

近40年来托木尔峰南坡三条监测冰川对气候变暖的响应^{*}

李开明¹, 李忠勤², 李明涛¹, 怀保娟²

(1. 兰州城市学院地理与城乡规划学院, 兰州 730070; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 兰州 730000)

提 要: 托木尔峰地区是中国现代冰川最大的作用中心之一。近四十年来, 冰川消融加剧, 退缩趋势明显, 冰川融水径流增加。对托木尔峰南坡三条不同规模冰川的研究表明, 面积减小厚度减薄是该区域冰川变化的主要趋势。受表碛覆盖影响, 厚度减薄趋势显著, 但末端退缩幅度差异很大。基于遥感监测资料以及实地考察数据, 三条冰川自1964年以来面积分别减小了21.4%、15.8%和0.3%, 末端平均退缩速率分别为 $41\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $30\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $1.5\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。大冰川大幅退缩对该区域水资源的短期和长期影响作用不容忽视。地形及表碛是影响冰川差异化消融的重要因子, 温度升高是造成冰川退缩的重要驱动因素。

关键词: 冰川变化; 托木尔峰; 天山; 遥感; 水资源

中图分类号: P343.6

文献标识码: A

冰川是气候的产物, 是寒旱区非常重要的水资源形式。在全球变暖的趋势下, 冰川普遍呈现退缩趋势^[1-3], 并影响到下游河川径流的变化。在我国西北干旱区, 冰川融水对下游人类的生产生活具有非常重要的作用, 在天山南坡部分区域的冰川融水径流对河川径流的贡献可达60%以上, 对冰川资源的监测研究不容忽视。由于冰川覆盖度、冰川规模等差异, 冰川对河流径流的影响与调节作用存在差异^[4], 但冰川持续萎缩对区域未来发展的影响, 以及由此引发的自然灾害等越来越受到关注^[5-7]。

天山托木尔峰地区是我国最大的现代冰川作用区之一。20世纪70年代末期, 中国科学院登山科学考察队曾对该区域进行了大气、冰川、地质、生物等方面的短期考察, 获取了相关数据。而在过去50多年间, 新疆气温总体上升趋势显著^[8], 天山冰川退缩强烈^[7], 造成天山南坡径流显著增加^[9]。随着社会发展对水资源需求的增大, 以及人们对高山区冰川水资源认识的进一步深入, 冰川资源的重要性日益凸现。因此, 加强托木尔峰区冰川变化动态监测, 进一步认识冰川变化机理及与区域环境的关系, 有利于了解区域水资源状况及未来利用, 防范极端天气可能造成的洪涝等突发性灾害。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

哈尔克他乌山是天山最高的山地, 其最高峰为托木尔峰(7435m)。该山脉南坡坡翼长于北坡, 是南坡冰川发育的地形条件, 冰川数量和规模优于北坡。南坡共发育冰川987条, 面积 $3\,387.63\text{km}^2$, 储量 636.96km^3 , 分别占该区冰川条数、面积和储量的36.7%、72.5%和88.7%, 是天山山区冰川数量最多, 规模最大的冰川分布区。天山山区大于 100km^2 的6条冰川全部发育在该山脉。发源于天山南脉和哈尔克他乌山的阿克苏河, 全长532km, 是输入塔里木河的四条河流(阿克苏河、和田河、叶尔羌河和开都-孔雀河)中唯一保持常年输水的河流。近些年伴随气候变暖, 径流增加十分明显, 冰川融水组分占径流总量的比例高达47%, 山区来水量增加了约31.2%^[10], 对河流水量稳定起到重要作用。

自2008年以来持续对该流域的托木尔冰川、青冰滩72号冰川、青冰滩74号冰川(表1)进行了实地考察与监测。三条冰川主要朝向均为南, 且不同程度覆盖有表碛。三条冰川规模差别很大, 表面及形态特征各异。托木尔冰川末端与青冰滩72号冰川(简称72号冰川)末端相距7km, 而72号冰川与其东面相

