



基于 SAR 影像的贡巴冰川末端冰湖年际变化 监测及溃决规律分析

张波¹ 张瑞^{1,2} 刘国祥^{1,2} 刘巧³ 蔡嘉伦¹
于冰⁴ 符茵¹ 李志林^{1,5}

1 西南交通大学地球科学与环境工程学院,四川 成都,611756

2 高速铁路运营安全空间信息技术国家地方联合工程实验室,四川 成都,611756

3 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,四川 成都,610041

4 西南石油大学土木工程与建筑学院,四川 成都,610500

5 香港理工大学土地测量及地理资讯学系,香港 九龙 红磡

摘要:受全球气候变化的影响,近年来藏东南区域多数冰川退化加剧,冰湖的异动也更为频繁,冰湖溃决诱发洪水、涌浪、泥石流等山地灾害的风险激增。以多源时序合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)影像为数据源,从水体和非水体信号的强度差异出发,开展冰湖的分类方法研究,提出了一种基于时序 SAR 影像的强度标准化比值实施冰湖提取与动态监测的方法。为了验证方法的可行性,选取日本航天局的 ALOS/PALSAR-1 与欧空局的 Sentinel-1A 影像序列,针对位于贡巴冰川流域的典型实验区,在 11 a 的时间跨度上开展了冰湖动态提取和长时序变化分析。通过实验成功获取了贡巴冰川末端冰湖 2007—2018 年间的时空变化,进而发现近 10 a 间冰湖的体量呈高速增长的态势,这从侧面也印证了贡巴冰川消融加剧的现状。此外,2018 年的新近监测结果表明,局部溃决涌道的扩张打破了冰湖固有的生存周期,甚至会诱发洪水和泥石流次生灾害的发生,有必要加强监测与防范。

关键词:SAR;冰湖;贡巴冰川;溃决;遥感分类

中图分类号:P237

文献标志码:A

冰川湖泊(简称冰湖),既是全球生态重要的水资源,同时也是诸多冰川次生灾害发生的诱因^[1-7]。在中国,冰湖主要分布在喜马拉雅山脉、昆仑山脉、天山山脉以及藏东南等地区^[8]。自 19 世纪中叶以来,青藏高原气温增长趋势已超过北半球同纬度地区,造成了青藏湖区数量和面积发生了较大改变^[4,7]。在全球气温变暖的背景下,近些年来,因冰川湖泊溃决所导致的洪水、涌浪、泥石流等灾害时有发生。据不完全统计,仅西藏地区近 80 a 来,因冰湖溃决导致的重大灾情事件就高达 27 次^[9];进入本世纪后,因冰湖溃决引发的灾害呈现频次增加和规模增大的潜在趋势^[8,10],给下游人员和基础设施安全造成巨大的威胁。

因冰湖多分布于高海拔偏远山区,现场勘察

工作存在难度大、成本高的问题。为此,国内外学者基于光学遥感影像解译和计算机辅助判识的思路开展了大量系统深入的研究^[7,11-13]。常用的技术途径一方面为人工干预的冰湖监督分类^[14-15],涉及单波段影像阈值分割、归一化差异水体指数、波谱关系法等方法;另一方面为基于机器学习的非监督自动分类,包括聚类分析、神经网络、支持向量机和决策树等提取方法^[16-18]。随着国内外高分辨率卫星系统的快速发展,为冰湖的编目等相关研究提供了更多可选择的数据源,在危险性冰湖的识别与动态监测方面发挥了重要作用^[16]。然而,基于光学影像的冰湖专题分析受气候环境的制约,尤其是中国藏东南和横断山脉等海洋型冰川分布区域受印度洋西南季风、太平洋东南季风和西风带影响,常年云雾较多、

收稿日期:2019-03-07

项目资助:国家重点研发计划(2017YFB0502700);国家自然科学基金(41771402,41871069,41601503,41801399);四川省科技支撑计划应用基础面上项目(2018JY0564,2018JY0138)。

第一作者:张波,博士生,主要从事 InSAR 及地表形变反演。rsbozh@qq.com

通讯作者:张瑞,博士,副教授。zhangrui@swjtu.edu.cn

潮湿多雨,可用数据极为匮乏,数据源瓶颈的问题尤为凸显。

近年来,卫星合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)传感器因其不受云、雾、雨等恶劣天气条件的限制,获得各行业部门的广泛关注和高度重视。世界各国正在竞相研发和部署新型 SAR 卫星平台,如德国宇航局的 TerraSAR-X/TanDEM-X 卫星编队、意大利宇航局的 COSMO-SkyMed 四星座、日本航天局的 ALOS/PALSAR-1/2 卫星系统、加拿大太空署的 Radar-Sat-1/2 卫星系统、欧空局的 Sentinel-1A/B 卫星星座以及中国的 GF-3 卫星系统等,能够为区域性灾害防治和预警科研等提供稳定可靠的数据支撑。随着国内外相关研究的不断深入,基于 SAR 遥感的大范围地表位移、形变与地表覆盖变化监测已展现出巨大的应用潜力^[19-20]。

目前,国内外基于 SAR 遥感的冰川运动、消融监测等研究已取得了长足进展^[20-21],而 SAR 数据应用于冰湖发育、溃决等方面的研究仍处于起步阶段,相关科研成果尚不多见。在洪灾和水域变化监测领域,基于 SAR 极化分类或强度阈值分割实施水域提取和动态评估的相关应用已有先例借鉴^[22-24]。但极化数据的获取极为有限,长期、全面的系统研究目前仍难以开展;基于强度信息的分类亦由于高斯白噪声的存在而无法回避阈值难以确定、分类精度低等问题^[24]。

针对上述问题,本文提出了基于时序 SAR 影像的强度归一化比值实施冰湖提取与动态监测的方法。首先选取 SAR 影像时间域强度均值作为参考基准,然后通过 SAR 影像强度图的标准化比值开展冰湖分类提取和时序变化监测分析。为验证方法的可行性,选取位于贡嘎山西坡的贡巴冰川作为典型实验区,基于日本航天局的 ALOS/PALSAR-1 与欧空局的 Sentinel-1A 影像序列获取了贡巴冰川末端冰湖 2007—2018 年间的时空变化,并结合实地调研和无人机影像对实验对象近年来的变化规律进行了分析。

1 研究区域和实验数据

贡巴冰川位于青藏高原东南缘横断山大雪山主峰贡嘎山的西坡,属季风海洋性冰川,是环绕贡嘎山西坡最大的山谷冰川^[25]。17 世纪初至 19 世纪中期,贡巴冰川分离成大、小贡巴冰川,如图 1(a)所示,其中大贡巴冰川全长 10.6 km,面积 19.1 km²;小贡巴冰川全长 6.46 km,面积

5.73 km²^[26]。根据 1982-06 至 1983-06 的中国科学院青藏高原综合科考实测数据^[27],贡巴冰川雪线高度为 4 900~5 100 m,是典型的表碛覆盖型冰川,消融区内表碛发育明显,延伸至雪线以下的冰瀑底部,厚度可达 1 m^[28]。在贡巴冰川冰瀑底部至冰川末端发育了较多的冰湖,通过无人机影像调查,仅小贡巴冰川海拔 4 300 m 至冰舌末端 0.38 km² 内就发育了 21 个大小冰湖。参考气象观测资料,贡巴冰川末端多年平均气温为 2.4℃,低于东坡的海螺沟冰川 4.4℃,年降雨量约 1 057 mm,降雨多集中于 6 月至 9 月间,夏季降雨集中而且多为暴雨,冰川的融水和降雨补充经冰川侧碛垄外沟谷和地下暗河流入田湾河后,最终汇入大渡河^[26-27]。

