

Sentinel-1 影像子孔径自相干技术识别固定冰研究

程煜恒, 李刚, 陈卓奇, 杨治斌, 程晓

1. 中山大学 遥感科学与技术学院 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 珠海 519082;
2. 极地环境立体观测与应用教育部重点实验室(中山大学), 珠海 519082

摘要: 固定冰附着于极地地区海岸线, 通过参与海气通量交换与辐射传输等方式影响极地气候。随着气候变化加剧以及极地沿海地区商业活动的增加, 利用遥感数据稳定、常规地识别和提取固定冰范围的重要性日益突出, SAR 影像为固定冰的监测与分析提供了可靠的数据源。本研究选取格陵兰岛梅尔维尔湾、乔克尔湾、南极阿蒙森海岸和班扎雷海岸共4个典型固定冰分布区域开展分析, 涵盖北极航道通行节点与南极冰架前沿等关键区域, 具备极地航运保障、科学考察支持及气候变化响应监测等多重应用需求。本研究利用 Sentinel-1 SAR 影像分解为前视与后视子孔径影像, 经干涉处理生成子孔径自相干影像, 结合 Otsu 相干性阈值分割与连通分量分析提取固定冰, 实现基于单景 SAR 影像的固定冰识别。使用与 SAR 影像成像时间间隔 <1 d 的无云光学影像进行精度验证, 结果发现4个研究区域的平均总体准确率为96.84%, Kappa系数为0.9338, F1值为0.9666, 交并比为96.28%。说明本研究提出方法在本研究的4个不同固定冰分布区域均取得较高的总体准确率和Kappa系数, 在不同区域条件下具有稳定性与适用性。

关键词: 极地遥感, 固定冰, 海冰, SAR 相干性, 子孔径自相干, Sentinel-1, TOPS, InSAR

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 程煜恒, 李刚, 陈卓奇, 杨治斌, 程晓. 2026. Sentinel-1 影像子孔径自相干技术识别固定冰研究. 遥感学报, 30(5): 1433-1449

Cheng Y H, Li G, Chen Z Q, Yang Z B and Cheng X. 2026. Deriving landfast ice with Sentinel-1 multi-aperture coherence image. National Remote Sensing Bulletin, 30(5): 1433-1449 [DOI: 10.11834/jrs.20264540]

1 引言

固定冰是一种分布在极地地区, 固定在海岸线、冰架或冰舌上的海冰 (Kim 等, 2015), 是极地沿岸系统的关键组成部分。与在水面上运动的流冰不同, 固定冰不受洋流或风的影响而移动, 其具有更长的冰期和更厚的海冰层, 并显示出明显的季节性变化趋势 (Howell 等, 2016)。在北极区域, 固定冰每年的持续时间大约为7—9个月。通常固定冰开始形成于10月份, 并在4月下旬面积达到最大范围 (Li 等, 2020b)。随着夏季的来临, 固定冰开始迅速融化, 大部分区域在7月份已经开始消融, 而在9月份几乎完全消失; 在南极洲大多数地区, 固定冰形成于秋季, 持续整个冬季, 并在春夏季融化, 但在某些特定地点固定冰可能

会持续整个夏季, 成为多年冰 (Fraser 等, 2023)。

固定冰覆盖范围表现出季节性变化, 通过影响海洋表面温度、海水盐度、海气通量交换与辐射传输, 对极地地区的气候及环境变化产生深远的影响 (Li 等, 2020a; Lewis 等, 2024)。固定冰能够为冰架与冰舌提供保护, 使其免受海洋膨胀和波浪的影响, 从而增强冰架与冰舌的稳定性, 进而对南极冰盖的物质平衡产生影响 (Miles 等, 2017)。此外, 固定冰为海洋动物, 如帝企鹅和海豹, 提供了重要的栖息地和狩猎平台 (Ainley 等, 2015; Fretwell, 2024)。近年来, 由于气候剧烈变化以及对极地沿海地区商业活动开发的增加, 从遥感数据中稳定、常规地识别并提取出固定冰范围的重要性日益凸显。

由于不同类型海冰之间的后向散射差异明显,

收稿日期: 2025-01-01; 预印本: 2025-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(编号:42371136, 42476256)

第一作者简介: 程煜恒, 研究方向为极地遥感。E-mail: chengyh39@mail2.sysu.edu.cn

通信作者简介: 李刚, 研究方向为微波遥感。E-mail: ligang57@mail.sysu.edu.cn

因此雷达技术在海冰遥感方面具有显著优势 (Lehtiranta 等, 2015)。星载合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 在海冰和开放水域的分类、冰况监测等领域具有广泛的应用 (Gill 和 Yackel, 2012)。美国国家冰中心 NIC (National Ice Center)、加拿大冰雪服务 CIS (Canadian Ice Service) 和俄罗斯北极与南极研究所 AARI (Arctic and Antarctic Research Institute) 制作的冰图通常参考多种遥感数据。这些图表由经验丰富的观察员汇编, 通常依赖于明确的边缘, 例如冰间水道、开放水域或明显的流冰区域, 以界定固定冰的范围 (Meyer 等, 2011)。通过单张影像描绘运动的海冰和保持静止的海冰之间的边界以识别固定冰较为困难。因此, 通常需要结合不同时间段的图像, 将每周/每两周内保持静止的冰被标记为固定冰 (Mahoney 等, 2007)。由于流冰和开放水域在风和洋流的作用下会发生运动, 固定冰与它们的重轨干涉相干性应表现出显著差异。相干性是表征表面不变程度的指标, 特别是地物在散射特性、潜在移动或变形相关的方面。

Marbouti 等 (2017) 使用多时相 C 波段 Sentinel-1 SAR 影像, 利用重复轨道星载合成孔径雷达干涉测量 InSAR (Interferometric SAR) 技术研究波罗的海上持续存在的固定冰, 并区分其与流冰。Meyer 等 (2011) 利用多时相 L 波段日本先进陆地观测卫星 ALOS (Advanced Land Observing Satellite) 影像使用重轨 InSAR 技术绘制阿拉斯加沿海地区的固定冰。Han 等 (2015) 利用 X 波段 COSMO-SkyMed 卫星影像研究了位于东南极特拉诺瓦湾坎贝尔冰川舌附近的固定冰的时空变化, 并根据相干影像和 SAR 强度图像估算了固定冰范围。Dammann 等 (2019) 基于重轨 InSAR 通过干涉条纹与相干影像在泛北极范围内评估并绘制固定冰稳定区面积。

Bechor 和 Zebker (2006) 在研究方位向形变估计时, 提出了一种新的干涉测量方法——多孔径合成孔径雷达干涉 MAI (Multiple Aperture InSAR) 技术。MAI 技术对 SAR 原始信号记录中零多普勒以前和以后的信号分别处理, 从而得到前后两个不同雷达视线方向的 SAR 影像, 称之为前视影像和后视影像。也可以通过对 SAR 的单视复数影像 SLC (Single Look Complex) 进行方位向公共频谱滤波 ACBF (Azimuth Common Band Filtering) 得到前后视影像 (胡俊 等, 2013)。Jung 等 (2009) 消

除了 MAI 技术中前后视干涉相位的基线差引起的误差。上述 MAI 技术相关研究目前主要集中于地表形变的监测, 用于提取方位向形变, 尚未涉及海冰范围的提取研究。

鉴于此, 为探索 MAI 技术在固定冰范围提取中的应用潜力, 本研究以极区海冰为研究对象, 采用基于多孔径干涉思想的子孔径自相干方法, 通过对单景 Sentinel-1 干涉宽幅模式单视复数影像 IW SLC (Interferometric Wide Swath Mode Single Look Complex) 进行子孔径分解, 利用前后视影像构建子孔径自相干 MAC (Multi Aperture Coherence) 指数影像识别固定冰, 以期对极区固定冰的快速识别与监测提供新的技术手段。

2 研究区概况与实验数据

本研究选取格陵兰岛和南极洲沿岸共 A—D 共 4 个海域作为研究区域。如图 1 所示: A 区域 (75°N , 60°W) 为位于格陵兰岛西北部海岸的梅尔维尔湾 (Melville Bugt); B 区域 (78°N , 20°W) 为位于格陵兰岛东北部腓特烈八世地海岸的乔克尔湾 (Jokel Bay); C 区域 (74°S , 105°W) 为位于西南极洲西部的阿蒙森海岸 (Amundsen Coast); D 区域 (66°S , 135°E) 为位于东南极洲东南部的班扎雷海岸 (Banzare Coast)。所展示 SAR 影像获取日期在表 1 中以星号标注。

Sentinel-1 A/B 双星分别于 2014 年 4 月 3 日和 2016 年 4 月 25 日发射。单星重访周期为 12 d, 双星可实现对同一地区 6 d 周期的全天候重复观测能力。Sentinel-1 搭载了 C 波段 (5.405 GHz) 合成孔径雷达成像仪, 成像分辨率为 5—40 m。考虑干涉效果, 本研究使用的 Sentinel-1 IW SLC 数据仅选取信噪比较高的 HH 极化影像。IW 模式采用 TOPS (Terrain Observation by Progressive Scans) 成像模式观测, 其在距离的向波位跳动形成 3 个子条带, 每个子条带在方位向由多个 Burst 拼接而成。TOPS 扫描模式沿轨迹方向采用电扫方式转动波束, 使其可以克服传统 ScanSAR 模式中存在的如方位向观测不一致和低信噪比等问题 (Jiang 等, 2017)。

考虑极昼极夜效应对获取光学影像以评价提取结果的影响, 本研究从欧洲航天局数据网站 (<https://dataspace.copernicus.eu/> [2025-01-01]) 主要获取当地夏季时间获取的时序 Sentinel-1 影像, 并仅选择包含固定冰范围的子条带以方便后续实

验处理（表 1）。精度评价采用从欧洲航天局数据网站获取的与 Sentinel-1 影像成像时间间隔相近（获取时间差<24 h）的 Sentinel-2 影像，或从美国地质调查局 EarthExplorer 平台（<https://earthexplorer.usgs.gov/>〔2025-01-01〕）获取的 Landsat 无云光学

影像构建固定冰验证样本。少数冬季的 Sentinel-1 影像用于对比 MAC 指数影像与重轨 InSAR 方法识别固定冰在不同场景的适用范围；同时借助成像日期相近（间隔 0—2 d）的影像数据，验证 MAC 指数影像提取固定冰结果的准确性。

