

# WEPP 模型在东北黑土区的适用性评价 ——以坡度和水土保持措施为例

刘远利<sup>1</sup>, 郑粉莉<sup>1,2</sup>, 王彬<sup>1</sup>, 王玉玺<sup>3</sup>, 解运杰<sup>3</sup>, 樊华<sup>3</sup>

(1. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 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, 陕西 杨凌 712100; 3. 黑龙江省水土保持研究所, 黑龙江 宾县 150400)

**摘 要:** 基于黑龙江省宾县试验站 2008 年气象观测数据和野外径流小区监测资料, 利用 WEPP 模型估算东北黑土区次降雨径流量和土壤流失量, 并通过与实测资料对比, 评价 WEPP 模型的适用性。结果表明, 在 3°, 5°, 8° 这 3 个坡度条件下, WEPP 模型对次降雨径流量模拟的 Nash—Sutcliffe 有效性系数 ME 分别为 0.47, 0.03 和 -5.9, 对次降雨土壤侵蚀量模拟的 Nash—Sutcliffe 有效性系数 ME 分别为 0.58, 0.72 和 0.60, 说明 WEPP 模型对次降雨坡面径流量的模拟效果较差, 而对次降雨坡面土壤侵蚀量模拟效果较好。WEPP 模型对次降雨的径流量和土壤流失量的模拟显示, WEPP 模型对坡度变化反应敏感。WEPP 模型对大豆、稗草、苜蓿和苗期榆树次降雨径流量模拟有效性系数 ME 分别为 0.81, 0.71 和 0.83, 0.94, 对次降雨土壤流失量的模拟有效性系数 ME 分别为 0.81, 0.71 和 0.83, 0.94, 表明 WEPP 对大豆地和苜蓿地的模拟效果好于稗草和苗期榆树, 且其好于不同坡度条件下裸地的模拟结果。WEPP 模型可以模拟不同水土保持措施条件下的次降雨径流量和土壤侵蚀量, 也可以模拟不同坡度条件下裸地的次降雨土壤侵蚀量, 但是不适合模拟不同坡度条件下裸地的次降雨径流量。

**关键词:** WEPP; 东北黑土区; 径流量; 土壤侵蚀; 适用性

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2010)01-0139-07

中图分类号: S157

## Assessment of WEPP Model Applicability in Black Soil Zone of Northeast China —A Case Study of Slope Gradient and Soil and Water Conservation Measures

LIU Yuan-li<sup>1</sup>, ZHENG Fen-li<sup>1,2</sup>, WANG Bin<sup>1</sup>, WANG Yu-xi<sup>3</sup>, XIE Yun-jie<sup>3</sup>, FAN Hua<sup>3</sup>

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;  
2. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, and Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Heilongjiang Institute of Soil and Water Conservation, Binxian, Heilongjiang 150400, China)

**Abstract:** Based on data observed from the automatic meteorological station near runoff plots and measured soil loss data from field runoff plots at Binxian Experimental Station in 2008, runoff and soil loss from the plots in black soil zone, Northeast of China were simulated. The simulation results were compared with measured values and the applicability of WEPP model was assessed. Results showed that Nash—Sutcliffe model efficiencies of event runoff simulation on different slopes by WEPP were 0.47, 0.03, and -5.9, respectively. Nash—Sutcliffe model efficiencies of event soil loss simulation were 0.58, 0.72, and 0.60, respectively. It indicated that event simulation result of soil loss was better than event simulation result of runoff. WEPP model was sensitive to the change of slope. Nash—Sutcliffe model efficiencies of event runoff simulation to soybean, Dallis grass, alfalfa, and elm were 0.81, 0.71, 0.83, and 0.94, whereas Nash—Sutcliffe model efficiencies of event soil loss simulation were 0.81, 0.71, 0.83 and 0.94, respectively. This show that simulation results of alfalfa and soybean were better, compared with simulation results of grass and elm and simulation results of bare land on different slopes. From the above results, WEPP can be used to simulate event runoff

收稿日期: 2009-07-09

修回日期: 2009-11-08

资助项目: 黄河水利委员会治黄专项“黄土高原水土流失数学模型(第一期)研发”(黄水保(2006)51); 西北农林科技大学创新团队建设计划项目“土壤侵蚀及其治理环境效应评价”(01140202)

作者简介: 刘远利(1983—), 男(汉族), 四川省成都市人, 在读硕士, 研究方向为 GIS 与土壤侵蚀。E-mail: emyuanli@yahoo.cn。

通信作者: 郑粉莉(1960—), 女(汉族), 陕西省蓝田县人, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀过程及预报和土壤侵蚀环境效应评价。E-mail: zhengfenli@yahoo.com。

and soil loss under different soil and water conservation measures and event soil loss at different slope gradients on bare land, but it is not suitable to simulate event runoff at different slope gradients on bare land.