大、小贡巴冰川在消融退缩过程中,在冰碛物所构成的终碛垄和大小贡巴冰川末端之间储水发育了两个较大的冰碛阻塞湖,总面积超过 120 000 m²,如图 1(a)、1(c)、1(d)中的 L_1 和 L_2 所示。经现场调研判断,冰湖 L_1 的湖水多为小贡巴冰川雪冰融水补给,而冰湖 L_2 的湖水则为大贡巴冰川融水径流因冰碛垄阻塞形成。

为获取贡嘎山贡巴冰川末端冰湖 L_1 和 L_2 的蓄水和溃决时序变化,选取两个 SAR 卫星系统自 2007-01 至 2018-11 期间获取的 103 景 SAR 卫星影像开展实验。其中,包括 2007-01 至 2011-03 期间由 ALOS/PALSAR-1 卫星获取的 20 景 SAR 影像(方位向分辨率为 3.18 m,距离向分辨率为 4.69 m),以及 2014-11 至 2018-11 期间由 Sentinel-1A 卫星获取的 83 景 SAR 影像(方位向分辨率为 13.99 m,距离向分辨率为 2.33 m),各卫星影像覆盖范围如图 1(b)所示。

使用 SRTM(shuttle radar topography mission)V3.0 30 m 分辨率的数字高程模型(digital elevation model, DEM)作为参考;此外,分别于 2018-06-09 和 2018-10-16 前往贡巴冰川现场调研,使用无人机进行航空影像采集,获取了贡巴冰川末端 6 cm 分辨率的正射影像和 DEM。

2 SAR 影像强度标准化比值提取冰湖技术方法

为了克服冰湖时序变化监测中 SAR 影像因斑点噪声的影响而导致阈值难以确定、分类难度高、分类精度低的缺点,提出了基于时序 SAR 影像的强度标准化比值开展冰湖提取与动态监测的方法,其技术流程如图 2 所示。

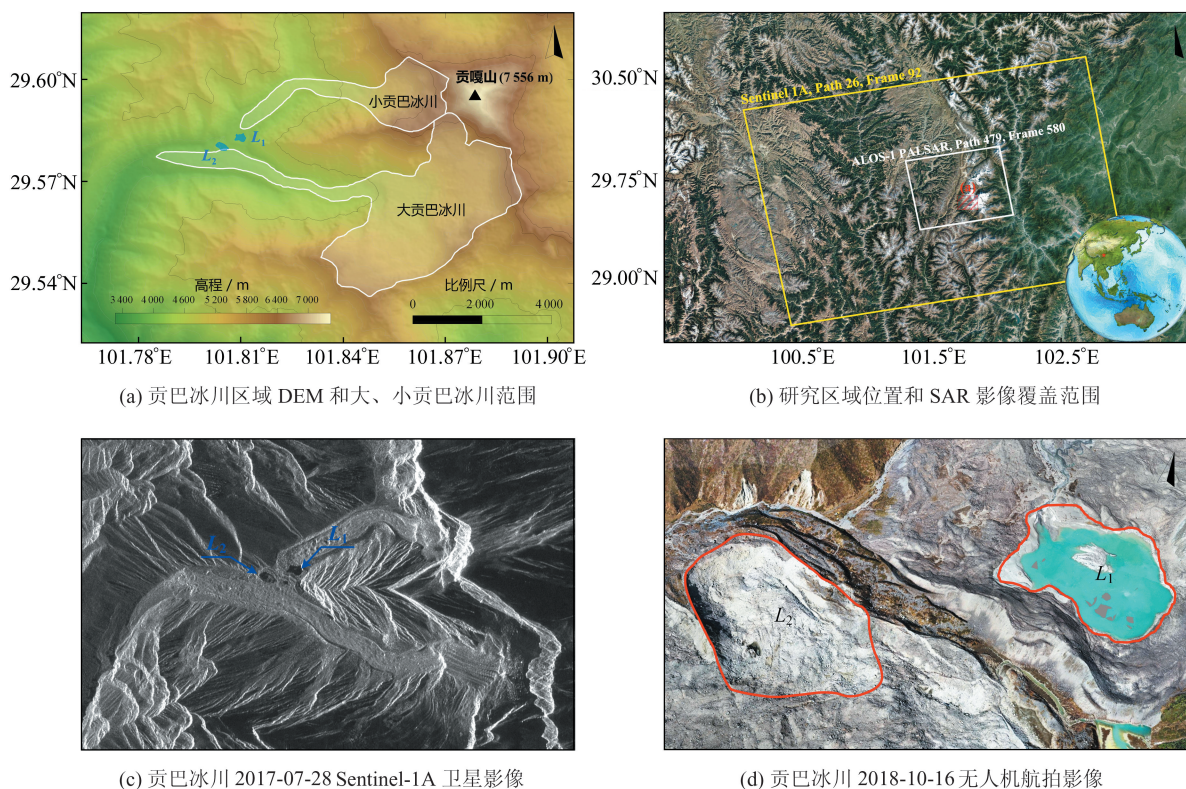


图 1 贡巴冰川区域概况

Fig. 1 Overview of the Gongba Glacier Area

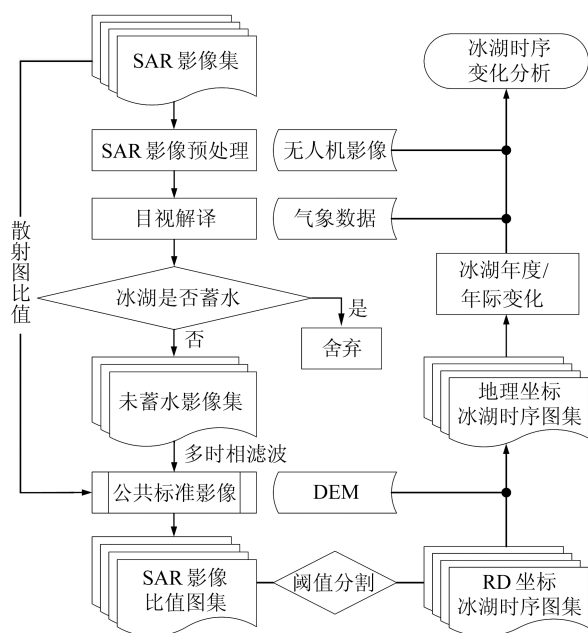


图 2 基于时序 SAR 影像的强度标准化比值开展冰湖动态提取的技术流程

Fig. 2 Experimental Flowchart of Dynamic Extraction for Glacial Lakes Based on the Intensity Standardization Ratio of Sequential SAR Images

2.1 基于多时相滤波的公共标准影像获取

在解译 SAR 影像前,需要完成影像的预处理,主要包含以下步骤: PALSAR 影像聚焦和

Sentinel-1A 影像的镶嵌处理、SAR 影像辐射校正、SAR 影像集子像元级配准、SAR 影像裁剪和 SAR 影像地理编码等。

卫星 SAR 成像过程是在雷达斜距-多普勒 (range-Doppler, RD) 坐标系下,完成回波信号的记录与处理,而 RD 坐标系是一个由卫星飞行方向(即方位向)和雷达波侧视方向(即距离向)构成的二维平面坐标系。具体到某一地面目标,每个雷达分辨单元由许多散射体组成,而这些散射体对于入射的雷达波都会产生后向散射,各散射体后向散射波相干叠加的结果将会在 SAR 影像上产生斑点噪声。由于斑点噪声的存在,单个像素的后向散射强度和实际地物分布特性表现为失相关;对于时序 SAR 影像集,由于斑点噪声的系统误差特征,单个像元在时间分布上呈现随机性,无论是干涉处理还是地物分类,斑点噪声的存在往往会导致边缘可见度降低或出现局部噪声。本文基于 SAR 影像的强度标准化比值对冰湖变化进行检测,为降低斑点噪声的影响,关键是要确立一个排除了斑点噪声影响的公共标准影像。

