

doi:10.3799/dqkx.2012.115

念青唐古拉山西段冰川 1977—2010 年时空变化

王 旭^{1,2}, 周爱国^{1,3*}, SIEGERT Florian^{2,4}, 张 志⁵, 陈昆仑⁶

1. 中国地质大学环境学院, 湖北武汉 430074

2. Geo-Bio Center, Ludwig-Maximilians-University, Munich 82152, Germany

3. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

4. Remote Sensing Solutions GmbH, Isarstr. 3, Munich 82065, Germany

5. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

6. 湖北大学资源环境学院, 湖北武汉 430062

摘要: 青藏高原现代冰川变化是对气候变化的响应, 对区域水资源评估有着重要的理论意义和现实意义. 采用 GIS 分析方法, 利用三期卫星遥感数据研究青藏高原中部念青唐古拉山西段冰川在 2 个时间段(1977—2001 和 2001—2010)的时空分布和变化, 并对比分析其在南坡和北坡变化速率趋势以及在不同海拔高度的变化特征. 研究发现: (1) 2010 年念青唐古拉山西段冰川面积为 $571.81 \pm 16.01 \text{ km}^2$, 主要分布在 5 500~6 200 m 的高山区; (2) 1977—2010 年念青唐古拉山西段冰川退缩明显, 总面积减少 $22.42\% \pm 2.90\%$; (3) 相比于 1977—2001 年时间段, 近十年来该区冰川退缩速率呈明显加剧趋势; (4) 与前一个时段相比, 低于 5 700 m 海拔区域, 各海拔段的冰川年均面积退缩速率呈减缓趋势; 而在 5 700~7 000 m 海拔区域, 则呈加剧趋势; (5) 北坡冰川退缩率 ($23.6\% \pm 2.88\%$) 高于南坡 ($21.97\% \pm 2.90\%$), 且南北坡 2001—2010 年年均冰川面积减少最大的海拔段比 1977—2001 年都升高了 200 m, 研究区冰川的持续退缩有向高海拔转移的趋势; (6) 南坡拉萨河流域内的冰川年均减少面积最大的海拔段比北坡高 100 m 左右. 气温升高是影响近十年来研究区的冰川退缩加剧的根本原因, 将对区域水文和生态环境产生重大的影响.

关键词: 气候变化; 冰川退缩; 青藏高原; 念青唐古拉山西段冰川.

中图分类号: P627; X141

文章编号: 1000—2383(2012)05—1082—11

收稿日期: 2011—12—18

Glacier Temporal-Spatial Change Characteristics in Western Nyainqentanglha Range, Tibetan Plateau 1977—2010

WANG Xu^{1,2}, ZHOU Ai-guo^{1,3*}, SIEGERT Florian^{2,4}, ZHANG Zhi⁵, CHEN Kun-lun⁶

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. GeoBio Center, Ludwig-Maximilians-University, Munich 82152, Germany

3. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Remote Sensing Solutions GmbH, Isarstr. 3, Munich 82065, Germany

5. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

6. School of Resource and Environment, Hubei University, Wuhan 430062, China

Abstract: Three atmospheric/topographic corrected Landsat images (acquired form 17/03/1977, 05/02/2001, 06/02/2010) have been used to map the glacier extents using threshold ratio images (BAND4/BAND5) and ISODATA unsupervised classification, respectively. A few of manual editing was made to correct the outline at ice-lake contacts and at debris covered glaciers. Spatial-temporal distribution and changes of glaciers are analyzed based on GIS and RS. Results show that (1) The glacier in WNR covered $571.81 \pm 16.01 \text{ km}^2$ in 2010, located mainly at the elevation zone of 5 500—6 200 m; (2) The glacier retreat is obvious in recent three decades, especially in the last decade. The glacier area had decreased by $22.42\% \pm 2.90\%$ between 1977 and 2010. (3) Compared to the period 1977—2001, the glacier retreat rate in the last decade is higher. (4) The annual mean reduction of glacier area slows down in the elevation

基金项目: 国土资源大调查专项“青藏高原资源开发的环境承载力评价方法与综合研究”(No. 1212010818093).

作者简介: 王旭(1983—), 女, 博士生, 研究方向为资源环境遥感. E-mail: jorrywangxu@163.com

*** 通讯作者:** 周爱国, E-mail: aiguo Zhou0516@126.com

zone of lower 5 700 m, while it speeds up between 5 800—7 000 m. (5) In Lhasa River basin the elevation zone that the glacier reduction fastest is 100 m higher than that in the Namco basin. The Lhasa river basin glacier reduction was affected by the climate change and anthropogenic activities, while the glacier retreat in Namco basin was mainly caused by climate change. (6) The rate of glacier retreat is higher in Namco basin on the northern slope ($23.6\% \pm 2.88\%$) of research area than those on the southern slope ($21.97\% \pm 2.90\%$). And the elevation zone where the highest rate of glacier retreat during 2001—2010 is 200 m higher than those between 1977 and 2001. It indicates that the glaciers tend to shrink in higher elevation.

Key words: climatic change; glacier retreat; Tibetan plateau; western Nyainqentanglha range.

近年来,气候变暖对全球环境(大气环流改变、冰川加速消融、海平面上升等)产生了一系列影响,并导致各种自然灾害频发.高山冰川对局部气候变化很敏感,是气候变化的放大器(Bajracharya *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2008; Owen *et al.*, 2009; Kang *et al.*, 2010).长时间冰川观测数据表明,从20世纪70年代中期开始全球冰川开始快速退缩,1990年后全球冰川物质损失都呈加速状态,尤其山地冰川在近30多年来呈加速退缩趋势(Dyurgerov and Meier, 2000; 姚檀栋等, 2004).青藏高原作为世界第三极,冰川面积占中国冰川总面积的80%以上(蒲健辰等, 2004),近年来该地区冰川发生全面退缩(施雅风和刘时银, 2000).冰川融化造成的高原地表反射率改变导致了地面比热变化,对区域乃至全球的大气环流系统都产生了深远的热动力学影响(Meier and Dyurgerov, 2002; Barry, 2006).中国西部已被研究的冰川中有80.8%正在退缩中,甚至部分冰川消失(Qin and Xiao, 2009).冰川的消融以及众多小冰川的消失,虽然在初期增加了地表径流使得可利用水资源比较丰富,但在后期导致水资源短缺,对区域生态环境、区域气候以及人类的可持续发展带来深远的影响.

