doi: 10.7522/j. isnn. 1000-0240. 2015. 0128

Huai Baojuan, Li Zhongqin, Wang Feiteng, *et al.* Variation of glaciers in the Sawuer Mountain within Chinese territory during 1959 – 2013 [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2015, 37(5): 1141 – 1149. [怀保娟,李忠勤,王飞腾,等. 1959 – 2013 年中国境内萨吾尔山冰川变化 特征[J]. 冰川冻土, 2015, 37(5): 1141 – 1149.]

1959-2013年中国境内萨吾尔山冰川变化特征

怀保娟¹², 李忠勤¹, 王飞腾¹, 王璞玉¹

(1.中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川站,甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘 要: 萨吾尔山冰川条数少,中国冰川编目将萨吾尔山南北坡的冰川分别附入了天山和阿尔泰山区 的冰川,不便于冰川变化研究,因此应给予其特殊考虑.鉴于前人工作中鲜有涉及该区的冰川研究,以 萨吾尔山区冰川为研究对象,利用地形图、冰川编目数据以及Landsat 遥感影像数据结合实测探地雷达 数据,分析萨吾尔山地区冰川变化特征.通过目视解译结合野外实地观测的方法,得到1959-2013 年 该区的冰川变化特征.结果表明:总体上,萨吾尔山冰川持续退缩明显,1959-2013 年中国境内的冰 川面积由17.69 km²退缩为10.13 km²,退缩率42.74%,平均每年退缩0.14 km²;萨吾尔山北坡的冰 川退缩率为37.57%,南坡退缩率为72.69%,南坡冰川退缩率基本为北坡的两倍.分析认为,南坡冰 川退缩率较高的原因除了与坡向因素有关外,单条冰川面积大小是该差异的主要影响因素;基于木斯 岛冰川探地雷达测厚结果,对该冰川体积进行了初步估算并与1959 年地形图估算出的体积进行对比, 发现该冰川体积减少约44.6%.

关键词: GPR 数据; Landsat 影像; 面积变化; 退缩; 木斯岛冰川; 萨吾尔山 中图分类号: P343.6 文献标志码: A 文章编号: 1000-0240(2015)05-1141-09

0 引言

中国冰川编目^[1-4] 中将萨吾尔山南北坡的冰川 分别附入了天山和阿尔泰山.需要特别说明的是, 萨吾尔山北起额尔齐斯河谷地,南至和布克赛尔盆 地边沿,西界中苏边境,向东逐渐没入准噶尔平 原,东西横跨中哈两国,在吉木乃境内延绵100多 公里,是界线分明的独立山体,又是北冰洋与新疆 内陆水系显著的分水岭,且距阿尔泰山和天山 200 km 左右,应该作为一个单独的山地^[5-6].且近 年来,吉木乃县内的木斯岛冰川是该县最主要的旅 游资源及水资源,因此,独立分析萨吾尔山区的冰 川特征及变化情况有重要意义.值得注意的是,萨 吾尔山区北坡流经着乌勒昆乌拉斯图河,是一条冰 川积雪补给河流,同时也是中哈两国的界河.近年 来,由于受气候变化及人为活动的影响,冰川消融 加剧,河流径流波动增大,洪水灾害频发,流量呈 减少趋势.

1981年,中国科学院兰州冰川冻土研究所按照 国际冰川编目规范进行了阿尔泰山区、天山区的中 国冰川编目,其中包括萨吾尔山南北坡的冰川.在 冰川编目的编撰说明中^[2,4],作者提出了由于所使 用的航空像片和地形图比较陈旧,所量测的冰川条 数、面积以及冰川长度、末端高度等指标只能反映 二十多年前的冰川面貌,不可避免的存在一些问 题.目前为止,萨吾尔山区冰川变化特征的资料没 有,因此适时正确评估该区域冰川变化,填补该地 区此项内容的空白,揭示冰川变化对该地区河流径 流量的影响,对于该地区的经济发展和人民生活有 极其重要的意义.2013年,中科院寒旱所组织科研 人员对乌勒昆乌拉斯图河的木斯岛冰川进行了综合 考察.本文主要利用遥感影像、地形图数据、实测

收稿日期: 2015-05-10; 修订日期: 2015-07-12

基金项目: 国家重大科学研究计划项目(2013CBA01801); 实验室创新群体科学基金项目(Y211661001); 国家自然科学基金(41471058; 41121001; 41301069); 国家自然科学基金委基础科学人才培养基金冰川学冻土学特殊学科点项目(J1210003/J0109)资助 作者简介: 怀保娟(1988 -),女,山东济南人,2013年于西北师范大学获硕士学位,现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所在读博 士研究生,主要从事冰川变化与地理信息技术研究. E-mail: huaibaojuan@126.com.

