

刘锦超, 刘建强, 丁静, 等. HY-1C 卫星 CZI 载荷的黄海绿潮提取研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(5): 1–11, doi:10.12284/hyxb2022097

Liu Jinchao, Liu Jianqiang, Ding Jing, et al. A refined imagery algorithm to extract green tide in the Yellow Sea from HY-1C satellite CZI measurements[J]. Haiyang Xuebao, 2022, 44(5): 1–11, doi:10.12284/hyxb2022097

HY-1C 卫星 CZI 载荷的黄海绿潮提取研究

刘锦超¹, 刘建强², 丁静^{2,3}, 陆应诚^{1*}

(1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210023; 2. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广东 广州 511458)

摘要: 海洋一号 C (HY-1C) 卫星是中国首颗海洋水色业务卫星, 其搭载的海岸带成像仪 (CZI) 在近海海洋环境监测中正发挥越来越重要的作用; 随着搭载有相同传感器的 HY-1D 卫星发射, 双星组网观测, 可形成 3 天 2 次的高频次、大范围对海观测能力, 在海洋漂浮藻类、海洋溢油等目标探测方面具备优异的效能。高空间分辨率光学数据中包含了丰富的海洋环境信息, 给特定目标的识别提取带来一定干扰。本研究面向 HY-1C 卫星 CZI 载荷开展中国近海漂浮藻类识别提取的业务化应用需求, 发展基于藻类缩放指数与虚拟基线高度融合的海洋漂浮藻类识别提取算法, 算法优选适用于无短波红外波段国产数据的虚拟基线高度指数来增强藻类信号, 通过藻类缩放指数滑动窗口运算, 有效剔除高空间分辨率光学数据中的复杂干扰信息, 实现了基于 CZI 数据的海洋漂浮藻类高精度提取, 且具有较好的计算运行效率。此外, 结合准同步高分卫星 16 m 多光谱数据, 开展 CZI 数据含藻像元的不确定性分析, 发现 CZI 数据反演结果对近海小斑块漂浮藻类存在不可忽视的高估现象。研究还指出, 光学数据用于漂浮藻类监测, 其不确定性不仅来源于传感器的空间分辨率差异, 还与海洋漂浮藻类形态特征的空间分异性有关。明晰海洋漂浮藻类的形态学空间分异特征, 将有助于提高光学数据反演结果的精度, 并阐明不确定性。

关键词: 海洋一号 C 卫星; 海岸带成像仪; 绿潮; 藻类缩放指数; 虚拟基线高度

中图分类号: X834

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)05-0001-11

1 引言

海洋一号 C (Haiyang-1C, HY-1C) 卫星是我国自主设计研制的首颗海洋水色业务卫星, 搭载有海岸带成像仪 (CZI)、水色水温扫描仪 (COCTS)、紫外成像仪 (UVI) 等多套光学载荷, 能为全球海洋水色水温反演、近海海洋环境监测提供多种数据产品。其中, 海岸带成像仪 (CZI) 能提供 50 m 空间分辨率、950 km 刈幅的近海观测多光谱数据, 该数据具备优良的辐射分辨率、高信噪比等特点, 随着搭载有同样传感器的

HY-1D 卫星发射, 实现了 3 天 2 次的高频次观测, 能为近海海洋环境监测、海洋防灾减灾、海洋权益维护以及江河湖泊的生态环境监测提供丰富数据支撑^[1]。

黄海绿潮是我国近海较为严峻的自然灾害之一, 不仅影响海上交通, 还会破坏沿岸生态环境, 对沿海水产养殖业、旅游业等产业造成巨大经济损失^[2]。2008 年, 因绿潮导致的沿海海水养殖业经济损失高达 8 亿元人民币^[3], 同年更是耗费了约 7 亿元人民币进行打捞清理^[4]。有研究表明, 绿潮的发生不仅受陆地无机氮和磷等营养盐的汇入影响^[5], 也与苏北沿岸

收稿日期: 2021-07-13; 修订日期: 2021-08-30。

基金项目: 河北省重点研发计划 (21373301D); 国家自然科学基金 (42071387, 41771376); 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项 (GML2019ZD0302)。

作者简介: 刘锦超 (1997—), 男, 山东省济宁市人, 研究方向为海洋环境光学遥感。E-mail: MG1927066@smail.nju.edu.cn

* 通信作者: 陆应诚 (1979—), 男, 教授, 研究方向为海洋环境遥感。E-mail: Luyc@nju.edu.cn

紫菜养殖产业的不断扩张息息相关^[6]。自 2007 年以来, 黄海夏季的绿潮爆发逐渐发展为常态, 对绿潮进行连续有效地观测和预警, 对绿潮灾害的防治具有重要意义^[7]。在这一过程中, 卫星遥感技术可实现对绿潮灾害的大范围、同步、快速探测, 成为绿潮灾害跟踪、预警和防治的主要手段。

中国近海绿潮的主要优势种为石莼属 (*Ulva*) 与浒苔属 (*Enteromorpha*) 大型绿藻^[8-9], 藻体依靠中空管状结构贮存氧气, 长时间漂浮于海面之上^[10], 具有特定的光谱响应特征^[11], 使得利用光学遥感影像探测绿潮成为可能。凭借与绿色植被相似的“红边”光谱特征^[11], 可利用植被指数来获取海面绿潮信息, 例如归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)^[12-13]、差异植被指数 (Difference Vegetation Index, DVI)^[14] 等。近年来, 为专门探测海面大型漂浮藻类, 相关研究人员开发了一系列针对不同传感器、不同水色背景的藻类指数, 如应用于 MERIS 数据的最大叶绿素指数 (Maximum Chlorophyll Index, MCI)^[11]、结合短波红外大气校正算法的归一化藻类指数 (Normalized Difference Algae Index, NDAI)^[15]、基于波段间基线减法的漂浮藻类指数 (Floating Algae Index, FAI)^[16] 和大型漂浮藻类虚拟基线高度法 (Virtual Baseline Floating macroalgae Height, VB-FAH)^[17] 等。上述算法中, 基于基线减法设计的 FAI 不仅对大气影响、观测几何、太阳耀光等干扰具有较好的适用性^[16], 还有利于藻类端元的线性解混^[14], 从而促进准确量化藻类的真实覆盖率、生物量等指标。参考 FAI 算法原理, VB-FAH 通过建立虚拟基线计算近红外波段的相对基线高度, 与 FAI 具有较强的一致性^[18], 考虑到国产系列多光谱传感器缺少短波红外波段, VB-FAH 算法更适用于中国海洋水色遥感卫星。

在利用不同指数对绿潮的遥感监测估算过程中, 一大挑战在于像元分割阈值的选取^[14] (介于“无藻”和“含藻”之间的藻类指数值), 即使在同一景影像的不同区域, 该值也可能发生变化。针对这种阈值不一致现象, 通过某些方法模拟藻类指数中无藻海水的背景图像并从原图像中减去, 可以达到消除阈值不一致的效果。本文将这些方法统称为“去背景方法”, 典型的去背景方法有缩放藻类指数 (Scaled Algae Index, SAI) 算法^[18]、藻类指数梯度去背景法^[14]、四次多项式曲面拟合法^[19] 等, 去背景方法有助于传统阈值法在背景差异较大的海域图像中发挥作用; 上述方法是面向粗空间分辨率传感器数据 (250 m、500 m 以及 1 km 空间分辨率 MODIS 数据), 随着空间分辨率提升至 50 m, 背景水色与耀光反射分异会更加显著, 上述去背景方法

