

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0150

Pu Hongzheng, Han Tianding, Li Xiangying, et al. Characteristics of the altitude-dependent mass balance and their impact on runoff of the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürtimqi River, Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1251–1259. [蒲红铮, 韩添丁, 李向应, 等. 天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡高度变化特征及其对径流的影响[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1251–1259.]

天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡高度变化特征及其对径流的影响

蒲红铮^{1,3}, 韩添丁^{1*}, 李向应¹, 鲁承阳², 焦克勤¹, 王进⁴

(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, 甘肃兰州 730000; 2. 黄河水利委员会上游水文水资源局, 甘肃兰州 730030; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 新疆阿克苏水文水资源勘测局, 新疆阿克苏 843000)

摘要: 利用天山乌鲁木齐河源1号冰川1980–2010年的物质平衡、水文气象实测资料, 分析了1号冰川1980–2010年的各高度带物质平衡特征, 进而分析了1984–2010年纯积累和纯消融的变化特点及其与气象要素、冰川融水径流变化的关系。结果表明: 1号冰川物质平衡处于持续的负平衡, 纯积累量与年降水的相关系数为-0.16, 纯消融量与年均温的相关系数为0.61, 与夏季(6–8月)气温的相关系数为0.78。2010年1号冰川为有观测记录以来的最强消融年($b_n = -1\,327\text{ mm}$), 整个冰川处于消融区(平衡线高度大于海拔4 484 m, 积累区面积为0), 同时东、西支冰川各高度区间的物质平衡变化也与往年度显著不同, 说明2010年是1号冰川物质平衡变化的特殊年份, 也有可能1号冰川的物质平衡变化进入了一个新的亏损变化阶段。对其径流数据的分析还表明, 温度对径流的影响大于降水对径流的影响。

关键词: 1号冰川; 物质平衡; 径流; 天山

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0240(2014)05-1251-09

0 引言

冰川在一定的气候条件下生存, 它随气候的冷暖、干湿波动变化而产生、发展和衰亡^[1]。冰川是气候变化的灵敏指示器, 对气候变化的响应首先是通过冰川的物质平衡表现的^[2]。冰川物质平衡不仅是联结冰川波动与气候变化的关键因子, 而且其净平衡的大小直接影响冰川进退^[3]。冰川物质平衡特征之一的物质平衡梯度, 即冰川物质平衡随高度的变化, 也就是冰川作用能, 可以作为衡量冰川活动性的指标。不同高度带的物质平衡变化可以更为详尽的展示冰川的物质平衡变化情况。更为重要的是冰川是我国西部尤其是干旱区主要河流的重要补给来源^[4], 在全球气候系统变暖毋庸置疑的背景

下^[5], 对其径流和河流补给作用有什么影响, 已成为举世关注的重大问题^[6]。

本文以天山乌鲁木齐河源1号冰川近30 a物质平衡观测资料为基础, 研究物质平衡高度变化特征, 分析其气候响应特点及其对径流过程的影响。

1 研究区域概况

乌鲁木齐河流域位于我国新疆天山中部, 西接头屯河流域, 东为板房沟流域, 乌鲁木齐河源1号冰川(以下简称1号冰川)(图1)($86^{\circ}48'E, 43^{\circ}05'N$)是河源区面积最大的一条冰川, 为冰斗-山谷冰川^[7], 是目前中国研究冰川物质平衡最详细、系列最长的冰川^[8]。1号冰川物质平衡的观测研究始于1959年夏季, 冰川面积为 1.95 km^2 , 冰川长度为

收稿日期: 2014-01-07; 修订日期: 2014-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271035; 41201060; 41121001); 中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-G03-04-03); 国家科技支撑计划专项(2013BAB05B03T1)资助

作者简介: 蒲红铮(1988–), 女, 四川南充人, 2012年毕业于西昌学院, 现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所在读硕士研究生, 主要从事冰川水文水化学的研究。E-mail: puhongzheng@lzb.ac.cn

* 通讯作者: 韩添丁, E-mail: tdhan@lzb.ac.cn

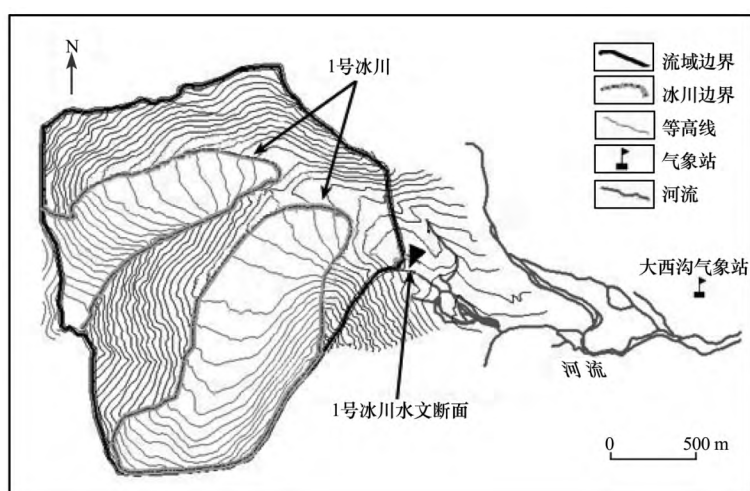


图1 天山乌鲁木齐河源1号冰川及水文气象站分布

Fig. 1 Map showing the locations of the Glacier No. 1 and the hydrological and meteorological stations at the headwaters of the Ürümqi River, Tianshan Mountains

2.41 km, 冰川末端最低为海拔 3 736 m. 随着冰舌退缩, 1993 年 1 号冰川已分离为两条完全独立的冰川, 即 1 号冰川西支(冰川面积为 0.677 km^2) 和 1 号冰川东支(冰川面积为 1.163 km^2). 此外, 该冰川是 WGMS(World Glacier Monitoring) 网络中唯一的一条中国冰川, 并于 2007 年被列为全球重点监测的 10 条冰川之一.

