

1959—2008年乌鲁木齐河源1号冰川 融水径流变化及其原因

孙美平¹, 李忠勤^{1, 2}, 姚晓军^{1, 2}, 张明军²

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室/天山冰川站, 兰州 730000;

2. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 采用数理统计、Morlet 小波分析和 Mann-Kendall 突变检验对乌鲁木齐河源1号冰川1959—2008年径流序列进行分析, 揭示了冰川融水径流的变化趋势、周期特征和突变特性, 并对径流与气候、冰川变化关系进行了探讨。结果表明: 乌鲁木齐河源1号冰川近50a来径流增加趋势显著, 特别是在1993年发生突变后, 平均径流较1993年前增加了69.4%。径流序列第一主周期为15a, 第二主周期为6a。在13~16a时间尺度上看, 1号冰川融水径流在未来的几年将继续保持偏多趋势, 但是从5~7a和超长期时间尺度上看则相反。冰川融水径流与冰川物质平衡、年均气温、消融期气温及年降水量存在良好的瞬时响应关系, 其中消融期气温的振动对冰川融水径流振动能量贡献最大, 在气温超过2℃时, 径流将加速增长。物质平衡变化100mm可引起河流径流变化 $22.9 \times 10^4 \text{ m}^3$, 1号冰川过去50a累积物质平衡为-13 693 mm, 相当于额外补给河流径流量 $3 135.7 \times 10^4 \text{ m}^3$, 约是年径流量的16.1倍。

关键词: 冰川融水径流; 径流变化; 气候变化; 物质平衡; 1号冰川

中图分类号: P343.6; P467 文献标志码: A 文章编号: 1000-3037(2012)04-0650-11

在全球变暖、冰川萎缩背景下, 冰川对气温升高的水文响应不仅是冰冻圈科学研究的一个核心问题^[1-2], 而且日益受到水资源管理部门的高度重视^[3-4]。冰川作为西北干旱区重要的水资源^[5], 分析冰川区径流的长期变化, 认识其变化趋势与演化规律, 不仅有助于深入了解冰川区水循环与水平衡以及流域的结构和功能, 而且对西北干旱区水资源合理开发与利用具有重要现实意义^[6]。

目前, 在我国西部仅有乌鲁木齐河源1号冰川有冰川水文的长期连续监测, 许多学者曾在不同时期对其观测资料进行过分析和总结。如康尔泗等将日照、日平均气温、低云量、水汽压和风速等气象观测要素作为基本输入因子, 建立了冰川消融参数化能量平衡模型^[7], 模拟计算了冰面逐日辐射平衡和能量平衡, 认为冰川作用区径流是能量、水量和物质综合平衡作用过程的产物^[8]。叶柏生等利用统计方法分析了1号冰川径流对气候变化的响应, 表明径流与夏季气温和降水呈正相关关系, 1号冰川水文点径流和冰川物质平衡变化主

收稿日期: 2011-06-14; 修订日期: 2012-02-09。

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB951401); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-GJ04); 国家重点基础研究发展计划(2010CB951003); 西北师范大学青年教师科研能力提升计划项目(NWNU-LKQN-10-35)。

第一作者简介: 孙美平(1982-), 女, 辽宁沈阳人, 博士研究生, 主要从事冰川水文与气候变化方向研究。E-mail: sunmeiping1985@163.com

致谢: 本文所用资料来自天山冰川站的长期观测, 是不同时期天山冰川站工作人员努力的结果, 金爽在水文数据整理时给予了大量帮助, 在此特致感谢!

要受夏季气温控制^[9]。李忠勤等对 1 号冰川融水径流进行了计算,认为 1995 年以来径流显著增加,冰川亏损加速,二者同受气温升高和降水增多影响^[3]。韩添丁等分析了 1 号水文点径流极值的时空特征,得出春季极大值径流呈现轻微增大趋势,夏季呈现出轻微减小趋势^[10]。这些研究成果大都反映了对某一时期冰川融水径流的认识,那么 1 号冰川自有观测记录至今,径流长序列变化如何?而且,近年来随着气候显著变暖、冰川加速退缩,1 号冰川融水径流又发生了怎样的变化?本文基于乌鲁木齐河源 1 号冰川融水径流长时间序列观测资料,从变化趋势、周期特征和突变特性三方面入手,尝试揭示不同时间尺度下隐含的冰川融水径流变化规律和丰枯变化趋势,在此基础上结合河源区气候变化、冰川退缩进行对照分析,探讨冰川融水径流对气候、冰川变化的响应及其交互作用。

1 乌鲁木齐河源 1 号冰川与观测资料

1.1 乌鲁木齐河源 1 号冰川

乌鲁木齐河源 1 号冰川($43^{\circ}06'N$, $86^{\circ}49'E$) (以下简称为 1 号冰川) 位于我国天山中部乌鲁木齐河源上游(图 1),地处亚洲中部,距亚洲地理中心约 100 km。冰川长 2.035 km,面积 1.677 km^2 ,朝向东北,由东西两支组成(1993 年分离)^[11]。该冰川属大陆型冰川,5—9 月降水占全年总降水量的 90%,年平均气温为 -5.1°C ,夏季平均气温为 4.2°C 。1 号冰川在我国冰川学研究兴起之初即被选为定位观测研究的冰川,是中国监测时间最长,资料最为详尽、系统的冰川,同时也是世界冰川监测服务处(WGMS)长期选定的参照冰川^[12]。与世界冰川物质平衡标准曲线对比发现,1 号冰川近 50 a 的变化幅度介于大多极大陆型和海洋型山岳冰川之间,与亚洲尤其是中亚地区冰川变化较为一致^[13],其冰川形态规模、积消类型与天山乃至中亚地区具有一定的典型性和代表性,因此,研究 1 号冰川长序列径流变化对于揭示其他大陆型山岳冰川融水径流变化具有一定借鉴意义。

