

基于 GF1-WFV 和 HJ-CCD 数据的 我国近海绿潮遥感监测算法研究

张海龙^{1,2} 孙德勇^{1,2*} 李俊生³ 丘仲锋^{1,2} 王胜强^{1,2} 何宜军^{1,2}

¹南京信息工程大学海洋科学学院, 江苏 南京 210044

²南京信息工程大学江苏省海洋环境探测工程技术研究中心, 江苏 南京 210044

³中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室, 北京 100094

摘要 大面积绿潮爆发对海洋生态环境、渔业经济、滨海旅游业等造成严重的负面影响。利用遥感技术可对绿潮进行宏观、及时、动态的有效监测,也可进行及时治理和预防,以减少经济损失。从 GF1-WFV 和 HJ-CCD 影像数据提取我国沿海绿潮水体的反射光谱特征,分析与非绿潮水体的光谱特征的差异,进而面向环境一号和高分一号开发了多光谱绿潮指数(MGTD)-多波段差值耦合算法,并用该算法对绿潮进行遥感监测。同时与 Landsat7-ETM+影像监测面积、归一化植被指数(NDVI)算法和增强型植被指数(EVI)算法提取绿潮面积进行比较验证。结果表明,所开发算法对绿潮发生位置和面积的监测效果较好,且精度达到 94%,可有效地应用于我国沿海二类水体的绿潮监测,为利用国产卫星数据监测沿海绿潮提供理论依据和方法支撑。

关键词 海洋光学; 绿潮; 多光谱绿潮指数; 遥感

中图分类号 P76 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0601004

Remote Sensing Algorithm for Detecting Green Tide in China Coastal Waters Based on GF1-WFV and HJ-CCD Data

Zhang Hailong^{1,2} Sun Deyong^{1,2} Li Junsheng³ Qiu Zhongfeng^{1,2}
Wang Shengqiang^{1,2} He Yijun^{1,2}

¹ School of Marine Science, Nanjing University of Information Science and Technology,
Nanjing, Jiangsu 210044, China

² Jiangsu Research Center for Ocean Survey Technology, Nanjing University of Information Science and
Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

³ Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract A large area outbreak of green tide poses serious negative impact on marine environment, fishery economy, and coastal tourism. Remote sensing technology has an advantage in macroscopic and dynamic monitoring of green tide in time, and is of significance for green tide treatment and prevention in time to reduce economic lost. We extract spectral reflectance characteristics of green tide from remote sensing data in coastal waters, and analyze spectral differences between green tide and normal waters. Towards the domestic satellite data of HJ-1 and GF-1, we develop a multispectral green tide index(MGTI)-multiband difference coupling algorithm that can be used to effectively detect green tide based on remote sensing technology. Meanwhile, remote sensing monitoring of green

收稿日期: 2016-01-18; 收到修改稿日期: 2016-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(41576172, 41276186, 41506200)、江苏省自然科学基金(BK20151526, BK20150914)、江苏省高校自然科学基金(15KJB170015)、“全球变化与海气相互作用”专项资助(GASI-03-03-01-01)、高分重大科技专项“环境保护遥感动态监测信息服务系统”(05-Y30B02-9001-13/15-5)

作者简介: 张海龙(1988—),男,博士研究生,主要从事水环境遥感方面的研究。E-mail: zhanghailong.1205@163.com

导师简介: 何宜军(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事海洋微波遥感基础与应用方面的研究。

E-mail: yjhe@nuist.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: sundeyong1984@163.com

tide area by using Landsat7-ETM+ data is collected as reference, and also two conventional remote sensing algorithms, including normalized difference vegetation index(NDVI) and enhanced vegetation index(EVI), can be used for comparing with our developed algorithm. The obtained results demonstrate that the developed algorithm can be effectively applied into green tide monitoring in China coastal waters, and the monitoring accuracy is approximately 94%. This research can provide a theoretical basis and strategy for using domestic satellite data to monitor green tide in coastal waters.

