

乌鲁木齐河源1号冰川2009年出现物质正平衡

张国飞¹, 李忠勤^{1,2}, 王文彬², 王卫东¹

(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 / 中国科学院天山冰川站, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 自1997年以来, 乌鲁木齐河源1号冰川消融极为强烈, 物质平衡呈大幅度亏损, 连续12 a都处于强负平衡状态, 平均物质平衡达-708 mm, 且在2008年物质平衡达到历史最低值-999 mm, 然而2009年出现了物质正平衡, 物质平衡63 mm, 年际变化量达1 062 mm。以2008-2009年物质平衡实测资料为基础, 根据该地区的气温和降水资料分析, 结果表明, 造成这种现象的主要原因是夏季气温(5~8月)的降低, 较2008年低1.8℃, 致使冰川消融期的开始时间推迟至了7月份, 结束时间提前到8月份, 大大削弱了冰川的消融强度, 其次是2005年以来逐渐增多的连续性降水, 增加了冰川的积累量。

关键词: 乌源1号冰川; 物质正平衡; 夏季气温

中图分类号: P931.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6060(2013)02-0263-06(263~268)

冰川物质平衡是联系冰川变化和气候的桥梁, 是冰川对气候变化的直接反应。在全球气候变暖的背景下, 全球大多数冰川都处于加速退缩状态^[1-2]。乌鲁木齐河源1号冰川(以下简称乌源1号冰川)自1958建立定位观测至今, 已成为国际公认的全球重点监测冰川, 是世界冰川监测网络WGMS中唯一的中国冰川, 也是中亚内陆地区的代表冰川, 具有较强的区域代表性^[3]。乌源1号冰川地理位置43°05'N, 86°49'E, 地处亚洲中部, 位于天山中部天格尔山II峰北坡, 乌鲁木齐河源头, 为典型的大陆型双冰斗—山谷冰川。

随着全球气候逐渐变暖, 自20世纪80年代中期以来, 乌源1号冰川迅速退缩和减薄, 尤其是从1997年来, 该冰川消融极为强烈, 物质平衡呈大幅度亏损, 连续12 a都处于强负平衡状态, 平均物质平衡达-708 mm, 并且在2008年物质平衡达到历史最低值-999 mm, 然而2009年出现了物质正平衡, 物质平衡63 mm, 物质平衡发生了重大转变, 这一现

象的出现暂时扭转了长时期连续物质亏损状态。本文通过分析乌源1号冰川2009年出现正平衡的原因, 旨在研究冰川物质平衡在气候变化中的反馈作用, 具有重要研究价值。

1 物质平衡观测和计算

乌源1号冰川2008-2009年物质平衡观测网点的布设是一致的, 即分别在冰川东支和西支消融区表面, 从冰舌开始自下而上布设A-I等各9个横剖面, 各横剖面上等距离布设3根测杆进行消融区积消量的观测, 积累区资料以雪坑观测结果获得^[4]。图1为2009年乌源1号冰川物质平衡观测网点。冰川物质平衡的观测包括冬平衡和夏平衡, 冬平衡的观测时间是从前一年的消融期末(8月底)至翌年的消融初期(5月初), 夏平衡则是消融初期(5月初)至消融期末(8月底)。

在获得观测数据的基础上, 计算出各花杆点的

收稿日期: 2012-06-11; 修订日期: 2012-08-09

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(41121001); 国家自然科学基金(41001040, 41161012); 中国科学院知识创新工程(KZCX2-EW-311); 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所青年人才基金(No.51Y084911); 国家自然科学基金委青年科学基金(41101066)资助

作者简介: 张国飞(1989-), 男, 甘肃临泽人, 硕士研究生, 2011年毕业于西北师范大学, 主要从事冰川物质平衡研究
Email: zhangguofei_lz@126.com

