

HY-1C/D 卫星数据的辽东湾海冰识别与估算

李玲¹, 锁子易^{1,2}, 石立坚³, 王卿^{1,4}, 焦俊男¹, 唐君¹, 陆应诚¹

1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 南京 210023;

2. 南京大学 中国南海研究协同创新中心, 南京 210093;

3. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081;

4. 集美大学 港口与海岸工程学院, 厦门 361021

摘要: 海冰是海洋环境监测的重点对象, 光学遥感能为海冰的精细化监测提供技术支持, 实现海冰的动态监测与量化估算。中国海洋水色业务卫星星座——海洋一号 C/D 卫星 (Haiyang-1C/D, 以下简称 HY-1C/D), 搭载有适用于海冰监测的海岸带成像仪 CZI (Coastal Zone Imager) 和水色水温扫描仪 COCTS (Chinese Ocean Color and Temperature Scanner), 具备开展海冰业务化监测应用的能力。本研究以 2021 年 12 月—2022 年 3 月中国渤海辽东湾海冰为研究区, 收集冰期内的 HY-1C/D 卫星影像数据, 开展海冰识别与估算研究, 评估 CZI 与 COCTS 数据对海冰的识别效能, 分析海冰、海水、云等典型目标在光学 (可见光—近红外) 和热红外波段的影像特征; 此外, 针对光学遥感影像中海冰识别易受到云干扰问题, 根据其在以上波段的遥感响应机理和图像特征差异, 提出一种适用于 HY-1C/D 卫星在海冰分布区域的云掩膜方法, 并对海冰进行精确提取; 在识别基础上, 进一步评估 HY-1C/D 卫星数据对于海冰密集度这一关键物理参数的光学遥感估算效能。结果表明: 引入热红外波段, 利用海冰和云的亮温差异对云进行掩膜, 使得利用全局阈值提取海冰像元成为可能; 通过对 CZI、COCTS 影像中海冰的高精度提取, 进一步实现海冰密集度的估算, 有效反映了像元中海冰和海水的混合程度, 从而达到海冰海水像元解混的效果, 提高海冰覆盖面积的估算精度。综上, 本研究针对 HY-1C/D 卫星影像数据中的海冰识别提取具有较高的精度和抗干扰能力, 可为国产海洋光学卫星的海冰监测业务化应用提供方法参考。

关键词: 海洋一号 C/D 卫星, 海冰, 光谱特征, 亮温, 云检测, 海冰密集度

中图分类号: TP79/P2

引用格式: 李玲, 锁子易, 石立坚, 王卿, 焦俊男, 唐君, 陆应诚. 2025. HY-1C/D 卫星数据的辽东湾海冰识别与估算. 遥感学报, 29 (4): 897-909

Li L, Suo Z Y, Shi L J, Wang Q, Jiao J N, Tang J and Lu Y C. 2025. Identification and estimation of sea ice in Liaodong Bay using HY-1C/D satellite images. National Remote Sensing Bulletin, 29 (4): 897-909 [DOI: 10.11834/jrs.20253410]

1 引言

海冰是海洋环境监测的重点对象, 其范围与厚度变化大, 可覆盖达 10% 的地球海洋, 会影响大气与海洋之间的能量交换, 冰情成因也与气候变化密切相关 (Riggs 等, 1999; 刘钦政 等, 2004; Swart, 2017)。海冰也是中国北方沿海地区的主要海洋灾害之一, 2010 年渤海与黄海北部地区发生了 30 年来最严重的海冰冰情, 对轮船、港口码头、海水养殖场、海上石油平台等产生了不同的损害,

造成了巨大的经济损失 (孙劭 等, 2011)。对海冰进行连续有效地监测和预警、及时获取海冰覆盖面积信息, 对于气候变化研究、灾害风险管理、航运规划、海上油气勘探与生产等具有重要意义 (Shi 等, 2003; 白珊 等, 1999; 刘钦政 等, 2004)。

卫星遥感技术可对分布广泛、情况复杂的海冰进行大范围、同步、连续快速的观测, 是海冰灾害预警、跟踪和防治的主要技术手段。海冰监测研究常用的技术手段主要为微波遥感和光学遥感 (程晓 等, 2021)。基于地物发射微波辐射能量

收稿日期: 2023-09-22; 预印本: 2024-01-14

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2021YFC2803301); 国家自然科学基金 (编号: 42371380, 42071387)

第一作者简介: 李玲, 研究方向为海洋环境遥感。E-mail: MG21270021@smail.nju.edu.cn

通信作者简介: 陆应诚, 研究方向为海洋环境遥感。E-mail: Luyc@nju.edu.cn

高低,被动微波辐射计能有效地识别海冰并反演海冰密集度(Cavalieri等,1984;Comiso,1986;Wiebe等,2009;Cheng等,2021),虽不受光照条件及云的影响,但被动微波辐射计空间分辨率低,难以获得冰表面细节信息(Karvonen,2017)。微波雷达遥感能提供海冰分类与厚度估算的高分辨率影像,但结果也易受海洋背景环境影响(刘眉洁,2016;Zhang等,2015)。光学遥感获取的数据具有较高的空间和时间分辨率,也是实现海冰覆盖和漂移动态监测的有效手段(Wu等,2005;Cavalieri等,2006),基于海冰和背景海水的反射率差异,可估算海冰面积、密集度、厚度等参数(Drue和Heinemann,2004;Su等,2013;Chi等,2019)。美国国家海洋和大气管理局NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)的业务化海冰识别和海冰密集度SIC(Sea Ice Concentration)反演算法,便是基于VIIRS(Visible Infrared Imaging Radiometer Suite)数据中海冰和海水的反射率差异得到(Liu等,2016)。海冰光学遥感易受云雾的干扰,相比于云,海冰及其表面积雪在短波红外波段有所下降,基于这一反射差异发展的归一化冰雪指数NDSI(Normalized Difference Snow Index)可以有效区分海冰与大部分卷云(Hall等,2001),被广泛应用于配置短波红外波段的VIIRS、MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)等卫星数据。

中国海洋水色业务卫星星座,海洋一号C/D卫星(Haiyang-1C/D, HY-1C/D)可提供快速、高精度的全球海洋水色、生态环境观测的卫星遥感数据,服务于海冰、绿潮、海面溢油等典型监测应用场景,数据产品质量较好,在海洋环境监测中具有较高的应用价值(沈亚峰等,2020;Suo等,2021,2022;刘锦超等,2022;刘建强等,2022,2023)。HY-1C/D卫星搭载的海岸带成像仪CZI(Coastal Zone Imager)可对我国近海实现2次/3d、空间分辨率50m的数据覆盖,将CZI数据中海冰的光谱和纹理特征结合,可应用于我国辽东湾海域无云情况下的海冰分类(臧金霞等,2022)。相比于常用于海冰监测的MODIS、VIIRS等数据,CZI数据不仅有高空间分辨率、高信噪比、大辐射动态范围等技术特点,还兼顾大幅宽和高时间分辨率,有助于实现海冰精细化动态识别与量化估算,当前面临的主要挑战在于:(1)CZI缺少短波红外波段,因此无法利用NDSI方法进行冰水分离;(2)云影响海冰识别结果,如何区分云与海冰,成为HY-1C/D