Key words oceanic optics; green tide; multispectral green tide index; remote sensing

OCIS codes 010.4450; 010.0280; 100.2000

1 引 言

绿潮是在特定的环境条件下,海水中某些大型绿藻(如浒苔)爆发性增殖或高度聚集而引起水体变色的一种有害生态现象,被视作和赤潮一样的海洋灾害。大规模绿潮爆发不仅恶化海洋生态环境,还严重地破坏海洋渔业资源及海滨旅游业,从而造成巨大的经济损失^[1-2]。近年来,绿潮发生频繁,规模不断扩大,已成为我国沿海的一大海洋灾害。目前,绿潮灾害监控已逐渐成为我国政府和海洋环境研究学者关注的热点问题之一。据中国海洋局海洋灾害公报统计^[3],我国黄海沿海海域 2010、2011、2014 年最大分布面积依次为 29800、26400、50000 km²。因此,有效的监测和预报绿潮已成为控制和减少灾害损失的必由之路。常规绿潮监测采用地面观测方法,不能体现绿潮空间尺度大、时间周期长、宏观漂移的特点。相比而言,卫星遥感技术具有宏观、(准)实时和周期性的优势,在绿潮监测中表现出较好的应用潜力。由此可见,卫星遥感绿潮监测很有意义且应用前景广泛。

国内外学者针对绿潮进行了大量的研究工作,提出了许多绿潮遥感监测算法,如单波段分割算法、多波段比值算法、监督分类法、支持向量机、辐射传输模型法等。其中比较典型的研究有:Hu^[4]提出了基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)数据的浮游藻类指数(FAI),并应用于北大西洋、墨西哥湾、黄海、中国东海的蓝藻监测;赵文静等^[5]利用辐射传输模拟方法,开展水下悬浮浒苔海面光谱响应研究,分析海面光谱随浒苔厚度、悬浮深度、水体浑浊度以及环境条件的变化规律;Shi 等^[6]基于 MODIS 数据采用归一化藻类指数(NDAI)监测出 2008 年 5 月至 7 月青岛沿岸海域浒苔覆盖面积达 4000 km²;施英妮等^[7]基于 HJ-1A/1B-CCD 数据利用浒苔光谱特性和归一化植被指数对黄东海浒苔进行监测;辛蕾等^[8]基于混合像素分解模型利用 MODIS 数据对胶东湾以东海域进行绿潮提取,从而减小混合像素对 MODIS 绿潮信息提取的影响;何世钧等^[9]根据 2012—2013 年南黄海海域绿潮遥感监测面积数据,建立温度、天气状况、风向、风力和浪高 5 个影响绿潮扩散气候因子的支持向量机回归模型;杨超宇^[10]结合近红外波段的浮游植物荧光信号和可见光部分的弹性散射的辐射传输模型,提出了新的光学遥感算法,用于提取浮游植物光学信息,结果表明该算法能较好地表征浮游植物叶绿素光学参数;郭宇龙等^[11]以野外实测光谱数据作为端元,对水体遥感反射率进行线性混合光谱分解,构建了一种新的水体叶绿素 a 光谱指数。

之前研究所采用的数据大多是国外的卫星数据,比如 MODIS 数据,而对我国具有自主知识产权的传感器 HJ-CCD 使用率较少^[12],特别是 GF1-WFV 的绿潮监测算法鲜有报道。其中,基于 HJ-CCD 数据大多数采用传统 NDVI 阈值算法,但 NDVI 对卫星观测时大气条件、观测角度和海洋环境的变化十分敏感,故导致在大型藻类的监测中存在较大的不确定性^[13]。若是针对我国国产卫星数据,之前的算法则未能有效地移植利用,因为不同传感器的波段设置和阈值使用等均存在差异。基于此,需要开发专门针对国产卫星遥感数据(GF1-WFV 和 HJ-CCD)的绿潮监测算法。高分一号卫星具有高空间分辨率和高重访周期,可获取小面积绿潮监测,充分掌握浒苔总量和漂移预测等更加详细的信息。因此,本文以我国黄海沿海绿潮区为研究区,通过比较绿潮和海水反射光谱差异,设计了基于 GF1-WFV 和 HJ-CCD 的多光谱绿潮指数(MGTI)-多波段差值耦合算法,并利用该算法对绿潮进行监测。

