

农牧业交错区禾本植被过滤带过滤效果模拟

宋凡凡¹, 李仙岳¹, 田德龙²

(1.内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018;2.水利部牧区水利科学研究所,呼和浩特 010020)

摘要:为探究内蒙古岱海流域农牧业交错区禾本植被过滤带截流减沙效果对入流强度和泥沙含量的响应。在内蒙古中部农牧业交错区的巨宝庄镇试验区设置不同来水流量(0.77,0.9,1.08,1.26 L/s)和泥沙含量(0.04,0.06,0.08,0.1 g/cm³),共计 16 个处理,研究不同来水条件下植被过滤带的截流减沙效果。基于 VFSMOD 模型模拟,并优化该地区植被过滤带参数。结果表明:VFSMOD 模型可以较好地对冰草、羊草混播植被过滤带泥沙和径流出流量进行模拟。植被过滤带前期对径流拦蓄主要依靠入渗,入流强度增加缩短了径流出流时间,0.77 L/s 入流强度水流经过过滤带后出流时间分别为 0.9,1.08,1.26 L/s 入流强度下出流时间的 1.3,1.6,1.6 倍。0.77,0.9 L/s 入流强度下泥沙出流量趋于稳定,而 1.08,1.26 L/s 入流强度下泥沙出流量随时间推移而增加。入流泥沙含量和入流强度对出流泥沙量影响显著($p<0.05$)。

关键词: 植被过滤带; VFSMOD 模型; 径流出流率; 泥沙出流率

中图分类号: S157.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)03-0057-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.03.009

Simulation the Filtering Effect of Grass Vegetation Filter Strip in Agro-pastoral Ecotone

SONG Fanfan¹, LI Xianyue¹, TIAN Delong²

(1.Water Conservancy and Civil Engineering College of Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot 010018; 2.Institute of Pastoral Water Conservancy, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020)

Abstract: In order to explore the response of interception and sediment reduction effect of grass-based vegetation filter strip to incoming water flow and sediment concentration, different incoming water flows (0.77, 0.9, 1.08, 1.26 L/s) and sediment concentrations(0.04, 0.06, 0.08, 0.1 g/cm³) were set up in a agro-pastoral ecotone in the central Inner Mongolia. The effect of river closure and sediment reduction of stem spacing in vegetation filter strip under different inflow conditions was studied. Based on VFSMOD model simulation, the relevant parameters of vegetation filter strip in this area were optimized. The results showed that VFSMOD model could well predict the sediment and runoff yield in the filter strip of agropyron cristatum and Leymus chinensis. The runoff interception of vegetation in the early stage mainly depended on soil infiltration, and the runoff outflow time was shortened with the increases of inflow intensities. The outflow time of 0.77 L/s inflow intensity was 1.3, 1.6 and 1.6 times of 0.9, 1.08 and 1.26 L/s. The sediment discharge under 0.77 and 0.9 L/s tended to be stable, while the 1.08 and 1.26 L/s increased with time. The inflow sediment content and inflow intensity have significant influence on the outflow sediment quantity ($p<0.05$).

Keywords: vegetation filter strip; VFSMOD; runoff outflow rate; the sediment outflow rate

水土流失使土地退化,对人类社会可持续发展构成威胁,缓减或者控制水土流失一直是世界性的课题^[1]。我国作为世界上水土流失最严重的国家之一,其分布范围广、强度大、危害重^[2]。在全球气候变化和极端降雨事件发生的大背景下,水土流失会进一步增加^[3]。位于农牧业交错区的岱海水质差、水土流失及富营养化严重,年均入湖泥沙量为 256.67 万 m³,

严重影响其功能及水环境。植被过滤带是控制和减弱水土流失的有效途径^[4],在环境影响、建设投资的优势以及对径流及泥沙的有效削减使其广泛地应用于生态修复及水土保持方面^[5]。在引黄济岱工程实施的同时,也应对入湖泥沙进行控制,在径流入湖过程中增强径流、泥沙削减、减少水土流失。

植被过滤带(vegetative filter strips,VFS)指建

收稿日期:2021-10-29
资助项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0409203);国家自然科学基金项目(52079064)
第一作者:宋凡凡(1996—),男,在读硕士研究生,主要从事水土保持与环境保护研究。E-mail:nystsff@126.com
通信作者:李仙岳(1980—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉原理及应用研究。E-mail:lixianyue80@126.com

