

基于 Sentinel-1 SAR 影像的南黄海浒苔提取与动态监测

唐鹏飞^{1,2,3,4}, 杜培军^{1,2,3,4}, 郭山川^{1,2,3,4}, 郟璐^{1,2}, 方宏^{1,2,3,4}

1. 南京大学 地理与海洋科学学院, 南京 210023;

2. 自然资源部 海岸带开发与保护重点实验室, 南京 210023;

3. 自然资源部 国土卫星遥感应用重点实验室, 南京 210023;

4. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023

摘要: 中国南黄海地区夏季常发生浒苔灾害, 引发严重的生态环境和经济问题, 精准获取浒苔时空分布信息对灾害的定量评估和制定相应的防控策略具有重要意义。光学遥感影像可用于区域尺度浒苔空间信息精准提取, 但常受限于数据的空间分辨率和云雨影响, 难支撑定期和稳定的浒苔监测。合成孔径雷达影像具有全天候全天时定期观测的优势, 为浒苔动态监测与时空分布研究提供了更多可能, 但目前研究尚不充分。在 Sentinel-1 影像支持下, 本文提出了一种顾及后向散射系数和标准差特征的浒苔自动提取方案。该方法首先通过自适应阈值方法对影像进行分割, 根据边缘浒苔与海水在后向散射系数标准差之间的差异, 剔除后向散射系数较高的海水, 获得浒苔初提取结果。最后针对海上与浒苔特征相似的目标, 依据不同类型分别设计了基于时序信息和后向散射系数阈值的后处理方案。基于 Google Earth Engine 平台, 以 2021 年南黄海为例, 实现了 2021 年 5—7 月南黄海区域的浒苔动态监测。结果表明, 提出的浒苔提取方法精度达 93%, 2021 年南黄海区域观测到的浒苔最大覆盖面积达 1700 多 km², 在浒苔发生发展过程中呈现“分散发育、聚集暴发、扩散消亡”的整体趋势。

关键词: 遥感, 浒苔监测, Sentinel-1 影像, 时空变化, Google Earth Engine, 南黄海区域

中图分类号: TP751/P2

引用格式: 唐鹏飞, 杜培军, 郭山川, 郟璐, 方宏. 2024. 基于 Sentinel-1 SAR 影像的南黄海浒苔提取与动态监测. 遥感学报, 28(8): 2030–2044

Tang P F, Du P J, Guo S C, Qie L and Fang H. 2024. Spatial-temporal dynamic monitoring of *Ulva prolifera* in the South Yellow Sea based on Sentinel-1 SAR images. National Remote Sensing Bulletin, 28(8): 2030–2044 [DOI: 10.11834/jrs.20242200]

1 引言

2021 年 6 月, 中国南黄海海域暴发大规模绿潮灾害, 造成了严重的生态灾害和经济损失。绿潮是海洋中一些大型绿藻 (如浒苔) 在一定环境条件下爆发性增殖或聚集达到一定水平, 导致生态环境异常的一种现象 (Guo 等, 2021)。据 2020 年中国海洋灾害公报统计, 自 2007 年以来, 中国南黄海海域已连续 15 年周期性大规模暴发浒苔绿潮灾害, 近年来浒苔的最大分布面积达到 57500 km² (自然资源部, 2021)。南黄海浒苔绿潮持续时间

长、影响海域广、清理难度大, 被认为是世界上最大规模的绿潮灾害 (Hu 等, 2019; Xing 等, 2019)。浒苔绿潮灾害也已经成为黄海最严重的生态灾害之一, 不仅影响海洋生态系统, 而且造成了严重的社会影响和经济损失, 对黄海浒苔绿潮灾害的防控治理迫在眉睫 (Xing 和 Hu, 2016; Xing 等, 2019)。

浒苔在海上的分布范围极广, 传统的调查方式难以在大范围提取。卫星遥感技术由于时效性高、监测范围广且周期性监测等优势, 为浒苔动态监测分析提供了可能。浒苔与陆地植被光谱特

收稿日期: 2022-04-24; 预印本: 2023-05-31

基金项目: 江苏省海洋科技创新项目 (编号: JSZRHYKJ202101); 自然资源部海岸带开发保护实验室开放基金 (编号: 2021CZEPK04)

第一作者简介: 唐鹏飞, 研究方向为遥感影像处理与时序分析。E-mail: sgos_tpf@smail.nju.edu.cn

通信作者简介: 杜培军, 研究方向为城市环境遥感。E-mail: peijun@nju.edu.cn

征相似,即在蓝光(400—490 nm)及红光(650—680 nm)通道各自存在吸收谷,而在绿光(530—570 nm)和近红外(700—750 nm)通道出现反射峰。因此浒苔遥感信息提取方法主要基于光学影像,通过归一化植被指数 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)、漂浮植被指数 FAI (Floating Algal Index) 和增强型植被指数 EVI (Enhanced Vegetation Index) 等来提取海面浒苔信息 (Hu, 2009; Qi 等, 2020; Schreyers 等, 2021; Xing 等, 2018; 袁超等, 2020; 齐琳等, 2023)。但目前基于光学影像的海面浒苔动态监测研究在南黄海浒苔大面积暴发的夏季常常伴随着多云、多雨天气,难以获取稳定和高质量的光学影像,使得利用光学影像获取精准的浒苔时空信息具有一定的局限性。

合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 具有全天时全天候对地观测的特点,已经广泛用于各类灾害监测和风险评估中 (Guo 等, 2019)。目前基于 SAR 影像 (如 Radarsat-2 和 GF-3) 的浒苔信息提取研究主要聚焦于 SAR 影像的提取试验,方法包括指数因子法、阈值法和分类法。指数因子法利用浒苔和海水在全极化 SAR 影像上不同极化方式的差异,构建新的指数用于无监督浒苔提取 (Shen 等, 2014)。阈值法是根据浒苔后向散射系数高于海水的特点,人工或自动选取阈值来提取浒苔 (Cui 等, 2018; Ma 等, 2022; Yu 等, 2020)。基于分类的方法通常采用深度学习模型和大量人工选择的样本来提取浒苔 (Gao 等, 2022; Yu 等, 2021)。然而,针对南黄海浒苔 SAR 影像的连续监测与动态分析,当前研究有以下两个缺点:(1)所使用的 SAR 数据多来自商业卫星或保密数据,主要聚焦在单期影像、小区域浒苔识别上,多与光学遥感数据结合使用,缺乏对整个南黄海区域浒苔的大尺度,长时序监测研究 (Cui 等, 2018);(2)未考虑到 SAR 影像中的噪声、海面风浪和船只等对浒苔信息解译的影响,使得浒苔提取的精度难以支持动态分析研究。

在时序 Sentinel-1 SAR 数据和 Google Earth Engine 平台支持下,提出了一种南黄海区域浒苔动态监测方法,分析了 2021 年浒苔的时空变化特征。该方法以高空间分辨率、短重访周期且免费获取的 Sentinel-1 SAR 影像为数据源,探究了浒苔与海面常见目标的后向散射信号的异同点,利用

后向散射系数及其标准差,自动剔除影像中的其他目标和噪声,实现了高精度、大尺度、定期的海面浒苔自动监测,可为进一步分析南黄海浒苔绿潮暴发时空特征及为浒苔防控策略制定提供数据和技术支持。

2 研究区与数据介绍

2.1 研究区概况

研究区 (32°N—37°N, 119°E—123°E) 位于南黄海区域 (图 1), 濒临江苏省和山东省, 跨越南通、盐城、连云港、日照、青岛、烟台、威海 7 个地级市。该区域覆盖面积约 30 万 km², 海底地势较为平坦, 平均水深约 45 m, 年平均降水达 1000 mm, 是浒苔的主要分布区域 (Jin 等, 2018; Li 等, 2021)。浒苔暴发期的 6—8 月, 该区域海面温度为 10 °C—28 °C, 受季风影响, 盛行南到东南风, 月平均风速可达 4—6 m/s (Jin 等, 2018)。据生态环境部卫星遥感监测结果, 2021 年 6—8 月南黄海区域暴发大面积的浒苔绿潮灾害, 创历史最大值, 浒苔的最大覆盖面积达 1746 km², 是之前最大年份 2013 年的 2.3 倍左右 (Sun 等, 2022)。

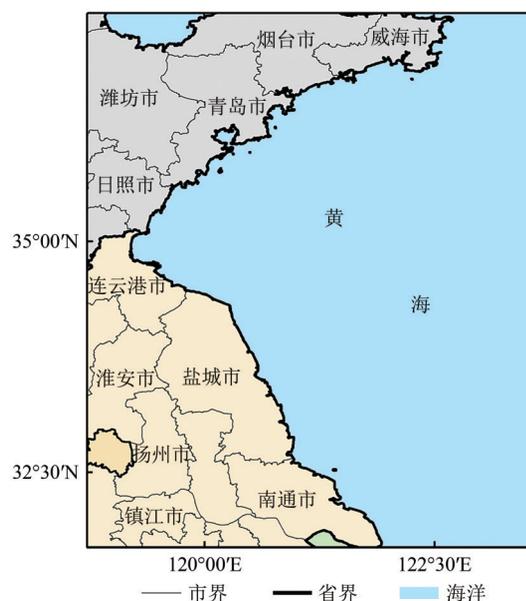


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

在浒苔暴发的 6—8 月, 南黄海地区伴随云雨天气, 限制了光学遥感影像监测海面浒苔的能力。统计 2021 年 6 月和 7 月的研究区 MODIS 影像的每日云量, 如表 1 所示。

由表1可以看出在2021年浒苔暴发的6月和7月,由于云层的影响,光学影像难以形成有效的观测序列对浒苔进行持续观测。虽然SAR影像的重访周期限制了其动态监测浒苔的能力,但其定

