

沈校熠, 柯长青, 李海丽. 基于多源卫星雷达高度计的南极海冰厚度估算[J]. 海洋学报, 2024, 46(8): 108–120, doi:10.12284/hyxb2024087
Shen Xiaoyi, Ke Changqing, Li Haili. The estimation of Antarctic sea ice thickness from multi-source satellite radar altimeters[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(8): 108–120, doi:10.12284/hyxb2024087

基于多源卫星雷达高度计的南极海冰厚度估算

沈校熠^{1,2*}, 柯长青², 李海丽²

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 南京大学 地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 南极海冰是极地气候系统的重要组成部分, 对全球气候有着深远影响。海冰厚度作为海冰的关键属性之一, 了解其时空分布特征和变化趋势对理解和预估气候变化进程具有重要意义。然而, 目前对于南极海冰厚度的监测局限在时空分布有限的实地观测和短时间序列的卫星观测阶段, 长时间序列的冰厚数据仍然缺失。针对这一问题, 基于时空连续的卫星雷达高度计 Envisat 和 CryoSat-2, 构建了一致性较高的雷达干舷高度数据, 定量估算了高度计雷达信号在积雪中的穿透深度, 发展了一种适用于南极海冰的厚度遥感估算方法。估算的冰厚与 Australian Antarctic Data Centre 实测数据的平均绝对偏差约为 0.28 m; 与 ICESat 激光雷达高度计冰厚的平均绝对偏差约为 0.65 m, 相关系数为 0.71, 一致性较高。2002–2023 年南极海冰厚度时空变化分析结果表明, 厚冰主要分布于西威德尔海和别林斯高晋海/阿蒙森海, 其他海域海冰相对较薄。南极海冰厚度在 2011 年之前呈现轻微降低趋势, 在 2011 年后加速降低 (-0.03 m/a)。南极海冰厚度的分布和变化趋势存在明显的季节和区域特征。

关键词: 海冰厚度; 海冰干舷高度; 穿透深度; 雷达高度计; 南极

中图分类号: P731.15

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2024)08-0108-13

1 引言

海冰是极地环境的关键组成部分, 对极地乃至全球气候系统都具有重要影响。随着全球气候变暖的加剧, 北极海冰面积呈现持续减少的状态, 而南极海冰的变化却较为复杂。卫星观测表明, 1979 至 2017 年南极海冰面积以每年 1.78×10^4 km² 的速度在增加, 然而在 2017 年之后却出现了急剧下降^[1]。这种与全球变暖不同步的现象引起了科学界的高度关注, 目前还未得到准确的解释。针对这一科学问题, 国内外相关研究大多是利用海冰范围或面积开展探索的^[1–8]。然而, 海冰范围或面积只能反映海冰的空间分布情况, 在揭示海冰体量变化上具有一定的局限性, 因此需要结合冰厚数据来进一步分析南极海冰的变化情况。

早期针对南极海冰厚度的观测主要是基于潜艇声呐技术和船载走航观测^[9–12]。这些数据往往时空代

表性有限, 难以用于分析长时间序列的冰厚变化。尽管航空测量可以获取更大范围的观测数据, 例如 NASA 的“冰桥计划”(Operational IceBridge mission, OIB) 等, 但其成本通常很高且仅能获取特定时期和区域内的数据。数值模式是评估大范围海冰变化的重要手段。Fichefet 等^[13–14]、Zhang^[15] 利用海洋–海冰模型重建了数十年的南极海冰体积数据。然而, 由于所使用的大气强迫场质量存疑^[16], 这些重建数据的可靠性并不高。Massonnet 等^[17] 利用海冰密集度数据同化的方法重构了 1980–2008 年南极海冰厚度和体积数据。但是, 该研究在同化模型的设置中存在部分缺点, 其冰厚结果具有一定的不确定性。此外, 多数 CMIP5 和 CMIP6 气候模式尚且无法模拟出南极海冰范围的实际变化趋势^[18–19]。因此, 目前数值模式仍然难以精确模拟南极海冰的厚度变化, 现有的模拟结果存在很大的不确定性^[20]。

收稿日期: 2024-05-09; 修订日期: 2024-07-10。

基金项目: 国家自然科学基金(42206174); 江苏省自然科学基金(BK20210193)。

* 通信作者: 沈校熠(1993—), 男, 江苏省盐城市人, 讲师, 研究方向为极地遥感。E-mail: shenxiaoyi@hhu.edu.cn

卫星遥感技术的发展给获取准确且大尺度的海冰厚度提供了机遇。光学、合成孔径雷达影像均可用于海冰厚度的遥感估算中^[21-22],但受限于观测范围相对较小等因素,在获取全南极海冰厚度方面仍然存在一定的挑战。相较于其他遥感技术,卫星高度计是获取半球尺度海冰厚度的主要手段^[23]。基于激光、雷达高度计的海冰厚度估算已经成功地应用于北极海冰,并且实现了冰厚变化的长时间序列研究。Laxon等^[23]利用卫星高度计估算了北极海冰的厚度,后续学者采用了不同的卫星高度计数据或相关改进方法进行了北极海冰厚度的反演研究^[24-26]。对于南极海冰,Giles等^[27]首次将雷达高度计应用于南极海冰表面高程的反演中,证明了其在南极冰厚反演中的潜力。Schwegmann等^[28]基于Envisat和CryoSat-2雷达高度计估算了南极海冰厚度;Kwok和Kacimi^[29]、陈亦卓等^[30]基于CryoSat-2雷达高度计估算了南极海冰的干舷高度或厚度。此外,部分学者利用激光雷达高度计的积雪干舷高度数据,采用不同方法对积雪厚度进行估算并进一步实现对南极海冰厚度的反演^[31-35]。

然而,由于南北极地理和气候条件的差异,常规的卫星高度计冰厚反演方法在估算南极海冰厚度方面存在一定的缺点^[27]。南极海冰被南大洋包围,水分较为容易获取,海冰表面积雪通常较厚而海冰较薄。在这种情况下,微波雷达高度计信号往往不能完全穿透积雪从而未在雪-冰分界面发生主散射,所测得的高程并非是海冰表面高程而是处于雪层中的某处,需要进行相应校正以降低后续冰厚估算的误差^[36]。尽管激光高度计不受该影响,但ICESat和ICESat-2的观测时长较短,尤其是两者间存在较长的观测空白。另外,较厚的积雪会将海冰表面压至海平面以下,海水浸泡部分积雪形成雪-水混合层,也会影响海冰厚度的估算精度。受限于上述原因,基于雷达高度计的海冰厚度长时间序列数据仍然有限^[30, 37-39],限制了对气候变暖背景下南极海冰厚度变化的科学探讨。

针对上述问题,结合卫星、航空、船载和地面观测数据,基于多源卫星雷达高度计开展了南极海冰厚度的遥感估算方法研究,并基于此进一步揭示了南极海冰厚度变化的时空特征,为分析气候变化下的南极海冰厚度变化以及探索变化的影响因素提供方法和数据基础。

2 数据

2.1 卫星高度计

为了生成长时间序列的南极海冰厚度数据,联合

Envisat和CryoSat-2两种卫星雷达高度计进行冰厚估算,两种雷达高度计的基本参数如表1所示。相较于Envisat,CryoSat-2采用了合成孔径雷达多视技术,脉冲信号具有更高的信噪比和空间分辨率。分别采用欧洲空间局发布的Envisat RA-2 Sensor Geographical Data Record(SGDR)产品(2002年6月至2012年4月)和CryoSat-2 SAR-Mode L1B产品(2011年1月1日至2023年5月31日)。

表1 Envisat、CryoSat-2、ICESat和ICESat-2数据的基本介绍

Table 1 The brief introduction of Envisat, CryoSat-2, ICESat and ICESat-2 data

	Envisat	CryoSat-2
传感器	Radar Altimeter-2	Synthetic Aperture Interferometric Radar Altimeter
探测波段	Ku波段	Ku波段
空间分辨率	足迹为2~10 km, 足迹间隔约为7 km	沿轨约0.3 km, 跨轨约1.5 km
重访周期	35 d	30 d
空间范围	82°N~82°S	88°N~88°S
	ICESat	ICESat-2
传感器	Geoscience Laser Altimeter System	Advanced Terrain Laser Altimeter System
空间分辨率	足迹为70 m, 足迹间隔约为170 m	足迹为17 m, 足迹间隔约为0.7 m
重访周期	183 d	91 d
空间范围	88°N~88°S	88°N~88°S

