

文章编号: 1000-5641(2010)04-0007-09

天山一号冰川地区气候要素的变化 及其对冰川物质平衡的影响

沈 琪¹, 徐建华², 王占永², 王飞腾³

(1. 华东理工大学 商学院, 上海 200237;

2. 华东师范大学 教育部地理信息科学重点实验室, 上海 200062;

3. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 冰冻圈与环境重点实验室天山冰川站, 兰州 730000)

摘要: 通过对逐日气温、降水、流量和相对湿度等实测数据进行小波分析, 提取了天山乌鲁木齐河源一号冰川地区近 10 年来的气候变化特征. 在此基础上, 运用灰熵关联分析方法进一步研究了冰川物质平衡量与不同气候要素的关联关系. 结果显示: 研究区气候要素在 4 d、16 d、32 d 和 64 d 尺度上的变化存在阶段性、周期性和弱趋势性三大特征; 在较宽的时间尺度上, 气温要素的极大值与极小值呈非对称性变化; 1996—2004 年期间, 冰川物质平衡主要受气温类要素的影响; 9—5 月(物质平衡年)的降水量是冰川物质积累的重要来源.

关键词: 小波分析; 灰熵关联分析; 时间序列; 天山乌鲁木齐河源一号冰川

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

Climate changes and their influence on the mass-balances of Glacier No. 1 in the headwater of Urumqi River, Tianshan, China

SHEN Qi¹, XU Jian-hua², WANG Zhan-yong², WANG Fei-teng³

(1. School of Business, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China;

2. Key Lab of GIS, Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 200062, China;

3. State Key Laboratory of Cryosphere Science / Tianshan Glaciological Station, CAREERI CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract Based on the daily data of temperature, rainfall, flow and relative humidity, this paper attempted to show the characters of climate change at Urumqi Glacier No. 1 in recent 10 years by wavelet analysis. Furthermore, grey entropy relational analysis was used to study the correlation between the glacier mass balances and various meteorological elements. The results indicated that: (1) at the scale of 4 d, 16 d, 32 d and 64 d the changes of meteorological factors in the study area have three major characteristics represented by stages, periodicity, and weak trend; (2) at a wider time scale, there is a non-symmetry change between the maximum and the minimum of temperatures; (3) during the period of 1996—2004, the glacier mass balance is mainly affected by the temperature factors; (4) the precipitation from September to May (the

收稿日期: 2009-04

基金项目: 中国科学院知识创新二期项目(KZCX2-XB2-03); 上海重点学科建设项目(B410); 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室开放基金

第一作者: 沈琪, 女, 博士, 讲师, 研究方向为生态经济模拟, E-mail: shenq03@163.com.

balance year) is the main source of Glacier accumulation.

Key words: wavelet analysis; grey entropy relational analysis; time series; Unumqi Glacier No. 1

0 引 言

由于气候变暖和人类活动的影响,天山乌鲁木齐河源一号冰川的消融十分显著^[1-4],表现为冰川融水径流剧增,面积缩小,末端后退,雪线升高等^[1].作为西北干旱区维持生产、生活的重要水源之一,一号冰川的这些变化引起学者和相关部门的普遍关注.

冰川变化的驱动因素是冰川区水热条件,即气候的变化^[1].其中,气温和降水是影响冰川消融的两大要素.以往对天山乌鲁木齐河源一号冰川地区气象数据时间序列的研究多以年为尺度,且多从单一要素入手,以经典统计方法进行分析^[3,7-9].这种研究方法在一定程度上掩盖了气候要素在更小时间尺度上的变化特征,同时也忽略了各要素之间相互影响、相互制约的关系.本文拟利用小波变换方法,从4 d,16 d,32 d和64 d 4个时间尺度上分析研究区1996—2004近10年间气温、降水、径流量和相对湿度4个指标在冰川物质平衡年间的非线性变化特征,并利用灰熵关联分析方法分析各气候要素对冰川物质平衡的影响.

