

# 极端暴雨条件下黄土区典型梯田防蚀效果研究

白先发<sup>1,3</sup>, 高建恩<sup>1,2,3,4</sup>, 贾立志<sup>1,3</sup>, 张梦杰<sup>2</sup>, 马润年<sup>5</sup>, 张英英<sup>5</sup>

(1. 中国科学院 教育部 水土保持与生态环境研究中心, 陕西 杨凌 712100;

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

4. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 5. 安塞县气象局, 陕西 安塞 717400)

**摘 要:** 2013年黄土高原延安地区发生的极端暴雨导致水土保持工程损毁严重, 因此急需研究不同类型梯田抗御暴雨侵蚀防蚀效果。选取安塞县同一地区典型梯田—大棚、梯田—大田和梯田—水窖—苹果3种具有不同水沙调控措施梯田, 根据暴雨前后野外监测资料, 分析比较了3种梯田抗御暴雨侵蚀灾害的能力。结果表明: 带有水沙调控措施的梯田防蚀效果明显好于无水沙调控措施的梯田。梯田—水窖—苹果侵蚀最轻, 各阶梯田侵蚀等级均在中度侵蚀以下, 平均土壤侵蚀模数仅为2 177 t/km<sup>2</sup>; 梯田—大棚由于在大棚基部修建有排水渠道其侵蚀程度次之, 平均土壤侵蚀模数为18 269 t/km<sup>2</sup>, 但棚面集流效率高使得各阶梯田土壤侵蚀等级都在极强度侵蚀以上; 梯田—大田侵蚀最严重, 平均土壤侵蚀模数为23 921 t/km<sup>2</sup>, 由梯田顶部到底部土壤侵蚀逐渐加重, 最下部3阶梯田累积侵蚀量占总侵蚀量的85.02%。黄土丘陵沟壑区发展高效农业需要在梯田上因地制宜修建水沙调控措施, 以调节水沙时空分布, 保障农业生产。

**关键词:** 水沙调控; 土壤侵蚀; 梯田; 暴雨径流; 黄土高原

**中图分类号:** S157.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2015)03-0010-06

## Preliminary Study of Effects of Different Terraces on Erosion Control in Loess Plateau

BAI Xianfa<sup>1,3</sup>, GAO Jian'en<sup>1,2,3,4</sup>, JIA Lizhi<sup>1,3</sup>, ZHANG Mengjie<sup>2</sup>, MA Runnian<sup>5</sup>, ZHANG Yingying<sup>5</sup>

(1. Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of

Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Natural Resources and

Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. University of Chinese Academy of

Sciences, Beijing 100049, China; 4. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. Meteorological Bureau of Ansai, Ansai, Shaanxi 717400, China)

**Abstract:** In order to understand the serious damage of soil and water conservation projects caused by heavy rain in Loess Plateau in 2013, it is urgent to study the effects of different water and sediment regulation measures on soil erosion control. Based on the field monitoring and collected rainfall data, this paper chose three kinds of terraces with different water and sediment regulation measures and compared their ability to resist the heavy rain disaster. The results showed that terraces with water and sediment regulation measures presented the better erosion controlling effect than those without water and sediment regulation measures significantly. Cellar-apple-terraces showed the lightest erosion intensity, with the degrees of all levels of terraces being middle erosion and average soil erosion modulus being 2 177 t/km<sup>2</sup>. Greenhouses-terrace showed middle erosion intensity and its average soil erosion modulus was 18 269 t/km<sup>2</sup> due to drainage channels constructed on the base of greenhouses, whereas the high efficiency of rainwater collection on the surface of greenhouse made the average soil erosion modulus of all levels of terraces reach to 18 269 t/km<sup>2</sup>. The erosion of field-terrace was the most serious, and the average soil erosion modulus of the field-terrace was 23 921 t/km<sup>2</sup>. There was an increasing tendency of soil erosion from the up to the down of field-terrace, and the erosion rate of the lowermost three levels of field-terrace accounted for 85.02% of total erosion rate. There was the increasing requirement of constructing water and sediment regulation measures based on practical situation to develop high efficient agriculture, control the spatiotemporal distribution of water and

收稿日期: 2014-05-07

修回日期: 2014-09-03

**资助项目:** 国家“十二五”科技支撑计划“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); 陕西省科技统筹创新工程计划“治沟造地工程区坡面整治综合技术集成与示范”(2013KTDZ03-03-01); 国家自然科学基金(41371276, 51309194); 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)

**第一作者:** 白先发(1989—), 男, 山东淄博人, 在读硕士, 研究方向为土壤侵蚀。E-mail: baixianfa@126.com

**通信作者:** 高建恩(1962—), 男, 山西运城人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土资源高效利用研究。E-mail: gaojianen@126.com

sediment, and ensure agricultural production.

