

文章编号: 1008-2786-(2015)2-157-09

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000021

# 近 40 年来西昆仑山冰川及冰湖变化与气候因素

李成秀 杨太保\* 田洪阵

(兰州大学资源环境学院冰川与生态地理研究所,甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 利用 Landsat TM/ETM+ 影像,结合冰川编目数据,应用比值阈值法和人工目视解译法得到近 40 年来西昆仑山冰川和冰湖面积变化数据,结合气象数据分析冰川和冰湖变化特征及其气候背景。结果表明: 1. 1976—2010 年,西昆仑山冰川呈现微弱的退缩,面积减少率为 4.1%,冰湖面积增加率 17.8%。冰川面积与冰湖面积变化呈现反相关,冰川融水补给的增加是冰湖面积扩大的主要原因。2. 气温的缓慢上升是西昆仑山冰川退缩的原因之一,个别气象站点显示近 20 a 夏季均温缓慢下降,这与近 10 年来研究区冰川退缩幅度较小相吻合。考虑到青藏高原多数冰川对气候变化响应的滞后时间在 10~20 a,由于夏季均温的下降,我们推测在接下来几年内西昆仑山冰川可能不会出现大幅度的退缩。3. 昆仑峰区可能存在的跃动冰川以及喀拉塔格山冰川的稳定,表明冰川对气候变化复杂的响应机制。气象站点数据不能完全解释冰川的变化特征,还需要进一步结合冰川区实测气象数据加以讨论。另外,西昆仑山冰川变化还受到冰川规模、地形等因素综合影响。

**关键词:** 冰川变化; 遥感监测; 西昆仑山; 跃动冰川

**中图分类号:** P343.6

**文献标志码:** A

西昆仑山作为中国西部冰川集中分布地区之一,近 630 万人的用水主要来自西昆仑山冰川融水<sup>[1]</sup>。近年研究发现在全球变化的背景下,青藏高原冰川物质呈现负平衡,但是其空间变化差异较大。喜马拉雅山地区冰川出现强烈的负平衡,但是帕米尔地区和喀喇昆仑山地区冰川退缩幅度较小,甚至出现前进或者物质正平衡<sup>[2-3]</sup>。有研究发现,增强的西风环流和减弱的印度季风所带来的降水的增加和减少是冰川变化差异的原因之一<sup>[2]</sup>。在西风环流影响下的西昆仑山地区,我们有必要进一步分析该区冰川变化特征,并与中国西部冰川变化作对比分析。

有关大范围长时间尺度研究西昆仑山冰川变化的报道较少<sup>[4-6]</sup>。本文分析近 40 年来冰川和冰湖变化特征,并讨论西风环流在时间和空间格局的差异

对该区冰川变化的影响,探讨冰川和冰湖变化的原因。据冰川编目,西昆仑山有冰川 5 485 条,冰川面积 8 817.78 km<sup>2</sup>,占整个昆仑山冰川总面积的 3/4 以上。该区为典型的极大陆性冰川,以山谷冰川为主。

本文的研究位于 35°~37°N,76°~82°E。从东至西,在不同西风强度的影响下分布 8 座主要山脉(图 1)。该区的气候寒冷干旱,塔什库尔干站(3 090 m)的年均温和降水量分别为 3.6℃、74 mm。在西昆仑山冰川融水的补给下,发育着大量的湖泊和河流(图 1)。

## 1 数据来源与方法

### 1.1 数据源

本研究使用的 Landsat 卫星遥感影像已经过系

收稿日期(Received date): 2013-08-01; 改回日期(Accepted): 2013-11-15。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金项目(412710247)资助。[The National Science Foundation of China(412710247).]

作者简介(Biography): 李成秀(1988-),女,汉族,青海西宁人,硕士,研究方向现代冰川变化研究。[Li Chengxiu(1988-),female, master degree candidate, mainly engaged in modern glacier change. ] E-mail: licx11@lzu.edu.cn

\* 通信作者(Corresponding author): 杨太保(1962-),男,山西平陆人,博士,教授/博导,主要从事自然地理环境变化研究。[Yang Taibao(1962-),male, professor, doctoral Supervisor, specialized in natural geographical environment change. ] E-mail: yangtb@lzu.edu.cn

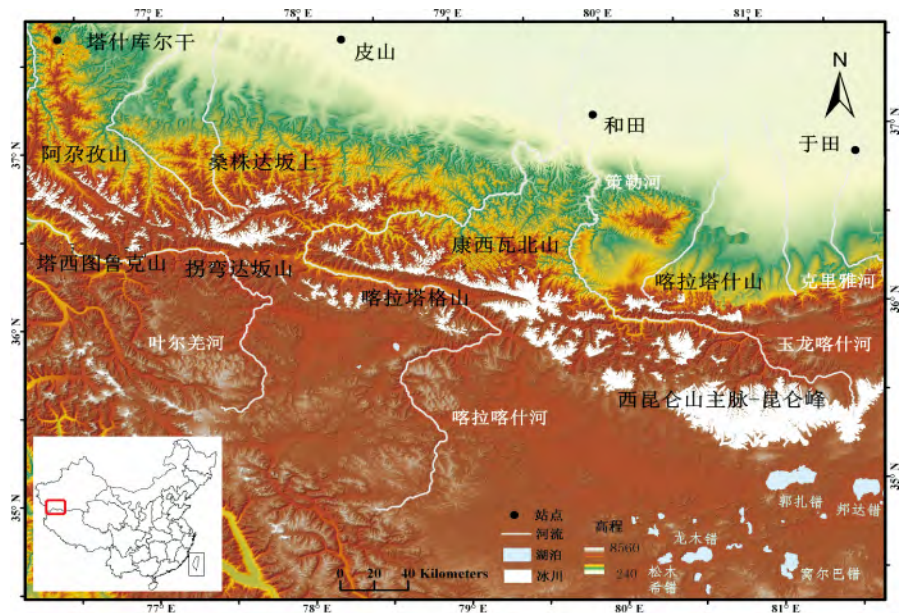


图 1 研究区示意图

Fig. 1 Location of the study area

统辐射校正和几何校正、地形校正<sup>[7]</sup>,并有相当高的校正精度<sup>[8]</sup>。下载受雪和云干扰小的影像,且尽可能多的下载相近年的影像,以便补充解译,得到更精确的数据(表 1)。

