

1973-2018年布喀达坂峰地区前进冰川遥感监测

高永鹏¹, 姚晓军¹, 刘时银^{2,3}, 祁苗苗¹, 段红玉¹, 刘娟¹, 张大弘¹

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000; 3. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500)

摘要: 冰川跃动是冰川动力不稳定性的表现, 影响着全球约1%的冰川。基于1973-2018年208景 Landsat MSS/TM/ETM+/OLI 遥感影像, 对布喀达坂峰地区不同时期前进冰川进行遥感识别。结果表明: (1) 1973-2018年布喀达坂峰地区共有7条冰川发生过前进, 其中冰川末端快速退缩型冰川有3条, 冰川末端波动前进型和冰川末端稳定型冰川各有2条。莫诺马哈冰川和5Y542H0020冰川可能为跃动冰川, 且前者正处于跃动阶。(2) 近45年间布喀达坂峰地区7条冰川共出现过25次前进现象, 各条冰川发生前进次数均多于(含)2次; 前进冰川发生时间主要集中于2000s(7次)和1970s(6次)。该地区冰川在各月份均发生过前进现象, 推断该地区前进冰川属斯瓦尔巴型。布喀达坂峰地区冰川前进无明显规律, 大多数冰川两次前进时间间隔为10年左右。(3) 布喀达坂峰地区冰川前进可能受热控和水控机理共同作用, 单一的气候变化尚难以解释其变化机理。

关键词: 前进冰川; 冰川跃动; 遥感监测; 布喀达坂峰

冰冻圈作为气候系统五大圈层之一, 由地球陆地和海洋表面及以下的积雪、冰和冻土组成^[1]。在全球气候变暖背景下, 冰冻圈变化及其影响引起了空前的广泛关注^[2]。山岳冰川作为冰冻圈的重要组成部分, 既是重要的淡水资源, 也是反映气候变化的记录器和预警器^[3]。随着卫星遥感技术的飞速发展, 基于遥感数据监测冰川变化得到全面发展。一些学者利用 Landsat、ASTER、CBERS 等遥感影像对中国西部主要山系不同时期冰川变化开展了研究, 如阿尔泰山^[4]、天山^[5]、塔里木河流域^[6]、祁连山^[7]、青藏高原腹地^[8]、念青唐古拉山^[9]、喜马拉雅山^[10]等区域; 同时, 基于地形图、数字高程模型 (DEM) 及差分雷达干涉测量 (InSAR) 的冰川表面高程变化研究也逐渐增多, 并主要集中于西昆仑山、青藏高原班公湖、祁连山团结峰、天山托木尔峰、念青唐古拉主峰等地区^[11-14]。研究表明中国西部冰川退缩幅度从青藏高原边缘向内陆地区逐步减小^[15]。

在全球气候变暖背景下, 特别是20世纪80年代以来, 中国西部冰川普遍处于物质亏损状态, 并呈退缩减薄趋势^[16]。然而, 受区域气候差异和地形等因素的影响, 一些区域的冰川变化呈现不同的变化态势。如Hewitt^[17]提出“喀喇昆仑异常”, 发现喀喇昆仑山部分区域存在冰川停滞和前进现象; Gardelle等^[18]认为2000-2008年喀喇昆仑山冰川处于正物质平衡状态, 其物质平衡变化为 $(0.05 \pm 0.16) \sim (0.11 \pm 0.22) \text{ m/a}$, 对海平面上升贡献

收稿日期: 2019-01-06; 修订日期: 2019-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41561016, 41861013, 41801052); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目 (NWNNU-LKQN-14-4)

作者简介: 高永鹏 (1990-), 男, 甘肃泾川人, 硕士, 研究方向为3S技术应用与冰川变化。

E-mail: gaoyongpeng_geogis@163.com

通讯作者: 姚晓军 (1980-), 男, 山西夏县人, 博士, 教授, 研究方向为地理信息技术与冰冻圈变化。

E-mail: xj_yao@nwnu.edu.cn

为 -0.01 mm/a ; Neckel等^[19]发现2003-2008年青藏高原腹地冰川物质平衡为正平衡,其变化为 $0.02\pm 0.3\text{ m w.e. a}^{-1}$; Brun等^[20]指出2000-2016年昆仑山冰川物质平衡变化为 $0.14\pm 0.08\text{ m w.e. a}^{-1}$ 。这些“异常”冰川,尤其是跃动冰川的发生机理及造成的直接或间接危害受到学者和地方政府的关注。

世界主要冰川作用区均有冰川跃动现象的报道,且大多数集中于格陵兰岛、冰岛、斯瓦尔巴特群岛、阿拉斯加一育空、加拿大北极和新地岛^[21-23]。中国西部地区的冰川跃动现象主要集中分布于帕米尔高原、喀喇昆仑山和西昆仑山等地区^[24-27],如在克勒青河流域、各拉丹冬峰、岗日嘎布山、努布拉流域等区域均发现冰川末端前进现象^[28-33]。布喀达坂峰位于昆仑山中部,近期发现该地区部分冰川末端出现前进现象,但目前对其监测并不全面,尚没有确定具体的前进时间,且缺乏连续监测^[34-35]。本文基于Landsat MSS/TM/ETM+/OLI遥感影像,对布喀达坂峰地区不同时期的冰川表面和末端变化特征进行遥感监测,以识别该地区前进冰川和潜在的跃动冰川,从而为该地区冰川跃动机理研究提供数据支撑。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

布喀达坂峰(又名新青峰或莫诺马哈峰, $35^{\circ}57'\sim 36^{\circ}09'N$, $90^{\circ}46'\sim 91^{\circ}08'E$, 6860 m)位于昆仑山中段,东西介于博卡雷克塔格山和阿尔格山,南北介于洪水河源和贝提力克达里亚河源谷地而与马兰山和西沙松乌拉山主峰相望,隶属于青海省海西州格尔木市,其山脊偏南侧,并呈东西向分布,东西长约36 km,南北宽约26 km(图1)。布喀达坂峰地层属昆南断裂以北东昆仑南坡断层区,地形起伏变化大,总体形态为典型的马鞍形山地。峰区共发育冰川51条,面积 402.16 km^2 ,冰储量约 50.34 km^3 ,分别占昆仑山冰川相应总量的0.57%、3.49%和4.55%^[16]。布喀达坂峰地区雪线平均海拔为5440 m,冰川以山谷冰川为主,并发育有冰斗冰川、坡面冰川等其他类型。布喀达坂峰南坡陡峭,沿主峰一线高差达1200~1970 m,故冰川在山地南麓多发育为出溢式的宽尾形态;北坡5600 m以下相对平缓,冰舌形态主要表现为叶瓣状或裙群状形态。因深居内陆,布喀达坂峰地

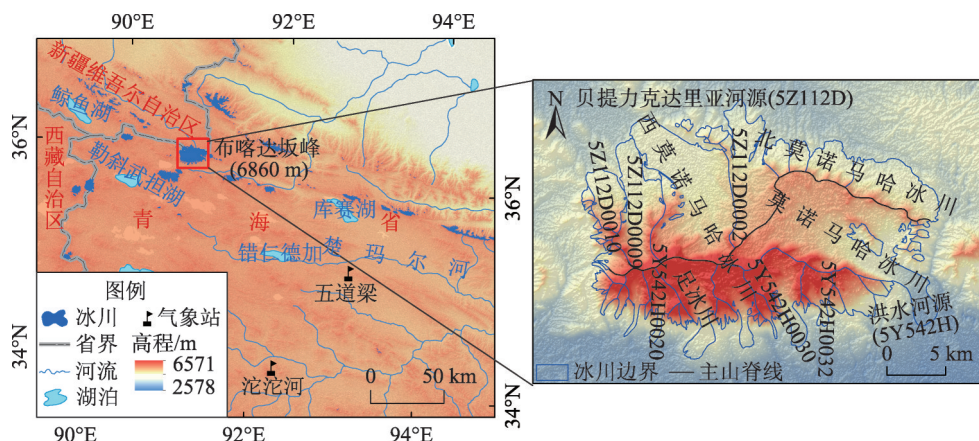


图1 布喀达坂峰地区冰川分布

Fig. 1 The distribution of glaciers in the Bukatage Mountains

区属大陆性暖温带高原气候,气温年均值介于-5.6~4.4℃,北部内流区和南部外流区年均降水量分别介于25.2~306.6 mm和303.9~764.4 mm之间。

