

极端暴雨条件下黄土高原水平梯田损毁情况调查分析 ——以岔巴沟流域“7·26”特大暴雨为例

郭晋伟, 何亮, 裴志林, 吕渡, 雷斯越, 张晓萍

(西北农林科技大学 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:2017 年 7 月 25 日 20 时至 26 日 8 时, 陕西榆林市 11 个县遭遇特大暴雨侵袭, 我们于当年 10 月对位于暴雨中心的岔巴沟流域的梯田损毁情况进行了专项调查。首先通过室内 Google Earth 近实时影像结合 GIS 绘图在流域内确定梯田位置和数量, 根据修建时间、利用和植被类型将这些梯田分类。在流域内空间分布均匀地选择不同类型典型梯田并进行野外实地测量, 统计各类型梯田的损毁情况、损毁形式并估算各类型梯田的土壤侵蚀模数及其流域平均侵蚀模数。结果表明: 岔巴沟流域梯田以 $\leq 4 \text{ hm}^2$ 规模为主, 梯田数量上占 91.4%, 面积上占了 50.7%。暴雨造成梯田的损毁形式以田埂表层结皮脱落、田埂滑塌崩塌、田埂冲毁、田面陷穴穿洞为主, 有人为干扰时会产生更加剧烈的后果。暴雨造成的梯田损毁侵蚀坑大部分为深度 0~0.5 m 的侵蚀。老梯田农地、老梯田乔木和老梯田草地侵蚀坑发生频率远远多于新机修梯田, 保持在 20~36 处/100 m。新机修梯田的侵蚀测坑发生频次少, 为 5 处/100 m, 但深度可达 4.8 m, 后果严重。不同类型梯田损毁产生侵蚀模数差异较大, 老梯田农地、老梯田草地和老梯田乔木的侵蚀模数为 34 000~37 000 t/km^2 , 新机修梯田为 19 404.3 t/km^2 , 老梯田灌木侵蚀模数最低, 为 5 958.4 t/km^2 。流域内梯田平均侵蚀模数为 30 733.4 t/km^2 。通过本次调查, 掌握不同类型梯田在极端暴雨条件下的损毁情况, 为黄土高原梯田保护及修复提供数据支持。

关键词:极端暴雨; 水平梯田; 损毁; 土壤侵蚀; 岔巴沟流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)06-0107-07

Investigation and Analysis of Damage of Horizontal Terraced Fields Under Extreme Rainstorm Conditions in the Loess Plateau —Taking the 7·26 Torrential Rain in the Chabagou Watershed as an Example

GUO Jinwei, HE Liang, PEI Zhilin, LÜ Du, LEI Siyue, ZHANG Xiaoping

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of
Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: From 20:00 on July 25 to 8:00 on July 26, 2017, 11 counties or districts in Yulin, Shaanxi Province were hit by torrential rains. In October of that year, we conducted a special investigation on the damage of terraces in the Chabagou Valley in the rainstorm center. First, the location and number of terraces were determined in the basin by Google Earth imagery combined with GIS mapping, and these terraces were classified according to construction time, utilization and vegetation type. We evenly selected different types of typical terraces in the basin in the spatial distribution and conducted field measurements on terraces. We calculated the damage and damage patterns of various types of terraces and estimated the soil erosion modulus of each type of terraces and the average erosion modulus of the basin. The results show that the number and area of terraces in the Chabagou watershed are the main scale of $<4 \text{ hm}^2$, accounting for 91.4% of the number and 50.7% of the area, the surface crust removal of terrace wall, terrace wall collapse, the ridge damage, and the hole development of terrace surface were the main damage forms of the terrace. The failure of the terrace was very severe under human disturbance. The depth of the eroded pits caused by heavy rain in

收稿日期: 2019-03-09

修回日期: 2019-04-08

资助项目: 国家自然科学基金“黄土高原径流泥沙过程对土地利用变化的响应及其区域差异”(41877083, 41440012)

第一作者: 郭晋伟(1994—), 男, 山西长治人, 硕士生, 从事土壤侵蚀模型应用研究。E-mail: 383940234@qq.com

通信作者: 张晓萍(1971—), 女, 河南焦作人, 博士, 研究员, 从事区域水土流失规律和水土保持等研究。E-mail: zhangxp@ms.iswc.ac.cn

the terraces ranged from 0 m to 0.5 m. The frequency of erosive pit occurrence of old terraced farming fields, old terraced meadow fields, and old terraced forestland was basically the same, and it was much greater than the newly machine-built terraces, which was 20~36 pits/100 m. The erosion pit of newly machine-built terrace has a low frequency of occurrence, which was 5 pits/100 m, but the maximum depth of the pit was 4.8 m, it caused the serious damage to the machine-built terrace. The erosion modulus of different types of terraced fields was quite different. The erosion modulus of old terraced farming fields, old terraced meadow fields and old terraced forestland ranged from 34 000 t/km² to 37 000 t/km², the soil erosion modulus of the newly machine-built terraces was 19 404.3 t/km², and old terraced shrub field had the lowest erosion modulus which was 5 958.4 t/km². The average erosion modulus of terraces in the basin was 30 733.4 t/km². Through this survey, we will grasp the damages of different types of terraced fields under extreme rain conditions, and provide data support for the protection and restoration of terraces in the Loess Plateau.