1 资料与方法

1.1 区域概况

天山乌鲁木齐河源一号冰川(简称一号冰川)地处亚洲中部,位于天山山脉东段,是中国监测时间最长,资料最为详尽的冰川,也是最为临近人类活动区的冰川之一.同时,它也是世界冰川监测服务处(WGMS)组织、协调的冰川监测网络中长期选定的参照冰川(Reference glaciers)之一,是中亚内陆地区的代表.

根据长时间序列的观测资料与相关研究,一号冰川自1959年开始观测以来一直处于退缩状态,尤其是20世纪90年代中期以来出现了明显的加速趋势.东西两支冰舌在1993年完全分离.1992—2004年,东支退缩38.7 m,西支退缩64.1 m.随着冰川后退,冰川末端的海拔从1962年的3 736 m上升到1980年的3 746 m.冰川面积在1962—2006年的45年间减少了0.27 km² (14%),其中1992—2006年间减少0.16 km²,占总减少量的59%;一号冰川地区的气温自1985年以来呈上升趋势,而影响冰川消融的主要因素——积温则与气温保持相同的变化^[3];对冰川粒雪特征和冰川成冰带的研究显示,目前冰川雪层剖面的组成和结构已发生了明显的变化,表现在雪层厚度减薄,结构变简单,各种粒雪层的边界变模糊等方面^[5];冰川物质平衡年度值和累计值均有负增长趋势,物质损失严重.

1.2 数据

研究使用的资料为一号冰川水文点1996—2004年逐日观测资料,包括冰川区气温、降水、流量和相对湿度等.其中,相对湿度仅在5—8月冰川消融期观测.

物质平衡变化是冰川对气候变化的直接反应,资料取自观测年报物质平衡资料和相关研究成果^[10],为年数据.

积温是影响冰川消融的主要因素,本文主要计算了气候积温和正积温.气候积温是稳定通过界限温度初、终日期间(包括初日、终日在内)的各日平均气温之和,代表了冰川消融期 $T \geq 0$ °C的积温.本文采用0 °C作为界限温度值,采用4 d小波变换确定其稳定通过0 °C的

初、终日, 然后求解气候积温; 正积温是整年内 $T \geq 0$ °C 的积温.

1.3 方法

1.3.1 小波分析

小波变换是一种信号的时间-尺度(时间-频率)分析方法, 具有多分辨率分析的特点^[11]. 这种方法为认识气候要素的周期变化提供了一种新的视角.

考虑气候要素时间序列 $X(t)$, 通过父小波和母小波映射变换, 作如下形式的二进展开:

$$S_{j,k} = \int X(t) \Phi_{j,k}(t) dt, \quad (1)$$

$$d_{j,k} = \int X(t) \Psi_{j,k}(t) dt, \quad j = 1, 2, \dots, J. \quad (2)$$

其中, J 为最大尺度, $\Phi_{j,k} = 2^{-j/2} \Phi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right)$ 是父小波, $\Psi_{j,k} = 2^{-j/2} \Psi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right)$ 是母小波. 一般来说, 父小波有最宽的支集, 用于最低频率的平滑部分; 母小波用于更高频的细节部分. 可以用父小波来重构趋势, 用母小波分析与趋势的离差. 信号 $X(t)$ 可以表达为

$$X(t) = S_J + D_J + D_{J-1} + \dots + D_1 \quad (3)$$

其中, $S_J = \sum_k S_{J,k} \Phi_{J,k}(t)$, $D_j = \sum_k d_{j,k} \Psi_{j,k}(t)$, $j = 1, 2, \dots, J$. 通常, $X(t)$ 的多分辨分解为

$$S_{j-1} = S_j + D_j. \quad (4)$$

$\{S_J, S_{J-1}, \dots, S_1\}$ 是函数 $X(t)$ 精细水平递增的多分辨逼近序列, 相应的多分辨分解为 $\{S_J, D_J, D_{J-1}, \dots, D_j, \dots, D_1\}$. 尺度 2^j 是分辨率 2^{-j} 的倒数.

本文以 Symmlet 作为基小波, 以 sym8 为小波函数做出小波分解与重构, 从多分辨率的时间尺度角度揭示一号冰川气候要素非年际变化的趋势. 选择 S_6, S_5, S_4 和 S_2 4 种分辨率进行分析.

