

基于 VFSMOD 模型的黄土坡面生草带 产流产沙动态模拟

潘岱立¹, 赵西宁¹, 高晓东¹, 宋亚倩², 吴普特^{1*}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100)

摘要: 利用微型径流小区和人工降雨试验, 探讨运用 VFSMOD 模型评估和预测引入不同草种生草带后黄土坡面产流产沙动态特征的可行性。通过土壤物理性质参数和生草带生长状态参数的差异, 模型还原了黄土坡面引入白三叶生草带与百脉根生草带后产流产沙特征的差异及其随生长时期的变化, 模拟效果可靠, 纳什系数: 0.93 (径流系数), 0.98 (修正后产沙量); 归一化均方根误差: 6.2% (径流系数), 10.9% (修正后产沙量)。当生草带在降雨集中期 (如本研究中百脉根草带 9 月上旬) 不能保证较好的生长状态和地表覆盖时, 其坡面产沙量急剧增大, 且明显大于 VFSMOD 模型模拟值。在实际生草带设计时, 应避免该情况发生。综上, VFSMOD 模型适用于引入生草带后黄土坡面产流、产沙量的模拟和预测。
关键词: 径流; 泥沙; 草; VFSMOD 模型; 黄土坡面; 生草带; 生长时期

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.08.016

中图分类号: S157; P642.13⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-08-0119-07

潘岱立, 赵西宁, 高晓东, 宋亚倩, 吴普特. 基于 VFSMOD 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.08.016 http://www.tcsae.org

Pan Daili, Zhao Xining, Gao Xiaodong, Song Yaqian, Wu Pute. VFSMOD-based runoff and sediment yield simulation on loess slope with vegetation filter strips[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(8): 119-125. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.08.016 http://www.tcsae.org

0 引言

生草带能增加地表阻力, 促进降雨就地入渗和泥沙沉降堆积, 是简单有效的水土保持植被措施^[1-2], 已在中国西南山区, 三峡库区, 黄土高原等地有广泛应用。由于草带形态学特征和土壤物理性质差异, 不同草种生草带水土保持效果往往不同^[3-6]。Zuazo 等^[7]发现橄榄园坡面布设黑麦草草带的减沙率为 71%, 而燕麦草和百里香的混合草带仅为 59%; 袁久芹等^[8]发现布设紫花苜蓿和灰毛豆草带后坡面产流量及产沙量存在显著差异。牧草形态学特征和生草带土壤物理性质都会随草带的生长时期而波动^[9-10], 因而生草带的水土保持效益具有时间变异性^[5,9]。Otto 等^[2]发现意大利北部生草带拦蓄径流的能力随生长时期波动。牧草品种和牧草的生长时期均是影响布设生草带后坡面产流和产沙特征的重要因素。因此, 生草带应选择能在降雨性侵蚀多发季节保持明显的拦蓄径流和过滤泥沙效果的草种。

基于物理过程的数学模型是预测生草带水土保持功

能, 优化生草带设计的重要工具^[11]。其中, 植被过滤带模型^[12] (vegetative filter strip model, VFSMOD) 获得了广泛应用^[13-16]。如 Xiao 等^[6]用该模型模拟了中国华北地区坡耕地引入生草带后坡面产流产沙特征, 取得了良好的模拟效果 (径流量和输沙量的纳什系数分别为 0.91 和 0.85); Munoz-Carpena 等^[11]将该模型用于北科罗拉多州坡面生草带适宜宽度的计算风险分析当中; Olilo 等^[17]利用该模型预测并对比了肯尼亚 6 种生草带的污染物过滤效果等。鉴于 VFSMOD 模型在模拟生草带径流泥沙运移过程方面的应用实践和成功经验, 本文亦选取该模型模拟黄土坡面引入生草带后的产流产沙特征。但以往研究多应用 VFSMOD 模型计算合理的生草带宽度^[11], 利用该模型分析不同草种生草带在不同生长时期下坡面产流产沙特征的研究尚较薄弱^[4]。另外以往研究多假定不同草种和生长时期下生草带土壤物理性质参数一致, 仅考虑各草种生草带形态学特征的差异。不同牧草品种和生长时期下, VFSMOD 模型能否反映出土壤物理性质参数和草带形态学参数差异对生草带坡面产流产沙特征的影响; 其能否用于指导生草带草种的优选, 目前尚不明确。

黄土高原退耕还林 (草) 工程实施以来, 该区特色果品红枣栽植面积迅速扩大。但果园仍多为清耕制, 致使坡面蓄水抑蒸保墒抗蚀效果差^[14,18]。已有研究表明, 引入行间生草带后, 坡地果园水土流失和土壤干燥化问题得到了同步缓解^[19]。合理选择生草带草种是有效控制该区果园坡面水土流失, 促进降雨就地拦蓄入渗, 同步实现果园经济与生态效益的前提。由于生草带布设宽度, 降雨特征, 土壤异质性等差异, 野外研究手段在有限试

收稿日期: 2016-07-16 修订日期: 2017-03-28

基金项目: 国家自然科学基金 (41571506、51579212); 国家重点研发计划 (2016YFC0400204); 陕西省科技统筹创新工程项目 (2015KTCL02-25、2016KTZDNY-01-03)

作者简介: 潘岱立, 山东德州人, 博士生, 主要从事水土资源高效利用研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。

Email: pandaili@nwsuaf.edu.cn

*通信作者: 吴普特, 陕西武功人, 研究员, 主要从事水土保持与节水农业研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。

