

1959 - 2008 年新疆阿尔泰山友谊峰地区冰川变化特征<sup>①</sup>白金中<sup>1</sup>, 李忠勤<sup>1, 2</sup>, 张明军<sup>1</sup>, 高闻宇<sup>1</sup>, 李开明<sup>2</sup>

(1 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 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, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 利用 1959 年地形图、2008 年 ASTER 数字遥感影像及数字高程模型, 在地理信息系统技术支持下分析了新疆阿尔泰山友谊峰地区冰川的变化特征。研究表明: 1959 - 2008 年该区冰川整体呈萎缩趋势, 且变化幅度相对较大。相对于 1959 年 2008 年冰川面积和数量分别变化 -32.5% 和 -27.9%。其中, 小于 1 km<sup>2</sup> 的冰川面积平均变化率为 -66.7%, 面积小于 0.5 km<sup>2</sup> 的冰川面积变化率大于 -70%, 面积大于 1 km<sup>2</sup> 以上的冰川面积变化率为 -35.0%, 1 ~ 5 km<sup>2</sup> 的冰川面积变化率为 -27.9%。冰川末端平均后退 253 m, 末端退缩比例为 -18.3%, 且南坡冰川末端变化率大于北坡。分析发现, 研究区冰川面积亏损较大主要缘于该区小冰川分布数量较多(面积小于 1 km<sup>2</sup> 的冰川数量达 75%), 对气候变化的响应较为敏感。

**关键词:** 友谊峰; 遥感; GIS; 冰川变化

中图分类号: TP79 P931.4 文献标识码: A 文章编号: 1000 - 6060(2012)01 - 0116 - 09(116 ~ 124)

在全球变暖不断加剧的背景下, 气候变化是人们议论最多的话题, 也是人们最关注的问题之一。近半个世纪以来, 冰川强烈退缩<sup>[1-3]</sup>, 而冰川对水资源有重要贡献, 具有调节多年径流的作用, 同时冰川强烈退缩会造成冰川洪水、泥石流等突发自然灾害<sup>[4-5]</sup>, 严重影响以冰川融水为主要的水源地的人民的生产生活。因而冰川变化备受关注。冰川作为我国西北干旱区水资源重要组成部分, 在近几十年, 冰川消融对该区径流和河流补给作用产生重大影响<sup>[6-9]</sup>。大量研究表明, 在全球气候变暖背景下, 冰川将进一步退缩, 且大量小冰川在未来会趋于消失<sup>[10-14]</sup>, 这将给以冰川融水为补给特征的区域水资源带来灾难性影响。因此, 研究冰川变化尤其对于干旱半干旱区具有重要的现实意义<sup>[15-17]</sup>。

传统的冰川变化监测研究中, 常用方法是地面观测法与重复航空摄影测量法<sup>[18-19]</sup>。但由于受到多种因素的制约, 冰川常规观测方法在大部分冰川区无法实施<sup>[9]</sup>。随着遥感卫星监测手段的广泛应用, 使得偏远山区人力观测所不能到达地区的冰川

资源的监测成为可能<sup>[20-22]</sup>。阿尔泰山脉是我国纬度最高的冰川分布区, 冰川数量不多, 规模较小。因地处中俄蒙边境, 人迹罕至, 常规的冰川观测方法难以实施。因此, 应用遥感资料调查阿尔泰山脉冰川资源成为首选。据研究表明<sup>[23]</sup>, 在全球气候持续变暖的情况下, 阿尔泰山区冰川持续退缩, 且中国阿尔泰山区的冰川变化大于俄阿尔泰山, 在 20 世纪 80 年代前后冰川消融达最大值, 之后开始回落, 冰川面积最终趋于消亡。为了进一步探讨新疆阿尔泰地区的冰川变化特征, 由于友谊峰地区冰川占阿尔泰山区冰川总数的半数以上, 故以友谊峰地区冰川作为研究对象, 利用 ASTER 高分辨率卫星影像、地形图, 并结合现有文献资料, 对友谊峰地区近 50 a 冰川变化数据进行了分析, 并结合气象观测数据探讨了该区域冰川对气候变化的响应。

## 1 研究区概况

友谊峰地区位于新疆阿尔泰山区, 介于 48°40′

① 收稿日期: 2011 - 03 - 21; 修订日期: 2011 - 05 - 10

基金项目: 全球变化研究国家重大科学计划项目(2010C13951404); 中科院知识创新重要院方向项目(KZCXZ - EW - 311); 国家自然科学基金项目(114001040 #1101066 #0930003 /J0109)

作者简介: 白金中(1983 -), 女, 山西省朔州市, 硕士研究生, 主要从事基于遥感的冰川动态监测与全球变化研究  
E-mail: woshibaijinzong@163.com

~49°10'N, 87°00' ~ 88°00'E 之间,是我国纬度最高的冰川分布区,该区冰川是布尔津河发源地(图1)。根据冰川编目资料<sup>[24]</sup>记录,在阿尔泰山区冰川融水,尤其是季节性积雪在河流补给比例中高达45%~50%,是该区河流的主要补给来源。该区属于大陆性气候,夏季短暂多雨、冬季漫长而酷寒。来自北方的极地气团沿额尔齐斯河谷侵入,带来了低温和降雪。在上述气团影响下,阿尔泰山区冬季

(5~6个月)较长且年较差较大,气温自西向东逐渐降低;降水量丰富,随海拔增高降水量也增多,且由西向东递减。阿尔泰山区盛行的湿润气流和地形特征相结合,使冰川分布具有自己的特点和规律,冰川发育规模随山地海拔降低而由西北向东南方向减小,冰川类型由西北向东南方向改变,冰川朝向呈现不对称性,冰川粒雪线等高度参数有西北向东南方向升高。

