

冰川运动速度对气候变化的响应

—以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例

周在明^{1,2)}, 井哲帆²⁾, 赵淑惠²⁾, 韩添丁²⁾, 李忠勤²⁾

1)中国地质科学院, 北京 100037;

2)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, 甘肃兰州 730000

摘 要: 山地冰川对气候变化的响应最为敏感, 在全球变暖的大背景下山地冰川和极地冰盖正在发生显著的变化。冰川运动速度的变化是气候变化的结果之一。乌鲁木齐河源 1 号冰川是中国西部山地冰川的代表, 本文以 1981-2007 年 27a 的运动速度资料与 1982 年以来的季节运动速度资料为基础, 结合冰川物质平衡、气温、降水等资料分析冰川运动速度对气候变化的响应。研究发现, 27a 来 1 号冰川运动速度下降趋势明显, 冬、夏季节运动速度波动较大, 但夏季运动速度较大。气候变化通过冰川物质平衡的改变作用于冰川运动速度, 物质平衡的持续亏损最终导致了冰川运动速度的持续降低。夏季的高温与降水对冰川运动速度具有加速的作用。

关键词: 冰川; 运动速度; 物质平衡; 气候变化

中图分类号: P512.4; P467 文献标志码: A 文章编号: 1006-3021(2010)02-237-08

The Response of Glacier Velocity to Climate Change: A Case Study of Urumqi Glacier No. 1

ZHOU Zai-ming^{1,2)}, JING Zhe-fan²⁾, ZHAO Shu-hui²⁾, HAN Tian-ding²⁾, LI Zhong-qin²⁾

1) Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037;

2) State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Region Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000

Abstract: Valley glacier is most sensitive to climate change under the background of global warming, and hence glaciers and ice caps of the world have changed significantly. Glacier movement is one of the results of climate variation. No.1 Glacier at the headwater of the Urumqi River is the representative of valley glaciers in western China. In this paper, based on 27 years' (1981-2007) velocity data and seasonal velocity data in combination with glacier mass balance as well as temperature and precipitation data, the authors analyzed the response of the glacier movement to climate change. Researches show that in the 27 years the velocity tended to decrease obviously, seasonal velocity fluctuated considerably, and the velocity was higher in the summer than in the winter. Climate change acted on glacier movement by mass balance variation, and the uninterrupted loss of mass balance led to the continuous decrease of glacier velocity. It is also found that high temperature and high precipitation accelerated the glacier movement.

Key words: glacier; velocity; mass balance; climate change

IPCC(政府间气候变化专门委员会)第四次评估 2007), 其中山地冰川较为敏感的响应了气候变化
报告指出, 冰川对气候变化的响应非常明显(IPCC, (施雅风等, 2000), 当前, 全球冰川急剧退缩(Klok et

本文由国家重点基础研究“973”发展计划项目(编号: 2007CB411501)、中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目(编号: CXTD-Z2005-2)、国家自然科学基金项目(编号: 40871036)联合资助。

收稿日期: 2010-01-19; 改回日期: 2010-03-05。

第一作者简介: 周在明, 男, 1980 年生。中国地质科学院在读博士研究生。从事冰川及水资源研究工作。通讯地址: 100037, 北京市西城区百万庄大街 26 号。E-mail: tougaozhou@163.com。

al., 2004; Meier et al., 2007), 在我国亦十分显著(姚檀栋等, 2004; 康世昌等, 2007; 段建平等, 2009)。冰川是气候的产物, 气候变化引起冰川物质平衡和运动速度的变化, 最终使冰川面积增减、末端前进或退缩(秦大河, 2005)。通过冰川变化特征及其波动趋势, 可以指示气候变化(苏珍等, 2000; 张寅生等, 1998; Bolch, 2007; Zemp et al., 2006)。事实上, 冰川响应气候的变化首先反映在冰川的物质平衡变化上, 其次是冰川的温度、运动特征等一系列变化上(李慧林等, 2007)。冰川物质平衡的改变与冰川运动速度的变化是互为因果关系的(Rignot et al., 2006; Carr et al., 2007; Nakamura et al., 2007)。

国际上, 冰川运动速度研究主要集中于极地冰盖与海洋性冰川(Dowdeswell et al., 1999; Rignot et al., 2004; Trabant et al., 2003; Iken et al., 1997), 国内以西部广布的山地冰川为主(Huang, 1992; Jing, 1992; 井哲帆等, 2002; 井哲帆等, 2003; Jing et al., 2006; 周建民等, 2009; 周在明等, 2009)。然而长序列运动速度监测的冰川比较稀少, 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川(以下简称 1 号冰川)是在我国境内观测资料最完善, 连续性最好的冰川, 运动及物质平衡观测始于 1959 年(孙作哲等, 1980), 连续观测始于 1980 年(李忠勤等, 2003)。

本文以 1981-2007 年 27a 运动速度的连续观测资料与 1982 年以来的季节观测资料为基础, 结合历年气象、物质平衡等资料, 分析 1 号冰川的运动特征及冰川运动对气候变化的响应。

1 观测方法

1 号冰川(43°05'N, 86°49'E)位于天山中段天格尔 II 峰(海拔 4476 m)北坡乌鲁木齐河源, 由已经分离的东、西两支组成(图 1)。运动速度及物质平衡以