2 研究数据与方法

2.1 卫星数据源

环境与灾害监测预报小卫星的 2 个星座(HJ-1A/1B 星)于 2008 年 9 月 6 日成功发射,HJ-1A 星搭载了

CCD 相机和超光谱成像仪, HJ-1B 星搭载了 CCD 相机和红外相机。HJ-1A/1B 卫星上装载的 2 台 CCD 相机设计原理完全相同, 以星下点对称放置, 平分视场, 并行观测, 联合完成对地刈幅宽度为 700 km、地面像素分辨率为 30 m、4 个谱段的推扫成像。高分一号卫星于 2013 年 4 月 26 日发射成功, 并于 2013 年 12 月 31 日正式投入使用。该卫星配置了 2 台分辨率为 2 m 全色以及 8 m 多光谱的高分辨率相机和 4 台分辨率为 16 m 的多光谱中分辨率宽幅相机^[14]。其中多光谱包括蓝、绿、红、近红外 4 个波段。HJ-CCD 传感器的空间分辨率为 30 m, 时间分辨率为 4 d, 光谱波段分别为 0.43~0.52、0.52~0.60、0.63~0.69、0.76~0.90 μm ; GF1-WFV 传感器的空间分辨率为 16 m, 时间分辨率为 2 d, 光谱波段分别为 0.42~0.52、0.52~0.59、0.63~0.69、0.77~0.89 μm 。

本研究所采用的卫星遥感数据包括环境卫星数据、高分一号数据和 Landsat7-ETM+ 影像各 1 景, 研究区主要位于山东省至江苏省沿海海域, 具体如表 1 所示。其中, Landsat7-ETM+ 数据是用于验证 GF1-WFV 数据绿潮监测精度。

表 1 本研究用的遥感数据
Table 1 Remote sensing data used in this study

Satellite data	Time	Study area
HJ-CCD	2015-06-21T09:51	Qingdao-Lianyungang coastal area
GF1-WFV	2015-07-08T11:01	Qingdao coastal area
Landsat7-ETM+	2015-07-08T10:35	Qingdao coastal area

2.2 技术路线

本文所采用的技术路线如图 1 所示。利用 HJ-CCD 和 GF1-WFV 遥感数据对研究区绿潮进行提取, 具体步骤如下: 1) 遥感图像预处理。影像预处理包括辐射定标、几何校正和大气校正等, Landsat7-ETM+ 数据在预处理之前需要进行条带修复, 然后采用 FLAASH (Fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes) 大气校正得到图像反射率, 所需参数有卫星影像参数、大气参数、气溶胶模型和传感器光谱响应曲线等。2) 水陆分离。由于陆地植被和绿潮光谱特征相似, 故需要对水陆分离, 以便下一步提取绿潮信息。3) 绿潮提取。本研究利用提出的 MGTI-多波段差值耦合算法区分绿潮和海水。4) 精度验证。基于 HJ-CCD 和 GF1-WFV 遥感数据采用 NDVI 算法和增强型植被指数 (EVI) 算法提取绿潮进行精度评价, 同时基于 Landsat7-ETM+ 数据采用 FAI 算法提取绿潮面积, 用于评价 GF1-WFV 数据提取精度。

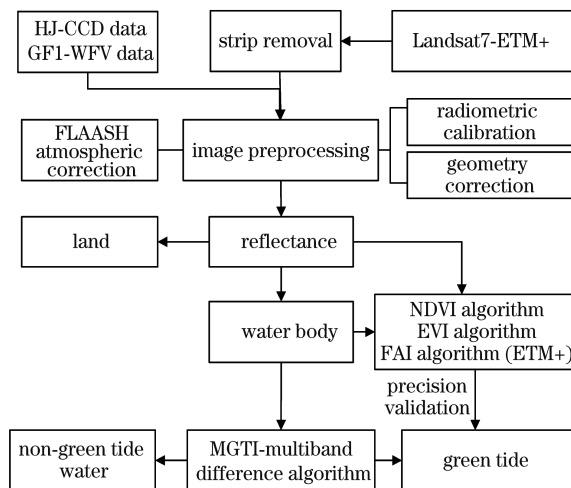


图 1 绿潮监测技术路线图

Fig. 1 Composite framework of green tide monitoring

3 MGTI-多波段差值耦合算法开发

本文采用 ENVI 软件中像素光谱收集模块, 采集相应水域或绿潮区的光谱集, 然后求出平均光谱作为该类型的光谱曲线。从 GF1-WFV 和 HJ-CCD 遥感图像上分别提取绿潮和海水的平均反射率光谱曲线, 如图

