

刘铸,李忠勤. 近期冰川表面径流系数变化的影响因素——以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例 [J]. 地球科学进展, 2016, 31(1): 103-112, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2016.01.0103. [Liu Zhu, Li Zhongqin. Factors affecting the variation of glacier surface runoff-coefficient—A case study of Urumqi No. 1 Glacier [J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(1): 103-112, doi: 10.11867/j.issn.1001-8166.2016.01.0103.]

近期冰川表面径流系数变化的影响因素^{*}

——以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例

刘铸^{1,2}, 李忠勤^{1*}

(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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 采用水量平衡法计算得到天山乌鲁木齐河源1号冰川1982—2014年物质平衡值, 与实测物质平衡值对比分析发现: ①水量平衡法适用于冰川区多年物质平衡的计算, 其中1号冰川1982—2014年计算值与实测值误差在1%以内, 与之对应的山岩区和冰面径流系数分别为0.7和0.85。②1982—2005年的物质平衡值与实测物质平衡值高度相关, 且误差较小, 在这一阶段径流系数能较好地反映冰川区的产流情况; 而2005—2014年计算得到的物质平衡值与实测物质平衡值之间有较大差距, 且变化趋势差异明显, 说明这一阶段径流系数受一些因素影响存在较大的波动。选取误差较大的2005—2008年和误差较小的1996—1999年进行逐月分析, 发现在夏平衡中, 计算结果普遍要高于实测物质平衡值。分析认为水热条件的改变以及相应的冰川产流系数的变化是导致这一差异的主要原因。分析结果表明在长时间尺度上利用水量平衡计算冰川物质平衡值准确度较高。

关 键 词: 水量平衡法; 物质平衡; 径流系数; 冰面蒸发; 乌鲁木齐河源1号冰川

中图分类号: P343.6; Q148

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2016)01-0103-10

1 引 言

冰冻圈是全球气候系统的五大圈层之一。因其独特的物理属性和形态特征, 冰冻圈是对气候变化响应最为直接和敏感的圈层。作为中、低纬度地区冰冻圈最发育的中国而言, 冰冻圈对水资源、生态系统、自然环境及气候均具有重要影响^[1]。在我国, 降水主要集中在夏季, 东亚季风和南亚季风携带的暖湿气团为内陆带来了大量的降雨。而西北干旱区的绝大部分区域位于非季风区, 所以该区降水稀少,

因此冰川水资源对该地区有着重要的意义。在温度较高的夏季, 冰川消融强烈, 此时, 冰面河发育, 冰川补给径流。与此同时, 降水也主要集中在这一时段, 冰川物质收入在这一时段也最强烈。而欧洲气候冬温夏凉, 降水全年分布均匀^[2], 因而冰川的积累消融模式不同于我国。这也是我国西北干旱区冰川具有的独特性之一。融化的冰川水以及降水对下游的工农业发展提供强有力的保障, 冰川融水在某些内陆河河水中所占比例可达到45%以上^[3]。在冬季, 由于气候条件的局限, 农牧业需水量急剧下降, 此时

* 收稿日期: 2015-11-10; 修回日期: 2015-12-15。

* 基金项目: 中国科学院重点部署项目“冰冻圈快速变化的关键过程研究”(编号: KJZD-EW-G03-01); 国家自然科学基金项目“新疆天山关键地区冰川变化模拟预测”(编号: 41471058); 科技部基础性工作专项项目“中国西部主要冰川作用中心冰量变化调查”(编号: 2013FY111400) 资助。

作者简介: 刘铸(1990-), 男, 湖南岳阳人, 硕士研究生, 主要从事天山地区全球变化与冰川水资源方面研究。E-mail: liuzhu@lzb.ac.cn

* 通信作者: 李忠勤(1962-), 男, 重庆人, 研究员, 主要从事冰川与环境方面研究。E-mail: lizq@lzb.ac.cn

的降水则以固态的形式存储在冰川上,而夏季,下游需水量增加,冰川的消融也急剧增加,补充河水,保证下游的工农业用水需求。通过这种方式在时间上进行一定程度的调蓄,所以,冰川有“固态水库”的作用,滋养着下游的绿洲。这一作用对于降水量严重不足且时空分布不均匀的西北干旱区来讲具有极其重要的作用^[6]。

径流系数是指研究区内流域平均径流深与流域平均降水量的比值,即: $\alpha = R/P$, 其中 R 表示流域平均径流深; P 表示流域平均降水量; α 表示径流系数,是流域水量平衡的基本参数。一般情况下 R 小于 P , 也就是说 α 一般小于 1。但是冰川作为具有独特性的研究对象,在干旱年份往往存在物质亏损,所以 R 要大于 P , 此时冰川覆盖区的 α 大于 1, 这与一般无冰川覆盖的地方的径流系数恒小于 1 不同。水量平衡法^[6]一般以年尺度计算,所以本文中 α 值为年平均。

冰川物质平衡是指单位时间内冰川上以固态降水形式为主的物质收入(积累)和以冰川消融为主的物质支出(消融)的代数和。积累部分主要包括冰川表面的降雪、凝华和再冻结的雨,以及由重力作用再分配的吹雪堆和雪崩堆等。消融则包括径流、蒸发、升华和冰体崩解、流失于冰川之外的风吹雪及雪崩。冰川物质平衡是冰川在气候系统影响下的客观存在,且与气候变化联系紧密。物质平衡值作为冰川观测的常规观测项目,能够在数值上定量表示冰川物质亏损或盈余,这是开展其他工作,如冰川运动速度、冰川储量变化和冰川模型等的前提。同时也是冰川动态监测、水文监测和政策决策方向的基础。