2 数据资料

本文统计了 1 号冰川 1959 – 2010 年以来的年净物质平衡及累积物质平衡, 分析其物质平衡的变化. 由于物质平衡观测点布设一直处在更新和合理化的过程中, 不同年份各测点位置均有变动, 但总体位置及高度区间变化不大^[9]. 为了便于与历史资料比较, 1 号冰川的零平衡线高度是利用面积加权法求得的^[10]. 同时, 整理了 1980 年以来实测的 1 号冰川表面单点物质平衡^[11], 分别计算了东、西两支冰川单独的物质平衡. 冰川纯积累量和纯消融量数据统计时段为 1984 – 2010 年, 统计的冰川径流为 1980 – 2010 年消融期(5 – 8 月) 1 号冰川水文断面实测资料; 气象资料主要选用乌鲁木齐河源大西沟气象站(海拔 3 539 m) 的资料(图 1).

根据大西沟气象站数据显示(图 2), 年均温呈持续升高的趋势. 1959 – 2010 年的平均温度为 $-5.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 1959 – 1996 年的年平均温度为 $-5.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 但是 1997 – 2010 年的年平均温度高达 $-4.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 并且各个季节温度都比以往显著升高. 年降水同样呈持续增加的趋势, 1986 – 2010 年平均

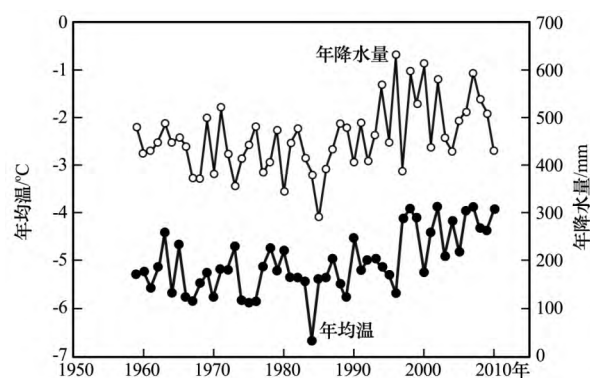


图2 1959 – 2010 年大西沟气象站年均温和年降水量的变化

Fig. 2 Annual air temperature and annual precipitation at Daxigou Meteorological Station changing from 1959 to 2010

降水量约为 493 mm, 较 1959 – 1985 年的 426 mm 增加了约 15.7%.

3 结论与分析

3.1 物质平衡变化

依据 1959 – 2010 年 52 a 来 1 号冰川物质平衡变化资料, 年平均物质平衡约为 -287 mm , 正、负平衡年数分别是 16 a 和 36 a, 负平衡年数比正平衡多 20 a. 1959 – 1996 年冰川物质平衡年际变化处在正负交替变化过程中, 期间的正、负平衡年数分别为 15 a 和 23 a, 其中, 1972 年净平衡为 262 mm, 1973 年为 -708 mm , 这期间的净平衡改变量最大, 达到 970 mm; 1997 – 2010 年的正、负平衡年数分别为 1 a 和 13 a, 其中, 1997 – 2008 年 12 a 呈持续

负平衡, 2008 年达到了这 12 a 的最低值 -999 mm , 纯消融量 ($169.3 \times 10^4 \text{ m}^3$) 是纯积累量 ($1.7 \times 10^4 \text{ m}^3$) 的 99.6 倍, 但是 2010 年物质平衡达到了历史上观测的最大值 -1327 mm , 较 2009 年降低了 1390 mm , 是 52 a 以来平均物质平衡的 4.6 倍. 累积物质平衡是可以观测到的过去气候变化最直接的证据, 截止 2010 年 1 号冰川累积物质平衡为 -14924 mm .

有研究表明^[12], 当温度升高 1 K , 需要降水增加 25% 才能弥补由升温造成的物质亏损. 以同期的气温和降水资料来看, 自 1990 年来, 降水量在一定程度上增加 (增幅为 17%), 但气温升高仍然主导影响了 1 号冰川物质平衡为负平衡的变化.

3.2 纯积累和纯消融的变化

1984–2010 年的 27 a 中, 1 号冰川纯积累量的波动范围为 $0 \sim 59.8 \times 10^4 \text{ m}^3$, 年平均纯积累量为 $21.4 \times 10^4 \text{ m}^3$, 有 9 个年度超过了这 27 年度的年平均纯积累量, 其中, 纯积累量最大值出现在 1989 年, 纯积累量为 $59.8 \times 10^4 \text{ m}^3$; 2010 年积累区面积和纯积累量是这 27 个年度中仅有的一个最低值年