Keywords: extreme rainstorm; horizontal terraces; damage; soil erosion; Chabagou watershed

黄土高原位于黄河中上游,是中国历史悠久的农耕文化发展中心^[1]。受地理位置影响,气候具有干旱特征,剧烈的水土流失和生活的贫困是面临的严重生态和社会问题^[2]。梯田是坡度>25°坡面水土保持的主要工程措施之一^[3-4],不仅可以显著改善土壤水分条件^[5-6],提高农作物产量^[7-8],还能大幅减少所在坡面的产沙数量,降低沟谷侵蚀程度^[9],在重建和改善生境方面发挥着重要作用^[10]。降雨是引起水土流失的前提条件和动力条件^[11]。在一定的降雨强度下,水平梯田的防蚀效益可以达到95%以上^[12]。当降雨强度大于一定程度后,水平梯田的减水减沙效益随着降雨强度的增大而减小^[11]。当降雨径流超过一定的值时,梯田就被冲毁^[13]。2017年7月25日20时至26日8时,黄土高原无定河中下游地区遭到大暴雨侵袭,此次暴雨历时短、强度大,次雨量、日雨量和24 h累积雨量均达到500年一遇^[14]。暴雨中心区集中在子洲县殿市镇的小理河流域和绥德县四十里铺的无定河流域,12 h最大降雨量为子洲县水地湾站236.6 mm、李家河站217.8 mm、绥德县赵家砭站257.7 mm^[15]。截至7月27日8时,暴雨洪水造成榆林子洲、榆阳、绥德、延安子长4个县区14个乡镇(社区中心)25.47万人受灾,1座小二型水库(清水沟)漫溢决口,农作物、淤地坝、水井、通讯、电力、交通设施受到严重损坏,因灾造成直接经济损失16.89亿元^[16]。

岔巴沟流域位于子洲、绥德暴雨中心区域,流域内的梯田也受到了不同程度的损毁。项目组于2017年10月份对岔巴沟流域内的梯田进行调查。通过本次调查,了解不同类型梯田、不同利用方式、不同植被覆盖等情况下暴雨对梯田的损毁情况,分析其对暴雨产生水土流失的防治效果,有利于分析黄土高原地区极端事件下水土保持成效,为生态环境建设和可持续发展提供科技支持。

1 流域概况

岔巴沟流域位于109.5°—110.1°E,37.5°—37.8°N,属黄土丘陵沟壑区第一副区^[17],为大理河的一级支流,无定河的二级支流,流域面积205 km²,包括13条支沟,沟道长度24.1 km,流域平均宽度7.22 km,切割深度50~250 m,沟壑密度1.05 km/km²^[18]。属于干旱半干旱气候,多年平均降雨量约450 mm,60%以上集中在6—8月,以短历时暴雨为主,最大雨强215 mm/h^[19]。地势西北高、东南低,是典型的黄土高原丘陵沟壑区。流域主要为河谷阶地和丘陵沟壑两种地貌,沟壑纵横交错^[20]。以黄土母质发育的黄绵土为主,土壤颗粒中大于0.05 mm含量约为25.8%,在0.01~0.05 mm之间约为57.7%,小于0.01 mm含量约为16.5%,土壤颗粒中以粉粒为主,极容易被侵蚀。黄土层厚度50~100 m,侵蚀剧烈,面蚀、沟蚀、重力崩塌等作用十分强烈,流域多年平均侵蚀模数15 780 t/km²。

岔巴沟流域内人口为12 000余人,耕地53 km²左右。乡镇和村落主要分布在左岸,人口较右岸稠密^[21]。流域内梯田广泛分布,其中一部分是1977年前修建的窄幅老梯田,一部分为近些年机械修建的宽幅新梯田。窄幅老梯田一部分还持续耕作,一部分已经退耕还林草。

2 调查方法

2.1 流域内梯田类型及分布调查

遵循科学、简洁、高效的基本原则,本次调查工作主要采用Google Earth和GIS绘图作业、野外调研及实地测量,室内数据处理及统计等方法,对岔巴沟流域不同类型梯田情况进行调查。

