

基于NDWI-NDSI组合阈值法的布加岗日冰湖提取及其变化分析

闫斌, 贾洪果, 任文静, 吴仁哲, 黄心茹

西南交通大学 地球科学与环境工程学院, 成都 611756

摘要: 自20世纪90年代以来, 中国冰川在全球升温影响下处于全面加速退缩的态势。长时序的冰湖变化既能反映冰川演变过程, 也可为冰湖灾害研究提供重要依据。本文提出一种基于NDWI-NDSI组合法提取冰湖的改进方法, 有效增加了阈值分割法提取冰湖的适用范围, 使冰湖的错分现象得到极大改善; 并以1988年—2018年共16景Landsat影像为数据源, 成功对布加岗日冰川的冰湖面积实施提取并对其做统计分析和时序研究。进而发现, 该冰川出现冰湖数目增多(2个)、面积增大近一倍(从约2.7666 km²增加至约5.2308 km²)的现象, 表明其在近30年间消融过快、退缩严重, 并阐明温度变化为导致这一现象的主要因素, 同时指出由冰川融水导致的部分冰湖诱发洪水、泥石流等次生灾害的可能性也极具增高。

关键词: 冰川, 全球变暖, 冰湖面积变化, 布加岗日, 冰湖灾害, NDWI-NDSI

中图分类号: P2

引用格式: 闫斌, 贾洪果, 任文静, 吴仁哲, 黄心茹. 2022. 基于NDWI-NDSI组合阈值法的布加岗日冰湖提取及其变化分析. 遥感学报, 26(11): 2344-2353

Yan B, Jia H G, Ren W J, Wu R Z and Huang X R. 2022. Glacier lake extraction and variation analysis of the Bujiagangri glacier based on the NDWI-NDSI combination threshold method. National Remote Sensing Bulletin, 26(11): 2344-2353 [DOI: 10.11834/jrs.20210205]

1 引言

冰川是重要的水资源, 由于其对河川径流起着自然地调节作用, 被誉为“高山固体水库”; 冰川的运动消融也极易引发自然灾害, 如冰川跃动、冰湖溃决、冰川泥石流等, 因此冰川研究对人类社会具有重要意义(邬光剑等, 2019; 张九天等, 2012; 陈宁生等, 2019)。冰川作为一种动态资源, 与气候变化密切相关(刘潮海等, 2002; 赵晓艳等, 2022)。相关研究(陈虹举等, 2017; 安国英等, 2019)表明: 中国冰川变化趋势主要呈现对夏季平均气温变化表现为正响应, 而对年降水量变化表现为负响应, 尽管冰川分布区年降水量的增加导致冰川积累量增多, 但这并不足以抵消因温度升高而增加的消融量, 因此温度的升高现已成为中国西部冰川快速退缩的主导性因素。

冰湖是冰川运动的产物, 通常由冰川挖蚀成的洼坑和冰碛物堵塞冰川槽谷积水而形成。冰湖个数增多、面积增大的同时, 冰川则往往处于退缩状态, 因此冰湖的形成演变与冰川的变化密切相关(姚晓军等, 2017)。在全球气候变暖的背景下, 由冰湖溃决引发的洪水和泥石流灾害呈现数量增多、危害程度加剧特征(Wang和Zhou, 2017)。由于冰湖多位于高海拔地区, 其溃决所产生的地质灾害具有突发性强、破坏性大、持续时间短、波及范围广的特点(Bolch等, 2008; 韩金良等, 2007; 刘建康等, 2019; 杨瑞敏等, 2019)。据《昌都地区志》记载, 1974年7月6日, 丁青县的波戈冰川冰湖溃决, 大量湖水泄入河谷, 沿河木桥全部冲走, 黑(河镇)昌(都)公路部分受损(姚晓军等, 2014)。因此对冰湖溃决灾害研究具有重要的社会意义。

收稿日期: 2020-06-30; 预印本: 2021-02-09

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 42171355, 41701535, 42071410); 四川省科技计划(编号: 2021YFH0038, 2019ZDZX0042, 2019YJ0224, 2020JDTD0003)

第一作者简介: 闫斌, 研究方向为雷达干涉测量。E-mail: binyan@my.swjtu.edu.cn

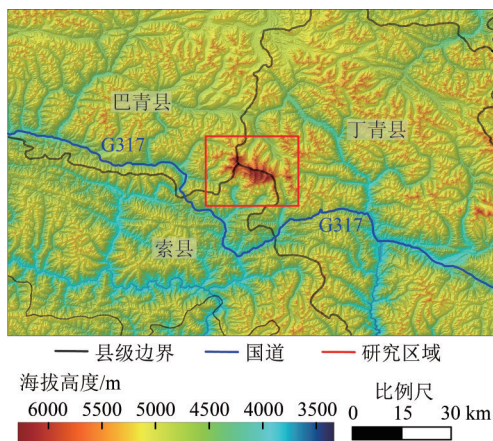
通信作者简介: 贾洪果, 研究方向为雷达干涉测量。E-mail: lemon_gg@hotmail.com

本文所选研究区为位于藏东南地区唐古拉山东段的布加岗日冰川，该冰川的冰湖周围地物主要包括冰舌和陆地。目前，在冰湖区基于归一化水指数NDWI (Normalized Difference Water Index) 进行冰湖提取已有先例借鉴 (李均力等, 2011; Li和Sheng, 2012; 骆剑承等, 2009; Watson等, 2018; Wendleder等, 2018), 此种方法适用于目标冰湖与周围地物信息在NDWI的直方图中呈双峰特性的情况; 并实验发现, 若冰湖与周围地物信息在NDWI直方图上呈现三峰, 如果直接使用阈值分割法极易造成错分现象。针对上述问题, 本文提出基于NDWI-NDSI组合阈值的冰湖面积提取方法。首先利用归一化雪被指数NDSI (Normalized Difference Snow Index) 具有分离陆地 (目标) 与冰水混合地物 (背景) 的特性制作去陆地掩膜, 再对掩膜后的NDWI进行阈值分割, 以准确提取冰湖面积信息。为验证方法的可行性, 首先基于冰

川区域分布的主要地物的NDWI-NDSI散点图和冰湖区的NDSI直方图进行陆地与冰水混合地物分离, 接着分别基于NDWI和NDWI-NDSI两种方法对冰湖提取进行对比分析。

