

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0043

JIA Bowen, HOU Shugui, WANG Yetang. Variation of glaciers at Zangser Kangri on the Qiangtang Plateau during 1971–2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2):307–317. [贾博文, 侯书贵, 王叶堂. 1971–2015年羌塘高原藏色岗日冰川变化[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2):307–317.]

1971–2015年羌塘高原藏色岗日冰川变化

贾博文¹, 侯书贵¹, 王叶堂²

(1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023; 2. 山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250014)

摘 要: 通过对地形图和 Landsat 系列影像的目视解译获取冰川边界, 分析得到 1971–2015 年羌塘高原藏色岗日冰川变化。结果表明: 2015 年研究区有冰川 84 条, 总面积 $(297.65 \pm 4.29) \text{ km}^2$; 1971–2015 年冰川持续退缩, 面积减少 $(19.32 \pm 24.31) \text{ km}^2$, 年均退缩率为 $(0.14 \pm 0.17)\%$, 退缩较慢; 五个时段年均退缩速率分别为 $(0.12 \pm 1.46)\%$ 、 $(0.20 \pm 0.32)\%$ 、 $(0.12 \pm 0.50)\%$ 、 $(0.01 \pm 0.57)\%$ 和 $(0.16 \pm 0.31)\%$ 。消融期(5–9月)温度的上升是研究区冰川退缩的主要驱动力。小规模冰川($<0.5 \text{ km}^2$)的退缩率 14.00% 大于大规模冰川($>2 \text{ km}^2$)的 5.58%; 北朝向冰川的退缩率 8.06% 大于南朝向冰川的 4.16%; 冰川数量由 78 条增加到 84 条反映出大冰川在退缩的过程中分裂成小冰川; 2 条冰川末端发生前进。

关键词: 冰川变化; 藏色岗日; 羌塘高原; 遥感; 气候变化

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)02-0307-11

0 引言

冰冻圈是地球系统的五大圈层之一, 在全球气候变化领域扮演着重要角色^[1]。冰川是气候的产物, 灵敏地指示着气候变化^[2–3]。IPCC 第 5 次评估报告指出: 1880–2012 年间全球表面平均温度上升 $0.85 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[4]。在温度快速上升的气候背景下, 青藏高原及周边地区冰川消融, 消融速率存在空间差异: 青藏高原东南部冰川退缩最快^[5], 西北内陆的西昆仑、喀喇昆仑及临近地区有冰川面积增加的报道^[5–6], 青藏高原中部的羌塘高原地区的冰川自 20 世纪 70 年代至 2010 年前后处在缓慢退缩的状态^[7–9]。羌塘高原冰川总体退缩缓慢, 但也存在一定时空差异: 王利平等^[10]研究表明 1990 年以来羌塘高原冰川退缩加快, 李德平等^[11]指出羌塘高原中西部部分冰川自小冰期以来表现出前进; 另有许多局地、流域尺度的研究表明羌塘高原北部的冰川(如普若岗日冰帽^[12]、马兰冰帽^[13])较羌塘高原南部的冰川(如申扎杰岗^[14])更为稳定。藏色岗日位于

羌塘高原中北部, 这里冰川变化的时间特征、局地影响和气候响应不清楚, 2010 年以来藏色岗日冰川面积变化情况未见报道。基于以上原因, 本文利用航拍地形图、Landsat 系列卫星影像、SRTM DEM 数据和中国第二次冰川编目数据提取、分割冰川, 分析 1971–2015 年藏色岗日地区冰川变化特征, 结合改则气象站年降水、夏季气温数据, ERA-Interim 再分析资料提供的年降雪、夏季气温数据和藏色岗日冰芯稳定同位素记录共同探究气候变化对冰川变化的影响。

1 研究区概况

羌塘高原指唐古拉山、念青唐古拉–冈底斯山、喀喇昆仑山和昆仑山之间的高地, 是青藏高原的主体部分, 这里气候受西风和印度季风的影响^[5], 作为青藏高原上最为寒冷干旱的地区, 年降水量小于 400 mm ^[15], 10 月至次年 4 月的气温低于 $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[16]。羌塘高原从东到西发育有普若岗日、藏色

收稿日期: 2018-10-18; 修订日期: 2019-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41830644; 41330526; 41711530148)资助

作者简介: 贾博文(1995–), 男, 新疆哈密人, 2017 年在南京大学获学士学位, 现为南京大学在读博士研究生, 从事冰川变化研究。

E-mail: jiabowen@smail.nju.edu.cn

通信作者: 侯书贵, 教授, 从事冰川学研究. E-mail: shugui@nju.edu.cn.

岗日、土则岗日等冰川群。藏色岗日位于羌塘高原中北部,主峰海拔 6 460 m,雪线高度 5 700 ~ 5 940 m^[17],本研究将其西侧的布若岗日也划入研究范围。本文研究区地理位置位于 34°10' ~ 34°40' N、85°30' ~ 86° E 之间,区内平均海拔 5 400 m 以上(图 1)。根据中国第二次冰川编目^[18]

(下文简称冰川编目),研究区发育有冰川 82 条,总面积达 308.41 km²,分属多格错仁(5Z51)、羊湖(5Z52)和戈木错(5Z63)三个内流流域;区内最大的冰川是位于藏色岗日南坡、全球陆地冰川监测计划(GLIMS)编号 G085874E34309N 的平顶冰川,面积 69.04 km²。

