

史红岭, 陆 洋, 杜宗亮等. 基于 ICESat 块域分析法探测 2003~2008 年南极冰盖质量变化. 地球物理学报, 2011, **54**(4): 958~965, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.010

Shi H L, Lu Y, Du Z L, et al. Mass change detection in Antarctic ice sheet using ICESat block analysis techniques from 2003~2008. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(4): 958~965, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.010

基于 ICESat 块域分析法探测 2003~2008 年 南极冰盖质量变化

史红岭^{1,2}, 陆 洋^{1,2}, 杜宗亮^{1,2}, 贾路路^{1,2}, 张子占^{1,2}, 周春霞³

1 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077

2 中国科学院动力大地测量学重点实验室, 武汉 430077

3 中国武汉大学中国南极测绘研究中心, 武汉 430079

摘 要 利用 2003~2008 年间的 ICESat 卫星激光测高数据, 通过块域交叉点分析提取南极大陆冰盖表面高程变化信息, 同时探讨了卫星激光测高不同任务间的系统偏差, 结合冰盖地表粒雪密度模型探测南极大陆冰盖质量变化, 并对其原因做了初步分析. 结果显示南极大陆冰盖高度变化具有明显的年周期信号, 平均周年振幅为 2.21 cm. 在南极大陆的边缘, 存在着明显的消融和增长, 尤其是在西南极阿蒙森海湾附近的冰川和南极半岛. 利用目前常用的三种不同的冰后回弹模型, 计算得到南极大陆冰盖整体平均质量变化趋势约为 $-82 \sim -73$ Gt/yr. 在由 ICESat 高度变化到质量变化过程中, 冰盖地表粒雪密度和冰后回弹模型的不确定性是影响结果精度的主要因素.

关键词 ICESat, 交叉点, 块域分析法, 南极冰盖, 质量变化, 最小二乘回归

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.010

中图分类号 P223

收稿日期 2010-06-15, 2011-01-15 收修改定稿

Mass change detection in Antarctic ice sheet using ICESat block analysis techniques from 2003~2008

SHI Hong-Ling^{1,2}, LU Yang^{1,2}, DU Zong-Liang^{1,2}, JIA Lu-Lu^{1,2},
ZHANG Zi-Zhan^{1,2}, ZHOU Chun-Xia³

1 *Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China*

2 *Key Laboratory of Dynamic Geodesy, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China*

3 *Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, School of Geodesy and Geomatics Wuhan University, Wuhan 430079, China*

Abstract In this paper, the ICESat laser altimetry data is used to obtain an estimate of the mass balance of Antarctic ice sheet from February 2003 to March 2008. The time series of elevation change in Antarctic ice sheet are derived by the block crossover analysis using the ICESat nadir ground track, and the calculation of the campaign basis is discussed. A least square regression of crossover difference is applied to calculate the average elevation change trend and the seasonal cycle, and then the mass changes of Antarctic ice sheet are estimated by combining the elevation change rate with the surface firn density model. The result shows that seasonal cycle signals are obvious in Antarctic ice sheet height changes, and the average annual amplitude is about 2.21

基金项目 国家自然科学基金(40874037, 40974045)、国家 863 计划(2009AA12Z133, 2006AA12Z128)、极地科学战略研究基金(20080207)和中国科学院动力大地测量学重点实验室开放基金(L09-18)联合资助.

作者简介 史红岭, 男, 1975 年生, 博士研究生, 主要从事卫星激光测高数据处理及其应用的研究. E-mail: hlshi@asch.whigg.ac.cn

cm. On the coast of the Antarctica continent, there are significant thinning and thickening, especially near the Amundsen Sea embayment of west Antarctic and Antarctic Peninsula. Considering the influence of GIA (three public GIA models), our best estimate of the mass change in Antarctic ice sheet is about $-82 \sim -73 \text{ Gt/yr}$. For the ICESat, the ice sheet surface firn density model and the GIA model are the main factors in the mass change estimates.

Keywords ICESat, Crossover, Block analysis, Antarctic ice sheet, Mass change, Least square regression

1 引言

南极大陆冰盖约占全球总冰量的 90%, 是全球气候变化的重要影响因素之一, 极地冰雪的微小变化将会显著地改变海平面高程. 由于对其变化趋势大小和机制尚不清楚, 从而使得人们难以准确预测它们对现今海平面上升的贡献程度. 南极冰盖趋于增长还是消退尚无定论, 南极冰盖物质平衡的定量研究显得尤为重要^[1].

国内外专家学者在极地冰盖质量变化的监测研究中进行了不断的探索, 利用多种观测技术进行了大量的研究. 目前主要有三种方法: 物质平衡方法、GRACE(Gravity Recovery and Climate Experiment)卫星重力方法和卫星测高方法. 三种方法各有优势和缺陷, 物质平衡方法费时, 受到人力、物力及环境等多方面的限制不能大规模的进行; GRACE 卫星重力目前空间分辨率较低(约 500 km)、存在海陆信号混淆以及固体地球对冰后回弹(GIA, Glacial Isostatic Adjustment)响应的不确定性等问题^[2, 3]; 卫星雷达测高受到覆盖范围和卫星分辨率的影响, 难以获得高精度、覆盖范围广的极地冰盖高程变化率.

