



引文格式: 刘港, 贾俊, 张戈, 等. 甘肃积石山地震液化型泥流特征、成因及其对黄河上游盆地地震次生灾害风险评估的启示[J]. 西北地质, 2024, 57(2): 220–229. DOI: 10.12401/j.nwg.2024015

Citation: LIU Gang, JIA Jun, ZHANG Ge, et al. Characteristics and Initiation Mechanism of the Liquefied Mudflow Caused by Jishishan Earthquake in Gansu Province and Its Enlightenment on Risk Assessment of Secondary Earthquake Disasters in the Upper Yellow River Basin[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(2): 220–229. DOI: 10.12401/j.nwg.2024015

甘肃积石山地震液化型泥流特征、成因及其对黄河上游盆地地震次生灾害风险评估的启示

刘港¹, 贾俊^{1,2,*}, 张戈¹, 洪勃¹, 董英¹, 裴赢¹, 薛强¹, 高波¹

(1. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要: 北京时间 2023 年 12 月 18 日 23 点 59 分 30 秒, 甘肃省临夏州积石山县发生 Ms 6.2 级浅源地震, 地震在青海省民和县中川乡诱发了一处同震特大型规模泥流灾害, 造成了特大型灾难事件的发生。笔者采用现场调查、无人机摄影测量、现场取样及室内测试等研究方法对此次泥流灾害发育特征及成因进行分析。结果表明: ①该泥流具有典型沟谷型泥石流平面特征, 形成区、流通区和堆积区分界明显, 泥流主要物源为山前洪积粉质黏土。②地震、降雪消融、农田冬灌、低温冻结, 为泥流提供了初始动力并抬升了局部地下水位, 是该泥流灾害的主要诱因; 地形坡度、地层岩性, 为泥流提供了后续运动势能和振动液化条件, 是该泥流灾害的内因。③泥流运移过程中存在侧向和底部铲刮效应, 尤其在 3 处流向改变区侧向铲刮、局部堆积显著, 最终快速流入沟口金田村和草滩村。分析结果可为官亭盆地乃至黄河上游沉积盆地地震次生灾害风险评价工作提供思路与理论依据。

关键词: 积石山地震; 振动液化; 雪融; 冬灌; 粉质黏土; 泥流灾害

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)02-0220-10

Characteristics and Initiation Mechanism of the Liquefied Mudflow Caused by Jishishan Earthquake in Gansu Province and Its Enlightenment on Risk Assessment of Secondary Earthquake Disasters in the Upper Yellow River Basin

LIU Gang¹, JIA Jun^{1,2,*}, ZHANG Ge¹, HONG Bo¹, DONG Ying¹, PEI Ying¹, XUE Qiang¹, GAO Bo¹

(1. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MLR, Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China;
2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: At 23:59:30 Beijing time on December 18, 2023, an Ms 6.2 shallow earthquake occurred in Jishishan.

收稿日期: 2024-01-17; 修回日期: 2024-01-29; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42177346), 中国地质调查局项目 (DD20230443、DD20221739), 陕西省自然科学基金青年项目 (2023-JC-QN-0288), 中国地质调查局西安地质调查中心主任基金项目 (XACGS-2022-04) 联合资助。

作者简介: 刘港 (1990–), 男, 助理研究员, 主要从事地质灾害调查及成因机制分析与研究工作。E-mail: liugang_igccas@163.com。

* 通讯作者: 贾俊 (1985–), 男, 高级工程师, 主要从事地质灾害调查工作。E-mail: geoj@qq.com。

han County, Linxia Prefecture, Gansu Province. The earthquake triggered a coseismic giant mudflow in Zhongchuan Township, Minhe County, Qinghai Province, resulting in a catastrophic event. Research methods such as on-site investigation, drone photogrammetry, sampling, and experimental testing were adopted to analyze the development characteristics and causes of this mudflow hazard. The results indicate that: ① The mudflow has typical planar characteristics of valley-type debris flow, with clear boundaries between the formation area, the circulation area, and the accumulation area. The main source of the mudflow is the piedmont pluvial silty clay. ② Earthquake provides initial momentum, while melting snow, winter irrigation of farmland, and low temperature freezing raise the local groundwater level, which are the main triggering factors of the mudflow. The topographic slope provides subsequent kinetic energy, and the geological lithology provides condition for vibrational liquefaction, which are the inherent causes of the mudflow. ③ There are lateral and bottom scraping effects in the process of mudflow transportation, especially in the three flow direction changing areas, where lateral scraping and local accumulation are significant. Eventually, it quickly flows into Jintian Village and Caotan Village at the mouth of the gully. The results obtained can provide ideas and theoretical basis for the risk assessment of secondary disasters caused by earthquakes in the Guanting Basin and even the sedimentary basins in the upper reaches of the Yellow River.

Keywords: Jishishan earthquake; vibrational liquefaction; snow melting; winter irrigation; silty clay; mudflow hazard

据中国地震台网, 北京时间 2023 年 12 月 18 日 23 时 59 分甘肃省临夏州积石山县(震中 E 102.79°, N 35.70°)发生 Ms 6.2 级地震, 最高烈度达 9 度, 震源深度 10 km。次主震过后该地相继发生了 13 次震级超过 3.0 级的余震。截至当月 22 日 8 时, 造成甘肃省和青海省共计 148 人遇难、979 人受伤和 3 人失联。

