

引用格式: Shi Jiankang, Sun Xiaohui. Comparative Study on Extraction Methods of Glacier Height Change in Qinghai-Tibet Plateau based on CryoSat-2 Radar Altimeter[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2019, 34(6): 1173-1180. [史建康, 孙晓慧. 基于CryoSat-2雷达高度计青藏高原地区冰川高度变化提取方法对比[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(6): 1173-1180.]
doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2019.6.1173

基于CryoSat-2雷达高度计青藏高原地区冰川高度变化提取方法对比

史建康¹, 孙晓慧^{2,3}

(1. 海南省环境科学研究院, 海南 海口 570026;
2. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 基于2010~2016年CryoSat-2雷达高度计SARIn模式的Level 2测高数据, 结合青藏高原地区冰川矢量数据以及全球GEDM数据, 通过重叠脚印法、伪平面拟合法以及较新的曲面拟合法提取青藏高原地区典型冰川冰帽的高度变化值。结果表明: ①CryoSat-2测高数据应用该3种方法提取山地冰川高度变化具备可行性; ②提取高度变化的3种方法各有优劣, 以此提供了提取山地冰川高度变化的方法选择的依据; ③应用上述3种方法获取的青藏高原地区典型冰川冰帽2010~2016年的定量高度变化结果, 绝大多数的冰川都处于消融状态且3种方法提取的高度变化结果增、减趋势一致。处于西昆仑山脉的中峰冰川、古里雅、土则岗目冰川缩减速率较慢, 而帕米尔高原的慕士塔格冰川缩减略快, 两者的缩减速度都趋于平缓。处于念青唐古拉山脉的来古、恰青冰川高度变化速率最大。

关键词: CryoSat-2; 冰川高度变化; 重叠脚印法; 伪平面拟合; 曲面拟合

中图分类号: TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2019)06-1173-08

1 引言

气候变化是现代地球科学研究的热点问题之一。政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在2013年指出, 1971年以来全球冰川每年减少2260亿吨, 近几十年冰川缩减尤为严重^[1]。冰川作为冰冻圈的重要组成部分之一, 其变化很大程度上影响着气候的变化。冰川对一些气候因子变化感应敏感, 因此冰川成为人们研究气候变化的重要标本, 尤其是那些处于温带的山地冰川, 被认为是气候变化的最佳天然指示器之一^[2]。我国拥有世界中低纬度面积最大的山地冰川, 冰储量约为5 600 km³^[3]。近几十年来,

青藏高原地区80.8%的冰川在退缩^[4], 1970~2008年冰川面积减少了14.3%^[5], 长期的冰川消融和退缩, 会使得冰川处于负物质平衡状态, 导致一些自然灾害的发生^[6], 如冰湖溃决等。因此在我国, 监测山地冰川变化对于研究气候变化以及人民安全具有重要意义。

在冰川变化研究中, 侧重于3个参数的测量: 冰川面积、长度以及高度或厚度变化。对于冰川面积、长度变化研究, 由于高精度、高分辨率和高重访率的遥感影像的不断出现, 使得冰川长度和面积变化研究得到了快速的发展, 现已有多种较为成熟的自动提取的方法。然而冰川高度变化的提取方法

收稿日期: 2018-10-23; 修订日期: 2019-10-25

基金项目: 中国科学院国际合作局对外合作重点项目(131X11KYSB20160061)资助。

作者简介: 史建康(1980—), 男, 安徽利辛人, 高级工程师, 主要从事生态调查与评估研究。E-mail: stanking16888@163.com。

有限,早期使用安插花杆的方法计算冰川表面高度变化,该方法能够获得连续且高精度的数据。随着GPS的发展,差分GPS方法也用于估算冰川表面高程变化^[7],但是上述两种方法都需要耗费大量的人力物力,加之我国绝大多数山地冰川海拔高、温度低、地形复杂,因此具有很多的限制性因素。随着遥感技术以及卫星测高技术的发展,ICESat、CryoSat-2等测高卫星,使得精确获得冰川高度变化成为了可能,且已经广泛应用于南极冰盖的高度变化监测^[7-8],已有的ICESat和CryoSat-2数据也被应用于计算北极海冰的厚度和体积^[9-10]。同时ICESat测高数据在监测青藏高原山地冰川冰面高程以及湖泊水位变化上也取得了一定的研究成果^[11-12],而CryoSat-2作为运行至今的测高卫星,其测高数据较少被应用于山地冰川。

目前雷达高度计用于计算冰川高度变化的方法有重叠脚印法、重复轨道平面拟合法。重叠脚印法是公认精度最高的方法,但是会受到数据量的限制,平面拟合法能够提高数据的利用率,因此被广泛应用于两极冰川的高度变化提取。随后有不少学者对传统方法进行了改进,使用更高阶的回归函数对冰川进行曲面拟合。Wouters等对重复轨平面拟合方法做了改进,将一个网格看作一个平面,利用一个网格内所有数据进行平面拟合估算冰川高度变化率,称为伪重复轨平面拟合法,同时考虑在大网格内表面地形的影响^[13]。

