

文章编号: 1000-0240(2007)04-0613-04

山地冰川平衡线高度作为气候变化代用指标的讨论

鞠远江¹, 刘耕年², 魏 遐³

(1. 中国矿业大学 资源学院, 江苏 徐州 221008; 2. 北京大学 环境学院 北京 100871;
3. 浙江财经学院 工商管理学院, 浙江 杭州 310012)

摘 要: 对以平衡线高度作为气候变化代用指标的理论依据进行了讨论, 依据天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的大量观测资料, 建立和完善现代冰川平衡线高度与气候统计关系, 从传统方法以区域范围内气候因子为参数改造为以冰川范围内气候因子为参数, 通过检验认为改造后的公式比较合理. 将公式外推到小冰期第二次冰进时的 1 号冰川, 并运用侧碛垄最大高度法确定了小冰期第二次冰进时冰川的平衡线高度, 给出了该次冰进时气候条件的半定量推算结果. 证明利用山地冰川平衡线高度作为气候变化的代用指标, 并且对气候状况进行半定量推断是可行的.

关键词: 山地冰川; 物质平衡线; 气候变化

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

1 冰川物质平衡理论依据

冰川物质平衡线(Equilibrium line)即冰川上的雪线, 是指冰川上积累量与消融量相等的点的连线. 物质平衡线对于冰川的物质平衡以及冰川区环境具有较好的指示意义. 由于大陆冰盖的物质平衡研究比较困难, 相对来说山地冰川对环境的反应更为灵敏, 因此对山地冰川物质平衡线的研究成为热点. 冰川的积累量与消融量受当地气候的影响, 降水决定冰川的积累, 总辐射决定冰川的消融, 通常情况下, 用当地气温能够较好的代表总辐射量. 可见, 在山地冰川物质平衡线高度和当地气候条件(气温和降水)之间存在密切的相关关系^[1].

整个冰川的物质平衡状况可表示为:

$$B = \int_0^{S_s} A(s)ds - \int_0^{S_s} C(s)ds \quad (1)$$

式(1)说明冰川的物质平衡是冰川面积上各点积累量和消融量之差. 出于微积分学的考虑, 如果

将冰川表面划分成若干条带, 分别计算各个条带的平衡量, 然后相加应该也是整个冰川的平衡量, 所以可以按高度对冰川物质平衡进行积分计算, 如下式:

$$B = \int_{h_0}^h A(h)dh - \int_{h_0}^h C(h)dh \quad (2)$$

实际上式(2)计算的同样是整个冰川的平衡总量, 由于冰川本身在不同高度必然具有不同的平衡过程, 从而具有不同的平衡量. 当具体分析某一个高度带内的平衡量时, 可以使用下式:

$$b = \int_h^{h+\Delta h} a(h)dh - \int_h^{h+\Delta h} C(h)dh \quad (3)$$

冰川的总消融基本可以用冰面消融来代替, 冰川消融的主要热源是太阳辐射能, 其次是湍流交换热. 但是二者在对冰川消融总量的贡献上比例差别很大, 这种差别基本上是由于冰川表面性质不同以及冰川所处气候区的不同造成的. 对于同一支冰川来说可以认为这个比例是不变的, 注意到辐射热平

收稿日期: 2006-10-06; 修订日期: 2006-12-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(90102016); 中国矿业大学科学研究基金项目(OF4535)资助

作者简介: 鞠远江(1975—), 男, 山东威海人, 讲师. 2004 年在北京大学获博士学位, 现主要从事环境演变及地质灾害防治研究. E-mail: juyuanjiang@pku.org.cn

衡和湍流交换热近似为气温的函数, 则推导出冰川消融总量为气温的函数. 即:

$$A = f(T) \quad (4)$$

这个关系式从理论上是存在的, 但在冰川区一般很少有辐射平衡观测资料. 根据实际观测结果统计分析, 发现消融深与气温之间为幂次方关系, 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的公式为^[1]:

$$A = 0.242(T+4)^{2.8} \quad (5)$$

式中: A 为冰川日消融深; T 为冰面气温.

