

王义衍, 刘荣杰, 刘建强, 等. 基于光谱特征的 HY-1C/D 卫星赤潮探测方法——以红夜光藻为例[J]. 海洋学报, 2023, 45(12): 166–178, doi:10.12284/hyxb2023179

Wang Yikan, Liu Rongjie, Liu Jianqiang, et al. Detection method of red tide based on the spectral features from HY-1C/D satellite: Take red *Noctiluca scintillans* blooms as an example[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(12): 166–178, doi:10.12284/hyxb2023179

# 基于光谱特征的 HY-1C/D 卫星赤潮探测方法 ——以红夜光藻为例

王义衍<sup>1,2</sup>, 刘荣杰<sup>1,3\*</sup>, 刘建强<sup>4</sup>, 丁静<sup>4</sup>, 叶小敏<sup>4</sup>, 赵鑫<sup>1,5</sup>, 宋冬梅<sup>2</sup>, 马毅<sup>1,3</sup>

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 中国石油大学(华东)海洋与空间信息学院, 山东 青岛 266580; 3. 自然资源部海洋遥测技术创新中心, 山东 青岛 266061; 4. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 5. 山东科技大学 测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:** 红夜光藻是我国主要的赤潮优势种, 在渤海、黄海、东海和南海均有发生。近年来, 红夜光藻赤潮发生频率明显上升, 监测需求迫切。但红夜光藻赤潮发生具有分布范围广、变化速度快、多呈条带状分布的特点, 其探测对卫星影像空间分辨率、覆盖范围和重访周期要求高。虽然水色卫星在赤潮监测中发挥了重要作用, 但其空间分辨率低, 无法准确探测条带状分布的红夜光藻赤潮。海洋一号 C、D (HY-1C/D) 卫星搭载的海岸带成像仪 (Coastal Zone Imager, CZI) 以其高空间分辨率、大幅宽和短重访周期的优势, 被越来越多地用于赤潮监测。现有的红夜光藻赤潮 HY-1C/D CZI 探测模型大多基于深度学习方法, 需要大量赤潮样本, 但赤潮样本获取困难, 影响模型的精度。因此, 本文以 2022 年 3 月发生在广东省汕尾市红海湾的红夜光藻赤潮为例, 分析了红夜光藻赤潮光谱特征, 基于红夜光藻赤潮在红光和近红外波段的高反射特性和浑浊水体在绿光波段的高反射特性, 构建了一个面向 HY-1C/D CZI 的红夜光藻赤潮探测方法。实验结果表明, 该方法可以有效地探测赤潮, 并避免浑浊水体的干扰, 精确率和 F1-Score 达到 89.72% 和 0.90。而且, 该方法具有较好的适用性, 可适用于不同海洋环境、不同宽波段卫星传感器的红夜光藻赤潮探测。

**关键词:** 赤潮; 红夜光藻; 遥感探测; HY-1C/D CZI; 光谱特征

中图分类号: P714+.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)12-0166-13

## 1 引言

赤潮是指水体中的浮游植物、原生生物或者细菌在一定环境条件下, 短时间内爆发性增殖或聚集而引起的一种水体变色的生态异常现象<sup>[1]</sup>。赤潮是我国主要的海洋生态灾害之一, 其发生会威胁海洋生态环境安全, 对海洋渔业和滨海旅游业造成一定影响<sup>[2]</sup>。夜光藻是我国主要的赤潮优势种, 主要有红夜光藻和绿

夜光藻两种, 其中红夜光藻赤潮在我国发生频率较高, 在各个海区均有分布<sup>[3-4]</sup>。近年来, 红夜光藻赤潮暴发频率增加, 分布范围也有明显扩张趋势, 其准确监测需求迫切<sup>[5]</sup>。红夜光藻赤潮发生具有分布范围广、变化速度快、多呈条带状分布的特点, 其探测对卫星影像空间分辨率和时空覆盖要求高。一直以来, 水色卫星在赤潮探测中发挥了巨大作用, 国内外学者围绕水色卫星探测赤潮, 开展了大量的研究, 发展了

收稿日期: 2023-05-12; 修订日期: 2023-11-25。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3105101); 国家自然科学基金重大项目(61890964); 中韩海洋科学共同研究中心项目(PI-2022-1)。

作者简介: 王义衍(1999—), 女, 山东省潍坊市人, 主要从事赤潮遥感探测研究。E-mail: wangyikan@126.com

\* 通信作者: 刘荣杰(1981—), 男, 副研究员, 主要从事海洋光学遥感方面研究。E-mail: liurj@fio.org.cn

系列赤潮探测方法<sup>[6-11]</sup>。但水色卫星空间分辨率较低, 由于混合像元效应, 对呈条带状分布的红夜光藻赤潮易误识别, 无法有效探测红夜光藻赤潮<sup>[12-13]</sup>。因此, 赤潮监测需要高空间分辨率卫星的支持。

近年来, 我国中高空间分辨率卫星技术发展迅速, 大批卫星发射升空, 包括海洋卫星系列、高分卫星系列等。其中, 海洋一号 C(HY-1C) 卫星是我国自主设计研制的首颗海洋水色业务卫星, 搭载的海岸带成像仪(Coastal Zone Imager, CZI)具有蓝光、绿光、红光和近红外 4 个波段, 能提供 50 m 空间分辨率、950 km 刈幅的多光谱数据, 并可与海洋一号 D(HY-1D) 卫星组网, 实现三天两次的高频次观测, 为赤潮探测提供丰富数据支撑, 已被越来越多地应用于赤潮监测<sup>[4, 14]</sup>。与水色卫星相比, HY-1C/D CZI 传感器虽然具有较高的空间分辨率, 但其光谱分辨率低, 只设置了蓝光、绿光、红光和近红外 4 个宽波段, 面向水色卫星的赤潮探测方法无法适用于 HY-1C/D CZI 数据。针对中高分辨率宽波段卫星赤潮探测, 国内外学者开展了基于光谱特征、叶绿素 *a* 浓度和深度学习的赤潮探测方法研究。根据赤潮水体光谱特征, Cao 等<sup>[15]</sup> 面向 Sentinel-2A 多光谱成像仪(MultiSpectral Instrument, MSI)数据构建了藻华检测指数(ABDI); Liu 等<sup>[12-13]</sup> 构建了基于伪色度角的高空间分辨率宽带卫星赤潮探测算法(PHA-RI)和面向高分一号宽幅相机(GF-1 Wide Field of View, GF-1 WFV)数据的赤潮探测指数 GF1\_RI。基于赤潮水体叶绿素 *a* 浓度, Yunus 等<sup>[16]</sup>、陈曦<sup>[17]</sup> 分别面向 Landsat8 陆地成像仪(Operational Land Imager, OLI)和环境一号 CCD(HJ-1 Charge-Coupled Device, HJ-1 CCD)数据构建了叶绿素 *a* 浓度反演模型, 根据叶绿素 *a* 浓度判断是否发生赤潮。深度学习方法也逐渐被用于赤潮探测, Lee 等<sup>[18]</sup> 面向 Landsat8 OLI 数据构建了基于深度神经网络的赤潮探测模型。Zhao 等<sup>[19]</sup> 面向 HY-1D CZI 数据构建了赤潮探测深度学习模型 RDU-Net, 可在云雾干扰情况下探测赤潮。Cui 等<sup>[20]</sup> 基于 HY-1C/D CZI 数据构建了夜光藻赤潮深度学习识别模型 NSBRNet, 成功探测到北部湾、大鹏湾和阳江等地暴发的夜光藻赤潮。虽然基于深度学习的赤潮探测方法具有强大的数据挖掘及特征提取能力, 但需大量的赤潮样本, 而赤潮样本获取困难, 影响模型的精度。

基于此, 本文以广东省汕尾市红海湾为研究区, 针对 2022 年 3 月红夜光藻赤潮事件, 分析红夜光藻赤潮光谱响应特征, 构建面向 HY-1C/D CZI 数据的简易红夜光藻赤潮探测方法, 以期为 HY-1C/D CZI 赤潮

遥感探测提供技术支撑。

## 2 数据与方法

### 2.1 卫星数据

HY-1C 和 HY-1D 卫星是我国首个海洋业务卫星星座, 分别于 2018 年和 2020 年发射, 其上搭载了海岸带成像仪、水色水温扫描仪和紫外成像仪等传感器, 其中 CZI 以其高空间分辨率、大幅宽和短重访周期的优势, 被越来越多的用于赤潮监测<sup>[4, 14]</sup>, CZI 传感器设置详见表 1。同时, 为检验本文方法对不同宽波段卫星传感器的适用性, 本文还获取了 GF-1 WFV 红夜光藻赤潮数据。GF-1 卫星于 2013 年发射, 其配备了 4 台 WFV 相机, 设置了蓝光、绿光、红光和近红外 4 个波段, 可以获得 16 m 空间分辨率的多光谱数据<sup>[21]</sup>, 具体传感器参数详见表 1。GF-1 WFV 传感器波段设置与 HY-1C/D CZI 相似, 但 4 个波段的波段宽度和中心波长设置略有差异, 其光谱响应函数也不完全相同<sup>[22]</sup>(图 1)。

