

探地雷达在冰川厚度及冰下地形探测中的应用

王璞玉^{1,2}, 李忠勤^{1,3}, 吴利华^{1,2}, 李慧林¹, 王文彬¹, 王飞腾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, 兰州 730000

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

3. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

摘要: 探地雷达因其快速、准确、无损、高分辨率等优势而被广泛应用于冰川学领域。以天山托木尔峰青冰滩72号冰川为例, 着重介绍了探地雷达在冰川厚度及冰下地形探测中的应用。通过对雷达图像的处理和解译, 获取了高精度的冰川厚度数据, 恢复了冰下地形, 计算了冰储量, 并分析了冰川厚度变化对气候变化的响应。结果表明: 冰舌厚度为0~148 m; 冰储量为0.055 860 km³, 折合成水为0.050 274 km³。近50年来, 该冰川呈现强烈消融, 与冰川区气温快速上升有直接关系, 雷达探测为研究此响应机制提供了定量化的科学依据。

关键词: 探地雷达; 冰川厚度; 冰储量; 冰下地形; 气候变化

中图分类号: P631.3; P343.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5888(2011) Sup. 1-0393-08

Application of Ground Penetrating Radar to the Survey of
Glacier Thickness and Bedrock TopographyWANG Pu-yu^{1,2}, LI Zhong-qin^{1,3}, WU Li-hua^{1,2}, LI Hui-lin¹, WANG Wen-bin¹, WANG Fei-teng¹

1. State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Region Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Ground Penetrating Radar (GPR) is widely used in glaciology study due to its superiority of fast, precisely, undamaged and efficiently surveying on underground obstacles. The authors demonstrate the ability of GPR in the survey of glacier thickness and bedrock topography with field measurements on Qingbintan glacier No. 72 in the Mt. Tomor Region of Tianshan. Based on the GPR images, the precise thickness of ice and topography of bedrock are acquired. The both data are then used to estimate the ice volume. Results indicate that the thickness of ice tongue ranges from 0 to 148 m with an estimated ice volume of 0.055 860 km³, corresponding to the water equivalent of 0.050 274 km³. The glacier has experienced intensive melting during the last 50 years because of the rapid air temperature rising in the glacierized area. GPR provides a scientific means to quantitatively study the mechanism.

Key words: ground penetrating radar; ice thickness; ice-volume; bedrock topography; climate change

0 引言

源, 其变化已经引起了国内外研究人员的广泛关注。目前, 有关冰川变化的研究^[1-4]主要集中在面积和长度方面, 在全球气候变暖背景下, 冰川作为一种动态资源, 由于厚度数据难以获得, 因此在厚度以及冰

收稿日期: 2010-11-06

基金项目: 国家“973”计划项目(2010CB951003); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-EW-311); 国家自然科学基金重点项目(40631001)

作者简介: 王璞玉(1983—), 女, 甘肃成县人, 博士研究生, 主要从事冰川变化研究, E-mail: wangpuyu862@163.com。

储量变化方面涉及甚少。然而,厚度是表征冰川物理特性的一个重要指标,又是冰川动力学研究、冰川水文模型的必备参数,只有获取到准确的冰川厚度数据,才能使冰川变化研究更加定量化、全面化,进而准确计算冰储量,为区域水资源的调查评估提供研究基础和科学依据。因此,获取准确的冰厚数据是进一步完善冰川变化研究、评估冰川水资源所要解决的关键性问题。

探地雷达 (ground penetrating radar, GPR) 的引入为冰川厚度数据的获取提供了一种强有力的技术支持,因为它具有以下几方面优点: 1) 是一种非破坏性的原位探测技术; 2) 抗干扰能力强; 3) 高分辨率; 4) 微机控制数据采集、存储和处理,工作效率高^[5-6]。由于冰川冰具有低传导性,因此探地雷达能够探测到深达几百到上千米的冰层,在冰川学领域中的应用已有较长的历史。国外使用探地雷达起步较早,早在20世纪20年代,人们就已经开始利用雷达来探测冰川的厚度^[7]。20世纪60年代,Bailey等^[8]利用无线电对极地冰盖进行了探测,指出由于冰川冰具有对无线电波衰减小、冰体成层性和均质性好的优点,因此无线电回波探测方法极有可能成为冰川学研究领域中一种有用的试验技术方法。随后,该探测方法在英国、北欧等国家相继开展。20世纪80年代,基于无线电波良好的穿透能力,Bogorodsky和Bentley^[9]将雷达无线电回波探测研究方法应用于冰川学研究领域。目前,随着无线电探测技术的相应发展,探地雷达已经被广泛应用于冰川学研究领域;它不仅能对冰川厚度以及冰床地形进行探测,根据冰-岩界面地形变化及其特点进行分析,而且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。我国探地雷达在冰川学领域的应用研究起步相对较晚。20世纪80年代,中国科学院兰州冰川冻土研究所(现中国科学院寒区旱区环境与工程研究所)自行研制B-1型冰川测厚雷达,并在天山乌鲁木齐河源1号冰川、南极半岛的纳尔逊冰帽和柯斯冰帽上成功地进行了冰厚测量^[10]。随着雷达探测技术的迅速发展,90年代末,开始引入国外先进的探地雷达,并于近年来在一些冰川上陆续开展了测厚工作^[11-12],相比之前的地震法以及重力法^[13-14]测量冰厚具有精度高、速度快等优点,为冰川变化研究提供了第一手、可靠的冰厚数据,也为本文从数据获取、处理、到分析整个流程的系统研究奠定了基础。

