

doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2014.0064

Wang Kun, Jing Zhefan, Wu Yuwei, *et al.* Latest survey and study of surface flow features of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 537–545. [王坤, 井哲帆, 吴玉伟, 等. 祁连山七一冰川表面运动特征最新观测研究[J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 537–545.]

祁连山七一冰川表面运动特征最新观测研究

王坤^{1,2}, 井哲帆^{1*}, 吴玉伟^{1,2}, 邓宇峰¹

(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, 甘肃 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了保持对祁连山七一冰川运动变化情况观测的连续性, 进一步揭示全球气候变暖背景下山岳冰川的运动变化规律, 对布设在七一冰川表面的花杆进行了定期观测, 获取了2012年7–8月以及2013年8–9月冰川考察期间的最新观测数据(花杆位置、冰川末端边界以及物质平衡等数据资料), 通过对数据进行分析, 获得了七一冰川表面的运动状况以及末端进退变化情况。结果表明: 空间分布特征方面, 七一冰川在横剖面以及纵剖面的运动保持了一般山岳冰川的运动规律; 横剖面上, 主流线附近冰川运动速度较两侧运动速度要大; 纵剖面上, 由冰川末端到零物质平衡线, 冰川运动速度逐渐增大; 运动方向上, 七一冰川运动速度矢量大多沿主流线向下运动, 或者稍微偏离主流线一定方向。在冰川运动速度时间分布特征方面, 七一冰川在消融季与非消融季的运动速度差异显著, 消融季运动速度要明显大于非消融季运动速度。最近几十年, 七一冰川整体运动速度呈现出了逐年减小的趋势。在2012年8月至2013年8月期间, 冰川末端退缩了大约5–7 m, 退缩较为显著。

关键词: 七一冰川; 表面运动; GPS; 特征

中图分类号: P343.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0240(2014)03-0537-09

0 引言

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告指出, 气候系统的暖化是毋庸置疑的, 自1950年以来, 气候系统观测到的许多变化是过去几十年甚至千年以来史无前例的, 2003–2012年平均温度比1850–1900年平均温度上升了0.78℃, 在过去的130 a全球升温0.85℃^[1–2]。冰川作为气候变化的指示器, 其变化可以敏感的反映出全球气候的变化, 对冰川运动变化的监测可以为研究气候变化以及了解干旱区水资源问题提供重要依据^[3]。特别是近年以来, 有关冰川动力学模式的研究成为冰川学研究的热点, 冰川动力学模式以其优越的物理过程描述能力, 可以很好地预测冰川未来的变化情况^[4], 而冰川运动速度又是冰川动力学模型必不可

少的参数之一。因而, 有关冰川运动特征的研究已经成为当前冰川学研究的重要内容之一, 对冰川运动进行研究有助于了解冰川的基本性质^[5]。冰川运动速度作为冰川运动的一个重要的量化指标^[6], 近年来有关冰川运动速度的研究越来越引起相关科技工作者的重视, 为研究冰川变化与全球变暖的关系, 前几年启动了全球陆地冰川计划^[7]。

中国西部山岳冰川发育众多, 是世界上山岳冰川最为发达的地区之一^[8]。自20世纪50年代以来, 中国有关山岳冰川运动速度的观测研究已经在很多自然区域相继展开, 例如在祁连山、天山、横断山、念青唐古拉山、喜马拉雅山等地区的数条冰川上的相关工作都取得了进展, 总结了不同环境、不同形态和不同类型冰川的运动特征^[9]。其中, 祁连山七一冰川(冰川目录编号: 5Y437C18)作为典

收稿日期: 2013-11-20; 修订日期: 2014-03-17

基金项目: 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB951404); 中国科学院重点部署项目(KJZD-EW-G03-04); 国家自然科学基金项目(41071043)资助

作者简介: 王坤(1987–), 男, 山东临沂人, 2008年毕业于山东农业大学, 现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所在读硕士研究生, 主要从事冰川运动变化研究。E-mail: wangkunsdau@163.com

* 通讯作者: 井哲帆, E-mail: jingzef@lzb.ac.cn

型的亚大陆型冰川,在中国西部山岳冰川中具有很好的代表性. 对该条冰川运动速度的观测始于1958年,此后又进行了多次有关冰川运动的观测. 为了保持对七一冰川运动变化情况观测的连续性,进一步揭示全球气候变暖背景下的山岳冰川运动变化规律以及河西走廊地区冰川融水的补给情况,我们于2012年7-8月以及2013年8-9月连续两年利用高精度差分GPS仪对祁连山七一冰川于消融季的运动变化情况进行了观测,获取了消融旺季以及一周年的冰川运动速度最新观测资料.

1 七一冰川概况

祁连山位于青藏高原北部边缘,分布着大量现代冰川,是甘肃省河西地区内陆河水系的发源地. 七一冰川位于甘肃省嘉峪关市西南的祁连山中段托来山北坡(图1),冰川融水流入北大河支流柳沟泉河. 冰川面积为 2.76 km^2 ,长 3.4 km ,末端海拔 $4\,304\text{ m}$,冰川最高峰海拔 $5\,158.8\text{ m}$. 七一冰川规模较小,按形态分类,属冰斗-山谷冰川,按冰川物理特性分类,属于亚大陆型冰川. 该冰川冰舌除了前端有零散表碛分布外,整个冰川冰面洁净;冰舌前段为起伏的冰丘,但坡度不大,冰川后壁较为陡峭,有较小横裂隙分布于其上. 在东、中、西3个大粒雪盆中,东西粒雪盆较为宽阔,中粒雪盆相对较小,海拔也较东西粒雪盆稍低一些,三道冰面河切割较深,一直延伸到粒雪盆深处^[10](图1). 近30多年来对七一冰川观测资料表明^[10-12],该冰川的平衡线高度在1958-2008年呈上升趋势,并在

2006年达到最高海拔 $5\,131\text{ m}$,最近几年该冰川的消融呈加速趋势.

