

# 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

张祥松 孙作哲 张金华 康兴成  
(中国科学院兰州冰川冻土研究所)

## 一、引言

冰川变化是现代冰川学最感兴趣的研究课题之一。早在1773年, J. Walcher 就提出了冰川变化与天气状况紧密有关的假设<sup>[1]</sup>。迄今, 关于冰川变化与气候变化之间复杂关系的研究主要有三个途径:

(1) 澄清冰川与气候的直接关系, 为解释冰川动态提供气候模式, 这方面已有许多早期的研究者<sup>[2-8]</sup>。以长期气候资料为基础的大多数气候模式又可分成两种: (a) 认为夏季消融季节状况对物质平衡与冰川末端变化有最大影响的那些模式<sup>[9]</sup>。(b) 包括积累季节或年降水量影响的那些模式<sup>[10-14]</sup>。

(2) 定量地模拟冰川动态对气候(更确切地说对物质平衡变化)如何反应, 以及理论分析冰川末端对气候变化非常敏感的反应特性<sup>[15-26]</sup>。

(3) H. C. Hoinkes (1968)<sup>[27]</sup>据中尺度的冰川-天气关系解释 1891—1965 年间瑞士冰川变化与气象站夏季温度和降水均值离差的比较结果。

本文试图从讨论冰川物质平衡变化入手, 论述天山乌鲁木齐河源1号冰川的近期变化, 进而推测其未来的发展趋势。

## 二、物质平衡测量及其近期变化

冰川物质平衡是联系冰川进退与气候变化过程的一个重要环节。气候变化引起冰川上积累量和消融量的变化, 从而促使冰川流动发生一系列复杂的变动, 最终导致冰川末端位置的前进或后退。

我们在实际测量中应用平衡年为基础并与测量年(固定日期)相结合的办法<sup>[28]</sup>。乌鲁木齐河源1号冰川上每个测点的物质平衡用固定在冰内的花杆法进行。1980年冰川上布设花杆58根(积累区8根, 消融区50根)。1982年增加到76根, 平均每平方公里达41.3根, 测点密度远大于G. J. Young (1981)在加拿大Peyto冰川上的物质平衡测点数(2.84根/平方公里)<sup>[29]</sup>。

图1表示1979/1980—1980/1981年1号冰川各横断面的净积消量随高度的变化。从该图可见,同一年份东、西支的净积消量随高度变化曲线大致平行,但在相同的净消融量下,东支测点的海拔高度比西支约低50—100米。然而,不同年份的净平衡对高程的标

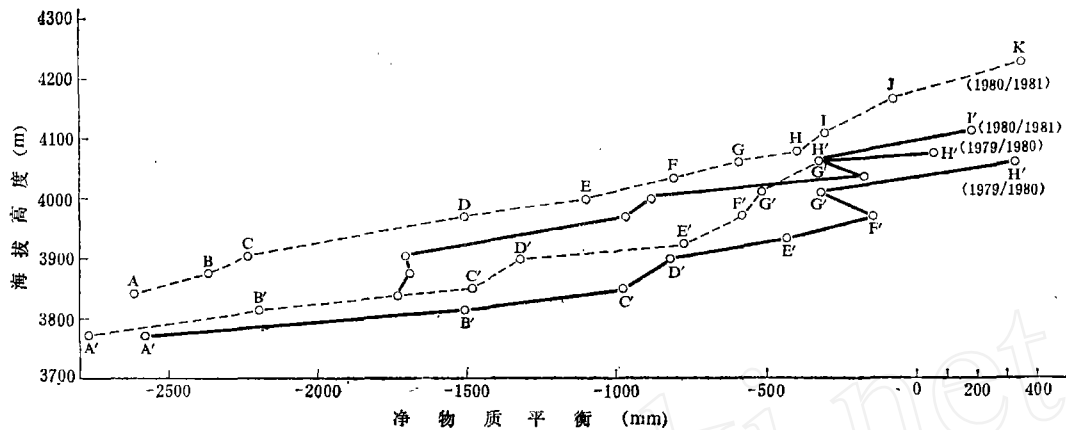


图1 1号冰川各横断面净积消量随高度的变化

Fig. 1. Variation of net accumulation and ablation at various transverse profiles of Glacier No. 1 in Tianshan Mountains with altitudes

绘图却有明显差异,净平衡值逐年变化很大。因此,虽然Meier, M.F. & W.V. Tangborn (1965) 根据南克斯克达冰川的七年观测资料,发现“净平衡随高程变化型式几乎没有随时间变化的规律”<sup>[30]</sup>,对于1号冰川说来可能并不完全适用,但是,这个规律在1号冰川的东、西支冰流之间似乎是存在的。

