

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡对气候变化的敏感性研究

刘时银¹ 丁永建¹ 王宁练¹ 谢自楚²

(1 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 兰州 730000; 2 湖南师范大学资源环境系, 长沙 410081)

摘 要 应用度日物质平衡模式对天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡及平衡线高度对气候变化的敏感性进行了研究. 结果表明, 位于大陆性气候区且具有暖季补给特征的乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡对气候变化的敏感性要小于海洋性冰川, 升温 1 或增加 20% 的降水可引起平衡线上升 81 m 或下降 31 m. 此外, 气温与降水在物质平衡形成过程中的作用是不同的, 气温引起物质平衡剖面以旋转方式变化, 而降水可导致其平移方式的响应. 若未来升温 2 时, 即使降水增加 30%, 1 号冰川向负平衡变化仍然不能得到遏制.

关键词 1 号冰川 物质平衡 平衡线高度 敏感性

中图法分类号 P343. 72

第一作者简介 刘时银, 男, 34 岁, 副研究员, 1986 年毕业于兰州大学水文地质与工程地质专业, 1996 年获中国科学院兰州冰川冻土研究所理学博士学位. 现从事冰川学研究.

1 前言

预测研究表明, 在未来数十年中全球地面气温升温速率为 $0.3 / 10 \text{ a}$ (Houghton *et al.*, 1990, 1992; 施雅风, 1995; 叶笃正, 1992). 很显然, 这种增温趋势将严重地威胁到山地冰川及小冰帽的存在, 并引起冰川作用流域内河川径流的剧烈波动. 特别是在我国西北各山区, 冰川融水径流波动与本区工农业等经济活动密切相关. 因此, 以代表性冰川作为试验冰川, 研究其在可能气候变化背景下的未来趋势, 无疑对本地区经济活动 (如引水灌溉工程、水电设施等) 具有现实意义.

本文以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川 (以下简称 1 号冰川) 为试验冰川, 原因在于该冰川已有 30 多年的物质平衡等观测资料, 而且近年来依照国际通用物质平衡计算标准, 已有多年的物质平衡随高度分布的资料, 因此在建立物质平衡气候变化的计算模式时, 其计算结果才具有可比性, 而且一些参数也能够得到较好的校正. 此外, 1 号冰川作用

特征在我国西北干旱区现代冰川中具有代表性, 在代表性冰川上能够成功地应用的物质平衡对气候变化响应的模式, 可以在区域上推广和应用.

2 模式简介

1 号冰川物质平衡对气候变化敏感性的分析仍采用度日物质平衡模式 (刘时银等, 1996), 该模式在欧洲温性冰川及冰岛等地冰川上得到了广泛的应用 (Johannesson *et al.*, 1995; Braithwaite, 1985; Laumann *et al.*, 1993), 而且在计算 1 号冰川数十年来的物质平衡变化时, 也给出了比较理想的结果 (刘时银等, 1996).

基本资料来自 1 号冰川附近的大西沟气象站实测气温与降水. 根据该冰川所处海拔及观测资料分析, 假定冰川区降水全为固态形式, 并以修正后的降水随海拔按 $18.3 \text{ mm}/100 \text{ m}$ 梯度线性递增 (杨大庆等, 1992); 气温随高度的变化则按自由大气直减率 $0.65 / 100 \text{ m}$ 推算. 度日物质平衡模式基本出发点为: 某时段 (t) 在某高度 (h) 的平均冰面

消融 (a_{th}) 为雪的消融 (a_{th}^{snow}) 与冰消融 (a_{th}^{ice}) 之和:

$$a_{th} = a_{th}^{snow} + a_{th}^{ice} = f_{snow} \cdot PDD_{snow} + f_{ice} \cdot (PDD_{th} - PDD_{snow})$$

式中: f_{snow} , f_{ice} 分别为积雪和冰川冰消融度日因子数 [分别为 7.3 和 3.1 mm/($^{\circ}C \cdot d$)]; PDD_{snow} 为时段内用于消融积雪的正积温; PDD_{th} 则为时段正积温总数.

若积雪完全融化并有剩余正积温时, 则剩余正积温用于消融冰川冰. 由于冷冰川上融化的积雪在消融开始时并不产流, 而是在雪层中下渗以加热雪层, 因而有部分正积温会重复用于积雪或下渗融水冻结后的融化, 而这种重复消融量值取决于冰层的温度状况. 特别是在积累区, 活动层增温较缓慢, 因而有很大一部分融水会下渗到当年年层乃至前数年形成的年层中, 成为冰川的内补给. 根据 1 号冰川积累区观测的冰川温度状况, 确定在附加冰带以上区域, 附加冰、渗浸冰等以内补给形式出现的融水冻结量以每 100 m 按其占消融量的 10% 增加来计算.