1.2 数据来源

布喀达坂峰地区冰川数据由科技部科技基础性工作专项“中国冰川资源及其变化调查”项目组提供,其数据源为2006年9月14日Landsat TM遥感影像。为识别该区域前进冰川和探讨其末端变化特征,从美国地质调查局网站(<http://glovis.usgs.gov>)共获取1973-2018年208景质量较好的Landsat MSS/TM/ETM+/OLI遥感影像(表1、图2),该产品经过系统辐射校正和地面控制点几何校正,并利用DEM数据进行了地形校正。由于2003年5月31日Landsat-7机载扫描行校正器(Scan Line Corrector, SLC)发生永久故障,导致此后获取的Landsat ETM+影像约22%的数据缺失,本文利用加权线性回归法对Landsat ETM+影像进行了条带修复^[6]。

本文所用的数字高程模型(DEM)数据为ASTER GDEM V2产品,从中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)下载获得。该数据由日本METI和美国NASA联合研制,并于2015年1月6日以1°×1°的图幅大小免费向公众分发,空间分辨率为1弧秒(30 m)。此外,选用距布喀达坂峰最近的国家基准气候站—五道梁(35.21°N, 93.08°E, 4612 m)和沱沱河(34.21°N, 92.43°E, 4533 m)气象站的气温和降水月值数据集作为布喀达坂峰气候背景参考,该数据由国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn>)提供。

1.3 研究方法

基于光学遥感影像的冰川边界提取方法主要有目视解译、监督分类、非监督分类、比值阈值法和雪盖指数法等^[30]。目视解译要求有丰富的专业经验和充足的野外实地调查资料,提取的冰川边界准确性较高。波段比值阈值法则是利用冰川在可见光波段的强发射率和在红外波段的强吸收特性来提取冰川。研究表明,结合波段比值阈值法和目视解译提取的冰川边界具有更高的精度^[37]。本文采用波段比值法并通过人工交互式方法确定阈值得到裸冰边界的二值图像,转化为矢量多边形,然后参考地形图、Google Earth等其他数据资料,对冰川矢量边界进行人工修订和数据质量检验,以保证冰川边界的正确性。利用数字高程模型数据提取山脊线,获得冰川区山脊线数据,对修订后的冰川边界进行分割,从而得到布喀达坂峰地区1973-2018年冰川边界矢量数据。

表1 本研究所选用的Landsat遥感影像

传感器类型	轨道号及影像数量/景			空间分辨率/m
	141035	145035	139035	
MSS	—	—	11	60
TM	22	14	51	30
ETM+	1	10	53	30
OLI	4	4	38	30

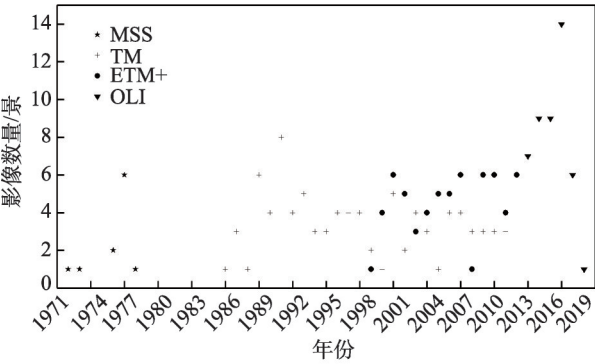


图2 布喀达坂峰地区Landsat遥感影像时间序列
Fig. 2 Time series of Landsat remote sensing images in the Bukatage Mountains

参考 Rankl 等^[38]提出的前进冰川定义,若冰川末端较前一时间距离变化大于 60 m,则视为冰川发生前进。冰川末端变化根据冰川中流线长度变化计算得到,其中冰川中流线提取采用姚晓军等^[39]提出的冰川中流线自动提取方法。

1.4 数据精度验证

冰川矢量边界的精度是描述冰川数据质量的一个重要指标,依据不同方法,尤其是有人为干预提取的冰川矢量边界会有诸多因素对其解译精度产生影响^[40],其误差来源一般可分为技术误差、解译误差和方法误差。本文所用 Landsat 遥感影像校正精度高,因此对于布喀达坂峰地区冰川矢量边界精度的评估只考虑冰川自动提取和人工修订两种方法所造成的误差。一般数据精度评估方法包括野外 GPS 测量验证和高分辨率遥感影像验证,但由于前者耗时耗力,后者成为遥感解译数据精度验证的主要方法^[41]。为验证基于 Landsat 系列卫星遥感影像提取的冰川矢量数据,本文选取了 4 景从欧空局哥白尼开放访问中心 (<http://scihub.copernicus.eu>) 获取的 Sentinel-2A 遥感影像(空间分辨率为 10 m),并对部分冰川进行了解译,其总面积为 223.96 km²,与同时段 Landsat OLI 影像上的相同冰川解译结果(223.91 km²)相比,两者仅相差 0.05 km²,表明利用上小节方法采集的冰川矢量数据具有较高的精度。

2 结果分析

2.1 布喀达坂峰地区前进冰川分布

基于 Landsat 系列卫星遥感影像及冰川编目数据,对比布喀达坂峰地区 1973-2018 年冰川末端变化情况,发现有 7 条冰川曾发生前进现象(图 3)。布喀达坂峰地区 7 条前进

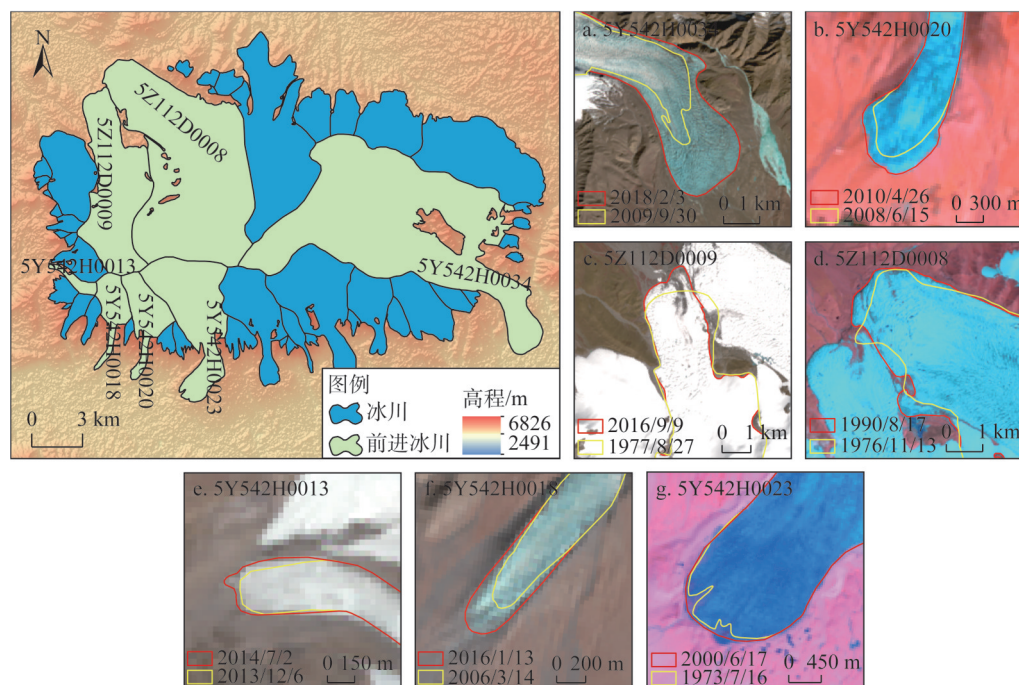


图3 布喀达坂峰地区前进冰川分布

Fig. 3 The distribution of advancing glaciers in the Bukatage Mountains

冰川分别隶属于东亚内流区的洪水河流域（5Y542）和青藏高原内流区的贝提力克达里亚河流域（5Z112）。由表2可知，7条前进冰川规模相差较大，面积最大的冰川为莫诺马哈冰川（89.55 km²），面积最小的冰川仅1.58 km²（CGI编码为5Y542H0013）；这些冰川总面积为225.06 km²，占该峰区冰川总面积的32.71%。从冰川最大前进距离来看，莫诺马哈冰川和西莫诺马哈冰川最大前进距离均超过1 km；其次是CGI编码分别为5Y542H0018、5Z112D0009的冰川和足冰川，这3条冰川最大前进距离均大于0.2 km；其他2条冰川（CGI编码为5Y542H0013和5Y542H0020）最大前进距离均小于0.1 km。

