

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0080

WEI Wenxia, LI Zhen, LI Yanan. Ice thickness measurements and volume calculation of Qiyi Glacier in Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3):822-829. [魏文霞, 李真, 李亚楠. 祁连山七一冰川雷达测厚及冰储量估算[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3): 822-829.]

## 祁连山七一冰川雷达测厚及冰储量估算

魏文霞<sup>1,2</sup>, 李真<sup>1</sup>, 李亚楠<sup>2,3</sup>

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院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; 3. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101)

**摘要:** 冰厚分布和冰储量是冰川水资源、冰川变化和冰川动力学模拟研究的基础数据。本文基于七一冰川冰厚度雷达测量结果, 结合GPS位置数据、遥感数据和冰川地形数据, 运用协同克里金空间插值算法, 绘制了冰厚分布图和冰床地形图, 并运用厚度积分法估算了冰川冰储量。2015年七一冰川的面积为2.517 km<sup>2</sup>, 平均冰厚和冰储量分别为44.9 m和0.1129 km<sup>3</sup>, 实测最大冰厚为115 m。海拔4480~4600 m和海拔4640~4800 m是七一冰川两个冰厚值较大的区域, 平均冰厚分别为88 m和97 m。

**关键词:** 七一冰川; 探地雷达; 冰川厚度; 冰储量

**中图分类号:** P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)03-0822-08

### 0 引言

冰川厚度和冰储量是冰川的重要属性, 是现代冰川学研究中的重要内容, 同时也是冰川水文模型<sup>[1]</sup>、冰川灾害评估<sup>[2]</sup>、冰川动力模型<sup>[3]</sup>研究中的重要输入参数。目前, 冰川冰储量的研究主要集中在冰量变化方面, 但对冰川冰储量的估算研究较少。冰川冰储量的估算主要有经验公式法<sup>[4-6]</sup>、冰厚模型估算法<sup>[7-8]</sup>和探地雷达法<sup>[9-11]</sup>, 除经验公式法外, 冰厚模型法和探地雷达法都是通过获取冰川厚度来估算冰川冰储量。探地雷达法是目前获取冰厚数据最为准确的方法<sup>[12]</sup>, 使用探地雷达对冰川厚度以及冰床地形进行探测, 可为冰川内部沉积层位、冰川结构、冰下河等方面研究提供丰富可靠的数据<sup>[13]</sup>。早在20世纪20年代, 国外就已经开始使用探地雷达测量冰川厚度<sup>[14]</sup>。在20世纪60年代Bailey等<sup>[15]</sup>提出无线电回波探测方法后, 探地雷达测量技术被更广泛地应用到冰厚测量中。我国探地雷达在冰川学中的应用始于20世纪80年代, 1980年中国科学院兰州冰川冻土研究所研制了B-1型冰川专用测厚雷达, 并在天山乌鲁木齐河源1、3号冰川上试

验成功<sup>[16]</sup>。近年来, 随着探地雷达技术的不断发展, 冰川探地雷达在天山、喜马拉雅山、昆仑山等地区的冰川上得到广泛应用<sup>[17-24]</sup>。本文利用2015年8月七一冰川探地雷达测厚数据, 对冰川的冰储量进行估算, 并绘制冰川的冰厚分布图和冰川冰下地形图, 为冰川动力学模拟提供基础数据。

### 1 研究区概况

七一冰川(GLIMS ID: G097755E39237N<sup>[25]</sup>; 第一次冰川编目编码5Y437C18<sup>[26]</sup>)位于青藏高原北部祁连山脉中段托赖山北坡, 冰川融水注入北大河流域柳沟泉河(属河西内流水系)。七一冰川是我国开展现代冰川综合考察与研究的第一条冰川<sup>[27]</sup>, 也是黑河流域内唯一一条具有较长时间观测序列的冰川。根据中国第二次冰川编目<sup>[25]</sup>, 2006年七一冰川面积为2.53 km<sup>2</sup>, 冰川朝向为北。七一冰川按照冰川形态来划分, 属于冰斗-山谷型冰川; 按冰川物理性质划分, 属于亚大陆型冰川。冰川最低海拔为4314 m, 最高海拔为5145 m, 海拔跨度830 m, 冰面平均坡度为20°, 冰舌部分较为平坦, 冰川后壁较陡峭, 坡度跨度大。冰川积累区上部发育有东、

收稿日期: 2021-07-21; 修订日期: 2021-11-28

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20070100); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0201)资助

作者简介: 魏文霞, 硕士研究生, 主要从事冰川冰储量变化及其对气候的响应机理研究. E-mail: wenxia@lzb.ac.cn

通信作者: 李真, 副研究员, 主要从事冰川和气候变化研究. E-mail: lizhen@lzb.ac.cn

中、西三个粒雪盆,其中东粒雪盆和西粒雪盆较为宽阔,中粒雪盆较小<sup>[28]</sup>。观测结果显示,七一冰川近年来冰川物质收支以负平衡为主,末端退缩,冰川面积呈持续减小态势<sup>[29]</sup>。

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源

本文使用两景 Landsat 8 遥感影像数据和一幅 DSM 地形数据获取七一冰川边界和冰下地形。遥感影像数据下载自美国地质调查局网站(USGS, <https://glovis.usgs.gov>),影像的轨道号均为 135/033,拍摄时间分别为 2015 年 3 月 19 日和 2015 年 8 月 10 日。提取冰川边界时以 2015 年 3 月 19 日的遥感影像为主,该景影像在研究区内无云量覆盖且冰川积雪覆盖范围很小,仅冰川上部边界处有少量积雪覆盖,在提取此处冰川边界时,使用 2015 年 8 月