探地雷达数据,较深入地讨论了该区冰川近期变化 特征.

1 研究区概况

根据萨吾尔山(图1)南北坡冰川在中国冰川编

目中的信息(表1),对其做统计,萨吾尔山北坡13 条冰川,编目中附入《中国冰川目录》-阿尔泰山区 (II),总面积为13.29 km²,分布在拉斯特河 (5A259B)与乌勒昆乌拉斯特河(5A259B)两条支 流上,平均雪线3310~3350 m,冰川平均面积



图 1 萨吾尔山位置 Fig. 1 Map showing the location of the Sawuer Mountain

表1 萨吾尔山区冰川编目

Table 1 Information of the glaciers in the Sawuer Mountain , quoted from "Chinese Glacier Inventory"

山系	冰川编号	面积/km ²	平均长度/km	末端海拔/m	雪线海拔/m	冰储量/km ³
阿尔泰山	5A259B001	1.11	1.3	3 240	3 370	0.04
	5A259B002	1.18	1.5	3 100	3 370	0.04
	5A259B003	1.55	1.9	3 120	3 370	0.06
	5A259B004	0.76	1.1	3 100	3 370	0.02
	5A259B005	0.28	0.7	3 220	3 370	0.005
	5A259B006	0.30	0.7	3 180	3 370	0.006
	5A259B007	0.04	0.3	3 320	3 370	0.0003
	5A259B008	0.37	0.7	3 330	3 370	0.008
	5A259B009	1.59	2.4	3 030	3 320	0.07
	5A259C001	4.27	3.7	3 090	3 310	0.28
	5A259C002	0.83	1.5	3 260	3 310	0.03
	5A259C003	0.31	0.8	3 550	3 310	0.006
	5A259C004*	0.70	2.8	3 070	3 410	0.03
天山	5Y754B001	0.09	0.4	3 500	3 380	0.001
	5Y754B002	0.06	0.3	3 650	3 380	0.0006
	5Y754B003	0.23	0.5	3 660	3 380	0.004
	5Y754B004	0.09	0.3	3 725	3 380	0.001
	5Y754C001	1.49	1.8	3 237	3 380	0.07
	5Y754C002	0.31	0.6	3 720	3 380	0.006
	5Y754C003	0.38	0.7	3 270	3 380	0.008
	5Y754C004	0.90	0.9	3 510	3 380	0.04

注: * 冰川总面积为 1.81 km², 我国境内面积为 0.70 km²

1.02 km²,末端海拔3030~3070 m^[4]. 萨吾尔山 南坡8条冰川,编目中附入《中国冰川目录》-天山 山区(西北部准噶尔内流区),总面积为3.55 km², 平均雪线在3660 m 左右,冰川平均面积 0.44 km²,末端海拔3270~3725 m^[2]. 萨吾尔山 冰川条数少,且编目中被分为两部分,不便于冰川 特征及变化研究,因此应给予其特殊考虑.

2 数据与方法

2.1 数据来源

本文所用地形图数据为 1959 年航摄,1960 年 调绘,1963 年出版第一版.比例尺为1:10 万,1954 年北京坐标系,1956 年黄海高程系.地形图用高精 度扫描仪进行扫描,分辨率为600 dpi,并对地形图 进行几何纠正,几何纠正的均方根误差小于一个象 元.影像数据为 Landsat MSS\TM\ETM +(表2), 研究区内无云、少雪,图像接收时间在8-9月间, USGS 经过正射校正处理后的,来自于 USGS (U.S. Geological Survey, http://www.usgs.gov) 的数据共享平台.数字高程模型来源于 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission),由美国太空总 署(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测 量.使用修订版 V4.1版本,分辨率90 m,该版本 由 CIAT(国际热带农业中心)利用新的插值算法得 到的 SRTM 地形数据,该数据标称绝对高程精度是 ±16 m,绝对平面精度是±20 m.此外,参考了第 二次冰川编目数据,该数据由中国科学院寒区旱区 环境与工程研究所提供.

