

具有水窖设施的梯田苹果地抗暴雨侵蚀研究

白先发^{1,3}, 高建恩^{1,2,3,4}, 张元星², 李慧娟^{1,3}, 吴丽娜⁴, 高塞青⁵, 张英英⁵

(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: 针对 2013 年延安地区极端暴雨径流侵蚀条件下土壤侵蚀严重、水土资源利用效率低等问题, 通过对陕北安塞县方塔村带有水沙调控措施的梯田—水窖—苹果水土流失状况进行定位监测, 基于收集的降雨资料, 研究该梯田内水沙调控措施在抗御暴雨条件下的防蚀作用和土壤侵蚀规律, 结果表明: 该梯田能够抗御暴雨的冲刷, 各阶梯田土壤侵蚀都在中度侵蚀以下, 平均土壤侵蚀模数仅为该区多年平均的 1/7。集中性的高强度降雨对黄土高原土壤侵蚀起决定性作用, 本文基于安塞水土保持试验站坡面土壤侵蚀预测预报模型, 给出了适宜该区具有水沙调控措施的梯田土壤侵蚀预测预报模型, 得到在 $I_{30} = 0.24 \text{ mm/min}$ 前提下, 当年降雨量小于 191.1 mm 时, 土壤能够维持较高的生产力; 当年降雨量小于 997.13 mm 时, 该区土壤侵蚀模数可控制在多年平均水平以内。梯田内修建的水窖、梯壁植草、地表枯枝落叶以及梯田质量等因素的综合作用在抗御暴雨侵蚀过程中起到了重要作用。

关键词: 水窖; 防蚀作用; 暴雨; 梯田; 黄土高原

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)04-0247-06

Study on Anti-erosion in Apple Orchard Terrace with Water Cellar

BAI Xianfa^{1,3}, GAO Jianen^{1,2,3,4}, ZHANG Yuanxing²,
LI Huijuan^{1,3}, WU Lina⁴, GAO Saiqing⁵, ZHANG Yingying⁵

(1. *Research Center of Institute 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. *the Bureau of Meteorology of Ansai County, Ansai, Shaanxi 717400, China*)

Abstract: In order to solve the problem of severe soil erosion and low use efficiency of water and soil resources, based on the collected rainfall data and field soil erosion monitoring in terraces with water and sediment regulation measures in Ansai County, north Shannxi Province, we analyzed the anti-erosion effect and mechanism of soil erosion in terraces with water and sediment regulation measures in the process of resisting the rainstorm disaster. The results showed that the terraces had the ability to resist rainstorm erosion with the degree of all the levels of terraces with middle erosion, and the average soil erosion modulus was one-seventh of annual mean value. Concentrated and high intensive rain played an important role in contributing to soil erosion modulus. Based on the corrected soil erosion forecasting model that is fit for the terraces in this region, when I_{30} is 0.24 mm/min, soil can maintain high productivity if annual precipitation is less than 191.1 mm, and soil erosion modulus can be controlled within annual mean value if annual precipitation is less than 997.13 mm. The comprehensive effects of cellar constructed in the terrace, planting grass on the side slope of terrace, the litter mulch on the terrace and terrace quality played the important role in resisting the rainstorm-induced disaster in the terrace.

Keywords: water cellar; anti-erosion effect; rainstorm; terrace; Loess Plateau

收稿日期: 2014-09-16

修回日期: 2014-09-26

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目课题(2011BAD31B05); 陕西省科技统筹创新工程计划(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(A315021304)

第一作者: 白先发(1989—), 男, 山东淄博人, 硕士, 主要从事土壤侵蚀研究。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, 从事地表径流调控与利用研究。E-mail: gaojianen@126.com

干旱缺水与水土流失严重是黄土高原发展高效农业的一个主要限制性因素,而解决这一问题的有效途径是调控降雨径流,高效利用水土资源,建设人与自然和谐的生态环境^[1]。梯田苹果+集流面+水窖作为一种高效利用水土资源的复合水沙调控措施,不仅能够适时满足作物的需水、增加作物产量和经济效益,还能有效减少水土流失,在该地区已经得到广泛的应用^[2-3]。

