

祁连山七一冰川物质平衡的时空变化特征

王盛¹, 姚檀栋², 蒲健辰³

(1. 山西师范大学地理科学学院, 临汾 041000; 2. 中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 基于2011-2016年七一冰川的野外观测资料, 结合气象站数据及1975-2015年的遥感影像, 分析了冰川末端变化、物质平衡时空变化特征及其对气候变化的敏感性, 结果表明: 1975年以来, 七一冰川末端持续退缩235 m, 平均退缩速率为5.9 m/a, 冰川面积减少0.13 km² (4.5%)。2011-2016年, 七一冰川的平均物质平衡为-476 mm w.e., 平均ELA为4941 m a.s.l., 物质平衡梯度为2.9 mm/m。从季节变化看, 受风吹雪和冰面升华影响, 11月至次年3月冰川呈负平衡; 4月和9月物质平衡受降水控制, 随海拔变化呈现降水效应; 强消融期(6-8月)物质平衡随海拔升高线性增加; 消融期末由9月初延后至9月底。敏感性分析结果表明, 物质平衡对气温变化的敏感性为-178.7 mm w.e. °C⁻¹ a⁻¹, 对降水变化的敏感性为+2.93 mm w.e. mm⁻¹ a⁻¹。即61 mm的降水增加才能弥补暖季气温升高1 °C引起的冰川净物质损失。

关键词: 物质平衡; ELA; 冰川变化; 气候敏感性; 七一冰川

山地冰川是世界的水塔, 是全球水循环不可分割的一部分, 影响各种空间尺度上的水量平衡^[1]。在全球尺度上, 山地冰川虽仅占地球表面冰川覆盖总面积的3%^[2,3], 但在评估和预测海平面变化中发挥着重要作用^[4]。目前, 全球范围内的山地冰川普遍持续退缩^[3,5-8], 冰川消融产生的融水在不同时期对海平面上升的贡献率约为20%~60%^[2,7,9,10]。与南极冰盖和格陵兰冰盖相比, 小冰川和冰帽对气候变化的响应时间更短^[4]。在未来气候持续变暖的影响下^[11], 山地冰川对未来海平面变化的贡献必然更大。在流域和局地尺度上, 冰川是季节性河流的重要补给来源。在温暖和干旱时期, 冰川作为固态水库补充径流。持续的冰川退缩对于河流中下游的区域水供应、水文生态系统可持续性以及水力发电产生严重影响^[12-14]。

青藏高原东北缘的河西走廊绿洲作为丝绸之路通道上的关键区域和支撑点, 对“丝绸之路经济带”的整体发展有着不可缺失的作用, 然而该区域水资源匮乏问题严重制约着经济和环境的可持续发展, 同时也是“一带一路”倡议中亟需解决的重大课题。祁连山区的冰川是河西走廊绿洲重要的补给水源^[15]。在我国西北气候暖干向暖湿转型的影响下^[16], 该区的冰川消融强烈, 物质亏损严重, 冰川融水径流普遍增加^[8,17-20]。冰川物质平衡作为冰储量变化的直接反映^[21], 其直接观测可用于定量评估冰川变化对河流径流的影响以及探讨冰川对气候变化敏感性等问题。受观测条件限制, 冰川野外观测无法全面系统开展, 即使在观测基础较好的典型冰川, 物质平衡观测往往集中在年尺度或半年尺度

收稿日期: 2018-11-13; 修订日期: 2019-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41801034); 中国科学院“一带一路”国际合作专项(131C11KYSB20160061); 中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室开放课题基金项目(TEL201801)

作者简介: 王盛(1986-), 男, 山东淄博人, 讲师, 主要从事冰川物质平衡的观测与模拟研究。

E-mail: wangsheng@sxnu.edu.cn

(冬、夏平衡)上,而对于反映季节变化的年内物质平衡过程了解甚少。本研究选取七一冰川作为研究对象,基于2011年9月至2016年8月间的逐月物质平衡观测数据,分析该冰川物质平衡的时空变化特征,着重探讨物质平衡的季节变化特征,并对冰川变化的气候敏感性问题进行讨论。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

七一冰川 (39.5°N, 97.5°E) 位于祁连山中段托赖山北坡,冰川融水流入北大河支流柳沟泉河 (图1)。七一冰川末端海拔4304 m, 平均海拔4807 m, 最高峰海拔5159 m, 海拔跨度855 m。根据冰川的物理性质分类,属于大陆型冰川。七一冰川规模较小,根据1975年地形图测算^[17],该冰川面积为2.87 km²,依据2010年野外考察实测冰川边界的GPS数据测算,冰川面积萎缩至2.76 km²,比1975年时减小3.8%。该冰川的平均坡度为20°,朝向为西北方向,于所在的北大河流域具有极好的区域代表性^[18]。七一冰川的物质平衡观测序列较长,自1958年起其观测时间总和超过20年,而系统连续观测(2000年至今)也已经超过15年。在气候变暖的影响下,尤其1986/1987年西北地区气候转型^[16]以来,七一冰川末端逐年退缩,物质亏损严重,冰川零平衡线海拔(ELA)持续上升。冰川的强烈消融同时造成了融水径流普遍增加。在北大河流域,2000年前后冰川融水对河流径流的补给贡献率从13.9%增加到20.4%^[18]。

1.2 研究方法

1.2.1 冰川边界与表面地形的提取

选取成图时间1975年覆盖冰川的1:50000地形图1幅和1973-2015年的遥感影像10景(表1),用于提取七一冰川在不同时期的边界信息,研究冰川末端及其面积变化。遥感影像为Landsat MSS/TM/ETM+数字影像,其选取原则为晴朗少云的天气条件,数据来源于美国地质勘探局网站(USGS, <http://www.usgs.gov/>)。由于1970s的MSS影像数据质量较差,该时段的冰川边界信息提取主要依靠地形图,并利用MSS影像辅助校正。覆盖七一冰川的数字高程模型(DEM)来源于ASTER GDEM 30 m数据。在冰川边界和地形信息的提取过程中,对地形图、遥感影像和DEM数据进行坐标归一化处理,统一采用UTM投影和WGS 84椭球体建立坐标系统。