早在1958年,我国冰川工作者就对七一冰川进行了考察,因而该冰川是中国最早进行冰川学研究的冰川. 此后几十年,许多冰川工作者对七一冰川进行了各种考察研究^[10,13-15]. 近年以来,王宁练等^[12]、宋高举等^[16]、蒋熹等^[17]又对七一冰川进行了持续性观测研究,获得了很多有关七一冰川物质平衡、融水径流以及冰川表面反照率方面的宝贵数据. 井哲帆等^[18]以七一冰川为例,对冰川运动速度影响因子的强度进行了分析,得到了冰川形态、物质平衡以及气候条件等对冰川运动速度的影响程度.

2 数据与方法

研究的数据资料是在2012年7-8月以及2013年8-9月于祁连山七一冰川考察期间获取的,主要包括两类数据,一类是花杆点数据(坐标等);另一类是冰川冰舌末端的边界数据. 此外,还参考了部分物质平衡数据.

目前,常用的冰川表面运动速度研究方法包括:1) 花杆测量法. 该方法是目前最为直接常用的方法^[19],也是精度最高的观测方法,但是很显然此种方法不适用大冰川区域;2) 合成孔径雷达干涉测量(InSAR). 该方法是近几年发展起来的新型测量方法,在大范围冰川区已得到广泛应用^[20-23],但是该方法受到卫星重访周期的限制,往往得不到很好的精度;3) 基于光学遥感的最大相关分析法. 该方法在山地冰川也进行了一些尝试性研究^[3,24-25],

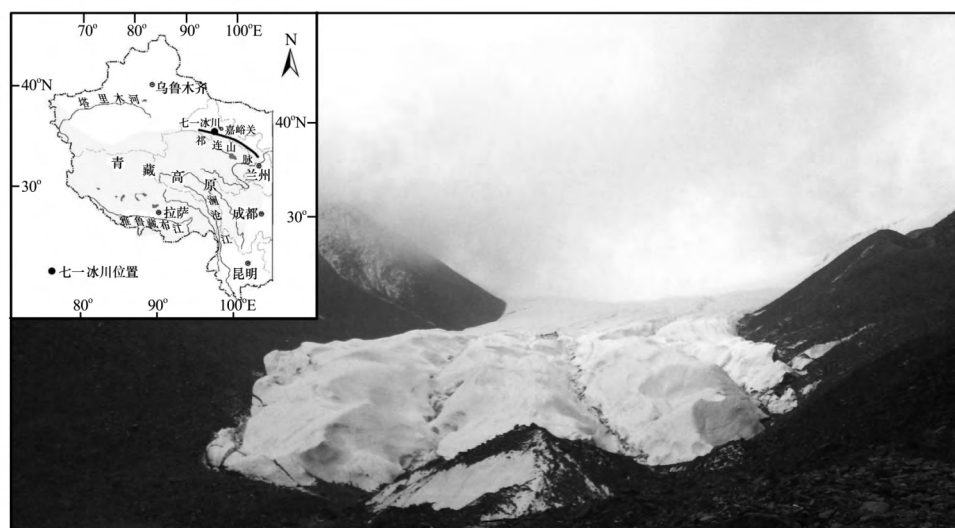


图1 七一冰川位置及冰舌形态

Fig.1 Map showing the position of the Qiyi Glacier, along with a photo of the glacier tongue

