

植被过滤带对悬浮固体净化效果的模拟*

邓娜^{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湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410126)

摘要 数学模型是进行植被过滤带(VFS)设计的重要工具。本研究通过分析植被过滤带对径流中悬浮固体的净化机理,采用植被过滤带田间尺度机理模型 VFSMOD 和修正的土壤侵蚀模型 MUSLE 耦合,对植被过滤带的悬浮固体净化效果进行模拟,并利用野外小区试验数据对该耦合模型进行了验证。结果表明,植被过滤带出流悬浮固体浓度模拟值与实测值的偏差多在 $\pm 20\%$ 以内,其模拟值与实测值的判定系数 R^2 为 0.98,该模型具有较高的精度,且优于 VFSMOD 模型,可用于我国植被过滤带的规划设计。

关键词 植被过滤带; VFSMOD 模型; MUSLE 模型; 悬浮固体; 净化效果

中图分类号 S963 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2012)11-2976-05

Purification effect of vegetative filter strip on suspended solids in surface runoff: A simulation study. DENG Na^{1,2**}, LI Huai-en¹, SHI Dong-qing¹ (¹Northwest Water Resources and Environment Ecology, Key Laboratory of Ministry of Education at Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; ²Department of Resource and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410126, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2012, 31(11): 2976-2980.

Abstract: Mathematical model is an important tool for the planning and design of vegetative filter strips (VFS). Through the analysis on the purification mechanisms of VFS to suspended solids in surface runoff, a mathematical model which coupled the field scale mechanism model VFSMOD and the revised soil erosion model MUSLE was designed to simulate the purification effect of VFS on the suspended solids in surface runoff. The applicability and performance ability of this coupling model were validated by field plot experiment. The results showed that the relative deviations between the simulated and measured values of the concentrations of suspended solids were within $\pm 20\%$, and the determination coefficients between the simulated and measured values were 0.98, suggesting that this coupling model had a high precision and was superior to VFSMOD model, being able to be used as a tool for the planning and design of VFS in China.

Key words: vegetative filter strip; VFSMOD model; MUSLE model; suspended solid; purification effect.

植被过滤带可以有效地拦截、滞留悬浮固体(主要是泥沙),显著降低非点源污染的影响,成为控制非点源污染的生态工程技术主要措施之一(李怀恩等,2006)。数学模型是进行植被过滤带设计的重要工具,目前国外常用的植被过滤带输沙模型有 VFSMOD 模型和 REMM 模型等,而 REMM 模型需要的数据量大,实际应用较为困难(Lowrance *et al.*, 2000; Altier *et al.*, 2002)。VFSMOD 模型是田间尺度的简单模型(Rafael & John, 2005),在美欧等

国得到了广泛的应用(Dosskey *et al.*, 2008; Kuo & Muñoz-Carpen, 2009; Sabbagh *et al.*, 2009),效果好。2005 年 VFSMOD 模型被美国环保局(USEPA)用来评价植被过滤带在最佳管理措施(BMPs)中的效率。

国内对于过滤效果定量计算的模型模拟研究较少,不仅没有自主开发的相关模型,对国外模型的检验与运用也报道较少(杨寅群等,2010),多数研究为建立影响因素与过滤效果之间的相关关系(黄沈发等,2009),还不能满足不同地区不同条件下植被过滤带设计的需要。因此,本研究基于植被过滤带对径流中悬浮固体的净化机理,建立植被过滤带对

* 国家自然科学基金项目(50979090)和国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-002-004-002)资助。

** 通讯作者 E-mail: dengna37@yahoo.cn

收稿日期: 2012-05-10 接受日期: 2012-08-07

悬浮固体净化效果的模拟模型,用于指导植被过滤带的设计和管理。

1 研究区域和方法

1.1 试验概况

试验场位于陕西华县的小华山水库旁,按照“接近自然、成本低廉、宜于推广”的设计原则,试验采用的过滤带植被为自然萌生的野生草本植物和沙棘(*Hippophae rhamnoides sub. sinensis*)。在试验场建有1个4 m×3.5 m的蓄水池,用于向各植被带提供水源并模拟地表径流,每个过滤带出口处建有集水池,用于收集试验带的出流。试验设计了4条植被过滤带,坡度均为2%,按1~4进行编号:1#尺寸为3 m×10 m,自然草本和3~6 m有少量沙棘的混合过滤带;2#尺寸为3 m×10 m,自然草本和3~9 m间种沙棘;3#为3 m×10 m和3 m×15 m两个断面的自然草本过滤带;4#尺寸为2.5 m×15 m,自然草本和4~13 m间种沙棘的混合过滤带。试验场的土壤为砂壤土,土壤有机质含量为25.4~38.3 g·kg⁻¹。