正积温计算则是假定气温正态分布来实现的, 若日或月平均气温以气温的谐波变化来表示 (T_d), 则

$$T_d(t) = T_a + T_1 \cos\left(\frac{2\pi t}{A}\right) + T_2 \sin\left(\frac{2\pi t}{A}\right) \quad (1)$$

式中: A 为 1 a 的总天数; T_a 为年平均气温; T_1 , T_2 为回归参数.

对于正态分布的气温, 其正积温由下式计算:

$$PDD_{th} = \frac{A_2}{A_1 - 1} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{A_2} e^{-\frac{(T_d(t) - T_m)^2}{2\sigma^2}} dT_d t \quad (2)$$

式中: σ 为气温分布标准差; T_m 为时段平均气温, 这里时段长度按月计; A_1 , A_2 分别为计算时起、止天数, 时段长度为 $A = A_2 - A_1 + 1$; $T_d(t)$ 由式 (1) 确定或由实测月平均气温来代替.

这种方法计算的消融量为给定时段对应高度带上的平均冰川总消融, 而以降水确定的冰川积累在忽略积雪再分配前提下应视为该高度带上的冰川总积累.

3 目前气候背景下的冰川物质平衡

在 1988/1989 物质平衡年度之后, 不仅计算出

了 1 号冰川各年份面积加权平均物质平衡, 而且也给出了每个平衡年度物质平衡随海拔的分布情况, 由此实测物质平衡高度分布, 可以评价度日物质平衡模式在研究 1 号冰川物质平衡及其对气候变化响应计算结果的合理性.

假定 1959~1993 年的 35 a 平均气候状况为目前气候背景, 对应的观测物质平衡为 -128 mm, 平均平衡线海拔高度达 4 048 m (含 1966/1967~1978/1979 年度中断物质平衡观测的恢复值). 目前气候背景下多年平均气温为 -5.3 $^{\circ}C$, 平均年降水量为 429.6 mm (未修正). 由于该冰川强烈消融季节在 5~9 月之间, 而其它月份的正积温一般很小, 因此为使问题得到简化, 在此采用自然年内气温和降水分别代替物质平衡年的降水、气温. 在目前气候背景下, 度日物质平衡模式计算的 1 号冰川物质平衡为 -118 mm, 平衡线海拔高度为 4 019 m, 与实测平均结果比较, 计算的 b_n 偏大 10 mm, ELA_0 偏低 29 m. 根据分析 (刘时银等, 1996), 缺测物质平衡年份所对应的物质平衡插补值相对于度日物质平衡模式计算值普遍偏小, 即插补的负平衡值大于本模式计算的负平衡值, 说明度日物质平衡模式计算结果具有合理性.

从该冰川始于 1988/1989 年度实测物质平衡随高度分布资料中, 人工所挑选最大负平衡和最大正平衡分别出现于 1988/1989 和 1990/1991 年度, 两年度的平衡量分别为 -706 mm 和 105 mm 水当量. 比较可以看出, 计算值介于两个极端年份物质平衡高度分布之间 (图 1), 但末端物质平衡计算值偏大, 原因可能有: 1) 冰川表面海拔

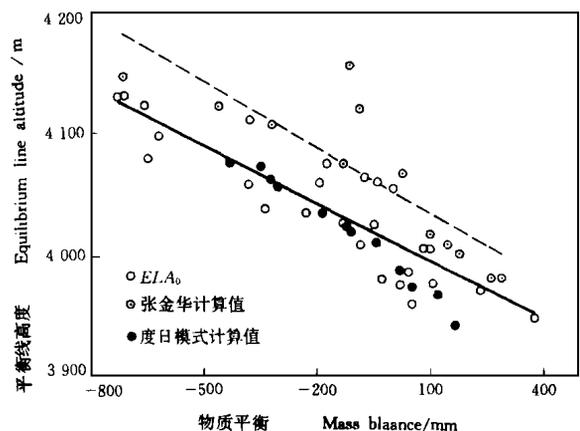


图 1 计算与实测的物质平衡高度分布之比较

Fig. 1 Calculated and measured elevation-dependent mass balance

3 800 m 以下区域有一定厚度的表碛覆盖；2) 正积温不能完全反映引起冰川消融的全部能量来源；3) 以大西沟气象站为基准，即推算的末端附近降水量可能偏大。此外，没有考虑低海拔区域降水的雨雪比例，这也可能有一定的影响。

