

# 基于海洋一号 D 卫星海岸带成像仪的 赤潮遥感监测特征

滕越<sup>1,2,3</sup>, 邹斌<sup>2,3</sup>, 叶小敏<sup>2,3</sup>

(1.国家海洋环境预报中心 北京 100081;2.国家卫星海洋应用中心 北京 100081;  
3.自然资源部空间海洋遥感与应用研究重点实验室 北京 100081)

**摘要:**为进一步加强赤潮等海洋生态灾害的动态监测,科学支撑海洋防灾减灾工作,文章基于海洋一号 D 卫星搭载的海岸带成像仪数据,选取北部湾、茂名近岸和陵水湾为研究区域,分析2021年2月发生的4例赤潮事件的遥感影像、叶绿素 a 浓度和赤潮指数特征。研究表明:遥感影像可清晰呈现赤潮分布状况,叶绿素 a 浓度和赤潮指数的异常值范围与遥感影像一致,赤潮水体的叶绿素 a 浓度和赤潮指数整体高于非赤潮水体。

**关键词:**赤潮;海岸带成像仪;遥感影像;叶绿素;赤潮指数

中图分类号:TP79;X834;P71

文献标志码:A

文章编号:1005-9857(2022)08-0060-07

## Remote Sensing Monitoring Characteristics of Red Tide Based on CZI on the HY-1D Satellite

TENG Yue<sup>1,2,3</sup>, ZOU Bin<sup>2,3</sup>, YE Xiaomin<sup>2,3</sup>

(1.National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China;  
2.National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China;  
3.Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, MNR, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to strengthen the dynamic monitoring of marine ecological disasters such as red tides and scientifically support marine disaster prevention and mitigation, this paper selected Beibu Gulf, Maoming Coast and Lingshui Bay as the study areas, analyzed the remote sensing images, chlorophyll a concentration and red tide index characteristics for 4 cases of red tide events that occurred in February 2021, based on the coastal zone imager data onboard the Chinese Haiyang-1D (HY-1D) satellite. The results showed that the remote sensing images could clearly show the distribution of red tides, the abnormal value ranges of chlorophyll a concentration and red tide index were consistent with the remote sensing images, and the chlorophyll a concentration and red tide index of red tide waters were higher than those of non-red tide waters.

**Keywords:** Red tide, Coastal zone imager, Remote sensing image, Chlorophyll, Red tide index

收稿日期:2021-11-24;修订日期:2022-07-09

基金项目:民用航天技术预先研究项目(D040107)。

作者简介:滕越,硕士研究生,研究方向为海洋遥感水色要素和海洋生态灾害监测

## 0 引言

赤潮是复杂的海洋生态异常现象,即海水中的藻类以及某些原生动物或细菌在特定环境条件下迅速繁殖和聚集而引起水体变色的有害生态现象,根据浮游生物的种类和繁殖程度<sup>[1]</sup>可呈现红色和黄褐色等。1990 年联合国将赤潮列为世界近海三大污染问题之一<sup>[2]</sup>。近年来,我国赤潮呈现发生频率提高、扩张范围增大和影响危害加重的特点,对近海渔业、滨海旅游业、海洋生态系统和人类健康都有严重的危害。目前我国对于赤潮的监测手段主要包括船舶定点监测、岸站和浮标监测以及卫星(航空)遥感监测<sup>[3]</sup>,其中卫星遥感以大尺度、高分辨率、实时和长时间序列等特点可为赤潮监测和预警预报提供较完善的信息,与传统监测方法具有很好的互补性,对采取有效措施治理和预防赤潮灾害具有十分重要的意义。自 20 世纪 80 年代以来,随着卫星监测平台和传感器的不断发展,国内外卫星遥感技术迅速发展,卫星遥感主要依据水体光谱特征的差异或相关环境因子的异常变化对赤潮进行识别监测<sup>[4]</sup>,研究方法主要包括单波段法<sup>[5-7]</sup>、双波段比值法<sup>[8-9]</sup>、归一化植被指数(NDVI)法<sup>[10-11]</sup>、多波段差值比值法<sup>[12-17]</sup>、叶绿素 a 浓度法<sup>[18-20]</sup>、水温水色法<sup>[21]</sup>、人工神经网络法<sup>[22]</sup>和数值模拟法<sup>[23-24]</sup>。