向蓄水池中加入预先混合化肥的坡面表层土来模拟地表径流,通过放水试验采集植被过滤带进出口水样,并用质量法测定悬浮固体质量浓度,在2008—2010年均进行了相关放水试验。

1.2 研究思路

为了研究植被过滤带对径流中悬浮固体的净化机理,在2010年的试验中采集了4条植被过滤带(编号为1#~4#)进出口集水池的混合水样,用马尔文激光粒度分析仪分析了进、出口泥沙粒径分布的变化。各植被过滤带进、出口水样中泥沙颗粒的粒径分布变化见表1。

由表1可知,对于粒径为0.01~1 μm的泥沙,在各植被过滤带出流水样中该粒径下的泥沙体积百分比相对于进口有增加幅度小,而1~10 μm的颗

粒在4条过滤带出流水样中所占的百分比相对于进口该粒径下的泥沙体积比例扩大了近2倍,说明水流经过植被过滤带时也会携带表层土壤中的一些细小颗粒,使出流水样中的细颗粒增多。对于粒径为10~30 μm的泥沙,3#和4#过滤带出流水样中泥沙粒径的体积百分比相对于进口减小;当泥沙的粒径>30 μm时,4条过滤带出口处的泥沙体积比均有所减小,粒径越大其体积比例削减幅度也越大,因此植被过滤带对粗颗粒的净化效果较好。

由以上分析,综合文献(李怀恩等,2010;邓娜等,2011)试验结果,植被过滤带对地表径流中悬浮固体或者泥沙的作用过程包括两个方面,一方面是植被过滤带对地表径流中悬浮固体的净化过程,另一方面是植被过滤带坡面自身侵蚀的过程,一般情况下,这两个过程是同时存在的。

因此,在计算植被过滤带出流中悬浮固体质量时,可分成两部分:植被拦截VFS上边缘径流中悬浮固体即净化过程的余量,与VFS自身坡面侵蚀即产沙过程的量之和。

1.3 计算方法

1.3.1 水文模拟 水文模拟利用VFSMOD子模型计算,用运动波方程计算径流深度和流量,用Green-Ampt公式计算径流的入渗量。将植被过滤带划分成若干段,允许系统不同节点的糙率和坡度存在空间变异,能得到在每个时间步长里流出VFS的流量、流速和径流深。

1.3.2 泥沙输移模拟

a) 净化过程

利用VFSMOD泥沙输移子模型(Rafael & John, 2005)模拟植被过滤带对悬浮固体的净化过程,该模型认为: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突然增加,导致了水流流速减缓和挟沙能力降低,从而造成主要以推移质形式

表1 各个植被过滤带进出口水样中泥沙粒径统计

Table 1 Grain diameter statistics at import and export of each vegetative filter strip

VFS	各个粒径范围的百分比(%)								
	0.01~0.5 μm	>0.5~1 μm	>1~10 μm	>10~30 μm	>30~50 μm	>50~80 μm	>80~100 μm	>100~250 μm	
进口	1#	0.8	4.06	30.39	35.5	18.98	9.1	1.17	0
	2#	0.65	3.49	26.45	34.65	20.83	10.96	2.1	0.87
	3#	0.71	3.99	34.28	38.04	16.35	6.52	0.1	0
	4#	0.72	4.3	37.61	40.48	13.05	3.51	0.28	0.04
出口	1#	0.71	4.88	55.88	33.13	4.58	0.82	0	0
	2#	0.73	4.8	53.13	35.94	5.24	0.16	0	0
	3#	0.81	5.39	61.6	29.85	2.35	0	0	0
	4#	1.01	6.21	65.15	25.32	1.99	0.32	0.01	0

运动的粗颗粒泥沙(粒径 $d_p > 0.0037 \text{ cm}$)的沉积。计算程序使用改进的曼宁明渠流公式、连续方程和 Einstein 推移质运动公式。

b) 产沙过程

参考已有研究(Rafael & John, 2005; 李怀恩等, 2010), VFSMOD 泥沙输移子模型是以拦截过滤为主。植被过滤带的净化过程中还伴随有非点源污染物产生的现象, 此模型没有考虑其自身产生污染的影响, 使模拟的净化效果偏高。因此, 考虑用坡面侵蚀经验模型对植被过滤带自身产沙过程进行模拟。

