

WEPP 模型坡面版在黄土丘陵沟壑区的适用性评价 ——以坡长因子为例

王建勋^{1,2}, 郑粉莉^{1,2}, 江忠善², 张勋昌³

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中科院 水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 美国农业部 农业研究局 草场实验室, 俄克拉荷马州 埃尔里诺 73036)

摘要: 利用安塞试验站 1985—1992 年的气象观测数据和野外坡长径流小区径流量和土壤侵蚀量监测资料, 评价了 WEPP 模型在黄土丘陵沟壑区不同坡长条件下的适用性。结果表明, 在 10, 20, 30 和 40 m 这 4 个坡长条件下, WEPP 模型对次降雨、年平均和多年平均径流量的模拟结果略差; 而 WEPP 模型对次降雨和年平均土壤侵蚀量模拟结果较好, 无论是模拟值在不同坡长之间的差值, 还是模拟值随坡长变化趋势均与实测值接近。WEPP 模型对次降雨和年平均径流量模拟的 Nash-Sutcliffe 有效性 M_E 分别为 0.915 和 0.879; 对次降雨和年平均土壤侵蚀量模拟的 Nash-Sutcliffe 有效性 M_E 分别为 0.853 和 0.758。WEPP 对多年平均径流量和侵蚀量的模拟效果可满足要求。 I_{30} 对 WEPP 模型模拟次降雨径流量有重要影响, 当 I_{30} 大于 0.92 mm/min, 模型模拟误差较大。WEPP 模型对次降雨土壤侵蚀量的模拟与 PI_{30} 密切相关, 当 PI_{30} 大于 129 mm²/min 时, 模型模拟误差较大。 $\sum PI_{30}$ 对 WEPP 模型模拟年平均径流量和侵蚀量有重要影响, 当 $\sum PI_{30}$ 大于 150 mm²/min 时, 模拟精度明显下降, 且 $\sum PI_{30}$ 对径流模拟的影响明显大于对土壤侵蚀模拟的影响。

关键词: WEPP; 土壤侵蚀; 坡长; 适用性; 黄土高原

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2007)02—0050—06

中图分类号: S157

Assessment of WEPP Model Applicability(Hillslope Version) on Hill-gully Region of the Loess Plateau ——A Case Study in Slope Length Factor

WANG Jian-xun^{1,2}, ZHENG Fen-li^{1,2}, JIANG Zhong-shan², ZHANG Xun-chang³

(1. College of Resource and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. USDA-ARS Grazinglands Research Laboratory, El Reno, Oklahoma 73036, U. S.)

Abstract: Based on observed meteorological data and measured soil loss data from field runoff plots in 1985—1992 at Ansai Comprehensive Experimental Station, the applicability of WEPP model to different slope lengths on hill-gully region of the Loess Plateau was assessed. Results showed that simulated values of event runoff, annual runoff, and average annual runoff by WEPP model were not desirable for the slope lengths of 10 m, 20 m, 30 m and 40 m. However, the simulated values of event soil loss and annual soil loss by WEPP model were desirable for the slope lengths of 10 m, 20 m, 30 m and 40 m, respectively. The differences of simulated values between slope lengths and increasing trend with increase of slope length were close to observed data of the soil loss. The Nash-Sutcliffe model efficiencies of event runoff simulation and annual runoff simulation were 0.915 and 0.879, respectively; and the Nash-Sutcliffe model efficiencies of event soil loss simulation and annual soil loss simulation were 0.853 and 0.758, respectively. The simulated accuracy of annual average runoff and soil loss by WEPP model was satisfied. I_{30} had a great effect on runoff simulated values at individual storms; the error between simulated values

收稿日期: 2007-03-26

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(40335050); 国家 973 计划项目(2007CB407201)

作者简介: 王建勋(1980—), 男(汉族), 内蒙古赤峰人, 在读硕士, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: wjx_nwswaf@yahoo.com.cn。

通讯作者: 郑粉莉(1960—), 女(汉族), 陕西省蓝田县人, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程、预报和土壤侵蚀环境效应评价研究。E-mail: zhenfenli@yahoo.com。

and observed data probably increased when I_{30} was higher than 0.92 mm/min. The soil loss simulated values at individual storm had a close correlation with PI_{30} , and the error between simulated values and observed values increased when PI_{30} was greater than 129 mm²/min. $\sum PI_{30}$ was an important factor affecting simulated accuracy of WEPP model, and simulated accuracy decreased when the $\sum PI_{30}$ was higher than 150 mm²/min; meanwhile, the effect of $\sum PI_{30}$ on runoff simulation was more greater than that on soil loss.