冰川的积累量从本质上来说是冰川区降水带来的, 因此, 把降水量用冰川积累量来代替是比较合理的近似. 据此可以得到下式:

$$b = \int_h^{h+\Delta h} P(h)dh - m \int_h^{h+\Delta h} (T(h)+4)^n dh \quad (6)$$

当 $\Delta h \rightarrow 0$ 时, 表示的是某一高度处的物质平衡计算公式, 而在冰川物质平衡线处, 冰川的物质平衡量为 0. 也就是说存在一个高度, 使得这个高度处降水与气温之间存在一个理论上的关系, 由于降水与气温都是高度的函数, 所以这个高度与降水与气温之间也应该是相关的. 这就为在冰川物质平衡观测过程中发现的物质平衡线高度与气候的良好相关性找到了理论依据. 由此, 如果计算冰川任意高度处物质平衡量可以参考下式:

$$b = \int_h^{h+\Delta h} (P_{ela0} + \Delta h k_1) dh - m \int_h^{h+\Delta h} (P_{ela0} + \Delta h k_2 + 4)^n dh \quad (7)$$

积分后则为:

$$b = (k_1 - mk_2)h^2/2 + \{[P - (mT + 4)]h\}^{n+1} + c \quad (8)$$

当 $b \rightarrow 0$ 时, 对方程求解, 所对应的 h 即为平衡线高度. h 与 P 和 T 间的关系形式上与用统计方法得到的类似:

$$H_s = aP_s - bT_s + c \quad (9)$$

式中: H_s 代表平均雪线高度; P_s 和 T_s 分别为冰川区的年平均降水量和年平均气温; a , b 和 c 为统计系数. 理论上讲, 公式中的 H_s 代表具体的冰川的特定时段平均物质平衡线高度, P_s 和 T_s 分别代表该冰川在该时段平衡线附近的降水强度和平均气温, a , b 和 c 为与冰川所处区域的大环境有关的

参数, 受区域热量收支平衡的影响.

2 公式的建立与改造

理论上决定冰川变化的应该是冰川区的气候条件, 对于特定冰川来说, 平衡线高度与气候的关系公式需要按冰川的不同特征进行调整. 中国科学院天山冰川观测实验站设立的 1 号冰川水文气象点, 位于 1 号冰川前约 300 m 的海拔 3 695 m 处. 该站气候与冰川变化关系密切, 选用该站 1985—1998 年数据与同时期冰川平衡线高度(h)值进行回归分析, 得到:

$$h = 3971.8 + 85.12T - 0.475P \quad (10)$$

式中: T 为消融季(6~8 月)站点气温; P 为站点平衡年降水量.

对于冰川区来说, 由于平衡线高度是变动的, 平衡线处的气候状况对气候变化具有更确切的指示意义. 为了将平衡线处的气候状况用公式表示出来, 需要将式(10)根据气温和降水在冰川区的垂直梯度进行调整. 对于该区气温的垂直梯度变化, 据姚檀栋等^[2]的研究, 较暖年平均梯度为 $-0.71^\circ\text{C} \cdot (100\text{m})^{-1}$, 较冷年为 $-0.65^\circ\text{C} \cdot (100\text{m})^{-1}$, 取其平均值 $-0.68^\circ\text{C} \cdot (100\text{m})^{-1}$. 据康尔泗等^[3]的研究, 降水的垂直梯度为东支 $51\text{mm} \cdot (100\text{m})^{-1}$, 西支 $76\text{mm} \cdot (100\text{m})^{-1}$. 由于确定平衡线高度所使用的是侧碛垄最大高度法, 小冰期以来冰碛垄的形成主要跟东支关系密切, 因此在考虑降水梯度时, 应该使用东支的梯度. 现代平衡线高度大约在海拔 4 050 m 左右, 1 号冰川气象水文站点海拔 3 695 m, 根据气温垂直梯度及 1 号冰川区降水垂直梯度, 现代条件下平衡线高度与平衡线高度处气候的关系式可以表示为:

$$h = 3971.8 + 85.12(T + 2.41) - 0.475(P - 181.05) \quad (11)$$

所有冰川区的共同特点是, 在其平衡线高度处积累量与消融量是相等的, 在不考虑风吹雪和雪崩积累的情况下, 积累量实际上就是降水量. 则冰川平衡线高度处降水量等于消融量, 即:

$$P = m(T(h) + 4)^n \quad (12)$$

同样, 以乌鲁木齐河源一号冰川为例, 即存在:

$$P = 0.242(T + 4)^{2.8} \quad (13)$$

为了与式(11)可以搭配使用, 将其转换为平衡年关系:

$$P = 22\ 264(T + 4)^{2.8} \quad (14)$$

式中: P 为冰川平衡线处年降水量; T 为冰川平衡线处消融季日平均气温。

由于冰面上气温受冷效应作用产生气温跃动, 取气温跃动值为 $1.6\ ^\circ\text{C}$ 计算^[1], 上式变为:

$$P = 22\ 264(T - 1.6 + 4)^{2.8} \quad (15)$$

将式(11)与式(15)结合, 可以计算乌鲁木齐河源 1 号冰川平衡线处的气候状况。现代冰川的状况为: 消融季日平均气温约为 $0.82\ ^\circ\text{C}$, 年降水量约为 $600\ \text{mm}$ 。按 1 号冰川水文点的现代气象观测资料推算, 海拔 $4\ 040\ \text{m}$ 处降水约为 $610\ \text{mm}$, 气温约为 $0.82\ ^\circ\text{C}$, 可见公式的计算基本满足精度要求。