**Keywords:** water and sediment regulation measures; soil erosion; terraces; rainstorm runoff; Loess Plateau

梯田作为一种水土保持型高效农业生产模式,在黄土高原地区得到了广泛推广应用。但是在暴雨径流冲刷条件下,梯田田面常常被冲毁,农作物大量减产,农业经济效益大大降低,高效农业发展受到了限制。因此,梯田防蚀措施成为一个新的研究热点,暴雨条件下如何减少梯田水土流失和保障粮食安全是一个亟需解决的现实问题。通过合理调控降雨径流,消除水土流失的原动力,实现水土资源的持续利用<sup>[1]</sup>,能够减少土壤侵蚀、保障土地安全,进行高效农业生产。

目前,黄土高原很多梯田建有降雨径流调控措施,比如在坡地上挖掘鱼鳞坑、梯田上修建大棚和水窖等<sup>[2-6]</sup>。研究表明,当降雨量、雨强在一定范围内时,梯田具有较高的蓄水保土效益,随着降雨量、雨强的增大梯田蓄水保土效益逐渐降低<sup>[7]</sup>。黄土高原水平梯田的工程质量也在水土保持中起着非常重要的作用<sup>[8-9]</sup>,不同梯田质量对梯田的蓄水拦沙效率差异较大,徐乃民等<sup>[10]</sup>按水平梯田质量将其分为四类:第一类,符合设计标准,田坎完好,田面平整或成反坡;第二类,边埂部分破坏,田面基本水平或坡度小于 $2^{\circ}$ ;第三类,埂坎破坏严重,田面坡度为 $2^{\circ}\sim 5^{\circ}$ ;第四类,埂坎破坏严重,没有地边埂,田面坡度大于 $5^{\circ}$ 。以往的研究在降雨对农业生产性梯田侵蚀影响方面研究较少,主要定位监测径流小区土壤侵蚀情况<sup>[7-9,11-13]</sup>,以未修建梯田前的坡耕地作为对照,分析不同降雨条件下梯田蓄水保土效益,而径流小区受人为控制因素影响较大,往往不能完全真实反映实际土壤侵蚀情况。本研究选取黄土高原丘陵沟壑区安塞县同一地区 3 种具有不同水沙调控措施的农业生产性梯田,研究 3 种梯田在强降雨条件下的土壤侵蚀状况以及土壤侵蚀规律,探究影响防蚀效果的因素,通过比较 3 种梯田抗御侵蚀灾害的能力和评价水沙调

控措施防蚀效果的好坏,以期为指导不同梯田因地制宜地合理布置径流调控措施提供技术支撑,减少侵蚀灾害,为保障梯田安全提供科学依据。

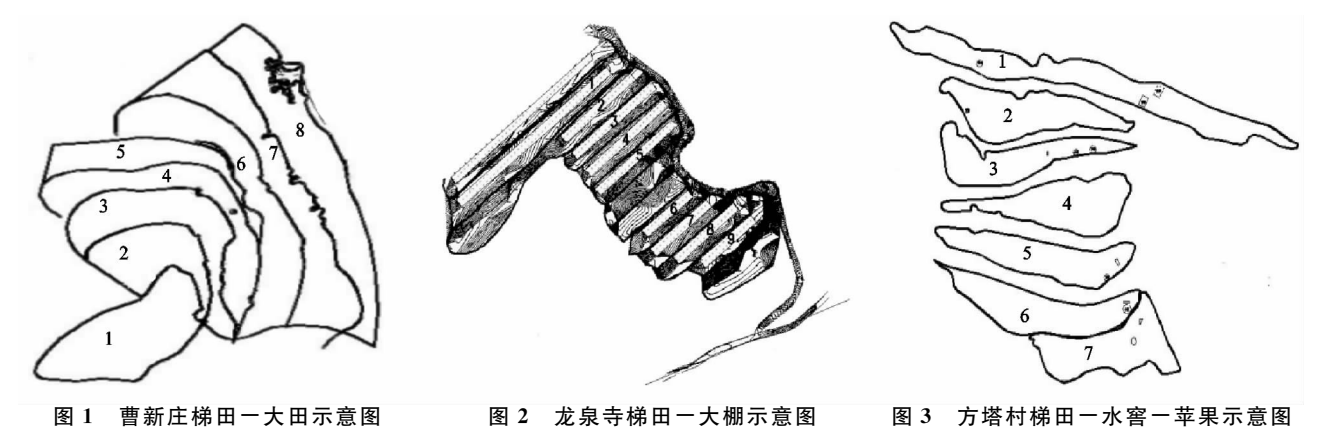
## 1 试验材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究选取安塞县马家沟流域龙泉寺典型梯田—大棚、曹新庄典型梯田—大田和沿河湾镇方塔村典型梯田—水窖—苹果作为研究对象。安塞县地处西北内陆黄土高原腹地,位于 $108^{\circ}50'\sim 109^{\circ}26'E$ , $36^{\circ}30'\sim 37^{\circ}19'N$ ,为典型的黄土高原丘陵沟壑区,属中温带大陆性半干旱季风气候,年平均气温 $8.8^{\circ}C$ ,年平均降水量 $505.3\text{ mm}$ ,降水主要分布在 $6\sim 9$ 月,海拔 $1\,012\sim 1\,731\text{ m}$ 。