强震造成饱和砂土或粉土液化的现场并非罕见。例如, 1920 年海原 8.5 级地震(白铭学等, 1990)、1964 年阿拉斯加 9.2 级地震(Plafker, 1969)、1976 年唐山 7.8 级地震(刘恢先, 1989)、1999 年集集 7.6 级地震(Ku et al., 2004)、2008 年汶川 8.0 级地震(袁晓铭等, 2009; 万飞鹏等, 2023)均造成了大面积的砂土液化。然而, 在里氏震级相对较小的积石山地震却引发了与振动液化有关的大规模次生灾害—泥流, 瞬间引起各界人士的关注(王运生等, 2023; 徐岳仁等, 2023; 陈博等, 2024; 铁永波等, 2024; 李为乐等, 2024; 许强等, 2024)。该泥流发生于距震中约 9 km 的官厅盆地, 造成青海省海东市中川乡金田村和草滩村大面积房屋被埋, 死亡人数高达 34 人, 受伤 198 人, 掩埋房屋 65 栋, 破坏农田近 200 亩, 阻断道路数千米, 损毁 1 座高压输电塔(图 1), 受灾面积高达 $6 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。研究团队于灾后第一时间采用无人机航测、现场取样与室内试验等手段, 从泥流基本特征调查和液化层物理力学特性等方面探讨本次泥流灾害的形成过程与成因机

制, 为今后黄河上游同类型沉积盆地的震前泥流灾害风险调查评价及防治提供理论依据。

1 泥流灾害特征

1.1 基本特征

此次泥流发生在黄河河流阶地和山前洪积扇交汇处, 地形北高南低。平面形态典型, 可明显区分形成区、流通区和堆积区(图 2)。泥流发生前, 沟脑(形成区)主要是农田且相对平缓; 沟道(流通区)为季节性流水, 冬季仅中上游洼地存在少量积水(池塘), 紧邻池塘南侧的村道将沟道分为上下两段, 沟道狭长; 沟口(堆积区)主要为下游金田村、草滩村及下部农田(图 2a)。泥流发生后, 形成区物源物质一方面沿沟道向南流动形成泥流主体, 一方面向东滑动(滑向 95°), 形成滑坡堆积于东侧农田; 流通区基本沿原有沟道流动, 但存在明显的底部和侧向铲刮效应, 并且在沟中部池塘附近发生淤堵扩离, 部分泥流堆积于此; 堆积区主要淹没位于沟口的金田村和草滩村部分道路及居民房屋, 最远处达下游农田(图 2b)。

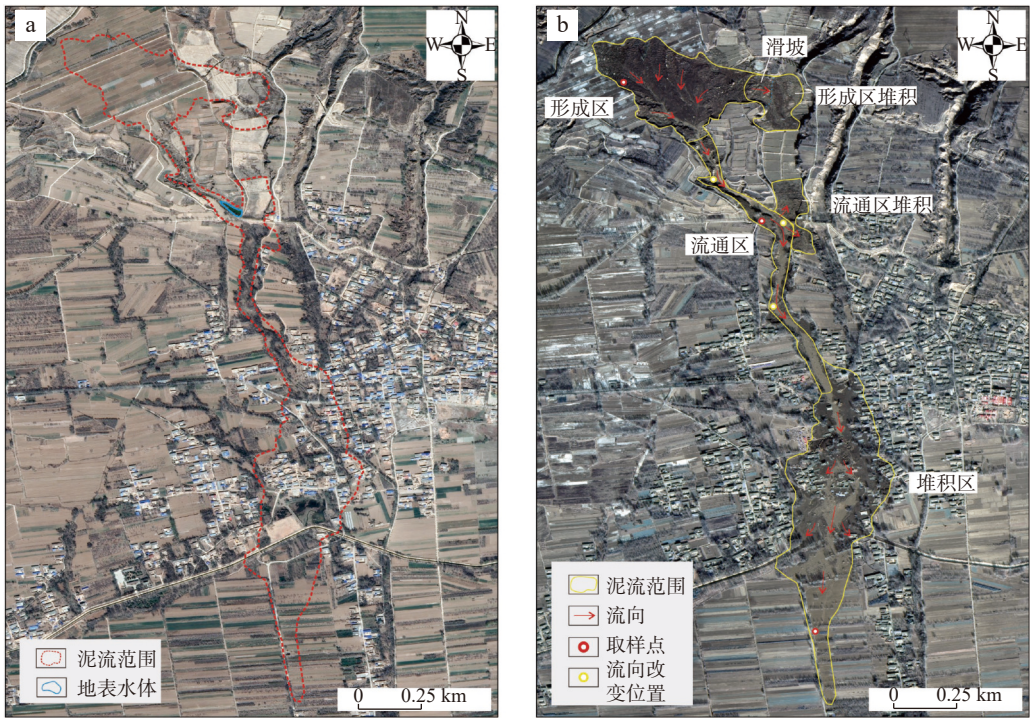
经无人机测量, 本次泥流后缘高程约为 1 800 m, 前缘高程约为 1 716 m, 相对高差为 84 m, 小流域总长度约为 2 800 m, 纵坡降为 30%。冬季因无农作物生长, 植被覆盖度低, 仅沟内生长乔灌木和矮草。形成区



a. 堆积区房屋掩埋; b. 堆积区村道堆积; c. 堆积区大范围堆积体; d. 形成区高压输电塔倾倒折断

图1 积石山地震诱发中川乡泥流灾害特征

Fig. 1 Characteristics of mud flow disaster in Zhongchuan township induced by Jishishan earthquake