研究表明（刘时银等，1996），度日物质平衡模式计算的平均物质平衡年际变幅为 660 mm、物质平衡随海拔的变幅达 3 468 mm。因此就 1 号冰川高度分布来看，从末端到顶部气温变幅远大于能够预见的下世纪由于 CO_2 倍增所引起的气温上升量，同时 1959 ~ 1993 年平均气温的实际变幅为 2.3 °C，则相当于未来 50 ~ 100 a 内的气温上升量。因此，本文利用度日物质平衡模式讨论的未来气候情景（最大升温 2 °C），仍然在当前气候背景下气温变幅范围之内，说明模型用于物质平衡对气候变化敏感性研究是可靠的。

4 未来气候变化与冰川物质平衡

目前，全球温室气体排放量不断增加，不少研究者认为近期的全球增温部分原于近代温室气体排放增加的结果（Hansen *et al.*，1987；1988），而且这种温暖化将不断加强。研究表明，大气中 CO_2 浓度倍增时，全球地面气温将上升 1.5 ~ 4.5 °C，每 10 a 气温上升速率约为 0.25 °C 或 0.3 °C（Houghton *et al.*，1990；1992）。如此推算 2050 年的气温比现在高 1.2 ~ 1.5 °C（施雅风，1995），到 2080 年气温上升约 2.0 ~ 2.4 °C。为此，本文应用这一预测的未来气候情景，计算未来某一年份，气温上升量高于目前气温平均值 2 °C，而降水保持不同比例增

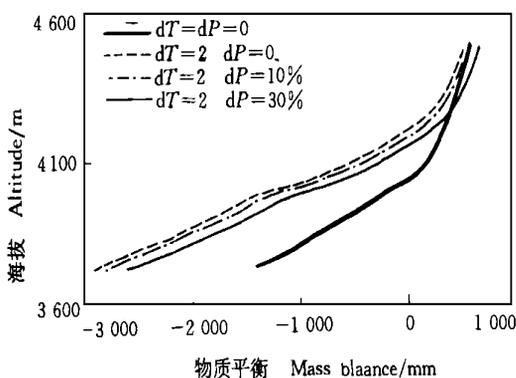


图 2 未来 3 种情景与当前气候背景下物质平衡高度分布之比较

Fig. 2 Elevation - dependent mass balance calculated for the three climatic scenarios and compared with that under the present climate

加，且 1 号冰川在具有当前冰川规模情况下，该冰川物质平衡的响应规律。

图 2 给出 1 号冰川物质平衡随海拔的分布及其与目前气候状况下物质平衡高度分布之比较。对应的气候背景及其 ELA 和 b_n 预测值列于表 1，其中气温上升和降水增加均以目前气候背景下的每个月升温或降水增加相同的量级。图 2 表明气温上升 2 °C 时，不论降水增加 10 % 还是 30 %，冰川的负平衡均远大于目前气候状态下的负平衡；即使有 30 % 降水增加，增温 2 °C，仍会使冰川的平衡线高度抬升 100 m 左右。另一方面增加 10 % 的降水量，还不能使冰川各高度带物质平衡向负平衡方向发展的趋势得到遏制，在降水增加 30 % 的情况下，也仅在约 4 140 m 高度以上区域正平衡大于目前气候状态下的物质平衡。上述比较还说明，对于 1 号冰川在升温背景下，气温对物质平衡的影响仍是物质平衡变化的主导因子。

表 1 未来气候变化的 3 种情景及在此情景下 1 号冰川物质平衡 (b 水当量) 和平衡线高度 (ELA) 预测值

Table 1 Mass balance and ELA estimated for the Glacier No. 1 under three climatic scenarios in the future

气候情景 Climatic Scenarios		ELA / m	b / mm
$dT=0$	$dp=0$	4 018	- 117.8
$dT=2$	$dp=0$	4 175	- 954.8
$dT=2$	$dp=10\%$	4 158	- 867.0
$dT=2$	$dp=30\%$	4 122	- 694.0

5 物质平衡的气候敏感性分析

为讨论方便，在模式运行中假定气温不变而使降水量按一定比例增加和假定降水不变而使气温上升两种方案。运行结果表明，降水和气温在物质平衡形成过程中的作用显著不同。保持气温不变而只改变降水时，物质平衡随海拔的分布仅以平移方式来响应降水量的变化（图 3a）。它也从另一方面说明，在海洋性冰川上由于降水丰富，物质平衡变化类似于物质平衡高度剖面平移所引起的结果（Oerlemans *et al.*，1989）。在假定降水保持不变时，气温引起的物质平衡变化则表现为物质平衡高度分布剖面的旋转（图 3b），表现为升温时物质平衡剖面趋于向负平衡增大的方向变化，而降温时则相反。