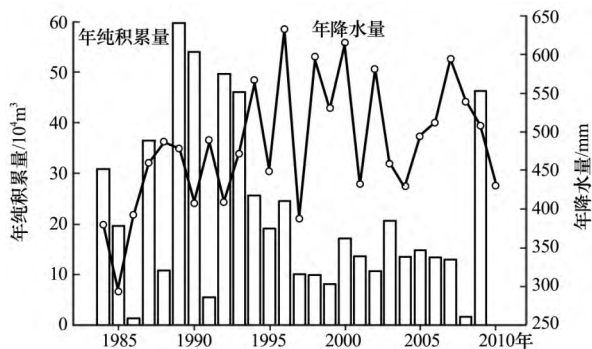


图3 1984–2010 年 1 号冰川年纯积累量与年降水量的变化
Fig.3 Annual net accumulation and annual precipitation changing from 1984 to 2010

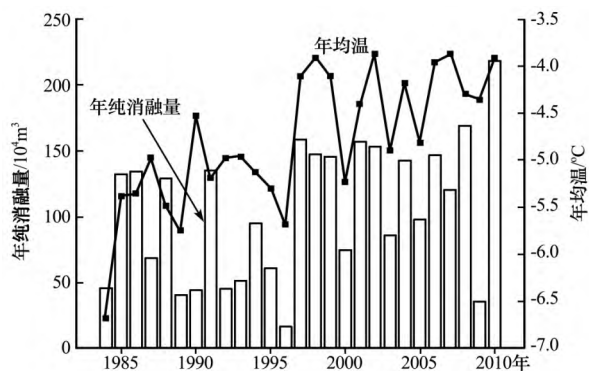


图4 1984–2010 年 1 号冰川年纯消融量与年均温的变化
Fig.4 Annual net ablation and annual mean air temperature changing from 1984 to 2010

度, 纯积累量为 0 (图 3)。

1984–2010 年 1 号冰川纯消融量的变化范围在 $16.8 \sim 218.52 \times 10^4 \text{ m}^3$ 之间, 年平均纯消融量为 $105.8 \times 10^4 \text{ m}^3$, 有 13 个年度的纯消融量低于年平均纯消融量, 其中, 2010 年的纯消融量值和消融区面积最大 (图 4); 1984–1996 年年平均纯消融量为 $77.0 \times 10^4 \text{ m}^3$, 1997–2010 年年平均纯消融量为 $132.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 1996 年的纯消融量值最小, 最大值是最小值的 13 倍. 积累区面积变化范围为 $0 \sim 1.3 \text{ km}^2$, 年平均积累区面积为 0.77 km^2 , 消融区面积变化范围为 $0.54 \sim 1.647 \text{ km}^2$, 年平均消融区的面积为 1.0 km^2 . 年平均消融区面积是年平均积累区面积的 1.30 倍, 而年平均纯消融量是年平均积累量的 4.94 倍. 积累区面积与纯积累量二者的相关系数为 0.89, 消融区面积与纯消融量的相关系数为 0.91.

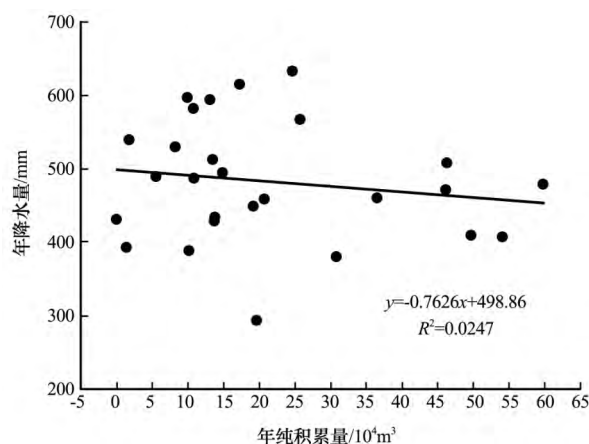


图5 1984–2010 年年纯积累量与年降水量的关系
Fig.5 Relation between annual net accumulation and precipitation from 1984 to 2010

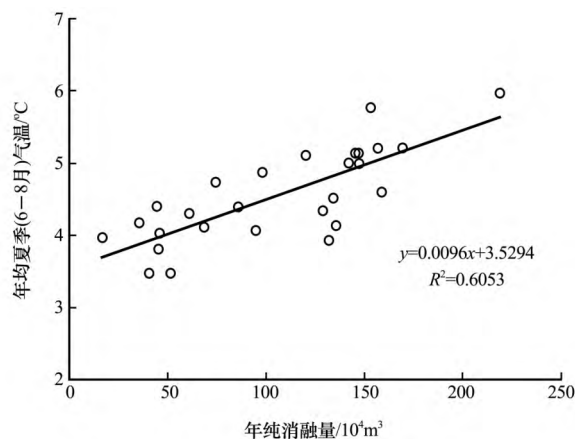


图6 1984–2010 年年纯消融量与年均夏季气温的关系
Fig.6 Relation of annual net ablation and summer air temperature from 1984 to 2010

冰川变化和区域气候密切相关,而温度和降水的变化直接影响其积累量和消融量^[13]。已有研究表明^[14],降水决定冰川积累,气温决定冰川消融。1984–1996年,1号冰川的年平均纯积累量为 $29.5 \times 10^4 \text{ m}^3$,该段时间的年平均降水量为455.3 mm;1997–2010年,年平均积累量为 $13.8 \times 10^4 \text{ m}^3$,年平均降水量为507.9 mm。虽然后阶段的降水量比前阶段增加了52.6 mm,增幅为11.6%,但前阶段的纯积累是后阶段的2.1倍。说明即使降水是冰川收入的主要部分,降水的增加也没能主导纯积累量减少的变化趋势。年纯消融量与年降水总量的相关系数为 -0.06 ($R^2=0.0031$),年纯积累量与年降水的相关系数为 -0.16 (图5),表明即使降水是冰川物质收入的主要来源,年降水量与年纯积累量变化的关系不显著,总体上降水对纯消融量和纯积累量的影响都很小,但是降水对纯积累的影响高于降水对纯消融的影响。