图2点绘了1959/1960—1981/1982年间1号冰川的年物质平衡变化、影响它的各种气象因子以及冰川积消区面积的逐年变化。乌鲁木齐河源区气候的季节变化,按月平均气温是否处于 $0^{\circ}\text{C}$ 可以划分为冬、夏两个季节。每年自10月至次年4月,月平均气温均在 $0^{\circ}\text{C}$ 以下,消融很微弱,河水断流。冬季降水量仅占年降水量的10.7%,基本上为纯积累期。5月和9月为冬、夏季节更替时期,气温的年际变化振幅很大,它们是决定夏半年消融期长短的关键月份。5—9月的降水量约占年降水量的90%,降水量最多的时期也是消融最强烈的时期。因此,夏季月降水量的多寡以及在此期间累计正积温的高低直接关系到冰川的物质平衡。但从图2可见,物质平衡与5—9月正积温的关系并不明显。固然,低温多降水年份为正平衡年份,高温少降水年份为负平衡年份。但是,降水量偏多气温偏高或降水量偏少气温偏低的年份,则难以确定物质平衡的正负及其量级。比较1961—1970年和1971—1980年的气温和降水量(表1)发现,七十年代的年均温( $5.3^{\circ}\text{C}$ )比六十年代升高了 $0.1^{\circ}\text{C}$ ,而同期的年平均降水量(426.6毫米)减少了7.2毫米,似变化均不大,但是最近二十多年来物质平衡的年际变化却差异很大。其原因是,从1号冰川面积分布图(图3)清晰可见,海拔3900—4200米间面积占冰川总面积的70%,而平

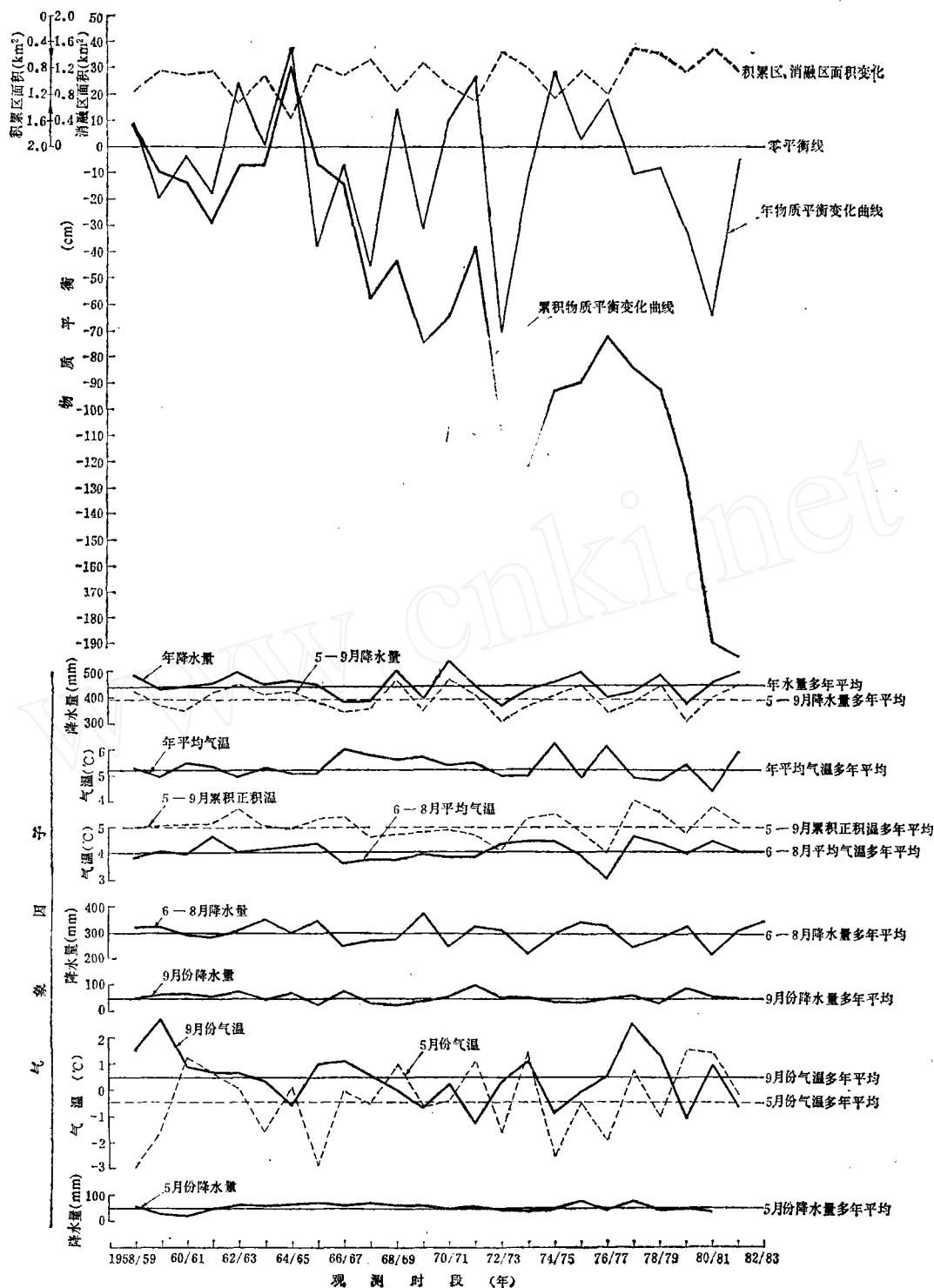


图 2 1959/1960—1981/1982年间 1 号冰川物质平衡和各种气象因子的变化

Fig. 2. Variations of mass balance on Glacier No. 1 and meteorological factors during 1959/1960—1981/1982