GPR 冰川厚度数据获取探地雷达(GPR)的基本原理是向地下发射脉冲形式的高频电磁波,当电磁波在地下介质传播过程中遇到存在电性差异的目标体时,就反射回地面,并由天线接收,再通过处理得到二维雷达图像.由于冰川与岩石之间存在介电性质的巨大差异,因此在雷达图像中可以通过识别冰-岩界面从而获取测点位置的厚度值.利用测量剖面的探地雷达图像资料,获得所测量点的冰厚度数据^[7-9].2013年,实地考察中利用加拿大 SSI公司的 pulse EKKOPRO100A 增强型探地雷达对木斯岛冰川冰舌附件区域进行了厚度测量,由于冰川上部地势陡峭,所以上部未开展测厚工作.此次测量共布设3条测线,2条横测线和1条纵测线(图2),本研究从三条测线粗略估算该冰川冰舌区的厚度分布信息.

2.2 方法

在 ENVI 软件支持下,用几何纠正过的地形图 来配准融合后的影像数据,并对地形图、遥感影像、

表 2 萨吾尔山冰川区遥感影像 Table 2 Remote sensing images in the Sawuer Mountain used in this study

_		6 6		5		_
	ID	接收年份	传感器	分辨率/m	轨道号	
	LM21560271977246	1977 年	MSS	80	156/027	
	LT51450271998245	1998 年	ТМ	30	145/027	
	LE71450272002200SGS00	2002 年	ETM +	30	145/027	
	LT51450272006251	2006 年	TM	30	145/027	
	LC81450272013158	2013 年	ETM +	30	145/027	





Fig. 2 Muz Taw Glacier sounded by GPR in 2013: the sounding routes (a) and C1-C2 sounding image (b)

数字高程模型以地形图作为参考坐标进行坐标归一 化处理. 均采用统一的 UTM 投影和 WGS84 椭球 体建立坐标系统. 影像处理过程中对校正后的影像 进行了锐化增强处理,这样可以有效地区分雪斑和 有积雪覆盖的冰川.

2.2.1 长度变化

冰川末端变化是冰川变化的重要指标之一^[10], 冰川末端变化研究通常采用野外实地测量和遥感解 译的方法,长期的冰川末端变化野外观测难度大, 研究主要分布在一些重要的冰川末端;基于遥感解 译的典型冰川长度变化速率普遍较野外实地测量数 值更高,反映出研究方法上存在尺度差异性.遥感 方法对冰川长度变化一般采用主流线长度之差值表 示,基于 GIS 技术,用该方法计算该区冰川长度 变化.

2.2.2 面积变化

在 ArcGIS 10 的支持下,对地形图进行矢量 化,得到 20 世纪 60 年代初一期的冰川分布数据. 并通过目视解译并结合影像叠加数字高程模型提取 冰川边界,最后参照专家野外考察指导意见进行边 界的再次修订^[11],并获取冰川面积、平均长度、经 纬度等属性信息^[12].冰川变化分析通过 ArcGIS 10 空间分析模块将不同期的冰川矢量数据进行叠加分 析,得到该区冰川面积变化的特征.

2.2.3 厚度估算

基于冰厚度探地雷达数据资料,利用 Kriging 插值法将实测的木斯岛冰舌区厚度资料进行网格化 处理(30 m × 30 m),再利用网格化的冰厚度数据, 绘制出木斯岛冰川冰舌的冰厚度等值线图,估算该 冰川的冰储量与平均厚度^[7-9].

2.3 不确定性评价

对处理后的数据进行误差评价,地形图纠正误 差在一个像元以内; Landsat 影像几何精纠正的误 差为0.5 个像元. 从遥感影像上获取冰川边界的精 度评价一直是十分重要却较难确定的问题. 遥感影像的空间分辨率与均方根误差都影响到测量的准确性,据 Hall、Silvreio等计算冰川长度和面积变化不确定性的公式^[13-15]:

$$U_{\rm T} = \sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \varepsilon^2}$$
(1)

$$U_{\rm A} = \sum \lambda^2 \times \frac{2 \times U_{\rm T}}{\sqrt{\sum \lambda^2}} + \sum \varepsilon^2$$
(2)

式中: $U_{\rm T}$ 为长度不确定性; λ 为影像分辨率; ε 为 配准误差; $U_{\rm A}$ 为面积不确定性. 计算得到,单条冰 川长度不确定性为 ± 30 m,面积的不确定性为 ± 0.002 km².

