



重大滑坡机理与风险防控研究取得系列进展

作者：李坤

在国家自然科学基金重点项目“黄土高原新近系泥岩灾变力学行为及滑坡机制”（42130720）、国家自然科学基金重大项目课题“埋藏型红层重大地质灾害成生演化机理”（42293350）、科技部重点研发计划项目“滑坡防治工程可靠性原位检测关键技术装备研发”（2023YFC3007000）等项目的资助下，孙萍研究员团队针对西北黄土高原地区重大滑坡地质灾害开展了系统而深入的研究工作，在水力及结构控滑作用下大型黄土-泥岩滑坡形成演化机理、运动过程及风险分析等方面取得了一系列研究成果，对有效防止滑坡灾害造成人员伤亡和减小经济损失、保障西部山区重大工程地质安全具有重要意义。

相关研究成果已发表于 *Engineering Geology* (SCI, Q1, TOP期刊, 影响因子: 6.9)、*Landslides* (SCI, Q1, 影响因子: 5.8) 等国际工程地质及地质灾害领域权威期刊。



新近系大型泥岩滑坡结构控滑机制及灾变动力过程

李坤, 孙萍*, 王浩杰, 任建

简介: 黄河中上游地区新近系大型泥岩滑坡致灾机理是目前亟待解决的重大前沿性课题。本研究基于物理模型试验, 从泥岩滑坡控滑结构出发, 研究了控滑结构面对泥岩斜坡变形破坏过程的作用效应, 提出了不同控滑结构主导的泥岩滑坡形成演化模式, 揭示了泥岩滑坡的结构面控滑机制。相关研究成果可为西北地区重大地质灾害防灾减灾提供理论依据。

