

中国近海马尾藻生物量的光学遥感研究

刘裕如¹, 齐琳², 朱小波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. 美国南佛罗里达大学 海洋科学学院, 美国 圣彼得斯堡 33701

摘要: 马尾藻 (*Sargassum*) 是一种在全球海洋广泛分布的漂浮大型褐藻, 近年来由于其大量繁殖引发的“金潮” (Golden tides) 现象, 在以中国东海 ECS (East China Sea) 为主要区域的中国近海爆发愈加频发, 对沿海生态环境和经济活动造成了不可忽视的影响。光学卫星遥感是海洋大型漂浮藻监测的有力支撑, 能实现马尾藻的精确识别与定量估算。光学卫星遥感精细化监测中国东海马尾藻, 尚缺乏马尾藻 (中国东海主要藻种为铜藻) 光学定量遥感模型, 主要是因为缺失模型研究所需的实测光谱数据, 制约了中国近海马尾藻的卫星光学定量遥感研究与应用。为实现其精准光学遥感估算, 本研究在中国东海进行了马尾藻 (铜藻) 生物量控制实验, 获取了反射率光谱数据, 结合传感器光谱响应函数与遥感瑞利校正反射率 R_{rc} (Rayleigh-corrected Reflectance), 建立了适用于多源光学传感器的中国东海马尾藻光学遥感估算模型, 实现了多源光学卫星数据上马尾藻生物量有效估算, 并对多源光学遥感数据的估算结果进行对比验证。结果表明相较于覆盖面积等定量参数, 生物量能有效减少不同空间分辨率传感器因遥感尺度效应所带来的定量估算偏差, 在多源卫星数据估算结果间具有较好的一致性, 是不确定性最小的量化参数。基于多源光学卫星遥感数据对中国近海马尾藻开展定量遥感估算, 为全面、准确掌握金潮爆发信息, 促进中国近海漂浮藻类的精准量化和动态监测提供了重要参考。

关键词: 金潮, 马尾藻, MSI, HY-1/CZI, MODIS, 多源光学卫星遥感

中图分类号: TP79/P2

引用格式: 刘裕如, 齐琳, 朱小波, 唐君, 陆应诚. 2026. 中国近海马尾藻生物量的光学遥感研究. 遥感学报, 30(1): 118-131

Liu Y R, Qi L, Zhu X B, Tang J and Lu Y C. 2026. Optical remote sensing of *Sargassum* biomass in the Marginal Sea of China. National Remote Sensing Bulletin, 30(1): 118-131 [DOI: 10.11834/jrs.20254470]

1 引言

近年来, 马尾藻过度繁殖形成的海洋“金潮”现象在全球范围内均有报道 (Hu 等, 2016; Wang 和 Hu, 2016; Wang 等, 2019; Qi 等, 2020)。自 2011 年起, 卫星影像的持续性观测表明, 大西洋马尾藻带自西非到墨西哥湾具有周期性爆发特征 (Wang 等, 2019), 中国黄海和东海等近海海域自 2014 年以来, 马尾藻规模和强度也呈现显著增加的趋势 (Qi 等, 2022)。马尾藻是一种褐藻纲大型海洋漂浮藻类, 是海洋生态系统的初级生产者 (Qi 等, 2022); 虽然漂浮的马尾藻在开阔大洋中为许多海洋生物提供了重要的栖息地和庇护所, 但其过度繁殖与登滩会对海岸带造成严重的生态

环境问题和经济损失影响。近年来, 墨西哥湾内大西洋马尾藻的大规模暴发, 对当地的旅游经济、渔业资源及海洋环境造成了破坏性影响, 德克萨斯州每年对海滩马尾藻的清理就花费了超过 291 万美元 (Webster 和 Linton, 2013); 中国近海的马尾藻登滩情况虽少有报道, 但 2016 年—2017 年间, 马尾藻金潮生物量显著高于往年同期, 且大量入侵苏北浅滩的马尾藻已对近海养殖造成较大经济损失, 江苏省近海养殖业因其影响, 受损面积超过 9000 ha, 经济损失约 5 亿元人民币 (Xing 等, 2017), 堪比 2008 年奥运会前夕在青岛航海比赛场地附近清理绿潮的成本 (Hu 和 He, 2008)。

现场观测方法难以满足藻华大范围、实时、精细化监测的应用需求, 光学遥感技术凭借监测

收稿日期: 2024-10-22; 预印本: 2025-03-20

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42371380); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (编号: 0904-14380035)

第一作者简介: 刘裕如, 研究方向为海洋环境遥感。E-mail: rueliu@foxmail.com

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

范围广、光谱信息丰富、获取数据简易等优势，是海洋大型漂浮藻精细化监测的重要手段。卫星光学遥感对海洋大型漂浮藻识别与估算，常利用藻类在近红外波段具有较高反射率的光学特点，通过构建谱间关系指数来增强藻类与背景水体的遥感图像信号差异，如基于波段间基线减法的漂浮藻类指数 FAI (Floating Algae Index) (Hu, 2009) 与选择不同波段衍生的替代漂浮藻类指数 AFAI (Alternative Floating Algae Index) (Wang 和 Hu, 2016)、差异植被指数 DVI (Difference Vegetation Index) (Richardson 和 Wiegand, 1977)、增强植被指数 EVI (Enhanced Vegetation Index) (Huete 等, 1999)、大型漂浮藻类虚拟基线高度 VB-FAH (Virtual Baseline Floating macroAlgae Height) (Xing 和 Hu, 2016)、基于去背景放大漂浮藻特征的缩放藻类指数 SAI (Scaled Algae Index) (Keesing 等, 2011)、利用可见光波段色素吸收差异的绿红波段差值 GRD (Green Red Difference) (Qi 和 Hu, 2021) 等，根据光学遥感数据的特点，优选适宜的方法，可有效地促进不同光学遥感数据中大型漂浮藻类的有效识别与提取。

囿于不同光学传感器的性能差异（空间分辨率、辐射分辨率、信噪比等），提取的图像含藻像元还包括较多的分异，需要进一步计算给出藻类“覆盖面积”与“生物量”。这是因为：（1）多源光学传感器数据所内含的遥感尺度效应，（2）海洋漂浮藻类在覆盖面积和藻体厚度上均存在的差异；这些因素会造成不同卫星光学遥感估算结果的不确定性 (Hu 等, 2017, 2023)。上述问题主要来自于不同载荷成像时混合像元所产生的差异，即卫星光学遥感数据中，绝大多数像元为混合像元，需要进一步进行像元解混，才能有效降低卫星遥感监测结果的不确定性 (Hu 等, 2023)。卫星光学遥感数据中大型漂浮藻类的像元混合主要包括线性混合与非线性混合两种情况，线性混合主要表现为光学图像中像元反射信号与其中藻类面积占比的线性相关，非线性混合则是像元反射信号还受到藻类厚度、单位面积生物量变化所产生的非线性响应特征 (Lu 等, 2019)。因此，大型漂浮藻光学遥感的像元解混过程（线性解混和非线性解混）有所不同，前者利用遥感参数与藻图像面积覆盖密度（以下简称覆盖密度）之间的线性关系，如利用 AFAI 对 MODIS 影像进行像元解混

(Wang 和 Hu, 2016)，生产大型漂浮藻覆盖面积反演产品；后者利用遥感参数与藻单位面积生物量 BPA (Biomass per Area) 之间的统计关系（常常是非线性函数或者是分段函数），如基于 AFAI_{MODIS} 的大西洋马尾藻生物量估算模型 (Wang 等, 2018)，生产大型漂浮藻生物量遥感反演产品。

中国东海马尾藻与美国大西洋马尾藻的藻种不同，其光谱特征存在差异 (齐琳 等, 2023)，大西洋马尾藻定量估算模型难以直接应用于中国近海马尾藻的量化估算。发生在加勒比海、墨西哥湾等大西洋海域的金潮（以 *S. fluitans* 和 *S. natans* 为主）(Smetacek 和 Zingone, 2013; Wang 等, 2019)，在中国渤海、黄海至东海等海域以铜藻 (*S. horneri*) 为主 (Komatsu 等, 2014)。相较于美国大西洋马尾藻，中国东海马尾藻气囊形态结构不同，且颜色更深的藻体吸收更多可见光，目视上与背景水体不易区分 (齐琳 等, 2023)。

为了进一步发展中国近海马尾藻“金潮”光学定量遥感算法，厘清典型光学遥感数据定量估算中国东海马尾藻覆盖面积与生物量的关键模型参数。本研究在 2021 年中国东海科考航次中，开展了中国近海马尾藻光学遥感实验研究，获取第一手的马尾藻定量变化光谱反射率数据，发展了中国马尾藻覆盖面积和生物量光学遥感模型与参数，并在多源光学遥感数据上开展了估算应用与交叉对比分析，取得良好结果，可以为中国近海马尾藻的光学遥感估算提供参考。