表 1 乌鲁木齐河源天山气象站(海拔3588米)月平均气温和降水量的变化

Table 1. Variations of monthly mean temperature and precipitation  
at Tianshan Meteorological Station(3588 m a.s.l.) in  
source area of Urumqi River

| 气温与降水         | 年 份       | 月 份   |       |       |      |      |      |        |      |      |      |       |       | 年平均   |
|---------------|-----------|-------|-------|-------|------|------|------|--------|------|------|------|-------|-------|-------|
|               |           | 1     | 2     | 3     | 4    | 5    | 6    | 7      | 8    | 9    | 10   | 11    | 12    |       |
| 气 温<br>(℃)    | 1961—1970 | -15.5 | 15.1  | -9.8  | -5.0 | -0.4 | 2.9  | 4.7    | 4.5  | 0.2  | -5.3 | -11.3 | -13.7 | -5.4  |
|               | 1971—1980 | -16.0 | -15.4 | -11.2 | -4.8 | -0.4 | 2.8  | 4.7    | 4.6  | 0.2  | -4.2 | -9.8  | -13.6 | -5.3  |
| 降 水 量<br>(mm) | 1961—1970 | 1.8   | 1.8   | 7.3   | 22.1 | 53.7 | 89.6 | 111.9  | 89.9 | 41.0 | 12.1 | 2.0   | 0.7   | 433.8 |
|               | 1971—1980 | 3.4   | 3.5   | 7.2   | 23.8 | 46.0 | 96.1 | 100.98 | 81.6 | 49.8 | 6.4  | 3.7   | 2.5   | 426.6 |

衡线亦在3971—4155米间摆动。所以,若6—8月平均气温或5—9月累积正温(两者变化趋势完全一致)略有升降(前者年际变幅最大达4.6℃,后者为194.8℃)就使积累区与消融区的面积比例发生巨大变化,从而形成年际物质平衡的巨大差异。

图4表示平衡线高度与净物质平衡之间的关系。平衡线高度(EL) =  $4038.1 - 0.16 M$  (净物质平衡), 均方差为-13219.48, 相关系数为-0.78。

### 三、最近二十多年来 冰川末端的退缩变化

我们应用传统的重复测量方法和对不同时间测绘的地形图进行比较,确定1号冰川的近期末端进退和冰面高程的升降变化。1962年10月、1973年8月和1980年8月,王文颖(1962、1973)、孙作哲(1962、1980)、陈建明(1962)、米德生(1962)和罗祥瑞(1973)等先后用平板仪(1962年)和地面立体摄影测量方法(1973、1980年)测绘了乌鲁木齐河源地形图,比例尺分别为1:10000和1:50000。三次测量的地形图有统一的控制基础,从而用同名空间坐标比较获得1962年10月至1980年8月间冰川末端变化(图5)和冰厚度

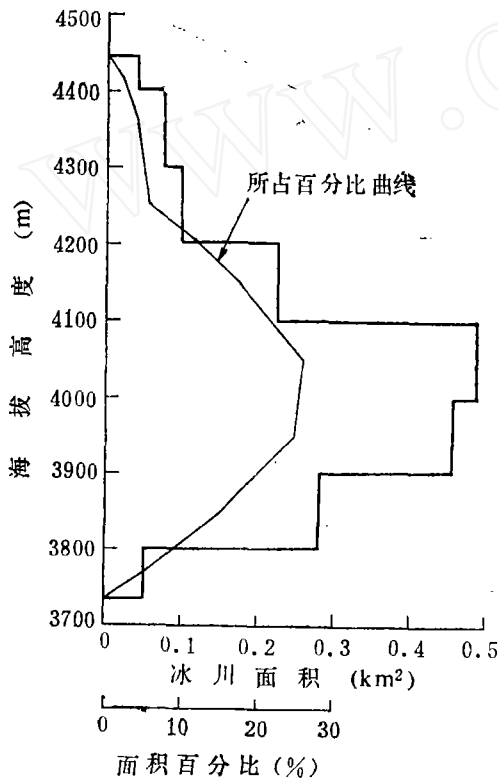


图3 1号冰川面积随高程的分布情况

Fig. 3. Distribution of the area of  
Glacier No. 1 with altitude

变化资料(图 6)。在此期间, 1 号冰川面积缩小了 0.11 平方公里(每年 0.006 平方公里), 主流线上冰川长度缩短了 80 米, 冰舌末端海拔高度上升了 10 米。从图 5 可见, 1962 年以来, 1 号冰川末端一直处于后退状态。但是, 后退速率不一, 1962 年 10 月—1973 年 8 月, 后退速率最大(5.96 米/年); 1973 年 8 月—1980 年 8 月, 后退速率明显变小(3.28 米/年); 1980 年 8 月—1981 年 8 月, 后退速率又增大到 4.83 米/年。总的说来, 对比同时期世界其他地区的冰川退缩情况<sup>[31]</sup>, 其后退速率是比较小的。从图 6 清晰可

