



引文格式:李为乐,陈俊伊,陆会燕,等.泸定Ms 6.8地震对海螺沟冰川的影响应急分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(1):47-57.DOI:10.13203/j.whugis20220593

Citation: LI Weile, CHEN Junyi, LU Huiyan, et al. Emergency Analysis of the Impact of the Luding Ms 6.8 Earthquake on Hailuogou Glacier[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(1):47-57. DOI:10.13203/j.whugis20220593

## 泸定Ms 6.8地震对海螺沟冰川的影响应急分析

李为乐<sup>1</sup> 陈俊伊<sup>1</sup> 陆会燕<sup>1</sup> 单云峰<sup>1</sup> 李志刚<sup>1</sup> 陈宝林<sup>1</sup>  
伍弯宇<sup>1</sup> 许洲<sup>1</sup> 李维敏<sup>1</sup> 张攀<sup>1</sup> 许善森<sup>1</sup> 汤明高<sup>1</sup>  
董秀军<sup>1</sup> 赵建军<sup>1</sup> 范宣梅<sup>1</sup> 许强<sup>1</sup>

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:**2022-09-05四川省甘孜州泸定县发生Ms 6.8地震,震中距离海螺沟冰川约10 km,海螺沟冰川受此次地震影响如何,受到社会广泛关切。利用多时相Landsat 8和Sentinel-2光学卫星影像,基于归一化雪覆盖指数对海螺沟冰川面积进行监测,并利用Sentinel-1雷达卫星影像,基于像素偏移追踪技术对海螺沟地震前和震中位移进行监测。结果表明,2016—2022年海螺沟冰川8月份面积呈波动变化趋势,与日平均最高气温具有负相关性,冰川运动速度与地形坡度和日平均最高气温具有正相关性。泸定地震未造成海螺沟冰川运动速度大范围显著增大,但对冰瀑布前缘区域扰动明显。震后冰崩直接致灾可能性较小,但增加了泥石流致灾风险。

**关键词:**泸定地震;海螺沟冰川;遥感监测;像素偏移追踪;归一化雪覆盖指数;应急分析

中图分类号:P237

文献标识码:A

收稿日期:2022-09-18

DOI:10.13203/j.whugis20220593

文章编号:1671-8860(2023)01-0047-11

## Emergency Analysis of the Impact of the Luding Ms 6.8 Earthquake on Hailuogou Glacier

LI Weile<sup>1</sup> CHEN Junyi<sup>1</sup> LU Huiyan<sup>1</sup> SHAN Yunfeng<sup>1</sup> LI Zhigang<sup>1</sup> CHEN Baolin<sup>1</sup>  
WU Luanyu<sup>1</sup> XU Zhou<sup>1</sup> LI Weimin<sup>1</sup> ZHANG Pan<sup>1</sup> XU Shanmiao<sup>1</sup> TANG Minggao<sup>1</sup>  
DONG Xiujun<sup>1</sup> ZHAO Jianjun<sup>1</sup> FAN Xuanmei<sup>1</sup> XU Qiang<sup>1</sup>

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

**Abstract:** Objectives: On 5th September 2022, an Ms 6.8 earthquake struck Luding County, Ganzi Prefecture, Sichuan Province, China, with the epicenter about 10 km away from Hailuogou Glacier. The affect of this earthquake on Hailuogou Glacier has been widely concerned by the society. Methods: Firstly, the glacier area is monitored based on normalized difference snow index using multi-temporal Landsat 8 and Sentinel-2 optical satellite images. Secondly, Sentinel-1 synthetic aperture radar satellite image is used to monitor the displacement before and during the Luding earthquake based on pixel offset tracking technology. Results: The results indicate that the area of Hailuogou Glacier shows a shaking trend from 2016 to 2022, which have a negative correlation with the daily average maximum temperature. While the velocity has a positively correlation with the slope gradient and the daily average maximum temperature. The Luding earthquake did not cause a significant increase in the velocity of Hailuogou Glaciers in a large range, but it significantly disturbed the front area of the ice waterfall. Conclusions: The possibility of direct disaster caused by ice avalanches after the earthquake was low, but which increased the risk of disaster caused by debris flow.

**Key words:** Luding earthquake; Hailuogou Glacier; remote sensing monitoring; pixel offset tracking; nor-

基金项目:国家重点研发计划(2021YFC3000401);国家自然科学基金(41941019);第二次青藏高原科学考察项目(2019QZKK0201)。

第一作者:李为乐,博士,教授,主要从事地质灾害隐患识别与监测研究。liweile08@mail.cdut.edu.cn

通讯作者:许强,博士,教授。xq@cdut.edu.cn

malized difference snow index; emergency analysis

2022-09-05 12时 52分,四川省甘孜藏族自治州泸定县境内发生了Ms 6.8 地震,震中位于泸定县磨西镇海螺沟冰川森林公园内( $29.59^{\circ}\text{N}$ , $102.08^{\circ}\text{E}$ ),震源深度约 16 km,地震持续时间约 20 s,最高地震烈度达 IX 度。此次地震为主震-余震型地震,截至 9月 8 日 15时共记录到 Ms 2.8 及以上余震 20 次,最大为 9月 7 日发生在石棉县田湾乡的 Ms 4.5 余震<sup>[1-2]</sup>。此次地震造成了严重的人员伤亡和财产损失,国务院抗震救灾指挥部办公室、应急管理部紧急启动了国家地震应急二级响应。截至 9月 13 日国家二级应急响应结束,地震及次生地质灾害共造成 93 人死亡,25 人失联,270 余人受伤<sup>[2]</sup>。同时,地震还触发了大量的崩塌、滑坡等地质灾害,造成大量居民房屋和道路被毁,王岗坪乡、草科乡等地一度成为孤岛,部分区域道路短期内未能抢修通行。

卫星和航空遥感技术在此次地震应急响应中发挥了重要作用。地震发生后,相关部门紧急协调了国产雷达卫星(高分三号、巢湖一号、海丝一号、齐鲁一号、泰景四号等)、光学卫星(高分一号、高分二号、高分六号、高分七号、资源一号、资源三号、北京二号、北京三号、四维 02 号等)、高光谱卫星(珠海一号)、夜光卫星(吉林一号)等多源卫星资源对地震灾区进行拍摄。由于震后灾区主要为云雾天气,应急响应前期获取到有效数据的主要是雷达卫星。9月 5 日晚便成功获取了震中区域 3 m 分辨率的高分三号雷达卫星数据,各单位主要利用其强度影像进行次生地质灾害、震毁房屋和道路等灾情的目视判译。笔者团队利用该影像在海螺沟景区内识别出 9 处大型滑坡隐患,第一时间提供给现场地质队伍进行排查,经与后期无人机航拍影像对比,识别出的滑坡隐患均有变形迹象或已在地震中失稳,证明了高分辨率雷达卫星强度影像在识别大型滑坡隐患的可行性。直到 9月 10 日高分六号、高分二号、北京三号等光学卫星才获取到有效的影像数据,相关单位迅速利用这些影像完成了重灾区同震地质灾害、损毁房屋、道路等的解译。其中,笔者团队利用高分六号和高分二号解译同震地质灾害 2 717 处,地质灾害总面积约 23 km<sup>2</sup>。泸定地震地貌和地质概况如图 1 所示,其中断层数据来源于四川省地震局提供的 1:50 万地质图,地震烈度来源于应急管理部,地震数据来源于中国地震台网中心。此外,自 2022-09-06 开始,相