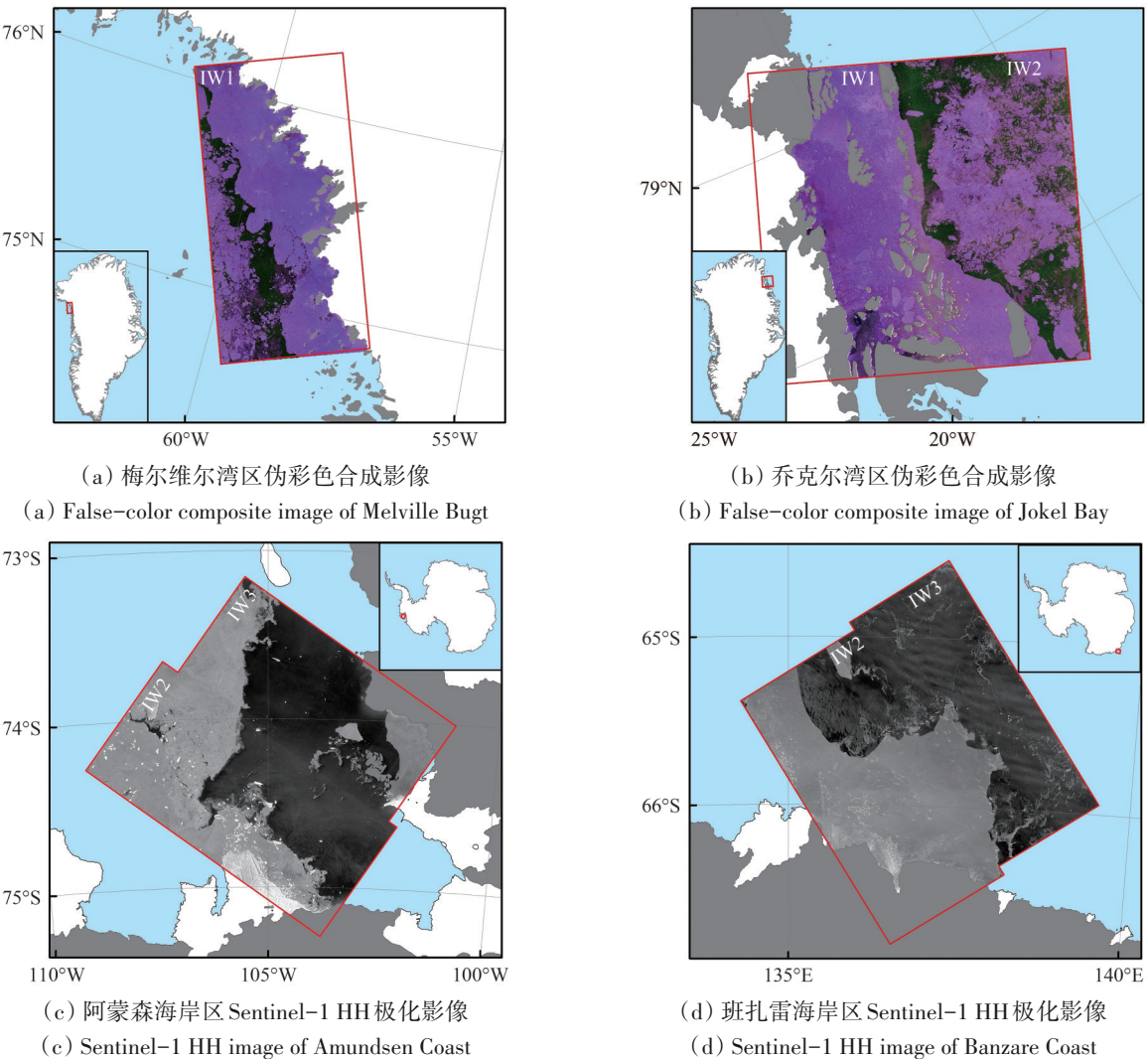


图 1 固定冰研究区域及 Sentinel-1 SAR 影像覆盖范围(背景为蓝色海域,白色为冰盖或冰架,灰色为其他地表覆盖陆地。A 和 B 区域用 HH 后向散射系数(红)、HV 后向散射系数(绿)及 HH/HV(蓝)伪彩色显示;C 和 D 区域影像为 HH 单极化采集,因此采用后向散射系数灰度影像显示)

Fig. 1 Landfast ice study areas and the Sentinel-1 SAR image coverage

3 研究方法

本研究方法可分为以下主要步骤（图 2）。首先，对单景 Sentinel-1 IW SLC 影像进行相位斜坡去除处理，并进行子孔径分解；在此基础上，利用前视与后视子孔径影像进行干涉处理，生成 MAC 指数影像。考虑到海面与固定冰在子孔径时

间尺度上的运动差异，基于 MAC 指数影像采用 Otsu 方法进行阈值分割，将研究区划分为水面与非水面。随后，通过连通分量分析提取与海岸线相连的非水面区域，并标记为固定冰，从而获得固定冰分布范围。最后，选取与 Sentinel-1 观测时间间隔 1 d 以内的 Sentinel-2 或 Landsat 光学影像作为对比数据，对提取结果进行精度评估。

表1 研究区影像参数

Table 1 Image parameters of study areas

实验区域	Sentinel-1 影像获取日期	子条带	Sentinel-1 轨道号	Sentinel-2 影像获取日期	Landsat 影像获取日期
梅尔维尔湾 Melville Bugt	2021-01-25	IW1	90		
	2021-01-31				
	2021-06-06*			2021-06-07	
	2021-06-12				2021-06-12
	2021-06-18			2021-06-17	
	2021-06-24			2021-06-23	
	2021-06-30				
	2021-07-06				2021-07-06
	2024-06-06	IW2、IW3	61		
	2024-06-08	IW1	90		
乔克尔湾 Jokel Bay	2021-01-25	IW2、IW3	59		
	2021-01-25	IW1、IW2	170		
	2021-01-31				
	2021-07-06			2021-07-05	
	2021-07-12*			2021-07-12	
	2021-07-18				
	2021-07-24			2021-07-24	
	2021-07-30			2021-07-30	
	2021-08-05				
阿蒙森海岸 Amundsen Coast	2021-09-15	IW2、IW3	65		
	2021-09-21				
	2023-10-23				
	2023-11-04				
	2023-11-16				2023-11-15
	2023-11-28				
	2023-12-10				2023-12-11
	2023-12-22*			2023-12-21	
班扎雷海岸 Banzare Coast	2021-09-05	IW2、IW3	98		
	2021-09-21				
	2021-11-22				
	2021-11-28			2021-11-28	
	2021-12-04				
	2021-12-10				
	2021-12-16*			2021-12-15	
	2021-12-22			2021-12-22	
	2024-12-30	IW1、IW2	98		

注：“*”为图1中所示影像日期。

3.1 去除相位斜坡

本研究使用瑞士 Gamma Remote Sensing 公司开发的 Gamma 软件处理 SLC 影像。TOPS 成像模式由于需要在较短的时间内覆盖更宽的地面范围，雷

达波束需要在距离向上快速切换，导致方位向上的多普勒频率和相位发生明显的变化，即“相位斜坡”（Grandin，2015）。使用 SLC_deramp_S1_TOPS 工具去除 SLC burst 中的相位斜坡。

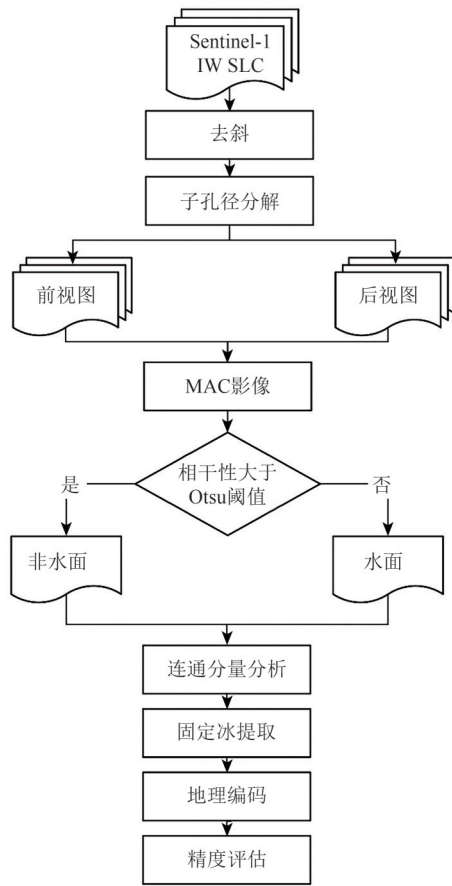


图2 技术路线图

Fig. 2 Study flow chart

设 SLC 数据已被预处理为零多普勒, 并忽略由于方位向上的天线模式引起的幅度调制, 压缩后的目标响应在原始 SLC 数据中的表达式如式下 (Grandin, 2015):

$$s_{\text{orig}}(\eta, \tau) = A \cdot \text{sinc}(B_{\text{eff}}(\eta - \eta_0)) \cdot \exp(j\pi k_t(\eta - \eta_c(\tau))^2) \quad (1)$$

式中, A 为幅度因子, B_{eff} 为决定方位分辨率的有效方位带宽, j 为虚数单位, k_t 为 SLC 数据中的多普勒中心调制率, τ 为距离向时间, η 为方位向时间, η_0 为目标的零多普勒时间, η_c 为 burst 中心时间。

方位向上的二次相位项会对干涉图的质量产生显著影响, 这些相位项通常由卫星姿态变化、轨道偏差等引起, 需要加以校正。所以在进行子孔径分解前需要先对 SLC 影像进行去斜处理, 通过在图像 (时间) 域中乘以适当的补偿项来移除方位向上的二次相位项。具体而言, 去斜处理的补偿项计算公式如下:

$$s_{\text{deramp}}(\eta, \tau) = \exp(-j\pi k_t(\tau)(\eta - \eta_{\text{ref}}(\tau))^2) \quad (2)$$

式中, $\eta_{\text{ref}}(\tau)$ 为参考时间, 对于 Sentinel-1 TOPS SAR 数据可由式 (3) 给出:

$$\eta_{\text{ref}}(\tau) = \eta_c(\tau) - \eta_c(0) = -\frac{f_{\text{nc}}(\tau)}{k_a(\tau)} \quad (3)$$

式中, $f_{\text{nc}}(\tau)$ 为多普勒中心频率, $k_a(\tau)$ 为多普勒调频率。

3.2 子孔径分解

本研究使用 Gamma 软件的 sbi_filt 工具对 SLC 数据进行方位向公共频谱滤波, 生成前斜视与后斜视 SLC 图像, 可以进行干涉测量 (MAI), 也可以获得相干影像 (MAC)。

公共频谱滤波最初是设计用在距离向上, 以补偿由地形起伏引起的频谱偏移 (Gatelli 等, 1994)。随后, 该技术被引入到方位向上以消除两个 SAR 影像在方位向频谱中的中心多普勒频率之差。利用公共频谱滤波可以控制影像多普勒中心的特性, 通过事先确定前视和后视 SLC 影像的中心多普勒频率和频谱宽度, 从而将原始 SLC 影像转换为前视和后视影像。

多普勒频移是指由于雷达和目标之间的相对运动导致接收到的信号频率发生变化的现象。偏斜角度 (squint angle) 是指雷达波束相对于轨迹方向的偏离角度。当雷达波束相对于飞行方向前偏或后偏时, 会产生正或负的多普勒频移 (Pidgeon, 1968)。具体表达式如下:

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \sin(\theta_{\text{sq}}) \quad (4)$$

式中, f_d 为多普勒质心, v 为卫星平台相对于地面的运动速度, λ 为雷达波长, θ_{sq} 为雷达偏斜角度。

SLC 的方位向频谱宽度由雷达的沿轨道采样率决定, 即脉冲重复频率 PRF (Pulse Repetition Frequency)。sbi_filt 工具使用有限脉冲响应 (Finite Impulse Response) 滤波器进行频域卷积, 从而生成具有不同多普勒中心的子孔径数据, 每个子孔径对应一个滤波器, 分别滤波后可得到前视影像和后视影像的相位为 (Bechor and Zebker, 2006):

$$\Phi_{\text{forward}} = -\frac{4\pi x}{\lambda} \sin\left(\theta_{\text{sq}} + \frac{\alpha}{4}\right) \quad (5)$$

$$\Phi_{\text{backward}} = -\frac{4\pi x}{\lambda} \sin\left(\theta_{\text{sq}} - \frac{\alpha}{4}\right) \quad (6)$$

式中, α 为天线波束宽度, x 为对应的方位向位移。

滤波器的关键是需根据多普勒质心和天线波束宽度来确定滤波器的中心频率和带宽。两个前

后视合成波束之间的角度间隔取决于它们在多普勒频率上的差异。通常，合成波束之间的最佳间隔大约是天线波束宽度的0.6倍 (Bechor和Zebker, 2006)，相当于两个波束的多普勒质心的差是PRF的一半。本研究通过norm_sq命令行参数将波束间的多普勒质心频率间隔指定为PRF的一半，以获取最佳的子孔径干涉质量。

3.3 MAC指数

本研究使用SLC影像的前视影像作为主从影像生成子孔径自相干 (MAC) 影像。相干系数量化了两幅干涉合成孔径雷达图像之间的相似性以及地形散射特征的变化，通常是评估两幅配准SAR图像质量和相干性的基本指标 (Touzi 等,

1999)。此处用于评估前后视子孔径影像间相似性。本研究后续计算采用基于5×5窗口的复相干系数样本平均，使用最大似然相干估计表述前后视影像的相干性指数 $\rho(x, y)$ (即MAC指数)：

$$\rho(x, y) = \left| \frac{\sum_{i,j=1}^{n=25} I_f(i, j) \cdot I_b(i, j)^*}{\sqrt{\sum_{i,j=1}^{n=25} I_f^2(i, j)} \cdot \sqrt{\sum_{i,j=1}^{n=25} I_b^2(i, j)}} \right| \quad (7)$$

式中，前视影像与后视影像分别记为 I_f 、 I_b 、*表示复共轭。MAC指数值 ρ 在区间 $[0, 1]$ 内，相干值的高低反映了干涉图像中地表目标的一致性和稳定性，以乔克尔湾 (B区域) 2021-07-12为例，如图3 (a) 所示。

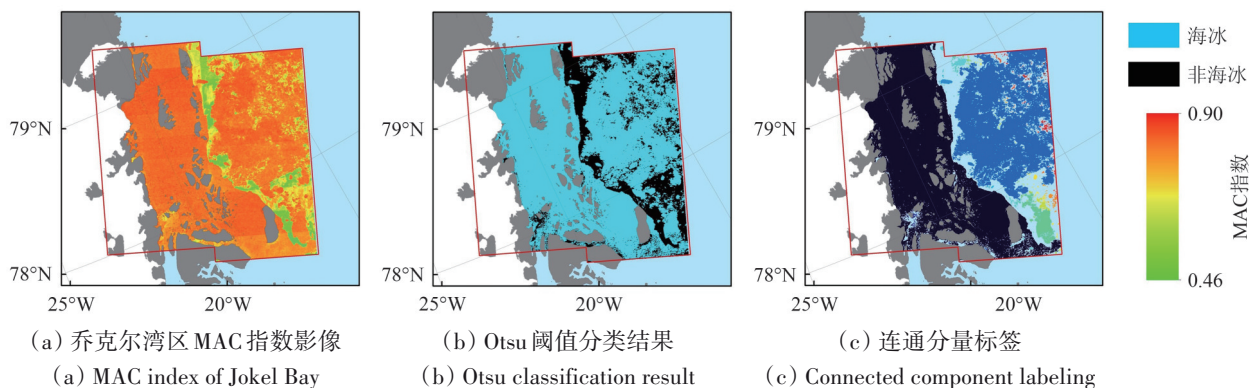


图3 乔克尔湾区域MAC指数影像、Otsu阈值分类结果及连通分量分析结果
Fig. 3 Results of Otsu thresholding classification and connected component labeling

3.4 Otsu 阈值分割算法

本研究通过 Otsu 阈值分割算法将 MAC 指数影像分为水面与非水面两类，如图3 (b) 所示 (Otsu, 1979)。假设 MAC 指数阈值 t 将图像分为前景与背景，前景的灰度值在区间 $[0, t]$ 内，背景的灰度值在区间 $[t+1, L-1]$ 内，则这两类出现的概率分别为 $w_1(t)$ 和 $w_2(t)$ 假设图像中前景和背景类间方差用 $\sigma^2(t)$ 来表示，则：

$$\sigma^2(t) = w_1(t)\sigma_1^2(t) + w_2(t)\sigma_2^2(t) \quad (8)$$

式中， $\sigma_1^2(t)$ 和 $\sigma_2^2(t)$ 分别为前景与背景的类内方差。当类间方差 $\sigma^2(t)$ 值达到最大时，对应的 t 值即为最佳分割阈值。

3.5 连通分量分析

连通成分标注算法为每个连通分量像素分配标签。首先搜索一个未标记的对象像素，为该像

素贴上新标签，然后将相同的标签传播给与该像素相连的所有对象像素 (He等, 2017)。本研究使用MATLAB的bwconncomp函数查找MAC指数影像中的各个连通分量并对其计数。输出结果包含MAC指数影像中连通分量的总数，以及分配给每个分量的像素索引。本研究将像素的连通性定义为8邻域连通性对上述Otsu阈值分割结果进行连通分量分析，将与海岸线相连的对象标记为固定冰，其余则标记为“其他”地物，包括漂浮的流冰、孤立噪声或小面积斑块等，并将“其他”地物剔除。如图3 (c) 所示，不同的连通分量采用不同颜色标记其连通分量编号。

3.6 求交集运算

尽管流冰与固定冰间通常存在冰间水道，但亦存有可能与固定冰相连。当固定冰与流冰之间

缺乏明显的边缘或形态差异时,仅依靠连通分量分析难以实现固定冰的精确提取。现有研究通常采用多时相影像交集分析法——通过对比相邻时间获取的影像,利用固定冰的位置稳定性(水平方向不变,仅存在垂直潮汐运动)与流冰的动态特性(受风力和洋流作用发生位移)之间的差异进行区分。如 Li 等(2020a)在南极固定冰研究中,利用 Sentinel-1 SAR 影像的相邻时间序列计算梯度差,固定冰区域因位置稳定呈现低梯度差,而浮冰因运动呈现高梯度差,从而通过交集提取固定冰范围。

针对部分固定冰与流冰堆叠出现边界模糊的现象,本研究对 MAC 指数影像采用多时相交集运算进行固定冰提取,具体采样日期详见表 2。具体流程为:(1)选取目标影像及其前一相邻时相(间隔 6 d 或 12 d)的 SAR 影像生成 MAC 指数影像;(2)分别提取两时相 MAC 指数影像中的潜在固定冰区域(包含可能存在的连接海冰);(3)通过空间交集运算识别两时相中保持空间位置稳定的区域,将其判定为固定冰。

表 2 采取交集运算的影像日期

Table 2 Image pairs for intersection analysis		
研究区域	目标日期	用于交集运算的影像日期
梅尔维尔湾	2021-06-12	2021-06-06
Melville Bugt	2021-06-24	2021-06-18
乔克尔湾	2021-07-24	2021-07-18
Jokel Bay		
阿蒙森海岸	2023-11-04	2023-10-28
Amundsen Coast	2023-12-10	2023-12-04
班扎雷海岸	2021-11-28	2021-11-22
Banzare Coast	2021-12-04	2021-11-28

3.7 精度评价

为评价固定冰提取结果的精度,本研究采用混淆矩阵中的 4 类基本元素进行精度评价: TP (True Positive): 固定冰被正确识别为固定冰的像素数; FP (False Positive): 其他区域被误识为固定冰的像素数; FN (False Negative): 固定冰被漏检的像素数; TN (True Negative): 非固定冰区域被正确识别的像素数。采用 4 类常用指标: 总体准确率 OA (Overall Accuracy)、Kappa 系数、F1 值 (F1-score) 和交并比 IoU (Intersection over Union)。

这些指标能够全面反映分类结果与参考数据的一致性和差异性,总体准确率 (OA) 具体定义如下:

$$OA = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (9)$$

式中, OA 表示正确分类的像素数占总像素数的比例,衡量整体分类性能。

Kappa 系数考虑随机一致性的修正准确率,用于反映分类结果与真实值之间的一致性程度,定义如下:

$$Kappa = \frac{OA - P_e}{1 - P_e} \quad (10)$$

式中,

$$P_e = \frac{(TP + FP)(TP + FN) + (FN + TN)(FP + TN)}{(TP + FP + TN + FN)^2}$$

F1 值为精确率 (Precision) 与召回率 (Recall) 的调和平均值,反映提取结果的准确性与完整性的综合表现,具体定义为

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (11)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (12)$$

$$F1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (13)$$

交并比 (IoU) 表示预测区域与真实区域的交集面积与并集面积之比,是空间重叠度的重要量化指标,定义为

$$IoU = \frac{TP}{TP + FP + FN} \quad (14)$$

本研究利用与其成像时间间隔 <1 d 的 Sentinel-2 与 Landsat 无云光学影像作为参考数据,在各研究区域中统计上述指标,量化 MAC 指数影像方法固定冰提取结果的精度和可靠性。

4 结果分析与精度评价

4.1 固定冰提取结果

图 4 展示了本研究方法在 4 研究区域提取的固定冰结果。其中可见: 梅尔维尔湾 (A 区域) 2021 年 6 月 6 日的固定冰面积为 $0.5943 \times 10^4 \text{ km}^2$; 乔克尔湾 (B 区域) 2021 年 7 月 12 日的固定冰面积为 $1.042 \times 10^4 \text{ km}^2$; 阿蒙森海岸 (C 区域) 2023 年 12 月 22 日的固定冰面积为 $1.2907 \times 10^4 \text{ km}^2$; 班扎雷海岸 (D 区域) 2021 年 12 月 16 日的固定冰面积为 $1.1973 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