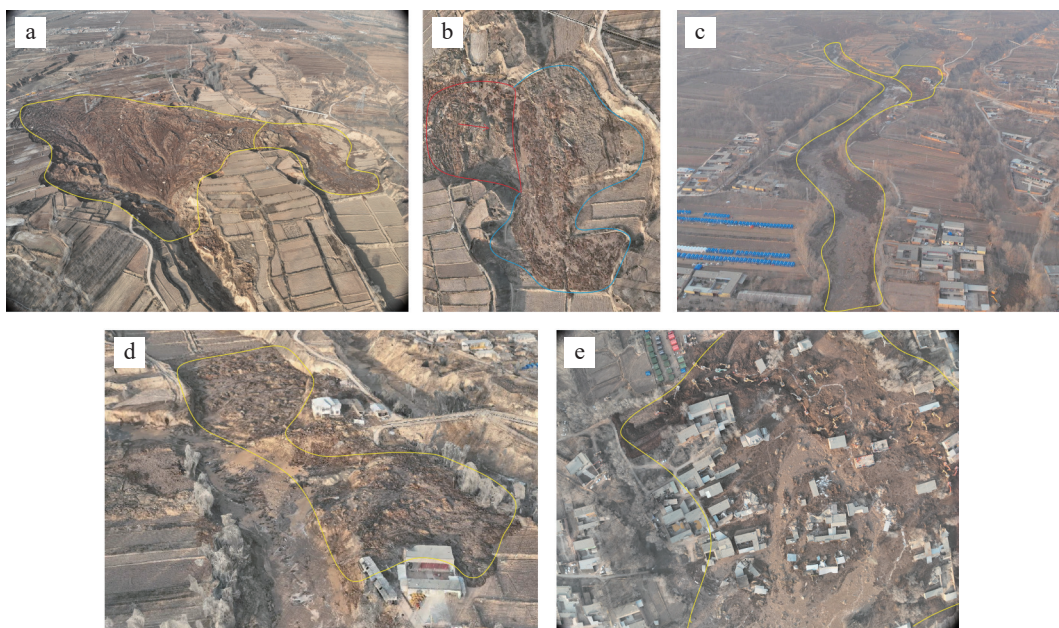
a. 震前影像，2020 年 12 月天地图; b. 震后影像，2023 年 12 月天地图

图2 泥流发生前后遥感影像

Fig. 2 Remote sensing images before and after the occurrence of mudflows

(图 3a)近似呈扇形,总面积约为 $13\times10^4\text{ m}^2$, 泥流发生后,局部最大下错深度为 15 m, 平均下错深度为 4.5 m, 物源方量约为 $58.5\times10^4\text{ m}^3$, 坡降比为 50%, 形成区发育的小型低角度滑坡堆积体(图 2b、图 3b)方量约为

$5\times10^4\text{ m}^3$. 流通区(图 3c)形态狭长, 长度为 1.2 km, 平均宽度为 40 m, 坡降比为 25%, 受源区泥流的冲击, 流通区沟道两侧相对松散层也被卷入泥流之中, 并出现 3 处明显的流向转变(图 2b), 流通区堆积体(图 2b、



a. 形成区; b. 形成区滑坡; c. 流通区; d. 流通区堆积体; e. 堆积区

图3 泥流典型无人机照片

Fig. 3 Typical UAV photos of the mudflow

图3d)方量约为 $1.84 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。堆积区(图2b、图3e)平面形状近似呈“纺锤形”, 坡降比为 10‰, 面积约为 20 万 m^2 , 最大厚度约为 5 m, 多处淹没屋顶(图1a), 平均厚度为 3 m, 堆积区土方量约为 $60 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

根据滑坡崩塌泥石流灾害调查规范(1:50 000)(DZ/T 0261-2014)(中华人民共和国国土资源部, 2014), 泥流规模为特大型。走访调查发现, 地震发生后约 10 min, 有居民看到泥流到达村上方农田, 由此估算泥流的平均流速为 2~3 m/s。

1.2 地层岩性

经现场调查, 绘制沿沟道流向的剖面图(图4), 由

图可知, 该地区主要出露岩性从上至下依次为耕植土、全新统(Q_4^{pl})山前洪积物、全新统(Q_4^{al})和上更新统(Q_3^{al})河流冲积物及新近系泥岩(图4)。农田耕植土处于最上层, 厚度为 0~1 m, 在泥流形成区分布广泛; 山前洪积包含上下两层, 上层为红黏土, 厚度为 1.5~2.0 m; 下层为粉质黏土层, 现场钻孔揭露其厚度不小于 18 m, 为此次泥流提供了主要的固体物源。调查结合官亭盆地河流阶地结构(张小虎等, 2005), 认为流通区和堆积区主要位于黄河二级阶地(T2)之上, 形成区位于黄河三级阶地(T3)之上, 二级阶地上部岩性主要为全新统(Q_4^{al})水成黄土和卵石层, 三级阶地

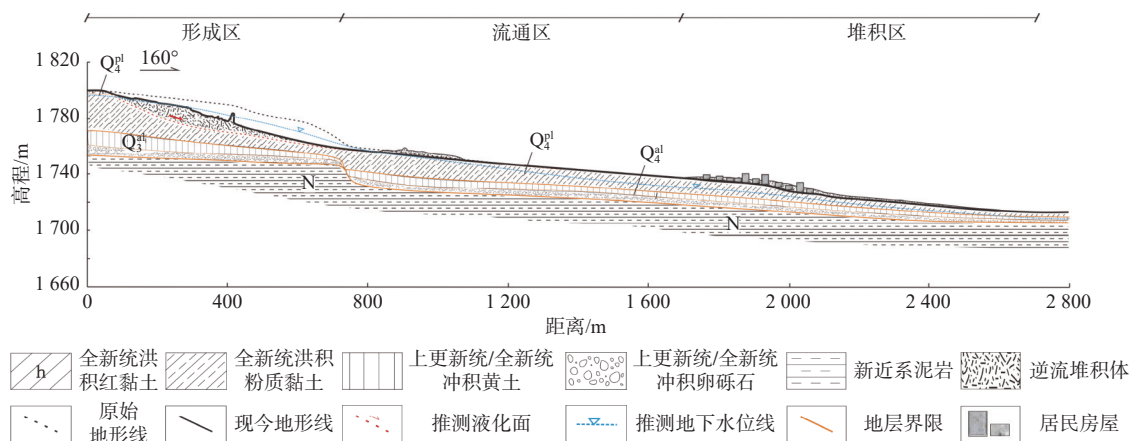


图4 中川乡地震液化型黄土泥流剖面

Fig. 4 Seismic liquefaction type mudflow profile in Zhongchuan Township

上部岩性主要为上更新统(Q_3^{al})水成黄土和卵石层,两个阶地下部岩性为新近系(N)泥岩。本次泥流的主要物源为位于三级阶地顶部的山前洪积层(下部黄色粉质黏土为主,夹带上层少量红黏土)。泥流所处的官亭盆地,在历史上曾发生过大规模地震诱发的灾难性事件,即 4 000 年前喇家遗址(夏正楷等, 2003),与泥流仅相隔不到 5 km,说明此处地层岩性特征易受地震影响,坡体稳定性对地震因素较为敏感。