以Google Earth影像为数据源,利用Google Earth和GIS平台对岔巴沟流域具有梯田纹理的区

域进行确认并勾勒线条,见图 1,确认流域内梯田的面积和位置分布情况。Google Earth 中岔巴沟流域影像时间为 2017 年 5 月 12 日,可以很好地反映出近期梯田位置和梯田利用方式等信息,为野外调查提供了扎实的数据基础。2017 年 9—10 月间,共勾勒梯田斑块 1 404 块,经过实地考察之后,对所勾勒的 1 404 块梯田进行再次确认,去除 85 块非梯田斑块,剩余 1 319 块梯田,面积总计 25.24 km²,约占岔巴沟



图 1 Google Earth 影像岔巴沟流域
梯田斑块及线条勾勒

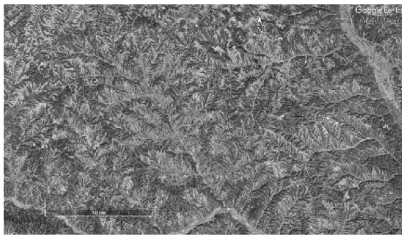


图 2 Google Earth 影像岔巴沟流域
梯田空间分布

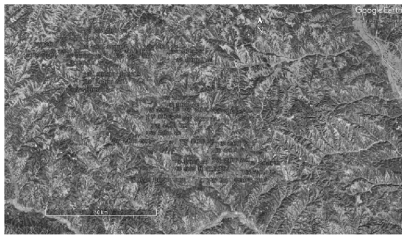


图 3 Google Earth 影像岔巴沟流域
梯田调查点位

于 2017 年 10 月 16 日—10 月 21 日,对选出来的 27 块梯田进行实地测量并进行记录。依据梯田在地形的分布,选取从分水岭到汇流的典型地段,依据梯田台数,按上、中、下分别选取典型台面进行各项指标测量和调查。再依据不同类型梯田的数量和面积估算全流域状况。测量指标包括调查梯田的田面宽、田埂高、梯田长度;梯田坍塌损毁的位置及宽、深、高;侵蚀坑数量等。梯田田面宽和田埂高分别以同一块梯田的 3 个不同位置进行测量取其平均值。记录每块梯田的机修、人工建造等属性、利用类型、植被覆盖情况、侵蚀特点、地埂培护情况等,将调查情况填写表格并对每块梯田的损毁情况进行拍照。

2.3 流域内梯田土壤侵蚀模数估算

流域内不同类型梯田土壤侵蚀模数按式(1)估算。

$$A_i = \frac{V_i \cdot D_v}{S_{i1}} \tag{1}$$

式中: A_i 为第 i 种类型梯田的土壤侵蚀模数; D_v 为土壤容重; S_{i1} 为第 i 种类型梯田的测量面积; V_i 为不同类型梯田上所测的侵蚀测坑体积,其中侵蚀坑体积 V 由测量的高、深、宽直接相乘得到,但实际侵蚀坑形状不规则且多为滑塌状,按照野外实测宽、深、高估算的测量体积会偏大,根据野外观测滑塌形状,对侵蚀坑计算体积取 1/2 进行修正。梯田统计面积为田面面积,通过野外测量,田埂面积约占梯田总面积的 15%,由此得到梯田修正面积。通过查阅《陕西农业土壤》数据资料,黄绵土土壤容重按 1.2 g/cm³。

流域内梯田土壤侵蚀模数按式(2)估算:

$$A = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot \frac{S_{i2}}{S}) \tag{2}$$

流域面积的 12.3%。空间分布上可以看出,流域上游梯田分布较为稀疏,中、下游分布较为密集,见图 2。

2.2 流域内梯田损毁情况调查

根据岔巴沟流域梯田情况和利用方式判断,首先按照田面宽幅将梯田分为机修梯田(>15~20 m)、老梯田(3~5 m),再根据利用方式和植被覆盖类型,又可分为乔木、灌木、草地和农地等几种类型。以均匀分布原则,在流域上、中、下游共选出不同类型梯田 27 块,见图 3。

式中: A 为流域内梯田的平均土壤侵蚀模数; S 为流域内梯田总面积; S_{i2} 为流域内第 i 种类型梯田的总面积。得到各类型梯田的土壤侵蚀模数后,通过加权平均数得到流域内梯田平均土壤侵蚀模数。

