

Amery 冰架附近区域年际表面高程变化分析

谢 欢^{1,2}, 顾振雄^{1,2}, 刘 俊^{1,2}, 童小华^{1,2}

(1. 同济大学 空间信息科学及可持续发展应用中心, 上海 200092; 2. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 使用基于坡度改正的 ICESat(冰云和地面高度卫星)激光测高数据重复轨分析法对 2003 至 2009 年 2 月与 10 月 Amery 冰架及其附近区域进行了表面高程变化分析. 该区域的 ICESat 轨道重复轨之间的平均距离为 100 m, 平均坡度为 0.3%, 使用数字高程模型(DEM)进行重复轨间的坡度改正可以消除坡度对重复轨之间高程点投影时的影响. 最终得到了 2003~2009 年 2 月和 10 月的总体平均高程变化, 以及不同高程区间内的平均高程变化. 结果表明海拔较低即更靠近海洋的区域高程变化剧烈, 波动范围在 ± 40 cm 左右甚至超出, 而海拔较高即内陆区域的高程变化较缓和, 波动范围在 ± 10 cm 以内.

关键词: 冰云和地面高度卫星(ICESat); 重复轨分析; 数字高程模型; 坡度改正; 表面高程变化分析

中图分类号: P228.3; P343.6

文献标志码: A

Annual Elevation Change Analysis of Amery Ice Shelf and Its Surroundings

XIE Huan^{1,2}, GU Zhenxiong^{1,2}, LIU Jun^{1,2}, TONG Xiaohua^{1,2}

(1. Center for Spatial Information Science and Sustainable Development, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Elevation change analysis was conducted on the ice, cloud, and land elevation satellite (ICESat) altimetry data collected around the Amery ice shelf (AIS) from 2003 to 2009 with a repeat-track method. The average cross-track separation between the repeat-tracks at AIS was 100 m, and the general slope was 0.3%. An existing digital elevation model(DEM) was used to correct for effects caused by the surface slope across the repeat-track pairs. The average elevation changes were achieved in the entire study area and also within several layers of elevations in the study area. The results show that coastal areas with lower elevations tend to

have significant elevation changes, ranging from -40 cm to $+40$ cm, while interior areas with higher elevations tend to change at a low level in the range of ± 10 cm.

Key words: ice, cloud, and land elevation satellite (ICESat); repeat track analysis; digital elevation model; slope correlation; elevation change analysis

南极冰雪的动态平衡对于维持全球气候稳定极其重要, 全球气候的变化也会对南极冰雪平衡产生巨大影响, 其中最直接的可观测影响之一就是南极冰盖表面的高程以及水平位置变化. 包括南极冰川在内的冰雪消融是引起海平面上升的因素之一^[1], Amery 冰架是南极三大冰架之一, 临近我国南极科考中山站, 对于研究东南极物质平衡有着重大的意义^[2].

ICESat 卫星发射的科学目的之一是监测南极和格陵兰岛冰盖的高程变化^[3], 对其激光测高数据常用的分析方法包括重复点分析、交叉点分析和重复轨分析等. Zwally^[4]用交叉点法对格陵兰岛区域的 Geosat 和 Seasat 雷达测高数据进行高程变化分析, Brenner 等^[5]用交叉点法对极地 ERS-2、Envisat 雷达测高数据和 ICESat 激光测高数据进行高程变化分析, 史红岭等^[6]人也曾用 ICESat 交叉点分析恩德比地区的高程变化.

