

天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡过程研究

刘潮海 谢自楚 王纯足

(中国科学院兰州冰川冻土研究所, 730000)

摘 要 天山乌鲁木齐河源1号冰川1958- 1959~ 1991- 1992年度, 以负物质平衡状态为主, 累积负平衡量达 $851.9 \times 10^4 \text{ m}^3$, 冰川平均亏损4562 mm 水层, 与中亚山地冰川物质平衡的变化趋势相似, 均是由夏季平均气温升高和年降水量减少引起的。分析17 a 的物质平衡实测资料表明, 净物质平衡与平衡线高度, 以及平衡线高度与夏季平均气温和年降水量存在着密切关系, 夏季平均气温变化1 $^{\circ}\text{C}$, 平衡线高度变化102 m, 年降水量变化100 mm, 平衡线高度波动58 m。

关键词 乌鲁木齐河源1号冰川 物质平衡 动态变化

物质平衡是冰川反应气候变化的最敏感的指标之一, 其动态变化是引起冰川规模和径流变化的物质基础, 因而长期监测物质平衡及其分量的变化具有重要的科学价值和实践意义, 一直受到世界各国政府和科学家的重视。乌鲁木齐河源1号冰川(以下简称1号冰川)是我国唯一长期监测物质平衡的冰川。本文在总结分析该冰川34 a 观测资料的基础上, 阐述物质平衡的年际和年内变化过程, 以及与气候变化的关系, 建立物质平衡与平衡线高度, 以及平衡线高度与夏季平均气温和年降水量的数学模式。

1 1号冰川概况

1号冰川位于天山天格尔山脉北坡, 乌鲁木齐河源区, 面积 1.84 km^2 , 为一双冰斗-山谷冰川。该冰川由东、西两支冰川组成, 面积分别为 1.163 km^2 和 0.677 km^2 , 它们的上至下界高度分别为4269~ 3740 m 和4486~ 3810 m。东、西支冰川有着各自的补给区和占据着不同的高度区间, 虽然在其末端汇流, 形成过统一冰舌, 但由于其强烈退缩, 现已分离为两支独立的冰川。

1号冰川东、西支分别布设了8条横断面和1条纵剖面, 共计69根测杆。除正常进行冬、夏和年平衡观测外, 还在夏季每10~ 15 d 一次的瞬时物质平衡和相应的平衡线高度的测量。

2 物质平衡的观测和计算

为了充分估算附加冰在物质平衡组成中的作用,减少物质平衡观测误差,在采用测杆测量的同时,还用雪层剖面法测量附加冰和雪层的厚度。因此,某时段的单点净物质平衡 (b_n) 由冰川冰 (b_i)、积雪 (b_s) 和附加冰 (b_{si}) 的平衡组成

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

$$b_i = \rho_i [(h_1 + h_{s1} + h_{si1}) - (h_2 + h_{s2} + h_{si2})] \quad (2)$$

$$b_s = \rho_s h_{s2} - \rho_{s1} h_{s1} \quad (3)$$

$$b_{si} = \rho_{si} (h_{si2} - h_{si1}) \quad (4)$$

式中: h_1, h_2 分别为前后两次观测的测杆至雪面或冰面的高度; h_{s1}, h_{s2} 分别为前后两次观测的雪层厚度; h_{si1}, h_{si2} 分别为前后两次观测的附加冰的厚度; ρ_{s1}, ρ_{s2} 分别为前后两次测量的雪层平均密度; ρ_i, ρ_{si} 分别为冰川冰和附加冰的平均密度, 分别取 0.90 g/cm^3 和 0.85 g/cm^3 。