表 1 HY-1C/D CZI 和 GF-1 WFV 卫星传感器参数

Table 1 HY-1C/D CZI and GF-1 WFV satellite sensor parameters

传感器	波段	光谱范围/ nm	中心波长/ nm	空间分辨率/ m	幅宽/ km	重访周期/ d
HY-1C/D CZI	1	420~500	460	50	950	3
	2	520~600	560	50	950	3
	3	610~690	650	50	950	3
	4	760~890	825	50	950	3
GF-1 WFV	1	450~520	485	16	800	4
	2	520~600	560	16	800	4
	3	630~690	660	16	800	4
	4	760~900	830	16	800	4

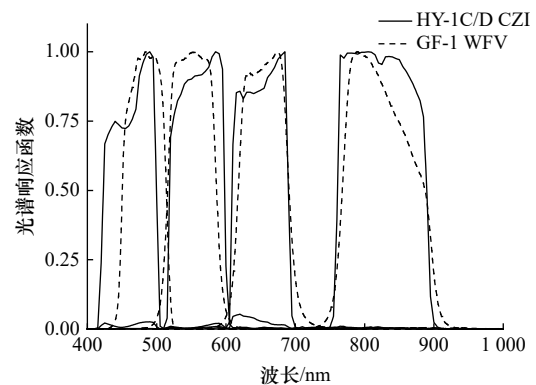


图 1 HY-1C/D CZI、GF-1 WFV 光谱响应函数

Fig. 1 Spectral response functions of HY-1C/D CZI and GF-1 WFV

研究报告显示,2022年3月广东省汕尾市红海湾附近海域暴发红夜光藻赤潮<sup>[20]</sup>。针对此次赤潮过程,本文从国家卫星海洋应用中心(<https://osdds.nsoas.org.cn/>)获取了3月13日HY-1DCZI影像和3月14日HY-1C CZI影像各1景。同时,本文从中国资源卫星应用中心(<https://data.cresda.cn/#/home>)获取了3月13日GF-1

WFV影像1景。另外,为探讨本文方法对不同海洋环境赤潮探测的适用性,本文获取了2020年8月东海红夜光藻赤潮HY-1C CZI影像<sup>[19]</sup>和2021年2月广西北部湾红夜光藻赤潮HY-1C CZI影像<sup>[20]</sup>各1景。数据详细情况见表2,数据空间覆盖见图2。

表2 所用卫星影像详细信息  
Table 2 Detailed information of satellite images used

传感器	成像时间	纬度	经度	覆盖区域
HY-1D CZI	2022年3月13日	19° 29' 44"~24° 33' 38"N	108° 00' 00"~118° 09' 04"E	广东红海湾
HY-1C CZI	2022年3月14日	19° 39' 52"~24° 44' 10"N	110° 10' 55"~120° 18' 59"E	广东红海湾
	2020年8月17日	31° 38' 33"~34° 44' 11"N	124° 14' 34"~135° 27' 05"E	东海
	2021年2月14日	16° 50' 08"~21° 52' 53"N	105° 48' 27"~115° 37' 30"E	广西北部湾
GF-1 WFV	2022年3月13日	21° 48' 09"~24° 03' 14"N	114° 34' 08"~117° 12' 22"E	广东红海湾

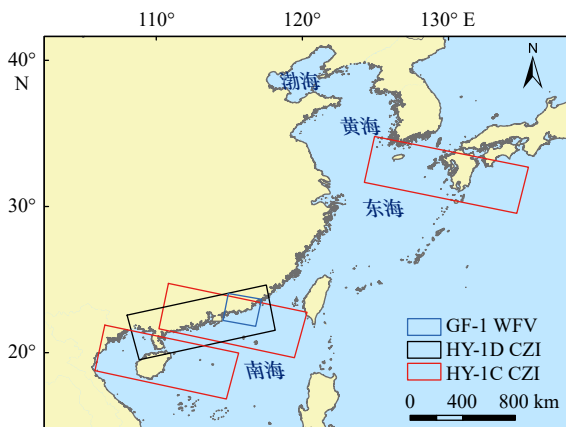


图2 不同卫星传感器数据覆盖范围  
Fig. 2 Data coverage of different satellite sensors

## 2.2 数据预处理

本文获取的HY-1C/D CZI L1C产品为经过几何校正的辐亮度数据。为消除陆地和云对赤潮探测的影响,首先对HY-1C/D CZI辐亮度产品进行陆地和云掩膜处理。考虑到成像环境差异导致的辐亮度变化对赤潮探测的影响,本文对四波段辐亮度产品进行了归一化处理,将各波段辐亮度值归一化到0~1。归一化方法采用最大最小值归一化方法<sup>[23]</sup>,具体如下:

$$x' = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}, \quad (1)$$

式中, $x'$ 为数据归一化处理后的数值; $x$ 为数据辐亮度值; $\min(x)$ 为样本数据辐亮度最小值; $\max(x)$ 为样本数据辐亮度最大值。

## 2.3 对比方法

为评估算法的有效性,本文选取了基于光谱指数

的赤潮探测方法GF1\_RI进行对比,方法详细如下。

GF1\_RI是由Liu等<sup>[13]</sup>面向GF-1 WFV数据构建的赤潮探测指数,该指数建立在赤潮红光波段响应的基础上,利用绿光、红光以及近红外波段辐亮度计算得到,具体如下:

$$GF1\_RI = L3 - (L2 + L4) / 2, \quad (2)$$

式中, $L2$ 、 $L3$ 和 $L4$ 分别代表绿光波段、红光波段以及近红外波段的辐亮度。

## 2.4 精度评价

本文基于混淆矩阵计算了总体精度(OA)、精确率(Precision)、召回率(Recall)、F1-Score以及Kappa系数<sup>[24-25]</sup>,以对赤潮探测精度进行评估,计算公式如下:

$$OA = (TP + TN) / N, \quad (3)$$

$$Precision = TP / (TP + FP), \quad (4)$$

$$Recall = TP / (TP + FN), \quad (5)$$

$$F1\text{-Score} = 2 \times (Precision \times Recall) / (Precision + Recall), \quad (6)$$

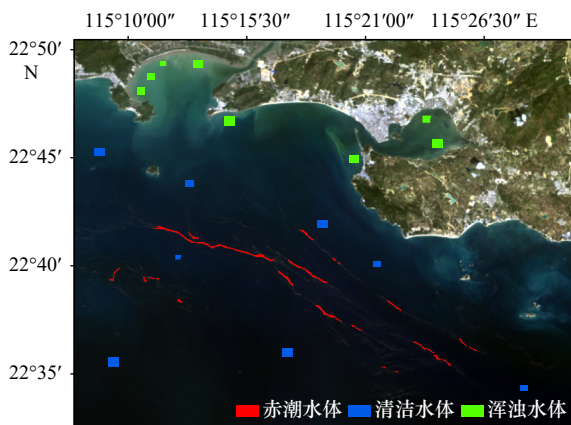
$$Kappa = \frac{TP + TN}{(TN + FP) \times (TN + FN) + (FN + TP) \times (FP + TP)}, \quad (7)$$

式中,TP(True Positive)表示赤潮像元正确识别为赤潮像元的个数;FP(False Positive)表示非赤潮像元被识别为赤潮像元的个数;TN(True Negative)表示非赤潮像元被正确识别为非赤潮像元的个数;FN(False Negative)表示赤潮像元被识别为非赤潮像元的个数; $N$ 为样本像元的总数。

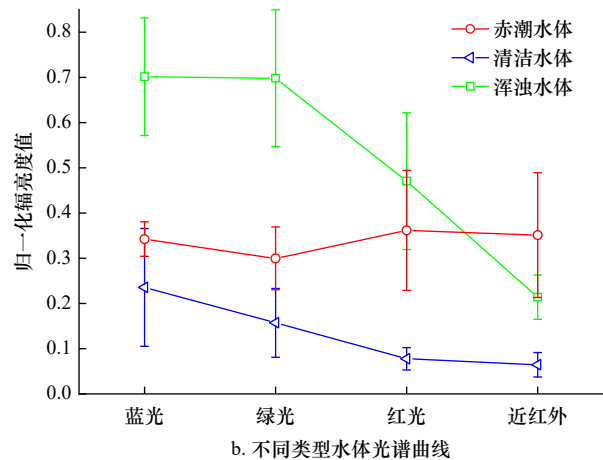
### 3 HY-1C/D CZI 红夜光藻赤潮光谱特征分析及方法构建

#### 3.1 红夜光藻赤潮光谱特征

考虑到不同类型水体光谱特征的差异, 本文在广东省红海湾红夜光藻赤潮发生期间的 3 月 14 日 HY-1C CZI 影像上选取了赤潮水体、浑浊水体和清洁水体样本像元各 1 200 个, 共计 3 600 个像元, 样本的选取兼顾空间分布的均匀性、完整性和数量的一致性



a. 样本分布示意



b. 不同类型水体光谱曲线

图 3 不同类型水体样本分布示意图与光谱曲线

Fig. 3 Schematic distribution and spectral curves of different types of water bodies