随着 2003 年世界上首颗激光测高卫星 ICESat (Ice Cloud and land Elevation Satellite) 的升空, 能够以更高的精度, 在更大的空间范围内($\pm 86^\circ$) 和更长的时间尺度上对极地冰盖地形及其变化进行连续的监测, 进而获得更加准确的冰盖高程变化时间序列. ICESat 卫星属于 NASA 地球观测系统(EOS, Earth Observing System) 中卫星观测的一部分, 其主要任务是监测南极洲和格陵兰冰盖的高程变化, 进而为估算冰盖表面物质平衡变化和全球气候变化提供直接或者间接的观测依据. Nguyen 等(2005)^[4] 研究显示在南极地势较为平坦地区冰盖的年变化趋势为 2 cm/yr ; Fricker 等(2005)^[5] 研究表明在最优的条件下, ICESat 的垂直精度优于 3 cm ; Gunter 等

(2009)^[6] 比较了 2003~2007 年 ICESat 与 GRACE 数据在南极应用中的一致性; Pritchard 等(2009)^[7] 利用 ICESat 分析了 2003~2007 年南极海拔 2500 m 以下区域的冰盖地表高度变化. 目前, 国内在 ICESat 激光测高数据处理方法和应用方面已相继开展研究. Dongchen E 等(2009)^[8] 融合 ASTER 三维立体数据和 ICESat 高精度测高数据提取了南极地区地形信息; Wen J 等(2007)^[9] 利用 ICESat 等数据对南极 Amery 冰架底部物质通量进行了估算; 史红岭等(2009)^[10] 利用 ICESat 数据针对恩德比地区冰盖高程变化进行了初步研究; 李建成等(2008)^[11] 利用 ICESat 数据对南极冰盖高程模型进行了研究.

本文在这些研究的基础上, 进一步考虑高程变化中季节性信号的影响, 通过基于块域的 ICESat 激光卫星地面轨迹交叉点分析方法, 获取 2003~2008 年间 ICESat 测量的冰盖高程变化的时间序列, 进而研究分析近年来南极大陆冰盖以及边缘地区冰架详细的物质平衡变化尺度及其空间分布特征.

2 数据简介

本文主要利用由美国冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center, NSIDC) 发布的供冰川学研究使用的 ICESat GLA12 R28 极地冰盖数据资料, 数据产品为 level 2 级, 包含冰、海洋及地球物理学参数^[12]. 通过该数据可获得极地冰盖表面相对于参考椭球的大地高及其表面特征参数等信息, 其中冰盖表面高程已通过预先计算的冰盖高程最优算法得到, 包括激光点脚印位置、反射率、仪器及大气等相关的改正, 并且考虑了固体潮和海潮的瞬时影响. 时间跨度为 2003 年 2 月 20 日至 2008 年 3 月 21 日 14 个 ICESat 任务工作期, 数据产品任务周期以及起始截止时间如表 1 所示. 由于 ICESat 升空不久后, 三个机载激光器的第一个就失效, 并确定其余两个激光器可能会经历相同的加速衰减, 为了延长任务的生存周期以满足其长期变化探测目标, 实施了

任务方案的改变,以 33 天子循环的 91 天重复轨道周期,每年激活激光器工作两次或三次^[13]. 通过 NSIDC 提供的 NGAT 程序释放为 ASCII 格式,数据内容包含数据记录号、日期、时间、纬度、经度、高程以及大地水准面高.

表 1 ICESat GLA12 R28 激光任务工作周期

Table 1 GLA12 R28 laser operations periods

序号	任务周期	起始日期	结束日期
1	L1A	2003-02-20	2003-03-29
2	L2A	2003-09-24	2003-11-18
3	L2B	2004-02-17	2004-03-21
4	L2C	2004-05-18	2004-06-21
5	L3A	2004-10-03	2004-11-08
6	L3B	2005-02-17	2005-03-24
7	L3C	2005-05-20	2005-06-23
8	L3D	2005-10-21	2005-11-24
9	L3E	2006-02-22	2006-03-27
10	L3F	2006-05-24	2006-06-26
11	L3G	2006-10-25	2006-11-27
12	L3H	2007-03-12	2007-04-14
13	L3I	2007-10-02	2007-11-05
14	L3J	2008-02-17	2008-03-21

3 计算方法

3.1 块域交叉点分析

交叉点分析主要是应用在利用卫星测高数据研究大地水准面和海洋动态现象过程中消除地球重力场误差和卫星轨道误差的影响^[14],并成为卫星测高数据应用分析中的常用方法^[15~18],近年也逐渐应用于 ICESat 激光测高数据处理中^[6, 19~21].

卫星的两条轨迹彼此相交,构成一个交叉点,投影到地球表面,两条星下点轨迹相交构成地面交叉点(图 1a),在此点上得到两次卫星通过的时间及地表高程测量值,那么这两次高程和时间测量值的差定义为交叉点差.