Keywords: WEPP; soil erosion; slope length; application; the Loess Plateau

土壤侵蚀预报模型是土壤侵蚀科学研究的前沿领域,也是水土保持方案设计的技术工具。因此,近 10 多年来世界各国在集中人力和物力开发侵蚀预报模型。WEPP(water erosion prediction project)^[1-16]是以物理过程为基础的水蚀预报模型,其研发目的是取代已应用了 30 多年的通用土壤流失方程 USLE(universal soil loss equation)^[18],解决 USLE 无法估算土壤侵蚀量的时空分布这一问题。WEPP 可以模拟农田、林地、牧场在降雨过程中坡面上任意一点在任意时刻的土壤流失量及其动态变化^[2]。

正是由于 WEPP 具有 USLE 不可比拟的优点,因此自从 1995 年 WEPP 坡面版本颁布以来,WEPP 模型在各国的适用性评价受到普遍关注。有关 WEPP 模型在我国适用性评价研究主要集中在紫色土丘陵区 and 黄土丘陵沟壑区。WEPP 在紫色土丘陵区的适用性研究结果表明,在一定坡度条件下 WEPP 模型对侵蚀过程模拟较为合理;WEPP 模型中的 CLIGEN(climate generator)气候生成器在黄土高原地区可以很好地模拟单个气象因子。但是 WEPP 模型在黄土丘陵沟壑区不同坡长条件下的适用性评价研究还尚未见报导。

本文基于安塞试验站 1985—1992 年的气象资料及野外径流小区监测的径流和土壤侵蚀数据,利用 WEPP 模型模拟在坡长分别为 10, 20, 30 和 40 m 条件下次降雨、年平均和多年平均 3 个不同时间尺度的径流量和土壤侵蚀量,评价 WEPP 模型在黄土丘陵区不同坡长的适用性,从而为建立适用于我国侵蚀环境的侵蚀预报模型提供科学依据。

1 试验区概况和数据来源

1.1 试验区概况

本试验小区设在中国科学院安塞水土保持综合试验站,位于黄土高原中部,东经 109°19′,北纬 36°51′,海拔 1 068~1 309 m^[13]。气候类型属于暖温带半干旱型气候,年平均温度为 8.8℃,极端高温为 36.8℃,极端低温为 -23.6℃。1985—1992 年的降雨资料表明年均降雨量为 530 mm,6—9 月平均降雨

量为 371 mm,约占年降雨量的 69%。地貌类型为典型的梁峁状丘陵沟壑区,沟壑密度为 8.06 km/km²,土壤类型为黄绵土。受自然条件和人类活动的共同影响,该试验小区水土流失严重,未治理区域的侵蚀模数达 14 000 t/(km²·a)^[13]。

本研究共布设了 4 个坡长的径流小区,坡长分别为 10, 20, 30 和 40 m(表 1),土壤为黄绵土,地面处理为裸露休闲地,即每年 4 月中旬进行人工翻地,翻耕深度 20 cm,并在观测期间内适时进行人工除草,保证小区的植被覆盖度小于 5%。

表 1 坡长小区布设

小区号	坡长/m	坡宽/m	坡度/(°)	地面处理
1	10	5	30	裸露休闲地
2	20	5	30	裸露休闲地
3	30	5	30	裸露休闲地
4	40	5	30	裸露休闲地

1.2 数据来源

共有 8 a(1985—1992 年)的气象数据,包括降雨量、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资料以及每次降雨过程记录数据。WEPP 模型适用性评价所用的径流量和土壤侵蚀量数据包括次降雨、年平均和多年平均的径流量和土壤侵蚀量,均来自于江忠善在安塞试验站布设的野外径流小区。

1.3 数据库的建立

利用安塞试验站 1985—1992 年的降雨量、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资料,按照断点气象文件格式(表 2),建立 WEPP 模型运行的气象文件,其中每次降雨的整个过程是通过每个断点(自记雨量纸上降雨量累积曲线的拐点)的时间—降雨量数据对进行描述的;根据径流小区的实际情况分别建立坡长为 10, 20, 30 和 40 m 这 4 个坡长文件和 1 个初始条件为无作物生长、地面处理为裸露休闲的作物管理文件;土壤文件中各参数经标定后确定。

