

近期新疆哈密代表性冰川变化及对水资源影响

王璞玉¹, 李忠勤^{1,2}, 周平¹, 金爽¹, 陈辉²

(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. 西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 新疆哈密是资源性缺水地区, 冰川是该区主要的供给水源。为了对该区冰川和水文水资源的现状和未来变化做出合理评价和预估, 以榆树沟6号冰川和庙尔沟冰帽为代表, 结合野外实测资料以及近年来在冰川变化领域所取得的相关研究成果, 综合分析了在气候变暖背景下新疆哈密地区冰川近年来的变化过程及对水资源的影响。结果表明, 1972—2011年, 榆树沟6号冰川厚度平均减薄20 m, 减薄速率约为0.51 m/a, 冰川末端退缩254 m, 年均退缩约6.5 m。由于强烈消融, 冰川表面径流发育明显, 且在末端有冰碛湖形成。相比之下, 庙尔沟冰帽消融速率相对较小, 对气候变暖的敏感度较低, 这与冰帽类型和所处海拔较高有直接关系。综合分析发现, 流域有无冰川覆盖及覆盖的比率大小, 直接造成哈密地区不同流域近期河川径流变化的差异。

关键词: 冰川变化; 水资源; 榆树沟6号冰川; 庙尔沟冰帽; 哈密地区

中图分类号: P343.6 文献标志码: A 文章编号: 1001-6791(2014)04-0518-08

水资源是制约干旱区经济发展的“瓶颈”, 是人类赖以生存和繁衍的不可或缺的物质基础。冰川作为高山区固体水库, 对于干旱区水资源的影响不容忽视, 是区域社会经济生活的生命线。哈密地区位于新疆东部极端干旱区, 包括哈密市与伊吾和巴里坤两县的范围, 总面积15.3万km², 分布有冰川179条, 面积155.9 km², 冰储量约8.0 km³, 平均每年融水量达1.72亿m³, 是哈密地区主要的供给水源^[1]。50多年来的水文气象观测记录显示^[2], 受全球气候变暖的影响, 哈密地区气温显著上升, 降水波动增加, 直接引起冰川强烈消融^[3-9]。冰川的快速退缩将对哈密及周边地区人民的生产生活产生重大影响, 对区域经济社会可持续发展规划和城市发展模式的确定起到举足轻重的作用, 也是水利行业十分重视和亟待解决的基本问题。

20世纪70年代, 中国科学院冰川冻土研究所(现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)曾对哈密庙尔沟流域开展过冰川考察, 1981年8月对流域内的庙尔沟冰帽和西侧的藏塔布迪冰川进行了厚度测量。2004年9月天山冰川站组织再次考察, 同时选定庙尔沟冰帽为长期定位观测冰川, 到目前已经积累了大量的观测资料和科研成果^[3-6]。为进一步加强哈密地区冰川变化及对水资源影响的研究, 2011年8~9月天山冰川站和哈密水文局共同组织了榆树沟流域冰川野外科学考察, 并对榆树沟6号冰川进行了详细监测。该冰川面积适中, 易于观测。此次监测涉及物质平衡、面积、厚度和冰川区水文气象等方面, 积累了受气候变化敏感的中小冰川的短期系统资料。此外, 1979年哈密水文局在榆树沟流域下游设立榆树沟水文站, 至今该站已拥有30年的观测资料, 因此, 对该冰川开展定位监测, 可以构成对该流域完整的冰川、水文、气象和水资源变化的观测, 为研究该地区的气候—冰川消融—径流的相互关系提供系统科学依据。

冰川变化研究可以从代表性冰川观测考察与区域冰川变化遥感监测两方面开展综合分析。鉴于此, 本文选定榆树沟6号冰川和庙尔沟冰帽为代表, 兼顾近年来在冰川变化领域所取得的研究成果, 综合分析在气候变暖背景下, 哈密地区冰川近年来的变化过程及对水资源的影响, 旨在对冰川水文及水资源的监测研究积累科学资料, 并对气候变化响应敏感的哈密地区冰川和水文水资源的现状与未来变化做出合理评价和预估。

收稿日期: 2013-10-29; 网络出版时间: 2014-05-29

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20140529.1803.009.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41301069); 中国博士后科学基金资助项目(2013M540779)