2 所示。为较全面地比较海水和绿潮的光谱差异,共选择 5 种类型光谱。海水 A 代表河流入海口处的海水,含有悬浮泥沙;海水 B 代表离陆地较近的海水,浊度低于海水 A;海水 C 为清澈海水;绿潮 A 为程度严重的绿潮光谱;绿潮 B 为绿潮区边缘或程度轻的绿潮光谱。从图 2 看出,绿潮和海水反射率光谱变化规律在 GF1-WFV 和 HJ-CCD 传感器上差别不大,且绿潮与陆地植被光谱相似。绿潮在绿色波段(对应于 HJ-CCD 和 GF1-WFV 的 560 nm)存在一个反射峰。这是由于叶绿素 a 对蓝光和红光有较强吸收,对绿光具有较强的反射。在近红外波段(对应 HJ-CCD 和 GF1-WFV 的 830 nm)反射率急剧上升^[7,15],如图 2 中绿潮 A 和绿潮 B 曲线。绿潮与海水的光谱特征呈现明显差异,这使通过光谱特征差异来提取绿潮成为可能并具有理论依据。

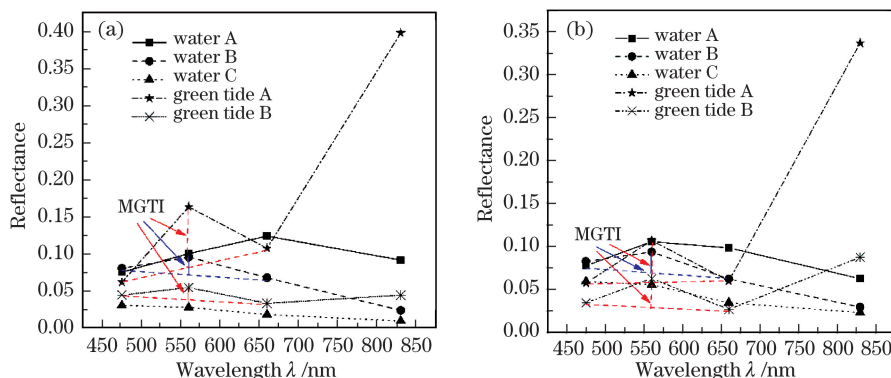


图 2 绿潮和海水平均反射率光谱曲线及 MGTI 指数示意图。(a)GF1-WFV;(b)HJ-CCD

Fig. 2 Reflectance curves and MGTI index schematic of green tide and sea water. (a) GF1-WFV; (b) HJ-CCD

根据以上分析,结合绿潮和海水反射曲线的差异,针对我国具有自主知识产权的 GF1-WFV 和 HJ-CCD 数据设计了多光谱绿潮指数(MGTI,示意图见图 2),MGTI 定义为绿波段的反射率与位于蓝波段和红外波段的线性基线插值的差值,即

$$R_{MGTI} = R_{green} - \left[R_{blue} + (R_{red} - R_{blue}) \times \frac{\lambda_{green} - \lambda_{blue}}{\lambda_{red} - \lambda_{blue}} \right], \quad (1)$$

式中 R_i 表示 i 波段的反射率, λ_i 表示 i 波段的中心波长。HJ-CCD 和 GF1-WFV 数据 4 个波段的中心波长分别为 475、560、660、830 nm,所以对于 HJ-CCD 和 GF1-WFV 数据而言, MGTI 可表示为

$$R_{MGTI} = R_{green} - R_{blue} - \frac{17}{37}(R_{red} - R_{blue}). \quad (2)$$

从图 2 中可看出,绿潮 A 和绿潮 B 的 MGTI 均大于 0(图 2 中红色箭头),大于海水 C 类曲线,故通过与真彩色合成图像交互式判读来确定合理的阈值,利用 MGTI 很好区分绿潮与该类海水。但对于海水 A 和海水 B 曲线而言,它们的 MGTI 值(图 2 中蓝色箭头)和绿潮 MGTI 值接近,故仅采用 MGTI 指数不能将绿潮较好地提取出来。针对这一问题,本研究将近红外与红外波段反射率差值大于某一个值,即 $R_{nir} - R_{red} > C_1$, 作为提取绿潮条件之一,其中 C_1 为阈值。

