

文章编号: 1673-1719 (2007) 03-0132-06

# 天山乌鲁木齐河源1号冰川消融对气候变化的响应

李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 李慧林, 董志文, 王文彬, 王林

(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)

**摘要:** 目前气候变暖导致的冰川退缩, 引起了全世界的广泛关注。以新疆天山乌鲁木齐河源1号冰川为例, 根据1958年以来的观测资料, 研究了冰川消融对气候变化的响应。结果表明, 近50 a来冰川在表面粒雪特征、成冰带、冰川温度、面积、厚度及末端位置等方面发生了显著变化, 而这些变化均与气温的升高有着密切的联系; 20世纪80年代以来的快速升温, 使冰川的退缩出现了加速趋势, 冰川融水径流量也呈加速增大趋势。

**关键词:** 冰川消融; 气候变暖; 天山; 乌鲁木齐河源1号冰川

**中图分类号:** P343.6/P467 **文献标识码:** A

## 引言

随着气候变暖, 冰川对温度变化的响应最为敏感, 全球覆盖的冰川消融越来越多, 到20世纪90年代全球冰川呈现出加速融化的趋势<sup>[1]</sup>。冰川的消融会影响到全球气候, 使海面上升, 引发区域淹没、冰雪灾害、冰川洪水等自然灾害, 这些都威胁着人类居住的环境安全, 并可能改变着许多动植物种群的习性和生境。地球上冰覆盖区的消失将会使全球气候产生重大改变, 冰覆盖, 特别是极地冰盖区, 会将大量的太阳能反射回太空, 这将有助于使我们人类居住的星球保持冷却。然而, 当冰融化后, 陆地和水面就会暴露出来, 使热量保留下来, 从而导致冰体融化得更多, 产生的反馈连锁反应, 会加速增温过程的进程。因此, 联合国环境署把2007年6月5日的世界环境日主题确定为“冰川消融, 后果堪忧”。IPCC第二工作组第四次评估报告指出<sup>[2]</sup>, 气候变化的影响已经非常明显, 包括以下一些例

子: 北极冰帽的缩小; 海平面的加速升高; 全球冰川的后退; 多年冻土的融化; 河流湖泊冰层的提早融化; 热带风暴强度的增加以及持续时间的延长; 中高纬度农作物生长季节的延长; 动植物分布区域和行为的改变。冰川的加速退缩在中国亦十分显著<sup>[3-4]</sup>, 尤其在西北部, 表现为冰川融水径流剧增, 冰川面积缩小, 末端后退, 雪线升高, 许多小冰川已接近消亡的边缘。冰川在我国西北干旱区被誉为固体水库, 绿洲的摇篮, 是维持生产、生活的主要水资源之一。目前冰川的这些变化, 无疑会引起人们的普遍关注和忧虑。

冰川动态监测是全球变化研究的重要内容之一, 由设在瑞士苏黎世的世界冰川监测服务处(WGMS)组织、协调的冰川监测网络, 定期对全球冰川的变化做出评估, 而中国天山乌鲁木齐河源区的1号冰川(43°06'N, 86°49'E, 简称1号冰川)是这一网络中亚内陆地区的代表冰川。1号冰川, 地处亚洲中部, 是中国监测时间最长, 资料最为详尽、系统

收稿日期: 2007-04-27; 修订日期: 2007-05-05

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-127); 国家自然科学基金项目(40631001; 40571033; 40371028; J0630966); 中国沙漠气象科学研究基金项目(sqj2005002)资助

作者简介: 李忠勤(1962-), 男, 研究员, 主要从事冰川与环境方面的研究。E-mail: lizq@lzb.ac.cn

的冰川，也是中国唯一依托于专门的冰川站来进行观测、试验和研究的冰川，最早的观测始于1958年，主要包括冰川、水文和气象观测等。许多学者在不同时期对各种观测资料进行过分析总结<sup>[5-7]</sup>，本文重点研究冰川消融对目前气候变暖的响应。

## 1 观测资料与河源区气候变化

### 1.1 观测资料序列

研究使用的资料为天山冰川站长期观测资料，包括冰川区气象、冰川粒雪特征、冰川温度、冰川物质平衡、冰川水文、冰川末端位置、冰川面积和冰川厚度等。气象观测资料取自于1958—2004年河源区的3个水文站、大西沟气象站及后峡基本站。