1.3.2 灰熵关联分析

冰川物质平衡的变化是多因素综合作用的结果, 这些因素之间的关系是灰色的, 很难分清哪些是主导因素, 哪些是非主导因素; 哪些因素之间关系密切, 哪些不密切. 灰色关联分析为解决这类问题提供了一种行之有效的方法. 它根据因素之间发展趋势的相似或相异程度, 亦即“灰色关联度”, 来衡量因素间关联程度. 但传统的灰色关联方法在确定关联度时, 多采用计算逐点关联测度值平均值, 这一方面使得在点关联测度值分布离散情况下由点关联测度值大的点决定了总体关联精度的倾向; 另一方面, 平均值淹没了许多点关联测度的个性, 没有充分利用由点关联测度值提供的丰富信息^[12]. 因此, 我们构造灰熵关联模型来克服传统灰色关联模型的缺陷. 具体建模思路如下.

(1) 设定参考序列和比较序列 已知序列 $X_0, X_1, X_2, \dots, X_n$, 其中 X_0 为参考数据列(本文中为物质平衡序列); $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 为比较数据列(本文中为气候要素序列), 每个数据均有 m 个时刻, 记为 $X_1(m), X_2(m), X_3(m), \dots, X_n(m)$.

(2) 为消除参考序列和比较序列的量纲和数量级差异, 采用正负指标极差标准化方法对原始数据进行无量纲化处理.

对于正向指标,

$$X'_i = \frac{x_i(j) - \min_j \{x_i(j)\}}{\max_j \{x_i(j)\} - \min_j \{x_i(j)\}}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (5)$$

对于逆向指标,

$$X'_i = \frac{\max\{x_i(j)\} - x_i(j)}{\max\{x_i(j)\} - \min\{x_i(j)\}}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m. \quad (6)$$

得到无量纲的数据序列,

$$X'_i = \{X'_i(1), X'_i(2), X'_i(3), \dots, X'_i(m), i = 0, 1, 2 \dots n\}.$$

(3) 计算关联系数

构造数据列级差矩阵 $Y, Y = \begin{bmatrix} Y_1(1) & Y_1(2) & \dots & Y_1(m) \\ Y_2(1) & Y_2(2) & \dots & Y_2(m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_n(1) & Y_n(2) & \dots & Y_n(m) \end{bmatrix}_{n \times m}.$ (7)

其中, $Y_i(j) = |X'_0(j) - X'_i(j)|, i = 1, 2 \dots n, j = 1, 2 \dots m.$ 求两级最小差 Y_{\min} 和两级最大差 Y_{\max} :

$$Y_{\min}(i) = \min(Y_i(1), Y_i(2), \dots, Y_i(m)),$$

$$Y_{\max}(i) = \max(Y_i(1), Y_i(2), \dots, Y_i(m)). \quad (8)$$

得到关联系数矩阵

$$\xi = \begin{bmatrix} \xi_1(1) & \xi_1(2) & \dots & \xi_1(m) \\ \xi_2(1) & \xi_2(2) & \dots & \xi_2(m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \xi_n(1) & \xi_n(2) & \dots & \xi_n(m) \end{bmatrix}_{n \times m}.$$
 (9)

其中, $\xi_i(j)$ 为关联系数, $\xi_i(j) = (Y_{\min} + 0.5Y_{\max}) / (Y_i(j) + 0.5Y_{\max}).$

(4) 计算灰熵关联度

首先定义参考数据列 X_0 与比较数据列 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 之间的映射

$$Map: R_j \rightarrow P_j \quad (10)$$

为灰关联系数分布映射. 其中, $R_i = \{r(x_0(k), x_j(k)) \mid k = 1, 2, \dots, n\},$ 映射值

$$p_h = \frac{\Delta r(x_0(h), x_j(h))}{\sum_{k=1}^n r(x_0(h), x_j(h))}$$

为分布的密度值, $p_h \in P_j; h = 1, 2, \dots, n; \sum p_h = 1.$ 得到 X_j 的灰关联熵计算公式

$$H(R_j) = - \sum_{h=1}^n p_h \ln p_h. \quad (11)$$

在此基础上定义

$$E_r(x_j) = H(R_j) / H_m \quad (12)$$

为序列 X_j 的灰熵关联度. H_m 代表由 n 个属性元素构成的差异信息列最大熵.