表 1 遥感数据列表

Table 1 Utilized Landsat scenes for the study

时间	获取日期	传感器	轨道号
1990 年	1990-11-15	TM	145/35
	1991-10-17/1990-11-15	TM	145/36
	1989-10-09	TM	147/35
	1990-06-29	TM	148/35
2000 年	1999-12-18/1999-10-31	ETM + /TM/ETM +	145/35
	/2001-02-06		
	1999-09-29/2001-10-20	ETM +	145/36
	1999-07-18/2000-05-09	ETM + / TM	146/35
	1998-09-07/1998-10-09	TM	148/35
	/1998-11-10		
2010 年	2000-10-31	ETM +	147/35
	2011-11-09/2011-08-05	TM	145/35
	/2009-08-15		
	2011-08-05/2011-11-09	TM	145/36
	/2010-12-08		
	2011-09-13	TM	146/35
2002 年	2009-08-13/2011-08-03	TM	147/35
	2010-08-23	TM	148/35
	2002-07-03	ETM +	145/36
2004 年	2004-09-19	ETM +	145/36

其他数据包括由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所提供的冰川编目数据,中国气象局提供的 9 个气象站 1960—2010 年气温和降水资料。

1.2 数据解译过程

本文选用比值阈值法提取冰川边界,这种方法运用非常广泛且受大多数研究者认同<sup>[9-11]</sup>。研究中阈值选为 1.8 最合适。对于个别有雪覆盖的地区,借助相近年的遥感影像和 Google earth 修正边界。另外,剔除面积 < 0.01 km<sup>2</sup> 的区域<sup>[9,12]</sup>,因为小面积的多边形多为雪斑或者阴影<sup>[13]</sup>。Bolch 等发现冰川编目数据存在不准确及空间定位错误<sup>[12]</sup>,但通过本研究验证,冰川编目的边界在本研究区是可靠的。因此,本文将冰川编目数据作为早期冰川数据来源。

1.3 误差评估

影像质量和分辨率是产生数据误差的原因之一,不同个体对影像辨认的差别也会造成结果的差异。另外,对冰川边界的提取精度还受图像配准误差的影响<sup>[14-15]</sup>。运用更高分辨率影像人工提取冰川面积对比评估 Landsat 影像的精度,是应用较广泛的方法<sup>[13,16-17]</sup>。在本文中,我们借鉴此方法,用稻割软件下载 2004 年 5 月 Google earth 14 级影像(分辨率为 9.5 m)进行 Landsat TM 影像验证,结果表明该方法的误差为 ± 2.2%。为了评估个体对冰川识别带来的误差,在应用同样的影像与方法,我们选用两位此领域工作者的解译结果对本研究结果进

行评估,结果显示误差是  $\pm 2.6\%$ 。由于本研究中数据来源统一,并有相当高的校正精度,影像配准误差可以忽略。综上所述,本研究结果的误差约为  $\pm 2.4\%$ 。

2 结果与分析

2.1 冰川面积变化的时空格局

研究区 2011 年冰川面积为  $6\,286\text{ km}^2$ ,以大规模的冰川为主。昆仑峰区冰川规模为最大,冰川条数只占  $2.3\%$ ,而面积占  $28\%$ ,总体来看,研究区东侧的冰川规模大于西侧。

对比分析 40 多年来冰川变化特征,西昆仑山冰川面积退缩率为  $4.1\%$ 。对比三个不同时间段绝对的退缩量,1990—2000 年的退缩量和退缩率达到最大,1976—1990 年次之,2000—2010 年达到最小(表 2)。

与纪鹏、上官冬辉等的研究结果<sup>[3,5]</sup>相比(表 3),个别单条冰川变化速率有略微差别,由于选用的是不同的遥感数据,研究的年限以及对影像冰川

辨认的差别,不同作者对相同冰川变化的研究结果并不完全一致。但是总体的趋势是一样的,昆仑峰区冰川变化与 Shangguan Donghui 的研究结果<sup>[18]</sup>相近。

表 2 不同时间段各山脉冰川退缩量

Table 2 The retreat area of the different period

山脉	年份		
	1976—1990 年	1990—2000 年	2000—2010 年
1 塔西土鲁克山	—	—	−3.1
2. 阿尔孜山	—	—	−16.1
3. 拐弯达坂山	−29	−146.6	−0.7
4. 桑株达坂山	−1.2	−49.6	−12.9
5. 康西瓦北山	−13.9	−209.2	−63.9
6. 喀拉塔格山	—	—	11.6
7. 喀拉塔什山	−2.7	−2.7	−5.9
8. 西昆仑主山脉	−267	−10.8	−28.7
面积变化总量	−313.8	−418.9	−112.1
面积退缩率	−12.3	−16.8	−1.2

