

基于水文和土壤侵蚀模型评估植被过滤带净化径流中氮磷的效果

邓 娜¹, 李怀恩^{2*}

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128;

2. 西安理工大学西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 西安 710048)

摘 要: 为了方便快速地评估单次径流条件下植被过滤带对污染物氮、磷的净化效果, 该文设计了地表径流的模拟放水试验, 分析了泥沙与颗粒态污染物的相关性, 依据土壤混合层概念简化了土壤污染物的输移, 建立了植被过滤带对污染物作用效果的估算模型。结果表明: 径流中颗粒态氮、磷含量与泥沙含量有显著相关性 ($P < 0.05$), 据此建立线性相关方程, 估算出植被过滤带对颗粒态污染物的净化效果, 其 86% 以上样本的颗粒态氮、磷质量浓度模拟偏差均在 $\pm 20\%$ 之内; 溶解态氮、磷的迁移分两部分, 即发生于坡面地表径流中和土壤混合层中, 分别根据质量平衡原理建立方程对溶解态污染物的迁移进行了模拟, 验证得到 83% 以上样本的溶解态氮质量浓度模拟偏差在 $\pm 20\%$ 之内, 67% 以上样本的溶解态磷质量浓度模拟偏差也在 $\pm 20\%$ 之内, 研究表明, 可以基于土壤混合层概念和水文及土壤侵蚀模型对植被过滤带净化效果进行评估。

关键词: 土壤; 氮; 磷; 植被过滤带; 净化效果; 评估

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.022

中图分类号: X171.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-18-0155-07

邓 娜, 李怀恩. 基于水文和土壤侵蚀模型评估植被过滤带净化径流中氮磷的效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 155—161. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.022 http://www.tcsae.org

Deng Na, Li Huaen. Assessment on retention efficiency of vegetative filter strips to nitrogen and phosphorus in surface runoff based on hydrology and soil erosion model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(18): 155—161. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.18.022 http://www.tcsae.org

0 引 言

由于地表汇流是污染物输移的主要路径, 在污染源和接纳水体间设置植被过滤带 (vegetative filter strip, VFS) 被认为是拦蓄径流污染物的“最佳管理措施”^[1-2]。数学模型是进行植被过滤带设计的重要工具, 如植被过滤带模型 (vegetative filter strip model, VFSMOD) 在欧美等国得到了广泛的应用^[3-6], 该模型被用来计算单次降雨径流条件下草地过滤带对泥沙的净化效果, 但不能模拟对其他污染物的削减效果。目前, 计算氮磷污染物去除效率的模型较少, 最典型的是由 Lowrance R 等^[7-11]开发的河岸生态系统管理模型 (riparian ecosystem management model, REMM), REMM 模型对植被过滤带净化过程描述较详细, 但模拟需要的数据量大, 包括每日气象数据、田间数据、河岸带及土壤数据、植被数据等 160 个指标^[7], 在中国实际应用起来较为困难, 且该模型未考虑季节的变化, 其模拟结果为植被过滤带的年平均净化效果。有学者将 VFSMOD 模型与生态水文模型

如 SWAT (soil and water assessment tool) 模型或农业非点源污染模型 (agricultural non point source pollution model, AGNPS) 耦合进行流域尺度上的模拟和应用^[12-13], 从整个流域角度对植被过滤带进行空间配置, 如 Sahu M 等利用 SWAT 模型设计了河岸等宽植被带和等高线植被带^[14], 但生态水文模型的重点放在流域的产汇流方面, 是对整个流域非点源污染物的输出进行评估, 并没有将植被过滤带作为一个独立的纳污系统进行模拟。然而污染物在土壤中及植被过滤带内的输移过程较复杂, 需将植被过滤带、地表径流及其土壤层作为相互作用的系统进行深刻描述, 因此, 无法直接利用 AGNPS 和 SWAT 等生态水文模型设计不同田间条件和不同功能的植被过滤带。

国内对于植被过滤带过滤效果定量计算的模型研究还远远不够, 多为 VFSMOD 模型在中国部分地区的检验报道^[15-16], 缺乏植被过滤带对其他污染物的净化效果模拟研究, 不能满足非点源污染控制的需要。此外, 不同季节, 不同的使用和管理方式, 以及在不同的降雨径流过程中, 植被、土壤、水文等条件不同, 植被过滤带对非点源污染物的净化效果将有较大的差异^[1-2]。基于此, 本文综合考虑影响植被过滤带过滤效率的多个因素, 提出了单次径流条件下植被过滤带系统对非点源污染物氮、磷净化效果的评估方法, 进而对植被过滤带的设计提供参考依据。

1 试验概况

试验场位于陕西华县小华山水库的左岸坡地, 按照

收稿日期: 2015-06-10 修订日期: 2015-08-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51279158, 51409101)

作者简介: 邓 娜, 女 (汉族), 湖南永州人, 讲师, 博士, 主要从事生态水文与水资源保护方面的工作。长沙 湖南农业大学资源环境学院, 410128。Email: na.home@163.com

*通信作者: 李怀恩, 男 (汉族), 陕西商南人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态水文、非点源污染与生态环境保护方面的科研与教学工作。西安 西安理工大学水利水电学院, 710048。Email: lhuaien@mail.xaut.edu.cn

