

doi:10.3799/dqkx.2016.064

萨吾尔山木斯岛冰川厚度特征及冰储量估算

怀保娟¹, 李忠勤¹, 王飞腾¹, 王璞玉¹, 李开明²

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天山冰川观测试验站, 甘肃兰州 730000

2. 兰州城市学院城市经济与旅游文化学院, 甘肃兰州 730070

摘要: 冰下地形与冰川体积的估算对冰川水资源研究具有重要意义. 以萨吾尔山木斯岛冰川为研究对象, 利用 Landsat 影像数据、探地雷达 (ground penetrating radar, 简称 GPR) 冰川厚度数据以及差分 GPS 数据, 分析模拟了萨吾尔山木斯岛冰川横纵剖面的厚度分布特征, 采用多种插值方法比较分析, 得到木斯岛冰川冰舌区的厚度分布图, 初步估算了该冰川的冰储量. 结合数字高程模型数据及冰川厚度分布图, 绘制了木斯岛冰川冰舌区冰床地形图. 研究表明, 两个横剖面的冰川槽谷形态存在较大的差异. 横剖面 B1-B2 有典型的“U”型地形发育, 冰川厚度可达 116.4 m; C1-C2 横剖面底部地形比较平缓, 冰川厚度分布较均匀, 平均在 70~90 m. 纵测线 A1-A2 冰下地形成阶梯状分布, 纵剖面冰体平均厚度约为 80.89 m, 最大冰体厚度为 122.67 m. 木斯岛冰川的冰床地形图与该冰川的冰厚度等值线图形成明显对比. 在海拔 3 240 m 和 3 280 m 处存在明显的冰斗地形地貌. 初步估算木斯岛冰川冰舌区的平均厚度和冰储量分别为 60.5 m 和 0.195 km³. 与传统计算冰储量的方法相比, 利用 GPR 测量得到的冰川厚度数据来插值计算冰储量的方法, 具有更高的准确性.

关键词: 冰川厚度; 冰储量; 冰下地形; 探地雷达系统; 木斯岛冰川; 萨吾尔山.

中图分类号: P96

文章编号: 1000-2383(2016)05-0757-08

收稿日期: 2016-01-12

Ice Thickness Distribution and Ice Volume Estimation of Muz Taw Glacier in Sawir Mountains

Huai Baojuan¹, Li Zhongqin¹, Wang Feiteng¹, Wang Puyu¹, Li Kaiming²

1. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Tianshan Glaciological Station, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2. School of Urban Economics and Tourism Culture, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Ice bedrock topographic map and ice volume estimation play very important parts in glacier melt water research. Muz Taw glacier in Sawir Mountains was explored in this study by means of Landsat remote sensing image, digital elevation model data, ground penetrating radar (GPR) data and GPS positioning data. Its terminus thickness distribution was obtained by analysis and simulation of thickness distribution of its transverse and vertical sections, combined with a variety of interpolation methods, on basis of which the ice volume was estimated. Results show obvious differences between the two transverse profiles. Cross-section B1-B2 has typical “U”-type terrain, with maximum glacier thickness of up to 116.4 m; cross-section C1-C2 is relatively flat, and glacier thickness distribution is more uniform, with an average of about 70—90 m. In longitudinal profile, A1-A2 forms a ladder-like distribution, with an obvious depression in the middle of the ice bed topography. The average ice thickness in longitudinal profile is about 80.89 m, with maximum ice thickness of 122.67 m. The ice bed topographic map is in sharp contrast with the thickness contour map of the glacier. In addition, there is obvious cirque terrain at an altitude of 3 240 m and 3 280 m. The preliminary estimation of the average thickness and total terminus ice volume are approximately 60.5 m and 0.195 km³, respectively. It is concluded that GPR method has higher accuracy compared with the traditional ice vol-

基金项目: 国家重大科学计划研究项目 (No.2013CBA01801); 国家自然科学基金项目 (Nos.41471058, 41301069); 国家自然科学基金委基础科学人才培养基金冰川学冻土学特殊学科点 (No.J1210003/J0109); 冰冻圈科学国家重点实验室创新群体科学基金 (No.Y211661001).

作者简介: 怀保娟 (1988—), 女, 博士研究生, 从事冰川变化与地理信息技术研究, 近年来重点研究利用探地雷达数据估算冰储量的问题.

E-mail: huabaojuan@126.com

引用格式: 怀保娟, 李忠勤, 王飞腾, 等, 2016. 萨吾尔山木斯岛冰川厚度特征及冰储量估算. 地球科学, 41(5): 757—764.

ume estimation method, but it has restrictions because of measurement difficulties.

Key words: ice thickness; ice volume; ice bedrock topographic map; ground penetrating radar systems; Muz Taw glacier; Sawir Mountains.

