

# 我国大陆型山地冰川对气候变化的响应

张寅生 姚檀栋 蒲健辰

(中国科学院兰州冰川冻土研究所冰芯与寒区环境开放研究实验室, 兰州 730000)

**摘要** 以乌鲁木齐河源1号冰川、唐古拉山冬克玛底冰川和祁连山“七一”冰川为例, 着重探讨青藏高原冰川变化的能量机制. 得到了在不同气候变化情景下, 冰川平衡线对气候因子波动的响应值, 并预测未来气候变化对青藏高原冰川物质平衡过程的影响. 文中所选取的3条冰川中, 以1号冰川对气候变化的响应最为强烈, 而“七一”冰川以其独特的能量交换特征, 对气候因子波动的响应相当迟缓, 从而在全球山地冰川普遍缩小规模的背景下, 该冰川处于相对较为稳定的状态.

**关键词** 冰川变化 气候波动 响应

**中国法分类号** P343.72

**第一作者简介** 张寅生, 男, 36岁, 副研究员, 1983年毕业于西北大学地理系自然地理专业, 1993年在中国科学院兰州冰川冻土研究所获博士学位. 现主要从事冰川与寒区气候气象研究工作.

## 1 问题的提出

冰川的长度、物质平衡和冰川物质平衡线高程是描述冰川变化最常用的3个要素, 三者之间亦互为关联、互相影响, 尤其后两者之间存在着良好的线性关系. 所以, 很多冰川变化的研究工作, 均从其物质平衡线高程(简称 *ELA*)与气候波动的关系入手.

本世纪60年代, Hoinkes (1968) 全面系统地总结和研究了不同天气系统与 *ELA* 之间的关系. 以后该方面的研究多沿用此方法. 在我国亦早就注意到 *ELA* 的波动特征, 但到80年代以来才开始进行系统研究. 康兴成等 (1981)、丁良福 (1984) 和张祥松 (1984) 等先后分析了 *ELA* 与气象要素之间的关系. 以上研究多采用统计学方法, 尚未能从冰川物质与能量传输过程即冰川变化的物理成因角度进行研究. 我国的冰川学研究监测时间序列多不能满足统计学方法所要求的长度, 观测时间序列最好的乌鲁木齐河源1号冰川(以下简称1号冰川), 以利用气候资料插补的时间序列再去探讨其与气候变化的关系, 在理论上缺乏说服力.

冰川发育的最根本要素只有两个: 能量和水分条件. 前者控制消融过程, 后者则决定其积累过程,

这一对互为矛盾的因子的相互作用决定了冰川变化的趋势和强度. 70年代末, Kuhn (1988) 通过阿尔卑斯山冰川物质及能量交换过程的观测研究认为, 可以将反映冰川变化的 *ELA* 波动特征概化为模型, 并提出 *ELA* 对气候变化响应的物理气候学模式. Kuhn (1985) 和 Ambach (1985) 分别将此模型应用到阿尔卑斯山、安第斯山及格陵兰冰盖上, 均取得了较为满意的结果. 本文亦沿用其思维方法, 结合我国青藏高原大陆型冰川的能量交换特征, 建立青藏高原冰川 *ELA* 对气候波动的响应模式, 并对未来不同气候变化情景下冰川物质平衡的变化作出初步预测.

## 2 模式的建立

冰川物质平衡线附近任一点的物质平衡与能量交换方程可表示为:

$$b(z) = c(z) - a(z) \quad (1)$$

$$Q_R(z) + Q_S(z) + Q_I(z) + Q_m(z) = 0 \quad (2)$$

式中:  $z$  为高程;  $b$ ,  $c$  和  $a$  分别为冰川物质平衡、积累和消融;  $Q_R$  为净辐射;  $Q_S$  为感热通量;  $Q_I$  为潜热通量;  $Q_m$  为融化耗热.