3 结果与分析

3.1 基于室内解译的流域水平梯田分类

3.1.1 按面积分级的梯田数量统计 在 ArcGIS 下对 1 319 块梯田斑块面积按照 0~0.5 hm² (包含 0.5),0.5~1 hm² (包含 1) 等分级,进行面积和块数统计分析。图 4 表明,梯田面积在分级统计上表现出单峰下降的幂函数分布态势。面积≤0.5 hm² 的梯田块数最多,为 369 块,占梯田总数的比例为 28.0%;0.5~1 hm² 间的梯田数 309 块,占比 23.4%;1~2 hm² 的 273 块,占比 20.7%。面积≤4 hm² 的梯田块数占梯田总数量的 91.4%,说明受地形特征影响,岔巴沟流域修建梯田面积以≤4 hm² 规模为主。随着梯田面积增大,梯田斑块数量迅速减少。

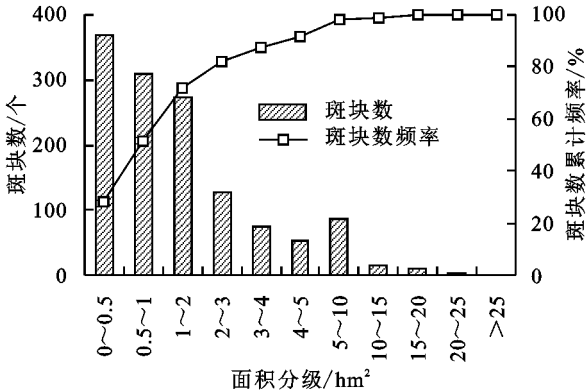


图 4 岔巴沟流域不同面积分级梯田斑块数量及频率分布
图 5 表明,岔巴沟流域梯田面积表现出双峰型特

征,分别在1~2 hm²,10~15 hm²面积级别上形成2个分布峰。≤4 hm²的梯田面积约占岔巴沟流域梯田总面积的1/2(50.7%)。联系图4和图5表明,岔巴沟流域梯田在数量和面积上均以≤4 hm²规模为主。

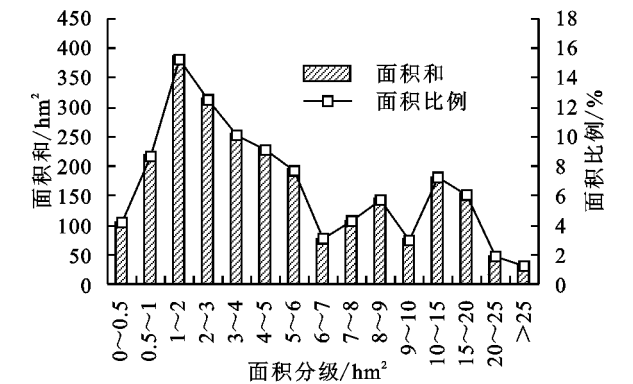


图5 岔巴沟流域不同面积分级上梯田面积总和及比例

3.1.2 各类型的梯田数量统计 根据野外调查和Google Earth影像进行对比,对1 319块梯田的属性进行确认,区分它们的利用方式并统计面积、个数及比例。该地区的梯田类型大致为新机修梯田、老梯田农地、老梯田草地、老梯田乔木、老梯田灌木和隔坡梯田六大类。从面积上看,新机修梯田,老梯田农地和老梯田草地各约占1/3,分别占梯田总面积的30.78%,36.73%和25.78%;老梯田乔木较少,占总面积的6.53%。从数量来看,老梯田农地和老梯田草地的块数最多,占梯田总块数的79.30%,其中老梯田农地占40.11%,老梯田草地占39.20%;新机修梯田和老梯田乔木数量较少,分别占13.87%和6.44%(表1)。

表1 岔巴沟流域各类型梯田面积、个数及比例				
梯田类型	面积/hm ²	比例/%	斑块数/个	比例/%
新机修梯田	777.07	30.78	183	13.87
老梯田农地	927.27	36.73	529	40.11
老梯田草地	650.80	25.78	517	39.20
老梯田乔木	164.90	6.53	85	6.44
老梯田灌木	2.61	0.10	4	0.30
隔坡梯田—乔木—灌木	1.73	0.07	1	0.08
总和	2524.38	100.00	1319.00	100.00

3.2 流域梯田损毁情况调查及分析

3.2.1 梯田损毁形式 经过野外调查,将暴雨造成的梯田损毁形式分为以下4种:表层结皮脱落、田埂滑塌崩塌,田埂冲毁、田面陷穴穿洞。

(1) 表层结皮脱落。主要发生于老梯田乔木和老梯田草地上。梯田田埂坡面在暴雨冲刷下发生大面积表皮滑塌,表皮基本全部损毁,深度2~3 cm,严重的整块梯田表皮全部冲刷滑塌(图6)。

(2) 田埂滑塌崩塌。主要发生在老梯田上,部分发生在新机修梯田上。老梯田田埂在暴雨的冲刷下,

由于表层硬壳脱落,内填土因降雨自重增加而发生滑塌崩塌,为直线型。还有部分因为田面不平,地势低洼处产生积水,达到临界点之后发生大面积滑坡,为抛物线型。新机修梯田田埂上部为斜坡,岸草茂密,下部分为机修时挖出的竖直田埂,土质疏松,降雨时外层土易与内层土剥离,如图7所示。