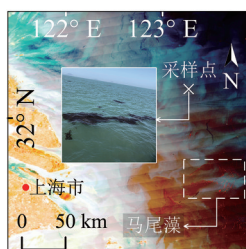
2 数据与方法

2.1 东海马尾藻光谱实验与数据获取

实验搭乘的国家基金委 2021 年中国东海科考航次，于 2021 年 3 月 30 日从青岛出发，4 月 25 日抵达厦门，航行途中在中国近海观测到大量的漂浮马尾藻（中国东海马尾藻藻个体较大，自然漂浮状态如图 1 (a) 所示）。4 月 2 日在东海海域，中心经纬度为 (123.27°E、32.30°N)，采集了大量马尾藻样品，并在科考船（向阳红 18 号）上开展了马尾藻光谱实验，获取不同生物量所对应的马尾藻光谱反射率数据。采用成熟的实验设计方案，该方案在中国黄东海绿潮和美国金潮定量遥感光谱观测中都获得了成功，取得了中国和美国近海不同大型漂浮藻定量估算的可靠成果 (Hu 等,

2017; Wang 等, 2018)。实验的核心准备与步骤如下: (1) 将现场漂浮马尾藻打捞、标记、沥干、称重(湿重); (2) 实验容器为水桶(直径0.46 m, 深度0.52 m), 四周及底部以黑色胶袋包裹, 减少光谱采样过程中的环境光影响; (3) 使用 ASD 光

谱仪进行光谱观测时应避免受到水面耀光干扰, 光谱仪视场角 25° , 波长范围 350—2500 nm, 光谱分辨率 3.5 nm, 光谱采样间隔 1 nm。马尾藻单位面积生物量 BPA (Biomass Per Area), 为每次观测中的马尾藻湿重除以水桶面积 (0.167 m^2)。



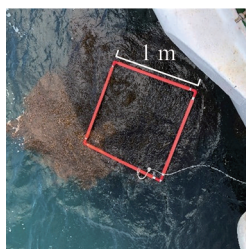
(a) 2021年4月6日04时55分(GMT)获取的 Aqua/MODIS FRGB 影像(R: 859, G: 645, B: 555, 下同)中马尾藻呈现红色斑块(采样点下方虚线区域内可见), 影像成像时间在实验所搭乘的科考船航行时间范围内, 内插照片为实验拍摄东海马尾藻照片

(a) Aqua MODIS FRGB image (R: 859, G: 645, B: 555, same hereinafter) acquired on GMT 04:55, April 6, 2021, during period of the voyage, with *Sargassum*_{ECS} appearing as red patches (Within the dashed area below the sampling point), and the inset field photo of *Sargassum*_{ECS} taken during the experiment



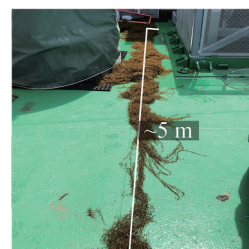
(b) 实验过程中拍摄中国东海马尾藻照片 1

(b) Field photos 1 of *Sargassum*_{ECS} taken during the experiment



(c) 实验过程中拍摄中国东海马尾藻照片 2

(c) Field photos 2 of *Sargassum*_{ECS} taken during the experiment



(d) 实验过程中拍摄中国东海马尾藻照片 3

(d) Field photos 3 of *Sargassum*_{ECS} taken during the experiment

图1 中国东海马尾藻海上光谱采集实验

Fig.1 Field spectrum collection experiment of the *Sargassum*_{ECS}

光谱实验观测选择无云晴朗天气, 实验光谱数据获取步骤如下: (1) 采集适量海水倒入观测黑桶且不溢过, (2) 向观测黑桶逐渐添加一定湿重马尾藻, 并计算实验观测马尾藻的 BPA, (3) 针对不同 BPA 的马尾藻样品, 先测量定标白板 (100% 反射率) 光谱, 然后测量马尾藻光谱, 对测量值做比值处理生成马尾藻反射率 (无量纲), 对每组样品的反射率光谱取均值作为本次测量结果, (4) 重复 (2)、(3) 步, 直至观测黑桶内马尾藻 BPA 达到 6.00 kg/m^2 。图2为观测黑桶上方照片, 展示了具有不同 BPA 数值的马尾藻在水中的分布情况, BPA 由 0.3 kg/m^2 开始增加, 当 BPA 较低时 (图2 (a)、图2 (b)、图2 (c) 所示), 马尾藻在水面自由铺开, 随着 BPA 增加至 1.2 kg/m^2 ,

马尾藻逐渐铺满水面; 此后, 随着 BPA 的增加, 马尾藻在观测黑桶内垂向堆积, 生物量增加也唯有显著的可见光信号改变, 即使是具有较高 BPA 的马尾藻, 在目视观察中也难以有效辨识其生物量变化 (图2 (g)、图2 (h)、图2 (i) 所示)。

2.2 卫星数据获取与预处理

为开展马尾藻光谱实验观测结果评估, 对基于此发展的马尾藻估算模型进行应用分析, 本研究还选择了部分卫星光学遥感数据来进行对比分析, 包括 Sentinel-2A/B 卫星搭载的多光谱成像仪 MSI (Multi-Spectral Instrument)、海洋一号 C/D 卫星 (HY-1C/D) 搭载的海岸带成像仪 CZI (Coastal Zone Imager) 和 Aqua/Terra 卫星搭载的中分辨率成像光谱仪 MODIS (Moderate Resolution Imaging

Spectroradiometer)。由于海洋大型漂浮藻类会增强近红外和短波红外波段的反射率，导致常用大气校正中的“暗像元”假设不成立 (Hu, 2009)，因此对本研究所有数据均进行瑞利校正，生成瑞利

校正反射率 (R_{rc} ，无量纲)，计算公式如下：

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

式中， L_t 为传感器探测的总辐亮度， L_r 为瑞利散射辐亮度， F_0 为太阳入射辐照度， θ_0 为太阳天顶角。

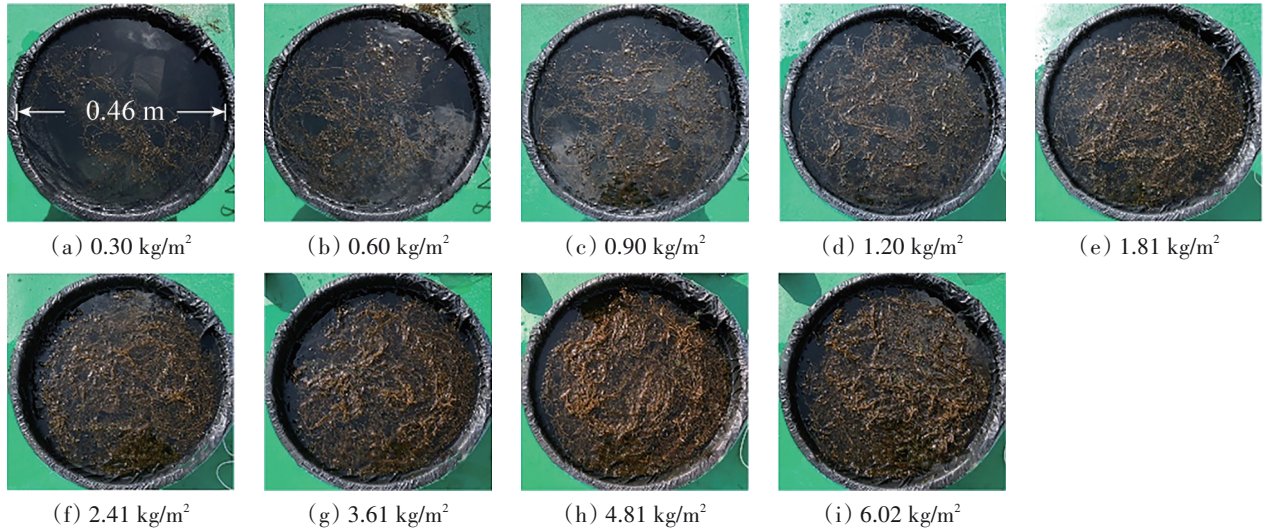


图2 光谱采集实验过程中所拍摄的观测黑桶中具有不同生物量(BPA, kg/m²)的东海马尾藻照片

Fig.2 Digital photos taken during experiment of *Sargassum*_{ECS} in black bucket with different BPA (kg/m²)

MSI R_{rc} 数据采用欧洲航天局哥白尼数据中心 (<https://dataspace.copernicus.eu/> [2024-07-07]) 下载的 L1C 级产品，经 ACOLITE 软件进行瑞利校正得到；CZI R_{rc} 数据采用中国海洋卫星数据服务系统 (<https://osdds.nsoas.org.cn/home/> [2024-07-07]) 下载的 L1B 级产品，后经瑞利校正得到 (刘锦超 等, 2022; 唐君 等, 2023); MODIS R_{rc} 数据采用 LAADS (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/> [2024-07-07]) 下载的 L1B 级产品，经 SeaDAS 软件进行瑞利校正得到，并对各传感器 R_{rc} 数据进行地理校正 (映射为 WGS-84 大地坐标系，并结合具体情况进行 UTM 投影)。所有数据的彩色合成影像见后图。

2.3 卫星数据含藻像元提取

利用遥感指数进行含藻像元的有效识别提取与量化估算时，线性减法指数 (如 FAI/AFAI、VB-FAH 等) 被优先推荐，这是因为以基线减法为核心的方法，能较好的消除光学遥感图像中海洋背景差异与海洋大气的影响，具有更强的抗干扰性 (Hu, 2009)。如 AFAI 图像中，不仅目视辨认马尾藻 (呈现为高亮斑块或条带) 更加容易，还在一定程度上避免了云的影响 (Wang 和 Hu, 2016)，基于 AFAI 建立的大西洋马尾藻遥感估算

