

天山乌一号冰川物质平衡特征的统计分析

鞠远江¹, 魏 遐^{2,3}, 刘耕年³

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

摘 要: 利用天山乌鲁木齐河源一号冰川物质平衡的多年观测资料, 通过数学统计方法提取主成分, 获得影响该冰川物质平衡的主要因素, 通过成分矩阵的旋转获得表示冰川物质平衡特征的两个主因子, 其中第一主因子为影响冰川物质平衡的常年因子, 代表该冰川的多年持续变化方向与趋势, 第二主因子为影响冰川物质平衡的年际因子, 代表该冰川在平衡年内的物质平衡变化特征。常年因子的持续下降反映了冰川持续后退的现实, 年际因子在上世纪 80 年代中期以后突然强劲上升, 实际上是冰川物质平衡水平提高, 平衡年内积累量和消融量都增加的表现, 清晰地指示了西北地区气候由暖干向暖湿的转型。常年因子是冰川物质平衡变化的主导因子, 控制了冰川变化的方向。常年因子具有较好的周期性, 以 6 年周期最为明显, 但其形成原因尚不明。年际因子周期性不明显, 但可以看出其周期与太阳黑子变化具有相关性, 同时受到常年因子的影响。

关 键 词: 一号冰川 物质平衡 乌鲁木齐河源 主成分分析 天山山脉

中图分类号: P641.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6060 (2006) 01-0076-05

对于小冰期以来气候变化剧烈区的环境特征, 前人有过大量的研究工作。我国西北干旱区不仅是典型的环境变化剧烈地区, 而且其环境变化的方向对于我国经济、政治的稳定具有至关重要的作用, 近年来很多学者对该区现代环境演变方向进行了详细讨论。由于已经进入器测阶段, 用数据统计方法研究这一段时间的环境变化特征是一种重要手段, 使用比较多的观测数据主要是气候观测数据及其代用指标, 发现 20 世纪 80 年代末以来, 该区环境出现了由暖干向暖湿转化的迹象。为了进一步搞清我国西北地区现代环境演变特征并对前人研究结果进行验证, 本文对天山一号冰川站物质平衡多年观测数据进行了多种统计分析, 其研究结果不仅可以用于判断区域环境特征, 而且在研究方法上是一种创新尝试。

1 研究方法

山地冰川对环境演变非常敏感, 我国西北干旱区的环境演变特征, 在高山区反映清晰, 因此, 选择天山乌鲁木齐河源一号冰川作为研究对象, 可以代表西北地区环境演变特征。天山一号冰川站建立

于 1959 年 7 月, 在 40 多年的时间内, 进行了大量的观测和研究, 积累了丰富的数据和经验, 虽然在 1967 年到 1980 年期间由于历史原因中断了大部分观测, 但是老一辈科学家并没有放弃对一号冰川的研究, 也留下了很多有价值的资料(天山冰川站年报)。根据该站点的物质平衡资料研究者们对该区的环境变化进行了较多研究, 并取得了一定成果。但在长时间尺度资料的利用及其信息获取方面方法比较陈旧, 影响了对观测数据的应用范围。

本文根据描述一号冰川物质平衡特征的参数(包括: 积累区面积、消融区面积、冰川率、零平衡线高度、纯积累、纯消融、消融区积累、积累区消融、季节性积雪、总积累、总消融、平衡差额(万方)、平衡差额(mm)等共 13 个指标)。选用 1959-1991 年历年一号冰川的该 13 项指标进行研究。虽然这 13 个指标每个指标都有自己独立的意义, 但是指标越多, 越不利于对物质平衡特征的总体认识, 也就是说过多的指标掩盖了数据的直观性, 如果仅仅依靠其中的某一两个指标, 则对物质平衡特征的认识必然不全面, 甚至可能出现错误。为了解决这种多指标问题, 必须引入主成分分析方

收稿日期: 2005-8-22; 修改日期: 2005-11-16

基金项目: 受国家自然科学基金(90102016)及中国矿业大学科学研究基金(0F4535)资助。

作者简介: 鞠远江(1975-), 男, 中国矿业大学讲师, 主要从事环境变化及地质灾害研究工作。

法。主成分分析就是设法将具有关联性的多指标体系重新组合成一组较少的、互相无关的综合指标，并且最大限度地保留原来多指标的信息量的一种数学统计方法。近年来该方法在自然科学和社会科学领域都得到了大量的应用，山地冰川物质平衡观测资料符合多指标特征，可以引入该方法进行研究。主成分分析只能给出最具有代表性的指标，对于进一步的、长时间尺度的指标特征难以描述，因此在主成分分析的基础上引入因子分析来提取物质平衡观测数据的主因子，引入功率谱分析来确定主因子的变化特征，对物质平衡特征和环境演变方向进行讨论。