**Keywords:** WEPP; black soil zone; runoff; soil erosion; applicability

东北黑土地区是我国主要商品粮产区,也是世界 3 大黑土区之一,其耕作层以其有机质含量高,土壤肥沃,土质疏松,适宜耕作而著称<sup>[1]</sup>。近几十年来人口数量的急剧增加,土地垦殖率不断上升,植被遭到严重的破坏,水土流失日益严重,土地退化现象十分明显,现已成为全国水土流失比较严重的地区<sup>[2]</sup>。黑龙江省水土保持科学研究所第 2,3 次土壤侵蚀遥感调查数据显示,东北黑土区侵蚀面积为  $4.47 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 占总面积的 37.9%。水蚀预报模型 WEPP<sup>[3-7]</sup> (water erosion prediction project) 是由美国农业部、普渡大学等 7 个部门开发的基于物理过程的土壤侵蚀预报模型,能够预测不同土地利用方式,不同时间尺度(单场降雨、每月、单个季节、每年、多年等)的径流量、土壤侵蚀量及其空间分布,对水土流失评价、水土保持措施的制定有着指导性意义。WEPP 模型诞生之初就受到了各国学者的关注<sup>[8-12]</sup>,其研究内容主要包括以下几个方面:(1) WEPP 模型侵蚀机理的研究,(2) WEPP 模型相关参数的研究,(3) WEPP 模型适用性研究,(4) 运用 WEPP 对土壤侵蚀量进行预测。国内研究者为了引入 WEPP 模型,也做了很多尝试。牛志明<sup>[13]</sup>等介绍了 WEPP 的开发背景、总体结构和主要功能,并对其运用前景作了分析。王建勋<sup>[14]</sup>等评价了 WEPP 模型在黄土丘陵沟壑区的适用性。代华龙<sup>[15-17]</sup>等探讨了该模型在川中丘陵紫色土地区的适用性,结果表明在大多数条件下预报值较合理。然而 WEPP 模型在东北黑土区域的适用性评价研究还是空白。本文采用黑龙江宾县宾州镇二龙山孙家沟小流域径流小区监测的次降雨产流和产沙数据,运用 WEPP 模型模拟不同坡度和不同水土保持条件下次降雨坡面径流量和土壤侵蚀量,分析 WEPP 模型在东北黑土区域的适用性,为该地区坡面土壤侵蚀定量评价提供技术支撑。

## 1 实验区概况和 WEPP 模型介绍

### 1.1 实验区概况

试验小区设置在黑龙江宾县宾州镇二龙山孙家沟小流域,距哈尔滨约 55 km,地理坐标为 127°24'47"E,45°44'57"N。小流域地貌属丘陵漫岗类型,地势由北向南倾斜,西南高,东北低。最高点高程 210 m,最低点高程 178 m,相对高差 32 m,面积 41.48  $\text{hm}^2$ 。气候属于寒温带大陆性季风气候区,气候温暖,多年平均降雨量 590 mm,最大年降雨量为

861 mm,最小年降雨量 398 mm,降雨集中在 7—9 这 3 个月,占全年降雨量的 70%以上,年均径流深 133 mm,年平均温度 3.5℃,无霜期 128 d,初霜期在 9 月中旬,终霜期在 5 月下旬。土壤主要是黑土,坡耕地有机质含量为 2%~6%,土层厚度为 30 cm 左右。实验区土壤侵蚀以水蚀为主,主要分布在坡耕地、荒草地和疏幼林地,侵蚀面积 13.76  $\text{hm}^2$ ,占总面积的 33.2%,轻度侵蚀占总侵蚀面积的 46%,中度侵蚀占总 34%。流域平均侵蚀模数为 754  $\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