国际上物质平衡的观测开始于 20 世纪上半叶,我国从 1950 年开始对物质平衡进行观测^[6]。在实际操作中,一般采用雪坑—花杆法测量冰川的物质平衡值。这种方法可以精确测量每个测量点在某一时段内的物质平衡的变化,然后运用从点到面的方法推算出冰川的积消情况,是当前操作较为可行、能得到较高质量数据的方法^[7,8]。雪坑—花杆法对人员和设备有一定要求,而且必须获得 2 期数据才能产出有效的物质平衡值。所以,本文尝试用较为容易获得的气象数据来建立水文气象资料和冰川物质平衡值的联系,也就是通过输入研究区 P , R 和 α 来获得研究区内冰川物质平衡值的方法——水量平衡法。这一方法在其他研究区域也有应用,陈仁升等^[9]根据水量平衡观测与模拟结果粗略算出高寒

区典型下垫面径流系数并预测了全球变暖情况下高寒山区的径流系数变化;张士峰等^[10]运用水量平衡法计算海河流域水资源存在的问题。

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川(以下简称 1 号冰川)已拥有 60 多年的连续观测资料,资料的序列长且完整性高。其中气象数据和水文数据应用于本研究中,能够满足本研究的需要。同时,1 号冰川观测资料中也有与之对应的实测物质平衡值数据。这给本研究进行计算值与实测值对比提供了可能,本文试图找出它们之间的联系,分析其存在差异的原因,并找出可能存在的普适性规律。

2 研究区与资料

2.1 1 号冰川

1 号冰川(43°06'N, 86°49'E)位于天山中部,是乌鲁木齐河流域的上游(图 1)。地处亚洲中部,属于东亚内流区。冰川区面积 3.34 km²,包括冰面和裸露山岩两部分。其中冰面面积由 1982 年的 1.84 km²减少为 2014 年的 1.62 km²^[11,12]。1 号冰川于 1993 年消融退缩为东西 2 支^[13]。1 号冰川作为我国观测时间最长、资料最为详尽的第一条观测冰川,也是世界冰川监测服务处(World Glacier Monitoring Service, WGMS)长期选定的参照冰川之一^[14,15]。1 号冰川是典型的大陆型冰川^[16],积累和消融主要集中在 5~8 月,即冰川物质夏平衡时期。其冰川规模和典型特征可以很好地代表这一类型的冰川,对中亚的冰川也有很好的代表性。冰川大多位于高海拔或者高纬度地区,气候条件较为恶劣,人迹罕至^[17~19]。这给大范围观测和研究带来了很大的困难。传统的物质平衡观测方法不适合进行大范围、高密度的观测。而气象数据的观测则比较容易实现自动化观测,便于数据采集和分析。因此,研究水量平衡法计算得到的物质平衡值与实测物质平衡值之间的对比关系并对其差异进行探讨,对于这一类型和这一地区的冰川研究具有重要的意义。

2.2 资料

本文所采用观测的年物质平衡值和 1 号冰川径流量数据来自天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的观测年报,观测序列从 1959 年开始。由于“文革”的影响,20 世纪 70 年代至 80 年代初观测停止,所以本文采用的数据序列为 1982—2014 年。水文资料来自于 1 号冰川水文观测站位,位于 1 号冰川下游 300 m,集水面积 3.34 km²^[20]。降水和气温数据来自中国气象局大西沟气象站(43.126°N, 86.858°E),海拔

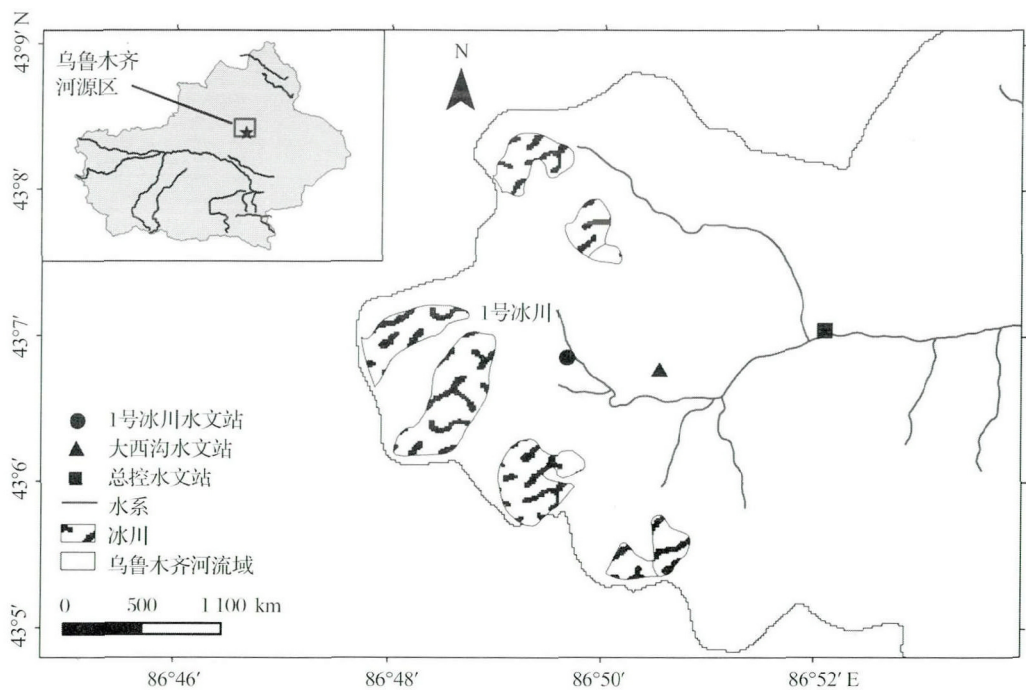


图 1 乌鲁木齐河源 1 号冰川及水文观测点的地理位置

Fig. 1 Location of Urumqi Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River and hydrological stations

3 539 m,距离 1 号冰川末端 3 km。

3 研究方法

3.1 雪坑—花杆法

物质平衡值作为冰川观测的常规观测项目之一,常规观测手段为雪坑—花杆法。即在平衡线以下或者雪量较少的地方插上花杆,并持续观测杆高、雪深以及对应的雪密度。而在粒雪盆地区,因为雪厚度较大,则采用挖雪坑的方法获得冰川冰以上雪和附加冰的水当量的情况,需要观测雪深和对应雪密度。1995 年 1 号冰川所设花杆点如图 2 所示,测量点共 42 个。其他年份测量点经纬度大致一样,会根据实际情况进行微调。