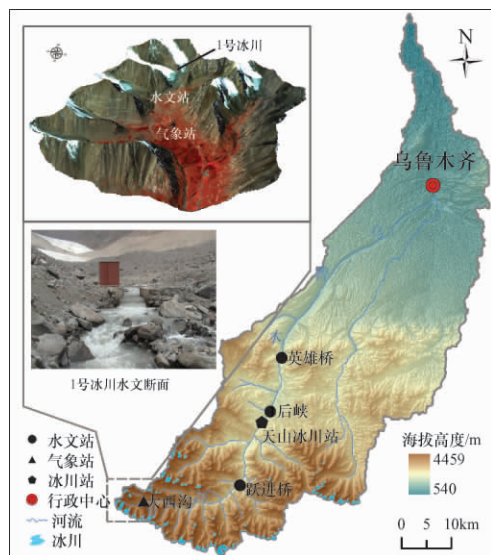


图 1 乌鲁木齐河源 1 号冰川与水文、气象站点位置

Fig. 1 Locations of Glacier No. 1 hydrologic and meteorological stations at the headwaters of the Urumqi River

1.2 观测资料

1 号冰川观测始于 1959 年,主要包括冰川、水文和气象等要素。1 号冰川水文断面位于冰舌末端下游 300 m,海拔 3 693 m,用于监测 1 号冰川融水径流变化,其流域面积为 3.34 km^2 ,冰川覆盖率达 50.2%(图 1)。5—9 月径流占到了全年径流的 95%,其余月份多处于冻结状态,年平均径流深为 720.8 mm ^[3]。根据李念杰 1985 年对 1 号冰川水文断面控制流域径流的分析,得出冰川融水径流占 70%,非冰川区降水形成的径流占 30%^[14]。自 20 世纪 90 年代以来,随着河源区气候的显著变暖,冰川呈现出快速退缩^[15],可以推测,冰川融水径流所占组分近年来应有所增加。根据 Li 等利用水量平衡方法估算出的 1 号冰川融水径流与 1 号冰川水文断面径流分析发现,二者之间的变化高度一致,相关系数达 0.98^[3],为此本文用 1 号冰川水文断面径流作为 1 号冰川融水径流量度。此外,本文应用的气象观测数据来自中国气象局大西沟气象站,该气象站海拔 3 539 m,距 1 号冰川末端 3 km。1 号冰川物质平衡数据是天山冰川站的冰川常规观测数据,自 1959 年开始观测,1967—1979 年因文革而中止,1980 年起恢复观测至今,其中文革期间数据由气象数据重建恢复得到^[16]。

2 1 号冰川融水径流的长期变化

2.1 变化总趋势

1 号冰川融水径流变化趋势分析采用距平和差积曲线两种方法,其中差积曲线能充分反映时间序列定性变化趋势^[17]。当差积曲线向下时,表示径流有所减少,反之表示径流增加。从径流距平曲线(图 2)来看,1 号冰川融水径流 1959—2008 年总体上呈增加趋势,平均增率为 $32.4 \times 10^4 \text{ m}^3 / 10 \text{ a}$ 。从差积曲线可以看出,近 50 a 来 1 号冰川年径流量变化主要经历了两个阶段:1959—1993 年是径流减少阶段,其间 1984—1988 年出现短暂的上升过程,但总体上仍表现为下降趋势;1994—2008 年是径流明显增加阶段。显然,后一阶段的变化程度较 1993 年前剧烈,表明 1993 年后径流量上升速率超过以往。1994—2008 年径流量均值为 $270.9 \times 10^4 \text{ m}^3$,与 1959—1993 年径流量均值相比,平均增加了 $111 \times 10^4 \text{ m}^3$ (69.4%)。