国内外学者对卫星赤潮遥感监测技术开展诸多研究,现有的赤潮遥感监测算法已较成熟。Xu 等<sup>[25]</sup>基于 MODIS 数据比较历史记载赤潮事件的光谱曲线和多年平均光谱曲线,提出基于背景场的赤潮监测算法并用于提取东海赤潮信息,可有效地确定赤潮发生的位置;Yuji 等<sup>[26]</sup>基于 Sentinel-2 MSI 的红~近红波段数据,提出监测日本湖山池咸水湖赤潮的模型,通过相对大气校正可自动生成叶绿素 a 和赤潮的分布图,与实测叶绿素值有很好的相关性且符合指数回归模型;Tao 等<sup>[27]</sup>基于 MERIS 数据并采用荧光基线法监测东海赤潮,与实地观测结果吻合较好;陈芸芝等<sup>[28]</sup>在多时相 MODIS 数据的基础上,综合运用叶绿素 a 浓度阈值法、叶绿素 a 浓度距平值阈值法和可视化分析法提取 2008 年 5 月东海赤潮分布信息,并分析不同方法的条件与不足;李阳东等<sup>[29]</sup>基于 GOCI 数据反演得

到总悬浮物浓度和赤潮指数,通过设定这 2 个指标的阈值提取赤潮水体信息,与相关公报中记录的赤潮位置和分布较吻合,同时发现浙江海域赤潮面积的日变化有先增后减的规律;孙丽雅等<sup>[30]</sup>利用 MODIS 数据提取 2008 年 5 月的东海赤潮信息,结果表明叶绿素浓度异常能更好地反映赤潮变化,综合利用多种指标更有利于赤潮监测。

我国海洋一号 D(HY-1D)卫星于 2020 年 6 月 11 日成功发射并与 HY-1C 卫星组网,增加海洋观测次数并提高全球覆盖能力。HY-1D 卫星载荷海洋水色水温扫描仪(COCTS)、海岸带成像仪(CZI)、紫外成像仪(UVI)、星上定标光谱仪和船舶监测系统。其中,CZI 主要用于获取陆海交互作用的海岸带的实时图像资料,了解河口港湾的海洋要素分布规律,并对赤潮和污染物等海洋环境灾害进行监测和预警;CZI 的轨道高度为 782 km,幅宽不小于 950 km,空间分辨率为 50 m,重访周期为 3 d,地方时为 1:30AM±30 min,各波段的应用对象如表 1 所示。

表 1 HY-1D 卫星 CZI 各波段的应用对象

波段/ $\mu\text{m}$	应用对象
0.42~0.50	叶绿素、污染、冰、浅海地形
0.52~0.60	叶绿素、低浓度泥沙、污染、滩涂
0.61~0.69	中等浓度泥沙、植被、土壤
0.76~0.89	植被、高浓度泥沙、大气校正

本研究基于 HY-1D 卫星的 CZI 数据,选取北部湾、茂名近岸和陵水湾为研究区域,针对 2021 年 2 月发生的 4 例赤潮事件,通过遥感影像、叶绿素 a 浓度和赤潮指数进行监测分析,从而掌握赤潮分布特征。

## 1 数据与方法

### 1.1 遥感数据

本研究所用的 HY-1D 卫星的 CZI 数据获取于 2021 年 2 月,均少云且成像清晰,包括 L1B、L2A 和 L2C 产品。其中,L1B 为各波段大气层顶辐亮度,用于呈现研究区域的真彩色影像;L2A 为各波段经过瑞利散射校正后的反射率,用于计算赤潮指数;L2C 为叶绿素 a 浓度和水色透明度产品。

叶绿素 a 浓度为 HY-1D 卫星标准数据产品,数据来自国家卫星海洋应用中心数据分发系统(<https://osdds.nsoas.org.cn/OceanColor>)。卫星遥感数据的成像时间如表 2 所示。