注:单位:面积:  $\text{km}^2$ ; 面积退缩率:  $\%$ ; — 表示影像质量较差,没有得到数据。

表 3 典型冰川面积变化结果对比

Table 3 Comparison of different results about typical glaciers

冰川名称	数据来源	研究年限	面积变化/ $\text{km}^2$	文献来源
泉水冰川	Landsat TM/ETM +	1991—2001 年	+0.05	纪鹏等 <sup>[3]</sup>
		1990—1999 年	−0.32	本文
弓形冰川	Landsat TM/ETM +	1991—2001 年	−0.05	纪鹏等 <sup>[3]</sup>
		1990—1999 年	−0.05	本文
5Y641F0085	Landsat TM/ETM +	1989—2001 年	−0.29	上官冬辉等 <sup>[5]</sup>
		1990—1999 年	−0.28	本文
中峰冰川	Landsat TM/ETM +	1991—2001 年	−0.29	纪鹏等 <sup>[3]</sup>
		1990—1999 年	−0.62	本文
5Y641F0070	Landsat TM/ETM +	1989—2001 年	−0.03	上官冬辉等 <sup>[5]</sup>
		1990—1999 年	−0.41	本文
5Y641G0038	Landsat TM/ETM +	1989—2001 年	−0.67	上官冬辉等 <sup>[5]</sup>
		1990—1999 年	−0.12	本文
东崇测冰川	Landsat TM/ETM +	1991—2001 年	+0.02	纪鹏等 <sup>[3]</sup>
		1990—1999 年	+0.33	本文
昆仑峰区北坡	Landsat TM/ETM +	1991—2001 年	−3.51	Shangguan Donghui <sup>[18]</sup>
		1990—2000 年	−6.9	本文
昆仑峰区南坡	Landsat TM/ETM +	1991—2001 年	+6.1	Shangguan Donghui <sup>[18]</sup>
		1990—2000 年	+4.6	本文

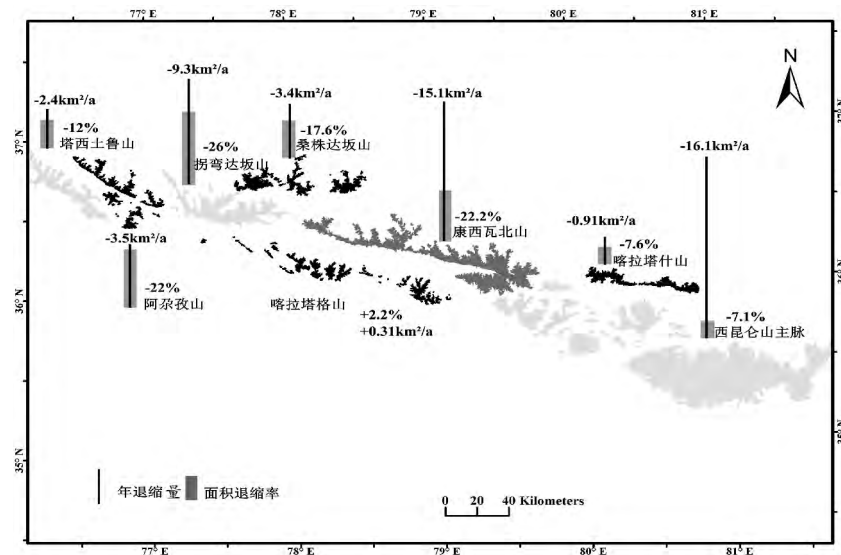


图2 不同山脉冰川退缩情况(1976—2010年)

Fig. 2 The retreat area ratio of different mountain glaciers(1976—2010 a)

冰川变化在空间上表现出差异性。位于研究区西侧的面积退缩率较大,而位于东侧喀拉塔什山面积退缩率较小( -7.6%),其冰川规模也较小;西昆仑山主脉的面积退缩率最小( -7.1%)。冰川年退缩率与冰川面积相对应,西昆仑山主脉冰川面积最大,其年退缩率也达到最大,而喀拉塔什山冰川规模和年退缩率达到最小。研究区中侧喀拉塔格山冰川面积增加2.2%,但考虑到误差范围,喀拉塔格山冰川基本处于稳定状态。总体而言,位于研究区东侧的冰川退缩幅度较西侧小(图2)。

2.2 跃动冰川

昆仑峰区中峰冰川末端在2002—2004年以661 m/a的速率在前进。崇测冰川末端在1991—1998年以200 m/a的速率在前进,跟据跃动冰川是指冰舌在几天或至多2~3 a内以超出正常冰川速率10倍以上的快速前进的一种特殊冰川的判断标准<sup>[19]</sup>。我们推测中峰与崇测冰川可能是跃动冰川(图3)。我们统计了近年来青藏高原的跃动冰川,在唐古拉山、阿尼玛卿山、喀喇昆仑山地区可能存在跃动冰川,其中有关喀喇昆仑山的报道最多<sup>[8,19-23,26]</sup>。

2.3 冰湖的变化特征

本文分析了西昆仑山南坡典型冰湖的变化特征,统计的16个冰湖总面积为629 km²,从1990—2010年冰湖面积增加率为17.8%,且相对于1990年2000年新增湖7个,增加面积为27 km²。两段时间内冰湖增加幅度相差不多,而1990—2000年间

冰川退缩幅度较大,二者的变化不相一致(表2、4)。

2.4 冰川面积变化的气候背景

在研究区周边选9个气象站点资料分析气温、

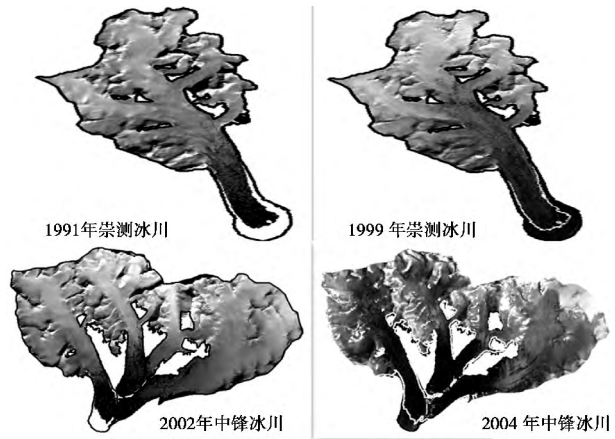


图3 中峰冰川、崇测冰川变化示意图

Fig. 3 Map showing advanced Zhongfeng and Chongce Glacier

表4 典型冰湖变化特征

Table 4 The change of representative glacial lake /km²					
湖泊	1990年	2000年	2010年	2000—1990年	2010—2000年
1. 郭扎错	235.86	244.58	246.88	8.72	2.30
2. 邦达错	109.22	109.92	134.77	0.70	24.85
3. 龙木错	99.44	99.44	104.16	0.00	4.72
4. 窝尔巴错	89.61	89.61	89.61	0.00	0.00
5. 松木希错	23.08	23.08	30.07	0.00	6.99
总面积	628.86	680.16	741.02	51.30	60.86