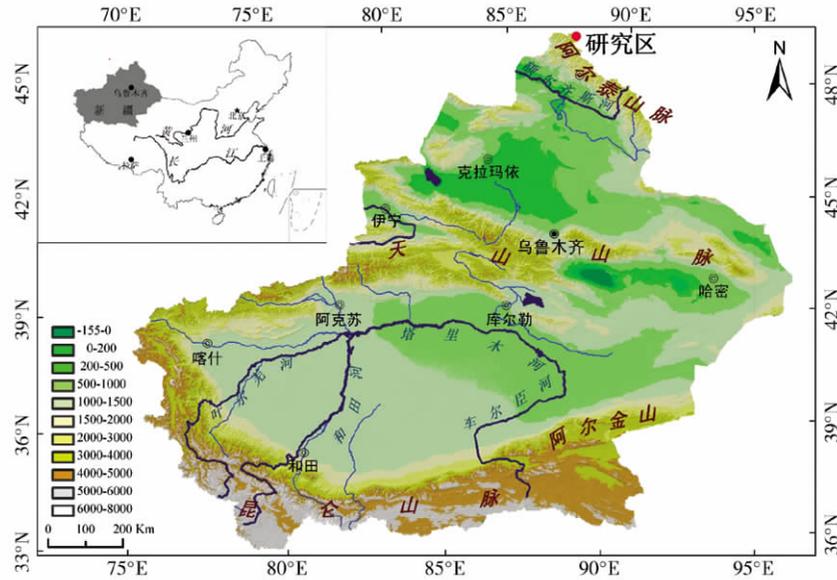


图1 新疆阿尔泰山友谊峰地区地理位置

Fig. 1 Location of the Youyi Peak in Altay Mountains of Xinjiang

根据冰川编目资料<sup>[24]</sup>,阿尔泰山脉共有416条冰川,总面积293.20 km<sup>2</sup>,冰川的平均面积0.70 km<sup>2</sup>,面积小于1 km<sup>2</sup>的冰川占总数的84.2%,冰储量16.49 km<sup>3</sup>,冰川面积和储量分别占该区冰川总面积和储量的32.61%和13.54%,冰川面积和储量主要集中在面积大于1 km<sup>2</sup>的冰川上。友谊峰海拔4374 m,为我国阿尔泰山的最高峰,是阿尔泰山区额尔齐斯河外流水系冰川数量最多的一条山脉,分别占总条数的72.6%、总面积的84.43%和总储量的89.70%,冰川平均面积0.82 km<sup>2</sup>。友谊峰及其左侧的奎屯峰构成了高大的山结,为我国阿尔泰山现代冰川集中发育的地区,且大于10 km<sup>2</sup>的3条冰川全集中在此,是该山区最大的冰川作用中心,其中面积最大的冰川是位于友谊峰的哈拉斯冰川,长10.8 km,面积30.13 km<sup>2</sup>,末端海拔2416 m,是友谊峰区最大的复式山谷冰川,也是我国末端最低的冰川,冬春积雪厚达1.5~2.0 m,冷季补给较

大,夏季消融较强,具有冰温较高、运动速度较快的特点,为冷季补给占优势的亚大陆性冰川<sup>[25]</sup>。

## 2 数据源及数据获取

研究区所采用的数据主要来源于:(1)4幅以1959年航测为依据成图的1:10000地形图及研究区分辨率90 m的数字高程模型(DEM)。(2)《中国冰川目录II-阿尔泰山区》。(3)2008年8月22日成像,云量覆盖较少的ASTER数据。2009年7~8月由新疆维吾尔自治区相关部门与中科院天山冰川站共同组织人员对友谊峰地区生态、水文、冰川资源进行实地考察,由于遥感冰川成像的复杂性,成像的最佳时间仅为每年的6~8月份,无积雪覆盖,且云量较少,通过对2000~2009年多数据源如SPOT、Landsat、CBERS、ASTER等的查询,2008年8月22日成像的ASTER数据最符合观测要求,因此选取该数据源。ASTER是搭载在美国EOS(地球观测系

统) 上午星 TERRA 上, 空间分辨率为 15 m 的先进星载热辐射与反射辐射计, 具有高空间分辨率, 星下点和后视成像能力的特点, 并且极地覆盖范围较广, 所以成为冰川变化动态监测的主要传感器之一<sup>(26-27)</sup>。(4) 哈巴河气象站从 1958 - 2009 年的月平均气温和降水资料。

首先对扫描后的地形图在 ArcGIS9.2 进行配准并重采样, 设置投影为高斯 - 克里格投影, 然后再 ERDAS9.1 中进行拼接, 之后在 ArcGIS9.2 将投影转换为所需投影 UTM WGS84, 作为地理底图。遥感影像依据地形图进行几何精校正, 均方根误差小于 1 个像元, 满足遥感影像几何校正所需的精度要求, 建立图像的坐标系统 UTM WGS84, 并进行重采样。地形因素会导致太阳入射角和高度角的变化, 产生阴影, 影响冰川分类的精度。因此, 引入数字高程模型对 ASTER 遥感影像进行地形校正, 配准误差在一个像元内, 有效地降低地形的影响, 确保冰川信息提取的准确性。对校正后的影像进行锐化增强处理以增强冰川边界信息。其次是冰川解译, 主要使用人工目视判读的方法, 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<sup>(18-19)</sup>。在 ArcView 中确定了不同时期的冰川边界(图 2), 提取了面积、长度等形态参数, 并对两期数据进行空间叠加研究其变化特征。虽然人工目视解译费时、费力, 但现阶段仍然是分辨冰川形态的最佳方法<sup>(28-29)</sup>。鉴于高质量影像数量有限, 且多数影像有积雪、云覆盖, 且研究区位于国界处, 资料有限, 因此仅对区域内 226 条冰川做重点研究。对于有些边界

