

联合双站 InSAR 与 WoldView DEM 估算 祁连山西段冰川多时段物质平衡

李超^{1,2}, 江利明^{1,2}, 柳林^{1,3}, 李涛^{1,2}, 陈圆圆^{1,4}

1. 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院, 武汉 430071;

2. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049;

3. 华中科技大学 物理学院引力实验中心, 武汉 430074;

4. 中国地质大学 地理与信息工程学院, 武汉 430074

摘要: 冰川物质平衡作为气候变化的敏感指标, 对于区域水资源管理, 冰川灾害防治以及全球海平面变化预测具有重要意义。随着全球变暖加剧, 自2000年来祁连山西段冰川消融加速, 然而近年来该地区尤其是老虎沟12号冰川的年际物质平衡变化仍知之甚少。本文利用WorldView光学立体测绘、SRTM和TanDEM-X双站InSAR生成的多源DEM数据, 采用DEM差分法分别获得了2013年—2014年、2014年—2015年祁连山西段年际冰厚变化速率和2000年—2015年平均冰厚变化速率, 同时获得了相应时段的冰川物质平衡结果。在此基础上以老虎沟12号冰川为例, 估算了2013年—2014年、2014年—2015年和2000年—2015等3个时间段的冰川物质平衡变化速率, 并分析了降水和气温变化对物质平衡变化的影响。结果表明: 2013年—2014年、2014年—2015年祁连山西段冰厚变化速率为 -0.35 ± 0.034 m和 -0.028 ± 0.004 m, 物质平衡变化速率分别为 -0.27 ± 0.014 m w.e./a和 -0.024 ± 0.084 m w.e./a。2000年—2015年老虎沟12号冰川平均物质平衡为 -0.013 ± 0.02 m w.e./a, 冰川处于消融状态。冰川亏损速率由2013年—2014年的 -0.33 ± 0.04 m w.e./a减缓至2014年—2015年的 -0.036 ± 0.09 m w.e./a, 这主要与2015年降水增多有关。本文验证了高质量的光学立体测绘卫星DEM数据在求解山地冰川年际物质平衡的可行性。

关键词: 遥感, WorldView DEM, TanDEM-X DEM, 老虎沟12号冰川, 物质平衡, InSAR, 祁连山

中图分类号: P2

引用格式: 李超, 江利明, 柳林, 李涛, 陈圆圆. 2023. 联合双站 InSAR 与 WoldView DEM 估算祁连山西段冰川多时段物质平衡. 遥感学报, 27(9): 2085–2097

Li C, Jiang L M, Liu L, Li T and Chen Y Y. 2023. Multi-period mass balance estimation of glaciers in the western Qilian Mountains based on the combination of bistatic SAR DEM and WordView DEM. National Remote Sensing Bulletin, 27(9): 2085–2097 [DOI:10.11834/jrs.20221150]

1 引言

山地冰川是气候变化的指示器, 也是重要的淡水资源, 近年来冰川消融对海平面上升的贡献也越来越大 (Houghton等, 2001; Jacob等, 2012)。随着全球气温的不断升高, 高亚洲地区大多数冰川出现末端退缩和面积减小现象, 冰川物质亏损加剧 (Bolch等, 2012; Cogley, 2016; Shean等, 2020; Bhattacharya等, 2021)。在此背景下, 地处西北内陆干旱区的祁连山冰川区域, 同样也经历

了不同程度的冰川退缩 (Yao等, 2012; 张其兵等, 2017; 高永鹏等, 2018)。此外, 冰川融水是中国西北干旱区重要的水资源, 对社会经济可持续发展具有重要意义, 但同时也会导致冰湖溃决、泥石流等灾害频发。因此, 加强祁连山冰川变化监测以及冰川物质平衡的估算, 对区域水资源管理、环境保护和冰川灾害防治具有重要意义 (谢自楚和刘潮海, 2010; 李新等, 2020)。

目前冰川物质平衡的估计方法主要包括冰川学方法、积累区面积比率法、水文学法、重力测

收稿日期: 2021-03-25; 预印本: 2022-05-05

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2017YFA0603103); 国家自然科学基金 (编号: 42174046); 江苏省高校自然科学研究重大项目 (编号: 23KJA560006)

第一作者简介: 李超, 研究方向为冰川物质平衡大地测量研究。E-mail: ch10lichao@163.com

通信作者简介: 江利明, 研究方向为影像大地测量理论、方法及应用。E-mail: jlm@apm.ac.cn

量法和大地测量方法等 (Gardelle 等, 2013)。受限于气候和地形条件, 冰川学方法实施困难且无法获取大范围冰川物质平衡 (杨大庆 等, 1992)。重力测量法虽然可以通过重力卫星观测数据直接反演冰川物质平衡, 但无法获取高空间分辨率的物质平衡 (Gardner 等, 2013; Matsuo 和 Heki, 2010)。积累区面积比率法需要高精度的冰川物质平衡和准确的冰川参数作为支撑。水文学法需要长时间序列的降水、蒸发、径流等数据, 其参数获取较为困难。大地测量法主要是通过使用重复的、全覆盖的数字高程模型 (DEM) 来比较冰面高程的变化, 获得高时空分辨率的冰川物质平衡方法。本文特指采用 DEM 差分法获得冰厚及冰量变化的方法。近年来, 随着卫星遥感技术的快速发展以及遥感卫星的增多 (周玉杉 等, 2019; 周建民 等, 2021), 高分辨率、高精度 DEM 的日益增多, 大地测量方法已成为获取大范围冰川物质平衡的主流方法 (Kääb 等, 2015; Neckel 等, 2014; Toutin 等, 2011)。

位于祁连山西段的老虎沟 12 号冰川是祁连山最大的冰川, 为当地经济发展提供了重要的水资源, 许多学者在此展开研究 (Du 等, 2016; Liu 等, 2019b; Qin 等, 2015; Sun 等, 2014; Wang 等, 2018; Zhang 等, 2012)。然而, 由于复杂的山地地形和恶劣的气候条件, 实测冰川物质平衡记录仍然很少, 目前相关研究大多基于激光测高、SAR 数据、重力数据和光学遥感数据。王玉哲等 (2013) 基于 ICESat 数据利用差分方法估算了冰川高程随时间的变化趋势, 进而获得了 2003 年—2009 年祁连山冰量变化。结果表明 21 世纪初祁连山冰川处于物质亏损状态, 但 ICESat 数据在冰川上的光斑较少导致该结果有很大的不确定性。Gardner 等 (2013) 基于 ICESat 数据研究表明 2003 年—2009 年整个祁连山的年平均高程变化 -0.32 ± 0.31 m/a。孙美平等 (2015) 基于两次冰川编目数据对祁连山冰川变化进行了分析, 研究表明近 50 年间祁连山冰川面积和冰储量分别减少约 420.81 km^2 (-20.88%) 和 21.63 km^3 (-20.26%), 且面积较小的冰川急剧萎缩是该区冰川面积减少的主要原因。随着 TanDEM-X 卫星的成功发射, 星载双站 SAR 干涉测量开始应用于冰厚变化监测。目前 TanDEM 已成功应用于青藏高原冰川区冰厚变化和物质平衡的估算 (Lin 等, 2017; Zhang 等, 2020)。Sun 等

(2018) 基于 TanDEM-X 双站 InSAR 数据, 采用 DEM 差分方法获取了祁连山西段 2000 年—2013 年的冰川表面高程变化结果, 并与 GPS 数据进行了对比分析, 结果表明祁连山冰川处于消融状态。高永鹏等 (2018) 基于校正后的 SRTM 数据与 ASTER 立体像对数据, 利用大地测量法, 对 2000 年—2010 年祁连山地区冰川冰储量变化进行应用研究, 结果表明 2000 年—2010 年祁连山冰川厚度平均减薄 $(5.68 \pm 2.76) \text{ m}$, 平均冰川物质平衡为 $(-0.48 \pm 0.23) \text{ m w.e./a}$, 冰川储量变化 $(-1.59 \pm 0.72) \text{ Gt}$ 。综上所述, 这些前期的工作一般侧重于监测冰川年代际的物质平衡, 缺乏年际物质平衡研究, 这在一定程度上限制了对冰川状态的时间变化和冰川对区域气候变化响应的认识。

本研究旨在利用 2013 年的 TanDEM-X 双站干涉合成孔径雷达生成的 DEM 数据 (TDX DEM) 以及 2014 年—2015 年的高空间分辨率 WorldView 光学 DEM (WV DEM) 进行差分处理获得相应时间段的冰厚变化, 并结合 2000 年的航天飞机雷达地形测绘任务 (SRTM) DEM 获得了 2000 年—2015 年祁连山西段的冰川高程变化。为了获得高精度的冰川物质平衡结果, 本文充分考虑 C 波段和 X 波段雷达的穿透性和 DEM 数据之间的季节性差异, 获得较为可靠的祁连山西段以及老虎沟 12 号冰川 2013 年—2015 年的年际冰川物质平衡。最后, 结合温度和降水数据分析老虎沟 12 号冰川物质平衡变化的影响因素。