本文将CryoSat-2测高数据用于青藏高原地区,提取山地冰川典型区域的高度变化率,验证该测高数据具备提取山地冰川高度变化的可行性。进一步对传统的重叠脚印法及改进的伪平面拟合法、曲面拟合法进行对比分析,总结3种方法用于山地冰川的优缺点,以此提供在山地冰川上提取高度变化率时方法选择的依据,获取青藏高原地区典型冰川冰帽2010~2016年的高度变化率。

2 研究区域与数据

2.1 研究区概况

研究区域为青藏高原地区典型山地冰川。青藏高原拥有极地外中低纬度面积最大的冰川,主要由山脉和高原组成,是亚洲很多河流的发源地。本研究所选研究对象为位于山脉和高原上坡度起伏相对较小的典型冰川冰帽,地理位置如图1所示,其形状大小及中心纬度信息如图2所示,依次为古里

雅、郭德冰帽、康甲若冰川、来古冰川、马兰冰帽、木孜塔格、慕士塔格冰川、恰青冰川、土则岗目、增冰川、中峰冰川。



图1 典型冰川冰帽的地理位置

Fig.1 Geographical position of typical glacier ice cap

2.2 研究数据

采用的数据为CryoSat-2 Level 2级别测高数据、青藏高原冰川矢量数据以及全球GDEM数据。

2.2.1 CryoSat-2测高数据

CryoSat-2卫星于2010年4月8日发射,主要目标是测量气候变化导致的冰盖变薄。卫星的轨道为 92° 的高倾角,距离极点仅 2° ,距轨道高度约为730 km,可覆盖的纬度达 88° ,包括极地以及大部分陆冰、海冰区域,能有效监测冰盖厚度和漂浮海冰的变化^[14]。Wang等^[15]对南极地区CryoSat-2 SARIn模式数据的精度进行了评估,CryoSat-2 SARIn模式数据的厘米级精度可以足够精确地监测粗糙和倾斜的冰盖,可能更适用于坡度较大的山地冰川。因此本研究中使用SARIn模式下Level 2级别的测高数据,该测高数据包括了WGS84参考椭球下的高程数据、地理位置、观测质量标签、卫星运行升降轨标签、测量时间和其他表面的参数,并且对高程值进行了校正,用于高程变化的监测^[16]。原始测高数据为以月为单位的全球测高点,本文通过Matlab提取经 $25^\circ\sim 51^\circ\text{N}$, $72^\circ\sim 105^\circ\text{E}$ 范围内的测高数据,包含青藏高原地区所有山地冰川CryoSat-2测高数据,时间范围为2010年7月~2016年7月。提取的CryoSat-2数据格式为:以m为单位的高程数据,以经纬度表示的测点位置;升降轨标签值为-1、1,分别代表降轨和升轨;测高点质量标签值为0