现有研究主要采取滤波的方法降低斑点噪声的影响,从而获取相对可信的强度图,常用的技术途径包括空间域(如均值滤波、中值滤波、Lee 滤波等)、频率域(如 Goldstein 滤波、小波滤波等)

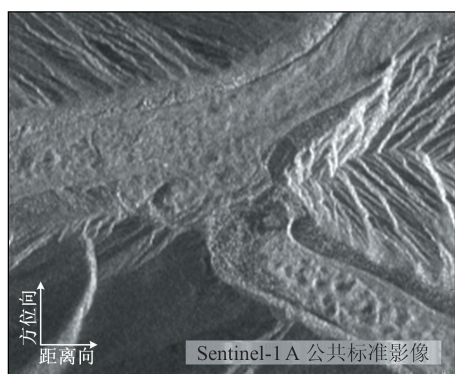
和时间域多时相滤波^[29]。尽管通过滤波可高效消除局部斑点噪声,但也会导致不同程度的空间分辨率降低或边缘失真。为此,本文首先在目视解译的基础上筛选出冰湖未蓄水的影像子集,然后通过多时相滤波方法逐像元过滤失相关信号,最后计算各像元相关信号的均值,并作为公共的标准影像。

2.2 基于散射强度比值的冰湖提取

雷达卫星成像时,由于入射的雷达波在水体表面发生镜面反射而呈现较低的散射强度,现有研究多采取阈值分割标记水体(如 Otsu 算法、熵阈值法等)^[30],从而实现水体区域的分离。然而在 SAR 影像中,并非低散射强度的区域都是水体,且对于同一地物单元,SAR 影像中的后向散射信号不仅受卫星入射角的影响,同时也受地形的影响,使用雷达信号的强度分离水体容易造成误判;再者,斑点噪声的存在也给水体分割阈值的精确确定产生了较大的影响。

针对上述问题,本文在同一强度公共标准 S_{ij} 下,通过不同时间获取的雷达影像强度信号 T_{ij} 与其作商,如式(1)所示,获取标准化强度比值 R_{ij} ,进而检测各成像时刻间的时序变化。

$R_{ij} = S_{ij} / T_{ij} (i = 1, 2, 3 \cdots; j = 1, 2, 3 \cdots)$ (1)
式中, $/$ 表示影像矩阵对应像元相除。



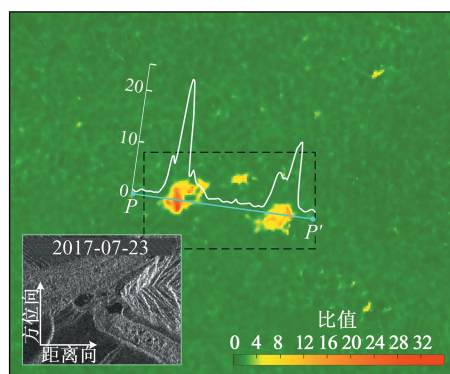
(a) 贡巴冰川末端冰湖未蓄水影像集的多时相滤波影像

除了可以有效消除噪声的影响外,标准化强度比值的另一个突出优势是可以抵消因地形变化引起的信号分量,即消除因地形不同导致的散射强度变化(包括叠掩、阴影和透视收缩)。对于周期性蓄水和溃决的冰湖,使用溃决后裸露湖床的影像集经多时相滤波处理后,作为公共标准影像,能够保证蓄水后信号变化效应的放大。而对于长期蓄水的冰湖区域,可采用冰湖周边散射信号对湖区内插来作为公共标准影像。

本实验针对贡巴冰川末端冰湖的周期性蓄水和溃决的特点,基于未蓄水影像集经多时相滤波结果后的均值作为公共标准影像,以式(1)对时序 SAR 影像各像元的强度值进行比值运算,计算各像元的标准化强度比值。

3 冰湖水体的时序分类提取

通过对时序 SAR 影像配准、裁剪、滤波和目视解译后,确认了冬季 L_1 和 L_2 均未蓄水时的数据子集,经多时相滤波后的公共标准影像如图 3(a)所示。经计算,公共标准影像和时序 SAR 影像散射强度的比值如图 4 所示。由于雷达对于水体比较敏感,蓄水前后的冰湖区域比值变化非常显著。



(b) 2017-07-23 SAR 比值图

图 3 公共标准影像和比值影像

Fig. 3 Standard Image and Ratio Image

以 2017-07-23 获取的 Sentinel-1A 影像为例,该期比值影像如图 3(b)所示,贡巴冰川末端冰湖 L_1 和 L_2 蓄水后,在水体和非水体区域对比明显, P - P' 剖面显示,非水体区域在(0,2)值域内波动,而水体区域集中于(5,33)值域内。分别选取 2015—2018 年期间冰湖 L_1 和 L_2 同时蓄水的比值影像提取 P - P' 剖面信息,如图 5(a)所示。在不同的成像时刻,非水体区域比值在(0,2)区间波动,这是由于在非水体区域,冰碛物的散射特性

相对稳定;而对于水体区域,尽管湖水的存在造成了湖区内散射信号的差异,但水域的分布范围在各期的比值影像内较为一致。

为了精确确定比值影像在水体和非水体的分割阈值,如图 5(b)标定的位置,在冰湖 L_2 边界处选取 9 个像元,提取 2014-11 至 2018-11 的时序变化,如图 5(c)所示。像元 T_3 、 T_6 和 T_9 随时间变化梯度明显,而 T_1 、 T_4 和 T_7 几乎与时间完全失相关,冰湖边缘处 T_2 、 T_5 和 T_8 在 2015 年消融期