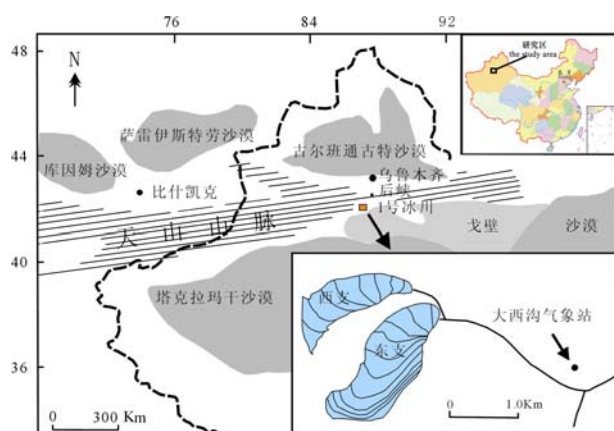


图 1 乌鲁木齐河源 1 号冰川位置图
Fig. 1 Location of No.1 Glacier at the headwater of the Urumqi River

花杆法进行观测, 速度计算以坐标法计算出冰体单位时间内的位移, 位移量与时间的比值即为单位时间内的速度值, 最终得到速度值误差 < 10%。东、西支冰川运动速度为各条冰川的平均值。

2 资料分析

对 1981-2007 年的运动速度分析发现(图 2), 27a 来 1 号冰川东、西两支的运动速度随时间变化呈现出基本一致的线性关系, 运动趋势线大体平行。1993 年, 东、西支冰川分离, 运动速度出现了明显的波动现象, 从 1980s 至今 1 号冰川的运动速度是在减缓的, 27a 间东、西支冰川平均每年减幅分别为 0.8% 和 2.0%。1981-1993 年间 1 号冰川运动速度波动较大, 从 1993-2007 年的后 15a 间东、西支冰川的运动速度持续减缓, 减幅为 3.4% 和 7.3%。东支冰川表现出相对稳定的运动规律, 西支冰川运动速度高于东支, 随着时间的延续到 2007 年两支冰川运动速度已经非常接近。总体上, 20 世纪末的 20a 时间是 1 号冰川运动速度发生剧烈波动变化的时期, 进入 21 世纪冰川运动速度趋于稳定。

不论是在冬季还是在夏季, 西支冰川的运动速度明显大于东支冰川, 同一季节内东支冰川与西支冰川具有基本相似的运动趋势。总体上同支冰川夏季运动速度大约是冬季的 1.2 倍。1982-1994 年间, 东、西两支冰川同在 1987 年出现了夏季运动的最大值, 而冬季运动速度的最大值则同在 1982 年出现。近两年来, 不论是冬季积累时间段内还是夏季消融时间段内的运动速度都开始回升, 但是速度值仍稳定在 1982-1994 年这 13a 的变化范围内(图 3)。

冰川物质平衡记录显示(图 4), 自 20 世纪 80 年代以来, 1 号冰川物质平衡有加速负平衡的趋势, 年均物质平衡为 $-413.63 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 其中负物质平衡年为 23 年, 仅有 4 年为弱积累年, 累积物质平衡达到 -12115.4 mm 。近 10a(1997-2006 年)是 1 号冰川监测史上负平衡波动时期最长并且继续延伸的物质亏损最强烈的时期。这是气候变暖作用于冰川的具体体现, 这种波动期继续延伸的可能性依然很大。冰川运动速度的持续降低与冰川物质平衡的持续亏损, 致使冰川末端由于冰川运动补充的物质质量远小于消融亏损的物质质量从而造成冰川退缩加剧, 仅 2006-2008 年间, 东、西支冰川分别后退 7.23 m 和 13.50 m。

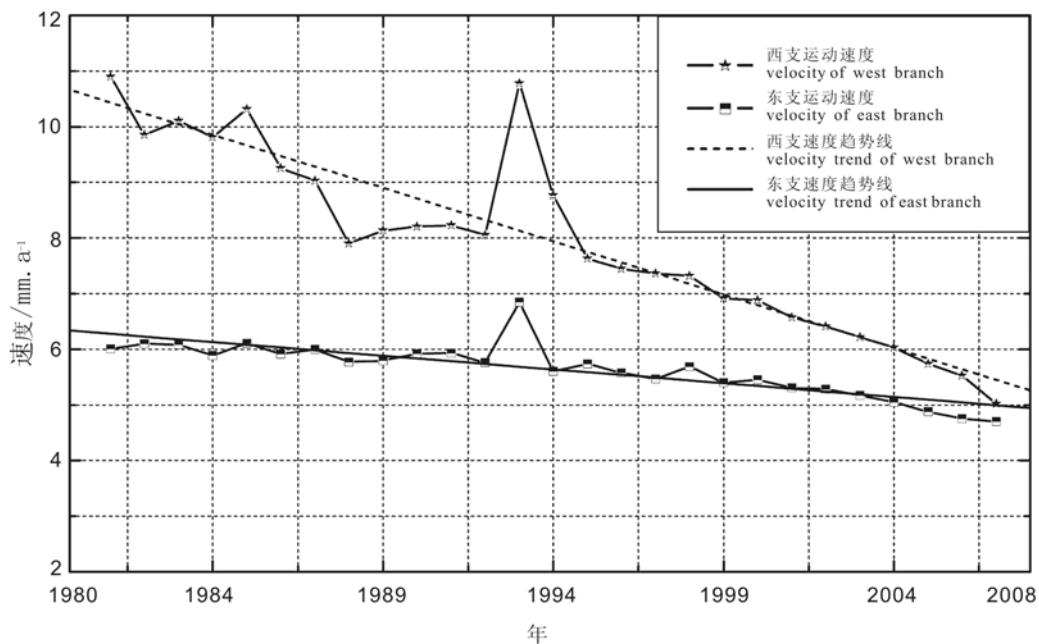


图 2 乌鲁木齐河源 1 号冰川运动速度变化图

Fig. 2 Velocity change of No.1 Glacier at the head water of the Urumqi River(1981-2007)