表 2 本研究卫星遥感数据的成像时间

覆盖区域	成像时间 (年-月-日,时:分)
北部湾	2021-02-14,05:56 2021-02-20,05:55
茂名近岸	2021-02-23,05:55
陵水湾	2021-02-23,05:54

## 1.2 赤潮指数

Kim 等<sup>[31]</sup> 基于 MODIS 数据提出赤潮指数 (MRI), 根据韩国沿海水域现场实测光谱, 赤潮水体和非赤潮水体在 488~551 nm 波长范围内呈反向梯度, 其中非赤潮水体的梯度为正, 赤潮水体的梯度为负。利用 551 nm 和 488 nm 波段的归一化离水辐亮度构建赤潮指数表达式:

$$MRI = \frac{W_{551} - W_{488}}{W_{551} + W_{488}} \quad (1)$$

式中:  $W_{551}$  和  $W_{488}$  分别表示 551 nm 和 488 nm 波段的归一化离水辐亮度。

考虑到 HY-1D 卫星的 CZI 载荷 4 个波段, 选取蓝、绿 2 个波段生成适用于 CZI 的赤潮指数 (RI) 表达式:

$$RI = \frac{R_{rs560} - R_{rs460}}{R_{rs560} + R_{rs460}} \quad (2)$$

式中:  $R_{rs560}$  和  $R_{rs460}$  分别表示 560 nm 和 460 nm 波段的遥感反射率。

## 2 赤潮遥感监测特征

### 2.1 遥感影像

#### 2.1.1 北部湾

北部湾位于我国南海西北部, 面积为 128 300 km<sup>2</sup>, 海岸线长达 1 628.6 km<sup>[32]</sup>; 北部湾三面环陆, 海岛众多, 是我国重要的渔场和海水养殖区。

北部湾海域 2021 年 2 月 14 日发生的赤潮水体呈亮红棕色团絮状分布在北部湾中部; 赤潮海域的范围为 107°57'E-108°56'E、20°16'N-21°19'N, 离

岸距离为 2.71 km, 直径约为 9.15 km。

北部湾海域 2021 年 2 月 20 日发生的赤潮水体呈浅红棕色片状横跨北部湾; 赤潮海域的范围为 107°17'E-109°9'E、20°25'N-21°17'N, 东西方向为 19.59 km, 南北方向为 8.57 km。北部湾西部的赤潮海域呈条带状平行于越南广宁近岸, 距离长达 11.97 km; 向东于北部湾中部呈片状覆盖, 直径为 4.49 km; 再向东蔓延至涠洲岛东部近岸, 以 21°7'N、109°7'E 为中心在距离涠洲岛 0.5 km 处呈放射状分布, 南北方向为 3.03 km。

北部湾海域赤潮的发生可能与近年来北部湾经济区的迅猛发展、过度捕捞和沿海工业开发密切相关<sup>[33]</sup>。北部湾海域污染严重, 藻类繁殖和水体富营养化加剧, 导致赤潮频发。

#### 2.1.2 茂名近岸

茂名位于广东西南部, 海岸线长为 220 km, 港湾众多, 石油化工业和临港工业发达<sup>[34]</sup>。根据《南海区海洋灾害公报》, 2017-2018 年茂名近岸海域发生 2 次赤潮, 赤潮优势种均为球形棕囊藻。其中, 2017 年 2 月 27 日至 3 月 17 日放鸡岛至大竹洲岛附近海域以及水东湾和博贺湾海域赤潮的最大面积达 495 km<sup>2</sup>, 2018 年 1 月 12 日至 2 月 5 日水东湾和博贺湾海域赤潮的面积为 44.96 km<sup>2</sup>。

茂名近岸海域 2021 年 2 月 23 日发生的赤潮水体呈亮红棕色, 从沙坝和上洋近岸的小港口开始向南蔓延, 在入海口处呈条带状分布, 至离岸 10.06 km 处聚集并呈团状分布, 团状分布海域的南北方向为 24.41 km; 赤潮海域的范围为 111°2'E-111°41'E、21°8'N-21°31'N, 东西方向为 67.07 km, 南北方向为 43.22 km。