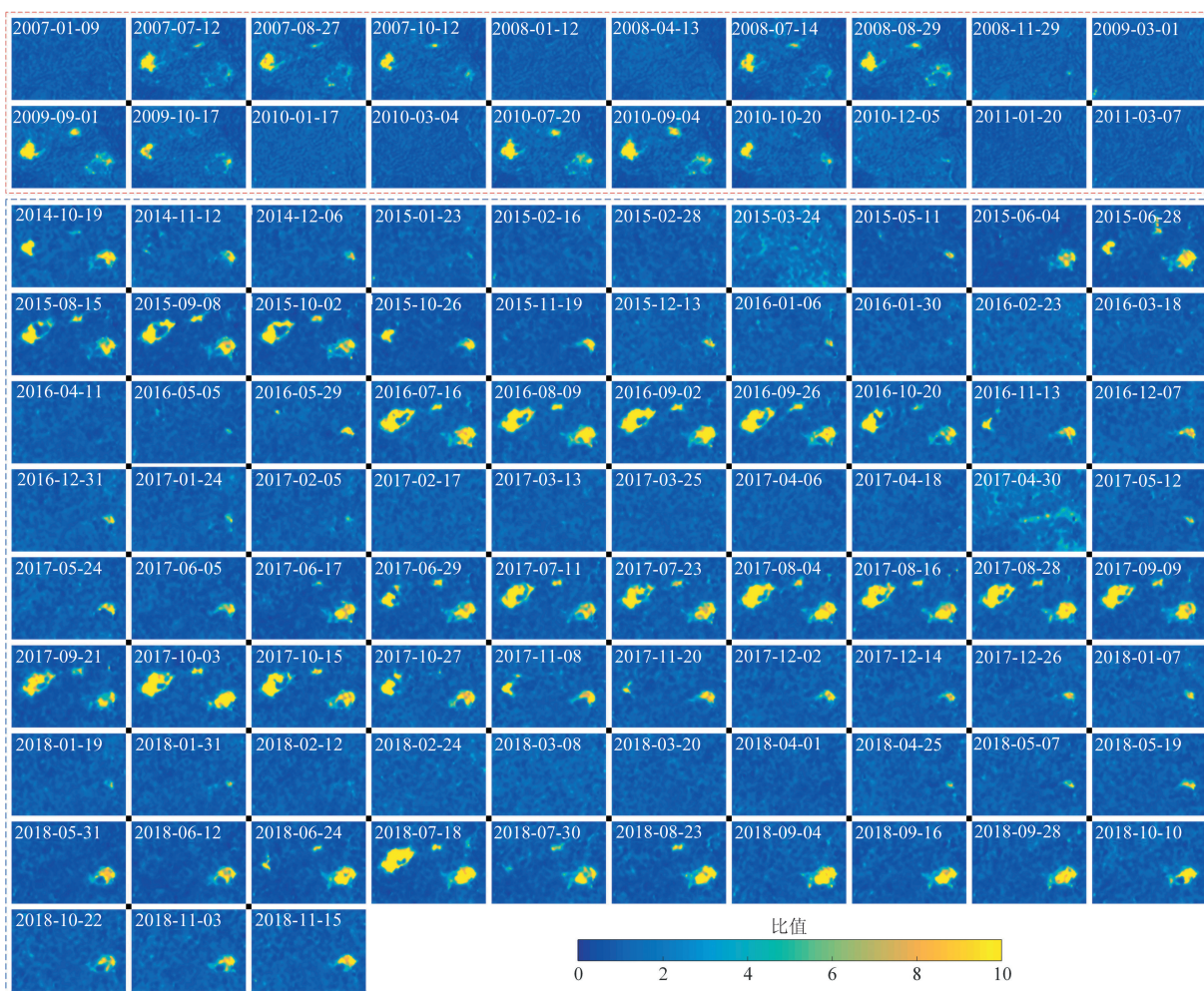


图 4 贡巴冰川末端冰湖 2007—2018 年时序 SAR 影像比值图

Fig. 4 Ratio Images for Sequential SAR Images of the Glacial Lakes at the End of the Gongba Glacier from 2007 to 2018

未发现明显相关性,而在 2016—2018 年消融期内相对敏感,这是由于冰湖面积的不断增长,引起像元的散射面中湖水的比例逐渐增加。基于此,选择 T_1 、 T_4 、 T_7 的全部时序点及 T_2 、 T_5 和 T_8 在 2016 年消融期前的比值最大值,同时考虑 T_3 、 T_6 和 T_9 在消融期内的最小值来确定分割阈值,经计算,阈值介于(2.32, 2.59)值域内。实验最终选取 2.59 作为水体和非水体标准化强度比值的分割阈值,研究区域内冰湖水体和非水体的分类结果如图 6 所示,黄色区域为冰湖分布范围。

4 实验结果分析

4.1 贡巴冰川末端冰湖 L_1 和 L_2 的时空变化

根据标准化强度比值的阈值分割结果获取冰湖的动态分布,再经过地理编码后,提取冰湖 L_1 和 L_2 的时序变化,获得如图 7(a)所示的冰湖蓄水面积变化曲线。由图 7(a)可知,2007—2018 年期间,冰湖 L_1 和 L_2 的蓄水面积存在显著的膨胀

趋势。纵观 11 a 间的蓄水面积变化,2018 年冰湖 L_1 的蓄水面积较 2007 年增加约 5 倍,冰湖 L_2 的蓄水面积增加约 2 倍。考虑到 2007—2011 年 PALSAR 数据采样间隔较稀疏,仅以 2015—2018 年间的变化进行考量,冰湖 L_1 和 L_2 的最大蓄水面积仍呈现出明显的增长趋势;尤其是 2015—2016 年间,冰湖 L_1 和 L_2 的增长率分别为 16% 和 26%;2016 年消融期后至今,冰湖 L_1 和 L_2 的最大蓄水面积增长率逐渐变缓。

借助无人机影像进行分析,冰湖 L_1 和 L_2 分别承载了小贡巴冰川和大贡巴冰川较大程度的融水汇集,冰湖 L_1 和 L_2 蓄水面积的增加,不仅是贡巴冰川冰雪融水对终碛堆积体不断冲刷导致湖盆面积增加的表现,同时也是在全球气温变暖的背景下,贡巴冰川加速消融的直接反映。图 7(b)和图 7(c)分别横向对比了不同年份下冰湖 L_1 和 L_2 的蓄水和溃决变化情况。从冰湖 L_1 和 L_2 的时间轴线分析,冰湖 L_1 每年开始蓄水的时间发生在 4 月下旬至 5 月初,而冰湖 L_2 的蓄水时间则

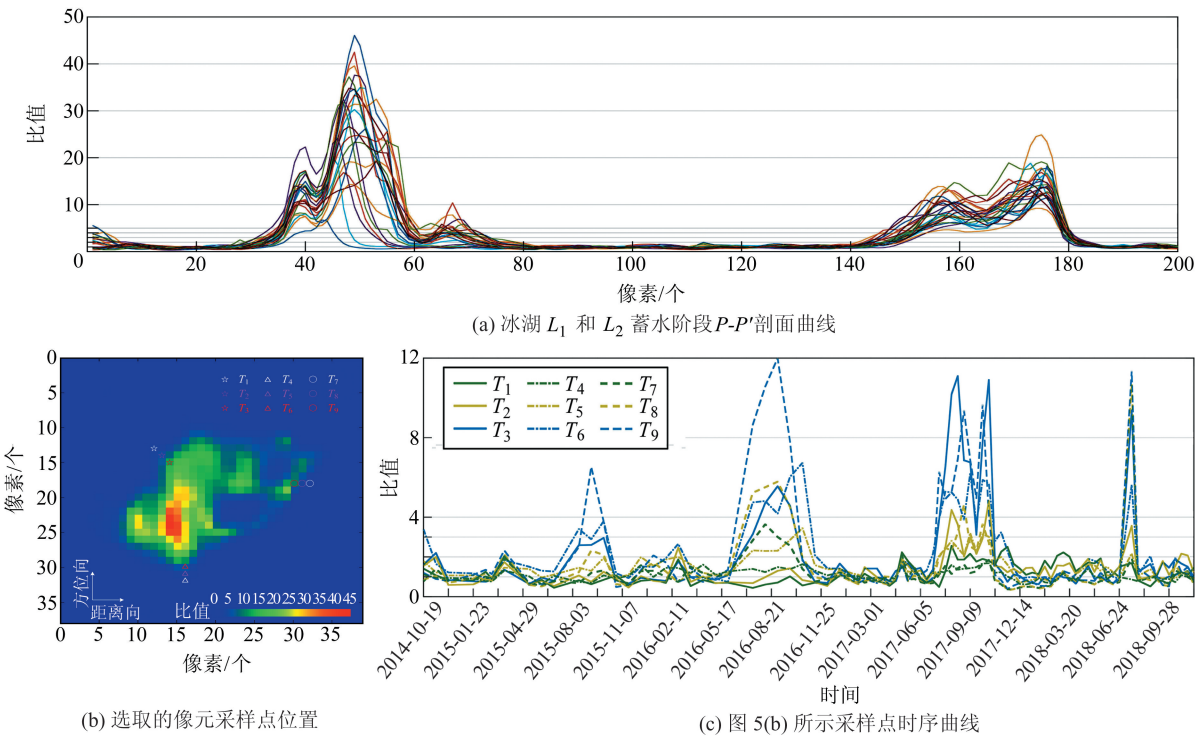


图 5 冰湖 L_1 、 L_2 蓄水阶段 P - P' 剖面和水域边界时序曲线

Fig. 5 P - P' Profile of Glacial Lakes L_1 and L_2 in Water Storage Stage and Time Series Curves of Water Boundary

