

## 近50年来中国阿尔泰山友谊峰地区冰川储量变化\*

骆书飞<sup>1</sup> 李忠勤<sup>1,2</sup> 王璞玉<sup>2</sup> 白金中<sup>1</sup> 康剑<sup>3</sup> 孙吉舟<sup>3</sup>

(1. 西北师范大学地理与环境科学学院地理信息系统系, 兰州 730070;

2. 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, 兰州 730000;

3. 喀纳斯景区管理委员会, 布尔津 836600)

**提 要:** 以中国阿尔泰山友谊峰地区为研究区, 结合 RS 和 GIS 技术对该区冰川厚度、储量及面积进行了定量综合评价分析。结果表明: 所研究的 58 条冰川, 在过去的 50 年间, 总面积减小了 19.2% (平均每条冰川缩小 0.363 km<sup>2</sup>); 共有 10 条消失了。冰川平均厚度减薄了 24.12 m; 储量减少了 2.649 km<sup>3</sup>, 冰川冰融水年径流量为 4.88 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>。分析显示: 该区小于 1 km<sup>2</sup> 的冰川数量占 67%, 但面积和储量主要集中于大于 1 km<sup>2</sup> 的冰川, 几条较大冰川厚度和储量的变化决定了该区域的变化趋势; 小冰川绝对变化量小, 相对变化率大, 对气候变化的敏感性强。

**关键词:** 阿尔泰山; 冰川储量变化; 数字高程模型; ASTER

中图分类号: P343.6

文献标识码: A

在全球变暖的背景下, 冰川对气候变化十分敏感, 是全球气候变化的天然指示剂<sup>[1]</sup>。在中国西北干旱区, 冰川对水资源有着重要贡献, 在水资源构成和调节多年河川径流方面占有重要地位, 准确评估冰川面积及其储量变化, 在水资源、供水和水电的评估等方面具有广泛的应用<sup>[2]</sup>。同时气温的上升和冰川的强烈消融对干旱区沙漠化、洪水、泥石流等有着重要的影响。因此, 冰川的时空变化备受关注<sup>[3,4]</sup>。

2009年8月, 中国科学院天山冰川观测试验站对喀纳斯冰川进行实地考察, 开展了冰川的物质平衡、冰川温度、冰川运动、雪冰化学及第四纪古冰川等相关研究。基于本次考察, 开展了冰川面积和长度变化的监测研究。如李忠勤等<sup>[5]</sup>对布尔津河源喀纳斯冰川的考察表明, 喀纳斯冰川的面积自1959年的30.13 km<sup>2</sup> 缩小到2009年的28.74 km<sup>2</sup>, 损失了4.6%, 冰川末端退缩速率为16.4 m/a。白金中等<sup>[6]</sup>利用地形图和 ASTER 高分辨率卫星影像, 对比得出阿尔泰山友谊峰区冰川面积整体呈强烈退缩趋势。此外, 王淑红等<sup>[7]</sup>应用冰川系统模型预测了阿尔泰山的冰川水资源, 认为本世纪末阿尔泰山冰川将趋近完全消失。这些研究成果在不同程度上反映了冰川面积与长度的变化及其对于气候变化的响应情况, 但缺少对冰川近期情况的深入认识。鉴于此, 文中基于两期数字高程模型, 对阿尔泰山友谊峰地区的58条冰川1959~2008年的厚度、面积和储量变化进行评价分析, 重点探讨冰川储量的变化, 旨在揭示该地区近期的冰川空间变化特征和成因, 以期为流域水资源评估提供可靠数据。

## 1 材料与研究方法

### 1.1 研究区概况

友谊峰地区(49°00′~49°11′N, 87°36′~87°53′E)位于中国阿尔泰山区北部, 是我国纬度最高的现代冰川分布区, 该区冰川是布尔津流域的发源地(图1)。该区海拔在2240~4374 m之间, 4000 m以上的高峰数座, 其中友谊峰海拔4374 m为我国阿尔泰山最高峰。根据第一次冰川编目资料<sup>[8]</sup>记录, 中国阿尔泰山位于阿尔泰山脉中部南坡, 为一系列北西-南东走向的高大山体。在西风环流、亚洲反气旋和来自北方的极地气团的影响下, 阿尔泰山区气候气温低, 年较差大, 以及降水丰富, 年内分配较均匀等特点。由于高大