10 日的遥感影像辅助。地形数据下载自日本宇宙航空研究开发机构网站(JAXA, <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>),水平分辨率 30 m。

冰厚数据是 2015 年 8 月利用 pulse EKKO PRO 型探地雷达获取的实测资料。测量时雷达天线的中心频率为 100 MHz,天线间距为 2 m,测点步长为 10 m,采样时间间隔为 0.8 ns,电磁波在冰川中的传播速度设定为  $0.169 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$ 。此套雷达系统和相应的工作参数曾在八一冰川<sup>[23]</sup>及煤矿冰川<sup>[24]</sup>的研究中使用,经八一冰川两根透底冰芯长度和同位置雷达实测值对比验证,雷达测厚相对误差小于 1%<sup>[23]</sup>。在测量过程中,同步利用集思宝 MG768W 手持 GPS 定位记录各测点的位置信息。七一冰川共获取 774 个有效冰厚度数据,主要包含 9 条横测线和 5 条纵测线(图 1)。

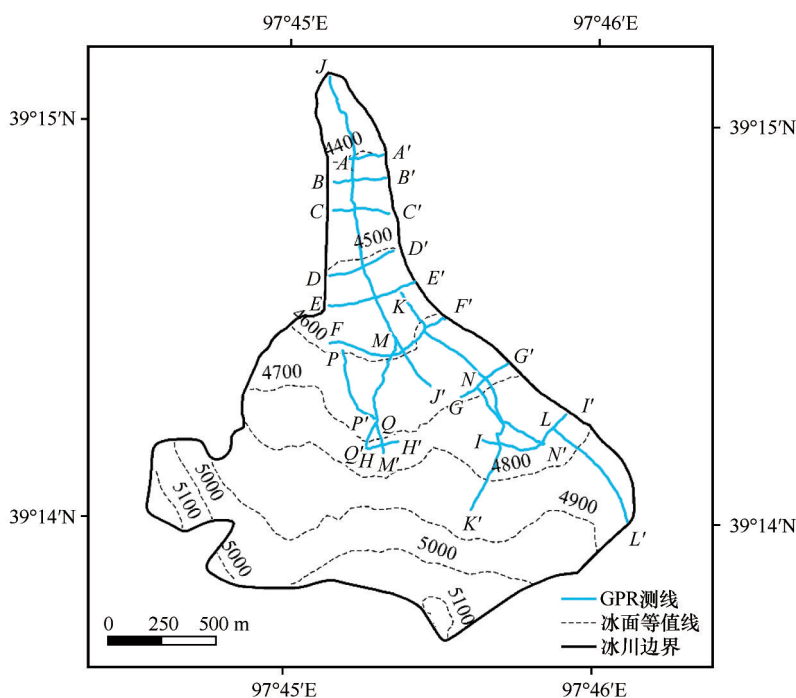


图 1 研究区位置示意和雷达测线分布图

Fig. 1 The location of Qiyi Glacier and the distribution of the Ground Penetrating Radar (GPR) sounding lines

### 2.2 数据处理

提取七一冰川边界时,首先把经过预处理的遥感影像的多光谱波段和全色波段数据进行了图像融合处理,使影像分辨率从 30 m 提高到了 15 m,然后裸冰区冰川边界利用影像红色波段与短波红外波段的比值阈值来提取<sup>[30]</sup>,结合人工目视解译进行修正,冰川分冰岭处边界则基于地形数据利用 ArcGIS 软件平台中的水文分析模块进行提取<sup>[31]</sup>,最后

将提取的两部分冰川边界合并后进行线平滑处理。

雷达数据使用与雷达系统配套的 EKKO-View Deluxe 软件处理。将雷达数据进行可视化处理后,再进行 AGC (Automatic Gain Control) 增益调节,使冰岩界面清晰(图 2)。假定雷达的波速为  $0.169 \text{ m} \cdot \text{ns}^{-1}$ ,将雷达信号的双程走时转化为冰厚度,逐个测点读取冰川厚度数据。

