

# 基于 WEPP 模型的沿海新围垦区土壤侵蚀规律研究

陈 凤<sup>1, 2\*</sup>, 邹玉田<sup>1</sup>, 张 华<sup>1</sup>, 陈文猛<sup>1</sup>

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 2. 南京林业大学, 江苏 南京 210037; )

**摘要:** 针对沿海新垦区盐土盐份高、土壤结构差、有机质含量少等特点, 对沿海新围垦区沟渠边坡高含盐土壤侵蚀开展试验分析, 研究土壤侵蚀变化规律, 利用实测数据验证模型, 分析 WEPP 模型适用性。通过野外径流小区试验分析及模拟结果说明在自然降雨条件下, 沿海新垦区径流小区盐碱土侵蚀主要影响因素是雨量、降雨强度, 且均为正相关显著关系。WEPP 模型模拟出侵蚀量的模型有效性系数平均为 0.543, 计算结果表明 WEPP 能较好模拟沿海新垦区沟渠边坡侵蚀情况, 在特殊的自然条件下尚需修正。

**关键词:** 盐土; 边坡; 土壤侵蚀; WEPP 模型

**中图分类号:** S774

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1007-7839 (2018) 04-0008-09

## Study on soil erosion regularity in coastal new reclamation area based on WEPP model

CHEN Feng<sup>1, 2\*</sup>, ZOU Yutian<sup>1</sup>, ZHANG Hua<sup>1</sup>, CHEN Wenmeng<sup>1</sup>

( 1. *Jiangsu Institute of Water Resources and Hydropower Research, Nanjing 210029, Jiangsu;*  
2. *Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu* )

**Abstract:** According to the characteristics of high salt content, poor soil structure and low organic matter content of salt soil in the new coastal reclamation area, experimental analysis was conducted on high-salted soil erosion in the trench slope of the new coastal reclamation area to study the change law of soil erosion. The model was validated using measured data to analyze the suitability of the WEPP model. The experimental analysis and simulation results of field runoff plot indicated that under natural rainfall conditions, the main influencing factors of saline-alkali soil erosion in runoff area of new coastal reclamation area were rainfall and rainfall intensity, and both were positively correlated and significantly related. The WEPP model simulated the erosion rate, and the average effective coefficient of the model was 0.543. The results showed that WEPP could better simulate the erosion of the gullies in the new coastal reclamation area, and it need to be corrected under special natural conditions.

**Key words:** salt soil; slope; soil erosion; WEPP model

水土流失是世界性的环境灾害问题之一, 其发生和发展受降水、土壤、地形、植被覆盖和土地利用方式等多因素的影响, 是一种复杂的人文和

自然地理过程。国内外许多学者和专家对水土流失及其影响因子进行了大量、广泛而较深入的观测和研究<sup>[1-7]</sup>。早期为开发沿海滩涂, 人们对于成

收稿日期: 2017-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31400617); 江苏省水利科技项目 (2015037); 江苏省水利科技项目 (2015038)

作者简介: 陈凤 (1980-), 女, 高级工程师, 在读博士, 研究方向为水土保持、农田水利和水生态。

陆较早并经过一段时间淋盐长草的土地进行开垦, 由于建设修筑海堤、挖河、筑路、修建田间沟渠等工程措施势必改变了原本地形状况, 形成许多集水、汇水坡面<sup>[8]</sup>, 江苏沿海地区沙壤土区占地面积较大, 裸露的坡面极易发生水土流失, 如果没有采取相应的有效措施, 雨季往往发生严重的土壤侵蚀。沿海平原区土壤沙性重、有机质含量少, 土壤结构差, 同时, 因土壤盐分较高, 植物难以生长。因此, 植被覆盖率低, 在降雨及地表径流作用下, 表土极易被雨水冲蚀, 土壤随径流冲入河中沉积或排除垦区, 加之海潮顶托、闸下淤积、排水不畅, 导致大量泥沙淤积河道, 造成引水排水系统失效<sup>[9]</sup>。本文通过试验及实地调查, 分析研究沿海新垦区高钠盐土壤边坡在自然降雨条件下土壤侵蚀发生发展过程, 采用 WEPP 模型模拟计算并进行适用性分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区设在江苏省东台市, 北纬  $32^{\circ}33' \sim 32^{\circ}57'$ , 东经  $120^{\circ}07' \sim 120^{\circ}53'$ , 处于北亚热带向暖温带过渡地带, 年平均气温  $14.5^{\circ}\text{C}$ 。主导风向为东南风和西北风, 年平均风速  $3.3\text{ m/s}$ 。年平均日照时数  $2231.9\text{ h}$ 。平均年降雨量  $1065.2\text{ mm}$ , 最大年降雨量  $1978.2\text{ mm}$  (1991 年), 最小年降雨量  $462.3\text{ mm}$  (1978 年), 汛期平均降雨量为  $733.4\text{ mm}$ , 汛期最大降雨量  $1294.1\text{ mm}$ , 汛期最小降雨量为  $218.5\text{ mm}$ 。汛期和非汛期雨量悬殊较大, 容易形成旱涝灾害。

