

基于 WEPP 模型的多级梯田暴雨侵蚀模拟初步研究

贾立志^{1,2}, 高建恩^{1,3}, 许秀泉^{1,2}, 白先发^{1,2}, 张元星³

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学 资源与环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:针对 2013 年 6—9 月份安塞县马家沟多级梯田遭受暴雨侵蚀严重等问题,运用新一代水蚀预报模型 WEPP 模型对马家沟多级梯田在暴雨条件下的侵蚀情况进行模拟,并将 WEPP 模型模拟的结果与实测资料进行了对比。结果表明:WEPP 模型能够较好地模拟黄土丘陵区多级梯田在暴雨条件下的径流量以及土壤侵蚀量,随着梯田级数的增加,WEPP 模型对径流量与侵蚀量的模拟精度逐渐降低。由于受该区地下水的影响,模拟径流量总体小于采用径流系数法算得的径流量,由于梯田田埂的防蚀作用,模拟土壤侵蚀量总体大于实测侵蚀量。研究为黄土丘陵区梯田防蚀以及梯田修筑提供科学依据及有效方法,为黄土丘陵区多级梯田的暴雨侵蚀预测提供了合理化建议。

关键词:多级梯田; 侵蚀; 暴雨; WEPP 模型; 黄土丘陵区

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2014)06-0001-05

Study on Rainstorm Erosion Simulation of Multi-Level Terraces Based on the WEPP Model

JIA Li-zhi^{1,2}, GAO Jian-en^{1,3}, XU Xiu-quan^{1,2}, BAI Xian-fa^{1,2}, ZHANG Yuan-xing³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi

712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: With respect to the problem of serious rainstorm erosion of multi-level terraces in Majiagou river basin from June to September in 2013, this article used the WEPP model to simulate the soil erosion of rainstorm of multi-level terraces, and then compared the result of simulation with the observed data. The results show that WEPP model can well simulate the runoff and soil loss of multi-level terraces under rainstorm in Loess Hilly and Gully Region. With the increase of terrace level the precision of WEPP model of the simulation on runoff and soil loss reduced; simulation of runoff is less than the result calculated by runoff coefficient method due to the influence of the groundwater. Simulation of soil erosion is greater than the measured erosion as a whole because of the prevention erosion of the terrace ridge. This research result provided scientific basis and effective method for the terrace anticorrosive and terraces buildup and provided scientific basis for the forecast of multi-level terrace erosion under rainstorm in the loess hilly region.

Key words: multi-level terraces; soil erosion; rainstorm; WEPP model; loess hilly region

水土资源流失与浪费严重已成为阻碍黄土高原地区经济发展的一个重要的因素,梯田作为黄土高原地区广泛推广应用的一种水土保持措施,为该区水土保持做出了巨大的贡献^[1]。梯田是指在坡耕地上沿着等高线修筑的田面平整的台阶状耕作田块,或按照等高线修建的田面^[2]。然而由于在修筑梯田时对一

些自然灾害考虑不足,当遇到暴雨等自然灾害时,下方梯田面汇集大量径流,梯田田埂就会遭到严重的冲毁^[3],不仅会造成该地水土流失、养分流失等问题,甚至造成农作物减产甚至绝产,因此对于梯田侵蚀的模拟与预报对黄土丘陵区的水土保持工作具有重要的现实意义。本文运用新一代水蚀预报模型 WEPP 模

收稿日期:2014-04-24

修回日期:2014-06-20

资助项目:国家“十二五”科技支撑计划项目课题“黄土丘陵沟壑区水土保持与高效农业关键技术集成示范”(2011BAD31B05);国家自然科学基金“复杂下垫面暴雨径流侵蚀相似性模拟实验研究”(41371276);中国科学院水利部水土保持研究所知识创新工程专项(A315021304)。

作者简介:贾立志(1988—),男,山东滨州人,硕士研究生,主要研究方向为水土资源高效利用。E-mail:jializhi10000@126.com

通信作者:高建恩(1962—),男,山西运城人,博士,博士生导师,研究员,主要研究方向:径流调控河流治理。E-mail:gaojianen@126.com

型对暴雨条件下安塞县马家沟多级梯田断面侵蚀情况进行模拟,将模拟结果与实测数据进行对比,并且探求该区多级梯田在暴雨冲刷下的侵蚀规律,以及梯田田埂与坡面林草措施在防蚀方面的作用与修筑标准。为黄土丘陵区梯田防蚀以及梯田修筑提供科学依据及有效方法,并且为黄土丘陵区多级梯田侵蚀的预测提供了合理化建议。

