

曾求, 储日升, 盛敏汉, 等, 2021. 四川丹巴梭坡滑坡微震信号初探. 中国地震, 37(2): 300~308.

四川丹巴梭坡滑坡微震信号初探

曾求^{1,2)} 储日升^{1,2)} 盛敏汉^{1,2)} 王清东^{1,2)} 马海超^{1,2)}

1) 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院,
大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077
2) 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 与滑坡变形相关的微震称作滑坡震, 反映了滑坡上不稳定区域对外界环境因素的响应, 分析滑坡体微震事件的地震学性质能够为理解滑坡的动力学过程、进行滑坡稳定性分析以及灾害防治提供关键信息。放置在滑坡上的地震仪不但能记录到和滑坡变形相关的微震, 可能还会记录到一些人类活动信号。滑坡上的人类活动产生的震动事件给滑坡震探测带来挑战。梭坡滑坡位于四川省丹巴县大渡河左岸猴子岩水库库尾, 是丹巴县古碉群的集中分布区之一, 近年来滑坡灾害频发, 其稳定性对古碉群保护和水库蓄水位的选择均十分重要。为监测该滑坡体局部破裂产生的微震信号, 2017 年 2 月至 3 月在滑坡上布设了 34 台三分量短周期地震仪。基于信号到时和波形特征确定几类模板事件, 采用滑动时窗互相关的方法检测微震事件, 并对信噪比较高的事件进行定位。根据事件的位置和到时信息, 估算出滑坡体东西部浅层沉积层面波速度结构存在一定差异, 表明了滑坡浅层沉积层物质分布的横向不均匀。根据这些事件的发生时间和波形特征, 认为除了滑坡震, 梭坡滑坡上还存在燃放烟花造成的震动事件。

关键词: 滑坡微震 微震识别与定位 模板匹配 滑坡烟花事件

[文章编号] 1001-4683(2021)02-0300-09 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

滑坡灾害在我国频繁发生, 通常会造成巨大的人员伤亡、财产损失和基础设施破坏(殷坤龙等, 2001; 朱良峰等, 2004; 黄润秋, 2007; 季伟峰等, 2007; Huang, 2009), 因此有必要对人类住所附近的滑坡体进行监测。滑坡的表面运动学特征目前可以通过大地测量、摄影测量等遥感手段获取(唐亚明等, 2012; Wang, 2013), 然而对于大型滑坡, 表面运动很难反映深部的情况。地震学手段常基于滑坡发生时产生的地震信号分析滑坡的动力学特征(Xie et al, 2020; Zhao et al, 2020), 同时也能通过检测滑坡变形过程中微破裂的活动性来了解滑坡内部的变形情况(Gomberg et al, 2011; 盛敏汉等, 2018)。放置在滑坡上的地震仪不但能记录到滑坡变形辐射出的地震信号, 还可能会记录到人类活动信号。

[收稿日期] 2021-01-01 [修定日期] 2021-03-01

[项目类别] 国家重点研发计划(2018YFC504200)、国家自然科学基金(U20A2095、42004043、41704066)和中国科学院王宽诚率先人才计划“卢嘉锡国际合作团队项目”(GJTD-2018-12)共同资助

[作者简介] 曾求, 男, 1994 年生, 博士研究生, 主要从事背景噪声成像工作。E-mail: chow@whigg.ac.cn

储日升, 通讯作者, 1978 年生, 研究员, 主要从事地震学和地球动力学研究。E-mail: chur@apm.ac.cn

滑坡上的地震仪能记录到大量的震动信号,包括滑坡体外事件的地震信号、与滑坡体变形相关的微震信号、滑坡上的滚石信号;以及非自然信号,包括车辆、行人经过地震仪所引起的震动信号等;甚至暴雨降临时地震仪也有记录(Gomberg et al, 2011; 盛敏汉等, 2018)。与滑坡形变相关的微震称作滑坡震(slidequake),其指滑坡体在运动过程中边界、基底和围岩的相互作用以及局部破裂产生能被地震仪记录到的信号(Helmstetter et al, 2010)。Yamada 等(2016)在日本的 Rausu 滑坡附近的地震记录中发现该滑坡在 2 次坍塌前的数小时内发生了大量的重复事件,认为该事件为滑坡底部边界和基岩之间的粘滑(stick-slip)产生,并认为这一过程对于认识滑坡的触发十分重要。