冰川厚度的探测是研究冰川厚度、冰储量、物质平衡、冰川动力学和冰川数值模拟的基础。由于雷达电磁波在冰川介质中传播时衰减很小,具有较强的穿透能力,近年来,探地雷达(ground penetrating radar, 简称 GPR)越来越多地应用于冰川学研究,包括冰层厚度探测(何茂兵等,2004;王宁练和蒲建辰,2009;吴利华等,2011)、冰下地形探测(孙波等,2003;张通等,2012;朱美林等,2014)、冰川水文特征探测(武震等,2009;武震,2011)等。国外自 Evans(1963)应用雷达技术探测南极和格陵兰冰盖厚度以来,探地雷达应用于冰川学的研究已有将近 50 a 的历史。我国于 20 世纪 70 年代末开始进行探地雷达的研制与应用(中国科学院兰州冰川冻土研究所,1988),在 90 年代末引进国外探地雷达设备,使我国探地雷达在冰川学上的应用有了很大的进展(马凌龙等,2008)。20 世纪 80 年代我国应用自行研制的 B-1 型冰川测厚雷达,分别在天山乌鲁木齐河源 1 号冰川(张祥松等,1985)、南极半岛的纳尔逊冰帽和林斯冰帽(朱国才等,1994)以及天山庙尔沟平顶冰川(李忠勤等,2007)成功地进行了冰川厚度测量。近年来,随着探地雷达冰川学研究成果的不断丰富,学者们陆续开始使用新型的雷达设备进行冰川厚度测量(马凌龙等,2010;王璞玉等,

2012),探地雷达探测技术在冰川与全球变化研究领域中将发挥重要的作用。

乌勒昆乌鲁斯图河,是一条冰川积雪补给河流,近年来,由于受气候变化及人为活动的影响,冰川消融加剧,河流径流波动增大,洪水灾害频发,流量呈减少趋势。木斯岛冰川是中哈界河乌勒昆乌鲁斯图河源上的一条冰川。为了研究木斯岛冰川的基本物理性质,2013 年笔者对木斯岛冰川进行了探地雷达测厚工作,同时还用全球定位系统(global positioning system,简称 GPS)进行了精确定位。本文依据该冰川 GPR 测厚的结果,分析冰下地形,绘制了冰川厚度等值线图,并对该冰川的体积进行了初步估算。以期对解决该流域的一系列的生态环境危机、冰川消融加剧等问题有所帮助。

1 木斯岛冰川概况

木斯岛冰川(85°33′40″E,47°3′44″N;图 1)是萨吾尔山北坡的一条冰川,分布在乌勒昆乌鲁斯图河源,于吉木乃县城正南 45 km 处。萨吾尔山北起额尔齐斯河谷地,南至和布克赛尔盆地边沿,西界中苏边境,向东逐渐没入准噶尔平原,东西横跨中哈两国,

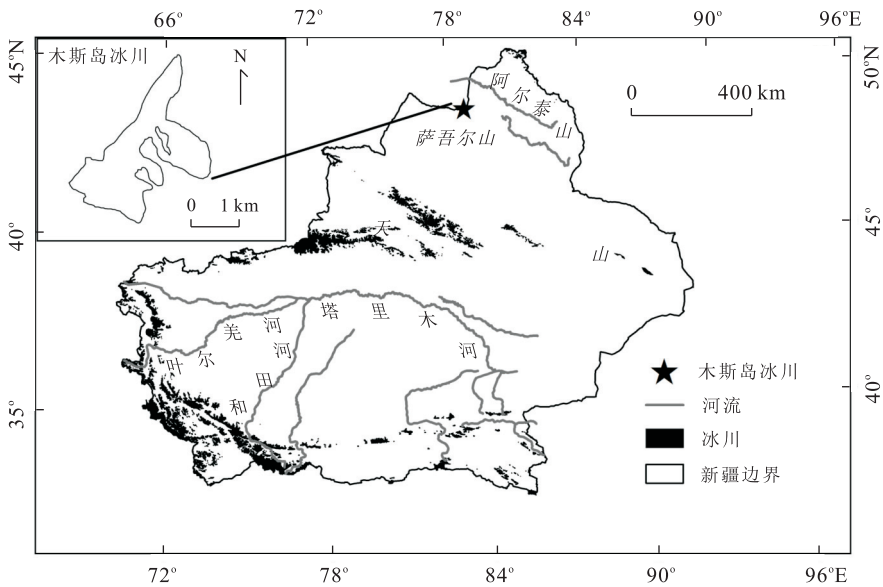


图 1 木斯岛冰川位置

Fig.1 Location of Muz Taw glacier in Sawir Mountains

在吉木乃境内延绵 100 多千米,是北冰洋与新疆内陆水系显著的分水岭(王宗太,1988).根据《中国冰川目录》—阿尔泰山区(Ⅱ)(刘潮海等,1982;施雅风,2005),木斯岛冰川编号 5A259C0001,冰川面积为 4.27 km²,长度为 3.7 km,平均厚度为 66 m,末端海拔为3 090 m,冰储量为 0.28 km³.

2 数据与方法

木斯岛冰川边界通过 Landsat 影像数据提取,影像接收日期为 2013 年 9 月 11 日,研究区内无云、少雪,轨道号 145/027,USGS 经过正射校正处理后的,来自于 USGS (U.S.Geological Survey,http://www.usgs.gov)的数据共享平台.数字高程模型来源于 SRTM(shuttle radar topography mission),由美国国家航空航天局(NASA)和国防部国家测绘局(NIMA)联合测量.本研究使用修订版 V4.1 版本,分辨率为 90 m,该版本由 CIAT(国际热带农业中心)利用新的插值算法得到的 SRTM 地形数据,该数据标称绝对高程精度是±16 m,绝对平面精度是±20 m.在 ENVI 软件支持下,采用统一的 UTM 投影和 WGS84 椭球体建立坐标系统.影像处理过程中对校正后的影像进行了锐化增强处理,这样可以更有效地区分雪斑和有积雪覆盖的冰川.