本研究通过具体实例着重介绍探地雷达在冰川厚度以及冰下地形探测中的应用,以期获取到高精度冰川厚度分布数据,恢复冰下地形,开展定量化的冰储量计算工作,为冰川水资源评估提供可靠数据支持;此外,通过进一步分析区域气候变化特征,研究冰川厚度变化对气候变化的响应,从而建立一套较为系统的研究体系。

1 探地雷达工作原理

探地雷达的基本原理是由地面上的发射天线将高频带短脉冲形式的高频电磁波定向送入地下,高频电磁波遇到存在电性差异的地下地层或目标体反射后返回地面,由接收天线接收。不同物质介电性质的差异是探地雷达检测目标物的先决条件。高频电磁波在传播时,其路径、电磁场强度与波形将随所通过介质的电性及几何形态而变化,故通过对接收天线接收到的雷达波进行处理和分析,可以获得二维雷达图像,以灰阶或者彩色形式显示地下垂直剖面,进而确定地下界面或地质体的空间位置。由于冰川与岩石介电性质的巨大差异,在探地雷达图像资料中很容易识别冰-岩界面的位置,从而获得测点位置的冰川厚度。探测冰川的厚度可以通过如下表达式获得:

$$Z = \frac{1}{2} \sqrt{t^2 v^2 - x^2}.$$

其中: Z 为探测物体深度; v 为雷达波速; x 为天线距(探地雷达发射天线和接收天线之间的距离); t 为雷达波双程走时。对于山地冰川而言,雷达波在冰川中的传播速度一般为 $0.167 \sim 0.171 \text{ m/ns}$ ^[15-16]。

2 探地雷达应用实例分析

2.1 研究区概况

托木尔峰地区位于天山山脉的最西端。该区在我国境内共有冰川1 858条,总面积达4 195.42 km²,是天山最大的现代冰川作用区,也是塔里木河的主要发源地^[17]。该区处于西风带,降水主要来自大西洋和北冰洋的潮湿气流补给^[18]。夏季和冬季降水量相对集中,春秋两季降水量相对较少,其中5—9月份降水量约占全年的70%,冷季降水量约占30%。托木尔峰南麓降水丰沛,年平均降水量估计在1 000 mm以上,冰川末端估计在400~600 mm,山前平原区多年平均降水不足80 mm。冰川区雪线附近年平均气温为 $-7 \sim -11 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。山区丰富的

降水和冰雪融水是山前河流主要的补给来源。

青冰滩 72 号冰川(41°45' N, 79°54' E, 以下简称 72 号冰川) 位于天山托木尔峰南麓, 阿克苏河上游。阿克苏河是塔里木河的主要支流, 供水量约占塔里木河地表径流量的 70 %。考虑到托木尔峰地区监测冰川甚少, 缺乏大量的实测数据作为支撑, 因此对 72 号冰川的研究具有显著的科学意义和社会实际需求。根据冰川编目^[17], 该冰川编码为 5Y673P0072, 面积 5.23 km², 长度约 7.4 km, 海拔为 5 986 ~ 3 560 m, 平均海拔 4 200 m, 是一条典型的冰斗山谷型冰川, 朝向为南, 冰舌具有表碛覆盖。冰川上部由 2 条冰斗冰川组成, 冰斗以及山脊陡峭部分产生的冰、雪崩是该冰川的主要补给来源。

2.2 雷达实地探测

2008 年 8 月天山冰川站科研人员对天山托木尔峰地区开展了大规模的科学考察, 选择青冰滩 72 号冰川为该区典型的监测冰川, 采用探地雷达对该冰川进行了多剖面的厚度测量, 并相应地使用差分 GPS(global positioning system) 精确定位。

