引文格式:许强,彭大雷,范宣梅,等.甘肃积石山Ms 6.2地震触发青海中川乡液化型滑坡-泥流特征与成因机理[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(2):207-222.DOI:10.13203/j.whugis20240007

Citation: XU Qiang, PENG Dalei, FAN Xuanmei, et al. Preliminary Study on the Characteristics and Initiation Mechanism of Zhongchuan Flowslide Due to Liquefaction Triggered by the Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(2):207-222.DOI:10.13203/j.whugis20240007

甘肃积石山Ms 6.2地震触发青海中川乡液化型滑坡-泥流特征与成因机理

许 强[1] 彭大雷[1] 范宣梅[1] 董秀军[1] 张晓超[1] 王 欣[1]

1 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都,610059

摘 要:2023-12-18甘肃积石山Ms 6.2地震在青海省海东市民和县中川乡金田村和草滩村触发了一起典型地震液化型滑坡-泥流,致使大量房屋被厚达数米的淤泥包围掩埋,因其表现出显著的突发性和超强的流动性,曾被误认为"砂涌"。通过现场调查和遥感解译分析,确认该地质灾害为地震触发的液化型滑坡-泥流,并探讨了其成因机理。结果表明:(1)此次地质灾害是地震过程中的振动荷载导致台塬底部饱水粉砂层(黄土层)液化,形成滑坡并转化为泥流,泥流沿沟谷流动到达村庄后漫流成灾,并不是传统意义上的就地"砂涌";(2)滑源区在液化过程中具体表现为溃散性破坏和侧向扩离两种失稳模式;(3)地震触发土体液化多发生在具有明显应变软化特征的饱水颗粒材料(粉质黄土、细砂等)中。此类地质灾害发生具有突发性,失稳后往往呈流体状远程运动,易造成灾难性后果,应引起高度重视。

关键词:地震滑坡-泥流;溃散性滑坡;侧向扩离;地震液化;积石山地震

中图分类号:P237 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-01-09

DOI:10.13203/j.whugis20240007 **文章编号**:1671-8860(2025)02-0207-16

Preliminary Study on the Characteristics and Initiation Mechanism of Zhongchuan Flowslide Due to Liquefaction Triggered by the Ms 6.2 Jishishan Earthquake in Gansu Province

XU Qiang[1] *PENG Dalei*[1] *FAN Xuanmei*[1] *DONG Xiujun*[1]
ZHANG Xiaochao[1] *WANG Xin*[1]

1 State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: On 18th December 2023, an Ms 6.2 earthquake centered in Jishishan County, Gansu Province triggered a prototypical earthquake-induced liquefaction flowslide in Jintian Village and Caotan Village, Zhongchuan Township, Minhe County, Haidong City, Qinghai Province. This hazard caused numerous buildings to be engulfed and interred by several meters of deposits. Owing to the abruptness of its occurrence and extremely high fluidity, it was mistakenly identified as a "sand surge". Through on-site investigation and remote sensing imagery analysis, we confirm this flowslide to be an earthquake-triggered liquefied flowslide event, and explore its causal mechanisms. The results show that: (1) This flowslide was induced by seismic vibratory loading causing liquefaction of the saturated silt layer (loess layer) underlying the plateau, forming a landslide that transformed into a mudflow moving along the valley, rather than an in-situ "sand surge" in the conventional sense. (2) This flowslide includes two failure modes: diffuse failure and lateral spreading. (3) Earthquake-induced soil liquefaction frequently occurs in saturated granular materials (silts, fine sands, etc.)

基金项目:国家自然科学基金(42125702,42007275,42377196);国家重点研发计划(2022YFC3003205);四川省自然科学基金重大项目(2022NSFSC0003);新基石科学基金会所设立的科学探索奖(XPLORER-2022-1012);青海省应急管理厅委托项目(2024-自然灾害处-01)。

第一作者:许强,博士,教授,主要从事地质灾害评价预测与防治处理研究。xq@cdut.edu.cn

exhibiting prominent strain softening characteristics. The occurrence of such geological hazard is abrupt. Post-instability, the landslide mass flows significant distances like a fluid, readily resulting in catastrophic consequences. This warrants heightened attention.

Key words: earthquake-induced flowslide; diffuse landslide; lateral spreading; seismic liquefaction; Jishishan earthquake

2023-12-18T23:59:30甘肃省临夏回族自治州积石山县(震中35.70°N,102.79°E)发生Ms 6.2逆冲型地震(图1(a))[1-2]。此次地震已造成大量房屋损毁、倒塌和151人遇难,983人受伤;其中,甘肃117人遇难,785人受伤;青海34人遇难,198人受伤。此次地震Ⅶ度及以上烈度区内共发育1 535处同震地质灾害,主要为中小规模黄土滑坡和浅表层岩质崩塌,集中分布于黄土梁和黄土塬内冲沟两侧、单薄黄土梁两侧以及大型历史滑坡后壁等局部地形较陡峭的部位[3]。但在这些地质灾害中,青海省民和县中川乡金田村和草滩村一带的祁家沟发生了一起特殊泥流灾害,造成51间民房破坏,19条道路中断,20名群众遇难,大量房屋被厚达数米的淤泥包围掩埋(图1(c))[4]。

一般而言,泥石流的发生需要一定水源,往往与强降雨或坝体溃决等相伴随,例如2013年强降雨触发天水娘娘坝地区大面积浅层滑坡-坡面泥流灾害[5],又如2015-01-28 11时许,兰州皋兰什川削山造地的淤堤坝发生坍塌,库区的10万m^3淤泥转化为泥流顺沟而下注入黄河[6]。为此,不少人甚至怀疑其上游是否发生了坝体溃决事件。但调查表明,积石山6.2级地震前后官亭盆地并未出现明显的降雨过程,上游也不存在淤地坝建造项目,因此中川乡金田村和草滩村一带突然出现的大范围泥流(或砂涌)的成因引起了国内外相关科研人员和社会的广泛关注,不少媒体将其视为"砂涌"引发的灾害。一些学者还将该事件与同处甘肃与青海接壤地带的官亭盆地喇家遗址遭遇史前地震、泥石流、洪水等综合灾难事件联系起来[7-9],其主要疑问和争论的焦点在于:

1)房屋破坏和人员掩埋区属于黄河的Ⅱ级阶地,地震发生在凌晨,等当地人员发现时,金田村和草滩村已被淤泥掩埋包围,但12月底祁家沟(季节性冲沟)基本处于干涸状态,这些大量的淤泥是从哪里来的?是一些村民和专家所说"从平地里冒出来的",还是从上游斜坡和沟谷流下来的?

2)滑源区顶面地势平坦,坡体稳定性良好,为何会发生如此大面积的圈椅状斜坡失稳破坏现象?

3)据处在灾害现场的祁家沟沟头(斜坡体沟口)村民讲述,地震和泥流似乎是同时到达的。但据中川乡干部和泥流下游金田村民介绍,地震发生后约10 min,泥流才掩埋距灾害源头2.0 km处的房屋。据此估算,该泥流平均流动速度约为3.3 m/s。为何在如此平缓的沟谷,泥流还能以较快的速度流动?

因此,中川乡泥流发生后,很多业内专家表示:"这次泥流(砂涌)是极其罕见的地质灾害类型"。关于此次灾害的成因,工程地质学、地震学界的专家学者和资深媒体人在各种场合出现了砂涌、泥石流、平地泥石流等多种解读,并展开过激烈的讨论乃至争论。

中川乡灾害发生的原因究竟是什么?本文在遥感解译和现场调查的基础上,结合对近年国内外发生的几起与中川乡地质灾害特征较为相似的灾害进行对比分析,初步探讨此类主要由粉土与细砂材料组成的斜坡,在底部饱水的条件下受地震动液化的影响,产生突发性的失稳破坏,并呈流体状远程运动的滑坡的成因机理。

1 中川乡地震液化型滑坡-泥流简介

1.1 液化型滑坡-泥流工程地质条件

甘肃积石山Ms 6.2地震发生后,笔者团队迅即利用遥感解译对地震产生的灾情进行了快速分析、跟踪研究,并于12月25日—29日开展现场调查研究。结合震前高分辨率的遥感影像、应急管理部国家减灾中心提供的灾后10 cm分辨率无人机影像(表1)、三维实景模型和高密度电法,对本次灾害发育特征和成因机理进行综合分析。

此次滑坡位于青海省民和县官亭盆地,距民和县约50 km,离甘肃省临夏回族自治州约40 km(图1(a))。官亭盆地是青藏高原东北麓与黄土高原西南缘接界处的山间河谷盆地,西北部为拉脊山,南部被积石山包围,广泛发育由红黏土和黄土组成的台地[10]。盆地新构造运动强烈,地震时有发生[11]。拉脊山断裂带穿过盆地西部,以逆冲活动为主,晚更新世和全新世时期活动频繁(图1(a))[8]。依据中国地震局发布的《甘肃积石山6.2级地震烈度图》,官亭盆地处在此次地震Ⅷ度烈度区[12]。

