

帕隆藏布流域冰湖变化及危险性评估^{*}

刘娟, 姚晓军^{**}, 高永鹏, 祁苗苗, 段红玉, 张大弘

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 冰湖作为区域气候变化的灵敏指示器和主要冰川灾害的启动器, 认识其空间分布及变化特征对探讨冰湖对气候变化的响应规律及冰湖溃决危险性评估具有重要意义. 基于 1968—1980 年地形图数据和 1994—2016 年 Landsat TM/OLI 遥感影像资料, 综合利用 RS、GIS 技术和数理统计方法分析帕隆藏布流域面积 $\geq 0.01 \text{ km}^2$ 冰湖时空分布及其动态变化, 并对潜在危险性冰湖进行判别和评估. 结果表明: 2016 年帕隆藏布流域共有冰湖 351 个, 面积 50.48 km^2 , 且面积和数量分别以面积 $> 1 \text{ km}^2$ 和面积 $< 0.1 \text{ km}^2$ 的冰湖为主, 这些冰湖主要分布于海拔 2800~5400 m 之间. 近 50 年来帕隆藏布流域冰湖总体呈数量增多、面积增加态势; 海拔 $< 3000 \text{ m}$ 的冰湖相对稳定, 而海拔 $> 4500 \text{ m}$ 的冰湖数量和面积增加则相对迅速. 近 50 年间帕隆藏布流域冰川面积减少 591.34 km^2 , 气候变暖导致的冰川末端退缩和冰川融水增加为冰湖形成和扩张提供了发育空间和物质来源. 切毛措、光谢错等 9 个冰湖为潜在危险性冰湖, 预计未来一段时间内帕隆藏布流域冰湖溃决可能处于活跃阶段, 其形成和暴发也将更加频繁.

关键词: 冰湖; 危险性评估; 冰川; 帕隆藏布流域

Glacial lake variation and hazard assessment of glacial lakes outburst in the Parlung Zangbo River Basin

LIU Juan, YAO Xiaojun^{**}, GAO Yongpeng, QI Miaomiao, DUAN Hongyu & ZHANG Dahong

(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, P.R.China)

Abstract: Glacial lake serves as a sensitive indicator of regional climate change and trigger of major glacial disasters. Understanding its spatial distribution and changing characteristics is of great significance for exploring the response of glacial lake to climate change and assessing the risk of glacial lake outburst. Based on the topographic maps in 1968–1980 and Landsat TM/OLI remote sensing images from 1994 to 2016, we analyzed the spatial-temporal distribution and dynamic changes of glacial lakes with an area larger than 0.01 km^2 in the Parlung Zangbo River Basin as well as identified and evaluated the potential dangerous glacial lakes using RS, GIS and mathematical statistics methods. The results showed that: In 2016, there were 351 glacial lakes with a total area of 50.48 km^2 in the Parlung Zangbo River Basin. Glacial lakes with areas $> 1 \text{ km}^2$ accounted for the largest area and $< 0.1 \text{ km}^2$ accounted for the biggest number. Glacial lakes were mainly concentrated in 2800–5400 m. In the past 50 years, the number and area of glacial lakes in this basin have increased. Among them, the number and area of glacial lakes below 3000 m were relatively stable, whereas those above 4500 m increased rapidly. Under the background of climate warming, the glacier area in the Parlung Zangbo River Basin has decreased by 591.34 km^2 in the past 50 years. The retreat of the glacier terminal and the increase of glacial meltwater provided development space and material source for the formation, expansion and area increase of glacial lakes. There were 9 potentially dangerous glacial lakes being identified in the Parlung Zangbo River Basin. It is expected that the glacial lake outburst will be in an active stage in the future.

Keywords: Glacial lake; risk assessment; glacier; Parlung Zangbo River Basin

湖泊不仅是影响青藏高原水循环的关键因子,也是区域气候变化的敏感指示器^[1]. 冰川湖泊(以下简称

^{*} 国家自然科学基金项目(41561016, 41861013, 41801052)和西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(NWNU-LKQN-14-4)联合资助. 2018-12-10 收稿; 2018-12-27 收修改稿. 刘娟(1993~), 女, 硕士研究生; E-mail: liujuan_qx@163.com.

^{**} 通信作者; E-mail: yaoxj_nwnu@163.com.

冰湖)作为湖泊的类型之一,是指以现代冰川融水为主要补给源或在冰碛垄洼地内积水形成的天然水体^[2]. 我国冰湖主要分布于念青唐古拉山、喜马拉雅山、横断山、唐古拉山、冈底斯山等地区^[3]. 冰湖受人类活动影响较小,能真实反映该区域的气候状态,可用于研究气候和环境的自然变化过程^[4-6]. 在全球气候变暖背景下,特别是1950s以来青藏高原变暖趋势超过北半球及同纬度地区^[7],青藏高原自然环境发生剧烈变化,如冰川普遍退缩^[8-11]、冰碛湖扩张迅速^[12-14]、洪水频率不断增加^[15]、冰湖潜在溃决风险逐渐增强^[16]. 由于冰湖分布区地形复杂,且难以到达,开展冰湖实地考察难度较大,随着遥感和地理信息系统技术的发展,尤其是近年来高分辨率遥感影像的增多和易获得性,为冰湖监测及其潜在危害评价提供了强有力的支持^[17]. 目前,冰湖变化研究主要是基于遥感影像,应用水体指数和图谱分析等方法来分析冰湖的面积变化^[18]. 冰湖溃决洪水(或泥石流)作为冰冻圈一种独特的自然灾害类型,不仅可以直接破坏下游地区的居民点、草场、道路和水电站等基础设施,而且可能阻塞下游河道继而引发次生灾害^[19]. 鉴于冰湖溃决具有突发性强、洪峰高、流量大、破坏性强、持续时间短和波及范围大的特点^[20],对下游地区人民群众的生命财产和基础设施有巨大影响^[21],因此冰湖变化监测和危险性评价日益受到地方政府和学术界的广泛关注^[22].

藏东南地区是自然灾害的“博物馆”^[23],自然灾害类型多样,如2000年的易贡特大山体崩塌滑坡和2018年林芝市米林县派镇加拉村的冰川泥石流. 已有研究表明,1980s以来,藏东南地区的冰湖正经历着扩张过程^[24],冰湖溃决洪水已成为该地区主要的自然灾害之一^[25]. 位于藏东南的帕隆藏布流域发育了我国最大的海洋性冰川群,冰湖星罗棋布,是遭受冰湖溃决危害的典型区域^[26]. 如1988年米堆沟光谢错冰湖溃决,导致帕隆藏布江局部堵塞,川藏公路被毁,交通中断200 d;此外,泥石流还冲毁了桥梁和民房,并造成人员死亡,直接经济损失上亿元^[27-28]. 为认清帕隆藏布流域冰湖现状及其潜在威胁,本文基于地形图和Landsat TM/OLI遥感影像,分析帕隆藏布流域冰湖的空间分布及动态变化,并根据已有研究选取易获取的指标,识别潜在危险性冰湖并对其进行评估,以期对帕隆藏布流域水资源合理利用和冰湖溃决洪水(或泥石流)灾害治理与预防提供科学依据.