“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。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 间种沙棘的混合过滤带; 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 2 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。另 5#为 3 m×15 m 无植被的空白对照带。

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, 同时记录出流速度和进出水量, 详细的试验设计可参考文献[17-18]。用质量法测定悬浮固体质量浓度, 用碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定总氮和溶解态氮素质量浓度, 颗粒态氮即为总氮与溶解态氮素质量浓度相减, 并用过硫酸钾氧化-钼锑抗比色法测定总磷和溶解态磷素质量浓度, 其溶解态氮、磷的质量浓度均用 0.45 μm 微孔滤膜过滤后的水样测定, 在 2008—2010 年均进行了相关放水试验。

为了更贴近实际, 试验所用泥沙取自试验场周围地表 0~5 cm 的表土, 并用 5.0 mm 的网筛去除较大的石块, 树叶以及一些植物根茬等, 经风干, 土质为沙壤土, 有机质质量分数约 16.14 g/kg, 速效磷约 10.85 g/kg, 土壤组成中, 颗粒粒径 ≥ 0.5 mm 的仅占 4.55%, 土壤颗粒粒径 < 0.5 mm 的占 95.45%。试验入流流量依据国内外相关研究, 植被过滤带中水流要求为漫流而避免有集中水流, 其中单宽流量一般为 0.0004~0.004 m³/(s·m)。入流水质参考了陕西省关中地区非点源污染监测资料, 泥沙的浓度为 50~5 000 mg/L, 总氮浓度为 1~20 mg/L, 总磷浓度为 0.02~4 mg/L。

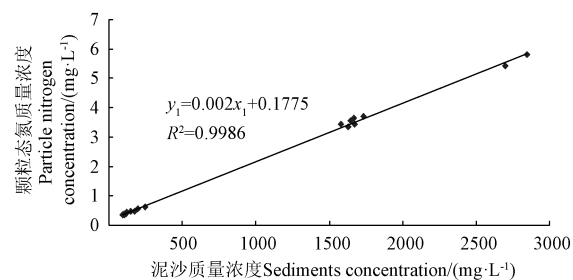
2 模型建立

本文假设: 营养物在地表径流主要以溶解态、颗粒或沉淀物结合的形式存在。据此分别就植被过滤带对颗粒态氮、磷和溶解态氮、磷的净化效果进行估算。

2.1 植被过滤带对颗粒态氮、磷净化效果的估算方法

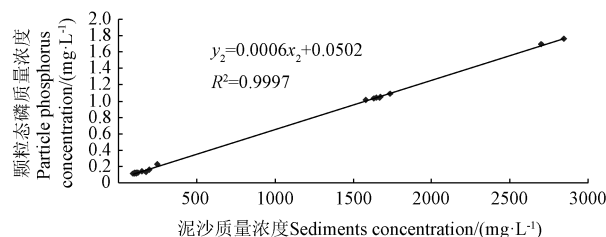
依据国内外相关研究^[1-2, 17-19]分析可知, 植被过滤带径流中颗粒态污染物主要随泥沙沉淀而得以削减。颗粒态氮(PN)和颗粒态磷(PP)的性质较稳定, 根据实测数据可确定地表径流中颗粒态氮、磷质量浓度与泥沙质量浓度的相关关系。因此, 可基于水文和泥沙输移模型(详见文献[20])模拟得到植被过滤带出流中的泥沙质量浓度, 并利用此相关性来估算植被过滤带对地表径流中颗粒态污染物的净化效果。

在本研究试验场, 此相关分析采用 2008 年实测的植被过滤带进出口泥沙和颗粒态氮、磷质量浓度数据, 共有 8 次不同植被过滤带(1#~3#)的放水试验(1~8 号), 如表 1 所示。实测 2008 年野外放水试验径流中泥沙质量浓度与颗粒态氮、磷质量浓度的关系如图 1 所示。



a. 径流中泥沙质量浓度与颗粒态氮质量浓度的关系图

a. Relational graph of particle nitrogen and sediments concentration in surface runoff



b. 径流中泥沙质量浓度与颗粒态磷质量浓度的关系图

b. Relational graph of particle phosphorus and sediments concentration in surface runoff

图 1 径流中泥沙质量浓度与颗粒态氮、磷质量浓度的关系图
Fig.1 Relational graph of particle nitrogen, particle phosphorus and sediments concentration in surface runoff

由图 1 可见, 植被过滤带径流中颗粒态氮、磷与泥沙含量呈显著相关 ($P < 0.05$), 并根据实测数据建立了线性相关方程, 其相关系数 R^2 分别为 0.9986 和 0.9997。因此, 可利用此相关方程来估算本试验中植被过滤带出流颗粒态污染物的质量浓度。

