

黄土丘陵沟壑区梯田暴雨侵蚀状况及规律分析

贾立志^{1,2}, 高建恩^{1,3,4}, 张元星³, 张梦杰³, 王显文⁴, 李兴华⁴

(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; 4. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要:针对 2013 年延安百年不遇暴雨造成的黄土丘陵沟壑区梯田侵蚀灾害严重、水土资源利用率低等问题。选取安塞县马家沟流域曹新庄梯田作为典型研究对象, 在进行野外监测的基础上, 分析了梯田在百年不遇暴雨条件下的梯级侵蚀灾害发生规律。结果表明: 按高程最上级梯田侵蚀轻微, 依次往下梯田侵蚀面积所占百分比逐渐增大并且增加明显, 上部梯田主要以面蚀为主, 仅发生轻微沟蚀, 下部梯田面蚀、沟蚀都比较严重。梯田侵蚀量与梯田汇水面积、地表径流量等条件有关, 影响梯田侵蚀灾害发生的主要因素是地表径流量。该区 2013 年 6—9 月延安百年不遇暴雨梯田平均侵蚀模数为 20 659.7 t/hm², 超过该区平均年侵蚀模数的 47.6%, 6—9 月月降雨量侵蚀的临界值为 118.8 mm。布置水沙调控措施层层拦蓄径流是保证梯田安全的重要措施。

关键词:梯田; 土壤侵蚀; ArcGIS; 暴雨; 规律分析; 黄土丘陵区

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2014)04-0007-05

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2014.04.002

Analysis of Rainstorm Erosion Disaster in Terrace Field in Loess Hilly and Gully Region

JIA Li-zhi^{1,2}, GAO Jian-en^{1,3,4}, ZHANG Yuan-xing³,
ZHANG Meng-jie³, WANG Xian-wen⁴, LI Xing-hua⁴

(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;

4. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In view of the occurrence of serious terrace rainstorm erosion disaster and low utilization of soil and water resources problems in Yan'an in 2013, this article selects the Caixinzhuang terraced field in Majiagou watershed as a typical terrace research site. On the basis of field monitoring, we analyzed the terraces in the worst storm regularity of cascade erosion disaster conditions. The results showed that: according to the elevation, the highest terrace erosion was slight, the percentage of erosion area increased gradually and significantly as terrace area increased. The higher terraces are mainly composed of sheet erosion with only slight gully erosion. In the lower terrace sheet erosion and gully erosion were serious. Terraced field erosion related to such conditions as the terrace catchment area, surface runoff, the main factor influencing the terraces erosion disaster is the sheet runoff. The average erosion modulus of terraced field is 20 659.7 t/hm² in Yan'an from June to September which is 47.6% more than average annual erosion modulus in this region. The critical value of rainfall causing erosion is 118.8 mm each month from June to September. The arrangement of water and sediment regulation measures is an important measure to guarantee the security of a terrace.

Key words: terraced field; soil erosion; ArcGIS; rainstorm; analysis; loess hilly region

收稿日期: 2014-01-22

修回日期: 2014-03-27

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(水土保持工程)(A315021304)

作者简介: 贾立志(1988—), 男, 山东滨州市人, 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, 主要研究方向为径流调控河流治理。E-mail: gaojianen@126.com

水土流失已成为阻碍黄土丘陵沟壑区发展的重要因素之一^[1],退耕还林还草则成为改善该地区生态环境以及防止水土流失的一项战略性措施。将坡耕地改为高标准梯田并进一步提高耕作技术会满足农村人口对粮食基本需求,并在一定程度上推动退耕还林还草的贯彻与实施^[2]。在黄土高原丘陵沟壑区修筑梯田不仅能够推动水土保持工作的实施,更有利于巩固退耕还林还草成果^[3]。水平梯田在蓄水、保水等方面具有起到了重要的作用^[4]。总体来说,梯田对于改善农田、土壤、以及整个生态系统都有重要的作用^[5]。除此之外,梯田也是确保新形势下粮食安全重要工程措施,因此兴建高标准梯田是必然趋势。