作者简介: 王璞玉(1983—), 女, 甘肃成县人, 助理研究员, 主要从事冰川变化及对水资源影响研究。

E-mail: wangpuyu@lzb.ac.cn

1 研究区概况

在哈密境内(40°53′N~45°06′N, 91°07′E~96°23′E),天山山脉由东向西分别为哈尔里克山和巴里坤山。哈尔里克山位于天山的最东端,包括大白杨沟、科托果勒、吐尔干、板房沟、榆树沟、庙尔沟、克尔其马克、乌拉台沟和大天生圈沟9个流域,共分布有冰川122条,面积为125.9 km²,平均冰川面积为1.03 km²。巴里坤山分布有冰川57条,面积为30.0 km²,平均冰川面积为0.53 km²。南北坡冰川分别属于东疆吐鲁番—哈密盆地水系和准噶尔盆地水系^[1]。

庙尔沟流域位于哈密哈尔里克山南坡,流域面积为372 km²,分布有冰川7条,总面积为18.43 km²,储量为1.27 km³。根据冰川编目^[1],庙尔沟冰帽(43°03′N, 94°19′E)朝向西南,面积为3.45 km²,总长度为2.4 km,最高海拔4512 m,末端海拔3840 m,是哈尔里克山主山脊南侧沿西南向山岭发育的冰川(图1)。榆树沟流域亦位于哈尔里克山南坡,哈密盆地北缘,西与故乡河流域为邻,东接庙尔沟流域。流域面积308 km²,有大小冰川9条,总面积约为22.85 km²,冰储量为1.59 km³,占哈密地区冰川面积及冰储量的14.7%和19.9%,是哈密地区范围内面积最大,冰储量最多的流域^[1-2, 10-11]。榆树沟6号冰川(43°05′N, 94°19′E)位于榆树沟流域上游(图1),山谷型冰川,朝向西,面积为4.06 km²,最高海拔4744 m,末端海拔3610 m^[1]。



图1 研究区位置

Fig. 1 Map of the study area

2 数据及测量方法

本研究中使用的数据包括地形图、遥感影像、GPS实测数据和雷达测厚数据及已有相关研究资料,具体如表1所示。2011年8月,天山冰川站和哈密水文局组织对榆树沟6号冰川进行了厚度测量。此次测量使用了加拿大SSI公司的pulse EKKO PRO增强型探地雷达,在该冰川冰舌区共均匀布设了5条测线,包括2条纵测线(A1~A2, B1~B2)和3条横测线(C1~C2, D1~D2, E1~E2),总共498个测点。由于冰川表面局部区域地形较为复杂,沿主流线方向很难连续测量,所以布设两条纵测线,自海拔较低处起测,以期较为全面揭示冰舌区的厚度分布特征。横向探测沿自东向西方向开展。由于冰川边缘较为陡峭且分布冰裂隙,所以部分测线未能到达。测量过程中选用中心频率为100 MHz的天线,测量方式采取剖面法,天线距和测量点间距均采用4 m,测量波速选取为0.169 m/ns。利用探地雷达配套的图像处理软件能够准确判读各测点的厚度值。通过评价,雷达测厚的相对误差约为1.18%。与此同时,利用北京合众思壮E650型GPS对雷达测点和冰川末端进行RTK(Real Time Kinematic)定位,高程测量相对精度为±2 cm,利用该数据可以进行雷达测线的GPS高程校正。基于雷达探测冰川厚度值,通过Kriging插值从而获取冰舌区的厚度分布。

早期冰川信息以1972年1:50 000地形图为基础,进行几何校正。2005年SPOT5遥感影像依据纠正后的地形图进行几何精校正,并通过GPS实地采集地面控制点进行正交化处理,使均方根误差在x、y方向均控制在1个像元内,满足遥感影像几何校正的精度要求。在ArcGIS 10.0软件中,使用人工目视解译进行不同时期冰川边界确定,通过对不同矢量图层地图代数,分析冰川变化情况。对于庙尔沟冰帽,李开明等^[3]、李忠勤等^[4-5]和Wang等^[6]曾对其开展过部分相关研究,本文将结合已有研究,对该冰川的厚度、面积和末端变化开展系统性的分析。