^{*} 收稿日期: 2016-11-26; 修回日期: 2017-2-21。

基金项目: 国家自然科学基金(41661014), 兰州城市学院博士科研启动基金(LZCU-BS2013-06)资助。

作者简介: 李开明(1974-), 男, 甘肃民勤人, 博士, 副教授, 主要从事冰川变化及寒旱区水资源研究。Email: lkm_wd@126.com

邻的青冰滩 74 号冰川(简称 74 号冰川)相距仅 2.8km。由于青冰滩 73、75 号冰川位于 74 号冰川上部的山脊上,其最终补给到 74 号冰川,因此,也可将其看作是同一条冰川进行研究。

表 1 研究冰川基本信息^[11]

Table 1 The basic information of investigated glaciers

冰川名称	位置	最高海拔(m)	末端海拔(m)	面积(km ²)	长度(km)	朝向
托木尔冰川(5Y673P37)	N41°55.17', E80°00.20'	7434	2689	311.04	37.36	SE
青冰滩 72 号冰川(5Y673P72)	N41°45.51', E79°54.43'	5986	3560	7.27	7.98	SW
青冰滩 73 号冰川(5Y673P73)	N41°46.90', E79°55.95'	5986	4780	1.66	0.86	SE
青冰滩 74 号冰川(5Y673P74)	N41°44.64', E80°56.61'	5600	3680	8.28	8.18	S
青冰滩 75 号冰川(5Y673P75)	N41°48.96', E79°57.25'	5100	4380	1.25	2.50	S

1.2 数据资料及方法

借助 1964 年地形图、2003 年的 SPOT5 遥感影像资料,提取冰川两期参数。遥感影像依据 1964 年比例为 1:50 000 的地形图几何精校正,并经过 GPS 实地测量的地面控制点正交化处理,使均方根误差在 x、y 方向均控制在 0.5 个象元以内。利用数字高程模型(DEM)对数字遥感影像进行地形纠正处理,消除太阳入射角和高度角变化对冰川分类精度的影响,增强表碛解译的准确性。

冰川测厚资料由加拿大 SSI (Sensors & software Inc) 公司生产的新一代 pulse EKKO PRO 100A 增强

型探地雷达测量得到。托木尔冰川表碛覆盖严重,测线布设困难,只能依地势而行。青冰滩 72 号冰川和 74 号冰川形态相似,两侧冰体有表碛覆盖,冰舌上呈现波浪状的微地貌特征,同时有大量的冰裂隙,因此中流线厚度测量沿相对平坦安全的路线进行。三条冰川测线如图 1 所示。

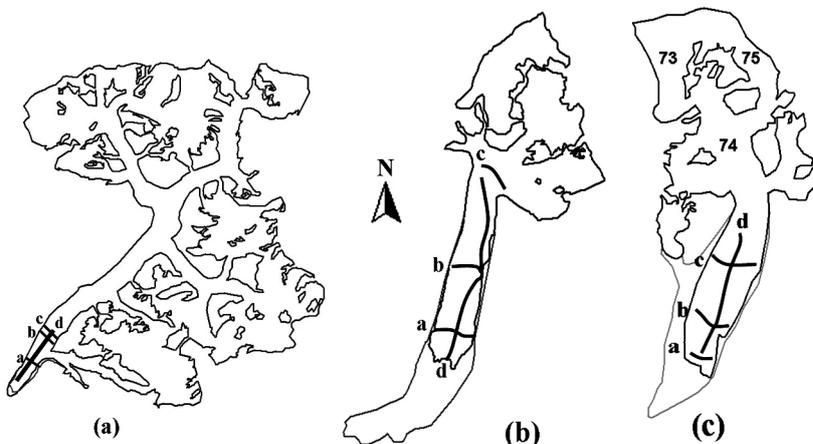


图 1 冰川轮廓及测厚线示意图

(a) 托木尔冰川; (b) 青冰滩 72 号冰川; (c) 青冰滩 73 - 75 号冰川。

Figure 1 The outline and the line of depth measurement of observed glaciers:

(a) Tumour glacier; (b) Qinbingtan glacier No. 72; (c) Qinbingtan glacier No. 74.

