第 39 卷第 3 期
2020 年 6 月

海 洋 环 境 科 学
MARINE ENVIRONMENTAL SCIENCE

Vol. 39 No. 3
June 2020

渤海赤潮遥感监测方法比较研究

姜德娟[1]， 王 昆[2]， 夏 云[1,3]

(1. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室，中国科学院烟台海岸带研究所，山东 烟台 264003; 2. 中国科学院空天信息创新研究院，数字地球重点实验室，北京 100094; 3. 青岛大学 化学化工学院，山东 青岛 266071)

摘 要: 渤海是我国赤潮重灾区，近年来赤潮灾害频发且呈加剧趋势。有效监测渤海赤潮的发生、发展及消亡过程具有重要意义。本研究基于 MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer) 数据，比较分析了叶绿素浓度异常法、赤潮指数、波段比值法、红波段差值法、*Karenia brevis* 指数等 5 种方法对渤海赤潮遥感监测的有效性。结果表明: 5 种方法均能有效监测到天津滨海旅游区附近海域的赤潮，不仅提取的范围与赤潮发生的最大面积相符，而且空间分布也一致。然而，由 5 种方法提取的秦皇岛附近海域的赤潮信息却表现出明显的差异，其中由叶绿素浓度异常法和波段比值法对赤潮信息的提取结果相对较为合理。因此，无论采用哪种方法进行赤潮监测，均需结合实地调查数据或 ERGB(enhanced red-green-blue) 影像等资料对不同时间、不同区域发生的赤潮的监测结果进行证实。

关键词: 赤潮; 遥感监测; 方法比较; 渤海

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-6336(2020) 03-0460-08

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2020.03.021

Comparative studies on remote sensing techniques for red tide monitoring in Bohai Sea

JIANG De-juan[1]， WANG Kun[2]， XIA Yun[1,3]

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. Key laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China)

Abstract: In Bohai Sea, one of the red-tide worst-hit areas of China, the red-tide disasters occurred frequently and aggravated in recent years. Effectively monitoring the processes of the red tide from happening to extinction is of great significance for Bohai Sea. Based on MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) data, five methods including the chlorophyll concentration anomalies, the red tide index, the Rrs band ratio method, the red band difference, the *Karenia brevis* bloom index have been comparatively analyzed to examine their availability for red tide extraction in Bohai Sea. The results showed that these five methods could effectively extract the red tide information in the offshore area of Tianjin Binhai tourism area. Not only the range but also the spatial distribution of remote sensing detection agreed with the fact. In contrast, the red tide extraction by these five methods indicated a distinct difference in the offshore area of Qinhuangdao area, which was relatively reasonable for the chlorophyll concentration anomalies and the band ratio method. However, no matter what the method was used, the field survey data or ERGB (enhanced red-green-blue) composite was necessarily combined to validate the performance of red tide extraction at different times or in different regions.

Key words: red tide; remote monitoring; method comparison; Bohai Sea

收稿日期: 2018-10-22，**修订日期:** 2018-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671473) ; 中国科学院战略性先导科技专项(XDA11020305)

作者简介: 姜德娟(1979-) ，女，山东日照人，副研究员，博士，主要研究方向为海岸带环境与水文过程模拟、水文遥感，E-mail: djjiang@yic.ac.cn

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

渤海是我国北方的天然渔场,是重要的鱼虾蟹生息场所,生态价值十分突出。近年来,随着环渤海地区经济的高速发展及海洋资源的大力开发利用,渤海生态环境遭受较大破坏,水环境质量恶化,水体富营养化严重,赤潮灾害频繁发生,给海洋生物造成严重威胁,甚至危害人类健康,已成为我国赤潮重灾区。据宋南奇等[1]的统计分析表明,1952 年—2016 年期间,渤海共发生赤潮 189 次,其中影响面积超过 1000 km^2 的有 21 次;21 世纪以来,渤海赤潮发生频率明显增加,分布范围更加广泛,且逐步由近岸海域向渤海中部扩散;6 月—8 月是渤海赤潮发生的主要时间段,占全年赤潮发生次数的比例达 69%。区域上,秦皇岛附近海域、天津附近海域、辽东湾西部海域是渤海赤潮发生的主要海域。尤其是秦皇岛附近海域,赤潮灾害频发且严重,仅 2001 年—2014 年发生的赤潮灾害就达 43 次,累计影响面积约 1.5 万 km^2,给秦皇岛近岸海域水体环境、生态安全和经济发展造成严重危害,如 2010 年发生的赤潮灾害导致的直接经济损失达 2.05 亿元[2-3]。因此,对渤海赤潮的发生、发展和消亡过程进行有效监测具有重要意义。