1.2.2 冰川物质平衡的观测与计算

七一冰川物质平衡的野外观测采用传统的冰川学方法,即以测杆法和雪坑雪层剖面

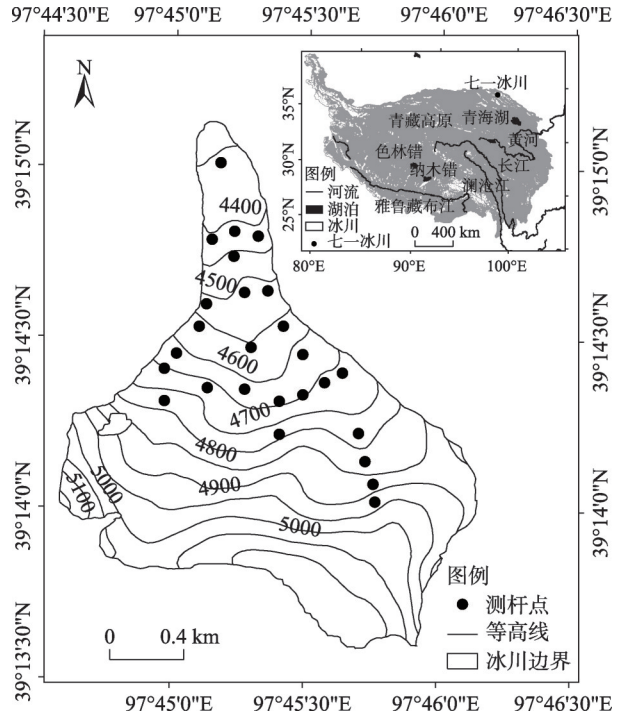


图1 七一冰川的区域位置和物质平衡测杆布设

Fig. 1 Location of the Qiyi Glacier and distributions of stakes for measuring mass balance

表1 遥感影像信息

Table 1 List of remote sensing images

遥感影像	接收日期	传感器	分辨率/m	轨道号	云量/%
LM11450331973301AAA05	1973-10-28	MSS	78	145/33	8
LM21450331975282XXX01	1975-10-09	MSS	78	145/33	23
LM21450331977127AAA03	1977-05-07	MSS	78	145/33	7
LT51350331986206BJC00	1986-07-25	TM	30	135/33	0
LT51350331990233BJC00	1990-08-21	TM	30	135/33	0
LT51350331995231BJC00	1995-08-19	TM	30	135/33	1
LE71350332000141SGS00	2000-05-20	ETM+	30/15	135/33	0
LE71350332005282PFS00	2005-10-09	ETM+	30/15	135/33	0
LE71350332010280SGS00	2010-10-07	ETM+	30/15	135/33	2
LE71350332015102EDC00	2015-04-12	ETM+	30/15	135/33	3

相结合的方法进行。根据七一冰川的表面形态和周边地形,在冰川表面按照海拔约50 m间隔,均匀布设了11个物质平衡观测横剖面,共计26根测杆(图1)。测杆的海拔跨度介于4350~4900 m之间,相对高差约为550 m。雪坑雪层剖面与测杆观测同步进行,观测内容包括积雪/粒雪厚度和密度、附加冰厚度和污化层深度等。21世纪初,七一冰川物质平衡观测的时间间隔一般为半年,同时在强消融期进行5天一次的物质平衡过程观测^[17]。自2011年7月起,七一冰川的观测频率从半年期加密至逐月。观测时间为每月月初(一般为每月1日),至今已积累了5年(2011年7月至2016年9月)的物质平衡逐月数据。

冰川物质平衡的计算通常采用等值线或等高线法。在本研究中,七一冰川作为整个青藏高原冰川观测网的一部分,其物质平衡计算沿用姚檀栋等^[8]提出的计算方法。根据野外观测资料,分别计算出各测杆的净平衡,同时利用ArcGIS软件对获取的冰川区DEM数据进行海拔分带处理,其中4900 m以上的冰川积累区根据物质平衡与海拔的关系进行线性插值,而零平衡对应的海拔即为零平衡线高度(ELA)。整个冰川的物质平衡*B* (mm w.e.)可由以下公式计算^[8]:

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n b_i \times s_i}{S} \quad (1)$$

式中: b_i 为第*i*个高度带的平均物质平衡 (mm w.e.); s_i 为第*i*个高度带的面积 (km^2); S 为七一冰川的总面积 (km^2)。

在河西走廊地区,山区与平原区的气候变化存在差异性,相较而言,气温变化的空间差异较小,而降水变化的空间差异较大^[22]。因此,本研究选取距离冰川最近且与冰川区气温降水变化相关性最好^[18]的托勒气象站(38°48'N, 98°25'E, 3367 m)数据进行物质平衡的气候敏感性研究。气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)。

2 结果分析

2.1 冰川末端和面积变化

利用地形图和遥感影像提取七一冰川不同年份的边界信息如图2所示。从整个研究

时段（1975-2015年）来看，七一冰川的末端持续退缩，平均退缩速率为5.9 m/a，40年间退缩了约235 m。末端海拔从4267 m升高至4304 m，升高了37 m。与冰川末端退缩相对应，1975-2015年七一冰川面积减少了0.13 km²，相比于1975年的冰川面积减少了4.5%，年面积减少速率为0.0031 km²/a。不同时段内冰川末端退缩和面积减小速率不同：从1970s中期至1980s中期，退缩速率较快，达到6.9 m/a，期间末端海拔升高了12 m，而面积减小了0.044 km²（1.5%）；从1980s中期至20世纪末，七一冰川基本处于稳定状态，退缩速度只有1.8 m/a，末端海拔一直处于4280 m附近，期间冰川面积仅减小了0.017 km²（0.6%）；进入21世纪后，在气候变暖的影响下七一冰川加速退缩，退缩速度升高至9.1 m/a，期间末端海拔升高了22 m，而冰川面积的减少量为0.068 km²（2.4%）。

2.2 物质平衡的时间变化特征

2.2.1 年际变化

图3显示了七一冰川物质平衡的年际变化状况。整体上七一冰川经历了从1970s正平衡^[23]，1980s物质平衡正负波动^[24]到21世纪负平衡^[8,17]的转变。根据文献中的物质平衡记录，在2011年以前，七一冰川于2005/2006年出现观测以来的最大负平衡-955 mm w.e.^[8]。最近5年的野外观测表明，气候变暖趋势下的冰川物质亏损仍在继续，而最大负平衡的记录也在2012/2013年（-1005 mm w.e.）被打破。1974年以来，物质平衡的年际变化呈现显著的降低趋势，年均减少38.3 mm w.e.。21世纪以后，尽管七一冰川处于持续负平衡状态，但整体呈现波动上升的趋势，物质平衡的平均增长率为+15.0 mm w.e./a，而最近5年的平均增长率更是高达+62.3 mm w.e./a。相应地，1974年以来ELA的年际变化呈现升高趋势（17 m/a，图4），这与王

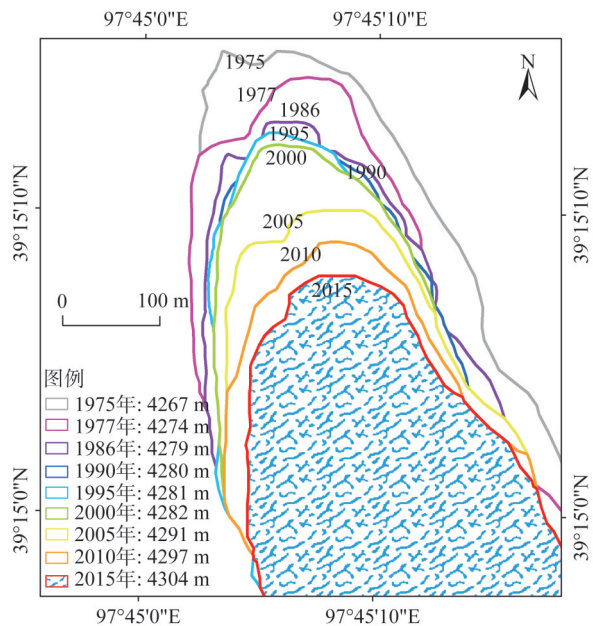


图2 1975-2015年七一冰川不同时期的边界信息
Fig. 2 Boundary information of Qiyi Glacier in different periods during 1975-2015