2 结果与分析

2.1 末端变化

冰川末端变化是研究冰川变化最直观的证据。结果表明,三条冰川末端均呈退缩状态(图 2)。托木尔冰川长度为 37.36km,在 1964 - 2009 年间共退缩 137m,平均退缩速率为 3.0m · a⁻¹。其中 1964 - 1978 年末端退缩 23m^[12],年退缩速率约为 1.5m · a⁻¹;在 1964 - 2003 年间和 2003 - 2009 年间年退缩速率分别为 2.9m · a⁻¹和 3.5m · a⁻¹。74 号冰川全长 8.18km,在 1964 - 2009 年间共退缩 1378m,平均退缩速率为 30.0m · a⁻¹,其中 1964 - 2003 年间和 2003 - 2009 年间年退缩速率分别为 29.2m · a⁻¹和 35.0m · a⁻¹。72 号冰川长度为 7.98km,在 1964 - 2009 年间退缩 1852m,年平均退缩速率为 41m · a⁻¹,其中 1964 - 2003 年间和 2003 - 2009 年间年退缩速率分别为 40.1m · a⁻¹和 48.0m · a⁻¹^[13,14]。

2.2 厚度变化

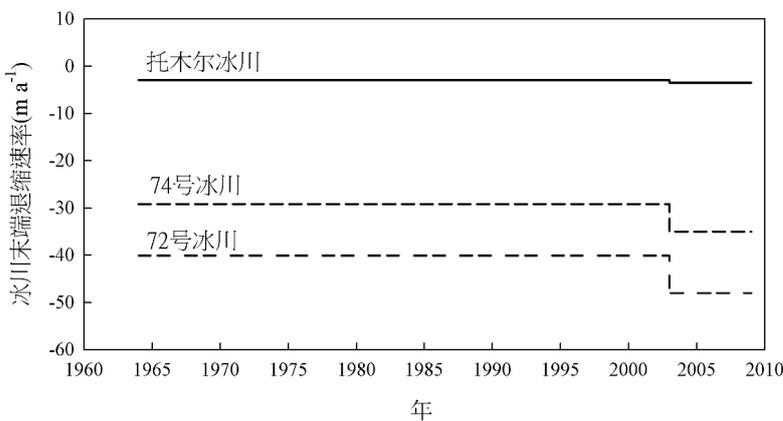


图 2 青冰滩 72 号、74 号、托木尔冰川末端退缩速率

Figure 2 Terminus retreat rates of glacier No. 72, 74 and Tomur

托木尔冰川三条测线分别在海拔高度大约为 2980m、3100m、3115m 处,平均厚度随海拔高度上升而增加,平均厚度在 30m 以上,最大部分达到 68.2m。从冰川末端出现的冰面湖可以判知其厚度减薄相当可观。估算冰川平均减薄量为 22.35m,年均减薄 $0.60\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[15]。72 号冰川 a 测线平均厚度 32.5m,在粒雪盆下 4200m 处 c 测线厚度平均为 97.1m,最大厚度达到 135.4m。1964 - 2008 年间冰川厚度减薄约为 $0.22 \pm 0.14\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[16]。74 号冰川在海拔 3885m 横测线 a 处冰川末端平均厚度达到 64.6m,在海拔 4020m 横测线 b 处平均厚度为 49m,最大厚度 74.6m。在高度为 4185m 横测线 c 处最大厚度达到 175m,平均厚度 109m。对主流线厚度测量表明最大厚度在海拔 4210m 处,达到 217.8m。

表 2 冰川厚度资料对比

Table 2 Thickness of investigated glaciers

冰川名称	测线及位置	测线高程 (m)	最大厚度 (m)	平均厚度 (m)
托木尔冰川	a,冰舌末端	2980	62.5	31.6
	b,冰舌末端	3100	68.2	34.2
	c,冰舌末端	3115	65.6	42.0
	d,中流线	2981 ~ 3092	58.7	40
青冰滩 72 号冰川	a,冰舌末端	3815	46.6	32.5
	b,冰舌中部	4015	31.8	25.7
	c,冰舌上部	4160	135.4	97.1
	d,中流线	3870 ~ 4151	103.1	37.4
青冰滩 74 号冰川	a,冰舌末端	3885	73.9	64.6
	b,冰舌中下部	4020	74.6	49
	c,冰舌中上部	4185	175.1	109
	d,中流线	3925 ~ 4213	217.8	147.2