#### 2.1.3 陵水湾

陵水湾位于海南东南部近岸, 通过细长的潮汐汉道与我国南海相通, 海岸线长为 118.57 km, 海域面积为 1 898.9 km<sup>2</sup><sup>[35]</sup>; 陵水湾凭借“三湾三岛两湖一山一水”的自然资源优势, 海洋旅游业和海洋渔业发展迅速。

陵水湾海域 2021 年 2 月 23 日发生的赤潮水体呈红棕色细条状, 从蜈支洲岛南近岸向北延伸至陵水湾; 赤潮海域的范围为 109°44'E-109°58'E、

18°18'N—18°23'N,东西方向为 23.81 km,南北方向为 8.50 km。三亚海棠近岸绕蜈支洲岛四周有细条状赤潮分布,赤潮海域的离岸距离为 0.81 km,与藤桥河入海口向南延伸的赤潮海域相接长达 7.61 km。

## 2.2 叶绿素 a 浓度

### 2.2.1 各研究区域

叶绿素 a 浓度是主要的赤潮参数之一,当叶绿素 a 浓度的变化超过一定的阈值时,可能是赤潮发生的标志之一,因此由 CZI 反演计算得到各研究区域的叶绿素 a 浓度分布状况。由于各研究区域均有陆源入海口,环境污染严重,藻类物质丰富,叶绿素 a 浓度均较高且向远海逐级递减至 0.50 mg/m<sup>3</sup> 左右。观察上述 4 个赤潮事件可以发现,赤潮水体的叶绿素 a 浓度较周围非赤潮水体存在异常高值(高约 0.20 mg/m<sup>3</sup>),异常高值的范围与对应研究区域赤潮遥感影像的位置相符,且在不同研究区域具有较好的一致性。

经综合分析,当忽略赤潮水体叶绿素 a 浓度的异常高值时,北部湾海域的叶绿素 a 浓度呈现自东向西、自近岸向湾中部逐渐递减的规律,这与已有研究结果相一致。2021 年 2 月 14 日北部湾海域叶绿素 a 浓度的最高值(1.60 mg/m<sup>3</sup>)分布在周江入海口和北海近岸,离岸 13.52 km 处的叶绿素 a 浓度降至 0.70 mg/m<sup>3</sup>;离岸 46.97 km 处赤潮水体的叶绿素 a 浓度异常增高至 0.72 mg/m<sup>3</sup>,周围非赤潮水体的叶绿素 a 浓度为 0.52 mg/m<sup>3</sup>。2021 年 2 月 20 日北部湾海域叶绿素 a 浓度的最高值(1.60 mg/m<sup>3</sup>)同样出现在北海近岸,离岸 22.84 km 处的叶绿素 a 浓度降至 0.70 mg/m<sup>3</sup>;越南广宁离岸 28.00 km 处、北部湾中部离岸 49.58 km 处和涠洲岛附近 14.54 km 处均有赤潮水体分布,叶绿素 a 浓度增高至 0.72 mg/m<sup>3</sup>。

2021 年 2 月 23 日茂名近岸海域叶绿素 a 浓度的最高值(1.50 mg/m<sup>3</sup>)分布在博贺至新屋近岸,从大竹舟至双山岛近岸向南出现异常高值即 0.98 mg/m<sup>3</sup>,周围非赤潮水体的叶绿素 a 浓度为 0.77 mg/m<sup>3</sup>。

2021 年 2 月 23 日陵水湾沿三亚海棠近岸海域有约 0.33 km 宽的叶绿素 a 浓度高值区

(1.58 mg/m<sup>3</sup>),离岸 0.89 km 处的叶绿素 a 浓度约为 0.50 mg/m<sup>3</sup>;赤潮水体的叶绿素 a 浓度沿陵水近岸地形走势为 0.70~1.50 mg/m<sup>3</sup> 不等。