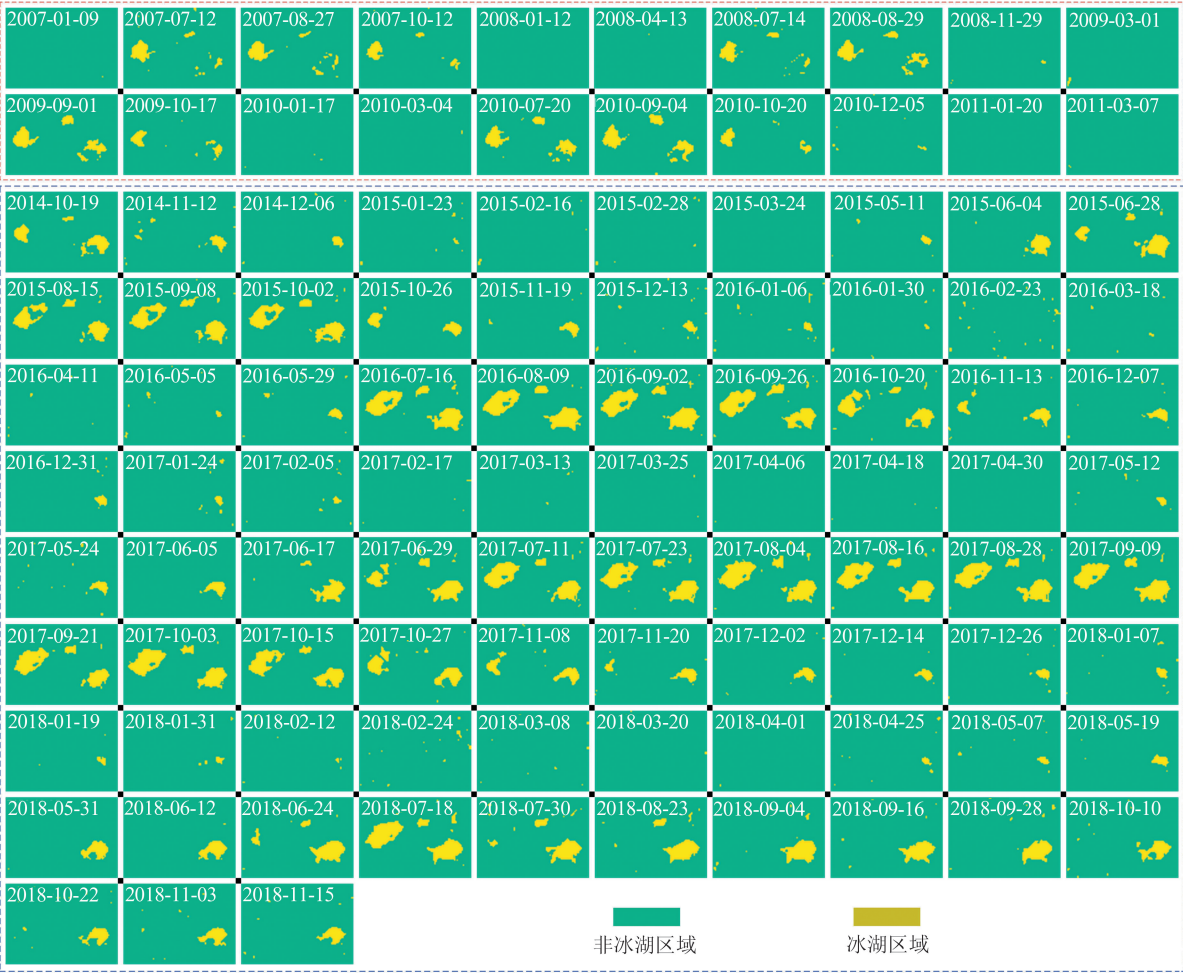
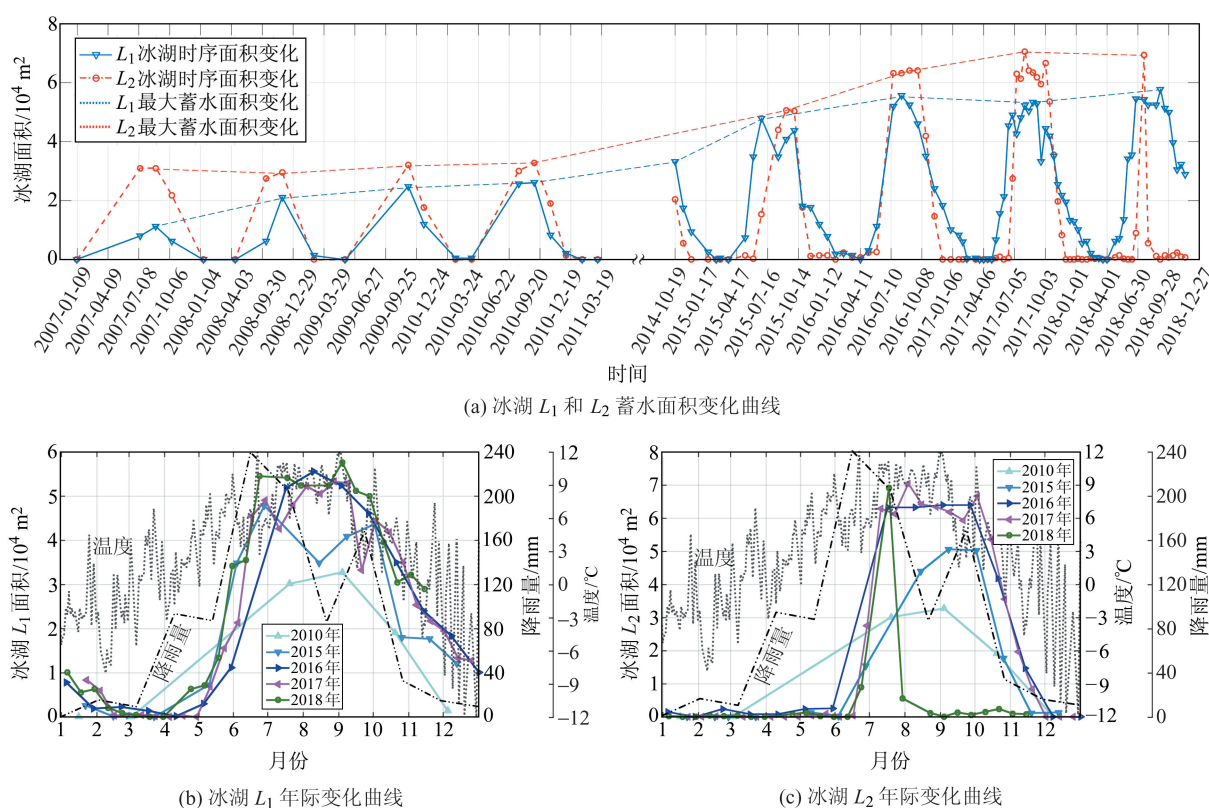


