中国地质灾害与防治学报
THE CHINESE JOURNAL OF GEOLOGICAL HAZARD AND CONTROL
中国科技核心期刊
《中国科学引用文数据库》来源期刊
Caj-cd规范获奖期刊

梯田型黄土滑坡隐患发育特征与成因分析

毛正君，张瑾鸽，仲佳鑫，王　军

Analysis of basic characteristics and deformation mechanism of loess potential landslide of terrace: Taking loess hilly region in southern Ningxia as an example

MAO Zhengjun, ZHANG Jinge, ZHONG Jiaxin, and WANG Jun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202205005

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

融雪诱发型黄土滑坡活动特征与应急响应模式——以新疆伊犁则克台滑坡为例

Kinematic characteristics and emergency response model of loess landslide drived by snowmelt: take the Zeketai Landslide in Yili, Xinjiang as an example

魏学利, 陈宝成, 赵龙, 赵楠, 李宾　中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(6): 78-90

青海尖扎盆地寺门村滑坡发育特征及成因分析

Characteristics and formation of Simencun Landslides in Jianzha Baisn of Qinghai Province

史立群, 魏刚, 殷志强, 袁材栋, 武新宁, 李振超　中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 15-21

溯源侵蚀引发的拉裂-倾倒型黄土崩塌形成机制

The mechanism of bending-toppling loess collapse caused by headward erosion

成玉祥, 张卜平, 唐亚明　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 86-91

湖南通道播阳镇楼团滑坡发育特征及稳定性分析

Development characteristics and stability analysison the Loutuan Landslide in Boyang Town, Tongdao County, Hunan Province

周小飞, 曹红娟　中国地质灾害与防治学报. 2020, 31(5): 48-53

黄土潜蚀机理及其致灾效应研究综述

A review on loess subsurface-erosion mechanism and it’s hazard effects

张卜平, 朱兴华, 成玉祥, 张智锋, 孙恒飞, 蔡佳乐　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(6): 41-52

三峡库区典型顺斜向岩质滑坡变形破坏特征及失稳机制分析

Deformation characteristics and failure mechanism of large-scale obliquely dip rock landslide in the Three Gorges Reservoir Region

蒋先念, 张晨阳　中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 36-42

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202205005
毛正君, 张瑾鸽, 仲佳鑫, 等. 梯田型黄土滑坡隐患发育特征与成因分析——以宁夏南部黄土丘陵区为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 142-152.
MAO Zhengjun, ZHANG Jinge, ZHONG Jiaxin, *et al*. Analysis of basic characteristics and deformation mechanism of loess potential landslide of terrace: Taking loess hilly region in southern Ningxia as an example[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 142-152.

梯田型黄土滑坡隐患发育特征与成因分析
——以宁夏南部黄土丘陵区为例

毛正君[1,2,3], 张瑾鸽[1], 仲佳鑫[4], 王　军[5]
（1. 西安科技大学地质与环境学院，陕西 西安　710054；2. 西安科技大学煤炭绿色开采地质研究院，陕西 西安　710054；3. 陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室，陕西 西安　710054；
4. 宁夏回族自治区国土资源调查监测院，宁夏 银川　750002；
5. 宁夏回族自治区矿产地质调查院，宁夏 银川　750021）

摘要：黄河流域地质构造活跃、地貌演化迅速、气候区域分异显著，导致流域内重大灾害类型多、分布广、突发性强。文章以宁夏南部黄土丘陵区为研究区，引入梯田型黄土滑坡隐患的概念，通过结合历史资料收集、遥感影像解译、现场调查和数理统计等手段，分析了梯田型黄土滑坡隐患的发育特征、分布规律及形成原因。结果表明：(1)研究区梯田型黄土滑坡隐患共 26 处，主要分布于第四系黄土中，中长边坡数量较多，主要为浅层与中层梯田型黄土滑坡隐患，规模以小型为主。(2)梯田型黄土滑坡隐患在空间上主要分布在黄土梁峁区和大起伏山地区，1 800~2 000 m 的高程区间，坡向为东南、南、西南时分布较多；在时间上主要分布在雨季或地震活动时期。(3)地形地貌、地层结构、降雨、地表水和人类工程活动是梯田型黄土滑坡隐患发育的主要因素。研究结果对于宁夏南部黄土丘陵区以及黄河流域梯田型黄土滑坡隐患风险识别与风险管理具有指导和借鉴意义。

关键词：梯田型；黄土；滑坡隐患；发育特征；成因分析；宁夏南部黄土丘陵区
中图分类号：P642.22　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1003-8035(2022)06-0142-11

Analysis of basic characteristics and deformation mechanism of loess potential landslide of terrace: Taking loess hilly region in southern Ningxia as an example

MAO Zhengjun[1,2,3], ZHANG Jinge[1], ZHONG Jiaxin[4], WANG Jun[5]
(1. *College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 2. *Geological Research Institute for Coal Green Mining, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 3. *Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Support for Coal Green Exploitation, Xi'an, Shaanxi* 710054, *China*; 4. *Ningxia Institute of Survey and Monitoring of Land and Resources, Yinchuan, Ningxia* 750002, *China*; 5. *Ningxia Institute of Geological and Mineral Resources Survey, Yinchuan, Ningxia* 750021, *China*)

收稿日期：2022-05-08；**修订日期：**2022-08-29　　**投稿网址：**https://www.zgdzzhyfzxb.com/
基金项目：陕西省重点研发计划项目(2020SF-379)；宁夏回族自治区重点研发计划项目(2022BEG03059)
第一作者：毛正君(1983-)，男，宁夏固原人，博士(后)，副教授，主要从事地质环境保护与国土空间生态修复方面的科研。E-mail: zhengjun_mao@163.com

Abstract: The Yellow River Basin has active geological structure, rapid geomorphic evolution and significant regional differentiation of climate, resulting in many types of major disasters in the basin, wide distribution and strong paroxysm. Taking the Loess Hilly Region in the south of Ningxia as the research area, this paper introduces the concept of loess potential landslide of terrace. By combining historical data collection, remote sensing image interpretation, field investigation and mathematical statistics, it analyzes the development characteristics and distribution rules of loess potential landslide of terrace, and analyzes its formation reasons. The results show that: (1)There are 26 loess potential landslide of terrace in the study area, which are mainly distributed in the Quaternary loess, with a larger number of medium and long slopes, mainly loess potential landslide of terrace of shallow and middle-level, and the scale is mainly small. (2)The loess potential landslide of terrace are mainly distributed in loess hilly areas and large undulating mountain areas, the elevation interval of 1 800~2 000 m, and the slope direction is southeast, South and southwest in space; It is mainly distributed in rainy season or seismicity period in time. (3) Topography, stratum lithologic, rainfall, surface water and human engineering activities are the main factors for the loess potential landslide of terrace. The research results have guiding and reference significance for the risk identification and risk management of loess potential landslide of terrace in the Loess Hilly Region in Southern Ningxia and the Yellow River Basin.