模型，展开了美国大西洋马尾藻定量遥感估算长时序研究 (Wang 等, 2018)。由于部分国产卫星传感器 (例如 HY-1C/D 卫星 CZI) 仅有一个近红外波段，无法计算 AFAI 指数，VB-FAH 也可作为替代指数，并也有较好的定量估算应用能力。在本研究的对比分析与交叉验证过程中，要尽量避免不同指数方法内在差异，仅对不同数据的相同指数结果开展分析，因此分别构建基于 MODIS、MSI 的中国马尾藻 AFAI 模型，和基于 MODIS、MSI 与 CZI 数据的 VB-FAH 模型，具体公式如下。

$$AFAI = R_3 - R_2 - (R_4 - R_2) \times \left(\frac{\lambda_3 - \lambda_2}{\lambda_4 - \lambda_2} \right) \quad (2)$$

$$VB - FAH = R_4 - R_1 - (R_2 - R_1) \times \left(\frac{\lambda_4 - \lambda_1}{2\lambda_4 - \lambda_2 - \lambda_1} \right) \quad (3)$$

式中， R 为 R_{rc} 反射率； λ 为波长， λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 对于 MSI 分别是 560 nm、665 nm、740 nm、865 nm，对于 MODIS 分别是 555 nm、645 nm、748 nm、859 nm，对于 CZI (缺少 λ_3) 分别是 560 nm、650 nm、825 nm。

较大幅宽的影像，例如 CZI 和 MODIS 影像，其较广的地理范围中海水背景差异大，使用单一指数阈值对影像全局进行藻类识别提取，会造成弱信号藻像元的漏提、云边像元误提等误差，因

此对 CZI 和 MODIS 指数进行阈值分割前先对其进行 SAI 运算, 过程见式 (4) — (5)。该算法遍历影像内所有像元, 在每个像元周围一定邻域范围内寻找所有像元指数分布的中值, 作为背景水像元信号。SAI 算法利用了小区域的中值差值消除了一部分异常干扰 (Wang 和 Hu, 2016), 可以在没有提取藻像元的情况下构建海水背景并将指数图像中的背景信号归一到 0 值附近, 减少背景差异影响 (刘锦超 等, 2022)。

$$g_{(x,y)} = \text{med}(f_{(x-k,y-l)}, k, l \in W) \quad (4)$$

$$\text{SAI}_{(x,y)} = f_{(x,y)} - g_{(x,y)} \quad (5)$$

式中, $f_{(x,y)}$ 是影像上 (x, y) 位置的原像元值, $g_{(x,y)}$ 是其 W 邻域内的中值, $\text{SAI}_{(x,y)}$ 是缩放后的像元值。

MSI 的光谱校正算法和 SAI 计算都包含利用滑动窗口与减法去背景运算的过程, 在增强含小斑块藻像元信号的同时, 也削减了含有大斑块藻的像元信号, 会造成藻像元的漏提。为提取更精确的马尾藻像元, 算法应用前后的 MSI、CZI 与 MODIS 指数图像均利用双阈值分割, 原始指数图像提取含有大斑块藻的像元, 再利用算法计算的指数图像对含有小斑块藻像元进行补充提取, 对两次提取结果进一步合并处理后, 得到的最终提取结果将应用于后续定量估算工作。

3 马尾藻光学特征分析与遥感建模

3.1 中国东海马尾藻光谱响应特征分析

东海航次实验观测获得的中国马尾藻光谱反射率 (无量纲) 如图 3 所示。中国东海马尾藻在可见光谱段范围内, 整体光谱反射率均较低, 这也与其颜色和漂浮状态有关, 在 BPA 相对较高的情况下, 马尾藻色素的光谱吸收特征依然可以辨识。可见光区域内存在的 3 个光谱吸收与反射特征 ($\sim 580 \text{ nm}$ 、 $\sim 628 \text{ nm}$ 、 $\sim 665 \text{ nm}$), 这是由马尾藻色素对光的强吸收特性所产生; 其中, $\sim 628 \text{ nm}$ 处的光谱反射谷是由于叶绿素 c 的吸收, 这也是东海马尾藻的特征光谱, 可作为区分马尾藻与其他藻类的重要依据之一; 在可见光范围内, 东海马尾藻反射光谱曲线明显低于浒苔和大西洋马尾藻 (齐琳 等, 2023), 是因为前者颜色较深, 且大部分位于水面以下, 且光学信号难以透过, 亦可作为区分依据。可见光—近红外波段范围内 ($\sim 700 \text{ nm}$),

与陆地植被和其他漂浮藻类似, 中国东海马尾藻反射率信号开始提高; 在近红外反射光谱区域内 ($\sim 761 \text{ nm}$ 出) 存在一个明显的反射尖峰, 这是由于太阳诱导的叶绿素荧光 SICF (Sunlight-Induced Chlorophyll II Fluorescence) 在氧气吸收谱段 ($\text{O}_2\text{-A}$) 内的填充效应造成的光谱反射峰 (Lu 等, 2016; 温颜沙 等, 2018)。东海马尾藻光谱反射率在近红外波段的抬升随着马尾藻 BPA 的增加而增强, 是光学卫星遥感通过谱间关系指数 (如 AFAI、VB-FAH 等) 开展中国近海马尾藻识别与量化估算的重要依据, 基于此可构建马尾藻 BPA 与遥感指数间的统计关系, 建立生物量估算模型。

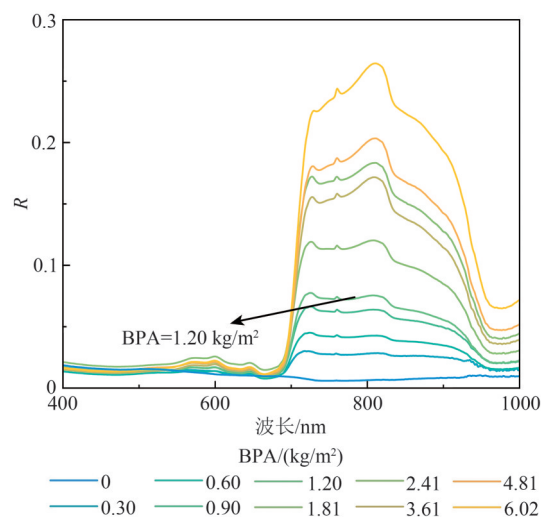


图3 中国东海马尾藻 (铜藻) 不同单位面积生物量 (BPA, kg/m^2) 下对应的反射率光谱

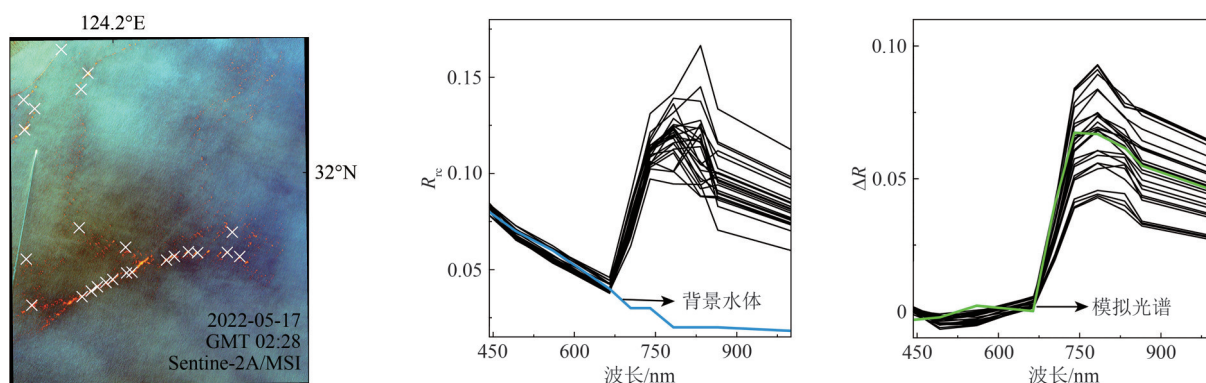
Fig.3 Reflectance spectra corresponding to different biomass per area (BPA, kg/m^2) conditions of *Sargassum*_{ECS} (*S. horneri*)

3.2 Sentinel-2 MSI 数据的马尾藻光谱特征分析

马尾藻 MSI 光谱特征与实测实验获取的高光谱反射率数据特征 (图 3) 略有不同, 其在高空间分辨率卫星光学影像 (例如 MSI 影像) 中具有较强的线性与非线性混合效应, 对应于像元内大型漂浮藻水平方向上的面积混合和垂直方向上的厚度或密度改变 (Hu 等, 2017); 理解卫星数据层面的大型漂浮藻光谱特征及其变化, 对开展漂浮藻覆盖面积或生物量估算具有指导意义 (唐君 等, 2023)。对于中国近海马尾藻, 其与中国浒苔绿潮和美国马尾藻金潮是不同的藻类种、属, 具有不同的生态特性, 也有不同的实测光谱与卫星光谱特征 (齐琳 等, 2023)。基于 MSI 假彩色合成影像 (图 4 (a)), 马尾藻呈现红色的斑块或条带状。光

学辐射传输过程中存在混合像元效应、大气效应、耀光等干扰因素，特别是 MSI 数据存在不同空间分辨率（10 m、20 m 和 60 m）和波段间像元错位，会导致其影像光谱出现偏差，从而被误认为是端元固有的特征光谱，这会造成目标的误判和漏判（Hu, 2021）。在 MSI 图像中随机选取 25 个含藻像元（图 4（a）），MSI 图像中藻类的可见光—近红外光谱（如图 4（b））形态相对杂乱，这并不是马尾藻本身应有的 MSI 影像光谱特征，而是源自上述传感器参数造成的光谱畸变。在分析和利用 MSI 数据藻类光谱前，必须进行像素平均和像素减法运算（Hu, 2022），来进行光谱校正。首先，对 MSI 影