### 2.2.2 赤潮水体和非赤潮水体

利用目视法选取各研究区域的小范围为感兴趣区,选取赤潮水体和非赤潮水体进行叶绿素 a 浓度的对比分析。

2021 年 2 月 14 日北部湾:①非赤潮水体在叶绿素 a 浓度为 0.475~0.525 mg/m<sup>3</sup> 时的占比最高达 91.02%,在叶绿素 a 浓度为 0.535~0.585 mg/m<sup>3</sup> 时的占比为 7.85%;赤潮水体在叶绿素 a 浓度为 0.535~0.585 mg/m<sup>3</sup> 时的占比最高达 65.93%,在叶绿素 a 浓度为 0.475~0.525 mg/m<sup>3</sup> 和 0.605~0.655 mg/m<sup>3</sup> 时的占比分别为 16.83% 和 12.68%。因此,以最高占比来看,赤潮水体的叶绿素 a 浓度比非赤潮水体高 0.060 mg/m<sup>3</sup>。②赤潮水体和非赤潮水体在叶绿素 a 浓度为 0.375~0.425 mg/m<sup>3</sup> 时均没有分布,在叶绿素 a 浓度为 0.425~0.475 mg/m<sup>3</sup> 时的占比分别为 0.11% 和 0.51%。③非赤潮水体在叶绿素 a 浓度为 0.605~0.655 mg/m<sup>3</sup> 时的占比为 0.60%,且其占比随着叶绿素 a 浓度升高而逐渐降低,当叶绿素 a 浓度高于 1.235 mg/m<sup>3</sup> 时没有分布;赤潮水体在叶绿素 a 浓度为 0.675~0.725 mg/m<sup>3</sup>、0.765~0.815 mg/m<sup>3</sup>、0.865~0.915 mg/m<sup>3</sup>、0.975~1.025 mg/m<sup>3</sup>、1.095~1.145 mg/m<sup>3</sup> 和 1.235~1.285 mg/m<sup>3</sup> 时的占比分别为 2.66%、0.92%、0.42%、0.22%、0.11% 和 0.12%,表明赤潮水体的叶绿素 a 浓度较非赤潮水体高。

2021 年 2 月 20 日北部湾:非赤潮水体在叶绿素 a 浓度为 0.535~0.585 mg/m<sup>3</sup> 和 0.475~0.525 mg/m<sup>3</sup> 时的占比分别为 80.24% 和 19.75%,在叶绿素 a 浓度为 0.605~0.915 mg/m<sup>3</sup> 时的占比为 0.004%~0.001%,在叶绿素 a 浓度高于 0.915 mg/m<sup>3</sup> 时没有分布;赤潮水体在叶绿素 a 浓度为 0.535~0.585 mg/m<sup>3</sup> 和 0.605~0.655 mg/m<sup>3</sup> 时的占比分别为 41.4% 和 50.22%,在叶绿素 a 浓度为 0.675~0.725 mg/m<sup>3</sup> 和 0.765~0.815 mg/m<sup>3</sup> 时的占比分别为 5.46% 和 1.41%,在叶绿素 a 浓度高

于  $0.865 \text{ mg/m}^3$  时的占比低于 1%。此外,随着时间的增加,叶绿素 a 浓度呈升高趋势,即 2021 年 2 月 20 日赤潮水体和非赤潮水体的叶绿素 a 浓度比 2021 年 2 月 14 日高  $0.025 \text{ mg/m}^3$ 。

2021 年 2 月 23 日茂名近岸:赤潮水体和非赤潮水体在叶绿素 a 浓度低于  $0.605 \text{ mg/m}^3$  时均没有分布或占比仅约为 0.001%;非赤潮水体在叶绿素 a 浓度为  $0.675 \sim 0.725 \text{ mg/m}^3$  时的占比为 77.92%,赤潮水体和非赤潮水体在叶绿素 a 浓度为  $0.765 \sim 0.815 \text{ mg/m}^3$  时的占比分别为 88.44% 和 22.07%;赤潮水体在叶绿素 a 浓度为  $0.865 \sim 0.915 \text{ mg/m}^3$  时的占比为 10.32%,且在叶绿素 a 浓度高于  $0.915 \text{ mg/m}^3$  时的占比低于 1%。因此,以最高占比来看,赤潮水体的叶绿素 a 浓度比非赤潮水体高  $0.090 \text{ mg/m}^3$ 。