Keywords: terrace type; loess; potential landslide; development characteristics; genetic analysis; loess hilly region of southern Ningxia

0　引言

“三调”数据显示，我国坡度大于 6°的耕地有 2.91×10^7 ha，占耕地总面积的 22.75%[1]。坡耕地是水土流失最严重的地类之一，同时水土流失会导致土壤和养分流失，也是造成区域生态环境恶化、生产力低下的根本原因[2]。为深入贯彻黄河流域生态保护和高质量发展战略，坡耕地综合治理是黄河流域水土流失治理的重要内容，是关系到农业可持续发展的紧迫问题[3]。其中，梯田建设是黄土高原水土流失治理中广泛采用的一项主要工程措施[4]。“梯田”一词最早出现在宋代，有明确记述及可考证的是在明、清两代[5]，20 世纪 40 年代初天水水土保持科学实验站在梁家坪进行了沟洫梯田的试验示范。陈蝶等[6]、王彦武等[7]认为梯田是在丘陵山坡地上沿等高线方向修筑的条状台阶式或波浪式断面的田地，由不同大小和形状的平面结构组成，田面可用于耕作，边缘用土或石块砌成梯级状田埂，以防治水土流失。张宏鸣等[8]指出梯田的修筑在很大程度上开发了坡耕地的农业生长潜力，具有蓄水、保土作用，广泛分布在北方黄土高原区和南方低山丘陵区。坡改梯工程实施后，可以改变小地形，有效降低地面坡度，从而增加入渗、减少径流速率，提高土壤质量，可减少水土流失量 90%，是建设可持续发展基本农田的可靠保证[3]。

从 20 世纪 80 年代“三西”建设开始，宁夏南部地区进行了大面积的坡改梯工程[9－10]。国内外学者主要开展了降雨入渗对梯田边坡稳定性的影响、侵蚀破坏过程、坡形优化设计等方面研究。Giordan 等[11]采用 LiDAR 和现场调查的方法对意大利西北部 Liguria 地区的滑坡开展调查，发现梯田农业区比森林和半自然区更容易发生浅层滑坡。Camera 等[12]为深入了解意大利阿尔泰利纳山谷发生的梯田边坡浅表大规模移动过程，在对降雨事件和地下水运动进行深入监测的基础上，对地下水运动进行了详细的数值模拟和相关的稳定性分析，结果表明基岩与墙体回填土接触处的地下水位的形成以及回填土的饱和是梯田边坡失稳的决定因素。Wen 等[13]为研究黄土丘陵沟壑区极端降雨条件下梯田浅层滑坡和深滑面的机理和过程，采用瑞典条分法进行了人工降雨条件下梯田的室内模型试验，结果表明细沟侵蚀加速了降雨入渗，增加了土体含水量，增大了孔隙水压力，减小了吸力，导致抗滑力矩小于滑动力矩，极易发生滑移。Bercic 等[14]运用可视化程序工具 Grasshopper，通过改变输入的梯田数据参数的值，对各种不同的解与所有相应的统计量进行组合仿真，使得在建造梯田时更容易有意识地决定哪些参数组合是最优的，以防止滑坡、规划适当的排水和控制土壤运动。

甘肃黑方台等台塬地区降水少，蒸发量大，因此通过抽取黄河水进行灌溉来保证农作物生长，一般一年灌溉 4～6 次，7 月下旬的灌水量最大，导致地下水位快速上涨，从而导致了大量台塬边缘黄土滑坡的发生[15]；然而，宁夏南部黄土丘陵区水浇地只占耕地面积的 13.46%，主要以旱地为主[16]，年降雨量虽小，但却集中，多暴雨和连阴雨。由于全球气候变化导致极端暴雨事件频发，此外坡改梯工程的实施，使得坡面降雨入渗条件发生了较

大的变化，降雨入渗量增加，土体基质吸力降低，下滑力增大，降低了边坡的稳定性[17]，尤其是在古(老)滑坡体上进行坡改梯，使古(老)滑坡复活的可能性增大。文章以宁夏南部黄土丘陵区(海原县、隆德县、彭阳县、泾源县、西吉县、原州区)为研究区，在引入梯田型黄土滑坡隐患定义的基础上，通过结合历史资料收集、遥感影像解译、现场调查和统计分析等手段，分析了研究区梯田型黄土滑坡隐患的发育特征及分布规律，并进行了成因分析。研究对于宁夏南部黄土丘陵区以及黄河流域梯田型黄土滑坡隐患风险识别与风险管理具有指导和借鉴意义。

1 梯田型黄土滑坡隐患定义

针对滑坡一词，国内外有两种意见：一种是广义的，把斜坡岩土体顺坡向下的一切运动现象统称为滑坡；另一种仅把斜坡岩土体沿一定的软弱面(带)整体向下滑动的现象称为滑坡[18]。欧美国家多采用广义滑坡定义，苏联、日本和我国学者等多采用后者。如王恭先把滑坡定义为“滑坡是一定自然条件下的斜坡，由于河流冲刷、人工切坡、地下水活动或地震等因素的影响，使部分土体或岩体在重力作用下，沿一定的软弱面或带，整体、缓慢、间歇性、以水平位移为主的变形现象”[19]。殷跃平认为“滑坡是指地质体在重力作用下，沿地质弱面向下向外滑动”[20]。波波夫[21]认为“滑坡是大量的岩体在重力作用下沿着斜坡向下滑动，且与地表水及地下水的活动有关”。中国地质条件复杂，板块构造活动频繁，近年来受人类活动和全球气候变化影响，灾难型滑坡灾害频发，严重威胁人类生命财产安全[22]。重大滑坡隐患分析研究具有重要意义，事先发现和识别滑坡隐患，是变“被动避灾救灾”为“主动防灾治灾”，减少甚至避免造成灾难性地质灾害事件发生的主要途径[23]。许强等[24]认为滑坡隐患有广义与狭义之分，广义指近期内可能失稳破坏并成灾的斜坡，狭义指已具有明显破坏迹象并在近期内可能成灾的斜坡，针对广义上的滑坡隐患又可分正在变形区、历史变形破坏区和潜在不稳定斜坡三种。由此可见，梯田型黄土滑坡隐患是指对黄土坡地或古(老)滑坡体进行改造修建的梯田，在内、外部因素的共同作用下造成其影响范围内近期可能失稳破坏并成灾的边(斜)坡。

2 梯田型黄土滑坡隐患发育特征

2.1 黄土滑坡隐患编录

文中通过收集资料确定了宁夏南部黄土丘陵区35处黄土滑坡隐患。在对这35处黄土滑坡隐患进行野外现场调研和遥感影像解译工作后，共确定研究区梯田型黄土滑坡隐患26处，其中在古(老)滑坡体上修建梯田的有4处(表1，图1—5)。