单点物质平衡 b_n :

$$b_n = b_i + b_s + b_{si} \quad (1)$$

式中: b_i 、 b_s 、 b_{si} 分别代表冰川冰、积雪和附加冰平衡值。以单点物质平衡为基础,绘制出物质平衡等值线,用面积加权法计算出整个冰川的物质平衡(B_n):

$$B_n = \frac{1}{S} \sum s_i b_i \quad (2)$$

式中: s_i 为两相邻等值线的投影面积; b_i 为 s_i 的平均物质平衡; n 为 s_i 的总数; S 为冰川总面积。表 1 是乌源 1 号冰川 2008-2009 年的物质平衡观测计算结果。研究使用的气温、降水资料选用乌鲁木齐河源大西沟气象站(86°50'E,43°06'N,海拔 3 539 m,该气象站距离乌源 1 号冰川的水平距离约 2 km)的资料。

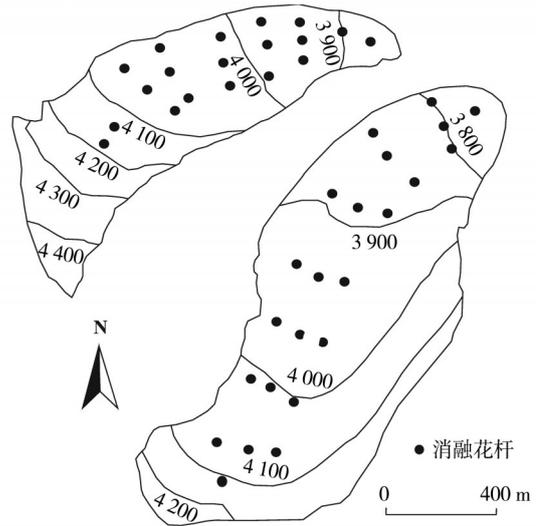


图 1 乌源 1 号冰川 2009 年物质平衡观测网点
Fig.1 Observation network of Urnmqi Glacier No.1 in 2009

表 1 乌源 1 号冰川 2008-2009 年物质平衡观测计算结果

Tab.1 Annual mass balance of Urnmqi Glacier No. 1 for 2008-2009

乌源 1 号冰川		纯积累			纯消融			物质平衡	
		积累区面积/km ²	积累量/10 ⁴ m ³	积累深/mm	消融区面积/km ²	消融量/10 ⁴ m ³	消融深/mm	总量/10 ⁴ m ³	平衡值/mm
2007/08	西支	0.185	1.6	88	0.406	47.8	1 178	-46.2	-782
	东支	0.022	0.1	32	1.064	121.5	1 141	-121.4	-1 118
	合计	0.207	1.7	82	1.47	169.3	1 152	-167.6	-999
2008/09	西支	0.466	26.1	561	0.112	9.7	871	16.4	283
	东支	0.595	20.1	338	0.474	26.1	551	-6.0	-56
	合计	1.061	46.3	436	0.586	35.8	612	10.4	63

2 结果与讨论

冰川积累区比率(AAR)的大小反映冰川补给条件的优劣变化,与物质平衡结果同步变化^[5],2008-2009年,冰川积累区比率从 12%变成了 64%,说明冰川补给量明显增多。物质平衡随积累区面积的增大而增大,随消融区面积的增大而减小,从积累区和消融区面积变化上看,2008 年与 2009 年相比,积累区面积后者比前者增多了 0.854 km²(增加了 4.1 倍),消融区面积后者比前者减少 0.884 km²,即减少了 60%,物质平衡后者比前者增加了 1 062 mm。物质平衡是纯积累量和纯消融量的代数和,反映了冰川表面单位面积上相对于上一个物质平衡年末冰面的平均升降变化情况,从纯积累量和纯消融量上看,2009 年纯积累量是 2008 年的 27 倍,而纯消融量仅为 2008 年的 1/5。

乌源 1 号冰川的物质平衡在 1986 年之前由气温和降水共同决定,且以降水为主,但 1986 年之后发生了转变^[4]。该冰川 1997-2009 年的平均夏季气温变化 0.11 °C/a,2009 年夏季气温较 2008 年降低了 1.8 °C,随海拔的升高,气温逐渐降低,冰面积雪增厚,消融强度减弱,物质平衡向正平衡发展的趋势增强。图 2 是乌源 1 号冰川东、西支 2008-2009 年冬平衡和夏平衡的变化。从东、西支的变化过程来看,冰川西支 2008 年和 2009 年的冬平衡变化没有大的差异,分别为 176 mm 和 232 mm,但是夏平衡变化发生了明显变化,2008 年夏季消融期从 5 月份开始,西支所有高度带(4 484 ~ 3 845 m)均处于消融状态,随着海拔的降低消融强度逐渐增大,其中 4 484 ~ 4 150 m 高度带消融比较微弱(物质平衡均 < -400 mm),4 150 ~ 3 845 m 高度带消融非常严重,致使西支 2008 年夏平衡达 -958 mm;而 2009 年夏