目前研究滑坡震主要是通过对滑坡震信号的识别、定位,进而分析滑坡震的时空变化来认识滑坡的活动性。滑坡上的滑坡震一般震级较小,Spillmann 等(2007)在研究瑞士阿尔卑斯地区滑坡时得到滑坡震震级主要分布在 $-2 \sim -1$ 级之间,这将对地震事件的识别带来挑战。而中国西南地区部分滑坡附近靠近河岸,土地比较肥沃,滑坡附近或滑坡体上常有居民居住,人类活动的干扰对滑坡震的识别带来进一步挑战。因此,鉴别与检测这些地震事件是利用地震学方法研究滑坡内部形变的重要前提。

本研究利用 2017 年 2 月至 3 月在梭坡滑坡上布设的 34 台地震流动台站记录到的连续地震波形,识别和检测了地震仪记录到的震动事件,通过进一步的波形分析并利用网格搜索的方法对记录较好的事件进行定位。我们发现地震仪不仅记录到了和梭坡滑坡变形相关的滑坡震事件,还清晰记录到了在滑坡上燃放烟花产生的震动事件。

1 梭坡滑坡概况

梭坡滑坡位于四川省丹巴县内大渡河上游,其堆积体总体走向为 $S30^{\circ}E$,坡面倾角约为 30° 。滑坡前缘高程约 1840m,延伸至大渡河河谷,滑坡体积超过 $3 \times 10^8 m^3$ (陈菲等, 2012)。梭坡滑坡侵蚀地貌较为发育,地势险峻,以高山陡坡为主,地质构造发育,降雨集中,人类工程、经济活动较强烈(阳东, 2010)。滑坡东侧为藏族古碉群集中区,近年来,梭坡滑坡灾害频发的趋势尤为明显,造成了巨大经济财产损失(许秦坤, 2012)。由于古碉群独特的历史、人文和旅游价值,梭坡滑坡的稳定性对古碉群保护和水库蓄水位的选择均十分重要。

为了监测该滑坡体上的滑坡震及其他震动事件,2017 年 2 月至 3 月在梭坡滑坡上布设了 34 台地震仪(图 1),平均台间距约为 50m,最大台间距约为 600m。所用仪器为 5s 短周期地震仪,固有频率为 4.5Hz,采样率为 100Hz。

2 微震信号检测与定位

在进行微震信号检测前,首先将原始数据进行高通 5Hz 滤波,以削弱远震信号的干扰。由于滑坡震震级通常比较微弱(Spillmann et al, 2007),本文采用拾取微弱信号能力较强的滑动时窗互相关(Sliding-window Cross-correlation, SCC)方法(Yang et al, 2009; 杨慧等, 2018; Ma et al, 2020)进行微震信号检测。

由于滑动时窗互相关方法检测地震信号需要依靠模板事件,需要依据到时和波形信息寻找模板事件。首先,确定一个所有台站均能记录到的区域地震,并按照 P 波到时对齐所有波形,以校正 GPS 时钟差和台站下方速度结构的影响;同时,由于滑坡土质松软,波速较低,