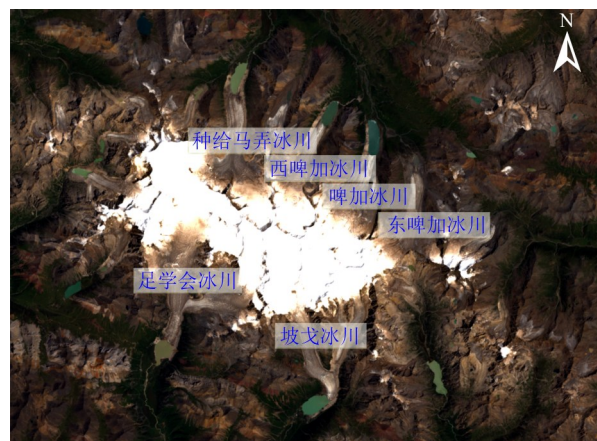
2 研究区概况及数据介绍

如图1所示, 布加岗日冰川位于距离川藏北线G317国道不远的西藏自治区那曲市索县、巴青县及昌都市丁青县的交界处, 与唐古拉山脉一致为东西走向。其海拔较高, 有16座海拔超过6000 m的高峰, 最高峰海拔为6328 m。受来自印度洋的西南季风作用, 年降水量达到600—700 mm, 高耸的地势和丰富的降水使这里成为较大的山岳冰川发育集中地 (Liu等, 2016; 王宁练和丁良福, 2002; 王聪强等, 2016)。据光学影像目视解译, 该冰川发育面积较为明显的冰湖约为12个, 它们分别对应编号L-1, L-2, ..., L-12, 其位置如图2所示。



(a) 地理位置图

(a) The geographical location of Bujiagangri glacier



(b) 主要冰川分布

(b) The distribution of major glaciers

图1 布加岗日冰川地理位置及主要冰川分布

Fig. 1 Geographical location of Bujiagangri glacier and distribution of major glaciers

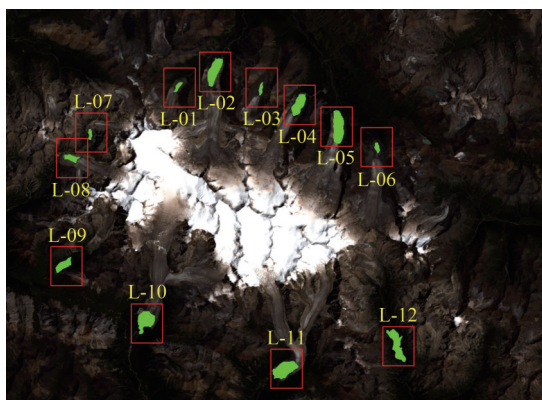


图2 布加岗日冰川冰湖分布图(2016-08-19)

Fig. 2 Distribution map of Bujiagangri glacial and glacial lakes (2016-08-19)

本文所用数据源为美国NASA的陆地卫星(Landsat) TM/OLI, 卫星波段介绍如表1所示。此次实验所使用的Landsat5/8卫星波段有: Green波段、NIR波段、SWIR1波段, 所选多光谱波段分辨率均为30 m。基于光学影像成功提取冰湖面积的前提条件是影像获取时间段内研究区上空无云或云雾较少、且冰湖处于非结冰期, 而布加岗日所在地区的夏季多数影像数据被云雾覆盖严重无法使用, 同时部分冬季影像由于冰湖结冰或被雪覆盖也导致数据不符合要求。考虑以上因素, 本文筛选出1988年—2018年间共16景质量较好且覆盖布加岗日冰川的Landsat (TM/OLI) 影像。对所选

影像首先裁剪处理, 并进行辐射定标和大气校正, 避免其对后期处理结果的精确性产生影响。以消除或减弱由传感器和大气带来的各种误差,

表1 Landsat 5/8 卫星波段介绍

Table 1 Introduction of Landsat 5/8 satellite bands

TM				OLI			
波段号	波段	频谱范围/ μm	分辨率/m	波段号	波段	频谱范围/ μm	分辨率/m
Band 1	Blue	0.45—0.52	30	Band 1	Coastal	0.433—0.453	30
Band 2	Green	0.52—0.60	30	Band 2	Blue	0.450—0.515	30
Band 3	Red	0.63—0.69	30	Band 3	Green	0.525—0.600	30
Band 4	NIR	0.76—0.90	30	Band 4	Red	0.630—0.680	30
Band 5	SWIR1	1.55—1.75	30	Band 5	NIR	0.845—0.885	30
Band 7	SWIR2	2.08—2.35	30	Band 6	SWIR1	1.560—1.651	30
Band 6	LW IR	10.40—12.5	120	Band 7	SWIR1	2.100—2.300	30
				Band 8	Pan	0.500—0.680	15
				Band 9	Cirrus	1.360—1.390	30

3 研究方法

NDWI (McFeeters, 1996) 又称为归一化水指数, 是基于水体的反射从可见光到中红外波段逐渐减弱的原理, 利用水体的高反射率主要集中在可见光中的蓝绿光波段, 而在可见光其它波段及近、中红外的反射率很低的特性, 从而使水体的亮度信息得到最大程度增强, 非水体受到普遍的抑制, 进而达到突出水体的目的 (Benoudjit 和 Guida, 2019; 徐涵秋, 2005), 其表达式为

$$\text{NDWI} = \frac{\text{band}_{(\text{green})} - \text{band}_{(\text{NIR})}}{\text{band}_{(\text{green})} + \text{band}_{(\text{NIR})}} \quad (1)$$

由 Hall 等 (1995) 提出的归一化雪被指数 NDSI 是目前光学遥感提取积雪的通用方法。实验发现, 该指数除了能突出积雪信息外, 对水体和冰同样具有高敏感性, 同时又对陆地信息具有很强的抑制作用, 本文正是利用这一特性实现对冰湖区陆地信息的识别。如图 3 所示, 结合冰湖区影像的 NDWI-NDSI 散点图中各地物信息表现出的差异性与其 NDSI 灰度直方图呈现双峰的条件, 可由 OTSU 法 (Otsu, 1979) 计算得到分割阈值 (红线所示), 据此可以分离出陆地信息。计算公式为

$$\text{NDSI} = \frac{\text{band}_{(\text{green})} - \text{band}_{(\text{SWIR1})}}{\text{band}_{(\text{green})} + \text{band}_{(\text{SWIR1})}} \quad (2)$$