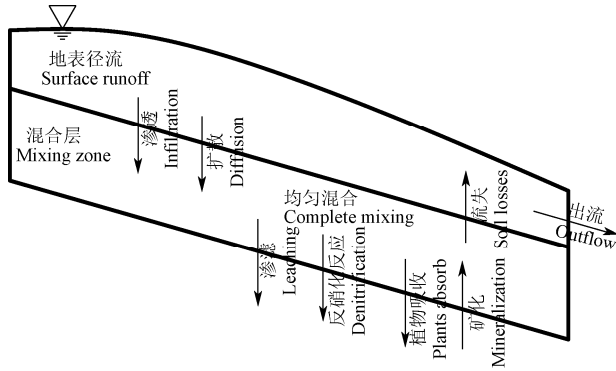
2.2 植被过滤带对溶解态氮、磷净化效果的估算模型

对于溶解态污染物, 由以往相关研究^[17-19]可知其削减主要是靠下渗实现, 拟采用土壤污染物与地表径流的相互作用机理进行分析。根据 Havis 提出的“混合区(Mixing zone)”概念^[21-22], 对深层土壤的污染物进行了简化, 从土壤中的污染物质量守恒出发, 下渗的污染物对土壤污染物进行了补给, 因而可据此建立方程计算溶解态氮、磷的输移量。本研究假设: 入渗是唯一能去除溶解态污染物的机制, 即植被过滤带入流溶解态氮、磷只有通过渗透和扩散到土壤层才能削减, 其他过程对其无影响; 下渗的溶解态氮、磷进入到土壤后, 在混合层均匀混合, 并进行一系列生物化学过程(矿化、反硝化反应、植物吸收、吸附或解吸), 由渗滤和再次流失到地表径流中将土壤中溶解氮、磷带出坡面; 溶解态氮、磷的输移分两部分: 发生于坡面地表径流中和土壤混合层中。模型概化原理见图 2 所示, 忽略雨水中污染物的输入。

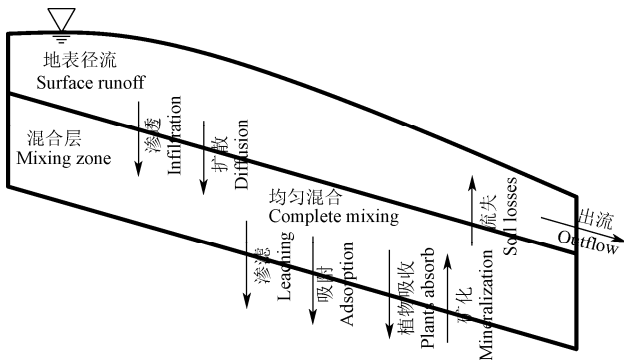
忽略混合区深度随时间的变化, 根据质量平衡原理可以得出下面方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial(Ch)}{\partial t} + \frac{\partial(uCh)}{\partial x} = -K(C - C_m) - fC + S_1 \\ n\varepsilon \frac{\partial C_m}{\partial t} = K(C - C_m) + fC + S_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中： x 为沿坡面向下方向（即带宽）， m ； t 为时间， s ； C 为坡面地表径流中的溶解态氮磷浓度， g/m^3 ； h 为径流深， m ； u 为坡面流流速， m/s ； C_m 为混合层内的溶解态氮磷浓度， g/m^3 ； K 为污染物的薄层传导系数， m/s ； f 为入渗率， m/s ； ε 为混合层的深度， m ； n 为土壤孔隙度， $\%$ ； S_1 为污染物从土壤中流失的源汇项， $g/(m^2 \cdot s)$ ； S_2 为土壤混合层的源汇项， $g/(m^2 \cdot s)$ ，源汇项可化为 $K_d C_m$ 形式， K_d 为表征各作用能力的系数， m/s 。



a. 溶解态氮的模拟概化
a. Generalized simulation of dissolve nitrogen



b. 溶解态磷的模拟概化
b. Generalized simulation of dissolve phosphorus

图 2 溶解态氮、磷的模拟概化原理图

Fig.2 Generalized elementary diagram of dissolve nitrogen and dissolve phosphorus

对于方程（1），初始条件： $C(x, 0)=0, C_m(x, 0)$ 即土壤初始浓度值，上边界条件 $C(0, t)$ 即植被过滤带入流污染物浓度值已知，根据隐式差分的 Preissmann 格式，运用 MATLAB 工具包编程可求解，能估算出植被过滤带净化效果随带宽 x 和时间 t 的变化。

在本研究试验中，放水水量约为 $2.8 m^3$ ，放水时间较短为 $4 \sim 20 min$ ，矿化和植物吸收等作用较小，因此忽略矿化和植物吸收过程。对于溶解态氮， S_2 源汇项考虑反硝化反应、渗滤和地表径流流失对土壤氮的输入输出。对于溶解态磷，源汇项主要考虑土壤对磷的吸附、渗滤和随地表径流流失量，其简化计算如下：

1) 反硝化作用

反硝化作用是将 NO_2^- 和 NO_3^- 降解为氮气态形式的过程，通常是在厌氧条件下进行。反硝化作用仅在土壤水

分充满 90% 孔隙以上时发生。参考文献[23]，反硝化作用丢失溶解态氮量的估算方程为：

$$\begin{cases} FN = (1 - \exp(-1.4 \cdot F_T \cdot orgC)) \times \frac{inDN_t \cdot conv}{1000000} & F_w > 0.9 \\ FN = 0 & F_w \leq 0.9 \end{cases} \quad (2)$$