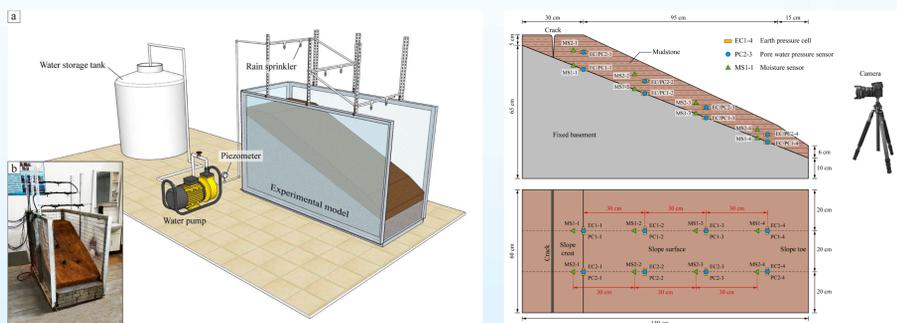


图1 物理模型试验装置及试验监测方案

一、结构面对斜坡渗流及破坏特征的影响

垂向节理对降雨在斜坡中的渗透路径及入渗速率存在直接影响, 作为斜坡的优势渗流通道, 垂向结构面促进了湿润锋的扩展, 导致斜坡中水分入渗速率更快。

不同结构面组合条件下, 斜坡破坏过程存在显著差异。随着垂向结构面数量的增加, 斜坡破坏模式由局部破坏向整体性破坏转变, 失稳滑体的体积也呈现显著的增大趋势。

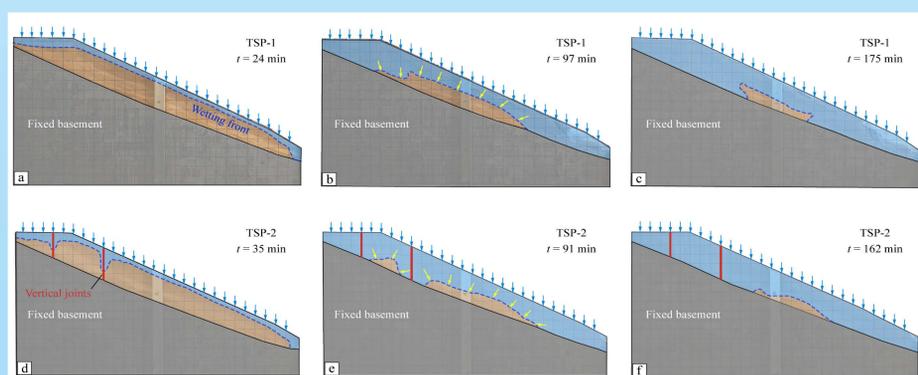


图2 不同结构面工况下湿润锋的迁移过程

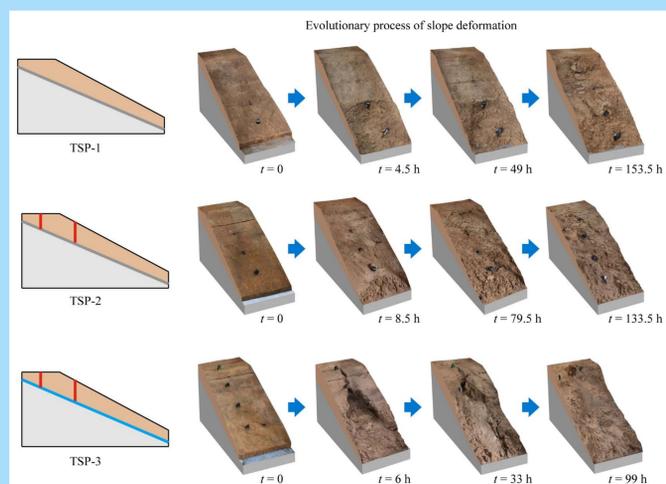


图3 不同结构面工况下斜坡的变形演化过程

二、不同结构控制作用下斜坡的水力响应特征

间歇性降雨条件下, 斜坡内部含水率和孔隙水压力呈现周期性变化特征, 这种饱和-非饱和的循环过程会降低土体的抗剪强度, 是诱发斜坡破坏的关键因素。

不同结构面条件下, 含水率和孔压随斜坡变形呈现不同的响应特征, 表明结构面主要通过影响斜坡内部的水力作用控制斜坡变形破坏。

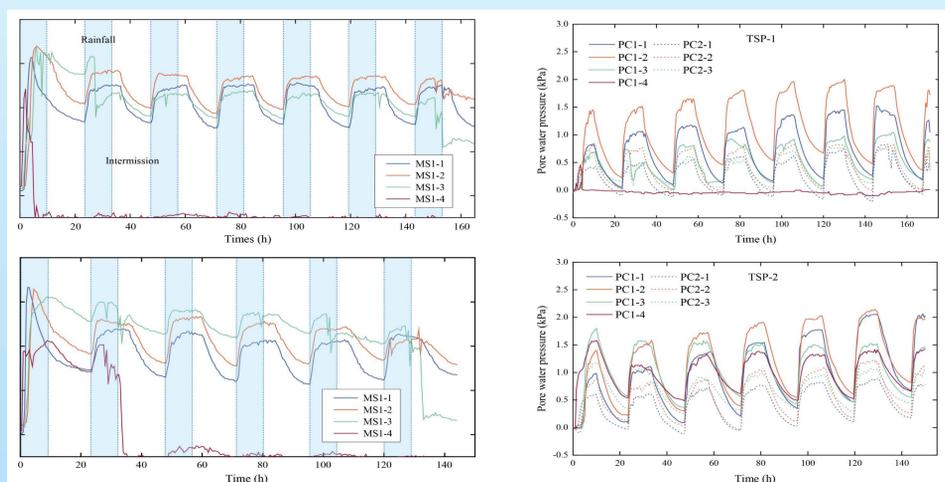


图4 不同工况下体积含水率及孔隙水压力的时间演化曲线

三、不同控滑结构主导的斜坡破坏模式及机制

垂向节理间歇性充水产生的静水压力使斜坡产生向临空方向推出的趋势; 另一方面, 促进了水在接触面附近的富集, 导致界面孔隙水压力增加, 抗剪强度下降。在以上两种因素综合作用下, 斜坡破坏范围、滑坡发生时间均显著增加。

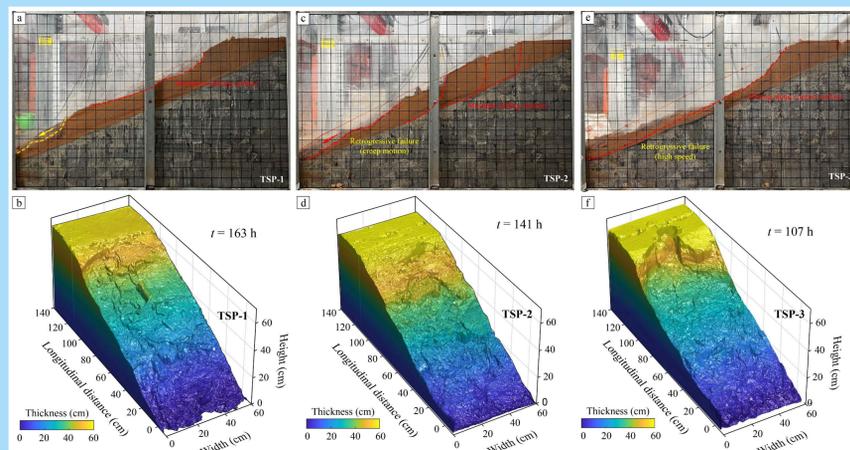


图5 不同结构面控制作用下斜坡的破坏模式

水力作用诱发大型泥岩滑坡复活机制研究

王浩杰, 孙萍*, 任建, 毛佳睿, 柯超英

简介: 大型泥岩滑坡在我国西北地区广泛发育且危害严重, 通常由多期历史地震触发并成群成带分布, 在水力作用下, 极易导致滑坡再次发生整体或局部复活。2020年8月~2022年5月期间, 甘肃省天水市王旗滑坡因大型储水井渗漏发生了多期复活, 属于人类工程活动诱发历史滑坡复活的典型案例。结合现场调研、无人机航测、岩土力学测试及数值分析, 基本揭示了该滑坡的变形演化历史、复活失稳机理及动力演化模式。

1. 渭南滑坡变形破坏特征

王旗滑坡的边界主要受两个储水井的控制, 1号储水井控制了其西侧边界, 2号储水井控制了其后壁边界。滑坡变形区主要位于滑坡中上部, 滑坡上部出现两级断陷槽, 中部出现多级反向陡坎, 坡脚出现横向隆胀裂缝, 表明其具有典型的推移式破坏特征。