的效果尚需要验证。与此同时, 50 m 空间分辨率图像可探测的海表目标信息更加丰富, 海浪、流、海洋锋面、船尾迹、海面溢油、小尺度云斑等目标均能被传感器探测到, 对海洋漂浮藻类识别提取形成干扰, 成为 50 m 分辨率图像绿潮遥感监测估算的又一挑战。

针对上述挑战, 本研究提出一种缩放藻类指数与 VB-FAH 指数融合处理方法, 针对 HY-1C/D 卫星 CZI 数据的波段构成与高异质性特征, 选择 VB-FAH 指数实现海洋漂浮藻类的信息增强; 针对高空间分辨率海洋光学遥感数据中的复杂干扰信息, 通过 SAI 滑动窗口运算, 在不生成海水背景图像的情况下, 实现藻类图像的“去背景化”处理, 过程简洁且对不同空间分辨率数据的适用性强。算法应用与验证结果表明, 本研究方法针对 HY-1C/D 卫星 CZI 数据中漂浮藻类提取具有较高的精度和抗干扰能力, 可以为国产海洋水色卫星高分辨率载荷的业务化应用提供技术方法参考。

2 数据与数据预处理

2.1 HY-1C 卫星 CZI 数据

HY-1C 卫星搭载有海洋水色水温扫描仪、海岸带成像仪、紫外成像仪、星上定标仪和船舶自动识别系统 5 个载荷。其中, 多光谱海岸带成像仪观测数据是本研究主要使用的数据源, CZI 载荷有可见光和近红外 4 个光谱波段, 能提供星下点 50 m 空间分辨率数据, 且具备 3 天 1 次的重访周期, 在 2019 年 5 月底至 8 月末共获取了多景云覆盖较少的黄海观测数据。50 m 空间分辨率所探测的漂浮藻类具有斑块状、条带状以及斑点状等不同形态特征, 可为粗空间分辨率数据开展大型漂浮藻类研究提供验证数据, 扫描幅宽为 950 km, 2 景影像即可实现黄海海域的覆盖观测。HY-1C 卫星 CZI 数据对于中国近海的大型漂浮藻类监测, 在时间、空间分辨率以及范围覆盖方面都具有显著优势。

2.2 数据预处理

研究主要使用 CZI 数据的 L1B 级辐亮度产品, 通过大气校正生成瑞利校正反射率 (R_{rs}) 数据, 相应产品也可通过中国海洋卫星数据服务系统 (<https://osdds.nsoas.org.cn/#/>) 免费下载。遥感反射率 (R_{rs}) 产品的大气校正过程包含瑞利散射校正、气溶胶校正等步骤, 由于气溶胶校正主要采用暗像元法^[21-22], 海面目标 (如浒苔、马尾藻与海面溢油等) 的近红外波段图像通常含有高值信号, 使基于暗像元法的气溶胶校正结果出现较大不确定性^[23], 因此 R_{rs} 数据是海面漂浮目标遥感研究相对较好的选择。几何校正选择多项式校正

法,利用 Python 平台开发基于 GDAL 库 Warp 函数的几何校正程序,以固定间隔提取经纬度文件内的地理控制点进行多项式校正,该方法对 1 景 CZI 数据的几何校正时间可以控制在 3 min 以内,相比于 ENVI 软件内利用 GLT 的几何校正方法大大缩短了运算时

间。最终将 R_{rs} 数据映射到 WGS-84 大地坐标系,UTM 投影(zone 51N)。通过数据预处理和遴选,选择了 9 景 2019 年黄海绿潮影像作为研究数据(图 1),每景影像中都有不同程度的绿潮分布,这些大型漂浮藻类的形态特征差异显著。

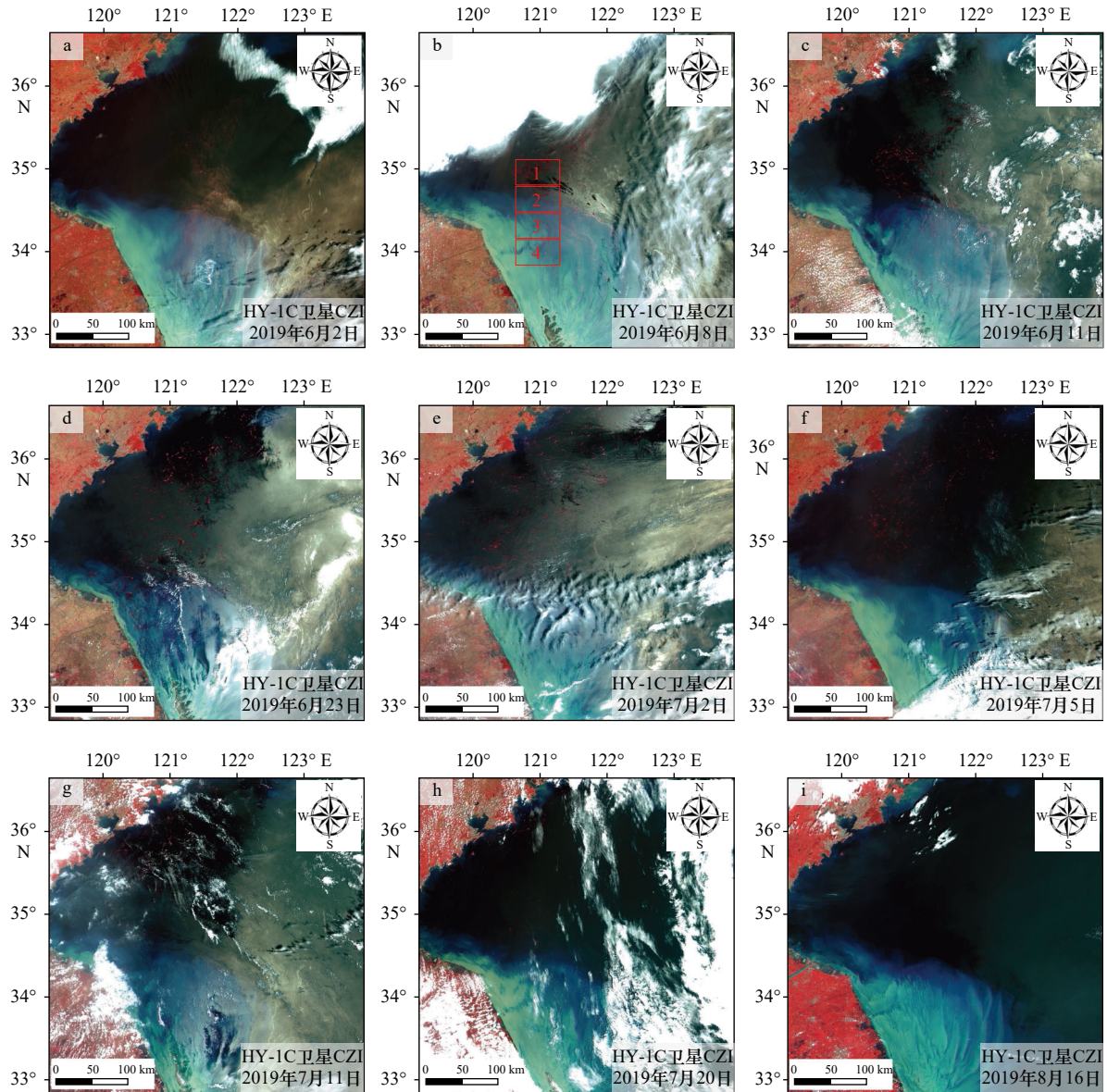


图 1 2019 年黄海大型漂浮藻类标准假彩色影像

Fig. 1 Standard false color images of macroalgae in the Yellow Sea during 2019

HY-1C 卫星 CZI 数据, R: 825 nm, G: 650 nm, B: 560 nm

Data from HY-1C satellite CZI, R: 825 nm, G: 650 nm, B: 560 nm

3 基于 SAI 的漂浮藻类提取

3.1 算法流程

本研究的算法流程主要包含以下步骤:(1)预处理步骤,包含黄海感兴趣区域选取,云和云阴影等干扰像元识别与剔除;(2)计算 HY-1C 卫星 CZI 数据的 VB-

FAH 指数图像;(3)图像的 SAI 处理,利用 SAI 对 VB-FAH 图像进行滑动窗口计算,做“去背景化”处理,生成 SAI(VB)图像,调整 T_{VB} 阈值分割出“待定”像元与背景海水像元,同时对 CZI 数据的红光波段(650 nm)进行 SAI 滑动窗口计算,优化 T_{RED} 阈值,对于干扰因素进行剔除,有效区分“藻类”像元与“干扰”像元,得到

