

天山乌鲁木齐河源 1号冰川物质平衡研究

张金华*

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

天山乌鲁木齐河源1号冰川(下称1号冰川)是我国现代冰川定位观测研究较早,时间序列最长(1959年6月—1967年7月),工作项目较全的冰川。在1965年发表了一批论文^[1],总结了1959—1962年三个年度的物质平衡。本文在上述基础上,根据连续七年的冰川积累、消融资料,利用距1号冰川2.5公里,海拔3588.6米的天山气象站资料(1958年6月—1974年8月)进行相关分析,试图对1号冰川的物质平衡进行系统计算、延长和研究,并得到较为满意的结果。

一、冰川积累、消融资料的整理

冰川表面消融测定用花杆法进行,1959—1964年每七天量测一次;1965—1967年消融期间每半月一次,其余时间每月一次。每根花杆的纯消融量可按下式计算:

$$b_{sc} = 0.90 [(m_1 + h_1) - (m_2 + h_2)] - (h_1 \cdot d_1 - h_2 \cdot d_2) \quad (1)$$

式中: m_1 、 m_2 分别为该处在积—消年度始末的花杆读数;

h_1 、 h_2 分别为该处在积—消年度始末的积雪厚度;

d_1 、 d_2 分别为该处始末积雪或冰的平均

密度;

0.90为冰川冰的平均密度。

当花杆位于粒雪线以上雪层结构为粒雪层时,可用(2)式表示^[2]:

$$b_{sc} = (m_1 - m_2) \cdot d \quad (2)$$

式中: m_1 、 m_2 分别为积—消年度积末花杆读数; d 为粒雪和渗浸冰片的平均密度。

用(1)、(2)式求得的年纯消融量(或纯积累)结果见于表1,纯消融和纯积累分别以“-”、“+”符号表示。

1973年夏季,王文颖等重新测量和绘制1号冰川地形图^[3],发现自1962年9月6日至1973年8月31日,冰舌末端略有退缩,但花杆位置的海拔高度变化很小,故仍用原高度。

二、零平衡线、冰川系数的年际变化

冰川上雪线位置的多年变化,是识别气候波动的重要佐证。为此,绘制出1号冰川1962—1966年历年和七年平均物质平衡等值线图(图1),在该图上可准确地定出冰川上每年的雪线位置,进而求出冰川系数。