降水变化特征(图3、4)。整体来看,近50 a 气温缓慢上升,升温率为 $0.31^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ,而在时间和空间格局上表现出差异性。1985年后气温呈明显的上升趋势,增温速率为 $0.6^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ,但塔什库尔干站点资料显示2000—2010年气温缓慢下降 $[-0.7^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})]$ ,此站点海拔3091 m,距离冰川区最近,最能接近冰川区气温变化特征。总体来看,研究区东部增温趋势较西部明显。这与已有的研究结果相一致,赵传成等研究发现从西向东,西昆仑山地区气温倾向率逐渐增加<sup>[25]</sup>。

相较于年均温的增加幅度,夏季均温的变化较平缓 $[0.18^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})]$ 。离冰川区较近的乌恰 $[-0.4^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})]$ 、塔什库尔干 $[-0.16^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})]$ 、吐尔尕特 $[-0.11^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})]$ 甚至近20年来气温有下降的趋势。这与其他站点不相一致,与中国西部近年来气温升高的变化趋势不相符。总体来看,夏季均温的变化与年均温在空间和时间格局上相似,但年均温的变化趋势更明显。这也与已有的研究结果相一致,近50年来西北地区夏季升温幅度最低<sup>[25]</sup>。

各站点年降水和夏季降水平均倾向率分别为

$6.14\text{ mm}/(10\text{ a})$ 、 $5.3\text{ mm}/(10\text{ a})$ ,年降水和夏季降水增加量所占比率为13.2%、19.7%,由图3、4降水量线性拟合曲线可知,降水增加趋势不明显,且 $P$ 值 $>0.05$ 。从降水量变化空间格局可知,研究区西侧的降水增加幅度更明显。降水量的时空变化格局与西风环流的时空变化有很大的关系。从西向东,西风环流的影响程度逐渐减弱,由此西昆仑山降水呈现西多东少的格局。在时间尺度上,近年来有研究发现西风指数增加<sup>[2]</sup>,与降水量在时间尺度上的增加相一致。

研究区气候变化趋势与中国西北地区相一致,且与西北地区气温增加率很接近 $[0.32^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})]$ <sup>[24]</sup>。与中国西部冰川区的气候变化做对比分析,祁连山区(1951—2005年)气温倾向率为 $0.3^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ ,降水倾向率 $11.6\text{ mm}/(10\text{ a})$ <sup>[26]</sup>。其他山区分别为:天山山区 $[0.33^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})]$ 、 $9.5\text{ mm}/(10\text{ a})$ <sup>[26]</sup>、横断山 $[0.15^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})]$ 、 $9.09\text{ mm}/(10\text{ a})$ <sup>[28]</sup>、东昆仑山 $[0.79^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})]$ 、 $18.84\text{ mm}/(10\text{ a})$ <sup>[15]</sup>。而在本文中,西昆仑山区9个气象站点资料显示年均温和年降水量分别以 $0.31^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ 、