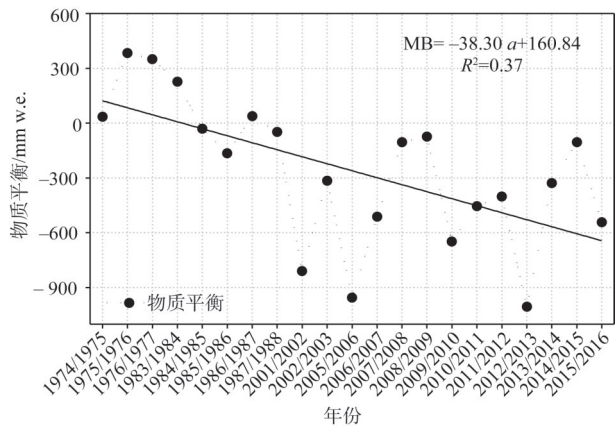


图3 七一冰川物质平衡的年际变化
Fig. 3 Inter-annual variation of mass balance on Qiyi Glacier

宁练等^[19]的研究结果一致。自2001年起, ELA的年际变化呈现微弱下降趋势 (-7 m/a), 而2011-2016年七一冰川的ELA分别为4958 m a.s.l.、5045 m a.s.l.、4899 m a.s.l.、4745 m a.s.l.和4956 m a.s.l., 近5年的下降速率高达 30 m/a 。因此, 21世纪以来, 七一冰川的物质亏损虽然仍在继续, 但亏损速率已经有所减缓。

表2统计了2011-2016年七一冰川纯积累量、纯消融量、物质平衡和ELA的年际变化状况。在最近的5个物质平衡年内, 七一冰川的平均物质平衡为 -476 mm w.e. , 平均ELA为4941 m a.s.l.。除了2014/2015年外, 消融区面积占冰川总面积的比例均超过了70%。2011-2016年冰川的物质损失总量为643.07万 m^3 , 其中消融量为703.45万 m^3 , 而积累量为60.38万 m^3 。2012/2013年冰储量损失最大, 达到272.85万 m^3 ; 而2014/2015年为近5年冰储量损失最小的年份, 仅有28.14万 m^3 。冰川物质损失主要受冰川消融量控制, 因此最大与最小消融量的发生年份与冰储量损失的极值相对应, 分别出现在2012/2013年 (-275.74 万 m^3) 和2014/2015年 (-39.24 万 m^3)。

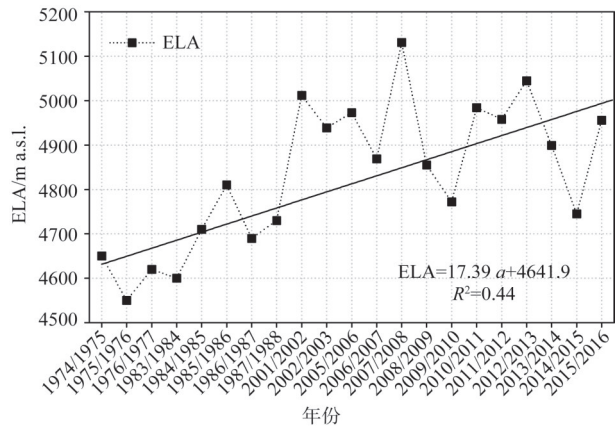


图4 七一冰川ELA的年际变化

Fig. 4 Inter-annual variation of ELAs on Qiyi Glacier

表2 七一冰川纯积累量、纯消融量、物质平衡和ELA的年际变化

Table 2 Inter-annual variation of accumulation, ablation, mass balance and ELA on Qiyi Glacier

观测年份	ELA/ m a.s.l.	积累量			消融量			物质平衡		
		积累区 面积/ km^2	积累量/ 万 m^3	积累深 度/ mm	消融区 面积/ km^2	消融量/ 万 m^3	消融深度/ mm	净平衡/ 万 m^3	物质平衡/ mm w.e.	消融区 面积比例/%
2011/2012	4958	0.48	7.44	154	2.22	-114.82	-518	-107.38	-403	82.1
2012/2013	5045	0.17	2.89	171	2.53	-275.74	-1090	-272.85	-1005	93.7
2013/2014	4899	0.81	15.86	196	1.89	-104.33	-552	-88.47	-328	70.1
2014/2015	4745	1.67	11.10	67	1.03	-39.24	-381	-28.14	-104	38.2
2015/2016	4956	0.49	23.09	467	2.21	-169.32	-768	-146.23	-542	81.7

在青藏高原及其周边地区, 冰川的物质平衡状态存在区域差异性。其中, 喜马拉雅山区 (喀喇昆仑山除外) 冰川萎缩最为强烈, 物质亏损最为严重, 而萎缩和亏损的趋势从喜马拉雅地区到大陆内部逐渐减弱^[8]。为深入研究21世纪以来青藏高原不同区域冰川物质平衡的空间差异, 自北向南选取高原中东部物质平衡观测序列较长的三条冰川与七一冰川进行对比 (图5、表3), 其中乌鲁木齐河源1号冰川 (简称1号冰川)^[25,26]和小冬克玛底冰川^[8,27]为大陆型, 帕隆94号冰川^[8,26]为海洋型。2000年以来, 四条典型冰川基本呈现负平衡。1号冰川仅在2008/2009年呈正平衡, 小冬克玛底和帕隆94号冰川在2010/2011年呈正平衡, 而七一冰川全为负平衡。2005-2012年, 四条冰川中帕隆94号冰川呈现最大负平衡 (-848 mm w.e.), 1号冰川次之 (-753 mm w.e.), 小冬克玛底 (-452 mm w.e.) 和七一冰川 (-450 mm w.e.) 最小且二者接近。说明青藏高原冰川的物

质亏损仍在继续,而且物质亏损的强度为海洋型冰川强于大陆型。从物质平衡的年际变化看,2000年以来只有七一冰川的物质平衡呈上升趋势。由于其他三条冰川的物质平衡序列仅到2013年,因此,近期七一冰川物质亏损速度减慢现象是否在青藏高原具有普适性仍需更深入的观测研究。