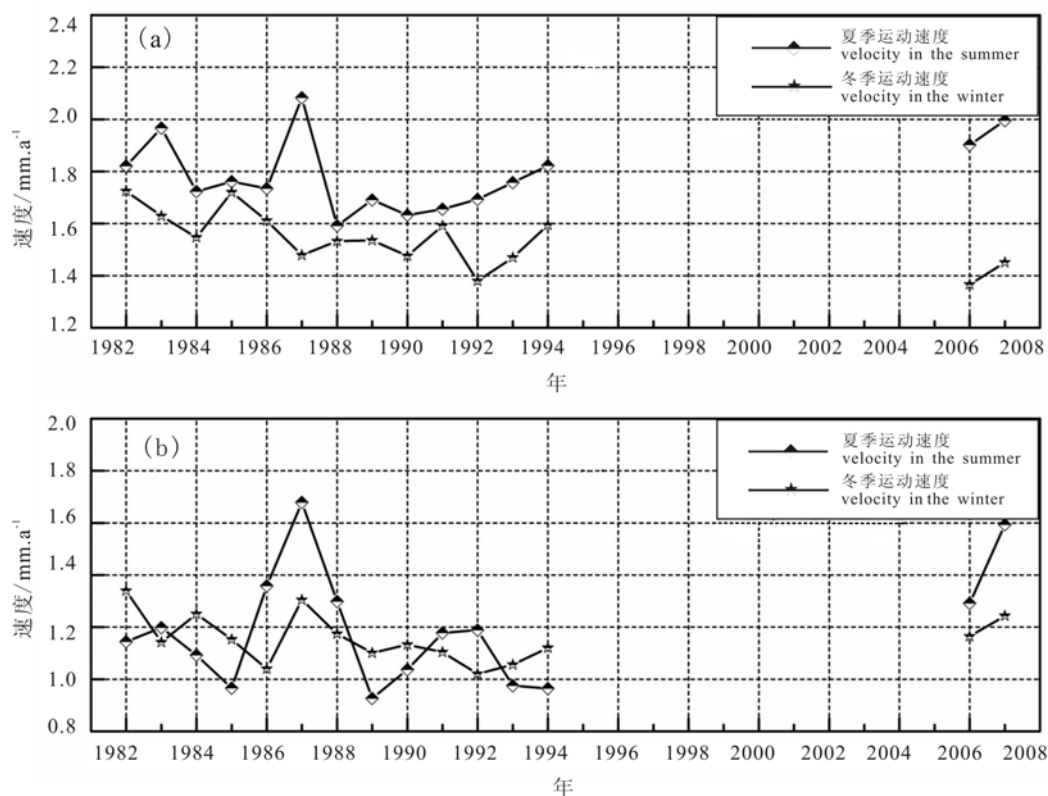


图 3 乌鲁木齐河源 1 号冰川冬夏季节运动速度变化图(a.西支冰川; b.东支冰川)

Fig. 3 Seasonal velocity of No.1 Glacier at the headwater of the Urumqi River (a-west branch; b-east branch)

3 冰川运动对气候变化的响应

3.1 气候变化的事实

从 1860 年有气象仪器观测记录以来, 全球平均温度升高了 0.6 ± 0.2 (秦大河, 2004)。20 世纪 90 年

代是近千年中最暖的年代(施雅风, 2004; 张晶晶等, 2006)。据天山乌鲁木齐河源树轮(施雅风, 1995)、敦德冰芯(姚檀栋等, 1990)、古里雅冰芯(姚檀栋等, 1995) 等资料, 中国西部山区 17 世纪温度平均比现代低 1.3 K。历史前例, 除小冰期盛时以来中国西部

山区的升温值比全球平均升温值高 1 倍左右。小冰期盛期以来升温 1.4 K, 冰川面积约损失 6 000 km², 相当于现代冰川面积的 23%(施雅风等, 2000)。

在全球气候变暖的大背景下, 1987 年起新疆以天山中西部为主要地区, 出现了气候转向暖湿的强劲信号(施雅风等, 2002)。年平均气温呈现升温趋势,

山前平原区年均升温幅度远大于山区, 冬季升温非常明显(苏宏超等, 2003; 韩添丁等, 2002)。

根据大西沟气象站(海拔 3539 m)的观测资料, 乌鲁木齐河源区的气温、降水自 1980 年以来增加趋势明显, 1985 年至今增加更甚。到 2007 年气温比 1984 年的最低温度升高了 3 , 1984 年以来, 年平