采用等值线法计算冰川净平衡, 以相邻等值线之间的投影面积 (S_i) 分别乘以相应区间的平均净平衡量 ($\bar{b}_{ia}$), 累积得到整条冰川的净平衡量 (B_n):

$$B_n = \sum_{i=1}^n \bar{b}_{ia} S_i \quad (5)$$

总物质平衡 B 为总积累 C 和总消融 A 之差。总积累和总消融分别由净积累 (B_c)、净消融 (B_a) 与消融区季节积累 (N_{sa})、积累区的季节消融 (N_{sc}) 组成

$$C = B_c + N_{sa} + N_{sc} \quad (6)$$

$$A = B_a + N_{sa} + N_{sc} \quad (7)$$

分析1号冰川净物质平衡和总物质平衡的关系表明, 总物质平衡系数 k_t (C/A) 和净物质平衡系数 k_n (B_c/B_a) 有密切的线性关系, 相关系数高达 0.99

$$k_t = 0.438 + 0.53k_n \quad (8)$$

总物质平衡和净物质平衡系数又分别与总消融和净消融有密切的指数关系

$$k_t = 254A^{-1.18} \quad (9)$$

$$k_n = 6923B_a^{-2.21} \quad (10)$$

由式 (9), (10) 可分别导出总积累和净积累。冰川消融量与夏季气温或正积温有关, 且又容易获得, 因而可以利用冰川的总消融或净消融计算冰川的总积累或净积累。

3 物质平衡的年际变化

利用距1号冰川 2.5 km 处的大西沟气象站 (海拔 3539 m) 的降水和气温资料, 与已

观测的冰川物质平衡的各特征值进行相关, 插补因故缺测的1967~ 1979年的物质平衡值(张金华, 1981; 张金华等, 1984)。分析这些插补和实测的冰川物质平衡表明, 34 a 中正平衡14 a, 负平衡20 a, 累积平衡量- $851.9 \times 10^4 \text{ m}^3$, 折合水层- 4562 mm。其中1978- 1979~ 1987- 1988年度间, 除1982- 1983年度为一弱正平衡年外, 其余年份均为较强的负平衡, 累积负平衡量达 $588.5 \times 10^4 \text{ m}^3$, 占34 a 物质总亏损量的69.1%, 是物质亏损的主要时期。1号冰川与同位于天山的图尤克苏冰川(外伊犁阿拉套)、卡拉巴特卡克(捷尔斯格伊阿拉套)和戈鲁宾(吉尔基斯山)冰川相比较后发现, 其物质平衡均以负平衡状态为主(Макаревич и др 1992; Люргеров 1993), 表现在累积物质平衡曲线上, 具有相似性和同一趋势(图1), 特别在气候反常年份, 上述4条冰川物质平衡的同步性增大, 其符号完全相同。

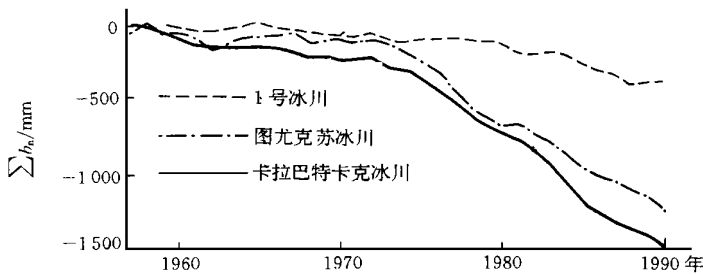


图1 1号冰川和图尤克苏、卡拉巴特卡克冰川累积物质平衡 ($\sum b_n$) 的变化

Fig 1 Variations of the cumulative mass balance in Glacier No. 1, Tuyuksu Glacier and Karabatkak Glacier