目前,针对农业生产性梯田布置合理水沙调控措施后的蓄水保土效益研究报道还很少,大多数研究还是基于观测径流小区,以相同坡度的坡耕地作为对照,分析水平梯田的减水减沙效益^[4-5]。2013年6—9月,黄土丘陵沟壑区特别是延安安塞地区发生超强降雨,此降雨使部分道路阻断、土地大面积冲毁、农作物大幅度减产甚至绝产,给当地人民生命财产造成了极大的损失。而在此次暴雨侵蚀条件下,安塞县沿河湾镇方塔村梯田—水窖—苹果受损程度较轻,基本安然无恙。因此,本文针对农业生产性梯田上所发生的时间长、累积降雨量高的暴雨所导致的土壤侵蚀进行定位监测,以该区建立的裸坡土壤侵蚀预测预报模型为依据,分析该梯田水沙调控措施在抗御暴雨侵蚀中的

防蚀作用并进行预测预报,探究影响梯田土壤侵蚀的因素,提出相应的防蚀措施建议,以期为其他地区梯田科学合理修建提供科技支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

安塞县地处西北内陆黄土高原腹地,位于东经 $108^{\circ}50'$ — $109^{\circ}26'$,北纬 $36^{\circ}30'$ — $37^{\circ}19'$,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°C ,年平均降水量 505.3 mm ,降水主要分布在6—9月,海拔 $1\ 012\sim 1\ 731\text{ m}$ 。本研究区的梯田位于安塞县城西南处沿河湾镇方塔村,北纬 $36^{\circ}80'$,东经 $109^{\circ}26'$,海拔高度 $1\ 236\text{ m}$ 。研究选取七阶梯田,梯田总体坡度为 15° ,从上到下依次编号为1—7号。梯田内布设有集流面积为 40 m^2 ,蓄水体积为 7.5 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 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 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。

表 1 水窖布置情况和各阶梯田土壤容重

项目	梯田编号						
	1	2	3	4	5	6	7
水窖数量/个	3	1	2	0	1	1	0
蓄水体积/ m^3	22.5	7.5	15	0	7.5	7.5	0
土壤容重/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.18	1.23	1.21	1.15	1.24	1.16	1.25

1.2 数据来源与处理

本研究所使用的仪器是 Leica(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 $1\text{ mm}+1.5\text{ ppm}$,利用 GPS 测量某些固定点的经纬度,利用莱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 月对三种梯田地形进行测量,获得了三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。根据陕西省水利厅公布的降雨资料,2013 年 6—9 月安塞县共降雨 $1\ 000.6\text{ mm}$,由于降雨的差异性,研究区累积降雨量为 778.7 mm ,通过该梯田安装的自动气象站统计 2013 年 6—9 月日降雨量分布如图 1 所

示。根据《延安地区实用水文手册》和已有研究^[6-7]取径流系数为 $K=0.1$ 。利用环刀法,通过测定土壤深度为 $20\sim 30\text{ cm}$ 土壤容重,土壤容重测量结果如表 1 所示,取土壤平均容重为 1.20 g/cm^3 。

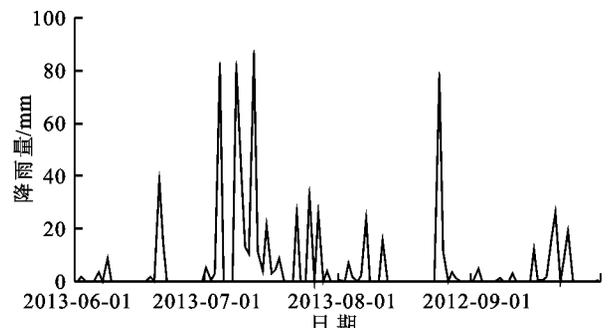


图 1 方塔村 2013 年 6—9 月日降雨量分布

2 结果与分析

2.1 降雨特性

2013 年 6—9 月研究区内共降雨 778.7 mm ,降雨次数为 83 次,各次降雨的雨量值具有很大差异,不同等级的降雨出现频率如表 2 所示。

表2 不同等级降水及其出现频率

项目	降水等级/mm									合计
	0~1	1~5	5~10	10~20	20~30	30~40	40~50	70~80	80~90	
降水次数	35	20	8	8	6	1	1	2	2	83
出现频率/%	42.17	24.10	9.64	9.64	7.23	1.20	1.20	2.41	2.41	100
累积降雨量/mm	12.0	59.6	60.1	109.3	147.9	38.1	41.0	147.9	162.8	778.7
平均次降雨量/mm	0.34	2.98	7.51	13.66	24.65	38.10	41.00	73.95	81.40	283.59
占总雨量/%	1.54	7.65	7.72	14.04	18.99	4.89	5.27	18.99	20.91	100