表 1 数据资料信息

Table 1 Information of the data

冰川名称	地形图	遥感影像	RTK-GPS 实测数据	雷达测厚数据	气象水文资料
榆树沟 6 号冰川	1972 年 1:50 000	2005 年 8 月 SPOT5 5 m 分辨率	2011 年 8 月 冰川末端及雷达测点定位数据	2011 年 8 月 3 条横测线 2 条纵测线	气温 降水 径流 头道沟水文站, 白吉水文站, 榆树沟水文站
庙尔沟冰帽			李开明等 ^[3] , 李忠勤等 ^[4-5] , Wang 等 ^[6]		

3 冰川变化过程

3.1 榆树沟 6 号冰川

图 2 显示了榆树沟 6 号冰川不同剖面冰-岩界面的位置, 可以反映出整个剖面的冰厚分布及冰下槽谷特征。纵剖面 A1 ~ A2, 即沿主流线方向自冰川末端到海拔 3 800 m, 冰体平均厚度为 26 m, 最大冰厚 33 m。纵剖面 B1 ~ B2 反映出沿主流线方向从海拔 3 840 m 至 4 000 m 的冰川厚度分布特征, 平均厚度已增至 64 m, 最大冰厚 101 m。结合纵剖面 A1 ~ A2 和 B1 ~ B2 整体来看沿主流线方向冰厚的分布特征, 可以看出, 冰舌区下部厚度普遍较薄, 但从海拔 3 900 m 起逐渐增厚, 到海拔 3 975 m 附近达到最大, 该处冰床地形呈凹陷状。榆树沟 6 号冰川横剖面 C1 ~ C2 和 D1 ~ D2 均呈现出不对称 U 型槽谷形态, 最大冰厚达 132 m。

