

融合悬浮颗粒物自适应分区的渤海一年生海冰自动检测算法

邱华昌, 宫兆宁, 赵宇欣, 伍洪委

1. 首都师范大学 三维信息获取与应用教育部重点实验室, 北京 100048;
2. 首都师范大学 水资源安全北京实验室, 北京 100048;
3. 首都师范大学 城市环境过程和数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048

摘要: 一年生海冰是中纬度气候变化的重要指示因子, 其中厚度小于 10 cm 的薄冰对气候变化的响应尤为显著。针对渤海高动态悬浮泥沙海域中海冰光谱波动性强、反射率变化显著、薄冰检测难度大的问题, 本文提出一种基于光谱形状特征的自适应分区方法, 将渤海动态划分为低、高悬浮颗粒物浓度区域。分区后, 区域内悬浮颗粒物浓度的异质性显著降低, 有效提升了厚度 10 cm 以下薄冰的可检测性。在此基础上, 采用单峰阈值法自动确定分割阈值, 并融合边缘特征以增强算法的稳健性。将该方法应用于 MODIS、Sentinel-2、GF-1、Sentinel-3 及 GOCI 等 5 种光学影像数据, 并利用自然资源部北海预报中心发布的 2017 年—2019 年共 12 景海冰解译图及高分辨率遥感影像样本点进行精度验证。结果表明: 该算法分类精度超过 90%, 适用于多种光学传感器。通过光谱线性混合模型模拟实验进一步证实, 该算法能在高动态悬浮泥沙海域有效识别密集度高于 30% 的一年生海冰。本研究为多源光学遥感数据的业务化海冰监测提供了有效方法支撑。

关键词: 渤海, 一年生海冰, 多光学传感器影像, 悬浮颗粒物浓度, CCI 指数, 自适应分区, 单峰阈值法, 自动检测算法

中图分类号: P2

引用格式: 邱华昌, 宫兆宁, 赵宇欣, 伍洪委. 2025. 融合悬浮颗粒物自适应分区的渤海一年生海冰自动检测算法. 遥感学报, 29(12): 3475–3492

Qiu H C, Gong Z N, Zhao Y X and Wu H W. 2025. Automatic detection algorithm of annual sea ice in Bohai Sea incorporating adaptive partitioning of suspended particulate matter. National Remote Sensing Bulletin, 29(12): 3475–3492[DOI: 10.11834/jrs.20254378]

1 引言

气候变化是全人类面临的挑战。近 30 年来, 全球“霸王级”寒潮事件频发, 海冰作为海—气—冰之间相互作用的关键环境因子, 是全球气候变化的指示器与放大器 (Stroeve 和 Notz, 2018; Walsh, 2014), 也是北半球气候系统稳定的重要基础之一, 尤其对于人口高度密集的中纬度沿海地区, 海冰的生消运移过程直接影响区域的水量平衡和能量平衡 (Budikova, 2009)。特别是一年生季节性海冰对气候变化高度敏感, 主要出现在巴伦海 (Tian 等, 2022)、波罗的海 (Yu Karpechko 等, 2015)、

鄂霍次克海 (Paik 等, 2017) 和渤海海域 (Yan 等, 2022)。

海冰是渤海生态环境的重要组成部分, 海冰形成初期, 主要受极端天气 (寒潮次数、强度和频率) 的影响, 目前全球气候变化正处于波动的高峰期 (AghaKouchak 等, 2020), 冰情随机波动的频率和幅度会大幅增加, 也就增加了海冰的风险程度。渤海是全球纬度最低的结冰海域, 通常年份冰期可跨 4 个月, 覆盖渤海 40% 的海域面积, 但 3.5 级以上极端冰情偶有发生 (Jiao 等, 2020; Yan 等, 2019)。如 1979 年 (5.0 级) 特大冰封期整个渤海被海冰覆盖, 2010 年 1 月中下旬出现近 30 年同

收稿日期: 2024-09-01; 预印本: 2025-06-20

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 41971381, 42071396); 国家重点研发计划 (编号: 2017YFC0505903)

第一作者简介: 邱华昌, 研究方向为海冰遥感。E-mail: qiu_huachang@163.com

通信作者简介: 宫兆宁, 研究方向为湿地遥感。E-mail: gongzhn@163.com

期最严重冰情,直接经济损失达9.3亿美元(Gu等, 2013; Li等, 2021; Liu等, 2013; Su等, 2012)。海冰作为渤海海域的控制性环境荷载,对海上污染物的迁移转化行为、关键物种栖息生境的演变和海上突发事故响应产生不同程度的直接影响,进而影响渤海的污染防治、生态保护、风险防范等重要任务。海冰分布范围是进行冰情监测的最直观、也是最重要的指标。长时序、高质量的海冰冰期、面积等不同时空尺度的综合观测数据,可用于冰情的演变分析、评估预测,完善海冰对气候变化的响应机制(Bai等, 2011; Ouyang等, 2019; Yan等, 2017)。

目前利用卫星遥感进行海冰监测主要可以分为微波、雷达遥感监测和光学遥感监测。光学遥感影像易受云雾影响,但有着价格低廉、数据源丰富、时间分辨率高等优势,成为海冰监测的重要数据源。渤海海冰为季节性一年生海冰,冰期较短,且冰情发展迅速,因此MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)、海洋系列卫星等高时间分辨率遥感影像成为渤海海冰业务化监测的主要数据源。高分系列、Sentinel-2、Sentinel-3等中高空间分辨率影像则在海冰精细化监测有着重要作用。因此,充分发挥多源遥感数据的优势对于渤海海冰的高质量监测具有重要作用(Han等, 2019; Pico等, 2016; Yu等, 2019; Zeng等, 2016)。

不同于极地区域,渤海受到黄河、辽河、海河等40条入海径流影响,海水悬浮颗粒物SPM(Suspended Particulate Matter)浓度远超其他海域,高动态变化的悬浮泥沙也导致了海冰与海水光谱的复杂性,这增加了渤海海冰范围精确检测的困难性。针对渤海的高动态悬浮泥沙的特点,国内外学者进行了一系列研究。Su等(2015)使用了MODIS的温度图像以及灰度共生矩阵提取的纹理图像,利用支持向量机进行图像分类,有效的提高了在渤海的浊度较高区域的海冰的检测。Liu等(2015)提出了一种光学图像和合成孔径雷达图像融合的方法,将中巴地球资源卫星影像转换到HIS色彩空间,同时利用小波变换提取雷达影像的纹理信息,然后使用HIS图像与纹理信息的图像来提取海冰,有效的提高了图像判读识别海冰的能力。Su等(2019)使用了Sentinel-3 OLCI数据的红与近红等4个波段建立了增强归一化差异海冰信息指数,能够减小浊度对海冰提取的影响。Li等

(2020)基于MODIS数据使用多端元约束方法求解海冰丰度以此提取海冰范围,该方法能够一定程度上解决悬浮泥沙误判的问题。臧金霞等(2022)基于海洋一号卫星海岸带成像仪影像,利用光谱和纹理特征构建特征集,并结合支持向量机方法进行海冰分类。从以上研究可以看出,机器学习、代数变换等方法是海冰检测的主要方法,这些方法能够在特定卫星影像下在一定程度上解决渤海悬浮泥沙海水误判的问题,但同时有着需要人工选择样本点、计算复杂、难以实现自动化的缺点。

渤海海冰具有敏感度高、变化速度快、年际变化大的特点,分析海冰需要更加密集时间尺度的海冰面积数据,这就需要一种能够对大量数据进行批量处理的快捷、高效、精准的海冰自动化提取方法。阈值分割方法具有快速、高效的特点,广泛应用于海冰提取(Su等, 2013, 2019; Yuan等, 2021)。然而使用阈值分割方法应用于渤海海冰提取面临两个问题:首先是时相、传感器、成像质量等差异,稳定阈值的确定仍然是此类方法的一个首先要解决的问题。基于渤海区域特点改进阈值分割提取方法和自动确定稳定的分割阈值是实现快速、高效、精准、自动化海冰提取方法的关键。本文基于光学传感器常用四波段,提出一种基于悬浮泥沙浓度的海洋自适应分区海冰检测算法,该算法可适用于Sentinel-2、GF-1、Sentinel-3、MODIS等影像,并且算法可实现全自动化,能够实现批量海冰检测。

2 研究区概况和数据

2.1 研究区概况

渤海(37°07'N—41°0'N和117°35'E—121°10'E)是中国的部分封闭海域,三面被陆地包围,东部连接黄海海域,包括3个海湾:辽东湾(北部)、渤海湾(西部)、莱州湾(南部)(图1)。渤海总面积约78000 km²,东西宽约346 km,南北长约550 km,海岸线全长约3800 km。水深较浅,平均水深只有18 m(Su和Wang, 2012),周围有黄河、辽河、滦河等四十条入海径流,是中国海水盐度最低的海域(Yan等, 2020)。该海域处于典型的季风气候带,冬季受欧亚大陆高压控制,北风和西北风占主导地位,天气干冷。每当强冷空气入侵时,往往伴随着大风降雪和气温剧降等过程。上

述特殊的地理环境和气候条件均为该海域的海水结冰提供了充分必要的条件。海冰经常会对渔港、码头、浅海滩涂养殖和海上基础设施造成重大影响（Gu 等，2013；Guo 等，2019；Xu 等，2019）。随着该地区海水养殖业的经济规模逐渐扩大，海冰对生产活动的影响更加显著。

每年12月到次年3月份，渤海各个海区都会出现不同程度的冰情（Ning 等，2009），冰期大约持续四个月。渤海的海冰为一年生海冰，厚度一般在30 cm以下（Xie 等，2006）。依据国家标准《海洋观测规范》（GB/T 14914.2-2019）以及世界气象组织发布的《Sea ice Information and Services》，渤海海冰可分为：初生冰（New ice）、冰皮（Ice rind）、尼罗冰（Nilas）、灰冰（Grey ice）、灰白冰（Grey-white ice）、白冰（white-ice）。当气温下降至冰点后，初生冰开始出现；随着气温下降，海冰厚度进一步增加，冰皮、尼罗冰开始出现，厚度在10 cm以下；尼罗冰不断受到重叠挤压，逐渐形成灰冰、灰白冰，海冰厚度为10—30 cm。下一个发展阶段被称为第一年冰，并被细分为薄、中、厚3类。

一年薄冰也被称为白冰，是由灰白冰发展而成，表面粗糙，多呈白色，厚度为30—70 cm。各种类型海冰表面特征及厚度数据见表1。依据不同一年生海冰类型的表面特征对遥感影像进行解译，可获得一年生海冰的光谱样本。

