

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0127

CHE Zheng, WANG Ninglian, LIANG Qian, et al. Analysis of ice thickness sounded by ground penetrating radar and ice volume of Tuolainanshan Glacier No. 6 in the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(5):1409-1418. [车正, 王宁练, 梁倩, 等. 祁连山托来南山6号冰川雷达测厚与冰储量分析[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5):1409-1418.]

祁连山托来南山6号冰川雷达测厚与冰储量分析

车 正^{1,2}, 王宁练^{1,2,3}, 梁 倩^{1,2}, 陈安安^{1,2}

(1. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127; 2. 西北大学 城市与环境学院 地表系统与灾害研究院, 陕西 西安 710127; 3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101)

摘 要: 冰川厚度测量是冰储量估算的关键。基于2019年7月利用探地雷达在托来南山6号冰川主冰川的测厚结果, 通过普通克里格法绘制了主冰川的冰厚分布图, 计算出主冰川的平均厚度为 (39.61 ± 5.32) m, 冰厚空间分布呈自边缘向中间逐渐增厚的特征, 最大冰厚 (100.78 ± 1.78) m位于纵剖面海拔4 770 m附近的凹陷盆地, 结合半物理公式估算出整条冰川的冰储量为 (0.0504 ± 0.0082) km³。冰床为典型槽谷地形, 谷槽横剖面呈U形, 且随海拔的升高谷槽宽度逐渐变小。现有的面积-体积公式并不适用于单条冰川的冰储量估算, 但分类型拟合公式具有降低估算结果误差的潜力。

关键词: 探地雷达(GPR); 冰川厚度; 冰储量估算; 托来南山6号冰川; 祁连山

中图分类号: P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)05-1409-10

0 引言

青藏高原及周边地区的山地冰川作为“亚洲水塔”的重要组成部分, 其变化关系着我国水资源供给与周边众多国家的水安全^[1-2]。在我国西北干旱地区和中亚干旱区, 山地冰川融水对河川径流起到“削峰填谷”的作用(在干旱年份, 冰川消融量增大, 对河川径流的补给增强, 从而缓解下游地区的干旱; 在湿润年份, 冰川消融减弱, 对河川径流的补给减少), 是当前冰川补给型河流径流量变化相对平缓的重要保障^[3]。随着全球变暖和冰川萎缩加剧, 流域尺度的冰川融水峰值出现时间是目前冰川水文研究和流域水资源管理部门最为关注的重大科学问题之一。

冰储量作为冰川融水径流模拟的重要参数, 其精度影响着冰川融水径流峰值出现时间的可信度^[4]。现有的大空间尺度冰川储量多通过面积-体积公式或冰厚估算模型计算^[5-11]。面积-体积公式是基于冰储量与冰川面积间存在良好关系而构建

的幂指数模型, 目前中国第二次冰川编目数据^[12]中冰储量估算公式就是参考了Radić等^[6]和Grinsted^[7]分别在WGI和RGI冰川编目数据基础上统计分析而得出的经验公式, 国内Liu等^[13]根据早期天山地区和祁连山地区的冰川测厚数据提出了适合于相应地区的冰川面积-体积公式。近年来, 基于一定物理过程的冰厚估算模型被应用到冰储量估算研究当中。例如利用浅冰近似理论估算出全球 727×10^3 km²冰川的冰储量约为 $(140.8 \pm 40.4) \times 10^3$ km³^[9], 比Farinotti等^[10]在2019年基于五种模型平均结果估算的全球 705×10^3 km²冰川的冰储量 $[(158 \pm 41) \times 10^3$ km³]少了约10%; 相较Huss等^[11]在2012年基于冰川流动定律估算的全球 734×10^3 km²冰川冰储量 $[(170 \pm 21) \times 10^3$ km³]少了约20%。为准确估算冰储量, Farinotti等^[14]结合实测数据对现有17个冰川厚度估算模型进行了对比实验, 结果表明尽管多种模型估算结果的均值能有效提高冰川厚度估算结果的精度, 但冰厚估算模型未来改进的关键仍是基于实测数据提

收稿日期: 2020-09-27; 修订日期: 2022-09-25

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA20060201); 国家自然科学基金项目(42130516; 41871053); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK020102)资助

作者简介: 车正, 硕士, 主要从事冰川变化与气候变化研究。E-mail: 18805446121@163.com

通信作者: 王宁练, 教授, 主要从事冰冻圈与全球变化研究。E-mail: nlwang@nwnu.edu.cn

升模型输入项的质量。冰川多位于高海拔山区,目前全球约3 000条冰川(占全球冰川总数约1%)进行了冰川测厚^[15],使得现有冰储量估算模型仍缺乏足够的实测数据进行模型参数率定,尤其是青藏高原及周边地区。

冰川测厚可追溯到20世纪20年代,60年代英国科学家Bailey等^[16]利用无线电在冰川中具有良好的穿透能力对极地冰盖进行了探测,随后Bogorodsky等^[17]将雷达无线电回波探测方法用于冰川测厚,使得利用无线电在冰川测厚研究领域得到了系统应用。我国首次冰川测厚是1979年5月用国产KDL-A型矿井地质雷达在祁连山羊龙河冰川开展的^[18],随后原兰州冰川冻土研究所研制了专门用于冰川测厚的B-1型雷达,并在天山1号冰川^[19]和南极半岛柯斯冰帽^[20]进行了冰厚探测。21世纪以来随着探地雷达设备的快速发展,冰川测厚工作已经在全球不同区域的冰川展开^[21-36],积累了一定的冰川厚度实测数据。

本文基于2019年7月利用pulse EKKO PRO探地雷达在托来南山6号冰川的测厚数据,估算了该冰川的冰储量,分析该冰川的厚度分布和冰床地形状况。本次工作是托来南山地区第一次开展冰川厚度测量工作,为建立该地区的冰储量工作估算提供了基础数据,也为未来在该地区开展的冰川融水径流模拟等工作奠定基础。