设于污染源与受纳水体之间的生态过滤带,其可以有效拦截地表径流、滞留水体中泥沙、削减氮磷污染物含量^[6]。美国农业部(USDA)自然资源保护署(NRCS)将其推荐为面源污染过程阻断最有效的工程措施^[7]。植被过滤带的过滤效果受坡度、径流流量^[8]、宽度^[9]、植物品种^[10-11]影响。前人^[8-11]研究泥沙削减效果与植被过滤带建设特征的统计关系得到,对特定水文特征下表现有所欠缺,无法对不同入流条件下过滤带表现进行评估。在物理试验不断开展的同时,数学模型在植被过滤带设计过程中也被广泛应用。常见的模型有 CREAMS 模型、GRASSF 模型、SEDO-THLEOTII 模型、VFSSMOD(vegetative filter strips model)等,VFSSMOD 是预测植被过滤带水沙削减效果模型,被美国环保局(US EPA)推荐作为植被过滤带效果评估方法,在欧美地区得到广泛应用^[12-13]。国内学者对其适用性进行了探讨,证明 VFSSMOD 模型对植被过滤带出流量及泥沙削减有着较好模拟能力,其可以用于国内植被过滤带规划设计^[14-15]。潘岱立等^[15]利用 VFSSMOD 对植物不同生长期水沙削减进行了建模分析,进一步证明模型适用于产流产沙模拟预测,VFSSMOD 在农牧业交错区较少报道,在不同入流条件下水沙削减的研究也较少,在不同入流泥沙含量的模拟效果尚不明确。

前人研究结果对不同入流条件影响的研究具有一定局限性,内蒙古农牧业交错区植被过滤带在不同降雨强度下产流产沙的规律尚不明确。引黄济岱工程实施的同时,应控制泥沙入湖量,保障岱海水体面积稳定。鉴于此,本研究通过野外原位试验,模拟当地不同重现期降雨后产流过程,基于实测泥沙、径流数据与 VFSSMOD 模型研究径流小区内不同重现期降雨汇流后产流产沙特征。探讨 VFSSMOD 模型在岱河流域的适用性,进一步明确过滤带径流泥沙拦蓄机理。以期为内蒙古中部农牧交错区水土流失防治工作提供理论支撑,并丰富产沙产流模型预测经验。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020—2021 年在内蒙古乌兰察布市巨宝庄

镇(113°09'E,40°92'N)进行。气候类型为温带大陆性气候,冬季严寒漫长,夏季炎热短促。多年平均降水量 407.5 mm,年内降水不均,主要集中于 7—8 月,该地区日照时间充足,多年平均日照时间 3 023.7 h,多年平均蒸发量 1 938 mm,主要草本植被有羊草、冰草、披碱草等,试验区距离岱海直线距离 30 km,土壤质地为砂质黏土(USDA 分类标准),土壤容重为 1.38~1.40 g/cm³。

1.2 试验布置

试验区设置 4 条植被过滤带,1 条为无植被对照小区,3 条过滤带植被选择为当地较为常见的禾本科植物羊草(*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel.)和冰草(*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn),禾本科植被过滤带根据样方法测得茎间距约为 0.9 cm。混合后草种在小区条播,播种时间 2020 年 5 月 15 日,播种后和播后 15 天浇水,种植高度 30 cm 左右进行刈割以促进分蘖,试验进行时茎粗约为 0.3~0.5 mm,覆盖率>90%。各小区坡度设置为 5°,小区建设尺寸为 6 m×4 m,小区之间用田埂隔开,防止径流相互干扰。小区上方放置储水桶,用于配置各不同含沙量径流,通过阀门控制出水流量。出水口连接均匀开孔 PVC 管,制成简易布水器。小区下方开沟设置集流槽,以方便对出流水体进行收集。每次试验设置 3 次重复,试验前去除各植被过滤带表层枯落叶,对土壤进行取样,用烘干法测定土壤初始含水率。水样分析项目包括泥沙含量与出流量,在过滤带末端沟内接集水桶,每 3 min 通过集水桶刻度读出流量,待集水桶内泥沙沉淀后,105 ℃烘干 10 h,称量泥沙质量。

在 8 月中旬进行冲水试验,试验模拟径流泥沙含量通过向过滤带上方蓄水桶内需水量添加泥沙来实现。泥沙为试验小区附近土壤自然风干后去除枯落叶及石块后过筛后得到。通过调节出水阀门开度控制出流量,记录蓄水桶内时间—水位关系得到出流曲线。为了研究不同流量与污染物浓度下的削减效果,设置 4 种流量 4 种浓度(表 1),每次冲刷后静置 72 h 进行下次试验,每处理重复 3 次,3 种流量梯度为 667 m²汇流面积在重现期为 3,5,10,20 年的频率下,以汇集系数为 0.1 的产流量。

表 1 试验方案

指标	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
流量/(L·s ⁻¹)	0.77	0.90	1.08	1.26	0.77	0.90	1.08	1.26	0.77	0.90	0.77	0.90	1.08	1.26	0.77	0.90
设计水量/m ³	1.38	1.61	1.94	2.26	1.38	1.61	1.94	2.26	1.38	1.61	1.38	1.61	1.94	2.26	1.38	1.61
泥沙浓度/(g·cm ⁻³)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08	0.06	0.06	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08	0.08