基于 NDWI-NDSI 组合法实施冰湖提取的过程如图 4 所示, 与通常基于 NDWI 提取冰湖不同的是, 本文首先利用 OTSU 对 NDSI 进行阈值分割得

到阈值 T1, 将 NDSI 中小于 T1 的部分用于制作掩膜以剔除陆地信息, 避免了 NDWI 在灰度直方图呈现三峰的可能, 再利用 OTSU 对掩膜后的 NDWI 所包含的地物信息 (积雪、冰舌和冰湖) 直方图进行分割得到阈值 T2。

由于局部影像中积雪量较少, 不会在 NDWI 直方图中产生三峰现象; 其次, 积雪与冰舌在可见光的蓝绿波段反射率较低, 而水体则相反, 在 NDWI 直方图中能很好地利用阈值分割法进行提取。因此, 可继续使用阈值分割法对阈值小于 T2 的积雪和冰舌信息进行剔除, 并统计大于 T2 的像素个数, 最后结合 30 m 的影像分辨率成功实现冰湖面积的提取。为了验证该方法的正确性, 本文分别选取冰湖 L-10 和 L-12 用于分析 (图 5)。L-10 与冰舌和陆地相连, 其 NDWI 的直方图呈现三峰, 直接基于 NDWI 提取的冰湖与 RGB 影像对比可知, 提取结果出现非冰湖区域; 而基于 NDWI-NDSI 组合法提取的冰湖则与目视判断的基本一致, 表明了该方法的正确性。与 L-10 不同的是, L-12 周围地物只有陆地, 其 NDWI 直方图显示双峰, 分别基于 NDWI 和 NDWI-NDSI 两种方法实施冰湖提取结果基本相同, 说明该组合法仍适用于双峰情况; 此外, 将两种方法提取的冰湖面积与目视解译结果进行对比可知 (表 2), NDWI-NDSI 组合法在上述两种情况下提取冰湖的精度明显优于 NDWI 法。