上世纪 80 年代窦玉青在统计分析了黄土高原地区不同地点的梯田的拦沙效益的基础上,对梯田的防蚀作用进行了理论上的分析。初步得出梯田防蚀是通过减缓径流流速与分散径流而达到的^[6]。揭曾佑在分析了黄土高原地区多年的平均降雨资料的基础上,得出在黄土高原地区的月降雨量在 100~200 mm 之间的情况下,梯田径流的入渗速率会大于降雨速率,降雨会被截留在梯田内不会产生径流,则不会发生土壤侵蚀^[4]。但是由于黄土高原地区降水在时间上的分布不均等状况^[1],导致侵蚀性降雨集中,当面临百年不遇的特大暴雨时,会在短时间内形成大量降雨,降雨速率超过入渗速率即为超渗产流,降雨径流会对梯田造成严重的冲刷,严重威胁到梯田的安全。当降雨径流超过一定的值时,梯田就被冲毁,不仅造成该地水土流失、养分流失等问题。当梯田被严

重冲毁时,将会造成农作物减产甚至绝产,严重威胁人民群众的生命与财产安全。因此对暴雨下的梯田侵蚀灾害规律分析研究具有非常重要的现实意义。

本文基于 2013 年 6 月到 9 月份特大暴雨,在进行对典型梯田进行实地测量的基础之上,分析梯田的侵蚀量与降雨径流之间关系。探求高标准梯田暴雨侵蚀灾害的成因以及相关规律,并为梯田的修建以及梯田防蚀措施的选取提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市安塞县马家沟流域(109°08′—109°22′E, 36°45′—N36°58′N),流域总面积 73.7 km²,水土流失面积 72.3 km²,主沟道长约 17.4 km,沟道比降平均约为 6.5‰^[7]。流域内地形陡峻,沟壑纵横水土流失严重,沟壑密度约为 4.5 km/km²,平均土壤侵蚀模数为 14 000 t/(km²·a)^[8],属于重度土壤侵蚀区,其地形地貌具有很强的代表性。土壤以黄绵土为主要土类,气候属于大陆性半干旱季风气候,多年平均降雨量约为 520 mm,大部分集中于春夏季节,其中 6—9 月份降雨约占全年降雨的 80%^[9]。本文选取马家沟流域曹新庄梯田作为研究对象。该梯田断面总共有 8 级梯田,按照高程从上到下依次为 1—8 号梯田断面。梯田主要的种植作物为谷子(*Olyza sativa*)、土豆(*Solanum tuberosum*)、玉米(*Zea mays*)、向日葵(*Helianthus annuus*)等,各梯田概况如表 1 所示。

表 1 各级梯田概况

梯田面编号	1	2	3	4	5	6	7	8
田面面积/m ²	3499.3	1979.5	2496.7	6550.4	2816.2	6238.7	4259.8	5814.3
海拔高度/m	1232.5	1229.2	1225.7	1219.7	1215.8	1213.7	1207.4	1200.6
大田土地利用方式	谷子	土豆	裸地	玉米	向日葵	裸地	玉米	玉米
作物覆盖度/%	65.4	51.6	0	62.5	57.4	0	66.8	53.2

1.2 资料获取

1.2.1 降雨资料获取 根据陕西省水利厅所统计的降雨资料^[10],安塞县 2013 年 6—9 月百年一遇特大暴雨总计降雨量为 1 000.6 mm。具体降雨日分布如图 1 所示。

1.2.2 侵蚀资料获取与处理 结合当地实际情况采用水准测量法和制图学方法相结合的手段对典型梯田进行土壤侵蚀测量与分析。运用徕卡全站仪^[11]对安塞县马家沟曹新庄典型梯田进行实地测量,具体步骤如下:(1)选取典型梯田断面,运用全站仪对梯田地形进行测量,测量内容包括:经度、纬度、高程;(2)整理资料绘制成图;(3)待降雨过后再次对该典型梯田进行测量,整理资料绘制成图;(4)对比两次测量数据并计算得出所需数据。

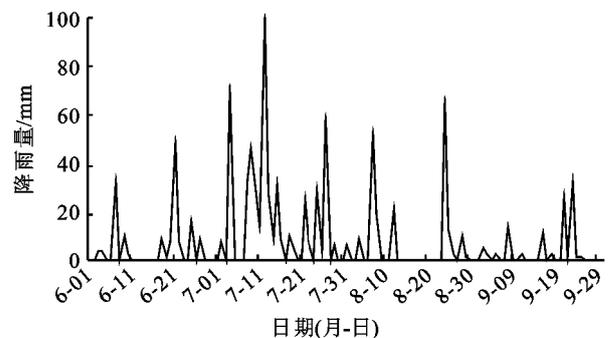


图 1 安塞县 2013 年 6—9 月降雨日分布

运用 ArcGIS 9.3 专业软件平台,对实地观测数据进行分析处理,具体方法步骤如下:(1)将全站仪所测数据导入 ArcGIS;(2)用实测坐标数据构建矢量点格式图层;(3)运用 ArcGIS 中 3D Analyst 模块中工具