### 1.2 水沙调控措施布置情况

曹新庄梯田—大田位于 $36^{\circ}53'51.10''N$ , $109^{\circ}13'39.39''E$ ,该梯田断面总共有 8 级梯田,从上到下依次为 1—8 号,梯田种植经济作物或者为裸地,暴雨前每阶梯田田埂高度在 $15\text{ cm}$ 左右,边坡裸露,属水平梯田(图 1)。龙泉寺梯田—大棚位于 $36^{\circ}53'9.42''N$ , $109^{\circ}13'49.64''E$ ,大棚从上向下依次编号 1—9 号,大棚平均长 $60\text{ m}$ ,宽 $7\text{ m}$ ,棚内栽有经济作物茄瓜,棚外则为裸地,大棚基部修建有人工排水渠道,地势西高东低(图 2)。方塔村梯田—水窖—苹果位于 $36^{\circ}48'40.14''N$ , $109^{\circ}15'2.09''E$ ,梯田内布设有集流面积为 $40\text{ m}^2$ ,蓄水体积为 $7.5\text{ m}^3$ 的个数不等的水窖,水窖布设情况见表 1;该梯田属于内斜式梯田,且每阶梯田都修有田埂,平均田埂高度为 $10\text{ cm}$ ;梯田内栽有经济作物苹果树,其株行间距为 $3\sim 4\text{ m}$ ,地表常年累积枯枝落叶层达 $1\text{ cm}$ 厚;每阶梯田边坡有大量自然生长的白茅,其覆盖度达 $80\%$ 以上(图 3)。水窖布设情况和 3 种梯田土地利用方式详见表 1,2,3。



1.3 数据来源

本研究所使用的仪器是徕卡全站仪和手持 GPS。全站仪,即全站型电子测距仪,是一种集光、机、电为一体的高技术测量仪器,是常用的野外土壤侵蚀测量仪器,其高程误差可控制在厘米级别,水平误差可控制在毫米级别,测距精度为  $1\text{ mm}+1.5\text{ ppm}\times D\text{ km}$ ,测距分辨率为  $0.1\text{ mm}$ ,其中  $D$  指测量距离(km)。本研究利用 GPS 测量某些固定点的经纬度,利用徕卡全站仪对侵蚀沟进行测量,在侵蚀形态变化快的地方测量的点越多,因此测量的土壤侵蚀量精确度较高。分别在雨季来临前的 5 月和暴雨过后的 10 月对 3 种梯田地形进行测量,获得 3 种梯田的原始地形数据和侵蚀后地形数据,测量结束后利用南方 CASS 7.0 成图软件将两次测量的地形数据绘制成 CAD 图,再利用 ArcGIS 10.1 软件对 3 种梯田土壤侵蚀量进行计算得到侵蚀量。

根据陕西省水利厅雨晴简报公布的降雨数据,2013 年安塞县 6—9 月累积降雨量高达  $1\,000.6\text{ mm}$ ,这段时间降雨量分布如图 4 所示。

