

文章编号:1000-0240(2011)01-0021-09

# 天山托木尔峰地区青冰滩 72 号冰川 表面运动速度特征研究

曹 敏<sup>1</sup>, 李忠勤<sup>1, 2\*</sup>, 李慧林<sup>2</sup>

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070; 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/天山冰川站, 甘肃 兰州 730000)

**摘 要:** 托木尔峰地区是天山最大的冰川分布区, 是阿克苏地区主要水资源补给地。一直以来, 该区冰川运动资料空白, 严重阻碍了对冰川水资源现状及未来变化评估工作的开展。鉴于以上情况, 中国科学院天山冰川站在 2008 年 8 月到 2009 年 8 月 3 次开展了对天山托木尔峰青冰滩 72 号冰川表面运动速度的观测, 获得了冰川表面运动速度特征变化状况。结果表明: 青冰滩 72 号冰川冰舌区域运动速度存在明显的消融季和非消融季的差异, 消融季速度偏大。年均水平运动速度  $47.1 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$  速度分布受局地地形因素影响明显。与天山乌鲁木齐河源 1 号冰川相比, 该冰川运动速度明显偏大, 消融季底部滑动显著, 其运动特征更偏向海洋性冰川。

**关键词:** 青冰滩 72 号冰川; 全球定位系统(GPS); 表面运动速度空间分布; 季节变化  
中图分类号: P343.6 文献标识码: A

## 0 引言

运动是冰川区别于其他自然冰体的标志之一<sup>[1-2]</sup>, 是冰川存在和发育的主要机制<sup>[3]</sup>。冰川运动与外部气候、冰川形态、物质平衡、温度及水力特征联系密切, 研究冰川运动特征有助于了解冰川的基本性质, 属于冰川学研究一项重要内容<sup>[4-6]</sup>。近年来, 全球变暖背景下冰川普遍退缩, 利用冰川动力模式模拟预估冰川未来变化等研究方兴未艾, 而冰川运动特征研究正是该类研究的基础。

中国是世界上山岳冰川最发达的国家之一<sup>[7]</sup>。20 世纪 60 年代以来, 我国的冰川运动观测研究在天山、阿尔泰山、祁连山、喀喇昆仑山、喜马拉雅山、念青唐古拉山、横断山等山区及藏北高原的少数冰川上相继开展<sup>[2, 8-13]</sup>。以上研究中, 我国冰川学者研究了天山乌鲁木齐河源 1 号冰川(以下简称 1 号冰川)的运动机理, 并对中国大陆性冰川的运动特征进行了总结。托木尔峰地区位于天山南麓,

塔里木盆地北缘, 是天山最大的冰川分布区, 现有冰川面积  $4\,098 \text{ km}^2$ , 储水量  $2\,154 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 是阿克苏地区主要水资源补给地<sup>[14]</sup>。托木尔峰地区发育的冰川与天山其他区域冰川相比有其显著特点: 1) 平均面积大(托木尔峰地区的冰川平均面积为  $2.6 \text{ km}^2$ , 而整个天山地区的冰川平均面积为  $1.03 \text{ km}^2$ ); 2) 顶端海拔高; 3) 呈典型土耳其型树枝状形态; 4) 雪崩为其主要补给形式之一; 5) 表碛覆盖普遍。规模与形态的差异很可能造成该区冰川运动特征与其他区域有所不同。目前, 该地区仅有 1978 年在琼台兰冰川获得的冰川运动观测资料, 表明该冰川运动速度快, 并且消融季节中冰舌末端有底部滑动发生<sup>[15]</sup>。近 30 a 来该区冰川变化显著, 其未来变化受到当地政府与人民的高度关注, 但相关冰川运动资料却属空白, 严重阻碍了利用动力学模式模拟评估未来冰川水资源工作的开展。

鉴于以上情况, 中国科学院天山冰川观测试验站依据地形图、遥感影像及数次野外考察结果, 选

收稿日期: 2010-06-06; 修订日期: 2010-11-26

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-311); 国家重点基础研究发展规划项目(2010CB951003); 国家自然科学基金项目(40631001; 91025012)资助

作者简介: 曹敏(1983—), 男, 甘肃平凉人, 2008 年毕业于西北师范大学, 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: caominkyo520@163.com

\* 通讯作者: 李忠勤, E-mail: lizq@lzb.ac.cn

择规模及形态在托木尔峰地区都有一定代表性的青冰滩 72 号冰川进行冰川运动特征研究。2008 年 8 月,在该冰川上布设了用于冰川运动和冰川物质平衡观测研究的测杆 21 根(观测剖面 10 个),并应用 GPS 对测杆位置进行首次测量。2009 年 7 月与 8 月又进行了上述项目的观测,获得了消融盛期及一周年的冰川运动速度资料。

## 1 研究区概况

托木尔峰地区位于中国天山最西端,天山南麓,塔里木盆地北缘,基本上由四条山脉相交组成,分别是东西向的哈拉周里哈山、汗腾格里山、托木尔山与南北向的子午山脉。山脉平均海拔 5 400~6 600 m,拥有天山最高峰托木尔峰(海拔 7 435.3 m)。该区山峰高耸、峡谷幽深,为大规模冰川的发育提供了有利地势条件。根据《天山托木尔峰地区的冰川与气象》<sup>[15]</sup> 专著,本区我国境内有冰川 509 条,面积 2 746.32 km<sup>2</sup>,相当于沙里扎斯河以东整个天山冰川总面积的 36%。其中,≤5 km<sup>2</sup>的冰川占 85%,类型为山谷冰川与悬冰川。该区降水主要靠来自大西洋和北冰洋的潮湿气流补给,6—8 月的降水占全年降水量的 50%左右,而 5—9 月占 70%左右。虽然冷季(10 月至翌年 4 月)的降水量只占全年的 30%左右,但这些降水都是冰川上的纯积累。对于该区冰川来说,其中 7—8 月为消融盛期。冰川区雪线附近年平均气温为 -7~-11℃,居于海洋性冰川与极大陆性冰川之间。