卫星遥感技术为赤潮的快速同步、空间大范围、高频率连续监测提供了重要手段[4-7]。赤潮发生时,赤潮生物大量聚集,水体颜色发生改变,其光谱特性也发生相应变化,遥感手段能探测到这些变化,因而可用于赤潮监测[8]。当前使用的主要传感器有 MODIS(moderate resolution imaging spectroradiometer)、SeaWIFS(sea-viewing wide field-of-view sensor)、MERIS(medium resolution imaging spectrometer)、GOCI(geostationary ocean color imager)等,其中 MODIS 产品因时间序列长、时空分辨率较高而得到了更多的应用。常用的赤潮监测方法有叶绿素浓度法、波段比值法、归一化荧光高度法(normalized fluorescence line height, nFLH)法、赤潮指数等[8-9]。不同方法在不同海域的适用性存在显著差异,即使相同方法在不同区域也会有所不同,甚至同一方法在同一海域也会随时间发生变化,因此,对赤潮的监测应采用合适的方法,而且通常有必要结合实地调查数据或赤潮历史记录等资料对遥感监测结果进行证实。其中在渤海,王其茂等[10]采用波段比值法成功提取了辽东湾和黄河口 2002 年 6 月和 2004 年 5 月的赤潮信息,Zhang 等[11]应用赤潮指数法对渤海 2014 年的赤潮发生及动态进行了遥感监测。究竟哪种方法更适用于渤海赤潮的监测?针对该问题,本研究比较分析 5 种方法对渤海赤潮遥感监测的有效性,以期为渤海赤潮的预测和防治提供科学依据和技术支持。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

渤海三面环陆,由辽东湾、渤海湾、莱州湾、中部海域和渤海海峡 5 部分组成(图 1),海域面积约 7.7×10^4 km^2,平均水深 18 m,是我国唯一的半封闭式内海,水交换能力、扩散能力和稀释能力都较差。渤海周边有 40 余条河流汇入,每年平均径流量约 792 亿 m^3,较大的河流有黄河、海河、辽河和滦河等,其中,黄河是渤海最大的入海河流,年径流量约 300 亿 m^3。环渤海地区经济发达,是我国东部沿海三大经济圈之一,人类活动十分强烈,如工业污水大量排放、农业化肥过量施用、人口及生活污水不断增加、入海径流量大幅下降等,严重威胁着渤海的生态与环境质量。由《中国海洋环境质量公报》和《北海区海洋环境公报》显示,渤海近岸海域水环境污染严重,水质劣于第四类海水水质标准,主要超标物质为无机氮和活性磷酸盐等。其中,莱州湾、渤海湾、辽东湾及其他近岸海域水体富营养化严重,赤潮灾害频繁发生。

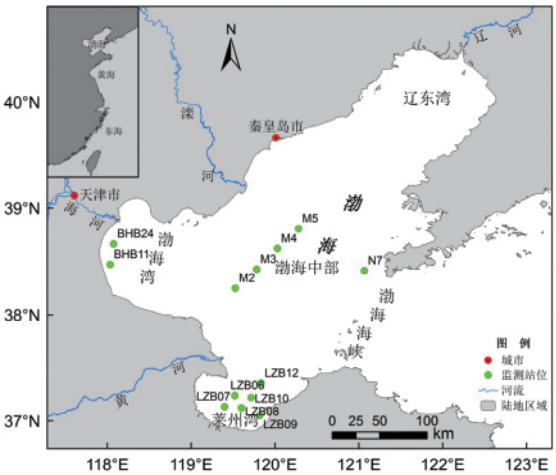

图 1　渤海位置示意图及叶绿素浓度在线监测站位

Fig. 1 Location map of Bohai sea and in-situ measurements of Chl *a* concentration

1.2　数据

本文应用的遥感数据为 NASA(National Aero-

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

nautics and Space Administration) Oceancolor 网站(http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/)下载的 MODIS Aqua 二级产品,时间为渤海赤潮频发且严重的 2014 年 5 月—10 月。该产品含有 10 个波段(412 nm、443 nm、469 nm、488 nm、531 nm、551 nm、555 nm、645 nm、667 nm、678 nm)的反射率(Rrs,/sr)、归一化荧光基线高度[nFLH,W/(m^2·μm·sr)]、叶绿素浓度(Chl,mg/m^3,OC3M 算法)等信息,时间和空间分辨率分别为 1 d 和 1 km。

本文采用的实地调查资料来自中国科学院战略性先导专项"热带西太平洋海洋系统物质能量交换及其影响"课题—"外海输入对渤海生态系统的影响"实施的渤海 2014 年夏季(8 月 11 日—9 月 6 日)综合调查航次,其中,叶绿素浓度采用 CTD 中的 WET Labs ECO-AFL 荧光传感器现场测定[12]。

渤海赤潮历史资料(表 1)主要来自国家海洋局发布的《2014 年中国海洋灾害公报》和北海分局发布的《2014 年北海区海洋灾害公报》。

表 1 渤海 2014 年主要赤潮历史记录

Tab. 1 Historic records of major red tides in Bohai Sea for the period of 2014

序号	起止时间	发现海域	最大面积/km^2	赤潮优势种
1	2014-05-30—2014-06-13	辽东湾东部海域	110	夜光藻
2	2014-06-11—2014-06-15	河北秦皇岛近岸海域	228	夜光藻、微小原甲藻
3	2014-09-13—2014-09-17	渤海中部海域	400	米氏凯伦藻
4	2014-05-15—2014-08-07	河北秦皇岛近岸海域	2000	抑食金球藻
5	2014-08-26—2014-09-25	天津滨海旅游区附近海域	300	离心列海链藻、多环旋沟藻、叉状角藻