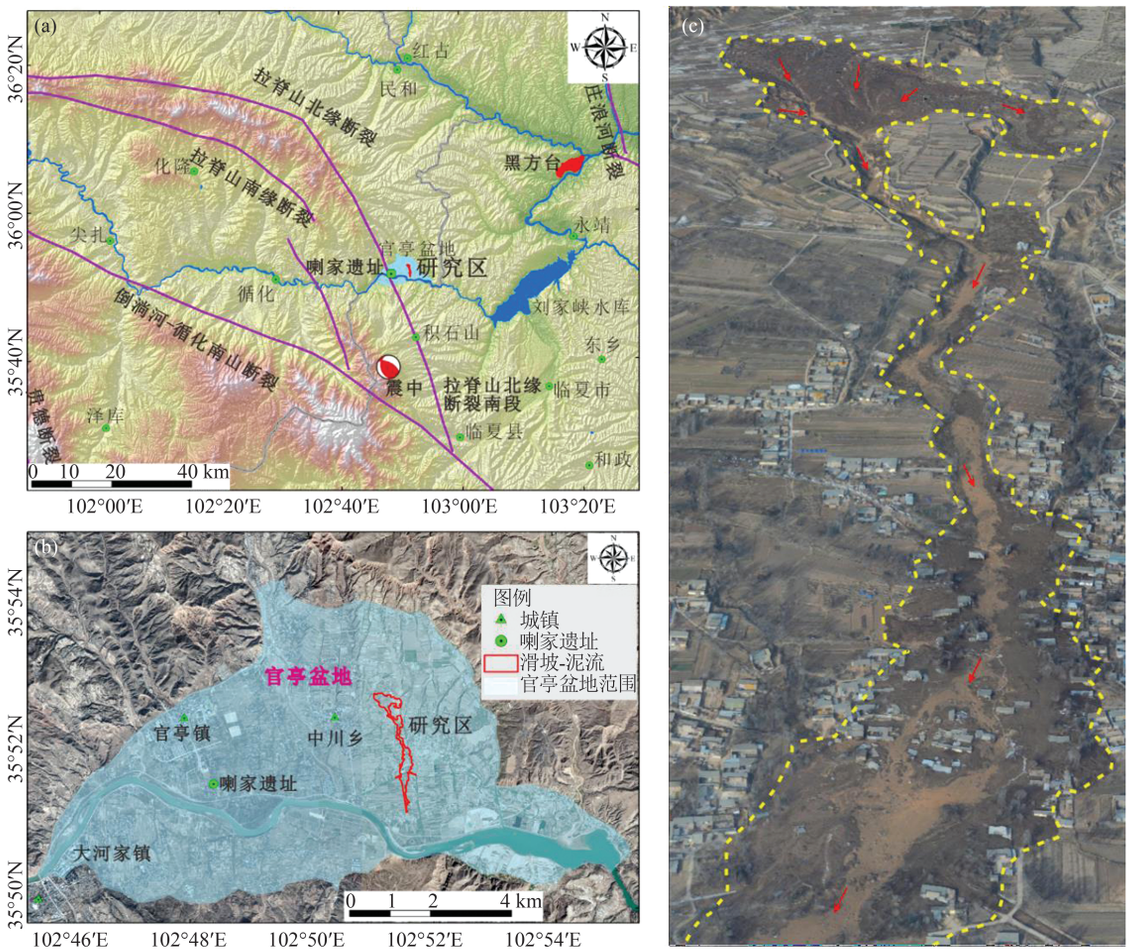


图 1 积石山 Ms 6.2 地震

(a)积石山地震震中及其周边断层和滑坡分布;(b)官亭盆地地貌特征及中川乡地震滑坡-泥流位置;(c)中川乡地震滑坡-泥流鸟瞰图

Fig. 1　Jishishan Ms 6.2 Earthquake

(a) The Location and Distribution of the Epicenter, Fault, and Landslide Area; (b) The Geomorphological Characteristics of the Guanting Basin and the Location of Earthquake-Induced Flowslide in Zhongchuan Town; (c) Aerial View of the Earthquake-Induced Flowslide in Zhongchuan Town

表 1　本文所使用的数据集

Table 1　Databases Used in This Study

数据类型	数据来源	时间	空间分辨率/m
震前影像	Key Hole	1961-11-15	2
	Google Earth	2022-04-07	0.5
	高分 7 号	2022-10-16	0.65
	Sentinel-2	2023-12-18	10
震前数字高程模型(digital elevation model,DEM)	高分 7 号立体相对数据	2022-10-16	5
震后影像	Sentinel-2	2023-12-20	10
	无人机低空摄影测量	2023-12-19	0.1
	无人机三维倾斜测量数据	2023-12-25	0.03
震后 DEM	无人机低空摄影测量	2023-12-19	0.5
	带地面相控点无人机三维倾斜测量数据	2023-12-25	0.1

黄河自西向东穿过盆地,两岸发育河流阶地或新老洪积扇。盆地内年平均气温约为 8～9 ℃,降水量为 250～300 mm,气候比较温和,自然条件相对优越,宜于发展农业生产,主要农作物是玉米和小麦[13]。据当地农田水利工程师介绍,自 1969 年,官亭盆地开始修建灌溉系统,早期通过高扬程水泵将黄河的

水提灌到阶地台塬上;2010年随着积石峡水电站建成,当地政府建造引水灌溉工程,并于2017年修建经过滑坡附近的北干渠渡槽工程,节约灌溉成本的同时,也提高了农作物种植面积和生产力,实现双丰收。在近55年的时间里,灌溉系统源源不断地将黄河水输送到黄河阶地上,直到12月18日地震期间部分干渠被毁(图2(a))。为了保证土壤的水分和温度,官亭盆地每年进行冬、春、夏3次大规模灌溉,其中冬灌主要在每年11月下旬至12月中旬。在持续灌溉下,台塬底部长期处于饱水状态,通过电阻率成像揭示滑源区的地下水埋深在15~20 m,斜坡下方田间地下水埋深在5~10 m(图3);在本次地震发生前,该区域已经连续进行了3天的冬灌(图2(b))。据地震当天白天的哨兵2号、地震后第二天的无人机影像和现场调查显示,田块表层含水量较高,局部含水量达80%(图2(b)和图2(c)),滑坡后壁底部的土体质量含水率高达33%,季节性冻土影响深度1 m左右。

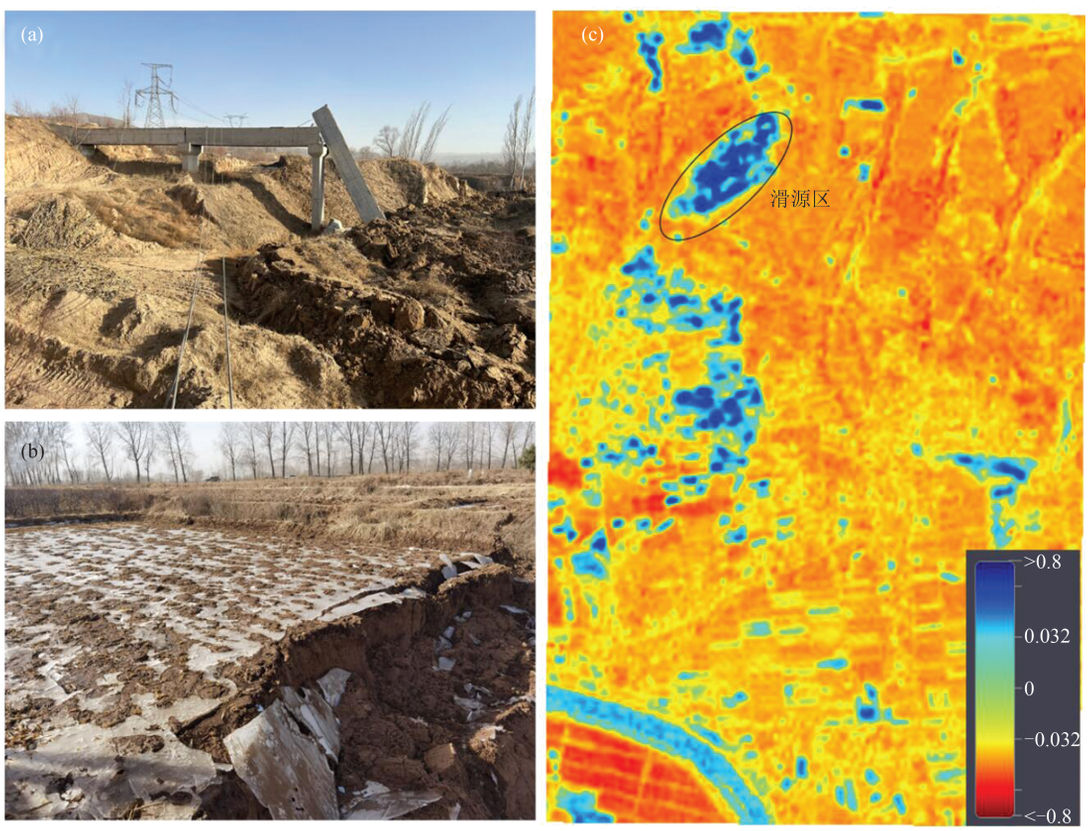


图2 水文地质条件

(a)被滑坡破坏的北干渠渡槽(照片拍摄于2023-12-25);(b)滑源区耕地表面高含水量情况(照片拍摄于2023-12-25);(c)Sentinel-2反演斜坡失稳前地表含水率情况(影像拍摄于2023-12-18)

Fig. 2 Hydrogeologic Condition

(a) The Beigan Canal Aqueduct Damaged by the Flowslide (Photo Taken on 25 December 2023);(b) The High Water Content on the Surface of Farmland in the Sliding Source Area (Photo Taken on 25 December 2023); (c) Sentinel-2 Data Inversion of Surface Water Content Before Slope Failure (Image Taken on 18 December 2023)

据台塬周缘与滑坡后壁出露剖面和探槽及其便携式钻探揭露,滑坡源区的地层结构近水平(图4),从上到下依次为:(1)0~0.5 m为Q_4耕作土壤层,深棕色,粘土质粉砂质地,植物根系发育,生物扰动现象明显;(2)0.5~1.8 m为Q_3红黏土层,整体呈红色黏土质沉积,局部呈现灰黑色-红色-灰黑色的变化,有层理;(3)1.8 m以下(未见底)为Q_3粉砂层(黄土层),浊黄橙色,粉砂质地,明显饱水,看似结构保持完好,轻轻震动后,就会液化变得极为粘稠;(4)Q_2砂卵石层。依据滑坡源区底部取样(图4(b)),颗粒组成测试结果表明,滑坡体以粉粒为主,粘粒和砂粒含量较少。地震后的12月25日—29日,通过洛阳铲和环刀采集的滑源区土体样品测试结果表明,液化层之上的粉砂层质量含水率为12.9%~19.4%,滑床底部的粉砂层质量含水率高达29.1%~33.6%。现场双环入渗试验结果显示,粉砂层入渗速率为2.17×10^{-5} m/s。

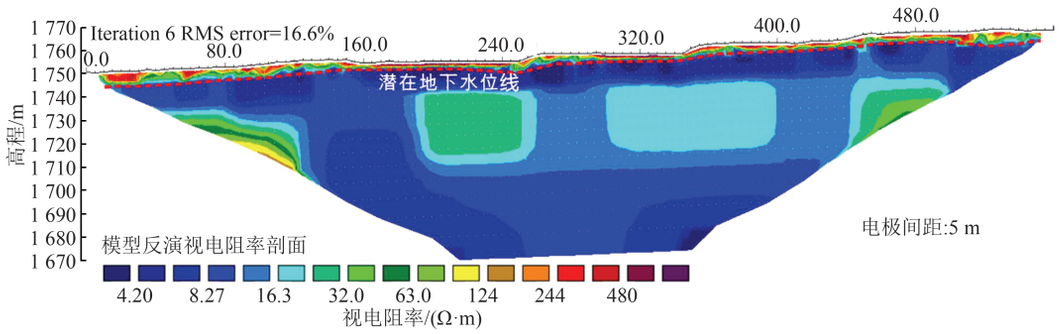


图 3　高密度电法探测的地下水位分布

Fig. 3　Distribution of Groundwater Level Detected by High-Density Electrical Method