图6 老梯田田埂表皮结皮脱落(郭晋伟于2017年10月拍摄)



图7 田埂滑塌崩塌(郭晋伟于2017年10月拍摄)

(3) 田埂冲毁。在各梯田上均有发生。老梯田因为缺少人为管护田埂上的地势低点在降雨中易被冲毁,多次降雨后形成深切沟道,并逐渐扩大,遇到大暴雨,大量雨水从沟道流下,发生更剧烈的侵蚀。老梯田草地和老梯田乔木有部分因为人类放牧,羊在田埂上造成数量极大地踩踏破坏,降雨时更容易冲刷造成破坏。老梯田农地由于人为耕种,田面不平,容易形成地势低点,在暴雨时造成破坏。新机修梯田上,由于机械耕作时填土不均或者对田埂造成破坏,使田埂土质疏松,暴雨时易被冲毁,并且由于侧坡太长,坡面径流冲刷厉害,造成严重的侵蚀(图8)。



图8 田埂冲毁(何亮于2017年10月拍摄)

(4) 田面陷穴穿洞。主要发生在老梯田农地和新机修梯田上,并且更容易造成田埂滑塌崩塌和冲毁。在梯田修建时,有的地方因为缺土少土,夯打不实,形成地势低点,径流汇集,加上黄土自重形成陷穴。由于田岸相对内层土土质疏松,离田岸近的陷穴更容易形成穿

洞,进一步形成切沟,使梯田断开,造成剧烈侵蚀。还有一部分由树木引起,在降雨时,土壤自重加上树木的重量更容易形成陷穴,深度可达 1~2 m,在岸边的树更容易引起田埂冲毁(图 9)。



图 9 田面陷穴穿洞(郭晋伟于 2017 年 10 月拍摄)

3.2.2 不同类型梯田损毁情况 经过 6 d 的实地调查测量,共获取 27 块梯田的数据,其中新机修梯田 8 块、老梯田农地 5 块、老梯田乔木 4 块、老梯田草地 8 块、老梯田灌木 1 块、隔坡梯田 1 块,具体调查情况见表 2 和表 3。6 类梯田类型中,由于新机修梯田的田埂防护较好,侵蚀坑发生频次最少,仅为 5 处/100 m,见表 2。但是由于时间短,没有形成一定的发生层次,土

质疏松,产生的侵蚀坑体积无论从平均值还是最大值均为最大,侵蚀坑切割田面最深可达 480 cm。老梯田农地、老梯田乔木和老梯田草地侵蚀情况基本为同一水平。老梯田农地田埂由于人为防护不力,侵蚀坍塌崩坍等现象较为频繁,侵蚀坑密度为 20 处/100 m。其年代较长,土层较实,侵蚀坑体积相对较小;有部分区域由于常年耕作导致梯田台面土壤分布不均,低洼缺土处侵蚀剧烈,侵蚀坑巨大,切割田面深度最大可达 300 cm。老梯田草地因为人为破坏或者人为看护不力,侵蚀坑数量较多,侵蚀坑密度为 36 处/100 m。由于草皮植被防护,侵蚀坑体积相对较小,多以田埂表层结皮脱落为主;但是人为破坏严重的地方侵蚀剧烈,侵蚀坑最大深度可达 240 cm。老梯田乔木条件下侵蚀坑数量较多。由于植被防护,平均侵蚀坑体积相对较小;但是因为树木根系汲水的作用,逐渐形成天然低洼地,形成巨大侵蚀,最大深度可达 160 cm。老梯田灌木地位于地势险要处,人类活动痕迹较少,侵蚀轻微,侵蚀坑密度为 21 处/100 m,侵蚀坑最大深度 40 cm。隔坡梯田地处公路边,放牧严重,羊群踩踏痕迹明显,侵蚀坑分布密集,为 68 处/100 m。侵蚀坑平均体积不大,最大深度 60 cm。

表 2 不同类型梯田调查的侵蚀坑量测的平均值

不同类型 梯田	斑块数	调查侵蚀 坑个数/处	侵蚀坑密度/ 处/100 m	侵蚀坑 平均深/cm	侵蚀坑 平均宽/cm	侵蚀坑 平均高/cm
新机修梯田	8	110	5	107.3	144	253
老梯田农地	5	246	20	59.2	105.5	223.3
老梯田草地	8	446	36	36.7	106.3	176.8
老梯田乔木	4	208	29	41.5	114.2	203.9
老梯田灌木	1	38	21	3.3	19.6	25.5
隔坡梯田_植树_灌木	1	146	68	14.9	144.4	80.9