精确的藻类提取结果。

3.1.1 VB-FAH 指数

基于波段线性差值方法的 VB-FAH 指数对于复杂大气、耀光反射等具有一定抗干扰能力,在像元解混方面,该指数与 FAI 一样,具有较好的应用特点^[14],特别适用于无短波红外波段的 HY-1C 卫星 CZI 数据。本研究主要使用 VB-FAH 作为藻类提取的基本指数,该指数的虚拟基线建立在绿光波段反射率和虚拟的近红外波段反射率(实际是红光波段反射率基于近红外波段的轴对称点)之上,然后基于虚拟基线计算近红外波段反射率的相对高度,VB-FAH 指数的计算公式为

$$\text{VB-FAH} = [R_{rc}(\lambda_4) - R_{rc}(\lambda_2)] + [R_{rc}(\lambda_2) - R_{rc}(\lambda_3)] \times (\lambda_4 - \lambda_2) / (2 \times \lambda_4 - \lambda_2 - \lambda_3), \quad (1)$$

式中, $R_{rc}(\lambda_4)$, $R_{rc}(\lambda_3)$ 和 $R_{rc}(\lambda_2)$ 分别是 CZI 数据的 825 nm (λ_4), 650 nm (λ_3) 和 560 nm (λ_2) 波段的瑞利校正反射率。

3.1.2 云与耀光干扰的消除

在藻类提取之前,云与耀光像元应当被首先剔除,本文利用一种简单的波段减法(Cloud & Sunlight, CS)将图像中的云和耀光信号剔除,

$$T_{CS} = R_{rc}(\lambda_1) - R_{rc}(\lambda_3) \times 0.5, \quad (2)$$

式中, $R_{rc}(\lambda_1)$ 和 $R_{rc}(\lambda_3)$ 分别是 CZI 数据 460 nm (λ_1) 和 650 nm (λ_3) 波段的瑞利校正反射率。利用 T_{CS} 阈值分割云和耀光干扰像元,当大于 T_{CS} 时,将被识别为云与耀光像元。在 2019 年 HY-1C 卫星 CZI 数据中, T_{CS} 值在 0.01 ~ 0.02 区间内浮动。该方法对亮度较高的云和强耀光的提取效果较好,但仍难以完全消除薄云与小云斑的干扰,这些干扰在后续误判处理方案中会进行再次提取与排除。

3.2 SAI 算法

基于阈值分割的方法几乎都受到大范围内图像梯度差异的影响^[19], FAI、VB-FAH 等指数应用也存在图像梯度差异问题,由 Keesing 等^[17]提出的缩放藻类指数,能够较好地解决藻类指数中的图像梯度差异问题^[20],具体原理如下:

$$g_{(x,y)} = \text{med}f_{(x-k,y-l)}, (k, l \in W), \quad (3)$$

$$\text{SAI}_{(x,y)} = f_{(x,y)} - g_{(x,y)}, \quad (4)$$

式中, $f_{(x,y)}$ 是滑动窗口的中心像元; $g_{(x,y)}$ 是滑动窗口中值; $\text{SAI}_{(x,y)}$ 是缩放后的像元值。

SAI 依靠滑动窗口遍历整个图像的有效像元进行计算,计算过程中选取窗口中值作为海水背景值对中心像元进行缩放。如果中心像元为藻类像元,缩放过程将从像元值中减去背景海水像元值;若中心像元为背景海水像元,会将其缩放到 0 值左右。一旦窗口过小,使得窗口内的藻类像元占据多数,窗口内像元

中值将不再代表海水背景值,从而部分藻类像元被缩放到 0 值,进而产生算法误差。因此滑动窗口大小必须经过人工调整以适配图像中不同形态大小的藻类,如图 2 所示,通过比较海域中不同尺寸滑动窗口提取

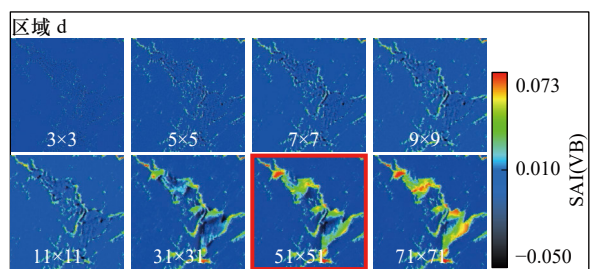
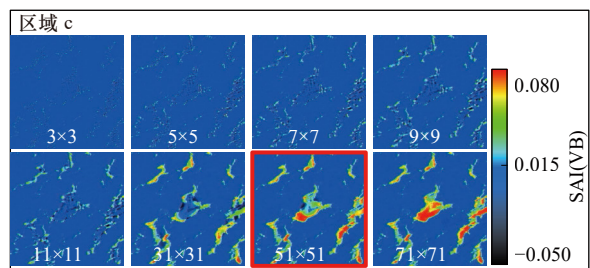
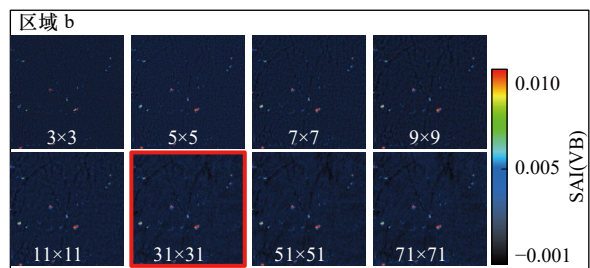
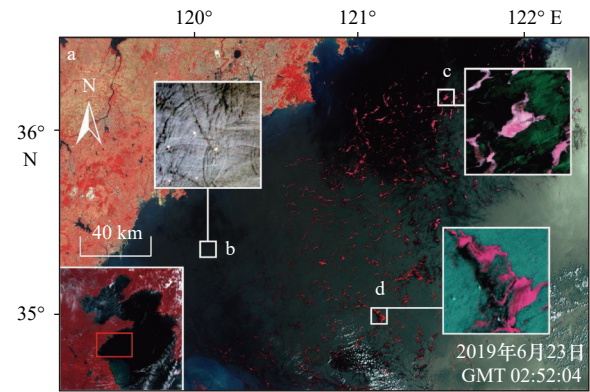


图 2 滑动窗口尺寸变化下的缩放藻类指数图像
Fig. 2 Scaled algae index images with changing size of sliding window

a. 研究区 RGB 合成图像 (R: 825 nm, G: 650 nm, B: 560 nm); b, c, d 中漂浮藻类斑块大小差异显著,其中红色框表示该区域的最佳滤波窗口尺寸

a. Red-Green-Blue composite image by bands 4 (R, 825 nm), 3 (G, 650 nm) and 2 (B, 560 nm) in study area. Floating algal patches in b, c, d show significant differences in size. The red box in b, c and d indicate the optimal sliding window size for the region