### 1.2 河源区气候变化

冰川变化的驱动因素是冰川区水热条件，冰川消融与冰川区气温的变化幅度有密切关系。根据河源区气象站（点）的观测资料，这一地区的气温自1985年以来呈总体上升趋势，1995年以后升温更为明显。1997年至今的升温最甚，平均气温增加了1℃左右。大西沟气象站资料显示，在1958—2004年的47 a间，年均气温升高了0.8℃（0.017℃/a），其中以冬季和秋季的升温最为明显。

积温是影响冰川消融的主要因素，由于气候积温代表的是冰川消融期温度 $T \geq 0^\circ\text{C}$ 的积温，所以气候积温与冰川消融区面积的关系密切，有较好的负相关性。根据王国亚等<sup>[8]</sup>的研究，1960—2004年间乌鲁木齐河源区的年积温上升了133℃·d，积温的变化趋势与气温的变化趋势是一致的，从20世纪80年代中后期开始明显上升，从那以后气候变暖呈加强和加速发展趋势（图1）。

## 2 冰川基本特征的变化

### 2.1 冰川粒雪性质、成冰带变化

冰川表面粒雪特征和冰川成冰带对气候变化十分敏感，而气候变暖对冰川的消融起到强烈的加速作用。根据1961—2005年间1号冰川海拔4100 m以

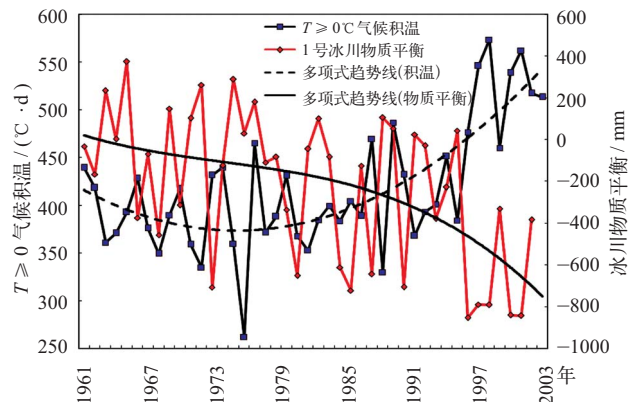


图1 1号冰川物质平衡与气候积温变化<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Mass balance of Glacier No.1 and the climate accumulated temperature change at headwater of Urumqi River<sup>[8]</sup>

上的60个雪坑剖面资料的统计分析表明，45 a来粒雪组成发生了显著的变化，雪坑中粗粒雪的含量从最初的40%增加到65%，细粒雪的含量从最初的25%减少到7%。粗粒雪的增加表明雪层受融水改造作用加强，粒雪化过程加快。与20世纪60和80年代相比，目前雪层剖面的组成和结构已发生了明显的变化，表现在雪层厚度减薄，结构变简单，各种粒雪层的边界变模糊；在强烈融水作用下，积累区雪层内的冰片数量减少，污化层的迁移叠加作用增强。

谢自楚等<sup>[9]</sup>在1962年将1号冰川的成冰带自下而上分为消融带、渗浸—冻结带、渗浸带和冷渗浸—重结晶带4个带。1988年王晓军等<sup>[10]</sup>、刘潮海<sup>[11]</sup>等发现，由于气候变暖，冰川上部的冷渗浸—重结晶带特征消失，被渗浸带所取代。从2002年至今，1号冰川的成冰带谱呈现由“冷”向“暖”转化的趋势，表现为消融区面积持续扩大，各带间的界限上移，雪层剖面特征趋于简化<sup>[12-15]</sup>，尤其是2004年在1号冰川东支顶部海拔4250 m处发现一个小冰面湖，表明冰川的消融有从两端进行的迹象<sup>[16]</sup>。

粒雪特征和成冰带上述变化的一个直接结果，就是造成冰川表面雪层中的新雪组分减少，杂质含量升高，从而引起雪面反照率的减弱，接收太阳辐射的能力增强，导致冰川消融加速。

### 2.2 冰川温度升高

冰川温度，尤其是活动层以下的温度决定了冰

川的许多基本物理性质。冰川温度的改变表明冰川内部冷储的变化,预示着冰川对气候响应敏感性的变化。对比1986、2001和2006年位于海拔3840 m的3个冰温剖面(图2)可见,该处冰川活动层深度大约为10 m,气温的季节变化对活动层以下冰温的影响很小。如果忽略活动层内变化,冰温在1986-2001年有显著的升高,其幅度随深度增加而衰减,在10 m左右最高,升幅约0.9℃(升高了10%),在22 m深处则变得不易辨别。与2001年相比,2006年的冰温又有了明显升高,在10 m深处的升幅约为0.4℃。冰温与气温之间保持着长期动态平衡,一般而言,冰川活动层下界的冰温与年均气温接近。因此,1号冰川温度的升高显然是气温不断上升的结果。