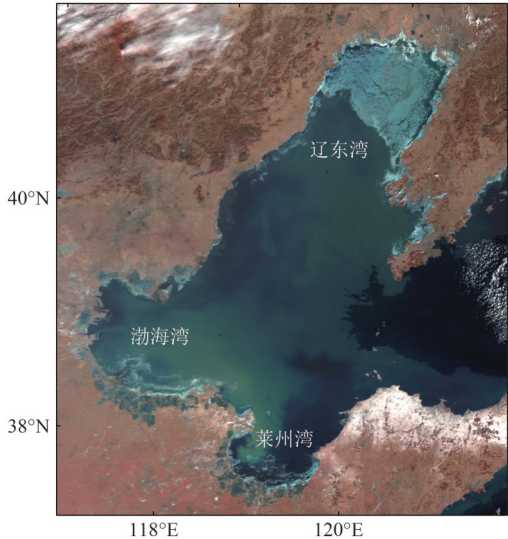


图1 渤海概况图
Fig. 1 Overview of the Bohai Sea

表1 海冰冰型特征
Table1 Froms and features of ice

浮冰冰型	符号	特征
初生冰(New ice)	N	海冰初始阶段的总称。由海水直接冻结或雪降至低温海面未被融化而生成的,多呈针状、薄片状、油脂状或海绵状。初生冰比较松散,只有当它聚集漂浮在海面附在礁石及其他物体上时才具有一定的形状。有初生冰存在时,海面反光微弱,无光泽,遇风不起波纹
冰皮(Ice rind)	R	由初生冰冻结或在平静海面上直接冻结而成的冰壳层,表面平滑、湿润而有光泽,厚度5 cm左右,能随风起伏,易被风浪折碎
尼罗冰(Nilas)	Ni	厚度小于10 cm的有弹性的薄冰壳层表面无光泽,在波浪和外力作用下易于弯曲和破碎,并能产生“指状”重叠现象
灰冰(Grey ice)	G	厚度为10—15 cm的冰盖层,由尼罗冰发展而成,表面平坦湿润,多呈灰色。比尼罗冰弹性小,易被涌浪折断,受到挤压时多发生重叠
灰白冰(Grey-white ice)	Gw	厚度为15—30 cm的冰层,由灰冰发展而成,表而比较粗糙,呈灰白色,受到挤压时大多形成冰脊
白冰(White ice)	W	厚度为大于30 cm的冰层,由灰白冰发展而成,表面粗糙,多呈白色

2.2 数据源

Sentinel-2是高分辨率多光谱成像卫星，携带一枚多光谱成像仪MSI（Multi-Spectral Imaging），用于陆地监测，可提供植被、土壤和水覆盖、内陆水路及海岸区域等图像，分为2A和2B两颗卫星。卫星高度为786 km，可覆盖13个光谱波段，幅宽达290 km。地面分辨率分别为10 m、20 m和60 m、一颗卫星的重访周期为10 d，两颗互补，重

访周期为5 d。本文所用数据为GEE（Google Earth Engine）中ESA（European Space Agency）提供的Level-C级数据，数据为经过正射校正和亚像元级几何校正后的大气表观反射率产品。

Sentinel-3搭载了OLCI（Ocean and Land Colour Instrument）传感器，包含21个光谱波段，中心波长范围在0.4—1.02 μm，空间分辨率为300 m，每2天覆盖全球范围。本文使用的Sentinel-3数据来源为ESDS（Earth Science Data Systems），数据为经过几

何校正、大气校正后的L2级数据。

高分一号（GF-1）发射于2013年4月，搭载了两台2 m分辨率全色/8 m分辨率多光谱相机，4台16 m分辨率多光谱相机。2 m高分辨率实现大于60 km成像幅宽，16 m分辨率实现大于800 km成像幅宽，适应多种空间分辨率、多种光谱分辨率、多源遥感数据综合需求，满足不同应用要求。本文使用的GF-1数据为16 m分辨率的多光谱相机，并经过几何校正、大气校正处理为表面反射率数据。本文使用的数据来源于中国资源卫星应用中心发布的L1A级数据，并利用PIE软件进行几何校正和大气校正。

COMS（Communication Ocean and Meteorological Satellite）搭载了GOCI（Geostationary Ocean Color Imager）传感器，于2010年成功发射，作为世界首颗静止轨道海洋遥感卫星，它具有覆盖可见光到近红外范围的8个波段，500 m空间分辨率，1 h的时间分辨率，覆盖范围2500 km×2500 km，涵盖了中国的黄渤海。优越的性能，特别是一天8景的高时间分辨率使其在海洋环境检测、渔业和航运等领域有着广泛的应用。本文使用数据来源为

NASA的ESDS，数据利用韩国海洋卫星中心发布的GDPS（GOCI Data Processing System）数据处理系统将L1B级数据处理为L2级地表反射率数据。

Terra和Aqua卫星搭载了MODIS传感器，由美国地球观测系统计划开发。MODIS数据的空间分辨率随波段不同而变化，分别为250 m（波段1—2）、500 m（波段3—7）和1000 m（波段8—36），扫描宽度为2330 km，广泛应用于地理学、环境监测、气候变化研究等多个领域。本文使用的MODIS数据来源为GEE中的表面反射率产品MOD09GA，空间分辨率为500 m。

Planet卫星能够实现每天覆盖一次的高时间分辨率，并且能够拍摄地面分辨率为3 m的多光谱影像，有红、绿、蓝、近红外等4个波段。本文使用Planet卫星影像获取样本点，作为小区域精度验证的数据。

表2为以上传感器影像的详细数据，从中可以看出这些传感器影像波段组成的共同点为都有蓝、绿、红、近红外这4个波段。因此，发展一种适合多种传感器影像的海冰自动提取算法，是实现充分利用多源遥感数据进行海冰检测的关键。

表2 各类型影像参数
Table 2 Parameters of various types of images

影像类型	分辨率/m	重访周期/d	波段数	蓝/nm	绿/nm	红/nm	近红外/nm
Sentinel-2	10	5	13	494.35	559.5	664.75	834.05
GF-1	16	4	4	485	555	660	830
Sentinel-3	300	2	21	490	560	665	865
MODIS	500	1	7	469	555	645	858.5
GOCI	500	8次/1	8	490	555	660	865
Planet	3	1	4	485	545	630	820

2.3 验证数据及样本数据

为了验证本文方法的精确度，本文选择使用2017年—2019年12景无云日期的海冰遥感解译图作为渤海海冰验证数据，此数据来源于自然资源部北海预报中心，数据基于250 m分辨率的MODIS通过目视解译和人机交互制作而成。

为了验证算法对不同传感器影像的适用性，考虑到高分辨率影像幅宽的大小，本文选择黄河口附近海域作为典型区对比。黄河口附近海域是渤海中SPM变动最为剧烈的区域，且分布有各种类型的一年生海冰。验证样本数据则基于2018年1月12日Planet影像以及表1的冰型表面特征进行

解译，并根据冰型的厚度区间将解译样本分为厚度10 cm以下海冰（初生冰、冰皮、尼罗冰）、厚度10 cm以上海冰（灰冰、灰白冰、白冰）、海水和陆地4类。其中厚度10 cm以下海冰样本128个，厚度10 cm以上海冰样本86个，海水样本180个，陆地样本200个。

为探究高动态SPM下冰水反射率与SPM之间的关系，本文选择使用周媛等（2018）基于Landsat 8提出的SPM反演模型，并经Li等（2019）验证同样适用于Sentinel-2的黄河口SPM反演，如式（1）—（3）所示。在Sentinel-2影像中选择70个不同SPM浓度下冰水样本对，每个样本对包含海冰样本以

及距离海冰最近的海水样本。

$$\lg(\text{SPM}) = 0.8079X_1 + 23.062X_2 + 0.6258 \quad (1)$$

$$X_1 = \frac{R_{rs}(665)}{R_{rs}(560)} \quad (2)$$

$$X_2 = R_{rs}(865) \quad (3)$$

式中, $R_{rs}(560)$, $R_{rs}(665)$, $R_{rs}(865)$ 分别是波长为 560 nm, 665 nm 和 865 nm 的遥感反射率。

3 研究方法

图2为一年生海冰检测算法流程图, 主要包括5个步骤, 即步骤1, 海陆分离; 步骤2, 10 cm 以上厚冰提取; 步骤3, 海洋自适应分区; 步骤4, 分

区阈值自动确定; 步骤5, 光谱及空间特征的联合检测。通过选择特定波段或者光谱指数来执行这5个步骤。其中, 检测算法的关键步骤之一是在近岸或河口附近SPM变化较大的10 cm 以下薄冰的精准提取。由于含沙水和薄冰的光谱相似性, 冰水容易产生混淆, 且往往很难确定最佳分割阈值。更重要的是, 随着水中SPM或水质的变化, 这些阈值在不同的区域和图像中是动态变化的。因此, 本文开发了一种方法能够适用于不同SPM下的海冰自动提取算法, 算法中所用到的阈值都是自动确定的, 且可移植到10—500 m空间分辨率的光学传感器影像。

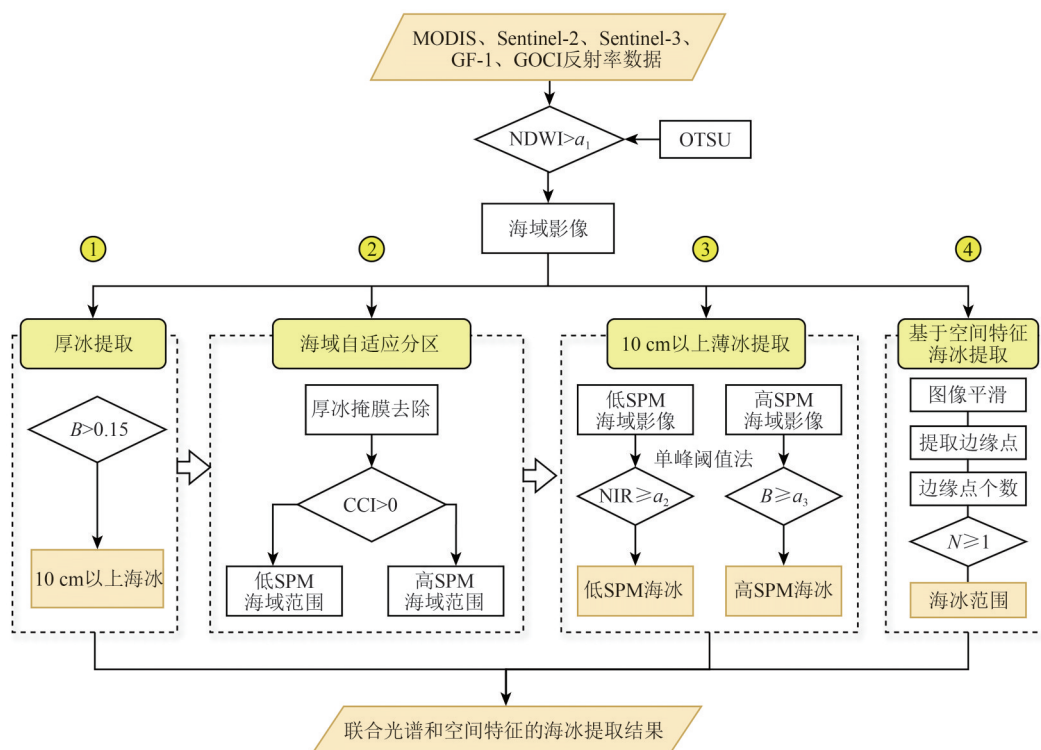


图2 海冰检测算法流程图

Fig. 2 Flowchart of sea ice detection algorithm

3.1 海陆分离

在进行海冰检测之前需要分离陆地和海洋, 归一化水体指数NDWI (Normalized Difference Water Index) 能够有效突出水体信息和抑制背景信息, 广泛应用于水和陆地的区分 (式 (4))。基于MODIS数据获取海冰、海水和陆地的NDWI, 如图3所示, 海水与海冰的NDWI分布范围相近, 与陆地有着较好的可分性。分割阈值采取OTSU阈值分割算法自动确定 (Otsu, 1979)。

$$\text{NDWI} = \frac{G - \text{NIR}}{G + \text{NIR}} \quad (4)$$

式中, G 为光学影像绿波段的反射率, NIR 为光学影像近红外波段的反射率。

3.2 10 cm 以上厚冰检测

光谱特征是进行地物分类的最基本特征之一, 分析海冰、海水的光谱及反射率特征对于海冰的精确提取至关重要。在对一年生海冰的光谱样本进行分析之后, 进一步将海冰分为了厚度在10 cm