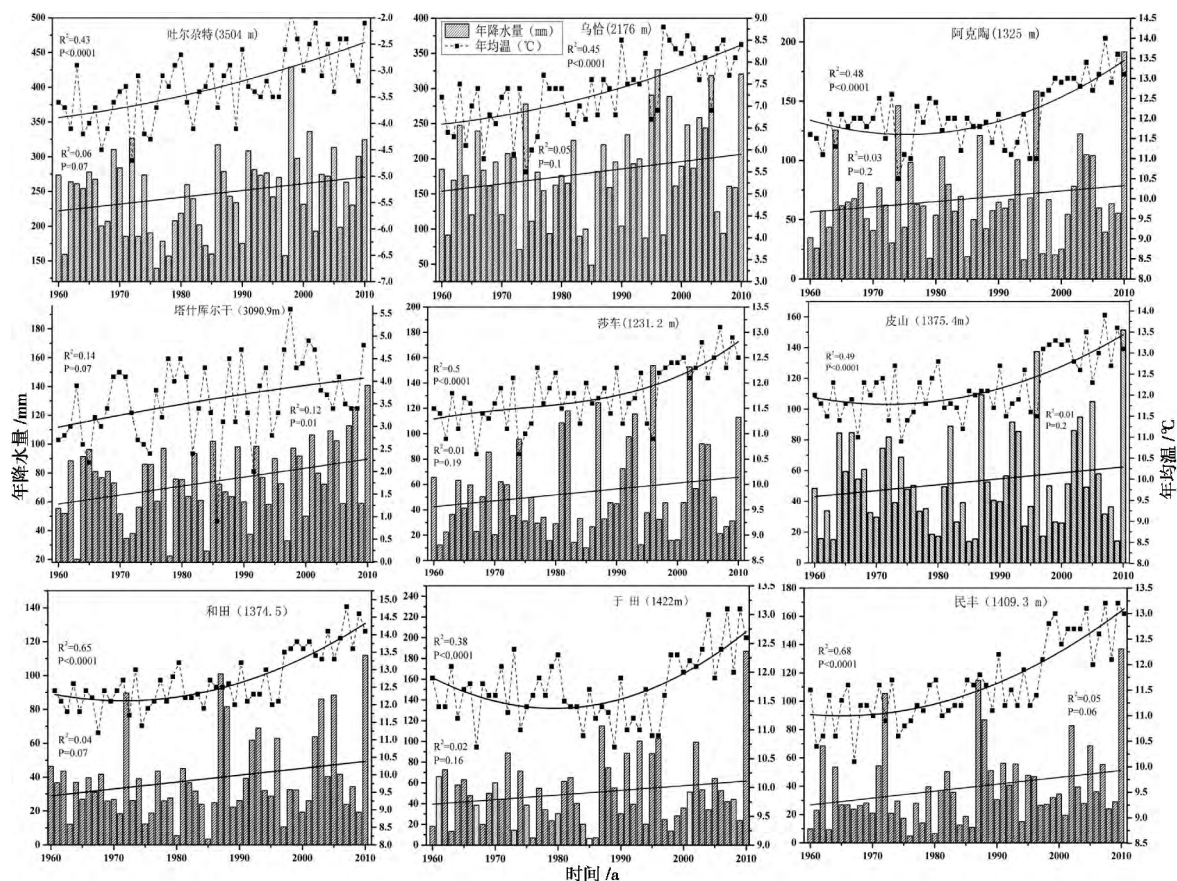


图3 研究区年均温和降水变化

Fig. 3 Variations of annual mean temperature and participation from 1960 to 2010



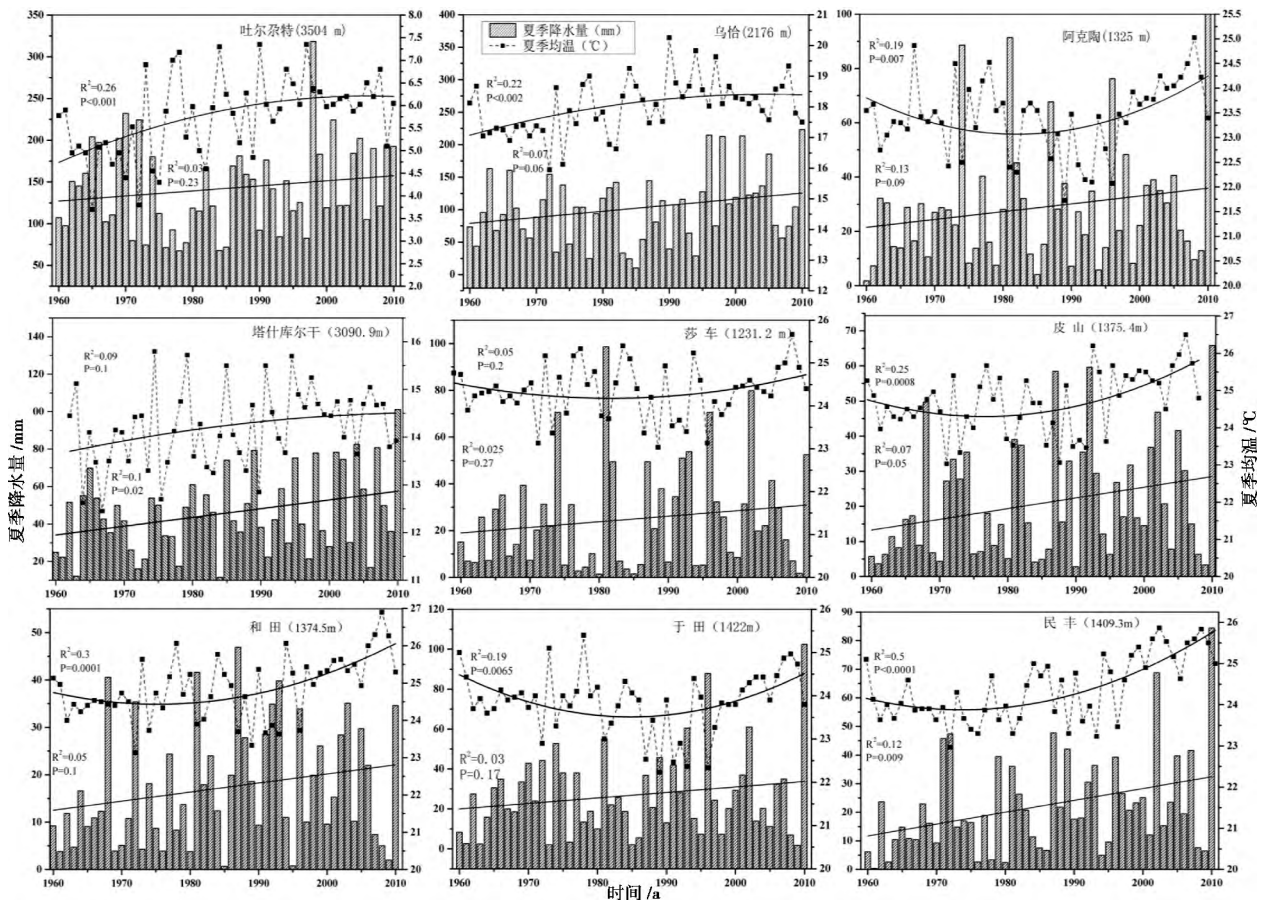


图4 夏季平均温度和降水量变化(1960—2010年)

Fig. 4 Variations of summer mean temperature and precipitation from 1960 to 2010

6.14 mm/(10 a) 的速率增加。升温幅度与祁连山区、天山山区、中国西部平均升温速率相似,但高于横断山区,低于东昆仑山区,而降水量的增加幅度相对较低。

冰芯资料作为研究区气候变化的补充。古里雅冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  和冰芯积累量是反映气候气温和降水的最好替代指标<sup>[29]</sup>。古里雅冰芯记录 1911—1990 年为相对高降水期<sup>[30]</sup>。姚檀栋等根据古里雅冰芯中  $\delta^{18}\text{O}$  记录与积累量得出进入 20 世纪以后,气温急剧上升,同样伴随着降水的急剧增加<sup>[29]</sup>。

### 3 讨论

#### 3.1 冰川变化的复杂性与跃动冰川的存在

本文中研究区东西跨度 516 km,范围相对较广,自然环境有明显差异,气温、降水的差异表现尤为明显,在复杂的自然环境背景下,冰川变化也较复杂。总体来看,研究区冰川呈现缓慢的退缩,冰川融水补给的冰湖面积增大。而中侧喀拉塔格山冰川基