已有研究利用20世纪70年代测绘地形图、卫星遥感影像和GPS(Global Positioning System)野外调查相结合的方法,对近年来青藏高原中部冰川末端后退速率进行了对比,研究发现这些冰川近几十年一直处在后退态势(张堂堂等, 2004; 蒲健辰等, 2006; 杨威等, 2008).然而,这些研究仅针对单个或几个大冰川的末端后退和物质损耗,并不能反映出该区域的冰川总体变化趋势.而在区域冰川研究方面,吴立宗和李新(2004)等根据1:10万和1:5万地形图完成了中国第一次冰川编目数据(CGI),上官冬辉等(2008)运用遥感资料监测分析了1970—2000年念青唐古拉山脉西段冰川变化.Nie *et al.* (2010)对近30年珠穆朗玛峰国家自然保护区冰川变化做了遥感监测.Wu and Zhu(2008)、

陈锋等(2009)利用地形图、遥感资料分析了纳木错流域1970—2000年来的冰川变化.Bolch *et al.* (2010a)也利用多期遥感影像研究了念青唐古拉山1976—2009年局部冰川的变化情况.但对近30年来念青唐古拉西段南、北坡以及不同海拔高度上冰川变化趋势、速率的差异,迄今尚未见研究报道.

冈底斯山—念青唐古拉山线将青藏高原分为南北不同的自然区(杨勤业和郑度, 1985),念青唐古拉山西段即位于该线上.为了研究青藏高原中部山地冰川的变化趋势以及这种变化的南北坡差异,本文利用遥感和GIS(Geographic Information System)数据,分析了念青唐古拉山西段地区1977—2001年、2001—2010年2个时段的冰川变化及其变化速率趋势,对南北坡冰川的变化特征和不同海拔高度分布变化作对比分析,并结合气象数据探讨了冰川变化及其可能产生的南北坡差异的原因.

1 研究区概况

念青唐古拉山脉西段位于青藏高原腹地,南接冈底斯山脉北部,西临纳木错湖泊,平均海拔约5 500 m,主峰念青唐古拉峰达7 111 m(图1).念青唐古拉山脊是内流区和外流区的分界线,也是纳木错流域和拉萨河流域的流域分水岭,冰雪融水沿山脉西北坡注入纳木错湖,从东南坡汇入拉萨河,最终流入雅鲁藏布江.山脊南侧地势陡峭,相对高差达2 000 m左右,而北侧山势较缓和,相对高差多在1 000 m左右.该地区冰川属于大陆性冰川(米德生等, 2002),发育规模自东向西明显减小,是青藏高原中部最重要的冰川分布区,且受到印度洋西南季风和大陆西风的交替影响,受全球气候变化影响较典型.山脊东南为藏南温暖半干旱高原季风气候区,山脊西北为羌塘寒冷半干旱高原季风气候区.夏季,来自印度洋的西南季风为该区域带来丰富的降水,但季风影响自东向西慢慢减弱;冬半年,干冷西风的控制使得该区域干燥、寒冷、多风(Rees and Col-

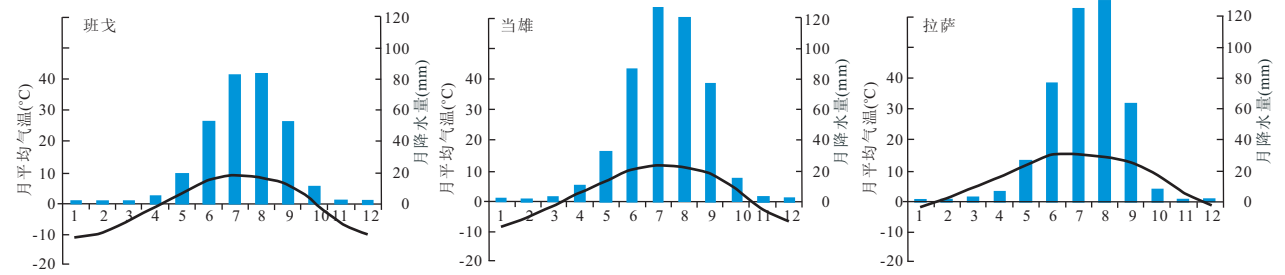


图 2 班戈、当雄和拉萨气象站 1962—2008 年逐月平均气温和降水量
Fig. 2 Monthly climatologies of air temperature (1962—2008, curve) and precipitation

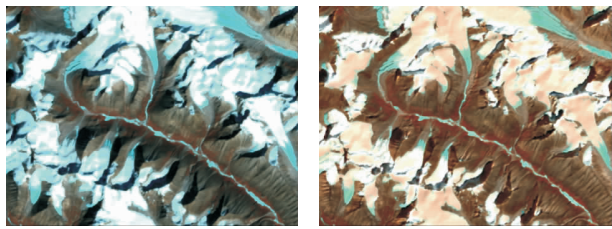


图 3 去阴影前和去阴影后对比

Fig. 3 The comparison of before shadow removing and after shadow removing

30 m 的 ASTER GDEM 数据,但在使用过程中发现该数据存在直线、坑、隆起或其他异常现象,这一现象主要是由于云或积雪覆盖以及边界堆叠产生 (Toutin, 2008; ASTER GDEM Validation Team, 2009). 本研究利用 ATCOR3 模型对 2001/02/05 (ETM+) 和 2010/02/06 (TM) 数据进行大气/地形校正,校正后大部分地形阴影都明显减弱或消除 (图 3). 因从 USGS 影像库下载到的 MSS 数据为重采样后的分辨率 60 m,利用经过大气/地形校正的影像为校正参考数据,采用 ERDAS IMAGINE AutoSync 模块对 MSS 影像进行地形校正,误差控制在一个像元之内. 利用 2001 年 ETM+ 数据 15 m 分辨率的全色波段影像和 DEM 对 Hexagon KH-9 进行正射校正,由于航片变形较大,在研究区共选取控制点 760 个, RMSE 为 8.46.

2.2.2 冰川信息的提取 目前冰川范围的提取方法主要有波段比值法、监督分类、非监督分类、目视解译法等. 前人研究使用波段比值法增强冰川信息时多采用 Band3/Band5,并能较好提取阴影中的冰雪信息 (Andreassen *et al.*, 2008),而也有研究者认为采用 Band4/Band5 比值法能正确地用于冰川制图,并能较好地分辨冰川和积雪范围 (Hall *et al.*, 1987; Paul *et al.*, 2002). 通过对研究区 Band3/Band5 和 Band4/Band5 两种不同波段的比值获得

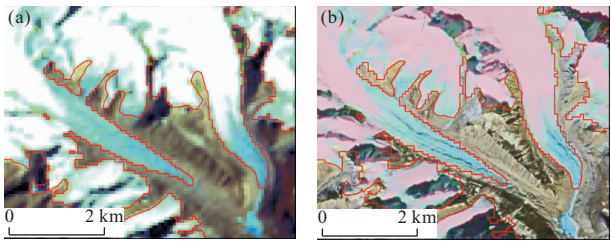


图 4 1977 年冰川提取范围示意
Fig. 4 Glacier extent in 1977

a 为 1977 年 MSS 影像, b 为 1977 年 MSS 影像和 1976 年 Hexagon-9 航片融合影像 (波段组合: RGB=421)

的比值图进行比较,发现经过大气/地形校正后,选用适当的阈值可以使两者对冰川范围的提取结果达到基本一致,能较好地提取冰川面积.