1 研究区概况

托来南山6号冰川(38.639°N、98.283°E,冰川编码:G098282E38637N)位于祁连山中段地区的托来南山北坡(图1),冰川融水最终汇入疏勒河,该冰川是一条小型冰斗-山谷冰川,无表碛物覆盖,冰面坡度较小,比较平整。依据2019年Landsat-8影像通过目视解译获取当年该冰川的总面积为(1.34±0.05) km²,末端海拔为4 586 m,顶端为5 231 m。其中主冰川面积为(1.25±0.04) km²,支冰川面积为(0.09±0.01) km²。第二次中国冰川编目数据^[12]显示该冰川2007年的面积(1.39±0.07) km²,表明该冰川过去十余年间仅萎缩了约3.6%,萎缩速率仅为0.3%·a⁻¹。

2 数据与方法

2.1 数据获取

为获取托来南山6号冰川的储量信息,2019年

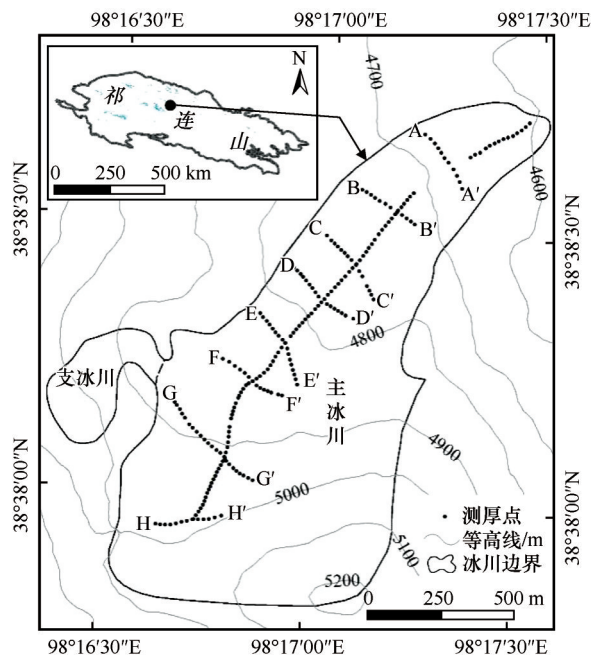


图1 托来南山6号冰川位置及雷达测点分布
Fig. 1 Location of Tuolainanshan Glacier No. 6 and distribution of the ground penetrating radar sounding points

7月利用加拿大SSI公司生产的pulse EKKO PRO探地雷达(ground penetrating radar, GPR)在该冰川共获取1条纵测线和8条横测线,共计216个测点(图1)。纵测线基本沿冰川中线,分布在海拔4 540~4 940 m,八条横测线依次分布在海拔约4 620 m(AA')、4 660 m(BB')、4 700 m(CC')、4 720 m(DD')、4 770 m(EE')和4 790 m(FF')、4 850 m(GG')和4 930 m(HH')附近。测量时雷达天线频率设定为100 MHz,发射和接收天线间距为1.5 m,纵剖面测点间隔为15 m,横剖面测点间隔为20 m。该套雷达系统及设定参数在八一冰川^[24]及煤矿冰川^[27]都取得了良好的结果,其中八一冰川的探测结果与冰芯长度的误差仅为1%^[24]。测点空间平面坐标用北京合众思壮公司生产的MG868型手持式GPS进行单点测量,其单点平面定位精度为1.2 m。数字高程模型为ASTER GDEM V3,其空间分辨率为30 m。冰川边界基于2019年8月14日的Landsat-8 OLI影像经人工目视解译获取,计算冰川面积时将投影设置为Albers等面积投影(与第二次中国冰川编目一致)。

2.2 数据处理

2.2.1 主冰川雷达测厚数据处理

雷达测点资料在EKKO-View Deluxe软件中处理,将电磁波在冰川中的传播速度设定为169 m·μs⁻¹,

对雷达资料进行可视化后获取不同断面上测点的冰厚数据。由于本文的测厚点全部在主冰川上,支冰川上没有测点分布,因此本文的冰川厚度分布和冰床地形分析都集中在主冰川。基于 ArcGIS 平台,利用普通克里格法对主冰川的冰厚数据进行插值,插值时将冰川边界处的冰厚值设置为 0,零值点尽可能均匀分布在主冰川边界上,主冰川与支冰川交汇处的冰厚设定为支冰川平均厚度的估计值。对插值后的冰厚数据通过栅格化获取主冰川区内的冰厚分布及冰储量信息,冰厚数据的空间分辨率保持为 30 m(与 ASTER GDEM 数据一致),进一步利用冰厚栅格数据绘制主冰川区 10 m 等间距的冰川厚度等值线图以分析主冰川冰厚分布特征;之后将冰面高程数据(ASTER GDEM)与冰厚数据相减获得测厚区冰床地形图。

2.2.2 支冰川平均厚度估算

支冰川因为没有测厚资料,无法通过插值得到该区域的冰储量,需寻找适合的方法进行估算。有学者基于半球物理公式提出了估算山地冰川平均厚度的方法^[8,37-38],其表达式为

$$H_F = H_t \times \frac{\pi}{4} \quad (1)$$

$$H_t = \frac{\tau}{f\rho g \sin \alpha} \quad (2)$$

式中: H_F 和 H_t 分别为整条冰川和冰川中线的平均厚度; f 为形态因子(山谷冰川通常取值 0.8); ρ 为冰密度($900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$); g 为重力加速度($9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$); α 为冰川中线的表面坡度;底部剪应力(τ)与冰川作用区的高程差(∂H)相关,其计算公式为

$$\tau(\text{kPa}) = \begin{cases} 0.5 + 159.8\partial H - 43.5(\partial H)^2 & \partial H \leq 1.6 \text{ km} \\ 150 & \partial H > 1.6 \text{ km} \end{cases} \quad (3)$$