### 1.2 WEPP 模型坡面版介绍

WEPP 模型坡面版<sup>[5]</sup>是美国农业部研发的用于预报次降雨坡面径流量和侵蚀量的过程模型,该模型是以细沟侵蚀和细沟间侵蚀为基础的物理过程模型,由天气随机生成模块、冬季过程模块、灌溉模块、水文过程模块、土壤模块、植物生长模块、残留物分解模块、地表径流模块、侵蚀模块等 9 个功能模块组成,它可以预测农田、林地、牧场、山地、建筑工地和城区不同区域的产沙和输沙状况,应用范围十分广泛。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

布设 3 个坡度径流小区(3°,5°,8°),小区长 20 m,宽 5 m,研究坡度对坡面土壤侵蚀的影响;布设 4 组 12 个非标准小区,坡度为 5°,长 5 m,宽 2 m,分析水土保持措施对坡面土壤侵蚀的影响。具体径流小区布设详见表 1。

表 1 径流小区布设

坡度	小区号	坡长/m	坡宽/m	小区地面处理
3°	A	20	5	休闲裸露
	B	20	5	休闲裸露
5°	$D_1/ D_2/ D_3$	5	2	种植大豆
	$E_1/ E_2/ E_3$	5	2	种植稗草
	$F_1/ F_2/ F_3$	5	2	种植苜蓿草
	$G_1/ G_2/ G_3$	5	2	人工榆树(苗期)
8°	C	20	5	休闲裸露

注:种植的榆树幼苗高度在 1 m 左右。其中  $D_1/ D_2/ D_3$ ,  $E_1/ E_2/ E_3$ ,  $F_1/ F_2/ F_3$ ,  $G_1/ G_2/ G_3$  为作物小区,每种作物有 2 个重复。

本研究使用的气象资料皆来自于布设在径流小区附近的自动气象站记录的 2008 年日气象数据,包括每分钟记录的降雨量、最高气温、最低气温、风向、风速、露点温度等,径流小区地形数据和不同水土保持措施数据

以及径流小区收集的次降雨产流和产沙数据资料。

## 2.2 WEPP 模型输入参数及数据文件建立

运行坡面版 WEPP 模型至少要求 4 个输入文件:地形文件、气候文件、土壤文件和管理措施文件,如果要模拟灌溉还需要其它输入数据文件。通过文件建立窗口可以建立或更改输入数据文件。

### 2.2.1 地形文件输入参数

WEPP 模型地形文件的建立包括坡度、坡长、坡向以及坡面形状等。在坡面文件中,坡面径流要素(OFE)是描述坡面的最小单元,它具有相同的土壤、作物和管理措施。也就是说 WEPP 模型的坡面可以看作由有多个 OFE 组成的。WEPP 模型允许用户模拟具有不同作物、不同土壤和不同管理措施的坡面径流要素。在模拟水文和侵蚀过程中,其它输入文件(土壤、坡度、管理措施等)都为每个 OFE 提供信息。

### 2.2.2 气候文件输入参数

气候数据要求每日的降雨、温度、太阳辐射、风向风速、露点温度等。WEPP 模型提供了两种格式的气象数据建立方法,CLIGEN 格式气候数据是通过降雨量、降雨历时、TP/IP 来描述的。而 BPCDG 格式气候数据是通过断点的形式来描述的,它包括断点数、各断点时间、降雨累积量。本次研究对次降雨进行模拟,采用 BPCDG 格式,用手工的方式建立。

### 2.2.3 土壤文件输入参数

WEPP 模型中支持 1.8 m 深,8 个不同土壤层的土壤输入文件。包括沙粒含量、黏粒含量、有机质含量、阳离子代换量和砾石含量。而对于初始饱和率、细沟可蚀性、临界剪切力、有效水力传导系数通过模型帮助文档提供的方程<sup>[3]</sup>计算得到,研究中采用的土壤数据是通过采集土壤样品进行分析后的土壤剖面分层数据。

### 2.2.4 措施管理文件输入参数

作物管理输入文件包括了与种植、耕作序列、耕作实施、作物和残余物管理、初始状况和作物轮作等相关信息以及各项目的众多子项目。本研究采用每个径流小区的作物管理措施记录信息,设置相关项目参数。在 WEPP 模型次模拟当中,作物管理措施初始数据子数据库(initial conditions)对于次模拟的输出结果影响很大,必须保证输入参数值的有效性与准确性。

## 2.3 模型模拟精度的评价方法

Nash—Sutcliffe<sup>[18]</sup>模型有效性系数 ME(model efficiency)是评价模型模拟值和实测值相关性的有效方法,本研究利用 ME 评价 WEPP 模型在不同条件下适用性,其计算公式为:

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (V_m - V_c)^2}{\sum_{i=1}^n (V_m - V)^2} \quad (1)$$

式中:ME——模型有效性系数; $V_m$ ——实测值; $V_c$ ——模拟值; $V$ ——实测值的平均值。ME 等于 1 表示模拟值与实测值的每一对数据均相等,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,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。具已有研究表明,当 ME 大于 0.5 时,可以认为 WEPP 模型的模拟结果较好<sup>[18]</sup>。另外,采用相对误差的绝对值来衡量 WEPP 模型对单次降雨径流量和土壤侵蚀量估算的精度。

## 3 结果分析

本研究中选用野外 15 个径流小区 2008 年的次降雨径流产流、产沙实测数据与 WEPP 模型模拟数据进行比较分析,分析模型各参数在不同坡度、不同水保措施条件下,对产流、产沙的影响,以及模型在这些条件下对次降雨模拟的有效性。

### 3.1 不同坡度下 WEPP 的模拟结果

对于地面休闲裸露处理,不同坡度(3°,5°,8°)条件下 WEPP 模型的 8 次次降雨坡面径流量和土壤流失量的结果列于表 2。在不同坡度(3°,5°,8°)条件下,WEPP 模型对径流量的 24 次模拟结果仅有 3 次的相对误差绝对值小于 25%,而大于 100%者却有 11 次,最大相对误差绝对值为 785.71%,表明 WEPP 模型对次降雨径流量的模拟结果较差,特别是 8°径流小区的径流量模拟的相对误差绝对值很大。但是,从次降雨径流量模拟的相对误差绝对值的分布可以看出,WEPP 模型对于小坡度径流量的模拟结果好于对大坡度径流量的模拟结果。从径流量实测值的变化趋势来看,WEPP 模型对次降雨径流量的模拟值随坡度的增大而增大,且增大的幅度也增大,径流量的实测值当中出现 3 次降雨事件(20080827,20080908 和 20080922)的小坡度径流小区产生的径流量大于大坡度径流小区产生的径流量,这表明 WEPP 模型对径流量的预测随坡度变化很敏感。

不同坡度(3°,5°,8°)条件下,WEPP 模型对次降雨土壤侵蚀 24 次模拟的结果中,有 9 次模拟结果的相对误差绝对值小于 25%,仅有 4 次模拟结果的相对误差绝对值大于 100%,其中 8°径流小区有 3 次。这些结果表明,WEPP 模型对次降雨土壤侵蚀量的模拟结果明显好于对次降雨径流量的模拟结果,然而对大坡度的侵蚀量模拟结果偏差较大。从土壤侵蚀量的变化趋势来看,模型模拟值和实测值均随坡度的增大而增大,具有相同的变化趋势。

在 3°,5°,8°这 3 个坡度条件下,WEPP 模型对次降雨的径流量和侵蚀量的模拟有效性系数 ME 如表

3 所示。WEPP 对径流量的模拟结果中,5 和 8 坡度径流小区的径流量模拟结果的有效性系数 ME 分别为 0.03 和 -5.9,结果较差。模型对次降雨土壤侵蚀量的模拟有效性系数 ME 均大于 0.5,表明 WEPP 模型对次降雨的侵蚀量的模拟结果较好。WEPP 模型对次降雨的侵蚀量和径流量模拟结果也表明该模型对次降雨事件的侵蚀量模拟效果明显好于对径流量的模拟效果。

实测值中,次降雨产生的土壤侵蚀量出现了几次

大坡度值小于小坡度值,而大坡度的模拟值恒大于小坡度的模拟值,模型有效性系数 ME 大于 0.5,这正反映了模型对于次降雨模拟的特点:次降雨由于受自然条件和各径流小区的影响,其实测值将出现随机性,而 WEPP 模型是基于大量数据的基础上研发的预报模型,它不能反映这种随机性,但其模型有效性系数 ME 均大于 0.5,表明 WEPP 能够预测土壤侵蚀量的值域,但是在这个值域内各模拟值具有一定的随机性。