青冰滩 72 号冰川位于托木尔峰地区南缘,托木尔峰以南 30 km,新疆阿克苏地区温宿县境内,库玛拉河源头之一(图 1)。根据实地测量,青冰滩 72 号冰川的地理位置为 79°53.27' E, 41°45.52' N,其形态属于复合型山谷冰川,冰川朝向 S,面积 3.70 km<sup>2</sup>,最大长度 6.2 km,海拔范围 5 986~3 720 m,雪线海拔为 4 400 m 左右。在 2008—2009 年的实地野外观测工作中发现,冰川上游冰崩-雪崩是青冰滩 72 号冰川的主要补给形式。粒雪盆冰体较薄,大面积基岩后壁已出露。整条冰川呈在该区域较为普遍的树枝状形态。冰舌绵长,较为平坦,表面发育有明显福布斯冰带,两侧有表碛分布,中上部冰裂隙发育较多。冰舌海拔较低,消融季曝露于强烈消融之中,减薄明显。

## 2 运动速度的观测与方法

冰川运动速度的观测是通过在冰川表面设置测

杆,定期使用仪器测量测杆位置实现的。某一时段内测杆的位移矢量除以该时段时长便得到相应冰川表面运动速度矢量。早期用来测量冰川运动速度的主要是全站仪等光学仪器,这些仪器受限于自身测量原理,并且测量过程对冰川区地表形态要求较高,因此获得冰川表面运动速度数据困难,且测量精度较低。GPS(全球定位系统)技术的发展,为冰川表面运动速度的测量提供了新的手段。GPS 利用卫星来获取冰川表面观测点的坐标数据,平面精度达到 ±1 cm+1 ppm×D,高程精度达到 ±2 cm+1 ppm×D(ppm 为百万分之一, D 为距离单位 km)。这大大提高了冰川表面运动速度的数据精度,并且不受表面形态的影响,为更好的研究冰川表面运动速度提供了基础。

2008 年 8 月 19 日,天山冰川观测试验站在青冰滩 72 号冰川上布设了用于冰川运动速度与物质平衡观测的测杆网,并对单个测杆位置进行首次观测。由于冰川上部地势陡峭、裂隙发育、冰崩雪崩频发,测杆主要布设在海拔 3 700~4 200 m 之间,共 10 排(A'~J')21 根花杆,覆盖整条冰舌(图 1)。同排花杆距离较近,其中标号为“2”的花杆沿冰川主流线布设,标号为“1”的花杆较接近冰舌东侧边界。2009 年 7 月 19 日与 8 月 20 日对所有测杆进行了重复位置测定。

为了使观测工作能够长期进行下去,首次测量时在冰川外围布设了 3 个基本控制点(K1、K2 和 K3)建立起观测控制网,并采用 E650 型 GPS 对控制点位进行了静态测量定位。测杆位置的观测应用载波相位差分又称 RTK(Real Time Kinematic)测量方法进行。实测中将一台 GPS 接收机作为基准站固定在基本控制点上,而另一台 GPS 接收机作为流动站在冰川表面进行流动观测。基准站将采集的载波相位发送给用户,进行求差解算坐标<sup>[16]</sup>。获得数据的误差在 0.10~0.30 m<sup>[17]</sup>。GPS 测量获得的数据坐标属于 WGS-84 大地坐标系,需使用转换软件 LandTop2.0.5.1 将其重投影到 1954 北京坐标系。转换中采用的 7 参数转换模型的误差 <0.002 m<sup>[18]</sup>。在 1954 北京坐标系下,用坐标法计算出冰体单位时间内的空间位移,包括水平速度和垂直速度。

依据观测资料,可获得 2008 年 8 月至 2009 年 7 月、2009 年 7—8 月及 2008 年 8 月至 2009 年 8 月 3 个时段的冰川表面运动速度数据。本文着重以第二与第三时段的数据为基础,讨论青冰滩 72 号冰