“内插构建 TIN”^[12]; (4) 两次测量数据都建立 TIN 后,用 ArcGIS 的 3D Analyst 模块中“Surface Analyst”命令,采用两个 TIN 图层作差的方式求得各个梯田断面汇水面积、侵蚀量、侵蚀面积等相关数据。

1.2.3 地表径流量计算 根据典型梯田坡面的实际地形,每级梯田汇集上面梯田所产生的径流,并使该级梯田发生侵蚀,侵蚀产生的泥沙最终在最下一层梯田坡面流失,该梯田坡面 2013 年 6—9 月地表径流量根据以下公式计算:

$$W = K \cdot R \cdot F / 1000 \quad (1)$$

式中: W ——地表径流量(m^3); F ——汇水面积(m^2); R ——该区 6—9 月降雨量(mm); K ——径流系数。

根据陕西省水利厅统计的降雨资料,该区 2013 年 6—9 月降雨量为 1 000.6 mm。据《延安地区实用水文手册》和已有的研究可知该地区径流系数为 $K = 0.15$ ^[13-14]。可以计算得出各梯田断面的地表径流量。

2 结果与分析

2.1 梯田断面侵蚀规律分析

根据典型梯田坡面实际地形,坡面中轴线呈西南—东北走向,总面积约为 33 654 m^2 ,地势西南高东北低,降雨径流由西南方向东北方汇集,每一级梯田汇集以上各个梯田坡面的降雨径流与泥沙,最末一级梯田为泥沙与径流出口。

在各级梯田中,海拔高度最高的第 1 级梯田面蚀

和沟蚀面积最小,分别占梯田面积的 13.1% 和 1.9%。就面蚀而言,第 1,2 级梯田属于轻度侵蚀,第 3—6 级梯田属于中度侵蚀,第 7,8 级梯田面蚀面积分别占梯田面积的 54.2% 和 68.2%,属于强度侵蚀。就沟蚀而言,第 1—5 级梯田沟蚀面积均小于 10%,属于轻度侵蚀,第 6 级梯田为中度侵蚀。第 7,8 级梯田沟蚀面积均超过 15%,属于强度侵蚀(表 2)。面蚀面积从第 3 级梯田开始增加比较明显而沟蚀从第 6 级梯田开始增加明显。

由于第 1—6 级梯田汇水面积比较小,在降雨初期主要以雨滴击溅侵蚀为主,并且很难在短时间内形成大量的径流对梯田断面形成冲刷。在坡面水流形成初期,水层很薄而且处于分散状态,没有形成巨大的能量,仅仅形成薄层水流引起坡面的薄层剥蚀,没有形成足够的水流冲刷下切,所以 1—6 级梯田主要以面蚀为主。然而由于第 7,8 级梯田汇集以上坡面所产生的地表径流,地表径流量达到一定的值后,水流集中,侵蚀能量增强,会对坡面造成剧烈的下切侵蚀、旁蚀与溯源侵蚀而形成面积较大的侵蚀沟。梯田断面总体侵蚀规律为:最上级梯田侵蚀轻微,依次往下梯田侵蚀面积所占百分比逐渐增大并且增加明显。1—6 级梯田主要以面蚀为主,仅发生轻微沟蚀,第 7,8 级梯田沟蚀面积明显增加,面蚀面积也有相应增加,侵蚀总面积占梯田面积 75% 以上,并且沟蚀所造成的危害比面蚀更加严重。

