

# 天山博格达峰扇状分流冰川的冰层温度

任 贾 文

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

发源于博格达峰北坡流向南北坡两个流域的5 Y725D 5及5 Y812B10冰川是博格达峰地区形态类型比较特别的一条冰川,本文合称为博格达峰扇状分流冰川。1981年中日联合考察队对该冰川考察时,在消融区上部打了一个20米深的钻孔,埋置温度计17只,取得了该冰川的第一批温度资料。

## 一、观测简况及结果

温度孔的位置选在冰川消融区上部的气象观测场,海拔高度约3750米。7月29日用兰州冰川冻土研究所自制的蒸汽钻打成20米深的孔,将17只热敏电阻温度计按1米或2米的间距放入。8月8日、11日、13日和15日先后观测了4次。

使用的热敏电阻温度计在室内作过鉴定,精度为0.1℃。野外使用前又鉴定一次,其精度未变。

各个温度计放置的深度自打钻时冰面算起。从打钻到最后一次观测,表面雪层最厚16厘米。观测期间的7天内,冰面下降不足5厘米。因此在本文中忽略了雪层和冰面变化。17和18米深的两个温度计因引出的导线太短而未能观测到,其余15只温度计的观测结果列于表1。

## 二、观测结果的分析

### 1. 最低温度及其深度

表2列举了中国某些冰川温度的观测结果。从表中看出,在博格达峰扇状分流冰川上测得的钻孔最低温度比其它冰川钻孔的相应温度都高。通过对祁连山羊龙河5号冰川冰层温度的研究认为<sup>[1-2]</sup>,冰川平衡线位置附近的冰层温度最低。表2中各冰川的温度测孔大多数不在平衡线上,博格达峰扇状分流冰川的测孔和其它冰川的测孔相比,与平衡线的高度差并不算大,因此它的最低温度较其它冰川的最低温度高是不容怀疑的。该测孔最低温度出现的深度为4—7米,与其它冰川测孔的相应深度较为一致。加拿大北极的白冰川在205米高度(冰川上限1800米,末端60米)处30米深钻孔中测得夏末最低温度出现的深度

表 1 博格达扇状分流冰川3750米高度钻孔冰温观测结果(°C)

Table 1. Measured results of ice temperature in the drilling-hole at 3750m

深 度 Depth(m)	8月8日 8 Aug.	8月11日 11 Aug.	8月13日 13 Aug.	8月15日 15 Aug.	平 均 Average
1	-0.8	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7
2	-1.6	-1.6	-1.6	-1.5	-1.6
3	-2.3	-2.3	-2.3	-2.2	-2.3
4	-3.0	-2.9	-3.0	-2.9	-3.0
5	-2.8	-2.8	-2.8	-2.7	-2.8
6	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0
7	-2.9	-3.0	-3.0	-2.9	-3.0
8	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9	-2.9
10	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4	-2.4
11	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2	-2.2
13	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9	-1.9
14	-1.6	-1.6	-1.7	-1.7	-1.7
16	-1.3	-1.3	-1.4	-1.4	-1.4
19	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0
20	-0.9	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0

为6米左右<sup>[3]</sup>。法国阿尔卑斯山勃朗峰(Grand Plateau)冰川在3900米高度上15米深钻孔中测得最低温度出现在3.5米<sup>[4]</sup>。Г.А.Авсюк<sup>[5]</sup>曾指出,大陆性冰川最低温度出现的深度在5—10米之间。

## 2. 活动层温度

我们以前曾作过中国大陆性冰川活动层温度的传热学分析<sup>[2]</sup>,认为一般在深度小于3米的层内,热交换方式多样化,超过3米以后,热传导为主,因而可用热传导理论来处理。并确定了描述活动层3米深向下的温度状况的热传导方程的修正解为

$$T(y, t) = T_s \exp\left[-\beta y \left(\frac{\omega}{2k}\right)^{1/2}\right] \cdot \sin\left[\omega t - y \left(\frac{\omega}{2k}\right)^{1/2}\right] + T_0(y). \quad (1)$$

此为半理论半经验的近似公式。

由于博格达扇状分流冰川只有一个测温孔,且观测时间甚短,要对此公式加以验证以至进一步深究还有困难。笔者仍用此式试算并进行回归分析得出平衡温度  $T_0(y)$  为

$$T_0(y) = 0.148y - 3.866, \quad (y > 2 \text{ 米}). \quad (2)$$

其相关系数为0.973。式中的一次项系数称为垂直升温率( $\gamma$ ),为0.148°C/米。表3列举了中国几条较深钻孔测温点的计算结果。可以看出,除羊龙河5号冰川粒雪盆4835米高度上的测孔外,博格达扇状分流冰川测温孔的 $\gamma$ 值为最高。

