

稳定状态下冰川纵向断面计算

——以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例

曹梅盛

M. F. 迈耶

(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

(美国科罗拉多大学北极和高山研究所)

内 容 提 要

据天山乌鲁木齐河源1号冰川1980年地形测量图、1980年5月至1981年5月冰面流速及冰川雷达测厚资料,用统计相关求得单宽流量与平均冰厚、坡降之间关系式。在假定今后冰川维持1959—1966年间物质平衡等值线分布下,计算了该冰川最终稳定纵向断面,此时该冰川面积与体积分别仅为1980年的83.6%与60.5%,且形态上分为两支,每年供水量为 $78 \times 10^4 \text{ m}^3$,为1958—1983年间平均供水量的83.4%。

冰川随气候变化是冰川动力学的重要研究领域之一。已有两类定量方法研究冰川对气候或物质平衡变化的动态反应,即奈(Nye)的微扰算法及数值分析法。它们都给定若干冰川动态变化过程的定量结果,但需较多假定,一定程度上影响结果本身的精确性和可靠性。本文试图依据假定冰川断面平均单宽流量 \bar{q} 仅为断面平均厚 \bar{h} ,坡降 $\bar{\alpha}$ 的函数^[1],据实测资料用统计相关法可求得天山乌鲁木齐河源1号冰川相应此函数关系式。若今后1号冰川维持某种物质平衡分布方式时,据公式:

$$d\bar{h}/dx = \bar{\beta} - \bar{\alpha} \quad (1)$$

即可计算冰川在相应物质平衡模式下最终稳定状态的纵向断面。 $\bar{\beta}$ 系底床平均坡降。尽管它不能预报或揭示整个冰川动态变化过程,但可获得若干有意义的定量结果。

一、冰川概况

1号冰川是个山谷冰斗冰川,面积 1.84 km^2 ,冰舌末端海拔高度 3734 m ,冰川上游最高海拔 4484 m ^[2],冰川站在离冰川末端 2.5 km 处。

1980年7月在孙作哲等摄成的天山站1号冰川地形图上冰川仍为一整体。因两支冰流分界面已存在深切冰川体的冰面河,更醒目的是两支冰流主流线在下游不能归并一起,所以在计算中我们按两支冰川进行了处理。

若 x 表示1980年冰川地形图上自冰川源头计起沿冰川主流线的距离,此时东西支冰川主流线长分别为 1950 m 及 2030 m 。图上主流线偏向一侧,不在冰川几何中轴线上(图1)。