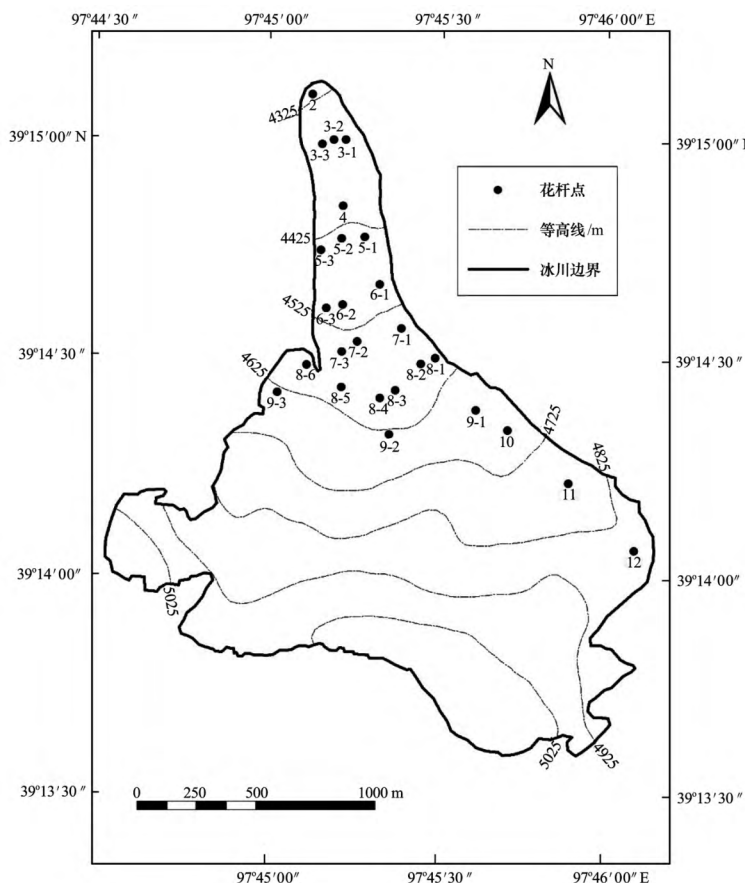


图2 2013年七一冰川测杆位置分布图

Fig. 2 Distribution of the posts on the surface of the Qiyi Glacier in 2013

但是也是受到精度的限制. 七一冰川面积较小, 冰面相对较容易攀爬, 因此, 比较适合应用花杆测量法来进行冰面速度的观测研究, 而此方法也保证了精度要求. 花杆测量法是通过在冰川表面设置花杆, 定期使用仪器测量花杆位置实现的. 某一时段的冰川表面运动速度是由这一时段内花杆的位移与该时段长度的比值得到, 位移可以通过坐标运算得到. GPS 技术的发展为冰川表面运动速度的测量提供了新手段, 相较于早期测点所用到的全站仪等光学仪器, GPS 更为方便、快捷, 精度更高, 而且不受冰面形态限制^[26].

此次研究所用到的有关冰面运动速度的数据就是通过花杆测量法得到的, 花杆的位置坐标是通过 Trimble GeoXT 型手持差分 GPS 测量得到. 该仪器使用方便, 可以实现在短时间内对整条冰川的完整测量, 保证测得的数据反映冰川运动状况的真实性^[4]. 在测量每一根花杆时, 先将仪器置于花杆底部并紧挨花杆, 等候几分钟待仪器读数稳定之后开始读数, 每隔 1 min 读取 1 次数据, 共读取 3 次, 取 3 次的平均值, 这在一定程度上避免了 GPS 定位漂

移现象. 测得的数据经后处理, 精度可达到 2 cm, 完全满足冰川表面运动速度测量的精度要求. 本研究所用数据是通过已布设好的花杆进行观测所得, 共计由 26 根花杆在冰川表面组成了观测网 (注: 2-1、8-2、8-6 花杆由于先前缺失, 于 2013 年重补, 位置较 2012 年发生较大变动, 故有些分析没用到这些花杆), 花杆的分布情况以及命名如图 2 所示. 位于同一横断面的相邻测杆相距约 100 m, 纵向上共计有 11 排测杆组成了 11 个断面, 相邻断面相对高度约 50 m. 为了保证测量精度, 每次都是尽量在一天之内完成对 26 根花杆的测量工作.

按照数据获取的时间, 可以将数据资料分为 3 个时段, 即 2012 年 7 月 27 日至 8 月 15 日、2013 年 8 月 24 日至 9 月 13 日以及 2012 年 8 月至 2013 年 8 月. 前两个时间段的数据属于消融旺季数据, 后一个时间段的数据属于整年数据.

首先, 用 2012 年 8 月和 2013 年 8 月作为时间起止点, 利用这一年内每根花杆的位移与年份的比值作为每根花杆的年运动速度. 利用 2013 年消融季期间花杆的位移与天数的比值作为消融季冰

川日均运动速度,将消融季每个断面的花杆运动速度求和平均作为每个断面消融季日均运动速度.借助于 ArcGIS 软件的数据分析以及制图功能,根据所测数据,得到了冰川表面各点的运动方向图以及冰川末端退缩变化图.此外,利用 ASTER GDEM V1 数字高程数据得到了七一冰川表面坡向图.我们还参考了 2013 年七一冰川最新物质平衡观测结果,并将物质平衡数据与冰川运动速度数据进行了对比分析.

3 运动特征分析

3.1 冰川表面运动速度空间分布特征

从图 3 可以看出,年运动速度最大值出现在海拔 4 348 m 的 3-2 点位处,速度值为 $12.84 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$;最小值出现在海拔 4 846 m 的 12 点位处,速度值为 $1.87 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$,整条冰川的年平均运动速度值为 $7.00 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$.除了 3-1 点位,位于冰舌部分的 3-2、3-3 以及 4 点位处运动速度较其他点运动速度要大,这可能与冰舌部分宽度较窄以及该处冰面起伏较大有关.对于山谷冰川,冰面宽度改变会引起运动速

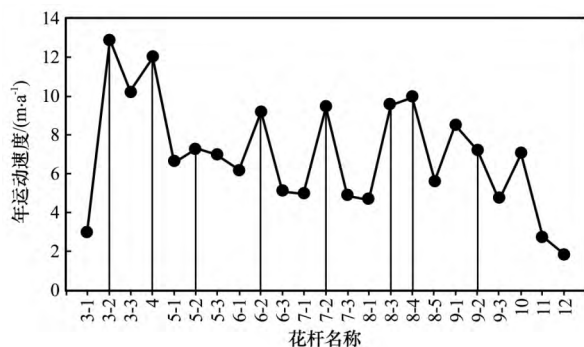


图 3 七一冰川 2012–2013 年花杆点年运动速度

Fig. 3 Annual surface flow velocities at different posts from 2012 to 2013

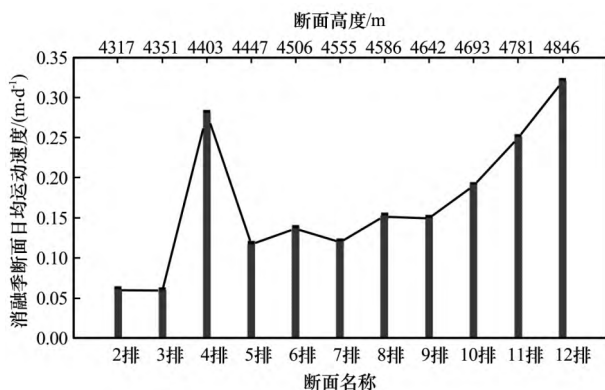


图 4 2013 年消融季各断面日均运动速度

Fig. 4 Ablation season mean surface flow velocities of different profiles in 2013