2 研究区和数据

2.1 研究区概况

祁连山位于中国青海省东北部与甘肃省西部边境, 发育有冰川 2859 条, 冰川总面积 1972.5 km^2 , 估算储水量为 $811.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。老虎沟 12 号冰川位于祁连山西段北坡的大雪山地区, 由东西两支冰川组成, 是祁连山区最大的极大陆型冷性复式山谷冰川, 冰川表面较为平缓 (坡度 3° — 6°) 且积累区较宽, 具有稳定性冰川的特征, 其冰川融水是昌马河重要的径流补给来源 (刘宇硕 等, 2013; 于国斌 等, 2014)。

祁连山冰川是中国西北干旱地区的“天然固体水库”, 也是西北山区内各条河流的重要补给源头。近年来, 随着全球不断变暖, 祁连山区的温

度也呈现出明显上升趋势，特别是 20 世纪 90 年代以后，气温上升幅度明显增大。祁连山地区的年降水量也呈增加趋势，其西段降水量增幅相对东段来说较大。祁连山区属高原大陆性气候，西北部主要受西风带气流控制，年平均气温 5℃左右，降水主要集中在夏季，年降水量由东向西逐渐减少。该地区冰川融水是中国西北绿洲城市农业灌溉和社会经济发展的重要水资源通道，因此研究该区域冰川物质平衡对于甘肃省、青海省乃至全国都意义重大（张其兵 等，2017）。

2.2 数据

本研究主要采用 3 种类型的 DEM 数据进行处理：（1）一对 TanDEM-X 双站 SAR 数据生成高分辨率高精度的 TDX DEM；（2）WorldView 光学影像生成的 8 m 分辨率的 DEM；（3）30 m 分辨率的 SRTM DEM。在数据处理的过程中我们还相应的采用 RGI V6.0 冰川编目数据和植被积雪覆盖数据。数据具体参数如下表 1 所示，图像覆盖范围如图 1 所示。

表 1 所用数据主要参数

Table 1 Main parameters of DEM data

名称	数据类型	空间分辨率/m	高程基准	获取时间
SRTM	DEM	30	EGM96	2000-02-11
TDX DEM	DEM	10	WGS84	2013-11-21
光学 DEM	DEM	8	WGS84	2014-12-04
光学 DEM	DEM	8	WGS84	2015-08-09
RGI V6.0	冰川编目		WGS84	
GlobLand	植被覆盖	30	WGS84	
MODIS	积雪覆盖	500	WGS84	

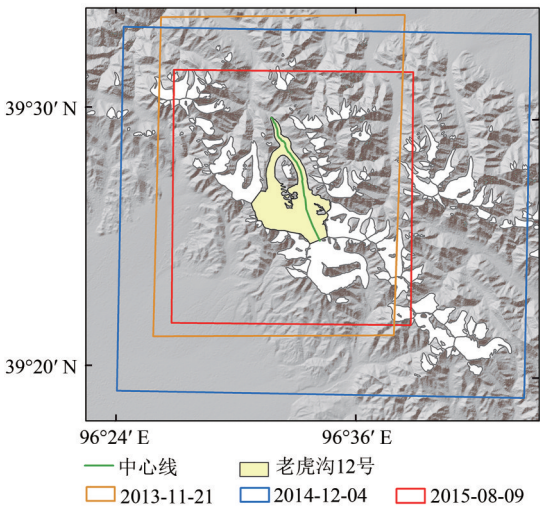


图 1 研究区地理位置与卫星数据范围

Fig. 1 Study region location and satellite data range

2.2.1 TDX DEM 数据

TanDEM-X 是德国宇航局（DLR）的对地观测雷达任务，由两颗成像参数相同的 X 波段雷达卫星（TerraSAR-X、TanDEM-X）以近距离螺旋结构紧密排列方式组成的双卫星系统进行观测，消除了时间去相干和大气去相干等去相干源（Breit 等，2010）。本研究中采用的高分辨率高精度的 TDX DEM 是由 2013 年 11 月 21 日获取的一对 TanDEM-X 双站 SAR 降轨数据生成，空间分辨率为 10 m（Sun 等，2018）。

2.2.2 SRTM DEM 数据

NASA 航天飞机雷达地形任务（SRTM）数据集是由美国国家航空航天局（NASA），国家地理空间情报局（NGA）和德国航空航天中心（DLR）联合开发的，其目的是使用雷达干涉测量法生成全球数字高程模型（DEM）。2000 年 2 月 11 日至 22 日在 STS-99 任务期间获取了大约 80% 的陆地总面积（60°S—60°N）的雷达干涉数据（Neckel 等，2013）。SRTM DEM 主要采用两个波段传感器分别为 C 波段（波长 5.6 cm）的 SIR-C 传感器和 X 波段（波长 3.1 cm）的 X-SAR 传感器，然而由于 X 波段数据的条带宽度较窄，仅呈相隔 50 km 宽度交叉覆盖，因此 X 波段 DEM 不连续，无法覆盖整个研究区域（Farr 等，2007）。

本文使用的是空洞填充后的 1 弧秒 C 波段和 X 波段 SRTM DEM，可以分别从 USGS 网站（<https://dds.cr.usgs.gov> [2022-04-18]）和 DLR 网站（<https://www.dlr.de> [2022-04-18]）免费下载。C 波段和 X 波段 SRTM DEM 具有相同的水平参考（WGS84 基准）；但二者的垂直参考基准不同（C 波段为 EGM96 大地水准面，X 波段为 WGS84 椭球体），需在 DEM 配准之前进行高程基准转换。此外，两个 DEM 在数据质量方面具有相同的水平精度（绝对误差和相对误差分别为 20 m 和 15 m）。由于 X 波段数据的分辨率和信噪比稍高，因此 X 波段数据的垂直精度（绝对精度 16 m，相对精度 6 m）优于 C 波段数据（绝对精度 16 m，相对精度 10 m）（Berthier 等，2006）。

2.2.3 光学 DEM 数据

本文采用美国冰雪数据中心提供的光学 DEM 数据，该数据主要是通过 WorldView 卫星获取的

Level-1B (L1B) 全色 (450—800 nm) 影像, 采用自动化的开源 NASA 艾姆斯立体声管道方法 (ASP) 生成的数字高程模型 (DEM)。主要参数如表 1 所示, 单个 DEM 条带内的相对误差通常小于 1—2 m (Shean 等, 2016)。

2.2.4 冰川编目和气象数据

本文使用 RGI 6.0 (Randolph Glacier Inventory, RGI) 全球冰川编目数据确定冰川边界。RGI 是在世界冰川编目 (WGMS) 的基础上编制而成, 并已在多个大规模的全球评估和建模研究中应用 (Vaughan 等, 2013)。该数据库覆盖高亚洲地区的 95537 个冰川, 总冰川面积为 97605 km²。研究区内冰川覆盖面积为 93.8 km²。

中国区域地面气象要素驱动数据集, 是高时空分辨率近地表气象数据集。该数据集是以国际上现有的再分析资料和卫星遥感数据为背景场, 融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成。其时空分辨率均较高, 时间分辨率为 3 h, 水平空间分辨率为 0.1°, 精度介于气象局观测数据和卫星遥感数据之间, 可为中国区陆面过程模拟提供驱动数据。本文提取 2010 年—2015 年祁连山区域日际温度和降水数据, 并分析其与冰川物质平衡的联系。

2.2.5 积雪和植被覆盖数据

为获得稳定的基岩区域我们需要对非冰川区域进行冰川积雪和植被覆盖区域的去除。积雪范围数据使用的是全球 8 d 500 m SIN 网格的 MODIS/Terra 积雪覆盖数据, 此数据可以免费从国家冰雪数据中心 ([https://nsidc.org/data/MOD10A2/versions/6\[2022-04-18\]](https://nsidc.org/data/MOD10A2/versions/6[2022-04-18])) 获得。该积雪数据集主要是通过归一化差异降雪指数 (NDSI) 获得, 此指数由 8 天的 500 m 分辨率 MOD10A1 瓦片生成, 因积雪数据的有效时间是从 2000 年 2 月 24 日开始, 所以我们提取了 2000 年 2 月 24 日至 3 月 24 日的积雪范围用于去除积雪区域对 SRTM C/X 波段 DEM 之间的垂直偏差的影响。

植被覆盖数据主要采用的是中国向联合国提供的首个全球地理信息公共产品。GlobeLand30 是一种 30 m 分辨率的全球土地覆盖数据产品, 是通过使用各种多光谱图像来开发和更新的 WGS-84 坐标系下的数据。已发布产品共包括 10 个土地覆盖