2021 年 2 月 23 日陵水湾:非赤潮水体在叶绿素 a 浓度为  $0.475 \sim 0.525 \text{ mg/m}^3$  时的占比最高达 92.64%,在叶绿素 a 浓度为  $0.425 \sim 0.475 \text{ mg/m}^3$  和  $0.535 \sim 0.585 \text{ mg/m}^3$  时的占比分别为 3.29% 和 4.06%,在其他叶绿素 a 浓度范围均没有分布;赤潮水体在叶绿素 a 浓度为  $0.535 \sim 0.585 \text{ mg/m}^3$  和  $0.605 \sim 0.655 \text{ mg/m}^3$  时的占比分别为 61.5% 和 30.71%,在叶绿素 a 浓度高于  $0.655 \text{ mg/m}^3$  时的占比低于 2%。由此也可看出,赤潮水体的叶绿素 a 浓度整体比非赤潮水体高。

### 2.2.3 叶绿素 a 平均浓度

感兴趣区的叶绿素 a 平均浓度以及基于非赤潮水体的差值占比如表 3 所示。

表 3 感兴趣区的叶绿素 a 平均浓度与差值占比

感兴趣区	叶绿素 a 平均浓度/( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )		差值占比/%
	赤潮水体	非赤潮水体	
北部湾 2021-02-14	0.570 7	0.503 4	13.37
北部湾 2021-02-20	0.614 3	0.538 7	14.03
茂名近岸 2021-02-23	0.814 9	0.740 1	10.11
陵水湾 2021-02-23	0.604 8	0.496 3	21.86

由表 3 可以看出:茂名近岸海域的叶绿素 a 平均浓度最高,2021 年 2 月 14 日北部湾海域的叶绿素 a 平均浓度最低;赤潮水体的叶绿素 a 平均浓度均比非赤潮水体高,其中北部湾海域和茂名近岸海域的差值占比均低于 15%,而陵水湾海域的差值占比高于 20%。

### 2.3 赤潮指数

基于 CZI 蓝、绿波段的遥感反射率,应用式(2)计算各研究区域的赤潮指数,结果表明各研究区域赤潮分布的空间形态特征与赤潮遥感影像和叶绿素 a 浓度有较好的一致性,赤潮水体的赤潮指数比非赤潮水体高 0.05~0.10。

对比分析各感兴趣区赤潮水体和非赤潮水体的赤潮指数:①2021 年 2 月 14 日北部湾海域赤潮水体和非赤潮水体在赤潮指数为  $-0.075 \sim -0.025$  时的占比分别为 81.91% 和 81.11%;赤潮水体在赤潮指数为  $-0.025 \sim 0.025$ 、 $0.025 \sim 0.075$  和  $0.075 \sim 0.275$  时的占比分别为 15.61%、1.38% 和低于 1%,非赤潮水体在赤潮指数为  $-0.125 \sim -0.075$  和  $-0.025 \sim 0.025$  时的占比分别为 17.24% 和 1.66% 且在赤潮指数高于 0.175 时没有分布。②2021 年 2 月 20 日北部湾海域非赤潮水体在赤潮指数为  $-0.075 \sim -0.025$  时的占比高达 99.99%,赤潮水体在赤潮指数为  $-0.075 \sim -0.025$  和  $-0.025 \sim 0.025$  时的占比分别为 26.15% 和 70.58%。③2021 年 2 月 23 日茂名近岸海域赤潮水体和非赤潮水体在赤潮指数为  $0.025 \sim 0.075$  时的占比分别为 98.11% 和 93.08%,非赤潮水体在赤潮指数为  $-0.025 \sim 0.025$  时的占比为 6.92%,赤潮水体在赤潮指数为  $0.075 \sim 0.125$  时的占比为 1.81%。④2021 年 2 月 23 日陵水湾海域非赤潮水体在赤潮指数为  $-0.075 \sim -0.025$  时的占比最高达 96.42%,在赤潮指数为  $-0.125 \sim 0.075$  时的占比为 3.58%,在其他赤潮指数范围没有分布;赤潮水体在赤潮指数为  $-0.075 \sim -0.025$ 、 $-0.025 \sim 0.025$ 、 $0.025 \sim 0.075$  和  $0.075 \sim 0.275$  时的占比分别为 57.53%、38.78%、2.09% 和低于 0.08%。