年纯消融量与年均温的相关系数0.61,而年纯消融量与夏季气温的相关系数为0.78(图6),年纯积累量与年均温的相关系数为 -0.35 。说明气温对纯消融量和纯积累量的影响大于降水对其的影响,并且气温对纯消融量的变化影响大于气温对纯积累量的影响。

2010年气温升高与降水量减少导致冰川的纯积累量为0,纯消融量高达 $218.52 \times 10^4 \text{ m}^3$,是1号冰川有观测记录以来的最强消融年,整个冰川处于消融区,积累区面积为0,其平衡线高度大于海拔4484 m。冰川越小对气候变化越敏感^[15],1号冰川属于小冰川,其物质平衡厚度处于持续减薄状态,对气候的反应将会更为灵敏。

3.3 不同高度带物质平衡变化特征

图7显示了1号冰川东、西支冰川的物质平衡在各高度区间上的变化,1号冰川东支各个高度区间的物质平衡从1997–2010年该时段显著低于1980–1996年这一时段各个高度区间的物质平衡。海拔3700~3800 m高度区间物质平衡在1997年急剧降低,1980–1996年该高度区间的物质平衡平均为 -2168.7 mm ,1997–2010年物质平衡平均为 -3171.6 mm ,并且该高度区间的物质平衡与夏季温度的相关系数为 -0.78 。海拔在3900~4000 m和4000~4100 m这两个区间物质平衡的变化趋势较一致,线性相关系数高达0.95($R^2=0.9107$),并且每年物质平衡值也很接近。海拔大于4200 m的物质平衡变化在2007–2010年这期

间的变化波动幅度比较大。2009年各高度区间的物质平衡值在1997–2010年这期间达到了观测以来的最大值,此外,2010年东支各高度区间的物质平衡亏损量特别大,海拔4000~4100 m和4100~4200 m这两个高度区间的物质平衡达到了观测以来的最低值。1997年各个季节温度显著升高,在东支各个高度区间的物质平衡得到了反映。

1号冰川西支各高度区间物质平衡变化类似于与东支,物质平衡1997–2010年显著低于1980–1996年。其中,海拔3800~3900 m、3900~4000 m、4000~4100 m和4100~4200 m这四个区间上变化趋势比较一致,1997–2010年这一时间段物质平衡显著低于1980–1996年的物质平衡;但海拔4200~4300 m与大于海拔4300 m这两个高度带的物质平衡变化趋势相近,并没有明显表现出上述特征。

1号冰川的东、西支各高度区间物质平衡变化中低海拔区域表现出了在1997年物质平衡的显著降低与2009年的陡然升高,两支冰川各高度区间变化差异比较大。1号冰川东支海拔3900~4000 m和海拔4000~4100 m这两个高度区间单点的物质平衡观测显示这两区间的平衡值较为接近,变化不大;而西支海拔4100~4200 m和海拔4200~4300 m这两区间表现出的特征不明显。值得一提的是,东支在大于海拔4200 m区间上,观测到2010年物质平衡为负,其值接近于海拔4100~4200 m区间的物质平衡。西支大于海拔4300 m区间的物质平衡平均值(244.1 mm)低于海拔4200~4300 m的物质平衡平均值(308.8 mm)64.7 mm。因此推测,在气温升高和1号冰川持续物质亏损的背景下,冰川积累区物质平衡也受到了影响,而且亏损较大。

1号冰川2009年物质平衡反转了之前连续12年的负平衡状态,但是2010年物质净平衡达到了历史上的最大值,整个冰川处于消融区。此时,1号冰川的东、西支各高度区间也经历了相同的变化(2009年升高,2010年降低),并且1号冰川东、西支2010年各高度区间上的物质平衡变化较以往年度变化显著不同,东支的海拔4000~4100 m、4100~4200 m及大于海拔4200 m这三个区间的物质平衡值低于以往任何年份对应高度的平衡值(图7a),西支的各高度区间(除了海拔3800~3900 m)的物质平衡变化也低于以往任何年份对应的值(图7b),2010年是1号冰川物质平衡变化的