期、稳定和不受天气影响的特点保障了监测浒苔整体趋势的能力。在光学影像无法提供有效信息时,SAR影像可以作为一个很好的辅助数据源用于分析浒苔的时空变化。

表1 2021年研究区6—7月云量表

Table 1 Cloud cover for study area during June and July in 2021

| 日期 | 云量 | | 日期 | 云量 | | 日期 | 云量 | |
|----|-----|-----|----|----|----|-------|----|-------|
| | 六月 | 七月 | | 六月 | 七月 | | 六月 | 七月 |
| 01 | 63 | 39 | 11 | 43 | 91 | 21 | 28 | 32 |
| 02 | 79 | 85 | 12 | 93 | 84 | 22 | 15 | 31 |
| 03 | 100 | 99 | 13 | 47 | 97 | 23 | 29 | 46 |
| 04 | 17 | 82 | 14 | 94 | 66 | 24 | 60 | 62 |
| 05 | 13 | 100 | 15 | 87 | 94 | 25 | 93 | 94 |
| 06 | 5 | 97 | 16 | 86 | 97 | 26 | 92 | 100 |
| 07 | 77 | 100 | 17 | 99 | 41 | 27 | 91 | 94 |
| 08 | 78 | 75 | 18 | 97 | 37 | 28 | 90 | 94 |
| 09 | 97 | 60 | 19 | 18 | 29 | 29 | 89 | 92 |
| 10 | 97 | 28 | 20 | 37 | 55 | 30/31 | 73 | 53/40 |

注:黑体表示云量大于20%。

2.2 数据源与GEE平台

GEE (Google Earth Engine) 是Google提供的对大量全球尺度地球科学和卫星数据进行在线可视化计算和分析处理的云平台 (Gorelick等, 2017)。平台能够存取卫星图像和其他地球观测数据库中的资料,并提供足够的运算能力进行数据处理,避免了传统遥感分析模式带来的数据下载、预处理等繁琐的过程 (郭山川等, 2021)。

Sentinel-1由两颗搭载了C波段合成孔径雷达传感器的卫星A、B组成,可提供免费的全球6d一期SAR观测数据 (Tiwari等, 2020)。Sentinel-1有4种成像模式:条带扫描模式SM (Stripmap)、干涉宽幅模式IW (Interferometric Wide Swath)、超宽模式EW (Extra Wide Swath)和波模式WV (Wave)。使用的是GEE平台中存储的Sentinel-1 IW模式的地距多视影像GRD (Ground Range Detected)产品,该数据集是通过Sentinel-1工具箱进行热噪声去除、辐射校准和地形校正等处理后的Level-1产品 (Filipponi, 2019)。IW模式下的SAR影像幅宽为250 km,空间分辨率为10 m,极化方式包括VV/VH双极化。在南黄海区域由于Sentinel-1B卫星条带不连续导致部分时段缺少数据。因此,在该研究区Sentinel-1的重访周期为6 d或12 d。

3 原理与方法

浒苔自动化提取的总体流程如图2所示,该方法主要包括:数据处理、信息提取和信息后处理3个部分。在数据处理中针对Sentinel-1 SAR进行相应的陆地和滩涂掩膜,对影像进行分割;在信息提取中,考虑海面情况复杂,采用逐级自适应阈值得到合适的浒苔分割阈值。由于部分风浪海面和浒苔的后向散射特征相似,利用位于边缘的浒苔与风浪海面在后向散射系数标准差之间的差异,可以剔除后向散射系数较高的海面,获得初步浒苔提取结果。滩涂、海面风电平台及海面船只等和浒苔具有相似的后向散射系数特征,会影响提取结果。因此针对不同噪声类型分别设计了基于时序信息和后向散射系数阈值的后处理方案。

3.1 数据筛选与掩膜

通过GEE平台筛选了符合以下条件的Sentinel-1数据:(1)成像时间为2021年5—7月。依据中国海洋灾害公报,每年的5月中下旬是卫星可以发现浒苔的最早时间,而浒苔一般会在7月下旬消亡 (自然资源部, 2021);(2)空间上覆盖如图1中所示的南黄海区域;(3)极化方式为VV/VH双极化。共筛选到112景的Sentinel-1数据,包含70景Sentinel-1A和42景Sentinel-1B数据。涉及到Sentinel-1A和

Sentinel-1B 的相对轨道号分别为 171, 69 和 98, 轨道号的分布情况如图 3 所示。由于陆地和滩涂的后向散射系数与浒苔相似, 使用最新的行政边界

数据和滩涂数据 (Jia 等, 2021) 将其掩膜。滩涂数据由 Sentinel-2 数据制作而成, 空间分辨率与 Sentinel-1 数据相同。

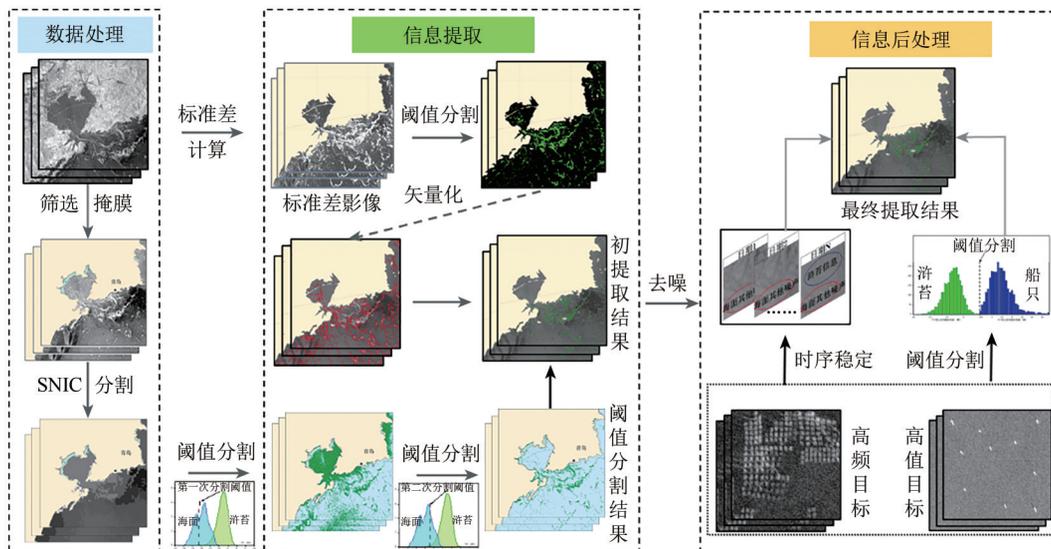


图 2 基于 Sentinel-1 的南黄海浒苔自动提取流程

Fig. 2 Flow chart of automatic extraction of *Ulva prolifera* in South Yellow Sea based on Sentinel-1

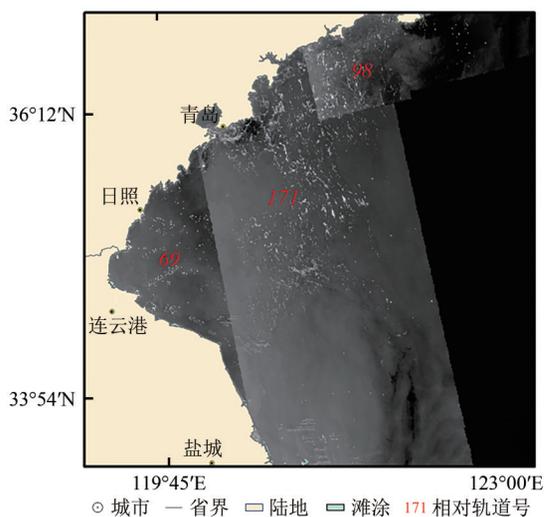


图 3 研究区 Sentinel-1 VV 极化方式数据覆盖范围及相对轨道号

Fig. 3 Data coverage and relative orbital numbers for the Sentinel-1 VV polarization mode in the study area

3.2 Sentinel-1 影像分割

相较于以体散射为主导的 VH 极化方式, 大量研究表明 VV 极化方式对浒苔的分布更加敏感, 能探测出更多的浒苔 (Yu 等, 2020; Shen 等, 2014)。如图 4 所示, 对比 VV 和 VH 影像, 可以看出 VV 影像下可观测到的浒苔更多。统计浒苔和海水样本的后向散射系数特征, 结果如图 5 所示, 浒苔与海

水在 VV 极化方式下相较于 VH 极化方式具有更加明显的区分度, 更适用于海面浒苔信息提取, 因此本研究选择 VV 极化方式进行浒苔提取。

考虑到浒苔在空间上表现为聚集性, 同时为了减弱 SAR 影像中相干斑噪声对浒苔提取的影响, 采用简单非迭代聚类算法 SNIC (Simple Non-Iterative Clustering) (Achanta 和 Süsstrunk, 2017) 对整个影像进行面向对象分割。SNIC 主要分割的参数如下: 尺寸为 10、紧致度为 0.2、连通性为八连通、邻近像素数设为 20 个。SNIC 在保留浒苔空间形态特征的同时, 有效地减弱了 SAR 影像中相干斑噪声的影响。

3.3 后向散射系数阈值分割

海面目标回波信号的强度由雷达分辨率单元内所有散射体共同决定。海面上漂浮的浒苔改变了原有海面的雷达散射机制, 散射过程复杂, 通常包含体散射、面散射和二次回波散射。由于海水通常为镜面反射, 回波能量较弱, 而覆盖在海水表面的浒苔回波能量相对较强, 在 SAR 影像上成亮点状或者亮色条带延伸状分布, 因此可以通过阈值分割方法提取浒苔 (Cui 等, 2018; Shen 等, 2014)。海面情况复杂多变, 基于经验的单一固定阈值难以满足不同时期、不同场景下的浒苔

提取 (Yu 等, 2020)。大津法 (Otsu) 作为一种图像灰度自适应的阈值分割算法, 可以按照灰度值的分布, 将图像分为背景和目标两部分 (Otsu, 1979)。该方法遍历不同的阈值, 当背景和目

标之间的类间方差最大时, 得到所求的最佳阈值, 大津法也被用于 SAR 影像浒苔提取中 (Yu 等, 2020), 因此本文采用大津法针对不同幅影像自动获取不同的分割阈值。

