

基于 WEPP 的黄土丘陵区不同坡长条件下坡面土壤侵蚀预测

王建勋¹ 郑粉莉² 江忠善² 张勋昌³

(¹ 煤炭科学研究总院西安研究院环境保护研究所 ² 中国科学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 ³ 美国农业部农业研究局)

摘要: 为了更全面地评价 WEPP 模型在我国的适用性, 该文通过建立模型数据库, 利用 WEPP 分别模拟了坡长为 10、20、30 和 40 m 的径流量和土壤侵蚀量, 并用实测径流和侵蚀资料进行对比分析。结果表明, 在 10、20、30 和 40 m 4 个坡长条件下, WEPP 模型对降雨、每年和多年平均径流量模拟的 Nash-Sutcliffe 有效性 (ME) 分别为 0.915、0.879 和 -0.056, 对单场降雨、每年和多年平均土壤侵蚀量模拟的 ME 分别为 0.853、0.758 和 -0.456, 多年平均的 ME 为负值可能是由小样本计算造成的。WEPP 模型对单场降雨和每年径流量和侵蚀量模拟效果较好。尽管 WEPP 模型对多年平均径流量和土壤侵蚀量模拟效果较差, 但模型模拟的多年径流量和土壤侵蚀量与实测值的多年径流量和土壤侵蚀量的最大相对误差分别为 7.90% 和 29.20%, 表明 WEPP 模型对多年径流量和侵蚀量的模拟可满足要求。径流量模拟值随坡长增加的变化和实测值相比不够敏感; 而土壤侵蚀量模拟值随坡长增加的变化和实测值相比过于敏感。

关键词: WEPP 模型; 径流; 土壤侵蚀; 坡长; 黄土丘陵区

中图分类号: S714.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1522(2008)02-0151-06

WANG Jian-xun¹; ZHENG Fen-li²; JIANG Zhong-shan²; ZHANG Xun-chang³. **Hillslope soil erosion prediction based on WEPP model under different slope lengths in hilly-gully region of the loess area.** *Journal of Beijing Forestry University* (2008) **30**(2) 151-156 [Ch., 21 ref.]

¹ Environmental Protection Institute, Xi'an Branch of China Coal Research Institute, Shaanxi Province, 710054, P. R. China;

² State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling Demonstration Zone, Shaanxi Province, 712100, P. R. China;

³ Agriculture Research Service, United States Department of Agriculture, El Reno, Oklahoma, 73036, USA.

The water erosion prediction project (WEPP) model is a new generation water erosion prediction model, and is capable of providing scientific guidance to soil erosion intensity assessment and land resources management. Since the development of WEPP model, many countries have tried and tested the applicability of it. Though several studies were conducted in China to evaluate the model, there was little work done for assessing WEPP model application under different slope lengths. In order to assess the applicability of WEPP model in China, the authors compiled a WEPP model database, simulated runoff and soil loss for slope lengths of 10, 20, 30 and 40 m, and compared the simulated runoff and soil loss and those of measured values. The results showed that the Nash-Sutcliffe model efficiency (ME) of even runoff simulation, annual runoff simulation and average annual runoff simulation were 0.915, 0.879 and -0.056, respectively; and the Nash-Sutcliffe ME of the corresponding soil loss simulations were 0.853, 0.758 and -0.456. The negative ME for

收稿日期: 2007-04-17

http://www.bjfujournal.cn, http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目: “973”国家重点基础项目(2007CB407201)、国家自然科学基金重点项目(40335050)。

第一作者: 王建勋。主要研究方向: 土壤侵蚀。电话: 029-87086874 Email: wjx-nwsuaf@yahoo.com.cn 地址: 710054 陕西省西安市煤炭科学研究总院西安研究院环境保护研究所。

