

水土保持 >

# WEPP 在黄土高原坡面径流调控中的适用性研究

幸定武<sup>1,3</sup>, 高建恩<sup>1,2,3</sup>

(1 西北农林科技大学, 陕西 杨凌 712100; 2 中国科学院、水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;  
3 国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100)

**摘 要:** 针对黄土高原坡面降雨径流调控优化难以采用数学模型的情况, 根据杨凌岭后降雨径流调控试验站部分降雨、产流、产沙观测资料, 对 WEPP 2006 年坡面版应用于黄土高原坡面产流、产沙模拟计算的适用性进行了研究。结果表明: WEPP 可对降雨径流调控措施下的径流量和产沙量进行模拟计算, 但需对模型参数进行率定, 并根据实测资料进行验证; WEPP 对缓坡径流量和产沙量的模拟计算优于对陡坡的模拟计算, 对裸地径流量和产沙量的模拟计算优于对径流调控措施(苜蓿地)的模拟计算, 对径流量的模拟计算优于对产沙量的模拟计算。

**关键词:** WEPP; 径流调控; 土壤侵蚀; 黄土高原

**中图分类号:** S157.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 100021379(2008)0420066202

干旱缺水与水土流失并存是制约黄土高原地区经济社会可持续发展的重要限制性因子<sup>[1]</sup>。黄土高原地处内陆, 属典型的大陆性季风气候区, 受东亚季风气候的影响, 降水在时间和空间上的分布都呈现不均的状况。事实上, 黄土高原的土壤侵蚀, 主要是由暴雨引起的, 暴雨造成的土壤侵蚀量占全年总侵蚀量的 90% 以上<sup>[2]</sup>。

通过对降雨径流的人工调控, 协调雨水资源在时间和空间上的不均衡性, 对于防治水土流失、改善生态环境、解决黄土高原地区的人畜饮水、农田灌溉等问题具有重要意义<sup>[1]</sup>。降雨径流侵蚀调控数学模拟是径流调控研究及措施优化的重要方法, 但目前已有的黄土高原侵蚀预报模型多数为统计或经验模型, 应用受到很大限制。为此, 根据裸地和苜蓿地降雨、产流、产沙观测资料, 对 WEPP 2006 年坡面版应用于黄土高原坡面产流、产沙模拟计算的适用性进行了研究。

## 1 WEPP 简介

WEPP(Water Erosion Prediction Project)是美国农业部农业研究所、土壤保持局与林业部、内政部、普度大学联合开发的基于连续时间的分布式水蚀模型, 可以预测农田、林地、牧场、山地、建筑工地和城区等不同区域的产沙、输沙状况, 自 1989 年推出以来, 已发展了流域版、坡面版和网格版 3 个版本<sup>[3-4]</sup>。

WEPP 将坡面土壤侵蚀分为细沟土壤侵蚀和细沟间土壤侵蚀 2 部分<sup>[5]</sup>, 以单位沟宽或单位坡面宽为基础进行计算。描述坡面侵蚀过程的稳态泥沙连续方程为

$$\frac{dG}{dx} = D_i + D_r \quad (1)$$

式中:  $x$  为距坡顶的距离,  $m$ ;  $G = qc$  为水流的输沙量,  $kg/(s \cdot m)$ ;  $q$  为单宽流量,  $m^3/(s \cdot m)$ ;  $c$  为含沙量,  $kg/m^3$ ;  $D_i$  为细沟间坡面向细沟内运输的泥沙量,  $kg/(m^2 \cdot s)$ ;  $D_r$  为细沟土壤侵蚀量,  $kg/(m^2 \cdot s)$ 。

细沟土壤侵蚀量从概念上表达为

$$D_r = D_c \left( 1 - \frac{G}{T} \right) \quad (2)$$

$$D_c = K_r (S - S_c) \quad (3)$$

式中:  $D_c$  为细沟水流对土壤的最大可能剥离率,  $kg/(m^2 \cdot s)$ ;  $T$  为水流输运泥沙的能力,  $kg/(s \cdot m)$ ;  $S, S_c$  分别为水流对土壤的剪切应力与土壤的临界抗剪切应力,  $Pa$ ;  $K_r$  为细沟土壤可蚀性参数,  $kg/(m^2 \cdot s)$ 。

