

# 1988—2013 年布加岗日地区冰川变化及其对气候变化的响应

王聪强, 杨太保, 冀琴, 何毅

(兰州大学 资源环境学院 冰川与生态地理研究所, 兰州 730000)

**摘要:**基于 Landsat TM/ETM+/OLI 遥感影像,采用比值阈值和目视解译相结合的方法提取分析了唐古拉山东段布加岗日地区近 25 a 来冰川现状及其变化,对比研究了四个时段的冰川变化特征及其对气候变化的响应。结果表明:1988—2013 年研究区冰川退缩比较严重,面积退缩 34.25 km<sup>2</sup>,占 1988 年冰川面积的 18.67%,且不同时段冰川退缩速率不同,1988—1994—1999—2006—2013 年冰川退缩表现为:慢—最快—中等—快的特点,冰储量预测减少 15.38%。夏季气温升高很可能是造成冰川加速退缩的主因,冰川变化对气候变化的响应更好地体现在长时段的气候变化上,而短时段气候变化对冰川总体变化趋势有一定的作用,这是造成各个时段冰川变化差异性的原因。研究区北坡冰川退缩明显快于南坡,这种变化的差异性一方面可能是由研究区季风气候特征和水汽来源对不同朝向冰川的影响造成的,另一方面也受冰川发育规模、分布海拔的影响。

**关键词:**冰川退缩;冰川规模;气候变化;布加岗日地区

中图分类号:P343.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0070-07

## Variation of Glacier and Its Response to Climate Change in the Bujiangri Region From 1988 to 2013

WANG Congqiang, YANG Taibao, JI Qin, HE Yi

(College of Earth and Environmental Sciences, Institution of

Glaciology and Ecogeography, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** We used the ratio threshold and visual interpretation to extract and analyze the glacier change and variation in the Bujiangri region in the last 25 years based on Landsat data (TM/ETM+/OLI). Compared to the variations of glacier in the four periods and its response to climate change, the result demonstrated that the glacial retreat was serious from 1988 to 2013 where 34.25 km<sup>2</sup> (18.67%) of glacier area had been retreated. In addition, the rates of glacier decline in 1988—1994—1999—2006—2013 appeared to be slowest, fastest, medium, and then faster, respectively. Generally, the volume of the glacier was decreased by 15.38% at the end of year 2013. The increase of temperature in the summer was likely to be the main reason for this phenomenon. Moreover, glacial change response was significant in the long-term climate change, while the short-term climate change was significant only in the overall trend of the glacier change. Generally, glaciers in the northern area declined quickly than that of the southern area due to the monsoon climate variations, the water vapor sources differences and variations in the scale and the elevation of the glacier areas.

**Keywords:** glacier retreat; glacier extent; climate change; Bujiangri region

冰川是地球上最大的淡水资源,也是地球上继海洋以后最大的天然水库,冰川变化是气候变化的灵敏指示器,对全球或区域生态环境和人类社会意义

重大<sup>[1]</sup>。随着全球气温升高,近三十年已经成为过去 1400 年中最暖的三十年(IPCC 第五次报告),世界上大多数冰川都出现一些重要的变化,我国西部、西北

部一些冰川退缩现象也越来越严重。目前学者对中国冰川的关注和研究越来越多,取得了比较重要的进展,但是大多数研究采用时间间隔跨度较大,不能很好地揭示近年来冰川变化的细节特征和对气候变化的响应,其中对唐古拉山已有研究区域大多集中在长江源各拉丹冬、冬克玛底等地区<sup>[2-5]</sup>,而对唐古拉山东段布加岗日地区冰川的研究十分缺乏,王宁练<sup>[6]</sup>主要揭示了该区域小冰期到现代冰川的变化而盛文坤<sup>[7]</sup>着重研究了该区域冰川水化学性质的变化,这些研究均未能很好地揭示近几十年来现代冰川的变化。因此,本文采用短时间间隔的遥感影像对布加岗日地区 1988 年,1994 年,1999 年,2006 年,2013 年的冰川现状、变化规律进行分析研究,揭示研究区冰川变化的影响因子及其对短时段气候变化的响应特征以及南北坡冰川变化差异的原因。

1 研究区概况

布加岗日地区位于唐古拉山脉东部,西藏自治区东北部那曲地区与昌都地区交界处偏北的索县与丁青县境内。海拔分布在 3 874~6 319 m,山峰区分布比较集中且海拔较高,有 16 座 6 000 m 以上的高峰,是山岳冰川发育的集中区。布加岗日地区属于半湿润的高原季风区<sup>[8]</sup>,该区盛行东南风或西南风,东南地区和偏南地区水汽压值高于偏北地区<sup>[9]</sup>,且该区域位于我国相对湿度分界线以西,在全球变暖背景下呈

现出“暖湿化”趋势<sup>[10]</sup>。  
布加岗日地区冰川位于 31.6°—32.0°N,94.5°—95.0°E,其山脉呈现东西走向趋势,山脉主山脊线以北(即北坡)冰川面积大于南坡的冰川且发育的冰川规模较小,北坡冰川分布于 4 551~6 317 m 高于南坡,南坡冰川分布于 4 180~6 319 m,但北坡冰川分布相对集中其平均海拔低于南坡。据第一次冰川编目研究表明,布加岗日地区发育有 124 条现代冰川,属于亚大陆性冰川,其冰川融水是怒江的重要补给来源<sup>[6]</sup>。