卫星用于海冰遥感监测的主要难题。

因此,本研究拟以我国渤海辽东湾为研究区,提出一种综合利用HY-1C/D卫星多类型数据的处理方法,研究基于海冰、不同类型的云、海水等典型目标在光学(可见光—近红外)和热红外波段内的数据特征;面向HY-1C/D卫星CZI数据的波段构成以及海冰与云易混淆的问题,结合水色水温扫描仪COCTS(Chinese Ocean Color and Temperature Scanner)同步观测获取的热红外遥感数据,利用海冰与不同类型云的亮度温度BT(Brightness Temperature)差异,实现不同类型云的区分和剔除。此外针对CZI及COCTS光学影像中的海冰、海水像元混合问题,通过海冰密集度进行海冰海水像元解混与海冰覆盖面积的量化估算,并利用哨兵2号卫星(Sentinel-2)高空间分辨率多光谱MSI(MultiSpectral Instrument)数据进行对比验证,以期为我国海洋光学卫星开展海冰遥感监测应用提供方法参考。

2 研究区与数据

2.1 研究区及数据源

HY-1C/D卫星先后于2018年和2020年发射,对我国近海可以实现单颗卫星1次/3d,双星组网2次/3d的重复观测。HY-1C/D卫星运行于距地782km的太阳同步回归轨道,遥感数据来自HY-1C/D卫星上搭载的CZI和COCTS载荷,其中CZI载荷在可见光—近红外波段范围内共有4个光学波段(420—890nm),空间分辨率优于50m;COCTS载荷星下点空间分辨率优于1100m,除覆盖可见光—近红外波段的8个光学波段(402—885nm),还配置有中心波长为10.8 μ m和12.0 μ m的2个热红外波段。通过对以上数据的处理,可以获得高时空分辨率的海冰空间分布和海冰密集度信息。此外,空间分辨率10m的Sentinel-2 MSI影像资料被用于海冰提取结果的验证。

渤海海冰主要位于辽东湾、莱州湾、渤海湾,其中辽东湾冰情最为严重。每年11月,辽东湾受冷空气侵袭、气温骤降、海水盐度降低等影响,出现结冰现象,且海冰由浅水区生成逐步向深水区发展(左涛等,2021),冰期通常持续3—4个月,至次年3月初消融。本研究以辽东湾(39°36'—41°6'N, 120°42'—122°12'E)为研究区,如图1所示,主要选取2021年12月17日至2022年3月3日共52景HY-1C/D卫星CZI影像,覆盖海冰生成至融化全过程。



图1 2021年12月—2022年3月辽东湾海冰真彩色合成影像 CZI 真彩色合成影像(R=650 nm, G=560 nm, B=460 nm)
Fig. 1 True color RGB images covering sea ice in Liaodong Bay from December, 2021 to March, 2022 CZI true color RGB images

2.2 数据预处理

对于海洋环境监测，海冰等异常目标对于大气校正的影响较大，因此通常只计算大气瑞利散射信号，获得瑞利校正反射率：

$$R_{re} = \pi(L_t - L_r)/F_0 \cos\theta_0 \tag{1}$$

式中， R_{re} 为瑞利校正反射率， L_t 为传感器探测的总辐亮度 ($\text{mW}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr})$)， L_r 为根据查找表，综合考虑观测几何信息（太阳天顶角、观测天顶角

和相对方位角)和海面粗糙度(主要受到风速影响)得到的瑞利散射辐亮度, F_0 为太阳入射辐照度, θ_0 为太阳天顶角。

对于CZI和COCTS数据, L1B级的辐亮度产品由国家卫星海洋应用中心提供, 本研究在此基础上根据查找表自行进行瑞利校正, 获取其 R_w 数据; 对于MSI数据, 则利用ACOLITE(版本20190326)软件对MSI L1C级数据根据式(1)的方法自行生成 R_w 数据。

对于COCTS的2个热红外波段, 则将辐亮度数据转换为亮度温度BT(Brightness Temperature)用以帮助区分海冰和云, 计算公式如下:

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)} \quad (2)$$

式中, BT为亮度温度(K), L 为辐亮度值, K_1 、 K_2 为常量, 结合普朗克常数、玻尔兹曼常数进行计算。

3 基于HY-1C/D数据的海冰识别提取

3.1 典型目标的遥感特征分异

3.1.1 卫星光谱特征

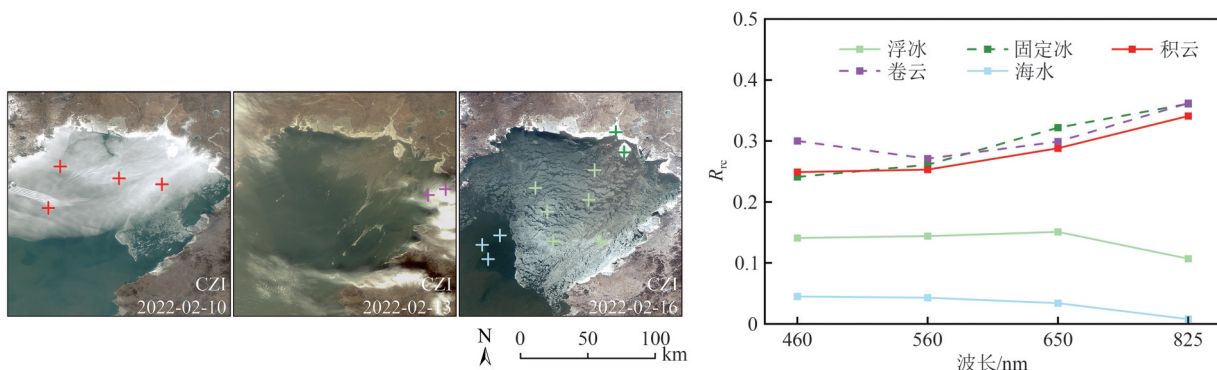
研究收集了2021年12月17日—2022年3月3日共52景辽东湾海冰HY-1C/D卫星数据(同步的CZI与COCTS影像), 覆盖了海冰生成至融化过程。图像中除海冰外, 还包含大量不同类型的云, 会对海冰识别造成较大干扰。对于海冰, 参考《海滨观测规范》的划分标准, 将其类型通过运动状态划分为固定冰和浮冰, 其中固定冰冻结于海岸或海底, 可以垂直运动, 但不能随水漂流, 浮冰能在风、流、浪的作用下随海水流动(刘眉洁, 2016)。对于云, 依据组成特点划分为积云和卷云, 其中低空积云主要由微小水滴组成, 高空卷

云主要由冰晶组成, 这2种云的亮温存在较大差异(Wang等, 2022)。辽东湾地区云的分布情况复杂, 云的有效剔除是海冰信息提取的重要前提。

以2022年2月10日、2月13日、2月16日为例, 在经过大气瑞利校正后的CZI与COCTS影像中开展光谱采样, 获取包括2种主要海冰类型(固定冰和浮冰)、2种主要云类型(卷云和积云)以及背景海水的 R_w 光谱曲线, 详见图2。可知: 背景海水在可见光—近红外波段的反射率均显著低于云和海冰, 反射率随波长增加而呈下降趋势, 在近红外波段趋近为0; 浮冰与海水具有相似的光谱变化特征, 但因结冰程度不同而呈现差异, 总体高于海水; 近岸固定冰反射率显著高于浮冰和海水, 由于含泥沙量较大, 在近红外波段呈现出明显的高反射特征; 云的光谱变化受云类型、天气情况、薄厚程度、云顶高度等因素影响, 总体而言反射率显著高于背景海水, 但易与海冰混淆。对于配置波段较少, 尤其是缺少短波红外卷云波段的CZI影像, 卷云与固定冰因反射率和光谱形态都较为接近且易造成混淆, 仅使用可见光—近红外波段难以对云进行有效剔除。