雪坑—花杆法的观测点取决于所观测冰川的大小、位置和地形。1 号冰川上的观测点超过 40 个,可以较好地反映出冰川整体的物质变化情况。1 号冰川为典型的中亚大陆型冰川,由于降水集中在夏季,而且夏季温度较高,所以积累与消融在夏季都比较强烈。

3.2 水量平衡法

冰川物质平衡的观测是冰川观测的基础,但是在实际操作中,雪坑—花杆法实施难度较大。尤其是在高海拔高纬度的冰川地区,气候条件较为恶劣,

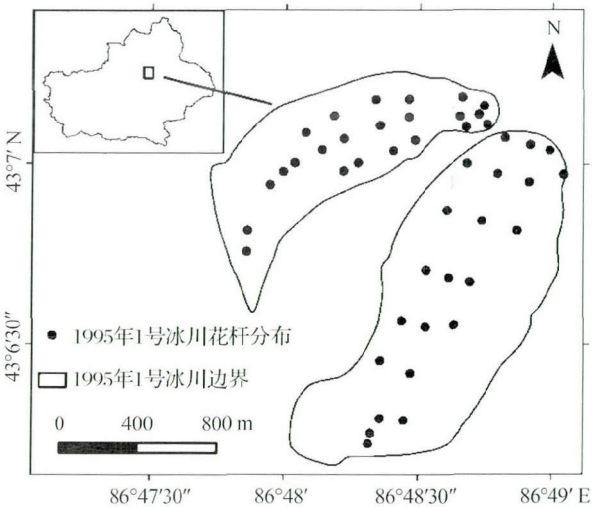


图 2 乌鲁木齐河源 1 号冰川 1995 年花杆点

Fig. 2 Distribution of the measured stakes on the Urumqi Glacier No. 1 in 1995

测量人员不仅需要坚强的体魄,还必须具备一定的专业知识。这不利于此种方法大范围应用,尤其是当冰川研究从单条冰川面向区域尺度研究发展的现在,迫切需要将水量平衡法和冰川的物质平衡值较好地联系起来。

水量平衡法也叫水均衡法或水量均衡法,是

研究某一地区一定时间内水的存储、补给和消耗的数量转化关系的平衡计算,水量平衡建立在物质守恒定律基础上^[21]。在水文学基本定义中,水量平衡定义为地球上任一区域或水体在一定时段内,输入与输出的水量之差等于该区域或水体的储水变化^[22]。而在冰川区,这种水体的储水变化则实际表现为冰川的冰量变化,也就是冰川的物质平衡值。

水量平衡法计算冰川物质平衡值输入的主要变量是冰川区降水和径流以及径流系数。所需变量比较容易获得,而且可以实现自动观测,特别是对于高纬度、高海拔或地形比较复杂的地方,采用这种方法计算冰川物质平衡值的意义尤为重要。冰川区包括两部分,一为冰面区,二为裸露山岩。由于下垫面性质不同,这两部分的产流能力也有差异。杨针娘^[23]根据已有数据得出冰川区和裸露山岩的产流经验系数。在水量平衡法中,这 2 种下垫面在降水条件下的产流系数分别设定为 0.85 和 0.7。以 1 号冰川为例,1958—1986 年运用水量平衡法计算得到的物质平衡值与实测的物质平衡值相比,所得误差在精度要求以内^[23]。

对于整个冰川区,应该有:

$$P' - R - E = \pm B_n \quad (1)$$

式中: P' 为修正后的降水量^[24], R 为冰川区径流, E 为冰川区蒸发, B_n 为冰川物质平衡值。冰川区的降水有 3 种可能的去向: 一是再蒸发为水汽, 二是形成径流, 三是有可能补给冰川^[23]。当然冰川冰、水汽、径流都是互相转化的, 水量平衡法主要在系统上把握, 系统内的相互转换对计算没有影响。水量平衡法如图 3 所示。

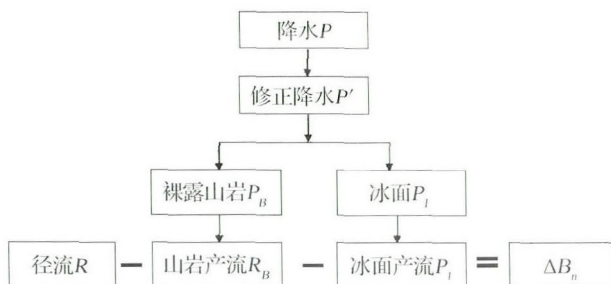


图 3 水量平衡法流程图

Fig. 3 Flow chart of water balance method

冰川的径流来源^[24]有: 裸露山岩的降水产流、冰面的降水产流和冰川消融产流。其中冰川的消融产流若为正, 则 B_n 为负, 冰川处于消融状态; 若冰川

消融产流为负, 则 B_n 为正, 冰川处于积累状态。山岩产流是根据山岩区降水量乘以多年经验系数 α_B 计算得到的: $R_B = P_B \times \alpha_B$, 其中 $\alpha_B = 0.7$, 为山岩的径流系数, 与之对应的山岩区的蒸发量为: $E_B = P_B \times (1 - \alpha_B)$ 。同理, 冰川产流则等于冰川区降水乘以多年经验系数 α_I 得到: $R_I = P_I \times \alpha_I$, 其中 $\alpha_I = 0.85$ 为冰川的径流系数, 冰面的蒸发量为: $E_I = P_I \times (1 - \alpha_I)$ 。所以, 我们可以根据冰川区的降水、径流数据以及径流系数得到一组利用水量平衡法计算得到的冰川物质平衡值。