2.3 面积变化

三条冰川面积均在缩减,但减少幅度差异很大(图 3)。托木尔冰川在 1964 - 2009 年间面积减少了 0.95km^2 (-0.3%),平均年减少速率为 $0.02\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。74 号冰川面积为 9.55km^2 ,在 1964 - 2009 年间面积减小了 1.51km^2 (-15.8%),平均年减少速率为 $0.33\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。72 号冰川面积为 7.27km^2 ,在 1964 - 2009 年间面积减小了 1.51km^2 (-21.4%),平均年减少速率为 $0.34\text{km}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ 。从相对变化看,72 号冰川退缩幅度略大于 74 号冰川,而托木尔冰川的相对变化仅为 -0.3%。单从面积变化看,托木尔冰川基本处于稳定不变的状态,而 72 号冰川面积萎缩较为强烈。

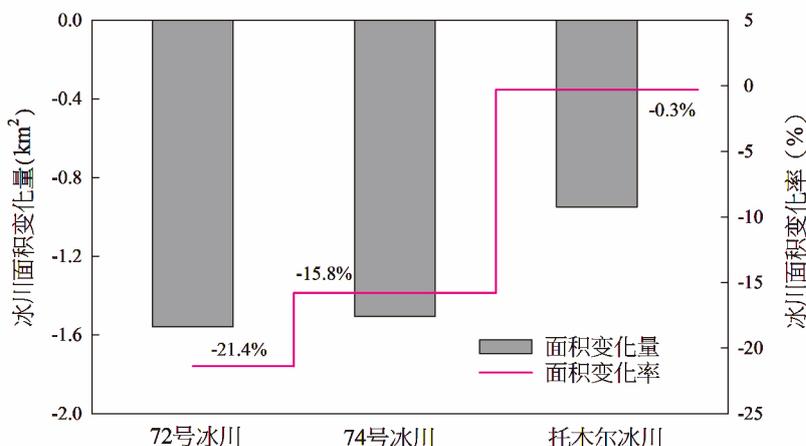


图 3 青冰滩 72 号、74 号、托木尔冰川面积变化量及变化率
Figure 3 Area changes of glacier No. 72, 74 and Tomur

3 讨论

3.1 表碛是影响冰川差异化消融的重要因素

托木尔峰地区冰川重要特征之一是表碛覆盖严重。其中 72 号冰川表碛主要分布在冰舌两侧,而中间部分冰面相对洁净,表碛对冰川消融影响表现为:一是消融期冰舌中间部分径流场发育,表面径流冲蚀使表面形成沟槽状;二是两侧表碛覆盖高于中间无表碛部分,表面减薄主要发生在冰舌末端,形成 1 - 20m 高差。短期物质平衡观测表明,夏季消融期冰面消融非常剧烈,在海拔 3950m 处日均消融量达 $10.12\text{mm} \cdot \text{w} \cdot \text{e}^{-1}$ ^[17]。托木尔冰川冰舌基本被厚厚的表碛所覆盖,末端很难判断。根据两侧水流交汇处以及终碛位置,最终将末端定位于海拔 2689m 处。厚重的覆盖物改变了冰川冰的消融模式。众多研究表明,冰川覆盖物对冰川消融具有非常重要的影响^[18]。较薄的表碛会降低反照率,增加消融,而当表碛覆盖厚度达到

临界值 3cm 时,则表现为对其下部冰体的保护,抑制冰川消融^[19]。随着表碛厚度的增加,冰面消融会急剧的减弱,当厚度达到 1.5–2m 时,冰的消融几乎停止了^[20]。此外,表碛厚度临界值因不同岩石和天气条件不同而有所变化。托木尔峰南坡的科其喀尔巴西冰川,在消融区表面覆盖了一层厚度介于 0–200cm 的灰色表碛,在表碛覆盖小于 3cm 时冰川消融最为强烈^[21]。

3.2 地形是影响冰川变化差异的内在因素

青冰滩 72 号冰川属于复式山谷冰川,其补给主要靠粒雪盆动力作用以及上部的冰崩和雪崩补给。上部积雪夹杂大块石头从上部沿雪槽滚落而下,最终形成冰碛物。呈环状的山脉将冰川包围形成朝南的盆状谷地,具有热汇作用,使冰舌上部消融也非常强烈。在冰川表面径流侵蚀作用与冰川运动拉伸作用下,冰舌部分波浪状的微地貌及冰裂隙颇为发育,波谷与波峰的落差甚至达到 7–8m。74 号的冰舌也呈狭长型,规模与形态与 72 号冰川相似,但 74 号冰川补给主要来源于粒雪盆的动力作用及其上部的 73 号和 75 号冰川(图 1c)。托木尔冰川积累区呈树枝状分布,非常复杂。广阔的积累区及其海拔高度优势(2780–7434m),成为冰川发育的重要条件。