式 (2) 中略去了传导热项, 因为它比其因子

要小 1~2 个数量级。引入块体交换系数 ( $\alpha$ , bulk transfer coefficient) 和鲍文比  $B$ , 则有:

$$Q_s = \alpha (T_a - T_s) \quad (3)$$

$$Q_i = \frac{Q_s}{B} = \frac{\alpha (T_a - T_s)}{B} \quad (4)$$

$$Q_m = \frac{1}{L_m} \cdot L_M \quad (5)$$

式中:  $T_a$ ,  $T_s$  分别为冰川近冰面及冰面气温, 消融  $T_s$  均值为零;  $M$  为消融期天数;  $M$  为冰雪在  $M$  时段内的融化量,  $L_m$  为冰雪融化潜热。大陆型冰川表面的消融量应为冰雪融化量与蒸发量之和, 表现为负值。考虑到习惯用法及方程的方向性, 则有:

$$M = \frac{1}{L_m} [Q_R + Q_s - \frac{Q_s}{B}] \quad (6)$$

令  $\frac{\partial T_a}{\partial z}$ ,  $\frac{\partial Q_R}{\partial z}$  和  $\frac{\partial c}{\partial z}$  分别为冰川表面气温、净辐射及积累量的随高程变化的梯度, 假设冰川的 ELA 位于  $h_0$  处, 由于气候因子的波动 ( $Q_R$ ,  $T_a$ ,

$c$ ), ELA 变化至  $h_1 = h_0 + h$ , 则有:

$$b(h_1) = b(h_0) = 0 \quad (7)$$

$$T_a(h_1) = T_a(h_0) + \frac{\partial T_a}{\partial z} h \quad (8)$$

$$c(h_1) = a(h_1) = c(h_0) + \frac{\partial c}{\partial z} h \quad (9)$$

$$Q_R(h_1) = Q_R(h_0) + \frac{\partial Q_R}{\partial z} h \quad (10)$$

综合以上各式

$$c + \frac{\partial c}{\partial z} h = \frac{1}{L_m} \left[ \frac{\partial c}{\partial z} \cdot Q_R h + Q_R + (1 - \frac{1}{B}) \left( \frac{\partial T_a}{\partial z} h + T_a \right) \right] \quad (11)$$

消融期天数取多年平均值, 则有:

$$c + \frac{\partial c}{\partial z} h = \frac{1}{L_m} \left[ \frac{\partial Q_R}{\partial z} h + Q_R + (1 - \frac{1}{B}) \left( \frac{\partial T_a}{\partial z} h + T_a \right) \right] \quad (12)$$

本模式的研究区域为 ELA 附近,  $\frac{\partial Q_R}{\partial z}$  由于直达辐射、反射率及冰面温度变化很小而忽略不计, 整理后得到:

$$h = \frac{-c + \frac{1}{L_m} [Q_R + (1 - \frac{1}{B}) T_a]}{\frac{\partial c}{\partial z} - \frac{1}{L_m} \left[ (1 - \frac{1}{B}) \frac{\partial T_a}{\partial z} \right]} \quad (13)$$

式 (13) 即为  $h$  对  $Q_R$ ,  $c$  和  $T_a$  波动的响应模式。和  $h$  可利用气温、风速和垂直梯度计算得到。  $\frac{\partial c}{\partial z}$  和  $\frac{\partial T_a}{\partial z}$  可通过物质平衡和冰川区不同点气候观测得到。在冰川积累区获得的积累量  $c$  一般被认为稍高于其降水量, 但在 ELA 附近两者可认为很接近, 至少其较小的波动是同步的。所以, 式 (13) 的意义在于气温、降水和太阳辐射平衡任一项发生变化或同时发生变化均会导致相应的冰川 ELA 及物质平衡波动。

从式 (13) 可分别得到 ELA 对气温波动的响应:

$$\frac{h}{T_a} = \frac{\frac{1}{L_m} (1 - \frac{1}{B}) T_a}{\frac{\partial c}{\partial z} - \frac{1}{L_m} (1 - \frac{1}{B}) \frac{\partial T_a}{\partial z}} \quad (14)$$

ELA 对降水波动的响应:

$$\frac{h}{c} = \frac{-c}{\frac{\partial c}{\partial z} - \frac{1}{L_m} (1 - \frac{1}{B}) \frac{\partial T_a}{\partial z}} \quad (15)$$

ELA 对太阳辐射平衡波动的响应:

$$\frac{h}{Q_R} = \frac{\frac{1}{L_m} Q_R}{\frac{\partial c}{\partial z} - \frac{1}{L_m} (1 - \frac{1}{B}) \frac{\partial T_a}{\partial z}} \quad (16)$$