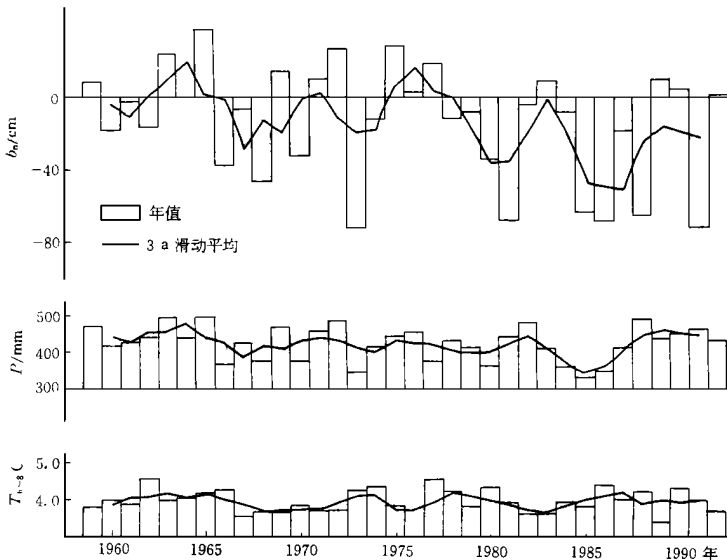


图2 1号冰川物质平衡 (b_n) 和大西沟气象站年降水量 (P)、夏季平衡气温 ($\bar{T}_{6-8}$) 的变化

Fig 2 The variations of mass balance (b_n) of Glacier No. 1, and annual precipitation (P) and summer temperature ($\bar{T}_{6-8}$) in Daxigou Meteorological Station

冰川积消过程及物质平衡直接受气温和降水的影响。分析邻近1号冰川的大西沟气象站(海拔3539 m, 43°06' N, 86°50' E)的资料表明, 除1967~ 1972年夏季(6~ 8月)平均

气温有所下降外,总的趋势是上升的。自1958年以来,夏季平均气温升高 0.1°C ,年降水量平均减少 10 mm (图2)。分析中亚天山的明日基(海拔 3014 m , $43^{\circ}05'\text{ N}$, $77^{\circ}04'\text{ E}$),巴伊蒂克(海拔 1579 m , $42^{\circ}19'\text{ N}$, $74^{\circ}30'\text{ E}$)和天山(海拔 3614 m , $41^{\circ}55'\text{ N}$, $78^{\circ}14'\text{ E}$)等气象站的长系列观测资料也表明,它们与大西沟气象站的夏季平均气温和年降水量的变化趋势相同。中亚天山冰川区自上一世纪末以来,可以分出两个多雨期:1894~1914年和1961~1972年。而夏季平均气温自本世纪20年代以来则处在不断的升高中,特别是70年代初以来,夏季平均气温升高 0.1°C ~ 0.6°C ,年降水量减少 $10\sim 40\text{ mm}$ 。高温对应着少雨的气候状态,使中亚天山冰川区物质平衡处于很大的亏损中,并导致冰川强烈后退(Liu Chao-hai et al., 1992)。

冰川系数或积累区面积比率是衡量其物质平衡变化的主要指标之一。1号冰川的平均冰川系数为 1.08 ,负物质平衡年份平均为 0.69 ,正物质平衡年份为 1.74 。由此可见,物质平衡随着积累区面积的增大而增加,而随着消融区面积的增大而减小。但是,积累区和消融区面积等量扩大使物质平衡增加或减小的增量并不相等。在正物质平衡年份,正物质平衡增加量与积累区面积扩大值的平均比率为 $1.1\text{ m}^3/\text{m}^2$,而负物质平衡年份,负物质平衡增加量与消融区面积扩大值的平均比率则为 $3.2\text{ m}^3/\text{m}^2$ 。说明消融区面积扩大所引起的物质亏损量,要比积累区面积等量扩大而引起的物质增加量大近3倍。在正物质平衡年份,平衡线高度下降,雪-粒雪覆盖面积扩大而使其反射率提高,抑制了冰川消融,从而使物质平衡增大而引起的积累区面积的扩大量,要比负物质平衡等量增大而引起的消融区面积的扩大量大。

4 物质平衡的年内变化过程

1号冰川所处的内陆位置和主要受西风气流带来的降水补给等因素的影响,冬季(10月至翌年3月)严寒少雨,降水主要集中于夏季3个月(65.8%),成为冰川的主要积累期。这种暖季补给型的水热条件,使1号冰川物质平衡形成的年内过程有着自身的特点。按照积累、消融强度,可将冰川物质平衡年分为以下几个时期:

(1) 冬季(10月至翌年3月)弱积累和弱消融期:冰川以积累为主,但积累量不大,日平均积累速率一般小于 1.5 mm 。在冰舌区,冰川物质继续亏损,使其冬平衡小于冬季积累。

(2) 春季(4~5月)中等积累和中等消融期:冰川积累较冬季增加较快,日平均积累速率一般大于 2 mm 。冰川消融主要出现在季节雪层中,在消融区普遍发育有附加冰,而在积累区的雪层中则出现冰夹层或冰透镜体。

(3) 夏季(6~8月)强积累和强消融期:随着冰川冰的出露,冰川消融增大得很快,尤以7月的消融量最大。日平均消融速率变化在 $5\sim 11\text{ mm}$ 。与此同时,补给区为持续的积累期,日平均积累速率为 $3\sim 6\text{ mm}$ 。

(4) 秋季(9月)中等积累和中等消融期:冰川消融高度随着气温下降和降水量的减少而下移,其消融速率一般小于 3 m m/d 。补给区积累量较冬季大,但又小于夏季。日平均积累速率介于 $1.5\sim 2.0\text{ mm}$ 之间。

冰川物质平衡形成的年内过程表明, 同一冰川积累和消融同时集中于夏季, 是这类冰川区别于冷季补给型冰川的显著特点。物质平衡随高度变化的年内过程也有其特殊性。冬季物质平衡梯度很小, 雪的平均密度随高度升高没有大的变化, 一般在 0.278 g/cm^3 左右。从冰川冰出露到强消融出现以前, 物质平衡梯度增大($1.2 \sim 1.6 \text{ mm/m}$), 主要依赖于补给区积累量的迅速增大, 而冰舌区消融量的增加则非常缓慢。

7月初(或7月中旬)到8月中旬为冰川的强消融期, 同时又是冰川的持续积累期, 从消融增大和积累增加两个方向上同时加大了物质平衡梯度, 其平均值可达 $3.0 \sim 3.5 \text{ mm/m}$, 物质平衡随高度分布曲线伸长, 呈现出多重结构(图3)。

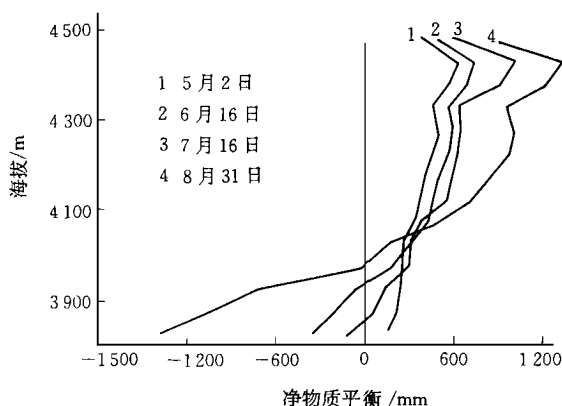


图3 1号冰川西支1988-1989年度物质平衡的高度结构

Fig. 3 The altitude structure of mass balance on the west branch of Glacier No. 1 during 1988-1989

5 平衡线动态与物质平衡

1958-1959~1991-1992年度间, 平衡线高度变化在3971~4160 m, 多年平均值为4055 m, 正物质平衡年平均为4003 m, 负物质平衡年平均为4085 m。

