携式水质分析仪测定水样中的泥沙含

量; 使用 DLY-2000 颗粒分析仪测定水样中泥沙的颗粒级配. 试验方案见文献[22].

1.2 VFSMOD 模型简介

VFSMOD 模型是由美国 Florida 大学于 1999 年开发的一个田间尺度机制模型, 输入进入植被过滤带的流量过程和泥沙过程, VFSMOD 能够计算植被过滤带的出流量、下渗水量和泥沙截留效果. 该模型能够处理时变雨量、空间分布式过滤参数(植被糙率或密度、坡度、土入渗特性)以及不同粒径的入流泥沙, 且能够处理不同的入流流量过程. VFSMOD 由一系列模拟水流和泥沙在 VFS 内运移的模块组成, 目前的可用模块有以下 3 个: ① Green-Ampt 入渗模块, 用于计算表层土壤水量平衡; ② 地表径流运动波模块, 用于计算渗透性土表面径流深和流量; ③ 泥沙过滤模块, 用于模拟泥沙在 VFS 内泥沙的输移和沉积过程.

VFSMOD 模型包括水文子模型和泥沙输移子模型. Green-Ampt 入渗模块和地表径流运动波模块组成了水文子模型. 水文子模型应用基于考虑时变雨强的改进型 Green-Ampt 公式计算入渗量, 使用圣维南方程(运动波)计算径流深和流量. 将植被过滤带划分成若干段, 可以考虑植被过滤带糙率 n 和坡度 S_0 的空间变异, 如图 2 所示. 该模型能够得到土类型(渗透性)、坡度、表面糙率、过滤带长度(带宽)、暴雨雨型及入流流量等因素对 VFS 效果的影响. 该模型也能够得到在每个时间步长里流出 VFS 的流量(q)、流速(V)和径流深(h).

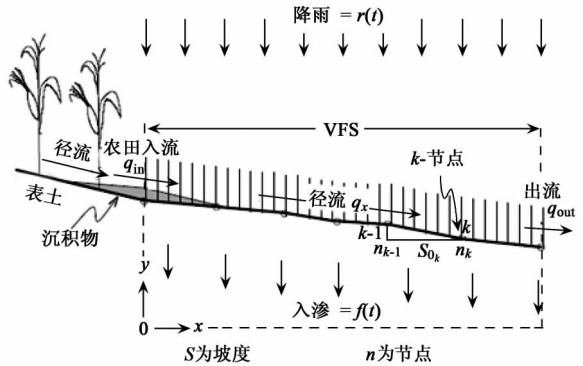


图 2 地表径流有限元子模型的离散域^[23]
Fig. 2 Domain discretization for the finite element overland flow submodel

泥沙输移子模型认为, 农田径流到达 VFS 的上边缘后, 由于植被的存在引起水流阻力的突然增加, 导致了水流流速的减缓和挟沙能力的降低, 从而造成主要以推移质形式运动的粗颗粒泥沙(粒径 $d_p >$

这部分参数包括:SS,过滤介质(草)茎秆间距(cm);VN,过滤介质修正糙率nm;*H*,过滤介质高度(cm);VN2,泥沙淤满过滤带后裸露表面的糙率.本次模拟输入的草间距和植株高度采用样方调查获得,1号、2号植被过滤带SS=2、*H*=5,3号植被过滤带SS=1.6、*H*=15;VN值均取0.012;VN2值均取裸露黏壤土的糙率0.02.

2.5 泥沙过滤模型泥沙特性参数的确定

NPART是按美国农业部(USDA)泥沙粒径分级标准对入流泥沙粒径进行分级的一个参数^[23],当采用的泥沙特性为实测值时,NPART=7;COARSE为入流泥沙中粒径>0.0037cm的泥沙所占的比例(如果是100%则为1),依据粒度仪对本次试验入流水样的分析结果,‘模拟的COARSE值均为0;CI为入流泥沙浓度(g/cm³),‘模拟的CI值采用过滤带进口断面水样的SS浓度;POR为沉积泥沙的空隙率,模型作者认为这并不是一个非常敏感的参数,在模拟时一般均将其值设定为0.437;DP为入流泥沙的中值粒径*d*₅₀(cm),只有在NPART=7时程序才读入DP值,本研究中各次模拟的DP值采用粒度仪实测的过滤带进口水样泥沙中值粒径;SG

为泥沙密度γ_s(g/cm³),只有在NPART=7时程序才读入SG值,SG取值见文献[23].

