

# 1990-2011年西昆仑峰区冰川变化的遥感监测

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, 兰州 730000)

**摘要:** 本文应用 Landsat 5、7 TM、ETM+ 影像分析 1990-2011 年昆仑山西段昆仑峰区冰川变化特征, 结果表明: 1990-2011 年冰川面积减少 16.83 km<sup>2</sup>, 退缩率仅为 0.65%, 冰川退缩趋势不明显。单条冰川变化有进有退, 中峰冰川末端在 2002-2004 年以 661 m/a 的速率前进, 初步判定为跃动冰川。1991-1998 年, 崇测冰川面积增加 9.47 km<sup>2</sup>, 冰川末端以 200 m/a 的速率前进, 不排除有跃动冰川的可能性。尽管近年来全球气温普遍上升, 大量冰川处于退缩状态, 但统计已有研究结果发现近 50 年来青藏高原存在冰川长度、面积增加, 冰川物质平衡为正的现象, 表现出冰川对气候变化复杂的反馈机制。通过分析气象站点和冰芯资料, 研究区周边地区气温上升、降水量缓慢增加可能是冰川微弱退缩的原因之一; 增强的西风环流带来更多的降水、研究区以极大陆型大规模冰川为主, 也可能是冰川退缩幅度较小的原因。

**关键词:** 冰川变化; 遥感技术; 前进冰川; 跃动冰川; 昆仑峰区

doi: 10.11820/dlkxjz.2013.04.007

## 1 引言

山地冰川是气候变化的指示器, 对气候变化的响应极为敏感。青藏高原是世界上中低纬度地区最大的现代冰川分布区, 在全球气候系统中起着重要的作用。随着全球气候的波动变暖, 特别是 20 世纪 80 年代以来的快速增温, 使青藏高原冰川末端在近几十年间呈现出快速退缩的趋势(蒲健辰等, 2004)。观测冰川的进退变化可以了解冰川动态并进行预测, 同时对人类活动, 特别是山区的交通、工矿、农业等经济建设也有着重要的现实意义(中国科学院青藏高原综合科学考察队, 1998)。

位于青藏高原西北部的昆仑山西段, 由于受自然条件和交通条件的制约, 系统性的冰川进退变化的观测很少, 利用遥感手段开展冰川变化的研究也不多见(纪鹏等, 2011; 上官冬辉等, 2004a; 许君利等, 2006), 而昆仑山西段昆仑峰区冰川变化的研究更是鲜有报道。本文选取 Landsat TM、ETM+ 影像, 分析 1990-2011 年昆仑峰区的冰川变化特征及其气候背景, 并且结合冰川变化和气候变化的事实, 讨论冰川变化与气候变化关系的复杂性。

## 2 数据与方法

### 2.1 研究区概况

西昆仑山是青藏高原西北边缘向南呈弧形的内陆高大山地, 山峰高度一般都在 6000 m 以上, 海拔为 7167 m 的昆仑峰是其最高峰。高亢的地势和寒冷的气候使之成为青藏高原最大的现代冰川作用中心之一。据冰川编目, 西昆仑山有冰川 5485 条, 冰川面积 8817.78 km<sup>2</sup>, 占整个昆仑山冰川总面积的 3/4 以上(焦克勤等, 2000)。

昆仑峰区位于 35~36°N、80~82°E 之间, 北坡地形复杂, 以树枝状大型山谷冰川为主, 南坡地形和缓(图 1)。其中由 12 条支冰川汇入主干而形成的多峰冰川, 成为昆仑山发育规模最大, 冰舌下伸最低的冰川和典型的树枝状山谷冰川之一。迄今在中低纬度发现的最大冰帽——古里雅冰帽(面积 376.05 km<sup>2</sup>)就发育在这里, 该区域是典型的极大陆型或具有极地冰川特征的冰川区(中国科学院青藏高原综合科学考察队, 1998)。

该区气候寒冷干旱, 年降水量仅 300 mm 左右, 平衡线处夏季平均气温多在 0℃ 以下, 液体降水比

收稿日期: 2012-08; 修订日期: 2013-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871057, 41271024)。