2 结果与讨论

2.1 主成分分析

利用 spss11.0 对所有 13 项指标都进行主成分分析的结果如表 1。

表 1 乌鲁木齐河源一号冰川 13 个物质平衡因子主成分分析结果表

Tab.1 Results of principle component analysis of 13 factors affecting the mass balance of Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River

因子名称	主成分		
	1	2	3
积累区面积	0.949	0.250	0
消融区面积	-0.925	-0.282	0
冰川率	0.882	0.300	0
零平衡线高度	-0.541	-0.427	0.368
纯积累	0.914	0	0.279
纯消融	-0.906	0.122	0
消融区积累	-0.628	0.107	0.707
季节积雪	-0.717	0.621	0.213
积累区消融	-0.345	0.747	-0.429
总积累	0.519	0.601	0.569
总消融	-0.925	0.307	0
平衡差额 (万方)	0.971	0	0.144
平衡差额 (mm)	0.969	0	0.152

通过 spss11.0 的计算，给出了 3 个主成分，然而从分析结果讨论该冰川物质平衡的特征比较困难，变量之间相关性大小的变化难以解释，甚至显得违背常识，究其原因是我们选择的这 13 个变量，都含有面积的因素在内，而本身就是反映面积变化的变量就有 3 个之多，变量的重复运用掩盖了有用信息，如果把这些变量先行处理，用一个变量来代

替，则应该会得到较好的结果，考虑到冰川率即是积累区面积与消融区面积之比，所以去掉积累区面积和消融区面积两项，而零平衡线高度，本身也是反映冰川率的参数，所以也去掉平衡线高度一项；季节积雪为消融区积雪和积累区积雪之和，所以后两项也可以去掉；平衡差额用不同的单位表示不影响其总体变化趋势，因此只选用一组平衡差额数据。按照处理后的数据再进行主成分分析。7 个因子之间的相关性如表 2。

表 2 乌鲁木齐河源一号冰川七个平衡因子之间的相关性分析表

Tab.2 Analysis on the correlations among 7 factors affecting the mass balance of Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River

因子名称	冰川率	纯积累	纯消融	季节积雪	总积累	总消融	差额 (mm)
冰川率	1.000	0.787	-0.701	-0.489	0.569	-0.693	0.777
纯积累	0.787	1.000	-0.742	-0.652	0.694	-0.780	0.902
纯消融	-0.701	-0.742	1.000	0.623	-0.382	0.963	-0.957
季节积雪	-0.489	-0.652	0.623	1.000	0.094	0.812	-0.677
总积累	0.569	0.694	-0.382	0.094	1.000	-0.253	0.542
总消融	-0.693	-0.780	0.963	0.812	-0.253	1.000	-0.949
差额 (mm)	0.777	0.902	-0.957	-0.677	0.542	-0.949	1.000

从相关系数矩阵可以看出任意两个变量之间的相关系数，由此可以判断其相关性大小，相关系数较大的变量一般从属于同一个主成分。从表中看出：冰川率与纯积累、纯消融、平衡差额的相关性强，与季节积雪的相关性最弱；纯积累也是与季节积雪的相关性最弱；而季节积雪只与总消融具有较强的相关性，由此大致可以判断在所得到的两个主成分中，季节积雪与纯积累应该处在不同的主成分中。在表 3 中，给出了提取的两个主成分，提取的原则是初始特征根的累计百分比超过 85%，提取的两个主成分的初始特征根的累计百分比达到了 91.6%，满足条件，可以确定取两个主成分比较合适。

2.2 因子分析

因子分析是在主成分分析的基础上对成分矩阵进行旋转，得到正交因子解。其分析结果如表 3。将旋转前后的成分矩阵对比发现因子分析的结果是将主成分分析的结果更加明朗化了，从以上结果可以看出：季节积雪与第 1 个主因子的关系最密切，而总积累与第 2 个主因子的关系最密切。分析其原因，总积累包括冰川本身的与气候的常年变化密切