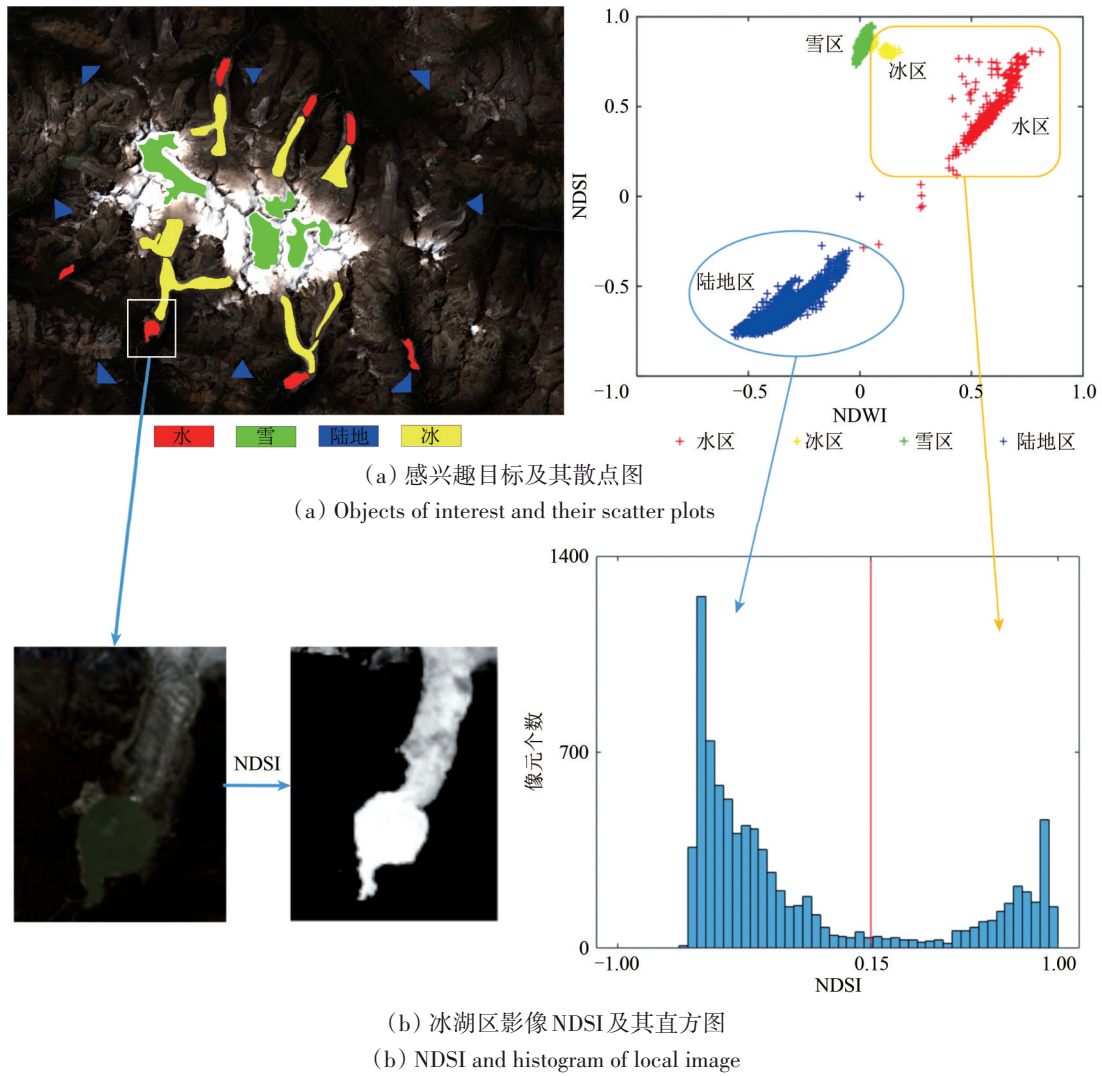


图3 基于NDSI分离陆地与冰水的方法验证

Fig. 3 Method verification of separation of land, ice and water based on NDSI

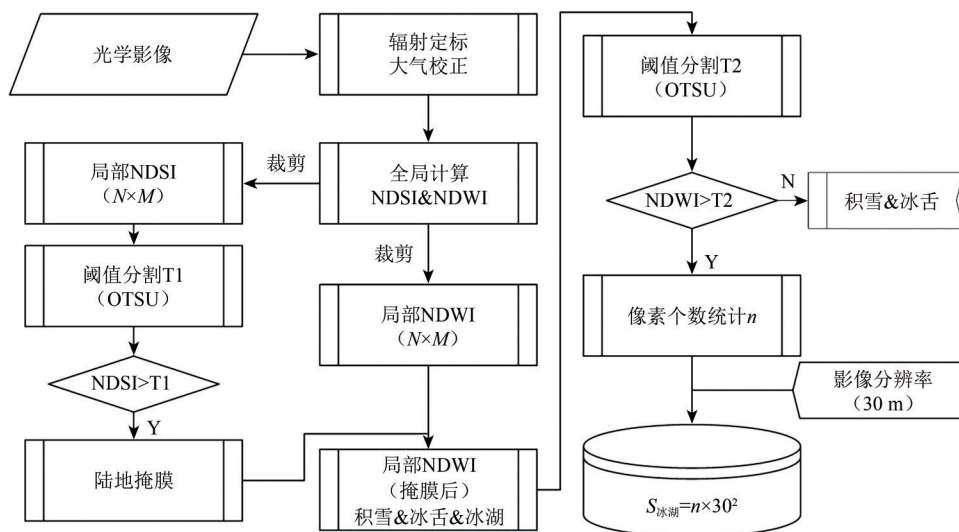
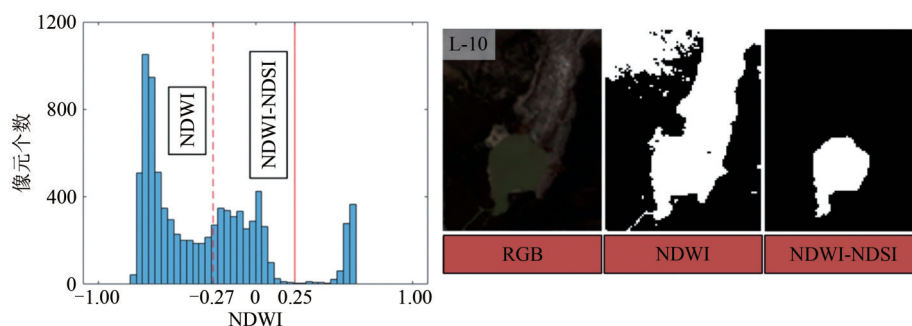


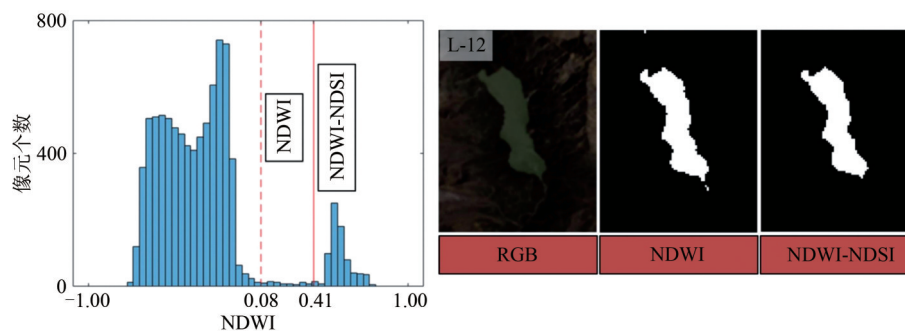
图4 冰湖提取流程

Fig. 4 Flow chart of glacial lake extraction



(a) L-10的NDWI灰度直方图和两种冰湖提取方法比较

(a) NDWI gray histogram of L-10 and comparison of two methods of glacial lake extraction



(b) L-12的NDWI灰度直方图和两种冰湖提取方法比较

(b) NDWI gray histogram of L-12 and comparison of two methods of glacial lake extraction

图5 基于NDWI与NDWI-NDSI的冰湖提取方法对比验证

Fig. 5 Comparative verification of two glacial lake extraction methods based on NDWI and NDWI-NDSI

表2 冰湖提取方法精度评价

Table 2 Accuracy evaluation of glacial lake extraction method

参数	冰湖编号					
	L-10(含冰舌)			L-12(不含冰舌)		
提取方法	目视解译	NDWI	NDWI-NDSI	目视解译	NDWI	NDWI-NDSI
面积/km ²	0.69	2.50	0.68	0.74	0.84	0.70
误判率	—	262%	0.01%	—	0.14%	0.05%

4 结果分析

本文利用NDWI-NDSI组合法成功提取了1988年—2018年的布加岗日冰川的冰湖面积,并从单个和整体两方面做了时序研究和统计分析。

4.1 单个冰湖变化分析

由图6可知,30年来布加岗日冰川的多数冰湖都有不同程度变化。除L-07、L-09、L-12这3个冰湖面积变化不大外,L-01、L-03、L-11面积有一定增加,L-02、L-04、L-05、L-06、L-08、L-10面积增加趋势明显,其中L-04和L-06面积从无到有,这说明该冰川冰湖个数在增加、面积在扩大,也表明其融水逐年增多,融化加速。结合图2冰川冰湖分布可知,变化不大的3个冰湖均未与冰舌相

连,但面积增加明显的6个冰湖中有5个与冰舌相连,而冰舌前端亦即冰川末端,其融水用于补充冰湖,这说明冰川消融是引起冰湖面积变化的主要因素。此外,有必要指出的是冰湖面积出现有一无→有的变化是由于冰湖结冰引起的,如L-01在1990年、1992年、1993年、2002年、2018年均处于结冰状态。

为了进一步分析冰湖变化,对该冰川的12个冰湖均做面积分级及其变化量分级处理。首先将其逐一按30年中扩张至最大年份的面积进行分级得到表3,其次以1988年冰湖面积为基准,用面积最大年份的冰湖面积最减去1988年的冰湖面积,可得到近30年中每个冰湖面积的最大变化量,再将变化量进行分级得到表4,最后将12个冰湖的

面积及其变化在空间的分布情况进行了分级展示，见图 7。由表 3 可知，面积超过 0.5 km² 的冰湖有 6 个，面积在 0.1—0.5 km² 之间的冰湖有 3 个，其余均小于 0.1 km²；如表 4 所示，面积变化最大的冰湖分别为 L-04、L-05、L-10，三者变化量均超过 0.5 km²；其次为 L-02、L-06、L-08，变化量在

0.1—0.5 km² 之间；L-07、L-09、L-12 这 3 个冰湖面积变化均小于 0.01 km²。另外对冰湖面积及其变化量取交集可得，面积最大且变化量最大的 3 个冰湖分别为 L-04、L-05、L-10，这 3 个冰湖极易发生溃堤且由此引发的地质灾害会更为严重。