博格达扇状分流冰川的测温孔在2米深以内热交换过程复杂,温度变化规律不能用

表 2 中国某些冰川温度观测结果统计表  
 Table 2. A table of statistics on measured ice-temperature of some glaciers in China

山系 Mountai system	冰 Glacier	雪线高度 Altitude of snow line (m)	观测高度 Altitude of position (m)	观测最大深度和相应温度 The large depth and the temperature [ m (°C) ]	观测最低温度和相应深度 The lowest temperature and the depth [ °C (m) ]	观测日期 Date
天山 Tian Shan	西琼台兰 West Quntailan	4500	4050	18(-1.5)	-3.9(6)	1978.6.30
	乌鲁木齐河 1 号 No. 1 in Urumqi river	4075	3825	4(-5.5)	-6.5(3.2)	1962.6-9
	博格达峰扇状分流 Bogda fan-shaped difffluence glacier	3900	3750	20(-1.0)	-3.0(4-7)	1981.8.8-15
祁连山 Qilian Shan	老虎沟 12 号 No. 12 in Laohugou	4700	4650	10(-10.2)	-12.8(7)	1976.6-8
	七一冰川 1st July glacier	4550	4737	6(-7.4)	-7.4(6)	1975.7-8
喜马拉雅山 Himalaya	羊龙河 5 号 No. 5 in Yanglong river	4600	4648	15.8(-8.1)	-10.7(4.8)	1977.6-8
	水管河 4 号 No. 4 in Shuiguan river	4450	4520	10(-2.3)	-3.9(4)	1976.7.31
喜马拉雅山 Himalaya	野博康加勒 Yebokangjiale	6000	5650	10(-4.2)	-5.1(6)	1964.4.20
	绒布 Runbuk	5800	5400	10(-2.1)	-3.9(3)	1966.5.29

表 3 中国几条冰川钻孔测温点的计算结果

Table 3. Calculated results of measured temperatures within drilling-hole in several glaciers in China

冰 川 Glacier	观测年份 Year	测点高度 Altitude (m)	$T_0(16)$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$\gamma$ ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ )	$L$ (m)
西 琼 台 兰 West Quntailan	1978	4050	-1.8	0.104	33
		4300	-3.0	0.124	40
羊 龙 河 5 号 No.5 Yanglong river	1977	4513	-6.2	0.083	91
		4648	-7.9	0.134	75
		4835	-4.9	0.196	41
野 博 康 加 勒 Yebokangjiale	1964	5650	-3.3	0.140	40
绒 布 Runbuk	1966	5400	-1.0	0.110	25
博格达扇状分流冰川 Bodga fan-shaped difffluence glacier	1981	3750	-1.5	0.148	26

热传导理论处理。就1981年观测期间而言, 2米深处的平均温度为 $-1.6^{\circ}\text{C}$ , 1米深处为 $-0.7^{\circ}\text{C}$ 。8月8日观察到钻孔内有0.54米深的未冻水, 8月15日未冻水0.51米深。看来该处表面在夏季至少有0.5米厚的零温层。黄茂桓等<sup>[6]</sup>1962年在乌鲁木齐河源1号冰川消融区观测到冰面在夏季出现厚度不足0.5米的零温层。在祁连山羊龙河5号冰川的消融区也曾测得夏季有厚度小于0.5米的零温层<sup>[7]</sup>。

### 3. 纵深层温度

黄茂桓等<sup>[7]</sup>曾对中国大陆性冰川的温度状况作过全面的讨论, 提出计算压融点深度的公式为:

$$L = \frac{-T_0(16)}{\gamma} + 16. \quad (3)$$

对博格达扇状分流冰川的测温孔, 按(2)式算得 $T_0(16)$ 为 $-1.5^{\circ}\text{C}$ , 于是若用(3)式, 则压融点深度( $L$ )约为26米。表3中列出了该测孔及其它几条冰川测温孔的 $\gamma$ 、 $T_0(16)$ 和 $L$ 的计算值。前面对 $\gamma$ 已有说明,  $T_0(16)$ 将在后面讨论。

据黄茂桓、孙作哲的研究表明, 冰川底部的滑动广泛存在<sup>[8]</sup>, 说明其底部达到融点。虽然博格达扇状分流冰川没有厚度资料, 但是在测温孔处冰厚肯定远大于26米。 $L$ 值虽为估算值, 但和实际偏差不致太大。从而可预料该处底部有温冰层存在。