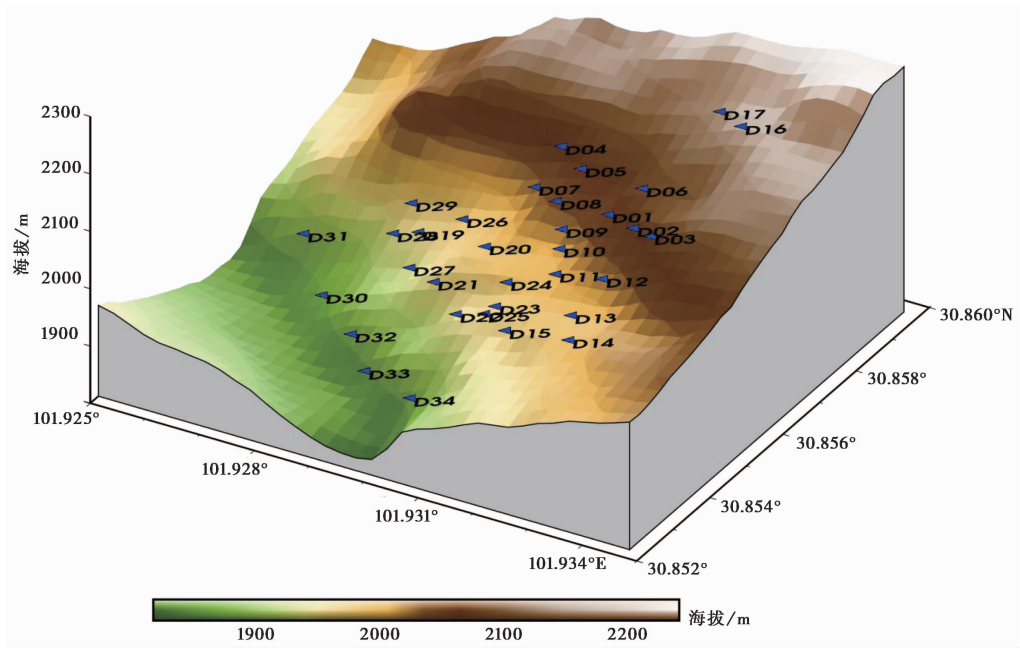


图 1 丹巴梭坡滑坡地形和台站分布
蓝色三角表示布设在梭坡滑坡上的 34 台地震流动台

如果事件发生在滑坡上将会导致明显的到时差,我们随后人工查看了大量对齐后的波形数据(一周)观察是否存在明显到时差,并试图找到分布在滑坡上所有类型的事件;最终,确定了两类信噪比较高的事件(图 2):第Ⅰ类事件(A)只能被 D04 台及研究区域西北部的少数几个台记录到,可能与事件本身能量较小有关;第Ⅱ类事件(B)信号在 D12 台最先被观测到,推测事件发生在 D12 台附近。

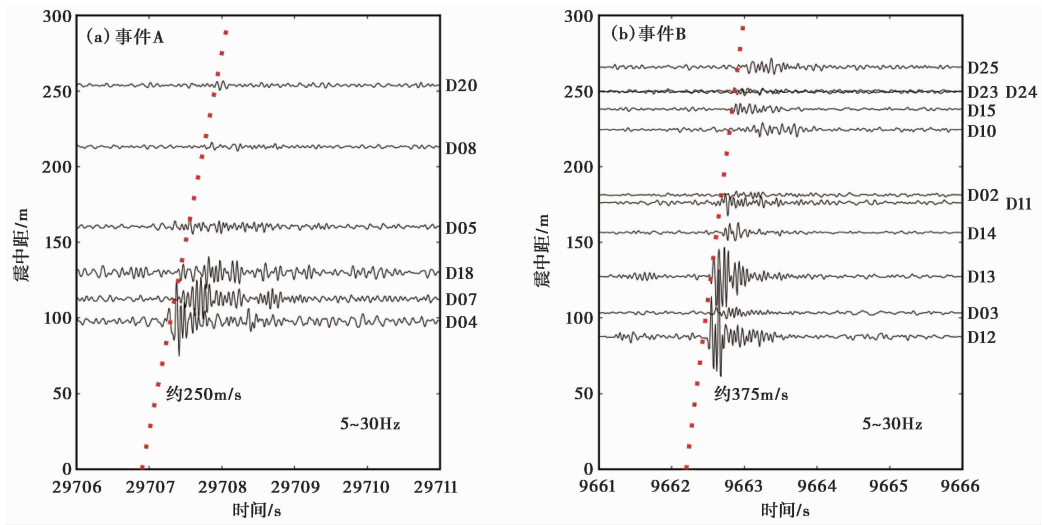


图 2 两类事件的地震剖面图
纵坐标为旋转到滑坡面上的震中距;红色虚线为参考视速度;波形滤波范围 5~30Hz

基于拾取的微震信号到时信息对两类事件进行定位,以更好地获取微震的空间分布。根据各个台站的到时延迟可大致估计这些波形均以一个较低的速度沿滑坡的表面传播,为了确定这一点,我们首先将两类不同事件的 ENZ 分量旋转到了滑坡面上的 RTV 分量(其中 RTV 分别为滑坡面上台站波形记录相对事件位置的径向分量、横向分量以及垂直分量),并将不同事件的 R 分量进行希尔伯特变换后与对应的 V 分量进行对比,如果事件为面波信号则变换后 R 与 V 分量的相位差会消除。由图 3(b)、3(d)可明显看出各事件的 R、V 分量信号的相位差经过希尔伯特变换后几乎均被消除,一定程度上说明这些事件为面波信号。此外,我们还分析了两类事件的 R-V 分量质点运动轨迹(图 3(c)、3(e)),结果显示两类事件的 R-V 分量质点运动轨迹均近似逆进椭圆,符合 Rayleigh 面波的质点运动轨迹特征,由此认为这两类事件信号在高通 5Hz 的频带范围内主要发育面波信号。在确定两类滑坡震事件主要为面波信号后,采用盛敏汉等(2018)一层模型网格搜索技术来确定事件的水平位置,图 3(a)中红色五角星为最终搜索得到的最佳位置。根据图 3 中两类事件的定位结果,将波形以沿滑坡表面到各台站的距离进行排列(图 2),可以看出两类事件随着震中距的增大振幅逐渐减小,由此说明定位结果较为可靠。