表 1 研究区滑坡隐患点

Table 1 Potential landslides points in the study area

编号	区县	点位	隐患类型
HY-01	海原县	关庄乡马圈村	梯田型
HY-02		关庄乡宋庄村井滩组	梯田型
HY-03		李俊乡联合村双沟组	梯田型
HY-04		树台乡龚湾村	非梯田型
YZ-01	原州区	开城镇上青石村三组	梯田型(图2)
YZ-02		官厅镇高红村二组	梯田型
YZ-03		张易镇驼巷五组	梯田型
YZ-04		张易镇陈沟村一组1号	梯田型
YZ-05		开城镇上青石村一组	梯田型，在古(老)滑坡上
YZ-06		张易镇陈沟村一组2号	梯田型
YZ-07		张易镇宋洼村一组1号	梯田型，在古(老)滑坡上
YZ-08		张易镇宋洼村一组2号	梯田型
YZ-09		张易镇盐泥村二组	梯田型
YZ-10		开城镇郭庙村八组	非梯田型
XJ-01	西吉县	马建乡刘垴村上垴组	非梯田型
XJ-02		马建乡台子村毛家湾组	非梯田型
XJ-03		火石寨乡大庄一组	非梯田型
XJ-04		白崖乡白崖村二组	非梯田型
XJ-05		偏城乡花儿岔村白套子组	梯田型，在古(老)滑坡上，见图3
XJ-06		硝河乡新庄村南湾组	梯田型，在古(老)滑坡上，见图4
XJ-07		震湖乡孟湾村孟湾组	梯田型
LD-01	隆德县	程靳乡民联村三组	梯田型
LD-02		城关镇杨店村二组	梯田型
LD-03		温堡乡杨家坡二组	梯田型
LD-04		凤岭乡巩龙村四组	梯田型
LD-05		沙塘镇许川村一组	非梯田型
LD-06		城关镇三合村一组	梯田型
LD-07		二中滑坡	梯田型
JY-01	泾源县	香水镇太阳村四组	梯田型
JY-02		香水镇米岗村二组	非梯田型
JY-03		香水镇卡子村三组	梯田型
JY-04		六盘山镇张堡村三组	梯田型
JY-05		兴盛乡红旗村五组	非梯田型
PY-01	彭阳县	古城镇挂马沟村郭庄	梯田型(图5)
PY-02		白阳镇余沟村杨树茆	梯田型

黄土高原在长期的地质演化过程中，存留着大量的古(老)滑坡体[25]，其经历了长期内外营力的改造，滑体内部应力状态达到了新的平衡，处在一个相对稳定的状态；但由于滑坡滑动过程中使原状黄土的土体结构发生了扰动，古(老)滑体土质疏松，结构性弱，裂隙、裂缝发育；在加载、坡脚侵蚀、库水位升降、人类工程活动及

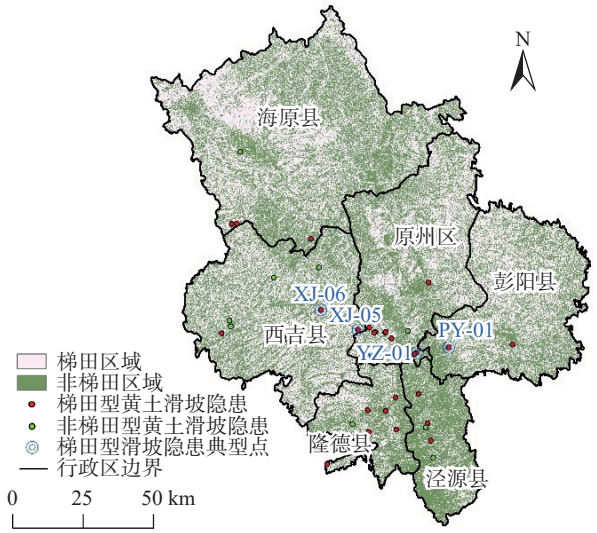


图 1　滑坡隐患点分布图

Fig. 1　Distribution of potential landslides points

极端天气事件等影响下极易发生变形，对人员及财产安全造成了极大威胁[26]。

2.2　黄土滑坡隐患与梯田分布

文中基于谷歌地球引擎(GEE)云计算平台和 Landsat 8 遥感影像，采用随机森林监督分类的方法提取了研究区的梯田分布(图 1)，其总体精度为 0.91，Kappa 系数为 0.81。将研究区 35 处滑坡隐患与梯田分布进行叠置分析，发现仅有 11 处滑坡隐患处于梯田影响范围内。对研究区 11 处梯田影响范围内的滑坡隐患进行验证，有 2 处不是梯田型黄土滑坡隐患，将其剔除。此外，在剩余的 24 处滑坡隐患中，通过现场调查结合遥感解译还识别出了 17 处梯田型黄土滑坡隐患，这 17 处隐患不直接处于梯田范围内的原因为：通过对比多期历史遥感影像发现，有些滑坡隐患以前为梯田，但由于坡体变形，如今已无法识别出梯田迹象；文中滑坡隐患为点文件，而滑坡隐患现场实际是一个区域，由于滑坡隐患定位点位的偏差导致了不处于图 1 中的梯田范围内。所以此次研究区内 26 处符合研究要求。

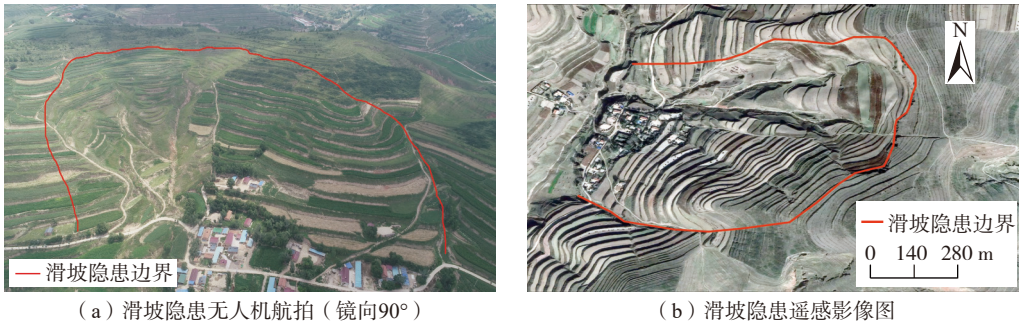
2.3　梯田型黄土滑坡隐患形态

依据《工程地质手册》[27]对研究区梯田型黄土滑坡隐患的形态特征进行分类统计。研究区梯田型黄土滑坡隐患的坡长在各区间都有分布，中长边坡数量较多，有 13 处，短边坡与长边坡数量依次递减，分别为 8 和 5 处(图 6)。将坡宽分为 4 个统计区间，由图可知梯田型黄土滑坡隐患数量随着坡宽的增加逐渐减小，分别有 12、8、5 和 1 处(图 7)。在剖面形态上，研究区没有超深层(厚度≥50 m)梯田型黄土滑坡隐患，主要为浅层

(a) 滑坡隐患无人机航拍(镜向3°)　　(b) 滑坡隐患遥感影像图

图 2　原州区开城镇上青石村三组(YZ-01)滑坡隐患图

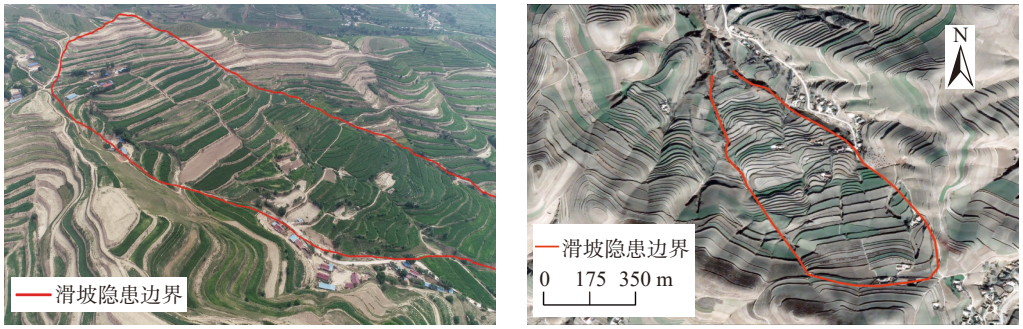
Fig. 2　Potential landslide of group 3, shangqingshi village, Kaicheng Town, Yuanzhou Distric (YZ-01)



