

冰川及其径流对气候变化响应过程的模拟模型^{*}

——以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例

叶佰生 陈克恭 施雅风

(中国科学院兰州冰川冻土研究所, 兰州 730000)

提 要 用冰川动力模型对乌鲁木齐河源 1 号冰川东支进行模拟计算结果表明:1 号冰川东支在维持目前的气候变化水平下还将继续退缩到约 1 600 m 长度;若气温升高 1℃,1 号冰川将退缩为约只有 300 m 长的悬冰川。随着冰川退缩,冰川冷却作用减弱,冰川区的升温将高于非冰川区。1 号冰川目前的冰川径流是处在一个高值期(相对于它的稳定状态),若气候继续变暖,冰川径流还将继续增大,达到一峰值后将迅速减小。

关键词 冰川 径流 气候变化 乌鲁木齐河

山地冰川是一定气候和地形共同作用的产物。气候的变化必将引起冰川的变化,这种变化是通过冰川内部自身的运动规律来调节自己的面积和长度以适应新的气候条件。从理论上讲,某一气候条件下,冰川对应着一种稳定状态,但是由于冰川自身运动规律的限制,一方面它对气候变化有一个逐步适应的过程,另一方面由于实际的气候也在不断变化,因而冰川很难达到一种理论上的稳定状态。本文应用冰川动力学模型模拟乌鲁木齐河源 1 号冰川东支达到稳定状态的过程,以及不同气候变化条件下,冰川的响应过程。

1 冰川动力模型

冰川由于自重而总是处在运动过程中,同时与大气进行着能量和物质的交换。冰川纵向水平运动速度远大于垂直和测向运动速度。如取冰川主流线为 x 轴,则得到冰体的一维连续性方程:

$$\frac{\partial S}{\partial t} = - \frac{\partial Q}{\partial x} + BW \quad (1)$$

其中 t —时间; S —垂直于流线方向的冰川横断面面积; Q —通过冰川横断面的冰通量; B —单位时间内的物质平衡值; W —冰川表面宽度。

式中 Q 的大小实际上包含着冰川动力学因素。气候对冰川的影响主要是通过物质平衡 B 来实现的,当然,气候亦可通过改变冰川温度从而会影响冰川的运动速度,但这一影响由于长期气温波动的量级较小,其影响程度可以忽略。

冰通量 Q 可表示为:

* 本文属国家自然科学基金资助项目,是在施雅风先生指导下完成,特此致谢。

$$Q = \bar{U} \cdot S \quad (2)$$

其中 \bar{U} —冰川断面平均流速。

根据冰川动力学的研究,冰川的运动主要是由冰川自重所致的内部变形和冰川沿底部滑动组成,即冰川沿主流线的运动速度 U ,为冰川内部变形引起的速度 U_d 和冰川沿底部滑动引起的速度 U_s 之和,即

$$U = U_d + U_s = A_1 H^3_b + A_2 \frac{3}{b} (N - P_{\text{压}}) \quad (3)$$

其中 A_1, A_2 —冰川流动参数; H —冰川厚度; b —底部剪切应力; N —冰川底部处的附加冰体压力; $P_{\text{压}}$ —底部水压。

底部剪切应力 b 为
$$b = -gH \sin \alpha \quad (4)$$

其中 α —冰面坡度。当 α 较小时, $\sin \alpha = \frac{dz}{dx}$

其中 z —冰面高程。

冰川内部运动速度变化非常复杂,对于不同的冰川,其滑动所引起的运动速度和变形引起的运动速度所占比例各不相同,部分冰川可能还有底部碎屑层的蠕动。根据乌鲁木齐河源 1 号冰川冰洞的观测研究^[1],目前 1 号冰川能辨认出 4 种运动机理,即冰川冰的变形、冰床变形、剪切现象和底部滑动,其中以冰川冰的变形为主。但是对于冰川演变研究而言,则无需详细研究冰川内部的速度分布,只要找到冰川断面的平均速度即可。为简化问题可不考虑冰川底部滑动,这一简化对规模较小、冰舌末端处在多年冻土区的大陆性冰川是合理的,即式(3)简化为:

$$U = A_1 H^3_b \quad (5)$$

公式(4)是无限宽冰川条件下的 b ,对于山谷冰川则加入断面形态因子 f ^[2]对式(5)进行修正,即:

$$U = -A_1 f H^4 (g)^3 \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^3 \quad (6)$$