季消融期开始的时间推迟至了7月份,结束于8月份,仅在冰川消融区4 000~3 845 m间的高度带发生了消融,其余高度带(面积占西支总面积的65%)仍然处于积累状态,使西支2009年夏平衡为51 mm。同理,东支2008和2009年冬平衡变化没有大的差异,分别为209 mm和265 mm,夏平衡也发生了明显变化,由于东支的海拔较西支低,2008年夏季消融期从5月份开始,东支所有高度带(4 267~3 742 m)均处于加速消融状态,消融强度远大于西支,夏平衡达-1 328 mm;到2009年夏季,冰川消融期开始

的时间推迟至了7月份,海拔在3 742~4 000 m间的消融区发生了消融,但消融强度较弱,海拔在4 000~4 267 m间的高度带也处于弱积累状态,使东支在2009年夏平衡为-321 mm,较2008年增大了1 006 mm。整体来看,西支2009年较2008年冬平衡多积累了56 mm,夏平衡少消融了1 009 mm,年物质平衡增加了1 065 mm;东支2009年较2008年冬平衡多积累了52 mm,夏平衡少消融了1 006 mm,年物质平衡增加了1 062 mm,表明东、西支的物质平衡变化情况是一致的(表2)。

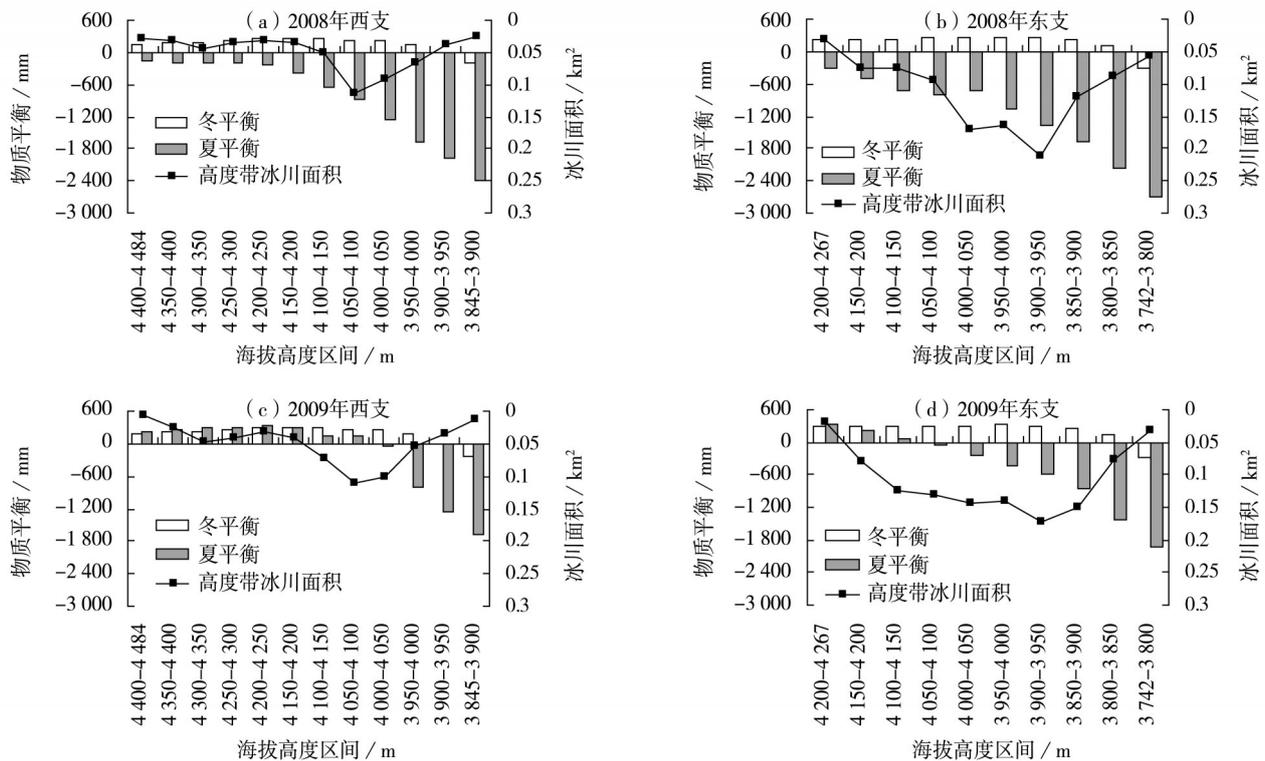


图2 乌源1号冰川东、西支2008-2009年冬平衡和夏平衡变化

Fig.2 Summer balance and winter balance of Urmqi Glacier No.1 for 2008-2009

表2 乌源1号冰川2008-2009年物质平衡及气象要素的观测计算结果

Tab.2 Annual mass balance and climate parameter of Urmqi Glacier No. 1 for 2008-2009

乌源1号冰川	9月至翌年4月	5月	6月	7月	8月	5~8月	物质平衡年
2008年西支 b_n /mm	176	-41	-213	-389	-315	-958	-782
2009年西支 b_n /mm	232	96	72	-104	-13	51	283
西支变化量 Δb_n /mm	56	137	285	285	302	1 009	1 065
2008年东支 b_n /mm	209	-129	-205	-631	-362	-1 327	-1 118