关单位陆续利用无人机航空平台先后获取了磨西镇、湾东河沟口、大渡河石棉县王岗坪乡-新民乡段、石棉县草科乡等重灾区高分辨率影像,笔者所在团队第一时间利用这些影像完成了同震地质灾害、损毁房屋、道路等的解译,先后向抗震救灾应急指挥部、应急管理部、自然资源部等部门提交解译简报 6 份,为抗震救灾工作提供了及时支撑。

此次地震震中位于贡嘎山海螺沟冰川森林公园内,距离海螺沟冰川直线距离约 10 km,海螺沟冰川受此次地震影响如何,受到社会广泛关切。为此,笔者团队第一时间收集了海螺沟冰川区域地震前后多时相光学和雷达卫星影像,通过归一化雪覆盖指数(normalized difference snow index, NDSI)计算、像素偏移追踪(pixel offset tracking, POT)、目视判译等方法,对海螺沟冰川地震前后面积变化、强形变区分布、运动速度变化等进行分析,为震后潜在冰崩等灾害风险评价提供参考。

## 1 研究区概况

### 1.1 区域地质背景

研究区地处青藏高原东南缘的横断山脉,属典型高山峡谷地貌,海拔高程最低约 980 m,最高约 7 550 m,海拔高差达 6 570 m。大渡河自北向南穿过研究区,河水落差大,水电资源丰富,目前已修建多座大型水利发电站。

本次泸定地震区域位于鲜水河断裂带、龙门山断裂带和安宁河断裂带构成的川西“Y字形”断裂带的交汇处附近(图 1),初步判断此次地震发震断裂为鲜水河断裂带东南段的磨西断裂。鲜水河断裂带为左旋走滑断裂带,全长约 350 km,是南北活动构造带的重要组成部分,也是中内陆地震活动性最强的断裂之一,自 1700 年以来已发生 7 级以上地震 9 次<sup>[3-9]</sup>。在此次地震发生前,已有学者预测未来 30 a 鲜水河断裂磨西段有发生 Ms 7.0 强震的危险<sup>[3-4]</sup>。

研究区地层岩性主要为早震旦系花岗岩、第三纪二长花岗岩、二叠系雷口坡组白云岩等,受构造长期挤压和风化作用,研究区岩土体破碎,是中国典型的地质灾害高易发区<sup>[1-2]</sup>。

### 1.2 海螺沟概况

海螺沟流域位于四川省甘孜州泸定县磨西

镇贡嘎山东坡,面积约  $195 \text{ km}^2$ ,主沟长约 15 km,沟口高程约 1 500 m,流域顶部海拔 7 556 m,高差高达 6 056 m。此次地震在流域内触发了大量崩塌、滑坡地质灾害,造成通往海螺沟冰川的唯一道路多处被掩埋,直至 2022-09-15 才被抢修通行。利用 2022-09-14 拍摄的从沟口至冰川舌末端低海拔区,面积约  $43 \text{ km}^2$  的无人机航空影像,共解译同震地质灾害 656 处,总面积  $3.2 \text{ km}^2$ ,占影像覆盖区面积的 7.4%。海螺沟一号营地附近同震滑坡分布如图 2 所示。从图 2 可以看出,流域内同震地质灾害最为严重的区域为一号营地上下游 1.5 km 范围,上下游各有一处大型滑坡将道路完全阻断。

海螺沟冰川卫星影像和照片如图 3 所示。海螺沟冰川是典型的季风海洋型温性现代冰斗-山谷冰川,长约 13.1 km,面积约  $25.7 \text{ km}^2$ <sup>[10-12]</sup>。在全球气候变暖影响下,冰川消融严重,近 100 多年来海螺沟冰川末端海拔上升了约 300 m,年均升高 1.64 m<sup>[11]</sup>。海螺沟冰川自上而下分为粒雪盆(4 980~7 556 m)、冰瀑布(3 700~4 980 m)和冰舌(2 900~3 700 m)3 个部分(图 3(a)),冰瀑布历史上曾与冰舌相连,但近年来由于冰川持续变薄,已与冰舌完全断开,形成垂直高差高约 1 080 m 的陡崖(图 3(b)),上部粒雪盆地形相对宽缓,堆积的大量冰川从不同方向不断向下运

动,行至冰瀑布上游狭窄沟谷段汇集收敛,地形坡度变陡且冰川前缘临空,导致该段流速显著升高,冰川被拉裂,裂隙发育,冰崩事件频发<sup>[11-12]</sup>。通过网络资料检索和历史 Planet 卫星影像对比,冰瀑布位置至少发生了 2018-04-03、2018-08-18、2022-04-30、2022-07-29 等多次大规模冰崩事件(图 4)。

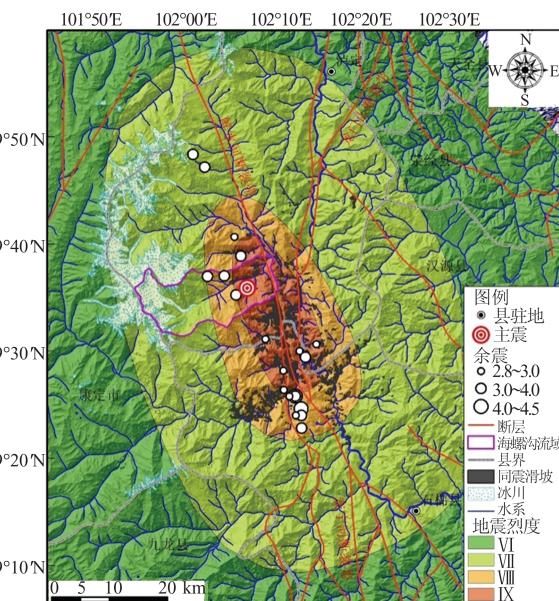


图 1 泸定地震地貌和地质概况图

Fig.1 Geomorphologic and Geological Map of the Luding Earthquake

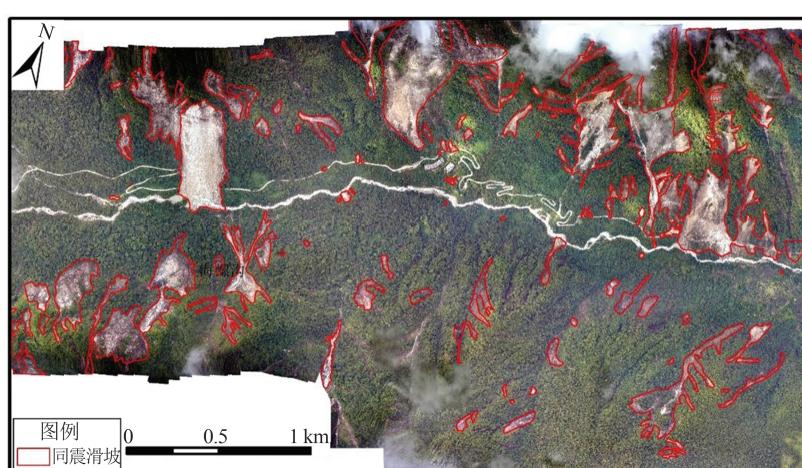


图 2 海螺沟一号营地附近同震滑坡分布

Fig.2 Distribution of Coseismic Landslides near No.1 Camp in the Hailuogou Valley