责任作者: 郑粉莉, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 土壤侵蚀过程及预报和土壤侵蚀环境效应评价。电话: 029-87011469 Email: flzh@ms.iisoc.ac.cn 地址: 712100 陕西杨凌水土保持研究所

average annual values was similar due to the small sample size used in its computation. The results showed that the WEPP model simulated eventual and annual runoff and soil loss well. Although the simulated accuracy for average annual runoff and soil loss simulation might be relatively low in this study, the maximum relative errors were 7.90% and 29.20% respectively, indicating that the WEPP model can predict average annual runoff and soil loss satisfactorily. Comparing with the measured data, the simulated runoff is less sensitive to the changes in slope lengths, but the simulated soil loss is more sensitive to slope length factor.

Key words WEPP model; runoff; soil erosion; slope length; hilly-gully region in the loess area

土壤侵蚀是影响农业可持续发展、生态安全及江河湖泊正常运行的重要环境问题之一,因此评价和预测土壤侵蚀已成为世界各国共同关注的重要议题。水蚀预报模型 WEPP (water erosion prediction project)^[1-11]是以物理过程为基础的水蚀预报模型,能预测降雨过程中农田、林地、牧场、山地以及建筑工地等侵蚀产沙的时空动态变化。因此,同传统的经验模型相比,WEPP 具有更广阔的应用范围。我国学者对 WEPP 在我国部分地区的适用性进行了评价,发现 WEPP 模型对紫色土区域一定坡度条件下的侵蚀量模拟较为合理^[12-13];WEPP 模型中气候模块的 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^[14],但 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相对较少。本文基于安塞试验站 1985—1992 年的气象资料,及野外坡长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,单场降雨、每年和多年平均 3 种不同时间尺度的径流量和土壤侵蚀量,评价 WEPP 模型在黄土丘陵区的适用性,从而为建立适用于我国侵蚀环境的土壤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

该试验区隶属于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^[15]。气候属于暖温带半干旱气候,年平均气温 8.8 °C,极端高温 36.8 °C,极端低温 -23.6 °C。1985—1992 年的年均降雨量为 530 mm,6—9 月平均降雨量为 371 mm,约占全年降雨量的 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(表 1),受自然条件和人类活动的共同影响,水土流失严重,未治理区域的侵蚀模数达 14 000 t/(km²·a)^[16-19]。

本试验共布设了 4 个不同坡长的径流小区,坡长分别为 10、20、30 和 40 m,坡宽均为 5 m,坡度均为 30°,土壤均为黄绵土,地面处理均为裸露休闲地,即每年 4 月中旬进行人工翻地,翻耕深度 20 cm,并在观测期内适时地进行人工除草,保证小区的植被覆盖度小于 5%。

表 1 安塞黄绵土理化性质

TABLE 1 Physical and chemical properties of loess soil in Ansai County, Shaanxi Province

土壤质地	土层/cm	有机质含量/%	机械组成/%			岩屑含量/%	阳离子交换量/(cmol·kg ⁻¹)
			<2 μm	2~50 μm	50 μm~2 mm		
粉质壤土	0~20	0.413	18.2	23.8	58	0	6.7

1.2 数据来源

共有 8 年(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的记录数据。WEPP 模型适用性评价所用的数据包括 248 场次降雨的径流量和土壤侵蚀量,以及在此基础上统计的每年和多年平均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 数据库的建立与土壤参数标定

1.3.1 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出现凸凹变化的拐点)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 的 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地的作物管理文件。

1.3.2 土壤参数标定与检验

WEPP 模型土壤文件中各参数的获得,既可以通过模型自动生成,也可通过手工标定计算得到。前者需要输入土壤的砂粒含量、粘粒含量、有机质含量、岩屑含量及阳离子交换量,通过 WEPP 模型内部