度的变化,若宽度变窄会促使运动速度增加,反之则会引起运动速度减小^[27]. 12 号点位处的运动速度最小,这可能与该点所处的冰川局部形态有关,该点所在冰面较为平坦,运动不明显.总体来看,从冰川上部到冰川末端,在冰川横剖面上,靠近主流线的花杆较两侧花杆运动速度偏大,运动速度从中部向边缘逐渐减小,这可能是由于山谷冰川受到两侧山体的阻尼作用及冰川厚度由中间向两侧减薄所致^[28].

在纵断面上,由图 4 可以看出,2013 年消融季日均运动速度最大值出现在平均海拔 4 846 m 处的 12 排,速度值 $0.32 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$;最小值出现在冰川末端的 2 排、3 排处,速度值为 $0.06 \text{ m} \cdot \text{d}^{-1}$.这里需要注意的是,年运动速度最小的 12 号花杆在 2013 年消融季的日均运动速度却为最大值,可能有两个因素决定了这一现象:其一,有可能 12 号花杆在消融季运动速度较大,而在非消融季运动速度很小,造成了整年水平上较小的运动速度;其二,2013 年消融季具体时间是 8 月 24 日到 9 月 15 日,而年运动速度限定的时间是 2012 年 8 月–2013 年 8 月.由此可见,出现上述这种情况是有可能的.由图 4 还可以得出,除 4 排以外,整体上各排运动速度随海拔的升高而增大,4 排运动速度的特殊性可能与局部区域冰川表面运动因素的复杂性有关,例如冰川底部滑动可能导致冰川局部区域运动速度的快速变化,此外,局部区域坡度也是一个不可忽视的因素.据 Paterson^[29]提出的冰川流动特性可知,积累区冰川运动速度自源头处逐渐增加至平衡线附近,平衡线至冰川末端区域受上游物质补给量限制和冰川消融的影响,运动速度逐渐减小.而由王宁练等^[12]的研究可知,近年来七一冰川物质平衡线高度呈上升的总趋势,并于 2006 年达到海拔 5 131 m.所以,本研究中各断面运动速度随高度升高而增大的结论符合一般山岳冰川的流动特性.

据相关研究,冰川物质平衡可以改变冰川的形态,进而影响到冰川的运动速度^[18].由图 5 可知,在 2013 年消融季,七一冰川物质平衡的积累消融表现出了有规律的变化,由冰川末端到 12 排花杆处,物质平衡总体上呈现减小的趋势,说明越往下,冰川的消融越为强烈,与此相对应的是该时间段内的冰川运动速度随海拔增高而增大.为了说明冰川物质平衡与其运动速度之间的关系,对 2013 年消融季各断面物质平衡值与同时段的断面运动速度值作了简单的相关分析,分析结果表明:二者在

0.05 水平上是显著相关的, 相关系数为 0.62. 这反映出了冰川运动速度与物质平衡之间的关系, 消融强烈, 可能导致冰川补给量不足, 进而导致冰川运动速度减小. 在讨论影响冰川局部运动速度的因素时, 不得不考虑到坡度的影响, 在很大程度上, 坡度可以影响到冰川局部运动速度的大小, 坡度愈大, 速度愈大, 例如 4 号花杆在消融季运动速度较大, 这与该点处的坡度较大存在一定的关系. 而 12 号花杆年运动速度很小, 经实地勘察, 该点所在冰川表面较为平坦, 坡度很小.

根据 2012 年以及 2013 年的观测资料作图可知, 该冰川运动速度的水平分布表现为: 运动速度矢量大多沿主流线方向或者平行于主流线(图 6), 这也符合山岳冰川运动方向分布的一般规律, 即无论在冰川积累区还是消融区, 冰川运动矢量大多沿主流线方向向下运动, 或者稍微偏离主流线一定方向^[30]. 图 6 也显示出个别花杆点的运动方向严重偏离了主流线方向, 例如 6-1 以及 12 号花杆, 这可能与冰川表面坡向有很大关系. 由图 7 并结合实地考察可以知道, 6-1 花杆所在位置坡向朝北偏东, 12 号花杆所在位置坡向朝东北方向, 由图 6 可以得

到, 该两点的运动方向也是大致朝东北方向, 运动方向与坡向表现出了很好的一致性. 由此可见, 冰川水平运动方向大致遵循沿主流线向下运动的规律, 但是受局部冰面坡向的影响, 一些点的运动方

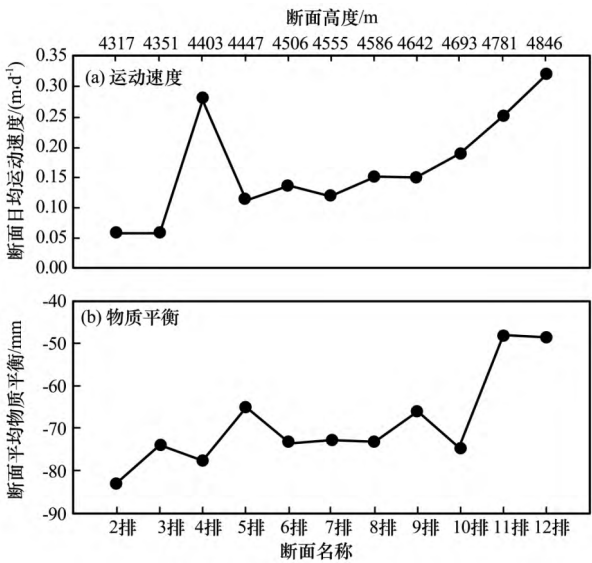


图 5 七一冰川运动速度与物质平衡对比
Fig. 5 Comparison between flow velocity and mass balance of the Qiyi Glacier