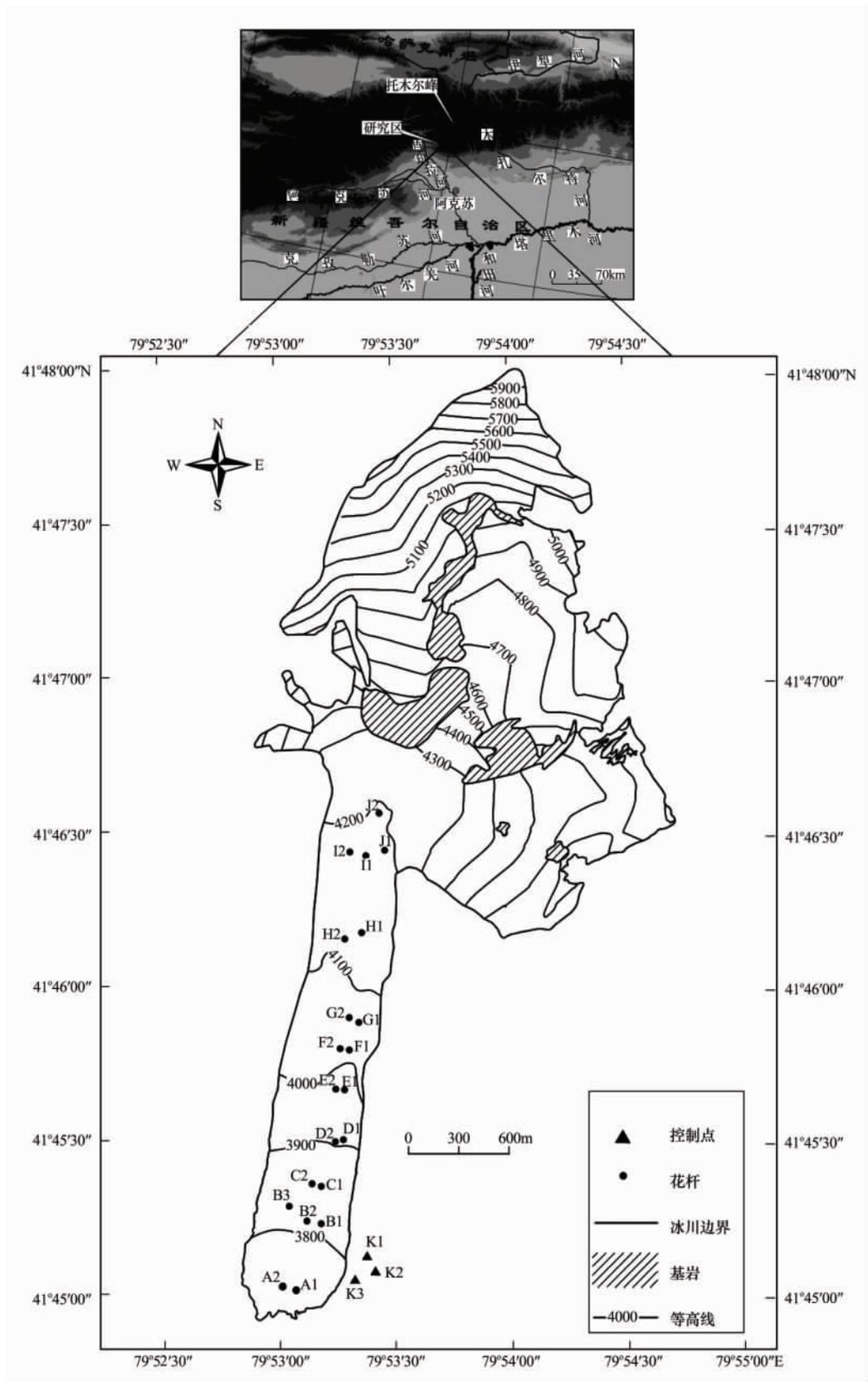


图 1 青冰滩 72 号冰川所处地理位置及 2008 年冰川地形与表面运动速度观测网点布设情况

Fig. 1 The Qingbingtan Glacier No. 72, the observational network of surface flow velocity on the glacier in 2008 also showed the annual and ablation season, ablation season and non-ablation season movement characteristics. In order to discuss these issues, we assume that 6-8 months represent the ablation season, and the 3 months' movement velocity are equal to the 2009 August monthly movement velocity. The annual movement velocity minus the total movement velocity of 6-8 months.

矢量后平均到剩余几月来代表非消融季月运动速度。以上假设势必带来误差，但在实测速度不足的情况下，可以作为一种初步评价消融季冰川运动形式与机理的替代方法。

### 3 运动速度空间分布特征

为了清晰分析运动速度的空间变化，将水平与垂直两个速度分量分别进行讨论。

#### 3.1 年水平运动速度特征

图 2 所示为各花杆 2008 年 8 月至 2009 年 8 月年度水平运动速度的分布情况，可以看出其最大值出现在海拔 4 050 m 的 G2 点，速度值为  $73.4 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ；最小值出现在海拔 4 170 m 的 J1 点，速度值为  $18.6 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ，整条冰舌的平均速度值为  $47.1 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。由于距离较近，同断面花杆的速度值差异甚小，总体来看靠近主流线的花杆运动速度略快于其他花杆，该规律与在 1 号冰川上相关研究的结果类似<sup>[19-22]</sup>。以下均以“断面”为单位来讨论速度的空间变化情况。

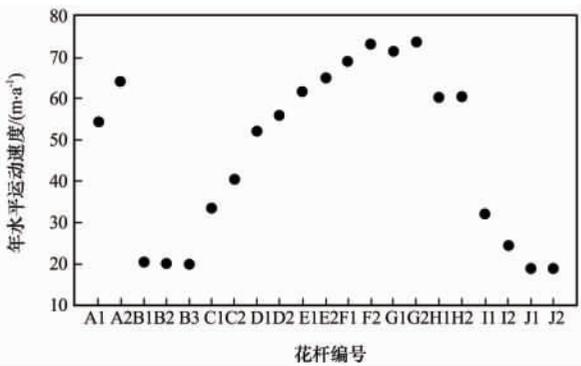


图 2 青冰滩 72 号冰川 2008—2009 年花杆点年水平运动速度图

Fig. 2 Annual horizontal surface velocities for different poles during September 2008 to August 2009