## 2 光学卫星影像冰川面积监测

### 2.1 遥感数据

卫星影像是否适合冰川测绘取决于云量、采集日期、季节性降雪的存在和采集时的照明几何形状

(太阳高度和方位角)<sup>[13-14]</sup>。本文从美国地质调查局(<http://earthexplorer.usgs.gov>)下载 2016—2022 年 Landsat 8 和 Sentinel-2 卫星影像数据。为了确保冰川面积提取的准确性,选取研究区内无云且采集时间在 8 月—9 月的遥感影像,数据信息见表 1。



图3 海螺沟冰川卫星影像和照片

Fig.3 Satellite Image and Photo of the Hailuogou Glacier

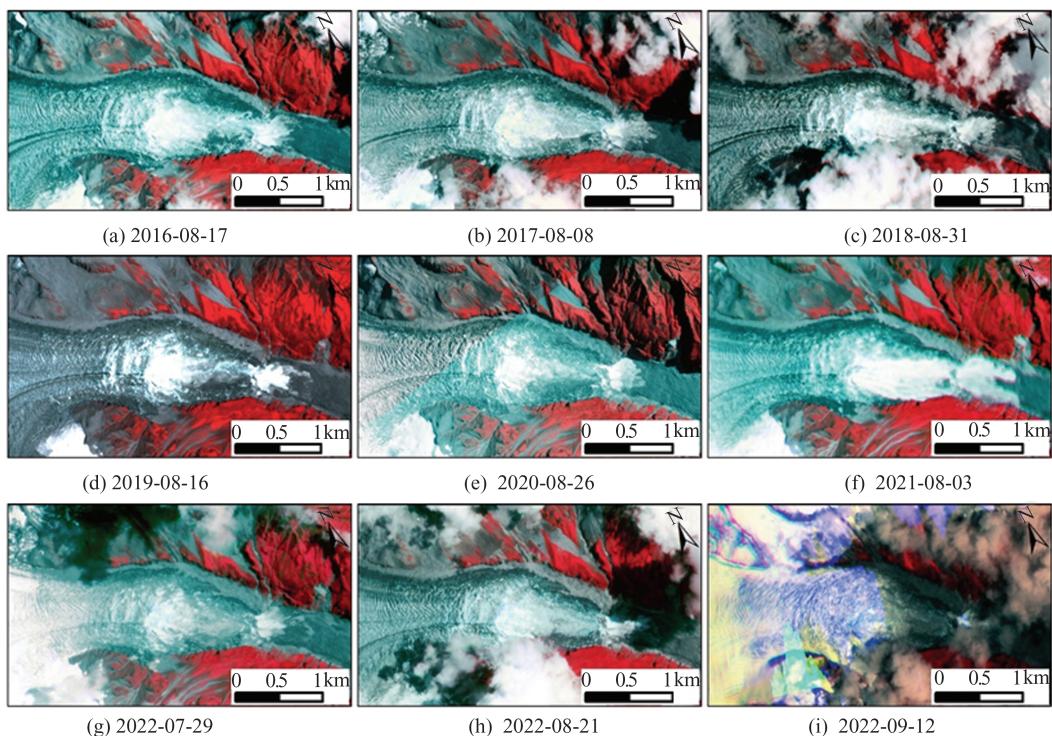


图4 多时相Planet卫星影像上显示的冰瀑布变化

Fig.4 Changes of the Ice Waterfall in the Multi-temporal Planet Satellite Images

表1 本研究中使用的卫星影像数据

Tab.1 Satellite Images Used in This Study

年份	卫星	分辨率/m	采集日期
2016	Landsat 8	30	2016-08-25
2017	Landsat 8	30	2017-09-13
2018	Sentinel-2	10	2018-08-28
2019	Landsat 8	30	2019-08-25
2020	Sentinel-2	10	2020-08-27
2021	Sentinel-2	10	2021-08-02
2022	Sentinel-2	10	2022-08-12

## 2.2 冰川面积提取方法

NDSI是常用的植被指数方法在冰川提取中

的扩展和延伸,能够很好区分冰川与背景信息,其计算式为:

$$\text{NDSI} = (\rho_G - \rho_{\text{SWIR}}) / (\rho_G + \rho_{\text{SWIR}}) \quad (1)$$

式中,  $\rho_G$ 、 $\rho_{\text{SWIR}}$  分别为可见光绿波段和短波红外(short-wave infrared, SWIR)波段的反射率。

阈值分割方法是遥感冰川信息提取的有效方法,根据文献[15]确定海螺沟冰川的阈值为0.2,即  $\text{NDSI} > 0.2$  的像素被划分为冰川,  $\text{NDSI} \leq 0.2$  被划分为非冰川。

## 2.3 2016—2022年冰川面积变化

利用上述遥感数据和方法,得到2016—2022年海螺沟冰川8月的面积变化曲线,如图5所示

(2017 年为 9 月数据)。从图 5 可以看出,海螺沟冰川面积在 6 年间呈波动变化趋势,2016 年为  $19.3 \text{ km}^2$ ,2017 年增加至  $19.4 \text{ km}^2$ ,2018 年剧减至  $18.2 \text{ km}^2$ ,为近 6 年内最小,2019 年与 2018 年相当,为  $18.3 \text{ km}^2$ ,2020—2021 年冰川面积呈显著增高趋势,2021 年达到  $20.7 \text{ km}^2$ ,为近 6 年内最大,2022 年又显著降低至  $18.9 \text{ km}^2$ 。

由于目前尚未收集到海螺沟冰川附近气象站气象数据,本文从咕呱天气网站(<http://www.ggtqw.com/2016luding/8yue.html>)下载了泸定县 2016—2022 年 8 月逐日最高和最低气温数据,用于应急状态下气温与冰川面积变化的分析,计算得到的每年 8 月平均最高气温和最低气温如图 5 所示。从图 5 可以看出,2016—2022 年海螺沟冰川 8 月面积变化趋势与泸定县 8 月日平均最高气温具有负相关性,即平均最高气温增高则冰川面积减少。如 2019 年 8 月平均最高气温由  $28.55^\circ\text{C}$  逐渐降低至 2021 年的  $26.84^\circ\text{C}$ ,冰川面积则由 2019 年的  $18.3 \text{ km}^2$  增加至 2021 年的  $20.7 \text{ km}^2$ 。2022 年 8 月四川省多次出现有记录以来最高温,泸定县 8 月平均最高气温也上升至  $30.55^\circ\text{C}$ ,冰川面积也减少至  $18.9 \text{ km}^2$ 。