1. 零平衡线和降水的关系及其计算、延长

*本文的实测资料除笔者观测外,还有王仲祥、苏珍等同志;有关计算得到丁良福同志的帮助,在此一并致谢。

1)式由谢自楚和笔者根据野外实际工作提出的。

表1 乌鲁木齐河源1号冰川花杆观测的积累与消融资料(1959—1966年)*

剖面 (位置)	花杆 (№)	纯积、消量(毫米)					纯积、消量(毫米)				
		1959 /1960	1960 /1961	1961 /1962	1962 /1963	1963 /1964	1964 /1965	1965 /1966	1966 /1967	1967 /1968	1968 /1969
西支	1	+470	+370	+66	+330	+277	+450	-110	+265		
	2	+60	-30	-264	+270	+147	+261	-390	+8		
	3	-323	-136	-281	+340	+26	+605	-680	-64		
平均	+69	+68	-160	+313	+150	+439	-393	+69			
4100米											
4080米	4	-319	-9	-170	+175	-213	+100	-510	-135		
	5	-102	-9	-629	+145	-162	+76	-485	-167		
	6	-637	-264	-586	-136	-255	+17	-629	-356		
平均	-510	-43	-808	-43	-247	0	-612	-323			
I	7	-510	-43	-808	-43	-247	0	-612	-323		
	8	-680	-94	-410	+67	-179	+52	-561	-258		
	平均	-482	-103	-608	+8	-211	+36	-572	-276		
4055米											
4020米	9	-374	-212	-366	+10	-272	+20	-485	-240		
	10	-945	-505	-585	-144	-450	+20	-1026	-519		
	平均	-604	-180	-603	-63	-306	-117	-900	-396		
II	11	-729	-189	-720	-270	-468	-369	-1071	-545		
	12	-759	-297	-636	-159	-408	-155	-999	-487		
	平均	-891	-252	-852	-144	-342	-171	-792	-492		
3990米											
3960米	13	-1390	-1170	-1395	-936	-936	-594	-1550	-1136		
	14	-2358	-1701	-1782	-1899	-2331	-1503	-2133	-1958		
	平均	-1989	-1602	-1998	-1701	-1422	-1314	-2043	-1724		
III	15	-2322	-1233	-1845	-1746	-1791	-1125	-1818	-1697		
	16	-2223	-1512	-1875	-1782	-1848	-1314	-1998	-1793		
	平均	-2223	-1512	-1875	-1782	-1848	-1314	-1998	-1793		
3870米											
3840米	17	-1989	-1602	-1998	-1701	-1422	-1314	-2043	-1724		
	18	-2322	-1233	-1845	-1746	-1791	-1125	-1818	-1697		
	平均	-2223	-1512	-1875	-1782	-1848	-1314	-1998	-1793		
3800米	19	-1872	-1080	-1991	-1494	-909	-1026	-1782	-1451		
	20	-1638	-918	-1422	-1044	-1116	-1044	-1953	-1305		
	平均	-1917	-1503	-2232	-1674	-1458	-1431	-1872	-1727		
西支	21	-2169	-1647	-1890	-1701	-1359	-594	-2286	-1664		
	22	-2070	-1629	-2080	-1611	-1629	-720	-2376	-1731		
	平均	-2070	-1278	-2079	-1395	-1341	-756	-2079	-1571		
V	23	-2070	-1377	-1980	-1638	-1359	-1269	-2097	-1713		
	24	-2061	-1359	-1755	-1422	-1269	-909	-2088	-1552		
	平均	-2059	-1495	-2004	-1574	-1403	-947	-2133	-1660		
东支	1'	-	+54	-110	+186	-120	+120	-150	-3		
	2'	-	-128	-291	+78	-179	+18	-570	-179		
	平均	-	-37	-200	+132	-150	+69	-360	-91		
4025米	3'	-	+180	+42	+342	+426	+264	-388	+141		
	4'	-	-272	-145	+96	-145	+102	-408	-129		
	5'	-	-135	-513	+120	-117	+6	-594	-206		
平均	-	-76	-205	+186	+55	+124	-463	-65			
3960米											
3930米	6'	-	-488	-666	-81	-315	-99	-801	-405		
	7'	-	-414	-	+120	-171	+78	-531	-184		
	8'	-	-702	-540	-198	-702	+72	-1233	-551		
平均	-	-558	-	-39	-437	+75	-882	-368			
3860米											
3840米	9'	-	-711	-738	-18	-495	-198	-1134	-549		
	10'	-	-1125	-882	-675	-891	-288	-1251	-852		
	平均	-	-1125	-882	-675	-891	-288	-1251	-852		