作者简介: 李成秀(1988-), 女, 青海西宁人, 硕士研究生, 主要研究方向为基于 RS 和 GIS 的山地冰川变化。

E-mail: licx11@lzu.edu.cn

通讯作者: 杨太保(1962-), 男, 山西平陆人, 教授, 博士生导师, 主要从事自然地理环境变化研究。Email: yangtb@lzu.edu.cn

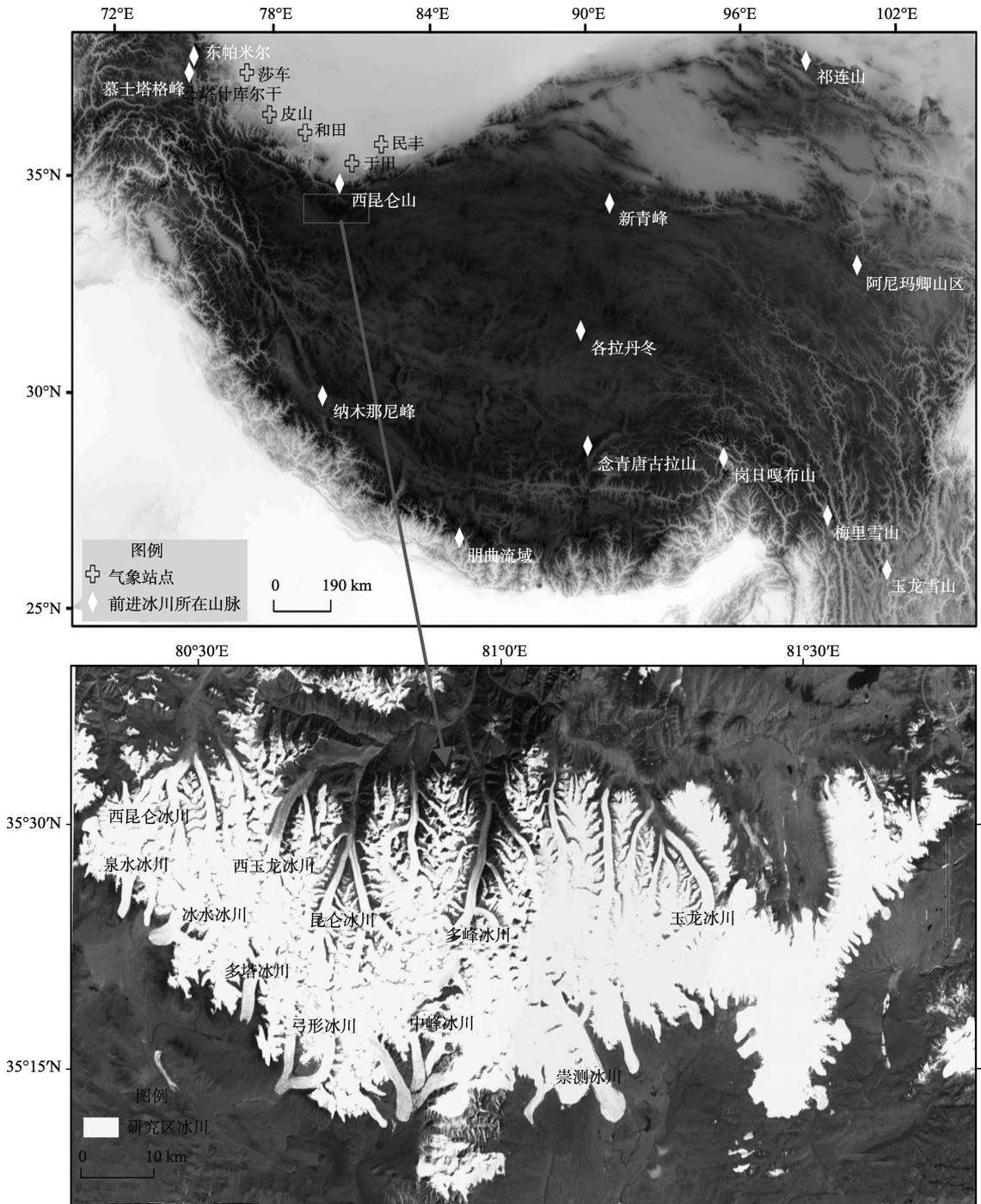


图1 研究区示意图

Fig. 1 Location of the study area

例极小,属于夏季补给型冰川区。昆仑峰区的冰川是北坡玉龙喀什河、克里雅河等河流的主要补给源泉(郑度等, 1999)。

2.2 数据源

本研究使用的是冰川变化分析运用最多的 Landsat 卫星遥感影像,主要来自美国地质调查局

(USGS)和马里兰大学网站。该产品经过系统辐射校正和地面控制点几何校正,并且利用DEM数据进行了地形校正,其大地测量校正依赖于精确的地面控制点和高精度的DEM数据。DEM数据的空间分辨率为30 m和1 km, TM和ETM+正射校正最大均方根误差 RMSE 不超过 50 m(Tucker et al,

2004),已有研究验证 USGS 所提供的经过正射校正后 Landsat 遥感影像具有相当高的校正精度(郭万钦等, 2012),因此,本文未作进一步的校正。选用数据的轨道号是 Path145/Row35、Path145/Row36 (1990、1999、2002、2004、2011)(表 1),选择的遥感影像含云量小于 10%,并且尽可能挑选受降雪干扰小的影像,对于受云和降雪影响质量较差的遥感影像,采用相近年份的数据补充(表 1)。

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,研究区冰川编目时采用由 1976 年出版的 1:10 万航摄测量地形图,1971 年出版的 1:6 万航空像片。中国气象局提供的 6 个气象站(于田、和田、民丰、塔什库尔干、皮山、莎车)1960-2010 年气温和降水资料。

## 2.3 数据解译过程

### 2.3.1 计算机自动分类

比值阈值法是先利用波段比值生成比值图像,再根据阈值提取冰川范围的方法。基本原理是利用冰川在可见光波段的强反射率和在红外波段的强吸收特性来提取冰川区。比值阈值法运用非常广泛且受大多数研究者认同(Bolch et al, 2010a, 2010b; Shangguan et al, 2007; Narama et al, 2010; Pan et al, 2012; Paul, Kaab et al, 2002)。Bolch 等在瑞士贝尔尼纳峰和北天山地区运用波段比值法 TM4/TM5 提取冰川取得了较好的结果;比值法结合人工修正结果与瑞士冰川编目的结果相比,面积相差仅为 0.8%;北天山冰川提取结果与世界冰川监测系统的结果相比,面积相差仅为 0.31%(Bolch et al, 2006)。Paul(2000)运用 TM 影像对比监督分类和非监督分类、比值阈值法等不同冰川提取方法,结果显示比值阈值法的效果最佳;结合目视解译,

用 TM 影像提取的冰川面积与用 SPOT 高分辨率影像人工提取的结果对比,绝对误差只有 1%。

本文选用 TM3/TM5 的波段比值组合,对于阈值的选取,不同的研究者有不同的取值,阈值的不同可能与影像的质量和冰川的类型有关(曹泊等, 2011)。在本研究中使用 ENVI 软件计算 TM3/TM5,得到比值影像,再利用决策树进行分类,经过试验对比阈值选为 1.8 最为合适,得到冰川的初步提取结果。

### 2.3.2 目视解译

在计算机自动分类的基础上,将冰川数据转换成 shp 格式,在 ArcGIS 中将其转换至 Albers 等积投影进行冰川边界修正,统计冰川面积及其变化,冰川末端长度变化可沿冰川主流线进行量算。该区域冰川基本上全是表面干净的冰川,冰舌无明显表碛覆盖,对于个别有雪覆盖的地区,借助相近年份遥感影像或者 Google Earth 修正边界。另外,剔除面积小于 0.01 km<sup>2</sup> 的区域(Bolch et al, 2010b; Narama et al, 2010; 上官冬辉等, 2004a),因为小面积的多边形多为雪斑或者阴影(Paul et al, 2002a)。另外,上官冬辉等(2004a)在西昆仑山的研究发现,冰川面积变化小于 0.01 km<sup>2</sup>,或冰川长度变化小于 45 m,被认为是变化不确定的冰川。冰川编目数据作为冰川解译和分割过程中的辅助数据, Bolch 等(2010b)发现冰川编目数据存在不准确及空间定位错误,但通过本文研究验证,冰川编目的边界是可靠的。为了便于比较,本文没有将冰川编目数据作为早期冰川分布数据来源。结合比值阈值法和目视解译的半自动冰川提取方法应用广泛,解译精度高(Bolch et al, 2010a, 2010b; Hagg et al, in press; Narama et al, 2010; Pan et al, 2012)。据 GLIMS 计划(Global Land Ice Measurements from Space, 全球陆地冰空间监测计划)有关评估显示,人工解译是目前提取冰川信息最为精确的方法(Raup et al, 2007)。

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(Bolch et al, 2006, 2010a; Paul, 2000; Paul 2002a, 2002b; 田洪阵等, 2012)。Bolch 等(2010a)用高分辨率航空相片对 Landsat 影像比值法进行精度评估,误差为±2.5%;Paul(2000)通过对 Spot 影像人工提取的冰川面积对比,发现 TM 影像得到的冰川面积的误差小于 1%。在本文中,我们借鉴此方法,用稻割

表 1 遥感数据列表

Tab. 1 Utilized Landsat scenes for the study

年份	获取日期	轨道号 (Path/Row)	传感器	分辨率
1990	1990-11-15	145/35	TM	30 m
	1991-10-17/1990-11-15	145/36	TM	
1999	1999-12-18/1999-10-31/2001-02-06	145/35	ETM+	
	1998-10-4/1999-09-29/2001-10-20	145/36	ETM+	
2011	2011-11-09/2011-08-05/2009-08-15	145/35	TM	
	2011-08-05/2011-11-09	145/36	TM	
2002	2002-07-03	145/36	ETM+	
2004	2004-09-10	145/36	ETM+	