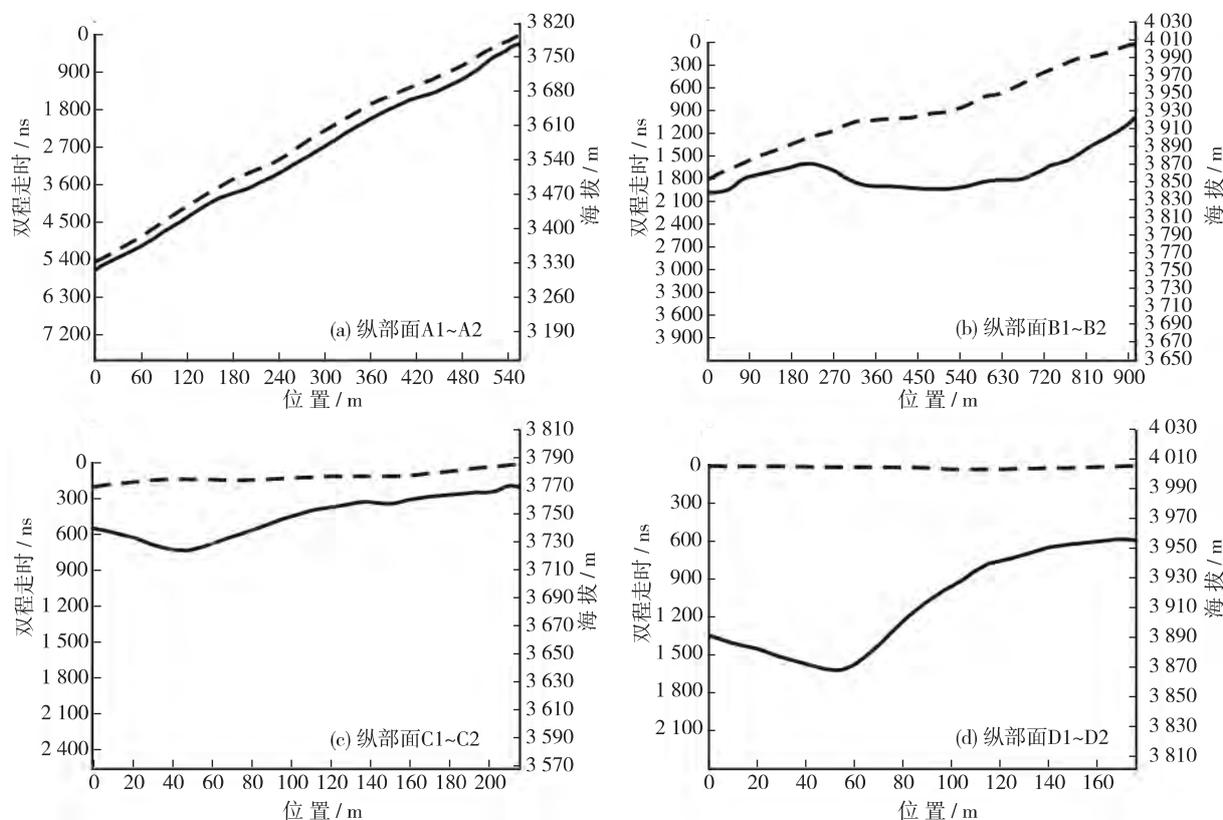


图 2 榆树沟 6 号冰川纵剖面和横剖面冰厚分布及冰下槽谷特征 (GPS 高程校正)

Fig. 2 Ice thickness distribution and subglacial valley of longitudinal and transversal profiles of Yushugou Glacier No. 6 (after elevation-calibration)

榆树沟 6 号冰川冰舌厚度分布及近年来末端变化特征如图 3 所示, 可以看出, 在冰舌流向改变处冰厚

存在一处明显的深色闭合区域,该区冰川厚度最大。相应地,冰床呈凹陷地形,冰川动力过程对基岩产生了强烈侵蚀。通过插值计算得出,2011年榆树沟6号冰川冰舌平均厚度约为50 m。野外实地考察发现,冰川上部区域地势相对平坦,整体坡度较为均一,由此可以推断,整条冰川的平均厚度应在50 m以上。结合冰川编目资料^[1]对比发现,从1972—2011年,榆树沟6号冰川厚度平均减薄了约20 m,年均减薄约0.51 m。同时段内,冰川末端共退缩254 m,退缩速率为6.5 m/a。其中,1972—2005年和2005—2011年冰川末端退缩速率分别为6.4 m/a和7.0 m/a,呈现出加速趋势。由于冰川表面发生强烈消融,冰面径流发育明显,在冰川末端形成了一个规模较大的冰碛湖(图4)。野外考察发现,冰舌下部区域局部受表碛覆盖,且裸露部分呈现大量粉尘颗粒沉积。据Li等^[12]研究显示,大量矿物粉尘的存在会造成冰川反照率的降低,从而引起冰川表面消融强度的增加,这是造成冰川加速退缩的一个重要方面。



(a) 冰面河



(b) 冰川末端的冰碛湖

图4 榆树沟6号冰川表面消融强烈

Fig. 4 Intensive ablation of Yushugou Glacier No. 6

已有研究对榆树沟流域冰川过去40年来的变化进行了详细分析^[7],结果显示,1959/1961—1972年和1972—1992年榆树沟流域冰川面积分别缩小了3.6%和2.1%,到1992—2001年冰川出现加速退缩,退缩率已增至4.6%。从1959/1961—2001年,流域冰川面积共减少了2.5 km²,占1959/1961年面积的11.3%,冰川储量约减少10.3%。其中,未来数年间冰川变化将以减薄为主,冰川对气候变化较为敏感,冰舌退缩殆尽之后气温的微弱增加亦将造成冰川消融的显著增加。

3.2 庙尔沟冰帽

庙尔沟冰帽的厚度在1981—2007年间减薄了0~20 m,上部减薄幅度小于中下部,减薄最大部位在冰川横断面最窄处海拔4300 m附近,这可能与此处冰川比较狭窄,两边都是悬崖,受局部地形影响有关^[5]。已有研究根据1981年和2005年相应冰川测厚点对比分析显示,1981—2005年的25年间,冰川厚度在海拔4295~4357 m处减薄了5 m左右^[4]。从钻取的冰芯资料来看,冰川在最近的20~30年消融加快。物质平衡观测结果显示冰帽顶部的消融微弱^[5-6]。李开明等^[3]结合1972年地形图和2005年SPOT5遥感影像对比分析显示,1972—2005年间,冰帽面积由3.64 km²缩小到3.28 km²,缩小了0.36 km²(9.9%),末端最大退缩速率平均为2.3 m/a。2005—2009年,冰帽末端最大退缩速率平均增至2.7 m/a^[5],如表2所示。相比榆树沟6号冰川,庙儿沟冰帽消融速率相对较小,这与冰川类型有直接关系,且由于该冰帽所处海拔较高,对气候变