冰川冰厚分布是基于 ArcGIS 软件平台,通过空

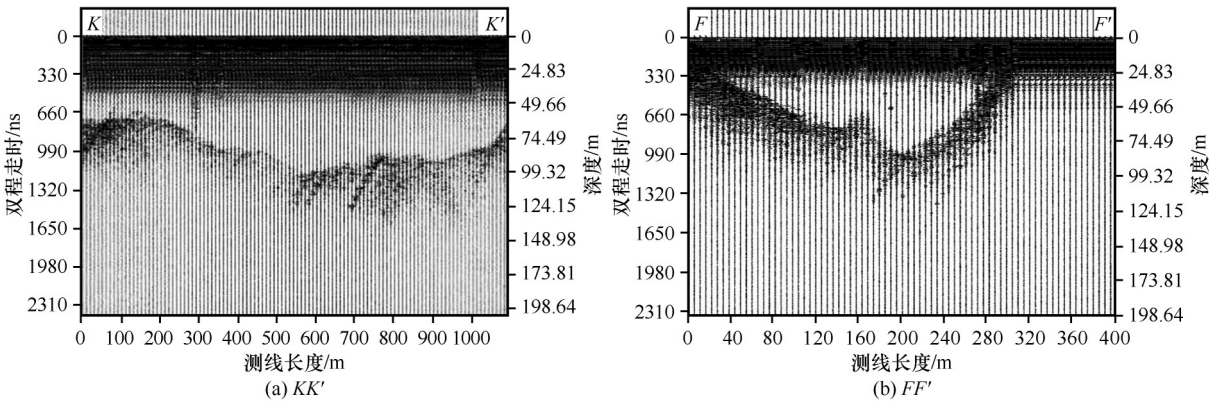


图2 七一冰川部分探地雷达图像  
Fig. 2 Example of GPR images sounded through Qiye Glacier

间插值运算获取。具体插值步骤为:(1)把测点的实测经度、纬度和冰厚数据导入软件中,生成冰厚点图层;(2)在冰川上部边界选取若干点,冰厚值设为零,加入冰厚点图层;(3)地形数据按冰川边界裁剪并生成冰川表面坡度图,获取坡度数据;(4)以冰厚点图层作为主要变量,坡度数据作为协变量<sup>[18]</sup>进行协同克里金空间插值运算;(5)插值结果按2015年七一冰川边界裁剪,得到冰川冰厚分布图。基于冰厚分布图利用厚度积分法估算2015年七一冰川冰储量。冰川冰下地形数据是利用冰川表面地形

数据和冰厚分布栅格图进行栅格运算获得。

3 结果分析

3.1 冰川测线冰厚分布特征

七一冰川2015年实测冰厚最大是115 m,出现在海拔4 710 m处,冰厚最小值是6 m,出现在海拔4 768 m处。七一冰川纵测线共布设了5条,利用测点高程和冰厚数据,绘制纵测线剖面示意图(图3)。可以看出,纵测线冰川厚度随海拔升高逐渐增大,至冰川中部粒雪盆区域达到实测冰厚最大值,在粒

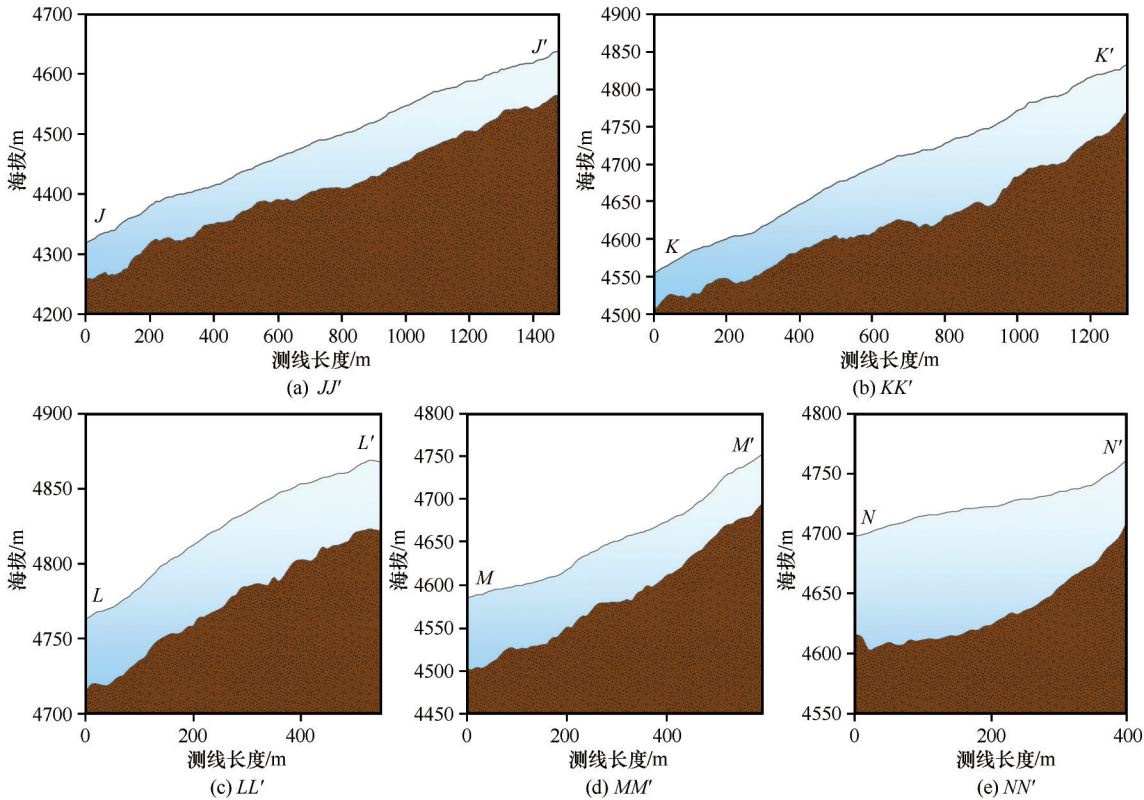


图3 七一冰川雷达测厚纵剖面  
Fig. 3 Longitudinal GPR sounding profiles of Qiye Glacier

雪盆上方,冰川厚度随海拔升高逐渐减小,但冰面地貌和冰床地形不尽一致。

图4是9条横测线剖面示意图,横剖面上冰川表面平均坡度和地形起伏差异较大。其中,较为完整的测线 $BB'$ 和 $CC'$ 槽谷呈“U”形, $DD'$ 和 $EE'$ 槽谷呈“V”形,说明由上至下冰川槽谷谷底越来越宽阔,谷壁越来越平缓,逐渐由“V”形向“U”形转变。据推测,其原因可能是在冰川向下运动时,运动的塑性冰川对底部岩块进行磨蚀与拔蚀,冰床两壁上的岩