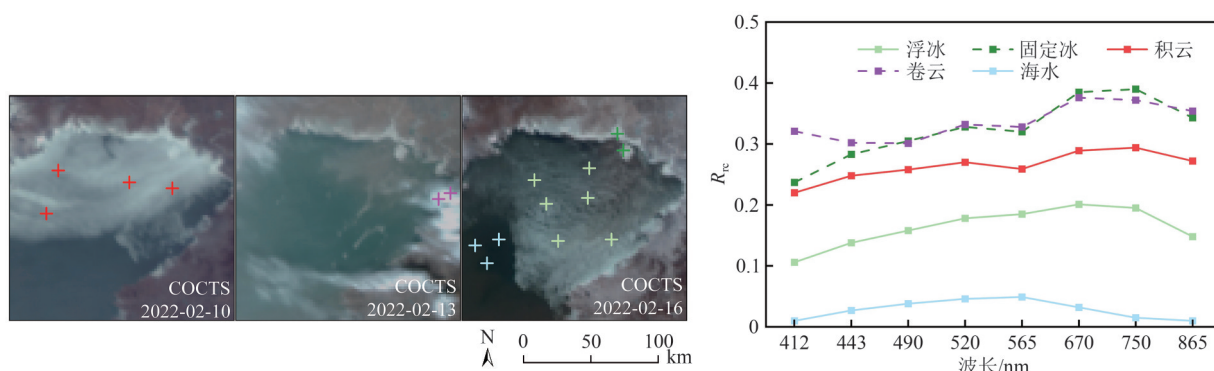
3.1.2 卫星热红外特征

COCTS影像还提供了海冰、云、海水等目标的热红外温度信息。渤海是北半球纬度最低的结冰海域, 且近岸受陆地影响大, 因此海冰与海水温度较为相近。不同类型的云由于其相态、云顶高度差异, 与海冰的亮温存在较大分异; 尤其是卷云, 主要由高空中的冰晶组成, 其与海冰亮温差异较大。对于低空积云, 与海冰的亮温差异较小, 但其在可见光—近红外波段的反射率高于其他目标, 可利用波段组合的方式进行云检测(Frey等, 2008)。



(a) CZI影像中目标采样及其 R_w 光谱

(a) Sampling of targets in CZI images and corresponding R_w spectra

(b) COCTS 影像中目标采样及期 R_{re} 光谱(b) Sampling of targets in COCTS images and corresponding R_{re} spectra

+为采样标识符

图2 HY-1C/D 卫星影像中典型目标 R_{re} 光谱Fig. 2 R_{re} spectra of typical targets in HY-1C/D images

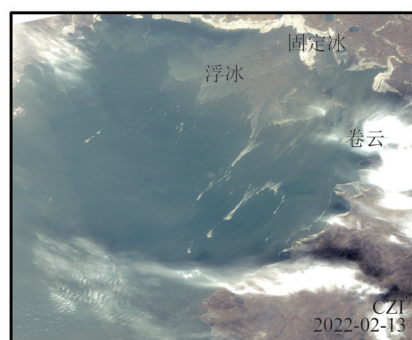
本研究提出一种结合光学和热红外波段, 综合利用亮度温度、红光和近红外波段反射率比值, 分别去除卷云和积云影响的方法。该方法适用于辽东湾地区海冰与云的特性, 具体如下:

$$BT < 267 \text{ K 或 } \frac{R_{re}(865)}{R_{re}(670)} > Y \quad (3)$$

式中, BT为亮度温度, $R_{re}(865)$ 、 $R_{re}(670)$ 分别为 COCTS 近红外和红光波段的 R_{re} 反射率, Y 为变化阈值。

图3、图4展现了不同类型海冰与卷云、积云

的亮度温度以及近红外红光波段反射率比值的差异。对于卷云, 其亮温与海冰分异明显, 在非极端天气情况下, 辽东湾海冰亮温通常高于 267 K, 而卷云的亮温则低于该值, 可以通过亮温区分卷云与海冰。对于与海冰亮温相近的积云, 其在近红外波段反射较强, 可以根据近红外与红光波段反射比进行剔除, 但该比值方法容易将泥沙含量较高, 在近红外波段同样表现为高反射特征的固定冰错误提取, 需要目视辅助判别剔除。



(a) 海冰、卷云的CZI真彩色合成影像

(a) CZI true color RGB image of sea ice and cirrus clouds

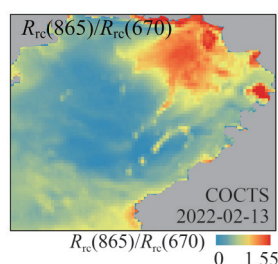
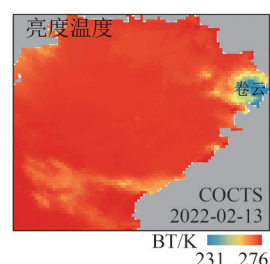
(b) COCTS 影像近红外和红光波段反射率比值分布
(b) NIR-red reflectance ratio of COCTS image(c) COCTS 影像亮度温度分布
(c) BT of COCTS image

图3 影像中卷云的识别

Fig. 3 Discrimination of cirrus clouds in images

3.2 融合光学及热红外特征的海冰识别提取

海冰的识别提取主要基于海冰与海水的反射率差异, 对影像进行陆地掩膜及云剔除后, 冰水分离是提取海冰各种要素信息的基础。由于辽东湾近岸海水背景复杂, 还会受到泥沙影响, 因此

只使用单一波段固定阈值的分割方法难以得到稳定的海冰识别结果。本研究利用如下参数, 实现基于 CZI 和 COCTS 数据的冰水分离, 计算公式如下:

$$R_{re, difference} = R_{re, blue} - \frac{\sum R'_{re, blue}}{n} \quad (4)$$

式中, $R'_{\text{re, blue}}$ 代表红光波段 R_{re} 反射率低于 0.05 的像元的蓝光波段 R_{re} 反射率, 该部分像元被确定为影像中的海水部分, 像元数为 n 。计算以上像元蓝光波段 R_{re} 反射率的平均值, 将逐个像元的蓝光波段

R_{re} 反射率 $R_{\text{re, blue}}$ 与该平均值相减, 得到代表蓝光波段冰水反射率差异的 $R_{\text{re, difference}}$ 值, 经过目视解译取阈值 0.02, 实现冰水分离。