其中： $F_T = \frac{T_1}{T_1 + \exp(9.93 - 0.312 \times T_1)}$ $0 < T_1 < 100$

$$F_T = 0 \quad T_1 \leq 0$$

$$F_T = \max(F_T, 0.1)$$

$$conv = 10 \times 1000 \cdot \rho_h \cdot A_{cell} \cdot D$$

式中： FN 为反硝化作用溶解态氮丢失量， kg ； $inDN_t$ 为土壤中 t 时刻溶解态氮（主要为硝酸氮）量， 10^{-6} ； F_T 为温度修正系数， T_1 为单元土壤平均温度， $^{\circ}C$ ； $orgC$ 为有机碳质量分数， $\%$ ； F_w 为湿度修正系数，用土壤层含水率与饱和含水率之比计算； $conv$ 为浓度与质量单位的转换因子， kg ； D 为表层土深度（耕作层深度）， mm ； ρ_h 为土壤容重， g/cm^3 ； A_{cell} 为单元面积， hm^2 。

2) 吸附方程

常用的对吸附平衡（吸附等温线）的描述是 Langmuir 吸附等温线与 Freundlich 等温线，其中 Langmuir 吸附模型充分表达了土壤对磷的吸附过程，因此本研究采用 Langmuir isotherm 磷吸附方程^[7]：

$$Pconc_t = \frac{Q^0 \cdot b \cdot inDP_t}{1 + b \cdot inDP_t} \quad (3)$$

其中， $Q^0 = -3.5 + (10.7clay) + (49.5TC)$

$$b = 0.061 + (170000 \times 10^{-pH}) + (0.027clay) + (0.76TC)$$

式中： $Pconc_t$ 为土壤吸附磷量， $\mu g/g$ ； Q^0 为在一定温度下最大吸附量， $\mu g/g$ ； b 为与吸附净熵能量有关的一个常数， L/mg ； $clay$ 为土壤层中黏土比例； pH 为土壤 pH 值； TC 为土壤层中碳质量分数， $\%$ ； $inDP_t$ 为土壤中 t 时刻溶解态磷（主要为速效磷）量， 10^{-6} 。

3) 渗滤

渗滤损失主要取决于土壤类型、水文条件、氮含量和植被类型。参考文献[23]，其计算式为：

$$\begin{cases} Lh = \frac{perc_loss}{SW - Wilting} \times \frac{inDN_t(P_t) \cdot conv}{1000000} & perc_loss > 0 \\ Lh = 0 & perc_loss \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中： Lh 为土壤层渗滤损失量， kg ； $perc_loss$ 为 t 时刻的渗滤损失， mm ； SW 为 t 时刻土壤层中的总水量， mm ； $Wilting$ 为植物凋萎的临界水量， mm ； $inDN_t(P_t)$ 为土壤中 t 时刻溶解态氮（磷）含量， 10^{-6} 。

4) 土壤层随地表径流流失的溶解态氮磷量

径流与土壤交互作用带走在土壤表层中的溶解态氮磷。参考文献[23]，假定径流作用影响深度为 $10 mm$ ，通过径流带出土壤混合层的溶解态氮磷量为：

$$C_s = edi \cdot \frac{inDN_t(P_t) \cdot conv}{1\ 000\ 000D} \quad (5)$$

式中: C_s 为土壤层随地表径流流失的溶解态氮、磷质量, kg; edi 为反应层厚度, 取值 10 mm。

本试验中单次地表径流时间较短, 且试验设计各植被过滤带入流污染物浓度在单次放水过程中恒定, 可忽略各污染物浓度随时间的变化, 因此在本文验证时, 溶解态氮、磷净化效果的估算模型未考虑时间步长, 仅估

算单次地表径流中出口断面污染物质量浓度的平均值。

3 结果与分析

3.1 植被过滤带对颗粒态氮、磷净化效果的模拟结果

验证利用文献[20]中水文和泥沙输移模型模拟泥沙出流质量浓度值, 再根据线性相关方程(图 1) 计算颗粒态污染物的出流质量浓度值, 检验了 2010 年不同植被过滤带(1#~4#)的 8 次放水试验(如表 1 中 9~16 号)的数据。其入流参数和模拟结果如表 1 所示。

表 1 植被过滤带出流颗粒态氮、磷质量浓度模拟值与实测值对照

Table 1 Simulated values and measured values of particle nitrogen and particle phosphorus concentration in outflow by VFS in contrast