4 MGTI-多波段差值耦合算法的应用与验证

4.1 算法应用

本研究以 2015 年 6 月中旬至 7 月初发生在山东省至江苏省沿海绿潮为例,展示算法的应用。选择该区域云覆盖较少的环境卫星影像和高分卫星影像各 1 景,应用所提出的 MGTI-多波段差值耦合算法对示例海域进行绿潮提取。图 3 和图 4 分别显示了两景影像的绿潮提取结果和原始真彩色合成图像。据统计,利用 GF1-WFV 数据监测在 2015 年 7 月 8 日青岛海域发生绿潮面积为 549.48 km²。利用 HJ-CCD 数据监测在 2015 年 6 月 21 日山东青岛至江苏连云港沿海海域发生绿潮面积为 2386.00 km²。国内各大新闻日报均报道该绿潮的发生。综合图 3 和图 4 可以看出,绿潮结果图与真彩色合成图在发生轮廓和范围上均能较好地对应。MGTI-多波段差值耦合算法整体上绿潮监测效果较好,具有一定的可信度和实用价值。

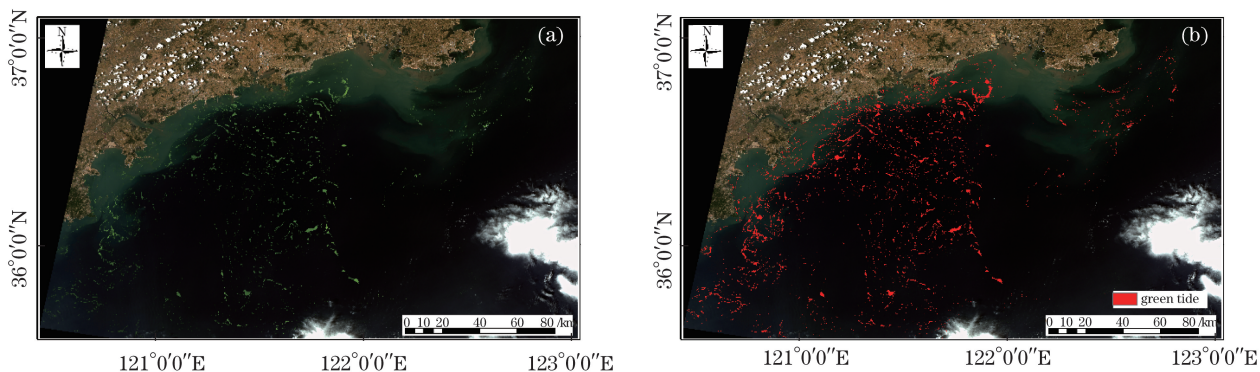


图 3 2015 年 7 月 8 日基于 GF1-WFV 的(a)真彩色合成与(b)绿潮监测结果

Fig. 3 (a) True color synthesis diagram and (b) monitoring results based on GF1-WFV on July 8th, 2015