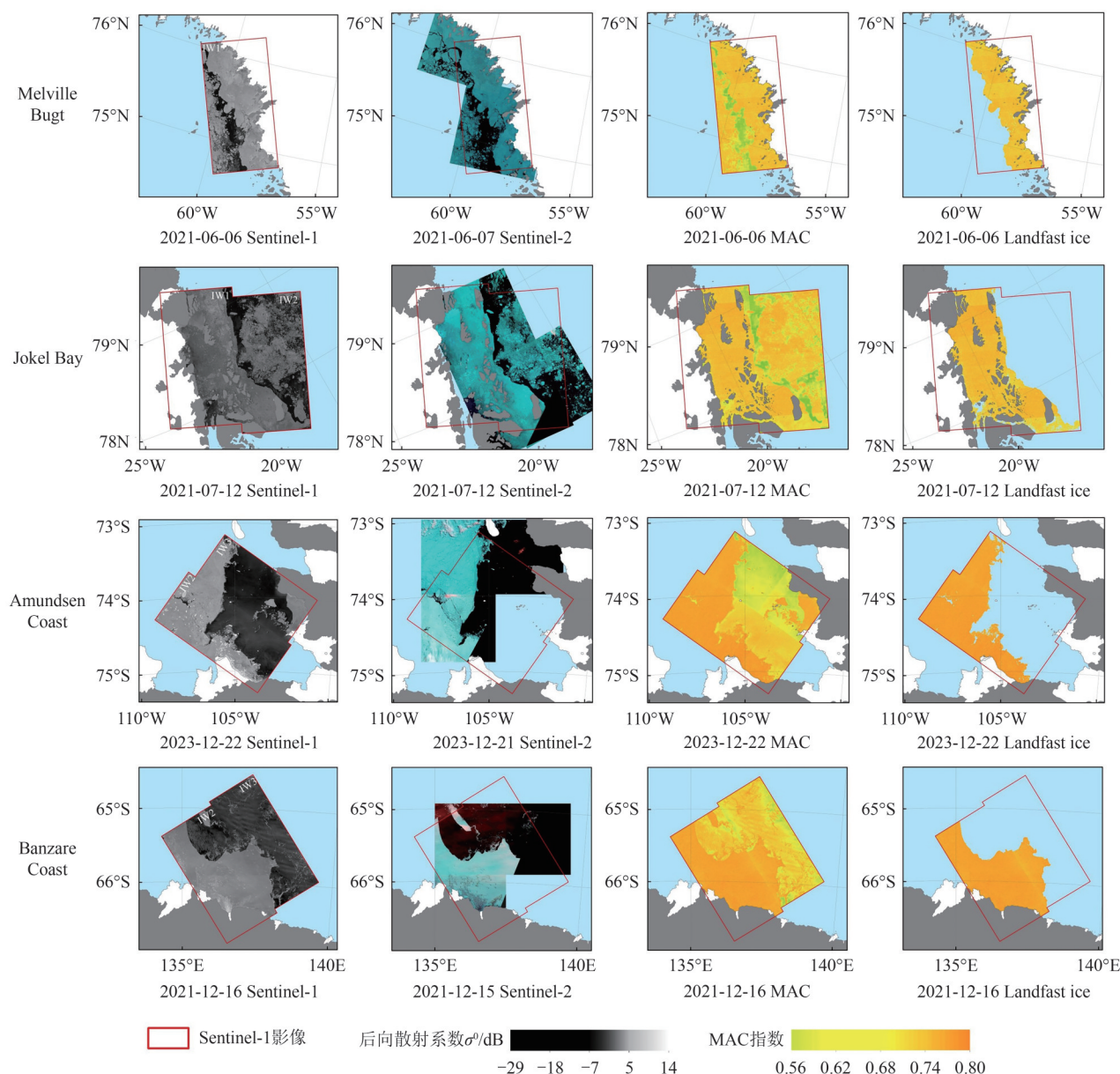


图4 参考图像和固定冰范围提取结果

Fig. 4 Reference image and extracted landfast ice extent

4.2 固定冰范围时序提取结果

固定冰的后向散射特性通常与流冰或海水表面有所差异，基于SAR影像的固定冰识别通常基于冰水后向散射系数差异及纹理特征，或基于合成孔径时间段内的散射体稳定性。然而在实际应用中由于SAR影像后向散射强度受到冰层表面粗糙度、海况、风浪等因素的影响，使得固定冰与周围粗糙的海冰或海水的散射特性可能趋于相似，该现象尤其在碎冰、风蚀冰以及积雪较厚的冰层区域中更加明显 (Shokr and Dabboor, 2023)。如图5所示，2021年12月04日班扎雷海岸固定冰与表面

较为粗糙的海面（图5（b））有着相近的后向散射系数及纹理。因此，仅依赖SAR影像的后向散射特性及纹理特征难以精确区分固定冰和非固定冰区域，提取结果的可靠性受到较大限制。

MAC指数影像识别固定冰的原理在于其能够有效区分静态目标与动态目标。尽管固定冰与流冰在后向散射系数上可能具有相似性，但MAC指数影像通过相干性分析可捕捉二者的运动差异：固定冰因位置稳定表现出较高的相干性，而流冰受风力和潮汐作用（如沿风向或潮汐方向漂移）会导致相干性降低。若存在明显冰间水道或物理分离特征，连通分量分析可有效剔除流冰。

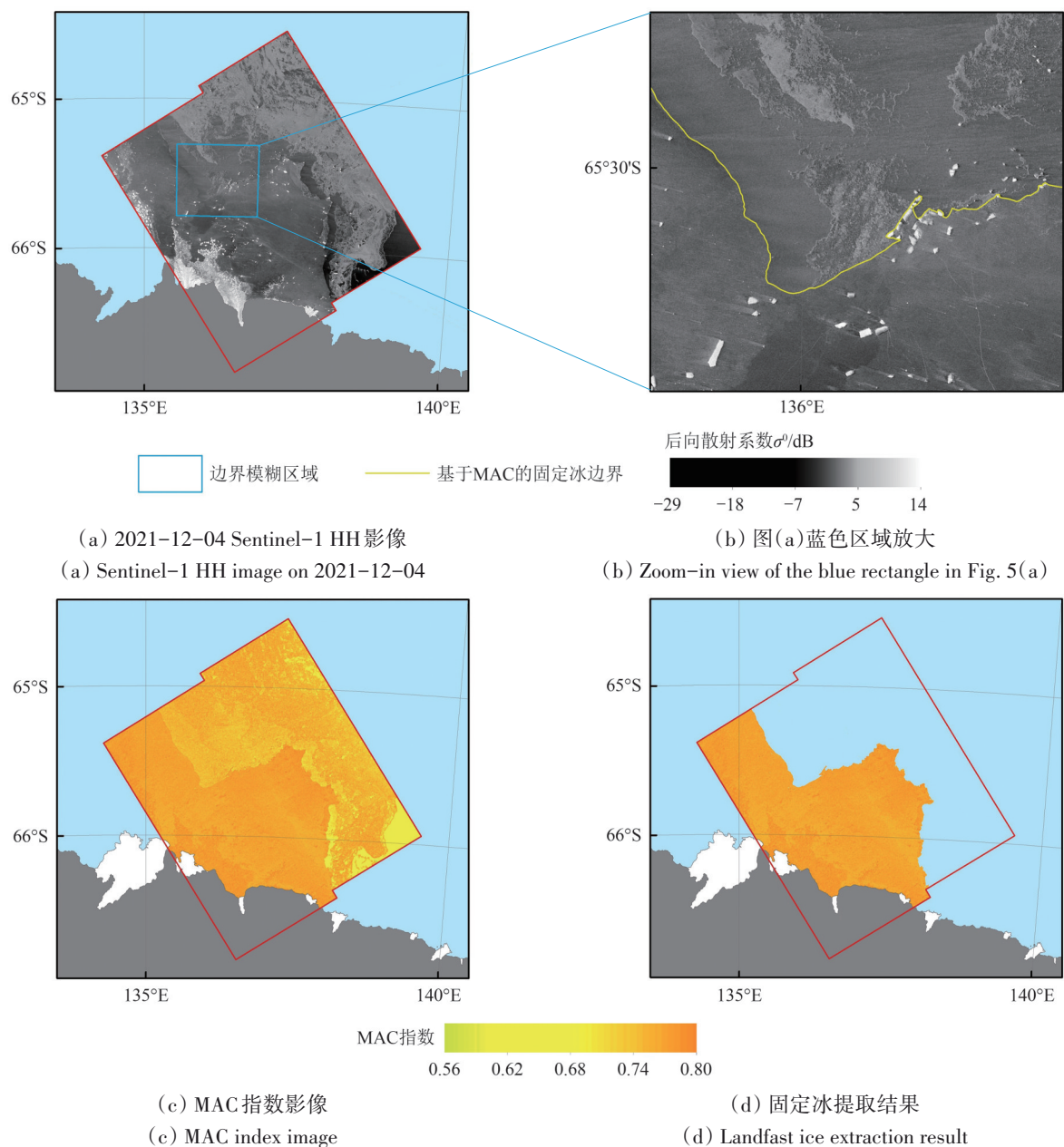


图5 班扎雷海岸区的后向散射系数与MAC指数对比
Fig. 5 Comparison of backscatter coefficient and MAC index in Banzare Coast

然而，若固定冰与流冰间缺乏清晰的形态或边缘差异，如大面积粘连，仅从单景影像通过MAC指数提取固定冰范围则较为困难。如图6所示为梅尔维尔湾（A区域）以本研究方法在2021年06月06日（a）与12日（b）得到的MAC指数影像，后者因流冰与固定冰发生堆叠，因此仅用相干性差异与连通分量分析难以精确地提取出固定冰，从而需要相邻成像时间的SAR影像干涉生成的MAC指数影像作为参考。

对于出现流冰与固定冰发生堆叠现象的部分时相MAC指数影像（表2），本研究利用6 d或12 d

间隔的Sentinel-1观测构建MAC指数影像对提取固定冰区域。首先，采用本研究方法分别从两张MAC指数影像中提取与海岸、岛屿连结的海冰部分作为初步的固定冰区域。接着，将各个时间点上视为固定冰的区域进行交集运算，以提取在一个卫星重访间隔（6 d或12 d）内保持不变的海冰区域。最后，应用连通分量分析对提取结果进行精细化处理，得到最终的固定冰范围。即目标时间点的固定冰范围通过该时间点影像与前一个时间点影像的交集运算确定。