2.2.2 年内变化

利用2011-2016年的月尺度物质平衡数据分析了七一冰川的年内物质平衡过程,结果如图6所示。从不同年份来看,物质平衡的年内变化过程基本一致。冬平衡(10月至翌年4月)的平均值为+14.4 mm w.e.。其中4月和10月呈现正平衡,而4月的物质平衡为全年最大,达到了+47.5 mm w.e.。11月至次年3月冰川物质积累和消融都很微弱,具体表现为微弱负平衡,平均月平衡为-11.5 mm w.e.,这不同于早期较小正平衡的观测结果^[17]。造成上述变化的原因可能有两个:一方面七一冰川冬季降雪为干雪,且降雪量不足全年的20%,在风吹雪的作用下大部分降雪从冰川区转移至非冰川区,不能形成积累;另一方面降雪转移造成冰川表面由积雪覆盖变为裸冰,冰川表面的反照率显著降低,冰面吸收的太阳辐射能量增加,造成冰面升华增强,从而引起冰川物质损失的微弱增加。七一冰川的平均夏平衡(5-9月)为-490 mm w.e.,夏季7-8月仍是全年消融最强烈的时期,7-8月的累积物质平衡为-463.6 mm w.e.,表现为极大负平衡。一般情况下,8月的消融强度大于7月,仅在2013/2014年出现了相反的情况。七一冰川的年平衡主要受夏季消融控制,如2012/2013年6-8月的物质平衡分别是-269.8 mm w.e.、-198.3 mm w.e.和-479.2 mm w.e.,造成2012/2013年出现了观测以来的最大负平衡。而2014/2015年6-8月的物质平衡分别是-13.9 mm w.e.、-54.5 mm w.e.和-118.4 mm w.e.,造成2014/2015年出现了近5年来的最小负平衡。在早期的物质平衡观测^[23,24]中,普遍认为9月初是消融季向积累季的转折点,而近5年的观测表明,整个9月份的冰川消融仍普遍发生,消融季末已延后至9月底。七一冰川物质平衡过程中4-5月和9-10月的物质平衡变化较为复杂,受到气温和降水的综合影响。如2012年4月、2013年5月和2014年10月出现了持续强降雪天气,上述三个月出现较大正平衡。而2012年9-10

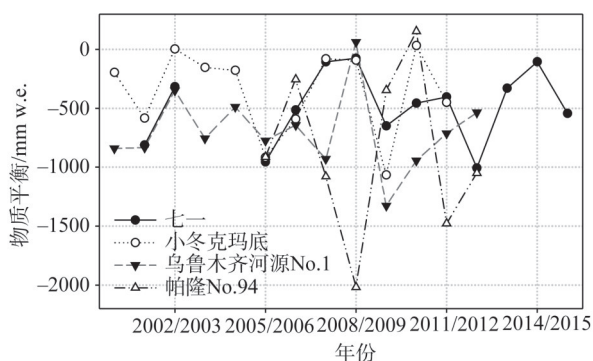


图5 青藏高原四条典型冰川的物质平衡序列

Fig. 5 Mass balance series of four typical glaciers in the Tibetan Plateau

表3 青藏高原四条典型冰川的平均物质平衡及其年际变化趋势

Table 3 Average mass balance and its trend of four typical glaciers in the Tibetan Plateau

名称	位置	类型	\bar{b}_n /(mm w.e.)	年变化率/(mm w.e. a ⁻¹)	研究时段/年
1号冰川	43.1°N, 86.8°E	大陆型	-753	-4.0	2000-2013
七一	39.5°N, 97.5°E	大陆型	-450	13.1	2001-2016
小冬克玛底	33.1°N, 92.1°E	大陆型	-452	-13.3	2000-2012
帕隆No. 94	29.2°N, 96.9°E	海洋型	-848	-20.2	2005-2013

注: \bar{b}_n 为2005-2012年的平均物质平衡。

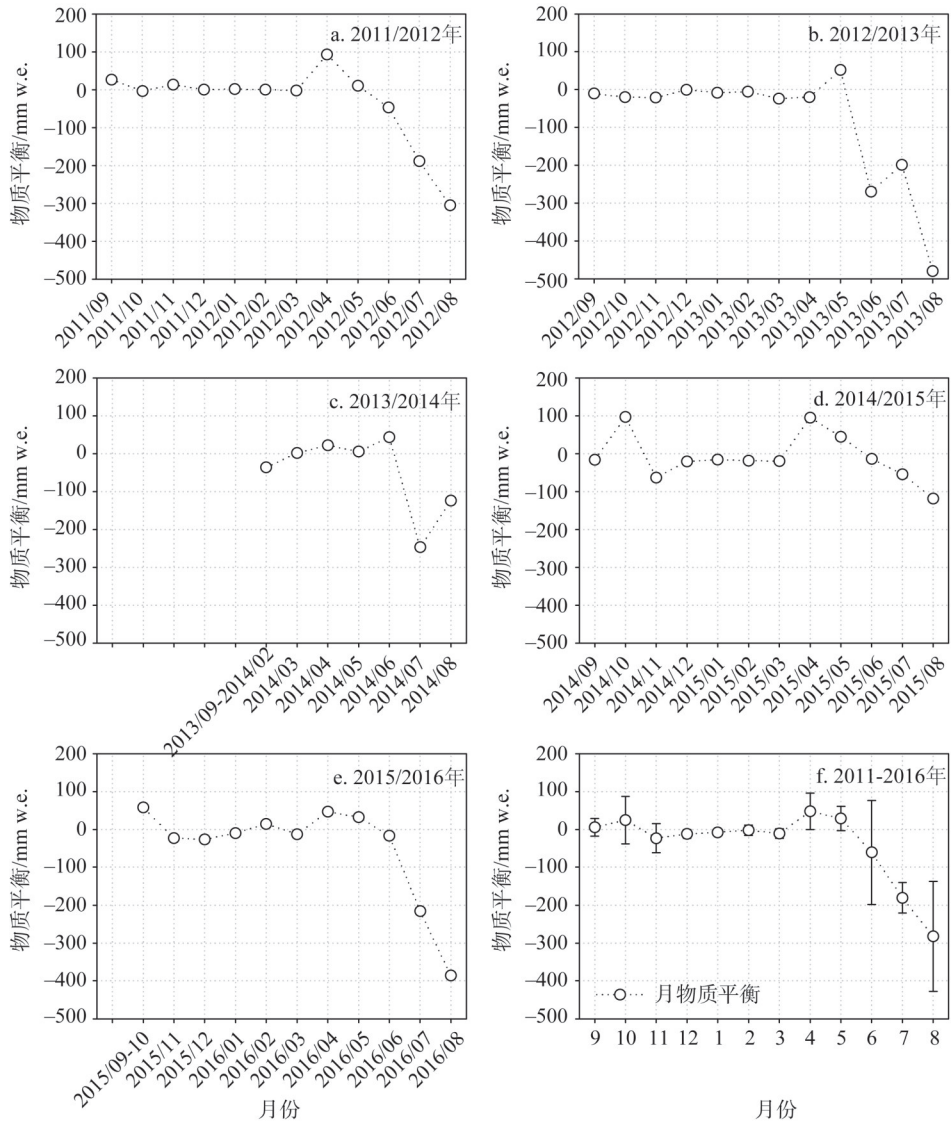


图6 2011年9月-2016年8月七一冰川实测的月平均物质平衡

Fig. 6 Measured monthly average mass balance of Qiyi Glacier from September 2011 to August, 2016