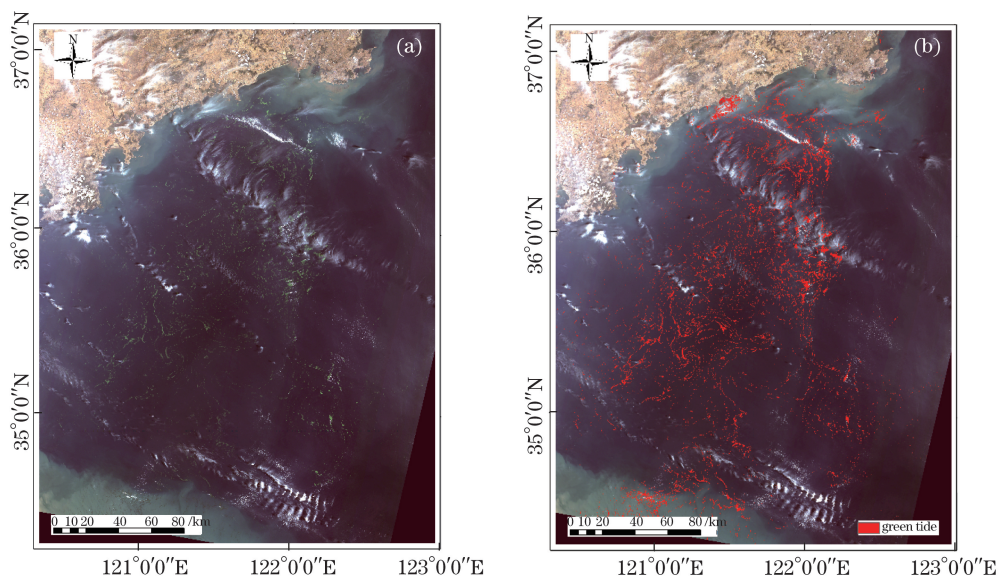


图 4 2015 年 6 月 21 日基于 HJ-CCD 的(a)真彩色合成与(b)绿潮监测结果

Fig. 4 (a) True color synthesis diagram and (b) monitoring results based on HJ-CCD on June 21th, 2015

遥感图像难免受云的影响,这导致绿潮提取可能出现误差。针对薄云覆盖下的绿潮信息,本研究算法能较好提取出来,如图 5 和图 6 所示。从图 5 和图 6 中可以看出,无论是 HJ-CCD 数据还是 GF1-WFV 数据,薄云下的绿潮均能监测出来,这说明该算法具有对环境敏感性较低和受薄云影响小等优点。

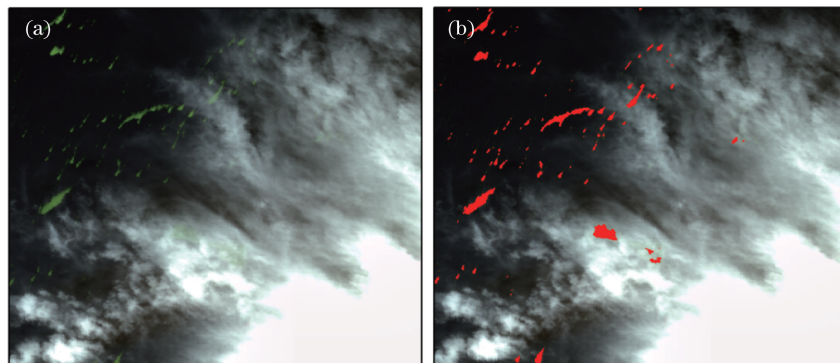


图 5 基于 GF1-WFV 的(a)云覆盖区域真彩色图像和(b)绿潮监测结果

Fig. 5 (a) True color image and (b) monitoring results of green tide in the area of cloud cover based on GF1-WFV

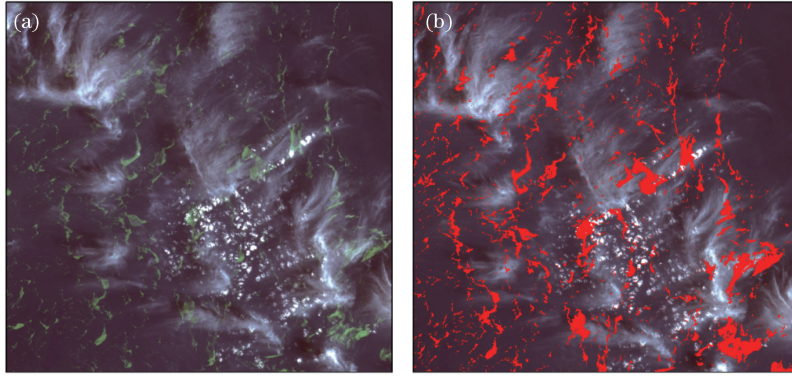


图 6 基于 HJ-CCD 的(a)云覆盖区域真彩色图像和(b)绿潮监测结果

Fig. 6 (a) True color image and (b) monitoring results of green tide in the area of cloud cover based on HJ-CCD

4.2 算法验证

为更好地验证 MGTI-多波段差值耦合算法的绿潮监测精度,本研究采用 2 种常规的绿潮监测算法 (NDVI 算法和 EVI 算法)作为参考,对本研究所开发的算法进行比较验证。本研究以偏差值 E 作为评价指标,即

$$E = \frac{|S_{\text{estimate}} - S_{\text{true}}|}{S_{\text{true}}}, \quad (3)$$