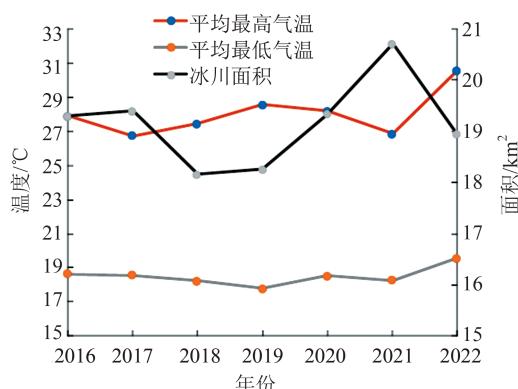


图 5 2016—2022 年海螺沟冰川 8 月面积变化及与平均最高气温的关系图

Fig.5 Area Change of the Hailuogou Glacier and the Relationship with Temperature from 2016 to 2022

### 3 雷达卫星影像冰川形变监测

#### 3.1 雷达卫星数据

为了探测海螺沟冰川受地震影响情况,本文收集了欧洲空间局提供的地震前后 6 景 Sentinel-1 雷达卫星影像数据。Sentinel-1 雷达卫星搭载了 C 波段合成孔径雷达,不同于遥感影像受天气影响的特征,雷达卫星可以全天时全天候提供连续

影像<sup>[16]</sup>。本文选取通过干涉宽幅工作模式(interferometric wide swath, IWS)获取的空间分辨率为  $5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  的合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)影像,对海螺沟冰川进行数据处理,影像获取时间为 2021-08-31、2021-09-12、2022-08-02、2022-08-14、2022-08-26、2022-09-07。

#### 3.2 形变监测方法

由于合成孔径雷达差分干涉测量(differential interferometric SAR, DInSAR)对监测目标相干性要求较高,在类似冰川运动等大梯度地表形变场的监测中容易造成失相干和相位解缠错误<sup>[17]</sup>,因此本文选用 POT 对海螺沟冰川运动情况进行监测。POT 技术主要通过对前后两景 SAR 影像的强度信息或相位信息精确配准后,获取同名像素坐标偏移量<sup>[18]</sup>。所获得的偏移量主要包括地表形变引起的偏移量、地形起伏引起的偏移量以及飞行轨道和成像姿态引起的偏移量<sup>[10]</sup>,计算式为:

$$D_{\text{offset}} = D_{\text{def}} + D_{\text{orbit}} + D_{\text{DEM}} \quad (2)$$

式中, $D_{\text{offset}}$  表示配准后获取的偏移量; $D_{\text{def}}$  为地表形变引起的偏移量; $D_{\text{orbit}}$  为飞行轨道和成像姿态引起的偏移量; $D_{\text{DEM}}$  表示地形起伏引起的偏移量。

联合无形变区的轨道偏移数据以及外部数字高程模型(digital elevation model, DEM),采用最小二乘准则构建出系统偏移模型,去除地形起伏度( $D_{\text{DEM}}$ )、飞行轨道及成像姿态( $D_{\text{orbit}}$ )引起的偏移量,从而获得海螺沟冰川地表形变引起的偏移量( $D_{\text{def}}$ )。

#### 3.3 监测结果分析

利用雷达卫星数据和 POT 方法,得到了 4 期贡嘎山主峰及海螺沟周边冰川的结果,分别是 2021-08-31—2021-09-12、2022-08-02—2022-08-14、2022-08-14—2022-08-26、2022-08-26—2022-09-07(以下分别简称 I、II、III、IV 期),其中泸定地震前后(IV 期)的 POT 结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,此次地震导致贡嘎山主峰东侧海螺沟、磨子沟、燕子沟、南门关沟等冰川及其后缘山体均探测到较显著形变信号,而主峰西侧冰川受地震影响相对较小。其中海螺沟冰川冰瀑布区形变最为显著,形变显著区面积约  $1.5 \text{ km}^2$ ,位移量最大约 30 m,最大平均运动速度约  $2.5 \text{ m/d}$ 。

4 个期次的结果图上均显示该区域有较显著的形变信号,本文将重点对该区域 POT 结果进行对比分析。首先,以 2022-07-29 Planet 卫

星影像为底图,根据各期次形变渲染图上不同形变量的色彩差异(位移量 $>4.0\text{ m}$ )圈定形变显著区范围,结果如图7所示。分析发现,4个期次的海螺沟冰川强形变区面积呈现线性增大的趋势,如图8所示,由I期的 $0.49\text{ km}^2$ 逐渐增加至IV期的 $1.51\text{ km}^2$ 。在空间上,强形变区依次向沟谷左岸和下游扩展。推测原因一方面在于2021

年8月研究区平均最高气温( $26.84^\circ\text{C}$ )比2022年同期( $30.55^\circ\text{C}$ )降低了 $3.71^\circ\text{C}$ ,因此冰川运动性2021年比2022年低;另一方面,2022年8月研究区气温持续升高导致冰川的运动性逐渐增强,强形变区的面积逐渐增加。值得注意的是,从图7可以看出,此次地震并未导致强变形区的面积增加速率增大。

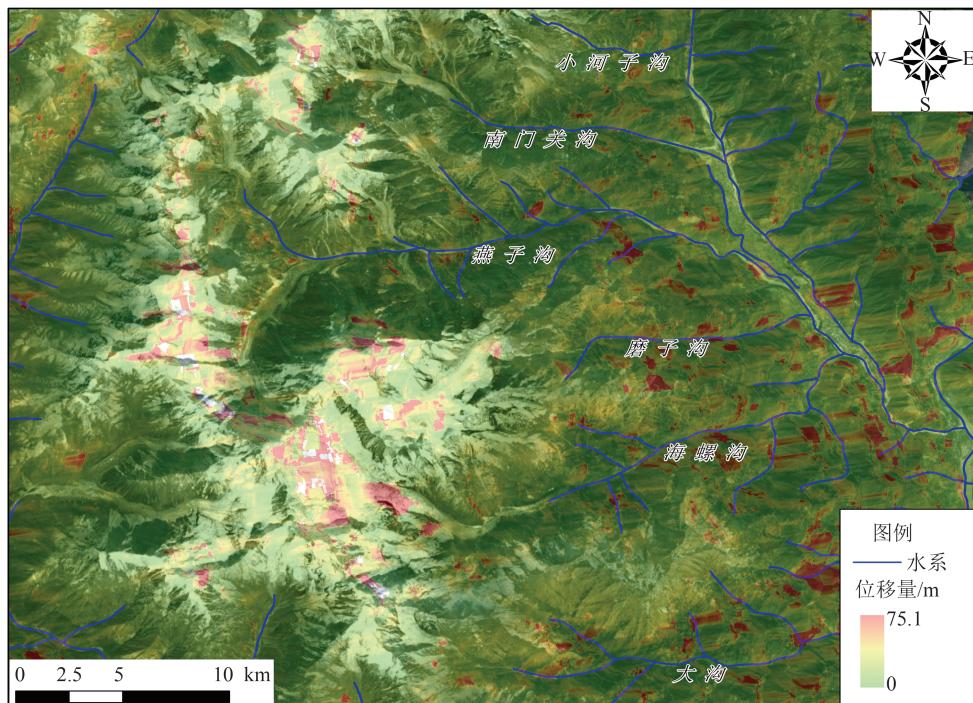


图6 2022-08-26—2022-09-07 Sentinel-1雷达卫星POT形变结果图

Fig.6 POT Deformation Result of Sentinel-1 SAR Images Between August 26 and September 7, 2022