1 研究区概况

帕隆藏布流域北抵念青唐古拉山,东靠伯舒拉岭,南邻祁灵公山,呈东南—西北方向,面积12183.7 km²,最高点为加拉白垒峰(海拔7294 m). 帕隆藏布发源于八宿县然乌湖,在西南部与易贡藏布汇流后流入雅鲁藏布江,是雅鲁藏布江水量最大的支流. 源头海拔4900 m,汇入雅鲁藏布江处海拔1540 m. 流域内高山环绕,相对高差大,自东南向西北大致分为三部分:从源头到然乌湖为河谷盆地;然乌湖至忠坝为高山峡谷,水流湍急,两岸岩石风化强烈,泄溜岩屑堆发育;忠坝以下至河口处,河谷宽窄相间,洪积扇、阶地发育. 流域位于青藏高原东南边缘的斜面上,受西南季风的直接影响,平均气温较高,年均气温在10~12℃之间;降水较充沛,年均降水量884.5 mm,主要集中于6—10月^[29],是我国最大的季风海洋性冰川分布区. 由于覆盖大面积的海洋性冰川,导致流域内有大量末次冰期冰川退缩时形成的冰湖(图1),主要分布在河源冰川作用范围地区,且以冰碛湖为主^[30].

帕隆藏布流域在行政区划上隶属于八宿县和波密县. 其中,八宿县(29°40′~31°01′N, 96°23′~97°28′E)属高原温带半干旱季风性气候,面积12564 km²,有3.9万人口,矿产和电力资源丰富;波密县(29°21′~30°40′N, 94°00′~96°30′E)位于帕隆藏布北岸,属高原气候,全县总面积16587 km²,人口3.1万,是西藏地区商品粮基地县之一.

2 数据与方法

2.1 数据源

为获取研究区的冰湖及冰川信息,共搜集和整理25幅基于1968—1980年航空摄影测量技术制作的地形图,其中1:5万地形图15幅,1:10万10幅,反映了1968—1980年的冰湖和冰川状况. 同时,选取1994、2005及2016年Landsat TM/OLI遥感影像,用于提取三期冰湖边界及2016年冰川矢量数据,数据从美国地质勘探局网站(<http://glovis.usgs.gov>)下载获得,共20景,空间分辨率为30 m. 由于该流域受印度洋暖湿气流和地形起伏的影响,较难获取无云或云量较少的影像^[31],因此部分时段采用前推后移1年的影像代替,以

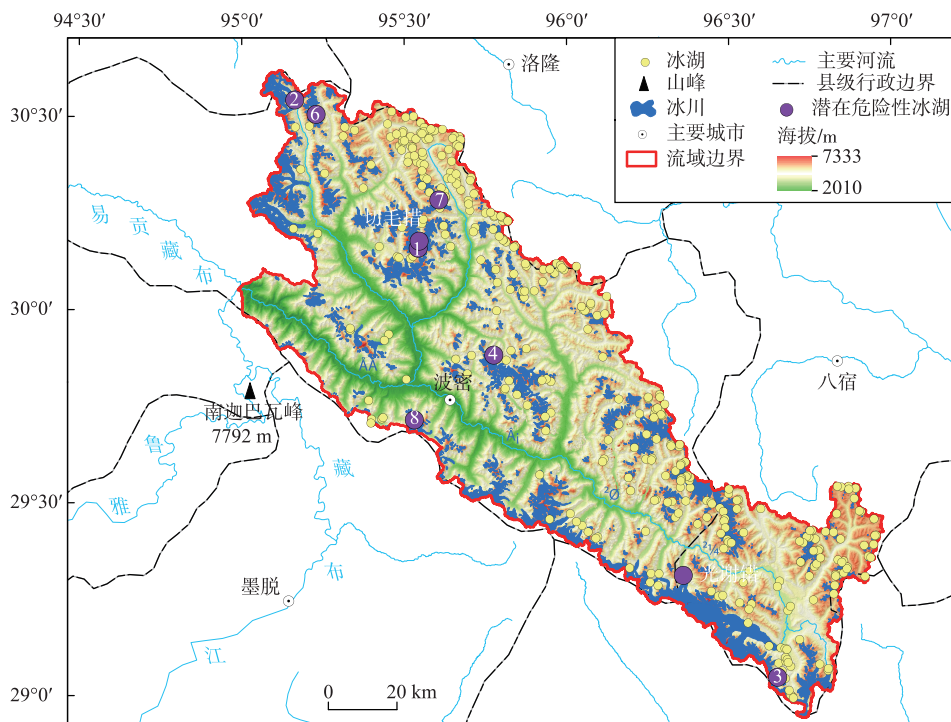


图1 帕隆藏布流域冰湖分布

Fig.1 The distribution of the glacial lakes in the Parlun Zangbo River Basin

保证数据的完整性。同时,按照云量较少、冰湖面积较为稳定的原则,选取5月或10—11月的影像,并参考地形图、Google Earth 和《中国湖泊志》^[32] 确定湖泊位置及名称。其中,所用的数字高程模型数据(DEM)为 ASTER GDEM V4,用于冰湖及冰川相关参数的提取。此外,研究区气象数据由国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn>)提供,该数据集是基于国家气象信息中心基础资料专项收集、整理的全国国家级台站(基本、基准和一般站)的气温和降水月值资料,由 GTOP30 数据经过重采样所获得。

2.2 冰湖与冰川信息的提取方法

2.2.1 冰湖信息提取 目前,对于湖泊范围提取主要有水体指数法、单波段阈值法、比值法及光谱分类法等方法^[33-36],这些方法在提取大范围单一、均质水体时能取得较好的效果。帕隆藏布流域冰湖面积较小,且受积雪分布的影响,自动提取方法效果较差。因此,本文采用人工目视解译方法提取该流域的冰湖边界,精度控制在一个像元以内。本研究所采用的 Landsat TM/OLI 遥感影像空间分辨率为 30 m,故仅识别面积 $\geq 0.01 \text{ km}^2$ 的冰湖。

遥感影像质量、空间分辨率、空间配准技术均影响冰湖信息的提取精度^[37-38]。帕隆藏布流域较难获取质量较高的遥感影像,且冰湖分布区地形复杂,对冰湖难以进行精度验证。此外,个体对影像的解译也是导致误差的因素之一,在解译过程中,单个像元的 50% 会被包含或排除,本文采用 Wang 等^[14] 提出的方法计算冰湖面积误差:

$$u_a = \frac{\lambda^2 \cdot p}{2 \sqrt{\lambda^2 + \lambda^2}} = \frac{\lambda \cdot p}{2\sqrt{2}} \quad (1)$$

式中, u_a 为冰湖面积误差(%), λ 为空间分辨率(地形图为 5 m; Landsat TM/OLI 为 30 m); p 为冰湖的周长(m)。结果表明:帕隆藏布流域地形图造成的冰湖面积误差为 $\pm 0.56 \text{ km}^2$, 1994、2005 和 2016 年由 Landsat TM/OLI 遥感影像造成的冰湖面积误差分别为 ± 3.85 、 ± 4.30 和 $\pm 4.69 \text{ km}^2$ 。

2.2.2 冰川信息提取 对于冰川边界的提取,目前广泛采用目视解译、监督分类、非监督分类、波段比值阈值

法和冰雪指数法等方法^[39-41]。帕隆藏布流域部分规模较大的冰川表面被表碛覆盖,且受山体阴影的影响,现有的冰川自动提取方法效果较差,因此对于冰川边界的提取亦采用人工目视解译方法。