像进行 5×5 窗口均值滤波，对像元反射率进行平均平滑；后以各含藻像元或藻斑块周围一定邻域范围，例如含藻像元窗口内或藻斑块缓冲区内（Keesing 等, 2011; Wang 和 Hu, 2016），以植被指数中值对应像元认定为该含藻像元或藻斑块的邻近清洁水体像元，进而对像元光谱反射率进行去除背景运算。校正后的含藻像元光谱（图 4（c）），形态特征更加接近实测光谱且一致性更强，并具有较好的数值梯度，有效地减弱了前述 3 种效应的影响，更有利于理解含藻像元的卫星光谱特征，并促进近海马尾藻覆盖面积和生物量的光学遥感估算。



(a) MSI FRGB 影像(R: 865, G: 665, B: 560, 下同), 其中马尾藻呈现红色斑块, 并以白色交叉符号(x)标注 25 个随机选择的含藻像元用于后续光谱分析

(a) The MSI FRGB image (R: 865, G: 665, B: 560, same hereinafter) with *Sargassum*_{ECS} appearing as red patches, marking 25 randomly selected pixels with white 'x' symbols for further analysis

(b) 在图 4(a) 中马尾藻像元样本与 1 个典型水像元 R_{rs} 光谱, 存在明显形状畸变

(b) R_{rs} spectra of sampled pixels containing *Sargassum*_{ECS} and 1 typical water pixel from Fig4(a), the former of which exhibiting significant shape distortion

(c) 对图 4(b) 的像元 R_{rs} 光谱应用光谱校正算法后的 ΔR_{rs} 光谱与 1 条由本文铜藻光谱采集实验模拟所得 MSI ΔR_{rs} 光谱, 算法对 MSI 像元光谱的形状畸变起到改善作用

(c) The ΔR_{rs} spectrum, after applying the correction algorithm to the R_{rs} spectrum from the same *Sargassum*_{ECS} containing pixels as figure 4(b) and 1 simulated spectra of in-situ *S. horneri* which comes from the experiment in this paper, showing the amelioration effect of the algorithm on the spectra shape distortion of MSI pixels

图 4 东海马尾藻 MSI R_{rs} 影像与光谱

Fig.4 MSI R_{rs} composite image and spectrum containing *Sargassum*_{ECS}

3.3 马尾藻光学遥感估算模型

利用卫星光学遥感数据估算中国东海马尾藻的覆盖面积和生物量，可以根据图 3 的实测数据集，建立东海马尾藻覆盖密度（覆盖面积）与生物量光学估算模型；相应的方法也被用于中国近海绿潮和美国大西洋马尾藻的光学定量遥感研究中（Hu 等, 2017; Wang 等, 2018）。首先将东海马尾藻光谱实验获取的不同生物量下的反射率数

据减去背景水体（生物量为 0）反射率，通过 MSI、CZI 和 MODIS 等传感器波段响应函数，模拟为相应传感器不同波段的反射率，并根据计算公式（式（2）—（3））得到 $\Delta AFAI$ 、 $\Delta VB-FAH$ 等去背景差值遥感指数，再进行统计建模，得到基于不同传感器、不同遥感指数的估算模型。需要特别注意的是，根据中国近海绿潮、美国大西洋金潮的光学定量遥感模型研究与应用经验认知，大型

漂浮藻的覆盖密度遥感指数模型一般是线性分段函数形式；而生物量遥感指数模型往往是线性与非线性相结合的分段函数形式，前段的线性统计关系描述藻在海面水平方向的聚集，后段的非线性统计关系则描述藻在垂直方向的聚集（Hu 等，2017）。换句话说，这是海洋大型漂浮藻类的遥感尺度效应，这种遥感尺度效应在高空间分辨率数据（如 MSI 影像）中是非常显著的（Lu 等，2019；唐君 等，2023）。

参考已构建的适用于美国大西洋马尾藻的 $\Delta\text{FAI}_{\text{MODIS}}$ -BPA 光学遥感生物量估算模型（Wang 等，2018），选择分段函数来拟合遥感指数差值（ ΔFAI 、 $\Delta\text{VB-FAH}$ ）与马尾藻 BPA 的线性与非线性统计关系，如图 5 展示适用于中国东海马尾藻的 $\Delta\text{FAI}_{\text{MODIS}}$ -BPA 光学遥感生物量估算模型。

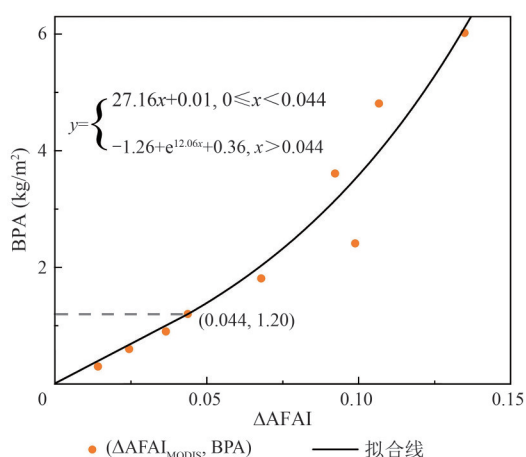


图 5 基于 $\Delta\text{FAI}_{\text{MODIS}}$ 的中国东海马尾藻生物量估算模型，其中散点 y 值为光谱采集实验中实际测量值的计算结果（实际称量的藻湿重与黑桶上底面积比值）， x 值为实测反射率去背景后模拟 MODIS 观测的 ΔFAI 值

Fig.5 The biomass estimation model for *Sargassum*_{ECS} based on ΔFAI -MODIS, and scatters with the y representing calculation from actual measured values from field experiments (Ratio of measured wet weight to top base area of black bucket), and the x representing ΔFAI values simulated as MODIS observations after removing the background from the measured reflectance

图 5 所示的生物量估算模型，其线性函数与非线性函数的转换发生在 $\text{BPA}=1.2 \text{ kg/m}^2$ ，说明在遥感图像层面，此时的东海马尾藻的状态最接近纯藻端元，即自然伸展条件下完全铺满一个传感器像元所在范围，马尾藻覆盖密度饱和，达到 100%。而通过遥感监测大型海洋漂浮藻类的过程中，尤其是通过中低空间分辨率的传感器例如

MODIS（Hu 等，2017），提取结果中绝大多数藻像元都是藻水混合像元，此时如果使用未加权的含马尾藻像元估算马尾藻面积覆盖，则会造成严重的误差（Wang 和 Hu，2016）。未饱和的藻像元信号来自海水和漂浮藻的共同贡献（式（6）），其反射率与藻覆盖密度呈线性关系（线性混合），因此基于线性算法的遥感指数（ ΔFAI 、 VB-FAH 等）可以对这种混合效应进行解混，具体计算见式（7）。

$$R_{\lambda} = \alpha R_{\lambda, A} + (1 - \alpha) R_{\lambda, W} \quad (6)$$

式中， R_{λ} 、 $R_{\lambda, A}$ 、 $R_{\lambda, W}$ 分别为传感器 λ 波段下像元、藻端元、水端元反射率， α 为该像元藻覆盖密度（0—100%，同式（7））。

$$\alpha = (x_T - x_W) / (X_A - X_W) = x / X \quad (7)$$

式中， x_T 、 x_W 分别为影像藻像元、水像元遥感指数（例如 ΔFAI 、 VB-FAH 等）， X_A 、 X_W 分别为实测藻端元、海水端元模拟指数， x 、 X 分别为减去背景水信号后的差值遥感指数与差值端元模拟指数。需要注意式（6）—（7）及其之间的推导，仅在遥感指数基于线性计算且藻像元为线性混合时成立；两式中 α 均不大于 100%，当藻生物量的持续累积导致藻像元各波段反射率随之变化响应，进一步影响遥感指数使得 $x > X$ ，即藻像元 BPA 超过藻端元 BPA（ 1.2 kg/m^2 ）后，其各波段反射率不再是线性混合， α 不能再定量反映像元内藻的状态与变化。

本研究面向多源传感器，给出了基于不同遥感指数的生物量估算模型，拟合数据均使用图像去背景后的遥感指数差值，模型函数形式参照图 5 展示的线性（ $y=k_1x+b_1$ ）与非线性（ $y=a+\exp(k_2x+b_2)$ ）结合的分段函数，且为量化模型拟合效果，并给出 RMSE（单位与原始数据相同），除下文用于定量结果对比验证的 MSI、CZI 与 MODIS 估算模型外，表 1 还列出了基于例如 Landsat 8/OLI、Sentinel-3/OLCI、GK-2B/GOCI- II、NPP/VIIIRS 等传感器估算模型的具体参数与拟合效果评价指标，其中各模型线性估算函数应用范围以 0 为起点，这是由于 $\text{BPA}=0$ 所对应的差值遥感指数近乎为 0（数量级为 10^{-4} ）。需要注意的是，不同于实测实验中反射率随 BPA 变化而变化，在遥感估算模型的应用中，遥感指数是自变量，而生物量和覆盖密度是因变量，因此在图 5 和表 1 中的 x 和 y 均进行了相应调整。