表 2 断点气象文件格式

断点日期	断点数	最高气温/℃	最低气温/℃	太阳辐射量/ (MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)	风速/ (m·sec ⁻¹)	风向	露点温度/ ℃
19900605	0	32.4	11.7	17.6	2.6	157.5	8.9
19900606	0	27.3	13.3	5.6	3.0	180.0	13.7
19900607	3 ^①	24.1	12.6	12.1	1.3	337.5	12.6

注: ① 各个断点的具体时间分别为: 19.00, 19.10, 19.30; 各断点的降雨量分别为: 0, 1.3, 1.4mm。

2 WEPP 模型中土壤参数的标定

2.1 土壤参数敏感性分析

土壤文件中有土壤反照率、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, 分别进行各土壤参数对径流量和土壤侵蚀量的敏感性分析。

图 1 表明, 径流量对土壤反照率、初始饱和导水率、土壤临界剪切力、细沟土壤可蚀性、细沟间土壤可蚀性的变化不敏感, 仅对有效水力传导系数敏感, 且为负相关。图 2 表明, 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和有效水力传导系数负相关, 与细沟土壤可蚀性正相关。

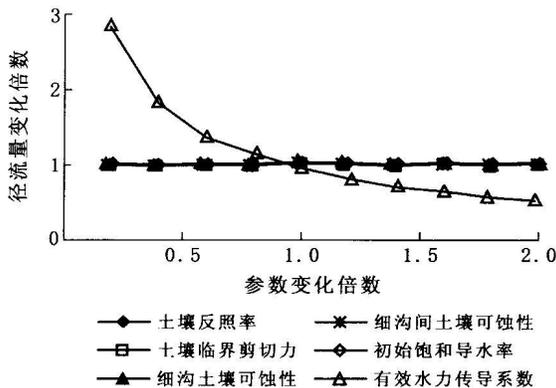


图 1 土壤参数对径流量的敏感性

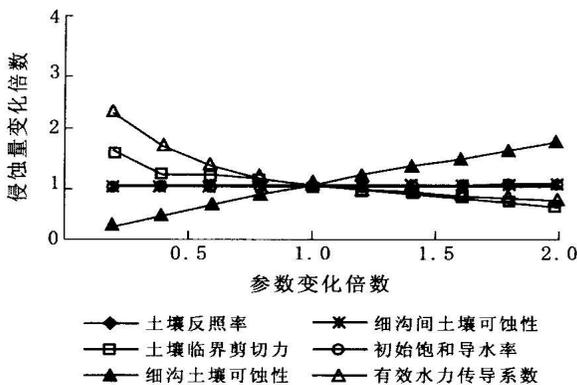


图 2 土壤参数对侵蚀量的敏感性

各土壤参数对径流量和土壤侵蚀量敏感性的分析结果表明, 有效水力传导系数可以通过径流量观测资料进行标定。基于有效水力传导系数的标定, 利用土壤侵蚀量观测资料标定土壤临界剪切力和细沟土壤可蚀性参数; 其它土壤参数选取土壤水蚀预报模型中的默认值。

2.2 参数标定

本试验中共有 4 个坡长径流小区, 坡长分别为 10, 20, 30 和 40 m, 选取坡长为 10 m 和 30 m 两个径流小区从 1985—1992 年各年的径流量和土壤侵蚀量来标定土壤参数, 用坡长为 20 m 和 40 m 两个径流小区各年的径流量和土壤侵蚀量对标定结果进行检验, 标定的公式为:

$$R = \sum_{j=5}^{25} \sum_{i=1985}^{1992} (X_{pi} - X_{mi})^2$$

$$(i = 1985, 1986, \dots, 1992; j = 5, 15, 25)$$

式中: R —— 累计误差; X_{pi} —— 每一年径流量或土壤侵蚀量的模拟值; X_{mi} —— 每一年径流量或土壤侵蚀量的实测值; i —— 年份, 1985—1992 年; j —— 标定参数时所选取的两个坡长, 即 10 m 和 30 m。