本处于稳定状态。另外,昆仑峰区可能存在跃动冰川,已有研究表明青藏高原也存在跃动冰川。对于跃动冰川的成因有不同的解释,唐古拉山和阿尼玛卿山冰川跃动原因是冰川内部长期积聚发作的能量变化,与当前气候变化无关<sup>[20]</sup>。喀喇昆仑山跃动冰川和前进冰川的出现主要依赖于高海拔、复杂的地形和气候背景<sup>[31-32]</sup>。对于昆仑峰区的崇测冰川和中峰冰川,冰川面积分别为 168.5 km<sup>2</sup>、239.2 km<sup>2</sup>,冰川规模相对较大。已有研究表明冰川运动速度与冰川规模大小关系明显,规模大的冰川运动速度值大<sup>[33]</sup>,由此昆仑峰区跃动冰川的出现可能与冰川规模有关。另外,雪线与末端海拔的降幅达到 700 m 左右,在升温的背景下引起冰川的消融,冰川顶部的推力加上复杂陡峻的地形,可能是冰川发生跃动的另一个原因。

#### 3.2 冰川变化原因的复杂性

冰川是气候的产物,气候的变化必然会引起冰川的变化。在气象要素中,气温和降水与其关系最为紧密<sup>[34]</sup>。研究区气温、年降水量以 0.031 °C/a、

6.14 mm/(10 a)的速率增加,冰芯数据显示进入20世纪以后气温上升,降水增加。然而,降水的增加幅度不明显,且已有研究表明冰川变化对温度更敏感<sup>[15]</sup>。由此可知西昆仑山冰川整体呈现缓慢的退缩与气温升高有关。但海拔较高的塔什库尔干(3 091 m)年均温在2000—2010年缓慢下降( $-0.07\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ )、离冰川区较近的乌恰( $-0.04\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ )、塔什库尔干( $-0.016\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ )、吐尔尕特( $-0.011\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ )近20年来夏季均温呈下降趋势。年均温和夏季均温的降低不利于冰川的消融,这与西昆仑山冰川退缩率在2000—2010年达到最小相吻合。考虑到青藏高原多数冰川对气候变化响应的滞后时间在10~20 a<sup>[35]</sup>,由此我们推测在接下来几年内西昆仑山冰川可能不会出现大幅度的退缩。

在空间格局上,冰川退缩程度呈现西强东弱的差异性,而研究区东部的增温趋势更明显,西侧的降水增加幅度较大,西侧的冰川规模小于东侧。在局部地区,西昆仑山冰川退缩幅度与气温降水的变化不相一致。反而与冰川规模有更大的相关性,即小规模冰川对气候响应更灵敏<sup>[15]</sup>。

另外,西昆仑山区气温变化与中国西部其他区相一致,而降水的增加幅度较慢。气温的升高和降水的增加不利于冰川的积累,然而,相较于中国其他冰川区,西昆仑山冰川退缩幅度较慢。如近50年来天山冰川的面积缩小了11.5%<sup>[36]</sup>,祁连山北河流域(1956—2003年)冰川面积变化率 $-15.42\%$ <sup>[37]</sup>。东昆仑山马兰冰帽1973—2010年冰川面积减少了6.04%<sup>[15]</sup>,横断山区玉龙雪山1999年冰川仅存15条,与1957年相比,总面积减少了26.78%( $3.11\text{ km}^2$ ),缩减速度居我国冰川区之首<sup>[38]</sup>。而在本文中,西昆仑山的冰川面积退缩率仅为4.1%,甚至存在前进冰川和跃动冰川。上述事实指示了气候变化与冰川响应的复杂性,影响西昆仑山冰川变化的因素复杂,地形、高海拔、小气候、冰川规模也是影响冰川变化的重要因素。另外,气象站点离冰川区有一定的距离,站点资料不能完全反映冰川区的气温降水变化,所以,分析冰川变化的气候背景还要实测的气象资料作为支撑。在青藏高原其他地区,冰川变化也出现了异常特殊现象。有研究表明,青藏高原北部偏西冰芯记录降温 $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相应的冰川退缩微弱,融水径流降低;青藏高原东南部以岗日嘎布山区为代表,出现较多的冰川前进,可能指示降水量有较大的增加<sup>[39]</sup>。

## 4 结论

1. 西昆仑山地区冰川1976—2010年呈现缓慢的退缩,面积退缩率为4.1%,研究区南侧冰湖面积增加了17.8%,另有7个新冰湖出现。冰川融水补给的增加是冰湖扩大的主要原因。

2. 气温的缓慢上升是西昆仑冰川退缩的主要原因之一,乌恰、塔什库尔干、吐尔尕特站点显示的近20年来夏季均温的略微下降,与西昆仑山冰川退缩率在2000—2010年达到最小相吻合。研究区冰川退缩呈现西强东弱的变化格局,这与研究区东部的增温幅度较大,西侧的降水增加趋势更明显不一致,反而与西侧冰川规模较小相吻合。

3. 冰川规模较大、升温引起的冰川消融及复杂的地形是引起昆仑峰区冰川跃动的原因。另外,研究区中侧喀拉塔格山冰川稳定,表明西昆仑山冰川对气候变化复杂的响应机制。

## 参考文献(References)

- [1] Gao Qianzhao, Shi Shensheng, Wen Peian, et al. Water Resources in the Arid Zone of Northwest China[J]. Journal of Desert Research, 1992, 12(4): 4-15 [高前兆, 史胜生, 温培安, 等. 中国西北干旱地区的水资源[J]. 中国沙漠, 1992, 12(4): 4-15]
- [2] Yao T, 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
- [3] Bolch T, Kulkarni A, Kaab A, et al. The state and fate of Himalayan Glaciers[J]. Science, 2012, 336(6079): 310-314
- [4] Ji Peng, Guo Huadong, Zhang Lu. Landsat-4 based dynamic area change of the glaciers to the north of the Guozhuo Lake, 1991—2009[J]. Remote Sensing Technology And Application, 2011, 26(2): 202-208 [纪鹏, 郭华东, 张露. 基于Landsat数据的郭扎错北面冰川近20年来面积动态变化遥感研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 202-208]
- [5] Xu Junli, Liu Shiyin, Zhang Shiqiang, et al. Glaciers fluctuations in the Karamilan Keriya River Watershed in the past 30 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(3): 312-318 [许君利, 刘时银, 张世强, 等. 塔里木盆地南缘喀拉米兰河克里雅河流域内流区近30a来的冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2006, 28(3): 312-318]
- [6] Shangguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Glacier changes at the head of Yurungkax river in the west Kunlun mountains in the past 32 Years. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 855-862 [上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 玉龙喀什河源区32年来冰川变化遥感监测[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 855-862]
- [7] Tucker C J, Grant D M, Dykstra J D. NASA's global orthorectified landsat data set[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1994, 60(1): 82-90