冰川边界提取的精度主要受传感器和图像配准误差的影响^[38,42],可通过地面实况调查或甚高空间分辨率的遥感数据对冰川边界遥感解译结果进行检验^[43]。由于冰川分布区地形复杂,气候恶劣,许多地方难以到达,对冰川难以进行全面的实地考察^[44]。因此,本文仅考虑遥感影像分辨率造成的误差,可由下式计算得出:

$$\varepsilon = N \cdot A \tag{2}$$

式中, ε 为影像空间分辨率造成的冰川面积误差, N 为冰川轮廓的周长, A 为半个像元的边长(Landsat OLI 为 15 m)。结果表明,2016 年由 Landsat OLI 遥感影像造成的冰川面积误差为 $\pm 83.11 \text{ km}^2$,占 2016 年冰川总面积的 $\pm 5.58\%$ 。

2.3 危险冰湖的识别

鉴于导致冰湖溃决的因素较多且具有很大的不确定性,如极端天气、地震、冰崩等具有突发性,增大了指标选取的难度和评估的复杂性。本文采用 Wang 等^[45]提出的指标并结合已有的研究,选取冰湖类型、冰湖面积、冰湖面积变化、冰舌坡度、母冰川变化及冰湖与母冰川的距离 6 个指标来识别潜在危险性冰湖(表 1),以此对帕隆藏布流域潜在危险性冰湖进行评估。据 Yao 等^[2]的研究,冰湖划分为冰川侵蚀湖、冰碛阻塞湖、冰川阻塞湖、冰面湖、冰下(内)湖和其他冰川湖六种类型。西藏地区的冰湖溃决灾害以冰碛湖溃决为主,因此本文仅对冰碛湖进行危险性评估。面积是评估冰湖危险性最重要的指标之一,当冰湖面积达到一定规模时,才具有危险性,如 Mool 等^[46]认为冰湖面积 $>0.2 \text{ km}^2$ 时为较大冰湖,并分析了其危险性,本文选用此规模大小。冰湖的扩张速率亦是评价其溃决风险的重要指标,本文选取冰湖面积增加比例 $>20\%$ 的冰碛湖进行危险性分析^[45,47]。冰碛湖的溃决与母冰川的活动密切相关,而冰湖与母冰川的距离会影响母冰川的运动速度,距离越小,母冰川运动的速度越大,冰体进入冰湖激起的浪涌越大,冰湖溃决的可能性也越大,本文将冰湖与母冰川的距离 $<500 \text{ m}$ ^[48]作为判别标准。冰崩作为导致冰湖溃决的诱发因素之一,其发生概率与冰舌坡度大小密切相关,因此仅选取冰舌坡度大于 $>10^\circ$ 的冰碛湖进行危险性分析^[49]。本文将满足表 1 所有判别标志和标准的冰湖识别为潜在危险性冰湖。

表 1 潜在危险性冰湖的判别标志与标准

Tab.1 The criteria for identifying potentially dangerous glacial lakes

判别标志	判别标准	资料来源
冰湖类型	冰碛湖	本研究
冰湖面积	$>0.2 \text{ km}^2$	[46]
冰湖面积变化	面积增加,且变化率 $>20\%$	[45,47]
冰舌坡度	$>10^\circ$	[49]
母冰川变化	母冰川面积减小,且变化率 $>10\%$	[47]
冰湖与母冰川的距离	$<500 \text{ m}$	[48]

3 结果与讨论

3.1 冰湖分布特征

2016 年帕隆藏布流域共有冰湖 351 个,面积 50.48 km^2 。流域内面积最大的为然乌湖(又名安错, $29^\circ 29' 29'' \text{N}$, $96^\circ 42' 15'' \text{E}$),面积为 6.39 km^2 ;其次是安目错(6.08 km^2),其余的均小于 4 km^2 。在行政区划上,八宿县境内有 102 个,面积为 29.68 km^2 ,占冰湖总面积的 58.80%;波密县境内有 249 个冰湖,面积较八宿县小,为 20.80 km^2 。将冰湖按照面积大小分为 5 个等级,统计各等级的冰湖面积与数量(图 2a),结果表明:帕隆藏布流域冰湖的显著特点是数量以面积 $<0.1 \text{ km}^2$ 的冰湖为主,面积以 $>1.0 \text{ km}^2$ 的冰湖为主。其中,面积 $<0.1 \text{ km}^2$ 的冰湖有 276 个(78.63%),面积为 9.89 km^2 ,占总面积的 19.60%;面积 $>1.0 \text{ km}^2$ 的冰湖有 8 个,面积为 25.02 km^2 ,占帕隆藏布流域冰湖总面积的 49.65%。

由 2016 年帕隆藏布流域冰湖在各海拔区间的分布(图 2b)可知,冰湖分布于 2800~5400 m 之间,随着海拔上升,冰湖面积和冰湖数量呈先增加后减少的趋势. 其中,冰湖面积主要集中分布于海拔 3500~5000 m 之间,占冰湖总面积的 90.27%,海拔更低和更高处冰湖面积则较小;冰湖数量在海拔 4500~5000 m 之间最多(164 个,占 46.72%),这与该流域的雪线高程基本一致(4500~4700 m),这是因为在这个海拔区间内,冰川的积累和消融较剧烈,冰湖大量出现.

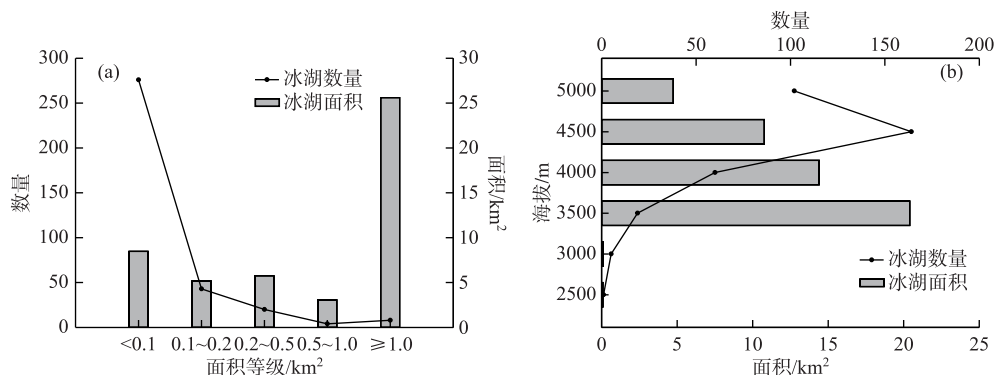


图 2 2016 年帕隆藏布流域冰湖分布

Fig.2 Distribution of glacial lakes in the Parlung Zangbo River Basin in 2016

3.2 冰湖变化

近 50 年间帕隆藏布流域有 136 个冰湖面积虽历经扩张或缩小状态,但一直存在,新生冰湖有 208 个,消失的有 64 个. 其中,新生冰湖大部分位于冰川末端或两侧,由冰雪融水补给,这是因为冰川末端在退缩过程中,冰川挖蚀或冰碛物堵塞水下通道,从而在末端形成洼地,积水形成冰湖;此外,有个别冰湖位于规模较大的有表碛覆盖冰川的表面,这是由冰川表面差异消融形成的洼地积水所形成.