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 $\pm 2.2\%$ 。

### 3 结果与分析

#### 3.1 冰川面积和长度变化结果

研究区 2011 年冰川的总面积为 2979.9 km<sup>2</sup>。1990-1999 年,研究区冰川面积减少 13.1 km<sup>2</sup>,退缩率为 0.46%; 1999-2011 年,冰川面积减少 8.17 km<sup>2</sup>,退缩率为 0.3%; 1990-2011 年,冰川面积减少 16.83 km<sup>2</sup>,退缩率为 0.65%。由此可见,昆仑峰区的冰川呈微弱的退缩状态,这与已有的研究结果相一致(上官冬辉等, 2004a; 许君利等, 2006)。

以下进一步分析研究区典型冰川的变化特征。1990-2011 年,10 条冰川面积减少了 16.3 km<sup>2</sup>,减少范围为 0.25~3.93 km<sup>2</sup>,退缩率在 0.26%~3.12% 之间。1990-2011 年中,西昆仑冰川退缩得最快,退缩量为 3.93 km<sup>2</sup>,退缩率为 2.88%(表 2)。

研究区部分冰川面积增加。其中,崇测冰川、多峰冰川、昆仑冰川、5Y641H0067、东崇测冰川、编号为 5Y641F0098 的冰川在 1990-1999 年期间增加,除崇测冰川外,其他冰川的面积增加幅度都很小,面积增加范围为 0.1~0.98 km<sup>2</sup>,面积变化率 0.18%~0.67%; 在此期间面积增加的冰川多集中在昆仑峰区的北侧(图 1)。5Y641H0073、中峰冰川、里田冰川在 1999-2011 年间略微增加(表 2),这 3 条冰川主要分布在研究区南侧(图 1)。中峰和崇测冰川末端长度和面积急剧增加,进一步分析其他时段的遥感图像,发现在 2002-2004 年期间中峰冰川的末端长度增加近 1322 m,面积增加了 2.31 km<sup>2</sup>,此条冰川末端以 661 m/a 速率在前进。崇测冰川在 1991-1998 年面积增加 9.47 km<sup>2</sup>,冰川末端前进 1400 m。跟据跃动冰川是指冰舌在几天或至多 2~3 年内以超出正常冰川速率 10 倍以上的速率前进的判断标准(上官冬辉等, 2005),我们推测中峰冰川具备跃动冰川的特征。崇测冰川末端的前进速率是 200 m/a,由于没有找到 1991-1998 年间的影像,此前进速率为 7

表 2 研究区典型冰川变化特征

Tab. 2 Statistics of typical area changed glaciers

冰川名称	1990-1999 年		1999-2011 年		1990-2011 年		
	面积变化/km <sup>2</sup>	面积变化率/%	面积变化/km <sup>2</sup>	面积变化率/%	面积变化/km <sup>2</sup>	面积变化率/%	末端长度变化/km
泉水冰川	-0.32	-0.89	-0.04	-0.11	-0.36	-1.00	+0.26
多塔冰川	-0.91	-1.05	-0.06	-0.07	-0.97	-1.13	-0.44
弓形冰川	-0.05	-0.04	-2.10	-1.66	-2.15	-1.70	-0.46
郭扎冰川	-0.68	-1.26	-0.11	-0.20	-0.79	-1.46	-0.05
西昆仑冰川	-2.48	-1.82	-1.44	-1.08	-3.93	-2.88	-0.92
玉龙冰川	-0.23	-0.16	-2.20	-1.53	-2.43	-1.69	+0.03
西玉龙冰川	-0.79	-0.60	-0.91	-0.69	-1.70	-1.29	-0.57
5Y641F0085	-0.28	-0.32	-2.91	-3.31	-3.19	-3.62	-0.11
5Y641F0070	-0.41	-0.10	-0.09	-0.24	-0.51	-1.25	-0.25
冰水冰川	-0.17	-0.17	-0.08	-0.09	-0.25	-0.26	+0.05
5Y641G0038	-0.12	-0.12	-0.06	-0.06	-0.18	-0.18	-0.43
5Y641F0073	-1.60	-5.63	+1.88	+7.02	+0.28	+0.99	-1.25
中峰冰川	-0.62	-0.26	+2.31	+0.98	+1.69	+0.72	+1.02
里田冰川	-0.63	-2.26	+0.59	2.15	-0.04	-0.16	+0.09
崇测冰川	+9.47	+5.87	-2.19	-1.28	+7.28	+4.52	+1.14
多峰冰川	+0.63	+0.25	-0.04	-0.02	+0.59	+0.23	-0.20
昆仑冰川	+0.98	+0.45	-1.09	-0.49	-0.11	-0.05	-1.30
5Y641H0067	+0.10	+0.18	-0.21	-0.36	-0.05	-0.09	-0.21
东崇测冰川	+0.33	+0.67	-0.21	-0.40	+0.12	+0.24	-0.05
5Y641F0098	+0.28	+0.42	-0.26	-0.39	+0.21	+0.03	-0.27

注:面积变化率误差范围( $\pm 2.2\%$ )

年平均的结果,因此并不能排除崇测冰川也是跃动冰川的可能性,并且此条冰川的面积增加值约为中峰冰川的4倍(图2)。

与纪鹏、上官冬辉等的研究结果相比(表3),个别冰川变化速率有略微差别,但是总体的趋势是一样的。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。

### 3.2 中国西部前进冰川统计

中国西部地区,尤其是青藏高原地区,冰川退缩的同时也存在冰川面积和长度的增加。本文不完全统计了已有研究结果中的冰川面积、长度的增

加值及所占比率,前进冰川条数及比率(表4、5)。结果发现,这些冰川多分布在青藏高原腹地、东南部、西北部及边缘地区,冰川类型有海洋型冰川、亚极大陆型和极大陆型冰川(图1)。从20世纪70年代至21世纪初,西部地区仍存在冰川前进。就前进冰川的条数来看,马兰冰帽前进冰川条数所占比例最大,而天山冰川的前进条数最多(表4)。位于青藏高原东南部的岗日嘎布山冰川面积增加值及所占的比率达到最大(表4),喀喇昆仑山地区前进长度及比率达到最大(表5)。近年又有研究发现喀喇昆仑山有冰川前进(Hewitt, 2011; Iturrizaga, 2011; Sarikaya et al, 2012),冰川物质呈现正平衡