根据已有研究^[6], 所选取的土壤参数基值分别是有效水力传导系数 15 mm/h, 土壤临界剪切力 3.5 Pa, 细沟土壤可蚀性为 0.002 5 s/m。在参数基值的基础上选取不同的数值, 通过标定公式计算累计误差 R , 当累计误差达到最小值时的有效水力传导系数、土壤临界剪切力和细沟土壤可蚀性的数值即为最终标定的参数值。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分别为 22.1 mm/h, 3.6 Pa 和 0.022 s/m。

2.3 标定结果检验

基于标定的土壤参数, 用 WEPP 模型分别模拟 20 m 和 40 m 两个坡长 1985—1992 年各年的径流量和土壤侵蚀量, 并用 Nash-Sutcliffe 模型有效性检验参数标定结果^[7]。

模型有效性是评价模拟值和实测值相关性的有效方法, 其计算公式为^[7]:

$$M_E = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{pred})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{mean})^2}$$

式中: M_E —— 模型有效性; Y_{obs} —— 实测值; Y_{pred} —— 模拟值; Y_{mean} —— 实测值的平均值。

M_E 的值等于 1, 表示模拟值与实测值的每一对数据均相等; M_E 为 0 值表示实测值的平均值和模型的模拟值对实测值具有相同的相关性; M_E 值为负值表示实测值的平均值对实测值的相关性要高于模型的模拟值。张勋昌先生认为当 M_E 大于 0.5 时, 表明模型的模拟结果较好^[7]。

表 3 标定小区与检验小区模拟结果对比

对比项目	径流量/mm		土壤侵蚀量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)	
	标定小区	检验小区	标定小区	检验小区
模型有效性 M_E	0.876	0.882	0.744	0.764
Spearman 相关系数	0.945	0.986	0.948	0.975

3 模型模拟结果评价及分析

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, 利用 WEPP 模型分别模拟坡长为 10, 20, 30 和 40 m 这 4 个坡长条件下次降雨、年和多年平均的径流量和土壤侵蚀量, 并用模型有效性对模型的模拟结果进行评价。

在这 4 个坡长条件下, WEPP 模型对次降雨、年平均和多年平均径流量的模拟值皆随坡长的增加不甚明显, 其表现近似为平行于 X 轴的直线(图 3, 5, 7), 不同坡长之间径流量的最大差值仅为 0.7 mm; 而实测资料不同坡长之间的最大差值达 12 mm, 说明 WEPP 模型对径流量的模拟结果较差。同 WEPP 模型模拟径流量相比, WEPP 模型对次降雨、年平均和多年平均土壤侵蚀量的模拟结果较好, 其表现为无论是模拟值在不同坡长之间的差值还是模拟值随坡长变化趋势均与实测更加接近(图 4, 6, 8)。故模型对土壤侵蚀量的模拟结果优于对径流量的模拟结果。

表 3 表明, 标定小区和检验小区径流量模型有效性 M_E 分别为 0.876 和 0.882, Spearman 相关系数分别为 0.945 和 0.986; 标定小区和检验小区土壤侵蚀量模型有效性 M_E 分别为 0.744 和 0.764, Spearman 相关系数分别为 0.948 和 0.975。说明 WEPP 模型对径流量和土壤侵蚀量的模拟无论是标定小区还是检验小区都达到了较好的效果, 因此这里对土壤参数的标定结果是合理的。

WEPP 模型对次降雨、年平均和多年平均径流量模拟的 Nash-Sutcliffe 有效性 M_E 分别为 0.915, 0.879 和 -0.056(图 3, 5, 7); 对次降雨、年平均和多年平均土壤侵蚀量模拟的 Nash-Sutcliffe 有效性 M_E 分别为 0.853, 0.758 和 -0.456(图 4, 6, 8)。除 WEPP 模型对多年平均径流量和土壤侵蚀量的 Nash-Sutcliffe 有效性 M_E 外, 其余 M_E 值均大于 0.75。说明 WEPP 对次降雨和年平均径流量和侵蚀量的模拟结果较好。造成 WEPP 对多年平均径流量和侵蚀量模拟结果较差的主要原因是本研究坡长小区的样本数较少。这里只是对 8 a 的平均径流量和土壤侵蚀量进行了模拟, 且模拟个数仅为 4; 而 Nash-Sutcliffe 有效性适合大样本相关性的评价。但从模拟值可知, WEPP 模拟的多年平均径流量与实测值的最大差值仅为 2.71 mm, 模拟的多年平均侵蚀量与实测值的最大差值仅为 3.81 kg/m^2 (图 7-8)。说明 WEPP 模型对多年平均模拟径流量和侵蚀量的模拟结果也可满足要求。