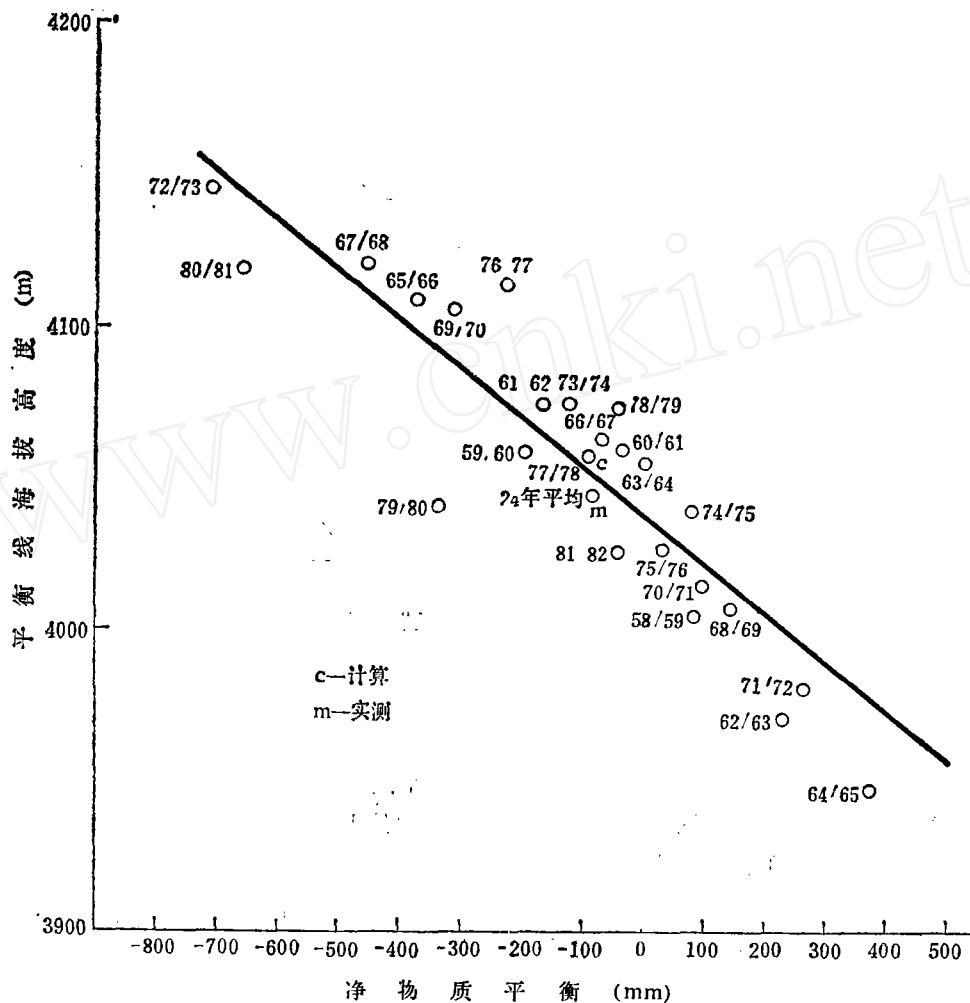


图 4 1 号冰川消融期末的平衡线高度与净年平衡值之间的关系

Fig. 4. Relationship between the altitude of equilibrium line and the net yearly mass balance of Glacier No. 1 at the end of ablation period

见,在1973—1980年期间,1号冰川东支粒雪盆的上、下部以及右侧,冰面有明显升高(5—10米),而其余地段都表现为冰面下降变薄的情况,特别是东支B、C剖面间,冰面高度降低了5—25米,从而造成冰面运动速度的明显下降。冰面高程升降反映运动波的向下传播,说明东、西支冰流的运动波传播状况有一定的差异。

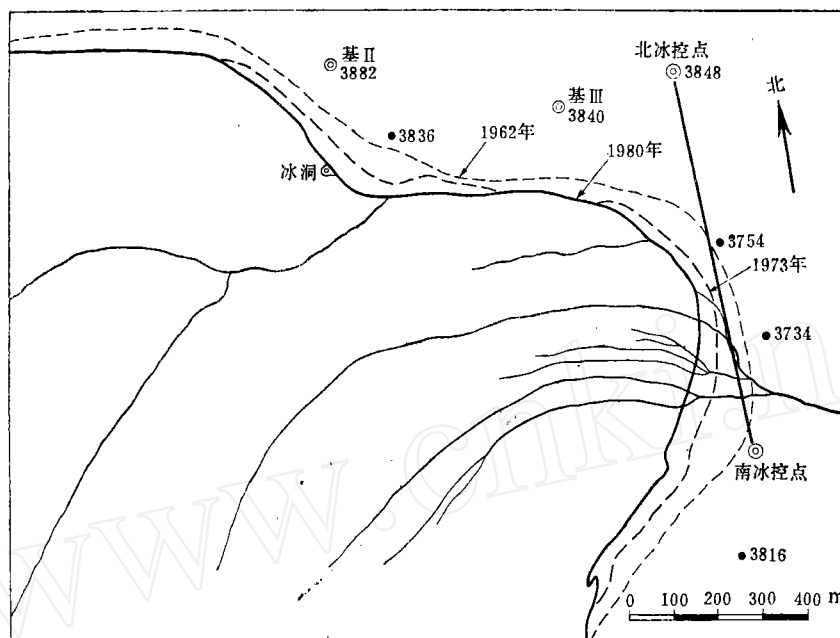


图5 1号冰川末端的近期退缩情况

Fig. 5. Recent retreat at the terminus of Glacier No. 1

图5的南冰控点和北冰控点为1962年9月6日在基岩上钻孔作的永久性标志。1980年6月28日—1983年5月27日间,对1号冰川末端七个测点进行定期测量,三个年度各测点的退缩量如图7所示。不同时间七个测点的平均退缩量分别为4.44米(1980年6月28日—1981年8月31日)、2.06米(1981年8月31日—1982年8月30日)和0.35米(1982年8月30日—1983年5月27日)。从该图可看到,在6—8月强烈消融期间,各测点迅速后退,在8月底至次年6月间,各测点表现轻微前进或略有后退。