2009年东支 b_n /mm	265	109	75	-175	-330	-321	-56
东支变化量 Δb_n /mm	56	238	280	456	32	1 006	1 062
2008平均气温 T /°C	-8.9	2.7	4.9	6.2	5.4	4.8	-4.3
2009平均气温 T /°C	-7.8	-1	3.4	5	4.7	3.0	-4.2
2008年降水 P /mm	138.5	68.0	80.5	145.6	104.6	398.7	537.2
2009年降水 P /mm	163.5	69.2	119.6	104.4	82.2	375.4	538.9

1959–2009 年间,乌源 1 号冰川物质平衡变化范围为-931 ~ 374 mm,多年平均值为-267 mm,负平衡年平均为-450 mm,正平衡年平均为 130 mm。利用 51 a 的实测资料,分析夏季气温(T_{5-8})、年降水量(P)对物质平衡(B_n)的敏感性:

$$B_n = 514 - 401T_{5-8} + 0.99P \quad (R=0.62, N=51), \quad (3)$$

当年降水量不变时,夏季气温升高(降低)1 °C,物质平衡减小(增大)401 mm。夏季气温不变时,年降水量增多 100 mm 时,物质平衡增大(降低)99 mm。大西沟气象站 51 a 的夏季气温为 3.1 °C,年降水量为 458 mm,这一平均气候状况所对应的物质平衡为-275 mm,与平均物质平衡-267 mm 基本吻合。根据式(3)对 2009 年物质平衡的变化分析,表明夏季气温降低 1.8 °C 是引起物质平衡变化的主要原因。

冰川物质平衡主要受气温和降水的影响,二者是决定物质平衡正负的关键,冰川的积累主要由降水决定,冰川的消融主要由气温决定,而积累的多少和消融的强弱取决于气温和降水的高低^[6-8]。对于乌源 1 号冰川这种暖季补给型冰川而言,积累和消融同时发生在夏季,在一个物质平衡年内,夏季消融期(5~8 月)气温的高低和降水的多少,对该年度的物质平衡起决定性作用。当物质平衡年内降水较多,夏季平均气温变化不大时,物质平衡的变化不大,如 1997 年与 1998 年相比,降水后者比前者多了 214 mm,夏季气温仅低了 0.2 °C,导致物质平衡变化了 63 mm,表明降水对物质平衡的影响不是特别明显,但是逐年增多的降水也会增加冰川的积累量,影响冰川物质平衡的变化。当物