采用测高精度更高的ICESat和ICESat-2激光雷达高度计数据对雷达高度计反演的海冰干舷高度进行交叉验证,两种激光雷达高度计的基本参数如表1所示。由于仪器硬件故障,NASA对ICESat的观测计划进行了调整,每年只进行了约6个月的观测。采用NASA Goddard Earth Science Laboratories发布的2003-2008年ICESat积雪干舷高度数据,该数据空间分辨率为50 km。精度验证结果表明,该数据与实测积雪干舷高度偏差约为1.8 cm^[40]。采用美国雪冰中心发布的2018-2019年ICESat-2 ATL10数据,ICESat-2与机载积雪干舷高度具有很高的一致性,平均偏差小于5 cm,相关系数大于0.95^[41-42]。

积雪深度(包括不确定度)数据来源于近期发布的南极海冰表面积雪深度产品^[43]。该产品基于AMSR-E和AMSR-2的微波辐射计数据,提供了2002年以来逐日的南极海冰表面积雪深度产品,空间分辨率为25 km。该方法反演的积雪深度与实测数据的平均

偏差为 5.64 cm, 明显优于之前的方法(文献 [44], 平均偏差为 14.47 cm)。

2.2 现场观测数据

2.2.1 OIB 机载测量数据

采用 NASA 发布的 OIB 机载测量数据进行海冰厚度估算方法的构建和精度验证。自 2009 年开始每年 10–11 月 NASA 会进行南极海冰参数的观测工作, 主要利用机载地形制图仪(Airborne Topographic Mapper, ATM)获取海冰高程数据。ATM 为波长 532 nm 的激光雷达高度计, 足印大小通常为 1 m^[45], 测高精度约为 0.1 m^[46]。首先基于 ATM 高程数据估算出积雪干舷高度^[47–48], 之后基于文献 [10] 提出的方法估算积雪深度。该方法针对南极不同海域分别进行雪深估算, 并且已经广泛地应用于南极海冰厚度的研究中^[32–34]。数据时间为 2009–2010 年、2012–2014 年、2016–2018 年 10–11 月, 数据的空间分布如图 1 所示。

2.2.2 ASPeCt 船载观测数据

采用 Antarctic Sea Ice Processes and Climate(ASPeCt)船载走航观测数据对估算的海冰厚度进行精度验证, 该数据集一共包含了 1981–2005 年 81 次船载观测记录。海冰厚度通过逐小时在船只半径 1 km 范围内进行走航观测得到, 并且通过删除与上次观测间隔 6 海里的观测值来去除变化的船舶速度等因素给数据采集带来的偏差^[11], 同时也保证了每次观测的独立性。采用 2002–2005 年(2、5–7 月无数据)的观测数据并利用文献 [11] 的方法进行了质量控制, 数据的空间分布如图 1 所示。由于雷达高度计包含了对平整冰和非平整冰的观测, 因此采用 ASPeCt 船载数据

中的“平均厚度”进行对比。海冰的“平均厚度”是利用观测到的平整冰的厚度、冰脊的高度和冰脊所占比例进行估算的^[11]。由于船只航行通常避免驶入厚冰区, ASPeCt 观测的海冰厚度通常较薄。该数据对平整冰厚度的估算偏差可达 20%(大于 0.3 m), 对于非平整冰的偏差可达 30%^[11]。尽管存在一定的偏差, 但其数据分布的空间范围较大, 是南极为数不多的实测数据。

2.2.3 AADC 实地测量数据

采用 Australian Antarctic Data Centre(AADC)发布的南极海冰厚度实地测量数据进行估算冰厚的精度验证。该数据集收集了 1985–2007 年间各个国家在南极科学考察中获取的南极海冰厚度实地测量数据, 采用数据的时间为 2003(9、10 月)和 2007 年(9、10 月), 主要分布在东南极和西南极(图 1)。数据内容包括了海冰干舷高度和海冰厚度等信息。不同于 ASPeCt 船载观测数据, AADC 实地测量数据对厚冰也进行了测量, 同时包含了薄冰和厚冰的实测结果。

3 方法和验证

3.1 南极海冰厚度估算方法

采用浮体法估算南极海冰厚度, 主要估算流程与北极海冰类似, 包括质量控制、地物分类、重跟踪校正和地理校正、雷达干舷高度计算和海冰厚度估算^[36]。为了保证雷达信号的可靠性, 仅针对海冰密集度 $\geq 75\%$ 的区域进行冰厚反演。海冰厚度观测值最终进行 50 km 的格网化, 该大小可以维持格网内具有足够多的质量可靠的雷达高度计测量点, 以保证海冰

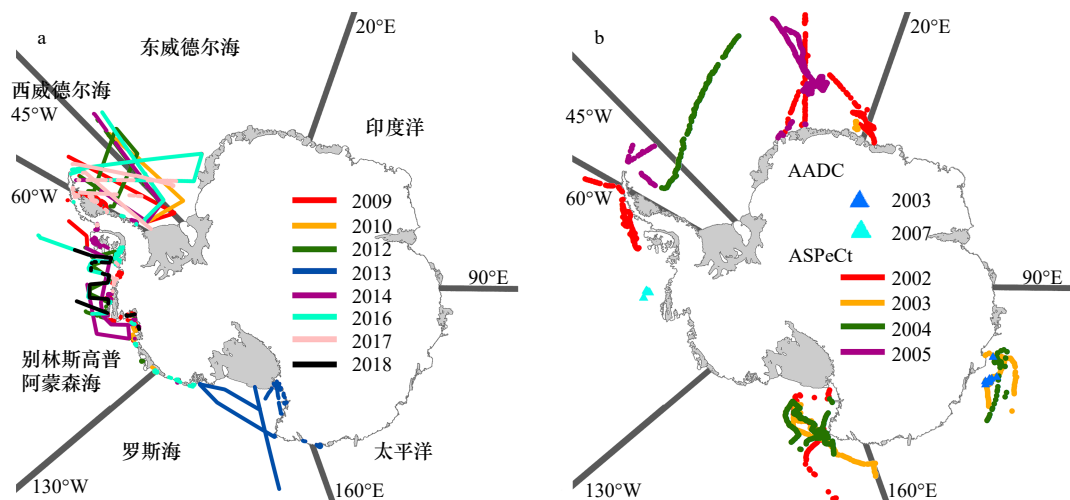


图 1 OIB 机载观测数据(a)、ASPeCt 船载观测数据和 AADC 实测数据的空间分布(b)

Fig. 1 The spatial distributions of OIB airborne measurements (a), ASPeCt shipborne observations and AADC in situ measurements (b)

图中经度线为南极 6 个子海域的分界线

The longitude lines show the boundary of six sea sectors in Antarctica

厚度估算结果的可靠性^[36]。特别是, 由于南极海冰的特性和长时间序列数据生产的要求, 不同雷达高度计之间观测的一致性、雷达信号在积雪中的穿透深度和存在雪-水混合层情况下的冰厚估算都需要给出针对性的解决方案, 以生成一致性高、可靠的南极海冰厚度数据集。

3.1.1 不同雷达高度计观测的一致性

在重跟踪校正阶段进行两种高度计观测值的一致性校正。对于 CryoSat-2 采用 50% 阈值法进行重跟踪校正; 对于 Envisat 采用文献 [36] 提出的动态阈值法。该方法考虑到 Envisat 的波形采样较为稀疏, 为了保证重跟踪的准确性, 以同时期的 CryoSat-2 高程为参照分析了与其高程差最小所采用的阈值与波形参数之间的关系, 构建了基于波形参数的最优阈值计算公式, 实现了高精度的波形重跟踪并且兼顾了与 CryoSat-2 观测结果的一致性。结果表明, 两种高度计的雷达干舷高度平均差值不超过 3 cm, 相关性不低于 0.85 (图 2), 一致性很高。