- ing, 2004, 70(3): 313–322
- [8] Guo Wanqian, 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]
- [9] Narama C, Kaab A, Duishonakunov M, et al. Spatial variability of recent glacier area changes in the Tien Shan Mountains, Central Asia, using Corona (similar to 1970), Landsat (similar to 2000), and ALOS (similar to 2007) satellite data[J]. Global and Planetary Change, 2010, 71(1–2): 42–54
- [10] Tian Hongzhen, Yang Taibao, Liu Qiping. Climate change and glacier retreat in Ganggaxiaoheli, middle Qilian Mountains using remote sensing data, 1976–2010[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(7): 41–46 [田洪阵, 杨太保, 刘沁萍. 1976–2010 年祁连山中段岗格尕尔肖合力雪山冰川退缩和气候变化的关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 41–46]
- [11] Lü Hui, Yang Taibao, Tian Hongzhen. Glacier changes in the northern Altay Mountains from 1980 to 2010 [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(10): 69–76 [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(10): 69–76]
- [12] Bolch T, Yao T, Kang S, et al. A glacier inventory for the western Nyainqentanglha Range and the Nam Co Basin, Tibet, and glacier changes 1976–2009[J]. Cryosphere, 2010, 4(3): 419–433
- [13] Paul F, Kaab A, Maisch M, et al. The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods [J]. Annals of Glaciology, 2002, 34(1): 355–361
- [14] Cao Bo, Pan Baotain, Gao Hongshan, et al. Glacier Variation in the Lenglongling Range of Eastern Qilian Mountains from 1972 to 2007 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, 32(2): 242–248 [曹波, 潘保田, 高红山, 等. 1972–2007 年祁连山东段冷龙岭现代冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2010, 32(2): 242–248]
- [15] Jiang Shan, Yang Taibao, Tian Hongzhen. Glacier shrinkage and its dependence on climate in the Malan Mountain in 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 的马尔山冰川退缩与气候变化关系研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(3): 522–529]
- [16] 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
- [17] Tian Hongzhen, Yang Taibao, Liu Qiping. Relationship between climate change and glacier retreat over the last 40 years in Lenglongling range of eastern Qilian mountains [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2012, 19(5): 34–38 [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. 水土保持研究, 2012, 19(5): 34–38]
- [18] Shang G D H, Liu S Y, Ding Y J, et al. Glacier changes in the west Kunlun Shan from 1970 to 2001 derived from Landsat TM/ETM+ and Chinese glacier inventory data[J]. Annals of Glaciology, 2007, 46: 204–208
- [19] Shangguan Donghui, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. Surging glacier found in Shaksam river, Karakorum Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(5): 641–644 [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]
- [20] Yang Jianping, Ding Yongjian, Liu Shiyin, et al. Glacier change and its effect on surface runoff in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers [J]. Journal of Nature Resources, 2003, 18(5): 595–602 [杨建平, 丁永建, 刘时银, 等. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 595–602]
- [21] Jiang Zonli, Liu Shiyin, Xu Junli, et al. Using feature – Tracking of ALOS PALSAR Images to acquire the Yengisogat Glacier surface velocities. [J]. Journal of Nature Resources, 2011, 33(3): 512–518 [蒋宗立, 刘时银, 许君利, 等. 应用 SAR 特征匹配方法估计音苏盖提冰川表面流速[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 512–518]
- [22] Wang Wenying, Huang Maohuan. The Surge Glaciers of Pakistan [J]. Journal of Nature Resources, 1980, 2(1): 26–31 [王文颖, 黄茂桓. 巴基斯坦帕尔提巴尔跃动冰川近况[J]. 冰川冻土, 1980, 2(1): 26–31]
- [23] Niu Jingfei, Liu Jingshi, Wang Di, et al. Monitoring on ice dammed lake and related surging glaciers in Yarkant River, Karakorum in 2009 [J]. Mountain Research, 2011, 29(3): 276–282 [牛竞飞, 刘景时, 王迪, 等. 2009 年喀喇昆仑山叶尔羌河冰川阻塞湖及冰川跃动监测[J]. 山地学报, 2011, 29(3): 276–282]
- [24] Zhang Wenjing. Some Feature of The Surge Glacier in the MT. NAMJAGBARWA [J]. Mountain Research, 1985, 3(4): 234–238 [张文敬. 南迦巴瓦峰跃动冰川的某些特征[J]. 山地研究, 1985, 3(4): 234–238]
- [25] Zhao Chuancheng, Wang Yan, Ding Yongjian, et al. Spatial Temporal Variations of Temperature and Precipitation in Northern China in Recent 50 Years [J]. Plateau Meteorology, 2011, 30(2): 385–390 [赵传成, 王雁, 丁永建, 等. 西北地区近 50 年气温及降水的时空变化[J]. 高原气象, 2011, 30(2): 385–390]
- [26] Jia Wenxiong, He Yuanqing, Li Zongsheng, et al. The regional difference and catastrophe of climatic change in Qilian Mt. Region [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, 63(3): 257–269 [贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析[J]. 地理学报, 2008, 63(3): 257–269]
- [27] Zhang Zhengyong, Liu Lin, Tang Xiangling. The regional difference and abrupt events of climatic change in Tianshan Mountains during 1960–2010 [J]. Progress in Geography, 2012, 31(11): 1475–1484 [张正勇, 刘琳, 唐湘玲. 1960–2010 年中国天山山区气候变化区域差异及突变特征[J]. 地理科学进展, 2012, 31(11): 1475–1484]
- [28] Li Zongsheng, He Yuanqing, Xin Huijuan. Spatio-temporal variations of temperature and precipitation in Mts. Hengduan Region during 1960–2008 [J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(5): 563–579 [李宗省, 何元庆, 辛惠娟, 等. 我国横断山区 1960–2008 年气温和降水时空变化特征[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 563–579]
- [29] Zhang Xinping, Yao Tandong, Shi Weilin, et al. Record of climate change since little ice age in the ice core of the Guliya ice cap [J]. Journal of Hunan Normal University (Natural Sciences), 1999, 22(1): 80–84 [章新平, 姚檀栋, 施维林, 等. 古里雅冰芯中小