较难辨别的冰川, 则参照冰川编目资料、地形图、Google Earth、DEM 进行判断。据 Hall<sup>(30)</sup>、Silvrio<sup>(31)</sup>、Ye<sup>(32)</sup> 等研究, 冰川面积和长度提取的总体精度主要与几何配准技术与像元分辨率有关, 计算冰川长度和面积变化的不确定性公式:

$$U_T = \sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \varepsilon^2} \quad (1)$$

式中:  $U_T$  为长度不确定性;  $\lambda$  为影像分辨率;  $\varepsilon$  为配准误差。

$$U_A = 2 U_T + \sqrt{\sum \lambda^2} + \sum \varepsilon^2 \quad (2)$$

式中:  $U_A$  为面积不确定性。结果表明冰川长度的不确定性为  $\pm 50.2$  m, 冰川面积的不确定性为  $\pm 0.005$  km<sup>2</sup>。

### 3 友谊峰冰川变化分析

#### 3.1 冰川变化分析

本研究依据地形图提取友谊峰的 226 条冰川作为研究对象, 对过去 49 a 冰川变化进行了分析。通过计算, 2008 年友谊峰区内共有 163 条冰川, 总面积 153.08 km<sup>2</sup>, 占该区冰川总面积的 52.21%, 其中最小的冰川仅 0.02 km<sup>2</sup>, 最大的为 26.80 km<sup>2</sup>, 42% 的冰川面积小于 0.5 km<sup>2</sup>, 该区内冰川大小分布及面积变化率如表 1 所示。在 1959 年, 研究区冰川面积为 226.63 km<sup>2</sup> (1959 年航测地形图), 而到了 2008 年, 面积减小为 153.07 km<sup>2</sup>, 区域冰川面积减少了 73.55 km<sup>2</sup>, 年均损失约为 1.5 km<sup>2</sup>, 面积变化了 -32.5% (表 1)。由表 1 可以看出, 在 1959 年有 3 条冰川面积大于 10 km<sup>2</sup>, 但在 2008 年有 1 条退缩到

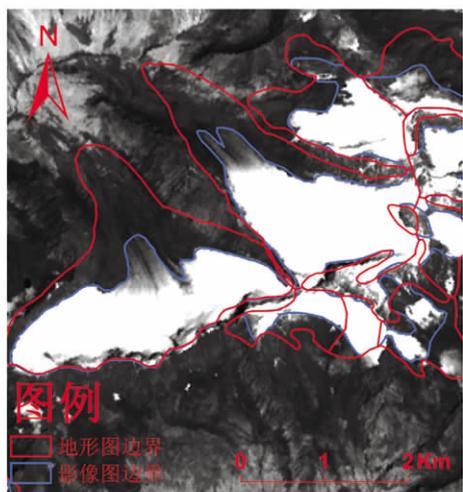


图 2 部分冰川的边界矢量叠加图

Fig. 2 Map showing of the glacier outlines

表 1 1959 - 2008 年间不同规模冰川数量、面积及其变化率

Tab. 1 Number area and its rate in different size of glacier durings 1959 - 2008

分类	1959 年			2008 年			面积变化率/%
	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	130	26.01	11.5	100	18.22	11.9	67.7
0.5 ~ 1	40	29.48	13.0	30	20.53	13.4	43.3
1 ~ 2	33	47.10	20.8	16	23.50	15.4	42.7
2 ~ 5	18	59.63	26.3	14	43.62	28.5	24.7
5 ~ 10	2	11.54	5.1	1	8.83	5.8	23.6
> 10	3	52.88	23.3	2	38.39	25.1	10.7
总计	226	226.63	1	163	153.08	1	32.5

小于  $10 \text{ km}^2$  的等级中; 与 1959 年相比 2008 年冰川面积小于  $2 \text{ km}^2$  的三个等级中冰川面积和数量都大幅减小。1959 年在  $5 \sim 10 \text{ km}^2$  区间有 2 条冰川面积已减小到  $5 \text{ km}^2$  以下, 2008 年的 1 条  $5 \text{ km}^2$  冰川大于  $10 \text{ km}^2$  的冰川退缩补充到该等级, 导致面积变化率较小。在友谊峰区冰川经过 49 a 退缩变化后, 出现了大面积冰川向小面积等级迁移, 而较小冰川趋于消失。

本次提取的 226 条冰川, 总面积为  $226.63 \text{ km}^2$ , 研究区冰川平均面积为  $1.00 \text{ km}^2$ , 相对大于整个山脉冰川平均规模 ( $0.70 \text{ km}^2$ ), 冰川类型区域涉及的有悬冰川、冰斗冰川、山谷冰川等, 占整个流域冰川总数的 54.3%, 占冰川总面积的 77.3%, 小于  $1 \text{ km}^2$  的冰川占总数的 75.2%, 但面积仅为总面积的 24.48%; 小于  $0.5 \text{ km}^2$  的冰川数量占总数的 57.5%, 面积减小量为  $17.6 \text{ km}^2$ , 明显高于其他面积等级的冰川面积减小量;  $1 \sim 5 \text{ km}^2$  的冰川条数仅占总数的 22.6%, 其面积占总数的 47.1%; 大于  $5 \text{ km}^2$  的冰川所占比例不足 3%, 面积占总数的 28% 以上; 表 1 和图 3 所示 226 条冰川在 49 a 间的面积变化率及其分布, 从中可以看出, 面积小于  $1 \text{ km}^2$  的冰川其面积变化率的变幅比较大, 平均变化率为  $-66.7\%$ , 其中面积小于  $0.5 \text{ km}^2$  的冰川面积减小率大于  $-70\%$ , 且消失的 63 条冰川面积全部小于  $1 \text{ km}^2$ , 数量变化了  $-27.9\%$ 。而面积处于  $1 \text{ km}^2$  以上的冰川较为稳定, 面积变化率为  $-35.0\%$ , 其中面积为  $1 \sim 5 \text{ km}^2$