2 数据方法

2.1 数据源

本文采用的遥感数据主要有 Landsat TM/ETM+ /OLI,来自美国地质调查局(USGS)(<http://glovis.usgs.gov/>),影像选择以 5 a 左右为一个时段,但因影像条带、云层、季节性降雪等影响有所调整,详细信息见表 1。本文研究所利用的 TM/ETM+ /OLI 影像多光谱波段分辨率均为 30 m,已经过辐射纠正、几何精纠正、正射纠正以及地形校正<sup>[11]</sup>。DEM 数据来源于地球遥感观测数据分析中心 ERSDAC(<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/>),即 ASTER GDEM 数据,分辨率 30 m。由于布加岗日地区冰川处于高海拔地区,没有气象站点,本文选择距离研究区域最近的海拔在 4 500 m 以上的伍道梁、沱沱河、安多气象站的观测数据来反映布加岗日气候变化情况。

表 1 遥感数据列表

年份	获取日期	传感器	条带号	影像说明	其他参考影像(按参考优先顺序排列,日期/传感器/条带号)
1988	1988/10/9	TM	136/038	无云,有部分积雪	1992/08/26 TM135/038,1986/07/25 TM135/038
					1991/10/18 TM136/038,1989/06/22 TM136/038
1994	1994/9/24	TM	136/038	无云,有少量积雪	1995/08/19 TM135/038,1994/08/07 TM136/038
1999	1999/7/21	ETM+	135/038	有云,且研究区域影像覆盖不完全	2000/07/22 TM136/038,1999/07/21 ETM+135/038
					2000/08/08 ETM+135/038,2000/07/15 TM135/038
					2000/10/02 ETM+136/038
2006	2006/8/8	TM	136/038	研究区东部南部受云层影响严重	2005/09/30 ETM+136/038,2005/09/07 ETM+135/038
					2004/09/27 ETM+136/038,2005/09/06 TM136/038
2013	2013/8/3	ETM+	136/038	影像有条带	2013/08/19 ETM+136/038,2013/08/110 LI136/038
					2013/09/28 OLI136/038

2.2 冰川边界提取方法

冰川提取方法采用前人验证过的解译精度较高的比值阈值法和目视解译相结合的方法<sup>[12]</sup>。该方法利用波段运算得到 Landsat 数据红光波段和近红外波段的比值 band3/band5 (Landsat 8 OLI 数据是 band4/band6),再利用决策树对其进行分类,经过对布加岗日地区不同时期影像数据的对比解译尝试,得出阈值为 1.6~2.4,有积雪的影像阈值选择大一些<sup>[13]</sup>,提取出冰川初始边界,然后结合遥感影像 5,4,

3(Landsat 8 影像对应的是 6,5,4)波段假彩色合成图、冰川编目数据和 Google Earth 进行目视解译,不断修正得到冰川边界。统计计算各期冰川面积时,采用的数据投影类型为 Albers 等积投影。

2.3 冰川冰储量计算方法

国内学者参考阿尔卑斯山冰川平均厚度估算方法<sup>[14]</sup>,并根据我国祁连山区实际观测资料得出冰川平均厚度经验公式<sup>[15]</sup>:

$$H=34.4A^{0.45}$$

(1)

$$V = \frac{A \cdot H}{1000} \quad (2)$$

式中:  $A$  为冰川面积( $\text{km}^2$ );  $H$  为冰川平均厚度( $\text{m}$ );  $V$  为冰川冰储量( $\text{km}^3$ )。

这个公式具有一定的局限性仅适用于面积为  $0.05 \sim 10 \text{ km}^2$  的冰川,但唐古拉山东段布加岗日地区冰川特征与祁连山区相似<sup>[16]</sup>且据统计计算布加岗日地区 1988—2013 年有  $82.86\% \sim 87.5\%$  冰川规模处于  $0.05 \sim 10 \text{ km}^2$ ,可以借用此公式便捷地估算出唐古拉山冰川平均厚度和冰川冰储量。

#### 2.4 精度评估

冰川边界解译误差利用 GIS 缓冲区(buffer)计算获得,即利用影像分辨率长度  $1/2$  的缓冲区面积与冰川提取面积的比值来估算误差大小<sup>[17]</sup>,计算出 1988 年,1993 年,1999 年,2006 年,2013 年的布加岗日地区冰川面积提取不确定值分别为  $4.54\%$ ,  $4.63\%$ ,  $5.23\%$ ,  $4.71\%$  和  $5.16\%$ 。