(a) 滑坡隐患无人机航拍(镜向90°)　　(b) 滑坡隐患遥感影像图

图 3　西吉县偏城乡花儿岔村白套子(XJ-05)滑坡隐患图

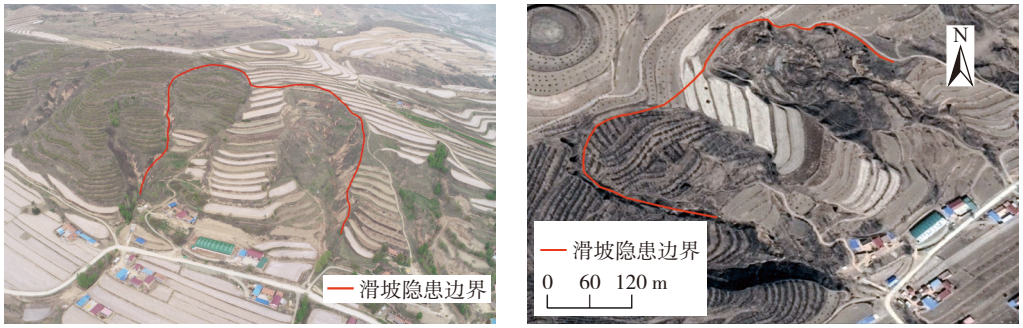
Fig. 3　Potential landslide of Baitaozi, huaercha village, piancheng Town, Xiji County (XJ-05)



（a）滑坡隐患无人机航拍（镜向200°） （b）滑坡隐患遥感影像图

图 4 西吉县硝河乡新庄村(XJ-06)滑坡隐患图

Fig. 4 Potential landslide of Xinzhuang village, Xiaohe Town, Xiji County (XJ-06)



（a）滑坡隐患无人机航拍（镜向310°） （b）滑坡隐患遥感影像图

图 5 彭阳县古城镇挂马沟村(PY-01)滑坡隐患图

Fig. 5 Potential landslide of Guamagou village, Gucheng Town, Pengyang County (PY-01)

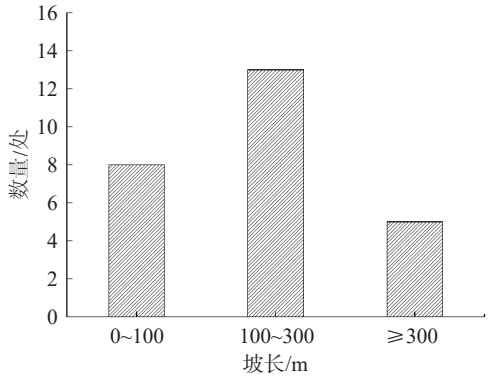


图 6 坡长分布统计图

Fig. 6 Statistical map of slope length distribution

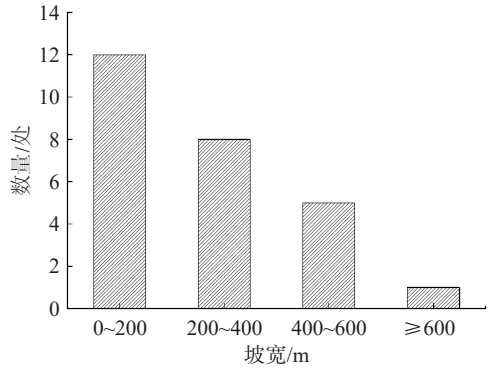


图 7 坡宽分布统计图

Fig. 7 Statistical map of slope width distribution

(厚度为 0 ~ 10 m)与中层隐患(厚度为 10 ~ 25 m), 分别各有 12 处(图 8)。研究区历史变形破坏区形态特征典型, 边界轮廓清晰, 具有明显的圈椅状形态, 且滑坡后壁完好, 多为直线型的陡坎或斜坡。

2.4 梯田型黄土滑坡隐患规模

就梯田型滑坡隐患规模而言, 小型、中型和大型隐患均有可能发生。研究区梯田型黄土滑坡隐患规模主要为小型 10 处, 占总数的 38.46%, 其次为中型 9 处, 占总数的 34.62%, 大型 7 处, 没有特大型和巨型(图 9)。可见研究区梯田型滑坡隐患规模以小型为主, 中型次之, 大型较少, 特大型和巨型基本不发育。

3 梯田型黄土滑坡隐患分布规律

3.1 空间分布规律

(1)在人口密度相对大的区县集中

研究区梯田型黄土滑坡隐患具有集中发育、扎堆群发的特点, 主要分布于人口密度大的原州区和隆德县, 分别有 9 处和 6 处, 占梯田型黄土滑坡隐患 34.62%

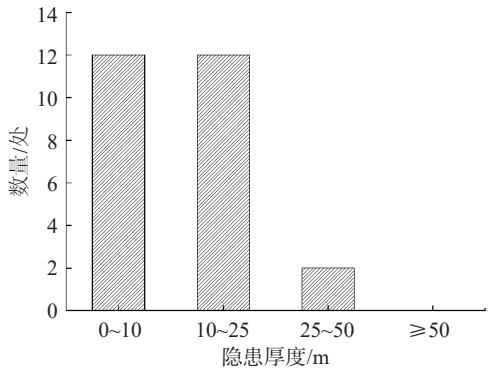


图 8　隐患厚度分布统计图

Fig. 8　Statistical map of potential landslides thickness distribution

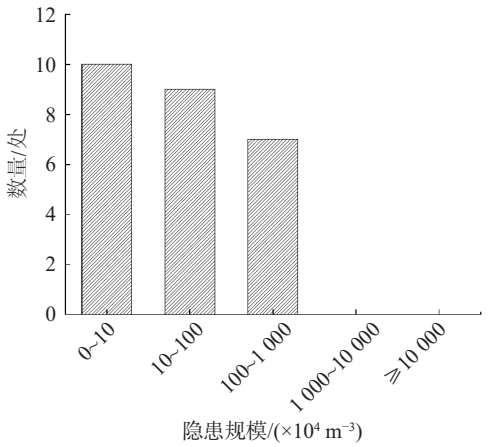


图 9　隐患规模分布统计图

Fig. 9　Statistical map of potential landslides scale distribution

和 23.07%，隐患密度分别为 0.33 处/100 km² 和 0.60 处/100 km²(表 2)。

表 2　梯田型黄土滑坡隐患行政区分布统计

Table 2　Administrative region distribution statistics of loess potential landslides of terrace

行政区	面积/km²	人口/万人	隐患数量/处	占比/%	人口密度/(人·km⁻²)	隐患密度/(处·100km⁻²)
隆德县	1 004.66	10.95	6	23.07	108.99	0.60
西吉县	3 116.13	31.58	3	11.54	101.34	0.10
彭阳县	2 534.62	16.05	2	7.69	63.32	0.08
泾源县	1 111.16	8.50	3	11.54	76.50	0.27
原州区	2 760.79	47.13	9	34.62	170.71	0.33
海原县	4 995.22	33.35	3	11.54	66.76	0.06