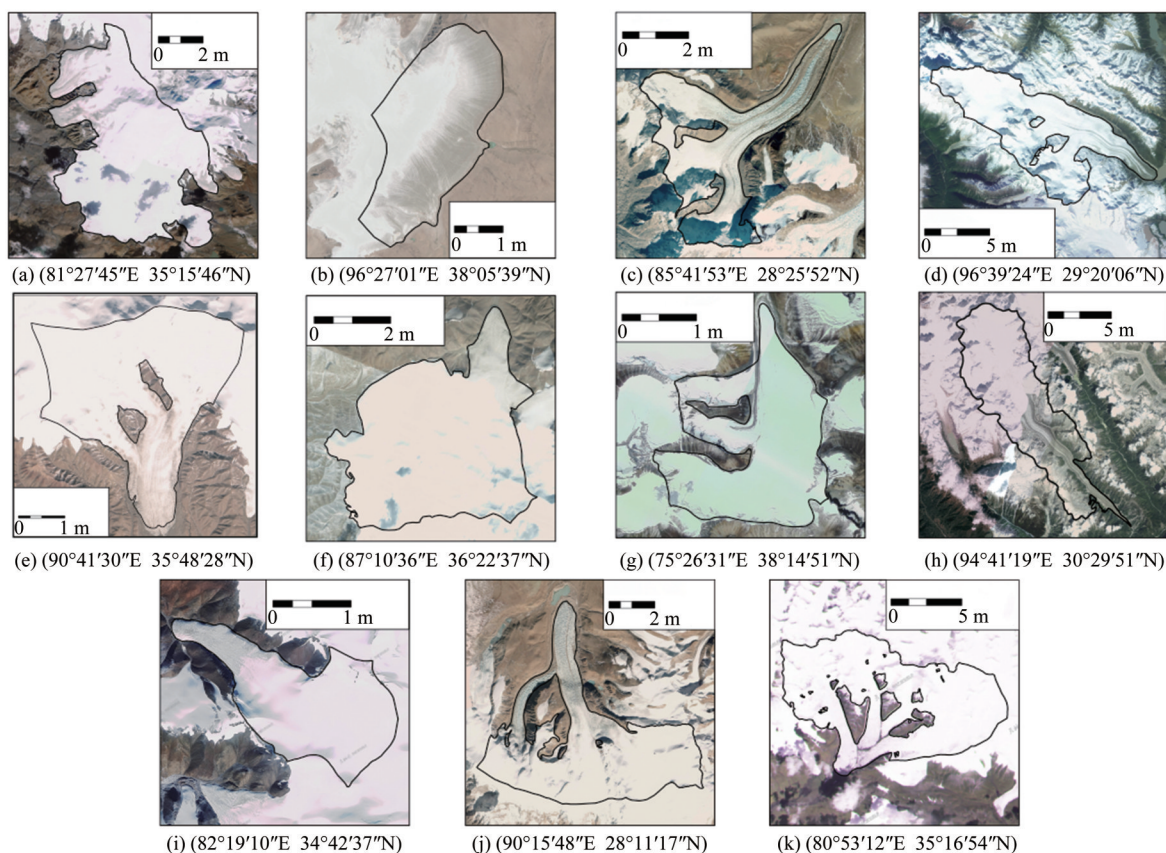


图 2 研究区冰川冰帽形状大小及中心经纬度

Fig.2 The shape size and center latitude and longitude of ice cap in study area

和 1,0 表示质量正常,1 表示测高点具有错误应剔除;测量时间以年月日表示。

2.2.2 青藏高原地区冰川矢量数据

青藏高原地区冰川矢量数据通过中国第二次冰川编目获取^[17]。中国第二次冰川编目的主要冰川边界提取使用了 Landsat TM/ETM+ 遥感卫星数据,属性数据的提取使用了最新全球数字高程模型 SRTM V4,并且采用波段比值阈值法提取裸冰区冰川边界。同时针对我国冰川开发了新的分冰岭提取算法用于提取冰川分冰岭以及单条冰川的分割,冰川属性的计算采用国际通用算法,从而获得了中国西部主要冰川信息的矢量数据和属性数据。截至 2013 年底,中国第二次冰川编目编制了我国西部绝大部分地区(86%)冰川,共解译出冰川 42 370 条,总面积 43 087 km²。图 3 为我国的青藏高原地区的冰川矢量数据。本文以各个典型冰川冰帽的矢量数据为边界提取其范围内测高数据。

2.2.3 GDEM 数据

全球空间分辨率为 30 m 的数字高程数据即地球地形数据 ASTER GEDM,是根据对地观测卫星 Terra 的观测结果制作完成,由美国 NASA 与日本

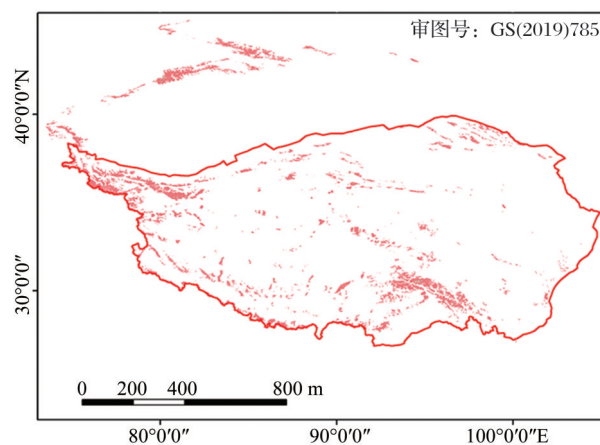


图 3 冰川矢量数据

Fig.3 Glacier vector data

METI 共同推出。ASTER 数据基本覆盖了陆地面积的 99%,覆盖范围为 83°N~ 83°S 之间的所有陆地区域。首先对 150 万景 ASTER 存档数据采用全自动化的方法进行处理生成,其中包括基于独立场景的通过立体相关生成的 ASTERDEM 数据,再经过去云处理,除去异常值后取平均值,并以此作为 ASTER GDEM 对应区域的最后像素值。最后再纠正剩余的异常数据,按 1°×1°分片,生成全球 AS-

TER GDEM 数据。本文使用 30 m 分辨率的 GEDM 数据剔除异常测高数据。

3 方法

本研究通过 3 种方法:重叠脚印法、伪平面拟合法以及曲面拟合法对山地冰川的典型冰川冰帽进行高度变化提取,并对 3 种方法所得冰川高度变化结果进行对比分析,揭示 3 种方法应用于山地冰川的优缺点,以此提供提取山地冰川高度变化方法的选择依据。本文主要技术流程分为数据预处理、3 种方法算法处理与结果生成、方法对比及规律分析(图 4)。