流动参数 A_1 主要与冰温、晶体大小和取向、杂质含量等因素有关。由于在试验中测定的 A_1 变化很大,这里只能通过模拟计算进行参数率定。为方便计算将式(6)代入(2)式:

$$Q = \bar{U} \cdot S = -f f_u A_1 H^4 (g)^3 \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^3 \cdot HW \quad (7)$$

其中 f_u —为断面面积和平均流速综合折算系数。

为计算方便,令 $F = f_u \cdot A_1$,它代表冰川流动特性、断面面积和平均流速折算的一个综合参数。

2 模型基本参数的确定

为了模拟计算冰川的变化,需要确定冰川形态参数(H, W, z 等)、冰川物质平衡 B 和主要代表冰川流动特性的综合参数 F 。

2.1 冰川形态参数

根据乌鲁木齐河源 1 号冰川 1962 年测绘的冰川地形图和 1986 年出版的具有冰厚度等

横断面的冰川地形图,可直接获取冰面和冰川沿主流线的高度以及冰面宽度资料。由于冰川横断面很不规则,为简化计算,断面假设为抛物线型。

2.2 冰川物质平衡 B

由于冰和雪反射率的差异,使得相同气象条件下的融冰和融雪量各不相同。为此假设冰、雪消融强度分别为 M_i 和 M_s ,则以月为时段的冰川物质平衡 B 可按下式计算:

$$B(z) = P_s(z) - F_t M_s - (1 - F_t) M_i \quad (8)$$

其中: P_s —降雪量; F_t —月融雪时间比例($F_t < 1$)。当 $F_t < 1$ 时即先融雪后融冰。月融雪时间比例可依据积雪量 P_{as} (假设从上一物质平衡年初计)计算:

$$F_t = P_{as} / M_s \quad (9)$$

$$\text{假设: } M_i = K M_s \quad (10)$$

K —比例常数,根据 1 号冰川冰面径流场的观测资料^[3], K 约为 1.56。

消融强度 M_s 根据乌鲁木齐河源 1 号冰川 1979~1990 年天山站年报公布的逐月各高度带(8 个高度)物质平衡值统计得出如下关系^[4]:

$$M_s = a(T - b)^c \quad (11)$$

各月 a 、 b 、 c 值见表 1。对于 b 值的选取主要依据统计关系中相关系数的大小(在样本数相同的条件下)。

冰川径流 R_g 为:

$$R_g = \sum_{i=1}^n (F_t M_{sj} + (1 - F_t) M_{ij} + P_{rj} - E_j) \cdot F_{gj} \quad (12)$$

其中: j —冰川沿高度的分带; F_j —对应的冰川面积; P_r —降雨量,冰面上的降雨直接形成径流; E —蒸发量。

由于冰川径流的变化主要依赖于冰川面积和气候条件的变化,蒸发量变化引起的冰川径流的变化相对要小,因而在冰川径流的估算中常忽略蒸发的影响^[5]。本文蒸发量的估算主要考虑以月气温和降水量为输入资料,并能在负温下使用,最后选择由高桥浩一郎公式计算^[6]。

表 1 冰的消融强度函数参数统计值

Table 1 The coefficient of ablation function for ice surface

月	a	b	c	相关系数	统计样本数
5	11.19	-8.5	1.267	0.50	58
6	0.798	-7.5	3.05	0.751	63
7	0.502	-7.0	3.349	0.856	63
8	7.94	-8.0	1.945	0.563	64