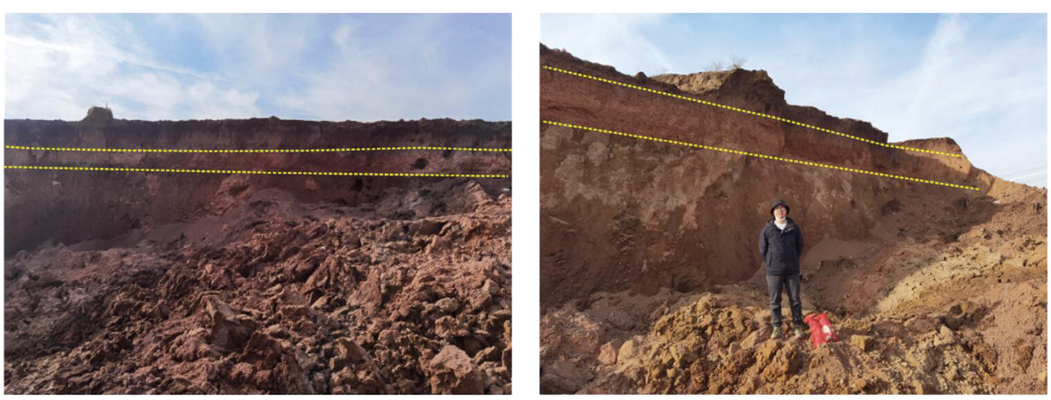


图 4　滑源区地层分布

Fig. 4　Distribution of Strata in the Source Area of the Loess Flowslide

1.2　滑坡-泥流发育特征

地震前后遥感解译结果表明(图 5(a)和 5(b)),整个灾害影响区面积为 0.472 km^2。泥流最远运动距离约 3.0 km,损毁民房 95 间,阻断道路 19 条。中川乡滑坡-泥流形态整体可分为滑源区和流通堆积区两部分(图 5(c))。从图 5 可以看出,滑源区在平面上呈“蝌蚪状”,后缘呈“圈椅状”,流通堆积区沿沟谷呈“条带状”展布。滑坡-泥流海拔介于 1 760～1 844 m。其中滑坡前缘到金田村居民居住地(村庄牌坊)的距离约为 1.8 km。滑坡运动路径见图 5(b)。据祁家沟头的居民介绍,当他们感受到地震穿好衣服跑出房屋时,泥流已经到达房屋周边,推断饱和黄土在地震过程中因震动液化而失稳破坏,并呈流体状快速涌入前缘的沟谷,且瞬时流量较大,流速较快。据中川乡干部和金田村村民介绍,地震发生后的 10 min 内,泥流到达下游草滩村及金田村。

1.2.1　滑源区

滑源区位于黄河的Ⅲ级阶地台塬上,滑坡后壁呈圈椅状,高度为 2～9 m。滑坡区高精度倾斜摄影测量成果显示(图 6 和图 7),滑体长 473 m,宽 311 m,面积 11.35×10^4 m^2,滑动的体积为 63.53×10^4 m^3;前后缘高差约 30 m,滑源区层面(滑面)视倾角为 3.63°,属于近水平滑动。滑源区最大滑动厚度为 13.7 m,平均约 5.6 m(图 7(d))。滑源区从破坏模式上可以分为两部分,前缘部分主要以溃散性失稳为主,大部分物质已滑(流)走(图 6(d)),后半部分只发生一定滑移,存在多级拉张裂缝和台坎,表现出因底部液化向外短距离滑移的侧向扩离破坏模式(图 6(b)和图 7(c)),其滑坡地貌特征与加拿大 Saint-Luc-de-Vincennes 滑坡极为相似[14],以溃散性和流动性失稳破坏开始,以侧向扩离结束。根据滑坡体上的歪斜树、水泥路及渡槽的残体等估测(图 6(a)和图 6(c)),滑源区后缘滑坡体大致滑移了约 200～400 m。滑源区的粉土液化层埋深大致 7～13 m(图 6(e))。根据灌溉前的遥感影像,滑源区以前是一个相对平坦的台塬,没有大规模人类工程活动的痕迹(图 7(a))。自 2017 年后,台塬建设了相对完整的灌溉系统和交通基础设施。斜坡失稳前,滑源区进行了高强度的灌溉(图 7(b))。野外调查发现,滑坡源区底部黄土含水量非常高,基本处于饱和状态,多处出现冒水、渗水现象,并沿主滑动方向形成一股溪水(图 6(d)和图 6(f))。

1.2.2　流通堆积区

流通堆积区主要位于黄河Ⅱ级阶地上,整体呈“条带状”分布。流通堆积区长 2.69 km,后缘最大宽度约 40 m,前缘最大宽度约 270 m,堆积和掩埋面

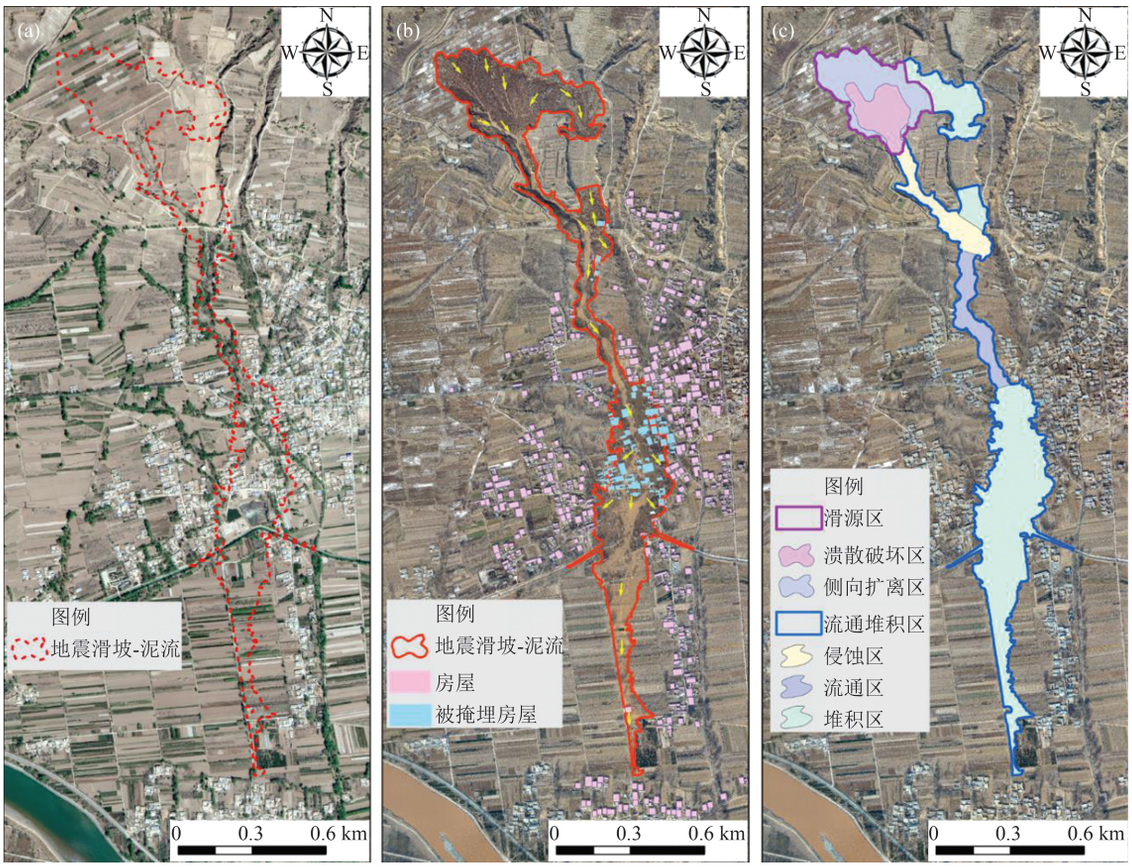


图5 中川乡地震滑坡-泥流前后遥感图、运动路径及滑坡-泥流分区图

(a)地震前遥感影像(来自Google影像(2022-04-07));(b)地震后无人机影像及滑坡运动路径;(c)滑坡-泥流分区图

Fig. 5 Positive Photographic Images of Pre-sliding and Post-sliding, Movement Route, and Zonation Map of the Flowslide

(a) A Pre-sliding Google Image Taken on 18 April 2022; (b) A Post-sliding Unmanned Aerial Vehicle(UAV)Image Taken on 19 December 2023; (c) The Zonation Map of the Flowslide

积35.91×10^4 m^2,前缘与后缘高差为53 m,视倾角为1.13°,平均堆积厚度约为2 m(图8),依据滑坡前后DEM差分,堆积方量约为72.3×10^4 m^3。对比滑坡前后的影像和当地村民口述,祁家沟沟头有一道压实度较低的土坝,土坝内侧有一定的积水,土坝下游是一条干涸的细沟(名为祁家沟)(图3(c)、图5(a)和图5(b)),到金田村与草滩村居民区后已无明显的沟道;同时,滑坡前DEM显示,沟道下游存在一片地势相对低洼地段。

结合现场调查和遥感解译结果,流通堆积区沿着泥流运动路径大体可以分为侵蚀区、流通区、堆积区(图8(a)),侵蚀区主要分布在滑坡剪出口到祁家沟沟头,泥流从滑坡剪出口冲出进入斜坡下方冲沟后,因沟床狭窄,泥流侵蚀沟道两侧并留下一定的松散堆积物(图8(b)),沟槽下部存在明显的擦痕,说明泥流运动时具有强烈的侵蚀作用。通过地震前后影像对比分析,沟底的宽度增加了1~2倍,表明祁家沟区泥流的峰值流速较大,侵蚀作用强烈。

泥流汇入祁家沟后,进入流通区,由于汇流口沟道转向和土坝的阻挡,造成泥流爬高并形成局部回淤(图8(c)),居民2层楼中部留下清晰的泥痕(距楼房地面高度约4 m)。泥流在运移过程中推倒了沟道两侧的树木,并对沟道两侧产生明显的侵蚀作用,并在沟道中部有一定的淤积(图8(d))。

泥流到达下游村庄后进入堆积区,形成了高3~5 m龙头,表现出极高的流动性并呈流塑状态(图8(f)和8(g)),掩埋了近90间房屋(图8(a)),但对地面本身没有明显的侵蚀,对房屋没有明显的撞击破坏。通过现场调查,泥流经过村口的道路和牌坊并没有倒塌和损坏(图8(e));同时,泥石流发生时,当时气温较低,地表处于冻结状态,在泥流堆积前缘发现堆积体与地面形成薄冰层,这些都会降低泥流与地面的摩擦阻力。此次滑坡-泥流的堆积类型主要有沟床堆积、弯道堆积、爬高舌状堆积、龙头堆积、环状堆积以及回溯堆积等[15]。