类别, 分别是: 耕地、林地、草地、灌木地、湿地、水体、苔原、人造地表、裸地、冰川和永久积雪。在这项研究中, 我们仅使用了 3 种类型的数据: 耕地, 人造地表和裸地 (Jun 等, 2014)。

3 研究方法

随着 InSAR 技术和光学立体测绘技术的快速发展, 多时相、高精度的 DEM 日益增多。特别是 DLR 的 TanDEM-X 双站 InSAR 获得的高分辨率、高精度 DEM 和基于 WorldView、SPOT 等光学影像的高精度 DEM。这些高质量、大范围的 DEM 数据产品, 为利用多时相 DEM 估算冰川物质平衡提供了宝贵的基础资料。本文主要是利用多时相 DEM 估算冰川物质平衡, 其数据处理流程主要包括以下几个方面: 首先是数据预处理, 统一多源 DEM 的空间分辨率和坐标系统等 (陈昊楠 等, 2020); 其次是进行多时相 DEM 配准与差值处理, 与此同时进行奇异值去除 (高程变化结果中的粗差); 然后是系统误差的改正主要包括雷达穿透性改正和季节性改正; 最后统计冰川研究区高程变化的平均值并将高程变化转换到物质平衡。具体实现流程如图 2 所示。

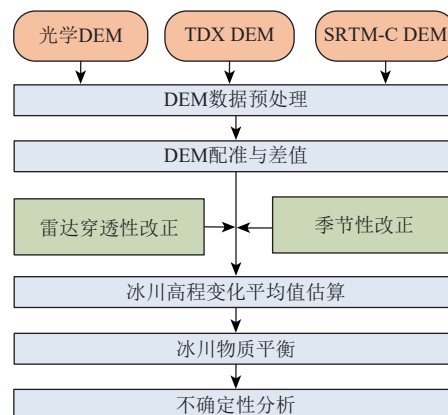


图2 数据处理技术路线

Fig. 2 Flowchart of data processing

3.1 DEM预处理

不同数据源的 DEM 往往会具有不同的时空分辨率、坐标系统以及高程基准等, 例如 SRTM-X DEM 的空间分辨率为 30 m, 高程基准为 WGS84 椭球面, 而 SRTM-C DEM 的空间分辨率有 30 m 和 90 m 两种, 高程基准为 EGM96 大地水准面。此外, 近年来随着星载光学摄影测量的不断发展,

光学影像的数据质量也大有不同, 利用光学影像生成的 DEM 空间分辨率也不尽相同, 所以在利用多时相 DEM 估算冰川物质平衡之前, 需要对其进行预处理, 基本处理步骤包括: (1) 坐标系统和高程基准的转换, 将研究区的所有 DEM 统一到一致的坐标系统和高程基准下, 一般采用 WGS84 坐标系和椭球面; (2) DEM 重采样, 将空间分辨率较低的 DEM 进行插值, 得到较高空间分辨率的 DEM, 使得所有 DEM 具有一致的空间分辨率。本文首先将 SRTM DEM 数据的坐标系统转到统一的 WGS84 系统, 其次利用三次样条插值法进行 DEM 重采样, 以 WordView DEM 为基准, 将所用到的 DEM 数据统一采样到 8 m 分辨率。

Paul (2008) 指出地形曲率较大的区域 DEM 重采样会引入高程误差。图 3 为 30 m SRTM 重采样到 8 m 的高程误差与曲率的相关性散点图, 可以看出 SRTM DEM 的曲率大多分布在 -0.01 到 0.02 m^{-1} , 相对应的重采样前后的 SRTM DEM 差值在 -0.1 — 0.2 m , 两者存在显著的线性关系。本文利用获得的线性关系方程式 ($y=9.617x-0.04$) 对高程误差进行了改正, 高程误差改正平均值约为 0.005 m 。另外, TanDEM-X DEM 与 WorldView DEM 分辨率相近, 故未进行重采样引起的高程误差改正。

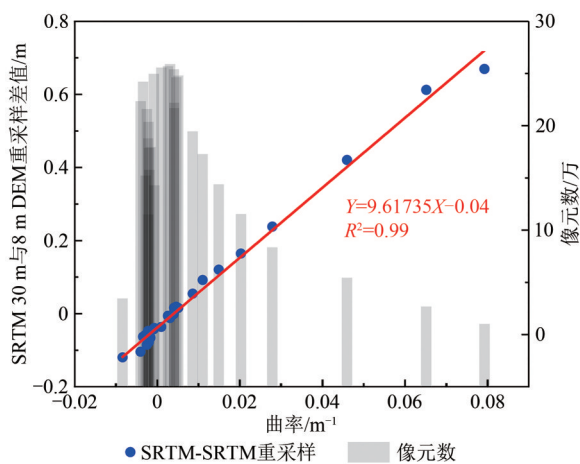


图3 SRTM 30 m 与 8 m DEM 重采样高程差与曲率的相关性
Fig. 3 Relation between curvature and the elevation differences computed from the original 30 m SRTM DEM and the one resampled from 8 m

3.2 DEM 配准方法

采用 Nuth 和 Kääb (2011) 提出的 DEM 高程差和坡度以及坡面朝向之间的关系, 进行配准, 获取 DEM 之间的偏移总量和偏移总方向。公式如下:

$$dh = a \times \cos(b - \psi) \times \tan(\alpha) + \bar{dh} \quad (1)$$

式中, dh 为不同 DEM 数据间的高程差异; ψ 和 α 分别为像元所对应的坡向和坡度; $\bar{dh}$ 为不同 DEM 数据间的整体高程差异。平面偏移会导致地面坡度产生偏差, 所以我们需要对不同 DEM 数据的高程差异基于坡度做归一化处理, 进而获得高程差异与坡向之间的三角函数关系, 公式如下所示:

$$\frac{dh}{\tan(\alpha)} = a \times \cos(b - \psi) + c$$

$$c = \frac{\bar{dh}}{\tan(\bar{\alpha})} \quad (2)$$

式中, 参数 a , b 和 c 可以通过回归分析获取, c 代表垂直偏移量; a 和 b 分别代表平面偏移的幅度和角度。不同 DEM 数据间 X , Y 和 Z 方向上的偏移量校正公式如下:

$$X = a \times \sin(b)$$

$$Y = a \times \cos(b)$$

$$Z = c \times \tan(\bar{\alpha}) \quad (3)$$

式中, a 和 b 分别代表平面偏移幅度和角度, $\bar{\alpha}$ 为 DEM 数据的平均坡度。

3.3 系统误差改正

3.3.1 SRTM C 波段穿透性改正

对于中低纬度地区的山地冰川而言, 雷达信号对冰雪的穿透深度是 SAR DEM 估算冰川物质平衡的一个重要的系统误差 (Gardelle 等, 2012; Lin 等, 2017; Zhou 等, 2018)。虽然 X 波段雷达信号对雪或冰有一定的穿透能力, 但是在先前青藏高原山地冰川的研究中基本被忽略, 通常将冰川区 SRTM X 波段和 C 波段的高程差作为 C 波段雷达信号在冰川区的穿透深度 (Gardelle 等, 2012)。然而, 在冬季 X 波段雷达信号对冰川也有一定的穿透性, 其穿透深度是不可忽略的, 所以本文将 SRTM C 波段穿透性改正分为两部分, 一是 SRTM C 波段与 X 波段的穿透性深度差异, 二是 X 波段的穿透深度。

SRTM C 波段与 X 波段的穿透性深度差异我们采用的是 DEM 差值法。首先我们将高亚洲地区按 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格进行划分, 然后通过 SRTM C 波段和 X 波段的高程做差, 获得该地区 SRTM C 波段和 X 波段的穿透性深度差异与高程的相关关系, 最后利用此关系式求得整个冰川区的 C 波段和 X 波段的穿透性深度差异。主要步骤如下: (1) 数据的预处

理, 将 SRTM C 波段的高程系统由 EGM96 转为 WGS84, 实现两个波段 DEM 的高程基准的统一。(2) SRTM C 波段与 X 波段 DEM 进行配准, 消除空间偏差后做差。(3) 利用基岩区 SRTM C 波段与 SRTM X 波段高程差为零这一原则得到非冰川区的高程偏差, 并从冰川区高程差中去除, 从而消除高程偏差的影响。值得注意的是, 此处基岩区指的是去除植被和积雪区的非冰川区。(4) 在冰川区利用 50 m 高程分段求取冰川区 SRTM C 波段和 X 波段的穿透性深度差异与高程的关系。

因 SRTM X 波段 DEM 与 TDX DEM 均为 X 波段数据, 所以在进行 SRTM X 波段穿透深度改正时采用的是 TanDEM-X 数据的穿透深度。因此, 本文采用 Liu 等 (2019a) 利用 1 月和 4 月的 TanDEM-X 数据获得的普若岗日地区的 X 波段的穿透性的平均值 (0.61 m) 进行 X 波段穿透深度改正。