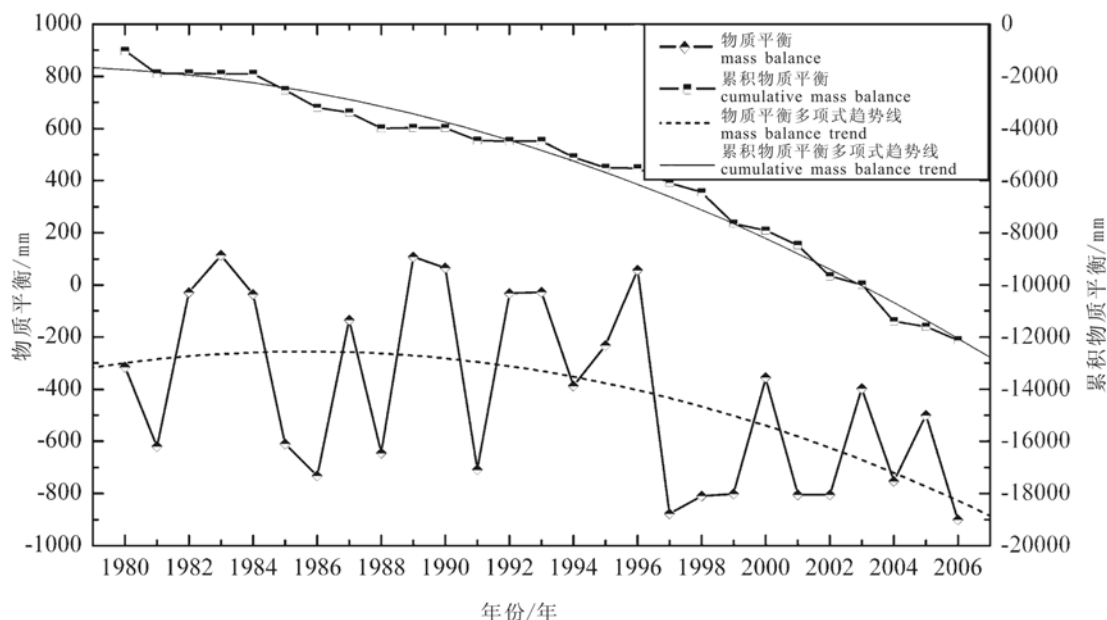


图 4 乌鲁木齐河源 1 号冰川物质平衡变化图

Fig. 4 Mass balance change of No.1 Glacier at the headwater of the Urumqi River (1980-2006)

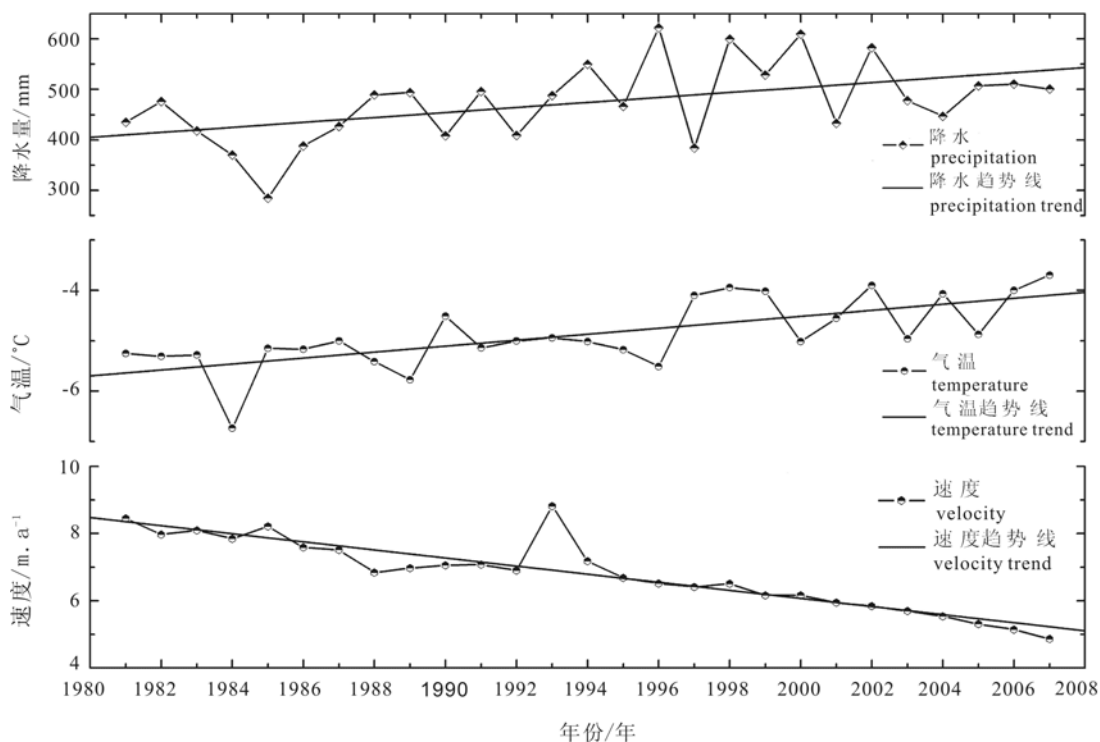


图 5 乌鲁木齐河源区气温、降水与 1 号冰川年平均运动速度变化图

Fig. 5 Temperature, precipitation and velocity change of No.1 Glacier at the headwater of the Urumqi River

均气温升高了 0.13℃, 气温的连续升高使 1 号冰川在 1993 年分为东、西两支独立的冰川。降水量 2007 年比 1985 年的低值增加了 210 mm。而与气温升高, 降水增加相反的是冰川运动速度持续减小(图 5)。

积温是影响冰川消融等变化的主要因素, 由于气温积温代表了冰川消融期温度 $T \geq 0$ 的积温, 所以气候积温与冰川消融有较好的负相关性。根据王国亚等的研究(王国亚等, 2005), 1960-2004 年间乌鲁木齐河源区的年积温上升了 133℃·d, 积温的变化趋势与气温的变化趋势是一致的, 从 20 世纪 80 年代中期开始明显上升, 此后气候变暖呈加剧和加速发展趋势。