(2)在黄土梁峁区和大起伏山地区地貌类型集中分布

按不同地貌类型将研究区划分为中起伏山地区、冲洪积台地区、冲洪积平原区、大起伏山地区、洪积平原区、黄土塬区和黄土梁峁区 7 个地貌类型。研究区 26 处梯田型黄土滑坡隐患点，分布在冲洪积台地区 3 处，冲洪积平原区 1 处，大起伏山地区 11 处，黄土梁峁区 11 处。统计分析表明，梯田型黄土滑坡隐患主要分布在黄土梁峁区和大起伏山地区，分别占 42.31%，冲洪积台地区和冲洪积平原区也有部分发育，在中起伏山地区和黄土塬区没有发育(图 10)。

(3)在 1 800 ~ 2 000 m 高程区间内相对集中

研究区高程分布于 1 264 ~ 2 905 m，其中梯田型黄土滑坡隐患点的高程主要分布在 1 800 ~ 2 000 m，共有 10 处，约占梯田型黄土滑坡隐患点总数的 38.46%。梯田型黄土滑坡隐患点在 2 000 ~ 2 200 m 和高于 2 200 m 的高程区间分布有 8 和 5 处，分别占总数的 30.77% 和 19.23%；1 600 ~ 1 800 m 和低于 1 600 m 的高程区间分别为 2 处和 1 处，占总数的 7.69% 和 3.85%(图 11)。

(4)在坡向为东南、南和西南时相对集中分布

不同坡向山坡的小气候和水热等条件有着规律性的差异，会导致斜坡土体含水量、风化程度、坡度等要素的不同，都可能影响滑坡发育状况，从而导致滑坡发育存在坡向性[28]。研究区梯田型滑坡隐患在坡向为东南、南和西南时分布 7、6 和 6 处(图 12)，这主要是由于

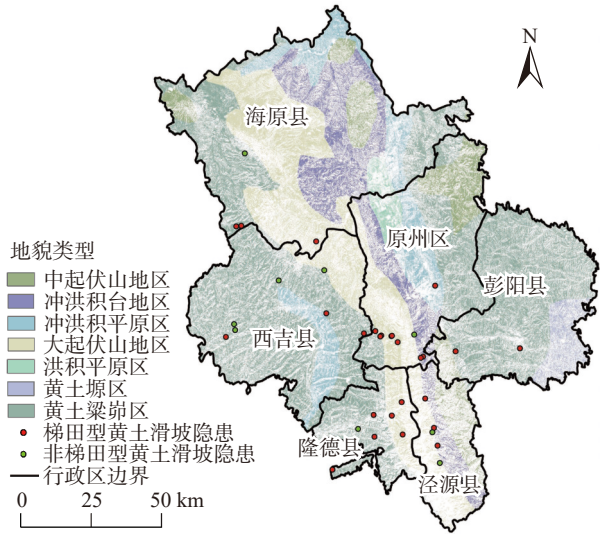


图 10　梯田型黄土滑坡隐患与地貌类型关系图

Fig. 10　Relationship between loess potential landslides of terrace and geomorphic type

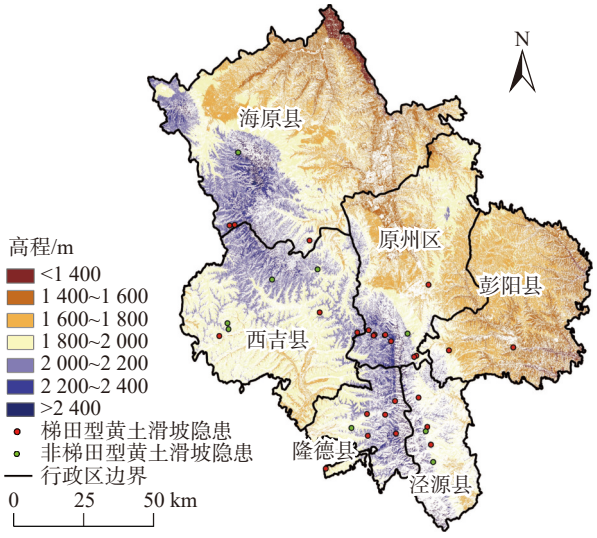


图 11 梯田型黄土滑坡隐患与高程关系图

Fig. 11 Relationship between loess potential landslides of terrace and elevation

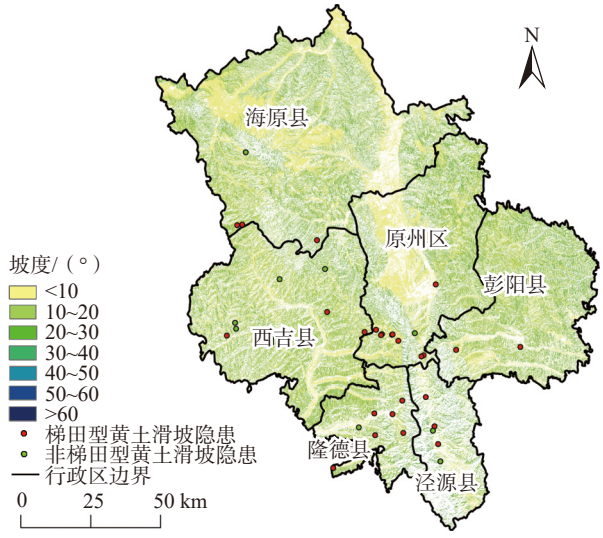


图 13 梯田型黄土滑坡隐患与坡度关系图

Fig. 13 Relationship between loess potential landslides of terrace and slope

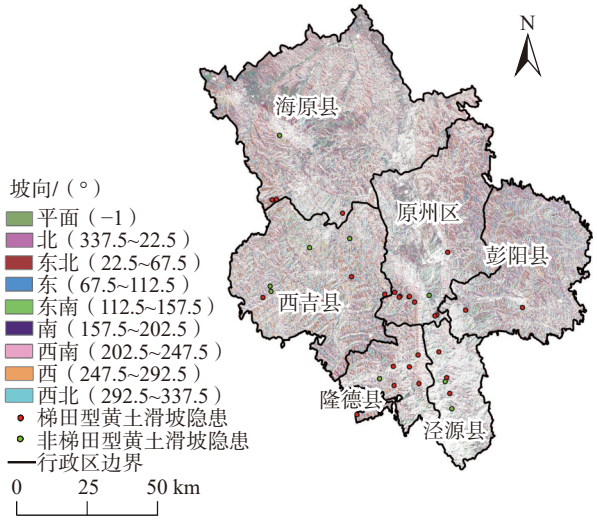


图 12 梯田型黄土滑坡隐患与坡向关系图

Fig. 12 Relationship between loess potential landslides of terrace and slope direction

河流及水系切割破碎的黄土梁峁导致的。

(5)在坡度 10° ~ 20°区间内相对集中

利用 ArcGIS 软件中的 3D Analysis 功能，从分辨率为 12.5 m 的 DEM 中提取研究区地形坡度，坡度范围是 0° ~ 76°，60°以下以 10°为间隔进行分组，60°以上为一组。可以看出，研究区梯田型黄土滑坡隐患数量在 10° ~ 20°范围内最多，有 15 处，占总数的 57.69%(图 13)。这是因为坡改梯工程的改造对象主要为坡度在 25°以下的边坡。