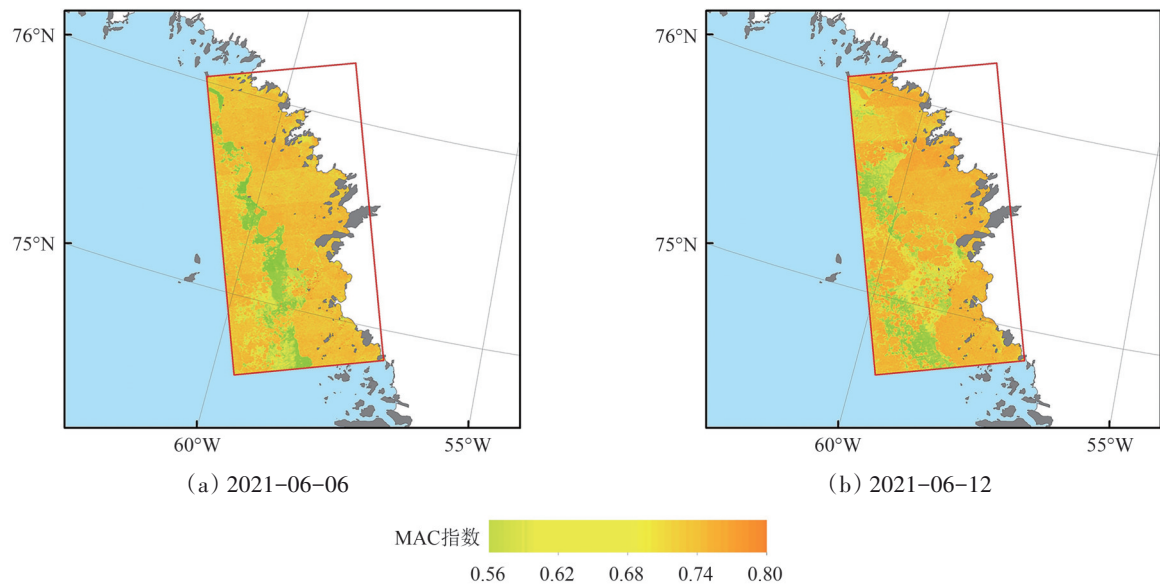
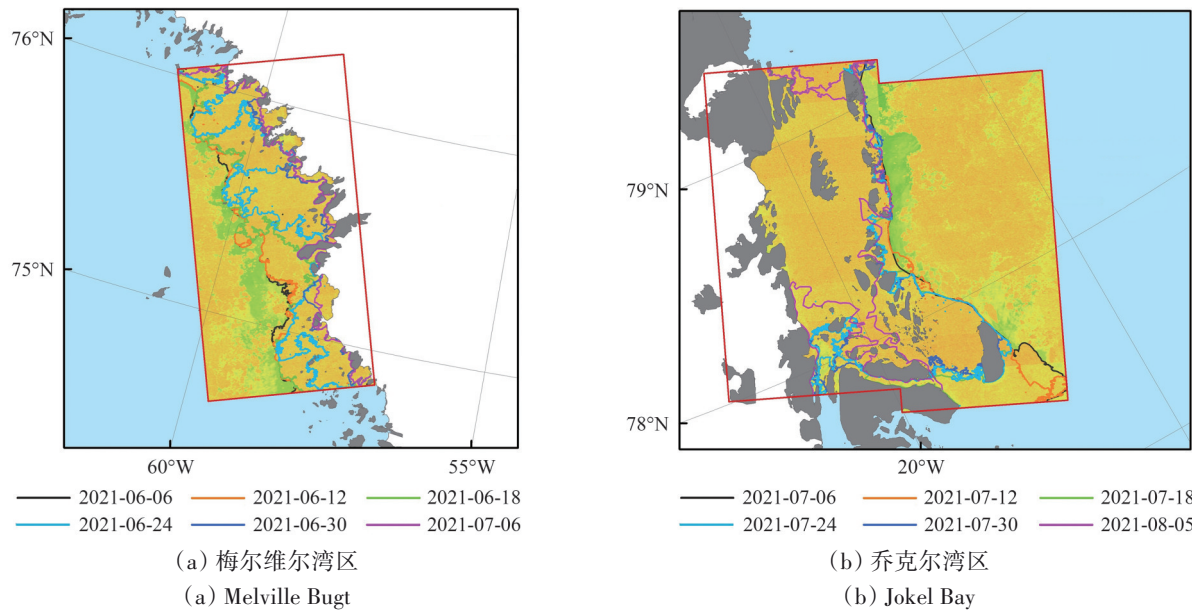


图6 梅尔维尔湾区流冰影响下的MAC指数影像变化

Fig. 6 MAC index images of Melville Bugt with the influence of drift ice

图7展示了利用MAC指数影像在各研究区域内进行时序固定冰提取的结果。其中，背景底图为各研究区域时序分析中所选的最早时刻的MAC指数影像（表1）。4个区域的固定冰范围在研究时段内呈显著缩减趋势，与夏季消融过程一致。在格陵兰岛，西格陵兰暖流携带源自大西洋的相对温暖水体，近年来已有研究观测到其增强趋势，这被认为是该地区海冰减少的重要原因之一（de Steur等，2023）。梅尔维尔湾位于西格陵兰沿岸，在6月末观测到其固定冰几乎完全消融，可能与西

格陵兰暖流入侵有关。相比之下，乔克尔湾区地理位置更偏北，受西格陵兰暖流影响较弱，固定冰范围在整个监测期内变化幅度较小，表现出更强的稳定性。在南极洲，固定冰范围的时序变化也表现出明显的区域差异。阿蒙森海岸部分海域远离大陆架，更易受到海洋环流的影响（Silvano等，2022），固定冰变季节化幅度较大；班扎雷海岸紧邻南极大陆，受陆源冷空气和低温环境主导，其固定冰范围呈现出更小的季节波动。



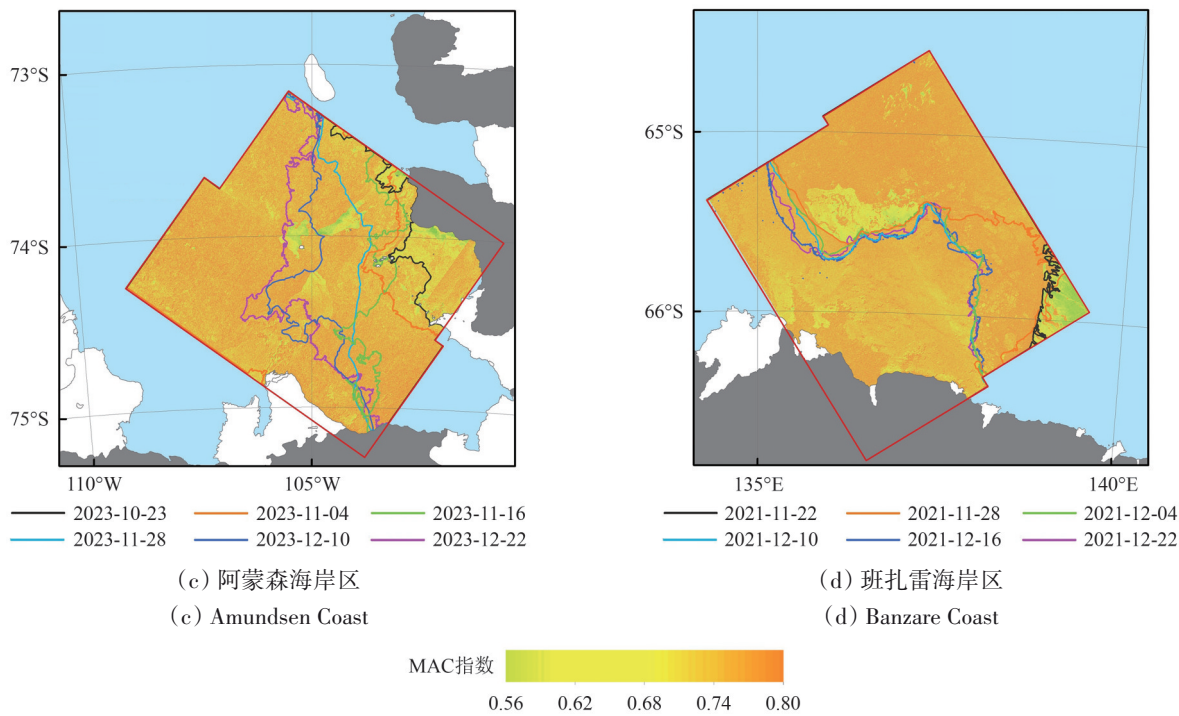


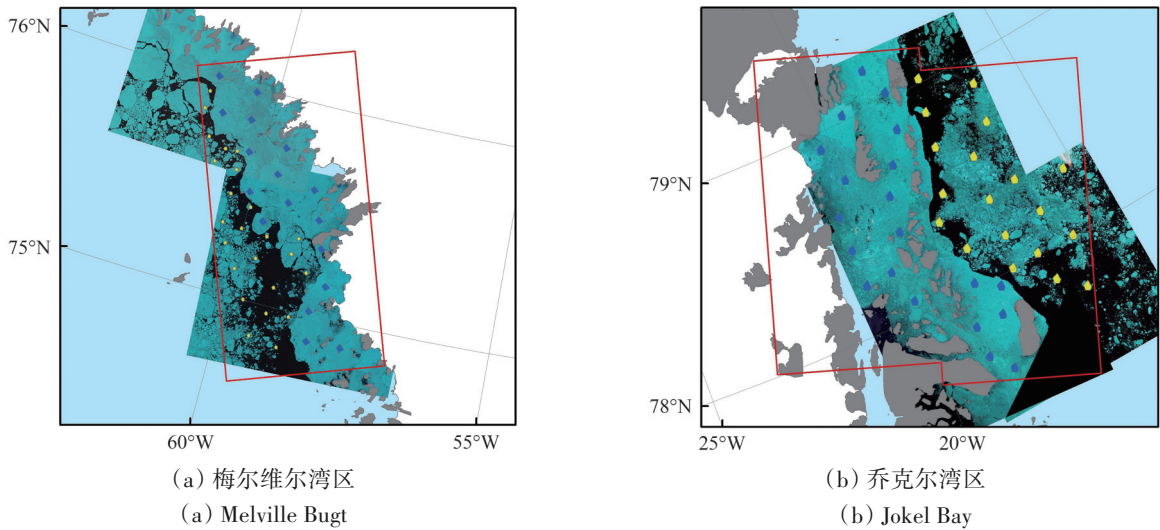
图7 不同区域研究区域固定冰范围时序变化

Fig. 7 Temporal evolution of the landfast ice extraction in different regions

4.3 精度评价

由于缺乏固定冰范围实地观测结果，本研究基于固定冰、流冰与海水表面形态的差异，参考与Sentinel-1 SAR影像间隔24 h内观测的Sentinel-2或Landsat光学影像，通过目视判读构建验证样本，对4个研究区域的时序固定冰范围提取结果进行精度评价。验证样本分为固定冰像素和非固定冰像素，参考海冰边界明显的区域按照均匀分布的方

式在影像上进行选取，其中蓝色为固定冰、黄色为非固定冰（图8），各研究区域在每个时间点的平均像素选取数量如下：乔克尔湾区固定冰42365像素、非固定冰25287像素；梅尔维尔湾区固定冰68978像素、非固定冰46467像素；阿蒙森海岸区固定冰44429像素、非固定冰26784像素；班扎雷海岸区固定冰36838像素、非固定冰32537像素。图8及以上信息仅为单时相实例。