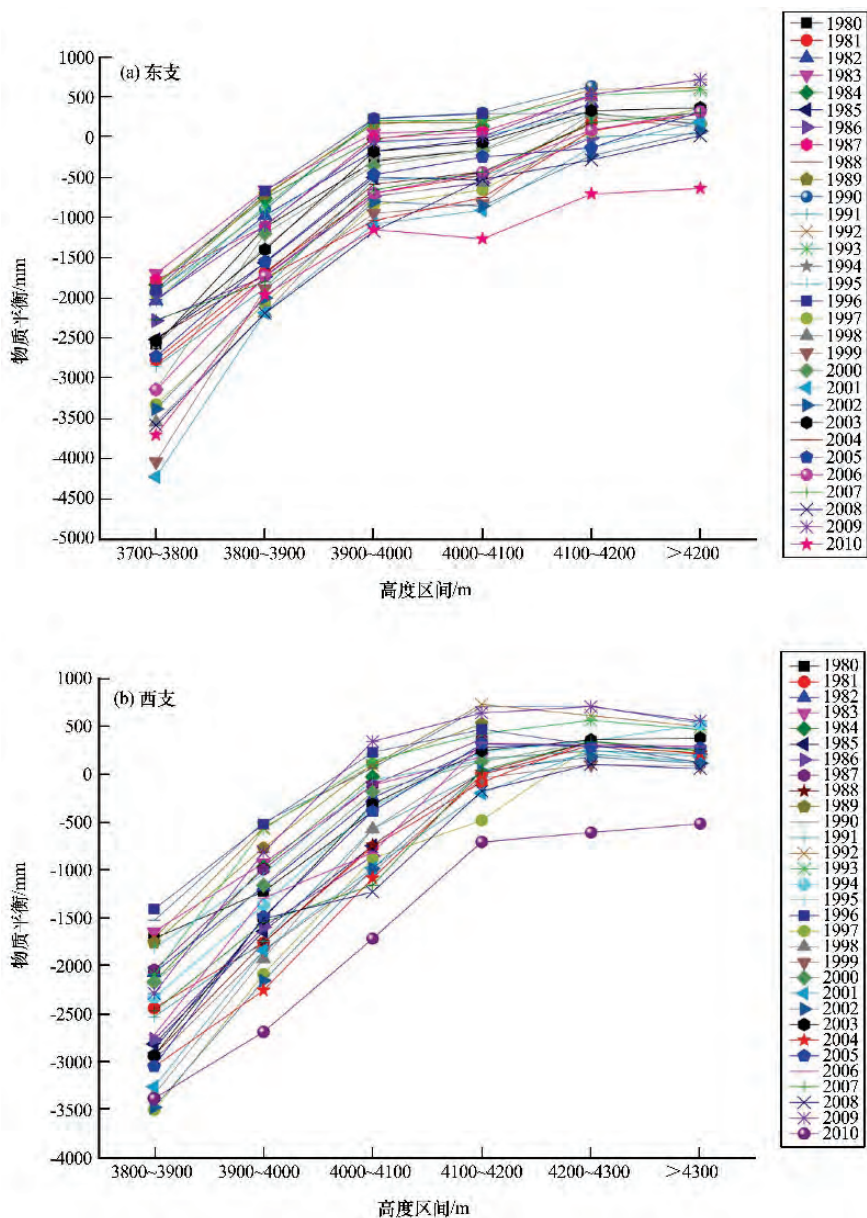


图 7 1980 - 2010 年 1 号冰川东支 (a)、西支 (b) 冰川各高度带物质平衡变化

Fig. 7 Annual mass balances at various altitude ranges on the Glacier No. 1 from 1980 to 2010, for east branch (a) and west branch (b)

特殊年份,进一步推测有可能 1 号冰川的物质平衡变化在近年来气温持续升高的背景下进入了一个新的变化阶段.

3.4 径流变化

冰川不仅是河流的主要补给来源^[16],而且对其径流具有稳定和调节作用^[17],而气候变化对水资源带来的最直接影响就是改变径流的大小和时空分布^[18].

径流的变化与气温变化趋势较为同步,说明了径流可以间接地反映出气温的变化,也证实了冰川越小其径流对气候变化越敏感^[13]. 1980 - 2010 年 1

号冰川水文断面消融期 (5 - 8 月) 平均流量为 $0.214 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 1997 年以后消融期的月平均流量显著增加, 1997 - 2010 年消融期月平均流量为 $0.258 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 1980 - 1996 年消融期的月平均流量为 $0.178 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. 此外, 1980 - 2010 年 8 月的流量波动幅度很大, 平均为 $0.302 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 最大值出现在 2006 年为 $0.802 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 最小值为 1990 年的 $0.104 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 极值比为 7.7, 1997 - 2010 年 8 月的平均流量为 $0.387 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 而 1980 - 1996 年 8 月的平均流量为 $0.232 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (图 8).