相关的积累部分,还包括与气候的年际变化密切相关的积累部分,而季节性积雪则是反映冰川的年际变化最好的参数,据此,我们可以将这 2 个主因子命名为:常年变化趋势因子和年际变化趋势因子。其中,常年变化因子代表一号冰川的多年持续变化趋势和方向,年际变化因子则代表一个平衡年内冰川物质平衡变化特征。这样,对于一号冰川物质平衡的变化趋势,我们就可以从定量的角度,依据两个因子的长年变化规律进行功率谱分析,找出其内在的发展规律。

表 3 乌鲁木齐河源一号冰川七个平衡因子
主成分及正交因子解

Tab.3 Principle components and orthogonal factorization solutions of 7 factors affecting the mass balance of Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River

因子名称	旋转前		旋转后	
	1	2	1	2
冰川率	0.834	0.221	0.586	0.633
纯积累	0.927	0.198	0.676	0.664
纯消融	-0.931	0.120	-0.851	-0.398
季节积雪	-0.719	0.602	-0.929	0.124
总积累	0.534	0.832	0.005	0.989
总消融	-0.944	0.298	-0.957	-0.254
差额 (mm)	0.991	0.008	0.833	0.537

对主因子进行长时间序列的分析,可以判断现代冰川的变化趋势。首先需要计算常年因子和年际因子的时间序列的数值,根据旋转后的因子得分矩阵以及从冰川站观测资料所得到的各变量的长年观测值,如果将原始变量按如下字母命名:冰川率— a ,纯积累— b ,纯消融— c ,季节积雪— d ,总积累— e ,总消融— f ,平衡差额 (mm)— g ,常年因子用 x 表示,年际因子用 y 表示,则可以按式 1 和

式 2 计算常年因子和年际因子得分值,为了使结果具有可对比性,将数据标准化以后进行计算。

$$x=0.834a+0.927b-0.931c-0.719d+0.534e-0.944f+0.991g, \tag{1}$$

$$y=0.221a+0.198b+0.120c+0.602d+0.832e+0.298f+0.007806g, \tag{2}$$

把两个主因子分别作出时间序列的趋势图如图 1。

由两因子的趋势图分析,明显可以看出常年因子具有不断下降的趋势。年际因子在 1987 年以前基本处于上下波动状况,1987 年以后则显出急剧上升的趋势。图中两因子采用的纵坐标值有差异,反映的是两个因子对冰川物质平衡贡献的大小。从图中看出常年因子纵坐标值变化幅度较年际因子大得多,由此认为冰川的物质平衡主要决定于常年因子。我们根据具体资料分析这两个图象:常年因子可以认为代表冰川的进退,从图上看冰川自 1958 年以来,总体趋势是处于不断的退缩过程中,但是有波动;而年际因子可以认为代表平衡年内物质平衡水平的变化,从趋势图上看,在 1975 年以前,该区的物质平衡水平基本上处于平稳阶段,变化不明显,1975 年以后出现较大幅度的波动,到 1987 年以后直至 1991 年,物质平衡水平则急剧升高,实际上是平衡年内降水总量和消融总量增多,即气候由暖干向暖湿转化。多项研究资料表明,我国西北地区在上世纪 20 世纪 80 年代中期以后,出现了由暖干气候转型为暖湿气候的现象^[2-7],乌鲁木齐河源一号冰川作为我国西北地区比较有代表性的一支冰川,很好的反映了这种气候转型现象。