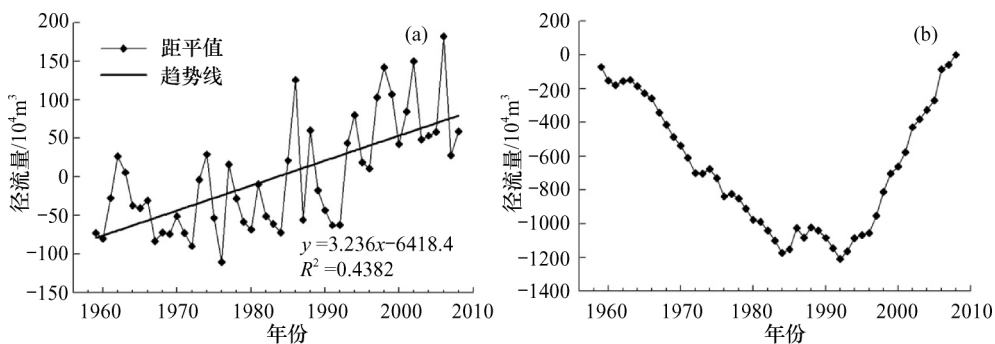


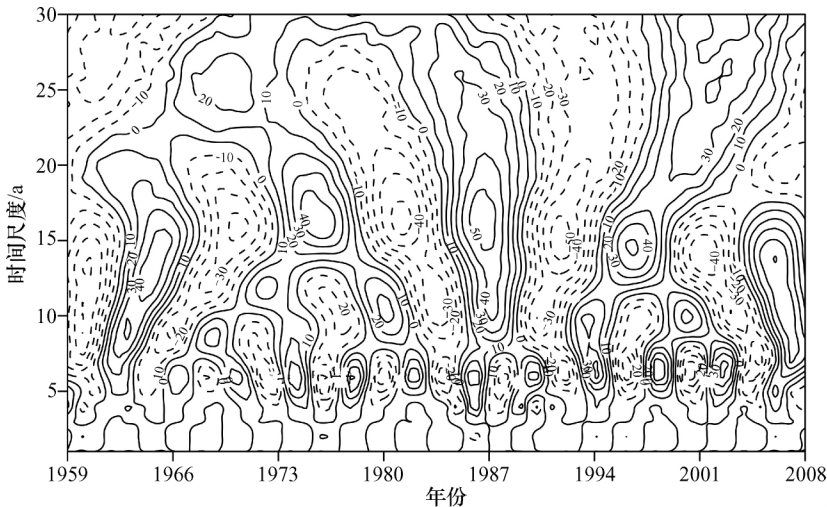
图 2 乌鲁木齐河源 1 号冰川(a) 年径流距平和(b) 年径流差积曲线

Fig. 2 The anomaly (a) and the accumulated difference curve (b) of annual runoff of Urumqi Glacier No. 1

2.2 周期特征

冰川融水径流的周期变化实际上是多时间尺度的,并且在时域中存在局部化特征。1 号冰川融水径流周期变化分析采用 Morlet 小波变换法,该方法详细介绍见文献[18—19],边界处理使用对称延伸法。需要说明的是,小波系数图中等值线的闭合中心对应于径流变化中心,正值表示径流量增多,负值表示径流量减少,小波系数的零值对应于径流量突变点。

图 3 是 1 号冰川 1959—2008 年径流序列的 Morlet 小波变换系数等值线图。图中等值线上的正、负值表示年径流在小波变化域中相对多年平均径流的波动,反映年径流在时间域上丰、枯变化特征。可以看出,1 号冰川近 50 a 的径流时间序列由 13~16 a 和 5~7 a 两个周期不同的谐波叠加而成。在 13~16 a 时间尺度上 1 号冰川融水径流经历了“枯—丰—枯—丰—枯—丰—枯—丰—枯—丰”的交替变化,含有 5 个相对枯水期和 5 个相对丰水期。第一个枯水期是 1959—1962 年,1962 年之后的几年进入丰水期,每个丰枯交替都对应着径流量突变,1962、1969、1972、1978、1984、1991、1993、2000 和 2004 年是突变年。在 5~7 a 时间尺度上,径流变化表现为嵌套在较大尺度下的较为复杂的丰枯结构,丰枯交替更为频繁,周期振荡更为复杂。从整个等值线图来看,无论是哪种时间尺度,最后一组等值线都没有闭合,小波系数曲线在 13~16 a 时间尺度上是实线,表明 13~16 a 时间尺度上,1 号冰川融水径流在未来几年将继续保持偏多趋势,但是从短期和更长期时间尺度上看,小波系数已出现负值,表明 1 号冰川融水径流可能已进入一个相对枯水期。



注: 实线表示丰水期, 虚线表示枯水期。

图 3 乌鲁木齐河源 1 号冰川年径流小波系数

Fig. 3 Wavelet coefficient for annual runoff of Urumqi Glacier No. 1

从径流序列的小波方差[图 5(c5)]来看,在 15 a 和 6 a 左右有 2 个明显峰值,说明 1 号冰川融水径流的第一主周期为 15 a,第二主周期为 6 a。15 a 和 6 a 是融水径流序列中的两个循环数,反映了近 50 a 冰川融水的波动,同时也表明在这两个时间尺度上径流序列的振荡上升趋势最显著,这与小波等值线图上所反映出来的周期相吻合。

2.3 突变特性

冰川融水径流突变特性分析采用 Mann-Kendall 法,该方法的详细描述参见文献[19-20]。由图 4 可以看出,1 号冰川融水径流在过去 50 a 整体上表现为增加趋势,在 1996 年附近 UF 线越过信度线,呈持续显著性增加。 UF 和 UB 两线相交于 1993 年,且介于 ± 1.96 信度线之间,表明 1993 年是冰川融水径流突变的开始。综合前述小波分析可以得出,1 号冰川融水径流尽管在 1962、1969、1972、1978、1984、1991、1993、2000 和 2004 年出现由枯到丰的突变,但真正突然的增加应是从 1993 年开始,这与韩添丁等^[21]对 1980—2003 年 1 号冰川融水径流序列的分析结果比较接近,即 1 号冰川融水径流显著增大开始

于20 世纪 90 年代初。

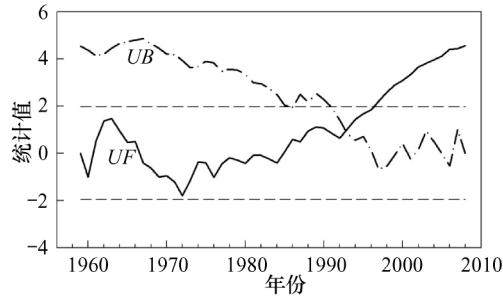


图 4 乌鲁木齐河源 1 号冰川融水径流 Mann-Kendall 突变检验

Fig. 4 Change points of annual runoff of Urumqi Glacier No. 1 established using the Mann-Kendall