3 冰川动力模型参数率定和检验

冰川动力模型的参数主要是 F 值,大小主要代表着冰川冰的变形快慢,不同 F 值将使冰川纵剖面变化很大(图 1)。因此按冰川长度变化和纵剖面率定冰川动力模型参数。

F 值的选取原则是在现代气候条件下使冰川纵剖面与实际的相一致。图 2 为不同 F

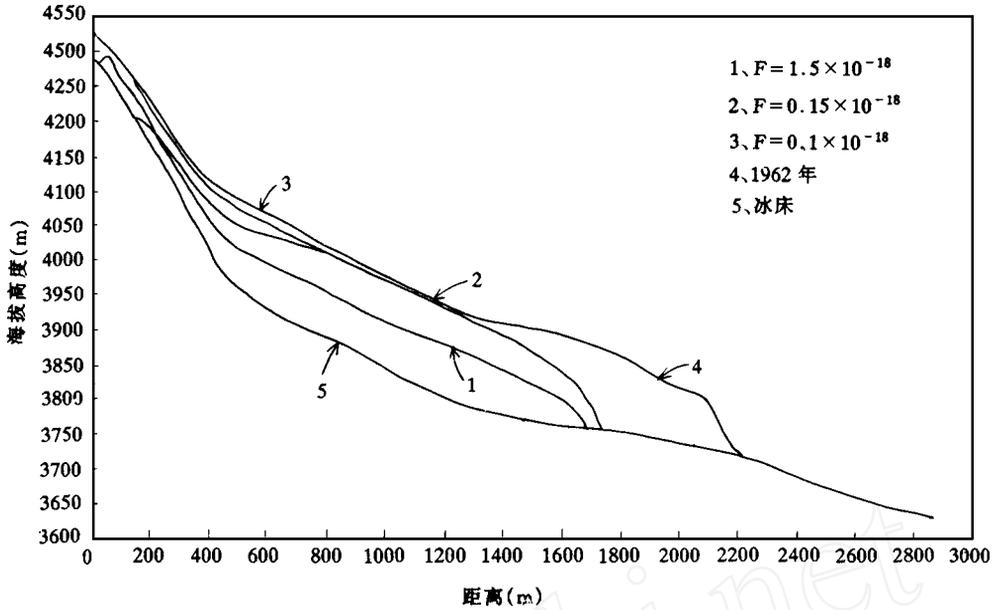


图 1 不同 F 值所对应的冰川稳定纵剖面

Fig. 1 The glacier longitudinal profiles in steady state with respect to different F values

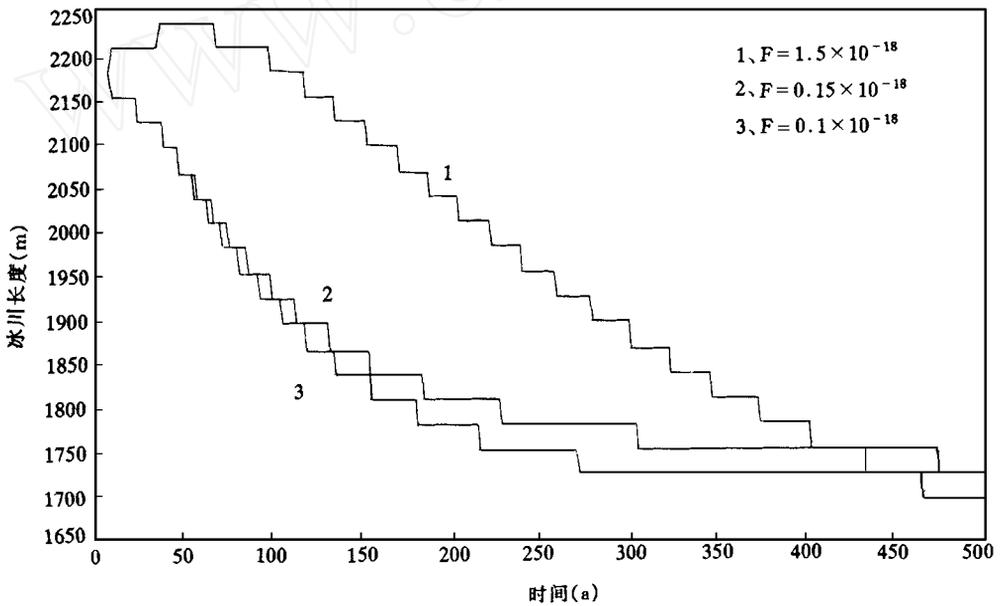


图 2 冰川长度变化对 F 值敏感性

Fig. 2 The sensitivity of glacier length change to F values

值时冰川长度的变化。从图 2 可以看出,当 $F = 1.5 \times 10^{-18} \text{m}^6 \text{N}^{-3} \text{月}^{-1}$ 时,此值接近于海洋性冰川 (瑞士的 Grindelwald 冰川),1 号冰川东支在现代气候条件下,要首先进,之后再

陈克恭,1994,冰川长度变化与气候变化(待发表)。

后退;当 $F = 0.10 \times 10^{-18} \text{m}^6 \text{N}^{-3} \text{月}^{-1}$ 时,冰川达到稳定时,冰川达到的最大厚度比目前冰川的实际厚度还要厚,这是不合理的。根据乌鲁木齐河源 1 号冰川 1980~1985 年间实测的表面运动速度、冰面坡度及冰川厚度^[7],由(6)式反算 A_1 值(表 2)。从表 2 可以看出,冰的流动参数沿高度变化不大,综合考虑冰川断面面积和平均流速综合折算系数 f_u 以及纵剖面厚度和冰川长度的变化,选取 $F = 0.15 \times 10^{-18} \text{m}^6 \text{N}^{-3} \text{月}^{-1}$ 。