### 3 模式的应用及其讨论

#### 3.1 ELA 波动值的计算

以上各式中  $L_m$  为常数, 其值为  $0.335 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其它各值要通过物质平衡与能量交换的观测来确定。1989 年至今在冬克玛底冰川进行了物质平衡观测, 其中 1991~1993 年进行了能量交换观测; 1995 年在“七一”冰川进行能量平衡观测, 其物质平衡观测可以追溯至 50 年代和 80 年代。1 号冰川的物质平衡观测开始于 1958 年, 1986~1988 年亦进行了能量交换过程观测。利用与以上观测研究相应的冰川区的气候资料, 计算出模各特

征值如表 1 所示. 3 条冰川中以位于青藏高原中部的冬克玛底冰川 *ELA* 最高. 值得注意的是, *ELA* 要低得多的“七一”冰川的消融期与前者相差无几. 1 号冰川的气温递减率比其它两者均高. 冬克玛底冰川的鲍文比与 1 号冰川相近, 而其块体交换系数却与“七一”冰川相似. 从物理意义上讲, 冬克玛底冰川具有与 1 号冰川相似的湍流交换结构, 却具有与“七一”冰川相似的感热能转换特征.

表 1 冬克玛底冰川和 1 号冰川、“七一”冰川表面参数值

Table 1 Parameters of the Dongkemadi Glacier, the Glacier No. 1 and the July First Glacier

冬克玛底冰川	<p><i>ELA</i> (平均): 海拔 5 600 m (平均): 41 d</p> <p><math>\frac{\partial T_a}{\partial z}</math>: 0.62 K/100 m</p> <p><math>\frac{\partial c}{\partial z}</math>: 3.7 mm/m</p> <p>: -1.5586</p> <p>: 0.374 MJ/(m<sup>2</sup>·K·d)</p>
1 号冰川	<p><i>ELA</i> (平均): 海拔 4 050 m (平均): 55 d</p> <p><math>\frac{\partial T_a}{\partial z}</math>: 0.88 K/100 m</p> <p><math>\frac{\partial c}{\partial z}</math>: 5.9 mm/m</p> <p>: -1.167</p> <p>: 1.010 MJ/(m<sup>2</sup>·K·d)</p>
“七一”冰川*	<p><i>ELA</i> (平均): 海拔 4 670 m (平均): 42 d</p> <p><math>\frac{\partial T_a}{\partial z}</math>: 0.66 K/100 m</p> <p><math>\frac{\partial c}{\partial z}</math>: 3.7 mm/m</p> <p>: -1.140</p> <p>: 0.264 MJ/(m<sup>2</sup>·K·d)</p>

\*部分引自刘潮海 (1992) 资料.

表 2 给出了 3 条冰川的 *ELA* 对各气候因子的波动值. 此处首先要强调的是, 此模式中的气温  $T_a$  是指冰川表面 *ELA* 附近约 2 m 高处的气温, 它与前面所提到的有关 *ELA* 波动方面研究工作所利用的气温有所不同. 一般来讲, 冰川表面的气温波动幅度要比非冰川区小. 冬克玛底冰川表面的研究成果表明, 该冰川表面气温变化对辐射通量的敏感性系数只有 0.03~0.06 K/(W·m<sup>-2</sup>), 比非冰川区要小 3~7 倍 (张寅生等, 1996). 所以冰川表面的气温波动幅度要比非冰川区小得多. 从表 2 可见, 冬克玛底冰川与“七一”冰川的 *ELA* 对降水波动的响应值竟然一样, 两者对辐射平衡波动的响

应值亦十分接近, 但对夏季平均气温变化的波动响应值却差别较大. 而 1 号冰川的各 *ELA* 对气候变化的波动响应值均与其它两者差别较大. 对辐射平衡波动的响应值相差 3.6 m/(MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>), 对降水波动的响应值小于其它两者 90 m/100 mm, 而对气温波动的响应值分别为另两条冰川的 2.4 倍和 9.9 倍. 对比 1 号冰川与“七一”冰川的物质平衡研究成果 (刘潮海, 1992), 1958~1988 年“七一”冰川物质平衡累积值为 1 833 mm, 同期 1 号冰川物质平衡累积值为 -4 068 mm. 造成以上两条冰川 *ELA* 对气温响应差异的根本估计是其块体交换系数 ( ) 的差异, 的物理意义在于单位气温梯度所形成的感热交换量, 在大陆型冰川上它是消融热源的组成部分. 消融期内冰面气温近似恒定为零, 亦即同样升温值会导致两条冰川相当大的热量差异.