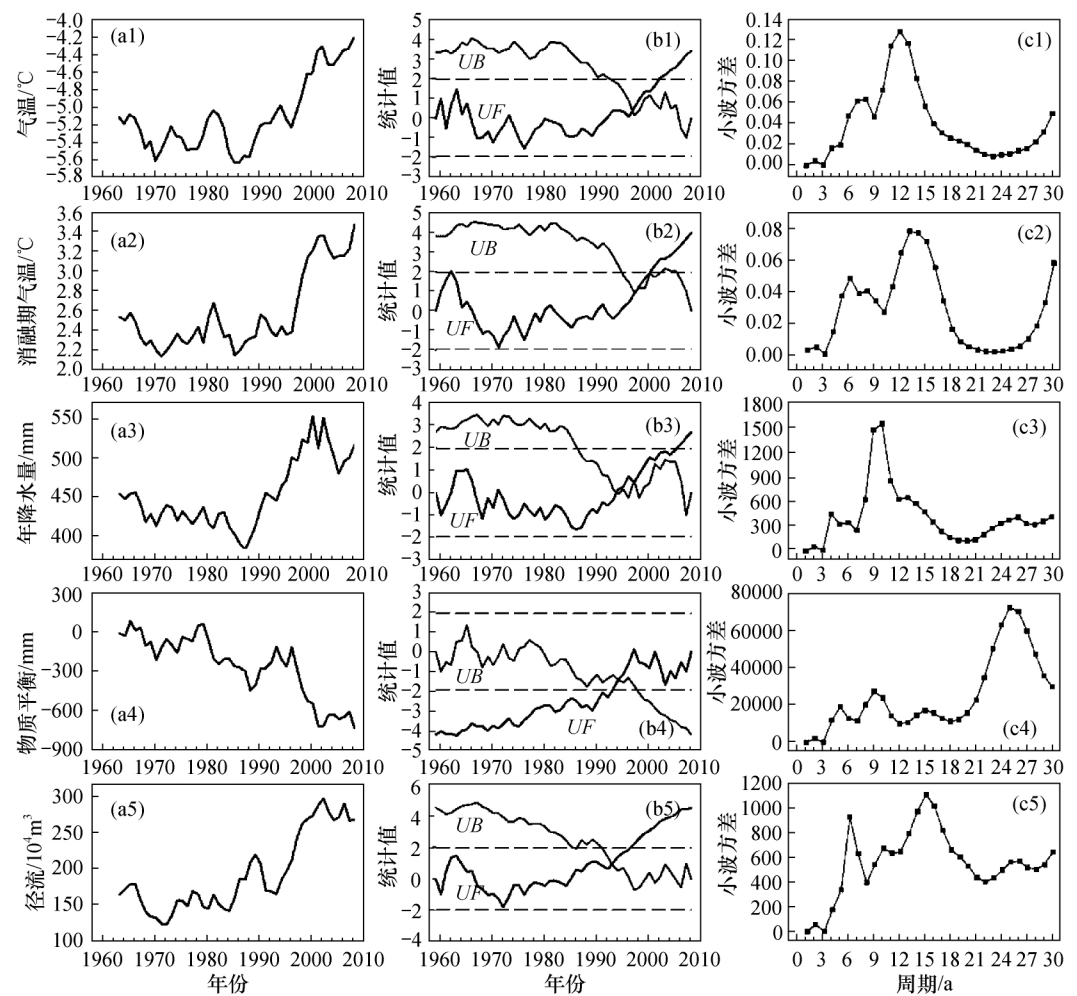


图 5 乌鲁木齐河源 1 号冰川融水径流与大西沟气象站年均气温、消融期(5—9 月) 气温、年降水量、冰川物质平衡 5 年滑动平均(a1— a5)、突变检验(b1— b5) 与小波方差(c1— c5) 比较

Fig. 5 Comparisons of 5-year moving average(a1— a5) abrupt tests (b1— b5) and wavelet variances (c1— c5) of annual runoff with annual average air temperature air temperature in ablation period annual precipitation in

Daxigou meteorological station and mass balance of Glacier No. 1

3 1 号冰川融水径流变化原因分析

3.1 气候变化对冰川融水径流的影响

1 号冰川融水径流在近 50 a 总体上呈增加趋势,尤其是 1993 年之后增加趋势显著 [图 5(a5)]。对比分析河源区大西沟气象站年平均气温、消融期(5—9 月) 气温和年降水量的 5 年滑动平均曲线 [图 5(a1—a3)]可知,年平均气温、消融期气温在 20 世纪 90 年代中期至今,增温趋势显著,上升速率分别为 0. 50 ℃/10 a 和 0. 43 ℃/10 a,并通过了 0. 01 显著性水平检验。年降水量自 20 世纪 90 年代初到 2000 年增加趋势迅猛,尽管 2000 年后略有下降,但仍维持在一个较高水平。由此可判断,1 号冰川融水径流的显著增加与河源区气温的显著升高和持续高降水过程有关。从 Mann-Kendall 突变检验曲线 [图 5(b1—b5)]看,河源区大西沟气象站年平均气温、消融期气温、降水和冰川融水径流突变年份对应较好,都集中在 1993—1997 年同一时间段,说明 1 号冰川融水径流与气温、降水存在着明显瞬时响应关系,冰川融水径流变化直接反映了本年度的气候特征。此外,从小波方差曲线 [图 5(c1—c5)]看,年径流量第一主周期(15 a)、第二主周期(6 a) 与消融期气温的第一主周期(13 a)、第二主周期(6 a) 相当,表明消融期气温的振动对冰川融水径流振动能量贡献最大,这与焦克勤等^[22]得出的 1 号冰川水文点径流主要受夏季气温变化控制的结论相一致。