为了获得木斯岛冰川的厚度数据,2013 年,采用具有优良穿透能力与探深能力的加拿大 SSI 公司的 pulse EKKOPRO 100A 增强型探地雷达进行测厚工作,测量路线如图 2 所示.选用中心频率为 100 MHz 的天线,测量方式采取剖面法,即探地雷达的发射天线和接收天线以固定的距离(即天线距)沿测线同步移动的测量方式(Nolan *et al.*, 1995; Plewes and Hubbard, 2001),测量点位于两个天线的中间位置.由于冰川上部地势陡峭,所以上部未开展测厚工作.此次测量共布设 3 条测线,2 条横测线和 1 条纵测线,其中纵测线 A1-A2 布设靠近冰川主流线,方向为由低海拔向高海拔测量;横测线 B1-B2、C1-C2 分别布设在海拔 3 309 m 和 3 404 m 处,

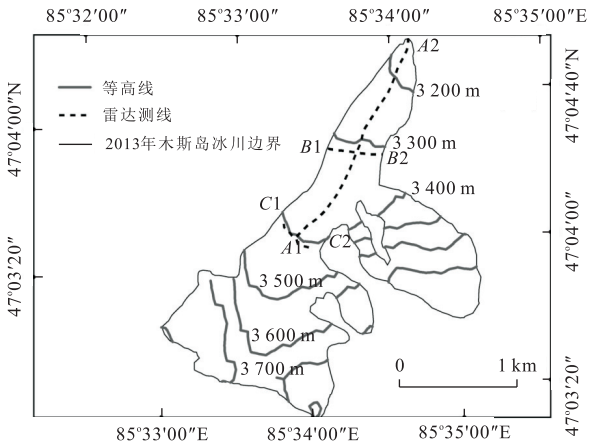


图 2 2013 年木斯岛冰川探地雷达测厚测线分布
Fig.2 GPR measuring lines of Muz Taw glacier in 2013

方向由东向西.在用探地雷达测量冰川厚度时,同步利用差分 GPS 对探地雷达测量点进行精确定位.差分 GPS 为北京合众思壮 E650 型,平面测量相对精度为(±1+0.1*D*)cm,高程测量相对精度为(±2+0.1*D*)cm,*D* 为距离.

获取探地雷达冰川厚度数据的基本原理是向地下发射脉冲形式的高频电磁波,当电磁波在地下介质传播过程中遇到存在电性差异的目标体时,就反射回地面,并由天线接收,再通过处理得到二维雷达图像.由于冰川与岩石之间存在介电性质的巨大差异,因此在雷达图像中可以通过识别冰—岩界面从而获取测点位置的厚度值.利用测量剖面的探地雷达图像资料,获得测量点的冰厚度数据.雷达测厚图像通常以脉冲反射波的波形记录,波形的正负峰分别以黑、白色表示,或者以灰阶、彩色表示,这样,同相轴或等灰度、等色线即可形象地表征出冰—岩的界面及其起伏变化(蒲健辰等,2006).

基于冰厚度探地雷达数据,利用插值法将实测的木斯岛冰舌区厚度资料进行网格化处理,再利用网格化的冰厚度数据,绘制出木斯岛冰川冰舌的冰厚度等值线图,估算该冰川的冰储量与平均厚度(王宁练和蒲健辰,2009;吴利华等,2011).表 1 为运用不同的插值方法对 GPR 数据进行拟和时各检验参

表 1 不同冰川厚度插值方法检验参数

Table 1 Test parameters of different ice thickness interpolation methods

方法	标准平均值	均方根预测误差	平均预测标准差	均方根预测误差	标准均方差预测误差
IDW 插值	0.131 6	11.07	—	—	—
Local polynomial 插值	—1.057	9.341	—	—	—
Kriging 插值(指数模型)	0.027 11	8.159	11.16	0.003 674	0.698 3

数的比较.经对比,本文选择了标准平均值(mean standardized)最接近于 0、且均方根预测误差(root-mean-square)最小的 Kriging 插值,并采用指数模型.

3 结果分析

3.1 冰川横纵剖面厚度特征

分析木斯岛冰川的两条横测线 B1-B2、C1-C2,位于冰川横向距离最大区域,两个横剖面 的高程差为 95 m.图 3 左面的纵坐标为雷达电磁波在冰川中的双程走时,右边的纵坐标为冰川的厚度,横坐标为实地测量时的位置和测线长度,图 3a 和 3b 分别显示了 B1-B2、C1-C2 这两条横测线的测量结果.雷达探测数据所勾勒出的冰川下伏槽谷横剖面轮廓清晰,可客观地展示出冰川槽谷形态.笔者分析木斯岛冰川测量所得的雷达剖面图,结合雷达探测原理和冰川介质的性质,发现雷达波在冰川中传播时在冰川不同层位的反射情况有很大差异,这反映出了冰川主体内部性质明显不同,如 B1-B2 雷达剖面图中,测线 40~80 m 区域处反射差异的产生可能与冰川水汽含量较高有关;但是雷达图像具有直观性和准确性,是研究冰川冰下地形的一种有效的方法.