本研究对大气/地形校正后的 TM/ETM+ 数据采用 Band4/Band5 波段比值法,能较好地提取出整个冰川的分布范围,也能够很好地识别和提取大部分阴影中的冰川. 由于 MSS 影像缺少判别冰川低反射特性的短波红外波段,波段比值算法受到限制,故在 1977 年的 MSS 数据分析中采用 ISODATA 非监督分类方法,将地物分成 30 类,参考 1976 年 11 月的 8 m 分辨率的 Hexagon-KH9 数据将冰川类合并得到冰川范围.

2.2.3 表碛覆盖型冰川末端解译及后处理 由于冰川末端表碛覆盖部分的光谱跟周围地貌的光谱很相似,目前利用遥感方法对表碛覆盖型冰川末端进行边界提取包括利用 DEM、热红外波段以及复合分类,但这些方法仍需完善 (Paul *et al.*, 2004a; Shukla *et al.*, 2010). 考虑到该区冰川末端被表碛覆盖的冰川分布不多,故采用目视解译提取表碛覆盖型冰川的末端边界. 同时,利用 Hexagon KH-9 (1976) 和 MSS (1977) 多光谱融合影像、CGI 数据、ETM+ 全色影像、Quickbird 影像和各期参考影像对获取的多期冰川范围进行数据修正,以获取更高质量的冰

川信息,为冰川变化分析提供有力保证.主要方法包括:(1)以 1977 年融合影像(图 4)、ETM+ 全色影像(2001)和 2007 年 Quickbird 影像为参考,以冰川末端出水口作为冰川终端,对表碛覆盖的冰川末端进行目视提取,并赋予属性;(2)由于小部分冰川末端冰湖与冰川相连被错分为冰川,参照各参考数据识别冰川末端和冰湖形态特征差异,对各期冰川数据进行修正.

2.3 精度评价

对冰川面积不同时期变化分析的误差主要包括遥感影像空间分辨率的差异、校正误差和冰川面积提取的误差.本文主要通过对冰川提取范围生成缓冲区,并在冰川提取范围和缓冲区内随机生成检测点,利用更高空间分辨率的相近时相的影像给定检测点的属性为冰川或非冰川,结合冰川提取范围来判定检测点的正误.首先,在 ArcGIS 软件下对 1977 年、2001 年和 2010 年三期影像提取出的冰川范围 shp 文件往外扩展生成 15 m 缓冲区,并利用 Hawth's Analysis 工具在各期生成的缓冲区和冰川范围内均生成 1 000 个随机检测点.随后,通过参考正射校正后的 8 m 分辨率的 1976 年的 Hexagon KH-9、15 m 分辨率的 2001 年 ETM+ 全色影像、2007 年 Google Earth 上的 Quickbird 影像、1970s 年的 CGI 数据,和 1977 年、2001 年和 2010 年三期影像提取出的冰川范围 shp 文件叠合来分别判定随机检测点是否为冰川或非冰川.若检测点在参考影像上为冰川但却位于提取出的冰川范围之外或者检测点在参考影像上为非冰川但却位于提取出的冰川范围之内则认为判定错误.最后得到 1977 年、2001 年和 2010 年的念青唐古拉西段冰川面积提取误差分别为 3.5%、3.6%和 2.8%.

3 结果

3.1 冰川分布变化的总体情况

对比研究区内不同时期的冰川面积发现,念青唐古拉山脉西段冰川从 1977 年以来呈持续退缩状态.2010 年该区冰川总面积为 $571.81 \pm 16.01 \text{ km}^2$,而 1977 年时为 $737.07 \pm 25.8 \text{ km}^2$,1977—2010 年的 34 年间冰川总面积退缩了 $165.26 \pm 21.4 \text{ km}^2$,减少比例约为 $22.42\% \pm 2.9\%$,年均减少速度为 $4.86 \pm 0.63 \text{ km}^2/\text{a}$ (表 1).但就 1977—2001 年和 2001—2010 年 2 个时段而言,却存在明显的速率差异.1977—2001 年期间该

区冰川年均减少 $4.59 \pm 0.96 \text{ km}^2/\text{a}$;而 2001—2010 年间的年均减少速度为 $5.61 \pm 2.13 \text{ km}^2/\text{a}$.研究区冰川在近 30 多年来尤其是最近十年以来呈现消融加剧趋势.冰川消融不仅包括冰川面积的变化,也包括冰川厚度的变化,这些变化在影像中主要表现为岩石出露(O)、冰舌分离(T)、强烈后退(R)、冰川消逝(D)等(图 5).

3.2 冰川分布变化的区域差异

对研究区纳木错流域和拉萨河流域的冰川面积变化分析表明,研究区不同时期不同区域的冰川分布及其变化存在着显著的差异性.两流域的冰川在总体上都呈退缩趋势,并且 2001—2010 年的冰川退缩速率与 1977—2001 年的相比呈加快趋势(表 1).纳木错流域 1977—2001 年间冰川面积减少 $15.58\% \pm 3.27\%$,这一结果与 Wu and Zhu(2008)利用 20 世纪 70 年代的航测地形图和 2000 年的 ETM+ 数据得到纳木错流域的冰川面积减少 15.36%一致.拉萨河流域 1977—2001 年间冰川面积以 $6.3\%/10 \text{ a}$ 的速率减少,而 2001—2010 年则以 $8.1\%/10 \text{ a}$ 速率减少.位于念青唐古山北坡的纳木错流域冰川退缩率在 2 个时段均高于南坡的拉萨河流域.虽然纳木错流域的冰川面积只占念青唐古拉山西段冰川的 29%,但其退缩速率略高,34 年间的退缩率为 23.6%,而拉萨河流域只有 21.97%.

3.3 冰川分布变化的海拔梯度特征和差异

利用各期冰川数据和 DEM(以 100 m 为单位间距)叠加分析,发现研究区冰川分布和不同时期冰川变化在不同的海拔高度具有明显的特征性和差异性(表 2):(1)1977—2010 年,冰川主要分布在海拔 5 500~6 200 m 区域,各时期均占到冰川总面积的 95%以上.而在各海拔梯度中,冰川主要分布在 5 800~5 900 m 区域.(2)冰川变化量在不同时段和不同海拔高度上存在差异.冰川变化主要发生的海拔段从 1977—2001 年间的 5 600~5 700 m 转移到 2001—2010 年的 5 800~5 900 m 的海拔段,海拔升高 200 m.(3)从 34 年间不同海拔高度冰川的年均面积变化速率来看,冰川分布在 1977—2001 年和 2001—2010 年 2 个时段的变化趋势是不同的.在 5 100~5 700 m 海拔区域,冰川年均面积减少速率呈减缓趋势;而在 5 700~6 900 m 海拔区域,冰川年均面积减少速率则呈加速趋势.虽然如此,但由于高于 6 300 m 高海拔地区的冰川分布仅占冰川总面积约 2%左右,冰川变化主要还是发生在冰川所分布的海拔稍低的区域.