Email: gjzwp@vip.sina.com

验时间条件下得到的结论,难以用于指导其他区域及条件下的坡面生草带的设计与优化工作。为此,本文通过模拟降雨试验,基于实测径流泥沙数据和 VFSMOD 模型研究微型径流小区(斑块尺度)上枣树(*Ziziphus jujube* Mill.)行间2种草带(百脉根(*Lotus corniculatus* L.),白三叶(*Trifolium repens* L.))在侵蚀性降雨多发季节(6—9月^[5])内的黄土坡面产流产沙特征。数值模拟过程同步考虑2种草带土壤物理性质和草带形态学参数的差异情况,探讨 VFSMOD 模型在不同草带品种和牧草生长时期条件下的适用性,以期为黄土高原果园行间生草中草种的选择提供模型预测方面的经验。

1 材料与方法

1.1 试验布设

本试验在陕西省杨凌区西北农林科技大学旱区节水农业研究院内进行,供试土壤为黄绵土(USDA 分类标准:黏壤土),土壤容重为 $1.35\sim 1.40\text{ g/cm}^3$ 。试验径流小区分为2类:1)枣树-生草带复合径流小区;2)枣树径流小区。枣树-生草带复合径流小区长 \times 宽 \times 高为 $1.4\text{ m}\times 0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}$,枣树径流小区长 \times 宽 \times 高为 $0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}\times 0.8\text{ m}$ 。土槽一端装有集流槽,用于坡面径流、泥沙收集(图1)。于2010年6月进行径流小区土壤装填,装填前土壤自然风干并充分混合后过直径8 mm筛,将植物根系、石块等杂物去除。于2011年5月,在每个枣树-生草带复合径流小区的上方区域(0.8 m)中心处,移栽1株生长情况相似的三龄梨枣树苗。在其径流小区下方(0.6 m)范围内,按照 15 g/m^2 的密度均匀撒播草籽。牧草品种为白三叶和百脉根,2种草种各布置3个径流小区作为重复。对于枣树径流小区,仅在中心区域移栽枣树苗。枣树管理措施相同,每年春秋两季修剪,其冠幅控制在径流小区上方区域(0.8 m)范围内且保持所有径流小区内的枣树叶面积指数基本一致。

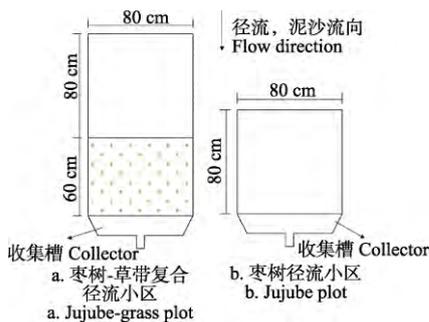


图1 试验小区布设示意图
Fig.1 Layout of experimental plots

试验降雨由一套全自动针头式人工模拟降雨器产生,降雨强度范围为 $0.3\sim 2.8\text{ mm/min}$,降雨高度4 m,降雨均匀度大于86%,雨滴中位直径2.2 mm,雨滴动能 $17.7\text{ J/(m}^2\cdot\text{mm)}$ 。降雨试验于2015年进行,根据物候期观测和以往研究^[19],牧草在6月中旬前处于返青,分枝阶段,叶面积增长,茎秆密度上升,6月中旬—8月下旬处于孕蕾,结实阶段,叶面积大致稳定且处于较高水平,8月下旬后开始进入枯黄凋萎阶段,叶面积开始下降。白

三叶与百脉根2种供试草种物候期稍有不同,但差异不大。因此本文选择牧草生长前期(6月10—17日),中期(7月21—28日),后期(9月1—8日)3个时期进行人工降雨,径流小区坡度为 15° 。每个时期内,按照小、中、大的顺序安排3场人工降雨试验,雨强分别为1.0、1.2和 1.5 mm/min ,降雨历时均为60 min。每次降雨前径流小区土壤体积含水率控制在 $0.26\sim 0.29$ 之间,牧草雨前茬割至10 cm高度。综上,本研究共进行9次人工降雨试验(3个生长时期 \times 3个雨强),每次7个径流小区(2草种 \times 3重复+1枣树径流小区)。径流小区开始产流后,在径流收集槽处每分钟收集1次径流,通过量筒读取径流体积,将径流转移至烧杯后,放入烘箱烘干(105°C)48 h。利用称量法测量泥沙质量。本试验通过2个指标反映生草带水土保持效益:径流系数,即次降雨中径流小区产流量与降雨量的比值;产沙量,即次降雨中径流小区产沙总量。

1.2 VFSMOD 模型

1.2.1 VFSMOD 模型简介

VFSMOD 模型结构示意图如图2所示。模型由土壤入渗模块,坡面流模块和泥沙运动模块3个模块组成。土壤入渗模块根据降雨和土壤入渗能力,利用改进后的Green-Ampt方程计算降雨中生草带土壤入渗情况。坡面流模块根据生草带地形信息,上方地块输入生草带的径流(即上方来水)和降雨超渗产流情况,通过运动波方程描述坡面不同位置径流流速和单宽流量。得到的地表径流流速,流量及坡度等信息输入泥沙运动模块,后者结合上方地块输入生草带的泥沙(即上方来沙),草带的形态学特征等,通过肯塔基算法(Kentucky algorithm)计算不同粒径泥沙运动情况^[12]。泥沙运动模块可以通过对地形参数的修改,考虑泥沙沉积对生草带地形和坡面流运动的反馈作用。模型可模拟次降雨尺度上生草带土壤入渗,泥沙运移与沉降以及污染物迁移过程^[20],模型输出主要包括生草带径流,泥沙输出情况(图2)。VFSMOD 模型中关于草被特征的输入项可分为土壤物理性质参数和草被形态学特征参数2大类。模型入渗-产流过程主要取决于各土壤物理性质参数,泥沙运动与径流运动耦合计算,因此土壤物理性质参数对坡面产沙量有间接影响^[12]。