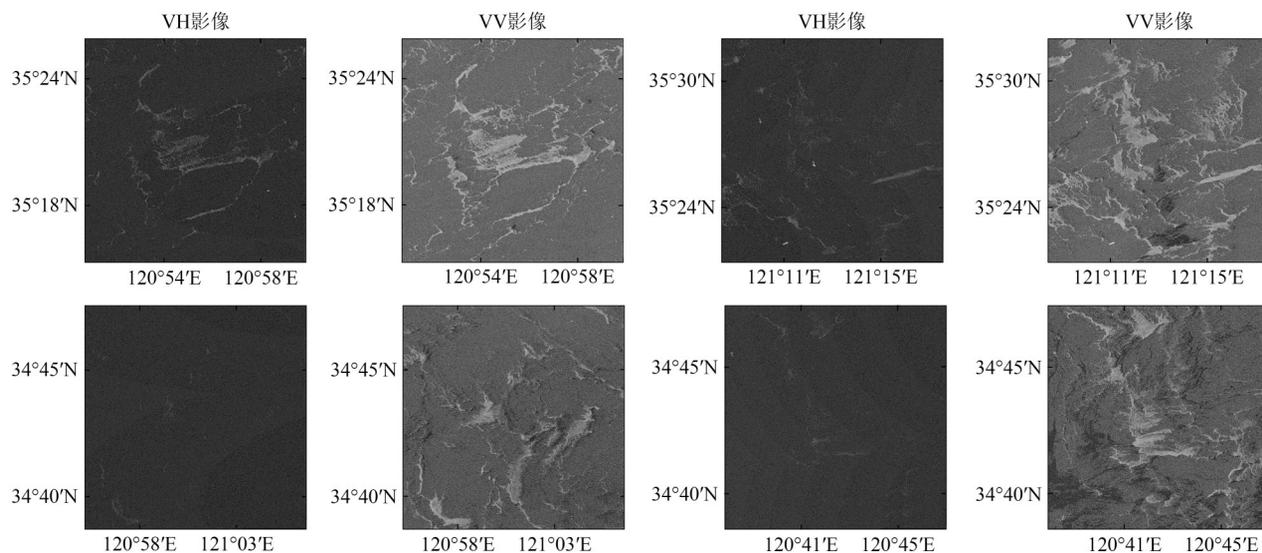


图4 VV和VH影像对比图

Fig. 4 Comparison of VV and VH images

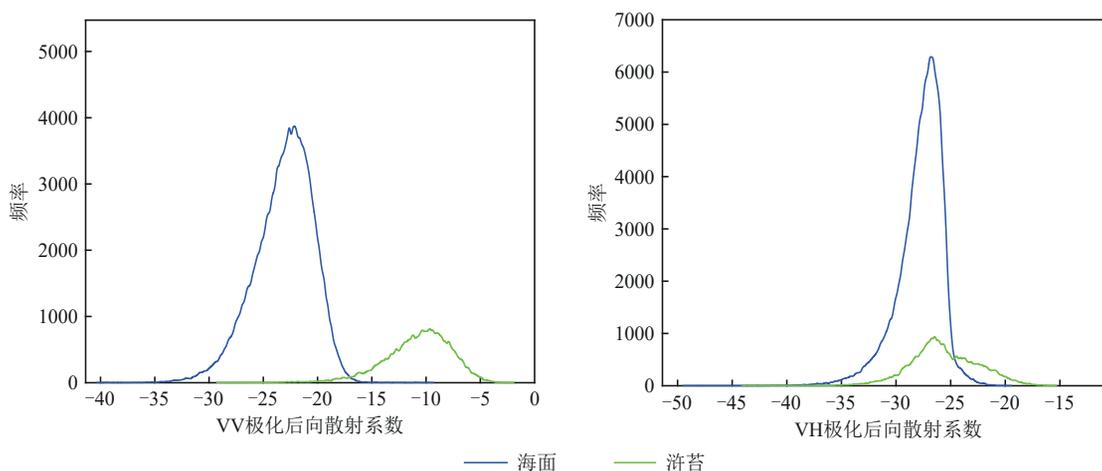


图5 不同极化方式下浒苔和海面的后向散射系数特征

Fig. 5 Characteristics of the backscattering coefficients of the *Ulva prolifera* and the sea surface under different polarization modes

对于单景 SAR 影像, 复杂海面情况使得单次的自适应阈值法难以取得理想效果。在 SAR 影像中, 海面一般分成 4 类: (1) 平静海面 (图 6 (a)), 海面无风或风速很小时可视为平坦海面, 它表现为镜面反射; (2) 风浪海面 (图 6 (b)), 海面有风浪时会形成一个随机起伏的粗糙面, 散射回波增强; (3) 冻结海面, 主要指海面中有冰雪、海冰等; (4) 污染海面, 它一般指海面上有油污或其他污染物等形成两层介质。海面上的漂浮杂物会改变雷达后向散射机制, 造成后向散射系数区

别于邻近水域。当海面上有浒苔时 (图 6 (c)), 会使雷达回波增强, 造成雷达影像上的亮点。在南黄海区域, 主要涉及 (1)、(2)、(4) 3 种情况。不同情况下的海面雷达回波强度在 VV 极化方式上有较为明显的差异, 使得类间方差呈现多峰。

统计 5 月 1 日和 6 月 30 日 VV 后向散射系数特征, 如图 7 所示。5 月 1 日海面尚未出现浒苔, 且无明显风浪, 后向散射系数统计图呈现单峰; 而 6 月 30 日, 海面上出现大面积的浒苔, 海面情况

复杂,同时包括(1)、(2)、(4)3种情况,后向散射系数统计图呈现多峰。因此,只使用一次大津法得到的阈值并不能确定是分割浒苔与其他海面的最佳阈值,反而很可能是平静海面与风浪海面的阈值。考虑到 Sentinel-1 SAR 影像 250 km 的

幅宽,在阈值分割阶段,采用两次逐级自适应阈值法自动分割。在第一次阈值分割的结果上,剔除后向散射系数低的平静海面后,重新使用大津法进行第二次阈值分割,获得浒苔的最佳分割阈值。

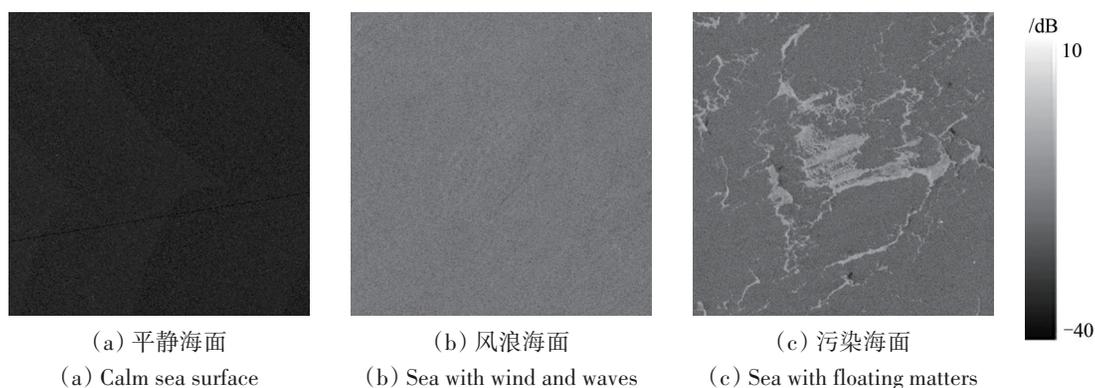


图6 南黄海海域不同海面 VV 极化方式 SAR 图像特征

Fig. 6 Characteristics of SAR images with different surface under VV polarization mode in the South Yellow Sea

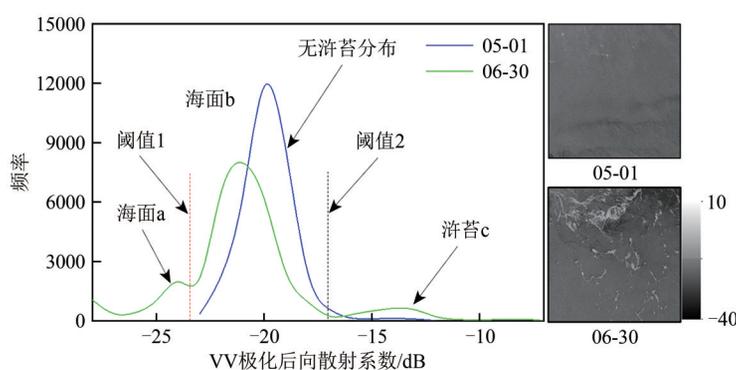
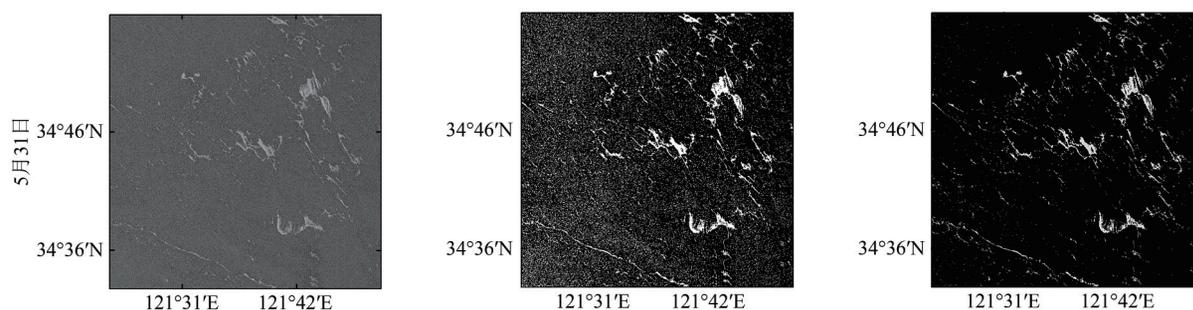


图7 SAR 影像海面后向散射系数分布特征

Fig. 7 Sea surface backscatter coefficient distribution characteristics in SAR images

为更好说明两次大津法的必要性,选择5月31日、6月18日和6月30日3个不同时间段的 VV 影像,对一次和两次大津法阈值分割结果进行对比。结果如图8所示,可以看出,在浒苔暴发的不