3 公式的外推应用

在讨论古冰川时期气候状况时, 学者们倾向于认为, 百年以上尺度的冰川平衡线高度变化, 更多得受制于气温的变化, 而与降水的变化相关性很小^[4]; 从而在推测古冰川时期气候时, 往往是根据平衡线高度降低值直接确定温度变化值^[5]。然而, 就全球范围来说, 气温的变化具有同时性, 而降水的变化则具有很大的地区差异。从这一点来说, 依据全球平均气温、平均降水以及山地冰川平衡线高度的平均变化值来确定这种关系, 具有很大的粗略性, 在具体应用到某一区域时, 甚至有可能是错误的。考虑到平衡线高度与平衡线上气候变化的相关性具有理论上的意义, 在讨论具体区域的气候变化时, 可以把这一关系大胆得应用到古冰川上, 从而对古冰川时期气温与降水的变化有更精确的研究。

考虑在 1 号冰川将式(11)与式(15)外推至小冰期的情况, 图 1 为乌鲁木齐河源 1 号冰川 1986 年范围图, 从图中可以很清楚地看出小冰期冰碛垄。根据张振拴^[6]的研究, 小冰期时乌鲁木齐河源有三次冰进, 其中前两次冰进规模相当, 冰碛垄几乎重合, 后一次冰进规模较小。从图 1 看到的比较明显的冰碛垄实际上是第一次和第二次冰进的冰碛垄, 张振拴估算这两次冰进时该区冰川的平衡线在 $(3\ 870 \pm 25) \sim (3\ 880 \pm 25)\ \text{m}$ ^[6]; 姚檀栋等^[2]认为小冰期时 1 号冰川的平衡线高度在海拔 $3\ 890\ \text{m}$; 从图中看出终碛垄的最大高度在海拔 $3\ 825\ \text{m}$ 。根据侧碛垄最大高度法判断, 依据老乌库公路过冰碛垄段地面沉降的实测结果判断, 该地区冰碛垄的沉降速度大约为 $0.2\ \text{m} \cdot \text{a}^{-1}$, 第二次冰进距 1986 年约 230 a, 则侧碛垄当时高度应约为海拔 $3\ 870\ \text{m}$ 。

由于小冰期第二次冰进与现代相比环境变化不是特别剧烈, 冰川性质应未发生根本性的变化, 式(11)在向当时冰川外推时, 认为其变化的只是常数项大小, 并且常数项的变化与平衡线高度变化之间具有正比关系, 公式的结构和形式不变。这一假设实际是假设从小冰期到现在气候的变化过程为一连续过程, 该区域气候类型并未根本性改变。调整后, 式(11)变为:

$$h = 3763.8 + 85.12(T + 2.41) - 0.475(P - 181.05) \quad (16)$$

式(11)和式(16)结合推算, 小冰期第二次冰进时冰川平衡线处的气候状况约为气温 $0.62\ ^\circ\text{C}$, 降水 $500\ \text{mm}$ 。这一结果与前人依据其他方法获得的结果接近^[7]。

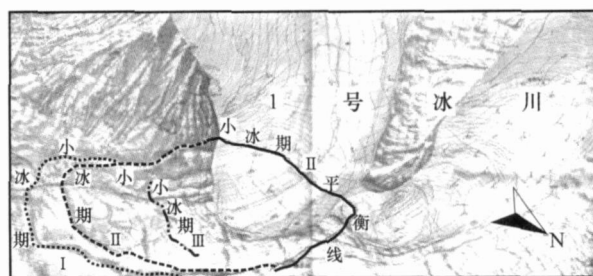


图 1 乌鲁木齐河源 1 号冰川小冰期冰碛垄及平衡线位置
Fig. 1 The locations of end moraines and equilibrium line of the Glacier No. 1 at the headwaters of Ürümqi River during the Little Ice Age