月和2013年4月, 受高温影响冰川甚至出现微弱负平衡。从近5年的平均值看, 4-5月和9-10月均为正平衡, 说明期间冰川积累占优势。此外, 近期的降水增加使4-5月的物质平衡向更大正平衡方向发展, 物质平衡比早期观测值普遍增大。

2.3 物质平衡的空间变化特征

图7为2011-2016年七一冰川平均年平衡空间分布的等值线图。从图中可以看出, 整体上冰川处于负平衡状态, 物质亏损严重。2011-2016年的平均ELA为4941 m a.s.l., 消融区面积占冰川总面积的78.5%, 而积累区仅有21.5%。冰舌部分消融强烈, 平均净平衡为-1.5 m w.e./a。积累区的积累量不大, 海拔最高处的物质平衡仍小于+0.5 m w.e./a, 而平均净平衡为+0.17 m w.e./a。早在1975-1977年, 王仲祥等^[23]利用连续的测杆和雪坑资料绘制了七一冰川的物质平衡等值线。期间仅在冰舌部分发生冰川物质亏损, 呈现负平

衡。这一时期的平均ELA仅为4585 m a.s.l., 冰舌以上的冰川大部分区域全为积累区, 约占冰川总面积的85%。冰川末端的净平衡最小, 平均值为-1.2 m w.e./a, 这一结果明显小于近期的观测值-1.8 m w.e./a。对于整个冰舌区, 1975-1977年的平均物质平衡为-0.52 m w.e./a, 而近期物质亏损多了近1 m w.e./a。在积累区, 1970s的最大物质平衡超过+1 m w.e., 平均净平衡为+0.41 m w.e., 均远大于2011-2016年相应地物质平衡值。因此, 近40年间七一冰川表面物质平衡发生了不同程度的减小, 而冰舌区是物质亏损最为强烈的部分。

七一冰川2011-2016年各测杆点物质平衡随海拔高度的变化状况如图8所示。近5年内, 各测杆点的年平衡随海拔升高线性增加(2012/2013年的线性相关性略差), 一元线性回归模型的决定系数 R^2 分别为0.80、0.43、0.74、0.87和0.87。冰川表面某一点的净平衡(b_n)随海拔高度(H)的变化率, 称为冰川作用能(E_g)或物质平衡梯度^[28](mass-balance gradient)。其表达式为:

$$E_g = \frac{db_n}{dH} \tag{2}$$

通过计算可知, 七一冰川2011-2016年的物质平衡梯度分别为3.2 mm w.e./m、1.9 mm w.e./m、2.4 mm w.e./m、2.9 mm w.e./m和4.1 mm w.e./m。平均为2.9 mm w.e./m (一

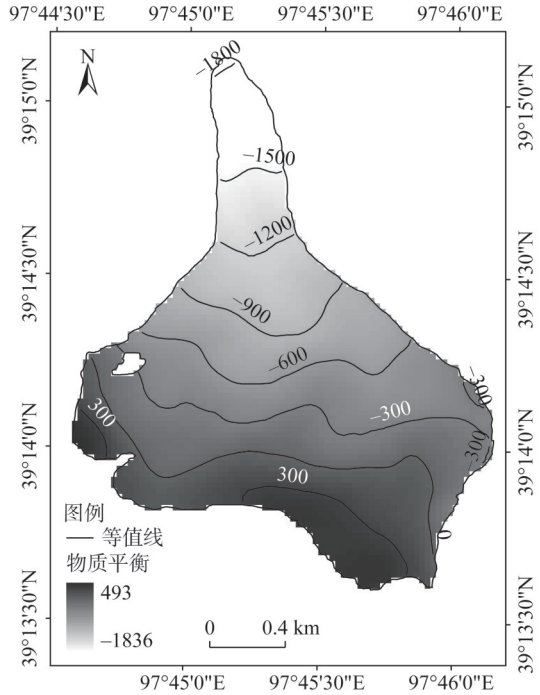


图7 2011-2016年七一冰川物质平衡空间分布的等值线

Fig. 7 Contours of mass balance in spatial distribution on Qiyi Glacier during 2011-2016

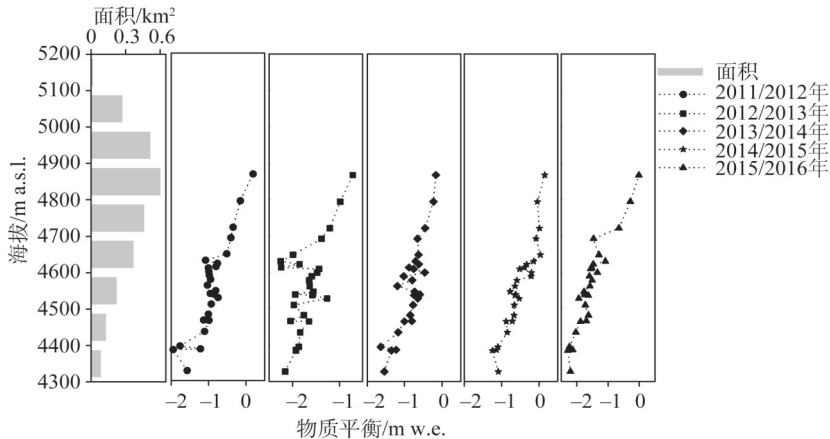


图8 2011-2016年七一冰川物质平衡随海拔高度的变化

Fig. 8 Mass balance change along with the altitude on Qiyi Glacier during 2011-2016

元线性回归模型的决定系数 R^2 高达0.92), 这与1975-1977年的物质平衡梯度 3.7 mm w.e./m 接近^[22]。物质平衡梯度的大小反映了冰川在水文循环中的活跃程度, 中国大陆性冰川的物质平衡梯度比较稳定, 一般在 7 mm w.e./m 以下, 现阶段七一冰川的物质平衡梯度仍呈现出类似1970s的特点。