以上的海冰(厚冰)和厚度在10 cm以下的海冰(薄冰)。图4(a)是基于MODIS数据绘制的海冰和海水的反射率图,从中可以看出,一年生海冰与海水的反射率在可见光波段和近红外波段差异最为显著,在短波红外波段则差异较小,因此可见光波段和近红外波段是进行海冰检测的重要波段。其中厚冰在可见光和近红外波段的反射率明显高于海水,因此可以采用简单的阈值分割方法进行分离。

为了分析悬浮泥沙对海水在可见光和近红外波段的影响及确定厚冰与海水的分割阈值,如图4(b)显示了在渤海区域模拟的SPM浓度与海水反射率之间的关系,随着SPM浓度的增加,可见光和近红外波段的反射率也在逐渐提高。当SPM浓度达到200 mg/L时,蓝波段最先达到饱和;当SPM浓度处于300—400 mg/L(此时绿、红波段反射率接近),绿波段反射率达到饱和;随后红波段接近饱和。因此最先达到饱和的蓝波段是最适合进行厚冰与海水

分离的波段,结合图4(a)的厚冰和海水的反射率区间,选择0.15作为分割阈值。厚冰提取方法为

$$\text{ThickIce} = B > 0.15 \quad (5)$$

式中, B 为光学影像中蓝波段的反射。

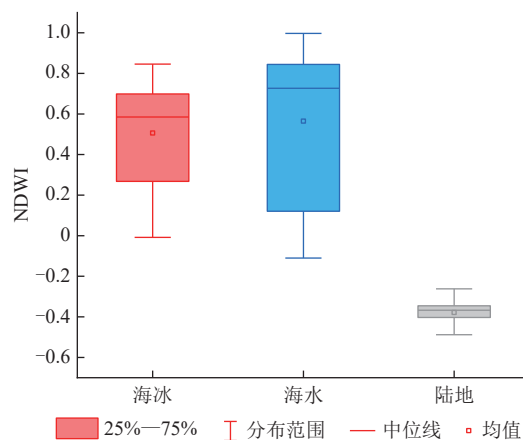
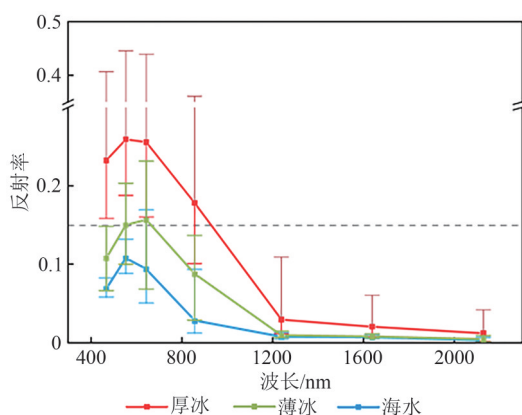


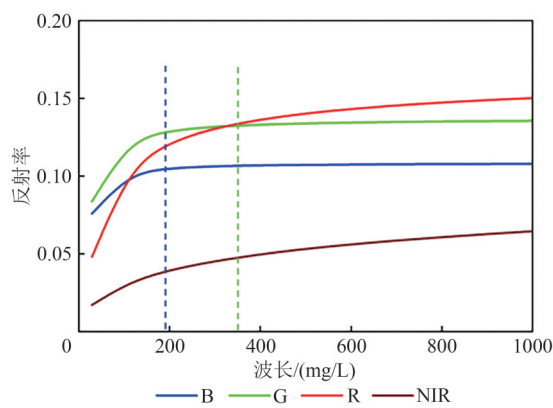
图3 海冰、海水及陆地的NDWI分布范围

Fig. 3 Distribution range of NDWI in ice, water and land



(a) 冰水光谱曲线及反射率分布范围

(a) Spectral and reflectance range of ice and water



(b) 海水反射率随SPM浓度的变化

(b) Changes in water reflectance with SPM concentration

图4 海冰光谱及海水反射率随SPM浓度的变化

Fig. 4 Spectra of sea ice and variation of seawater reflectance with SPM concentration

3.3 海洋自适应分区

薄冰检测的难点是渤海高动态变化悬浮泥沙提高了海水的反射率,导致海冰与海水易于混淆。如图4所示,10 cm以下的薄冰光谱形状与海水几乎相同,反射率则略高于海水。随着海水SPM浓度的上升,海水各个波段反射率都会有不同程度的增加,其中,可见光和近红外波段反射率增加明显,波谱形状也会产生较大的变化,波谱峰值会从绿波段逐渐转移至红波段。同时海冰的波谱也产生相似的变化,与海水的主要区别只是反射率

略低,这意味一般的光谱指数很难区分薄冰与水。同时渤海海域(尤其是黄河口附近海域)SPM浓度差异十分显著,这就导致图像中冰、水像元亮暗不均,一处区域的海水像元可能比另外一处的海冰像元更亮。分区阈值法是解决这种问题的关键。由此,本文提出了一种基于SPM分区的方法,根据SPM浓度将冰水分为高SPM区域和低SPM区域,保证区域内的SPM浓度接近,以此确保小区域内海冰的反射率总是高于海水,即便这种差异较小(海冰与海水光谱曲线相似),也能够确定一个阈值准确的分割冰和水。

可见光和近红外波段是进行海冰检测的主要波段，冰水差异更为明显。基于不同SPM浓度下冰和水的常用四波段光谱特征构建了凹凸指数CCI (Concave Convex Index) (式(6) — (7))，将海洋分为了两个区域：低SPM区域和高SPM区域。

$$CCI = R - NIR - a(G - NIR) \tag{6}$$

$$a = \frac{L(NIR) - L(R)}{L(NIR) - L(G)} \tag{7}$$

式中，R、G、NIR分别为红、绿、近红外波段的反射率，L(R)、L(G)、L(NIR)分别为红、绿、近红外中心波长。a的值为常数，不同传感器影像各波段中心波长都有差异，因此a值也各不相同，表3列出了常用传感器影像的a值。

表3 不同类型影像a值

Table 3 Values of a for different types of image

参量	影像					
	Sentinel-2A	Sentinel-2B	GF-1	Sentinel-3	MODIS	GOCI
a	0.6201	0.6131	0.6182	0.6557	0.7035	0.6613

如图5所示，凹凸指数是基于光谱形状的指数，其物理含义是绿—红—近红外波段反射率曲

线的凹凸度，凸的程度越大，SPM浓度越高，反之越低。

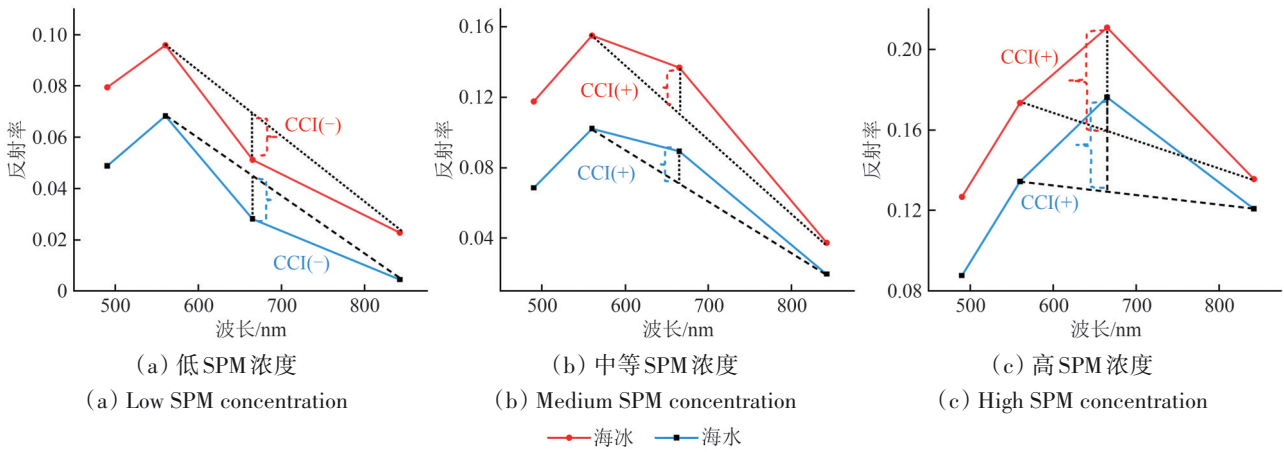


图5 不同SPM浓度冰和水的 spectra 对比

Fig. 5 Spectral comparison of ice and water at different SPM concentration

根据凹凸指数对海洋进行分区：

- (1) 当CCI为负值时，曲线形状特征为凹，此区域为低SPM浓度区域；
- (2) 当CCI为正值时，曲线形状特征为凸，此区域为高SPM浓度区域，根据光谱形状此区域包括两种情况。如图5(b)、(c)所示，一种是反射峰出现在绿波段，另一种则是反射峰出现在红波段，这是SPM浓度上升导致的光谱波峰红移现象，SPM浓度越高红移现象越明显，凹凸指数的值也越高。

为了更加直观的显示分区性能，图6展示了MODIS数据分区前后的直方图，分区前海冰和海水的直方图重叠现象明显，分区后两种SPM区域冰和水可分性大大增强。在低SPM区域近红外波段的可分性最高，这是由于低SPM浓度下近红外波段受悬浮泥沙的影响最小(图4)，因此近红外波

段的可分性要优于可见光波段。而在高SPM浓度区域蓝波段的可分性最高，这是由于水体的蓝波段反射率最先达到饱和，饱和后即便SPM浓度增加，水体反射率也几乎保持不变。此时海冰蓝波段的反射率高于水体，并且会随着海冰厚度的增加而增加。相对的，绿、红、近红外波段的反射率未饱和，仍会随着SPM浓度的增加继续升高，冰和水仍然容易混淆。理论上只要再次进行分区，就可以进一步增强其可分性。考虑到目前近红外和蓝波段已经能够区分冰和水，为了避免增加计算量，分别选择近红外和蓝波段进行低、高SPM浓度区域的特征波段，薄冰提取公式如下：

$$\text{thin ice} = \begin{cases} NIR > a_1 & CCI < 0 \\ B > a_2 & CCI \geq 0 \end{cases} \tag{8}$$