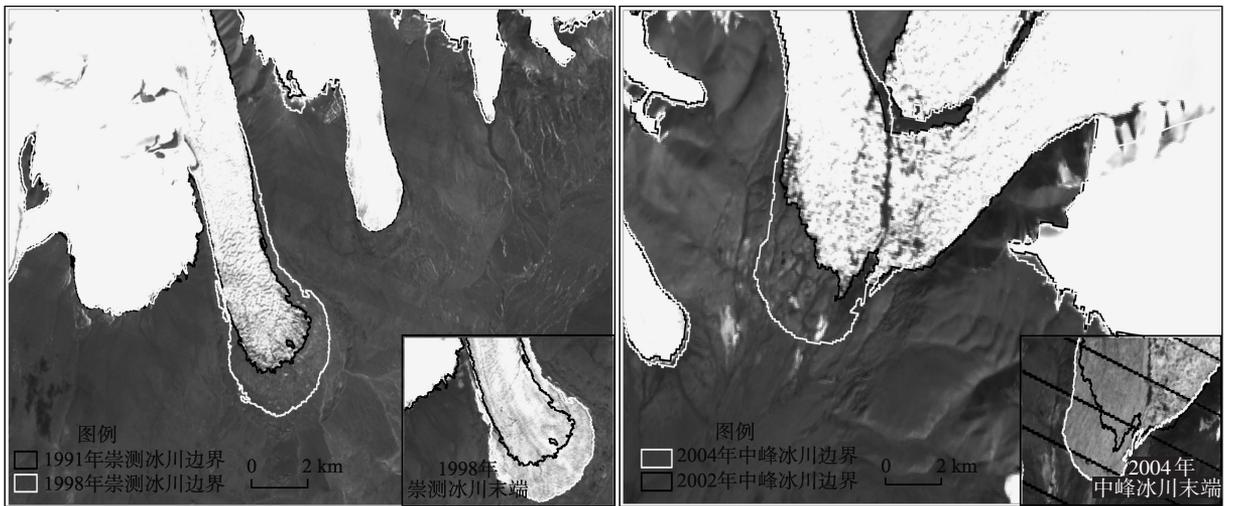


图2 中峰冰川、崇测冰川前进图

Fig. 2 Map showing advanced Zhongfeng and Chongce Glacier

表3 典型冰川面积变化结果对比

Tab. 3 Comparison of different results about typical glaciers

冰川名称	数据来源	研究年限	面积变化/km	文献来源
泉水冰川	Landsat TM/ETM+	1991-2001	+0.05	纪鹏等, 2011
		1990-1999	-0.32	本文
弓形冰川	Landsat TM/ETM+	1991-2001	-0.05	纪鹏等, 2011
		1990-1999	-0.05	本文
5Y641F0085	Landsat TM/ETM+	1989-2001	-0.29	上官冬辉等, 2004a
		1990-1999	-0.28	本文
中峰冰川	Landsat TM/ETM+	1991-2001	-0.29	纪鹏等, 2011)
		1990-1999	-0.62	本文
5Y641F0070	Landsat TM/ETM+	1989-2001	-0.03	上官冬辉等, 2004a
		1990-1999	-0.41	本文
5Y641G0038	Landsat TM/ETM+	1989-2001	-0.67	上官冬辉等, 2004a
		1990-1999	-0.12	本文
东崇测冰川	Landsat TM/ETM+	1991-2001	+0.02	纪鹏等, 2011
		1990-1999	+0.33	本文

表4 中国西部前进冰川条数和面积统计

Tab. 4 The number and area of the advancing glaciers in Western China

冰川名称 或位置	所属区域	冰川总条数/ 冰川面积/km <sup>2</sup>	研究年限	前进条数/ 前进面积/km <sup>2</sup>	条数比率/ 面积比率/%	资料来源
天山	天山	960/-	1962-2000	+224/-	+23/-	刘时银等, 2006
祁连山西段	祁连山	-/-	1956-2000	+10/-	-/-	
东帕米尔高原	东帕米尔高原	753/-	1966-2001	+198/-	+26/-	
玉龙喀什流域	西昆仑山	14/-	1971-2001	+3/-	+21/-	上官冬辉等, 2004a
西段冰川	念青唐古拉山	870/-	1970-2000	+119/-	+13.7/-	上官冬辉等, 2008
朋曲流域	青藏高原	999/-	1970-2001	+202/-	+20/-	晋瑞等, 2004
唐盖河流域	慕士塔格峰	36/95.45	1965-2001	+5/+0.92	+13.9/+0.9	蔡迪花等, 2006
康西瓦河流域		75/213.26	1965-2001	+2/+0.74	+2.6/+0.3	
阔克萨依		17/68.5	1965-2001	+5/+2.7	+29.4/+3.8	
新青峰冰帽	青藏高原	64/274.2	1971-2000	+16/+5.1	+25/+1.8	刘时银等, 2004
马兰冰帽		65/165.6	1971-2000	+38/+3.7	+59/+2.2	
50822B0123	岗日嘎布山	-/25.4	1980-2001	-/+0.4	-/+1.5	刘时银等, 2005
50822B0136		-/10.6	1980-2001	-/+0.5	-/+4.8	
北坡然		-/140.9	1980-2001	-/+1.5	-/+1.1	
乌错流域						
南坡丹						
龙曲流域		-/215.3	1980-2001	-/+8.9	-/+4.1	

表5 青藏高原前进冰川长度统计

Tab. 5 The length of the advancing glaciers in Tibetan Plateau

冰川名称	所属区域	冰川长度/km	研究年限	前进长度/km	长度比率/%	资料来源
白水1号冰川	玉龙雪山	2.7	1957-1982	+0.80	+30	郑本兴等, 1999
		3.5	1997-1998	+0.01	+0.10	
明永冰川	梅里雪山	5.0	1959-1971	+0.73~+0.93	+18.60	
		5.9	1971-1982	+0.07	+1.20	
		6.0	1982-1998	+0.28	+5.60	
5J352E0022	黄河源区	3.0	1966-2000	+0.08	+2.60	刘时银等, 2002
5J352E0023		2.3	1966-2000	+0.08	+3.40	
哈龙冰川		7.7	1966-2000	+0.38	+5.00	
5K451F12	长江源区	5.4	1969-2000	+0.68	+12.5	鲁安新等, 2005
5K451F1		1.1	1969-2000	+0.54	+49.36	
5J351D26	黄河源区	1.6	1969-2000	+0.31	+19.60	
5J351D20		7.3	1969-2000	+0.38	+5.26	
5Y663E14	慕士塔格—	8.6	1963-2001	+1.76	+20.40	上官冬辉等, 2004b
5Y663E8	公格尔山	9.4	1963-2001	+0.44	+4.60	
5Y656I27		6.5	1963-2001	+0.94	+14.40	
5Y656I22		2.1	1963-2001	+1.41	+67.10	
5Y654D48	喀喇昆仑山	6.1	1976-2000	+2.15	+33.60	
5Y654D77		5.3	1968-2000	+0.91	+17.20	
5Y654D78		2.8	1968-2000	+0.14	+5.00	
5Y654D97		10.7	1968-2000	+2.0	+18.70	

(Bolch et al, 2012; Gardelle et al, 2012)。姚檀栋等研究发现,帕米尔地区冰川长度和面积萎缩幅度较小,且呈现正物质平衡(Yao et al, 2012)。曾磊(2012)研究发现,2000-2011年盖孜河流域有16条冰川前进。从全球冰川变化情况来看,Houghton的研究表明挪威西部19世纪末出现较多的前进冰川(引自施雅风等,2006);而新西兰地区西海岸111条冰川的变化信息显示,在20世纪后20年中,这些冰川有明显的前进迹象(Chinn, 1996)。

## 4 冰川变化的气候背景

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(王璞玉等,2011),因此,本文主要分析气温和降水变化特征。

由于青藏高原地域辽阔,地形复杂,气候变化具有多样性,在其内部有着复杂的差异。为综合客观地反映西昆仑山高山地带地区气温和降水特征,除分析研究区附近气象站点的资料外,还选用古里雅冰芯研究结果对研究区气候变化背景进行补充说明。