\* 收稿日期: 2013-8-10; 修回日期: 2013-8-21。

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB951404); 中科院知识创新重要方向项目(KZCX2-EW-311); 国家自然科学基金项目(1141001040; 41101066; J0930003/J0109) 国家自然科学基金(41301069) 资助。

作者简介: 骆书飞(1986-), 男, 贵州遵义人, 硕士研究生, 主要从事基于遥感的冰川储量研究。E-mail: luofufei007@126.com

山脉对西风输送水汽的阻挡,中、高山带降水量明显增加,降水梯度达 19 ~ 22mm/100m,降水随高度递增和由西而东递减,且冬夏多,春秋少。结合该区冬季时间长和降雪多于降雨等因素,形成了独特的冰川补给源。

根据第一次冰川编目资料<sup>[7]</sup>,研究区共有 58 条冰川,其中喀纳斯河源(5A255E)共有冰川 40 条,布的乌拉哈拉斯河(5A255F)共有冰川 18 条。平均粒雪线 3100m,平均最低末端高度 2800m。该区包括了阿尔泰山区大部分的山谷冰川,集中了阿尔泰山区面积大于 10km<sup>2</sup>、长度大于 5km 的三条冰川,是该区最大的冰川作用中心。其中位于友谊峰的喀纳斯冰川(5A255E21),长 10.8km,面积 30.13km<sup>2</sup>,雪线平均高度 3200m,末端海拔 2416m,是中国阿尔泰山区最大的复式山谷冰川,也是我国末端海拔最低的冰川之一。

### 1.2 数据来源

(1) 地形图:1959 年拍摄的航片调绘而成的比例尺 1:50000 地形图,用高精度扫描仪对地形图进行扫描,进行几何精纠正并重采样,几何纠正的均方根误差小于 1 个像元,满足精度要求;1:50000 比例尺地形图 DEM 数据利用 ArcGIS9.3 中矢量地形信息中的等高线、高程点、控制点、深度点,及特征地形要素,运用 3D Analyst 模块生成 TIN(不规则三角网, Triangulated Irregular Network),然后内插生成数字高程模型,格网间隔为 30m × 30m。用 DEM 的高程值与 1:50000 地形图等高线、三角点高程比较,地形图 DEM 的精度在 3 ~ 5m 之间。

(2) 《中国冰川目录 II - 阿尔泰山区》。

(3) 遥感影像:2008 年 8 月获取的 ASTER 数据,云量覆盖较少,冰川处于消融末期。

ASTER(高级星载热发射和反射辐射计, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)是搭载在对地观测系统 EOS - Terra 卫星上的星载热量散发和反辐射仪,空间分辨率为 15 m,具有质量稳定、覆盖地球表面广、分辨率高、星下点和后视成像能力等特点,是冰川面积变化动态监测的主要传感器之一<sup>[9]</sup>。

ASTER 影像在天底方向的空间分辨率为 15m,另外在后视点方向有一个通道 - 近红外通道,可以由天底方向的近红外通道(Band\_3n)和后视方向的近红外通道(Band\_3b)形成立体像对用于 DEM 的生产。利用 ENVI4.7 软件对 ASTER 立体像对数据提取 DEM,在 1:50000 地形图选取 40 地面控制点(GCPs)和 49 个 TIE 点,进行空间三角测量,重采样为 30m,使其与地形图 DEM 具有相同分辨率。最终生成 DEM 并进行编辑,采用三角网内插填补无效值区域和代替高程误差在阈值以外的点<sup>[10]</sup>。对于精度评估采用“检查点法”<sup>[11]</sup>,在海拔大于 2350m(森林上限)的非冰川区选择 60 个高程同名点与地形图比较,ASTER 影像 DEM 的最大高程差为 ±13.45m,且在坡度较大地区误差较为明显。