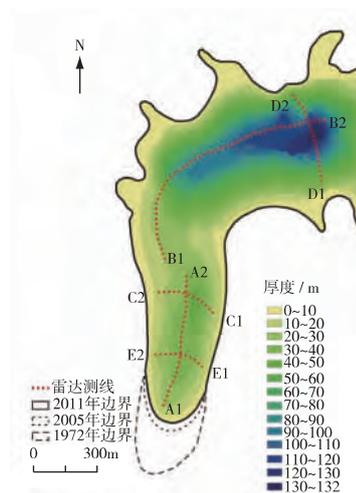


图3 榆树沟6号冰川冰舌区雷达测线及厚度分布

Fig. 3 Radar survey lines and ice thickness distribution of the tongue of Yushugou Glacier No. 6

暖的敏感度较低。

表 2 榆树沟 6 号冰川和庙尔沟冰帽变化特征
Table 2 Changes of Yushugou Glacier No. 6 and Miaoergou ice cap

冰川名称	冰川末端变化		冰川厚度变化		资料来源
	时间段	年均变化/(m a ⁻¹)	时间段	年均变化/(m·a ⁻¹)	
榆树沟 6 号冰川	1972—2005	6.4			本研究
	2005—2011	7.0	1972—2011	0.51	
	1972—2011	6.5			
庙尔沟冰帽	1972—2005	2.3	1981—2005	0.21 (海拔 4 295 ~ 4 357 m)	李开明等 ^[3] , 李忠勤等 ^[4-5] , Wang 等 ^[6]
	2005—2009	2.7	1981—2007	0 ~ 0.77	

王叶堂等^[7]通过对不同时期地形图、航片和遥感影像的对比研究显示,庙尔沟流域冰川面积在 1959/1961—1972 年、1972—1992 年和 1992—2001 年分别缩小了 1.82 km² (8.8%)、0.78 km² (3.8%) 和 0.50 km² (2.4%)。近 40 年来,该流域冰川面积共缩小了 3.10 km², 缩小比率 (15.0%) 和冰川储量亏损率 (18.3%) 均较榆树沟流域 (11.3%, 10.3%) 明显要大。造成这一结果可能缘于,庙尔沟流域冰川平均面积相对榆树沟流域要大,较大比率的冰川面积萎缩将会造成相对较大的冰川储量亏损。

4 冰川变化对水资源的影响

4.1 冰川变化对径流影响的时间变化特征

高山冰川可以调节河川径流,使水循环保持平衡。普遍认为,冰川能够通过对降水的储存,从而延迟河川径流,主要以降雪积累和消融的形式,因此,水以雪和冰的形式储存在冰川中,其消融主要依赖于气候^[13-14]。在湿润低温的年份,由于热量不足,冰川的消融微弱,冰川积累增加,造成冰川融水径流减少;在干旱少雨年份,晴朗天气增多,冰川的消融加剧,从而释放出大量的冰川融水。因此,冰川对流域水资源的年内分配具有重要的调节作用,在干旱少雨的季节,有冰川融水补给的河流不至于断流;在降水量丰沛的季节,降水以固态形式保存在冰川上,不至于发生洪灾^[5]。已有研究显示^[15-16],冰川退缩可以分为 3 个阶段,当处于第一和第二阶段时,冰川消融面积为增加与稳定状态,相应地,冰川融水量增加和稳定,而处于第三阶段时,由于冰川消融面积逐渐减少,冰川融水量也将开始逐渐减少。也就是说,在气候变暖的背景下,冰川退缩引起冰川融水径流增大,而径流增加是以消耗冰川固体冰为代价,随着冰川储量的迅速减少,冰川融水径流也会急剧减少,冰川水资源及其对河流的调节作用也随之消失。