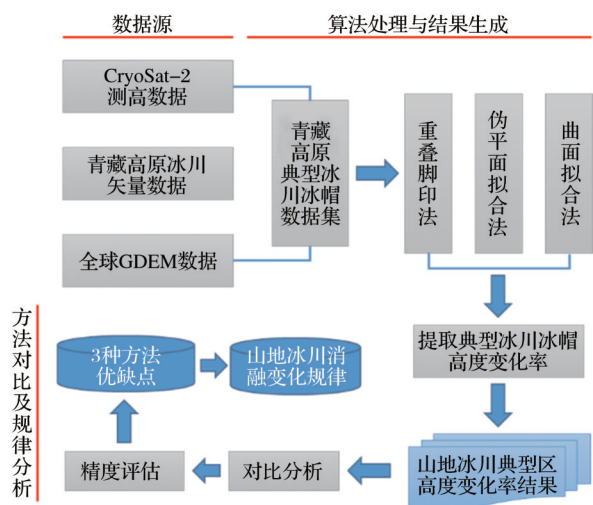


图 4 技术流程图

Fig.4 Technical Flow Chart

3.1 数据预处理

首先提取青藏高原地区典型冰川冰帽的原始测高数据。通过 Matlab, 设置位置参数, 通过输入经纬度提取该范围内的测高点。研究区经纬度范围为 $25^{\circ}\sim 51^{\circ}\text{N}$, $72^{\circ}\sim 105^{\circ}\text{E}$, 即覆盖整个青藏高原地区。在读取测高数据的同时, 也将测高点的必要参数, 日期、经纬度、升降轨标识以及质量标签等同步提取, 构建包含整个青藏高原地区的 CryoSat-2 Level 2 级别的原始测高点数据集。联合典型冰川冰帽矢量数据, 通过交叉及合并处理, 获取各个典型冰川冰帽上 2010~2016 年的原始测高点数据。由于高程获取过程中受到传感器、重构算法等其他因素的影响, 可能导致异常高程数据的产生, 因此进行高度变化研究之前, 需要进行粗差剔除。CryoSat-2 Level 2 级别的测高点数据提供了多个质量标签, 可以作为剔除粗差的依据, 本文剔除了大部分高程质量标签为 1 (代表数据错误) 的数据, 通过标

签剔除异常数据后可进一步根据统计方法进行剔除(本研究使用粗差剔除方法有 3 倍中误差、肖维勒、一阶差分, 旨在构建准确的山地冰川测高数据集), 最后通过阈值法将 30 m 分辨率的 GDEM 数据作为基准数据进行对应地理位置的 CryoSat-2 测高数据的异常剔除, 获取典型冰川冰帽上无异常值的测高数据。

3.2 重叠脚印法

将雷达高度计打下的测点看作“脚印”, 重叠脚印法即找到同一地点不同时间重叠的脚印, 图 5 为研究区古里雅冰川 CryoSat-2 数据“脚印”及重叠点对分布图。

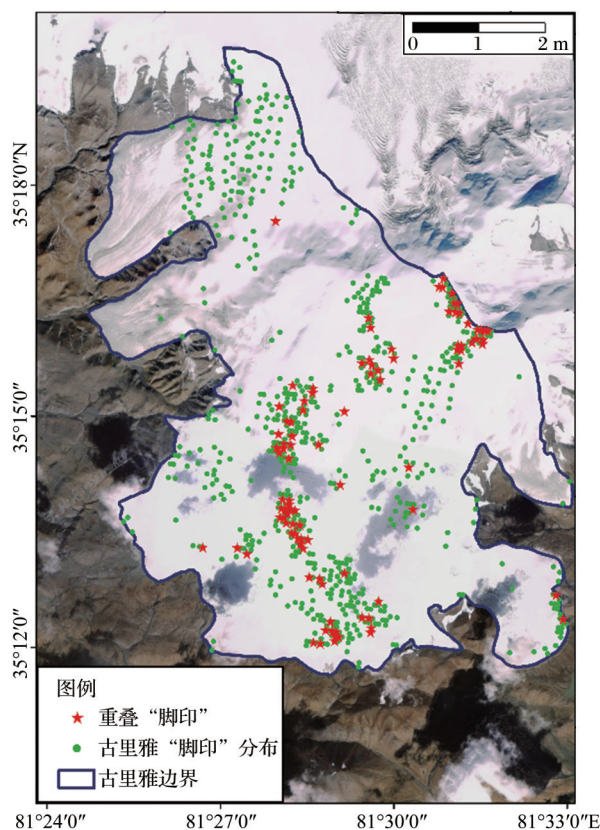


图 5 古里雅冰川 CryoSat-2 数据“脚印”分布图

Fig.5 GuLiYa glacier CryoSat-2 data

“footprint” distribution map

重叠脚印有两种不同的类型, 来自于交叉轨道的重叠脚印和来自于重复轨道的重叠脚印。交叉轨道的重叠脚印 (Crossing Track Footprint Pair, CTFP) 是指升轨和降轨两条轨道上的交叉点; 重复轨道的重叠脚印 (Repeat Track Footprint Pair, RTFP) 是指来自同一方向的两条轨道上的交叉点, 同是升轨或者同是降轨^[8], 如图 6 所示。

来自不同轨道的脚印交集为非空, 即可看做一

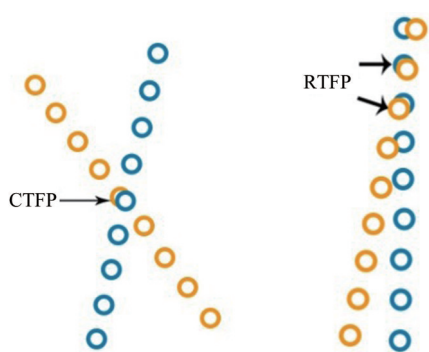


图6 交叉轨道重叠脚印和重复轨道重叠脚印

Fig.6 Crossing track footprint pair and repeat track footprint pair

对重叠脚印。获取不同时间某一冰川上的重叠脚印,通过作差提取该点冰川高度变化。在理想情况下,可以找到完全重叠的脚印,但在实际研究中考考虑冰川上测高点的密度以及坡度的影响,将重叠的条件放宽,若以两个测点为圆心构成半径为30 m的两个圆相交则判定为一对重叠脚印。在找到重叠脚印后,则可根据对应的时间标签,来计算该点的年平均变化率,最终以冰川内所有重叠脚印的高度变化率的均值代表该冰川的高度变化率。