同时期和阶段,相比会误提大量海水的一次分割法,两次大津法分割能够有效抑制复杂背景和不均衡样本的影响,提供了更好的分割阈值,实现了浒苔和海水的初步区分。



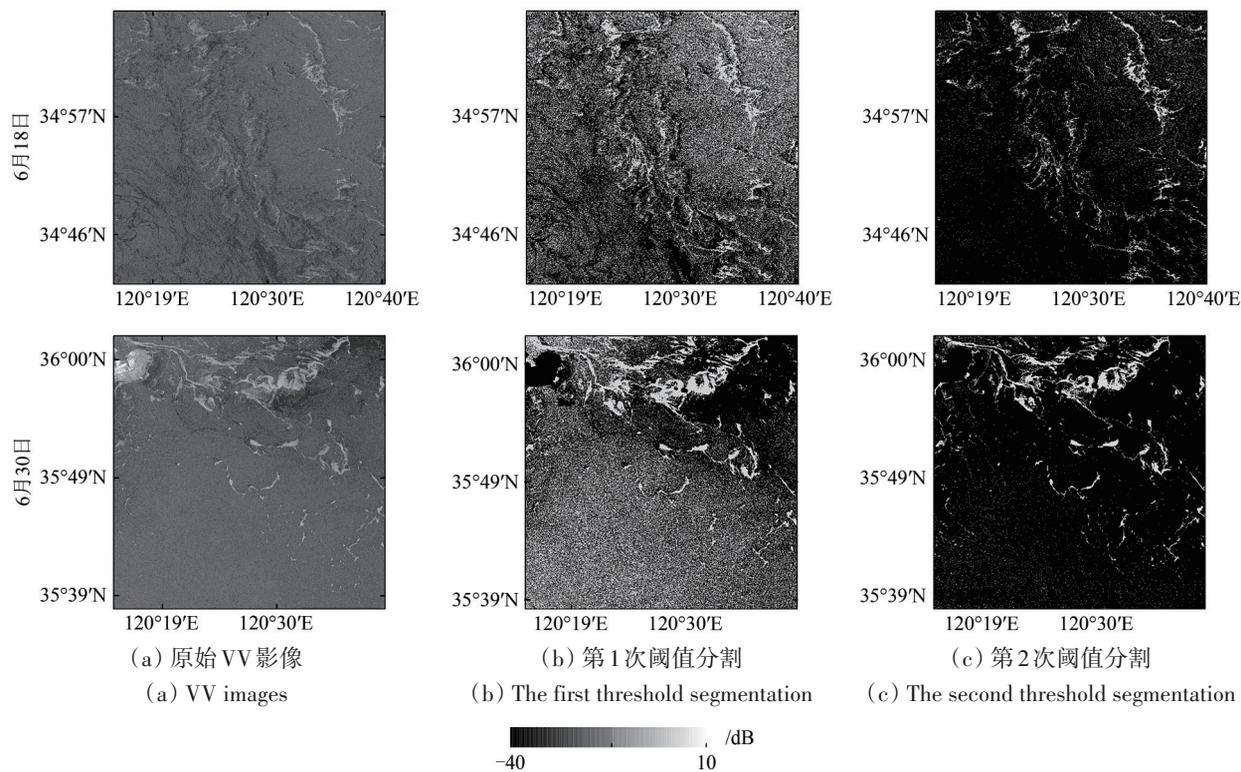


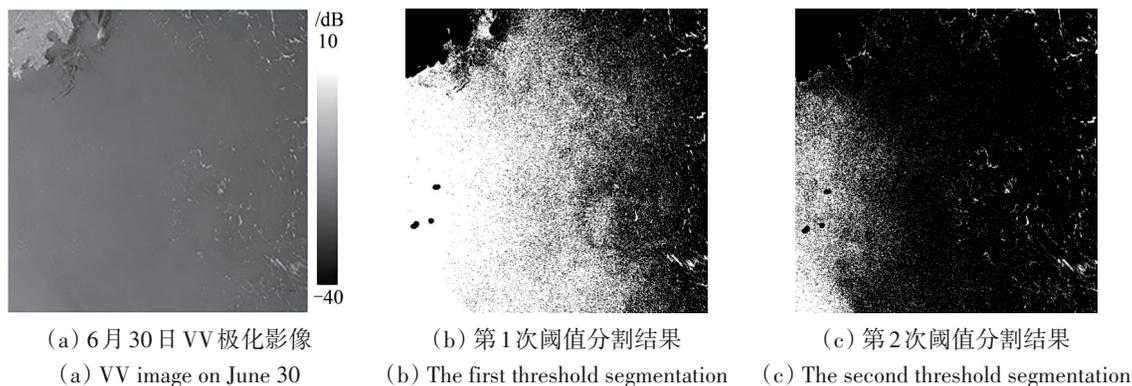
图8 Sentinel-1 VV影像和阈值分割结果

Fig. 8 Threshold segmentation results for Sentinel-1 VV images and standard deviation images

3.4 基于标准差的海水掩膜

两次逐级自适应阈值法可以有效剔除掉平静海面，但当海面上局部区域有较大风浪导致后向散射系数较高时，仅通过阈值法会将该区域错误提取为浒苔信息。如图9(c)所示，仅基于阈值分割的提取效果并不理想，会引入部分风浪海面噪声。虽然可以通过增加分割次数获取更高的阈值，但同时会掩膜掉后向散射系数较低的浒苔，造成浒苔漏提。浒苔斑块边缘是浒苔和海水的临

界部分，由于浒苔和海水的后向散射系数存在较大差异，在SAR影像上图像亮度差异明显。由风浪等所引起的海面噪声其本质上还是海面，虽然整体后向散射系数偏高，但分布均一，不存在明显的边界。因此，可以通过边缘检测算法识别浒苔斑块的边缘来剔除由风浪海面所引起的噪声。常用的边缘检测方法如Canny边缘算子也常被用于浒苔提取中(Zhang等, 2021)，但阈值选取通常需要人工来判断，同时由于SAR影像中相干斑噪声的影响导致出现很多的破碎边缘。



(a) 6月30日 VV极化影像
(a) VV image on June 30

(b) 第1次阈值分割结果
(b) The first threshold segmentation

(c) 第2次阈值分割结果
(c) The second threshold segmentation

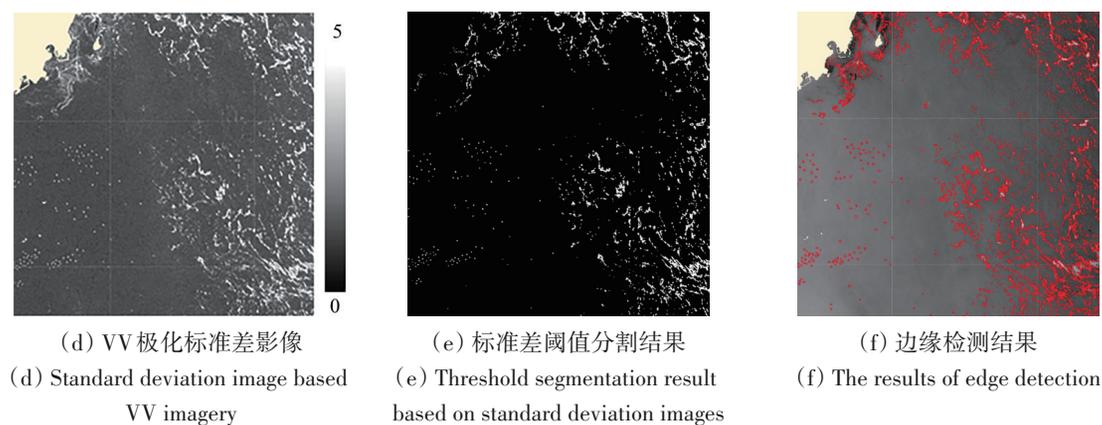


图9 Sentinel-1 VV影像和标准差影像的阈值分割结果

Fig. 9 Threshold segmentation results for Sentinel-1 VV images and standard deviation images

标准差反映组内个体的离散程度,对噪声敏感性较低,也常被用于边缘信息提取中(Xu等,2015)。对于处于浒苔的边缘部分,后向散射系数变化明显,因此标准差较大。相反后向散射系数较高的风浪海面,整体分布均匀,标准差较小。

为统计后向散射系数标准差的差异,分别随机选择后向散射系数高于第一次分割阈值的海面和位于边缘的浒苔样本点各5000个。样本点的分布如图10所示,其中I—VI为部分边缘浒苔样本点的细节图。

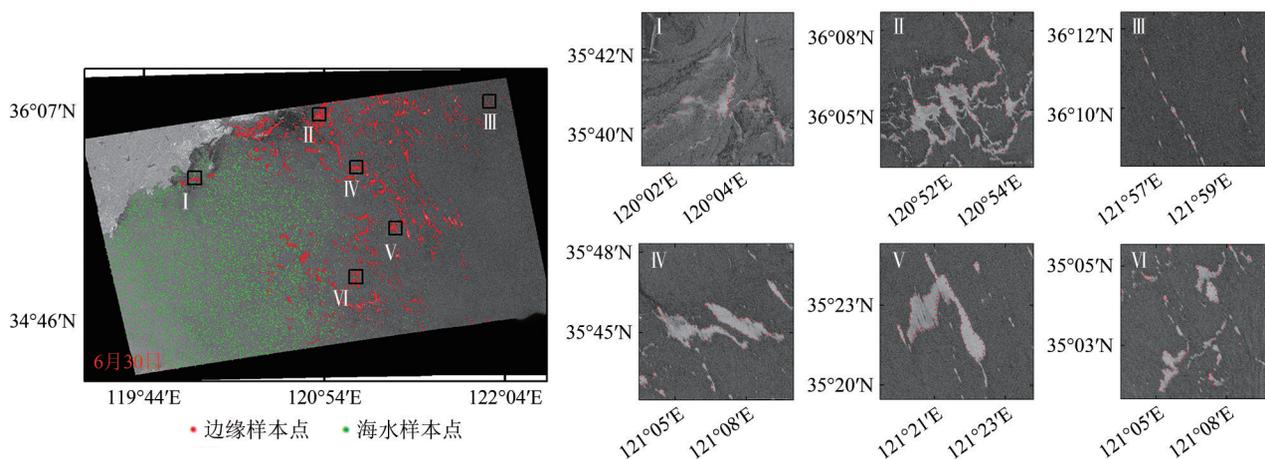


图10 海水和边缘浒苔的样本点分布图

Fig. 10 Sample point distribution map of seawater and edge of *Ulva prolifera*

统计边缘浒苔和风浪海面的后向散射系数标准差,如图11所示,边缘浒苔和风浪海面在后向散射系数标准差中具有明显差异。因此可以通过影像后向散射系数标准差之间的差异来剔除后向散射系数较高的风浪海面。考虑到平静海面与风浪海面的接触面标准差也较大,因此只对经过阈值分割后的影像进行滑动窗口后向散射系数标准差统计,并通过自适应阈值法选择标准差分割阈值,滑动窗口大小设为20。对比图9(c)和图9(f),基于标准差影像的检测算法可以有效剔除由风浪海面造成的噪声。最后将后向散射系数阈值分割