的公式进行计算而得到。后者是在输入土壤的砂粒含量、粘粒含量、有机质含量、岩屑含量及阳离子交

换量之后,通过土壤参数的敏感性分析,然后再利用迭代计算得到。

表 2 断点气象文件格式
TABLE 2 Breakpoint climate file format

时间	断点数	断点时刻	断点累积降雨量/mm	最高气温/°C	最低气温/°C	太阳辐射量/(MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)	风速/(m·s ⁻¹)	风向/(°)	露点温度/°C
19880627	0		0	26.7	16.2	11.8	2.0	157.5	18.2
	1	4:18	0						
	2	5:05	1.5	27.8	13.5	18.4	1.6	180.0	16.3
19880628	3	6:08	1.8						
	4	7:40	4.2						
19880629	0		0	30.6	17.0	17.2	1.6	337.5	19.3

注:1988年6月28日的降雨过程可用4个断点表示,27和29日无降雨。

WEPP 模型土壤文件中有土壤反照率、初始饱和和导水率、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。各土壤参数对径流量敏感性分析表明^[20],除了有效水力传导系数外,其他参数对径流量均不敏感;各土壤参数对土壤侵蚀量敏感分析表明,土壤临界剪切力、细沟土壤可蚀性和有效水力传导系数对土壤侵蚀量敏感,而其他 3 个参数对土壤侵蚀量不敏感。因此,用径流量观测资料对有效水力传导系数进行标定,再利用土壤侵蚀量观测资料标定土壤临界剪切力、细沟土壤可蚀性;其他土壤参数选取模型中的默认。

为了保证用于土壤参数标定的数据与标定结果检验数据的相对独立性,本文选取坡长为 10 和 30 m 两个径流小区 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 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。土壤参数标定结果是有效水力传导系数,为 22.1 mm/h;土壤临界剪切力为 3.6 Pa 及细沟土壤可蚀性为 0.022 s/m。用模型有效性系数 $ME^{[21]}$ 对标定结果进行评价,其结果表明,标定小区和检验小区径流量模型有效性 ME 和土壤侵蚀量模拟有效性 ME 非常接近,即标定小区和检验小区径流量 ME 分别为 0.876 和 0.882,其土壤侵蚀量 ME 分别为 0.744 和 0.764。说明无论是径流量还是土壤侵蚀量,标定小区和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(表 3)。

2 WEPP 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 4 个坡长条件下,单场降雨、每年和多年平均的径流量和土壤侵蚀量,并用模型有效性对其模拟结果进行评价。

表 3 标定小区和检验小区模拟结果对比
TABLE 3 Comparison of simulated results between calibration plots and validation ones

径流量/mm		土壤侵蚀量/(kg·m ⁻²)					
标定小区		检验小区		标定小区		检验小区	
实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值	实测值	模拟值
41.26	39.16	35.14	39.16	4.60	5.44	5.67	9.06
18.51	12.69	14.33	12.68	1.45	3.17	1.89	5.32
25.01	19.33	23.50	19.33	3.43	3.81	4.88	6.67
109.47	84.98	105.26	84.56	26.29	13.32	35.44	22.59
39.59	59.50	37.41	59.50	10.55	10.21	16.41	18.37
17.69	16.04	14.65	16.04	2.80	3.40	4.36	6.14
60.06	59.90	58.91	59.88	11.24	10.07	13.62	18.05
5.79	6.04	4.47	6.04	0.12	0.85	0.15	1.59
30.20	39.16	29.49	39.16	7.75	11.87	11.38	14.26
10.50	12.68	9.95	12.46	1.74	6.74	1.80	7.67
17.87	18.69	18.78	18.62	4.23	8.21	5.53	9.63
97.27	84.44	99.95	84.38	39.48	29.56	42.03	34.93
37.83	59.50	39.11	59.50	17.90	24.23	20.68	28.56
15.56	16.04	12.23	16.04	5.47	7.96	5.75	9.27
64.21	59.87	60.84	59.86	15.81	23.91	16.96	28.32
4.65	6.04	4.07	6.04	0.23	2.16	0.26	2.61
<i>ME</i>	0.876	0.886		0.744		0.764	