为揭示丰枯水年冰川融水径流变化原因,挑选径流序列中历年流量最大的 2006 年和最小的 1976 年进行分析。表 1 列出了这两年径流、消融期气温、降水对多年平均值的增减。可以看出,2006 年消融期降水量与 1976 年相当,但月平均气温高出 1. 6 ℃,导致 2006 年月平均流量为 0. 434 m³/s,比多年平均值增加 141. 1%;而 1976 年平均流量仅为 0. 119 m³/s,比多年平均值减少 33. 9%。这两个年份消融期月平均气温升高和减少的幅度相同(均为 30. 8%),但导致径流量增加幅度远大于减少的幅度,即气温对径流的影响是非线性的。2006 年 6—8 月(平均气温为 5. 1 ℃)、7—8 月(平均气温为 6 ℃) 的持续高温直接影响消融区形成的时间和范围,继而影响径流量大小。据 2006 年物质平衡资料,可推算出 1 号冰川夏季平衡线高度在 4 150 m 处,冰川消融区面积为 1. 43 km²,占冰川面积的 85. 3%,积累区

表 1 2006、1976 年乌鲁木齐河源 1 号冰川融水径流、大西沟气象站消融期气温和降水变化

Table 1 The comparisons of air temperature, precipitation and runoff of Urumqi Glacier No. 1 during the ablation period in 2006 and 1976

观测项目		2006 年			1976 年		
		5—9 月	6—8 月	7—8 月	5—9 月	6—8 月	7—8 月
气温	月平均气温/℃	3. 4	5. 1	6. 0	1. 8	3. 0	3. 5
	多年平均/℃	2. 6	4. 2	4. 9	2. 6	4. 2	4. 9
	变化/℃	0. 8	0. 9	1. 1	-0. 8	-1. 2	-1. 4
降水量	降水量/mm	86. 6	113. 1	100. 5	86. 5	104. 9	86. 3
	多年平均/mm	80. 2	102. 3	105. 2	80. 2	102. 3	105. 2
	变化/%	8. 0	10. 6	-4. 5	7. 9	2. 5	-18. 0
流量	月平均流量/(m ³ /s)	0. 434	0. 466	0. 598	0. 119	0. 163	0. 214
	多年平均/(m ³ /s)	0. 180	0. 270	0. 327	0. 180	0. 270	0. 327
	变化/%	141. 1	72. 6	82. 9	-33. 9	-39. 6	-34. 6

面积为 0.247 km^2 , 仅占 14.7% , 由此可知平衡线高度已上升至粒雪区, 消融区面积已扩大至积累区。此外 6—8 月降水量丰沛, 使流量增加有了更充足的补给来源, 这也导致 2006 年 1 号冰川平均流量在 6—8 月继续增加, 这一年的最大径流主要是由于强烈升温导致冰川强烈消融和河源区丰沛降水双重因素叠加的结果。

进一步探究冰川融水径流与消融期气温的定量关系, 选取 1985—2008 年 1 号冰川月径流与消融期大西沟气象站月平均气温数据进行分析。由图 6 可知, 1 号冰川月径流与消融期大西沟气象站月平均气温呈指数关系, 且拟合效果较好 ($R^2 = 0.762$, $P < 0.01$, $n = 115$)。表现为消融期气温大于 2°C 时, 冰川融水径流呈加速增长, 进一步验证了上述丰枯水年径流变化分析所得到的结论。

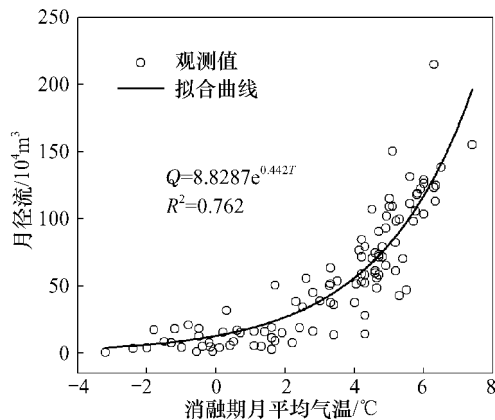


图 6 乌鲁木齐河源 1 号冰川月径流与消融期大西沟气象站月平均气温拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve between monthly runoff of Urumqi Glacier No. 1 and the air average temperature in the ablation period at Daxigou meteorological station