*表中1959—1962年的引自谢自楚同志的资料[6]。

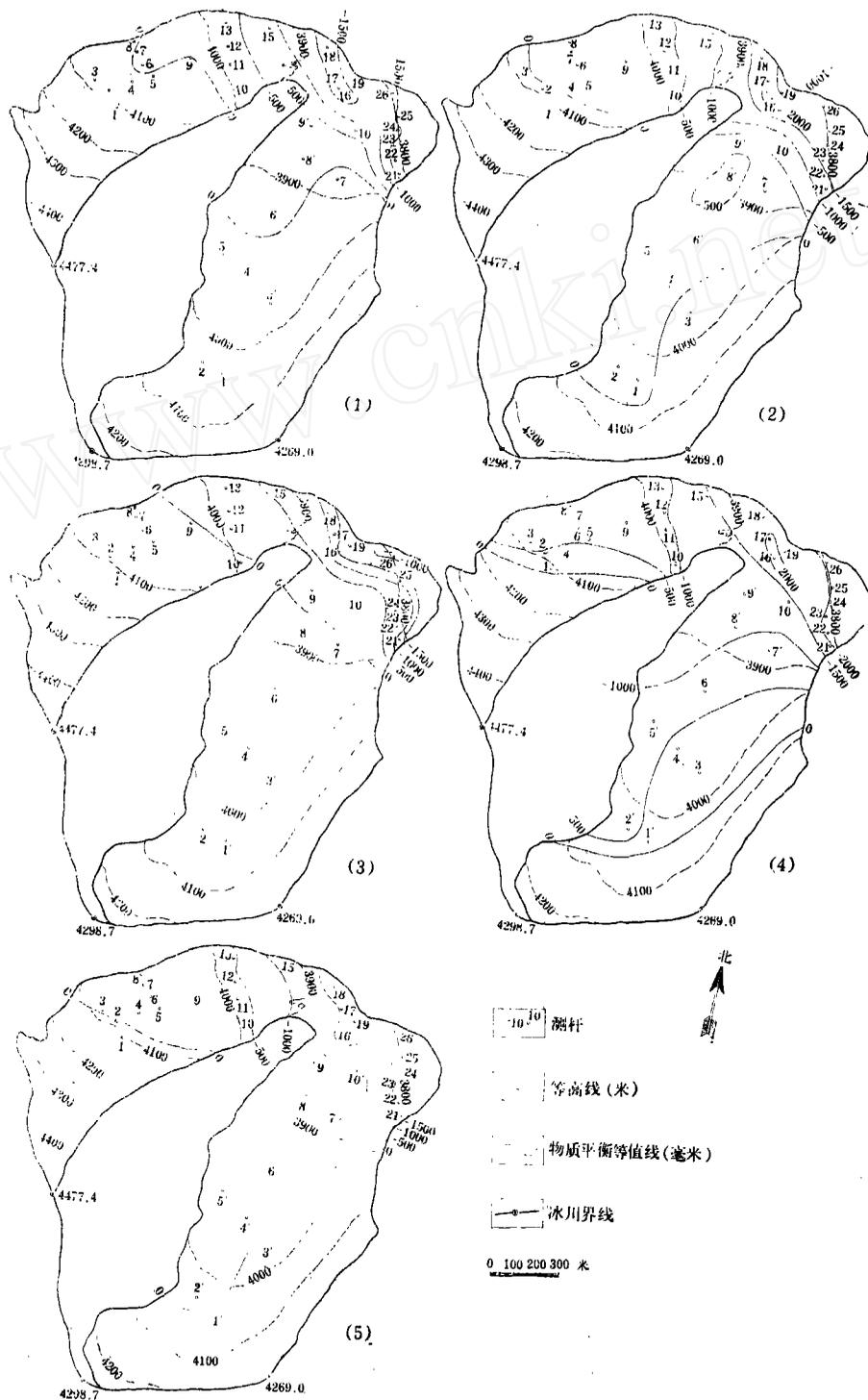


图1 乌鲁木齐河一号冰川物质平衡等值线图

(1) 1962—1963年; (2) 1963—1964年; (3) 1964—1965年; (4) 1965—1966年; (5) 1959—1966年平均值

根据1号冰川七年的零平衡线高度和天山气象站同年年降水量资料, 绘成图2, 发现二者关系密切, 据此可配成式(3):

$$h = 4325 - 0.00143R^2 \quad (3)$$

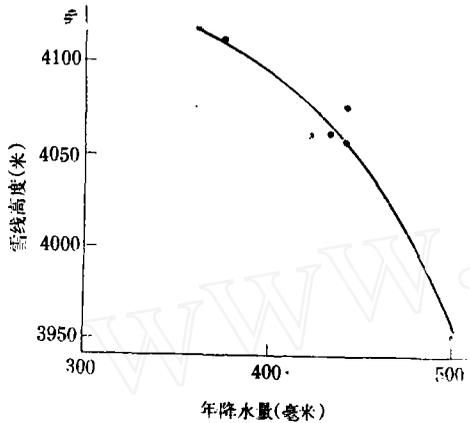


图2 零平衡线高度与年降水量的关系

式中: h 为1号冰川零平衡线海拔高度(米);
 R 为天山气象站相应积一消年度的年降水量(9—8月, 毫米)。

根据图2计算, 二者相关系数为0.9557。

2. 依赖雪线计算的冰川系数

根据图1, 分别求出积累区和消融区面积, 进而得到冰川系数, 与零平衡线相关绘成图3, 图3表明二者关系十分密切, 相关系数达0.996, 其相关方程为:

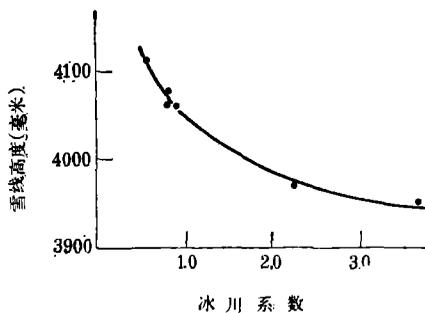


图3 零平衡线高度与冰川系数的关系

$$gc = ah^{-b} \quad (4)$$

式中: gc ——冰川系数;

a ——常数;

h ——零平衡线高度;

$-b$ ——零平衡线高度的指数。

3. 零平衡线、冰川系数和冰川作用能的年际变化

根据式(3)、(4)求出的零平衡线高度、冰川系数和据表1计算的冰川作用能的变化, 均列入表2。

表2表明降水量对1号冰川的零平衡线位置的影响十分明显, 其次是消融期的气温。在相同的气温条件下, 冰川上因降雪量的多寡, 积雪厚度也不同, 因而融化耗热亦各异。如1959—1960年、1962—1963年消融期气温均为 4.0°C , 但年降水量二者相差73.1毫米, 致使前者雪线位置比后者高出89米。

16年来1号冰川零平衡线位置变化在

表2 1958—1974年1号冰川零平衡线、冰川系数、冰川作用能*

年份	零平衡线 (米)	冰川系数	冰川作用能 (毫米/米)	天山站	
				降水量 (9—8月) (毫米)	温度 (6—8月) ($^{\circ}\text{C}$)
1958—59	4005	1.50		472.8	3.8
1959—60	4060	0.79	6.5	422.4	4.0
1960—61	4060	0.88	5.6	434.5	3.9
1961—62	4075	0.79	6.7	444.2	4.6
1962—63	3971	2.25	6.0	495.5	4.0
1963—64	4055	0.91	4.7	444.2	4.1
1964—65	3948	3.64	6.0	502.3	4.2
1965—66	4110	0.57	5.9	373.8	4.3
1966—67	4063	0.84		428.0	3.6
1967—68	4121	0.54		377.6	3.7
1968—69	4008	1.44		471.0	3.7
1969—70	4106	0.60		380.5	3.9
1970—71	4015	1.32		465.5	3.8
1971—72	3981	2.05		490.3	3.8
1972—73	4146	0.44		354.0	4.3
1973—74	4075	0.76		418.4	4.4
平均	4050	1.01	5.9	435.9	4.0

*表中1959—1966年的零平衡线, 冰川系数和冰川作用能为实测值, 1958—1959和1967—1974年为计算值。

3948—4146米之间，最大变幅近200米，与天山西部相同类型冰川上雪线变幅相似〔4〕。与此相应的冰川系数的变幅可超过八倍以上。可见，只有较长时期的物质平衡观测，才能较正确地定出冰川平均零平衡线位置及冰川系数。

据表1，我们点绘了1号冰川1959—1966年历年纯消融量随高度的分布图(见图4)。从图上表明，纯消融与高度的关系呈直线变化，只是由于降水量和气温的差异，其斜率有所不同。

表2指出1号冰川的冰川作用能变化在4.7—6.7毫米/米之间，可见，其年际变化十分明显。这同V.舒特在瑞典的斯托(stor)冰川上的研究结果〔5〕一致。

三、冰川消融、积累和物质平衡的研究

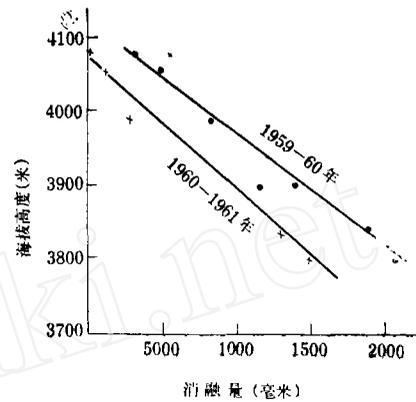
较长期的冰川物质平衡观测是研究冰川变化的一个重要方面，是定量计算冰川收支水平的依据。本文在七年实测的基础上，用统计方法计算并延长自1958—1974年的16个年度的物质平衡。