2011-2016年七一冰川各测杆点的月平均物质平衡随海拔变化呈现出显著的季节特征(图9)。除4月以外, 冷季(10月至翌年4月)各月的物质平衡均未随海拔表现出明显的梯度关系。在4月, 冰舌区的物质平衡随海拔线性增加, 物质平衡梯度为 0.22 mm w.e./m ($R^2=0.55$)。最大正平衡($+111.2 \text{ mm w.e.}$)的观测点海拔为 4648 m a.s.l. , 与最大降水带的观测点海拔(4670 m a.s.l.)一致。在最大降水带以上的冰川积累区, 物质平衡随海拔线性减少, 物质平衡梯度为 -0.64 mm w.e./m ($R^2=0.85$)。在暖季(5-9月), 9月物质平衡随海拔的变化过程与4月类似, 最大降水带上下的物质平衡梯度分别为 -0.22 mm w.e./m ($R^2=0.67$)和 0.20 mm w.e./m ($R^2=0.74$)。说明4月和9月的物质平衡主要受降水控制, 随海拔的变化特征表现出降水效应。从4月底开始, 七一冰川末端出现不同强度的阵性消融现象。这一时期消融强度和范围有限, 难以形成持续的冰川融水径流。由于冰面雪层温度较低, 少量的融水会在渗浸再冻结作用下, 以附加冰的形式补给冰川内部。七一冰川在5月下旬进入消融期, 在整个强消融期(6-8月)物质平衡随海拔升高线性增加。6-8月的物质平衡梯度分别为 0.56 ($R^2=0.86$)、 0.97 ($R^2=0.83$)和 0.80 mm w.e./m ($R^2=0.74$)。7、8月份的物质平衡梯度在冰舌及以上的冰川区域发生明显变化, 7月的物质平衡梯度从冰舌区的 0.88 增加至冰川上部的 3.15 mm w.e./m , 而8月从 0.63 增加至 3.35 mm w.e./m 。

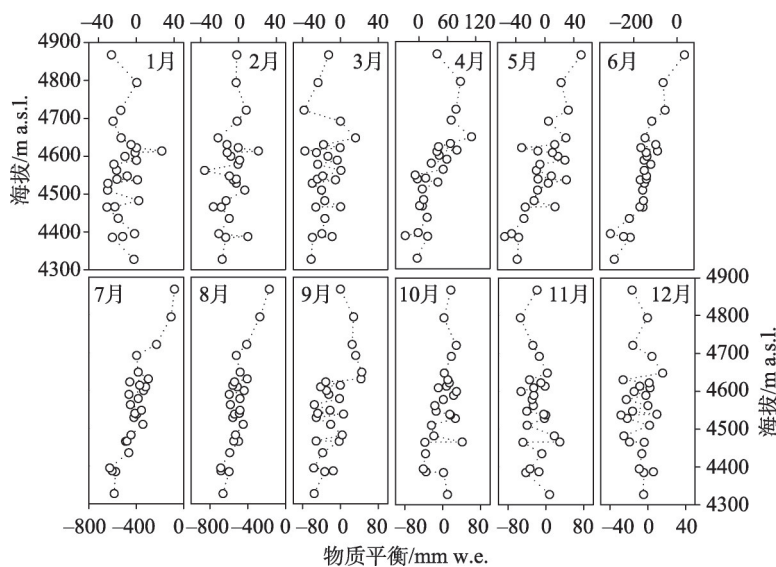


图9 七一冰川月平均物质平衡随海拔的梯度变化

Fig. 9 Monthly average mass balance change along with the altitude on Qiye Glacier

3 结论与讨论

3.1 结论

基于2011-2016年七一冰川的逐月物质平衡野外观测资料, 结合气象数据及1975-

2015年的地形图和遥感影像，分析了冰川末端变化、物质平衡的时空变化特征及其对气候变化的敏感性，主要结论如下：

(1) 1975-2015年，七一冰川的末端持续退缩235 m，平均退缩速率为5.9 m/a，末端海拔升高了37 m，而冰川面积减少了0.13 km² (4.5%)。

(2) 2011-2016年，七一冰川的平均物质平衡为-476 mm w.e.，平均ELA为4941 m a.s.l.，物质平衡梯度为2.9 mm/m，2000年以来冰川物质亏损仍在继续，但亏损速率有所减缓。

(3) 从季节变化看，受风吹雪和冰面升华的影响，11月至次年3月冰川消融加剧，呈现负平衡；4月和9月物质平衡受降水控制，随海拔的变化特征呈现降水效应；强消融期(6-8月)物质平衡随海拔升高线性增加，而消融期末由9月初延后至9月底。

(4) 七一冰川稳定状态下的零平衡线高度ELA₀为4722 m a.s.l.，有效的物质平衡梯度α为2.54 mm w.e./m。气候变化的敏感性分析结果表明，物质平衡对气温变化的敏感性为-178.7 mm w.e. °C⁻¹ a⁻¹，而对降水量的敏感性为+2.93 mm w. e. mm⁻¹ a⁻¹。即61 mm的降水增加才能弥补暖季气温升高1 °C引起的冰川净物质损失。

3.2 讨论

3.2.1 物质平衡与ELA的关系

零平衡线高度(ELA)变化是冰川物质平衡波动的反映，物质平衡越小，冰川消融越强烈，相应地ELA越高；反之则ELA越低。大量的统计数据表明，在同一年内，年平衡(*b_n*)与ELA之间存在很好的线性关系，Braithwaite^[29]将这种关系描述为：

$$b_n = \alpha(ELA_0 - ELA_t) \quad (3)$$

式中：*ELA*₀是冰川稳定状态下(物质平衡为零)的零平衡线高度(m a.s.l.)，即当*b_n*=0时，*ELA*₀=*ELA*_{*t*}。*α*是有效的物质平衡梯度(mm w.e./m)，代表物质平衡梯度的时空平均值。如图10，七一冰川稳定状态下的零平衡线高度*ELA*₀为4722 m a.s.l.，有效的物质平衡梯度*α*为2.54 mm w.e./m。

3.2.2 物质平衡的气候敏感性

已有研究表明^[17,19,30]，七一冰川物质平衡受夏季气温控制，而降水量也在一定程度上影响物质平衡。利用2011-2016年七一冰川物质平衡与气象要素(托勒气象站)之间的统计关系，分析了物质平衡对气候变化的敏感性(图11)。在冷季，平均气温处于0 °C以下，1月为最冷月，温度接近-20 °C。此时冰川物质平衡基本维持在零平衡附近上下波动，并未随着气温而变化(物质平衡与气温的相关系数*R*²=0.23)，而与月降水变化的相关性更强(*R*²=0.54)，说明冷季物质平衡主要受降水控制，而气温的影响很小。在暖季，物质平衡与气温的相关系数达到0.66，而与降水的相关系数仅为0.08。说明暖季物

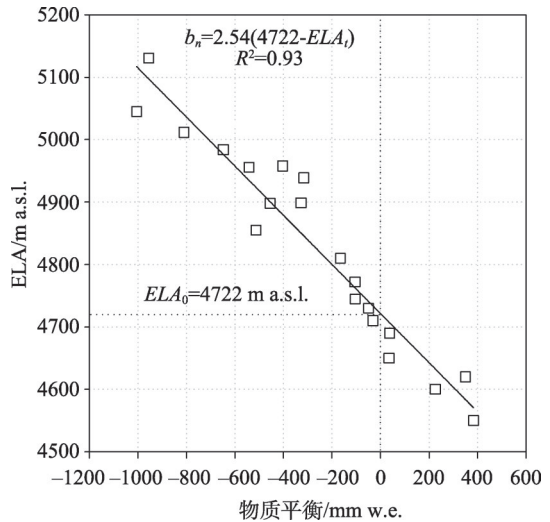


图10 七一冰川年平衡与ELA之间的关系
Fig. 10 Relationship between annual mass balance and ELA on Qiyi Glacier