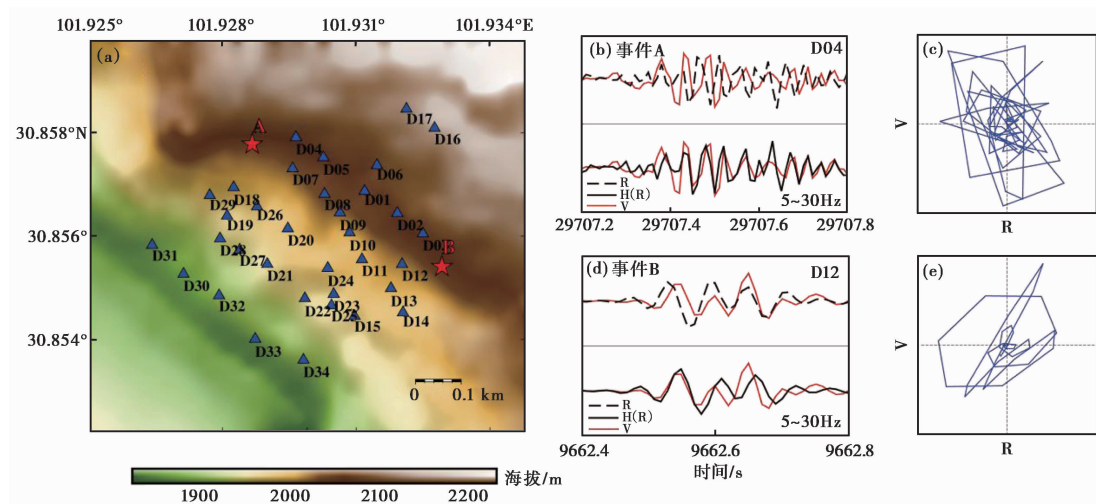


图 3 事件 A、B 定位及波形分析图

(a) 事件 A、B 的地震定位图,其中红色五角星表示事件 A、B 的定位位置,蓝色三角形表示台站;(b)、(c) 分别为发生在 D04 台的事件 A 的希尔伯特变换图与 R-V 分量质点运动轨迹图,其中红色波形为 V 分量波形,黑色虚线与实线分别为希尔变换前后 R 分量波形,滤波频带范围为 5~30Hz;(d)、(e) 分别为发生在 D12 台的事件 B 的希尔伯特变换图与 R-V 分量质点运动轨迹图,其中红色波形为 V 分量波形,黑色虚线与实线分别为希尔变换前后 R 分量波形,滤波频带范围为 5~30Hz

随后,我们拟以图 2 中两类波形为模板,采用滑动时窗互相关(SCC)方法(Yang et al, 2009)匹配与上述两类波形相似的滑坡震事件。为了确保所选模板的波形质量以提高模板匹配的可靠性,对于 A、B 两类事件,分别选取了信噪比最高的 D04 台以及 D12 台作为模板进行互相关匹配并对互相关匹配的结果进行人工检查,最终筛选出 46 个事件 A 以及 48 个事件 B。

3 滑坡上烟花信号的监测

完成事件 A、B 的拾取与定位工作后,发现除事件 A、B 外,在滑坡东部还检测到一类长时间尺度位置和波形一致的重复成簇事件 C(图 4(a)),该事件在 D03 台到时最早且波形信噪比最高,推测可能发生在 D03 附近。为了更好地了解重复事件的发生机理,分别从重复性、波形特征以及时间分布特征等方面对其进行了研究。