表1 中国东海马尾藻生物量多源遥感估算模型关键参数
Table 1 The key parameters of biomass estimation model for *Sargassum*_{ECS} based on multi-source remote sensing

差值遥感指数 x	$y=k_1x+b_1$, ($0\leq y\leq 1.20$)参数:				$y=a+\exp(k_2x+b_2)$, ($y>1.20$)参数				
	k_1	b_1	RMSE (kg/m ²)	应用范围	a	k_2	b_2	RMSE (kg/m ²)	应用范围
$\Delta\text{FAI}_{\text{MSI}}$	25.47	0.010	0.09	$0\leq x\leq 0.047$	-1.03	12.28	0.25	0.75	$x>0.047$
$\Delta\text{FAI}_{\text{MODIS}}$	27.16	0.010	0.09	$0\leq x\leq 0.044$	-1.26	12.06	0.36	0.74	$x>0.044$
$\Delta\text{FAI}_{\text{GOCI-II}}$	26.85	0.010	0.09	$0\leq x\leq 0.044$	-1.14	12.26	0.37	0.74	$x>0.044$
$\Delta\text{FAI}_{\text{OLCI}}$	27.81	0.010	0.09	$0\leq x\leq 0.043$	-1.32	11.71	0.47	0.72	$x>0.043$
$\Delta\text{FAI}_{\text{VIIRS}}$	26.02	0.010	0.09	$0\leq x\leq 0.046$	-1.25	11.47	0.34	0.74	$x>0.046$
$\Delta\text{VB-FAH}_{\text{MSI}}$	19.74	0.008	0.09	$0\leq x\leq 0.060$	-3.11	4.65	1.16	0.70	$x>0.060$
$\Delta\text{VB-FAH}_{\text{CZI}}$	20.24	0.008	0.09	$0\leq x\leq 0.058$	-3.00	4.95	1.14	0.70	$x>0.058$
$\Delta\text{VB-FAH}_{\text{MODIS}}$	21.65	0.009	0.10	$0\leq x\leq 0.054$	-4.37	4.17	1.50	0.70	$x>0.054$
$\Delta\text{VB-FAH}_{\text{OLI}}$	22.21	0.009	0.10	$0\leq x\leq 0.053$	-4.72	4.06	1.54	0.67	$x>0.053$
$\Delta\text{VB-FAH}_{\text{GOCI-II}}$	21.93	0.008	0.11	$0\leq x\leq 0.054$	-4.66	4.08	1.55	0.67	$x>0.054$
$\Delta\text{VB-FAH}_{\text{OLCI}}$	21.86	0.009	0.11	$0\leq x\leq 0.054$	-4.67	4.08	1.55	0.67	$x>0.054$
$\Delta\text{VB-FAH}_{\text{VIIRS}}$	21.70	0.009	0.11	$0\leq x\leq 0.055$	-4.55	4.12	1.52	0.68	$x>0.055$

式（6）与（7）说明解混运算实际上为实测模拟的差值藻端元指数，对差值影像遥感指数的归一化处理，而对差值藻端元模拟指数取倒数即可获得覆盖密度解混模型中的唯一参数（参考表1中各模型中分段函数的转折点，例如在利用 $\text{FAI}_{\text{MODIS}}$ 来计算覆盖密度时，式（7）可写作 $\Delta\text{FAI}_{\text{MODIS}}/0.044$ ）。但是这样基于线性归一化思想的藻定量遥感估算因不能解释“当覆盖密度达到100%后，藻的光谱反射率仍随其BPA的增加而变化”的现象，而为其定量结果引入了不确定性，反映了基于非线性解混的藻生物量遥感估算，能够实现更加稳健的量化信息。

以基于 $\Delta\text{FAI}_{\text{MODIS}}$ 的遥感估算模型（图5与表1）为例，（1）当马尾藻BPA从0增加至~1.2 kg/m²时， $\Delta\text{FAI}_{\text{MODIS}}$ （0—0.044区间内）、像元覆盖密度 α （0—100%区间内）随之线性变化，遥感影像层面表现为藻水混合像元；（2）当BPA>1.2 kg/m²后， $\Delta\text{FAI}_{\text{MODIS}}$ 随之响应减缓，二者之间呈非线性关系，而 α 达到100%饱和后保持不变，遥感影像层面表现为纯藻像元。因此， $\Delta\text{FAI}_{\text{MODIS}}\approx 0.044$ 时，生物量估算模型由线性函数过渡为非线性函数。

4 东海马尾藻遥感估算与对比分析

4.1 大型漂浮藻类光学遥感估算

已有研究表明，不同类型的海洋大型漂浮藻

类（绿潮和金潮）在海面均具有水平方向上的面积混合与垂直方向上的厚度变化等特征（Hu等，2017，Wang等，2018），对卫星光学遥感监测而言，其结果会有与之相对应的像元线性混合与非线性混合特征。不同空间分辨率的遥感影像，对这种线性与非线性混合特征的表现也不同，从而产生了大型漂浮藻光学卫星估算的遥感尺度效应（Lu等，2019；唐君等，2023）。换句话说，粗空间分辨率数据像元中会同时包含藻类的线性混合与非线性混合；而在高空间分辨率数据像元中，这两种混合往往能得以区分，但这给不同空间分辨率卫星数据的对比验证带来了更多的挑战。

4.2 中国东海马尾藻光学遥感估算结果对比分析

为进一步开展基于准同步MSI、CZI、MODIS数据的中国东海马尾藻定量估算与对比分析，本研究建立的中国东海马尾藻覆盖密度与生物量遥感估算模型，将应用于2022年中国东海马尾藻主要生长周期内云、耀光等干扰较少的MSI、CZI、MODIS准同步影像，其中MSI更高的空间分辨率使其影像估算结果能够作为验证数据源，可以很好地用来评估CZI和MODIS影像估算结果（Qi等，2023）。由于中国东海范围相比于传感器扫描幅较大导致影像无法完全覆盖，并且影像中藻所占面积较小，因此对影像均裁剪高质量成像区域，共获得MSI-CZI、MSI-MODIS各9个位置准同步影

像对（相关信息见表2），对其估算结果进行网格统计，以 MSI 数据计算结果作为参考值对相互匹配的网格单元内估算结果进行对比分析。

表2 中国东海马尾藻准同步影像对信息, 网格单元个数为各影像对网格统计结果中定量参数(覆盖面积、生物量等)均不为0的单元数量, 即其范围内有藻的网格单元数量

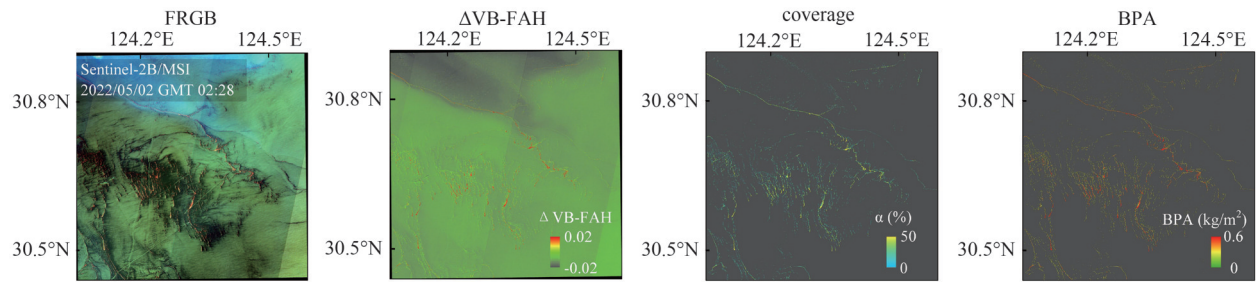
Table 2 The information for quasi-synchronous image pairs of *Sargassum*_{ECS}, with the grid cell counts representing the number of cells in the grid statistics from the image pair whose quantitative parameters (Coverage area, biomass, and etc.) are both non-zero, indicating the presence of algae within these grid cells

成像日期	影像对数据源	网格单元个数
2022-02-26	MSI、MODIS	44
2022-02-28	MSI、CZI、MSI、MODIS	40, 14
2022-03-03	MSI、CZI	391
2022-03-13	MSI、MODIS	243
2022-03-15	MSI、CZI	27
2022-04-05	MSI、CZI	60
2022-04-17	MSI、CZI、MSI、MODIS	72, 95
2022-04-20	MSI、CZI	568
2022-05-02	MSI、CZI	324
2022-05-05	MSI、MODIS	1015
2022-05-17	MSI、CZI	83

准同步影像的对比分析首先需要对其中的东海马尾藻进行识别提取与估算，对影像计算遥感指数图像，后采用前文介绍的双阈值分割方法对东海马尾藻进行识别提取，再结合前文基于遥感指数的估算模型进一步估算覆盖面积与生物量。根据前文基于两种指数的估算模型以及传感器的波段载荷情况，AFAI估算模型应用于MSI与MODIS对比，VB-FAH估算模型应用于MSI与CZI对比。对估算的马尾藻像元面积、覆盖面积、生物量等结果图像进行网格统计并匹配网格单元，获得2976对匹配单元（MSI-CZI 1565对，MSI-MODIS 1411对）并进行验证，由于影像和估算结果图像的同质性，图6、图7展示了其中两组影像与指数图像数据及其估算与统计结果，需要指出的是，即使是在时间差小于20 min的准同步影像中，马尾藻也可能发生了一定程度的漂移，进而影响统计结果，在4 km×4 km的统计网格范围内，大部分藻位移误差可以被网格单元范围平滑掉，不会显著影响整体的统计结果。