3.3.2 季节性改正

采用 Wang 等 (2017) 利用 ICESat 数据得到的 2003 年—2009 年的季节性改正数据的平均值进行季节性改正。因 2013 年—2014 年的数据均在 12 月不需要改正, 只需将 2015 年 08 月的数据改正到 12 月份, 对获得的季节性改正数据按月平均, 获得最后的改正结果为 -0.23 ± 0.10 m。

3.4 冰川高程变化平均值估算

在数据预处理、DEM 配准以及各项系统性误差改正之后需要对获取的冰川表面高程变化进行统计分析, 为估算冰川物质平衡提供基础数据。但在进行统计工作之前, 采用两倍中误差方法剔除冰川表面高程变化结果中的奇异值, 以提高平均值估算的精度和准确性。为了抑制随机误差的影响我们采用 50 m 高程分段统计冰川高程变化平均值, 就是将冰川区的 DEM 分割成多个连续的高

程段 (如: 4100—4150 m、4150—4200 m 和 4200—4250 m 等) 并且假定单个高程段内 (如: 4100—4150 m) 的像元具有相似的高程变化结果, 然后分别计算各个高程段的冰川平均高程变化, 最后根据各个高程段的冰川面积, 采用面积加权方法 (该高程段像素个数与总像素个数的比值), 统计冰川区的高程变化平均值 (式 4)。

$$\overline{dh} = \frac{\sum dh_i \times S_i}{S_{\text{total}}} = \frac{\sum dh_i \times N_i}{\sum N_i} \quad (4)$$

式中, $\overline{dh}$ 为冰川区高程变化均值; S_i 和 S_{total} 分别为第 i 个高程区间内冰川面积和冰川总面积; dh_i 和 N_i 分别为第 i 个高程区间内高程变化均值和像元个数 (Liu 等, 2019a, 2020)。

3.5 冰川物质平衡估算

由于高亚洲地区气候条件恶劣, 人力很难到达, 所以无法获得 DEM 获取时间段内实测的冰川区密度。在此背景下, 通常采用密度模型估算的冰川密度进行冰川高程变化到冰川物质平衡的转换 (Liu 等, 2020)。具体公式如下:

$$\Delta B = dh \times \rho = (\overline{dh} - dh_{\text{pene}} - dh_{\text{season}}) \times \rho \quad (5)$$

式中, dh_{pene} 和 dh_{season} 分别为穿透性改正和季节性改正, ρ 为冰雪密度, 在本研究中采用 Huss 2013 年得到的适用于多种条件的冰川密度 850 ± 60 kg m⁻³ (Huss, 2013)。

3.6 不确定性分析

利用多时相 DEM 估算冰川物质平衡, 其误差来源主要包括以下几个方面: (1) 高程分段统计冰川高程变化均值的误差; (2) C 波段穿透性差异改正引起的误差; (3) 冰川季节性变化改正引起的误差。本文最终采用下式 (6) 评估冰川物质平衡不确定性:

$$\sigma_{\Delta B} = \sqrt{(\sigma_{\Delta h} \times \rho)^2 + (\sigma_{\Delta h} \times \rho)^2 + (\sigma_{\rho} \times \Delta h_{\text{pene}})^2 + (\sigma_{\Delta h_{\text{pene}}} \times \rho)^2 + (\sigma_{\rho} \times \Delta h_{\text{sea}})^2 + (\sigma_{\Delta h_{\text{sea}}} \times \rho)^2} \quad (6)$$

式中, $\sigma_{\Delta h}$, σ_{ρ} , $\sigma_{\Delta h_{\text{pene}}}$, $\sigma_{\Delta h_{\text{sea}}}$ 分别为平均冰川高程变化值误差、冰川密度误差、雷达波段穿透差异误差、季节性改正误差。其中, σ_{ρ} 为冰川密度值的 7%, 即 ± 60 kg/m³ (Huss, 2013), $\sigma_{\Delta h_{\text{sea}}}$ 为季节性改正的数值, $\sigma_{\Delta h_{\text{pene}}}$ 通过高程分段法计算的

穿透深度利用误差传播定律获得, $\sigma_{\Delta h}$ 计算公式如下:

$$\sigma_{\Delta h} = \sqrt{\sum \left(\left(\frac{N_i}{\sum N_i} \right)^2 \times \sigma_{\Delta h_i}^2 \right)} \quad (7)$$

式中, 在某一高程区间内, N_i 为像元个数, $\sigma_{\Delta h_i}^2$ 为

第*i*个高程段的高程变化均值误差其计算公式如下:

$$\sigma^2_{\Delta h_i} = \frac{STD_i^2}{n}, n = \frac{N_i \times PS}{2D} \tag{8}$$

式中, STD_i 为第*i*个高程段均值标准差, PS 是所用 DEM 的像素分辨率; D 是空间自相关的距离。Bolch 认为 D 约为像素大小的 20 倍 (Bolch 等, 2012)。

4 结果与讨论

4.1 DEM 配准前后结果分析

本文通过对 2013 年—2014 年和 2014 年—2015 年的 DEM 配准前后高程变化结果的对比来评判配准方法的可行性以及可靠性。如图 4 所示。

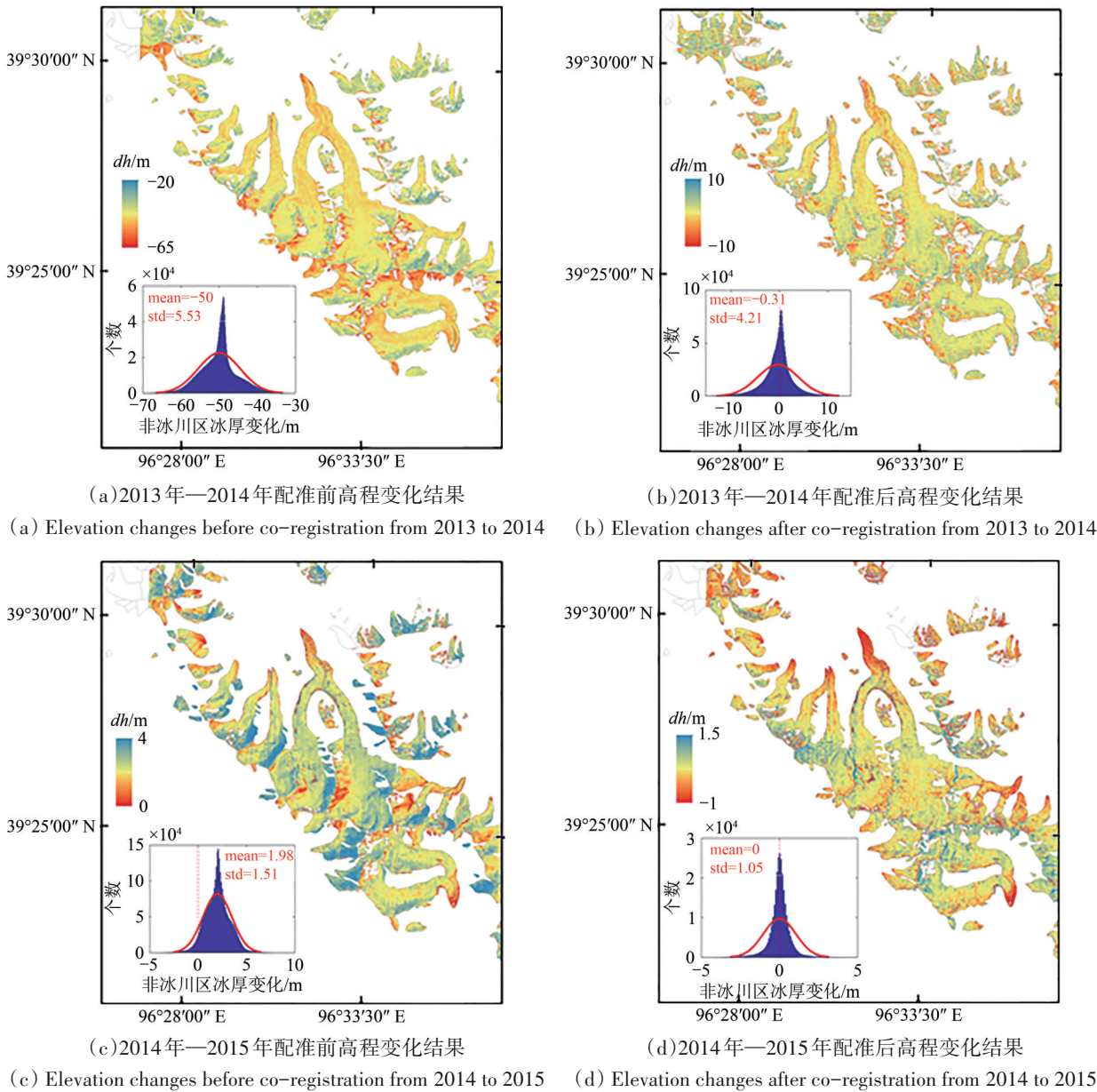


图 4 祁连山冰川配准前后高程变化,其中直方图表示非冰川冰厚变化

Fig. 4 Elevation changes before and after co-registration of Qilian Mountains Glacier where the histogram shows the elevation changes in non-glacial area