1.3 VFSSMOD 模型

1.3.1 模型简介 VFSSMOD 模型由 Carpena^[16]1999 年开发,目前该模型主要由 3 个模块:基于降雨和土壤入渗计算过滤带表面水分平衡的改进 Green

Ampt 入渗模块;基于上方来水和超渗产流来计算渗透土壤表面径流深度与流速的地表径流的运动波模块;基于肯塔基算法(kentucky algorithm)计算不同粒径入流泥沙在各植被特征下输送与沉淀量泥沙过

滤模块^[17]。泥沙过滤模块对植被过滤带地表参数修正以提高拦沙量计算精度。故 VFSMOD 可以准确计算过滤带的出水量、下渗水量与泥沙截留效果^[16]。也可处理不同雨型的降雨、分段式过滤带参数输入及不同配比颗粒粒径泥沙的输入。

水文模型为 Munoz—Carpena 提出的基于运动波近似的二次有限元坡面流子模型^[16]。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i_e(t) \quad (1)$$

$$S_o = S_f \quad (2)$$

$$q = q(h) = \frac{\sqrt{S_o}}{n} h^{\frac{5}{3}} \quad (3)$$

式中: h 为地表径流深(m); q 为单宽流量(m²/s); S_o 为坡度(m/m); S_f 为水力坡度(m/m); n 为曼宁糙率系数(m³/s^{1/3})。

每个时间步长都由地表径流方程与基于 Green—Ampt 的非稳定降雨方程的入渗方程进行耦合^[16]。

$$f_p = \frac{K_s + K_s MS_{av}}{F_p} \quad (4)$$

$$K_s(t - t_p + t_0) = F - MS_{av} \ln(1 + \frac{F}{MS_{av}}) \quad (5)$$

式中: f_p 为入渗条件下的瞬时入渗率(m/s); K_s 为纵向饱和导水率(m/s); M 为初始土壤水分亏缺量(m³/m³); S_{av} 为平均湿润锋吸力(m); F_p 为入渗后累积入渗量(m); F 为事件累积入渗量(m); t 为实际入渗时间(s); t_p 为入渗时间(s); t_0 为转移到植被过滤带外时间(s)。

泥沙过滤模块考虑 2 种类型的输送关系。使用爱因斯坦泥沙输移方程来描述距离为 k 的沉积物捕获^[16]:

$$\frac{r_s - r}{r} \frac{d_p}{R_{sk} S_k} = 1.08 \left(\frac{g_{sk}}{r_s \sqrt{\frac{r_s - r}{r}} g d_p^3} \right)^{-0.28} \quad (6)$$

$$R_{sk} = \frac{S_s d_{fk}}{2d_{fk} + S_s} \quad (7)$$

式中: r_s 、 r 分别为泥沙和水的密度(g/cm³); d_p 为颗粒直径(cm); g_{sk} 为在距离为 k 上的沉淀物捕获量(g/(cm·s)); S_k 为底面坡度; g 为重力加速度(cm/s²); R_{sk} 为距离 k 上的平均水力半径(cm); S_s 为茎间距(cm); d_f 为坡面流深度(cm)。

地表径流深度由径流通过距离 k 的间距为 S_s 的介质后的平均流速,曼宁公式为:

$$q_k = V_k d_{fk} \quad (8)$$

$$V_k = \frac{\sqrt{S_o}}{m} R_{sk}^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

式中: V_k 为在距离 k 上的平均速度(cm/s); m 为过滤

介质曼宁系数(s³/cm^{1/3})。

对于悬沙条件,悬沙捕集能力的方程为:

$$\frac{S_i - S_0}{S_i} = \text{Exp} \left(-1.05 \times 10^{-3} \left(\frac{V_k R_{sk}}{v} \right)^{0.82} \left(\frac{V_m L_k}{V_k d_{fk}} \right)^{-0.91} \right) \quad (10)$$

1.3.2 参数获取 VFSMOD 模型参数主要由土壤参数、植被参数、降雨与产流过程参数组成。本试验不涉及降雨,降雨过程参数不作考虑。参数由饱和导水率(VKS)(m/s)、湿润锋处平均吸力(S_{av})(m)、土壤初始含水率(OI)(m³/m³)、土壤饱和含水率(OS)(m³/m³)、最大表面储水量(SM)(m)构成。饱和导水率是模型运行的敏感参数,且空间变异性大^[18]。试验结束后在 3 条过滤带上中下游各取 3 次土样,风干后挑出石块根系后混合均匀,在实验室测定混合土样 VKS。OS 在试验结束后用环刀测定,OI 在每次试验前取土用烘干法测得,假定土壤参数在试验期间无变化。