1.3 诱发因素

中川乡泥流与积石山 Ms6.2 级地震相隔仅数分钟,属同震次生灾害。积石山地震提供了震动来源,是该泥流的最直接诱发因素。调查发现,泥流形成区局部地下水位偏高,原因是降雪消融、农田冬灌造成了地下水补给增加,而低温冻结导致地下水向沟脑排泄通道受阻,即融雪和冬灌入渗、低温浅表层冻结是除地震之外的几大诱发因素。

2 泥流液化层物理力学特性

泥流的固体物源位于黄河三级阶地之上,以振动液化的洪积饱和粉质黏土层为主,含少量上层红黏土(图 5)。开展液化土层的粒径、塑性以及剪切参数测定,查清土质本身的物理力学性质,以为泥流形成机理分析提供数据基础。

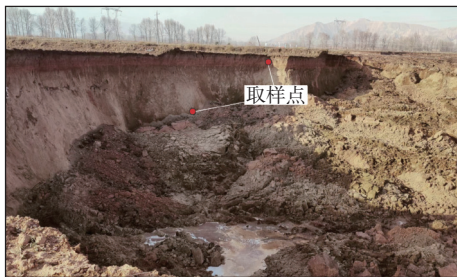


图5 泥流形成区地层岩性及物源

Fig. 5 Stratigraphic lithology and material sources in mudflow formation areas

2.1 液化层粒径特征

笔者分别在形成区、流通区和堆积区对液化土进行取样(图 2b),编号分别为土样 1、土样 2、土样 3,作为液化判别对照,在液化层上层红色粘土层中也进行取样(图 5 上层取样点),编号为土样 4。采用 Better-size 3000 激光粒度仪对上述 4 组土样进行粒组测定。测试结果见图 6。

采用液、塑限联合测定仪测试液化层土壤的塑限

和液限,得到塑限为 19.24%、液限为 30.48%,塑性指数为 11.25。按照砂粒、粉粒、粘粒成分统计测试结果(表 1)。根据岩土工程勘察规范(GB50021-2001)(中华人民共和国建设部, 2001),结合土壤成因、颜色、粒径分布特征,进一步确定泥流形成区液化层(土样 1)为粉质黏土,液化层上层红色土壤(土样 4)为红黏土。特别需要注意,振动液化通常发生在饱和砂土或粉土层内,但粉粒含量高的粉质黏土同样存在发生液化的可能(辛鸿博等, 2011; 王兰民, 2020)。

对比土样 2、土样 3 与土样 1 的粒径分布特征,可以看出,3 组样品几乎同源,进一步佐证了物源主要源于形成区黄色粉质黏土。此外,土样 2 和土样 3 的砂粒、粉粒和粘粒含量处于土样 1、土样 4 对应数据之间且更接近土样 1,表明此次泥流物源还夹杂了少量的上层红黏土。

根据构筑物抗震设计规范(GB50191-2012)关于饱和土液化初判判据(中华人民共和国住房和城乡建设部, 2012),结合该地区地震烈度 VIII(王立朝等, 2024),黄色粉质粘土粘粒含量(12.41%)略小于 13%(该值为液化初判临界值,大于等于该值时,土层不液化),在饱水和地震作用下有发生液化的可能,而上层红粘土粘粒含量(26.28%)远大于 13%,则不具备发生振动液化的条件。

2.2 液化层抗剪特性

采用四联直剪仪测定液化层原状粉质黏土在天然、饱和状态下的抗剪参数。法向应力分别施加 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa,剪切速率为 0.4 mm/min,试验结果见图 7。通过曲线拟合,得到天然状态下粉质黏土的粘聚力为 13.38 kPa,内摩擦角为 7.3°;而在其饱和后粘聚力为 7.07 kPa,内摩擦角为 9.9°(表 2)。天然粉质黏土饱水后,内摩擦角对于水的响应不敏感,而粘聚力下降了 47.16%,抗剪强度显著降低。

3 泥流成因机制

3.1 形成原因

官亭盆地是位于黄河上游的一处小型沉积盆地,地势相对平坦,岩性以黄河一级至三级阶地冲积物和山前洪积物为主体。该泥流所处沟谷的平均坡降比仅为 30%(坡度 $<2^\circ$),不具备发生泥流灾害的有利地形条件,然而却发生了大规模泥流灾害,说明其经历了历史级强降雨或者强震(于国强等, 2014; 陈秀清等,