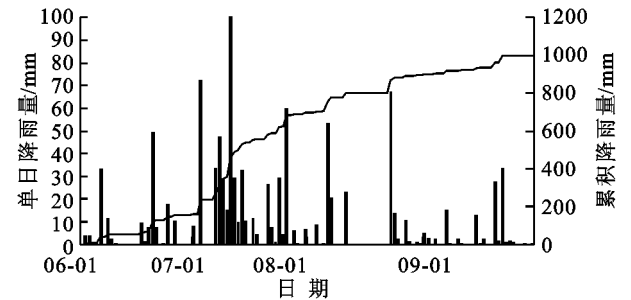


图 4 安塞县 2013 年 6—9 月日降雨量和累积降雨量

根据中国科学数据共享服务网延安站 1951—2013 年月最大降雨量数据,运用适线法计算出该区月最大降雨量出现的频率为  $0.02\%$ (图 5),重现期为

表 1 曹新庄梯田一大田侵蚀情况

项目	梯田编号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
梯田面积/ $\text{m}^2$	3499.30	1979.50	2496.70	6550.40	2816.20	6238.70	4259.80	5814.30
汇水面积/ $\text{m}^2$	3499.31	5478.82	7975.58	14525.62	17341.64	23580.34	27840.17	33654.53
地表径流量/ $\text{m}^3$	525.20	822.30	1197.10	2180.2	2602.80	3539.20	4178.50	5051.20
侵蚀量/t	2.96	7.53	28.11	40.10	41.87	168.96	201.25	314.26
侵蚀模数/ $(\text{t}\cdot\text{km}^{-2})$	846.28	3804.37	11259.87	6121.04	14870.28	27083.66	47244.75	54048.39
土地利用方式	谷子	土豆	裸地	玉米	向日葵	裸地	玉米	玉米

本研究梯田一大田仅种植一些农作物或是裸地,田埂平均高度  $15\text{ cm}$ ,暴雨冲刷过程中下部梯田田埂已被冲毁。由表 1 可知,第 1 阶梯田侵蚀模数为  $846.28\text{ t}/\text{km}^2$ ,属于轻度侵蚀;第 2 阶梯田侵蚀模数为  $3\,804.37\text{ t}/\text{km}^2$ ,属于中度侵蚀;第 4 阶梯田侵蚀模数为  $6\,121.04\text{ t}/\text{km}^2$ ,属于强度侵蚀;第 3、5 阶梯

5 000 年,属于 5 000 年一遇暴雨。

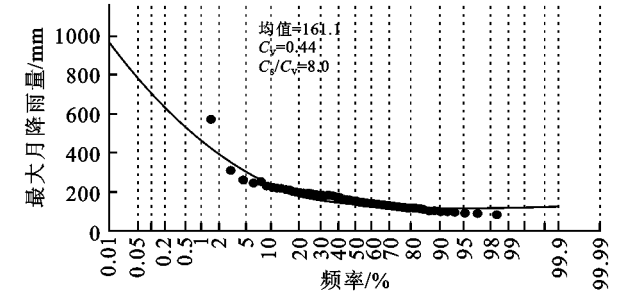


图 5 延安站 1951—2013 年最大月降雨量频率分析曲线

1.4 数据处理

2013 年安塞县发生极端强降雨,使各种梯田受到不同程度的破坏。梯田作为集流面,其地表径流量计算公式如下:

$$W=\frac{1}{1000}K\cdot R\cdot F\tag{1}$$

式中: $W$ ——地表径流量( $\text{m}^3$ ); $F$ ——汇水面积( $\text{m}^2$ ); $R$ ——降雨量( $\text{mm}$ ); $K$ ——径流系数。

据《延安地区实用水文手册》和已有研究<sup>[14-15]</sup>可知该地区多年平均径流系数为  $K=0.10\sim 0.15$ 。由于梯田一大田植被覆盖率较低,选取径流系数  $K=0.15$ ;梯田一水窖一苹果地以及梯田一大棚外侧土地植被覆盖率和枯枝落叶较多,能够有效拦截降雨径流,取径流系数  $K=0.10$ ;梯田一大棚棚面硬化,据相关研究其集流效率可达到  $85.4\%$ <sup>[16]</sup>,因此取径流系数  $K=0.854$ 。通过测定 3 种梯田土层深度为  $20\sim 30\text{ cm}$  的土壤容重,取土壤平均容重  $1.20\text{ g}/\text{cm}^3$ 。

