

基于色相角算法的珠江口赤潮遥感识别*

许源兴¹, 孙琰¹, 肖鹤¹, 艾彬^{2,3}, 刘大召^{1,4}

1. 广东海洋大学电子与信息工程学院, 广东 湛江 524088
2. 中山大学海洋科学学院, 广东 珠海 519082
3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082
4. 广东省海洋遥感与信息技术工程技术中心, 广东 湛江 524088

摘要: 为实现珠江口高分辨率赤潮遥感识别, 科学支撑赤潮灾害防灾减灾工作, 利用海洋一号C/D卫星搭载的海岸带成像仪高空间分辨率数据, 在分析珠江口近岸浑浊水体、干净水体和赤潮水体遥感影像光谱特征基础上, 通过计算水体色相角并结合目视解译识别珠江口赤潮。利用该方法成功识别2020年10月26日—11月6日在珠江口海域发生的双胞旋沟藻赤潮。利用色相角能够很好地识别出珠江口海域的赤潮; 赤潮水体的色相角在 58° ~ 61° 变化; 该方法对形成初期的小范围赤潮、低密度赤潮和条带状赤潮具有很好的识别效果。

关键词: 珠江口; 赤潮; HY-1C/D; 色相角

中图分类号: X26 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2024)01-0096-09

Remote sensing identification of red tide in Pearl River Estuary based on hue angle algorithm

XU Yuanxing¹, SUN Yan¹, XIAO He¹, AI Bin^{2,3}, LIU Dazhao^{1,4}

1. College of Electronic and Information Engineering, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China
2. School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China
4. Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center of Marine Remote Sensing and Information Technology, Zhanjiang 524088, China

Abstract: To realize the red tide identification of Pearl River Estuary with high resolution remote sensing, and to scientifically support red tide disaster prevention and mitigation work. This paper used the high spatial resolution data of the coastal zone imager carried by Haiyang-1C/D satellite, together with the analysis of the spectral characteristics of remote sensing images of turbid water, clean water and red tide in the Pearl River Estuary, to identify red tide by calculating the water hue angle and combining with visual interpretation. This method was used to successfully identify the *Cochlodinium geminatum* red tide in the Pearl River Estuary from October 26 to November 6, 2020. The hue angle can be used to identify the red tide in the Pearl River Estuary. The hue angle of red tide water varies

* 收稿日期: 2023-02-24

录用日期: 2023-05-18

网络首发日期: 2023-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(42206187, 42071261); 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)创新团队建设项目(311020003/311021004)

作者简介: 许源兴(1997年生), 男; 研究方向: 赤潮的遥感识别及机理; E-mail: xuyuanxing@gdhqx.com

通信作者: 刘大召(1972年生), 男; 研究方向: 海洋遥感及应用; E-mail: liudz@gdou.edu.cn

from 58° to 61° , which has a good identification effect on small area red tide during their initiation, low density red tide and red tide in strip distributed areas.

Key words: Pearl River Estuary; red tide; HY-1C/D; hue angle

赤潮, 是由海水中的某些浮游植物、原生动物或细菌在适宜的海域条件下, 短时间突发性的剧增或集聚引起的水体变色的异常现象(Liu et al., 2013; Zohdi et al., 2019)。赤潮作为一种典型的生态灾害, 会破坏海洋生态环境, 给海洋生物带来巨大威胁, 影响渔业资源, 还会给沿海旅游业造成经济损失。此外, 人类可能因意外饮食受赤潮污染的海洋产品中毒或死亡(吴霓等, 2013; 吕颂辉等, 2019)。根据广东省海洋灾害公报, 2013—2020年珠江口附近海域共发生16起赤潮事件, 其中珠海市珠江口海域7起, 深圳市珠江口海域9起。主要赤潮生物种包括夜光藻(4起)、红色赤潮藻(3起)、赤潮异湾藻(4起)、双胞胎沟藻(4起)、中肋骨条藻(1起)。珠江口赤潮爆发具有区域性和季节性, 赤潮藻种类多样。随着粤港澳大湾区建设发展, 必须更加重视赤潮灾害, 大力发展赤潮监测技术。

传统的赤潮监测主要依靠船只调查和岸滨人工观测。常规船只监测赤潮需要采集水样, 并带回实验室进行生物、化学分析(庞勇等, 2015; 李光毅等, 2022)。这些方法不仅费时费力, 且获取的数据覆盖面小, 连续性差。而卫星遥感技术为赤潮的快速、大范围连续监测提供了重要手段(Blondeau-Patissier et al., 2014)。赤潮遥感识别是通过分析赤潮水体和非赤潮水体光谱特征差异进行的。赤潮发生时, 海水中的浮游植物、原生动物或者细菌过度繁殖会使水体颜色发生变化, 一般海水会呈现红、黄、绿或者褐色, 导致卫星接收到的水体反射光学信号发生改变(Guan et al., 2022)。相关研究指出, 赤潮水体有两个吸收峰和两个反射峰。两个吸收峰, 其中一个在440~460 nm的蓝光波段, 另一个在650~670 nm的红光波段; 两个反射峰, 一个在560~580 nm的绿光波段, 另一个在690~710 nm波段(Xu et al., 2014)。不同藻类引发的赤潮, 其水体光谱曲线也会有所差异(Tao et al., 2015)。赤潮水体的光谱特征成为利用遥感技术识别赤潮的依据。基于赤潮水体光谱特征, 主要利用赤潮指数、波段比值法等识别赤潮(Luo et al., 2014; 程玉等, 2021)。此外赤潮爆发, 浮游植物大量繁殖, 赤潮水体中叶绿素含量要高于周围水体, 因此也常用叶绿素阈值法对赤潮进