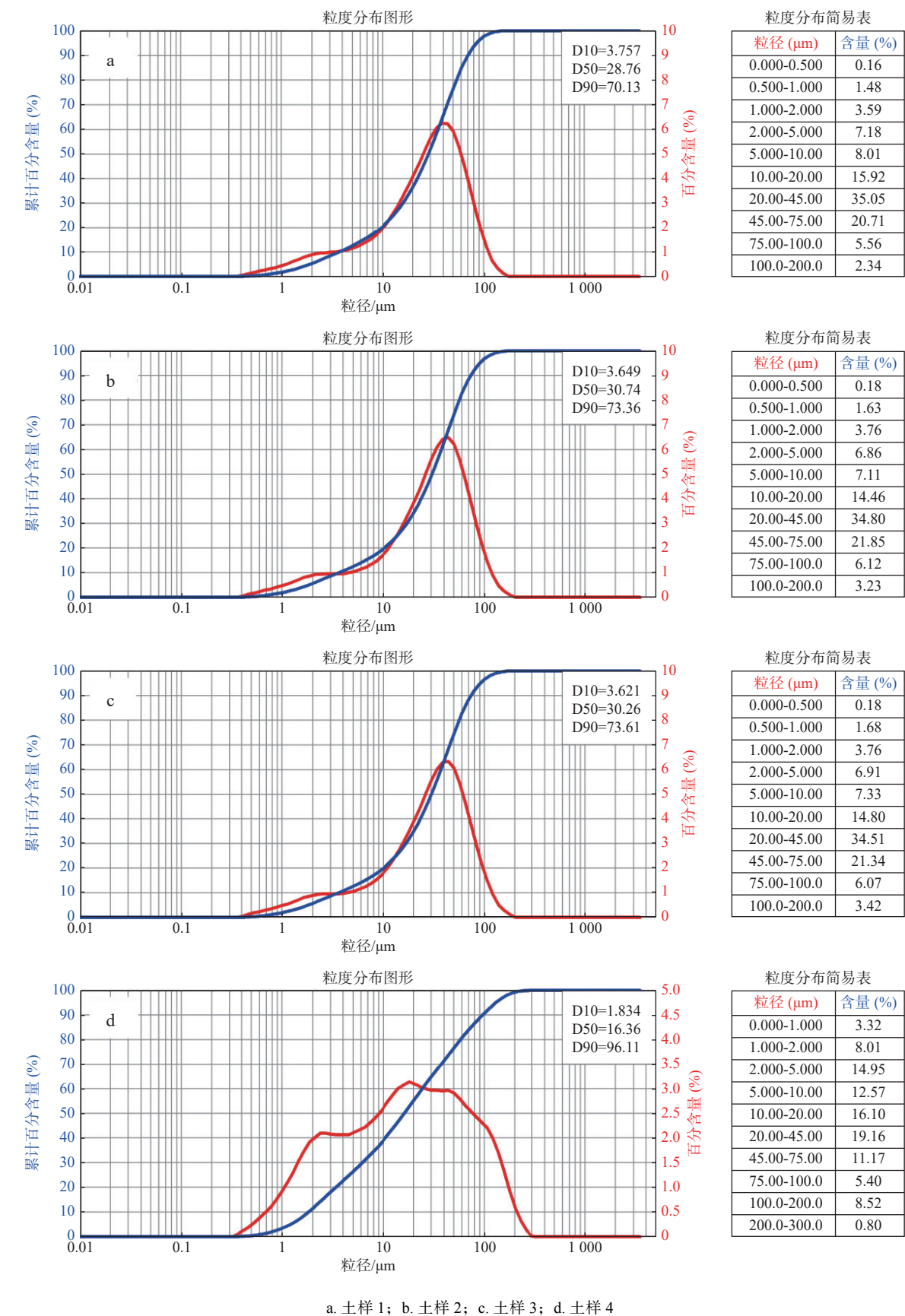


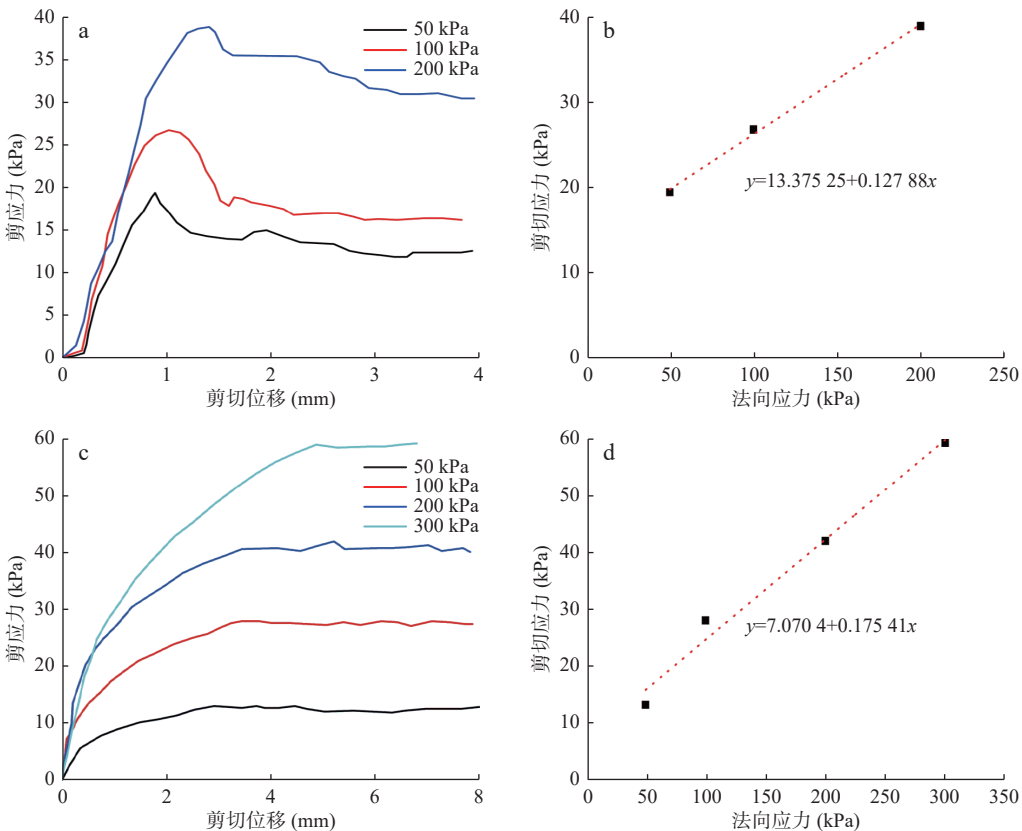
图6 泥流土样的粒径级配曲线

Fig. 6 Particle size distribution curve of mud flow soil sample

表 1 土样砂粒、粉粒和粘粒占比

Tab. 1 The proportion of sand, silt, and clay particles in the soil sample

土样编号	取样位置	砂粒含量 > 75 μm	粉粒含量 5 ~75 μm	粘粒含量 < 5 μm
土样 1	形成区液化土	7.90%	79.69%	12.41%
土样 2	流通区液化土	9.35%	78.22%	12.43%
土样 3	堆积区液化土	9.49%	77.98%	12.53%
土样 4	形成区上层红色黏土	14.72%	59.00%	26.28%



