

近 40 年乔戈里峰北坡冰川与气候变化关系研究

许艾文, 杨太保, 何毅, 冀琴

(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:以乔戈里峰北坡冰川为研究对象,选取 1978 年、1991 年、2001 年、2014 年 4 个时期的 Landsat MSS/TM/ETM+/OLI 影像,通过遥感图像计算机辅助分类和目视解译等方法提取了不同时期乔戈里峰北坡的冰川边界,并分析了乔戈里峰北坡冰川 1978—2014 年的进退变化。结果表明:1978—2014 年乔戈里峰北坡冰川面积减小了 53.37 km²,占 1978 年冰川总面积的 6.81%,冰川近 40 a 在气候变暖的背景下反而呈现退缩速率由快变慢的趋势,且近 10 a 冰川退缩尤为缓慢,年均退缩率仅为 0.12%。研究区东向冰川退缩率明显高于西向冰川,冰川退缩率随冰川规模的增大而减小,同时也随海拔高度的上升而减小。冰川变化的原因分析显示:气温升高导致研究区冰川退缩,而降水量的持续增加在一定程度上抑制了冰川的退缩;研究区内 12 条典型前进冰川对冰川积累区面积贡献较大,使得研究区整体冰川退缩率由快变慢的趋势更为显著。

关键词:冰川变化; 遥感; 气候变化; 乔戈里峰北坡

中图分类号:P467;P343.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0077-06

Research for Glaciers and Climate Change of K2 on the Northern Slope in the Past 40 Years

XU Aiwen, YANG Taibao, HE Yi, JI Qin

(Institute of Glaciology and Ecogeography, College of Earth and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract:Based on four periods of Landsat MSS/TM/ETM+/OLI images of 1978, 1991, 2001, 2014, we selected K2 glaciers on the northern slope as the research sample, glacier boundaries from different periods of K2 on the northern slope were extracted by the computer aided classification and visual interpretation methods using remote sensing images, and we analyzed K2 glaciers on the northern slope changes in the period from 1978 to 2014. The results show that the K2 glaciers on the northern slope areas decreased the 53.37 km² during the period from 1978 to 2014, accounting for 6.81% of the total glacier areas. Under the background of climate warming, glaciers retreat rate showed the trend from fast to slow in the past 40 years, glacier retreat was very slow in the past 10 years, and the annual retreat rate was only 0.12%. In the study area, the glacier retreat rate on the eastern aspect was much higher than the ones on the western aspect. The glacier retreat rate decreased with the increase of the glacier scale, but decreased with the increase of the altitude. Glacier area change analysis showed that higher temperatures led to the glaciers retreat of the study area, to a certain extent, increasing rainfall inhibited the glaciers retreat; the advance of the 12 typical glaciers in the study area had a greater contribution to glacier areas in accumulation area, making the trend shifting fast shrinkage of the whole glacier to the slow more significant in the study area.

Keywords:glacier change; remote sensing; climate change; the northern slope of K2

冰川是寒冷地区多年降雪积聚、经过变质作用形成的冰体,在重力作用下有一定的运动^[1]。世界范围的冰川与冰盖分布面积达 14.51×10^6 km², 占全球

陆地面积的 10%, 储存了全球淡水资源的 75%^[2]。冰川是中国极其重要的固体水资源,具有调节多年径流的作用,是西北干旱区生产生活用水的重要来源,

收稿日期:2015-07-01

修回日期:2015-07-18

资助项目:国家自然科学基金项目“黄河上游晚更新世河流阶地和冰川演化对千年尺度气候变化的响应”(41271024);兰州大学地理学基地科研训练及科研能力提高项目(J1210065)