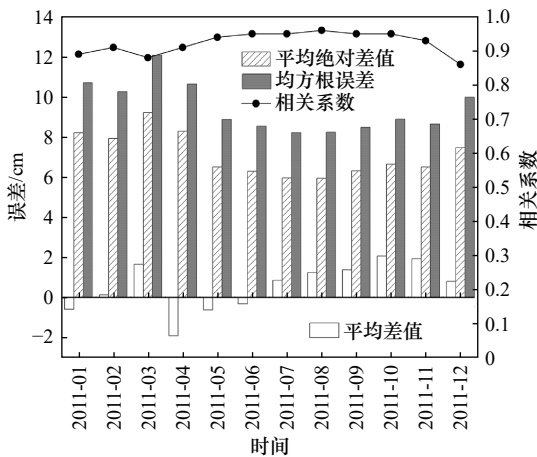


图 2 2011 年基于 Envisat 和 CryoSat-2 雷达高度计的雷达干舷高度对比

Fig. 2 The comparisons of radar freeboard estimates from Envisat and CryoSat-2 in 2011

3.1.2 雷达信号在积雪中的穿透深度

由于南极海冰表面积雪较厚, 高度计雷达信号并不能完全穿透积雪^[27], 并且雷达信号在积雪中的传播速度会发生变化^[49], 因此要同时对获取的雷达干舷高度进行穿透深度和传播速度的校正以获取高精度的海冰干舷高度:

$$h_f = h_r - (h_s - h_t) + h_t \times h_c, \quad (1)$$

其中,

$$h_c = 1 - \frac{c_{\text{snow}}}{c}, \quad (2)$$

$$c_{\text{snow}} = \frac{c}{\sqrt{1 + 1.7\rho_s + 0.7\rho_s^2}}, \quad (3)$$

式中, h_f 为海冰干舷高度, h_r 为雷达干舷高度, h_s 为积雪深度, h_t 为雷达高度计信号在积雪中的穿透深度, h_c 为速度校正因子, c_{snow} 为雷达信号在积雪中的传播速度, c 为雷达信号在真空中的传播速度, ρ_s 为积雪密度 (取值 300 g/cm^3)。

过去的研究并未对雷达高度计信号在南极海冰表面积雪中的穿透情况进行探究, 因此相应的穿透情况仍然未知。雷达信号在积雪中的穿透深度可以通过积雪深度进行估算^[50]。为了探究穿透深度与积雪深度之间的定量关系, 采用 2009–2018 年共计 8 a (2011 年和 2015 年无数据) 的 OIB 机载测量数据 (包括积雪深度和积雪干舷高度) 和同期的 Envisat、CryoSat-2 数据进行数值分析。将同一月份内的 OIB 机载测量数据与雷达高度计数据进行空间匹配, 对每个雷达高度计雷达干舷高度格网 ($50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$) 内的所有 OIB 机载测量数据 (包括积雪干舷高度和积雪深度) 进行平均, 完成与雷达高度计数据的空间匹配后计算其穿透深度 (共计 1 250 个格网)。结果表明, 积雪深度与穿透系数之间存在较好的线性关系 (图 3), 相关系数为 0.85 (通过置信度为 99% 的两侧显著性检验), 可以用于估算穿透深度:

$$h_t = -0.06 + 0.73h_s, \quad (4)$$

式中, h_t 为穿透深度, h_s 为积雪深度, 单位为 m。完成穿透深度校正后, 通过公式 (1)~(3) 即可估算出海冰干舷高度。

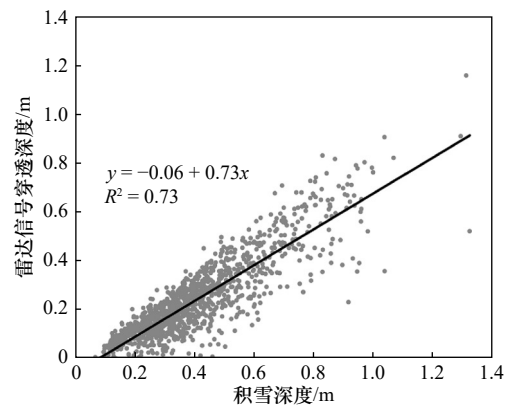


图 3 雷达信号穿透深度与积雪深度的散点图

Fig. 3 The scatter diagram of the radar penetration depth and snow depth

3.1.3 不同情形下的海冰厚度估算

通常而言, 表面覆盖积雪的海冰在海水中处于静力平衡状态, 结合浮体法存在以下关系^[23] (图 4a):

$$h_i = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_i} \cdot h_f + \frac{\rho_s}{\rho_w - \rho_i} \cdot h_s, \quad (5)$$

式中, h_i 为海冰厚度, ρ_w 、 ρ_s 和 ρ_i 依次为海水密度、积雪密度和海冰密度, 分别取固定值 $1 023.9 \text{ kg/m}^3$,

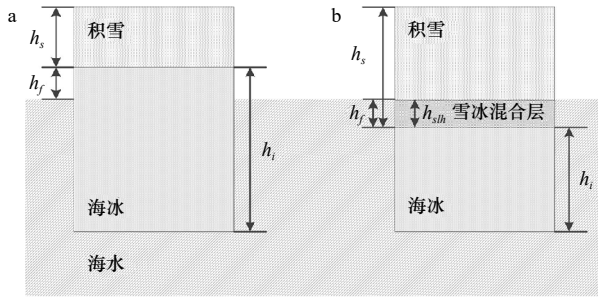


图4 南极海冰静力平衡示意图

Fig. 4 The schematic diagram of hydrostatic balance of Antarctic sea ice

a. 正海冰干舷高度, b. 负海冰干舷高度

a. Positive ice freeboard, b. negative ice freeboard

300.0 kg/m³和 915.1 kg/m³[36]。然而,在部分月份(7-10月份)南极海冰表面的积雪较厚,会出现积雪将海冰表面压至海表面以下的情形(图4b)。此时海表面以下的积雪与海水混合形成雪-水混合层,该层属性与积雪和海冰不同,且海冰干舷高度为负,因此公式(5)已不能适用于此时的情况。这里,考虑积雪、雪-水混合层和海冰三者呈现静力平衡状态,此时的海冰厚度估算公式可表示为[10]

$$h_i = \frac{(\rho_{sh} - \rho_i - \rho_s)}{\rho_w - \rho_i} \cdot h_{sh} + \frac{\rho_s}{\rho_w - \rho_i} \cdot h_s, \quad (6)$$

其中,

$$h_{sh} = -h_f, \quad (7)$$

式中, h_{sh} 为雪-水混合层的厚度, ρ_{sh} 为雪-水混合层的密度(940 kg/m³[10])。

3.1.4 海冰厚度不确定度估算

基于高斯误差传播方法计算海冰厚度的不确定度,分别考虑高程、密度参数和格网化等过程的影响。对于 Envisat 雷达高度计,所测地物高程和海表面高程异常的不确定度为 0.15 m (σ_{ELE} , σ_{SSA}); 对于 CryoSat-2 雷达高度计,所测地物高程和海表面高程异常的不确定度为 0.10 m[36]。积雪密度和海冰密度的不确定度(σ_{ρ_s} , σ_{ρ_i})为 20 kg/m³,雪-水混合层密度的不确定度($\sigma_{\rho_{sh}}$)为 20 kg/m。海水密度的不确定度不作考虑。针对式(5)和式(6),对于每个雷达高度计测量点,分别有如下海冰厚度不确定度的计算公式:

$$\sigma_{SIT} = \sqrt{G_{1,1}^2 \sigma_{h_f}^2 + G_{2,1}^2 \sigma_{\rho_i}^2 + G_{3,1}^2 \sigma_{h_s}^2 + G_{4,1}^2 \sigma_{\rho_s}^2}, \quad (8)$$

$$\sigma_{SIT} = \sqrt{G_{1,2}^2 \sigma_{h_f}^2 + G_{2,2}^2 \sigma_{\rho_i}^2 + G_{3,2}^2 \sigma_{h_s}^2 + G_{4,2}^2 \sigma_{\rho_s}^2 + G_{5,2}^2 \sigma_{\rho_{sh}}^2}, \quad (9)$$

其中,对于公式(8)有:

$$G_{1,1} = \frac{\partial SIT}{\partial h_f} = \frac{\rho_w}{\rho_w - \rho_i}, \quad (10)$$

$$G_{2,1} = \frac{\partial SIT}{\partial \rho_i} = \frac{h_f \cdot \rho_w + h_s \cdot \rho_s}{(\rho_w - \rho_i)^2}, \quad (11)$$

$$G_{3,1} = \frac{\partial SIT}{\partial h_s} = \frac{\rho_s}{\rho_w - \rho_i}, \quad (12)$$

$$G_{4,1} = \frac{\partial SIT}{\partial \rho_s} = \frac{h_s}{\rho_w - \rho_i}, \quad (13)$$