表 2 1968—2016 年帕隆藏布流域冰湖数量与面积

Tab.2 The number and area of glacial lakes in the Parlung Zangbo River Basin during 1968–2016

时间	冰湖数(个)	冰湖面积/km²
1968 年	210	39.83±0.56
1994 年	264	43.99±3.85
2005 年	319	48.07±4.30
2016 年	351	50.48±4.69

由 1968—2016 年帕隆藏布流域冰湖数量与面积(表 2)可知,该流域冰湖总体呈数量增多、面积增加的态势,表明帕隆藏布流域冰湖正经历着“扩张”过程. 其中,1968—1994 年冰湖数量由 210 个增加到 264 个,面积由 39.83 km² 增加到 43.99 km²,该时段冰湖扩张最慢,平均扩张速率为 0.16 km²/a; 1994—2005 年冰湖扩张迅速,面积增幅较 1968—1994 年略小(4.09 km²),但扩张速率最快,为 0.37 km²/a,且冰湖数量增加最多(55 个); 2005—2016 年,冰湖数量

和面积增幅均最小(32 个和 2.41 km²),扩张速率较低(0.22 km²/a).

尽管近 50 年来帕隆藏布流域冰湖总体正经历着“扩张”过程,但不同规模的冰湖面积变化存在明显的差异(图 3). 其中,面积介于 0.5~1.0 km² 的冰湖数量和面积呈减少(小)趋势,面积介于 0.2~0.5 km² 的冰湖数量保持不变,面积增加,其余各规模的冰湖数量和面积均呈增加趋势. 1968—2016 年面积<0.1 km² 的冰湖增幅最大,为 4.29 km²;其次是面积>1.0 km² 的冰湖(4.16 km²),面积介于 0.2~0.5 km² 的冰湖增幅最小(0.63 km²);面积介于 0.5~1.0 km² 的冰湖数量减少 2 个,面积减少 1.47 km². 从不同规模冰湖面积变化百分比来看,面积介于 0.1~0.2 km² 的冰湖面积变化最快(106.27%),其次是面积<0.1 km² 的冰湖(76.61%),面积介于 0.2~0.5 km² 的冰湖面积变化最小,为 10.94%. 因此,帕隆藏布流域规模较小的冰湖面积变化较大,表明其对气候变化比较敏感;而规模较大的冰湖则相对稳定,这与其调蓄能力强有关系.

帕隆藏布流域冰湖主要分布于海拔 2600~5400 m 之间,不同时段冰湖分布特征有所差异. 1968—2016 年该流域不同海拔的冰湖数量总体呈增加趋势,面积呈扩张态势(图 4). 其中,海拔 3000 m 以下的区

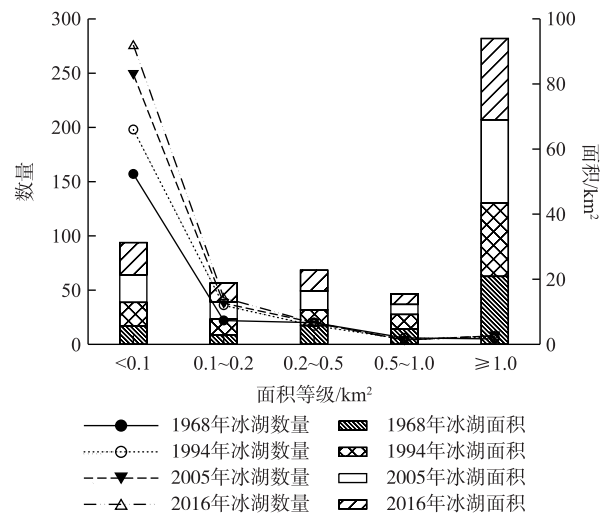


图 3 1968—2016 年帕隆藏布流域不同规模等级冰湖数量与面积

Fig.3 The number and area of glacial lakes in different sizes in the Parlung Zangbo River Basin during 1968–2016

域冰湖数量保持不变,海拔 3000~4500 m 之间的区域冰湖数量较稳定(16 个),而海拔高于 4500 m 的区域冰湖数量则急剧增加. 海拔 4500~5000 m 之间冰湖面积增幅最大(3.34 km²),其次是位于海拔 4000~4500 m 之间和海拔>5000 m 的冰湖,海拔 3500~4000 m 之间的冰湖面积增幅最小(0.03 km²);从面积变化百分比来看,海拔<3000 m 区域的冰湖面积变化最快(100%),海拔>5000 m 的变化最慢(8.72%). 2016 年冰湖分布的最低海拔比 1968 年高 168 m,表明随着冰川的退缩,冰湖的形成和分布逐渐趋向高海拔地区. 综上所述,冰湖数量和面积在海拔较低地区相对稳定,而在海拔较高地区增加迅速,这与该区域冰川的集中分布和强烈退缩有关.

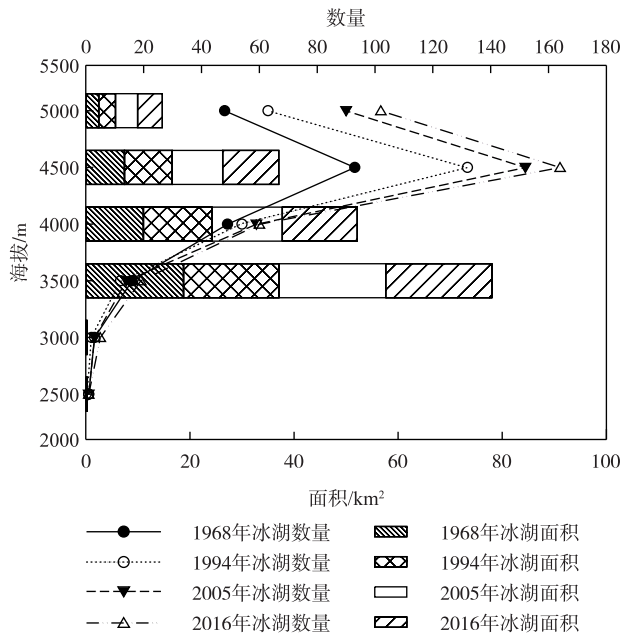


图 4 1968—2016 年帕隆藏布流域各海拔冰湖面积分布

Fig.4 Altitudinal characteristics of glacial lakes in the Parlung Zangbo River Basin during 1968–2016

3.3 冰湖危险性评估

2016 年帕隆藏布流域面积>0.2 km²的冰湖有 32 个,根据表 1 的判别标准对面积>0.2 km²的冰湖进行潜在危险性评估,最终识别出 8 个具有潜在危险的冰湖.虽然光谢错的面积变化率和母冰川米堆冰川的变化率均小于判别标准,因其在 1988 年曾发生溃决,面积减小,然而近 30 年来该冰湖面积扩张迅速,有再次溃决的可能,因此将光谢错也识别为潜在危险性冰湖(表 3).除光谢错和 3 号冰湖位于八宿县境内外,其余 7 个冰湖均在波密县境内.各冰湖的母冰川退缩较快,平均变化率为(-25.90%),其中 6 号冰湖的母冰川面积退缩最快(-63.50%),7 号冰湖母冰川退缩最慢(-11.22%);3 号冰湖面积增幅最快,其次是 1 号冰湖,切毛措增幅最慢(51.09%);除光谢错外,其余冰湖面积平均增加 0.44 km²,扩张较快.冰湖母冰川冰舌段的坡度较大,冰川发生冰崩后冰体进入湖中的可能性越大,冰湖溃决的可能性相应增大,4 号冰湖母冰川冰舌段的坡度最大,光谢错最小;冰湖与母冰川的距离越小,冰体落入湖中激起的浪涌越大,冰湖溃决的可能性也越大,其中 2、5、6 号冰湖及光谢错与母冰川相接,溃决的可能性较大.受全球气候变暖的影响,帕隆藏布流域的冰川将呈退缩趋势,冰川面积将继续减小,而冰湖面积则会持续增加.因此,预计未来一段时间内帕隆藏布流域冰湖溃决可能处于活跃阶段,其形成和暴发也将更加频繁.