第一作者:许艾文(1992—),女,湖北十堰人,硕士研究生,研究方向为冰川变化与气候响应。E-mail:xuaw92@163.com

通信作者:杨太保(1962—),男,山西运城人,教授,博士生导师,主要从事自然地理环境变化研究。E-mail:yangtb@lzu.edu.cn

对中国西部自然生态环境演变、农业生产和社会经济可持续发展起着举足轻重的作用^[3-4]。

在全球变暖的大背景下,全球冰川总体上在波动中呈现不同程度的持续退缩^[5]。尤其是 20 世纪 90 年代后,冰川退缩进一步加快^[6],许多小冰川已经或面临消失^[7]。然而,冰川变化对气候变化的响应具有差异性,尽管全球冰川正持续退缩甚至消失,但 20 世纪 90 年代以来喀喇昆仑山脉冰川面积却不断增加^[8-9]。Gardelle 等^[10]利用数字高程模型数据计算出喀喇昆仑山在 2000—2008 年的冰川物质平衡变化量为正,为 $(0.05 \pm 0.16) \sim (0.11 \pm 0.22) \text{ m/a}$,对海平面上升贡献为 -0.01 mm/a 。

乔戈里峰作为喀喇昆仑山中巴边界上的世界第二高峰,其周边区域的冰川研究资料甚少,缺乏长序列的观测资料,仅有的资料是秦大河等^[11]在 1987 年对乔戈里峰北坡现代冰川进行科学考察,了解其基本性质与特征。基于此,本文选择乔戈里峰的北坡作为研究区域,以 4 期 Landsat 遥感影像、冰川编目数据以及 DEM 数据为数据源,分析 1978—2014 年乔戈里峰北坡冰川进退变化,结合气象资料初步研究了该区域冰川对气候变化的响应。

1 研究区概况

乔戈里峰($35^{\circ}52'55''\text{N}$, $70^{\circ}30'51''\text{E}$)又称 K2,作为海拔 8 611 m 的世界第二高峰,坐落于中国新疆维吾尔自治区塔什库尔干塔吉克自治县与巴基斯坦 Gilgit-Baltisan 地区之间。这里是世界中纬山岳冰川最发育的地区^[12],其北侧发育着我国最长的冰川——音苏盖提冰川(长度为 41.5 km)。乔戈里峰北坡的现代冰川由于发育在海拔极高的欧亚内陆腹地,有独特的基本性质和特征^[10]。研究区位于乔戈里峰北坡,东起斯坎杨冰川东侧分水岭,西到音苏盖提冰川西侧分水岭,北止于上述两分水岭与克勒青河谷地交汇处,总面积达 1 348.65 km²。有现代冰川 89 条,冰川总面积 795.4 km²。受西南季风影响,积累区物质来源丰富,消融区冰面地形复杂,差别消融强烈。冰川运动速度较高,冰川温度上段较低,下段较高,冰川类型为暖季补给为主的亚大陆性冰川^[11]。

2 研究数据与方法

2.1 研究数据

(1) 1966 年的第一次冰川编目数据与 2014 年的第二次冰川编目数据,均来自寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn>)。(2) Landsat MSS/TM/ETM+/OLI 影像,来源于美国地质调查

局影像数据库中心(<http://glovis.usgs.gov>)。本文选取了云量少、暖季的 Landsat 影像,并下载了相邻年份的影像,以便补充解译(表 1)。

表 1 遥感影像数据列表

获取日期	轨道号	传感器	云量/%	分辨率/m	影像说明
1978-07-18	159/35	MSS	5	80	解译影像
1978-07-19	160/35	MSS	13	80	解译影像
1991-07-02	148/35	TM	26	30	解译影像
1993-07-07	148/35	TM	1	30	参考影像
2001-07-21	148/35	ETM+	6	30	解译影像
2002-08-09	148/35	ETM+	20	30	参考影像
2013-07-30	148/35	OLI	5	30	参考影像
2014-08-18	148/35	OLI	17	30	解译影像

(3) 研究区数字高程模型为 ASTER GDEM 数据,来源于地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为 $30 \times 30 \text{ m}$ 。(4) 研究区气象资料由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>)提供,选用了研究区周围的塔什库尔干($37^{\circ}47'\text{N}$, $75^{\circ}14'\text{E}$, 海拔 3 090.9 m)、吐尔尕特($40^{\circ}18'\text{N}$, $75^{\circ}08'\text{E}$, 3 504.4 m)、乌恰($39^{\circ}26'\text{N}$, $75^{\circ}09'\text{E}$, 2 175.7 m)3 个气象站点近 50 a 的年平均气温与年降水量数据。

