

从天山乌鲁木齐河源 1 号冰川变化估计 近百年来该地区夏季升温

王 宁 练 刘 时 银

(中国科学院兰州冰川冻土研究所, 730000)

摘 要 通过冰川波动历史来揭示气候变化是一种重要的方法。然而, 以往有关这一方面的研究大都是一些定性的结果。文章试图依据冰川变化来定量的研究气候变化, 并且通过近百年来天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的变化, 揭示出本世纪以来该河源地区夏季气温上升了约 $0.23 \sim 0.25$; 同时, 对于该冰川不同长度规模时的气候敏感性也进行了讨论。

关键词 天山 1 号冰川 末端变化 零平衡线 气候敏感性 气候变暖

1 前言

近百年来, 冰冻圈变化的各种证据以及气象仪器观测记录均表明全球的升温趋势。然而城市化过程对气象记录的影响程度, 目前人们还难以准确估计。因此, 从冰冻圈各要素自身的变化来定量地揭示气候变化的幅度, 这不仅会使人们对于全球偏远无资料地区的气候变化有更加充分的认识, 而且对于现代全球气候变化研究具有重大意义。

冰川是气候变化的敏感指示器。目前关于冰川变化的研究资料极为丰富, 但通过冰川变化来定量地揭示气候变化的研究较少, 仅有的一些定量研究, 其研究方法主要有: 1) 依据冰川末端变化来估计气候变化 (Oerlemans, 1994)。应用这种方法的关键在于冰川长度敏感性的确定, 因为它直接关系到该方法估计结果的可靠程度; 2) 依据冰川平衡线变化来估计气候变化。许多研究者应用这一方法时, 都是在确定了冰川平衡线变化之后, 以大气平均的气温递减率值 $0.65/100\text{ m}$ 为基础来讨论气温的变化 (Allison *et al.*, 1977; 陈吉阳, 1988), 这显然具有很大的不确定性, 因为不同的冰川其平衡线与气候要素之间具有不同的关系。鉴于以上原因, 本文首先通过天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 (以下简称天山 1 号冰川) 近百年来变化, 确定其平衡线的变化, 再依据该冰川平衡线波动与气候要素变化之间的关系, 揭示其所在地区的气候变化幅度。

2 资料及方法

冰川终碛垄是冰川前进稳定之后或冰川稳定时的产物, 它标志着终碛垄形成时期的

冰川规模。在距天山 1 号冰川末端约 280 m 处, 存在一道明显的终碛垄, 地衣测年资料表明, 这道终碛垄大约形成于 1910 年左右 (陈吉阳, 1988)。乌鲁木齐河源地区树木年轮资料 也表明, 该地区在本世纪初存在一个相对低温时段。由此可见, 这道终碛垄是天山 1 号冰川对于这一低温时段响应的表现。自本世纪初以来该冰川末端总的退缩了约 280 m (图 1)。天山 1 号冰川目前已基本分裂成为独立的东、西两支, 长度分别为 2.12 km 和 1.96 km; 面积分别为 1.163 km² 和 0.677 km²。1979/1980 ~ 1992/1993 年度的平均平衡线高度分别为海拔 3 994 m 和 4 084 m。

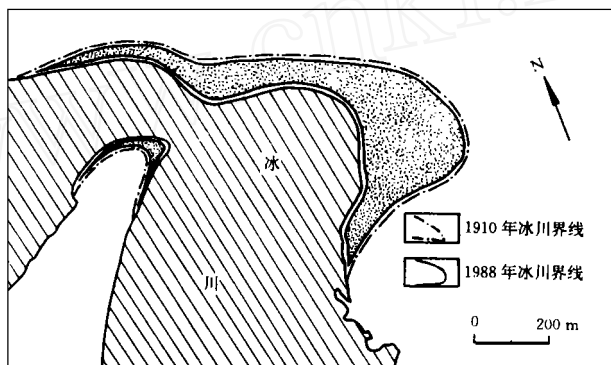


图 1 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川末端近百年来退缩幅度

Fig. 1 The retreat magnitude of the terminus of Glacier No. 1 at the source of Urumqi River in the recent 100 years