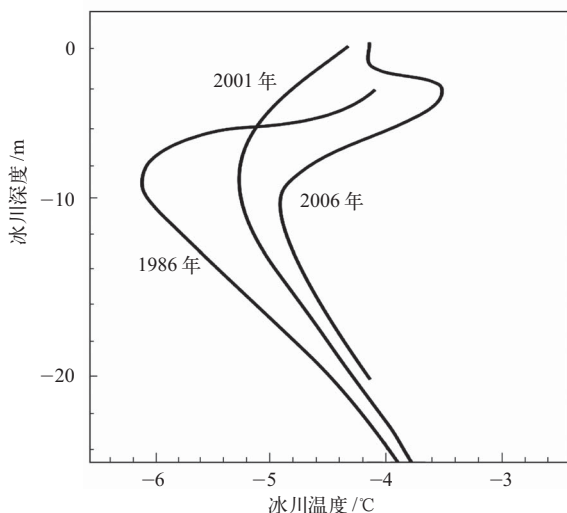


图2 1号冰川海拔3840 m处的冰温剖面比较

Fig. 2 Comparison of ice temperature profiles obtained in 1986, 2001 and 2006 at a site around 3840 m a.s.l. on Glacier No. 1 in Tianshan Mountain

### 2.3 冰川末端和冰川面积变化

在气候变暖背景下,冰川变化一般遵循后退、减薄的规律。冰川末端和面积的变化是冰川对气候短期和长期变化的综合响应。1号冰川自1959年有观测记录以来一直处于退缩状态,东、西两支冰舌在1993年完全分离,成为独立的两支冰川,期间共退缩139.72 m,平均每年退缩4.5 m。1993-2004年,东支年均退缩3.5 m,共计38.7 m;西支年均退缩5.8 m,共64.1 m。1962-2004年间冰川的后退率(后

退长度与冰川长度的比值)东支约为7.8%,西支约为10.5%。西支末端1999年和2000年的退缩量分别为6.92 m和6.95 m,创下历史最高纪录。这很可能是强烈消融所致,因为同期冰川末端的冰流速较为稳定,冰流补给大幅减少的可能性不大。随着冰川后退,冰川末端的海拔从1962年的3736 m上升到1980年的3746 m,2005年东支为3777 m,与1980年相比上升了31 m。

1号冰川面积在1962-2006年的45 a间减少了0.27 km<sup>2</sup> (14%),并呈加速减小趋势,其中1992-2006年间减少0.16 km<sup>2</sup>,相比1962-1992年减少的面积(0.12 km<sup>2</sup>)还多出0.04 km<sup>2</sup>。从1962-2006年面积变化中看出,冰川面积的减少在1986年以后出现了加速趋势。图3绘制了根据实测图所做的1号冰川退缩过程,图4的照片显示了不同时期冰川的形态。

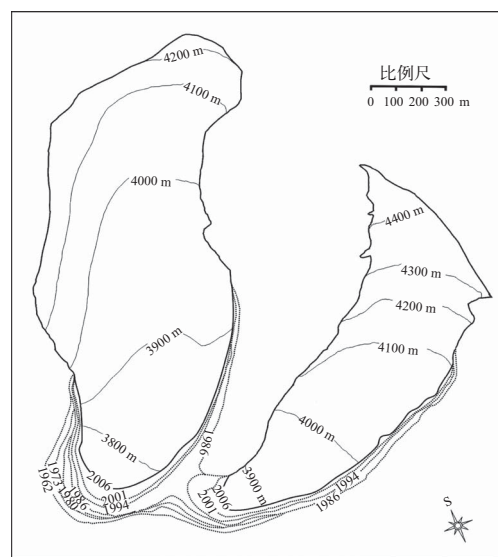


图3 1962-2006年1号冰川演变图(虚线表示1962, 1973, 1980, 1986, 1994和2001年的冰川边缘,实线表示2006年的冰川边缘)