从光谱曲线看, 清洁水体和浑浊水体的光谱曲线随着波长的增加呈下降态势, 赤潮水体在红光和近红外波段有较大幅度的抬升。由于近岸水体悬浮泥沙浓度较高, 浑浊水体在绿光波段有一个明显的反射峰<sup>[26-27]</sup>, 这一光谱特征有助于区分浑浊水体与其他两类水体。而由于叶绿素 *a* 荧光特性<sup>[1, 6]</sup>, 赤潮水体在红光波段具有明显的反射峰。

#### 3.2 红夜光藻赤潮探测方法构建

赤潮水体在红光波段的高反射特性可用红光波段反射峰值与绿光波段-近红外波段基线(图 4 中的虚线)值的差表示, 计算公式如下:

$$\Delta y = R_{\text{Red}} - R_{\text{Green}} - \frac{\lambda_{\text{Red}} - \lambda_{\text{Green}}}{\lambda_{\text{NIR}} - \lambda_{\text{Green}}}(R_{\text{NIR}} - R_{\text{Green}}), \quad (8)$$

式中,  $R_{\text{Green}}$ 、 $R_{\text{Red}}$  和  $R_{\text{NIR}}$  分别表示像元绿光波段、红光波段和近红外波段的归一化辐亮度值;  $\lambda_{\text{Green}}$ 、 $\lambda_{\text{Red}}$  和  $\lambda_{\text{NIR}}$  分别表示绿光波段、红光波段和近红外波段的中心波长, 即 560 nm、650 nm 和 825 nm。

利用所选取的不同类型水体样本, 计算了赤潮集中分布区、赤潮分布边缘区、清洁水体区和浑浊水体区的红光波段基线差值( $\Delta y$  值), 并进行统计分析。

(图 3a)。在样本选取的基础上, 对不同类型水体进行了光谱特征分析(图 3b)。

由图 3b 可知, 在蓝光和绿光波段, 浑浊水体的归一化辐亮度值高于赤潮水体和清洁水体, 与其他两类水体的可分性较好, 而赤潮水体与清洁水体易在该波段混淆。从动态范围来看, 清洁水体和浑浊水体标准差较大, 赤潮水体的标准差相对较小。在红光和近红外波段, 赤潮水体响应较强, 归一化辐亮度值明显大于清洁水体, 但与浑浊水体有部分重合。清洁水体和浑浊水体标准差较小, 赤潮水体具有较大的动态范围。

结果显示, 赤潮集中分布区的  $\Delta y$  值明显高于清洁水体区, 但赤潮分布边缘区的  $\Delta y$  值与清洁水体区有部分重合, 这主要是因为赤潮发生具有生物量分布不均的特点<sup>[12-13]</sup>, 赤潮分布边缘生物量明显低于集中分布区域, 导致赤潮分布边缘区红光波段反射峰较弱。此外, 浑浊水体区  $\Delta y$  值与赤潮集中分布区、赤潮分布边缘区均有重合(图 5)。

从以上分析可知, 赤潮水体  $\Delta y$  值与部分浑浊水体相近, 易误识别。考虑到浑浊水体在绿光波段的高反射特性<sup>[26-27]</sup>, 本文构建了绿光波段反射峰值与蓝光

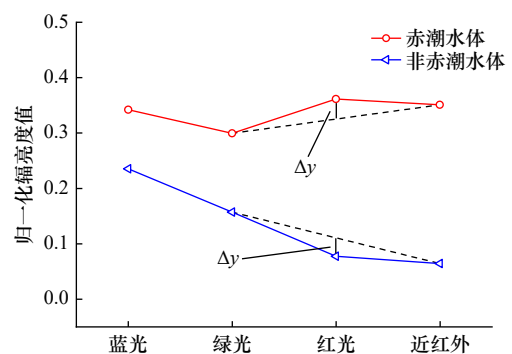


图 4 红光波段基线差示意图

Fig. 4 Schematic of the baseline difference in the red band

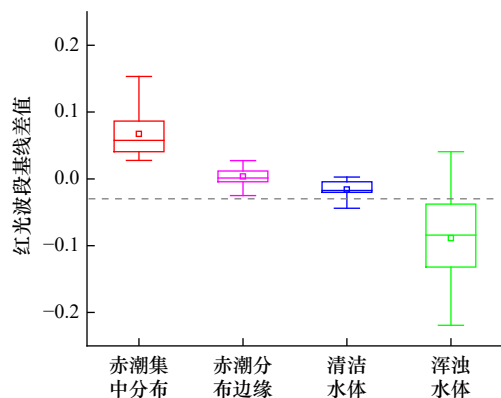


图 5 红光波段基线差值统计结果

Fig. 5 Statistical results of the values of the baseline difference in the red band

波段-红光波段基线(图 6a 中的虚线)值的差来识别浑浊水体,即  $\Delta z$ , 计算公式如下:

$$\Delta z = R_{\text{Green}} - R_{\text{Blue}} - \frac{\lambda_{\text{Green}} - \lambda_{\text{Blue}}}{\lambda_{\text{Red}} - \lambda_{\text{Blue}}}(R_{\text{Red}} - R_{\text{Blue}}), \quad (9)$$

式中,  $R_{\text{Blue}}$ 、 $R_{\text{Green}}$  和  $R_{\text{Red}}$  分别表示像元蓝光波段、绿光波段和红光波段的归一化辐亮度值;  $\lambda_{\text{Blue}}$ 、 $\lambda_{\text{Green}}$  和  $\lambda_{\text{Red}}$  分别表示蓝光波段、绿光波段和红光波段的中心波长。统计结果显示, 浑浊水体  $\Delta z$  值大于赤潮水体(图 6b)。因此, 可利用  $\Delta z$  值将浑浊水体剔除。

由于叶绿素  $a$  荧光特性<sup>[1,6]</sup>, 导致赤潮水体在近红外波段也具有明显的响应。本文利用该特征, 在基线差的基础上引入了近红外波段。考虑到赤潮水体基线差  $\Delta y$ (-0.06~0.35) 与近红外波段归一化辐亮度值(0.09~1)的值域范围, 利用 3 月 14 日红海湾红夜光藻赤潮影像开展了不同倍数近红外波段的探测实验(图 7), 最终确定了  $\Delta y$  与 0.5 倍近红外波段归一化辐亮度值的加和时赤潮探测精度最高(图 8)。