表2 布喀达坂峰地区前进冰川基本参数
Table 2 The basic parameters of advancing glaciers in the Bukatage Mountains

CGI编码	GLIMS编码	名称	面积/km ²	朝向	平均坡度/°	冰裂隙	最大前进距离/m
5Y542H0013	G090819E36011N		1.58	NW	24.76		95
5Y542H0018	G090846E36001N		5.77	S	24.59	发育	658
5Y542H0020	G090868E35998N		8.28	S	24.57	发育	898
5Y542H0023	G090901E36002N	足冰川	22.75	SE	21.29	发育	281
5Y542H0034	G091032E36060N	莫诺马哈冰川	89.55	S	15.12	发育	1027
5Z112D0009	G090837E36060N		28.48	N	17.39	发育	344
5Z112D0008	G090884E36076N	西莫诺马哈冰川	68.65	NW	13.84	发育	1053

2.2 布喀达坂峰地区前进冰川变化特征

图4为1973-2018年布喀达坂峰地区7条前进冰川面积与长度变化情况。为探究该地区前进冰川末端变化状态，本文根据冰川长度变化总体特征，将布喀达坂峰地区前进冰川分为以下三种类型：

（1）冰川末端波动前进型。以莫诺马哈冰川为代表（图4a），该冰川末端自1973年以来一直处于波动退缩状态，至2009年9月30日发生前进之后，冰川末端不断下移，至2018年2月3日冰川长度和面积分别增加1.488 km和5.48 km²。由于莫诺马哈冰川消融区冰裂隙十分发育，推测其可能为跃动冰川，且处于跃动阶。在布喀达坂峰地区，编码为5Y542H0020的冰川也具有类似特征（图4b），其在2014年7月2日发生前进后，冰川长度呈现波动增加态势，至2018年2月3日冰川末端共前进0.061 km。

（2）冰川末端稳定型。以西莫诺马哈冰川和编码为5Z112D0009冰川为代表（图4c、图4d），二者长度变化趋势基本一致，冰川末端总体上呈波动稳定状态，其中前者1990年之后末端基本处于稳定状态；后者1987年末端突然前进1.053 km后处于稳定状态，2003年再次发生前进，之后随着冰川消融再次恢复至前进前水平，在较长时间尺度上亦为冰川末端稳定型。

（3）冰川末端快速退缩型。以足冰川和编码为5Y542H0013、5Y542H0018为代表（图4e~图4g），此类冰川具有在冰川前进后末端快速退缩特征。如足冰川在1973-2018年期间曾发生多次前进，但前进后冰川末端多在次年恢复至之前水平，且呈现快速退缩特征。编码为5Y542H0013冰川末端在1973-2003年退缩0.216 km，2004-2009年处于稳定状态，2009年之后处于波动前进状态，但冰川长度亦小于1990s时长度，总体上处于退缩状态。编码为5Y542H0018冰川与足冰川具有类似特征，在1987年和2005年两次前进后冰川长度和面积都快速减少。

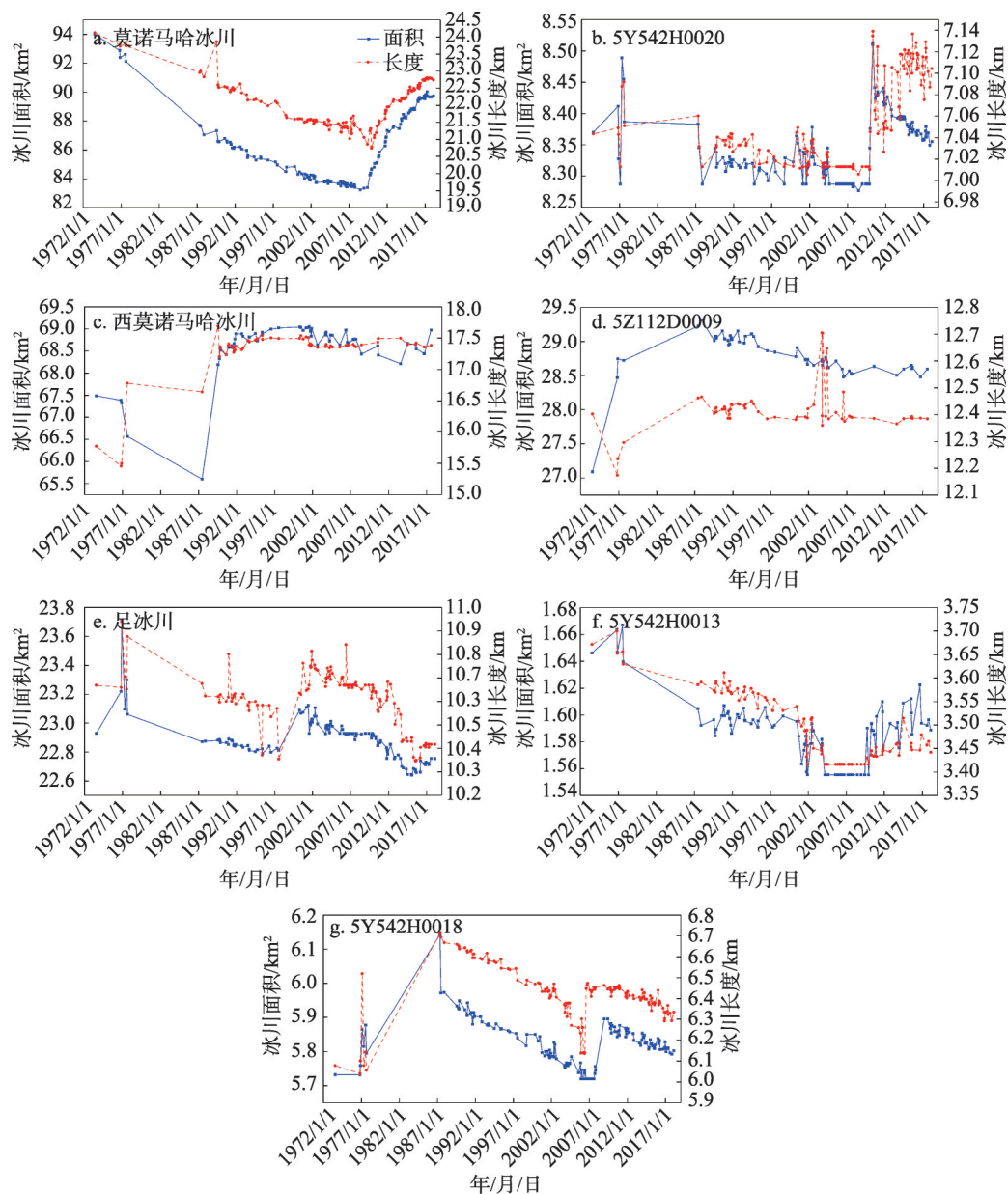


图4 1973-2018年布喀达坂峰前进冰川面积与长度变化

Fig. 4 The area and length change of advancing glaciers in the Bukatage Mountains from 1973 to 2018

为进一步明晰布喀达坂峰地区前进冰川特征及末端变化状况,选取该区域4条与前进冰川相邻或相近的冰川做对比分析。研究发现,非前进冰川面积变化呈现微弱退缩或相对稳定的趋势(图5),退缩速率均小于 $0.05 \text{ km}^2/\text{a}$;且冰川表面相对光滑,冰裂隙发育较少(图6),蓄水功能较弱。从冰川形态来看,布喀达坂峰北坡非前进冰川冰舌部分较宽,坡度平缓,多为叶瓣状;南坡冰川表面平均坡度虽大于北坡,但远低于前进冰川。因此,推测布喀达坂峰地区各冰川由于其内部结构、冰面状况及冰舌形态等因素的差异而表现出不同的进退状态。