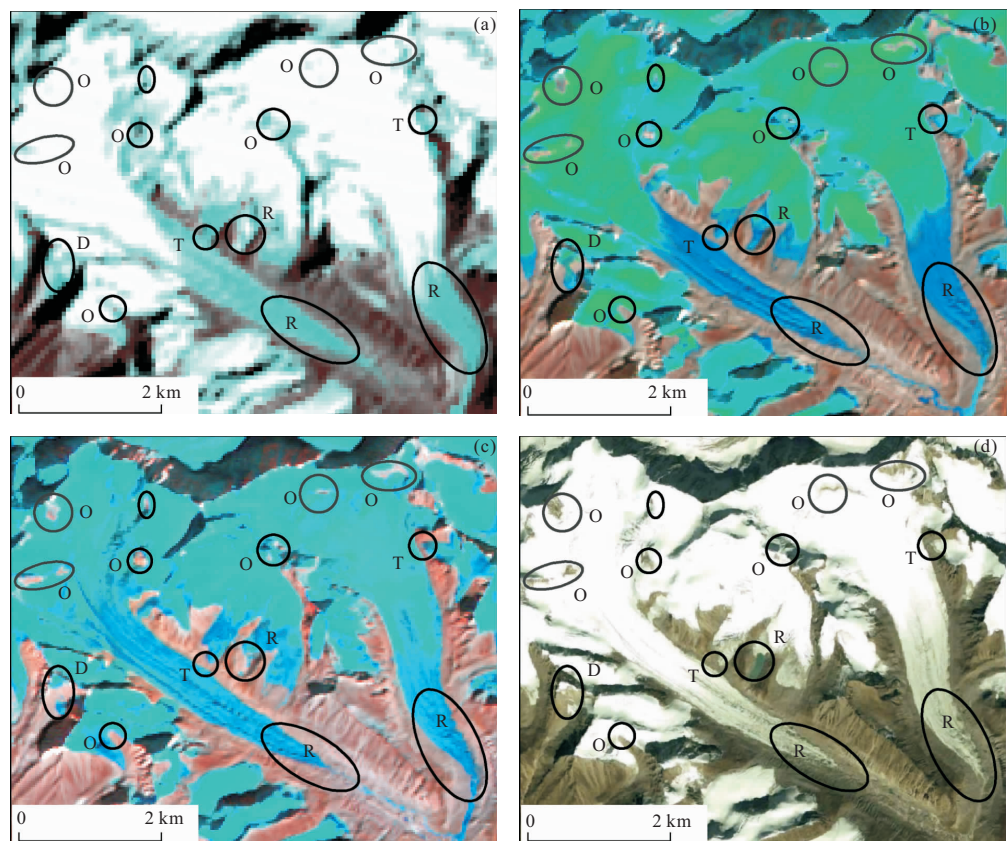


图 5 不同年份(a)1977、(b)2001、(c)2010、(d)2007 拉萨河流域冰川变化(局部)对比

Fig. 5 The region in the south of study area as seen in a false color composition in (a) 1977(MSS 4, 2, 1), (b) 2001 (ETM + 5, 4, 3), (c) 2010 (TM 5, 4, 3) and (d) 2007
圆圈标出同一冰川部位在不同影像中的同一位置,表示不同时期冰川变化 (MSS 波段组合为 RGB : 4, 2, 1; ETM+ 和 TM 波段组合为 RGB : 5, 4, 3; Quickbird 为 RGB : 3, 2, 1)

表 1 1977—2010 年念青唐古拉山西段冰川不同区域的冰川分布和变化

Table 1 Glacier area and area changes in the south part of West Nyainqentanglha Range (1977—2010)

	面积(km ²)			1977—2001			2001—2010			1977—2010		
	1977	2001	2010	Δa_1 (km ²)	Δa_2 (%)	Δa_3 (km ² /a)	Δa_1 (km ²)	Δa_2 (%)	Δa_3 (km ² /a)	Δa_1 (km ²)	Δa_2 (%)	Δa_3 (km ² /a)
研究区	737.07 ±25.80	622.26 ±22.40	571.81 ±16.01	-114.81 ±24.10	-15.58 ±3.27	-4.59 ±0.96	-50.45 ±19.20	-8.11 ±3.09	-5.61 ±2.13	-165.26 ±21.40	-22.42 ±2.90	-4.86 ±0.63
纳木错流域	215.54 ±7.54	180.37 ±6.49	164.68 ±4.61	-35.17 ±7.00	-16.32 ±3.25	-1.41 ±0.28	-15.69 ±5.55	-8.70 ±3.08	-1.74 ±0.62	-50.86 ±6.21	-23.60 ±2.88	-1.50 ±0.18
拉萨河流域	486.58 ±17.03	409.60 ±14.75	379.69 ±10.63	-76.98 ±15.89	-15.82 ±3.27	-3.08 ±0.64	-29.91 ±13.20	-7.30 ±3.10	-3.32 ±1.41	-106.89 ±14.10	-21.97 ±2.90	-3.14 ±0.41

注: Δa_1 (km²)=发生变化的冰川面积; Δa_2 (%)=发生变化的冰川面积占冰川总面积的比例; Δa_3 (km²/a)=年均变化冰川面积。

3.4 不同区域冰川分布变化的区域海拔梯度差异

对纳木错流域和拉萨河流域内冰川面积在不同海拔高度分布变化的统计分析表明,两流域的冰川主要分布于海拔 5 500~6 300 m 之间,分别占 97% 和 96% 以上,但其分布变化存在着显著差异:
(1)两流域冰川分布的最低海拔近年都发生了明显升高。拉萨河流域冰川分布的最低海拔从 1977 年的 5 100~5 200 m 后退到了现在的 5 200~

5 300 m,冰川分布的最低海拔升高在 100 m 以内;而纳木错流域冰川分布的最低海拔则由 1977 年的 5 100~5 200 m 后退到了 5 300~5 400 m,冰川分布的最低海拔升高了约 200 m。目前,位于北坡纳木错流域冰川分布的最低海拔比南坡拉萨河流域的冰川要高 100 m 左右。
(2)冰川变化速率存在着南北坡的差异。南坡拉萨河流域的冰川在海拔 5 200~5 900 m 区域,年均

表 2 1977—2010 年西念青唐古拉南段冰川不同海拔梯高度的冰川分布和变化

Table 2 Distribution and change of glacier area in each elevation zone of West Nyainqentanglha Range from 1977—2010