植被参数主要由植株茎秆间距(SS)(cm)、过滤带介质修正糙率(VN)(s/cm^{1/3})、过滤带植株高度(H)(cm)、泥沙沉积后过滤带裸地表面糙率(VN₂)(s/cm^{1/3})、植被过滤带曼宁糙率(strip manning roughness, RNA)(s/cm^{1/3})(表 2)。VN、VN₂ 对模型输出结果不敏感,采用推荐值。SS 与 RNA 为敏感参数^[19],故用实测值。假定试验阶段内各参数无变化。SS 计算公式^[18]为:

$$SS = \sqrt{\frac{100}{D_s}} \quad (11)$$

式中: D_s 为植株密度(株/m²),在试验前在 3 条植被过滤带随机取 100 cm×100 cm 样方测定,取平均值作为 D_s 值。

RNA 计算公式^[18]为:

$$V = \frac{1}{RNA} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S} \quad (12)$$

式中: V 为植被过滤带内水流流速(m/s),径流过程中利用红墨水示踪法测定; R 为水力学半径(m),此处取水流深度,在冲刷时通过水尺读数获取; S 为坡度(m/m),无量纲。

泥沙参数主要有入流泥沙浓度(CI)(g/cm³)、入流泥沙中值粒径(DP)(cm)、泥沙密度(SG)(g/cm³)、入流泥沙粗砂百分数(COARSE)(%)。使用激光粒度仪对入流泥沙进行分析。

1.4 误差分析

本文模拟结果分析使用模拟偏差(D)、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)、平均相对误差(MRE)4 个指标评价水、沙模拟精度。

$$D = \frac{S_i - M_i}{M} \times 100\% \quad (13)$$

$$\text{RMSE}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(S_i-M_i)^2}{n}}$$

(14)

$$\text{MAE}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n|S_i-M_i|$$

(15)

$$\text{MRE}=\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n|S_i-M_i|}{M_i}$$

(16)

式中: S_i 为模拟值; M_i 为实测值; i 为第*i*次冲刷试验; n 为总冲刷试验次数; M_m 为观测值均值。

表 2 植被过滤带各参数意义及取值

参数	单位	物理意义及描述	取值
FWIDTH	m	过滤带宽度	4
VL	m	过滤带长度	6
S_{av}	m	湿润锋平均吸力	0.38
OI	$\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	土壤初始含水率	0.18
OS	$\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$	土壤饱和含水率	0.40
SM	m	填洼水量	0
H	cm	植株高度	10
SS	cm	茎间距	0.9
CI	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	入流泥沙浓度	0.04/0.06/0.08/0.1
RNA	$\text{s}\cdot\text{cm}^{-1/3}$	过滤带曼宁系数	0.16
VN	$\text{s}\cdot\text{cm}^{-1/3}$	过滤介质曼宁系数	0.012
VN_2	$\text{s}\cdot\text{cm}^{-1/3}$	裸地曼宁系数	0.04
COARSE	%	粒径>0.0037 cm 泥沙占比	0.1
DP	cm	入流泥沙中值粒径	0.0009

使用方差分析中 LSD 法分析各处理间差异的显

表 3 率定验证

出流量	指标	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	T16
泥沙	D/%	-1.99	-0.68	-2.29	-3.44	-2.27	-1.92	-1.63	-2.51	-7.85	-1.25	-4.68	10.12	-13.47	-5.55	-15.13	-3.24
	RMSE/g	0.19	0.12	0.40	0.93	0.09	0.13	0.17	0.41	0.18	0.08	0.27	0.80	0.17	0.10	0.46	0.16
	MAE/g	0.18	0.11	0.40	0.93	0.08	0.11	0.16	0.40	0.16	0.05	0.26	0.77	0.14	0.09	0.45	0.13
	MRE/%	2.83	1.08	2.35	3.56	2.32	1.95	1.66	2.57	8.52	1.73	4.91	1.10	15.56	5.87	17.83	3.34
径流	D/%	11.82	8.92	1.73	-1.65	2.50	5.67	-2.25	-6.57	-5.38	-1.67	-5.94	-3.82	-3.53	-3.01	-5.05	-3.11
	RMSE/L	0.07	0.08	0.07	0.07	0.03	0.06	0.05	0.16	0.07	0.02	0.07	0.06	0.08	0.04	0.06	0.05
	MAE/L	0.06	0.06	0.05	0.07	0.02	0.05	0.03	0.14	0.07	0.02	0.06	0.05	0.06	0.03	0.05	0.04
	MRE/%	13.01	8.19	5.45	5.15	4.61	6.50	3.44	10.50	14.09	2.45	6.32	3.98	13.01	4.80	5.32	3.21