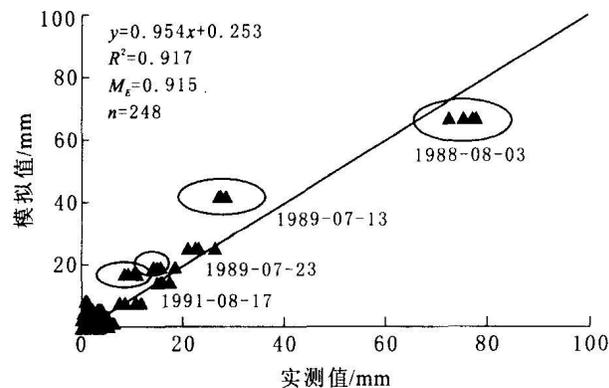


图 3 次降雨径流量随坡长变化的模拟

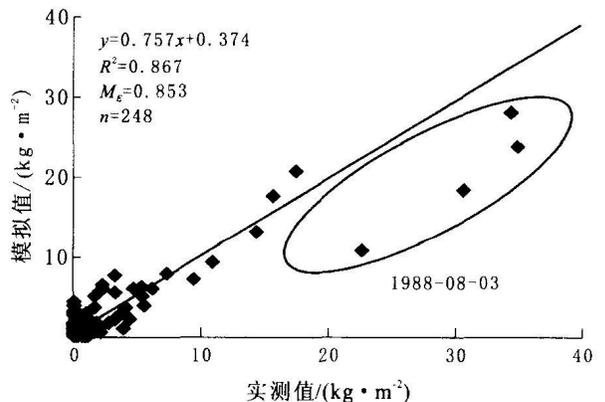


图 4 次降雨土壤侵蚀量随坡长变化的模拟

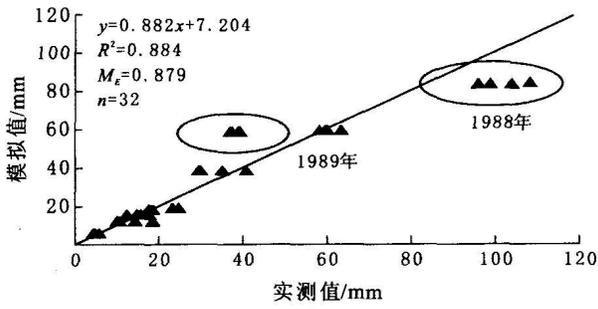


图 5 年平均径流量随坡长变化的模拟

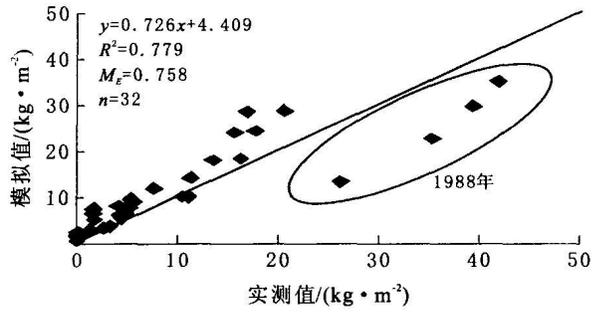


图 6 年平均土壤侵蚀量随坡长变化的模拟

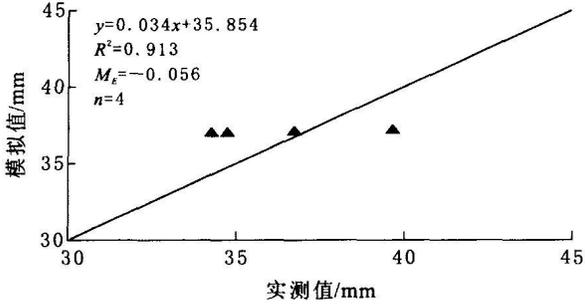


图 7 多年平均径流量随坡长变化的模拟

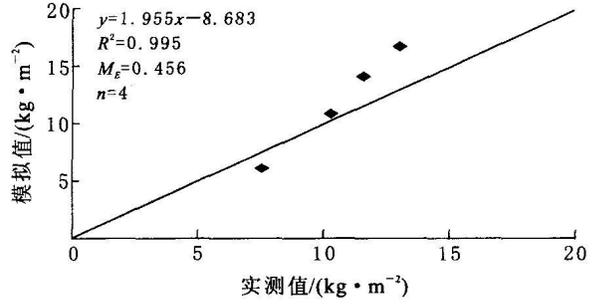


图 8 多年平均土壤侵蚀量随坡长变化的模拟

在次降雨的径流量模拟中,有 4 次降雨 (19880803, 19890717, 19890717, 19890723 和 19910817) 的模拟值略差(图 3)。其造成的主要原因是这 4 次降雨的 I_{30} (最大 30 min 降雨强度) 较大。表 4 表明,这 4 次降雨的 I_{30} 分别达到 0.94, 1.00, 0.092 和 0.96 mm/min, 说明 WEPP 模型对次降雨的径流量模拟与 I_{30} 有关,且当 I_{30} 较大时模拟值会出现一定程度的偏差。在次降雨的土壤侵蚀量模拟中只有一场降雨(19880803)的模拟值略差,其它模拟较好(图 4)。这主要是由 PI_{30} 较大造成的。表 4 表明,这次降雨的 PI_{30} 最大达到 129.34 mm²/min, 说明 WEPP 模型对次降雨土壤侵蚀量的模拟与 PI_{30} 有关,且当 PI_{30} 较大时,模拟值会出现偏差。

在年平均径流量的模拟中,有 1988 和 1989 年的模拟值出现较大程度的偏离(图 5),其原因是由这两年的 $\sum PI_{30}$ (一年中所有次降雨的雨量与 I_{30} 乘积之和) 较大引起的。表 5 表明 1988 和 1989 年的 $\sum PI_{30}$ 较大分别达到 192.52 和 150.90 mm²/min, 说明 WEPP 模型对年平均降雨量的模拟与 $\sum PI_{30}$ 有关,且当 $\sum PI_{30}$ 较大时模拟值会出现偏差。在年平均土壤侵蚀量的模拟中只有 $\sum PI_{30}$ 为最大的 1988 年(表 5) 出现偏离(图 6),说明 WEPP 模型对年平均土壤侵蚀量的模拟也与 $\sum PI_{30}$ 有关,当 $\sum PI_{30}$ 较大时模拟值会出现偏差,且 $\sum PI_{30}$ 对土壤侵蚀量模拟精度的影响不如对径流量明显。