2.3 布喀达坂峰地区冰川前进时间特征及与气候变化关系

1973-2018年布喀达坂峰地区7条前进冰川共出现过25次前进现象(表3)。这7条冰川发生前进次数均多于(含)2次,其中莫诺马哈冰川发生前进次数最多(6次),足冰川与编码为5Y542H0018冰川次之(5次)。从年代来看,布喀达坂峰地区前进冰川发生时间主要集中于2000s(7次)和1970s(6次),其次是2010s和1980s(4次);1990s年代最少,仅出现3次冰川前进现象。从月份来看,布喀达坂峰地区冰川在各月份均发生过前进现象,

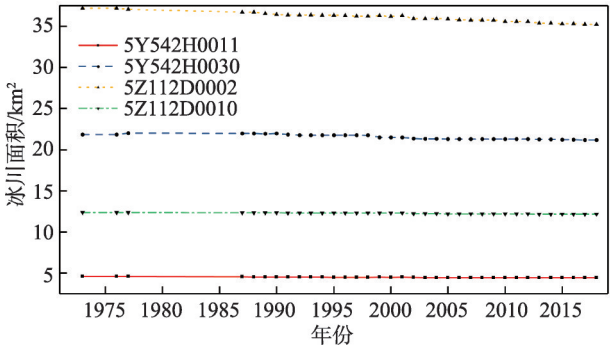
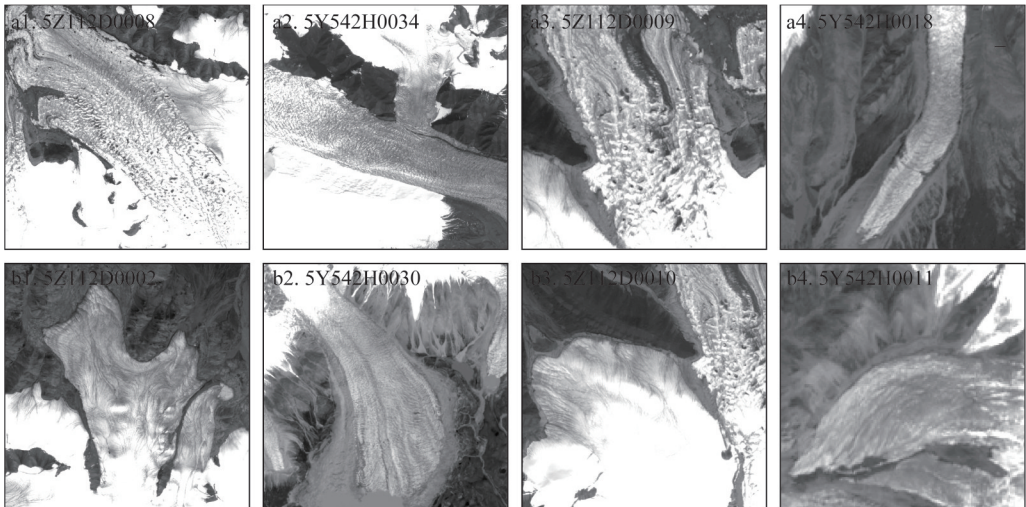


图5 1973-2018年布喀达坂峰非前进冰川面积变化
Fig. 5 The area change of non-advancing glaciers in the Bukatage Mountains from 1973 to 2018



注: a. 前进冰川; b. 非前进冰川。
图6 布喀达坂峰前进冰川与非前进冰川冰面状况

Fig. 6 The surface status of advancing glaciers and non-advancing glaciers in the Bukatage Mountains

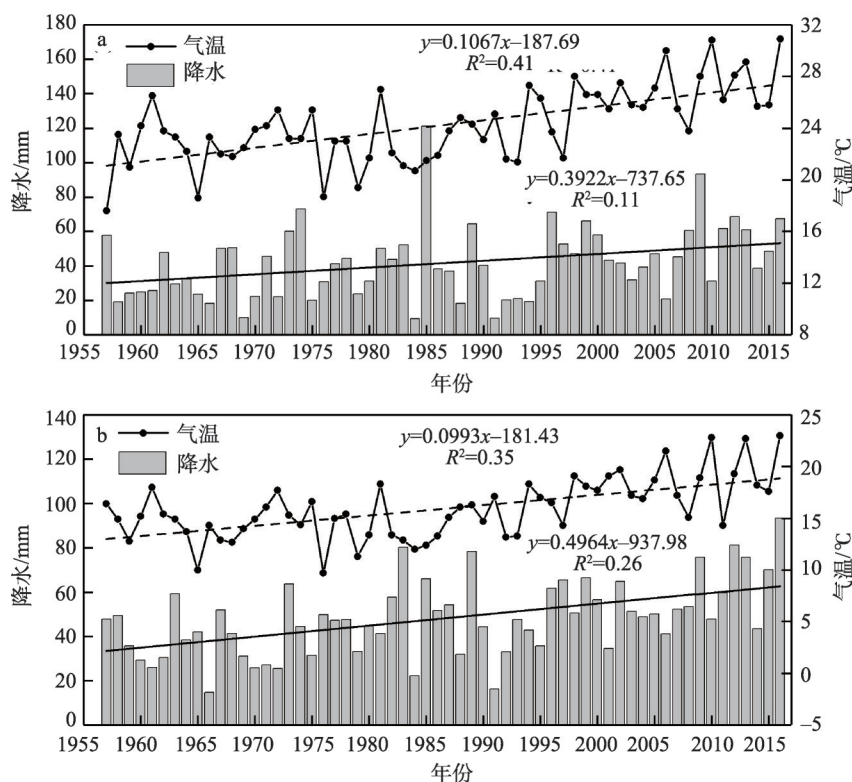
表3 布喀达坂峰地区冰川前进发生日期

Table 3 The dates of glacier advance in the Bukatage Mountains

CGI编码	GLIMS编码	名称	前进日期
5Y542H0013	G090819E36011N		2002/5/14, 2014/7/2
5Y542H0018	G090846E36001N		1976/11/13, 1977/7/22, 1987/5/5, 2005/12/24, 2016/1/13
5Y542H0020	G090868E35998N		1977/4/28, 2010/4/26
5Y542H0023	G090901E36002N	足冰川	1976/11/13, 1990/12/23, 2000/4/14, 2001/11/19, 2013/4/5
5Y542H0034	G091032E36060N	莫诺马哈冰川	1977/7/22, 1989/7/29, 1992/9/7, 2006/3/14, 2007/4/18, 2009/9/30
5Z112D0009	G090837E36060N		1976/11/13, 1987/6/22, 2003/9/22
5Z112D0008	G090884E36076N	西莫诺马哈冰川	1989/7/29, 1990/12/7

且主要集中于4月和7月(5次),其次是11月(4次)、12月和9月(3次)、5月(2次),1月、3月和6月各发生过1次,由此推断该地区前进冰川属斯瓦尔巴型。从时间间隔来看,布喀达坂峰地区冰川前进无明显规律,最短为1年,最长为33年,但大多数冰川两次前进时间间隔为10年左右。

气温和降水分别影响冰川的消融和积累,二者组合共同决定冰川的性质、发育和演化^[42]。为探讨布喀达坂峰地区冰川前进与气候变化间的关系,选择距该区最近的国家基准气候站——五道梁和沱沱河的降水与气温月值数据集,分析布喀达坂峰地区冰川消融期(6-9月)平均气温和非冰川消融期(10月至次年5月)降水年际变化。由图7可知,1957-2016年五道梁气象站和沱沱河气象站在冰川消融期气温速率分别为 $1.07^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $0.99^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$),而非消融期的降水速率分别为 $3.92\text{mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 和 $4.96\text{mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ($P<0.05$),表明布喀达坂峰地区在过去近60年间消融期气温和非消融期降水呈明显的上升与增加趋势。已有研究表明,中国西部冰川末端变化对气候变化的响应往往滞后10~20年^[43]。就布喀达坂峰地区前进冰川而言,冰川末端的前进与气候变化异常具有一定的相关性,如足冰川和编码为5Z112D0009、5Y542H0018的冰川均在1976年发生前进,结合图7可知,1976年冰川消融期平均气温显著下降,加之1973-1974年非消融期降水异常增多,冰川物质积累增加,可能打破冰川物质平衡平均状态,从而导致冰川



注: a. 沱沱河; b. 五道梁。

图7 1957-2016年沱沱河和五道梁气象站消融期气温(6-9月)和非消融期降水(10月至次年5月)变化

Fig. 7 Annual variations of average temperature in the ablation period (June-September) and precipitation in the non-ablation period (October-May in the following year) at Tuotuohe and Wudaoliang meteorological stations