3.3 伪平面拟合法

“平面法”是指将感兴趣区域划分成多个平面,对于CryoSat-2雷达高度计非规则分布的测高数据,最佳的平面拟合方法就是将数据划分到网格,即伪平面拟合法。假设处在该网格内的冰川冰帽为一平面整体,对网格内的数据建立平面方程,通过最小二乘回归计算冰川高度变化率。因此对每一个网格则可以建立以下的线性回归方程^[18]:

$$\begin{aligned} dH_1 &= dE_1 \cdot \alpha_E + dN_1 \cdot \alpha_N + dt_1 \cdot \frac{dh}{dt} + r_1 \\ &\vdots \\ dH_n &= dE_n \cdot \alpha_E + dN_n \cdot \alpha_N + dt_n \cdot \frac{dh}{dt} + r_n \end{aligned} \quad (1)$$

其中:需要求解的参数为 (α_E, α_N) 、 dh/dt 即东西方向和南北方向的坡度以及高度变化率, dH 、 dE 、 dN 分别为网格平面内所有测高点的高程、经度、纬度与其平均值的差值, dt 为网格内所有测高点的日期分别与网格内最小日期(把最小日期看作是冰川开始变化的起始点)的差值。其中 r 为残差,包含了剩余的高程信号,即其他因素导致的高程误差。求解3个未知数,即进行最小二乘求解,列立误差矩阵。由于求解的未知参数为3个,则所列方程应大于等于3个,因此对于所划分网格内少于3个的点要剔除,误差方程如下:

$$\begin{bmatrix} dH_1 \\ \vdots \\ dH_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dE_1 & dN_1 & dt_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ dE_n & dN_n & dt_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_E \\ \alpha_N \\ dh/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

令

$$v = \begin{bmatrix} r_1 \\ \vdots \\ r_n \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} dE_1 & dN_1 & dt_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ dE_n & dN_n & dt_n \end{bmatrix}, \hat{x} = \begin{bmatrix} \alpha_E \\ \alpha_N \\ dh/dt \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中: v 为常数项矩阵, B 为系数矩阵, \hat{x} 为未知数矩阵,因此可以写成:

$$v = B\hat{x} - f \quad (4)$$

则根据最小二乘求解原理,可得:

$$\hat{x} = (B^T B)^{-1} B^T P f \quad (5)$$

P 取单位权矩阵,由此得到参数的估计 \hat{x} 包含所需求解的高度变化率 dh/dt 。最终冰川冰帽的高度变化率结果由每个网格的高度变化的均值构成。

3.4 曲面拟合法

曲面拟合是建立在平面拟合的基础之上,用1个二元多项式函数的曲面拟合来代替平面拟合^[19],将冰川冰帽用1个较为贴近的数学曲面进行逼近,通过最小二乘回归来计算曲面的高度变化。因此对落在冰川冰帽上的每1个测高点,可以建立以下方程:

$$\begin{aligned} H_1 &= \sum_{j=1}^p \sum_{i=0}^j a_{ji} E_1^i N_1^{j-i} + h_1 \\ &\vdots \\ H_n &= \sum_{j=1}^p \sum_{i=0}^j a_{ji} E_n^i N_n^{j-i} + h_n \end{aligned} \quad (6)$$

其中: p 是二元多项式的阶数,其值应大于等于0, a_{ji} 是二元多项式的拟合系数,因此同理可得误差方程式(7):

$$\begin{bmatrix} dH_1 \\ dH_2 \\ \vdots \\ dH_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dE_1^p & dN_1^p & \cdots & \Delta t_1 \\ dE_2^p & dN_2^p & \cdots & \Delta t_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ dE_n^p & dN_n^p & \cdots & \Delta t_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{p0} \\ a_{0p} \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: a_{p0} 和 a_{0p} 是二元多项式函数的系数,下标 n 是方程的个数。通过求解等式(7)可以获得冰川高度变化 dh/dt 以及二元多项式函数的 a_{p0} 、 a_{0p} 系数。这里, p 表示微分方程组的复杂性。 p 的值越大,求解方程(7)所需的测高数据点越多。如果 p 为1,则求解方法为“平面法”,因此确定1个 p 值,即阶数,根据测高点数据,通过最小二乘即可解得冰川的高度变化率。冰川上测高点的个数要大于等于 p 个,才能进行求解,因此若冰川冰帽上少于 p 个测高点,用曲面拟合的方法是无法得到冰川的高度变化。 p 的取值通过数据测试选择使得曲面拟合误差RMS最小的值。