表 2 2008 年不同坡度条件下径流量和侵蚀量的模拟值与实测值对比

坡度日期	降雨量/ mm	降雨历 时/h	最大 30 min 雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	径流量实 测值/mm	径流量模 拟值/mm	相对误差的 绝对值/%	侵蚀量实测值/ (kg·m <sup>-2</sup> )	侵蚀量模拟值/ (kg·m <sup>-2</sup> )	相对误差的 绝对值/%	
3°	0706	18.2	3.6	9.2	0.08	0.04	50	0.002	0.001	50.0
	0729	10.4	2.3	17.2	0.04	0.16	300	0.001	0.001	0.0
	0801	31.8	11.5	4.8	0.22	1.12	409	0.004	0.002	50.0
	0827	12.3	3.8	12.8	1.27	0.83	34.7	0.023	0.010	56.5
	0908	13.8	2.9	6.2	0.92	0.49	46.7	0.026	0.005	80.7
	0915	13.4	1.8	10.8	2.65	1.36	48.7	0.045	0.036	20.0
	0917	9.8	4.7	4.4	0.32	0.00	100.0	0.006	0.000	100.0
	0922	7.8	3.8	6.0	0.16	0.02	87.5	0.003	0.001	66.7
	5°	0706	18.2	3.6	9.2	0.50	1.27	154.0	0.012	0.014
0729		10.4	2.3	17.2	0.15	0.96	540.0	0.003	0.011	266.7
0801		31.8	11.5	4.8	0.25	2.01	704.0	0.004	0.004	0.0
0827		12.3	3.8	12.8	2.92	2.46	15.8	0.060	0.025	58.3
0908		13.8	2.9	6.2	1.59	1.86	17.0	0.047	0.035	25.5
0915		13.4	1.8	10.8	1.53	2.52	64.7	0.071	0.074	4.2
0917		9.8	4.7	4.4	0.29	0.14	51.7	0.005	0.002	60.0
0922		7.8	3.8	6.0	1.30	0.52	60.0	0.038	0.014	63.2
8°		0706	18.2	3.6	9.2	0.75	3.61	381.33	0.013	0.048
	0729	10.4	2.3	17.2	1.27	2.75	116.54	0.007	0.052	642.86
	0801	31.8	11.5	4.8	0.56	4.96	785.71	0.011	0.009	18.18
	0827	12.3	3.8	12.8	2.91	3.82	31.27	0.073	0.087	19.18
	0908	13.8	2.9	6.2	0.88	4.17	373.86	0.018	0.106	488.89
	0915	13.4	1.8	10.8	2.54	4.68	84.25	0.306	0.284	7.19
	0917	9.8	4.7	4.4	0.38	1.15	202.63	0.008	0.011	37.50
	0922	7.8	3.8	6.0	0.99	1.01	2.02	0.041	0.028	31.71

表 3 模型有效性系数 ME

坡度	3°		5°		8°	
	径流量	侵蚀量	径流量	侵蚀量	径流量	侵蚀量
ME	0.47	0.58	0.03	0.72	-5.90	0.60

在 20080729 降雨事件当中,径流量模拟结果的相对误差绝对值在不同坡度(3°,5°,8°)条件下分别为 300%,540%,116%,模拟结果出现了较大的偏差,分析这次降雨事件的气象数据发现,最大 30 min 降雨强

度( $I_{30}$ )为 17.2 mm/h,远大于其它降雨事件的最大降雨强度。在 20080801 降雨事件中,径流量模拟结果的相对误差绝对值在不同坡度(3°,5°,8°)条件下分别为 409%,704%,785%,是历次降雨模拟当中偏差最大的。分析气象数据发现,这次降雨事件降雨量为 31.8 mm,降雨历时为 11.5 h,是这 8 次降雨事件当中降雨历时最长的降雨事件。通过以上分析结果可以看出,WEPP 模型对  $I_{30}$  偏大和降雨历时偏长的降雨事件的径流量次模拟结果的偏差较大。20080729 降雨事件的

侵蚀量的模拟结果相对误差绝对值在不同坡度(5°,8°)条件下分别为 266.7%,642.9%,表明 WEPP 模型对  $I_{30}$  大的降雨事件的土壤模拟结果偏差也较大。因此,气象数据当中降雨历时和  $I_{30}$  等降雨特征参数对 WEPP 模型次降雨模拟的径流量和土壤侵蚀量的实测值和模拟值都有较大影响。