2.2 植被过滤带对入流强度变化的响应

入流强度增加缩短了径流在植被过滤带内的迁移时间。4 种流量处理径流出流规律一致(图 1),不同强度入流开始出流时间呈现显著差异。入流流量为 0.77 L/s 处理在第 7 min 开始出流,该入流强度下水流在过滤带平缓通过,植株与地面和水体充分接触,最大程度上减缓了水流推进速度。流量为 0.9 L/s 的处理在 6 min 左右开始出流,过滤带较好地发挥了蓄水的效果。流量持续增加至 1.08~1.26 L/s,出流时间稳定于 4 min,入流流量的增加导致过滤带部分植株出现倒伏,对径流阻挡作用降低,径流在短时间内通过植被过滤带到达末端。过滤带拦蓄效果

著性($\alpha=0.05$)情况。数据分析处理采用 Excel 2010 和 DPS 7.05 软件,绘图采用 Origin 2017 软件完成。

2 结果与分析

2.1 模型率定与验证

利用 T1~T4 和 T5~T16 的试验数据进行参数率定,以实测数据进行校准和验证。进行了各种统计(模拟偏差 D 、均方根误差 RMSE、平均绝对误差 MAE、平均相对误差 MRE),模拟值与实测值之间显示出良好的一致性(表 3)。SDR(泥沙出流率)和 RDR(径流出流率)校准期 D 范围为-0.68%~3.44%和-1.65%~11.82%。RMSE 范围为 0.12~0.93 g 和 0.07~0.08 L。MAE 为 0.11~0.93 g 和 0.05~0.07 L。MRE 的范围为 1.08%~3.56%和 5.15%~13.01%。验证期 SDR 与 RDR 的 D 范围为-15.13%~10.12%和-6.57%~5.67%。RMSE 范围为 0.08~0.46 g 和 0.02~0.16 L。MAE 范围为 0.05~0.77 g 和 0.02~0.14 L。MRE 范围为 1.10%~17.83%和 2.45%~13.01%,模型对径流出流量及泥沙出流量较为敏感,可以较好地对时段径流和泥沙出流量进行捕捉。从模拟结果和验证指标来看,VFSMOD 模型可以较好地对农牧业交错区植被过滤带对不同来水强度下过滤带水、沙出流量变化情况,因此,VFSMOD 模型可以用于该地区不同入流强度下水、沙出流量的预测和模拟。



图 1 不同入流强度下累积出流量

植被过滤带对径流及污染物去除主要通过减缓径流流速,增加入渗量来实现。由图 2 可知,4 种强

度径流进入过滤带后土壤入渗率分别为 64.3%, 56.08%, 47.67%, 41.27%。各入流强度处理前期入渗曲线与入流曲线重叠,证明入流流量全部通过入渗进入土壤。入渗水量斜率即为土壤水入渗速率,土壤初始含水率较低,径流刚进入植被过滤带入渗速率较快,斜率较大。当土壤水饱和后除少部分通过稳定入渗进入更深层土壤外,其余水量通过出流流出过滤带,即为图中第 2 阶段入渗情况,斜率下降,入渗速率减缓,出流量增加,导致入流强度增加入渗率下降的现象。

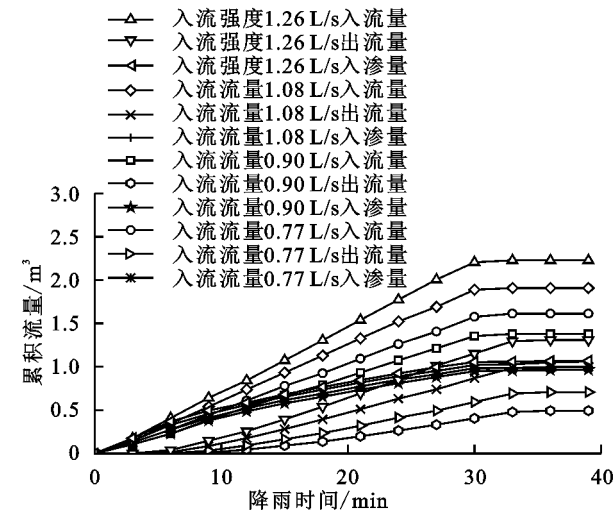


图 2 累积入流出入渗曲线

2.3 不同入流条件下泥沙出流情况分析

不同入流强度下泥沙出流规律不同,0.77, 0.90 L/s 在入流强度下各浓度泥沙出流稳定,1.08, 1.26 L/s 入流强度下泥沙出流量随时间增加;不同入流泥