那么参考数据列 X_0 与比较数据列 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 之间的灰熵关联度为

$$E_r = (E_{r1}, E_{r2}, \dots, E_m). \quad (13)$$

2 结果与讨论

2.2 气候要素的非线性变化趋势

通过对各气候要素的小波分解与重构, 得到了不同时间尺度上各要素的线性变化趋势

(见图 1 和 2).

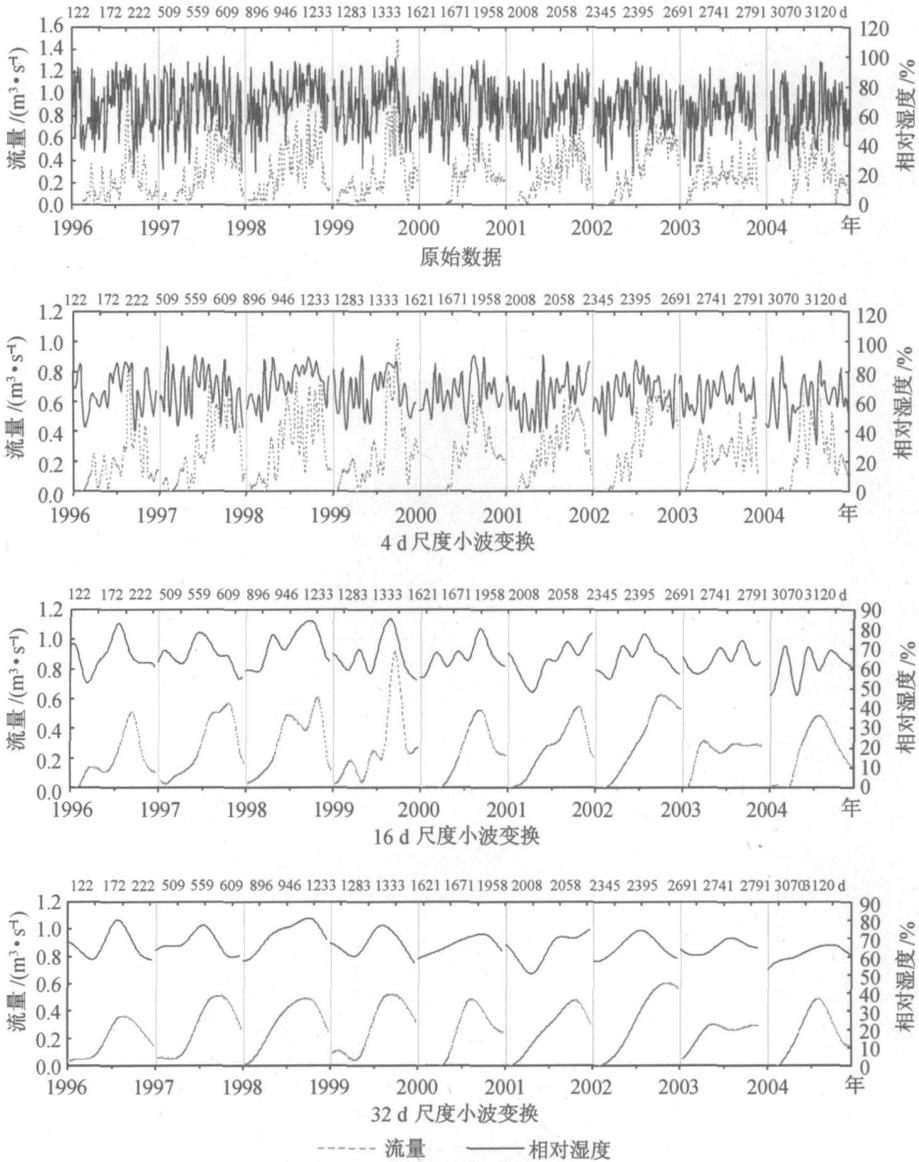


图 1 一号冰川水文点 5—8 月流量和相对湿度在不同时间尺度下的非线性趋势

Fig. 1 The nonlinear trend of flow and relative humidity from May to August at different time scales