大、小漂浮藻类斑块的能力差异,发现大尺寸藻类斑块的准确提取得益于大尺寸的滑动窗口,小尺寸斑块的提取结果不会随着滑动窗口的增大而产生剧烈变化。需要注意的是,滑动窗口尺寸过大会使算法的运算效率下降,因此滑动窗口的尺寸并非越大越好。基于2019年夏季黄海藻类提取的滑动窗口设置分析,发现在绿潮暴发期(6月8日至7月上旬),黄海海域大型条带状绿潮频繁出现,为完整提取这些条带型绿潮,选择 51×51 像元滑动窗口进行提取。而位于绿潮发展的早期与后期(5月中旬至6月初、7月中旬至9月初), 31×31 像元窗口足以完整提取区域内的大型藻类斑块。

SAI算法特点是不需要重建海水背景即可将海水背景值缩放到0值水平,在一定程度上克服了背景反射率分异的影响。在大型漂浮藻类生物量的定量遥感估算过程中,同等覆盖率的藻类也会因分布于不同海水背景下,而表现出不同的藻类指数,导致其生物量估算含有较大不确定性,通过SAI方法计算的藻类指数可以降低不同背景差异所带来的误差。如图3所示,通过对SAI处理前后VB-FAH值剖面线的数值对比,对VB-FAH图像经过SAI计算后(SAI(VB)),图像中的海水背景将缩放到同一水平区间,而藻类目标值仍处在较高水平,这将较好地提高漂浮藻类提取与估算精度。

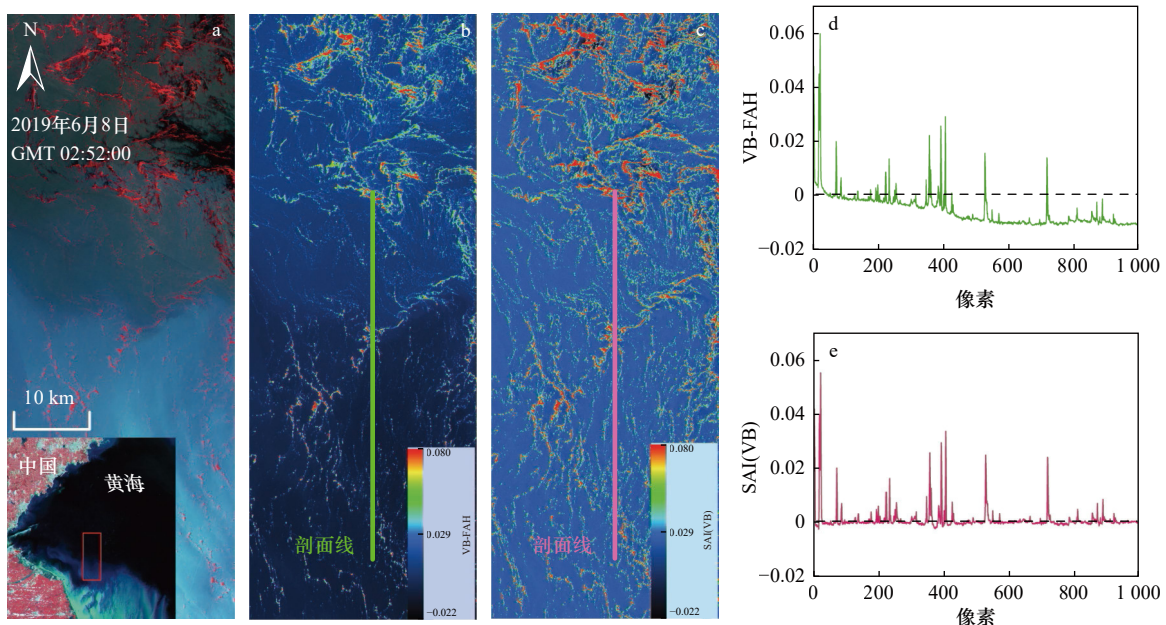


图3 大型漂浮藻类虚拟基线高度法(VB-FAH)与对VB-FAH图像经过缩放藻类指数计算后值(SAI(VB))对比图

Fig. 3 Comparison between virtual baseline floating macroalgae height (VB-FAH) and SAI (VB)

a. 2019年6月8日HY-1C卫星CZI传感器RGB合成影像(R: 825 nm, G: 650 nm, B: 560 nm); b. 大型漂浮藻类虚拟基线高度法图; c. SAI (VB)指数图; d. VB-FAH垂直剖面; e. SAI (VB)垂直剖面

a. HY-1C/CZI Red-Green-Blue composite image by bands 4 (R, 825 nm), 3 (G, 650 nm) and 2 (B, 560 nm) acquired on June 8, 2019; b. image of VB-FAH; c. image of SAI (VB); d. vertical profile of VB-FAH; e. vertical profile of SAI (VB)

3.3 误判信息剔除

在较高空间分辨率的海洋光学遥感数据中,海面波浪、海洋锋面、内波、船尾迹、海洋溢油等均可以清晰展现,这也给海洋漂浮藻类提取算法带来干扰,这些干扰所产生的误判信息需要进一步剔除,进而提高藻类提取的精度。海面漂浮藻类在红光波段(650 nm)具有一定的吸收特征,图像中的其他干扰因素,如小云斑、耀光、油气平台及船舶等,在650 nm波段具备高反射特征。可以进一步对650 nm波段反射率图像进行SAI处理。此过程中,漂浮藻类因在

650 nm波段不具备高反射特征而被处理成背景,耀光、云斑、船尾迹等干扰信号则通过SAI算法得到增强,从而实现藻类信号与背景干扰信号的区分。图4显示了该算法对小云斑干扰噪声二次去除的效果,降低了云的干扰与误判。其他干扰因素的剔除效果如图5所示,研究海域中存在多种干扰(如海上平台、不同粗糙度水面等),会被SAI(VB)的分割阈值所误判;基于SAI(VB)影像阈值分割结果,计算其SAI(RED)值,对误判信息进行再次剔除,有效提高了海面漂浮藻类的识别提取精度。