从经过地形校正的雷达横剖面图中可以清楚地看到,两个横剖面反映的冰川槽谷形态存在较大的不同.海拔 3 309 m 处的横剖面 B1-B2(图 3a)有典型的“U”型地形发育,说明该处冰川运动速度较快,对底床和谷壁的剥蚀、磨蚀作用强烈,从而把谷地改造成这种抛物线形状.该断面冰川最厚区域达 116.4 m,冰川厚度变化区间较大.相对于 B1-B2 剖面,海拔 3 404 m 处的横剖面 C1-C2(图 3b)底部地形比较平

缓,冰川厚度分布较均匀,平均厚度为 70~90 m.探究海拔 3 404 m 处剖面发现,其相对于 3 309 m 处剖面冰厚度较薄的原因,可能与冰面坡度、下伏地形、基岩形态等因子有关,还需要进一步的研究.

纵测线 A1-A2 段的雷达测厚结果,如图 4 所示.该测线靠近冰川主流线,A1-A2 段冰下地形成阶梯状分布,冰川自末端向上,冰厚由薄变厚再变薄变厚,其中在中间部位冰床地形有 3 个较明显的凹陷状.冰体平均厚度约为 80.89 m,最大冰体厚度为 122.67 m.

3.2 冰川厚度分布与冰储量计算

为了准确地计算冰川的体积,首先要确定冰川的边界,结合 Landsat 遥感影像,通过对比进一步分析木斯岛冰川的动态变化.结果表明,1977 年木斯岛冰川面积为 3.97 km²,1998 年减小为 3.47 km²,到 2006 年为 3.19 km²,2013 年面积已减少为 3.15 km²,1977—2013 年的 37 a 时间木斯岛冰川面积退缩约 0.82 km²,退缩率为 20.65%.由影像上观察小冰期木斯岛冰川末端有较长冰舌发育,将 2013、2006、1998 年和 1977 年四期冰川边界叠加分析发现,1977—2013 年的 37 a 时间,木斯岛冰川末端退缩约 269.19 m,每年平均退缩约 7.28 m.1977—1998 年共退缩约 62.2 m,每年平均退缩约 2.83 m;1998—2006 年共退缩约 74.07 m,每年平均退缩约 8.23 m;2006—2013 年共退缩约 132.92 m,每年平均退缩约 16.62 m.显然由木斯岛冰川面积和末端的变化发现该冰川末端呈现加速退缩的趋势,近年来退缩趋势严重.