海拔高度(m)	各年占冰川总面积比例(%)			面积变化(km ²)			年均面积变化速率(km ² /a)		
	1977	2001	2010	1977—2001	2001—2010	1977—2010	1977—2001	2001—2010	1977—2010
<5 200	0.01	0.00	0.00	−0.09	−0.01	−0.10	−0.003 6	−0.001 0	−0.002 9
5 200~5 300	0.16	0.14	0.13	−0.34	−0.12	−0.45	−0.013 5	−0.012 9	−0.013 3
5 300~5 400	0.39	0.36	0.32	−0.64	−0.39	−1.03	−0.025 5	−0.043 7	−0.030 3
5 400~5 500	1.28	0.82	0.70	−4.33	−1.11	−5.45	−0.173 4	−0.123 6	−0.160 2
5 500~5 600	4.67	3.09	2.69	−15.27	−3.81	−19.08	−0.610 7	−0.423 6	−0.561 1
5 600~5 700	11.50	9.65	9.34	−24.93	−6.67	−31.60	−0.997 2	−0.741 4	−0.929 5
5 700~5 800	19.31	19.24	19.43	−23.02	−8.61	−31.63	−0.920 9	−0.956 3	−0.930 3
5 800~5 900	23.97	25.42	26.10	−18.99	−8.91	−27.90	−0.759 7	−0.989 9	−0.820 6
5 900~6 000	19.76	21.02	21.33	−15.20	−8.85	−24.05	−0.607 9	−0.983 3	−0.707 2
6 000~6 100	11.54	12.23	11.98	−9.19	−7.58	−16.77	−0.367 7	−0.842 3	−0.493 3
6 100~6 200	4.14	4.55	4.47	−2.27	−2.76	−5.03	−0.090 9	−0.306 5	−0.148 0
6 200~6 300	1.44	1.64	1.62	−0.42	−0.91	−1.33	−0.016 7	−0.101 6	−0.039 2
6 300~6 400	0.46	0.55	0.55	0.02	−0.27	−0.25	0.000 8	−0.029 5	−0.007 3
6 400~6 500	0.23	0.27	0.27	−0.05	−0.12	−0.16	−0.001 9	−0.013 1	−0.004 8
6 500~6 600	0.22	0.25	0.26	−0.07	−0.08	−0.15	−0.002 8	−0.008 8	−0.004 4
6 600~6 700	0.22	0.25	0.25	−0.06	−0.10	−0.16	−0.002 6	−0.010 9	−0.004 8
6 700~6 800	0.20	0.23	0.24	−0.04	−0.05	−0.09	−0.001 6	−0.005 7	−0.002 7
6 800~6 900	0.12	0.15	0.16	−0.01	−0.02	−0.03	−0.000 6	−0.001 9	−0.000 9
6 900~7 000	0.08	0.09	0.10	−0.01	0.00	−0.01	−0.000 5	0.000 1	−0.000 3
>7 000	0.04	0.05	0.06	0.00	0.00	0.00	0.000 0	−0.000 4	−0.000 1

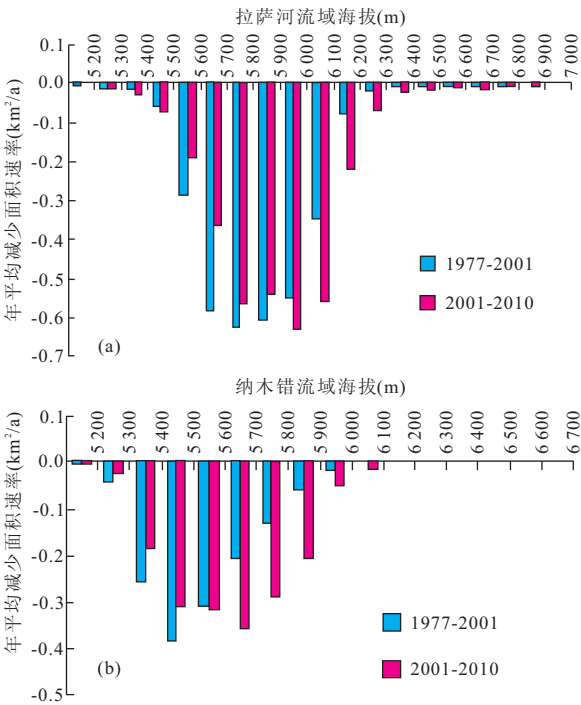


图 6 拉萨河流域(a)和纳木错流域(b)冰川面积在 1977—2001 年和 2001—2010 年 2 个时段随海拔高度变化的年平均减少面积变化率

Fig. 6 The rate change of annual mean glacier reduction area at each elevation zone of Lhasa River basin (a) and Namco basin (b) from 1977—2001 and 2001—2010

面积减少速率呈减缓趋势;而在海拔 5 900 ~ 7 000 m 区域,年均面积减少速率呈加剧趋势. 北坡纳木错流域的冰川在海拔低于 5 700 m 区域,年均面积减少速率呈减缓趋势;而在海拔 5 700 ~ 6 900 m 区域则呈加剧趋势(图 6).

(3)冰川面积变化最大发生的海拔区域存在南北坡差异. 1977—2001 年拉萨河流域和纳木错湖流域冰川年均减少面积最大值分别发生在海拔 5 700 ~ 5 800 m 和 5 600 ~ 5 700 m 区域,而 2001—2010 则分别发生在海拔 5 900 ~ 6 000 m 和 5 800 ~ 5 900 m 区域. 拉萨河流域年均冰川变化量最大值发生的海拔区间要比纳木错流域高 100 m 左右(图 7).

4 讨论

冰川变化是气候变化的必然结果,气象要素中影响冰川进退变化的主要因素是气温和降水. 对纳木错流域和拉萨河流域内的班戈、当雄和拉萨 3 个气象站的气温和降水数据进行分析,发现 1971—2010 年该区的年均气温和年降水量都呈明显上升趋势. 其中 2001—2010 年和 1971—2000 年相比,三站年均温升高了 0.31 ℃,三站年降水量平均增加 11.58 mm,特别是近十年年均温升高显著,比平均气温(1971—2010)偏高 0.6 ℃(图 8). 三站夏季

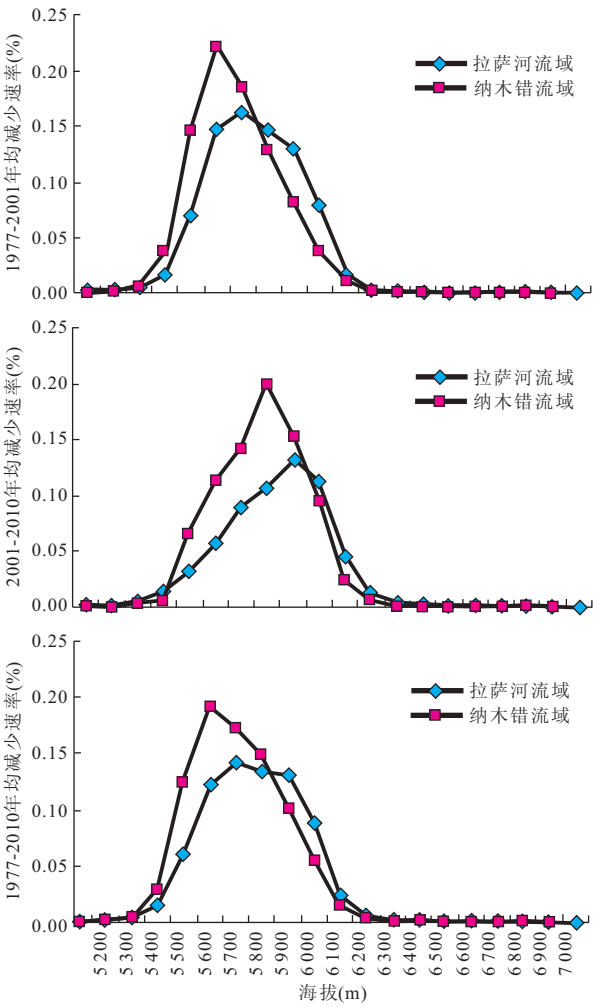


图 7 拉萨河流域和纳木错流域冰川在 1977—2001, 2001—2010, 1977—2010 年期间各海拔段变化情况
Fig. 7 The rate of glacier reduction area at each elevation zone of Lhasa River basin (red) and Namco basin (blue) in 1977—2001, 2001—2010, 1977—2010