a. 天然状态剪切应力-剪切位移曲线；b. 天然状态剪切应力-法向应力拟合结果；c. 饱和状态剪切应力-剪切位移曲线；
d. 饱和状态剪切应力-法向应力拟合结果

图7 粉质黏土抗剪参数测试结果

Fig. 7 Test results of shear parameters of silty clay

表 2 粉质黏土粘聚力与内摩擦角

Tab. 2 Cohesion and internal friction angle of the silty clay

样品状态	粘聚力 (kPa)	内摩擦角正切 (°)	相关系数
天然	13.38	7.3	0.994 86
饱和	7.07	9.9	0.975 79

2014; 王新刚等, 2021; 孙萍萍等, 2022)。中国气象局气象资料(图 8)显示, 灾害发生前民和县半月内无明显降水(仅 12 月 14 日为小雪)。因而, 积石山县 Ms

6.2 级地震(泥流位于地震烈度 VIII 度带内)则成为本次泥流的主要诱因。冬季降雪逐渐融化水、农田冬灌水优势入渗至地下结构性较差的洪积粉质黏土层, 冬季结冰(泥流发生前 5 日气温均在 0℃ 以下)引起沟脑处农田排泄区水流排泄不畅, 造成局部地下水水位明显抬升, 为土层饱和提供了重要的水源条件, 是本次泥流的其他诱因。饱和粉质黏土在强震作用下存在液化可能且强度损失严重, 以粉粒成分为主的粉质黏土是本次泥流的内因。虽然纵坡降较小的沟谷地

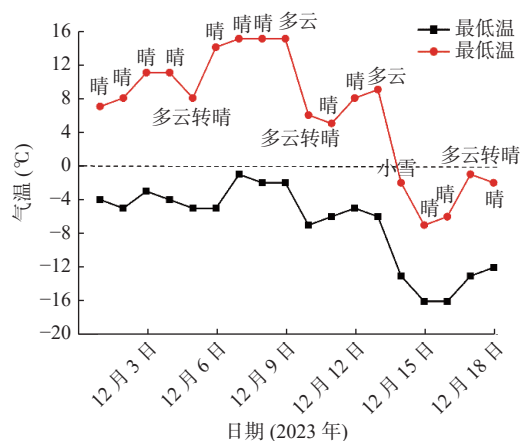


图8 泥流发生前当月民和县气温与天气情况(数据源: 中国气象局)

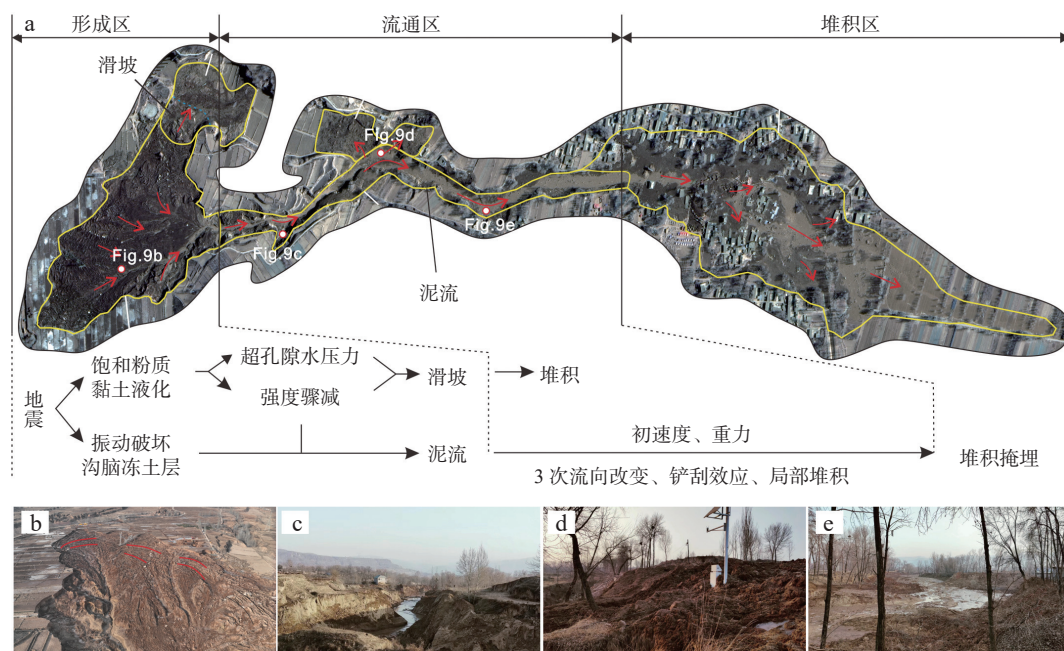
Fig. 8 Temperature and weather conditions in Minhe County in the month before the mud flow occurred (Data source: China Meteorological Administration)