2.3 误差评价

2.3.1 冰川厚度误差评估

主冰川平均厚度误差一方面来源于利用 GPR 进行冰川测厚时产生的测量误差(ε_{Hdata}),另一方面来源于利用普通克里格插值进行冰川厚度预测时,预测结果和实测结果之间存在的误差(ε_{HRMSE})。因此,冰川平均厚度的估算误差 $\varepsilon_{\bar{H}}$ 可以表示为

$$\varepsilon_{\bar{H}} = \sqrt{\varepsilon_{Hdata}^2 + \varepsilon_{HRMSE}^2} \quad (4)$$

Lapazaran 等^[39]指出雷达脉冲测量误差和平面定位误差是基于探地雷达获取冰川厚度数据误差的主要来源。本文在托来南山 6 号冰川共计获取了 216 个测点,用所有测点误差的均值为作为估算冰川平均厚度误差中的雷达脉冲测量误差[式(5)],

各个测点误差(ε_{Hdata_i})如式(6)所示。

$$\varepsilon_{Hdata} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_{Hdata_i} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{Hdata_i} = \sqrt{\varepsilon_{HGPR_i}^2 + \varepsilon_{Hxy_i}^2} \quad (6)$$

式中: ε_{HGPR_i} 和 ε_{Hxy_i} 分别为测点 i 的雷达脉冲测量误差和平面定位误差。其中, ε_{Hxy_i} 可分为两部分,一是 GPS 自身定位误差,二是当 GPS 与 GPR 连接时, GPS 的位置信息更新时间和 GPR 测厚信息获取时间存在差异而导致的位置偏差。本文未将 GPS 和 GPR 连接,二者因信息获取时间偏差而导致的位置误差可以忽略,因此平面定位误差主要来源于 GPS 仪器自身定位误差。雷达脉冲测量误差 ε_{HGPR} 可以表示为

$$\varepsilon_{HGPR} = \sqrt{\varepsilon_{H_c}^2 + \varepsilon_{H_t}^2} \quad (7)$$

式中: ε_{H_c} 和 ε_{H_t} 分别为雷达信号在冰川内传播速度的误差和雷达信号在冰川内传播时间的误差,二者的计算公式为

$$\varepsilon_{H_c} = \varepsilon_c \times t/2 \quad (8)$$

$$\varepsilon_{H_t} = c \times \varepsilon_t/2 \quad (9)$$

式中: t 和 c 分别为雷达信号在冰川中的传播时间和传播速度(取中值为 $169 \text{ m} \cdot \mu\text{s}^{-1}$); ε_c 和 ε_t 分别为二者的误差,取 $\varepsilon_c = 0.02c$, $\varepsilon_t = 1/f_t$, f_t 为雷达天线的频率(本文为 100 MHz)。

利用普通克里格法对测厚点数据进行插值,获取冰川范围内空间分辨率为 30 m 的冰川厚度预测结果(\hat{y}_i),结合对应位置的实测冰厚(y_i)计算二者的均方根误差作为利用克里格插值法进行冰川厚度估算结果的误差(ε_{HRMSE})。

$$\varepsilon_{HRMSE} = \sqrt{\frac{(y_1 - \hat{y}_1)^2 + (y_2 - \hat{y}_2)^2 + \dots + (y_i - \hat{y}_i)^2}{i}} \quad (10)$$

2.3.2 主冰川冰储量误差评估

本文考虑通过遥感影像获取冰川面积的误差和平均冰川厚度的估算误差,主冰川冰储量(V)计算公式为

$$V = (\bar{H} \pm \varepsilon_{\bar{H}}) \times (\text{Area} \pm \varepsilon_{\text{Area}}) \quad (11)$$

本文利用 2019 年的 Landsat 影像通过目视解译获取了托来南山 6 号冰川的面积信息,冰川面积的误差($\varepsilon_{\text{Area}}$)可通过冰川边缘的像元数计算^[12]。

$$\varepsilon_{\text{Area}} = N \times \frac{S}{2} \quad (12)$$

式中: N 为冰川边界经过的像元数; S 为 Landsat-8 经全色波段融合后的像元面积(225 m^2)。考虑误差传播,可以将主冰川冰储量误差(ε_V)近似表示为

$$\varepsilon_V = \bar{H} \times \varepsilon_{\text{Area}} + \text{Area} \times \varepsilon_{\bar{H}} \quad (13)$$

3 结果与分析

3.1 冰川纵剖面冰川厚度分布特征

托来南山6号冰川的纵测线基本是沿冰川中线布设的,共计有99个测点。图2为冰川厚度与冰下基岩在纵剖面的变化图,其中在海拔4 670~4 720 m范围(测线距离为210~375 m)的雷达测量资料缺失。纵剖面的冰川厚度总体上呈现出比较均匀的分布状况,整个剖面的平均厚度为 (78.61 ± 1.67) m,厚度最大值出现在海拔4 820 m附近,约为 (93.83 ± 1.74) m,最小的测点深度也有 (45.5 ± 1.54) m。纵剖面冰下地形的起伏状况整体比较平缓,平均坡度仅为 15° ,相较于平整的冰川表面,基岩的纵剖面仅在局部区域有微弱起伏。例如,在海拔4 725 m附近有一个微弱的凸起区域,该区域的冰川厚度小于65 m,海拔4 820 m和4 770 m附近有两个凹陷区域,两处冰川厚度均在85 m以上。一般来说,山地冰川的运动速度和冰通量均会在冰川中值高度附近达到最大^[40],此处往往冰川厚度也最大。第二次中国冰川编目数据显示托来南山6号冰川的中值高度约为海拔4 886 m,略高于本文观测到冰川厚度最大的海拔,其原因可能是该冰川西侧山坡的支冰川在海拔4 850 m左右汇入了主冰川,此处山谷对冰川的侧向约束变小,支冰川的冰开始向主冰川流动,主冰川受力表现为横向挤压和纵向拉伸,使得冰川最厚的地方出现在汇入点下方。