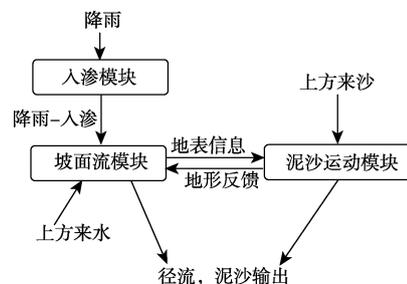


图2 VFSMOD 模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of VFSMOD model

1.2.2 VFSMOD 模型参数获取

VFSMOD 模型输入参数主要有以下4大类:降雨和上方来水来沙情况,土壤物理性质参数,生草带生长状态参数,泥沙特征参数。上方来水来沙指生草带上方区

域输入草地的径流和泥沙量。本试验各处理枣树冠幅和土壤管理措施一致，因而假定各枣树-生草带复合径流小区上方来水来沙情况一致，且均等于枣树径流小区（图 1）收集槽处所得的径流、泥沙量。降雨参数由人工降雨中雨强和降雨历时确定。

土壤物理性质参数主要包括：饱和含水量（OS），初始含水量（OI）和湿润锋平均吸力（SAV），饱和导水率（VKS）。鉴于 VKS 对径流量是最敏感参数，是对泥沙量最敏感的 3 个参数之一^[12]，且草带区域 VKS 存在较大时空变异性^[10]，本研究中不同生长时期和径流小区内，均采用各自的 VKS 值。VKS 空间变异性较大，土壤取样次数较少难以真实反映整个生草带 VKS 平均水平，而土壤取样较多则会破坏土壤结构，影响后续试验^[21]。所以，其值由 VFSSMOD 模型率定确定，率定采用 GMCS (global multilevel coordinate search) 算法^[12]。土壤初始含水量由降雨前实测获得，OS 和 SAV 反映草种长期生长后对于土壤物理性质的影响^[14]。因此本研究仅考虑种植不同草种后土壤 OS 和 SAV 的差异，即假定同一生草带 OS，SAV 在 3 个生长时期（6—9 月）内无变化。9 月中旬降雨结束后，通过环刀法在每个径流小区取随机取样 3 次，用烘干法测量 OS，离心机法测量和计算 SAV^[21]。

生草带生长状态参数主要包括草带微域水流曼宁糙度（filter media Manning’s roughness, VN）、裸地曼宁糙度（bare surface Manning’s roughness, VN2）、草带茎秆间距（stem spacing, SS）和生草带曼宁糙度（strip Manning’s roughness, RNA）等。前二者对于模型输出不敏感，故采用模型推荐值^[12]。不同草种和生长时期草带生长状态差异主要体现在 SS 和 RNA 这 2 个参数上^[4]。本研究中不同生长时期和径流小区内，均测量并采用各自的 SS 和 RNA 值。SS 由下式计算^[5]：

$$SS = \sqrt{\frac{100}{D_s}} \quad (1)$$

式中 D_s 为茎秆密度（株/m²），在每个生长时期降雨之后测量，每个径流小区随机取 3 个样方（20 cm×20 cm），取平均值作为该径流小区 D_s 值。

RNA 由下式计算^[4]：

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

式中 V 表示生草带内水流流速，m/s；每次降雨中由高锰酸钾示踪法测量； R 为水力学半径，此处取水流深度，由径流量和生草带宽度计算得到，m； S 为坡度，无量纲。

泥沙特征参数主要包括泥沙淤积区孔隙度，输入泥沙粒径分布，输入泥沙浓度等。泥沙淤积区孔隙度表示泥沙在生草带前方沉降形成的堆积区域的土壤孔隙度，模型默认采用 0.43。使用激光粒度计（Malvern Instruments, Malvern, England）对枣树径流小区集流槽收集得到的泥沙进行粒径分析，得到输入生草带的泥沙粒径分布信息。通过该处所得泥沙总量与径流总量的比例，计算得到输入泥沙浓度（各雨强和生长时期下采用各自测量值）。不同生长时期和草种生草带 SS，RNA 和 VKS 取值情况见表 1，模型其他参数意义及其取值汇总见表 2。

表 1 不同草种和生长时期下主要土壤物理参数均值和方差
Table 1 Means and standard deviation of main soil physical parameters of different grass species at each development period

草种 Grass species	生长时期 Development period	土壤饱和导水率 Saturated soil water conductivity (cm·h ⁻¹)	生草带茎秆平均间距 Strip mean stem spacing/cm	生草带曼宁糙度 Strip Manning’s coefficient (s·m ^{-1/3})
白三叶 White clover	前(6月10日—17日)	3.78±0.13	1.20±0.06	0.45±0.05
	中(7月21日—28日)	3.66±0.18	0.37±0.02	0.75±0.11
	后(9月1日—8日)	3.16±0.11	0.34±0.03	0.61±0.06
百脉根 Birdfoot trefoil	前(6月10日—17日)	3.17±0.07	1.34±0.07	0.36±0.12
	中(7月21日—28日)	2.96±0.09	0.91±0.09	0.09±0.02
	后(9月1日—8日)	2.76±0.06	3.07±0.18	0.06±0.03

注：样本数为 3。

Note: Samples numbers: 3.

