

文章编号:1000-0240(2009)01-0055-07

天山乌鲁木齐河源区 1 号冰川运动速度特征及其动力学模拟

周在明, 李忠勤, 李慧林, 井哲帆

(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/天山冰川国家野外观测试验站, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 冰川运动造成了冰川物质的再分布, 改变了冰体所处的水、热环境, 维系了冰川的动态平衡。冰川表面速度是冰川运动的基本体征, 通过对天山乌鲁木齐河源区 1 号冰川 2006—2008 年连续 2 a 的月观测, 获得了冰川表面运动速度的时、空变化特征, 并对其进行了动力学模拟验证。结果表明: 冰川运动速度分布是冰川厚度、冰面坡度及冰川基岩形态等因素综合作用的结果, 而厚度的改变是运动速度季节性变化的主要影响因素。

关键词: 1 号冰川; 运动速度; 冰川断面; 动力学模拟

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A

0 引言

冰川或冰盖内部的冰, 由于受到重力的驱动作用发生着沿坡向下的位移。此外, 冰川还可能发生底部运动包括在下伏基岩上发生的滑动与底部沉积层变形造成的运动。这两种运动过程构成了冰川运动的主要形式作^[1]。运动是冰川的基本过程, 是冰川动力学的基础, 是冰川区别于其它自然冰体的主要标志之一^[2-3]。与冰川运动相适应的是冰川物质平衡的变化^[4-7], 冰体所处的融水、温度环境的改变^[8-9], 以及冰体所受应力作用的不稳定^[10]。因此, 冰川运动造成了冰川物质的再分布, 改变了冰体所处的水、热环境, 维系了冰川的动态平衡。

目前, 国际上以欧美国家为主对极地冰盖与阿拉斯加湾、阿尔卑斯山区的海洋型冰川进行了深入的研究^[11-15], 揭示了冰川运动速度的分布规律及其与冰下地形、潮汐作用、水压作用等的关系^[9, 12, 16-17]。中国是世界上山岳冰川最发达的国家之一^[18], 自 20 世纪 50 年代以来, 科学工作者对天山、阿尔泰山、祁连山、喀喇昆仑山、喜马拉雅山、念青唐古拉山、横断山等山区的冰川进行了运动速

度的观测研究, 取得了一定的研究成果^[19-23]。天山乌鲁木齐河源区 1 号冰川(以下简称 1 号冰川)是在我国境内研究冰川运动速度最早的冰川, 对 1 号冰川的运动观测始于 1959 年^[24], 至今已有近 50 a 的观测历史。然而其运动速度的季节变化资料缺乏, 对其运动速度与动力学关系的认识还不够深入, 为此我们开展了 1 号冰川运动速度的季节变化与动力学模拟研究。

1 运动速度的观测与方法

1 号冰川的观测点位源于早期的冰川运动速度与物质平衡花杆点。点位布设情况为: 东支冰川在海拔 3 800~4 050 m 共布设 A'~H 共 8 排 23 根花杆, 西支冰川在海拔 3 850~4 100 m 共布设 A~L 共 9 排 22 根花杆(观测点位图 1 所示)。控制点位的观测采用传统的大地测量方法, 应用 SOKKIA, GSS1A 型 GPS 定点。运动点位观测应用 KTS442 型全站仪测定。GPS 测量控制点的处理采用定位解算软件 GAMIT/ GLOBK, 根据观测方法并经过误差分析, 水平方向精度 ≤ 5 mm, 高程精度 ≤ 20 mm。运动速度观测数据计算以坐标法计算出冰体单位时间内的

收稿日期: 2008-08-13; 修订日期: 2008-12-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB411501); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-127); 国家自然科学基金项目(40631001; 40571033; 40371028; J0630966)资助

作者简介: 周在明(1980—), 男, 山东淄博人, 2004 年毕业于山东理工大学, 现为在读硕士研究生, 主要从事冰川运动与冰川变化研究。
E-mail: zhoumingzhou@163.com

位移, 位移量与时间的比值即为单位时间内的速度值. 坐标系为独立坐标系, X 为纵坐标, Y 为横坐标. U_X, U_Y 分别为平行于 X, Y 轴的速度分量, Y_{XY} 为速度的水平分量, $Y_{XY} = (U_X^2 + U_Y^2)^{1/2}$, 误差一般不超过其本身数据的 10 %.