表 2 推算的 1 号冰川东支冰的流动参数 A_1

Table 2 Estimated flow parameters of glacier in the eastern branch of the Glacier No. 1

点号	高度 (m)	坡度	速度 (m/a)	厚度 (m)	宽度 (m)	形态因子 f	$F(\times 10^{-18}) \text{m}^6 \text{N}^{-3} \text{月}^{-1}$
G ₄	4004	0.182	4.4	123	600	0.666	0.568
F ₄	3970	0.192	5.0	122	615	0.696	0.556
E ₃	3993	0.172	5.1	130	765	0.752	0.583
C ₃	3847	0.278	5.5	91	575	0.764	0.593

以冰川变化模型对冰川变化过程的模拟结果与冰川实际变化的对比,对模型进行检验。应用以上的冰川物质平衡计算和所选动力模型参数,根据 1958~1988 年的气象资料对 1 号冰川的长度变化过程进行了模拟计算,并与同期冰川实际变化过程对比(图 3),计算得出的冰川退缩速度基本上与实际相符,表明这一模型基本上能够模拟冰川对气候的响应过程。

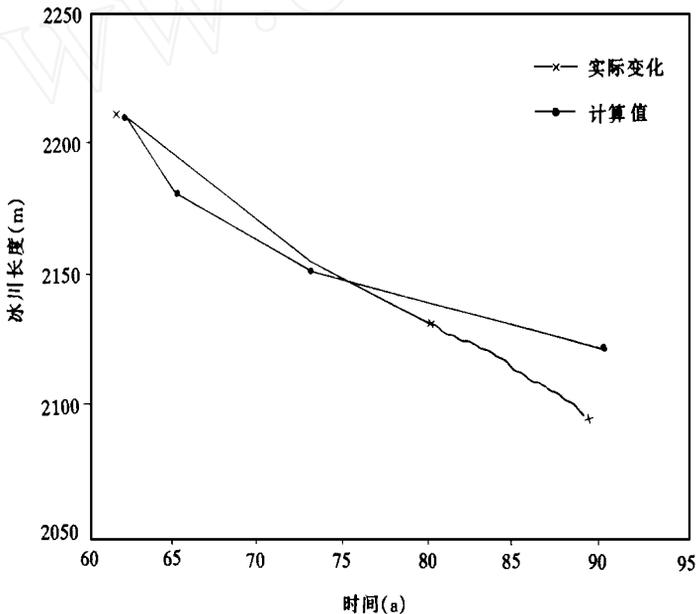


图 3 冰川长度变化

Fig. 3 The change of glacier length with time

4 冰川对不同气候变化的响应过程

利用上述冰川动力模型,依据不同的气候变化就可得到冰川长度、面积和冰川径流对气

候变化的响应过程。

根据最新研究报告(IPCC,1992),与1990年相比,到2050年全球气温将升高 1.2°C ,按此计算到2030年气温升高 0.8°C 左右,考虑到基础气温为1958~1988年均气温,假设到2030年气温升高 1°C 。为便于比较,在计算中设定三种气温变化方案:即气温不变、气温突然升高 1°C 和气温从1988年开始到2030年线性升高 1°C 。此外,为说明冰川冷却作用的大小,以基础气温不变,冰川的温度跃动值以1962年冰川长度估算,并且在以后的冰川变化过程中保持不变,作为一种方案,共4种气候方案。通过冰川动力模型的模拟计算,得到冰川长度、面积和冰川径流的变化如图4~6,图中的时间从1958年起算。

从计算结果可以看出,1号冰川东支,如果气温维持1958~1988年的水平,并且不考虑冰川冷却作用的变化,(图4中的3),冰川达到稳定状态的长度为1700m。这与曹梅盛计算的1号冰川达到稳定的长度 $1865\text{m}^{[8]}$ 有一定出入,究其原因主要是后者在计算中选取的物质平衡值为 -81mm ,即接近零平衡,而本文计算所得物质平衡为 -162mm ,实测为 -136mm 。