为了确定本世纪初天山 1 号冰川稳定时其长度规模所对应的零平均线高程, 应用 Wang Ninglian *et al.* (1996a) 提出的山地冰川长度规模对于气候变化的平衡态 (即稳定态) 响应模型:

$$L_0 = C \cdot e^{-7.5604} \cdot H_0^{0.7325} \cdot AAR_0^{0.6424} \cdot (b_c/b_a)_0^{0.0997} \cdot \alpha^{-1.2724} \quad (1)$$

式中: L_0 为冰川稳定态长度; C 为校正系数; H_0 为冰川稳定态时的冰川作用正差; AAR_0 为冰川稳定态时的积累区面积比率; $(b_c/b_a)_0$ 为冰川稳定态时积累区物质平衡梯度与消融区物质平衡梯度的比率; α 为冰川稳定态时的冰面平均坡度 (用冰川作用差与冰川长度的比值表示)。各参数的确定方法 Wang Ninglian *et al.* (1996b) 已有叙述。表 1 是根据天山 1 号冰川的多年观测资料得到的东、西两支冰川目前长度规模下的各参数值。由于参数 α 对于冰川稳定态长度规模的影响最大 (Wang Ninglian *et al.*, 1996a), 因此在冰川长度规模发生变化以后必须考虑该参数值变化的影响。天山 1 号冰川东、西支不同长度规模时的 α 值, 可由 1988 年测绘成的该冰川地形图来计算。自本世纪初以来, 天山 1 号冰川的变化量与其长度规模相比是很小的, 因此可以认为这一时期参数 $(b_c/b_a)_0$ 的值变化不大, 可取其目前值作计算。为了提高计算结果的可靠性, 在计算冰川平衡线的高程时对参数 AAR_0 进行了修正 (Wang Ninglian *et al.*, 1996b)。

表 1 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川东、西支冰川各参数值
Table 1 Various parameters of the East and West branches of the Glacier
No. 1 at the source of Urumqi River in the Tianshan Mts.

参 数	C	AAR_0	$(b_c/b_a)_0$	ELA_p^*
东 支	0.7823	68.5	0.1518	3 994
西 支	0.9515	64.1	0.1191	4 084

* ELA_p 是目前的平衡线高度。

3 夏季升温幅度的估算

尽管过去天山 1 号冰川东、西支合并为一条冰川，但是各支冰川对整个冰川末端变化的贡献大小是不同的，其贡献大小取决于各支冰川的气候敏感性。然而，冰川长度规模的气候敏感性不仅与冰面坡度大小有关，而且与冰川平衡线的气候敏感性有关。王宁练等（1996）应用灰色系统理论对于天山 1 号冰川平衡线与气候要素之间关系的研究结果表明：1) 夏季气温是 1 号冰川平衡线波动的主要气候因子；2) 夏季气温升降变化 1℃，其东、西支冰川平衡线分别升降 238 m 和 122 m；3) 年降水量增减 10%，东、西支冰川平衡线分别升降 29 m 和 10 m。东、西支冰川的气候敏感性试验结果表明，在气候变化幅度不大的情况下，东支冰川对于气候变化的敏感程度要比西支冰川大得多。可见在天山 1 号冰川长度规模变化不大的情况下，末端变化主要由东支冰川变化所决定。

若将东支冰川的各参数值代入式（1）计算，那么当东支冰川平衡线高程位于海拔 3 906 m 时，它就会达到本世纪初时的稳定态长度规模，即东支冰川平衡线自本世纪初以来上升了 88 m。然而，冰川平衡线的变化不仅与气温变化有关，而且与年降水量变化有关。乌鲁木齐河源地区森林下限树木年轮指数近几百年来 的变化表明（康兴成，1985），本世纪初的年轮指数平均值比多年平均年轮指数值高出 10% 左右，而目前的年轮指数值接近多年平均值。据此可以认为，本世纪初乌鲁木齐河源地区降水比现在多 10% 左右。这样以来，从东支冰川平衡线的总上升量中扣除降水量的影响，那么夏季气温变化所引起的平衡线上升量为 59 m，这相当于夏季气温自本世纪初以来上升了 0.25℃。由于这里的计算忽视了西支冰川对 1 号冰川末端变化的影响，因此夏季升温的这一估计值是这一地区本世纪夏季气温上升的最大可能值。