年内瞬时平衡线高度随着冰川的消融增大而有规律地上升。5月中旬起, 平衡线随着冰川冰的出露和消融开始在冰舌下段出现, 在冰川强消融期出现以前, 上升缓慢。由于冰舌区在消融的同时, 冰川中上部出现强的积累, 物质平衡为正值, 平衡线高度没有随物质平衡增大而升高(图4)。冰川进入强消融期后, 瞬时平衡高度(ELA_t)才以较大的幅度升高, 并与瞬时物质平衡(b_t)呈现出较密切的线性关系:

$$1 \text{ 号冰川东支} \quad ELA_t = 3929.8 - 0.33b_t \quad (11)$$

$$1 \text{ 号冰川西支} \quad ELA_t = 4140.7 - 0.52b_t \quad (12)$$

式(11)、(12)仅根据1988-1989年度夏季消融期的观测资料所得出的瞬时物质平衡与相应的平衡线高度的关系, 其它年份所观测的大量资料还有待整理和分析。

分析1号冰川17 a的实测资料, 平衡线高度(ELA)和净物质平衡(b_n)有以下相关关系(图5):

$$ELA = 4018 - 0.15b_n \tag{13}$$

假设冰川处于稳定状态时，平衡高度为 ELA_0 ，物质平衡值相应为零。当冰川处于非稳定状态时，平衡高度为 ELA ，相应的物质平衡 $b(ELA)$ 和对应的平衡线高度差 ($ELA - ELA_0$) 可用下列方程式表示:

$$b(ELA) = \frac{db_n}{dz} (ELA - ELA_0) \tag{14}$$

式中: db_n/dz 为平衡线波动时的物质平衡有效梯度 (mm/m)。

根据式 (13) 判定，物质平衡为零时，即冰川稳定状态下的平衡线高度为4018m。以此高度作为计算条件，可导出非稳定状态下物质平衡与平衡线高度差的经验关系:

$$b(ELA) = -25.52 - 5.64(ELA - ELA_0) \tag{15}$$

对式 (15) 求导数，可以得出平衡线波动1m 时，净物质平衡变化5.64mm 的结论。由于此值不同于一般的冰川物质平衡梯度或冰川作用能，故定义为有效物质平衡梯度。

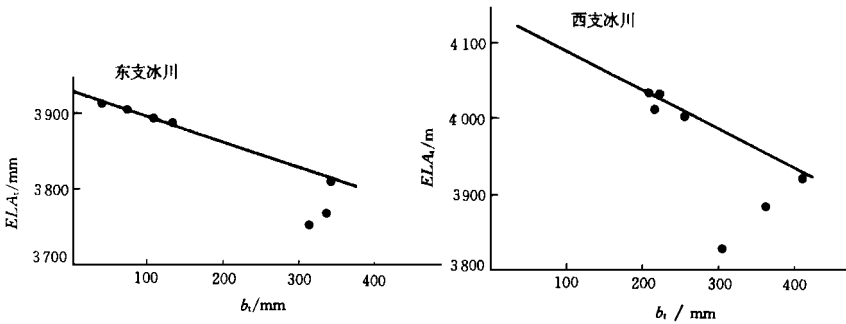


图4 1号冰川东、西支瞬时物质平衡(b_t)与其平衡线高度(ELA_t)的关系

Fig 4 The relationship between instantaneous mass balance (b_t) and corresponding instantaneous equilibrium line altitude (ELA_t) for the east branch and the west branch of Glacier No. 1

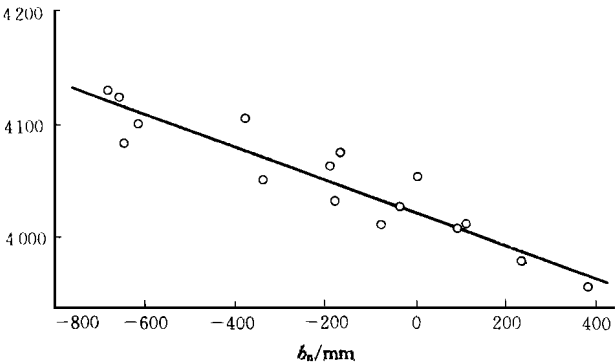


图5 1号冰川平衡线高度(ELA)和净物质平衡值(b_n)的关系

Fig 5 The relationship between the equilibrium line altitude (ELA) and net mass balance (b_n) of Glacier No. 1