流量和相对湿度是以每年 5—8 月的实测数据为基础进行计算, 分别计算了 S2, S4 和 S5 这 3 个尺度上的非线性变化趋势. 在较小的尺度上, 相对湿度振荡较剧烈, 没有明显的规律可循. 而流量则存在先升后降的总体趋势. 随着尺度加大两要素初步表现出“S”型变化的前半段趋势. 在 S5 尺度上, 各年 5—8 月流量和相对湿度的极值点大体上在同一时间段出现, 有必要研究径流对相对湿度的影响.

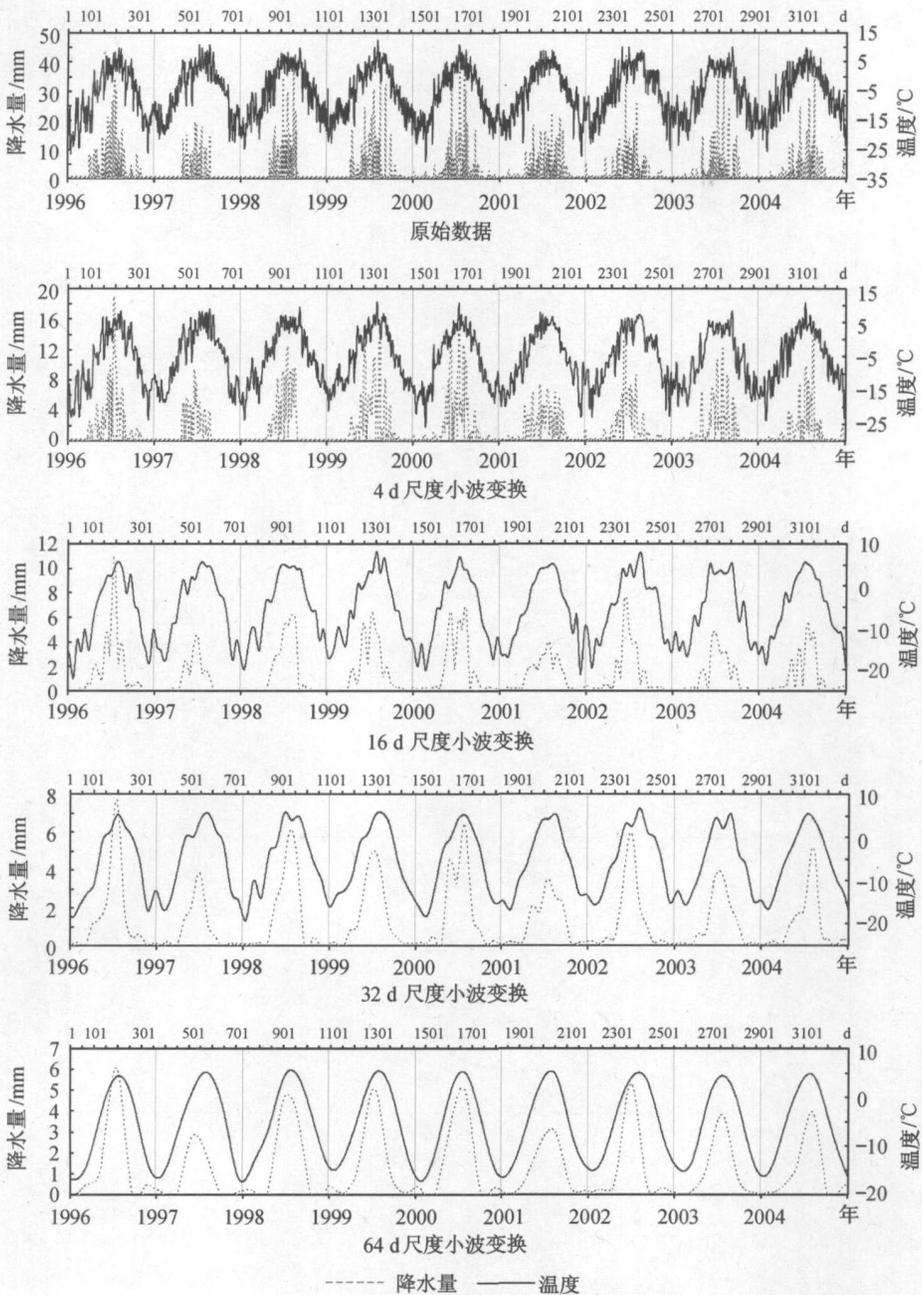


图2 一号冰川水文点温度和降水量在不同时间尺度下的非线性趋势

Fig. 2 The nonlinear trend of temperature and rainfall at different time scales

从各时间尺度来看, 气温和降水量均以年为周期起伏振荡, 随着时间尺度的加宽, 这种趋势越发明显, 而且两要素的极大值点均集中在5—8月冰川消融期. 随着尺度细化局部极值点明显增多. 值得注意的是: (1) 在S6尺度上, 即64(2⁶) d尺度上降水量除了在5—8月冰川消融期有极大值点外, 在每年的冬半季有一个较小的起伏过程; 以往以年为尺度的研究中这一波动往往被忽略, 但有定性研究认为, 这些降水对冰川物质平衡有较大的影

响^[1,9]; 本文在后续研究中将用灰熵关联分析方法对此进行定量化分析. (2) 降水量的振幅在各尺度上均不稳定, 峰值主要集中在 6, 7, 8 三个月. (3) 气温要素的振幅逐渐缩小, 在较宽的尺度上, 这种变化较为明显; 而且其振幅的极大值变化不大、极小值相对变化较明显, 即极大值与极小值呈非对称性变化.