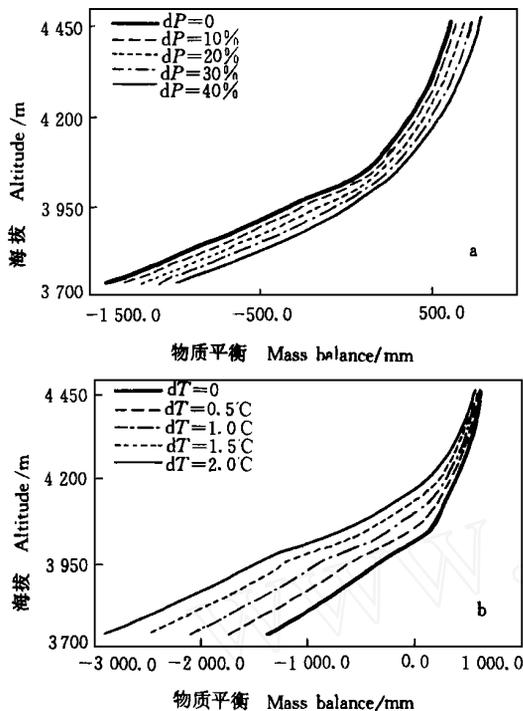


图3 降水 (a) 和气温 (b) 在物质平衡形成和变化中的作用

Fig. 3 The contributions of precipitation (a) and air temperature (b) to the mass balance variations

表2 气温、降水独立对物质平衡 (b) 与平衡线高度 (ELA) 变化的影响结果

Table 2 Mass balance and ELA variations dependent on precipitation or air temperature change, respectively

气温不变 Constant temperature		
降水变化/ %	b/ mm	ELA/ m
d p = 0	- 117. 8	4 019
d p = 10	- 46. 6	4 005
d p = 20	21. 2	3 988
d p = 30	86. 0	3 970
d p = 40	147. 3	3 951
降水不变 Onstant temperature		
气温变化/	b/ mm	ELA/ m
d T = 0	- 117. 8	4 019
d T = 0. 5	- 286. 0	4 059
d T = 1. 0	- 483. 0	4 100
d T = 1. 5	- 706. 4	4 138
d T = 2. 0	- 954. 8	4 175

由于降水引起物质平衡变化以其高度剖面平移方式来实现的, 因此某一百分比降水量增加所引起的物质平衡改变量与其以相同百分比降水减小量所

引起的物质平衡改变量应是相等的. 如此本文仍以增加降水量的方式来讨论. 就1号冰川来说若降水增减100 mm (相当于降水增减20%, 对应的改变量为111 mm), 平衡线高度的改变量约为+31 m (表2), 物质平衡改变量为+139 mm水当量; 气温升高1°C时, 平衡线可上升81 m, 负物质平衡增大365 mm水当量. 这一结果与姚檀栋等(1988)对气温的估计基本一致, 但本文所给降水对平衡线高度的影响要小于姚檀栋等所计算的结果. 简单的计算还说明保持气温不变时, 只有在降水增加47.3%才能使ELA下降80 m.

6 讨论与结论

度日物质平衡模式研究冰川物质平衡对气候变化的响应, 可以给出类似于依赖能量平衡的物质平衡模式所给出结果, Oerlemans *et al.* (1989) 用基于能量平衡的物质平衡模式分析欧洲阿尔卑斯山欣特冰川 (Hintereisferner) 物质平衡梯度及物质平衡对气候变化敏感性时, 发现气温和其它因子保持不变而降水增减20%时, 物质平衡改变量随海拔的分布几乎处于相同的量级, 即由于降水改变所诱发的物质平衡增量在各个高度上基本相同, 这一结果与本文所计算降水引起的冰川物质平衡高度分布剖面以平移方式引起物质平衡变化是完全一致的. 其对气温变化的计算结果说明物质平衡高度剖面的变化是非线性的, 且在平衡线下部, 随海拔降低, 物质平衡变化幅度巨大, 而在平衡以上物质平衡变化表现出强烈的非线性特征, 这与1号冰川单纯改变气温所引起的物质平衡高度剖面表现出旋转的特征不谋而合.