由于三条冰川受地形等因素的影响,其面积缩小的部位主要发生在末端及冰舌两侧。其中 72 和 74 号冰舌处在山谷中,冰川末端表碛影响有限,表碛主要分布于两侧,造成中间退缩幅度很大,两侧山坡上冰体消融或坍塌,呈现两侧和末端退缩。托木尔冰川末端全部被表碛覆盖,对冰体起到保护作用,其末端退缩不明显,面积减小微弱。冰川受地形及表碛的影响,三条冰川均发育成狭长型。无表碛覆盖和有表碛覆盖的冰川消融过程不同:无表碛覆盖的冰川表现为末端退缩,表面减薄;而有表碛覆盖的冰川末端退缩不明显,若表碛过厚,下面可能会形成死冰,冰舌发育为狭长型,末端海拔较低^[22]。

3.3 气温升高是冰川退缩动力因素

选择与研究区冰川相近的协和拉和阿克苏气象站的资料分析表明,在 20 世纪下半叶,气温出现明显

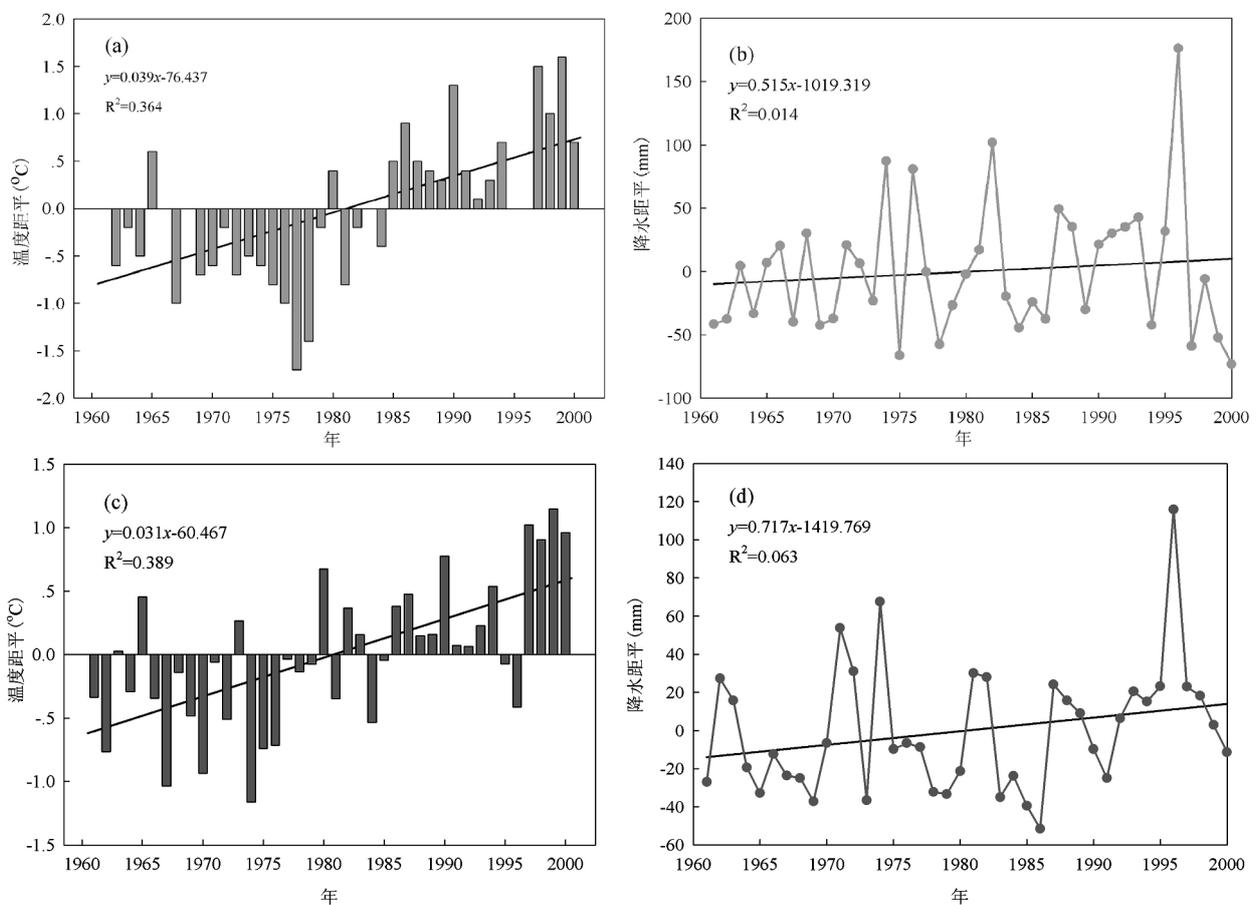


图 4 温度和降水的距平变化 (a) 协和拉站温度距平; (b) 协和拉站降水距平; (c) 阿克苏温度距平; (d) 阿克苏降水距平

Figure 4 Anomalies of temperature and precipitation (a) Anomaly of temperature at Xiehela station. (b) Anomaly of precipitation at Xiehela station. (c) Anomaly of temperature at Akesu station. (d) Anomaly of precipitation at Akesu station