(6)在第四系浅黄色粉砂质黄土地层岩性集中分布

研究区地层岩性主要以第四系浅黄色粉砂质黄土为主，其中南部呈条带状分布着白垩系砾岩、砂岩、泥岩、灰岩等岩体(图 14)。黄土是一种碎散的多孔多相颗粒介质，由于独特的物质来源、特有的生成环境及遭受过的应力-应变历史而具有特殊微结构，当遇水浸湿或遭受中强地震作用时，其结构会出现崩溃性破坏，导致强度突发性完全丧失，从而诱发严重的地质灾害或者工程病害[29]。研究区梯田型黄土滑坡隐患主要分布于第四系黄土中，还有部分分布于古近系砂岩、白垩系泥岩等岩性中，文中为便于统计就不再单独区分了。宁夏南部梯田型黄土滑坡隐患按物质成分可分为黄土滑坡隐患和黄土-基岩滑坡隐患。

3.2 时间分布规律

在时间域上，研究区梯田型黄土滑坡隐患也呈现出集中分布的规律。主要表现为：在一年中的雨季相对集中；在地震活动时期相对集中。

降雨是诱发地质灾害的主要因素[30]。研究区梯田型滑坡隐患的发生与降雨周期关系密切，表现为滑坡隐患的发生主要在丰水年，在每年 6—9 月的雨季，并且与雨季降雨集中和暴雨频次相一致，但在连阴雨季节时滑坡隐患的发生有一定的滞后性。

周期性的地震活动使得滑坡灾害的发生频率也具有周期性[31]。1920 年海原大地震和 1970 年的苏堡地震使研究区内产生大量滑坡灾害。宁夏南部黄土丘陵区的地震震中均分布于六盘山南北向造山带，即“南北古脊梁”附近，在造山带上梯田型黄土滑坡隐患均匀分布，造山带西部梯田型黄土滑坡隐患可能主要由于地震诱发产生，造山带东部地震因素不强烈(图 15)。

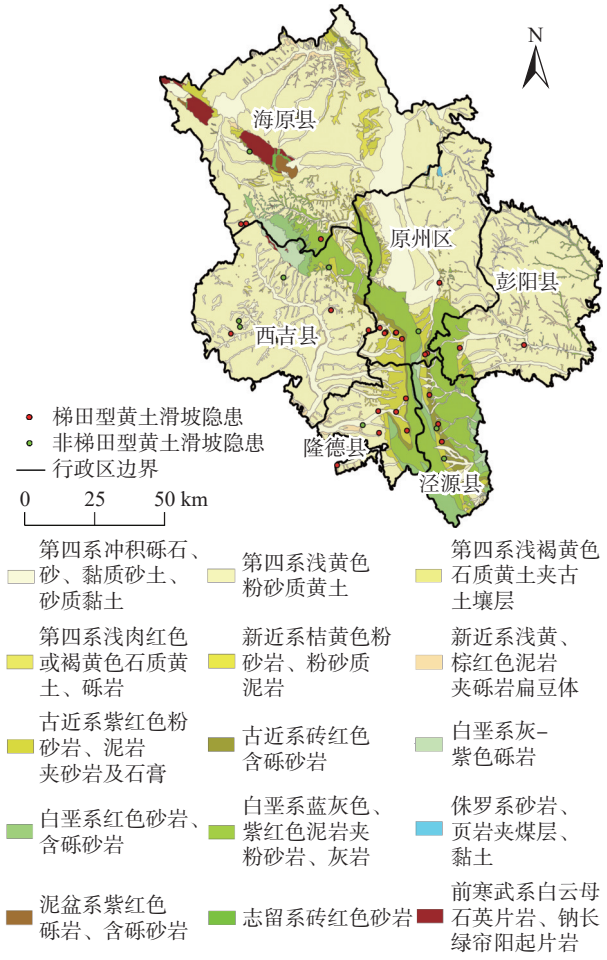


图 14　梯田型黄土滑坡隐患与地层岩性关系图

Fig. 14　Relationship between loess potential landslides of terrace and formation lithology

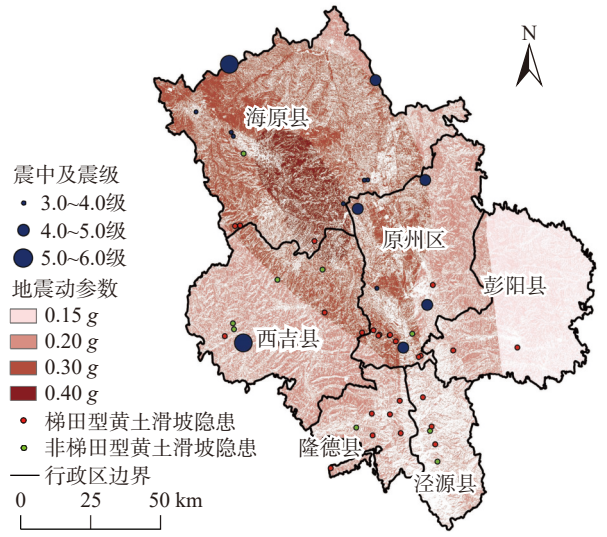


图 15　梯田型黄土滑坡隐患与地震关系图

Fig. 15　Relationship between loess potential landslides of terrace and seismic

4　梯田型黄土滑坡隐患成因分析

4.1　地形地貌

地形地貌是滑坡等突发性地质灾害类型和规模的主控因素，为地质灾害提供能量和活动场所[32]。研究区梯田型滑坡隐患主要发生于地貌切割破碎、山梁单薄的黄土梁峁。这主要是因为黄土梁峁受到研究区内葫芦河、红河、茹河及其支流的强烈切割，导致地形地貌较为破碎，形成高陡临空面，减少了斜坡前缘抗滑支撑。并且黄土地区大多发育一些微地貌，如落水洞、裂隙等，以及人工梯田的修建，都为地表水的聚集与快速入渗滑坡体内提供了条件与有利通道，导致坡体内部孔隙水压力升高，基质吸力下降，黄土抗剪强度降低，在其他外因的作用下，有利于梯田上土体发生滑动破坏。

4.2　地层结构

研究区梯田型滑坡隐患密集分布在第四系黄土中，并且在第四系黄土中分布着古土壤层。由于古土壤层为黄土层中的软弱结构面，因此研究区梯田型滑坡隐患可能为以古土壤层作为软弱接触面的黄土层内滑坡。而黄土下伏的古近系砂泥岩等基岩为相对隔水层，当降雨下渗至两者接触面时，土体被软化，孔隙水压力增大，抗剪强度降低，形成了黄土-基岩接触面滑坡，一般在暴雨或连阴雨之后发生，具有一定的时间滞后性。

4.3　降雨

降雨是滑坡发生的主要因素。黄土地区年降雨量虽小，但却集中，多暴雨和连阴雨，黄土滑坡空间上多发生在降雨量大的区域，时间上多集中在雨季[33]。由于黄土的渗透性很低，降雨直接入渗影响的深度有限，但在连阴雨作用下，30° ~ 50°的黄土斜坡上，也会触发数量多但规模不大的浅层黄土滑坡。虽然黄土的渗透性很低，但黄土结构疏松、强度低、遇水软化、垂直节理裂隙发育等特性，导致黄土坡面多发育一些微地貌，又由于黄土斜坡经人工改造形成阶梯型平面，促进了降雨的入渗作用，导致地下水位的局部上升或形成上层滞水，导致梯田型黄土滑坡隐患的发育。