在气候变化一定的情况下，如果分别独立地计算天山 1 号冰川东、西支各自的末端变化量（指前进量），并将两者之和看作是 1 号冰川末端总的变化量，那么，当东支冰川平衡线位于海拔 3 910 m 和西支冰川平衡线位于海拔 4 046 m 时，1 号冰川末端就会达到本世纪初时的位置。这说明自本世纪初以来东、西支冰川平衡线分别上升了 84 m 和 38 m，若从中扣除降水量的影响，那么夏季气温变化引起的东、西支冰川平衡线上升量分别为 55 m 和 28 m。据此可估计出，天山 1 号冰川所在地区的夏季气温自本世纪初以来上升了约 0.23℃。由于在本世纪初时 1 号冰川的末端宽度大于西支冰川的平均宽度，而与东支冰川的平均宽度较为一致，因此上述计算方法夸大了西支冰川对于 1 号冰川末端变化的贡献，从而使这里对于乌鲁木齐河源地区近百年来夏季气温升温值的估

计, 成为该地区夏季升温幅度的最小可能估计值。

4 讨论

在 Oerlemans (1994) 的方法中, 主要应用了冰川长度变化的线性趋势量和长度敏感性。应用冰川末端变化线性趋势量的目的, 是要消除变化过程中一些小波动的影响。然而对于本世纪以来主要以退缩过程为主, 并且在六七十年代没有出现明显前进的冰川, 其总的退缩量与其末端变化的线性趋势量是比较接近的, 两者之间无论应用哪一个参数来估计气候的变化幅度, 都不会导致大的偏差。另外, 该方法中末端变化量的两次标定 (即坡度标定和物质平衡敏感性标定) 是为了增强不同冰川变化量之间的可比性。当这种方法应用于个别冰川时, 无须做这些标定。笔者认为, 无论是从个别冰川的长度变化, 还是从大量冰川的长度变化来估计气候变化, 其中存在的主要问题是冰川长度敏感性的确定和讨论时段起至时间冰川长度远离当时气候条件下冰川平衡态长度的程度。

根据笔者关于天山 1 号冰川气候敏感性的研究结果, 图 2 绘出了乌鲁木齐

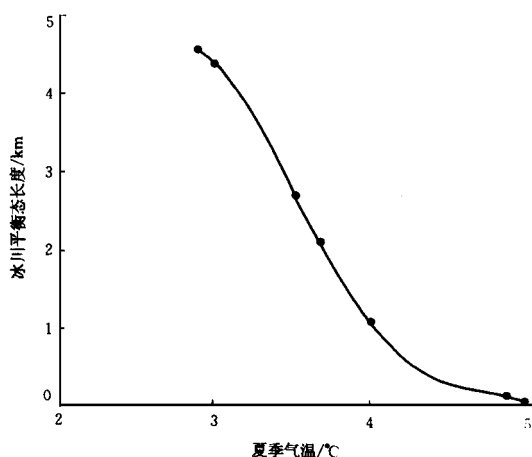


图 2 不同夏季气温下天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的平衡态长度

Fig. 2 The steady - state lengths of the Glacier No. 1 at the source of Urumqi River under various scenarios of summer temperature

河源夏季不同气温下该冰川平衡态长度的变化情况。从中可见, 天山 1 号冰川平衡态长度随夏季气温具有明显的非线性变化, 这意味着该冰川在不同的平衡态规模时具有不同的气候敏感性。为了进一步说明这一点, 首先应用多项式来拟合天山 1 号冰川平衡态长度规模随夏季气温的变化, 当采用下式:

$$L_0 = -0.8594 \cdot T_s^4 + 14.1462 \cdot T_s^3 - 85.2528 \cdot T_s^2 + 220.4647 \cdot T_s - 202.0602 \quad (2)$$