表 2 VFSSMOD 模型参数意义和取值
Table 2 Parameters meanings and values in VFSSMOD model

参数 Parameters	单位 Unit	物理意义描述 Description	取值 Values
FWIDTH	m	草带宽度	0.6
VL	m	草带长度	0.8
SAV	m	湿润锋平均吸力	0.32~0.35（白三叶） 0.28~0.30（百脉根）
OI	m ³ ·m ⁻³	雨前土壤体积含水量	0.26~0.29， 每次降雨前测量
OS	m ³ ·m ⁻³	土壤饱和和体积含水量	0.44~0.47（白三叶） 0.40~0.44（鸡脚草）
SM	m	坡面填洼含水量	0
HE	cm	牧草高度	10
CI	g·cm ⁻³	输入泥沙浓度	0.014~0.051
VN	s·cm ^{-1/3}	草带微域水流曼宁糙度	0.012
VN2	s·m ^{-1/3}	裸地曼宁糙度	0.02
NPART	无量纲	上方泥沙粒径分级代码	1（代表黏粒类）
POR	无量纲	泥沙淤积区孔隙度	0.434

注：其他参数，例如最大迭代次数等，均采用模型推荐值。

Note: For other parameters such as maximum iterations, the recommended values were applied.

1.3 模型模拟效率评价和数据分析方法

本研究用模拟偏差（ D ）、归一化均方根误差（normalized root mean square error, NRMSE）、纳什系数（Nash coefficient, NE）评价模型径流量和泥沙量模拟效果。

$$D = \frac{P_s - O}{O} \times 100\% \quad (3)$$

$$NRMSE = \frac{1}{O_m} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_{si} - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$NE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_{si} - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_m - O_i)^2} \quad (5)$$

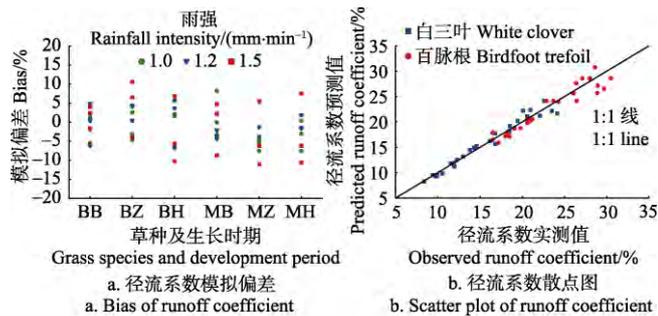
式中 P_s 和 O 分别为预测值和实测值； P_{si} 和 O_i 为第 i 次降雨预测值和实测值； n 为总降雨次数； O_m 为观测值均值。

利用 LSD 法分析处理间差异显著性 (α 均取 0.05) 情况。数据分析由 EXCEL(R2013)和 MATLAB(R2014b) 完成, 图采用 ORIGIN (R8.0) 软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同草种生长时期坡面径流系数模拟

图 3 表示 VFSMOD 模拟各次降雨径流系数模拟偏差分布情况和模拟值与实测值散点图。绝大多数情况下 (54 场降雨中的 51 场), 径流系数模拟偏差在 $\pm 10\%$ 以内, NE 高于 0.9, NRMSE 为 6.2% (表 3)。不同生长时期内, 模型模拟精度无明显变化 (图 3a)。



注: BB、BZ、BH 分别为白三叶前、中、后期; MB、MZ、MH 分别为百脉根前、中、后期; 下同。
Note: BB, BZ and BH are early, middle and late period of white clover, respectively; MB, MZ and MH are early, middle and late period of birdfoot trefoil, respectively; Same as below.

图 3 径流系数及其模拟偏差
Fig.3 Runoff coefficient and its bias

表 3 坡面径流系数和产沙量模拟效果

Table 3 Modeling performance of runoff coefficient and sediment yield

参数 Parameters	归一化均方根误差 NRMSE/%	纳什系数 NE
径流系数 Runoff coefficient	6.2	0.93
产沙量 Sediment yield	41.5	0.82
修正后产沙量 Modified sediment yield	10.9	0.98

注: 修正后产沙量指除去百脉根生长后期 1.2 和 1.5 mm min⁻¹ 雨强下的产沙量数据。
Note: Modified sediment yield is obtained after excluding data of late development period of birdfoot trefoil at rainfall intensity 1.2 and 1.5 mm min⁻¹.

2 种草被在 3 个降雨量条件下坡面径流系数在 9.2% (白三叶生长前期, 1.2 mm/min 雨强) ~29.6% (百脉根生长后期, 1.5 mm/min 雨强) 之间 (图 4)。随雨强增加, 各处理径流系数均明显增加, 表明更大比例降雨以坡面径流形式流失。相同雨强和生长时期下, 白三叶处理径流系数均显著小于百脉根处理 ($P < 0.05$), 表现出较好的降雨拦蓄效果。随着生长时期延伸, 2 种草带径流系数均呈现逐步上升趋势。

2.2 不同草种生长时期坡面产沙量模拟结果

产沙量模拟值与实测值比较及其偏差分布如图 5 所示。模型严重低估了百脉根处理生长后期产沙量, 特别是 1.2 和 1.5 mm/min 雨强下, 模拟值均值分别为 23.3 和 54.3 g, 实测值均值分别为 32.8 和 91.5 g, 模拟偏差分别达到 -28.8% 和 -40.6%。模型对产沙量模拟效果一般, NRMSE 高达 41.5% (表 3)。如除去百脉根生长后期 1.2

和 1.5 mm/min 雨强下的 6 场降雨数据, 产沙量模拟偏差大都在 $\pm 15\%$ 以内 (48 场中的 40 场降雨), NRMSE 为 10.9%, NE 为 0.98, 模拟结果总体较好 (表 3), 表明白三叶整个生长时期和百脉根前中期模型适用性较好。