4.4　地表水

研究区主要有葫芦河、红河、茹河及安家川河等。地表水对滑坡隐患的诱发具有直接影响作用。季节性或常年性流水的侧蚀、下蚀作用会割裂坡体，冲刷、掏蚀坡脚，浸泡土体，使坡体下部支撑力减小，可能破坏斜坡稳定性，从而有利于产生滑坡。此外，地表水补给地下水致使地下水位升高，在地表水与地下水的浸润软化作用下，斜坡土体容重增大，也易产生滑坡。同时研究

区由于降雨量小，水库周边斜坡前缘抗滑段被库水淹没，削弱其抗滑能力，并且导致坡体内地下水位抬升，孔隙水压力增加，有效应力减小，促进了梯田型黄土滑坡隐患的发育。

4.5 人类工程活动

宁夏南部黄土丘陵区不合理的人类工程活动，改变了地表的环境状态和应力条件，容易造成地质灾害问题。目前对于坡改梯工程，研究人员重点关注其减少水土流失、提高土壤墒情、增加粮食产量的正效应[34]。但与原始坡面相比，坡改梯工程的实施使得坡面降雨入渗条件发生了较大的变化，地表径流减少，降雨入渗量增加，土体基质吸力降低，黏聚力、内摩擦角降低，重度增加，下滑力增大，降低了边坡的稳定性，可能引发梯田型黄土滑坡隐患。对于梯田型黄土滑坡隐患的忽视，尤其是极端气候背景下容易造成该类型滑坡隐患的风险识别与评估管理的漏洞。

5 结论

（1）文中在给出梯田型黄土滑坡隐患定义的基础上，总结了梯田型黄土滑坡隐患的发育特征。研究区梯田型黄土滑坡隐患的中长边坡数量较多，坡宽主要集中在 0 ~ 200 m 范围内，主要为浅层（厚度为<10 m）与中层（厚度为 10 ~ 25 m）梯田型黄土滑坡隐患，规模以小型为主。

（2）从空间来看，研究区梯田型黄土滑坡隐患在人口密度相对大的区县、黄土梁峁区和大起伏山地区、1 800 ~ 2 000 m 的高程区间、坡向为东南、南、西南时分布较多；从时间来看，在一年中的雨季和地震活动时期相对集中，在“南北古脊梁”造山带上均匀分布，造山带西部由地震诱发产生，造山带东部地震因素不强烈。

（3）研究区梯田型黄土滑坡隐患的形成原因为地形地貌、地层结构、降雨、地表水和人类工程活动的综合作用。梯田型黄土滑坡隐患主要发生于地貌切割破碎、山梁单薄的黄土梁峁区，主要为第四系黄土。研究区年降雨量虽小，但却集中，多暴雨和连阴雨，此外葫芦河、红河、茹河及安家川河季节性和常年性的流水对梯田型黄土滑坡隐患具有影响作用。

（4）目前对于坡改梯工程，研究人员重点关注其正效应，往往忽视了梯田型黄土滑坡隐患。由于全球气候变化导致极端暴雨事件频发，此外坡改梯工程的实施，使得坡面降雨入渗条件发生了较大的变化，降雨入渗量增加，土体基质吸力降低，下滑力增大，降低了边坡的稳定性，尤其是在古（老）滑坡体上进行坡改梯，使古（老）滑坡复活的可能性增大。因此，重视梯田型黄土滑坡隐患风险识别与评估管理，将为进一步推广坡改梯工程及保护已建梯田，并为增加农民收入、科技服务“三农”、推动乡村振兴提供理论和科学依据。

参考文献（References）：

[1] 新华社. 第三次全国国土调查主要数据公报［EB/OL］.（2021-08-26）［2022-05-07］.［Xinhua News Agency.The third national land survey main data bulletin［EB/OL］.（2021-08-26）［2022-05-07］.(in Chinese)］

[2] 王祯，吴金华，白帅，等. 延安市坡耕地资源时空变化及其土壤侵蚀效应［J］. 水土保持研究，2022, 29(3)：1－11.［WANG Zhen, WU Jinhua, BAI Shuai, et al. Spatiotemporal changes of sloping farmland resources and its soil erosion effects in Yan'an City［J］. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(3)：1－11.（in Chinese with English abstract）］

[3] 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.［JIAO Juying, WANG Wanzhong. Quality and soil-water conservation effectiveness of level terrace on the loess plateau［J］. Transactions of the CSAE, 1999, 15(2)：65－69.（in Chinese with English abstract）］

[4] 薛萐，刘国彬，张超，等. 黄土高原丘陵区坡改梯后的土壤质量效应［J］. 农业工程学报，2011, 27(4)：310－316.［XUE Peng, LIU Guobin, ZHANG Chao, et al. Effects of terracing slope cropland on soil quality in hilly region of loess plateau［J］. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4)：310－316.（in Chinese with English abstract）］

[5] 周波. 甘肃省标准化梯田建设综合技术研究［D］. 西安：西安理工大学，2017.［ZHOU Bo. Research on comprehensive technology of standardized Terrace Construction in Gansu Province［D］. Xi'an: Xi'an University of technology, 2017.（in Chinese with English abstract）］

[6] 陈蝶，卫伟，陈利顶，等. 梯田生态系统服务与管理研究进展［J］. 山地学报，2016, 34(3)：374－384.［CHEN Die, WEI Wei, CHEN Liding, et al. Progress of the ecosystem services and management of terraces［J］. Mountain Research, 2016, 34(3)：374－384.（in Chinese with English abstract）］

[7] 王彦武，牛莉婷，张峰，等. 黄土区高标准梯田生态服务功能及其价值［J］. 水土保持学报，2019, 33(6)：190－196.［WANG Yanwu, NIU Liting, ZHANG Feng, et al. Ecological service function and its value of high-standard terrace in loess region［J］. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6)：190－196.（in Chinese with English abstract）］

[8] 张宏鸣，胡勇，杨勤科，等. 基于影像与坡度数据融合的梯田田块分割方法［J］. 农业机械学报，2018, 49(4)：249－

256. ［ZHANG Hongming, HU Yong, YANG Qinke, et al. Segmentation method of terraced fields based on image and gradient data［J］. Journal of agricultural machinery, 2018, 49(4): 249 − 256. (in Chinese with English abstract)］

［9］ 王爱云. 1978—1985年的农村扶贫开发［J］. 当代中国史研究, 2017, 24(3): 36 − 50. ［WANG Aiyun. Rural poverty alleviation and development from 1978 to 1985［J］. Contemporary China History Studies, 2017, 24(3): 36 − 50. (in Chinese with English abstract)］

［10］ 李万源. 基于GEE和机器学习的固原市黄土梯田时空变化遥感监测［D］. 宁夏：宁夏大学, 2021. ［LI Wanyuan. Remote sensing monitoring of temporal and spatial changes of loess terraces in Guyuan City Based on GEE and machine learning［D］. Ningxia: Ningxia University, 2021. (in Chinese with English abstract)］

［11］ GIORDAN D, CIGNETTI M, BALDO M, et al. Relationship between man-made environment and slope stability: the case of 2014 rainfall events in the terraced landscape of the Liguria region (northwestern Italy)［J］. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2017, 8(2): 1833 − 1852.

［12］ CAMERA C A S, APUANI T, MASETTI M. Mechanisms of failure on terraced slopes: the Valtellina case (northern Italy)［J］. Landslides, 2014, 11(1): 43 − 54.