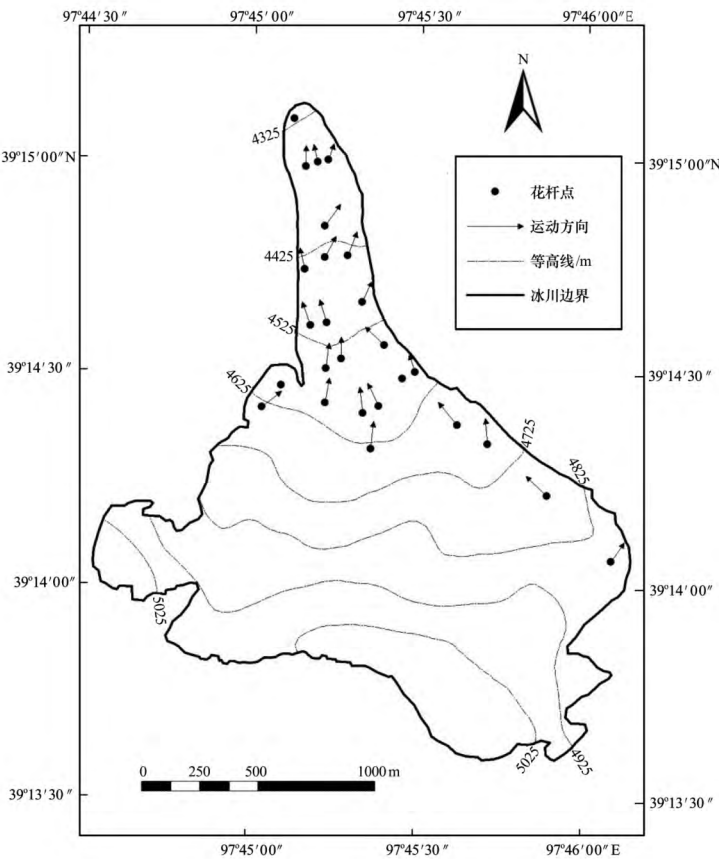


图 6 七一冰川表面花杆点运动方向示意图
Fig. 6 Map showing the flow directions of different posts on the surface of the Qiyi Glacier

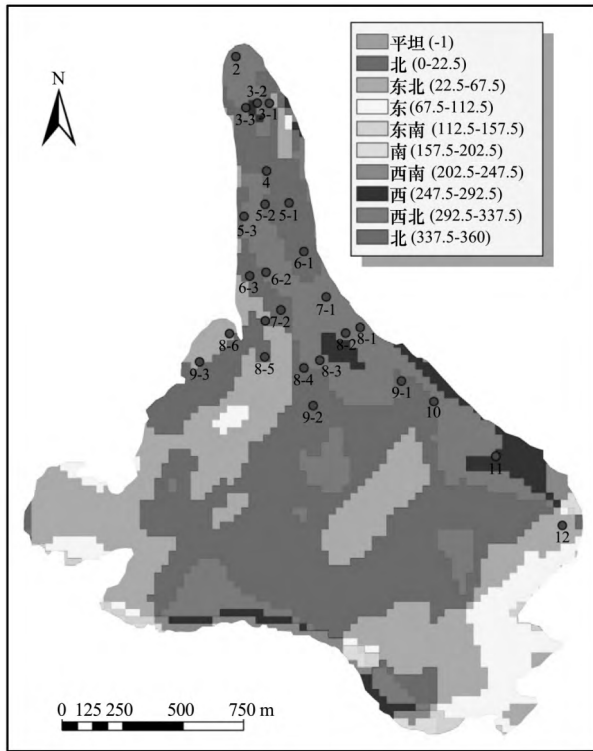


图 7 七一冰川表面坡向图

Fig.7 Map showing the surface slopes of the Qiyi Glacier

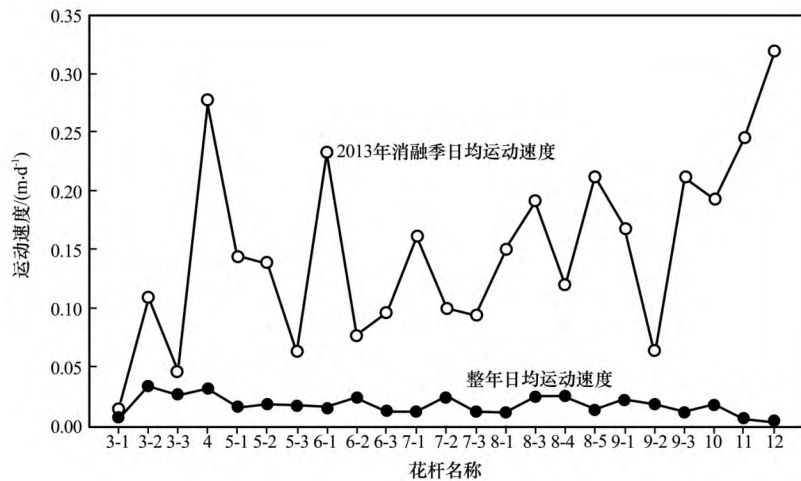


图 8 七一冰川 2012 - 2013 年消融季与整年日均表面运动速度比较

Fig. 8 Surface flow velocities , annual mean and ablation period mean , of different posts from 2012 to 2013