的升温趋势,降水略有增加趋势(图4)。其中协和拉在20世纪90年代的气温比60年代升高了 1°C ,降水增加了 24.3mm ,相比60年代增加了 21% ;阿克苏站90年代温度比60年代增加了 0.8°C ,降水增加了 31.2mm ,增加了 31% 。尤其自80年代以后,升温幅度比较明显。降水在年际间的变化幅度比较大,但总体上呈现出增加趋势(图4)。这种变化趋势也与新疆总体变化趋势相一致^[23],是造成冰川退缩的动力因素。

4 结论

冰川退缩是山地冰川变化的普遍趋势。对托木尔峰地区三条不同规模冰川研究表明,冰川消融很强烈,尽管消融发生在冰川的不同部位,但总体趋势是面积缩小,厚度减薄。主要结论为:

(1) 在1964–2009年间,青冰滩72号、74号和托木尔冰川面积分别减小了 21.4% 、 15.8% 和 0.3% 。其末端退缩速率差别较大,分别为 $41\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $30\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $1.5\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ 。其中2003–2009年间的平均退缩速率略高于1964–2003年间。

(2) 74号冰川厚度总体要大于72号冰川,在主流线上74号最大厚度为 217.8m ,72号冰川为 103.3m ,约是72号的两倍。托木尔冰川在海拔 3200m 以下的最大厚度为 68m 。

(3) 表碛对冰川消融影响显著。表碛覆盖较厚时消融主要以厚度减薄为主;无表碛覆盖时,消融主要是以厚度减薄和面积萎缩两种方式为主。表碛覆盖是造成冰川消融差异化的重要因素。