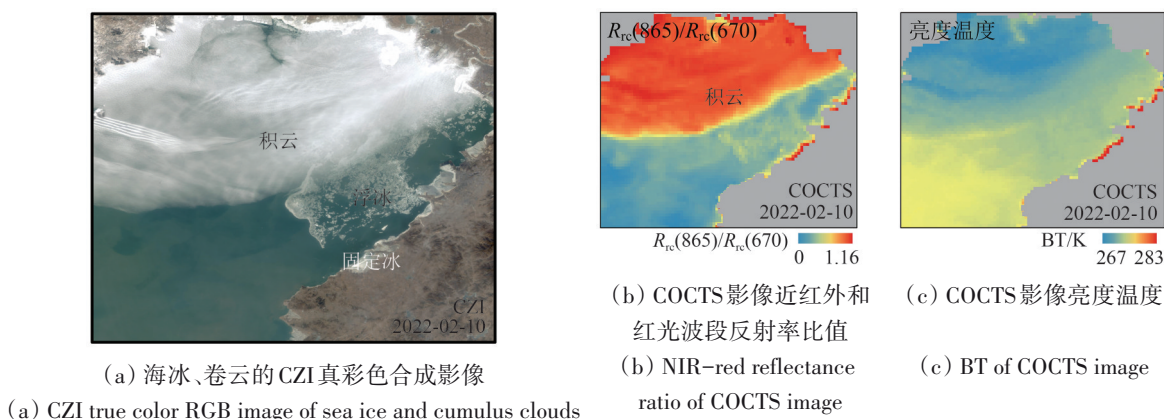


图4 影像中积云的识别

Fig. 4 Discrimination of cumulus clouds in images

综上得到海冰识别的具体工作流程如图5所示。该流程的关键点有2个：一是利用HY-1C/D卫星多源数据，剔除不同类型云（卷云和积云）的影响；二是要进行海冰覆盖海面和海水的反射差异评估，利用二者在特征波段的光谱特征差异最终实现海冰的识别提取。基于CZI影像的海冰提取结果如图6所示，2021年12月与2022年3月初分别对应海冰开始生成和冰期结束的阶段，沿岸固定冰最早出现、最迟消融，海冰分布范围最小。高时空分辨率的CZI数据能实现对辽东湾海冰整个冰期的变化监测。高空间分辨率保证CZI数据可以观测到海冰表面精细的纹理特征，以及面积较小的碎冰和海冰海水间的细小缝隙；而高时间分辨率则可以对海冰的分布范围变化过程进行有效观测。从整体识别结果看，海冰在1月中下旬及2月中旬达到盛冰期，海冰分布范围最大。当海冰部分被云遮挡时，云下海冰的反射率会受到影响，造成识别范围的偏差。特别需要指出的是，以上用于卷云识别的COCTS热红外波段空间分辨率（1100 m）远低于CZI数据（50 m），为了保证海冰识别的准确性，即减少云被误分为海冰的情况，可将云边缘混合像元都认为是云，这虽会造成在海冰和云交汇处识别出的云面积略大，但保证了海冰识别的准确性。

4 辽东湾海冰密集度与面积估算

4.1 海冰密集度估算

海冰密集度SIC（Sea Ice Concentration）指的是单位面积内海冰覆盖所占百分比，是估算海冰范围SIE（Sea Ice Extent）和海冰面积SIA（Sea Ice Area）的基础。对于光学遥感，海冰密集度相关研究主要基于中低空间分辨率遥感影像，例如当前NOAA采用的业务化海冰密集度反演算法，便是基于VIIRS数据空间分辨率为750 m的红光波段（662—682 nm）纯冰与纯水像元的反射率差异确定海冰面积所占比例得到（Liu等，2016）。为排除云的影响提高估算精度，选取6对晴空条件下的CZI和COCTS同步影像，海冰密集度估算公式如下：

$$\text{SIC}_p = \begin{cases} 0\%, & R_p \leq R_{\text{water}} \\ \frac{R_p - R_{\text{water}}}{R_{\text{ice}} - R_{\text{water}}}, & R_{\text{water}} < R_p < R_{\text{ice}} \\ 100\%, & R_p \geq R_{\text{ice}} \end{cases} \quad (5)$$

式中, SIC_p 为海冰密集度, R_p 为像元实际反射率, R_{water} 和 R_{ice} 分别代表纯水和纯冰像元的阈值反射率。 R_{water} 取值与太阳天顶角有关, 当太阳天顶角 $< 65^\circ$ 时, R_{water} 取值为 0.05, 当太阳天顶角 $> 65^\circ$ 时, R_{water} 取值为 0.07, 当 R_p 低于 R_{water} 时, 可认为是纯水像元; R_{ice} 取当前像元位置周围 50×50 个像元内出现

概率最大的海冰反射率 (Liu 等, 2016), 当 R_p 高于 R_{ice} 时, 可认为是纯冰像元; 而当 R_p 介于 R_{water} 和 R_{ice} 之间时, 则认为像元内海冰和海水混合。