1. 冰川消融、积累的计算方法

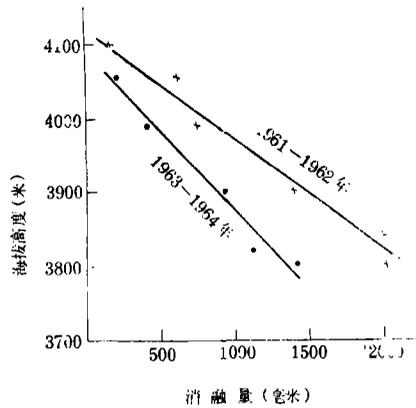
1号冰川因有七年的实测资料，其相应年份和七年平均纯消融量可据图1求出。但1962年以后，因在积累区的雪层剖面挖得较少，故纯积累量不易求出，谢自楚根据天山气象站的年降水量和年平均气温与同期冰川的纯积累量的关系建立如下的经验公式：

$$\bar{b}_{sa} = \frac{-tR}{K} \quad (5)$$

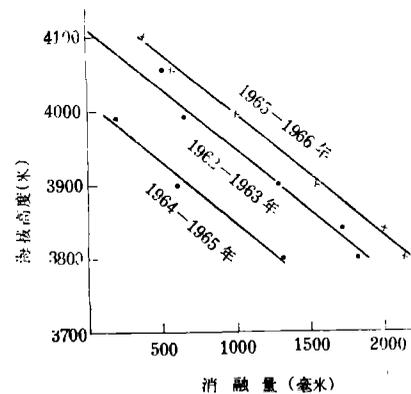
式中： \bar{b}_{sa} ——冰川平均积累深度(毫米)；
 t ——该积消年度天山气象站平均气温(℃)；
 R ——该积消年度天山气象站年降水量(毫米)；
 K ——经验系数，1959—1962年平均为3.85。



(一)



(二)



(三)

图4 乌鲁木齐河1号冰川纯冰消融梯度

根据上式和天山气象站的降水、气温资料,可求出1958—1959和1963—1974年1号冰川每年度的纯积累量,然后用本文计算的冰川系数,求出1号冰川的积累区面积,就不难得到冰川的纯积累量。这个方法显然比实测精度差,但因冰川总纯积累量在很大程度上取决于积累区面积的大小,而后者用花杆资料可准确地获得,故在实测资料不足时,亦可用式(5)计算冰川的纯积累量。

据表2的冰川系数,用关系式(6)可分别求得冰川积累区和消融区面积。

$$S_{\text{积}} = \frac{s \cdot gc}{1 + gc} \quad (6)$$

式中: $S_{\text{积}}$ ——冰川积累区面积(平方公里);
 S ——整个冰川面积(平方公里);
 gc ——冰川系数。

式(6)可换成式(7),求得消融区面积:

$$S_{\text{消}} = \frac{S}{1 + gc} \quad (7)$$

2. 冰川纯消融量的计算方法

根据七年实测的消融区面积和纯消融量资料,绘成图5,发现二者关系为指数相关,进而求出1958—1959和1967—1974年各年消融区的纯消融量,如下式所示:

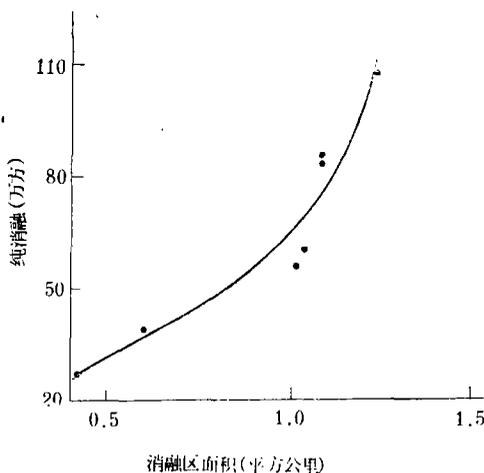


图5 消融区面积和纯消融关系图

$$S_{\text{消}} = a \cdot b_{sc}^e \quad (8)$$

上式可变换为:

$$b_{sc} = a + e \log S_{\text{消}} \quad (9)$$

式中: b_{sc} 为消融区的纯消融量(毫米);
 e 为消融区面积的指数。

式(9)表明,消融区面积与纯消融量二者的相关系数 r 为0.961。

将式(5)和式(9)的计算结果相加,得到该年度的物质收支差额。

因1号冰川雪崩影响很弱,液态降水又少,故可用年降水量近似地表示冰川上的总积累量。降在消融区的雪为季节性积雪,而降在积累区的季节积雪仅在零平衡线至粒雪线的面积上有一半流失,这样一来:

$$N_{sa} = \frac{1}{2} \int_{sa_1} n(h) \cdot Sa_1 \quad (10)$$

式中: $n(h)$ 为降水量,随海拔高度递增,
 Sa_1 为零平衡线一粒雪线的面积。

将式(9)和式(10)的计算结果相加便得到整个冰川的总消融量。

3. 冰川物质平衡及年际变化

上述计算结果列入表3。表3清楚地表明,1958—1974年的16个年度中,1号冰川有七个年度的物质平衡出现正平衡,其中1962—1965年连续三个年度和1970—1971年连续两个年度出现正值。正平衡最大值出现在1964—1965年度,达73.0万方,其次是1970—1971年度,达51.1万方。充分说明,1号冰川在七个正平衡年度内,由于降水量增加(天山气象站年降水量均在444毫米以上,雪线下降,积累区面积随之扩大,使冰舌区的季节积累迅速增加,抑制了冰舌区的冰川冰消融量,减缓了冰川的后退趋势。而1972—1973年度却出现了16年中最强的消融年,其原因主要是该年度内降水量为16年中最小的年份,仅有354毫米,而夏季消融期的月平均气温却出现较高的值(4.3℃)所引起的,纯冰消融量达到165.0万方的最大值,致

表3 乌鲁木齐河源1号冰川积累、消融及物质平衡表*

年 度	消融区面积 (平方公里)	积累区面积 (平方公里)	纯消融 (万公方)	纯积累 (万公方)	消融区 季节积雪 (万公方)	积累区消融 (万公方)	总消融 (万公方)	总结累 (万公方)	物质收支差额	
									万公方	毫米水柱
1958—1959	0.78	1.17	47.0	63.9	36.9	5.1	89.0	105.9	+16.9	+87
1959—1960	1.09	0.86	86.2	49.6	59.5	9.5	155.2	118.6	-36.6	-188
1960—1961	1.04	0.91	60.3	53.9	60.0	9.0	129.3	122.9	-6.4	-33
1961—1962	1.09	0.86	84.2	51.6	60.5	9.5	154.2	121.6	-32.6	-167
1962—1963	0.60	1.35	39.5	85.2	33.4	5.0	77.9	123.6	+45.7	+234
1963—1964	1.02	0.93	55.5	55.9	51.6	7.3	114.4	114.8	+0.4	+2
1964—1965	0.42	1.53	26.8	99.8	23.7	3.4	53.9	126.9	+73.0	+374
1965—1966	1.24	0.71	107.5	34.6	54.0	11.0	172.5	99.6	-72.9	-374
1966—1967	1.06	0.89	72.0	58.4	51.9	8.4	132.3	118.7	-13.6	-70
1967—1968	1.27	0.68	127.0	38.0	55.8	12.5	195.3	106.3	-89.0	-456
1968—1969	0.80	1.15	48.6	77.4	42.6	6.2	97.4	126.2	+28.8	+148
1969—1970	1.22	0.73	102.0	41.0	53.5	10.6	166.1	105.1	-61.0	-313
1970—1971	0.84	1.11	51.2	71.1	44.3	6.5	102.0	121.9	+19.9	+102
1971—1972	0.64	1.31	39.0	90.1	35.3	5.1	79.4	130.5	+51.1	+262
1972—1973	1.35	0.60	165.0	27.0	56.1	15.1	236.2	98.2	-138.0	-708
1973—1974	1.11	0.84	80.0	55.7	53.3	9.1	142.4	118.1	-24.3	-125
平 均	0.97	0.98	74.5	59.6	48.3	8.3	131.1	116.2	-14.9	-76