### 1.3 数据处理

首先对地形图、ASTER 影像进行坐标归一化处理。均采用统一的 UTM(45N 带)投影和 WGS84 椭球体建立坐标系;遥感影像依据地形图进行几何精校正并重采样,几何校正均方根误差小于 1 个像元。在山地地区,地形因素会导致太阳入射角和高度角的变化,使得影像像元所接收的有效光照有很大的差别,导致冰川提取出现错误现象,影响其精度。文中借助于地形图 DEM 对 ASTER 遥感影像进行地形校正,对校正后的影像进行锐化增强处理,这样可以更有效的区分冰川区和非冰川区。

由于遥感影像的空间分辨率与均方根误差都影响到冰川边界提取的准确性,据 Hall、Silvreo 等计算面积变化不确定性的公式<sup>[12,13]</sup>:

$$U_A = 3U_T \sqrt{\Sigma \lambda^2 + \Sigma \varepsilon^2} \tag{1}$$

式中:λ 为影像分辨率;ε 为配准误差;U<sub>A</sub> 为面积不确定性。计算得单条冰川面积的最大误差为 ±0.0019km<sup>2</sup>。

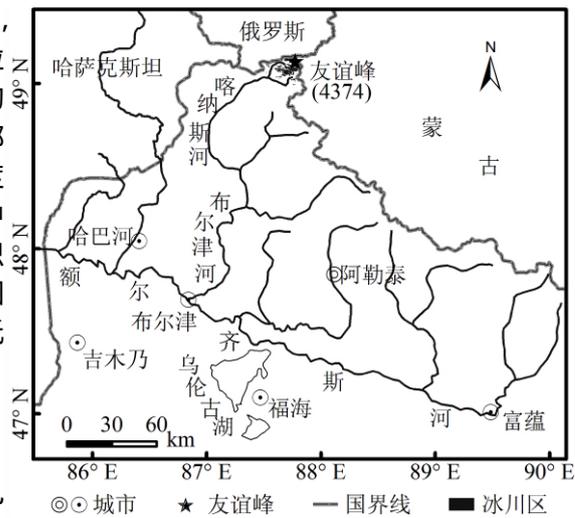


图 1 研究区示意图

Fig.1 The study area

国内外当前大规模监测冰川变化的常规方法是通过多时相的多波段遥感影像来提取冰川信息,比较得出各时期冰川面积与空间分布情况。而多源 DEM 数据的出现,使冰川厚度变化的获取成为可能。Khalsa 等<sup>[14]</sup>按照 DEM 模型算出冰川表面的高程分布函数,通过面积加权得到储量; Berthier 等<sup>[15]</sup>将两期 DEM 数据进行几何精校正后作差,在假设冰川面积不变的情况下与厚度变化相乘得到冰川储量变化; K3/4 3/4b<sup>[16]</sup>与地形相结合,计算不同高程下 DEM 数据的差值,按高程与厚度变化的关系计算得到总体厚度变化值。文中采取 Berthier 等的方法,以 1959 年冰川面积为基础,两期 DEM 作差得到厚度变化,通过 1959 年冰川面积与厚度变化相乘得到储量变化。技术路线(图 2):冰川范围提取、冰川轮廓图层的叠置分析、冰川厚度变化计算、冰川储量变化计算。与此同时,给出了对应的结果分析。

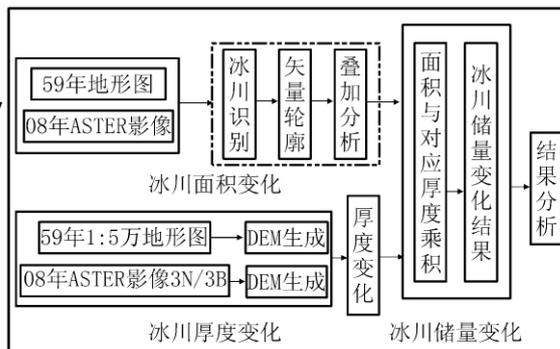


图 2 技术路线

Fig. 2 The technology route

冰川识别的方法主要分为两类:人工目视解译的信息提取、计算机辅助分类方法。虽然人工目视解译费时费力,但解译精度高,现阶段仍然是分辨冰川形态的最佳方法<sup>[17]</sup>。而且本研究区表碛覆盖较广,计算机解译分类容易出现表碛覆盖冰川区与岩体难以区分现象,参照冰川编目资料、地形图,结合冰川学知识对冰川边界进行了准确的判读和勾画,尽量减小误差。