为了得到 ICESat 上升轨迹和下降轨迹交叉点的位置和差值,本文首先对 ASCII 码数据进行了轨迹分离,逐一分离出升、降轨迹进行最小二乘二次曲线拟合,通过逐次迭代和样条插值得到交叉点高程和时间(图 1b),详细过程参见文献^[14].

冰盖地表高程变化可以通过星下点轨迹交叉点在时间间隔 $\Delta t = t_2 - t_1 (t_2 > t_1)$ 升轨迹、降轨迹的

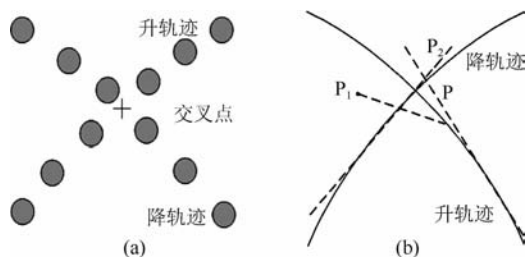


图 1 ICESat 星下点轨迹交叉点(a)及其精确位置确定示意图(b). P 为交叉点精确位置, P_1 为迭代首次近似位置, P_2 为迭代计算交叉点近似精确位置,即下次迭代的近似位置

Fig. 1 Spot tracks for the determination of a crossover. P is the exact location of the intersection, P_1 is the approximate location of the first iteration, P_2 is the approximate exact location of the iteration

高程之差计算得到. 升-降和降-升高程变化估计值分别为:

$$\Delta H_{AD} = H_A(t_2) - H_D(t_1) + \epsilon_{AD}, \quad (1)$$

$$\Delta H_{DA} = H_D(t_2) - H_A(t_1) + \epsilon_{DA}, \quad (2)$$

ϵ_{AD} 和 ϵ_{DA} 代表卫星测高中轨道径向测量误差可能引起的不随时间变化的偏差^[10, 22].

ICESat 卫星为极轨卫星,轨道倾角 94° ,激光脚印直径约 60 m,沿轨迹方向间距约 172 m,其设计目标是以足够的准确度、时空分辨率在 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 冰盖范围内可以获得小于 1.5 cm/yr 的精度的一年和长期高程变化量^[23],且保证 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 范围内有足够的交叉点用于研究. 因此,本文设置块域的大小约 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$,计算块域内的平均高程变化. 块域的大小在纬度方向保持为 1° (约 111 km); 由于余弦函数递减,在经度方向设置为从纬度 -62° 处的约 3° 到纬度 -86° 处的 15° 之间.

在块域内,通过相互比较 14 个 ICESat 任务工作期间星下点轨迹得到 91 个不同的任务间交叉点集(L1A vs L2A, L1A vs L2B, ..., L3J vs L3I). 为了剔除由于小尺度地表粗糙度、未探测出的前向散射以及交叉点线性插值过程中带来的粗差,本文首先剔除了交叉点高差大于 10 m 的点,以保留部分西南极沿海岸地区冰盖高程变化信息,然后在块域内进行 $3\text{-}\sigma$ 准则检验进一步剔除残留的粗差^[19]. 最后得到南极大陆上交叉点总数为 1200 多万个,越靠近极区,块域内交叉点数越多.

3.2 块域高程变化时间序列回归分析

在以往的冰盖高程变化估计过程中大多未考虑季节性周期的影响^[6, 7, 24, 25],仅顾及趋势变化,忽略

了季节性信号的影响. 近年来, 许多的研究发现冰盖高度变化具有季节性周期, 认为可能是由于季节性的积累和依赖于温度的密实化过程引起的^[19, 26]. ICESat 每年有 2~3 个观测工作期, 那么根据奈奎斯特采样定理可以利用块域范围内的所有交叉点来估计高程变化的年周期信号.

假设随时间变化的交叉点高差仅包含冰盖高程变化的趋势项和周年信号, 那么块域内高程变化量可以以公式(3)来表示.

$$y = a + b\Delta t + c\cos\left(2\pi\frac{\Delta t}{T}\right) + d\sin\left(2\pi\frac{\Delta t}{T}\right)$$

$$= \left[1\Delta t\cos\left(2\pi\frac{\Delta t}{T}\right)\sin\left(2\pi\frac{\Delta t}{T}\right)\right] \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$B = \sqrt{c^2 + d^2}, \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{d}{c}, \quad (5)$$

b 表示块域内高程变化趋势, y 为长度为 n 的交叉点高差矢量, Δt 为相应的交叉点时间差值, B 和 θ 分别为周期项的振幅和相位.

令:

$$\hat{x} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \left[1\Delta t\cos\left(2\pi\frac{\Delta t}{T}\right)\sin\left(2\pi\frac{\Delta t}{T}\right)\right]. \quad (6)$$

则基于公式(3)的最小二乘估计为:

$$\hat{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{y},$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1},$$

\mathbf{P} 为 \mathbf{y} (交叉点高差) 的权阵, $\mathbf{Q}_{\hat{x}}$ 为估计值的协因数阵. 据此, 可以计算得到高程变化的趋势项和周年项.