3 结果

3.1 冰川面积变化

±

总体上, 萨吾尔山地区冰川持续退缩明显 (图3), 1959 - 2013 年中国境内的冰川面积由 17.69 km²退缩为10.13 km², 共退缩7.56 km², 退 缩率42.74%, 平均每年退缩0.14 km², 年退缩率 为0.78% • a⁻¹.

1977年,根据 MSS 影像,该区域冰川总面积 15.68 km²,相比 1959年,退缩 2.01 km².1998年, 冰川总面积退缩到 13.79 km²,2002年,退缩到 13.13 km².1959 - 1977年,冰川年均退缩率为 0.60% • a⁻¹,1977 - 1998年,冰川年均退缩率为 0.55% • a⁻¹,1998 - 2002年,冰川年均退缩率为 0.96% • a⁻¹,到 2002 - 2013年,冰川退缩率为 1.90% • a⁻¹.

1959 - 2013 年, 萨吾尔山北坡的冰川数量未 变, 面积由 15.09 km²减少到 9.42 km², 退缩率为 37.57%; 南坡冰川由 1959 年 8 条减少到 2013 年的 1 条, 面积由 2.60 km²减少到 0.71 km², 退缩率为 72.69%, 南坡的冰川退缩率比北坡冰川退缩率高 出近2倍.结合SRTM-DEM数据分析认为, 南坡



Fig. 3 Shrinkage of glaciers in the Sawuer Mountain from 1959 to 2013

冰川的末端海拔高度(3 493 m)比北坡冰川 (3 160 m)高出333 m,但南坡冰川的消融高出北2 倍,因此冰川末端海拔高度不是南北坡冰川消融差 异的主要因素.南坡冰川退缩率较高的原因除了与 坡向因素有关外,本研究认为单条冰川面积的大小 是该差异的主要影响因素.由1959年地形图数据 分析,南坡冰川平均面积为0.33 km²,北坡冰川平 均面积为1.68 km²,导致了萨吾尔山南坡冰川的高 退缩率.

3.2 冰川长度变化

对冰川长度变化进行了统计(表 3),发现萨吾 尔山区 1959 – 2013 年所有冰川都呈现末端退缩趋 势.与第一次冰川编目的长度数据相比,有一些差 异.究其原因,本研究认为涤纶薄膜坐标纸量算方 法的不精确导致的.此外,我们发现南坡的小冰川 在 1959 – 1977 时段内消融已非常强烈,6条小冰川 已经消失.

此外,对比木斯岛冰川小冰期的末端以及1959 年航测地形图末端,发现地形图数据上该冰川冰舌 发育较短,本研究认为1977年、1998年、2006年、 2013年以及小冰期该冰川均有较长冰舌发育,认为 1959年木斯岛冰川的地形图数据末端存在一些错 误,从而导致了该冰川编目时的偏差.

3.3 木斯岛冰川变化

木斯岛冰川是中哈界河乌勒昆乌拉斯图河流域

上的一条冰川. 1977 年,木斯岛冰川面积为 3.97 km², 1998 年减小为 3.47 km², 到 2006 年为 3.19 km², 2013 年, 面积已减少为 3.15 km², 1977-2013 年的 37 a 时间,木斯岛冰川面积退缩 约0.82 km²,退缩率为20.65%.由影像上观察小 冰期木斯岛冰川末端有较长冰舌发育,将2013、 2006、1998年,1977年四期冰川边界叠加分析发 现,1977-2013年的37 a时间,木斯岛冰川末端退 缩约 269.19 m,每年平均退缩约 7.28 m. 1977 -1998年共退缩约62.2 m,每年平均退缩约2.83 m; 1998-2006 年共退缩约 74.07 m,每年平均退缩约 8.23 m; 2006-2013 年共退缩约132.92 m, 每年平 均退缩约16.62 m. 显然由木斯岛冰川面积和末端 的变化发现该冰川末端呈现加速退缩的趋势,近年 来,退缩趋势严重,2013年实地考察中发现木斯岛 冰川山脊上已出现裸露岩石.