### 4.1 冰芯资料分析

古里雅冰芯的研究能够揭示青藏高原中部和西部的温度变化特征,冰芯所记录的降水变化也是迄今恢复过去降水变化最可靠、最真实的代用指标(姚檀栋等,1994;姚檀栋等,1999)。章新平等(1999)分析古里雅冰芯D<sup>18</sup>O记录显示,20世纪80年代以来气温升高,并且是50年来最强烈的一次。进入20世纪,降水量急增。姚檀栋等(1994)分析古里雅冰芯资料的结果显示,进入20世纪以后,气温急剧上升,伴随着降水的急剧增加。在古里雅冰帽北坡,冰芯资料指示1975-1992年间有较微弱降温 and 较强的降水增加(引自施雅风等,2006)。姚檀栋等(1999)对古里雅百年尺度降水量变化的研究结果表明,20世纪初以来降水量有明显的增加。

### 4.2 气象资料分析

本文选取研究区周边地区的气象站点包括莎车、皮山、和田、于田、民丰、塔什库尔干。由于夏季气温和降水量是冰川变化的两个主要控制因素(王璞玉等,2011)。本文分析了1960-2010年均温、夏季均温和年降水量、夏季降水量的变化特征。

选用拟合度较好的多项式曲线拟合气温变化

趋势,20世纪80年代以后,年平均气温和夏季平均气温上升(图3、图4)。20世纪60-80年代,于田站所记录的年均温和夏季均温呈现轻微的下降趋势。其他站点显示气温变化较平稳或者缓慢增长。总体来看,1960-1980年,气温变化相对稳定或略微降低,1980年后升温趋势明显。这与古丽雅冰芯的研究结果一致,并且和青藏高原气温变化趋势相吻合(蔡英等,2003;王楠等,2010)。海拔为3000m左右的塔什库尔站更能揭示冰川区气候变化特征,从图中可以看出,近40年来气温较其他站点波动幅度大,在波动中缓慢增加,但是趋势不明显,从10年分段拟合线来看,近10年来年均温和夏季气温甚至出现下降的趋势(图3、图4)。

从降水量拟合曲线可以看出,年降水量和夏季降水量有略微的增加趋势(图3、图4)。需要说明的是降水量的拟合系数较低,变化趋势不明显。而古里雅冰芯的研究结果显示,进入20世纪,降水量有显著的增加(侯书贵等,2002)。

## 5 结论与讨论

(1) 遥感监测结果显示,西昆仑山昆仑峰区1990-2011年冰川面积减少16.83 km<sup>2</sup>,退缩率为0.65%。相较于青藏高原其他地区,昆仑峰区冰川退缩幅度偏小。喀喇昆仑山和西昆仑山、东帕米尔高原都受到西风环流的影响,近期的研究发现,喀喇昆仑山冰川前进(Hewitt, 2011; Iturrizaga, 2011; Sarikaya et al, 2012),冰川物质呈现正平衡(Bolch et al, 2012; Gardelle et al, 2012)。Yao等(2012)认为增强的西风带来了更多的降水,使东帕米尔地区冰川物质呈现正平衡。西风环流作为西昆仑山降水来源之一,其加强必然导致研究区降水增加,并且从气象站点资料及冰芯资料可以看出,研究区周边地区的降水缓慢增加。在气温升高的大背景下,降水增加抑制了冰川的进一步消融,可能是研究区冰川退缩幅度较小的原因之一;同时由于昆仑峰区冰川为极大陆型冰川,对气候变化不敏感,研究区冰川规模大,对气候变化的响应较小冰川慢;以上因素综合作用致使研究区冰川退缩幅度较小。当然,冰川变化与气候之间存在着复杂的内部机制,其间关系还需进一步探讨研究。