从表2中可以看出,降水等级与降水次数、出现频率呈负相关关系,而与累积降雨量、平均次降雨量、占总雨量百分比呈正相关关系。其中以雨量在0~1 mm的降雨次数最多,共35次,频率为42.17%,但是其累积降雨量仅为12.0 mm,占总雨量的1.54%;虽然雨量在80~90 mm的降雨量只有两次,频率为2.41%,但是累积降雨量占总雨量的20.91%。这说明在低降水等级区,虽然其降雨次数多、出现频率高,但是其累积降雨量低,降雨相对分散,因此对土壤侵蚀贡献率低;而在高等级降雨区,虽然其降雨次数少,但是降雨量大且集中,其对土壤侵蚀的贡献率远远大于降雨次数多但总降雨量少的低等级降雨。根据中国科学数据共享服务网延安站1951—2012年月最大降雨量数据利用适线法计算确定了延安地区7月最大降雨量出现的频率小于0.01%,重现期大于10 000年,超过10 000年一遇暴雨。

2.2 土壤侵蚀分析

2013年进入汛期以后,受冷空气和副热带高压外围偏南湿气流的影响,研究区域从6月到9月持续降雨,累计降雨量达778.7 mm,是该区域年平均降水量的1.5倍,最大月降水量高达467 mm,利用上述对延安站1951—2013年最大月降雨量分析得知,该降雨为5000年一遇暴雨。通过对安塞县农田土壤侵蚀状况大量实地调查发现,很多梯田发生严重土壤侵蚀,农作物大量减产,经济损失比较严重。例如马家沟龙泉寺的梯田一大棚,由于大棚集流效率非常高,大棚外侧的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;曹辛庄的梯田一大田由于缺少水沙调控措施,从上到下侵蚀程度不断增加,底部梯田侵蚀沟达2 m深,3 m宽。但是本研究区梯田受损程度较轻,仅在内部出现较浅侵蚀沟或者在边埂处出现土壤断裂裂痕,通过野外定位监测得到各阶梯田侵蚀情况如表3所示。

表3 方塔典型梯田侵蚀情况

项目	梯田编号						
	1	2	3	4	5	6	7
梯田面积/m ²	3600.43	2263.60	1871.70	2172.25	2048.70	2114.99	2050.75
径流量/m ³	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 ⁻²)	774.91	1122.11	1923.39	2444.47	3070.24	2392.45	4637.33

从表3中可以看出,从梯田上部到下部,侵蚀量和侵蚀模数呈现逐渐增加的趋势,这是由于越靠下部的梯田其上方来水量越大。该梯田在暴雨冲刷条件下最大侵蚀模数<5 000 t/(km²·a),平均土壤侵蚀模数为 $M_{s_{\text{实测}}}=2\ 177\ \text{t}/\text{km}^2$,属于轻度侵蚀,而安塞地区多年平均侵蚀模数为15 000 t/km²,属于极强度侵蚀^[8]。在遭遇强降雨侵蚀冲刷条件下,本研究区梯田平均土壤侵蚀模数仅为该区多年平均侵蚀模数的1/7,是梯田内各种水沙调控措施综合作用的结果。

图2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:

$$M_s = 1.4169Q^{1.0777}, R^2 = 0.9146 \quad (1)$$

式1中: M_s ——土壤侵蚀模数(t/km²); Q ——地表径流量(m³)。

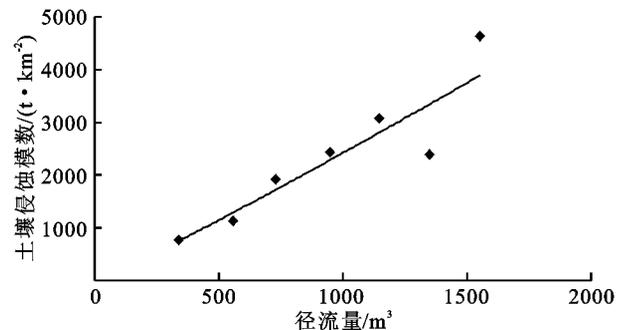


图2 地表径流量和土壤侵蚀模数关系

从图2中可以看出,土壤侵蚀模数随地表径流量呈幂函数关系,土壤侵蚀模数随地表径流量增加而增加,而且其增加速度大于径流量增加速度,因此控制地表径流量是保障梯田安全生产的关键因素。目前,关于坡耕地改为梯田后的土壤侵蚀预测预报模型研究较少,大多数研究是基于多年径流小区观测资料,