式中，B、NIR分别为蓝、近红外波段的反射率。

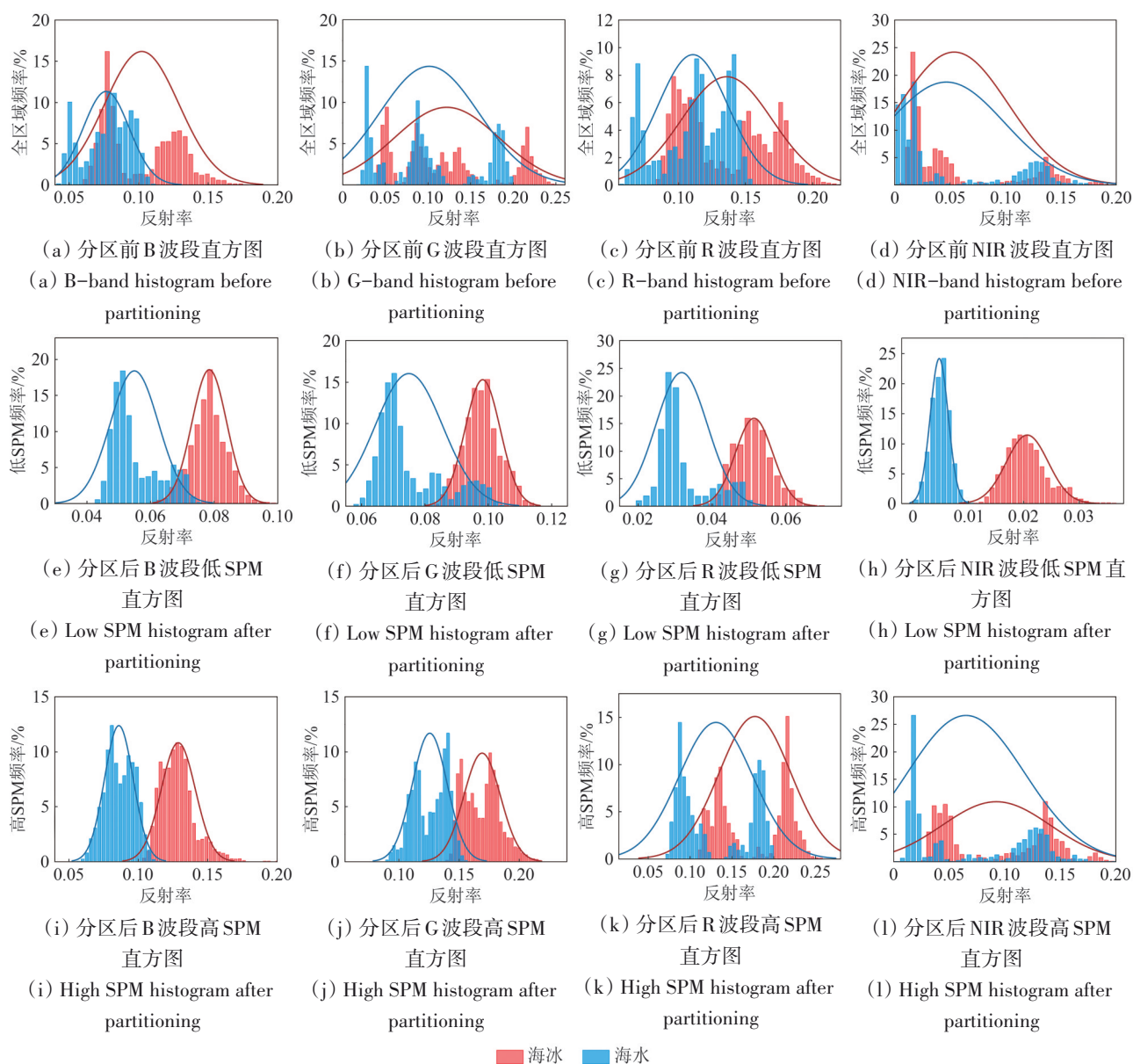


图6 分区前后的冰水可分性

Fig. 6 Histogram of ice and water before and after zoning

3.4 分区阈值自动确定

由于传感器、影像时相等因素的差异，冰水分割阈值是动态变化的。本文采用无监督分类单峰三角阈值算法自动提取海冰。一年生海冰的日变化差异较大，因此为了充分发挥多源遥感数据的优势，实现海冰高频次密集监测，需要一种处理速度快、自动化程度高的海冰检测算法。三角阈值法最早由Zack等（1977）提出，该方法是使用直方图数据，基于纯几何方法来寻找最佳阈值，它的成立条件是假设直方图最大波峰在靠近最亮的一侧，然后通过三角形求得最大直线距离，根据最大直线距离对应的直方图灰度等级即为分割

阈值，如图7所示。该图的含义为，在可见光和近红外范围内，海水的反射率一般低于海冰，且分布较为集中；而一年生海冰的反射率则随着海冰厚度的增加而增加，分布区间较广。因此，直方图的最高峰代表海水像元的分布，最高峰的右侧峰谷则代表冰和水像元的最佳分割阈值。另外值得注意的是，在使用本方法进行阈值确定时，务必将非相关像元掩膜去除，以免影响阈值的准确度。例如，在对低悬浮颗粒物浓度海域的海冰进行提取时，要将高悬浮颗粒物浓度海域以及陆地区域的像元掩膜去除。有时为了海冰检测的稳健性还需要增加其他掩膜。例如，GEE中的MODIS

09GA.061 地表反射率数据有时部分区域会出现反射率为负值的情况，这部分区域也需要掩膜去除。

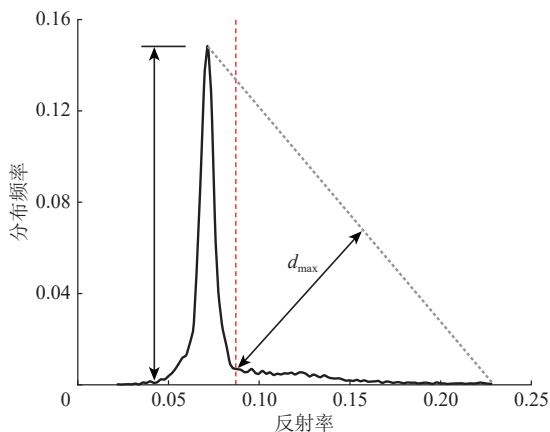


图7 单峰阈值法原理图

Fig. 7 Schematic diagram of the single-peak threshold method

3.5 一年生海冰边缘特征

上述基于光谱的分割方法能够大大提高在高动态悬浮泥沙海域中的一年生海冰提取精度。但基于光谱分割方法的通病是提取结果中存在噪声和斑块。同时，在进行海冰批量处理或是业务化运行时，会遇到各种各样的情况，例如，影像质量较差，薄云难以去除，有光谱异常区域等，这些都可能降低海冰检测的精度，因此提升方法的稳健性至关重要。在以往的海冰提取中，常用到基于灰度共生矩阵的纹理特征来提取海冰，对于较低分辨率影像来说，这是一个较为稳定且有效的方法，然而面对高分辨率遥感影像来说却并不完全适用。因此本文引入了一年生海冰的边缘特征来增强方法的稳健性。一年生海冰易于被风浪折断、重叠和挤压，形状各异，但具有明显的边缘特点。具体方法如下：

(1) 图像平滑。使用形态学腐蚀操作进行平滑，目的是去除图像的噪声，减少海冰伪边缘的数量。

(2) 提取海冰边缘点。sobel算子简单易用，广泛应用于边缘检测，它不但具有较好的检测效果，而且对噪声具有平滑和抑制作用，本文利用sobel算子提取海冰边缘点的计算公式如式(9) — (12)。依据Sentinel-2影像，选择海冰边缘点和海水样本各100个，计算样本的sobel值。如图8所示，海冰边缘的sobel值高于海水，本文选择0.03作为边缘点的分割阈值。

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * A \quad (9)$$

$$G_y = \begin{bmatrix} -1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * A \quad (10)$$

$$G_{xy} = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (11)$$

$$edge = G_{xy} > 0.03 \quad (12)$$

(3) 计算边缘点的个数。通过对高分辨率影像的分析，一年生平整冰（冰皮，尼罗冰）的直径一般在1 km以内，这是由于一年生海冰易于被风浪折断或者是重叠挤压形成脊，这种变化会被检测为特征点，从而增加海冰检测的几率。计算每个像元1 km范围内边缘的个数，边缘点个数大于1的像元被视为海冰的潜在区域。

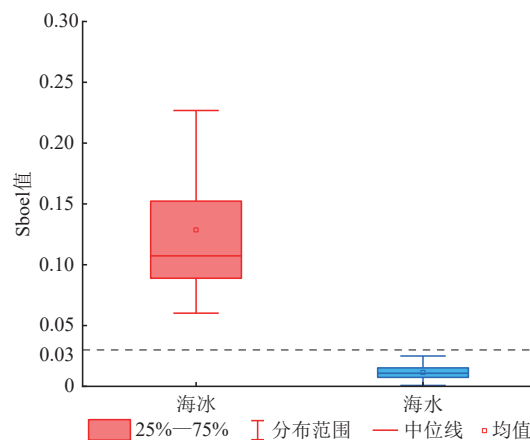


图8 冰水Sobel值分布范围

Fig. 8 Distribution range of Sobel values for ice and water

3.6 联合光谱特征和空间特征进行海冰检测

为了提高基于光谱的海冰检测方法的稳定性，本文选择联合影像的光谱和空间特征提取海冰。获取基于光谱的海冰提取结果和基于空间特征的海冰提取结果后，将两者的结果进行合并，同为海冰的像元最终被确定为海冰。

3.7 精度验证

本文选择以自然资源部的海冰解译图作为MODIS渤海海冰提取结果的验证图像，使用混淆矩阵定量评价海冰提取精度。为了验证算法在不同传感器影像的适用性，考虑到高分辨率遥感影像的幅宽大小，选择SPM浓度变化最为剧烈且分布有各种冰型的黄河口海域作为典型区，同时以黄河口的样本点作为验证数据，使用混淆矩阵定

量评价算法在不同传感器影像的精度。

混淆矩阵是用来进行分类精度评价的一种方法。在进行图像分类的精度评价时，主要用于比较分类结果和实际类型，把分类结果的精度情况显示在一个混淆矩阵中。混淆矩阵将真实像元的类别和位置，与分类后图像中的对应像元的类别比较获得的。在混淆矩阵中，对角线上的数字为对应类别分类正确的样本数量，其他地方为与验证样本不同的样本数量。研究采用目前被广泛应用的生产者精度PA（Producer Accuracy）、用户精度UA（User Accuracy）、误分误差（Commission）、漏分误差（Omission）、总体精度OA（Overall Accuracy）和Kappa系数来评价分类效果。其中，OA为分类正确的像元数量占总像元数量的比值。UA计算方法为某一类别分类正确部分的数量与分类结果总数量之间的比值，UA可以代表误分的程度，即将其它类别像元误分为这一类别的情况，UA越高，则误分现象越少。PA为某一类别正确分类的数量与这一类别真实数量的比值，PA可以描述某一类别漏分的情况，正确分类部分的数量越高，PA越高，其漏分部分越少。误分误差指该类别被错误分类的概率，漏分误差指该类别在分类时被遗漏的概率。Kappa系数可以用来综合评价分类质量，并且能够克服只使用上述分析指标所引起的对采样样本及方法的依赖，用于衡量分类精度。Kappa系数计算公式如下：

$$\text{Kappa} = \frac{p_o - p_e}{1 - p_e} \tag{13}$$

$$p_e = \frac{a_1 \times b_1 + a_2 \times b_2 + \cdots + a_c \times b_c}{n \times n} \tag{14}$$

式中， p_o 是某一类别正确分类的样本数量除以总样本数，即总体分类精度； $a_1, a_2, \cdots, a_c$ 为每一类别的真实样本个数； $b_1, b_2, \cdots, b_c$ 为分类后每一类的样本个数； n 为总样本数。

4 结果与讨论

4.1 海冰检测结果

为了定量评价方法的精度，本文依据自然资源部发布的2017年—2019年海冰遥感解译图作为参考影像，对提取结果进行精度验证。结果表明，本文算法的海冰提取结果与海冰解译图一致性较好，OA在90%以上（表4）。海冰提取误差主要来源于两方面：（1）漏分误差，海冰解译图是通过