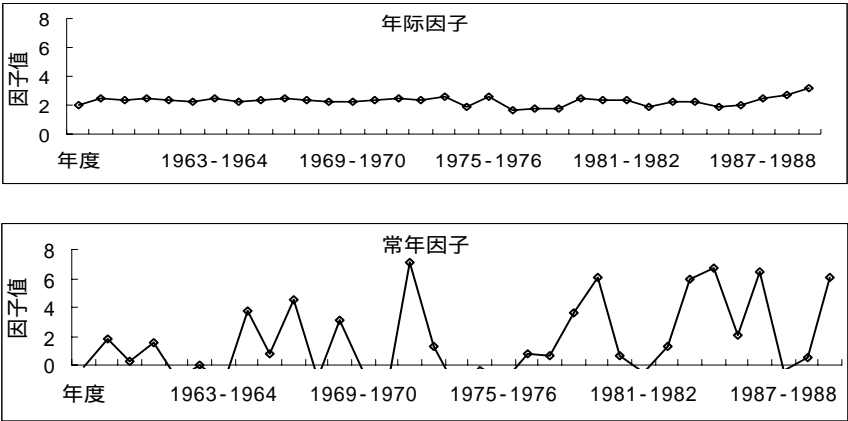


图 1 多年因子和年际因子变化趋势图

Fig.1 Change trends of the perennial and annual factors

2.3 功率谱分析

为了准确的找出常年因子和年际因子的内在变化规律, 必须引入功率谱分析。利用 excel2000 分析软件进行功率谱分析的辅助计算, 将两个因子分别表示为型如 (3) 的形式:

$$x_t = \sum_{i=1}^k (a_i \cos 2\pi f_i t + b_i \sin 2\pi f_i t) + \varepsilon_t, \quad (3)$$

其中: 式中 f_i 为频率, t 为时间序号, k 为周期分量的个数即主周期 (基波) 及其谐波的个数, ε_t 为标准误差 (白噪声序列)。当频率 f_i 给定时, 式 3 可以视为多元线性回归模型, 可以证明, 待定系数 a_i , b_i 的最小二乘估计为:

$$\begin{aligned} \hat{a}_i &= \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N x_t \cos 2\pi f_i t, \\ \hat{b}_i &= \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N x_t \sin 2\pi f_i t, \end{aligned} \quad (4)$$

这里 N 为观测值的个数。定义时间序列的周期图

$$I(f_i) = \frac{N}{2} (a_i^2 + b_i^2), \quad i = 1, 2, \dots, k, \quad (5)$$

式中 $I(f_i)$ 为频率 f_i 处的强度。以 f_i 为横轴, 以 $I(f_i)$ 为纵轴, 绘制时间序列的周期图, 可以在最大值处找到时间序列的周期。为了以后进一步进行傅立叶变化的方便, 我们去掉一年的资料, 则正好剩余 32 年的资料, 是 2^5 , $N=32$, $t=1, 2, \dots, N$, $f_i=i/N$, 将分析结果标准化后做成趋势图如图 2。

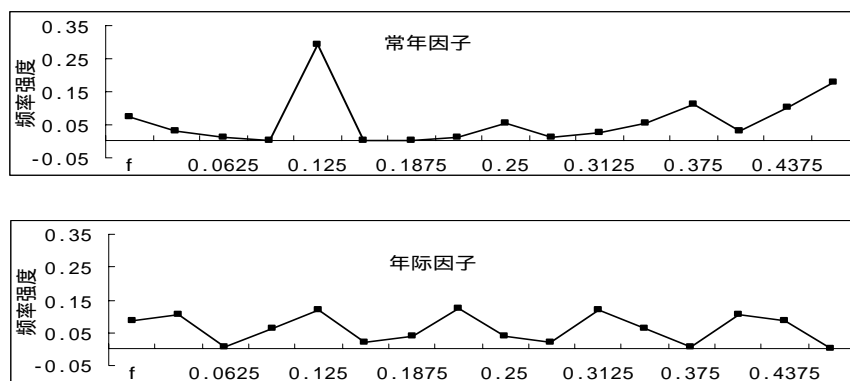


图 2 常年因子和年际因子频率强度图

Fig.2 Frequency intensities of the perennial and annual factors

从图 2 看出, 常年因子的周期是 6.4 年, 可见一号冰川在总体趋势是持续的后退的情况下, 其物质平衡的变化具有波动性, 并具有 6 年左右的周期, 其原因目前暂时不明, 应进一步做工作。而年际因子的周期并不明显, 按照突变点取周期, 则存在 10-16 年周期、6.4 年周期、4 年和 3 年周期, 其中 10-16 年周期可以解释为太阳黑子变化引起气候变化的年际响应, 而 6.4 年周期可以解释为年际因子受冰川本身常年变化趋势的影响, 对于冰川来说, 这种影响基本可能是冰川率的变化造成的对季节积雪的融化时间的影响。