试验编号 Experimental number	过滤带编号 Vegetative filter strip	入流流量 Inflow flow/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	入流泥沙浓度 Inflow Sediments concentration/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出流颗粒态氮 Particle nitrogen concentration in outflow			出流颗粒态磷 Particle phosphorus concentration in outflow		
				模拟值 Simulated values/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	实测值 Measured values/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	模拟偏差 Simulated deviation/%	模拟值 Simulated values/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	实测值 Measured values/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	模拟偏差 Simulated deviation/%
1	3#	0.0023	1630	0.3875	0.388	-0.13	0.1132	0.119	-4.87
				0.4035	0.386	4.53	0.1180	0.119	-0.84
2	3#	0.0023	1645	0.3855	0.364	5.91	0.1126	0.113	-0.35
				0.3595	0.363	-0.96	0.1048	0.112	-6.43
3	3#	0.0023	2845	0.4775	0.468	2.03	0.1402	0.140	0.14
				0.4055	0.376	7.85	0.1186	0.115	3.13
4	3#	0.0038	1675	0.5235	0.468	11.86	0.1540	0.136	13.24
				0.4215	0.421	0.12	0.1234	0.121	1.98
5	1#	0.0023	1735	0.4135	0.437	-5.38	0.1210	0.120	0.83
6	1#	0.0023	2700	0.5715	0.575	-0.61	0.1684	0.159	5.91
7	2#	0.0023	1670	0.4175	0.443	-5.76	0.1222	0.122	0.16
8	2#	0.0038	1580	0.6695	0.616	8.69	0.1978	0.231	-14.37
9	1#	0.0045	4010	1.9875	2.450	-18.88	0.5932	0.561	5.83
10	2#	0.0041	4910	2.3155	2.313	0.13	0.6916	0.744	-6.98
11	3#	0.0040	4980	2.3655	2.561	-7.63	0.7066	1.734	-59.25
				2.3835	2.905	-17.95	0.7120	0.789	-9.70
12	4#	0.0047	4182	2.2535	2.210	2.13	0.6730	0.840	-19.88
13	1#	0.0035	3748	2.3975	6.448	-62.82	0.7162	0.400	79.05
14	2#	0.0043	2944	2.4595	4.654	-47.16	0.7348	0.865	-15.05
15	3#	0.0039	3374	2.2715	2.590	-12.30	0.6784	0.610	11.21
				2.3615	1.975	19.55	0.7054	0.590	19.56
16	4#	0.0039	2466	2.5375	3.912	-35.13	0.7582	0.676	12.16

注: 模拟偏差 $D_v = \frac{V - V'}{V'} \times 100$, V 为模型模拟值; V' 为实测值。过滤带 1# 尺寸为 3 m×10 m, 自然草本和 3~6 m 间种沙棘的混合过滤带; 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 2 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, 下同。

Note: Simulated deviation $D_v = \frac{V - V'}{V'} \times 100$, V is simulated values, V' is measured values. 1# is combined vegetative filter strip with grass and intercropping hippophae rhamnoides sub.sinensis in 3-6 m length, and its size is 3 m×10 m; 2# is combined vegetative filter strip with grass and intercropping hippophae rhamnoides sub.sinensis in 3-9 m length, and its size is 3 m×10 m; 3# is natural grass filter strip with two sections, separately sizes are 3 m×10 m and 3 m×15 m; 4# is combined vegetative filter strip with grass and intercropping hippophae rhamnoides sub.sinensis in 4-13 m length, and its size is 2.5 m×15 m, the same below.

由表 1 可知, 出流颗粒态氮、磷的质量浓度实测值与模拟值相差不大, 其 86% 以上样本的颗粒态氮质量浓度模拟偏差在±20%之内, 91% 以上样本的颗粒态磷质量浓度模拟偏差在±20%之内, 可见该线性相关方程能估算出本试验场植被过滤带对颗粒态氮、磷的净化效果。但该模拟是简化为与泥沙质量浓度的相关方程来估算的, 所选用于率定的样本准确性及代表性对建立相关方程的影响较大, 因此在各个地区此相关方程将有一定差异。

另由表 1 可见, 在植被过滤带出流颗粒态氮、磷质量浓度较高的试验中, 其颗粒态污染物的模拟偏差较大,

如: 第 13、14 及 16 次试验出流中实测颗粒态氮质量浓度较高, 第 11 次实测出流颗粒态磷质量浓度较高, 其对应的模拟值与实测值相差大, 模拟偏差均在±20%之外, 究其原因可能是: 该几次试验中细颗粒泥沙较多, 细颗粒泥沙吸附氮、磷素的作用较强, 而此相关方程未考虑泥沙颗粒的组成, 从而造成了较大误差, 可见这是造成该模型误差的重要原因; 其次, 因出流泥沙的质量浓度采用模拟值, 在第 13 次试验中泥沙的模拟偏差为 -17.23%, 再利用相关方程计算的颗粒态氮模拟值偏差 (-62.82%) 和磷的模拟值偏差 (79.05%) 将更大; 此外,

在野外试验中，其取样以及测定误差也较大，也可能使检验样本中部分实测值与模拟值相差较大。

3.2 植被过滤带对溶解态氮、磷净化效果的模拟结果

植被过滤带对溶解态氮、磷净化效果的估算模型验证采用 2010 年 5 次放水试验（如表 1 中 13~16 号和对照过滤带 17 号）的数据。其参数设定如下：

混合层设为 200 mm，由于试验条件限制，只测得土壤中初始有机质的含量，而土壤中无机氮量据经验认为是土壤有机质含量的 0.27%^[22]，溶解态磷量为土壤速效磷实测值，其值见表 2。

前述方程中入渗率 f 可运用 Green-Ampt 入渗方程估算随时间变化的入渗速率，这里简化为稳态入渗速率，可利用计算的下渗水量和总径流量比值进行估算；污染物的薄层传导