(4) 地形和表碛是冰川表面形态差异化和消融过程差异的内在因素。

(5) 流域内温度升高趋势明显,降水也有一定程度的增加。温度升高是该区域冰川退缩的主要驱动因素。

参考文献

- [1] Dyurgerov, M. Mountain and subpolar glaciers show an increase in sensitivity to climate warming and intensification of the water cycle[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 282(1–4): 282: 164–176.
- [2] Zemp M. W, Hoelzle H M, Paul F. Alpine glaciers to disappear within decades? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(13): 1–4.
- [3] Oerlemans J H. Extracting a climate signal from 169 glacier records[J]. *Science*, 2005, 308: 675.
- [4] Li K M, Li Z Q, Wang L, Gao W Y. Recent glacial retreat and its effect on water resources in eastern Xinjiang[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(33): 3596–3604.
- [5] 刘时银,丁永建,张勇,上官冬辉,李晶,韩海东,王建,谢昌卫. 塔里木河流域冰川变化及其对水资源影响[J]. *地理学报*, 2006, 61(5): 482–490.
- [6] 李开明,李忠勤,高闻宇,王林. 近期新疆东天山冰川退缩及其对水资源影响[J]. *科学通报*, 2011, 56(32): 2708–2716.
- [7] 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.
- [8] 杨建军,刘永强,郭玉川,何玉敏. 新疆近54年气温和降水变化特征[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(2): 128–133.
- [9] 王国亚,沈永平,苏宏超,王进,毛炜峰,高前兆,王顺德. 1956–2006年阿克苏河径流变化及其对区域水资源安全的可能影响[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(4): 562–568.
- [10] 陈亚宁,李稚,范煜婷,王怀军,方功焕. 西北干旱区气候变化对水文水资源影响研究进展[J]. *地理学报*, 2014, 69(9): 1295–1304.
- [11] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川编目Ⅲ—天山山区(西南部塔里木内流区) [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1–172.
- [12] 中国科学院登山科学考察队. 天山托木尔峰地区的冰川与气象 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985: 32–94.
- [13] Wang P Y, Li Z Q, Wang W B, Li H, Zhou P, Jin S. Changes of six selected glaciers in the Tomor region, Tian Shan, Central Asia, over the past 50 years, using high-resolution remote sensing images and field surveying[J]. *Quaternary International*, 2013, 311: 123–131.
- [14] Wang P Y, Li Z Q, Huai B J, Li H, Wang L. Spatial variability of glacial changes and their effects on water resources in the Chinese Tianshan Mountains during the last five decades[J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(6): 717–727.
- [15] Huai B J, Li Z Q, Sun M P, Wang W B, Li K M. Change in glacier area and thickness in the Tomur Peak, western Chinese Tien Shan over the past four decades[J]. *Journal of Earth System Science*, 2015, 124(2): 353–363.
- [16] Wang P Y, Li Z Q, Li H L, Wang W B, Wang F T. Ice surface-elevation change and velocity of Qingbingtan glacier No. 72 in the Tomor region, Tianshan Mountains, central Asia[J]. *Journal of Mountain Science*, 2011, 8(6): 855–864.
- [17] 雒园,李慧林,李忠勤,吴利华,张明军. 托木尔峰地区神奇峰冰川3950m处物质平衡与气象要素关系分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(3): 62–67.
- [18] Carenzo M F, Mabillard P J, Reid T, Brock B W. An enhanced temperature index model for debris-covered glaciers accounting for thickness effect[J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 94: 457–469.
- [19] Östrem G. Ice melting under a thin layer of moraine, and the existence of ice cores in moraine ridges[J]. *Geografiska Annaler*, 1959, 41(4): 228–230.
- [20] Hagg W, Mayer C, Lambrecht A, Helm A. Sub-debris melt rates on southern Inylchek Glacier, central Tian Shan[J]. *Geografiska Annaler*,

Series A, *Physical Geography*, 2008, 90(1): 55–63.

- [21] Xie C W, Ding Y J, Chen C P, Han T D. Study on the change of Keqikaer glacier during the last 30 years, Mt. Tuomuer, Western China[J]. *Environmental Geology*, 2007, 51(7): 1165–1170.
- [22] Anderson L S, Anderson R S. Modeling debris-covered glaciers: response to steady debris deposition[J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(3): 1105–1124.
- [23] 黄成荣, 何亚萍, 马雷凯. 1960–2009 年新疆气温时空变化及影响因子分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(10): 7–12.

Response of three observed glaciers in south slope of Tomur Peak area to global warming in recent 40 years

LI Kaiming¹, LI Zhongqin², LI Mingtao¹, HUAI Baojuan²

(1. School of Geography and Urban-Planning, Lanzhou City University, Lanzhou 730070; 2. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Toumur-peak is one of the most developed modern Glacier areas in China. During past 40 years, glaciers in this area were in strong melting and retreating for climatic warming. Glacier meltwater plays an extremely important role both on water resource and stabilization of river runoff in the Tarim basin. Based on investigation on three different-sized glaciers in south slope of Toumur peak, this study has shown that glaciers in this area were in recession according to thickness thinning and area reducing. However, due to the influence of debris cover, the extent of area reduction and terminus recession varied widely for Toumur glacier and glacier No. 72, No. 74. Remote sensing technology was further used matching with field observation to determine the glacier change in quantity. Results shows that the three glaciers were lost 21.4%, 15.8% and 0.3% of their areas in 1964, respectively. Meanwhile, the terminus retreats were at a rate of $41\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$, $30\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ and $1.5\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$, respectively. The recession of larger glaciers have strong impact on water resource, thus those glaciers should attach important to its future variation. Topography and debris cover are main factors in differentiation ablation, and climatic warming may be the main factor forcing glacier in strong retreating.

Key words: glacier change; Tianshan; Toumur Peak; remote-sensing; water resources