- 冰期以来的气候变化记录[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 1999, 22(1): 80–84]
- [30] Yao Tandong, Jiao Keqin, Yang Meixue. Precipitation change in the ice core of the Guliya ice cap during past 400 years. *Advance of Nature Science, Suppl*, 1999, 9(12): 1161–1165 [姚檀栋, 焦克勤, 杨梅学. 古里雅冰芯中过去400a降水变化研究[J]. 自然科学进展, 1999, 增刊9(12): 1161–1165]
- [31] Hewitt K. The Karakoram anomaly? Glacier expansion and the elevation effect, Karakoram Himalaya [J]. *Mountain Research and Development*, 2005, 25(4): 332–340
- [32] Iturrizaga L. Trends in 20th century and recent glacier fluctuations in the Karakoram Mountains [J]. *Zeitschrift Fur Geomorphologie*, 2011, 55(3): 205–231
- [33] Jing Zhefan, Zhou Zaiming, Liu Li. Progress of the Research on Glacier Velocities in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(4): 749–754 [井哲帆, 周在明, 刘力. 中国冰川运动速度研究进展[J]. 冰川冻土, 2010, 32(4): 749–754]
- [34] Wang Puyu, Li Zhongqin, Gao Weiyu et al. Glacier changes in the Heihe River Basin over the past 50 years in the context of climate change. *Resources Science*, 2011, 33(3): 399–407 [王璞玉, 李忠勤, 高闻宇, 等. 气候变化背景下近50年来黑河流域冰川资源变化特征分析. 资源科学, 2011, 33(3): 399–407]
- [35] Duan Jianping, Wang Lili, Ren Jiawen, et al. Progress in glacier variations in China and its sensitivity to climatic change during the Past Century [J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(2): 231–237
- [段建平, 王丽丽, 任贾文, 等. 近百年来中国冰川变化及其气候的敏感性研究进展[J]. 地理科学进展, 2009, 28(2): 231–237]
- [36] Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zongqin, et al. Response of glacier area variation to climate change in Chinese Tianshan Mountains in the Past 50 Years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(1): 38–46 [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[J]. 地理学报, 2011, 66(1): 38–46]
- [37] Yan Donghai, Li Z Q, Gao Wongqin, et al. RS-based Monitoring of glacier change in the Beidahe River Basin in the Qilian Mountains [J]. *Arid Zone Research*, 2012, 29(2): 245–250 [颜东海, 李忠勤, 高闻宇, 等. 祁连山北大河流域冰川变化遥感监测[J]. 干旱区研究, 2012, 29(2): 245–250]
- [38] Li Zongsheng, He Yuanqing, Wang Shijin, et al. Changes of some monsoonal temperate glaciers in Hengduan Mountains Region during 1900–2007 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1319–1330 [李宗省, 何元庆, 王世金, 等. 1900–2007年横断山区部分海洋型冰川变化[J]. 地理学报, 2009, 64(11): 1319–1330]
- [39] Shi Yafeng, Liu Shiyin, Shangquan Donghui, et al. Two peculiar phenomena of climatic and glacial variations in the Tibetan plateau [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(4): 154–160 [施雅风, 刘时银, 上官冬辉, 等. 近30a青藏高原气候与冰川变化中的两种特殊现象[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(4): 154–160]

## Variation of Western Kunlun Mountain Glaciers Monitored by Remote Sensing during 1976—2010

LI Chengxiu, YANG Taibao, TIAN Hongzhen

(College of Earth and Environmental Sciences, Institution of Glaciers and Ecology, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** The water released from Kunlun Mountain glaciers is the major source of stream flow to the Tarim Basin and nearly 6.3 million people live in the oasis of Tarim Basin rely on the glacier runoff. Reliable information about current and future glaciation and runoff is crucial for the best use of melt water. Using Landsat images of Western Kunlun Mountain in 1990, 2000 and 2010, together with the China glacier inventory in 1976. We present an analysis of meteorological data and glacial area change for these three periods. Results show that 1) from 1976 to 2010, glaciers reduced by 4.1% and glacial lakes expanded by 17.8%. The change of glaciers area were inversely correlated with glacier lake area. For the glacier runoff was the main contributor for the lake. 2) Increase in temperature over the study period is the key factors causing retreat. Some stations shows lower increasing trend in summer temperature from 1990–2010, which is consistent with the lower glacier retreat ratio. The time of Glacier change response to increasing temperature lag nearly 10–20 years. So we speculate that Western Kunlun Mountain glaciers suffer slight retreat or keep stable in the future. 3) Surge glaciers may occur in the eastern part of study area, and some glaciers remain stable in the middle of study area. It shows that many factors were influenced glacier change in Western Kunlun Mountain, including topographic factors, microclimate glacier size and so on.

**Key words:** glacier change; remote sensing monitoring; Western Kunlun Mountain; surge glacier