系数 K 据经验估算为 $K=K_s t/nD$ ， K_s 为实测饱和导水率，土壤孔隙度 $n=100%\times(1-\text{土壤容重}/\text{土壤比质量})=47\%$ ，土壤容重实测值为 1.4 g/cm^3 。对于源汇项，溶解态氮在植被过滤带土壤中发生一系列生物化学反应，由于本试验忽略矿化和植物吸收过程，主要考虑反硝化作用丢失量和渗滤损失，采用式（2）和式（4）计算。单元土壤平均温度设为 $10\text{ }^\circ\text{C}$ ，土壤层中碳含量、土壤含水率和土壤饱和含水率均为实测，渗滤方程（4）中植物凋萎的临界水量难以确定，因此简化为土壤深层渗透系数，并用土壤下渗率 f 估算。溶解态磷在植被过滤带土壤中主要考虑土壤吸附和渗滤，土壤吸附计算方程为式（3），pH 值实测为 8，土壤黏土比例根据水文学手册选用。具体参数及参数计算值见表 2 所示。

由式（1）—式（5）计算得结果如表 3 所示。

表 2 植被过滤带出流溶解态污染物浓度计算参数
Table 2 Calculation parameters of dissolve pollutant concentration in VFS outflow

过滤带 Vegetative filter strip	$\theta_v/\%$	有机质 Organic matter/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	速效磷 Rapidly Available phosphorus/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	$C_{\text{径流}N}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	$C_{\text{径流}P}/$ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	conv/kg	K	径流量 Volume of runoff/ m^3	下渗水量 Infiltration water/ m^3	$TC/\%$	$\text{clay}/\%$
1#	24.67	12.30	5.995	12.049	0.485	8400	0.0537	0.48	1.62	1.755	20
2#	28.77	12.11	4.950	10.688	0.520	8400	0.0549	0.54	1.42	1.767	10
3#(10m)	38.30	16.41	11.921	11.406	0.570	8400	0.0480	0.6	2.48	2.122	40
3#(15m)	38.30	16.41	11.921	11.406	0.570	12600	0.0480	0.3	2.78	2.122	40
4#	42.29	15.22	11.907	7.048	0.406	10500	0.0537	0.2	2.32	2.220	40
5#	29.84	11.14	9.848	11.406	0.660	12600	0.0537	0.81	2.13	1.475	10

注： θ_v 为土壤初始体积含水率， $C_{\text{径流}N}$ 为入流溶解态氮质量浓度， $C_{\text{径流}P}$ 为入流溶解态磷质量浓度， conv 为浓度与质量单位的转换因子， K 为污染物的薄层传导系数， TC 为土壤层中碳含量， clay 为土壤层中黏土比例。5#为 $3\text{ m}\times 15\text{ m}$ 无植被的空白对照带，下同。

Note: θ_v is soil initial volumetric water content, $C_{\text{径流}N}$ is inflow dissolve nitrogen concentration, $C_{\text{径流}P}$ is inflow dissolve phosphorus concentration, conv is conversion factor, K is thin layer transmission coefficient of pollutant, TC is carbon content in soil layer, clay is clay ratio in soil layer. 5# is control strip without vegetative, size is $3\text{ m}\times 15\text{ m}$, the same below.

表 3 植被过滤带出流溶解态氮、磷质量浓度模拟值与实测值对比

Table 3 Simulated values and measured values of dissolve phosphorus and dissolve nitrogen concentration in outflow by VFS in contrast

试验号 Experimental number	过滤带 Vegetative filter strip	出流溶解态氮			出流溶解态磷		
		Dissolve nitrogen concentration in outflow			Dissolve phosphorus concentration in outflow		
		实测值 Measured values/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	模拟值 Simulated values/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	模拟偏差 Simulated deviation/%	实测值 Measured values/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	模拟值 Simulated values/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	模拟偏差 Simulated deviation/%
13	1#	12.087	11.732	-2.94	0.420	0.454	8.10
14	2#	10.589	12.155	14.78	0.490	0.457	-6.81
15	3#	11.760	9.944	-15.44	0.455	0.590	29.63
		12.326	11.167	-9.40	0.400	0.484	21.08
16	4#	7.048	8.934	26.76	0.458	0.459	0.19
17	5#	11.134	11.984	7.63	0.705	0.797	13.03

由表 3 可知，溶解态氮、磷质量浓度的模拟值与实测值相差较小，67%以上样本的溶解态磷质量浓度模拟偏差在 $\pm 20\%$ 之内，83%以上样本的溶解态氮质量浓度模拟偏差在 $\pm 20\%$ 之内，据其机理建立的模型能模拟出植被过滤带对溶解态氮、磷的净化效果，可用与植被过滤带规划设计的参考。但也有部分模拟值偏差较大，原因是由于野外试验条件限制，试验本身误差较大，如在次径流过程中未实时监测，取出口断面的混合水样，仅得污染物质量浓度的平均值等；另外，模拟所涉及的部分参数值试验中并未测定，如：土壤中初始溶解态氮、磷量值均为估计值，黏土比例 clay 值是根据水文学手册确定的，还有部分参数的简化估算，如入渗率、薄层传导系数等，