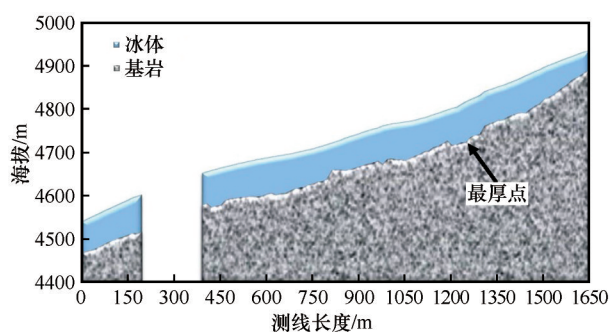


图2 托来南山6号冰川纵剖面

Fig. 2 Longitudinal GPR sounding profile of Tuolainanshan Glacier No. 6

3.2 冰川横剖面形态特征

本文通过在托来南山6号冰川共布设的8条横测线,共计117个有效测点(图1)。结合GPS实测的高程数据获取了不同海拔区间的冰下横剖面(图3):冰舌区的几条横剖面(AA'、BB'、CC'和DD')呈现出明显的U形冰川槽谷形态,且随着海拔的上

升,冰川槽谷底部逐渐宽阔,谷壁逐渐陡峭,横剖面形状向梯形靠近;冰川中部EE'和FF'两个剖面的冰川槽谷尽管仍呈U形谷形态,但谷底部的宽度却变窄,其中在EE'剖面测得该冰川的最大冰厚 $[(100.78 \pm 1.78)$ m],该位置与冰川纵剖面海拔4 770 m处附近的凹陷盆地接近;GG'剖面冰川厚度自西向东呈现出逐渐减小趋势,其原因可能是该剖面西段位于西侧支冰川往主冰川汇入点附近,使得该剖面西段几个测点的冰厚较大;HH'剖面测点主要位于冰川上部比较平缓区域,因此该剖面冰厚整体呈现出比较平缓,仅在偏西段呈现比较微弱的V形。托来南山6号冰川不同海拔的横剖面结果整体表明,该冰川的槽谷地形整体呈现出明显的U形,冰川谷槽的宽度随海拔升高呈现出先变宽再变窄的趋势,冰川谷槽宽度在DD'剖面处最大。冰川槽谷是冰川长期作用山谷的结果,冰川的侵蚀能力决定了槽谷的形态,通常冰川规模越大、侵蚀能力越强,冰川槽谷越宽、越深,谷壁越陡^[41]。按照施雅风^[42]对我国冰川的类型分区,托来南山6号冰川属亚大陆型冰川,亚大陆型冰川的温度相对较低,往往与冰床冻结在一起,对冰床的侵蚀较弱,对冰川两侧山坡的侵蚀较强,此时冰川谷槽易形成谷底较宽,谷壁较陡的U形谷,这与本文得到的剖面结果基本一致。

3.3 冰川厚度分布及冰床地形

基于已有的测厚点,利用普通克里格法在主冰川范围内进行插值,得到主冰川的平均厚度为 (39.61 ± 5.32) m,估算结果最大厚度为 (100.33 ± 6.03) m(与实测最大厚度相近)。从主冰川的冰川厚度等值线图(图4)可以看出:冰厚分布在整体上呈现出自边缘向中间逐渐增厚的特征;在纵测线附近形成了数个封闭的等值线区域,其中冰舌区中下部形成了2个厚度值为80 m的区域,冰川中部形成了2个厚度为90 m的闭合区;结合冰川形态分析,2个90 m的闭合区域均位于冰川西部支冰川与主冰川交汇处的附近。

基于冰厚数据,结合DEM数据获取主冰川的冰床地形图(图5),从等高线的分布可看出,冰床地形整体上为中间低两边高的典型槽谷地形,且以4 800 m等高线为分界线,上部冰床槽谷的宽深比相较于下部冰舌区域冰床的更大,也就是上部槽谷比较浅,谷底宽阔,中下部槽谷较深,谷底相对较窄。另外,在冰川东侧的山坡区域,冰床地形与冰川表