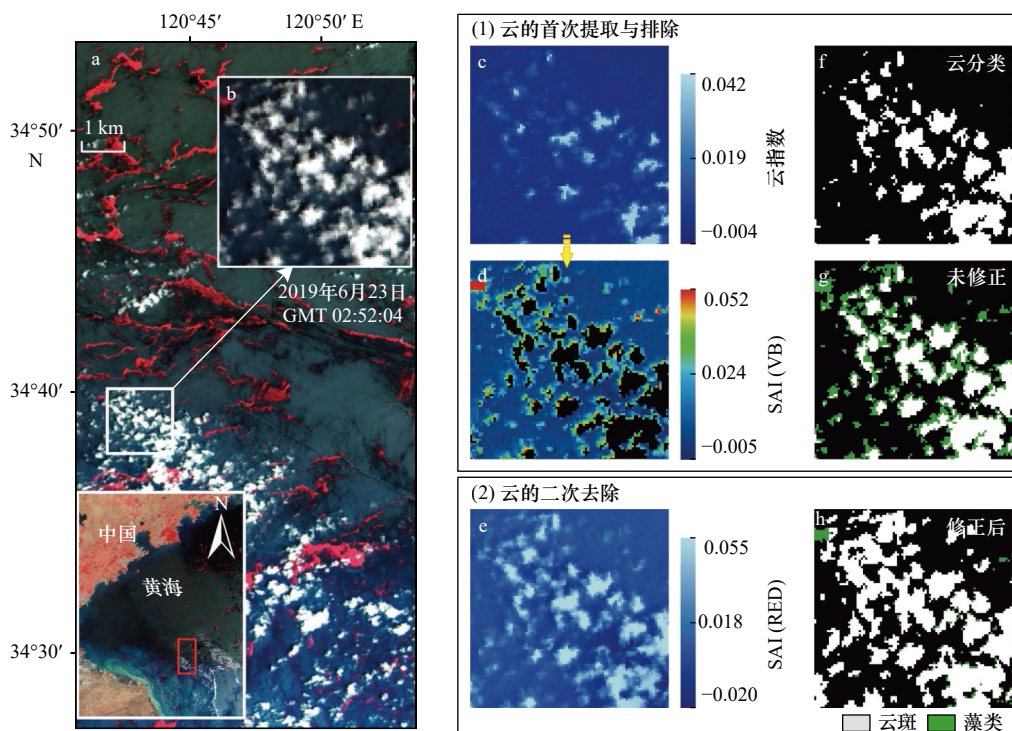


图 4 基于 SAI(RED)的小云斑干扰信息的剔除

Fig. 4 Elimination for confusion signal of cloud spots based on SAI (RED)

基于上述 SAI-VB 融合识别方法, HY-1C 卫星 CZI 数据(图 1)的海面漂浮绿潮识别提取结果如图 6 所示。基于中高空间分辨率 CZI 数据提取的海洋大型漂浮藻类, 对比粗分辨率数据(如 MODIS、GOCI、VIIRS 等)而言, 具有更为精细和丰富的空间细节信息, 尤其在江苏近岸海域。特别需要指出的是, 由于空间分辨率差异所带来的混合效应, 如何有效估算基于 CZI 数据的含藻像元面积和藻类真实覆盖面积, 还需要进一步开展细致的评估。

4 精度评估与不确定性分析

4.1 精度评估

由于海面实测与低空观测数据的稀缺, 且囿于海面漂浮藻类具有一定的漂浮速度, 难有实时同步的卫星成像数据用于验证, 即使只有几分钟的成像时间差异, 海面藻类的位置和形态都会有一定的改变, 其不仅受到海面流场、风场等多种因素影响, 还受到卫星数据的空间分辨率、波段差异等影响。鉴于如上影响, 将采用人工目视解译结果和自动提取结果对比分析的方式来进行本研究算法的精度评估, 精度评价数据选用 2019 年 6 月 8 日 CZI 数据的 4 个研究区(图 1b), 目视解译过程还参考了同一天的 GF-1/WFV1 多光谱数据(16 m 空间分辨率)。特别需要指出的

是, 囿于藻类形态和位置变化、空间分辨率以及波段差异等原因, 国产 GF-1/WFV1 多光谱数据并不能直接用于对比分析来评估算法精度, 后续主要将其用于不确定性分析(见 4.3 节)。4 个区域的标准假彩色合成图像、人工解译结果与算法提取结果如图 7 所示。

基于人工解译和算法提取的 4 个区域漂浮藻类结果, 利用如下指标定量描述算法提取精度:

$$\lambda = |S_{SAI} - S_0| / S_0 \times 100\%, \quad (5)$$

式中, S_{SAI} 为本算法提取的含藻像元面积; S_0 为人工目视解译提取的含藻像元面积。结果表明, 算法提取精度最低者为区域 4, λ 为 8.34%; 最高者为区域 1, λ 为 1.03%; 总体精度均比较高, 特别是区域 1 到区域 3(表 1)。区域 1 到区域 3 中的漂浮藻类形态相对较大, 以大型条带型、斑块型等形态为主, 而区域 4 中

表 1 精度评价

Table 1 Accuracy evaluation

区域编号	人工解译/像元数	算法提取/像元数	$\lambda/\%$
1	126 907	125 600	1.03
2	104 782	97 021	2.37
3	94 963	92 345	2.76
4	68 722	74 452	8.34

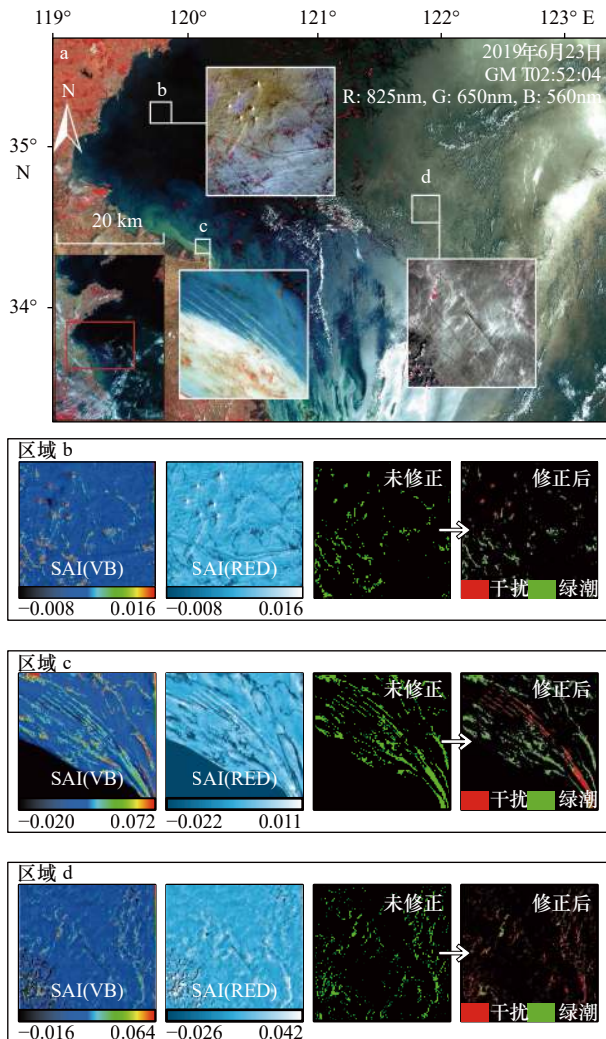


图5 海面目标误判信息剔除与修正结果

Fig. 5 Results of elimination and correction for misclassification of sea surface targets

则包含数量较多的小斑块型漂浮藻类, 由于 50 m 空间分辨率的遥感混合像元特点, 这些小斑块漂浮藻类提取结果的不确定性较大。总体上, 本研究应用的 SAI(VB) 算法精度较高, 对中国首颗海洋水色业务卫星 CZI 载荷取得较好的效果, 未来可以进一步用于该载荷的业务化应用。

4.2 算法的时间效率

SAI 算法的首次提出是基于 MODIS 数据, 本研究将算法调整应用于国产 HY-1C/CZI 数据上, 展现出算法在数据空间分辨率上的可扩展性。随着空间分辨率提升到 50 m, 其图像噪声、耀光干扰、水色背景等干扰信息得以凸显, 干扰因素也会随之增加, 但本算法仍能保持较高的提取精度, 也一定程度说明了算法的稳健性。面对中国近海广阔的业务化应用范围, 还需要关注算法应用的时间效率。为此, 从上述研究