4.2 冰川变化对径流影响的空间变化特征

已有研究显示,哈密地区气温呈升高趋势,倾向率为 0.344℃/10 a^[17],在此背景下,对头道沟、白吉以及榆树沟水文站径流资料分析(具体位置如图 1 所示),可以看出,白吉和榆树沟降水几乎保持不变,相比之下,头道沟降水有所增加,相应地,由于白吉和榆树沟流域具有冰川覆盖,其径流变化不大,而头道沟没有冰川覆盖,以致径流呈现出较大的波动性,且逐年增加(图 5)。从 10 年尺度可以看出,对于冰川覆盖度较小的流域,比如白吉水文站所显示的,由于过去 30 年小冰川的强烈消融,其径流释放呈逐渐减小。对于榆树沟流域,径流主要来自高山冰雪消融水和山区直接降水,逐月径流量的丰枯,是流域内地面温度、高空温度、前期降水和降水过程(即温度和降水)的综合反映。由于大冰川的存在,径流呈逐渐增加。然而,径流增加也非常有限。强烈的冰川消融使得河川径流增加,当达到临界冰川规模时转而减小^[18]。由此可以看出,冰川覆盖可能直接控制着径流的逐年变化。当冰川覆盖达到适中程度(约 40% 左右),径流的年际变化最小。而当冰川覆盖度增加或减小时,径流均会增加^[19]。有无冰川覆盖的流域,其主要差别是无冰川覆盖区的径流主要受降水的控制,而冰川覆盖区是受能量的控制。冰川之所以具有如此的重要性,主要是其能在降水缺少的干热年份释放出最多的水量。近年来冰川融水径流的持续增加是对气候变暖的直接响应^[20]。

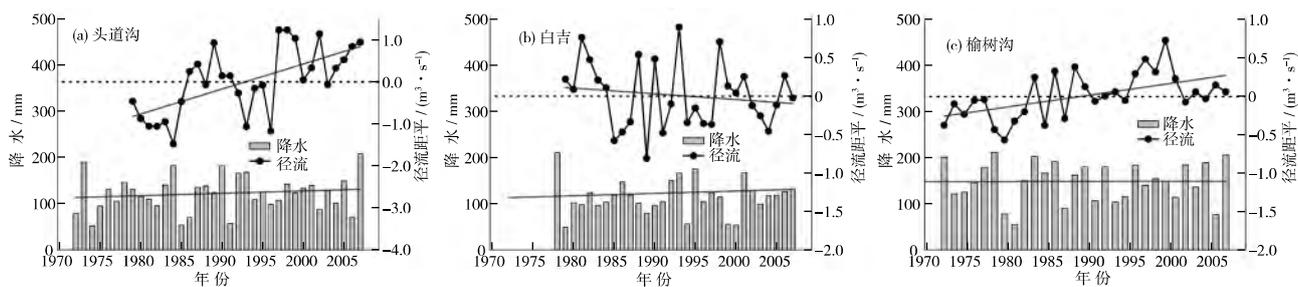


图5 代表站点近40年来降水量及径流距平变化

Fig. 5 Precipitation and runoff anomalies of representative hydrological stations during the past four decades

4.3 冰川变化对冰湖水储量及其溃决的影响

冰川变化不仅对河川径流具有重大影响,而且与冰湖水储量及其溃决有着直接关系。如图5显示,气温的上升直接导致近期冰川萎缩,而强烈的物质损失会直接引起径流变化,造成冰湖水储量增加,溃决风险也在不断增大,使冰湖溃决事件近年来频发。当冰湖溃决洪水洪峰增大,从而导致洪水量增多^[21]。尤其对于像榆树沟6号冰川末端形成的距离母冰川很近的冰湖,当冰川融水量突然增加,常导致这些湖泊溃堤而引发洪水、泥石流等灾害,与人类生产和生活日益密切,需要特别关注和防范。国际山地综合发展研究中心(IC-IMOD)已于近几年启动了“喜马拉雅山冰川与冰湖编目以及全球变暖导致的潜在冰湖溃决洪水识别”研究计划,旨在监测和防治未来冰川灾害,保护人民生命,减少灾害损失,引起人们的高度重视和警觉。

5 结 论

(1) 雷达探测结果显示,2011年榆树沟6号冰川冰舌区平均厚度约为50m,在冰舌流向改变处冰厚最大。1972—2011年,冰川厚度平均减薄20m,减薄速率约为0.51m/a。冰川末端退缩254m,年均退缩约6.5m。由于强烈消融,冰川表面径流发育明显,且在末端形成冰碛湖。