## 2 结果与分析

### 2.1 厚度变化

通过计算,该冰川区近 50 年来厚度平均变化 -24.12m,年均达 -0.416m/a。图 3 显示了 1959~2008 年以来友谊峰地区 58 条冰川 DEM 差值结果及 1959 年冰川轮廓线(黑色)。可见,近 50 年间冰川区整体处于消融状态,在积累区有少量的积累;消融量在空间分布上具有一致性,即在低平冰舌处冰川消融极其强烈,最大值超过了 100 m,随着海拔的升高,距冰川末端越远,消融减弱,除了温度随着高度的增加递减外,其很重要的一个原因是在坡度较陡的区域无法形成稳定的表碛覆盖,末端附近表碛较厚,向冰川上游表碛厚度变薄,在高海拔地区基本以裸冰的形势存在。

图 4 显示了本研究区面积大于 3km<sup>2</sup> 的 6 条冰川随着海拔升高平均厚度变化情况,低海拔地区厚度损失明显增加,冰川末端平均厚度损失最大值在 60m 以上,尽管对于不同的冰川有不同的地理位置和地形环境,但它们在相应的不连续区间趋势是类似的。在海拔超过 3400m 以上冰川整体趋于平稳,区域波动开始变小,均在 0~-40m 之间变化。然而在各自冰川的最高处,又因为山坡陡峭和 ASTER 生成的 DEM 的精度等因素导致出现波动。

图 5 可知,面积小于 1km<sup>2</sup> 的冰川有 39 条,占该区冰川数量的 67%,其厚度变化集中分布于 -30 m~-10m 之间,厚度变化平均值为 -20.64m;小于 10km<sup>2</sup> 的冰川有 16 条,占冰川总数的 28%,其均值厚度变

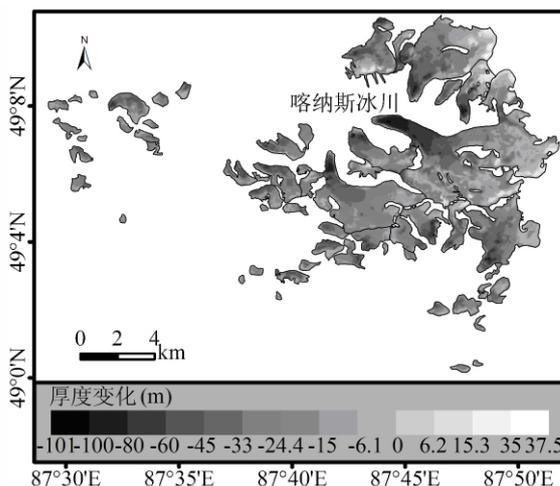


图 3 1959~2008 年冰川区厚度变化图

Fig. 3 Surface elevation changes of glaciers in the study area from 1959 to 2008

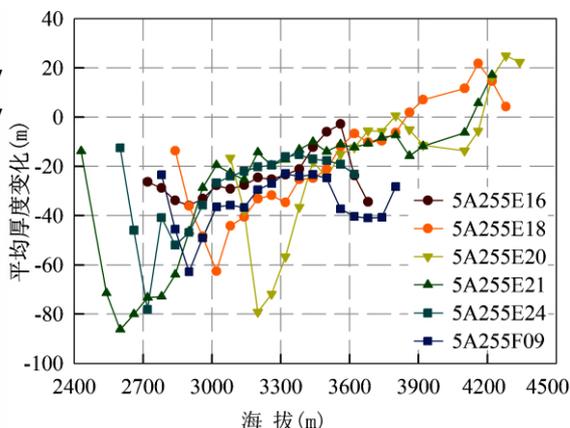


图 4 1959~2008 年不同海拔区间内 6 条典型冰川平均厚度变化

Fig. 4 Elevation changes from different elevation intervals for six larger glaciers from 1959 to 2008

化介于 -30m ~ -20m 之间,厚度变化平均值为 -26.37m;而大于 10km<sup>2</sup> 的 3 条冰川之间的厚度变化幅度较小,厚度变化平均值为 -23.48m。该图还反映了冰川面积与厚度变化有一定的相关性,冰川面积大小对厚度变化影响显著。与托木尔峰地区相似,大冰川是以减薄的形势消融,遵循“减薄后退”的规律<sup>[5]</sup>。