由图 4 得: (1) 因采用数据的时间间隔为 1 年左右, 故高程变化不会太大, 配准之后的高程变化值的范围减小, 平均值减小, 并向 0 附近靠拢, 表明配准后的结果精度更高。

(2) 配准后的标准差整体趋势是减小的, 数

据的离散程度减小, 配准后的结果更可靠。

4.2 SRTM C 波段穿透性深度

因为老虎沟 12 号冰川地区无 SRTM X 波段覆盖, 所以采用临近 1°×1° 网格区域获得的穿透性深度

与高程的关系式进行外推获得。采用临近网格 N39E095 的穿透深度差异数据，此网格 SRTMC/X 的穿透深度差异与高程呈现线性相关关系，方程式为 $Y=0.00409X-19.81$ （详见 Li 等，2021），具体如图 5 所示。

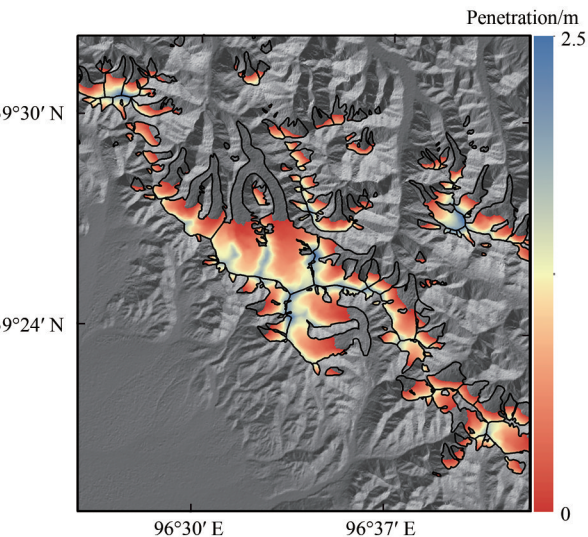


图 5 穿透性改正数据
Fig. 5 Penetration correction data

4.3 祁连山西段冰川高程变化结果分析

(1) 2013 年—2014 年冰厚变化。2013 年—2014 年老虎沟 12 号冰川高程变化信号明显（图 6），冰川末端高程变化为负，表明末端处于消融状态且越靠近末端消融越快，而冰川上游高程变化为正处于积累状态。祁连山西段冰川的高程变化均值为 $-0.35\pm0.034\text{ m}$ ，老虎沟 12 号冰川的高程变化均值为 $-0.32\pm0.024\text{ m}$ （表 2），物质平衡为 $-0.33\pm0.04\text{ m w.e./a}$ ，表明 2013 年—2014 年老虎沟 12 号冰川处于亏损状态，这与刘宇硕等实测的 2014 年老虎沟 12 号物质平衡数据（ -0.49 m w.e./a ）相近（刘宇硕，2018）。

(2) 2014 年—2015 年冰厚变化。由图 7 可以看出祁连山西段地区的冰川高程变化在 $\pm1\text{ m}$ 波动，明显比 2013 年—2014 年的高程变化幅度要小，图中祁连山西段冰川的高程变化均值为 $-0.03\pm0.004\text{ m}$ ，老虎沟 12 号冰川的高程变化均值在 -0.04 m 左右（表 2），从图 7 中可以明显看出冰川末端区域处于消融状态。我们以老虎沟 12 号冰川为例，发现该冰川在 2014 年—2015 年的高程变化的平均值与 2013 年—2014 年相比要小，表明冰川厚度减薄变缓。

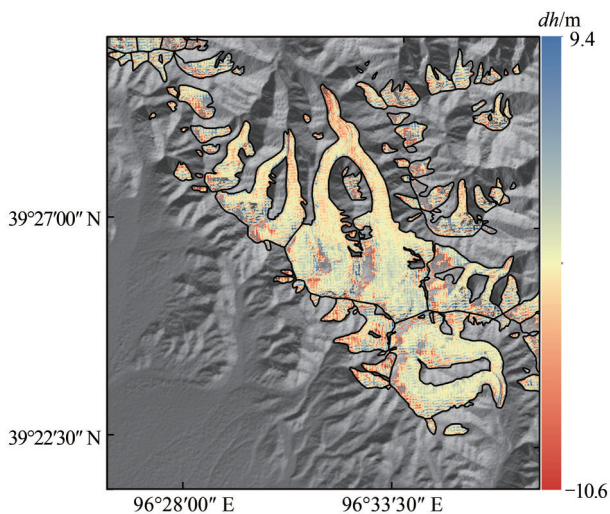


图 6 祁连山西段冰川 2013 年—2014 年高程变化结果
Fig. 6 Glacier elevation changes in the West Qilian Mountains from 2013 to 2014

表 2 2013 年—2014 年—2015 年祁连山西段冰川和老虎沟 12 号冰川配准后统计结果(两倍中误差)

区域	时间/年	最小值/m	最大值/m	平均值/m	标准差/m
祁连山西段	2013—2014	-10	10	-0.35	0.034
	2014—2015	-3	3	-0.028	0.004
	2000—2015	-13	13	-0.115	0.040
老虎沟 12 号冰川	2013—2014	-10	10	-0.32	0.024
	2014—2015	-3	3	-0.04	0.005
	2000—2015	-13	13	-0.15	0.053

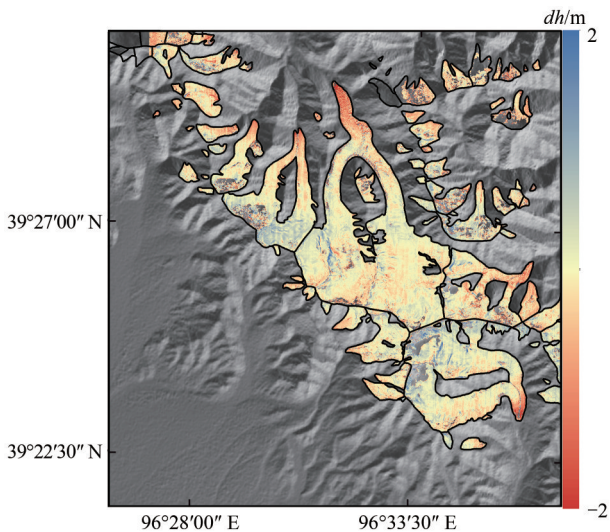


图 7 祁连山西段冰川 2014 年—2015 年高程变化结果
Fig. 7 Glacier elevation changes in the West Qilian Mountains from 2014 to 2015

(3) 2000 年—2015 年冰厚变化。本文通过对 WorldView DEM 与 SRTM 进行差值, 经过穿透性和季节性改正, 最终获得祁连山西段高程变化结果, 如下图 8 所示。从图 8 中可以看出 2000 年—2015 年高程变化集中在-15—15 m, 老虎沟 12 号冰川的高程变化均值为-0.15 m/a, 整体上冰川处于消融状态。由于冰川末端消融较大, 为了使结果更精确, 本文未对 2000 年—2015 年的冰川高程变化进行两部中误差去除。图 8 明显可以看出冰川末端处于消融状态且越靠近末端消融越快。

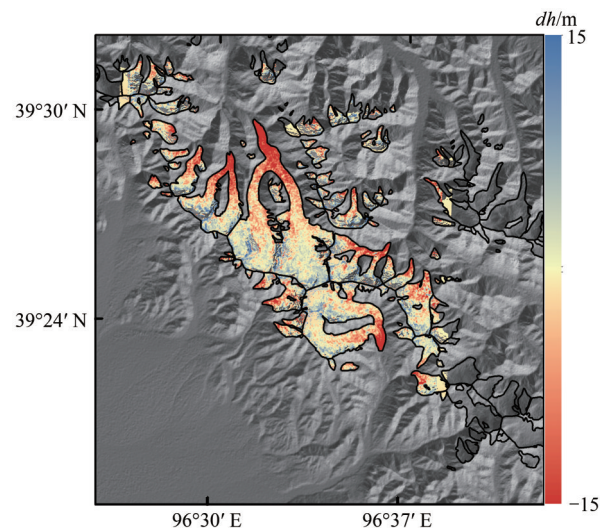


图 8 祁连山西段冰川 2000 年—2015 年高程变化结果
Fig. 8 Glacier elevation changes in the West Qilian Mountains from 2000 to 2015