式中 S_{estimate} 和 S_{true} 分别为本文算法提出的绿潮面积和参考真值。

相对于其他植被指数,NDVI 和 EVI 指数是常用的绿潮监测的植被指数。NDVI 被定义为近红外波段与可见光、红光波段数值之差和这 2 个波段数值之和的比值,即

$$p_{\text{NDVI}} = \frac{R_{\text{NIR}} - R_{\text{Red}}}{R_{\text{NIR}} + R_{\text{Red}}}, \quad (4)$$

式中 R_{NIR} 和 R_{Red} 分别为近红外和红光波段的反射率。EVI 的表达式为^[16]

$$p_{\text{EVI}} = \frac{2.5 \times (R_{\text{NIR}} - R_{\text{Red}})}{R_{\text{NIR}} + 6.0 \times R_{\text{Red}} - 7.5 \times R_{\text{Blue}} + 1}, \quad (5)$$

式中 R_{Blue} 为蓝光波段的反射率。

4.2.1 高分一号数据的算法验证

利用当天 Landsat7-ETM+ 遥感数据,采用本文算法和 Hu 提出的 FAI 算法^[4]进行绿潮监测。由于 2 幅图像覆盖面积不同,将裁切共同区域进行算法精度验证。同时,利用 NDVI 算法和 EVI 算法对 GF1-WFV 卫星影像进行绿潮提取。

利用 NDVI 算法、EVI 算法和本文算法对 GF1-WFV 卫星影像进行绿潮提取。图 7 展示了 GF1-WFV 真彩色图像和 3 种算法的绿潮结果分布对比[图 7(b)]。从图 7 中可以看出,这 3 种算法提取绿潮分布轮廓基本上一致[图 7(b)中绿色标识],并且与真彩色图像中绿潮范围和轮廓有很好的对应。根据各种验证方法监测的绿潮面积,计算出 MGTI-多波段差值耦合算法与其他算法提取绿潮的面积及偏差 E 。本文算法利用 GF1-WFV 数据提取绿潮面积为 106.14 km^2 , NDVI 算法和 EVI 算法提取的面积分别为 107.93 km^2 和 110.64 km^2 。值得注意的是,本研究采取综合的误差验证方法,即以 NDVI 算法和 EVI 算法的平均值作为真值(109.28 km^2),计算 MGTI-多波段差值耦合算法提取绿潮相对误差 E 为 2.88% 。以提取面积和轮廓分布来说,本研究提出算法与其他两种常规提取绿潮面积相接近且精度较高。但传统 NDVI 阈值法是“硬分类”方法,容易导致误差,尤其是利用低分辨率遥感数据时忽视混合像素的存在^[17]。此外,NDVI 和 EVI 算法对卫星观测时外在条件的变化比较敏感,比如大气条件、观测角度和浒苔自身因素等^[1,4,12]。

同时,将本文算法和 FAI 算法应用到 Landsat7-ETM+ 数据监测绿潮结果(见图 8)来验证本文算法精度。对比图 8(a)和图 8(b)发现,利用 2 种算法的监测绿潮结果轮廓整体上基本一致,且与 Landsat7-ETM+ 真彩色图像和 GF1-WFV 真彩色图像中绿潮轮廓和范围较好地对应。但对于部分条带修复像素,2 种算法监测结果不一致。基于 Landsat7-ETM+ 数据采用 FAI 算法监测绿潮面积为 120.44 km^2 ,采用本文算法监测