WEPP 模型对次降雨、每年和多年平均径流量模拟的 Nash-Sutcliffe 有效性 ME 分别为 0.915、0.879 和 -0.056(图 1),对次降雨、每年和多年平均土壤侵蚀量模拟的 Nash-Sutcliffe 有效性 ME 分别为 0.853、0.758 和 -0.456(图 2)。除 WEPP 模型对多年径流量和土壤侵蚀量的 Nash-Sutcliffe 有效性 ME 外,其他值均大于 0.5,说明 WEPP 模型对次降雨和每年径流量和侵蚀量模拟效果较好,而对多年平均径流量和侵蚀量模拟结果较差。这主要是由于 Nash-Sutcliffe 有效性适合大样本相关性的评价,而这里只是对坡长为 10、20、30 和 40 m 条件下的 8 年平均径流量和土壤侵蚀量进行了模拟,模拟坡长样本数仅为 4 个,从而造成 WEPP 模型对多年平均径流量和土壤侵蚀量的 Nash-Sutcliffe 有效性 ME 偏低。但从多年平均径流量和侵蚀量模拟值来看,WEPP 模型模拟的多年径流量和土壤侵蚀量与实测

值的最大差值分别为 2.71 mm 和 3.81 kg/m² (表 4), 即模拟结果与实测值较接近。说明 WEPP 模型对多年平均径流量和土壤侵蚀量的模拟可满足要求。

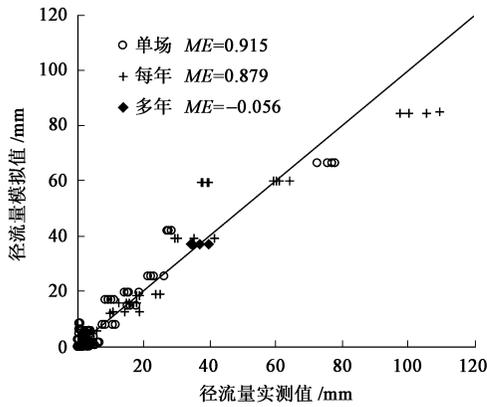


图 1 径流量模拟值与实测值对比
FIGURE 1 Comparison of runoff between the simulated and measured values

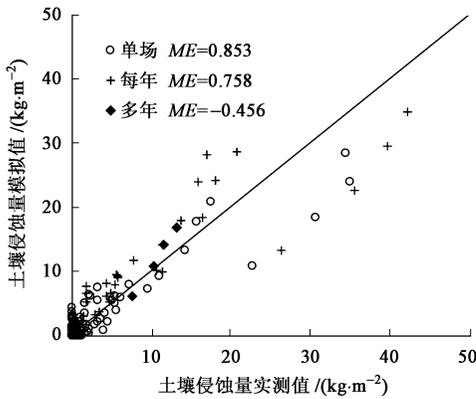


图 2 土壤侵蚀量模拟值与实测值对比
FIGURE 2 Comparison of soil loss between the simulated and measured values

在单场降雨事件中, 径流量模拟值在 3 段坡长 (10~20 m、20~30 m 和 30~40 m) 间的增加值 ($R_{10,20}$ 、 $R_{20,30}$ 和 $R_{30,40}$) 均为 0; 而径流量实测值在这 3 个坡段间的增加值变化于 -4~3 mm 之间。在每年条件下, 径流量模拟值在 10~40 m 坡长间的增加值 ($R_{10,40}$) 变化于 -1~0 mm 之间, 且径流量模拟值在 10~40 m 坡长间的增加值中有 62.5% 为 0 (图 3b), 而径流量实测值在 10~40 m 坡长间的增加值变化于 -12~1 mm 之间。说明与实测值相比, 径流量模拟值随坡长增加的变化不够敏感。同时, 在次降雨条件下, 径流量实测值在这 3 段坡长间的增加值中有 80% 为负值 (图 3a), 类似于次降雨条件, 年径流量实测值在 10~40 m 坡长间增加值中也有 87.5% 为负值 (图 3b), 说明大多数情况下, 无论是次降雨还是年径流量, 其实测值皆随坡长的增加而呈减小趋势。