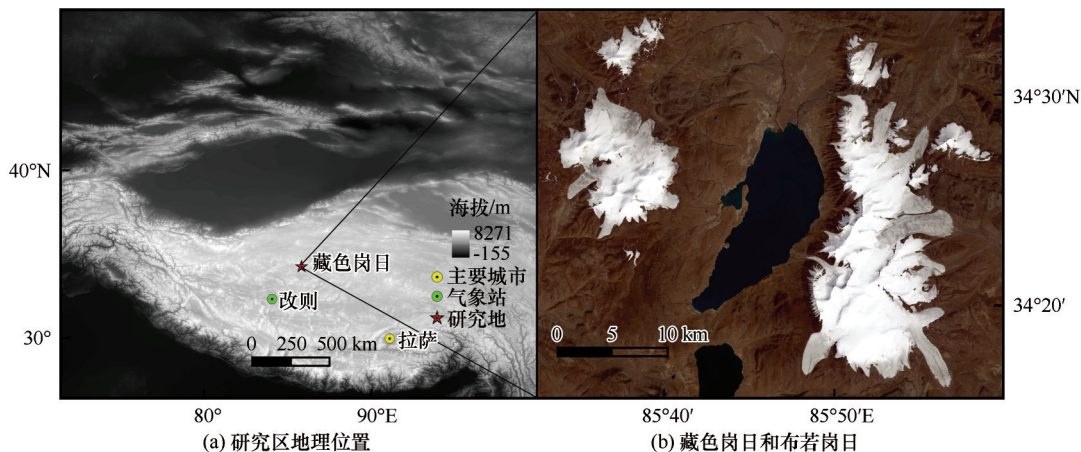


图 1 研究区地理位置及冰川

Fig. 1 Geographic location and glaciers of the study area

2 数据来源及方法

2.1 数据来源

本文选用的 1:10 万地形图航摄于 1971 年 12 月,调绘于 1974 年 8 月,采用 1954 北京坐标系和 1956 黄海高程系。Landsat 系列卫星影像来自美国地质调查局(USGS)网站(<https://glovis.usgs.gov/>)。为减小冰川解译的误差,尽可能选取消融期、云和积雪少的影像(对于云或积雪较多的影像选取临近时段的影像解译或作为参考影像),共挑选 7 景影像(表 1)。遥感影像经过辐射校正和地面控制点几何校正,没有显著的水平位移^[19-20],本文在此未对它们做进一步处理。SRTM DEM 数据来自国际农业磋商研究组织(CGIAR)空间信息联盟网站(<http://srtm.csi.cgiar.org/>),空间分辨率为 90 m,该数据由美国航空航天局(NASA)和美国国家图像测绘局(NIMA)于 2000 年 2 月共同测量得到。冰川编目数据来自寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)。改则气象站(84°15' E、32°05' N, 4 415 m)数据来自国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>),时间范围是 1973 - 2016 年。ERA-Interim 再分析数据来自欧洲中期天气预报中心(<https://www.ecmwf>。

int/),本研究选取的数据空间分辨率为 0.75°×0.75°,选取 33.75° N、85.5° E, 34.5° N、85.5° E, 33.75° N、86.25° E 和 34.5° N、86.25° E 共 4 个格点数据,时间范围是 1979 - 2015 年。2009 年 4 月,课题组在藏色岗日(34°18' N, 85°51' E, 6 226 m)钻取两支长度分别为 127.7 m (core 1) 和 126.7 m (core 2) 的透底冰芯。其中 core 1 以 4 ~ 6 cm 的间隔取样分析稳定同位素^[21],本文选取的数据时间范围是 1960 - 2008 年。

2.2 冰川信息提取方法

航拍地形图以 2006 年 Landsat TM 影像为底图配准后(配准误差 7.3 m),数字化冰川边界。Landsat MSS 影像选择 321 波段组合, TM 和 ETM+ 影像选择 543 波段组合, OLI 影像经全色波段融合后选择 654 波段组合进行假彩色合成(这样的波段组合可以有效地将冰雪和云区分开)。冰川边界的提取采用目视解译的方法,该方法具有较高的解译精度^[22]。解译的冰川边界参考地形图和冰川编目提供的冰川边界进行修正以减小山体阴影和季节性积雪带来的解译误差。对 SRTM DEM 提取山脊线并参考冰川编目对解译结果进行分割,得到各条冰川的矢量数据。

表1 Landsat影像信息
Table 1 Information of Landsat images

影像编号	获取时间	云量/%	分辨率/m	积雪情况	说明
LM21520361977062AAA05	1977年3月3日	1	60	少	解译影像
LT51420361993242ISP00	1993年8月30日	0	30	很少	解译影像
LT51420361998144ULM00	1998年5月24日	0	30	少	参考影像
LE71420362000206SGS00	2000年7月24日	52	30	很少	解译影像
LE71420362000302SGS00	2000年10月28日	6	30	较多	参考影像
LT51420362006262IKR00	2006年9月19日	0	30	少	解译影像
LC81420362015255LGN00	2015年9月12日	0	15	很少	解译影像

2.3 误差评估

Landsat 遥感影像的山体阴影、积雪和分辨率等可能造成解译误差^[23]。本文仅评估影像分辨率带来的误差，计算冰川边界经过的像元数量得到解译误差^[24-25]：

$$\varepsilon = N \cdot \lambda_L^2 / 2 \quad (1)$$

式中： ε 为分辨率引起的解译误差； N 为冰川边界经过的遥感影像像元个数； λ_L 为像元分辨率（对于Landsat MSS数据取60 m，对于TM和ETM+数据取30 m、OLI数据取15 m）。计算得到1977年、1993年、2000年、2006年和2015年冰川面积解译误差占各时段冰川面积的 $\pm 4.50\%$ 、 $\pm 2.50\%$ 、 $\pm 2.43\%$ 、 $\pm 2.40\%$ 和 $\pm 1.44\%$ ，这一结果与前人研究的误差相当^[8,26]。

航拍地形图的数字化精度以及配准误差可能造成解译误差。地形图冰川解译误差的计算方法^[9,27]：

$$\varepsilon_T = N \cdot \lambda_t \cdot \sqrt{\left(\lambda_t / 2\right)^2 + \lambda_m^2} \quad (2)$$

式中： ε_T 为地形图冰川解译误差； N 为冰川边界经过的地形图像元个数； λ_t 为冰川边界数字化精度，对于1:10万地形图，该数值取27 m^[9]； λ_m 为配准误差，前文提及该数值为7.3 m。计算得到1971年冰川解译的误差占1971年冰川面积的 $\pm 7.55\%$ 。

在评估冰川变化的误差时，不同时段解译误差会造成冰川变化的误差，它的评估方法是：

$$\varepsilon_{\text{change}} = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} \quad (3)$$

式中： $\varepsilon_{\text{change}}$ 代表冰川变化误差； ε_1 和 ε_2 则代表不同时段冰川解译的误差。

3 结果与分析

3.1 研究区冰川现状

如图2所示，2015年研究区有冰川84条，冰川

面积 $(297.65 \pm 4.29) \text{ km}^2$ 。从冰川规模看，小于 1 km^2 的冰川有56条，面积 18.74 km^2 ，占研究区冰川面积的6.30%；大于 5 km^2 的冰川有12条，面积 241.31 km^2 ，占研究区冰川面积的81.07%。从冰川朝向看，东北、东和南三个朝向的31条冰川面积达到 223.70 km^2 ，占研究区冰川总面积的75.15%，冰川规模较大；其他朝向的53条冰川面积共计 73.95 km^2 ，占研究区冰川面积的24.85%，冰川规模较小。