3 模拟结果与分析

为了评价VFSSMOD模型的模拟精度,本研究采用2个指标来表征模型模拟值与实测值的拟合度.

(1)模拟偏差(*D_v*),计算公式为:

$$D_v = \frac{V - V'}{V'} \times 100$$

式中,*V*为模型模拟值;*V'*为实测值;*D_v*值越趋向于0,则拟合越好.该指标符合评价指标应尽可能简化的原则^[25].

(2)绘制1:1连线图和回归曲线,反映水量和泥沙的拟合度.在1:1连线图上,数据点越接近1:1连线,则拟合度越高.判定系数*R*²越大,则表示模拟值与模拟值的相关关系越好.

采用VFSSMOD模型对8次放水试验进行了水量和泥沙模拟,植被过滤带出流量及出流泥沙浓度模拟值与实测值见表1;出流模拟值与实测值1:1连线图如图4所示.

表 1 植被过滤带出流量及出流泥沙浓度模拟值与实测值对照
Table 1 Simulated values and measured values of outflow by VFS in contrast

模拟序号	样本	水量/m ³		水量 <i>D_v</i> /%	泥沙浓度/mg·L ⁻¹		泥沙浓度 <i>D_v</i> /%
		模拟值	实测值		模拟值	实测值	
1	3号第1次10m	0.519	0.493	5.27	92	110	-16.36
	3号第1次15m	0.111	0.099	12.12	98	109	-10.09
2	3号第2次10m	0.583	0.63	-7.46	93	97	-4.12
	3号第2次15m	0.159	0.182	-12.64	78	96	-18.75
3	3号第3次10m	0.593	0.61	-2.79	138	151	-8.61
	3号第3次15m	0.165	0.167	-1.2	100	105	-4.76
4	3号第4次10m	0.557	0.663	-15.99	159	140	13.57
	3号第4次15m	0.16	0.202	-20.79	106	120	-11.67
5	1号第1次	1.224	1.218	0.49	107	120	-10.83
6	1号第2次	1.23	1.223	0.57	185	200	-7.5
7	2号第1次	1.62	1.58	2.53	105	118	-11.02
8	2号第2次	1.663	1.717	-3.15	218	296	-26.35

出流量模拟值与实测值的偏差多在±15%以内.最大偏差出现在3号过滤带第4次放水试验时,10m断面和15m断面出流量的模拟值偏差分别达到-15.99%和-20.79%,过滤带对地表径流量的实际削减量大于模型模拟值.这主要是由于3号过滤带在连续过水后,过滤带滞留水流的能力下降,且过滤带内部分刚性较小的植物发生了倒伏,但在模型模拟时这种变化没有反映出来,造成了模拟值的偏差.且在每次放水后,过滤带微地形均会有所变化,而在模

拟时采用的过滤带地形均是该过滤带第1次放水前的地形,在进行第4次放水前过滤带地形与第1次放水前的过滤带地形的差异要较第2次、第3次放水前的差异大,这也是造成3号过滤带第4次放水模拟结果偏差最大的原因.虽然部分模拟结果与实测值存在一定的偏差,但出流水量的模拟值和实测值的数据均较好地分布在1:1连线上,模拟值与实测值的判定系数*R*²达到0.995,表明模型较好地模拟了植被过滤带对地表径流水量的削减效果.