利用所测数据，计算得 2012 - 2013 年间七一冰川整体运动速度为 $7.0 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。通过对比七一冰川历年以来的运动速度(表 1)，发现七一冰川的运动速度呈现不断减小的趋势，运动速度从 1958 年的 $16 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 降低到 2005 - 2007 年的 $8.3 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ，而最新的观测速度延续了这一降低的趋势。七一冰川运动速度的年际变化趋势代表了大多数山岳冰川的运动速度变化情况，即目前大多数山岳冰川整体上都呈现出了运动速度逐渐降低的趋势^[31]，虽然

向也表现出了特殊性。

3.2 冰川表面运动速度时间分布特征

将各个花杆 2013 年消融季日均运动速度与整年水平上的日均运动速度进行比较(图 8)，发现 2012 年 8 月至 2013 年 8 月间冰川日均运动速度要远远小于 2013 年消融季的运动速度，前者占后者的百分比仅为 18.6%。这说明，七一冰川消融季运动速度有可能远大于非消融季运动速度。由于消融季一般处于 7 - 9 月，这个时段温度较高，降水较多，冰川底部和岩石交界面融水量充足，这容易导致冰川底部发生滑动，造成此时冰川较非消融季要活跃的多，运动速度较大。此外，冰川积累与消融在年内引起的厚度变化也可能会造成一定的速度波动^[22]，有可能这两个因素的综合作用导致七一冰川在消融季与非消融季的运动速度差异。通过仔细分析观测数据不难发现，某些花杆点(如 11 号花杆)，在 2013 年消融季的运动位移大于整年水平上的位移，这种情况是有可能的，因为本研究中 2013 年消融季时段并没有完全包含在 2012 年 8 月到 2013 年 8 月这一整年时间段之内。

表 1 七一冰川不同年份运动速度对比

Table 1 Flow velocities of the Qiyi Glacier in different periods

观测时间	运动速度/($\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$)	资料来源
1958	16.0	文献[9]
1976 - 1977	11.3	
1984 - 1985	9.5	
2004 - 2005	8.6	
2005 - 2007	8.3	
2012 - 2013	7.0	本研究

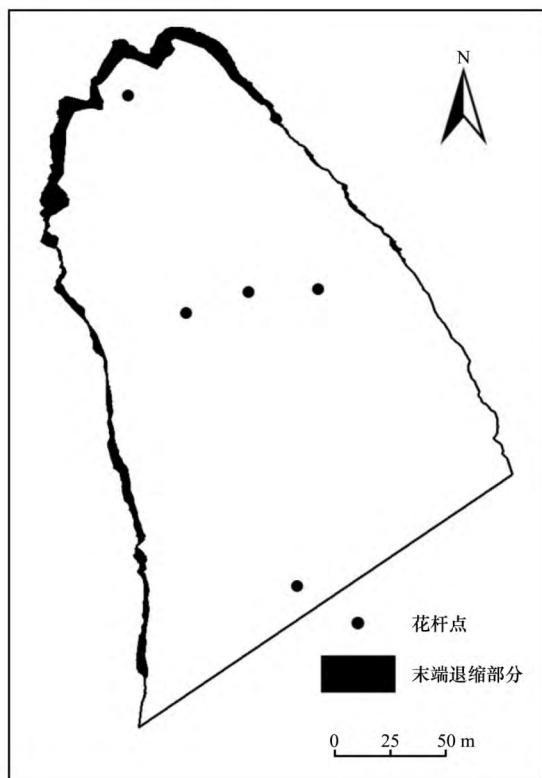


图9 七一冰川 2012–2013 年末端边界变化
Fig. 9 The terminus boundary variation of the Qiyi Glacier from 2012 to 2013

不同规模冰川运动速度大小表现出差异性,但是它们运动速度的变化趋势是一致的^[9]。

3.3 冰川末端变化

相关研究表明,在气候变暖背景下,中国西部冰川近几十年呈现出退缩不断加剧的趋势^[32–33]。为了得到七一冰川的最新退缩情况,我们分别于 2012 年 8 月以及 2013 年 8 月利用手持 GPS 仪沿着冰川末端边界采集到了两个时相的末端边界数据,由此得到的 2012 年 8 月至 2013 年 8 月七一冰川末端退缩范围如图 9 所示。从图 9 中我们可以看出,该冰川末端退缩比较明显,一年时间大约退缩了 5~7 m 的距离。随着气候的不断变暖,可以预见冰川的消融将不断加剧,冰川末端退缩趋势将持续下去。

4 结论与讨论

综上所述,可以得到以下七一冰川运动特征:

(1) 在空间分布特征方面,七一冰川在冰舌部位运动速度较大,这可能与冰舌较窄有关。横剖面上,主流线附近冰川运动速度较两侧运动速度要大;纵剖面上,由冰川末端到零物质平衡线,冰川

运动速度逐渐增大,保持了一般山岳冰川的运动规律。在运动方向方面,七一冰川运动速度矢量大多沿主流线向下运动或者稍微偏离主流线一定方向。此外,冰川运动与物质平衡以及坡度、坡向之间存在着较为明显的因果关系。