行监测(宋德彬, 2019; 李仁虎, 2020)。另外, 海面温度、悬浮泥沙等因子也与赤潮发生特征具有一定的关系, 可以将其作为遥感反演赤潮的参考因素(李阳东等, 2020)。随着计算机技术的不断发展, 机器学习也被用于赤潮识别(Zhao et al., 2021; 李敬虎等, 2022)。

珠江口赤潮遥感识别, 大多是基于低、中分辨率遥感数据的大尺度空间监测。张涛等(2009)利用MODIS遥感数据, 采用波段比值法结合监督分类, 成功提取珠江口赤潮信息。Wang等(2011)基于HJ-CDD和MODIS多光谱遥感数据, 采用归一化差分指数组合方法实现珠江口赤潮监测。随着高分辨率遥感卫星的发射, 如高分一号卫星(GF-1)、哨兵二号卫星(Sentinel-2)、海洋一号C/D卫星(HY-1C/D)等, 越来越多高分辨率遥感数据可用于更精细化的赤潮监测(Liu et al., 2022), 而目前利用相关数据开展珠江口赤潮研究的工作很少。据报道, 2020年10月26日珠江口伶仃洋海域出现水色异常, 经深圳市海洋监测预报中心现场采样测量, 水色异常为双胞胎沟藻赤潮。因此本文利用水体颜色识别常用方法—色相角算法, 基于HY-1C/D海岸带成像仪(CZI)高分辨遥感影像数据, 识别本次珠江口爆发的双胞胎沟藻赤潮并描述其时空分布。

1 材料与方法

1.1 遥感数据

海洋一号系列卫星用于水色水温探测, 配置光学载荷, 陆海兼顾, 多种空间分辨率、高信噪比、高动态范围与宽刈幅, 于2002年5月、2007年4月、2018年9月、2020年6月分别发射了海洋一号A、B、C、D卫星(HY-1A/1B/1C/1D), 其中海洋一号A卫星为试验星, 海洋一号B卫星为试验业务星, 海洋一号C、D卫星为业务卫星星座。海洋一号A、B卫星载荷为海洋水色水温扫描仪(COCTS)和海岸带成像仪(CZI), 海洋一号C、D卫星在原有海洋水色水温扫描仪、海岸带成像仪配置基础上提升性能, 同时增配了紫外成像仪(UVI)、定标光谱仪(SCS)、船舶自动识别系统(AIS)。海洋一号C、D卫星上下午组网, 增加监

测频率,同时弥补下午无数据的瓶颈(刘建强等, 2020)。

海岸带成像仪有红、绿、蓝、近红外4个通道, 扫面宽幅为 950 km, 空间分辨率优于 50 m, 重访周期 3 d, 主要用于获取海陆交互作用区域的实时图像资料进行海岸带叶绿素、悬浮泥沙等水质监测(Chen et al., 2019; Cai et al., 2020; Huang et al., 2020), 金潮、绿潮、溢油等海洋环境灾害实时监测和预警(沈亚峰等, 2020; 刘锦超等, 2022; 郑龙啸等, 2022)。更多详细载荷参数见表 1。

海洋一号 C/D 卫星(HY-1C/D)海岸带成像仪(CZI)能很好识别赤潮, 自发射以来监测到渤海辽

东湾、东海天津滨海新区、珠江口深圳海域等赤潮现象, 已成为海洋生态环境监测的有力工具。本文利用国家卫星海洋应用中心提供的 L2A 级别的瑞利校正反射率数据(表 2)进行研究。

表 1 海岸带成像仪相关参数

Table 1 Parameters of coastal zone imager

波段	光谱范围/ μm	中心波长/ μm
1	0.42~0.50	0.460
2	0.52~0.60	0.560
3	0.61~0.69	0.650
4	0.76~0.89	0.825

表 2 本文使用的遥感数据

Table 2 Remote sensing data used in this paper

卫星	日期	数据
HY-1C	2020.10.26	H1C_OPER_CZI_L2A_20201026T032509_20201026T032605_11181_10
HY-1D	2020.10.27	H1D_OPER_CZI_L2A_20201027T053429_20201027T053524_01986_10
HY-1C	2020.11.01	H1C_OPER_CZI_L2A_20201101T032502_20201101T032557_11267_10
HY-1D	2020.11.02	H1D_OPER_CZI_L2A_20201102T053358_20201102T053453_02072_10
HY-1C	2020.11.04	H1C_OPER_CZI_L2A_20201104T032457_20201104T032553_11310_10
HY-1D	2020.11.05	H1D_OPER_CZI_L2A_20201105T053341_20201105T053436_02115_10
HY-1C	2020.11.07	H1C_OPER_CZI_L2A_20201107T032454_20201107T032549_11353_10

1.2 基于色相角算法的赤潮检测方法

CIE 1931 色彩空间(International Commission on Illumination 1931 color space)是一个最先采用数学方式来表示颜色的数学模型, 它由国际照明委员会(International Commission on Illumination)于 1931 年创立。在 CIE 色彩空间中, 色度被认为是人类色彩视觉中感知到的 X、Y 和 Z 三刺激值的综合效应(Chen et al., 2020)。通过三刺激值计算色度坐标(x,y)来获得感知色彩(Wang et al., 2018)。如图 1 所示。马蹄形包络线(轨迹)包含所有可能的色度值, 由每个波长的单色光计算的 x 值和 y 值组成。色度图的中心坐标位于 $x = y = z = 1/3$ 处。色相角(hue angle) α 表示色度坐标(x,y)与辐射光谱的夹角。