关于冰储量的计算,之前的研究主要采用经验公式法,就此问题,国内外已经开展过大量工作

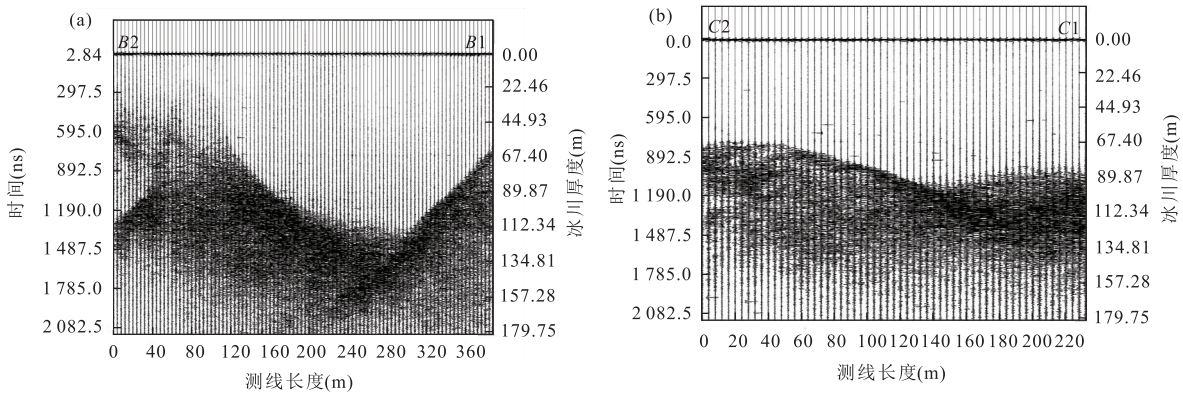


图 3 木斯岛冰川横剖面雷达测厚情况

Fig.3 GPR measuring lines of Muz Taw glacier in 2013
a.B1-B2 测线;b.C1-C2 测线

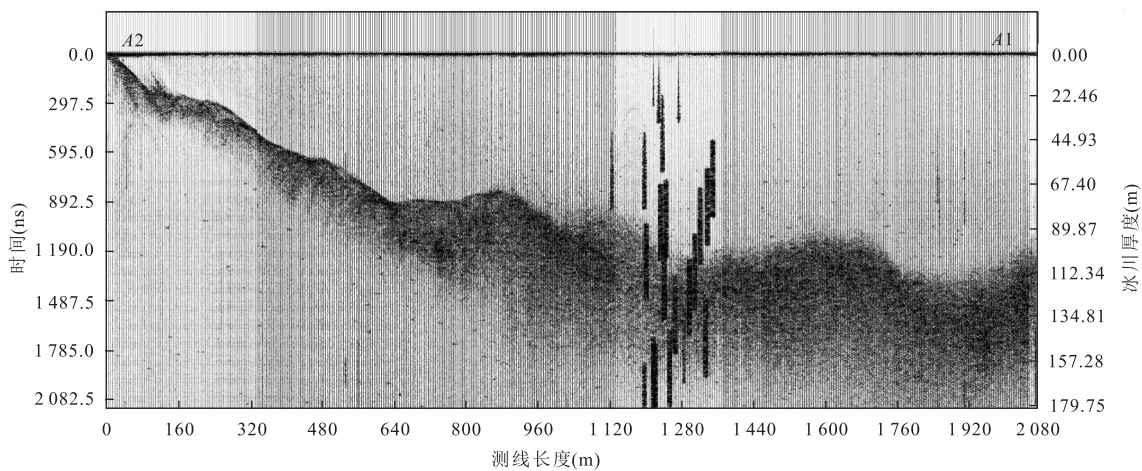


图 4 纵测线 A1-A2 雷达测厚情况

Fig.4 A1-A2 GPR measuring line of Muz Taw glacier in 2013

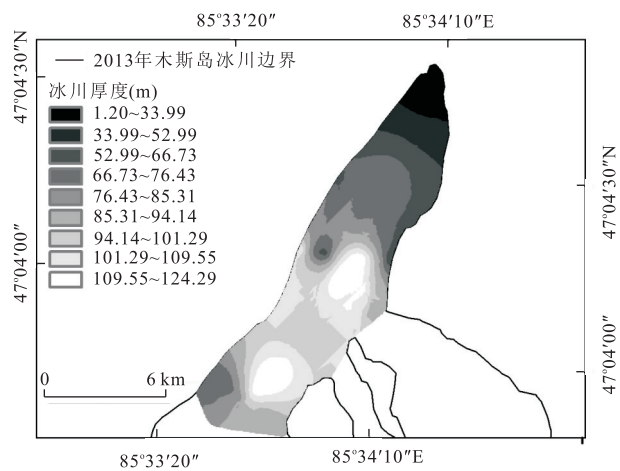


图 5 木斯岛冰川 Kriging 插值厚度分布

Fig.5 Kriging interpolation of glacier thickness distribution of Muz Taw glacier

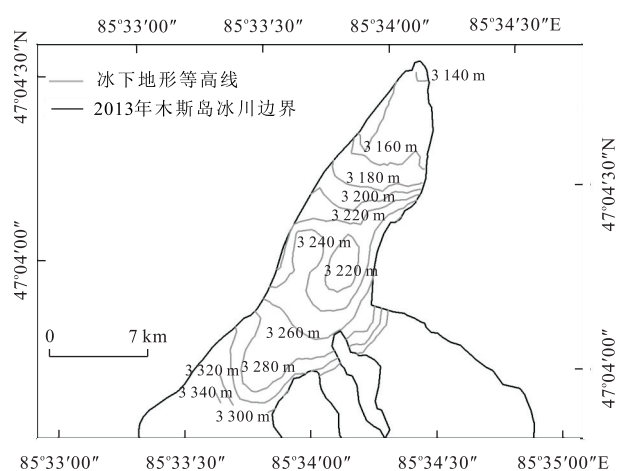


图 7 木斯岛冰川冰下地形

Fig.7 Bedrock topographic contours of Muz Taw glacier

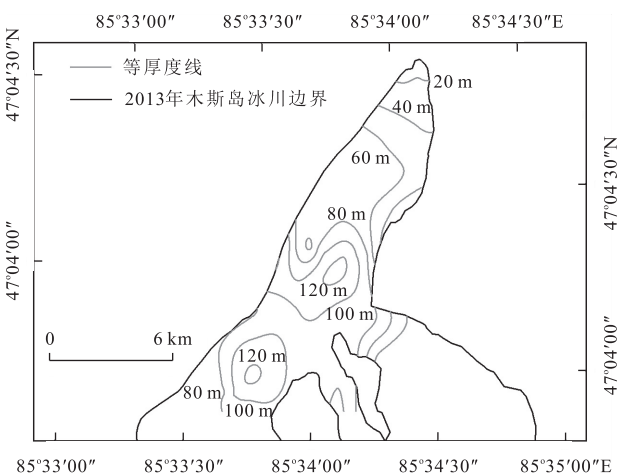


图 6 木斯岛冰川厚度等值线

Fig.6 Thickness contours of Muz Taw glacier

(Arendt *et al.*, 2006; Bauder *et al.*, 2007).面对不同的经验公式,在计算冰储量时究竟该如何选择,而且由于缺乏足够的实际钻孔和物探方法所取得的冰川厚度数据,冰川厚度的计算通常用经验公式进行估算,这样计算得来的冰储量不够精确.本文基于测量的冰川厚度数据,利用 ArcGIS 软件地统计模块,采用网格化方法,计算了木斯岛冰川末端的平均厚度并估算了冰储量.如图 5 所示,利用 GPR 数据进行冰舌区厚度的 Kriging 插值,得到了冰川厚度分布图,木斯岛冰舌区域冰川最大厚度值为 109.55~124.29 m,分布在两个相对应的冰斗区域.

根据冰川厚度数据并结合 2013 年冰川矢量边界数据进行冰川储量的计算,得到木斯岛冰川冰舌区的平均厚度、冰储量分别为 60.5 m、0.195 km³.笔者对木斯岛冰舌区厚度分布图提取冰川厚度等值线

图(图 6),以便与绘制的冰下地形图进行对比分析.