图 3 所示为各断面花杆运动速度平均值。可以看到，青冰滩 72 号冰川的运动速度整体量值较大，变化范围  $18.6 \sim 73.4 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。最小值  $18.6 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$  出现在海拔 4 170 m 的 J' 断面，而后沿海拔下降运动速度迅速增加。峰值  $70 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$  出现在海拔 4 050 m 的 G' 断面，该处出现峰值与海拔 4 050 ~ 4 100 m 为一由局部台阶地形造成的小型冰瀑有密切联系（见图 3）。相比其他区域，海拔 4 050 ~ 4 100 m 处的冰川表面更加沟壑丛生，不断从高处向下运动的冰流被伸张应力拉扯开裂，由 G' 断面到海拔 3 820 m 的 B' 断面，运动速度随海拔降低持续减小到  $20 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ，表现出压缩流特点。海拔最

低的 A' 断面没有延续上游的速度减小趋势，转而迅速增加到  $60 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ，为 B' 断面速度的 3 倍。总体来看，该冰川冰体运动过程中物质输送活跃，每年有大量冰由较高海拔处被运送到低海拔区域。冰川运动速度受到局地地形的严重影响，已有研究中<sup>[23]</sup>消融区完全为压缩流的观点并不适用于该冰川。冰舌末端区域运动速度较高与该处坡度明显较陡峻有关。

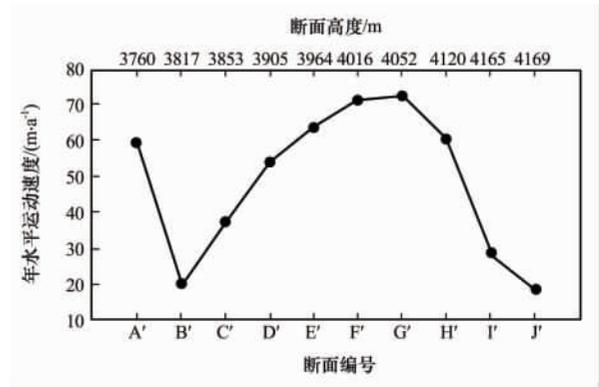


图 3 青冰滩 72 号冰川 2008—2009 年各断面年水平运动速度

Fig. 3 Annual horizontal surface velocities for different profiles during September 2008 to August 2009

#### 3.2 年垂直运动速度特征

各断面年垂直运动速度随海拔变化情况与水平运动速度相似，但最值出现的位置不同（图 4）。最小值  $2 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$  出现在海拔 3 820 m 的 B' 断面而非 J' 断面（海拔 4 170 m）。峰值  $15 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$  则出现在海拔 4 016 m 的 F' 断面，略低于水平运动速度最大值出现的 G' 断面。F' 断面以下，垂直运动速度持续减小，到 B' 断面后又开始迅速增加。A' 断面的垂直运动速度达到  $12 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ，为 B' 断面相应速度的 6 倍。

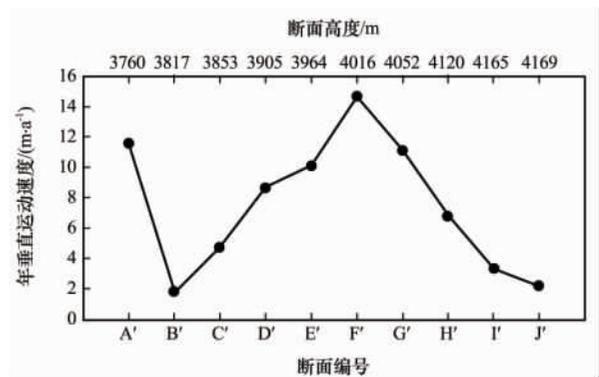


图 4 青冰滩 72 号冰川 2008—2009 年各断面年垂直运动速度

Fig. 4 Annual surface vertical velocities for different profiles during September 2008 to August 2009

冰川运动速度模拟计算中，通常假设其方向与冰川表面切线方向一致<sup>[3]</sup>。该假设成立的条件是：1)冰川表面坡度平缓；2)表底面坡度差异较小。青冰滩 72 号冰川冰舌区域较平坦，除海拔 4 050 ~ 4 100 m 由于底部地形因素出现的冰瀑及末端陡峭地形外，其余区域最大坡度 12.4°，最小坡度 2.3°，平均 7.9°，基本满足条件 1)。此时，条件 2) 是假设是否成立的唯一影响因素。因此，通过分析实测速度方向与表面切线方向的异同，则可定性评价冰川表底坡度是否存在明显差异。

理论上，若冰川运动速度方向与冰川表面切线方向一致，实测水平运动速度与坡度正切值相乘的结果即为垂直运动速度(本研究中称之为“理论垂直速度”)。图 5 所示为各断面理论与实测垂直运动速度差值，及差值占实测垂直速度的百分比。

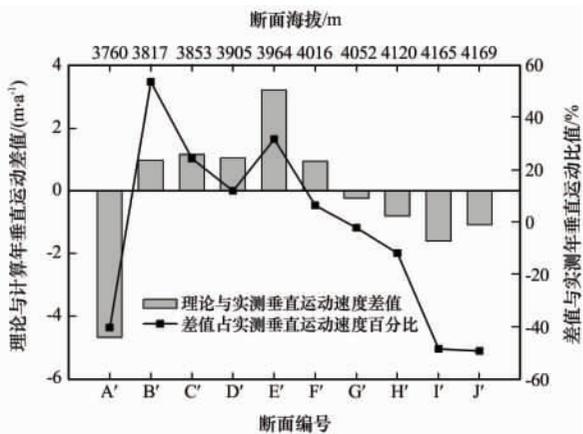


图 5 青冰滩 72 号冰川 2008—2009 年各断面理论与实测垂直运动速度差值，及差值占实测垂直速度百分比

Fig. 5 Annual surface vertical velocity differences (columns), calculated and measured, for different profiles during September 2008 to August 2009, together with the ratios of the difference to the measured annual surface vertical velocity (solid line with square points)