1984 - 2010 年 1 号冰川水文断面年径流深与年

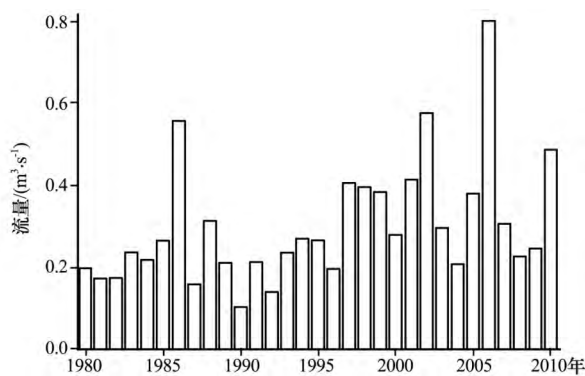


图8 1980-2010年8月的流量变化

Fig. 8 Flow of the Glacier No. 1 in August changing from 1980 to 2010

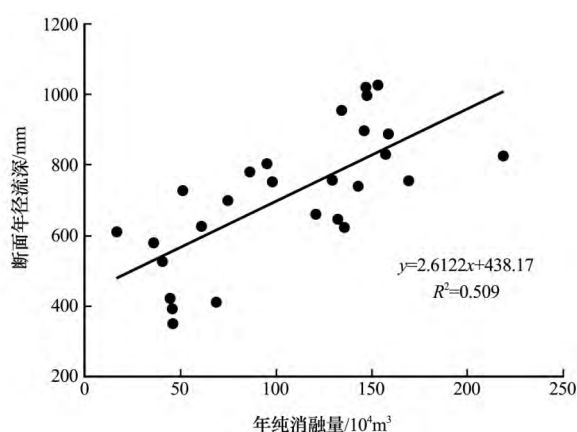


图9 1984-2010年年纯消融量与断面年径流深的关系

Fig. 9 Relation between annual net ablation and runoff depth from 1984 to 2010

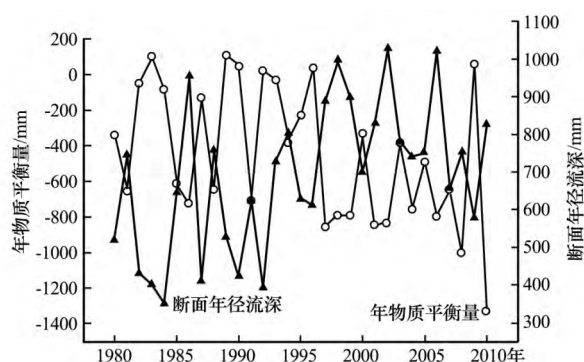


图10 1980-2010年1号冰川年物质平衡量与断面年径流深的变化

Fig. 10 Variations of the annual mass balance and runoff depth of the Glacier No. 1 from 1980 to 2010

纯消融量的相关系数为0.71(图9),表明了其接受冰川融水补给较多。1980-2010年断面径流深与物质平衡的相关系数为-0.77,断面径流深与物质平衡变化的阶段性较为一致,即物质平衡1997-2010年比1980-1996年亏损较多,而断面径流深

1997-2010年比1980-1996年增加,因此断面径流深与物质平衡变化关系则大致表现为,冰川物质平衡亏损越多,断面径流深越大(图10)。

通过分析消融期流量、断面径流量与气温、降水的关系可知,降水对径流的影响小于温度对径流的影响。1980-2010年消融期(5-8月)月平均流量与消融期降水总量的相关系数为0.37,而与温度的相关系数为0.59;1980-2010年断面径流量与降水量的相关系数为0.35,断面径流量与温度的相关系数为0.58。因为温度主导了冰川消融强度,进而影响了以融水补给为主的河流径流量。

3.5 各高度区间物质平衡变化对径流的影响

表1展示了东、西支各高度区间物质平衡与断面径流量的 R^2 (R 为相关系数)变化,可知,低海拔区间的物质平衡变化对径流量的影响大于高海拔区间。1号冰川西支各高度区间物质平衡对径流量的相关系数 R^2 表现为由低海拔到高海拔逐渐减低。东支总体上表现出了低海拔的相关系数 R^2 大于高海拔,但是海拔3800~3900m区间比海拔3700~3800m区间对径流量的影响大,中间海拔高度区间对径流量的影响相近。东、西支高度区间物质平衡对径流量影响的差异体现了,两支冰川各自的地形差异特点:东支海拔3700~4100m比海拔4100m以上的地形平缓,西支海拔3800~4100m也比海拔4100m以上的地形平缓,但是西支海拔3800~4100m的地形要比东支海拔3700~4100m的陡,总体上西支冰川面积小,所处海拔高,地形陡峭,东支冰川面积相对较大,低中海拔区地形比较缓。

分析不同时段物质平衡高度变化,结果显示:1980-1996年西支各高度区间的物质平衡与该时段的径流量相关系数 R^2 从低海拔到高海拔分别为

表1 1号冰川东、西支各高度区间物质平衡与断面径流量的 R^2 变化Table 1 R^2 between runoff and mass balance in various altitudinal ranges in the east and west branches of the Glacier No. 1

东支/m	R^2	西支/m	R^2
3 700 ~ 3 800	0.5527	3 800 ~ 3 900	0.6186
3 800 ~ 3 900	0.6206	3 900 ~ 4 000	0.4492
3 900 ~ 4 000	0.5107	4 000 ~ 4 100	0.3989
4 000 ~ 4 100	0.5141	4 100 ~ 4 200	0.2606
4 100 ~ 4 200	0.3199	4 200 ~ 4 300	0.2123
> 4 200	0.1251	> 4 300	0.1198

0.3954、0.3125、0.3676、0.0424、0.0424 和 0.0047, 东支分别为 0.3716、0.4723、0.4081、0.4084 和 0.4545, 此外东支大于 4 200 m 高度区间的物质平衡在该时段数据缺失较多所以没有计算。这些表明在该时段东、西支对径流量的影响上差异很明显, 东支各高度区间对径流量的影响比较接近, 而西支则明显表现出低海拔区对径流量的影响大于高海拔区。

1997–2010 年西支各高度区间的物质平衡与该时段的径流量相关系数 R^2 从低海拔到高海拔分别为 0.4366、0.2044、0.1218、0.0503、0.0967 和 0.0718, 东支分别为 0.357、0.3556、0.1552、0.2291、0.0651 和 0.0825。明显看出这段时间东、西支各高度区间对径流量的影响较 1980–1996 这段时间不一样, 东支各高度区间表现出低海拔区对径流量影响较为明显, 西支则表现为高海拔区比 1980–1996 年时段对径流量的影响增大了, 海拔 3 800~3 900 m、3 900~4 000 m 和 4 000~4 100 m 这三个区间对径流量的影响则表现为逐渐减低的变化趋势。