使溶解态氮、磷出流浓度的模拟有一定误差。

4 结 论

本文基于混合层理论和水文及泥沙输移模型，提出了一个参数较少，计算简单的植被过滤带氮、磷素净化效果估算模型，模拟了次径流条件下植被过滤带中氮、磷的净化效果，并与实测值进行对比验证。得到植被过滤带径流中颗粒态氮、磷与泥沙含量有显著相关性 ($P<0.05$)，利用此相关性估算出植被过滤带对颗粒态污染物的净化效果，与实测值相比，其 86%以上样本的颗粒态氮质量浓度模拟偏差在 $\pm 20\%$ 之内，91%以上样本的颗粒态磷质量浓度模拟偏差在 $\pm 20\%$ 之内。基于植被过滤

带对径流中溶解态污染物的净化机理,利用混合层概念构建了植被过滤带对溶解态氮、磷素净化效果的质量守恒模型,验证其溶解态磷质量浓度的模拟偏差 67%以上在 $\pm 20\%$ 之内,溶解态氮质量浓度的模拟偏差 83%以上在 $\pm 20\%$ 之内。综上,该模型可用于植被过滤带对地表径流中污染物净化效果的评估。

植被过滤带系统内污染物的输移过程较复杂,包括在植被、径流和土壤层中的相互作用过程,因此对污染物运移过程进行适当的简化是必要的,也是合理的。但是该模拟验证存在一定的误差,还需进一步进行模型的灵敏度分析,确定各个参数的重要性以及各输入数据的误差对模型模拟精度的影响程度等,以期进行多方面应用。

[参 考 文 献]

- [1] Noij I G, Heinen M, Heesmans H I, et al. Effectiveness of unfertilized buffer strips for reducing nitrogen loads from agricultural lowland to surface waters[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2012, 41(2): 322—333.
- [2] Jaana U K, Lauri J. Long-term monitoring of buffer zone efficiency under different cultivation techniques in boreal conditions[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 137(1/2): 75—85.
- [3] Mohamad A F, Mohd H K, Badronnisa Y. Sediment traps from synthetic construction site stormwater runoff by grassed filter strip[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 502(3/4): 53—61.
- [4] Muñoz-Carpena R, Zajac Z, Kuo Y M. Evaluation of water quality models through global sensitivity and uncertainty analyses techniques: application to the vegetative filter strip model VFSSMOD-W[J]. *Transactions of ASAE*, 2007, 50(5): 1719—1732.
- [5] Lambrechts T, François S, Lutts S, et al. Impact of plant growth and morphology of sediment concentration on sediment retention efficiency of vegetative filter strips: Flume experiments and VFSSMOD modeling[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 511(7): 800—810.
- [6] Kuo Y M, Muñoz-Carpena R. Simplified modeling of phosphorus removal by vegetative filter strips to control runoff pollution from phosphate mining areas[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 378(3/4): 343—354.
- [7] Altier L S, Lowrance R, Williams R G, et al. Riparian Ecosystem Management Model: Simulator for Ecological Processes in Riparian Zones[R]. Washington: United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Conservation Research Report, 2002.
- [8] Inamdar S P, Lowrance R, Altier L S, et al. Evaluation of the riparian ecosystem management model: IV. multiple buffer scenarios[J]. *Transactions of the ASAE*, 2000, 41(6): 179—189.
- [9] Zhao Xining, Huang Jun, Wu Pute, et al. The dynamic effects of pastures and crop on runoff and sediments reduction at loess slopes under simulated rainfall conditions[J]. *Catena*, 2014, 119(3): 1—7.
- [10] Lowrance R, Sheridan J M. Surface runoff water quality in a managed three zone riparian buffer[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(5): 1851—1859.
- [11] Mao Longjiang, Mo Duowen, Yang Jinghong, et al. Concentration and pollution assessment of hazardous metal elements in sediments of the Xiangjiang River, China[J]. *J Radioanal Nucl Chem*, 2013, 295(1): 513—521.
- [12] White M J, Arnold J G. Development of a simplistic vegetative filter strip model for sediment and nutrient retention at the field scale[J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(11): 1602—1616.
- [13] Chen Yi, Shuai Jiabing, Zhang Zhao, et al. Simulating the impact of watershed management for surface water quality protection: A case study on reducing inorganic nitrogen load at a watershed scale[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 62(1): 61—70.
- [14] Sahu M, Gu R R. Modeling the effects of riparian buffer zone and contour strips on stream water quality[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(8): 1167—1177.
- [15] 孙晓涛, 陈传胜, 肖波, 等. 植被过滤带拦截径流和泥沙效果的模型研究[J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(4): 96—101.
Sun Xiaotao, Chen Chuansheng, Xiao Bo, et al. Model study of interception effects of vegetative filter strips on runoff and sediment[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, 34(4): 96—101. (in Chinese with English abstract)
- [16] Muñoz-Carpena R, Parsons E J. Vegetative Filter Strips Hydrology and Sediment Transport Modelling System Documentation and User's Manual[M]. Florida: Institute Food and Agricultural Sciences University of Florida, 2005.
- [17] 李怀恩, 邓娜, 杨寅群, 等. 植被过滤带对地表径流中污染物的净化效果[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 81—87.
Li Huaen, Deng Na, Yang Yinqun, et al. Clarification efficiency of vegetative filter strips to several pollutants in surface runoff[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(7): 81—86. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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.
Deng Na, Li Huaen, Shi Dongqing, et al. Influence of inflow rate of runoff on purification effectiveness of vegetative filter strip[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(4): 124—129. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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.
Shen Xiaobo, Chen Chuansheng, Zhang Zhang, et al. Interception of runoff, sediment, nitrogen and phosphorus by vegetative filter strips with different width in a simulated experiment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(4): 721—729. (in Chinese with English abstract)
- [20] 邓娜, 李怀恩, 史冬庆. 植被过滤带对悬浮固体净化效果的模拟[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(11): 2966—2976.
Deng Na, Li Huaen, Shi Dongqing. Purification effect of vegetative filter strip on suspended solids in surface runoff: A