可以看到在 G' 以上各断面，理论垂直运动速度均小于实测垂直运动速度，表明冰川实际运动的速度方向并不沿表面切线方向，而是指向冰川内部。该区域冰川底部坡度很可能较表面坡度要陡。G' 断面以下，除 A' 断面理论垂直运动速度明显小于实测垂直运动速度外，其他断面情况均与之相反，冰川实际运动的速度方向指向冰川外部。该区域冰川底部坡度则很可能小于表面坡度。在整个冰舌上，理论与实测垂直运动速度差值占实测垂直运动速度百分比的最大值接近 60%，因此，在对青冰滩 72 号冰川的运动速度模拟研究中，不可简单认为运动方向与冰川

表面切线一致，底部地形将是个不可忽视的因素。

### 3.3 消融季月水平运动速度特征

图 6 中实线所示为消融季消融盛期 8 月(具体时间为 2009 年 7 月 28 日至 8 月 28 月)的月水平运动速度。可以看出，其空间分布规律和年水平运动速度完全一致。最小值 3.1 m · 月<sup>-1</sup> 出现在海拔最高(4 170 m)的 J' 断面，之后随海拔下降运动速度迅速增加，到海拔 4 050 m 的 G' 断面出现最大值 10.3 m · 月<sup>-1</sup>。从 G' 断面开始，水平运动速度随海拔下降持续减小，至 B' 断面该速度低至 4.1 m · 月<sup>-1</sup>。从 B' 断面到临近末端的 A' 断面，速度转而升高。A' 断面水平运动速度为 5.7 m · 月<sup>-1</sup>，为 B' 断面该速度值的 1.4 倍。消融季和年运动速度空间分布规律的一致性说明，强烈消融产生的充沛融水对冰舌不同区域运动的影响是同步的。

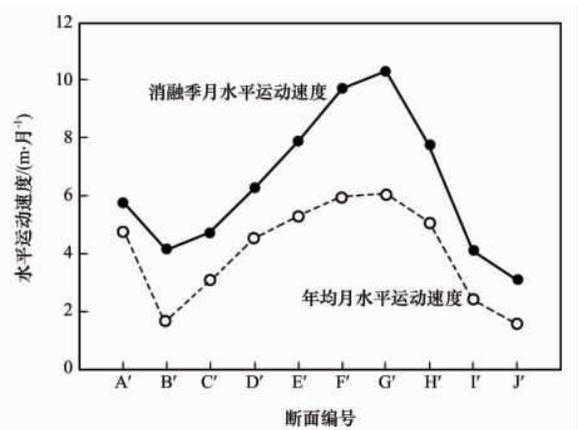


图 6 青冰滩 72 号冰川 2008—2009 年消融季与年均月水平运动速度比较

Fig. 6 Surface horizontal velocities in the ablation season and annual mean for different profiles during September 2008 to August 2009

### 3.4 消融季月垂直运动速度特征

消融季消融盛期月垂直运动速度变化范围为 0.41 ~ 3.42 m · 月<sup>-1</sup>，平均值 1.50 m · 月<sup>-1</sup>，其空间分布规律和消融季消融盛期月水平运动速度基本相同，表现为 A' 断面速度值大于 B' 断面速度值。从 B' 断面开始，速度随海拔升高逐渐增大，至 G' 断面出现最大值。G' ~ J' 断面之间速度逐渐减小。差异在于，最小值出现在 B' 断面而非 J' 断面，B' ~ G' 断面之间速度也非一致性增大，其中 E' 断面的速度值要低于 D' 断面速度值(图 7)。

## 4 运动速度季节变化

### 4.1 水平运动速度季节变化

将各断面消融季月水平运动速度与年水平运动

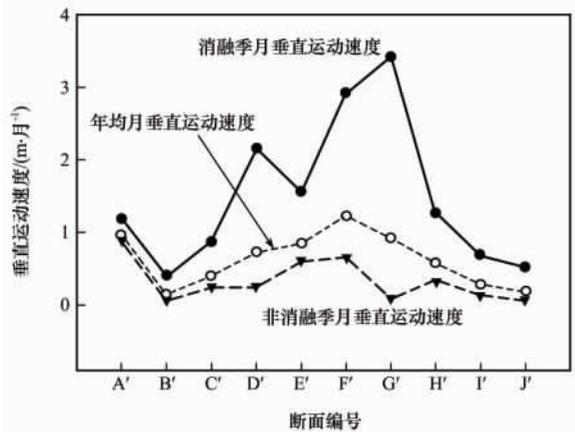


图7 青冰滩72号冰川2008—2009年消融季、年均及非消融季月垂直运动速度比较

Fig.7 Vertical surface velocities in the ablation season, non-ablation season and annual mean for different profiles during September 2008 to August 2009

速度进行比较,发现前者占后者的百分比为9.4%~21.8%,平均14.23%。将年运动速度平均到每月,与消融季月运动速度进行比较发现(图6),各断面的年均月速度均小于消融季月速度,前者占后者的41.2%~88.4%,平均61.31%。由此推断,青冰滩72号冰川消融季速度大于非消融季速度。