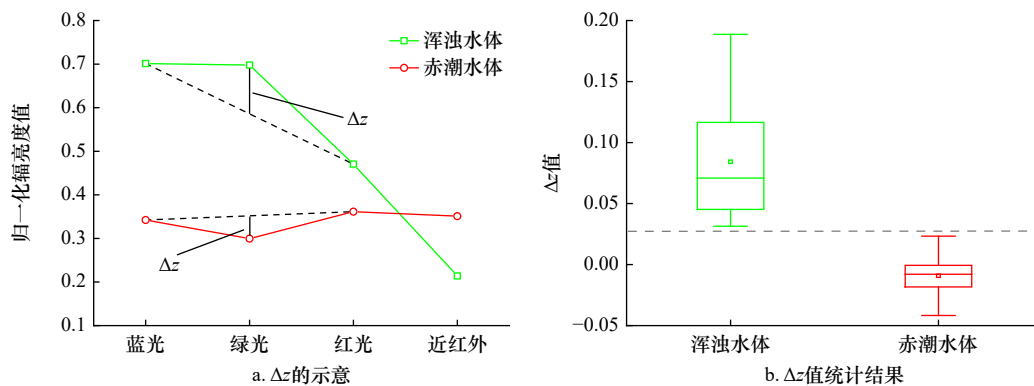
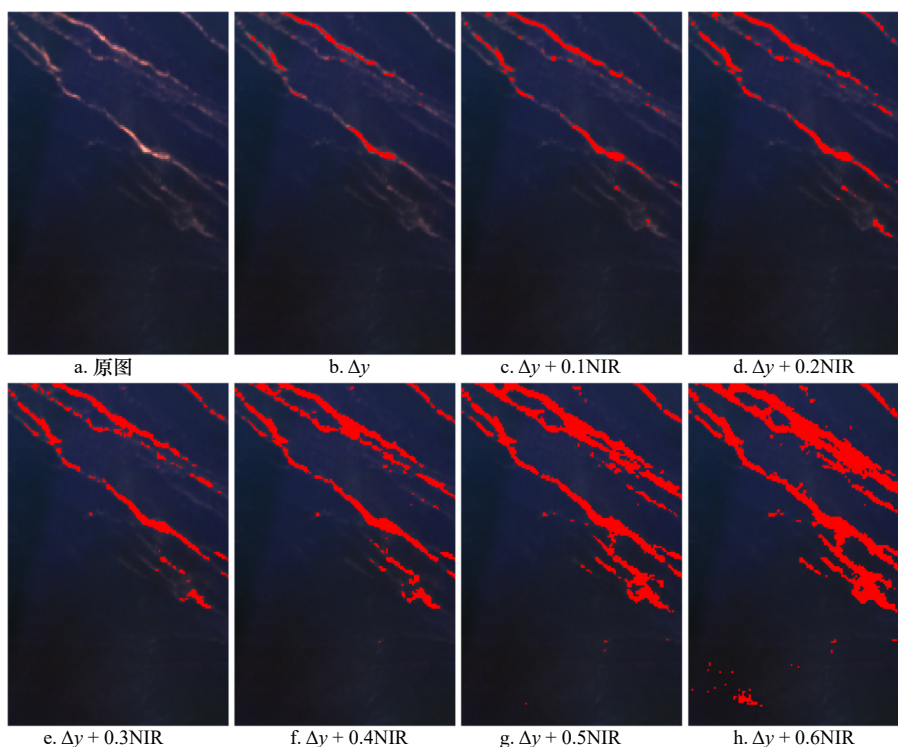


图 6 绿光波段基线差的示意图与统计结果

Fig. 6 Schematic and statistical results of the baseline difference in the green band



a. 原图 b.  $\Delta y$  c.  $\Delta y + 0.1\text{NIR}$  d.  $\Delta y + 0.2\text{NIR}$  e.  $\Delta y + 0.3\text{NIR}$  f.  $\Delta y + 0.4\text{NIR}$  g.  $\Delta y + 0.5\text{NIR}$  h.  $\Delta y + 0.6\text{NIR}$

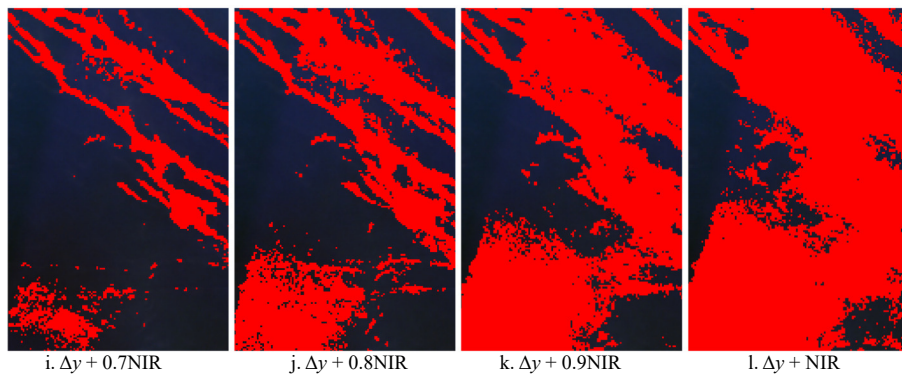


图7 不同倍数加和局部赤潮探测结果

Fig. 7 Local red tide detection results of different multiplicative summation

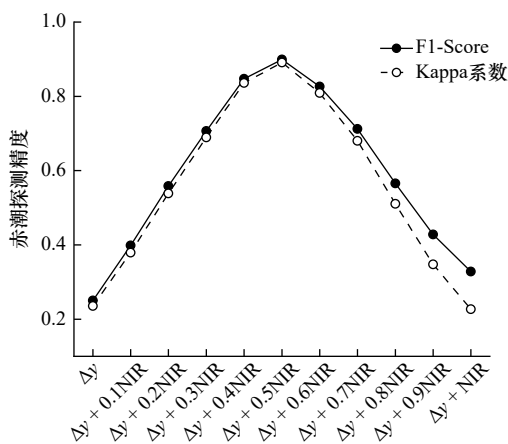


图8 不同倍数加和赤潮探测精度

Fig. 8 Accuracy of red tide detection by different multiplicative summation

在  $\Delta y$  与近红外波段的基础上, 本文构建了面向 HY-1C/D CZI 的红夜光藻赤潮光谱指数 RTSI, 计算公式如下:

$$RTSI = [R_{Red} - R_{Green} - \frac{\lambda_{Red} - \lambda_{Green}}{\lambda_{NIR} - \lambda_{Green}} (R_{NIR} - R_{Green})] + 0.5 \times R_{NIR}, \quad (10)$$

式中,  $R_{Green}$ 、 $R_{Red}$  和  $R_{NIR}$  分别表示像元绿光波段、红光波段和近红外波段的归一化辐亮度值;  $\lambda_{Green}$ 、 $\lambda_{Red}$  和  $\lambda_{NIR}$  分别表示绿光波段、红光波段和近红外波段的中心波长。

在此基础上, 本文设计了基于光谱特征的赤潮探测方法, 其流程如图9所示。首先对输入的 HY-1C/D CZI 影像进行陆地、云掩膜处理, 并进行最大最小值归一化处理<sup>[29]</sup>, 以减少成像环境差异导致的辐亮度变化对赤潮探测的影响。然后, 计算  $\Delta z$  值并利用该值进行浑浊水体判别。在此基础上计算 RTSI 指数, 并根据 RTSI 值判断是否发生赤潮。

基于光谱特征的赤潮探测方法涉及到浑浊水体和赤潮判定阈值 T1 和 T2, 为确定阈值 T1 和 T2, 本文利用 3 月 13 日广东省红海湾 HY-1D 卫星影像、3 月

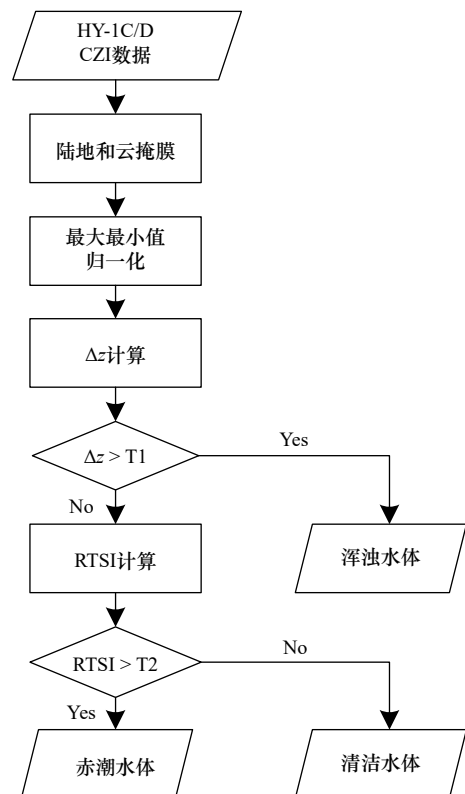


图9 基于光谱特征的赤潮探测方法流程图

Fig. 9 Flowchart of red tide detection method based on spectral features

14 日广东省红海湾 HY-1C 卫星影像和广西省北部湾 HY-1C 卫星影像, 每景影像分别选取了赤潮水体和浑浊水体样本像元各 1 500 个, 共计 9 000 个样本像元, 并进行了统计分析。最终确定阈值 T1 为 0.05, 阈值 T2 为 0.035。需要特别指出的是, 如果卫星成像环境差异过大, 会导致阈值失效, 需对阈值进行调整。

## 4 结果分析

### 4.1 实验结果

为评估本文方法赤潮探测效果, 本文利用广东省红海湾红夜光藻赤潮发生期间的 HY-1C 和 HY-1D 两

颗卫星不同成像时间的 CZI 影像开展了赤潮探测实验。其中, HY-1D CZI 影像成像时间为 3 月 13 日, HY-1C CZI 影像成像时间为 3 月 14 日。探测结果显示, 本文方法可以有效地探测赤潮。此次赤潮过程主要分布在红海湾北部, 且呈条带状分布, 条带长度约为 20 km, 条带宽度约为 0.3 km。而且, 3 月 14 日赤潮分布有明显东移趋势(图 10)。赤潮局部探测结果显示, 本文方法能有效探测到窄条带分布赤潮区域和生

物量较低的赤潮分布边缘区域(图 11)。

从影像上看, 红海湾近岸大多为浑浊水体。如图 12 所示, 在浑浊水体区域, 本文方法未将浑浊水体误识别为赤潮水体。因此, 本文方法在探测到赤潮的同时, 能够有效地避免浑浊水体的干扰。