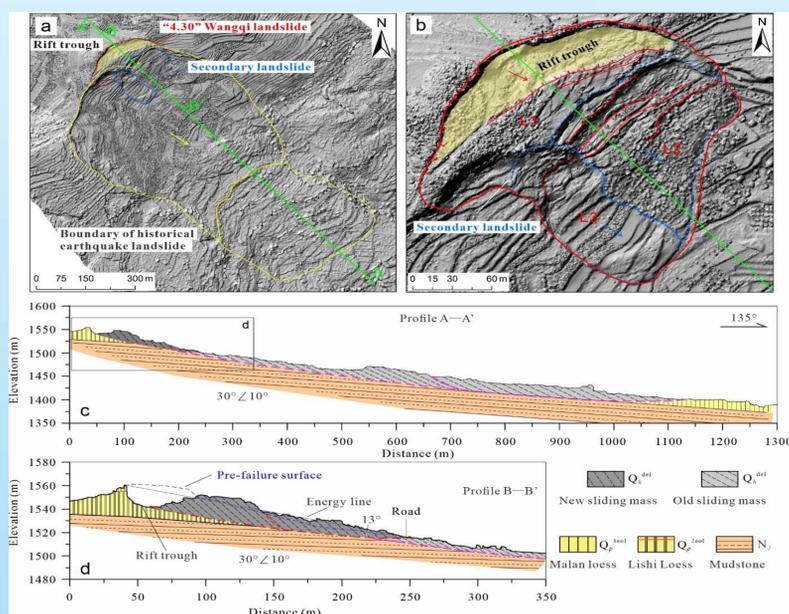


图1 渭南滑坡平、剖面图

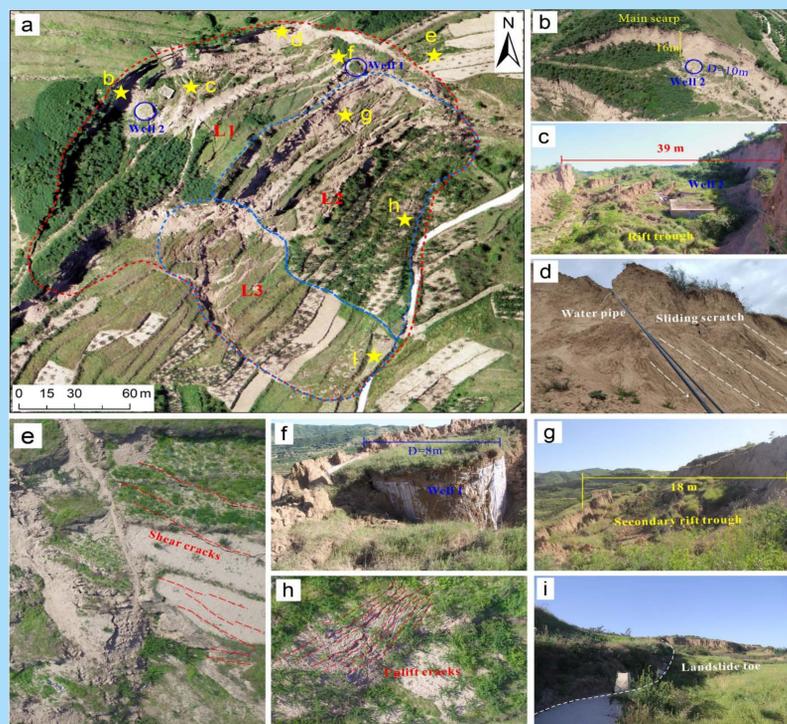


图2 滑坡滑动破坏特征

2. 滑坡动力演化过程及成灾模式

基于连续-非连续单元方法分析了滑坡变形-失稳-运动全过程, 其失稳破坏模式可概括为蠕滑-拉裂式; 失稳后运动可分为三个阶段: 加速阶段, 持速阶段和减速阶段。数值反演该滑坡运动时间约25s, 最大运动速度约2.5m/s。

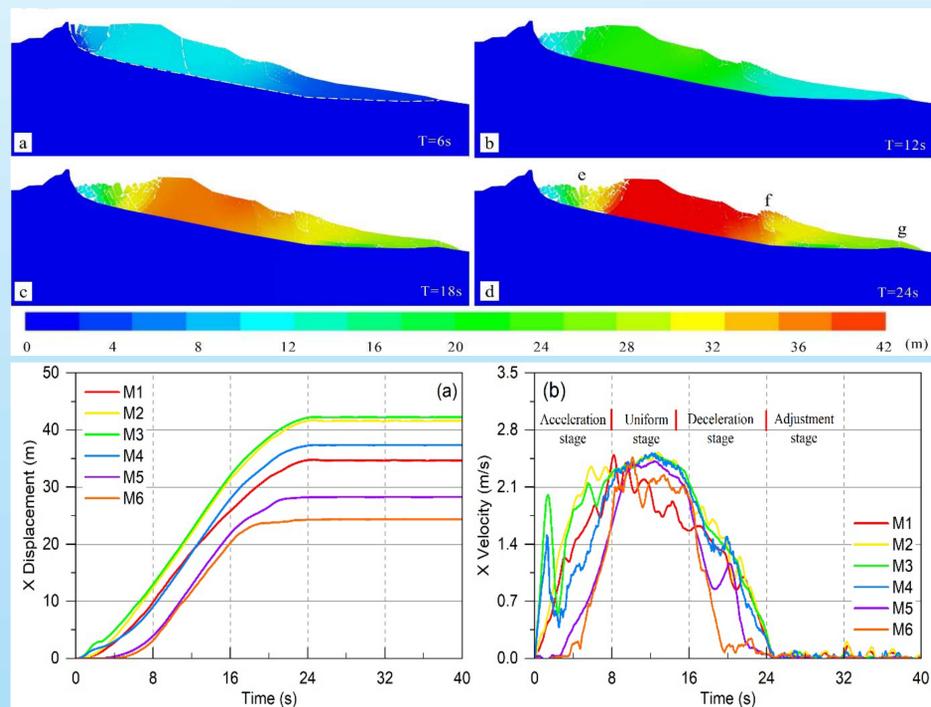


图3 滑坡动力演化过程

该滑坡体的变形具有由后缘向前缘传递的特征, 总体可概括为“深部蠕滑-表层拉裂-渗流软化-滑带渐进贯通-推移运动”的失稳运动模式。

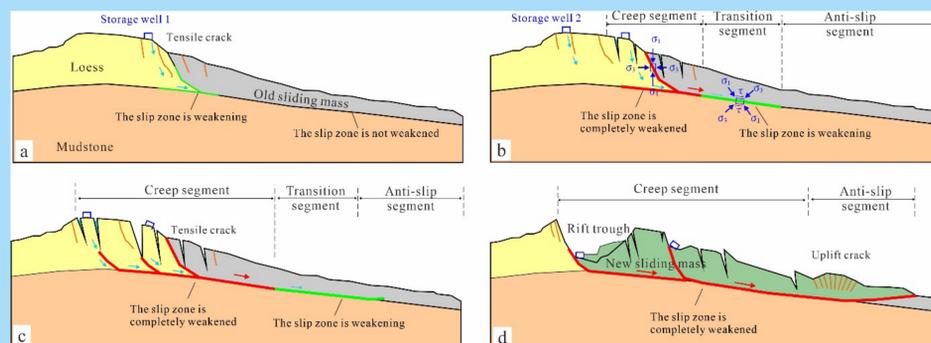


图4 滑坡成灾模式



西北地区特大泥岩滑坡破坏机理研究

李冉, 孙萍*

简介: 2022年9月15日, 青海省西宁市九家湾村发生大型泥岩滑坡, 导致兰新高铁停运近10个月。对此滑坡开展了详细的野外调查、无人机勘测、探槽观测、力学试验和数值模拟等, 讨论了滑坡几何特征、潜在触发因素、破坏机理、破坏过程和再次滑动可能性。

一、九家湾滑坡基本特征

九家湾滑坡发生在古近纪西宁组紫红色泥岩夹石膏岩的反倾斜坡上, 岩层产状 $68\sim 85^\circ \angle 14\sim 23^\circ$, 平均坡度为 35° 。滑坡长宽分别为458m和283m, 面积约 $9 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。