根据国内外建立坡面土壤侵蚀模型的成功经验(Renard *et al.*, 1991; 江忠善等, 2005; 秦伟等, 2010), 坡面的侵蚀量采用修正的通用土壤侵蚀方程(MUSLE)(郝芳华等, 2006)来计算, 区别于 USLE 模型, MUSLE 模型考虑了径流对侵蚀产沙的影响, 计算公式如下:

$$Y = 11.8(Q \cdot q_p)^{0.56} \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中: Y 为单次降雨侵蚀产沙量(t); Q 为径流量(m^3), q_p 为峰值流量($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子; LS 为地形因子; C 为植被覆盖与管理因子; P 为水土保持因子。本研究坡面面积较小, 土壤可蚀性因子统一采用下式计算:

$$K = \{0.2 + 0.3 \exp[-0.0256S_a(1 - S_i/100)]\}$$

$$\left(\frac{S_i}{C_1 + S_i}\right)^{0.3}$$

$$\left[1 - \frac{0.25C_0}{C_0 + \exp(3.72 - 2.95C_0)}\right]$$

$$\left[1 - \frac{0.7S_n}{S_n + \exp(-5.51 + 22.9S_n)}\right] \quad (2)$$

式中: $S_n = 1 - S_a/100$, S_a 为粒径在 0.05 ~ 2.00 mm 沙粒的百分含量(%); S_i 为粒径在 0.002 ~ 0.05 mm 的淤泥、细沙百分含量(%); C_1 为粒径小于 0.002 mm 的黏土百分含量(%)。

$$LS = \left(\frac{L}{22.1}\right)^m \times (65.41 \sin^2 a + 4.56 \sin a + 0.0654)$$

$$m = 0.6 \times (1 - \exp(-35.835S_0)) \quad (3)$$

式中: a 为坡度角($^\circ$); S_0 为坡度(%); L 为坡长(m); m 为坡长指数。

c) 耦合模拟

VFSMOD 泥沙输移子模型可计算出植被过滤带入流悬浮固体被拦截的量; 修正的土壤侵蚀方程已考虑植被覆盖度因子, 可以直接计算 VFS 出流中的

自身产沙量。本研究采用松散耦合的方式(王盛萍等, 2010)结合 VFSMOD 模型和 MUSLE 模型的模拟值, 即 MUSLE 模型模拟的产沙量除以通过水文模拟计算出的植被过滤带出流量得到自身产沙的质量浓度, 加上 VFSMOD 模型计算出的浓度值, 得 VFS 出流中总的悬浮固体浓度值。本研究利用 2008—2010 年试验实测数据对模型进行验证。

2 结果与分析

2.1 模型参数选择

VFSMOD 模型的参数选择见文献(杨寅群等, 2010)。

通用土壤侵蚀方程中 K 和 LS 因子由式(2)、(3)计算; 因是放水试验, 径流量和峰值流量由试验直接测定; C 和 P 因子是由实际试验的情况依据水文学手册(Maidment, 2002)选定。

C 值的确定要考虑试验时植被的不同情况, 如 2008 年试验时, 植被覆盖度达到了 95% 以上, 因此 3# 自然草地过滤带 C 值选为 0.003, 1#, 2# 过滤带根据沙棘灌木下草本情况 C 值分别选为 0.006 和 0.01(李怀恩等, 2010); 2009 年试验时, 植被覆盖度约 80% ~ 90%, 且沙棘下草本部分死亡, 有未腐烂的枯枝残叶, 从而 C 值选为 0.011 ~ 0.02; 2010 年 9、10 月试验时, 植被覆盖度约 40% ~ 60%, C 值选为 0.042 ~ 0.09。

2.2 模拟结果

为评价模型的模拟效果, 采用以下两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

$$D_v = \frac{V - V'}{V'} \times 100(\%) \quad (4)$$

式中: V 为模型模拟值; V' 为实测值; D_v 值越趋向于零, 则拟合越好。

(2) 绘制 1:1 连线图和回归曲线, 来反映拟合度。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, 则表示模拟值与实测值的相关关系越好。植被过滤带出流悬浮固体浓度的 VFSMOD 模型和耦合模型模拟结果如表 2 所示。