1.3 研究方法

1.3.1 研究方法概述

比较分析叶绿素浓度异常法、赤潮指数(MODIS red tide index,*MRI*)、*Rrs* 波段比值法、红波段差值法(red band difference,*RBD*)、*RBD_KBBI*(*Karenia brevis* bloom index)等 5 种方法或指标对渤海赤潮遥感监测的有效性。这些方法相对比较成熟,已在国内外得到较多应用。本研究在应用上述 5 种方法对赤潮信息进行提取时,主要参考 ERGB(enhanced red-green-blue)影像(由 MODIS 547 nm、488 nm 和 443 nm 三个波段的反射率合成)以及赤潮历史记录(表 1)对其阈值进行确定。其中,ERGB 影像对区分赤潮水体和其他水体具有较好的可行性[4-5,8],赤潮历史记录则代表赤潮空间分布及范围的真实情况。另外,以往研究认为 nFLH 法在赤潮监测方面具有独特的优势[13]。本文也尝试采用 nFLH 法对渤海赤潮信息进行提取,然而提取结果与赤潮历史资料、ERGB 影像及其他方法的提取结果严重不符。可能因为受总悬浮泥沙(TSS)和有色可溶性有机物(CDOM)等成分的影响,nFLH 的高值可能是由悬浮颗粒的弹性散射而非仅叶绿素荧光引起的[8],因此,在海岸带浑浊水体中应用 nFLH 法监测赤潮易造成假性判定[14]。

1.3.2 叶绿素浓度异常法

叶绿素浓度是表征赤潮最主要的特征参数,当 Chl *a* 浓度变化超过一定阈值时,可能是赤潮发生的一个标志[9,15],因此,Chl *a* 浓度异常法在海洋赤潮监测方面得到了较多应用(如陈曦等[9]、Zhao 等[16])。然而,受 TSS 和 CDOM 等成分的影响,遥感反演的 Chl *a* 浓度通常被过高估算[4,16-17],因此,该方法在近岸 II 类水体中的应用存在一定缺陷,但结合 ERGB 影像有助于区分赤潮水体和其他水体[4-5,8]。

于堃等[18]的研究表明,NASA Clark 三通道算法对渤海表层水体叶绿素浓度的反演结果较为准确,其计算公式如下:

$$C = 5.56 \times \{(nLw_{443} + nLw_{531}) / nLw_{550}\}^{-2.252} \quad (1)$$

式中:C 为叶绿素浓度(mg/m^3);nLw_{443}、nLw_{531} 和 nLw_{550} 分别是 443 nm 波段、531 nm 波段和 550 nm 波段的归一化离水辐亮度[W/(m^2·μm·sr)]。在具体计算过程中,公式中的 550 nm 波段采用 MODIS 的 551 nm 波段代替。

所有波段的归一化离水辐亮度(nLw)均根据每个波段(λ)的平均日地距离大气层外太阳辐照度(F_0)与遥感反射率(Rrs)的乘积进行计算,计算公式如下:

$$nLw(\lambda) = Rrs(\lambda) * F_0(\lambda) \quad (2)$$

1.3.3 赤潮指数(*MRI*)

本文应用的赤潮指数(*MRI*)是由 Kim 等[19]基于 MODIS 数据提出的有助于赤潮监测的一个指数,该指数能增强赤潮水体和周边水体之间的差异,因而可用于赤潮的判定,其计算公式如下:

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$MRI = (nLw_{551} - nLw_{488}) / (nLw_{551} + nLw_{488}) \quad (3)$$

式中：nLw_{551} 和 nLw_{488} 分别是 551 nm 波段和 488 nm 波段的归一化离水辐亮度［W/(m^2·μm·sr)］。

1.3.4　波段比值法

波段比值法是由王其茂等[10]基于 MODIS 数据建立的赤潮监测方法。MODIS 555 nm 波段(绿波段)中含有赤潮水体的反射信息，469 nm 波段(蓝波段)中含有赤潮水体的吸收信息，利用这两个波段的比值可以提取海洋水体中的赤潮信息，其计算公式如下：

$$Rrs_{555} / Rrs_{469} > C_r \quad (4)$$

式中：Rrs_{555} 和 Rrs_{469} 分别为 555 nm 波段和 469 nm 波段的遥感反射率(sr^{-1})；C_r 为常数，其值大小与发生赤潮的海域和赤潮藻相关。C_r 阈值的选取主要凭借经验，因此在应用该方法时结合 ERGB 影像或其他参数进行赤潮的判别。

1.3.5　红波段差值法(*RBD*)