图 6 贡巴冰川末端冰湖 2007—2018 年时序分类结果

Fig. 6 Classification Results of the Glacial Lakes at the End of the Gongba Glacier from 2007 to 2018

图7 冰湖 L_1 和 L_2 蓄水面积时序和年际变化曲线Fig. 7 Time Series and Interannual Variation Curves of the Water Storage Areas for Glacial Lakes L_1 and L_2

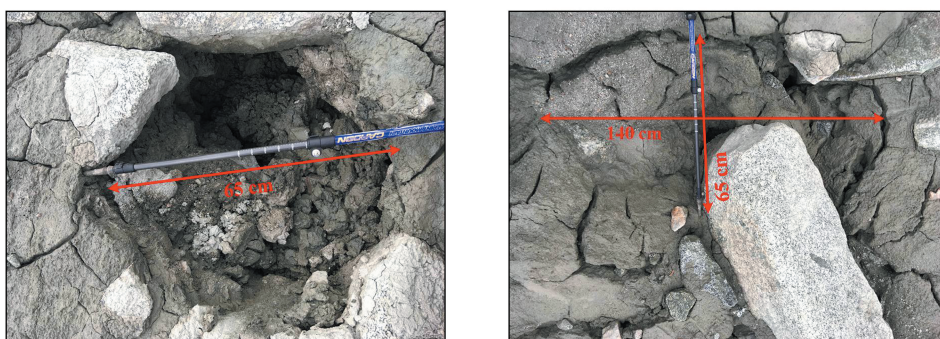
开始于每年的6月初至6月下旬,蓄水时间的差异性是由于两者水源的不同所导致。除去降雨的影响,小贡巴冰川的雪冰融水一部分从侧碛外沟谷流出,一部分经冰下暗河在4 200 m处融出后,再经冰面河道汇集至 L_1 ;而在冰湖 L_2 的上游,未发现明显的河道冲刷痕迹,其水源多为冰川上游冰面融水被侧碛垄阻挡后,受重力影响向下流动,冰湖 L_2 的周围存在多处低洼,可以推测冰湖 L_2 是大贡巴冰川冰面融水的最后汇集处之一。

对比冰湖 L_1 和 L_2 的蓄水过程,冰湖 L_2 的蓄水速度明显高于 L_1 ,且冰湖 L_1 蓄水前期的速度低于后期,这是由于在消融期初始阶段,雪冰消融较慢,进入6月后,雨热同季的气象特征给冰湖 L_1 和 L_2 的蓄水提供了充足的水源。对比 L_1 和 L_2 的生存周期,湖水水源补充的不同也导致了两者不同的生存周期。冰湖 L_2 于每年10月份初开始溃决,到11月中下旬完全干涸;而冰湖 L_1 的溃决相对缓慢,水位在每年9月中下旬开始下降,至次年的2月下旬湖水完全消失。

4.2 贡巴冰川末端冰湖 L_1 和 L_2 与气温和降雨量的关系

原中国科学院兰州冰川冻土研究所于1982—1983年在贡巴冰川进行了科学考察,详尽记录

了贡嘎寺站的气温、降雨和水文状况,结合1980年以来甘孜州气象站记录的气温和降雨数据,近30多年来,该区域除气温呈上升趋势外,降雨基本保持稳定^[26-27]。贡巴冰川在12月至次年3月间,气温在零度以下,冰川几无消融,且降雨分布较少,冰湖 L_2 保持着湖床的干涸,冰湖 L_1 水位逐步降低,至2月后湖水全部消失;进入4月后,降雨量开始增加,气温回暖至零度以上,雪冰开始消融,5月小贡巴冰川融水汇集至冰湖 L_1 ,6月高山带积雪消融,径流出现春汛,加速冰湖 L_1 和 L_2 的蓄水,同时,冰湖底部的暗河通道受温度和水压力的影响开始疏通,湖水通过湖下暗河排出,经现场实地踏勘,在冰湖 L_2 的湖盆底部有多处如图8所示的地下暗河入口;在8月和9月间,冰湖 L_1 和 L_2 的补充和流出达到平衡,湖水保持动态稳定;贡巴冰川的降雨在10月以后开始逐步减少,气温也开始降低,冰湖 L_1 和 L_2 的蓄水量开始逐渐减少,到12月后,冰湖 L_2 完全干涸,冰湖暗河也开始冻结。从图7(b)和图7(c)冰湖 L_1 、 L_2 湖水面积和温度、降雨量的曲线分布可知,冰湖的蓄水和溃决与温度、降雨量的变化具有较高的相关性,以此可推测贡巴冰川的消融期为4月至10月,比青藏高原冰川的消融期(5月至9月)长两个月。

图 8 冰湖 L_2 湖盆底部暗河入口Fig. 8 Underground River Entrances at the Bottom of the Basin of Glacial Lake L_2

4.3 贡巴冰川末端冰湖 2018 年溃决异常

2018-10-17,在贡巴冰川末端实地调研时发现,冰湖 L_2 已完全干涸,湖床也已龟裂。在冰湖 L_2 西侧,一个较小湖盆被冲刷形成了一个宽 47 m、深 20 m、底部长度 75 m、断面面积 580 m^2 的倒三角形缺口,经量测,坝体缺口体积达 $16\,000 \text{ m}^3$,如图 9 中的 A 区域所示。对比 2018-10-16 和 2018-06-09 的无人机航拍影像,此次溃决产生的涌浪引起的下游河道走移与变化显著(图 9)。考虑到冰湖 L_2 比往年同期蓄水更快,推测在 2018-06-24 至 2018-07-18 间有较强的降雨,强降雨作用下,水体汇集挤压松散的冰碛坝体,导致坝体溃口。

从图 7(c)2018 年冰湖 L_2 的变化可知,冰湖 L_2 在 2018-06-24 至 07-18 间蓄水后,于 2018-07-18 至 07-30 间溃决,此后直到 2018-11,冰湖 L_2 再未蓄水。通过无人机影像对比,冰湖 L_2 坝体在溃决前后未发生较大改变,而在湖盆底部新增了一个周长 67 m、面积 188 m^2 的地下暗河入口,如图 9 中的 B 区域所示。与湖盆底部发现的其他暗河入口(图 8)相比较,新增暗河入口的断面面积较原入口扩大了约 400 倍,当湖盆底部的死冰通道渗透潜蚀贯通后,湖水在水压力的作用下,短时间内迅猛排出。