(2) 在时间分布特征方面,七一冰川消融季与非消融季的运动速度差异明显,这可能与年内冰川厚度的变化以及冰川底部滑动有关。此外,该冰川整体运动速度呈现出了逐年减小的趋势,运动速度从 1958 年的 $16 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 降低到 2012–2013 年的 $7.0 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

(3) 2012–2013 年间,冰川末端退缩比较显著,大约退缩了 5~7 m 的距离,随着气候的不断变暖,可以预见冰川的消融将不断加剧。

本研究仅就七一冰川表面的最新运动特征进行了观测研究,为了更进一步了解该冰川的运动特征,在以后的研究中可以借助于探地雷达等手段研究冰川底部的运动特征,并将冰川底部的运动特征与表面运动特征相结合进行分析研究。除此之外,还可以进一步结合所测得的冰川运动数据与同期物质平衡数据、气象数据等资料进行相关分析,并对七一冰川和不同地区、不同规模冰川的运动特征进行对比研究,揭示影响冰川运动的因素以及不同类型、不同规模冰川的运动特征差异。

现如今,遥感影像时空分辨率逐步提高,在以后的研究中,可以尝试利用遥感影像解译的方法来提取该冰川边界数据以及运动变化情况,以此可以用来验证实地测量并作为实地测量的一个补充。

致谢: 贺建桥、刘力、吴红波、陈安安、孙建勇等在野外工作中给予了帮助,并提供了部分数据支持,在此一并表示感谢。

参考文献(References):

- [1] Ren Jiawen. Updating assessment results of global cryospheric change from SPM of IPCC WGI Fifth Assessment Report [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1065–1067. [任贾文. 全球冰冻圈现状和未来变化最新评估: IPCC WGI AR5 SPM 发布 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1065–1067.]
- [2] Shen Yongping, Wang Guoya. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, 35(5): 1068–1076. [沈永平, 王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点 [J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068–1076.]
- [3] Kaab 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.

- [4] Li Huilin, Li Zhongqin, Shen Yongping, *et al.* Glacier dynamic models and their applicability for the glaciers in China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, **29**(2): 201–207. [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): 201–207.]
- [5] Jing Zhefan, Yao Tandong, Wang Ninglian. The surface flow features of 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.]
- [6] Liu Li, Jing Zhefan, Du Jiankuo. A study of velocity of Baishui No. 1 Glacier, Mt. Yulong [J]. *Advances in Earth Science*, 2012, **27**(9): 987–992. [刘力, 井哲帆, 杜建括. 玉龙雪山白水1号冰川运动速度测量与研究[J]. 地球科学进展, 2012, **27**(9): 987–992.]
- [7] Raup B, Käab A, Kargel J S, *et al.* Remote sensing and GIS technology in the Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) Project [J]. *Computers and Geosciences*, 2007, **33**: 104–125.
- [8] 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.]
- [9] 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.]
- [10] Pu Jianchen, Yao Tandong, Duan Keqin, *et al.* Mass balance of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains: A new observation [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, **27**(2): 199–206. [蒲健辰, 姚檀栋, 段克勤, 等. 祁连山七一冰川物质平衡的最新观测结果[J]. 冰川冻土, 2005, **27**(2): 199–206.]
- [11] Wang Sheng, Pu Jianchen, Wang Ninglian. Study of mass balance and sensibility to climate change of Qiyi Glacier in Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(6): 1214–1221. [王盛, 蒲健辰, 王宁练. 祁连山七一冰川物质平衡及其对气候变化的敏感性研究[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(6): 1214–1221.]
- [12] Wang Ninglian, He Jianqiao, Pu Jianchen, *et al.* Variations in equilibrium line altitude of the Qiyi Glacier, Qilian Mountains, over the past 50 years [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(33): 3810–3817. [王宁练, 贺建桥, 蒲健辰, 等. 近50年来祁连山七一冰川平衡线高度变化研究[J]. 科学通报, 2010, **55**(32): 3107–3115.]
- [13] Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. *Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology*, Chinese Academy of Sciences: No. 7: The Monitoring of Glacier, Climate, Runoff Changes and the Research of Cold Region Hydrology in Qilian Mountains [M]. Beijing: Science Press, 1992: 1–147. [中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊: 第7号: 祁连山冰川、气候及径流变化监测与寒区水文研究专辑[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 1–147.]
- [14] Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences. *Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology*, Chinese Academy of Sciences, No. 5, Glacier Variations and Utilizations in Qilian Mountains [M]. Beijing: Science Press, 1985: 1–185. [中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊, 第5号: 祁连山冰川变化及利用[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1–185.]
- [15] Sakai A, Matsuda Y, Fujita K, *et al.* Hydrological observations at July 1st Glacier in Northwest China from 2002 to 2004 [J]. *Bulletin of Glaciological Research*, 2006, **23**: 33–39.
- [16] Song Gaoju, Wang Ninglian, Jiang Xi, *et al.* Study on glacier melt-water change of Qiyi Glacier in climate warming of Qilian Mountains [J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, **30**(2): 84–88. [宋高举, 王宁练, 蒋熹, 等. 气候变暖背景下祁连山七一冰川融水径流变化研究[J]. 水文, 2010, **30**(2): 84–88.]
- [17] Jiang Xi, Wang Ninglian, Yang Shengpeng, *et al.* The surface energy on the Qiyi Glacier in Qilian Mountains during the ablation period [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(4): 686–695. [蒋熹, 王宁练, 杨胜鹏, 等. 祁连山七一冰川暖季能量平衡及小气候特征分析[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(4): 686–695.]
- [18] Jing Zhefan, Liu Li, Zhou Zaiming, *et al.* Analysis on the influencing factors of glacier flow velocity: A case study of Qiyi Glacier in Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(6): 1223–1228. [井哲帆, 刘力, 周在明, 等. 冰川运动速度影响因子的强度分析: 以祁连山七一冰川为例[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(6): 1223–1228.]
- [19] 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.]
- [20] Goldstein R M, Engelhardt H, Kamb B, *et al.* Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: Application to an Antarctic ice stream [J]. *Science*, 1993, **262**: 1525–1530.
- [21] Joughin I, Tulaczyk S, Fahnestock M, *et al.* A mini-surge on the Ryder Glacier, Greenland, observed via satellite radar interferometry [J]. *Science*, 1996, **274**: 228–230.
- [22] 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.
- [23] Cheng Xiao, Zhang Yanmei. Detecting ice motion with repeat-pass ENVISAT ASAR interferometry over Nunataks region in Drove Mountain, East Antarctic: The preliminary result [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2006, **10**(1): 118–122. [程晓, 张艳梅. ENVISAT ASAR 重轨 INSAR 用于东南极冰盖格罗夫山角峰地区冰流探测的初步结果[J]. 遥感学报, 2006, **10**(1): 118–122.]
- [24] Mayer C, Lambrecht A, Hagg W, *et al.* Post-drainage ice dam response at Lake Merzbacher, Inylchek Glacier, Kyrgyzstan [J]. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 2008, **90**(1): 87–96.
- [25] Huang Lei, Li Zhen. Mountain glacier flow velocities analyzed from satellite optical images [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2009, **31**(5): 935–940. [黄磊, 李震. 光学遥感影像的山地冰川运动速度分析方法[J]. 冰川冻土, 2009, **31**(5): 935–940.]
- [26] Cao Min, Li Zhongqin, Li Huilin. Features of the surface flow velocity on the Qingbingtan Glacier No. 72, Tianshan Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2011, **33**(1): 21–29. [曹敏, 李忠勤, 李慧林. 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[J]. 冰川冻土, 2011, **33**(1):