4 结论

山地冰川物质平衡线是山地冰川变化的良好指标, 冰川进退与气候变化之间具有密切相关性是很多学者早已注意到的现象, 然而对于冰川进退与气候关系的定量研究发展比较迟缓。通过对平衡线高度与气候相关性的研究, 结合平衡线处气象因子的固有规律对两者关系进行半定量的研究, 有助于充分发挥山地冰川对气候变化的指示作用, 从而对气候变化历史有更为明确的研究。本文通过对前人研究经验的总结, 将现代冰川的研究结果通过合理的外推应用到古冰川研究上, 对 1 号冰川小冰期第二次冰进时的气候状况进行了恢复。虽然这种恢复利用的是统计的方法, 但不难从理论上找到依据, 依据气象因子与平衡线高度之间的良好统计关系直接来判断具有现实意义。运用冰川平衡年的资料来进行统计, 更符合冰川区气候变化与平衡线高度变化的实际情况, 且其相关性更好。估算出小冰期第二

次冰进时 1 号冰川平衡线处气温约为 0 62 ℃, 降水约 500 mm,

参考文献(References):

[1] Shi Yafeng, Huang Maohuan, Yao Tandong, *et al.* Glaciers and Their Environments in China [M] . Beijing: Science Press, 2000; 30—31. [施雅风, 黄茂桓, 姚檀栋, 等. 中国冰川与环境[M] . 北京: 科学出版社, 2000; 30—31.]

[2] Yao Tandong, Shi Yafeng. Climate, glacier and runoff change and its trend in Ürümqi River[J] . Science in China (Series B), 1988(6): 657—666. [姚檀栋, 施雅风. 乌鲁木齐河气候、冰川、径流变化及未来趋势[J] . 中国科学(B 辑), 1988(6): 657—666.]

[3] Kang Ersi, Liu Chaohai, Wang Chunzu, *et al.* Seasonal variation of mass balance and altitude dependency of total melt in the glacierized source area of the Ürümqi River[J] . Journal of Glaciology and Geocryology, 1994, 16(2): 119—127.[康尔泗, 刘潮海, 王纯足, 等. 乌鲁木齐河源冰川物质平衡季节变化和总消融海拔分布[J] , 冰川冻土, 1994, 16(2): 119—127.]

[4] Gao Xiaoqing, Tang Maocang, Feng Song. Discussion on the

relationship between glacial fluctuation and climate change [J] . Plateau Meteorology, 2000, 19(1): 9—16. [高晓清, 汤懋苍, 冯松. 冰川变化与气候变化关系的若干探讨[J] . 高原气象, 2000, 19(1): 9—16.]

[5] Shi Yafeng, Cui Zhijiu, Li jiju, *et al.* Quaternary Glacier and Environment Research in East China [M] . Beijing : Science Press, 1989: 1—370. [施雅风, 崔之久, 李吉均, 等. 中国东部第四纪冰川与环境问题[M] . 北京: 科学出版社, 1989: 1—370.]

[6] Zhang Zhenshuan. Snowline fluctuation at the headwater of the Ürümqi River, Tianshan Mountains[J] . Journal of Glaciology and Geocryology, 1981, 3 (Suppl.): 106—113. [张振拴. 天山乌鲁木齐河源的雪线变化[J] . 冰川冻土, 1981, 3 (增刊): 106—113.]

[7] Shi Yafeng. The Climate and Sea Surface Changes in China and Their Influences and Tendency (4): Impact of Climatic Change on the Water Resources in Northwest and North China [M] . Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1995: 62—63. [施雅风. 中国气候与海面变化及其趋势和影响(4): 气候变化对西北华北水资源的影响[M] . 济南: 山东科学技术出版社, 1995: 62—63.]

Equilibrium Line Altitude of Mountain Glacier
as a Proxy of Climate Changes

JU Yuan-jiang¹, LIU Geng-nian², WEI Xia³

(1. College of Resource and Environmental Sciences, China University of Mining & Technology, Xuzhou Jiangsu 221008, China;
2. College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. College of Business Administration
Sciences Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou Zhejiang 310012, China)

Abstract: The theory that equilibrium line altitude acts as a proxy of climate changes is discussed. Based on the abundant observation data on the Glacier No.1 at the headwaters of Ürümqi River in Tianshan Mountains, since the 1960s, a statistical equation relating the present equilibrium line altitude and climate is established and improved, which is verified of rationality in the region. Extrapolating the equation to the second phase of the

Little Ice Age of the glacier, and inferring the equilibrium line altitude at that time from maximum elevation of lateral moraines, the climate condition during the phase can be determined. The result is closed to the previous outcomes deduced by other methods. All these show that taking the equilibrium line altitude of alpine glacier as a proxy of climate changes and calculating the climate condition from the equation is feasible.

Key words: mountain glacier; equilibrium line; climate change