本次测厚使用的是加拿大 SSI 公司(Sensors & Software Inc.) 的 pulse EKKO PRO 100A 增强型探地雷达。目前常用的探地雷达测量方法有剖面法和宽角法 2 种, 本次野外实地工作中采用的是剖面法, 该方法是指探地雷达系统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, 记录点位于 2 个天线的中间位置。探测过程中使用 100 MHz 天线, 天线间隔为 4 m, 以 1 m 记录一次; 由于冰川与岩石之间存在介电性质的巨大差异, 因此可以获取到冰-岩界面清晰的雷达图像。鉴于冰川上部地势陡峭, 且分布有大量冰裂隙, 探测工作很难开展, 因此本次雷达探测主要集中在海拔 4 200 m 以下的冰舌区域, 综合考虑物质平衡观测花杆、冰川的表面形态、冰川运动等因素, 共布设 9 条测线, 包括 5 条横测线和 4 条纵测线, 共计 824 个测点, 如图 1 所示。横向探测沿自西向东方向开展, 纵向探测自海拔较高处起测, 由于冰川边缘比较陡峭, 所以部分测线未能到达边缘位置。雷达探测过程中, 横向测线尽量沿花杆横排布设, 经过冰厚可能最大的区域, 以保证探测结果可以客观地揭示冰川厚度的整体分布特征, 并与纵向测线探测结果进行比对。开展纵向探测时, 由于冰川表面局部区域地形较为复杂, 沿主流线方向很难连续测量, 因此, 布设了如图 1 所示的 2 条纵测线: B—B' 沿主流线方向从海

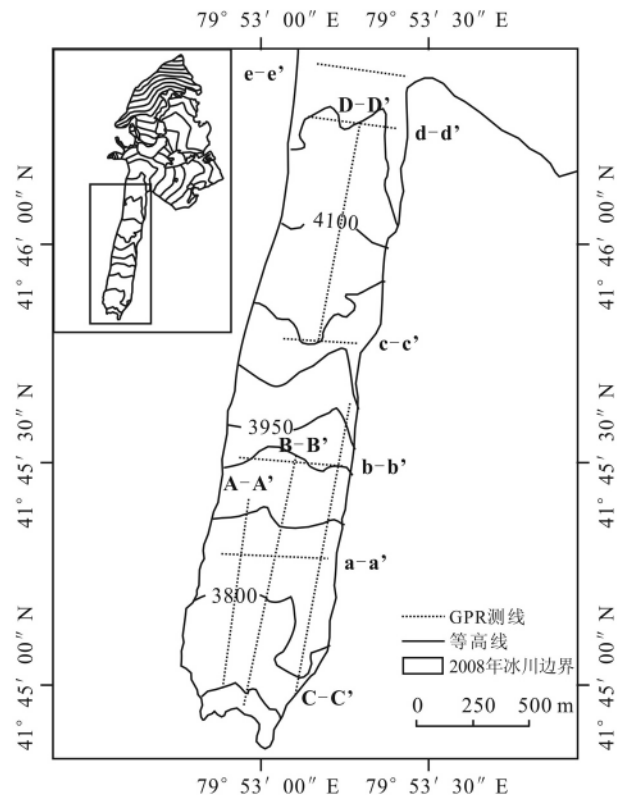


图 1 青冰滩 72 号冰川 GPR 探测路线分布图

Fig. 1 Map of the GPR survey lines of Qingbingtan glacier No. 72

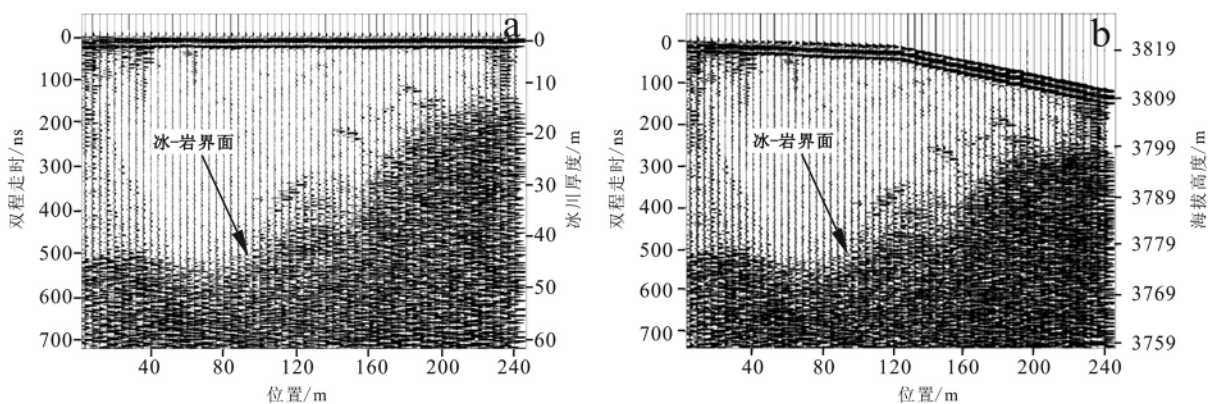
拔 3 900 m 到冰川末端) 和 D—D' (海拔 4 050 m 至海拔 4 150 m)。此外, 在海拔 4 000 m 以下区域的東西两侧分别开展了纵向探测并取得了效果较好的雷达图像。GPR 探测的同时使用北京合众思壮 E650 型 GPS, 采用动态载波相位差分技术 RTK(real time kinematic) 测量, 同步记录下测点的 X、Y、Z 空间坐标, 实现对每个雷达测点的地形校正, 并确定冰川边界。72 号冰川各测量断面雷达图像资料中冰-岩界面十分清晰, 利用 pulse EKKO PRO 探地雷达系统配套的图像处理软件 EKKO_View Deluxe 很容易判读各断面雷达测点处的冰川厚度。GPR 测厚数据的误差主要来源于雷达波在冰川中的传播速度。本次测量波速选取为 0.169 m/ns, 根据 $\frac{\Delta z}{z} = \frac{\Delta v}{v}$ 进行评价^[11], 雷达探测冰厚 z 的最大相对误差约为 1.18 %; 在冰川学研究中, 这种雷达测厚数据的精度完全满足要求。本研究采用的 EKKO 增强型探地雷达的天线发射为全向发射, 可以很好地反映连续的冰-岩界面, 相比 B-1 型冰川测厚雷达的非连