表 2 1988—2013 年布加岗日地区冰川面积及数量变化

年份	条数	面积/ $\text{km}^2$	冰储量/ $\text{km}^3$	条数 变化	面积变化/ $\text{km}^2$	面积变化 比例/%	面积变化速率/ $(\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1})$	冰储量变 化/ $\text{km}^3$	冰储量变化 比例/%
1988	120	$183.43 \pm 0.38$	17.68						
1994	119	$178.41 \pm 0.38$	17.39	-1	$-5.02 \pm 0.76$	-2.74	-0.84	-0.29	-1.64
1999	111	$168.23 \pm 0.46$	16.53	-8	$-10.18 \pm 0.84$	-5.71	-2.04	-0.86	-4.95
2006	107	$159.53 \pm 0.35$	15.78	-4	$-8.7 \pm 0.81$	-5.17	-1.24	-0.75	-4.54
2013	105	$149.18 \pm 0.40$	14.96	-2	$-10.35 \pm 0.75$	-6.49	-1.48	-0.82	-5.20
总计				-15	$-34.25 \pm 0.78$	-18.67	-1.37	-2.72	-15.38

#### 3.2 不同规模冰川的变化

根据世界冰川监测服务处(WGMS)对冰川规模的划分原则,即以面积  $2^{n-1} \sim 2^n (\text{km}^2)$  为标准划分, $n$  取  $-5 \sim 7$  的整数,据本文统计计算布加岗日地区单条冰川面积均小于  $2^5 \text{ km}^2$ ,且介于各个区间的冰川条数较少,因此以  $2^{-5}, 2^{-3}, 2^{-1}, 2^1, 2^3, 2^5 (\text{km}^2)$  为界限将布加岗日地区冰川规模分为六个区间,各个区间内冰川面积变化情况见图 1。研究区域大规模冰川面积退缩对冰川总面积退缩贡献较大, $2^{-1} \sim 2^5 (\text{km}^2)$  的冰川退缩面积占到总退缩面积的  $93.76\%$ ,其中退缩比率最大的是  $2^1 \sim 2^3 \text{ km}^2$  的冰川。数目最多的冰川分布在  $2^{-5} \sim 2^1 (\text{km}^2)$  区间,该区域冰川数目变化也是最明显的,规模在  $2^{-3} \sim 2^1 (\text{km}^2)$  的冰川数目减少了 21 条,而面积小于  $2^{-3} (\text{km}^2)$  的冰川数目却增加了 12 条。小规模冰川面积和数目都有所增加,很可能是由于相邻规模等级冰川消融造成的。而且消融过程中常伴随着冰川裂解现象,据统计在 1988—2013 年研究区有 38 条冰川总共出现 70 次裂解,尤其是 1994—1999 年和 2006—2013 年裂解现象比较显著分别为 28 次和 21 次,冰川裂解大多数发生在较小规模冰川并且裂解出

### 3 结果与分析

#### 3.1 冰川面积、数量、与冰储量变化

研究对比布加岗日地区 1988—2013 年不同时期冰川空间分布和部分冰川变化,发现该区域 124 条冰川到 2013 年已经变为 105 条,有 19 条冰川已经完全消失(近 25 a 间消失 15 条)。该区域冰川面积在 1988—2013 年期间处于持续退缩状态,总面积由  $183.43 \text{ km}^2$  退缩为  $149.18 \text{ km}^2$ ,退缩了  $18.67\%$ 。各个时段冰川退缩速率不同,1988—1994—1999—2006—2013 年冰川退缩表现为:慢—最快—中等—快的特点,1994—1999 年的年均退缩速率最大为  $2.04 \text{ km}^2/\text{a}$ ,2006—2013 年和 1999—2006 年次之分别为  $1.48 \text{ km}^2/\text{a}$ ,  $1.24 \text{ km}^2/\text{a}$ ,1988—1994 年明显偏小仅为  $0.84 \text{ km}^2/\text{a}$ 。近 25 a 冰川储量估测减少  $2.72 \text{ km}^3$ ,减少率达  $15.38\%$ 。研究表明唐古拉山布加岗日地区冰川近年来退缩比较明显,表现出加速退缩趋势(表 2)。

来的小冰川图斑常伴随着明显的消融和消失现象,说明小规模冰川对气候反映更敏感。

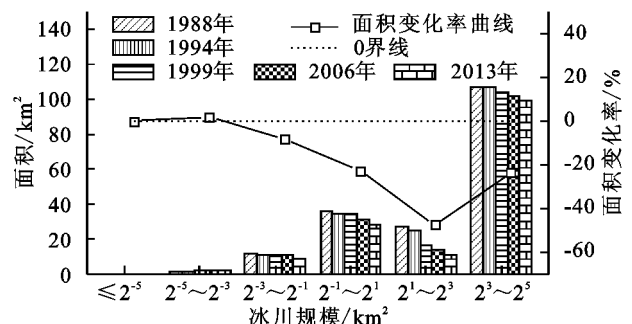
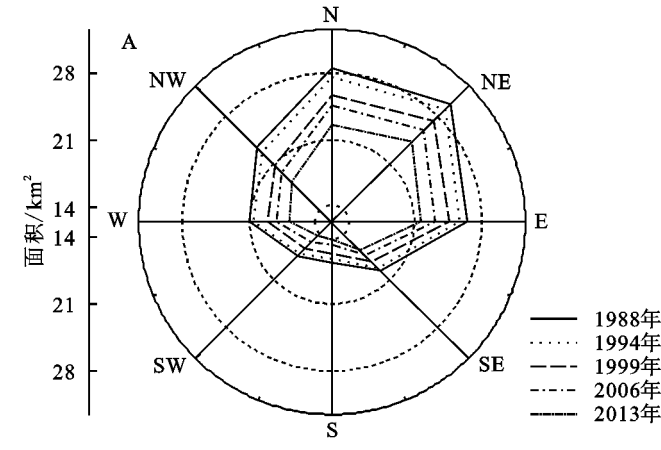