(6—9 月)线性增温趋势为 $0.32\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,而冬季(12—2 月)线性增温趋势约为 $0.59\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,冬季增温趋势比夏季明显. 其中班戈气象站冬季气候增温率为 $0.68\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,明显高于中国西部 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的增温速率(刘时银等, 2006). 青藏高原中部各拉丹东冰心恢复的气候记录表明近期的增温也呈加速趋势,且冬季高海拔区域对全球变暖的响应更为敏感(康世昌等, 2007). 冬季气温升高使得冰川活动层升温来得更早,因而冰川表层温度接近于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的持续时间更长,这一现象可使冰川表面消融期延长,加快冰川的减薄或退缩. 对拉萨河流域近 50 年来径流变化分析以及拉萨河冬季径流对气候变暖和冻土退化的响应研究表明,冬半年径流变化主要受冬季气温明显升高的影响,主要原因可能是气温上升导致

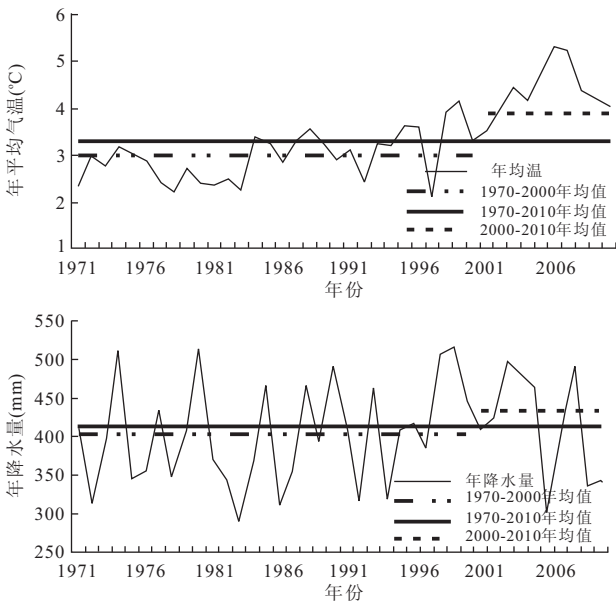


图 8 念青唐古拉山西段地区 1971—2010 年均温、年降水变化趋势(3 站平均)
Fig. 8 Variation tendency of annual mean temperature and annual precipitation during 1971—2010 in western Nyainqentanglha area

的冰川融水增加和冻土退化(巩同梁等, 2006; 蔺学东等, 2007). 而夏季气温持续升高则引起雪线的上升,使得高海拔冰川区夏季液态降水增加,固态降水发生在更高海拔. 研究结果也表明,近十年来冰川退缩速度超过以往,说明气温的升高极大地影响着冰川的退缩消融.

1971—2010 年 3 个气象站的监测数据显示,年均降水量的线性趋势线均处于略微上扬态势(图 8),但降水量的增加主要集中在夏季,而冬季该区域的降水很少几乎没有. 对念青唐古拉峰拉弄冰川垭口处冰心记录的大气降水 δD 和净积累量与中亚冬季的气压、南亚和青藏高原冬季、夏季的位势高度关系的研究表明:印度夏季风的增强导致了念青唐古拉峰地区 20 世纪 80 年代以来降水量的增多和降水中 δD 值的降低(康世昌等, 2006). 由于该区在冬季大风、干燥,冰川积累较少,夏季降水的增加为冰川的积累创造了有利条件,但气温的显著升高使得增加的降水主要为液态降水,固态降水对冰川物质的积累难以抵消物质平衡亏损,使得冰川退缩加速. 已有的研究也认为气候变暖导致的降水中雪/雨比例下降,也可能是影响冰川物质积累和消融平衡的因素之一(Hoelzle *et al.*, 2007). 该区域的持续升温 and 冬季气温显著升高,可能会导致该区冰川的持续退化.

冰川变化也受冰川规模及其所处地理位置、海

拔高度和地形条件所导致的太阳辐射、水汽来源和季风强度的差异的影响。北坡位于羌塘寒冷半干旱高原季风气候区,而南坡位于藏南温暖半干旱高原季风气候地区,为夏季印度洋西南季风暖湿气流进入高原的迎风坡,较为丰富的降水部分抵消了太阳辐射对冰川的消融,使得冰川的面积、规模和冰储量都大于北坡。而已有研究认为小规模冰川比大规模冰川退缩更快(Paul *et al.*, 2004b; Barnett *et al.*, 2005; Bolch *et al.*, 2010b),这可能是造成念青唐古拉山西段冰川不到 30% 的北坡冰川退缩率高于南坡的原因之一。

由海拔高度和地形条件导致的局地环流差异也可能导致北坡与南坡冰川退化速率不同。谢健等(2010)等对念青唐古拉山南坡不同海拔土壤温度和地表气温的分析得出,地、气温差表现为冬季大夏季小,高海拔山地冬季地面对大气的加热作用比其他地区强烈。游庆龙等(2007)利用自动气象站的近地层观测数据研究了该地区气候特征,得出北坡的升温 and 降温幅度都比南坡大,月平均气温日较差除夏季(6—9 月)外,其余月份均高于南坡,年气温直减率也高于南坡;而且北坡月、年平均风速均比南坡大,日平均风速最大值均出现在北坡 1 月份,北坡总辐射强度大于南坡。这些都可能是造成南北坡冰川分布和变化差异的重要原因。

本研究从冰川变化面积以及不同海拔高度的冰川变化等方面,定量研究了近年来念青唐古拉山西段冰川对气候变化的响应,但因现有条件限制未涉及冰川厚度和储量变化方面。

5 结论

本研究利用多期同时段的遥感数据监测念青唐古拉西段冰川 1977—2010 年的冰川变化及其对气候变化的响应。采用的数据无云且少积雪覆盖,数据采集时间也有很好的一致性。研究结果表明,该区冰川随着温度的升高将可能持续退缩并向高海拔转移。念青唐古拉山西段南坡和北坡冰川由于其发育规模以及所处地理位置、海拔高度和地形条件等所导致的太阳辐射、水汽来源和季风强度的差异的影响,使得该区南北坡冰川变化存在明显差异,表现为北坡冰川退缩速率大于南坡。冰川萎缩近十年有加快趋势,气温的急剧升高是造成冰川退缩加剧的主要原因。气温升高造成的本区冰川强烈的物质损耗及占本区冰川数量众多的小冰川的“消失”将可能会