东台地区属于沿海淤积性砂土区, 距离海边越近, 成陆开垦的时间越短, 土壤质地越差, 海洋性气候越明显, 试验小区设立在距离海边  $20\text{ km}$  的华J镇。海拔高度  $4.1\text{ m}$  (废黄河口), 地形平缓, 高低起伏不大, 成土土质多以砂土、砂壤土为主。

试验区设在华J境内的东台河北岸的清坎上, 共有 7 个径流小区, 分别设立在坡度为  $1^{\circ}$ 、 $2.36^{\circ}$ 、 $5^{\circ}$ 、 $15^{\circ}$ 、 $26.5^{\circ}$ 、 $35^{\circ}$ 、 $45^{\circ}$  的荒坡上。为防止客水进入, 每个小区周围设有楔形保护墙, 保护墙深  $30\text{ cm}$ , 地上露出部分  $25\text{ cm}$ , 墙的上口外缘向小区外呈  $60^{\circ}$  倾斜, 小区下部设有集流槽, 集流槽内光滑, 上口与小区内地面齐平。集流槽下端接集水池。集水池下端设有排水阀, 便于测后排水。小区之间设立  $1\text{ m}$  宽的保护带。为防止汛期集水池内

蓄水量超过集水池的设计容积, 故在集流槽内设置三角堰进行  $1/2$  分流, 分流出的径流分别排入集水池和东台河内。试验区地理位置见图 1。



图 1 试验区地理位置 (东台)

### 1.2 试验方法

本试验于 2016 年 5 ~ 9 月在野外径流小区进行, 供试土壤为沿海新垦区高盐土, 主要观测项目有: 土壤容重采用环刀法; 土壤颗粒级配采用比重计法测定; 土壤盐分的常规测定采用 ProCheck 手持式多功能读表 / 数采仪器, 每月初另外取表层  $0 \sim 10\text{ cm}$  土壤使用水土比  $5:1$  电导法校核。土壤含水率的测定: 每周测定 1 次 (TDR), 降雨后加测; 降雨径流结束后, 测量径流量和泥沙量。本文试验气象数据气象要素采集采用锦州阳光全自动气象站, 温湿度采用大气温湿度传感器 LC-WSD1, 降雨量采用雨量传感器 LC-YL1, 蒸发量采用蒸发传感器 LC-ZF1, 气象数据采集仪 (带屏幕显示) 带分析软件 LC-CQ1。

### 1.3 数据分析计算

本文试验数据采用 SPSS11.5、excel2010 对数据和公式进行统计分析计算, 同时采用 Pearson 简单相关系数、Spearman 等级相关系数和 Kendall 秩相关系数进行相关分析。

### 1.4 WEPP 模型

水蚀预报模型 WEPP 可以模拟和预测不同时间尺度 (日、月、季、每年及多年)、不同土地利用类型 (农地、草地、林地、建筑工地及城区等) 的径流

量和土壤侵蚀量,同时还具备模拟和预测土壤水分的入渗、蒸发、农作物生长等功能。目前 WEPP 模型的机理研究主要为模型的一些参数因子对模拟产流产沙的关系<sup>[9-15]</sup>。WEPP 模型将坡面侵蚀分为细沟侵蚀和细沟间侵蚀 2 种。WEPP 模型是以稳态泥沙连续方程 (1) 为基础来描述泥沙运动过程:

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

式中:

$x$ —某点沿下坡方向的距离, m;

$G$ —输沙量,  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ;

$D_r$ —细沟侵蚀速率,  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ;

$D_i$ —细沟间泥沙输移到细沟的速率,  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

当水流剪切力大于临界土壤剪切力,并且输沙量小于泥沙输移能力时,细沟内以搬运过程为主:

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

$$D_c = K_r (\tau_f - \tau_c) \quad (3)$$

式中:

$D_c$ —细沟水流的剥离能力,  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ ;

$T_c$ —细沟间泥沙输移能力,  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ;

$K_r$ —细沟可蚀性参数,  $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ;

$\tau_f$ —水流剪切压力, Pa;

$\tau_c$ —临界剪切压力, Pa。

当输沙量大于泥沙输移能力时,以沉积过程为主:

$$D_r = \frac{\beta V_f}{q} (T_c - G) \quad (4)$$

式中:

$V_f$ —有效沉积速率,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$q$ —单宽水流流量,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$\beta$ —雨滴扰动系数。

## 1.5 模型适用性评价

模型适用性评价是当气候、土壤和作物覆盖等条件都相同的条件下,将 WEPP 模型模拟的土壤侵蚀量与实测值进行比较:如果两者比值接近 1,说明模型能够较好地模拟该地区土壤侵蚀实际情况,区域土壤侵蚀量可以用 RUSLE 模型来进行模拟预测;如果模拟值与实测值相差较大,说明 RUSLE 模型并不适用。模型适用性评价用模型模拟结果的 Nash-Sutcliffe 有效性表示,其计算公式为:

$$ME = 1 - \frac{\sum (Y_{obs} - Y_{pred})^2}{\sum (Y_{obs} - Y_{mean})^2} \quad (5)$$

式中:

ME—模拟有效性;

$Y_{obs}$ —实测值;

$Y_{pred}$ —模拟值;

$Y_{mean}$ —实测值的平均值。

ME 的值在  $-8 \sim 1$  之间:当 ME=1 时,表示模拟值与实测值均相等;当 ME=0 时,表示模拟值与实测值的平均值精度相同;负值表示实测值的平均值要优于模型的模拟值。ME 的值越接近 1,预测精度越高。

## 2 试验结果

### 2.1 土壤盐分变化

图 2 为 2016 年径流小区 0 ~ 10cm 土壤盐分变化及降雨量,由图 2 可以看出,土壤初始盐分虽

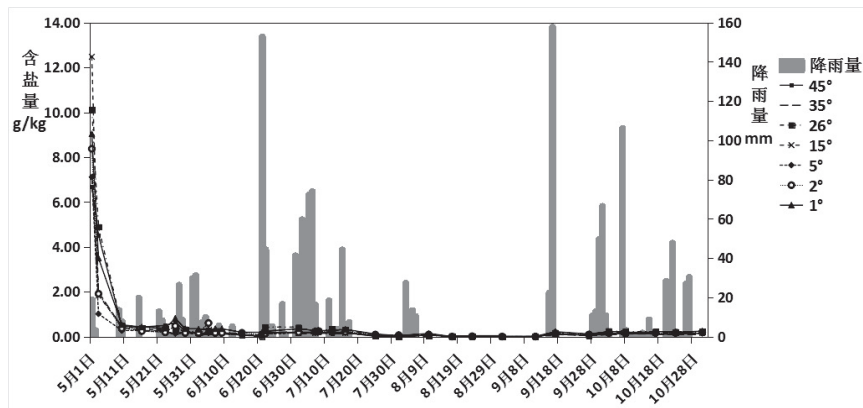


图 2 2016 年径流小区 0 ~ 10 cm 土壤盐分变化及降雨量

达到试验开始的条件,但随着降雨淋盐过程的开始径流小区土壤盐分便急剧下降,5月10日之后土壤盐分一直在 $0 \sim 0.5 \text{ g/kg}$ 之间波动,不同坡度的盐分变化趋势一致。

采用 Spearman 相关系数及 Kendall 秩相关系数计算分析土壤盐分与降雨量之间的关系,经计算,降雨量和土壤盐分之间的 Spearman 相关系数为 0.237, Kendall 秩相关系数为 0.145,两者之间不相关的双侧显著性值为 0,小于 0.01。因此,降雨量和土壤盐分为显著的弱相关且为正相关,这也进一步说明降雨淋盐作用可加速土壤脱盐理论的正确性。