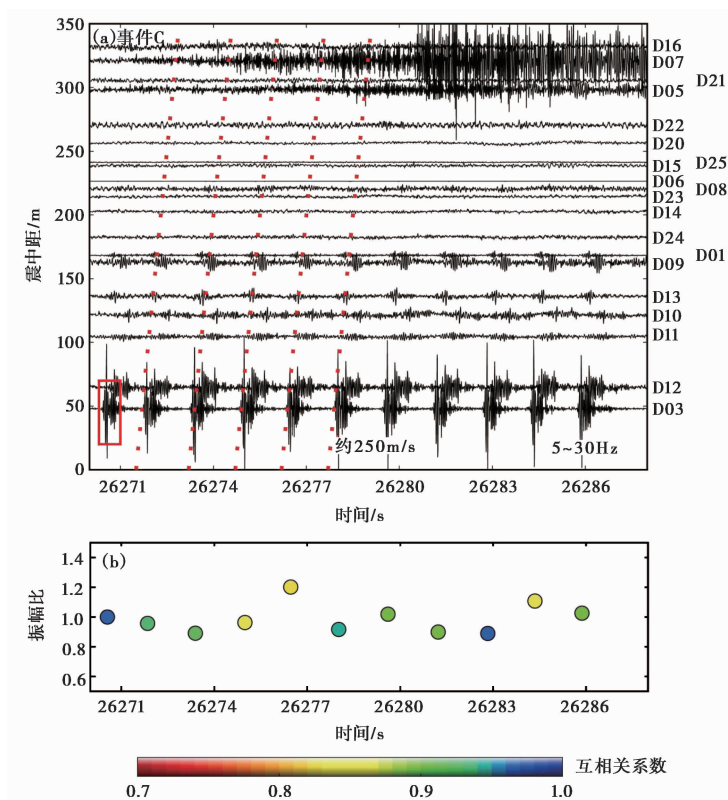


图 4 事件 C 重复性分析

(a) 事件 C 地震剖面图,纵坐标为旋转到滑坡面上的震中距,红色虚线为参考视速度,红色框为模板事件窗口,波形滤波范围为 5~30Hz;(b) 重复事件与模板事件的互相关系数及振幅比

首先,为研究事件 C 的重复性,截取 D03 台一段波形作为模板,如图 4(a) 中红框所示,将其与随后发生的若干重复事件进行互相关计算,得到不同重复信号与模板信号的振幅比及互相关系数(图 4(b))。结果显示,所有重复事件与模板事件的互相关系数、振幅比均在 0.8 以上,说明该类重复事件之间具有较好的一致性,猜测其可能为由人类活动(如道路打钻、施工或燃放烟花等)产生的一致性较高的重复事件。此外,由图 4(a) 可知事件 C 传播距离超过 200m 就很难被地震仪记录到,考虑到该滑坡道路主要为土路,无道路施工现象,同时确认在梭坡滑坡内 D03 附近处仅存在一户人家(图 5 中黑色圆圈),而梭坡滑坡外距离滑坡内最近的住户约 300m,说明该重复事件主要由 D03 附近的住户产生。

其次,对事件 C 进行定位,获取其波形特征,结果如图 5(a) 所示。根据得到的定位结

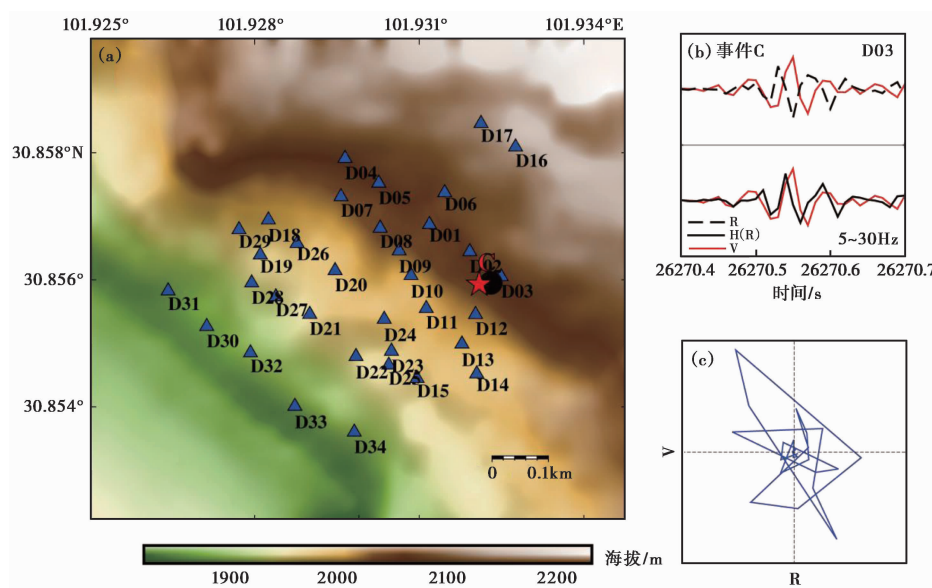


图 5 事件 C 定位及波形分析图

(a) 事件 C 地震定位图, 其中红色五角星表示事件 C 的定位位置, 蓝色三角形表示台站, 黑色圈为滑坡内唯一住户; (b)、(c) 分别为发生在 D03 台事件 C 的希尔伯特变换图与 R-V 分量质点运动轨迹图, 其中红色波形为 V 分量波形, 黑色虚线与实线分别为希尔变换前后 R 分量波形, 滤波频带范围为 5~30Hz

果, 将 D03 的三分量波形 ENZ 分量旋转至滑坡面上的 RTV 分量, 并对 R 分量进行希尔伯特变换, 图 5(b) 表明变换后的 R 分量与 V 分量的相位差几乎消除。同时, 对事件 C 的 R-V 分量质点运动轨迹进行分析 (图 5(c)), 结果显示事件 C 的 R-V 分量质点运动轨迹也近似逆进椭圆。因此事件 C 波形在高通滤波 5Hz 也主要发育面波信号, 结合其重复性特征, 认为其可能为烟花爆炸引起的空气震动耦合地面运动产生的微震信号 (Ishihara et al, 2012)。