利用多元统计分析得出坡面土壤侵蚀模型。因此我们根据已有研究成果^[9],统计出次降雨量在 10 mm、平均雨强在 0.04 mm/min 以上的侵蚀性降雨共 13 次(表 4),这 13 次集中性降雨对研究区土壤流失量起到了决定性作用。

表 4 方塔侵蚀性降雨统计

编号	$I_{30}/$ (mm·min ⁻¹)	降雨量/ mm	降雨 历时/h	平均雨强/ (mm·min ⁻¹)
1	0.34	38.1	10	0.06
2	0.64	81.9	8	0.17
3	0.20	70.3	16	0.07
4	0.14	41.0	18	0.04
5	0.21	86.6	24	0.06
6	0.25	21.2	6	0.06
7	0.07	26.7	11	0.04
8	0.19	27.4	9	0.05
9	0.24	26.1	6	0.07
10	0.14	15.7	3	0.09
11	0.40	76.6	11	0.12
12	0.13	16.6	7	0.04
13	0.14	26.1	9	0.05

在众多土壤侵蚀模型中,与本研究最相似的是贾志伟、江忠善等人在安塞水土保持试验站的研究成果。利用 1985—1991 年安塞水土保持试验站径流小区观测资料,得到裸露农地基准状态下坡面土壤侵蚀模型^[8,10]:

$$M=5.097P^{0.999}I_{30}^{2.637}S^{0.880}L^{0.286} \quad (2)$$

式中: M ——裸地基准状态下次降雨侵蚀模数(t/km^2); P ——次降雨量(mm); I_{30} ——次降雨量最大 30 min 降雨强度(mm/min); S ——坡度($^\circ$); L ——坡长(m)。

贾志伟^[10]基于安塞水土保持试验站天然降雨定位试验观测资料,在不同坡度条件下研究了土壤侵蚀模数与复合因子 PI_{30} 的关系,其研究结果如表 5 所示。

表 5 不同坡度条件下侵蚀模数与符合因子 PI_{30} 的统计分析结果

$s/(^\circ)$	A	a	r
5	1.8476	1.4984	0.797
10	2.6172	1.6709	0.78
15	3.8543	1.7059	0.749
20	4.8453	1.7064	0.761
26	5.0198	1.7743	0.748
28	6.4579	1.6878	0.745

注: s 为坡度; A , a 为经验参数; r 为相关系数。

模型的一般表达式为:

表 6 次降雨侵蚀模数计算值

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
计算侵蚀模数/($t \cdot km^{-2}$)	117.65	1221.30	134.95	31.21	212.60	25.48	4.94	25.20	35.27	6.16	497.15	5.48	13.47

由表 6 可得,第 2,11 次降雨由于 I_{30} 和总降雨量 P 都较大,两者降雨量之和占总雨量的 28.59%,侵

$$M_s = A \times (P \cdot I_{30})^a \quad (3)$$

式中: M_s ——不同坡度下次降雨土壤侵蚀模数(t/km^2); P ——次降雨量(mm); I_{30} ——次降雨最大 30 min 降雨强度(mm/min)。