对于公式(9)有:

$$G_{1,2} = \frac{\partial SIT}{\partial h_f} = \frac{\rho_i + \rho_s - \rho_{sh}}{\rho_w - \rho_i}, \quad (14)$$

$$G_{2,2} = \frac{\partial SIT}{\partial \rho_i} = \frac{h_f \cdot (\rho_w + \rho_s - \rho_{sh}) + \rho_s \cdot h_s}{(\rho_w - \rho_i)^2}, \quad (15)$$

$$G_{3,2} = \frac{\partial SIT}{\partial h_s} = \frac{\rho_s}{\rho_w - \rho_i}, \quad (16)$$

$$G_{4,2} = \frac{\partial SIT}{\partial \rho_s} = \frac{h_f + h_s}{\rho_w - \rho_i}, \quad (17)$$

$$G_{5,2} = \frac{\partial SIT}{\partial \rho_{sh}} = \frac{-h_f}{\rho_w - \rho_i}, \quad (18)$$

对于公式(10)~(18)有:

$$h_f = h_r - h_s + (1 + h_c) \cdot h_i, \quad (19)$$

$$\sigma_{h_f} = \sqrt{\sigma_{h_r}^2 + \sigma_{h_s}^2 + (1 + h_c)^2 \sigma_{h_i}^2}, \quad (20)$$

$$\sigma_{h_f} = \sqrt{\sigma_{ELE}^2 + \sigma_{SSA}^2}, \quad (21)$$

$$\sigma_{h_i} = \sqrt{\sigma_{intersect}^2 + \sigma_{slope}^2 \cdot h_s^2 + slope \cdot \sigma_{h_s}^2}, \quad (22)$$

这里, $slope = 0.73$, $\sigma_{slope} = 0.01$, $\sigma_{intersect} = 0.01$ 。公式斜率和截距的不确定度为其线性拟合结果的标准差。

对于格网化后的海冰厚度,其不确定度的计算公式为[49]

$$\overline{\sigma_{SIT}} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{SIT}^2}}}, \quad (23)$$

式中, $\overline{\sigma_{SIT}}$ 是格网化后海冰厚度的不确定度, σ_{SIT} 是每个雷达高度计测量点处的海冰厚度不确定度, N 是每个海冰厚度格网内所包含的雷达高度计测量点数目。

3.2 验证

3.2.1 海冰干舷高度

(1) 穿透深度估算方法的自验证

为了证明提出的穿透深度估算公式的稳健性,利用不同年份组合的 OIB 积雪厚度数据分别进行回归分析,探讨公式回归系数的变化情况。同时,为了保证分析结果的可靠性,仅针对格网数超过 80 的结果进行分析。对于 2009-2018 年(2011 年、2015 年无数据)每 7 a 的 OIB 积雪深度数据的组合,共得到了 8 个回归系数(表 2),估算公式系数的不确定度可通过多个回归系数的标准差进行评估。不同年份穿透深度估算公式的斜率变化介于 0.51~0.88 之间,基于所有数据获取的斜率为 0.73,斜率的不确定度为 0.12,引起的穿透深度偏差小于 4 cm。截距变化介于 -0.10 和 0 之间,基于所有数据获取的截距为 0.06,截距的不确定度为 0.04。斜率和截距的不确定度较小,没

表 2 基于不同年份 OIB 机载测量数据的穿透深度
估算公式回归系数

Table 2 The regression coefficients of the penetration depth estimation equations based on OIB airborne measurements in different years

样本中被去除数据所在的年份	斜率	截距	格网数
2009	0.76	-0.05	208
2010	0.88	-0.10	196
2012	0.75	-0.09	218
2013	0.51	0.00	98
2014	0.65	-0.04	216
2016	0.68	-0.05	199
2017	1.07	-0.18	79
2018	0.52	0.01	36
应用所有数据	0.73	-0.06	1 250

有明显的年际差异,因此该估算公式具有一定的稳健性。

采用 2016 年 OIB 机载测量数据作为验证数据进行精度自验证,利用基于其余年份的 OIB 机载测量数据所获取的穿透深度估算公式(公式系数见表 2)进行 2016 年海冰干舷高度的估算。选择 2016 年数据的原因一方面是具有一定的随机性,另一方面也是考虑其数据量较大。结果表明,经过穿透深度校正的海冰干舷高度的精度得到较大提升,平均绝对差值由原先的 14 cm 降低到 8 cm。不进行穿透深度校正会导致十几厘米的偏差,严重影响海冰厚度估算的准确性。

(2) 与 AADC 实测数据的对比

将雷达高度计和 AADC 实测的海冰干舷高度数

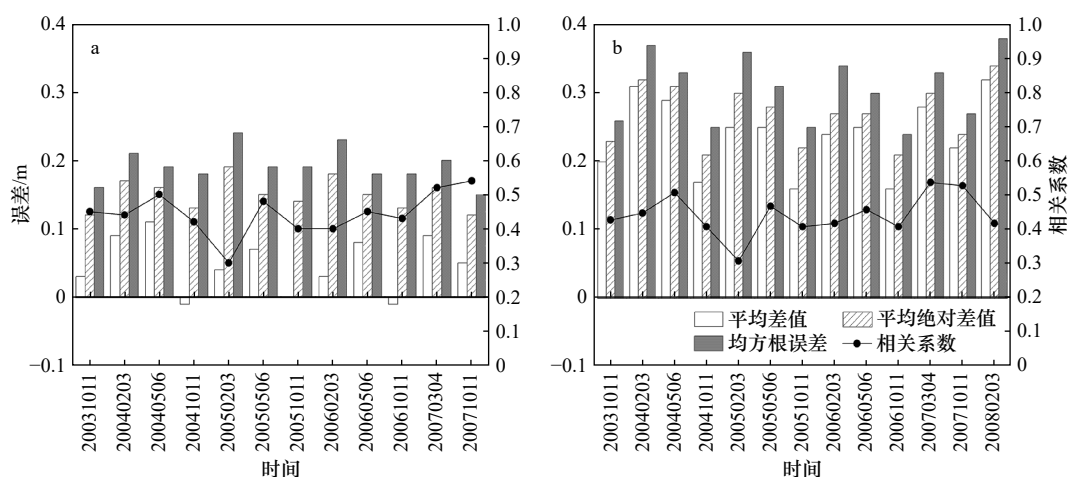


图 5 Envisat 与 ICESat 估算的积雪干舷高度对比

Fig. 5 The comparisons between the snow freeboard estimates from Envisat and ICESat

a. 经过穿透深度校正, b. 未经过穿透深度校正。20031011 代指 2003 年 10-11 月,其他类似

a. Corrected for the penetration depth, b. no correction for the penetration depth. 20031011 indicates from October to November in 2003, others are similar

据进行时空匹配,即对同一月份内每个雷达高度计海冰干舷高度格网内所有的 AADC 海冰干舷高度进行平均,然后进行比较。结果表明,经过穿透深度校正的海冰干舷高度平均绝对误差为 0.06 m,小于未进行校正的 0.10 m。尽管可用于验证的数据较少,但分布较为随机,保证了评价结果的客观性。

(3) 与激光雷达高度计数据的对比

将海冰干舷高度和积雪厚度相加获取积雪干舷高度,并与 ICESat 和 ICESat-2 激光雷达高度计获取的结果进行对比,间接地评估干舷高度的反演精度。根据 ICESat 的运行时段选择相应时段内的 Envisat 雷达高度计数据进行干舷高度的时空匹配和比较。图 5 显示了在 ICESat 运行的 13 个时段内,两种积雪干舷高度数据之间的差异。相较于未进行穿透深度校正的积雪干舷高度,进行穿透深度校正的积雪干舷高度与 ICESat 积雪干舷高度差异明显减小,平均差值由 24 cm 减小到 5 cm。图 6 显示了在 2019 年基于 CryoSat-2 雷达高度计估算的积雪干舷高度与 ICESat-2 积雪干舷高度的差异。进行穿透深度校正的积雪干舷高度与 ICESat-2 积雪干舷高度平均差值约为 6 cm,大多数月份的差值小于 7 cm 且不超过 12 cm。未经过穿透深度校正的积雪干舷高度与 ICESat-2 积雪干舷高度的平均差值约为 25 cm,最大差值达 34 cm,精度明显低于经穿透深度校正的结果。