3.3 冰下地形图绘制

利用 SRTM-V4 数据结合以上得到的冰厚度数据,将两期数据统一到黄海高程基准,绘制出该区域的冰床地形图.由图 7 可以看出,在冰体厚度最大值区域,冰床地形呈凹陷状,与木斯岛冰川的厚度等值线(图 6)形成明显对比.此外,在海拔 3 240 m 和 3 280 m 处,存在一个明显的冰斗地形地貌,底部平面上呈半圆形,三面环以陡峭的岩壁,出口处为一高起的岩槛,这也与探地雷达测厚数据纵剖面一致(图 4).

4 讨论

4.1 冰储量计算方法对比分析

冰川的二维参数如面积、长度、范围可借助遥感手段相对容易获得,而冰川三维参数的获得相对较困难,起步较晚.但冰储量是表征冰川水资源变化状况的最直接参数,冰储量估算的核心问题是冰川厚度的测量,冰厚度及储量的研究对冰川水资源评估与研究意义重大(施雅风,2001).因此,近年来冰川厚度与储量的研究逐渐成为冰川学研究的热点.早期学者们曾利用冰川动力学方法、重力测量方法等进行冰川厚度的估算(Paterson,1994),但这些方法难度较高,局限性较大.长期以来,冰川厚度主要通过冰川面积的统计模型进行估算,往往会由于缺乏足够的冰川厚度观测资料,使得冰川平均厚度与冰川面积统计模型尚不成熟,由此得出的冰储量值精度不够.笔者结合冰储量变化经验公式(Liu *et al.*,2003)得出的冰川编目中的储量数据对比分析,发现由 GPR 实测数据插值得到的结果(表 2)与经验公式得到的编目数据存在普遍的差异,说明不同方法获得的冰川平均厚度存在着显著的差别,这在冰川冰储量估算等实际研究工作中应引起重视.因此,未来工作中亟待开展一系列实际测厚工作,以便较准确地估计该区冰川的储量,更好地为水资源评价提供可靠的基础资料.

4.2 问题与不足

在此需要说明的是,与传统的计算冰储量的方法相比,利用 GPR 测量得到的冰川厚度数据插值计算冰储量的方法,具有更高的准确性,但由于冰川上部地势陡峭增加了探地雷达测量的难度,使该方法受到了一定限制.本研究中只得到了消融区的 GPR 及 GPS 数据,这样得到的厚度数据代表性不足,加密观测得到整条冰川的厚度分布数据来评估木斯岛

表 2 探地雷达实测数据与编目数据对比分析

Table 2 Comparison of GPR measured data and glacier inventory data

数据项	八一冰川	古仁何口冰川	扎当冰川	木斯岛冰川
编目平均厚度(m)	30	48	54	66
编目体积(km ³)	0.084	0.067	0.107	0.282
实测平均厚度(m)	54.2	36.0	38.1	60.5(冰舌区)
实测体积(km ³)	0.153	0.045	0.066	0.195(冰舌区)

注:八一冰川的数据来自于王宇练和蒲建辰(2009);古仁何口冰川数据来自于马凌龙(2008);扎当冰川数据来自于朱美林(2014);木斯岛冰川数据来自于本研究.

冰川的储量变化是下一步亟待解决的问题.

此外,在计算的过程中也存在如下问题:

(1)由于冰的性质不同,其密度和电导率会随深度发生变化,使雷达波在冰层内部出现多次反射,形成不同的反射图像,在冰岩交界线处也会形成反射图像,这样在某些点判读冰的深度时会产生误差.本次测量中天线距和测量点间距均采用 4 m,因探地雷达电磁波在冰川中的传播速度在 0.169 ~ 0.171 m/ns,此次测量电磁波的传播速度取平均值 0.169 m/ns,探地雷达测厚的相对误差根据如下公式(孙波等,2003;何茂兵等,2004):

$$\frac{dh}{h} = \frac{dv}{2v} = 1.18\%, \quad (1)$$

式中: v 为电磁波在冰川冰介质中的传播速度(m/ns); h 为冰厚度(m);得出探地雷达测厚的相对系统误差为 1.18%.

(2)本次测量得到的 GPS 高程测点数据较少且分布不均匀,因此冰川的高程表面并未采用 GPS 数据插值,利用 SRTM-V4 数据结合 GPR 数据得到冰舌区的储量数据.

5 结论

(1)根据经过地形校正的雷达剖面数据,两个横剖面的冰川槽谷形态存在较大的不同.横剖面 B1-B2 有典型的“U”型地形发育,冰川厚度可达 116.4 m;C1-C2 横剖面底部地形比较平缓,冰川厚度分布较均匀,平均在 70~90 m.纵测线 A1-A2 冰下地形成阶梯状分布,冰川自末端向上,冰厚由薄变厚再变薄变厚,其中在中间部位冰床地形有 3 个较明显的凹陷状.冰体平均厚度约为 80.89 m,最大冰体厚度为 122.67 m.