## 2.2 土壤侵蚀量

降雨是导致土壤侵蚀的主要原因。江苏沿海地区全年土壤侵蚀形式主要为水力侵蚀。因此,观测期也是水土流失的重点监测时段,表1为径流小区观测期处理后的土壤侵蚀模数,泥沙流失量数据采集自每次清池收集到的土壤。由表1可以看出,土壤流失量与阶段内的降雨总量关系不明显,而与24 h内的降雨量有密切关系,这是因为产生径流受降雨前期含水量的影响,当前期土壤含水量高,土壤受降雨影响易饱和,易产生径流量;反之,则不易产生径流,这也是阶段降雨量与土壤流失量关系不明显的主要原因之一。从径流小区土壤侵蚀模数与降雨量变化图(图3)可以直观的看出,观测期初期的侵蚀模数明显大于观测期后期,6月21日和9月16日的总体降雨量相差不

大,且降雨前后的2次清池之间均无特大降雨产生土壤流失,可以基本判断2次清池之间的泥沙流失量由一场降雨产生,但是后者的泥沙流失量明显小于前者,这主要是因为试验初期土地平整,土层被扰动,土壤侵蚀模数最大,随后随着观测进行,经自然雨水浸润和重力密实后土壤侵蚀模数降低。

降雨强度与土壤侵蚀关系十分密切,图4为各径流小区土壤侵蚀模数与最大30 min瞬时雨强的关系分析图,可以看出各径流小区土壤侵蚀模数与最大30 min瞬时雨强呈线性相关。因此,推论坡度一定条件下,坡面土壤侵蚀模数随降雨强度的增加有线性增加的趋势。

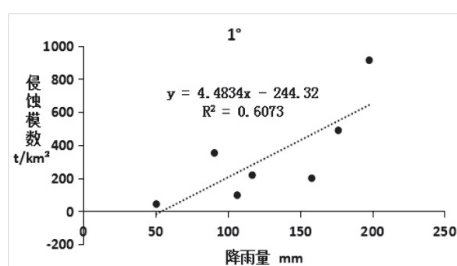
采用 SPSS 软件分析计算降雨量与土壤流失量以及降雨强度与土壤流失量的相关系数。降雨量和土壤流失量之间的 Pearson 相关系数为 0.419, Spearman 相关系数为 0.349, Kendall 秩相关系数为 0.266,两者的不相关的双侧显著性值小于 0.05,因此降雨量和土壤侵蚀量为显著的弱相关且为正相关。而降雨强度和土壤流失量之间的 Pearson 相关系数为 0.427, Spearman 相关系数为 0.362, Kendall 秩相关系数为 0.266,两者的不相关的双侧显著性值小于 0.05,因此降雨强度和土壤侵蚀量也是显著的弱相关且为正相关。因此,可以判断降雨量及降雨强度两者都是影响土壤侵蚀量的关键因素,从相关分析结果看,降雨强度对土壤侵蚀量的影响较降雨量更显著。

表1 不同边坡条件下径流小区土壤侵蚀模数变化

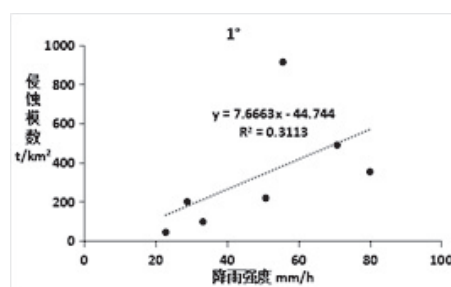
清池日期	径流小区土壤侵蚀模数 ( $\text{t}/\text{km}^2$ )							降雨量 (mm)	24 h 最大降雨 量 (mm)
	45°	35°	26.5°	15°	5°	2°	1°		
2016/6/9	1585	1367	2086	820	54	15	42	212.5	61.4
2016/6/22	9725	7474	5782	4731	1322	658	914	203.2	197.8
2016/7/6	1582	6480	2533	753	350	443	489	250.2	116.4
2016/7/8	3045	4769	2191	750	262	317	352	90.6	90.6
2016/9/17	4604	4622	4314	2367	94	261	199	314	180.6
2016/10/3	1317	3469	1310	538	76	284	217	262.8	116.8
2016/10/31	971	1532	1512	471	38	177	96	178	106.4
2016 年总计	22829	29714	19729	10430	2196	2154	2309	1714.5	