表 2 冬克玛底冰川、1 号冰川和“七一”冰川 *ELA* 对气候因子波动的响应值

Table 2 The response values of *ELA* to variation in climatic parameters of the Dongkemadi Glacier, the Glacier No. 1 and the July First Glacier

冬克玛底冰川	<p><i>ELA</i> 对气温波动响应值 (<math>-\frac{h}{T_a}</math>): 4.6 m/K</p> <p><i>ELA</i> 对降水波动响应值 (<math>-\frac{h}{c}</math>): -0.28 m/mm</p> <p><i>ELA</i> 对辐射平衡波动响应值 (<math>-\frac{h}{Q_R}</math>): 34.1 m/(MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)</p> <p><i>ELA</i> 波动模式: <math>h = \frac{-c + 122.8(Q_R + 0.13 T_a)}{3.598}</math></p>
1 号冰川	<p><i>ELA</i> 对气温波动响应值 (<math>-\frac{h}{T_a}</math>): 10.9 m/K</p> <p><i>ELA</i> 对降水波动响应值 (<math>-\frac{h}{c}</math>): -0.19 m/mm</p> <p><i>ELA</i> 对辐射平衡波动响应值 (<math>-\frac{h}{Q_R}</math>): 30.6 m/(MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)</p> <p><i>ELA</i> 波动模式: <math>h = \frac{-c + 164.7(Q_R + 0.357 T_a)}{5.383}</math></p>
“七一”冰川	<p><i>ELA</i> 对气温波动响应值 (<math>-\frac{h}{T_a}</math>): 1.1 m/K</p> <p><i>ELA</i> 对降水波动响应值 (<math>-\frac{h}{c}</math>): -0.28 m/mm</p> <p><i>ELA</i> 对辐射平衡波动响应值 (<math>-\frac{h}{Q_R}</math>): 34.2 m/(MJ·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>)</p> <p><i>ELA</i> 波动模式: <math>h = \frac{-c + 125.7(Q_R + 0.032 T_a)}{3.673}</math></p>

### 3.2 相应的物质平衡响应值的计算

任一冰川的  $ELA$  与物质平衡之间存在着良好的线性关系. 利用冬克玛底冰川、1号冰川和“七一”冰川的物质平衡研究成果可得到其对气候因子波动的响应值(表3). 3条冰川对气候波动的响应趋势与  $ELA$  相同, 但波动幅度的差异更为明显. 1号冰川物质平衡对气温波动的响应值是“七一”冰川的30倍强, 对辐射平衡波动的响应值是“七一”冰川的2.5倍, 对降水波动的响应值是“七一”冰川的1.8倍. 值得注意的是, “七一”冰川在区域的气温、降水条件均好于地处青藏高原腹地的冬克玛底冰川, 但它对气候波动的各项响应指标均小于后者. 所以, “七一”冰川是一条变化趋势独特的冰川. 以上讨论亦从一个侧面反映青藏高原冰川对水资源影响特征的区域差异性, 对气候波动反应强烈, 则冰川对水资源调节作用强度高.

表3 冬克玛底冰川、1号冰川和“七一”冰川物质对气候波动的响应值

Table 3 Response of mass balance to climatic parameter variation of the Dongkemadi Glacier, the Glacier No. 1 and the July First Glacier