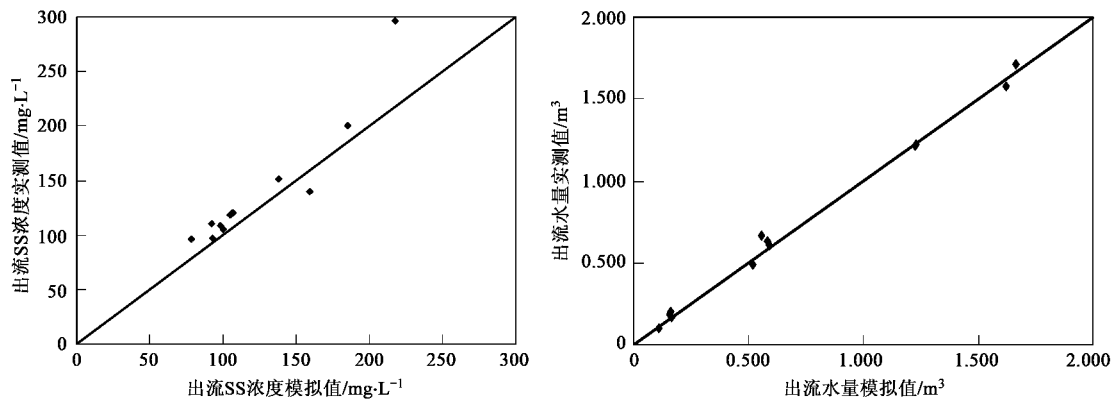


图 4 植被过滤带出流模拟值与实测值 1:1 连线图

Fig.4 1:1 continuous graph of the simulated values and measured values of outflow by VFS

出流 SS 浓度模拟值与实测值的偏差基本在 $\pm 20\%$ 以内. 最大偏差出现在 2 号过滤带第 2 次放水试验时,为 -26.35% ,这是由于 2 号过滤带沙棘下的草本植被群落欠发达,植被对过滤带表层土壤的保护作用较差,而 2 号过滤带第 2 次放水试验时采用的流量为 3.8 L/s ,属较大流量,有一部分表层松散土壤被冲刷进入水体中,引起实测值偏大. 另外,SS 浓度的模拟值除个别数据外,均小于实测值,其原因与 2 号过滤带第 2 次放水模拟值偏小的原因类似,均是由于 VFSMOD 模型在进行泥沙输移模拟时,只考虑了入流泥沙的运动,而没有考虑到植被过滤带内的枯枝落叶和表层土壤也有可能进入过滤带地表径流这一因素. 而言,SS 浓度的模拟偏差要大于水量的模拟偏差,除输沙模拟更复杂外,由于模型对泥沙输移的模拟是与水流运动模拟结合的,水流模拟的偏差也会影响泥沙输移模拟的偏差. 虽然模拟结果与实测值存在一定的偏差,但大多数出流 SS 浓度的模拟值和实测值的数据还是较好地分布在 1:1 连线上,模拟值与实测值的判定系数 R^2 为 0.889 ,模型对地表径流中泥沙削减情况的模拟精度较高.

4 讨论

目前 VFSMOD 模型仅能对植被过滤带的水量和泥沙进行模拟,应考虑在其基础上增加污染物迁移子模型,实现对其它非点源污染物特别是泥沙吸附态污染物削减情况的模拟. 另外,VFSMOD 模型已发展成一个可视化的集成软件 VFSMOD-W,该软件能够模拟降雨条件下非点源污染源区的产流产沙情况,并将其输入到 VFSMOD 模型中,计算一次降雨过程中植被过滤带对一定区域的地表径流和侵蚀泥

沙的削减情况,可将 VFSMOD-W 软件与 GIS 相结合,分析和模拟较大尺度下植被过滤带对水质保护的作用与效果.

关于土壤含水量等因素变化对植被过滤带净化效果(下渗、滞沙、减污)的作用与影响分析,笔者另文讨论^[22].

5 结论

(1)VFSMOD 模型对植被过滤带出流水量的模拟偏差多在 $\pm 15\%$ 以内,模拟值与实测值的判定系数 R^2 达到 0.995 ,说明该模型对植被过滤带地表径流具有良好的模拟能力.

(2)VFSMOD 模型对植被过滤带出流泥沙浓度的模拟精度比对出流水量的模拟精度稍低,但绝大多数仍在 $\pm 20\%$ 以内,模拟值与实测值的判定系数 R^2 为 0.889 ,模型精度能够满足植被过滤带规划设计的要求.

(3)VFSMOD 模型可用于国内植被过滤带的规划设计.

参考文献:

[1] 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.

[2] Barfield B J, Tollner E W, Hayes J C. The use of grass filters for sediment control in strip mining drainage, Vol. 1: Theoretical studies on artificial media [R]. Lexington: University of Kentucky,1978.