由表 2 可知, 出流 SS 浓度的耦合模型模拟值与实测值的偏差基本在 $\pm 20\%$ 以内, 明显优于 VFSMOD 模型的模拟值。其中 20080904 号试验中耦合

表2 植被过滤带出流 SS 浓度模拟值与实测值对照

Table 2 Comparison of simulated values and measured values of SS in outflow by VFS

模拟编号	样本	入流量	进口浓度	出流 SS 浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)			耦合模型 模拟偏差 (%)
				VFSMOD 模拟值	耦合模型 模拟值	实测值	
20080901	3# 10 m	0.0023	1630	92	105	110	-4.55
	3# 15 m			98	113	109	3.67
20080902	3# 10 m	0.0023	1645	93	104	97	7.22
	3# 15 m			78	91	96	-5.21
20080903	3# 10 m	0.0023	2845	138	150	151	-0.66
	3# 15 m			100	114	105	8.57
20080904	3# 10 m	0.0038	1675	159	173	140	23.57
	3# 15 m			106	122	120	1.67
20080905	1#	0.0023	1735	107	118	120	-1.67
20080906	1#	0.0023	2700	185	197	200	-1.50
20080907	2#	0.0023	1670	105	120	118	1.69
20080908	2#	0.0038	1580	218	246	296	-16.89
20090901	1#(干)	0.0075	90	21	125	110	13.64
20090902	2#	0.0112	80	33	140	140	0.00
20090903	1#	0.0071	231	49	191	230	-16.96
20090904	3# 10 m	0.0070	221	38	136	160	-15.00
20100901	1#	0.0045	4010	446	905	853	6.16
20100902	2#	0.0041	4910	675	1069	1096	-2.46
20100903	3# 10 m	0.0040	4980	474	1094	1054	3.80
	3# 15 m			401	1103	1024	7.71
20100904	4#	0.0047	4182	428	1038	1070	-2.99
20101001	1#	0.0035	3748	247	1110	1341	-17.23
20101002	2#	0.0043	2944	188	1141	1174	-2.81
20101003	3# 10 m	0.0039	3374	300	1047	1207	-13.26
	3# 15 m			246	1092	1010	8.12
20101004	4#	0.0039	2466	223	1180	1141	3.42

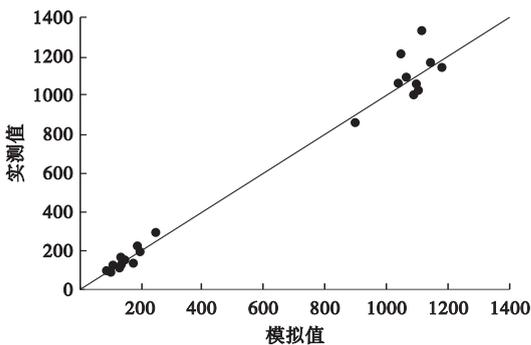


图1 植被过滤带出流 SS 浓度的耦合模型模拟值与实测值 1:1 连线图

Fig.1 1:1 continuous graph of simulated values of coupling model and measured values of SS in outflow by VFS

模型的模拟偏差 $>20\%$, 该 VFSMOD 模拟值也高于实测值, 可能是其实测值有一定的误差。

表2中 VFSMOD 模型模拟值与实测值比较, 除个别数据外, 均小于实测值, 进一步说明 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表层土壤也有可能进入过滤带地表径流中这一因素(杨寅群等, 2010)。此外, 在入流流量较大和植被覆盖度较低的情况下, VFSMOD 模型的模拟值与实测值相差较大, 并不能满足植被过滤带规划设计的要求。

从图1可知, 大多数出流 SS 浓度的耦合模型模拟值和实测值的数据还是较好地分布在 1:1 连线附近, 模拟值与实测值的判定系数 R^2 为 0.98, 认为该耦合模型能够较好地模拟植被过滤带对地表径流中悬浮固体的净化效果。

此外, 在植被较差的情况下即 2010 年的试验中, 植被过滤带出流悬浮固体的浓度实测值较大, 在图1中数据点也离 1:1 连线较远, 主要原因为植被覆盖度较低时植被过滤带自身产生的侵蚀较大, 即坡面产沙量较大, 而经验的通用土壤侵蚀方程由于其参数的选择有一定的主观性, 使其模拟的误差较大。可见, 植被覆盖和管理因子是影响模拟精度的重要因子。