基于测量的冰川厚度数据,利用 AreGIS 软件 地统计模块,采用网格化方法,计算了木斯岛冰川 末端的平均厚度.利用 GPR 数据进行冰舌区厚度的 Kriging 插值,得到了冰川厚度分布图(图4),木斯 岛冰舌区域冰川最大厚度值为 109.55~124.29 m, 分布在两个相对应的冰斗区域.结合绘制出的木斯 岛冰川冰舌的冰厚度分布图,对木斯岛冰川 1959 年地形图等高线数据也利用 Kriging 插值法进行上 述网格化处理,对比差值得到该冰川冰舌区厚度减

冰川编号	1959 年/km	1977 年/km	1998 年/km	2002 年/km	2013 年/km
5A259B0001	1.13	0.91	0.81	0.73	0.67
5A259B0002	2.69	2.52	2.48	2.40	2.27
5A259B0003	2.39	0.78	0.64	0.62	0.60
5A259B0004	2.32	2.16	2.11	2.07	2.02
5A259C0002	1.88	1.45	1.23	1.16	1.11
5A259C0003	0.60	0.49	0.37	0.31	0.29
5A259C0004	2.88	2.50	2.33	2.31	2.27
5A259C0005	2.70	2.49	2.38	2.36	2.22
5Y754B0001	0.43	0	0	0	0
5Y754B0002	0.30	0	0	0	0
5Y754B0003	1.00	0	0	0	0
5Y754B0004	0.82	0.70	0	0	0
5Y754C0001	1.78	1.72	1.48	1.46	1.43
5Y754C0002	0.24	0	0	0	0
5Y754C0003	0.89	0	0	0	0
5Y754C0004	0.87	0	0	0	0

表3 萨吾尔山境内单条冰川长度变化

Table 3 Change of some glacier lengths in the Sawuer Mountain





Fig. 4 Thickness distribution of the Muz Taw Glacier , treated with Kriging interpolation

薄数据,发现该冰川冰舌区体积减少约44.6%.

4 讨论

4.1 萨乌尔山区冰川储量变化估算

木斯岛冰川对区域冰川的变化情况具有一定代 表性,标志着萨吾尔山地区的冰川处于物质严重亏 损状态,直接影响到流域水资源状况.此外,受探 地雷达测厚数据以及地形图数据精度的限制,对木 斯岛冰川储量损失是粗略估算的值,但可根据该冰 川末端的损失情况推测该区域冰川正处于极度的退 缩消融中.

考虑到此次测厚是在冬季,大量积雪以及测厚 布线较少,得到的体积耗损值是粗略估算数据.结 合适用于冰川变化导致的冰储量变化经验公式^[16]:

$$V = 0.04 \times S^{1.35} \tag{3}$$

式中: *S* 为冰川面积(km²); *V* 为冰川冰储量(km³). 计算结果表明,1959-2013 年萨乌尔山区的冰川冰储量共减少约0.61 km³,相比冰川编目中给出的该区总储量(0.73 km³),减少比例83.56%.将这一结果与实测木斯岛冰川储量减少值44.6%比较,发现二者之间存在较大差异. 这说

明该经验公式是基于统计意义得出的^[17-18],有一 定地域性,对于萨吾尔山区域条数较少冰川的体积 估算或许并不完全适用.此外,对该地区广泛开展 测厚工作准确地获得该区冰川的储量变化状况,为 水资源评价研究提供可靠的基础资料是亟待展开的 工作.

4.2 冰川退缩变化对比

气候变暖背景下全球山地冰川呈现总体退缩趋 势^[19-20],为了进一步了解该区冰川变化的特征, 选取中国西部几个山区山与本研究做对比(表4). 在考虑研究时段的情况下,结合祁连山冷龙岭^[21]、 疏勒南山^[22]、天山^[23]等的冰川变化研究进行统计 分析,发现与西部其他山地冰川相比,本研究区冰 川退缩率明显较高(0.78% • a⁻¹).