4.4 祁连山西段冰川物质平衡结果分析

根据大地测量法获得祁连山西段冰川 2013 年—2014 年—2015 年的高程变化, 结合冰雪密度进而获得其冰川物质平衡。结果表明祁连山西段在 2013 年—2014 年和 2014 年—2015 年的物质平衡变化速率分别为 $-0.27 \pm 0.014 \text{ m w.e./a}$ 和 $-0.024 \pm 0.084 \text{ m w.e./a}$, 2000 年—2015 年的物质平衡为 $-0.098 \pm 0.01 \text{ m w.e./a}$ 。另外, 老虎沟 12 号冰川的物质平衡由 2013 年—2014 年的 $-0.33 \pm 0.04 \text{ m w.e./a}$ 减小到 2014 年—2015 年的 $-0.036 \pm 0.09 \text{ m w.e./a}$, 其 2000 年—2015 年的物质平衡为 $-0.13 \pm 0.02 \text{ m w.e./a}$ 。可以看出整体上祁连山西段处于负物质平衡状态 2014 年—2015 年物质平衡相对 2013 年—2014 年有所增加, 物质趋于平衡, 尤其是老虎沟 12 号冰川。相比 2013 年—2014 年结果, 2014 年—2015 年冰川物质平衡的不确定性较大, 主要是由于季节性改正误差的影响。由图 9、图 10 和表 3 可以看出, 在

2015 年祁连山地区降水量显著增加且温度与前几年相比变化不大 (图 9、图 10), 所以祁连山西段冰川在 2014 年—2015 年物质平衡有所增加的主要原因为降水量增加。综合以上分析结果, 祁连山冰川物质平衡处于稳定且略有亏损的阶段, 2014 年—2015 年物质平衡相对 2013 年—2014 年略有增加的主要原因为降水量增加。

表 3 2010 年—2015 年祁连山地区温度和降水统计

Table 3 Statistics of temperature and precipitation in Qilian Mountains from 2010 to 2015

	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年
年平均降水/mm	0.42	0.38	0.61	0.38	0.36	0.57
年累积降水/mm	151.74	140.43	224.22	139.00	130.14	208.99
年平均温度/℃	-3.67	-3.22	-3.77	-2.29	-3.00	-3.40

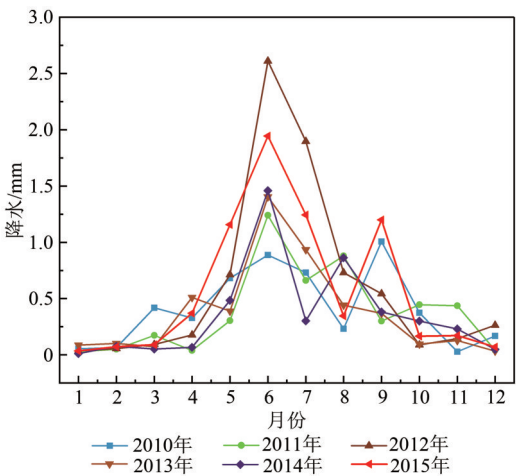


图 9 2010 年—2015 年祁连山地区月均降水量
(每年 01-01—12-31)

Fig. 9 Average monthly precipitation in the Qilian Mountains from 2010 to 2015 (January 1 to December 31 each year)

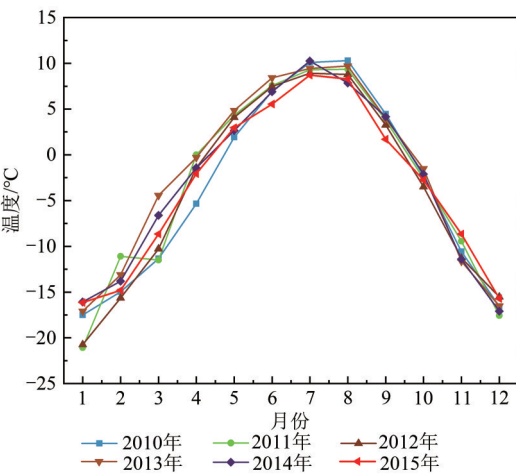


图 10 2010 年—2015 年祁连山地区温度 (每年 01-01—12-31)
Fig. 10 The temperature in the Qilian Mountains from 2010 to 2015 (from January 1 to December 31 each year)

4.5 祁连山西段冰川高程变化与海拔之间的关系

同一区域,冰川整体上高程变化是类似的,但依然存在局部空间差异,往往与冰川海拔、冰川地形坡度、坡向和冰川动力等因素有关。本研究对老虎沟冰川高程变化与海拔之间的关系进行了剖面线

分析,剖面线位置如图11绿线所示。由图11可以看出,随着海拔的升高,冰川高程变化由负转正,冰川高程变化结果与海拔之间呈负正相关关系,表明海拔是冰川表面高程变化的一种重要因素。

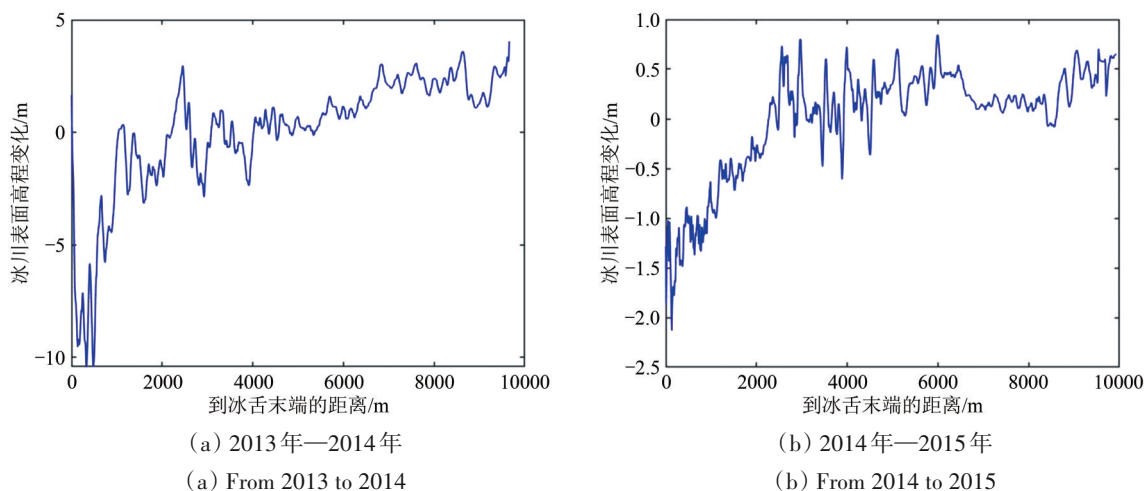


图11 老虎沟12号冰川中心线剖面图

Fig. 11 Centerline profile of Laohugou No.12 Glacier

5 结论

本文利用大地测量法,结合多时相高精度DEM数据,充分考虑SRTM C波段的穿透深度和季节性改正两类系统误差的影响,获得了祁连山西段冰川2000年—2013年和2013年—2015年的冰厚变化以及冰川物质平衡,尤其是老虎沟12号冰川的2000年—2013年和2013年—2015年多时段的冰川物质平衡结果。

结果表明:2013年—2015年祁连山西段冰川冰厚减薄速率变缓,冰厚变化结果由2013年—2014年的 -0.35 ± 0.024 m变为2014年—2015年的 -0.03 ± 0.004 m,物质平衡变化速率也由 -0.27 ± 0.014 m w.e./a减缓至 -0.024 ± 0.084 m w.e./a,主要原因是2015年降水量的增加。其中就老虎沟12号冰川而言,冰川消融呈现相同的变化规律,即2013年—2015年冰川消融速率降低。老虎沟12号冰川的2013年—2014年和2014年—2015年的物质平衡分别为 -0.33 ± 0.04 m w.e./a和 -0.036 ± 0.09 m w.e./a。结合2000年—2015年的冰川物质平衡结果表明祁连山西段冰川尤其是老虎沟12号冰川在2000年—2015年整体处于消融状态。另外本文通过分析冰川中线位置处的高程变化,发现冰川高程变化与

海拔之间呈正相关关系,随着海拔的升高,冰川高程变化越小。

本研究初步验证了光学立体测绘卫星DEM数据在求解冰川年际物质平衡方面的可行性,但受限于数据获取问题,难以获得长时间序列的冰川年际变化信息。随着卫星遥感技术的不断发展,高精度DEM数据将在长时间序列的冰川物质平衡估算中发挥更大的作用。

志 谢 感谢美国地质调查局(USGS)提供的SRTM-C DEM,德国航空航天中心(DLR)的提供SRTM-X DEM和美国冰雪数据中心提供的World-View DEM数据;感谢时空三级环境大数据平台提供的地面气象要素驱动数据;感谢匿名审稿人的宝贵意见和建议。

参考文献(References)