为进一步评估本文方法的有效性, 基于目视解译结果, 本文对赤潮探测结果进行了定量评估。结果显示, 本文方法具有较高的赤潮探测精度, 总体精度和

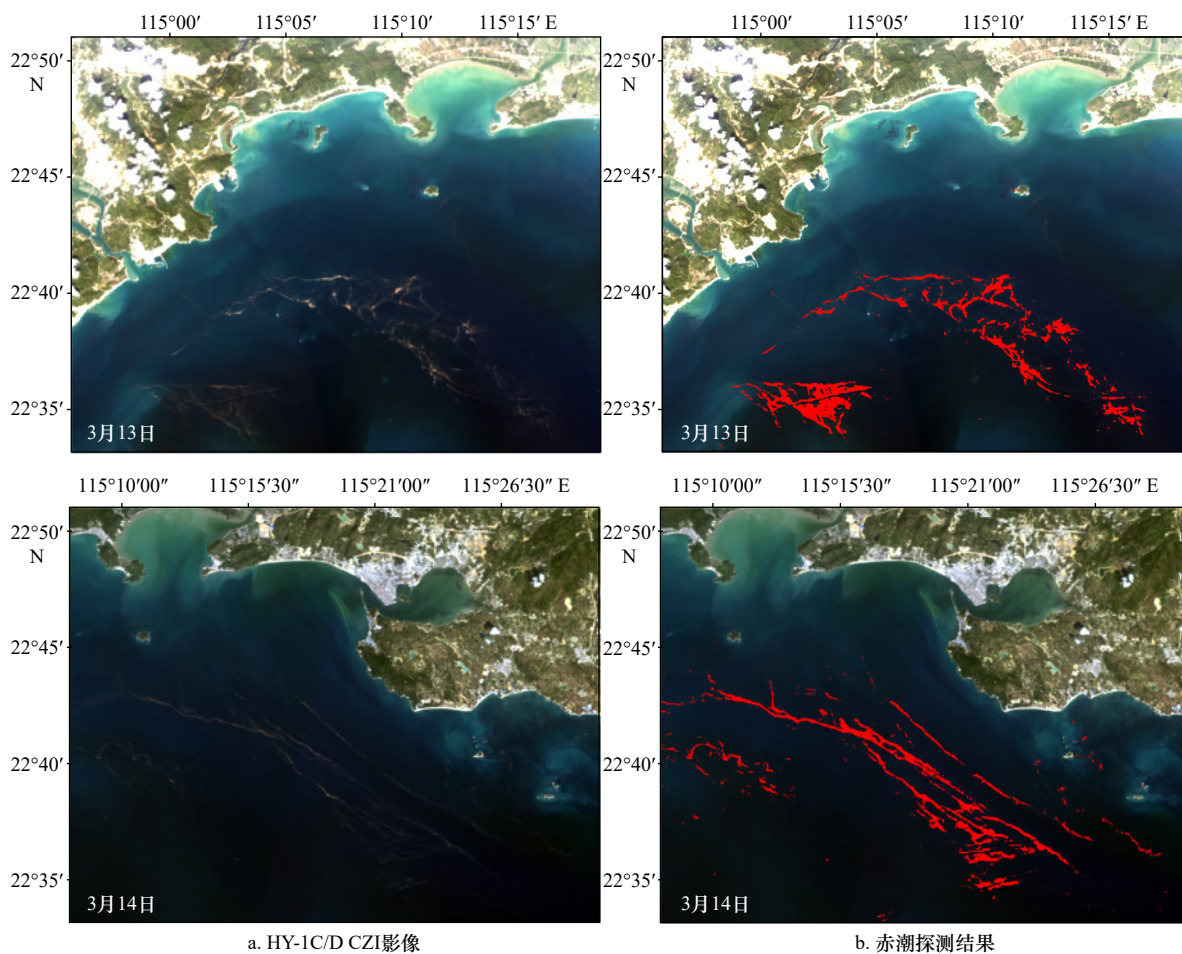


图 10 HY-1C/D CZI 影像赤潮探测结果(红色表示赤潮)  
Fig. 10 HY-1C/D CZI image red tide detection results (red indicates red tide)

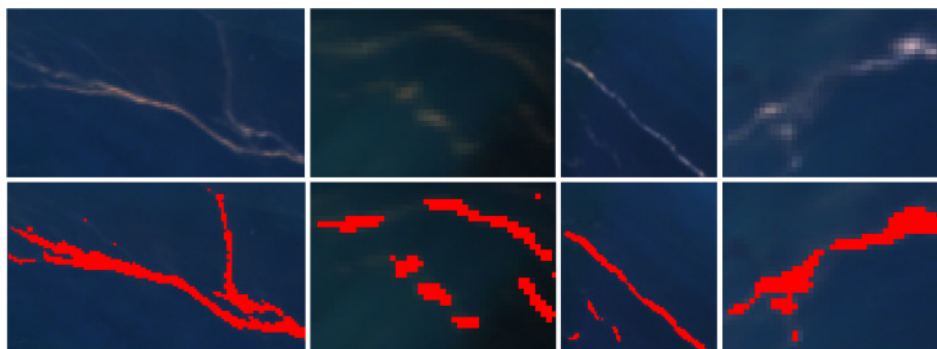


图 11 HY-1C/D CZI 影像局部赤潮探测结果(红色表示赤潮)  
Fig. 11 Local red tide detection results of HY-1C/D CZI image (red indicates red tide)

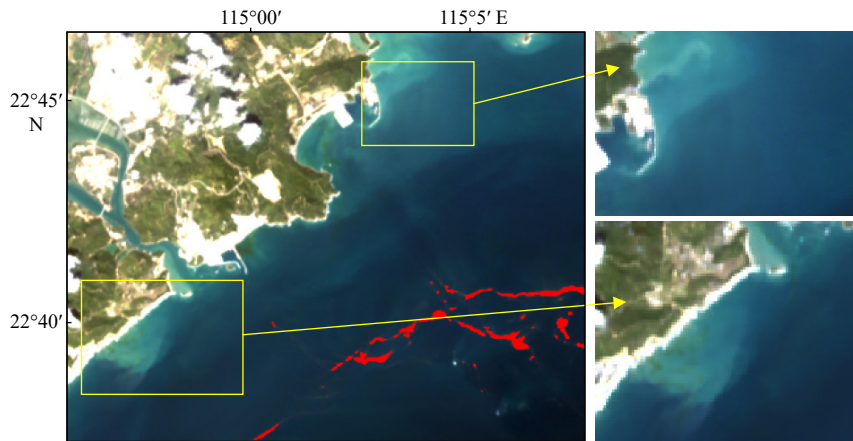


图 12 浑浊水体区域赤潮探测结果(红色表示赤潮)

Fig. 12 Red tide detection results in turbid water areas (red indicates red tide)

召回率均在 90% 以上, 精确率达 89.72%, F1-Score 和 Kappa 系数分别达到了 0.90 和 0.89(表 3)。

表 3 不同方法赤潮探测精度

Table 3 Accuracy of red tide detection by different methods

方法	总体精度/%	精确率/%	召回率/%	F1-Score	Kappa系数
RTSI	98.42	89.72	90.16	0.90	0.89
GF1_RI	97.02	81.90	79.76	0.81	0.79

#### 4.2 不同赤潮探测方法对比

为检验本文方法的有效性, 本文选取了基于光谱指数的赤潮探测方法 GF1\_RI 进行对比, 利用 3 月 14 日红海湾 HY-1C CZI 影像进行了赤潮探测实验。结果显示, 两种方法均能有效探测到集中分布赤潮, 探测结果在空间分布上较为一致。相较于 GF1\_RI, 本文方法具有明显的优势, 可有效地消除浑浊水体的干扰, 误检现象较少(图 13)。局部探测结果显示, 在赤潮分布边缘区域 GF1\_RI 存在漏分和误分的现象, 而本文方法可以有效探测到赤潮分布边缘区域(图 14)。

基于目视解译结果进行定量评估, 结果显示, 本

文所提出的方法各项评价指标均优于 GF1\_RI。与 GF1\_RI 相比, 精确率提高了 7.82%, 召回率提高了 10.4%, F1-Score 提高了 9%, Kappa 系数提高了 10%(表 3)。

## 5 讨论

### 5.1 不同海洋环境赤潮探测适用性分析

为验证本文方法对不同海洋环境红夜光藻赤潮探测的适用性, 本文利用 2020 年 8 月东海 HY-1C CZI 影像 1 景和 2021 年 2 月北部湾 HY-1C CZI 影像 1 景进行了赤潮探测实验<sup>[28-29]</sup>。从影像可以看出东海红夜光藻赤潮呈条带状分布; 北部湾红夜光藻赤潮呈片状分布, 分布范围集中, 且有薄云覆盖。