人机交互绘制的海冰范围数据，海冰范围中也包括了冰间水道；而本文方法的提取结果能够识别冰间水道，尤其是对于初冰期和融冰期的影像，海冰分布较为稀疏，冰间裂隙较多，这是漏分误差的重要来源（图9）。（2）错分误差，海冰解译图在SPM浓度变化较大的区域会漏掉一些细碎海冰以及厚度较薄的海冰。以2018年2月6日为例，在莱州湾出现了大量初生冰，且莱州湾SPM浓度变化较为剧烈，本文改进了对厚度在10 cm以下薄冰的提取方法，能够识别这部分初生冰。总体上说，本文使用的海冰检测算法能够以较高的精度提取海冰。

表4 MODIS海冰精度评价表

Table 4 MODIS-based sea ice accuracy evaluation table

MODIS影像	OA/%	Kappa	Commission/%	Omission/%
2017-01-27	95.80	0.746	3.41	36.17
2017-01-30	96.28	0.829	2.18	24.88
2018-02-01	91.99	0.767	7.79	23.66
2018-02-03	91.62	0.788	13.75	16.99
2018-02-04	91.42	0.794	8.91	19.4
2018-02-06	91.23	0.807	15.15	9.58
2018-02-12	91.56	0.742	7.19	20.9
2019-01-17	94.91	0.788	2.96	19.2
2019-01-20	95.23	0.653	16.14	43.12
2019-01-22	98.24	0.811	17.52	18.31
2019-01-23	98.61	0.829	6.65	24.19
2019-01-26	96.81	0.700	11.34	39.83

为了验证本方法在不同传感器影像的适用性以及考虑到高分辨率遥感影像的幅宽限制，本文选取了Sentinel-2、GF-1、Sentinel-3、MODIS、GOCI这5种影像在2018年1月12日黄河口海域的影像。此区域位于渤海湾和莱州湾的交界处，是黄河的入海口，是渤海中SPM变化最剧烈的区域且分布有各种类型的一年生海冰，因此黄河口海域是渤海海冰提取的典型区。如图10所示，各种传感器影像的海冰检测结果类似，但与北海预报中心发布的海冰解译图有一定差别。这是由于海冰解译图是基于MODIS影像通过人机交互方法产生，在黄河口高动态SPM浓度海域较难分辨10 cm以下的薄冰。因此，本文基于同期的Planet影像获取的黄河口海域的样本数据进行验证海冰提取的精度。由表5可知，不同影像海冰提取结果的精度都在90%以上，说明本算法对不同传感器影像的适用性较好。

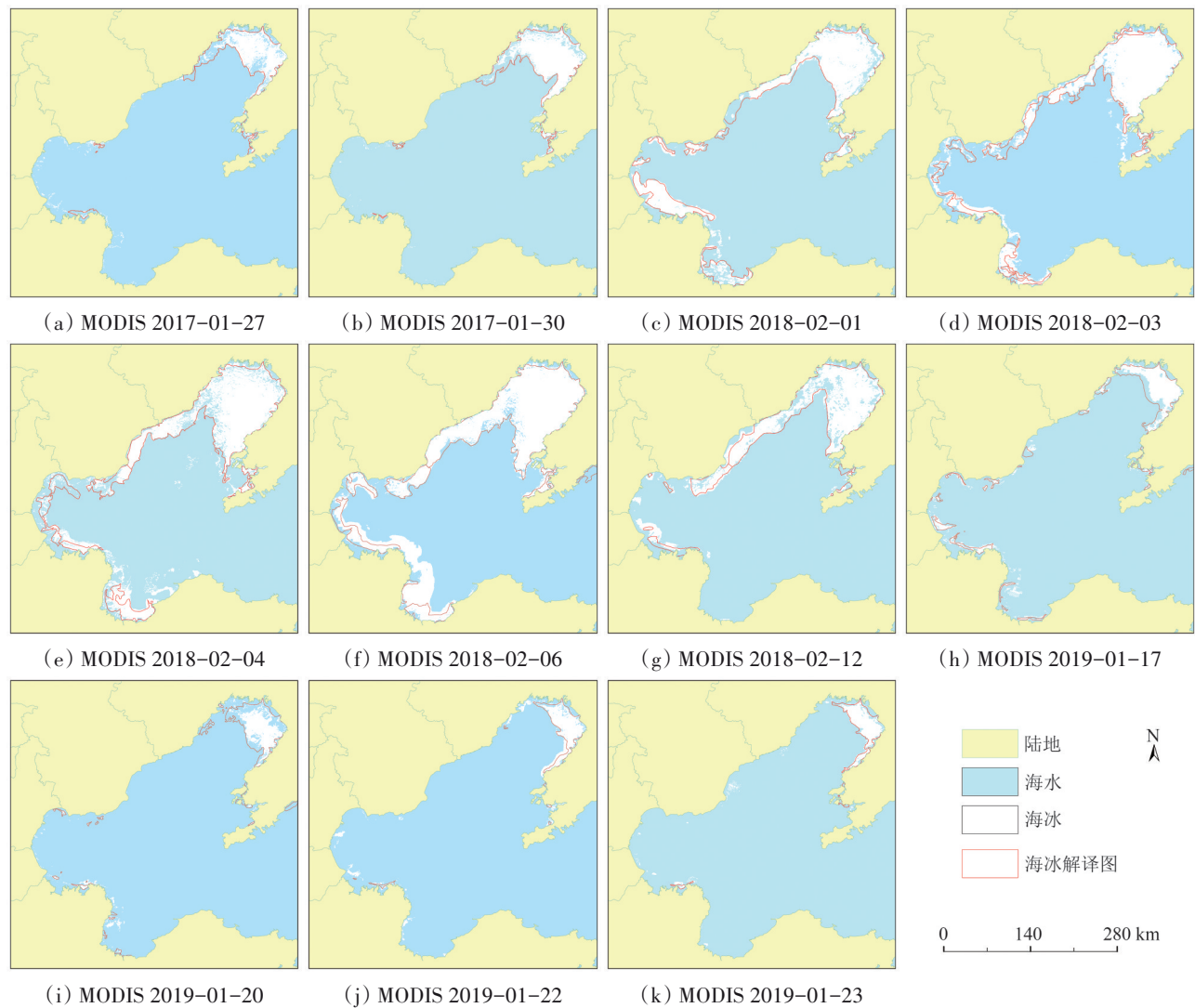


图9 MODIS海冰检测结果

Fig. 9 Results of MODIS-based sea ice detection

4.2 CCI与SPM浓度的关系

为了探究 CCI 和 SPM 浓度的关系以及验证相似 SPM 浓度海域的冰和水是否能够正确划分, 由图 11 所示, CCI 指数与 SPM 浓度呈正相关关系, 高、低 SPM 浓度的界限大概在 50 mg/L。在低 SPM 浓度海域中, 随着 SPM 浓度的升高, 红波段反射率增加速度高于绿波段和近红外波段, CCI 呈现稳步上升趋势; 当 SPM 浓度达到 50 mg/L 之后, CCI 的增加速度逐渐变缓, 最终接近饱和。同时相同 SPM 浓度下冰和水的 CCI 的值具有良好的相似性, 这表明基于 CCI 的分区能够将相近 SPM 浓度的冰和水划分在同一海域, 这为冰水分割提供了重要的基础。

为比较不同传感器的阈值, 本文选取了黄河口同一天的 Sentinel-2、MODIS、GF-1 数据进行对比。图 12 (a) — (c) 为低 SPM 海域 Sentinel-2、MODIS、GF-1 数据的直方图, 图 12 (d) — (f) 则

是高 SPM 海域 3 种影像的直方图。从图 12 中可以看出, 3 种类型的影像直方图几乎都呈现单峰, 此峰代表水像元, 水像元反射率较低且分布较为集中; 冰水分割阈值出现在右侧峰谷, 这是由于分区后海冰像元反射率较高且分布范围较广。根据图 12 (a) 和 12 (d) 直方图的分布, Sentinel-2 影像的反射率整体上要高于 MODIS 和 GF1, 因此确定的分割阈值也要高于另外两种影像。图 12 (c) 中低 SPM 海域的 GF-1 影像呈现一大一小的双峰, 这是 GF1 影像幅宽的限制、影像区域略小的原因。这种情况并不影响单峰阈值法的使用, 单峰阈值法是根据波峰、反射率最大值以及 x 轴线所组成的三角形求得最大直线距离, 图 12 (c) 的直方图的最大距离会确定在两峰之间的位置, 这与 OTSU 方法确定的位置相似, 但 OTSU 对于单峰的直方图的效果较差。因此, 单峰阈值法更适合于分区后的海冰阈值确定。

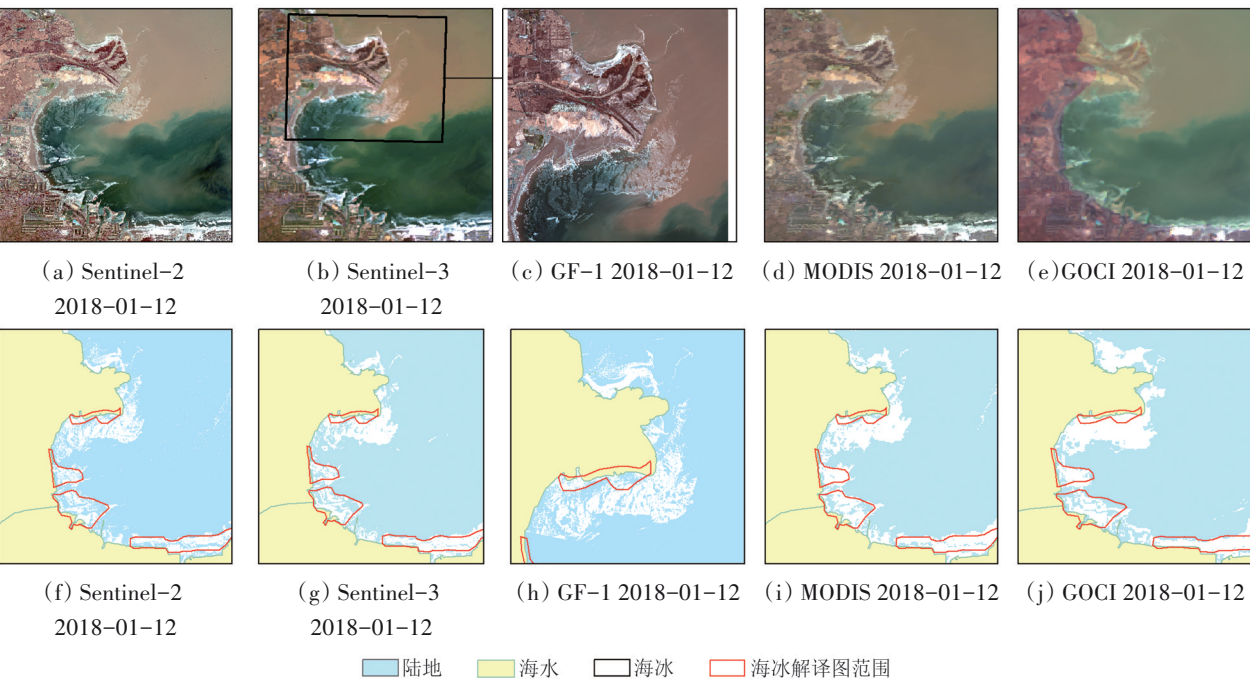


图10 不同传感器海冰检测结果
Fig. 10 Sea ice detection results from different sensors

表5 不同传感器影像精度验证表

Table 5 Accuracy verification table of different sensor images

影像	OA/%	Kappa	UA	PA
Sentinel-2	97	0.93	0.96	0.93
GF-1	94	0.88	0.96	0.8
Sentinel-3	93	0.86	0.87	0.94
MODIS	92	0.85	0.82	0.98
GOCI	90	0.77	0.86	0.89