本文于1985年9月28日收到,1986年4月2日改回。

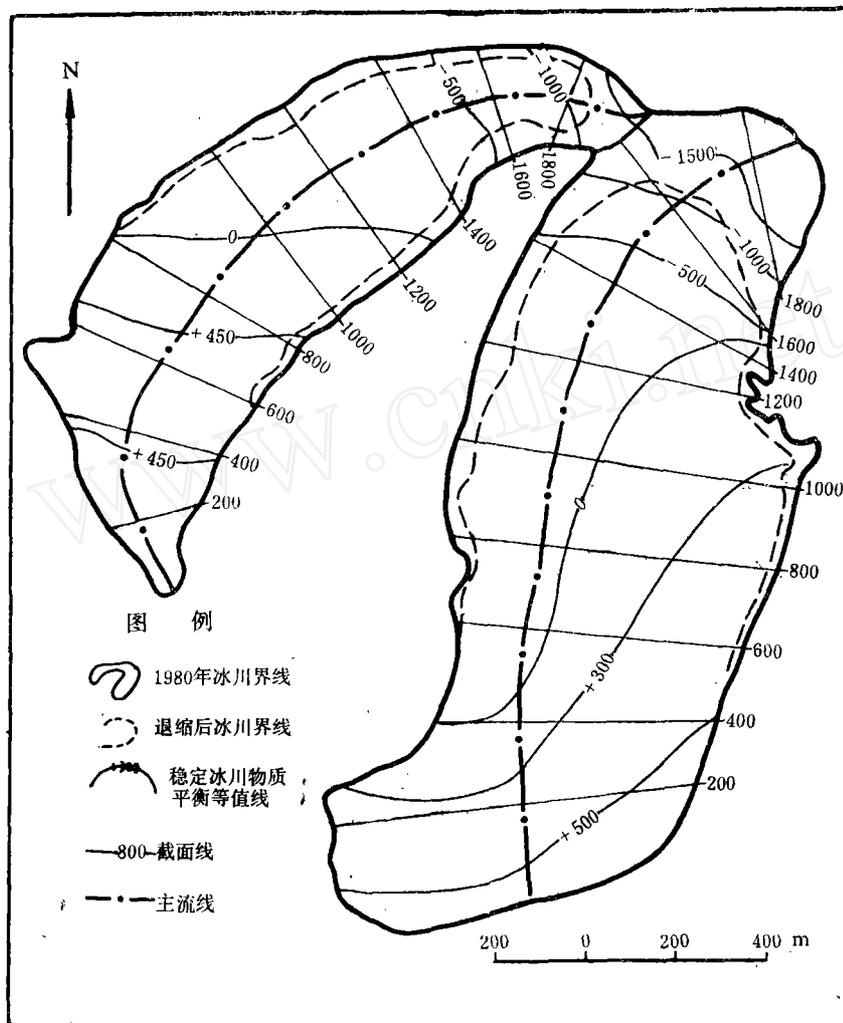


图1 1号冰川采用的冰川稳定物质平衡等值线分布、截面线及达稳定状态时冰川界线
 Fig.1 Adopted distribution of stable mass balance contours of Glacier No. 1, the line of transverse profiles and glacier boundary under datum state

二、物质平衡

选用什么样物质平衡分布方式模拟今后冰川物质平衡,对本文讨论的计算方法无实际影响,但为获得有意义结果,选用今后实际有可能出现的物质平衡分布方式仍值得探讨。

1959—1982年间24年平均值为-0.081m。其中1959—1966年及1980—1982年为实测值,其余为据冰川站气象资料外推而得。另外,有1961—1966年和1979—1982年历年消融区物质平衡等值线图及1959—1966年7年平均物质平衡等值线图^[3-4]。所有这

既有年物质平衡值又有物质平衡等值线分布图的年份, 只有1959—1966年平均物质平衡值为 -0.022m 及1960—1961年度的 -0.033m 最接近 -0.081m 。又考虑1959—1966年平均物质平衡等值线图更有代表意义, 所以其分布方式被选作冰川消融区今后物质平衡等值线的分布方式。积累区仅有1961—1962年及1981—1982年度的物质平衡等值线分布资料〔4—5〕, 考虑1981—1982年度的物质平衡值 -0.045m 更接近 -0.081m , 且测量精度优于1961—1962年度, 故选用该年度积累区物质平衡等值线分布方式。西支冰川积累区的等值线又据张金华等从雪坑资料获得的1978—1979年度(年物质平衡值 -0.084m)若干点积累测量值作了必要订正。上两者除进行组合外, 还在1980年冰川地形图上作若干平移, 使物质平衡值达 -0.081m 后的等值线分布图, 被选作冰川今后可能长期维持的物质平衡分布方式(图1)。一段时间后冰川最终将达稳定状态, 其冰川末端位置可由式(2)确定:

$$\int_0^L B a dx = 0. \quad (2)$$

L 为从源头至稳定状态下末端的距离, 即冰川长度(m), B 为冰川横截面宽度(m), a 为截面处冰面的物质平衡值(m/a)。据计算, 此时东西两支冰川长分别为1664m及1856m, 即东支退缩284m, 西支退缩174m。

三、断面 \bar{q} 与 \bar{h} 、 $\bar{\alpha}$ 间关系

沿冰川主流线每隔200m截取一横截面(图1)。据钱嵩林等的1号冰川雷达测厚资料, 可求得每一截面处相应横截面积 W (m^2)及平均厚 $\bar{\alpha} = W/B$ 。每个截面处取5点计算坡降, 主流线两侧各两点且分别均分主流线两侧冰面宽。5点坡降平均值用作该断面的平均坡降 $\bar{\alpha}$ 。计算中注意到了坡降值与图上丈量时所取水平距离密切相关。由于纵向应力梯度的影响, 一般应取较长水平距离才能获得该截面处真正坡降值。埃克梅尔(Echmyer)曾对此作过较详细的研究, 指出量坡降时一般需2—4倍冰川厚水平距离才能降低纵向应力梯度的影响。1号冰川规模小且断面间距为200m, 4倍冰川厚有可能超过断面间距, 所以量坡降时我们仅取 \bar{h} 、 $2\bar{h}$ 、 $3\bar{h}$ 的水平距离作比较, 从图上分别量得每一断面处的 $\bar{\alpha}$ 。