式(2)表明了细沟水流中泥沙含量与土壤剥蚀的反馈耦合关系。

## 2 试验概况

### 2.1 试验区概况

试验区位于杨凌岭后降雨径流调控试验站内, 根据坡地地形上陡下缓的自然条件, 试验小区按上下 2 排进行布局, 上排为 12 个 20b 小区, 下排为 12 个 10b 小区。小区垂直投影长 20  $m$ , 宽 5  $m$ , 四周边缘设置高出地面 15  $cm$  的地面分水界, 并配套建造 3 级径流桶, 以测定每次降雨后的径流、泥沙量。

### 2.2 有关参数的取值与率定

WEPP 作为描述土壤水蚀物理过程的计算机程序<sup>[6]</sup>, 参数的支持最为重要。WEPP 模型所需参数由土壤、坡度、管理措施和气候 4 个参数模块组成。利用杨凌岭后降雨径流调控试

收稿日期: 200711207

基金项目: 国家/十一五科技支撑计划项目(2006BAD09B01)。

作者简介: 幸定武(1981), 男(土家族), 重庆万州人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持。

通讯作者: 高建恩(1962), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为水土保持与雨水资源高效利用技术。

E-mail: gaojianen@126.com

验站 2003~2004年降雨量、最高气温、最低气温、太阳辐射量、风向、风速和露点温度的日序列气象观测资料,建立气象文件;建立坡长为 20m、坡度分别为 10°和 20°两个坡面文件;作物管理文件包括裸地和苜蓿 2种管理文件,苜蓿平均株高为 45 cm,覆盖度为 50%,其他参数采用 WEPP中的默认值;土壤参数经率定后确定。

土壤参数模块中有土壤反照率、初始饱和导水率、土壤临界剪切力、细沟土壤可蚀性、细沟间土壤可蚀性和有效水力传导系数 6个参数。径流量仅对有效水力传导系数敏感,且为负相关,而对其他 5个参数的变化不敏感;土壤侵蚀量对土壤反照率、初始饱和导水率、细沟间土壤可蚀性的变化不敏感,而对土壤临界剪切力、细沟土壤可蚀性和有效水力传导系数敏感,同时,土壤侵蚀量与土壤临界剪切力及有效水力传导系数呈负相关,与细沟土壤可蚀性呈正相关<sup>[7]</sup>。

王建勋等<sup>[7]</sup>利用陕西省安塞县的资料,率定黄绵土的有效水力传导系数、土壤临界剪切力和细沟土壤可蚀性分别为 22.1 mm/h、3.6 Pa和 0.022 s/m。以此为参考,根据杨凌区的实际情况和径流量、土壤侵蚀量观测资料,最终将有效水力传导系数、土壤临界剪切力和细沟土壤可蚀性分别率定为 37.8 mm/h、4.9 Pa和 0.028 s/m,其他土壤参数采用土壤水蚀预报模型中的默认值。

### 3 模型验证及调控计算

#### 3.1 模型验证结果与分析

基于标定的有效水力传导系数、土壤临界剪切力和细沟土壤可蚀性 3个土壤参数,采用 2003~2004年 10次降雨产流观测资料,利用 WEPP模拟计算 10°和 20°裸地与苜蓿地次降雨的径流量和产沙量。将实测数据(径流量  $W_s$ , mm; 产沙量  $G_s$ , g/m<sup>2</sup>)与 WEPP计算数据(径流量  $W_j$ , 产沙量  $G_j$ )点绘成图,观察散点的分布趋势可知,实测值与计算值存在明显的直线关系,拟合的关系式见表 1、表 2。

表 1 径流量实测值与计算值的关系

坡度 / (°)	调控措施	关系式	相关系数
10	裸地	$W_s = 0.5828W_j + 0.7441$	0.9541
	苜蓿	$W_s = 0.5424W_j + 1.1677$	0.9005
20	裸地	$W_s = 0.6890W_j + 0.4983$	0.9273
	苜蓿	$W_s = 1.0126W_j + 0.1268$	0.8573

表 2 产沙量实测值与计算值的关系

坡度 / (°)	调控措施	关系式	相关系数
10	裸地	$G_s = 0.8570G_j + 39.644$	0.8828
	苜蓿	$G_s = 0.1263G_j + 5.2639$	0.8344
20	裸地	$G_s = 0.9664G_j - 10.427$	0.8739
	苜蓿	$G_s = 0.1015G_j + 3.8283$	0.7905