2.2 研究方法

利用遥感影像提取冰川边界的方法主要有监督分类、非监督分类、雪盖指数和比值阈值法等^[13-14]。本文选择采用稳定便捷的比值阈值法,对于个别有云雪覆盖的区域,参考 Google Earth 的高分辨率影像、两次冰川编目数据以及相邻年份的影像,对边界进行目视解译修正。具体流程:

(1) 决策树分类。使用 ENVI 软件将 Landsat 各波段影像进行合成,计算红色波段和近红外波段的比值(TM, ETM+ 为 band3/band5, OLI 为 band4/band6)。得到比值影像后,进行决策树分类,将阈值设置为 1.9(多次试验得出),得到初步提取结果。

(2) 将决策树分类结果转为 shape 格式,并将投影方式转换为 Albers 等积投影。

(3) 结合 Google Earth 高分辨率影像及两次冰川编目数据,绘出乔戈里峰北坡的山脊线。利用山脊线对冰川多边形进行裁切,得到最终冰川提取结果。

3 结果与分析

3.1 冰川面积变化

3.1.1 冰川总体面积变化 对 1978—2014 年乔戈里峰北坡冰川面积变化进行分析(表 2),可以看出,近 40 a 研究区冰川总面积退缩了 53.37 km²,占 1978 年冰川总面积的 6.81%。三个时段退缩速率有

所不同,1978—1991 年、1991—2001 年和 2001—2014 年年平均变化率分别为-0.25%, -0.18%和-0.12%。由此可见,乔戈里峰北坡冰川近 40 a 退缩速率呈现由快变慢的趋势。

表 2 乔戈里峰北坡 1978—2014 年冰川面积变化

年份	面积/ km ²	绝对变 化/km ²	年变化率/ (km ² ·a ⁻¹)	相对变 化率/%	年平均 变化率/%
1978	782.70				
1991	757.62	-25.08	-1.93	-3.20	-0.25
2001	743.90	-13.72	-1.37	-1.81	-0.18
2014	732.33	-11.57	-0.89	-1.56	-0.12

注:表中变化率与绝对变化是上一个时段冰川面积与当前时段冰川面积之差,故 1978 年无变化率与绝对变化。

3.1.2 不同规模的冰川变化 将乔戈里峰北坡的冰川按冰川面积分为 6 个规模等级,统计各等级的冰川 1978—2014 年的面积退缩情况(图 1)。结果表明:冰川规模与冰川面积变化百分比呈反相关关系,面积小于 5 km² 的冰川退缩较为严重,其中面积小于 1 km² 的冰川退缩率达到 19.14%,面积介于 1~2 km² 和 2~5 km² 的冰川分别退缩了 15.83%和 15.11%,而面积大于 100 km² 的冰川仅退缩了 4.12%。说明冰川规模越小,退缩幅度越大,对气候变化更为敏感。晋锐等^[15-16] 在研究其他地区冰川变化时也发现存在同样的规律。

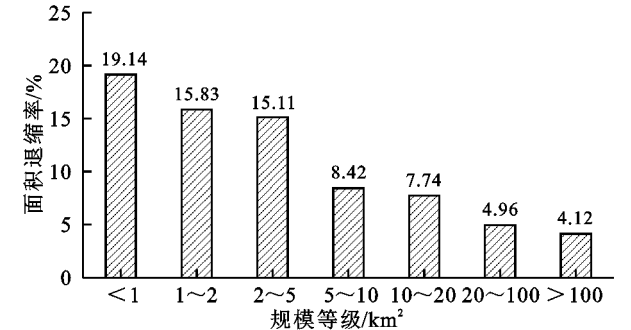


图 1 冰川面积变化与规模等级的关系

3.1.3 不同坡向的冰川变化 利用 DEM 数据及冰川编目数据,按照不同坡向分析研究区 1978—2014 年冰川面积变化(图 2),结果表明:1978 年东北坡冰川面积最大为 137.88 km²,西南坡冰川面积最小为 65.13 km²,各坡向面积分布并不均匀。1978—2014 年研究区各坡向的冰川都在退缩,但退缩程度有所不同。南坡的冰川退缩最为严重,退缩率高达 11.62%;其次为东南坡的冰川,退缩率为 11.53%;西北坡的冰川退缩率最小,为 1.61%,其他坡向的冰川退缩率介于南坡与西北坡之间。东向冰川退缩率明显高于西向冰川,除了冰川自身规模差异以外,主要受降水量的影响:研究区受到西风环流的影响,西风环流携带着丰沛的大西洋水汽^[17],降水由西向东递减,因此西向冰川相比于东向冰川降水更为丰富,