平衡线高度(ELA)与夏季平均气温($\overline{T_{6-8}}$)、物质平衡年度降水量(P)有密切的关系:

$$ELA = 3888 + 102 \overline{T_{6-8}} - 0.58P \quad (16)$$

该公式相关系数为0.92, 通过5% 信度下方差比和相关系数检验, 可以用来分析和观测夏季平均气温和年降水量的变化对平衡线高度的影响。

在年降水量不变时, 夏季平均气温变化1℃, 平衡线高度波动102m, 高于年平均气温变化1℃, 平衡线高度变化81m 的数值(姚檀栋, 1987)。在夏季平均气温不变时, 年降水量变化100mm 时, 平衡线高度波动58m。大西沟气象站34a 夏季平均气温平均为4℃, 年平均降水量为427mm。这一平均气候状况所对应的平衡线高度为4050m, 与该时段实测的平衡线平均高度(4055m)基本吻合。

综上所述, 可以得到以下主要结论:

(1) 自1959年以来, 1号冰川以负物质平衡状态为主, 其中, 1978- 1979~ 1987- 1988年度累积负物质平衡量占34a 物质亏损总量的69.1%, 是物质亏损的主要时期。这一趋势与中亚天山冰川相似, 均是由夏季平均气温升高和年降水量减少所引起。

(2) 1号冰川消融期和积累期同时发生在夏季, 属典型的暖季补给型冰川, 在物质平衡形成的年内过程, 以及物质平衡的高度结构上均区别于冷季补给型的海洋性冰川。

(3) 1号冰川平衡线高度(ELA)和年净物质平衡(b_n)有良好的线性关系, 年内瞬时物质平衡(b_t)和相应的平衡线高度(ELA_t)在冰川强消融期也有良好的关系。据此所建立的数学模式, 可以插补和延长年净物质平衡。

(4) 统计分析表明, 平衡线波动1m, 净物质平衡变化5.64mm。夏季平均气温和年降水量的变化是使平衡波动的主要因素, 年降水量变化100mm 和夏季平均气温变化1℃, 分别使平衡线波动58m 和102m。

参 考 文 献

张金华 1981 天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡研究 冰川冻土, 3(2): 32~ 40

张金华, 王晓军, 李军 1984 天山乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡变化与气候相互关系的研究 冰川冻土, 6(4): 25~ 36

姚檀栋 1987 冰川物质平衡、零平衡线及气候间的关系 冰川冻土, 9(4): 289~ 296

Liu Chaohai and Han Tianding 1992 Relation between recent glacier variations and climate in the Tianshan Mountains, Central Asia Annals of Glaciology, 16: 11~ 15

Макарович К. Г., А. Л. Волошина и В. Н. Уваров 1992 Внешний массообмен ледника туюксу пространственно-временной анализ за период инструментальных измерений МПИ, 33: 70~ 74

Дюргерев М. Б. 1993 Мониторинг баланса массы горных ледников М, Наука 85~ 87.

A Research on the Mass Balance Processes of Glacier No. 1 at the Headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains

Liu Chaohai, Xie Zichu and Wang Chunzu

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, 730000)

Abstract

During 1958/1959 and 1991/1992, negative mass balance was predominant over Glacier No. 1, when the cumulative negative balance amounted to $851.9 \times 10^4 \text{ m}^3$, equivalent to a specific mass balance of -4562 mm. The general trend of mass balance was similar to that in Asia, which can be attributed to the rising of summer mean temperature and decreasing of annual precipitation. An analysis of 17 year's mass balance measurement data shows that there exists close relationship between the equilibrium line altitude and net mass balance, so does that between the equilibrium line altitude and summer mean temperature and annual precipitation. When summer mean temperature and annual precipitation vary by 1 and 100 mm respectively, the equilibrium line altitude will shift 102 m and 58 m respectively.

Key words: Glacier No. 1, mass balance, variation

第一作者简介: 刘潮海, 男, 56岁, 研究员, 1964年毕业于兰州大学地质地理系自然地理专业。现从事现代冰川和古冰川学研究。