*表中1959—1962年的资料引自参考文献〔6〕。

使冰川负平衡量亦达138.0万方的极值。

表3表明,冰川上零平衡线和物质平衡每年都有变化,有时幅度相当大,这与高山区的气候变化密切相连。当气候变湿(降雪量增多)或变冷时,零平衡线下降,物质平衡出现正值,反之,零平衡线上升,物质平衡出现负值。这种小的活动规律在1号冰川上基本每隔2—3年出现一次。

根据表3和谢自楚对冰川物质平衡特征值的研究方法〔7〕作进一步的计算得到表4。它构成了1号冰川物质平衡的本身特征。就物质平衡水平而言,其年际变化在464—858毫米之间,和祁连山老虎沟12号冰川相似¹⁾,远小于西天山的卡拉格玉勒冰川,更小于喀

表4 乌鲁木齐河源1号冰川物质平衡特征值表

年 度	物质平衡 水 平 (毫米)	物质平衡 差 额 (毫米)	物质平衡 递 度 (毫米/米)	稳 定 性 系 数
1958—1959	500	+87		0.57
1959—1960	702	-188	6.5	0.49
1960—1961	647	-33	5.6	0.46
1961—1962	708	-167	6.7	0.49
1962—1963	517	+234	6.0	0.60
1963—1964	587	+2	4.7	0.49
1964—1965	464	+374	6.0	0.64
1965—1966	698	-374	5.9	0.49
1966—1967	644	-70		0.52
1967—1968	774	-456		0.51
1968—1969	573	+148		0.56
1969—1970	696	-313		0.50
1970—1971	574	+102		0.54
1971—1972	538	+262		0.59
1972—1973	858	-708		0.49
1973—1974	668	-125		0.52
平 均	638	-76	5.9	0.53

1)1958年编号为老虎沟20号冰川,亦称老虎沟冰川

表5 冰川物质平衡水平值的计算结果

山区	冰川名称	物质平衡水平(毫米)	观测年代	资料来源
天山	卡拉格玉勒	1488	1959	据袁建模 ¹⁾
	乌鲁木齐1号	638	1958—1974	作者
祁连山	老虎沟12号	641	1959—1976	据祁连山队资料
	七一冰川	577	1975—1976	同上
	水管河4号	1153	1963, 1976	同上
喜马拉雅山	绒布冰川	733	1959—1960	据〔7〕
念青唐古拉山	古乡冰川	2678	1965	据袁建模等 ²⁾
喀喇昆仑山	巴托拉冰川	2317	1974—1975	据〔8〕

1)袁建模：汗腾格里地区土耳其斯坦型冰川的积累消融和径流特征（1960年）。

2)袁建模等：西藏古乡海洋性冰川的基本特征（1978年）。

喇昆仑山的巴托拉冰川(见表5)，表明了1号冰川所在的喀拉乌成山区的大陆性程度较为强烈，由此决定了1号冰川是一支物质水平很低、活动能力很弱的冰川。

从表4看出，1号冰川的稳定性系数最大值出现在1964—1965年度，为0.64；最小值出现在1960—1961年度，为0.46，最大变幅达0.18，可见其年际变化较大，其平均值为0.53，仅次于祁连山西部的老虎沟冰川〔7〕，反映该冰川比较稳定。