表 4 多年平均径流量和土壤侵蚀量模拟值与实测值对比

TABLE 4 Comparison of average annual runoff and soil loss between the simulated and measured values

坡长/m	径流量/mm			土壤侵蚀量/(kg·m ⁻²)		
	实测值	模拟值	相对误差/%	实测值	模拟值	相对误差/%
10	39.67	37.20	-6.23	7.56	6.26	-17.20
20	36.71	37.15	1.20	10.30	10.97	6.50
30	34.76	37.05	6.59	11.58	14.23	22.88
40	34.30	37.01	7.90	13.05	16.86	29.20

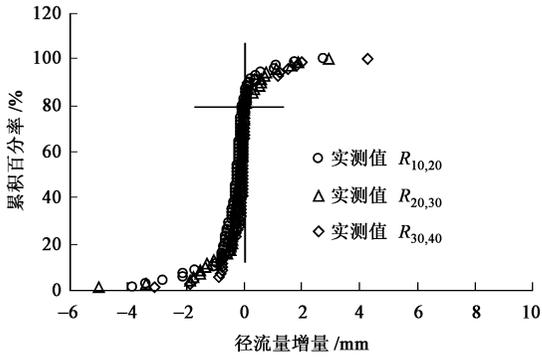
在对土壤侵蚀量的模拟中, 无论是次降雨还是每年条件下, 侵蚀量模拟值在 3 段坡长 (10~20 m、20~30 m 和 30~40 m) 间的增加值 ($E_{10,20}$ 、 $E_{20,30}$ 和 $E_{30,40}$) 均大于实测的对应值 (图 3c~f)。次降雨条件下, 3 段坡长间侵蚀量增加值 ($E_{10,20}$ 、 $E_{20,30}$ 和 $E_{30,40}$) 分别为实测对应值的 6.24、2.63 和 3.14 倍; 每年条件下, 3 段坡长间侵蚀量的增加值 ($E_{10,20}$ 、 $E_{20,30}$ 和 $E_{30,40}$) 分别为实测对应值的 1.71、1.28 和 1.47 倍, 说明与实测值相比, 土壤侵蚀量模拟值随坡长增加的变化过于敏感。此外, 侵蚀量模拟值在 3 段坡长间, 增加值的次序为 $E_{10,20} > E_{20,30} > E_{30,40}$ (图 3g), 实测值的 $E_{10,20}$ 、 $E_{20,30}$ 和 $E_{30,40}$ 也呈这一趋势 (图 3h)。

3 结 论

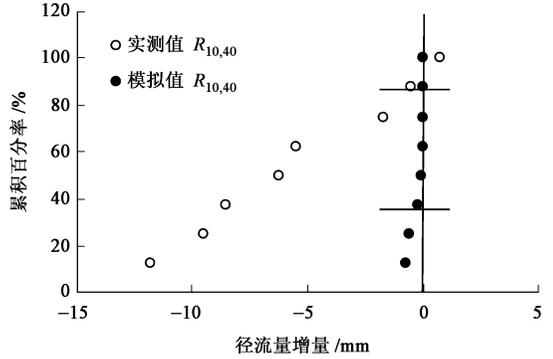
利用安塞站 1985—1992 年的气象实测资料、坡面径流小区的径流量和土壤侵蚀量观测资料, 通过对 WEPP 模型土壤文件中有效水力传导系数、临界水力剪切力和细沟土壤可蚀性 3 个土壤参数的标定, 模拟了 10、20、30 和 40 m 4 个坡长条件下次降雨、每年和多年平均的径流量和土壤侵蚀量, 用 Nash-Sutcliffe 模型有效性评价了模拟结果。