比较 Oerlemans *et al.* (1989) 对欣特冰川敏感性试验研究的结果发现, 1号冰川平衡线高度变化对气温、降水变化的敏感性均小于阿尔卑斯山区的冰川, 在欣特冰川上气温上升1.0°C可以引起平衡线高度上升131 m, 降水增加20%可以引起平衡线高度下降62 m; 而在1号冰川对应的数值分别为81 m和-31 m. 这也从一个侧面说明不同的气候背景和冰川物理特征决定了冰川对气候变化响应的敏感程度, 海洋性冰川物质平衡对气候变化响应的敏感性要大于大陆性冰川.

综上所述, 可以得出如下结论:

(1) 度日物质平衡模式能够模拟出与能量平衡物质平衡模式所能得到的类似结果, 与基于能量

平衡的物质平衡模式相比, 度日模式方法简单, 且易于推广。

(2) 气温乃是影响 1 号冰川物质平衡变化的主导因子, 若未来气温高于现在 2℃, 则 1 号冰川的负平衡量是目前负平衡的 8~9 倍, ELA 则高于现今高度 156 m。

(3) 在气温降水引起物质平衡变化方式上, 改变气温可引起物质平衡高度剖面旋转方式的变化, 而降水则使其以平移方式改变冰川的物质平衡。

(4) 气温升高 1℃ 可使 1 号冰川平衡线高度上升 81 m, 降水增加 20%, 只能使其平衡线高度下降 31 m。

参 考 文 献

叶笃正主编, 1992. 中国的全球变化预研究. 北京: 气象出版社, 5~20

刘时银, 丁永建, 叶佰生等, 1996. 度日因子用于乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡计算的研究. 见: 第五届全国冰川冻土学大会文集 (上册), 兰州: 甘肃文化出版社, 197~204

杨大庆, 施雅风, 康尔泗等, 1992. 天木齐河流域降水观测系统误差分析和修正. 见: 乌鲁木齐河地区水资源形成和估算, 北京: 科学出版社, 14~40

施雅风主编, 1995. 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. 济南: 山东科学技术出版社, 1~13; 53~78

姚檀栋, 施雅风, 1988. 乌鲁木齐河气候、冰川、径流变化及未来趋势. 中国科学 (B 辑), 6: 657~666

Braithwaite R J, 1985. Calculation of degree - days for glacier climate research. *Z. Gletscherkd. Glazialgeol.*, Band 20, 1~8

Hansen J, Lebedeff S, 1987. Global trends of measured surface air temperature. *Journal of Geophysical Research* 92, 13 345~13 372

Hansen J, Lebedeff S, 1988. Global surface air temperature: update through 1987. *Geophysical Research Letter* 15, 323~326

Houghton J T, Jenkins G S, Ephraums J J, eds, 1990. *Climate Change 1990—the IPCC scientific assessment*. Cambridge, Cambridge University Press. 67~85

Houghton J T, Callander B A, Varney S K, eds, 1992. *Climate Change 1992—the supplementary report to the IPCC scientific assessment*. Cambridge, Cambridge University Press.

Johannesson T, Sigurdsson O, 1995. Degree - day glacier mass balance modelling with application to glaciers in Iceland, Norway and Greenland. *Journal of Glaciology*, 41 (138): 345~358

Laumann T, Reeh N, 1993. Sensitivity to climate change of the mass balance of glaciers in southern Norway. *Journal of Glaciology*, 39 (133): 656~665

Oerlemans J, Hoogendoorn N C, 1989. Mass - balance gradients and climatic change. *Journal of Glaciology*, 35 (121): 399~405

Mass Balance Sensitivity to Climate Change of the Glacier No. 1 at the Urumqi River Head, Tianshan Mts.

LIU Shi - Yin¹ DING Yong - Jian¹ WANG Ning - Lian¹ XIE Zi - Chu²

(1 Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, CAS Lanzhou 730000; 2 Department of Resources and Environment, Hunan Normal University, Changsha 410081)

Abstract In this paper the degree - day mass balance model is applied to the sensitivity test of mass balance / ELA to climate change of the Glacier No. 1 at the Urumqi river head, Tianshan Mts. Results demonstrate that mass balance of a continental type glacier with warm season accumulation as the Glacier No. 1 is less sensitive than that of a maritime type glacier. On the glacier air temperature rise of 1℃ or precipitation increase by 20% can cause the

Key words Glacier No. 1, at the Urumqi river head, mass balance, equilibrium line altitude (ELA), sensitivity

ELA shifting 81 m up or 31 m down. Air temperature and precipitation play different roles in mass balance, i. e. elevation - dependent mass balance follows the temperature variation by means of rotation against the elevation axis and it shifts parallel to precipitation change. Assuming a future temperature rise of 2℃ the minus mass balance trend of the glacier can not be reversed even if precipitation increases by 30%.