续点测方式在一定程度上增强了对冰川厚度测量的准确性,还有助于对冰川内部信息进行分析研究。

2.3 雷达图像分析

本次 GPR 探测获取到的雷达图像清晰地呈现出冰-岩界面的位置、冰川槽谷以及整个剖面的冰厚分布特征,显示了雷达波对山地冰川良好的穿透能力和对冰下地形的高分辨探测能力;体现出现场雷达测线的布设和探测参数,包括接收和发射天线间距、时窗宽度、叠加次数等设定的合理性。以剖面 a—a'、d—d' 的雷达图像为例进行分析(图 2 和图 3)。雷达图像的横坐标为探测点位置(与起测点之间的距离),左侧纵坐标为电磁波在冰川中的双程走时,右侧纵坐标为冰川厚度或海拔高度(经高程校正后)。a—a' 剖面雷达图像(图 2)显示西侧边缘的冰床较为平坦,东侧陡峭,测线最深处为 46.6

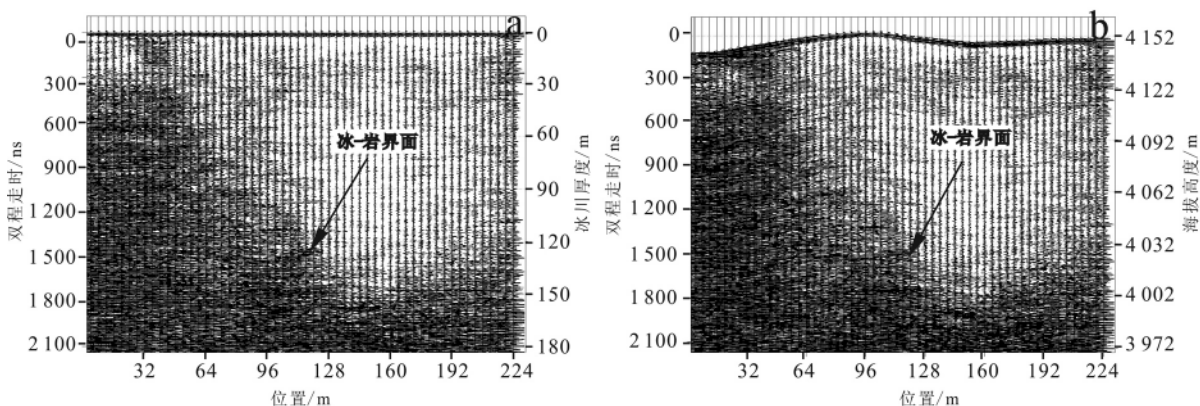
m。d—d' 剖面(图 3)槽谷形状与其类似,方向却相反,最深可达 148.0 m,冰厚明显较大。与乌鲁木齐河源 1 号冰川^[19]相比,72 号冰川横剖面呈现两壁不对称 U 型、非典型的冰川槽谷特征。一方面可能与冰川类型、发育条件、地形、动力作用等有密切关系,另一方面可能是测线未能到达冰川边缘所致。雷达图像均反映出冰川表面和冰床地形存在显著差异,冰床地形呈现更为显著的起伏形态。这一方面反映出冰床基岩经受冰川强烈磨蚀和拔蚀等动力作用的过程,支持冰川槽谷纵剖面“溯源延伸”的演化模式^[20];另一方面意味着冰床起伏地形对冰层的扰动在接近冰面时被衰减,体现出 Hutter 理论模型^[21]对 72 号冰川的适用性。该理论模型显示,当冰床起伏波长是冰厚的 3~5 倍时,将直接影响到冰面起伏状况,在冰床起伏波长过短或过长时,反而不会表现



a. 雷达冰厚分布; b. 雷达冰川表面与冰床分布 (GPS 高程校正)。

图 2 青冰滩 72 号冰川剖面 a—a' 雷达图像

Fig. 2 Radar image of Qingbingtan glacier No. 72 along the survey line a-a'



a. 雷达冰厚分布; b. 雷达冰川表面与冰床分布 (GPS 高程校正)。

图 3 青冰滩 72 号冰川剖面 d—d' 雷达图像

Fig. 3 Radar image of Qingbingtan glacier No. 72 along the survey line d-d'