退缩速率更为缓慢。

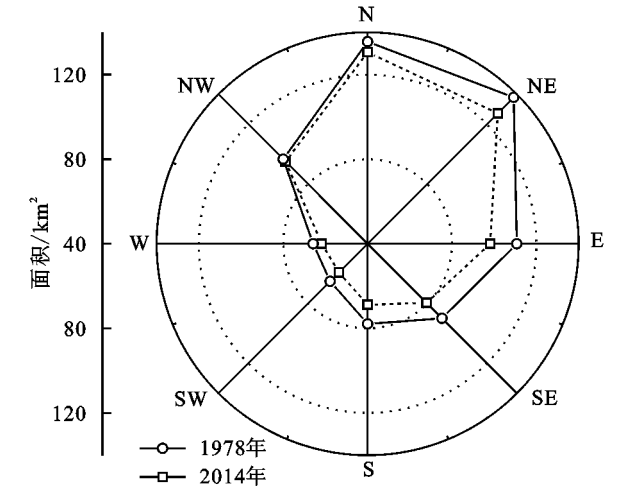


图 2 1978 与 2014 年不同坡向冰川面积分布

3.1.4 不同海拔的冰川变化 乔戈里峰北坡冰川分布的海拔范围为 4 097~8 611 m,本文将冰川海拔以 400 m 为间隔分为 12 个高度带,统计乔戈里峰北坡冰川在每个高度带的面积变化情况(图 3)。1978—2014 年 12 个高度带的冰川面积均呈减少趋势。其中 4 000~4 400 m 冰川退缩最为严重,面积退缩率达 88.27%;8 400~8 800 m 冰川面积稳定,退缩率为 0。可见乔戈里峰北坡的冰川退缩主要发生在 4 800 m 以下,且冰川面积退缩率随海拔的升高而降低。

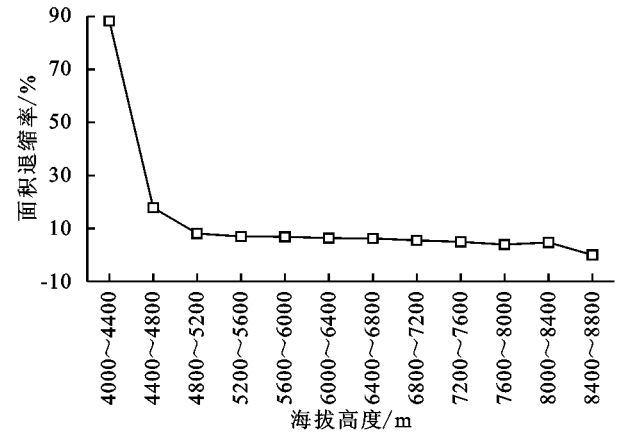


图 3 不同海拔冰川面积退缩率对比

3.2 气候变化特征

在气象要素中,气温和降水与其关系最为紧密^[18-19]。为了研究气温和降水量对冰川变化的影响,本研究选取研究区周边的气象站点包括塔什库尔干、吐尔尕特、乌恰,分析了 1960—2013 年各站点年均温与年降水量的变化特征(图 4)。

(1) 气温的年际变化。从 1960—2013 年气温线性趋势线可以看出,研究区气温呈上升趋势,塔什库尔干、吐尔尕特、乌恰 3 个站点气温升高速率分别为 0.255,0.263,0.310℃/10 a。其中塔什库尔干的气温波动幅度最大,而乌恰的升温速率最大。