区任意选取了多个固定大小的区域(1 000 像元×1 000 像元), 评估算法运算速度。在如下配置的电脑中(Intel(R)Core(TM)i9-10 900 CPU@2.80 GHz~2.81 GHz 32 GB 内存), 基于 MATLAB 编程实现的 SAI 提取算法, 对上述数据计算运行时间平均约为 12 s, 其中有关两步 SAI 计算(SAI(VB)、SAI(RED))的平均耗时约 6 s。本研究是基于滑动窗口遍历图像的方式进行计算, 时间成本会随图像矩阵面积的增大而增加, 对于整个黄海海域来说, CZI 图像矩阵不超过 10 000 像元×10 000 像元, 数据的计算时间可控制在 20 min 以内。还需要注意的是, 高分辨率数据包含的丰富海洋环境信息, 也给自动识别提取带来挑战, 往往需要基于专家经验知识, 采用人机交互的方式以保证算法精度, 这样一来将不可避免地牺牲算法效率, 因此在业务化应用过程中还需要在时间效率和提取精度间达到一个最佳的平衡。

4.3 不确定性分析

光学遥感数据识别提取的最直观绿潮规模指标为“含藻像元面积”, 并不等同于真实的藻类覆盖面积。基于不同空间分辨率数据提取的含藻像元面积也存在较大差异, 这不仅与传感器空间分辨率有关, 还与海洋漂浮藻类的真实形态有关。有研究表明, 真实藻类面积即使只占像元面积的 1%~2%, 也可以被识别并提取出来^[23], 产生的高估效应在所难免。为探寻这种像元空间分辨率与真实藻类形态大小所带来的不确定性影响, 本研究还选用了同一天(2019 年 6 月 8 日)准同步的 GF-1/WFV1 数据(16 m 空间分辨率)和 HY-1C/CZI 数据开展不确定性分析。上述数据均进行大气校正生成 R_c 反射率产品, 并基于相同的提取流程识别了海面漂浮藻类, 以 GF-1/WFV1 数据结果作为真值来评估 HY-1C/CZI 提取结果的不确定性。研究结果如图 8 所示, 在藻类覆盖差异显著的海域选择 2 个典型区域(区域 1 和区域 2), 值得注意的是, 两区域之间不仅存在明显的水色差异, 漂浮藻类斑块的形态特征和空间分布也存在巨大差别。区域 1 中大尺寸条带型漂浮藻类占据主体地位, 肉眼观察到仅有少量小尺寸斑块形态漂浮藻类分布; 区域 2 中则以小尺寸斑块状漂浮藻类为主, 大尺寸条带型漂浮藻类分布较少。这两个区域 CZI 数据和 GF-1/WFV1 数据的漂浮藻类提取结果显示(图 8c 至图 8f), 区域 1 的含藻像元面积相近(分别为 373.72 km² 和 342.77 km², 相对偏差为 9.03%), 而区域 2 的含藻像元面积差异显

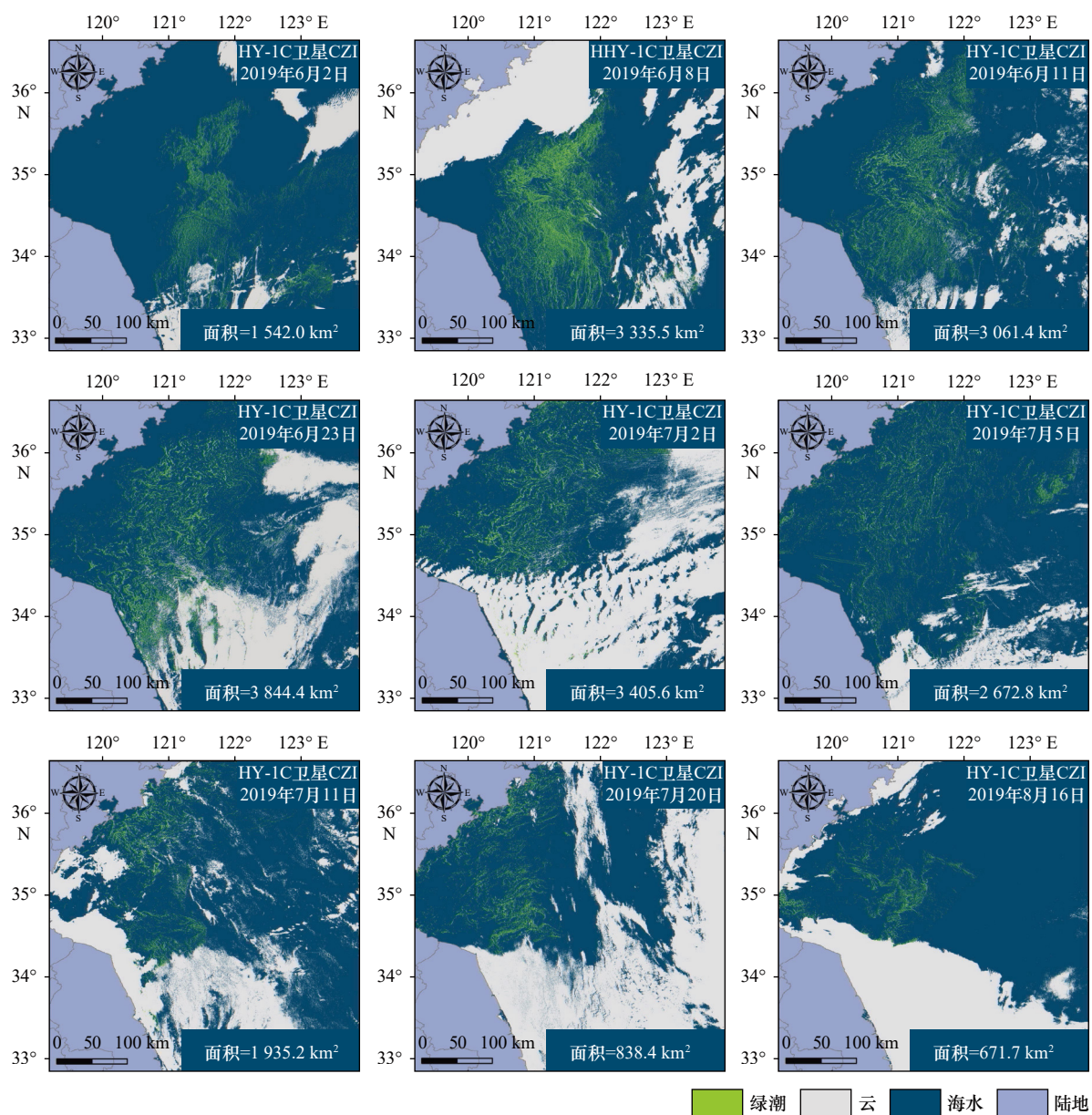


图 6 基于 HY-1C 星 CZI 数据提取的 2019 年海面漂浮绿潮

Fig. 6 The information of floating green tides in 2019 extracted from HY-1C CZI measurements

图中“面积”表示含藻像元面积

The “area” in the figure represents the area of algae-containing pixels

著 (分别为 254.77 km^2 和 143.46 km^2 , 相对偏差为 77.59%), 表明就含藻像元面积指标而言, CZI 数据提取结果产生的不确定性也存在明显的空间分异。藻类形态尺寸空间分异的存在表明: 区域 1 中分布数量较多的大尺寸条带型漂浮藻类一定程度上降低了含藻像元面积的不确定性; 相反, 区域 2 中大量的小型斑块分布显著提高了这种不确定性。这说明, 基于光学遥感数据反演的含藻像元面积与真实藻类面积之间的不确定性, 不仅与传感器空间分辨率密切相关, 还与漂浮藻类的斑块大小与形态特征具有密切的关