总体来说, 研究区气候要素在 S2, S4, S5 和 S6 4 个时间尺度上的变化存在周期性和阶段性和弱趋势性的特征. 周期性是指各要素均呈现出周期波动变化的特征, 尤其是气温、降水和径流量 3 个要素. 而且时间尺度越宽, 周期性越明显; 阶段性是针对降水和相对湿度, 其振幅变化较大, 不同周期内的极大值存在明显差异. 对于相对湿度指标, 由于缺乏全年逐日观测数据, 其变化情况有待于进一步的完善; 要素均未表现出明显的增加或减少趋势. 主要是气温要素表现出振幅逐渐变小, 极小值升高的特征. 但在 9 年的研究时段内, 其变化相对缓慢, 不如其他长时间序列研究成果的变幅明显^[1,3,9].

2.2 气候要素对冰川物质平衡的影响

冰川物质平衡变化是冰川对气候变化的直接反应, 它反映了冰川在不同平衡年度内总积累量与总消融量之间的差异程度.

鉴于以往对冰川物质平衡变化影响因素的定性、定量研究成果^[13-17], 以及天山 1 号冰川水文点的观测项目, 结合气候要素非线性变化趋势, 以冰川物质平衡年为时间节点选择了 1994/1995—2003/2004 逐年度的年均温、冬半年均温(9—5 月)、夏半年均温(5—8 月)、气候积温、气候积温持续天数、正积温、正积温持续天数、5—8 月平均相对湿度、年降水量、5—8 月降水量和 9—5 月降水量等要素来分析同期 1 号冰川物质平衡变化的主导气象因子.

研究表明: 在缺乏气候要素修正值研究的山区, 只要能保证所选择的高山气象台站的气候要素变化趋势与冰川作用区的气候要素变化趋势相同, 即选用距研究冰川水平距离较近, 海拔高差不大的气象台站资料, 就可以直接进行气候要素与冰川平衡线的灰熵关联分析^[13]. 因此, 本文直接采用 1 号冰川水文点的观测资料进行分析.

从表 1 看出, 以冰川物质平衡为参考序列, 与气候要素的关联度依次为夏半年均温(5—8 月) > 物质平衡年均温 > 冬半年均温(5—9 月) > 9—5 月降水量 > 气候积温 > 年降水量 > 气候积温持续天数 > 正积温 > 正积温持续天数 > 5—8 月降水量 > 5—8 月平均相对湿度.