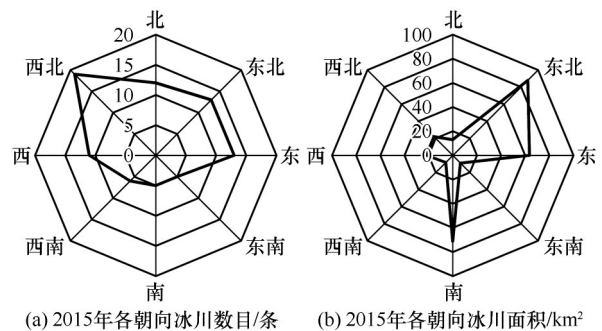


图2 藏色岗日不同朝向冰川分布和面积

Fig. 2 Distribution and area of glaciers in different aspects at Zangser Kangri

3.2 冰川面积变化

1971－2015年研究区冰川面积由 $(316.97 \pm 23.93) \text{ km}^2$ 减少至 $(297.65 \pm 4.29) \text{ km}^2$ ，冰川退缩 $(19.32 \pm 24.31) \text{ km}^2$ ，年均退缩速率 $(0.14 \pm 0.17)\%$ 。各时段冰川退缩速率不一致，特别是2000－2006年研究区冰川退缩量非常小（表2）。冰川条数由1971年的78条增加到2015年的84条，1977－1993年和2006－2015年两个冰川退缩速度较快的时段发生冰川数量的增加，反映出冰川较快退缩过程中较大规模冰川的分裂。1971－1977年冰川增加1条、消失2条，增加的这条冰川仅在地形图中未标出，在5期遥感影像中均可解译，说明

极有可能是地形图标注错误；消失的2条冰川面积分别为0.02 km²和0.06 km²，这2条冰川在1971年、1993年和2000年均可解译，考虑到1977年Landsat MSS影像分辨率低，影像获取时(3月)太阳高度角低、山体阴影大，认为是解译误差。2000—2006年1条0.04 km²的冰川消失，在2015年也未解译，认为是冰川退缩造成的。

研究区冰川(0.14±0.17)%的年均退缩速率相较于祁连山(0.56±0.15)%^[28]、珠峰0.52%^[29]、申扎杰岗0.86%^[14]等地小，但大于西昆仑和喀喇昆仑地区0.07%^[5]。此外，研究区冰川2003—2009年冰川物质平衡为(+0.37±0.25) m w. e. ·a⁻¹^[30]，表明冰川物质平衡状况较好，冰川退缩慢，这与本研究2000—2006年冰川退缩缓慢具有一定一致性；研究区冰川2006年以后的快速退缩与马兰冰帽^[13]、普若岗日冰帽^[12]和祁连山老虎沟流域冰川变化^[31]相似。

3.3 冰川规模和面积变化

1971—2015年规模大于2 km²的冰川面积减少

表2 藏色岗日冰川面积和冰川变化

Table 2 Glacier area and glacier number change at Zangser Kangri

年份	冰川条数	冰川面积/km ²	时段	年均退缩速率/(%·a ⁻¹)
1971	78	316.97±23.93	1971—1977	0.12±1.46
1977	77	314.60±14.16	1977—1993	0.20±0.32
1993	83	304.70±7.62	1993—2000	0.12±0.50
2000	83	302.16±7.34	2000—2006	0.01±0.57
2006	82	302.00±7.24	2006—2015	0.16±0.31
2015	84	297.65±4.29	1971—2015	0.14±0.17

16.51 km²，占研究区冰川面积减小的85.46%；规模小于0.5 km²的冰川增加10条，面积增加1.75 km²。2~5 km²冰川数量的增加是因为有1条5~10 km²冰川退缩至2~5 km²。较小规模冰川的条数和面积的增加能够反映冰川快速退缩时较大规模冰川的分裂^[20,32]，而2000—2006年小规模冰川(<0.5 km²)减少2条、面积减少0.49 km²(表3)，小规模冰川这种条数和面积同时减少的特征一定程度上体现出研究区冰川2000—2006年退缩缓慢。

表3 藏色岗日不同规模冰川数量和面积

Table 3 Glacier number and glacier area at Zangser Kangri for different sizes

冰川规模/km ²	1971年		1977年		1993年		2000年		2006年		2015年	
	数量/条	面积/km ²	数量/条	面积/km ²	数量/条	面积/km ²	数量/条	面积/km ²	数量/条	面积/km ²	数量/条	面积/km ²
<0.1	5	0.34	7	0.55	13	0.73	12	0.70	11	0.69	16	0.98
0.1~0.5	26	5.66	24	5.28	25	6.09	26	6.26	25	5.78	25	6.77
0.5~1	18	13.76	15	11.21	16	11.52	16	11.52	18	12.87	15	10.99
1~2	8	12.04	10	13.79	8	11.55	9	13.20	7	10.77	7	10.24
2~5	8	24.68	8	24.3	9	27.58	8	25.88	9	27.92	9	27.36
5~10	6	43.87	6	43.09	5	36.96	5	37.26	5	36.56	5	36.77
>10	7	216.63	7	216.38	7	210.26	7	207.33	7	207.40	7	204.54

以1971年冰川条数和规模为基准(冰川分裂成多条仍计为一条冰川、单条冰川即使规模改变仍按1971年的规模计)，统计分析1971—2015年冰川变化的规模特征。结果表明，规模小于0.5 km²的冰川退缩0.84 km²，较1971年退缩14.00%；规模大于2 km²的冰川退缩15.93 km²，较1971年退缩5.58%。可见研究区小规模冰川的退缩更快，面积退缩主要由较大规模冰川贡献。

3.4 冰川朝向和面积变化

表4为藏色岗日不同朝向冰川数量和面积统计情况，分析得到，1971—2015年东北、东和南朝向

的冰川退缩15.54 km²，占研究区冰川退缩的80.43%。受太阳辐射和地形遮蔽等影响，南朝向冰川的退缩率应大于北朝向冰川^[33]，但本研究北朝向(包括北、东北和西北朝向)冰川的退缩率(8.06%)高于南朝向(包括南、东南和西南朝向)冰川的退缩率(4.16%)，这是因为前者冰川平均规模(3.18 km²)较后者平均规模(5.84 km²)小，同时前者冰川平均坡度(12.57°)较后者平均坡度(9.01°)大；研究区北朝向冰川较南朝向冰川退缩更快表明较小规模冰川对气候变化更为敏感，同时动力过程强(坡度大)的冰川退缩更快。西朝向冰川退缩最

表4 藏色岗日不同朝向冰川数量和面积
Table 4 Glacier number and glacier area at Zangser Kangri for different aspects