(2) 研究区有部分冰川在1990年至1999年面积增加,在此期间昆仑冰川的面积增加值最大为

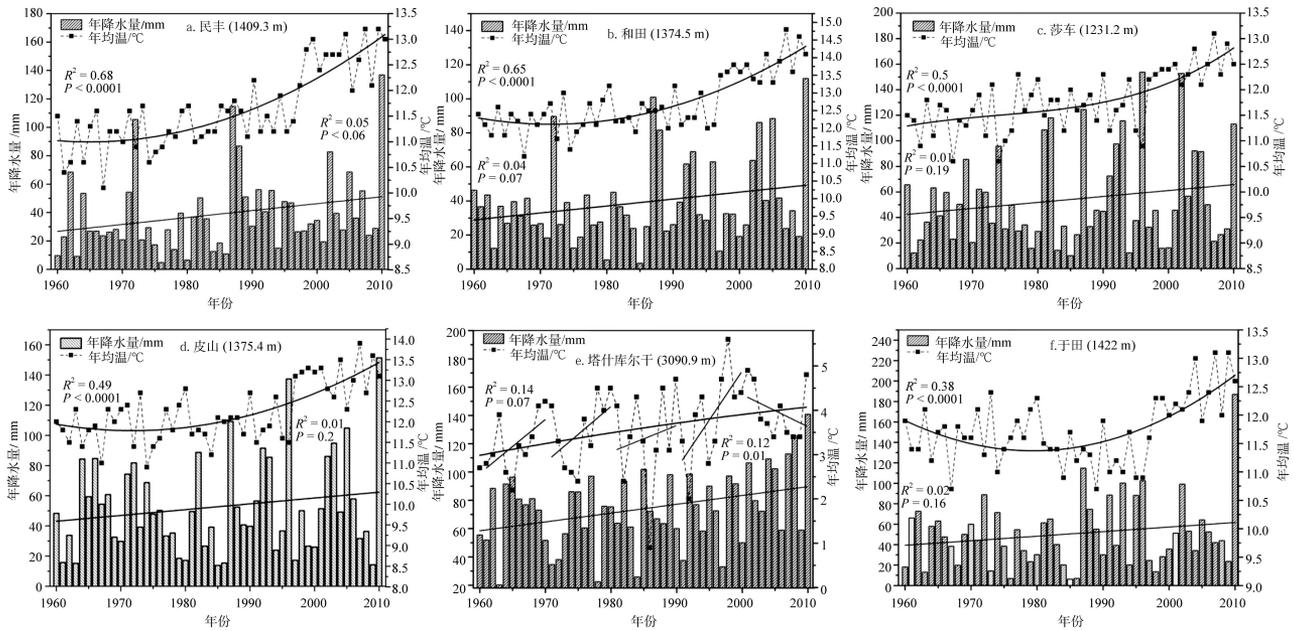


图3 1960-2010年各站平均气温和降水量变化

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

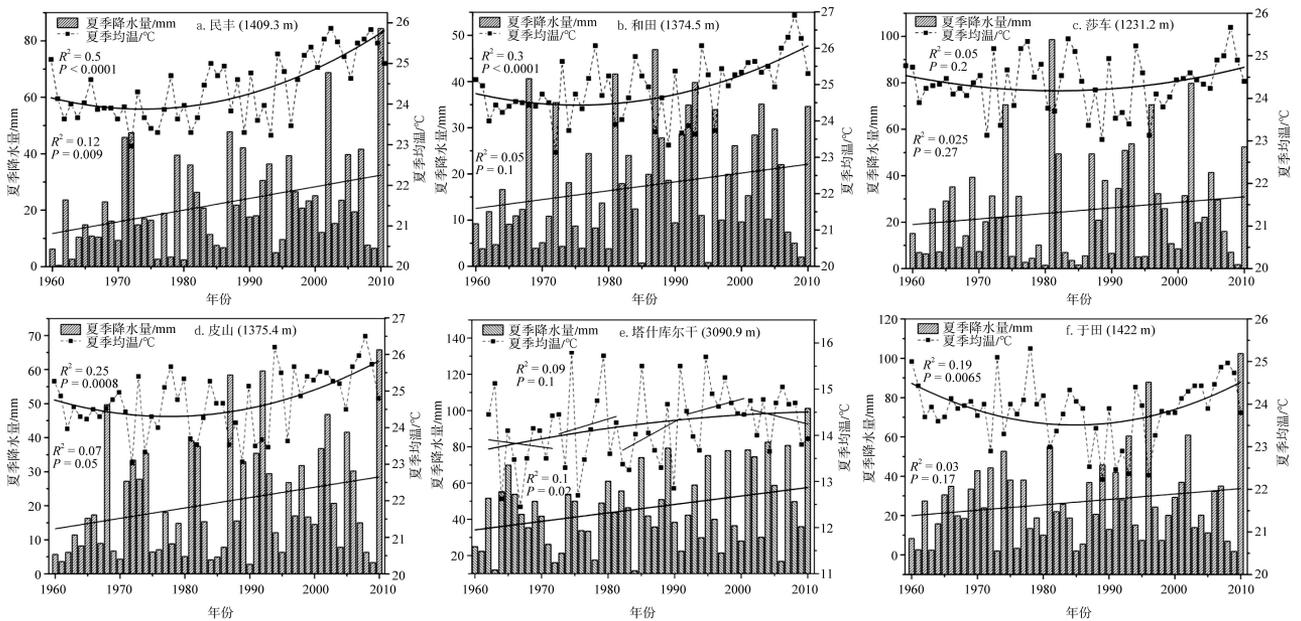


图4 1960-2010年各站夏季平均温度和降水量变化

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

0.98 km<sup>2</sup>。1999年至2011, 编号为5Y641F0073的冰川面积增加值为最大, 达到1.88 km<sup>2</sup>。尽管全球温度普遍变暖, 尤其是20世纪80年代以来, 青藏高原气温升高, 冰川强烈消融。但近年来有研究发现, 中国及世界其他地区冰川出现物质正平衡或前进现象。施雅风等(2006)研究表明, 青藏高原北部可能至帕米尔山区冰川萎缩程度小于1%; 特别是

马兰山区中1970-2000年前后, 65条冰川中有38条呈前进状态, 与马兰冰帽至克孜河源区的东西相距超过1200 km范围内存在一个可能不连续的降温带有关; 另外, 青藏高原东南部岗日嘎布山区1980-2000年左右出现较多前进冰川与较大的前进值, 是近年降水量有较大增加的缘故。Wang等(2011)研究表明, 降水量的增加引起冰川积累量的

增加是导致羌塘高原部分冰川在1970-2000年增厚或前进的原因。Gordon等(2008)研究表明,南乔治亚地区西南海岸冷湿复杂的气候特征决定了冰川对气候复杂的响应机制,在低海拔地区冰川退缩,在高海拔地区冰川稳定或者缓慢前进。Hewitt(2005)的研究发现,山谷气象站显示过去50年降水的增加和夏季气温的缓慢降低可能是冰川物质正平衡的原因。本文发现,离西昆仑山较近的塔什库尔干气象站点近10年年均温和夏季气温呈现略微的下降趋势,并且降水量在1960-2010年微弱增加;这可能是昆仑峰区冰川退缩幅度较小,甚至部分冰川出现略微前进的原因。

(3)中峰冰川末端在2002-2004以661 m/a的速率前进,可能具备跃动冰川的特征。崇测冰川末端在1991-1998年间也以200 m/a的速率前进,在此期间冰川面积增加了9.47 km<sup>2</sup>。该冰川位于地形相对平缓的昆仑峰区南坡,冰舌表现为宽阔的扇状或葫芦状形态,由于地形开阔,且积累区丰富的补给量是宽尾冰川形成的重要因素,也可能是冰川前进的原因之一。另外,崇测冰川海拔6000 m处气温为-60.5°C,为已观测到的青藏高原气温最低处(中国科学院青藏高原综合科学考察队,1998),低温条件有利于冰川的积累,可能是冰川前进的另外一个原因。由于遥感影像的限制,崇测冰川末端前进速率为7年平均的结果,因此不能排除其也为跃动冰川的可能性。已有研究表明在中国其他冰川区也有跃动冰川存在,如木孜塔格峰、喀喇昆仑山、东昆仑山莫诺马哈山峰、西藏东南部的南迦巴瓦峰西坡、唐古拉山、阿尼玛卿山均有发育(郭万钦等,2012;刘景时,2009;上官冬辉等,2005;杨建平,2003)。气温升高导致冰温升高,冰川流速加快,冰川应力场也发生相应的变化,利于冰川跃动的发生(上官冬辉等,2005)。杨建平认为唐古拉山、阿尼玛卿山部分冰川在1966-1981年发生跃动的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(杨建平,2003)。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(Iturrizaga et al, 2011; Hewitt, 2005)。中峰冰川和崇测冰川都是由几条冰川汇合而成,雪线与末端的海拔降幅达到700 m左右,且冰川末端冰面破碎,这是跃动冰川的典型特征。

致谢:中国气象局提供研究区有关台站气象资料,美国地质调查局和马里兰大学提供Landsat影像,谨致谢忱。

## 参考文献(References)

- Bolch T, Kamp U. 2006. Glacier mapping in high mountains using DEMs, Landsat and ASTER data. *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, 41: 37-48.
- Bolch T, Menounos B, Wheate R. 2010a. Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985-2005. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 127-137.
- 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. *Cryosphere*, 4(3): 419-433.
- Bolch T, Kulkarni A, Kaab A, et al. 2012. The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*, 336: 310-314.
- Cai D H, Ma J H, Nian Y Y, et al. 2006. The study of glacier change using remote sensing in Mt. Muztagta. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 42(1): 13-17. [蔡迪花, 马金辉, 年雁云, 等. 2006. 慕士塔格峰冰川变化遥感研究. 兰州大学学报: 自然科学版, 42(1): 13-17.]
- Cai Y, Li D L, Tang M C, et al. 2003. Decadal temperature changes over Qinghai-Xizang Plateau in recent 50 years. *Plateau Meteorology*, 22(5): 464-470. [蔡英, 李栋梁, 汤懋苍, 等. 2003. 青藏高原近50年来气温的年代际变化. 高原气象, 22(5): 464-470.]
- Cao B, Wang J, Zhang C, et al. 2011. The remote sensing in research of modern glacier changes. *Remote Sensing Technology and Application*, 26(1): 52-59. [曹泊, 王杰, 张忱, 等. 2011. 遥感技术在现代冰川变化研究中的应用. 遥感技术与应用, 26(1): 52-59.]
- Chinn T J. 1996. New Zealand glacier responses to climate change of the past century. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 39(3): 415-428.
- Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y. 2012. Slight mass gain of Karakoram glaciers in the early twenty-first century. *Nature Geoscience*, 5(5): 322-325.
- Gordon J E, Haynes V M, Hubbard A. 2008. Recent glacier changes and climate trends on South Georgia. *Global and Planetary Change*, 60(1): 72-84.
- Guo W Q, Liu S Y, Xu J L, et al. 2012. Monitoring recent surging of the Yulinchuan glacier on north slopes of Muztag range by remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 34(4): 765-774. [郭万钦, 刘时银, 许君利, 等. 2012. 木孜塔格西北坡鱼鳞川冰川跃动遥感监测. 冰川