联。今后需通过进一步阐明中国近海漂浮藻类的形态特征空间分布差异, 将对不同空间分辨率数据的优化使用以及海洋漂浮藻类反演精度的提高具有重要的参考意义。

5 结论

面向中国 HY-1C/D 卫星 CZI 载荷的业务化应用需求, 针对海洋高空间分辨率数据内含的丰富信息, 本文提出一种利用 SAI 与 VB 融合的认识提取算法, 算法通过 3 步实现: (1) 采用 VB-FAH 指数进行藻类

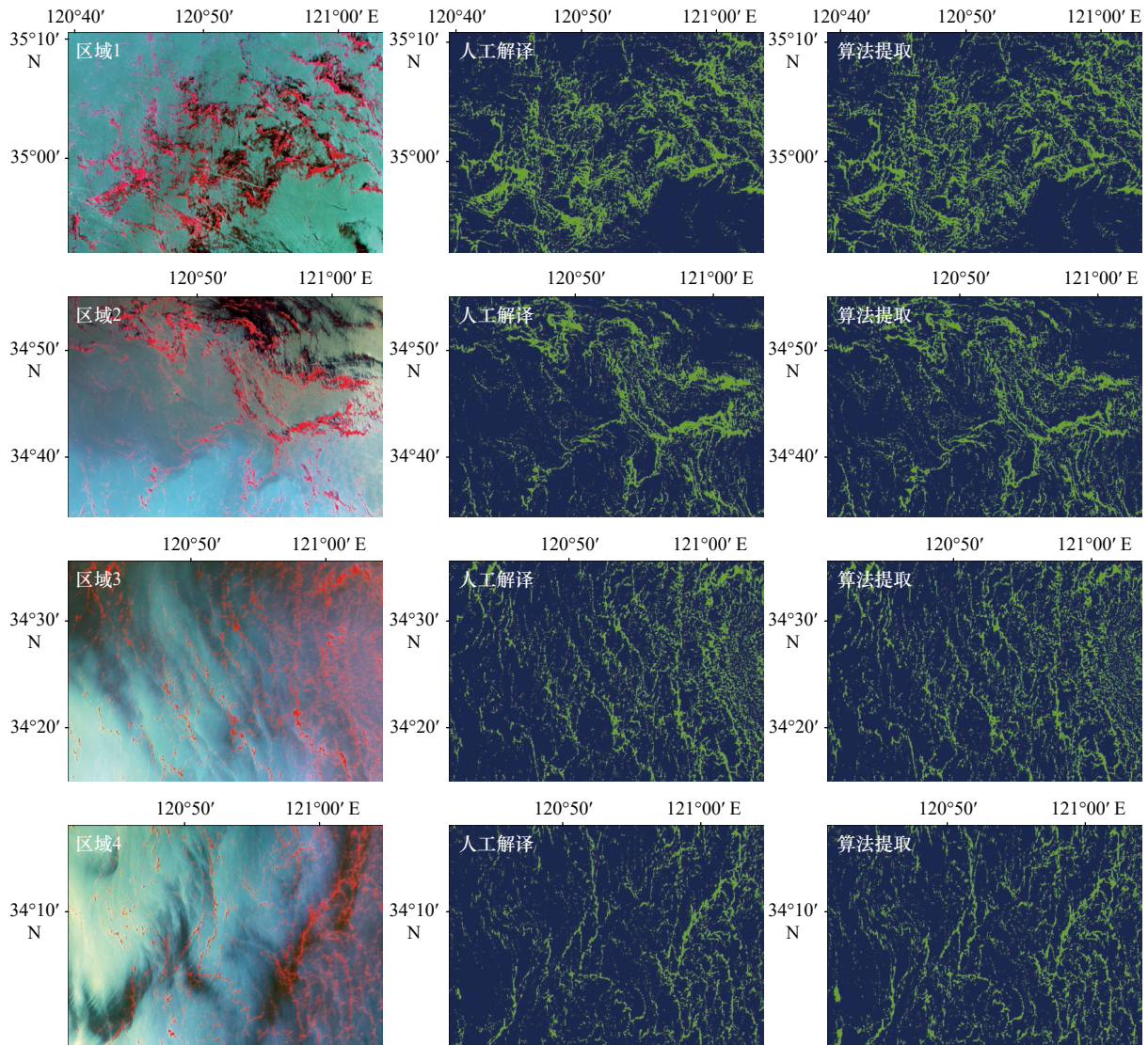


图7 感兴趣区域内人工解译结果与算法提取结果的对比分析
 Fig. 7 Comparative study between manual interpretation and algorithm extraction within the regions of interest

信号增强;(2)通过SAI算法对指数图像进行去背景处理;(3)对误判目标进行识别与排除。在中国近海漂浮大型藻类的提取过程中,算法展现出以下几点优势:(1)诸如VB-FAH、NDVI、FAI等藻类指数在大尺度海域范围内往往表现出背景水色差异,该算法通过客观消除背景水色差异,使利用全局阈值分割藻类像元成为可能;(2)通过SAI计算的藻类像元一定程度消除了自身携带的海水背景信号值,在指示藻类的覆盖规模方面相比原像元更加精确;(3)误判识别步骤有效剔除了多种海面干扰因素,使算法的精度多一重保障。为评价算法提取精度,选择了4个不同区域进行人工解译,对比发现,算法提取精度最低者为区域4, λ 为8.34%;最高者为区域1, λ 为1.03%,总体精度均比较高。

此外,本研究结合准同步的GF-1/WFV1数据,对CZI载荷的漂浮藻类提取结果进行了不确定性分析。研究发现在不同空间分辨率光学遥感数据之间,反演的含藻像元面积指标存在较大的不确定性——对以大型条带型藻类分布为主的海域,CZI数据反演的含藻像元面积不确定性较小;而对于小型斑块型藻类分布为主的海域,CZI数据反演的含藻像元面积不确定性可以高达77.59%。因此,本研究认为不确定性不仅来源于空间分辨率的差异,还来源于漂浮藻类形态大小的空间分异规律。上述研究也进一步指明,今后需要推进海洋大型漂浮藻类形态学的空间分异研究,这将有助于明确不同空间分辨率光学数据反演结果的不确定性。