结果显示, 本文方法对条带状分布和片状分布赤潮均有较好的探测效果, 受薄云影响较小(图 15)。本文在 2021 年 2 月北部湾 HY-1C CZI 影像上选取薄云区域赤潮水体和清洁水体样本各 1 200 个, 分析其光谱特征。如图 16 所示, 薄云区两类水体归一化辐亮度值整体较高, 但光谱形状大致保持不变, 两类水体的  $\Delta y$  和近红外波段辐亮度值差异明显。RTSI 指数受光谱数值变化的影响小, 所以本文方法在探测赤

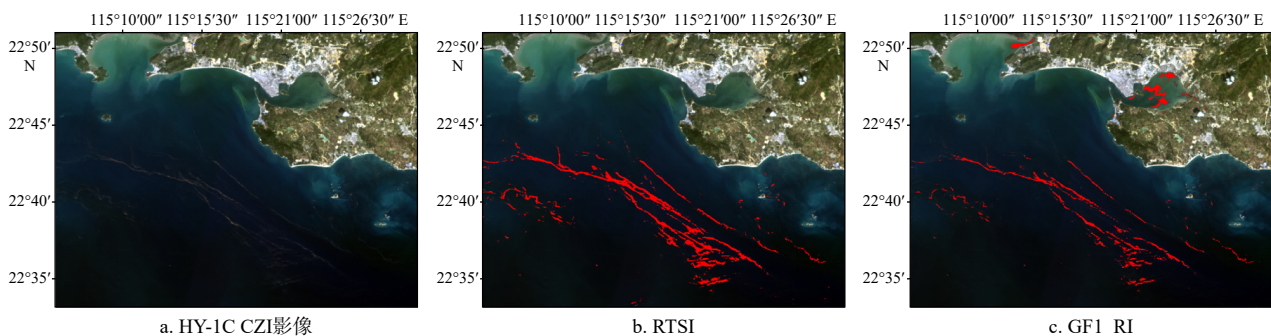


图 13 不同赤潮探测方法结果对比(红色表示赤潮)

Fig. 13 Comparison of results of different red tide detection methods (red indicates red tide)

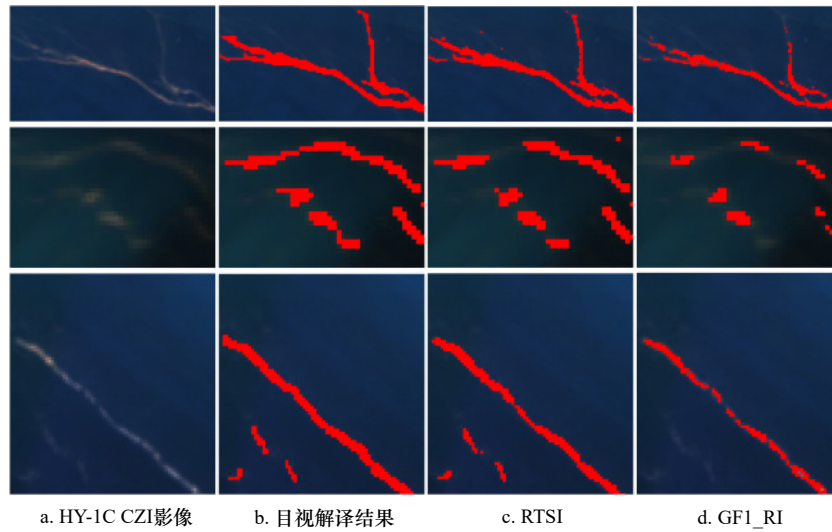


图 14 不同赤潮探测方法局部赤潮探测结果(红色表示赤潮)

Fig. 14 Local red tide detection results of different red tide detection methods (red indicates red tide)

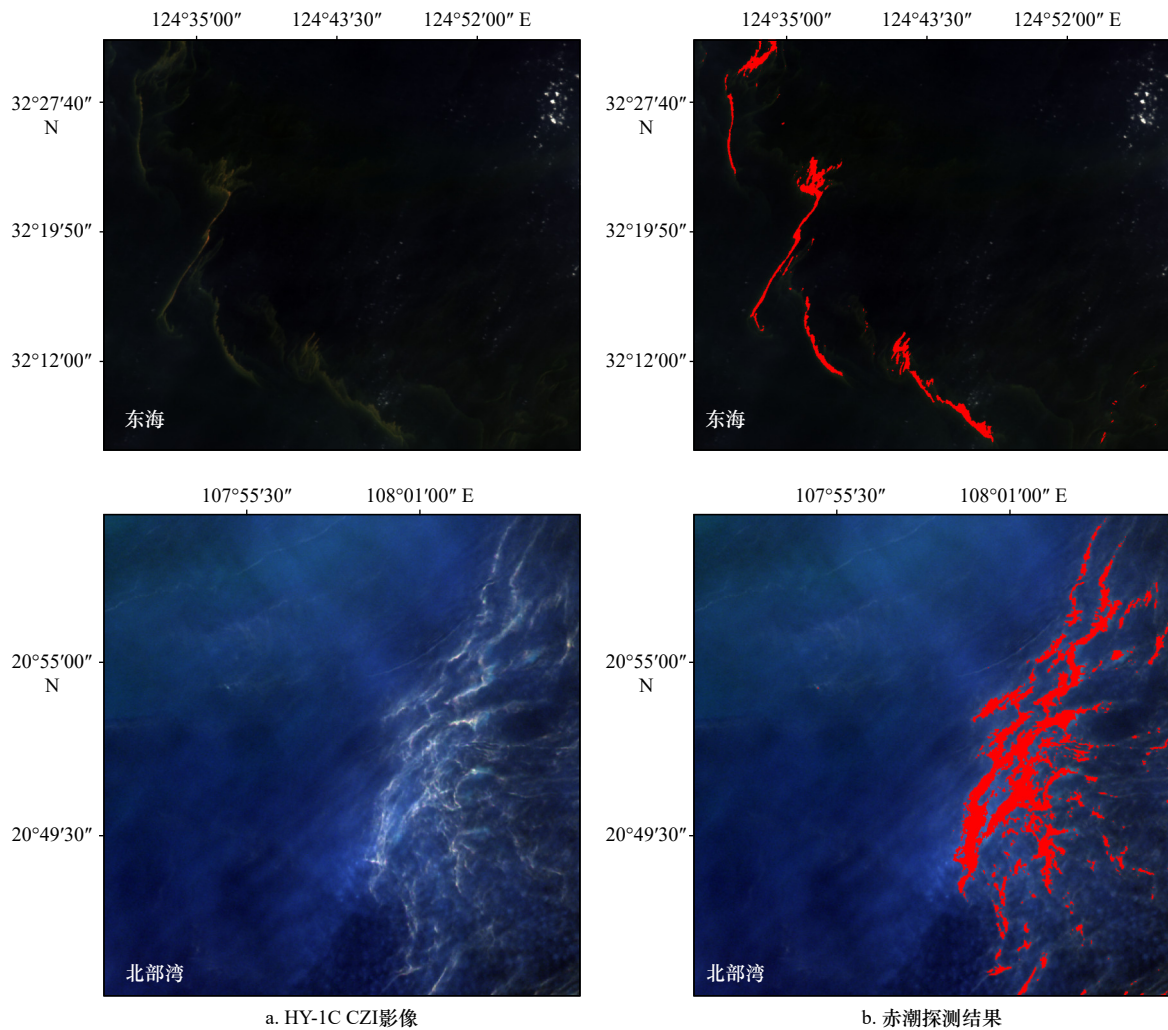


图 15 不同海洋环境 HY-1C CZI 影像赤潮探测结果(红色表示赤潮)

Fig. 15 Red tide detection results of HY-1C CZI images in different marine environments (red indicates red tide)

潮时受薄云影响较小。

基于目视解译结果进行定量评估,从结果来看,

总体精度和精确率均在 90% 以上,召回率达 87%, F1-Score 和 Kappa 系数分别为 0.88 和 0.87。上述结果显

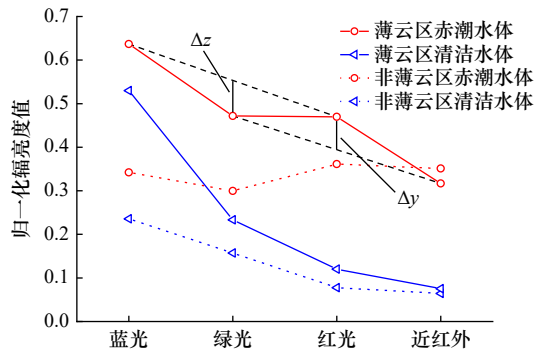


图 16 有无薄云覆盖下不同类型水体光谱曲线

Fig. 16 Spectral curves of different types of water bodies with and without thin cloud cover