2 结果与分析

2.1 梯田一大田对暴雨径流侵蚀的影响

根据实测资料,2013 年 6—9 月暴雨过后,曹新庄梯田一大田土壤侵蚀情况如表 1 所示。

田侵蚀模数分别为  $11\,259.87,14\,870.28\text{ t}/\text{km}^2$ ,属于极强度侵蚀;第 6、7、8 阶梯田侵蚀模数远远大于  $15\,000\text{ t}/\text{km}^2$ ,为剧烈侵蚀<sup>[17]</sup>。由此可见,梯田一大田从顶部到底部,随着上方来水量的增加,侵蚀越来越严重,且土壤侵蚀强度在极强度侵蚀以上的梯田面积占总面积的  $64.26\%$ ,侵蚀量占总量的  $85.02\%$ 。

地表径流量是土壤侵蚀发生的主要动力,通过建立地表径流量与土壤侵蚀模数之间的关系(图 6),回归得到侵蚀模数和地表径流量之间的经验关系式为:

$$M_s=0.0572Q^{1.6058},R^2=0.8795 \quad (2)$$

式中: $M_s$ ——土壤侵蚀模数( $t/km^2$ ); $Q$ ——地表径流量( $m^3$ )。

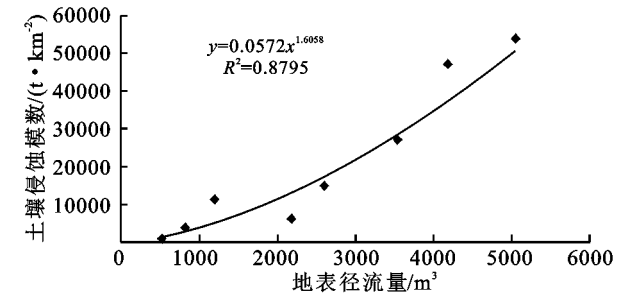


图 6 梯田一大田地表径流量与土壤侵蚀模数关系

如图 6 所示,梯田一大田土壤侵蚀模数与地表径流量之间呈幂函数关系,随着地表径流在梯田上累积,从梯田顶部到底部,土壤侵蚀程度不断加重。降雨产生的地表径流从梯田顶部到底部不断累积增加,

表 2 龙泉寺梯田一大棚侵蚀情况

项 目	梯田编号							
	1	2	4	5	6	7	8	9
大棚面积/ $m^2$	801	325	390	387	229	296	315	277
大棚外侧空地面积/ $m^2$	970	500	486	537	321	524	240	240
大棚棚面径流量/ $m^3$	684.46	277.72	333.26	330.70	195.68	252.94	269.17	236.70
大棚外侧空地径流量/ $m^3$	97.06	50.03	48.63	53.73	32.12	52.43	24.01	24.01
总净流量/ $m^3$	781.52	327.75	381.89	384.43	227.80	305.37	293.19	260.71
土壤侵蚀量/ $t$	33.28	8.87	15.69	16.62	8.85	7.16	17.58	16.87
侵蚀模数/ $(t \cdot km^{-2})$	18791.64	10751.52	17910.96	17987.01	16090.91	8731.71	31675.68	32630.56
土地利用方式	大豆地	免耕地	草地	玉米地	西瓜地	西瓜地	草地	草地

由表 2 可以看出,第 7 阶梯田侵蚀模数为 8 731.71  $t/km^2$ ,为强度侵蚀;第 2 阶梯田侵蚀模数为 10 751.52  $t/km^2$ ,在 8 000~15 000  $t/km^2$  范围内,属于极强度侵蚀;其余梯田侵蚀模数都大于 15 000  $t/km^2$ ,为剧烈侵蚀<sup>[17]</sup>。梯田一大棚这种水沙调控措施在 2013 年 6—9 月强降雨侵蚀条件下,几乎所有梯田土壤侵蚀等级都是剧烈侵蚀。由此可见,该梯田侵蚀非常严重,通过调查发现大棚外侧梯田产生大面积侵蚀沟,侵蚀沟的平均深度为 1.15 m,最深达 3 m。降雨径流冲刷侵蚀梯田形成了深度深且面积大的侵蚀沟,侵蚀沟贴近大棚基部,部分侵蚀沟已经进入到大棚内部,大棚墙体也发生了部分塌方,破坏了大棚安全稳定。严重的侵蚀增加了梯田产流产沙量,破坏了梯田蓄水保土效益,降低了农民的经济收益。