1) 在 10、20、30 和 40 m 4 个坡长条件下, WEPP 模型对次降雨、每年和多年平均径流量模拟的 Nash-Sutcliffe 有效性 ME 分别为 0.915、0.879 和 -0.056; 对次降雨、每年和多年平均土壤侵蚀量模拟的 Nash-Sutcliffe 有效性 ME 分别为 0.853、0.758 和 -0.456。说明 WEPP 模型对次降雨和年平均径流量和侵蚀量的模拟效果较好, 而在多年平均条件下的模拟效果较差, 但多年平均条件下径流量和土壤侵蚀量与实测值的最大相对误差分别为 7.90% 和 29.20%, 表明 WEPP 模型对多年平均径流量和侵蚀量的模拟可满足要求。

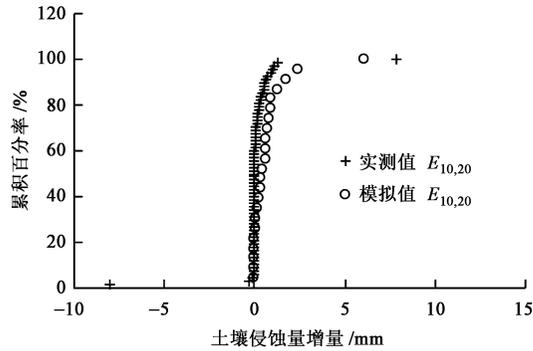
2) 径流量模拟值随坡长增加的变化与实测值相比不够敏感。在次降雨事件中, 径流量模拟值在 3 段坡长 (10~20 m、20~30 m 和 30~40 m) 间的增加



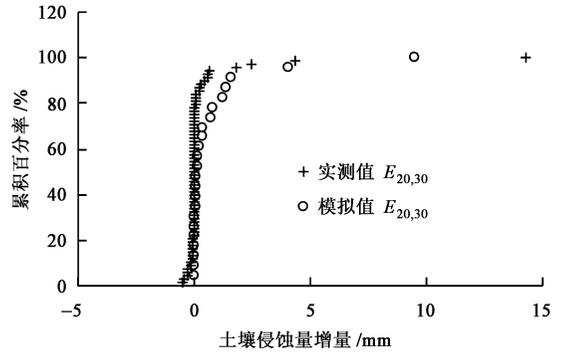
a 次降雨径流量实测值 $R_{10,20}$ 、 $R_{20,30}$ 和 $R_{30,40}$ 的对比