据孙作哲等提供的1980—1981年度的冰川表面流速分布图, 量得每一断面与冰川中轴线相交处的流速值。若冰川谷床为半抛物线型, 据 $B/2\bar{h}$ 值查奈(Nye)编制的抛物线型谷床冰川表面中心流速与断面平均流速比率系数 f 表〔6〕, 可求得断面平均流速 \bar{v} (m/a), 即 $\bar{v} = fv$, v 为冰面中心线处流速(m/a)。奈是在基于冰川底部无滑动的情况下编成此表的。但近年来位于西支冰川冰舌末端冰洞内的试验证实该冰川在消融区存在底部滑动。1981年在冰床局部地段量得滑动速度为 2m/a 〔7〕。因此上述计算所得的 \bar{v} 值将偏小。我们把西支冰川靠近冰洞处 $x = 1000\text{m}$ 断面处表面平均流速 \bar{v}_s 乘以奈提供的 \bar{v} 与 \bar{v}_s 的比率系数, 得 $\bar{v} = 6.1\text{m/a}$ 。与上述用中心流速 v 算得的 5.8m/a 很接近, 相对偏差为6%, 证明该处冰体仍以内部运动为主, 局部底部滑动对冰体运动的影响仍很小。再考虑上游其它断面处尚难断定是否存在底部滑动, 故仍采用不计底部滑动的 f 值, 并据冰面中心流速去计算 \bar{v} 。从而可按下式求得各断面的平均宽流量,

$$\bar{q} = f\sqrt{W}/B. \quad (3)$$

现有东支流 x 值从400—1800m的8组,西支流 x 值从1000—1800m 5组,共13组 \bar{q} 、 \bar{h} 和 $\bar{\alpha}$ 的可靠资料作复相关计算,得表达式

$$\bar{q} = K\bar{h}^a\bar{\alpha}^b, \quad (4)$$

式中: a 、 b 为常数, K 为单宽流量系数(表1)。显然表1所列第二式最佳。3 \bar{h} 水平距离量 $\bar{\alpha}$ 所得第三式劣于第二式。因为冰川并非整直延伸,水平距离过长后往往因不能正确丈量而带来误差。故选用第二式作为1号冰川基本关系式。

表1 \bar{q} 与 \bar{h} 及 $\bar{\alpha}$ 间统计关系表达式

Table 1 Statistical expressions of relationship among \bar{q} , \bar{h} , and $\bar{\alpha}$

丈量 $\bar{\alpha}$ 所用 水平距离	表 达 式	相关系数	剩余标准差
\bar{h}	$\bar{q} = 0.1973\bar{h}^{2.86}\bar{\alpha}^{1.27}$	0.634	0.112
2 \bar{h}	$\bar{q} = 0.00096\bar{h}^{3.94}\bar{\alpha}^{2.02}$	0.829	0.077
3 \bar{h}	$\bar{q} = 0.1236\bar{h}^{3.10}\bar{\alpha}^{1.58}$	0.801	0.083

四、稳定状态下纵断面的计算

稳定状态下冰川断面 \bar{h} 、 \bar{p} 和 $\bar{\alpha}$ 间仍应满足式(1),将表1中第二表达式代入式(1)中得

$$d\bar{h}/dx = \bar{p} - (\bar{q}/\bar{K}\bar{h}^{-3.94})^{(1/2.02)}, \quad (5)$$

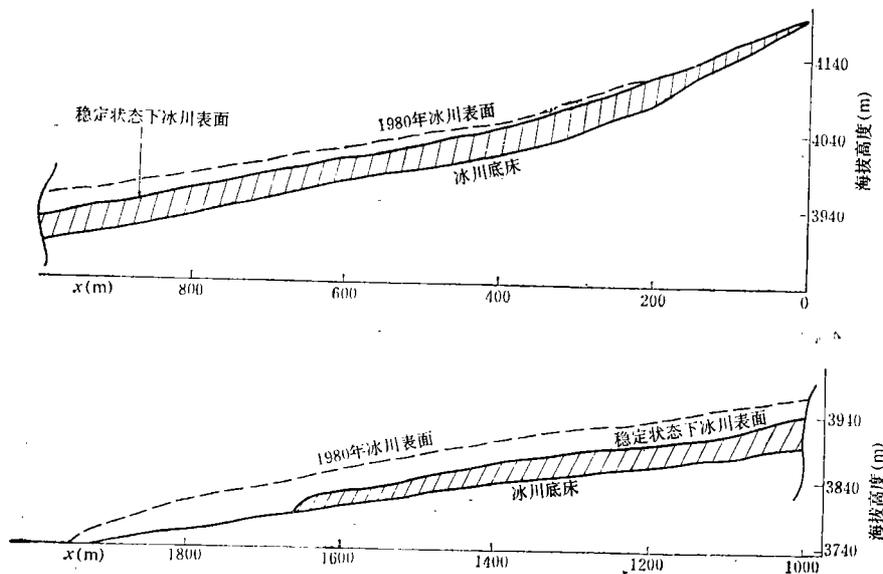


图2 1号冰川东支稳定状态下及1980年的冰川平均厚度沿纵向 x 轴的变化

Fig. 2 Average thickness of eastern branch of Glacier No. 1 in 1980 and datum state changes along x axis