冬克玛底冰川
$ELA(h)$ 与物质平衡( $b$ )的关系: $h = 5\ 606.7 - 0.32b$
$b$ 对 $T_a$ 的响应值: $-14.4\ \text{mm}/\text{K}$
$b$ 对 $c$ 的响应值: $0.88\ \text{mm}/\text{mm}$
$b$ 对 $Q_R$ 的响应值: $-106.6\ \text{mm}/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$
$b$ 的响应模式: $b = \frac{+c - 122.8(Q_R + 0.138T_a)}{1.151}$
1号冰川
$ELA(h)$ 与物质平衡( $b$ )的关系: $h = 4\ 023 - 0.15b$
$b$ 对 $T_a$ 的响应值: $-72.7\ \text{mm}/\text{K}$
$b$ 对 $c$ 的响应值: $1.27\ \text{mm}/\text{mm}$
$b$ 对 $Q_R$ 的响应值: $-204.0\ \text{mm}/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$
$b$ 的响应模式: $b = \frac{+c - 164.7(Q_R + 0.357T_a)}{0.808}$
“七一”冰川
$ELA(h)$ 与物质平衡( $b$ )的关系: $h = 4\ 705.7 - 0.40b^*$
$b$ 对 $T_a$ 的响应值: $-2.75\ \text{mm}/\text{K}$
$b$ 对 $c$ 的响应值: $0.70\ \text{mm}/\text{mm}$
$b$ 对 $Q_R$ 的响应值: $-85.5\ \text{mm}/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})$
$b$ 的响应模式: $b = \frac{+c - 125.7(Q_R + 0.032T_a)}{1.469}$

\*据刘潮海(1992)资料.

### 3.3 未来变化趋势预测

统计结果表明, 青藏高原冰川  $ELA$  处的年平

均气温与年降水量有如下关系(赖祖铭, 1988):

$$T = -42.8 + 5.08 \ln P \quad (17)$$

式中:  $T$  为年平均气温;  $P$  为年降水量. 对式(17)作数值微分, 则有:

$$T = 5.08 \frac{P}{P} \quad (18)$$

此处降水  $P$  与模式中的积累量  $c$ , 如前面讨论, 其变化可认为十分同步, 考虑到物质平衡的特征加之冬季气温对整个冰川的热力状况亦有较大的影响, 所以此处引用年平均量值的关式.

利用式(18)及前面计算结果, 对3条冰川在未来不同气候变化情景下, 对物质平衡响应的变化

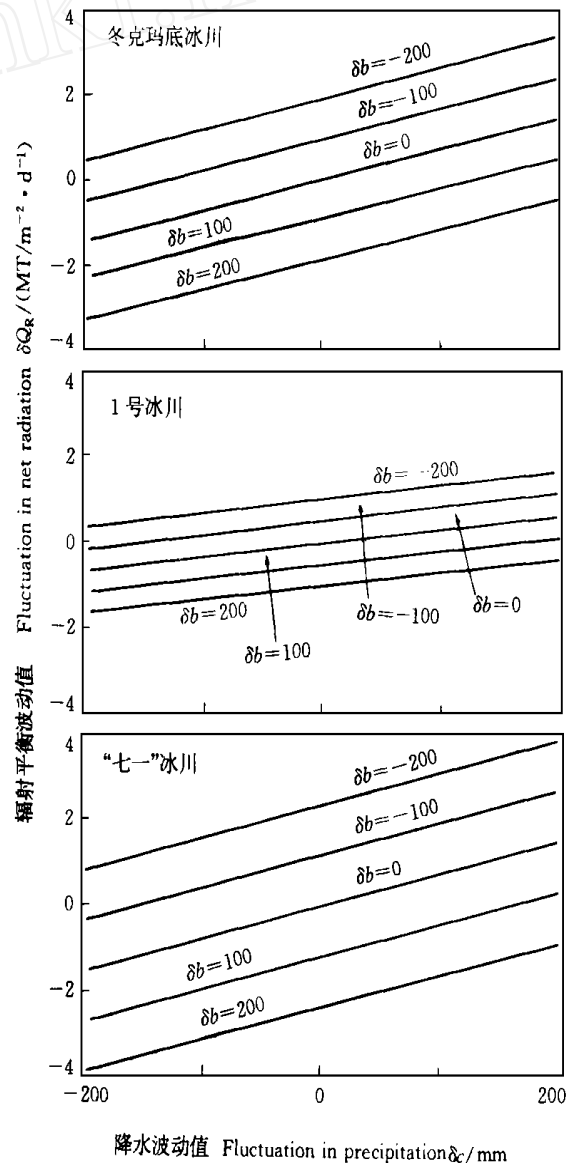


图1 冬克玛底冰川、1号冰川及“七一”冰川物质平衡( $b$ )对气候波动的响应值

Fig. 1 The response values of mass balance ( $b$ ) to climate variation of the Dongkemadi Glacier, the Glacier No. 1 and the July First Glacier