进一步在强形变区选取了1-1'和2-2'两条剖面线,对比分析剖面上不同期次的形变特征,其中1-1'剖面位于IV期强形变区中轴线位置,2-2'剖面位于I期强形变区中轴线位置(图7),分别绘制其位移量曲线和平均运动速度曲线(图9)。具体分析如下。

#### 1)1-1'剖面

在此剖面上,I、II期位移不显著,剖面线从其强变形区的边缘穿过。III、IV期在剖面线 $0\sim1300\text{ m}$ 段位移基本一致,运动速度呈缓慢增加趋势,运动速度由 $0.5\text{ m/d}$ 增至 $1.0\text{ m/d}$ 。III期运动速度从 $1300\text{ m}$ 后快速增加,到 $1880\text{ m}$ 处运动速度增加至最大 $2.7\text{ m/d}$ ;之后运动速度陡降,到 $2200\text{ m}$ 处运动速度降至 $0.1\text{ m/d}$ 。IV期运动速度从 $1500\text{ m}$ 处显著增加,到 $1810\text{ m}$ 处运动速度由 $1.2\text{ m/d}$ 增加至最大 $2.3\text{ m/d}$ ;之后运动速度呈现剧烈波动下降的趋势。

#### 2)2-2'剖面

在此剖面上,II、III、IV期在 $0\sim1300\text{ m}$ 段运动速度基本一致,均呈缓慢增加趋势;I期也呈缓慢增加趋势,但速率小于II、III、IV期。I期运动速度在剖面线 $0\sim1680\text{ m}$ 段呈缓慢增加的趋势,由 $0.25\text{ m/d}$ 增加至 $1.0\text{ m/d}$ ;之后运动速度陡降,到 $1820\text{ m}$ 处降至 $0.1\text{ m/d}$ 。II期运动速度在剖面线 $0\sim1850\text{ m}$ 段呈缓慢增加的趋势,由 $0.32\text{ m/d}$ 增加至 $1.7\text{ m/d}$ ;之后运动速度陡降,到 $2000\text{ m}$ 处降至 $0.1\text{ m/d}$ 。III期运动速度在剖面线 $0\sim1420\text{ m}$ 段呈缓慢增加的趋势,由 $0.36\text{ m/d}$ 增加至 $1.2\text{ m/d}$ ;在 $1420\text{ m}$ 后运动速度快速增加,至 $1620\text{ m}$ 处增加至最大 $2.4\text{ m/d}$ ;之后运动速度陡降,到 $2000\text{ m}$ 处降至 $0.1\text{ m/d}$ 。IV期运动速度在剖面线 $0\sim1300\text{ m}$ 段呈缓慢增加的趋势,由 $0.25\text{ m/d}$ 增加至 $1.1\text{ m/d}$ ;在 $1300\sim2000\text{ m}$ 段运动速度呈缓慢降低趋势,降低至 $0.7\text{ m/d}$ ,其中

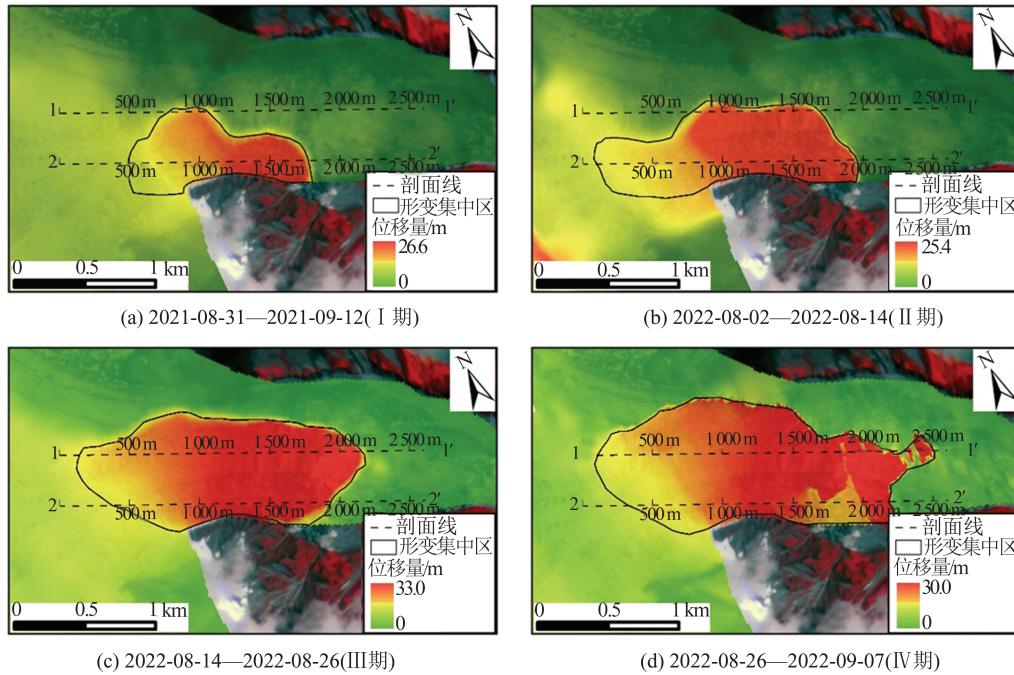


图 7 强形变区不同期次 Sentinel-1 雷达卫星 POT 位移量

Fig.7 POT Deformation of the Significant Deformation Zones in Sentinel-1 SAR Images of Different Periods

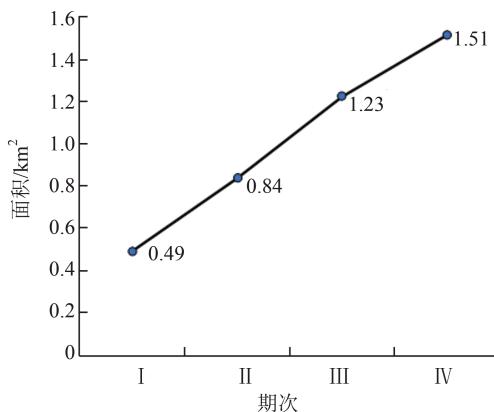


图 8 海螺沟冰川强形变区面积变化

Fig.8 Area Change of the Significant Deformation Zones of the Hailuogou Glacier

在 1 700 m 附近运动速度有所波动; 2 000 m 之后运动速度陡增至 2.3 m/d, 在 2 150 m 之后开始剧降, 到 2 280 m 处降至 0.05 m/d。

### 3.4 监测结果讨论

#### 1) 监测结果可靠性分析

文献[10]利用日本 ALOS 雷达卫星 2007—2018 年共 38 景 PALSAR-1/2 影像, 基于 POT 技术提取了海螺沟冰川形变速率, 结果显示冰瀑布及上游区域多年平均速度为 1.2 m/d, 与本文探测到的结果吻合(图 9(b)、图 9(d)); 同时探测到冰瀑布位置为运动速度最快的部位, 运动速度最大为 2.5 m/d, 与本文泸定地震前一期次在 1-1' 剖面探测到的最大速度 2.7 m/d 接近(图 9(b))。因

此, 本文在地震应急状态下虽只利用 Sentinel-1 雷达计算了 4 个期次冰川位移数据, 但计算结果总体上应该是可靠的。后续笔者团队将收集更多期次雷达影像对该冰川运动特征进行深入分析。