从表 1、表 2 可以看出: WEPP模型对裸地的预测要优于对苜蓿地的预测,原因是作物管理数据库涉及的参数众多,这些参数很难通过试验得到,有些参数借用模型参数库中的数据;对产流的预测优于对产沙的预测,原因是 WEPP是基于过程的模型,对土壤可蚀性等因子的计算利用了经验公式,这在一定程度上影响了 WEPP对产沙量预测的准确性;对坡度为 10°的

预测优于对 20°的预测,原因是 WEPP是基于缓坡耕地开发的,应用在陡坡耕地时,需要进行验证和修正。

综上所述: WEPP对裸地和苜蓿地产流、产沙进行的验证基本合理,可以利用 WEPP对各种调控措施下的调控作用进行预测。

#### 3.2 径流量与产沙量模拟计算

黄土高原降雨径流调控措施设计经常面临的一个问题是,在坡度一定条件下,推求某一调控措施在不同暴雨条件下的侵蚀产沙量。为此,利用 WEPP和表 1、表 2中的函数关系,对降雨量不变而改变雨强和雨强不变而改变雨量情况下,分别进行调控措施(种植苜蓿)下径流量与产沙量的模拟计算,其中降雨量和雨强为 2003~2004年观测资料的平均值,其模拟计算结果见图 1、图 2。

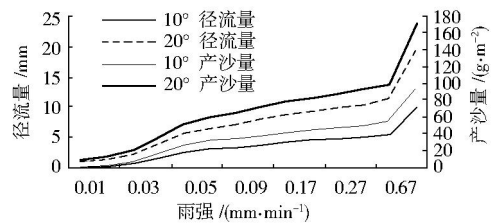


图 1 WEPP对苜蓿地变雨强的模拟计算结果

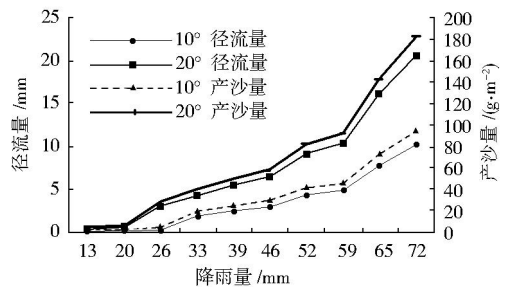


图 2 WEPP对苜蓿地变雨量的模拟计算结果

从图 1、图 2 可以看出: 当雨强大于 0.6 mm/min、降雨量大于 60 mm时,曲线急剧上升,即出现暴雨时产流量大、侵蚀严重;当雨强小于 0.05 mm/min、降雨量小于 20 mm时,曲线较平缓,即降小雨时产流量小、侵蚀轻微;当雨强和降雨量介于二者之间时,产流产沙随雨强和雨量的增加而逐渐增加,随降雨量变化的增幅比随雨强变化的增幅要大。同一坡度条件下,降雨量对产流产沙的影响大于雨强的影响;同一雨强和降雨量条件下,WEPP对缓坡径流量和产沙量的模拟计算优于对陡坡的模拟计算。

### 4 初步结论

(1) WEPP模型可对降雨径流调控措施下的径流量和产沙量进行模拟计算,但需对模型参数进行率定,并根据实测资料进行验证。

(2) WEPP模型对缓坡径流量和产沙量的模拟计算优于对陡坡的模拟计算,对裸地径流量和产沙量的模拟计算优于对径流调控措施(苜蓿地)的模拟计算,对径流量的模拟计算优于对产沙量的模拟计算。

黄土高原坡面降雨径流调控,其措施多种多样,本研究只对种植苜蓿的单一调控措施进行了简单模拟。(下转第 95 页)

该优化问题属于非线性约束问题,以 1stopt 和 MATLAB 为优化工具,先用 MATLAB 对要约束的方程进行处理,然后通过 1stopt 附带的差分进化法进行求解,再用其附带的遗传算法重新演算进行校核,以保证结果的正确性。

1stopt 是国内自主开发的一种软件,其最大特点是克服了使用迭代时必须给出合适初始值的难题,即用户不必给出参数初始值,而由 1stopt 随机给出,通过其独特的全局优化算法,最终找出最优解。其附带的差分进化法是一种简单、快速的优化算法,在数值优化应用中,特别是对大规模、多峰态、高度非线性的函数计算速度快、精度高。其原理是通过把种群中几个个体的向量差加权后,按一定的规则与另外一个个体求和并进行适当的交叉操作来产生新个体。将新个体与当代种群中某个预定的个体相比较,如果新个体的目标函数值小于与之相比较的旧个体,则在下一代中就用新个体取代预定的旧个体。否则,旧个体仍保存下来。每次迭代都完成一次对全部个体的更新,计算过程中种群的个体数量不变。经过若干次迭代后,目标函数值就会收敛于函数的最小值,此时最优的个体对应着近似最优解。