示, 本文方法具有较好的区域适用性, 可以用于探测不同海洋环境中的红夜光藻赤潮。

### 5.2 不同宽波段卫星传感器适用性分析

为进一步验证本文方法对不同宽波段卫星传感器的适用性, 本文以 GF-1 WFV 传感器为例, 开展了赤潮探测适用性分析。本文利用 3 月 13 日红海湾 GF-1 WFV 影像进行了赤潮探测实验, 并进行定性和定量评估。结果显示, 虽然 HY-1C CZI 与 GF-1 WFV 的波段设置不完全相同, 但本文方法仍可用于 GF-1 WFV 赤潮探测, 有效避免浑浊水体的干扰(图 17)。基于目视解译结果进行定量评估, 结果显示, 本文方法针对 GF-1 WFV 赤潮探测具有较高的探测精度, 总体精度和精确率均在 90% 以上, 召回率达 86%, F1-Score 和 Kappa 系数均达 0.90。

上述结果表明, 本文方法能够较好的应用于 GF-1 WFV 的赤潮探测, 受卫星传感器波段宽度和中心波长的影响较小, 可以广泛应用于具有蓝光、绿光、红光和近红外 4 个波段的宽波段卫星。

### 5.3 归一化处理对赤潮探测的影响

在数据预处理部分, 本文对陆地和云掩膜处理后的四波段辐亮度产品进行了归一化处理, 归一化方法采用最大最小值归一化方法<sup>[23]</sup>。最大最小值归一化方法根据样本本数据的最大值和最小值将数据缩放到 0~1。为探讨归一化处理对本文方法赤潮探测的影响, 利用在 3 月 14 日红海湾 HY-1C CZI 影像上选取的样本, 进行了不同类型水体归一化前后光谱特征分析。

由图 18 可知, 最大最小值归一化后赤潮水体、清洁水体和浑浊水体的光谱曲线发生改变。从数值上看, 在蓝光和绿光波段, 归一化处理后浑浊水体与赤潮水体和清洁水体的可分性增强; 在红光和近红外波段, 赤潮水体和清洁水体的数值差距增大。从光谱曲线来看, 在归一化处理前, 三类水体的光谱曲线均随波长的增加呈下降态势, 浑浊水体在绿光波段有一反射峰, 在归一化处理后, 赤潮水体在红光波段和近红外波段有明显抬升, 赤潮水体在红光波段有一明显反射峰。

本文方法利用赤潮水体在红光和近红外波段抬升的特征区别于其他类型水体, 根据上述光谱特征分析表明, 归一化处理后赤潮水体与清洁水体的  $\Delta y$  和近红外波段归一化辐亮度值差距增加, 增强了二者的

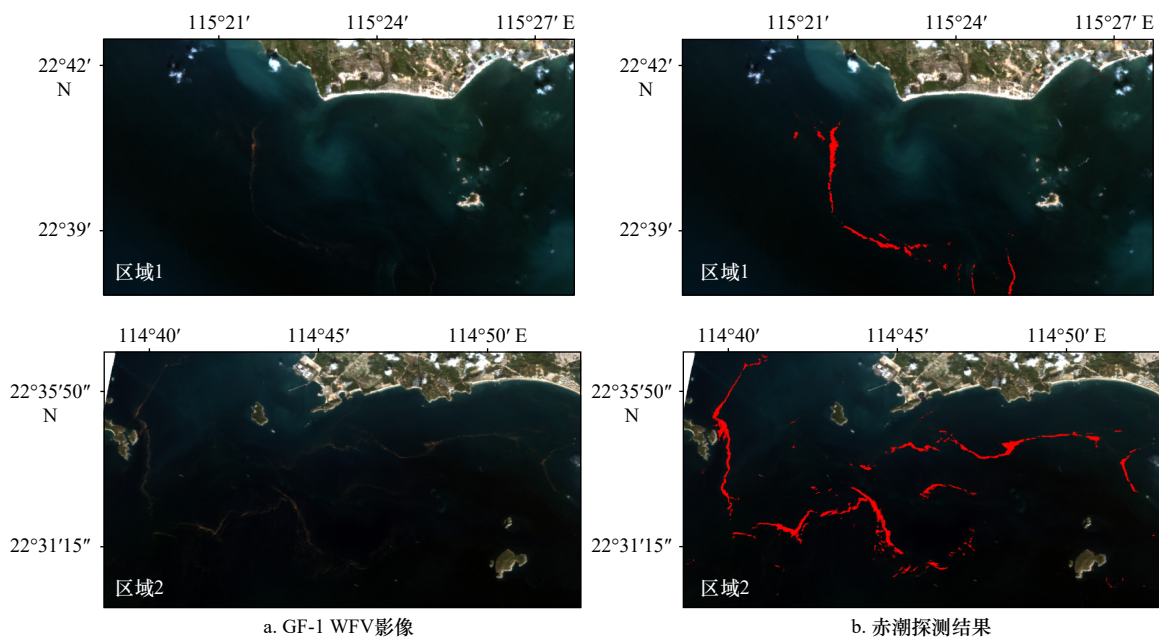


图 17 GF-1 WFV 影像赤潮探测结果(红色表示赤潮)

Fig. 17 GF-1 WFV image red tide detection results (red indicates red tide)

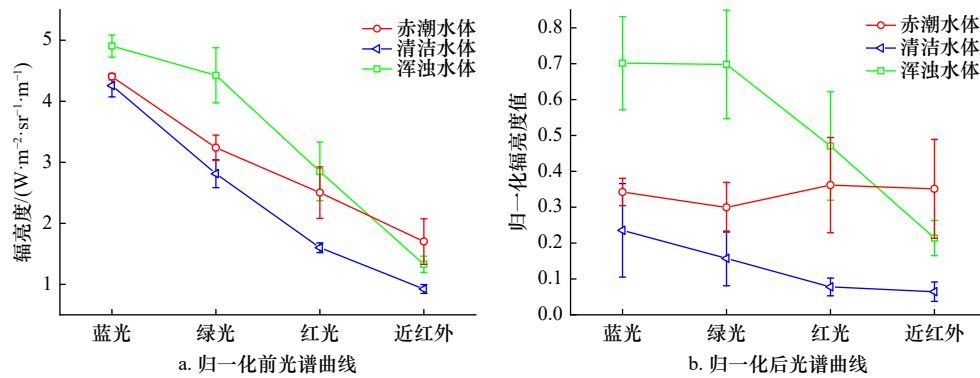


图 18 归一化处理前后不同类型水体光谱曲线

Fig. 18 Spectral curves of different types of water bodies before and after normalization

可分性。

## 6 结论

本文针对 HY-1C/D CZI 红夜光藻赤潮快速探测需求,分析了红夜光藻赤潮的光谱特征,基于红夜光藻赤潮在红光和近红外波段的高反射光谱特征,构建了面向 HY-1C/D CZI 的红夜光藻赤潮光谱指数 RT-SI。针对浑浊水体常被误识为赤潮水体的问题,本文利用浑浊水体在绿光波段高反射特性,对浑浊水体进行剔除。在此基础上,构建了基于光谱特征的赤潮探测方法。结果表明,本文方法可以有效探测到赤潮分布边缘区域和窄条带分布赤潮区域,精确率达 89.72%。

### 参考文献:

- [1] 崔廷伟,张杰,马毅,等. 赤潮光谱特征及其形成机制[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, 26(5): 884–886.  
Cui Tingwei, Zhang Jie, Ma Yi, et al. Study of red tide spectral characteristics and its mechanism[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(5): 884–886.
- [2] 谢宏英,王金辉,马祖友,等. 赤潮灾害的研究进展[J]. *海洋环境科学*, 2019, 38(3): 482–488.  
Xie Hongying, Wang Jinhui, Ma Zuyou, et al. Review of harmful algal blooms hazard[J]. *Marine Environmental Science*, 2019, 38(3): 482–488.
- [3] do Rosário Gomes H, Goes J I, Matondkar S G P, et al. Massive outbreaks of *Noctiluca scintillans* blooms in the Arabian Sea due to spread of hypoxia[J]. *Nature Communications*, 2014, 5(1): 4862.
- [4] 齐琳,胡传民,陆应诚,等. 基于 HY-1C/D 卫星 CZI 的海洋、湖泊中漂浮藻华的光谱分析与识别[J]. *遥感学报*, 2023, 27(1): 157–170.  
Qi Lin, Hu Chuanmin, Lu Yingcheng, et al. Spectral analysis and identification of floating algal blooms in oceans and lakes based on HY-1C/D CZI observations[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(1): 157–170.
- [5] 杨幸幸,杨颖,许彩燕,等. 福建和浙江海域夜光藻赤潮 2009–2019 年的变化及主要环境因子分析[C]//第三届海洋开发与管理学术年会论文集. 北京: 海洋出版社, 2019: 76–83.  
Yang Xingxing, Yang Ying, Xu Caiyan, et al. Changes of red tide of nocturnal algae in Fujian and Zhejiang waters from 2009 to 2019 and analysis of main environment factors[C]//Proceedings of the Third Annual Conference on Ocean Development and Management. Beijing: China Ocean Press, 2019: 76–83.
- [6] Gower J, King S. Validation of chlorophyll fluorescence derived from MERIS on the west coast of Canada[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(3/4): 625–635.
- [7] Gower J, King S, Goncalves P. Global monitoring of plankton blooms using MERIS MCI[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(21): 6209–6216.
- [8] Lee M S, Park K A, Micheli F. Derivation of red tide index and density using geostationary ocean color imager (GOCI) data[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(2): 298.