图 1 1988—2013 年布加岗日地区不同等级规模的冰川面积分布及变化比率

#### 3.3 不同坡向冰川的变化

根据  $30 \text{ m}$  分辨率的 ASTER GDEM 数据,将冰川坡向分为北、东北、东、东南、南、西南、西、西北八类,统计计算 1988—2013 年各类的变化情况,发现布加岗日地区不同朝向冰川分布呈现出东北多—西南少的特点,且东北朝向冰川面积所占比例一直最大,约为  $16.20\%$ 。近 25 a 来冰川退缩率最大的是北朝向的冰川,面积减少  $5.90 \text{ km}^2$  约占  $17.28\%$ ,其次为

东北、西北。北、东北、西北三个朝向的冰川退缩面积占总退缩面积的 48.38%。而南、西南、西朝向的冰川面积变化比较小,其中南朝向冰川 25 a 来退缩面积最小仅减少 7.12%(见图 2)。这种变化可能与研究区高原季风特征和水汽来源有关,布加岗日地区处于青藏高原东部东南部唐古拉山脉的东段,李生



3.4 南坡北坡冰川变化的差异

研究发现布加岗日地区南北坡冰川具有各自的特征,冰川变化的差异性比较明显。1988 年布加岗日北坡冰川面积为 92.50 km<sup>2</sup>,南坡为 90.94 km<sup>2</sup> 两者相差不大,而北坡冰川数目明显多于南坡(北坡 77 条、南坡 43 条),研究发现 1988—2013 年北坡冰川面积退缩了 20.15 km<sup>2</sup>,南坡退缩了 14.10 km<sup>2</sup>。为了进一步探索南北坡冰川变化特征差异,本文对比研究了南北坡不同海拔等级冰川的分布和变化(图 3 和图 4);不同等级规模冰川的面积变化(表 3);南北坡不同朝向冰川变化情况。布加岗日地区北坡冰川平均海拔为 5 458 m,南坡为 5 584 m,对比分析发现各海拔梯度内北坡冰川退缩面积总体大于南坡,尤其是 5 200~5 600 m 的冰川退缩面积较大退缩约 13.19 km<sup>2</sup>,明显高于南坡的 7.90 km<sup>2</sup>,南坡主要退缩冰川海拔分布较高,主要集中在 4 800~6 000 m(约占 94.15%)而北坡集中在 4 600~5 800 m(约占 95.64%)。

北坡冰川规模整体比南坡小,冰川变化条数多,

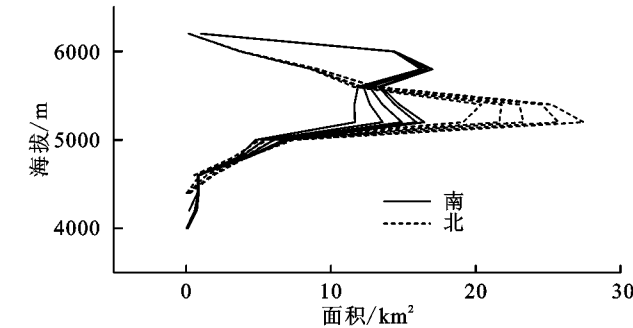


图 3 研究区南北坡不同海拔等级冰川分布

辰<sup>[18]</sup>等认为三江源地区(布加岗日位于三江源地区附近)在东亚和印度季风驱动下的西南暖湿气流是空中主要水汽来源,其次是来自西边界中东高压中的偏西气流和西风带中的偏北气流,因此布加岗日地区西南、偏南、西方位水汽来源相对充足,该朝向分布的冰川退缩较慢,而北、偏北朝向冰川退缩较快。