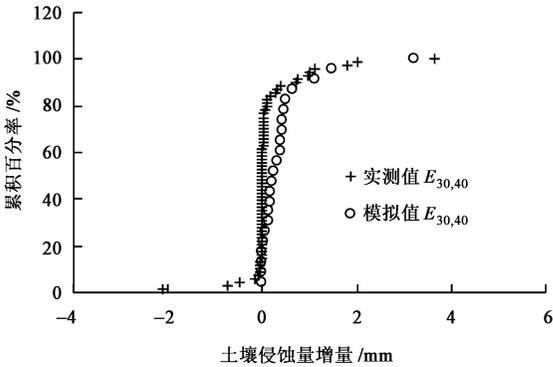
b 每年径流量实测值与模拟值 $R_{10,40}$ 的对比



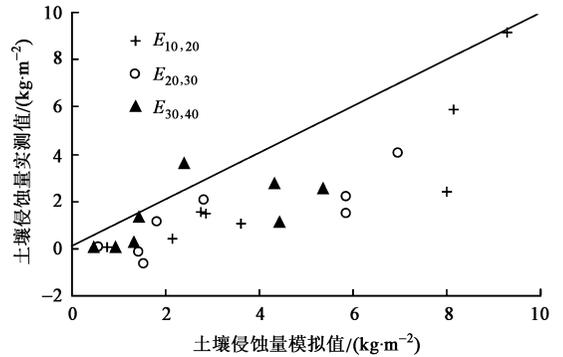
c 次降雨侵蚀量实测值与模拟值 $E_{10,20}$ 的对比



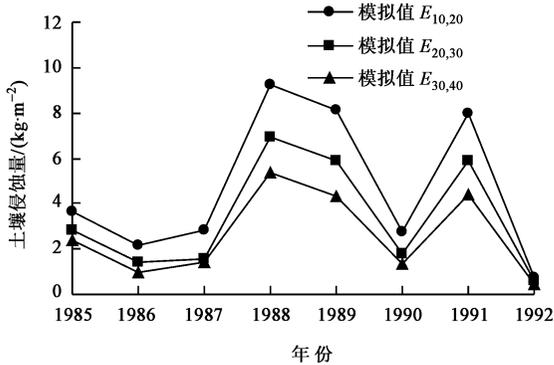
d 次降雨侵蚀量实测值与模拟值 $E_{20,30}$ 的对比



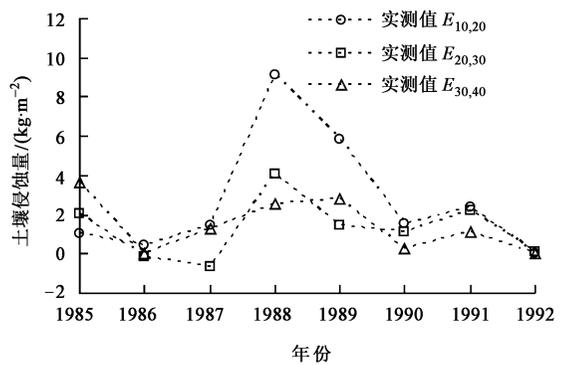
e 次降雨侵蚀量实测值与模拟值 $E_{30,40}$ 的对比



f 每年侵蚀量实测值与模拟值 $E_{10,20}$ 、 $E_{20,30}$ 和 $E_{30,40}$ 的对比



g 每年侵蚀量模拟值 $E_{10,20}$ 、 $E_{20,30}$ 和 $E_{30,40}$ 的对比



h 每年侵蚀量实测值 $E_{10,20}$ 、 $E_{20,30}$ 和 $E_{30,40}$ 的对比

图 3 模拟值与实测值在坡长间增加值的对比

FIGURE 3 Comparison of increased ranges under different slope lengths between the simulated and measured values

注: $R_{10,20}$ 、 $R_{20,30}$ 、 $R_{30,40}$ 和 $R_{10,40}$ 分别代表径流量在坡长 10~20 m、20~30 m、30~40 m 和 10~40 m 间的增加值,

$E_{10,20}$ 、 $E_{20,30}$ 和 $E_{30,40}$ 分别代表土壤侵蚀量在坡长 10~20 m、20~30 m 和 30~40 m 间的增加值。

值($R_{10,20}$ 、 $R_{20,30}$ 和 $R_{30,40}$)均为0,而实测对应值变化于 $-4\sim 3$ mm之间;在每年条件下,径流量模拟值在 $10\sim 40$ m坡长间的增加值($R_{10,40}$)变化于 $-1\sim 0$ mm之间,而实测对应值变化于 $-12\sim 1$ mm之间。此外,大多数情况下实测的径流量随坡长的增加而呈减小趋势。

3)土壤侵蚀量模拟值随坡长增加的变化与实测值相比过于敏感。在次降雨条件下,土壤侵蚀量模拟值在3段坡长($10\sim 20$ m、 $20\sim 30$ m和 $30\sim 40$ m)间的增加值($E_{10,20}$ 、 $E_{20,30}$ 和 $E_{30,40}$)分别为实测对应值的6.24、3.63和3.14倍;在每年条件下,土壤侵蚀量模拟值的 $E_{10,20}$ 、 $E_{20,30}$ 和 $E_{30,40}$ 分别为实测对应值的1.71、1.28和1.47倍。另外,土壤侵蚀量模拟值在不同坡长间增幅的次序为 $E_{10,20} > E_{20,30} > E_{30,40}$,实测值的 $E_{10,20}$ 、 $E_{20,30}$ 和 $E_{30,40}$ 也呈这一趋势。