#### 4. 活动层下界温度

一般认为活动层下界的深度为15—20米。在我们以往的研究中<sup>[2,7]</sup>曾把16米深处的年平衡温度近似看作为活动层下界的温度,是因为以前我国冰川温度资料大于16米深度者甚少。从表1中看出,博格达扇状分流冰川的测温孔中16米深度的温度和20米深度的温度在观测期间相差0.3℃。但是为了便于和其它冰川的温度进行比较,仍以式(2)算出了16米深处的平衡温度 $T_0(16)$ 列于表3。从表3中看出,该测孔的 $T_0(16)$ 比其它冰川的此值均高,仅绒布冰川除外。应当指出,表中所列的冰川平衡线高度和测温部位都不相同,观测年份也各异,且计算方法也是近似的,因而这些数据的比较具有不准确性。黄茂桓等<sup>[7]</sup>曾就这个问题指出,用积消平衡线位置的活动层下界的平衡温度 $T_0(16)_E$ 作为冰川的特征温度进行比较是较为合理的。然而这样做必须将各个冰川测温点上的 $T_0(16)$ 换算到平衡线上,而大多数有较深钻孔测温的冰川只有一个测温孔,难以确定 $T_0(16)$ 随高度 $Z$ 变化的梯度 $dT_0(16)/dZ$ 。按照羊龙河5号冰川三个高度上的测温孔,算出 $dT_0(16)/dZ$ 为 $-1.25^\circ\text{C}/100\text{米}$ 。对博格达扇状分流冰川应用此值,得 $T_0(16)_E$ 为 $-3.4^\circ\text{C}$ 。表4列举了用 $dT_0(16)/dZ = -1.25^\circ\text{C}/100\text{米}$ 推算出的几条冰川的 $T_0(16)_E$ ,同时还列出了冰川平衡线上的年平均气温 $T_E$ 和 $T_0(16)_E$ 与 $T_E$ 的差。有人认为冰川活动层下界平均温度与年平均气温有一定的关系。例如Paterson<sup>[9]</sup>指出,在最高气温低于 $0^\circ\text{C}$ 的地区,冰川10米或15米深度处的温度等于该点上的年平均气温。 $\Gamma.A.Авсюк$ <sup>[5]</sup>指出,冷湿型和大陆型冰川的活动层下界平均温度高于年平均气温。Muller<sup>[3]</sup>通过在加拿大北极白冰川上观测认为,该冰川10米深温度与年平均气温之间不存在简单的关系,二者之差最大达 $10^\circ\text{C}$ ,最小为 $0.9^\circ\text{C}$ 。从表4也不能看出 $T_0(16)_E$ 和 $T_E$ 之间的对应关系,只能认为我国几个典型冰川的 $T_0(16)_E$ 均比 $T_E$ 高,而博格达扇状分流冰川高出最多。

### 三、讨 论

通过以上的分析和对比,我们看出:博格达扇状分流冰川的冰层温度是我国已有冰温资料的冰川中的最高者。就测温点而言,夏季表面有0.5米以上的零温层,并含有液相水。随着深度的增加,温度不断降低,在4—7米深处达最低,为 $-3.0^\circ\text{C}$ 。再向下又开始变暖,温度随深度的升高率 $\gamma$ 为 $0.148^\circ\text{C}/\text{米}$ 。16米深处的平衡温度 $T_0(16)$ 为 $-1.5^\circ\text{C}$ 。粗略地计算表明,压融点出现的深度 $L$ 约为26米,自此向下直到底部为温冰层。虽其数据欠准确,但冰川底部有温冰层存在是无可置疑的。

表征冰川温度状况的 $T_0(16)_E$ 的计算值为 $-3.4^\circ\text{C}$ ,比其它冰川的 $T_0(16)$ 均高出 $2^\circ\text{C}$ 以上,与年平均气温 $T_E$ 的差值也较其它冰川大。这些都表明,博格达峰5号冰川是目前为止考察过的中国大陆性气候区最暖的冰川。究竟这条冰川应划入哪种性质的冰川,只依据温度是不完全的,况且只有一个测温孔,整个冰川温度状况确切的定量数据还不具备,故有待进一步探讨。

我国冰川学者经过多年的考察研究认为,祁连山西段可能是中低纬度高山冰川中温

表 4 我国几条冰川平衡线位置活动层下界冰温 $T_0(16)_E$ 与年平均气温 $T_E$   
 Table 4. Ice temperatures at the lower bound of active layer and mean annual air temperatures, at the altitude of the equilibrium line on several glaciers in China