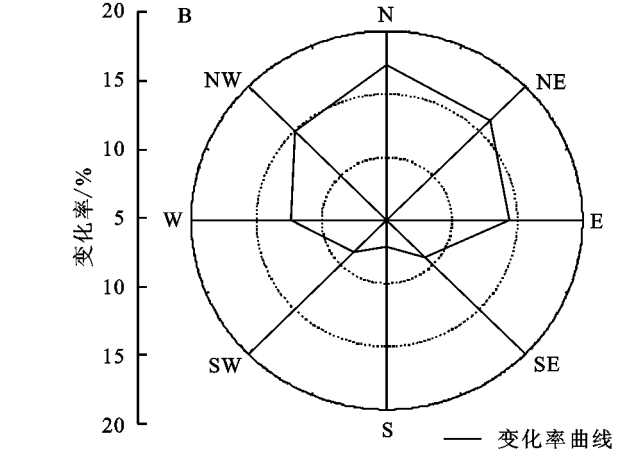


图 2 不同坡向冰川分布及变化率

小规模冰川较多,面积小于 2<sup>-1</sup> km<sup>2</sup> 的冰川面积有 9.23 km<sup>2</sup> 明显多于南坡的 3.95 km<sup>2</sup>,并且北坡小规模冰川(面积小于 2<sup>-1</sup> km<sup>2</sup>)退缩面积明显大于南坡,但南北坡均显示出大于 2<sup>-1</sup> km<sup>2</sup> 的冰川消融面积对总消融贡献较大尤其是北坡变化更明显(北坡该范围内冰川面积减少 17.46 km<sup>2</sup> 南坡减少 14.65 km<sup>2</sup>),北坡冰川处于 2<sup>1</sup>~2<sup>3</sup> km<sup>2</sup> 的冰川消融面积最大,南坡是处于 2<sup>-1</sup>~2<sup>1</sup> km<sup>2</sup> 的冰川,北坡小于 2<sup>-3</sup> km<sup>2</sup> 的冰川面积处于增加状态,而南坡 2<sup>-1</sup> km<sup>2</sup> 以下的冰川均处于增加状态。

布加岗日地区冰川朝向以东北、北、东为主,冰川变化以北、东北、西北为主,北以及偏北朝向的冰川变化对冰川总变化影响最大,因此布加岗日北坡冰川相对南坡更加活跃,变化更大,据统计在研究区北坡,北、东北、西北朝向冰川面积变化较明显,在总面积变化中分别占 13.46%,11.74%和 10.91%,南坡各朝向冰川变化比较均匀,西朝向冰川变化最大为 6.30%,东、东南、南、西南朝向冰川变化均为 5%左右。

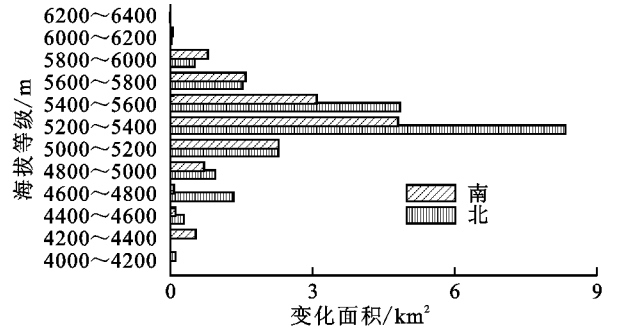


图 4 研究区南北坡不同海拔等级冰川变化

## 4 讨论

### 4.1 气候与降水变化

前人研究表明夏季气温和降水的变化是冰川变化的主要因素<sup>[19]</sup>,张立芸和周文明<sup>[20]</sup>对唐古拉山各拉丹冬的研究表明各拉丹冬及其附近区域 5—9 月份的降水量和气温及其变化量最大,本文选取伍道梁、沱沱河、安多气象站 5—9 月份的平均气温和降水量为研究对象,发现 70 年代以来研究区夏季气温和降水量总体处于上升状态(见图 5),三个气象站的平均夏季气温上升比较明显,上升趋势是  $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ;降水量总趋势也在上升,上升幅度  $20.28\text{ mm}/10\text{ a}$ 。近 25 a 来布加岗日地区冰川退缩约 18.67%,年均退缩面积  $1.37\text{ km}^2/\text{a}$ ,相比其他地区处于偏高水平(怀保娟, 2014;何毅, 2014),因此本文认为这种变化可能主要是由近年来研究区夏季均温持续升高引起的,同时降水量的小幅增加对冰川变化起到了一些减缓作用。

表 3 研究区南北坡不同等级规模的冰川面积变化对比

冰川规模/ $\text{km}^2$	1988 年面积 (北/南坡)/ $\text{km}^2$	2013 年面积 (北/南坡)/ $\text{km}^2$	变化面积 (北/南坡)/ $\text{km}^2$
$\leq 2^{-5}$	0.08/0.04	0.10/0.04	0.02/0.00
$2^{-5} \sim 2^{-3}$	0.98/0.27	1.53/0.35	0.55/0.08
$2^{-3} \sim 2^{-1}$	8.17/3.64	4.91/4.12	-3.26/0.48
$2^{-1} \sim 2^1$	17.04/18.77	16.35/11.67	-0.69/-7.10
$2^1 \sim 2^3$	15.57/11.78	3.67/7.41	-11.9/-4.37
$2^3 \sim 2^5$	50.67/56.43	45.80/53.25	-4.87/-3.18

