

天山博格达峰北坡现代冰川积累和消融特征及物质平衡的估算

张文敬 谢自楚

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

1981年7月下旬至8月中旬,我们重点对博格达峰区北坡的四工河4号冰川(5Y725D4)、四工河5号冰川(5Y725D5)和古班博格达河10号冰川(5Y812B10)进行了冰川消融、积累的短期观测。

四工河5号冰川和古班博格达河10号冰川是博格达峰分别流向北坡和南坡的同一条冰川,称为“博格达扇状分流冰川(以下称“扇状分流冰川”)。扇状分流冰川面积为10.94平方公里,其中消融区面积为3.42平方公里,约占总面积的31.30%。冰川上限接近博格达峰顶(海拔5445.0米),西北侧是十分发育的雪崩区,也是该冰川的主要积累地带。冰川的中下部分则呈扇形分布在主峰下次一级山岭的鞍部,其末端分别流入北坡的四工河和南坡的古班博格达河。扇状分流冰川主要由四条冰流汇合而成,雪线海拔高度3800—3900米,除第一冰流为粒雪盆补给外,其余均为雪崩补给;在三条冰流的汇合线上有中碛发育,末端有零星表碛分布,覆盖了总面积的2%。冰川末端高程在四工河为3615米,在古班博格达河为3535米,前缘均有终碛湖和冰蚀湖发育(图1)。

四工河4号冰川是四工河源头一条较大的冰斗-山谷冰川(见图1),上限海拔高度4348米,末端3600米,亦发育着一个终碛湖。雪线海拔高度3900米左右。该冰川形态单一,冰面冰碛少,属典型的“洁净型”(Clean type)冰川,面积为2.96平方公里。

一、冰川积累特征

博格达峰区北坡冰川的补给直接来源于大气固态降水,但由于山坡陡峭,雪崩和风吹雪在补给中也占有较大比重。

1. 固态降水及其与冰川积累的关系

固态降水是冰川物质积累的主要来源,因此大气固态降水的比例及其季节分配直接关系到冰川物质积累的性质与规模。

据天池气象站(海拔1942.5米)资料分析得知,该区中山带多年平均降水量为536毫米,其中5—9月为411毫米,占年降水量的77%。由此可见本区降水量的年内分配仍以暖季为主。