表 4 冬克玛底冰川、1 号冰川和“七一”冰川物质平衡对降水、气温波动的特征值之比较

Table 4 Characteristic values of mass balance for different climatic parameter variation of the Dongkemadi Glacier, the Glacier No. 1 and the July First Glacier

冰川名称 Glaciers	降水波动值 Fluctuation in precipitation $P/ \text{mm}$	相应物质平衡 波动值 Response fluctuation in mass balance $b_p/ \text{mm}$	相应气温波动值 Response fluctuation in temperature $T/ \text{K}$	相应物质 平衡波动值 Response fluctuation in mass balance $b_T/ \text{mm}$	$PT$ 比 $PT$ ratio $b_p/ b_T$
冬克玛底冰川	100	88	0.9	13.1	6.7
1 号冰川	100	127	0.8	56.8	2.2
“七一”冰川	100	70	1.0	2.8	25.1

作出预测 (图 1)。很明显, 1 号冰川物质平衡变化一定值时所要求气候波动变化幅度比两条冰川要小得多, 或者说 1 号冰川对气候波动的反应要比另两条冰川敏感得多。当气温上升  $1^\circ\text{C}$ , 降水减小  $100 \text{ mm}$ , 辐射平衡增加值为  $1 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  时 1 号冰川物质平衡会变化  $-400.4 \text{ mm}$ ; 而“七一”冰川相应的变化值为  $-156.4 \text{ mm}$ ; 冬克玛底冰川相应的变化为  $-208.3$ 。3 条冰川保持稳定状态的气候条件分别为 ( $P$  为降水波动值):

$$P - 122.8(Q_R + 0.138 T_a) = 0 \quad (\text{冬克玛底冰川})$$

$$P - 164.7(Q_R + 0.357 T_a) = 0 \quad (1 \text{ 号冰川})$$

$$P - 125.7(Q_R + 0.032 T_a) = 0 \quad (\text{“七一”冰川})$$

以上条件在图 1 中表现为  $b=0$  时的气候要素波动组合条件。

### 3.4 冰川变化的主导因子

冰川变化中的主导气候因子, 常常成为众多研究者关注的对象。从上述讨论的结果可见, 对本文所选取的 3 条冰川来讲, 物质平衡对辐射平衡波动的响应值均较高, 在冬克玛底冰川、1 号冰川和“七一”冰川分别为  $106.6 \text{ mm}$ ,  $204.0 \text{ mm}$  和  $85.5 \text{ mm}$ 。同样的物质平衡波动值所要求的气温与降水的波动值分别为: 冬克玛底冰川气温需波动  $7.4 \text{ K}$ , 降水需波动  $121 \text{ mm}$ ; 1 号冰川气温需波动  $2.8 \text{ K}$ , 降水需波动  $160 \text{ mm}$ ; “七一”冰川气温需波动  $31.1 \text{ K}$ , 降水需波动  $122 \text{ mm}$ 。从上看出, 尤其气温相应的波动值几乎是不可能发生的, 所以辐射平衡作为冰川表面重要能量输入在冰川变化中有着不可替代的地位, 当然辐射平衡变化  $1 \text{ MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$  的可能性尚需考虑, 但在目前的观测条件下尚无法进行分析。

在以前的冰川与气候变化关系的研究中, 人们更为关心的是  $ELA$  处的气温与降水对冰川变化的影响。从式 (17) 和 (18) 可见,  $ELA$  处每一个降水波动 ( $P$ ) 都会有相应气温波动值 ( $T$ ) 发生, 而物质平衡亦将发生响应波动值分别为  $b_p$  和  $b_T$ , 两者之间的比值  $PT = b_p/ b_T$ , 暂且称之为冰川变化的水热比 ( $PT$  ratio)。当  $PT$  值大于 1 时, 可认为降水对冰川变化的作用相对重要, 反之亦然。假设降水波动值为  $100 \text{ mm}$ , 那么 3 条冰川  $ELA$  处相应的气温、物质平衡及  $PT$  比值如表 4 所示。表 4 的计算结果显示, 3 条冰川的物质平衡均对降水波动更为敏感, “七一”冰川的  $PT$  比达到了 25.1, 1 号冰川的  $PT$  比最低, 所以 1 号冰川对气温波动相对敏感一些。