与边缘提取的结果叠加得到浒苔信息。

3.5 浒苔信息后处理

然而,一些海面目标与浒苔的后向散射系数特征相似,对浒苔提取产生一定影响。这些目标可以分为两类:一类属于高频目标如沿海陆地,另一类属于高值目标如海面船只。因此针对不同类型的目标采用相应的策略进行信息后处理。高频目标如沿海陆地或近海养殖由于被海水覆盖(图12(d)),后向散射系数特征与浒苔相似,无法通过后向散射系数的阈值去除。但这些目标是常年存在的,具有时空稳定性。而浒苔具有明显

的时间特征, 只在特定时期出现, 且空间上具有随机性。因此将浒苔暴发前的提取结果作为该类目标并逐期剔除。

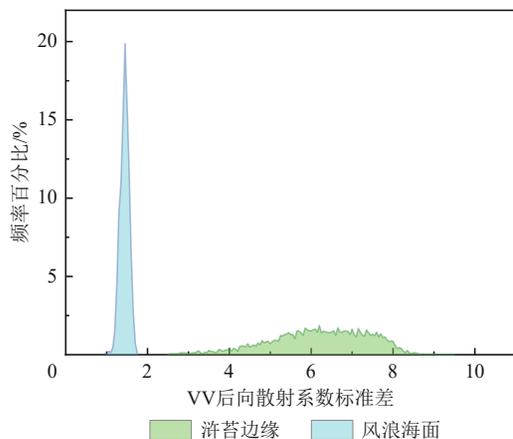


图 11 Sentinel-1海面VV极化标准差分布特征

Fig. 11 Characteristics of the standard deviation distribution of sea surface VV polarization in Sentinel-1

高值目标如船只(图12(c))多为金属目标, 且具有特定的几何结构, 通常在雷达信号中发生二面角反射, 散射信号增强造成的后向散射系数相较于浒苔更强, 在VV影像上后向散射系数也很高, 尤其是中心金属部分。分别随机采样2000个

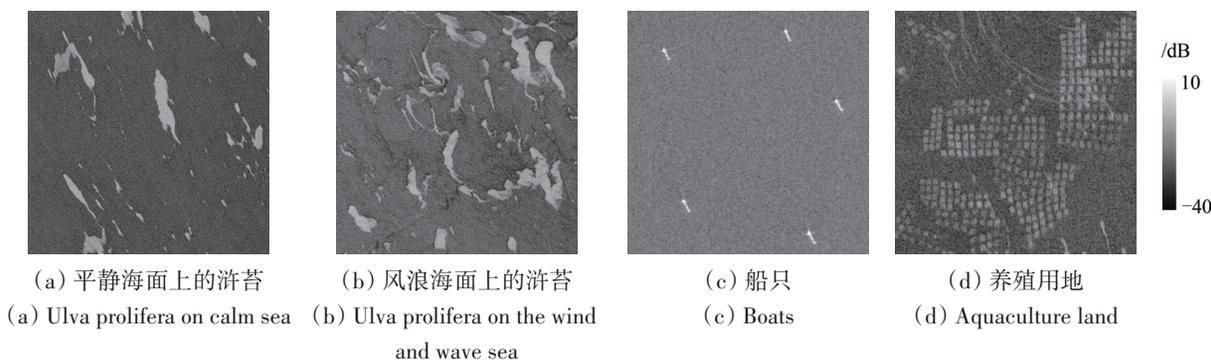


图 12 VV极化方式下南黄海海域常见的Sentinel-1图像特征

Fig. 12 Common Sentinel-1 image features in the South Yellow Sea under VV polarization mode

图14(a)影像中包含244个浒苔样本和1756个非浒苔样本, 图14(b)影像中包含319个浒苔样本和1681个非浒苔样本。考虑到两类样本的不均匀性以及本研究主要是针对浒苔的目标提取, 以精确率(Precision)、召回率(Recall)和综合二者的F1-分数(F1)作为精度评定的指标。精度评定的结果如表2所示。

从表2可以看出, 提出的方法F1评价指标超过0.94, 其他评价指标也均超过93.50%, 表明了

船只样本和3000个浒苔样本进行统计(图13), 发现船只目标在VV影像上的后向散射系数基本大于0, 而浒苔的后向散射系数均小于0。考虑到某些船只目标的局部存在后向散射系数值小于0的情况, 因此构建 20×20 的滑动窗口, 获取窗口中的最大值, 如果大于0, 则将该区域掩膜掉。

4 结果与分析

4.1 浒苔提取结果验证

由于浒苔相较于整个海面属于小目标, 随机空间抽样选择精度评估点可能会导致抽取到的浒苔验证点较少, 造成精度评价的不准确性。考虑到浒苔分布特征与Sentinel-1影像的后向散射系数密切相关, 采用基于后向散射系数的分层抽样获取验证点。同时为了更好地验证所提方法的可靠性, 顾及到时间维和空间维的精度评价, 以浒苔分布较为密集的山东省附近海域, 筛选6景不同日期覆盖该区域的影像用于点位选取。基于分层抽样法共选择了4000个验证样本点, 结合光学影像分幅、逐点进行人工目视判读、标记和核查。点位分布、影像日期和覆盖范围如图14所示。

所提方法的有效性, 选择6个浒苔的主要分布区域, 提取结果如图15所示。从图15可以看出, 在不同海面场景, 不同浒苔分布程度下所提方法均可以精准刻画出浒苔的范围。对比不同时期青岛市近海浒苔的提取结果(图15(d), (f)), 所提方法在稳定有效提取浒苔的同时可有效去除海面其他目标。不同场景、不同时期下的对比结果也充分表明所提方法具有普适性和稳定性, 为后续浒苔时空分布特征的研究提供了有效精度保证。

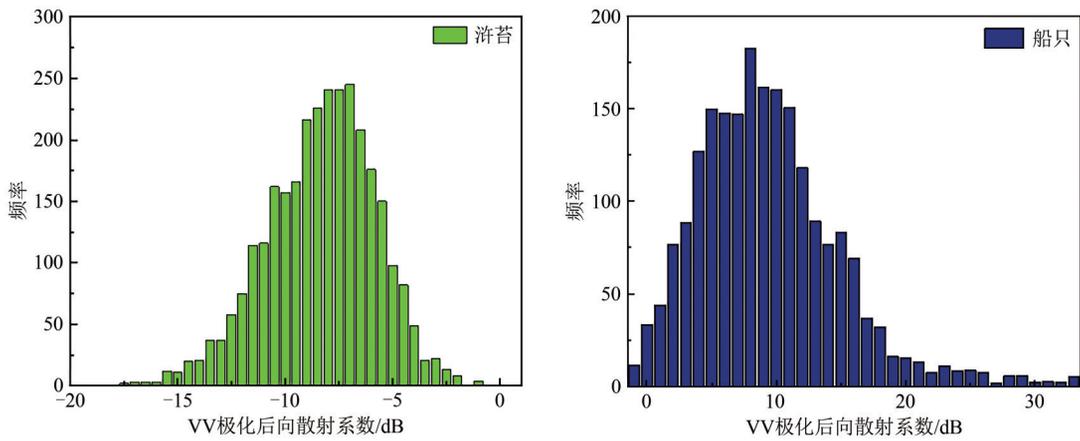
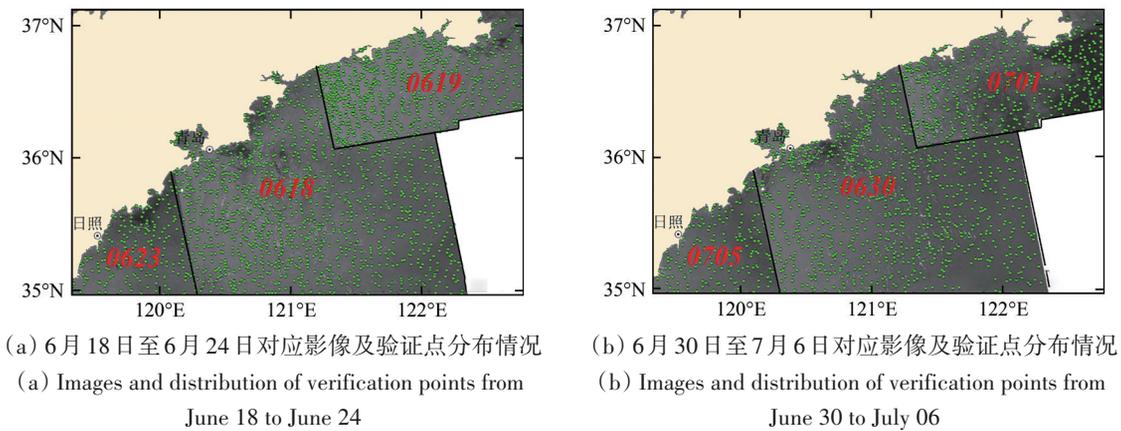


图 13 船只和浒苔后向散射系数统计图

Fig. 13 Statistical plot of backscatter coefficients for ships and *Ulva prolifera*



○ 城市 · 验证样本点 0618 哨兵影像日期 □ 影像范围

图 14 验证样本空间分布

Fig. 14 Spatial distribution of validation samples

表 2 精度评定表

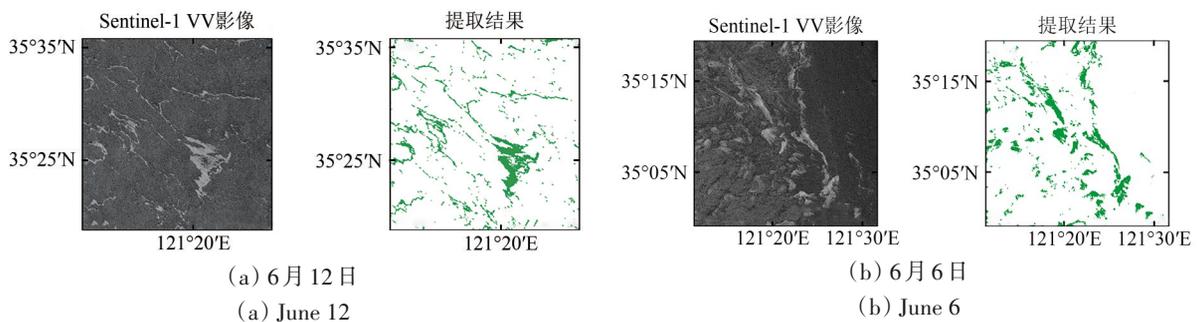
Table 2 Accuracy evaluation table

| 期号 | 精确率/% | 召回率/% | F1 |
|---------|-------|-------|--------|
| 图 14(a) | 93.52 | 94.67 | 0.9409 |
| 图 14(b) | 97.09 | 94.35 | 0.9571 |