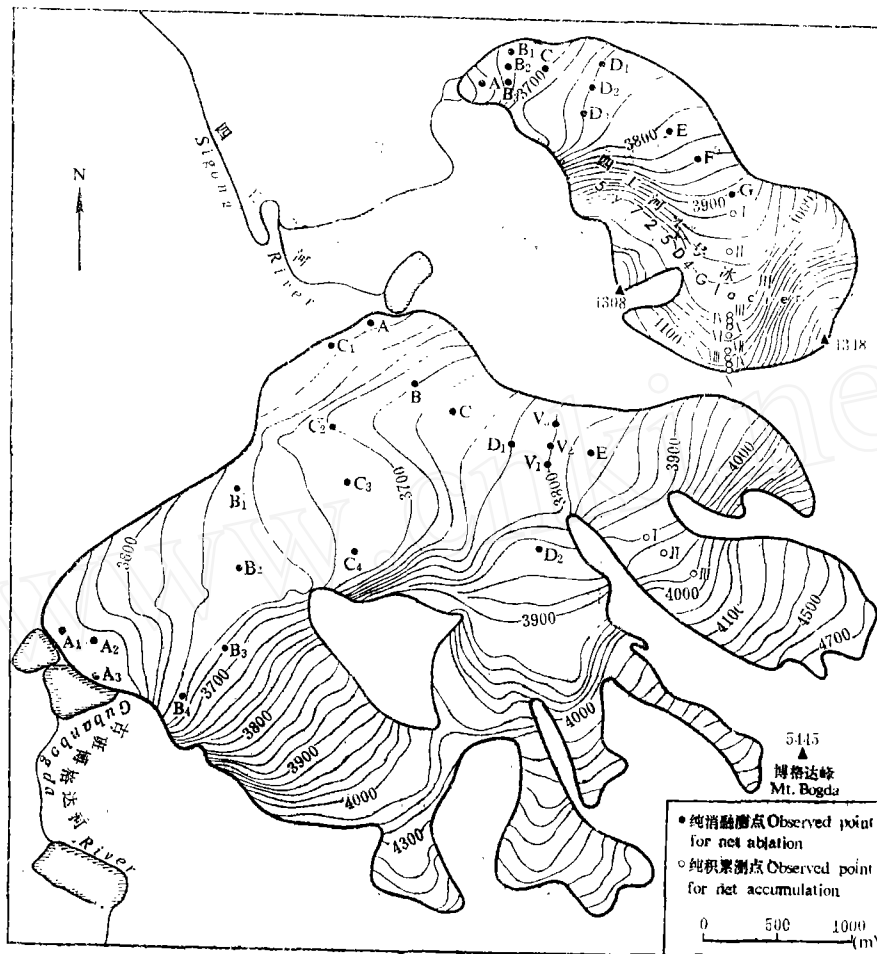


图1 博格达扇状分流冰川和四工河4号冰川野外测点布设图

Fig. 1. Sketch-map of location of field observed points on the Bogda fan-shaped difffluence glacier and glacier D-4 of Sigong river source

为了推算高山冰川积雪带的年降水量, 1981年7月25日至8月15日在3650米处进行了短期观测, 测得降水量为88.5毫米; 谢应钦等人于1961年6月下旬至8月上旬在四工河源3510米处观测到降水量为204.4毫米¹⁾, 与同期天池气象站的区段降水值相比分别多37.6毫米和39.6毫米。由此可见本区高山冰川带的降水量大于中山森林带。1980年9月至1981年8月天池站实测降水量为557.4毫米, 由考察期间实测降水梯度估算同年度降水量可达600毫米以上。

上述高山带比较丰富的降水, 由于高山低温和凝结高度较低, 绝大部分以固态形式出现。例如, 考察期间, 3650米大本营处观测到液态降水仅集中在7月底短时段内, 其量为19.9毫米, 仅占1980—1981年积消年度降水量的3%以下。

事实上, 本区最热月固态降水的下限远低于现代冰川的末端。据1981年6—7月来此

1) 谢应钦, 博格达山四工河源气候状况, 1963, 油印稿。

登山的日本登山队证实,这期间,3550米登山大本营的降水呈固态;7月19日,当我们从四工河林场出发,上行至驴尾巴梁与力行达坂之间约3000米处时,因风雪迷路(积雪厚约10厘米)而不得不停止前进;另据张祥松等1962年6月观测,该区降雪下限接近于森林上限。可见,本区全年降水以固态占绝对优势。假定雪崩及吹雪在同一流域中进行再分配,且不考虑雪的升华作用,现代冰川的总积累量则相当于年降水量。

2. 冰川物质积累的坡向差异

在整个东部天山,冰川物质积累存在明显的坡向差异性,博格达峰北坡的现代冰川尤其如此。就本次考察的两条冰川而言,其积累区凡局部地形坡向北者,雪线与冰川粒雪线一致,物质积累区可由山坡顶部延伸到坡脚而与所在谷地的冰川相连;可是,同一山体的南坡,除自北坡沿山脊延伸过来的一线雪檐之外,从坡顶到坡脚全为破碎的基岩。本区这种冰雪作用的坡向差异,垂直高度一般在300米左右,最大高差可达500米(图2)。据谢维荣^[1]、寇有观^[2]分析,冰川积累的坡向差异是由于太阳辐射量的差异所致。另外,在东天山水汽的侵入方向是由北(包括西北、东北)向南,这也有利于北坡冰雪的积累。