3 结 语

本研究基于植被过滤带对径流中悬浮固体的净化机理,对其净化效果进行模拟。模拟分两个过程,即植被的拦截净化过程和植被过滤带自身的产沙过程,利用 MUSLE 模型与植被过滤带简单的机理模型 VFSMOD 耦合计算。

由野外试验实测数据验证知,该耦合模型对植被过滤带出流悬浮固体浓度的模拟精度绝大多数在 $\pm 20\%$ 以内,模拟值与实测值的判定系数 R^2 为 0.98,且耦合模型精度优于 VFSMOD 模型,能够满足植被过滤带规划设计的要求,可用于国内植被过滤带的规划设计。

该耦合模型是在 VFSMOD 模型的基础上,考虑了植被带自身的侵蚀产沙过程,从而提高了模拟精度。其净化过程采用 VFSMOD 模型,能较好地模拟植被过滤带拦截的泥沙量,但输出结果存储在自带的数据库中,自动读取不易,可据其原理自行计算。此外,产沙过程选用经验的通用土壤侵蚀方程 MUSLE 模型,对于我国的一些坡度较大、植被条件较差的区域,由经验也可估算植被过滤带对悬浮固体的净化效果,但其参数的选择有一定的主观性,且植被覆盖和管理因子是影响模拟精度的重要因子。

参考文献

邓 娜,李怀恩,史冬庆,等. 2011. 植被过滤带非点源污染及其对净化效果的影响. 西安理工大学学报, **27**(4): 400-407.

郝芳华,程红光,杨胜天. 2006. 非点源污染模型:理论方法与应用. 北京:中国环境科学出版社.

黄沈发,唐 浩,鄢忠纯,等. 2009. 3 种草皮缓冲带对农田径流污染物的净化效果及其最佳宽度研究. 环境污染与防治, **31**(6): 53-57.

江忠善,郑粉莉,武 敏. 2005. 中国坡面水蚀预报模型研究. 泥沙研究, (4): 1-6.

李怀恩,邓 娜,杨寅群,等. 2010. 植被过滤带对地表径流中污染物的净化效果. 农业工程学报, **26**(7): 81-

86.

李怀恩,张亚平,蔡 明,等. 2006. 植被过滤带的定量计算方法. 生态学杂志, **25**(1): 108-112.

秦 伟,朱清科,张 岩. 2010. 通用土壤流失方程中的坡长因子研究进展. 中国水土保持科学, **8**(2): 117-124.

王盛萍,张志强,唐 寅,等. 2010. MIKE-SHE 与 MUSLE 耦合模拟小流域侵蚀产沙空间分布特征. 农业工程学报, **26**(3): 92-98, 386.

杨寅群,李怀恩,史冬庆. 2010. VFSMOD 模型对植被过滤带净化效果的模拟与适应性分析. 环境科学, **31**(11): 2613-2618.

Maidment DR. 2002. 水文学手册. 北京:科学出版社.

Altier LS, Lowrance R, Williams RG, et al. 2002. Riparian ecosystem management model: Simulator for ecological processes in riparian zones. United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Conservation Research Report.

Dosskey MG, Helmers MJ, Eisenhauer DE. 2008. A design aid for determining width of filter strips. *Journal of Soil and Water Conservation*, **63**: 232-241.

Kuo YM, Muñoz-Carpena R. 2009. Simplified modeling of phosphorus removal by vegetative filter strips to control runoff pollution from phosphate mining areas. *Journal of Hydrology*, **378**: 343-354.

Lowrance R, Altier LS, Williams RG, et al. 2000. REMM: The riparian ecosystem management model. *Journal of Soil and Water Conservation*, **55**: 27-34.

Rafael MC, John EP. 2005. Vegetative Filter Strips Hydrology and Sediment Transport Modelling System Documentation and User's Manual. Florida: Institute Food and Agricultural Sciences University of Florida.

Renard KG, Foster GR, Weesies GA, et al. 1991. RUSLE revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, **46**: 30-33.

Sabbagh GJ, Fox GA, Kamanzi A, et al. 2009. Effectiveness of vegetative filter strips in reducing pesticide loading: Quantifying pesticide trapping efficiency. *Journal of Environmental Quality*, **38**: 762-771.

作者简介 邓 娜,女,1979 年生,博士研究生,主要从事生态水文与水资源保护研究. E-mail: dengna37@yahoo. cn
责任编辑 魏中青