RBD 是由 Amin 等[20]基于 *dinolflagellate* 水华的高荧光属性提出的一种赤潮遥感监测方法，其计算公式如下：

$$RBD = nLw_{678} - nLw_{667} \quad (5)$$

式中：nLw_{678} 和 nLw_{667} 分别是 678 nm 波段和 667 nm 波段的归一化离水辐亮度［W/(m^2·μm·sr)］。

1.3.6　*RBD_KBBI*

RBD_KBBI 是由 Amin 等[21]在 *RBD* 基础上提出的赤潮监测指标。Amin 等[21]研究发现，当 $RBD > 0.15$ W/(m^2·μm·sr) 且 $KBBI > 0.3 \times RBD$，可成功监测墨西哥湾的 *Karenia brevis* 水华；Soto 等[8]研究则认为，当 $RBD \geqslant 0.15$ W/(m^2·μm·sr) 且 $KBBI \geqslant 0.2 * RBD$，能有效监测西佛罗里达近岸水体的 *Karenia brevis* 水华。其中，*KBBI* 的计算公式如下：

$$KBBI = (nLw_{678} - nLw_{667}) / (nLw_{678} + nLw_{667}) \quad (6)$$

2　结果与讨论

2.1　基于叶绿素浓度异常法的赤潮监测

图 2 为渤海 2014 年夏季调查航次不同站位的叶绿素浓度实测值以及对应位置同一时间(相差不超过 6 h)由 OC3M 和 Clark 算法估算的叶绿素浓度值。由图可见，OC3M 算法对渤海叶绿素浓度的估算相对过高，而 Clark 算法的估算结果与实测值比较接近(图 2)，因此本文基于 Clark 算法的估算结果对渤海赤潮信息进行提取。根据渤海 Chl *a* 浓度的空间分布和 ERGB 影像，选取 5 mg/m^3 的叶绿素浓度值作为赤潮监测的阈值，由此提取的 2014 年 9 月 3 日天津滨海旅游区附近海域(在渤海主要赤潮爆发的区域，该日该区域的影像质量相对较好、缺失数据相对较少)的赤潮范围为 316 km^2(表 2)，与实际报道的赤潮最大面积(300 km^2)(表 1)基本相符。而且，由图 3 可见，遥感提取的赤潮空间分布与 ERGB 影像的深色区域对应较好，说明基于 Clark 算法的 5 mg/m^3 的 Chl *a* 浓度阈值法对天津滨海旅游区附近海域赤潮信息的提取比较合理。之前我们将 16 mg/m^3 的叶绿素浓度作为渤海赤潮信息提取的阈值，是因为采用的 Chl *a* 浓度数据是未验证的 OC3M 算法的估算结果，其数值相比渤海实测值较高，但该研究关注更多的是渤海赤潮过程及其与低氧区间的关系，因此认为估算误差可以忽略不考虑[22]。

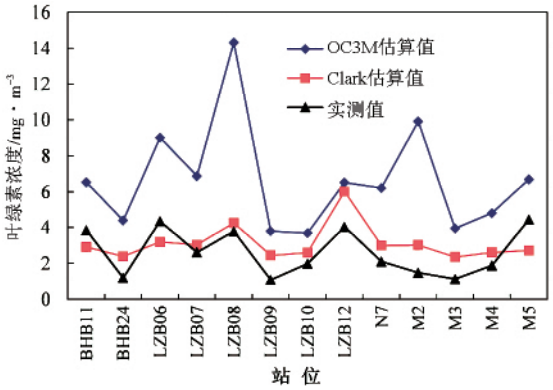

图 2　2014 年夏季渤海不同站位叶绿素浓度实测值及对应位置的遥感估算值

Fig. 2　Field observed and remote sensing estimated Chl *a* concentration at different stations of Bohai Sea in the summer of 2014

2.2　基于 *MRI* 的赤潮监测

根据渤海 *MRI* 值的空间分布和 ERGB 影像，确定 *MRI* 阈值为 0.31 对天津滨海旅游区附近海域 2014 年 9 月 3 日的赤潮进行提取，由此提取的赤潮范围为 289 km^2(表 2，图 4)，比较接近该海域赤潮实际发生的最大面积，说明 *MRI* 也可用于天津滨海旅游区附近海域的赤潮监测。Zhang 等[11]基于 GOCI 数据应用由 Ahn 和 Shanmugam[23]提出的赤潮指数也有效监测到渤海

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2014 年 5 月发生的赤潮，但所提取的赤潮范围比实际面积大很多。不过 Zhang 等[11] 认为研究的重点是秦皇岛附近海域赤潮随时间的动态变化过程而非数值大小，因此算法误差可以忽略不考虑。