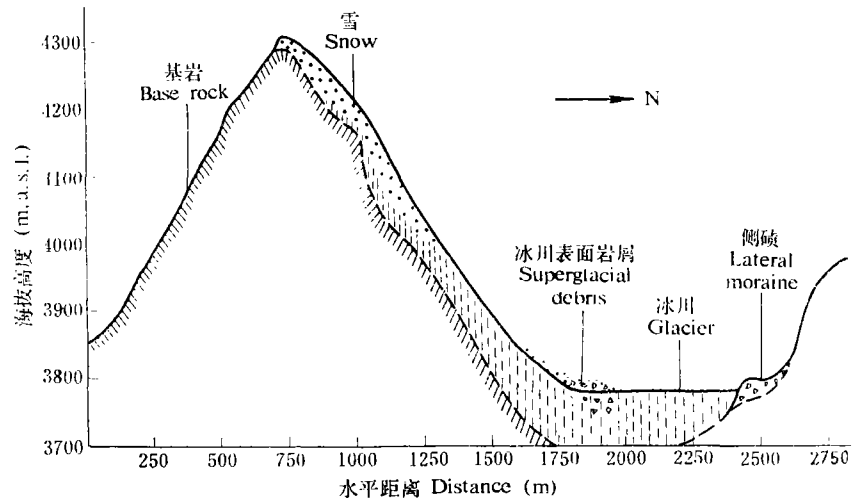


图2 四工河4号冰川积累区南北坡之间的积累作用的差异

Fig. 2. Difference of accumulation between north slope and south slope in the accumulation area of glacier D-4 of Sigong river

3. 雪崩补给型冰川的纯积累

博格达扇状分流冰川的发育,与特殊地形条件下频繁的吹雪和雪崩冰崩有很大关系。该冰川2号冰流4000米处各主要雪崩锥的中上部位,年积累厚度可达十多米。雪崩锥底部边缘地带雪坑资料表明,其积累厚度亦达一米以上。1981年7月30日,该冰流主雪崩锥3980米处,观测到1980—1981年度的纯积累厚度为1.07米(水层),再往下即非雪崩堆积区,其积累厚度随海拔高度的降低而骤然减少(表1,图3)。

表 1 冰川纯积累观测值

Table 1. Observed data of net glacial accumulation

冰川名称 Name of glacier	点号 No. of point	高程 Elevation (m)	纯积累深 Net accumulation depth (mm, W.E.)
四工河 4 号冰川 Glacier D-4, Sigong river source	I	3920	170
	II	3950	144
	III	4010	165
	IV	4014	187
	V	4020	140
	VI	4030	179
	VII	4060	165
	VIII	4080	420
	IX	4085	664
	X	4100	128
博格达扇状分流冰川 Bogda fan-shaped difffluence glacier	I	3920	150
	II	3970	225
	III	3980	1070

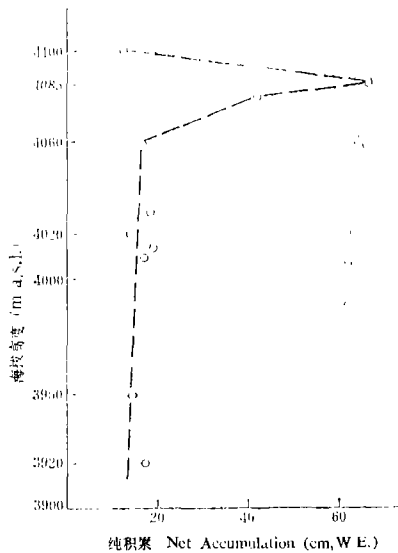


图 3 博格达扇状分流冰川纯积累随海拔高度的变化

Fig. 3. Change of net accumulation with altitude on the Bogda fan-shaped difffluence glacier