通过分析,我们可以看出式(2)中变量较多,当将该模型应用到梯田土壤侵蚀中时,变量的参数难以确定,而在表 5 和式(3)中我们发现模型的参数只有 2 个,较式 2 简化不少,而且研究表明次降雨侵蚀模数与 PI_{30} 之间有密切的关系^[8]。式(3)是在坡度一致的裸露坡耕地上基于多次天然降雨和土壤侵蚀资料得出的,因此其适用性也是有条件的。根据我们对本研究梯田地形测量的结果,7 阶梯田总体坡度为 15.4 $^\circ$,但是该梯田经坡地改为梯田后,其地形已经较原来发生了较大的变化,分梯田田坎和水平田面两部分,其次我们无法将某一坡度下的模型应用到该梯田土壤侵蚀预测预报中。但通过对表 5 分析可知,经验参数 a 是一个与符合因子 PI_{30} 有关系的参数,在不同坡度条件下其变化范围在 1.49~1.69 之间,变化幅度不大;而 A 是一个调节次降雨侵蚀模数的参数,在不同坡度条件下其变化范围在 1.8~6.5 之间,变化范围较大。这就说明 a 是一个与侵蚀模数和复合因子 PI_{30} 具有某种确定的内在联系的参数,它主导侵蚀模数的变化趋势,而 A 是为了满足模型模拟的准确性的一个参数。我们选取不同坡度下 a 的平均值 $\bar{a}=1.6740$ 作为经验参数 a 的值,通过实测土壤侵蚀模数来反求该模型中另一个经验参数 A^* 。

根据式(3),13 次降雨的总侵蚀模数为:

$$\begin{aligned} M_{s\text{实测}} &= M_{s1} + M_{s2} + \dots + M_{s13} \\ &= A(P_1 I_{1,30})^a + A(P_2 I_{2,30})^a + \dots + A(P_{13} I_{13,30})^a \end{aligned} \quad (4)$$

式中: M_{s_i} ——第 i 次降雨所产生的侵蚀模数(t/km^2); $I_{i,30}$ ——第 i 次降雨最大 30min 降雨强度(mm/min)

求得 $A^* = 1.6160$,由此我们计算得出了适宜本研究区梯田的土壤侵蚀预测模型如式(5)所示。

$$M_s = 1.6160 \times (P \cdot I_{30})^{1.6740} \quad (5)$$

通过与表 5 中不同坡度条件下的经验参数 A 相比较,我们发现 $A^* < A$,这也说明修正经验参数后的模型比较合理。利用上述式(5)算各次降雨所产生的土壤流失量,如表 6 所示。

蚀模数之和竟然占到了总侵蚀模数的 73.73%;第 5 次降雨虽然降雨量最大为 86.6 mm,占总降雨量的

15.62%,但 I_{30} 相对第2和第11次降雨来说为小,降雨历时长达24 h,因此该次降雨产生的土壤侵蚀模数只有 212.60 t/km^2 ,占总量的9.12%;对于其他几次降雨,不管是 P 还是 I_{30} 都较小,因此对侵蚀模数贡献率不大,仅占总量的16.51%。通过以上分析也再次验证了引起黄土高原严重土壤侵蚀的降雨往往是少数降雨强度大、短历时暴雨这一事实。

本研究区多年平均土壤侵蚀模数达 $15\ 000 \text{ t/km}^2$,根据《水土保持技术规范》^[11],本研究区容许土壤流失量为 $1\ 000 \text{ t/km}^2$ 。利用上述求得的安塞县方塔村土壤侵蚀预报模型,选取2013年6—9月13次侵蚀性降雨的最大30 min降雨强度的平均值 $I=0.24 \text{ mm/min}$,我们得到当年降雨量小于 193.8 mm 时,土壤能够维持较高的生产力;当年降雨量小于 977.13 mm 时,该区侵蚀模数可控制在多年平均水平以内。而该区多年平均降雨量为 505.3 mm ,这也间接说明了研究区水沙调控措施具有很大的水土保持效益。

2.3 防蚀效果影响因素探究

2.3.1 水窖 经2013年陕北黄土高原发生的超强降雨侵蚀灾害检验,黄土丘陵沟壑区梯田内修建水窖是一种较为合理的水沙调控措施。水窖不仅收集降落到集雨面上的降雨并贮存起来,起到直接拦蓄降雨径流、减少地表径流量的作用,使得水资源时间分配不均问题得到合理解决,促进农业高效生产,而且还作为梯田中的硬化面防止土壤受到雨滴的打击,在一定程度上减少了暴雨径流侵蚀条件下的土壤侵蚀量^[1]。