末端前进。然而,降水增加和气温降低组合难以解释布喀达坂峰地区所有年份冰川前进现象,尤其是2000s以后,这一时期非消融期降水明显增多,但消融期气温亦呈快速上升趋势,在升温背景下冰川消融加剧,冰川融水有可能通过冰内水系进入冰床,导致冰川底部摩擦力减小,从而导致冰川前进。因此,布喀达坂峰地区冰川前进与气候变化具有一定的相关性,但仅用气候变化尚难以解释其前进机制。

3 结论与讨论

3.1 结论

(1) 1973-2018年布喀达坂峰地区共有7条冰川发生过前进现象,这7条前进冰川总面积为225.06 km²,占峰区冰川总面积的32.71%。其中,莫诺马哈冰川和西莫诺马哈冰川最大前进距离均超过1 km;其次是编码分别为5Y542H0018、5Z112D0009的冰川和足冰川;其他两条冰川最大前进距离均小于0.1 km。根据冰川长度变化总体特征,布喀达坂峰地区前进冰川可分为冰川末端波动前进型、冰川末端稳定型和冰川末端快速退缩型三种类型。

(2) 布喀达坂峰地区7条前进冰川近45年间共出现过25次前进现象,各条冰川发生前进次数均多于(含)2次,其中莫诺马哈冰川发生前进次数最多(6次);前进冰川发生时间主要集中于2000s(7次)和1970s(6次)。该地区冰川在各月份均发生过前进现象,且主要集中于4月和7月(5次),推断该地区跃动冰川属斯瓦尔巴型。从时间间隔来看,布喀达坂峰地区冰川前进无明显规律,最短为1年,最长为33年,但大多数冰川两次前进时间间隔为10年左右。

(3) 布喀达坂峰地区冰川前进可能受热控和水控机理共同作用,单一的气候变化尚难以解释其变化机理。在加强气象要素和冰川物质平衡观测基础上,今后还应对该区域前进冰川的冰面流速、冰内水系通道、冰面高程变化和裂隙发育程度等要素开展遥感监测和实地考察工作,从而明晰这一区域冰川前进的发生机理和诱发机制。

3.2 讨论

冰川跃动是冰川运动的一种特殊形式,具有末端快速前进、冰面突然隆升和破碎严重等特征。昆仑山是跃动型冰川发育较为集中的地区之一,如在西昆仑山^[23,44]、木孜塔格峰^[25]等地区均发现冰川跃动现象。布喀达坂峰地区位于昆仑山中部,因此,厘清昆仑山地区跃动冰川末端变化模式、跃动周期及其跃动机理,对于理解该区域冰川前进机理及识别中国西部地区跃动冰川发生规律具有重要意义。

3.2.1 昆仑山地区跃动冰川末端变化模式

冰川末端变化不仅与气候环境、冰川规模密切相关,而且与冰川形态、运动速度及底部性质等因素有关^[45-47]。为探究昆仑山地区跃动冰川末端变化模式,选取已有研究的西昆仑地区2条跃动冰川(编码分别为5Y641H0067和5Y641F0073)^[23]和木孜塔格西北坡鱼鳞川冰川(编码为5Y624E0035)^[25]作为研究对象,分别提取各冰川不同年份末端海拔高度^[48]、长度及流速分析跃动冰川末端变化状况。

由图8a可知,5Y641H0067冰川末端处于“前进—退缩—再前进”的反复状态,且每次前进持续时间不同;该冰川于1990年、1992年、1999年、2002年和2008年发生前进,冰川长度相应增加,至2007年冰川长度最短(14.142 km),末端海拔上升至5369 m,之后该冰川一直处于前进状态,冰川末端海拔也呈波动降低趋势(图9a),且2008年5月至

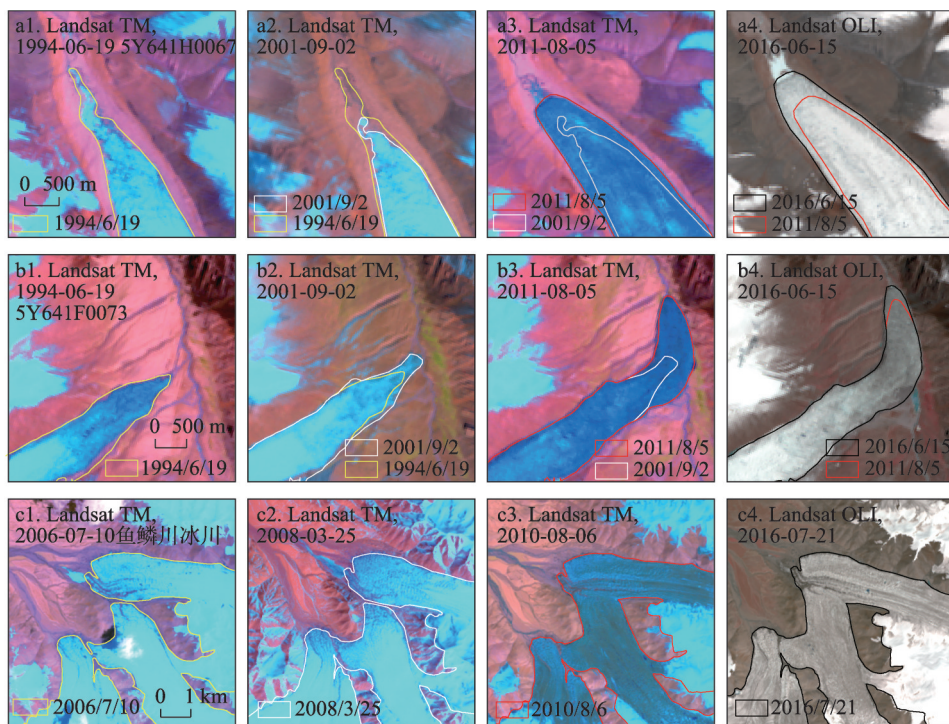


图8 昆仑山地区跃动冰川末端变化

Fig. 8 The change of terminus of surge-type glaciers in the Kunlun Mountains

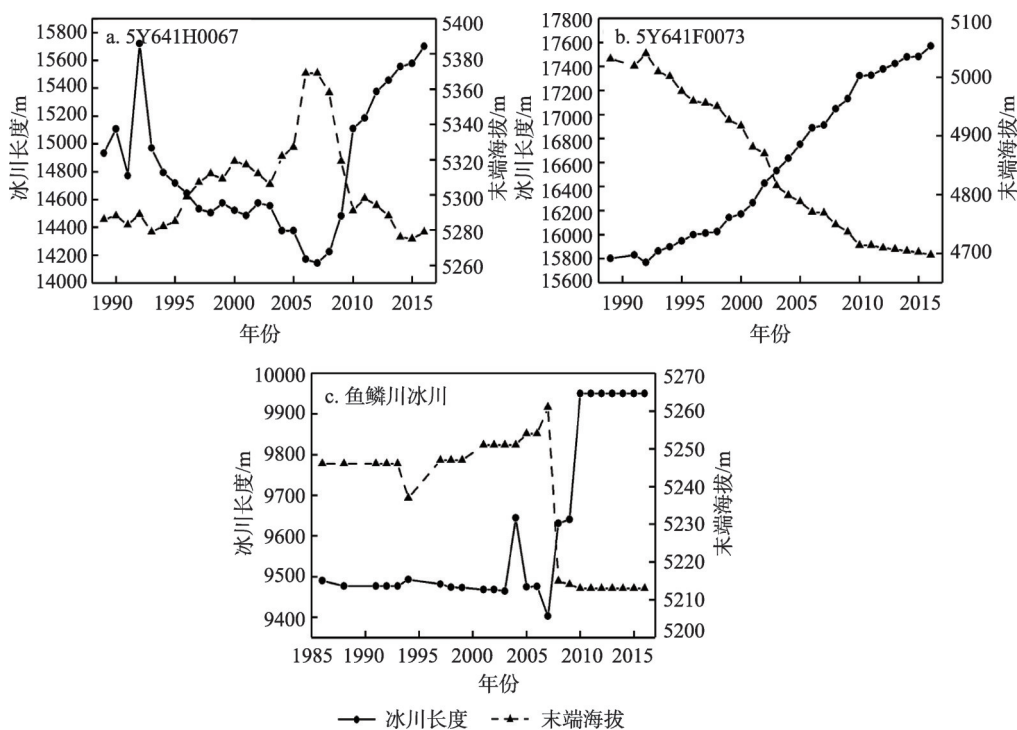


图9 昆仑山地区跃动冰川长度与末端海拔变化

Fig. 9 The change of length and terminal elevation of surge-type glaciers in the Kunlun Mountains