前面已经提及 1 号冰川东、西支各个高度区间的物质平衡 1997–2010 年期间低于 1980–1996 年期间各个高度区间的物质平衡; 而断面径流量则表现出 1997–2010 年期间比 1980–1996 年期间有所增加, 增幅为 39.7%。后段时间各高度区间的物质亏损较多, 而断面径流量表现为增加, 表明各高度区间的物质平衡变化影响了径流量的变化, 即各个区间物质亏损越多, 径流量则表现为增加趋势。根据单点物质平衡观测, 东支海拔 3 700~3 800 m、3 800~3 900 m、3 900~4 000 m 和 4 000~4 100 m 这四个高度区间 1980–2010 年的物质平衡值为负, 为亏损时段, 1997–2010 年期间的物质平衡分别是 1980–1996 年期间的 1.5、1.6、4.4 和 7.3 倍; 西支海拔 3 800~3 900 m、3 900~4 000 m 和 4 000~4 100 m 这三个区间的物质平衡为负, 1997–2010 年期间的物质平衡分别是 1980–1996 年的 1.4、1.5 和 3.2 倍, 这说明中间高度区间的物质平衡亏损较为剧烈。东支海拔 4 100~4 200 m 和大于 4 200 m 区间物质平衡为正, 而 1980–1996 年期间的物质平衡分别是 1997–2010 年期间的 7.4 和 1.7 倍; 西支海拔 4 100~4 200 m、4 200~4 300 m 和大于 4 300 m 区间的物质平衡同样为正, 1980–1996 年期间的物质平衡是 1997–2010 年期间的 10.9、1.7 和 1.7 倍。这些都表明东、西支冰川的中间海

拔高度区间上物质亏损最为剧烈。

各高度区间上物质平衡的变化具有差异性, 低海拔区间的物质亏损程度没有中间高度区间大, 但是对径流的影响上还是大于中间海拔高度区间对径流的影响。推测是因为中间海拔亏损的物质在流经低海拔时得到了保存, 而其中低海拔的物质亏损有大量转换成了径流。

4 结论

(1) 气温对冰川纯消融量和纯积累量的影响大于降水对其的影响, 并且气温对纯消融量的变化影响远大于对纯积累量的影响。2010 年是 1 号冰川有观测记录以来的最强消融年, 整个冰川处于消融区, 物质净平衡达到了 $-1\,327\text{ mm}$, 且东、西支各高度区间上的物质平衡变化较以往年度变化显著不同。初步认为, 2010 年是 1 号冰川物质平衡变化的特殊年份, 也有可能 1 号冰川的物质平衡变化在近年来气温持续升高的背景下进入了一个新的变化阶段。

(2) 1 号冰川低海拔区域 (海拔 3 800~3 900 m) 的物质平衡变化对径流的影响远大于高海拔区间, 其东、西支相关系数分别为 $R^2=0.6206$ 和 $R^2=0.6186$ ($n=31$, 在 0.01 水平上显著相关)。

(3) 1 号冰川西支各高度区间物质平衡对径流的相关系数关系表现为由低海拔到高海拔逐渐减低。对比 1997–2010 年和 1980–1996 年时段, 1 号冰川西支物质平衡梯度变化对径流影响的敏感性明显增大, 且大于 1 号冰川东支。

参考文献 (References):

- [1] Xie Zichu, Feng Qinghua, Wang Xin. Modeling the response of glacier system to climate warming: Taking glaciers in China as an example [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5): 77–82. [谢自楚, 冯清华, 王欣. 中国冰川系统变化趋势预测研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 77–82.]
- [2] Xie Zichu. The research of glacier mass balance in High Asia [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 1994(3): 245–248. [谢自楚. 高亚洲冰川物质平衡研究[J]. 中国科学院院刊, 1994(3): 245–248.]
- [3] Xie Zichu, Zhou Zaigen, Li Qiaoyuan, et al. Progress and prospects of mass balance characteristic and responding to global change of glacier system in High Asia [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(10): 1065–1072. [谢自楚, 周宰根, 李巧媛, 等. 高亚洲冰川系统物质平衡特征及其对全球变化响应研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2009, 24(10): 1065–1072.]
- [4] Ding Yongjian, Liu Shiyin, Liu Fengjing, et al. Advancement of cold-region hydrology studies over last the two decades in Chi-