3.3 任务间偏差

在 ICESat 数据处理过程中, 如何确定不同观测任务期间所产生的潜在的高程偏差非常重要^[6]. 东南极内陆大部分区域冰盖高程基本上没有变化, 从图 2 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 观测的南极 2003 年 1 月至 2006 年 12 月的年降雪量可以看出, 东部的白色轮廓显示的区域年降雪量很小, 则认为这一地区为零高度变化, 可用来计算任务间系统偏差. 在白色轮廓区域内得到 2003 年 2 月至 2008 年 3 月之间交叉点高度变化趋势为 4.26 cm/yr, Gunter 计算得到的 2003~2007 年间白色轮廓区域的偏差为 4.7 cm/yr, 在海洋

上的偏差为 2.1 cm/yr, 表明了 ICESat 的观测任务间确实存在系统偏差并具有全局性^[6, 27]. 对 ICESat 来说, 偏差的准确探测对质量变化估计非常重要, 假设利用平均的地表粒雪密度为 350 kg/m³, 则每厘米的偏差将引起大约 50 Gt/yr 的质量变化.

4 结果分析

4.1 南极冰盖高程变化

在南极大陆, 通过块域的设置, 我们得到 936 个大约 100 km × 100 km 的块域, 在每个块域中利用得到的交叉点差时间序列, 通过最小二乘回归分析, 估计冰盖高度变化的趋势项及年周期项. 本文由 ICESat 得到的南极冰盖高度变化趋势与 Gunter (2009) 得到的结果显示出了很好的空间相似性^[6].

图 3 为南极大陆冰盖高度变化的空间分布特征, (a、b、c) 分别为其趋势项、周年振幅、周年相位. 如图 3a 所示, 在西南极地区, 比较先前雷达测高资料结果^[28~30], 发现 8#、15# 流域显著的动态变薄, 流域 16#、17#、20# 呈现显著的动态变厚. 在冰川尺度上, 西南极的阿蒙森海湾 (Amundsen Sea embayment, ASE) 附近表现为最强的变薄, 已证实是由于冰川及其支流的快速流动引起的. 由许多小的独立冰川注入的 Crosson 及 Dotson 冰架, 也经历着动态的变薄, 研究表明海洋洋流驱动为其最有力的证据^[7]. 在阿蒙森海湾 (ASE) 的整个流域表面高程呈现明显的降低, 一直延伸到松岛冰川流域分界线. 计算得到 15# 流域的平均高度变化率为 -7.5 ± 1.1 cm/yr (1995~2003 年间为 -9.2 ± 0.7 cm/yr^[31]).

在东南极, 位于 3# 流域的恩德比地及其靠近 4# 流域附近表现为明显的增长趋势. 并观测到一些注出冰川的动态变薄, 尤其是在东经 120° 附近. 邻近的小的独立注出冰川也经历类似的变化, 其主要的因素也是来自于大洋洋流的驱动^[7].

图 3a 还显示出南极高程变化模式中一些新的特征. 利用 ICESat, 第一次可以监测到整个南极半岛的高度变化, 并发现慢流冰帽和沿 Bellingshausen Sea 海岸分界线地区以 1 m/yr 的速度增厚^[32], 这种信号延伸到半岛北端的高海拔地区 (17# 流域), 与此形成对比的是, 由高原流向东西海岸的崩塌冰架支流冰川正经历着深度的动态变薄. ICESat 激光测高卫星覆盖到了 -86° , 基本覆盖了南极大陆, 因此现在还可以看到完整的南极接地线, 包括在赛普尔海岸在内的高度变化. 在横贯山脉附近快速流动的

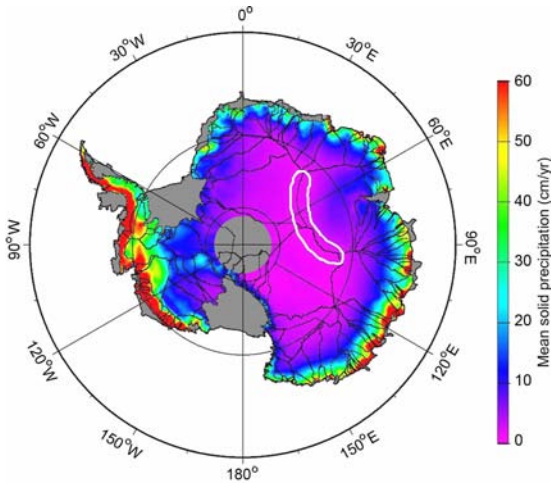


图 2 ECMWF 2003 年 1 月至 2006 年 12 月降雪量，白色轮廓区域用于计算任务间偏差
 Fig. 2 Mean solid precipitation as derived from ECMWF operational data over the period Jan 2003 to Dec 2006. The white outline in East Antarctica represents the area used to compute the campaign biases