4 实验验证与分析

由上述3种方法的算法原理,分别提取验证冰川对应时间的冰川高度变化结果。实验选取纳木那尼、抗物热以、古仁河口三个冰川的差分GPS(DGPS)所测的高度变化结果为验证数据^[20],验证结果如表1所示。重叠脚印法在3个冰川上的重叠对数很少,因此重叠脚印法的实验结果与伪平面拟合法的偏差较大,但冰川冰帽的消融、增长趋势一致。相对于DGPS数据,重叠脚印法在三个验证冰川上的平均偏差为21 cm/a,伪平面拟合法的平均偏差为13 m/a,曲面拟合的偏差为18 cm/a。因此

CryoSat-2数据应用3种方法提取山地冰川高度变化具有可行性,且平面拟合法偏差较小。

冰川高度变化的不确定度分析基于离冰川区1~5 km距离范围内非冰川区域的测高点,计算非冰川区域的高度变化率作为冰川高度变化误差^[21],以此得到验证冰川的不确定度。基于上述3种方法,将CryoSat-2 Level 2级别的测高数据用于典型冰川冰帽,分别提取11个冰川冰帽的高度变化结果并进行方法的对比分析,结果如表2所示。

实验结果以及实验过程表明:

(1)绝大多数的典型冰川冰帽都处于消融的状态,且消融速度较快。

表 1 冰川高度变化验证结果
Table 1 Verification results of glacier height change

冰川名称	验证数(DGPS) (cm/a)	重叠脚印法 (cm/a)	重叠点对个数(过滤后)	伪平面拟合法 (cm/a)	曲面拟合 (cm/a)
纳木那尼	-58.0(2009~2013)	-46.9±34.0(2010~2013)	3	-43.0±20.2(2010~2013)	-78.1±13.9(2010~2014)
抗物热	-61.0(2009~2014)	-95.0±29.8(2010~2015)	1	-51.0±5.7(2010~2015)	-76.2±27.8(2010~2016)
古仁河口	39.0(2011~2014)	19.0±24.7(2011~2014)	3	53.0±36.5(2011~2014)	无

表 2 典型冰川冰帽冰川高度变化结果
Table 2 Height change results of typical glacier ice cap

冰川	重叠脚印法 (单位: cm/a)	过滤后重叠 点对个数	伪平面拟合法 (单位: cm/a)	曲面拟合 (单位: cm/a)
古里雅	3.6±5.7	62	0.6±2.9	无
郭德冰帽	-50.4±7.0	5	-42.3±3.2	-19.5±0.17
康甲若冰川	-20.0±9.5	1	37.1±2.9	无
来古冰川	-48.6±2.7	28	-40.5±17.2	-120.8±0.2
马兰冰帽	-24.8±6.0	16	-33.0±16.1	-36.0±1.1
木孜塔格	-108.2±1.6	8	-68.3±6.1	-106.2±0.1
慕士塔格冰川	-8.6±1.8	3	6.5±1.2	-19.3±1.4
恰青冰川	-77.3±2.7	29	-33.7±7.6	-106.5±0.2
土则岗目	-0.6±8.4	9	0.9±4.0	-30.0±2.0
增冰川	-6.9±9.5	18	-9.4±9.1	无
中峰冰川	-8.7±5.7	70	-24.1±5.4	无

(2)CryoSat-2 Level 2测高数据应用3种方法提取山地冰川的高度变化具备一定的可行性,所获取的冰川高度变化结果增、减趋势基本一致。

(3)重叠脚印法,被公认是精度最高的,但是对于小冰川或者落在冰川上点数较少时,重叠点对很少,此时准确度很低,并且较少的重叠点对,难以代表整个冰川的高度变化。但是对于重叠点对分布均匀或较多时,置信度将会提高。例如古里雅、来古冰川、恰青冰川、中峰冰川。综合考虑,在山地冰

川若重叠点对较多,则重叠脚印法最优。

(4)平面拟合法适用于平缓且测高点分布较均匀的山地冰川,从3个验证冰川结果来看,平面拟合法具有最小的偏差。但是平面法对于网格大小的划分较为敏感,因此需要通过调整划分网格大小得到最优解。

(5)曲面拟合同样需要划分网格,由于4阶曲面拟合至少需要15个系数,若将网格划分的太小,将会导致很少的点落在冰川上而无法提取冰川高度变化结果。对于坡度较大的冰川即山脉的突然拔起,若是在变化过程中没有采集到测高点,曲面拟合结果将具有很大偏差。从结果可以看出曲面拟合的冰川高度变化值偏大,相较于重叠脚印法以及平面拟合具有更大的偏差。但值得一提的是曲面拟合对于选择的网格大小相对不敏感,即所得结果比较稳定。例如在郭德冰帽上,划分成2~4个曲面,结果都趋于稳定。

(6)从11个典型冰川冰帽的定量高度变化结果来看,处于西昆仑山脉的中峰冰川、古里雅、土则岗目冰川缩减速率较慢,而帕尔米高原的慕士塔格冰川较西昆仑山脉缩减略快,但是上述冰川的缩减速度都处于平缓。可能由于两者的海拔较高,且昆仑峰区顶部地势较平坦,对冰川发育提供了有利的地形与温度优势^[22]。处于喜马拉雅山脉东段的康甲