的面积变化率为  $-27.9\%$ 。随着冰川面积逐渐增大, 面积变化率逐渐减小, 说明不同规模冰川对气候变化的响应不同, 小冰川对气候变化的响应更为敏感。

除面积、数量变化外, 冰川长度变化也是一个最直接且易于获取的参数, 是对气候变化延迟的反应。49 a 资料显示, 226 条冰川冰川末端平均后退  $253 \text{ m}$ , 末端退缩比例为  $18.3\%$ 。其中北坡冰川平均长度为  $1234 \text{ m}$ , 南坡冰川平均长度为  $1916 \text{ m}$ , 南坡冰川长度大于北坡冰川长度  $682 \text{ m}$ 。这也说明南北坡地形差异对冰川发育的影响, 长而缓的南坡地形使得冰川发育较为狭长。1959 - 2008 年, 南坡冰川末端退缩了  $433 \text{ m}$ , 年平均退缩量为  $8.8 \text{ m/a}$ , 而北坡冰川退缩了  $244 \text{ m}$ , 年平均退缩量为  $5.0 \text{ m/a}$  (表 2)。

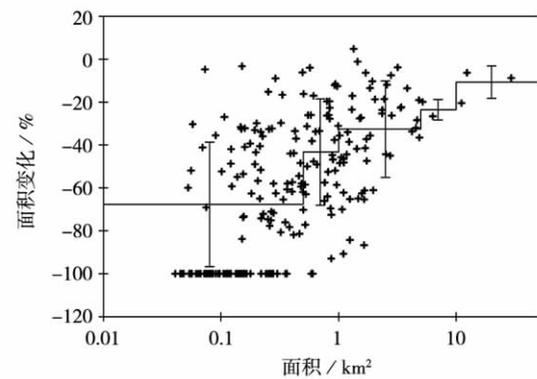


图 3 1959 - 2008 年间不同等级冰川面积变化率分布  
Fig. 3 Distribution of reduction rate of area in different size of glacier during 1959 - 2008

表 2 1959 - 2008 年间北坡和南坡不同规模冰川海拔分布及长度退缩量

Tab. 2 Distribution of elevation and length changes in different size of glaciers of the Youyi Area during 1959 - 2008

分类 ( $\text{km}^2$ )	北 坡				南 坡			
	平均最高 海拔/m	平均最低 海拔/m	平均最大 长度/m	长度退缩 /m	平均最高 海拔/m	平均最低 海拔/m	平均最大 长度/m	长度退缩 /m
<0.5	3 105	2 812	635	399	3 177	2 895	789	304
0.5~1	3 310	2 714	1 497	711	3 291	2 891	1 748	629
1~2	3 413	2 667	2 217	853	3 363	2 757	2 451	894
2~10	3 476	2 559	3 199	911	3 612	2 748	3 621	756
>10	3 977	2 505	8 955	2 124	4 070	2 788	6 706	372
总计	3 208	2 763	1 234	244	3 328	2 841	1 916	433

### 3.2 气候变化对冰川变化的影响

研究表明, 近半个世纪以来新疆地区气温升高, 降水量增多, 气候由暖干转向暖湿, 气候变化导致冰川消融<sup>(33-36)</sup>。冰川是气候影响的产物, 而冰川变化是气候变化驱动的结果。在气象要素中, 气温和降

水与其关系最为紧密<sup>(37-39)</sup>, 而夏季气温和年降水是冰川变化的两个主要的控制因素, 夏季气温决定冰川消融量, 年降水影响冰川积累量<sup>(28)</sup>。冰川消融一般在夏季 6~8 月, 冰川积累在冬季的 11 月至翌年 3 月。冰川变化虽滞后温度变化, 但是它们之间存

在对应关系<sup>(28,40)</sup>,尤其对于长度小于 2 km 的冰川,它们的变化与气候变化基本同步<sup>(41)</sup>。本次研究提取的冰川规模小、长度短,其中长度小于 2 km 的冰川占该区冰川的 90%,因此可以认为该研究区冰川变化与气候变化基本同步。研究区没有直接的气象观测站,在此选择与之相邻的哈巴河气象站数据做比较,气象站位于 48°03'N,86°24'E。1958 - 2009 年夏季、冬季平均温度,上升约 2.6 °C,平均每年上升 0.1 °C,冬季平均温度降低 1.9 °C;其中,

1959 - 2000 年夏季平均温度上升约 1.7 °C,平均每年上升 0.04 °C,冬季平均温度上升 2.8 °C,2000 - 2008 年夏季平均温度上升约 0.87 °C,平均每年上升 0.12 °C,冬季平均温度下降 1.9 °C,从线性关系看(图 4),冬季和夏季的平均气温都呈现明显的增加趋势,冬季升温使得冰川活动层升温开始时间提前且持续的较长,导致冰川表面消融增加。另外,夏季升温幅度较大,冰川表面温度升高,加剧了冰川消融。

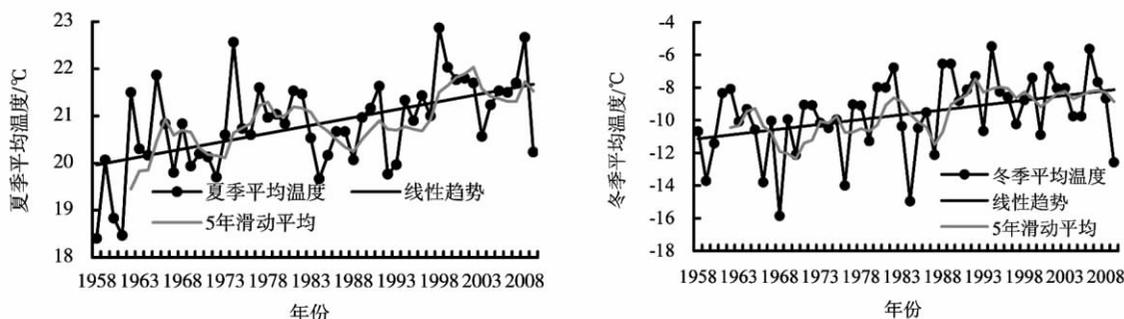


图 4 1958 - 2009 哈巴河气象站夏季、冬季平均温度

Fig. 4 Mean values of summer and winter temperature at Habahe Meteorological Station between 1958 and 2009