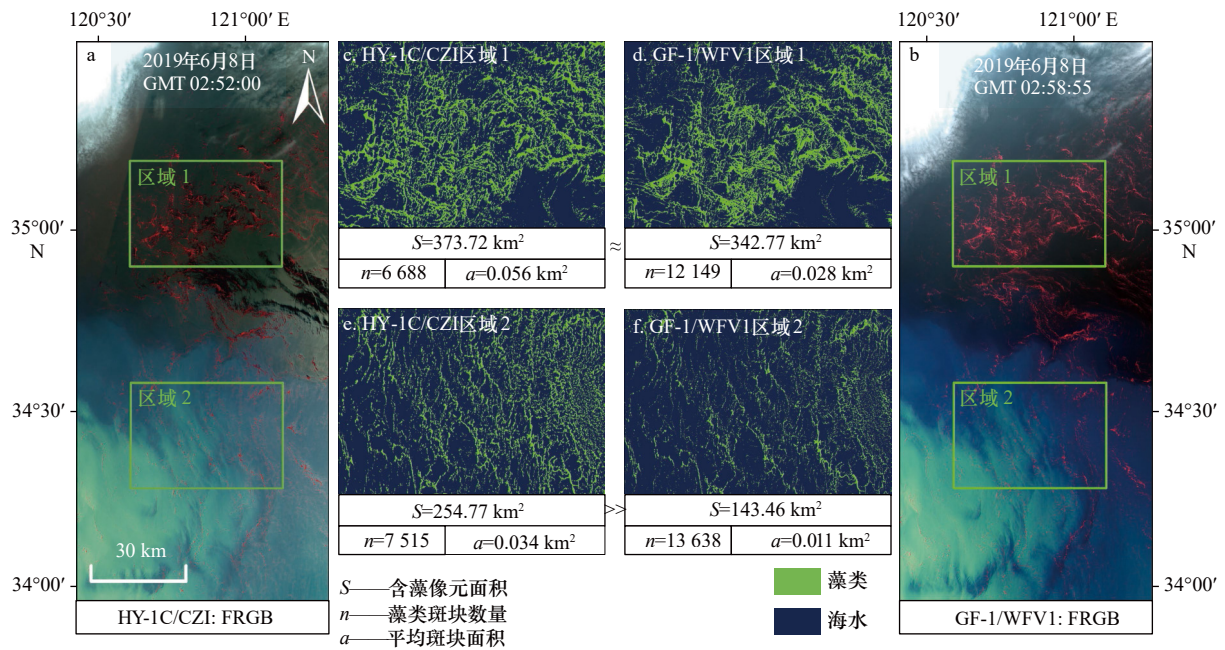


图 8 2019 年 6 月 8 日 HY-1C/CZI 和 GF-1/WFV1 准同步数据反演结果比较

Fig. 8 Comparison of inversion results between image of HY-1C/CZI and quasi-synchronous image of GF-1/WFV1 on June 8, 2019

参考文献:

- [1] Nelson T A, Haberlin K, Nelson A V, et al. Ecological and physiological controls of species composition in green macroalgal blooms[J]. *Ecology*, 2008, 89(5): 1287–1298.
- [2] Ye Naihao, Zhang Xiaowen, Mao Yuze, et al. ‘Green tides’ are overwhelming the coastline of our blue planet: taking the world’s largest example[J]. *Ecological Research*, 2011, 26(3): 477–485.
- [3] Wang X H, Li L, Bao X, et al. Economic cost of an algae bloom cleanup in China’s 2008 Olympic sailing venue[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2009, 90(28): 238–239.
- [4] Li Hongmei, Zhang Yongyu, Tang Hongjie, et al. Spatiotemporal variations of inorganic nutrients along the Jiangsu coast, China, and the occurrence of macroalgal blooms (green tides) in the southern Yellow Sea[J]. *Harmful Algae*, 2017, 63: 164–172.
- [5] Liu Dongyan, Keesing J K, Dong Zhijun, et al. Recurrence of the world’s largest green-tide in 2009 in Yellow Sea, China: *Porphyra yezoensis* aquaculture rafts confirmed as nursery for macroalgal blooms[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(9): 1423–1432.
- [6] Liu Dongyan, Keesing J K, Xing Qianguo, et al. World’s largest macroalgal bloom caused by expansion of seaweed aquaculture in China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(6): 888–895.
- [7] Liu Dongyan, Keesing J K, He Peimin, et al. The world’s largest macroalgal bloom in the Yellow Sea, China: formation and implications[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 129: 2–10.
- [8] Zhang Xiaowen, Mao Yuze, Zhuang Zhimeng, et al. Morphological characteristics and molecular phylogenetic analysis of green tide *Enteromorpha* sp. occurred in the Yellow Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2008, 15(5): 822–829.
- [9] Liang Zongying, Lin Xiangzhi, Ma Mu, et al. A preliminary study of the *Enteromorpha prolifera* drift gathering causing the green tide phenomenon[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2008, 38(4): 601–604.
- [10] Gower J, Hu Chuanmin, Borstad G, et al. Ocean color satellites show extensive lines of floating Sargassum in the gulf of Mexico[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(12): 3619–3625.
- [11] Hu Chuanmin, Li Daqiu, Chen Changsheng, et al. On the recurrent *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C5): C05017.
- [12] Hu Chuanmin, He Mingxia. Origin and offshore extent of floating algae in Olympic sailing area[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2008, 89(33): 302–303.
- [13] Hu Lianbo, Zeng Kan, Hu Chuanmin, et al. On the remote estimation of *Ulva prolifera* areal coverage and biomass[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 223: 194–207.
- [14] Shi Wei, Wang Menghua. Green macroalgae blooms in the Yellow Sea during the spring and summer of 2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114(C12): C12010.
- [15] Hu Chuanmin. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2118–2129.

- [16] Xing Qianguo, Hu Chuanmin. 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[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 178: 113–126.
- [17] Keesing J K, Liu Dongyan, Fearn P, et al. Inter-and intra-annual patterns of *Ulva prolifera* green tides in the Yellow Sea during 2007–2009, their origin and relationship to the expansion of coastal seaweed aquaculture in China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2011, 62(6): 1169–1182.
- [18] Wang Mengqiu, Hu Chuanmin. Mapping and quantifying *Sargassum* distribution and coverage in the Central West Atlantic using MODIS observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 183: 350–367.
- [19] Garcia R A, Fearn P, Keesing J K, et al. Quantification of floating macroalgae blooms using the scaled algae index[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(1): 26–42.
- [20] Gordon H R, Wang Menghua. Retrieval of water-leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: a preliminary algorithm[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(3): 443–452.
- [21] Wang Menghua. Remote sensing of the ocean contributions from ultraviolet to near-infrared using the shortwave infrared bands: simulations[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(9): 1535–1547.
- [22] Qi Lin, Hu Chuanmin, Mikelsons K, et al. In search of floating algae and other organisms in global oceans and lakes[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 239: 111659.
- [23] Qi Lin, Hu Chuanmin. To what extent can *Ulva* and *Sargassum* be detected and separated in satellite imagery?[J]. *Harmful Algae*, 2021, 103: 102001.

A refined imagery algorithm to extract green tide in the Yellow Sea from HY-1C satellite CZI measurements

Liu Jinchao¹, Liu Jianqiang², Ding Jing^{2,3}, Lu Yingcheng¹

(1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 2. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China)

Abstract: As China's first operational ocean color sensor, the coastal zone imager (CZI) carried by Haiyang-1C (HY-1C) satellite is playing an increasingly significant role in offshore ocean environmental monitoring. After the launch of HY-1D satellite, the combination of CZI sensors can provide two observations in three days for coastal zone through dual-satellite system. CZI sensors have demonstrated prominent application advantages for monitoring marine floating algae, oil spill and so on. Since the high spatial resolution optical data contains abundant information about the marine environment, it also brings some distraction to the identification and extraction of specific ocean targets. In this work, a novel CZI algorithm was developed based on cooperation of scaled algae index (SAI) and virtual baseline floating macroalgae height (VB-FAH) to extract floating green tide information in the Yellow Sea from HY-1C satellite CZI measurements. VB-FAH method can be used to enhance the difference between floating algae and sea water, especially for satellite's sensors with no short-wave infrared bands. After that, the algorithm efficiently rejects the complex interference information in the ocean high spatial resolution optical data by SAI sliding window. The algorithm has high accuracy and time efficiency in the extraction of floating green tide from CZI measurements. Moreover, the study carried out an uncertainty analysis for the area of algae-containing pixels between HY-1C satellite CZI data with 50 m spatial resolution and GF-1 satellite WFV1 data with 16 m spatial resolution. The result indicates that the uncertainty in the inversion results of CZI data mainly comes from the over estimation of small patches of floating algae. The study also pointed out that the uncertainty of optical data for floating algae monitoring is not only from the difference of spatial resolution between two sensors, but also related to the spatial variability of the morphological size of floating algae. Exploring the morphological spatial variability of floating algae will help improve the accuracy of optical data inversion results and clarify the uncertainty.

Key words: HY-1C satellite; coastal zone imager; green tide; scaled algae index; virtual baseline floating macroalgae height