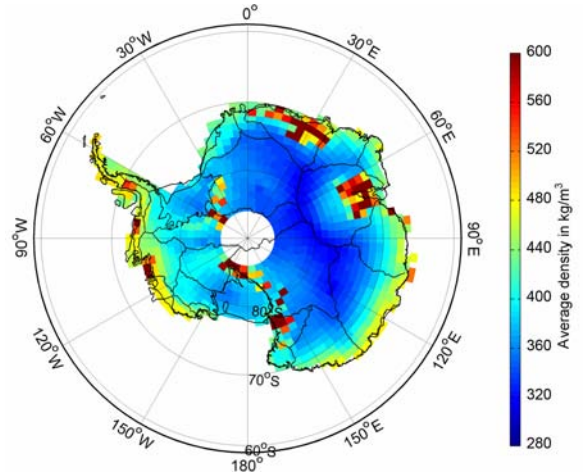


图 4 表面密度分布模型图
 Fig. 4 The block surface firn density model in Antarctica

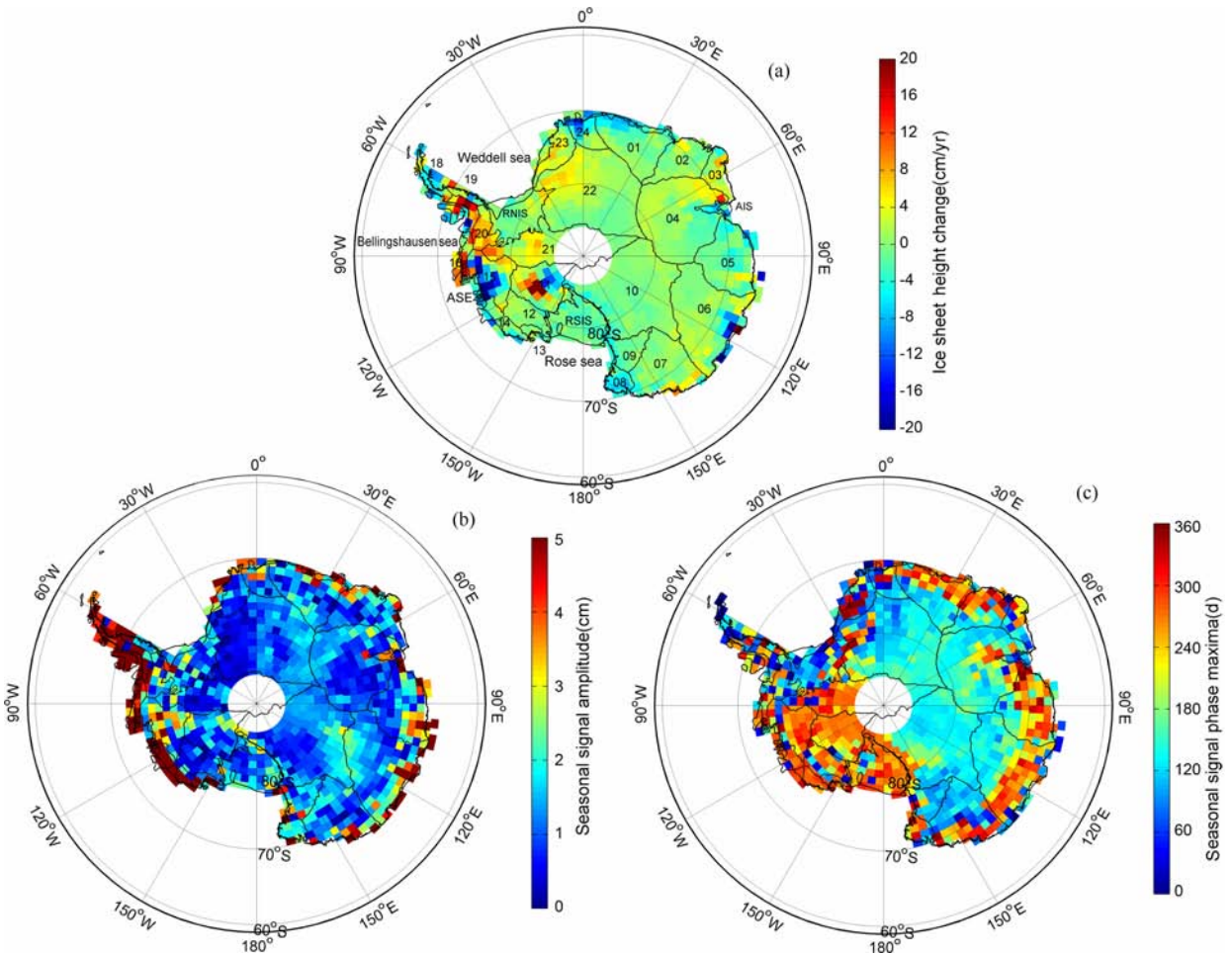


图 3 南极冰盖高度变化趋势项(a)、周年振幅(b)、周年相位(c)
 Fig. 3 The Antarctic Ice Sheet elevation change trend term(a), seasonal signal amplitude(b), seasonal signal phase(c)