1 数据监测与整理

1.1 研究区概况

安塞县马家沟流域位于延安市西北 35 km,属于典型的黄土丘陵沟壑区,区内地形破碎,植被稀少,地形陡峻,水土流失严重^[4]。其中沟蚀、面蚀严重,土壤侵蚀模数约为 14 000 t/(km²·a),多年平均降雨约为 500 mm,80%集中在 6—9 月,并且多以短历时大强度的暴雨为主^[5]。曹新庄梯田所处位置经纬度为:36.8983905N,109.2286867E,土壤以黄绵土为主,为典型的粉壤土。土壤容重在 1.08 g/cm³ 左右,其中粉粒含量 67.06%,黏粒含量 5.53%,砂粒含量 26.27%,有机质含量 0.9%^[6-7]。梯田断面总共有 8 级,按高程从上到下依次为 1—8 号梯田断面。

1.2 监测数据与降雨资料整理

运用徕卡全站仪与 ArcGIS 软件结合对梯田侵蚀量进行测定与计算,具体步骤如下:(1)在 5 月份降雨前运用全站仪对多级梯田地形数据进行测量包

括经度、纬度、高程;(2)将测量数据导入 ArcGIS,构建矢量点格式图层并且“内插构建 TIN”;(3)在 9 月份降雨过后再运用全站仪对多级梯田地形数据测量并按照第 2 步操作,生成降雨后 TIN 图;(4)将降雨前后的两个 TIN 图层做差便可得到各级梯田土壤侵蚀量以及汇水面积。

参照多级梯田实际地形,每一级梯田所产生的地表径流量都是上方梯田所汇集的降雨量。每一级上方来水量都需要根据汇水面积计算。所以,由于下级梯田的汇水面积大,所以上方来水量也比上级梯田要多,对梯田造成的侵蚀也越严重。多级梯田的各级产流量可用径流系数法根据地表径流量公式计算得出:

$$W=\frac{K\cdot R\cdot F}{1000}$$

(1)

式中:W——地表径流量(m³);F——汇水面积(m²);R——该区 6—9 月降雨量(mm);K——径流系数。

根据安塞试验站所观测统计的气象资料,马家沟流域 2013 年 6—9 月累计降雨量为 1 000.6 mm。由于各级梯田的海拔高度不同,地下水出露情况也不同,受地下水与各级梯田不同的管理措施影响下的土壤含水量也不同。根据实地测量可获得各级梯田土壤含水量、土壤容重以及土壤入渗率数据,同时参照《延安地区实用水文手册》^[8-9],各个梯田断面的 5 月份降雨前土壤含水量、土壤容重、土壤入渗率以及径流系数选取如表 1 所示。

表 1 各梯田断面土壤数据以及径流系数选取

项目	梯田面编号(从上到下)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
海拔高度/m	1 232.5	1 229.2	1 225.7	1 219.7	1 215.8	1 213.7	1 207.4	1 200.6
土壤含水量/%	7.78	7.52	10.31	9.19	11.41	11.76	16.38	20.51
土壤容重/(g·cm ⁻³)	1.23	1.28	1.21	1.24	1.27	1.30	1.28	1.31
土壤入渗率/(mm·min ⁻¹)	0.72	0.74	0.67	0.69	0.60	0.56	0.45	0.38
径流系数选取	0.15	0.15	0.20	0.25	0.35	0.45	0.5	0.7

在监测的 2013 年 6—9 月的暴雨中,7 月持续强降雨累计达 524 mm,是该区域年平均降水量的 1.04 倍^[5],共计有 66 次单场日降雨,日降雨量如图 1 所示,平均日降雨量为 15.2 mm,最大日降雨量为 100 mm,最小日降雨量为 0.2 mm。其中 6 月 20 日、7 月 4 日、7 月 8 日、8 月 24 日 1 h 最大降雨量分别为 13.6,24,11.4,22.4 mm。