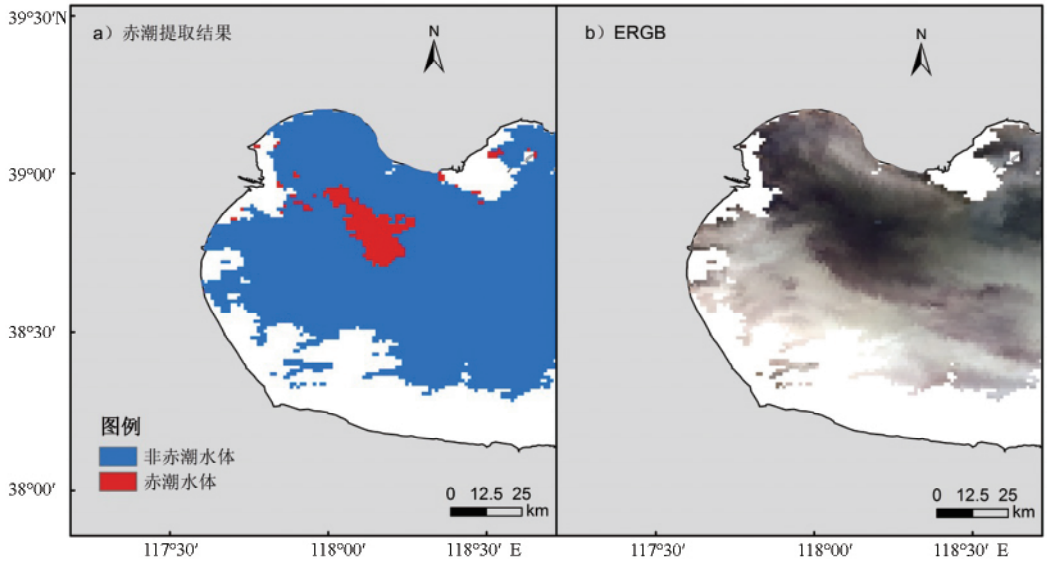

图 3 基于叶绿素浓度异常法的 2014 年 9 月 3 日天津滨海旅游区附近海域赤潮提取结果(a) 和 ERGB 影像(b)

Fig. 3 Red tide information extraction based on the threshold of chlorophyll-*a* concentration (a) and ERGB composite (b) in the offshore area of Tianjin Binhai tourism area on Septermber 3, 2014

表 2 本研究应用的赤潮监测方法及对渤海赤潮信息的提取

Tab. 2 Red tide detection techniques and their extraction areas in Bohai Sea for this study

赤潮监测方法	阈 值	赤潮提取面积/km²	
		天津滨海旅游区附近海域 (2014 年 9 月 3 日)	秦皇岛附近海域 (2014 年 5 月 26 日)
叶绿素浓度异常法[9,10]	5 mg·m⁻³	316	1448
MRI[19]	0.31	289	5481
Rrs 波段比值法[10]	2.55	274	3085
RBD[8,20]	0.3 W·(m²·μm·sr)⁻¹	266	4106
KBBI[8,21]	0.05	302	4176

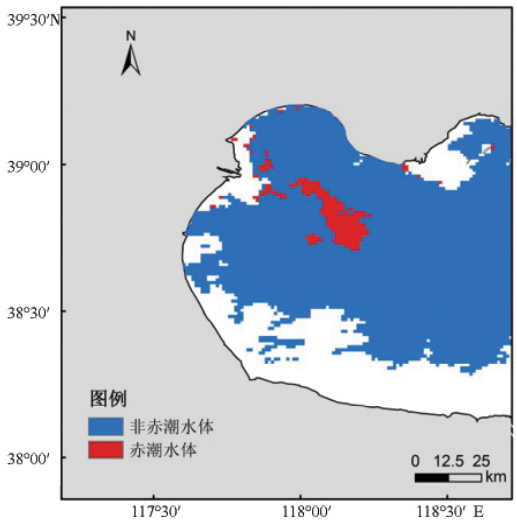

图 4 基于 *MRI* 的赤潮提取结果

Fig. 4 Red tide information extraction based on the threshold of *MRI*

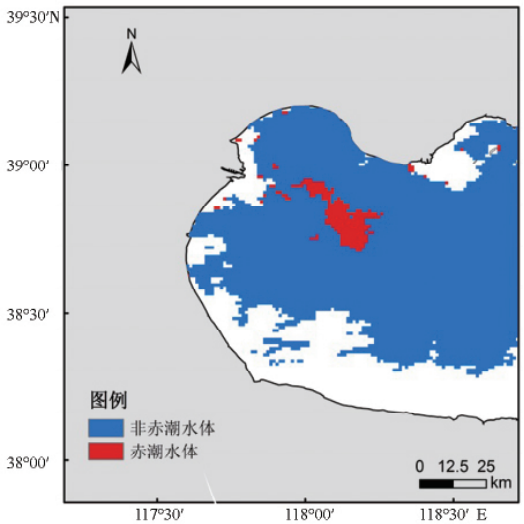

图 5 基于 *Rrs* 波段比值法的赤潮提取结果

Fig. 5 Red tide information extraction based on the *Rrs* band ratio method

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.3　基于波段比值法的赤潮监测

参考渤海赤潮历史记录及 ERGB 影像,将赤潮发生时的蓝绿波段 *Rrs* 比值设为 2.55,由此提取的 2014 年 9 月 3 日天津滨海旅游区附近海域的赤潮面积为 274 km^2(图 5,表 2),与赤潮实际最大面积相近,说明 *Rrs* 波段比值法比较适用于该海域的赤潮监测。