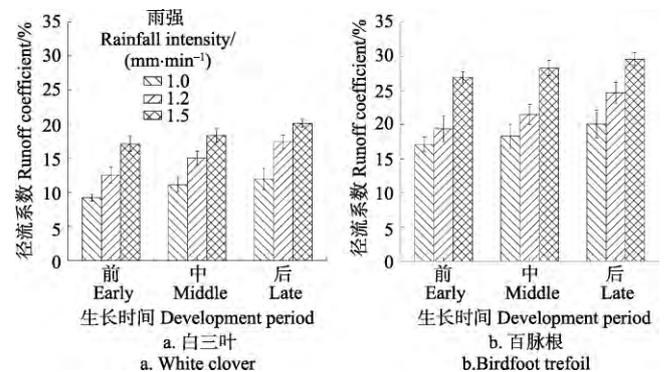


图 4 不同草种各生长时期径流系数模拟结果
Fig.4 Simulated runoff coefficient at each development period of different grass species

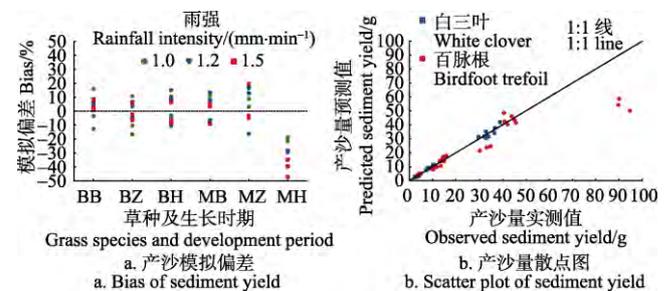


图 5 产沙量实测值及模拟值比较及其模拟偏差
Fig.5 Comparison of measured and simulated sediment yield and its bias

各雨强下 2 种草被坡面产沙量随生长时期的变化如图 6 所示。随着雨强增加, 径流小区产沙量迅速增大。白三叶处理生长中后期产沙量相近, 均低于生长前期。以 1.2 mm/min 雨强为例, 白三叶处理前中后期产沙量分别为 12.3、8.3、9.4 g。百脉根处理生长前期产沙量与白三叶处理相近, 3 个雨强下均无显著性差异 ($P > 0.05$)。百脉根生长后期产沙量较前中期明显增加, 且显著高于白三叶处理 ($P < 0.05$)。生长后期 1.5 mm/min 雨强下, 百脉根处理产沙量达到最大值 91.5 g。可见, 2 种草带坡面产沙量随生长时期变化趋势并不一致。

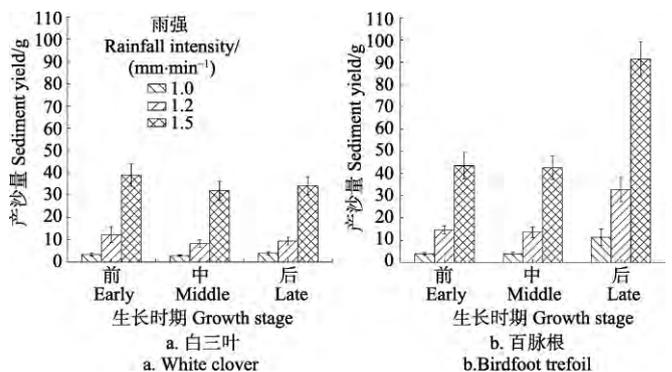


图 6 不同草种各生长时期产沙量模拟结果
Fig.6 Simulated sediment yield at each development period of different grass species

3 讨 论

3.1 生草带坡面产流特征与径流系数

在降雨强度和土壤初始含水量等因素相近的情况下, 白三叶生草带处理径流系数小于百脉根处理(图 4), 表明白三叶草带土壤入渗较大, 降雨就地拦蓄效果明显。土壤 VKS、OS 和 SAV 等物理性质差异可能是导致二者差异的主要原因。白三叶须根系较多, 根系分布深度较浅, 可促进土壤容重降低和孔隙度增加, Holtham 等^[22]通过白三叶盆栽试验, 也得到相同结论。白三叶生草带土壤 VKS、OS 和 SAV 均大于百脉根(表 1 和表 2), 有利于土壤入渗。随生长时期延伸, 草带饱和导水率率定值呈现逐渐减小趋势(表 1)。可能原因是当径流流经草带区域时, 阻力增加, 流速和携沙能力下降^[20]。较小粒径的泥沙在草带内沉降, 堵塞土壤孔隙, 引起后续土壤饱和导水率下降。Hu 等^[10]也发现黄土高原地区草地土壤饱和导水率在月份尺度上逐渐减小并得到类似原因。Deletic 等^[23]利用机理模型 TRAVA 模型率定获取生草带饱和导水率随牧草生长时期的变化情况, 发现饱和导水率率定值逐步下降。本文利用 VFSMOD 模型率定计算了土壤饱和导水率, 得到相似结果。事实上, 土壤物理性质随草种和生长时期变化是很多研究的共同结论^[17;24], 但目前利用 VFSMOD 模型进行生草带设计时, 对这一因素考虑尚不充分。如 Munoz-Carpena 等^[11]设计生草带宽度时, 将土壤饱和导水率固定为 0.6 mm/h, Yang 等^[25]在计算黑河流域生草带适宜宽度时, 将土壤饱和导水率, 饱和含水率和湿润锋平均吸力取值分别固定为 8 mm/h、0.463 和 8.99 cm。以上研究忽略不同生草带和生长时期下土壤物理性质的波动, 因此其结果可靠性受到一定制约。该条件下依据模型模拟方法规划得到的生草带宽度可能偏小, 无法保证在各个生长时期下获得规定的减流减沙效益, 或者偏大, 造成土地资源浪费。