图 9 所示的溃决和冰湖 L_2 的管涌溃决改变了大贡巴冰川末端径流的平衡,雪冰融水和降雨

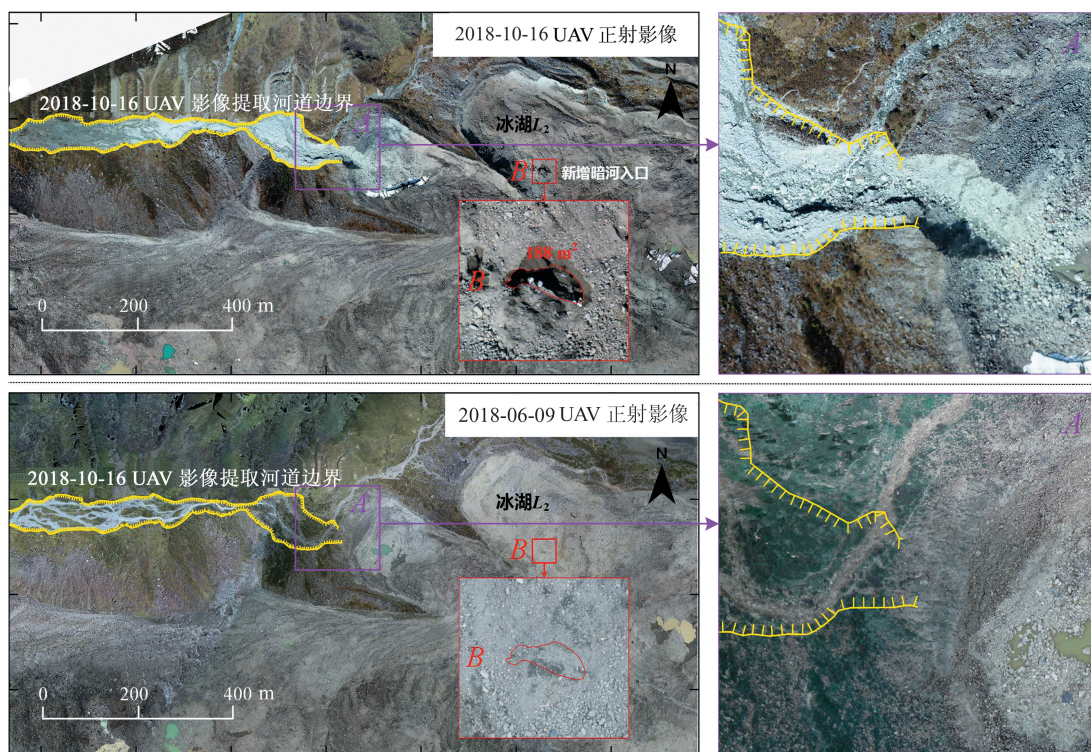
说明:A 区域是贡巴冰川末端侧碛垄溃决坝体,B 区域为冰湖 L_2 新增暗河入口

图 9 贡巴冰川 2018-10-16 和 2018-06-09 无人机正射影像对比

Fig. 9 Comparison of UAV Orthophotos Taken on October 16, 2018 and June 9, 2018

在贡巴冰川末端难以再汇集,尤其是冰湖 L_2 新增的暗河涌道在新的消融期到来时,会造成冰湖再次溃决,甚至导致洪水和泥石流发生,给下游人员和各类设施带来安全隐患。

5 结 语

本文提出了基于时序 SAR 影像强度标准化比值的冰湖提取与动态监测方法,并选取位于贡嘎山西坡的贡巴冰川作为实验对象,基于日本航天局的 ALOS/PALSAR-1 与欧空局的 Sentinel-1A 先后获取的 103 景 SAR 影像,提取了贡巴冰川末端两个较大冰湖 2007—2018 年间的时空分布,并对实验对象近年来的变化过程和趋势进行了归纳和分析。

首先,本文对贡巴冰川的实验研究凸显了 SAR 卫星不受云雾恶劣气候条件制约的突出优势。尤其是 Sentinel-1A/B 卫星星座组网后,能够直接获取最快 6 d 重访周期的影像数据,为冰湖溃决的动态监测以及高原山地的相关遥感应用提供了稳定可靠的高现势性数据支撑。

本文提出以多时相滤波获取参考基准影像,使用时序 SAR 影像的强度标准化比值提取冰湖面积变化,不仅可以有效消除热噪声的影响,还能够抵消因复杂地形造成的干扰,放大了冰湖水体和非水体信号的差异,从而保证了水体分割的精度。实验结果表明,贡巴冰川末端冰湖 L_1 近 10 余年来的蓄水面积从 10 000 m² 增长到 58 000 m²,而冰湖 L_2 也从 32 000 m² 增加了近 1 倍。这一现象充分反映了全球气温持续增长背景下贡巴冰川正在加速消融的现状。

通过长时序的年际变化分析,发现近 10 a 间贡巴冰川末端冰湖 L_1 和 L_2 具有较为稳定的生存周期。尽管冰湖一定程度上受冰川区域的温度变化及降雨量波动的影响,但冰湖 L_2 通常于每年 10 月份初开始溃决,至 11 月中下旬完全干涸;而冰湖 L_1 的溃决过程较为缓慢延续,每年 9 月中下旬水位开始下降,直至次年的 2 月中下旬才干涸。然而监测数据表明,2018 年消融期内,冰湖 L_2 底部新形成的 188 m² 暗河涌道已打破了这一相对稳定的生存周期。新的消融期到来后,湖水的溃决和释放可能会更加迅猛,诱发洪水和泥石流的风险激增,给下游人员和各类设施造成安全隐患,有必要重视并加强监测与防范。

以上结论可供冰湖领域研究参考,也可为该区域相关次生地质灾害的研究提供基础数据。

参 考 文 献

- [1] Liu J, Cheng Z, Su P. The Relationship Between Air Temperature Fluctuation and Glacial Lake Outburst Floods in Tibet, China[J]. *Quaternary International*, 2014, 321(2): 78-87
- [2] Cenderelli D A, Wohl E E. Peak Discharge Estimates of Glacial-Lake Outburst Floods and “Normal” Climatic Floods in the Mount Everest Region, Nepal[J]. *Geomorphology*, 2001, 40(1): 57-90
- [3] Richardson S D, Reynolds J M. An Overview of Glacial Hazards in the Himalayas[J]. *Quaternary International*, 2000, 65-66: 31-47
- [4] Ma Ronghua, Yang Guishan, Duan Hongtao, et al. China's Lakes at Present: Number, Area and Spatial Distribution[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 41(3): 394-401(马荣华, 杨桂山, 段洪涛, 等. 中国湖泊的数量、面积与空间分布[J]. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(3): 394-401)
- [5] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Li Long, et al. Spatial-Temporal Variations of Lake Area in Hoh Xil Region in the Past 40 Years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(7): 886-896(姚晓军, 刘时银, 李龙, 等. 近 40 年可可西里地区湖泊时空变化特征[J]. 地理学报, 2013, 68(7): 886-896)
- [6] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Ye Baisheng, et al. Climatic Implications on Variations of Lakes in the Cold and Arid Regions of China During the Recent 50 Years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(5): 623-632(丁永建, 刘时银, 叶柏生, 等. 近 50 a 中国寒区与旱区湖泊变化的气候因素分析[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 623-632)
- [7] Wang Xin, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. Glacier Lake Investigation and Inventory in the Chinese Himalayas Based on the Remote Sensing Data[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 29-36(王欣, 刘时银, 姚晓军, 等. 我国喜马拉雅山区冰湖遥感调查与编目. 地理学报, 2010, 65(1): 29-36)
- [8] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Han Lei, et al. Definition and Classification Systems of Glacial Lake for Inventory and Hazards Study[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(7): 1 173-1 183(姚晓军, 刘时银, 韩磊, 等. 冰湖的界定与分类体系——面向冰湖编目和冰湖灾害研究[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1 173-1 183)
- [9] Sun Meiping, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. The Cause and Potential Hazard of Glacial Lake Outburst Flood Occurred on July 5, 2013 in Jiali County, Tibet [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(1): 158-165(孙美平, 刘时银, 姚晓军,