2.3.2 梯壁白茅边坡防护 梯壁植草是指种植草类植物以防止梯壁的土壤侵蚀。本研究区每阶梯田边坡有大量自然生长的白茅草,覆盖度达80%以上,白茅草根长度可达2 m。梯壁植草是一种效果较好的水沙调控措施,该项技术可以增加梯田的稳定性,具有明显的蓄水保土作用。武艺等^[12]通过研究表明梯壁植草不光可以保护梯壁表面不受雨水等外营力对梯壁的冲刷,而且草类的侧根互相缠绕形成具有一定抗张强度的根网,将根际土壤固结为一整体,加强了土体的稳定性,同时垂直根系的浅层土层锚固到深处较稳定的土层,更增加了土体的稳定性;裸露梯壁样地的年均土壤侵蚀量是植草梯壁典型样地的9倍以上,年均地表径流率是植草梯壁样地的3倍以上。

在遭遇强降雨径流冲刷条件下,研究区梯田在梯壁白茅的防护作用下,7阶梯田边坡只有1处发生土壤侵蚀,侵蚀量为 1.73 t ,由此表明梯壁植草在暴雨侵蚀作用下的防蚀作用意义重大,这也与张国华的研究结果相似。

2.3.3 梯田内苹果经济林及枯枝落叶蓄水保土作用 地表的枯枝落叶层可以起到调节地表径流的作用,直接承受落下的雨水,保护地表免遭雨滴的溅击,而且枯枝落叶层结构越疏松,其吸水能力和透水性也就越强。当其吸水饱和以后,多余的水分通过枯枝落叶层深入土壤,变成地下水,因而大大减少了地表径流^[13]。有研究表明枯枝落叶层所涵蓄的降水达到了农地径流量的62.9%,它具有的保持土壤的能力,足以使坡面森林采伐后不会出现新的水土流失^[14]。山杨枯枝落叶能够显著地提高土壤的抗冲性,1 cm能够减少土壤冲刷量83.2%,2 cm能更有效的控制土壤冲刷量^[15]。油松林地1.5 cm厚枯枝落叶层能减少土壤击溅侵蚀97.5%,2 cm可完全防止土壤击溅侵蚀发生^[16]。

梯田内苹果树冠在减少土壤侵蚀过程中起到了一定作用。在降雨过程中,苹果树冠改变了雨水落地方式,一方面减少了林下的径流量和径流速度,另一方面,又推迟了降雨时间和产流时间,缩短了林地土壤侵蚀的过程,使侵蚀量大大减少。此外,枯枝落叶层还能增加地表粗糙度,降低径流速度。周素萍^[17]通过野外径流小区观测试验,对贵州喀斯特地区不同生物措施的水土保持效果进行了研究,结果表明,各种生物措施的水土保持效果为经济林>人工草地>水保林,以撂荒坡耕地为对照,经济林(梨树)的保水和保土效果均优于其他生物措施。

2.3.4 梯田质量 水平梯田的质量对其减水减沙效益影响很大,焦菊英等^[18]通过研究黄土丘陵区水平梯田的减水减沙效益研究发现,有埂水平梯田在 PI_{30} 为 $4.4\sim 45 \text{ mm}^2/\text{min}$ 的范围内减水减沙效益均为100%,比无埂梯田减水减沙效益分别为75%和94.5%,梯田质量是其充分发挥水土保持作用的保证。本研究梯田边埂部分被破坏,田面略微向内倾斜,为内斜式梯田,内外平均高差为10 cm,按照徐乃民等^[19]对梯田质量的分类标准和焦菊英的研究结果,本梯田属于第二类梯田,在持续时间长、径流量大的暴雨侵蚀中,梯田质量发挥了重要的作用。

3 结论及建议

(1) 黄土丘陵沟壑区梯田—水窖—苹果能够抵御超强降雨的冲刷,是一种较为理想的解决农业发展的模式,各阶梯田土壤侵蚀都在中度侵蚀以下,平均土壤侵蚀模数仅为该区多年平均的1/7。

(2) 集中性的高强度降雨对黄土高原土壤侵蚀起决定性作用,通过修正的适宜该区具有水沙调控措施梯田的土壤侵蚀模型,得到在 $I_{30}=0.24 \text{ mm/min}$