大棚棚面径流量占径流总量的 75% 以上,大棚棚面所拦截的降雨,成为该梯田侵蚀的主要外营力,因此大棚棚面所拦截产生的径流量对梯田的侵蚀量

由图 6 可以看出,当地表径流量在 2 000  $m^3$  以内时,土壤侵蚀模数可控制在 10 000  $t/km^2$  以下,且土壤侵蚀模数增加较缓慢;当地表径流量大于 2 000  $m^3$  时,土壤侵蚀模数增加较快。第 2 阶至第 8 阶梯田地表径流量是第 1 阶梯田的 1.5~9.6 倍,而侵蚀模数在 7.2~102.9 倍。在最后 3 阶梯田,平均土壤侵蚀模数增加量达到径流增加量的 10 倍,可见径流量的增加导致土壤侵蚀模数成倍增加,控制地表径流量是控制土壤侵蚀模数的关键因素。因此该类梯田急需通过修建拦蓄水设施合理调节地表径流,减少梯田级数,将地表径流量控制在 2 000  $m^3$  以内,有效降低侵蚀模数,保障梯田安全高效生产。

2.2 梯田一大棚对暴雨径流侵蚀的影响

由于梯田一大棚地势西高东低,大棚基部建有一定排水设施,每阶梯田形成的大部分径流并不进入下一阶梯田,而是流入梯田东边的道路上,因此各阶梯田发生的土壤侵蚀是由本阶梯田棚面以及大棚外侧空地产生的径流冲刷造成的,各阶梯田侵蚀情况见表 2。

起决定性作用。大棚面积直接决定棚面拦截的径流量,梯田侵蚀量与大棚棚面径流量关系如图 7 所示,可见,侵蚀量与棚面径流量成对数关系,回归得到侵蚀量与棚面径流量关系式如下:

$$M_s=19.281\ln Q-94.375,R^2=0.762 \quad (3)$$

式中: $M_s$ ——侵蚀量( $t$ ); $Q$ ——棚面累计径流量( $m^3$ )。

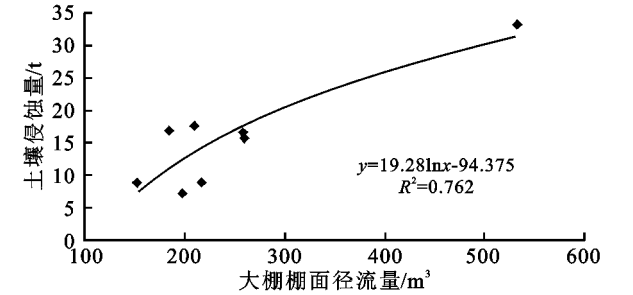


图 7 梯田一大棚侵蚀量与棚面径流量关系

2.3 梯田一水窖一苹果对暴雨径流侵蚀的影响

由表 3 可以看出,梯田侵蚀量与径流量呈正相关关系,梯田侵蚀量随着径流量的增大而增大,由梯田

顶部到底部侵蚀程度逐渐加重。第1阶梯田土壤侵蚀模数为774.91 t/km<sup>2</sup>,属于微度侵蚀;第2,3,4,6阶梯田土壤侵蚀模数分别为1 122.11,1 923.39,2 444.47,2 392.45 t/km<sup>2</sup>,属于轻度侵蚀;第5,7阶梯

田土壤侵蚀模数分别为3 070.24,4 637.33 t/km<sup>2</sup>,为中度侵蚀<sup>[17]</sup>。通过以上分析可知,梯田—水窖—苹果在遭遇极端降雨侵蚀条件下,各阶梯田土壤侵蚀程度较轻,都在中度侵蚀以下,没有发生强烈侵蚀。

表3 方塔村梯田—水窖—苹果暴雨过后土壤侵蚀情况

项目	梯田编号						
	1	2	3	4	5	6	7
梯田面积/m <sup>2</sup>	3600.43	2263.6	1871.7	2172.25	2048.7	2114.99	2050.75
汇水面积/m <sup>2</sup>	3600.43	5864.03	7735.73	9907.98	11956.68	14071.67	16122.42
水窖布设数量	3	1	2	0	1	1	0
水窖拦截径流量/m <sup>3</sup>	22.5	30	45	45	52.5	60	60
累积径流量/m <sup>3</sup>	337.76	556.75	729.04	946.39	1143.89	1348.01	1553.21
侵蚀量/t	2.79	2.54	3.60	5.31	6.29	5.06	9.51
侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> )	774.91	1122.11	1923.39	2444.47	3070.24	2392.45	4637.33
土地利用方式	苹果地	苹果地	苹果地	苹果地	苹果地	苹果地	苹果地