拟合时, 已有相当高的精度 ($R_2 = 0.99997$)。式 (2) 中 T_s 为夏季平均气温。利用式 (2), 至少可在图 2 所示的天山 1 号冰川平衡态长度规模范围内 (0.1 ~ 4.56 km), 讨论该冰川长度的气候敏感性随其规模变化的情况。对式 (2) 求导, 便可获得该冰川的气

候敏感性:

$$\frac{dL_0}{dT_s} = -3.4375 \cdot T_s^3 + 42.4386 \cdot T_s^2 - 170.5057 \cdot T_s + 220.4647 \quad (3)$$

将式 (2) 和式 (3) 联立, 并将 T_s 作为参数, 便可得到 dL_0/dT_s 随平衡态长度规模变化的曲线 (图 3)。从图 3 看出, 天山 1 号冰川在不同的长度规模时, 其气候敏感性差异很大。在讨论的平衡态长度规模范围内, 当 $L_0 = 2.85$ km 时, 该冰川的气候敏感性最大, 为 -3.82 km/°C; 当 $L_0 = 0.22$ km 时, 气候敏感性最小, 为 -0.32 km/°C。因此, 在该冰川末端变化量较大时 (如从平衡态长度 L_{01} 变化到 L_{02}), 夏季气温的变化量 (ΔT_s) 应由下式确定:

$$\Delta T = \int_{L_{01}}^{L_{02}} \left[\frac{1}{f(L_0)} \right] dL_0 \quad \alpha u \quad (4)$$

式中: $f(L_0) = dL_0/dT_s$ (这里 dL_0/dT_s 是由图 3 所确定的关于 L_0 的函数), 并称为冰川长度的气候敏感性函数。

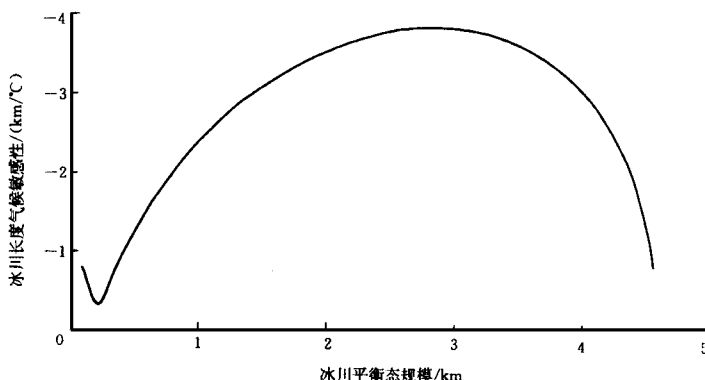


图 3 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川不同规模时的气候敏感性

Fig. 3 Climate sensitivity of the Glacier No. 1 at the source of Urumqi River under its different steady-state lengths

天山 1 号冰川长度的气候敏感性随其平衡态长度变化的主要原因是, 该冰川所在山谷地形坡度及冰面坡度沿海拔变化的结果。当山谷平均坡度小时, 冰川长度的气候敏感性就大 (指 dL_0/dT_s 的绝对值); 反之, 当山谷平均坡度大时, 冰川长度的气候敏感性就小。天山 1 号冰川越向其上游方向, 山谷坡度越陡, 因而其气候敏感性也就变小。当该冰川平衡态长度小于 0.22 km 时, 其气候敏感性稍有增加是由于此时冰川位于目前的粒雪盆区, 山谷平均坡度相对变缓的缘故。天山 1 号冰川平衡态长度大于 2.85 km 时, 气候敏感性反而减小, 这很可能与此时冰川平衡线处的冰面坡度较陡有关 (在式 (1) 中, 这一点是通过 $AA R_0$ 的修正值表现出来的)。以图 2 中为数不多的几个点的资料为基础, 所获得的上述结论难免存在误差。但是, 天山 1 号冰川长度的气候敏感性随其规模而发生变化的这一结论是肯定的。

如果简单地利用天山 1 号冰川的退缩量为 280 m, 与该冰川在 2.12 km 处的气候敏

感性 (-3.59 km/) 来计算夏季升温幅度, 那么自本世纪初以来该冰川所在地区的气候敏感性是针对冰川平衡态长度规模而言的, 只有当计算时段始末冰川处于或接近当时气候状况所决定的平衡态长度时, 才可这样计算, 否则就会造成很大的误差。这一点在计算时间尺度较短时尤为重要。天山 1 号冰川在本世纪初处于或接近于当时气候条件所具有的平衡态长度, 而目前的长度规模 (2.12 km) 远离当前气候条件所对应的平衡态长度 (1.10 km)。