X、Y、Z 三刺激值可以通过对可见光范围(380~700 nm)内的光谱进行积分, 从高光谱遥感反射率和 CIE 颜色匹配函数中计算出来(Wang et al., 2015)

$$X = \int_{380}^{700} R(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

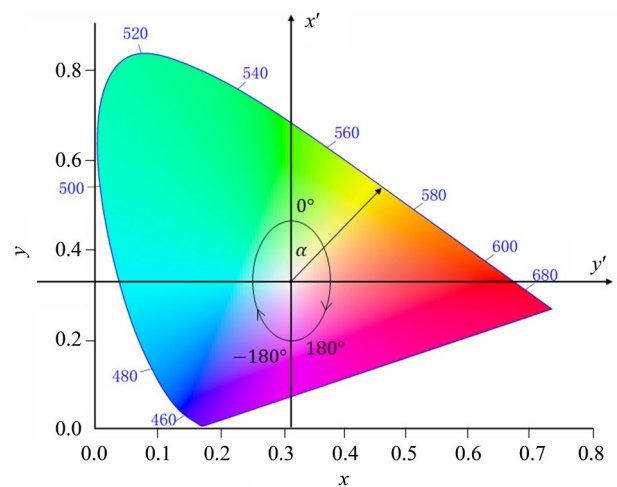


图 1 CIE 1931 色度图

Fig. 1 CIE 1931 chromaticity diagram

$$Y = \int_{380}^{700} R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

$$Z = \int_{380}^{700} R(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

其中 λ 为波长, $R(\lambda)$ 为遥感反射率, $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、

$\bar{z}(\lambda)$ 为CIE颜色匹配函数。

而大多数高空间分辨率光学传感器只有红、绿、蓝3个波段。因此,采用CIE标准RGB转换三刺激值方法,利用红、绿、蓝波段遥感反射率计算CIE三刺激值 X 、 Y 和 Z (Wang et al., 2015)

$$X = 2.768 9R + 1.751 7G + 1.130 2B, \quad (4)$$

$$Y = 1.000 0R + 4.590 7G + 0.060 1B, \quad (5)$$

$$Z = 0.000 0R + 0.056 5G + 5.593 4B, \quad (6)$$

其中 R 为红光波段的遥感反射率, G 为绿光波段的遥感反射率, B 为蓝光波段的遥感反射率。

基于三刺激值 X 、 Y 和 Z 计算色度坐标 (x, y, z) (Wang et al., 2015)

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad (7)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}, \quad (8)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}. \quad (9)$$

利用色度坐标推算色相角坐标系统 (x', y') (Wang et al., 2015)

$$x' = y - \frac{1}{3}, \quad (10)$$

$$y' = x - \frac{1}{3}, \quad (11)$$

计算色相角 α (Wang et al., 2015)

$$\alpha = \left(\text{ARCTAN2} \frac{y'}{x'} \right) \frac{180}{\pi}. \quad (12)$$

1.3 赤潮提取

1.3.1 遥感影像预处理 首先利用影像自带的图像定位信息,通过ENVI软件生成地理位置查找表文件,对遥感影像进行几何校正。然后对影像进行裁剪,选择包含珠江口海域赤潮水体区域的影像,利用影像自带的掩膜文件,去除陆地和云,提取海域信息。

1.3.2 样本选取 从真彩色合成影像(图2)可以看出,伶仃洋沿岸水体呈现亮黄色,因为此处含大量悬浮泥沙,水体反射率高。大部分水体呈现蓝绿色,另一部分水体呈现红褐色。基于目视解译,可将伶仃洋海水分为浑浊水体、干净水体和赤潮水体。从光谱曲线(图3)可以看出,浑浊水体由于高悬浮泥沙浓度,在各波段存在高反射率;干净水体在蓝光波段存在高反射率;赤潮水体在绿、蓝波段反射率均低于浑浊水体和干净水体。