2.4　基于 *RBD* 的赤潮监测

Soto 等[8] 和 Amin 等[20] 应用 *RBD* [阈值为 0.15 W/(m^2·μm·sr)] 分别监测到西佛罗里达近岸水体的 *Karenia brevis* 水华和墨西哥湾、蒙特雷湾、东中国海等海域的 *dinolflagellate* 水华。但由该阈值提取的天津滨海旅游区附近海域 2014 年 9 月 3 日的赤潮面积为 541 km^2,远远超出赤潮实际发生的最大面积,因此,认为 *RBD* 为 0.15 W/(m^2·μm·sr) 的阈值并不适用于渤海赤潮的监测。根据渤海 *RBD* 值的空间分布和 ERGB 影像,确定 *RBD* 阈值为 0.3 W/(m^2·μm·sr) 对渤海赤潮信息进行提取,由此计算的天津滨海旅游区附近海域的赤潮面积为 266 km^2(图 6,表 2),与赤潮实际发生面积相近。因此,认为 *RBD* 为 0.3 W/(m^2·μm·sr) 的阈值比较适用于天津滨海旅游区附近海域的赤潮监测。

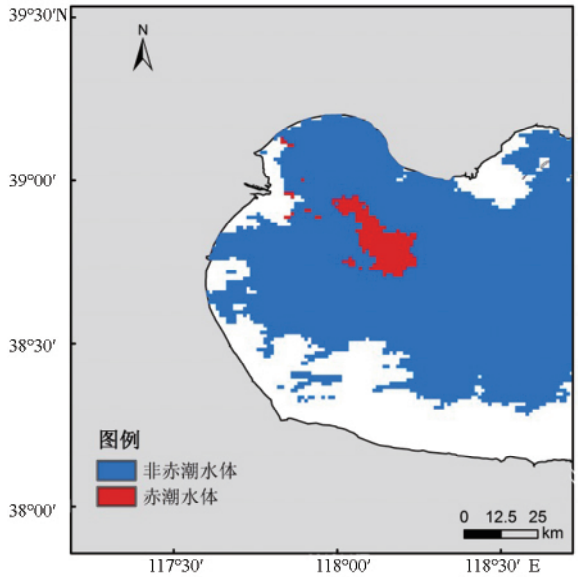

图 6　基于 *RBD* 的赤潮提取结果

Fig. 6 Red tide information extraction based on the threshold of *RBD*

2.5　基于 *RBD_KBBI* 的赤潮监测

Soto 等[8] 和 Amin 等[20] 的研究均认为结合 *RBD* 与 *KBBI* 的 *RBD_KBBI* 方法能更好地监测赤潮。而且 Soto 等[8] 通过对多种赤潮遥感监测方法的比较研究发现,*RBD_KBBI* 是赤潮信息提取效果最好的一种方法。然而,本研究发现该方法并不适用于天津附近海域,但应用 *KBBI* 法能有效监测到渤海赤潮。当 *KBBI* 为 0.05 时,提取的 2014 年 9 月 3 日天津滨海旅游区附近海域的赤潮范围为 302 km^2(图 7,表 2),与赤潮最大面积相差无几,说明 *KBBI* 法也可用于该海域的赤潮监测。

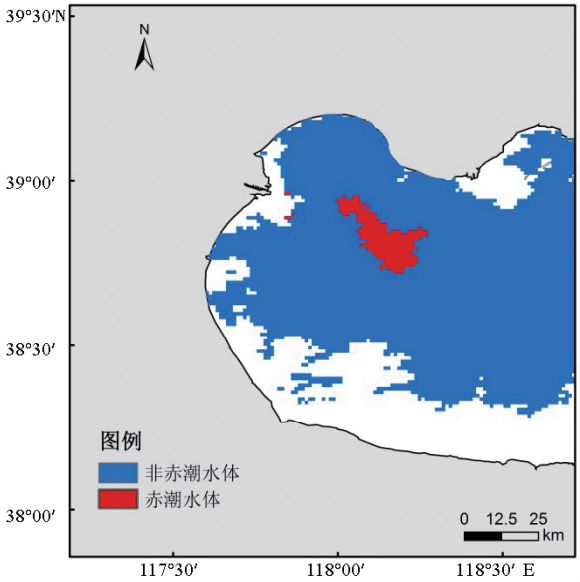

图 7　基于 *KBBI* 的赤潮提取结果

Fig. 7 Red tide information extraction based on the threshold of *KBBI*

2.6　不同赤潮监测方法的比较

采用上述 5 种方法对天津滨海旅游区附近海域 2014 年 9 月 3 日发生的赤潮的监测结果均比较合理,不仅提取的赤潮范围与实际最大面积相近,而且空间分布也一致。然而,由这些方法对秦皇岛附近海域 2014 年 5 月 26 日(该日赤潮的分布范围仅次于 5 月 28 日;秦皇岛附近海域赤潮面积于 5 月 28 日达到最大[11],但该日 MODIS 数据缺失严重)发生的赤潮所提取的结果却表现出很大差异(表 2,图 8)。由 *MRI*、*RBD* 和 *KBBI* 提取的秦皇岛附近海域的赤潮面积均远远超出实际最大面积(2000 km^2)。其中,通过 *MRI* 提取的赤潮范围最大,达 5481 km^2;其次为 *RBD* 和 *KBBI*,由这两个指标提取的秦皇岛附近海域的赤潮范围均超过 4000 km^2。综上,这三种方法虽然对天津滨海旅游区附近海域赤潮信息的提取结果比较合