3.2 冰川运动速度的响应

运动是冰川的基本过程, 是冰川动力学的基础而气候变化影响着冰川的动力学机制(Kääb, 2005)。随着新疆气候由暖干向暖湿转型, 乌鲁木齐河源区气温、降水都明显变化。通过冰川运动速度与气温、降水的相关性分析表明, 运动速度的大小直接受气温与降水的影响较小(图 6), 相关系数仅为 -0.57 与 -0.42, 通过置信度 95% 的检验。考虑气温、降水对冰川运动速度影响的情况下, 通过多元回归分析建立了 1 号冰川运动速度 $V(\text{m/a})$ 与气温 $T(^{\circ}\text{C})$ 、降水 $P(\text{mm})$ 之间的关系式(1), 校正的决定系数 $R_{adj}^2=0.40$, 说明 V 的总变异中可由回归模型中自变量 T 、 P 解释的部分所占的比例较小, 对速度 V 的影响还有其他重要因素。而式子(1)表明气温(T)对冰川运动速度(V)的影响比降水(P)要显著的多。

$$V = 4.643 - 0.821T - 0.004P \quad (1)$$

由于气温与降水是影响冰川变化的最直接因素, 因此可以说气温、降水以及其引起的冰川物质

平衡, 冰川厚度, 冰川形态等的变化这些综合因素共同影响着冰川运动速度的改变。

从 20 世纪 80 年代中期以来, 气温升高, 降水增大, 而物质平衡的负平衡趋势也在加剧。通过 27a 的物质平衡与气温、降水的相关性分析表明: 1 号冰川物质平衡主要取决于平均气温的高低, 二者具有较好的反相关性(相关系数为 -0.69), 而与降水的相关性较差。乌鲁木齐河源区大西沟气象站的观测记录显示从 80 年代后期开始乌鲁木齐河源区的气温持续升高, 进入 90 年代气温升高显著, 而进入 21 世纪气温的升高趋势更加明显。气温变化导致 1 号冰川物质平衡无论是年度值还是累计值均有负增长的趋势, 物质损失严重。1980-2006 年 27a 间冰川累积物质平衡达到 -12115.4 mm, 相应的厚度资料(李忠勤等, 2007)表明 1981-2006 年冰川中轴线剖面平均厚度减薄 10-18 m。根据周在明等(周在明等, 2009), 对 1 号冰川运动速度与冰川厚度的研究发现, 厚度的改变对冰川运动速度的变化起着重要的作用。通过敏感性实验, 在 20-120 m 厚度范围内的 1 号冰川, 厚度减少 1 m, 冰川运动速度的变化幅度在 30%-40% 之间, 速度值的最大变化达 0.4/a。冰川物质平衡积累量减小, 冰川厚度的持续减薄, 造成了冰川纵向应力的变小最终导致了冰体运动速度减速。同时冰川物质平衡的减少, 运动速度的递减促使了冰川退缩加剧。此外, 1 号冰川东西支的积累区差异较大, 东支冰川明显大于西支, 物质积累量的差异造成了东、西支冰川运动速度的差别。

1980-2007 年河源区冬(12 月至翌年 3 月)、夏季 3 个月(6-8 月)增温 2.4℃ 和 1.7℃, 降水增加 6.1 mm 和 134.2 mm。冬、夏季节的增温与降水量的增加具

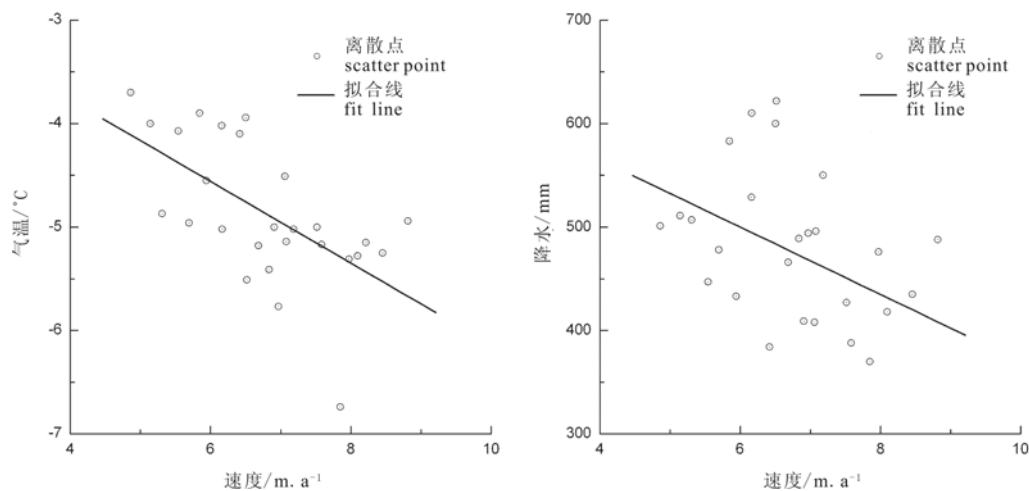


图 6 气温、降水与运动速度的相关性(年平均值)

Fig. 6 Relationship between temperature, precipitation change and glacier velocity (yearly average)

有较高的同步性。由于冰川活动层升温是一个缓慢的过程,冬季最高气温预示着活动层升温开始时间提前,因而冰川表层温度接近于 0 的时间及整个冰川活动层升温比低温年份来得早并且持续时间长,这一现象可使冰川表面消融期延长,在气温高的夏季使冰川消融更加强烈,从而整个冰川负物质平衡加剧。因此冬季的升温作用对夏季冰川消融产生重大的影响。另一方面,根据 1 号冰川物质平衡对气温降水的敏感性分析说明,降水增加 100 mm,该冰川物质平衡改变量 139 mm,而温度升高 1 可使负物质平衡增大 365 mm(刘时银等, 1998)。说明降水对 1 号冰川物质平衡的影响要比气温变化的影响小的多。由于物质平衡的变化改变着冰川运动速度,从而可见气温对冰川运动速度的影响比降水的影响大。