参 考 文 献

- [1] FOSTER G R, LANE L J. *User requirements, USDA water erosion prediction project (WEPP)* [R]. 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): 1 587-1 593.
- [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): 1 702-1 711.
- [4] LAFLEN J M, LWONARD 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, USDA water erosion prediction project, hillslope profile and watershed model documentation* [R]. West Lafayette: USDA-ARS Purdue Univ, 1995.
- [6] WISCHMEIER W H, SMITH D D. *Prediction rainfall erosion losses; A guide to conservation planning* [R]. West Lafayette: USDA-ARS Purdue Univ, 1978.
- [7] ZHANG X C. Calibration, refinement, and application of the WEPP model for simulation climatic impact on wheat production[J]. *Trans ASAE*, 2004, 47(4): 1 075-1 085.
- [8] 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.
- ZHENG F L, WANG Z L, YANG Q K. Development strategy on soil erosion science in China [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 1-10.
- [9] 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.
- LIU B Y, SHI P J. Water erosion prediction project (WEPP) model for watershed scale [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1998, 18(5): 6-12.
- [10] 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.
- ZHENG F L, YANG Q K, WANG Z L. Water erosion prediction model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 13-24.
- [11] 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.
- ZHANG Y B, ZHENG F L, JIA Y Y. WEPP model and its application[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(4): 146-149.
- [12] 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.
- MIU C Y, HE B H, CHEN X Y, et al. Study on the application and contrast of CLIGEN and BPCDG in WEPP model application [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2004, 20(6): 321-324.
- [13] 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, 21(1): 13-16.
- MIU C Y, HE B H, CHEN X Y. Application and comparison of the erosion model USLE and WEPP in predicting erosion of purple soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(1): 13-16.
- [14] 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.
- SHI W L, YANG Q K, MU W H. Applicability test of CLIGEN in the Loess Plateau [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2006, 4(2): 18-23.
- [15] 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.
- Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources. *A study on conservational eco-agriculture on hill-gully region of the Loess Plateau* [M]. Yangling: Tianze Press, 1990: 36-56.
- [16] 陕西省农业勘查设计院. 陕西农业土壤[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1982: 71-72.
- Agricultural Survey Institute of Shaanxi Province. *Agricultural soil of Shaanxi Province* [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1982: 71-72.
- [17] 王夏晖, 王益权, KUZNETSOV M S. 黄土高原几种主要土壤的物理性质研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 99-103.
- WANG X H, WANG Y Q, KUZNETSOV M S. Study on physical properties of several main soils in the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(4): 99-103.
- [18] 全国土壤普查办公室. 中国土种志: 第5卷[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995: 464-465.
- National Soil Survey Office. *Soil species of China: Vol. 5* [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1995: 464-465.
- [19] 李裕元, 邵明安. 土壤翻耕对坡地水分转化与产流产沙特征的影响[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 46-50.
- LI Y Y, SHAO M A. Impact of tillage on water transformation and runoff-sediment yielding characteristics on slope land [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19(1): 46-50.
- [20] 王建勋, 郑粉莉, 江忠善, 等. 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.
- WANG J X, ZHENG F L, JIANG Z S, et al. Assessment of WEPP model applicability (hillslope version) on hill-gully region of the Loess Plateau [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27(2): 50-55.
- [21] NASH J E, SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models(I): A discussion of principles[J]. *Journal of Hydrology*, 1970, 10(3): 282-290.

(责任编辑 李 契)