#### 四、小冰期期间冰川的进退变化

1982年7—9月,康兴成在乌鲁木齐河流域所属林场,共采集雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)树木年轮标本六个。这些树木年轮包括的时间长度大致相当于“小冰期”(Little ice age)所包括的年代(1500—1920年),这为我们探讨小冰期期间的冰川进退变化提供了有利条件。乌鲁木齐河流域456年雪岭云杉所反映的冷暖与375

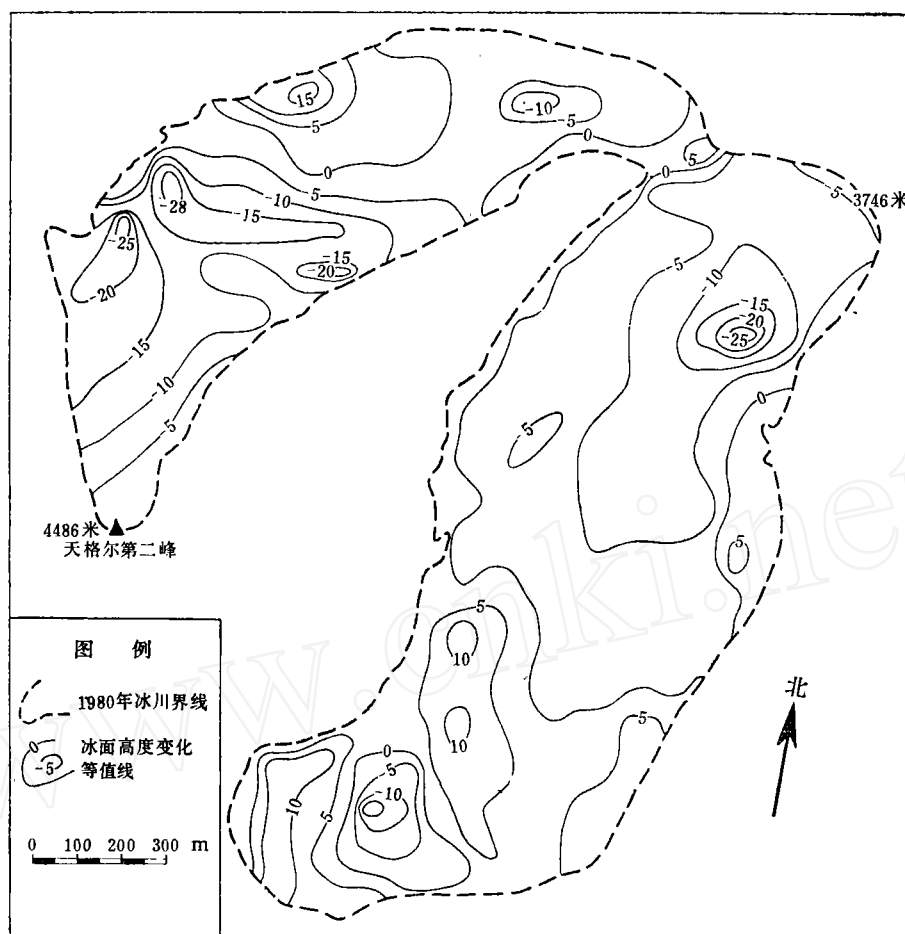


图 6 1973—1980 年 1 号冰川冰面高程的变化

Fig. 6. Variations of surface altitude of Glacier No. 1 in 1973—1980

年树轮所反映的干湿变化可获悉天山乌鲁木齐河流域 1535 年至今的气候状况。如果说，湿冷气候有利于冰川前进，干暖气候促使冰川退缩，冷干气候或暖湿气候使冰川进退速率变慢或稳定停滞的话，则乌鲁木齐河流域在小冰期期间冰川变化的一般动态如表 2 所示。

冰川进退反映气候变化存在着时间上的滞后现象。在物质输入变化与冰川达到新的平衡之间的时间间隔叫“反应时间”(response time)。反应时间的长短与冰川形态类型关系甚为密切。如前所述，1 号冰川的大部分面积分布于平衡线附近，因此，平衡线位置的微小变化将引起积累区面积比率(AAR)巨大的改变。而且流域内各冰川的规模均很小，长度短，因此，它对于气候变化引起物质输入变化的反应比较灵敏，它的反