夏季气温高并且降水多,降水量占全年的 70%(杨新元等, 1996),既是冰川物质平衡的主要积累期,同时也是冰川强烈的消融期,尤其以 7 月下旬的消融量最大。一方面夏季较高的气温加剧了冰川的升温,根据我们在运动速度观测期间对冰川末端底部的温度及形态的观测发现消融季节冰川底部有融水流出,底部沙砾松散。针对这种情形我们应用 Weertmen 滑动定律及冰川动力学模式进行了验证,结果表明 1 号冰川在夏季强烈消融期间有底部滑动现象,并且底部滑动占冰川运动速度的比重较大。另一方面高温降水产生较大的冰面径流,大量融水冲刷作用加剧了冰裂隙的发育改变了冰川原本稳定的结构。此外,冰川强烈的消融导致了雪线以下部分物质亏损严重,冰川迅速减薄,冰川厚度的大幅度改变使运动速度加速。综合以上三点夏季冰川运动速度较快。

冬季冰川温度降低不再有滑动现象。河源区冬季降雪较少,降水量仅占全年的 10%(焦克勤等, 2004),冰川出现微弱的物质积累,但由于全球变暖的大环境,河源区气温的不断升高,根据实际观测发现在冰舌区也存在弱的消融,冰川物质平衡有少量亏损。总体上冰川的物质积累量增加但由于冬季降水少,物质平衡积累少,冰川厚度变化也不明显。因此冬季运动速度缓慢。

4 结论

气候变暖对冰川的影响表现在冰川后退、物质平衡亏损、冰川厚度减薄、运动速率下降。冰川运动速度的变化是气温、降水以及由气温、降水引起的冰川变化等综合因素共同影响的结果。而在众多

的影响因素中气温升高导致的冰川减薄是影响冰川运动速度减小的最重要的因素。随着全球气候变暖加剧不断出现冰川规模的减小,有些冰川甚至消亡,冰川运动速度减小甚至最终停止运动。27a 来 1 号冰川的运动速度是在逐年减小的,特别是从 1993-2007 年的后 15a 间东、西支冰川的运动速度减幅为 3.4%和 7.3%。20 世纪末的 20a 时间是 1 号冰川运动速度发生剧烈波动变化的时期,进入 21 世纪冰川运动速度趋于稳定。

夏季的高温与降水对冰川运动速度有积极的正面影响。冰川底部产生滑动、冰川径流加剧了冰体结构的改变、严重的物质亏损等因素综合促使 1 号冰川的运动速度总体上保持着夏季速度高冬季速度低,单条冰川夏季速度是冬季速度的 1.2 倍左右。

参考文献:

- 段建平,王丽丽,任贾文,李论. 2009. 近百年来中国冰川变化及其对气候变化的敏感性研究进展[J]. 地理科学进展, 28(2): 231-237.
- 韩添丁,叶柏生,焦克勤. 2002. 天山天格尔山南北坡气温变化特征研究[J]. 冰川冻土, 24(5): 567-570.
- 焦克勤,井哲帆,韩添丁,杨惠安,叶柏生,李忠勤. 2004. 42a 来天山乌鲁木齐河源 1 号冰川变化及趋势预测[J]. 冰川冻土, 26(3): 253-260.
- 井哲帆,姚檀栋,王宁练. 2003. 普若岗日冰原表面运动特征观测研究进展[J]. 冰川冻土, 25(3): 288-290.
- 井哲帆,叶柏生,焦克勤,杨惠安. 2002. 天山奎屯哈希勒根 51 号冰川表面运动特征分析[J]. 冰川冻土, 24(5): 563-566.
- 康世昌,陈锋,叶庆华,井哲帆,秦大河,任贾文. 2007. 1970-2007 年西藏念青唐古拉峰南、北坡冰川显著退缩[J]. 冰川冻土, 29(6): 869-873.
- 李慧林,李忠勤,沈永平,王飞腾,王文彬. 2007. 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, 29(2): 201-208.
- 李忠勤,韩添丁,井哲帆,杨惠安,焦克勤. 2003. 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, 25(2): 117-123.
- 李忠勤,沈永平,王飞腾,李慧林. 2007. 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, 3(3): 132-137.
- 刘时银,丁永建,王宁练,谢自楚. 1998. 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]. 20(1): 9-13.
- 秦大河,陈宜瑜,李学勇. 2005. 中国气候与环境演变(上卷)-气候与环境的演变与预测[M]. 北京: 科学出版社.
- 秦大河. 2004. 进入 21 世纪的气候变化科学-气候变化的事实、影响与对策[J]. 科技导报, 7: 4-7.
- 施雅风,刘时银. 2000. 中国冰川对 21 世纪全球变暖响应的预估[J]. 科学通报, 45(4): 333-341.
- 施雅风,沈永平,胡汝骥. 2002. 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, 24(3): 219-226.
- 施雅风. 1995. 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.