表 3 不同类型梯田调查的侵蚀坑量测的深度最大值

不同类型梯田	侵蚀坑 最大深/cm	侵蚀坑 相应宽/cm	侵蚀坑 相应高/cm
新机修梯田	480	150	470
老梯田农地	300	600	280
老梯田草地	240	400	70
老梯田乔木	160	140	180
老梯田灌木	40	70	115
隔坡梯田_植树_灌木	60	80	167

3.3 不同类型梯田侵蚀量估算及分析

3.3.1 不同类型梯田损毁体积分析 如图 10 所示,从侵蚀坑个数来看,本次暴雨造成的梯田损毁侵蚀坑大部分为深度 0~0.5 m 的浅层侵蚀,其中新机修梯田和老梯田农地的相对较少,分别占各自侵蚀坑数量的 41.82%和 56.10%,老梯田乔木占 72.60%,老梯田

草地占 82.75%,老梯田灌木和隔坡梯田则基本全部为 0~0.5 m 的浅层侵蚀,分别占 100%和 96.58%;深度 0.5~2 m 的侵蚀也占很大比例,新机修梯田占 41.82%,老梯田农地占 43.09%,老梯田乔木占 27.40%,老梯田草地占 16.59%,隔坡梯田只有 3.42%;新机修梯田、老梯田农地和老梯田草地还有部分深度 2 m 以上的侵蚀坑,其中新机修梯田的较多,2~3 m 的占 13.64%,甚至有 3 m 以上的侵蚀坑,占总数的 2.73%,老梯田农地和老梯田草地的则较少,分别占 0.81%和 0.66%。

如图 11 所示,从侵蚀体积来看,新机修梯田大部分为深度 1 m 以上的侵蚀坑,占总侵蚀体积的 83.95%,其中 2~3 m 的占 54.88%,而深度 0~0.5 m 的则只有 4.15%;老梯田农地大部分为 0.5~2 m 的侵蚀坑,占总侵蚀体积的 68.63%,其中 0.5~1 m 的

占 41.87%；老梯田乔木的大部分为深度 0.5~1 m 的侵蚀坑，占总侵蚀体积的 89.61%，其中 0~0.5 m 的和 0.5~1 m 分别占总侵蚀体积的 45.39%和 44.25%，深度为 1~2 m 的则只占 10.39%；老梯田草地的大部分为深度 0.5~1 m 的侵蚀坑，占总侵蚀坑体积的 75.03%，深度为 1~2 m 的占总侵蚀体积的 18.87%，深度 2~3 m 的则只有 6.10%；老梯田灌木和隔坡梯田则基本全部为深度 0~0.5 m 的侵蚀坑，分别占总侵蚀体积的 100%和 95.26%。

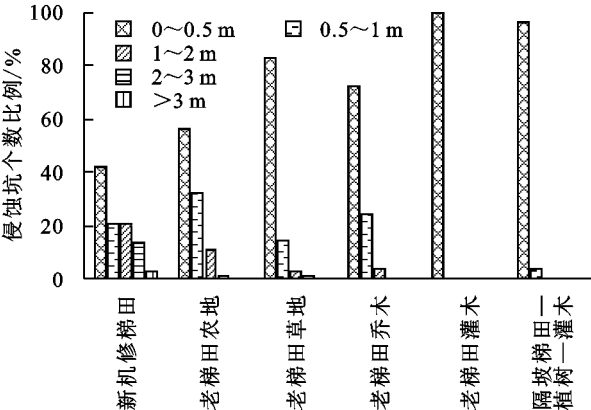


图 10 按深度分级的各类型梯田侵蚀测坑个数比例

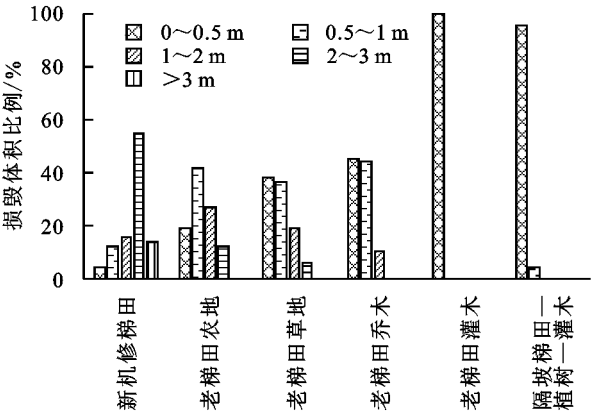


图 11 按侵蚀坑深度分级各类型梯田侵蚀坑损毁体积比例

总体来看，梯田损毁情况受人类活动影响较大，人类活动频繁的新机修梯田和老梯田农地深度 1 m 以上侵蚀占据了较大比例，暴雨过后不好修复，甚至继续扩大，发展为沟蚀；老梯田乔木、老梯田草地、老梯田灌木和隔坡梯田侵蚀深度 1 m 以下的占据了较大比例，多为面状侵蚀。