分析 1958 - 2009 降水数据,自 1958 年以来,冬季降水量和年降水量都呈现增加趋势,而夏季降水量呈现减少趋势(图 5);其中 1959 - 2000 年夏季年降水量减少 0.9 mm,冬季年降水量增加 12.4 mm,2000 - 2008 年夏季年降水量减少 51.9 mm,冬季年降水量增加 20.5 mm。冬季降水增加有利于冰川积累,相关研究表明即使降水增多,也不会阻止温度上升所引起的冰川消融<sup>(28)</sup>。夏季作为冰川的主要积累期,只有当年降水量增加到 260 ~ 340 mm 才能保

证冰川平衡线稳定<sup>(28,39)</sup>。研究区冬季为冰川主要补给期,补给量占冰川总积累量的 50% 以上<sup>(25)</sup>。研究区冬季降水量增加仍然引起冰川的剧烈消融,主要原因是夏季升温导致冰川消融较强,而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。研究区年均降水量为 187 mm,年降水量增加不明显,且升温引起冰川积累区面积的减少,冰川物质平衡收入减小,但是支出在增加,使得冰川加速退缩,因此友谊峰冰川退缩主要是由于气候变暖造成的。

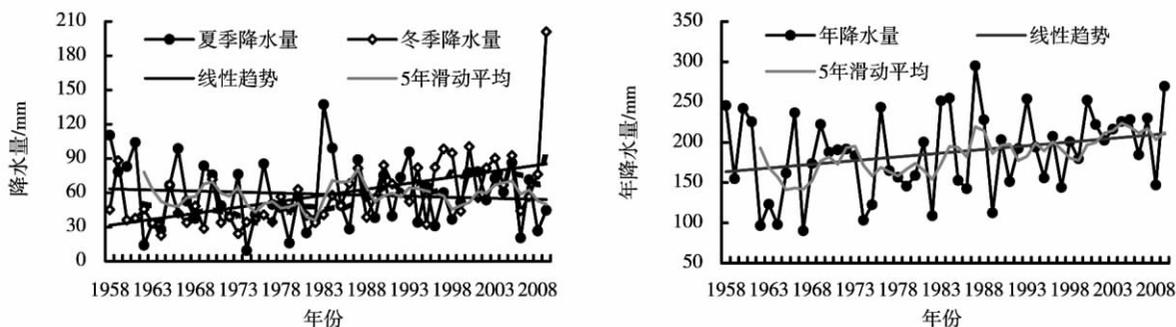


图 5 1958 - 2009 哈巴河气象站夏季、冬季降水与年降水

Fig. 5 Mean values of summer, winter and annual precipitation at Habahe Meteorological Station between 1959 and 2008

### 3.3 对比分析

据中国冰川资料<sup>(24)</sup>,阿尔泰山区冰川目录包括额尔齐斯河外流水系和乌伦古河等内陆水系,额尔

齐斯河有哈巴河、布尔津河、克兰河等支流,均发育在东北和西北向构造带上。相关研究表明<sup>(23)</sup>,我国阿尔泰山区 403 条冰川在 1959 - 2000 年间,消失

130 条,其中 100 条位于布尔津河流域,年均变化率为  $-0.0076/a$ ,小于天山乌鲁木齐河流域冰川变化,后者在 1964 - 1992 年间的冰川变化率为  $-0.006/a$ <sup>(18)</sup>;哈巴河消失 1 条,面积变化率为  $-32.96%$ ,年变化率为  $-0.0080/a$ (表 3)。本文研究的 226 条冰川主要分布于友谊峰额尔齐斯河两个主要支流——布尔津河和哈巴河流域,对这两个流域的冰川变化进行比较(表 3),从 1959 - 2008 年,友谊峰布尔津河流域,冰川数量从 213 条减少为 152 条,消失了 61 条冰川;面积由  $213.15\text{ km}^2$  退缩为  $145.03\text{ km}^2$ ,减小  $68.12\text{ km}^2$ ,面积变化率为  $-31.96%$ ,年均变化率为  $-0.0065/a$ 。哈巴河消失 2 条冰川,年均变化率为  $-0.0082/a$ ,大于布尔津河的冰川面积变化率,这是因为在哈巴河流域分布的冰川主要以悬冰川、冰斗冰川为主,而布尔津河流域是中国阿尔泰山冰川的集中分布区,其中友谊峰面积最大的冰川哈拉斯冰川即位于此,虽然数量

上变化较大,但消失的都是小冰川,在总面积中的比重较小,且哈巴河冰川平均面积为  $0.56\text{ km}^2$ ,小于布尔津河流域冰川平均面积  $0.82\text{ km}^2$ 。这说明了在气候变暖的情况下哈巴河流域的冰川变化剧烈。

我国西部监测冰川数量较少,大量资料来源于重复测量和地面立体摄影测量。随着遥感卫星数据在冰川监测广泛应用,许多学者应用此手段对冰川面积变化进行了跟踪研究,发现所有冰川都处于退缩状态,但退缩程度存在明显的差异。现利用遥感监测获得西部部分冰川变化,并将友谊峰区冰川变化与它们进行对比(表 4),结果表明,友谊峰区冰川变化趋势与其冰川所表现的趋势相吻合,即条数减少、面积变小,但友谊峰地区的冰川退缩幅度较大,对气候变化较敏感,应该加强监测,同时对冰川退缩后对该地区的生态及水资源方面的影响密切关注,虽然该地区冰川融水在径流中的份额不是太大,但冰川退缩可能会带来一系列的负面影响。

表 3 1959 - 2008 年友谊峰及阿尔泰山各流域冰川变化比较

Tab. 3 Statistics of the glacier changes in Youyi Peak and in different basins of Altay Mountain between 1959 and 2008