虽然重复点法和交叉点法能够非常精确地分析出某一位置的高程变化, 但是它们对于 ICESat 数据的利用率太低, 一般都低于 1%^[7]. 为了提高数据的利用率, 有学者提出了重复轨分析法. Abdalati 和 Bamber 等^[8]早在 1995 至 2002 年间就已分别在加拿大和挪威用机载激光测高仪对局部区域进行了高程测量, 并通过比较前后两次的高差来推算局部区域的质量平衡. 重复轨法还被用于探测西南极 Ronne 冰架接地线、探测 Whillans 冰流等地区的冰

收稿日期: 2012-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(41201426); 国家重大科学研究计划项目(2012CB957701); 国家“八六三”高技术研究发展计划(2012AA12A305); 上海市晨光计划项目(11CG21)

第一作者: 谢 欢(1983—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为极地遥感和高光谱遥感处理方法. E-mail: huanxie@tongji.edu.cn

下湖以及估算格陵兰和南极冰盖的高程变化率^[8]. Fricker 等^[9]用 ICESat 重复轨数据,基于潮汐对延伸到海洋的冰架具有抬升作用的原理来探测 South Ronne 冰架的接地线,以及基于类似的原理来探测冰下湖^[10].

然而这些研究普遍没有考虑重复轨道之间的坡度变化对高程变化的影响. 在刘学军等人对多种计算任意方向数字高程模型(digital elevation model, DEM)坡度的方法研究的基础上^[11],本文使用基于 DEM 坡度改正的重复轨分析法^[7],分析 Amery 冰架及附近区域 2003~2009 年的年际高程变化,并对不同海拔区域的冰盖表面高程变化进行了分析.

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

Amery 冰架位于南大洋普里兹湾(Prydz Bay)的南部,是南极三大冰架之一,而澳大利亚的莫森站(Mawson Station)、戴维斯站(Davis Station)、俄罗斯的进步站(Progress Station)和中国的中山站都设立在 Amery 冰架附近. 本文的研究区域定在 Amery 冰架及其附近经纬度范围为 $40^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$ 、 $68.5^{\circ}\text{S}\sim 81^{\circ}\text{S}$ 的扇形区域,如图 1 所示.

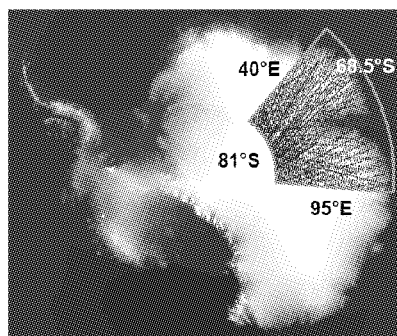


图 1 研究区域
Fig.1 Study Area

1.2 ICESat 数据介绍

本文中使用的数据包括 ICESat GLA 12(极地冰盖测高数据)激光测高数据^[12]和南极 DEM 数据, ICESat 数据用于高程的变化分析^[13], DEM 数据用于 ICESat 重复轨之间的坡度改正.

1.3 DEM 数据介绍

本文采用的是 Liu 等^[14]用不同的内插方法得到的 200 m 分辨率的南极 DEM,一般记为 RAMPv2,如图 1 所示. 它是基于纸质地形图、雷达测高、机载冰雷达、地面观测和地理定位系统(GPS)等多种观测数据,采用多种内插方法得到的最高分辨率为 200

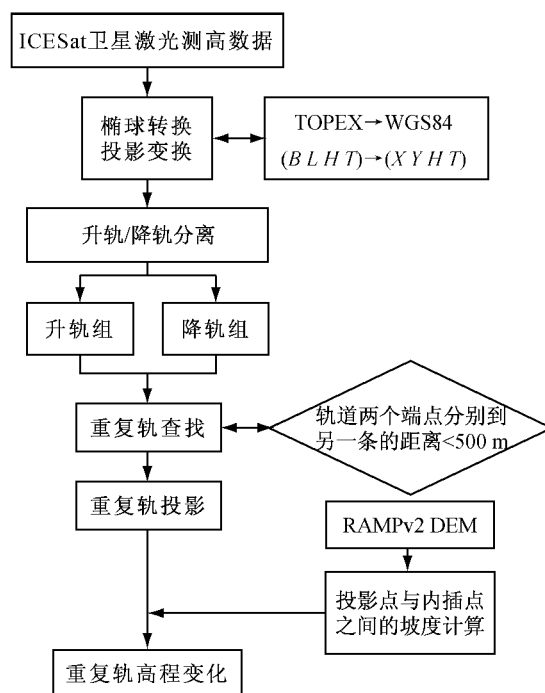
m 的全南极 DEM.