3.2.2 海冰厚度

(1) 与船载和实测数据的对比

以 ASPeCt 船载观测数据和 AADC 实地测量数据为参考数据,经时空匹配后对估算的海冰厚度进行精度验证。与 ASPeCt 船载观测数据的比较结果表明,

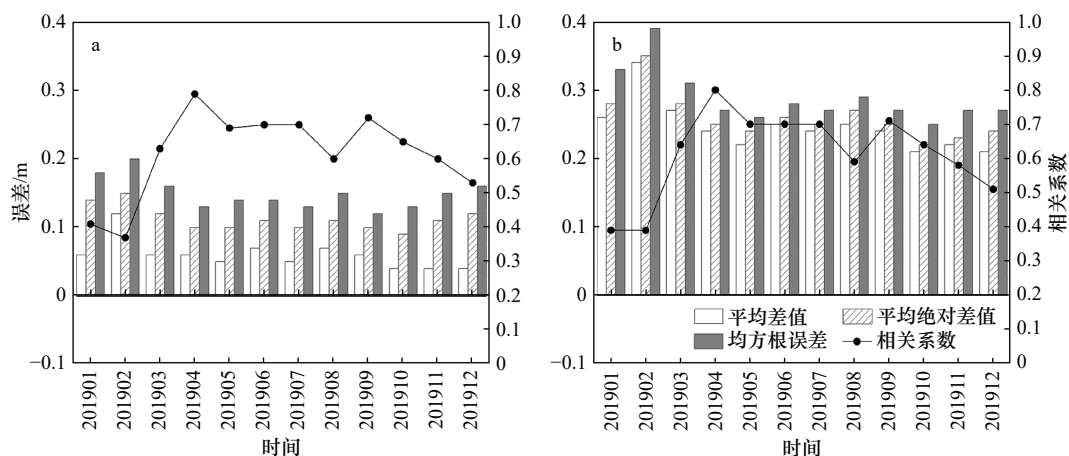


图 6 CryoSat-2 与 ICESat-2 估算的积雪干舷高度对比

Fig. 6 The comparisons between the snow freeboard estimates from CryoSat-2 and ICESat-2

a. 经过穿透深度校正, b. 未经过穿透深度校正

a. Corrected for the penetration depth, b. no correction for the penetration depth

估算的海冰厚度平均绝对差值约为 0.56 m, 该误差已经与北极海冰厚度的估算误差相当^[51]。此外, 由于 ASPeCt 海冰厚度存在 20%~30% 的估算误差^[11], 因此实际的海冰厚度偏差可能更低。相较于 ASPeCt 船载观测数据, AADC 实地测量数据具有更高的精度。与 AADC 实地测量数据的对比结果表明, 估算的海冰厚度精度较高, 平均绝对差值约为 0.28 m。

(2) 与前人研究的对比

相较于雷达高度计, 激光雷达高度计不受信号穿透的影响, 估算的海冰厚度准确性通常更高, 是目前估算南极海冰厚度的主要卫星数据来源。为了进一步说明本文海冰厚度估算的可靠性, 将其与国际上两种基于 ICESat 估算的海冰厚度(文献 [34] 和 [52])进行比较(图 7, 图 8)。估算的海冰厚度与两种 ICESat 海冰厚度具有相似的时序变化特征, 海冰厚度的变化范围也与两者相当, 具有很高的一致性。与文献 [34] 的结果相比, 估算的海冰厚度与其平均差值约为 0.02 m, 与文献 [52] 的平均差值约为 0.26 m。总体而言, 与 ICESat 冰厚的平均绝对偏差约为 0.65m, 相关系数为 0.71。在不同季节, 海冰厚度差异具有不同的表现。在冬、春季, 估算的海冰厚度与 ICESat 海冰厚度的差异较小; 在夏季海冰厚度差异较大, 这可能是因为夏季海冰表面融化影响了雷达高度计信号的稳定性。

综合上述验证结果可以发现, 无论是相较于船载和地面实测数据, 还是激光雷达高度计数据, 本文方法在海冰干舷高度和厚度的反演精度上均优于原先方法。这些均表明本文所提出的厚度反演方法适用于南极海冰, 可以有效地估计雷达高度计信号在南极海冰表面积雪中的穿透深度, 从而进一步准确地反演海冰干舷高度和厚度。然而, 需要指出的是, 用于获

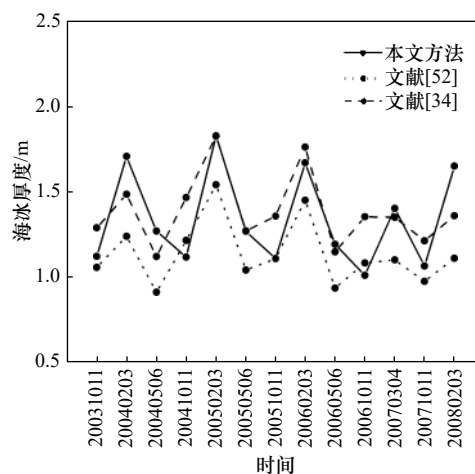


图 7 雷达高度计海冰厚度与两种 ICESat 海冰厚度的对比

Fig. 7 The comparison between sea ice thickness estimates from radar altimeters and ICESat (based on two methods)

20031011 代指 2003 年 10 月–11 月, 其他类似

20031011 indicates from October to November in 2003, other are similar

取穿透深度估算公式的机载 OIB 数据主要分布在西南极地区, 并且集中在 10–11 月份, 可能无法完全代表其他地区或者月份的情况。用于验证的实测数据和激光雷达高度计数据具有更为广泛的空间和时间分布, 较好的验证结果也表明该方法在南极其他地区和月份依然可用。尽管如此, 该方法更加适用于春季西南极海冰。未来在获取更多其他地区和月份的观测数据后可以进一步更新该方法。

4 2002–2023 年南极海冰厚度的时空变化

基于发展的南极冰厚遥感估算方法, 生成了 2002–2023 年南极海冰厚度逐月数据。图 9 展示了在 En-

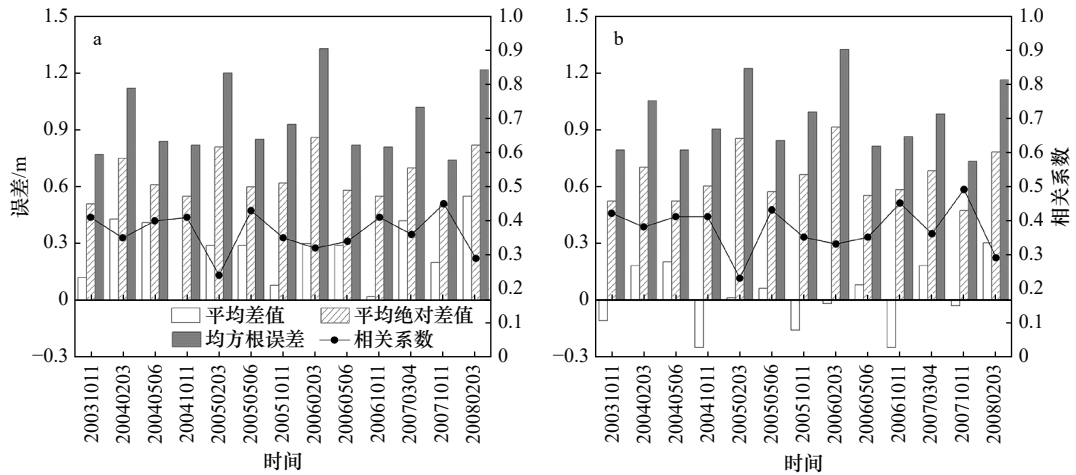


图 8 基于雷达高度计估算的海冰厚度与两种基于 ICESat 激光雷达高度计估算的海冰厚度的详细对比

Fig. 8 The detailed comparisons between the sea ice thickness estimates from radar altimeters and sea ice thickness estimates from ICESat (based on two methods)

a.与文献 [52] 的对比, b.与文献 [34] 的对比。20031011 代指 2003 年 10 月-11 月, 其他类似

a. Comparison to reference [52], b. comparison to reference[34]. 20031011 indicates from October to November in 2003, other are similar