在冰面上,模型与观测结果具有一致性,均适用于 72 号冰川和乌鲁木齐河源 1 号冰川^[11],可见该模型的适用性具有一定的普遍意义。此外,雷达图像不仅对冰川厚度以及冰川槽谷形态研究具有直观的指示作用,而且从图像中反映出的槽谷形态特征可以为空槽谷研究提供数据参考。

2.4 冰川厚度分布、冰储量及冰床地形

在 GIS 技术的支持下,将 2008 年雷达测厚数据导入 ARCGIS 软件中,将冰川厚度作为一个重要的属性值,确定冰川边界并设定其厚度值为 0,统一坐标系为 BJ54。采用 Kriging 插值可以生成 5 m × 5 m 冰川厚度分布图层,以此来研究 72 号冰川冰舌区的厚度分布。结果显示:72 号冰川冰舌区厚度介于 0 ~ 148 m,除海拔 4 200 m 附近冰川厚度较大且变化明显之外,冰舌区域厚度整体较薄且变化平缓,且冰体厚度最大值发育于冰川中部趋于主流线位置,这与冰川动力学理论相一致。

冰川储量与水资源密切相关。长期以来使用冰川储量(厚度)-面积的统计关系来估算储量^[22-23],基本公式为 $V = \beta S^\gamma$ 。其中: V 为冰川储量; S 为冰川面积; β 和 γ 为 2 个参数,只要确定其量值,便可以利用这个关系根据冰川面积计算出冰川的储量。冰川是具有黏性、弹性及塑性综合特性的固体,很多因素都会影响冰川的形态特征,从而影响到 β 和 γ 参数的量值。这些因素包括底部基岩形态、所处海拔及上下高差、冰川朝向等^[24]。在同一区域或者更小的地理单元内,个体冰川所受上述因素影响差别很小,达到可以忽略不计时,则可使用相同的 β 和 γ 量值。根据 Jóhannesson 等^[25]的研究,当冰川与所处地区的气候条件达到平衡时,冰川最终会达到稳定状态,此时冰川的几何特征参数之间会形成一定的比例关系,这也是冰川储量(厚度)-面积经验公式产生的原理。而目前所研究的大多数冰川处在对气候响应的不同阶段,属非稳定状态,其几何特征参数之间的比例关系是不稳定的,存在显著的时空变化,尤其会由于冰川处在对气候响应的不同阶段而发生变化;因此,使用经验公式进行单条冰川储量的计算不够精确。本研究基于探地雷达冰川厚度数据,在 ARCGIS 的 3D Analyst 模块中计算了冰川储量。其计算公式为

$$V = \sum_{i=1}^n s_i^2 \times H_i$$

其中: s_i 为第 i 个像元的面积; H_i 为第 i 个像元的厚

度。结果表明,72 号冰川冰舌区储量为 0.055 860 km³,折合成水为 0.050 274 km³(冰密度 0.9×10^3 kg/m³)。与传统的经验公式法相比,该方法计算冰储量更具科学性和合理性。但是,采用探地雷达不可能对每条冰川进行测量,使得冰川厚度数据的获取受到一定限制,而且本研究冰储量计算仅局限于测厚区域,对于非测厚区域的计算还有待进一步研究,以期更全面地揭示冰川厚度整体分布特征。

冰床是承接冰川的载体,在冰川学研究领域中,冰床地形不仅是冰川地貌形成过程与机制研究的重要对象,又是冰川动力学研究必须考虑的内容,直接反映冰川的动力作用特征;因此,恢复并分析冰床地形是冰川学研究中的一个重要方面。但是,冰床地形并不像冰川表面一样可以通过测绘直接获取,因此本研究采用冰川表面 DEM 与冰川厚度分布相结合的方式间接恢复,见图 4。可以看出:72 号冰川冰舌区冰床地形沿纵剖面随海拔升高规则起伏,在海拔 4 200 m 附近出现了 2 处冰床等高线闭合区域,呈明显的凹陷地形,反映出冰川对冰下地形强烈的动力作用过程。