4 水量平衡法与实测物质平衡法结果对比

4.1 数据对比

由天山冰川观测站年报数据整理可得 1982—2014 年乌鲁木齐河源 1 号冰川实测物质平衡值。降水、径流数据由中国气象局大西沟气象观测站和 1 号冰川水文观测站测得。根据这些数据可以求得 1982—2014 年 1 号冰川的计算物质平衡值。实测物质平衡值和计算物质平衡值如图 4 所示。冰川的亏损值有明显增多的趋势, 这一趋势可能是由于气温持续升高, 冰川冷储减少导致的^[13]。1 号冰川加速消融, 观测事实表明 1 号冰川持续退缩, 面积逐年减少^[27,28]。气候变化导致的冰川强烈消融, 在长时间尺度上对人类社会的影响是循序渐进的, 不会立刻显现, 如对水资源的影响、对地形条件的改变等。但是, 在短时间尺度上对人类社会的影响是极其重大的, 如冰崩、雪崩以及冰湖溃决洪水等^[29]。在这些自然灾害面前, 人类显得非常渺小。但是有效的预警系统和防治措施可以很有效地减轻、消除这些灾害对人类社会的影响^[30,31]。

根据水量平衡法计算得到的冰川物质平衡值多年平均值为 -461.21 mm , 观测得到的冰川物质平衡多年平均值为 -464.95 mm 。计算与实测的多年平均值误差仅为 -1% 。可见水量平衡法适合于多年预测。但是具体到每一年, 这种误差差别很大, 误差分布在 $1.45 \sim 867 \text{ mm}$ 。选取误差在 17% 以内或距实不超过 100 mm 的年份作为误差小的点。研究发现误差较大的点主要集中在 3 个时间段: 1985—1988 年、1992—1994 年和 2005—2014 年 (其中 2011 年误差为 5.4%), 此外 1991 年、2000 年和 2003 年, 误差也较大。

4.2 初步分析

我们可以清楚地看到, 在 1982—2005 年, 即使

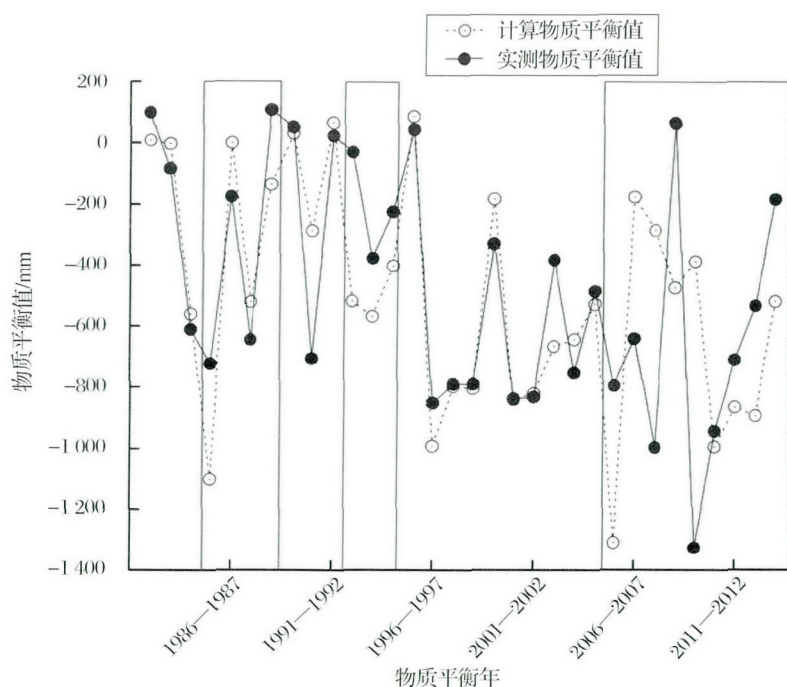


图4 实测物质平衡值和水量平衡法计算物质平衡值对比图

Fig. 4 Comparison of the mass balance calculated by water balance method and measurement

在误差较大的年份,实测与计算的变化趋势也是一致的。如1985—1988年和1992—1994年这2个时间段,变化趋势高度相关,只是变化幅度存在差异,导致误差较大。冰川的消融速率逐渐增加。说明,水量平衡法可以很好地推导出冰川的物质平衡变化趋势,这也是该方法运用到高山、高纬度地区的基础。

但是,在2005—2014年,这种误差逐渐拉大。随着冰川的消融,冰川体积、面积和长度的减小,最近几年这种误差也越来越明显。2004—2005年,计算和测量的值的误差可达到867 mm。下文就这种变化差异来进行分析探讨,以期获得导致这种差异的原因和解决方法。

4.3 逐月分析结果

因为本文所研究的时间序列为1982—2014年,时间跨度较长,年份较多,不便于进行每年精细的比较。所以将会选取其中几年,对每年的物质平衡值变化较大的5~8月进行逐月分析。在夏平衡(一般为5~8月),环境温度较高,降水也相对集中,冰川的消融与积累在这一时段比较强烈。本文将每年5~8月进行实测与计算的物质平衡值逐月对比。主要选取2类,一类是计算物质平衡值和实测物质平衡值误差较小的年份,还有一类是计算物质平衡值和实测物质平衡值误差较大的年份。

选取1996—1997年、1997—1998年和1998—1999年作为误差小的年份代表(误差分别为16%, 1%和2%),进行逐月分析。选取2005—2006年、2006—2007年和2007—2008年,作为误差大的年份代表(误差分别为65%, -72%, -71%),进行逐月分析,分析结果如图5所示(由于某些月份数据缺失,故略去不计)。

在误差较小的1996—1997年、1997—1998年和1998—1999年,计算值普遍大于观测值(占12个样本月中的9个,其他3个与实测值相差不大),这种差距平均值为60.02 mm。也就是说,在物质夏平衡,温度较高的5~8月,运用水量平衡法会少算一部分冰量的损失。这是由于夏季蒸发强度要远远大于年平均的蒸发强度^[3],若只计算夏平衡时段的水量平衡,则冰的损失量会偏高。同理,冬平衡中蒸发量低于年平均,那么计算值会小于观测值。所以平均到一年这种损失量是趋近于零的。表现在年尺度上计算值与实测值相对等。这也是为什么在1996—1997年、1997—1998年和1998—1999年计算值与实测值误差较小的原因。

在误差较大的2005—2008年,计算值也是普遍大于实测值(9个样本月中的7个计算值大于实测值,其他2个月与实测值相差不大),但是这种差距平均值高达191.86 mm。2005—2008年的夏平衡中,