3.3.2 不同类型梯田侵蚀模数估算及分析 由表 4 看出，从侵蚀模数来看，隔坡梯田平均侵蚀模数最大，达到 122 525.6 t/km²。老梯田农地、草地和乔木条件下侵蚀模数均在 30 000 t/km²水平，新机修梯田为 20 000 t/km²，老梯田灌木最小，为 6 000 t/km²左右。通过加权平均数求得梯田的平均侵蚀模数为 30 733.4 t/(km²·a)。老梯田不同利用中，草地利用类型的侵蚀量最大，其次为老梯田乔木和老梯田农

地。这是由于老梯田农地人为破坏严重，田埂看护不利，容易形成大量侵蚀坍塌。老梯田上形成冲毁后，进一步发展为切沟，使梯田田面断开，又因为补修困难，侵蚀逐年扩大，进而对下部的梯田田块造成破坏。暴雨来时无防护，引起大量的梯田损毁。老梯田草地田埂滑塌严重，基本全部冲毁，虽然大块侵蚀很少，但是数量庞大，侵蚀量较大，田埂损毁长度达到 95%以上。老梯田乔木因为树木原因，更容易形成陷穴和田埂破坏，但是因为造成了地势低点，侵蚀数量相对减少，侵蚀量相对较低。

新机修梯田田埂上部为斜坡，岸边草被茂密，暴雨过程中减少径流冲刷保护了田埂。然而新机修梯田单个坍塌处侵蚀量极大，坍塌体高可达 5~7 m，深和宽可达 3~5 m，造成几十方的土方损毁，但是由于数量极少，侵蚀量最小。

表 4 不同类型梯田调查的侵蚀模数估算 t/km²

梯田类型	最大侵蚀模数	最小侵蚀模数	平均侵蚀模数	修正侵蚀模数
新机修梯田	118388.7	0	45126.3	19404.3
老梯田农地	124600.4	40061.4	80274.0	34517.8
老梯田草地	174831.8	35075.9	87618.9	37676.1
老梯田乔木	121114.8	34970.8	81083.3	34865.8
老梯田灌木	—	—	13856.8	5958.4
隔坡梯田	—	—	284943.3	122525.6

4 结论与建议

4.1 结论

(1) 受地形特征影响，岔巴沟流域修建梯田面积以≤4 hm²规模为主，数量上占 91.4%，面积上占 50.7%。新机修梯田、老梯田农地和老梯田草地各约占流域内水平梯田总面积的 1/3。老梯田农地和老梯田草地的块数最多，分别占 40.11%和 39.20%，新机修梯田和老梯田乔木数量较少。

(2) 特大暴雨造成的梯田损毁形式总结有田埂表层结皮脱落、田埂滑塌崩塌、田埂冲毁、田面陷穴穿洞 4 种。

(3) 新机修梯田由于人为看护较好，侵蚀坑发生频率最低，为 5 处/100 m，但是由于土体夯压不实，低处易形成侵蚀坑，侵蚀坑深平均 1 m，最大深度 4.8 m，对梯田形成毁灭性损失。老梯田农地、草地和乔木的侵蚀坑发生频率为 20~36 处/100 m，侵蚀坑平均深 0.3~0.6 m。老梯田灌木和隔坡梯田大部分为深度 0~0.5 m 的侵蚀坑，老梯田灌木由于人类活动极少，侵蚀坑频率较低，隔坡梯田由于放牧严重，侵蚀坑频率最高。

(4) 流域内梯田的平均侵蚀模数为 30 733.4 t/km²。

其中,老梯田农地、草地和乔木条件下侵蚀模数均在 30 000 t/km² 水平;新机修梯田为 20 000 t/km²;老梯田灌木最小,为 6 000 t/km² 左右;受放牧等的影响,隔坡梯田的平均侵蚀模数最大,达到 122 525.6 t/km²。

需要说明的是,在具体测量过程中,受暴雨及径流冲刷,梯田田埂破坏严重,无法辨认损毁部位的新旧情况,因此直接测量侵蚀坑的体积并全部计入本次暴雨造成的损毁情况中,可能会导致估算得到的土壤侵蚀模数偏高。

4.2 建议

(1) 增加人为管护。在梯田防护中,人为管护有着极大地作用,有人为管护的田埂侵蚀数量明显减少,缺少人为管护的田埂侵蚀严重。应当定期检查梯田田埂,做好田垄,在侵蚀严重的地方适当补土,阻止或减缓侵蚀扩大。调查中发现由于田埂管护得当,部分梯田农地安然无恙,损失较小。