滑坡滑面呈圆弧型, 主滑段为滑坡中部。主滑段滑面倾角约 20° , 滑坡后壁滑面倾角约 45° 。运动摩擦角为 19.3° 。

根据滑坡发生前地貌特征和以往资料判断, 滑坡发生在老滑坡旧址上。



图1 九家湾滑坡典型野外照片

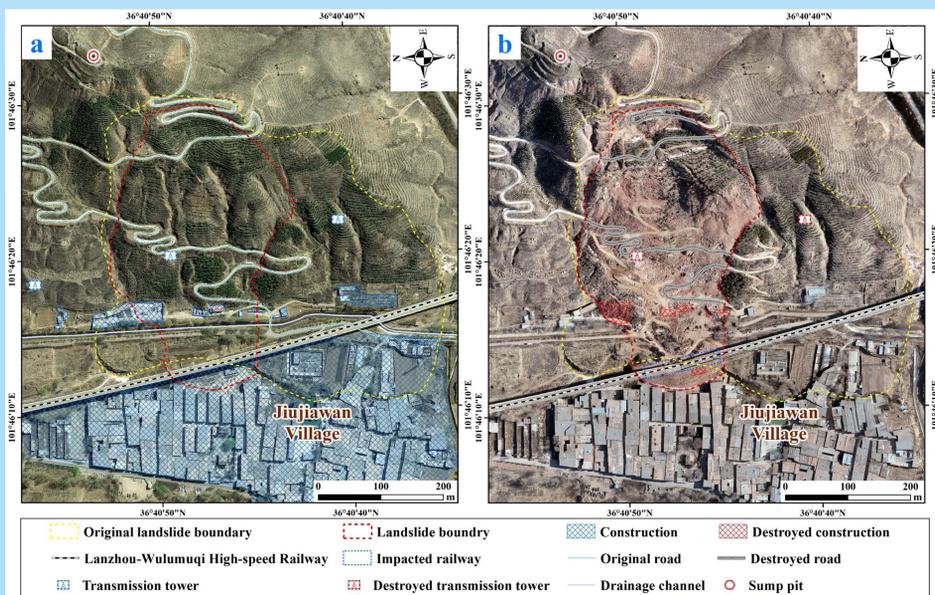


图2 九家湾滑坡破坏前 (a)、后 (b) 正射影像

二、九家湾滑坡主要控滑因素

九家湾滑坡滑坡区发育多组构造结构面, 产状分别为 $170\sim 190^\circ \angle 80\sim 85^\circ$ 、 $275^\circ \angle 70\sim 76^\circ$ 、 $140\sim 150^\circ \angle 60\sim 64^\circ$ 、 $60^\circ \angle 60^\circ$ 、 $80\sim 85^\circ \angle 70\sim 80^\circ$, 是滑坡发生的元凶。

2022年1月8日年门源6.9级地震可能诱发了滑坡区结构面发展, 对滑坡发生起到了促进作用。

九家湾滑坡发生于7-9月的雨季时期, 双苏堡雨量监测站记录累积降水量为191.6mm。8月的最大日降水量和小时降水量分别为34.8mm和25.0mm。强降雨事件导致湟水盆地发生多起灾害, 是滑坡发生的主要诱发因素。

相对透水层石膏岩层和结构面, 为坡体提供了水分渗流通道, 滑体开挖后坡面中部可见源源不断的水分缓慢渗出, 使坡体长期处于湿润状态, 是滑坡发生的主要控制因素。

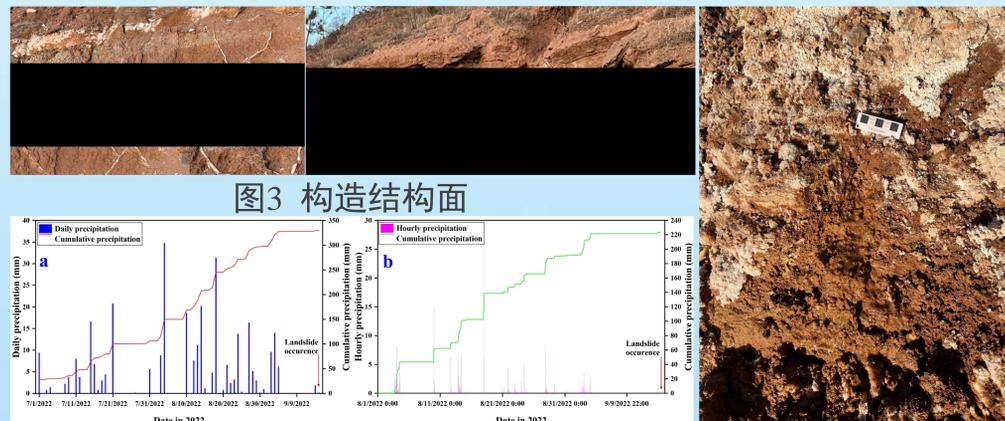


图4 日 (a)、小时 (b) 降雨量

图5 坡面渗水

三、九家湾滑坡滑动过程

受水流渗透作用和结构面控制, 九家湾滑坡在坡体中部发生滑动, 滑面位于泥岩与石膏岩接触面, 控滑地层为泥岩地层。随着滑坡滑动, 滑动带逐渐转换为泥岩与石膏岩混合物, 摩擦系数逐渐增加。