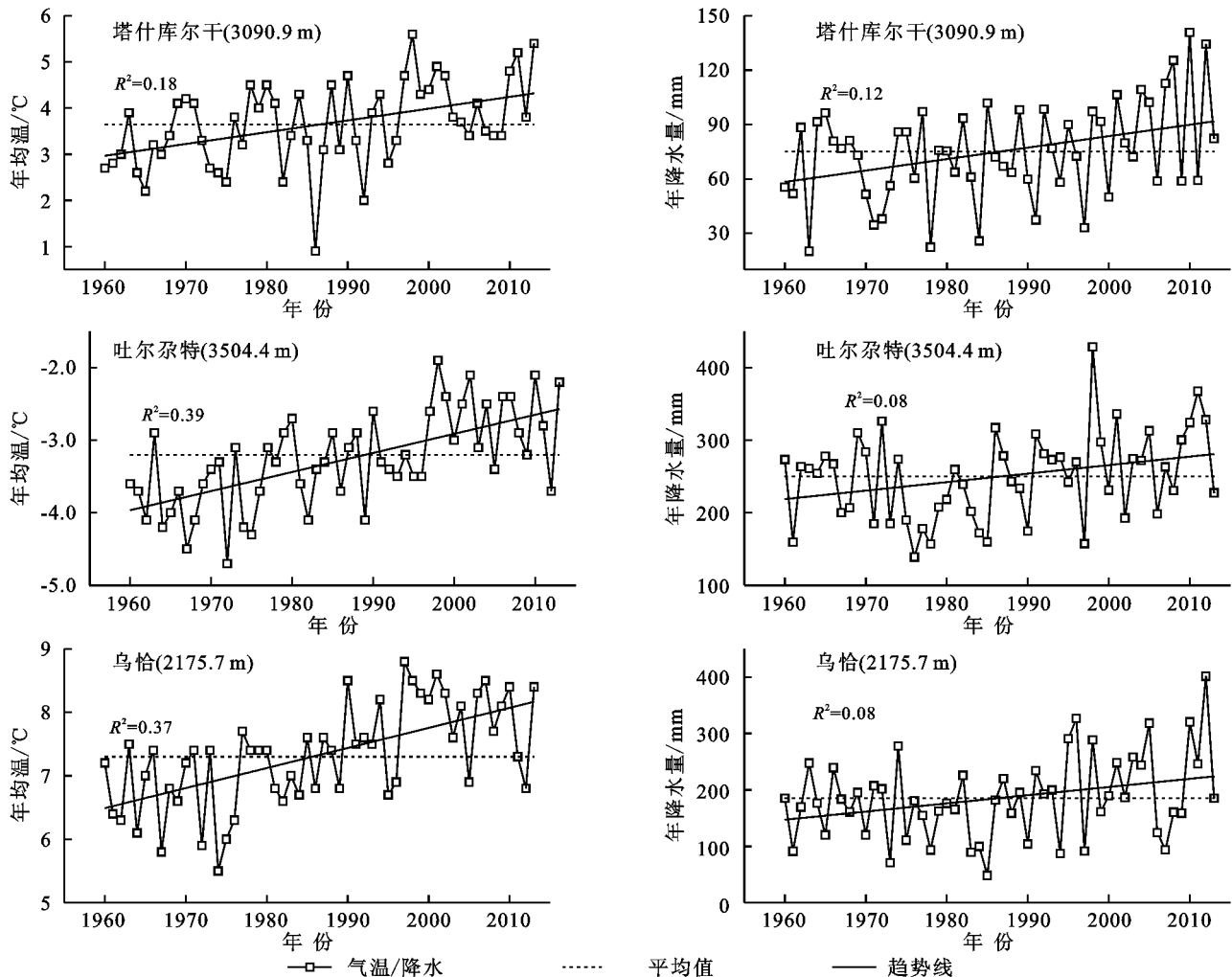


图4 1960—2013年各站年均温与年降水量变化

(2) 降水量的年际变化。从1960—2013年降水量线性趋势线可以看出,研究区年降水量呈增加趋势,塔什库尔干、吐尔尕特、乌恰3个站点降水量升高速率分别为6.316, 11.709, 14.519 mm/10 a。由于三个站点的降水量波动幅度较大,拟合系数较低,乌恰的降水量升高速率最大。