图6（a）—图6（d）都对去除背景后的差值遥感指数图像（ Δ AFAI、 Δ VB-FAH）进行了展示，这些差值遥感指数将会应用于后续中国东海马尾藻量化估算工作中，其核心思想是为了尽可能消

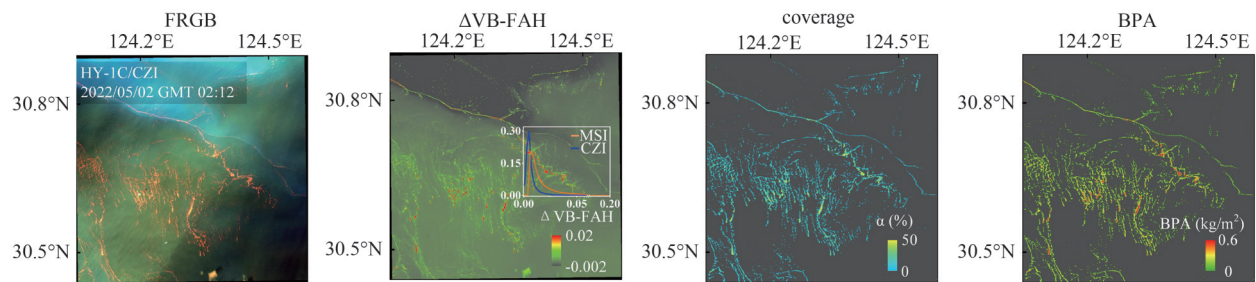
除影像中不同藻像元受到不同背景干扰的差异，以得到较为稳健的藻像元遥感指数阈值下限（Hu等，2023），减少弱信号藻的漏判。相较MSI和CZI数据而言，MODIS数据的分辨率较粗，对马尾藻小斑块探测能力较差。使用相同网格对多源遥感数据估算结果进行统计后删除0值网格单元，随后以MSI的估算结果为参考值，开展对CZI和MODIS估算结果的对比分析，对准同步影像中非零网格单元的交集所生成散点拟合其趋势并给出拟合评价指标及与1:1线的比较，结果见图7。利用式（7）与表2所列模型估算得到图6中国东海马尾藻定量估算结果，应注意的是对于某一种传感器数据，即使是空间分辨率最低的MODIS，算得的覆盖面积与生物量之间并不呈现简单的线性关系，即后者不能直接等于前者的1.2倍（中国东海马尾藻饱和藻端元BPA），说明在藻的光学定量遥感中往往同时存在线性混合与非线性混合效应，而涉及到非线性混合的含藻像元，其BPA大于饱和藻端元BPA，这些藻像元虽然在像元数量上占比较少，但其对总生物量的贡献较高，如果不能对这部分藻像元进行合理解混，则会给生物量估算带来不确定性（Lu等，2019）。



(a) MSI数据,从左向右依次为FRGB影像、减水背景下差值指数图像、覆盖密度与生物量密度估算结果,

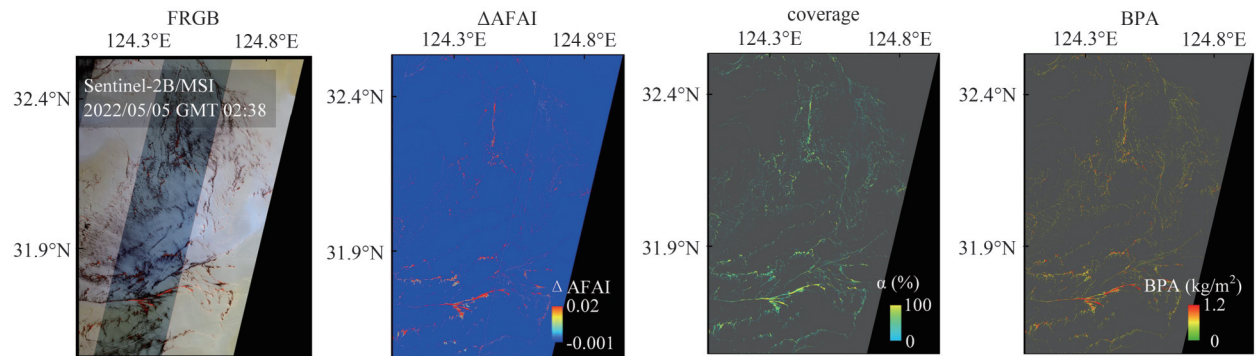
以MSI估算得到中国东海马尾藻覆盖面积11.41 km²,生物量15.18 kt

(a) MSI data, the corresponding FRGB images, water background subtracted index difference images and estimation of coverage and BPA results listed from left to right in each row, with the coverage area of 11.41 km² and biomass of 15.18 kt for *Sargassum*_{ECS} estimated from MSI data



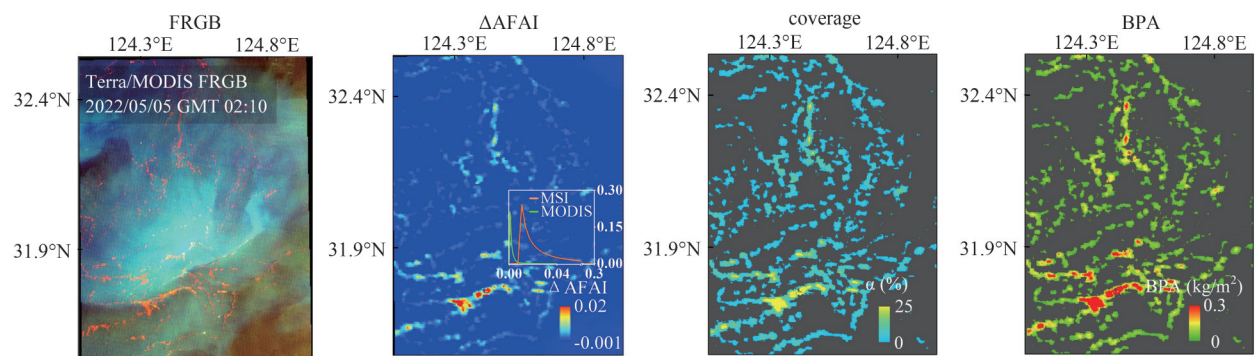
(b) CZI数据,其中FRGB影像通道 R:825,G:650,B:560,以CZI估算得到中国东海马尾藻覆盖面积19.27 km²,生物量24.35 kt

(b) CZI data, the corresponding FRGB image R: 825, G: 650, B: 560, with the coverage area of 19.27 km² and biomass of 24.35 kt for *Sargassum*_{ECS} estimated from CZI data



(c) MSI数据,以MSI估算得到中国东海马尾藻覆盖面积47.08 km²,生物量61.70 kt

(c) MSI data, with the coverage area of 47.08 km² and biomass of 61.70 kt for *Sargassum*_{ECS} estimated from MSI data

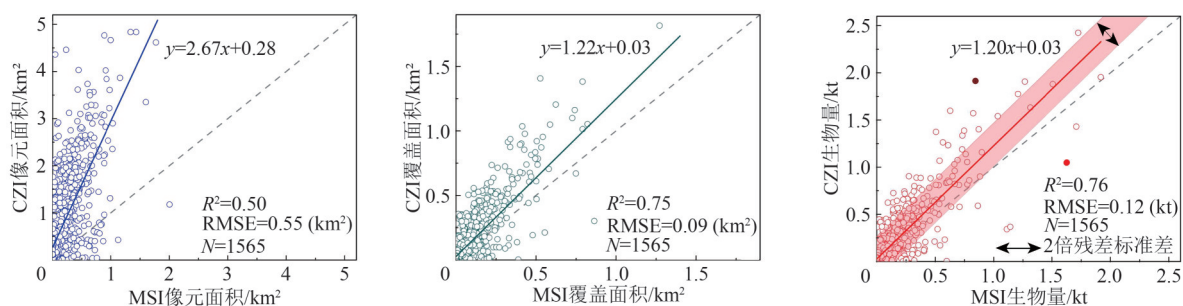


(d) MODIS数据,以MODIS估算得到中国东海马尾藻覆盖面积42.10 km²,生物量56.41 kt

(d) MODIS data, with the coverage area of 42.10 km² and biomass of 56.41 kt for *Sargassum*_{ECS} estimated from MODIS data

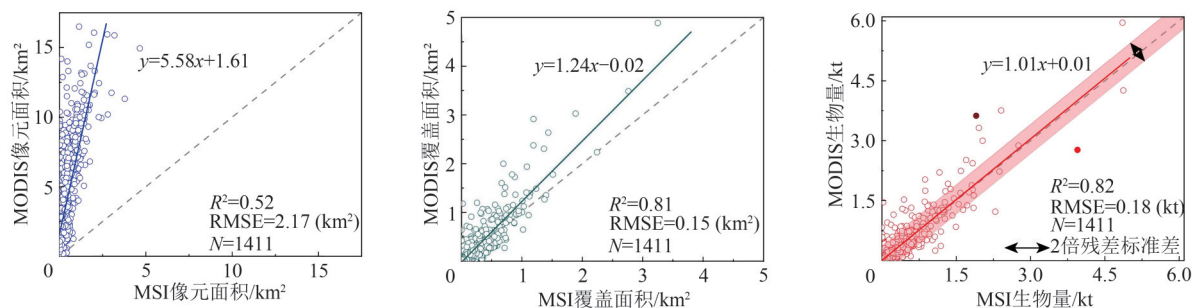
图6 中国东海马尾藻准同步影像及其计算与估算结果

Fig.6 The quasi-synchronous images of *Sargassum*_{ECS} and its corresponding calculation and estimation