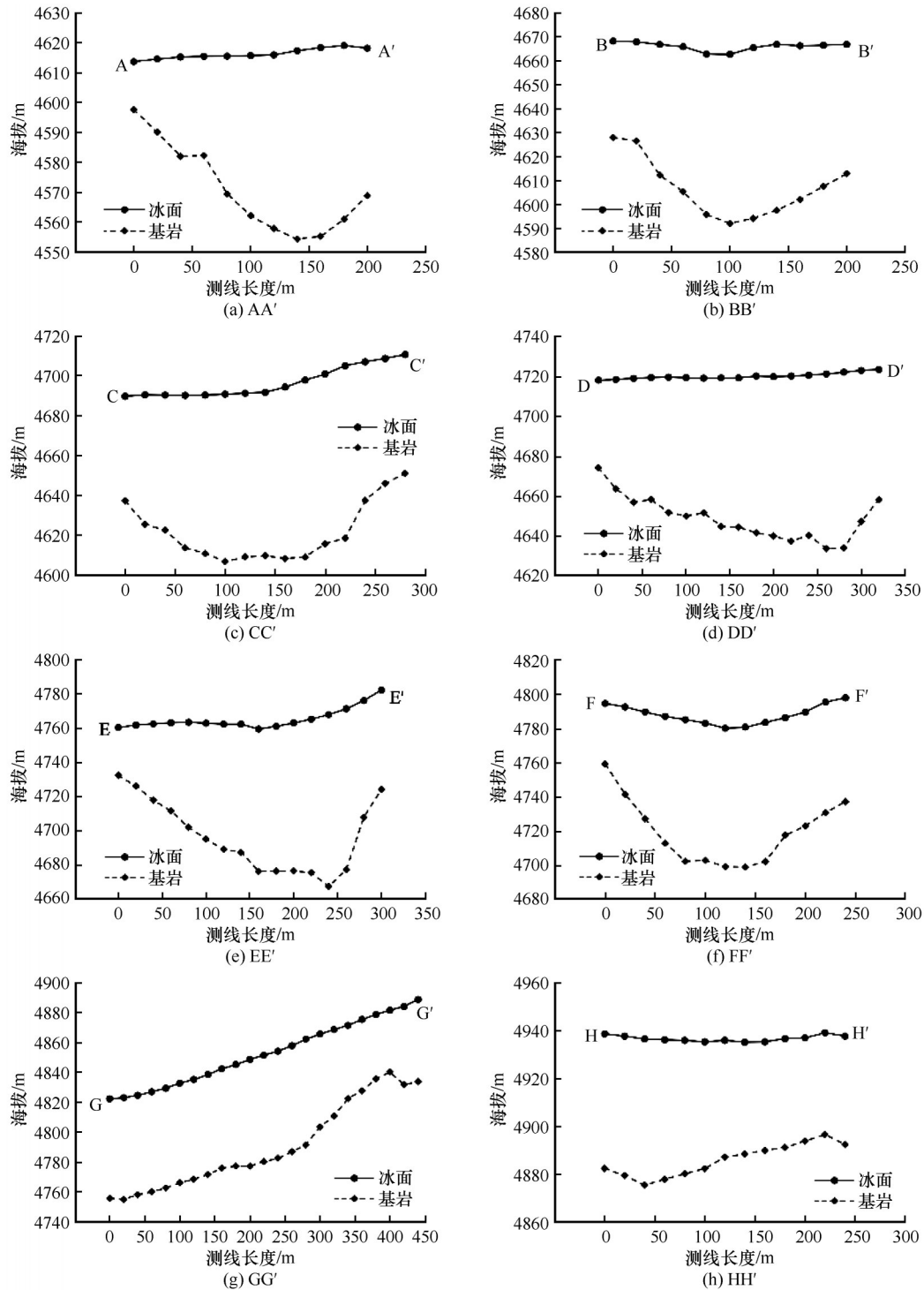


图3 托来南山6号冰川横剖面

Fig. 3 Transverse GPR sounding profiles of Tuolainanshan Glacier No. 6

面地形基本一致,且冰床等高线近似平行,说明此处受到的冰川侵蚀作用小,这与该区域冰川厚度普遍较小相吻合。通过冰面与冰床地形的对比可看出,冰川表面地形与冰床地形的对应关系比较明显,这说明冰床地形相对比较规整,仅在冰川末端形成了闭合等值线,这里随着后期冰川进一步退缩

有形成冰湖的潜力。

3.4 冰储量估算

结合冰川矢量边界,对插值后的雷达测厚区的冰厚栅格数据进行二重积分,获得测厚区冰储量为 $(0.0495 \pm 0.0082) \text{ km}^3$ 。支冰川作用区的高程差为 0.17 km ,用式(3)计算出支冰川的底部剪应力(τ)为

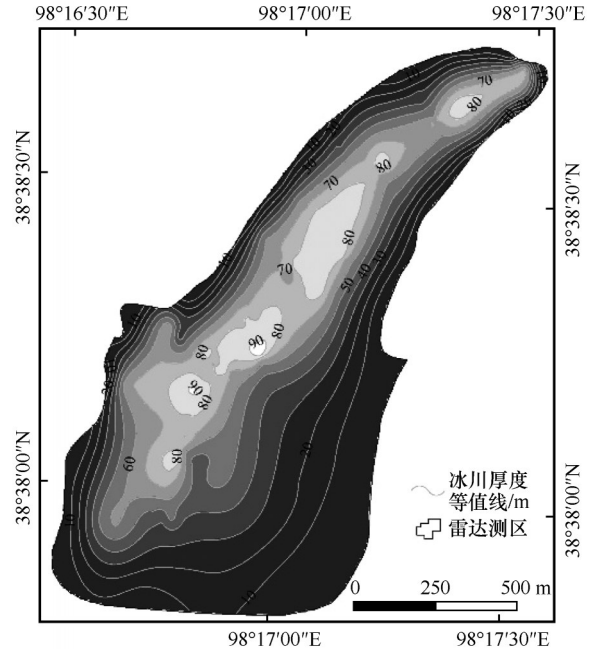


图4 主冰川冰厚等值线
Fig. 4 Ice thickness contours of the trunk glacier

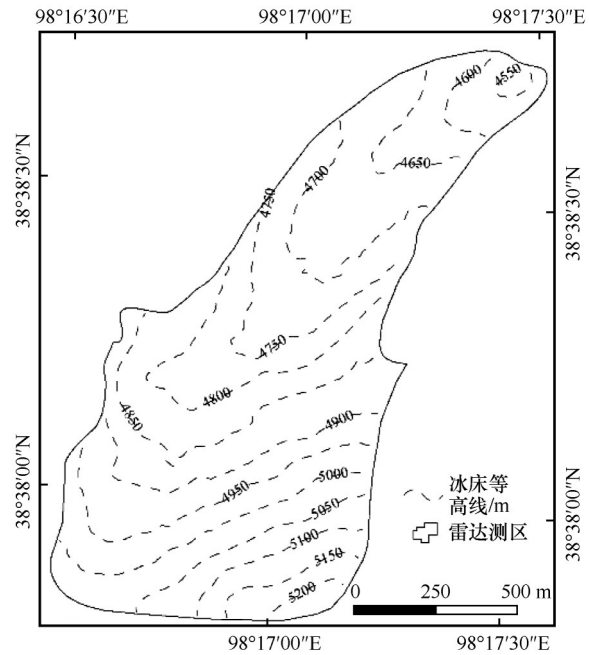


图5 主冰川冰床地形
Fig. 5 Topography of ice bed of the trunk glacier

26.99 kPa,支冰川中线处的平均坡度为16.9°,用式(2)计算出支冰川中线的平均厚度为13.14 m,支冰川的平均厚度仅有10.32 m,支冰川储量的估算结果为(0.0009±0.0001) km³。将雷达测厚区的主冰川冰储量与支冰川的冰储量相加,得到托来南山6号冰川的总冰储量为(0.0504±0.0082) km³。利用第二次中国冰川编目两组面积-体积公式^[12]估算出