(2)木斯岛冰川的冰床地形图显示,在冰体厚度

最大值区域,冰床地形呈凹陷状,与冰川厚度等值线图形成明显对比。此外,在海拔 3 240 m 和 3 280 m 处,存在一个明显的冰斗地形地貌。

(3) 木斯岛冰川冰舌区的平均厚度和冰储量分别为 60.5 m 和 0.195 km³。与传统计算冰储量的方法相比,利用 GPR 测量得到的冰川厚度数据插值计算冰储量的方法,具有更高的准确性。

致谢:本研究离不开野外工作人员辛苦的野外工作,在此表示感谢。对于 USGS (U. S. Geological Survey, <http://www.usgs.gov>) 数据共享平台提供的 Landsat 影像也一并表示感谢。

References

- Arendt, A., Echelmeyer, K., Harrison, W., et al., 2006. Updated Estimates of Glacier Volume Changes in the Western Chugach Mountains, Alaska, and a Comparison of Regional Extrapolation Methods. *Journal of Geophysical Research*, 111 (F3): F03019. doi: 10. 1029/2005jf000436
- Bauder, A., Funk, M., Huss, M., 2007. Ice-Volume Changes of Selected Glaciers in the Swiss Alps since the End of the 19th Century. *Annals of Glaciology*, 46 (1): 145 — 149. doi:10.3189/172756407782871701
- Evans, S., 1963. Radio Techniques for the Measurement of Ice Thickness. *Polar Record*, 11 (73): 406 — 410. doi: 10. 1017/s0032247400053523
- He, M. B., Sun, B., Yang, Y. X., et al., 2004. Ice Thickness Determination and Analysis of No. 1 Glacier at the Source of Urumchi River, Tianshan by Ground Penetrating Radar. *Journal of East China Institute of Technology*, 27 (3): 235 — 239 (in Chinese with English abstract).
- Jia, L. L., Wang, H. S., Xiang, L. W., 2014. Uncertainty of Approximate Relationship between GIA Induced Viscous Gravity and Radial Displacement. *Earth Science*, 39 (7): 905 — 914 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Q., Wang, F. T., Zhu, G. C., et al., 2007. Basic Features of the Miaoergou Flat-Topped Glacier in East Tianshan Mountains and Its Thickness Change over the Past 24 Years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 29 (1): 61 — 65 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. H., You, G. X., Pu, J. C., 1982. Glacier Inventory of China II: Altay Mountains. Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, 1 — 18 (in Chinese).
- Liu, S. Y., Sun, W. X., Shen, Y. P., et al., 2003. Glacier Changes since the Little Ice Age Maximum in the Western Qilian Shan, Northwest China, and Consequences of Glacier Runoff for Water Supply. *Journal of Glaciology*, 49 (164): 117 — 124. doi:10.3189/172756503781830926
- Ma, L. L., Tian, L. D., Pu, J. C., et al., 2010. Recent Area and Ice Volume Change of Kangwure Glacier in the Middle of Himalayas. *Chinese Sci. Bull.*, 55 (18): 1766 — 1774 (in Chinese).
- Ma, L. L., Tian, L. D., Yang, W., et al., 2008. Measuring the Depth of Gurenhekou Glacier in the South of the Tibetan Plateau Using GPR and Estimating Its Volume Based on the Outcomes. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 30 (5): 783 — 788 (in Chinese with English abstract).
- Nolan, M., Motkya, R. J., Echelmeyer, K., et al., 1995. Ice-Thickness Measurements of Taku Glacier, Alaska, USA and Their Relevance to Its Recent Behavior. *Journal of Glaciology*, 41 (139): 541 — 553.
- Paterson, W. S. B., 1994. The Physics of Glacier (Third Edition). Pergamon Press, Oxford, 238 — 288.
- Plewes, L. A., Hubbard, B., 2001. A Review of the Use of Radio-Echo Sounding in Glaciology. *Progress in Physical Geography*, 25 (2): 203 — 236. doi: 10. 1191/030913301668581943
- Pu, J. C., Yao, T. D., Tian, L. D., 2006. Change of the Gurenhekou Glacier in Yangbajain Area, Nyainqentanglha Range. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 28 (6): 861 — 864 (in Chinese with English abstract).
- Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences, 1988. An Introduction to the Glaciers in China. Science Press, Beijing, 92 — 93 (in Chinese).
- Shi, Y. F., 2001. Estimation of the Water Resources Affected by Climatic Warming and Glacier Shrinkage before 2050 in West China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 23 (4): 333 — 341 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. F., 2005. Concise China Glacier Inventory. Shanghai Popular Science Press, Shanghai, 101 — 105 (in Chinese).
- Sun, B., He, M. B., Zhang, P., et al., 2003. Determination of Ice Thickness, Subice Topography and Ice Volume at Glacier No. 1 in the Tien Shan, China, by Ground Penetrating Radar. *Chinese Journal of Polar Research*, 15 (1): 35 — 44 (in Chinese with English abstract).
- Wang, N. L., Pu, J. C., 2009. Ice Thickness, Sounded by Ground Penetrating Radar, on the Bayi Glacier in the Qilian Mountains, China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 31 (3): 431 — 435 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. Y., Li, Z. Q., Li, H. L., et al., 2012. Changes of Ice-Thickness and Volume for Representative Glaciers in Tianshan Mountains in the Past 50 Years. *Acta Geographica Sinica*, 67 (7): 929 — 940 (in Chinese with English abstract).