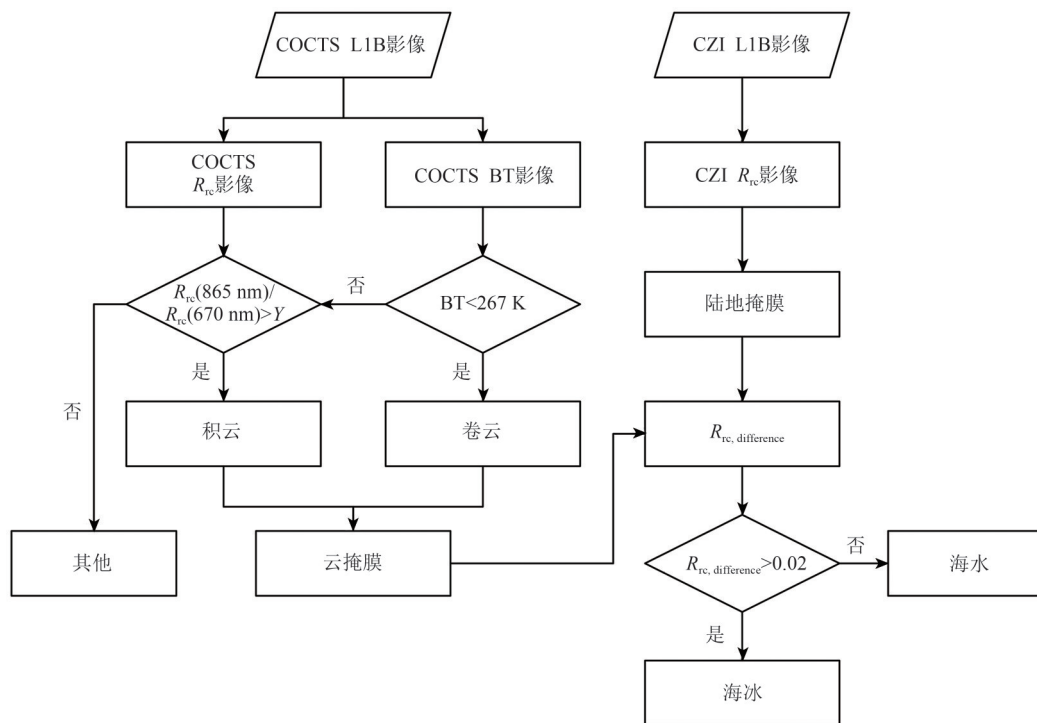


图5 HY-1C/D 卫星开展海冰识别提取应用流程

Fig. 5 Flowchart of the identification of sea ice using HY-1C/D satellites



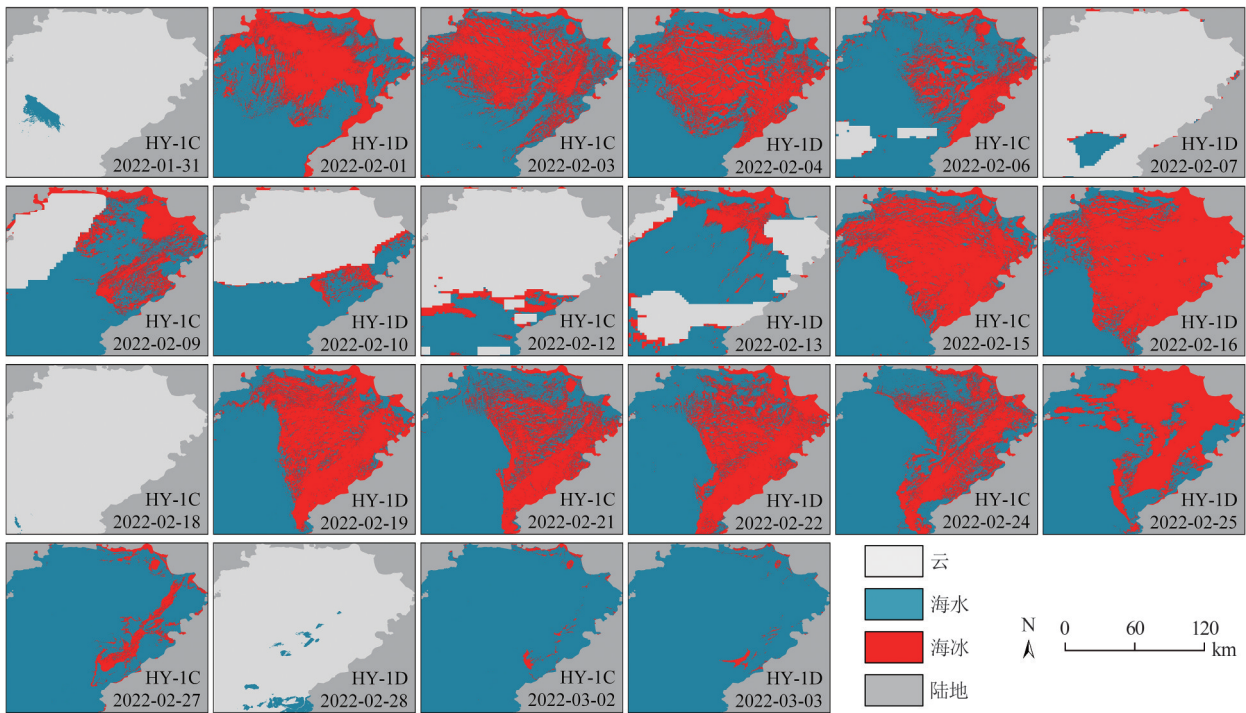


图6 基于HY-1C/D卫星数据的海冰识别提取结果
Fig. 6 Sea ice extraction results of HY-1C/D images

海冰密集度的估算结果如图7所示。可见在1100 m空间分辨率的COCTS影像中能够达到较好的冰水混合像元分解效果。对于上述影像，漂浮海冰通常难以充满整个影像像元，海冰密集度这一概念能对像元中的海冰海水所占比例进行解混，

并一定程度上解释漏检的破碎海冰对混合像元信号的贡献。此外，50 m空间分辨率的CZI影像可对海冰和海水进行更细化的区分，尤其是在冰水混合、海冰边缘、碎冰等低密集度区域，对小面积海冰的检测能力提升显著（图7）。

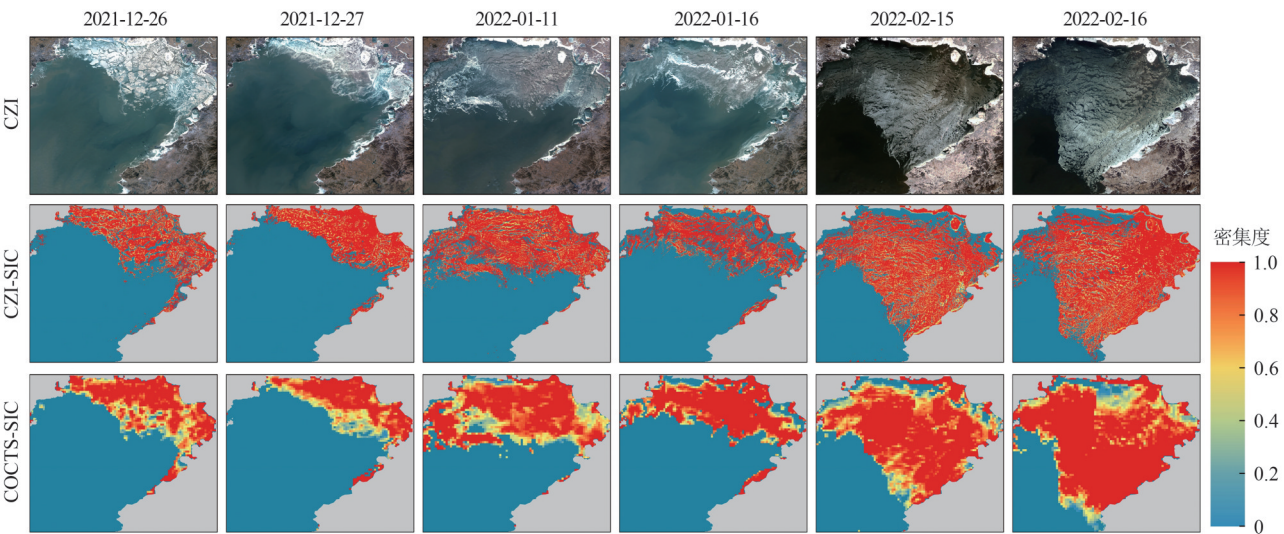


图7 基于CZI和COCTS数据海冰密集度反演结果
Fig. 7 Sea ice concentrations derived from CZI and COCTS images

4.2 海冰密集度验证及面积估算

为进一步探究不同空间分辨率光学影像中海

冰识别和面积估算的分异，选取2022年2月15日的MSI（10 m）、CZI（50 m）和COCTS（1100 m）

准同步影像, 所选影像中海冰均不受云影响, 成像时间差在 15 分钟以内, 减少了云遮挡和海冰漂移造成的不确定性。对于海冰密集度分布情况不同的区域, 不同空间分辨率的影像也呈现出不同的探测效能, 结果见图 8。由图 8 (a) — (d) 可知: 对于位于海冰边缘区域 I、II 中的大量小面积破碎海冰, COCTS 难以探测到, 而空间分辨率更高的 CZI 则探测效果较好, 与 MSI 识别结果接

近; 对于海冰内部密集区域 III、IV、V 中的浮冰间海水缝隙, COCTS 影像将其识别为海冰, CZI 影像对于微小缝隙也存在一定程度的误判。这是空间分辨率不同带来的识别差异, 对于空间分辨率较低的 COCTS 影像尤为严重; 在低密集度区域易将海冰识别为海水, 在高密集度区域则易将海水识别为海冰, 空间分辨率越低, 被误分的海冰范围越大。