3.2 冰川物质亏损对冰川融水径流的影响

冰川变化主要体现在冰川物质平衡(冰川净积累或消融量)的收支状况^[15]。1 号冰川物质平衡自 1959 年有观测记录以来, 大部分年份处于亏损状态, 1985 年以后有加速亏损趋势, 尤其是 1996 年至今这种亏损趋势更为显著[图 5(a4)]。在 1959—2008 年 50 a 间, 1 号冰川年平均物质平衡为 -273.9 mm (约为 $-52.2 \times 10^4 \text{ m}^3$), 累积物质平衡达到 $-13\,693 \text{ mm}$, 相当于冰川厚度较 1959 年减薄了 15 m 多, 累积亏损量达 $2\,610 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。此外, 1 号冰川自 1997 年以来观测到了连续负物质平衡, 1997—2008 年累积 12 a 的物质平衡占到了过去 50 a 的 61.6% 。根据统计, 1 号冰川 1994—2008 年平均径流是 1959—1993 年的 1.7 倍, 说明这一时期径流的大幅度增加与冰川物质的持续亏损有着密切联系, 这也可从 1 号冰川物质平衡与冰川融水径流二者发生突变年份相近得到验证[图 5(b4—b5)]。从小波方差曲线[图 5(c4—c5)]可以看到, 1 号冰川物质平衡第一主周期为 25 a, 第二主周期为 9 a, 与冰川融水径流的第一、二主周期并不完全对应。尽管径流序列与物质平衡振荡强弱不相一致, 但在冰川物质平衡有振荡的频域上, 冰川融水径流也发生振荡, 表明 1 号冰川融水径流与冰川的短期演变和波动存在密切联系。需要说明的是, 物质平衡呈现出第一主周期为 25 a, 因 1 号冰川的观测序列为 50 a, 25 a 应是序列中的隐含周期。当然, 随着序列长度增加, 会得出更

多的更接近实际的周期。

3.3 冰川融水径流与气候、冰川变化耦合关系讨论

由上述分析可知, 1 号冰川融水径流与气温、降水、冰川物质平衡瞬时响应关系密切。冰川对气候变化极为敏感, 改变自身规模是冰川响应气候变化的结果。冰川融水径流不仅包含了冰川对气候变化的瞬时响应, 也包含了冰川对气候变化的滞后响应, 即由物质平衡和冰川流变参数变化引发的冰川动力学过程的变化^[23]。参考王国亚等根据不同时期冰川面积退缩速率对 1 号冰川面积插值的结果^[24], 本文考虑了 1 号冰川流变参数——冰川面积变化对冰川融水径流的影响, 计算了 1962—2008 年 1 号冰川体积损失量 (图 7)。从中可以看出 1 号冰川体积变化较好地验证了冰川融水径流变化, 二者相关系数达 0.72。需要指出的是, 这里的冰川融水径流仍采用的是 1 号冰川水文站径流, 比实际冰川融水径流高 30% 左右。因冰川体积损失量不同于冰川消融量, 所得的冰川体积变化是冰川融水径流的最保守估计, 这导致二者在数值上存在一定差异。这一认识反映了“气候变化—冰川物质平衡变化—冰川动力学响应—冰川体积变化—冰川融水径流变化”这一系统复杂的物理过程。

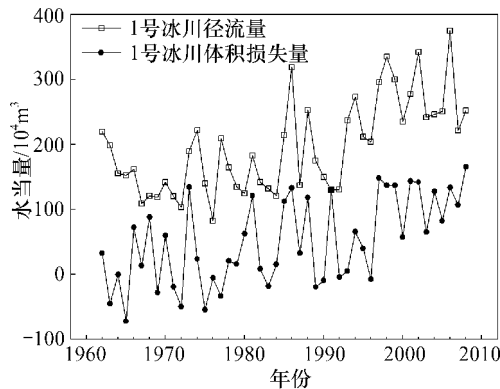


图 7 1 号冰川 1962—2008 年径流变化与冰川体积损失量比较

Fig. 7 Comparison annual runoff changes of Glacier No. 1 with its loss of ice volume for the period 1962—2008

为进一步探讨 1 号冰川融水径流与气候、冰川变化的定量关系, 分析 1 号冰川不同时段融水径流、水文断面径流、冰川物质平衡和大西沟气象站平均气温、降水的变化 (表 2)。1959—1993 年冰川平均融水径流为 $107.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 1994—2008 年则为 $207.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 较前期增加 93.4%, 其中约 13.1% 来源于降水增加, 80.3% 来源于冰川物质损失。水文断面径流增加 69.4%, 其中约 6.8% 来源于降水增加, 62.6% 来源于冰川融水径流的贡献, 即水文断面径流增加的 90.2% 是冰川退缩的结果。年平均气温升高 0.8°C 导致 484 mm 的冰川物质亏损, 它是在克服 113 mm 降水 (假设全为固态降水) 后的结果, 相当于冰川物质平衡变化 $-605 \text{ mm}/^\circ\text{C}$, 这与王国亚计算出的 1 号冰川对气温变化的敏感性 $-633 \text{ mm}/^\circ\text{C}$ 很接近^[24]。对 1 号冰川物质平衡和水文断面径流分析可知, 冰川物质平衡变化 100 mm 可引起水文断面径流变化 $22.9 \times 10^4 \text{ m}^3$, 而 1 号冰川过去 50 a 累积物质平衡为 $-13\,693 \text{ mm}$, 相当于额外补给河流径流量 $3\,135.7 \times 10^4 \text{ m}^3$, 约是年径流量的 16.1 倍。

表2 乌鲁木齐河源大西沟气象站降水、气温、1号冰川物质平衡及其水文断面径流在1993年前、后的变化

Table 2 The changes in annual precipitation , air temperature , glacier mass balance and runoff in hydrologic section for the period prior to 1990 and after 1990