4. 冰川物质平衡与冰川进退变化

表3表明1号冰川16年来的物质平衡量变动在+374—-708毫米之间，年平均物质平衡值为-76毫米，亦即冰川平均每年减薄

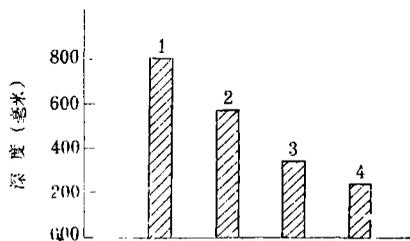


图6 中纬度某些冰川物质平衡绝对值比较

1.美国南卡斯卡特冰川；2.阿尔卑斯山亨德列斯费尔聂尔冰川；3.苏联天山中央图尤克苏冰川；4.中国天山乌鲁木齐河源1号冰川

84毫米，16年冰川共变薄1.35米左右，与中纬度其它高山冰川相比，1号冰川的物质平衡值是很小的(图6)。

据王文颖等1962年9月6日在该冰川末端做的标志，1973年8月31日重覆测量，11年来冰舌末端共退缩56.0米，平均以5.12米/年的速度后退〔3〕。施雅风对1号冰川历史变化的研究推测，约100年来，1号冰川面积缩小12.1%，而高加索冰川总面积在1950—1959年间缩小10%〔4〕。近年来，张祥松在对喀喇昆仑公路沿线的现代冰川进退变化研究中，提出了近期变化的二个量级。其中，在数年或数十年内进退年变化以米计的，为变幅最小，稳定性较大的大陆性冰川〔9〕。综合上述，可见1号冰川在这个量级之内，是一条低水平的、具有较大稳定性的冰川。

(1980年4月22日收到)

参 考 文 献

- 〔1〕中国科学院地理研究所冰川冻土研究室，天山乌鲁木齐河冰川与水文研究，科学出版社，1965。
- 〔2〕Meier Mark F. Proposed definitions for glacier mass budget terms, "Journal of Glaciology", vol.4.1962.No.33.
- 〔3〕王文颖等，1962—1973年天山乌鲁木齐河1号冰川的后退和运动的对比测量，中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所集刊，第一号，科学出版社，1976。
- 〔4〕施雅风、谢自楚：中国现代冰川的基本特征，《地理学报》，第30卷第3期，1964。
- 〔5〕Schytt V., A study of "Ablation gradient" Geografiska Annaler, Ser. A Vol.49 A No.2—4, 1967, PP 327—332.
- 〔6〕谢自楚、葛光文：天山乌鲁木齐河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，1965。
- 〔7〕谢自楚：冰川物质平衡及其与冰川特征的关系，《冰川冻土》，2(4)，1980。
- 〔8〕Permanent Service on the Fluctuations of Glacier of IUGG—FAGS/ICSU Fluctuations of Glaciers(1959—65), (1965—70), (1970—75) IAHS (ICSU) UNESCO.
- 〔9〕张祥松：喀喇昆仑公路沿线冰川的近期变化，地理学报,35(2),140—160, 1980。

MASS BALANCE STUDIES ON THE NO.1 GLACIER OF ÜRÜNGI RIVER IN TIANSHAN

Zhang Jinhua

(Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Academia Sinica)

Abstract

In this paper, the seven year-round (from 1959 to 1967) observed data of mass balance on No.1 Glacier and the climatic data of the Tianshan meteorological station located at an elevation of 3,546 m approximately 2.5km from the No.1 Glacier' were used, and their correlations investigated.

Based on the above mentioned analysis, the location of snowline (ELA) and mass balance were calculated and these data were prolonged to sixteen years by extrapolation. Then, the author discussed the regularity of the changes and their characteristics.

The following points may be drawn by statistical analysis:

(1) the mean height of zero equilibrium line (ELA) for many years is 4,050m, (2) when the annual precipitation on the glacier is estimated to be over 450 mm, the mass balance has positive values and a small regular fluctuation appears at every two or three years interval, (3) during the sixteen years of negative, variational tendency of mass balance there appeared four times of positive values. However, these negative values are far less than those in other mountains of middle latitude, and (4) the annual mean reduction of glacial thickness is 0.084 m, and the annual mean recession is 5.12m in 1962-1973. On the basis of the above-mentioned facts, the author considers that the No.1 glacier of Ürüngi river is a comparatively stable mountain glacier in China.