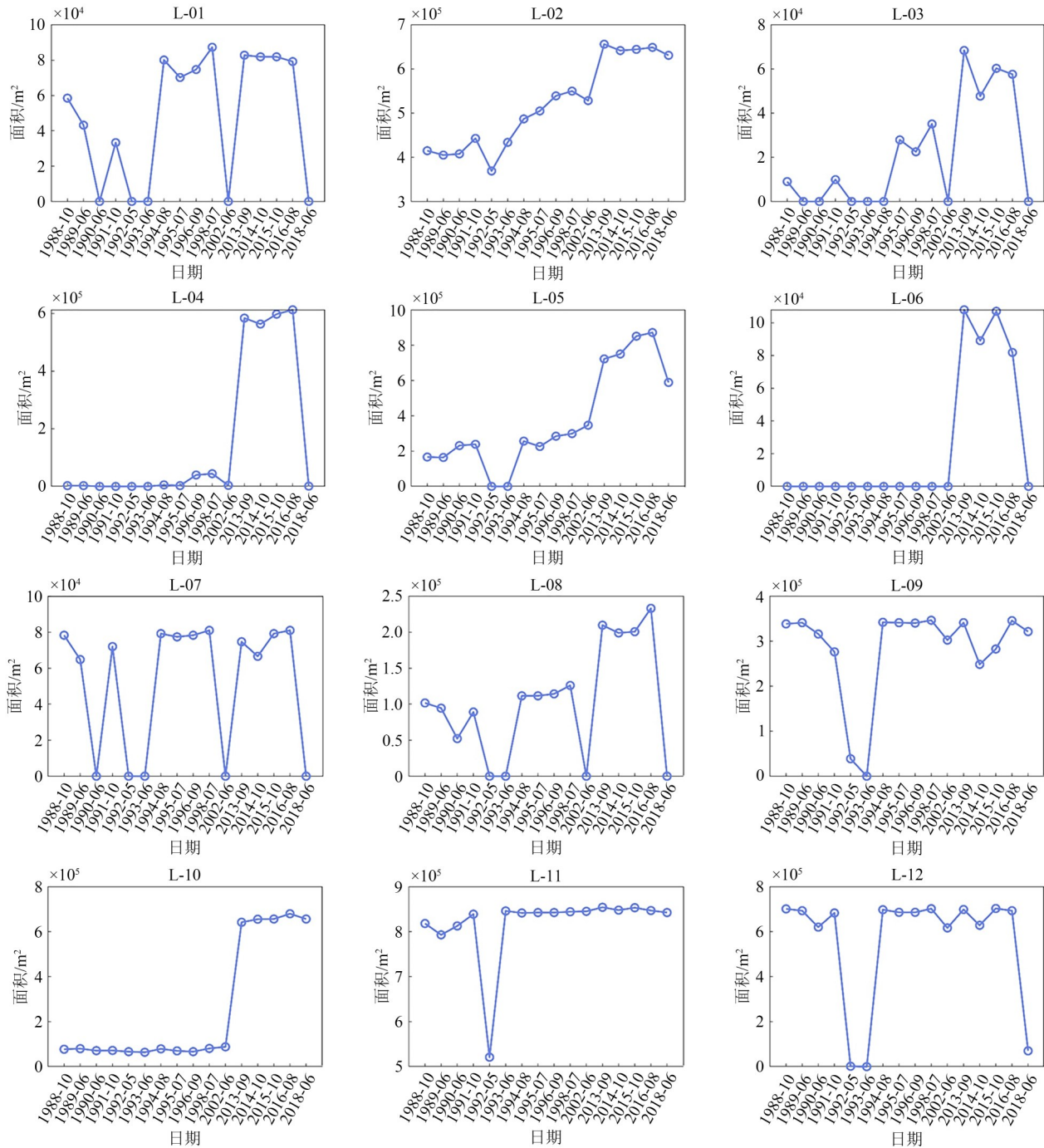


图 6 冰湖面积年际变化

Fig. 6 Interannual change of glacial lakes area

表3 冰湖面积分级表

Table 3 Classification of glacial lakes area

面积(30年)/km ²	冰湖编号	冰湖个数
<0.1	L-01、L-03、L-07	3
0.1—0.5	L-06、L-08、L-09	3
0.5—1.0	L-02、L-04、L-05、L-10、L-11、L-12	6

表4 冰湖面积变化分级表

Table 4 Classification of glacial lakes area changes

面积变化量(30年)/km ²	冰湖编号	冰湖个数
<0.01	L-07、L-09、L-12	3
0.01—0.1	L-01、L-03、L-11	3
0.1—0.5	L-02、L-06、L-08	3
0.5—1.0	L-04、L-05、L-10	3

4.2 整体面积变化分析

在4.1节中针对单个冰湖面积的时序演变情况做了分析,本节将对12个冰湖面积加以分析整个冰川的冰湖变化情况。但由于影像数据受结冰、落雪及云雾遮挡等影响导致部分较大冰湖面积未被正确提取,因此从16景影像中筛选出1988年、1994年、1998年、2013年、2016年这5组质量较好(即冰湖不受上述几类影响因素过多干扰而被正确提取)的冰湖数据进行分析。

如图8(a)与图8(b)所示,布加岗日冰川冰湖总面积在1988年约为2.7666 km²,1994年增至约2.9799 km²,1988年—1994年期间年平均变化速率约为0.0356 km²/a;1998年增至约3.1959 km²,1994年—1998年期间年平均变化速率约为0.0540 km²/a;2013年增至约5.0409 km²,1998年—2013年期间年平均变化速率约为0.1230 km²/a;2016年增至约5.2308 km²,2013年—2016年期间年平均变化速率约为0.0633 km²/a。可以看出近30年布加岗日冰川的冰湖面积变化呈慢→较快→很快→较快趋势,虽然面积变化不能准确反映冰川的消融量及湖水变化量,但其结果仍然可以表明布加岗日冰川退缩明显。结合图9可知,冰湖总面积变化与温度呈现正相关特性(该地区温度数据为中国气象局提供),表明该地区逐年气温的不断升高正是冰川消融过快的主要原因;其次,经统计发现,布加岗日冰川地区近30年来平均气温在0℃以上的年份共7个,而1998年—2013年(红色虚线框内)冰湖面积增长速率之所以最快,与这段时间内年均气温在0℃以上的年数较多紧密相关(5个年份);2013年—2016年(橙色虚线框内)增长速率变化次之,其原因为年均气温在0℃以上的年数相应较少(2个年份)。