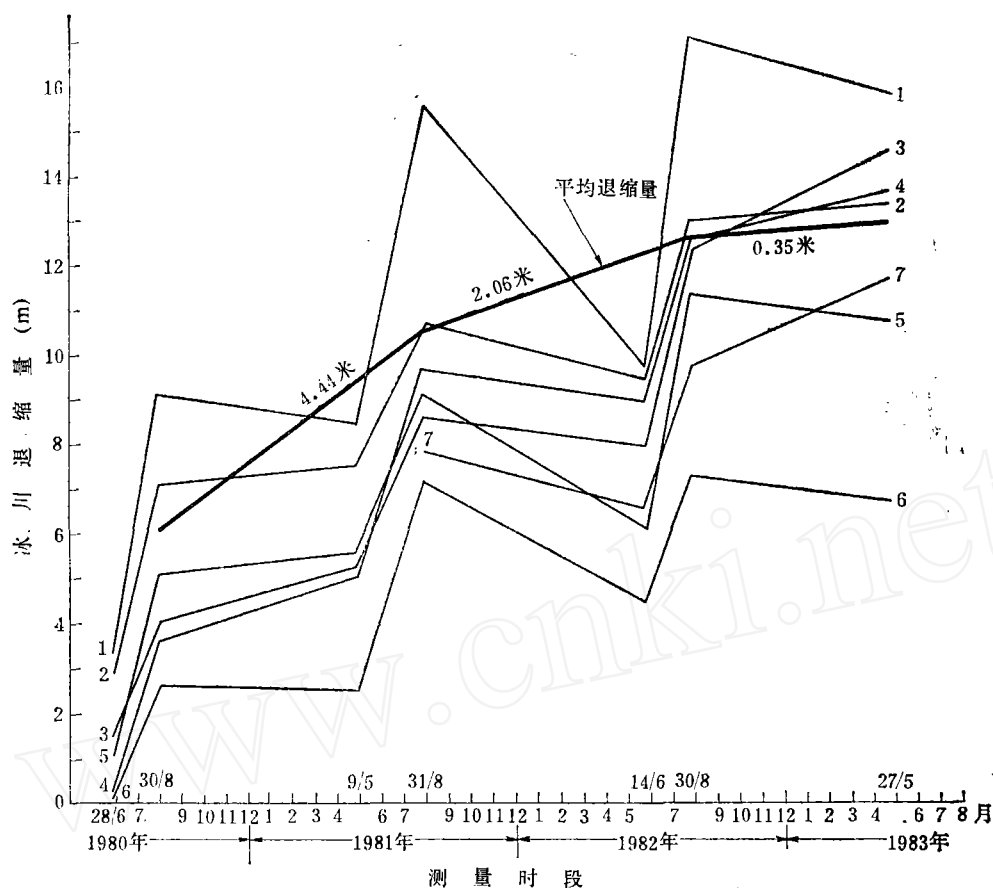


图7 1980年6月28日—1983年5月27日间1号冰川末端的进退变化  
Fig. 7. Variations of advance and retreat at the terminus of Glacier No. 1 from 28th June, 1980 to 27th May, 1983

应时间相对地说是比较短暂的。另外,由于增加消融量倾向于直接影响冰舌区;反过来,增加积累量一般影响冰舌要在一定的时间滞后之后。所以,对于1号冰川来说,高温引起的冰舌后退比降水量增加引起的冰舌前进出现的时间更迅速些。

**终碛的形成时间:**冰川前进过程中,冰舌末端象“推土机”一样推挤前端的河床砾石,在前缘形成推碛(push moraine);在末端相对稳定阶段,由于剪切和融化不断加积,从而形成高大的终碛垅;冰川末端迅速地后退,冰碛物比较均一地堆积在谷底,不能形成明显的冰碛垅岗。由此可见,终碛形成的时间应理解为冰川前进到最大位置后到开始退缩之间的时期内。鉴于上述认识,我们根据树木年轮反映小冰期期间冷暖、干湿的气候变化,推测1号冰川前端三道小冰期终碛形成的时期分别为1595—1650年、1765—1795年和1820—1900年。小冰期期间有四次明显的前进,即1535—1595年、1740—



表 2 乌鲁木齐河流域 1535 年至今的气候状况和冰川动态

Table 2. Climatic condition and glacial behaviour in the drainage area of Urumqi River since A.D.1535

| 年 代       | 气 候 状 况    | 冰 川 动 态            |
|-----------|------------|--------------------|
| 1950—1982 | 温暖少降水时期    | 冰川普遍退缩             |
| 1900—1950 | 低温多降水时期    | 冰川明显前进             |
| 1820—1900 | 低温少降水时期    | 冰川前进变慢或相对稳定        |
| 1795—1820 | 低温多降水时期    | 冰川前进               |
| 1765—1795 | 低温少降水时期    | 冰川前进变慢或相对稳定        |
| 1740—1765 | 低温多降水时期    | 冰川前进               |
| 1710—1740 | 温暖多降水时期    | 前期冰川退缩变慢, 后期转为相对稳定 |
| 1650—1710 | 温暖少降水时期    | 冰川退缩               |
| 1595—1650 | 冷暖交替变化急剧时期 | 冰川进退频繁, 末端位置相对稳定   |
| 1535—1595 | 很冷湿润气候     | 冰川前进               |

1765年、1795—1820年以及1900—1950年。最后一次前进由于五十年代以来迅速的增温和降水减少, 冰川后退较快, 故在冰川前没有形成比较明显而高大的终碛。根据Denton, H. & W. Karlen (1973) [32]研究, 小冰期期间, 小的冰川前进出现于公元1500—1640年、1710年、1780年、1850年、1890年和1916年, 前进的时间和次数与我们的研究结果并不严格地对应, 这可能是区域性差异所致。