- 等. 2013 年西藏嘉黎县“7.5”冰湖溃决洪水成因及潜在危害[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 158-165)
- [10] Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Sun Meiping, et al. Study on the Glacial Lake Outburst Flood Events in Tibet Since the 20th Century[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(8): 1 377-1 390(姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 20 世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理[J]. 自然资源学报, 2014, 29(8): 1 377-1 390)
- [11] Hasnain S I. Himalayan Glaciers: Hydrology and Hydrochemistry[M]. Mumbai: Allied Publishers, 1999
- [12] Mangerud J, Gosse J, Matiouchkov A, et al. Glaciers in the Polar Urals, Russia, Were not Much Larger During the Last Global Glacial Maximum than Today [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27(9-10): 1 047-1 057
- [13] Byers A. Contemporary Human Impacts on Alpine Ecosystems in the Sagarmatha (Mt. Everest) National Park, Khumbu, Nepal[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2005, 95(1): 112-140
- [14] Jawak S D, Kulkarni K, Luis A J. A Review on Extraction of Lakes from Remotely Sensed Optical Satellite Data with a Special Focus on Cryospheric Lakes[J]. *Advances in Remote Sensing*, 2015, 4(3): 177-195
- [15] Deus D, Gloaguen R. Remote Sensing Analysis of Lake Dynamics in Semi-Arid Regions: Implication for Water Resource Management. Lake Manyara, East African Rift, Northern Tanzania[J]. *Water*, 2013, 5(2): 698-727
- [16] Racoviteanu A, Williams M, Barry R. Optical Remote Sensing of Glacier Characteristics: A Review with Focus on the Himalaya[J]. *Sensors*, 2008, 8(5): 3 355-3 383
- [17] Song C, Huang B, Ke L, et al. Remote Sensing of Alpine Lake Water Environment Changes on the Tibetan Plateau and Surroundings: A Review[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 92: 26-37
- [18] Sakai A. Glacial Lakes in the Himalayas: A Review on Formation and Expansion Processes[J]. *Global Environmental Research*, 2012, 16: 23-30
- [19] Zhou Zhiwei, Yan Ziping, Liu Su, et al. Persistent Scatterers and Small Baseline SAR Interferometry for City Subsidence Mapping: A Case Study in Panjin, China[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(8): 928-931(周志伟, 鄢子平, 刘苏, 等. 永久散射体与短基线雷达干涉测量在城市地表形变中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(8): 928-931)
- [20] Zhou Chunxia, E Dongchen, Liao Mingsheng. Feasibility of InSAR Application to Antarctic Mapping [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2004, 29(7): 619-623(周春霞, 鄂栋臣, 廖明生. InSAR 用于南极测图的可行性研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004, 29(7): 619-623)
- [21] 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)
- [22] Zhao Lei, Chen Erxue, Li Zengyuan, et al. Segmentation of PolSAR Data Based on Mean-Shift and Spectral Graph Partitioning and Its Evaluation[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(8): 1 061-1 068(赵磊, 陈尔学, 李增元, 等. 基于均值漂移和谱图分割的极化 SAR 影像分割方法及其评价[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2015, 40(8): 1 061-1 068)
- [23] Li Yu, Hu Haifeng, Zhao Xuemei, et al. Fuzzy Clustering Algorithm for Multi-view SAR Image Segmentation Based on Gamma Distribution with Variable Shape Parameter[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2018, 43(7): 984-992(李玉, 胡海峰, 赵雪梅, 等. 基于可变形参数 Gamma 分布的模糊聚类多视 SAR 图像分割[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2018, 43(7): 984-992)
- [24] Wang H, Zhou Z, Turnbull J, et al. Pol-SAR Classification Based on Generalized Polar Decomposition of Mueller Matrix[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(4): 565-569
- [25] Su Zhen. The Condition of Development and Distributed Characteristic of the Mt. Gongga Glacier[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1992, 15(4): 551-558(苏珍. 贡嘎山海洋性冰川发育条件及分布特征[J]. 冰川冻土, 1992, 15(4): 551-558)
- [26] Zhang Ningning, He Yuanqing, Duan Keqin, et al. Changes of Gongba Glacier in the West Slope of Mt. Gongga During the Past 25 Years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(3): 380-382(张宁宁, 何元庆, 段克勤, 等. 贡嘎山西坡贡巴冰川 25 a 的变化情况[J]. 冰川冻土, 2008, 30(3): 380-382)
- [27] Cao Zhentang. The Hydrologic Characteristics of

- the Gongba Glacier in the Mount Gongga Area[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988, 10(1):57-65(曹真堂. 贡嘎山贡巴冰川水文特征[J]. 冰川冻土, 1988, 10(1):57-65)
- [28] Kang Jiancheng. The Characteristics and Forming Process of Glacial Peripheral Moraines at Gongba Glaciers in Mt. Gongga[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1989, 11(2): 172-176,193(康建成. 贡巴冰川边缘冰碛垄特征与形成过程[J]. 冰川冻土, 1989, 11(2): 172-176,193)
- [29] Ma X, Wu P, Wu Y, et al. A Review on Recent Developments in Fully Polarimetric SAR Image Despeckling[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(3): 743-758
- [30] Sha C, Hou J, Cui H. A Robust 2D Otsu's Thresholding Method in Image Segmentation[J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2016, 41: 339-351

Monitoring of Interannual Variabilities and Outburst Regularities Analysis of Glacial Lakes at the End of Gongba Glacier Utilizing SAR Images

ZHANG Bo¹ ZHANG Rui^{1,2} LIU Guoxiang^{1,2} LIU Qiao³ CAI Jialun¹
YU Bing⁴ FU Yin¹ LI Zhilin^{1,5}

1 Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

2 State-Province Joint Engineering Laboratory of Spatial Information Technology of High-Speed Rail Safety, Chengdu 611756, China

3 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

4 School of Civil Engineering and Architecture, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

5 Department of Land Surveying and Geo-Informatics, the Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China

Abstract: Affected by global climate change, most glaciers in southeastern Tibet have deteriorated more and more frequently. The risk of mountain disasters, such as floods, surges and debris flows, has increased sharply in recent years. This paper implements a research on glacial lakes classification by using multi-source synthetic aperture radar (SAR) images. According to the statistical analysis of intensity difference between signals coming from water and non-water objects, a method of glacial lake extraction and dynamic monitoring based on the intensity standardization ratio of sequential SAR images is proposed. Within a typical experimental area in Gongba Glacier basin, the image series of ALOS/PALSAR-1 of Japan Space Agency and Sentinel-1A of European Space Agency are selected to carry out dynamic extraction of glacial lakes and long-term change analysis over 11 years' time, just for validation purpose. The temporal and spatial variations of glacial lakes at the end of Gongba Glacier from 2007 to 2018 are successfully obtained. And the further analysis finds out that the volume of glacial lakes increase rapidly in the past ten years. This evidence can also confirm the current situation of aggravated melting of Gongba Glacier. In addition, the recent monitoring results in 2018 show that the expansion of local burst gushes has broken the inherent life cycle of glacial lakes, and even trigger secondary disasters of floods and debris flows. It is necessary to strengthen monitoring and prevention.

Key words: SAR; glacial lakes; Gongba Glacier; outburst; remote sensing classification

First author: ZHANG Bo, PhD candidate, specializes in InSAR and surface deformation retrieval. E-mail: rsbozh@qq.com

Corresponding author: ZHANG Rui, PhD, associate professor. E-mail: zhangrui@swjtu.edu.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFB0502700; the National Natural Science Foundation of China, Nos. 41771402, 41871069, 41601503, 41801399; the Project on the Application Foundation of Sichuan Science and Technology Support Plan, Nos. 2018JY0564, 2018JY0138.