(2) 庙尔沟冰帽在1972—2005年间,面积由3.64km²缩小到3.28km²,缩小了0.36km²(9.9%)。冰帽末端平均退缩速率为2.3m/a。

(3) 榆树沟流域和庙儿沟流域冰川在过去40年均发生了强烈消融,直接影响河川径流变化。哈密地区近期冰川径流呈现明显不一致。对于无冰川覆盖流域,比如头道沟水文站显示的径流年际变化非常大。但对于有冰川覆盖流域,比如白吉和榆树沟,尽管冰川退缩引起了径流的变化,但其影响非常有限。从10年尺度来看,冰川覆盖较小的流域,比如白吉,其径流量减小主要是由于过去30年小冰川的强烈消融。对于榆树沟流域,径流量趋于增加主要缘于大冰川的存在。为获得长期连续的观测资料,更有效地评估气候变暖影响下冰川退缩对区域水资源的影响,开展研究区系统监测非常必要,一方面可以为预测冰川水文水资源变化提供科学数据,另一方面对区域发展和水资源可持续利用提出应对措施。

参考文献:

- [1] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰川目录: III卷: 天山山脉: 东部散流内陆区[M]. 北京: 科学出版社, 1986: 1-21. (Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Science. Glacier inventory of China: III: Tianshan Mountains: Interior drainage area of scattered flow in east [M]. Beijing: Science Press, 1986: 1-21. (in Chinese))
- [2] 高建芳, 骆光晓. 气候变化对新疆哈密地区河川径流的影响分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(4): 748-758. (GAO Jianfang, LUO Guangxiao. Analysis of the impact of climate changes on river's runoff in Hami Prefecture, Xinjiang [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(4): 748-758. (in Chinese))
- [3] 李开明, 李忠勤, 高闻宇, 等. 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. (LI Kaiming, LI Zhongqin, GAO Wenyu, et al. Recent glacial retreat and its effect on water resources in eastern Xinjiang [J]. Chinese