## 五、冰川变化趋势预测

### 1. 从物质平衡的变化趋势预测

从冰川物质平衡角度出发, 冰川末端可以说是冰川的另一条零平衡线。冰川末端的进退位置变化, 取决于冰川运动向下移运的冰量与当年消融量引起冰川后退之间的对比关系。若前者大于后者则冰川前进, 反之则退缩。因此, 在讨论冰川未来发展趋势时, 不仅要考虑每年平衡值的正负、大小, 更应考虑多年累计的物质平衡值。从图 2 可见, 负的累计平衡值高达1954毫米。除非要连续五年出现二十多年来最大正平衡(+374毫米), 才能扭亏为盈, 改变这个巨大的物质亏损。据C.J.E.Schuermans (1980) 研究[33], 小冰期期间的气候特点是冷而干, 平均冬季气温比现在低1℃以上, 夏季温度约低0.5℃, 而年降水量偏少, 特别是冬季降水仅为本世纪平均冬季降水的90%。因此, 上述情况不大可能出现。所以, 我们推测1号冰川目前的退缩趋势还将持续相当长的时间, 至少到本世纪九十年代不会出现明显的前进。

## 2. 从树木年轮反映的冷暖、干湿气候变化周期性推测

康兴成对树木年轮的周期分析计算获得,反映乌鲁木齐河流域气温冷暖变化 456 年序列的方差分析有 55 年、62 年的主要周期。在谱密度分析中存在 2—3 年的短周期以及 50—100 年、150 年和 302 年的长周期;349 年序列干湿变化的方差分析有 45 年、67 年、106 年和 163 年四个周期。在谱密度分析中存在 2—3 年的短周期,以及 11—18 年、46 年和 115 年的中、长周期。目前正是小冰期以来第二个温暖少降水时期,其周期约为 62—67 年。1950 年至今已经历 34 年。若这次暖干期重现 1650—1710 年的情况,则目前的暖干气候可能还将持续 30 年左右。由此推测 1 号冰川还将持续退缩数十年。上述两种方法和王文梯等 (1984) 按 J. F. Nye (1963) 扰动方程的频率解推测<sup>[34]</sup>的结果基本一致。

## 参 考 文 献

- [1] Walcher, J. (1773), Nachrichten Von den Eisbergen in Tyrol. Wien, Joseph Kurzböck.
- [2] Wagner, A. (1929), Untersuchung der Schwankungen der allgemeinen. Zirkulation. Geografiska Annaler, Arg. 11, Ht. 1, PP.33—88.
- [3] Wagner, A. (1940), Klimaänderungen und Klimaschwankungen. Braunschweig, Fridrich Vieweg und Sohn.
- [4] Matthes, F. E. (1942), Glaciers. In Meinzer, O. E., ed. Hydrology. New York, McGraw-Hill Book Co., PP.149—219. (Physics of the Earth, 97).
- [5] Billwiller, R. (1931), Temperature und Niederschlag im Schweizerischen Alpengebiete Während des letzten Gletschervorstosses. Annalen der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt Bd. 67, Anhang No.6.
- [6] Wallen, C.C. (1949), The shrinkage of the Kärse Glacier and its probable meteorological causes. Geografiska Annaler, Arg.31, Ht. 1—4, PP.275—291.
- [7] Ahlmann, H. W. (1953), Glacier variations and climatic fluctuations. New York, American Geographical Society. (Bowman Memorial Lectures, Ser.3).
- [8] Meier, M.F. (1965), Glaciers and climate. In H. E. Wright and D. G. Frey (eds.) The Quaternary of the United States. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, U. S. A..
- [9] Posamentier, H. W. (1977), A new climatic model for glacier behavior of the Austrian Alps. Journal of Glaciology, Vol.18, No.78, PP.57—65.
- [10] Martin, S. (1974), Correlation bilans de masse annuels-facteurs meteorologiques dans les Grandes Rousses. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, Vol.10, PP.89—100.
- [11] Krenke, A. N. and Popova, B. S. (1974), Reconstructions of changes in mass balances of Kazbek glaciers using meteorological data. (in Russian). Materraly Gliatsiologicheskikh Issledovani, Vol.24, PP.264—273.
- [12] Tangborn, W. A. (1968), Mass balances of some North Cascade glaciers as determined by hydrologic parameters. IASH, Publ. 97, PP.267—274.
- [13] Tangborn, W. A. (1980), Two models for estimating climate-glacier relationships in the North Cascades, Washington, U. S. A. Journal of Glaciology, Vol.25, No.91, PP.3—21.
- [14] Burbank, D. W. (1982), Correlations of climate, mass balances, and glacial fluctuations at Mount Rainier, Washington, U. S. A. since 1850. Arctic and Alpine Research, Vol.14, No.2, PP.137—148.
- [15] Weertman, J. (1958), Traveling waves on glaciers. IASH, Publ. 47, PP.162—168.