表 1 冰川物质平衡量与不同气候要素的灰熵关联度

Tab. 1 Grey entropy relational degree between the glacier mass balance and various meteorological elements

物质平衡年均温	冬半年均温(9—5 月)	夏半年均温(5—8 月)	气候积温	气候积温持续天数	正积温	正积温持续天数	5—8 月平均相对湿度	年降水量	5—8 月降水量	9—5 月降水量	
关联度	0.642 5	0.638 8	0.721 8	0.632 7	0.610 1	0.592 9	0.592 4	0.554 6	0.615 9	0.591 3	0.637 3

值得注意的是: (1) 研究时段内气温要素对物质平衡量的变化起主要作用. 气候积温对冰川物质平衡量的影响要大于正积温. 这说明年内稳定的 $T \geq 0$ °C 的时段是冰川消融的主要阶段. (2) 5—8 月降水量和 9—5 月降水量与冰川物质平衡量之间的关联度非常接近, 且 9—5 月降水量的关联度略大于 5—8 月降水量的关联度. 说明降水量在小波变换 64 d 时间尺度上所体现出的冬半季的小振幅有较大的意义, 9—5 月的降水量是冰川物质积累的重要来源. (3) 相对湿度与冰川物质平衡量关联程度大于 0.5. 同时, 由于温度与空气的饱和蒸汽压具有正相关关系, 高温的空气比低温的空气能容纳更多的气态水, 说明较高的湿度有利于

冰川物质平衡的正向变化.

3 结 论

(1) 通过小波分析, 在 1996—2004 年的研究时段内, 研究区气候要素的变化总体上存在周期性、阶段性和弱趋势性的特征. 其中气温的振幅逐步缩小, 极大值变化不大, 极小值变化较明显, 即极大值与极小值呈非对称性变化趋势.

(2) 在以往气候要素长时间序列的分析中, 往往将冬半季降水的变化忽略, 64 d 的小波变换较清晰地揭示了这一特征. 而且灰熵关联分析结果显示, 9—5 月降水量与 5—8 月降水量对冰川物质平衡的影响几乎同等重要. 这可能是由于乌鲁木齐河源地区夏季固态降水多为易于消融而不易冷储的湿雪, 但其机制需要进一步的深入研究.

(3) 很多定性研究指出积温是影响冰川物质平衡的一个主要因素. 本文运用灰熵关联分析从定量的角度揭示了积温对冰川物质平衡的影响. 分析认为气候积温对冰川物质平衡的影响要大于正积温. 这主要是因为气候积温代表的是冰川消融期 $T \geq 0$ °C 的积温, 而正积温代表了全年 $T \geq 0$ °C 的积温, 说明稳定的 $T \geq 0$ °C 的时段对冰川消融的影响更大.

[参 考 文 献]

- [1] 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 冰川消融对气候变化的响应: 以乌鲁木齐河源 1 号冰川为例 [J]. 冰川冻土, 2007, 29: 333-342.
LI Z Q, SHEN Y P, WANG F T, et al. Response of glacier melting to climate change: Take Urumqi glacier No. 1 as an example [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29: 333-342.
- [2] 姚檀栋, 刘时银, 蒲健辰, 等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响 [J]. 中国科学(D 辑), 2004, 34 (6): 535-543.
YAO T D, LIU S Y, PU J C, et al. Recent glacial retreat in High-Asia in China and its impact on water resources in Northwest China [J]. Science in China (Series D), 2004, 34 (6): 535-543.
- [3] 李忠勤, 韩添丁, 井哲帆, 等. 乌鲁木齐河源区气候变化和 1 号冰川 40a 观测事实 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 117-123.
LI Z Q, HAN T D, JING Z F, et al. A summary of 40 year observed variation facts of climate and Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River, Tianshan, China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 117-123.
- [4] YE B S, YANG D Q, JIAO K Q, et al. The Urumqi River source Urumqi Glacier No. 1, Tianshan, China: Changes over the past 45 years [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32, L21504, doi: 10.1029/2005GL024178.
- [5] 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川消融对气候变化的响应 [J]. 气候变化研究进展, 2007 (3): 132-137.
LI Z Q, SHEN Y P, WANG F T, et al. Response of melting ice to climate change in the glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountain [J]. Advances in Climate Change Research, 2007(3): 132-137.
- [6] 苏宏超, 魏文寿, 韩萍. 新疆近 50a 来的气温和蒸发变化 [J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 174-178.
SU H C, WEI W S, HAN P. Change in air temperature and evaporation in Xinjiang during recent 50 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(2): 174-178.
- [7] 王晓军, 王仲祥, 谢自楚. 从乌鲁木齐河源 1 号冰川二十八年来变化看天山地区近期气候变化趋势 [J]. 科学通报, 1988(9): 693-696.
WANG X J, WANG Z X, XIE Z C. A change trend of recent climatic on the Tianshan regions from the change of the past 28 years of the Glacier No. 1 at the Urumqi River Headwater, Tianshan [J]. Chinese Science Bulletin,