### 2.2 面积与储量变化

通过对遥感影像(2008)和地形图(1959)两期资料进行分析和整理,研究区冰川共 58 条,朝向为北的冰川 33 条,所占比例为 57%。近 50 年来储量减少了 2.649km<sup>3</sup>,冰川冰融水年径流量为 4.88 × 10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>。1959 年、2008 年的冰川总面积分别 109.67km<sup>2</sup>、88.64km<sup>2</sup>;平均面积分别为 1.89km<sup>2</sup>、1.53km<sup>2</sup>;面积共减少了 21.04km<sup>2</sup>,占 1959 年冰川面积的 19.18%,年均减少 0.43km<sup>2</sup>;近 50 年来,共有 10 条冰川消失,集中于冰川面积小于 0.5km<sup>2</sup> 独立发育的冰川。消失冰川总面积达 1.68km<sup>2</sup>,占 1959 年面积的 1.54%;文中为了估算冰川储量变化情况,采用《中国冰川编目-祁连山区》所使用的经验公式得到 1959 年冰川储量。

为了更好的体现冰川发育与冰川规模良好的一致性,将冰川按照面积大小分成 4 个等级(表 1),小于 1km<sup>2</sup> 的冰川数量占总数的 67%,但面积不足总面积的 15%;其中小于 0.5km<sup>2</sup> 的冰川数量又占总数的 45% 以上,面积仅为总面积的 5.11%,面积变化和储量变化分别为 -59% 和 -89.28%。而大于 10km<sup>2</sup> 的冰川所占比例不足 6.00%,面积占总数的 60.09% 以上,面积变化和储量变化分别为 -10.71% 和 -20.12%。随着面积的增大,储量变化在逐渐的增多,且增幅越来越远。综上所述,本研究区内小冰川数量占绝大多数,小冰川较之大冰川变化量小,变化率大;而面积与储量主要分布于大于 1km<sup>2</sup> 的冰川,且集中于几条较大的冰川,大冰川的变化决定了区域平均变化的趋势。比较相同规模冰川储量和表面积的变化比例不难发现,冰储量变化大于冰川面积变化,符合冰川体积变化大于冰川面积变化这一认识<sup>[18]</sup>。

表 1 1959 ~ 2008 年不同规模冰川面积、储量及其变化率

Tab. 1 Volume, area and its change rate of different size of glaciers from 1959 to 2008

分类	1959			2008			面积 变化率 (%)	储量 变化 (km <sup>3</sup> )	储量 变化率 (%)
	条数 (条)	面积 (km <sup>2</sup> )	面积比例 (%)	条数 (条)	面积 (km <sup>2</sup> )	面积比例 (%)			
<0.5	26	6.11	5.57	23	4.62	5.21	-59.74	-0.106	-89.28
0.5~1	13	9.7	8.84	12	8.99	10.15	-32.35	-0.221	-73.91
1~10	16	40.99	37.37	11	36.64	41.34	-20.95	-1.081	-43.49
>10	3	52.88	48.21	2	38.39	43.31	-10.71	-1.242	-20.12
总计	58	109.67	100	48	88.64	100	-19.18	-2.649	-29.20

## 3 讨论

为了进一步研究中国阿尔泰山友谊峰地区冰川的变化特征,与中国其他山系冰川面积变化相比(表 2),阿尔泰山地区冰川面积年平均减少率是最大的,是冰川面积退缩最强烈的地区。同时,与天山不同区域冰川厚度变化比较(表 3),友谊峰地区冰川消融明显强烈。