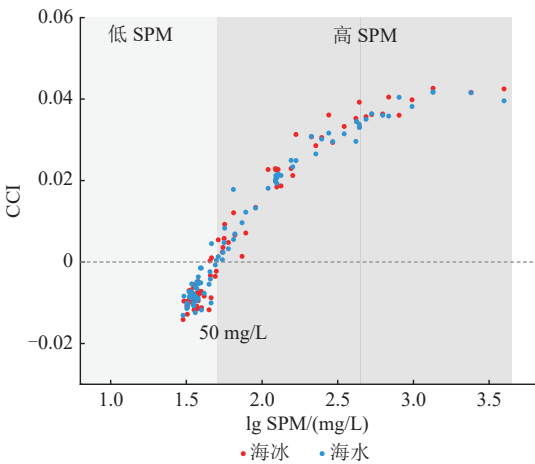


图11 CCI与SPM浓度的关系
Fig. 11 Scatter plot of CCI and SPM

4.3 边缘特征与纹理特征对比

基于灰度共生矩阵 GLCM (Gray Level Co-occurrence Matrix) 的纹理特征常用于较低空间分辨率影像的海冰检测算法 (Haralick 等, 1973)。其原理是海冰表面粗糙不平、具有明显的不规则不稳

定的纹理特征；水面光滑均匀，具有不变的纹理特征。然而这一特征在高分辨率遥感影像上并不完全适用。图 13 (a) 为 Sentinel-2 真彩色影像，图 13 (b)、(c) 是使用 GLCM 的相异性纹理特征的海冰提取结果，窗口大小采取 3×3，其他参数默认。图 13 (b) 采用较为保守的分割阈值，出现两个问题：(1) 在高 SPM 区域大量的水被分为了冰，原因是 SPM 高动态变化的海水表面不再平滑；(2) 平整冰很容易误分为水 (图 13 (f))，这是由于并不是所有的海冰表面都是粗糙的，冰皮和尼罗冰表面平滑，与海水有着非常相似的纹理特征。图 13 (c) 采用了较为激进的分割阈值，在高 SPM 区域冰水混淆的情况得到了减轻，同时冰皮、尼罗冰与海水的混淆却更加严重 (图 13 (g))。增大窗口能够改善这一问题 (将窗口增大到 30×30，甚至更大)，同时也会极大的增加计算量。因此基于 CLCM 的纹理特征在海冰检测方面的性能还是有所欠缺的。

本文利用海冰的边缘特征来解决这一问题。海冰在形成过程，反射率一般都高于周边海水，有着较为明显的边缘特征。通过搜索一定范围内的海冰边缘点即可确定海冰大致范围。而通过高分辨率遥感影像的解译，可以确定厚度小于 10 cm 的冰皮、尼罗冰容易被风浪折碎，其半径一般小于 1 km，因此搜索范围可以确定为半径 1 km。图 13 (d) 为边缘特征的海冰提取结果，边缘特征能够确定

海冰的范围的同时也会将冰间水道识别为海冰 (图 13 (h)), 这已经达到了加入空间特征的目的, 即增加算法的稳健性, 更精确的海冰检测由海冰的光谱特征来进行。

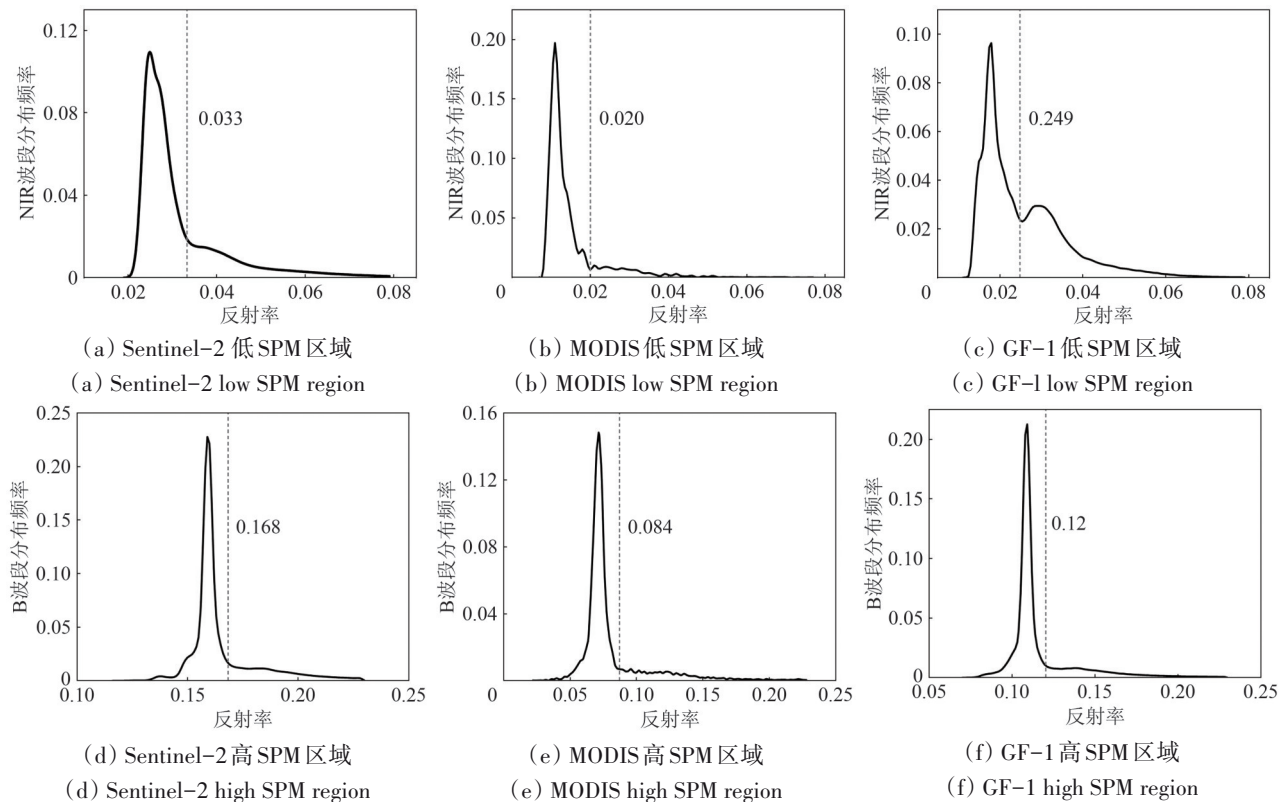


图 12 不同传感器影像的分区阈值对比

Fig. 12 Comparison of zoning thresholds for different sensors

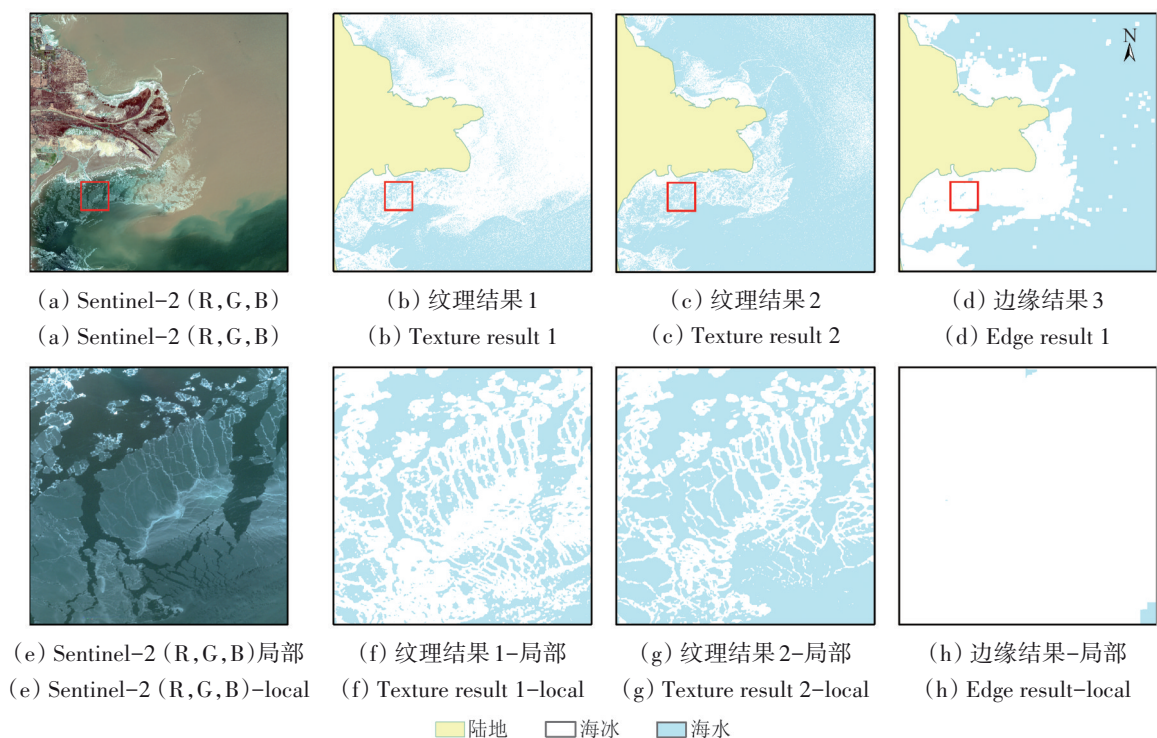


图 13 海冰纹理特征与边缘特征提取结果

Fig. 13 Sea ice detection results using texture features and edge features respectively

4.4 检测算法的检测限制

为了进一步确定本文算法对海冰的检测极限, 本文从海冰厚度、海冰密集度、海水悬浮泥沙浓度 3 个方面探讨海冰的检测情况。一年生海冰随着冰厚的增加反射率也会升高, 根据海冰的发展阶段, 可以将海冰分为冰皮 (5 cm)、尼罗冰 (<10 cm)、灰冰 (10—15 cm)、灰白冰 (15—30 cm)、白冰 (>30 cm), 厚度逐渐增加。参照 Planet 数据的样本点, 将 Sentinel-2 影像中的冰块中心区域的海冰视为密集度为 100% 的海冰, 将远离海冰的海水作为海冰密集度为 0 的纯海冰像元。图 14 (a) 和图 14 (b)

分别为低、高 SPM 海域下, 各种类型海冰和海水在分割波段的分布范围, 取其均值作为模拟的纯像元值。可以看出, 高悬浮泥沙海域中相同类型海冰的反射率要高于低悬浮泥沙海域的海冰。图 14 (c) 和 14 (d) 所示的矩阵, 每个单元格显示了在低 (高) SPM 海域中给定海冰密集度和不同厚度海冰组合下的模拟值, 即在给定海冰密集度和不同厚度海冰的比例下, 对其光谱进行线性混合。将 Sentinel-2 影像使用双线性内插法重采样到 500 m 并利用本文方法获取分割阈值, 即为图中红线。任何高于该阈值的像元将被归类为海冰。