表 4 单次产流降雨 I_{30} ($I_{30} \geq 0.5$ mm/min)

日期	$I_{30}/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$PI_{30}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1})$	日期	$I_{30}/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	$PI_{30}/(\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1})$
19850805	0.85	45.31	19890723 ^①	0.92	35.70
19860706	0.50	8.20	19910609	0.63	23.75
19880803 ^①	0.94	129.34	19910817 ^①	0.96	28.32
19890717 ^①	1.00	105.10	19910914	0.60	16.50

注: ① 代表图 3 中偏差较大 4 次降雨。

表 5 1985—1992 年各年降雨的 $\sum PI_{30}$

年份	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
$\sum PI_{30} / (\text{mm}^2 \cdot \text{min}^{-1})$	88.29	33.02	51.94	195.52	150.9	61.01	116.77	22.57

4 结论

利用安塞站 1985—1992 年的气象实测资料、坡长小区的径流量和土壤侵蚀量观测资料,通过对 WEPP 模型土壤文件中有效水力传导系数、临界水力剪切力和细沟土壤可蚀性 3 个土壤参数的标定,模拟了 10、20、30 和 40 m 这 4 个坡长条件下次降雨、各年平均和多年平均的径流量和土壤侵蚀量,并用 Nash-Sutcliffe 模型有效性评价了模拟结果。

(1) 在 WEPP 模型中,径流量仅对有效水力传导系数敏感,且为负相关;土壤侵蚀量对土壤临界剪切力、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和有效水力传导系数负相关,与细沟土壤可蚀性正相关。基于土壤各参数对径流量和土壤侵蚀量的敏感性分析,标定 WEPP 模型中有效水力传导系数、土壤临界剪切力和细沟土壤可蚀性 3 个土壤参数。最终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分别为 22.1 mm/h, 3.5 Pa 和 0.022 s/m。