支流和停滞的主流躯干变薄的速度达到了 15 cm/yr, 快速流动的 Kamb 冰流表现为增厚, 显然是受制于冰流的剪力边缘、冰间脊的作用^[7]。

表 2 给出了 2003~2008 年间南极冰盖高度变化的平均趋势项和周年项数值结果. 南极冰盖高度变化的平均趋势为 -0.99 cm/yr, 意味着在这期间南极大陆冰盖整体变化趋势趋于负平衡. 冰盖高度的周年变化非常明显, 平均振幅为 2.21 cm, 平均相位约为 180 天. 图 3b 给出了周年振幅的空间分布情况, 可以看到其分布具有明显的规律, 较大的振幅值出现在南极大陆边缘区域, 约 5 cm 或者更高; 而内陆区域振幅值大都小于 2 cm. 图 3c 显示在西南极及整个南极大陆边缘区域相位约为 200~360 天, 而东南极内陆相位基本上在 80~160 天之间. 各区域相位的不同与区域内年温度变化、积累率变化有关, 具体差异有待进一步研究.

表 2 2003~2008 年南极冰盖高度变化
Table 2 Antarctica Ice Sheet height change
from 2003 to 2008

	趋势项(cm/yr)	周年振幅(cm/yr)	周年相位(d)
高程变化	-0.99 ± 0.05	2.21 ± 0.09	179.79 ± 2.24

4.2 南极冰盖质量变化

由 ICESat 求出的冰盖高度变化转换到质量变化, 必须考虑地表粒雪层的密度. 假定垂直冰速度(压实和冰流)与长期的平均积累率平衡, 那么, 高度的变化可能是由于观测期内的累积异常引起的. 因此, 质量的变化可由观测的高度变化和此期间累积粒雪平均密度计算得到.

在以往的许多研究中, 大多采用常冰层密度值来估算质量变化, 而事实上由于冰雪表层密度存在空间变化, 仅利用一个假定不变的密度值(如 350 kg/m³)代表整个南极大陆表面密度模型来确定冰盖质量变化是不恰当的, 估计精度远远不够^[33]. 例如, 在阿蒙森海地区有明显的加速冰流, 引起强烈的冰盖高程变化, 即垂直的冰盖高程变化速度超过了长期的积累率^[34], 对于这些区域, 使用 917 kg/m³ 的密度值对质量变化比较恰当. 同样对于沿海岸冰流加速的区域, 密度模型需要加相应的优化, 以减少冰雪密度模型带给质量变化估计的影响.

本文通过由南极区域气候模型(RACMO2/ANT)^[6, 27, 35]输出的年平均积累率、离地面 10 m 高的风速和地表温度计算得到南极冰盖地表块域粒雪密度模型(见图 4). 值得注意的是, 积累率变化随着

不同的时间尺度而发生变化, 年际和年代变化的积累可能很大, 对粒雪深度变化有显著的影响, 建立精确的、涵盖 ICESat 卫星观测时间粒雪密度分布模型将另作讨论.

另外, 由于 ICESat 得到的南极冰盖高程变化包含了 GIA 这一地球物理信号, 所以还需要借助于冰川均衡调整模型来扣除其对冰盖物质平衡的影响. 本文分别利用目前常用的三种冰后回弹模型: 汪汉胜(2009)的 RF3L20 模型、Ivins(2005)的 IJ05 以及 Peltier(2004)的 ICE-5G 扣除其对南极冰盖高程变化的影响, 三种模型对南极大陆高度平均变化的影响分别约为 3.15 mm/yr、 1.43 mm/yr 和 2.06 mm/yr, 三种模型采用了不同的计算方法而差异较大, 对其物理机制的研究极其差异为下一步的研究内容^[6, 36~38].

结合密度模型并考虑 GIA 影响后, 本文得到的 2003~2008 年南极大陆冰雪质量变化的结果约在 $-82 \sim -73$ Gt/yr 之间. 表 3 列出了最近由 ICESat 和 GRACE 得到的南极冰盖质量变化的部分结果, Gunter 利用 2003~2007 年 ICESat 数据扣除 GIA 后估计得到不包含冰架区域(RONNE 和 ROSS 冰架等)的南极冰盖质量变化约在 $-26 \sim -24$ Gt/yr^[6]. 而本文是利用 2003 年 2 月至 2008 年 3 月期间的 14 个 ICESat 工作任务测高数据, 并且包含了沿海岸区域的冰架, 由于区域和时间的差异, 加上所使用的地表粒雪密度模型的不同, 所以数值上有所不同; 而由 GRACE 得到的结果则相差甚大, 在 $-250 \sim -74$ Gt/yr 之间^[2, 3, 6], 这主要是由 GRACE 的固有空间分辨率以及一阶项、 $C_{2,0}$ 和 GIA 的不确定性造成的. 虽然 ICESat 的测高精度已经足够高, 但是也受到系统偏差、转换为质量变化过程中所需要的粒雪密度模型以及 GIA 信号的影响, 不同的结果之间也不尽相同.