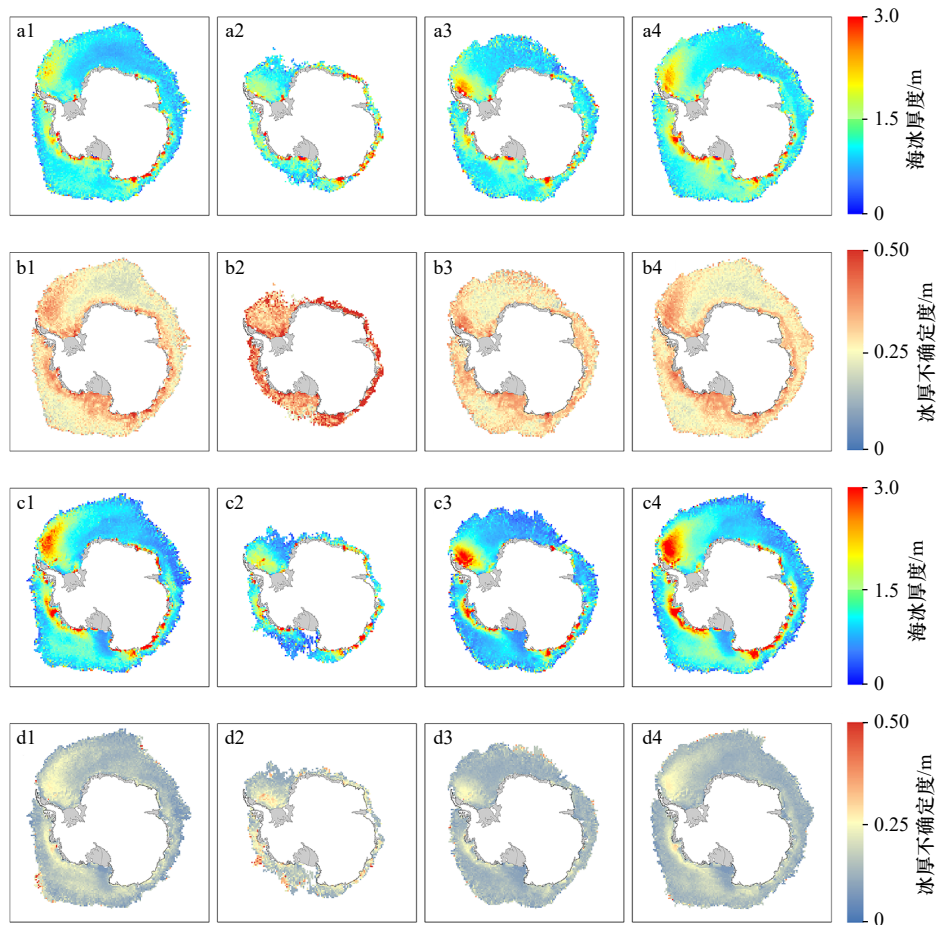


图 9 2002–2010 年 Envisat 时期不同季节平均海冰厚度(a)及其不确定性(b)的空间分布, 2011–2023 年 CryoSat-2 时期不同季节平均海冰厚度(c)及其不确定性(d)的空间分布(1~4 依次为春季、夏季、秋季和冬季)

Fig. 9 The spatial distributions of averaged sea ice thickness (a) and its uncertainty (b) in different seasons during 2002–2010 (Envisat period); the spatial distributions of averaged sea ice thickness (c) and its uncertainty (d) in different seasons during 2011–2023 (CryoSat-2 period) (the figures 1–4 are in order: spring, summer, autumn and winter)

visat 时期和 CryoSat-2 时期各季节平均海冰厚度及其不确定度的空间分布。在两个卫星时期,海冰厚度分布具有明显的空间特征,厚冰主要分布在西威德尔海和别林斯高晋海/阿蒙森海,也是有较多多年冰分布的海域。其他海域以一年冰为主,海冰厚度也相对较薄。南极海冰厚度空间分布特征在不同季节大体类似,但薄冰的面积存在较大变化。在两个卫星时期,海冰厚度不确定度的空间分布特征类似,都是夏季冰、厚冰的不确定度较大,此外 CryoSat-2 的冰厚不确定度相对较小。

图 10 显示了南极和各子海域海冰厚度的月异常

变化。月异常数据减少了因季节差异带来的影响,可以较好地揭示海冰厚度的时序变化情况。2002–2023 年南极海冰厚度总体上呈现轻微的降低趋势。其中,2002–2010 年海冰厚度没有明显的变化特征,但是 2011 年之后海冰厚度呈现明显的加速降低趋势 (0.03 m/a),降低速度是 2002–2010 年降低速度的 6 倍左右。此外,海冰厚度的变化特征存在较大的区域差异。

图 11 显示了 2002–2023 年各季节海冰厚度的空间变化趋势。在春、夏季,威德尔海和别林斯高晋海/阿蒙森海海冰厚度呈现增长趋势,在其他海域变化趋

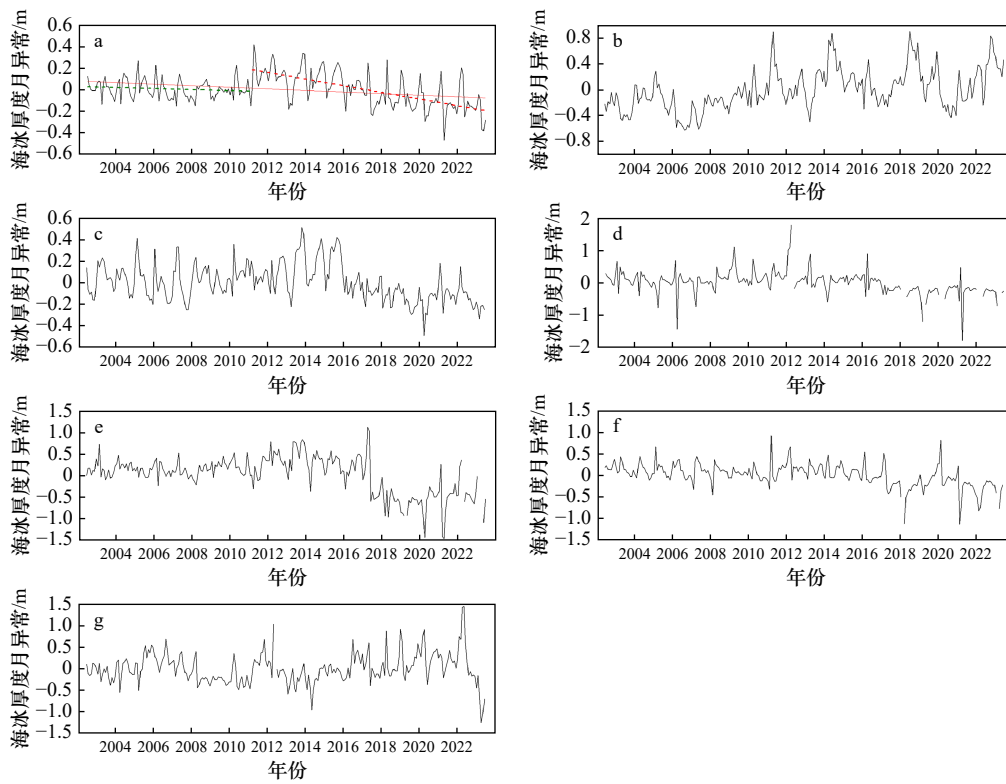


图 10 2002–2023 年海冰厚度的月异常变化

Fig. 10 The monthly anomaly variations of Antarctic sea ice thickness estimates from 2002 to 2023

a. 南极, b. 西威德尔海, c. 东威德尔海, d. 印度洋海域, e. 太平洋海域, f. 罗斯海, g. 别林斯高晋海/阿蒙森海

a. Antarctica, b. Western Weddell Sea, c. Eastern Weddell Sea, d. Indian Ocean, e. Pacific Ocean, f. Ross Sea, g. Bellingshausen/Amundsen Seas