#### 2) 地形坡度对运动速度的影响分析

从 III、IV 期的 1-1' 剖面平均运动速度曲线可以看出, 冰川运动速度从上至下可分为速度缓增段(0~1 300 m)、速度陡增段(1 300~1 880 m)和速度陡降段(1 880~2 600 m)3 个区段(见图 10)。通过地震前后 Planet 卫星影像(分辨率为 3.0 m)对比发现, 速度缓增段冰川表面裂缝细长、排列紧密有序; 速度陡增段冰川表面裂缝宽大、排列较凌乱; 速度陡降段则正好对应冰崩高发区。

图 11 为 1-1' 剖面坡度曲线和速度分段图。从图 11 可以看出, 1 300 m 和 1 880 m 速度分界点分别对应地形上的裂点, 其中速度缓增段平均坡度仅 11.6°, 速度陡增段平均坡度增加至 20.5°, 速度陡降段平均坡度进一步增加至 34.6°。由此可见, 地形坡度与冰川运动速度有强相关性, 总体上冰川运动速度随地形坡度增高而增大; 当平均坡度达到 20.5° 时, 运动速度显著增大; 当平均坡度达到 34.6° 时, 运动速度急剧降低。对照光学影像(图 10)发现, 运动速度剧降区在影像上呈高亮度显示, 与周围冰川对比明显, 正好与冰瀑布前端的冰崩高发区对应。

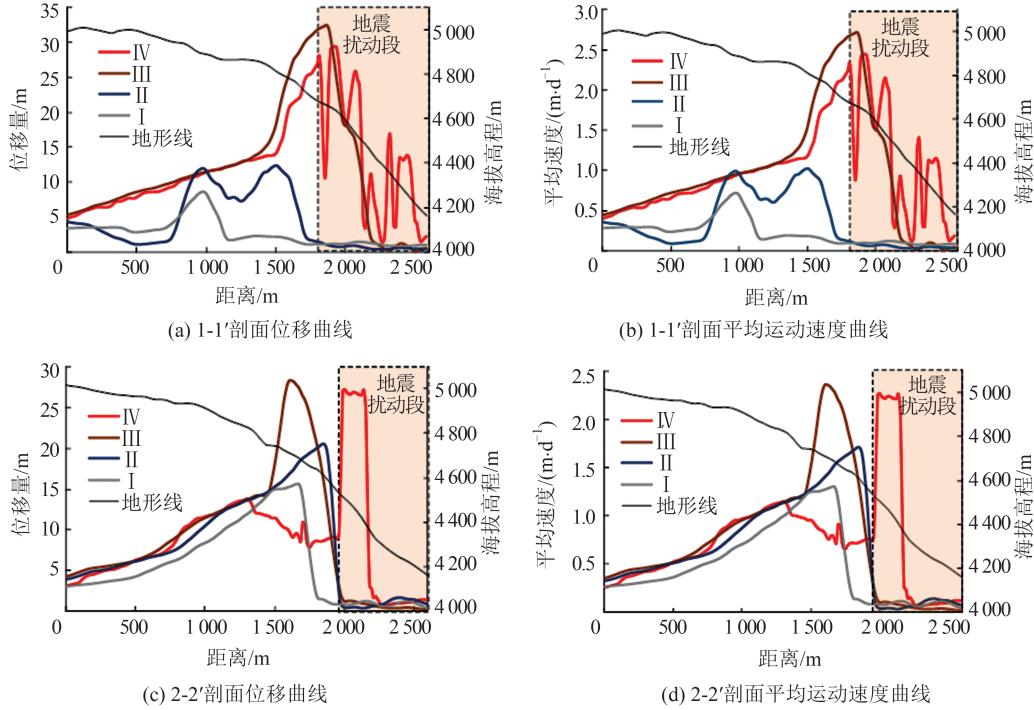


图9 海螺沟冰川强形变区位移量和平均运动速度剖面

Fig.9 Displacement and Average Velocity Sections of the Significant Deformation Zones of the Hailuogou Glacier

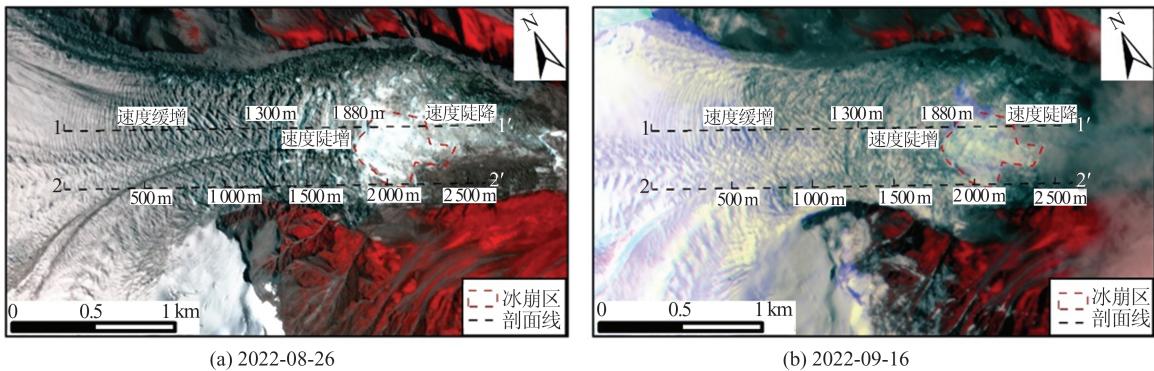


图10 泸定地震前后冰瀑布Planet卫星影像

Fig.10 Planet Satellite Images of the Ice Waterfall Before and After the Luding Earthquake

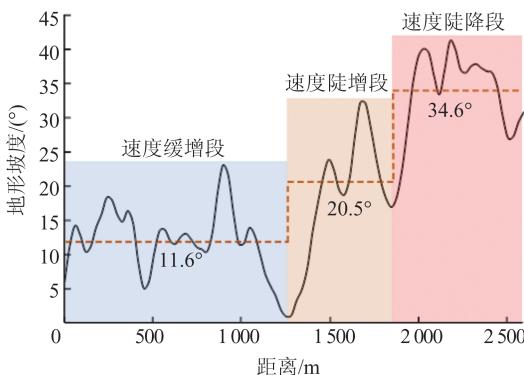


图11 1-1'剖面坡度曲线和速度分段图

Fig.11 Slope Gradient and Velocity Segment of 1-1' Section

运动速度急剧降低可能有两方面的原因:一方面,由于该区域地形坡度陡,前缘临空条件好,

不同规模的冰崩频繁发生。对于冰崩频繁发生的区域,地表破坏严重,前后两期雷达影像强度图上同名像素点丢失,导致POT技术偏移估计信噪比较低<sup>[10]</sup>,计算结果可能失真,因此该区域测得的地表速度并不一定能真实反映冰川主体的运动速度。另一方面,冰瀑布三维遥感影像如图12所示,呈上下游窄、中间宽的地貌特征,上游宽约850 m,中部最宽约1 100 m,下游宽约580 m,只有中部宽度的一半,有可能对冰川运动起到阻挡作用,使冰川运动速度迅速降低,后缘冰川不断在该处堆积增高,达到一定程度,发生冰崩失稳。