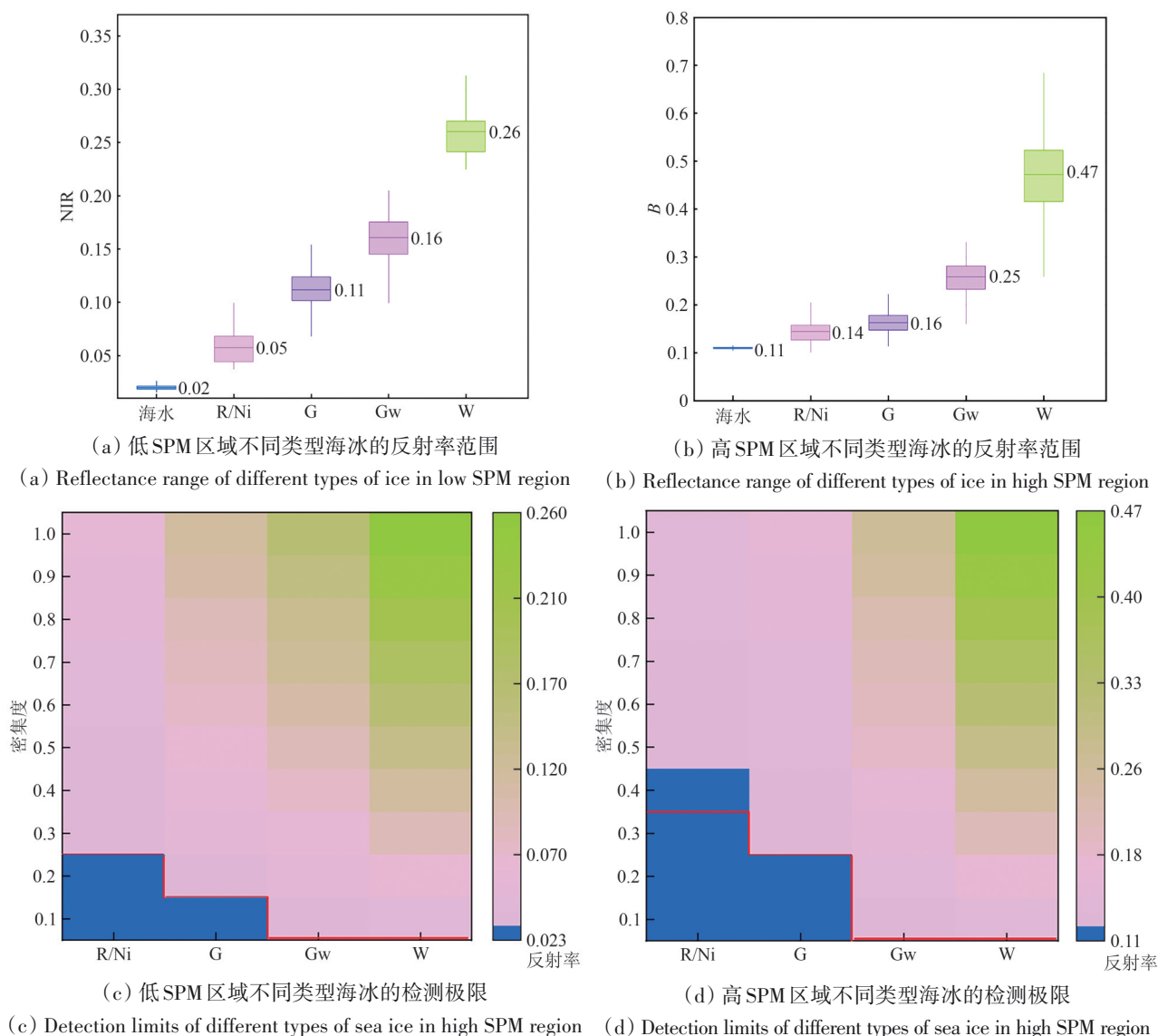


图 14 冰水混合像元的检测极限

Fig. 14 Detection limit of mixed pixels of ice and water

由图 14 (c) 和 14 (d) 所示, 在低 SPM 海域中, 能够检测到海冰密集度高于 20% 的冰皮、尼

罗冰以及密集度高于 10% 的灰冰。灰白冰和白冰的反射率较高, 密集度只要高于 10% 就能被检测

到。在高SPM海域中,能够检测到密集度高于30%的冰皮、尼罗冰以及密集度高于20%的灰冰。同样的,灰白冰和白冰的反射率较高,密集度只要高于10%就能被检测到。低悬浮泥沙区域检测到的冰皮、尼罗冰、灰冰的密集度高于高悬浮泥沙区域,可能是高悬浮泥沙海域的冰和水的反射率差异更小导致的。

5 结 论

5.1 结论

气候变化是当今研究热点之一,海冰作为气候变化的指示器和放大器,也受到广泛的关注。一年生海冰厚度薄,其生成、发展和消融过程对于气候变化的响应更加敏感。因此,长时序、高质量、精细化的海冰范围和面积数据对于研究气候变化至关重要。本文针对高动态悬浮泥沙海域提出了一种适用于多种光学传感器影像的海冰自动检测方法。重点研究了厚度在10 cm以下的薄冰光谱及其纹理特征。研究发现,厚度在10 cm以下的薄冰光谱与临近的海水光谱形状相似,反射率则略高于临近海水。同时由于高动态悬浮泥沙的影响,冰和水的的光谱也在发生变化。影像中冰和水的像元亮暗不均,一处区域的海水反射率可能会高于另一处区域的薄冰,这就导致阈值难以确定。本文在分析不同SPM下冰和水的变化情况下,提出了CCI指数将渤海动态的分为了高SPM海域和低SPM海域,在每个分区中的特征波段下,冰的反射率高于水,这就为之后的阈值分割创造了良好的条件。另外值得注意的是,CCI指数并非传统的归一化光谱指数(如NDVI),而是基于光谱形状的指数,其物理含义是光谱曲线中绿、红、近红外反射率线段的凹凸度。不同时相、不同传感器影像可能会由于大气校正方法等原因反射率大小出现一定的偏差,但经过大气校正后的影像地物波谱形状一般不会发生大的变化,这也是能够进行稳定分区的重要原因。为了精准确定不同时相和传感器影像的分割阈值,本文并没有采用常用的OTSU算法,因为分区后的影像直方图并不呈现明显的双峰。先去除厚冰后进行分区,影像会呈现出薄冰少,海水多的特点,直方图形状总是单峰的。因此本文选择使用了单峰阈值法来确定分割阈值。为了提升算法的稳定性,本文加入了海冰的

边缘特征,将一定范围内能够检测到边缘点的区域作为海冰存在的潜在区域,这对于高分辨率遥感影像中较为表面较为平滑的冰皮、尼罗冰会有较好的识别效果。边缘特征的加入可能会将冰间水道也识别为海冰,但基于光谱的方法会准确识别这一点。空间特征的加入是为了提高算法稳定性。

算法能够检测到的海冰与海冰密集度、海冰厚度和SPM浓度3方面都有关系。一般来说,海冰的厚度越高、密集度越高,海冰的反射率就越大,越容易被识别。这是本文先提取厚度10 cm以上海冰的原因。而SPM浓度越高,海水的反射率也会逐渐增加,这会缩小海水与海冰的反射率差距,从而使得海冰,尤其是厚度10 cm以下的薄冰更难检测出。本文通过线性混合模型初步模拟不同冰型的检测极限,在理想情况下算法能够检测到低SPM浓度下海冰密集度高于20%的冰皮、尼罗冰以及密集度高于10%的灰冰。在高SPM浓度海域中,能够检测到密集度高于30%的冰皮、尼罗冰以及密集度高于20%的灰冰。总体来说,本方法能够自动、稳定、高效、准确的提取一年生海冰,能够适用于多源传感器,也为充分发挥多源遥感数据的优势,进行更全面、更精细的海冰监测,为研究气候变化提供数据支撑。

5.2 展望

通过以上分析,可以证明该方法在高动态悬浮泥沙海域中海冰检测的能力。与以往的方法相比,它具有适用于10—500 m传感器的特点,这意味着可以更好的发挥出多源遥感数据的优势,而不需要每一种传感器影像都需要进行调试和改变。同时本方法能够自动化精准提取海冰,无需任何人为干预,从而可以对适用于海量数据的批处理。目前,光学遥感数据仍然是中国业务化运行的重要数据,这就为本方法的应用提供了基础。然而,在业务化进行海冰检测时,云检测是一个很重要的挑战。一年生海冰与薄云更加易于混淆。本方法基于常见光学传感器影像的四波段进行海冰检测,四波段对于云检测来说仍有一定难度,因此结合光学传感器常用四波段的云检测方法仍需进一步研究。除此之外,对于低分辨率遥感数据,海冰提取结果的精确略显不足,海冰密集度数据不仅能够反映海冰在水平方向的分布情况,还能够进一步提升低分辨率海冰产品的潜在精度。但目前

大部分海冰密集度反演方法主要集中在极地, 应用于渤海这种高动态悬浮泥沙变化海域中方法较少。渤海海冰密集度反演的难点是, 不仅要考虑海冰厚度的影响还要考虑海水悬浮泥沙的高动态变化。因此, 高动态悬浮泥沙海域的一年生海冰密集度反演方法需要进一步研究。

参考文献(References)