3 结论

通过以上分析, 将乌鲁木齐河一号冰川的物质

平衡数据归纳为两个主因子数据, 即: 常年变化趋势数据和年际变化趋势数据。这两个因子分别代表冰川本身所固有的, 反映常年变化方向和趋势的参数, 以及受平衡年内降水和消融影响, 反映冰川物质平衡水平的参数。其中常年因子具有随时间而下降的趋势, 冰川的物质平衡是处在持续偏负的状态中, 冰川本身在持续后退。年际因子在 1975 年以前相对平稳, 该区的物质平衡水平, 即年际气候没有显著的变化; 1975 年到 1986 年的 10 年当中, 年际因子出现剧烈的波动, 当地年际气候很不稳定; 1987 年以后年际因子曲线出现了强烈的上升趋势, 冰川物质平衡水平持续提高, 年际气候转向降水丰富、消融增加的状态。对两个因子的频率强度图分析, 发现常年因子具有 6 年左右的周期, 但其原因尚不明, 需做进一步的工作。而年际因子变化周期

不明显,其变化周期与太阳黑子具有相关性,并受到常年因子的影响。

参考文献 (References)

- [1] Zhang Gouwei, Wu Sufen, Wang Zhijie. The signal of climatic shift in Northwest China deduced from river runoff change in Xinjiang Region[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25 (2): 183-187. [张国威, 吴素芬, 王志杰. 西北气候环境转型信号在新疆河川径流变化中的反映[J]. *冰川冻土*, 2003, 25 (2): 183-187.]
- [2] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm dry to warm humid in Northwest China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24 (3): 219-226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J]. *冰川冻土*, 2002, 24 (3): 219-226.]
- [3] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm dry to warm wet in Northwest China[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23 (2): 152-164. [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23 (2): 152-164.]
- [4] Wang Yan, Li Xiong, Miao Qilong. Analyses on variety characteristics of temperature in Qinghai-Tibet Plateau in recent 50 years[J]. *Arid Land Geography*, 2004, 27(1): 41-46. [王堰, 李雄, 缪启龙. 青藏高原近50年来气温变化特征的研究[J]. *干旱区地理*, 2004, 27 (1): 41-46.]
- [5] Yuan Yujiang, Mu Guijin. Features of spring climate change in Tianshan Mountainous Area for the recent 40 years and comparison with that in plain area of Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2004, 27 (1): 35-40. [袁玉江, 穆桂金. 新疆天山山区近40年春季气候变化特征与平原区的比较[J]. *干旱区地理*, 2004, 27(1): 35-40.]
- [6] Chen Yimeng, Chen Fahu, Chen Xingsheng, et al. Laws of climate change in arid and semiarid zones of China since last glacial period[J]. *Arid Land Geography*, 2004, 27 (1): 161-165. [陈一萌, 陈发虎, 陈兴盛, 等. 中国干旱、半干旱区末次冰期以来气候变化规律[J]. *干旱区地理*, 2004, 27 (2): 95-99.]

Statistics and analysis on the mass balance of Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River in the Tianshan Mountains

JU Yuan-jiang¹, WEI Xia^{2,3}, LIU Geng-nian³

(1 College of Natural Resources and Environmental Sciences, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu, China;

2 College of Business Administration Science, Zhejiang University of Finance & Economics, Hangzhou 310012, Zhejiang, China;

3 College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Based on the observation data since the 1960s of Glacier No.1 at the headwaters of the Urumqi River, the mathematics statistical methods are used in this paper to derive the principal components of the main factors affecting the mass balance of the glacier, and two principal factors affecting the mass balance of the glacier are also derived, among them the first principal factor is the perennial factor reflecting the long-term change trend of the glacier, and the second one is the annual factor reflecting the annual mass balance of the glacier. The analyzed result of the perennial factor reveals that the glacier is in a continuous shrinkage. The analyzed result of the annual factor reveals that the glacier fluctuated slightly before 1975 but violently during the period from 1976 to 1986. The annual factor has been sharply increased since the mid-1980s, which reveals that both the glacial accumulation and melt have been significantly increased, that is the climate change in northwest China has shifted from the warming-drying pattern towards the warming-wetting pattern since the mid-1980s. The fluctuation of the perennial factor is periodical, especially the 6-year periodical change is significant, its causes, however, are not understood yet. The periodicity of the annual factor is not so significant, and it is considered that the fluctuation of the annual factor is related to the change of sunspots and affected by the perennial factor.

Key words: Glacier No.1 ; mass balance ; headwaters of the Urumqi River ; principle component analysis ; the Tianshan Mountains