2 WEPP 模型准备

2.1 WEPP 模型简介

WEPP 模型是美国农业部开发的新一代水蚀预报模型,主要包括气候、土壤、植物生长、残留物分解、冬季过程、灌溉、水文过程、地表径流、侵蚀等 9 个模

块,输入参数有气候、地形、土壤和管理措施等 4 个数据库参数模块^[10]。该模型克服了传统的经验模型 USLE 的缺点,在调整参数之后对产沙、产流、土壤水分的模拟具有较高的精度^[10-12]。

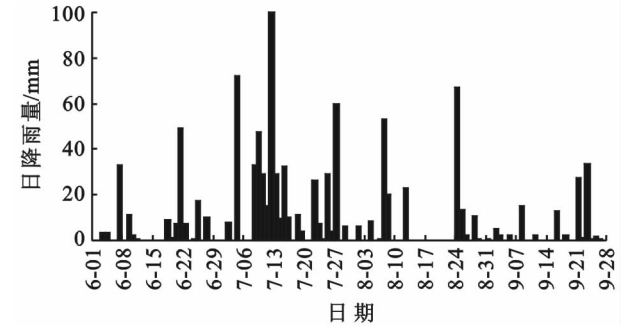


图 1 马家沟流域日降雨过程

2.2 WEPP 模型数据库建立

WEPP 模型坡面版是 WEPP 模型中最基本、最简单的模型版本,运行所需要建立的四个数据库分别是气候、坡面、土壤、作物数据库。

根据安塞县试验站统计的 2013 年 6—9 月的日序列的气象数据,包括日降雨量、太阳辐射量、风速、风向、最高气温、最低气温、露点温度等数据。按照随机气候生成器 CLIGEN 格式建立 WEPP 模型运行所

需要的气象数据库^[13-14]。在坡面数据库的建立方面,根据 WEPP 模型中自带的分段功能模块,可将该梯田分为多个断面^[15],通过对每个断面的模拟可以实现对整个梯田的模拟,由于地势原因,上级梯田所产生的径流与泥沙会通过流失进入下一级,并且在该级梯田发生蒸发、入渗、侵蚀等一系列过程。根据实地测量可将各级梯田分为水平田面段和梯田田坎段两部分,梯田坡度、坡长等地形数据如表 2 所示。

表 2 各级梯田断面坡度、坡长概况

项目	梯田面编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
水平田面宽度/m	36.1	27.9	16.5	18.3	17.2	19.8	16.7	18.7
水平田面坡度/%	1.5	2.3	3.1	2.8	3.6	2.8	2.7	2.9
梯田田坎宽度/m	1.5	2.2	1.9	1.7	1.8	1.5	1.9	1.6
梯田田坎坡度/%	81.5	121.6	79.6	97.3	105.2	98.6	116.5	101.7
坡向	西南	西南	西南	西南	西南	西南	西南	西南

土壤数据库总共包括 6 个参数,其中土壤反射率、粉粒含量、初始饱和导水率、细沟间土壤可蚀性在输入土壤的砂粒含量、黏粒含量、有机质含量、岩屑含量及阳离子交换变量之后可通过 WEPP 模型自带的公式计算得到。土壤临界剪切力、细沟土壤可蚀性、有效水力传导系数则是在已有的观测资料基础之上,结合前人的研究而取得^[16-17]。本文选取休闲地土壤参数分别为有效水力传导系数为 19.7 mm/h,细沟土壤可蚀性为 0.026 s/m,土壤临界剪切力为 3.51

Pa^[18]。

作物数据库是 WEPP 数据库中涉及参数最多、最为复杂的一个,其包含 8 个子数据库,70 多个参数,其中玉米(*Zea mays*)、裸地、向日葵(*Helianthus annuus*)、谷子(*Olyza sativa*)等采用梁改革^[19]与郝连安^[20]所建立的安塞地区的作物数据库,由于 WEPP 模型没有关于土豆(*Solanum tuberosum*)的数据库,因此选用苜蓿代替。各梯田断面作物与土壤类型如表 3 所示。

表 3 各级梯田断面作物与土壤概况

项目	梯田面编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
梯田管理措施	谷子	土豆	裸地	玉米	向日葵	裸地	玉米	玉米
土壤	黄绵土	黄绵土	黄绵土	黄绵土	黄绵土	黄绵土	黄绵土	黄绵土