对本区水资源、生态环境、局地气候及人类可持续发展等造成较大的影响。

致谢:衷心感谢徐恒力教授,中国科学院寒区旱区环境与工程研究所吴立宗博士,西藏地质环境监测总站刘伟博士, RSS GmbH 的 Peter Navratil, Dr. Jonas Franke, Dr. Vanessa Heinzl, Keith Peterson 以及中国地质大学环境学院甘义群博士和孙自永博士等在研究过程中给予的帮助;感谢审稿老师对本文提出的宝贵意见和建议。

References

- Andreassen, L. M., Paul, F., Kääb, A., et al., 2008. Landsat-derived glacier inventory for Jotunheimen, Norway, and deduced glacier changes since the 1930s. *The Cryosphere*, 2 (2): 131—145. doi: 10.5194/tc-2-131-2008
- ASTER GDEM Validation Team: METI/ERSDAC/NASA/LPDAAC/USGS/EROS, 2009. ASTER Global DEM Validation Summary Report.
- Bajracharya, S. R., Mool, P. K., Shrestha, B. R., 2007. Impact of climate change on Himalayan glaciers and glacial lakes—case studies on GLOF and associated hazards in Nepal and Bhutan. International Centre for Integrated Mountain Development G. P. O. Box 3226, Kathmandu, Nepal.
- Barnett, T. P., Adam, J. C., Lettenmaier, D. P., 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438 (17), 303—309. doi: 10.1038/nature04141
- Barry, R. G., 2006. The status of research on glaciers and global glacier recession: a review. *Prog. Phys. Geog.*, 30(3): 285—306. doi: 10.1191/0309133306pp478ra
- Bolch, T., Yao, T., Kang, S., et al., 2010a. Interactive comment on “A glacier inventory for the western Nyainqentanglha Range and Nam Co basin, Tibet, and glacier changes 1976—2009” by T., Bolch, et al. *The Cryosphere Discussion*, 4: C490—C516. www. the-cryosphere-discuss. net/4/C490/2010/
- Bolch, T., Yao, T., Kang, S., et al., 2010b. A glacier inventory for the western Nyainqentanglha Range and the Nam Co basin, Tibet, and glacier changes 1976—2009. *The Cryosphere*, 4(3): 419—433. doi: 10.5194/tc-4-419-2010
- Chen, F., Kang, S. C., Zhang, Y. J., et al., 2009. Glaciers and lake change in response to climate change in the Nam Co basin, Tibet. *Journal of Mountain Science*, 27(6): 641—647 (in Chinese with English abstract).
- Dyrgerov, M. B., Meier, M. F., 2000. Twentieth century climate change: evidence from small glaciers. *PNAS*, 97

- (4): 1406—1411. doi: 10.1073/pnas.97.4.1406
- Gong, T. L., Liu, C. M., Liu, J. S., 2006. Hydrological response of Lhasa River to climate change and permafrost degradation in Xizang. *Acta Geographica Sinica*, 7(6): 641—647. 131—2008, 61(5): 519—526 (in Chinese with English abstract).
- Hall, D. K., Ormsby, J. P., Bindschadler, R. A., et al., 1987. Characterization of snow and ice reflectance zones on glaciers using Landsat Thematic Mapper data. *Annals of Glaciology*, 9: 104—108.
- Hoelzle, M., Chinn, T., Stumm, D., et al., 2007. The application of glacier inventory data for estimating past climate change effects on mountain glaciers: a comparison between the European Alps and the southern Alps of New Zealand. *Global. Planet. Change.*, 56(1—2): 69—82. doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.07.001
- Kang, S. C., Qin, D. H., Ren, J. W., et al., 2006. Relationships between an ice core records from southern Tibetan plateau and atmospheric circulation over Asia. *Quaternary Sciences*, 26(2): 153—164 (in Chinese with English abstract).
- Kang, S. C., Xu, Y. W., You, Q. L., et al., 2010. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan plateau. *Environ. Res. Lett.*, 5(1): 015101. doi: 10.1088/1748-9326/5/1/015101
- Kang, S. C., Zhang, Y. J., Qin, D. H., et al., 2007. Ice-core evidence for rapid increased temperature in “Sanjiang yuan” region in recent years, Tibetan plateau. *Chinese Science Bulletin*, 52(4): 457—462 (in Chinese).
- Lin, X. D., Zhang, Y. L., Yao, Z. J., et al., 2007. Trend analysis of the runoff variation in Lhasa River basin in Tibetan plateau during the last 50 years. *Progress in Geography*, 26(3): 58—67 (in Chinese with English abstract).
- Liu, S. Y., Ding, Y. J., Li, J., et al., 2006. Glaciers in response to recent climate warming in western China. *Quaternary Sciences*, 26(5): 762—771 (in Chinese with English abstract).
- Liu, W., Guo, Q. H., Wang, Y. X., et al., 2008. Temporal-spatial climate change in the last 35 years in Tibet and its geo-environmental consequences. *Environmental Geology*, 54(8): 1747—1754. doi: 10.1007/s00254-007-0952-y
- Liu, X. D., Cheng, Z. G., Yan, L. B., et al., 2009. Elevation dependency of recent and future minimum surface air temperature trends in the Tibetan plateau and its surroundings. *Global. Planet. Change.*, 68(3): 164—174. doi: 10.1016/j.gloplacha.2009.03.017
- Meier, M. F., Dyurgerov, M. B., 2002. How Alaska affects the world. *Science*, 297(5580): 350—351. doi: 10.1126/science.1073591
- Mi, D. S., Xie, Z. C., Luo, X. R., 2002. China glacier inventory—the ganga drainage basin, indus river drainage basin. Xi'an Cartographic Press, Xi'an (in Chinese).
- Nie, Y., Zhang, Y. L., Liu, L. S., et al., 2010. Glacial changes in the vicinity of Mt. Qomolangma (Everest), central high Himalayas since 1976. *J. Geogr. Sci.*, 20(5): 667—686. doi: 10.1007/s11442-010-0803-8
- Owen, L. A., Thackray, G., Anderson, R. S., et al., 2009. Integrated research on mountain glaciers: current status, priorities and future prospects. *Geomorphology*, 103(2): 158—171. doi: 10.1016/j.geomorph.2008.04.019
- Paul, F., Huggel, C., Kääb, A., 2004a. Combining satellite multispectral image data and a digital elevation model for mapping debris-covered glaciers. *Remote Sens. Environ.*, 89(4): 510—518. doi: 10.1016/j.rse.2003.11.007
- Paul, F., Kääb, A., Maisch, M., et al., 2004b. Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. *Geophysical Research Letters*, 31; L21402. doi: 10.1029/2004GL020816
- Paul, F., Kääb, A., Max, M., et al., 2002. The new remote sensing derived Swiss glacier inventory: I. Methods. *Annals of Glaciology*, 34(1): 355—361. doi: 10.3189/172756402781817941
- Pu, J. C., Yao, T. D., Ren, L. D., 2006. Change of the Gurenhekou glacier in yangbajain area, Nyainqentanglha Range. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28(6): 861—864 (in Chinese with English abstract).
- Pu, J. C., Yao, T. D., Wang, N. L., et al., 2004. Fluctuations of the glaciers on the Qinghai-Tibetan plateau during the Past Century. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(5): 517—522 (in Chinese with English abstract).
- Qin, D., Xiao, C., 2009. Global climate change and cryospheric evolution in China. *Eur. Phys. J. Conferences.*, 1: 19—28. doi: 10.1140/epjconf/e2009-00907-x
- Rees, H. G., Collins, D. N., 2006. Regional differences in response of flow in glacier-fed Himalayan rivers to climatic warming. *Hydrol. Process.*, 20(10): 2157—2169. doi: 10.1002/hyp.6209
- Richter, R., Muller, A., 2005. De-shadowing of satellite/airborne imagery. *Int. J. Remote. Sens.*, 26(15): 3137—3148. doi: 10.1080/01431160500114664
- Shangguan, D. H., Liu, S. Y., Ding, L. F., et al., 2008. Variation of glaciers in the western Nyainqentanglha Range of Tibetan plateau during 1970—2000. *Journal of*