冰川运动速度的年内变化通常受两种因素影响。其中,一种是厚度的变化,积累与消融在当年内引起的冰厚度变化可能会造成15%~20%的速度波动。这种因素影响下,速度应在春末时最大,夏末时最小;另一种因素是冰川底部滑动,消融季节冰岩交界面融水量丰沛,导致冰川底部发生滑动,此时冰川速度应当最大。冰川的年内速度变化可能是上述两种作用综合影响的结果。根据消融季与年均月水平运动速度比较结果,对青冰滩72号冰川起作用的主要是第二种因素。为了粗略量化滑动对冰川运动的贡献,假定底部滑动发生在6—8月,在粗略假设前提下进行比较发现,整个冰舌上各断面非消融季运动速度占消融季运动速度比值的平均值约为50%(图8)。理论上消融季速度包含两部分内容,一部分为冰体变形产生的速度(应与非消融季速度相近),另一部分为底部滑动速度。对青冰滩72号冰川来说,消融季底部滑动产生的速度量值很可能与冰体变形产生的速度量值相近。

#### 4.2 垂直运动速度季节变化

消融季月垂直运动速度占年垂直运动速度的百分比为10.1%~30.8%,平均20.5%。如图7所示,为了研究垂直速度的季节变化,将消融季月速

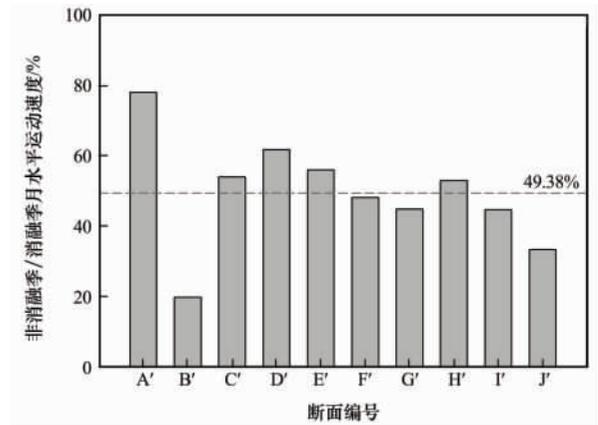


图8 青冰滩72号冰川2008—2009年非消融季与消融季月水平运动速度比值

Fig.8 The ratio of monthly horizontal velocity in non-ablation season to ablation season during September 2008 to August 2009

度、年均月速度与非消融季月速度(各种速度的计算方法与消融季水平运动速度中相应速度的计算方法相同)进行比较,发现3种速度曲线变化趋势大体一致。年均月垂直运动速度明显小于消融季月垂直运动速度,前者占后者百分比为27.0%~82.2%,平均44.2%,小于年均与消融季月水平运动速度的比值。

比较消融季与非消融季月垂直运动速度发现(图9),后者占前者百分比为2.7%~76.2%,平均26.0%。如果不计在A'断面出现的高值,那么二者比值的平均值将降至20.0%,远远小于非消融季与消融季月水平运动速度的比值。消融季冰川底部发生滑动,应引起原有速度在水平与垂直方向成比

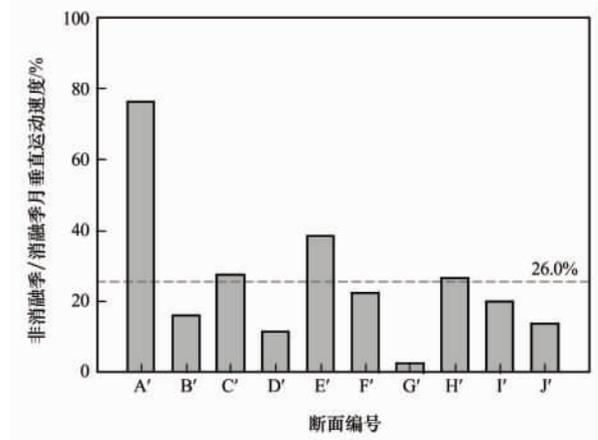


图9 青冰滩72号冰川2008—2009年非消融季与消融季月垂直运动速度比值

Fig.9 The ratio of monthly vertical velocity in non-ablation season to ablation season during September 2008 to August 2009

例增加. 速度增加幅度在垂直方向明显大于水平方向, 说明除底部滑动外有其他因素在起作用. 消融季大量冰面融水流入冰川内部, 增加了冰岩界面的静水压力, 形成交错分布的“水膜”与“水道”. 在冰川发生滑动的同时, 融水也使冰川底部发生消融. 底部消融导致冰面下降很可能是垂直方向速度增加较明显的原因, 造成冰舌区域非消融季月垂直运动速度与消融季相应速度相比小大约  $0.6 \text{ m} \cdot \text{月}^{-1}$ .

## 5 与天山乌鲁木齐河源 1 号冰川运动速度比较

1 号冰川是我国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<sup>[24]</sup>, 至今已有近 50 a 的观测历史. 1 号冰川运动速度资料丰富, 为此我们将 1 号冰川的运动速度与青冰滩 72 号冰川的运动速度进行比较. 1 号冰川位于东天山中部, 乌鲁木齐市以南 84 km, 该冰川属双支冰斗山谷冰川, 2008 年实测东支面积  $1.083 \text{ km}^2$ , 西支面积  $0.594 \text{ km}^2$ , 两支皆面朝北, 覆盖海拔范围  $3750 \sim 4484 \text{ m}$ .