- Berthier E, Arnaud Y, Vincent C and Rémy F. 2006. Biases of SRTM in high-mountain areas: implications for the monitoring of glacier volume changes. *Geophysical Research Letters*, 33(8): L08502 [DOI: 10.1029/2006gl025862]
- Bhattacharya A, Bolch T, Mukherjee K, King O, Menounos B, Kapitsa V, Neckel N, Yang W and Yao T D. 2021. High Mountain Asian

- glacier response to climate revealed by multi-temporal satellite observations since the 1960s. *Nature Communications*, 12(1): 4133 [DOI: 10.1038/s41467-021-24180-y]
- Bolch T, Kulkarni A, Kääb A, Huggel C, Paul F, Cogley J G, Frey H, Kargel J S, Fujita K, Scheel M, Bajracharya S and Stoffel M. 2012. The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*, 336(6079): 310-314 [DOI: 10.1126/science.1215828]
- Breit H, Fritz T, Balss U, Niedermeier A, Eineder M, Yague-Martinez N and Rossi C. 2010. Processing of bistatic TanDEM-X data//Proceedings of 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu: IEEE: 2640-2643 [DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5653602]
- Chen H N, Xu S F, Huang Y, Wang S J, Shu S, Yu B L and Wu J P. 2020. Vertical accuracy correction and analysis of ASTER GDEM V2 over Antarctic Glacier. *Journal of Remote Sensing*, 24(8): 1010-1022 (陈昊楠, 许诗枫, 黄艳, 王淑杰, 舒松, 余柏菡, 吴健平. 2020. ASTER GDEM V2 的南极冰川高程误差校正及精度分析. *遥感学报*, 24(8): 1010-1022) [DOI: 10.11834/jrs.20208361]
- Cogley J G. 2016. Glacier shrinkage across High Mountain Asia. *Annals of Glaciology*, 57(71): 41-49 [DOI: 10.3189/2016AoG71A040]
- Du W T, Qin X, Kang S C, Cui X Q and Sun W J. 2016. Variations in annual accumulation recorded in a Laohugou ice core from the northeastern Tibetan Plateau and their relationship with atmospheric circulation. *Environmental Earth Sciences*, 75(9): 845 [DOI: 10.1007/s12665-016-5601-x]
- Farr T G, Rosen P A, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S, Kobrick M, Paller M, Rodriguez E, Roth L, Seal D, Shaffer S, Shimada J, Umland J, Werner M, Oskin M, Burbank D and Alsdorf D. 2007. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2): RG2004 [DOI: 10.1029/2005rg000183]
- Gao Y P, Yao X J, An L N, Li X F, Gong P and Qi M M. 2018. Change of ice volume in the Qilian mountains during the period from 2000 to 2010. *Arid Zone Research*, 35(2): 325-333 (高永鹏, 姚晓军, 安丽娜, 李晓峰, 宫鹏, 祁苗苗. 2018. 2000-2010 年祁连山冰川冰储量变化. *干旱区研究*, 35(2): 325-333) [DOI: 10.13866/j.azr.2018.02.09]
- Gardelle J, Berthier E and Arnaud Y. 2012. Impact of resolution and radar penetration on glacier elevation changes computed from DEM differencing. *Journal of Glaciology*, 58(208): 419-422 [DOI: 10.3189/2012JoG11J175]
- Gardelle J, Berthier E, Arnaud Y and Kääb A. 2013. Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999-2011. *The Cryosphere*, 7(4): 1263-1286 [DOI: 10.5194/tc-7-1263-2013]
- Gardner A S, Moholdt G, Cogley J G, Wouters B, Arendt A A, Wahr J, Berthier E, Hock R, Pfeffer W T, Kaser G, Ligtenberg S R M, Bolch T, Sharp M J, Hagen J O, van den Broeke M R and Paul F. 2013. A reconciled estimate of glacier contributions to sea level rise: 2003 to 2009. *Science*, 340(6134): 852-857 [DOI: 10.1126/science.1234532]
- Houghton J T, Ding Y, Grigg D J, Noguer M, van der Linden P J, Dai X, Maskell K and Johnson C A. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge: University of Cambridge
- Huss M. 2013. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *The Cryosphere*, 7(3): 877-887 [DOI: 10.5194/tc-7-877-2013]
- Jacob T, Wahr J, Pfeffer W T and Swenson S. 2012. Recent contributions of glaciers and ice caps to sea level rise. *Nature*, 482(7386): 514-518 [DOI: 10.1038/nature10847]
- Jun C, Ban Y F and Li S N. 2014. China: open access to earth land-cover map. *Nature*, 514(7523): 434-434 [DOI: 10.1038/514434c]
- Kääb A, Treichler D, Nuth C and Berthier E. 2015. Brief communication: contending estimates of 2003-2008 glacier mass balance over the Pamir - Karakoram - Himalaya. *The Cryosphere*, 9(2): 557-564 [DOI: 10.5194/tc-9-557-2015]
- Li X, Chen T and Li X W. 2020. *Cryosphere Remote Sensing*. Beijing: Science Press. (李新, 车涛, 李新武. 2020. 冰冻圈遥感学. 北京: 科学出版社)
- Lin H, Li G, Cuo L, Hooper A and Ye Q H. 2017. A decreasing glacier mass balance gradient from the edge of the Upper Tarim Basin to the Karakoram during 2000-2014. *Scientific Reports*, 7(1): 6712 [DOI: 10.1038/s41598-017-07133-8]
- Liu L, Jiang L M, Jiang H J, Wang H S, Ma N and Xu H Z. 2019a. Accelerated glacier mass loss (2011-2016) over the Puruogangri ice field in the inner Tibetan Plateau revealed by bistatic InSAR measurements. *Remote Sensing of Environment*, 231: 111241 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111241]
- Liu L, Jiang L M, Sun Y L, Wang H S, Sun Y F and Xu H Z. 2019b. Diurnal fluctuations of glacier surface velocity observed with terrestrial radar interferometry at Laohugou No. 12 Glacier, western Qilian mountains, China. *Journal of Glaciology*, 65(250): 239-248 [DOI: 10.1017/jog.2019.1]
- Liu L, Jiang L M, Wang H S, Ding X L and Xu H Z. 2020. Estimation of glacier mass loss and its contribution to river runoff in the source region of the Yangtze River during 2000-2018. *Journal of Hydrology*, 589: 125207 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125207]
- Liu Y S. 2018. Dataset of mass balance on the Laohugou Glacier No. 12, western Qilian Mountains (2014-2018) (A Big Earth Data Platform for Three Poles (刘宇硕. 2018. 祁连山老虎沟 12 号冰川物质平衡数据(2014-2018). 时空三极环境大数据平台) [DOI: 10.11888/Glacio.tpc.270006]
- Liu Y S, Qin X, Gao S R, Zhang M J, Du W T and Zhang X Y. 2013. Accuracy evaluation of glacier area information extracted from Landsat-5 TM remote sensing image. *Journal of Northwest A and F University (Natural Science Edition)*, 41(12): 209-219 (刘宇硕, 秦翔, 高思如, 张明杰, 杜文涛, 张雪艳. 2013. Landsat-5 TM 影像在冰川面积信息提取中的精度评价. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 41(12): 209-219) [DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2013.12.073]
- Matsuo K and Heki K. 2010. Time-variable ice loss in Asian high mountains from satellite gravimetry. *Earth and Planetary Science Letters*, 290(1/2): 30-36 [DOI: 10.1016/j.epsl.2009.11.053]
- Neckel N, Braun A, Kropáček J and Hochschild V. 2013. Recent mass