随着全球气候的波动变暖,本研究区与其它区域冰川变化呈现同样的趋势,即面积退缩、厚度减薄。但由于区域间气候及位置等差异,其变化特征又不尽相同。阿尔泰山友谊峰地区由于冬季和夏季的平均气温都呈现明显的增加趋势,且夏季升温幅度较大,冰川表面温度升高,冬季积累不足以弥补气温升高造成的物质平衡的亏损,使得冰川加速退缩<sup>[6]</sup>。且该地区是中国冰川雪线分布最低的流域,冰川区平均海拔相对较低,冰川平均面积小,导致该区面积变化较大,厚度减薄十分明显<sup>[5]</sup>,对气候变化较敏感,应该加强该区域冰川的监测,密切关注冰川退缩后对该地区的生态及水资源方面的影响。虽然该地区冰川融水在径流中的份额不是太大,短期内冰川退缩将使河流水流量呈增加态势,但冰川的急速退缩亦会加大以冰川融水补给为主的河流或河段的不稳定性,随着冰川的持续退缩,冰川融水将锐减,以冰川融水补给为主的

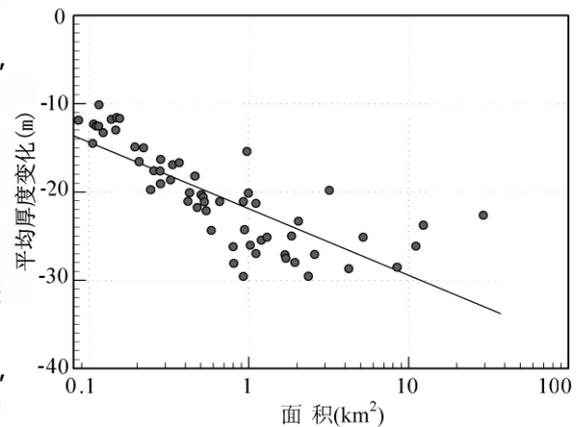


图 5 1959 ~ 2008 年不同等级冰川的平均厚度变化  
Fig. 5 Glacier size vs. mean elevation  
change from 1959 to 2008

河流特别中小支流将面临逐渐干涸的威胁。

表 2 近几十年来中国西部冰川面积变化比较

Tab.2 Statistics of the glacier area changes in western China in recent decades

位置	时间段	数量	总面积 ( km <sup>2</sup> )	消失 条数	面积变化 率( % )	资料来源
友谊峰地区	1959 ~ 2008	58	109.67	10	-19.2	本研究
中国阿尔泰山	1960 ~ 2009	389	283.39	116	-36.91	[19]
朋曲流域	1980 ~ 2001	999	1461.84	99	-8.98	[20]
昆仑山北坡	1970 ~ 2001	372	1776.96	-	-0.3	[21]
祁连山西段	1956 ~ 1990	1731	1229.4	-	-10.3	[22]
乌鲁木齐河	1964 ~ 1992	155	48.04	0	-13.8	[23]
喜马拉雅东段洛扎地区	1980 ~ 2007	335	491.64	27	-16.40	[24]
伊犁河	1963 ~ 2004	293	265.81	11	-18.9	[4]
托木尔峰地区	1964 ~ 2003	483	2267.71	-	-8.8	[4]

表 3 与天山不同区域冰川厚度变化比较

Tab.3 Comparison of elevation changes of the glaciers in different areas of Tianshan Mountains in recent decades

研究区域	位置	条数	时间段	冰川厚度年均 减薄( m/a)	数据来源
友谊峰地区	49°00' ~ 49°11' N 87°36' ~ 87°53' E	58	1959 ~ 2008	0.42	本研究
Akshirak	41°43' ~ 41°59' N 78°15' ~ 78°22' E	178	1943 ~ 2000	0.4 ± 0.10	[3]
青冰滩 72 号冰川	41°45' N 79°54' E	1	1964 ~ 2008	0.22( 冰舌)	[25]
乌鲁木齐河源 1 号冰川	43°06' N 86°49' E	1	1962 ~ 2006	0.15	[25]
黑沟 8 号冰川	43°46' N 88°23' E	1	1986 ~ 2009	0.57( 冰舌)	[25]
四工河 4 号冰川	43°49' N 88°21' E	1	1962 ~ 2009	0.32( 冰舌)	[25]
哈密庙尔沟冰川	43°03' N 94°19' E	1	1981 ~ 2005	0.21 ( 海拔 4295 ~ 4357m)	[26]

## 4 结论

文中在前人研究的基础上,通过 1959 年地形图和 2008 年遥感影像数据,结合 RS 和 GIS 技术,对中国阿尔泰山友谊峰地区喀纳斯河源和布的乌拉哈拉斯河部分冰川近 50 年来冰川变化进行了分析,结果表明:

(1) 厚度变化:本研究区是阿尔泰山地区冰川集中分布的区域,平均面积达 1.89km<sup>2</sup>,明显大于整个山脉冰川平均规模 0.70km<sup>2</sup>。冰川区厚度普遍下降,在积累区有少量积累;随着海拔的升高,相对温度的下降和表碛物的减少等因素影响下冰川均值厚度变化呈现平缓的趋势,在低平的冰舌处厚度变化达最大值(达 -101 m),主要原因是冰川的后退和末端冰下河出水口的坍塌所致;冰川的规模一定程度上影响了冰川厚度的变化。

(2) 面积和储量变化:在全球气候变暖的情况下,研究的 58 条冰川在近 50 年面积退缩率为 19.2%,储量退缩率为 26.6%,冰川数目减少了 10 条,面积全部小于 0.5km<sup>2</sup>;研究区冰川整体呈退缩趋势,随着冰川的退缩,大冰川向小冰川过渡,小冰川趋于消失。小冰川较大冰川对气候变化的响应更为敏感。

(3) 该研究区主要受气温和降水的影响,冰川变化趋势与中国西部其它区域一致,都呈现消融的趋势,但该区域面积年均减小率大,厚度减薄十分明显。但冬季和夏季的平均气温都呈现明显的增加趋势,且夏季升温幅度较大,冰川表面温度升高。除此之外,冰川所处位置、末端海拔、冰川类型、形态特征、运动速度、表碛覆盖等因素也有直接关系<sup>[18]</sup>。

(4) 本研究在实地考察的基础上对阿尔泰山友谊峰地区近 50 年来部分冰川的面积和储量进行了估算评价,但由于该地区缺乏实测冰川厚度资料,两期 DEM 只是以地形图为基准针对性做了误差的评估,难以得到进一步的修正完善。对于典型冰川缺乏相应气候规律的研究,对未来冰川水量估算、过程和时间尺度上的变化需要进一步把握。因此,未来有必要对该地区进行针对性的观测研究,建立针对不同规模、不同类型冰川的定位观测体系,从而实现遥感和实测相结合的冰川变化完整研究。