- Science Bulletin, 2011, 56(32): 2708-2716. (in Chinese))
- [4] 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 24 a 间的厚度变化[J]. 冰川冻土, 2007, 29(1): 61-65. (LI Zhongqin, WANG Feiteng, ZHU Guocai, et al. Basic features of the Miaoergou flat-topped glacier in east Tianshan Mountains and its thickness change over the past 24 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(1): 61-65. (in Chinese))
- [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. (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. (in Chinese))
- [6] WANG Wenbin, LI Kaiming, GAO Jianfang. Monitoring glacier shrinkage using remote sensing and site-observation method on southern slope of Kalik Mountain, eastern Tian Shan, China [J]. Journal of Earth Science, 2011, 22(4): 503-514.
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] 王璞玉, 李忠勤, 吴利华, 等. GPR, GPS 与 GIS 支持下的冰川厚度及冰储量分析: 以天山博格达峰黑沟 8 号冰川为例[J]. 地球科学, 2012, 37(增刊 1): 178-186. (WANG Puyu, LI Zhongqin, WU Lihua, et al. Ice thickness and volume based on GPR, GPS and GIS: Example from the Heigou Glacier No. 8, Bogda-peak region, Tianshan, China [J]. Earth Science, 2012, 37(suppl 1.): 178-186. (in Chinese))
- [9] 王璞玉, 李忠勤, 曹敏, 等. 近 50 年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. (in Chinese))
- [10] 骆光晓, 艾力, 祁先明, 等. 榆树沟流域水文特征[J]. 新疆气象, 2002, (5): 19-20, 37. (LUO Guangxiao, AI Li, QI Xianming, et al. Hydrological characteristics of the Yushugou valley [J]. Xinjiang Meteorology, 2002, (5): 19-20, 37. (in Chinese))
- [11] 马雪娟, 骆光晓. 气候变化对榆树沟流域径流的影响分析[J]. 中国水运, 2009, 9(10): 190-193. (MA Xuejuan, LUO Guangxiao. Impacts of climate change on the streamflow in the Yushugou River basin [J]. China Water Transport, 2009, 9(10): 190-193. (in Chinese))
- [12] LI Zhongqin, LI Huilin, CHEN Yaning. Mechanisms and simulation of accelerated shrinkage of continental glaciers: A case study of Urumqi Glacier No. 1 in eastern Tianshan, central Asia [J]. Journal of Earth Science, 2011, 22(4): 423-430.
- [13] 高鑫, 张世强, 叶柏生, 等. 河西内陆河流域冰川融水近期变化[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 344-350. (GAO Xin, ZHANG Shiqiang, YE Baisheng, et al. Recent changes of glacier runoff in the Hexi Inland river basin [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 344-350. (in Chinese))
- [14] 卿文武, 陈仁升, 刘时银. 冰川水文模型研究进展[J]. 水科学进展, 2008, 19(6): 893-902. (QING Wenwu, CHEN Rensheng, LIU Shiyin. Progress in study of glacier hydrological model [J]. Advances in Water Science, 2008, 19(6): 893-902. (in Chinese))
- [15] 王宗太. 中国西北区小冰期以来冰川变化及其影响和未来动态[J]. 地理科学, 1993, 13(2): 97-103. (WANG Zongtai. The glacier variation and influence since little ice age and future trends in Northwest Region, China [J]. Scientia Geographica Sinica, 1993, 13(2): 97-103. (in Chinese))
- [16] 李治国, 姚檀栋, 田立德. 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, TIAN Lide. Progress in the research on the impact of glacial change on water resources [J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(1): 1-8. (in Chinese))
- [17] 张山清, 普宗朝, 韩勇, 等. 近 47 年哈密地区气候变化[J]. 气象科技, 2009, 37(5): 560-566. (ZHANG Shanqing, PU Zongchao, HAN Yong, et al. Climatic change in Hami region in recent 47 years [J]. Meteorological Science and Technology, 2009, 37(5): 560-566. (in Chinese))
- [18] HOCK R, JANSSON P, BRAUN L N. Modelling the response of mountain glacier discharge to climate warming [C]//HUBER U M, BUGMANN H K M, REASONER M A. Global Change and Mountain Regions (A State of Knowledge Overview). Dordrecht: Springer, 2005.
- [19] BRAITHWAITE R J, OLESEN O B. Effect of glaciers on annual run-off, Johan Dahl Land, South Greenland [J]. Journal of Glac-

iology, 1988, 34(117): 200-207.

- [20] BARNETT T P, ADAM J C, LETTENMAIER D P. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions [J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 303-309.
- [21] 王欣, 刘时银, 郭万钦, 等. 我国喜马拉雅山区冰碛湖溃决危险性评价 [J]. *地理学报*, 2009, 64(7): 782-790. (WANG Xin, LIU Shiyin, GUO Wanqin, et al. Hazard assessment of moraine-dammed lake outburst floods in the Himalayas, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(7): 782-790. (in Chinese))

Changes of representative glaciers in Xinjiang Hami and their impact to water resources*

WANG Puyu¹, LI Zhongqin^{1,2}, ZHOU Ping¹, JIN Shuang¹, CHEN Hui²

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute/Tianshan Glaciological Station, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Water scarcity is a big problem in Hami, Xinjiang and glaciers are the major water supply. In order to make reasonable evaluation and forecast of glaciers and water resources in Hami, taking Yushugou Glacier No. 6 and Miaoergou ice cap as representative, the study comprehensively analyzed the recent glacier changes in Hami and their impact on water resources under the background of climate warming based on in-situ observation and previous studies. Results indicated that the thickness of Yushugou Glacier No. 6 decreased by 20 m, or 0.51 m/a with the terminus retreat of 254 m, or 6.5 m/a during the period 1972—2011. Due to serious ablation, the surface meltwater runoff of Yushugou Glacier No. 6 was obvious and a moraine lake was formed at the terminus. By comparison, the melting rate of Miaoergou ice cap was smaller than Yushugou Glacier No. 6, which was directly related to the glacier types and the high altitude of Miaoergou ice cap with low sensitivity to climate warming. The comprehensive analysis found that the difference of recent runoff changes in various rivers was directly caused by whether there was any glacier coverage and its ratio in the drainage basins of Hami.

Key words: glacier change; water resources; Yushugou Glacier No. 6; Miaoergou ice cap; Hami

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41301069).