沙浓度下泥沙出流量有差异,出流规律一致。泥沙出流主要受径流影响,径流强度增加导致泥沙出流率增加。分析不同入流条件下泥沙出流情况,不同强度径流产沙过程有显著差异。由图 3 可知,入流流量为 0.77 L/s(重现期 $P=3$, P 为降雨重现期)和 0.9 L/s(重现期 $P=5$)处理中,自泥沙最初从过滤带末端出现开始,先增加之后趋于稳定。入流泥沙浓度对其影响仅为数值上的变化(图 3)。1.08 L/s(重现期 $P=10$)和 1.26 L/s(重现期 $P=20$)入流强度处理中,变化规律则为持续增加,泥沙出流率增加即出流泥沙斜率变大。1.26 L/s 处理泥沙出流率增加幅度要 >1.08 L/s。说明植被过滤带对泥沙的拦蓄能力存在极限,在到达拦蓄上线之前,随时间推移,泥沙出流量小于入流量。植被过滤带内泥沙存蓄量处于不断增加的状态。从 1.08, 1.26 L/s 泥沙出流量变化可发现,当泥沙入流累积量大于植被过滤带泥沙拦蓄能力之后,泥沙出流量大幅增加。

泥沙在植被过滤带内拦蓄作用主要由泥沙粒径、入流强度、下垫面状况共同影响。当入流强度增加到 1.08 L/s($P=10$)之后,过滤带对其拦蓄效果较差,其泥沙出流量的增加可能与过滤带自身产沙有关,在入流强度增加后,过滤带表层细小沉积物随水流迁移,影响拦蓄结果。由图 4 可知,随入流径流强度的增加(T1~T4、T5~T8、T9~T12、T13~T16),泥沙出流率成上升趋势,泥沙浓度的增加对出流率有着同样的影响。同入流强度下,各入流强度均呈现显著差异($p<0.05$),同入流强度下,各浓度处理也呈现显著差异($p<0.05$)。

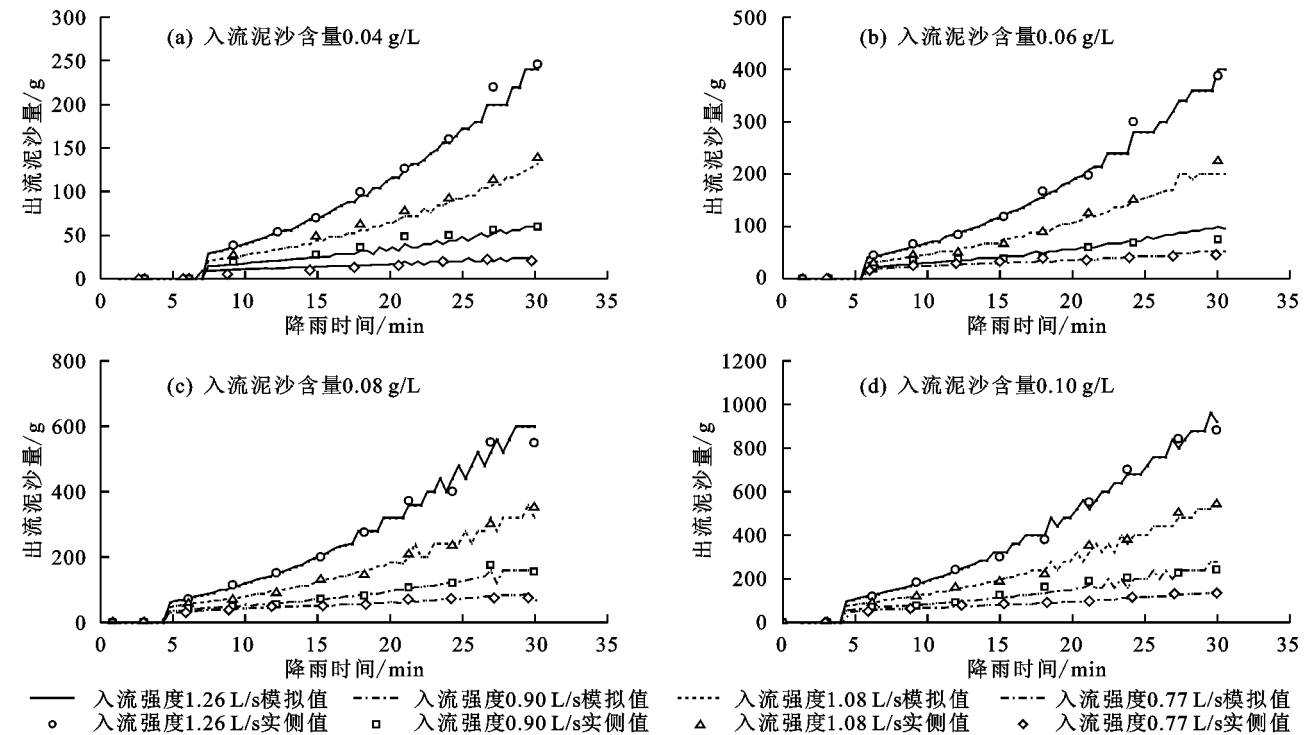
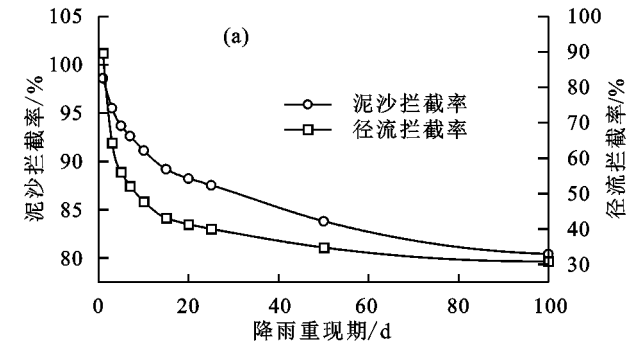