- na: In memorial of outstanding cold-region hydrologist, Dr. Ye Baisheng, for his scientific achievements and innovative contributions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34** (5): 1009–1022. [丁永建, 刘时银, 刘凤景, 等. 中国寒区水文学研究的新阶段: 记我国杰出寒区水文学家叶柏生研究员的创新与贡献[J]. *冰川冻土*, 2012, **34**(5): 1009–1022.]
- [5] Ren Jiawen. Updating assessment results of global cryospheric change from SPM of IPCC WGI Fifth Assessment Report [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(5): 1065–1067. [任贾文. 全球冰冻圈现状和未来变化的最新评估: IPCC WGI AR5 SPM 发布[J]. *冰川冻土*, 2013, **35**(5): 1065–1067.]
- [6] Liu Chaohai, Kang Ersi, Liu Shiyin. Study on the glacier variation and its runoff responses in the arid region of Northwest China [J]. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 1999, **42** (S1): 64–71. [刘潮海, 康尔泗, 刘时银. 西北干旱区冰川变化及其径流效应研究[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 1999, **29**(S1): 55–62.]
- [7] Dong Zhiwen, Qin Dahe, Ren Jiawen, *et al.* Variations in the equilibrium line altitude of Ürtümqi Glacier No. 1, Tianshan Mountains, over the past 50 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, **57**(36): 4776–4783. [董志文, 秦大河, 任贾文, 等. 近 50 年来天山乌鲁木齐河源 1 号冰川平衡线高度对气候变化的响应[J]. *科学通报*, 2013, **58**(9): 825–832.]
- [8] Annual Report of Tianshan Glaciological Station, Vol. 19 [R]. Lanzhou: Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2011. [天山冰川观测试验站年报: 19 卷[R]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所天山冰川观测试验站, 2011.]
- [9] Han Tianding, Liu Shiyin, Ding Yongjian, *et al.* A characteristic mass balance of Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürtümqi 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.]
- [10] Annual Report of Tianshan Glaciological Station: Vol. 20 [R]. Lanzhou: Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 2011. [天山冰川观测试验站年报: 20 卷[R]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所天山冰川观测试验站, 2011.]
- [11] Annual Report of Tianshan Glaciological Station: Vols. 1–20 [R]. Lanzhou: Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, 1980–2011. [天山冰川观测试验站年报: 1–20 卷[R]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所天山冰川观测试验站, 1980–2011.]
- [12] Oerlemans J. Extracting a climates signal from 169 glacier records [J]. *Science*, 2005, **308**: 675–677.
- [13] Li Kaiming, Li Zhongqin, Gao Wenyu, *et al.* Glacier Retreating in the East Tianshan Mountains and its impact on water resources [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(32): 2708–2716. [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.]
- [14] Zhang Guofei, Li Zhongqin, Wang Wenbin, *et al.* Change processes and characteristics of mass balance of the Ürtümqi Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürtümqi River, Tianshan Mountains, during 1959–2009 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(6): 1301–1309. [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.]
- [15] Ye Baisheng, Ding Yongjian, Liu Chaohai. Response of valley glaciers in various size and their runoff to climate change [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, **23**(2): 103–110. [叶柏生, 丁永建, 刘潮海. 不同规模山谷冰川及其径流对气候变化的响应过程[J]. *冰川冻土*, 2001, **23**(2): 103–110.]
- [16] Shen Yongping, Su Hongchao, Wang Guoya, *et al.* The responses of glaciers and snow cover to climate change in Xinjiang (II): Hazards effects [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(6): 1355–1370. [沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(II): 灾害效应[J]. *冰川冻土*, 2013, **35**(6): 1355–1370.]
- [17] Casassa G, López P, Pouyaud B, *et al.* Detection of changes in glacial run-off in alpine basins: Examples from North America, the Alps, Central Asia and the Andes [J]. *Hydrological Processes*, 2009, **23**: 31–41.
- [18] Liu Youcun, Huo Xueli, Hao Yonghong, *et al.* A study of the variation of extreme runoff in the upstream of the Ürtümqi River, Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, **35**(5): 1248–1258. [刘友存, 霍雪丽, 郝永红, 等. 天山乌鲁木齐河上游径流极值变化分析研究[J]. *冰川冻土*, 2013, **35**(5): 1248–1258.]

Characteristics of the altitude-dependent mass balance and their impact on runoff of the Glacier No.1 at the headwaters of the Ürümqi River , Tianshan Mountains

PU Hongzheng^{1,3}, HAN Tianding¹, LI Xiangying¹, LU Chengyang², JIAO Kebin¹, WANG Jin⁴

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences , Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute , Chinese

Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China; 2. Hydrology and Water Resources Bureau of the Upper Reaches of the

Yellow River , Yellow River Conservancy Commission , Lanzhou 730030 , China; 3. University of Chinese

Academy of Sciences , Beijing 100049 , China; 4. Aksu Hydrology and Water Resources

Reconnaissance Bureau , Aksu 843000 , Xinjiang , China)

Abstract: Based on the observation of surface mass balance from 1980 to 2010 on the Glacier No. 1 at the headwaters of the Ürümqi River , Tianshan Mountains , together with hydrological and meteorological data , the relationships between net ablation and climatic factors and between net accumulation and climatic factors during 1984 – 2010 are studied. In addition , characteristics of mass balances in different altitude ranges and their impact on runoff of the glacier are analyzed. It is found that in the Glacier No. 1 mass balance is in a continuous deficit situation. A statistical analysis shows that the correlation coefficient is -0.16 between net accumulation and precipitation; the correlation coefficient is 0.61 between net ablation and annual mean air temperature; the correlation coefficient is 0.78 between net accumulation and the summer mean air temperature; in 2010 both annual net accumulation and accumulation area reached the minimum in the record since observation; in 2010 both annual net ablation and ablation area reached the maximum in the record since observation. 2010 was the strongest ablation year ($b_n = -1\,327\text{ mm}$) , when the Glacier No. 1 was totally in the ablation zone ($\text{ELA} > 4\,484\text{ m}$) . Most notably , mass balances in various altitude ranges of the glacier , whatever in east branch or in west branch , were significantly different from those in previous years. These suggest that 2010 was a special year of mass balance and that mass balance of the glacier seems to enter a new stage. It is also revealed that the influence of air temperature on runoff is greater than that of precipitation.

Key words: Glacier No. 1; mass balance; runoff; Tianshan Mountains