冰川朝向	1971年		1977年		1993年		2000年		2006年		2015年	
	数量/条	面积/km ²	数量/条	面积/km ²	数量/条	面积/km ²	数量/条	面积/km ²	数量/条	面积/km ²	数量/条	面积/km ²
北	11	13.84	12	13.08	12	13.07	12	12.75	12	13.44	12	12.93
东北	13	96.25	13	93.98	13	89.64	13	89.12	13	89.55	13	87.91
东	9	67.40	9	68.18	12	66.06	12	65.22	12	64.49	13	63.57
东南	5	9.49	4	10.05	6	9.48	6	9.71	5	9.35	5	9.06
南	5	75.58	5	76.39	5	74.25	5	73.04	5	72.94	5	72.21
西南	6	8.31	6	8.34	6	8.05	6	8.03	6	7.99	6	8.22
西	11	22.65	11	21.97	11	22.14	11	22.39	11	21.96	11	21.79
西北	18	23.45	17	22.6	18	22.00	18	21.90	18	22.26	19	21.94

为缓慢，有研究指出西朝向冰川的缓慢退缩可能是西风带水汽输送增加造成的^[20]，本文研究区受西风和印度夏季季风影响，加之西朝向冰川平均规模小(2.06 km²)，解译误差对其存在较大影响，因此西朝向冰川缓慢退缩的原因有待进一步讨论。

3.5 冰川前进

1971 – 1977年朝向东、编号为G085885E34389N的冰川末端明显前进，面积由36.17 km²增加至36.49 km²；长度从12 445 m增长至12 636 m(冰川

长度采用手动提取方法^[34])；该冰川面积大，长度较长，在1971 – 1977年前进以后持续退缩(2015年长度12 062 m)，这与西昆仑的一些跃动冰川特征相似^[35]，但是否发生跃动需要进一步研究来确认。1993 – 2015年朝向东北、编号为G085870E34462N的冰川末端持续缓慢前进，面积由1993年的13.46 km²减小至2015年的13.42 km²；长度从8 421 m增长至8 475 m；该冰川前进的模式与上一条冰川不同，其原因需要更多研究进行讨论(图3)。

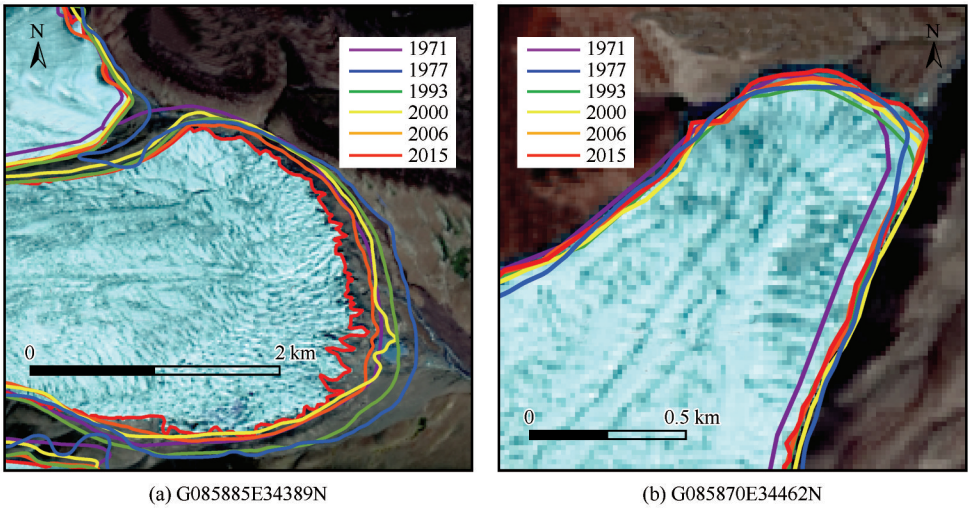


图3 不同时期冰川前进情况
Fig. 3 Advances of glaciers in different periods

3.6 解译结果不确定性

1977年影像获取时间为3月3日，积雪和较多的阴影使得解译结果存在一定误差；2000年7月影像云量大，解译时参考1998年5月影像和2000年10月影像(受积雪影响严重)，这种组合可能导致2000年冰川面积偏大。地形图航测于1971年12月，解译结果可能受积雪影响；除此，曾有研究指

出航测地形图数据存在冰川边界绘制不准确、部分小冰川被遗漏的问题^[36]，本研究也指出类似情况的存在，这可能造成1971年冰川面积的不准确。

4 讨论

4.1 冰川和气候

气温和降水的变化是驱动冰川变化的主要因

素。夏季气温和年降雪量的变化更直接影响山地冰川的进退^[37],两者共同决定冰川物质支出和收入,从而决定冰川的物质平衡状况。气温上升使雪、冰消融,冰川趋向于负物质平衡;气温上升超过0.5℃时冰川的变化主要取决于温度^[38];气温上升1℃带来的冰川负平衡需要增加25%的降水才能抵消^[39]。降雪为冰川带来新物质;雪吸收的太阳辐射能量相较于冰更少;雪的融化和升华消耗大量能量,一定程度上抑制冰川的消融^[40];较大降雪的发生会增加当年及随后几年冰川表面的反射率,缓解冰川消融^[41];因此降雪增加会使冰川趋向于正物质平衡。当冰川物质平衡为正时,平衡线下降、冰川通过运动运送更多物质至下游,冰川末端物质收入多于支出,冰川发生扩张;反之冰川发生退缩。冰川需要一定时间响应气候的改变,王宁练等^[42]统计全球山地冰川百年变化和气候的关系,认为冰川变化滞后于气候变化12~13年;Ding^[43]研究过去40年北半球冰川对气候变化的滞后响应,结果表明大冰川滞后时间为8年而小冰川滞后时间仅为2年;高晓清等^[38]通过统计分析指出:百年来瑞士Alps冰川变化落后北半球气温变化8年;基于这些研究,冰川变化对气候变化的响应滞后时间为8~10年。在羌塘高原,气温在5~9月高于0℃^[16],这意味着冰川消融主要发生在这一时段,因此选取气象站数据和ERA-Interim数据中消融期(5~9月)的气温进行分析。

气象站数据、ERA-Interim数据(取4个格点均值)和冰芯数据的获取位置不同,同时考虑到藏色岗日冰芯定年存在±1年的不确定性^[21],对气候数据和冰芯氧同位素进行5年滑动平均。滑动平均后的气象站5~9月温度、ERA-Interim 5~9月温度以及冰芯氧同位素显著相关(表5)。研究区气温上升,降水、降雪却没有表现出显著增加或减少的趋势(图4)。气象站5~9月温度升温幅度为0.47℃·(10a)⁻¹, ERA-Interim 5~9月温度升温幅度为0.23℃·(10a)⁻¹,冰芯氧同位素记录表明21世纪以来升温幅度最大;三套数据共同表明20世纪90年代后期到21世纪早期温度下降。气象站降水量在20世纪90年代以前呈下降趋势,之后增加,21世纪以来维持在200mm·a⁻¹左右;ERA-Interim降雪量在1990年以前维持在160mm·a⁻¹左右,20世纪90年代呈增加趋势,其后减少,2009年以来又有所增加,但没有达到160mm·a⁻¹。