3.2 生草带坡面泥沙产量

能得到妥善维护的草带一般植被覆盖情况较好, 因而 VFSMOD 模型假定草带内部不发生土壤侵蚀, 草带对于坡面产沙的影响仅体现在对上方来水中泥沙的沉降和阻挡作用^[12]。VFSMOD 模型严重低估了百脉根 9 月的泥沙输出量(图 5), 其可能原因如下: 百脉根 9 月进入枯黄凋萎期, 叶片大量凋落, 植株连片枯萎死亡现象明显。从 7 月底—9 月初, 百脉根草带茎秆平均间距从 0.91 cm 上升到 3.07 cm, 坡面流曼宁系数发生明显下降(表 1), 生长后期(9 月初)百脉根草带已失去对土壤的有效覆盖。此时径流小区泥沙来源有: 上方枣树地输入泥沙和草带自身发生土壤侵蚀, 产生泥沙, VFSMOD 模型中草带内部不发生土壤侵蚀的假定此时已不再适用。由于此时草带自身土壤发生侵蚀导致模型严重低估了百脉根处理的产沙量。杨寅群等^[15]应用 VFSMOD 模型模拟华县沙棘带对泥沙的过滤效果时, 也得到类似结果: 其 8 号放水试验中, 模型模拟误差高达 -26.4%。说明应用 VFSMOD 模型预测较高雨强、生长状况较差的生草带的产沙量时, 应注意生草带自身是否发生土壤侵蚀, 应避免田间实际

状况与 VFSMOD 模型假定发生冲突, 导致模型严重低估草带产沙量^[26-28]。邓娜等^[29]通过修正的土壤侵蚀模型(MUSLE)估算了草带自身发生的土壤侵蚀量, 并将这部分泥沙来源与 VFSMOD 模型预测草带泥沙输出量相加, 预测了生草带的泥沙产量。这一改进一定程度上纠正了 VFSMOD 模型偏差。本研究结果表明, 在牧草生长状况较差等特定情况下, 需要类似方法对模型进行修正。

本试验中白三叶处理产沙量明显低于百脉根处理(图 6), 表明不同草种生草带泥沙过滤效果存在明显差异。这一结果与以往研究一致^[4,7-8], 如: Lambrechts 等^[4]对比三叶草和黑麦草发现 2 种牧草对上方泥沙拦蓄能力差异显著, 且随生长季节延伸呈现不同变化趋势。这说明草种选择应是布设生草带的重要考虑因素。本试验中百脉根处理生长后期生草带自身发生土壤侵蚀是导致其产沙量大于白三叶处理的原因之一。其他原因还有: 首先, 白三叶分枝能力较强, 茎秆密度大, 对坡面径流有更大阻力。白三叶生长中后期(7 月下旬—9 月上旬)茎秆平均间距明显下降, 坡面流曼宁系数明显增大(表 1), 且与百脉根处理均存在显著差异, 有利于径流流速下降, 泥沙沉降增加。Lambrechts 等^[4]也观察到黑麦草和三叶草之间草带茎秆平均间距以及坡面流曼宁糙度存在显著差异, 并将其归结为 2 种草带产沙量不同的主要原因。其次, 由于土壤性质差异, 百脉根处理坡面径流系数普遍大于白三叶处理(图 4)。在径流携沙能力相同时, 径流量增大会导致泥沙输出量上升, 这是 2 种生草带产沙量差异的另一原因。以往利用 VFSMOD 模型对比不同草种生草带泥沙及污染物拦蓄能力时, 多在雨前将土壤置于水分饱和状态^[4,11], 忽略土壤物理性质差异对生草带产沙量的影响, 试验代表性受到制约。土壤物理性质参数通过径流量间接影响生草带产沙量^[12], 因此利用 VFSMOD 模型模拟不同草种生长时期下草带产沙特征时, 应考虑土壤物理性质差异及其动态变化特征, 以提高研究的代表性。

VFSMOD 模型作者指出, 当草被茎秆平均间距大于 3 cm 时^[12], 生草带内部容易发生土壤侵蚀, 因此不推荐作为生草带使用。黄土高原地区干旱缺水, 气候情况差异大, 应当注意牧草在推广区域是否适宜生存, 在降雨多发时期能否保持旺盛生长。牧草较好的生长状态是 VFSMOD 模型准确模拟坡面产流产沙的前提, 也是生草带取得较好减流减沙效果的保证。除去百脉根 9 月试验结果后, 本研究中 VFSMOD 对生草带径流模拟偏差集中在 10% 以内, 对泥沙模拟偏差多集中在 15% 以内, 结果与以往研究结果接近^[13,15], 证明考虑不同草种和生长时期条件下, VFSMOD 对模拟黄土坡面产流产沙动态情况具有良好的适应性。

3.3 有待进一步研究的问题

植被措施与径流泥沙运动关系复杂, 在斑块, 坡面, 流域(区域)等不同研究尺度下往往呈现不同规律^[5,30]。本研究采用模拟降雨手段, 径流小区面积有限, 因此主要在斑块尺度上研究了生草带与黄土坡面产流产沙的关系, 研究结果主要为黄土坡面生草带设计和优化提供理

论参考。坡位、坡长、坡向、气候和地貌特征等因素对生草带措施减流、减沙效益的影响,尚需在坡面及流域(区域)尺度下进一步研究。将VFSMOD模型手段应用于坡面及流域尺度时,可能需对模型参数获取和率定等过程做出适当调整。

4 结 论

本文通过实测和模拟,研究了枣树地引入白三叶和百脉根生草带后9月中旬—9月上旬坡面产流产沙动态特征。结果表明,随生长时期延伸,2种生草带处理径流系数均逐渐上升,白三叶生草带处理坡面产沙量先小幅上升,后保持稳定,百脉根草带处理坡面产沙量先保持稳定,随后明显上升。白三叶生草带处理在各雨强和生长时期下,径流系数和产沙量均显著小于百脉根生草带处理(6月下旬产沙量除外)($P < 0.05$)。