4 冰川变化的原因分析

4.1 气候变化对冰川变化的影响

影响冰川变化的主要因素有太阳辐射、地形、气温、降水、冰川规模、云量、风、冰碛物等^[20-21]。气候因素对冰川的退缩起非常重要的作用。其中,气温和降水是冰川发育的两个重要控制性因素:决定冰川积累的主要因素是冰川区的降水量,影响冰川消融的主要因素是冰川区的温度^[22-23]。

通过对研究区周边的3个气象站1960—2013年气温和降水数据求平均值后的年均温度和年降水量进行统计,以提取冰川的影像年份为界线划分出4个气象数据区间(1960—1978年、1978—1991年、

1991—2001年、2001—2013年),分别分析各区间温度与降水的变化(图5)。

研究发现冰川面积变化与前一阶段的气温和降水变化有响应关系:1978—1991年较1960—1978年气温上升0.49℃,降水量减少13.2 mm,气温显著上升而降水量略有减少,对应于1978—1991年年平均退缩率为0.25%/a,是三个阶段中退缩率最大的;1991—2001年较1978—1991年气温上升0.36℃,降水量增加39.2 mm,气温与降水量均大幅度升高,对应于1991—2001年年均退缩率为0.18%/a,与第一阶段相比有所减小;2001—2014年较1991—2001年气温上升0.24℃,降水量增加16.0 mm,气温与降水量均持续升高,对应于2001—2014年年均退缩率为0.12%/a,是三个阶段中最小的。

由气象数据分析结果可知:1960—2013年研究区气温持续升高且幅度明显,导致冰川的消融。而降水量则在波动中增加,第一阶段降水量略有减少,第二阶段显著增加,第三阶段亦有所增加。可见,第一阶段气温的显著上升与降水量的小幅减少,导致冰

川的加速消融,因此第一阶段冰川退缩率最大;第二阶段气温的持续显著上升导致冰川进一步消融,而降水量的显著增加有利于冰川的累积,因此第二阶段冰川退缩率有所减小;第三阶段气温仍持续升高,降水量亦有所增加,而研究区冰川退缩率却进一步减小,说明第三阶段气温的显著升高并未引起研究区冰川的加速消融。

此外,本文在对乔戈里峰北坡冰川变化影响因素的研究中发现,现有的气象数据和模型低估了研究区

的降水量。姚檀栋等^[24]指出喀喇昆仑山北部和帕米尔东部地区直接降水观测数据非常稀少切不准确,而全球降水气候项目(Global Precipitation Climatology Project)通过卫星重新观测降水数据,显示该地区降水量远大于已有的观测值。降水的增加不仅能够增加冰川的累积量,还会通过减弱太阳辐射而抑制冰川的消融^[17]。因此降水的增加在一定程度上抑制了研究区冰川的消融,导致乔戈里峰北坡冰川在气候变暖背景下反而退缩缓慢甚至微弱增长。