注:土壤侵蚀模数是指上次清池日期到本次清池日期总侵蚀模数;降雨量同理。

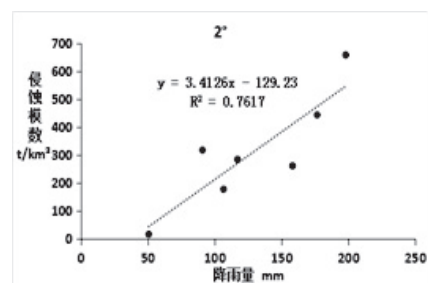




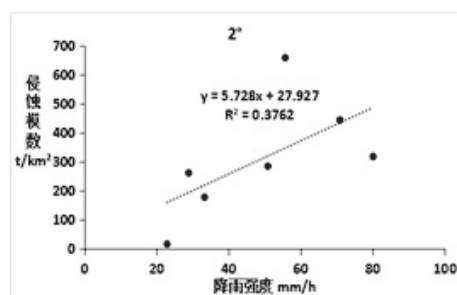
(1)



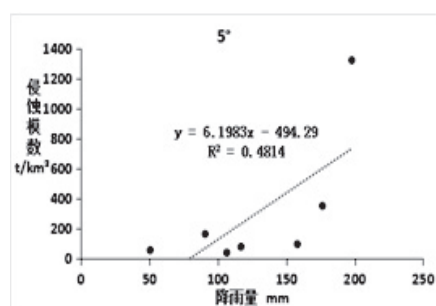
(1)



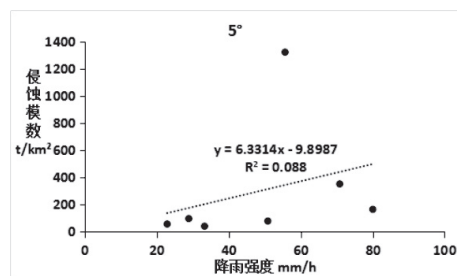
(2)



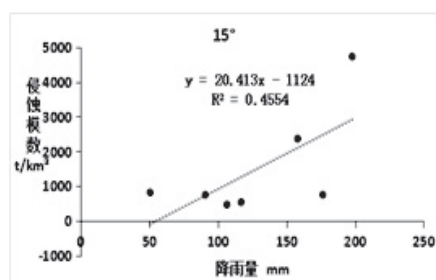
(2)



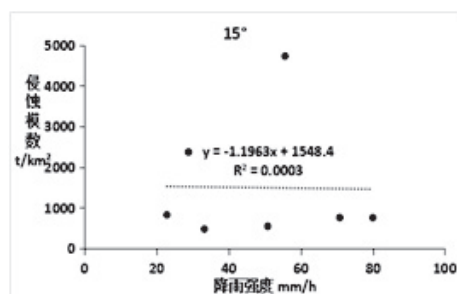
(3)



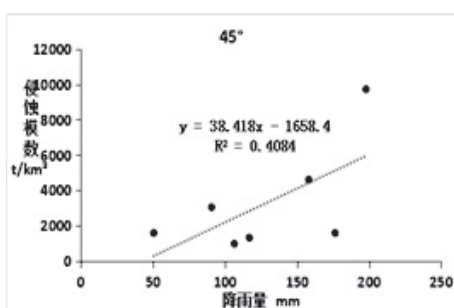
(3)



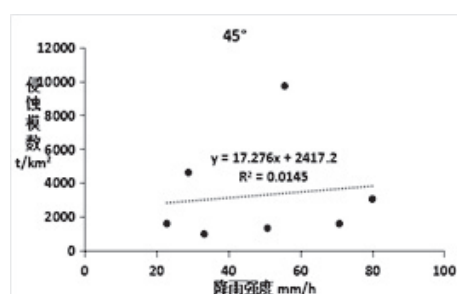
(4)



(4)



(5)



(5)

图 3 2016 年径流小区土壤侵蚀模数与降雨量

图 4 2016 年径流小区土壤侵蚀模数与降雨强度

2.3 土壤侵蚀实测与模型模拟

表 2 为东台华 / 径流小区阶段总土壤流失量的实测值与模拟值的对比情况, 由表可以看出, 各径流小区的拟合结果较好, 其中 1° 小区的拟合结果最好。WEPP 模型的研发主要针对坡度 10° 以下的缓坡, 模型模拟时一些数据不可避免需要美国

的观测数据填补, 而模型的数据库中不包含坡度 10° 以上的观测资料且模型模拟所依赖的计算方程的部分参数对坡度的变化不敏感, 因此 WEPP 模型不能很好地模拟坡度较大的径流小区。