### 3.2 不同坡面水保措施下 WEPP 模型的模拟结果

不同水土保持措施下 WEPP 模拟值和实测值的结果见表 4。在 WEPP 模型对种植大豆、稗草、苜蓿、苗期榆树的径流小区的径流量的 32 次模拟中,相对误

差的绝对值小于等于 25% 者有 17 次,占总模拟次数的 53%,相对误差的绝对值在 25%~50% 者有 11 次,占总模拟次数的 34%,相对误差的绝对值大于 50% 者有 4 次,占总模拟次数的 13%。在模型对土壤侵蚀量的 32 次模拟中,相对误差的绝对值小于等于 25% 者有 15 次,占总模拟次数的 47%,相对误差的绝对值在 25%~50% 者有 9 次,占总模拟次数的 28%,相对误差的绝对值大于 50% 者有 8 次,占总模拟次数的 25%,这表明 WEPP 模型对种植大豆、稗草、苜蓿草、苗期榆树的径流小区径流量和土壤侵蚀量的模拟精度皆较好。

表 4 2008 年不同水保措施条件下的径流量和土壤侵蚀量的模拟值和测量值

作物日期	降雨量/ mm	降雨历 时/h	最大 30 min 雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	径流量实 测值/mm	径流量模 拟值/mm	相对误差的 绝对值/%	侵蚀量实测值/ (kg·m <sup>-2</sup> )	侵蚀量模拟值/ (kg·m <sup>-2</sup> )	相对误差的 绝对值/%	
种植大豆	0706	18.2	3.6	9.2	3.35	3.29	1.79	0.055	0.046	16.36
	0729	10.4	2.3	17.2	1.13	1.33	17.70	0.017	0.017	0.00
	0801	31.8	11.5	4.8	2.68	2.81	4.85	0.045	0.041	8.89
	0827	12.3	3.8	12.8	0.85	1.24	45.88	0.017	0.008	52.94
	0908	13.8	2.9	6.2	0.89	1.38	55.06	0.016	0.008	50.00
	0915	13.4	1.8	10.8	1.96	2.57	31.12	0.031	0.025	19.35
	0917	9.8	4.7	4.4	0.98	0.93	5.10	0.015	0.012	20.00
	0922	7.8	3.8	6.0	1.51	1.10	27.15	0.020	0.006	70.00
种植稗草	0706	18.2	3.6	9.2	5.45	5.64	3.49	0.102	0.112	9.80
	0729	10.4	2.3	17.2	1.76	2.78	57.95	0.031	0.023	25.81
	0801	31.8	11.5	4.8	2.48	2.98	20.16	0.064	0.032	50.00
	0827	12.3	3.8	12.8	1.36	1.29	5.15	0.030	0.024	20.00
	0908	13.8	2.9	6.2	1.66	1.88	13.25	0.037	0.028	24.32
	0915	13.4	1.8	10.8	1.79	3.51	96.09	0.047	0.016	65.96
	0917	9.8	4.7	4.4	1.01	1.21	19.80	0.019	0.011	42.11
	0922	7.8	3.8	6.0	2.09	1.74	16.75	0.050	0.041	18.00
种植苜蓿	0706	18.2	3.6	9.2	8.70	7.10	18.39	0.192	0.173	9.90
	0729	10.4	2.3	17.2	2.51	2.87	14.34	0.058	0.044	24.14
	0801	31.8	11.5	4.8	3.09	2.23	27.83	0.086	0.058	32.56
	0827	12.3	3.8	12.8	1.26	1.24	1.59	0.025	0.023	8.00
	0908	13.8	2.9	6.2	1.69	1.89	11.83	0.035	0.025	28.57
	0915	13.4	1.8	10.8	0.63	2.76	338.10	0.014	0.013	7.14
	0917	9.8	4.7	4.4	1.23	0.96	21.95	0.021	0.029	38.10
	0922	7.8	3.8	6.0	1.06	1.34	26.42	0.009	0.021	133.33
苗期榆树	0706	18.2	3.6	9.2	6.53	5.42	17.00	0.134	0.121	9.70
	0729	10.4	2.3	17.2	3.19	2.77	13.17	0.081	0.059	27.16
	0801	31.8	11.5	4.8	2.26	2.99	32.30	0.048	0.019	60.42
	0827	12.3	3.8	12.8	2.30	2.95	28.26	0.044	0.014	68.18
	0908	13.8	2.9	6.2	2.61	1.81	30.65	0.056	0.025	55.36
	0915	13.4	1.8	10.8	0.88	2.57	192.05	0.017	0.015	11.76
	0917	9.8	4.7	4.4	0.90	1.81	101.11	0.016	0.008	50.00
	0922	7.8	3.8	6.0	2.39	1.73	27.62	0.045	0.009	80.00