对比得到 1994—1998 年、1999—2005 年、2006—2012 年夏季平均气温相比于上一阶段分别上升  $0.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $-0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $0.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 对应时段的降水分别上升  $-31.84$ ,  $72.05$ ,  $14.93\text{ mm}$ 。根据前人研究温度和降水变化是冰川面积变化的两大因素<sup>[21]</sup>而且升温是冰川退缩最主要的影响因子<sup>[22-23]</sup>, 70 年代以来研究区夏季年均降水增加幅度比较小,在  $4.20\% \sim 25.4\%$ ,根据怀保娟<sup>[24]</sup>的研究表明该范围内降水的增多不足以抵消升温对冰川退缩的影响作用,布加岗日地区 70 年代以来冰川面积持续退缩且退缩速度表现为慢—最快—中等—快的趋势,大致与气温数据变化吻合。其中 1994—1999 年冰川年均退缩面积最大为  $2.04\text{ km}^2/\text{a}$ ,可能主要原因是该阶段增温最明显(约  $0.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ )造成的,并且该时段夏季平均降水减少  $31.84\text{ mm}$ 在一定程度上加剧了这种变化;2006—2012 年夏季年平均气温上升  $0.41\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,该阶段冰川退缩速率较快为  $1.48\text{ km}^2/\text{a}$ 。因此布加岗日地区不同时段冰川变化不同很可能是由夏季气温的变化造成的。

1999—2005 年夏季平均气温却呈现出微弱的降低趋势(降低约  $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),降水也在增加,由  $283.25\text{ mm}$  增加到  $355.3\text{ mm}$ 。但是冰川变化与气候变化表现出不太吻合的趋势,1999—2006 年冰川年均处于

退缩状态,退缩速率比 1988—1994 年还要快,达到  $1.24\text{ km}^2/\text{a}$ 。这种变化对气候变化响应出现比较大的偏差,本研究认为这很有可能与短时段气候数据划分有关。冰川变化与气候变化并不是完全同步的,它对气候变化的响应不能立即体现出来<sup>[25]</sup>,前人研究中多采用长时段的气候变化往往能准确反映冰川变化对气候变化的影响,而短时段气候数据波动比较大,因此本文通过对冰川变化与气候变化关系的研究认为冰川变化对短时段气候变化的响应不是十分灵敏的,短时期气候变化从某种程度上可以说明其相比于相邻时期对冰川总体变化趋势的正向或负向的作用效果,但不影响冰川总体变化趋势,冰川总体变化趋势取决于长时期内气候的变化趋势。前文研究表明布加岗日冰川变化主要受夏季气温的影响,70 年代以来研究区夏季气温总体处于上升状态,升温比较明显达到  $+0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,决定了近几十年来冰川总体处于逐渐加快的退缩状态,而 1999—2005 年温度降低和降水量增加的变化特征均反映出该时段气候变化对冰川总退缩趋势有一定的遏制作用,因而冰川退缩速率相比于上一阶段有了比较明显的下降,但仍然是处于快速退缩状态,其他阶段分别对冰川变化总趋势起到了不同程度的正向促进作用,促进程度取决于升温幅度,所以研究区 1988—2013 年冰川退缩速率表现出:慢—最快—中等—快的特征。因此本文得出冰川变化对气候变化的响应更好地体现在长时段气候的变化上,而短时段气候变化仅仅对冰川总体变化趋势有一定的作用,这种作用造成了同一变化趋势下各个时段冰川变化的差异性。

### 4.2 南北坡冰川变化差异分析

北坡冰川退缩比南坡显著很可能是由于研究区季风气候特征和水汽来源对不同朝向冰川的影响造成的,本文南北坡选取基本上是沿着唐古拉山脉布加岗日段的主山脊线划分的,根据郑新江等<sup>[26]</sup>研究得出青藏高原的东部地区基本是南湿北干,干湿区之间的边界基本上是沿着唐古拉山—巴颜喀拉山—一线。前文研究表明研究区受季风特征和水汽来源影响,布加岗日北、偏北朝向冰川退缩较快,而西南、偏南、西朝向冰川退缩较慢。而研究区位于北坡的冰川朝向以东北、东、北为主,南坡以西和偏南地区为主,因此北坡冰川退缩、数目变化比南坡明显。另外受季风气候和低海拔的影响,布加岗日地区北坡冰川发育规模比较小,前文研究表明北坡冰川面积变化相比南坡更集中于低海拔地区,北坡小规模冰川变化比南坡更明显,1988—2013 年北坡小于  $2^{-1}\text{ km}^2$  规模的冰川变化数目达到 24 条,南坡仅为 6 条。因此北坡冰川退缩明显,另一方面可能是北坡冰川分布海拔较低,冰川规模较小对气候变化反映敏感。