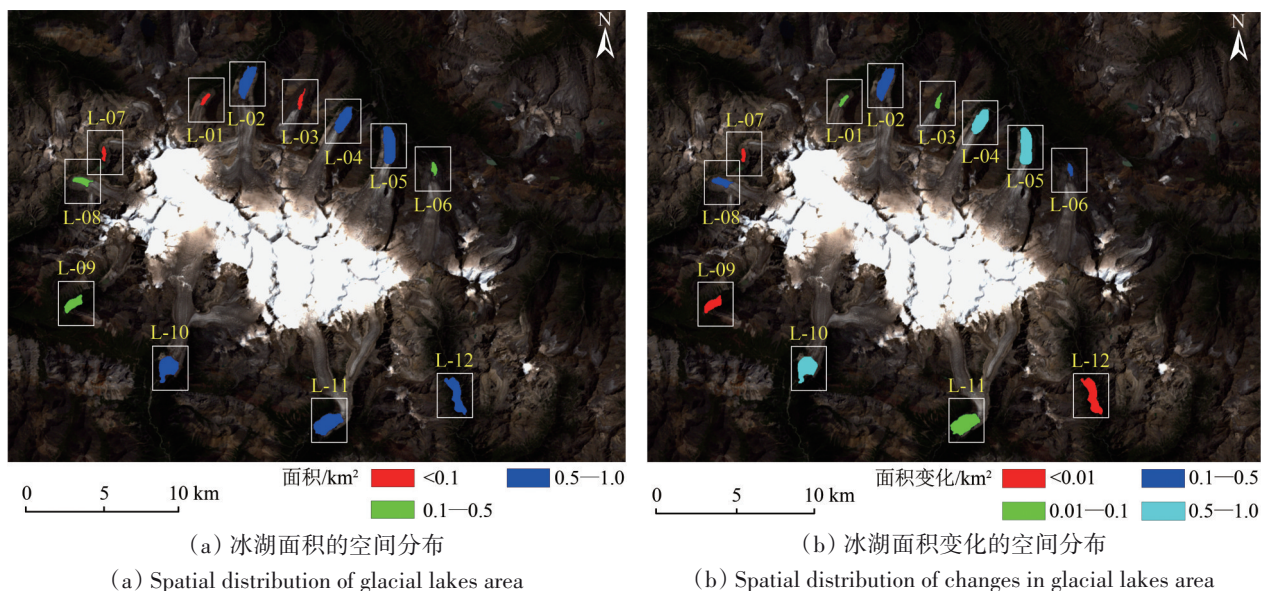
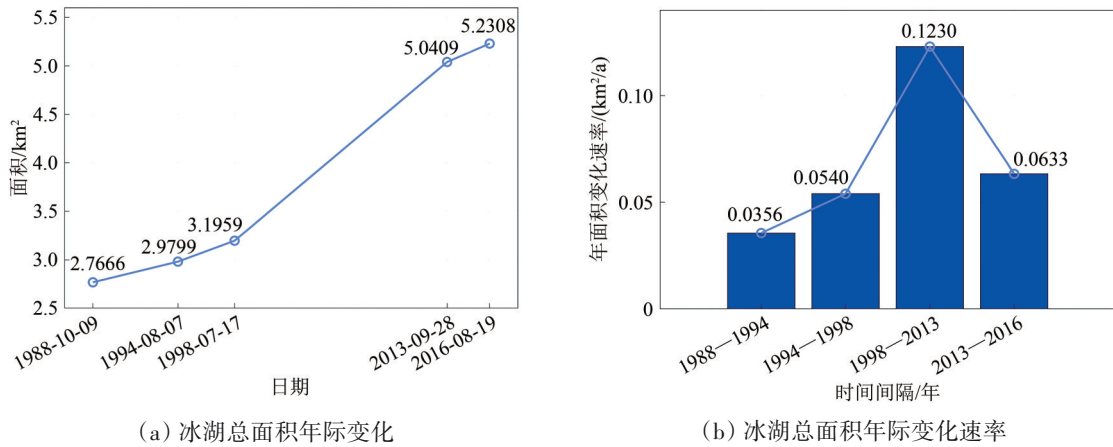


图7 冰湖面积及其变化空间分布

Fig 7 Spatial distributions of the area of glacial lakes and their changes



(a) 冰湖总面积年际变化 (b) 冰湖总面积年际变化速率
 (a) Interannual change of the total area of glacial lakes (b) Interannual rate of change of the total area of the glacial lakes

图8 冰湖总面积年际变化及其变化速率

Fig 8 Interannual change and rate of change of total area of glacial lakes

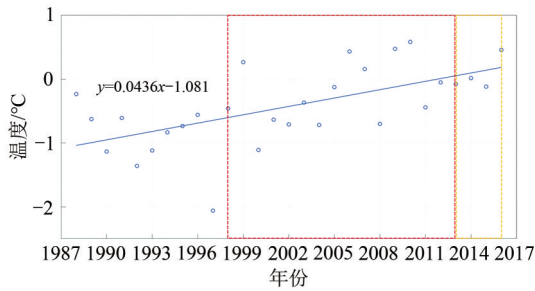


图9 布加岗日地区年均气温变化

Fig 9 Annual average temperature change in Bujiagangri area

5 结论

本文利用改进的 NDWI-NDSI 的组合阈值法，对 1988 年—2018 年研究区内的 16 景 Landsat 影像进行了冰湖提取试验，研究的主要结论如下：

(1) 归一化积雪指数 (NDSI) 除了能够提取积雪外还可以用于分离试验区内陆地信息和冰雪水混合信息，据此可制作陆地掩膜；

(2) 基于 NDWI 的阈值分割法在冰湖区提取含有冰舌、陆地两种地物信息的冰湖时会出现错分现象，改进的 NDWI-NDSI 的组合阈值法成功解决了这一问题，增加了阈值分割法提取冰湖的适用范围；

(3) 通过对试验区提取的冰湖做时序研究和统计分析可知，30 年来布加岗日冰川的冰湖面积从约 2.7666 km² 增加至约 5.2308 km²，增加最快时的年际变化率约 0.1230 km²/a。12 个冰湖中多数冰湖面积都有不同程度增加，其中 L-04、L-05 和 L-10 这 3 个冰湖的面积 (0.5—1.0 km²) 及其扩张