石经过冻融作用后也变得松散、易崩塌,冰川不断下蚀与展宽,冰川槽谷两侧谷壁慢慢变得平直,槽谷形态逐渐转变为“U”形形态。测线 $FF'$ 和 $II'$ 槽谷均出现两个明显凹槽,呈现复式槽谷特征。一般来说,在冰床基岩软硬特征确定的情况下,冰床如果遭受多个不同方向冰流的侵蚀,冰床截面就可能形成复式槽谷。测线 $FF'$ 的槽谷主要因西粒雪盆和中粒雪盆两股冰流侵蚀而成,测线 $II'$ 槽谷则是中粒雪盆和东粒雪盆两处冰流的侵蚀结果。

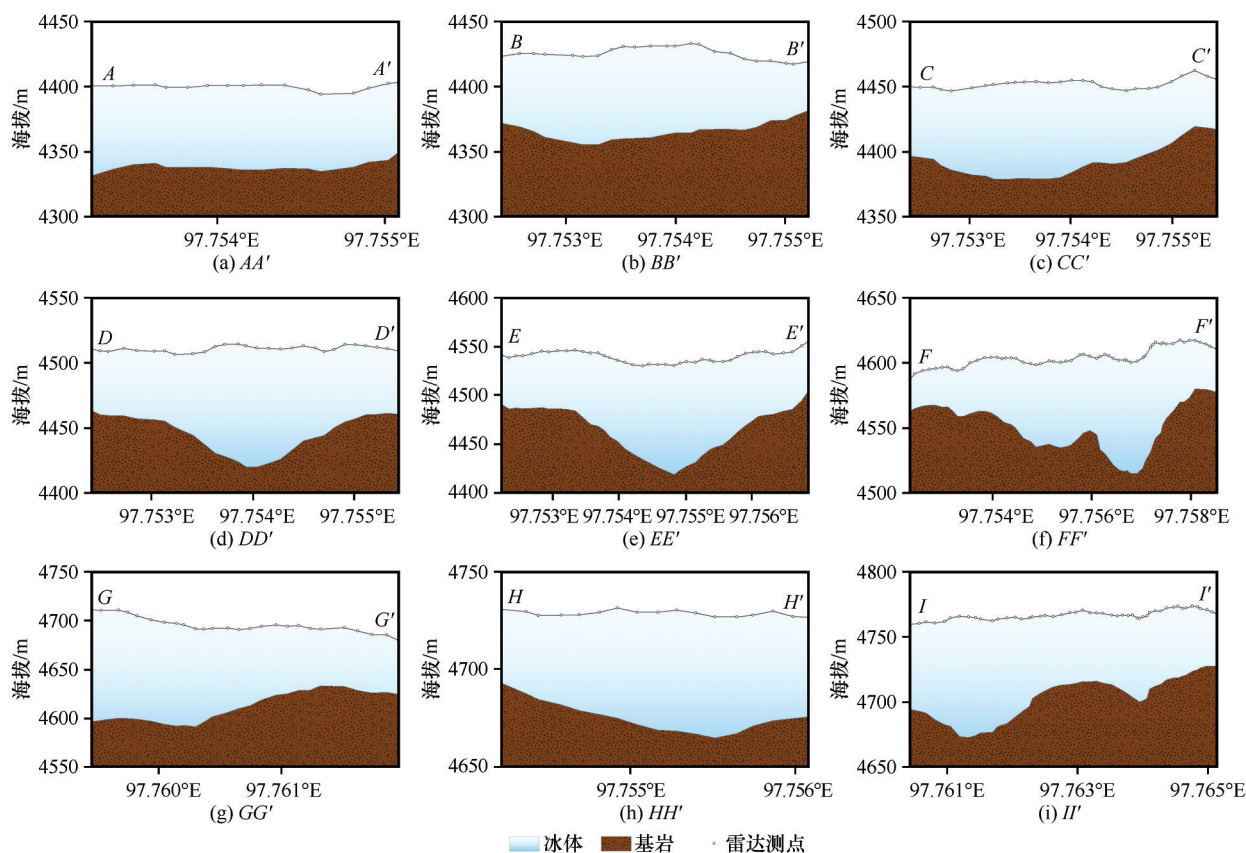


图4 七一冰川雷达测厚横剖面

Fig. 4 Transverse GPR sounding profiles of Qiyi Glacier

值得注意的是,在冰川消融区,临近冰川边界的测点,实测冰厚值都较大(表1)。测线 $AA'$ 最东侧测点距离冰川边界10.3 m,实测冰厚值为60 m;测线 $DD'$ 最东侧测点距离边界仅1.3 m,对应的实测冰厚值为51 m。实际上,在消融期,七一冰川积累区冰川边界处冰川冰和基岩相接,但在消融区,边界冰体与基岩基本被水流分离,冰体明显下切呈冰崖状,边界处冰厚并不为零。如果定义冰川消融区冰川边界处冰厚值为零,显然与实际不符。因此,本文在冰厚插值时,冰川消融区边界处未设零值。大部分冰川厚度模型都假定冰川消融区边界处的

冰厚值为零<sup>[32]</sup>,若能在模型中对冰川消融区和积累区边界处冰厚进行不同定义,模拟结果可能更符合实际。

### 3.2 冰川冰厚分布情况和冰床地形

基于实测冰厚数据,利用空间插值运算获得七一冰川冰厚分布如图5(a)所示。冰川厚度沿主流线向东西两侧逐渐减薄,东粒雪盆下方海拔4 650~4 700 m范围是整条冰川冰厚值中心,平均厚度是96 m;在海拔4 470~4 560 m之间冰川消融区也存在一个冰厚较大区域,平均厚度是84 m;冰川海拔4 850 m以上的区域冰厚值较小,平均厚度仅有