图 3 不同入流强度及浓度下泥沙出流量

2.4 情景模拟

上文对入流强度和入流泥沙含量对径流和泥沙出流率的影响呈现显著差异,为进一步对当地不同入流强度下进行研究,利用 VFSSMOD 模型对不同入流强度下径流、泥沙出流率进行模拟。由图 4a 可知,随着降雨重现期增加,泥沙拦截率下降,由 $P=1$ 的 98.61% 下降至 $P=100$ 时的 80.40%;径流拦截率由 89.63% 下降至 30.85%。与泥沙拦截率相比,径流变化更大。草本植被茎秆强度较低,在高强度入流流量冲刷下,过滤带内植株发生倒伏,导致过滤带内植株过滤效果下降,大量水携沙流出过滤带,过滤效果下降。



不同含沙量处理泥沙截留量随浓度增加而减少,由 0.01 g/L 的 98.31% 减少到 1 g/L 的 33.59%。径流截留率不随入流泥沙含量变化(图 4b)。植被过滤带对径流的拦蓄主要以土壤入渗的途径实现,入流量恒定,故在入流泥沙含量增加过程中,径流拦截率无变化。泥沙含量的增加对水分入渗无影响。泥沙截留率随泥沙入流流量增加迅速降低,证明了植被过滤带储沙能力恒定,当入流泥沙总量小于过滤带拦蓄能力时,大部分泥沙在过滤带内沉降。泥沙含量较大,植被过滤带达到最大拦蓄量之后,植被过滤带过滤效果丧失,无法对后续进入泥沙进行沉降。

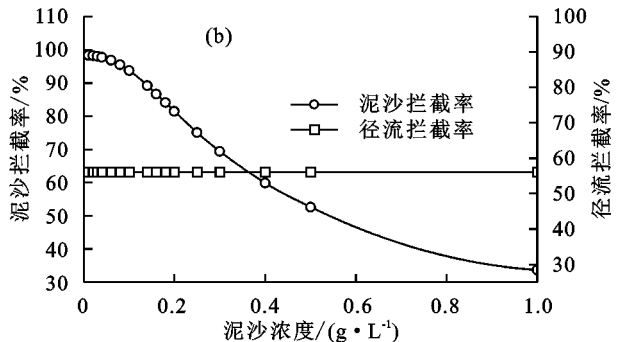


图 4 不同入流条件下径流泥沙出流率

3 讨论

本文选择当地本土植被进行植被过滤带建设,入流流量为流域重现期为 3,5,10,20 年一遇降雨在 30 min 内 667 m² 产流量,结果表明,来水强度与泥沙浓度的增加导致泥沙出流量显著增加。植被过滤带构建中植物选择对污染物净化效果有着显著影响,国内外对一些草本植物的截留拦沙效果进行了探讨^[15]。但植物生长对气候及土壤状况有着较强的依赖性,其所得结论推广及可复制性受到约束^[20]。相较引进其他物种,使用当地常见植物品种不会在生态脆弱地区产生土壤水分亏缺及土壤干层风险。植被过滤带的入流流量对泥沙等悬浮类污染物去除效率有着直接的影响^[7],过滤带的存在可以有效降低悬浮污染物的含量及浓度。在小流量下,植被过滤带的拦截效果更好^[21]。本试验模拟径流冲刷,对比分析 4 种汇流强度下植被过滤带对水沙拦蓄效率,结果也证明了余冬立等^[6]的结论,小流量径流水土拦蓄效果更好。植被过滤带的存在降低了径流流速,增加水力停留时间,提高了水分入渗量,从而达到了降低污染物浓度的效果。当径流量大时,径流在过滤带内停留时间短,较大的来水流量导致刚性较差的植株出现倒伏,下渗水量减少,从而影响污染物净化效果。与泥沙出流率比较,径流出流率受土壤含水率影响较大,各入流强度初期均以入渗为主,当土壤接近饱和后入渗速率减

缓,径流出流量增加。岱海流域地处干农牧业交错区且生态脆弱,干旱缺水,降水集中且降水强度较大,应注意在过滤带建设中考考虑地形与汇流面积及降雨强度因素,由过滤带的控制面积来对建设进行指导,确保入流流量在过滤带最佳控制范围内,使其可以较好地发挥蓄水减沙作用。