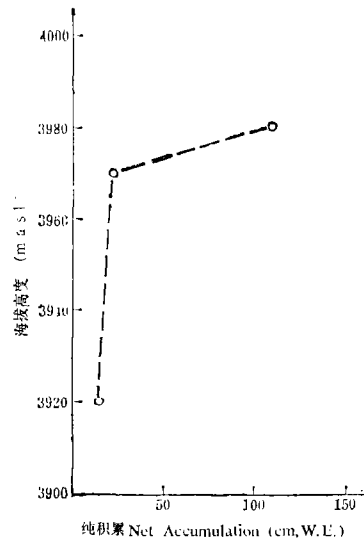


图 4 四工河 4 号冰川纯积累随海拔高度的变化

Fig. 4. Change of net accumulation with altitude on the glacier D-4 of Sigong river

在雪崩锥上限地带的积累过程与地势、地形、天气状况等因素有关。主峰北坡, 除大约三分之一地段为裸露基岩外, 其余地段均发育着大大小小的雪崩槽。例如, 博格达扇状分流冰川的积累区发育着30多条雪崩槽, 其中有6条雪崩频繁, 规模较大, 其下部的雪崩锥高度可达50米, 个别达100米以上。1981年7月25日上午10时, 我们观测到扇状分流冰川第三冰流后壁发生的一次连续性的大雪崩, 夹有雪粒的气浪波及到2—3公里以外的地方。雪崩后, 该处雪崩锥全为这次雪崩下来的碎冰雪物质所覆盖, 雪崩锥底部弧长200多米, 高约150米, 下部平均坡度约35度。考察期间, 类似的雪崩经常在主峰附近发生, 可见它是冰川的重要补给来源。

4. 四工河4号冰川的纯积累

四工河4号冰川向北坡即为该冰川主要的积累区。根据在各不同高度的观测和计算得知(表1), 纯积累量随海拔高度的增加具有独特的形式(图4)。由图4看出, 冰川在海拔4060米以下地段的纯积累量随高度变化不大, 年平均纯积累量不到200毫米水层, 这是由于左右两个山峰附近雪崩雪的再分配, 弥补了该地段季节消融所造成的纯积累之递增差异的缘故。4085米处的高积累量可能反映了吹雪在北坡堆积作用的影响。由于鞍部受基岩山坡的辐射及吹雪迁移的影响而使冰雪积累明显减少。

利用图1和图4中所标明的各高度上的实测纯积累量和相应高度区间的积累面积, 求得四工河4号冰川1980—1981年度纯积累量为43.6万立方米水体(表2), 平均纯积累深为147.3毫米。由于未曾测算融水下渗所形成的内补给, 上述积累量可能偏低。但因该冰川平均上限约为4200米, 主要靠一小型粒雪盆的自然降水补给, 其纯积累作用较弱。

表2 四工河4号冰川1980—1981年度纯积累计算

Table 2. Calculated values of net accumulation in Glacier D-4

海拔高程 Elevation (m)	面积 Area (km ²)	平均纯积累深 Average measured net accumulation (mm, W.E.)	年度纯积累计算值 Calculated annual net accumulation(m ³)
3900—3980	0.4874	157.0	76521.8
3980—4040	0.5779	168.0	97087.2
4040—4080	0.2000	293.0	58600.0
4080—4348	0.5148	396.0	203860.8
总计 Total	1.7801		436069.8

因为整个冰川区的降水呈固态相, 使其季节积累扩展到整个冰川上, 其值相当于冰川降水量与纯积累量之差。四工河4号冰川1980—1981年度的季节积累量约在450毫米水层左右。