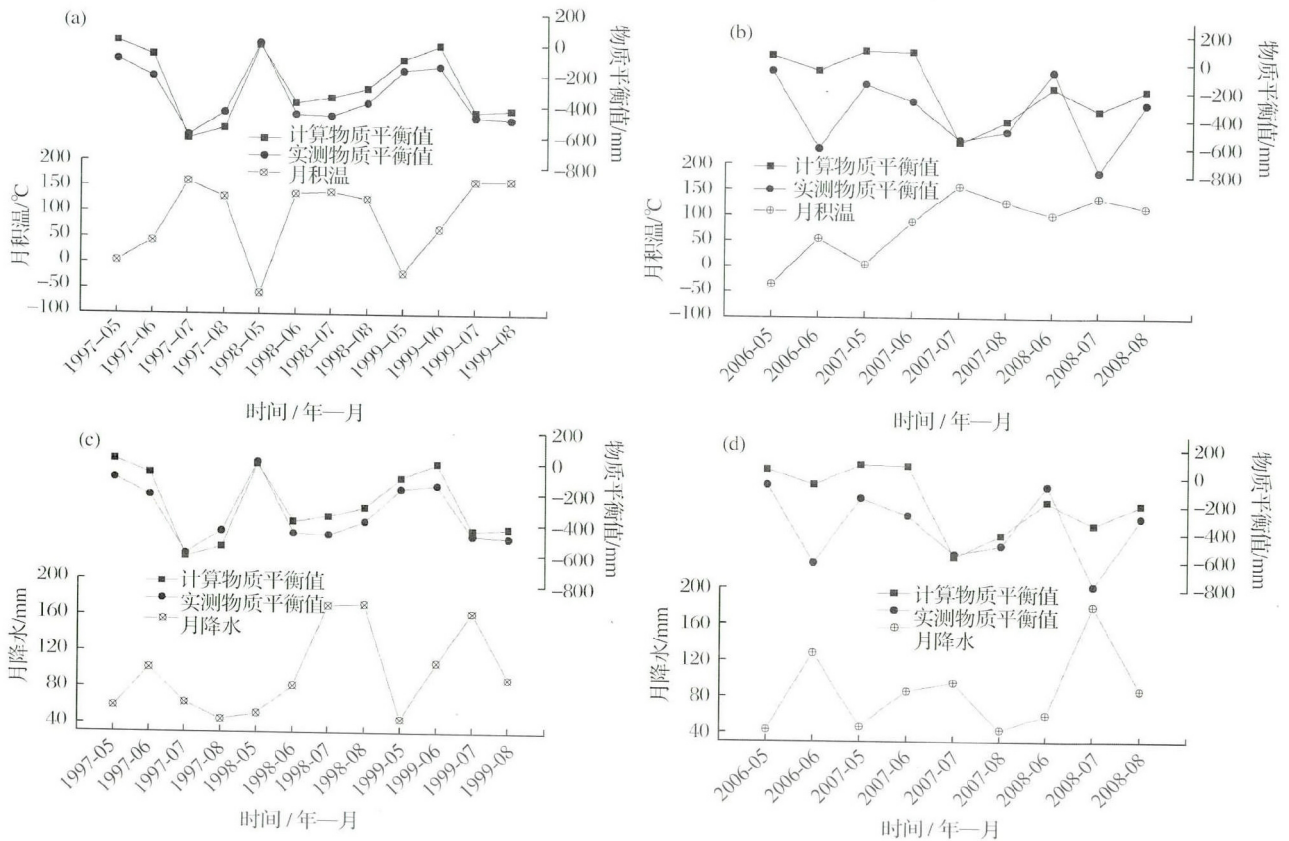


图 5 1997—1999 年 (a)、(c) 和 2006—2008 年 (b)、(d) 夏季物质平衡值与月累积气温、降水的关系图

Fig. 5 Relationships between mass balance, precipitation and temperature in summer of 1997-1999 (a)、(c) and 2006-2008 (b)、(d)

物质平衡计算值与实测值的差距是 1996—1997 年、1997—1998 年和 1998—1999 年 3 年夏平衡平均值的 320%，与此对应的是 2005—2014 年计算值与实测物质平衡值存在较大误差，并且它们之间的变化趋势存在较大差异。有意思的是，年尺度上物质平衡计算值与实测值的误差并不是单纯的计算值恒大于实测值，而是交替变化。这可能是由于水热条件的改变导致降水—积雪—成冰—径流等过程的时间发生了改变，从而出现这种不规律的交替变化。

综上所述，分析可能存在的原因有：① 随着水热条件的改变，尤其是温度的升高，冰川的实际蒸发量要大于水量平衡法算出的结果 $(1 - 0.85) \times P'$ (P' 为修正后的降水量)，从而影响物质平衡的定量计算；② 水热条件的改变影响了冰川的产流系数，导致计算值偏离实际值。

4.4 水热条件对径流系数的影响

根据对 1996—1999 年和 2005—2008 年逐月对比发现，实测值物质平衡值与月累计温度的相关性

比较好(图 5)。1997—1999 年实测冰川物质平衡值与月累计温度的相关系数是 0.90，6 年总体的相关系数是 0.58，通过了 0.05 的显著性检验，所以温度是影响 1 号冰川物质平衡的决定性因素。另一方面，1997—1999 年实测值与降水的相关系数则只有 0.12，2006—2008 年实测值与降水的相关系数是 0.64，都通过了 0.05 的显著性检验。说明降水对 1 号冰川物质平衡的影响程度也在逐渐加强。

研究区的温度和降水都处于一个增长的趋势(图 6)。在 1982—2014 年，1 号冰川的平均降水量为 475.89 mm，年平均温度为 -4.89°C 。误差较大的年份中，有 9 年物质平衡计算值小于实测值。在这种情况下，说明冰川的损失量被高估，也就是冰川区产流系数比预设值要低。此时，冰川径流系数偏高，平均降水为 461.29 mm，年平均温度为 -4.95°C 。有 7 年物质平衡计算值大于实测值。在这种情况下，冰川的损失量被低估，也就是说冰川区的产流系数比预设值要高。此时，冰川径流系数偏