表5 气象站5~9月温度, ERA-Interim 5~9月温度和冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 相关系数

Table 5 Correlation coefficients between temperature (May – September) from Gerze weather station and ERA-Interim and $\delta^{18}\text{O}$ values in Zangser Kangri ice core

	气象站5~9月 温度	ERA-Interim 5~9月温度	冰芯 $\delta^{18}\text{O}$
气象站5~9月温度			
ERA-Interim 5~9月温度	0.85 ($P<0.001$)		
冰芯 $\delta^{18}\text{O}$	0.62 ($P<0.001$)	0.72 ($P<0.001$)	

可以看出,研究区5~9月气温的上升是研究区冰川持续退缩的主要驱动力;20世纪90年代后期至21世纪早期研究区气温下降,同时段降水的增加,特别是降雪量处在较高的水平增加冰面反射率、同时积雪在消融时消耗大量能量,使冰川在2000~2006年退缩缓慢;由于21世纪以来青藏高原北部显著的增温以及藏色岗日地区降水量减少的趋势^[44],未来研究区冰川可能会加速退缩。

4.2 冰面污化和差异消融

研究区地处青藏高原腹地,所发育的冰川类型为极大陆型冰川,这种冰川冰面比较清洁^[45]。然而通过1993年和2015年两幅遥感影像地表反照率(USGS:<https://earthexplorer.usgs.gov/>)的对比发现冰川污化面积明显增加(图5),这可能与中亚、南亚因化石燃料和生物质燃烧产生的黑炭和有机碳以及青藏高原周边干旱区产生的粉尘随大气传输、沉降有关^[46]。这些物质降低冰面反照率,使更多能量被吸收、冰面增温、融化加剧;冰川融化又使多年沉积的杂质暴露富集,进一步降低冰面反照率。这样一个潜在的正反馈机制会使研究区冰川持续退缩。

除此,通过遥感影像看出反照率分布并不均匀,在复杂局地条件影响下,冰面消融速率出现差异。差异消融表现在冰川末端使得末端形态变得蜿蜒曲折(图5);差异消融还会导致冰面高低起伏,冰雪融水形成水流对冰面进行冲刷、侵蚀,造成冰川物质的负平衡。融水聚集于冰面低洼处或终碛之前,形成冰上湖或冰缘湖。湖水温度通常高于冰川融点^[47];在南阿尔卑斯塔斯曼冰川^[48]和天山依内里切克冰川^[49]的研究还表明冰缘湖泊会使冰川朝冰湖方向的运动明显加速,反映出冰湖的存在使冰川消融加速。研究区冰川在退缩的过程中,也

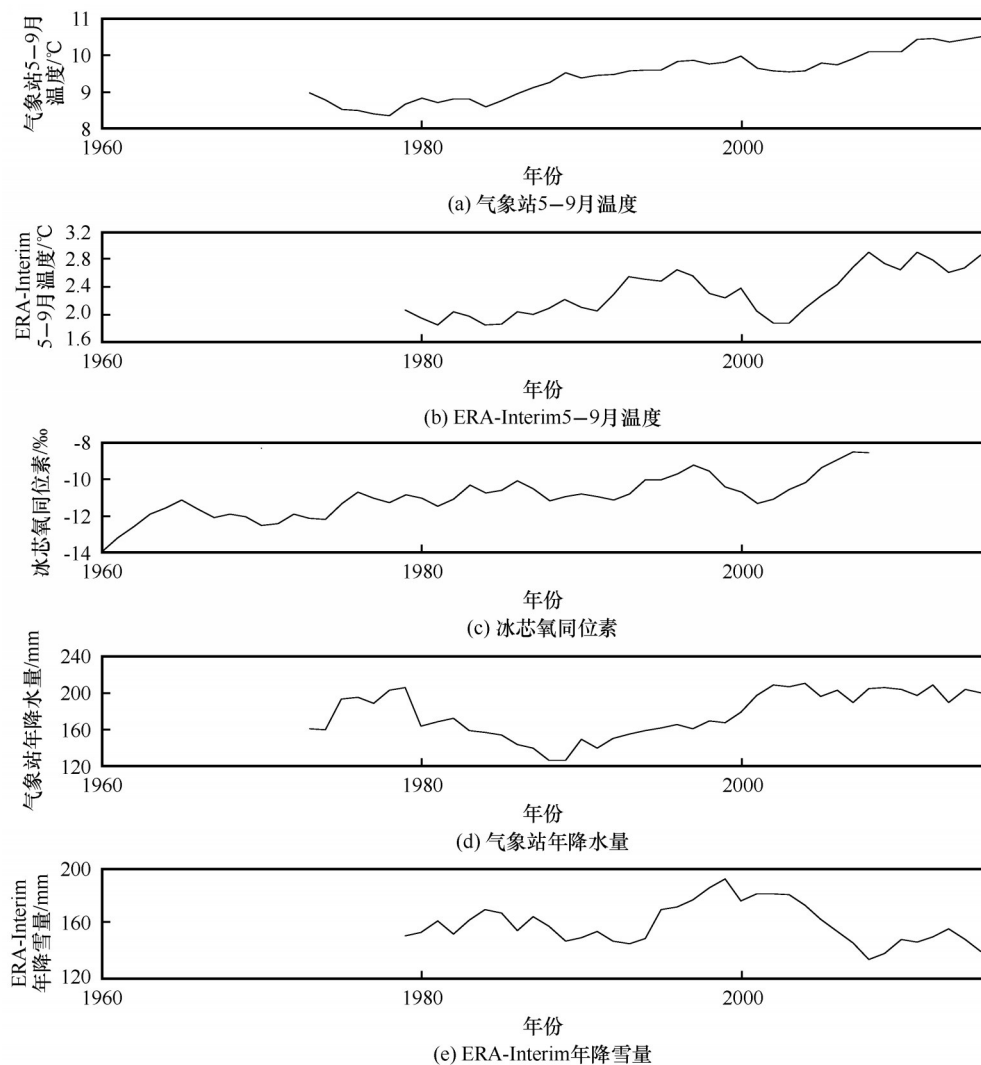


图4 气象数据和冰芯记录

Fig. 4 Climate data and ice core records

出现了一些小型冰缘湖,冰川在这些湖泊的影响下可能会加速退缩。

5 结论

通过对研究区 1971—2015 年共 6 个时期冰川边界的解译及对比,结合气象和冰芯资料,得到以下结论:

(1) 2015 年研究区有冰川 84 条,总面积 $(297.65 \pm 4.29) \text{ km}^2$ 。小于 1 km^2 的冰川数量 56 条、冰川面积占比小(仅为 6.30%);北朝向冰川 44 条,明显多于南朝向的 16 条;东、东北和南三个朝向的 30 条冰川占研究区冰川面积的 75.15%,表明这三个朝向冰川面积较大。

(2) 1971—2015 年研究区冰川面积由 $(316.97 \pm 23.93) \text{ km}^2$ 退缩至 $(297.65 \pm 4.29) \text{ km}^2$,

年均退缩速率为 $(0.14 \pm 0.17)\%$,退缩缓慢,较西昆仑和喀喇昆仑地区快但慢于青藏高原其他地区。

(3) 1971—1977 年、1977—1993 年、1993—2000 年、2000—2006 年和 2006—2015 年五个时段年均退缩速率分别为 $(0.12 \pm 1.46)\%$ 、 $(0.20 \pm 0.32)\%$ 、 $(0.12 \pm 0.50)\%$ 、 $(0.01 \pm 0.57)\%$ 和 $(0.16 \pm 0.31)\%$ 。消融期(5—9 月)气温的升高是冰川持续退缩的主要驱动力,20 世纪 90 年代后期温度降低和较高的降雪可能是导致 2000—2006 年冰川退缩缓慢的原因。

(4) 小规模冰川($<0.5 \text{ km}^2$)退缩率(14.00%)较大规模($>2 \text{ km}^2$)冰川退缩率(5.58%)高;北朝向冰川的退缩率(8.06%)高于南朝向冰川退缩率(4.16%)。冰川数量由 78 条增加到 84 条反映出大冰川在退缩的过程中分裂成为小冰川。

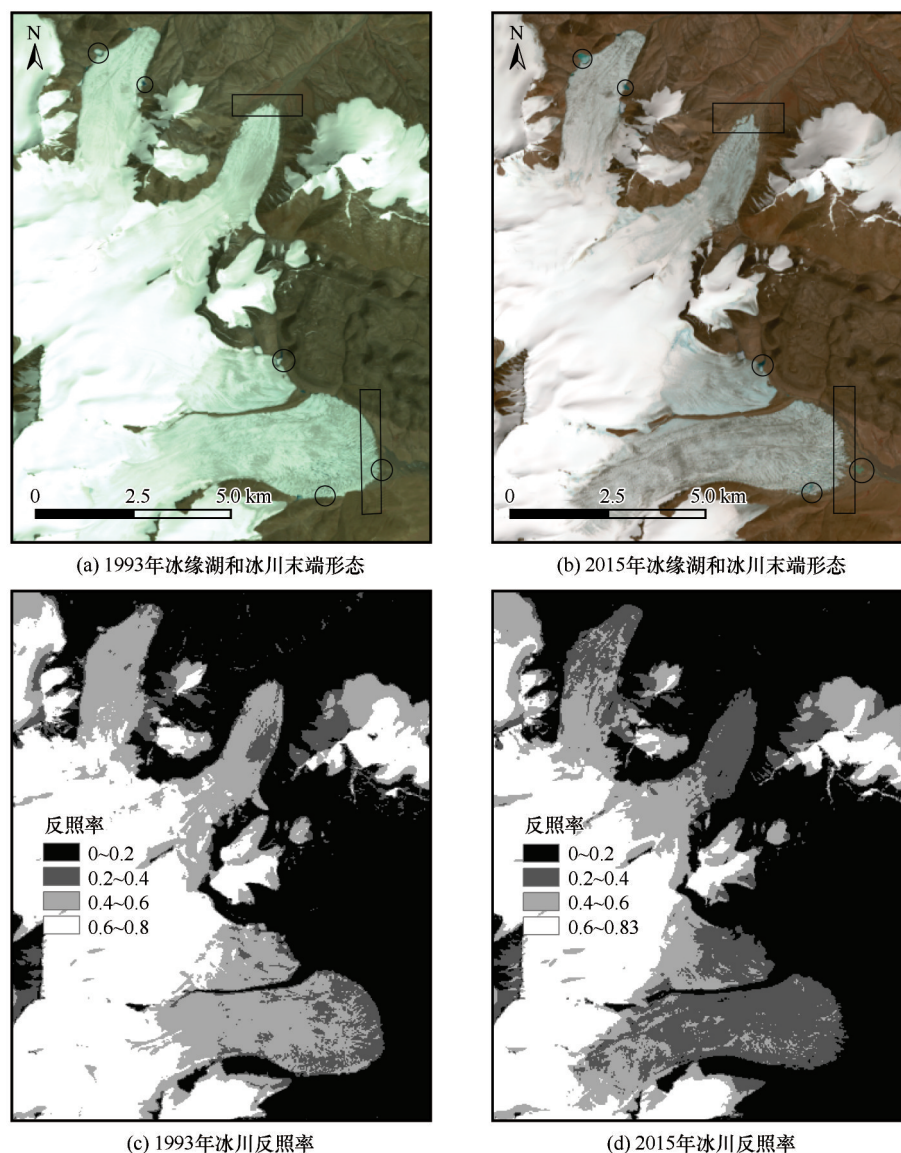


图5 1993年和2015年冰川冰缘湖、末端形态和反照率(圆圈和矩形分别指示冰缘湖和末端形态变化)

Fig. 5 Proglacial lakes, terminal morphology and albedo of glaciers in 1993 and 2015 (circles and rectangles show the variations of proglacial lakes and terminal morphology respectively)

(5) 1971 – 2015 藏色岗日地区 2 条冰川发生前进。

参考文献(References):

- [1] Qin Dahe, Ding Yongjian, Xiao Cunde, et al. Cryospheric Science: research framework and disciplinary system[J]. National Science Review, 2018, 5(2): 255 – 268.
- [2] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. Tropical glaciers, recorders and indicators of climate change, are disappearing globally[J]. Annals of Glaciology, 2011, 52(59): 23 – 34.
- [3] Shanguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Glacier changes in the Koshi River basin, central Himalaya, from 1976 to 2009, derived from remote-sensing imagery[J]. Annals of Glaciology, 2014, 55(66): 61 – 68.
- [4] Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI 5th Assessment Report[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1068 – 1076. [沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068 – 1076.]
- [5] Yao Tandong, Thompson L, Yang Wei, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings[J]. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663 – 667.
- [6] Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y. Slight mass gain of Karakoram glaciers in the early twenty-first century[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(5): 322 – 325.
- [7] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Li Jing, et al. The retreat of glaciers in response to recent climate warming in western China[J]. Annals of Glaciology, 2006, 43: 97 – 105.
- [8] Ye Qinghua, Zong Jibiao, Tian Lide, et al. Glacier changes on the Tibetan Plateau derived from Landsat imagery: mid-1970s -