托来南山6号冰川主冰川2019年的储量分别0.0496 km³和0.0577 km³,其结果表明其中一个公式的估算结果与基于实测数据估算结果比较接近,另外一组则有16.7%的差异。

4 讨论

冰储量是描述冰川水资源状况最直接的参数,青藏高原及其周边地区冰储量的准确估算对评估该地区冰川融水资源具有重要意义。因此,冰储量估算一直是青藏高原及周边地区冰川变化研究的核心问题,该区域现有的冰储量主要依靠经验公式估算。例如我国第一次冰川编目用于估算冰川平均厚度的经验公式就是依据27条冰川测厚结果建立的^[42],而第二次中国冰川编目中的冰储量估算则分别引用了Radić等^[6]总结的适用于WGI冰川编目中山地冰川的式(4)和Grinsted^[7]在RGI冰川编目数据基础上经统计分析得出的估算全球冰储量的式(5)。此外,Liu等^[13]根据早期天山地区和祁连山地区的冰川测厚数据提出了适合于中国地区的冰川面积-体积公式,为

$$V=0.0365A^{1.375} \tag{14}$$

$$V=0.0433A^{1.290} \tag{15}$$

$$V=0.0395A^{1.350} \tag{16}$$

式中:V为冰川冰储量(km³);A为冰川面积(km²)。然而,Bahr等^[5]指出面积-体积公式通常适用于大区域的冰储量估算,当被应用于单条冰川计算时其准确度仅能与真实结果保持在同一数量级,且不同类型冰川的面积-体积公式参数也存在一定差异。Grinsted^[7]在进行全球冰储量估算时分别对冰川和冰盖,以及不同规模的冰川面积-体积公式进行了构建。为了尝试提升冰川面积-体积经验公式在青藏高原地区的适用性,收集了青藏高原及周边地区12条已发表的测厚冰川资料(表1),尝试分析冰川类型对利用面积-体积公式进行冰储量估算的影响。

利用已有的面积-体积公式对12条已测厚冰川进行冰储量估算,与实测数据对比结果表明尽管二者处于同一数量级,但单条冰川的误差存在较大差异。例如在八一冰川、七一冰川、乌鲁木齐河源1号冰川和羌塘1号冰川等冰川的估算误差仅在10%左右,而在抗物热冰川和四工河4号冰川的估算误差约为1倍。冰川类型通常是由冰川规模、运动及其所处地形共同决定。以下尝试依据冰川类型来进行面积和体积关系的分析。表1的整体结果显示,

表1 青藏高原及周边地区部分冰川雷达实测冰储量与经验公式估算值对比

Table 1 Ice volumes, sounded by GPR, of some glaciers on the Tibetan Plateau and surrounding areas, compared with the ice volumes estimated from volume-area scaling of glaciers

冰川名称	面积/km ²	类型	实测冰储量/km ³	式(14)估算值/km ³ (误差/%)	式(15)估算值/km ³ (误差/%)	式(16)估算值/km ³ (误差/%)	分类型估算值/km ³ (误差/%)
托来南山6号主冰川	1.25	冰斗-山谷型	0.0495	0.0496(0.2)	0.0577(16.7)	0.0534(7.9)	0.0435(-12.1)
古仁河口冰川 ^[23]	1.40	冰斗-山谷型	0.0447	0.0580(29.7)	0.0668(49.5)	0.0622(39.2)	0.0522(16.8)
羌塘1号冰川 ^[25]	2.42	冰斗-山谷型	0.1240	0.1227(-1.1)	0.1350(8.9)	0.1299(4.7)	0.1254(1.1)
七一冰川	2.78	冰斗-山谷型	0.1660	0.1489(-10.3)	0.1619(-2.5)	0.1571(-5.4)	0.1572(-5.3)
木斯岛冰川(冰舌区) ^[31]	3.22	冰斗-山谷型	0.1950	0.1825(-6.4)	0.1960(0.5)	0.1918(-1.7)	0.1994(2.3)
乌源1号冰川 ^[19]	1.68	冰斗型	0.0812	0.0743(-8.4)	0.0844(4.0)	0.0794(-2.2)	0.0551(-32.1)
扎当冰川 ^[26]	1.73	冰斗型	0.0660	0.0776(17.5)	0.0878(33.1)	0.0828(25.4)	0.0572(-13.4)
煤矿冰川 ^[27]	0.95	冰斗型	0.0240	0.0340(41.7)	0.0405(68.9)	0.0369(53.6)	0.028(16.8)
宁缠河3号冰川 ^[29]	1.20	冰斗型	0.0330	0.0471(42.6)	0.0550(66.5)	0.0507(53.6)	0.0371(12.5)
四工河4号冰川 ^[21]	2.75	冰斗型	0.0760	0.1467(93.0)	0.1597(110.1)	0.1548(103.6)	0.0991(30.4)
八一冰川 ^[24]	2.81	冰帽型	0.1530	0.1511(-1.2)	0.1642(7.3)	0.1593(4.1)	—
抗物热冰川 ^[32]	1.96	悬冰川	0.0520	0.0921(77.1)	0.1032(98.4)	0.0980(88.4)	—

已有的3组经验公式对冰帽型(平顶)冰川(八一冰川)的估算误差均较小,其后依次为冰斗-山谷型冰川和冰斗冰川,其中悬冰川(抗物热冰川)的估算误差相对较大。据此,本文分别对冰斗型和冰斗-山谷型两类实测数据相对较多的冰川的面积-体积关系进行了拟合(悬冰川和冰帽型冰川各自仅有1条,未拟合)。结果如图6所示,两种形态冰川的面积-体积拟合曲线有明显的差异,即冰斗型冰川面积与体积之间的关联程度要明显要小于冰斗-山谷型冰川,且5条冰斗-山谷型冰川的拟合关系明显要优于冰斗型冰川。利用两种形态的拟合结果,分别对表1中的冰斗型冰川和冰斗-山谷型冰川的冰储量进行了估算。结果表明利用分形态拟合公式估算的冰储量误差整体比之前的几种方法都有明显的降低(表1),这说明分类型进行冰川面积-体积