面积 (0.5—1.0 km²) 最大，这 3 个冰湖受夏季受高温天气影响蓄水过快随时有溃堤的可能性，对下游居民的人身财产安全及川藏公路 (G317) 等形成潜在威胁，希望有关部门给予重视。此外，基于单个和整体的冰湖面积变化分析均表明该冰川 30 年消融过快，退缩严重。

本文的不足之处为提出的 NDWI-NDSI 组合阈值法只能适用于单个冰湖提取，且该方法准确性受冰湖周围地物的复杂性影响，是否能在其它冰川用于冰湖提取有待验证；另外值得说明的是，由于受实验区域在该时间段内所获取的光学影像受云雾遮挡较为严重所限，很难于每年相同或相近月份收集到符合要求的数据。因此，只能通过比较年际带有一定时间跨度的冰湖面积进行后续分析。在今后的研究中若能获取到时间跨度较小的高质量影像数据，将会考虑如季节性等问题对冰湖提取所带来的影响，从而进行更加精确细致的结果分析。

志 谢 此次所用光学数据来自美国 NASA 的陆地卫星 (Landsat 5/8)，温度数据为中国气象局提供，在此表示衷心的感谢！

参考文献 (References)

An G Y, Han L, Huang S C, Gu Y Q, Guo Z C and Wang S S. 2019. Dynamic Variation of Glaciers in Nyainqentanglha Mountain During 1999-2015: evidence from Remote Sensing. *Geoscience*, 33(1): 176-186 (安国英, 韩磊, 黄树春, 谷延群, 郭兆成, 王珊珊. 2019. 念青唐古拉山现代冰川 1999—2015 年期间动态变化遥感研

- 究. 现代地质, 33(1): 176-186 [DOI: 10.19657/j.geoscience.1000-8527.2019.01.17]
- Benoudjit A and Guida R. 2019. A novel fully automated mapping of the flood extent on SAR images using a supervised classifier. *Remote Sensing*, 11(7): 779 [DOI: 10.3390/rs11070779]
- Bolch T, Buchroithner M F, Peters J, Baessler M and Bajracharya S. 2008. Identification of glacier motion and potentially dangerous glacial lakes in the Mt. Everest region/Nepal using spaceborne imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(6): 1329-1340 [DOI: 10.5194/nhess-8-1329-2008]
- Chen H J, Yang J P and Tan C P. 2017. Responsivity of glacier to climate change in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 39(1): 16-23 (陈虹举, 杨建平, 谭春萍. 2017. 中国冰川变化对气候变化的响应程度研究. 冰川冻土, 39(1): 16-23) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2017.0003]
- Chen N S, Wang Z, Tian S F and Zhu Y H. 2019. Study on debris flow process induced by moraine soil mass failure. *Quaternary Sciences*, 39(5): 1235-1245 (陈宁生, 王政, 田树峰, 朱云华. 2019. 冰碛土体起动泥石流特征研究. 第四纪研究, 39(5): 1235-1245) [DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2019.05.15]
- Hall D K, Riggs G A and Salomonson V V. 1995. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 54(2): 127-140 [DOI: 10.1016/0034-4257(95)00137-P]
- Han J L, Wu S R and Wang H B. 2007. Preliminary study on geological hazard chains. *Earth Science Frontiers*, 14(6): 11-23 (韩金良, 吴树仁, 汪华斌. 2007. 地质灾害链. 地学前缘, 14(6): 13) [DOI: 10.3321/j.issn:1005-2321.2007.06.003]
- Li J L and Sheng Y W. 2012. An automated scheme for glacial lake dynamics mapping using Landsat imagery and digital elevation models: a case study in the Himalayas. *International Journal of Remote Sensing*, 33(16): 5194-5213 [DOI: 10.1080/01431161.2012.657370]
- Li J L, Sheng Y W and Luo J C. 2011. Automatic extraction of Himalayan glacial lakes with remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 15(1): 29-43 (李均力, 盛永伟, 骆剑承. 2011. 喜马拉雅山地区冰湖信息的遥感自动化提取. 遥感学报, 15(1): 29-43) [DOI: 10.11834/jrs.20110103]
- Liu C H, Shi Y F, Wang Z T and Xie Z C. 2002. Glacier resources and their distributive characteristics in China—a review on Chinese glacier inventory. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 22(2): 106-112 (刘潮海, 施雅风, 王宗太, 谢自楚. 2002. 中国冰川资源及其分布特征——中国冰川目录编制完成. 冰川冻土, 22(2): 106-112)
- Liu J K, Zhang J J, Gao B, Li Y L, Li M Y, Wu J D J and Zhou L X. 2019. An overview of glacial lake outburst flood in Tibet, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 41(6): 1335-1347 (刘建康, 张佳佳, 高波, 李元灵, 李梦宇, 吾金多吉, 周路旭. 2019. 我国西藏地区冰湖溃决灾害综述. 冰川冻土, 41(6): 1335-1347) [DOI: 10.7522/j.issn.1000-0240.2019.0073]
- Liu Q, Guo W Q, Nie Y, Liu S Y and Xu J L. 2016. Recent glacier and glacial lake changes and their interactions in the Bugyai Kangri, southeast Tibet. *Annals of Glaciology*, 57(71): 61-69 [DOI: 10.3189/2016AoG71A415]
- Luo J F, Sheng Y W, Shen Z F, Li J L and Gao L J. 2009. Automatic and high-precise extraction for water information from multispectral images with the step-by-step iterative transformation mechanism. *Journal of Remote Sensing*, 13(4): 604-615 (骆剑承, 盛永伟, 沈占锋, 李均力, 郜丽静. 2009. 分步迭代的多元光谱遥感水体信息高精度自动提取. 遥感学报, 13(4): 604-615) [DOI: 10.11834/jrs.20090405]
- McFeeters S K. 1996. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7): 1425-1432 [DOI: 10.1080/01431169608948714]
- Otsu N. 1979. A threshold selection method from gray-level histogram. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1): 62-66 [DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076]
- Wang C Q, Yang T B, Ji Q and He Y. 2016. Variation of glacier and its response to climate change in the Bujiaogangri Region from 1988 to 2013. *Research of Soil and Water Conservation*, 23(4): 70-76 (王聪强, 杨太保, 冀琴, 何毅. 2016. 1988—2013年布加岗日地区冰川变化及其对气候变化的响应. 水土保持研究, 23(4): 70-76) [DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2016.04.009]
- Wang N L and Ding L F. 2002. Study on the glacier variation in Bujiaogangri Section of the East Tanggula Range since the Little Ice Age. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(3): 234-244 (王宁练, 丁良福. 2002. 唐古拉山东段布加岗日地区小冰期以来的冰川变化研究. 冰川冻土, 24(3): 234-244) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2002.03.003]
- Wang S J and Zhou L Y. 2017. Glacial lake outburst flood disasters and integrated risk management in China. *International Journal of Disaster Risk Science*, 8(4): 493-497 [DOI: 10.1007/s13753-017-0152-7]
- Watson C S, King O, Miles E S and Quincey D J. 2018. Optimising NDWI supraglacial pond classification on Himalayan debris-covered glaciers. *Remote Sensing of Environment*, 217: 414-425 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.020]
- Wendleder A, Friedl P and Mayer C. 2018. Impacts of climate and supraglacial lakes on the surface velocity of Baltoro Glacier from 1992 to 2017. *Remote Sensing*, 10(11): 1681 [DOI: 10.3390/rs10111681]
- Wu G J, Yao T D, Wang W C, Zhao H B, Yang W, Zhang G Q, Li S H, Yu W S, Lei Y B and Hu W T. 2019. Glacial hazards on Tibetan Plateau and surrounding alpine. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 34(11): 1285-1292 (郇光剑, 姚檀栋, 王伟财, 赵华标, 杨威, 张国庆, 李生海, 余武生, 类延斌, 胡文涛. 2019. 青藏高原及周边地区的冰川灾害. 中国科学院院刊, 34(11): 1285-1292) [DOI: 10.16418/j.issn.1000-3045.2019.11.011]
- Xu H Q. 2005. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing*, 9(5): 589-595 (徐涵秋. 2005. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. 遥感学报, 9(5): 589-595) [DOI: 10.11834/jrs.20050586]
- Yang R M, Zhang T J, Zhu L P and Ju J T. 2019. Laigu glacial lake