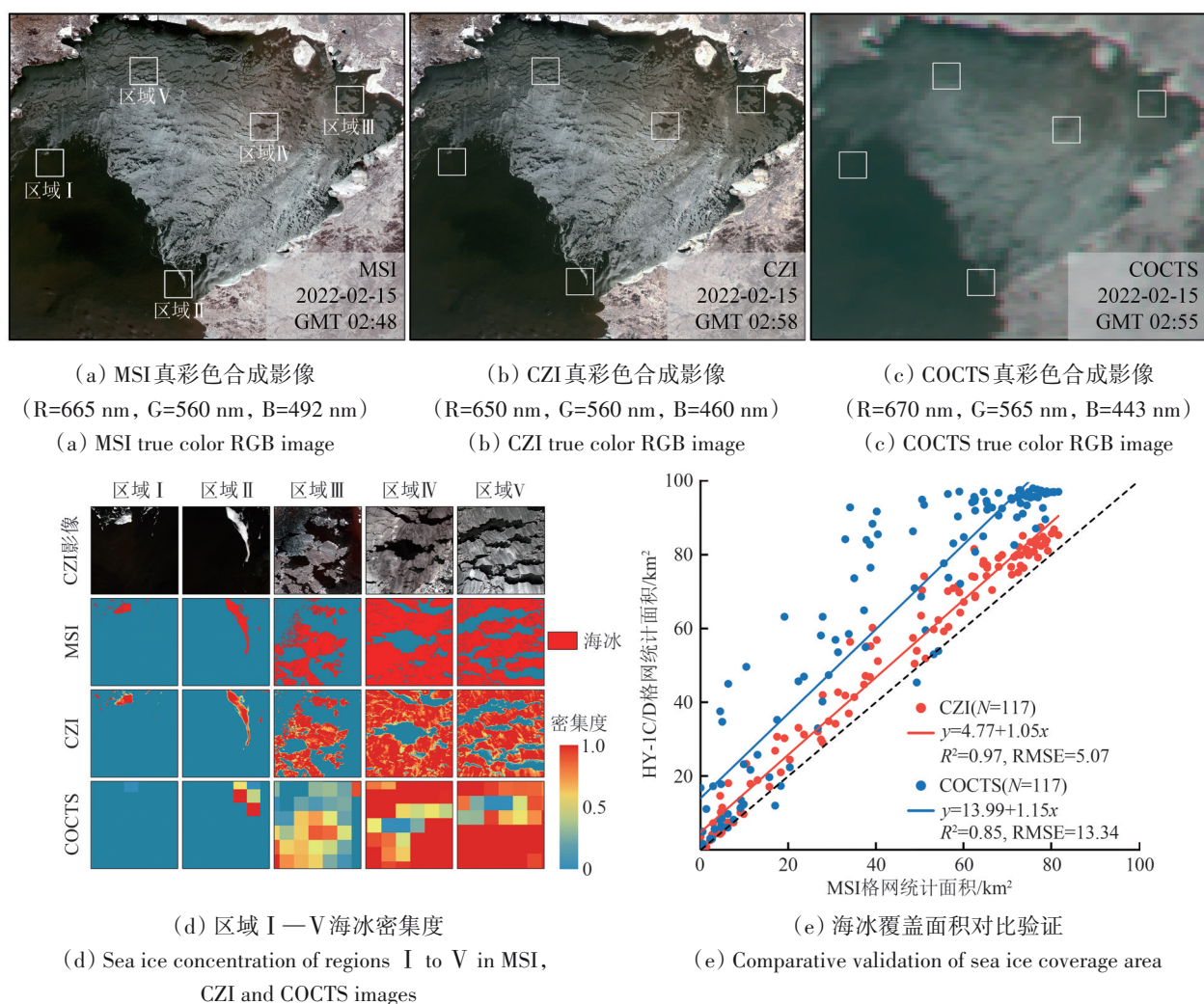


图 8 不同空间分辨率影像中的海冰密集度差异及覆盖面积对比验证

Fig. 8 Difference of sea ice concentration in multi-resolution optical images and comparative validation of sea ice coverage

在海冰密集度反演的基础上, 可对海冰覆盖面积进行估算。以空间分辨率最高的 MSI 影像中海冰识别结果作为海冰的真实覆盖范围, 认为所有海冰像元的密集度均为 1, 海冰覆盖面积即为海冰像元面积之和; 对于空间分辨率低于 MSI 影像的 CZI 和 COCTS 影像, 由于像元的混合效应, 海冰覆

盖面积计算公式如下:

$$S = A \times SIC \quad (6)$$

式中, S 为海冰覆盖面积, A 为含有海冰像元的总面积, SIC 为区域内的海冰密集度。

不同区域海冰覆盖面积估算结果验证结果见图 8。准同步影像以 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ 格网覆盖海冰

分布范围,将研究区划分为117个小区域。以MSI影像中海冰覆盖面积为真值,对CZI和COCTS影像依据式(6)计算得到的海冰面积进行对比验证,结果如图8(e)。可见:CZI和COCTS影像中海冰覆盖面积估算结果总体呈现出高估的趋势,尤其是在海冰覆盖面积较大的区域,主要由浮冰间海水缝隙被识别为海冰造成;空间分辨率较高的CZI影像与MSI影像估算结果较为接近, R^2 为0.97,精度优于COCTS影像;海冰密集度在一定程度上反映了像元的混合程度,达到冰水解混的效果,能提高海冰覆盖面积的估算精度,海冰密集度对粗分辨率影像的估算精度提升较大。

接着,对2021年12月17日—2022年3月3日共52景HY-1C/D卫星CZI影像中的海冰覆盖面积进行统计,结果如图9所示。可见:橙色部分表示该日研究区海冰受到云影响,若云遮挡海冰,估算面积仅为未受云遮挡部分,小于海冰实际覆盖面积,且存在海冰被云完全覆盖导致估算面积为0的情况。图9展示了该时间段内海冰覆盖面积的变化。可见2021年冬季辽东湾海冰于12月中旬产生,至次年3月初完全消融;盛冰期间冰情出现反复,于2022年1月中旬和2月中旬2次达到峰值,覆盖面积分别为7776.8 km²(2022年1月23日,受到云影响致结果偏大)和6681.7 km²(2022年2月16日)。

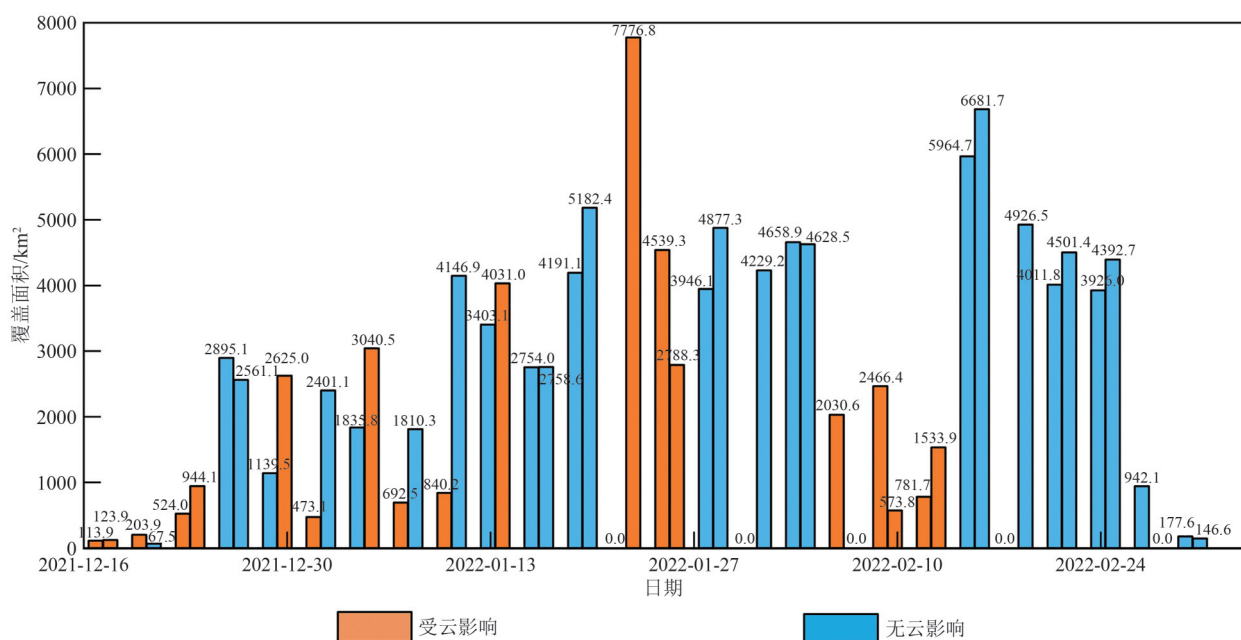


图9 辽东湾海冰覆盖面积变化

Fig. 9 Variations of sea ice coverage in Liaodong Bay

5 结论

面向中国海洋水色业务卫星HY-1C/D卫星的海冰监测业务化应用需求,本研究针对海冰识别易受云干扰的问题,以中国渤海辽东湾为研究区,收集了2021年12月至2022年3月HY-1C/D卫星的CZI和COCTS影像,系统分析海冰、海水、不同类型云的遥感响应特征,提出一种云掩膜和海冰识别提取方法;基于海冰和海水在特征波段的反射差异,识别提取海冰像元,计算海冰密集度、海冰覆盖面积等物理参数。主要结论如下:(1)由