Fig. 3 Morphological change of Glacier No. 1 with time (Dashed lines represent the glacial boundaries of 1962, 1973, 1980, 1986, 1994 and 2001, and solid line represents the glacial boundary of 2006)

## 3 冰川物质平衡与融水变化及其对气候变化的响应

### 3.1 物质平衡变化

与冰川的面积、厚度及末端变化不同,冰川物



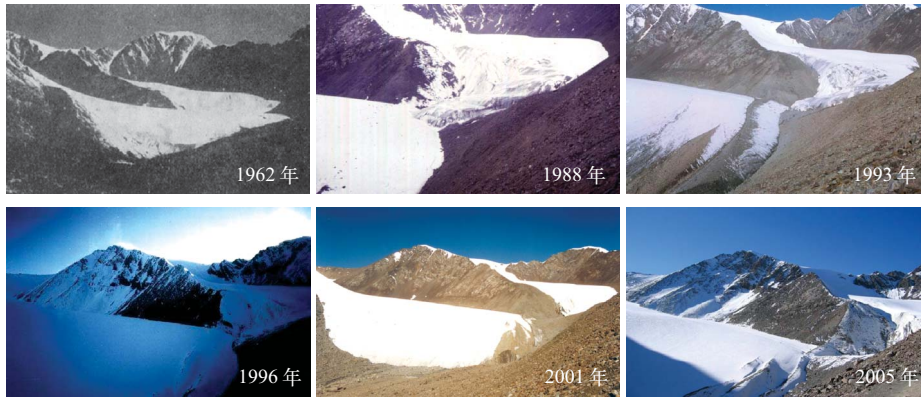


图 4 1 号冰川 1962、1988、1993、1996、2001 和 2005 年照片，显示其形态变化  
 Fig. 4 Photos of Glacier No. 1 in the years of 1962, 1988, 1993, 1996, 2001 and 2005, showing its morphological changes

质平衡变化是冰川对气候变化的直接反应。1 号冰川物质平衡的许多基本特征已在其他研究成果中有所揭示<sup>[5-6,17]</sup>，在此仅将主要观测结果做一简要概述。1 号冰川物质平衡无论是年度值还是累计值均有负增长趋势，物质损失严重。1958-2004 年的记录中，负平衡年 31 a，正平衡年 15 a。从 1997 年到现在，负物质平衡已经连续了 8 a，并仍在延续，这是前所未有的。1958-2004 年间年均冰川物质平衡为 -233.6 mm，累计达到 -10746.5 mm，表明此间 1 号冰川平均厚度减薄了近 12 m，损失体积达  $2062 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

### 3.2 物质平衡对温度上升和降水增加的响应

欧洲和北美中部的冰川在冬季获得物质积累，夏季损失物质，而与之不同的是 1 号冰川的积累和消融均发生在夏季，冬季少有降雪。前人的许多研究表明，1 号冰川物质平衡与降水呈正相关，与夏季（5-8 月）气温呈负相关。然而，目前的气候状况是温度和降水都有显著升高，冰川物质平衡对此有不同的响应。图 5 显示了 1959-2004 年物质平衡、夏季气温、年均气温和降水量变化曲线，可以看出，1960-1986 年间物质平衡与温度呈微弱负相关，而与降水有明显的正相关关系 ( $R^2 = 0.51, N = 27, P < 0.01$ )，表明此间物质平衡由温度和降水共同决定，但起主要作用的是降水。这一时期，年均温度和降水量分别为  $-5.4 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $425.8 \text{ mm}$ 。然而，自 1986 年以来，这种耦合关系发生了变化，物质平衡显示出与温度的负相关，而与降水的相关性不大，表明

此间物质平衡主要由气温控制。这一时期，年均温度和降水分别上升到  $-4.9 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $491.6 \text{ mm}$ 。以上分析结果表明，物质平衡通常由温度和降水共同决定，但当温度升高到一定程度后，尽管降水量很大，物质平衡仍然主要受气温控制。