1.3.3 阈值选取 选取2020年11月1日的遥感影像数据,利用公式(4)~(12)分别计算出各类水体的色相角 α 。经图像拉伸处理(图4a)可以看出,高

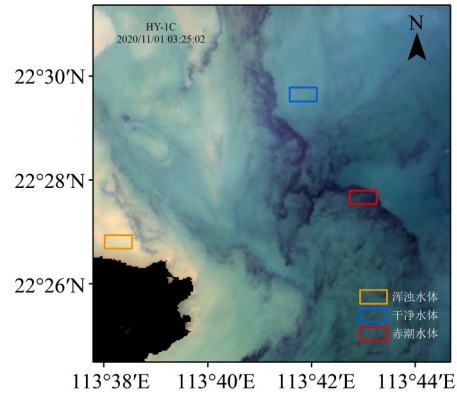


图2 样本示意图

Fig. 2 Schematic diagram of samples

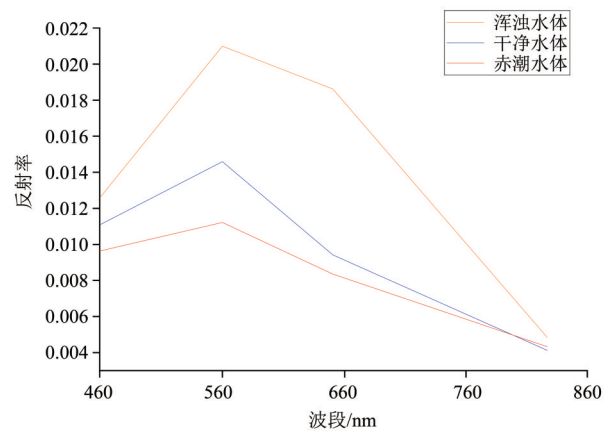


图3 不同水体HY-IC影像遥感反射率光谱

Fig. 3 HY-IC remote sensing reflectance spectra of different waters

值区为浑浊水体和赤潮水体,低值区为干净水体,但是仅利用色相角不能将赤潮水体识别出来。分析发现利用归一化刺激值 z 能够很好识别出浑浊水体。如图4b所示高值区为赤潮水体和干净水体,低值区为浑浊水体。因此通过归一化刺激值 z 和色相角 α 可以将赤潮水体从背景水体(浑浊水体和干净水体)中提取出来。

对样本点进行统计分析,确定赤潮识别阈值。图5a可以看出,浑浊水体的归一化刺激值 z 小于干净水体和赤潮水体,浑浊水体阈值确定为0.29;干净水体的色相角 α 小于赤潮水体,赤潮水体阈值确定为 59.5° (图5b)。因此利用归一化刺激值 z 和色相角 α ,通过阈值分割,建立决策树提取赤潮(图6)。首先,使用公式(4)~(6)计算出三刺激值 X 、 Y 、 Z 。然后通过公式(7)~(9)计算色度坐标 x 和 y 。使用公式(10)~(11)将色度坐标转换为色相角坐标。最后利用公式(11)计算得出色相角 α 。 z 用于确定浑浊水体,当 $z < 0.29$ 时,水体判断为浑浊水