- Glaciology and Geocryology*, 30(2): 204—210 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. F., Liu, S. Y., 2000. The estimation of Chinese glacier in response to global climate warming in 21 century. *Chinese Science Bulletin*, 45(4): 434—438 (in Chinese).
- Shukla, A., Arora, M. K., Gupta, R. P., 2010. Synergistic approach for mapping debris-covered glaciers using optical-thermal remote sensing data with inputs from geomorphometric parameters. *Remote Sens. Environ.*, 114(7): 1378—1387. doi: 10.1016/j.rse.2010.01.015
- Toutin, T., 2008. ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: a review. *Int. J. Remote. Sens.*, 29(7): 1855—1875. doi: 10.1080/01431160701408477
- Wang, X. D., Zhong, X. H., Liu, S. Z., et al., 2008. Regional assessment of environmental vulnerability in the Tibetan plateau: development and application of a new method. *J. Arid. Environ.*, 72(10): 1929—1939. doi: 10.1016/j.jaridenv.2008.06.005
- Wu, L. Z., Li, X., 2004. China glacier information system. China Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Wu, Y. H., Zhu, L. P., 2008. The response of lake-glacier variations to climate change in Nam Co Catchment, central Tibetan plateau, during 1970—2000. *J. Geogr. Sci.*, 18(2): 177—189. doi: 10.1007/s11442-008-0177-3
- Xie, J., Liu, J. S., Du, M. Y., et al., 2010. Hydrothermal characteristics of the Land-Atmospheric System in an alpine area of west Nyainqentanglha mountains. *Progress in Geography*, 29(2): 151—158 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Q. Y., Zheng, D., 1985. On the significance of the boundary line—the Cangdisi-Nyainqentanglha Range. *Geographical Research*, 4(2): 36—44 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W., Yao, T. D., Xu, B. Q., et al., 2008. Rapid glacial mass loss and retreat in Gangrigabu region, South-east of Tibetan plateau. *Chinese Science Bulletin*, 53(17): 2091—2095 (in Chinese).
- Yao, T. D., Liu, S. Y., Pu, J. C., et al., 2004. The effect of glacier retreat recently in High Asia to the water resources in north western China. *Science in China (Series D)*, 34(6): 535—543 (in Chinese).
- You, Q. L., Kang, S. C., Pepin, N., et al., 2009. Relationship between temperature trend magnitude, elevation and mean temperature in the Tibetan plateau from homogenized surface stations and reanalysis data. *Global and Planetary Change*, 71(1—2): 124—133. doi: 10.1016/j.gloplacha.2010.01.020
- You, Q. L., Kang, S. C., Tian, K. M., et al., 2007. Preliminary analysis on climatic features at Mt. Nyainqentanglha, Tibetan plateau. *Journal of Mountain Science*, 25(4): 497—504 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T. T., Ren, J. W., Kang, S. C., 2004. Lanong glacier retreat in Nyainqentanglha Range of Tibetan plateau during 1970—2003. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(6): 736—739 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈锋, 康世昌, 张拥军, 等, 2009. 纳木错流域冰川和湖泊变化对气候变化的响应. *山地学报*, 27(6): 641—647.
- 巩同梁, 刘昌明, 刘景时, 2006. 拉萨河冬季径流对气候变暖 and 冻土退化的响应. *地理学报*, 61(5): 519—526.
- 康世昌, 秦大河, 任贾文, 等, 2006. 青藏高原南部冰心记录与大气环流的关系. *第四纪研究*, 26(2): 153—164.
- 康世昌, 张拥军, 秦大河, 等, 2007. 近期青藏高原原长江源区急剧升温的冰心证据. *科学通报*, 52(4): 457—462.
- 蔺学东, 张懿铨, 姚治君, 等, 2007. 拉萨河流域近 50 年来径流变化趋势分析. *地理科学进展*, 26(3): 58—67.
- 刘时银, 丁永健, 李晶, 等, 2006. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应. *第四纪研究*, 26(5): 762—771.
- 米德生, 谢自楚, 罗祥瑞, 2002. 中国冰川编目: 恒河水系, 印度河水系. 西安: 西安地图出版社.
- 蒲健辰, 姚檀栋, 田立德, 2006. 念青唐古拉山羊八井附近古仁河口冰川的变化. *冰川冻土*, 28(6): 861—864.
- 蒲健辰, 姚檀栋, 王宁练, 等, 2004. 近百年来青藏高原冰川的进退变化. *冰川冻土*, 26(5): 517—522.
- 上官冬辉, 刘时银, 丁良福, 等, 2008. 1970—2000 年念青唐古拉山脉西段冰川变化. *冰川冻土*, 30(2): 204—210.
- 施雅风, 刘时银, 2000. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估. *科学通报*, 45(4): 434—438.
- 吴立宗, 李新, 2004. 中国冰川信息系统. 北京: 海洋出版社.
- 谢健, 刘景时, 杜明远, 等, 2010. 念青唐古拉山西段高海拔陆—气系统水热特征. *地理科学进展*, 29(2): 151—158.
- 杨勤业, 郑度, 1985. 冈底斯山—念青唐古拉山线自然地理意义的探讨. *地理研究*, 4(2): 36—44.
- 杨威, 姚檀栋, 徐柏青, 2008. 青藏高原东南部岗日嘎布地区冰川严重损耗与退缩. *科学通报*, 53(17): 2091—2095.
- 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等, 2004. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响. *中国科学 (D 辑)*, 34(6): 535—543.
- 游庆龙, 康世昌, 田克明, 等, 2007. 青藏高原念青唐古拉峰地区气候特征初步分析. *山地学报*, 25(4): 497—504.
- 张堂堂, 任贾文, 康世昌, 2004. 近期气候变暖念青唐古拉山拉弄冰川处于退缩状态. *冰川冻土*, 26(6): 736—739.