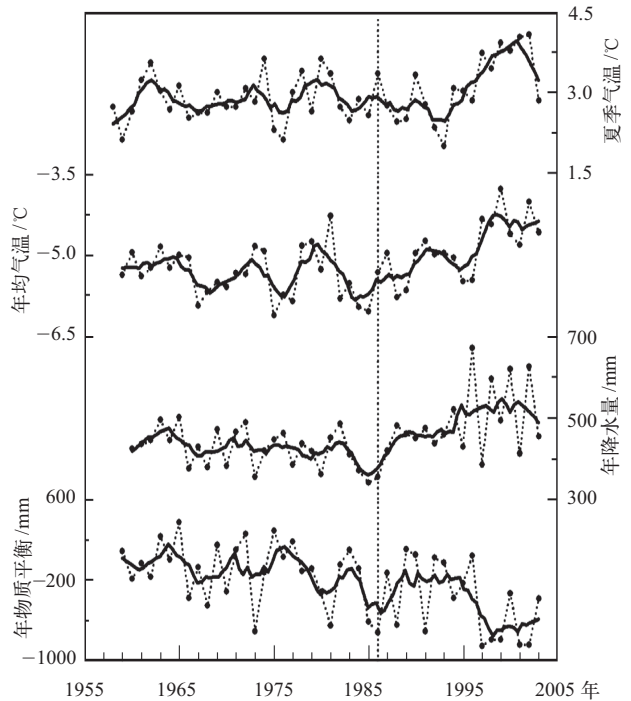


图 5 1 号冰川年物质平衡、大西沟气象站夏季气温、年均气温和年降水量变化

Fig. 5 Annual mass balance of Glacier No. 1 against summer temperature (May-August), annual temperature and precipitation at Daxigou Meteorological Station (The annual values are smoothed by negative exponential smoother with sampling proportion 0.1 and polynomial degree 1)

### 3.3 冰川融水的变化

冰川融水径流量变化是冰川对气候变化响应的重要综合性指标。李忠勤等<sup>[4]</sup>利用水量平衡法计算和分析了1号冰川1958—2001年融水径流量,根据气候变化的不同阶段,1958—1985年1号冰川平均融水径流深为508.4 mm/a,而1986—2001年则为936.6 mm/a,较前期增加84.2%。由此可见,20世纪80年代以来的快速升温,促使冰川融水径流量迅速增大(图6)。

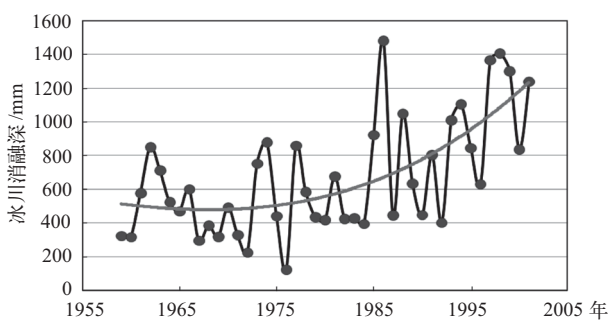


图6 1号冰川融水径流深逐年变化

Fig. 6 Changes in annual meltwater runoff depth of Glacier No. 1

## 4 结论

以新疆天山乌鲁木齐河源1号冰川为例,利用近50 a的观测资料,研究了冰川消融对气候变化的响应,得到以下结论:

(1) 自20世纪60年代以来,1号冰川粒雪特征已发生明显变化,表现在雪层厚度减薄,结构变简单,各种粒雪的边界变模糊。冰川消融区持续扩大,各成冰带之间的界限上移,东支顶部局部已具备了消融区特征。

(2) 1号冰川面积在1962—2006年间减少了0.27 km<sup>2</sup> (14%),并呈加速减小趋势。在海拔3840 m附近,10 m深处冰温在1986—2001年间升高了0.9℃,在2001—2006年间升高了约0.4℃。

(3) 1958—2004年,年均物质平衡是-233.6 mm,累积物质平衡量增至-10746.5 mm,表明1号冰川平均厚度已变薄了12 m,损失的体积为2062 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。1号冰川物质平衡在1986年之前由气温和降水共同决定,且以降水为主,但自1986年之后发生了转变,