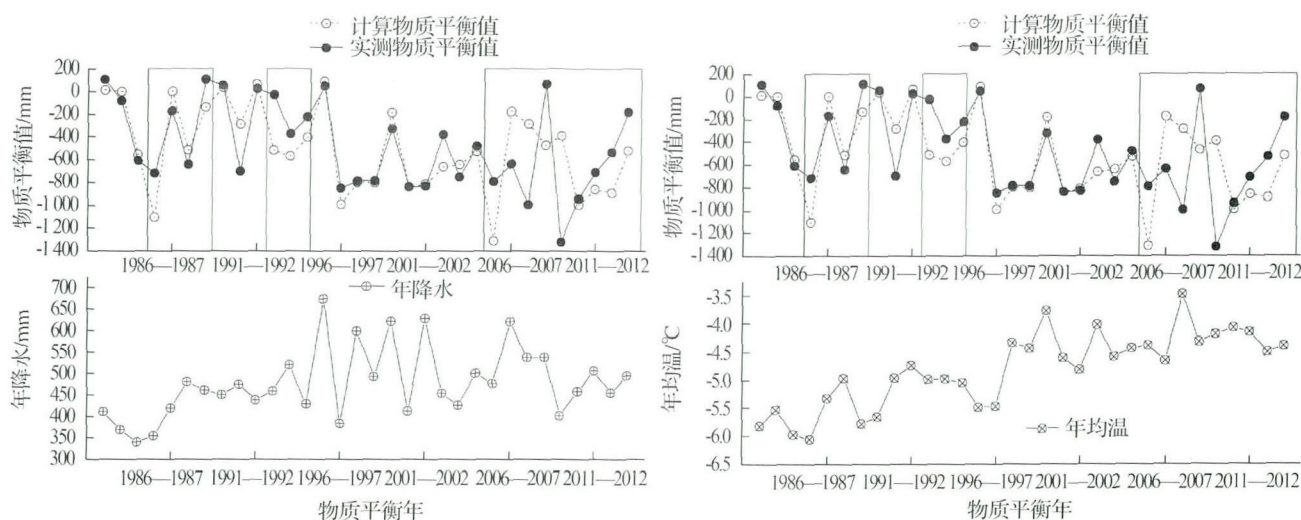


图 6 实测与计算物质平衡值对比图和年降水、年均温的关系图

Fig. 6 Relationships between mass balance and annual average of precipitation and temperature

低,平均降水为 502.54 mm,多年平均温度为 -4.48°C 。可见,在温度低于多年年平均气温,降水低于平均降水量的情况下,冰川的径流系数有降低的趋势;同理,在温度高于多年年平均气温,降水高于平均降水量的情况下,冰川的径流系数有升高的趋势。

5 讨 论

(1) 水量平衡法适用于冰川区多年物质平衡的计算,其中 1 号冰川 1982—2014 年计算值与实测值误差在 1% 以内,与之对应的山岩区和冰面径流系数分别为 0.7 和 0.85。可见,水量平衡法在单条冰川长时间尺度上的物质平衡值的计算中准确度较高且具有独特的优势。说明水量平衡法计算冰川物质平衡值可以推广到缺乏观测资料的高海拔高纬度地区的冰川区。

(2) 1982—2005 年水量平衡法计算得到的物质平衡值与实测物质平衡值高度相关,且误差较小,在这一阶段径流系数能较好地反映冰川区的产流情况;而 2005—2014 年水量平衡法计算得到的物质平衡值与实测物质平衡值之间有较大差距,且变化趋势差异明显,说明这一阶段径流系数受一些因素影响存在较大的变动。但是,这种变动不是单一的增大或者减小,而是交替往复地变化。可见,水热条件的改变对于冰川区径流系数的影响是非常复杂的。

(3) 选取误差较大的 2005—2008 年和误差较小的 1996—1999 年进行逐月分析,结果表明:夏平衡中,水量平衡法计算结果普遍要高于实测物质平衡值。在误差较小的 1996—1999 年为 60.02 mm,

在误差较大的 2005—2008 年为 191.86 mm。水热条件的改变,尤其是温度的升高,导致冰川的实际蒸发量与水量平衡法给出的 $(1 - \alpha) \times P'$ 存在差异。由于缺少实地测量,研究区的蒸发量变化过程尚不能得出。但是可以肯定的是,蒸发量的变化是影响水量平衡计算准确性的关键因素。

(4) 在温度低于多年年平均气温,降水低于平均降水量的情况下,冰川的径流系数有降低的趋势。这可能是由于温度较低,降水形成径流的能力下降。而且,降水偏低导致降水中能形成径流的比例下降。同理,在温度高于多年年平均气温,降水高于平均降水量的情况下,冰川的径流系数有升高的趋势。此时,温度较高,降水较多,那么降水形成径流的能力增强,形成径流的比例也会上升。

6 结 论

水量平衡法适合于多年预测。在运用水量平衡法计算天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡值时,计算得到的冰川物质平衡多年平均值为 -461.21 mm ,观测得到的冰川物质平衡多年平均值为 -464.95 mm 。计算与实测的误差在平均值上仅为 -1% ,与之对应的山岩区和冰面径流系数分别为 0.7 和 0.85。

总体来讲,在温度低、降水少的年份里,冰川的径流系数有降低的趋势;反之,则有升高的趋势。受水热条件改变的影响,2005 年以后水量平衡法的计算值与物质平衡实测值的误差总体增大,说明径流系数也随着水热条件的改变而发生了变化。但是,

径流系数的变化并不是单一的增大或减小,变化规律有待进一步研究。

由逐月对比分析发现:冰川区的蒸发强度随时间变化而发生变化。这一改变导致冰川水量平衡法计算值与实测值的误差总体增大,表现为实际蒸发量要大于水量平衡法给出的 $(1 - \alpha) \times P'$,从而影响物质平衡的定量计算。

参考文献(References):