2007—2009 年度 1 号冰川表面运动速度数据仍在整理当中, 我们选用最靠近本文研究时段的 2006—2007 年度速度数据进行下边的比较分析. 1 号冰川东西支的运动速度整体较小, 变化范围  $1.5 \sim 4.5 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ , 远远小于青冰滩 72 号冰川  $20 \sim 70 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$  的速度范围. 其原因很可能与 1 号冰川规模小、厚度薄及表面平坦有关. 另外, 青冰滩 72 号冰川冰舌区消融季底部滑动也是使其运动速度明显偏大的原因. 1 号冰川东支最小值  $2.32 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ , 出现在海拔  $4050 \text{ m}$ , 峰值  $3.96 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$  出现在海拔  $3950 \text{ m}$ ; 西支最小值  $1.83 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$  出现在海拔  $3800 \text{ m}$ , 峰值  $4.13 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$  出现在海拔  $3975 \text{ m}$ . 青冰滩 72 号冰川出现峰值和最小值的断面的海拔均高于 1 号冰川.

综合上述比较结果, 青冰滩 72 号冰川与 1 号冰川这样的典型大陆性冰川相比, 表现出冰体运动过程中物质输送异常活跃的特点. 而消融季底部滑动对整条冰舌影响显著的现象, 则使青冰滩 72 号冰川的运动特征更偏向海洋性冰川.

## 6 结论

(1) 青冰滩 72 号冰川冰舌区域年运动速度较大, 实测最大水平速度达到  $73.4 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ , 实测平均水平速度  $47.1 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ . 全年与消融季速度都表

现出冰舌中部大而两头小的趋势, 使得冰舌上部为伸张流区域而下部为压缩流区域, 已有研究中消融区均为压缩流区域的结论并不适用于该冰川. 最大流速点出现在海拔  $4010 \sim 4050 \text{ m}$  的 F'~G' 断面, 峰值出现很可能与该区域地形陡峭有关.

(2) 青冰滩 72 号冰川消融季水平运动速度明显大于非消融季水平运动速度. 原因很可能是消融季大量冰面融水流入冰内, 增加了冰岩界面的静水压力, 内部形成了“水膜”与“水道”, 导致底部滑动发生. 消融季垂直运动速度亦明显大于非消融季垂直运动速度, 推测其原因除了底部滑动贡献的额外运动速度分量外, 还可能受到消融季冰川底部消融的影响.

(3) 青冰滩 72 号冰川和 1 号冰川相比, 运动速度明显偏大, 其原因与该冰川规模大及底部可能有滑动有关. 青冰滩 72 号冰川冰体运动过程中物质输送活跃, 消融季底部滑动影响显著, 其运动特征与 1 号冰川这样的典型大陆性冰川相比更偏向海洋性冰川.

致谢: 本项研究是天山冰川站开展的雪冰现代过程研究项目的一部分. 谨此对参加本项研究的所有观测人员及项目组人员表示衷心感谢.