(2) 减少或禁止放牧。放牧对梯田的危害极大,放羊过度的地方田埂破坏严重,对暴雨的抵抗力明显减弱,暴雨来时极易形成损毁。

(3) 多建机修梯田。调查中发现,机修梯田田面宽,耕作方便,对暴雨的抵抗力也强。在机修梯田修建时应当注意田面平整,避免出现低洼处,田埂要夯打坚实。

(4) 注意植树方法。在梯田上植树应注意选择灌木树种,避免树木过重带动黄土下陷。植树位置应当选择田面中间或内部,不宜在田岸边植树,避免树木下陷径流冲刷形成损毁。

参考文献:

- [1] Wang T M, Wu J G, Kou X J, et al. Ecologically asynchronous agricultural practice erodes sustainability of the Loess Plateau of China[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(4):1126-1135.
- [2] Wei W, Chen L, Zhang H, et al. Effects of crop rotation and rainfall on water erosion on a gentle slope in the hilly loess area, China[J]. *Catena*, 2014,123(1):205-214.
- [3] Li M M, Wang K Q, Chen Z Z, et al. Storage of water and sediment reduction benefits of reverse-slope terrace under the different slopes[J]. *Research of Soil & Water Conservation*, 2011,18(6):100-104.
- [4] Li H F, Wei W, Chen L D, et al. Progress in the study of soil water balance under forest and grassland covers on the Loess Plateau[J]. *Research of Soil & Water Conservation*, 2013,20(1):287-293.
- [5] Courtwright J, Findlay S E G. Effects of Microtopography on hydrology, physicochemistry, and vegetation in a tidal swamp of the Hudson River[J]. *Wetlands*, 2011,31(2):239-249.
- [6] Huo Y P, Zhu B B. Analysis on the benefits of level terrace on soil and water conservation in loess hilly areas[J]. *Research of Soil & Water Conservation*, 2013,20(5):24-28.
- [7] Dumbrovský M, Sobotková V, Šarapatka B, et al. Cost-effectiveness evaluation of model design variants of broad-base terrace in soil erosion control[J]. *Ecological Engineering*, 2014,68:260-269.
- [8] Lafavor M C. Restoration of degraded agricultural terraces: rebuilding landscape structure and process[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014,138:32-42.
- [9] 刘晓燕,王富贵,杨胜天,等.黄土丘陵沟壑区水平梯田减沙作用研究[J].*水利学报*,2014,45(7):793-800.
- [10] Wei W, Chen D, Wang L, et al. Global synthesis of the classifications, distributions, benefits and issues of terracing[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016,159:388-403.
- [11] 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].*水土保持学报*,1999,5(3):59-63.
- [12] 揭曾祐,李艳,王规凯,黎沛虹.水平梯田防止土壤侵蚀作用的理论分析[J].*中国水土保持*,1986(01):31-32.
- [13] 贾立志,高建恩,张元星,等.黄土丘陵沟壑区梯田暴雨侵蚀状况及规律分析[J].*水土保持研究*,2014,21(4):7-11.
- [14] 刘宝元,刘晓燕,杨勤科,等.黄土高原小流域水土流失综合治理抗暴雨能力考察报告[J].*水土保持通报*, 2017,37(4):349-350.
- [15] 张伟,杨芝.“7·26”特大暴雨致陕西榆林 9 县 43 万人受灾,重建工作全面开展[EB/OL]. [2017.08.04]. https://news.china.com/domesticgd/10000159/20170804/31038620_all.html.
- [16] 徐钰婷,何思雨.子洲县“7·26”特大洪涝灾害百年一遇,造成直接经济损失 16.89 亿元[EB/OL]. [2017.07.28]. http://www.sohu.com/a/160478553_351303.
- [17] 崔普伟.基于单元流域的黄土丘陵沟壑区岔巴沟流域次暴雨产沙经验模型研究[D].武汉:华中农业大学,2010.
- [18] 綦俊谕,蔡强国,方海燕,等.岔巴沟流域水土保持减水减沙作用[J].*中国水土保持科学*,2010,8(1):28-33.
- [19] 宋献方,刘鑫,夏军,等.基于氢氧同位素的岔巴沟流域地表水—地下水转化关系研究[J].*应用基础与工程科学学报*,2009,17(1):8-20.
- [20] 张宇军.基于 DEM 骨架特征点线的地貌自动综合研究[D].西安:西北大学,2008.
- [21] 马秀霞. TOPMODEL 模型在岔巴沟与灞河流域的应用比较研究[D].西安:西安理工大学,2018.