根据 2016 年径流小区阶段实测土壤流失量与模型模拟值对比计算模型有效性系数 ME, 结

表 2 2016 年自然降雨条件下径流小区裸地土壤侵蚀实测与模拟

坡度	日期	实测值 ( kg / m <sup>2</sup> )	预测值 ( kg / m <sup>2</sup> )	相对误差绝对值 ( % )
1°	5 月 1 日 ~ 6 月 9 日	0.42	0.00	100.00
	6 月 10 日 ~ 6 月 22 日	9.14	8.00	12.47
	6 月 23 日 ~ 7 月 6 日	4.89	3.81	22.09
	7 月 7 日 ~ 7 月 8 日	3.52	2.22	36.93
	7 月 9 日 ~ 9 月 17 日	1.99	4.58	130.15
	9 月 18 日 ~ 10 月 3 日	2.17	3.55	63.59
	10 月 4 日 ~ 10 月 31 日	0.96	1.82	89.58
2°	5 月 1 日 ~ 6 月 9 日	0.15	0.09	40.00
	6 月 10 日 ~ 6 月 22 日	6.58	8.58	30.40
	6 月 23 日 ~ 7 月 6 日	4.43	6.35	43.34
	7 月 7 日 ~ 7 月 8 日	3.17	4.62	45.74
	7 月 9 日 ~ 9 月 17 日	2.61	4.29	64.37
	9 月 18 日 ~ 10 月 3 日	2.84	3.44	21.13
	10 月 4 日 ~ 10 月 31 日	1.77	1.86	5.08
5°	5 月 1 日 ~ 6 月 9 日	0.54	0.18	66.67
	6 月 10 日 ~ 6 月 22 日	13.22	11.87	10.21
	6 月 23 日 ~ 7 月 6 日	3.50	7.20	105.71
	7 月 7 日 ~ 7 月 8 日	2.62	5.20	98.47
	7 月 9 日 ~ 9 月 17 日	0.94	6.04	542.55
	9 月 18 日 ~ 10 月 3 日	0.76	4.93	548.68
	10 月 4 日 ~ 10 月 31 日	0.38	2.17	471.05

(续表 2)

坡度	日期	实测值 (kg/m <sup>2</sup> )	预测值 (kg/m <sup>2</sup> )	相对误差绝对值 (%)
15°	5 月 1 日 ~ 6 月 9 日	8.20	5.47	33.29
	6 月 10 日 ~ 6 月 22 日	47.31	59.16	25.05
	6 月 23 日 ~ 7 月 6 日	7.53	27.39	263.75
	7 月 7 日 ~ 7 月 8 日	7.50	12.61	68.13
	7 月 9 日 ~ 9 月 17 日	23.67	30.81	30.16
	9 月 18 日 ~ 10 月 3 日	5.38	10.44	94.05
	10 月 4 日 ~ 10 月 31 日	4.71	5.07	7.64
26.5°	5 月 1 日 ~ 6 月 9 日	20.86	6.75	67.64
	6 月 10 日 ~ 6 月 22 日	57.82	63.40	9.65
	6 月 23 日 ~ 7 月 6 日	25.33	33.30	31.46
	7 月 7 日 ~ 7 月 8 日	21.91	12.88	41.21
	7 月 9 日 ~ 9 月 17 日	43.14	32.68	24.25
	9 月 18 日 ~ 10 月 3 日	13.10	28.33	116.26
	10 月 4 日 ~ 10 月 31 日	15.12	13.76	8.99
35°	5 月 1 日 ~ 6 月 9 日	13.67	5.47	59.99
	6 月 10 日 ~ 6 月 22 日	74.74	115.09	53.99
	6 月 23 日 ~ 7 月 6 日	64.80	67.75	4.55
	7 月 7 日 ~ 7 月 8 日	47.69	43.97	7.80
	7 月 9 日 ~ 9 月 17 日	46.22	63.54	37.47
	9 月 18 日 ~ 10 月 3 日	34.69	42.29	21.91
	10 月 4 日 ~ 10 月 31 日	15.32	15.57	1.63
45°	5 月 1 日 ~ 6 月 9 日	15.85	7.55	52.37
	6 月 10 日 ~ 6 月 22 日	97.25	83.47	14.17
	6 月 23 日 ~ 7 月 6 日	15.82	49.46	212.64
	7 月 7 日 ~ 7 月 8 日	30.45	21.03	30.94
	7 月 9 日 ~ 9 月 17 日	46.04	44.69	2.93
	9 月 18 日 ~ 10 月 3 日	13.17	35.49	169.48
	10 月 4 日 ~ 10 月 31 日	9.71	16.59	70.85