通过建立径流量与土壤侵蚀模数之间的关系如图8所示,得出地表径流量与土壤侵蚀模数之间的关系式如下:

$$M_s = 1.4179Q^{1.0777} \quad (R^2 = 0.9146) \quad (4)$$

式中: $M_s$ ——土壤侵蚀模数(t/km<sup>2</sup>); $Q$ ——径流量(m<sup>3</sup>)。

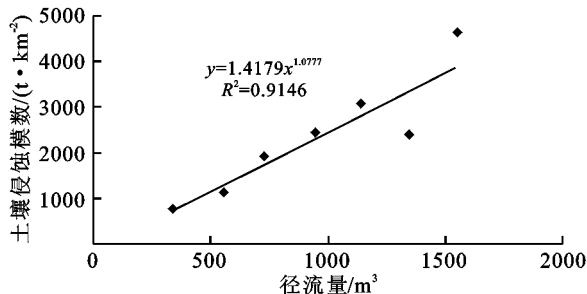


图8 方塔梯田苹果径流量与侵蚀模数关系

#### 2.4 3种梯田土壤侵蚀对比及防蚀措施

通过计算,得到3种梯田平均土壤侵蚀模数(图9)。梯田—大田平均土壤侵蚀模数最大,为23 921 t/km<sup>2</sup>,梯田—大田次之,为18 269 t/km<sup>2</sup>,梯田—水窖—苹果最小,仅为2 177 t/km<sup>2</sup>。在2013年黄土高原延安地区发生的持续时间长达4个月、累积降雨量高达1 000.6 mm的暴雨侵蚀条件下,梯田—水窖—苹果由于具有较完善的水沙调控措施,平均土壤侵蚀模数仅为梯田—大田的1/11,梯田—大田的1/8;而梯田—大田由于在大棚基部建有人工排水渠道,各个大棚产生的径流不累加,其平均土壤侵蚀模数是梯田—大田的76.37%,较之减少5 652.20 t/km<sup>2</sup>;而梯田—大田内部种植粮食作物或为裸地,无调控措施,其平均侵蚀模数超过该区多年平均(15 000 t/km<sup>2</sup>)的59%。因此带有较完善水沙调控措施的梯田—水窖—苹果防蚀效果明显好于带有简易排水沟的梯田—大田以及无水沙调控措施的梯田—大田。

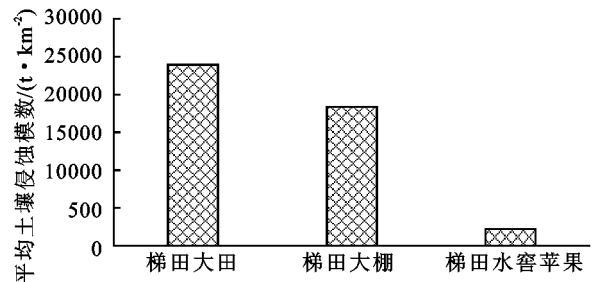


图9 3种梯田平均土壤侵蚀模数

梯田—水窖—苹果侵蚀较轻,是各种水沙调控措施共同作用的结果。水窖不仅收集降雨,起到直接拦截降雨径流、减少地表径流量的作用,而且水窖集流面作为梯田中的硬化面能够防止土壤受到雨滴的打击,减少溅蚀量;边坡白茅草可以增加梯田的稳定性,具有明显的蓄水保土作用<sup>[18]</sup>;苹果树树冠既减少了林下的径流量和径流速度,又推迟了降雨时间和产流时间;枯枝落叶层可以起到调节地表径流的作用<sup>[19]</sup>。虽然大棚作为硬化集流面可以防止棚面以下土壤受到侵蚀,但是由于棚面集流效率高,降雨产生的径流沿大棚基部冲刷土壤,每阶梯田侵蚀都较严重,有的侵蚀沟可达3 m深。而梯田—大田无水沙调控措施,各阶梯田产生的径流相互叠加,径流量越来越大,侵蚀也越来越严重,所以梯田—大田在暴雨径流侵蚀过程中由梯田顶部到底部表现出了从轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀、极强度侵蚀到剧烈侵蚀的演变过程,第6,7,8阶梯田累积侵蚀量占总侵蚀量的85.02%。