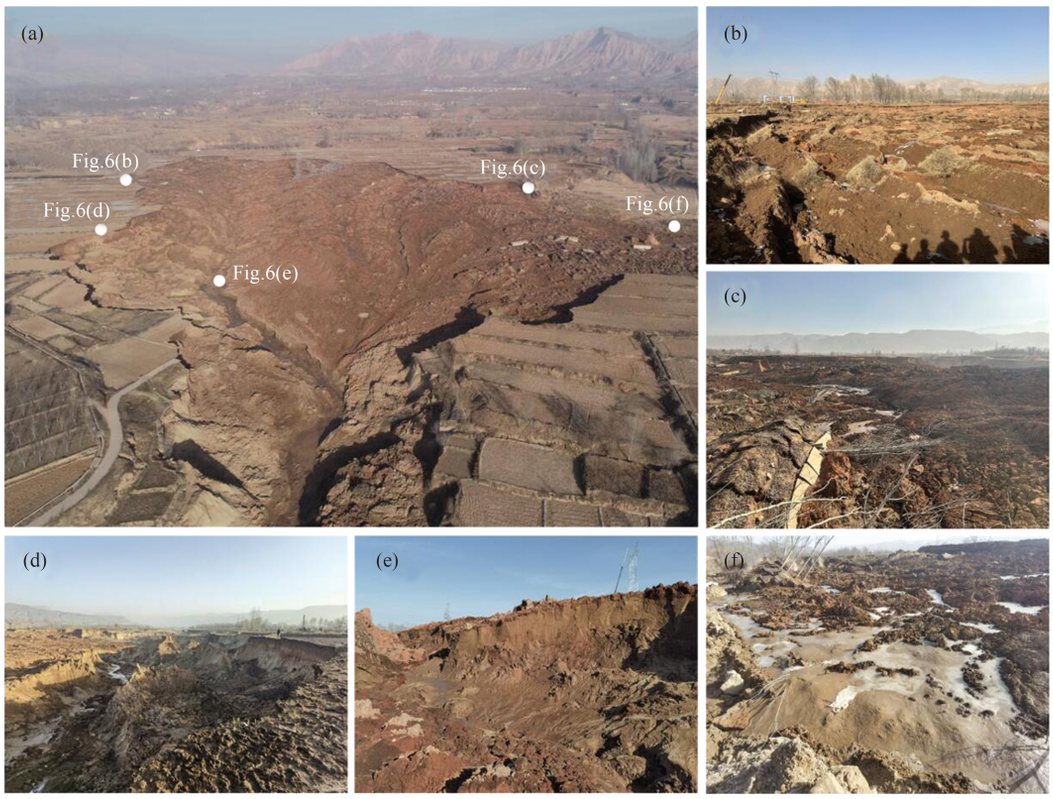


图 6　滑源区失稳破坏特征

(a)滑源区鸟瞰图(图片来源于兰州大学孟兴民教授团队);(b)滑源区“卧倒”波浪型地貌(侧向扩离式破坏);(c)滑源区残留的“内倾”的杨树(醉汉树);(d)滑源区前缘溃散性破坏;(e)滑源区粉砂土(砂黄土)液化层;(f)滑源区残留的地下水

Fig. 6　Characteristics of Instability and Failure in the Source Area of the Loess Flowslide

(a) Aerial View of the Source Area(Photo from the Team of Professor Meng Xingmin at Lanzhou Univewrsity); (b) The “Lying Down” Wave Shaped Landform in the Source Area (Lateral Spreading Failure Model); (c) The Remaining “Inward Leaning” Poplar Trees (Drunken Chinese Trees) in the Source Area; (d) Diffuse Failure at the Leading Edge of the Source Area; (e) Liquefied Layer of Silt (Loess) in the Source Area; (f) Residual Water Seepage from Underground in the Source Area

2　地震触发滑坡-泥流的共性特征

2.1　中国黄土高原地震类似诱发滑坡-泥流

黄土具有极强的水敏性和动力易损性,历史上黄土高原也发生过由地震触发土壤液化形成滑坡的案例。例如,1920 年海原 8.5 级地震引发多起大规模的黄土滑坡群,具有代表性的是党家岔滑坡和石碑塬滑坡,其中西吉党家岔滑坡滑坡体以 500 m 的宽度运移了 2 km 左右[16-17];它们是由黄土液化作用引发,具有流动性大、运动距离远、沿缓坡路径行进的特点[18](图 9)。2013 年甘肃岷县 6.6 级地震也引发了永光村黄土滑坡-泥流,滑坡体体积约 $40\times10^4\ m^3$,原始坡度约为 18°,运动距离 1.03 km[19-20]。

2.2　国外地震诱发类似滑坡-泥流

2018 年印度尼西亚帕卢 7.5 级地震造成 4 340 人死亡,地震引发的几处大规模土壤液化滑坡是造成伤亡的重要原因之一(图 10)。值得注意的是,帕卢与中川乡地震滑坡的现象与诱因较为相似:由于砂质土壤的种植业需要大量的地下水灌溉,在干旱区因地制宜发展现代化农业灌溉技术,造成了大片耕地的地下水水位明显偏高。在地震动作用下,灌溉田下的土壤发生液化,即便是在坡度很缓的地方也能形成滑坡并且能够运动相当长的距离[21-22]。

此外,2018 年日本北海道 6.6 级地震同样引发了部分土壤液化滑坡(图 11)。北海道震区主要被火山灰地层覆盖。火山灰比普通粗粒砂更容易发生液化。加之震前震区降水造成土体含水率大大增加,局部地区火山灰处于饱水状态,在之后的地震作用下导致火山灰地层液化,形成大量流态型滑坡[23]。此外,日本 2004 年新潟中越 6.8 级地震、2008 年岩手-宫城县 7.2 级地震、2011 年东北部 9.0 级地震以及 2016 年熊本 7.0 级地震诱发的部分滑坡均存在类似现象。

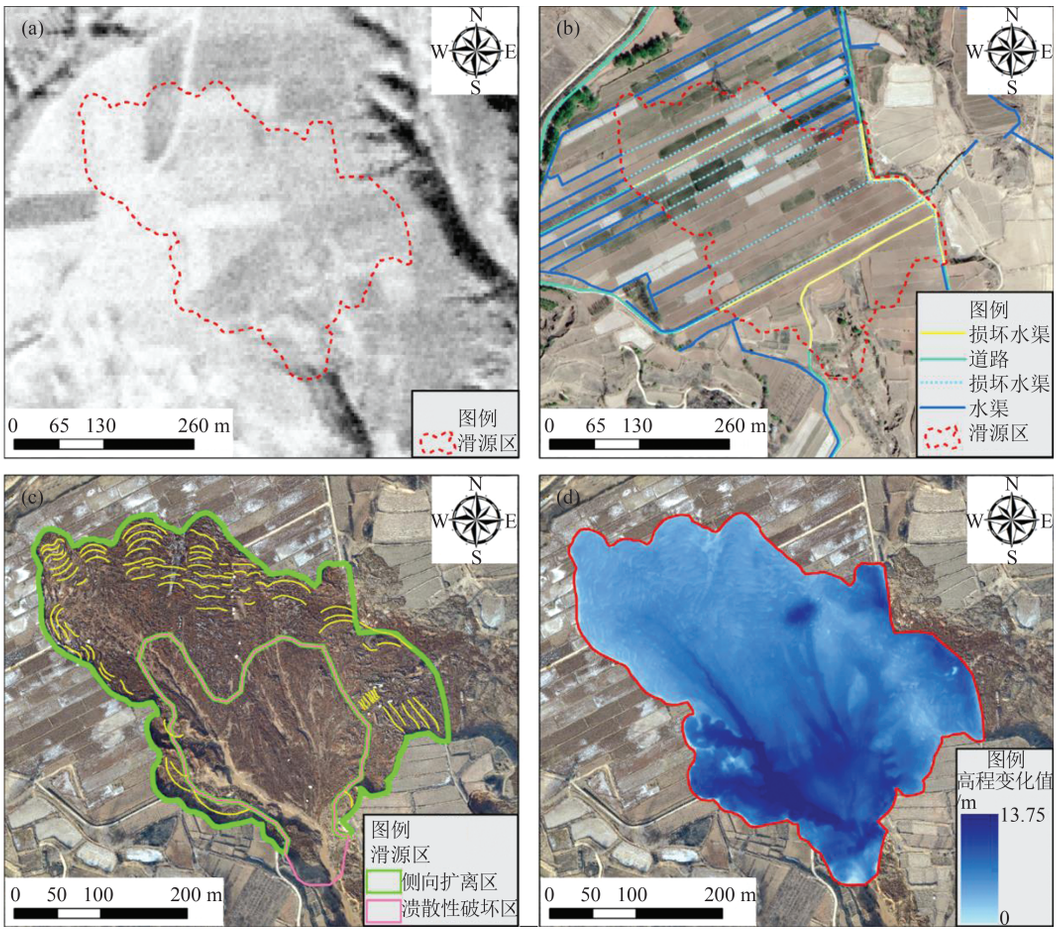


图7 滑源区发育特征

(a)灌溉之前的遥感影像图(来自Key Hole影像(1961-11-15));(b)地震之前的滑源区影像及道路和水渠破坏情况(来自Google影像(2022-04-07));(c)滑后影像及滑源区分区(来自UAV正射影像(2023-12-19));(d)滑坡发生前后高程变化分布图

Fig. 7 Development Characteristics of the Source Area of the Loess Flowslide

(a) Remote Sensing Image Before Irrigation (From Key Hole Image Taken on 15 November 1961); (b) Image of the Sliding Source Area and Damage to Roads and Waterways Before the Earthquake (From Google Image Taken on 7 April 2022); (c) Post-sliding Image and the Slide Source Area Zoning (From UAV Orthophoto Images Taken on 19 December 2023); (d) The Elevation Variation of the Pre-sliding and Post-sliding

2.3 中国黄土高原灌溉诱发滑坡-泥流

在中国黄土高原上,由于液化形成的黄土滑坡-泥流较为常见,距本次灾害事件直线距离不到50 km的甘肃永靖县盐锅峡镇黑方台,是最具代表性的灌溉型黄土滑坡灾害区之一[24]。自1968年来,在持续灌溉的影响下,地下水位抬升了近20 m,局部抬升了约40 m[25],在黑方台塬边发生了黄土滑坡200多起,其中代表性类型为静态液化型黄土滑坡,呈现溃散性破坏特征[24,26],2015-04-29发生的党川2号滑坡具有典型的溃散性滑坡特征(图12)。

上述几处滑坡无论在形成条件,还是滑坡后所表现出的特征,都具有以下共同特点:(1)滑坡区物质组成为粉土或者细砂土;(2)发生的时候并没有强降雨;(3)滑体底部处于饱水状态;(4)多发生在低角度或者近水平地层;(5)运动呈现出显著的流体状特征;(6)底部土层在地震动或者自身重力作用下发生“液化”现象。

3 中川乡滑坡-泥流成因机理

地震发生后,奋斗在一线的记者发布了宝贵的救援照片(图13),一些专家根据救援照片和现场非常稀软的泥土,结合以往的工作经验,给出了“青海海东民和县中川乡发生局地砂涌”,并在媒体上迅速传播。有些专家通过公众号发表观点,认为这是“平地泥石流”。笔者团队通过对12月20日应急管理部国家减灾中心提供的10 cm分辨率无人机影像的解译分析,认为金田村和草