冰 川 Glacier	年 份 Year	平衡线高度(米) Altitude of equilibrium line (m)	$T_0(16)_E, (^\circ\text{C})$	$T_E, (^\circ\text{C})$	$T_0(16)_E$ $-T_E$
西琼台兰 West Quntailan	1978	4500	-5.5	-8.8	3.3
羊龙河 5 号 No.5, Yanglong river	1977	4600	-7.3	-11.0	3.7
野博康加勒 Yebokangjiale	1964	6000	-7.7	-9.5	1.8
绒 布 Runbuk	1966	5800	-6.0	-8.5	2.5
博格达扇状分流冰川 Bogda fan-shaped diffluence glacier	1981	3900	-3.4	-9.8	6.4

度最低地段, 往东、西、南三个方向, 冰川温度都逐渐增高, 反映了大陆度从这三个方向向祁连山西段增加<sup>[7, 10]</sup>。博格达峰地区冰川的温度高于祁连山中西段似乎易于理解, 但它高于其它地区冰川的温度, 尤其是高于天山西段的冰川, 好象有点新奇。需要指出的是 5 号冰川的形态类型和积累方式等比较特别, 其温度可能不是该区冰川温度的典型。然而因为它们所处的气候条件相同, 温度虽有差异但不会太大。这样我们有理由认为, 博格达峰地区冰川的温度有比我国其它地区的冰川温度高的趋势, 至少比天山西段冰川的温度高。

### 参 考 文 献

- [1] 黄茂桓等, 祁连山羊龙河 5 号冰川的温度状况, 祁连山冰川变化及其利用研究文集, 科学出版社(待出版)。
- [2] 任贾文、黄茂桓, 1981, 冰川活动层温度状况的传热学分析, 冰川冻土, 3 卷 3 期, 23—28。
- [3] F. Muller, 1976, On the thermal regime of a high arctic valley glacier, *Journal of Glaciology*, Vol. 16, No. 74, p. 119-131.
- [4] L. Lliboutry, M. Briat, M. Creveur and M. Pourchet, 1976, 15m deep temperatures in the glaciers of Mont Blanc (French Alps), *Journal of Glaciology*, Vol. 16, No. 74, p. 197-203.
- [5] Г. А. Авсюк, 1956, Температура льда в ледниках, "Тр. ИИ-та геогр." Вып. 67.
- [6] 黄茂桓、袁建模, 1965, 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川冰雪表层温度状况, 天山乌鲁木齐河冰川与水文研究, 科学出版社, 25—30。
- [7] 黄茂桓、王仲祥、任贾文, 1982, 我国冰川的温度, 冰川冻土, 4 卷 1 期, 20—28。
- [8] 黄茂桓、孙作哲, 1982, 我国大陆型冰川运动的某些特征, 冰川冻土, 4 卷 2 期, 35—44。
- [9] W. S. B. Paterson, 1969, *The physics of glaciers*. Oxford, etc., Pergamon Press.
- [10] 施雅风、谢自楚, 1964, 中国现代冰川的基本特征, 地理学报, 30 卷 3 期, 183—208。

## The Ice Temperature of Bogda Fan-Shaped Difffluence Glacier in Bogda Area, Tian Shan

Ren Jiawen

(Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Academia Sinica)

### Abstract

Although the glaciers in Bogda area of Tian Shan were investigated in past years, the ice temperature observation was carried out only for the first time.

During the joint expedition to Bogda area by Chinese and Japanese glaciologists, a 20 m deep hole was bored with steam drill at some 3750 m a. s. l. in the upper ablation area of the Bogda Fan-shaped Difffluence Glacier on July 29, 1981.

Seventeen thermal resistor thermometers were put into the hole at intervals of 1-2 m, and four observations were taken respectively on 8, 11, 13 and 15 August.

Analysis of the records shows that there was a zero temperature layer of liquid water at least 0.5 m deep on the glacier surface in summer. The ice temperature dropped with the increase in depth, and the lowest, being about  $-3^{\circ}\text{C}$ , located in the layer 4-7 m deep. Below this layer, temperature went up in a vertical gradient  $\gamma = 0.148^{\circ}\text{C}/\text{m}$ , and reached the pressure melting point at about 26 m deep. Besides, it was calculated that the equilibrium temperature at the lower limit of the active layer at the equilibrium line of the glacier  $T_0(16)\text{E}$  equals to  $-3.4^{\circ}\text{C}$ . Thus, there might be temperate ice in the lower layer of the glacier. The ice temperature of Bogda Fan-shaped Difffluence Glacier may be higher than other glaciers in Northwest China. Further observation of this glacier may provide new informations for the classification of the continental type glaciers in China.