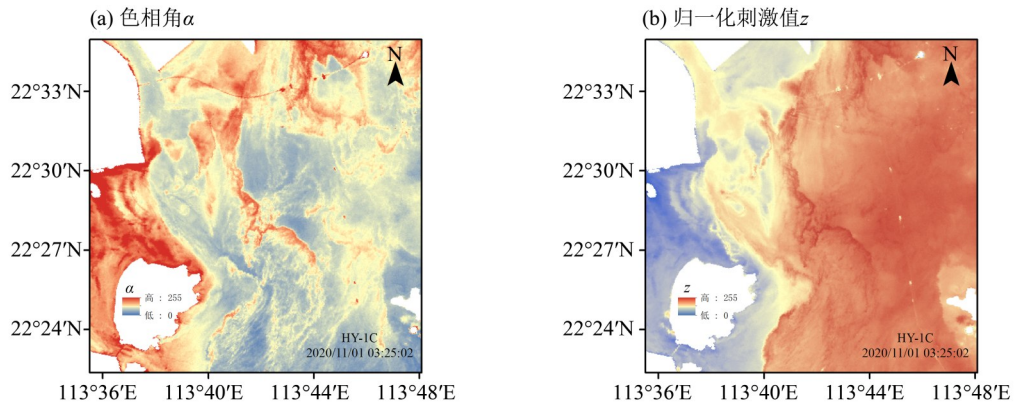


图 4 水体特征值

Fig. 4 Characteristic value of water

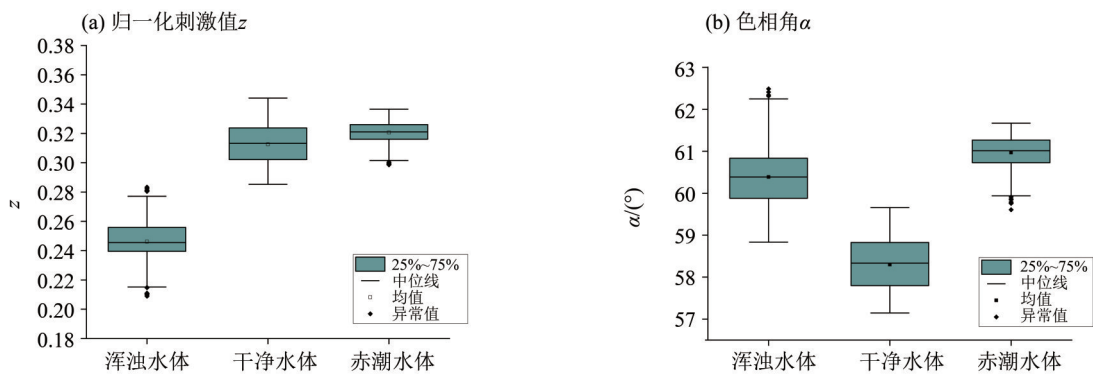


图 5 统计分析

Fig. 5 Statistical analysis

体。最后 α 用于判断赤潮水体，当 $\alpha > 59.5^\circ$ 时，水体为赤潮水体。

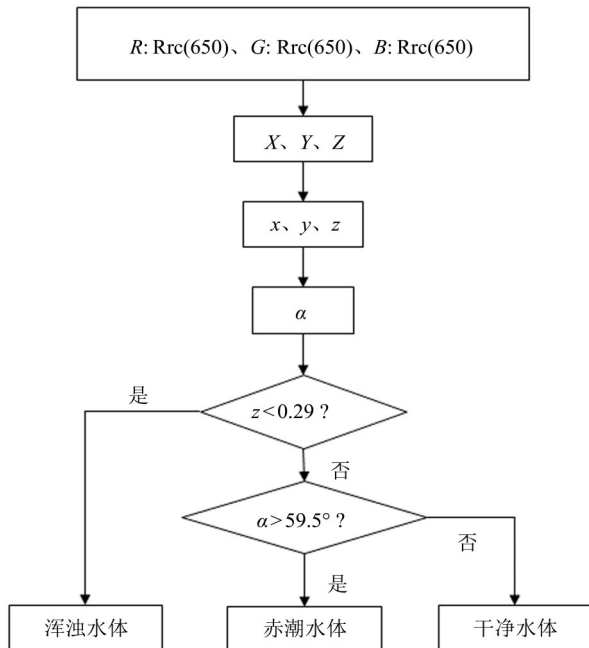


图 6 赤潮识别流程

Fig. 6 Red tide identification process

基于上述流程，对其他影像的赤潮进行识别。在不同影像上，阈值选取存在一定差异(表 3)。海洋一号 C、D 卫星上下午组网观测，在不同观测时间，色相角出现差异。海洋一号 C 卫星影像色相角阈值在 $57.5^\circ \sim 59.8^\circ$ 之间，而海洋一号 D 卫星影像色相角阈值在 $60.5^\circ \sim 61.3^\circ$ 之间。同样，归一化刺激值 z 在不同观测时间也存在一定差异，上午观测数据的归一化刺激值 z 小于下午观测数据的归一化刺激值 z 。由于太阳高度角对于地表的太阳辐照度影响较大，从而影响地表尤其是水体的表观辐亮度，进而影响分割阈值的确定(程玉等, 2021)。此外还与水体中悬浮泥沙含量差异有关。

2 结果与讨论

2.1 赤潮过程

在进行多次试验后，设置动态阈值并结合目视解译对赤潮进行提取，识别了 2020 年秋季珠江口伶仃洋双胞旋沟藻赤潮爆发过程。

2020 年 10 月 26 日 3 时 25 分(UTC)，HY-1C 卫星 CZI 传感器分别监测到深圳机场附近海域和内伶

表3 不同影像阈值
Table 3 Different image thresholds

影像	日期	$z(Z)$	$\alpha(^{\circ})$
HY-1C	10月26日	深圳:0.290	深圳:58.0
		内伶仃岛:0.037(Z)	内伶仃岛:7.5
HY-1D	10月27日	-	深圳: 61.3
		-	内伶仃岛: 61.0
HY-1C	11月1日	0.30	59.0
HY-1D	11月2日	0.34	60.5
HY-1C	11月4日	0.28	59.8
HY-1D	11月5日	0.36	60.5

内伶仃岛东北部海域出现小范围水色异常现象。如图7所示, 赤潮呈现条带状、片状分布, 颜色为红褐色。利用色相角赤潮检测方法, 能够准确识别出赤潮分布。深圳机场附近海域赤潮位于22°32'~22°36' N, 113°43'~113°49' E之间, 内伶仃岛东北部海域赤潮位于22°25'~22°30' N, 113°45'~113°49' E之间。通过遥感定量估算, 深圳机场附近海域赤潮面积约5.15 km², 内伶仃岛东北部海域赤潮面积约3.09 km², 赤潮分布面积很小, 赤潮处在发展阶段。

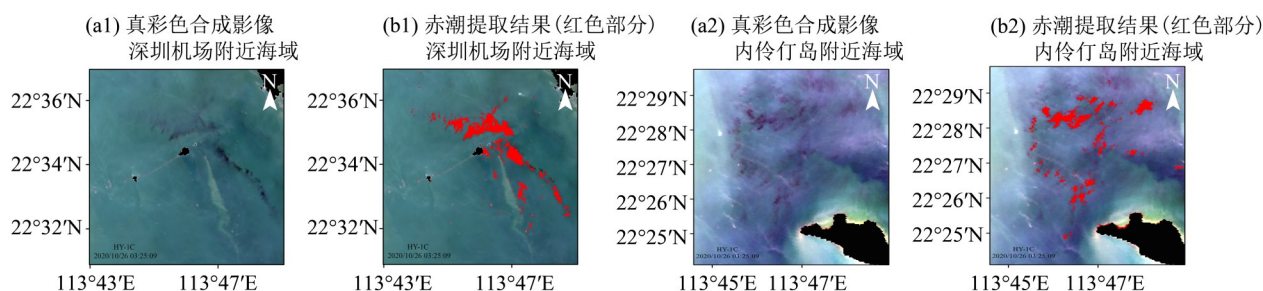


图7 10月26日深圳机场、内伶仃岛附近海域赤潮

Fig. 7 Red tide near Shenzhen Airport and Neilingding Island sea area on October 26

10月27日, 深圳机场附近海域赤潮位于22°34'~22°38' N, 113°45'~113°48' E之间(图8a1、b1), 面积约4.24 km², 较26日赤潮位置稍微偏北, 空间分布形态发生变化, 面积有所减小; 内伶仃岛东北部海域赤潮位于22°26'~22°30' N, 113°45'~113°49' E之间, 面积增至9.65 km²(图8a2、b2)。

从11月1日遥感影像(图9a1、b1)可以看出, 赤潮影响区域明显扩大, 呈大面积连续分布, 面积约348 km², 赤潮处在爆发阶段。赤潮集中在伶仃洋北部和中部, 最北接近虎门, 位于22°40' N海域附近, 最南靠近珠海香洲港东部22°20' N海域。