若、增冰川高度变化速率较快,主要是因为季风湿润气团的影响,降水夏季较多,同时海拔低于上述两条山脉,因此冰川高度变化较明显^[23]。念青唐古拉山脉的来古冰川和恰青冰川高度变化最剧烈,两者分布于南侧迎风坡上,气温的升高可能导致冰川高度变化加剧。

5 结 语

本文通过利用CryoSat-2卫星的Level 2级别测高数据,分别采用重叠脚印法、平面拟合法以及曲面拟合法3种方法对青藏高原地区典型的冰川冰帽高度变化进行提取,并对提取结果进行对比分析。结果表明:①CryoSat-2测高数据应用于提取山地冰川高度变化具备可行性;②当落在冰川上重叠点对很少时,选择平面拟合法效果最佳,当重叠点对较多时,重叠脚印法具有较高的置信度。若曲面拟合阶数为4阶,当点数少于15时,曲面拟合无法求解。当落在冰川上的点分布均匀且较多时,曲面拟合相较于伪平面法具有更好的稳定性。而点数较少时,选择重叠脚印法具有更高的可信度和效率;③此外,在平面拟合法中,网格的划分是通过使得实验数据具有最小误差来计算确定。曲面拟合中的参数 p 也是通过数据测试得到4阶拟合最优,不同的冰川将有不同的拟合阶数,因此两者自动化的程度较低,需要进一步的研究和改进;④绝大多数的冰川都处于消融状态且3种方法提取的高度变化结果增、减趋势一致。主要受海拔、季风以及温度的影响,处于不同山脉的冰川高度变化不同。处于西昆仑山脉的中峰冰川、古里雅、土则岗目冰川缩减速率较慢,而帕尔米高原的慕士塔格冰川缩减略快,但两条山脉缩减速率处于稳定。喜马拉雅山脉东段的康甲若、增冰川高度变化速率较快,处于念青唐古拉山脉的来古冰川、恰青冰川高度变化速率最大。

参考文献(Reference):

- [1] Climate change 2013: the physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Pachauri R K, Allen M R, Barros V R, *et al.* Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I[R]. The II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014, 151.
- [3] Xu B, Cao J, Hansen J, *et al.* Black Soot and the Survival of Tibetan Glaciers[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, 106(52): 22114-22118.
- [4] Yao Tandong, Qin Dahe, Shen Yongping, *et al.* Cryospheric Changes and Their Impacts on Regional Water Cycle and Ecological Conditions in the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Nature, 2013, 35(3): 179-186.[姚檀栋, 秦大河, 沈永平等. 青藏高原冰冻圈变化及其对区域水循环和生态条件的影响[J]. 自然杂志, 2013, 35(3): 179-186.]
- [5] Wang X, Siegert F, Zhou A G, *et al.* Glacier and Glacial Lake Changes and Their Relationship in the Context of Climate Change, Central Tibetan Plateau 1972 - 2010[J]. Global & Planetary Change, 2013, 111(12): 246-257.
- [6] Li Zhiguo, Yao Tandong, Ye Qinghua, *et al.* Monitoring Glacial Variations based on Remote Sensing in the Luozha Region, Eastern Himalayas, 1980~2007[J]. Geographical Research, 2011, 30(5): 939-952.[李治国, 姚檀栋, 叶庆华, 等. 1980~2007年喜马拉雅东段洛扎地区冰川变化遥感监测[J]. 地理研究, 2011, 30(5): 939-952.]
- [7] Zhang Y, Liu S, Shangguan D, *et al.* Thinning and Shrinkage of Laohugou No.12 Glacier in the Western Qilian Mountains, China, from 1957 to 2007[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(3): 343-350.
- [8] Helm V, Humbert A, Miller H. Elevation and Elevation Change of Greenland and Antarctica Derived from CryoSat-2[J]. The Cryosphere, 2014, 8(4): 1539-1559.
- [9] Slobbe D, Lindenbergh R, Ditmar P. Estimation of Volume Change Rates of Greenland's Ice Sheet from ICESat Data using Overlapping Footprints[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(12): 4204-4213.
- [10] Laxon S W, Giles K A, Ridout A L, *et al.* CryoSat-2 Estimates of Arctic Sea Ice Thickness and Volume[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(4): 732-737. doi: 10.1088/1748-9326/10a/4/043001.
- [11] Kwok R. Arctic Sea Ice Thickness, Volume, and Multi-year Ice Coverage: Losses and Coupled Variability (1958 - 2018) [J]. Environmental Research Letters, 2018, 13(10): 105005. doi: 10.1088/1748-9326/aac3ee.
- [12] Zong Jibiao, Ye Qinghua, Tian Lide. Recent Naimona'nyi Glacier Surface Elevation Changes on the Tibetan Plateau Based on ICESat/GLAS, SRTM DEM and GPS Measurements (2000~2010) [J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(21): 2108-2118.[宗继彪, 叶庆华, 田立德. 基于ICESat/GLAS, SRTM DEM和GPS观测青藏高原纳木那尼冰面高程变化(2000~2010年)[J]. 科学通报, 2014, 59(21): 2108-2118.]
- [13] Huang Tianjin. Spatial-temporal Changes of Glacier Thickness and Lake Level on the Qinghai-Tibetan Plateau[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese Academy Sciences, 2017.[黄田进. 青藏高原冰川厚度与湖泊水位的时空变化研究[D]. 北京: 中国科学院遥感与数字地球研究所, 2017.]
- [14] Wouters B, Martin, Espail A, *et al.* Dynamic Thinning of Glaciers on the Southern Antarctic Peninsula [J]. Science,