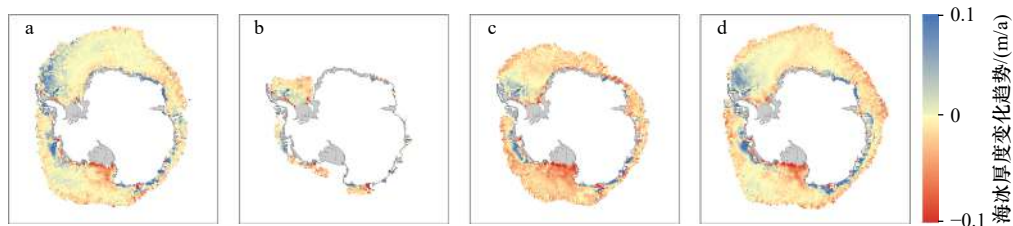


图 11 2002–2023 年不同季节南极海冰厚度的空间变化趋势

Fig. 11 The spatial distributions of sea ice thickness trends in different seasons from 2002 to 2023

a. 春季, b. 夏季, c. 秋季, d. 冬季

a. Spring, b. summer, c. autumn, d. winter

势不明显。在秋、冬季,西威德尔海和罗斯海海冰厚度的变化趋势呈现相反的分布特征,西威德尔海海冰厚度增长而罗斯海海冰厚度降低。特别的是,在冬、春两季,海冰厚度的增长区域主要分布在冰架周边,例如靠近南极半岛冰架、西南极冰架、印度洋海域冰架和太平洋海域冰架的区域。这些冰架受到全球变暖的影响正处于融化和崩解的状态^[53-54],因此冰架融水可能对海冰变化存在一定的影响。

5 结论

针对南极海冰厚度卫星雷达高度计估算中存在的难点,校正了多源雷达高度计海冰干舷高度的一致性,定量估算了雷达信号在积雪中的穿透深度,给出了不同情形下的海冰厚度估算方法。结果表明,月际

尺度上两种高度计反演的雷达干舷高度差异不超过 3 cm,一致性很高。经过穿透深度校正的海冰干舷高度相较于未校正的结果精度提升了近 1 倍,平均绝对误差由 0.10 m 降低到 0.06 m。估算的海冰厚度与实测数据的平均绝对偏差约为 0.28 m,精度较高。估算了 2002–2023 年南极海冰厚度并分析了时空变化特征。厚冰通常分布在西威德尔海区域,其他区域海冰相对较薄。南极海冰厚度总体呈现轻微降低的趋势,变化趋势在 2011 年之前并不明显,但是自 2011 年之后开始加速降低。海冰厚度的增长主要在西威德尔海,降低主要在罗斯海,该现象在冬、春两季更为明显。南极海冰厚度的分布和变化存在空间上的差异性,后续开展南极海冰厚度变化机制分析时需着重考虑海域间的差异。

参考文献:

- [1] Parkinson C L. A 40-y record reveals gradual Antarctic sea ice increases followed by decreases at rates far exceeding the rates seen in the Arctic[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116(29): 14414–14423.
- [2] 杨颖玥, 刘海龙. 南极海冰快速下降历史事件的时空特征分析[J]. *海洋与湖沼*, 2023, 54(6): 1564–1572.
Yang Yingyue, Liu Hailong. Temporal and spatial characteristics of historical events of rapid decline of Antarctic sea ice[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2023, 54(6): 1564–1572.
- [3] 蔡伟, 艾松涛. 基于 Argo 浮标的南极海冰范围变化分析[J]. *海洋通报*, 2021, 40(5): 492–501.
Cai Yi, Ai Songtao. Analysis of Antarctic sea ice extent variation based on Argo floats[J]. *Marine Science Bulletin*, 2021, 40(5): 492–501.
- [4] 李双林, 韩哲, 刘娜, 等. 2016 年南极海冰破纪录减少及其成因的研究综述[J]. *海洋学报*, 2021, 43(7): 1–10.
Li Shuanglin, Han Zhe, Liu Na, et al. A review of the researches on the record low Antarctic sea ice in 2016 and its formation mechanisms[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(7): 1–10.
- [5] 刘玥, 庞小平, 赵羲, 等. 1979–2018 年南极海冰边缘区范围时空变化研究[J]. *极地研究*, 2021, 33(4): 508–517.
Liu Yue, Pang Xiaoping, Zhao Xi, et al. Analysis of temporal and spatial changes in the extent of the Antarctic marginal ice zone from 1979 to 2018[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2021, 33(4): 508–517.
- [6] 柯长青, 金鑫, 沈校熠, 等. 南北极海冰变化及其影响因素的对比分析[J]. *极地研究*, 2020, 32(1): 1–12.
Ke Changqing, Jin Xin, Shen Xiaoyi, et al. Comparison of Antarctic and Arctic sea ice variations and their impact factors[J]. *Chinese Journal of Polar Research*, 2020, 32(1): 1–12.
- [7] 刘森, 邹斌, 石立坚, 等. 基于 FY-3C 微波辐射计数据的极区海冰密集度反演方法研究[J]. *海洋学报*, 2020, 42(1): 113–122.
Liu Sen, Zou Bin, Shi Lijian, et al. Polar sea ice concentration retrieval based on FY-3C microwave radiation imager data[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(1): 113–122.
- [8] 张雷, 徐宾, 师春香, 等. 基于卫星气候资料的 1989–2015 年南北极海冰面积变化分析[J]. *冰川冻土*, 2017, 39(6): 1163–1171.
Zhang Lei, Xu Bin, Shi Chunxiang, et al. Analysis of sea ice area change in the Arctic and Antarctic based on the satellite climate data during 1989–2015[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2017, 39(6): 1163–1171.
- [9] Willmes S, Nicolaus M, Haas C. The microwave emissivity variability of snow covered first-year sea ice from late winter to early summer: a model study[J]. *The Cryosphere*, 2014, 8(3): 891–904.
- [10] Ozsoy-Cicek B, Ackley S, Xie Hongjie, et al. Sea ice thickness retrieval algorithms based on in situ surface elevation and thickness values for application to altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(8): 3807–3822.
- [11] Worby A P, Geiger C A, Paget M J, et al. Thickness distribution of Antarctic sea ice[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C5): C05S92.
- [12] 唐述林, 李宁. 基于走航观测的夏季南极海冰分布特征分析[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(2): 211–217.
Tang Shulin, Li Ning. Analysis of the signature of summer Antarctic sea ice distribution by ship-based ice observation[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(2): 211–217.
- [13] Fichefet T, Goosse H, Morales Maqueda M A. A hindcast simulation of Arctic and Antarctic sea ice variability, 1955–2001[J]. *Polar Research*, 2003, 22(1): 91–98.
- [14] Fichefet T, Tartinville B, Goosse H. Antarctic sea ice variability during 1958–1999: a simulation with a global ice-ocean model[J]. *Journ-*