表 2 各级梯田侵蚀状况

梯田面 编号	田面面积/ m^2	面蚀情况			沟蚀情况		
		面蚀面积/ m^2	占梯田比例/%	侵蚀等级	沟蚀面积/ m^2	占梯田比例/%	侵蚀等级
1	3499.3	459.6	13.1	轻度侵蚀	67.3	1.9	轻度侵蚀
2	1979.5	283.9	14.3	轻度侵蚀	72.6	3.7	轻度侵蚀
3	2496.7	827.6	33.1	中度侵蚀	207.3	8.3	轻度侵蚀
4	6550.4	2474.2	37.8	中度侵蚀	426.2	6.5	轻度侵蚀
5	2816.2	1032.7	36.7	中度侵蚀	258.8	9.2	轻度侵蚀
6	6238.7	2534.8	40.6	中度侵蚀	654.9	10.5	中度侵蚀
7	4259.8	2309.1	54.2	强度侵蚀	685.2	16.1	强度侵蚀
8	5814.3	3967.5	68.2	强度侵蚀	1083.1	18.6	强度侵蚀

注:梯田侵蚀分级根据中华人民共和国水利部(1986)所颁布的《土壤侵蚀分类分级标准》^[15]。

2.2 地表径流与侵蚀量关系分析

第 1—5 级梯田的土壤侵蚀量都在 50 t 以内,第 6 级梯田侵蚀量则陡升为 168.96 t,相对于第 5 级梯田增加 303.5%。第 7 级梯田的土壤侵蚀量增加则相对比

较缓慢仅为 19.1%。而第 8 级梯田则陡升为 314.26 t,相对于上一级梯田增加 51.2%。由此可以看出随着梯田级数的增加,土壤侵蚀量有一个先缓慢增加,然后陡然上升,最后又缓慢增加的一个过程(表 3)。

表 3 各级梯田侵蚀量与侵蚀模数

项目	梯田面编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
汇水面积/ m^2	3499.31	5478.82	7975.58	14525.62	17341.64	23580.34	27840.17	33654.53
地表径流量/ m^3	525.23	822.34	1197.16	2180.27	2602.88	3539.29	4178.54	5051.25
侵蚀量/t	2.96	7.53	28.11	40.10	41.87	168.96	201.25	314.26
侵蚀模数/($t \cdot km^{-2}$)	846.28	3804.37	11259.87	6121.04	14870.28	27083.66	47244.75	54048.39

根据吴钦孝等^[16]的研究,地表径流量在很大程度上影响着梯田坡面的侵蚀产沙量。梯田断面地表径流量对侵蚀产沙量起到了主要的作用,随着地表径流量的增加侵蚀量有明显的增加趋势。图 2 为地表径流量与侵蚀量经回归分析后建立的关系,地表径流量与侵蚀量存在显著的相关关系。其中第 6 级梯田侵蚀量增加显著,主要因为地表径流量汇集达到一定的程度,大量的地表径流致使梯田无法承受强烈冲刷导致侵蚀剧烈。除了地表径流因素影响外,在一定程度上也与该梯田断面的土地利用方式有关。第 6 级梯田面的土地利用方式为裸地,因此没有植被的截流以及防蚀措施,裸露的地表无法抵御暴雨以及大量地表径流的冲刷,必然导致该梯田坡面侵蚀显著。而第 7 级梯田坡面的侵蚀量增加率仅为 19.1%,主要因为该断面种植作物玉米。根据杨晓芬,吴发启等的研究:与裸地相比玉米能够起到很好的减水减沙作用,并且很好的起到了防止水如流失的作用,其中玉米可减少 43.12% 的径流模数以及 56.57% 的侵蚀模数^[17]。在下级梯田断面采取一定的林草措施会起到拦蓄径流,防止坡面冲刷的作用。第 8 级梯田侵蚀量又显著升高,由此可见,当面临百年不遇特大暴雨时,林草措施很难抵御降雨径流的冲刷,需要在梯田断面布置水沙调控措施层层拦蓄径流,才能保障梯田断面的安全。