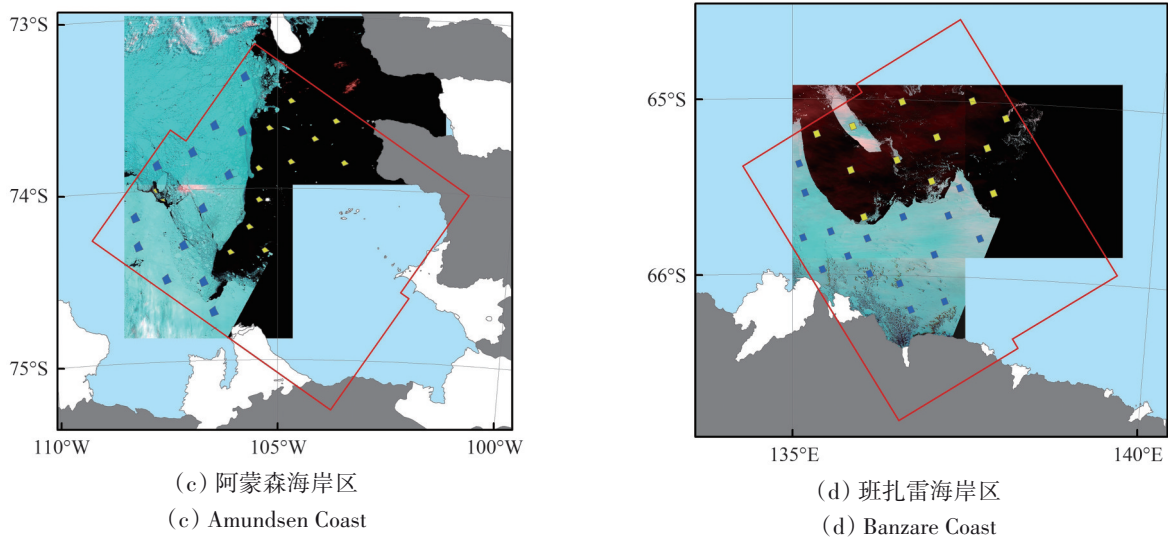


图8 研究区域固定冰验证样本
Fig. 8 Validation samples of landfast ice on optical images

分类精度评估采用混淆矩阵来记录4种结果，而后计算总体准确率OA、Kappa系数、F1值和交并比（IoU）作为衡量固定冰提取精度的指标。本研究对每个时间点MAC指数影像的提取结果进行精度评价，然后取所有时间点的平均精度作为最终的评价结果，而非采用MAC指数影像求交操作。精度评价结果如表3所示。可见除D区域（班扎雷海岸）分类精度较低外，其他3区域都呈现出较高的固定冰分类精度。

表3 MAC指数影像分类不同评价指标精度评价结果
Table 3 Accuracy assessment results of classification based on the MAC index image

区域	OA/%	Kappa系数	F1值	IoU/%
梅尔维尔湾 Melville Bugt	98.37	0.9613	0.9882	97.95
乔克尔湾 Jokel Bay	99.30	0.9806	0.9784	98.57
阿蒙森海岸 Amundsen Coast	99.76	0.9945	0.9982	98.47
班扎雷海岸 Banzare Coast	89.91	0.7988	0.9014	90.14
4区域平均	96.84	0.9338	0.9666	96.28

5 讨论

5.1 本研究的优势与不足

尽管通常海冰后向散射系数较高而海面较低，

但在海面风浪较强时，粗糙海面的后向散射强度可能与固定冰相近甚至更高。如图9（a）—（b）所示2024年12月30日Sentinel-1影像，班扎雷海岸区部分固定冰表面相对平整，后向散射强度较低；而受风浪作用的粗糙海面则产生强散射回波，二者强度值均分布在-18 dB至-9 dB，两类地表直方图呈现单峰分布，导致基于单一SAR强度的固定冰提取存在较大误判率。图9（c）—（d）展示的MAC指数特征则呈现出更优的区分度：固定冰区MAC指数多集中在0.70—0.80，而海水区域则低于0.70。图9（d）的MAC指数分布呈现近似双峰分布（主峰值约0.74），在0.68附近存在明显分界阈值。MAC指数方法结合前后视子孔径图像的相干性信息，抑制了由海面扰动引起的后向散射强度变化对冰水分类的干扰，提高了复杂海况下提取固定冰的鲁棒性。

为了验证本方法的时间维稳定性，我们在梅尔维尔湾与乔克尔湾选取了间隔两日的Sentinel-1影像对MAC指数进行对比分析。通过引入固定冰边界重复比（经5像元缓冲区匹配后，交集区域两日边界重合长度与边界长度的比值）与范围交并比进行量化评估。在梅尔维尔湾，边界重复比为78.83%，交并比为89.31%；在乔克尔湾分别为91.75%与96.17%（图10）。这表明两区域在不同日期下提取的固定冰边界具有较高的一致性，体现了MAC方法良好的时间稳定性。

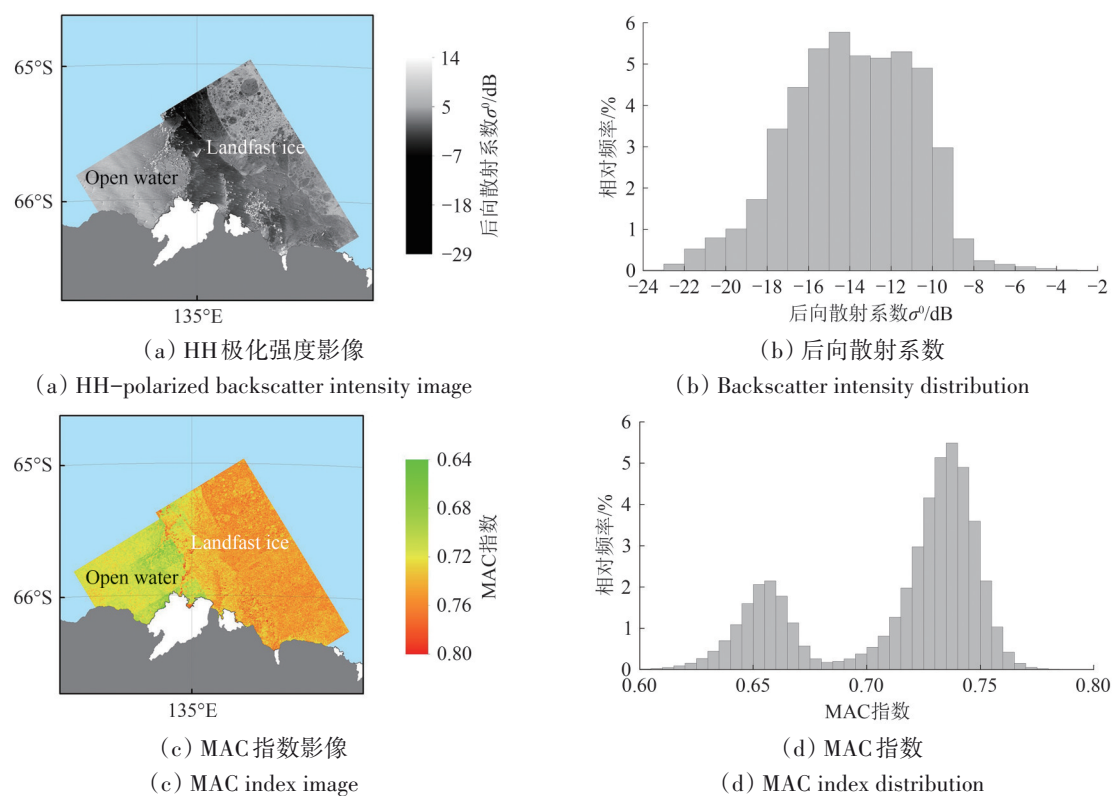


图9 班扎雷海岸区2024年12月30日固定冰SAR特征分析
Fig. 9 SAR characterization of landfast ice in Banzare Coast on December 30, 2024

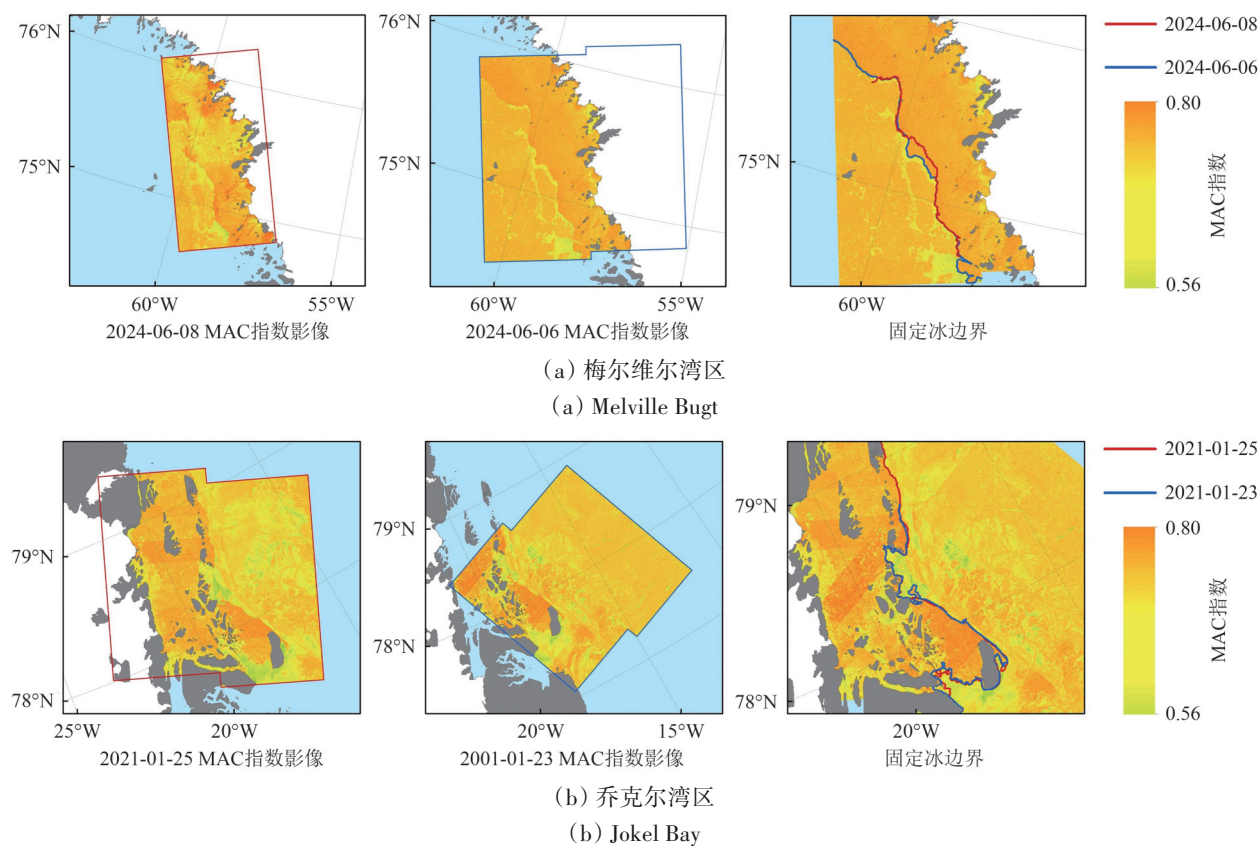


图10 梅尔维尔湾区与乔克尔湾区相近日期基于MAC提取固定冰边界对比
Fig. 10 Comparison of landfast ice boundaries derived from MAC imagery in Melville Bugt and Jokel Bay on adjacent dates