(2) 在 10、20、30 和 40 m 这 4 个坡长条件下,WEPP 模型对次降雨、各年平均和多年平均径流量的模拟结果略差。而 WEPP 模型对次降雨和年平均土壤侵蚀量的模拟值结果较好,无论是模拟值在不同坡长之间的差值,还是模拟值随坡长变化趋势均与实测值更加接近。因此,WEPP 模型对土壤侵蚀量的模拟结果优于对径流量的模拟结果。WEPP 模型对次降雨和年平均径流量模拟的 Nash-Sutcliffe 有效性 M_E 分别为 0.915 和 0.879;对次降雨和年平均土壤侵蚀量模拟的 Nash-Sutcliffe 有效性 M_E 分别为 0.853 和 0.758。WEPP 模型模拟的多年平均径流量与实测值的最大差值仅为 2.71 mm,模拟的多年平均侵蚀量与实测值的最大差值仅为 3.81 kg/m²,说明 WEPP 模型对多年平均模拟径流量和侵蚀量的模拟结果可满足要求。

(3) I_{30} 对 WEPP 模型模拟次降雨径流量有重要影响,当 I_{30} 大于 0.92 mm/min,模型模拟误差较大。WEPP 模型对次降雨土壤侵蚀量的模拟与 PI_{30} 密切相关,当 PI_{30} 大于 129 mm²/min 时,模型模拟误差较大。 $\sum PI_{30}$ 对 WEPP 模型模拟年平均径流量和侵蚀量有重要影响,当 $\sum PI_{30}$ 大于 150 mm²/min 时,模拟精度明显下降,且 $\sum PI_{30}$ 对径流模拟影响较对土壤侵蚀模拟影响明显。

[参 考 文 献]

[1] Foster G R, Lane L J. User requirements, USDA Water

Erosion Prediction Project (WEPP) [A]. NSERL Report No. 1, West Lafayette: USDA-ARS National Soil Erosion Laboratory, 1987.

- [2] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology [J]. Trans ASAE, 1989, 32(5): 1587—1593.
- [3] Nearing M A, Lane L J, Alberts E E, et al. Prediction technology for soil erosion by water: status and research needs [J]. Soil Sci. Soc Am J, 1990, 54(6): 1702—1711.
- [4] Laflen J M, Lw onard J L, Foster G R. WEPP a new generation of erosion prediction technology [J]. J of Soil and Water Cons, 1991, 46(1): 34—38.
- [5] Foster G R, Nearing M A, Laflen J M, et al. Hillslope erosion component [A]. USDA-Water erosion prediction project, hillslope profile and watershed model documentation. W Lafayette: Ind: NSERL Report No.10. USDA-ARS. Purdue Univ, 1995.
- [6] Zhang X C, Liu W Z. Simulating potential response of hydrology, soil erosion, and crop productivity to climate change in Changwu tableland region on the Loess Plateau of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 131(3—4): 127—142.
- [7] Zhang X C. Calibration, refinement, and application of the WEPP model for simulation climatic impact on wheat production [J]. ASAE, 2004, 47(4): 1075—1085.
- [8] Wischmeier W H, Smith D D. Prediction rainfall erosion losses a guide to conservation planning [A]. U. S.: Agriculture Handbook, 1978. 537.
- [9] 郑粉莉,王占礼,杨勤科.土壤侵蚀学科发展战略 [J].水土保持研究, 2004, 11(4): 1—10.
- [10] 刘宝元,史培军. WEPP 水蚀预报流域模型 [J].水土保持通报, 1998, 18(5): 6—12.
- [11] 郑粉莉,杨勤科,王占礼.水蚀预报模型研究 [J].水土保持研究, 2004, 11(4): 13—24.
- [12] 张玉斌,郑粉莉,贾媛媛. WEPP 模型概述 [J].水土保持研究, 2004, 11(4): 146—149.
- [13] 中国科学院水利部西北水土保持研究所.黄土丘陵区水土保持型生态农业研究 [M]. 杨凌:天则出版社, 1990. 36—56.
- [14] 缪驰远,何丙辉,陈晓燕,等. WEPP 模型中的 CLIGEN 与 BPCDG 应用对比研究 [J]. 中国农学通报, 2004, 20(6): 321—324.
- [15] 缪驰远,何丙辉,陈晓燕.水蚀模型 USLE 与 WEPP 在紫色土水蚀预测中的应用对比研究 [J]. 农业工程学报, 2005, 1(1): 13—16.
- [16] 史婉丽,杨勤科,穆婉红.随机气候生成器在黄土高原的适用性评价 [J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(2): 18—23.