二、冰川消融特征

考察期间, 先后对博格达扇状分流冰川的20个测点和四工河4号冰川的11个测点进行了冰川纯冰消融的观测(见图1, 表3), 同时, 还观测了冰面气温、积雪、冰碛及

表 3 1981年考察期间冰川纯冰消融观测值

Table 3. Observed data of net glacial ablation, 1981. 7-8

冰川名称 Name of glacier	点号 No. of point	海拔高度 Elevation (m)	观测日期 Date of observation	总纯冰消融深 Net ablation amount (mm, W.E.)	日平均纯冰消融深 Daily average net ablation (mm/day, W.E.)	说明 Remarks
博格达扇状分流冰川 Bogda fan-shaped difffluence glacier	A ₁	3550	7.21—8.15	1197	47.90	
	A ₂	3558	7.21—8.15	342	13.70	
	A ₃	3550	7.21—8.15	1152	46.10	
	B ₁	3650	7.21—8.16	864	33.20	
	B ₂	3660	7.21—8.16	531	20.40	
	B ₃	3660	7.21—8.16	567	21.80	
	B ₄	3670	7.21—8.16	747	28.70	
	C ₁	3640	7.22—8.13	666	30.30	
	C ₂	3690	7.22—8.13	594	27.00	
	C ₃	3724	7.22—8.16	657	26.30	
	C ₄	3690	7.22—8.13	549	25.00	
	D ₁	3780	7.23—8.13	450	21.40	
	D ₂	3850	7.23—8.13	518	24.60	
	E	3840	7.23—8.15	468	20.30	
	A	3640	7.25—8.13	513	27.00	From Ageta
	B	3750	7.25—8.13	333	17.50	" "
	C	3775	7.25—8.13	378	19.90	" "
	V ₁	3800	7.30—8.13	243	17.40	" "
	V ₂	3800	7.30—8.13	207	14.80	" "
V ₃	3800	7.30—8.13	162	11.60	" "	
四工河 4 号冰川 Glacier D-4, Sigong river source	A	3633	7.26—8.14	585	30.80	From Ageta
	B ₁	3670	7.26—8.14	558	29.40	" "
	B ₂	3670	7.26—8.14	486	25.60	" "
	B ₃	3671	7.26—8.14	572	30.10	" "
	C	3700	7.26—8.14	437	23.00	" "
	D ₁	3760	7.26—8.14	396	20.80	" "
	D ₂	3760	7.26—8.14	432	22.70	" "
	D ₃	3760	7.26—8.14	323	17.30	" "
	E	3810	7.27—8.14	293	16.30	" "
F	3839	7.27—8.14	248	13.80	" "	
G	3900	7.27—8.14	225	12.50	" "	

表 4 一些地区现代冰川末端 7 月份平均气温的比较

Table 4. Comparison of average temperature in July in the vicinity of glacial terminus in certain area

山脉名称 Mountain ranges	冰川名称 Name of glacier	冰川末端高程 Height of glacier terminus (m)	测点高程 Height of measuring site (m)	7 月平均气温 Average temperature in July (°C)	资料来源 Data source
博格达峰 Bogda Mt.	博格达扇状分流冰川 Bogda fan-shaped diffluence glacier	3535	3500	5.0	天池气象站
天格尔山 Tiangol Mt.	乌鲁木齐河源 1 号冰川 Glacier No.1, Urumqi river	3740	3539	4.8	天山云雾站
祁连山 Qilian Mts.	老虎沟冰川 Laohugou glacier	4260	4200	4.5	大雪山气象站
阿尔泰山 Altay Mts.	哈拉斯冰川 Halas glacier	2416	2300	10.8	王立伦

污化状况。

1. 消融强度与气温的关系

气温的高低不仅影响着冰川消融的强度,而且还决定消融期的长短和总消融量的多寡。

据1981年7月下旬到8月中旬的实际观测和谢应钦于1961年8月上旬资料,天池至冰川末端之间的气温梯度分别为 $-0.67^{\circ}\text{C}/100$ 米和 $-0.63^{\circ}\text{C}/100$ 米,其平均值为 $-0.65^{\circ}\text{C}/100$ 米。再据天池气象站22年气温资料,推得冰川末端海拔高度3500米处6、7、8三个月,多年平均气温分别为 3.0°C 、 5.0°C 和 4.2°C 。日最高气温为正温的连续日数开始于4月底,结束于10月初。据此,可知冰川消融期为5—9月,强消融期为6—8月。就冰川末端附近最热月(7月)平均气温看,本区现代冰川的消融强度与乌鲁木齐河源1号冰川相近,较祁连山西部老虎沟冰川略高,却远低于阿尔泰山的哈拉斯冰川(表4)。