- variation and its outburst flood risk in southeast Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 39(5): 1171-1180 (杨瑞敏, 张廷军, 朱立平, 鞠建廷. 2019. 青藏高原东南部来古冰湖变化及其溃决洪水评估. *第四纪研究*, 39(5): 1171-1180) [DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2019.05.09]
- Yao X J, Liu S Y, Han L, Sun M P. 2017. Definition and classification systems of glacial lake for inventory and hazards study. *Acta Geographica Sinica*, 72(7): 1173-1183 (姚晓军, 刘时银, 韩磊, 孙美平. 2017. 冰湖的界定与分类体系——面向冰湖编目和冰湖灾害研究. *地理学报*, 72(7): 1173-1183) [DOI: 10.11821/dlxb201707004]
- Yao X J, Liu S Y, Sun M P and Zhang X J. 2014. Study on the glacial lake outburst flood events in Tibet since the 20th century. *Journal of Natural Resources*, 29(8): 1377-1390 (姚晓军, 刘时银, 孙美平, 张秀娟. 2014. 20 世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理. *自然资源学报*, 29(8): 1377-1390) [DOI: 10.11849/zrzyxb.2014.08.010]
- Zhang J T, He X J, Shangguan D H, Zhong F L and Liu S Y. 2012. Impact of intensive glacier ablation on arid regions of Northwest China and its countermeasure. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 34(4): 848-854 (张九天, 何霄嘉, 上官冬辉, 钟方雷, 刘时银. 2012. 冰川加剧消融对我国西北干旱区的影响及其适应对策. *冰川冻土*, 34(4): 848-854)
- Zhao X Y, Zhao Z B, Liu J H, Liu Q and Li Y K. 2022. Influences of multi-source and multi-resolution DEMs on glacier simulation in Mt. Noijin Kangsang. *Quaternary Sciences*, 42(4): 1181-1192 (赵晓艳, 赵志斌, 刘金花, 刘强, 李英奎. 2022. 多源多分辨率 DEMs 对宁金康桑峰地区冰川模拟的影响研究[J]. *第四纪研究*, 42(4): 1181-1192) [DOI: 10.11928/j.issn.1001-7410.2022.04.21]

Glacier lake extraction and variation analysis of the Bujiangri glacier based on the NDWI–NDSI combination threshold method

YAN Bin, JIA Hongguo, REN Wenjing, WU Renzhe, HUANG Xinru

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

Abstract: Glaciers are precious solid freshwater resource for humans. Since the 1990s, the glaciers in China have been in accelerating trend in melting due to global warming, so as to increase the sizes of surrounding ice lakes and form new ice lakes. This may result in geological disasters because glacial lake outburst have the characteristics of suddenness, great destructiveness, short duration, and wide distribution. Hence many research work has focused on the monitoring glacial lake changes.

This study proposed an improved method to extract ice lakes based on the NDWI-NDSI combination. In this study, the NDSI (Normalized Difference Snow Index) was used to generate the land masks to separate the lands (foreground) and the mixed regions of land and ice (background). Then the threshold segmentation of masked NDWI was conducted in order to precisely extract the areas of glaciers. In the evaluation experiment, the ice lakes of the Bujiangri glaciers located in the eastern section of Tanggula in southeastern Tibet were used as study region and 16 Landsat images covering the study area from 1988 to 2018 were used as test data. The experiment results indicated that the proposed method in this study can effectively extract the glaciers and reduce the misclassification compared with the methods using NDWI. By the proposed method, it can be found: (1) the area of the ice lakes has increased nearly 2 times (from about 2.7666 km² to about 5.2308 km²) due to the glacier evolution; (2) the annual increase rates of the areas of glacial lakes in this region is about 0.1230 km²/yr; (3) among the 12 glacial lakes, L-04, L-05 and L-10 glacial lakes have the largest areas (0.5—1.0 km²) and enlargement areas (0.5—1.0 km²). This indicated that the glaciers have greatly rapidly melted and severely retreated in the past 30 years, which may result in potential threats to the personal and property safety of downstream residents and Sichuan Tibet Highway (G317). Further investigations will be conducted to verify the usability of the proposed method in this study in other regions containing the glaciers with different geographic conditions.

Key words: glacier, global warming, glacial lake changes, Bujiangri, glacial lake disaster, NDWI-NDSI

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42171355, 41701535, 42071410); Sichuan Science and Technology Program (No. 2021YFH0038, 2019ZDZX0042, 2019YJ0224, 2020JDTD0003)