4.2 2021 年浒苔时空分布特征

图 16 为 5 月 1 日以来提取的浒苔分布情况。根

据提取结果, 计算不同时期的浒苔质心点。考虑到 Sentinel-1 影像重访周期是 6 天或 12 天, 融合 Sentinel-2 影像监测了研究区的浒苔时空分布, 通过云覆盖率筛选出 6 月 22 日和 7 月 17 日两期云含量较少的 Sentinel-2 影像, 利用 FAI (Hu, 2009) 指数提取浒苔, 阈值通过天津法获得。通过联合 Sentinel-2 影像增加了浒苔监测的时间频率, 提高对浒苔的时空变化规律认识的可靠性。



(a) 6月12日
(a) June 12

(b) 6月6日
(b) June 6

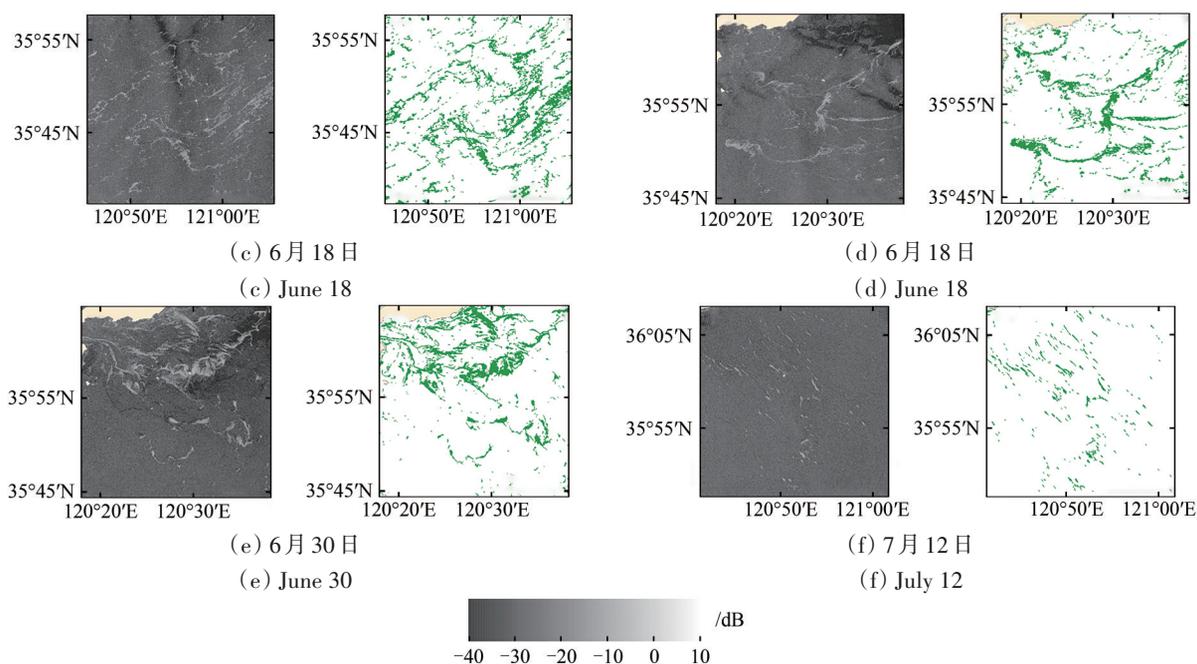


图 15 研究区 Sentinel-1 VV 影像与浒苔提取结果(绿色)

Fig. 15 Sentinel-1 VV images of the study area with the results of the extraction of *Ulva prolifera* (Green)

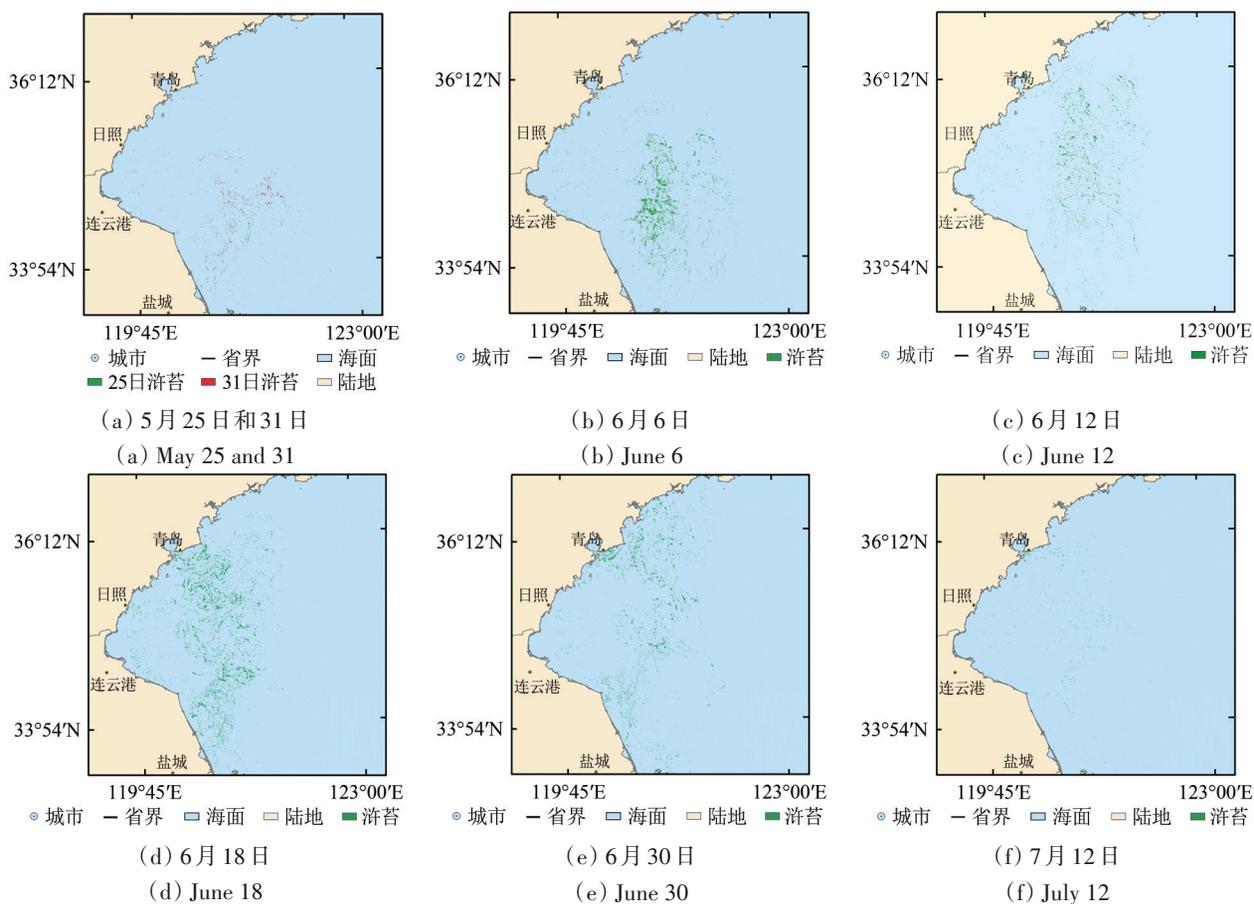


图 16 2021年不同日期 Sentinel-1 影像下浒苔分布情况

Fig. 16 Distribution of *Ulva prolifera* under Sentinel-1 imagery at different dates in 2021

从图 16 和图 17 中可以看出, 从 5 月 25 日开始, 在江苏盐城东部外海监测到小面积聚集的浒

苔, 随着时间推移, 在 5 月 31 日开始往海域北部和东部扩散, 到 6 月 6 日开始第一次大规模暴发,

海面出现大量分布离散的条带状浒苔, 但此时距离海岸相对较远, 在青岛、日照等地附近海岸并未发现大规模浒苔。6月6日至6月12日, 浒苔分布面积进一步扩散, 整体朝着北部和西部扩散。6月12日到6月18日, 浒苔迎来了大暴发, 分布面积剧增, 逐渐分布于南黄海大部分区域。6月22日6月30日, 浒苔的分布面积开始逐渐减少, 向北登陆青岛等附近沿海城市, 由于打捞和自然死亡等原因, 导致7月12日的浒苔大面积减少, 只有少数面积较大的浒苔存在于胶州湾附近, 到7月17日只能在青岛附近外海海域检测到零星浒苔分布。整体来看, 2021年南黄海区域浒苔于江苏省外海萌生, 后生长扩散至南黄海区域中部, 大规模暴发后逐渐向西北部登陆靠岸的形式, 整个持续过程历时两个月。

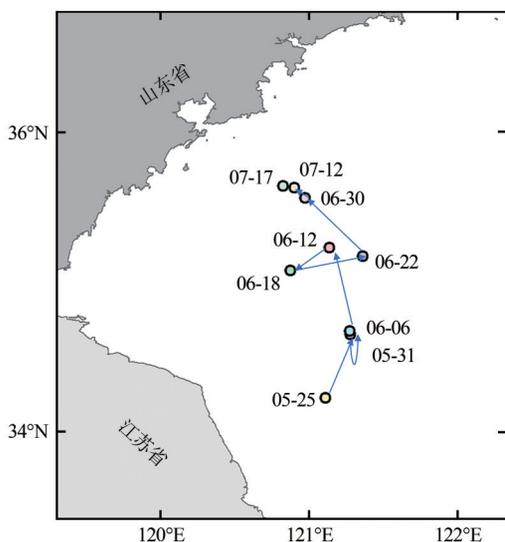


图 17 2021 年不同时期浒苔质心点和迁移方向

Fig. 17 Barycenter and migration directions of *Ulva prolifera* at different periods in 2021