质平衡年内夏季气温较高,降水相当时,则造成物质平衡严重亏损,如 2003 年与 2004 年相比,夏季气温后者比前者高 0.8 °C,降水相差 28 mm,导致当年的物质平衡减少了 371 mm(低了 1 倍)。当物质平衡年内夏季气温较低,降水相当时,气温对物质平衡值的影响极为明显,如 2008 年与 2009 年相比,降水相当,但夏季平均气温后者比前者低 1.8 °C,使得当年的物质平衡增多了 1 062 mm,说明夏季气温对物质平衡的影响非常敏感。

物质平衡受气温和降水的影响在一些极值年份表现的尤为明显。从表 3 中可以看出,一些年份如 1996–1997 年、2002–2003 年、2008–2009 年,物质平衡在年际间都发生了剧烈的变化,变化幅度均大于 500 mm,对应的夏季气温也发生了明显的变化,变化幅度在 1 °C 左右。降水对物质平衡的影响具有时间上的滞后性,物质平衡发生剧烈变化年份的前一年或者前两年的降水也有明显的变化。气温和降水共同影响着物质平衡的变化,尤其是夏季气温的显著变化更为敏感,2009 年物质平衡从 2008 年的-999 mm 转为 63 mm,主要是夏季气温降低了 1.8 °C,削弱了冰川的消融强度,减少了冰川的消融量,其次是从 2005 年以来逐渐增多的连续性降水,由于其滞后性使更多的降水以固态的形式在冰川上保留下来,增加了冰川的积累量。

冰川物质平衡在相同区域具有相似性,因而可以通过某一区域内代表性参照冰川的研究,揭示该区域物质平衡特征和变化规律。鉴于乌源 1 号冰川 2009 年出现正平衡的现象,对比分析 WGMS 收录的世界重点监测冰川的多年物质平衡

表 3 乌源 1 号冰川 1994–2009 年物质平衡与夏季气温、年降水量观测结果

Tab.3 Mass balance and summer temperature, precipitation of Urmqi Glacier No.1 in 1994–2009

年份	夏季均温/°C	物质平衡/mm	年降水量/mm	年份	夏季均温/°C	物质平衡/mm	年降水量/mm
1994	3.1	-378	521	2002	4.0	-834	627
1995	3.0	-228	429	2003	2.8	-384	454
1996	2.8	42	674	2004	3.6	-755	426
1997	3.7	-853	383	2005	3.5	-488	500
1998	3.5	-790	597	2006	3.8	-795	476
1999	3.9	-791	493	2007	4.3	-642	619
2000	3.7	-330	621	2008	4.8	-999	537
2001	4.0	-840	412	2009	3.0	63	539

变化情况,发现2009年度物质平衡发生剧烈变化出现物质正平衡的冰川,除乌源1号冰川外,还有处于西天山的图尤克苏冰川(地处外伊犁阿拉套山北坡),其物质平衡由2008年-1 357 mm变为2009年的206 mm,这可能是区域性气温降低而导致的。进一步分析两条冰川过去的50余年的物质平衡资料,发现二者的物质平衡变化趋势具有显著的同步性,且变化趋势基本一致,总体上表现为物质亏损,图尤克苏冰川的亏损程度远大于乌源1号冰川。

3 结 论

物质平衡受气温和降水的影响,当气温升高到一定程度后,夏季气温对物质平衡的影响非常敏感。而降水对物质平衡的影响变得很微弱。因此,夏季气温是引起物质平衡变化的主控因子,其高低决定冰川消融期的开始时间和结束时间以及消融强度,从而决定冰川物质平衡的变化趋势。此外,夏季气温和降水对物质平衡的影响在一些极值年份表现的尤为明显。

乌源1号冰川2009年出现物质正平衡的主要原因是夏季气温(5~8月)的降低,较2008年低1.8℃,致使冰川消融期的开始时间推迟至了7月份,结束时间提前到8月份,大大削弱了冰川的消融强度,其次是2005年以来逐渐增多的连续性降水,增加了冰川的积累量。而夏季气温与消融量的定量关系以及物理变化机理,还有待进一步研究。

参考文献(References)