公式在提升单条冰川冰储量估算精度领域存在一定潜力。但由于样本量太少,使得验证的结果缺乏足够的说服力,后续还应该通过增加测厚冰川的数量来提升分类型面积-体积公式的适用性。

5 结论

冰川测厚是目前获取精确冰川储量的关键,本文利用探地雷达对托来南山6号主冰川进行了系统的冰厚测量,在此基础上结合普通克里格法和半球物理公式,揭示了该冰川的最大厚度为(100.78±1.78) m,主冰川的平均厚度为(39.61±5.32) m,支冰川的平均厚度为10.32 m,进而估算出整条冰川的冰储量为(0.0504±0.0082) km³。主冰川绘的厚度等值线图显示该冰川冰厚呈自边缘向中间逐渐增厚的分布特征,冰川中部有两个闭合区域的冰厚超过了90 m。主冰川冰床纵剖面地形整体比较平缓,仅在海拔4 820 m和4 770 m附近有两个凹陷区域,横剖面形态呈典型的U形,且随着海拔升高冰川槽谷的宽度呈现出先变宽再变窄的趋势,冰床地形整体呈中间低两边高的典型槽谷地形,冰川上部的槽谷比较浅,谷底宽阔,中下部槽谷较深,谷底相对较窄。面积-体积公式是目前青藏高原及周边地区大范围冰储量估算的有效手段之一,本文初步探索结果显示出分类型进行拟合具有降低单条冰川储量结果误差的潜力。

参考文献(References):

[1] Yao Tandong, Wu Guangjian, Xu Baiqing, et al. Asian water

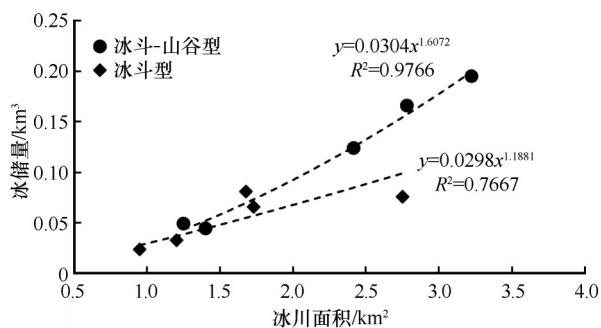


图6 基于实测数据的冰斗型和冰斗-山谷型冰川面积-体积拟合关系

Fig. 6 Fitting relationship between area and volume for the cirque glaciers and the cirque-valley glaciers based on surveyed data