11月2日在卫星图像上有部分区域被云层覆盖, 晴空区所见赤潮面积约226.07 km², 赤潮向南漂移至22°10' N, 113°40' E附近海域, 位于南部海域赤潮呈线条带状分布(图9a2、b2)。11月4日伶仃洋北部部分区域被云层覆盖, 晴空区所见赤潮面积285.03 km², 赤潮继续向南漂移, 从港珠澳大桥下穿过, 最南到达22° N, 113°30' E附近海域, 南部赤潮呈现细长条带状分布(图9a3、b3)。11月5日赤潮影响区域较前一天变化不大, 南部赤潮出现消散, 所见赤潮面积288.26 km², 赤潮处在消亡阶段(图9a4、b4)。11月7日卫星图像上已经看不到赤潮特征信息(图10)。

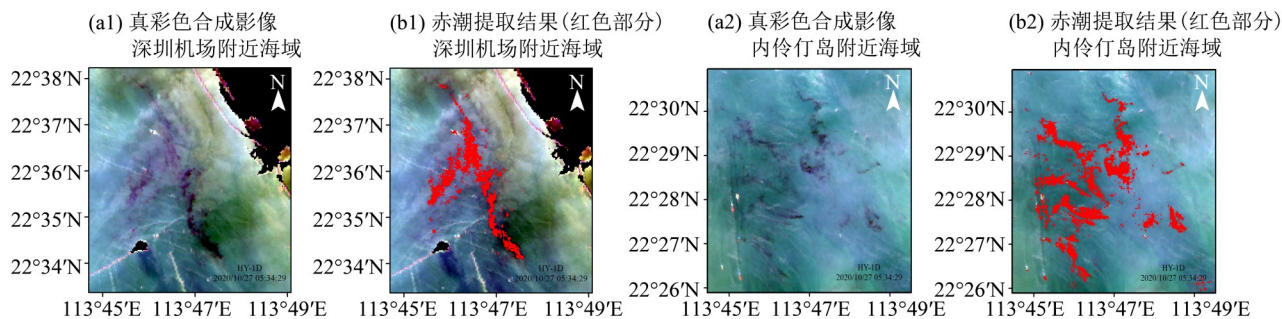


图8 10月27日深圳机场、内伶仃岛附近海域赤潮

Fig. 8 Red tide near Shenzhen Airport and Neilingding Island sea area on October 27