表1 临近冰川边界测点的冰厚  
Table 1 The ice thickness that measured near  
the glacier boundary

测线	测点位置	冰厚/m	距边界长度/m
AA'	东侧	60	10.3
BB'	西侧	52	27.6
	东侧	38	13.9
CC'	西侧	53	25.5
	东侧	38	26.2
DD'	西侧	42	19.1
	东侧	44	35.9
EE'	东侧	51	1.3
	西侧	51	19.8
FF'	东侧	33	11.0
GG'	东侧	56	13.3
II'	东侧	41	17.2

22 m。2015 年七一冰川面积为 2. 517 km<sup>2</sup>,冰川平均厚度为 44. 9 m,冰储量为 0. 1129 km<sup>3</sup>。

冰川冰面地形数据和冰厚分布数据结合,经过栅格运算,获取的七一冰川冰床地形数据如图 5(b) 所示。七一冰川冰床海拔高度在 4 246~5 144 m 之间。冰川东部海拔 4 550~4 850 m 之间发育有西北方向的沟槽,冰川西侧海拔 4 550~4 700 m 内发育有东北方向的沟槽。两沟槽在海拔 4 450~4 500 m 处汇聚,因冰川对底部基岩侵蚀作用加强,导致该处形成较大范围的围椅状洼地。冰床地形与冰川表面特征在海拔 4 900 m 以上几乎一致,在海拔 4 350~4 650 m 之间差异较大。海拔下降到 4 246~4 350 m,冰床和冰面地形特征又趋于相似,冰厚分布较均匀。

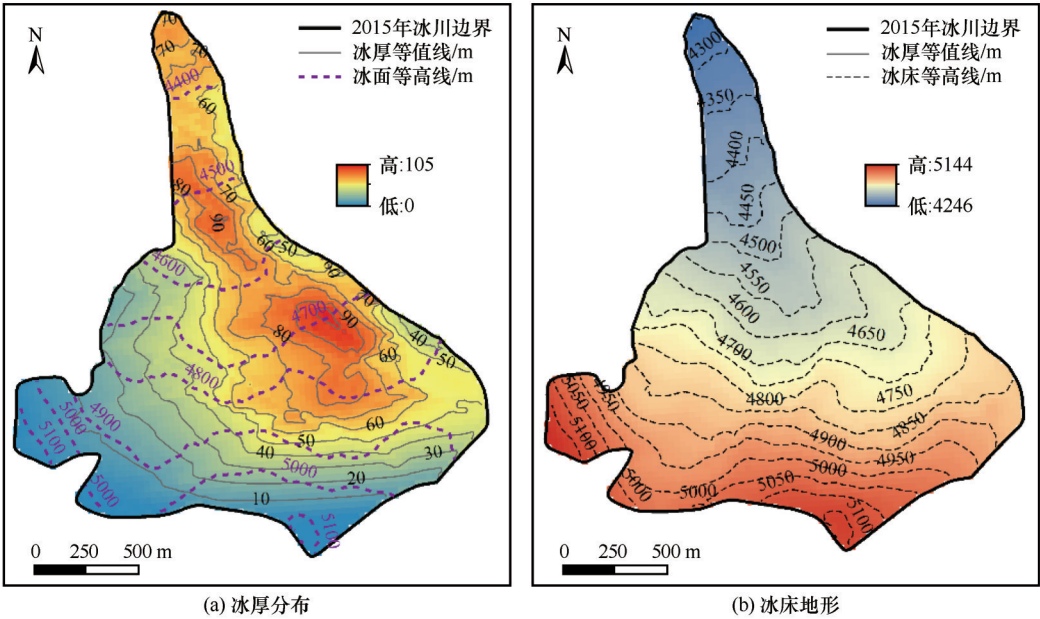


图5 冰厚分布和冰床地形图

Fig. 5 Ice thickness distribution and bed topography of Qiye Glacier

4 讨论

七一冰川冰储量估算误差可能来自以下几个方面:(1)探地雷达系统设置的参数影响冰川厚度测量精度<sup>[33]</sup>。本文使用的探地雷达系统和参数实际测量的相对误差小于 1%<sup>[23]</sup>。(2)插值时,地形数据的精度对冰厚插值结果会产生一定的影响。JAXA 发布的 DSM 数据集垂直精度±5 m,符合插值方法的要求。(3)测点空间分布情况和空间插值方法影响冰厚插值结果。七一冰川测点并未完全覆盖整个冰川,尤其是冰川上部缺乏冰厚测量值,这

可能导致冰厚插值结果较小,冰储量估算值也会略小于真实值。本文实测点位置插值所得冰厚值和实测值相比,平均相对误差仅为 1. 25%,说明插值方法是可行的。本文的冰储量估算误差在误差容许范围内,结果是可靠的。此外,本文使用的 DSM 数据集是 JAXA 发布的最新版本,该数据代表的为研究区 2011 年的地形,与探地雷达观测时间相差 4 年。受冰川消融作用的影响,4 年内七一冰川表面高程会有所下降,用 2011 年地形数据进行栅格运算绘制七一冰川冰床地形,会导致冰床高程比实际值偏高。根据七一冰川物质平衡观测资料,2011—