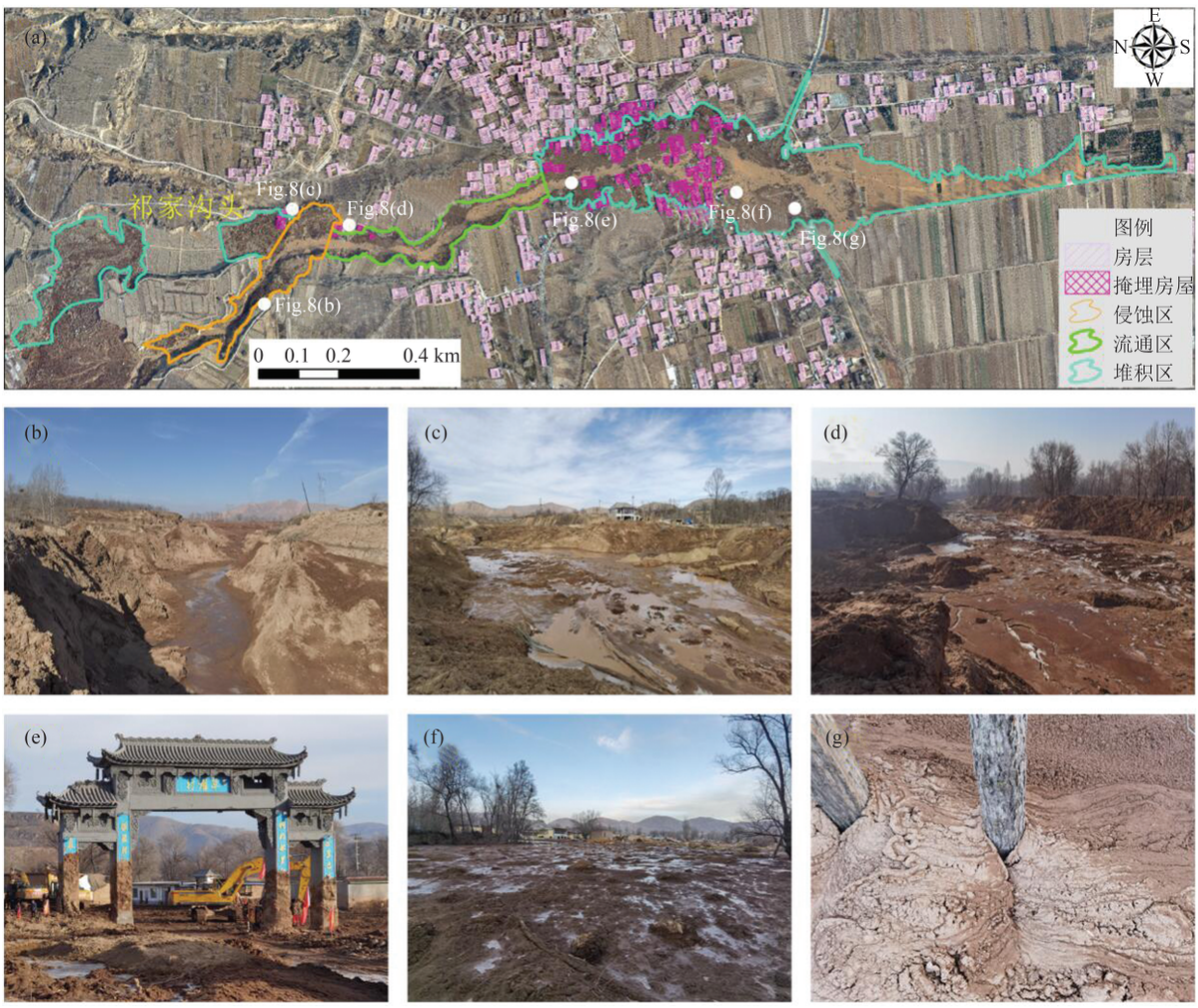


图 8　滑坡-泥流的流通堆积特征

(a)滑坡-泥流的堆积分区及对建筑物的掩埋破坏;(b)侵蚀区的发育特征;(c)泥流对土坝和祁家沟沟头的冲击破坏;(d)流通区的侵蚀与堆积形态;(e)挖掘出完好的牌坊和硬化道路;(f)堆积区的堆积形态与堆积体的状态;(g)泥流对树干“拥抱状”堆积形态

Fig. 8　Transition and Accumulation Characteristics of the Flowslide

(a) Flowslide Accumulation Zoning and Buried Damage to Buildings; (b) The Development Characteristics of Erosion Areas; (c) The Impact and Damage of Flowslide on the Earth Dam and Qijiagou Head; (d) Erosion and Accumulation Patterns in the Circulation Area; (e) Excavate Intact Memorial Archway and Hardened Road; (f) The Accumulation Form and State of the Accumulation Area; (g) Flowslide Embraces the Stacking Form of Tree Trunks

滩村出现的成片分布的高含水淤泥应为“地震滑坡-泥流”,而非“砂涌”[27]。

在现场救援工作接近尾声时,笔者团队于 12 月 25 日—29 日对此次地震滑坡-泥流灾害事件的滑源区和流通堆积区进行了详细调查,并试图寻找公众比较关心的“砂涌”或者“平地泥石流”的证据。通过金田村现场的堆积体特征和挖掘机开挖救援现场的土层,说明这些非常稀软的泥土是从后山台塬上流下来的(图 14),并不是所谓的地震引发的就地“平地泥石流”或“砂涌”。

“砂涌”是一种强震之后常见的自然现象。在地震过程中,地下的含水砂土会发生强烈的液化现象,液化的砂土会沿着一定的通道往上涌并到达地表,出现“喷水冒砂”现象,即通常所说的“砂涌”[28-29](图 15)。砂涌主要由液化的砂土构成,可能包含其他物质,如泥土、石块和树木等。“砂涌”往往发生在平坦的地表,并会在地表留下一个个串珠状的像火山锥似的小鼓包和圆形坑。“砂涌”在地震中非常常见。例如,2011 年 Mw 9.0 日本东北部大地震,2018-09-06 日本北海道地震、2021-05-22 中国青海玛多 7.4 级地震,在现场均出现多处喷水冒砂现象,并在地表留下砂土堆积证据。此次地震在其他乡镇也出现砂涌现象(图 15)。但砂涌的规模往往非常小,很难将房屋包围掩埋,涌出地表的砂土

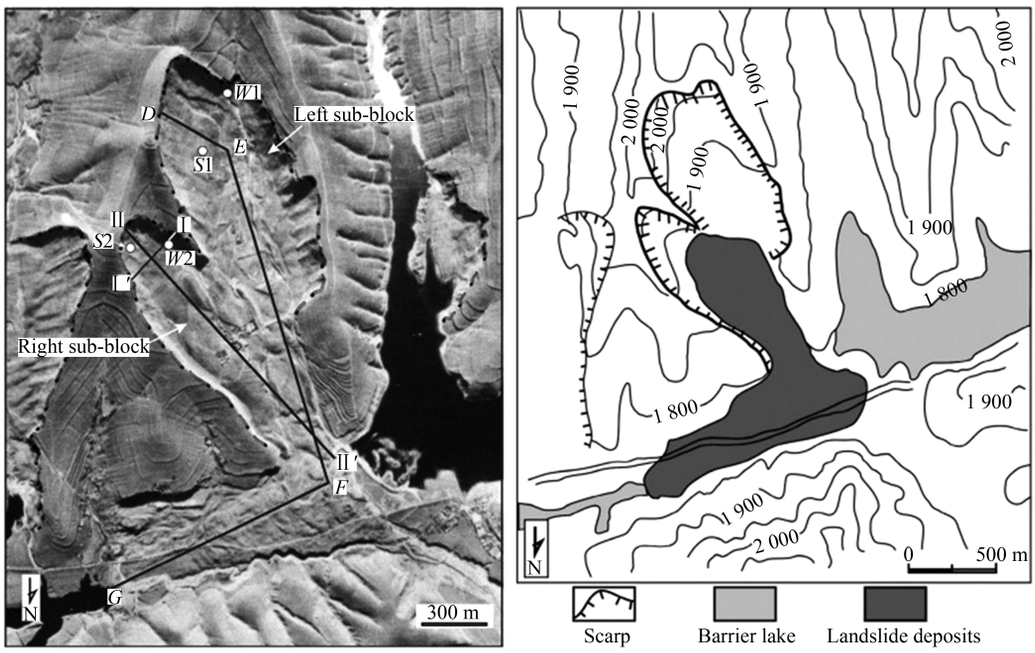


图9 1920年海原8.5级地震诱发宁夏西吉党家岔滑坡(照片拍摄于1966年)及其区域地形[17]

Fig. 9 Dangjiacha Landslide in Xiji, Ningxia, Triggered by the 1920 Haiyuan Earthquake (Photo Taken in 1966) and Its Topographic Map[17]

一般也不会远距离流动。

黄土主要由极细砂、粉砂和粘土组成,具有极强的水敏性和动力易损性。中川乡地震滑坡-泥流失稳地层主要为粉砂质黄土,其与1920年海原地震的石碑塬液化型滑坡的物质组成比较类似[30]。关于地震触发液化型滑坡机理,振动台模型试验表明:底部的黄土液化是大规模滑坡滑移的触发机制,是特殊地层结构及高烈度地震动共同作用的结果[30]。土动三轴试验表明,黄土的液化能力与黄土粒度组成、土体微观结构参数及饱和度有密切关系,黏粒含量越低和黄土孔隙比越大,液化能力越强,同一土体饱和度越高,越容易液化[18,31](图16)。数值模拟结果表明,高含水率非饱和黄土层也可发生振动液化,斜坡前缘和中部土体发生液化的初始饱和度范围分别为68.3%~100%和73.8%~100%,斜坡后缘土体不发生液化。综上所述,非饱和黄土层液化发生机理可概括为:地震作用下导致台塬底部饱水黄土层孔隙水压力激增,高含水率非饱和黄土层孔压增长响应滞后,随着孔隙水压朝上部消散,地下水向上渗流,当平均有效应力接近0时,底部饱水黄土层发生液化,其抗剪强度接近于0,致使其上部非饱和黄土层向台塬临空方向发生局部滑动[16-18,30]。

饱和黄土的稳态强度是黄土斜坡液化后是否大变形或者流滑破坏的关键因素,决定了液化型滑坡-泥流的运动特征。环剪试验结果表明,通过比较不同固结压力下黄土的稳态强度,可以发现滑体厚度对滑带孔压及稳态强度的发展有一定的影响,滑体厚度越大,孔隙水压力增长较慢,稳态强度越大,反之亦然;剪切速率对黄土稳态强度也有一定的影响,随着剪切速率的增加,稳态强度有所降低,且饱和度越高,剪切速率对强度的影响越明显[16,32]。饱和黄土或高含水率黄土具有很高的液化势和流态破坏势,在强震作用下,饱和黄土比较容易发生液化和流滑[18];斜坡体的快速下滑运动使滑动面以上更多土层液化,最终整个滑动的滑坡体进入流动状态[17]。