2009年8月之间冰川流速为227 m/a, 2009年8月至2010年11月增加至460 m/a, 之后冰川流速又缓慢降低至130 m/a。5Y641F0073冰川末端于2000年以后一直处于前进状态(图8b), 持续时间较长; 该冰川末端仅在1992年呈略微退缩趋势(图9b), 冰川长度及末端海拔分别为15.769 km和5040 m, 其他年份一直处于缓慢前进状态, 且自2000年以后该冰川平均流速为126 m/a^[23]。由此可见, 尽管5Y641H0067冰川和5Y641F0073冰川位于同一区域, 但冰川末端却呈现不同的变化模式, 这可能与其形态、冰床物质等因素有关。鱼鳞川冰川中支在2007-2011年发生了跃动, 郭万钦等^[22]推测其跃动周期至少大于40年(图8c); 2008-2010年间, 鱼鳞川冰川中支北侧末端从之前与北支冰川的分离状态向前突进, 至2010年挤入北支冰川, 前进距离达0.548 km, 末端海拔降低48 m(图9c); 期间冰川各部分都经历了急剧的运动速度变化过程, 其中冰川中部最大运动速率达 (13.3 ± 1.5) m/d^[25]。综上所述, 昆仑山跃动冰川受地理位置、冰川流速及形态等因素影响, 其末端表现出不同的变化模式。

3.2.2 昆仑山地区跃动冰川发生的周期性

周期性是跃动冰川的基本特征之一。冰川跃动周期通常为数年至数十年, 个别冰川则更长。研究表明, 冰川跃动周期长短由冰川本身的稳定性所决定^[20]。当冰川物质积累与冰下水系达到某个临界值, 冰川即发生跃动; 之后, 冰体压力降低或新的冰下水系形成, 冰川处于静止阶的稳定状态, 直至下次跃动前, 以此循环往复^[49-50]。因冰川跃动具有周期性和非同时性, 一直被认为是与冰川自身剖面形态有关, 而与外部事件, 如地震、气候变化等无关。然而, 近十年来的研究发现, 在喀喇昆仑山等地区这一规律被打破, 表现为一些从未跃动的冰川发生了局部跃动(如冰川上部支流), 且明显与气候变化有关^[27,51]。在不同区域, 冰川跃动时间的长短存在较大差异, 多数为3个月至1年, 而跃动后恢复到正常速度的时间一般较长, 需要数年时间^[52]。

昆仑山脉近东西走向, 长约2750 km, 地势起伏较大, 不同区域冰川的跃动周期有着很大的差异, 而对于同一条冰川来说其跃动阶与恢复阶时长则是相对恒定的。Yasuda等^[23]指出, 西昆仑山地区跃动冰川跃动阶持续时间大于5年, 静止阶大于42年, 属斯瓦尔巴型跃动冰川; 郭万钦等^[25]推测鱼鳞川冰川中支跃动周期至少大于40年, 北支冰川过去40年一直处于缓慢前进状态。在布喀达坂峰地区, 前进冰川前进周期则为10年左右。与中国西部其他冰川区相比, 昆仑山地区冰川跃动期持续较长, 如帕米尔地区跃动期只有1~3年^[26], 喀喇昆仑山地区跃动期也仅为3~5年^[53]。

3.2.3 昆仑山地区跃动冰川发生机理

关于冰川跃动机理至今尚无较系统的解释, 目前普遍认为冰川动力不稳定性是冰川跃动的根本原因^[54-56]。如Robin等^[57]认为应力不稳定、温度不稳定和水膜不稳定共同促使冰川跃动, 但主要是应力不稳定性。Meier等^[58]则认为在跃动冰及停滞冰界线的底部, 当剪切应力达到某临界值时, 便开始发生跃动, 冰川快速向下游运动。当前国内外对于跃动冰川的控制机理解释主要包括热控和水控两种动力学机制^[26,59-61]。前者认为冰川底部温度场的变化造成冰下沉积层形变和孔隙度增加, 从而触发冰川跃动; 后者则认为冰川底部排水系统由集中式变为分散式是触发冰川跃动的主要驱动因素。然而, 在不同的冰川作用区或同一区域的不同冰川, 由于冰川的类型与规模、冰川地形、冰床岩性、冰温及区域气候特征等差异, 很难用单一机制去解释冰川跃动的机理。

就昆仑山地区而言, Yasuda 等^[23]认为热控和水控机理共同造成西昆仑地区冰川跃动。1970s 以来, 西昆仑地区夏季升温显著^[44], 气温升高导致冰川融水增加, 大量融水随裂隙进入冰内和冰下^[62]。当冰川底部有效应力达到某一临界值时, 储水洞穴打开, 转换为冰下通道排水状态, 通道排水系统进而塌陷, 从而导致冰体快速运动^[63]。这一地区温型冰川流速在跃动阶表现出明显的夏季减速而冬季加速的信号, 但一些冰川(如多峰冰川)却展现出显著的夏季加速而冬季减速的现象, 又如末端基本处于停滞状态的崇测冰川, 其末端附近流速季节变化不大, 这可能由于下游冰川变薄或完全冻结于冰床而不能流动。因此, 不同的季节流速演变模式表明, 冰川融水路径的变化和排放过程的不同致使该区域跃动冰川在任何季节都可能发生跃动。Frappét 等^[64]认为冰川的热力状况可能会影响冰川的跃动形式, 但消融压力和摩擦生热过程也可使西昆仑山冰川在寒冷干燥的环境中冰下产生融水, 从而致使冰川跃动。

如前文所述, 布喀达坂峰地区冰川末端前进现象一年四季均有发生, 推测该区域冰川前进机理与西昆仑地区跃动冰川跃动机理类似, 即受热控与水控机理共同控制。此外, 冰川基底岩性及冰面物质的重新分配对冰川跃动也有重要影响^[65]。布喀达坂峰地区基岩质地偏软^[66], 随着大量冰川融水渗入冰川内部, 使得在高孔隙流体压力之下, 基底剪切强度降低, 利于冰川底部出现滑动。受山势陡峭影响, 在冰川积累区通过风吹雪使得冰川表面物质在空间上重新分配, 导致冰体下覆压力增加, 冰川内部应力平衡受到破坏, 也会造成冰体快速向下运动。因此, 布喀达坂峰地区冰川前进或跃动并无单一控制机理, 冰川融水、冰川内部结构、冰川表面裂隙发育程度等因素都是影响冰川跃动的重要因子, 要明晰布喀达坂峰冰川前进机理, 仍有待于实地考察和进一步研究。

致谢: 感谢美国地质调查局及地理数据空间云平台分别提供的 Landsat 遥感影像和 DEM 数据。此外, 本文冰川编目数据由科技部科技基础性工作专项“中国冰川资源及其变化调查”提供, 在此表示谢忱。

参考文献(References):

- [1] VAUGHAN D G, COMISO J C, ALLISON I, et al. Observations: Cryosphere//STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] GRINSTED A. An estimate of global glacier volume. *The Cryosphere*, 2013, 7(1): 141-151.
- [3] OERLEMANS J. Quantifying global warming from the retreat of glaciers. *Science*, 1994, 264(5156): 243-245.
- [4] 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. [YAO X J, LIU S Y, GUO W Q, 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.]
- [5] 王圣杰, 张明军, 李忠勤, 等. 近 50 年来中国天山冰川面积变化对气候的响应. *地理学报*, 2011, 66(1): 38-46. [WANG S J, ZHANG M J, LI Z Q, et al. Reponse of glacier area variation to climate change in Chinese Tianshan Mountains in the past 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 38-46.]
- [6] 上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 中国喀喇昆仑山、慕士塔格—公格尔山典型冰川变化监测结果. *冰川冻土*, 2004, 26(3): 374-375. [SHANGGUAN D H, LIU S Y, DING Y J, et al. Monitoring results of glacier change in China Karakorum and Muztag Ata-Konggur Mountain by remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(3): 374-375.]
- [7] 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近 50 年来祁连山冰川变化: 基于中国第一、二次冰川编目数据. *地理学报*, 2015, 70(9): 1402-1414. [SUN M P, LIU S Y, YAO X J, et al. Glacier change in the Qilian Mountains in the past half century: Based