- balance of the Purogangri Ice Cap, central Tibetan Plateau, by means of differential X-band SAR interferometry. *The Cryosphere*, 7(5): 1623-1633 [DOI: 10.5194/tc-7-1623-2013]
- Neckel N, Kropáček J, Bolch T and Hochschild V. 2014. Glacier mass changes on the Tibetan Plateau 2003-2009 derived from ICESat laser altimetry measurements. *Environmental Research Letters*, 9(1): 014009 [DOI: 10.1088/1748-9326/9/1/014009]
- Nuth C and Kääb A. 2011. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*, 5(1): 271-290 [DOI: 10.5194/tc-5-271-2011]
- Qin X, Cui X Q, Du W T, Dong Z W, Ren J W and Chen J Z. 2015. Variations of the alpine precipitation from an ice core record of the Laohugou glacier basin during 1960-2006 in western Qilian Mountains, China. *Journal of Geographical Sciences*, 25(2): 165-176 [DOI: 10.1007/s11442-015-1160-4]
- Shean D E, Alexandrov O, Moratto Z M, Smith B E, Joughin I R, Porter C and Morin P. 2016. An automated, open-source pipeline for mass production of digital elevation models (DEMs) from very-high-resolution commercial stereo satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 116: 101-117 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.03.012]
- Shean D E, Bhushan S, Montesano P, Rounce D R, Arendt A and Osm-anoglu B. 2020. A systematic, regional assessment of high mountain Asia glacier mass balance. *Frontiers in Earth Science*, 7: 363 [DOI: 10.3389/feart.2019.00363]
- Sun M P, Liu S Y, Yao X J, Guo W Q and Xu J L. 2015. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half century: based on the revised first and second Chinese glacier inventory. *Acta Geographica Sinica*, 70(9): 1402-1414 (孙美平, 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 许君利. 2015. 近50年来祁连山冰川变化——基于中国第一、二次冰川编目数据. *地理学报*, 70(9): 1402-1414) [DOI: 10.11821/dlxb201509004]
- Sun W J, Qin X, Du W T, Liu W G, Liu Y S, Zhang T, Xu Y T, Zhao Q D, Wu J K and Ren J W. 2014. Ablation modeling and surface energy budget in the ablation zone of Laohugou glacier No. 12, western Qilian mountains, China. *Annals of Glaciology*, 55(66): 111-120 [DOI: 10.3189/2014AoG66A902]
- Sun Y F, Jiang L M, Liu L, Sun Q S, Wang H S and Hsu H. 2018. Mapping glacier elevations and their changes in the western Qilian mountains, northern Tibetan Plateau, by Bistatic InSAR. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(1): 68-78 [DOI: 10.1109/jstars.2017.2764751]
- Toutin T, Schmitt C, Berthier E and Clavet D. 2011. DEM generation over ice fields in the Canadian Arctic with along-track SPOT5 HRS stereo data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 37(4): 429-438 [DOI: 10.5589/m11-052]
- Vaughan D G, Comiso J C, Allison I, Carrasco J, Kaser G, Kwok R, Mote P, Murray T, Paul F, Ren J, Rignot E, Solomina O, Steffen K, Zhang T. 2013. Observations: cryosphere//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V and Midgley P M, eds. *Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press: 317-382 [DOI: 10.1017/CBO9781107415324.012]
- Wang Q Y, Yi S, Chang L and Sun W K. 2017. Large-scale seasonal changes in glacier thickness across high mountain Asia. *Geophysical Research Letters*, 44(20): 10427-10435 [DOI: 10.1002/2017gl075300]
- Wang Y Z, Ren J W, Qin D H and Qin X. 2013. Regional glacier volume changes derived from satellite Data: a case study in the Qilian Mountains. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 35(3): 583-592 (王玉哲, 任贾文, 秦大河, 秦翔. 2013. 利用卫星资料反演区域冰川冰量变化的尝试——以祁连山为例. *冰川冻土*, 35(3): 583-592)
- Wang Y Z, Zhang T, Ren J W, Qin X, Liu Y S, Sun W J, Chen J Z, Ding M H, Du W T and Qin D H. 2018. An investigation of the thermomechanical features of Laohugou Glacier No. 12 on Qilian Shan, western China, using a two-dimensional first-order flow-band ice flow model. *The Cryosphere*, 12(3): 851-866 [DOI: 10.5194/tc-12-851-2018]
- Xie Z C and Liu C H. 2010. *Introduction to Glaciology*. Shanghai: Shanghai Science Popular Press (谢自楚, 刘潮海. 2010. *冰川学导论*. 上海科学普及出版社)
- Yang D Q, Liu C H, Wang C Z, Elder K, Kattelmann R, Ушнуруев С Н and Чичаков С. 1992. Studies of measurement and calculation methods of accumulation on glacier No.1. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 14(1): 1-10 (杨大庆, 刘潮海, 王纯足, Elder K, Kattelmann R, Ушнуруев С Н, Чичаков С. 1992. 冰川积累量测量和计算方法研究. *冰川冻土*, 14(1): 1-10)
- Yao T D, Thompson L, Yang W, Yu W S, Gao Y, Guo X J, Yang X X, Duan K Q, Zhao H B, Xu B Q, Pu J C, Lu A X, Xiang Y, Kattel D B and Joswiak D. 2012. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. *Nature Climate Change*, 2(9): 663-667 [DOI: 10.1038/nclimate1580]
- Yu G B, Li Z Q and Wang P Y. 2014. Glacier changes at the Daxue Mountain and Danghenan Mountain of west Qilian Mountains in recent 50 years. *Arid Land Geography*, 37(2): 299-309 (于国斌, 李忠勤, 王璞玉. 2014. 近50a祁连山西段大雪山和党河南山的冰川变化. *干旱区地理*, 37(2): 299-309) [DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2014.02.012]
- Zhang G Q, Chen W F, Li G, Yang W, Yi S and Luo W. 2020. Lake water and glacier mass gains in the northwestern Tibetan Plateau observed from multi-sensor remote sensing data: implication of an enhanced hydrological cycle. *Remote Sensing of Environment*, 237: 111554 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111554]
- Zhang Q B, Kang S C and Wang J. 2017. Elevation change of the Laohugou Glacier No. 12 in the western Qilian Mountains from 2000 to 2014. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 39(4): 733-740 (张其兵, 康世昌, 王晶. 2017. 2000-2014年祁连山西段老虎沟12号冰川高程变化. *冰川冻土*, 39(4): 733-740)
- Zhang Y S, Liu S Y, Shangguan D H, Li J and Zhao J D. 2012. Thinning and shrinkage of Laohugou No. 12 glacier in the Western Qilian Mountains, China, from 1957 to 2007. *Journal of Mountain Science*, 9(3): 343-350 [DOI: 10.1007/s11629-009-2296-4]

Zhou J M, Zhang X, Liu Z P and Li Z. 2021. Extraction and analysis of mountain glacier movement from GF-1 satellite data. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(2): 530-538 (周建民, 张鑫, 刘志平, 李震. 2021. 高分一号山地冰川运动速度提取与分析. *遥感学报*, 25(2): 530-538) [DOI: 10.11834/jrs.20219080]

Zhou Y S. 2019. Investigation of glacier mass balance in the Qinghai-Tibet Plateau and its surroundings based on multi-source Remote Sensing data. *Geography and Geo-information Science*, 35(4):

142 (周玉杉. 2019. 基于多源遥感数据的青藏高原及其周边区域冰川物质平衡变化研究. *地理与地理信息科学*, 35(4): 142) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2019.04.023]

Zhou Y S, Li Z W, Li J, Zhao R and Ding X L. 2018. Glacier mass balance in the Qinghai-Tibet Plateau and its surroundings from the mid-1970s to 2000 based on Hexagon KH-9 and SRTM DEMs. *Remote Sensing of Environment*, 210: 96-112 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.020]

Multi-period mass balance estimation of glaciers in the western Qilian Mountains based on the combination of bistatic SAR DEM and WordView DEM

LI Chao^{1,2}, JIANG Liming^{1,2}, LIU Lin^{1,3}, LI Tao^{1,2}, CHEN Yuanyuan^{1,4}

1. State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. School of Earth and Planetary, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. MOE Key Laboratory of Fundamental Physical Quantities Measurement, School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

4. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: As a sensitive indicator of climate change, the glacial mass balance is of great relevance to regional water resource management, glacier disaster prevention and control, and global sea-level change prediction. With the intensification of global warming, the melting of glaciers in the western Qilian Mountains has accelerated since 2000. However, in recent years, not much is known about the interannual mass balance changes in this area, especially in Laohugou Number 12 glacier.

In this paper, worldview optical stereo mapping, SRTM, and TanDEM-X bistatic InSAR are used to generate multisource DEM data, and the DEM difference method is used to obtain the interannual ice thickness change rate of the western Qilian Mountains from 2013 to 2014 and 2014 to 2015, and the average ice thickness change rate from 2000 to 2015. Results of the glacier mass balance for the corresponding period are obtained. On this basis, taking Laohugou Glacier Number 12 as an example, the glacier mass balance change rate during the three periods of 2013—2014, 2014—2015, and 2000—2015 is estimated, and the impact of precipitation and temperature changes on the mass balance changes are analyzed.

The results show the ice thickness change rates of the western Qilian Mountains from 2013 to 2014 and 2014 to 2015 were -0.35 ± 0.034 m and -0.028 ± 0.004 m, respectively, and the mass balance change rates were -0.27 ± 0.014 m w.e./year and -0.024 ± 0.084 m w.e./year, respectively. The average mass balance of Laohugou Number 12 Glacier from 2000 to 2015 was -0.013 ± 0.02 m w.e./year, and the glacier was in a state of melting. The glacier loss rate slowed down from -0.33 ± 0.04 m w.e./year in 2013—2014 to -0.036 ± 0.09 m w.e./year in 2014—2015, which was mainly related to the increase in precipitation in 2015.

This paper verifies the feasibility of high-quality optical stereo mapping satellite DEM data in solving the interannual mass balance problem of mountain glaciers.

Key words: remote sensing, WorldView DEM, TanDEM-X DEM, Laohugou No. 12 Glacier, mass balance, InSAR, Qilian Mountains

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2017YFA0603103); National Natural Science Foundation of China (No.42174046)