VFSMOD模型对不同生草带及生长时期的黄土坡面径流预测效果可靠,但严重低估了百脉根生长后期(9月上旬)黄土坡面产沙量,原因在于生草带自身发生土壤侵蚀。其他情况下模型对产沙量预测准确。通过土壤物理性质、茎秆间距、坡面流曼宁糙度3参数,VFSMOD模型刻画出不同草种及生长时期下生草带坡面产沙量动态,可以用于预测枣树地引入行间生草带后坡面产流产沙特征。

黄土高原6—9月降雨频发,是水土流失多发时段。坡面生草带设计中应加强生长旺盛时期与降雨多发季节相吻合的草种的推广。如本试验中白三叶在降雨多发期生长旺盛,坡面径流系数和产沙量较小,百脉根处理在9月初不能有效发挥水土保持作用,不适合在黄土高原地区生草带建设中推广。应用VFSMOD模型优化生草带设计时,应考虑土壤物理性质的影响,同时保证模型假定与田间实际情况相符。

[参 考 文 献]

- [1] Pan Chengzhong, Ma Lan, Wainwright John et al. Overland flow resistances on varying slope gradients and partitioning on grassed slopes under simulated rainfall[J]. Water Resources Research, 2016, 52(4): 2490—2512.
- [2] Otto S, Vianello M, Infantino A, et al. Effect of a full-grown vegetative filter strip on herbicide runoff: Maintaining of filter capacity over time[J]. Chemosphere, 2008, 71(1): 74—82.
- [3] Zhao Chunhong, Gao Jian'en, Huang Yuefei et al. Effects of vegetation stems on hydraulics of overland flow under varying water discharges[J]. Land Degradation & Development, 2015, 27(3): 748—757.
- [4] Lambrechts T, François S, Lutts Stanley et al. Impact of plant growth and morphology and of sediment concentration on sediment retention efficiency of vegetative filter strips: Flume experiments and VFSMOD modeling[J]. Journal of Hydrology, 2014, 511(1): 800—810.
- [5] 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.
- [6] Xiao Bo, Wang Qinghai, Wang Huifang et al. The effects of grass hedges and micro-basins on reducing soil and water loss in temperate regions: A case study of Northern China[J]. Soil and Tillage Research, 2012, 122(2): 22—35.
- [7] Zuazo VH D, Pleguezuelo CR R, Panadero L A, et al. Soil conservation measures in rainfed olive orchards in south-eastern Spain: Impacts of plant strips on soil water dynamics[J]. Pedosphere, 2009, 19(4): 453—464.
- [8] 袁久芹, 梁音, 曹龙熹, 等. 红壤坡耕地不同植物篱配置模式减流减沙效益对比[J]. 土壤, 2015, 47(2): 400—407. Yuan Jiuqin, Liang Yin, Cao Longxi et al. Comparison of benefits of runoff and sediment reduction of different hedgerow configuration modes in red-soil hilly area[J]. Soils, 2015, 47(2): 400—407. (in Chinese with English abstract)
- [9] Feng Junjun, Zhang Chaolin, Zhao Tingning, et al. Rapid revegetation by sowing seed mixtures of shrub and herbaceous species[J]. Solid Earth, 2015, 6(2): 573—581.
- [10] Hu Wei, Shao Mingan, Wang Qianju et al. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses[J]. Geoderma, 2009, 149(3/4): 355—366.
- [11] Munoz-Carpena R, Parsons J E. A design procedure for vegetative filter strips using VFSMOD-W[J]. Transactions of ASAE, 2004, 47(6): 1933—1941.
- [12] Munoz-Carpena R, Parsons J E. VFSMOD-W Vegetative Filter Strips Modeling System: Model Documentation and User's Manual Version 6. X[M]. Gainesville, FL, USA: Press of University of Florida, 2014.
- [13] 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. 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)
- [14] Mekonnen M, Keesstra S D, Stroosnijder L, et al. Soil conservation through sediment trapping: A review[J]. Land Degradation & Development, 2015, 26(6): 544—556.
- [15] 杨寅群, 李怀恩, 史冬庆. VFSMOD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. Yang Yinqun, Li Huaen, Shi Dongqing. Study on simulation of clarification for vegetative filter strips by VFSMOD model[J]. Environmental Science, 2010, 31(11): 2613—2618. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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): 2976—2980. 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): 2976—2980. (in Chinese with English abstract)
- [17] Olilo C O, Onyando J O, Moturi W N, et al. Effect of vegetated filter strips on transport and deposition rates of Escherichia coli in overland flow in the eastern escarpments of the Mau Forest, Njoro River Watershed, Kenya[J]. Energy, Ecology and Environment, 2016, 1(3): 157—182.
- [18] 凌强, 赵西宁, 高晓东, 等. 间作经济作物对黄土丘陵区旱作红枣土壤水分的调控效应[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 504—510. Ling Qiang, Zhao Xining, Gao Xiaodong, et al. Effects of inter-row economic crop planting on soil moisture in a rain-fed jujube orchard in loess hilly region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(2): 504—510. (in Chinese with English abstract)
- [19] Huang Jun, Wang Juan, Zhao Xining, et al. Effects of permanent ground cover on soil moisture in jujube orchards under sloping ground: A simulation study[J]. Agricultural Water Management, 2014, 138(3): 68—77.
- [20] Munoz-Carpena R, Parsons J E, Gilliam J W. Modeling