感兴趣区的平均赤潮指数以及基于非赤潮水体的差值占比如表 4 所示。

表 4 感兴趣区的平均赤潮指数与差值占比

感兴趣区	平均赤潮指数		差值占比/%
	赤潮水体	非赤潮水体	
北部湾 2021-02-14	-0.036 9	-0.065 3	43.49
北部湾 2021-02-20	-0.014 8	-0.048 1	69.23
茂名近岸 2021-02-23	0.054 1	0.031 4	72.29
陵水湾 2021-02-23	-0.023 5	-0.062 3	62.28

由表 4 可以看出:赤潮水体的平均赤潮指数均比非赤潮水体高,这与叶绿素 a 平均浓度的分布特征相一致;茂名近岸海域的平均赤潮指数与差值占比最高,2021 年 2 月 14 日北部湾海域的平均赤潮指数与差值占比最低。

### 3 结语

HY-1D 卫星的 CZI 载荷具有空间分辨率较高和重访周期较短的优势,可实现对赤潮等海洋生态灾害的动态监测。本研究基于 CZI 数据分析研究区域的遥感影像、叶绿素 a 浓度和赤潮指数的主要特征,其中遥感影像可清晰呈现赤潮分布状况即形状各不相同、覆盖范围很广以及均呈红棕色,叶绿素 a 浓度和赤潮指数的异常值范围与遥感影像一致,赤潮水体的叶绿素 a 浓度和赤潮指数整体高于非赤潮水体。由于赤潮的发生与海面温度、盐度、风向和洋流等环境因子和地理水文要素密切相关,后续研究重点为环境因子和地理水文要素等对赤潮生消过程的影响。

### 参考文献

[1] 姜宁.广西北部湾海域赤潮演变趋势分析及其防控思路[J].海洋开发与管理,2019,36(11):82-85.

[2] 窦勇,高金伟,时晓婷,等.2000-2013 年中国南部近海赤潮发生规律及影响因素研究[J].水生态学杂志,2015(3):31-37.

[3] 顾德宇,许德伟,陈海颖.赤潮遥感进展与算法研究[J].遥感技术与应用,2003,18(6):434-440.

[4] STRONG A E.Remote sensing of algal blooms by aircraft and satellite in Lake Erie and Utah Lake[J].Remote Sensing of Environment,1974,3(2):99-107.

[5] GROOM S B,HOLLIGAN P M.Remote sensing of coccolithophore blooms[J].Advances in Space Research,1987,7(2):73-78.

[6] HOLLIGAN P M,VIOLLIER M,HARBOUR D S,et al.Satellite and ship studies of coccolithophore production along a continental shelf edge[J].Nature,1983,304(5924):339-342.

[7] 江彬彬,李辉林,滕国超,等.基于 GOCI 提取东海近几年赤潮信息及时序分析[J].浙江大学学报(理学版),2017,44(5):576-583.

[8] STUMPF R P,TYLER M E.Satellite detection of bloom and pigment distributions in estuaries[J].Elsevier,1988,24(3):385-404.

[9] PRANGSMA G J,ROOZEKRANS J N.Using NOAA AVHRR imagery in assessing water quality parameters[J].International Journal of Remote Sensing,1989,10(4):811-818.

[10] 赵冬至.AVHRR 遥感数据在海表赤潮细胞数探测中的应用[J].海洋环境科学,2003,22(1):10-14,19.

[11] GOWER J F R.Red tide monitoring using AVHRR HRPT imagery from a local receiver[J].Remote Sensing of Environment,1994,48(3):309-318.

[12] GOWER J F R,BROWN L,BORSTAD G A.Observation of chlorophyll fluorescence in west coast waters of Canada using the MODIS satellite sensor[J].Canadian Journal of Remote Sensing,2004,30(1):17-25.

[13] 毛显谋,黄韦良.多波段卫星遥感海洋赤潮水华的方法研究[J].应用生态学报,2003,14(7):1200-1202.