表 5 模型有效性系数

小区	大豆		稗草		苜蓿		榆树	
	径流量	侵蚀量	径流量	侵蚀量	径流量	侵蚀量	径流量	侵蚀量
有效性系数	0.81	0.71	0.65	0.71	0.83	0.94	0.65	0.51

在不同水土保持措施条件下, WEPP 模型对次降雨的侵蚀量和侵蚀量的模拟有效性系数 ME 如表 5 所示。模型模拟的有效性系数 ME 均大于 0.5, 这表明 WEPP 模型对不同水保措施条件下的径流小区的次模拟的效果较好, 种植苜蓿的径流小区的径流量和土壤侵蚀量的模型有效性系数 ME 分别为 0.83, 0.94, 在 4 种作物中, WEPP 模型模拟苜蓿小区的有效性系数最高, 这说明模型参数较好地描述了影响其径流量和土壤侵蚀量的各项参数。而在种植苗期榆树的径流小区的径流量和土壤侵蚀量的模拟值分别为 0.65, 0.51, 模型有效性系数最低。

在历次降雨特征参数中, 20080801 的降雨量最大, 降雨历时也最长; 20080729 的  $I_{30}$  最大, 而这两次降雨事件径流量和土壤侵蚀量的实测值和模拟值没有出现较大的偏差, 这表明径流小区的植被覆盖对于抑制降雨特征影响土壤流失的效果十分明显, WEPP 模型的模拟结果也能反映出这种结果。20080706 降雨事件中, 测量值和模拟值均高于其它次降雨事件测量值和模拟值, 这可能有两个因素导致这个结果: 第一, 在 5 月份, 霜期结束后, 对径流小区进行了翻耕操作, 种植上了不同的作物, 致使土质酥松, 增加了土地的可侵蚀性。第二, 由于融雪期结束, 土壤水分含量较大, 减小了土壤的入渗能力, 增加了土壤的径流量和土壤侵蚀量。从径流量和土壤侵蚀量在历次降雨事件中的变化来看, 在同一次降雨事件中, 不同径流小区在历次降雨事件的径流量和土壤侵蚀量, 并没有呈现出明显的规律性(即衡大或衡小)。出现这样的原因, 大概有两个, 第一, 在不同的降雨时间, 各种作物处于生长周期的不同阶段, 水分的需求以及作物的覆盖度等要素不同。第二, 由于径流小区建于 2007 年, 处于试验观测的初级阶段, 土壤结构和作物的都还不稳定。而对于作物小区次降雨模拟来说, 其径流量和土壤侵蚀量受降雨数据的影响大于长期连续模拟受降雨数据影响。

## 4 结论

本文运用 WEPP 模型模拟东北丘陵黑土区次降雨在不同坡度, 不同水保措施条件下的径流量和土壤侵蚀量, 并与径流小区的产流、产沙实测数据比较, 分析模型参数对模拟结果的影响, 评价 WEPP 模型在

东北黑土区的适用性。

在不同坡度(3°, 5°, 8°)条件下, 大部分径流量模拟结果的相对误差绝对值大于 100%, WEPP 模型对径流量模拟值的有效性系数 ME 分别为 0.47, 0.03, -5.9, 对土壤侵蚀量模拟结果的有效性系数 ME 分别为 0.58, 0.72, 0.60。表明 WEPP 模型对次降雨土壤侵蚀量的模拟结果较好, 对径流量模拟结果达不到大于 0.5 的要求。

在不同水保措施条件下, 径流量和土壤侵蚀量模拟结果的相对误差绝对值小于 50% 者分别占总模拟次数的 87%, 75%, WEPP 模型对径流量模拟值的有效性系数 ME 均大于 0.5, 这说明模型对径流量和土壤侵蚀量的模拟结果满足要求。WEPP 模型对于种植苜蓿的径流小区径流量和土壤侵蚀量的模拟结果有效性系数 ME 分别为 0.83, 0.94, 好于其它径流小区的模拟结果。在种植作物的径流小区内, 模型对径流量的模拟结果偏大, 对土壤侵蚀量的模拟结果偏小, 表明 WEPP 模型对径流量模拟比对土壤侵蚀量模拟更加敏感。在相同的土壤和地形条件下, 降雨情况和作物生长阶段是决定径流量和侵蚀量关键性因素。