需要指出尽管该方法在大多数情况下固定冰范围提取结果较为稳定，但仍存在一定局限性，主要表现在以下4个方面：(1) MAC方法的窗口限制：本研究采用在一定范围窗口（如5×5窗口）内对多视影像相干性进行评估，其实际分辨率远不如多视后的SAR影像；(2) 冰水区分MAC指数阈值依赖影像直方图：需要进一步考察MAC指数与不同海况、固定冰生长情况的关系，以优化冰水区分阈值；(3) 未考虑海冰运动信息：基于MAC指数影像识别固定冰的方法不包含不同时相之间的海冰运动信息，因此可对多时相影像增加海冰漂移识别，将稳定区域增设为判别固定冰的特征之一（李超越等，2024）；(4) 交集运算的系统性偏差：交集运算获得的固定冰范围实质上是双时相数据的共同覆盖区域，其空间范围通常小

于单日固定冰真实范围，这种系统性偏差会影响精度验证结果。

5.2 与重轨InSAR相干影像方法对比

传统重轨InSAR相干性方法提取固定冰范围需要使用两幅具有一定时间间隔获取的SAR影像，会受制于固定冰表面散射特性改变或及固定冰轻微移动（超出InSAR监测能力范围但不足判别为流动海冰）导致的失相干现象（Wang等，2021）。当研究区域内固定冰（包括散射特性与位置）稳定，重轨InSAR方法可以从相干图结果获取影像对时期内的固定冰范围（Meyer等，2011）。本研究选取了4组在冬季获取的Sentinel-1 SAR影像对进行干涉，研究区内的四组影像对都能够得到良好的干涉条纹（图11，第1列），并通过重轨InSAR相干性（图11，第2列）提取固定冰范围。

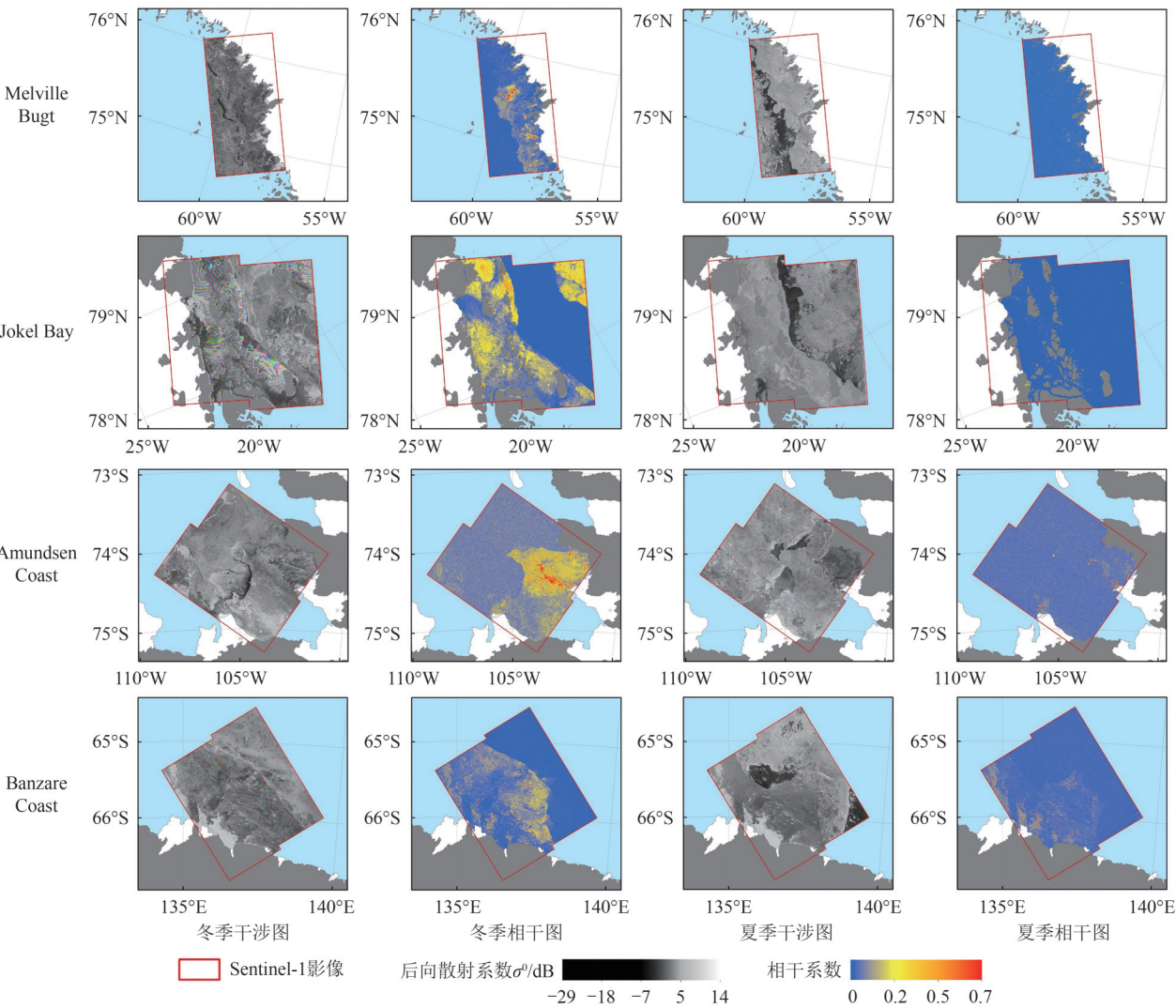


图 11 重轨InSAR方法相干性在不同季节的结果比较
Fig. 11 Comparison of repeat pass InSAR coherence at different seasons

然而在海冰融化季节,受冰表面冻融过程或及轻微形变影响,InSAR 条纹不清晰甚至完全消失,相干性显著下降(图 11,第 3、4 列),使得固定冰与流动海冰无法区分。其原因在于此时固定冰表面冻融造成失相干或及固定冰运动范围或形变梯度已超过形成干涉条纹允许条件(Li 等, 2021)。作为参考,格陵兰冰盖北部区域 Sentinel-1 可以形成干涉影像的最大允许形变量约为视线向 21.6 m (Feng 等, 2023),对应不足斜距向(与视线向相同)约 10 像素位移量。

相较之下,本研究提出的 MAC 方法通过单景影像前后视子孔径构建相干性图像,不依赖多时相观测,因此可有效规避时间失相干(图 11,第 3、4 列)。即便冰体处于表面冻融交替或及运动状态,仍可从当日影像中提取固定冰边界,保持较高的时间分辨率。单幅影像获取的特性还为快速响应与实时监测提供了可能,适合用于气候快速变化区域、海冰动态边界跟踪等高频观测需求场景。

6 结 论

为探索 MAI 技术在固定冰范围提取中的应用潜力,本研究以格陵兰岛及南极沿岸固定冰为研究对象,提出一种基于 Sentinel-1 子孔径干涉相干性影像(MAC)的固定冰范围提取方法,并选取格陵兰岛及南极洲沿岸 4 个海域,测试了不同季节获取的影像,并与传统重轨 InSAR 相干性提取固定冰方法进行了比较。主要结论如下:

(1) 本研究方法通过子孔径分解和动态相干性阈值结合连通分量分析,有效提取了固定冰范围,通过与同期的 Sentinel-2 与 Landsat 光学影像对比验证,评估结果显示,梅尔维尔湾、乔克尔湾、阿蒙森海岸和班扎雷海岸区域的总体准确率分别达到 98.37%、99.30%、99.76% 和 89.91%, Kappa 系数分别为 0.9613、0.9806、0.9945 和 0.7988, F1 值分别为 0.9882、0.9784、0.9982 和 0.9014,交并比分别为 97.95%、98.57%、98.47% 和 90.14%,该方法在不同季节和不同研究区域中均表现出了较高的可靠性。

(2) 不同研究区域固定冰的演化过程存在显著空间差异,其变化主要受海洋环流、地理位置及岸线约束等因素控制。格陵兰西岸固定冰对西格陵兰暖流响应显著,表现出快速消融特征,而高纬海域稳定性较强;南极沿岸固定冰则呈现出

明显的区域分异,其中远离大陆架区域受海洋动力过程主导,季节变化剧烈,而近岸区域受低温环境约束,变化相对缓和。

(3) 与传统重轨 InSAR 相干图方法相比,本研究提出的方法在融化季时期也能够从单幅 SAR 影像中有效区分固定冰和流冰,避免了因固定冰微量漂移或及表面冻融导致的时间失相干影响,提高了在复杂环境下海冰分类的鲁棒性。对比分析同区域相近日期的 MAC 指数影像提取固定冰结果,MAC 指数影像提取固定冰方法在单时相条件下具有较高精度,因此子孔径自相干法适用于长时序高时间分辨率的固定冰范围研究。

志 谢 感谢欧洲航天局提供的 Sentinel-1 与 Sentinel-2 数据支持,以及美国地质调查局提供的 Landsat 光学影像数据支持。衷心感谢北京大学地球与空间科学学院梁存任老师在 Sentinel-1 IW SLC 子孔径分解相关技术方面提供的指导与宝贵建议。

参考文献(References)

- Ainley D G, Larue M A, Stirling I, Stammerjohn S and Siniff D B. 2015. An apparent population decrease, or change in distribution, of Weddell seals along the Victoria Land coast. *Marine Mammal Science*, 31(4): 1338-1361 [DOI: 10.1111/mms.12220]
- Bechor N B D and Zebker H A. 2006. Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair. *Geophysical Research Letters*, 33(16): L16311 [DOI: 10.1029/2006GL026883]
- Dammann D O, Eriksson L E B, Mahoney A R, Eicken H and Meyer F J. 2019. Mapping pan-Arctic landfast sea ice stability using Sentinel-1 interferometry. *The Cryosphere*, 13(2): 557-577 [DOI: 10.5194/tc-13-557-2019]
- de Steur L, Sumata H, Divine D V, Granskog M A and Pavlova O. 2023. Upper ocean warming and sea ice reduction in the East Greenland Current from 2003 to 2019. *Communications Earth and Environment*, 4(1): 261 [DOI: 10.1038/s43247-023-00913-3]
- Feng X M, Chen Z Q, Li G, Ju Q, Yang Z B and Cheng X. 2023. Improving the capability of D-InSAR combined with offset-tracking for monitoring glacier velocity. *Remote Sensing of Environment*, 285: 113394 [DOI: 10.1016/j.rse.2022.113394]
- Fraser A D, Wongpan P, Langhorne P J, Klekociuk A R, Kusahara K, Lannuzel D, Massom R A, Meiners K M, Swadling K M, Atwater D P, Brett G M, Corkill M, Dalman L A, Fiddes S, Granata A, Guglielmo L, Heil P, Leonard G H, Mahoney A R, McMinn A, van der Merwe P, Weldrick C K and Wienecke B. 2023. Antarctic landfast sea ice: a review of its physics, biogeochemistry and ecology. *Reviews of Geophysics*, 61(2): e2022RG000770 [DOI: 10.