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

理，但对秦皇岛附近海域的赤潮监测结果并不理想，可能是因为这三种方法多是基于国外 I 类水体所建立的方法，并不适用于光学特性复杂的渤海等 II 水体的赤潮监测[6]。

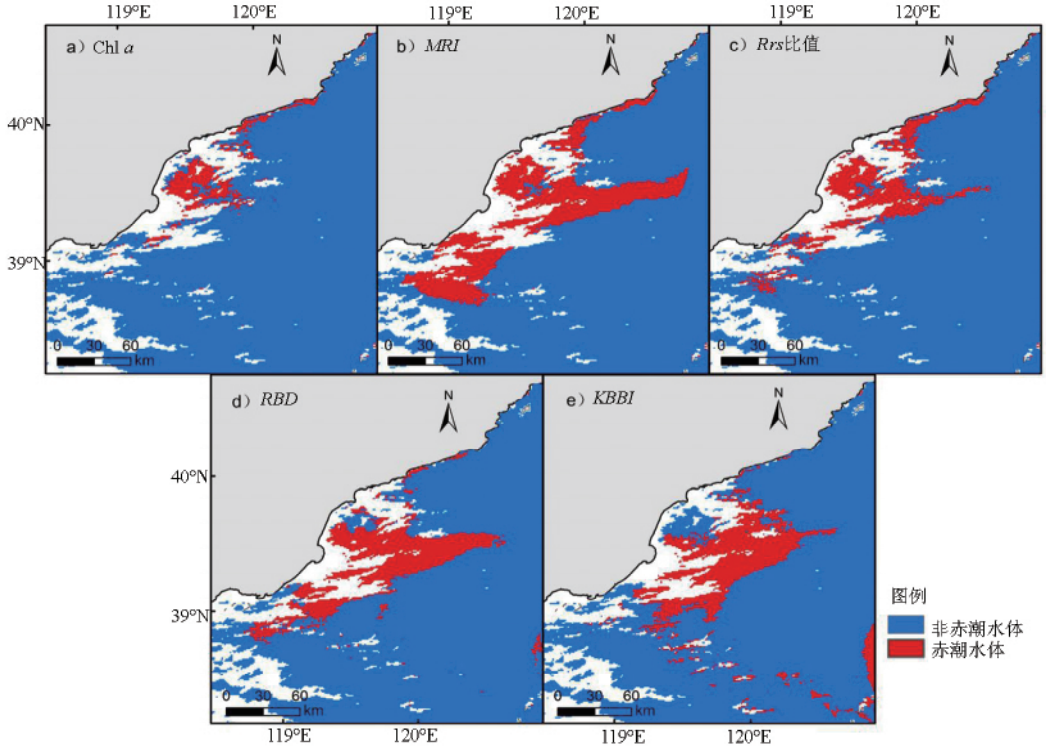

图 8 2014 年 5 月 26 日秦皇岛附近海域的赤潮信息提取

(a) Chl *a* 浓度异常法，(b) *MRI*，(c) *Rrs* 比值法，(d) *RBD*，(e) *KBBI*

Fig. 8 Red tide information extraction based on the threshold of chlorophyll-*a* concentration (a), *MRI* (b), *Rrs* ratio (c), *RBD* (d) and *KBBI* (e) in the offshore area of Qinhuangdao area on May 26, 2014

由 *Rrs* 波段比值法提取的秦皇岛附近海域的赤潮范围为 3085 km^2，与赤潮实际最大面积比较接近。早期研究表明，*Rrs* 波段比值法能有效监测黄河口和辽东湾发生的赤潮[10]，而且在珠江口、福建厦门附近海域等区域也得到成功应用[5,9]，说明该方法比较适用于 II 类水体的赤潮监测。通过叶绿素浓度异常法所提取的赤潮范围为 1448 km^2，虽然比实际最大面积偏小，但考虑到 5 月 26 日的 MODIS 影像也存在较多的数据缺失，因此认为叶绿素浓度异常法对秦皇岛附近海域的赤潮监测结果最为合理。叶绿素浓度异常法虽然在 II 类水体中的应用存在很大不确定性，但如果叶绿素浓度的遥感估算值比较准确，且有 ERGB 影像等资料的辅助，能够用于渤海赤潮监测。

综上所述，无论采用哪种方法对赤潮进行遥感监测均可能存在一定程度的不确定性。而且赤潮信息提取的方法的有效性，还与传感器类型、算法以及遥感时相紧密相关，因此，需结合实际调查数据等资料对监测结果进行验证。例如，Hu 等[5,13]的研究认为 nFLH 方法因能较好地规避 TSS 或 CDOM 的影响，所以对赤潮信息提取的结果较好，但也需要根据实际监测的赤潮数据或 ERGB 影像对 nFLH 方法的有效性进行证实。本文以 ERGB 影像和赤潮历史记录等资料为佐证，可以实现赤潮的有效监测。而且对整个渤海海域而言，还需同时考虑不同区域、不同时间发生的赤潮，共同检验和证实所采用方法对研究区赤潮监测的有效性。

3 结 论

(1) 叶绿素浓度异常法、*MRI*、*Rrs* 波段比值法、*RBD*、*KBBI* 等方法均能有效监测到天津滨海旅游区附近海域 2014 年 9 月 3 日发生的赤潮，不仅提取的赤潮范围与实际发生最大面积相符，而且空间分布也一致。