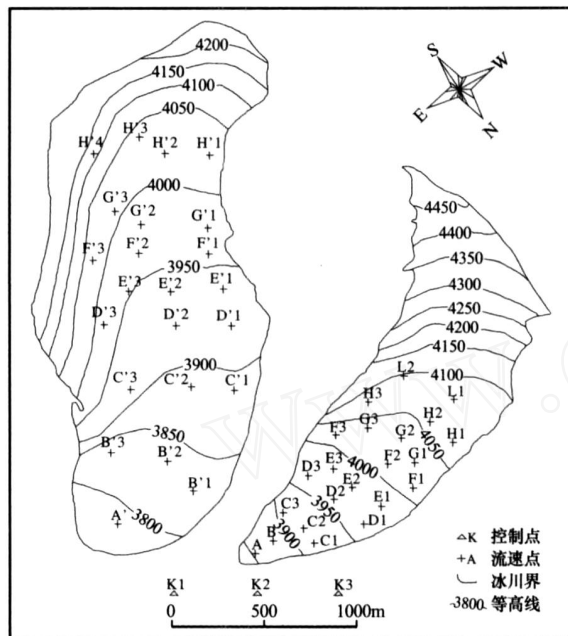


图 1 乌鲁木齐河源区 1 号冰川运动速度观测点位

Fig. 1 Points for flow velocity surveying of the Glacier No. 1 at the headwaters of Ürümqi River

本文研究的 1 号冰川运动速度资料来自 2006 年 6 月 1 日至 2008 年 4 月 3 日之间的 12 次观测数据, 观测时间分别为: 2006 年 6 月 1 日、2006 年 7 月 17 日、2006 年 8 月 19 日、2006 年 9 月 26 日、2006 年 10 月 20 日、2007 年 5 月 1 日、2007 年 7 月 24 日、2007 年 8 月 20 日、2007 年 9 月 22 日、2007 年 10 月 24 日、2007 年 12 月 21 日和 2008 年 4 月 3 日.

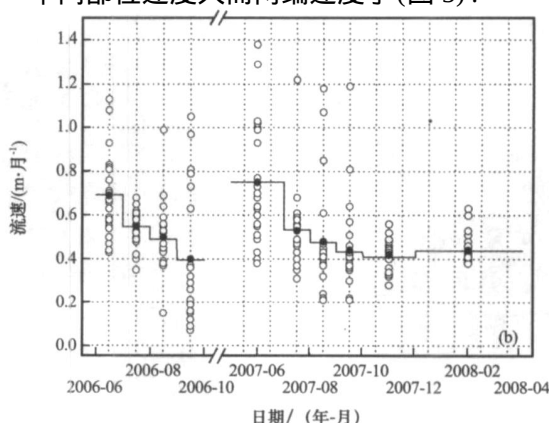
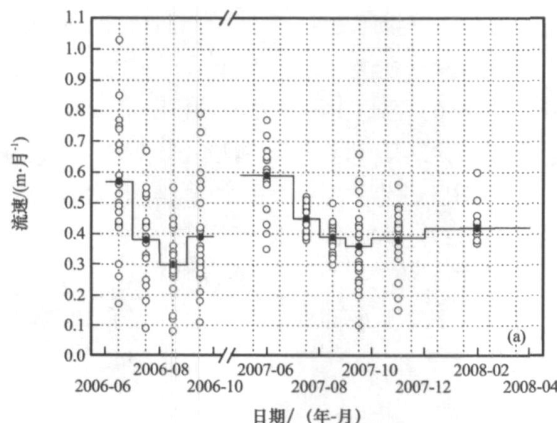


图 2 乌鲁木齐河源区 1 号冰川 2006—2008 年月运动速度图

注: (a) 东支冰川; (b) 西支冰川, 图中的小圆圈表示不同观测点, 实线表示月平均运动速度值

Fig. 2 Observed monthly flow velocities of the Glacier No. 1 at the headwaters of Ürümqi River (2006—2008)

2 运动速度的时间变化特征分析

对 1 号冰川 2006—2008 年的观测数据分析表明, 东、西支冰川的月运动速度变化规律表现出很好的一致性(图 2). 东西两支的月运动速度最大值都出现在 2007 年 5—7 月间, 东支冰川最大值为 $0.59 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$, 西支冰川为 $0.75 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$; 月运动速度的最小值东支出现在 2006 年 8—9 月间, 速度值为 $0.30 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$, 西支出现在 2006 年 9—10 月间, 速度值为 $0.40 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$. 总体来看, 5—7 月的运动速度值较大, 从 7 月份开始运动速度开始减小, 东支冰川 9 月份以后运动速度值又开始缓慢增大, 西支冰川 12 月以后速度开始小幅度回升.