### 4 结语

本文依资料状况选取研究对象分别位于青藏高原唐古拉山、天山和祁连山, 从地域分布来讲尚具有一定代表性, 但毕竟只有 3 条冰川, 所以关于青藏高原冰川变化对气候波动的响应特征尚需进一步研究。

(1) 青藏高原冰川  $ELA$  对辐射平衡波动的响应值差别不大, 为  $30.6 \sim 34.2 \text{ m}/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$ , 而对气温波动响应差别较大, 为  $1.1 \sim 10.9 \text{ m}/\text{K}$ 。

(2) 由于各冰川物质平衡过程的差异, 其对气候波动的响应值的差异较  $ELA$  更大。对气温波动响应值为  $2.75 \sim 72.7 \text{ m}/\text{K}$ , 对降水波动的响应值为  $70 \sim 127 \text{ mm}/\text{mm}$ , 对辐射平衡波动的响应值为  $85.5 \sim 204.0 \text{ m}/(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$ 。

(3) 辐射平衡在冰川变化中具有明显的主导地

位, 冰川变化对降水波动相对比气温更加敏感. 观测表明, 其变化对气温相对敏感的冰川, 近几十年来表现出较大幅度的后退现象.

### 参 考 文 献

- 丁良福, 1984. 祁连山冰川发育的气候条件及其对冰川特征的影响. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第 5 号. 北京: 科学出版社, 9~15
- 刘潮海, 1992. 祁连山冰川的近期变化及趋势预测. 见: 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第 7 号. 北京: 科学出版社, 1~9
- 张祥松, 1984. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的变化及其与气候变化的若干关系. 冰川冻土, 6 (4): 1~12
- 张寅生等, 1996. 唐古拉山冬克玛底冰川平衡线高度附近的能量平

- 衡. 冰川冻土, 18 (1): 10~19
- 康兴成等, 1981. 天山和祁连山的冰川物质平衡、雪线位置与天气气候的关系. 冰川冻土, 3 (1): 53~58
- 赖祖铭, 1988. 中国冰川概论. 北京: 科学出版社, 23~24
- Ambach W, 1985. Climatic shift of the equilibrium line: Kuhn's concept applied to the Greenland Ice Cap. Ann. Glaciol., 6: 76~78
- Hoinkes H C, 1968. Glacier variation and weather. J. Glaciol., 7: 3~19
- Kuhn M, 1985. Fluctuation of climate and mass balance: different responses of two adjacent glaciers. Z. Gletscherkd Glazialgeol. 21: 409~416
- Kuhn M, 1988. The responses of the ELA to climate fluctuation: theory and observation. Glacier Fluctuations and Climatic Change, KLUWER A. Pub., 407~417

## The Response of Continental - type Glaciers to Climate Change in China

ZHANG Yin - Sheng YAO Tan - Dong PU Jian - Cheng  
(Laboratory of Ice Core and Cold Regions Environment, LIGG, CAS, 730000)

**Abstract** This paper takes the Dongkemadi Glacier in the Tanggula Mts., the Glacier No. 1 in the headwaters of the Urumqi River in the Tianshan Mts. and the July First Glacier in the Qilian Mts. as studying objects. The energy mechanisms for glacier fluctuation are discussed. As an indicator of climatic change, the ELA has linear correlation with mass balance. A model is established to study and forecast the ELA. From this model, it can be obtained the ELA respond-

**Key words** glacier variation, climate change, response

ing to climatic factors under different future climatic scenarios. Meanwhile, the future effects of climate change on mass balance were also forecasted. Among the three glaciers, the Glacier No. 1 is more sensitive to climate fluctuation, and the July first Glacier, with its especial features of energy exchange, is quite sluggish to climate fluctuation so that the glacier is almost stationary under the background of most glaciers all over the world in retreat.