- 2000-13 [J]. *Journal of Glaciology*, 2017, 63 (238): 273 – 287.
- [9] Wei Junfeng, Liu Shiyin, Guo Wanqin, et al. Surface-area changes of glaciers in the Tibetan Plateau interior area since the 1970s using recent Landsat images and historical maps [J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(66): 213 – 222.
- [10] Wang Liping, Xie Zichu, Liu Shiyin, et al. Glacierized area variation and its response to climate change in Qangtang Plateau during 1970 – 2000 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(5): 979 – 990. [王利平, 谢自楚, 刘时银, 等. 1970 – 2000年羌塘高原冰川变化及其预测研究[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(5): 979 – 990.]
- [11] Li Deping, Wang Liping, Liu Shiyin, et al. Tuptu analysis of the spatio-temporal glacier variations in the central and western Qangtang Plateau since the Little Ice Age [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, 31(1): 40 – 47. [李德平, 王利平, 刘时银, 等. 小冰期以来羌塘高原中西部冰川变化图谱分析[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(1): 40 – 47.]
- [12] Laba, Gesang Zhuoma, Laba Zhuoma, et al. Variation and reasons of the coverage of Puruogangri Glacier and its surrounding lakes during 1992 – 2014 [J]. *Arid Land Geography*, 2016, 39(4): 770 – 776. [拉巴, 格桑卓玛, 拉巴卓玛, 等. 1992 – 2014年普若岗日冰川和流域湖泊面积变化及原因分析[J]. *干旱区地理*, 2016, 39(4): 770 – 776.]
- [13] Jiang Shan, Yang Taibao, Tian Hongzhen. Glacier shrinkage and its dependence on climate in the Malan Mountain in the past 40 years based on RS and GIS [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(3): 522 – 529. [姜珊, 杨太保, 田洪阵. 1973 – 2010年基于RS和GIS的马尔兰冰川退缩与气候变化关系研究[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(3): 522 – 529.]
- [14] Nie Yong, Yang Chao, Zhang Yili, et al. Glacier changes on the Qiangtang Plateau between 1976 and 2015: a case study in the Xainza Xiegang Mountains [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2017, 8(1): 97 – 104.
- [15] Zheng Du. Natural region system research of Tibetan Plateau [J]. *Science in China: Series D*, 1996, 26(4): 336 – 341. [郑度. 青藏高原自然地域系统研究[J]. *中国科学: D辑*, 1996, 26(4): 336 – 341.]
- [16] Yao Yonghui, Zhang Baiping. The spatial pattern of monthly air temperature of the Tibetan Plateau and its implications for the geo-ecology pattern of the Plateau [J]. *Geographical Research*, 2015, 34(11): 2084 – 2094. [姚永慧, 张百平. 青藏高原气温空间分布规律及其生态意义[J]. *地理研究*, 2015, 34(11): 2084 – 2094.]
- [17] Shi Yafeng, Liu Shiyin, Ye Baisheng, et al. Concise glacier inventory of China [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2008.
- [18] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Xu Li, et al. The Second Chinese Glacier Inventory: data, methods and results [J]. *Journal of Glaciology*, 2015, 61(226): 357 – 372.
- [19] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Xu Junli, et al. Monitoring recent surging of the Yulinchuan glacier on north slopes of Muztag Range by remote sensing [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(4): 765 – 774. [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[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(4): 765 – 774.]
- [20] Liu Kai, Wang Ninglian, Bai Xiaohua. Variation of glaciers in the Nubra basin, Karakora Mountains, revealed by remote sensing images during 1993 – 2015 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39 (4): 710 – 719. [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[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(4): 710 – 719.]
- [21] Zhang Wangbin, Hou Shugui, An Wenling, et al. Variations in atmospheric dust loading since AD 1951 recorded in an ice core from the north Tibetan Plateau [J]. *Annals of Glaciology*, 2016, 57(71): 258 – 264.
- [22] Liu Yushuo, Qin Xiang, Zhang Tong, et al. Variation of the Ningchan River Glacier NO. 3 in the Lenglongling Range, east Qilian Mountain [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1031 – 1036. [刘宇硕, 秦翔, 张通, 等. 祁连山东段冷龙岭地区宁缠河3号冰川变化研究[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(5): 1031 – 1036.]
- [23] Bolch T, Menounos B, Wheate R. Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985 – 2005 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(1): 127 – 137.
- [24] Paul F, Kääb A, Maisch M, et al. The new remote-sensing-derived swiss glacier inventory: I. Methods [J]. *Annals of Glaciology*, 2002, 34: 355 – 361.
- [25] Li Zhijie, Wang Ninglian, Chen An'an, et al. Remote sensing monitoring of glacier changes in Shyok basin of the Karakoram Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(4): 770 – 782. [李志杰, 王宁练, 陈安安, 等. 1993 – 2016年喀喇昆仑山什约克流域冰川变化遥感监测[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(4): 770 – 782.]
- [26] Liu Shiyin, Yao Xiaojun, Guo Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 3 – 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[J]. *地理学报*, 2015, 70(1): 3 – 16.]
- [27] Shangguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Glacier changes during the last forty years in the Tarim Interior River basin, northwest China [J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(6): 727 – 732.
- [28] Tian Hongzhen, Yang Taibao, Liu Qiping. Climate change and glacier area shrinkage in the Qilian mountains, China, from 1956 to 2010 [J]. *Annals of Glaciology*, 2014, 55(66): 187 – 197.
- [29] Nie Yong, Zhang Yili, Liu Linshan, et al. Monitoring glacier change based on remote sensing in the Mt. Qomolangma National Nature Preserve [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65 (1): 13 – 28. [聂勇, 张懿锂, 刘林山, 等. 近30年珠穆朗玛峰自然保护区冰川变化的遥感监测[J]. *地理学报*, 2010, 65(1): 13 – 28.]
- [30] Neckel N, Kropacek J, Bolch T, et al. Glacier mass changes on the Tibetan Plateau 2003 – 2009 derived from ICESat laser altimetry measurements [J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(1): 1 – 7.
- [31] Zhang Mingjie, Qin Xiang, Du Wentao, et al. Glacier change in the Laohugou river basin monitored by remote sensing from 1957 to 2009 [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(4): 70 – 75. [张明杰, 秦翔, 杜文涛, 等. 1957 – 2009年祁连山老虎沟流域冰川变化遥感研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(4): 70 – 75.]
- [32] Huai Baojuan, Li Zhongqin, Sun Meiping, et al. RS analysis of glaciers change in the Heihe River Basin in the last 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(3): 365 – 377. [怀保娟, 李忠勤, 孙美平, 等. 近50年黑河流域的冰川变化遥感分析[J]. *地理学报*, 2014, 69(3): 365 – 377.]
- [33] Li Linfeng, Li Kaiming. Study on the relationship between glacier change and topographic factors in the Shiyang River basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41 (5): 1026 – 1035. [李林凤, 李开明. 石羊河流域冰川变化与地形