- AghaKouchak A, Chiang F, Huning L S, Love C A, Mallakpour I, Mazdiyasn O, Moftakhari H, Papalexou S M, Ragno E and Sadeh M. 2020. Climate extremes and compound hazards in a warming world. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 48(1): 519-548 [DOI: 10.1146/annurev-earth-071719-055228]
- Bai X Z, Wang J, Liu Q Z, Wang D X and Liu Y. 2011. Severe ice conditions in the Bohai Sea, China, and mild ice conditions in the great lakes during the 2009/10 winter: links to El Niño and a strong negative Arctic oscillation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(9): 1922-1935 [DOI: 10.1175/2011jamec2675.1]
- Budikova D. 2009. Role of Arctic sea ice in global atmospheric circulation: a review. *Global and Planetary Change*, 68(3): 149-163 [DOI: 10.1016/j.gloplacha.2009.04.001]
- Gu W, Liu C Y, Yuan S, Li N, Chao J L, Li L T and Xu Y J. 2013. Spatial distribution characteristics of sea-ice-hazard risk in Bohai, China. *Annals of Glaciology*, 54(62): 73-79 [DOI: 10.3189/2013AoG62A303]
- Guo W J, Zhang S and Wu G X. 2019. Quantitative oil spill risk from offshore fields in the Bohai Sea, China. *Science of the Total Environment*, 688: 494-504 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.06.226]
- Han Y L, Gao Y, Zhang Y, Wang J and Yang S H. 2019. Hyperspectral sea ice image classification based on the spectral-spatial-joint feature with deep learning. *Remote Sensing*, 11(18): 2170 [DOI: 10.3390/rs11182170]
- Haralick R M, Shanmugam K and Dinstein I. TEXTURAL FEATURES FOR IMAGE CLASSIFICATION. *Ieee Transactions on Systems Man and Cybernetics*. 1973; SMC3(6):610-621. [doi:10.1109/tsmc.1973.4309314]JiaoY, HuangF, LiuQ R, LiG, LiY R, YuQ X and ZhaoY D. 2020. Interannual variability and scenarios projection of sea ice in Bohai Sea part I: variation characteristics and interannual hindcast. *Journal of Ocean University of China*, 19(2): 272-280 [DOI: 10.1007/s11802-020-4236-4]
- Li P, Ke Y H, Bai J H, Zhang S Y, Chen M M and Zhou D M. 2019. Spatiotemporal dynamics of suspended particulate matter in the Yellow River Estuary, China during the past two decades based on time-series Landsat and Sentinel-2 data. *Marine Pollution Bulletin*, 149: 110518 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2019.110518]
- Li R, Lu Y Y, Hu X M, Guo D L, Zhao P, Wang N, Lee K and Zhang B Y. 2021. Space-time variations of sea ice in Bohai Sea in the winter of 2009-2010 simulated with a coupled ocean and ice model. *Journal of Oceanography*, 77(2): 243-258 [DOI: 10.1007/s10872-020-00566-2]
- Li Y W and Yang D Q. 2020. Extraction of Bohai Sea ice from MODIS data based on multi-constraint endmembers and linear spectral unmixing. *International Journal of Remote Sensing*, 41(14): 5525-5548 [DOI: 10.1080/01431161.2020.1734248]
- Liu C Y, Gu W, Chao J L, Li L T, Yuan S and Xu Y J. 2013. Spatio-temporal characteristics of the sea-ice volume of the Bohai Sea, China, in winter 2009/10. *Annals of Glaciology*, 54(62): 97-104 [DOI: 10.3189/2013AoG62A305]
- Liu M J, Dai Y S, Zhang J, Zhang X, Meng J M and Xie Q C. 2015. PCA-based sea-ice image fusion of optical data by HIS transform and SAR data by wavelet transform. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(3): 59-67 [DOI: 10.1007/s13131-015-0634-7]
- Ning L, Xie F, Gu W, Xu Y J, Huang S Q, Yuan S, Cui W J and Levy J. 2009. Using remote sensing to estimate sea ice thickness in the Bohai Sea, China based on ice type. *International Journal of Remote Sensing*, 30(17): 4539-4552 [DOI: 10.1080/01431160802592542]
- 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]
- Ouyang L X, Hui F M, Zhu L X, Cheng X, Cheng B, Shokr M, Zhao J C, Ding M H and Zeng T. 2019. The spatiotemporal patterns of sea ice in the Bohai Sea during the winter seasons of 2000-2016. *International Journal of Digital Earth*, 12(8): 893-909 [DOI: 10.1080/17538947.2017.1365957]
- Paik S, Min S K, Kim Y H, Kim B M, Shiogama H and Heo J. 2017. Attributing causes of 2015 record minimum sea-ice extent in the Sea of Okhotsk. *Journal of Climate*, 30(12): 4693-4703 [DOI: 10.1175/jcli-d-16-0587.1]
- Pico T, Mitrovica J X, Ferrier K L and Braun J. 2016. Global ice volume during MIS 3 inferred from a sea-level analysis of sedimentary core records in the Yellow River Delta. *Quaternary Science Reviews*, 152: 72-79 [DOI: 10.1016/j.quascirev.2016.09.012]
- Stroeve J and Notz D. 2018. Changing state of Arctic sea ice across all seasons. *Environmental Research Letters*, 13(10): 103001 [DOI: 10.1088/1748-9326/aade56]
- Su H, Ji B W and Wang Y P. 2019. Sea ice extent detection in the Bohai Sea using sentinel-3 OLCI data. *Remote Sensing*, 11(20): 2436 [DOI: 10.3390/rs11202436]
- Su H and Wang Y P. 2012. Using MODIS data to estimate sea ice thickness in the Bohai Sea (China) in the 2009-2010 winter. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C10): 2012JC008251 [DOI: 10.1029/2012jc008251]
- 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]
- Su H, Wang Y P, Xiao J and Yan X H. 2015. Classification of MODIS images combining surface temperature and texture features using the support vector machine method for estimation of the extent of sea ice in the frozen Bohai Bay, China. *International journal of re-*

- mote sensing, 36(10): 2734-2750
- Su H, Wang Y P and Yang J X. 2012. Monitoring the spatiotemporal evolution of sea ice in the Bohai Sea in the 2009-2010 winter combining MODIS and meteorological data. *Estuaries and Coasts*, 35(1): 281-291 [DOI: 10.1007/s12237-011-9425-3]
- Tian Y L, Zhang Y, Zhong D Y, Zhang M X, Li T J, Xie D and Wang G Q. 2022. Atmospheric energy sources for winter sea ice variability over the north Barents – Kara Seas. *Journal of Climate*, 35(16): 5379-5398 [DOI: 10.1175/jcli-d-21-0652.1]
- Walsh J E. 2014. Intensified warming of the Arctic: causes and impacts on middle latitudes. *Global and Planetary Change*, 117: 52-63 [DOI: 10.1016/j.gloplacha.2014.03.003]
- Xie F, Gu W, Ha S, Cui W J, Chen W B, Zhou C G, Huang S Q and Liu Z. 2006. An experimental study on the spectral characteristics of one year-old sea ice in the Bohai Sea, China. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14): 3057-3063 [DOI: 10.1080/01431160600589153]
- Xu N, Liu X Q, Yuan S, Ma Y X, Shi W Q and Chen W B. 2019. Sea ice disaster risk assessment index system based on the life cycle of marine engineering. *Natural Hazards*, 95(3): 445-462 [DOI: 10.1007/s11069-018-3463-0]
- Yan Y, Gu W, Gierisch A M U, Xu Y J and Uotila P. 2022. NEMO-Bohai 1.0: a high-resolution ocean and sea ice modelling system for the Bohai Sea, China. *Geoscientific Model Development*, 15(3): 1269-1288 [DOI: 10.5194/gmd-15-1269-2022]
- Yan Y, Huang K Y, Shao D D, Xu Y J and Gu W. 2019. Monitoring the characteristics of the Bohai Sea ice using high-resolution geostationary ocean color imager (GOCI) data. *Sustainability*, 11(3): 777 [DOI: 10.3390/su11030777]
- Yan Y, Shao D D, Gu W, Liu C Y, Li Q, Chao J L, Tao J and Xu Y J. 2017. Multidecadal anomalies of Bohai Sea ice cover and potential climate driving factors during 1988-2015. *Environmental Research Letters*, 12(9): 094014 [DOI: 10.1088/1748-9326/aa8116]
- Yan Y, Uotila P, Huang K Y and Gu W. 2020. Variability of sea ice area in the Bohai Sea from 1958 to 2015. *Science of the Total Environment*, 709: 136164 [DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136164]
- Yu Karpechko A, Andrew Peterson K, Scaife A A, Vainio J and Gregow H. 2015. Skilful seasonal predictions of Baltic Sea ice cover. *Environmental Research Letters*, 10(4): 044007 [DOI: 10.1088/1748-9326/10/4/044007]
- Yu Z Q, Wang T W, Zhang X, Zhang J and Ren P. 2019. Locality preserving fusion of multi-source images for sea-ice classification. *Acta Oceanologica Sinica*, 38(7): 129-136 [DOI: 10.1007/s13131-019-1464-2]
- Yuan S, Liu C Y, Liu X Q, Chen Y and Zhang Y J. 2021. Research advances in remote sensing monitoring of sea ice in the Bohai sea. *Earth Science Informatics*, 14(4): 1729-1743 [DOI: 10.1007/s12145-021-00683-6]
- Zack G W, Rogers W E and Latt S A. 1977. Automatic measurement of sister chromatid exchange frequency. *Journal of Histochemistry and Cytochemistry*, 25(7): 741-753 [DOI: 10.1177/25.7.70454]
- 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]
- Zeng T, Shi L J, Marko M, Cheng B, Zou J H and Zhang Z P. 2016. Sea ice thickness analyses for the Bohai Sea using MODIS thermal infrared imagery. *Acta Oceanologica Sinica*, 35(7): 96-104 [DOI: 10.1007/s13131-016-0908-8]
- Zhou Y, Hao Y L, Liu D W, Cui T W, Yu R H and Zhang Z L. 2018. Estimation of suspended particulate matter concentration based on Landsat 8 data in the Yellow River Estuary. *Journal of Marine Sciences*, 36(1): 35-45 (周媛, 郝艳玲, 刘东伟, 崔廷伟, 于瑞宏, 张志磊. 2018. 基于Landsat 8影像的黄河口悬浮物质量浓度遥感反演. *海洋学研究*, 36(1): 35-45) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-909X.2018.01.004]

Automatic detection algorithm of annual sea ice in Bohai Sea incorporating adaptive partitioning of suspended particulate matter

QIU Huachang, GONG Zhaoning, ZHAO Yuxin, WU Hongwei

1. MOE Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
2. Beijing Laboratory of Water Resource Security, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
3. State Key Laboratory Incubation Base of Urban Environmental Processes and Digital Simulation, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract: Annual sea ice is an important indicator of climate change in mid-latitudes, especially the thin ice with a thickness of less than 10 cm has a more significant response to climate. The Bohai Sea, as a marine system with special research value in the temperate monsoon climate zone and even globally, shows a high degree of sensitivity in its natural ecological and socio-economic systems, and there is a significant bidirectional feedback effect between the sea ice dynamics and the regional climate and human activities. The Bohai Sea is affected by forty runoffs from the Yellow River, Liao River, and Hai River, and the concentration of Suspended Particulate Matter (SPM) in

seawater is much higher than that in other sea areas, and the high dynamics of suspended sediment also leads to the complexity of the spectra of sea ice and seawater, which increases the difficulty of accurately detecting the extent of sea ice in the Bohai Sea.

In this study, a segmented processing strategy was employed. Initially, sea ice with a thickness greater than 10 cm was extracted by means of a simple threshold segmentation method. Secondly, in order to address the challenges posed by the high spectral volatility of sea ice and the difficulty in detecting thin ice in the highly dynamic suspended sediment sea area of the Bohai Sea, this study proposes an adaptive partitioning method based on spectral shapes by deeply analysing the spectral characteristics of ice and water in this region. The method is predicated on the dynamic division of the Bohai Sea into regions characterised by low and high suspended particulate matter concentrations. Following this treatment, the spatial heterogeneity of SPM concentration in the region is significantly reduced, thereby effectively improving the detectability of thin ice with a thickness of less than 10 cm. Subsequently, an analysis was conducted on the four bands most commonly employed in optical images, with a view to ascertaining their degree of separability and identifying the preferred segmentation features. The analysis results demonstrate that the blue band and the near-infrared band are the most effective segmentation bands for low and high SPM concentration regions, respectively. The segmentation threshold is determined automatically based on the preferred features using the single-peak threshold method, and the image edge features are fused to enhance the robustness of the algorithm.

The present method is applied to five optical images, MODIS, Sentinel-2, GF-1, Sentinel-3 and GOCI, and the accuracy is verified by using the 12 views of sea ice interpretation maps and sample points of high-resolution remote sensing images for the years 2017–2019 released by the North Sea Forecasting Centre of the Ministry of Natural Resources. The results show that the accuracy of this algorithm can reach more than 90% and is applicable to a variety of optical images; simulation experiments using the spectral linearity mixing model demonstrate that this algorithm is capable of identifying annual sea ice with densities of more than 30% in highly dynamic suspended sediment sea areas.

This method can automatically, stably, efficiently and accurately extract annual sea ice, which can be applied to multi-source sensors, and also provides data support for researching climate change by giving full play to the advantages of multi-source remote sensing data for more comprehensive and fine sea ice monitoring.

Key words: Bohai sea, annual sea ice, multiple optical sensors, suspended particulate matter concentration, concave convex index, adaptive marine zoning, single-peak threshold method, automatic detection algorithm

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41971381, 42071396); National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFC0505903)