海冰和云等典型目标在光学(可见光—近红外)和热红外波段内的影像光谱特征可知,高空由冰晶组成的卷云亮温通常远低于海冰亮温,而低空由水滴组成的积云近红外、红光波段反射率之比显著高于海冰,基于以上特性设置阈值,可实现光学影像中云混淆信息的剔除。(2)海冰密集度这一关键物理参数的计算,有助于理解混合像元效应对于不同空间分辨率数据中海冰像元信号贡献,实现较低空间分辨率光学影像中的海冰海水混合像元的解混,有效提高海冰覆盖面积的估算精度。本研究所提出方法具有较好的抗干扰能

力, 展现了 HY-1C/D 卫星数据应用于渤海海冰精细化监测的能力, 为进一步开展国产海洋光学卫星海冰厚度反演、冰间水道提取、冰面融池等研究提供参考。

志 谢 感谢国家卫星海洋应用中心 [刘建强] 研究员对本研究的指导; 感谢欧空局提供的 MSI 数据 (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> [2023-09-22]); 感谢国家卫星海洋应用中心提供的 HY-1C/D 卫星数据 (<http://www.nsoas.org.cn/> [2023-09-22])。

参考文献 (References)

- Bai S, Liu Q Z, Li H and Wu H D. 1999. Sea ice in the Bohai sea of China. *Marine Forecasts*, 16(3): 1-9 (白珊, 刘钦政, 李海, 吴辉璇. 1999. 渤海的海冰. *海洋预报*, 16(3): 1-9) [DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.1999.03.001]
- Cavalieri D J, Gloersen P and Campbell W J. 1984. Determination of sea ice parameters with the NIMBUS 7 SMMR. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 89(D4): 5355-5369 [DOI: 10.1029/JD089iD04p05355]
- Cavalieri D J, Markus T, Hall D K, Gasiewski A J, Klein M and Ivanoff A. 2006. Assessment of EOS Aqua AMSR-E arctic sea ice concentrations using landsat-7 and Airborne Microwave Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(11): 3057-3069 [DOI: 10.1109/tgrs.2006.878445]
- Cheng X, Hui F M, Pang X P and Li L L. 2021. Arctic Sea Ice Remote Sensing: Methods and Application. Beijing: China Ocean Press: 21-26 (程晓, 惠凤鸣, 庞小平, 李乐乐. 2021. 北极海冰遥感反演方法及应用. 北京: 海洋出版社: 21-26)
- Chi J, Kim H C, Lee S and Crawford M M. 2019. Deep learning based retrieval algorithm for Arctic sea ice concentration from AMSR2 passive microwave and MODIS optical data. *Remote Sensing of Environment*, 231: 111204 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.023]
- Comiso J C. 1986. Characteristics of Arctic winter sea ice from satellite multispectral microwave observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C1): 975-994 [DOI: 10.1029/JC091iC01p00975]
- Drüe C and Heinemann G. 2004. High-resolution maps of the sea-ice concentration from MODIS satellite data. *Geophysical Research Letters*, 31(20): L20403 [DOI: 10.1029/2004gl020808]
- Frey R A, Ackerman S A, Liu Y H, Strabala K I, Zhang H, Key J R and Wang X. 2008. Cloud detection with MODIS. Part I: improvements in the MODIS cloud mask for collection 5. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25(7): 1057-1072 [DOI: 10.1175/2008jtecha1052.1]
- Hall D K, Riggs G A, Salomonson V V, Barton J S, Casey K, Chien J Y L, DiGirolamo N E, Klein A G, Powell H W and Tait A B. 2001. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the MODIS snow and sea ice-mapping algorithms. NASA [https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod10.pdf]
- Karvonen J. 2017. Baltic sea ice concentration estimation using SENTINEL-1 SAR and AMSR2 microwave radiometer data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(5): 2871-2883 [DOI: 10.1109/tgrs.2017.2655567]
- Liu J C, Liu J Q, Ding J and Lu Y C. 2022. A refined imagery algorithm to extract green tide in the Yellow Sea from HY-1C satellite CZI measurements. *Haiyang Xuebao*, 44(5): 1-11 (刘锦超, 刘建强, 丁静, 陆应诚. 2022. HY-1C 卫星 CZI 载荷的黄海绿潮提取研究. *海洋学报*, 44(5): 1-11) [DOI: 10.12284/j.issn.0253-4193.2022.5.hyx202205001]
- Liu J Q, Lu Y C, Ding J, Suo Z Y and Liang C. 2022. Oil spills in China Seas revealed by the national ocean color satellites. *Chinese Science Bulletin*, 67(33): 3997-4008 (刘建强, 陆应诚, 丁静, 锁子易, 梁超. 2022. 中国海洋水色业务卫星揭示我国近海溢油污染状况. *科学通报*, 67(33): 3997-4008) [DOI: 10.1360/TB-2021-0992]
- Liu J Q, Ye X M, Song Q J, Ding J and Zou B. 2023. Products of HY-1C/D ocean color satellites and their typical applications. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(1): 1-13 (刘建强, 叶小敏, 宋庆君, 丁静, 邹斌. 2023. HY-1C/D 海洋水色卫星产品体系及其典型应用. *遥感学报*, 27(1): 1-13) [DOI: 10.11834/jrs.20235002]
- Liu M J. 2016. Research on the Sea Ice Classification and Thickness Detection with High-Resolution and Polarimetric SAR Data. Qingdao: China University of Petroleum (East China) (刘眉洁. 2016. 基于高分辨率极化 SAR 的海冰分类和厚度探测方法研究. 青岛: 中国石油大学(华东)) [DOI: CNKI:CDMD:1.1018.702734]
- Liu Q Z, Huang J Y, Bai S and Wu H D. 2004. Studies on the causation of sea ice decadal variation in the Bohai Sea of China. *Acta Oceanologica Sinica*, 26(2): 11-19 (刘钦政, 黄嘉佑, 白珊, 吴辉璇. 2004. 渤海冬季海冰气候变异的成因分析. *海洋学报*, 26(2): 11-19) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-4193.2004.02.002]
- Liu Y, Key K, Mahoney R. 2016. Sea and freshwater ice concentration from VIIRS on Suomi NPP and the future JPSS satellites. *Remote Sensing*, 8(6), 523.
- Riggs G A, Hall D K and Ackerman S A. 1999. Sea ice extent and classification mapping with the moderate resolution imaging spectroradiometer airborne simulator. *Remote Sensing of Environment*, 68(2): 152-163 [DOI: 10.1016/s0034-4257(98)00107-2]
- Shen Y F, Liu J Q, Ding J, Jiao J N, Sun S J and Lu Y C. 2020. HY-1C COCTS and CZI observation of marine oil spills in the South China Sea. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 24(8): 933-944 (沈亚峰, 刘建强, 丁静, 焦俊男, 孙绍杰, 陆应诚. 2020. 海洋一