- [16] Nye, J. F. (1958), Surges on glaciers. *Nature* (London), Vol.181, PP.1450—1451.
- [17] Nye, J. F. (1960), The response of glaciers and ice sheets to seasonal and climatic changes. *Proceedings of the Royal Society of London Series A*, Vol.256, No.1287, PP.559—584.
- [18] Nye, J.F. (1963), The response of a glacier to changes in the rate of nourishment and wastage. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol.275, No.1360, PP.87—112.
- [19] Nye, J. F. (1963), On the theory of advance and retreat of glaciers. *Geophysical Journal*, Vol.7, PP.431—456.
- [20] Campbell, W. J. and L. A. Rasmussen (1969), Three dimensional surges and recoveries in a numerical glacier model. *Canadian Journal of Earth Sciences*, Vol.6, PP.979—986.
- [21] Rasmussen, L. A. and W. J. Campbell (1973), Comparison of three contemporary flow laws in a three dimensional time-dependent glacier model. *Journal of Glaciology*, Vol.12, No.60, PP.361—373.
- [22] Budd, W. F. (1975), A first simple model for periodically self surging glaciers. *Journal of Glaciology*, Vol.14, No.70, PP.3—22.
- [23] Mahaffey, M. (1976), Three-dimensional numerical model of ice sheets: tests on the Barnes ice cap, Northwest Territories. *Journal of Geophysical Research*, Vol.81, No.6, PP.1059—1066.
- [24] Bindshadler, R.A. (1978), A time-dependent model of temperate glacier flow and its application to predict changes in the surge type Variegated Glacier during its quiescent phase. Ph. D. thesis. University of Washington.
- [25] 施雅风、王文颖、张祥松 (1980), 巴托拉冰川本世纪内前进的预测和下世纪内变化的趋势, 喀喇昆仑山巴托拉冰川考察与研究, 191—207页, 科学出版社。
- [26] 施雅风、丁德文、傅连弟 (1982), 巴托拉冰川末端动态数值预报, 冰川冻土, 4 卷 1 期, 35—44页。
- [27] Hoinkes, H. C. (1968), Glacier variation and weather. *Journal of Glaciology*, Vol.7, No.49, PP.3—19.
- [28] Mayo, L. R., M. F. Meier and W. V. Tangborn (1972), A system to combine stratigraphic and annual mass-balance systems: a contribution to the International Hydrological Decade. *Journal of Glaciology*, Vol.11, No.61, PP.3—14.
- [29] Young, G. J. (1981), The mass balance of Peyto Glacier, Alberta, Canada, 1965—1978. *Arctic and Alpine Research*, Vol.13, No.3, PP.307—318.
- [30] Meier, M. F. and W.V. Tangborn (1965), Net budget and flow of South Cascade Glacier, Washington. *Journal of Glaciology*, Vol.5, No.41, PP.547—566.
- [31] Permanent Service on the Fluctuations of Glaciers of the IUGG- FAGES/ICSU eds. (1967, 1973, 1977), Fluctuations of the glaciers, I. 1959—1965; II. 1965—1970; III. 1970—1975, IAHS(ICSU)-UNESCO.
- [32] Denton, H. and W. Karlen (1973), Holocene climatic variations---their pattern and possible cause. *Quaternary Research*, Vol.3, No.2, PP.155—205.
- [33] Schuurmans, C.J.E. (1980), Climate of the last 1000 years. In A. Berger ed. *Climate variations and variability: facts and theories*. PP.245—258. D. Reidel Publishing Company.
- [34] 王文梯、刘宗香 (1984), 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川频率响应特性的计算与分析, 冰川冻土, 6 卷 4 期。

( 本文于1984年6月15日收到修改稿 )

## Some Relationships of the Fluctuation of Glacier No.1 with Climatic Change at the Source of Urumqi River, Tianshan

Zhang Xiangsong, Sun Zuozhe, Zhang Jinhua and Kang Xingcheng  
(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Academia Sinica)

### Abstract

Three ways of research on the complicated relationship between glacial fluctuation and climatic changes are applied at present: (1) Explaining the direct relationship between glacial fluctuation and climatic changes so as to provide a climatic model for the explanation of glacial behaviour; (2) Quantitatively modelling the response of glacial behaviour on change of mass balance and theoretical analysis of very sensitive respondent properties of glacial terminus on climatic changes; (3) Explaining the variation of Switzerland glaciers in 1891—1965 with the relationship between glacier and weather.

The areal distribution of Glacier No.1 has large influence on the annual change of mass balance, because the range of annual variation of the altitude of the equilibrium line locates just within the maximum area of the distributive region of the glacier. The empirical relationship between the altitude ( $EL$ ) of equilibrium line and the net mass balance ( $M$ ) has been found as:  $EL = 4038.1 - 0.16 M$ . Correlation coefficient is  $-0.78$ .

Comparative results of topographic maps of different periods indicate that Glacier No.1 has continuously retreated since 1962. But the retreating rate is obviously different: 5.96 m/yr. during Sep. 1962—Aug. 1977; 3.28 m/yr. during Aug. 1973—Aug. 1980 and 4.83 m/yr. during Aug. 1980—Aug. 1981.

Inference of climatic changes and glacial behaviour in drainage area of Urumqi River from tree ring data during the Little Ice Age is shown in Table 2. From these three methods we come to the conclusion that the state of degradation of Glacier No.1 at present will still continue for a considerable time, at least before 1990.