东西支冰川表面运动速度的季节变化规律在 2007 年表现出很好的一致性. 运动速度在春季最大, 到夏、秋季节持续减小, 到冬季又有增大趋势, 最小值出现在秋季. 西支冰川的运动速度比东支冰川大, 其差别在春季尤为显著为 $0.15 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$, 而冬季较小 $0.03 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$. 对同支冰川来说, 不同季节的运动速度差异明显, 春季速度与秋季速度相比, 东支冰川为 1.7 倍, 西支冰川为 1.6 倍.

2007 年四季中, 西支冰川的运动速度变化幅度都大于东支, 西支冰川表现出相对较快的运动特征. 在春季较为明显, 西支冰川运动速度变化幅度为 $0.36 \sim 0.12 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$, 而东支为 $0.36 \text{ h} \sim 0.78 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$. 在不同季节中东西支冰川速度分布差异较大, 在运动速度较快的春季与夏季西支冰川个别点位运动速度值较大, 且速度值的大小差别较大, 东支冰川速度分布相对均匀. 在运动速度相对较慢的秋、冬季节东西支冰川速度分布均匀, 且表现为中间部位速度大而两端速度小(图 3).

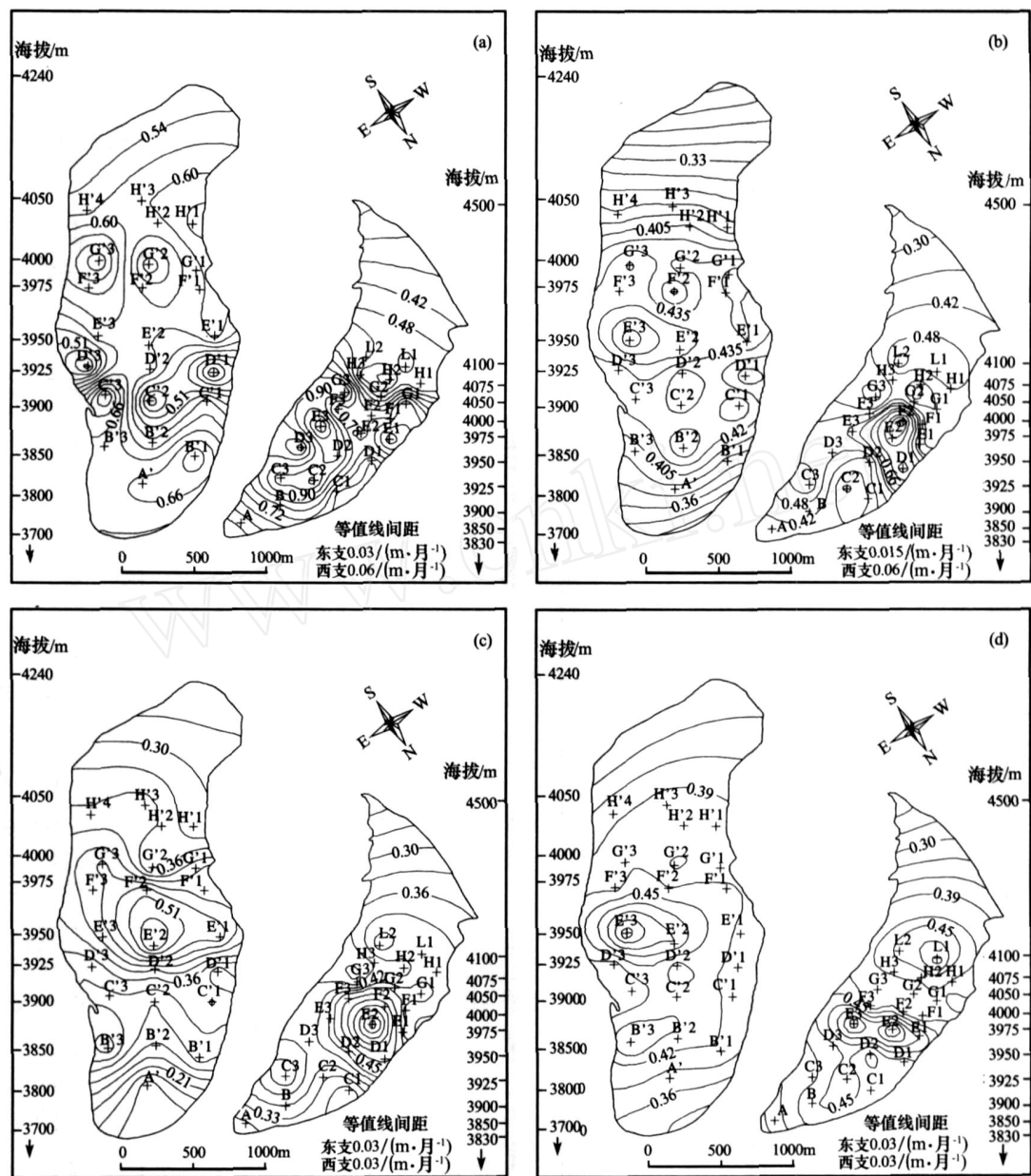


图 3 乌鲁木齐河源区 1 号冰川 2007 年不同季节运动速度等值线
(a、b、c、d 分别代表春、夏、秋、冬)

Fig.3 Isolines of flow velocities of the Glacier No.1 at the headwaters of Ürümqi River in spring (a) summer (b) autumn (c) and winter (d) in 2007

3 运动速度高度变化特征分析

在同时期内，西支冰川的运动速度比东支冰川的大，东支冰川在历次观测中都表现出中间 E'断面运动速度快，而两端运动速度低的现象。西支冰川的历次观测中基本上是中间 E 断面速度最大，而末端 A 断面与顶端的 G 或 H 断面速度较小。东、西支冰川的速度变化幅度都表现为中间断面大而两端断面小(图 4)。

东西支冰川表现出在中间断面两边的断面上运

动速度值表现出对称性：如东支冰川以海拔 3 950 m 的 E'断面为中心两边的 H'与 B'断面；西支冰川以海拔3 975 m 的 E 断面为中心两边的 C 与 G 断面，B 与 H 断面(图 5)。

4 运动速度动力学模式模拟

为了进一步讨论冰川表面运动速度的时空分布及成因，利用表面高程、厚度、长度及宽度等实测资料对 1 号冰川的表面速度进行动力学模拟。采用的模式是近年来国际上通用的 SIA (Shallow Ice