- 号C星光学载荷对海面溢油的识别能力分析. 遥感学报, 24(8): 933-944 [DOI: 10.11834/jrs.20209475]
- Shi P J, Gu W, Xie F, Yuan Y and Jing G F. 2003. Spatial characteristics of sea ice resources of Liaodong gulf in winter. *Resources Science*, 25(3): 2-8 (史培军, 顾卫, 谢锋, 袁艺, 景贵飞. 2003. 辽东湾冬季海冰资源量的空间分布特征. 资源科学, 25(3): 2-8) [DOI: 10.3321/j.issn:1007-7588.2003.03.001]
- Su H, Wang Y P, Xiao J and Li L L. 2013. Improving MODIS sea ice detectability using gray level co-occurrence matrix texture analysis method: a case study in the Bohai Sea. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 85: 13-20 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.07.010]
- Sun S, Su J and Shi P J. 2011. Features of sea ice disaster in the Bohai Sea in 2010. *Journal of Natural Disasters*, 20(6): 87-93 (孙劭, 苏洁, 史培军. 2011. 2010年渤海海冰灾害特征分析. 自然灾害学报, 20(6): 87-93) [DOI: 10.13577/j.jnd.2011.0615]
- Suo Z Y, Lu Y C, Liu J Q, Ding J, Xing Q G, Yin D Y, Xu F F and Liu J C. 2022. HY-1C ultraviolet imager captures algae blooms floating on water surface. *Harmful Algae*, 114: 102218 [DOI: 10.1016/j.hal.2022.102218]
- Suo Z Y, Lu Y C, Liu J Q, Ding J, Yin D Y, Xu F F and Jiao J N. 2021. Ultraviolet remote sensing of marine oil spills: a new approach of Haiyang-1C satellite. *Optics Express*, 29(9): 13486-13495 [DOI: 10.1364/oe.423702]
- Swart N. 2017. Natural causes of Arctic sea-ice loss. *Nature Climate Change*, 7(4): 239-241 [DOI: 10.1038/nclimate3254]
- Wang Q, Lu Y C, Hu C M, Hu Y X, Zhang M W, Jiao J N, Xiong J K, Liu Y X and Zhang Z K. 2022. Discrimination of biomass-burning smoke from clouds over the ocean using MODIS measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60: 4102010 [DOI: 10.1109/tgrs.2021.3084042]
- Wiebe H, Heygster G and Markus T. 2009. Comparison of the ASI ice concentration algorithm with landsat-7 ETM+ and SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(9): 3008-3015 [DOI: 10.1109/tgrs.2009.2026367]
- Wu L T, Wu H D, Li W B, Liu Q Z, Zhang Y F, Liu Y and Bai S. 2005. Sea ice drifts in response to winds and tide in the Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 27(5): 15-21 (吴龙涛, 吴辉斌, 李万彪, 刘钦政, 张蕴斐, 刘煜, 白珊. 2005. 渤海冰漂移对海面风场、潮流场的响应. 海洋学报, 27(5): 15-21) [DOI: 10.3321/j.issn:0253-4193.2005.05.003]
- Zang J X, Liu J Q, Yin X B, Zeng T and Zhou L. 2022. Study on sea ice classification of HY-1C satellite coastal zone imager images based on the optimal feature set. *Haiyang Xuebao*, 44(5): 35-46 (臧金霞, 刘建强, 殷晓斌, 曾韬, 周磊. 2022. 基于最优特征集的HY-1C卫星海岸带成像仪影像海冰分类方法研究. 海洋学报, 44(5): 35-46) [DOI: 10.12284/hyxb2022021]
- Zhang X, Dierking W, Zhang J and Meng J M. 2015. A polarimetric decomposition method for ice in the Bohai Sea using C-band Pol-SAR data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(1): 47-66 [DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2356552]
- Zuo T, Guo Y D, Liu B X and Wang C X. 2021. Characteristics analysis of the sea ice area based on MODIS satellite data in Liaodong Bay and its correlation with air temperature. *Marine Forecasts*, 38(5): 47-52 (左涛, 郭玉娣, 刘彬贤, 王彩霞. 2021. 基于MODIS数据的辽东湾海冰面积特征分析及与气温关系的探讨. 海洋预报, 38(5): 47-52) [DOI: 10.11737/j.issn.1003-0239.2021.05.007]

Identification and estimation of sea ice in Liaodong Bay using HY-1C/D satellite images

LI Ling¹, SUO Ziyi^{1,2}, SHI Lijian³, WANG Qing^{1,4}, JIAO Junnan¹, TANG Jun¹, LU Yingcheng¹

1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Collaborative Innovation Center of South China Sea Studies, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. National Satellite Ocean Application Center, Beijing 100081, China;

4. College of Harbour and Coastal Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China

Abstract: Sea ice represents a typical natural phenomenon that affects the marine and coastal environment in North China; thus, it is the focus of marine environment monitoring. Timely and accurate remote sensing data about sea ice is crucial for emergency treatment and recovery. Various remote sensing technologies have been applied to sea ice monitoring, with Sea Ice Concentration (SIC) serving as a key parameter indicating the spatial distribution characteristics of sea ice. Among these, optical remote sensing is frequently used. However, sea ice and different types of clouds (i. e., cirrus and cumulus) have similar reflection characteristics in Visible and Near-Infrared (VNIR)

wavelengths, thus posing great difficulties for the optical extraction of sea ice. Haiyang-1C/D (HY-1C/D) satellites are the first operational ocean color satellites of China, and both of them are equipped with a Coastal Zone Imager (CZI) and the Chinese Ocean Color and Temperature Scanner (COCTS), which can technically support the fine and dynamical monitoring of sea ice due to their wide coverage and high spatiotemporal resolution. In addition to the VNIR bands (412—865 nm), the onboard COCTS sensor can interpret the thermal characteristics of targets, which would help distinguish between sea ice and clouds. In this study, Liaodong Bay of the Bohai Sea is selected as the study area, and synchronous CZI and COCTS images covering Liaodong Bay from December 2021 to March 2022 are collected and analyzed. The main objective of this study is to verify the feasibility of HY-1C/D satellites to detect sea ice, especially the image characteristics of typical targets (i.e., sea ice, seawater and clouds) in optical (i.e., VNIR) and thermal infrared bands. Using the Brightness Temperature (BT) difference between sea ice and cloud in the thermal infrared band of COCTS, sea ice and cirrus clouds can be preliminarily separated. However, the difference in BT between sea ice and cumulus clouds is minimal, which can be further separated in accordance with the NIR-red reflectance ratio. In addition to the sea ice identification, the application of SIC can effectively unmix ice-water pixels and improve the estimation accuracy of the sea ice coverage area for optical images with different spatial resolutions. The above results can confirm the capability of HY-1C/D satellites in sea ice detection. Therefore, HY-1C/D satellites can provide reliable data and improve the monitoring of sea ice.

Key words: HY-1C/D satellites, sea ice, spectral features, brightness temperature, cloud detection, Sea Ice Concentration (SIC)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFC2803301); National Natural Science Foundation of China (No. 42371380, 42071387)