由于目前天山 1 号冰川的长度远离当前气候状况下该冰川的平衡态规模, 同时考虑到该冰川气候敏感性随其平衡态长度规模变化的事实, 因此应用式 (4) 从该冰川本世纪初的长度规模到目前气候状况下的平衡态长度进行数值积分, 可得到自本世纪初以来乌鲁木齐河源地区夏季气温上升了约 0.37 (事实上从图 2 中更容易获得夏季气温的变化量)。这是在没有考虑本世纪初该地区降水量比现在多的情况下所得的结果, 因此, 可以说本世纪以来乌鲁木齐河源地区夏季气温的上升量不会超过 0.37 。

另外, 如果对树木年轮所恢复的乌鲁木齐河源地区年平均气温, 自本世纪初以来的变化拟合一个线性趋势, 结果发现这一时期年平均气温上升了约 0.52 。一般来说, 年平均气温的变化幅度要大于夏季气温的变化幅度。因此, 通过冰川变化对本世纪初以来乌鲁木齐河源地区夏季气温上升幅度的估计具有一定的可信度。

5 结语

以上分析表明, 天山 1 号冰川长度的气候敏感性随着该冰川平衡态长度的不同而变化, 而且可能存在气候敏感性极大的冰川长度。在讨论的平衡态长度范围内 ($0.1 \sim 4.56 \text{ km}$), 当天山 1 号冰川平衡态长度为 2.85 km 时, 其气候敏感性最大。从天山 1 号冰川近百年来变化, 定量地估计出这一时期乌鲁木齐河源地区的夏季气温上升了约 $0.23 \sim 0.25$ 。

参 考 文 献

- 王宁练, 周宇斌. 1996. 气候变化对于冰川零平衡线影响的灰色建模分析. 见: 第五届全国冰川冻土学大会论文集 (上册). 兰州: 甘肃文化出版社, 205~212.
- 陈吉阳. 1988. 天山乌鲁木齐河源全新世冰川变化的地衣年代学等若干问题之初步研究. 中国科学 (B 辑), (1): 95~104.
- 康兴成. 1985. 天山乌鲁木齐河流域年轮气候的初步分析. 冰川冻土, 7 (2): 133~140.
- Allison I and P Kruss. 1977. Estimation of recent climate change in Irian Jaya by numerical modelling of its tropical glaciers. Arctic and Alpine Research, 9 (1): 49~60.
- Oerlemans J. 1994. Quantifying global warming from the retreat of glaciers. Science, 264: 243~245.
- Wang Ninglian and Yao Tandong. 1996a. Study of the steady-state response of a glacier to climate change. Cryosphere, 2: 67~74.
- Wang Ninglian, Yao Tandong and Pu Jianchen. 1996b. Climate sensitivity of the Xiao Dongkemadi Glacier in the Tanggula

Pass. Cryosphere, 2: 63 ~ 66.

Summer Temperature Rise Quantified from the Change of the Glacier No. 1 at the Source of Urumqi River in the 20th Century

Wang Ninglian and Liu Shiyin

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

Abstract

History of glacier fluctuation is an important way to reveal climate change. However, almost all results of climate change derived from glacier fluctuation were qualitative in the past. In this paper, an attempt is made to reveal climate change by analysing glacier fluctuation quantitatively, and from the change of Glacier No. 1 at the source of Urumqi River in the Tianshan Mts., it is found that summer temperature has risen about 0.23 ~ 0.25 in this source area since the beginning of this century. Meanwhile, climate sensitivity of the glacier under its different lengths is discussed.

Key words: Glacier No. 1 at the source of Urumqi River, glacier fluctuation, equilibrium line, climate sensitivity, climate warming

第一作者简介：王宁练，男，31 岁，助理研究员，1988 年毕业于西北大学地理系。现主要从事冰芯气候环境记录、冰川波动与气候变化研究。