形条件不利于泥流的大规模长距离运移,但地层岩性、水源及地震动力均促进了此次泥流的形成,进而导致

同震次生灾害灾难性事件的发生。

3.2 形成过程

积石山地震造成泥流沟脑位置埋深较浅的饱和粉质黏土层液化并且破坏浅表层冻土的完整性,土层内部产生超孔隙水压力,一方面诱发滑向向东的小型滑坡(图2b、图3b),该滑坡堆积体位于东侧低洼农田处,并未进入沟道;另一方面将沟脑处农田浅表部起封盖作用的冻土层破坏、冲溃,形成临空面,饱和粉质黏土层因液化强度骤减甚至丧失,沿沟脑冲溃缺口喷涌而出,构成泥流主要物源(图9)。形成区前部泥流流出牵引后部流态液化层向沟脑汇集,液化层流速快于上覆未液化土,形成反台阶状错坎(图9b)。沟脑处具有一定初速度的泥流在重力作用下顺沟道向下流动,沿路铲刮沟底,经历了3次明显转向、侧壁铲刮与局部堆积(图9c、图9d、图9e)后,快速进入下部村落,瞬间蔓延和掩埋逃生道路及房屋,造成灾难性事件的发生,泥流最远处流到金田村下游农田。



a. 泥流形成过程; b. 形成区反台阶错坎; c. 泥流首次转向和堆积位置; d. 泥流二次转向和堆积位置; e. 泥流三次转向和堆积位置

图9 中川乡泥流灾害形成过程示意图

Fig. 9 Schematic diagram of the formation process of the Zhongchuan mudflow

4 讨论

官亭盆地面积约为 20 km², 大小支沟有数十条。在地震烈度一样且都存在冰雪消融、农田冬灌、低温

冻结的情况下,为何仅金田村和草滩村上游支沟发生了泥流,而其他支沟甚至紧邻支沟均未发生因饱和含水层振动液化导致的泥流。

除局部微地形地貌的差异外,与颗粒组成、塑性指数以及天然强度不无关系。根据本次泥流形成区

下部粉质黏土的液化初判结果,其粘粒含量处于液化临界值附近,说明该粉质黏土存在发生液化的可能性,但并非很容易液化,即对振动液化的条件要求相对苛刻,后续研究可结合动力触探进一步判断该层粉质黏土的液化等级,进一步验证这一猜想。同时,该层粉质黏土的原状抗剪参数明显偏低,说明液化土并非原状黄土,多是全新世(1.17 万年至今)以来山前洪积物,它不具备典型原状黄土的结构性和强度,后续研究可结合微观观测试验对该猜想展开进一步验证。

需要指出的是,尽管该泥流沟脑处粉质黏土液化等级可能不高,但在官厅盆地乃至整个黄河上游盆地地震液化评价中,应当加大对粉质黏土液化可能性的重视程度,以避免类似灾难的发生。

已有媒体和研究学者将本次积石山地震诱发的次生灾害定义为“砂涌”、“滑坡-泥流”(赵丽梅等, 2023; 许强等, 2024),这与文中定义的“泥流”其实并无冲突。“砂涌”源于当地居民第一反应,因其发生时,下游村庄夜黑地平,所以公众惯性将其定义为砂涌;“滑坡-泥流”是从灾害类型转化角度对本次灾害进行定义;笔者主要考虑灾害体的运动、运移方式,以有效区分区内 1 处典型滑坡和该典型泥流。

5 结论

(1)中川乡泥流具有典型的沟谷型泥石流平面特征,形成区、流通区、堆积区三区界限分明。形成区东侧发育 1 处小型滑坡,其余均顺沟而下形成泥流。液化层岩性为官亭盆地山前全新世以来覆盖于黄河三级阶地之上的洪积粉质黏土,天然强度较低、饱和强度下降显著。

(2)中川乡泥流灾害是地震、局部高地下水位、气温、地形地貌、土层物质组成等内外因素共同作用的结果。外因是积石山地震在此处形成的 VIII 级烈度给泥流的发生提供了强大的振动力,降雨消融和农田冬灌入渗补给以及冻结造成排泄不畅抬升了局部地下水位。内因是泥流原始沟道具有一定的纵向坡降,为泥流的运移提供了重力势能,沟脑农田下部存在可发生液化的粉质黏土层。

(3)泥流地震液化后,液化土内部孔隙水压力突增、强度损失严重,超孔隙水压力将沟脑处表层冻结土层冲溃,液化土压力向临空面释放,前部液化土流向沟内并牵引后部液化土层向前流动。结构和强度

几乎丧失的液化土夹带上覆未液化粉质黏土及少量红黏土沿落差较小的沟道水流而下,经过持续底部铲刮和 3 次明显侧向铲刮后堆积于沟口,掩埋金田村和草滩村部分房屋,造成本次灾难性事件。

(4)黄河盆地冲洪积物中砂粒、粉粒含量较多,饱和粉质黏土发生地震液化并诱发次生灾害并非偶然,粉粒含量较高的粉质黏土液化问题仍需加强关注。建议进一步探索此次泥流与官亭盆地其余未发生泥流沟道在地形地貌、地层岩性、地下水位等方面的对比研究,揭示泥流在此沟而非彼沟发生的深层原因,为该盆地乃至整个黄河上游沉积盆地地震次生灾害的调查与研究提供理论依据。并持续开展黄河上游盆地各流域发生地震次生灾害的风险评估工作,及时提出防治建议,以最大限度减少灾难性事件的发生。

参考文献(References):