2015 年期间,七一冰川累积物质平衡为 $-1\,840\text{ mm w. e.}$ <sup>[29]</sup>,相当于冰川冰面减薄 $2.05\text{ m}$ ,小于地形数据的垂直精度 $\pm 5\text{ m}$ ,说明使用2011年地形数据引起的冰川冰床地形误差在可接受范围内。

根据中国第二次冰川编目中使用的冰储量估算公式计算七一冰川的冰储量是 $0.130\text{ km}^3$ <sup>[25]</sup>,与实测值相比,相对误差为 $15.02\%$ 。表2汇集了当前青藏高原具有完整雷达测厚资料的冰川,可以看出:大部分冰川冰储量实测值和经验公式计算结果有较大差异。这进一步说明适用于区域尺度的冰储量-面积经验公式应用到单条冰川的冰储量估算时有其局限性,方法带来的误差不可忽视。未来仍然需要积累大量冰川雷达厚度观测资料,通过分析冰川规模,冰川形态和冰川所处地域等参数条件,进一步优化冰川冰储量估算公式,提高单条冰川的冰储量估算精度。

表2 青藏高原部分冰川探地雷达和经验公式  
所得冰储量对比

Table 2 Comparison of ice volumes obtained by GPR and empirical formula in some glaciers on the Tibetan Plateau

研究地点	冰川面积/ $\text{km}^2$	冰储量/ $\text{km}^3$		相对误差/ $\%$	文献来源
		探地雷达	经验公式		
八一冰川	2.810	0.1530	0.1511	1.24	[23]
羌塘1号冰川	2.415	0.1236	0.1227	0.73	[19]
古仁河口冰川	1.200	0.0447	0.0441	1.34	[9]
天山一号冰川	1.742	0.0720	0.0783	8.75	[18]
大昂龙冰川	6.660	0.4520	0.4950	9.50	[11]
七一冰川	2.517	0.1129	0.1299	15.02	本文
扎当冰川	1.730	0.0660	0.0776	17.58	[10]
嘎尼冰川	4.310	0.2180	0.2721	24.82	[20]
煤矿冰川	0.950	0.0242	0.0340	40.50	[24]
抗物热冰川	1.960	0.0517	0.0921	78.14	[17]
四工河4号冰川	2.960	0.0760	0.1623	113.55	[21]

Farinotti 等<sup>[34]</sup>通过集成多个冰厚模型的结果,发布了全球冰川冰厚数据集。在此数据集中,七一冰川平均冰厚为 $44.6\text{ m}$ ,冰储量为 $0.1129\text{ km}^3$ ,与本文实测结果几乎一致。这说明该模型模拟结果精度高,可能适用于类似于七一冰川的其他冰川冰厚和冰储量估算。图6是该模型模拟的冰厚分布图<sup>[34]</sup>,在细节方面与实测结果存在一些差异。模拟最大冰厚值为 $84\text{ m}$ ,比实测最大冰厚值小 $31\text{ m}$ 。模型模拟的七一冰川最大冰厚区出现在海拔 $4\,550\sim 4\,570\text{ m}$ 之间,与本文实测结果(图5)分布不同。如

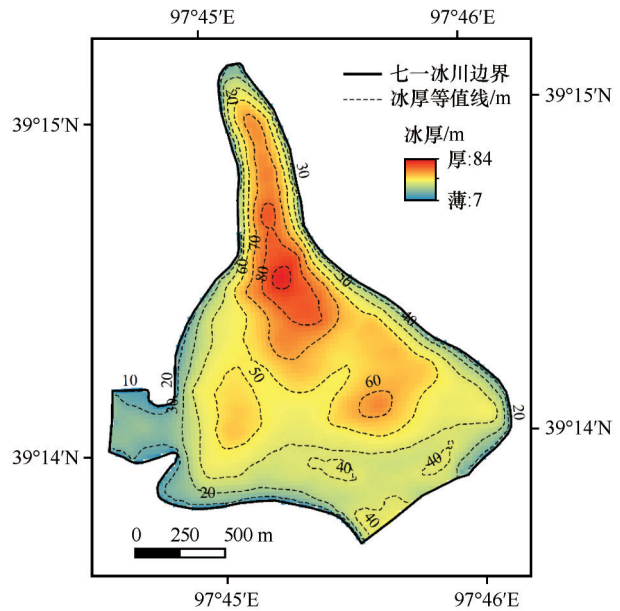


图6 冰厚数据库中七一冰川冰厚分布图<sup>[34]</sup>

Fig. 6 Ice thickness distribution of Qiyi Glacier derived by inversion method<sup>[34]</sup>

果对该模型的输入参数进行细微调整,可能会获得与实际情况更符合的结果。

## 5 结论

本文通过对2015年七一冰川实测GPR冰川厚度数据进行协同克里金插值运算,绘制出了冰川冰厚分布和冰床地形图,得出其冰储量。七一冰川2015年面积为 $2.517\text{ km}^2$ ,冰储量为 $0.1129\text{ km}^3$ ,平均冰厚为 $44.9\text{ m}$ ;海拔 $4\,640\sim 4\,800\text{ m}$ 之间与海拔 $4\,640\sim 4\,800\text{ m}$ 之间是冰厚值较大的区域。冰储量实测结果与冰厚模型法估算结果一致,而与经验公式法所得结果差异较大。冰厚模型估算法在冰川冰储量估算方面具有很好的应用前景,在未来需要更多冰川的雷达测厚资料,结合冰川规模和冰川流速等物理参数对模型进行优化,获取与实际更符合的模拟结果。

## 参考文献(References):

- [1] Gabbi J, Farinotti D, Bauder A, et al. Ice volume distribution and implications on runoff projections in a glacierized catchment [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2012, 16(12): 4543-4556.
- [2] Vincent C, Desclotres M, Garambois S, et al. Detection of a subglacial lake in glacier de tête rousse (Mont Blanc area, France)[J]. Journal of Glaciology, 2012, 58(211): 866-878.
- [3] Zekollari H, Fürst J J, Huybrechts P. Modelling the evolution of Vadret da Morteratsch, Switzerland, since the Little Ice Age and into the future[J]. Journal of Glaciology, 2014, 60(224): 1155-1168.