[3] Barfield B J, Tollner E W, Haye J C. Filtration of sediment by simulated vegetation I. Steady-state flow with homogeneous sediment[J]. Transactions of ASAE,1979,22(5):540-545.

[4] Hayes J C. Evaluation of design procedures for vegetal filtration of sediment from flowing water [D]. Lexington: University of Kentucky, 1979.

- [5] Hayes J C, Barfield B J, Barnhisel R I. Filtration of sediment by simulated vegetation II. Unsteady flow with non-homogeneous sediment [J]. Transactions of ASAE, 1979, **22**(5): 1063-1067.
- [6] Hayes J C, Barfield B J, Barnhisel R I. The use of grass filters for sediment control in strip mine drainage. III. Empirical verification of procedures using real vegetation [R]. Lexington: University of Kentucky, 1982.
- [7] Hayes J C, Barfield B J, Barnhisel R I. Performance of grass filters under laboratory and field conditions [J]. Transactions of ASAE, 1984, **27**(5): 1321-1331.
- [8] Tollner E W, Barfield B J, Haan C T, *et al.* Suspended sediment filtration capacity of simulated vegetation [J]. Transactions of ASAE, 1976, **19**(4): 678-682.
- [9] Tollner E W, Barfield B J, Vachirakornwatana C, *et al.* Sediment deposition patterns in simulated grass filters [J]. Transactions of ASAE, 1977, **20**(5): 940-944.
- [10] Wilson B N, Barfield B J, Moore I D. 1981. A Hydrology and Sedimentology Watershed Model, Part I: Modeling Techniques [R]. Lexington: University of Kentucky, 1981.
- [11] Knisel W G. CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems [R]. Washington DC: US Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1980.
- [12] Dosskey M G, Helmers M J, Eisenhauer D E. A Design Aid for Determining Width of Filter Strips [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, **63**(4): 232-241.
- [13] Muñoz-Carpena, Zajac R Z, Kuo Y M. Evaluation of water quality models through global sensitivity and uncertainty analyses techniques: application to the vegetative filter strip model VFSMOD-W [J]. Transactions of ASAE, 2007, **50**(5): 1719-1732.
- [14] Muñoz-Carpena R, Parsons J E, Gilliam J W. Modeling hydrology and sediment transport in vegetative filter strips [J]. Hydrology, 1999, **214**: 111-129.
- [15] Gharabaghi B, Rudra R P, Whiteley H R, *et al.* Improving removal efficiency of vegetative filter strips [R]. ASAE Paper, 2000. No. 00-2083. ASAE, St. Joseph, MI.
- [16] Abu-Zreig M, Rudra R P, Whiteley H R. Validation of a vegetated filterstrip model (VFSMOD) [J]. Hydrological Process, 2001, **15**: 729-742.
- [17] Sabbagh G J, Fox G A, Kamanzi A, *et al.* Effectiveness of vegetative filterstrips in reducing pesticide loading: quantifying pesticide trapping efficiency [J]. Journal of Environmental Quality, 2009, **38**(2): 762-771.
- [18] Kuo Y M, Muñoz-Carpena R. Simplified modeling of phosphorus removal by vegetative filterstrips to control runoff pollution from phosphate mining areas [J]. Journal of Hydrology, **378**(2009): 343-354.
- [19] Yang W, Weersink A. Cost-effective targeting of riparian buffers [J]. Canadian Journal of Agricultural, 2004, **52**: 17-34.
- [20] White M J, Arnold J G. Development of a simplistic vegetative filterstrip model for sediment, nutrient retention at the field scale [J]. Hydrological Process, 2009, **23**: 1602-1616.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [22] 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, (6): 176-181.
- [23] Muñoz-Carpena R, Parsons J E. VFSMOD-W model documentation and user's manual [M]. University of Florida, 2005.
- [24] Rawls W J, Brakensiek D L. A procedure to predict Green-Ampt infiltration parameter Adv. in infiltration [M]. ASAE, 1983. 102-112.
- [25] Martinec J, Rango A. Merits of statistical criteria for the performance of hydrological models [J]. Water Resources Bulletin, 1989, **25**(20): 421-432.