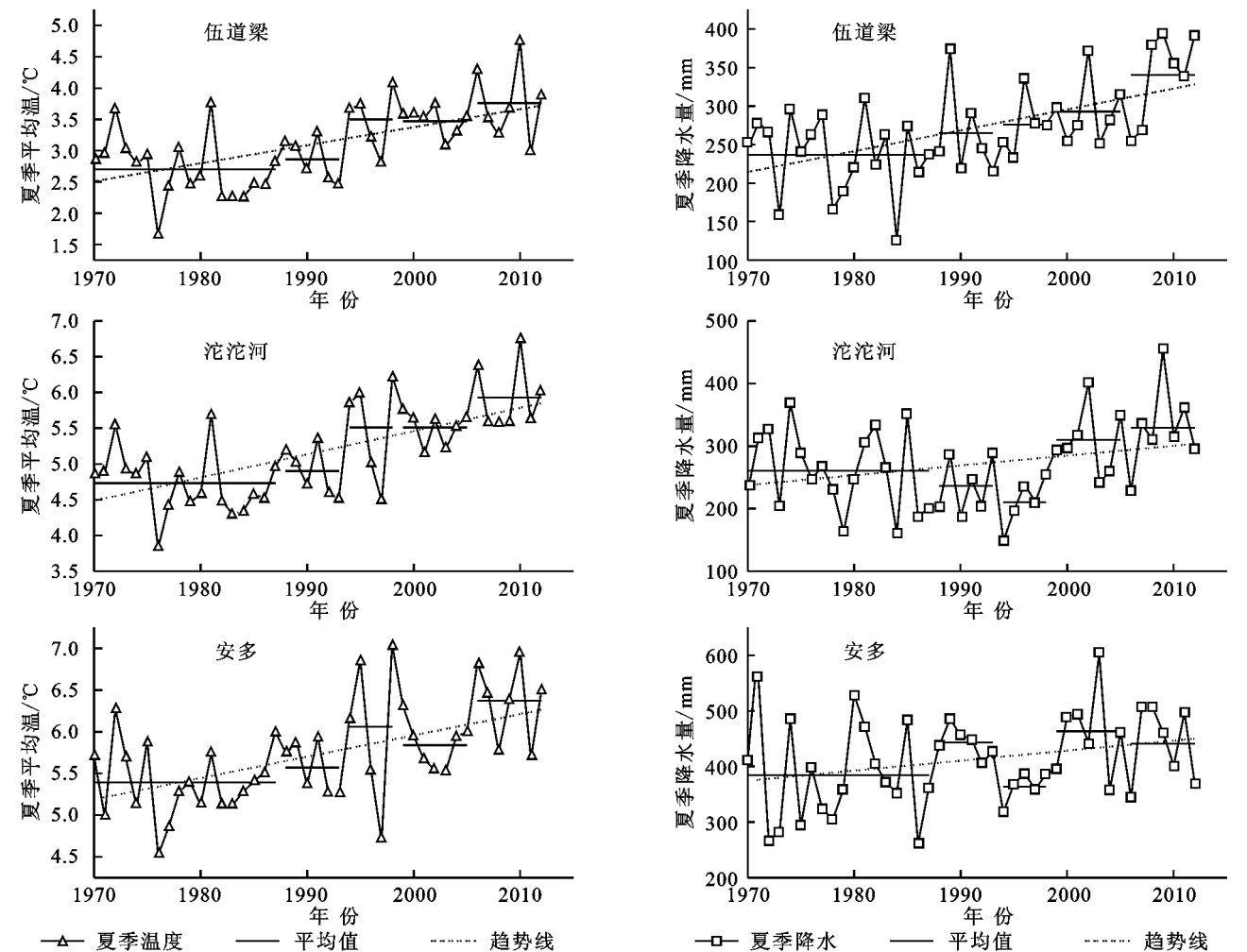


图 5 1970—2012 年夏季(5—9 月份)均温和降水量变化

5 结 论

(1) 1988—2013 年布加岗日地区冰川退缩比较显著,冰川面积由 183.43 km<sup>2</sup> 退缩为 149.18 km<sup>2</sup>,面积退缩比率 18.67%;冰川编目中 124 条冰川中的 19 条已经完全消失;冰川储量预估减少了 2.72 km<sup>3</sup>,减少 15.38%。不同时段冰川退缩速率不同 1988—1994—1999—2006—2013 年冰川退缩表现为慢—最快—中等—快的特点,1994—1999 年的年均退缩速率最快为 2.04 km<sup>2</sup>/a

(2) 大规模冰川面积退缩对冰川总面积退缩贡献较大,2<sup>-1</sup>~2<sup>5</sup> (km<sup>2</sup>) 的冰川退缩面积占到总退缩面积的 93.76%,而较小规模冰川面积和数目变化比较明显,裂解消融现象比较严重,小规模冰川对气候反映更敏感。

(3) 不同朝向冰川变化表现出明显的差异性,北、东北、西北朝向的冰川面积退缩速率比较快,而南、西南、西朝向的冰川较慢,很可能受研究区季风气候特征和水汽来源的影响。

(4) 夏季气温升高很可能是造成布加岗日地区

冰川加快退缩的主因,冰川变化对气候变化的响应更好地体现在长时段气温降水的变化上,而短时段气候变化对冰川总体变化趋势有一定的作用,这是造成布加岗日地区各个时段冰川变化差异性的原因。

(5) 北坡冰川退缩比南坡更显著,这一方面可能是由研究区季风气候特征和水汽来源对不同朝向冰川的不同作用造成的,另一方面可能在于北坡冰川规模较小,冰川分布海拔较低,对气候变化反映更敏感。

参考文献:

[1] 张正勇,李忠勤,何新林,等.玛纳斯河流域冰川变化及水资源研究进展[J].水土保持研究,2014,21(5):332-337.

[2] 张立芸,唐亚,杨欣.1969—2012 年长江源各拉丹冬地区主要冰川整体和局部变化及其对气候变化的响应[J].干旱区地理,2014,37(2):212-221.

[3] 金姗姗,张永红,吴宏安.近 40a 长江源各拉丹冬冰川进退变化研究[J].自然资源学报,2013,28(12):2095-2104.