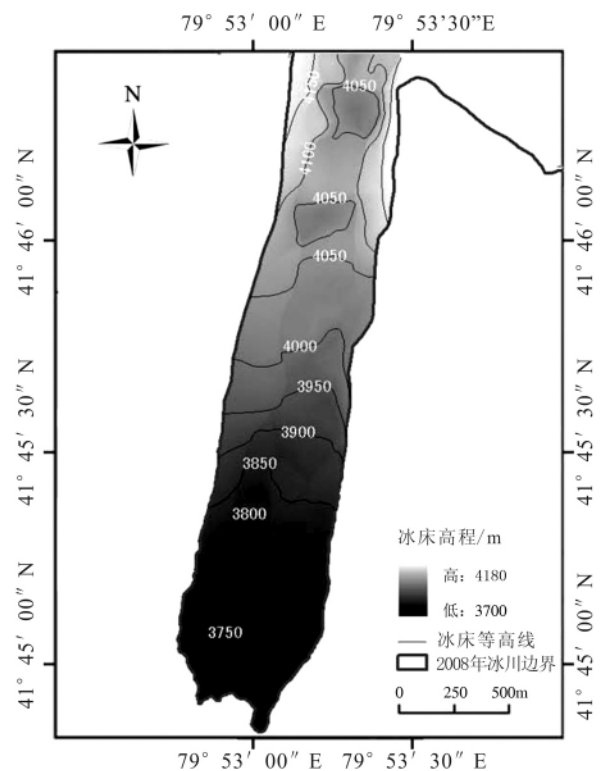


图 4 青冰滩 72 号冰川冰舌区冰床地形

Fig. 4 Bedrock topography of the tongue of Qingbingtan glacier No. 72

3 讨论

已有研究显示^[3]近50年来托木尔峰地区的冰川消融强烈,分布在哈尔克他乌山南北坡的483条冰川总面积已经由1964年的2 267.708 km²缩小到2003年的2 067.412 km²,缩小比率达8.8%,平均每条冰川缩小0.415 km²,末端退缩速率6.2 m/a。结合地形图以及野外实测资料分析发现,位于该区的青冰滩72号冰川面积在1964—2008年间减少了22.7%,末端退缩速率达到41.0 m/a,表面运动速度最高可达70 m/a,与乌鲁木齐河源1号冰川相比,该冰川的消融和运动补给相对强烈,具有海洋型冰川的某些特征。

气候变化是冰川变化的直接驱动因素。阿克苏河流域库马力克河协合拉水文站(海拔1 487 m)是托木尔峰地区距离72号冰川最近的一个水文站,位于该冰川西南方向。选取该水文站近40年来(1964—2000年)的气象资料研究区域气候变化特征及其对冰川变化的影响(图5)。分析发现,该区

年均气温2000年比1964年升高了1.62℃,从线性关系看,呈现明显的增高趋势,增幅为0.45℃/10a。而主要影响冰川变化的夏季(6—9月)平均温度则升高0.55℃/10a,更为显著。同时段年降水也有增加趋势,平均增加率为2.8 mm/10a。刘卫平等^[26]分析阿克苏河流域5个气象站资料(1961—2000年)发现,该流域近40年来气温在波动中上升,年平均气温变化倾向率为0.2℃/10a,增温趋势显著,20世纪60—70年代、70—80年代分别上升0.2℃,80—90年代上升0.1℃。同时段年降水量也呈现逐渐增加趋势(10.8 mm/10a)。阿克苏河的年径流量亦呈明显增加趋势,尤其是20世纪90年代以来,较过去50年(1957—2005年),年径流量增加了约10.9%^[27]。此外,据2008年8月72号冰川冰面海拔3 950 m处自动气象站以及距冰川末端约1 100 m处水文断面水文气象观测点处资料显示,72号冰川区平均气温5.2℃,较同期乌鲁木齐河源1号冰川区要高1.5℃。

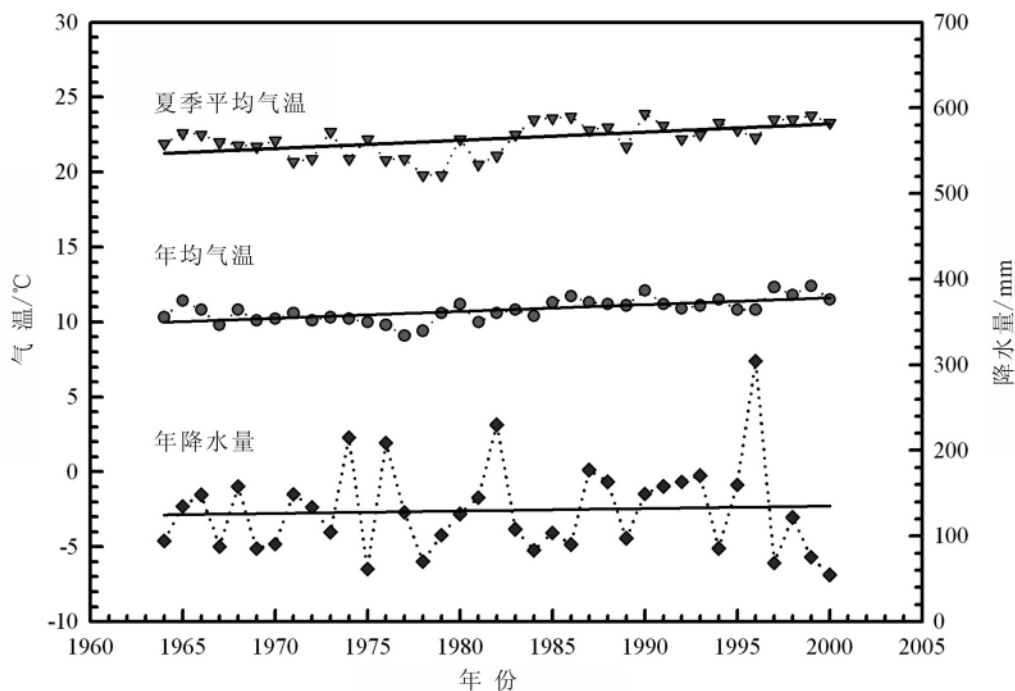


图5 协合拉水文站1960—2000年夏季平均气温、年均气温和年降水量变化

Fig. 5 Changes of summer and annual mean temperature, annual precipitation at the Xiehela hydrological station during 1960-2000