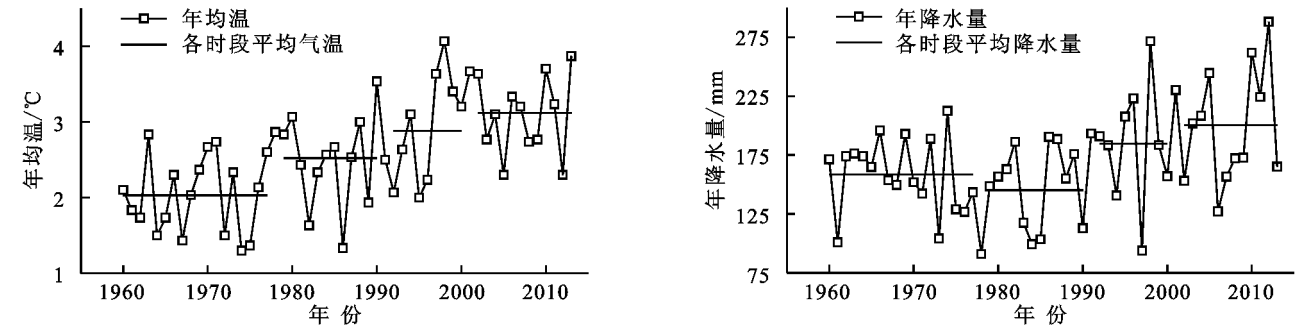


图 5 1960—2013 年研究区年均温与年降水量变化

4.2 典型前进冰川对整体冰川变化的影响

本研究在冰川提取过程中,对比分析了不同时段冰川末端的变化情况,发现研究区内有 12 条典型冰川在 1978—2014 年发生特殊的大幅度前进现象。分析各条冰川不同时段面积变化(表 3)可知:近 40 a 来 12 条冰川的面积均发生大幅度增大,且大部分面积增大现象集中发生于 2001—2014 年。最显著的面积增大发生于 2001—2014 年的 5Y654D0016 冰川,面积增量为 3.81 km²。总体来看,1978—2014 年 12 条冰川总面积增量为

9.74 km²,相比于 1978—2014 年研究区整体冰川面积退缩量 53.57 km²,这 12 条典型冰川的前进对冰川积累区面积贡献较大。分 3 个时段来看,1978—1991 年、1991—2001 年、2001—2014 年 12 条冰川总面积增量分别为 0.18、3.47、6.25 km²,可以看出 3 个时段典型冰川面积增量持续增大,使得研究区整体冰川退缩减缓的趋势更为显著。2001—2014 年典型冰川前进现象尤为明显,也间接解释了“第三阶段气温的显著升高并未引起冰川加速消融”这一现象。

表 3 典型冰川面积变化

所属冰川编号	1978 年冰川面积/km ²	冰川面积变化/km ²				2014 年冰川面积/km ²
		1978—1991 年	1991—2001 年	2001—2014 年	1978—2014 年	
5Y654D0016	15.78	-2.33	-0.19	+3.81	+1.09	18.16
5Y654D0023	3.33	+0.02	+0.05	+0.23	+0.30	3.93
5Y654D0064	4.24	+0.09	+0.04	+0.56	+0.69	5.62
5Y654D0065	3.13	+0.43	-0.31	+0.81	+0.93	4.99
5Y654D0096	27.17	-0.25	+0.23	+2.81	+2.79	32.75
5Y654D0053	8.73	+0.11	+0.08	+0.14	+0.33	9.39
5Y654D0068	9.85	-0.16	+0.05	+0.72	+0.61	11.07
5Y654D0033	15.92	+0.26	+0.14	+0.53	+0.93	17.78
5Y654D0044	3.97	+0.49	-0.39	+0.42	+0.52	5.01
5Y654D0042	10.53	-0.06	+0.08	+0.15	+0.17	10.87
5Y654D0097	20.34	+0.80	-0.12	+0.36	+1.04	22.42
5Y654D0048	9.62	+0.62	+3.79	-4.27	+0.14	9.90

5 结论

(1) 乔戈里峰北坡冰川总面积在 1978—2014 年减少了 53.37 km²,退缩率为 6.81%。1978—1991

年、1991—2001 年和 2001—2014 年三个时段年平均变化率分别为 -0.25%、-0.18%和 -0.12%,由此可见,研究区冰川近 40 a 在气候变暖的背景下反而呈现退缩速率由快变慢的趋势。

(2) 冰川规模与冰川面积退缩率呈反相关关系。面积小于 1 km^2 的冰川面积退缩率达到 19.14%, 面积大于 5 km^2 的冰川面积退缩率仅为 4.12%。说明冰川规模越小, 退缩幅度越大, 对气候变化更为敏感。

(3) 研究区冰川在各坡向分布并不均匀, 东北坡面积最大而西南坡面积最小。其中东向冰川退缩率明显高于西向冰川, 主要由西向冰川降水量充沛所致。

(4) 研究区冰川分布的海拔范围为 $4\ 097 \sim 8\ 458 \text{ m}$, 其中 $4\ 000 \sim 4\ 400 \text{ m}$ 冰川退缩最为严重, 面积退缩率达 88.27%, $8\ 400 \sim 8\ 800 \text{ m}$ 冰川最为稳定, 面积退缩率为 0。研究区冰川面积退缩率随海拔的升高而降低。