表 3 不同作者得到的南极冰盖质量变化(Gt/yr)

Table 3 Antarctica Ice Sheet mass change
from different mission, in Gt/yr

作者	任务	期间	GIA 模型		
			IJ05	ICE-5G	RF3L20
Gunter 等 ^[6]	GRACE	2003~2007	-74	-92	-
J. L CHEN ^[2]	GRACE	2002~2009	-190	-250	-
Gunter 等 ^[6]	ICESat	2003~2007	-24	-26	-
本文结果	ICESat	2003~2008	-73	-76	-82

5 结 论

本文基于近 5 年的 ICESat 南极冰盖观测资料,通过块域分析方法有效地获得了较以往研究更高分辨率的南极冰盖高程变化精细信息,检测到以前研究未能很好揭示的南极内陆、边缘以及南极半岛冰盖的详细时空变化趋势.西南极以及南极大陆边缘地区呈现出明显的动态变化,东南极内陆变化基本上不明显,结果与目前对南极大陆质量变化的认识基本一致.在考虑表面粒雪密度空间变化和三种不同的 GIA 模型影响的情况下,南极冰盖质量整体趋势变化在 $-82 \sim -73 \text{Gt/yr}$ 之间.精确地提取高程变化信息是利用 ICESat 观测资料研究南极冰盖质量平衡问题的关键,块域分析法能够有效地提取南极冰盖高程变化信息,其研究结果有助于加深极地冰盖变化对海平面上升、气候变化影响的认识和理解,但任务间系统偏差、地表粒雪模型和 GIA 模型的影响为利用卫星测高资料主要的影响因素.

致 谢 感谢美国冰雪数据中心(NSIDC)提供的 ICESat 卫星激光测高数据,荷兰 Delft University of Technology 的 B. C. Gunter 博士提供的 ECMWF 降雪量数据.

参考文献(References)

- [1] 任贾文,秦大河. 南极冰盖表面积累率与物质平衡. 冰川冻土, 1996, **18**(增): 83~89
Ren J W, Qin D H. Surface accumulation rate and mass balance of the antarctic ice sheet. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 1996, **18**(S): 83~89
- [2] Chen J L, Wilson C R, Blankenship D, et al. Accelerated Antarctic ice loss from satellite gravity measurements. *Nat Geosci*, 2009, **2**(12): 859~862
- [3] 鄂栋臣, 杨元德, 晁定波. 基于 GRACE 资料研究南极冰盖消减对海平面的影响. 地球物理学报, 2009, **52**(9): 2222~2228
E D C, Yang Y D, Chao D B. The sea level change from the Antarctic ice sheet based on GRACE. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(9): 2222~2228
- [4] Nguyen A, Herring T. Analysis of ICESat data using Kalman filter and Kriging to study height changes in East Antarctica. *Geophys Res Lett*, 2005, **32**(23): L23S03
- [5] Fricker H, Borsa A, Minster B, et al. Assessment of ICESat performance at the salar de Uyuni, Bolivia. *Geophys Res Lett*, 2005, **32**(21): 21
- [6] Gunter B, Urban T, Riva R, et al. A comparison of coincident GRACE and ICESat data over Antarctica. *J Geodesy*, 2009, **83**(11): 1051~60
- [7] Pritchard H D, Arthern R J, Vaughan D G, et al. Extensive dynamic thinning on the margins of the Greenland and Antarctic ice sheets. *Nature*, 2009, **461**(7266): 971~975
- [8] Dongchen E, Shen Q, Xu Y, et al. High-accuracy topographical information extraction based on fusion of ASTER stereo-data and ICESat/GLAS data in Antarctica. *Sci China Ser D*, 2009, **52**(5): 714~722
- [9] Wen J, Jezek K, Csathó B, et al. Mass budgets of the Lambert, Mellor and Fisher Glaciers and basal fluxes beneath their flowbands on Amery Ice Shelf. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, **50**(11): 1693~1706
- [10] 史红岭, 陆洋, 鲍李峰等. 利用 ICESat 交叉点分析探测恩德比地冰盖近年高程变化. 武汉大学学报: 信息科学版, 2009, **34**(4): 440~443
Shi H L, Lu Y, Bao L F, et al. Recently elevation change detection of Enderby Land Ice sheet using ICESat laser altimetry. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 2009, **34**(4): 440~443
- [11] 李建成, 范春波, 褚永海等. ICESAT 卫星确定南极冰盖高程模型研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2008, **33**(3): 226~228
Li J C, Fan C B, Chu Y H, et al. Using ICESAT altimeter data to determine the antarctic ice sheet elevation model. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 2008, **33**(3): 226~228
- [12] Jester P, Lee J. GLAS standard data products specification-level 2. Version 5.0. ICESat (GLAS) Science Processing Software Document Series, 2002
- [13] Schutz B, Zwally H, Shuman C, et al. Overview of the ICESat mission. *Geophys Res Lett*, 2005, **32**(21): L21S01
- [14] 王广运, 王海瑛, 许国昌. 卫星测高原理. 科学出版社, 1995
Wang G Y, Wang H Y, Xu G C. Principle of Satellite Altimetry (in Chinese). Beijing: Science Press, 1995
- [15] Carnochan S, Moore P, Ehlers S. ERS-1 radial position refinement by dual crossover analysis with TOPEX/Poseidon. *Adv Space Res*, 1995, **16**(12): 119~122
- [16] Le Traon P, Ogor F. ERS-1/2 orbit improvement using TOPEX/POSEIDON: the 2cm challenge. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(C4): 8045~8057
- [17] Davis C, Segura D. An algorithm for time series analysis of ice sheet surface elevations from satellite altimetry. *Ieee T Geosci Remote*, 2001, **39**(1): 202~206
- [18] Bosch W, Savcenko R. Satellite Altimetry: Multi-Mission Cross Calibration, F, 2005. Springer
- [19] Smith B, Bentley C, Raymond C. Recent elevation changes on the ice streams and ridges of the ross embayment from ICESat crossovers. *Geophys Res Lett*, 2005, **32**(21): L21809
- [20] Brenner A C, Dimarzio J R, Zwally H J. Precision and accuracy of satellite radar and laser altimeter data over the continental ice sheets. *Ieee T Geosci Remote*, 2007, **45**(2): 321~331