4.3 讨论

20 世纪 80 年代以来, 萨吾尔山区冰川呈显著 退缩状态, 表现为融水径流增加, 面积缩小, 末端 后退, 雪线升高, 小冰川已经消亡或接近消亡的边 缘. 该区冰川的大量减少和消失, 无疑造成水资源 时空分布和水循环过程的迅速变化, 并足以引发某 些地区水系统的崩溃. 与此同时, 由于气候变暖,

Table 4 Shrinkage of some typical mountain glaciers						
研究区域	面积变化/km ²	退缩速率/(%・a ⁻¹)	数据源	起止年份	文献来源	
祁连山冷龙岭	-24.29	-0.67	地形图、ETM	1972 - 2007 年	文献[21]	
疏勒南山	- 55.00	-0.36	地形图、ETM	1970 - 2006 年	文献[22]	
天山	-	-0.22	-	1960 - 2010 年	文献[23]	
阿尼玛卿山	-21.70	-0.49	TM	1966 - 2000 年	文献[24]	
格拉丹东	- 14.91	-0.05	航片、TM	1969 - 2000 年	文献[25]	
纳木那尼峰	-7.12	-0.26	MSS、TM、ASTER	1976 - 2003 年	文献[26]	
萨吾尔山	-7.56	-0.78	地形图、ETM	1959 - 2013 年	本研究	

表4 典型山地冰川退缩情况

使得萨吾尔山地区形成冻土环境的水、土、热等条 件发生变化,从而引发了一系列的生态环境危机.

本文重新对萨吾尔山区的冰川数据进行了整 理,对该地区的冰川以及变化情况有了新的认识. 以往研究中,由于萨吾尔山地区的冰川较少,学者 们通常忽略了该区冰川的研究.针对近年来乌勒昆 乌拉斯图河由于受气候变化及人为活动的影响,冰 川消融加剧,河流径流波动增大,洪水灾害频发, 流量呈减少等问题,未来亟待在该区域冰川上开展 一系列实际测量工作.选取木斯岛冰川作为代表性 冰川,进行冰川进退测量、冰川物质积消测量、反 映冰川滞后响应的各项指标(速度、温度等)的观 测.清晰了解该区域冰川变化规律,进而对其未来 变化趋势进行预测的有效技术方案.

5 结论

本文重新对萨吾尔山区的冰川数据进行整理, 并对该地区的冰川变化情况进行研究.结果表明:

(1) 总体上, 萨吾尔山地区冰川持续退缩明显, 1959 - 2013 年中国境内的冰川面积由 17.69 km²退缩为10.13 km², 共退缩7.56 km², 退 缩率42.74%, 平均每年退缩0.14 km², 年退缩率 为0.78% • a⁻¹; 萨吾尔山北坡的冰川退缩率为 37.57%, 南坡退缩率为72.69%, 南坡冰川退缩率 基本为北坡的两倍.

(2)基于木斯岛冰川探地雷达测厚结果,对该冰川体积进行了初步估算并与1959年地形图估算出的体积进行对比,发现该冰川体积减少约44.6%.

(3) 萨吾尔山地区冰川变化带来的水资源变化 已经成为不可忽视的问题.选取木斯岛冰川作为代 表性冰川,进行冰川进退变化、冰川物质积消、反 映冰川滞后响应的各项指标(速度、温度等)的观测 已成为未来亟待开展的研究工作.

致谢:本研究离不开野外工作人员辛苦的野外 工作,在此表示感谢.在论文撰写过程中也得到了 诸多专家建议,表示衷心感谢.对于 USGS(U.S. Geological Survey, http://www.usgs.gov)数据共 享平台提供的 Landsat 影像表示感谢.

参考文献(References):

 [1] Shi Yafeng. Concise Chinese Glacier Inventory [M]. Shanghai: Shanghai Scientific Popularization Press, 2005: 101-105. [施 雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海:上海科学普及出版社, 2005: 101-105.]