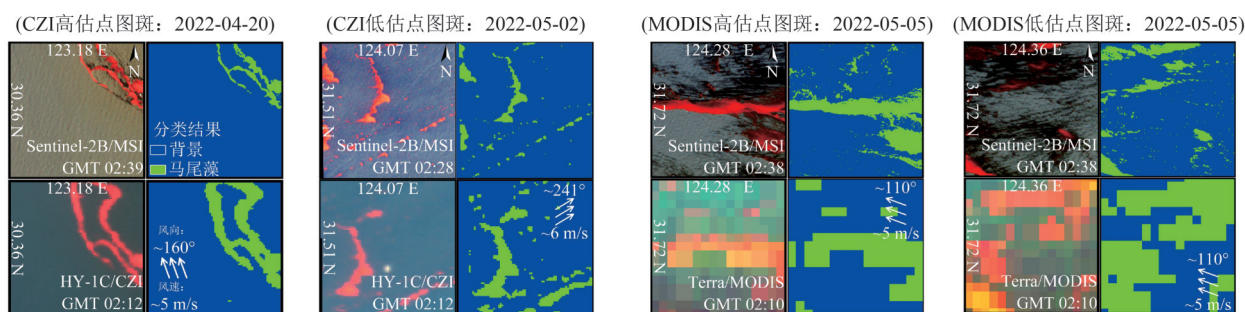
(a) MSI与CZI对比验证,以表2中匹配网格单元内MSI估算结果为参考值对CZI估算结果展开验证,从左向右依次为像元面积、覆盖面积、生物量验证结果,在其中生物量对比验证结果中,选择距离散点拟合线超过两倍残差标准差且偏差程度较大的2个散点(高估、低估点分别以深色、浅色实心点标注)分析数据详情

(a) Comparison and validation between MSI and CZI, using the estimation results from MSI as reference value to validate that of CZI within the matched grid cells listed in Table 2, from left to right are the pixel area, the coverage area, and the biomass verification results, among which, the 2 solid points (The overestimated and underestimated points are marked with dark and light solid dots respectively) in the biomass validation of, which significantly exceeded the 2-fold residual standard deviation from the fitted line, selected for the detailed analysis



(b) MSI与MODIS对比验证,以表2中匹配网格单元内MSI估算结果为参考值对MODIS估算结果展开验证

(b) Comparison and validation between MSI and MODIS, using the estimation results from MSI as reference value to validate that of MODIS within the matched grid cells listed in Table 2



(c) Abnormal points in biomass estimations comparison between CZI and MSI, with the FRGB images and algae pixel extractions of the quasi-synchronous MSI and CZI respectively corresponding to the points selected in (a) biomass validation, annotating the approximate wind speed and direction within 1 hour from the imaging time, calculated from ERA5 hourly data, same hereinafter

(d) Abnormal points in biomass estimation results comparison between MODIS and MSI, with the FRGB images and algae pixel extraction of the quasi-synchronous MSI and MODIS respectively corresponding to the points selected in (b) biomass validation

图7 中国东海马尾藻多源遥感估算结果对比验证

Fig.7 Comparison and validation of estimation results for *Sargassum*_{ECS} from multi-source remote sensing

图7(a)和图7(b)的结果揭示了以下3点：(1) 未经像元解混的含藻像元面积受数据空间分辨率的影响显著：以MSI数据的估算结果为基准(图中的1:1线)，CZI和MODIS数据的马尾藻像元面积分别高估了2.67倍和5.58倍，其估算结果受传感器空间分辨率影响很大，由粗空间分辨率数据估算的未解混像元面积会存在更明显的高估；(2) 进行像元解混后的覆盖面积较像元面积，其估算结果在多源传感器之间差异性减小：CZI和MODIS数据的覆盖面积分别高估了1.22倍和1.24倍，更真实地代表了中国东海马尾藻的实际面积；(3) 生物量是不确定最小的马尾藻定量遥感参数，相较于前两项二维面积参数，生物量反映了反射率对藻厚度变化的响应，在不同传感器之间显示出更高的一致性。多源数据估算散点整体趋势的斜率更加接近1，分布也更加集中在1:1线附近。

图7以MSI估算结果为参考值，对CZI与MODIS所估算的中国东海马尾藻像元面积、覆盖面积与生物量展开对比验证，虽然多源数据估算结果之间随着解混算法过程(由不解混所得的像元面积到线性解混所得的覆盖面积，再到非线性解混所得的生物量)，逐渐展示出更高的一致性，但即使是生物量估算结果对比验证的散点中仍存在明显离群点，这是由于CZI或MODIS相对于MSI的显著高估或低估。图7(c)—图7(d)对这几种情况分别列举探究其异常原因，图中分别展示了不同的准同步数据源影像对中，某个明显离群的散点所对应4 km×4 km网格单元范围内藻的分布情况与后续提取结果；其中图7(c)与图7(d)展示了其他传感器(CZI或MODIS)相对于MSI的同时存在高估与低估情况。这些高估和低估是由于波浪、风等因素作用下(图7(c)—图7(d)中给出的风速风向数据作为参考)，藻在准同步数据对成像时间差内的移动距离超过了网格统计范围，造成的一种随机误差，即使扩大网格范围(例如10 km×10 km等更大尺寸的网格)，也不能消除发生于网格单元边界的藻漂移所带来的误差；而在数据量足够大，即参与趋势拟合的散点足够多时，这种随机误差不会显著影响整体的拟合趋势与效果。

上述结果表明，多源遥感数据得到的像元面积明显受到传感器空间分辨率的影响，结果之间缺乏可比性，不适合代表实际马尾藻面积；而采

用像元解混作为核心思想计算得到的覆盖面积与生物量，可以有效减少不同传感器影像的遥感尺度效应；进一步比较分析表明，生物量在多源估算结果一致性上优于覆盖面积。虽然覆盖面积可以减少水平的线性混合效应，但藻在像元中覆盖密度达到100%后，其厚度增加仍会影响光学传感器的信号响应，此时面积定量参数已经无法准确反映藻体厚度变化对信号的贡献。由于解混思想将空间分辨率的影响纳入遥感定量估算，覆盖面积和生物量均可用于定量描述中国东海马尾藻，提高了多源估算结果精度与一致性，有助于东海马尾藻的多源定量遥感协同监测。

5 结 论

为了实现对东海马尾藻的精准遥感估算，本研究通过详细的生物量控制实测实验，获取了东海马尾藻的反射率光谱数据，并对其光谱特征进行了深入分析，明确了在不同波段的反射特性和变化规律。在此实测高光谱数据集基础上，结合光学卫星遥感数据，构建了中国东海马尾藻生物量的遥感定量估算模型，为未来的马尾藻监测估算提供了关键的科学依据。

多源遥感的协同监测能够更及时、全面地获取马尾藻生物量的时空分布信息，而这一协同监测的可行性依赖于估算模型的准确性和可靠性。为此，本研究基于多源光学卫星数据提供了对中国东海马尾藻从覆盖面积到生物量的定量估算方法，包括含藻像元识别与提取、藻类指数计算与处理、线性解混估算覆盖面积与非线性解混估算生物量；并对其中多源遥感数据(如MSI、CZI、MODIS)进行了对比验证，通过对准同步影像中含藻像元面积、覆盖面积和生物量的估算和比较，结果表明，基于本研究的生物量估算模型在不同遥感数据间具有高度一致性和准确性，能够有效减少不同空间分辨率数据间的尺度效应影响。

本研究提出的多源遥感生物量估算模型，不仅能够精准量化中国东海马尾藻的空间分布和生物量，还为东海生态系统的科学评估和管理提供可靠的卫星定量遥感估算工具。通过对不同传感器数据的交叉对比分析，进一步确认了该模型在多源协同遥感监测中的适用性，其准确性和实用性为未来的实时监测、预警和保护海洋生态系统提供有力的支持。

志 谢 美国南佛罗里达大学海洋科学学院胡传民教授、美国国家海洋和大气管理局卫星应用与研究中心齐琳博士在研究过程中给予了大量指导和帮助。

参考文献(References)