式中: $\bar{q} = \bar{q}_0 + ax$; \bar{q}_0 为稳定状态下计算起始断面单宽流量, a 为稳定状态下计算段冰面平均物质平衡, K 为两计算断面间平均流量系数。为了精确计算, 据1980年资料及算每个断面相应 K 值, 然后得每两计算断面间的 K 。

假定冰川达稳定状态时底床坡降 \bar{p} 仍等于1980年冰床坡降, 则可从1980年冰川地形图上量得 $\bar{\alpha}$ 和 $d\bar{h}/dx$ 后按

$$\bar{p} = \bar{\alpha} + d\bar{h}/dx \quad (6)$$

计算 \bar{p} 。那么若已知退缩后冰川每个截面 \bar{q}_0 值及计算段冰面平均物质平衡值 a , 即可按式 (5) 计算冰川平均厚度 \bar{h} 沿 x 轴的变化。计算结果列于表 2 及图 2。两支冰川上游断面缺乏原始数据, 故计算是从已知冰川末端向上游推算。结果表明, 退缩到稳定状态的冰川不但表现在冰舌末端的退缩, 而且表现在整个冰川的减薄上, 且减薄量向上游逐渐减少。图 2 中东支 x 值 400—200m 处减薄量是根据 x 值 800—400m 段减薄量按比例推算的。

表 2 稳定状态下 1 号冰川平均厚度沿 x 轴变化的计算结果

Table 2 The calculation result of average thickness of Glacier No.1 which under datum state changes along x axis

截面位置 (m)	\bar{p}	a (m/a)	\bar{q} (m^3/a / m)	K	计算结果*(m)	1980年 \bar{h} (m)	减薄量 $\Delta\bar{h}$ (m)	
东 支	1664—1600	0.172	-1.238	79.6	0.000737	$\bar{h}(1664) = 0$ $\bar{h}(1660) = 18.5$	(46.0) 51.6	(26.0) 33.10
	1600—1400	0.178	-0.550	167.8	0.000735	$\bar{h}(1400) = 26.25$	56.0	29.75
	1400—1200	0.0985	-0.162	180.3	0.000918	$\bar{h}(1200) = 31.11$	67.3	36.19
	1200—1000	0.1575	-0.036	159.4	0.001049	$\bar{h}(1000) = 33.68$	61.8	28.12
	1000—800	0.2190	0.051	161.1	0.001065	$\bar{h}(800) = 35.20$	50.0	14.80
	800—600	0.2115	0.098	163.9	0.001048	$\bar{h}(600) = 36.58$	45.7	9.12
	600—400	0.209	0.130	142.1	0.000913	$\bar{h}(400) = 37.77$	43.9	6.12
西 支	1856—1800	0.2615	-1.348	73.2	0.001064	$\bar{h}(1856) = 0$ $\bar{h}(1800) = 15.50$	(26.0) 32.2	(26.0) 16.7
	1800—1600	0.2615	-0.867	208.0	0.001165	$\bar{h}(1600) = 23.51$	45.7	22.4
	1600—1400	0.229	-0.373	178.2	0.001153	$\bar{h}(1400) = 27.55$	49.1	21.5
	1400—1200	0.171	-0.209	200.0	0.000983	$\bar{h}(1200) = 31.46$	57.9	26.4
1200—1000	0.195	-0.087	210.2	0.000946	$\bar{h}(1000) = 34.33$	55.9	21.6	

* 方程 (5) 采用龙格-库塔法解算, 间距选用 20m。

表 3 稳定状态下 1 号冰川若干特征值与 1980 年实际值的比较

Table 3 Comparison of some characteristics of Glacier No. 1 under datum state with actual values in 1980