项目	降水/mm	气温/℃	物质平衡/mm	冰川融水径流 ^① /mm	冰川融水径流 ^② /10 ⁴ m ³	水文断面径流/10 ⁴ m ³
1959—1993 年	538	- 5. 3	- 102	603	107. 1	159. 9
1994—2008 年	651	- 4. 5	- 586	1 166	207. 2	270. 9
变化量	113	0. 8	- 484	563	100. 1	111. 0
变化/%	21. 0			93. 4	93. 4	69. 4

注: ①为冰川融水径流深; ②为冰川融水径流量 两者计算结果引自参考文献[3]。

4 结论

- (1) 1号冰川近50 a来径流总体上呈增加趋势,径流突变发生在1993年,1996年后径流增加显著。冰川融水径流序列由13~16 a和5~7 a两个周期不同的谐波叠加而成。从13~16 a时间尺度上看,1号冰川融水径流在未来几年将继续保持偏多趋势。但是从5~7 a和超长期时间尺度上看,1号冰川融水径流可能已进入一个相对枯水期。
- (2) 1号冰川融水径流与大西沟气象站年均气温、消融期气温、年降水量及冰川物质平衡存在着明显的瞬时响应关系,其中消融期气温对冰川融水径流贡献最大。尽管1号冰川融水径流与降水、冰川物质平衡的振荡强弱不尽一致,但在物质平衡、年降水有振荡的频域上,冰川融水径流也发生振荡,表明冰川融水径流与1号冰川的短期演变和波动存在密切关系。
- (3) 1号冰川融水径流对消融期气温变化较敏感。月径流量与大西沟气象站月平均气温呈指数关系,当消融期气温超过2℃时,冰川融水径流将加速增长。此外,气温的显著升高导致了物质平衡持续亏损,过去50年1号冰川累积物质平衡为-13 693 mm,相当于额外补给河流径流量 $3\,135.7\times10^4\text{ m}^3$,约是年径流量的16.1倍。

参考文献(References):

[1] 秦大河,丁永建. 冰冻圈变化及其影响研究——现状、趋势及关键问题[J]. 气候变化研究进展,2009,5(4): 187-195. [QIN Da-he ,DING Yong-jian. Cryospheric changes and their impacts: Present ,trends and key issues. *Advances in Climate Change Research* ,2009 ,5(4) : 187-195.]

[2] 李忠勤,李开明,王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究[J]. 第四纪研究,2010,30(1): 96-106. [LI Zhong-qin ,LI Kai-ming ,WANG Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang , northwestern China. *Quaternary Sciences* ,2010 ,30(1) : 96-106.]

[3] Li Z Q ,Wang W B ,Zhang M J ,et al. Observed changes in streamflow at the headwaters of the Urumqi River , eastern Tianshan ,Central Asia [J]. *Hydrological Processes* ,2010 ,24: 217-224.

[4] Liu S Y ,Zhang Y ,Zhang Y S ,et al. Estimation of glacier runoff and future trends in the Yangtze River source region , China [J]. *Journal of Glaciology* ,2009 ,55: 353-362.

[5] 杨针娘. 中国冰川水资源[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社,1991. [YANG Zhen-niang. Glacier Water Resources in China. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press ,1991.]

[6] Hagg W ,Braun L N ,Kuhn M ,et al. Modelling of hydrological response to climate change in glacierized Central Asian catchments [J]. *Journal of Hydrology* ,2007 ,332: 40-53.

[7] 康尔泗,Atsumu Ohmura. 天山冰川消融参数化能量平衡模型[J]. 地理学报,1994,49(5): 467-476. [KANG Er-si ,Atsumu Ohmura. A parameterized energy balance model of glacier melting on the Tianshan Mountain. *Acta Geographica Sinica* ,1994 ,49(5) : 467-476.]