2 基于 DEM 坡度改正的 ICESat 重复轨分析

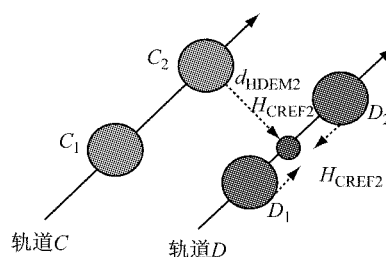
重复轨分析法流程图如图 2a 所示. 图中, x, y 分别为投影平面的横坐标,纵坐标; B, L 分别为纬度,经度; H 为大地高; T 为时间. 首先对 ICESat 激光测高点进行过滤^[15]、椭球转换、投影变换等预处理和升降轨分离,然后在重复轨上计算临近点的高程投影,并利用 DEM 进行坡度改正,最后得到高程变化量.

本文使用二次曲线对分离后的每一条轨道进行最小二乘拟合,然后在升轨和降轨中分别搜索重复轨. 重复轨组中重复轨的数量一般是 2 条或 2 条以上.

本文研究区域的 ICESat 重复轨之间的平均距



a 流程图



b 示意图

图 2 重复轨分析法流程图和及重复轨投影示意图

Fig.2 Flow chart and illustration of repeat-track slope correction method

离为 100 m,而该区域的平均坡度为 0.3%,因此必须考虑坡度对重复轨之间高程点投影时的影响后才能进行高程变化分析.如图 2b 所示,以图中轨道 C 上的 C_2 点为例,首先计算 C_2 到轨道 D 上所有点的距离,如果最小的两个距离都小于某个给定阈值,则认为轨道 D 上存在相邻的激光测高点 D_1 和 D_2 ,此时可以获取 C_2 到 D_1 和 D_2 连线上的垂足点 D_{REF2} ,然后分别计算投影点 C_2 投影到轨道 D 后的高程 $H_{CREF2} = H_{C_2} + d_{HDEM2}$ 和由 D_1 、 D_2 得到的内插高程 H_{DREF2} ,其中 H_{C_2} 为 C_2 点的高程, d_{HDEM2} 即为根据已有 DEM 计算的坡度而得到的投影高程改正^[11].那么 H_{CREF2} 与 H_{DREF2} 之间的差别即可代表该投影点处两个时期之间的高程变化,进而可以用于分析整个研究区域的高程变化^[7].

在确定了投影点 C_2 和内插点 D_{REF2} 之后,首先计算它们的中点在 DEM 上两个正交方向的偏导数,再根据它们连线的方位角计算方向导数,即该方向的坡度^[11].

3 实验与分析

本文选用了 15 期数据,并合并了第 15 和 16 两期获取时间较近的数据,共计 14 期数据.首先分析高程的年际变化,结果如图 3 所示;然后依次对相邻两期测高数据进行分析,总体结果如图 4 所示,具体高程变化分析如图 5 所示.

3.1 总体高程变化分析

图 3 显示的是研究区域从 2003 年~2009 年相邻年度 2 月和 10 月的平均高程变化结果,图 4 显示的是该区域从 2003~2009 年连续的平均高程变化结果.图中的横坐标均代表进行高程变化比较的时间段,纵坐标为研究区域以 cm 为单位的平均高程变化.图 3 表明,本文研究区域的平均高程变化一般在 $-3.2 \sim 6.2$ cm,只有 2004~2005 年的高程变化很大,为 10 cm 以上.