采用图 4(a) 中的模板事件, 通过滑动时窗互相关方法对所有波形进行搜索来获取重复事件 C 的时间分布特征。最终统计得到 638 个重复事件 C (图 6(a)), 通过其时间分布图 (图 6(a) 中红色实线为发生时间段) 可知, 事件 C 发生的日期为 2017 年 2 月 22 日、2017 年 2 月 27 日、2017 年 3 月 3 日以及 2017 年 3 月 17 日, 并且这 4 天的地震事件较未发生事件 C 的日期 (2017 年 2 月 23 日) 数量明显增多, 且主要集中在每天的北京时间中午 12 点至下午 6 点间。由于该滑坡区域主要住户为藏民, 为此我们首先查找了藏历, 发现 2017 年 2 月 27 日为藏历新年, 而根据藏族传统, 此时为藏民庆祝的时间。另外, 我们将得到的互相关函数包络相邻最大振幅的时间差作为事件发生的间隔进行统计, 得到图 6(b) 所示事件 C 发生间隔的柱状图, 发现大部分事件 C 的两两时间间隔分布在 1.5~2.5s 区间内, 这一现象与烟花燃放时的爆炸时间间隔吻合。由此推测该事件可能是人工燃放烟花产生的信号。

4 讨论与结论

本文识别了梭坡滑坡上的震动事件并利用滑动互相关方法检测了相似事件, 通过网格搜索的方法对信噪比高的事件进行了定位。分析滑坡体微震事件的地震学性质能够为理解滑坡的动力学过程、进行滑坡稳定性分析以及灾害防治提供关键信息, 因此我们分别从波速

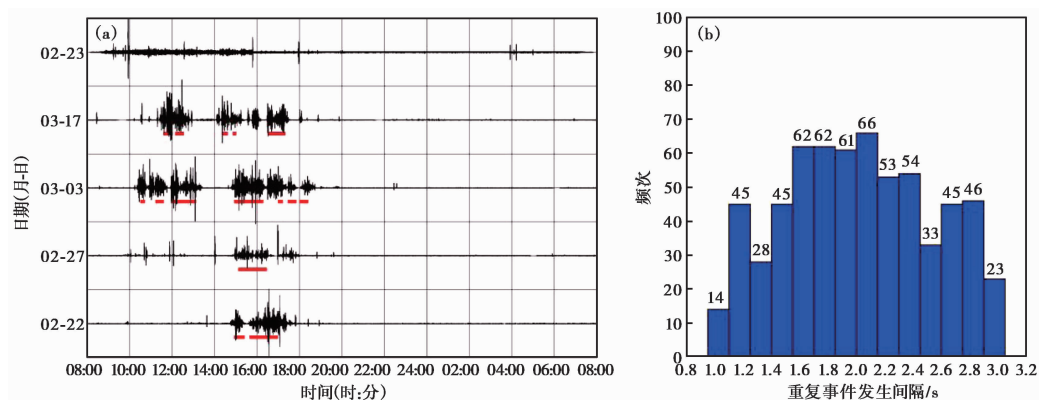


图 6 事件 C 发生频率分析图

(a) 重复事件 C 的时间分布图, 红色实线表示重复事件发生的时间段; (b) 重复事件 C 的时间间隔图

以及频谱等地震学性质对拾取到的微震信号进行讨论。

高频面波波速能够反映滑坡浅层沉积层的物质空间分布信息(曾求等, 2020)。根据一层模型网格搜索技术获得的微震定位结果, 计算了微震位置到不同台站沿滑坡表面的震中距, 将各事件按照震中距排列并剔除信噪比较低的信号(图 2(a)、4(a))。通过微震事件的位置和到时信息可以估算出各事件信号的面波视速度, 结果显示, 不同事件间的面波波速存在一定差异, 其中事件 A 速度约为 250m/s, 事件 B 约为 375m/s, 事件 C 约为 250m/s。这些速度差异体现了滑坡浅层沉积层的物质的横向分布不均匀, 事件 A 和 C 较事件 B 速度偏低, 这与我们在野外布台时所观察到的地质环境相对应。事件 A 与 C 发生在滑坡中段内部, 浅层沉积层为较软的风化土壤; 事件 B 发生在滑坡东部边缘处, 接近藏族古碉群住宅区, 浅层沉积层为稍硬的风化块石夹土(陈菲等, 2012)。该速度结果也在一定程度上说明了定位结果的可靠性。