3 结果与分析

将 WEPP 模型模拟的 8 个梯田断面的土壤侵蚀量、径流量与实测数据进行对比分析,并且运用 Nash-Sutcliffe 模型有效性对模型进行评价^[21]。在 8 个梯田断面的不同坡长、坡度、管理措施条件下,WEPP 模型对土壤侵蚀量与径流量的模拟精度也表现出不同。

3.1 径流量模拟效果分析

将 WEPP 模型模拟数据与径流系数法算得径流量进行对比,计算得到模拟值与径流系数法算得值之间绝对误差与相对误差如表 4 示。模拟值与径流系数法算得值基本吻合并且 R^2 达到 0.87 为显著相关(如图 2 所示),大于一般认为的模型可用 $R^2=0.5$,因此 WEPP 模型能较好地模拟黄土丘陵区多级梯田坡面在暴雨条件下的地表径流量。

表 4 为地表径流量模拟值和径流系数法计算得

值以及误差对比。可以看出,第 1 级梯田径流量模拟值与径流系数法计算得值吻合度最高,相对误差仅为 8.55%,主要原因为第 1 级梯田产生径流不受其他梯田影响,并且海拔较高,受地下水影响小,因此 WEPP 模型在模拟时具有较高的精度。第 3,4,5 级梯田模拟径流量比径流系数法计算得值分别高 27.29%,14.38%,16.56%,因为第 1,2 级梯田田埂在暴雨冲刷过程中有效地拦挡了径流,并且由于汇流面积较小,径流量没有冲毁梯田田埂,所以大部分径流被拦蓄在上级梯田,没有对下级梯田造成显著影响。从第 6 级梯田开始径流系数法计算得值比模拟径流量大,并且随着梯田级数增加相对误差显著增加,因为随着汇流面积的增加,土壤含水量增加明显,梯田径流逐渐冲毁梯田田埂并且对下级梯田径流产生具有贡献。第 6 级梯田径流系数法计算得值与模拟径流量间相对误差为 16.30%,由于第 7,8 级梯田田埂被完全冲

毁,所以径流系数法计算得值显著高于模拟值,其相对误差分别为 30.87%,32.23%,说明 WEPP 模型在模拟多级梯田暴雨冲刷时,随着梯田级数增加,精度有降低趋势。

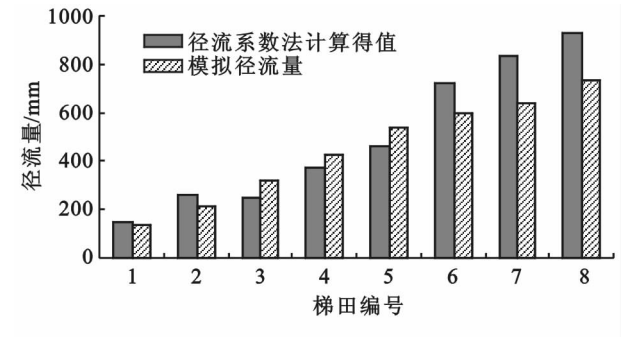


图 2 径流量模拟值与径流系数法计算得值对比

通过对比可以看出,模型模拟的径流量总体上明显小于径流系数法计算得值,分析主要原因是该区地下水丰富,可使土壤保持在相对湿润状态,使得土壤含水量较高,这样降水不容易下渗,更容易使土壤含水量达到饱和状态,对于地表径流的补给起到了重要的作用^[22],WEPP 模型在对该区地表径流量模拟时对地下水的含量考虑不够充分,所以对于地表径流量的模拟值要小于径流系数法计算得值。所以在运用 WEPP 模型对该地区径流量模拟时应当充分考虑地下水对于地表径流的补给以及土壤含水量的影响。

表 4 地表径流量模拟值和径流系数法计算得值对比

梯田编号	径流量模拟值/mm	径流系数法计算得值/mm	AE	AER/%
1	137.25	149.09	11.84	7.94
2	213.47	263.12	49.65	18.87
3	319.69	251.15	68.54	27.29
4	425.73	372.18	53.55	14.38
5	539.97	463.24	76.73	16.56
6	595.73	720.36	124.63	17.30
7	640.41	926.39	285.98	30.87
8	734.95	1 084.42	349.47	32.23