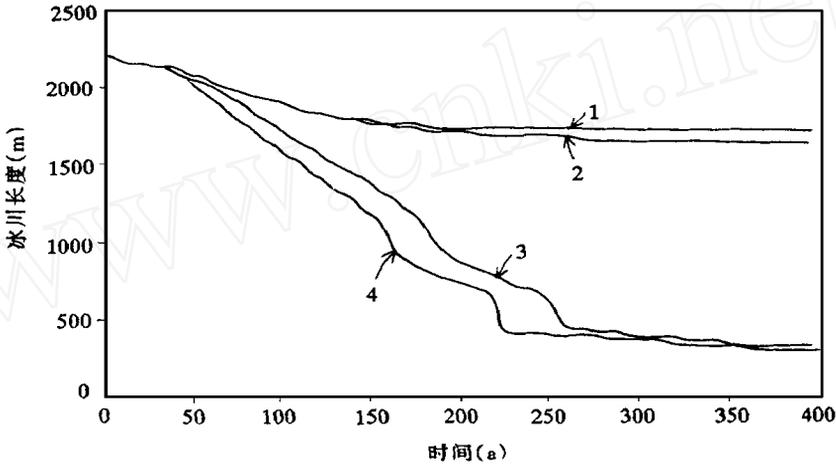


图4 不同气候条件下冰川长度的变化(冰川冷却作用变化之比较)

- 1 气温不变,不考虑冰川冷却作用变化; 2 气温不变,考虑冰川冷却作用变化;
3 气温升高 1.0°C ,不考虑冰川冷却作用变化; 4 气温升高 1.0°C ,考虑冰川冷却作用变化。

Fig. 4 The change of glacier length under different climate conditions
(the comparison under the cooling and non-cooling of glacier)

从冰川纵剖面的计算结果看,在气温不变条件下冰川减薄主要在冰川下部,冰川上部厚度有某些增加,其原因可能是在上部冰川表面的风吹雪等比较严重,而在计算中没有考虑这一类因素。

冰川径流的变化是气候条件和冰川面积变化共同作用的结果。图6可看出,目前1号冰川的冰川径流处在一个大于平衡态径流的高值期,从这一点看,目前天山山区的冰川径流已远大于其平衡态的补给量,随今后气温的继续升高,冰川径流还会继续增大,并在达到最大值时能维持很短的一段时间,但随着冰川的迅速退缩,冰川径流会迅速减少。

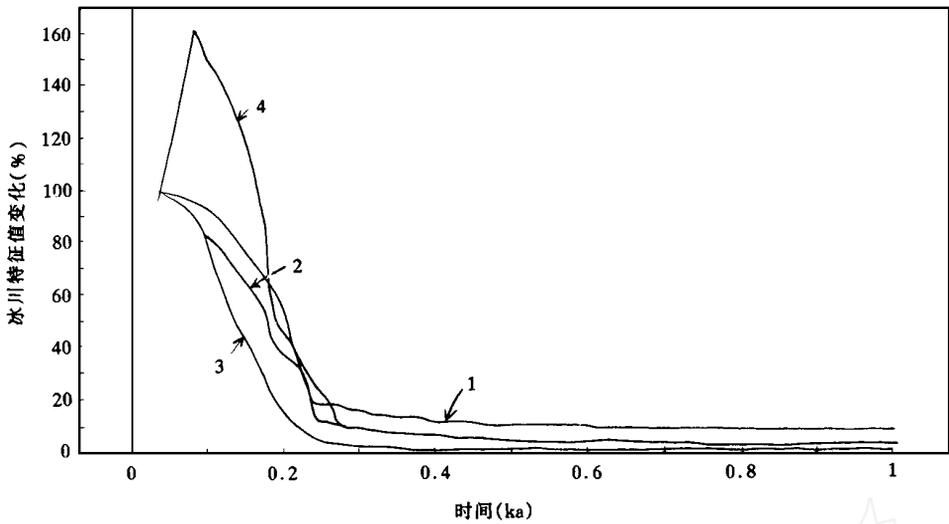


图 5 气温升高 1 冰川长度、面积、体积和径流的变化

1—长度(length) 2—面积(area) 3—体积(volume) 4—径流(runoff)

Fig. 5 The change of glacier length, area, volume and runoff with 1.0 rise of air temperature