- 施雅风. 2004. 冰川学开拓与气候环境变化研究的回顾[J]. 冰川冻土, 26(1): 66-72.
- 苏宏超, 魏文寿, 韩萍. 2003. 新疆近 50a 来的气温和蒸发变化[J]. 冰川冻土, 25(2): 174-178.
- 苏珍, 施雅风. 2000. 小冰期以来中国季风温冰川对全球变暖的响应[J]. 冰川冻土, 22(3): 223-229.
- 孙作哲, 陈要武, 张金华. 1980. 乌鲁木齐河源 1 号冰川表面运动速度[R]. 天山冰川站年报, 1: 22-30.
- 王国亚, 沈永平, 毛伟峰. 2005. 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, 27(6): 813-819.
- 杨保, 施雅风, 李恒鹏. 2002. 过去 2ka 气候变化研究进展[J]. 地球科学进展, 17(1): 111-117.
- 杨新元, 韩添丁. 1996. 乌鲁木齐河源气温和降水的变化趋势及其对冰川影响[J]. 冰川冻土, 18(2): 189-193.
- 姚檀栋, 焦克勤, 杨志红, 施维林. 1995. 古里雅冰芯记录的小冰期以来的气候变化[J]. 中国科学 B 辑, 25(10): 1108-1114.
- 姚檀栋, 刘时银, 蒲建辰, 沈永平, 鲁安新. 2004. 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, 34(6): 535-543.
- 姚檀栋, 谢自楚, 武筱龄, THOMPSON L G. 1990. 敦德冰帽中的小冰期气候记录[J]. 中国科学 B 辑, 11: 1196-1201.
- 张晶晶, 陈爽, 赵昕奕. 2006. 近 50 年中国气温变化的区域差异及其与全球气候变化的联系[J]. 干旱区资源与环境, 20(4): 1-6.
- 张寅生, 姚檀栋, 蒲建辰. 1998. 我国大陆性山地冰川对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 20(1): 3-8.
- 周建民, 李震, 李新武. 2009. 基于 ALOS/PALSAR 雷达干涉数据的中国西部山谷冰流运动规律研究[J]. 测绘学报, 38(4): 341-347.
- 周在明, 李忠勤, 李慧林, 井哲帆. 2009. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川运动特征及其动力学模拟[J]. 冰川冻土, 31(1): 55-61.

References:

- BOLCH T. 2007. Climate change and glacier retreat in northern Tien Shan (Kazakhstan/Kyrgyzstan) using remote sensing data[J]. Global and Planetary Change, 56: 1-12.
- CARR S, COLEMAN C. 2007. An improved technique for the reconstruction of former glacier mass-balance and dynamics[J]. Geomorphology, 92: 76-90.
- DOWDESWELL J A, UNWIN B, NUTTALL A M, WINGHAM D J. 1999. Velocity structure, flow instability and mass flux on a large Arctic ice cap from satellite radar interferometry[J]. Earth and Planetary Science Letters, 167: 131-140.
- DUAN Jian-ping, WANG Li-li, REN Jia-wen, LI Lun. 2009. Progress in Glacier Variations in China and Its Sensitivity to Climatic Change during the Past Century[J]. Progress in Geography, 28(2): 231-237(in Chinese with English abstract).
- HAN Tian-ding, YE Bai-sheng, JIAO Ke-qin. 2002. Temperature variations in the southern and northern slopes of Mt. Tianger in the Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 24(5): 567-570(in Chinese with English abstract).
- HUANG Mao-huan. 1992. The movement mechanisms of the Urumqi Glacier No.1, Tianshan Mountains, China[J]. Annals of

Glaciology, 16: 39-44.