分析可见,72号冰川强烈消融与冰川区气温较高、近年来气温快速上升有直接关系。气温升高导致冰川表面消融加快,尽管此间降水亦有增加,但未能扭转冰川物质亏损的趋势。一般情况下,冰川消

融遵循“减薄退缩”的基本模式,虽然 72 号冰川末端有表碛覆盖,但较厚的表碛覆盖区所占面积不大,且位于冰川消融最强烈的部分。因此,表碛覆盖的冰面仍表现出强烈减薄、末端后退的特点;这一结论可以从本研究结果冰川厚度已变得很薄得以证实。另外,对于 72 号冰川而言,其冰舌位于山谷底部,海拔低。观测研究表明:冰舌部分消融强烈,对气候变化十分敏感,而其体积占到了整条冰川体积的绝对比例,是冰川融水径流产生的主体。72 号冰川厚度较薄、末端急剧后退,标志着托木尔峰地区的冰川正处于强烈消融状态,在气候变暖背景下,该区冰川强烈消融仍将持续一个较长的时期。

4 结语

1) 以青冰滩 72 号冰川为例,着重介绍了探地雷达在冰川厚度及冰下地形探测中的应用;并结合区域气候变化特征,分析了冰川厚度变化对气候变化的响应。该冰川冰舌厚度为 0 ~ 148 m,冰储量 0.055 860 km³,折合成水为 0.050 274 km³。2) 雷达探测不仅可以获取到清晰的雷达图像来分析冰川槽谷形态特征,而且可以获得高精度冰川厚度数据,为冰储量准确计算及冰下地形恢复提供可靠数据支持。将 GPS 和 GIS 技术引入到 GPR 探测的整个过程中,有利于解决空间信息获取、表达、管理、分析等方面的问题,为冰川学研究提供了一种有效的分析方法。与经验公式法相比,基于雷达测厚数据分析冰川厚度分布、计算冰储量精度更高,更具科学性和合理性,但在估算流域冰川储量时受到一定限制。3) 可考虑在更多的区域、流域,选择不同类型、形态、面积大小的冰川开展测厚工作,从而完善经验公式,以便更为准确地估算冰川储量,为评估冰川水资源提供必要的前提条件。4) 还需加强冰川重复雷达探测,使用多期厚度之间的差值估算冰川在此期间的物质积累与消融,为缺少长期观测冰川提供一种估算物质平衡的有效方法,从而全面了解冰川的变化特征。

参考文献 (References):

- [1] Koch J, Mennounos B, Clague J J. Glacier change in Garibaldi Provincial Park, southern Coast Mountains, British Columbia, since the Little Ice Age [J]. *Global and Planetary Change*, 2009, 66: 161-178.
- [2] 姚檀栋,刘时银,蒲健成,等. 高亚洲冰川的近期退缩及其对西北水资源的影响 [J]. *中国科学: D 辑*, 2004, 34(6): 535-543.
- [3] YAO Tan-dong, LIU Shi-yin, PU Jian-cheng, et al. Recent glacial retreat in high-Asia in China and its impact on water resources in Northwest China [J]. *Science in China: Series D*, 2004, 34(6): 535-543.
- [4] 李忠勤,李开明,王林. 新疆冰川近期变化及其对水资源的影响研究 [J]. *第四纪研究*, 2010, 30(1): 96-106.
- [5] LI Zhong-qin, LI Kai-ming, WANG Lin. Study on recent glacier changes and their impact on water resources in Xinjiang, North Western China [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(1): 96-106.
- [6] 李宗省,何元庆,王世金,等. 1900—2007 年横断山区部分海洋型冰川变化 [J]. *地理学报*, 2009, 64(11): 1319-1330.
- [7] LI Zong-xing, HE Yuan-qing, WANG Shi-jin, et al. Changes of some monsoonal temperate glaciers in Hengduan Mountains region during 1900-2007 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(11): 1319-1330.
- [8] 董航,刘四新,王春晖,等. 探地雷达测量近地表含水量的研究 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009, 39(1): 163-167.
- [9] DONG Hang, LIU Si-xin, WANG Chun-hui, et al. Study on near-surface water content measurement by ground-penetrating radar [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2009, 39(1): 163-167.
- [10] 薛建,贾建秀,黄航,等. 应用探地雷达探测活动断层 [J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2008, 38(2): 347-350.
- [11] XUE Jian, JIA Jian-xiu, HUANG Hang, et al. Application of GPR in active fault detection [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2008, 38(2): 347-350.
- [12] Stern W. Über grundlagen, methodik und bisherige ergebnisse elektrodynamischer dickenmessung von gletschereis [J]. *Z Gletscherkunde*, 1930, 15: 24-42.
- [13] Bailey J T, Evans S, Robin G De Q. Radio echo sounding of polar ice sheets [J]. *Nature*, 1964, 204: 420-421.
- [14] Bogorodsky V V, Bentley C R, Gudmandsen P E. Radio-glaciology [M]. Dordrecht: D Reidel Pub Co, 1985.
- [15] 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.
- [16] ZHANG Xiang-song, ZHU Guo-cai, QIAN Song-lin, et al. Radar measuring ice thickness of Glacier No. 1 at the