- on the revised first and second Chinese glacier inventory. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(9): 1402-1414.]
- [8] WEI J F, LIU S Y, GUO W Q, et al. Surface-area changes of glaciers in the Tibetan Plateau interior area since the 1970s using recent Landsat images and historical maps. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(66): 151-155.
- [9] LIU S Y, SHANGGUAN D H, DING Y J, et al. Glacier changes during the past century in the Gangrigabu Mountains, Southeast Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau, China. *Annals of Glaciology*, 2006, 43(1): 187-193.
- [10] 叶庆华, 姚檀栋, 郑红星, 等. 西藏玛旁雍错流域冰川与湖泊变化及其对气候变化的响应. *地理研究*, 2008, 27(5): 1178-1190. [YE Q H, YAO T D, ZHENG H X, et al. Glacier and lake co-variations and their responses to climate change in the Mapam Yumco Basin on Tibet. *Geographical Research*, 2008, 27(5): 1178-1190.]
- [11] BAO W J, LIU S Y, WEI J F, et al. Glacier changes during the past 40 years in the West Kunlun Shan. *Journal of Mountain Science*, 2015, 12(2): 344-357.
- [12] WEI J F, LIU S Y, GUO W Q, et al. Changes in glacier volume in the north bank of the Bangong Co Basin from 1968 to 2007 based on historical topographic maps, SRTM, and ASTER stereo images. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 2015, 47(2): 301-311.
- [13] XU J L, LIU S Y, ZHANG S Q, et al. Recent changes in glacial area and volume on Tuanjiefeng peak region of Qilian Mountains, China. *Plos One*, 2013, 8(8): e70574-e70574.
- [14] PIECZONKA T, TOBIAS B, WEI J, et al. Heterogeneous mass loss of glaciers in the Aksu-Tarim Catchment (Central Tien Shan) revealed by 1976 KH-9 Hexagon and 2009 SPOT-5 stereo imagery. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 130(4): 233-244.
- [15] 魏俊锋. 基于多源遥感数字高程模型的中国西部冰川冰量变化研究. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2015. [WEI J F. Mass change of Western China based on multi-source remote sensing digital elevation model. Lanzhou: Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Science, 2015]
- [16] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状. *地理学报*, 2015, 70(1): 3-16. [LIU S Y, YAO X J, GUO W Q, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 3-16.]
- [17] HEWITT K. The Karakoram anomaly? Glacier expansion and the elevation effect, karakoram himalaya. *Mountain Research & Development*, 2005, 25(4): 332-340.
- [18] GARDELLE J, BERTHIER E, ARNAUD Y, et al. Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999-2011. *The Cryosphere*, 2013, 7(4): 1263-1286.
- [19] NECKEL N, KROPÁČEK J, BOLCH T, et al. Glacier mass changes on the Tibetan Plateau 2003-2009 derived from ICESat laser altimetry measurements. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(9): 468-475.
- [20] BRUN F, BERTHIER E, WAGNON P, et al. A spatially resolved estimate of High Mountain Asia glacier mass balances, 2000-2016. *Nature Geoscience*, 2017, 10(9): 668-674.
- [21] CUFFEY K M, PETERSON W S B. *The Physics of Glaciers* (Fourth Edition). Elsevier, 2010.
- [22] RANKL M, KIENHOLZ C, BRAUN M. Glacier changes in the Karakoram region mapped by multitemission satellite imagery. *The Cryosphere*, 2014, 8(3): 4065-4099.
- [23] YASUDA T, FURUYA M. Dynamics of surge-type glaciers in West Kunlun Shan, Northwestern Tibet. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2016, 120(11): 2393-2405.
- [24] YAO T D, THOMPSON L, YANG W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.
- [25] 郭万钦, 刘时银, 许君利, 等. 木孜塔格西北坡鱼鳞川冰川跃动遥感监测. *冰川冻土*, 2012, 34(4): 765-774. [GUO W Q, LIU S Y, XU J L, et al. Monitoring recent surging of the Yulinchuan Glacier on north slopes of Muztag Rang by remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(4): 765-774.]
- [26] 张震, 刘时银, 魏俊锋, 等. 新疆帕米尔跃动冰川遥感监测研究. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 11-20. [ZHANG Z, LIU S Y, WEI J F, et al. Monitoring recent surging of the Karayaylak Glacier in Pamir by remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 11-20.]
- [27] ROUND V, LEINSS S, HUSS M, et al. Surge dynamics and lake outbursts of Kyagar Glacier, Karakoram. *The Cryosphere*, 2017, 11(2): 1-28.

- [28] 许艾文, 杨太保, 王聪强, 等. 1978-2015年喀喇昆仑山克勒青河流域冰川变化的遥感监测. 地理科学进展, 2016, 35(7): 878-888. [XU A W, YANG T B, WANG C Q, et al. Variation of glaciers in the Shaksgam River Basin, Karakoram Mountains during 1978-2015. Progress in Geography, 2016, 35(7): 878-888.]
- [29] 金姗姗, 张永红, 吴宏安. 近40 a长江源各拉丹冬冰川进退变化研究. 自然资源学报, 2013, 28(12): 2095-2104. [JIN S S, ZHANG Y H, WU H A. Study on glacial advancement and retreatment in Geladandong region of Changjiangyuan in recent 40 years. Journal of Natural Resources, 2013, 28(12): 2095-2104.]
- [30] 吴坤鹏, 刘时银, 鲍伟佳, 等. 1980-2015年青藏高原东南部岗日嘎布山冰川变化的遥感监测. 冰川冻土, 2017, 39(1): 24-34. [WU K P, LIU S Y, BAO W J, et al. Remote sensing monitoring of the glacier change in the Gangrigabu Range, Southeast Tibetan Plateau from 1980 through 2015. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(1): 24-34.]
- [31] 刘凯, 王宁练, 白晓华. 1993-2015年喀喇昆仑山努布拉流域冰川变化遥感监测. 冰川冻土, 2017, 39(4): 710-719. [LIU K, WANG N L, BAI X H. Variation of glaciers in the Nubra Basin, Karakoram Mountains, revealed by remote sensing images during 1993-2015. Journal of Glaciology and Geocryology, 2017, 39(4): 710-719.]
- [32] KÄÄB A, LEINSS S, GILBERT A, et al. Massive collapse of two glaciers in Western Tibet in 2016 after surge-like instability. Nature Geoscience, 2018, 11(2): 1-13.
- [33] ZHANG Z, LIU S, ZHANG Y, et al. Glacier variations at Aru Co in Western Tibet from 1971 to 2016 derived from remote-sensing data. Journal of Glaciology, 2018, 64(245): 1-10.
- [34] 姜珊, 杨太保, 王秀娜, 等. 1973-2010年布喀塔格峰冰川波动对气候变化的响应. 干旱区资源与环境, 2013, 27(3): 47-52. [JIANG S, YANG T B, WANG X N, et al. Respinse of glacier variation to climate change in the Bukatage Ice Cap from 1973 to 2010. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(3): 47-52.]
- [35] 胡凡盛, 杨太保, 冀琴, 等. 近25 a布喀达坂峰冰川变化与气候的响应. 干旱区地理, 2018, 41(1): 66-73. [HU F S, YANG T B, JI Q, et al. Response of glacier in the Bukatage Mountains to climate change from 1990 to 2015. Arid Land Geography, 2018, 41(1): 66-73.]
- [36] ZENG C, SHEN H F, ZHANG L P. Recovering missing pixels for Landsat ETM+ SLC-off imagery using multi-temporal regression analysis and a regularization method. Remote Sensing of Environment, 2013, 131: 182-194.
- [37] GUO W Q, LIU S Y, XU J L, et al. The second Chinese glacier inventory: Data, methods and results. Journal of Glaciology, 2015, 61(226): 357-372.
- [38] RANKL M, KIENHOLZ C, BRAUN M. Glacier changes in the Karakoram region mapped by multitemission satellite imagery. The Cryosphere, 2014, 8(3): 4065-4099.
- [39] 姚晓军, 刘时银, 朱钰, 等. 基于GIS的冰川中流线自动提取方法设计与实现. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1563-1570. [YAO X J, LIU S Y, ZHU Y, et al. Design and implementation of an automatic method for deriving glacier centerlines based on GIS. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(6): 1563-1570.]
- [40] BOLCH T, MENOUNOS B, WHEATE R. Landsat-based inventory of glaciers in Western Canada, 1985-2005. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(1): 127-137.
- [41] RACOVITEANU A E, PAUL F, RAUP B, et al. Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: Results of the 2008 Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA. Annals of Glaciology, 2009, 50(53): 53-69.
- [42] SHI Y F. Concise Glacier Inventory of China. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2008.
- [43] 段建平, 王丽丽, 任贾文, 等. 近百年来中国冰川变化及其对气候变化的敏感性研究进展. 地理科学进展, 2009, 28(2): 231-237. [DUAN J P, WANG L L, REN J W, et al. Progress in glacier variations in China and its sensitivity to climatic change during the past century. Progress in Geography, 2009, 28(2): 231-237.]
- [44] WANG Y T, HOU S G, HUAI B J, et al. Glacier anomaly over the Western Kunlun Mountains, Northwestern Tibetan Plateau, since the 1970s. Journal of Glaciology, 2018, 64(255): 1-13.
- [45] EVANS I S. Local aspect asymmetry of mountain glaciation: A global survey of consistency of favored directions for glacier numbers and altitudes. Geomorphology, 2006, 73(1): 166-184.
- [46] EVANS I S, COX N J. Climatogenic north-south asymmetry of local glaciers in Spitsbergen and other parts of the Arctic. Annals of Glaciology, 2014, 51(51): 16-22.
- [47] HODGKINS R, FOX A, NUTTALL A M. Geometry change between 1990 and 2003 at Finsterwalderbreen, a Svalbard