- [1] Qin Dahe, Ding Yongjian. Cryospheric changes and their impacts: Present, trends and key issues [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2009, 5(4): 187-195. [秦大河, 丁永建. 冰冻圈变化及其影响研究——现状、趋势及关键问题 [J]. *气候变化研究进展*, 2009, 5(4): 187-195.]
- [2] Ageta Y, Higuchi K. Estimation of mass balance components of a summer-accumulation type glacier in the Nepal Himalaya [J]. *Geografiska Annaler (Series A)*, 1984, 66(3): 249-255.
- [3] Luo Guangxiao, Liu Li, Wu Liping. Analysis on the hydrologic properties of Yiwu River valley [J]. *Arid Land Geography*, 1999, 22(1): 47-52. [骆光晓, 刘莉, 吴力平. 伊吾河流域水文特性分析 [J]. *干旱区地理*, 1999, 22(1): 47-52.]
- [4] Li Zhongqin, Li Kaiming, Wang Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xin Jiang, North Western China [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 96-106. [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.]
- [5] Yang Zhenjiang, Zeng Qunzhu. *Glacier Hydrology* [M]. Chongqing: Chongqing Press, 2001. [杨针娘, 曾群柱. *冰川水文学* [M]. 重庆: 重庆出版社, 2001.]
- [6] Qin Dahe. Glossary of Cryosphere Science [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2014. [秦大河. *冰冻圈科学词典* [M]. 北京: 气象出版社, 2014.]
- [7] Xie Zichu, Liu Chaohai. *Introduction of Glacial Science* [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2010. [谢自楚, 刘潮海. *冰川学导论* [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2010.]
- [8] Han Tianding, Liu Shiyin, Ding Yongjian, et al. A characteristics mass balance of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumuqi River, Tianshan Mountains [J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(3): 298-303. [韩添丁, 刘时银, 丁永建, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡特征 [J]. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 298-303.]
- [9] Chen Rensheng, Yang Yong, Han Chuntan, et al. Field experimental research on hydrological function over several typical underlying surfaces in the cold regions of western China [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(4): 507-514. [陈仁升, 阳勇, 韩春坛, 等. 高寒区典型下垫面水文功能小流域观测试验研究 [J]. *地球科学进展*, 2014, 29(4): 507-514.]
- [10] Zhang Shifeng, Jia Shaofeng. Water balance and security study in the Haihe Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(6): 684-691. [张士锋, 贾绍凤. 海河流域水量平衡与水资源安全问题研究 [J]. *自然资源学报*, 2003, 18(6): 684-691.]
- [11] Zhang Guofei, Li Zhongqin, Wang Wenbin, et al. A positive mass balance appeared at Urumuqi Glacier No. 1 in 2009 [J]. *Arid Land Geography*, 2013, 36(2): 263-268. [张国飞, 李忠勤, 王文彬, 等. 乌鲁木齐河源1号冰川2009年出现物质正平衡 [J]. *干旱区地理*, 2013, 36(2): 263-268.]
- [12] Tianshan Glaciological Station. Annual Report of Tianshan Glaciological Station: Vol. 5 [R]. Lanzhou: Tianshan Glaciological Station, CAS, 1982. [天山冰川站. *天山冰川站年报*: 5卷 [R]. 兰州: 中国科学院天山站, 1982.]
- [13] Tianshan Glaciological Station. Annual Report of Tianshan Glaciological Station: Vol. 20 [R]. Lanzhou: Tianshan Glaciological Station, CAS, 2012. [天山冰川站. *天山冰川站年报*: 20卷 [R]. 兰州: 中国科学院天山站, 2012.]
- [14] Tianshan Glaciological Station. Annual Report of Tianshan Glaciological Station: Vol. 18 [R]. Lanzhou: Tianshan Glaciological Station, CAS, 2008. [天山冰川站. *天山冰川站年报*: 18卷 [R]. 兰州: 中国科学院天山站, 2008.]
- [15] Li Zhongqin, Shen Yongping, Wang Feiteng, et al. Response of melting ice to climate change in the Glacier No. 1 at the headwater of Urumuqi River, Tianshan Mountain [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(3): 132-137. [李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川消融对气候变化的响应 [J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 132-137.]
- [16] Shi Yafeng, Liu Chaohai, Wang Zongtai. The Concise Catalogue of Chinese Glacier [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2005. [施雅风, 刘潮海, 王宗太. *简明中国冰川编目* [M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.]
- [17] Shanguan D, Liu S, Ding Y, et al. Glacier changes during the last forty years in the Tarim Interior River Basin, northwest China [J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(6): 727-732.
- [18] Wu Shanshan, Yao Zhijun, Jiang Liguang, et al. Method review of modern glacier volume change [J]. *Advances in Earth Science*, 2015, 30(2): 237-246. [吴珊珊, 姚治君, 姜丽光, 等. 现代冰川体积变化研究方法综述 [J]. *地球科学进展*, 2015, 30(2): 237-246.]
- [19] Li Xiangying, Li Zhongqin, Chen Zhenghua, et al. Seasonal variations and elution processes of pH and electrical conductivity in snow pits on Glacier No. 1 at the Urumuqi River head Tianshan [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(5): 487-495. [李向应, 李忠勤, 陈正华, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川雪坑中pH值和电导率的季节变化及淋溶过程 [J]. *地球科学进展*, 2006, 21(5): 487-495.]
- [20] Yang Huian, Li Zhongqin, Ye Baisheng, et al. Study on mass balance and process of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumuqi River in the past 44 years [J]. *Arid Land Geography*, 2005, 28(1): 76-80. [杨惠安, 李忠勤, 叶柏生, 等. 过去44年乌鲁木齐河源一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.]
- [21] Li Wenyun, Zhang Wei, Ge Jianmin, et al. Analysis method and application of water balance [J]. *Resources Protection*, 2012, 27