- 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 C M. 2021. Remote detection of marine debris using satellite observations in the visible and near infrared spectral range: challenges and potentials. *Remote Sensing of Environment*, 259: 112414 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112414]
- Hu C M. 2022. Remote detection of marine debris using Sentinel-2 imagery: a cautious note on spectral interpretations. *Marine Pollution Bulletin*, 183: 114082 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.114082]
- Hu C M and He M X. 2008. Origin and offshore extent of floating algae in Olympic sailing area. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 89(33): 302-303 [DOI: 10.1029/2008EO330002]
- Hu C M, Murch B, Barnes B B, Wang M Q, Maréchal J P, Franks J, Johnson D, Lapointe B, Goodwin D S, Schell J and Siuda A N S. 2016. *Sargassum* watch warns of incoming seaweed. *Eos*, 97 [DOI: 10.1029/2016EO058355]
- Hu C M, Qi L, Hu L B, Cui T W, Xing Q G, He M X, Wang N, Xiao Y F, Sun D Y, Lu Y C, Yuan C, Wu M Q, Wang C Y, Chen Y L, Xu H P, Sun L, Guo M H and Wang M H. 2023. Mapping *Ulva prolifera* green tides from space: a revisit on algorithm design and data products. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 116: 103173 [DOI: 10.1016/j.jag. 2022. 103173]
- Hu L B, Hu C M and He M X. 2017. Remote estimation of biomass of *Ulva prolifera* macroalgae in the Yellow Sea. *Remote Sensing of Environment*, 192: 217-227 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.01.037]
- Huete A R, Justice C. 1999. MODIS Vegetation Index (MOD 13) Algorithm Theoretical Basis Document (Version 3)
- Keesing J K, Liu D Y, Fearn P and Garcia R. 2011. 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. *Marine Pollution Bulletin*, 62(6): 1169-1182 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.03.040]
- Komatsu T, Mizuno S, Natheer A, Kantachumpoo A, Tanaka K, Morimoto A, Hsiao S T, Rothäusler E A, Shishidou H, Aoki M and Ajisaka T. 2014. Unusual distribution of floating seaweeds in the East China Sea in the early spring of 2012. *Journal of Applied Phycology*, 26(2): 1169-1179 [DOI: 10.1007/s10811-013-0152-y]
- Liu J C, Lu 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/hyxb2022097]
- Lu Y C, Li L H, Hu C M, Li L, Zhang M W, Sun S J and Lv C G. 2016. Sunlight induced chlorophyll fluorescence in the near-infrared spectral region in natural waters: interpretation of the narrow re-reflectance peak around 761 nm. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(7): 5017 - 5029 [DOI: 10.1002/2016JC011797]
- Lu T, Lu Y C, Hu L B, Jiao J N, Zhang M W and Liu Y X. 2019. Uncertainty in the optical remote estimation of the biomass of *Ulva prolifera* macroalgae using MODIS imagery in the Yellow Sea. *Optics Express*, 27(13): 18620-18627 [DOI: 10.1364/OE. 27. 018620]
- Qi L, Hu C M, Mikelsons K, Wang M H, Lance V, Sun S J, Barnes 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]
- Qi L and Hu C M. 2021. To what extent can *Ulva* and *Sargassum* be detected and separated in satellite imagery?. *Harmful Algae*, 103: 102001 [DOI: 10.1016/j.hal.2021.102001]
- Qi L, Hu C M, Barnes B B, Lapointe B E, Chen Y L, Xie Y Y and Wang M H. 2022. Climate and anthropogenic controls of seaweed expansions in the East China Sea and Yellow Sea. *Geophysical Research Letters*, 49(19): e2022GL098185 [DOI: 10.1029/2022GL098185]
- 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, Wang M H and Hu C M. 2023. Uncertainties in MODIS-derived *Ulva prolifera* amounts in the Yellow Sea: a systematic evaluation using Sentinel-2/MSI observations. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 20: 1501805 [DOI: 10.1109/LGRS.2023.3272889]
- Richardson A J and Wiegand C L. 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(12): 1541-1552
- Smetacek V and Zingone A. 2013. Green and golden seaweed tides on the rise. *Nature*, 504(7478): 84-88 [DOI: 10.1038/nature12860]
- Tang J, Lu Y C, Jiao J N, Liu J Q, Hu L B, Ding J, Xing Q G, Wang F T, Song Q J, Chen Y L, Tian L Q, Wang X Y and Liu J C. 2023. High-precision monitoring of green tide biomass in the Yellow Sea of China through optical remote sensing. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(11): 2484-2498 (唐君, 陆应诚, 焦俊男, 刘建强, 胡连波, 丁静, 邢前国, 王福涛, 宋庆君, 陈艳珑, 田礼乔, 王心源, 刘锦超. 2023. 中国近海绿潮生物量的卫星光学遥感估算. *遥感学报*, 27(11): 2484-2498) [DOI: 10.11834/jrs.20232535]
- Wang M Q and Hu C M. 2016. Mapping and quantifying *Sargassum* distribution and coverage in the Central West Atlantic using MODIS observations. *Remote Sensing of Environment*, 183: 350-367 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.019]
- Wang M Q, Hu C M, Barnes B B, Mitchum G, Lapointe B and Montoya J P. 2019. The great Atlantic *Sargassum* belt. *Science*, 365

- (6448): 83-87 [DOI: 10.1126/science.aaw7912]
- Wang M Q, Hu C M, Cannizzaro J, English D, Han X X, Naar D, Lapointe B, Brewton R and Hernandez F. 2018. Remote sensing of *Sargassum* biomass, nutrients, and pigments. *Geophysical Research Letters*, 45(22): 12359-12367 [DOI: 10.1029/2018GL078858]
- Webster R K and Linton T. 2013. Development and implementation of *Sargassum* Early Advisory System (SEAS). *Shore and Beach*, 81(3): 1-6
- Wen Y S, Deng J M, Mao Z H, Shi J, Zhou Y, Lu T and Lu Y C. 2018. Effect of the Fresnel reflection of a water surface on Chlorophyll Fluorescence line height at approximately 761 nm. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 22(3): 424-431 (温颜沙, 邓建明, 毛志华, 石静, 周杨, 鲁婷, 陆应诚. 2018. 水面菲涅尔反射对~761 nm 叶绿素荧光估算的影响. *遥感学报*, 22(3): 424-431) [DOI: 10.11834/jrs.20187251]
- Xing Q G, Guo R H, Wu L L, An D Y, Cong M, Qin S and Li X R. 2017. High-resolution satellite observations of a new hazard of golden tides caused by floating *Sargassum* in winter in the Yellow Sea. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 14(10): 1815-1819 [DOI: 10.1109/LGRS.2017.2737079]
- 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]

Optical remote sensing of *Sargassum* biomass in the Marginal Sea of China

LIU Yuru¹, QI Lin², ZHU Xiaobo¹, TANG Jun¹, LU Yingcheng¹

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

2. College of Marine Science, University of South Florida, St. Petersburg 33701, USA

Abstract: *Sargassum*, a type of floating macroalgae widely distributed in global oceans, is responsible for mass algae beaching events along the coastal areas of Caribbean Sea and other central western seas of the tropical Atlantic Ocean, causing many severe problems to the production and life of local residents. In recent years, *Sargassum* has also triggered frequent occurrences of “golden tides” in the marginal sea of China, particularly the East China Sea (ECS), due to its massive proliferation entangled with intricate climate and anthropogenic events. The emergence of golden tide events has had a significant impact on coastal ecosystems and economic activities. Optical satellite remote sensing has become a powerful tool for monitoring algae because of its advantages, such as wide monitoring coverage, rich spectral information, relatively uniform data formats, and easy accessibility. By combining accurate algae-identifying algorithms and algae-estimating quantitative models such as Biomass Per Area (BPA, kg/m²) estimation model, it will enable optical satellite remote sensing to precisely identify and quantitatively estimate *Sargassum*. Notably, *Sargassum* in the ECS (*Sargassum*_{ECS}), which is primarily composed of *S. horneri*, exhibits different reflectance spectral characteristics due to species differences compared with *Sargassum* that inhabits other regions in the Atlantic Ocean, where *S. natans* and *S. fluitans* are the dominant species. Many studies that aimed to observe the *Sargassum*_{ECS} via remote sensing of optical satellites were mainly qualitative or not based on quantitative estimation models suitable for *S. horneri*, whose key parameters have not been scientifically and objectively determined due to the lack of measured spectral data from spectrum collecting experiment. Thus, to realize the accurate quantification of *Sargassum*_{ECS} via optical remote sensing, this study conducted controlled biomass experiments on *S. horneri* in the marginal sea of China, acquiring its hyperspectral reflectance dataset, then integrating spectral response functions of multiple optical sensors to simulate the corresponding Rayleigh-corrected reflectance (R_{rc}), such as the Multispectral Imager (MSI) onboard Sentinel-2A/B, the Coastal Zone Imager onboard HaiYang-1C/D (CZI on HY-1C/D), the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer onboard Aqua/Terra (MODIS on Aqua/Terra), the Operational Land Imager onboard Landsat-8, the Ocean and Land Color Instrument onboard Sentinel-3A/B, the Visible Infrared Imaging Radiometer onboard National Polar-Orbiting Partnership, and the Geostationary Ocean Color Imager-II on board GEO-KOMPSAT-2B, to develop remote sensing estimation models applicable to multisource sensors. In the comparison and validation step of the quantitative models of multisource remote sensing data, CZI and MODIS multispectral images with quantitative estimation results was selected as samples to be compared with the quasi-synchronous MSI quantitative estimation results as reference value. The comparison and validation result showed that the biomass from BPA estimation models that integrate the spatial resolution of pixel, as the most robust quantitative parameter among algae-containing pixels area or algae coverage area, effectively reduces the remote sensing scale effect discrepancies among data from multiple optical sensors, offering higher consistency and less uncertainty in multisource data estimation results. This study, which is based on multisource optical satellite remote sensing data, analyzes *Sargassum* in the marginal sea of China, providing crucial references for comprehensively and precisely understanding the dynamics of golden tide outbreaks and enhancing the precise quantification and monitoring of floating algae in these areas

Key words: golden tides, *Sargassum*, MSI, HY-1/CZI, MODIS, multi-source optical satellite remote sensing

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42371380)