王兰民等[33]通过对比中国宁夏回族自治区海原地震触发的地震滑坡、美国密西西比河左岸二级阶地上液化滑坡和塔吉克斯坦发生在缓斜坡丘陵地带的滑坡,总结出黄土地区必须具备以下条件才有可能发生振动液化:(1)地貌较为平坦或缓斜坡中更新世和晚更新世以来的黄土地层完整;(2)地下水埋深较浅或者有其他水源补给;(3)地震动超过一定强度。根据野外观察和地球物理探测,此次灾害具备以上条件(图17):(1)滑源区位于台塬Ⅲ级阶地,地势平坦,同时底部发育黄土地层;(2)长期灌溉使地下水位抬升,在台塬底部形成了一定厚度的饱水黄土层(图4),尤其是地震前滑坡源区连续3天的冬灌,入渗深度约为3~4 m,致使浅表层含水量相对较高(图2);(3)该区域处于极震区,地震动背景值最

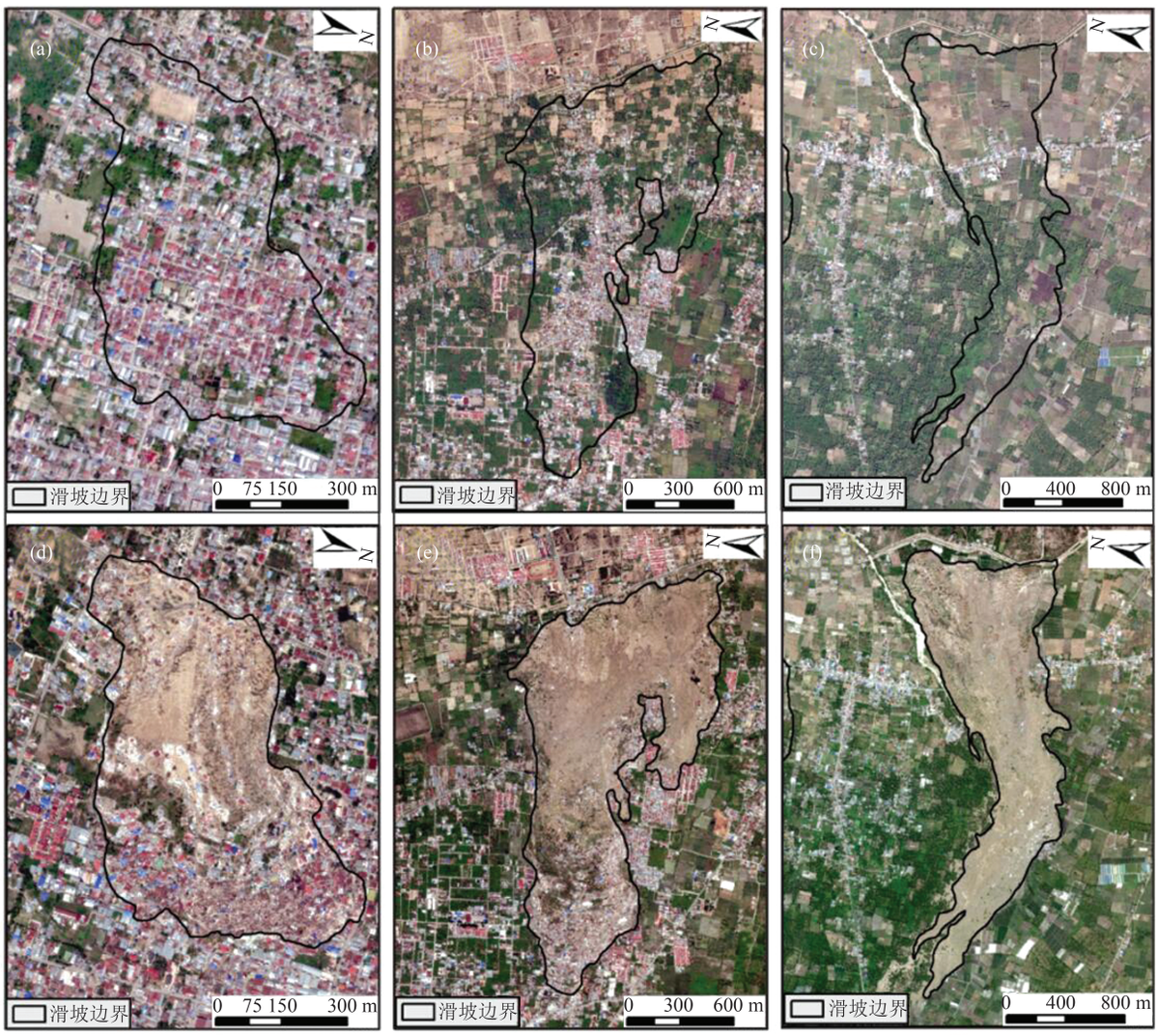


图 10　2018 年印度尼西亚帕卢 7.5 级地震引发土壤液化滑坡

(a、d) Balaroa 滑坡前后影像;(b、e) Petobo 滑坡前后影像;(c、f) Tinggede 滑坡前后影像

Fig. 10　Soil Liquefaction Landslide Caused by the 2018 Palu 7.5 Magnitude Earthquake in Indonesia

(a,d) Pre- and Post-sliding Images of Balaroa Landslide; (b,e) Pre- and Post-sliding Images of Petobo Landslide; (c,f) Pre- and Post-sliding Images of Tinggede Landslide

大已接近 0.5 g[34],加上黄土覆盖层对地震波的放大效应(放大 1.5～3.0 倍)[4]。

台塬黄土层在地震液化失稳后,靠近台塬边缘的土体因良好的临空条件迅速解体破碎成颗粒状,并快速冲入下游的沟道,高含水的黄土颗粒迅即转化为泥流沿狭窄的沟谷呈流体状运动(图 17)。大量的黄土滑坡实例表明,应黄土粒间粘结力较弱,滑动后很容易散体成黄土颗粒,即使含水率较低也可呈流体状运动(图 12)。当泥流到达金田村和草滩村一带时,因沟谷消失地势变平坦,随即以泥浆状涌入村庄,包围掩埋房屋,并造成人员伤亡。上述现象和过程在遥感影像中已得到充分反映和证实,也与当地村民的目击证据相吻合,即地震后沟道泥流随即发生,而包围掩埋金田村和草滩村的泥流是地震后一定时间后(大概 10 min 左右)才抵达。

造成此次地震液化型滑坡-泥流灾害的其他原因可能包括以下几个方面:(1)地震导致北干渠渡槽断裂,干渠水和滑坡物质一起沿沟谷流向下游,大大增加泥流的含水量,可能对滑坡物质快速转化为泥流和远距离流动有较大的促进作用;(2)地震前连续 3 天高强度的冬灌,对增加滑坡物质的整体含水率并转化为泥流也有一定的促进作用[35];(3)黄土台塬前缘具有较好的临空条件,滑源区前部的黄土层发生液化和滑动后迅即涌入坡下并汇聚于沟谷,因此就地停留堆积的相对较少。而滑源区后部的黄土在底部因液化剪切强度急剧降低而发生向外滑动,但因地势平

缓附近又不具有很好的临空条件,所以滑动一定距离后就停积下来,并表现出侧向扩离状破坏模式;(4)滑坡下游是狭窄的沟谷,有利于限制和约束泥流沿沟谷远距离运移;沟口的土坝失稳可能会影响滑坡-泥流的动力过程,类似情形在兰州皋兰什川溃坝泥流[6]和汶川地震区板子沟[36]出现

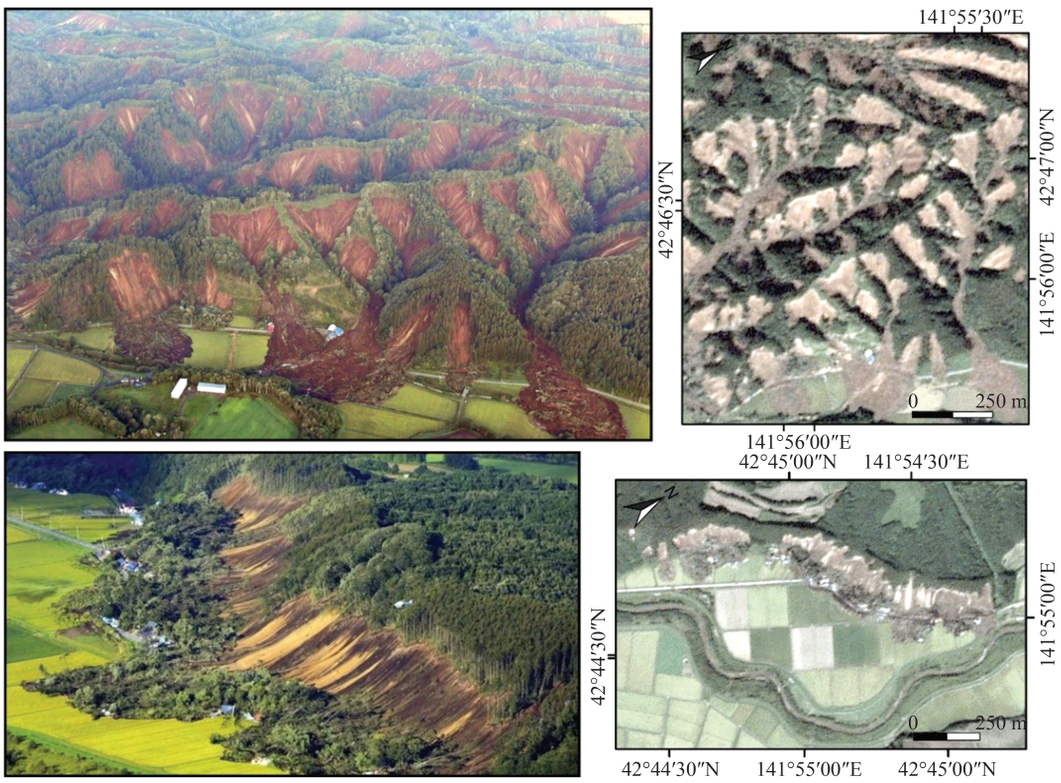


图11 2018年日本北海道6.6级地震引发土壤液化滑坡[17]

Fig. 11 Soil Liquefaction Landslide Caused by the 6.6 Magnitude Earthquake in Hokkaido, Japan in 2018[17]