- IKEN A, TRUFFER M. 1997. The relationship between subglacial water pressure and velocity of Findelengletscher, Switzerland, during its advance and retreat[J]. Journal of Glaciology, 43(144): 328-338.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- JIAO Ke-qin, JING Zhe-fan, HAN Tian-ding, YE Bai-sheng, YANG Hui-an, LI Zhong-qin. 2004. Variation of the Glacier No.1 at the Tianshan Mountains during the past 42 years and its trend prediction[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 26(3): 253-260(in Chinese with English abstract).
- JING Xiao-ping, HUANG Mao-huan, CHEN Jian-ming. 1992. Basal deformation of Urumqi Glacier No.1, Tianshan Mountains, China[J]. Annals of Glaciology, 16: 123-126.
- JING Zhe-fan, JIAO Ke-qin, YAO Tan-dong, WANG Ning-lian, LI Zhong-qin. 2006. Mass balance and recession of Urumqi glacier No.1, Tian Shan, China, over the last 45 years[J]. Annals of Glaciology, 43: 214-217.
- JING Zhe-fan, YAO Tan-dong, WANG Ning-lian. 2003. The surface flow features of the Puruogangri Ice Field[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 25(3): 288-290(in Chinese with English abstract).
- JING Zhe-fan, YE Bai-sheng, JIAO Ke-qin, YANG Hui-an. 2002. Surface velocity on the Glacier No.51 at Haxilegen of the Kuytun River, Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 24(5): 563-566(in Chinese with English abstract).
- KAAB A. 2005. Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpin glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya[J]. Remote Sensing of Environment, 94: 463-474.
- KANG Shi-chang, CHEN Feng, YE Qing-hua, JING Zhe-fan, QIN Da-he, REN Jia-wen. 2007. Glacier Retreating Dramatically on the Mt. Nyainqentanglha During the Last 40 Years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 29(6): 869-873(in Chinese with English abstract).
- KLOK E J, OERLEMANS J. 2004. Climate reconstructions derived from global glacier length records[J]. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 36(4): 575-583.
- LI Hui-lin, LI Zhong-qin, SHEN Yong-ping, WANG Fei-teng, WANG Wen-bin. 2007. Glacier dynamic models and their applicability for the glacier in China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 29(2): 201-208(in Chinese with English abstract).
- LI Zhong-qin, HAN Tian-ding, JING Zhe-fan, YANG Hui-an, JIAO Ke-qin. 2003. 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, 25(2): 117-123(in Chinese with English abstract).
- LI Zhong-qin, SHEN Yong-ping, WANG Fei-teng, LI Hui-lin. 2007. 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*, 3(3): 132-137(in Chinese with English abstract).
- LIU Shi-yin, DING Yong-jian, WANG Ning-lian, XIE Zi-chu. 1998. Mass balance sensitivity to climate change of the Glacier No.1 at the Urumqi River head, Tianshan Mts[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 20(1): 9-13(in Chinese with English abstract).
- MEIER M F, DYURGEROV M B, RICK U K, O'NEEL S, PFEFFER W T, ANDERSON R S, ANDERSON S P, GLAZOVSKY A F. 2007. Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century[J]. *Science*, 317(5841): 1064-1067.
- NAKAMURA K, DOI K, SHIBUYA K. 2007. Estimation of seasonal changes in the flow of Shirase Glacier using JERS-1/SAR image correlation[J]. *Polar Science*, 1: 73-83.
- QIN Da-he, CHEN Yi-yu, LI Xue-yong. 2005. Climate and environment changes in China. Volum I, Climate and environment changes in China and their projections[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English Summary).
- QIN Da-he. 2004. Climate change sciences into the 21st century: facts, impact and strategies addressing climate change[J]. *Science and Technology Review*, 7: 4-7(in Chinese with English abstract).
- RIGNOT E, CASASSA G, GOGINENI P, KRABILL W, RIVERA A, THOMAS R. 2004. Accelerated ice discharge from the Antarctic Peninsula following the collapse of Larsen B Ice Shelf[J]. *Geophysical Research Letters*, 31, L18401, doi: 10.1029/2004GL020697.
- RIGNOT E, KANAGARATNAM P. 2006. Changes in the velocity structure of the Greenland Ice Sheet[J]. *Science*, 311: 986-990.
- SHI Ya-feng, LIU Shi-yin. 2000. Estimation on the response of glaciers in China to the global warming in the 21st century[J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(4): 333-341.
- SHI Ya-feng, SHEN Yong-ping, HU Ru-ji. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in North-west China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 24(3): 219-226(in Chinese with English abstract).
- SHI Ya-feng. 1995. Impacts of climate change on water resources in the western and northern China[M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press(in Chinese with English Summary).
- SHI Ya-feng. 2004. Deploitation of glaciology in China and retrospect of studies on climatic and environmental change[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 26(1): 66-72(in Chinese with English abstract).
- SU Hong-chao, WEI Wen-shou, HAN Ping. 2003. Change in air temperature and evaporation in Xinjiang during recent 50 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 25(2): 174-178(in Chinese with English abstract).
- SU Zhen, SHI Ya-feng. 2000. Response of monsoonal temperature glaciers in China to global warming since the Little Ice Age[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 22(3): 223-229(in Chinese with English abstract).
- SUN Zuo-zhe, CHEN Yao-wu, ZHANG Jin-hua. 1980. The velocity of Glacier No.1 at the headwater of Urumqi River[R]. *Annual Report of Tianshan Glaciological Station*, 1: 22-30(in Chinese).
- TRABANT D C, KRIMMEL R M, ECHELMMEYER K A, ZIRNHELD S L, ELSBERG D H. 2003. The slow advance of a calving glacier: Hubbard Glacier Alaska, U.S.A[J]. *Annals of Glaciology*, 36: 45-50.
- WANG Guo-ya, SHEN Yong-ping, MAO Wei-yi. 2005. Climate warming at headwater of Urumqi River, Xinjiang in past 44 years and its impact on glacier shrinking[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 27(6): 813-819(in Chinese with English abstract).
- YANG Bao, SHI Ya-feng, LI Heng-peng. 2002. Some advances in climatic change over the past two millennia[J]. *Advance in Earth Sciences*, 17(1): 111-117(in Chinese with English abstract).
- YANG Xin-yuan, HAN Tian-ding. 1996. The variation trends of temperature and precipitation and their influence on glaciers in the headwaters of Urumqi River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 18(2): 189-193(in Chinese with English abstract).
- YAO Tan-dong, JIAO Ke-qin, YANG Zhi-hong, SHI Wei-lin. 1995. The little ice age as recorded in the Guliya ice core[J]. *Science in China Series B: Chemistry*, 25(10): 1108-1114.
- YAO Tan-dong, LIU Shi-yin, PU Jian-chen, SHEN Yong-ping, LU An-xin. 2004. Recent glacial retreat in High-Asia in China and its impact on water resources in Northwest China[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 34(6): 535-543.
- YAO Tan-dong, XIE Zi-chu, WU Xiao-ling, THOMPSON L G. 1990. The climate records of DunDe Ice Cap since the Little Ice Age[J]. *Science in China Series B: Chemistry*, 11: 1196-1201.
- ZEMP M, HAEBERLI W, HOELZLE M, PAUL F. 2006. Alpine glaciers to disappear within decades[J]. *Geophysical Research Letters*, 33(13): L13504.
- ZHANG Jing-jing, CHEN Shuang, ZHAO Xin-yi. 2006. Spatial divergency of temperature change during 1951 – 2000 in China and its correlation with global climate change[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 20(4): 1-6(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yin-sheng, YAO Tan-dong, PU Jian-chen. 1998. The response of continental-type glaciers to climate change in China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 20(1): 3-8(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Jian-min, LI Zhen, LI Xin-wu. 2009. Research on rules of the valley glacier motion in western China based on ALOS/PALSAR Interferometry[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 38(4): 341-347(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Zai-ming, LI Zhong-qin, LI Hui-lin, JING Zhe-fan. 2009. The flow velocity features and dynamic simulation of the glacier No.1 at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 31(1): 55-61(in Chinese with English abstract).