- 1029/2022RG000770]
- Fretwell P T. 2024. A 6 year assessment of low sea-ice impacts on emperor penguins. *Antarctic Science*, 36(1): 3-5 [DOI: 10.1017/S0954102024000130]
- Gatelli F, Monti Guamieri A, Parizzi F, Pasquali P, Prati C and Rocca F. 1994. The wavenumber shift in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(4): 855-865 [DOI: 10.1109/36.298013]
- Gill J P S and Yackel J J. 2012. Evaluation of C-band SAR polarimetric parameters for discrimination of first-year sea ice types. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 38(3): 306-323 [DOI: 10.5589/m12-025]
- Grandin R. 2015. Interferometric processing of SLC Sentinel-1 TOPS data//Proceedings of Fringe 2015: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop. Frascati: European Space Agency [DOI: 10.5270/Fringe2015.pp116]
- Han H, Kim Y, Jin H and Lee H. 2015. Analysis of annual variability of landfast sea ice near Jangbogo Antarctic station using InSAR coherence images. *Korean Journal of Remote Sensing*, 31(6): 501-512 [DOI: 10.7780/KJRS.2015.31.6.1]
- He L F, Ren X W, Gao Q H, Zhao X, Yao B and Chao Y Y. 2017. The connected-component labeling problem: a review of state-of-the-art algorithms. *Pattern Recognition*, 70: 25-43 [DOI: 10.1016/j.patcog.2017.04.018]
- Howell S E L, Laliberté F, Kwok R, Derksen C and King J. 2016. Landfast ice thickness in the Canadian Arctic Archipelago from observations and models. *The Cryosphere*, 10(4): 1463-1475 [DOI: 10.5194/tc-10-1463-2016]
- Hu J, Li Z W, Zhang L, Ding X L, Zhu J J, Sun Q and Ding W. 2012. Correcting ionospheric effects and monitoring two-dimensional displacement fields with multiple-aperture InSAR technology with application to the Yushu earthquake. *Science China Earth Sciences*, 55(12): 1961-1971 (胡俊, 李志伟, 张磊, 丁晓利, 朱建军, 孙倩, 丁伟. 2013. 多孔径 InSAR 技术电离层校正方法及二维形变场应用研究——以玉树地震为例. *中国科学: 地球科学*, 43(3): 457-468) [https://doi.org/10.1360/zd-2013-43-3-457]
- Jiang H J, Pei Y Y and Li J. 2017. Sentinel-1 TOPS interferometry for along-track displacement measurement. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 57: 012019 [DOI: 10.1088/1755-1315/57/1/012019]
- Jung H S, Won J S and Kim S W. 2009. An improvement of the performance of multiple-aperture SAR interferometry (MAI). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(8): 2859-2869 [DOI: 10.1109/TGRS.2009.2016554]
- Kim M, Im J, Han H, Kim J, Lee S, Shin M and Kim H C. 2015. Landfast sea ice monitoring using multisensor fusion in the Antarctic. *GIScience and Remote Sensing*, 52(2): 239-256 [DOI: 10.1080/15481603.2015.1026050]
- Lehtiranta J, Siiriä S and Karvonen J. 2015. Comparing C- and L-band SAR images for sea ice motion estimation. *The Cryosphere*, 9(1): 357-366 [DOI: 10.5194/tc-9-357-2015]
- Lewis N T, Seviour W J M, Roberts-Straw H E and Screen J A. 2024. The response of surface temperature persistence to Arctic sea-ice loss. *Geophysical Research Letters*, 51(2): e2023GL106863 [DOI: 10.1029/2023GL106863]
- Li C Y, Li G, Wang X, Ju Q and Chen Z Q. 2024. Sea ice drift vectors extraction based on feature tracking to Sentinel-1 images. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(8): 2062-2072 (李超越, 李刚, 王雪, 鞠琦, 陈卓奇. 2024. 基于 Sentinel-1 影像特征匹配的北极海冰漂移矢量提取. *遥感学报*, 28(8): 2062-2072) [DOI: 10.11834/jrs.20222238]
- Li W R, Lhermitte S and López-Dekker P. 2021. The potential of synthetic aperture radar interferometry for assessing meltwater lake dynamics on Antarctic ice shelves. *The Cryosphere*, 15(12): 5309-5322 [DOI: 10.5194/tc-15-5309-2021]
- Li X Q, Shokr M, Hui F M, Chi Z H, Heil P, Chen Z Q, Yu Y N, Zhai M X and Cheng X. 2020a. The spatio-temporal patterns of landfast ice in Antarctica during 2006-2011 and 2016-2017 using high-resolution SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 242: 111736 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111736]
- Li Z X, Zhao J C, Su J, Li C H, Cheng B, Hui F M, Yang Q H and Shi L J. 2020b. Spatial and temporal variations in the extent and thickness of Arctic landfast ice. *Remote Sensing*, 12(1): 64 [DOI: 10.3390/rs12010064]
- Mahoney A, Eicken H, Gaylord A G and Shapiro L. 2007. Alaska landfast sea ice: links with bathymetry and atmospheric circulation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 112(C2): C02001 [DOI: 10.1029/2006JC003559]
- Marbouti M, Praks J, Antropov O, Rinne E and Leppäranta M. 2017. A study of landfast ice with Sentinel-1 repeat-pass interferometry over the Baltic Sea. *Remote Sensing*, 9(8): 833 [DOI: 10.3390/rs9080833]
- Meyer F J, Mahoney A R, Eicken H, Denny C L, Druckenmiller H C and Hendricks S. 2011. Mapping arctic landfast ice extent using L-band synthetic aperture radar interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 115(12): 3029-3043 [DOI: 10.1016/j.rse.2011.06.006]
- Miles B W J, Stokes C R and Jamieson S S R. 2017. Simultaneous disintegration of outlet glaciers in Porpoise Bay (Wilkes Land), East Antarctica, driven by sea ice break-up. *The Cryosphere*, 11(1): 427-442 [DOI: 10.5194/tc-11-427-2017]
- Otsu N. 1979. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1): 62-66 [DOI: 10.1109/TSMC.1979.4310076]
- Pidgeon V W. 1968. Doppler dependence of radar sea return. *Journal of Geophysical Research*, 73(4): 1333-1341 [DOI: 10.1029/JB073i004p01333]
- Shokr M and Dabboor M. 2023. Polarimetric SAR applications of sea ice: a review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16: 6627-6641 [DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3295735]
- Silvano A, Holland P R, Naughten K A, Dragomir O, Dutrieux P, Jenkins A, Si Y D F, Stewart A L, Molino B P, Janzing G W, Dotto T S and Garabato A C N. 2022. Baroclinic ocean response to cli-

- mate forcing regulates decadal variability of ice-shelf melting in the Amundsen sea. *Geophysical Research Letters*, 49(24): e2022GL100646 [DOI: 10.1029/2022GL100646]
- Touzi R, Lopes A, Bruniquel J and Vachon P W. 1999. Coherence estimation for SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1): 135-149 [DOI: 10.1109/36.739146]
- Wang Z Y, Wang Z H, Li H, Ni P and Liu J. 2021. A modified approach of extracting landfast ice edge based on Sentinel-1A InSAR coherence image in the Gulf of Bothnia. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(10): 1076 [DOI: 10.3390/jmse9101076]

Deriving landfast ice with Sentinel-1 multi-aperture coherence image

CHENG Yuheng, LI Gang, CHEN Zhuoqi, YANG Zhibin, CHENG Xiao

1. School of Geospatial Engineering and Science/Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China;
2. Key Laboratory of Comprehensive Observation of Polar Environment of Ministry of Education (Sun Yat-Sen University), Zhuhai 519082, China

Abstract: This study proposes a novel method for mapping landfast ice in polar regions using Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) imagery. Landfast ice, which is attached to coastal boundaries, plays a crucial role in influencing polar climate with its heat exchange and radiation processes. Mapping landfast ice extent by using regularly acquired remote sensing SAR imageries, such as those from Sentinel-1, is necessary due to climate change and increasing commercial activities in polar coastal areas. However, the scattering properties of landfast ice and surrounding rough sea ice or open water can be similar, and thus, distinguishing between fixed and non-fixed ice regions based solely on SAR backscatter characteristics is a challenging task. The repeat-pass interferometric SAR (InSAR) method identifies in accordance with a coherence map. However, the results are affected by temporal decorrelation due to displacement and/or its melting and refreezing surface, particularly during early winter and/or the melting season. To address this challenge, this study introduces a method based on Multiple Aperture Coherence (MAC). This method effectively improves the accuracy and temporal resolution of landfast ice identification based on Sentinel-1 imagery.

The proposed method utilizes sub-aperture decomposition of single Sentinel-1 interferometric wide swath single look complex images to generate MAC index images. By splitting SAR image into forward and backward sub-apertures, coherence maps that are sensitive to the stability of the ice features are produced. These MAC index images are then classified into seawater and sea ice by using Otsu's thresholding algorithm. The sea ice regions are further segmented into connected components to identify landfast ice, which is defined as ice connected to the coast. The method was applied to four distinct study areas in Greenland (Melville Bugt and Jokel Bay) and Antarctica (Amundsen Coast and Banzare Coast), covering various polar environments. For validation, Sentinel-2 and Landsat imageries acquired within 24 h of the corresponding Sentinel-1 scenes were used to assess accuracy.

Validation achieved an Overall Accuracy (OA) of 96.84% for the proposed method, a kappa coefficient of 0.9338, and an F1-score of 0.9666 (averaged across the four study sites), demonstrating its effectiveness under diverse geographic conditions. Results revealed extensive landfast ice coverage in each region, with significant seasonal variations driven by environmental factors. Compared with repeat-pass InSAR, the proposed method is less susceptible to temporal decorrelation, ensuring reliable landfast ice extraction even during rapid changes (e.g., the melting season). Although a clear difference in the MAC index was observed between sea ice and seawater, the method occasionally produced sharp edges at burst boundaries during the acquisition of terrain observation by progressive scans. This condition may affect sea ice/water separation and warrants further investigation. Moreover, future research may focus on applying this method to assess seasonal and interannual variations in landfast ice extent, deepening our understanding of the mechanisms that influence polar sea ice stability.

Key words: polar remote sensing, landfast ice, sea ice, SAR coherence, multi aperture coherence, Sentinel-1, TOPS, InSAR

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42371136, 42476256)