- simulation study[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(11): 2966—2976. (in Chinese with English abstract)
- [21] Havis R N, Smith R E, Adrian D D. Partitioning solute transport between infiltration and overland flow under rainfall[J]. Water Resource Research. 1992, 28(10): 2569—2580.
- [22] 张亚丽, 李怀恩, 张兴昌, 等. 降雨-径流-土壤混合层深度研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 283—290.
- [23] Ronald L B, Fred D T, Yuan Y. AnnAGNPS Technical Processes Documentation[Z]. Washington: United States Department of Agriculture, 2007.
- Zhang Yali, Li Huaen, Zhang Xingchang, et al. Review on the mixing zone depth of rainfall-runoff-soil interaction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(9): 283—290. (in Chinese with English abstract)

Assessment on retention efficiency of vegetative filter strips to nitrogen and phosphorus in surface runoff based on hydrology and soil erosion model

Deng Na¹, Li Huaen^{2*}

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha, 410128, China;

2. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an, 710048, China)

Abstract: Vegetative filter strips can effectively reduce nitrogen and phosphorus load or concentration from agricultural land to surface water. However, the efficiency of vegetative filter strips vary with soil, hydrology and vegetation condition in different rainfall-runoff cases through long-term monitoring, so it is important to assess retention efficiency of vegetative filter strips under single rainfall-runoff condition. Mathematical model is an important tool for the planning and design of vegetative filter strips. Thus, an ease-to-use assessment model is presented to better assess nitrogen and phosphorus retention effect by vegetative filter strips under single runoff condition in the northwest area of China with serious soil erosion. The simplified model proposed involves 3 parts: coupling sub-model, linear correlation sub-model and mixing zone conceptual sub-model. The coupling sub-model of the vegetative filter strips model (VFSMOD) and the modified universal soil loss equation (MUSLE) is made to simulate purification effect of suspended solids (mainly means sediments), because sediment retention efficiency is the combined effect of the sediments entrapped process and the soil erosion or sediments yield process in vegetative filter strips itself. According to significant correlation with sediments and those particle pollutants on runoff, the linear correlation method is used to calculate removal effect of particle nitrogen and particle phosphorus by vegetative filter strips. Infiltration is regarded as the only mechanism to remove dissolved pollutants, namely vegetative filter strips reduce dissolved nitrogen and phosphorus volume by diffusion and infiltration into soil. Therefore, based on mechanism research of the interaction of dissolved pollutants in topsoil and surface runoff, and through simplifying pollutant transport in deep soil, the mixing zone conceptual sub-model is utilized to assess the effect of vegetative filter strips on dissolved nitrogen and phosphorus. Furthermore, the mass dynamic balance equilibrium within overland flow and soil mixing zone is considered accordingly; in overland flow, mass balance includes diffusion, infiltration and soil losses, and in soil mixing zone, it is regarded as uniform mixing and its change covers diffusion and infiltration from runoff, denitrification, leaching, soil losses and adsorption etc. Among them, the coupling model can predict hydrology and suspended solids transport well by considering runoff sluicing impact on sediments from vegetative filter strips in surface soil, and the results show that the relative deviations between simulated and measured concentrations of suspended solids are within $\pm 20\%$, and the determination coefficients between simulated and measured values is 0.98. The simplified particle nitrogen and phosphorus transport algorithm is presented by the linear correlation method based on field plot experiment data, and the good prediction in runoff and sediments also resulted in good prediction of particle nitrogen and phosphorus transport by vegetative filter strips, since adsorbed nitrogen and phosphorus are the main components of nitrogen and phosphorus in the areas with serious soil erosion. Similarly, the results also show that the relative deviations between simulated and measured concentrations of particle pollutants are within $\pm 20\%$. It is obvious that a good prediction of dissolved nitrogen and phosphorus is obtained by the mixing zone conceptual model, the input and output of the mass balance system of vegetative filter strips consider biological and chemical processes of dissolved nitrogen and phosphorus in soil mixing zone, and furthermore the detailed analysis and proper simplification for vegetative filter strips system are presented. The relative deviations are within $\pm 20\%$ between simulated and measured concentrations of dissolved nitrogen and phosphorus. Thus, the combined nitrogen or phosphorus modeling approach successfully predicts runoff, sediment, nitrogen and phosphorus transport in the areas with serious soil erosion, which provides the reference for controlling runoff and pollutants transport using vegetative filter strips.

Key words: soils; nitrogen; phosphorus; vegetative filter strips; retention efficiency; assessment