## 参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Huang Maohuan, Sun Zuoze. Some flow characteristics of continental type glaciers in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 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.]
- [3] 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.]
- [4] Echelmeyer K, Harrison W D. Jakobshavn Isbrae, West Greenland: Seasonal variations in velocity-or lack thereof [J]. *Journal of Glaciology*, 1990, **36**(122): 82—88.
- [5] Iken A, Truffer M. The relationship between subglacial water pressure and velocity of Findelenglet scher, Switzerland, during its advance and retreat [J]. *Journal of Glaciology*, 1997, **43**(144): 328—338.
- [6] Shi Yafeng. Estimation of the water resources affected by climatic warming and glacier shrinkage before 2050 in west China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, **23**(4): 33—341. [施雅风. 2050 年前气候变暖冰川萎缩对水资源影响情景预估 [J]. *冰川冻土*, 2001, **23**(4): 333—341.]
- [7] Shi Yafeng, Xie Zichu. General features of modern glaciers in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1964, **30**(3): 183—208. [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.]
- [8] Huang Maohuan. The movement mechanisms of the Ürümqi Glacier No. 1, Tianshan Mts., China[J]. *Annals of Glaciology*, 1992, **16**: 39–44.
- [9] Jing Xiaoping, Huang Maohuan, Chen Jianming, *et al.* Basal deformation of Ürümqi Glacier No. 1, Tianshan Mts., China [J]. *Annals of Glaciology*, 1992, **16**: 123–126.
- [10] Jing Zhefan, Zhou Zaiming, Liu Li. Progress of research on glacier velocities in China[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(4): 749–754. [井哲帆, 周在明, 刘力. 中国冰川运动速度研究进展[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(4): 749–754.]
- [11] 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. 天山奎屯河哈勒根 51 号冰川表面运动特征分析[J]. *冰川冻土*, 2002, **24**(5): 563–566.]
- [12] 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.]
- [13] Sun Zuozhe, Chen Yaowu, You Genxiang, *et al.* Flow characteristics of Glacier No. 1 at the headwater of Ürümqi 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.]
- [14] Jiang Yan, Zhou Chenghu, Cheng Weiming. Analysis on the Characteristics of Runoff Time Series in Akesu Basin[J]. *Progress in Geography*, 2005, **24**(1): 87–96. [蒋艳, 周成虎, 程维明. 新疆阿克苏河流域年径流时序特征分析[J]. *地理科学进展*, 2005, **24**(1): 87–96.]
- [15] Su Zhen, Song Guoping, Wang Lilong. Modern glaciers in Mt. Tuomuer[M]//*Glacial and Meteorology in Mt. Tuomuer District, Tianshan. Ürümqi: Xinjiang People's Publishing House*, 1985: 32–88. [苏珍, 宋国平, 王立伦. 托木尔峰地区的现代冰川[M]//天山托木尔峰地区的冰川与气象. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1985: 32–88.]
- [16] Xu Shaoquan, Zhang Huahai, Yang Zhiqiang, *et al.* Principles and Applications of the GPS Surveying[M]. Wuhan: Press of Wuhan University, 2003: 66–72. [徐绍铨, 张华海, 杨志强, 等. GPS 测量原理及应用(修订版)[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003: 66–72.]
- [17] Rivera A, Casassa G, Bamber J, *et al.* Ice-elevation changes of Glaciar Chico, southern Patagonia, using ASTER DEMs, aerial photo graphs and GPS data[J]. *Glaciol.*, 2005, **51**(172): 105–112.
- [18] Wang Jiexian, Wang Jun, Lu Caiping. Problem of coordinate transformation between WGS-84 and BEIJING54[J]. *Geod. Geodyn.*, 2003(3): 70–73. [王解先, 王军, 陆彩萍. WGS-84 与北京 54 坐标的转换问题 [J]. *大地测量与地球动力学*, 2003(3): 70–73.]
- [19] Zhou Zaiming, Li Zhongqin, Li Huilin, *et al.* The flow velocity features and dynamic simulation of the Glacier No. 1 at the headwaters of Ürümqi River, Tianshan Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(1): 55–61. [周在明, 李忠勤, 李慧林, 等. 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[J]. *冰川冻土*, 2009, **31**(1): 55–61.]
- [20] Jing Zhefan. Surface velocity and the termini variations of Glacier No. 1 at the headwater of Ürümqi River, Tianshan [R]. Annual Report of Tianshan Glaciological Station, 1997, **14**: 76–79. [井哲帆. 乌鲁木齐河源 1 号冰川表面运动速度和冰舌进退变化(1995–1996)[R]. 中国科学院天山冰川观测试验站年报, 1997, **14**: 76–79.]
- [21] Jing Zhefan. Surface velocity and the termini variations of Glacier No. 1 at the headwater of Ürümqi River, Tianshan [R]. Annual Report of Tianshan Glaciological Station, 1999, **15**: 154–159. [井哲帆. 乌鲁木齐河源 1 号冰川表面运动速度和冰舌末端变化(1996/1997 和 1997/1998 年度)[R]. 中国科学院天山冰川观测试验站年报, 1999, **15**: 154–159.]
- [22] Jing Zhefan. Surface velocity and the termini variations of Glacier No. 1 at the headwater of Ürümqi River, Tianshan [R]. Annual Report of Tianshan Glaciological Station, 2001, **16**: 61–66. [井哲帆. 乌鲁木齐河源 1 号冰川表面运动速度和冰舌末端变化(1998/1999 和 1999/2000 年度)[R]. 中国科学院天山冰川观测试验站年报, 2001, **16**: 61–66.]
- [23] Shi Yafeng. The Introduction to Glacier in China[M]. Beijing: Science Press, 1988: 88–104. [施雅风. 中国冰川概论[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 88–104.]
- [24] Sun Zuozhe, Chen Yaowu, Zhang Jinhua. The velocity of Glacier No. 1 at the headwater of Ürümqi 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.]

## Features of the Surface Flow Velocity on the Qingbingtang Glacier No.72, Tianshan Mountains

CAO Min<sup>1</sup>, LI Zhong-qin<sup>1,2</sup>, LI Hui-lin<sup>2</sup>

(1. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou Gansu 730070, China; 2. The State Key Laboratory of Cryospheric Sciences/Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

**Abstract:** Movement is the main characteristic making glacier ice differ from other ice in nature. Observation of surface flow velocity is a basic method to study the glacier movement. Tomur Peak is the region with the highest concentration of glaciers in the Tianshan Mountains, and the glaciers are the main water resources for Aksu Municipality. Because of the important role of glaciers in local water resources, to study the current state and future evolution of the glaciers and glacial runoff in the municipality is urgent need. However, the study is hampered, because there is almost no observed glacier movement data here. To fill the blank, in August 2008, a large-scale scientific expedition was taken by Tianshan Glaciological Station, during which 21 stakes were set on the glacier for glacier flow velocity and mass balance observations. The Global Positioning System was applied to monitor the stake position. In July and August 2009, the measurement of the position of

stakes was taken repeatedly. According to all the measured data, the features of surface flow velocity of the glacier is obtained, showing that the maximum horizontal surface velocity was around 73.4  $\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$ , averaging at 47.1  $\text{m}\cdot\text{a}^{-1}$  in the tongue area. The spatial distribution of velocity was highly correlated with geometry of the glacier surface. There is obvious seasonality of the surface flow velocity. In detail, the velocities in the ablation season are significantly higher than that in non-melting season. In addition to the contribution of basal sliding, the ablation season velocity is also impacted by the ablation at the glacier bottom. Comparing to the corresponding features of the Ürümqi Glacier No. 1, the velocity of Qingbingtang Glacier No. 72 is much higher, the mass transport by movement is more active, and the basal sliding is more significant. Generally, the velocity features of the Qingbingtang Glacier No. 72 are similar to those of maritime glaciers in China.

**Key words:** Qingbingtang Glacier No. 72; GPS; velocity characteristics; seasonality