位置	时间段	数量	总面积/ $\text{km}^2$	消失条数	面积变化率/%	年均变化率/a	资料来源
布尔津河	1959 - 2000	302	247.55	100	29.95	0.0073	王淑红 <sup>(23)</sup>
	1959 - 2008	213	213.15	61	31.96	0.0065	本文
哈巴河	1959 - 2000	35	18.6	1	32.96	0.0080	王淑红 <sup>(23)</sup>
	1959 - 2008	13	13.48	2	40.36	0.0082	本文

表 4 1980 - 2008 年中国西部冰川变化比较

Tab. 4 Statistics of the glacier changes in western china in recent decades

位置	时间段	数量	总面积/ $\text{km}^2$	消失条数	面积变化率/%	资料来源
朋曲流域	1980 - 2001	999	1461.84	99	-8.98	晋锐 <sup>(14)</sup>
昆仑山北坡	1970 - 2001	372	1776.96	-	-0.3	上官冬辉 <sup>(42)</sup>
祁连山西段	1956 - 1990	1731	1229.4	-	-10.3	刘时银 <sup>(43)</sup>
中国阿尔泰山	1959 - 2000	403	279.03	130	-31.31	王淑红 <sup>(23)</sup>
俄罗斯阿尔泰山	1952 - 1998	1039	804.9	78	-7.1	王淑红 <sup>(23)</sup>
乌鲁木齐河	1964 - 1992	155	48.04	0	-13.8	陈建明 <sup>(18)</sup>
伊犁河	1963 - 2004	293	265.81	11	18.9	李忠勤 <sup>(44)</sup>
托木尔峰地区	1964 - 2003	483	2267.71	-	8.8	李忠勤 <sup>(44)</sup>
友谊峰	1959 - 2008	226	226.63	63	-32.5	本文

## 4 结 论

通过对比 1959 年地形图和 2008 年 ASTER 遥感影像数据,对阿尔泰山友谊峰区冰川在过去 49 a 间的退缩变化进行分析研究。结果表明:在全球气候持续变暖的情况下,研究的 226 条冰川中,面积退缩率为  $32.5%$ ,冰川末端平均后退  $253\text{ m}$ ,末端

退缩比例为  $18.3%$ ,消失了 63 条,面积全部小于  $1\text{ km}^2$ ,研究区冰川整体呈强烈退缩趋势。随着冰川退缩,大冰川向小冰川过度,小冰川趋于消失,且小冰川较大冰川对气候变化的响应更为敏感。由于南北坡冰川所处气候条件的差异,接受太阳辐射以及地形差异等影响,使得南坡长度减小幅度大于北坡冰川。夏季气温和年降水是导致冰川变化的根本因

素,夏季气温决定冰川消融量,年降水影响冰川积累量,研究区冬季降水量增加仍然引起冰川的剧烈消融,主要原因是夏季升温导致冰川消融较强,而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。虽然,研究区年均降水量较少且增加不明显,升温引起冰川积累区面积的减少,冰川物质平衡收入减小,但是支出在增加,进一步加剧冰川退缩,因此友谊峰冰川退缩主要是由于气候变暖造成的。通过友谊峰两个流域的冰川变化进行比较,友谊峰哈巴河消失冰川数小于布尔津河,但面积变化率、年均变化率大于布尔津河冰川变化,在气候变暖的情况下哈巴河流域冰川变化剧烈。将友谊峰区冰川变化与西部部分冰川进行对比,结果表明,友谊峰区冰川变化趋势与其它冰川所表现的趋势相吻合,即条数减少、面积变小,但友谊峰地区的冰川退缩幅度较大,对气候变化较敏感,未来应该扩展研究范围,并加强监测,同时对冰川退缩后对该地区的生态及水资源方面的影响密切关注,虽然该地区冰川融水在径流中的份额不是太大,但冰川退缩可能会带来一系列的负面影响。