- Wang, Z. T., 1988. New Statistical Figures and Distribution Feature of Glaciers on the Various Mountains in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 11(3): 8–14 (in Chinese with English abstract).
- Wu, L. H., Li, Z. Q., Wang, P. Y., et al., 2011. Sounding the Sigong River Glacier No. 4 in Mt. Bogda Area, the Tianshan Mountains by Using Ground Penetrating Radar and Estimating the Ice Volume. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 33(2): 276–282 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z., 2011. The Research of Ice-Thickness and Englacial Structure Base on Ground Penetration Radar (Dissertation). University of Chinese Academy of Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z., Liu, S. Y., Zhang, S. Q., 2009. Structural Characteristics of the No. 12 Glacier in Laohugou Valley, Qilian Mountain Based on the Ground Penetrating Radar Sounding. *Advances in Earth Science*, 24(10): 1049–1158 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Y. J., Yan, J. X., Wu, S. Q., 2015. Sedimentary Records of Early Permian Major Glacial Sea-Level Falls in Southern Guizhou Province, China. *Earth Science*, 40(2): 372–380 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, T., Xiao, C. D., Qin, X., et al., 2012. Ice Thickness Observation and Landform Study of East Rongbuk Glacier, Mt. Qomolangma. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 34(5): 1069–1066 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X. S., Zhu, G. C., Qian, S. L., et al., 1985. Radar Measuring Ice Thickness of Glacier No. 1 at the Source of Urumqi River, Tianshan. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 7(2): 153–162 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, G. C., Jing, X. P., Han, J. K., et al., 1994. Radar Sounding and Study of the Bedrock Topography on Collins Ice Cap. *Antarctic Research (Chinese Edition)*, 6(2): 40–45 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, M. L., Yao, T. D., Yang, W., et al., 2014. Ice Volume and Characteristics of Sub-Glacial Topography of the Zhadang Glacier, Nyainqentanglha Range. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 36(2): 268–277 (in Chinese with English abstract).
- 移近似关系的不确定性. *地球科学*, 39(7): 905–914.
- 李忠勤, 王飞腾, 朱国才, 等, 2007. 天山庙尔沟平顶冰川的基本特征和过去 24 a 间的厚度变化. *冰川冻土*, 29(1): 61–65.
- 刘潮海, 尤根祥, 蒲健辰, 1982. 中国冰川目录 II: 阿尔泰山区. 兰州: 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1–18.
- 马凌龙, 田立德, 蒲健辰, 等, 2010. 喜马拉雅山中段抗物热冰川的面积和冰储量变化. *科学通报*, 55(18): 1766–1774.
- 马凌龙, 田立德, 杨威, 等, 2008. 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. *冰川冻土*, 30(5): 783–788.
- 蒲健辰, 姚檀栋, 田立德, 2006. 念青唐古拉山羊八井附近古仁河口冰川的变化. *冰川冻土*, 28(6): 861–864.
- 施雅风, 2001. 2050 年前气候变暖冰川萎缩对水资源影响情景预估. *冰川冻土*, 23(4): 333–341.
- 施雅风, 2005. 简明中国冰川目录. 上海: 上海科学普及出版社, 101–105.
- 中国科学院兰州冰川冻土研究所, 1988. 中国冰川概论. 北京: 科学出版社, 92–93.
- 孙波, 何茂兵, 张鹏, 等, 2003. 天山 1 号冰川厚度和冰下地形探测与冰储量分析. *极地研究*, 15(1): 35–44.
- 王宁练, 蒲健辰, 2009. 祁连山八一冰川雷达测厚与冰储量分析. *冰川冻土*, 31(3): 431–435.
- 王璞玉, 李忠勤, 李慧林, 等, 2012. 近 50 年来天山地区典型冰川厚度及储量变化. *地理学报*, 67(7): 929–940.
- 王宗太, 1988. 中国各山脉的冰川最新统计及其分布特征. *冰川冻土*, 11(3): 8–14.
- 吴利华, 李忠勤, 王璞玉, 等, 2011. 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. *冰川冻土*, 33(2): 276–282.
- 武震, 2011. 探地雷达冰川测厚与储量估算 (博士学位论文). 北京: 中国科学院大学.
- 武震, 刘时银, 张世强, 2009. 祁连山老虎沟 12 号冰川冰下形态特征分析. *地球科学进展*, 24(10): 1049–1158.
- 严雅娟, 颜佳新, 武思琴, 2015. 黔南地区早二叠世大幅度冰川性海平面下降的沉积学新证据. *地球科学*, 40(2): 372–380.
- 张通, 效存德, 秦翔, 等, 2012. 珠穆朗玛峰东绒布冰川厚度测量与地形特征分析. *冰川冻土*, 34(5): 1069–1066.
- 张祥松, 朱国才, 钱嵩林, 等, 1985. 天山乌鲁木齐河源 1 号冰川雷达测厚. *冰川冻土*, 7(2): 153–162.
- 朱国才, 井晓平, 韩建康, 等, 1994. 柯林斯冰帽雷达测厚和冰下地形研究. *南极研究*, 6(2): 40–45.
- 朱美林, 姚檀栋, 杨威, 等, 2014. 念青唐古拉山扎当冰川冰储量估算及冰下地形特征分析. *冰川冻土*, 36(2): 268–277.

附中文参考文献

- 何茂兵, 孙波, 杨亚新, 等, 2004. 天山乌鲁木齐河源一号冰川探地雷达测厚及其数据分析. *东华理工学院学报*, 27(3): 235–239.
- 贾路路, 汪汉胜, 相龙伟, 2014. 冰川均衡调整重力与径向位