- [2] Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. Glacier Inventory of China Ⅲ: Tianshan Mountains [M]. Beijing: Science Press, 1986: 1-206. [中国科学院兰州冰川冻土研究所.中国冰川目录Ⅲ:天山山区 [M].北京:科学出版社, 1986, 1-206.]
- [3] Wang Lilun, Liu Chaohai, Wang Ping. Modern glaciers in Altay Mountains of China [J]. Acta Geographica Sinica, 1985, 40
 (2): 142-154. [王立伦,刘潮海,王平. 中国阿尔泰山的现 代冰川[J]. 地理学报, 1985, 40(2): 142-154.]
- [4] Liu Chaohai, You Genxiang, Pu Jianchen. Glacier Inventory of China II: Altay Mountains [M]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, 1982: 1-18. [刘潮海,尤根祥,蒲健辰.中国冰川目录 II: 阿尔泰山区[M]. 兰州:中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1982: 1-18.]
- [5] Wang Lilun, Liu Chaohai, Kang Xingcheng, et al. Fundamental features of modern glaciers in the Altay Shan of China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(4): 27 – 38. [王 立伦,刘潮海,康兴成,等. 我国阿尔泰山现代冰川的基本特 征:以哈拉斯冰川为例[J].冰川冻土, 1983, 5(4): 27 – 38.]
- [6] Wang Zongtai. New statistical figures and distribution feature of glaciers on the various mountains in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1988, 11(3): 8-14. [王宗太. 中国 各山脉的冰川最新统计及其分布特征[J]. 冰川冻土, 1988, 11(3): 8-14.]
- [7] Ma Linglong, Tian Lide, Pu Jianchen, et al. Recent area and ice volume change of Kangwure Glacier in the middle of Himala-yas [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (20): 2088 2096. [马凌龙,田立德,蒲健辰,等. 喜马拉雅山中段抗物 热冰川的面积和冰储量变化[J]. 科学通报, 2010, 55 (18): 1766 1774.]
- [8] Sun Bo, He Maobing, Zhang Peng, et al. Determination of ice thickness, subice topography and ice volume at glacier No. 1 in the Tien Shan, China, by ground penetrating radar[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2003, 15(1): 35-44. [孙波,何茂 兵,张鹏,等. 天山1号冰川厚度和冰下地形探测与冰储量分 析[J]. 极地研究, 2003, 15(1): 35-44.]
- [9] Sun Bo, Wen Jiahong, He Maobing, et al. Measure the depth of the Arctic Ocean sea-ice using GPR and analyze its underside morphology [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2002, 32(11): 951-958. [孙波, 温家洪, 何茂兵,等. 北冰 洋海冰厚度穿透雷达探测与下表面形态特征分析[J]. 中国 科学(D辑:地球科学), 2002, 32(11): 951-958.]
- [10] Nie Yong, Zhang Yili, Liu Linshan, et al. Monitoring glacier change based on remote sensing in the Mt. Qomolangma National Nature Preserve, 1976 – 2006 [J]. Acta Geographica Sinica, 2010,65(1):13–28. [聂勇,张镱锂,刘林山,等. 近30年 珠穆朗玛峰国家自然保护区冰川变化的遥感监测[J]. 地理 学报,2010,65(1):13–28.]
- [11] Jacobs J D , Simms E L , Simms A. Recession of the southern part of Barnes Ice Cap , Baffin Island , Canada , between 1961 and 1993 , determined from digital mapping of Landsat TM [J]. Journal of Glaciology , 1997 , 43(143) : 98 – 102.
- [12] Wei Yuchun, Tang Guo´an, Yang Xin, et al. Remote sensing digital image processing tutorial [M]. Beijing: Science Press, 2007. [韦玉春,汤国安,杨昕,等. 遥感数字图像处理教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.]
- [13] Hall D K, Bayr K, Schfner W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from

 \pm

ground and space (1893 - 2001) [J]. Remote Sensing of Environment , 2003 , 86(4): 566 - 577.