在博格达扇状分流冰川末端进行的观测表明,当白天时段平均气温 $0^{\circ}\text{C} < t_d \leq 5^{\circ}\text{C}$ 、平均风速 2.0 米/秒 $< v_d < 3.0$ 米/秒时,冰川日纯冰消融深同白天时段平均气温 t_d 之间具有较好的线性变化关系,其相关系数为0.9064(图5),并可表示为下式:

$$a = 1.002 + 0.996t_d \quad (1)$$

式中: a ——为纯冰消融深(厘米水层); t ——为白天时段平均气温($^{\circ}\text{C}$)。

冰川消融的夏季,冰面温度处于 0°C 左右,在收入热量中,总辐射量虽然在晴日子日里变化不大,但气温对长波辐射平衡的影响却比较显著,使辐射平衡量有随气温增加而增大的趋势。另外,在冰面上的稳定逆温层结下,冰面通过与近冰面空气层湍流交换而获得可感热量,其量值主要取决于近地层中的气温高低,在中等风速和温度的影响下,冰面收入的感热与气温可能呈线性变化关系。这样就促成了消融量和气温在一定区间范围内呈线性变化关系。

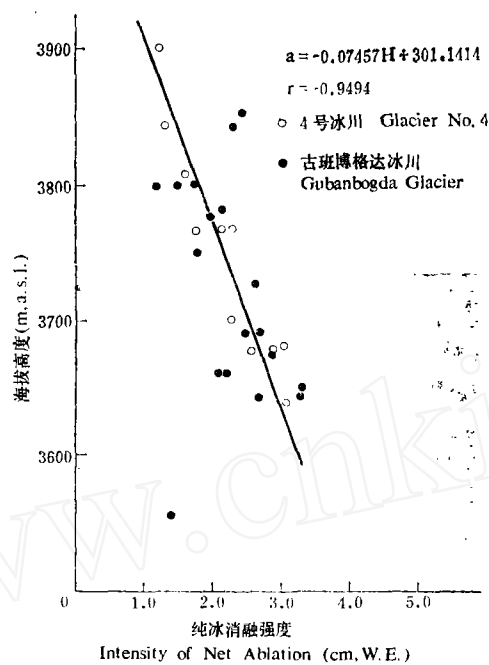


图5 博格达扇状分流冰川3630米处纯冰消融同气温之间的关系(7月26日—8月3日)

Fig. 5. Relationship between ablation (h) and air temperature (t) at 3630 m, during July 26-August 3, on the Bogda fan-shaped diffluence glacier

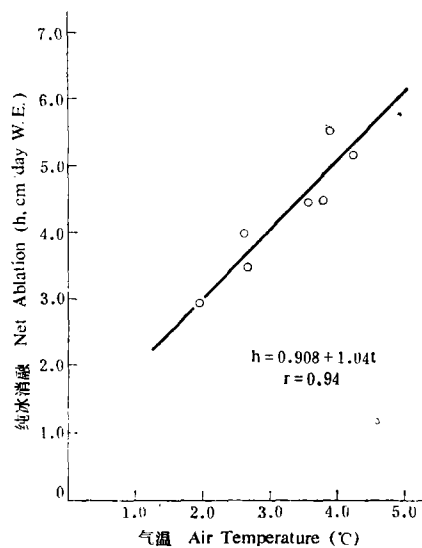


图6 纯消融强度和高度的关系

Fig. 6. Relationship between intensity of net ablation (a) and altitude (h)

2. 消融强度同海拔高度的关系

据表 3、图 6 可以看出, 本区现代冰川纯冰消融强度的空间分布不同于中国西部天山“托木尔型”冰川^[3], 而与祁连山^[4]、乌鲁木齐河源冰川^[5]相似, 其消融强度随海拔高度增加而呈线性减少。但由于博格达扇状分流冰川冰面形态较为复杂, 因此微地形的坡向不同, 对辐射热的吸收影响较大, 从而导致某些观测值的偏离, 而使相关关系不如四工河 4 号冰川。