［13］ WEN Y, GAO P, MU X, et al. Experimental Study on Landslides in Terraced Fields in the Chinese Loessial Region under Extreme Rainfall［J］. Water, 2021, 13(3): 270.

［14］ BERCIC T, AZMAN-MOMIRSKI L. Parametric terracing as optimization of controlled slope intervention［J］. Water, 2020, 12(3): 634.

［15］ 史绪国，张路，许强，等. 黄土台塬滑坡变形的时序InSAR监测分析［J］. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 1027 − 1034. ［SHI Xuguo, ZHANG Lu, XU Qiang, et al. Monitoring slope displacements of loess terrace using time series InSAR analysis technique［J］. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 1027 − 1034. (in Chinese with English abstract)］

［16］ 刘茹，张庚，王思楚，等. 宁南黄土丘陵沟壑区土地类型与土地利用耦合分析［J］. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(3): 426 − 434. ［LIU Ru, ZHANG Geng, WANG Sichu, et al. Coupling analysis of land type and land use in Ningnan hilly-gully area［J］. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2018, 54(3): 426 − 434. (in Chinese with English abstract)］

［17］ 刘佳丽，田佳，郑田恬，等. 基于边坡稳定的黄土梯田优化设计［J］. 中国水土保持科学, 2020, 18(4): 21 − 28. ［LIU Jiali, TIAN Jia, ZHENG Tiantian, et al. Optimized design of loess terrace based on slope stability［J］. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(4): 21 − 28. (in Chinese with English abstract)］

［18］ 徐峻龄，马惠民，郑静，等. 滑坡的规律研究与防治［J］. 铁道工程学报, 2005(增刊 1): 333 − 339. ［XU Junling, MA Huimin, ZHENG Jing, et al. Research in the rules and controlling of landslide［J］. Journal of Railway Engineering Society, 2005(Sup 1): 333 − 339. (in Chinese with English abstract)］

［19］ 王恭先. 滑坡学与滑坡防治技术［M］. 北京：中国铁道出版社, 2004: 3 − 4. ［WANG Gongxian. Landslide science and landslide prevention technology［M］. Beijing: China Railway Press, 2004: 3 − 4. (in Chinese)］

［20］ 殷跃平. 滑坡防治技术指南［M］. 北京：地质出版社, 2018: 3 − 4. ［YIN Yueping. Technical guide for landslide prevention and control［M］. Beijing: Geological Publishing House, 2018: 3 − 4. (in Chinese)］

［21］ 波波夫. 工程地质学［M］. 北京：地质出版社, 1957: 95 − 96. ［И. В. Попов. Engineering geology［M］. Beijing: Geological Publishing House, 1957: 95 − 96. (in Chinese)］

［22］ 黄润秋. 20世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制［J］. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(3): 433 − 454. ［HUANG Runqiu. Large-scale landslides and their sliding mechanism in China since the 20th Century［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(3): 433 − 454. (in Chinese with English abstract)］

［23］ 朱庆，曾浩炜，丁雨淋，等. 重大滑坡隐患分析方法综述［J］. 测绘学报, 2019, 48(12): 1551 − 1561. ［ZHU Qing, ZENG Haowei, DING Yulin, et al. A review of major potential landslide hazards analysis［J］. Acta Geodaeticaet Cartographica Sinica, 2019, 48(12): 1551 − 1561. (in Chinese with English abstract)］

［24］ 许强，董秀军，李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警［J］. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957 − 966. ［XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards［J］. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957 − 966. (in Chinese with English abstract)］

［25］ 张茂省，孙传尧，校培喜，等. 延安市宝塔区地质灾害详细调查示范［J］. 西北地质, 2007, 40(2): 29 − 55. ［ZHANG Maosheng, SUN Chuanyao, XIAO Peixi, et al. A demonstration project for detailed geo-hazard survey in the Baota District, Yan'an City［J］. Northwestern Geology, 2007, 40(2): 29 − 55. (in Chinese with English abstract)］

［26］ 陈春利，贺凯，李同录. 坡脚开挖诱发古滑坡复活的机制分析［J］. 西北地质, 2014, 47(1): 255 − 260. ［CHEN Chunli, HE Kai, LI Tonglu. Research on the mechanism of the ancient landslide resurrection triggered by slope toe excavation［J］. Northwestern Geology, 2014, 47(1): 255 − 260. (in Chinese with English abstract)］

［27］《工程地质手册》编委会. 北京：工程地质手册第5版［M］. 中国建筑工业出版社, 2018: 651－653.［Editorial board of engineering geology manual. Engineering geology manual［M］. Beijing: China Construction Industry Press, 2018: 651－653. (in Chinese)］

［28］樊晓一, 张友谊, 杨建荣. 汶川地震滑坡发育特征及其影响因素［J］. 自然灾害学报, 2012, 21(1): 128－134.［FAN Xiaoyi, ZHANG Youyi, YANG Jianrong. Developmental characteristics and influence factors of landslides in Wenchuan earthquake［J］. Journal of Natural Disasters, 2012, 21(1): 128－134. (in Chinese with English abstract)］

［29］王兰民, 蒲小武, 吴志坚, 等. 地震和降雨耦合作用下黄土边坡失稳滑移的振动台试验研究［J］. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(增刊2): 3873－3883.［WANG Lanmin, PU Xiaowu, WU Zhijian, et al. The shaking table test of the instability sliding of loess slope under the coupling effects of earthquake and rainfall［J］. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(Sup 2): 3873－3883. (in Chinese with English abstract)］

［30］李泊良, 张帆宇. 降雨和地震条件下浅层黄土滑坡三维稳定性评价［J］. 工程科学学报, 2022, 44(3): 440－450.［LI Poliang, ZHANG Fanyu. Three-dimensional stability evaluation of shallow loess landslides under rainfall and earthquake conditions［J］. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(3): 440－450. (in Chinese with English abstract)］

［31］曹生奎, 刘峰贵, 张海峰, 等. 青海高原地震重灾区的灾害特点及成因探析［J］. 灾害学, 2005, 20(1): 77－80.［CAO Shengkui, LIU Fenggui, ZHANG Haifeng, et al. An Analysis on characteristics and causes of earthquake disaster in heavy disastered area in the Qinghai Plateau［J］. Journal of Catastrophology, 2005, 20(1): 77－80. (in Chinese with English abstract)］

［32］王高峰, 王爱军, 陈宗良, 等. 六盘山东麓断裂带滑坡类型与变形机理研究——以泾河源区为例［J］. 水文地质工程地质, 2017, 44(2): 102－109.［WANG Gaofeng, WANG Aijun, CHEN Zongliang, et al. Study on types and deformation mechanism of landslide in the fauli zone of eastern Liupanshan: Taking the source district of Jinghe River as an example［J］. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(2): 102－109. (in Chinese with English abstract)］

［33］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.［ZHANG Maosheng, LI Tonglu. Triggering factors and forming mechanism of loess landslide［J］. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(4): 530－540. (in Chinese with English abstract)］

［34］温永福, 高鹏, 穆兴民, 等. 黄土高原丘陵沟壑区梯田边坡侵蚀过程对雨强的响应［J］. 泥沙研究, 2017, 42(6): 46－51.［WEN Yongfu, GAO Peng, MU Xingmin, et al. Response of soil erosion to rainfall intensity in terraced slope in the Loess Plateau［J］. Journal of Sediment Research, 2017, 42(6): 46－51. (in Chinese with English abstract)］