### 3)气温对运动速度的影响分析

如上文所述,冰川面积与日平均最高气温具

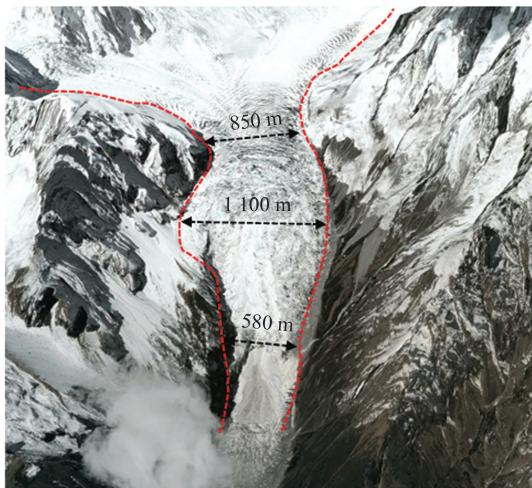


图 12 冰瀑布三维遥感影像

Fig.12 3D Remote Sensing Image of the Ice Waterfall

有负相关性,那么气温与冰川运动速度是否相关呢?如图 9(b)所示,在 1-1' 剖面速度缓增段,Ⅲ、Ⅳ 期的平均运动速度相当;在速度陡增段,Ⅲ 期的平均运动速度要显著大于Ⅳ 期。如图 9(d)所示,在 2-2' 剖面速度缓增段,Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ 期的平均运动速度相当,Ⅰ 期的平均运动速度略小于Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ 期;在速度陡增段,运动速度从高到低依次是Ⅲ、Ⅱ、Ⅰ、Ⅳ 期。利用从咕呱天气网站下载的气温数据计算 4 个期次对应的日平均最高气温,分别为 25.46 °C、31.38 °C、32.08 °C、24.5 °C。可见日平均最高气温从高到低依次也是Ⅲ、Ⅱ、Ⅰ、Ⅳ 期,与 2-2' 剖面速度陡增段的速度大小关系正好对应,满足日平均最高气温越大,平均运动速度也越大的特点;在 1-1' 剖面上速度陡增段,如果排除Ⅰ、Ⅱ 期(剖面线从强形变区边缘通过),则Ⅲ 期平均运动速度大于Ⅳ 期,也满足日平均最高气温越大、平均运动速度也越大的特点。由此可见,冰川平均运动速度与日平均最高气温具有正相关性。

#### 4) 泸定地震对冰川影响分析

如上文 1-1' 和 2-2' 剖面平均运动速度分析,在 1-1' 剖面上,Ⅳ 期在 1 810 m 之前的平均运动曲线与震前相比无明显异常,1 810 m 之后呈现剧烈波动下降的趋势,与震前连续下降趋势有明显差异;在 2-2' 剖面上,Ⅳ 期在 1 700 m 之前的平均运动速度与震前相比无明显异常,1 700 m 之后出现波动,并在 2 000 m 之后陡增,2 150 m 后开始剧降,与震前连续下降趋势有明显差异。推测上述运动速度异常主要受此次地震扰动影响。对比地震前后 3.0 m 分辨率的 Planet 卫星影像,发现地震疑似在对应运动速度异常区域触发了

冰崩。但由于现有震后 Planet 卫星影像分辨率有限且有云雾影响,尚无法判断发生冰崩的具体规模和位置,需要后续进行现场调查或获取震后高分辨率遥感影像进行对比判断。

通过对地震前后冰瀑布位置运动速度的对比分析,可以初步判断此次地震对冰川的直接影响区域主要是冰瀑布前缘区域,对后缘冰川直接影响较小,震后发生大规模冰崩的可能性较小,而且冰瀑布下方较长范围的宽缓冰舌区对冰崩物质具有较好的缓冲作用,初步判断震后冰崩事件直接致灾的可能性较小。但此次地震在流域内触发了大量崩塌、滑坡灾害(图 2),并使沟内冰碛物和周边山体震裂松动,为泥石流灾害的发生提供了丰富的物源,未来发生暴雨泥石流的风险增加,后续应加强相关调查和研究。

## 4 结语

本文综合利用多时相光学卫星影像 NDSI 计算和雷达卫星影像 POT 技术对海螺沟冰川面积和运动速度进行定量监测和详细分析,得到以下初步认识:

1) 基于 Landsat 8 和 Sentinel-2 光学卫星影像 NDSI 计算结果,发现 2016—2022 年海螺沟冰川面积呈波动变化趋势,2018 年面积最小,2021 年面积最大,与泸定县日平均最高气温具有较好的负相关性。

2) 基于泸定地震前后 Sentinel-1 雷达卫星影像 POT 计算结果,发现海螺沟冰川强形变区主要位于冰瀑布范围,面积约 1.5 km<sup>2</sup>,位移量最大约 30 m,最大平均运动速度约 2.5 m/d。强形变区从上往下可分为速度缓增段、速度陡增段和速度陡降段。不同段冰川表面具有明显的形态特征差异,速度缓增段冰川表面裂缝细长、排列紧密有序,速度陡增段冰川表面裂缝宽大、排列较凌乱,速度陡降段则正好对应冰崩频发区。

3) 地形坡度与冰川运动速度有强相关性,总体上冰川运动速度随地形坡度增高而增大,当平均坡度达到 20.5° 时,运动速度显著增大,当平均坡度达到 34.6° 时,运动速度急剧降低。推测运动速度急剧降低的原因一方面可能为冰崩作用使得偏移估计信噪比低,计算结果失真;另一方面可能为冰瀑布前缘沟道显著变窄,对冰川运动起到阻挡作用。

4) 冰川平均运动速度与日平均最高气温具有正相关性,2022-08-14—2022-08-26 期间冰川

运动速度最大,正好与该段时间川渝地区出现大范围极高温异常天气对应。

5) 泸定地震未造成海螺沟冰川运动速度大范围显著增大,但对冰瀑布前缘区域扰动明显。震后发生大规模冰崩的可能性较小,而且冰瀑布下方较长范围的宽缓冰舌区对冰崩物质具有较好的缓冲作用,初步判断震后冰崩事件直接致灾的可能性较小。但震后沟内泥石流物源显著增多,未来发生暴雨泥石流的风险增加,后续应加强泥石流物源调查和致灾风险评价。

本文是地震应急状态下开展的初步研究,利用的 Sentinel-1 雷达影像数据期次较少,后续将收集更多期次雷达影像对该冰川运动特征进行长时间序列分析,进一步揭示该冰川运动规律和地震影响。