#### 参考文献(References)

- (1) IPCC. Summary for policymakers of the synthesis report of the IPCC Fourth Assessment Report (M). Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007: 1-18.
- (2) 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估(M). 北京: 气象出版社, 2003. (SHI Yafeng, SHEN Yongping, LI Dongliang, et al. Assessm of the issues of climatic shift from warm-dry to warm-wet in Northwest China (M). Beijing: China Meteorological Press, 2003.)
- (3) 施雅风,沈永平,胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨(J). 冰川冻土, 2002, 24(3): 219-226. (SHI Yafeng, SHEN Yongping, HU Ruji. Preliminary study signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 219-226.)
- (4) DING Yongjian, LIU Jingshi. Glacier lake outburst flood disasters in China (J). Annals of Glaciology, 1992, 16: 180-184.
- (5) HUGGEL C, KAAB A, HAEBERLI 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.
- (6) 刘潮海,康尔泗,刘时银,等. 西北干旱区冰川变化及其径流效应研究(J). 中国科学(D辑), 1999, 1: 55-62. (LIU Chaohai, KANG Ersi, LIU Shiyin, et al. Glacier change effects and runoff in the arid area of northwest China (J). Science in China (Series D: Earth Sciences), 1999, 1: 55-62.)
- (7) 康尔泗,程国栋,董增川. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流(M). 北京: 科学出版社, 2002. (KANG Ersi, CHEN Guodong, DONG Zengchuan. Glacier-snow water resources and mountain runoff in the arid area of northwest China (M). Beijing: Science Press, 2002.)
- (8) 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. (LU Anxin, YAO Tandong, LIU Shiyin, et al. Glacier change in Geladandong area of the Tibetan Plateau monitored by remote sensing (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(5): 559-562.)
- (9) 叶庆华,陈锋,姚檀栋,等. 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). 冰川冻土, 2007, 11(4): 511-520. (YE Qinghua, CHEN Feng, YAO Tandong, et al. 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.)
- (10) DYURGEROV M B, MEIER M F. Twentieth century climate change: evidence from small glaciers (J). Proceedings of the National Academy of Sciences, 2000, 97(4): 1406-1411.
- (11) OORLEMANS J, FORTUIN J P F. Sensitivity of glaciers and small ice caps to greenhouse warming (J). Science, 1992, 258: 115-117.
- (12) HAEBERLI W, HOELZLE M. Application of inventory data for estimating characteristics and regional climate change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps (J). Annals of Glaciology, 1995, 21: 206-212.
- (13) 施雅风. 2050年前气候变暖冰川萎缩对水资源影响情景预估(J). 冰川冻土, 2001, 23(4): 333-341. (SHI Yafeng. Estimation of the water resources affected by climatic warming and glacier shrinkage before 2050 in west China (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(4): 333-341.)
- (14) 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. (JIN Rui, CHE Tao, LI Xin, et al. Glacier variation in the Pumqu Basin derived from remote sensing data and GIS technique (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(3): 261-266.)
- (15) 李治国,姚檀栋. 国内外冰川变化对水资源影响研究进展(J). 自然资源学报, 2008, 23(1): 1-8. (LI Zhiguo, YAO Tandong. Progress in the research on the impact of glacial change on water resources (J). Journal of Natural Resources, 2008, 23(1): 1-8.)
- (16) 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. (LAN Yongchao, SHEN Yongping, WU Sufen, et al. Changes of the glaciers and the glacier water resources in the typical river basins on the north and south slopes of the Tianshan Mountains since 1960s (J). Journal of Arid Land Resources and Environment, 2007, 21(11): 1-8.)
- (17) 姚永慧,励惠国,张百平. 近30年来天山托木尔峰东侧分水岭处冰川变化(J). 干旱区地理, 2009, 32(6): 828-833. (YAO Yonghui, LI Huiguo, ZHANG Baiping. Glacier changes in the past 30 years at the eastwatershed of Mt Tomor (J). Arid Land Geography, 2009, 32(6): 828-833.)

- (18) 陈建明, 刘潮海, 金明燮. 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. (CHEN Jianming, LIU Chaohai, JIN Mingxie. Application of the repeated aerial photogrammetry to monitoring glacier variation in the drainage area of the Urumqi River (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(4): 331 - 336.)
- (19) 谢自楚, 刘潮海. 冰川学导论 (M). 上海: 上海科学普及出版社, 2009. (XIE Zichu, LIU Chaohai. Glaciology introduction (M). Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2009.)
- (20) ADINA E, YVES, MARK W, et al. Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing (J). Journal of Glaciology, 2008, 54(186): 499 - 511.
- (21) KHROMOVA T E, OSIPOVA G B, TSVETKOV D G, et al. Changes in glacier extent in the eastern Pamir, Central Asia, determined from historical data and ASTER imagery (J). Remote Sensing of Environment, 2006, 102: 24 - 32.
- (22) 王叶堂, 侯书贵, 鲁安新, 等. 近 40 年来天山东段冰川变化及其对气候的响应 (J). 干旱区地理, 2008, 31(6): 813 - 821. (WANG Yetang, HOU Shugui, LU Anxin, et al. Response of glacier variations in the eastern Tianshan Mountains to climate change during the last 40 years (J). Arid Land Geography, 2008, 31(6): 813 - 821.)
- (23) 王淑红. 阿尔泰山冰川系统结构特征及对气候变化的响应 (D). 湖南师范大学硕士学位论文, 2009. (WANG Shuhong. Glaciers system structure characteristics and the response to climate change in Altay Mountain (D). Hunan Normal University Master degree theses, 2009.)
- (24) 刘潮海, 尤根祥, 蒲健辰, 等. 中国冰川目录 ( II 阿尔泰山区) (R). 中国科学院兰州冰川冻土研究所编辑, 1982. (LIU Chaohai, YOU Genxiang, PU Jianchen, et al. Glacier inventory of China ( II Altay Mountain) (R). Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Academia Sinica, 1982.)
- (25) 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. (WANG Lilun, LIU Chaohai, KANG Xingcheng, et al. Fundamental features modern glaciers in the Altay Shan of China (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 1983, 5(4): 27 - 38.)
- (26) 蔡迪花, 马金辉, 年雁云, 等. 慕士塔格峰冰川变化遥感研究 (J). 兰州大学学报 (自然科学版), 2006, 2(1): 13 - 17. (CAI Dihua, MA Jinhui, NIAN Yanyun, et al. The study of glacier change using remote sensing in Mt. Muztagta (J). Journal of Lanzhou University, 2006, 42(1): 13 - 17.)
- (27) 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. (SHANGGUAN Donghui, LIU Shiyin, DING Yongjian, et al. Monitoring glacier changes and inventory of glacier in Muztag Ata - Kongur Tagh, East Pamir, China, using ASTER data (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 344 - 351.)
- (28) 高闻宇, 李忠勤, 李开明, 等. 基于遥感和 GIS 的库克苏河流域冰川变化研究 (J). 干旱区地理, 2011, 34(2): 252 - 261. (GAO Wenyu, LI Zhongqin, LI Kaiming, et al. Glacier variation in the Kukesu River Basin during 1963 - 2004 based on Remote Sensing Data and GIS Techniques (J). Arid Land Geography, 2011, 34(2): 252 - 261.)
- (29) 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. (WANG Puyu, LI Zhongqin, GAO Wenyu, et al. Glacier changes in the Heihe River Basin over the past 50 years in the context of climate change (J). Resources Science, 2011, 33(3): 399 - 407.)
- (30) 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.
- (31) 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.
- (32) YE Q H, KANG S C, CHEN F, 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.
- (33) 叶柏生, 丁永建, 刘潮海. 不同规模山谷冰川及其径流对气候变化的响应过程 (J). 冰川冻土, 2001, 23(2): 103 - 110. (YE Baisheng, DING Yongjian, LIU Chaohai. Response of valley glaciers in various size and their runoff to climate change (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(2): 103 - 110.)
- (34) 姚玉璧, 肖国举, 王润元, 等. 近 50 年来西北半干旱区气候变化特征 (J). 干旱区地理, 2009, 32(2): 159 - 165. (YAO Yubi, XIAO Guojia, WANG Runyuan, et al. Climatic changes of semi-arid region over the northwest China in recent 50a (J). Arid Land Geography, 2009, 32(2): 159 - 165.)
- (35) 董山, 徐建华, 陈亚宁, 等. 塔里木盆地年平均气温的分形特征研究 (J). 干旱区地理, 2009, 32(1): 17 - 22. (DONG Shan, XU Jianhua, CHEN Yaning, et al. Fractal characteristics of annual mean temperature of the Tarim Basin (J). Arid Land Geography, 2009, 32(1): 17 - 22.)
- (36) 马丽娟, 赵景峰, 张宏俊, 等. 气候变化背景下冰川积雪融水对博斯腾湖水位变化的影响 (J). 干旱区地理, 2010, 33(2): 210 - 216. (MA Lijuan, ZHAO Jingfeng, ZHANG Hongjun, et al. Impact of melting of glacier and snow on Bosten Lake under climate change (J). Arid Land Geography, 2010, 33(2): 210 - 216.)
- (37) 王璞玉, 李忠勤, 曹敏, 等. 近 50a 来天山博格达峰地区四工河 4 号冰川表面高程变化特征 (J). 干旱区地理, 2011, 34(3): 464 - 470. (WANG Puyu, LI Zhongqin, CAO Min, et al. Ice surface - elevation changes of glacier No. 4 of Sigong River in Bogda, Tianshan Mountains, during the last 50 years (J). Arid Land Geography, 2011, 34(3): 464 - 470.)
- (38) XU J H, CHEN Y N, JI M H, et al. Climate change and effects on runoff of Kaidu River, Xinjiang, China: a multiple time-scale analysis (J). Chinese Geographical Science, 2008, 18(4): 331 - 339.
- (39) 秦大河, 丁一汇. 中国西部环境演变评估, 第二卷 (M). 北京: 科学出版社, 2002: 67. (QIN Dahe, DING Yihui. Assessment on environmental change in western China, Vol. 2 (M). Beijing: Science Press, 2002: 67.)
- (40) JOE T K, SANDEEP C R. An overview of glaciers glacier retreat, and subsequent impacts in Nepal, India and China (J). WWF Nepal Program Report, 2005: 1 - 70.