整个运动学过程持续时间约为36s, 在10s~15s之间达到19 m/s的最大速度。

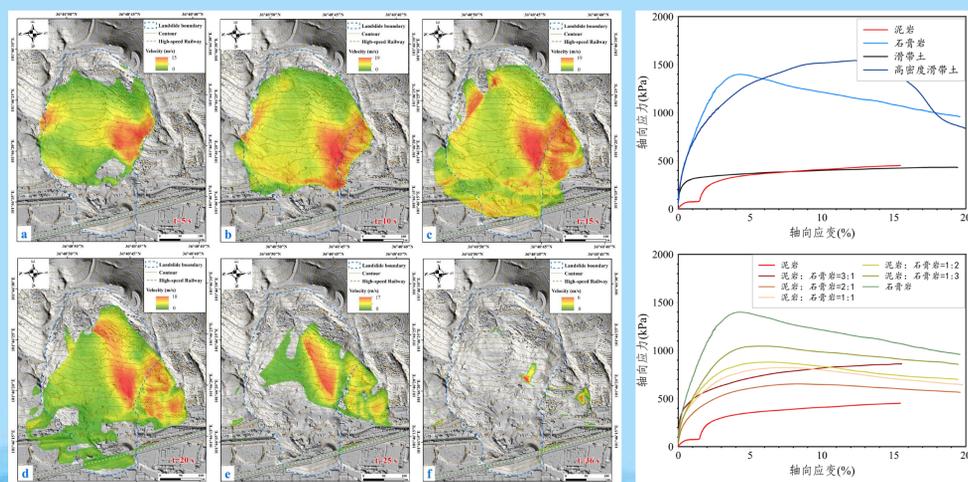


图6 滑坡运动过程模拟

图7 岩石力学试验结果



西北地区降雨型黄土流滑启滑机制

张帅, 孙萍*, 王浩杰, 任健

简介: 以天水中寨、互助及化隆上滩黄土流滑为例, 采用遥感动态解译、无人机航测、现场详查、三轴试验、数值仿真、统计分析等技术, 从区域尺度揭示该区群发性降雨滑坡滑移距离与几何形态关系式, 从典型单体尺度, 解释了多期次降雨作用下, 滑坡溯源侵蚀破坏演化机制。上述滑坡均具有典型的滑流转化特征, 后缘拉张裂隙提供优势入渗通道, 雨水快速汇聚黄土-基岩接触面后发生液化, 上部土体呈现蠕滑-拉裂破坏, 并在运动过程散体, 产生流滑转化。

一、黄土流滑灾害放大效应

尽管降雨型黄土流滑灾害厚度薄 (0-6m)、规模小 ($<10^5 \text{ m}^3$), 但受降雨类型、沟谷形态等环境因素影响, 通常呈现超高运动速度、超长运动距离、超强冲击破坏特征, 灾害放大效应明显。

黄土流滑灾害放大效应主要体现在: ①表观摩擦角小: 黄土流滑灾害表观摩擦角通常低于 20° ; ②运动速度快: 2021年天水中寨黄土流滑和2022年青海互助大型流滑运动速度分别超过 12m/s 和 15m/s ; ③冲击压力大: 中寨黄土流滑以仅 $16,000\text{m}^3$ 方量远程冲击损毁坡脚4户房屋, 互助黄土泥流更是击穿推倒数栋教学楼; ④扩散停积流态化: 沟谷型和坡面型黄土流滑经历长距离剪切后均在坡脚扩散堆积, 扩展角高达 180° 。

二、黄土流滑启滑机制及演化特征

两期降雨诱发的滑坡均具有典型的滑流转化特征, 后缘拉张裂隙提供优势入渗通道, 雨水快速汇聚于黄土-基岩接触面后发生液化, 上部土体呈现蠕滑-拉裂破坏, 并在运动过程散体, 产生滑流转化。

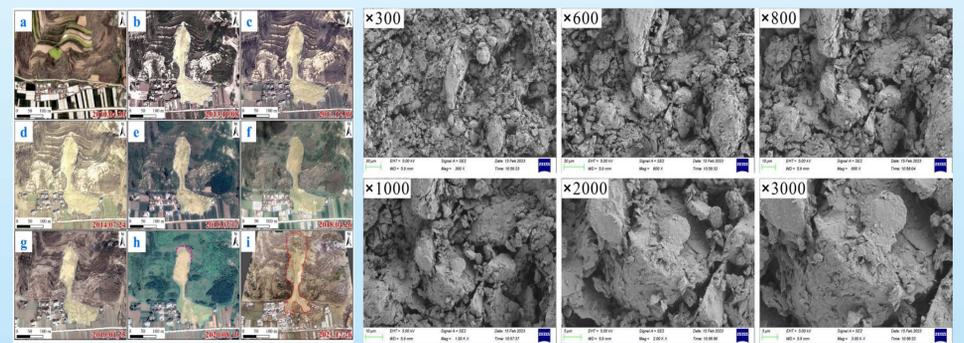


图3 降雨黄土流滑多期次演化特征及微观

三、滑坡复活机制反演及滑移距离预测

数值仿真显示, 中寨黄土流滑整个运动过程历时 93s , 其中在 $t=60\text{s}$ 以前, 滑坡向下快速运动, 最大速度可达 16.8m/s , 在 $t=60\text{s}$ 以后, 滑坡运动表现为缓慢的溜滑, 最终将沟口左侧两栋房屋建筑掩埋。

中寨黄土流滑溯源侵蚀显著, 复发风险高。以中寨黄土流滑后缘潜在物源为对象, 结合复活机制反演所得主要参数, 通过数值仿真分析发现中寨流滑具有最大运动速度高达 29.5m/s , 坡脚建筑未来受中寨流滑影响巨大。