- tower change and its impacts[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1203-1209. [姚檀栋, 邬光剑, 徐柏青, 等. “亚洲水塔”变化与影响[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1203-1209.]
- [2] Pritchard H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress [J]. *Nature*, 2019, 569 (7758): 649-654.
- [3] Wang Ninglian, Yao Tandong, Xu Baiqing, et al. Spatiotemporal pattern, trend, and influence of glacier change in Tibetan Plateau and surroundings under global warming[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2019, 34(11): 1220-1232. [王宁练, 姚檀栋, 徐柏青, 等. 全球变暖背景下青藏高原及周边地区冰川变化的时空格局与趋势及影响[J]. *中国科学院院刊*, 2019, 34(11): 1220-1232.]
- [4] Huss M, Hock R. Global-scale hydrological response to future glacier mass loss [J]. *Nature Climate Change*, 2018, 2(8): 135-140.
- [5] Bahr D B, Pfeffer W T, Kaser G. A review of volume-area scaling of glaciers[J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(1): 95-140.
- [6] Radić V, Hock R. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2010, 115 (F1): 2009JF001373.
- [7] Grinsted A. An estimate of global glacier volume [J]. *The Cryosphere*, 2013, 7(1): 141-151.
- [8] 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.
- [9] Millan R, Mouginot J, Rabatel A, et al. Ice velocity and thickness of the world's glaciers[J]. *Nature Geoscience*, 2022, 15: 124-129.
- [10] 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: 168-173.
- [11] Huss M, Farinotti D. Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, 117: F04010.
- [12] Liu Shiyin, Guo Wanqin, Xu Junli. The second glacial catalogue data set of China (v1.0)[DB]. Lanzhou: National Cryosphere Desert Data Center, 2019. [刘时银, 郭万钦, 许君利. 中国第二次冰川编目数据集(v1.0)[DB]. 兰州: 国家冰川冻土沙漠科学数据中心, 2019.]
- [13] Liu Shiyin, Sun Wenxin, Shen Yongping, et al. Glacier changes since the Little Ice Age maximum in the western Qilian Shan, northwest China, and consequences of glacier runoff for water supply [J]. *Journal of Glaciology*, 2003, 49 (164): 117-124.
- [14] Farinotti D, Brinkerhoff D J, Clarke G K C, et al. How accurate are estimates of glacier ice thickness? Results from ITMIX, the Ice Thickness Models Intercomparison eXperiment [J]. *The Cryosphere*, 2017, 11(2): 949-970.
- [15] Welty E, Zemp M, Navarro F, et al. Worldwide version-controlled database of glacier thickness observations[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12: 3039-3055.
- [16] Bailey J T, Evans S, Robin G. Radio echo sounding of polar ice sheets[J]. *Nature*, 1964, 204(4957): 420-421.
- [17] Bogorodsky V V, Bentley C R, Gudmandsen P E. Radioglaciology[M]. Dordrecht, the Netherlands: Reidel, 1985.
- [18] Radar Apparatus Group. Type B-1 experimental radar installation for measuring the thickness of glacier[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1982, 4(2): 93-95. [雷达制作组. B-1型冰川测厚雷达试验装置[J]. *冰川冻土*, 1982, 4(2): 93-95.]
- [19] 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.]
- [20] Zhu Guocai, Jing Xiaoping, Han Jiankang, et al. Radar sounding and study of the bedrock topography on Collins Ice Cap[J]. *Antarctic Research*, 1994, 6(2): 40-45. [朱国才, 井晓平, 韩建康, 等. 柯林斯冰帽雷达测厚和冰下地形研究[J]. *南极研究*, 1994, 6(2): 40-45.]
- [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] Sun Bo, He Maobing, Zhang Peng, et al. Determination of ice thickness, subice topography and ice volume at Glacier No. 1 in the Tien Shan, China, by ground penetrating radar[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2003, 15(1): 35-44. [孙波, 何茂兵, 张鹏, 等. 天山1号冰川厚度和冰下地形探测与冰储量分析[J]. *极地研究*, 2003, 15(1): 35-44.]
- [23] 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.]
- [24] 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.]
- [25] 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.]
- [26] 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. 念青唐古拉山扎当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.]
- [27] 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.]
- [28] 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.]
- [29] 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. 祁连山东段冷龙岭地区宁缠河3号冰川变化研究[J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1031-1036.]
- [30] Wang Yuzhe, Ren Jiawen, Qin Xiang, et al. Ice depth and glacier-bed characteristics of the Laohugou Glacier No. 12, Qilian Mountains, revealed by ground-penetrating radar[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 28-35. [王玉哲, 任贾文, 秦翔, 等. 祁连山老虎沟12号冰川雷达测厚和冰下地形特征研究[J]. 冰川冻土, 2016, 38(1): 28-35.]
- [31] Huai Baojuan, Li Zhongqin, Wang Feiteng, et al. Ice thickness distribution and ice volume estimation of Muz Taw Glacier in Sawir Mountains[J]. *Earth Science*, 2016, 41(5): 757-764. [怀保娟, 李忠勤, 王飞腾, 等. 萨吾尔山木斯岛冰川厚度特征及冰储量估算[J]. 地球科学, 2016, 41(5): 757-764.]
- [32] 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(20): 2088-2096. [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.]
- [33] Zhang Tong, Xiao Cunde, Qin Xiang, et al. Ice thickness observation and landform study of east Rongbuk Glacier, Mt. Qomolangma[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(5): 1059-1066. [张通, 效存德, 秦翔, 等. 珠穆朗玛峰东绒布冰川厚度测量与地形特征分析[J]. 冰川冻土, 2012, 34(5): 1059-1066.]
- [34] Wang Puyu, Li Zhongqin, Wu Lihua, et al. Ice thickness and volume based on GPR, GPS and GIS: example from the Heigou Glacier No. 8, Bogda-Peak region, Tianshan, China[J]. *Earth Science: Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(Suppl 1): 179-187. [王璞玉, 李忠勤, 吴利华, 等. GPR, GPS 与 GIS 支持下的冰川厚度及冰储量分析: 以天山博格达峰黑沟8号冰川为例[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2012, 37(增刊1): 179-187.]
- [35] Langhammer L, Rabenstein L, Schmid L, et al. Glacier bed surveying with helicopter-borne dual-polarization ground-penetrating radar[J]. *Journal of Glaciology*, 2019, 65(249): 123-135.
- [36] Bohleber P, Sold L, Hardy D R, et al. Ground-penetrating radar reveals ice thickness and undisturbed englacial layers at Kilimanjaro's Northern Ice Field[J]. *The Cryosphere*, 2017, 11: 469-482.
- [37] Haeberli W, Hoelzle M. Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps[J]. *Annals of Glaciology*, 1995, 21: 206-212.
- [38] Linsbauer A, Paul F, Haeberli W. Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with GlabTop: application of a fast and robust approach[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2012, 117(F3): 2011JF002313.
- [39] 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, 63(236): 1008-1020.
- [40] Yang Ruitang, Hock R, Kang Shichag, et al. Glacier surface speed variations on the Kenai Peninsula, Alaska, 2014—2019[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2022, 127(3): e2022JF006599.
- [41] Li Yingkui, Liu Gengnian. Discussion on the cross section features of glacial valley[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(2): 171-177. [李英奎, 刘耕年. 冰川槽谷横剖面形态特征探析[J]. 冰川冻土, 2000, 22(2): 171-177.]
- [42] Shi Yafeng. Concise Chinese glacier inventory[M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press, 2005. [施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2005.]

Analysis of ice thickness sounded by ground penetrating radar and ice volume of Tuolainanshan Glacier No. 6 in the Qilian Mountains

CHE Zheng^{1,2}, WANG Ninglian^{1,2,3}, LIANG Qian^{1,2}, CHEN An'an^{1,2}

(1. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China; 2. Institute of Earth Surface System and Hazards, College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China; 3. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The measurement of ice thickness is the key to the ice volume estimation. In 2019, a ground penetrating radar system (with a 100 MHz antenna) was used to sound ice thickness along one longitudinal transect and eight transverse transects on the trunk glacier of Tuolainanshan Glacier No. 6 in the Qilian Mountains. The map of ice thickness distribution of trunk glacier was acquired by using ordinary Kriging method, the spatial ice thickness gradually thickening from margin to inner, and the average ice thickness was found to be about (39.61 ± 5.32) m. The total ice volume $[(0.0504 \pm 0.0082) \text{ km}^3]$ of Tuolainanshan Glacier No. 6 was estimated by combine with shallow ice approximation, and the maximum thickness $[(100.78 \pm 1.78) \text{ m}]$ was sounded in the depressed basin located near the 4 770 m a. s. l. of longitudinal transect. The transverse transects of ice bed was typical U-shape, and the width of glacier valley decreases with rising elevation. The existing volume-area scaling of glaciers was not suitable for estimation of the ice volume for single glacier, but the scaling fitting by glacier shape had the potential to reduce the error of the estimated results.

Key words: ground penetrating radar (GPR); ice thickness; ice volume estimation; Tuolainanshan Glacier No. 6; Qilian Mountains

(责任编辑: 刘时银)