- 2015, 348(6237): 899—903.
- [15] Wei Xin, Li Fei, Zhang Shenkai, *et al.* CryoSat-2 Satellite Altimetry and Its Application [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2015, 27(4): 446-453. [魏鑫, 李斐, 张胜凯, 等. CryoSat-2 卫星测高计划及其应用[J]. 极地研究, 2015, 27(4): 446-453.]
- [16] Wang F, Bamber J L, Cheng X. Accuracy and Performance of CryoSat-2 SARIn Mode Data over Antarctica [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(7): 1516-1520.
- [17] Wang Fang. Accuracy Assessment, Analysis and the Application of Novel SAR/Interferometric Radar Altimeter over the Marginal Antarctic Ice Sheet [D]. Beijing: Beijing Normal University, 2015. [王芳. 新型干涉合成孔径雷达高度计在南极冰盖边缘地区观测精度评估分析及应用[D]. 北京: 北京师范大学, 2015.]
- [18] Liu Shiyin, Guo Wanqin, Xu Junli, *et al.* The Second Glacier Inventory Dataset of China (Version 1.0) [Z]. Cold and Arid Regions Science Data Center at Lanzhou, 2014. doi:10.3972/glacier.001.2013.db. [刘时银, 郭万钦, 许君利, 等. 中国第二次冰川编目数据集(V1.0)[Z]. 寒区旱区科学数据中心, 2014. doi:10.3972/glacier.001.2013.db.]
- [19] Moholdt G, Nuth C, Hagen J O, *et al.* Recent Elevation Changes of Svalbard Glaciers derived from ICESat laser Altimetry [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(11): 2756-2767.
- [20] Huang T, Jia L, Menenti M, *et al.* A New Method to Estimate Changes in Glacier Surface Elevation based on Polynomial Fitting of Sparse ICESat—GLAS Footprints [J]. Sensors, 2017, 17(8): 1803.
- [21] Zhu Dayun. Changes of Ice Thickness for Typical Glaciers in Different Areas of Tibetan Plateau [D]. Chongqing: Southwest University, 2015. [朱大运. 青藏高原不同地区典型冰川厚度变化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2015.]
- [22] Ye Qinghua, Cheng Weiming, Zhao Yongli, *et al.* A Review on the Research of Glacier Changes on the Tibetan Plateau by Remote Sensing Technologies [J]. Journal of Geo-information Science, 2016, 18(7): 920-930. [叶庆华, 程维明, 赵永利, 等. 青藏高原冰川变化遥感监测研究综述[J]. 地球信息科学学报, 2016, 18(7): 920-930.]
- [23] Hu Fansheng. Remote Sensing Monitoring of Glacier Changes between Eastern Pamirs Plateau and Western Kunlun Mountains from 1976~2016 [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. [胡凡盛. 1976~2016年东帕米尔—西昆仑地区冰川变化遥感监测[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.]
- [24] Ji Qin. Glacier Variations in Response to Climate Change in the Himalaya during 1990~2015 [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018. [冀琴. 1990~2015年喜马拉雅山冰川变化及其对气候波动的响应[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.]

Comparative Study on Extraction Methods of Glacier Height Change in Qinghai-Tibet Plateau based on CryoSat-2 Radar Altimeter

Shi Jiankang¹, Sun Xiaohui^{2,3}

(1. Hainan Research Academy of Environmental Sciences, Haikou 570026, China;

2. Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on the L2 level altimeter data in the SARIn mode of the CryoSat-2 from 2010 to 2016, combined with the glacier vector data of the Qinghai-Tibet Plateau and the global GEDM data, use the overlapping footprint method, pseudo-plane fitting method, and new method curved surface fitting to extract the height variation of typical glacier ice caps in the Qinghai-Tibet Plateau. The results show that: (1) CryoSat-2 altimetry data is feasible by using these three methods to extract height changes of mountain glaciers. (2) The three methods for extracting height changes have their own advantages and disadvantages, which provides the basis for the method selection for extracting the height variation of mountain glaciers. (3) The above three methods were used to obtain the quantitative height change results of typical glacier ice caps in the Qinghai-Tibet Plateau from 2010 to 2016. The results show that most of the glaciers are in ablation and the height change results of the three methods are almost the same. In the West Kunlun Mountains, the Zhongfeng Glacier, Guliya, and Tuzegangmu Glaciers have gentle reduce, while the Mushitage Glacier in the Palmy Plateau has shrunk slightly, but both are balance. And Laigu and Qiaqing glaciers in the Nianqing Tanggula have the fastest rate of change.

Key words: CryoSat-2; Glacier height changes; Overlapping footprint method; Pseudo-plane fitting method; Curved surface fitting method