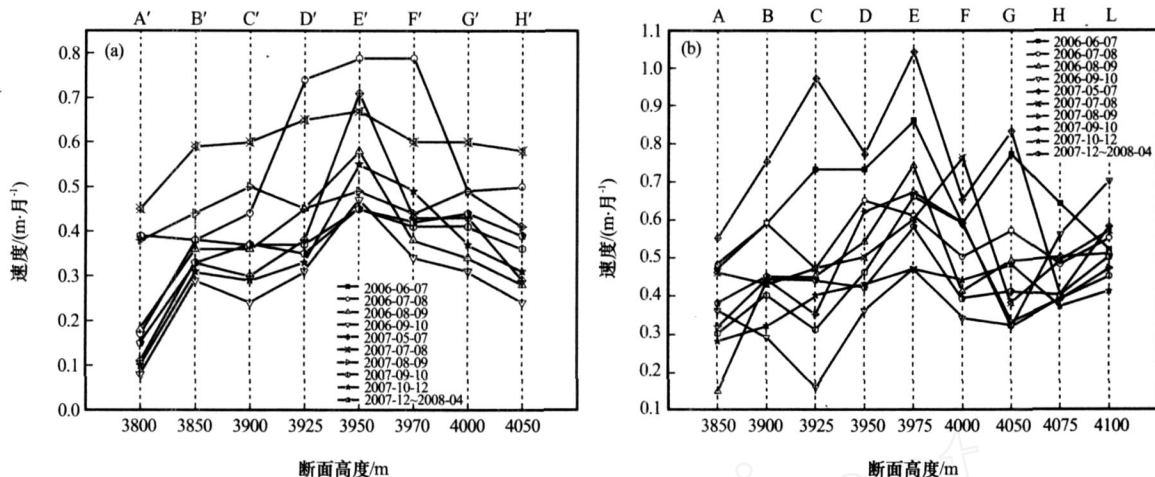
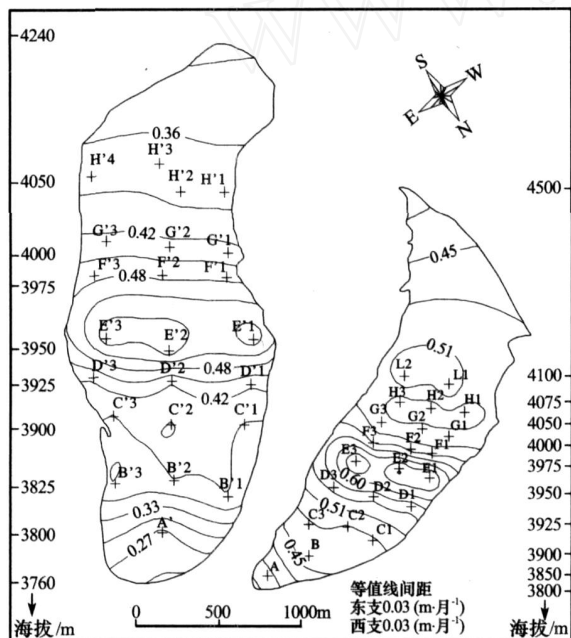


图 4 乌鲁木齐河源区 1 号冰川 2006—2008 年逐月断面速度图
a. 为东支冰川; b. 为西支冰川

Fig. 4 Monthly flow velocities for different profiles of the Glacier No. 1 at the headwaters of Ürümqi River (2006—2008)



明显小于实测值, 平均差值在 $2\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$ 左右. 20 世纪 80 年代科学家在 1 号冰川东西两支末端冰洞内的观测表明, 冰川底部温度略高于融点或非常接近融点, 并且底部有较厚的沙砾沉积层, 在有溶水的情况下极易变形. 因此, 获得结论: 在 1 号冰川末端有底部运动发生, 并且底部运动占整体运动的比重较大^[26]. 之后近 30 a 中, 随着气温度上升, 1 号冰川发生明显退缩, 东西两支分离为两条独立的冰川. 在速度观测期间, 我们对冰川末端底部的温度及形态作了粗略同步观测, 发现消融季节底部有融水流出, 底部沙砾松散, 冰川极有发生底部运动的可能. 针对这种可能性, 应用 Weertmen 滑动定律(式(6))将冰川滑动因素引入模式对冰川下游部分(海拔3 750~3 890 m)的年运动速度重新模拟, 获得了令人满意的结果(图 6). 发现在冰川下游, 底部运动占整个运动的 50 % 左右, 平均值为 $2.5\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$.

$$u_b = A_s \rho g \sin \alpha h^2 \tag{6}$$

式中: A_s 为滑动系数, 通过在模型中不断调整冰川厚度与速度最终确定经率定为 $A_s = 2.063 \times 10^{-13}\text{ m}\cdot\text{Pa}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$; h 为沿冰川主流线方向的厚度其平均值为 85.3 m, 变化范围 20~120 m.

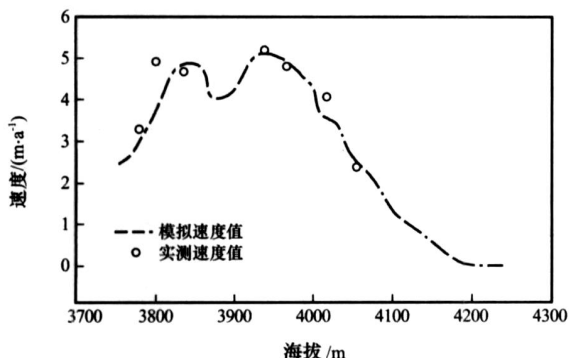


图 6 模拟与观测表面运动速度的比较

Fig. 6 The measured and simulated surface flow velocity

4.2 速度的时间变化模拟与实测比较

对速度主要起作用的厚度、坡度及形状因子 3 个因素中, 厚度是最基本的影响因子, 而且厚度的改变直接影响坡度与形状因子的变化. 在年尺度内, 厚度也是变化最活跃的因子. 因此, 我们作了表面运动速度对厚度改变的敏感性实验.