### 4 不同情况下剖面尺寸分析

在实际工程中由于地形及地质条件不同,因此要选择不同的坝高及摩擦系数。笔者计算出了各种情况下变量的不同取值,这里只列出了坝高为 70 m 时参数的取值(见表 1)。从表 1 可以看出:1 变量 m 主要取决于坝底正应力,当  $R_{yu}$  取最小值时 m 也达到最小。2 变量 n 的选取主要决定于折点处垂直正应力  $R_1$ 。3 变量 h 的选取主要受折坡重力坝剖面面积控制,随着 h 的增大,面积在减小,当 h 与坝高一一致时,面积达到最小。4 在满足坝底应力、折点应力和抗滑稳定条件的情况下,随着摩擦系数的增大,上游坡率 m 在不断减小,而折点高度 h 在不断增大,也就是说折点位置从上向下不断降低。

表 1 坝高 H = 70m 时坝形参数

摩擦系数	m	n	h / m	剖面面积 / m <sup>2</sup>	$K_s$	$R_{yu}$	$R_1$
0.50	0.300	0.67	26.6	1916.59	1.00	0.35	0
0.55	0.287	0.67	38.6	1779.30	1.00	0.25	0
0.60	0.297	0.67	51.8	1687.14	1.00	0.13	0
0.65	0.292	0.67	65.2	1641.36	1.00	0.03	0
0.70	0	0.67	70.0	1638.00	1.05	0.01	0
0.75	0	0.67	70.0	1638.00	1.13	0.01	0

### 5 控制条件分析

建立数学模型,以 30 m 坝高为例,取摩擦系数  $f = 0.5$  使稳定约束处于临界状态,即式 (2) 取等号,在满足式 (3) 的条件下, m 与 h 的关系见图 2 中曲线 1; 使应力约束处于临界状态,即式 (3) 取等号,在满足式 (2) 的条件下, m 与 h 的关系见图 2 中曲线 2。

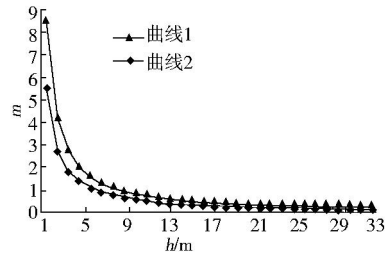


图 2 m) h 关系曲线

由图 2 可见,当 h 一定时,由曲线 1 确定的 m 值大于由曲线 2 确定的 m 值,两曲线没有交点,随着 h 的减小 m 值在不断增大。因此,对于折线重力坝而言,基本剖面主要是由稳定临界条件确定的,而且折点越高这种趋势越明显。

—责任编辑 张华岩—>

(上接第 67 页)其结果应该用观测资料进行验证,但由于资料不足未得到验证,因此还需开展进一步研究。

### 参考文献:

[1] 吴普特, 高建恩. 黄土高原水土保持新论 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006

[2] 刘元保, 唐克丽, 周佩华. 黄土高原坡面沟蚀的类型及其发生发展规律 [J]. 中国科学院水土保持研究所集刊, 1998(7): 9- 18

[3] 张玉斌, 郑粉莉, 贾媛媛, 等. WEPP 模型概述 [J]. 水土保持研究, 2004 11(4): 146- 149

[4] 莫放, 贾忠华, 罗纨. 基于水蚀模型 WEPP 和 GIS 的高原小流域侵蚀模拟 [J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(4): 41- 45

[5] Flanagan D C, Nearing M A. USDA- Water erosion Prediction project hillslope profile and watershed model Documentation[R]. Washington D C: USDA - ARS National soil erosion research Laboratory 1995.

[6] National Soil Erosion Research Laboratory (US). WEPP - predicting water erosion using a process- based model [J]. Journal of Soil and water Conservation, 1997, 52( 2): 96 - 102

[7] 王建勋, 郑粉莉, 江忠善. WEPP 模型坡面版在黄土丘陵沟壑区的适用性评价 [J]. 水土保持通报, 2007, 27(2): 50- 55.

—责任编辑 张智民—>