果表明, 各径流小区按坡度由小到大的顺序的模型有效性系数分别为 0.744, 0.474, 0.467, 0.563, 0.551, 0.353, 0.652, 模拟结果较好。径流量的模型有效性系数明显的大于侵蚀量的模型有效性系数, 说明 WEPP 模型对径流的模拟结果明显好于侵蚀的模拟结果。

### 3 讨论

本试验中自然降雨条件下径流小区土壤盐分的保持作用不明显, 主要有以下原因: ①由于径流小区全部建设在原地面之上, 以地下水补给为形式的土壤毛管水上升高度达不到原地面以上的坡面高度, 因而坡面土壤蒸发不能得到高矿化度地下水补给; ②因径流小区临近东台河, 加速了淋盐洗盐的过程, 地下水含盐量较其他地区低; ③ ProCheck 测量土壤含盐量是基于土壤中盐分越高, 其电导性越强的原理, 而干旱时土壤含水量低, 测得电导率为 0, 此时测得的盐分数据不具代表性, 相反干旱季节测得的电导率偏低的情形有可能土壤盐分反而较高。因此, 从盐分变化的角度, 本试验不能完全模拟江苏沿海新垦区的脱盐过程。杨延春等<sup>[16]</sup>通过室内人工模拟降雨, 研究江苏沿海土壤侵蚀量与土壤盐分的关系, 试验结果显示土壤侵蚀量与土壤盐分呈线性正相关, 同时也指出江苏沿海盐分与黏聚力呈线性负相关关系。但从影响土壤侵蚀的机理上来讲, 盐分对土壤侵蚀的影响属于间接影响, 自然状态下, 盐分高的土壤往往土壤结构性差且植被发育程度低, 土壤有机质得不到补充, 形成团聚体的植被根系、腐殖质、微生物菌丝等黏结剂少, 土壤黏聚性差, 在相同降雨条件下, 盐分高的土壤更容易流失。因此, 防治江苏沿海土壤侵蚀除了要注重正常的水土保持措施外, 还要高度重视土壤的脱盐过程, 尤其是植被在淋盐洗盐过程中的脱盐改土, 通过引淡洗盐、在沿海新垦区推广耐盐作物可以加快土壤的脱盐过程和有机质积累, 促进土壤团聚体形成, 土壤黏聚力和抗侵蚀力增强。

坡度一定条件下, 单场降雨雨强大则降雨雨滴动能大, 作用于地表土壤颗粒容易造成土粒分散、飞溅, 形成地表径流, 冲刷土体, 侵蚀和输沙能力增强。不同坡度条件下, 6月21日降雨最大 30 min 瞬时雨强 (降雨强度为 55.6 mm/h) 与土壤侵蚀模

式均偏离拟合趋势线, 一方面是因为 6月21日降雨历时长降雨总量大, 另一方面因为试验初期土壤疏松, 由此可以看出降雨总量及降雨强度都是影响土壤侵蚀的关键因素。

5° 小区 7月9日~9月17日、9月18日~10月3日、10月4日~10月31日的3个阶段流失量实测值和模拟值相对误差绝对值均在 100% 以上, 分析其中原因可能有: ①该径流小区旁边有一片落叶林, 从 7月开始常有落叶飘入径流小区, 其中 5° 小区影响最大; ②通过土壤颗粒剂配分析, 3个缓坡小区地表土构成相差不大, 通过土壤容重分析, 5° 小区是各径流小区中容重最低的, 由此可以看出 5° 小区土壤孔隙度较大, 土壤渗透性强, 而 WEPP 模型所需输入的土壤参数却未涉及土壤孔隙度。根据试验初土壤渗透性监测, 坡度为 5° 小区的渗透系数平均 0.0029 cm/s, 在所有径流小区中最大, 而径流的产生于土壤渗透性密切相关, 渗透系数越小, 降雨过程大于土壤入渗, 达到土壤含水量饱和所需时间越短, 产流时间提前, 地表形成的径流越大, 土壤越容易流失。