1 号冰川东支主流线上的厚度变化范围为 20~120 m. 依据敏感性实验结果, 在此变化范围内, 冰川厚度增加或减少 1 m, 表面运动速度的变幅主要在 30 %~40 % 之间. 量值上, 变化主要发生在冰川中部海拔 3 800~4 050 m 之间, 变化最大值约为

$0.4\text{ m}\cdot\text{a}^{-1}$. 比重上, 冰川两端的变化最为明显, 增加 1m 与减少 1m 分别造成 45 % 与 33 % 的变化; 冰川中部的变化幅度相对较小, 界于 3 %~10 % 之间.

4.3 速度的高度变化模拟与实测比较

将 2006—2008 年实测表面运动速度与模拟的数值进行比较(图 6), 发现除海拔 3 800 m 左右的 B 排花杆外, 其它点都符合良好. 结果充分证明, 冰川运动速度是冰川厚度、冰面坡度及冰川基岩形态等因素的综合作用结果(海拔 3 880 m 以下的模拟加入了冰川底部的运动分量).

5 原因分析

由于速度的季节性变化主要发生在春末到夏末期间, 因此, 我们把研究的重点放在 7—10 月这 4 个月. 综合考虑冰川不同部分在不同季节积累与消融可能引起的厚度变化, 以及夏季消融盛期冰川末端发生底部运动等因素, 界定了表面运动速度季节变化的理论范围(图 7).

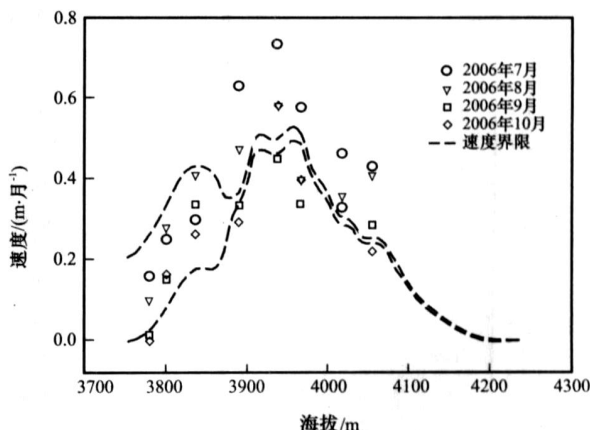


图 7 实测表面运动速度与其季节变化理论范围的比较

Fig. 7 Observed surface flow velocity and its theoretic limitation

可以看到海拔 3 900 m 以下的观测数据几乎都在理论变化范围以内, 而此点以上则大部分都超出解释范围. 说明冰川末端区域的运动速度季节性变化, 主要是由于夏季强烈消融造成的厚度骤减及消融盛期底部运动差异造成, 并且底部运动是相当重要的因素.

海拔 3 900 m 以上各点速度变化幅度大, 其成因较为复杂, 这与我们只沿冰川主流线方向的一维速度模拟有关. 另外, 在实地测量中发现该海拔以上的冰川表面出现连续起伏变化, 造成坡度陡缓交替, 多数点在夏初仍然有降雪沉积. 这些因素造成

花杆在消融与沉积共同作用的过程中出现倾斜或类似状况,使观测结果存在除仪器误差外的其它误差。由于月观测的运动速度量值仅在几厘米到十几厘米之间,误差对观测结果来说有一定影响。

此外,物质平衡积累量减小导致纵向应力的变化,纵向应力减小会导致冰体运动减速,反之则加速。夏季降水对冰川物质平衡积累为负作用而对冰川的消融是正面作用,同样夏季的气温对冰川物质平衡影响为负,但对冰川的径流融化有积极的影响,高温导致冰川消融加剧从而产生大的冰川径流。因此,一定程度上夏季的气温控制着冰川物质平衡的改变。伴随着气温的升高与降水的增多,1号冰川消融大于积累,从而影响着整个冰川的运动速度改变。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东西支冰川运动速度的差别。