微震事件的频谱特征同样也包含了地震波传播过程中的介质信息(Fan et al, 2017)。为了削弱衰减对频谱的影响, 我们选取了震中距均约为 100m 的事件 A、B、C 进行频谱分析, 如图 7 所示。其中, 事件 A 与事件 C 的频谱特征相似, 主频均约为 20Hz, 因此并不能简单地通过波形频谱特征分析将烟花事件与滑坡震事件进行区分。相比之下事件 B 主频较高(约

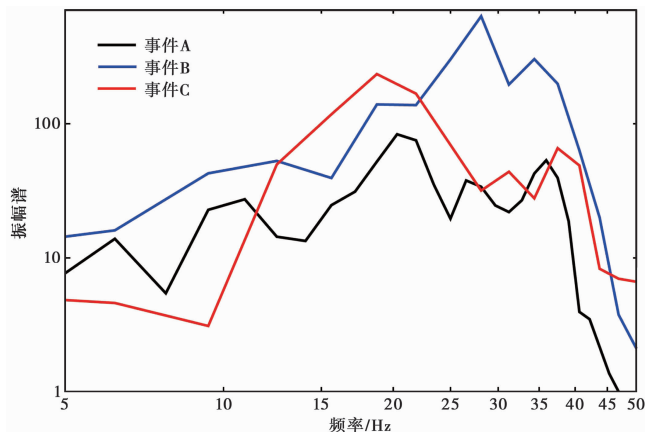


图 7 事件 A、B、C 的波形频谱图

30Hz)。结合三类事件的面波视速度信息可知,主频较低的事件 A 与事件 C 对应的视速度也较小(均约 250m/s),而主频较高的事件 B 对应的面波时速度较大(约为 375m/s)。这可能是由于事件 A 与事件 C 均发生于位于滑坡内较为松散的风化土壤层,高频面波衰减较快,而事件 B 发生于滑坡边缘较硬的风化块石夹土层,大于 20Hz 的高频面波信号得以保留。由此表明,对于微震事件的频谱分析能够获得滑坡体浅层介质的物理性质分布特征。

此外,通过对事件 C 的重复性、波形特征以及事件分布特征进行分析,确认了事件 C 为滑坡上烟花爆竹引起的空气震动耦合地面运动产生的微震信号。这一方面有助于与滑坡内部产生的微震信号进行区分,在滑坡活动性分析时能够有效去除人工信号的干扰;另一方面信噪比较高的烟花信号可以作为人工爆炸源提供滑坡浅层介质物性参数,为研究滑坡体的浅层速度结构及其随时间变化等信息提供基础。

本文观测到了滑坡滑动变形过程中辐射出的大量地震信号,对于这些地震事件发生机理、与滑坡变形的关系及与天然断层类比的情况,则需要进一步对这些微震的机制解进行分析。同时,本文在定位过程中所使用的单层模型过于简单,但是对于浅地表区域有利于问题的简化。而对于重复的烟花事件,下一步考虑对所有事件进行定位,并结合速度结构反演研究滑坡体速度随时间的变化情况。