类似地,图 4 表明,在 2005 年 2~10 月期间,研

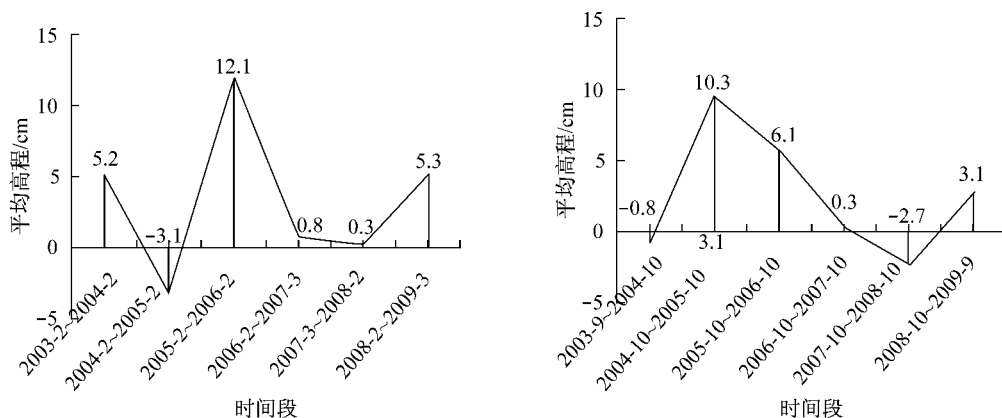


图 3 年际高程变化

Fig.3 Annual elevation changes

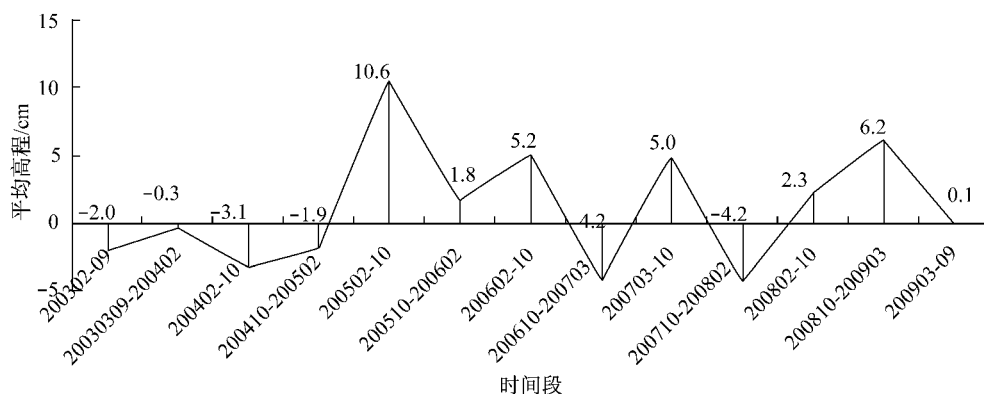


图 4 2003 年~2009 年连续高程变化

Fig.4 Elevation changes from 2003 to 2009

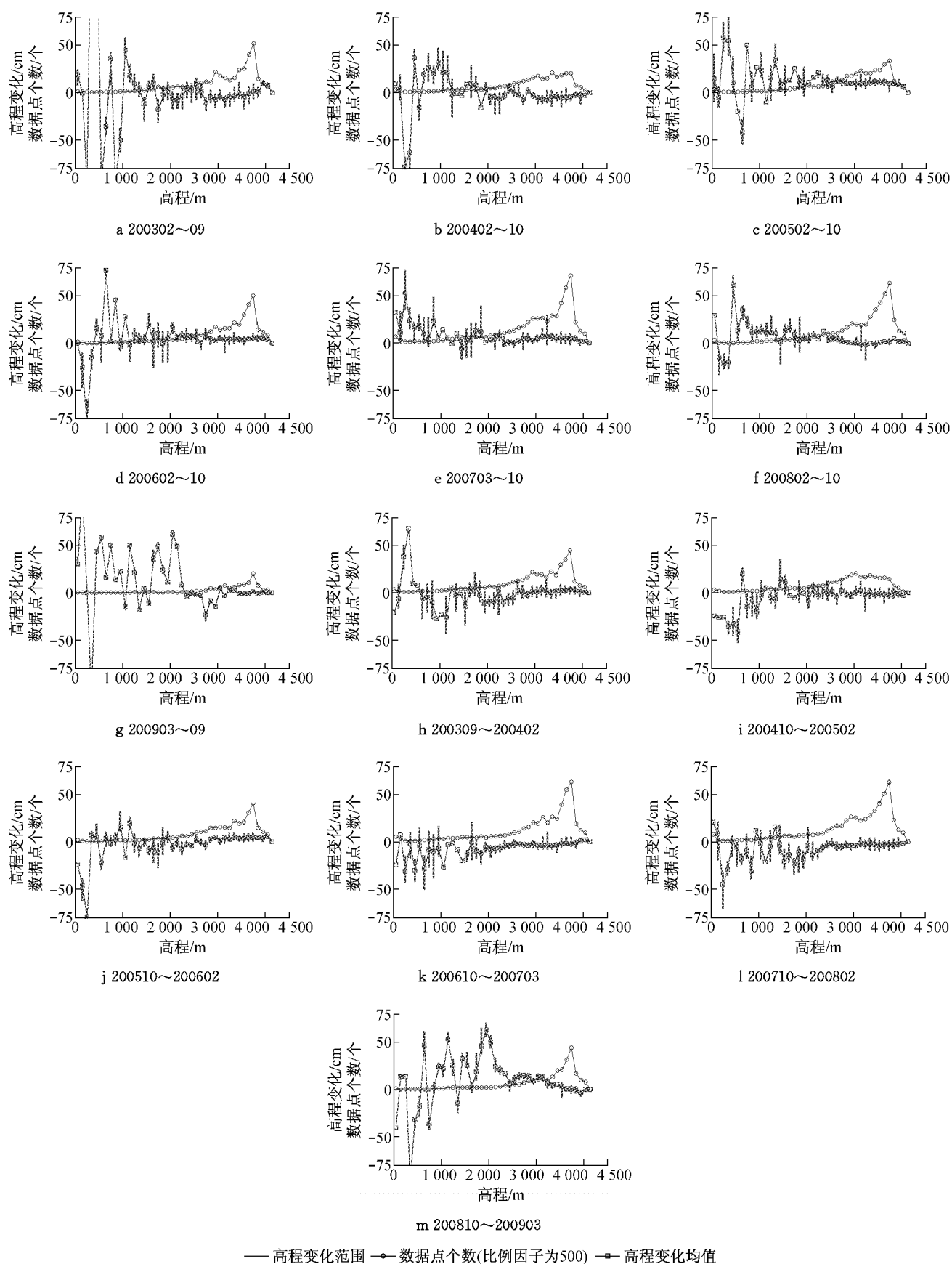


图 5 2003 年 2 月~2009 年 3 月高程变化

Fig.5 Elevation change from February, 2003 to March, 2009

究区域的平均高程变化为上升10.6 cm,这段时间正好覆盖了南极的整个冬季,从2月冬季刚刚开始到10月冬季即将结束,所以在寒冷的气温作为主导因素的作用下,研究区域的物质平衡有显著的正积累.图4中的2006年2~10月、2007年3~10月、2008年2~10月有同样的结果,只是量级上略有差别.至于2003年2~9月和2004年2~10月的变化可能是由于其他因素代替气温因素占主导而引起的.又如图4中2005年10月至2006年2月这段时间覆盖的是南极夏季开始到夏季结束,是南极一年中气温相对最高的时间,物质平衡应该是负积累,与本文的结果上升1.8 cm不一致.但是将2005年10月至2006年2月这段时间的高程变化和与其相邻的两个结果放在一起分析,即2005年2~10月上升10.6 cm和2006年2~10月上升5.2 cm这两个结果,可以看到从2005年10月至2006年10月的高程变化都以显著上升为主,因此可推测这段时期的物质平衡以正积累为主.