6 结论

时间变化上看,2006—2008年同月份西支冰川速度值的分布范围比东支大,总体上月间运动速度的变化幅度西支冰川是东支冰川的1.6倍。东西支冰川逐月间的运动速度表现出很好的规律一致性,东西支冰川月间运动速度大体同方向变化。5—7月份内运动速度值最大,从7月份开始运动速度值开始减小,东支冰川9月份以后运动速度值开始缓慢增大,而西支冰川12月份以后速度值开始回升。总体上,西支冰川运动速度是东支冰川的1.2倍,冰川厚度的改变是其原因。

高度变化上看,2006—2008年总体上东西支冰川表现出中间断面运动快而两端断面速度慢,越靠近冰体两端运动速度越低,但是西支冰川最上端断面速度是增大的。冰川以中间断面为中心两端断面的运动速度值表现出对称性分布的特点。在同一断面上,冰川表面运动速度从中间向两侧逐渐减小。原因是冰川厚度、冰面坡度及冰川基岩形态等综合作用的结果。

致谢:本研究得到天山冰川国家野外观测试验站的大力支持,在此对天山站的工作人员表示衷心的感谢和敬意。

参考文献(References):

[1] Paterson W S B. The Physics of Glaciers [M]. Beijing: Sciences Press, 1987: 37 - 40. [W. S. B. 佩特森. 冰川物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 37 - 40.]

[2] Kääb A. Combination of SRTM3 and repeat ASTER data for deriving alpine glacier flow velocities in the Bhutan Himalaya [J]. Remote Sensing of Environment, 2005, **94**: 463 - 474.

[3] Huang Maohuan, Sun Zuozhe. Some flow characteristics of continental-type glaciers in China [J]. Journal of Glaciology and Cryopedology, 1982, **4**(2): 35 - 44. [黄茂桓, 孙作哲. 我国大陆性冰川运动的某些特征[J]. 冰川冻土, 1982, **4**(2): 35 - 44.]

[4] Shi Yafeng. Some achievement on mountain glacier researches in China. Seppyo, 1980, **42**(4): 215 - 228.

[5] Rignot E, Kanagaratnam P. Changes in the velocity structure of the Greenland Ice Sheet [J]. Science, 2006, **311**: 986 - 990.

[6] Carr S, Coleman C. An improved technique for the reconstruction of former glacier mass-balance and dynamics [J]. Geomorphology, 2007, **92**: 76 - 90.

[7] Nakamura K, Doi K, Shibuya K. Estimation of seasonal changes in the flow of Shirase Glacier using JERS-1/ SAR image correlation [J]. Polar Science, 2007, **1**: 73 - 83.

[8] Echelmeyer K, Harrison W D, Jakobshavn Isbrae, West Greenland: Seasonal variations in velocity-or lack there of [J]. Journal of Glaciology, 1990, **36**(122): 82 - 88.

[9] Iken A, Truffer M. The relationship between subglacial water pressure and velocity of Findelengletscher, Switzerland, during its advance and retreat [J]. Journal of Glaciology, 1997, **43**(144): 328 - 338.

[10] Rabus B T, Lang O. Interannual surface velocity variations of Pine Island Glacier, West Antarctica [J]. Annals of Glaciology, 2003, **36**: 205 - 214.

[11] Gudmundsson GH. Fortnightly variations in the flow velocity of Rutford Ice Stream, West Antarctica [J]. Nature, 2006, **444**(7122): 1063 - 1064.

[12] Dowdeswell J A, Unwin B, Nuttall A M, et al. Velocity structure, flow instability and mass flux on a large Arctic ice cap from satellite radar interferometry [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, **167**: 131 - 140.

[13] Bamber J L, Hardy R J, Huybrechts P, et al. A comparison of balance velocities, measured velocities and thermomechanically modeled velocities for the Greenland ice sheet [J]. Annals of Glaciology, 2000, **30**: 211 - 216.

[14] Fatland D R, Lingle G S, Truffer M. A surface motion survey of Black Rapids Glacier, Alaska, U. S. A. [J]. Annals of Glaciology, 2003, **36**: 29 - 36.

[15] Lliboutry L. Velocities, strain rates, stress, crevassing and faulting on Glacier de Saint - Sorlin, French Alps, 1957-76 [J]. Journal of Glaciology, 2002, **48**(160): 125 - 141.