- [14] Silverio W, Jaquet J M. Glacial cover mapping (1987 1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(3): 342 – 350.
- [15] Ye Qinghua, Kang Shichang, Chen Feng, et al. Monitoring glacier variation on Geladandong Mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote sensing and GIS technologies [J]. Journal of Glaciology, 2006, 52(179): 537-545.
- [16] Liu Shiyin , Sun Wenxin , Shen Yongping , et al. Glacier changes since the Little Ice Age Maximum in the western Qilian Mountains , Northwest China [J]. Journal of Glaciology , 2003 , 49(164): 117-124.
- [17] Arendt A, Echelmeyer K, Harrison W, et al. Updated estimates of glacier volume changes in the western Chugach Mountains, Alaska, and a comparison of regional extrapolation methods [J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111 (F3). doi: 10. 1029/2005JF000436.
- [18] Bauder A , Funk M , Huss M. Ice-volume changes of selected glaciers in the Swiss Alps since the end of the 19th century [J]. Annals of Glaciology , 2007 , 46(1): 145 – 149.
- [19] Haeberli W, Cihlar J, Barry R G. Glacier monitoring within the Global Climate Observing System [J]. Annals of Glaciology, 2000, 31(1): 241-246.
- [20] Qin Dahe, Xiao Cunde, Ding Yongjian, et al. Progress on cryo-spheric studies by international and Chinese communities and perspectives [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(6): 649-656. [秦大河,效存德,丁永建,等. 国际冰冻圈研究动态和我国冰冻圈研究的现状与展望[J]. 应用气象学报,2006,17(6): 649-656.]
- [21] Zhang Huawei, Lu Anxin, Wang Lihong, et al. Glacier change in the Lenglongling Mountain monitored by remote sensing [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(5): 682

-686. [张华伟,鲁安新,王丽红,等. 基于遥感的祁连山东 部冷龙岭冰川变化研究[J]. 遥感技术与应用,2010,25(5): 682-686.]

- [22] Zhang Huawei, Lu Anxin, Wang Lihong, et al. Glacier change in the Shulenan Mountain monitored by remote sensing [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(1): 8-13.
 [张华伟,鲁安新,王丽红,等. 祁连山疏勒南山地区冰川变 化的遥感研究[J]. 冰川冻土, 2011, 33(1): 8-13.]
- [23] Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, 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.]
- [24] Liu Shiyin, Lu Anxin, Ding Yongjian, et al. Glacier fluctuations and the inferred climate changes in the A Nyêmaqên Mountains in the source area of the Yellow River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(6): 701-707. [刘时银,鲁安新, 丁永建,等. 黄河上游阿尼玛卿山区冰川波动与气候变化 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(6): 701-707.]
- [25] Lu Anxin, Yao Tandong, Liu Shiyin, et al. Glacier change in the Geladandong area of the Tibetan Plateau monitored by remote sensing [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24 (5): 559 - 562. [鲁安新,姚檀栋,刘时银,等. 青藏高原各 拉丹冬地区冰川变化的遥感监测 [J]. 冰川冻土, 2002, 24 (5): 559 - 562.]
- [26] Ye Qinghua, Chen Feng, Yao Tandong. Tupu of glacier variations in the Mt. Naimona Nyi region, Western Himalayas, in the last three decades [J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11 (4): 511-520. [叶庆华,陈锋,姚檀栋.近30年来喜马拉雅山脉西段纳木那尼峰地区冰川变化的遥感监测研究[J].遥感学报,2007,11(4): 511-520.]

Variation of glaciers in the Sawuer Mountain within Chinese territory during 1959 – 2013

HUAI Baojuan¹², LI Zhongqin¹, WANG Feiteng¹, WANG Puyu¹

 (1. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute/Tianshan Glaciological Station, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;
 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As the number of glaciers in the Sawuer Mountain (Muz Taw Mountain range) was small, glaciers located at the north and south slopes were divided into the Altai Mountains and the Tianshan Mountains by "Glacier Inventory of China", respectively. Therefore, it is difficult to study the glacier change information, should be given special consideration. In this study, topographic maps, Landsat images, digital elevation model and ground penetrating radar (GPR) data were used to study the glacier variation. Through visual interpretation and interpolation method, glacierized area and glacier length changes were extracted, and the Muz Taw Glacier thickness distribution was also obtained. The results show that: (1) during 1959 – 2013, glaciers had retreated evidently, glacierized area had shrunk from 17.69 km² to 10.13 km², with a retreating rate of 42.74%, and an annual retreating rate of 0.14 km² • a⁻¹approximately; (2) the retreating rate was 37.57% on north slopes and 72.69% on the south slopes, depending on slope aspect and glacierized area; (3) based on the GPR data, it is found that the Muz Taw Glacier volume had decreased by 44.6% as compared with the estimated glacier volume from the topographic map in 1959.

Key words: GPR data; Landsat images; area change; shrinkage; Muz Taw Glacier; Sawuer Mountain