由图 6 中四工河 4 号冰川纯冰消融强度与海拔高度进行相关分析, 可得如下经验方程:

$$a = -0.07457H + 301.1414 \quad (2)$$

式中: H ——消融区测点的海拔高度(米); a ——纯冰消融强度(厘米水层)。

考察期间四工河 4 号冰川纯冰消融量可用一定高度区间的面积和相应纯冰观测值求出(表 5), 由此可求出四工河 4 号冰川 1981 年 7 月下旬至 8 月中旬的纯冰消融深为 139 毫米水层。

表 5 1981 年 7 月下旬至 8 月中旬四工河 4 号冰川纯冰消融量的计算

Table 5. Net glacial ablation at glacier No.4

高 程 Elevation (m)	面 积 Area (km ²)	纯 冰 消 融 Net ablation	
		观 测 值 Measured (mm)	消 融 量 Amount (m ³)
3600—3660	0.045	585	26325
3660—3680	0.060	539	32340
3680—3720	0.125	437	54625
3720—3780	0.385	386	148610
3780—3820	0.312	293	91416
3820—3860	0.135	248	33480
3860—3900	0.115	225	25875
总计 Total	1.177		412671

据表 3 中 3633 米和 3900 米处的消融实测值, 求得该冰川在考察期间纯冰消融梯度为 -1.35 毫米/米。

3. 季节积雪、表碛及污化对冰川消融强度的影响

裸露冰面上堆积起来的季节积雪对冰川纯冰消融起着一定的抑制作用。因为新雪能反射 50—95% 的太阳辐射能^[6]。据观测, 每次降落在冰面的积雪, 可保持几小时到几天之久。例如, 7 月 22 日在扇状分流冰川 3700 米处测得雪厚 9 厘米, 到 24 日积雪融尽时冰面在两天之内仅下降 3 厘米, 到 25 日再次观测时冰面下降 15 厘米, 日纯冰消融强度相当于前者的 10 倍。

由于本区山坡风化岩屑不太发育, 因此它对冰川表面的污化和覆盖程度以及对消融的影响远不如托木尔峰的台兰冰川和西藏的阿扎冰川。冰碛的覆盖和污化对消融的影响

仅仅表现为高度相近的同一横断面上消融强度的差异。例如,扇状分流冰川南支末端A、B两断面上,裸露冰面的A₁和A₃点的日平均消融强度分别为47.90毫米和46.10毫米,而表碛厚20厘米的A₂点,其消融强度仅为裸露冰的29.1%;在B断面上,有污化现象的B₁和B₄点的日平均消融强度比裸露冰面B₂和B₃点要增加46.7%左右。

4. 冰川的季节消融

1981年8月5日,中国登山协会于良璞在博格达扇状分流冰川第四冰流4100米处发现一融雪水坑,同时,我们在第二冰流4050米处听到冰裂隙下有水流声。据日本登山队回忆,在6月10日已在该处听到水流声。可见积累区季节消融至少始于6月上旬,结束于8月初,产流高度在4100米以上。

消融区季节消融指春末夏初对冬春积雪的消融和消融期中固态降水的消融。由于大气降水主要集中在5至9月,所以消融区的季节消融也主要发生在暖季。

积累区的季节消融量相当于积累区降水量与纯积累量之差;消融区的季节消融量相当于消融区降水量。整个冰川的季节消融量则大致相当于冰川降水量与冰川纯积累量之差,也等于前已述及的冰川季节积累量。

三、物质平衡趋势的讨论

四工河4号冰川1980—1981年度纯积累深为147.3厘米,仅1981年7月下旬至8月中旬的纯冰消融深为139.0毫米。显然,该冰川1980—1981年度的纯物质平衡为负值。该区冰川的季节消融量等于季节积累量,所以冰川物质总平衡也必然为负。