项 目	东 支	西 支	总 和
1980 年 7 月冰川面积 (m ²)	1181000	665000	1846000
稳定状态下冰川面积 (m ²)	984000	559000	1543000
减少面积 (m ²)	197600	106200	303800
减少面积占 1980 年面积百分比 (%)	16.7	16.0	16.4
1980 年 7 月冰川水当量体积 ¹⁾ (m ³)	49310000	27550000	76860000
稳定状态下冰川水当量体积 (m ³)	28360000	18170000	46530000
减少水当量体积 (m ³)	20950000	9380000	30330000
减少水当量体积占 1980 年体积百分比 (%)	42.5	34.0	39.5
稳定状态下冰川年供水量 ²⁾ (m ³ /a)	497700	283100	780800
稳定状态下冰川年供水量占冰川水当量储量百分比 (%)	1.76	1.56	1.68
稳定状态下冰川年供水量占 1958—1983 年平均供水量的百分比 ³⁾ (%)	83.3	84.1	83.4
稳定状态下冰川系数	1.97	1.54	

注: 1) 冰密度 = 0.9; 2) 1958—1983 年 25 年平均年冰川径流深 = 0.506m; 3) 1958—1983 年 25 年平均年冰川径流总量 = $93.6 \times 10^4 \text{m}^3$ 。

五、若干其它结果

据表 2 可确定该冰川其它特征量变化结果(表 3)。显然,在规定的冰川物质平衡分布模式下,1 号冰川达稳定状态后在地形图上将成为两支独立的小型冰斗山谷冰川。稳定状态下冰川水当量体积储量仅为 1980 年冰川的 60.5%,而面积为 1980 年的 83.6%。稳定状态下冰川面积是各断面处 \bar{h} 与 1980 年相比减少值及该处冰床形态量算而得。假定该冰川维持 1958—1983 年间的年平均径流深值 0.506m 条件下^[8],冰川年融水补给仍可达 $78 \times 10^4 \text{m}^3$,占整个冰川水当量储量的 1.68%,比 1983 年前冰川参与融水补给占自身水当量储量的 1.2% 还略多一些。

参 考 文 献

- [1] Paterson, W.S.B., The Physics of Glaciers (Second Edition), Pergamon Press, New York, U.S.A.

pp.243, 1981.

- [2] 孙作哲等, 1985, 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的运动特征, 冰川冻土, 7 卷 1 期, 第 27—40 页。
- [3] 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 卷 2 期, 第 34 页。
- [4] 张金华等, 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 卷 4 期, 第 29 页。
- [5] 谢自楚、葛光文, 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的积累、消融及物质平衡, 天山乌鲁木齐河源冰川与水文研究, 科学出版社, 1965。
- [6] Nye, J.F., 1965, The flow of a glacier in a channel of rectangular, elliptic or parabolic cross section, *Journal of Glaciology*, Vol. 5, No. 5, pp.661—692.
- [7] 王仲祥, 1983, 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川人工冰洞初步观测, 冰川冻土, 5 卷 1 期, 第 90 页。
- [8] 李念杰, 1985, 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区的径流特征, 冰川冻土, 7 卷 2 期, 第 163—169 页。

www.cnki.net

Calculation of Glacial Longitudinal Sections Under Stable Conditions—Glacier No. 1 at the Headwater of the Urumqi River, Tianshan Mt, as an Example

Cao Meisheng* and M·F·Meier**

(*Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences,

** Arctic and Alpine Research, University of Colorado, U.S.A.)

Abstract

Based on Glacier No. 1 topography map of July 1980, the glacial surface velocity during Moy 1980—May 1981 and ice thickness data measured by radio-echo, a statistical relationship between flux per unit width \bar{q} ($\text{m}^3/\text{arye}/\text{m}$), average ice thickness \bar{h} (m) and slope $\bar{\alpha}$ in transverse profile has been obtained by multiregression as follow:

$$\bar{q} = 0.000961 \bar{h}^{3.94} \bar{\alpha}^{2.02}$$

Suppose the mass balance contour distribution shape is stable from now on, and approximates the average distribution shape during 1959—1966, that is, the glacier mass balance value under this distribution in 1980 is equal to the average value -0.08 m in the 24 years from 1958 to 1982, then the longitudinal section of Glacier No. 1 under stable conditions could be calculated with the fomula:

$$d\bar{h}/dx = \bar{\beta} - \bar{\alpha}$$

where $\bar{\beta}$ is the average bed slope in 1980 and is supposed not to change with time. Glacier No.1 could really be separated into two small glaciers and their volume and area are 60.5% and 83.6% of that in 1980 respectively. These two small glaciers supply $78 \times 10^4 \text{m}^3$ water to the Urumqi River each year, which equals to 83.4% of average supplied glacial water from 1958 to 1983.