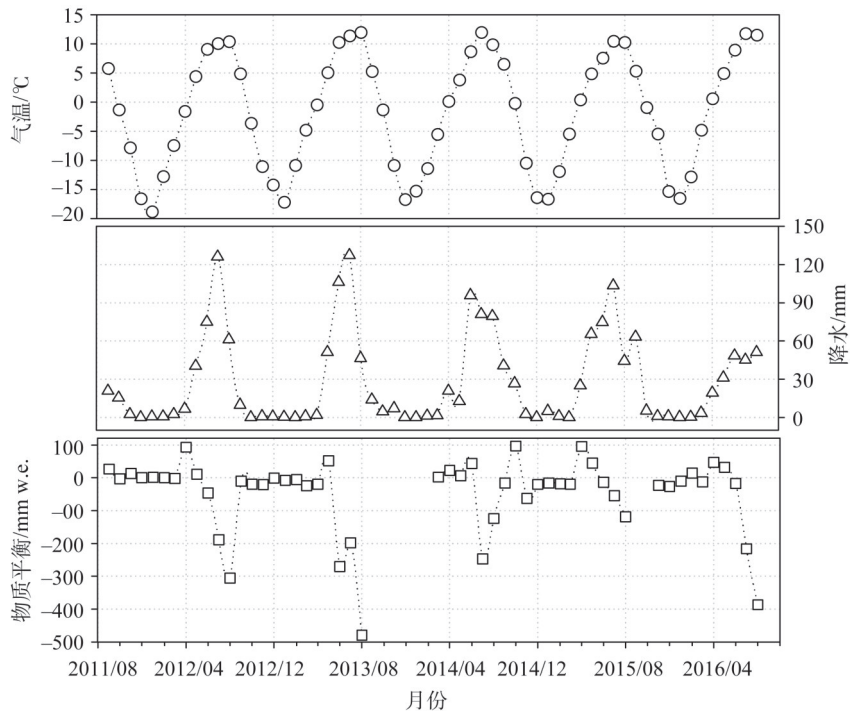


图 11 七一冰川月物质平衡与气温降水的关系

Fig. 11 Relationship between monthly mass balance and temperature/precipitation on Qiyi Glacier

质平衡主要受气温控制,而降水的影响很小,这与早期的研究结果一致^[19,30]。将消融最强的8月份的物质平衡数据剔除,暖季物质平衡与降水量的相关性有所提升,相关系数升高至0.32。说明物质平衡在强消融期受高温的绝对控制,但在暖季其他月份物质平衡是气温和降水共同作用的结果。

利用七一冰川2011-2016年物质平衡与托勒气象站暖季平均气温、年降水量数据,获取了物质平衡(B)与暖季平均气温(T_w)、年降水量(P)的统计关系:

$$B = -794.2T_w + 6020 \quad (4)$$

$$B = 2.2P - 1219 \quad (5)$$

结果表明,物质平衡与暖季平均气温呈显著的负相关关系,相关系数 R^2 为0.78(显著性水平 $\text{Sig.} = 0.00 < 0.05$)。当夏季平均气温升高时,物质平衡迅速降低,向更大负平衡方向发展。物质平衡与年降水量呈正相关关系,相关系数 R^2 为0.08(显著性水平 $\text{Sig.} = 0.00 < 0.05$)。随着降水量的增多,物质平衡将会相应增加,但增加量极为有限。

为研究七一冰川物质平衡对气候变化的敏感性,采用多元线性回归方法建立了物质平衡(B)与暖季平均气温(T_w)和年降水量(P)回归方程:

$$B = -178.7T_w + 2.93P \quad (6)$$

式中:物质平衡对气温和降水的敏感性系数采用最小二乘法确定。该式的复合相关系数 $R^2 = 0.81$,显著性水平为0.000置信度为99.9%。

由上述回归方程可以得出,当暖季平均气温升高或降低 1°C 时,七一冰川的物质平衡将降低或升高 178.7 mm w.e. ;当年降水量增加或减少 1 mm 时,七一冰川的物质平衡

将升高或降低2.93 mm w.e.。即61 mm（相当于2011-2016年托勒气象站平均年降水量的18.2%）的降水增加才能弥补暖季气温升高1℃引起的冰川净物质损失。

参考文献(References):

- [1] VIVIROLI D, DÜRR H H, MESSERLI B, et al. Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, 2007, 43(7): W07447, <https://doi.org/10.1029/2006WR005653>.
- [2] MEIER M F. Contribution of small glaciers to global sea level. *Science*, 1984, 226(4681): 1418-1421.
- [3] ARENDT A A, ECHELMAYER K A, HARRISON W D, et al. Rapid wastage of Alaska glaciers and their contribution to rising sea level. *Science*, 2002, 297(5580): 382-386.
- [4] OERLEMANS J, FORTUIN J P F. Sensitivity of glaciers and small ice caps to greenhouse warming. *Science*, 1992, 258(5079): 115-117.
- [5] 金姗姗, 张永红, 吴宏安. 近40 a长江源各拉丹冬冰川进退变化研究. *自然资源学报*, 2013, 28(12): 2095-2104. [JIN S S, ZHANG Y H, WU H A. Study on glacial advancement and retreatment in Geladandong Region of Changjiangyuan in recent 40 years. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(12): 2095-2104.]
- [6] 姚晓军, 刘时银, 郭万钦, 等. 近50 a来中国阿尔泰山冰川变化—基于中国第二次冰川编目成果. *自然资源学报*, 2012, 27(10): 1734-1745. [YAO X J, LIU S Y, GUO W Q, et al. Glacier change of Altay Mountain in China from 1960 to 2009: Based on the Second Glacier Inventory of China. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(10): 1734-1745.]
- [7] MEIER M F, DYURGEROV M B, RICK U, et al. Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century. *Science*, 2007, 317(5841): 1064-1067.
- [8] YAO T D, THOMPSON L, YANG W, et al. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2012, 2(9): 663-667.
- [9] KASER G, COGLEY J G, DYURGEROV M B, et al. Mass balance of glaciers and ice caps: Consensus estimates for 1961-2004. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(19): L19501, <https://doi.org/10.1029/2006GL027511>.
- [10] GARDNER A S, MOHOLDT G, COGLEY J G, et al. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. *Science*, 2013, 340(6134): 852-857.
- [11] 秦大河, STOCKER T, 259名作者和TSU(驻伯尔尼和北京). IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论. *气候变化研究进展*, 2014, 10(1): 1-6. [QIN D H, STOCKER T, 259 AUTHORS and TSU (Bern & Beijing). Highlights of the IPCC working group I fifth assessment report. *Climate Change Research*, 2014, 10(1): 1-6.]
- [12] KASER G, GROSSHAUSER M, MARZEION B. Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 2010, 107(47): 20223-20227.
- [13] HUSS M. Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water Resources Research*, 2011, 47(7): W07511, <https://doi.org/10.1029/2010WR010299>.
- [14] IMMERZEEL W W, VAN BEEK L P H, BIERKENS M F P. Climate change will affect the Asian water towers. *Science*, 2010, 328(5984): 1382-1385.
- [15] 程国栋. 黑河流域可持续发展的生态经济学研究. *冰川冻土*, 2002, 24(4): 335-343. [CHEN G D. Study on the sustainable development in Heihe River Watershed from the view of ecological economics. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(4): 335-343.]
- [16] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152-164. [SHI Y F, SHEN Y P, LI D L, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2): 152-164.]
- [17] 蒲健辰, 姚檀栋, 段克勤, 等. 祁连山七一冰川物质平衡的最新观测结果. *冰川冻土*, 2005, 27(2): 199-206. [PU J C, YAO T D, DUAN K Q, et al. Mass balance of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains: A new observation. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(2): 199-206.]
- [18] WANG S, YAO T D, TIAN L D, et al. Glacier mass variation and its effect on surface runoff in the Beida River catchment during 1957-2013. *Journal of Glaciology*, 2017, 63(239): 523-534.