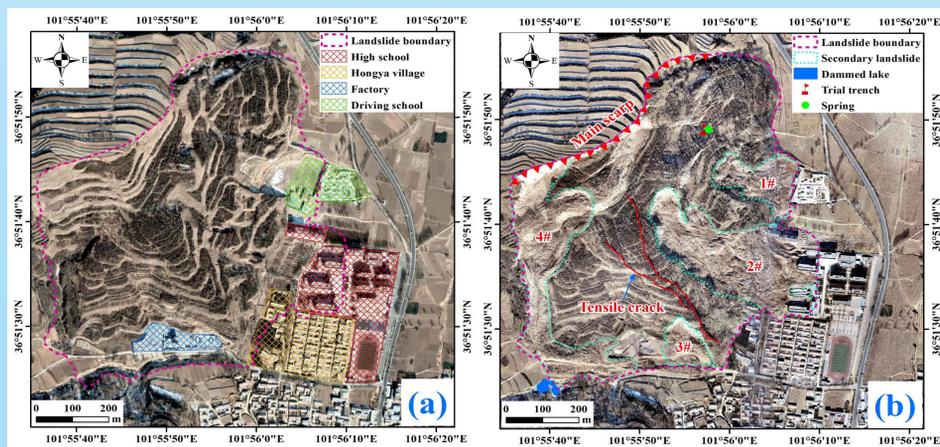


图1 2022年互助重大黄土流滑灾害平面图



图2 互助大型黄土流滑典型特征及灾害效应

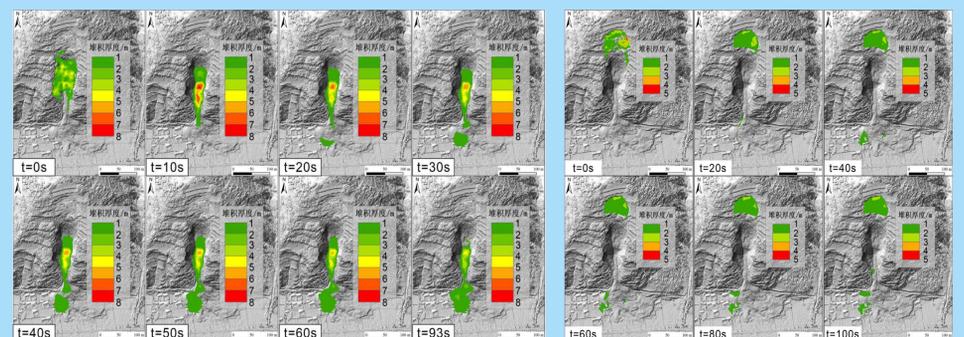


图4 中寨黄土流滑复活堆积厚度及运动速度预测

资助项目: 国家自然科学基金重点项目 (42130720); 国家自然科学基金重大项目 (42293352)

成果信息: Zhang Shuai, Sun Ping*, Li Ran, et al. (2023) Preliminary investigation on a catastrophic loess landslide induced by heavy rainfall on 1 September 2022 in Qinghai, China. Landslides 20, 1553–1559; Zhang Shuai, Sun Ping, Ren Jian, et al. (2022) Successful emergency evacuation from a catastrophic loess landslide reactivated by the torrential rain in October 2021 in Tianshui, Gansu, NW China. Geoenvironmental Disasters 9, 1-10.



黄土流滑历史演化、运动过程反演及潜在危险性预测评价

王浩杰, 孙萍*, 张帅, 任建, 王涛

简介: 中寨村滑坡首次发生于2013年天水市“7.25”暴雨期间, 于2021年10月5日再次复活, 属于典型的降雨诱发泥流型黄土滑坡, 本次复活体积约16000m³, 压埋房屋2户, 造成后缘约21600m³不稳定土体, 在后期降雨作用下再次失稳滑动的风险极高。基于此, 通过大比例尺调绘与数值模拟, 揭示了中寨滑坡多期滑动历史演化过程、启程滑移机理和运动学特征, 并预测了不稳定区失稳滑动后的威胁范围。

1. 中寨村黄土流滑历史演化及滑动破坏特征

中寨村滑坡首次发生于2013年天水市“7.25”暴雨期间, 滑动体积约58000m³, 属于降雨诱发黄土泥流。2021年10月再次复活, 复活体积约16000m³, 压埋房屋2户, 后缘仍发育21600m³不稳定土体, 在后期降雨作用下失稳滑动风险极高。