- [1] WANG Wenbin, LI Zhongqin, ZHANG Guofei, et al. The processes and characteristics of mass balance on the Urumqi Glacier No.1 during 1958–2009[J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2012, 4(6):505–513.
- [2] 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.
- [3] LI Zhongqin, SHEN Yongping, LI Huilin, et al. Response of the melting Urumqi Glacier No.1 in eastern Tianshan to climate Change [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(Suppl.): 67–72.
- [4] 张国飞, 李忠勤, 王文彬, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川1959–2009年物质平衡变化过程及特征研究[J]. *冰川冻土*, 2012, 34(6): 1301–1309. [ZHANG Guofei, LI Zhongqin, WANG Wenbin, et al. Change processes and characteristics of mass balance of the Urumqi Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains during 1959–2009[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(6):1301–1309.]
- [5] 杨惠安, 李忠勤, 叶佰生, 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. [YANG Huian, LI Zhongqin, YE Baisheng, et al. Study on mass balance and process of Glacier No.1 at the Urumqi River in the past 44 years[J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(1):76–80.]
- [6] 焦克勤, 王纯足, 韩添丁. 天山乌鲁木齐河源1号冰川新近出现大的物质负平衡[J]. *冰川冻土*, 2000, 22(1):62–64. [JIAO Keqin, WANG Chunzu, HAN Tianding. A strong negative mass balance recently appeared in the Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(1):62–64.]
- [7] 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): 464–469. [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):464–469.]
- [8] 王立伟, 李忠勤, 董志文, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川冰芯记录形成过程及年代划分[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(5): 739–746. [WANG Liwei, LI Zhongqin, DONG Zhiwen, et al. Chronology and record formation process of an ice core from Glacier No.1 at the Urumqi Riverhead in eastern Tianshan, China[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(5):739–746.]

A positive mass balance appeared at Urumuqi Glacier No. 1 in 2009

ZHANG Guo-fei¹, LI Zhong-qin^{1,2}, WANG Wen-bin², WANG Wei-dong¹

(1 College of Geography and Environmental Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2 State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The shrinkage of mountain glaciers in the 20th century has been occurring on a global scale, and the rate of shrinkage of most glaciers appears to have been accelerated during the past two or three decades. Observations of Urumqi Glacier No. 1 were initiated in 1959, implemented by the Tianshan Glaciological Station, Chinese Academy of Sciences. As the longest series data in China and a reference glacier in the World Glacier Monitoring Service glacier monitoring network, Urumqi Glacier No.1 provides the longest glaciological and climatological monitoring record in China. This paper is intended to analyze the mass balance of Glacier No.1 to identify its response to the changes in temperature and precipitation. The techniques of glacier mass balance measurements using a standardized method have been described by Meier. The mass balance is calculated by contour maps of accumulation, ablation, and additional snow pits. Comparisons of methods for mass balance calculations show that the stake network generally provides accurate estimates of glacier mass balance. The total mass balance of the glacier (bn) can be obtained by the area-weighted method for all altitude zones. Based on the past 51 years of mass balance observation data, some results were obtained. The mass balance process of Tianshan Mountains Glacier No.1 experienced glacier nine times positive balance fluctuation and nine times negative balance fluctuation, the rates of negative balance years with positive balance years are 35:16. With global warming, the Urumqi Glacier No.1 is retreating and thinning rapidly, especially from 1997 to 2009, there are continuous 12 negative balance observation years at Tianshan Mountains Glacier No.1. It shows that the Glacier No.1 in a strong negative numerical balance, and the strongest negative balance, -931 mm. w.e., emerges from 2008 during the observation period. And what's more, the cumulative mass balance reaches 13 709 mm. w.e. in 2008. But in 2009, the mass balance is positive, 63 mm. w.e., and the inter-annual change up to 1 062 mm. w.e.. Glacier mass balance is highly sensitive to changes in temperature and precipitation, which makes them become important indicators of climate change. When temperature reach the higher or lower, the mass balance of warm season supplied Glacier controlled by the temperature though the precipitation is great or small, Summer air temperature is the main control factors for the change of glacier mass balance. By analyzing the observation data of mass balances, air temperature and precipitation at Urumuqi Glacier No.1 between 2007/08 and 2008/09, the lower summer temperature is the main factor to result in the phenomenon. The lower summer temperature caused the start time of glacial ablation period was delayed and the end time of glacier ablation was advanced, so the loss mass reduced. And, secondly, increase annual precipitation is one of factor represent addition of mass to the glacier.

Key Words: Urumuqi Glacier No.1; Positive mass balance; Summer temperature