- source of Urumqi River ,Tianshan [J]. Journal of Glaciology and Geocryology ,1985 ,7(2) : 153-162.
- [11] 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.
SUN Bo ,HE Mao-bing ,ZHANG Peng ,et al. Determination of ice thickness , subice topography and ice volume at Glacier No. 1 in the Tianshan , China , by ground penetrating radar [J]. Chinese Journal of Polar Research ,2003 ,15(1) : 35-44.
- [12] 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.
WANG Ning-lian ,PU Jian-chen. 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.
- [13] Krimmel R M. Gravimetric ice thickness determination , South Cascade Glacier , Washington [J]. Northwest Science ,1970 ,44(3) : 147-153.
- [14] 苏珍. “七一”冰川厚度的测定及重力法测量冰川厚度的几个问题[C]// 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊: 第5号. 北京: 科学出版社,1985.
SU Zhen. Thickness measurements of “July First” Glacier in Qilian Mountains and some problems in glacier measurement by gravimetric method [C]// Memoirs of Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology , Chinese Academy of Sciences: No. 5. Beijing: Science Press ,1985.
- [15] Nolan M ,Motkya R J ,Echelmeyer K ,et al. Ice-thickness measurements of Taku Glacier , Alaska , USA and their relevance to its recent behaviour [J]. Journal of Glaciology ,1995 ,139: 541-553.
- [16] Moore J C ,Palli A ,Ludwig F ,et al. High resolution hydrothermal structure of Hansbreen , Spitsbergen mapped by ground penetrating radar [J]. Journal of Glaciology ,1999 ,151: 524-532.
- [17] 施雅风. 简明中国冰川目录[M]. 上海: 上海科学普及出版社,2005: 61-64.
SHI Ya-feng. China glacier inventory (CGI) [M]. Shanghai: Shanghai Popular Science Press ,2005: 61-64.
- [18] 中国科学院登山科学考察队. 天山托木尔峰地区的冰川与气象[M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社,1985.
Mountaineering and Expedition Term of Chinese Academy of Sciences. Glacial and weather in Mt. Tuomuer district ,Tianshan [M]. Ürümqi: Xinjiang People' s Publishing House ,1985.
- [19] 何茂兵,杨亚新,陈越,等. 浅谈探地雷达在冰川研究中的应用[J]. 华东地质学院学报,2003,26(1): 48-51.
HE Mao-bing ,YANG Ya-xin ,CHEN Yue ,et al. The normal application of GPR to glaciology [J]. Journal of East China Geological Institute ,2003 ,26(1) : 48-51.
- [20] Paterson W S B. The physics of glacier [M]. 3rd ed. Oxford: Pergamon Press ,1994.
- [21] Hutter K. Theoretical glaciology [M]. Holland: D Reidel Publishing Company ,1983: 256-332.
- [22] Bahr D B ,Meier M ,Peckman S. The physical basis of glacier volume area scaling [J]. Journal of Geophysical Research ,1997 ,102(B9) : 20355-20362.
- [23] Liu S Y ,Sun W X ,Shen Y P ,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 ,164: 117-124.
- [24] 李慧林,李忠勤,秦大河. 冰川动力学模式基本原理和参数观测指南[M]. 北京: 气象出版社,2009: 1-56.
LI Hui-lin ,LI Zhong-qin ,QIN Da-he. Basic principles of glacial dynamic models and observation guide for corresponding parameters [M]. Beijing: China Meteorological Press ,2009: 1-56.
- [25] Jóhannesson T ,Raymond C ,Waddington E. Time-scale for adjustment of glaciers to change in mass balance [J]. Journal of Glaciology ,1989 ,121: 355-369.
- [26] 刘卫平,魏文寿,杨青,等. 新疆阿克苏河流域近40年来气温和降水变化[J]. 干旱区研究,2007,24(3): 339-343.
LIU Wei-ping ,WEI Wen-shou ,YANG Qing ,et al. Study on climate change in the Aksu River basin since recent 40 years [J]. Arid Zone Research ,2007 ,24(3) : 339-343.
- [27] 陈亚宁,徐长春,郝兴明,等. 新疆塔里木河流域近50 a 气候变化及其对径流的影响[J]. 冰川冻土,2008,30(6): 921-929.
CHEN Ya-ning ,XU Chang-chun ,HAO Xing-ming ,et al. Fifty-year climate change and its effect on annual runoff in the Tarim River basin ,China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology ,2008 ,30(6) : 921-929.