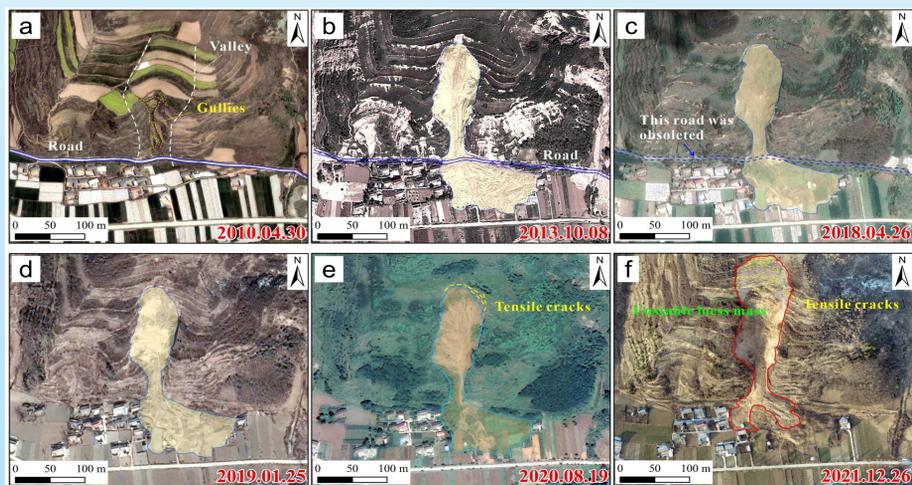


图1 中寨滑坡形成演化过程遥感解译图

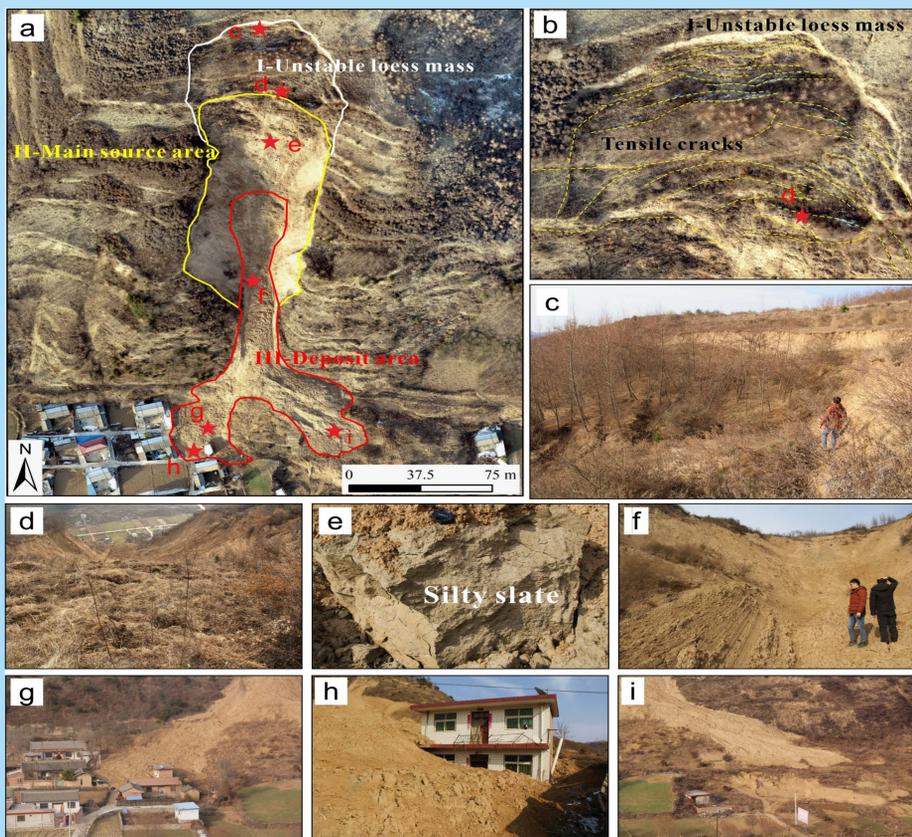


图2 滑坡剖面图及滑动破坏特征

2. 滑坡危险性定量分析

利用厘米级DTM和DOM数据, 结合数值分析方法, 获取了滑坡的运动学参数, 对后缘不稳定土体开展了危险性定量分析。综合研究表明: 该滑坡具有典型的滑流转化、灾害放大和多期次复发特征, 整体破坏形式为蠕滑-拉裂式; 后缘约不稳定土体在降雨作用下失稳滑动后威胁范围为250~295m, 堆积体厚度约为2.7~3.9m, 前缘滑体冲击压力约为40~80kPa, 威胁坡脚6户民居安全, 建议搬迁避让。

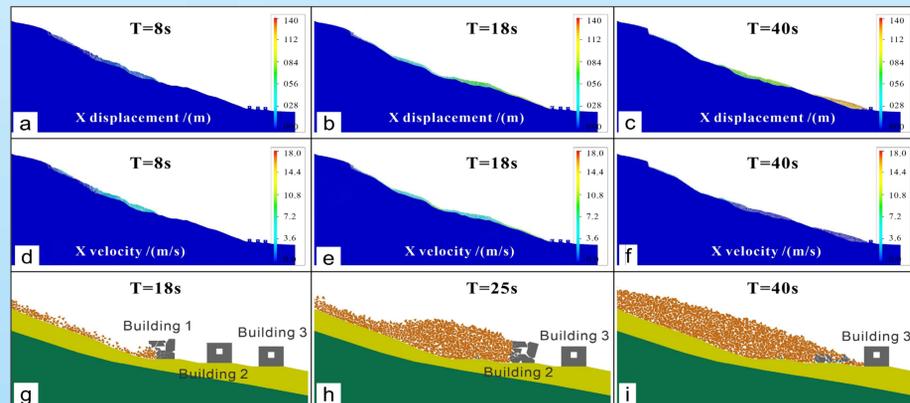


图3 中寨滑坡的运动过程及对建筑物的冲击破坏效应

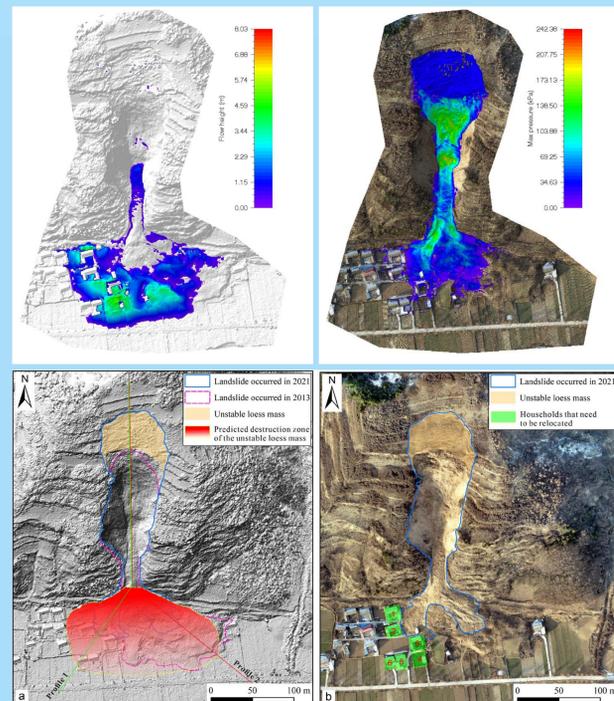


图4 潜在滑体失稳后的堆积厚度、冲击压力和风险管控

黄土高原西南缘灾害发育特征及多情景致灾范围预测

张帅, 孙萍*, 任健, 王浩杰

简介: 以黄土高原西南缘武都区1,144处地质灾害为例, 基于野外详查、空间分析及统计分析等方法, 总结了研究区地质灾害空间分布, 提出灾害环境和诱发因素对灾害的控制作用。在此基础上, 采用层次分析法和GIS空间分析统计方法相结合的方法对区内地质灾害易发性、危险性、风险性完成综合评价。针对区内重大泥石流灾害, 采用数值仿真技术, 研究不同降雨条件下的潜在运动距离和致灾范围, 并综合考虑沟口暴露村庄和公路等财产, 实现了多情境风险评估。

1. 黄土高原西南缘灾害发育特征

滑坡灾害优势地形条件为西南、南、西、东南向凹坡, 坡高小于200 m, 坡度 $21^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之间, 中上更新世黄土、全新世洪积岩、志留系千层岩、板岩、新近系泥岩、泥盆系片岩、片麻岩等易滑岩土体组合。

崩塌灾害发育的优势岩土体条件与滑坡基本一致, 但通常发育在坡度大于 45° 的陡坡; 泥石流灾害主要发育在沟谷坡降小于400‰、高差100 m ~ 500 m、流域面积1~10 km²的沟谷中, 泥石流物源区最优固体物源补给坡度为 $25^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 。