在不同坡度条件下, 降雨量、降雨历时和最大 30 min 降雨强度( $I_{30}$ )等降雨特征参数对 WEPP 模型模拟结果产生重要的影响, 模型对降雨量大, 降雨历时长和最大 30 min 降雨强度大的降雨事件的模拟结果偏差较大。在不同水保措施(种植大豆、稗草、苜蓿、苗期榆树)条件下, 降雨量、降雨历时和最大 30 min 降雨强度对模型模拟值的影响不明显, 表明这些水保措施可以有效地抑制降雨特征参数对 WEPP 模型模拟结果产生的影响。

由于本研究主要是对 WEPP 模型坡面条件下的次模拟进行了验证, 因此, 对于能够在不同空间、时间尺度的 WEPP 模型来说, 本研究的评价是不够完善的。与其它地区(黄土丘陵沟壑区和紫色土区域)同类研究相比, WEPP 模型在东北黑土区的适应性研究还有很多工作要做。将来 WEPP 模型的有效性研究应该进一步利用年及多年的径流小区观察数据, 对 WEPP 模型的有效性进行彻底的研究并且对侵蚀力参数进行校正, 改善模型的预报水平, 为在东北丘陵黑土区广泛使用 WEPP 模型进行水蚀预报, 制定水土保持措施打下更加坚实的理论基础。

## [ 参 考 文 献 ]

- [1] 杨文文,张学培,王洪英. 东北黑土区坡耕地水土流失及防治技术研究进展[J]. 水土保持研究,2005,12(5):232-236.
- [2] 刘鸿雁,张海涛,石鑫. 黑土区水土流失及水土保持研究概述[J]. 水利科技与经济,2005,11(3):167-170.
- [3] Flanagan D C, Livingston S J. USDA-Water Erosion Prediction Project (WEPP) Version 95.7: User Summary[Z]. NSERL Rep. No11,1995.
- [4] Flanagan D C, Nearing M A. USDA—Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation[R]. NSERL Rep. No10,1995.
- [5] 张玉斌,郑粉莉,贾媛媛. WEPP 模型概述[J]. 水土保持研究,2004,11(4):13-24.
- [6] Laflen J M, Elliot W J, Flanagan D C. WEPP-predicting water erosion using a process-based model[J]. Soil Water Conservation,1997,52(4):96-102.
- [7] Laflen J M, Flanagan D C, Engel B A. Soil erosion and sediment yield prediction accuracy using WEPP [J]. Journal of the American Water Resources Association, 2004,40(2):289-297.
- [8] Oropeza-Mota J L, Larose M, Norton L D. Testing the applicability of the WEPP model for predicting soil loss in tropical hillside lands in the Tuxtlas, Veracruz, Mexico[C]// ASA - CSSA - SSSA Proceedings, Seattle, WA,2004.
- [9] Pieri Linda, Bittelli Marco, Wu Joan Q. Using the water erosion prediction project (WEPP) model to simulate field-observed runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy [J]. Journal of Hydrology,2007,336(3):84-97.
- [10] Gronsten H A, Lundekvam H. Prediction of surface runoff and soil loss in southeastern Norway using the WEPP Hillslope Model [J]. Soil & Tillage Research, 2006,85:186-199.
- [11] Yu B, Rosewell C J. Evaluation of WEPP for runoff and soil loss prediction at Gunnedah, NSW Australia [J]. Soil Research. 2001,39(8):1131-1145.
- [12] Hunt Allen G, Wu Joan Q. Climatic influences on Holocene variations in soil erosion rates on a small hill in the Mojave Desert [J]. Geomorphology,2004,58(3):263-289.
- [13] 牛志明,解明曙. 新一代土壤水蚀预测模型:WEPP 介绍[J]. 北京林业大学学报,1998,20(06):64-65.
- [14] 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:以坡度因子为例[J]. 泥沙研究,2008,12(6):52-58.
- [15] 代华龙,曹叔尤,刘兴年,等. 基于 WEPP 模型的紫色土坡面水蚀预报[J]. 中国水土保持科学,2008,6(2):60-65.
- [16] 严冬春,文安邦,张忠启,等. 坡面版 WEPP 模型在川中丘陵区的应用研究[J]. 水土保持学报,2007,21(5):41-45.
- [17] 陈晓燕,何丙辉,缪驰远,等. WEPP 模型在紫色土坡面侵蚀预测中的应用研究[J]. 水土保持学报,2003,17(3):42-46.
- [18] 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.