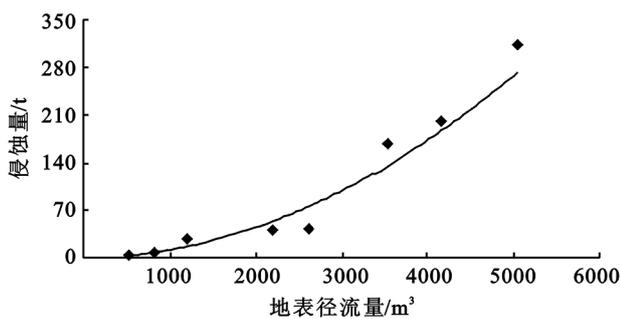


图 2 地表径流量与侵蚀量关系

2.3 地表径流与侵蚀模数关系分析

根据统计,该区 2013 年 6—9 月平均侵蚀模数为 20 659.7 t/hm²,超过了该区年平均土壤侵蚀模数 [14 000 t/(km²·a)] 的 47.6%。根据我国水利部(1986)在《水土保持技术规范》^[18]中的土壤侵蚀分级,侵蚀模数大于 15 000 t/(km²·a)即为剧烈侵蚀^[19],该区为极剧烈侵蚀。导致该梯田坡面极剧烈侵蚀的主要原因有两点:(1)该梯田坡面修筑时没有充分考虑当地实际降雨以及侵蚀情况,没有修筑梯田田坎等一系列的拦挡措施。导致大暴雨产生的地表径流随坡面流入下一级梯田,不仅导致了径流对梯田断面的冲刷侵蚀,还会增加下一级梯田的地表径流

量,对梯田坡面造成严重的损坏;(2)该流域 2013 年 6—9 月份降雨为 1 000.6 mm,为该区年均降雨量的 2 倍多,仅 7 月 12 日一天降雨量达 100 mm。根据王万忠等人对黄土高原地区降雨与水土流失的关系分析可知,造成该区土壤侵蚀的主要原因为短历时、高强度的暴雨^[20]。大量降雨致使梯田断面来不及入渗,再加上黄土结构疏松^[21]以及渗透性较低^[22],导致了地表径流对梯田坡面冲刷严重。

由表 3 可以看出,1—5 级梯田 2013 年 6—9 月份都小于 15 000 t/km²,第 6 级梯田侵蚀模数较第 5 级梯田侵蚀模数增加率为 82.13%,第 7,8 级分别为 74.4%和 14.4%。各级梯田侵蚀模数的变化趋势和侵蚀量的变化趋势类似,都经过一个缓慢增加然后陡升,最后又缓慢增加的一个过程。第 7,8 级梯田侵蚀模数达到 47 244 t/km²和 54 048 t/km²,分别为该区年平均侵蚀模数的 3.4 倍和 3.9 倍。影响各级梯田侵蚀模数变化的因素有梯田面积、地表径流量、防蚀措施等,其中主要因素是地表径流量。

图 3 为地表径流量和土壤侵蚀模数之间关系图。可以看出侵蚀模数与地表径流量存在显著的关系。经回归分析可得侵蚀模数和地表径流量关系式为:

$$M_s = 0.0572W^{1.61} \quad (2)$$

式中: M_s ——土壤侵蚀模数(t/km²); W ——地表径流量(m³)。

黄土高原丘陵沟壑区的最大容许土壤流失量为 1 000 t/(km²·a)^[19],但是由于实地条件的限制,该区的侵蚀模数控制在年平均侵蚀模数 [14 000 t/(km²·a)]即可。可求出该区 6—9 月份降雨量临界值为 475 mm,可知该区 6—9 月月临界降雨量为 118.8 mm。

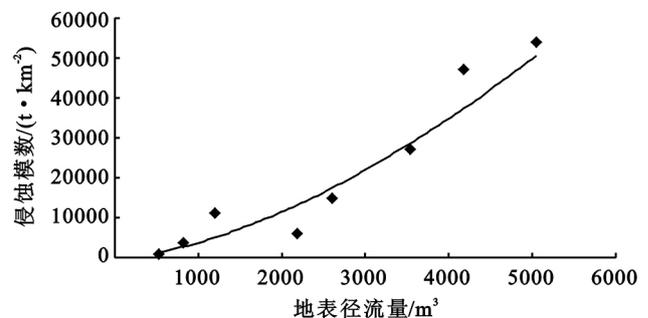


图 3 地表径流量和土壤侵蚀模数关系

2.4 梯田防蚀措施探究

根据以上研究可知梯田的土壤侵蚀量与地表径流量呈显著相关,所以控制梯田侵蚀的关键是控制地表径流量。在降雨量一定的条件下,应通过控制该地区径流系数与汇水面积或改变微地形条件来减少地表径流量,进而达到减少径流对梯田坡面的冲刷的目的