为评估帕隆藏布流域冰湖的危险性,利用 Google Earth 和 LocaSpace Viewer 三维数字地球对上述潜在危险性冰湖进行确认.1 号冰湖和切毛措位于同一沟谷,距离不足 1 km,沿途还分布几个冰湖,最终汇入林珠藏布,但离下游居民点较远(约 30 km).2 号冰湖的母冰川是关星冰川,距最近的居民点则普约 30 km,距离较远.3 号冰湖的母冰川为喜日隆普冰川,与错差湖相距不足 100 m,距学那错约 3 km,离下游最近的居民点拉那格约 11 km.4 号冰湖位于杂拉着散,其母冰川为杂按着散冰川,冰湖下游有大片森林,离最近的居民点丁中村约 25 km.6 号冰湖最终汇入拉廊容曲,离最近的居民点德棠村较远(约 29 km).7 号冰湖与下游的冰湖相距不到 1 km,离最近的居民点曲那玛约 25 km.8 号冰湖位于丹卡隆巴,沟谷两侧有大片森林,丹卡村和易贡茶厂在冰湖的下游(约 10 km),此外帕隆藏布和叶班线也在其下游;沟谷的纵比降较大(137‰),有利于冰湖溃决洪水(或泥石流)形成.光谢错位于米堆隆巴,离居民点古勒、俄次及米堆村较近,居民点附近有大片的农田和森林,川藏公路在其下游;其母冰川米堆冰川是藏东南的著名景观之一,有较为完善的基础设施,同时米堆河是雅鲁藏布江的二级支流,位于米堆冰川的下游,最终汇入帕隆藏布;米堆隆巴沟谷内广泛分布大量松散颗粒物,有利于冰湖溃决洪水演化为冰湖溃决泥石流.因此,光谢错和 8 号冰湖如果发生溃决,造成的危害和规模较其他潜在危险性冰湖可能更大更广.

表 3 帕隆藏布流域潜在危险性冰湖信息

Tab.3 Potentially dangerous glacial lakes in the Parlung Zangbo River Basin

冰湖	地理位置		冰湖面积/km ²		面积变化/km ²	冰舌坡度/°	母冰川面积/km ²		面积变化/km ²	冰湖与母冰川距离/m	
	经度/°	纬度/°	1968 年	2016 年			1968 年	2016 年		1968 年	2016 年
1	95.60	30.25	0.22	1.19	0.96	15	5.71	4.12	-1.59	123	253
2	95.18	30.60	0.27	1.03	0.76	12	35.48	29.67	-5.82	0	0
3	96.81	29.22	0.07	0.49	0.42	13	8.19	7.08	-1.11	489	246
4	95.87	29.99	无冰湖	0.43	0.43	21	9.55	5.80	-3.74	无冰湖	69
切毛措	95.61	30.27	0.26	0.39	0.13	16	6.40	4.86	-1.54	0	0
6	95.25	30.57	无冰湖	0.31	0.31	12	8.59	3.13	-5.45	无冰湖	0
7	95.65	30.38	无冰湖	0.24	0.24	16	1.16	1.03	-0.13	无冰湖	37
8	95.64	29.81	无冰湖	0.23	0.23	19	5.02	3.47	-1.55	无冰湖	254
光谢错	96.50	29.47	0.28	0.29	0.01	10	28.77	26.95	-1.82	111	0

3.4 讨论

3.4.1 冰湖对气候变化的响应 冰湖是气候变化的敏感指示器^[50],冰湖面积变化与气候变化关系密切,降水量增加、蒸发量减少及气候暖湿化都能造成冰湖面积增加.据吴绍洪等研究^[51],青藏高原近几十年来气温总体呈上升趋势,降水呈增加态势,最大可能蒸散呈降低趋势,大部分地区的干湿状况呈由干向湿发展趋势.

为探讨本研究区冰湖对气候变化的响应,选取距研究区最近的波密(29.52°N, 95.46°E, 海拔 2731 m, 观测始于 1961 年)、察隅(28.39°N, 97.28°E, 2327 m, 观测始于 1969 年)和林芝(29.07°N, 94.03°E, 2991.8 m, 观测始于 1954 年)3 个气象站的气温和降水数据. 由图 5 可知,近 60 年来波密、林芝和察隅 3 个气象站的年均温总体呈上升趋势,增温率分别为 0.25、0.18 和 0.29℃/10 a;波密、林芝气象站的年降水量呈上升趋势(42.75 和 14.87 mm/10 a),察隅气象站的年降水量则呈下降趋势,但幅度较小(-9.54 mm/10 a). 总体而言,波密的气候暖湿化较为明显,林芝和察隅的气候则较为温暖,温度的升高有利于帕隆藏布流域冰川的退缩和冰湖的扩张,增大了冰湖溃决风险.