[16] Hagen J O, Kohler J, Melvold K, et al. Glaciers in Svalbard: mass balance, runoff and freshwater flux [J]. Polar Research, 2003, **22**(2): 145 - 159.

[17] Urbini S, Frezzotti M, Gandolfi S, et al. Historical behavior of Dome C and Talos Dome (East Antarctica) as investigated by snow accumulation and ice velocity measurements [J]. Global and Planetary Change, 2008, **60**: 577 - 588.

[18] Shi Yafeng, Xie Zichu. General features of modern glaciers in China [J]. Acta Geographica Sinica, 1964, **30**(3): 183 - 206. [施雅风, 谢自楚. 中国现代冰川的基本特征[J]. 地理学报, 1964, **30**(3): 183 - 208.]

[19] Huang Maohuan. The movement mechanisms of the 110000

- Glacier No. 1, Tianshan Mts., China[J]. *Annals of Glaciology*, 1992, **16**: 39 - 44.
- [20] Jing Xiaoping, Huang Maohuan, Chen Jianming, *et al.* Basal deformation of Ū ūnqī Glacier No. 1, Tianshan Mts., China [J]. *Annals of Glaciology*, 1992, **16**: 123 - 126.
- [21] Jing Zhefan, Ye Baisheng, Jiao Keqin, *et al.* Surface velocity on the Glacier No. 51 at Haxilegen of the Kuytun River, Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, **24**(5): 563 - 566. [井哲帆, 叶柏生, 焦克勤, 等. 天山奎屯河哈希勒根 51 号冰川表面运动特征分析[J]. *冰川冻土*, 2002, **24**(5): 563 - 566.]
- [22] Jing Zhefan, Yao Tandong, Wang Ninglian. The surface flow features of the Puruogangri Ice Field[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, **25**(3): 288 - 290. [井哲帆, 姚檀栋, 王宁练. 普若岗日冰原表面运动特征观测研究进展[J]. *冰川冻土*, 2003, **25**(3): 288 - 290.]
- [23] Sun Zuozhe, Chen Yaowu, You Genxiang, *et al.* Flow characteristics of Glacier No. 1 at the headwater of Ū ūnqī River, Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, **7**(1): 27 - 40. [孙作哲, 陈要武, 尤根祥, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川的运动特征[J]. *冰川冻土*, 1985, **7**(1): 27 - 40.]
- [24] Sun Zuozhe, Chen Yaowu, Zhang Jinhua. The velocity of Glacier No. 1 at the headwater of Ū ūnqī River[R]. *Annual Report of Tianshan Glaciological Station*, 1980, **1**: 22 - 30. [孙作哲, 陈要武, 张金华. 乌鲁木齐河源 1 号冰川表面运动速度[R]. *天山冰川站年报*, 1980, **1**: 22 - 30.]
- [25] Ny J F. The motion of ice sheets and glaciers [J]. *Journal of Glaciology*, 1959, **3**(26): 493 - 507.
- [26] Wang Zhongxiang, Song Genhai, Li Gang. Observation and experiment on inner flow characteristics of Glacier No. 1 in the Ū ūnqī River Headwaters, Tianshan[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1985, **7**(2): 123 - 131. [王仲祥, 宋根还, 李纲. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川冰体流变的现场观测与试验研究[J]. *冰川冻土*, 1985, **7**(2): 123 - 131.]

The Flow Velocity Features and Dynamic Simulation of the Glacier No. 1 at the Headwaters of Ū ūnqī River, Tianshan Mountains

ZHOU Zai-ming, LI Zhong-qin, LI Hui-lin, JING Zhe-fan

(Key State Laboratory of Cryospheric Sciences, Tianshan Glaciological Station, CAREERI, CAS, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: The movement of glacier can redistribute glacier mass, change the water and thermal environment of a glacier, so the glacier can maintain its dynamic balance. Surface flow velocity of glacier is a basic feature of the glacier movement. By the successive monthly observation from 2006 to 2008, the space-time variation features of the surface

flow velocity of the glacier is obtained. A dynamic simulation is made to validate the findings. The results show that the altitude distribution of the glacier flow velocity is an integrated effect of the glacier thickness, slope and bedrock morphology. However, the seasonal variation in flow velocity is resulted from the thickness changing.

Key words: Glacier No. 1; velocity; slope; dynamic simulation