- hydrology and sediment transport in vegetative filter strips[J]. *Journal of Hydrology*, 1999, 214(1/4): 111–129.
- [21] Liu Chunli, Shao Ming'an. Spatial variation of saturated hydraulic conductivity and soil water of the surface layer of a slope on the Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2009, 7(1): 13–18.
- [22] Holtham D AL, Matthews G P, Scholefield D S. Measurement and simulation of void structure and hydraulic changes caused by root-induced soil structuring under white clover compared to ryegrass[J]. *Geoderma*, 2007, 142(1/2): 142–151.
- [23] Deletic A, Fletcher T D. Performance of grass filters used for storm water treatment: A field and modelling study[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 317(3/4): 261–275.
- [24] Wu Gaolin, Yang Zheng, Cui Zeng, et al. Mixed artificial grasslands with more roots improved mine soil infiltration capacity[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535(3): 54–60.
- [25] Yang Yinqun, Yanru Wang, Huaian Li et al. Planning and effect evaluation for vegetative filter strips in water source area based on model simulation[C]// *Geomatics for Integrated Water Resources Management (GIWRM)*. LanZhou: GIWRM, 2012.
- [26] Pan Daili, Gao Xiaodong, Dyck M, et al. Dynamics of runoff and sediment trapping performance of vegetative filter strips: Run-on experiments and modeling[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 593(1): 54–64.
- [27] Park YS, Hyun G. Optimization of vegetative filter strip using VFSSMOD-W model and Genetic-Algorithm[J]. *Journal of Korean Society on Water Environment*, 2014, 30(2): 159–165.
- [28] Fox GA, Munoz-Carpena R, Sabbagh GJ. Influence of flow concentration on parameter importance and prediction uncertainty of pesticide trapping by vegetative filter strips[J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 384(4): 164–173.
- [29] Pan Daili, Song Yaqian, Dyck M, et al. Effect of plant cover type on soil water budget and tree photosynthesis in jujube orchards[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 184(2): 135–144.
- [30] Li Jianye, Zhang Fengbao, Wang Shiwen, et al. Combined influences of wheat-seedling cover and antecedent soil moisture on sheet erosion in small-flumes[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 151(1): 1–8.

VFSSMOD-based runoff and sediment yield simulation on loess slope with vegetation filter strips

Pan Daili¹, Zhao Xining¹, Gao Xiaodong¹, Song Yaqian², Wu Pute^{1*}

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;*

2. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)*

Abstract: The vegetation filter strip is an effective land management practice to reduce the runoff and sediment yield in the sloping orchards in Loess Plateau, China. In the present paper, the feasibility of using vegetative filter strip model (VFSSMOD) as a tool to predict the runoff coefficient and sediment yield of vegetative filter strip was evaluated. The experiment was carried out in Yangling, Shannxi. The loess soil was silt loam with bulk density of 1.35-1.40 g/cm³. Two kinds of plots included jujube-grass plots (each was 1.4 m in length, 0.8 m in width and 0.8 m in height) and jujube plots (each was 0.8 m in length, width and height). In 2011, a jujube (*Ziziphus jujube* Mill.) tree was planted in the center at 0.8 m away from the upper boundary of the plots and grass was planted at the seeding rate of 15 g/m² in the center at 0.6 m away from the lower boundary of the plots. Grass species were white clover (*Trifolium repens* L.) and birdfoot trefoil (*Lotus corniculatus* L.) conjoined to source areas. Each type of vegetative filter strip treatments had 3 replications. Simulated rainfalls were applied in 3 development periods (early, middle and late period) of the grass. In each period, 3 rainfall events with different intensities (1.0, 1.2 and 1.5 mm/min) and identical rainfall duration of 60 minutes were designed. The initial soil water content was 0.26-0.29 for all the rainfalls. Grass was cut to 10 cm in height before rainfall. Runoff from each plot was collected for runoff coefficient (the ratio of runoff to rainfall) calculation and sediment yield measurement. Meanwhile, the VFSSMOD model was used to simulate the runoff coefficient and sediment yield. The results showed that the bias of runoff coefficient simulation was between -10% and 10%. The Nash coefficient (NE) was higher than 0.9 and the normalized root mean square (NRMSE) was 6.2%. It indicated that the simulation was reliable for runoff. For the sediment yield, the model had the NRMSE of 41.5%. The bias analysis showed that the large error occurred to the birdfoot trefoil at the rainfall intensity of 1.2 and 1.5 mm/min. The VFSSMOD model underestimated the sediment yield of birdfoot trefoil filter strip in late September by 28.8% at 1.2 mm/min rainfall intensity and 40.6% at 1.5 mm/min rainfall intensity. The large bias might be attributed to the poor growth status of birdfoot trefoil vegetation filter strip in late September (the stem spacing of 3.07 cm) and poor coverage on the ground. Soil erosion occurred inside the vegetation filter strip in this condition, which was contradicted with the assumption of VFSSMOD on soil erosion inside the vegetation filter strip. In the practice, the poor growth status at the storm season should be avoided since it would lead to great sediment yield. Removing these values of birdfoot trefoil, the model had a better simulation with NRMSE of 10.9% and NE of 0.98. Thus, the VFSSMOD could well simulate the runoff and sediment yield of soil in the white clover filter strips and the filter strips of birdfoot trefoil at the early and middle development periods. The simulated results showed that the runoff coefficient increased during the development periods of the 2 grass species. The runoff coefficient was 9.2%-29.6%. The runoff coefficient increased with increasing the rainfall intensity, indicating the large rainfall may lead to big runoff. At the same rainfall intensity and development period, the white clover had the lower runoff coefficient ($P<0.05$) than the birdfoot trefoil. It suggested that the former grass had the better runoff reduction effect after rainfall. The sediment yield of the 2 species was different. At the early period, both were similar in sediment yield. At the late period, the sediment yield of birdfoot trefoil was significantly higher than the white clover ($P<0.05$). Since the plot with the white clover filter strip had the small runoff and sediment yield in September when rainfall occurs frequently in the loess plateau. Thus, it rather than the birdfoot trefoil was probably suitable to use for filter strip in the loess plateau especially in September.

Keywords: runoff; sediments; grass; VFSSMOD model; loess slope; vegetation filter strips; growth stage