- [8] 康尔泗, Atsumu Ohmura. 天山冰川作用流域能-水-质平衡和水文流量模型研究[J]. 科学通报, 1993, 38(10): 925-929. [KANG Er-si, Atsumu Ohmura. Study on energy-water-mass balance and the hydrological flow model in a glacier-ized catchment of Tianshan mountain. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(10): 925-929.]
- [9] Ye B S, Yang D Q, Jiao K Q, *et al.* The Urumqi River source Glacier No. 1, Tianshan, China: Changes over the past 45 years [J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32: L21504.
- [10] 韩添丁, 丁永建, 焦克勤, 等. 天山乌鲁木齐河源冰雪径流的极值分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 276-281. [HAN Tian-ding, DING Yong-jian, JIAO Ke-qin, *et al.* Analysis of the extremum of snow and glacier meltwater runoff at the headwaters of the Urumqi River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(2): 276-281.]
- [11] 天山冰川站. 天山冰川站年报: 18 卷[R]. 兰州: 中国科学院天山站, 2008. [Tianshan Glaciological Station. Annual report of Tianshan Glaciological Station: Vol. 18. Lanzhou: Tianshan Glaciological Station, 2008.]
- [12] 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(3): 132-137. [LI Zhong-qin, SHEN Yong-ping, WANG Fei-teng, *et al.* Response of melting ice to climate change in the Glacier No. 1 at the Headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountain. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(3): 132-137.]
- [13] 李忠勤, 沈永平, 王飞腾, 等. 冰川消融对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2007, 29(3): 333-342. [LI Zhong-qin, SHEN Yong-ping, WANG Fei-teng, *et al.* Response of glacier melting to climate change. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(3): 333-342.]
- [14] 李念杰. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区的径流特征[J]. 冰川冻土, 1985, 7(2): 163-169. [LI Nian-jie. Characteristics of runoff in the Glacier No. 1 region at headwater of Urumqi River, Tianshan. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, 7(2): 163-169.]
- [15] 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 40 a 观测事实[J]. 冰川冻土, 2003, 25(2): 117-123. [LI Zhong-qin, HAN Tian-ding, JING Zhe-fan, *et al.* A summary of 40 year observed variation facts of climate and Glacier No. 1 at headwater of Urumqi River, Tianshan, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 117-123.]
- [16] 张金华. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡研究[J]. 冰川冻土, 1981, 3(2): 32-40. [ZHANG Jin-hua. Mass balance studies on Glacier No. 1 in Urumqi River, Tianshan. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1981, 3(2): 32-40.]
- [17] 于延胜, 陈兴伟. 水文序列变异的差积曲线-秩检验联合识别法在闽江流域的应用[J]. 资源科学, 2009, 31(10): 1717-1721. [YU Yan-sheng, CHEN Xing-wei. Difference curve-rank test method for detecting the change point in hydrological time series. *Resources Science*, 2009, 31(10): 1717-1721.]
- [18] 王文圣, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. [WANG Wen-sheng, DING Jing, LI Yue-qing. *Hydrology Wavelet Analysis*. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.]
- [19] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 第 2 版. 北京: 气象出版社, 2007. [WEI Feng-ying. *Statistical Diagnosis and Prediction Technology of Modern Climate*. 2nd Edition. Beijing: Meteorological Press, 1999.]
- [20] 刘兆飞, 王翊晨, 姚治君, 等. 太湖流域降水、气温与径流变化趋势及周期分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1575-1584. [LIU Zhao-fei, WANG Yi-chen, YAO Zhi-jun, *et al.* Trend and periodicity of precipitation, air temperature and runoff in the Taihu Lake Basin. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(9): 1575-1584.]
- [21] 韩添丁, 丁永建, 焦克勤, 等. 天山乌鲁木齐河源冰雪径流的极值分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(2): 276-281. [HAN Tian-ding, DING Yong-jian, JIAO Ke-qin, *et al.* Analysis of the extremum of snow and glacier meltwater runoff at the headwaters of the Urumqi River. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(2): 276-281.]
- [22] 焦克勤, 叶柏生, 韩添丁, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川径流对气候变化的响应分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(3): 606-611. [JIAO Ke-qin, YE Bai-sheng, HAN Tian-ding, *et al.* Response of runoff to climate change in the Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains during 1980-2006. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, 33(3): 606-611.]
- [23] 李慧林, 李忠勤, 沈永平, 等. 冰川动力学模式及其对中国冰川变化预测的适应性[J]. 冰川冻土, 2007, 29(2): 201-208. [LI Hui-lin, LI Zhong-qin, SHEN Yong-ping, *et al.* Glacier dynamic models and their applicability for the glaciers in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(2): 201-208.]

- [24] 王国亚. 冰川物质平衡估算及其方法研究——以天山乌鲁木齐河源1号冰川为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2010. [WANG Guo-ya. The Estimation of Glacier Mass Balance and Its Methods Research—Taking Glacier No. 1 in Urumqi River, Tianshan Mountain as an Example. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2010.]

Analysis on Runoff Variation of Glacier No. 1 at the Headwaters of the Urumqi River from 1959 to 2008

SUN Mei-ping¹, LI Zhong-qin^{1,2}, YAO Xiao-jun^{1,2}, ZHANG Ming-jun²

(1. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS/Tianshan Glacier Station, Lanzhou 730000, China; 2. Geography and Environment College of Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Based on multiple methods, such as mathematical statistics, Morlet wavelet analysis and Mann-Kendall method, runoff variation of Glacier No. 1 at the headwaters of the Urumqi River during 1959–2008 was analyzed in order to detect its changing trend, periodicity characteristics and mutation features. Then the relationships among runoff, climate and glacier change were also discussed. The results firstly showed that runoff of Urumqi Glacier No. 1 experienced an increasing trend in recent 50 years; especially since 1993 the increase was more obvious. Secondly, the first principal periodicity of runoff series was 15 years and the secondary one was 6 years. From 13–16 years scale, the glacier runoff would continue to increase in the future years. However, an opposite tendency existed from another time scales of 5–7 years or more. Thirdly, there was a good instantaneous response relation among glacier runoff, glacier mass balance, annual average temperature, temperature in the melt season and annual precipitation. More specifically, the vibration of temperature in the ablation season gave the greatest contribution to glacier runoff vibration, and glacier runoff showed an accelerated growth when the temperature was more than 2 °C. It was finally concluded that 100 mm change of glacier mass balance could cause $22.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ river runoff. The cumulative mass balance of Glacier No. 1 reached up to -13693 mm in the past 50 years, which was equivalent to $3135.7 \times 10^4 \text{ m}^3$ additional supplies of river runoff and was about 1.6 times that of the river annual runoff. This study highlighted the relationships between climate-induced glacier change and runoff yield. The mutation and periodicity of glacier mass balance was also analyzed, so the inherent law of glacier runoff was revealed to some extent.

Key words: glacier runoff; runoff change; climate change; mass balance; Urumqi Glacier No. 1