- 冻土, 34(4): 765-774.]
- Hagg W, Mayerb C, Lambrecht A, et al. in press. Glacier changes in the Big Naryn basin, central Tian Shan. *Global and Planetary Change*. doi: 10.1016/j.gloplacha.2012.07.010.
- Hewitt K. 2005. The Karakoram anomaly? Glacier expansion and the "elevation effect", Karakoram Himalaya. *Mountain Research and Development*, 25(4): 332-340.
- Hewitt K. 2011. Glacier change, concentration, and elevation effects in the Karakoram Himalaya, Upper Indus Basin. *Mountain Research and Development*, 31(3): 188-200.
- Hou S G, Qin D H, Yao T D, et al. 2002. Recent changes of the environmental information recorded in the ice core in Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 47(20): 1588-1591. [侯书贵, 秦大河, 姚檀栋, 等. 2002. 青藏高原冰芯积累量的近期变化. *科学通报*, 47(20): 1588-1591.]
- Iturrizaga L. 2011. Trends in 20th century and recent glacier fluctuations in the Karakoram Mountains. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementbände*, 55(3): 205-231.
- Ji P, Guo H D, Zhang L. 2011. Landsat-based dynamic area change of the glaciers to the north of the Guozhacuo Lake, 1991-2009. *Remote Sensing Technology and Application*, 26(2): 202-208. [纪鹏, 郭华东, 张露. 2011. 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. *遥感技术与应用*, 26(2): 202-208.]
- Jiao K Q, Yao T D, Li S J. 2000. Evolution of glaciers and environment in the West Kunlun Mountains during the past 32 ka. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 22(3): 250-256. [焦克勤, 姚檀栋, 李世杰, 2000. 西昆仑山32 ka来的冰川与环境演变. *冰川冻土*, 22(3): 250-256.]
- Jin R, Che T, Li X, et al. 2004. Glacier variation in the pumqu basin derived from remote sensing data and GIS technique. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(3): 261-266. [晋锐, 车涛, 李新, 等. 2004. 基于遥感和GIS的西藏朋曲流域冰川变化研究. *冰川冻土*, 26(3): 261-266.]
- Liu J S, Wang D. 2009. Glacier surge in Karakorum Mountains of upper Yarkand River during summer 2009. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 31(5): 992. [刘景时, 王迪. 2009. 2009年夏季喀喇昆仑山叶尔羌河上游发生冰川跃动. *冰川冻土*, 31(5): 992.]
- Liu S Y, Ding Y J, Li J, et al. 2006. Glaciers in response to recent climate warming in the western china. *Quaternary Sciences*, 26(5): 762-771. [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. *第四纪研究*, 26(5): 762-771.]
- Liu S Y, Lu A X, Ding Y J, et al. 2002. Glacier fluctuations and the inferred climate changes in the A'Nyêmaqên Mountains in the source area of the Yellow River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(6): 701-707. [刘时银, 鲁安新, 丁永建, 等. 2002. 黄河上游阿尼玛卿山区冰川波动与气候变化. *冰川冻土*, 24(6): 701-707.]
- Liu S Y, Shangguan D H, Ding Y J, et al. 2004. Variation of glaciers studied on the basis of RS and GIS: A reassessment of the changes of the Xinqingfeng and Malan ice caps in the northern Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(3): 244-252. [刘时银, 上官冬辉, 丁永建, 等. 2004. 基于RS与GIS的冰川变化研究: 青藏高原北侧新青峰与马兰冰帽变化的再评估. *冰川冻土*, 26(3): 244-252.]
- Liu S Y, Shangguan D H, Ding Y J, et al. 2005. Glacier variations since the early 20th century in the Gangrigabu Range, southeast Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(1): 55-63. [刘时银, 上官冬辉, 丁永建, 等. 2005. 20世纪初以来青藏高原东南部岗日嘎布山的冰川变化. *冰川冻土*, 27(1): 55-63.]
- Lu A X, Yao T D, Wang L H, et al. 2005. Study on the fluctuations of typical glaciers and lakes in the Tibetan Plateau using remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(6): 783-792. [鲁安新, 姚檀栋, 王丽红, 等. 2005. 青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究. *冰川冻土*, 27(6): 783-792.]
- Narama C, Kaab A, Duishonakunov M, et al. 2010. 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. *Global and Planetary Change*, 71(1-2): 42-54.
- Pan B T, Cao B, Wang J, et al. 2012. Glacier variations in response to climate change from 1972 to 2007 in the western Lenglongling Mountains, northeastern Tibetan Plateau. *Journal of Glaciology*, 58: 879-888.
- Paul F. 2000. Evaluation of different methods for glacier mapping using Landsat TM. *Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop Land Ice and Snow*. Dresden, Germany: June 16-17.
- Paul F, Kääb A, Maisch M, et al. 2002a. The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: I. Methods. *Annals of Glaciology*, 34(1): 355-361.
- Paul F, Huggel C, Kääb A, et al. 2002b. Comparison of TM-derived glacier areas with higher resolution data sets. *Proceedings of EARSeL-LISSIG-Workshop: Observing our Cryosphere from Space*. Bern, Germany: March 11-13.
- 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. [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.]
- Raup B, Racoviteanu A, Khalsa S J S, et al. 2007. The GLIMS geospatial glacier database: A new tool for studying glacier change. *Global and Planetary Change*, 56(1-2): 101-110.
- Sarikaya M A, Bishop M P, Shroder J F, et al. 2012. Space-based observations of eastern Hindu Kush glaciers between 1976 and 2007, Afghanistan and Pakistan. *Remote Sensing Letters*, 3(1): 77-84.
- Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, et al. 2004a. Glacier changes at the head of Yurungkax River in the west Kunlun Mountains in the past 32 Years. *Acta Geographica Sinica*, 59(6): 855-862. [上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 2004a. 玉龙喀什河源区 32 年来冰川变化遥感监测. *地理学报*, 59(6): 855-862.]
- Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, et al. 2004b. Monitoring results of glacier changes in China Karakorum and Muztag Ata-Konggur Mountains by remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(3): 374-375. [上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 2004b. 中国喀喇昆仑山、慕士塔格格格尔山典型冰川变化监测结果. *冰川冻土*, 26(3): 374-375.]
- Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, et al. 2005. Surging glacier found in Shaksgam River, Karakorum Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(5): 641-644. [上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 2005. 喀喇昆仑山克勒青河谷近年来发现有跃动冰川. *冰川冻土*, 27(5): 641-644.]
- Shangguan D H, Liu S Y, Ding Y J, et al. 2007. Glacier changes in the west Kunlun Shan from 1970 to 2001 derived from Landsat TM/ETM+ and Chinese glacier inventory data. *Annals of Glaciology*, 46(1): 204-208.
- Shangguan D H, Liu S Y, Ding L F, et al. 2008. Variation of glaciers in the western Nyainqêntanglha Range of Tibetan Plateau during 1970-2000. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 30(2): 204-210. [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.]
- Shi Y F, Liu S Y, Shangguan D H, et al. 2006. Two peculiar phenomena of climatic and glacial variations in the Tibetan Plateau. *Advances in Climate Change Research*, 2(4): 154-160. [施雅风, 刘时银, 上官冬辉, 等. 2006. 近 30a 青藏高原气候与冰川变化中的两种特殊现象. *气候变化研究进展*, 2(4): 154-160.]
- The Comprehensive Scientific Expedition to the Qinghai-Xizang Plateau, CAS. 1998. *Glaciers and Environment of the Karakorum-Kunlun Mountains*. Beijing, China: Science Press: 19-32. [中国科学院青藏高原综合科学考察队. 1998. 喀喇昆仑山—昆仑山地区冰川与环境. 北京: 科学出版社: 19-32.]
- Tian H Z, Yang T B, Liu Q P. 2012. Relationship between climate change and glacier retreat over the last 40 years in Lenglongling Range of eastern Qilian Mountains. *Research of Soil and Water Conservation*, 19(5): 34-38. [田洪阵, 杨太保, 刘沁萍. 2012. 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*, 19(5): 34-38.]
- Tucker C J, Grant D M, Dykstra J D. 2004. NASA's global orthorectified landsat data set. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(3): 313-322.
- Wang L, Xie Z, Wang X, et al. 2011. The glacier area changes in the Qangtang Plateau based on the multi-temporal grid method and its sensitivity to climate change. *Journal of Mountain Science*, 8(6): 882-893.
- Wang N, Li D L, Zhang J. 2010. Research advance of surface temperature change over Tibetan Plateau. *Journal of Arid Meteorology*, 28(3): 265-269+290. [王楠, 李栋梁, 张杰. 2010. 青藏高原气温变化的研究进展. *干旱气象*, 28(3): 265-269, 290.]
- Wang P Y, Li Z Q, Gao W Y, et al. 2011. Glacier changes in the Heihe River Basin over the past 50 years in the context of climate change. *Resources Science*, 33(3): 399-407. [王璞玉, 李忠勤, 高闻宇, 等. 2011. 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*, 33(3): 399-407.]
- Xu J L, Liu S Y, Zhang S Q, et al. 2006. Glaciers fluctuations in the Karamilan-Keriya River watershed in the past 30 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28(3): 312-318. [许君利, 刘时银, 张世强, 等. 2006. 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. *冰川冻土*, 28(3): 312-318.]
- Yang J P, Ding Y J, Liu S Y, et al. 2003. Glacier change and its effect on surface runoff in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers. *Journal of Natural Resources*, 18(5): 595-602. [杨建平, 丁永建, 刘时银, 等. 2003. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响. *自然资源学报*, 18(5): 595-602.]
- Yao T D, Jiao K Q, Yang M X. 1999. Trends and features of precipitation changes in the past 400 years by the Guliya ice cap. *Progress in Natural Science*, 9(A12): 1161-1165. [姚檀栋, 焦克勤, 杨梅学. 1999. 古里雅冰芯中过去 400a 降水变化研究. *自然科学进展*, 9(A12): 1161-1165.]