[4] 王媛,吴立宗,许君利,等.1964—2010 年青藏高原长江源各拉丹冬地区冰川变化及其不确定性分析[J].冰川冻土,2013,35(2):255-262.

[5] 谯程骏.唐古拉山冬克玛底地区冰川变化遥感监测[J].安徽农业科学,2010,38(14):7703-7705.

[6] 王宁练,丁良福.唐古拉山东段布加岗日地区小冰期以

- 来的冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 234-244.
- [7] 盛文坤, 王宁练. 唐古拉山冬克玛底冰川作用区的水化学特征[J]. 冰川冻土, 1996, 18(3): 235-243.
- [8] 张家诚, 林之光. 中国气候[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [9] 戴加洗. 青藏高原气候[M]. 北京: 气象出版社, 1990.
- [10] 卢爱刚, 熊友才. 全球气候变化背景下近五十年中国湿度区域变化趋势[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 141-143.
- [11] 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[J]. 水土保持研究, 2014, 21(2): 306-310.
- [12] 李成秀, 杨太保, 田洪阵. 1990—2011 年西昆仑峰区冰川变化的遥感监测[J]. 地理科学进展, 2013, 32(4): 548-559.
- [13] 许君利, 张世强, 上官冬辉. 30a 来长江源区冰川变化遥感监测[J]. 干旱区研究, 2013, 30(5): 919-926.
- [14] 吴珊珊, 姚治君, 姜丽光, 等. 现代冰川体积变化研究方法综述[J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 237-246.
- [15] Wang Z T, Liu C, You G, et al. Glacier Inventory of China I, Qilian Mountains[J]. Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Academia Sinica, 1981: 59-119.
- [16] 施雅风, 黄茂桓, 任炳辉. 中国冰川概论[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [17] 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.
- [18] 李生辰, 李栋梁, 赵平, 等. 青藏高原“三江源地区”雨季水汽输送特征[J]. 气象学报, 2009(4): 591-598.
- [19] 吕卉, 杨太保, 田洪阵. 北阿尔泰山近 30 年冰川变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(010): 69-76.
- [20] 周文明, 李志伟, 李佳, 等. 1992—2009 年格拉丹东冰川及冰前湖面积变化的遥感研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014(10): 3505-3512.
- [21] 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响[J]. 中国科学: D 辑, 2004, 34(6): 535-543.
- [22] Vincent C, Le Meur E, Six D, et al. Solving the paradox of the end of the Little Ice Age in the Alps[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32: L09706.
- [23] Zemp M, Haeberli W, Hoelzle M, et al. Alpine glaciers to disappear within decades[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33: L13504.
- [24] 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.
- [25] 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[J]. 地理科学进展, 2009, 28(2): 231-237.
- [26] 郑新江, 李猷洲. 夏季青藏高原水汽输送特征[J]. 高原气象, 1997, 16(3): 274-281.

(上接第 69 页)

- [7] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review [J]. Soil Sci., 2000, 165(4): 277-304.
- [8] IPCC. Land use, land use change and forestry: summary for policy makers. IPCC special report[R]. Intergovernmental Panel on Climate Change, Washington, DC, 2000.
- [9] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential [J]. Global Change Biology, 2000, 6(3): 317-327.
- [10] 安娟娟, 陈少锋, 赵发珠, 等. 不同人工植被下土壤活性有机碳及碳库管理指数变化[J]. 农业环境科学报, 2014, 33(5): 985-991.
- [11] 郭宝华, 范少辉, 杜满义, 等. 土地利用方式对土壤活性碳库和碳库管理指数的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(3): 723-728.
- [12] 邱莉萍, 张兴昌, 程积民. 土地利用方式对土壤有机质及其碳库管理指数的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(1): 84-89.
- [13] 唐国勇, 李昆, 孙永玉, 等. 土地利用方式对土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 林业科学研究, 2011, 24(6): 754-759.
- [14] 徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 等. 缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数还有的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(10): 4009-4016.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [16] 徐明岗, 于荣, 王伯人. 土壤活性有机质的研究进展[J]. 土壤肥料, 2000(6): 3-7.
- [17] 戴全厚, 刘国彬, 薛莲, 等. 不同植被恢复模式对黄土丘陵区土壤碳库及其管理指数的影响[J]. 水土保持研究, 2008, 15(3): 61-64.
- [18] 韩新辉, 佟小刚, 杨改河, 等. 黄土丘陵区不同退耕还林地土壤有机碳库差异分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 223-229.
- [19] 王淑平, 周广胜, 高素华, 等. 中国东北样带土壤活性有机碳的分布及其对气候变化的响应[J]. 植物生态学报, 2003, 27(6): 780-786.
- [20] 吴建国, 张小全, 徐德应. 六盘山林区几种土地利用方式下土壤活性有机碳的比较[J]. 植物生态学报, 2004, 28(5): 618-622.
- [21] 曾从盛, 钟春棋, 仝川, 等. 土地利用变化对闽江河口湿地表层土壤有机碳含量及其活性的影响[J]. 水土保持学报, 2008, 22(5): 125-129.