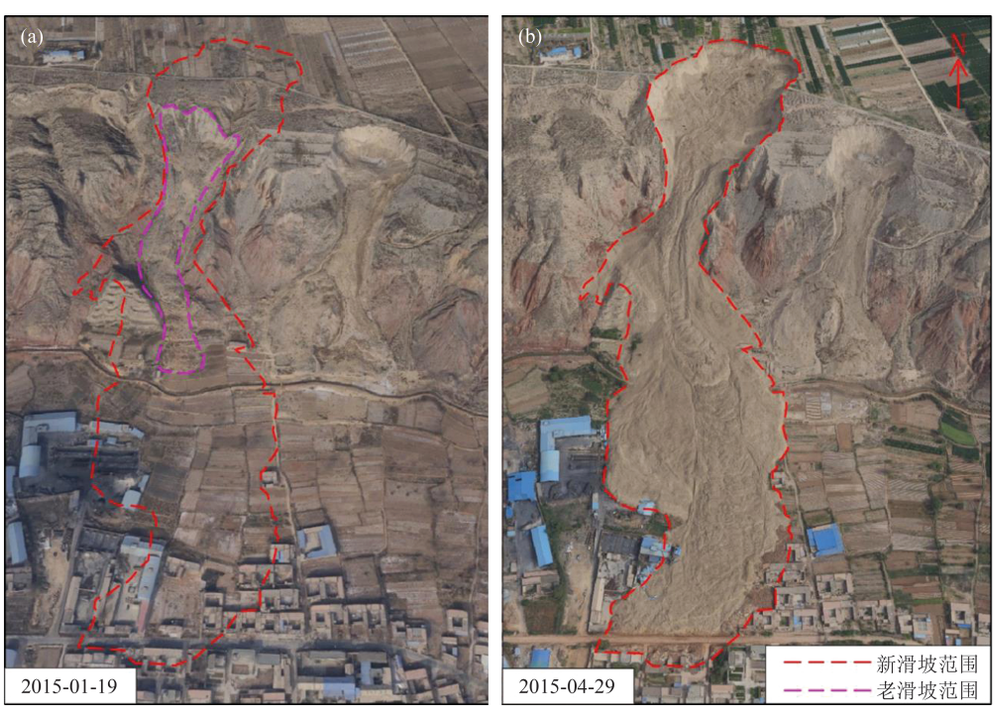


图12 长期灌溉触发甘肃永靖县盐锅峡镇黑方台党川2#滑坡[26]

(a)滑坡发生前地貌;(b)滑坡发生后地貌

Fig. 12 Dangchuan 2# Loess Landslide Triggered by Long-Term Irrigation at Heifangtai Terrace in Yanguoxia Town, Yongjing County, Gansu Province[26]

(a) Landform and Topography of Pre-sliding, (b) Landform and Topography of Post-sliding



(a) 金田村掩埋后照片　　(b) 搜救现场

图 13　金田村掩埋后照片和搜救现场(新华社拍摄)

Fig. 13　Photos of Jintian Village After Burial and Search and Rescue Scene (Taken by Xinhua News Agency)



图 14　泥流是从上游流下而非地下涌出的现场实证

(a)金田村泥流堆积呈明显的流动特征;(b)救援现场挖掘的地表以下土壤

Fig. 14　Field Evidence Shows that Mudflows Originate from Upstream Rather than Underground

(a) Obvious Flow Characteristics of Flowslide Accumulation in Jintian Village; (b) The Soil Beneath the Surface Excavated at the Rescue Site

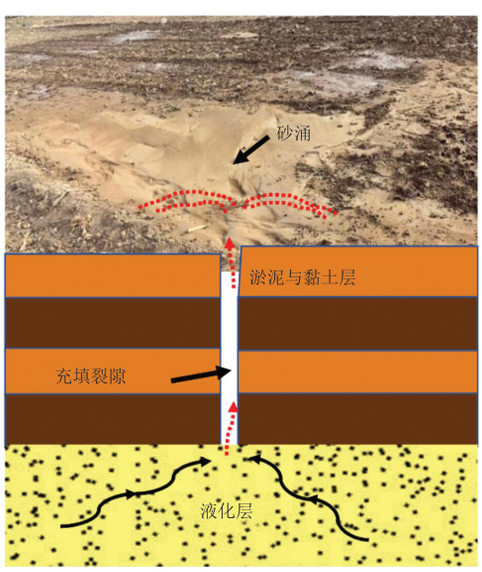


图 15　地震土体液化喷砂机制示意图(现场图片来自中国地震局地震预测研究所路畅研究员)

Fig. 15　Schematic Diagram of Liquefaction Sandblasting Mechanism of Seismic Soil (On-Site Photo from Researcher Lu Chang at Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration)

过;村庄附近的平缓地形是导致泥流向两侧扩散并包围掩埋村庄的主要原因,下游的低洼地形有利于泥流的汇聚与堆积。

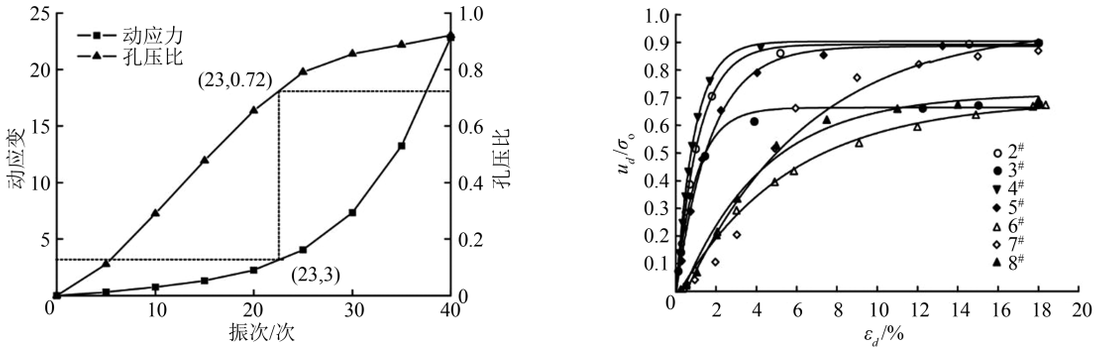
4　结　语

本文较详细介绍了 2023-12-18 甘肃积石山 Ms 6.2 地震触发的青海省中川乡滑坡-泥流的基本特征,并结合近年来发生于国内外的其他几处由地震和灌溉引发液化滑坡特征的对比分析,探讨了地震液化型滑坡-泥流的成因机理,纠正了人们对“砂涌”的认识,得到以下几方面结论:

1)甘肃积石山 Ms 6.2 地震触发的中川乡“砂涌”实为地震液化型滑坡-泥流,形成了一个完整的“地震-液化-滑坡-泥流”地质灾害链,不宜误读为“砂涌”或者“平地泥石流”。

2)此次滑坡-泥流灾害在滑源区呈现出溃散性破坏和侧向扩离两种模式,有别于一般的滑坡。

3)饱水黄土体失稳破坏进入沟谷后呈流体



(a) 应变-孔隙水压力比-振次关系曲线 (b) 黄土液化过程中孔隙水压力比-应变关系曲线

图16 地震触发黄土液化特征[18, 32]

Fig. 16 Earthquake-Induced Loess Liquefaction Characteristics[18, 32]

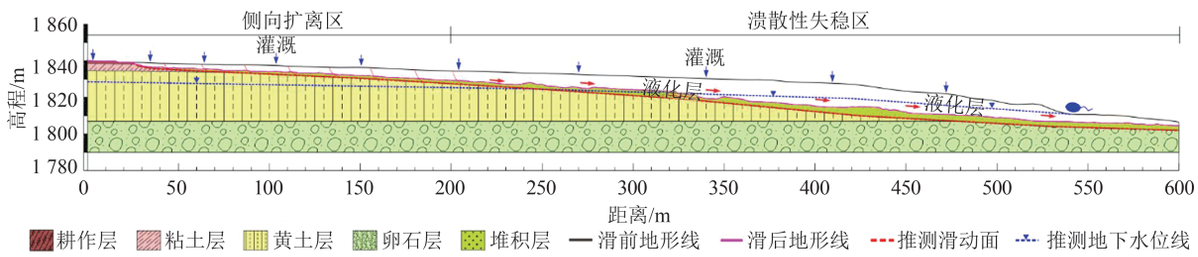


图17 地震触发中川乡液化型滑坡-泥流失稳模式

Fig. 17 Failure Model of Zhongchuan Town Flowslide Triggerd by Earthquake

状远距离运动,易造成重大人员伤亡和财产损失,大大增加了防范难度,应引起高度重视。

4)此类滑坡-泥流的形成条件、成因机理、液化判据、监测预警以及风险防控还需进一步深入研究。

致谢:感谢应急管理部国家减灾中心提供震后高分辨无人机影像数据,京创智慧科技有限责任公司提供震后高精度的三维实景模型数据,欧洲空间局提供的Sentinel-2光学影像,成都理工大学李为乐教授提供印度尼西亚帕卢7.5级地震触发灾难性滑坡前后影像数据;感谢甘肃省和青海省各级单位给予现场调查工作的支持;参与此次调查的还有吉峰教授、王文松研究员、夏明垚研究员、戴岚欣博士、巨袁臻博士、蒋力洋、魏涛、方成勇、杨航、张宗硕、李泽寰、沈宇洋、薛泽远、王高远、周灿平,在此一并表示感谢!

参 考 文 献

[1] 王立朝, 侯圣山, 董英, 等. 甘肃积石山Ms 6.2级地震的同震地质灾害基本特征及风险防控建议[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 108-118.
WANG Lichao, HOU Shengshan, DONG Ying, et al. Basic Characteristics of Co-seismic Geological Hazards Induced by Jishishan Ms 6.2 Earthquake and Suggestions for Their Risk Control[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2024, 35(3): 108-118.

[2] 铁永波, 张宪政, 曹佳文, 等. 积石山Ms 6.2和泸定Ms 6.8地震地质灾害发育规律对比[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(1): 9-21, 59.
TIE Yongbo, ZHANG Xianzheng, CAO Jiawen, et al. Comparative Research of Characteristics of Geological Hazards Induced by Jishishan (Ms 6.2) and Luding (Ms 6.8) Earthquakes[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*(*Science & Technology Edition*), 2024, 51(1): 9-21, 59.

[3] 李为乐, 许强, 李雨森, 等. 2023年积石山Ms 6.2地震同震地质灾害初步分析[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(1): 33-45, 90.
LI Weile, XU Qiang, LI Yusen, et al. Preliminary Analysis of the Coseismic Geohazards Induced by the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*(*Science & Technology Edition*), 2024, 51(1): 33-45, 90.

[4] 王运生, 赵波, 吉锋, 等. 2023年甘肃积石山Ms 6.2地震震害异常的启示[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2024, 51(1): 1-8.
WANG Yunsheng, ZHAO Bo, JI Feng, et al. Preliminary Insights into Hazards Triggered by the 2023 Ms 6.2 Jishishan Earthquake, Gansu Province[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*(*Science & Technology Edition*), 2024, 51(1): 1-8.

[5] LI M Y, MA C, DU C, et al. Landslide Response to Vegetation by Example of July 25 - 26, 2013, Extreme Rainstorm, Tianshui, Gansu Province, China[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*,

2021, 80(2): 751-764.