的。但是仅仅采取林草措施不足以抵御百年不遇大暴雨的冲刷,因此需要采取工程措施对梯田进行水沙调控设计来对坡面径流层层拦蓄,以达到防止梯田侵蚀的目的。

根据黄土高原丘陵沟壑区的实际情况,主要的工程措施采取修建反坡梯田与梯田田埂相结合来对水沙进行调控。反坡梯田是广泛应用于黄土丘陵沟壑区的一种水土保持工程措施。其主要特征为:梯田反坡修筑,梯田外部高于内部,即梯田断面向梯田根基部位倾斜成一定角度^[23]。反坡梯田在一定程度上可以截断地表径流,如此一来,既减少了径流对下一级梯田断面的冲刷,减少了侵蚀,又将径流分别存蓄在梯田断面内,形成小型的蓄水系统。对于改良土壤理化性质、蓄水保肥、提供农作物产量都起到了关键的作用。因此可根据当地实际地形修建反坡梯田的坡度一般在 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 为宜。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^[24]。根据梁改革等人的研究梯田断面泥沙淤积大都小于30 cm,因此该区梯田田埂修建可按照梯田设计规范中30 cm修建^[25]。

3 结论

(1) 该区2013年6—9月份平均侵蚀模数超过年平均侵蚀模数47.6%。在黄土丘陵沟壑区,6—9月降雨量临界值为118.8 mm,当降雨量超过这一值时,梯田面将遭受严重的侵蚀。

(2) 造成梯田侵蚀严重的因素有多种,其中地表径流量为主要考虑因素。梯田田面沟蚀和面蚀状况都非常严重,由于地表径流量的增加,下级梯田侵蚀比上级梯田严重,侵蚀面积最高可占梯田面积的86.8%。因此,梯田底部仅采取林草措施无法有效的防止侵蚀,还需要运用水沙调控等水保工程措施达到防止土壤侵蚀的目的。

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,2006:15-22.

[2] 甘枝茂,桑广书.关于黄土高原退耕还林(草)问题[J].干旱区资源与环境,2002,16(1):62-65.

[3] 张彩.梯田建设在农村经济发展中的地位与作用[J].甘肃水利水电技术,2009,45(8):58-59.

[4] 霍云霄,朱冰冰.黄土丘陵区水平梯田保水保土效益分析[J].水土保持研究,2013,20(5):24-28.

[5] 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.

[6] 窦玉青.梯田防止侵蚀的理论分析[J].西北大学学报:自然科学版,1988,18(2):95-100.

[7] 万龙,张晓萍,陈凤娟,等.黄土区退耕背景下的土地利用适宜性评价:以安塞县马家沟流域为例[J].中国水土保持科学,2010,8(5):30-35.

[8] 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].陕西杨凌:天则出版社,1990:36-56.

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

[10] 陕西省水利厅雨情简报:陕西省水利厅.陕西省水利厅雨情简报[EB/OL].[2013.11].<http://www.sxmw.gov.cn/fw-zxfw-yqjb-1-155-60>.

[11] 文南秋,张志成.徕卡全站仪的应用[J].港口工程,1996,11(2):46-48.

[12] 刘万青,张超超,王旭红.等高线图形概括在黄土高原沟谷侵蚀量估算中的应用[J].水土保持通报,2011,31(1):128-131.

[13] 延安地区水电局.延安地区实用水文手册[M].延安:陕西省延安地区水利水土保持局,1987:11-16.

[14] 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.

[15] 中华人民共和国水利部.土壤侵蚀分类分级标准[M].北京:中国水利水电出版社出版,1997:9-10.

[16] 吴钦孝,赵鸿雁,韩冰.黄土丘陵区草灌植被的减沙效益及其特征[J].草地学报,2003,11(1):23-26.

[17] 杨晓芬,吴发启,马波,等.黄土坡耕地玉米作物的防蚀作用研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(10):97-102.

[18] 中华人民共和国水利部.水土保持技术规范[M].北京:中国水利水电出版社,1986:16-19.

[19] 刘秉正,吴发启.土壤侵蚀[M].西安:陕西人民出版社,1997.

[20] 王万忠.黄土地区降雨特性与土壤流失关系的研究[J].水土保持通报,1983,21(4):7-14.

[21] 张茂省,李同录.黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究[J].工程地质学报,2011,19(4):530-540.

[22] 王家鼎,张倬元.地震诱发高速黄土滑坡的机理研究[J].岩土工程学报,1999,21(6):670-674.

[23] 韩春玲,时述凤,廖为民.反坡梯田在土地整理项目中的应用[J].中国农村水利水电,2007(11):39-40.

[24] 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.

[25] 梁改革,高建恩,韩浩等.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.