参考文献

- 陈菲,邓建辉,高明忠,等,2012. 丹巴县莫洛村滑坡的地质成因与稳定评价. 岩土力学, **33**(6):1781~1786.
- 黄润秋,2007. 20 世纪以来中国的大型滑坡及其发生机制. 岩石力学与工程学报, **26**(3):433~454.
- 季伟峰,胡时友,宋军,2007. 中国西南地区主要地质灾害及常用监测方法. 中国地质灾害与防治学报, **18**(S1):38~41.
- 盛敏汉,储日升,危自根,等,2018. 四川省理县西山村滑坡运动变形过程中的微震研究. 地球物理学报, **61**(1):171~182.
- 唐亚明,张茂省,薛强,等,2012. 滑坡监测预警国内外研究现状及评述. 地质论评, **58**(3):533~541.
- 许秦坤,2012. 狭长通道火灾烟气热分层及运动机制研究. 博士学位论文. 合肥:中国科学技术大学.
- 阳东,2010. 狭长受限空间火灾烟气分层与卷吸特性研究. 博士学位论文. 合肥:中国科学技术大学.
- 杨慧,储日升,盛敏汉,2018. 2015 山东平邑石膏矿塌陷地震震源参数测定. 地球物理学进展, **33**(1):125~132.
- 殷坤龙,朱良峰,2001. 滑坡灾害空间区划及 GIS 应用研究. 地学前缘, **8**(2):279~284.
- 曾求,储日升,曾祥方,等,2020. 利用地震背景噪声提取西山村滑坡高频面波信号. 地球物理学报, **63**(5):1830~1843.
- 朱良峰,吴信才,殷坤龙,等,2004. 基于信息量模型的中国滑坡灾害风险区划研究. 地球科学与环境学报, **26**(3):52~56.
- Fan G, Zhang L M, Zhang J J, et al, 2017. Energy-based analysis of mechanisms of earthquake-induced landslide using Hilbert-Huang transform and marginal spectrum. Rock Mech Rock Eng, **50**(9):2425~2441.
- Gomberg J, Schulz W, Bodin P, et al, 2011. Seismic and geodetic signatures of fault slip at the Slumgullion landslide natural laboratory. J Geophys Res:Solid Earth, **116**(B9):B09404.
- Helmstetter A, Garambois S, 2010. Seismic monitoring of S chilienne rockslide (French Alps): Analysis of seismic signals and their correlation with rainfalls. J Geophys Res:Earth Surf, **115**(F3):F03016.
- Huang R Q, 2009. Some catastrophic landslides since the twentieth century in the southwest of China. Landslides, **6**(1):69~81.
- Ishihara Y, Hiramatsu Y, Yamamoto M Y, et al, 2012. Infrasound/seismic observation of the Hayabusa reentry: Observations and preliminary results. Earth Planets Space, **64**(7):655~660.
- Ma H C, Chu R S, Sheng M H, et al, 2020. Template matching for simple waveforms with low signal-to-noise ratio and its application to icequake detection. Earthq Sci, **33**:1~8.
- Spillmann T, Maurer H, Green A G, et al, 2007. Microseismic investigation of an unstable mountain slope in the Swiss Alps. J Geophys Res:Solid Earth, **112**(B7):B07301.
- Wang G Q, 2013. Millimeter-accuracy GPS landslide monitoring using precise point positioning with single receiver phase ambiguity (PPP-SRPA) resolution: a case study in Puerto Rico. J Geodetic Sci, **3**(1):22~31.
- Xie J, Chu R S, Ni S D, 2020. Relocation of the 17 June 2017 Nuugaatsiaq (Greenland) Landslide Based on Green's Functions From

- Ambient Seismic Noises. *J Geophys Res:Solid Earth*,**125**(5):e2019JB018947.
- Yamada M, Mori J, Matsushi Y, 2016. Possible stick-slip behavior before the Rausu landslide inferred from repeating seismic events. *Geophys Res Lett*,**43**(17):9038~9044.
- Yang H F, Zhu L P, Chu R S, 2009. Fault-plane determination of the 18 April 2008 Mount Carmel, Illinois, earthquake by detecting and relocating aftershocks. *Bull Seismol Soc Am*,**99**(6):3413~3420.
- Zhao J, Ouyang C J, Ni S D, et al, 2020. Analysis of the June 2017 Maoxian landslide processes with force histories from seismological inversion and terrain features. *Geophys J Int*,**222**:1956~1976.

Preliminary Study on Microseismic Signals of Danba Suopo Landslide in Sichuan Province

Zeng Qiu^{1,2)} Chu Risheng^{1,2)} Sheng Minhan^{1,2)} Wang Qingdong^{1,2)} Ma Haichao^{1,2)}

1) State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2) University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Microseisms caused by the landslide deformation are called slidequakes, which are the response of unstable areas on the landslide to external environmental factors. Analyzing the seismological properties of slidequakes helps to understand the dynamics of landslides, to analyze landslide stability and to prevent potential disasters. The seismometers deployed on the landslide can record the microseisms related to the deformation of the landslide along with some human activity signals. However, events generated by human activities on landslides pose challenges for slidequake detection. The Suopo landslide is located at the end of the Houhouyan Reservoir on the left bank of the Dadu River in Danba County, Sichuan Province, where is famous for ancient blockhouses in Danba County. In recent years, landslide disasters have occurred frequently on Suopo landslide. So the stability of Suopo landslide is key to the protection of the ancient blockhouses and the determination of water level of local reservoirs. In order to monitor the microseismic signal generated by the local rupture of the landslide, we deployed 34 three-component short-period seismometers on the landslide from February to March 2017. Based on the signal arrival time and waveform characteristics several types of template events are determined firstly, then the sliding time window cross-correlation method is used to detect microseismic events, and the events with high signal-to-noise ratio are located. According to the location and time information of the event, we find that there exist certain differences in the wave velocity structure of the shallow sedimentary layer between the east and the west of the landslide, indicating the lateral unevenness of the material distribution in the shallow sedimentary layer of the landslide. Based on the time and waveform characteristics of these events, we believe that in addition to slidequakes, there are also vibration events caused by fireworks on the Suopo landslide. Our results provide a reference for the detection of slidequakes and the inversion of shallow structures of landslides.

Keywords: Slidequake; Microseismic identification and location; Template matching; Landslide fireworks events