滑坡、崩塌、泥石流主要发生在构造侵蚀中山、侵蚀构造高中山、构造侵蚀堆积河谷平面3类地貌单元。

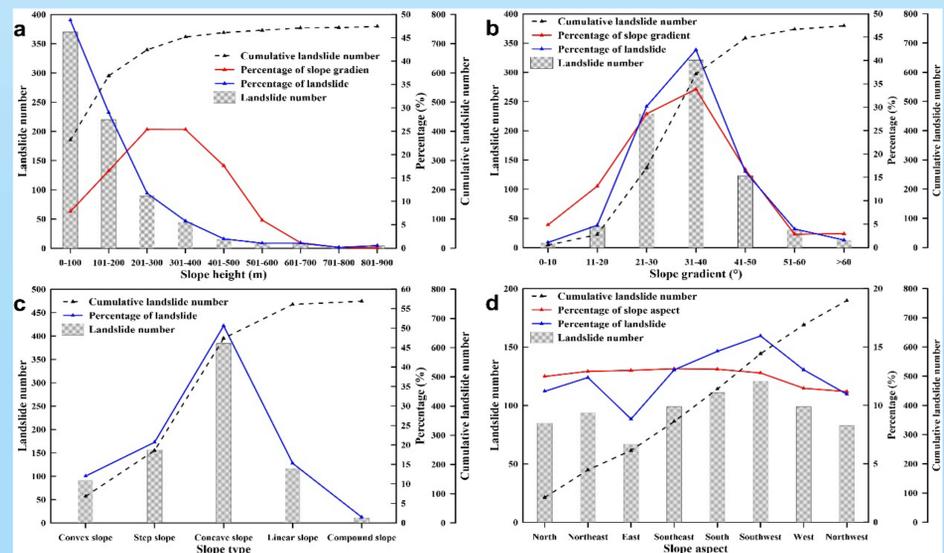


图1 滑坡灾害与地形因子相关性分析

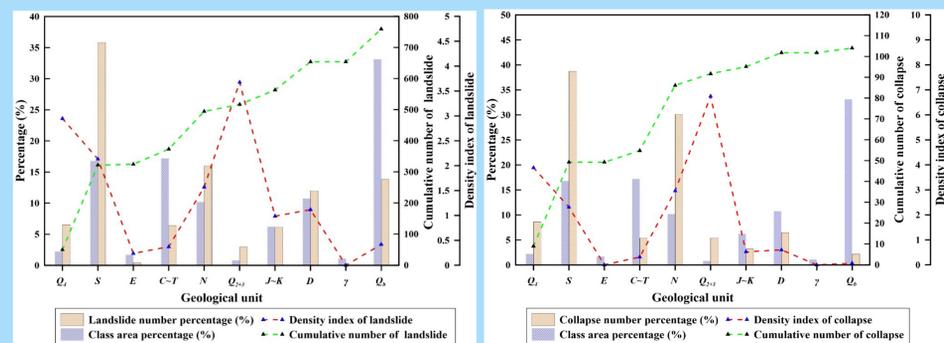


图2 滑坡灾害(左)及崩塌灾害(右)与地质条件相关性分析

2. 黄土流滑启滑机制及演化特征

采用层次分析法和GIS空间分析方法相结合的方法对区内地质灾害易发性、危险性、风险性进行评价, 得出:

极高易发区分布面积253.6km², 占全区总面积的5.4%, 高易发区面积1400.1km², 占全区总面积的29.9%; 极高危险区596.9km², 占全区总面积的12.7, 高危险区面积1095.2km², 占全区总面积的23.4%; 地质灾害极高风险区面积约481.2km², 占全区总面积的10.3%, 高风险区面积956.2km², 占全区总面积的20.4%。

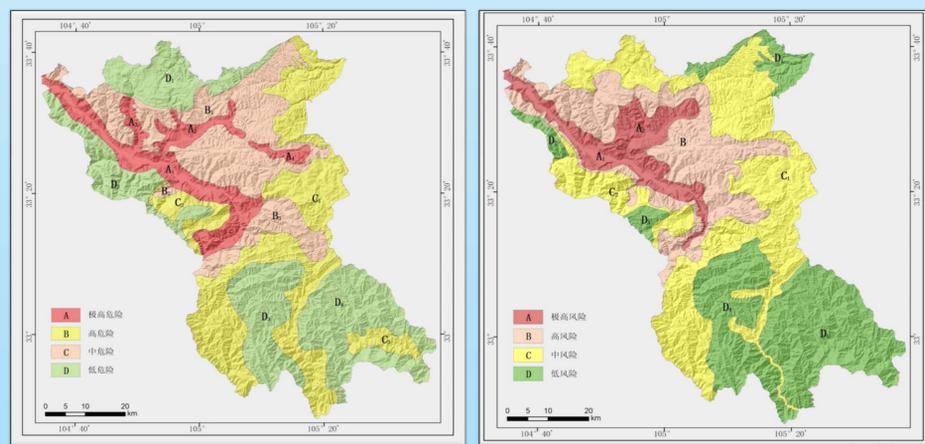


图3 武都地质灾害危险性评价(左)及风险评价(右)

3. 地质灾害多情景致灾范围预测及风险评估

采用FLO-2D数值仿真技术, 完成了100年和50年降水条件下柏水沟泥石流的流深和运动范围评估, 最大流速分别为5.46m/s和5.18m/s, 最大深度分别为5.85m和5.57m; 极高风险、高风险区分别为1个、5个, 面积分别约0.0026km²、0.0152km², 占比2.0%和11.8%。

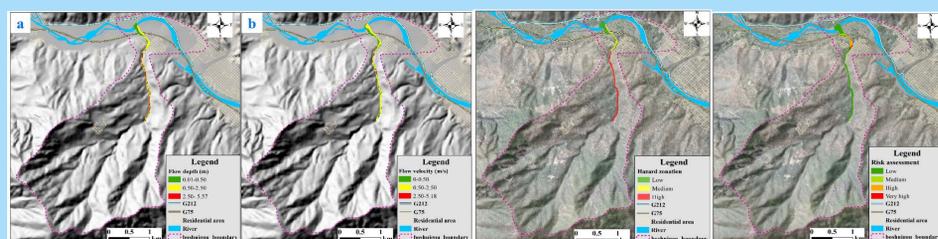


图4 柏水沟泥石流危险性分区及风险综合评价

资助项目: 国家自然科学基金重点项目(42130720)

成果信息: Zhang Shuai, Sun Ping*, Zhang Yanlin, et al. (2022) Hazard zonation and risk assessment of a Debris flow under different rainfall condition in Wudu District, Gansu Province, Northwest China. Water. 2022, 14(17): 2680; Zhang Shuai, Sun Ping*, Li Ran, et al. (2022) Distribution feature and development characteristics of geohazards in Wudu district, Gansu province, Northwest China. Geoenvironmental Disasters, 9(1): 23.