前提下,当年降雨量小于 191.1 mm 时,土壤能够维持较高的生产力;当年降雨量小于 930.6 mm 时,该区侵蚀模数可控制在多年平均水平以内。

(3) 梯田内修建的水窖、梯壁植草、地表枯枝落叶以及梯田质量等因素的综合作用在抗御暴雨侵蚀过程中起到了重要作用。仅靠水土保持林草措施无法使梯田不受侵蚀,应因地制宜地采用水土保持林草措施和工程措施相结合的方法保障梯田的安全高效生产。

(4) 建议该区梯田级数控制在 5 级以内,梯田内水沙调控设施应定期检查维护,梯田田埂应完整结实,以阻挡径流累积,减少土壤侵蚀。

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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 延安地区水电局.延安地区实用水文手册[M].陕西延安:陕西省延安地区水利水土保持局,1987.
- [7] 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.
- [8] 刘秉正,吴发启.土壤侵蚀[M].西安:陕西人民出版社,1997.
- [9] 谢云,刘宝元,章文波.侵蚀性降雨标准研究[J].水土保持学报,2000,14(4):6-11.
- [10] 贾志伟,江忠善,刘志.降雨特征与水土流失关系的研究[J].中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊,1990,12(2):9-15.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 张科利,蔡永明,刘宝元,等.黄土高原地区土壤可蚀性及其应用研究[J].生态学报,2001,21(10):1687-1695.
- [14] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等.森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(2):23-28.
- [15] 赵鸿雁,吴钦孝,刘向东.山杨枯枝落叶的水文水保作用研究[J].林业科学,1994,30(2):176-180.
- [16] 赵鸿雁,吴钦孝,刘国彬.黄土高原人工油松林枯枝落叶层的水土保持功能研究[J].林业科学,2003,39(1):168-172.
- [17] 周素萍,张兴奇,张科利,等.贵州喀斯特地区不同生物措施的水土保持效果[J].贵州农业科学,2011,39(4):117-120.
- [18] 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.
- [19] 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):32-34.

(上接第 246 页)

- [4] 高占义.中国的灌溉发展及其作用[J].水利经济,2006,24(1):36-39.
- [5] 彦明,高淑桃.粮食单产影响因素的计量分析[J].新疆农垦经济,2005(12):5-8,20.
- [6] 党安荣,阎守邕.建国以来我国粮食单产的时序变化研究[J].中国农村观察,1998(3):7-11.
- [7] 张营周.我国粮食单产及其影响因素的协整分析[J].生态经济,2010(8):129-132.
- [8] 蔡文春,杨德刚.新疆耕地和粮食灰色关联分析[J].干旱区资源与环境,2007,21(11):54-58.
- [9] 郭淑敏,马帅,陈印军.我国粮食主产区粮食生产影响因素研究[J].农业现代化研究,2007,28(1):83-87.
- [10] 马惠兰,刘英杰,孙长平.新疆粮食生产与影响因素分析[J].农业技术经济,2010(11):96-99.
- [11] 柳长顺,杜丽娟,陈献,等.近 20a 我国有效灌溉面积动态分析[J].资源科学,2006,28(2):8-12.
- [12] 姜宁,付强,孙颖娜.基于 Logistic 模型的黑龙江省西部半干旱区有效灌溉面积分析[J].水土保持研究,2010,17(12):174-177.
- [13] 杜晓梅,琪美格,瓦哈甫等.新疆有效灌溉面积动态变化[J].农业系统科学与综合研究,2008,24(3):284-288.
- [14] 王鹤华.江苏省有效灌溉面积发展分析[J].治淮,2007(10):19-20.
- [15] 侯薇,刘小学,魏晓妹.陕西关中地区农业水土资源时空匹配格局研究[J].水土保持研,2012,9(1):134-138.
- [16] 刘春成,朱伟,庞颖,等.区域灌溉水利用率影响主因分析[J].灌溉排水学报,2013,32(4):40-43.
- [17] 万玉文,苏超,方崇.我国大中型灌区有效灌溉面积的灰色预测[J].人民长江,2011(15):96-98.
- [18] 李建伟,魏伟,陈沛然,等.农田有效灌溉面积的预测方法及应用[J].湖北农业科学,2013,52(9):2157-2160.
- [19] 何自立,马孝义,靳国云,等.基于新陈代谢 GM(1,1)-Markov 链模型的有效灌溉面积预测[J].灌溉排水学报,2011,30(4):107-110.