F1-Score 达 0.90。而且,本文方法具有较好的适用性,可适用于不同海洋环境、不同宽波段卫星传感器的赤潮探测。与现有面向 HY-1C/D CZI 的赤潮深度学习探测算法相比,本文方法不需要大量赤潮样本构建模型,计算简单。

需要指出的是,受不同优势种赤潮样本量不足的限制,本文在方法构建时仅选取了红夜光藻赤潮样本进行光谱特征分析,本文赤潮探测方法能否用于探测其他优势种赤潮尚未可知,后续将收集不同优势种赤潮 HY-1C/D CZI 卫星数据,开展不同优势种赤潮探测效果的应用评估。

- [9] Shen Fang, Tang Rugang, Sun Xuerong, et al. Simple methods for satellite identification of algal blooms and species using 10-year time series data from the East China Sea[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 235: 111484.
- [10] Tao Bangyi, Mao Zhihua, Lei Hui, et al. A novel method for discriminating *Prorocentrum donghaiense* from diatom blooms in the East China Sea using MODIS measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 158: 267–280.
- [11] Tao Bangyi, Mao Zhihua, Wang Difeng, et al. The use of MERIS fluorescence bands for red tides monitoring in the East China Sea[C]//Proceedings of SPIE 8175, Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice, Coastal Waters, and Large Water Regions 2011. Prague: SPIE, 2011: 439–446.
- [12] Liu Rongjie, Xiao Yanfang, Ma Yi, et al. Red tide detection based on high spatial resolution broad band optical satellite data[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2022, 184: 131–147.
- [13] Liu Rongjie, Zhang Jie, Cui Binge, et al. Red tide detection based on high spatial resolution broad band satellite data: a case study of GF-1[J]. *Journal of Coastal Research*, 2019, 90(SI): 120–128.
- [14] 刘建强, 叶小敏, 宋庆君, 等. HY-1C/D 海洋水色卫星产品体系及其典型应用 [J]. *遥感学报*, 2023, 27(1): 1–13.  
Liu Jianqiang, Ye Xiaomin, Song Qingjun, et al. Products of HY-1C/D ocean color satellites and their typical applications[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2023, 27(1): 1–13.
- [15] Cao Mengmeng, Qing Song, Jin E, et al. A spectral index for the detection of algal blooms using Sentinel-2 Multispectral Instrument (MSI) imagery: a case study of Hulun Lake, China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2021, 42(12): 4514–4535.
- [16] Yunus A P, Dou Jie, Sravanthi N. Remote sensing of chlorophyll-*a* as a measure of red tide in Tokyo Bay using hotspot analysis[J]. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2015, 2: 11–25.
- [17] 陈曦. 基于 MODIS 和 HJ-1 数据的赤潮遥感监测 [D]. 福州: 福州大学, 2014.  
Chen Xi. Red tide remote sensing monitoring based on MODIS and HJ-1 data[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2014.
- [18] Lee M S, Park K A, Chae J, et al. Red tide detection using deep learning and high-spatial resolution optical satellite imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(15): 5838–5860.
- [19] Zhao Xin, Liu Rongjie, Ma Yi, et al. Red tide detection method for HY-1D coastal zone imager based on U-net convolutional neural network[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(1): 88.
- [20] Cui Hanlin, Chen Shuguo, Hu Lianbo, et al. HY1C/D-CZI *Noctiluca scintillans* bloom recognition network based on hybrid convolution and self-attention[J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(7): 1757.
- [21] Lin Mingsen, Zou Bin, Zeng Tao, et al. Marine environmental monitoring with GF-1 data[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing: IEEE, 2016: 3750–3753.
- [22] 葛化鑫, 刘荣杰, 赵鑫, 等. 中高空间分辨率宽波段光学卫星传感器参数赤潮探测影响研究 [J]. *海洋学报*, 2022, 44(12): 136–147.  
Ge Huaxin, Liu Rongjie, Zhao Xin, et al. Impact of medium and high spatial resolution wide band optical satellite sensor parameters on red tide detection[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(12): 136–147.
- [23] Kreyszig E. *Advanced Engineering Mathematics*[M]. 10th ed. New Delhi: Wiley, 2011: 154–196.
- [24] Congalton R G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, 37(1): 35–46.
- [25] Powers D M W. Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness & correlation[J]. *Journal of Machine Learning Technologies*, 2011, 2(1): 37–63.
- [26] 蔡丽娜. 舟山近岸海域水体光谱特性分析 [J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(16): 9070–9071, 9090  
Cai Lina. Analysis of nearshore water spectral character in Zhoushan[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(16): 9070–9071, 9090.
- [27] 方圣辉, 张加晋. 不同泥沙含量水体光谱特性分析 [J]. *测绘信息与工程*, 2007, 32(6): 47–49.  
Fang Shenghui, Zhang Jiabin. Spectral property analysis of water suspended sediment concentrations[J]. *Journal of Geomatics*, 2007, 32(6): 47–49.
- [28] 雷惠, 潘德炉, 陶邦一, 等. 东海典型水体的黄色物质光谱吸收及分布特征 [J]. *海洋学报*, 2009, 31(2): 57–62.  
Lei Hui, Pan Delu, Tao Bangyi, et al. The spectral absorption and distribution characteristics of CDOM in the typical waters of the East China Sea[J]. *Haiyang Xuebao*, 2009, 31(2): 57–62.
- [29] Xie Qiling, Yan Nanyang, Yang Xue, et al. Synoptic view of an unprecedented red *Noctiluca scintillans* bloom in the Beibu Gulf, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 863: 160980.

## Detection method of red tide based on the spectral features from HY-1C/D satellite: Take red *Noctiluca scintillans* blooms as an example

Wang Yikan<sup>1,2</sup>, Liu Rongjie<sup>1,3</sup>, Liu Jianqiang<sup>4</sup>, Ding Jing<sup>4</sup>, Ye Xiaomin<sup>4</sup>, Zhao Xin<sup>1,5</sup>, Song Dongmei<sup>2</sup>, Ma Yi<sup>1,3</sup>

(1. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2. College of Oceanography and Space Informatics, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 3. Technology Innovation Center for Ocean Telemetry, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 4. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 5. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** Red *Noctiluca scintillans* is the main red tide species in China, which often occurs in the Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea and South China Sea. Recently, the red *N. scintillans* blooms occurred frequently, leading to an urgent need for their monitoring. However, the occurrence of red *N. scintillans* blooms is characterized by wide distribution range, rapid change and strip distribution. Therefore, the high spatial resolution, large coverage and short revisit period satellites are needed for red *N. scintillans* blooms monitoring. Although, ocean color satellites have played an important role in red tide detection, they cannot detect the strip distributed red *N. scintillans* blooms for their low spatial resolution. The Coastal Zone Imager (CZI) onboard HY-1C/D satellite, with high spatial resolution, wide swath and short revisit cycle, has been increasingly used for red tide monitoring. Most existing red *N. scintillans* blooms detection methods for HY-1C/D CZI are based on deep learning methods, which need a large number of training samples. However, the training samples are difficult to obtain, which affects the accuracy of the models. Therefore, taking red *N. scintillans* bloom occurred in the Honghai Bay, Guangdong Province in March 2022 as an example, the spectral features of red *N. scintillans* blooms were analyzed in this paper, the red tide detection method based on the high reflectance features of red *N. scintillans* blooms in the red and near infrared bands and turbid water in the green band was constructed for HY-1C/D CZI. The experimental results show that based on the method, red *N. scintillans* blooms can be detected effectively in the turbid water, with precision and F1-Score of 89.72% and 0.90 respectively. Moreover, the method has good applicability, and it is proved to be suitable for the detection of red *N. scintillans* blooms in different marine environments. Also, it is applicable to different broad band sensors.

**Key words:** red tide; red *Noctiluca scintillans*; remote sensing detection; HY-1C/D CZI; spectral features