- 因子的关系探究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1026 – 1035.]
- [34] Bris R L, Paul F. An automatic method to create flow lines for determination of glacier length: a pilot study with Alaskan glaciers[J]. Computers & Geosciences, 2013, 52(3): 234 – 245.
- [35] Yasuda T, Furuya M. Dynamics of surge-type glaciers in west Kunlun Shan, Northwestern Tibet[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2015, 120(11): 2393 – 2405.
- [36] Liu Shiyin, Shanguan Donghui, Ding Yongjian, et al. Glacier variations since the early 20th century in the Gangrigabu Range, southeast Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(1): 55 – 63. [刘时银, 上官东辉, 丁永建, 等. 20世纪初以来青藏高原东南部岗日嘎布山的冰川变化[J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 55 – 63.]
- [37] Ren Binghui. Existing glacier fluctuation and its relation to the climatical changes in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 10(3): 244 – 249. [任炳辉. 我国现代冰川变化及其与气候变化的关系[J]. 冰川冻土, 1988, 10(3): 244 – 249.]
- [38] Gao Xiaoqing, Tang Maocang, Feng Song. Discussion on the relationship between glacial fluctuation and climate change[J]. Plateau Meteorology, 2000, 19(1): 9 – 16. [高晓清, 汤懋苍, 冯松. 冰川变化与气候变化关系的若干探讨[J]. 高原气象, 2000, 19(1): 9 – 16.]
- [39] Oerlemans J. Extracting a climate signal from 169 glacier records[J]. Science, 2005, 308(5722): 675 – 677.
- [40] Cuffey K M, Paterson W S B. The physics of glaciers[M]. USA: Academic Press, 2010.
- [41] Oerlemans J, Giesen R H, Van de Broeke M R. Retreating alpine glaciers: increased melt rates due to accumulation of dust (Vadret da Morteratsch, Switzerland)[J]. Journal of Glaciology, 2009, 55(192): 729 – 736.
- [42] Wang Ninglian, Zhang Xiangsong. Mountain glacier fluctuations and climatic change during the last 100 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1992, 14(3): 242 – 250. [王宁练, 张祥松. 近百年来山地冰川波动与气候变化[J]. 冰川冻土, 1992, 14(3): 242 – 250.]
- [43] Ding Yongjian. Global glacial fluctuations in response to climatic change in the past 40 a[J]. Science in China: Series D, 1996, 39(1): 66 – 73.
- [44] An Wenling, Hou Shugui, Zhang Qiong, et al. Enhanced recent local moisture recycling on the northwestern Tibetan Plateau deduced from ice core deuterium excess records[J]. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 2017, 122(23): 12541 – 12556.
- [45] Shi Yafeng, Xie Zichu. General features of modern glaciers in China[J]. Acta Geographical Sinica, 1964, 30(3): 183 – 213. [施雅风, 谢自楚. 中国现代冰川的基本特征[J]. 地理学报, 1964, 30(3): 183 – 213.]
- [46] Xu Baiqing, Cao Junji, Hansen J, et al. Black soot and survival of Tibetan glaciers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(52): 22114 – 22118.
- [47] Ding Guangxi, Chen Caiping, Xie Changwei, et al. Study of the ice tongue ablation features of a large glacier in the south slopes of the Mt. Tuomuer in the Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(1): 20 – 29. [丁光熙, 陈彩萍, 谢昌卫, 等. 托木尔峰南麓大型山谷冰川冰舌区消融特征分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(1): 20 – 29.]
- [48] Frédéric H, Brian A, Sébastien L. Mountain glacier velocity variation during a retreat/advance cycle quantified using sub-pixel analysis of ASTER images[J]. Journal of Glaciology, 2011, 57(202): 197 – 207.
- [49] Li Jia, Li Zhiwei, Wu Lixin, et al. Deriving a time series of 3D glacier motion to investigate interactions of a large mountain glacial system with its glacial lake: use of Synthetic Aperture Radar Pixel Offset-Small Baseline Subset technique[J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 596 – 608.

Variation of glaciers at Zangser Kangri on the Qiangtang Plateau during 1971 – 2015

JIA Bowen¹, HOU Shugui¹, WANG Yetang²

(1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China)

Abstract: The inaccessibility of many glaciers makes remote sensing data crucial at glacier change monitoring. Glacier outlines were digitized on-screen manually from topographic maps and Landsat images. Glacier change characteristics were analyzed at Zangser Kangri on the Qiangtang Plateau from 1971 to 2015. The results reveal there are 84 glaciers in 2015, covering an area of $(297.65 \pm 4.29) \text{ km}^2$, while 56 of them are smaller than 1 km^2 and there are 44 and 16 glaciers facing north and south respectively. Glacier area decreased by $(19.32 \pm 24.31) \text{ km}^2$ from 1971 to 2015, at the annual shrinkage rate of $(0.14 \pm 0.17)\%$, which is relatively slow. The annual shrinkage rates are $(0.12 \pm 1.46)\%$ for 1971 – 1977, $(0.20 \pm 0.32)\%$ for 1977 – 1993, $(0.12 \pm 0.50)\%$ for 1993 – 2000, $(0.01 \pm 0.57)\%$ for 2000 – 2006 and $(0.16 \pm 0.31)\%$ for 2006 – 2015, respectively. Based on the meteorological data, ERA-Interim reanalysis and ice cores records, the increased ablation season (May to September) temperature is the main driving force accounting for the shrinkage. Small glaciers ($< 0.5 \text{ km}^2$) retreated faster at the rate of 14.00% than big glaciers ($> 2 \text{ km}^2$) at the rate of 5.58%. Northward glaciers shrank faster at the rate of 8.06% than southward glaciers at the rate of 4.16%. The increased number (from 78 to 84) of glaciers indicates big glaciers subdivided to small glaciers while retreating quickly. Two glaciers advanced during our study period.

Key words: glacier change; Zangser Kangri; Qiangtang Plateau; remote sensing; climate change

(责任编辑: 刘时银; 编辑: 周成林)