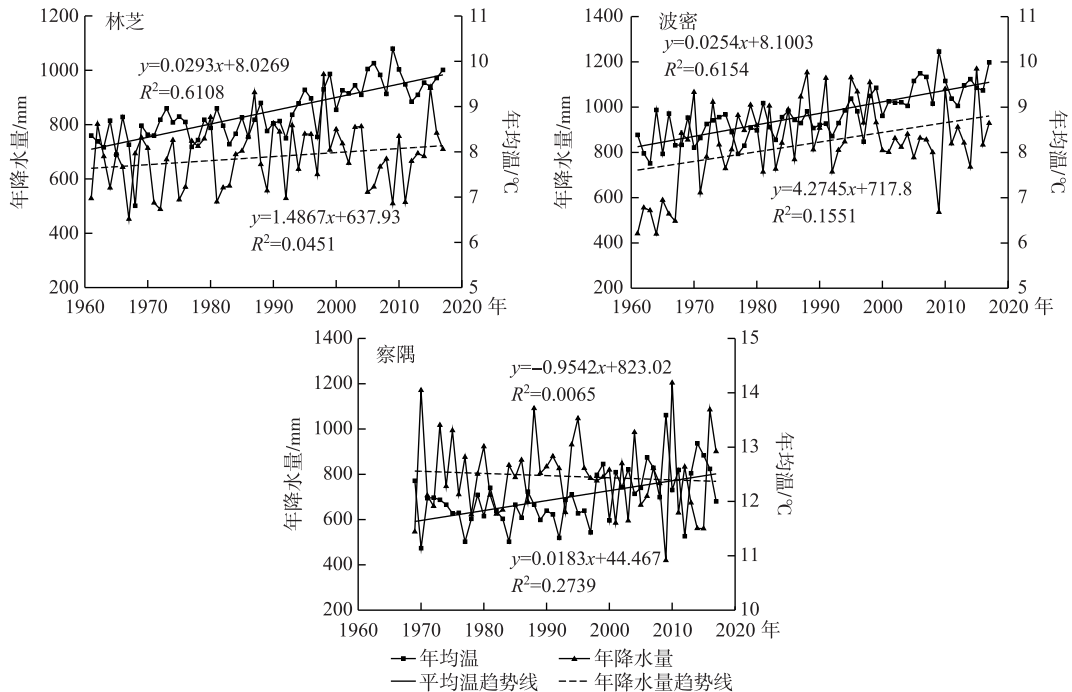


图 5 林芝、波密和察隅气象站年降水和年均温变化

Fig.5 Variations of annual precipitation and annual mean temperature in Nyingchi, Bomi and Zayü Stations

3.4.2 冰湖变化与冰川变化 冰川融水作为冰湖的重要补给水源,冰湖面积变化与母冰川进退密切相关^[14,52]. 帕隆藏布流域 1968 年有冰川 1192 条,面积 2080.60 km²,冰储量约 180.05 km³;2016 年该流域有冰川 1268 条,面积 1489.26 km²,冰储量约 130.55 km³. 近 50 年来帕隆藏布流域冰川面积减少 591.34 km²,占 1968 年冰川面积的 28.42%,年均退缩 12.32 km²;冰储量减少 49.50 km³,减少比例为 27.49%. 为探讨帕隆藏布流域冰湖变化与冰川变化的关系,选择典型冰湖探讨二者间关系. 雅弄冰川是帕隆藏布流域面积最大的冰川,近 60 年来面积快速减少(-13.37 km²),冰川末端的冰碛湖(图 6a1 和 a2)随着冰川退缩,冰湖面积呈扩张趋势,由 2 个冰湖最终扩张为 1 个冰湖,面积从 0.40 km²增加到 2.75 km²,面积扩大了近 7 倍. 容错(图 6b1 和 b2)随着母冰川末端的退缩,冰湖面积逐渐萎缩,到 2016 年时面积<0.01 km²,不再识别为冰湖. 冰川末端的不断退缩,为冰湖的形成提供了合适的发育空间和必要的物质来源,促使了冰湖的形成(图 6c1 和 c2).

综上所述,近 50 年来帕隆藏布流域冰川面积和冰储量呈减少趋势,冰川退缩与该流域物质负平衡的出现^[53],为冰湖形成与扩张提供了必要的物质来源,因此冰雪融水量增加是该流域冰湖扩张的根本原因. 同时,随着冰川退缩,部分冰湖的水源补给逐渐减少,面积不断萎缩直至消失. 此外,合适的地形为帕隆藏布流域冰湖的形成与扩张提供了必要的发育空间,这也是导致该流域冰湖面积扩张的主要原因. 然而,冰湖面积变化是水量注入与支出共同作用的结果,冰川融水并不是冰湖的唯一补给源.

3.4.3 冰湖溃决洪水(或泥石流)危害与防治对策 冰湖溃决后在流动和堆积的过程中会引发一系列次生灾害并形成灾害链,其造成的损失较一般灾害要严重的多。首先,冰湖溃决后在流动过程中不仅会冲毁或掩埋民房、耕地、桥梁和道路,且常伴随滑坡等次生灾害;其次可能堵塞主河道,引起主河回水淹没或形成临时性水库和堰塞湖,一旦溃决可能会对下游地区造成更大范围或更大规模的二次灾害。在全球变暖背景下,帕隆藏布流域的冰湖在短期内将会继续扩张,冰湖溃决的风险也会相应增加。

为了减轻冰湖溃决洪水(或泥石流)造成的危害,针对具体的潜在危险性冰湖应采用差异化防治措施。如光谢错可采用工程措施加固危险坝体,防止发生管涌和渗漏;或人工开挖或修建溢洪通道,降低冰湖水位来减少库容,防止冰湖发生漫顶溢流。8号冰湖可利用高分辨率遥感影像对其进行定期监测,尤其是在高温多雨的夏季。其他各冰湖应建立冰湖溃决灾害预警预报体系,一旦发生冰湖溃决洪水(或泥石流)灾害,可提前预警,避免和减轻灾害。

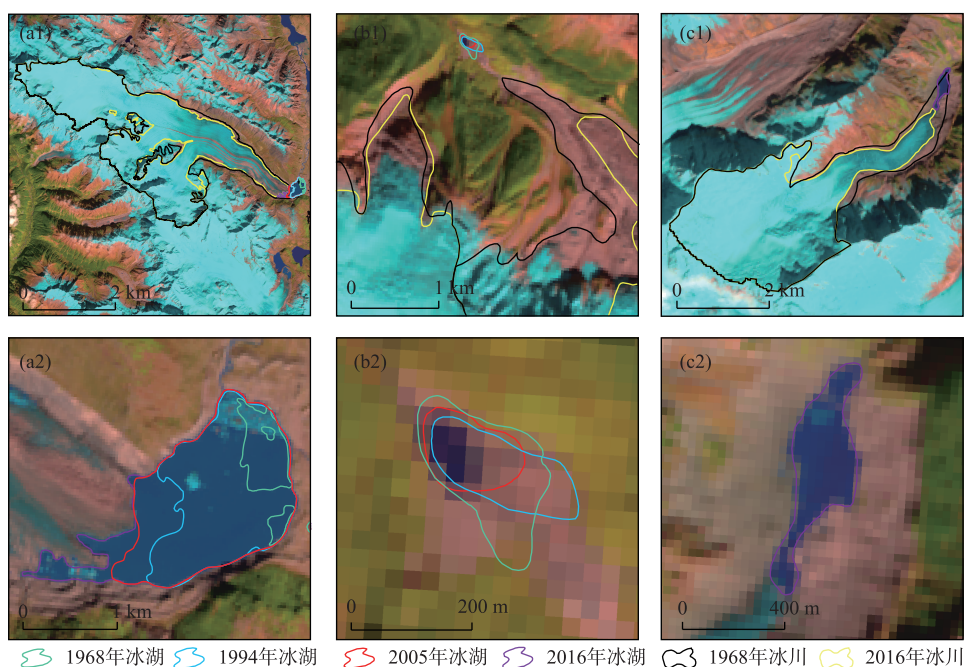


图6 帕隆藏布流域典型冰湖变化

Fig.6 Changes of typical glacial lakes in the Parlung Zangbo River Basin

4 结论

1) 2016年帕隆藏布流域有冰湖351个,面积50.48 km²。其中,冰湖数量以面积<0.1 km²的冰湖为主,面积以>1 km²的冰湖为主,这些冰湖主要分布于海拔2800~5400 m之间。1968年该流域有冰湖210个,面积39.83 km²。近50年来帕隆藏布流域冰湖总体呈数量增多、面积增加态势,表明该流域冰湖正经历着“扩张”过程。其中,海拔<3000 m的地区冰湖数量和面积相对稳定,海拔>4500 m的地区增加则相对迅速。