因此,在极端暴雨侵蚀下,梯田—水窖—苹果能够有效地调控降雨径流,是一种较为理想的梯田,可以作为示范梯田进行推广,但也应该定期对集流面和水窖运行情况进行检查、维护;梯田—大田由于棚面集流效率较高,大棚外侧土壤侵蚀较严重,需要进一步配置水沙调控设施减少侵蚀,比如在大棚基部修筑

渠道拦截棚面径流,并将径流收集在水窖内;而梯田一大田几乎没有水沙调控措施,土壤侵蚀最严重,上部梯田侵蚀较轻,下部梯田侵蚀相当严重。因此建议黄土丘陵沟壑区梯田级数应控制在5级以下以减少汇水面积,雨季来临前应将梯田田埂修建完整、结实,各阶梯田都应种植农作物,严禁裸地,有条件的地方可以修建反坡梯田,以减少径流叠加和侵蚀灾害。

### 3 结论

(1) 在2013年极端强降雨条件下,陕北黄土丘陵沟壑区带有水沙调控措施的梯田在防御极端暴雨侵蚀灾害过程中,防蚀效果明显好于无水沙调控措施的梯田。梯田—水窖—苹果侵蚀最轻,梯田—一大棚次之,梯田—一大田侵蚀最严重。

(2) 3种水沙调控措施梯田土壤侵蚀等级分布不同。梯田—水窖—苹果土壤侵蚀等级都在中度侵蚀以下;梯田—一大田由顶部到底部轻度侵蚀、中度侵蚀、强度侵蚀、极强度侵蚀、剧烈侵蚀等各种土壤侵蚀等级都存在,其中极强度侵蚀以上的梯田面积占总面积的64.26%;而梯田—一大棚由于棚面集流效率高,径流集中,除第7阶梯田为强度侵蚀外,其他所有梯田土壤侵蚀等级在极强度侵蚀以上。

(3) 黄土丘陵沟壑区应尽量减少梯田级数,以减少汇流面积;各阶梯田都应种植农作物,禁止裸地,有条件的地方可以修建反坡梯田;在梯田—一大棚外部可以修建水窖收集大棚棚面拦截的径流,既可以减少土壤流失,又能满足农作物灌溉需水,保障高效农业生产;梯田—水窖—苹果虽防蚀效果较好,但也应该定期进行检查、维护。

#### 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] 孙盛辉.鱼鳞坑在治理水土流失中的应用[J].水利科技与经济,2005,11(9):570.
- [3] 赵文礼.黄河流域的梯田[J].中国水土保持,1983(2):

38-42.

- [4] 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(3):57-63.
- [5] 孟岩,高建恩,杨世伟,等.基于径流调控的集雨补灌苹果利用模式研究[J].节水灌溉,2010(6):21-25.
- [6] 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(1):24-32.
- [7] 焦菊英,王万中,李靖.黄土丘陵区不同降雨条件下水平梯田的减水减沙效益分析[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1999,5(3):59-63.
- [8] 焦菊英,王万中.黄土高原水平梯田质量及水土保持效果的分析[J].农业工程学报,1999,15(2):65-69.
- [9] 吴发启,张玉斌,王健.黄土高原水平梯田的蓄水保土效益分析[J].中国水土保持科学,2004,2(1):34-37.
- [10] 徐乃民,张金慧.水平梯田蓄水减沙效益计算探讨[J].中国水土保持,1993(3):36-38.
- [11] 侯喜录,梁一民,曹清玉.人工林草植被蓄水减沙效益的研究[J].中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊,1991(1):105-112.
- [12] 张国华,张展羽,左长清,等.红壤坡地不同类型梯田的水土保持效应[J].水利水电科技进展,2007,27(2):77-79.
- [13] 张靖宇,杨洁,王昭艳,等.红壤丘陵区不同类型梯田产流产沙特征研究[J].人民长江,2010,41(14):99-103.
- [14] 延安地区水电局.延安地区实用水文手册[M].陕西延安:延安地区水电局,1971.
- [15] 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.
- [16] 魏兴琥,谢忠奎,李小雁,等.温室集雨与集雨水高效利用研究[J].干旱地区农业研究,2003,21(1):11-16.
- [17] 王文龙,穆兴民.评《黄土高原降雨侵蚀产沙与黄河输沙》一书[J].水土保持通报,1998,18(2):94.
- [18] 武艺,杨洁.梯壁植草的水土保持效益分析[J].南昌工程学院学报,2008,27(3):67-70.
- [19] 郑粉莉,刘峰,杨勤科,等.土壤侵蚀预报模型研究进展[J].水土保持通报,2001,21(6):16-18.