- [4] Meier M F, Bahr D B. Counting glaciers: Use of scaling methods to estimate the number and size distribution of the glaciers of the world[C]//Samuel C Colbeck. Glaciers, ice sheets and volcanoes: a tribute to Mark F Meier, Special Report, 1996, 96 (27): 89-94.
- [5] Radić V, Hock R. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2010, 115 (F1): F01010.
- [6] Adhikari S, Marshall S J. Glacier volume-area relation for high-order mechanics and transient glacier states[J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(16): L16505.
- [7] Farinotti D, Brinkerhoff D J, Clarke G K C, et al. How accurate are estimates of glacier ice thickness? Results from IT-MIX, the Ice Thickness Models Intercomparison experiment[J]. The Cryosphere, 2017, 11(2): 949-970.
- [8] Clarke G K C, Anslow F S, Jarosch A H, et al. Ice volume and subglacial topography for western Canadian glaciers from mass balance fields, thinning rates, and a bed stress model[J]. Journal of Climate, 2013, 26(12): 4282-4303.
- [9] Ma Linglong, Tian Lide, Yang Wei, et al. Measuring the depth of gurenhekou glacier in the south of the Tibetan Plateau using GPR and estimating its volume based on the outcomes[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(5): 783-788. [马凌龙, 田立德, 杨威, 等. 青藏高原南部羊八井古仁河口冰川 GPR 测厚及冰川体积估算[J]. 冰川冻土, 2008, 30(5): 783-788.]
- [10] Zhu Meilin, Yao Tandong, Yang Wei, et al. Ice volume and characteristics of sub-glacial topography of the Zhadang Glacier, Nyainqentanglha Range[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 268-277. [朱美林, 姚檀栋, 杨威, 等. 念青唐古拉山扎达冰川冰储量估算及冰下地形特征分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 268-277.]
- [11] Chen Yanhui, Tian Lide, Zong Jibiao, et al. Variation of the large and small anglong glaciers in the Ngari Prefecture, Tibet, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43 (1): 14-23. [陈艳辉, 田立德, 宗继彪, 等. 西藏阿里地区大、小昂龙冰川变化观测研究[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1): 14-23.]
- [12] Gao Yongpeng, Yao Xiaojun, Liu Shiyin, et al. Methods and future trend of ice volume calculation of glacier[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(6): 1204-1213. [高永鹏, 姚晓军, 刘时银, 等. 冰川冰储量计算方法及发展趋势[J]. 干旱区地理, 2018, 41(6): 1204-1213.]
- [13] Wang Puyu, Li Zhongqin, Wu Lihua, et al. Application of ground penetrating radar to the survey of glacier thickness and bedrock topography[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2011, 41(Suppl 1): 393-400. [王璞玉, 李忠勤, 吴利华, 等. 探地雷达在冰川厚度及冰下地形探测中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(增刊1): 393-400.]
- [14] Stern W. Über Grundlagen, Methodik und bisherige Ergebnisse elektrodynamischer Dickenmessung von Gletschereis[J]. Zeitschrift für Gletscherkunde, 1930, 15: 24-42.
- [15] Bailey J T, Evans S, Robin G Q. Radio echo sounding of polar ice sheets[J]. Nature, 1964, 204(4957): 420-421.
- [16] Zhang Xiangsong, Zhu Guocai, Qian Songlin, et al. Radar measuring ice thickness of No. 1 Glacier at the source of Urumqi River, Tianshan[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1985, 7(2): 153-162. [张祥松, 朱国才, 钱嵩林, 等. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雷达测厚[J]. 冰川冻土, 1985, 7(2): 153-162.]
- [17] Ma Linglong, Tian Lide, Pu Jianchen, et al. Recent area and ice volume change of Kangwure Glacier in the middle of Himalayas[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55 (18): 1766-1774. [马凌龙, 田立德, 蒲健辰, 等. 喜马拉雅山中段抗物热冰川的面积和冰储量变化[J]. 科学通报, 2010, 55(18): 1766-1774.]
- [18] He Maobing, Sun Bo, Yang Yaxin, et al. Ice thickness determination and analysis of No. 1 Glacier at the source of Urumchi River, Tianshan by ground penetrating radar[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2004, 27(3): 235-239. [何茂兵, 孙波, 杨亚新, 等. 天山乌鲁木齐河源一号冰川探地雷达测厚及其数据分析[J]. 东华理工学院学报, 2004, 27(3): 235-239.]
- [19] Zhu Dayun, Tian Lide, Wang Jianli, et al. The Qiangtang Glacier No. 1 in the middle of the Tibetan Plateau: depth sounded by using GPR and volume estimated[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 278-285. [朱大运, 田立德, 王建力, 等. 青藏高原中部双湖羌塘 1 号冰川厚度特征及冰储量估算[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 278-285.]
- [20] Jin Shengqiang, Tian Lide. Depth sounded by GPR and volume estimated of the Gani Glacier in Ngari Prefecture, Tibet[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41 (3): 516-524. [靳胜强, 田立德. 西藏阿里地区嘎尼冰川厚度特征及冰储量估算[J]. 冰川冻土, 2019, 41(3): 516-524.]
- [21] Wu Lihua, Li Zhongqin, Wang Puyu, et al. Sounding the Sigong River Glacier No. 4 in Mt. Bogda area, the Tianshan mountains by using ground penetrating radar and estimating the ice volume[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(2): 276-282. [吴利华, 李忠勤, 王璞玉, 等. 天山博格达峰地区四工河 4 号冰川雷达测厚与冰储量估算[J]. 冰川冻土, 2011, 33(2): 276-282.]
- [22] Kutuzov S, Thompson L G, Lavrentiev I, et al. Ice thickness measurements of Guliya ice cap, western Kunlun Mountains (Tibetan Plateau), China[J]. Journal of Glaciology, 2018, 64 (248): 977-989.
- [23] Wang Ninglian, Pu Jianchen. Ice thickness, sounded by ground penetrating radar, on the bayi glacier in the Qilian Mountains, China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(3): 431-435. [王宁练, 蒲健辰. 祁连山八一冰川雷达测厚与冰储量分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(3): 431-435.]
- [24] Li Yanan, Li Zhen, Wang Ninglian. Ice thickness sounded by ground penetrating radar on the Meikuang Glacier in the Eastern Kunlun Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1): 38-46. [李亚楠, 李真, 王宁练. 东昆仑山煤矿冰川雷达测厚及冰储量估算[J]. 冰川冻土, 2018, 40(1): 38-46.]
- [25] Guo Wanqin, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al. The Second Glacier Inventory Dataset of China (Version 1.0)[DS]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Science Data Center, 2019. DOI: 10.12072/ncdc. Westdc. db0006. 2020. [刘时银, 郭万钦, 许君利. 中国第二次冰川编目数据集(V1.0)[DS]. 兰州: 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 2019. DOI: 10.12072/ncdc. Westdc. db0006. 2020.]
- [26] Wang Zongtai, Liu Chaohai, You Genxiang, et al. Glacier Inventory (I) -Qilian Mts[M]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences, 1981: 118. [王宗太, 刘潮海, 尤根祥, 等. 中国冰川目录 I 祁连山区[M]. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所,