- surge-type glacier, from GPS profiling. *Annals of Glaciology*, 2007, 46(1): 131-135.
- [48] 冀琴, 杨太保, 李霞. 念青唐古拉山东段八盖乡地区近40年冰川与气候变化研究. *水土保持研究*, 2014, 21(2): 306-310. [JI Q, YANG T B, LI X. Study on relationship between glacier retreat and climate change in the Eastern Nyainqentanglha in the past 40 years. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(2): 306-310.]
- [49] CLARKE G K C. Length, width and slope influences on glacier surging. *Journal of Glaciology*, 1990, 37(126): 236-246.
- [50] WEERTMAN J. Water lubrication mechanism of glacier surges. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1969, 6(4): 929-942.
- [51] WEERTMAN J. General theory of water flow at the base of a glacier or ice sheet. *Reviews of Geophysics*, 1972, 10(1): 287-333.
- [52] HEWITT K. Tributary glacier surges: An exceptional concentration at Panmah Glacier, Karakoram Himalaya. *Journal of Glaciology*, 2007, 53(181): 181-188.
- [53] HAMISH P, TAVI M, ADRIAN L, et al. Glacier surge dynamics of Sortebrae, east Greenland, from synthetic aperture radar feature tracking. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2005, 110(F3): 4-13.
- [54] QUINCEY D J, GLASSER N F, COOK S J, et al. Heterogeneity in Karakoram glacier surges. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2015, 120(7): 1288-1300.
- [55] CLARKE G K C, SCHMOK J P, OMMANNEY C S L, et al. Characteristics of surge-type glaciers. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1986, 91(B7): 7165-7180.
- [56] DUNSE T, SCHELLENBERGER T, HAGEN J O, et al. Glacier-surge mechanisms promoted by a hydro-thermodynamic feedback to summer melt. *The Cryosphere*, 2015, 9(1): 197-215.
- [57] ROBIN G DE Q, WEERTMAN J. Cyclic surging of glaciers. *Journal of Glaciology*, 1973, 12(64): 3-18.
- [58] MEIER M F, POST A. What are glacier surges?. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1969, 6(4): 807-817.
- [59] KAMB B, RAYMOND C F, HARRISON W D, et al. Glacier surge mechanism: 1982-1983 surge of variegated glacier, Alaska. *Science*, 1985, 227(4686): 469-479.
- [60] MURRAY T, STUART G W, MILLER P J, et al. Glacier surge propagation by thermal evolution at the bed. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2000, 105(B6): 13491-13507.
- [61] FOWLER A C, MURRAY T, NG F S L. Thermally controlled glacier surging. *Journal of Glaciology*, 2001, 47(159): 527-538.
- [62] MACKINTOSH A N, ANDERSON B M, LORREY A M, et al. Regional cooling caused recent New Zealand glacier advances in a period of global warming. *Nature Communications*, 2017, 8(14202): 1-13.
- [63] JAMIESON S S, EWERTOWSKI M W, EVANS D J. Rapid advance of two mountain glaciers in response to mine-related debris loading. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2015, 120(7): 1418-1435.
- [64] FRAPPÉ P, CLARKE G K C. Slow surge of Trapridge Glacier, Yukon Territory, Canada. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2007, 112(F3): 1-17.
- [65] BOULTON G S, JONES A S. Stability of temperate ice caps and ice sheets resting on beds of deformable sediment. *Journal of Glaciology*, 1979, 24(90): 29-43.
- [66] 李原, 王瑾, 薛宁, 等. 东昆仑西段布喀达坂峰地区早更新世河湖相地层的发现及初步研究. *西北地质*, 2004, 37(1): 58-62. [LI Y, WANG J, XUE N, et al. Discovery and study of the Early Pleistocene river and lake facies stratum in Bukedaban area of the western segment in the eastern Kunlun Mt. *Northwestern Geology*, 2004, 37(1): 58-62.]

Remote sensing monitoring of advancing glaciers in the Bukatage Mountains from 1973 to 2018

GAO Yong-peng¹, YAO Xiao-jun¹, LIU Shi-yin^{2,3}, QI Miao-miao¹,
DUAN Hong-yu¹, LIU Juan¹, ZHANG Da-hong¹

(1. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Northwest Institute of Eco-Environmental and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Institute of International Rivers and Eco-Security,

Yunnan University, Kunming 650500, China)

Abstract: Glacier surging is a performance of glacial dynamic instabilities, which affects about 1% of glaciers worldwide. Glacier surge refers to the periodically rapid movement of glacier in a short period of time (2-3 a). Compared with the monitoring of ice crevasse change in glacier ablation area and the elevation change of glacier surface, the advance of glacier terminal is the most obvious feature to identify the surging glacier from remote sensing image. Based on 208 Landsat MSS/TM/ETM+/OLI remote sensing images from 1973 to 2018, advancing glaciers at different periods in the Bukatage Mountains are recognized. Meanwhile, we have explored the factors affecting the advance of glacier with the combination of meteorological data and established the variational mode of surge glacier terminal on the basis of the existing research for surging glaciers to lay a foundation for the study of the mechanism of glacier surging in this region and provide the basis for the Chinese Advancing Glacier Dataset. The results showed that: (1) There were 7 advancing glaciers in the Bukatage Mountains range from 1973 to 2018, among which 3 glaciers were in the state of fluctuating retreat and 2 glaciers in the state of advancing and fluctuating stability. We inferred that Monuomaha Glacier and the 5Y542H0020 Glacier belonged to surging glaciers, whose fronts were in an active phase. (2) There were 25 advance events for these 7 advancing glaciers in the past 45 years. The frequency of each glacier advance was more than or equal to 2 times and the time of advance was focused on the 2000s (7 times) and the 1970s (6 times). Additionally, glacier advance occurred in each month, so these advancing glaciers probably belonged to Svalbard glacier. There was no obvious pattern of the glacier advance in the Bukatage Mountains. The time interval between two advances of most glaciers was 10 years. (3) The terminals of advancing glaciers in the Kunlun Mountains exerted different changing patterns because of the geographical location, glacier velocity, glacier morphology and etc. The glacial stage lasted 5 years and was longer compared with other areas of China. These 7 advancing glaciers are shown as the modes of terminal change of the "repeated type" in the Bukatage Mountains range. It was hard to solely explain the trigger mechanism that is so complex in the Kunlun Mountains.

Keywords: advancing glacier; glacier surges; remote sensing monitoring; Bukatage Mountains