- (41) 苏珍,刘宗香,王文梯,等. 青藏高原冰川对气候变化的响应及趋势预测 (J). 地球科学进展, 1999, 16(2): 607 - 612. (SU Zhen, LIU Zongxiang, WANG Wenti, et al. Glacier fluctuations responding to climate change and forecast of its tendency over the Qinghai - Tibet Plateau (J). Advance in Earth Sciences, 1999, 16(2): 607 - 612. )
- (42) 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. (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 (J). Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 855 - 862. )
- (43) 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. (LIU Shiyin, SHEN Yongping, SUN Wenxin, et al. Glacier variation since the maximum of the Little Ice Age in the western Qilian Mountains, Northwest China (J). Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(3): 227 - 233. )
- (44) 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. (LI Zhongqin, LI Kaiming, WANG Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, North Western China (J). Quaternary Sciences, 2010, 30(1): 96 - 106. )

## Glacier changes in Youyi Area in the Altay Mountains of Xinjiang during 1959 - 2008

BAI Jin-zhong<sup>1</sup>, LI Zhong-qin<sup>1,2</sup>, ZHANG Ming-jun<sup>1</sup>, GAO Wen-yu<sup>1</sup>, LI Kai-ming<sup>2</sup>

(1 College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, 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, Gansu, China)

**Abstract:** Research on glacier change has been limited in Chinese Altay Mountains among the border of China, Russia and Mongolia, despite the fact that the number of glaciers in the Altay Mountains is less among all mountain ranges in China, and the glaciers in this region provide very important water resources for local economic development and drinking water for man use. Most of the research on glaciers in China is in Tianshan Mountains, Qinghai - Tibet Plateau and Qilian Mountains, but not in Altay Mountains. During the past several decades, most glaciers are in a state of rapid retreating due to climate warming. The glaciers of Youyi in the Altay Mountains were selected as the study area. Based on 1:50 000 topographic maps in 1959, ASTER remote sensing data in 2008 and digital elevation model (DEM), the study area for glaciers was extracted by using the remote sensing image processing and analyzing method, and the changes of glaciers in the study area were analyzed under the support of the geographic information systems technology. The results indicate that the amplitude of the whole change of glaciers in the Youyi Area is large and glaciers in this area have retreated rapidly during the study period from 1959 to 2008. In the study period, the total area and number of the investigated glaciers (226) have reduced by 32.5% and 27.9%. At the same time, the results showed that glaciers average rate of change with area less than 1 km<sup>2</sup> is -66.7% and glaciers average rate of change with area less than 0.5 km<sup>2</sup> is -70%. Moreover, those glaciers with area from 1 to 5 km<sup>2</sup> have reduced by 27.9%. The paper analyzed the reasons of the large change rate of glaciers, and the results indicate that the large change rate of glaciers is caused by the large proportion of small glaciers, whose glaciers smaller than 1 km<sup>2</sup> account for nearly 75% in the investigated glaciers. Moreover, the results show that the larger the glaciers are, the higher the amplitude of the ablation is, but the reduced rate is lower. And those glaciers have the highest degree of response to climate change. The glaciers retreated by 253 m at a rate of 18.3%. The glacier changes exhibited obvious spatial differences, indicating that the reduction rate of glaciers to the south slope of the Youyi Area was larger than that of the north.

**Key Words:** Youyi area; remote sensing; geographic information system; glacier change