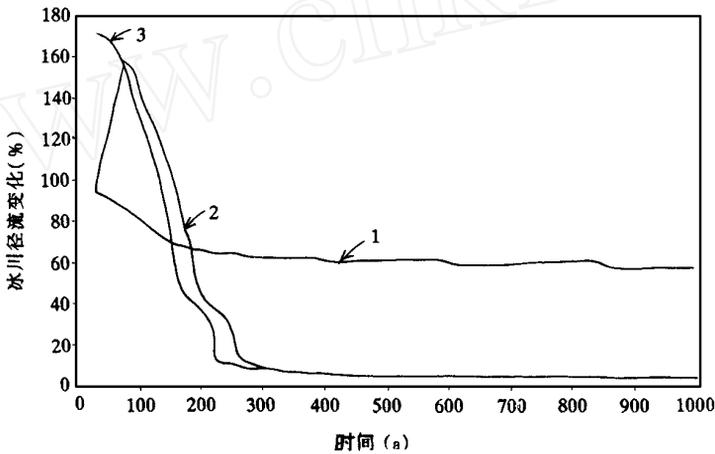


图 6 不同气候条件下冰川径流的变化(与 30 年平均比较)

1—气温不变 2—气温在 40 年内线性升高 1.0 3—气温突然升高 1.0

Fig. 6 The glacier runoff changes under the different climatic conditions

维持目前的气候水平,1 号冰川要达到稳定约需 800 年时间(理论上为一衰减过程,稳定时间为无穷大),但冰川达到基本稳定的时间则需 200~250 年左右,其相应的长度约 1 700 m,最终稳定长度为 1 600 m 左右。若气温升高 1 (考虑到冰川冷却作用减弱,冰川区实际升温接近于 2),冰川达到稳定时的长度约为 300 m,也就是说 1 号冰川东支就变成一支悬冰川。

5 小结

本文主要用冰川动力模型结合冰川径流模型模拟 1 号冰川东支对气候变化的响应过

程,得出以下结论。

(1) 1号冰川东支如维持1958~1988年的气候水平,并且不考虑冰川冷动作用的变化,冰川稳定长度约为1700 m,若考虑冰川冷却作用的变化,则冰川稳定长度约为1600 m。

(2) 若未来气温升高1 (加之冰川冷却作用减小,冰川区实际升温约为2),1号冰川东支将退缩只有约300 m的悬冰川。

(3) 目前1号冰川的径流量处在一个相对稳定状态的高值期。

(4) 气温升高将引起冰川径流在升温初期增加,之后将迅速减少。

(5) 径流在升温初期的增加量及峰值出现时间取决于升温的速度。

参 考 文 献

- 1 Huang Maohuan. The movement mechanisms of the Urumqi Glacier No. 1, Tian shan Mts. China. *Annals of Glaciology*. 1992, (16):39-44.
- 2 佩特森. 冰川物理学. 张祥松等译. 北京:科学出版社,1987.
- 3 王文浚,莫承略,等. 冰川消融及其对乌鲁木齐河的补给作用. 见:天山乌鲁木齐冰川与水文研究. 北京:科学出版社,1965. 88~97.
- 4 叶佰生,陈克恭,等. 乌鲁木齐河源冰川的消融强度函数. *冰川冻土*,1996. (待刊).
- 5 1985.
- 6 赖祖铭. 用冰川区水量平衡模型估计气候变化对冰川水资源影响的初步研究. *水科学进展*,1990,1(1):58~64.
- 7 尤根祥. 乌鲁木齐河源1号和2号冰川图. 西安:西安地图出版社,1988.
- 8 曹梅盛,迈耶 M F. 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. *冰川冻土*. 1987, 9(2):131~137.

RESPONSES OF GLACIER AND GLACIAL RUNOFF TO CLIMATIC CHANGE

—A model in simulating the Glacier No. 1 in headwaters of the Urumqi River

Ye Baisheng Chen Kegong Shi Yafeng

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

ABSTRACT

This paper presents a model that simulates processes on responses of Glacier No. 1 in headwaters of the Urumqi River to various future climatic scenarios with a glacier dynamic model. The results indicate that the Glacier No. 1 in headwaters of the Urumqi River will continue to retreat if current climatic conditions prevail, until it reaches a steady state of 1600 m in length after 700 to 800 years. If the air temperature were to rise 1 °C, the glacier would degenerate and become a hanging glacier with a length of 300 m after 700 to 800 years. Due to glacier degeneration, cooling function of the glacier would decrease so that the increase of the air temperature in glaciated area would be higher than that in non-glaciated areas. The current glacier runoff is in higher value in comparison with the runoff in the equilibrium state under the current climatic conditions. If the air temperature would continue to rise, however, the runoff of the glacier would still increase and reach a new peak but after then decrease rapidly.

Key Words : Glacier ; Runoff ; Climatic change ; Urumqi River

(收稿日期:1995 - 10 - 26;改回日期:1995 - 11 - 25)