3.2 不同高程范围的高程变化分析

除了上述总体平均高程变化分析,本文还对其进行了按高程分层次分析,即分析不同高程范围内在一段时间内的高程变化,具体结果如图5所示.以小方块标记的点是某一高程范围内的平均高程变化,有极个别处于高程较低区域因为数据较少而且变化比较剧烈,所以变化值超出了绘图范围.细实线表示该高程区间的高程变化波动范围,从而可以直观地显示该高程区间高程变化强度.从图5a—5m中,首先可以看到Amery冰架及其附近区域海拔较低的沿海区域的高程变化比海拔较高的内陆区域更加剧烈.

图5c—5f表明,2005~2008年期间同一年内的夏季到冬季,大多数区域的高程变化是正值,并且与图4中的总体结果一致.在图4中2003年和2004年的年内总体高程变化为负值,从图5a—5b中更细化的结果中也可以看到高程在2 000 m以上的内陆地区确实以负增长为主,其原因有待解释.2009年3月~9月的重复轨投影点数据较少,约为其他年份的1/3.所以虽然图5g显示2009年3月~9月期间低海拔地区的震荡较大,但由于高海拔地区的数据量占主导并且变化趋近于零,所以最终总体高程变化结果趋于稳定,与图4中的总体结果一致.

图5h—5l表明,2003年~2008年期间冬季到夏季,大多数区域的高程变化是负值.从图4中也可以得到相同的结论,虽然2005年10月至2006年2月

期间的总体高程变化为1.8 cm,但相邻的两个年内高程变化都比一般情况要高,因此可以认为2005年~2006年期间该区域的总体物质平衡为正平衡.唯一看似异常的是图5m中表示的2008年10月至2009年3月的高程变化,而实际上该结果是由第15~17期数据计算得到的,并且把第15和16期数据作了合并处理,其数据获取时间分别为2008-10-04~2008-10-19和2008-11-25~2008-12-17,其数据点个数分别为185 290和257 014.其中第16期数据的采集时间是南极气温最高的时间,而第17期数据的采集时间为2009-03-09~2009-04-11,即将进入最寒冷的季节,因此更倾向于代表从夏季到冬季的冰盖表面高程变化,所以结果显示为正积累也是合理的.

4 结论与展望

本文用重复轨分析法对Amery冰架及其附近区域的ICESat测高数据进行了冰盖表面高程变化分析.从18期数据中选取了15期数据进行重复轨分析,得到了12个年际高程变化结果和13个相邻季节的冰盖表面高程变化比较结果.此外,还对13个相邻季节之间的冰盖表面高程变化进行了按不同高程区间的分析.海拔较低即靠近海洋的区域高程变化剧烈,平均高程变化波动范围为 ± 40 cm,而海拔较高即内陆区域的高程变化比较缓和,平均高程变化均在 ± 10 cm以内.冰流从冰原流向冰架,海拔由高到低,因此这些区域往往伴随着较大的高程变化.冰原通常比较稳定,因此高程变化幅度不会太大.总体上,从夏季到下一个冬季的高程变化以增长为主,从冬季到下一个夏季的高程变化以降低为主.

由于极地环境恶劣,地面真实数据稀少,只有将多种独立的结果进行比对,才能更好地证明方法的可靠性.下一步工作将是采用其他数据源,如ERS(欧洲遥感卫星)雷达测高数据、ERS InSAR数据对同一地区同一时期和不同时期的高程变化进行分析.另外如果在本文中重复轨投影时使用多个时期的、精度、分辨率更高的DEM,必定会使坡度改正更加精确.

参考文献:

- [1] 胡明城.关于海面的长期上升趋势[J].测绘学报,1992,21(2):151.