- 1981: 118. ]
- [27] Investigation Team on Utilization of Snow and Ice Resources in Mountain Regions, Chinese Academy of Sciences. Investigations report of glaciers in the Qilian Mountains [M]. Beijing: Science Press, 1959: 52. [中国科学院高山冰雪利用研究队. 祁连山现代冰川考察报告-专刊第一号[M]. 北京: 科学出版社, 1959: 52. ]
- [28] 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): 199-204. [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): 199-204. ]
- [29] Wang Sheng, Yao Tandong, Pu Jianchen. Spatial and temporal variations in mass balance of Qiyi Glacier in Qilian Mountains [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(2): 399-412. [王盛, 姚檀栋, 蒲健辰. 祁连山七一冰川物质平衡的时空变化特征[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(2): 399-412. ]
- [30] Paul F, Bolch T, Kääb A, et al. The glaciers climate change initiative: Methods for creating glacier area, elevation change and velocity products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 162: 408-426.
- [31] Tang Guoan, Yang Xin. ArcGIS GIS spatial analysis experiment course [M]. Beijing: Science Press, 2006: 503-506. [汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 503-506. ]
- [32] Frey H, Machguth H, Huss M, et al. Estimating the volume of glaciers in the Himalayan-Karakoram region using different methods [J]. *The Cryosphere*, 2014, 8(6): 2313-2333.
- [33] Lapazaran J J, Otero J, Martín-Español A, et al. On the errors involved in ice-thickness estimates I: Ground-penetrating radar measurement errors [J]. *Journal of Glaciology*, 2016, 62 (236): 1008-1020.
- [34] Farinotti D, Huss M, Fürst J J, et al. A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth [J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(3): 168-173.

## Ice thickness measurements and volume calculation of Qiyi Glacier in Qilian Mountains

WEI Wenxia<sup>1,2</sup>, LI Zhen<sup>1</sup>, LI Yanan<sup>2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Ice thickness distribution and ice volume are the basics of glaciological research. In order to obtain the ice thickness distribution and ice volume of this glacier, the ground-penetrating radar (GPR) was used to probe the ice thickness of Qiyi Glacier in August 2015. In this paper, we integrated GPS location data, glacier topographic data, and remote sensing data, using a co-kriging spatial interpolation algorithm, to retrieve the ice thickness distribution map and ice bed topography of the glacier. The thickness integration method was used to estimate the ice volume. The results show that the area of Qiyi Glacier in 2015 was 2.517 km<sup>2</sup>, and the average ice thickness and ice volume were 44.9 m and 0.1129 km<sup>3</sup>, respectively. The measured maximum ice thickness was 115 m. The regions within the altitude range of 4 480 to 4 600 m and altitude of 4 640 to 4 800 m have larger ice thicknesses on Qiyi Glacier, where the average ice thicknesses are 88 m and 97 m, respectively.

**Key words:** Qiyi Glacier; ground penetrating radar; ice thickness; ice volume

(责任编辑: 郭万钦)