主要受气温控制。 ■

**致谢:** 本文所用资料来自天山冰川站的长期观测,是不同时期天山冰川站人员努力的结果,在此表示衷心的感谢和敬意。近期冰川面积的测绘由井哲帆、周在明完成,某些照片由杨惠安、焦克勤提供,在此一并感谢。

### 参考文献

- [1] 沈永平, 梁红. 全球冰川消融加剧使人类环境面临威胁 [J]. 冰川冻土, 2001, 24(2): 208-211
- [2] IPCC. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 2007 (in press)
- [3] 姚檀栋, 刘时银, 蒲建辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响 [J]. 中国科学 (D辑), 2004, 34(6): 535-543
- [4] 李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和1号冰川40 a观测事实 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 117-123
- [5] Jing Z F, Jiao K Q, Yao T D, *et al.* Mass balance and recession of Ürtümqi Glacier No. 1, Tianshan, China over the last 45 years [J]. Annals of Glaciology, 2006, 43: 214-217
- [6] Han T D, Ding Y J, Ye B S, *et al.* Mass-balance characteristics of Ürtümqi Glacier No. 1, Tianshan, China [J]. Annals of Glaciology, 2006, 43: 323-328
- [7] Ye B S, Yang D Q, Jiao K Q, *et al.* The Ürtümqi River source Ürtümqi Glacier No. 1, Tianshan, China: changes over the past 45 years [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32, L21504, doi:10.1029/2005GL024178
- [8] 王国亚, 沈永平, 毛炜峰. 乌鲁木齐河源区44 a来气候变暖特征及其对冰川的影响 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 813-819
- [9] 谢自楚, 黄茂恒. 天山乌鲁木齐河源1号冰川雪-粒雪层的演变及成冰作用 [C]// 天山乌鲁木齐河源冰川与水文研究. 北京: 科学出版社, 1965: 1-14
- [10] 王晓军, 王仲祥, 谢自楚. 从乌鲁木齐河源1号冰川28 a来的变化看天山地区近期气候变化趋势 [J]. 科学通报, 1988, 9: 693-696
- [11] 刘潮海, 谢自楚, 王纯足. 天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡研究 [J]. 冰川冻土, 1997, 19(1): 17-24
- [12] 李传金, 李忠勤, 尤晓妮, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川不同时期雪层剖面、成冰带特征及成冰年限对比 [J]. 冰川冻土, 2007,

- 29: 169–175
- [13] 王飞腾, 李忠勤, 尤晓妮, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川积累区表面雪层演化成冰过程的观测研究 [J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 45–53
- [14] 尤晓妮, 李忠勤, 王飞腾. 利用雪层层位跟踪法研究暖型成冰作用的年限问题—以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(6): 853–860
- [15] 李向应, 李忠勤, 尤晓妮, 等. 近期乌鲁木齐河源 1 号冰川成冰带及雪层剖面特征研究 [J]. 冰川冻土, 2006, 28(1): 36–44
- [16] 李忠勤. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川东支顶部出现冰面湖 [J]. 冰川冻土, 2005, 27(1): 150–153
- [17] 杨惠安, 李忠勤, 叶柏生, 等. 过去 44 年乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡结果及其过程研究 [J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 76–80

## Response of Melting Ice to Climate Change in the Glacier No. 1 at the Headwaters of Ürümqi River, Tianshan Mountain

Li Zhongqin, Shen Yongping, Wang Feiteng, Li Huilin,  
Dong Zhiwen, Wang Wenbin, Wang Lin

(State Key Laboratory of Cryospheric Science/ Tianshan Glaciological Station,  
Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute,  
Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** Current glacier recession under climate warming has drawn widely attention around the world. Initiated from 1958, the observations of Ürümqi Glacier No. 1 at the headwaters of Ürümqi River in eastern Tianshan promise the best datasets of glacier and climate changes in China. Taking Ürümqi Glacier No. 1 as an example, this paper has analyzed the response of the glacier to the climate change. The results show that during the past 50 years, remarkable changes occurred on the glacier, including snow-firn stratigraphy, glacial zone, glacial temperature (borehole temperature), glacier area, and glacier terminus position etc. These changes are found to be closely related to temperature rise in this area. The glacier retreat appeared throughout the entire observed time period and has shown an accelerated tendency during the last 20 years, particularly after 1995. In addition to summer temperature increase, other two reasons may also be responsible for the acceleration of glacier melting: one is the glacial temperature rise, which reduced the cold reserve in the glacier and thus increased the sensitivity of the glacier to air temperature rise; the other is the decrease of albedo on the glacier surface, which evidently enhanced absorption of radiation.

**Key words:** glacier melting; climate warming; Tianshan Mountain; Ürümqi Glacier No. 1