2) 对帕隆藏布流域面积>0.2 km²冰碛湖进行评估,结果表明该流域有9个潜在危险性冰湖,其中光谢错和8号冰湖如果发生溃决,造成的危害和规模可能更大更广。预计未来一段时间内该流域冰湖溃决可能处于活跃阶段,其形成和暴发也将更加频繁。

3) 近50年来帕隆藏布流域冰川呈退缩趋势,面积减少591.34 km²,冰川融水增加和合适的地形为该流域冰湖的形成与扩张提供了物质来源和发育空间。近60年来波密气候暖湿化较为明显,林芝和察隅气候则较为温暖,温度升高有利于帕隆藏布流域冰川退缩和冰湖扩张,加大了冰湖溃决风险。

5 参考文献

- [1] Ma YZ, Yi CL, Wu JZ *et al.* Lake surface expansion of Nam Co during 1970–2009: Evidence of satellite remote sensing and cause analysis. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(1): 81-88. [马颖钊, 易朝路, 吴家章等. 1970—2009年纳木错湖泊面积扩张的遥感卫星观测证据及原因之商榷. 冰川冻土, 2012, **34**(1): 81-88.]
- [2] Yao X, Liu S, Han L *et al.* Definition and classification system of glacial lake for inventory and hazards study. *Journal of Geographical Sciences*, 2018, **28**(2): 193-205.
- [3] Liu SY, Zhang Y, Liu Q *et al.* eds. Impact and risk study of climate change on glaciers. Beijing: Science Press, 2017: 205. [刘时银, 张勇, 刘巧等. 气候变化对冰川影响与风险研究. 北京: 科学出版社, 2017: 205.]
- [4] Zhang YL, Shi JJ. Protection and utilization of lake resources in western areas. *Journal of Ecology and Economy*, 2001, (9): 14-22. [张运林, 施晶晶. 中国西部地区湖泊资源的保护与利用. 生态经济, 2001, (9): 14-22.]
- [5] Jiang JH, Huang Q. Distribution and variation of lakes in Tibetan Plateau and their comparison with lakes in other part of China. *Water Resources Protection*, 2004, **4**(6): 24-27. [姜加虎, 黄群. 青藏高原湖泊分布特征及与全国湖泊比较. 水资源保护, 2004, **4**(6): 24-27.]
- [6] Xu DM, Feng QH. Studies on catastrophes of glacial debris flow and glacial lake outburst flood in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988, **10**(3): 284-289. [徐道明, 冯清华. 冰川泥石流与冰湖溃决灾害研究. 冰川冻土, 1988, **10**(3): 284-289.]
- [7] Zheng D, Lin ZY, Zhang XQ. Progress in studies of Tibetan Plateau and global environment change. *Earth Science Frontiers*, 2002, **9**(1): 95-102. [郑度, 林振耀, 张雪芹. 青藏高原与全球环境变化研究进展. 地学前缘, 2002, **9**(1): 95-102.]
- [8] Liu SY, Ding YJ, Li J *et al.* Glaciers in response to recent climate warming in western China. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(5): 762-771. [刘时银, 丁永建, 李晶等. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应. 第四纪研究, 2006, **26**(5): 762-771.]
- [9] Yao T, Thompson L, Yang W *et al.* Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012, (2): 663-667.
- [10] Bolch T, Kulkarni A, Kääb A *et al.* The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*, 2012, **336**: 310-314.
- [11] Zhang GS, Kang SC, Fujita K *et al.* Energy and mass balance of Zhadang glacier surface, central Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology*, 2013, **59**(213): 137-148.
- [12] Thompson SS, Benn DI, Dennis K *et al.* A rapidly growing moraine-dammed glacial lake on Ngozumpa Glacier, Nepal. *Geomorphology*, 2012, **145/146**: 1-11.
- [13] Gardelle J, Arnaud Y, Berthier E. Contrasted evolution of glacial lakes along the Hindu Kush Himalaya mountain range between 1990 and 2009. *Global and Planetary Change*, 2011, **75**(1/2): 47-55.
- [14] Wang X, Liu SY, Guo WQ *et al.* Using remote sensing data to quantify changes in glacial lakes in the Chinese Himalaya. *Mountain Research and Development*, 2012, **32**(2): 203-212.
- [15] Shen YP, Wang GY, Ding YJ *et al.* Changes in Merzbacher Lake of Inylchek Glacier and Glacial Flash Floods in Aksu River Basin, Tianshan during the period of 1903–2009. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(6): 993-1002. [沈永平, 王国亚, 丁永建等. 百年来天山阿克苏河流域麦茨巴赫冰湖演化与冰川洪水灾害. 冰川冻土, 2009, **31**(6): 993-1002.]
- [16] Benn DI, Benn T, Hands K *et al.* Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards. *Earth-Science Reviews*, 2012, **114**: 156-174.
- [17] Nie Y, Sheng Y, Liu Q *et al.* A regional-scale assessment of Himalayan glacial lake changes using satellite observations from 1990 to 2015. *Remote Sensing of Environment*, 2017, **189**: 1-13.
- [18] Wang X, Liu SH, Yao XJ *et al.* Glacier lake investigation and inventory in the Chinese Himalayas based on the remote sensing data. *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.]
- [19] Nie Y, Liu Q, Wang J *et al.* An inventory of historical glacial lake outburst floods in the Himalayas based on remote sensing observations and geomorphological analysis. *Geomorphology*, 2018, **308**: 91-106.