- 21–29.]
- [27] Douglas I B , David J A E. *Glaciers and Glaciation* [M]. London: Hodder Arnold Publication , 1998: 162–175.
- [28] Nye J F. The flow of a glacier in a channel of rectangular , elliptic or parabolic cross-section [J]. *Journal of Glaciology* , 1965 , 5 (41) : 661–690.
- [29] Paterson W S B. *The Physics of Glaciers* [M]. 2nd ed. Oxford , UK: Pergamon Press , 1994: 37–59.
- [30] Huang Maohuan , Sun Zuozhe. 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. 我国大陆型冰川运动的某些特征[J]. *冰川冻土* , 1982 , 4(2) : 35–44.]
- [31] Cao Bo , Wang Jie , Pan Baotian , *et al.* Surface flow velocities of the Ningchanhe No.1 and Shuiguanhe No.4 Glaciers in the East Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* , 2013 , 35(6) : 1428–1435. [曹泊, 王杰, 潘保田, 等. 祁连山东段宁缠河1号冰川和水管河4号冰川表面运动速度研究[J]. *冰川冻土* , 2013 , 35(6) : 1428–1435.]
- [32] Liu Yushuo , Qin Xiang , Zhang Tong , *et al.* Variation of the Ningchan River Glacier No. 3 in the Lenglongling Range , East Qilian Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* , 2012 , 34(5) : 1031–1036. [刘宇硕, 秦翔, 张通, 等. 祁连山东段冷龙岭宁缠河3号冰川变化研究[J]. *冰川冻土* , 2012 , 34(5) : 1031–1036.]
- [33] Bie Qiang , Qiang Wenli , Wang Chao , *et al.* Monitoring the glacier variation in the upper reaches of the Heihe River based on remote sensing in 1960–2010 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology* , 2013 , 35(3) : 574–582. [别强, 强文丽, 王超, 等. 1960–2010年黑河流域冰川变化的遥感监测[J]. *冰川冻土* , 2013 , 35(3) : 574–582.]

Latest survey and study of surface flow features of the Qiyi Glacier in the Qilian Mountains

WANG Kun^{1,2} , JING Zhefan¹ , WU Yuwei^{1,2} , DENG Yufeng¹

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences , Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000 , China; 2. University of Chinese Academy of Sciences , Beijing 100049 , China)

Abstract: In order to monitor the flow features of the Qiyi Glacier and further reveal the variation of mountain glaciers , the positions of posts on the surface of the Qiyi Glacier were surveyed and the latest observation data (the positions of posts , the mass balance of the glacier , the border of glacier's terminus) were obtained by using hand-held GPS receiver from July to August of 2012 and from August to September of 2013. Through analyzing these data with the help of GIS software , the surface flow features and the terminus variation of the glacier were obtained. In terms of spatial distribution , the flow features of the glacier maintains a general regulation of the mountain glaciers in cross section and longitudinal section. In the cross section , velocities nearby the mainstream line are larger than those in both sides of the glacier; along a longitudinal section , velocity increases from the terminus to the equilibrium line altitude. In terms of the flow direction , the velocity vector of the glacier mostly points downwards along the mainstream line or slightly off the line in a certain direction. Temporally , the surface flow velocity varies with season. In detail , the velocity in the ablation season is significantly higher. The overall velocity of the Qiyi Glacier is showing a decreasing trend in recent decades. The terminus is significantly retreating , for example , it retreated about 5–7 m from August 2012 to August 2013.

Key words: Qiyi Glacier; surface flow; GPS; features