[14] AHN Y H,SHANMUGAM P.Detecting the red tide algal blooms from satellite ocean color observations in optically complex northeast-Asia coastal waters[J].Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal,2006,103(4):419-437.

[15] 王其茂,马超飞,唐军武,等.EOS/MODIS 遥感资料探测海洋赤潮信息方法[J].遥感技术与应用,2006,21(1):6-10.

[16] 卢霞,焦明连.基于多源遥感数据的连云港海域赤潮信息提取研究[J].安徽农业学,2011,39(31):19369-19371.

[17] 陈磊.赤潮遥感探测方法及应用研究:以秦皇岛海域为例[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2012.

[18] 王芮.基于 GOCI 遥感资料的东海赤潮信息提取[D].上海:上海海洋大学,2018.

[19] 陈曦,汪小钦,陈芸芝.赤潮水体水质遥感参数时空变化分析[J].遥感信息,2014,29(3):88-93.

[20] 李继龙,唐援军,郑嘉淦,等.利用 MODIS 遥感数据探测长江口及邻近海域赤潮初步研究[J].海洋渔业,2007,29(1):25-30.

[21] 黄韦良,林寿仁,毛天明.浙江海区赤潮灾害的卫星遥感实时监测[R].杭州:自然资源部第二海洋研究所,2001.

- [22] 楼琇林,黄韦良.基于人工神经网络的赤潮卫星遥感方法研究[J].遥感学报,2003(2):125-130.
- [23] CULLEN J J, CIOTTI A M, DAVIS R F, et al. Optical detection and assessment of algal blooms[J]. *Limnology & Oceanography*, 1997, 42(5): 1223-1239.
- [24] DOERFFER R, FISCHER J. Concentrations of chlorophyll, suspended matter, and gelbstoff in case II waters derived from satellite coastal zone color scanner data with inverse modeling methods[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C4): 7457-7466.
- [25] XU X H, PAN D L, MAO Z H, et al. A new algorithm based on the background field for red tide monitoring in the East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(5): 62-71.
- [26] YUJI S, AKIHIRO M, AKIHIRO M, et al. A simple red tide monitoring method using Sentinel-2 data for sustainable management of Brackish Lake Koyama-ike, Japan [J]. *Water*, 2019, 11(5): 1044.
- [27] TAO B Y, MAO Z H, WANG D F, et al. The use of MERIS fluorescence bands for red tides monitoring in the East China Sea[A]. SPIE. Remote sensing of the ocean, sea ice, coastal waters, and large water regions 2011[C]. SPIE, 2011: 81751K-1-81751K-8.
- [28] 陈芸芝,郑高强,汪小钦,等.基于叶绿素 a 浓度时序变化的赤潮分布信息遥感提取[J].福州大学学报(自然科学版),2013, 41(6): 1002-1008.
- [29] 李阳东,李仁虎,常亮.基于 GOCI 数据的浙江沿海赤潮监测[J].生态环境学报,2020,29(8): 1617-1624.
- [30] 孙丽雅,陈芸芝,汪小钦.时间序列 MODIS 数据赤潮信息提取研究[J].遥感信息,2012,27(3): 71-77.
- [31] KIM Y, BYUN Y, KIM Y. Detection of *Cochlodinium polykrikoides* red tide based on two-stage filtering using MODIS data[J]. *Desalination: The International Journal on the Science and Technology of Desalting and Water Purification*, 2009, 249(3): 1171-1179.
- [32] 姚焕玫,龚祝清,钟炜萍,等.广西北部湾海域初级生产力与环境因子相关关系研究[J].海洋环境科学,2021,40(2): 242-249.
- [33] 马宁,母景琴,杜瑞庆.近海海洋水色遥感技术对赤潮的监测[J].科技资讯,2015,13(13): 7-9.
- [34] 杨建设,牛显春,林东年.茂名近海岸水环境污染评价与对策[J].水土保持研究,2003,10(2): 38-40.
- [35] 尹建军,陈思国.海南陵水:推进海洋经济发展示范区建设[J].中国土地,2019(5): 58-59.