- Yao T D, Thompson L, Yang W, et al. 2012. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2(9):663-667.
- Yao T D, Yang Z H, Liu J S. 1994. Recent warming as recorded in the ice core, Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 39(5): 438-441. [姚檀栋, 杨志红, 刘景寿. 1994. 冰芯记录所揭示的青藏高原升温. *科学通报*, 39(5): 438-441.]
- Zeng L. 2012. Glacier variation in the eastern Pamirs Plateau during 1972-2011 based on remote sensing data and GIS techniques [D]. Lanzhou, China: Lanzhou University. [曾磊. 2012. 基于RS和GIS的东帕米尔高原冰川近40年来的变化研究 [D]. 兰州: 兰州大学.]
- Zhang X P, Yao T D, Shi W L, et al. 1999. Record of climate change since Little Ice Age in the ice core of the Guliya ice cap. *Journal of Natural Science of Hunan Normal University*, 22(1): 80-84. [章新平, 姚檀栋, 施维林, 等. 1999. 古里雅冰芯中小冰期以来的气候变化记录. *湖南师范大学自然科学学报*, 22(1): 80-84.]
- Zheng B X, Zhao X T, Li T S, et al. 1999. Features and fluctuation of the Melang Glacier in the Mainri Mountain. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 21(2): 145-150. [郑本兴, 赵希涛, 李铁松, 等. 1999. 梅里雪山明永冰川的特征与变化. *冰川冻土*, 21(2): 145-150.]
- Zheng D. 1999. Physical-geography of the Karakorum-Kunlun Mountains. Beijing, China: Science Press: 28-47. [郑度. 1999. 喀喇昆仑山—昆仑山地区自然地理. 北京: 科学出版社: 28-47.]

## Variation of West Kunlun Mountains glacier during 1990–2011

LI Chengxiu, YANG Taibao, TIAN Hongzhen

(Institution of Glaciology and Ecogeography, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Mountain glaciers are a potential climate indicator because they are sensitive to climate changes. The water released from Kunlun Mountains glaciers is the major source of stream flow to the Tarim Basin and nearly 6.3million people who live in the oasis of Tarim Basin rely on the glacier runoff. Remote sensing has proved to be the best method of investigating the extent of glacial variations in remote mountainous areas. Using remote sensing (RS) and geographical information system (GIS) technologies, we analyzed glacier changes in the Western Kunlun Mountains on the Northwestern Tibetan Plateau. The satellite images (Landsat TM, ETM+) from 1990 to 2011 were used to extract the extent of the glaciers. The results indicated that there was no significant change in glacier area in the study area as a whole, and the glacier area decreased about 16.83 km<sup>2</sup> (0.65%) over the 22 years. But the glacier changes were not homogeneous. The changes in single glacier area have differed among the study regions, and some glaciers advanced while other glaciers retreated. ZhongFeng glacier advanced at 661 m/a from 2002 to 2004 and we infer that the ZhongFeng glacier is a surge glacier. Chongce glacier advanced at 200 m/a from 1991 to 1998 and the glacier area increased 9.47 km<sup>2</sup>. This glacier is characteristic of surge glacier. The temperature showed an increasing trend from 1960 to 2010, while precipitation increased slightly. The Guliya ice core indicates that the temperature and precipitation increased after twenty century. The increase in air temperature resulted in the slight glacier recession. The low retreat rate of the glaciers may be due to two factors: the large scale of the glaciers and the increasing precipitation accompanied by strengthening westerlies.

**Key words:** glacier change; remote sensing monitoring; advancing glaciers; surge glaciers; West Kunlun Mountains