谢自楚曾将物质平衡水平(m)定义^[7]为:

$$m = \frac{c + d}{2} \quad (3)$$

式中:c——总积累量;d——总消融量。

1980—1981年度冰川总积累量大于600毫米,而且同年度的纯冰消融量肯定大于139毫米,季节消融量约为450毫米。据式(3)求出四工河4号冰川1980—1981年度物质平衡水平约为600毫米。

据计算^[8],季风海洋性的西藏波密古乡冰川1965年的m值为2678毫米,大陆性的祁连山老虎沟冰川1959—1976年平均m值为641毫米,乌鲁木齐河源1号冰川1959—1962年平均m值为685毫米,可见本区冰川物质平衡水平表现为大陆性冰川的特征。

本文得到施雅风、张祥松、任炳辉、谢维荣的帮助并提出宝贵的意见,白重璠同志帮助修改,对此深表感谢。

参 考 文 献

- [1] 谢维荣等,不同坡向热量状况对冰川积累、消融的关系,中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊第3号,科学出版社,1982。

- 〔2〕 寇有观等，青藏高原总辐射研究，中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊，第3号，科学出版社，1982。
- 〔3〕 张文敬，汗腾格里-托木尔峰现代冰川的消融，托木尔峰考察文集，冰川与气候，新疆人民出版社（待出版）。
- 〔4〕 中国科学院高山冰雪利用研究队，1959，祁连山现代冰川考察报告，科学出版社，234—239页。
- 〔5〕 谢自楚、葛光文，1965，天山乌鲁木齐河源1号冰川的积累、消融及物质平衡，天山乌鲁木齐河冰川与水文研究，科学出版社，14—24页。
- 〔6〕 兰州冰川冻土沙漠研究所冰川研究室、兰州大学地质地理系，冰雪世界，科学出版社，1978，10页。
- 〔7〕 谢自楚，1980，冰川物质平衡及其与冰川特征的关系，冰川冻土，2卷4期，1—10页。
- 〔8〕 张祥松，1964，新疆博格达山北坡冰川发育和演变，华东师大学报（自然科学版），第2期，163—170页。

www.cnki.net

Features of Accumulation and Ablation of Existing Glaciers on the Northern Slope of Bogda, Tian Shan and an Estimation of Their Mass Balance

Zhang Wenjing and Xie Zichu

(Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Academia Sinica)

Abstract

Solid precipitation in existing glacial area on northern slope of Bogda is absolutely dominant. About 77 percent of the annual precipitation is concentrated in months May–September, commensurable to the total accumulation amount. From the record of Tianchi from 1980 to 1981, precipitation in the glacier area is found to be more than 600 mm. Because of differences in solar radiation with slope facing, the source of water vapour and other factors, glacial accumulation is distinctly different according to slope facing. Data from snow pits do not perfectly show the regularity of the increase in net accumulation with the rise of elevation. The net accumulation amount (water equivalent) of glacier No.4 was $4.36 \times 10^5 \text{ m}^3$ during 1980–1981, and the mean depth of net accumulation (water equivalent) was 147.3 mm.

According to mean annual temperature data for many years the period of glacial ablation in this region is from May to September, and the strongest from June to August, during which glacial ablation is closely correlated with temperature and elevation. Because a large part of precipitation is concentrated in ablation period and new snow has a stronger reflection rate, the strength of net ablation is influenced to a certain extent. During surveying, the net ablation amount (water equivalent) of Glacier No.4 was $4.127 \times 10^5 \text{ m}^3$ and the mean depth of net ablation is 139 mm, the net ablation gradient being 1.35 mm/m.

The mass balance of glacier No.4 was negative during 1980–1981. The level of the mass balance was not high (only 600 mm). It is consistent with Laohuogou glacier, in Qi Lian Shan (641 mm) and with glacier No.1 at the head of Urumqi river, Tian Shan (685 mm), but much less than Guxiang glacier, Pomi county Tibet (2678 mm).