- 白铭学, 张苏民. 高烈度地震时黄土地层的液化移动[J]. 工程勘察, 1990, 18(6): 1-5.
- BAI Mingxue, ZHANG Sumin. Landslide induced by liquefaction of loessial soil during earthquake of high intensity[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 1990, 18(6): 1-5.
- 陈博, 宋闯, 陈毅, 等. 2023 年甘肃积石山 Ms6.2 地震同震滑坡和建筑物损毁情况应急识别与影响因素研究[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024: 1-16.
- CHEN Bo, SONG Chuang, CHEN Yi, et al. Emergency Identification and Influencing Factor Analysis of Coseismic Landslides and Building Damages Induced by the 2023 Ms 6.2 Jishishan (Gansu, China) Earthquake[J/OL]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024: 1-16.
- 陈秀清, 白福, 于燕燕. 甘肃省泥石流发育特征、成因分析及其危害[J]. 西北地质, 2014, 47(3): 205-210.
- CHEN Xiuqing, BAI Fu, YU Yanyan. Development Characteristics, Causes and Hazard Analysis of Debris Flow in Gansu Province[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(3): 205-210.
- 李为乐, 许强, 李雨森, 等. 2023 年积石山 Ms6.2 级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 Jishishan Ms 6.2 Earthquake[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2024, 51(1): 33-45+90.
- 刘恢先. 唐山大地震震害[M]. 北京: 地震出版社, 1989.
- 孙萍萍, 张茂省, 贾俊, 等. 中国西部黄土区地质灾害调查研究进展[J]. 西北地质, 2022, 55(3): 96-107.
- SUN Pingping, ZHANG Maosheng, JIA Jun, et al. Geo-hazards Research and Investigation in the Loess Regions of Western China[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(3): 96-107.
- 铁永波, 张宪政, 曹佳文, 等. 积石山 Ms6.2 级和泸定 Ms6.8 级

- 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.
- 万飞鹏, 杨为民, 邱占林, 等. 甘肃岷县纳古呢沟滑坡-泥石流灾害链成灾机制及其演化[J]. 中国地质, 2023, 50(3): 911-925.
- WAN Feipeng, YANG Weimin, QIU Zhanlin, et al. Disaster mechanism and evolution of Nagune Gully landslide-debris flow disaster chain in Minxian County, Gansu Province[J]. Geology in China, 2023, 50(3): 911-925.
- 王兰民. 黄土层大规模地震液化滑移的机理与风险评估[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 1-19.
- WANG Lanmin. Mechanism and risk evaluation of sliding flow triggered by liquefaction of loess deposit during earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 1-19.
- 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/OL]. 中国地质灾害与防治学报, 2024: 1-11.
- 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/OL]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024: 1-11.
- 王新刚, 刘凯, 连宝琴, 等. 黄土-泥岩滑坡诱发因素及形成机理研究进展[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 404-413.
- WANG Xingang, LIU Kai, LIAN Baoqin, et al. Recent advance in understanding inducing factors and formation mechanism of loess-mudstone landslides[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2021, 51(3): 404-413.
- 王运生, 赵波, 吉锋, 等. 2023 年甘肃积石山 Ms6.2 级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 Jishishan Ms 6.2 earthquake, Gansu Province[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2024, 51(1): 1-8.
- 夏正楷, 杨晓燕, 叶茂林. 青海喇家遗址史前灾难事件[J]. 科学通报, 2003, 48(11): 1200-1204.
- XIA Zhengkai, YANG Xiaoyan, YE Maolin. Prehistoric disasters at Lajia Site, Qinghai, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(11): 1200-1204.
- 辛鸿博, 周锡元. 关于软弱粉质粘土地震液化或震陷的判别标准[J]. 世界地震工程, 2011, 27(01): 153-156.
- XIN Hongbo, ZHOU Xiyuan. On liquefaction criteria of low plasticity fine soils[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(01): 153-156.
- 许强, 彭大雷, 范宣梅, 等. 甘肃积石山 6.2 级地震触发青海中川乡液化型滑坡-泥流特征与成因机理[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024: 1-18.
- XU Qiang, PENG Dalei, FAN Xuanmei, et al. Preliminary Study on the Characteristics and Initiation Mechanism of Zhongchuan Town Flowslide Triggered by Jishishan Ms 6.2 Earthquake in Gansu Province[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024: 1-18.
- 徐岳仁, 窦爱霞, 李智敏, 等. 2023 年 12 月 18 日甘肃积石山 Ms6.2 地震触发次生灾害快速评估[J/OL]. 地震, 2024: 1-7.
- XU Yueren, DOU Aixia, LI Zhimin, et al. Rapid assessment of co-seismic hazards induced by Jishishan Ms6.2 earthquake on December 18, 2023 in Gansu Province, Northwest China[J]. Earthquake, 2024: 1-7.
- 袁晓铭, 曹振中, 孙锐, 等. 汶川 8.0 级地震液化特征初步研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(6): 1288-1296.
- YUAN Xiaoming, CAO Zhenzhong, SUN Rui, et al. Preliminary research on liquefaction characteristics of Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1288-1296.
- 于国强, 张茂省, 胡炜. 天水市“7.25”群发性山洪地质灾害发育特征及成因分析[J]. 西北地质, 2014, 47(3): 185-191.
- YU Guoqiang, ZHANG Maosheng, HU Wei. Analysis on the Development Characteristics and Hydrodynamic Conditions for the Massive Debris Flow in Tianshui[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(3): 185-191.
- 张小虎, 夏正楷. 青海官亭盆地黄河二级阶地的结构分析[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 33-34.
- ZHANG Xiaohu, XIA Zhengkai. Analysis of Geomorphologic Structure of Second Terrace in Guanting Basin in Qinghai Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(4): 33-34.
- 赵丽梅, 李隽辉. “砂涌”大救援[N]. 中国青年报, 2023-12-22(001).
- 中华人民共和国国土资源部. 滑坡崩塌泥石流灾害调查规范(1:50 000): DZ/T 0261-2014[M]. 中国标准出版社, 2014-09-22.
- 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB50021-2001[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 构筑物抗震设计规范: GB50191-2012 建筑规范[M]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- Ku Chihsheng, Lee Derher, Wu Jianhong. Evaluation of soil liquefaction in the Chi-Chi Taiwan earthquake using CPT[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2004, 24(9-10): 659-673.
- Plafker George. Tectonics of the March 27, 1964 Alaska Earthquake[J]. US Geological Survey Professional Paper, 1969, 543(1): 1-74.