注:AE 为绝对误差的绝对值,AER 为相对误差的绝对值。

3.2 土壤侵蚀量模拟效果分析

在土壤侵蚀量方面,WEPP 模型模拟数据与实测土壤侵蚀量进行对比,结果如图 3 所示。

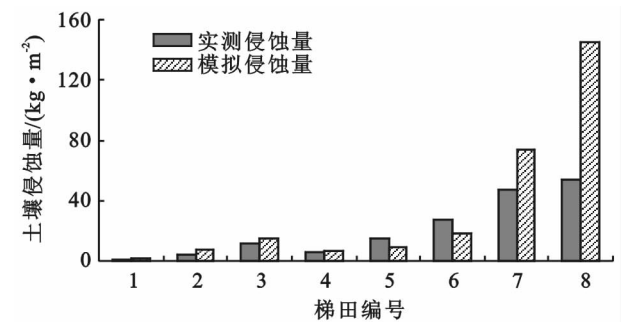


图 3 土壤侵蚀量模拟值与实测值对比

模拟值与实测值之间的 R^2 达到 0.79 为显著相关,因此 WEPP 模型能较好地模拟黄土丘陵区多级梯田坡面在暴雨条件下的土壤侵蚀。

通过对比可以看出(表 5),第 1,2 级梯田模拟值与实测值之间的相对误差比较大,分别为 127.05%,104.72%,主要原因为,在第 1,2 级梯田田埂分别为 27,26 cm,梯田田埂是分布于梯田外围的主要用于减水减沙的埂坎,其具有拦蓄径流、防止侵蚀、保水保肥等作用^[23],当面临 2013 年 6—9 月暴雨时,梯田田埂能够有效地拦蓄径流防止土壤侵蚀的发生,梯田田埂对于缓减径流对下级梯田冲刷起到了重要的作用,并且在一定范围内,梯田田埂高度越高,其对泥沙拦蓄效果越好。然而在模型坡面版中没有相对应的拦挡措施模块,没有充分考虑梯田田埂的作用,导致模拟值远远大于实测值。

表 5 土壤侵蚀量模拟值与实测值对比

梯田编号	侵蚀量/(kg·m ⁻²)		AE	AER/%
	模拟值	实测值		
1	1.93	0.85	1.08	127.05
2	7.8	3.81	3.99	104.72
3	14.63	11.26	3.37	29.23
4	6.41	6.12	0.29	4.74
5	8.99	14.87	5.88	39.54
6	18.18	27.08	8.9	32.87
7	63.48	47.24	16.24	34.38
8	145.4	54.05	91.35	169.01

注:AE 为绝对误差的绝对值,AER 为相对误差的绝对值

从数据分析来看,第 8 级梯田模拟侵蚀量与实测侵蚀量之间的相对误差为 169.01%,该级梯田田埂高度最高为 28 cm(表 6 为梯田田埂暴雨冲刷情况),所以起到拦蓄径流以及防蚀效果最好,WEPP 模型的模拟效果也就最差。根据蒋定生^[24]在中国科学院安塞实验站的观测表明,梯田田埂高度超过 25 cm 时能够很好地保持水土,在整个汛期都不发生水土流失。然而在面临极端暴雨时,尤其是仅 2013 年 7 月 12 日一天降雨量达到 100 mm,多级梯田特别是下级梯田土壤含水量接近饱和,降雨无法入渗,形成大量的径流,对梯田田埂冲刷严重,造成梯田田埂被严重冲毁,无法起到蓄水保土、防止侵蚀的目的。因此对于多级梯田的下级梯田应当提高防蚀措施的设计标准,可将梯田田埂的设计年限由原来的 20 a 一遇的暴雨提高至 50 a 一遇的暴雨,才能切实地起到防止土壤侵蚀的目的。

在第 3,6 级梯田模拟值与实测值误差较大,相对误差仅为 29.23%与 32.87%,因为第 3,6 级梯田为

裸地,人为干预较少,并且梯田田埂高度分别为 21 cm 和 22 cm,没有能够有效地拦蓄地表径流来防止土壤侵蚀的发生,WEPP 模型在对其进行模拟时能够较好地反映实地情况。

表 6 梯田田埂暴雨冲蚀情况

项目	梯田面编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
暴雨前田埂高度/cm	27	26	21	20	23	22	24	28
暴雨后田埂高度/cm	23	21	10	9	6	7	0	0
梯田田埂冲蚀情况	未被冲蚀	未被冲蚀	部分冲蚀	部分冲蚀	部分冲蚀	部分冲蚀	冲毁	冲毁