VFSSMOD 模型被广泛地应用于非点源污染的预测工作中。由于其考虑径流沿程坡度及植被条件变化,考虑随时间变化的土壤水分入渗量,故其可以准确反映径流中泥沙的浓度变化。近年来在我国得到广泛利用,杨寅群等^[13]利用 VFSSMOD 对野外小区试验结果进行模拟发现,模型可以对降雨后植被水沙出流量进行准确预测提出,其可以用于黄土高原植被过滤带建设。孙晓涛等^[22]在我国华北地区引入此模型,模拟效果良好,该模型的有效推广有助于面源污染防治工作进行。潘岱立等^[15]研究表明,VFSSMOD 模型参数是影响其预测精度的重要因素。本试验利用 VFSSMOD 模型对试验数据进行模拟发现,该软件预测结果精度较高,并确定了冰草与羊草混播的模拟参数。

4 结论

(1)VFSSMOD 模型对有植被过滤带 SDR、RDR 率定后模拟值与实测值模拟精度较高该模型可以较好地对径流泥沙出流量进行模拟,可以用于农牧业交

错区植被过滤带建设。

(2)入流强度增加会缩短径流开始出流时间,0.77 L/s 入流强度的径流出流时间为 0.9,1.08,1.26 L/s 的 1.3,1.6,1.6 倍。4 种强度径流进入过滤带后土壤入渗率分别为 64.3%,56.08%,47.67%,41.27%。

(3)泥沙出流量呈现 2 种不同规律,0.77,0.9 L/s 入流强度泥沙出流量先增加后趋于稳定,1.08,1.26 L/s 入流强度下,泥沙出流量随时间推移而增加。同入流浓度下,各入流强度均呈现显著差异($p<0.05$);同入流强度下,各浓度处理也呈现显著差异($p<0.05$)。

参考文献:

[1] 肖培青,姚文艺,张海峰.黄土高原植被固土减蚀作用研究进展[J].水土保持研究,2012,19(6):282-286.

[2] 莫明浩,方少文,涂安国,等.水土流失面源污染及其防控研究综述[J].中国水土保持,2012(6):32-34.

[3] Francipane A, Fatichi S, Ivanov V Y, et al. Stochastic assessment of climate impacts on hydrology and geomorphology of semiarid headwater basins using a physically based model [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface,2015,120(3):507-533.

[4] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.草本植被覆盖对坡面降雨径流侵蚀影响的试验研究[J].土壤学报,2010,47(3):401-407.

[5] Mekonnen M, Keesstra S D, Stroosnijder L, et al. Soil conservation through sediment trapping: A review [J]. Land Degradation and Development,2015,26(6):544-556.

[6] 余冬立,阿力木·阿布来提,陈倩,等.不同入流条件下植被过滤带对坡面径流氮、磷的拦截效果[J].应用生态学报,2018,29(10):3425-3432.

[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] 黄沈发,唐浩,鄢忠纯,等.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[J].环境污染与防治,2009,31(6):53-57.

[9] 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.

[10] 吴建强,黄沈发,吴健,等.缓冲带径流污染物净化效果

研究及其与草皮生物量的相关性[J].湖泊科学,2008,20(6):761-765.

[11] Abu-Zreig M. Factors affecting sediment trapping in vegetated filter strips: Simulation study using VFSSMOD [J]. Hydrological Processes,2010,15(8):1477-1488.

[12] Abu-Zreig M, Rudra R P, Whiteley H R, et al. Validation of a vegetated filter strip model (VFSSMOD) [J].Hydrological Processes,2001,15(5):729-742.

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

[14] 杨寅群,李怀恩,杨方社.基于数学模型的陕西黑河水源区植被过滤带效果评估[J].水科学进展,2013,24(1):42-48.

[15] 潘岱立,赵西宁,高晓东,等.基于 VFSSMOD 模型的黄土坡面生草带产流产沙动态模拟[J].农业工程学报,2017,33(8):119-125.

[16] Muñoz-carpena R, Fox G A, Sabbagh G J. Parameter importance and uncertainty in predicting runoff pesticide reduction with filter strips [J]. Journal of Environmental Quality,2010,39(2):630-641.

[17] 程谅,占海歌,郭忠录.3 种草本植物根系对土壤抗蚀特性的响应[J].草业科学,2019,36(2):284-294.

[18] Wei H, Shao M G, Wang Q J, et al. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses [J].Geoderma,2009,149(3/4):355-366.

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

[20] Lambrechts T, Francis S, Lutts S, et al. Impact of plant growth and morphology and of sediment concentration on sediment retention efficiency of vegetative filter strips: Flume experiments and VFSSMOD modeling [J].Journal of Hydrology,2014,511:800-810.

[21] 陈倩,傅瑜,余冬立,等.坡面产流产沙过程对植被过滤带响应的试验研究[J].水土保持学报,2017,31(6):104-109.

[22] 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.