部分径流小区 6月23日~7月6日阶段的模拟效果较差, 这可能与 6月21日特大降雨有关, 从 6月21日降雨前后土壤颗粒级配分析可以看出, 降雨前后模拟效果较差的径流小区土壤颗粒组成发生了明显变化。通过径流量的模拟得出 WEPP 模型不能很好的模拟雨量大雨强大降雨事件的结论, WEPP 模型基于一个稳态的产流产沙过程, 模拟过程中不能很好的修正某一单场降雨事件对土壤理化性质的影响, 从而影响后期降雨的模拟。此外各径流小区 5月1日~6月9日阶段实测与模拟的相对误差绝对值也普遍偏高, 且模拟值均小于实测值, 这主要还是因为试验初期土地平整导致土壤疏松, 土壤总孔隙度变大, 土壤渗透系数变大。

根据东台华 I 径流小区 6个月的观测结果, 计算 WEPP 模型模拟 1°、2°、5°、15°、26.5°、35°、45° 不同坡度径流小区在整个观测期内侵蚀量, 用模型有效系数评价模型模拟效果。WEPP 模型对土壤侵蚀量的模型有效性系数 ME 分别为 0.744、0.474、0.467、0.563、0.551、0.353、0.652, 模拟结果较好。WEPP 模型模拟江苏沿海新垦区坡面产流产沙情况适用性良好。对于长时期或多尺度过程的模拟, WEPP 模型虽显著优于其他经验模型,



如 USLE, 但 WEPP 模型基于一个稳态的产沙过程且涉及多项参数, 而实际上土壤地表特征随时间、降雨不断变化, 模拟时 WEPP 模型却又不能将多尺度过程参数变化输入其中, 模型模拟精度和效率不够准确, 说明 WEPP 模型应用时需要针对特殊的自然条件进一步率定和修正。

## 4 结论

自然降雨条件下, 沿海新垦区边坡土壤侵蚀过程复杂, 影响因素较多。本文中土壤侵蚀模数与 24 h 降雨总量、瞬时雨强密切相关, 相关关系显著; WEPP 模型模拟出土壤侵蚀量的模型有效性系数平均为 0.543, WEPP 模拟结果适用性较好, 在特殊的自然条件下尚需进一步修正。在以后的沿海新垦区土壤侵蚀研究中需考虑近沿海地表地下水位及水盐运移的影响。

### 参考文献:

- [1] 李锐, 上官周平, 刘宝元, 等. 近 60 年我国土壤侵蚀科学研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5):1-6.
- [2] 王礼先, 张有实, 李锐, 等. 关于我国水土保持科学技术重点研究领域[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(1):1-6.
- [3] 胡茂友. 沿海滩涂垦区水土流失成因与防治途径探讨[J]. 江苏水利, 2005, 7:1-10.
- [4] 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.
- [5] 徐文才, 甘玉华. 土壤侵蚀预报模型研究现状[J]. 科技信息, 2004, 11(4):1-10.
- [6] 贾媛媛, 郑粉莉, 杨勤科. 国外水蚀预报模型述评[J]. 水土保持通报, 2003, 23(5):82-87.
- [7] 符素华, 刘宝元. 土壤侵蚀量预报模型研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(1):78-83.
- [8] 胡海波, 林文棣, 张金池. 江苏沿海平原沙土区土壤侵蚀规律的研究[J]. 南京林业大学学报, 1992, 16(2):25-29.
- [9] 雷廷武, 张晴雯, 姚春梅, 等. WEPP 模型中细沟可蚀性参数估计方法误差的理论分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1):9-12.
- [10] 王小燕, 李朝霞, 徐勤学, 等. 砾石覆盖对土壤水蚀过程影响的研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2011, 09(1):115-120.
- [11] 龙明忠, 吴克华, 熊康宁. WEPP 模型(坡面版)在贵州石漠化地区土壤侵蚀模拟的适用性评价[J]. 中国岩溶, 2014, 33(2):201-207.
- [12] 刘远利, 郑粉莉, 王彬, 等. WEPP 模型在东北黑土区的适用性评价——以坡度和水保措施为例[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1):139-145.
- [13] 闫峰陵, 李朝霞, 史志华, 等. 红壤团聚体特征与坡面侵蚀定量关系[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3):000037-41.
- [14] 陈记平. WEPP 模型在南方红壤果园区的适应性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [15] 叶俊道, 秦富仓, 岳永杰, 等. WEPP 模型在砭砂岩地区土壤侵蚀模拟的适用性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7):132-135.
- [16] 杨延春, 邹志国, 施朱峰. 江苏滨海盐土土壤盐分与侵蚀规律[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(10):347-349.