- [19] 王宁练, 贺建桥, 蒲健辰, 等. 近50年来祁连山七一冰川平衡线高度变化研究. 科学通报, 2010, 55(32): 3107-3115. [WANG N L, HE J Q, PU J C, et al. Variations in equilibrium line altitude of the Qiyi Glacier, Qilian Mountains, over the past 50 years. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(32): 3107-3115.]
- [20] 徐春海, 李忠勤, 王飞腾, 等. 基于LiDAR、SRTM DEM的祁连山黑河流域十一冰川2000-2012年物质平衡估算. 自然资源学报, 2017, 32(1): 88-100. [XU C H, LI Z Q, WANG F T, et al. Estimation of mass balance of Shiyi Glacier in the Heihe River Basin, Qilian Mountains during 2000-2012 based on LiDAR and SRTM. Journal of Natural Resources, 2017, 32(1): 88-100.]
- [21] BOLCH T, KULKARNI A, KÄÄB A, et al. The state and fate of Himalayan glaciers. Science, 2012, 336(6079): 310-314.
- [22] 王宁练, 贺建桥, 蒋熹, 等. 祁连山中段北坡最大降水高度带观测与研究. 冰川冻土, 2009, 31(3): 395-403. [WANG N L, HE J Q, JIANG X, et al. Study on the zone of maximum precipitation in the north slopes of the central Qilian Mountains. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(3): 395-403.]
- [23] 王仲祥, 谢自楚, 伍光和. 祁连山冰川的物质平衡. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第5号), 祁连山冰川变化及应用. 北京: 科学出版社, 1985. [WANG Z X, XIE Z C, WU G H. Glacier mass balance in Qilian Mountain. In: Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS, No. 5: Glacier Variations and Utilizations in Qilian Mountains. Beijing: Science Press, 1985.]
- [24] 刘潮海, 谢自楚, 杨惠安, 等. 祁连山“七一”冰川物质平衡的观测、插补及趋势研究. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊(第7号), 祁连山冰川、气候及径流变化监测与寒区水文研究专辑. 北京: 科学出版社, 1992. [LIU C H, XIE Z C, YANG H A, et al. Observation, interpolation and trend study of glacier mass balance on the Qiyi Glacier in Qilian Mountain. In: Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS, No. 7: The Monitoring of Glacier, Climate, Runoff Changes and the Research of Cold Region Hydrology in Qilian Mountains. Beijing: Science Press, 1992.]
- [25] WORLD GLACIER MONITORING SERVICE (WGMS). Glacier mass balance bulletin No. 1-No. 12. Switzerland: Department of Geography University of Zurich, 2013.
- [26] WORLD GLACIER MONITORING SERVICE (WGMS). Global glacier change bulletin No.1 (2012-2013). Switzerland: Department of Geography University of Zurich, 2015.
- [27] 张健, 何晓波, 叶柏生, 等. 近期小冬克玛底冰川物质平衡变化及其影响因素分析. 冰川冻土, 2013, 35(2): 263-271. [ZHANG J, HE X B, YE B S, et al. Recent variation of mass balance of the Xiao Dongkemadi Glacier in the Tanggula range and its influencing factors. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(2): 263-271.]
- [28] 施雅风, 黄茂桓, 姚檀栋, 等. 中国冰川与环境-现在、过去和未来. 北京: 科学出版社, 2000. [SHI Y F, HUANG M H, YAO T D, et al. The Glaciers and Environment in China: Present, Past and Future. Beijing: Science Press, 2000.]
- [29] BRAITHWAITE R J. Can the mass balance of a glacier be estimated from its equilibrium line altitude. Journal of Glaciology, 1984, 30(106): 364-368.
- [30] 王盛, 蒲健辰, 王宁练. 祁连山七一冰川物质平衡及其对气候变化的敏感性研究. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1214-1221. [WANG S, PU J C, WANG N L, et al. Study of mass balance and sensibility to climate change of Qiyi Glacier in Qilian Mountains. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1214-1221.]

Spatial and temporal variations in mass balance of Qiyi Glacier in Qilian Mountains

WANG Sheng¹, YAO Tan-dong², PU Jian-chen³

(1. Geography Science Institute, Shanxi Normal University, Linfen 041000, Shanxi, China; 2. Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Institute of Tibetan Plateau Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Northwest Institute of Environment and Resources, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on in-situ observations in Qiyi Glacier during 2011-2016, and combined with the data from meteorological stations and remote sensing images (1975-2015), this paper analyzed the glacier terminal change, spatial and temporal variations of glacier mass balance and its sensitivity to climate change. The results showed that: the terminal of Qiyi Glacier continued to retreat 235 m from 1975 to 2015, with a rate of 5.9 m/a, and the glacier area reduced by 0.13 km² (4.5%). During 2011-2016, the average annual mass balance of Qiyi Glacier was -476 mm w.e., the average ELA was 4941 m a.s.l., and the mass balance gradient was 2.9 mm/m. Affected by snowdrift and ice sublimation, the glacier mass balance tended to be more negative from November to March of the next year. Mass balance in April and September is dominated by precipitation, and the change with altitude showed the precipitation effect. Mass balance increased with altitude linearly from June to August, and the end of glacier melting season was delayed from early September to the end of September. The sensitivity analysis of glacier to climate change showed that, mass balance sensitivity to air temperature change was -178.7 mm w.e. °C⁻¹ a⁻¹, while that to precipitation change was +2.93 mm w.e. mm⁻¹ a⁻¹. A 61 mm increase in precipitation was required to compensate for the net mass loss induced by an air temperature increase of 1 °C.

Keywords: mass balance; ELA; glacier change; climate sensitivity; Qiyi Glacier