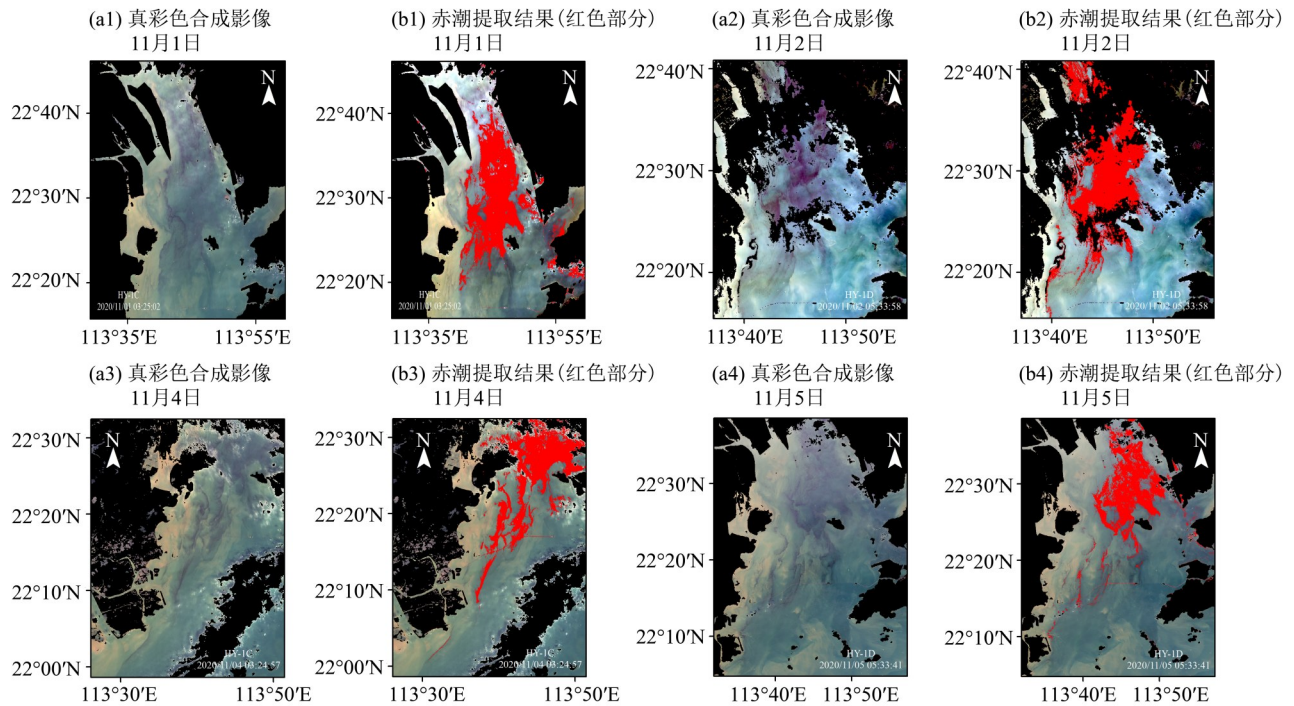


图9 伶仃洋赤潮

Fig. 9 Red tide in Lingdingyang Bay

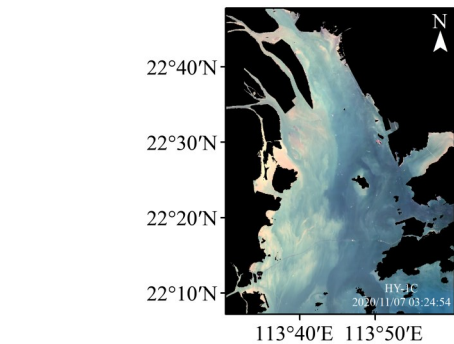


图10 11月7日伶仃洋海域真彩色合成影像

Fig. 10 True color composite image of Lingdingyang Bay on November 7

2.2 讨论

从真彩色遥感影像可以看出, 此次双胞旋沟藻赤潮爆发导致海水变色, 使水体呈红褐色。而非赤潮水体, 如干净水体呈蓝绿色, 浑浊水体呈黄色。因此可以利用常用水体颜色分类方法, 通过色相角设置阈值来识别赤潮。许多学者通过色相角将遥感反射率与水体颜色联系起来, 进行水体分类和识别水色异常 (Woerd et al., 2015; Zhao et al., 2020)。由于珠江口接收来自上游珠江三角洲地区的大量径流以及泥沙, 水体光学性质复杂, 特别是悬浮泥沙会干扰赤潮识别。因此通过 z 设置阈值来排除悬浮泥沙的干扰。

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, 这会对赤潮识别形成干扰 (刘锦超等, 2022)。根据识别结果发现 (图 11), 在深圳湾出现赤潮误判情况。通过谷歌地球影像和资料判断, 在深圳湾海域有大面积蚝排分布。另外在香港沿岸同样出现赤潮误判情况, 结合国家卫星海洋应用中心相关资料可以看出, 该区域被云块和薄云覆盖, 虽然已经利用影像自带的掩膜文件来去除云的影响, 但难以消除薄云的影响。

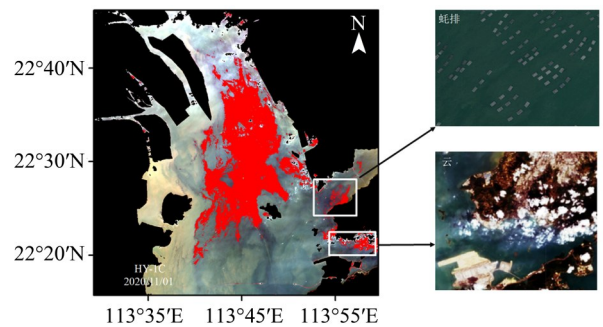


图11 赤潮干扰信息判断

Fig. 11 Judgment of red tide disturbance information

利用MODIS、GOCI等遥感数据, 许多学者采用叶绿素阈值法、赤潮指数、波段比值法等监测渤海、黄海和东海等海域赤潮。由于不同传感器波段设置存在差异和空间分辨率以及水体空间质

异性,上述方法并不能直接应用于基于HY-1C/D遥感影像的珠江口精细化赤潮监测,需要结合实测数据进行大量研究以选择最佳波段和参数。本研究基于HY-1C/D卫星高分辨率遥感影像,结合目视解译,利用色相角能够很好识别出珠江口海域的双胞旋沟藻赤潮。与Liu et al.(2022)研究不同的是,本文利用了真彩色合成波段(红、绿、蓝)遥感数据而非假彩色合成波段(近红外、红、蓝)遥感数据。

本文的赤潮识别方法中,采用了460、560、650 nm波段的遥感反射率作为颜色的蓝、绿、红分量进行计算,这在CIE标准比色体系中是不精确的。在CIE标准比色系统中,R、G和B分量是在整个可见光光谱上进行综合反射的结果(van der Woerd et al., 2018)。因此利用单个蓝光、绿光和红光波段的遥感反射率计算出的色相角会出现偏

差,需要进一步进行校正,但是本文研究结果为基于高分辨率遥感影像的精细化赤潮识别提供一定参考价值。

3 结 论

本研究利用水体的色相角,通过阈值分割对珠江口海域HY-1C/D高分辨率遥感影像赤潮进行识别,并定量估算其面积,得出以下结论:

1) 基于HY-1C/D卫星高分辨率遥感影像,结合目视解译,利用色相角能够很好识别出珠江口海域的双胞旋沟藻赤潮,特别是对形成初期的小范围赤潮、低密度赤潮、条带状赤潮具有很好的识别效果。

2) 珠江口水体光学性质复杂,以及水体接受到的太阳辐射存在差异,通过设置动态阈值来识别赤潮,赤潮水体的色相角在 $58^{\circ}\sim 61^{\circ}$ 变化。

参考文献:

- 程玉,张圣佳,李金宇,等,2021.基于GOCI的渤海海域赤潮信息遥感监测与分析[J].山东科技大学学报(自然科学版),40(4):11-20.
- 李光毅,刘保清,邱勇,等,2022.链状裸甲藻赤潮消亡过程及其与休眠包囊关系的初步研究[J].海洋学报,44(8):123-132.
- 李敬虎,邢前国,郑向阳,等,2022.基于深度学习的无人机影像夜光藻赤潮提取方法[J].计算机应用,42(9):2969-2974.
- 李仁虎,2020.浙江海域赤潮时空分布特征与赤潮监测研究[D].上海:上海海洋大学.
- 李阳东,李仁虎,常亮,2020.基于GOCI数据的浙江沿海赤潮监测[J].生态环境学报,29(8):1617-1624.
- 刘建强,曾韬,梁超,等,2020.海洋一号C卫星在自然灾害监测中的应用[J].卫星应用,6:26-34.
- 刘锦超,刘建强,丁静,等,2022.HY-1C卫星CZI载荷的黄海绿潮提取研究[J].海洋学报,44(5):1-11.
- 吕颂辉,岑竞仪,王建艳,等,2019.我国近海米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)藻华发生概况、危害及其生态学机制[J].海洋与湖沼,50(3):487-494.
- 庞勇,裴瑞,吕颂辉,2015.珠江口双胞旋沟藻 *Cochlodinium geminatum* 赤潮生消过程的环境特征初步分析[J].生态环境学报,24(2):286-293.
- 沈亚峰,刘建强,丁静,等,2020.海洋一号C星光学载荷对海面溢油的识别能力分析[J].遥感学报,24(8):933-944.
- 宋德彬,2019.基于多源数据的黄渤海藻类灾害时空分布及对策研究[D].烟台:中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所).
- 吴霓,江涛,江天久,等,2013.珠江口海域双胞旋沟藻赤潮对卤虫幼体、鱼苗和虾苗的急性毒性[J].水产学报,37(9):1328-1333.
- 张涛,苏奋振,杨晓梅,等,2009.MODIS遥感数据提取赤潮信息方法与应用——以珠江口为例[J].地球信息科学学报,11(2):244-249.
- 郑龙啸,吴孟泉,赵杰,等,2022.南黄海金潮的遥感监测及时空分布特征研究[J].海洋学报,44(5):12-24.
- BLONDEAU-PATISSIER D, GOWER J F R, DEKKER A G, et al, 2014. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans[J]. Prog Oceanogr, 123: 123-144.
- CAI L N, ZHOU M R, LIU J Q, et al, 2020. HY-1C observations of the impacts of islands on suspended sediment distribution in Zhoushan coastal waters, China [J]. Remote Sens, 12(11): 1766.
- CHEN Q, HUANG M T, TANG X D, 2020. Eutrophication assessment of seasonal urban lakes in China Yangtze River Basin using Landsat 8-derived Forel-Ule index: A six-year (2013-2018) observation [J]. Sci Total Environ, 745: 135392.
- CHEN X Y, ZHANG J, TONG C, et al, 2019. Retrieval algorithm of chlorophyll-a concentration in turbid waters from satellite HY-1C coastal zone imager data [J]. J

- Coast Res, 90(S1): 146–155.
- GUAN W B, BAO M, LOU X L, et al, 2022. Monitoring, modeling and projection of harmful algal blooms in China [J]. Harmful Algae, 111: 102164.
- HUANG S Y, LIU J Q, CAI L N, et al, 2020. Satellites HY-1C and landsat 8 combined to observe the influence of bridge on sea surface temperature and suspended sediment concentration in Hangzhou Bay, China [J]. Water, 12 (9): 2595.
- LIU L S, ZHOU J, ZHENG B H, et al, 2013. Temporal and spatial distribution of red tide outbreaks in the Yangtze River Estuary and adjacent waters, China [J]. Mar Pollut Bull, 72(1): 213–221.
- LIU R J, XIAO Y F, MA Y, 2022. Red tide detection based on high spatial resolution broad band optical satellite data [J]. ISPRS J Photogramm Remote Sens, 184: 131–147.
- LUO X L, HU C M, 2014. Diurnal changes of a harmful algal bloom in the East China Sea: Observations from GOCI [J]. Remote Sens Environ, 140: 562–572.
- TAO B Y, MAO Z H, LEI H, et al, 2015. A novel method for discriminating *Prorocentrum donghaiense* from diatom blooms in the East China Sea using MODIS measurements [J]. Remote Sens Environ, 158: 267–280.
- van der WOERD H, WERNAND M, 2018. Hue-angle product for low to medium spatial resolution optical satellite sensors [J]. Remote Sens, 10(2): 180.
- WANG G L, ZHANG B, LI J S, et al, 2011. Study on monitoring of red tide by multi-spectral remote sensing based on HJ-CCD and MODIS [J]. Procedia Environ Sci, 11: 1561–1565.
- WANG S L, LI J S, SHEN Q, et al, 2015. MODIS-based radiometric color extraction and classification of inland water with the forel-ule scale: A case study of Lake Taihu [J]. IEEE J Sel Top Appl Earth Obs Remote Sens, 8(2): 907–918.
- WANG S L, LI J S, ZHANG B, et al, 2018. Trophic state assessment of global inland waters using a MODIS-derived Forel-Ule index [J]. Remote Sens Environ, 217: 444–460.
- WOERD H J, WERNAND M R, 2015. True colour classification of natural waters with medium-spectral resolution satellites: SeaWiFS, MODIS, MERIS and OLCI [J]. Sensors, 15(10): 25663–25680.
- XU X H, PAN D L, MAO Z H, et al, 2014. A new algorithm based on the background field for red tide monitoring in the East China Sea [J]. Acta Oceanol Sin, 33(5): 62–71.
- ZHAO X, LIU R J, MA Y, et al, 2021. Red tide detection method for HY-1D coastal zone imager based on U-net convolutional neural network [J]. Remote Sens, 14(1): 88.
- ZHAO Y L, SHEN Q, WANG Q, et al, 2020. Recognition of water colour anomaly by using hue angle and sentinel 2 image [J]. Remote Sens, 12(4): 716.
- ZOHDI E, ABBASPOUR M, 2019. Harmful algal blooms (red tide): A review of causes, impacts and approaches to monitoring and prediction [J]. Int J Environ Sci Technol, 16(3): 1789–1806.

(责任编辑 张 冰)