统计不同时期浒苔的总覆盖面积、大于 0.5 km^2 和 1 km^2 的浒苔数量, 其统计结果如图 18 所示。

从图 18 中可以看出, 研究区中 2021 年浒苔暴发主要经历了两个时间点, 首先是 6 月初, 浒苔覆盖面积从最初的 200 km^2 急剧扩增至 1300 km^2 , 后虽有小幅的面积减少, 但在 6 月中下旬又迎来了新一轮暴发, 最大覆盖面积约约为 1700 km^2 。后在 7 月 12 日, 由于大面积的人工捕捞, 整个浒苔的覆盖面积降至 200 km^2 。在 7 月 17 日的 Sentinel-2 影像中的观测中, 浒苔已经趋于消亡。不同面积的浒苔分布数量统计结果同样支撑这一观点。

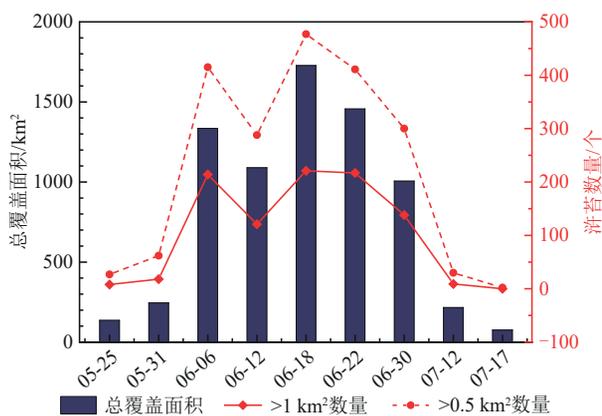


图 18 2021 年南黄海海域浒苔覆盖面积和数量变化

Fig. 18 Changes in area and quantity of *Ulva prolifera* cover in the South Yellow Sea in 2021

4.3 方法的可靠性与局限性

在 SAR 影像中绝大多数浒苔的后向散射系数较强, 与海水有明显区分, 但部分生物量较低的浒苔雷达回波也较低, 容易与海水混淆。为了进一步验证所提方法对于生物量较低的浒苔的适用性, 选择浒苔初生期的 Sentinel-1 影像, 将提取结果与同日期的 Sentinel-2 多光谱影像进行对比, 对比结果如图 19 所示。

如图 19 所示, 所有影像的采集日期为 5 月 31 日, 为浒苔的初生期, 其中图 19 (a) — (e) 为相同的区域, 图 19 (f) 和图 19 (g) 为另一个区域。在光学影像中浒苔的光谱曲线特征与植被相似, 具有明显的特征, NDVI 的值还可以被用于表征浒苔的生物量。

Sentinel-2 及 NDVI 影像说明这个地方存在浒苔, 其中 NDVI 均值为 0.2 左右, 表明浒苔的生物量较低。由于生物量较低的浒苔无法造成体散射, 因此在 VH 影像上无法被观测到 (图 19 (c))。而对于 VV 极化方式, 生物量较低的浒苔也呈现局部“亮斑”的特征 (图 19 (d))。因此, VV 极化方式下可以获得更加精准的浒苔分布结果。为顾及后向散射系数较低的浒苔, 所提方法自适应选择阈值进行分割。由于浒苔相较于海水占比很少, 通常这个阈值相对较低, 涵盖了生物量较低的浒苔。

根据图 19 可知, 基于 Sentinel-1 VV 影像和所提方法可以提取到生物量较低的浒苔 (图 19 (e)), 其中 Sentinel-1 和 Sentinel-2 影像所观测到的浒苔从分布形状和大小来看很有可能为同一片浒苔。由图 19 (e) 和 (g) 可知, 即使部分海水与生物量较低的浒苔后向散射系数接近, 所提方法可以

有效区分两者, 证实该方法的有效性和可靠性。

浒苔的某些部分在其开花期间漂浮在海面上, 而其余部分则淹没在水中, 水下的部分一般不超过 2 m (丁兰平和栾日孝, 2009)。光学传感器可

以采集至少 10 m 深的光谱信息, 有效地捕捉到漂浮的浒苔和水下的浒苔 (Shen 等, 2014)。而 SAR 传感器无法穿透海面, 因此本文提出的方法只适用于检测漂浮在海面上, 呈现“亮斑”的浒苔。

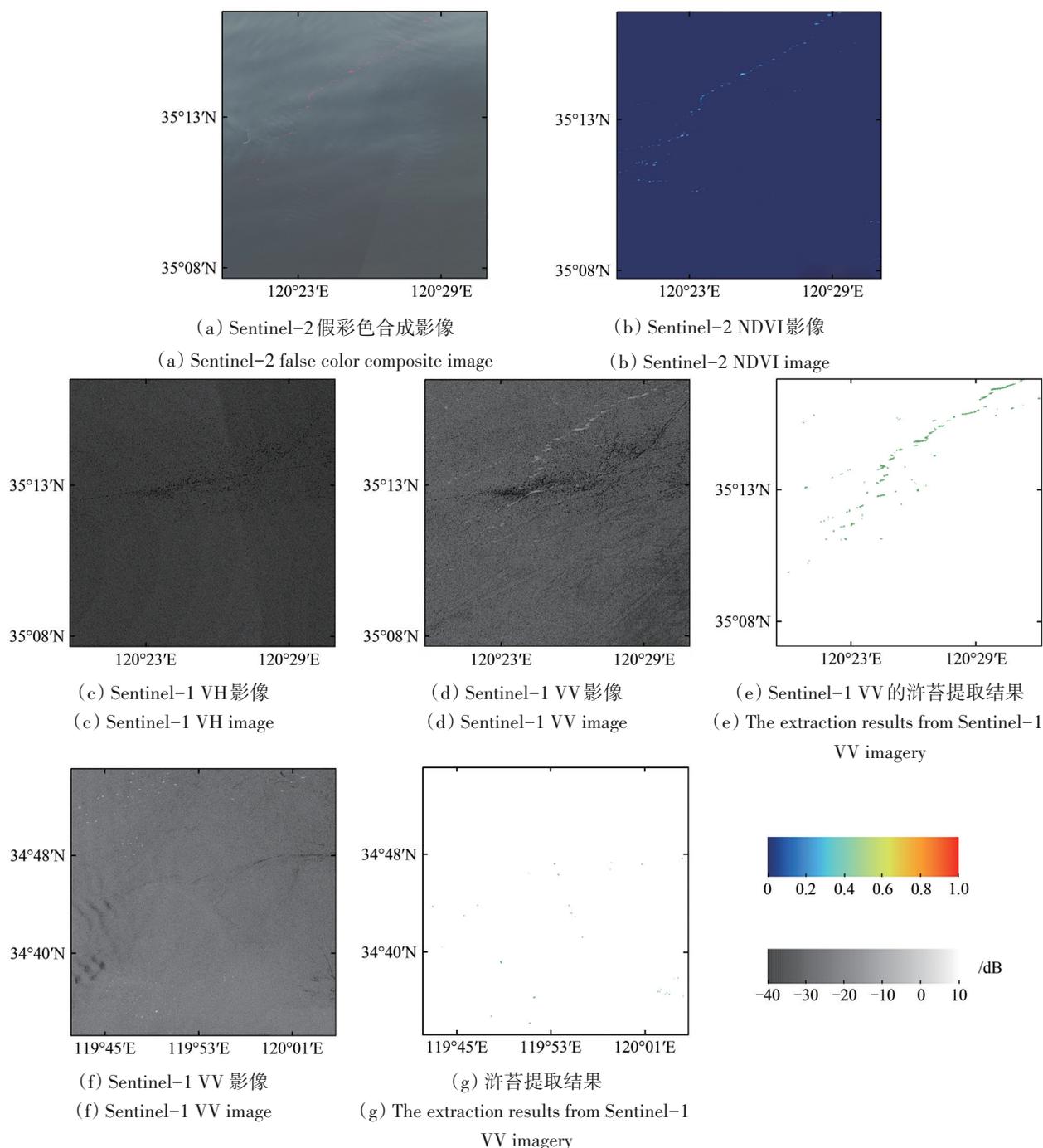


图 19 Sentinel-1 和 Sentinel-2 影像下的浒苔对比图

Fig. 19 Comparison of *Ulva prolifera* under Sentinel-1 and Sentinel-2 images

5 结论

利用中高时空分辨率的 Sentinel-1 双极化 SAR 影像, 分析了南黄海区域浒苔与海面其他目标的

后向散射系数特征的差异性, 顾及浒苔后向散射系数及其标准差的特性, 构建了一种 SAR 影像浒苔信息自动提取流程, 联合 Sentinel-2 光学影像, 实现了 2021 年南黄海区域浒苔的定期监测, 主要

结论如下:

(1) 利用 SAR 影像上浒苔的后向散射系数和标准差与海面其他目标的差异, 可以准确、有效提取浒苔信息, 精确度达 93% 以上, F1 指标超过 0.94。(2) 2021 年南黄海区域研究区所观测到的浒苔最大覆盖面积达 1700 km², 约为 2020 年最大覆盖面积的 9 倍, 与自然资源部的监测结果基本保持一致 (Sun 等, 2022)。(3) 2021 年南黄海的浒苔移动呈现先往东北方向扩散, 大规模暴发后逐渐向西北部登陆靠岸的趋势, 整个持续过程历时两个月左右。下一步将开始推广应用, 联合多源卫星影像, 从更高的时间分辨率对南黄海区域浒苔灾害进行连续、动态监测, 为进一步制定相应的浒苔防控策略提供技术支持。

参考文献 (References)