- (6): 83-87. [李文运, 张伟, 戈建民, 等. 水量平衡分析方法及应用 [M]. 水资源保护, 2012, 27(6): 83-87.]
- [22] Wu Mingyuan, Zhan Daojiang, Ye Shouze. Engineering Hydrology [M]. Beijing: China Water & Power Press, 1987. [吴明远, 詹道江, 叶守泽. 工程水文学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1987.]
- [23] Yang Zhenning. Glacier water resources in China [J]. *Resources Science*, 1987, (1): 46-55. [杨钟娘. 中国冰川水资源 [J]. 资源科学, 1987, (1): 46-55.]
- [24] Yang Daqing, Jiang Tong, Zhang Yinsheng, et al. Analysis and correction of errors in precipitation measurement at the head of Urumqi River, Tianshan [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1988, (4): 384-399. [杨大庆, 姜彤, 张寅生, 等. 天山乌鲁木齐河源降水观测误差分析及其改正 [J]. 冰川冻土, 1988, (4): 384-399.]
- [25] Yang Zhenning. The Hydrology in Cold Regions of China [M]. Beijing: Science Press, 2002. [杨钟娘. 中国寒区水文 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.]
- [26] Pei Tesen, Zhang Xiangsong. Glacier Physics [M]. Beijing: Science Press, 1987. [佩特森, 张祥松. 冰川物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.]
- [27] Li Zhongqin, Han Tianding, Jing Zhefan, et al. A summary of 40-year observed variation facts of climate and Glacier No. 1 at headwater of Urumqi River, Tianshan, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 117-123. [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40a观测事实 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 117-123.]
- [28] Sun Meiping, Yao Xiaojun, Li Zhongqin, et al. Hydrological process of glacier and snow melting and runoff in Urumqi River source region, eastern Tianshan Mountains, China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(7): 945-957. [孙美平, 姚晓军, 李忠勤, 等. 天山东段冰雪消融与产汇流水文过程 [J]. 地理学报, 2014, 69(7): 945-957.]
- [29] Richardson S D, Reynolds J M. An overview of glacial hazards in the Himalayas [J]. *Quaternary International*, 2000, 65: 31-47.
- [30] Chhetri M P. Disaster management in Nepal: Problems and solutions [R]. // Natural Disaster Management. Leicester: Tudor Rose Holdings Ltd., 1999: 223.
- [31] Clarke G K C. Glacier outburst floods from "Hazard Lake", Yukon, and the problem of flood magnitude prediction [J]. *Journal of Glaciology*, 1982, 28: 3-21.
- [32] Pu Zongchao, Zhang Shanqing, Li Jinglin, et al. Change characteristics of reference crop Evapotranspiration in Urumqi River Basin [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2008, 2(1): 41-45. [普宗朝, 张山清, 李景林, 等. 乌鲁木齐河流域参考作物蒸散量时空变化特征 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2008, 2(1): 41-45.]

Factors Affecting the Variation of Glacier Surface Runoff-Coefficient ——A Case Study of Urumqi No. 1 Glacier*

Liu Zhu^{1,2}, Li Zhongqin^{1*}

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730070, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The mass balance of Urumqi Glacier No. 1 (Glacier No. 1) was calculated by water balance method and direct measurement method respectively. Water balance method is a kind of calculating method, which studies about the relationship between storage, supply and consumption of water resource in a certain area in a certain period of time (Time for this research is a mass balance year). Mass balance calculated by this method and acquired by filed observation was compared and analyzed. Therefore we got their correlation and expected to apply it to other high latitude and altitude areas.

* **Fundation item:** Project supported by the Key Deployment Project of the Chinese Academy of Sciences "The key process research about the quick change of the cryosphere" (No. KJZD-EW-G03-01); The National Natural Science Foundation of China "Simulation and prediction of glacier change in the key areas of Tianshan Mountains, Xinjiang" (No. 41471058); The Special Program for Fundamental Work of the Ministry of Science and Technology "Investigation on ice volume changes of primary glacier centers in western China" (No. 2013FY111400).

First author: Liu Zhu (1990-), male, Yueyang City, Hunan Province, Master student. Research areas include the global change and glacier water resources of Tianshan Mountain. **E-mail:** liuzhu@lzb. ac. cn

Corresponding author: Li Zhongqin (1962-), male, Chongqing City, Professor. Research areas include glacier and environment.

E-mail: lizq@lzb. ac. cn

Mass balance and glacial runoff data of Urumqi Glacier No. 1 used in this research were acquired from Annual Report of Tianshan Glacier Station, and that started observing in 1959. The data used by this study is collected from 1982–2014. The data of runoff was measured by the hydrology station of Urumqi Glacier No. 1 Glacier, which is located in the lower reaches of the glacier about 300 m, and catchment area is about 3.34 km². The data of precipitation and runoff was provided by Daxigou Meteorological Station located in the altitude of 3 539 m, which is distant from the terminus of Urumqi No. 1 Glacier about 3 km.

Through the comparison of these two kinds of methods, we found that: ①It is better to use water balance method to calculate the mass balance in long time series. The result of water balance method was 1% different from the result of direct measurement during 1982–2014, and the corresponding glacier runoff coefficients were 0.7 and 0.85, respectively. ②The results of water balance method during 1982–2005 had a high correlation with the direct measurements, and the error was relatively small. Besides that, the glacier runoff coefficient reflected the glacier runoff well. However, there were obvious differences between the two kinds of methods during 2005–2012 which showed that the glacier runoff coefficients changed a lot. According to analyzing the two periods of 2005 to 2008 with large error and 1996 to 1999 with small error, we found that the results of water balance method were generally higher than that of the direct measurement in summer. The analysis showed that the changes of water conditions and the corresponding in the glacier runoff coefficient were the main reasons for these differences.

The data of precipitation and runoff in the study area was combined with the measured mass balance data, and their potentially internal relationship was found, which could be used to acquire the meteorological data easily and to deduce the mass balance data which is difficult to be acquired. This conclusion is helpful to extending the study area from a single glacier or basin to a large regional scale. Limited to the shortage of data, for the example, this study only discussed the single glacier, Urumqi Glacier No. 1. Overall, this study shows that using the potential of water balance method can compute the data of glacier mass balance more accurate on long time scale.

Key words: Water balance; Mass balance; The coefficient of runoff; Ice evaporation; Urumqi Glacier No. 1.