4 结论

(1) WEPP 模型能够较好地模拟黄土丘陵区多级梯田在暴雨条件下的产流量与土壤侵蚀量,随着梯田级数的增加 WEPP 模型的模拟精度有降低趋势,并且对产流量的模拟精度要高于土壤侵蚀量的精度。

(2) WEPP 模型对多级梯田暴雨冲刷的径流量模拟效果较好,由于该区地下水丰富的原因,径流系数法计算得值总体高于模拟值。WEPP 模型对下级梯田的模拟精度低于上级梯田。

(3) 由于 WEPP 模型缺少拦挡措施模块,在模拟土壤侵蚀量时,模拟值总体上要大于实测值。随着梯田级数增加,模拟值与实测值之间的相对误差值增加显著。梯田田埂在应对暴雨冲刷时对多级梯田的防蚀起到了重要的作用。

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] 辛树帜,蒋德麟.中国水土保持概论[M].北京:农业出版社,1982.

[3] 吴发启,张玉斌,宋娟丽,等.水平梯田环境效应的研究现状及其发展趋势[J].水土保持学报,2003,17(5):28-31.

[4] 赵诚信.安塞县水土保持实验区的土壤侵蚀情况[J].泥沙研究,1986(1):81-87.

[5] 陈凤娟,张晓萍,付艳玲,等.陕北安塞县马家沟流域近 20a 来土地利用变化分析[J].水土保持通报,2011,31(1):244-248.

[6] 唐科明,汪邦稳,曹颖.黄土高原土壤分离速率的季节变化研究[J].水土保持学报,2010,24(2):57-60,65.

[7] Zhang Guanghui, Tang Mingke, Zhang Xingchang. Temporal variation in soil detachment under different land uses in the Loess Plateau of China [J]. Earth Surface Process and Landforms, 2009,34(9):1302-1309.

[8] 延安地区水电局.《延安地区实用水文手册》[M].延安地区水电局,1971.

[9] 卢龙彬,付强,黄金柏.黄土高原北部水蚀风蚀交错区产流条件及径流系数[J].水土保持研究,2013,20(4):17-23.

[10] 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.

[11] 梁改革,高建恩,韩浩,孟岩,幸定武,赵文君.基于作物需水与降雨径流调控的隔坡梯田结构优化[J].中国水土保持科学,2011,9(1):24-32.

[12] 王建勋.WEPP 模型(坡面版)在黄土高原丘陵沟壑区的适用性评价[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2006.

[13] Flanagan D C, Meyer C R, Yu B, et al. Evaluation and enhancement of the CLIGEN weather generator[C]//International Symposium of ASAE and Soil Erosion Research for the 21st century. 2001:107-110.

[14] Elliot W J, Arnold C D. Validation of the weather generator CLIGEN with precipitation data from UGANDA [J]. Trans. ASAE,2001,44(1):53-58.

[15] Frankenberger D C, Flanagan J R. Water erosion prediction project (WEPP) windows interface tutorial [M]. Indiana: USDA-Agricultural Research Service & Purdue University National Soil Erosion Research Laboratory West Lafayette, 2004.

[16] 田均良,良一民,刘普灵.黄土高原丘陵沟壑区中尺度生态农业建设探索[M].郑州:黄河水利出版社,2003.

[17] 王建勋,郑粉莉,江中善.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.

[18] 郝连安,高建恩,张元星,等.基于土壤水分动态的梯田苹果园水窖配置[J].中国水土保持科学,2012,10(3):57-63.

[19] 梁改革.基于降雨径流调控的坡地梯田结构优化初步研究[D].北京:中国科学院研究生院,2010.

[20] 郝连安.黄土丘陵沟壑区隔坡梯田结构及集蓄措施配置优化[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2012.

[21] Zhang X C. Calibration, refinement, and application of the WEPP model for simulation climatic impact on wheat production[J]. American Society of Agricultural Engineer, 2004,47(4):1075-1085.

[22] 陆垂裕,孙青言,李慧,等.基于水循环模拟的干旱半干旱地区地下水补给规律评价[J].水利学报,2014,45(6):701-711.

[23] 周孚明.山地梯田埂坎设计探讨[J].水土保持研究,2004,11(3):281-282.

[24] 蒋定生.三川河和无定河流域的基本农田建设述评[J].水土保持学报,1989,3(4):61-66.