- [20] Chen ZL, Hong Y, Li XY. The warning technology of debris flow caused by glacier-lake outburst in Tibetan Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2011, **29**(3): 369-377. [程尊兰, 洪勇, 黎晓宇. 青藏高原典型冰湖溃决泥石流预警技术. 山地学报, 2011, **29**(3): 369-377.]
- [21] Harrison S, Kargel JS, Huggel C *et al.* Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *Cryosphere*, 2018, **12**: 1195-1209.
- [22] Li ZG. Glaciers and lakes changes on the Tibetan Plateau under Climate change in the past 50 years. *Journal of Natural Resources*, 2012, **27**(8): 1431-1443. [李治国. 近 50a 气候变化背景下青藏高原冰川和湖泊变化. 自然资源学报, 2012, **27**(8): 1431-1443.]
- [23] Wang PQ, Li PM. Analysis of geological disasters in Southeast Tibet. *Advances in Sciences and Technology of Water Resources*, 2002, **22**(4): 21-22. [王培请, 黎普明. 藏东南地区地质灾害浅析. 水利水电科技进步, 2002, **22**(4): 21-22.]
- [24] Song C, Sheng Y, Ke L *et al.* Glacier lake evolution in the southeastern Tibetan Plateau and the cause of rapid expansion of proglacial lakes linked to glacial-hydrogeomorphic processes. *Journal of Hydrology*, 2016, **540**: 504-514.
- [25] Wang W, Yao T, Yang X. Variations of glacial lakes and glaciers in the Boshula mountain range, southeast Tibet, from the 1970s to 2009. *Annals of Glaciology*, 2017, **52**(58): 9-17.
- [26] Liu JF, Cheng ZL, Chen XQ. The hazard assessment of glacier-lake outburst in Palongzangbu River from Ranwu to Peilong. *Journal of Mountain Science*, 2012, **30**(3): 369-377. [柳金峰, 程尊兰, 陈晓清. 帕隆藏布流域然乌—培龙段冰湖溃决危险性评估. 山地学报, 2012, **30**(3): 369-377.]
- [27] Cheng ZL, Zhu PY, Dang C *et al.* Hazards of debris flow due to glacier lake outburst in Southeastern Tibet. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30**(6): 954-959. [程尊兰, 朱平一, 党超等. 藏东南冰湖溃决泥石流灾害及其发展趋势. 冰川冻土, 2008, **30**(6): 954-959.]
- [28] Liu JJ, Cheng ZL, Li Y. The 1988 glacial lake outburst flood in Guangxiec Lake, Tibet, China. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2014, **14**(11): 3065-3075.
- [29] Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences/Ministry of Water Resources ed. Mountain hazards and prevention measures of Sichuan-Tibet Highway South Line (in Tibet). Beijing: Science Press, 1995: 1-251. [中国科学院—水利部成都山地灾害与环境研究所. 川藏公路南线(西藏境内)山地灾害及防治对策. 北京: 科学出版社, 1995: 1-251.]
- [30] Cheng ZL, Shi L, Liu JK *et al.* Distribution and change of Glacier Lakes in the Upper Palongzang River. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, **32**(5): 8-12. [程尊兰, 时亮, 刘建康等. 帕隆藏布江上游冰湖分布及其变化. 水土保持通报, 2012, **32**(5): 8-12.]
- [31] Ding JX, Shang YJ, Yang ZF. Cause analysis and quantitative zonation of mudflow hazards along the Rawu-lunang section, Sichuan-Tibet Highway. *Journal of Geomechanics*, 2006, **12**(2): 203-210. [丁继新, 尚彦军, 杨志法. 川藏公路然乌—鲁朗段泥石流灾害成因分析及定量化分区. 地质力学学报, 2006, **12**(2): 203-210.]
- [32] Wang SM ed. Records of lakes in China. Beijing: Science Press, 1998. [王苏民. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [33] Huggel C, Kaab A, Haeberli W *et al.* Remote sensing based assessment of hazards from study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 2002, **39**: 316-330.
- [34] Lu JJ, Li SH. Improvement of the technique for distinguishing water bodies from TM data. *Journal of Remote Sensing*, 1992, **7**(1): 17-23. [陆家驹, 李士鸿. TM 资料水体识别技术的改进. 遥感学报, 1992, **7**(1): 17-23.]
- [35] Fan W, Xun SP, Wu WY. Waterbody identification under semitransparent cloud in MODIS image. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(1): 73-77. [范伟, 荀尚培, 吴文玉. 应用气象卫星 MODIS 识别薄云覆盖下的水体. 大气与环境光学学报, 2007, **2**(1): 73-77.]
- [36] Frazier SP, Page JK. Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, **66**(12): 1461-1467.
- [37] Paul F, Huggel C, Käab A. Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers. *Remote Sensing Environment*, 2004, **89**: 510-518.
- [38] Hall DK, Bayr KJ, Schöner W *et al.* Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from the ground and space (1893–2001). *Remote Sensing Environment*, 2003, **86**: 566-577.

- [39] Bolch T, Buchroithner M, Pieczonka T *et al.* Planimetric and volumetric glacier changes in the Khumbu Himal, Nepal, since 1962 using Corona, Landsat TM and ASTER data. *Journal of Glaciology*, 2008, **54**(187): 592-600.
- [40] Yao XJ, Liu SY, Guo WQ *et al.* Glacier change of Altay Mountain in China from 1960 to 2009: Based on the Second Glacier Inventory of China. *Journal of Natural Resources*, 2012, **27**(10): 1734-1745. [姚晓军, 刘时银, 郭万钦等. 近 50 a 来中国阿尔泰山冰川变化: 基于中国第二次冰川编目成果. 自然资源学报, 2012, **27**(10): 1734-1745.]
- [41] Nie Y, Zhang YL, Liu LS *et al.* Monitoring glacier change based on remote sensing in the Mt. Qomolangma National Nature Preserve, 1976-2006. *Acta Geographica Sinica*, 2010, **65**(1): 13-28. [聂勇, 张懿锂, 刘林山等. 近 30 年珠穆朗玛峰国家自然保护区冰川变化的遥感监测. 地理学报, 2010, **65**(1): 13-28.]
- [42] Williams RS, Hall DK, Sigurosson O. Comparison of satellite-derived with ground-based measurements of the fluctuations of the margins of Vatnajökull, Iceland, 1973-92. *Annals of Glaciology*, 1997, **24**: 72-80.
- [43] Shanguan DH. Glacier changes in Tarim Interior River Basin using 3S [Dissertation]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2007. [上官冬辉. 基于 3S 的塔里木河流域冰川应用研究[学位论文]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2007.]
- [44] Yan LL, Wang J. Study of extracting glacier information from remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(1): 110-118. [彦立利, 王建. 基于遥感的冰川信息提取方法研究进展. 冰川冻土, 2013, **35**(1): 110-118.]
- [45] Wang WC, Yao TD, Gao Y *et al.* A first-order method to identify potentially dangerous glacial lakes in a region of the Southeastern Tibetan Plateau. *Mountain Research and Development*, 2011, **31**(2): 122-130.
- [46] Mool PK, Bajracharya SR, Joshi SP. Inventory of glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods, Nepal. International Centre for Integrated Mountain Development, Kathmandu, Nepal, 2001.
- [47] Che T, Jin R, Li X *et al.* Glacial lakes variation and the potentially dangerous glacial lakes in the Pumqu Basin of Tibet during the last two decades. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, **26**(4): 397-402. [车涛, 晋锐, 李新等. 近 20a 年来西藏朋曲流域冰湖变化及潜在冰湖分析. 冰川冻土, 2004, **26**(4): 397-402.]
- [48] Wang X, Liu SY, Guo W Q *et al.* An approach for estimating the breach probabilities of moraine-dammed lakes in the Chinese Himalayas using remote-sensing data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2012, **12**(10): 3109-3122.
- [49] Rounce D, Watson CS, Mckinney D. Identification of hazard and risk for glacial lakes in the Nepal Himalaya using Satellite imagery from 2000-2015. *Remote Sensing*, 2017, **9**(7). DOI: 10.3390/rs9070654.
- [50] Yao TD, Zhu LP. The response of environmental changes and adaptation strategy. *Advances in Earth Science*, 2006, **21**(5): 459-464. [姚檀栋, 朱立平. 青藏高原环境变化对全球变化的响应及其适应对策. 地球科学进展, 2006, **21**(5): 459-464.]
- [51] Wu SH, Yin YH, Zheng D *et al.* Climate changes in the Tibetan Plateau during the last three decades. *Acta Geographica Sinica*, 2005, **60**(1): 3-11. [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势. 地理学报, 2005, **60**(1): 3-11.]
- [52] Yao TD, Li ZG, Yang W *et al.* Glacial distribution and mass balance in the Yarlung Zangbo River and its influence on lakes. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(20): 2072-2078.
- [53] Yang W, Yao TD, Xu BQ *et al.* Characteristics of recent temperat glacier fluctuations in the Parlang Zangbo River basin, southeast Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(20): 2097-2102.