- al of Geophysical Research: Oceans, 2003, 108(C3): 3102.
- [15] Zhang Jinlun. Increasing Antarctic sea ice under warming atmospheric and oceanic conditions[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(11): 2515–2529.
- [16] Vancoppenolle M, Timmermann R, Ackley S F, et al. Assessment of radiation forcing data sets for large-scale sea ice models in the Southern Ocean[J]. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2011, 58(9/10): 1237–1249.
- [17] Massonnet F, Mathiot P, Fichefet T, et al. A model reconstruction of the Antarctic sea ice thickness and volume changes over 1980–2008 using data assimilation[J]. *Ocean Modelling*, 2013, 64: 67–75.
- [18] Shu Q, Song Z, Qiao F. Assessment of sea ice simulations in the CMIP5 models[J]. *The Cryosphere*, 2015, 9(1): 399–409.
- [19] Shu Qi, Wang Qiang, Song Zhenya, et al. Assessment of sea ice extent in CMIP6 with comparison to observations and CMIP5[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47(9): e2020GL087965.
- [20] 王今菲, 杨清华, 于乐江, 等. 南极海冰变化及其气候效应研究述评 [J]. *海洋学报*, 2021, 43(7): 11–22.
Wang Jinfei, Yang Qinghua, Yu Lejiang, et al. A review on Antarctic sea ice change and its climate effects[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(7): 11–22.
- [21] Karvonen J, Cheng B, Vihma T, et al. A method for sea ice thickness and concentration analysis based on SAR data and a thermodynamic model[J]. *The Cryosphere*, 2012, 6(6): 1507–1526.
- [22] Kwok R, Nghiem S V, Yueh S H, et al. Retrieval of thin ice thickness from multifrequency polarimetric SAR data[J]. *Remote sensing of environment*, 1995, 51(3): 361–374.
- [23] Laxon S, Peacock N, Smith D. High interannual variability of sea ice thickness in the Arctic region[J]. *Nature*, 2003, 425(6961): 947–950.
- [24] Kwok R. Arctic sea ice thickness, volume, and multiyear ice coverage: losses and coupled variability (1958–2018)[J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(10): 105005.
- [25] Kwok R, Rothrock D A. Decline in Arctic sea ice thickness from submarine and ICESat records: 1958–2008[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(15): L15501.
- [26] 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.
- [27] Giles K A, Laxon S W, Worby A P. Antarctic sea ice elevation from satellite radar altimetry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(3): L03503.
- [28] Schwegmann S, Rinne E, Ricker R, et al. About the consistency between Envisat and CryoSat-2 radar freeboard retrieval over Antarctic sea ice[J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(4): 1415–1425.
- [29] Kwok R, Kacimi S. Three years of sea ice freeboard, snow depth, and ice thickness of the Weddell Sea from Operation IceBridge and CryoSat-2[J]. *The Cryosphere*, 2018, 12(8): 2789–2801.
- [30] 陈亦卓, 季青, 庞小平. 基于 CryoSat-2 卫星测高数据分析南极海冰厚度的时空变化 [J]. *冰川冻土*, 2019, 41(5): 1214–1220.
Chen Yizhuo, Ji Qing, Pang Xiaoping. Spatio-temporal variation of Antarctic sea ice thickness using Cryosat-2 satellite altimeter data[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(5): 1214–1220.
- [31] Yi Donghui, Zwally H J, Robbins J W. ICESat observations of seasonal and interannual variations of sea-ice freeboard and estimated thickness in the Weddell Sea, Antarctica (2003–2009)[J]. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(57): 43–51.
- [32] Xie Hongjie, Tekeli A E, Ackley S F, et al. Sea ice thickness estimations from ICESat altimetry over the Bellingshausen and Amundsen Seas, 2003–2009[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(5): 2438–2453.
- [33] Kern S, Ozsoy-Çiçek B. Satellite remote sensing of snow depth on Antarctic Sea Ice: an inter-comparison of two empirical approaches[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(6): 450.
- [34] Li Huan, Xie Hongjie, Kern S, et al. Spatio-temporal variability of Antarctic sea-ice thickness and volume obtained from ICESat data using an innovative algorithm[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 219: 44–61.
- [35] Xu Yue, Li Huan, Liu Baojian, et al. Deriving Antarctic sea-ice thickness from satellite altimetry and estimating consistency for NASA's ICESat/ICESat-2 missions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(20): e2021GL093425.
- [36] Paul S, Hendricks S, Rinne E. Sea ice thickness algorithm theoretical basis document (ATBD)[EB/OL]. European Space Agency, 2017 [2017–09–25]. https://admin.climate.esa.int/media/documents/Sea_Ice_Thickness_Algorithm_Theoretical_Basis_Document_1.0.pdf.
- [37] 高翔, 庞小平, 季青. 利用 CryoSat-2 测高数据研究南极威德尔海海冰出水高度时空变化 [J]. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 2021, 46(1): 125–132.
Gao Xiang, Pang Xiaoping, Ji Qing. Spatiotemporal variation of sea ice freeboard in the Antarctic WeddellSea based on CryoSat-2 altimeter data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(1): 125–132.
- [38] Garnier F, Bocquet M, Fleury S, et al. Latest altimetry-based sea ice freeboard and volume inter-annual variability in the Antarctic over 2003–2020[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(19): 4741.
- [39] Fons S, Kurtz N, Bagnardi M. A decade-plus of Antarctic sea ice thickness and volume estimates from CryoSat-2 using a physical model and waveform fitting[J]. *The Cryosphere*, 2023, 17(6): 2487–2508.
- [40] Markus T, Massom R, Worby A, et al. Freeboard, snow depth and sea-ice roughness in east Antarctica from in situ and multiple satellite

- data[J]. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(57): 242–248.
- [41] Kwok R, Cunningham G F, Markus T, et al. ATLAS/ICESat-2 L3A sea ice height, version 1[EB/OL]. National Snow and Ice Data Center, 2019 [2019–05–23]. <https://doi.org/10.5067/ATLAS/ATL07.001>.
- [42] Kwok R, Kacimi S, Markus T, et al. ICESat-2 surface height and sea ice freeboard assessed with ATM Lidaracquisitions from Operation Ice Bridge[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(20): 11228–11236.
- [43] Shen Xiaoyi, Ke Changqing, Li Haili. Snow depth product over Antarctic sea ice from 2002 to 2020 using multisource passive microwave radiometers[J]. *Earth System Science Data*, 2022, 14(2): 619–636.
- [44] Comiso J C, Cavalieri D J, Markus T. Sea ice concentration, ice temperature, and snow depth using AMSR-E data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 243–252.
- [45] Kurtz N T, Farrell S L, Studinger M, et al. Sea ice thickness, freeboard, and snow depth products from Operation Ice Bridge airborne data[J]. *The Cryosphere*, 2013, 7(4): 1035–1056.
- [46] Krabill W B, Thomas R H, Martin C F, et al. Accuracy of airborne laser altimetry over the Greenland ice sheet[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1995, 16(7): 1211–1222.
- [47] Zwally H J, Yi Donghui, Kwok R, et al. ICESat measurements of sea ice freeboard and estimates of sea ice thickness in the Weddell Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2008, 113(C2): C02S15.
- [48] Kern S, Spreen G. Uncertainties in Antarctic sea-ice thickness retrieval from ICESat[J]. *Annals of Glaciology*, 2015, 56(69): 107–119.
- [49] Ricker R, Hendricks S, Helm V, et al. Sensitivity of CryoSat-2 Arctic sea-ice freeboard and thickness on radar-waveform interpretation [J]. *The Cryosphere*, 2014, 8(4): 1607–1622.
- [50] Nandan V, Geldsetzer T, Yackel J, et al. Effect of snow salinity on CryoSat-2 Arctic first-year sea ice freeboard measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(20): 10.
- [51] Li Mengmeng, Ke Changqing, Xie Hongjie, et al. Arctic sea ice thickness retrievals from CryoSat-2: seasonal and interannual comparisons of three different products[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(1): 152–170.
- [52] Wang Xianwei, Jiang Weixu, Xie Hongjie, et al. Decadal variations of sea ice thickness in the Amundsen-Bellingshausen and Weddell seas retrieved from ICESat and IceBridge laser altimetry, 2003–2017[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2020, 125(7): e2020JC016077.
- [53] Adusumilli S, Fricker H A, Medley B, et al. Interannual variations in meltwater input to the Southern Ocean from Antarctic ice shelves[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(9): 616–620.
- [54] Rignot E, Jacobs S, Mouginot J, et al. Ice-shelf melting around Antarctica[J]. *Science*, 2013, 341(6143): 266–270.

The estimation of Antarctic sea ice thickness from multi-source satellite radar altimeters

Shen Xiaoyi^{1,2}, Ke Changqing², Li Haili²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Antarctic sea ice is a crucial component of the polar climate system, with profound implications for global climate. Sea ice thickness, as one of the key properties of sea ice, holds significant importance for understanding and predicting the influences of climate change by revealing its spatial and temporal distribution patterns and variation trends. However, current monitoring of Antarctic sea ice thickness is constrained by limited ground observations with restricted spatial and temporal coverage or short-term satellite observations, long-term sea ice thickness data remains elusive. To address this issue, this study utilized the continuous satellite radar altimetry data from Envisat and CryoSat-2 and constructed a consistent dataset of radar freeboard of Antarctic sea ice. Then, the penetration depth of radar signals through the snow covers over Antarctic sea ice was quantitatively estimated, and a method applicable to various sea ice-snow scenarios for estimating Antarctic sea ice thickness was developed. The estimated sea ice thickness shows an average absolute bias of approximately 0.28 m compared to in situ measurements from the Australian Antarctic Data Centre, and an average absolute bias of approximately 0.65 m compared to ICESat laser altimeter with a high correlation coefficient of 0.71. Analysis of the spatiotemporal variations of Ant-

arctic sea ice thickness from 2002 to 2023 reveals that thick ice is predominantly concentrated in the western Weddell Sea and Bellingshuan/Amundsen Seas, while ice in other sea sectors is relatively thin. Antarctic sea ice thickness exhibited a slight decreasing trend before 2011, followed by an accelerated decline after 2011 (-0.03 m/a). The distribution and trends of Antarctic sea ice thickness exhibit distinct seasonal and regional characteristics.

Key words: sea ice thickness; sea ice freeboard; radar signal penetration depth; radar altimeters; Antarctica