- 1988(9): 693-696.
- [8] 王宁练, 刘时银. 从乌鲁木齐河源 1 号冰川变化估计近百年来该地区夏季升温[J]. 冰川冻土, 1997, 19(3): 207-212.
WANG N L, LIU S Y. Summer temperature rise quantified from the change of the Glacier No. 1 at the source of Urumqi River in the 20th century[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(3): 207-212.
- [9] 王国亚, 沈永平, 毛炜峰. 乌鲁木齐河源区 44a 来气候变暖特征及其对冰川的影响[J]. 冰川冻土, 2005, 27: 813-819.
WANG G Y, SHEN Y P, MAO W Y. Climate warming at headwater of Urumqi River, Xinjiang in past 44 years and its impact on glacier shrinking[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27: 813-819.
- [10] 杨惠安, 李忠勤, 叶柏生, 等. 过去 44 年乌鲁木齐河源一号冰川物质平衡结果及其过程研究[J]. 干旱区地理, 2005, 28(1): 76-80.
YANG H A, LI Z Q, YE B S, et al. Study on mass balance and process of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River in the past 44 years[J]. Arid Land Geography, 2005, 28(1): 76-80.
- [11] 胡昌华, 张军波, 夏军, 等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计: 小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999.
HU C H, ZHANG J B, XIA J, et al. Analysis of System & Design: Wavelet Analysis Based on MATLAB[M]. Xi'an: Xi'an Electronics Science and Technology University Press, 1999.
- [12] 张绍良, 张国良. 灰色关联计算方法比较及其存在的问题分析[J]. 系统工程, 1996, 14(3): 45-9.
ZHANG S L, ZHANG G L. Comparison of grey relational methods and analysis of its problems [J]. Systems Engineering, 1996, 14(3): 45-9.
- [13] 王宁练. 冰川平衡线变化的主导气候因子灰色关联分析[J]. 冰川冻土, 1995, 17(1): 8-15.
WANG N L. Grey relational analysis of the leading climatic factor influencing the changes of the equilibrium line [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1995, 17(1): 8-15.
- [14] JING Z F, JIAO K Q, YAO T D, et al. Mass balance and recession of Urumqi glacier No. 1, Tianshan, China over the last 45 years [J]. Annals of Glaciology, 2006, 43: 214-217.
- [15] 刘时银, 丁永建, 王宁练, 等. 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[J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 9-13.
LIU S Y, DING Y J, WANG N L, et al. Mass balance sensitivity to climate change of the Glacier No. 1 at the Urumqi River Head, Tianshan Mts [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1998, 20(1): 9-13.
- [16] 刘潮海, 谢自楚, 王纯足. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡研究[J]. 冰川冻土, 1997, 19(1): 17-24.
LIU C H, XIE Z C, WANG C Z. A research on the mass balance processes of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River, Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1997, 19(1): 17-24.
- [17] JHANNESON T, RAYMOND C, WADDING E. Time-scale for adjustment of glaciers to change in mass balance [J]. Journal of Glaciology, 1989, 35(121): 355-369.