(5) 研究区近 40 a 气温变化呈上升趋势, 降水量在波动中持续增加。近 20 a 研究区气温显著升高, 然而气温的显著升高并未引起研究区冰川的加速消融, 降水量的增加在一定程度上抑制了研究区冰川的消融。

(6) 本文发现研究区内有 12 条典型冰川在 1978—2014 年发生特殊前进现象, 1978—2014 年典型冰川总面积增量为 9.74 km^2 , 对冰川积累区面积贡献较大。3 个时段典型冰川总面积增量持续增大, 使得研究区整体冰川退缩率由快变慢的趋势更为显著。

参考文献:

- [1] 施雅风. 中国冰川与环境: 现在、过去和未来[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [2] Oerlemans J. Extracting a climate signal from 169 glacier records[J]. *Science*, 2005, 308(5722): 675-677.
- [3] 沈永平, 刘时银, 甄丽丽, 等. 祁连山北坡流域冰川物质平衡波动及其对河西水资源的影响[J]. *冰川冻土*, 2001, 23(3): 244-250.
- [4] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43-51.
- [5] Jacob T, Wahr J, Pfeffer W T, et al. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise[J]. *Nature*, 2012, 482(7386): 514-518.
- [6] 刘时银, 丁永建, 李晶, 等. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 762-771.
- [7] 祝合勇, 杨太保, 田洪阵. 1973—2010 年阿尔金山冰川变化[J]. *地理研究*, 2013, 32(8): 1430-1438.

- [8] Hewitt K. The Karakoram anomaly Glacier expansion and the elevation effect, Karakoram Himalaya[J]. *Mountain Research and Development*, 2005, 25(4): 332-340.
- [9] Iturrizaga L. Historical and recent glacier variations in the Karakoram Mountains[R]. Munich, Germany: European Geosciences Union, 2007.
- [10] 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.
- [11] 秦大河, 谢自楚, 刘永平. 乔戈里峰北坡现代冰川的初步观察[J]. *冰川冻土*, 1989, 11(2): 105-136.
- [12] 上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 中国喀喇昆仑山、慕士塔格格公格尔山典型冰川变化监测结果[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(3): 374-375.
- [13] 王高峰, 张廷斌, 张建平, 等. 遥感影像的冰川信息提取方法对比[J]. *地理空间信息*, 2010, 8(3): 43-46.
- [14] 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.
- [15] 晋锐, 车涛. 基于遥感和 GIS 的西藏朋曲流域冰川变化研究[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(3): 261-266.
- [16] 李治国, 姚檀栋, 叶庆华, 等. 1980—2007 年喜马拉雅东段洛扎地区冰川变化遥感监测[J]. *地理研究*, 2011, 30(5): 939-952.
- [17] 冯童. 喀喇昆仑山乔戈里峰南北坡冰川变化对比研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [18] 李成秀, 杨太保, 田洪阵. 近 40 年来西昆仑山冰川及冰湖变化与气候因素[J]. *山地学报*, 2015, 3(2): 157-165.
- [19] 刘时银, 丁永建, 李晶, 等. 2006. 中国西部冰川对近期气候变暖的响应[J]. *第四纪研究*, 26(5): 762-771.
- [20] 田洪阵, 杨太保, 刘沁萍. 近 40 年来冷龙岭地区冰川退缩和气候变化的关系[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(5): 34-38.
- [21] 上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 喀喇昆仑山克勒青河谷近年来发现有跃动冰川[J]. *冰川冻土*, 2005, 27(5): 641-644.
- [22] 王凯, 杨太保, 何毅, 等. 近 30 年阿尼玛卿山冰川与气候变化关系研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 300-305.
- [23] 李霞, 杨太保, 田宏阵, 等. 贡嘎山近 40 年冰川对气候变化的响应[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(6): 125-129.
- [24] Yao T, Thompson L, Wang W, et al. Different glacier status with atmospheric circulation in Tibetan Plateau and surroundings[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.