(2) 由 5 种方法提取的秦皇岛附近海域 2014 年 5 月 26 日发生的赤潮表现出明显的差异。其中，由叶绿素浓度异常法提取的赤潮范围与赤潮

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

实际最大面积最为接近，其次为 *Rrs* 波段比值法，而由 *MRI*、*RBD*、*KBBI* 提取的赤潮范围均过大。总的来说，叶绿素浓度异常法和 *Rrs* 波段比值法比较适用于渤海等 II 类水体的赤潮监测。

(3) 无论采用哪种方法进行赤潮的遥感监测，均需结合 ERGB 影像或赤潮历史记录等资料对监测结果进行证实。而且，有必要对不同时间、不同区域发生的赤潮的监测结果进行并行验证。

参考文献：

[1] 宋南奇，王 诺，吴 暖，等. 基于 GIS 的我国渤海 1952 ~ 2016 年赤潮时空分布 [J]. 中国环境科学，2018，38 (3)：1142-1148.

[2] 翟伟康，许自舟，张 健. 河北省近岸海域赤潮灾害特征分析 [J]. 海洋环境科学，2016，35(2)：243-246，251.

[3] 曹西华，俞志明，宋秀贤，等. 秦皇岛入海河流的污染水平、排放特征及对褐潮暴发区生源要素的影响 [J]. 海洋与湖沼，2017，48(5)：970-981.

[4] HU C M，MULLER-KARGER F E，TAYLOR C J，et al. Red tide detection and tracing using MODIS fluorescence data: A regional example in SW Florida coastal waters [J]. Remote Sensing of Environment，2005，97(3)：311-321.

[5] 张 涛，苏奋振，杨晓梅，等. 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，2009，11(2)：244-249.

[6] 徐晓晖，毛志华，陶邦一. 基于光谱差异的东海赤潮提取算法 [J]. 海洋学研究，2013，31(2)：26-34.

[7] 杨 斌，石 静，田 力，等. 秦皇岛海域微微藻褐潮遥感监测方法初探 [J]. 海洋环境科学，2016，35(4)：605-610.

[8] SOTO I M，CANNIZZARO J，MULLER-KARGER F E，et al. Evaluation and optimization of remote sensing techniques for detection of *Karenia brevis* blooms on the West Florida Shelf [J]. Remote Sensing of Environment，2015，170：239-254.

[9] 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.

[10] 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.

[11] ZHANG H，ZHENG X S. Study on red tide remote sensing monitoring in the Bohai Sea in 2014 [J]. Marine Science Bulletin，2017，19(1)：37-51.

[12] 张 华，李艳芳，唐 诚，等. 渤海底层低氧区的空间特征与形成机制 [J]. 科学通报，2016，61(14)：1612-1620.

[13] HU C M，BARNES B B，QI L，et al. A harmful algal bloom of *Karenia brevis* in the northeastern gulf of Mexico as revealed by MODIS and VIIRS: a comparison [J]. Sensors，2015，15(2)：2873-2887.

[14] 张宏亮. FLH 算法反演渤海叶绿素浓度的能力评价研究 [D]. 呼和浩特：内蒙古师范大学，2007.

[15] 徐家声，孟 毅，李 冰，等. 黄骅虾池中叶绿素 *a* 浓度及其与赤潮的关系 [J]. 黄渤海海洋，1996，14(2)：45-51.

[16] ZHAO J，GHEDIRA H. Monitoring red tide with satellite imagery and numerical models: A case study in the Arabian Gulf [J]. Marine Pollution Bulletin，2014，79(1/2)：305-313.

[17] TAKAHASHI W，KAWAMURA H，OMURA T，et al. Detecting red tides in the eastern Seto inland sea with satellite ocean color imagery [J]. Journal of Oceanography，2009，65(5)：647-656.

[18] 于 堃，陆殿梅. 二类水体的 MODIS 数据大气校正及在渤海表层水体叶绿素浓度监测反演中的应用研究 [J]. 海洋通报，2009，28(5)：21-27.

[19] KIM Y，BYUN Y，KIM Y，et al. Detection of *Cochlodinium polykrikoides* red tide based on two-stage filtering using MODIS data [J]. Desalination，2009，249(3)：1171-1179.

[20] AMIN R，GILERSON A，GROSS B，et al. MODIS and MERIS detection of *dinoflagellates* blooms using the RBD technique [C]//Proceedings of the SPIE 7473，Remote Sensing of the Ocean，Sea Ice，and Large Water Regions. Berlin，Germany: SPIE，2009：747304.

[21] AMIN R，ZHOU J，GILERSON A，et al. Novel optical techniques for detecting and classifying toxic dinoflagellate *Karenia brevis* blooms using satellite imagery [J]. Optics Express，2009，17(11)：9126-9144.

[22] 姜德娟，张 华. 渤海叶绿素浓度时空特征分析及其对赤潮的监测 [J]. 海洋科学，2018，42(5)：23-31.

[23] 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，2006，103(4)：419-437.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net