[6] ZHANG F Y, YAN B B, FENG X M, et al. A Rapid Loess Mudflow Triggered by the Check Dam Failure in a Bulldoze Mountain Area, Lanzhou, China[J]. *Landslides*, 2019, 16(10): 1981-1992.

[7] 董广辉,张帆宇,刘峰文,等. 喇家遗址史前灾害与黄河大洪水无关[J]. 中国科学:地球科学, 2018, 48(4): 467-475.
DONG Guanghui, ZHANG Fanyu, LIU Fengwen, et al. Ultiple Evidences Indicate no Relationship Between Prehistoric Disasters in Lajia Site and Outburst Flood in Upper Yellow River Valley, China[J]. *Scientia Sinica* (*Terrae*), 2018, 48(4): 467-475.

[8] 黄春长,郭永强,张玉柱,等. 青海官亭盆地喇家遗址全新世地层序列与史前灾难研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(2): 434-455.
HUANG Chunchang, GUO Yongqiang, ZHANG Yuzhu, et al. Holocene Sedimentary Stratigraphy and Pre-historical Catastrophes over the Lajia Ruins Within the Guanting Basin in Qinghai Province of China[J]. *Scientia Sinica* (*Terrae*), 2019, 49(2): 434-455.

[9] 张玉柱, 黄春长, 周亚利, 等. 黄河上游积石峡史前滑坡堰塞湖形成年代与发展演变研究[J]. 中国科学: 地球科学, 2017, 47(11): 1357-1370.
ZHANG Yuzhu, HUANG Chunchang, ZHOU Yali, et al. Formation and Development of the Prehistorical Landslide Dammed-Lake in the Jishixia Gorge Along the Upper Yellow River[J]. *Scientia Sinica* (*Terrae*), 2017, 47(11): 1357-1370.

[10] 郑紫星, 黄春长, 赵辉, 等. 青海喇家遗址全新世中期土壤与泥流沉积物地球化学特征[J]. 山地学报, 2018, 36(1): 1-12.
ZHENG Zixing, HUANG Chunchang, ZHAO Hui, et al. Geochemical Characteristics of the Mid-Holocene Palaeosol and Mudflow Deposits in the Lajia Ruins of Qinghai Province[J]. *Mountain Research*, 2018, 36(1): 1-12.

[11] 王海燕, 庞奖励, 黄春长, 等. 青海喇家遗址地层划分及齐家文化废墟覆盖层成因分析[J]. 地理科学, 2020, 40(5): 853-862.
WANG Haiyan, PANG Jiangli, HUANG Chunchang, et al. Stratigraphic Subdivisions and Formation of the Sediment Overlying the Lajia Ruins of the Qinghai Province[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2020, 40(5): 853-862.

[12] 王勤彩,罗钧,陈翰林,等. 2023年12月18日甘肃积石山6.2级地震震源机制解[J]. 地震 ,2024,44(1): 185-188.
WANG Qincai, LUO Jun, CHEN Hanlin, et al. Focal Mechanism for the December 18 , 2023, Jishishan M 6 Earthauake in Gansu Province[J]. *Earthquake*, 2024,44(1):185-188.

[13] 炊郁达, 黄春长, 庞奖励, 等. 青海喇家遗址土壤序列及史前山洪泥流灾难释光测年研究[J]. 地理学报, 2019, 74(11): 2371-2384.
CHUI Yuda, HUANG Chunchang, PANG Jiangli, et al. OSL Dating of the Pedo-stratigraphic Sequence and the Prehistoric Flash Floods and Mudflows over the Lajia Ruins of Qinghai Province[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2019, 74(11): 2371-2384.

[14] TREMBLAY-AUGER F, LOCAT A, LEROUEIL S, et al. The 2016 Landslide at Saint-Luc-de-Vincennes, Quebec: Geotechnical and Morphological Analysis of a Combined Flowslide and Spread[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2021, 58(2): 295-304.

[15] 地理发现与探索. 直面 | 积石山 6.2 级地震次生泥流灾害透视(上篇)[OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/IV3T5xJ1wsmNpVnPTBPcDg,2024.
Geographical Discovery and Exploration. Face to Face | Perspectives on Secondary Mud Flow Hazards Caused by Jishishan 6.2 Earthquake (Part 1)[OL]. 2024 https://mp.weixin.qq.com/s/IV3T5xJ1wsmNpVnPTBPcDg,2024.

[16] 张晓超, 裴向军, 张茂省, 等. 强震触发黄土滑坡流滑机理的试验研究: 以宁夏党家岔滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1219-1226.
ZHANG Xiaochao, PEI Xiangjun, ZHANG Maosheng, et al. Experimental Study on Mechanism of Flow Slide of Loess Landslides Triggered by Strong Earthquake—A Case Study in Dangjiacha, Ningxia Province [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(5): 1219-1226.

[17] WANG G H, ZHANG D X, FURUYA G, et al. Pore-Pressure Generation and Fluidization in a Loess Landslide Triggered by the 1920 Haiyuan Earthquake, China: A Case Study[J]. *Engineering Geology*, 2014, 174: 36-45.

[18] 张晓超, 黄润秋, 许模,等. 石碑塬滑坡黄土液化特征及其影响因素研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 801-810.
ZHANG Xiaochao, HUANG Runqiu, XU Mo, et al. Loess Liquefaction Characteristics and Its Influential Factors of Shibeiyuan Landslide[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(3): 801-810.

[19] 王国亚, 任路滨, 吴玮江,等. 甘肃岷县永光村滑坡特征及其成因研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 392-399.
WANG Guoya, REN Lubin, WU Weijiang, et al. Characteristics and Causes of the Landslide Outbreaking in Yongguangcun, Minxian County, Gansu Province[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(2): 392-399.

[20] 吴志坚, 陈豫津, 王谦, 等. 岷县漳县6.6级地震永光村滑坡致灾机制分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(S2): 165-168.

WU Zhijian, CHEN Yujin, WANG Qian, et al. Disaster-Causing Mechanism of Yongguang Landslide Under Minxian-Zhangxian Ms 6.6 Earthquake[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(S2): 165-168.

[21] WATKINSON I M, HALL R. Impact of Communal Irrigation on the 2018 Palu Earthquake-Triggered Landslides[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 940-945.

[22] BRADLEY K, MALLICK R, ANDIKAGUMI H, et al. Earthquake-Triggered 2018 Palu Valley Landslides Enabled by Wet Rice Cultivation[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 935-939.

[23] WANG F R, FAN X M, YUNUS A P, et al. Coseismic Landslides Triggered by the 2018 Hokkaido, Japan (Mw 6.6), Earthquake: Spatial Distribution, Controlling Factors, and Possible Failure Mechanism[J]. *Landslides*, 2019, 16(8): 1551-1566.

[24] 彭大雷, 许强, 董秀军, 等. 无人机低空摄影测量在黄土滑坡调查评估中的应用[J]. 地球科学进展, 2017, 32(3): 319-330.
PENG Dalei, XU Qiang, DONG Xiujun, et al. Application of Unmanned Aerial Vehicles Low-Altitude Photogrammetry in Investigation and Evaluation of Loess Landslide[J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(3): 319-330.

[25] PENG D L, XU Q, ZHANG X L, et al. Hydrological Response of Loess Slopes with Reference to Widespread Landslide Events in the Heifangtai Terrace, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2019, 171: 259-276.

[26] 许强, 彭大雷, 亓星, 等. 2015年4.29甘肃黑方台党川2#滑坡基本特征与成因机理研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(2): 167-180.
XU Qiang, PENG Dalei, QI Xing, et al. Dangchuan 2# Landslide of April 29, 2015 in Heifangtai Area of Gansu Province: Characteristices and Failure Mechanism[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2016, 24(2): 167-180.

[27] 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室. 甘肃积石山6.2级地震中川乡泥流("砂涌")成因分析[OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/2CKNIhj4YqKjNrKLIZVPSQ,2023.
State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection. Analysis of the Causes of Mud Flow ("Sand Surge") in Chuanxiang Township During the 6.2 Magnitude Earthquake in Jishishan, Gansu Province[OL]. https://mp.weixin.qq.com/s/2CKNIhj4YqKjNrKLIZVPSQ,2023.

[28] TRIFUNAC M D. Empirical Criteria for Liquefaction in Sands via Standard Penetration Tests and Seismic Wave Energy[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 1995, 14(6): 419-426.

[29] HUANG Y, YU M. Review of Soil Liquefaction Characteristics During Major Earthquakes of the Twenty-First Century[J]. *Natural Hazards*, 2013, 65(3): 2375-2384.

[30] 柴少峰, 王兰民, 王平, 等. 石碑塬低角度黄土地层液化滑移特征与机理振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(12): 2565-2574.
CHAI Shaofeng, WANG Lanmin, WANG Ping, et al. Shaking Table Tests on Sliding Characteristics and Mechanism of Liquefaction Landslide of Low-Angle Loess Deposit in Shibeiyuan[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(12): 2565-2574.

[31] 王谦, 王峻, 王兰民, 等. 石碑塬饱和黄土地震液化机制探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 4168-4173.
WANG Qian, WANG Jun, WANG Lanmin, et al. Discussion on Earthquake Liquefaction Mechanism of Saturated Loess in Shibeiyuan[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(S2): 4168-4173.

[32] 张晓超. 地震诱发石碑塬低角度黄土滑坡形成机理的试验研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
ZHANG Xiaochao. Experimental Study on the Formation Mechanism of Low-Angle Loess Landslide Induced by Earthquake in Shibeiyuan[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.

[33] 王兰民, 刘红玫, 李兰, 等. 饱和黄土液化机理与特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(1): 89-94.
WANG Lanmin, LIU Hongmei, LI Lan, et al. Laboratory Study on the Mechanism and Beheviors of Saturated Loess Liquefaction[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(1): 89-94.

[34] 中国地震局工程力学研究所. 甘肃积石山6.2级地震(第1报)[EB/OL]. [2023-12-27]. https://www.iem.ac.cn/detail.html?id=2963.
Institute of Engineering Mechanics, CEA. Gansu Jishishan 6.2 Magnitude Earthquake (Report 1st)[EB/OL]. [2023-12-27]. https://www.iem.ac.cn/detail.html?id=2963.

[35] XU Q, ZHAO K Y, LIU F Z, et al. Effects of Land Use on Groundwater Recharge of a Loess Terrace Under Long-Term Irrigation[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 751: 142340.

[36] 张宪政, 铁永波, 宁志杰, 等. 四川汶川县板子沟"6·26"特大型泥石流成因特征与活动性研究[J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 134-145.
ZHANG Xianzheng, TIE Yongbo, NING Zhijie, et al. Characteristics and Activity Analysis of the Catastrophic "6·26" Debris Flow in the Banzi Catchment, Wenchuan County of Sichuan Province[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(5): 134-145.