**致谢:**感谢四川测绘地理信息局、四川省国防科技情报研究所和深圳飞马机器人科技有限公司提供震后遥感数据,同时感谢欧洲空间局提供的 Sentinel-1 雷达卫星数据和美国 Planet 卫星公司提供的 Planet 光学卫星数据。本文撰写过程中参考了中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所刘巧研究员震后发表的关于地震对海螺沟冰川影响的相关科普论文,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Xin, Fang Chengyong, Tang Xiaochuan, et al. Research on Emergency Evaluation of Landslides Induced by Luding Ms 6.8 Earthquake [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, DOI: 10.13203/J.whugis20220586. (王欣, 方成勇, 唐小川, 等. 泸定 Ms 6.8 级地震诱发滑坡应急评价研究 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, DOI: 10.13203/J.whugis20220586.)
- [2] Fan Xuanmei, Wang Xin, Dai Lanxin, et al. Characteristics and Spatial Distribution Pattern of Ms 6.8 Luding Earthquake Occurred on September 5, 2022 [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022. [http://www.gcdz.org/article/id/77d603ac-db72-4aac-822e-f37abe547b9c.](http://www.gcdz.org/article/id/77d603ac-db72-4aac-822e-f37abe547b9c) (范宣梅, 王欣, 戴岚欣, 等. 2022 年 Ms 6.8 级泸定地震诱发地质灾害特征与空间分布规律研究 [J]. 工程地质学报, 2022. [http://www.gcdz.org/article/id/77d603ac-db72-4aac-822e-f37abe547b9c.](http://www.gcdz.org/article/id/77d603ac-db72-4aac-822e-f37abe547b9c))
- [3] Cheng Jia, Xu Xiwei. Features of Earthquake Clustering from Calculation of Coulomb Stress Around the Bayan Har Block, Tibetan Plateau [J]. *Seismology and Geology*, 2018, 40(1): 133–154. (程佳, 徐锡伟. 巴颜喀拉块体周缘强震间应力作用与丛集活动特征初步分析 [J]. 地震地质, 2018, 40(1): 133–154.)
- [4] Bai Mingkun, MarieLuce C, Li Haibing, et al. Late Quaternary Slip Rate and Earthquake Hazard Along the Qianning Segment, Xianshuihe Fault [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(7): 2312–2332. (白明坤, Chevalier Marie-Luce, 李海兵, 等. 鲜水河断裂带乾宁段晚第四纪走滑速率及区域强震危险性研究 [J]. 地质学报, 2022, 96(7): 2312–2332.)
- [5] Xu Xiwei, Wu Xiyan, Yu Guihua, et al. Seismo-Geological Signatures for Identifying  $M \geq 7.0$  Earthquake Risk Areas and Their Preliminary Application in China's Mainland [J]. *Seismology and Geology*, 2017, 39(2): 219–275. (徐锡伟, 吴熙彦, 于贵华, 等. 中国大陆高震级地震危险区判定的地震地质学标志及其应用 [J]. 地震地质, 2017, 39(2): 219–275.)
- [6] Deng Qidong, Cheng Shaoping, Ma Ji, et al. Seismic Activities and Earthquake Potential in the Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(7): 2025–2042. (邓起东, 程绍平, 马冀, 等. 青藏高原地震活动特征及当前地震活动形势 [J]. 地球物理学报, 2014, 57(7): 2025–2042.)
- [7] Wang Minjie, Li Tianbin, Meng Lubo, et al. Back Analysis of Stress Field in the Intersection Region of Y Shaped Fault, Sichuan [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2015, 12(5): 1088–1095. (王敏杰, 李天斌, 孟陆波, 等. 四川“Y字形”断裂交汇部应力场反演分析 [J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(5): 1088–1095.)
- [8] Xu Jing, Shao Zhigang, Ma Hongsheng, et al. Evolution of Coulomb Stress and Stress Interaction Among Strong Earthquakes Along the Xianshuihe Fault Zone [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 1146–1158. (徐晶, 邵志刚, 马宏生, 等. 鲜水河断裂带库仑应力演化与强震间关系 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1146–1158.)
- [9] Xiong Wei, Tan Kai, Yu Pengfei, et al. Triggering of Mw 5.9 Kangding Earthquake by Coulomb Stress Evolution Along Xianshuihe Fault Zone Since 1955 [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(2): 95–100. (熊维, 谭凯, 余鹏飞, 等. 鲜水河断裂近期库仑应力演化及其与康定 Mw 5.9 地震的关系 [J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(2): 95–100.)
- [10] Liu Guoxiang, Zhang Bo, Zhang Rui, et al. Monitoring Dynamics of Hailuogou Glacier and the Secondary Landslide Disasters Based on Combination of Satellite SAR and Ground-Based SAR [J].

- Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 980-995. (刘国祥, 张波, 张瑞, 等. 联合卫星 SAR 和地基 SAR 的海螺沟冰川动态变化及次生滑坡灾害监测[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 980-995.)
- [11] Liu Qiao, Liu Shiyin, Zhang Yong, et al. Surface Ablation Features and Recent Variation of the Lower Ablation Area of the Hailuogou Glacier, Mt. Gongga [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(2): 227-236. (刘巧, 刘时银, 张勇, 等. 贡嘎山海螺沟冰川消融区表面消融特征及其近期变化[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 227-236.)
- [12] Liu Qiao, Zhang Yong. Studies on the Dynamics of Monsoonal Temperate Glaciers in Mt. Gongga: A Review [J]. *Mountain Research*, 2017, 35 (5) : 717-726. (刘巧, 张勇. 贡嘎山海洋型冰川监测与研究: 历史、现状与展望[J]. 山地学报, 2017, 35 (5) : 717-726.)
- [13] Wang L C, Yu K, Chang L, et al. Response of Glacier Area Variation to Climate Change in the Kaidu-Kongque River Basin, Southern Tianshan Mountains During the last 20 Years [J]. *China Geology*, 2021, 4(3): 389-401.
- [14] Wu Renzhe, Huang Xinru, Li Yong, et al. Analysis of the Snow Line Change and its Influencing Factors in the Glaciers in Bugyai Kangri Region from 1994 to 2016 [J]. *Journal of Geomatics*, 2020, DOI: 10.14188/j.2095-6045.2020075. (吴仁哲, 黄心茹, 李勇, 等. 布加岗日地区冰川 1994 至 2016 年雪线变化及其影响因素分析 [J]. 测绘地理信息, 2020, DOI:10.14188/j.2095-6045.2020075.)
- [15] Pratibha S, Kulkarni A V. Decadal Change in Supraglacial Debris Cover in Baspa Basin, Western Himalaya [J]. *Current Science*, 2018, 114(4): 792.
- [16] Lu Huiyan, Li Weile, Xu Qiang, et al. Early Detection of Landslides in the Upstream and Downstream Areas of the Baige Landslide, the Jinsha River Based on Optical Remote Sensing and InSAR Technologies [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(9): 1342-1354. (陆会燕, 李为乐, 许强, 等. 光学遥感与 InSAR 结合的金沙江白格滑坡上下游滑坡隐患早期识别[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(9): 1342-1354.)
- [17] Deng Fanghui, Zhou Chunxia, Wang Zemin, et al. Ice-Flow Velocity Derivation of the Confluence Zone of the Amery Ice Shelf Using Offset-Tracking Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40 (7): 901-906. (邓方慧, 周春霞, 王泽民, 等. 利用偏移量跟踪测定 Amery 冰架冰流汇合区的冰流速[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(7): 901-906.)
- [18] Wasowski J, Bovenga F. Investigating Landslides and Unstable Slopes with Satellite Multi Temporal Interferometry: Current Issues and Future Perspectives [J]. *Engineering Geology*, 2014, 174: 103-138.