- Achanta R and Süsstrunk S. 2017. Superpixels and polygons using simple non-iterative clustering//Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Honolulu: IEEE: 4895-4904 [DOI: 10.1109/CVPR.2017.520]
- Cui T W, Liang X J, Gong J L, Tong C, Xiao Y F, Liu R J, Zhang X and Zhang J. 2018. Assessing and refining the satellite-derived massive green macro-algal coverage in the Yellow Sea with high resolution images. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 144: 315-324 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.08.001]
- Ding L P and Luan R X. 2009. The taxonomy, habit, and distribution of a green alga *Enteromorpha prolifera* (Ulvales, Chlorophyta). Oceanologia et Limnologia Sinica, 40(1): 68-71 (丁兰平, 栾日孝. 2009. 浒苔(*Enteromorpha prolifera*)的分类鉴定、生境习性及其分布. 海洋与湖沼, 40(1): 68-71) [DOI: 10.3321/j.issn:0029-814X.2009.01.011]
- Filipponi F. 2019. Sentinel-1 GRD preprocessing workflow. Proceedings, 18(1): 11 [DOI: 10.3390/ECRS-3-06201]
- Gao L, Li X F, Kong F Z, Yu R C, Guo Y and Ren Y B. 2022. AlgaeNet: a deep-learning framework to detect floating green algae from optical and SAR imagery. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 15: 2782-2796 [DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3162387]
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D and Moore R. 2017. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202: 18-27 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031]
- Guo S C, Du P J, Meng Y P, Wang X, Tang P F, Lin C and Xia J S. 2021. Dynamic monitoring on flooding situation in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Region using Sentinel-1A time series. National Remote Sensing Bulletin, 25(10): 2127-2141 (郭山川, 杜培军, 蒙亚平, 王欣, 唐鹏飞, 林聪, 夏俊士. 2021. 时序 Sentinel-1A 数据支持的长江中下游汛情动态监测. 遥感学报, 25(10): 2127-2141) [DOI: 10.11834/jrs.20210547]
- Guo S C, Zheng H R, Yang Y J, Zhang S L, Hou H P, Zhu Q L and Du P J. 2019. Spatial estimates of surface deformation and topsoil moisture in operating CO₂-EOR project: pilot environmental monitoring using SAR technique. Journal of Cleaner Production, 236: 117606 [DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.117606]
- Guo X N, Zhu A and Chen R S. 2021. China's algal bloom suffocates marine life. Science, 373(6556): 751-751 [DOI: 10.1126/science.abl5774]
- Hu C M. 2009. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. Remote Sensing of Environment, 113(10): 2118-2129 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.012]
- Hu L B, Zeng K, Hu C M and He M X. 2019. On the remote estimation of *Ulva prolifera* areal coverage and biomass. Remote Sensing of Environment, 223: 194-207 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.01.014]
- Jia M M, Wang Z M, Mao D H, Ren C Y, Wang C and Wang Y Q. 2021. Rapid, robust, and automated mapping of tidal flats in China using time series Sentinel-2 images and Google Earth Engine. Remote Sensing of Environment, 255: 112285 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112285]
- Jin S, Liu Y X, Sun C, Wei X L, Li H T and Han Z. 2018. A study of the environmental factors influencing the growth phases of *Ulva prolifera* in the southern Yellow Sea, China. Marine Pollution Bulletin, 135: 1016-1025 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.08.035]
- Li D X, Gao Z Q and Xu F X. 2021. Research on the dissipation of green tide and its influencing factors in the Yellow Sea based on Google Earth Engine. Marine Pollution Bulletin, 172: 112801 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112801]
- Ma Y F, Wong K, Tsou J Y and Zhang Y Z. 2022. Investigating spatial distribution of green-tide in the Yellow Sea in 2021 using combined optical and SAR images. Journal of Marine Science and Engineering, 10(2): 127 [DOI: 10.3390/jmse10020127]
- Ministry of Natural Resources. 2021. Bulletin of China marine disaster in 2020. Beijing: Ministry of Natural Resources (自然资源部). 2021. 2020 年中国海洋灾害公报. 北京: 自然资源部
- 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]
- Qi L, Hu C M, Lu Y C and Ma R H. 2023. Spectral analysis and identification of floating algal blooms in oceans and lakes based on HY-1C/D CZI observations. National Remote Sensing Bulletin, 27(1): 157-170 (齐琳, 胡传民, 陆应诚, 马荣华. 2023. 基于 HY-1C/D 卫星 CZI 的海洋、湖泊中漂浮藻类的光谱分析与识别. 遥感学报, 27(1): 157-170) [DOI: 10.11834/jrs.20235009]
- Qi L, Hu C M, Mikelsons K, Wang M H, Lance V, Sun S J, Barnes B B, Zhao J and Van Der Zande D. 2020. In search of floating algae and other organisms in global oceans and lakes. Remote Sensing of Environment, 239: 111659 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111659]
- Schreyers L, van Emmerik T, Biermann L and Le Lay Y F. 2021. Spotting green tides over Brittany from space: three decades of monitoring with landsat imagery. Remote Sensing, 13(8): 1408 [DOI: 10.3390/rs13081408]
- Shen H, Perrie W, Liu Q R and He Y J. 2014. Detection of macroalgal blooms by complex SAR imagery. Marine Pollution Bulletin, 78(1/2): 190-195 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.10.044]
- Sun Y Q, Yao L L, Liu J L, Tong Y C, Xia J, Zhao X H, Zhao S, Fu M L, Zhuang M M, He P M and Zhang J H. 2022. Prevention strategies for green tides at source in the Southern Yellow Sea. Marine Pollution Bulletin, 178: 113646 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.

- 113646]
- Tiwari V, Kumar V, Matin M A, Thapa A, Ellenburg W L, Gupta N and Thapa S. 2020. Flood inundation mapping-Kerala 2018; Harnessing the power of SAR, automatic threshold detection method and Google Earth Engine. *PLoS ONE*, 15(8): e0237324 [DOI: 10.1371/journal.pone.0237324]
- Xing Q G, An D Y, Zheng X Y, Wei Z N, Wang X H, Li L, Tian L Q and Chen J. 2019. Monitoring seaweed aquaculture in the Yellow Sea with multiple sensors for managing the disaster of macroalgal blooms. *Remote Sensing of Environment*, 231: 111279 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.111279]
- Xing Q G and Hu C M. 2016. Mapping macroalgal blooms in the Yellow Sea and East China Sea using HJ-1 and Landsat data: application of a virtual baseline reflectance height technique. *Remote sensing of Environment*, 178: 113-126 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.02.065]
- Xing Q G, Wu L L, Tian L Q, Cui T W, Li L, Kong F Z, Gao X L and Wu M Q. 2018. Remote sensing of early-stage green tide in the Yellow Sea for floating-macroalgae collecting campaign. *Marine Pollution Bulletin*, 133: 150-156 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.05.035]
- Xu M L, Yang C B, Wu Y G, Chen J Y and Huan H F. 2015. Edge detection in the potential field using the correlation coefficients of multidirectional standard deviations. *Applied Geophysics*, 12(1): 23-34 [DOI: 10.1007/s11770-014-0473-5]
- Yu H F, Wang C Y, Li J H and Sui Y. 2021. Automatic extraction of green tide from GF-3 SAR images based on feature selection and deep learning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14: 10598-10613 [DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3118374]
- Yu H F, Wang C Y, Sui Y, Li J H and Chu J L. 2020. Automatic extraction of green tide using dual polarization Chinese GF-3 SAR images. *Journal of Coastal Research*, 102(S1): 318-325 [DOI: 10.2112/SI102-038.1]
- Yuan C, Zhang J Y, Xiao J, Fu M Z, Zhang X L, Cui T W and Wang Z L. 2020. The spatial and temporal distribution of floating green algae in the Subei Shoal in 2018 retrieved by Sentinel-2 images. *Haiyang Xuebao*, 42(8): 12-20 (袁超, 张靖宇, 肖洁, 傅明珠, 张学雷, 崔廷伟, 王宗灵. 2020. 基于哨兵2号卫星遥感影像的2018年苏北浅滩漂浮绿藻时空分布特征研究. *海洋学报*, 42(8): 12-20) [DOI: 10.3969/j.issn.0253-4193.2020.08.002]
- Zhang G Z, Wu M Q, Wei J, He Y F, Niu L F, Li H Y and Xu G C. 2021. Adaptive threshold model in Google Earth Engine: a case study of *Ulva prolifera* extraction in the South Yellow Sea, China. *Remote Sensing*, 13(16): 3240 [DOI: 10.3390/rs13163240]

Spatial-temporal dynamic monitoring of *Ulva prolifera* in the South Yellow Sea based on Sentinel-1 SAR images

TANG Pengfei^{1,2,3,4}, DU Peijun^{1,2,3,4}, GUO Shanchuan^{1,2,3,4}, QIE Lu^{1,2}, FANG Hong^{1,2,3,4}

1. School of Geography and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

2. Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resources, Nanjing 210023, China;

3. Key Laboratory for Land Satellite Remote Sensing Applications of Ministry of Natural Resources, Nanjing 210023, China;

4. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China

Abstract: The recurring *Ulva prolifera* disasters in the South Yellow Sea region of China during summers significantly impact the environment, ecology, and economy. To address this issue, accurate spatial and temporal distribution information of *Ulva prolifera* needs to be obtained for quantitative assessment of the disaster and development of effective prevention and control strategies. Optical remote sensing images provide spatial information on *Ulva prolifera* at a regional scale. However, they are limited by low spatial resolution and the influence of clouds and rain. Thus, regular and stable monitoring of *Ulva prolifera* is challenging. By contrast, synthetic aperture radar images provide all-weather, all-day observation, which enables more possibilities for dynamic monitoring and research on the spatial and temporal distribution of *Ulva prolifera*. To this end, this study proposes an automatic extraction process for *Ulva prolifera* using the backscattering coefficient and standard deviation features, supported by Sentinel-1 images. The method involves an adaptive thresholding approach to segment the image. The seawater with higher backscattering coefficient is excluded to obtain the initial extraction result of *U. prolifera*, which is based on the difference between edge *Ulva prolifera* and seawater in the standard deviation of backscattering coefficient. The post-processing schemes are designed based on temporal information and backscattering coefficient thresholds for targets with similar characteristics to *Ulva prolifera* in the sea according to different types. The proposed method is employed to monitor the dynamic distribution of *Ulva prolifera* in the South Yellow Sea region from May to July 2021 by using the Google Earth Engine platform. Results show that the accuracy of the extraction method reaches 93%, and the maximum coverage of *Ulva prolifera* observed in the South Yellow Sea region in 2021 was over 1700 km². The analysis reveals an overall trend of “scattered development, aggregation outbreak, and diffusion extinction” in the process of *Ulva prolifera* development.

Key words: remote sensing, *Ulva prolifera*, Sentinel-1 images, spatiotemporal variation, Google Earth Engine, South Yellow Sea Region

Supported by Special Fund of Natural Resources Development (Marine Scientific and Technological Renovation) (No. JSZRHYKJ202101); Open Fund of Key Laboratory of Coastal Zone Exploitation and Protection, Ministry of Natural Resource (No. 2021CZEPK04)