- [21] Shi H L, Lu Y, Bao L F, et al. 2003~2008 ice sheet elevation change on the Lake Vostok, Antarctica, from ICESat. 2008 International Workshop on Education Technology and Training and 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing, Vol 2, Proceedings, 2009, 561~564,849
- [22] Ferguson A, Davis C, Cavanaugh J. An autoregressive model for analysis of ice sheet elevation change time series. *Ieee T Geosci Remote*, 2004, **42**(11):2426~2436
- [23] Zwally H J, Schutz B, Abdalati W, et al. ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land. *J Geodyn*, 2002, **34**(3-4): 405~445
- [24] Davis C H, Li Y H. Decadal mass balance of the antarctic ice sheet and its contribution to global sea level rise. *Igarss 2004: Ieee International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings*, 2004, Vols 1-7, 1152~1155
- [25] Davis C H, Ferguson a C. Elevation change of the Antarctic ice sheet, 1995~2000, from ERS-2 satellite radar altimetry. *Ieee T Geosci Remote*, 2004, **42**(11): 2437~2445
- [26] Zwally H, Jun L. Seasonal and interannual variations of firn densification and ice-sheet surface elevation at the Greenland summit. *J Glaciol*, 2002, **48**(161):199~207
- [27] Gunter B C, Riva R E M, Urban T, et al. Evaluation of GRACE and ICESat mass change estimates over Antarctica. *Proceedings of the IAG international symposium on gravity, geoid and earth observation (GGEO)*, Chania, Greece. 2008
- [28] Wingham D, Shepherd A, Muir A, et al. Mass balance of the Antarctic ice sheet. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2006, **364**(1844):1627
- [29] Zwally H J, Giovinetto M B, Li J, et al. Mass changes of the Greenland and Antarctic ice sheets and shelves and contributions to sea-level rise: 1992~2002. *J Glaciol*, 2005, **51**(175): 509~527
- [30] Davis C, Li Y, Mcconnell J, et al. Snowfall-driven growth in East Antarctic ice sheet mitigates recent sea-level rise. *Science*, 2005, **308**(5730): 1898~1901
- [31] Helsen M, Van Den Broeke M, Van De Wal R, et al. Elevation changes in Antarctica mainly determined by accumulation variability. *Science*, 2008, **320**(5883):1626
- [32] Wingham D J, Shepherd A, Muir A, et al. Mass balance of the antarctic ice sheet. *Philos T Roy Soc A*, 2006, **364**(1844): 1627~1635
- [33] Wingham D, Ridout A, Scharroo R, et al. Antarctic elevation change from 1992 to 1996. *Science*, 1998, **282**(5388): 456~458
- [34] Thomas R, Rignot E, Casassa G, et al. Accelerated sea-level rise from West Antarctica. *Science*, 2004, **306**(5694): 255~258
- [35] Kaspers K, Van De Wal R, Van Den Broeke M, et al. Model calculations of the age of firn air across the Antarctic continent. *Atmos Chem Phys*, 2004, **4**(5):1365~1380
- [36] Peltier W. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth; the ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci*, 2004,**32**:111~149
- [37] Ivins E, James T. Antarctic glacial isostatic adjustment: a new assessment. *Antarct Sci*, 2005, **17**(4): 541~553
- [38] 汪汉胜, Patrick W, Wouter V. D. W 等. 大地测量观测和相对海平面联合约束的冰川均衡调整模型. *地球物理学报*, 2009, **52**(10):2450~2460
- Wang H S, Wu Patrick, van der Wal Wouter, et al. Glacial isostatic adjustment model constrained by geodetic measurements and relative sea level. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(10):2450~2460

(本文编辑 胡素芳)