## 参考文献

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis [A]. In: IPCC. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report [C]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2001.
- [2] Huggel C, Kaab A, Haeblerli W, et al. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps [J]. Canadian Geotechnical Journal 2002, 39: 316 - 330.
- [3] Vladimir B A, Valeriy A K, Arzhan B S, et al. Glacier changes in the Tien Shan as determined from topographic and remotely sensed data [J]. Global and Planetary Change 2007, 56: 328 - 340.
- [4] 蓝永超, 沈永平, 吴素芬, 等. 近50年来新疆天山南北坡典型流域冰川与冰川水资源的变化 [J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(11): 1 - 8.
- [5] 李忠勤, 李开明, 王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究 [J]. 第四纪研究, 2010, 30(1): 96 - 106.
- [6] 白金中, 李忠勤, 张明军, 等. 1959 - 2008年新疆阿尔泰山友谊峰地区冰川变化特征 [J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 116 - 124.
- [7] 王淑红, 谢自楚, 戴亚南, 等. 阿尔泰山冰川系统结构、近期变化及趋势预测 [J]. 干旱区地理, 2011, 34(1): 115 - 123.
- [8] 刘潮海, 尤根祥, 蒲健辰, 等. 中国冰川目录( II 阿尔泰山区) [M]. 中国科学院兰州冰川冻土研究所编辑, 1982.
- [9] <http://www.glims.org/EB/OL/>. 2004 - 11 - 15.
- [10] Goncalves J, Fernandes J C. Assessment of SRTM - 3 DEM in Portugal with Topographic Map Data [EB/OL]. [www.ipi.uni-hannover.de/html/aktivitaeten/EARSel-Workshop2005\\_Paper/Goncalves.pdf](http://www.ipi.uni-hannover.de/html/aktivitaeten/EARSel-Workshop2005_Paper/Goncalves.pdf) 2006 - 10 - 08.
- [11] 王贵林, 姚鑫, 杨艳明, 等. ASTER 立体像对提取山地 DEM 精度研究 [J]. 矿山测量, 2008(2): 34 - 37.
- [12] Hall D K, Bayr K, Schfner W, et al. Consideration of the errors inherent in mapping historical glacier positions in Austria from ground and space (1893 - 2001) [J]. Remote Sensing of Environment 2003, 86: 566 - 577.
- [13] 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.
- [14] Khalsa S J S, Dyurgerov M B, Khromova T, et al. Space based mapping of glacier changes using ASTER and GIS tools [J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing 2004, 42(10): 2177 - 2183.
- [15] Berthier E, Arnaud Y, Kumar R, et al. Remote sensing estimates of glacier mass balances in the Himachal Pradesh( Western Himalaya, India) [J]. Remote Sensing of Environment 2007, 108: 327 - 338.
- [16] Kaab A. Glacier volume changes using ASTER optical stereo. A test study in Eastern Svalbard [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS) 2007: 3994 - 3996.
- [17] 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 [J]. 资源科学, 2011, 33(3): 399 - 407.
- [18] 谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论 [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2009.
- [19] 姚晓军, 刘时银, 郭万钦, 等. 近50a来中国阿尔泰山冰川变化 - 基于中国第二次冰川编目成果 [J]. 自然资源学报, 2012, 27(10): 1734 - 1745.
- [20] 晋锐, 车涛, 李新, 等. 基于遥感和GIS的西藏朋曲河流域冰川变化研究 [J]. 冰川冻土, 2004, 26(3): 261 - 266.
- [21] 上官冬辉, 刘时银, 丁永建, 等. 利用ASTER影像对慕士塔格 - 公格尔山冰川解译与目录编制 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 344 - 351.
- [22] 刘时银, 沈永平, 孙文新, 等. 祁连山西段小冰期以来的冰川变化研究 [J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 227 - 233.
- [23] 陈建明, 刘潮海, 金明变. 重复航空摄影测量方法在乌鲁木齐河流域冰川变化监测中的应用 [J]. 冰川冻土, 1996, 18(4): 331 - 336.
- [24] 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和冰湖变化研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 47 - 52.
- [25] 王璞玉, 李忠勤, 李慧林, 等. 近50年来天山地区典型冰川厚度及储量变化 [J]. 地理学报, 2012, 67(7): 929 - 940.
- [26] 李忠勤, 王飞腾, 朱国才, 等. 天山庙尔沟平顶冰川的基本特征和过去24a间的厚度变化 [J]. 冰川冻土, 2007, 29(1): 61 - 65.

## Glacier volume change in Youyi area of Altay Mountains, China from 1959 to 2008

LUO Shufei<sup>1</sup>, LI Zhongqin<sup>1, 2</sup>, WANG Puyu<sup>1</sup>, BAI Jinzhong<sup>1</sup>, KANG Jian<sup>3</sup>, SUN Jizhou<sup>3</sup>

(1. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, P. R. China; 2. The State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological station, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P. R. China; 3. Administration of Kanas Scenic Spot, Burgin, Xinjiang 836600, P. R. China)

**Abstract:** Combined with remote sensing and GIS, the spatial variability of glacier elevation changes in Youyi area of the Altay Mountain in China were obtained from two digital elevation models (one is from 1:50 000 topographic map in 1959 and the other is from ASTER remote sensing data in 2008). Elevation changes were converted to volume changes by multiplication with the respective glacier area. This research presents elevation and area changes from 1985 to 1999 for about 58 glaciers in the Youyi area. The area of the glaciers had reduced 19.2%. The average area of individual glaciers had reduced 0.363 km<sup>2</sup>. 10 glaciers had melted away and the mean elevation change was -24.12 m. The volume had reduced 2.66 km<sup>3</sup>, and the annual glacier runoff was 4.88 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. The analysis shows that the amounts of the glaciers with a size smaller than 1 km<sup>2</sup> are 67%, but the area and volume mainly concentrated in those larger than 1 km<sup>2</sup>. So the elevation and volume changes of several larger glaciers determined the change trend in this region; the absolute variation of the smaller glaciers was small, but the relative change rate was much bigger, and the sensitivity to climate change was much stronger.

**Key words:** Altay Mountain; ice volume changes; Digital Elevation Model; ASTER