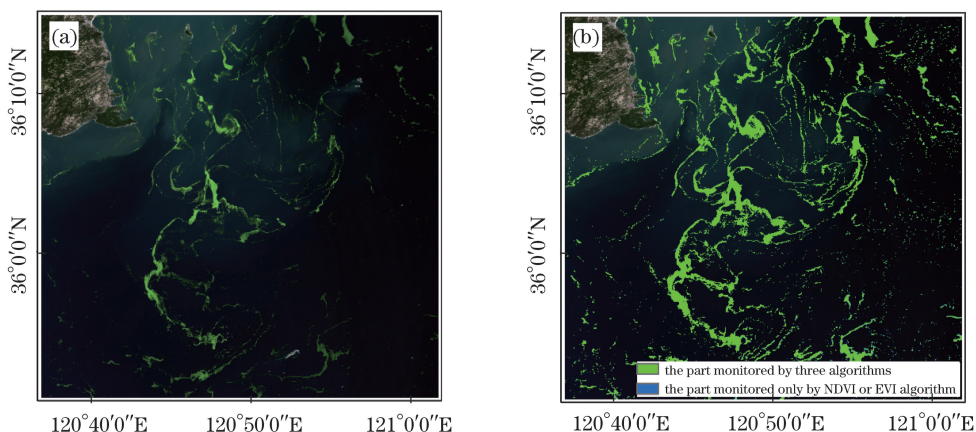


图 7 (a)GF1-WFV 真彩色图像和(b)3 种算法提取绿潮对比结果(本文算法、NDVI 算法和 EVI 算法)
 Fig. 7 (a) True color image of GF1-WFV and (b) results of three algorithms for green tides extraction
 (the proposed algorithm, NDVI algorithm and EVI algorithm)

面积为 112.43 km²。如果 FAI 算法提取结果为真值,利用本文算法基于 Landsat7-ETM+数据提取绿潮的相对误差为 6.6%,这表明本文算法应用到 Landsat7-ETM+数据也具有较高精度。由于这不是本文重点研究内容,故不再详细分析。为验证本文算法在高分一号卫星的精度,本研究以基于 Landsat7-ETM+数据的上述 2 种算法提取结果的平均值(116.44 km²)作为真值,本文算法基于 GF1-WFV 数据监测绿潮面积(106.14 km²)的相对误差为 8.8%。这可能由于 Landsat7-ETM+空间分辨率较低(30 m),存在混合像素问题。同时,条带修复工作使绿潮监测结果偏大,从而导致相对误差偏大。

综合上述 2 种验证方法,其平均相对误差为 5.84%,这表明基于 GF1-WFV 数据的所设计的算法提取绿潮精度较高,达到 94%,并能准确确定绿潮位置和分布信息,可信度高。

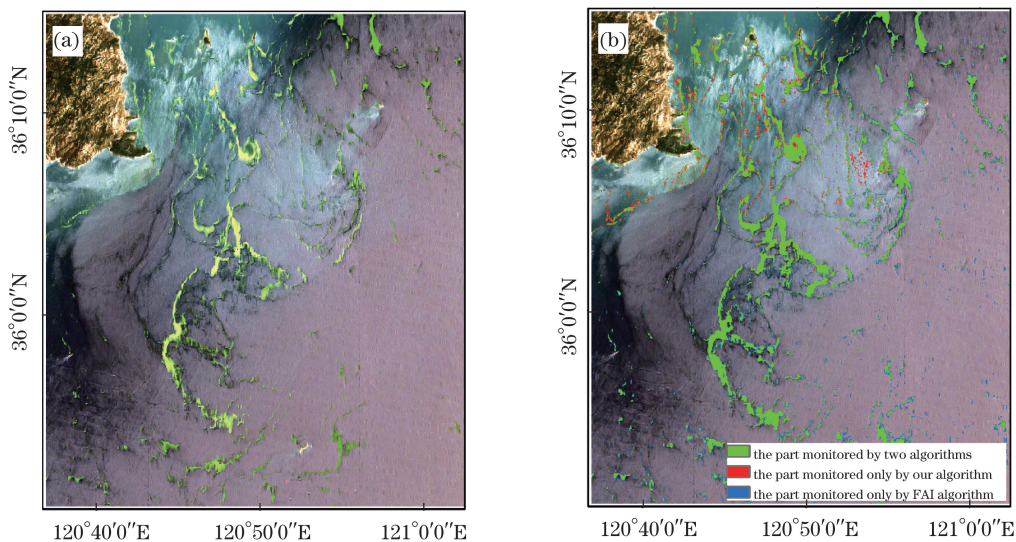


图 8 (a)Landsat7-ETM+真彩色图像和(b)不同算法(本文算法和 FAI 算法)提取绿潮结果
 Fig. 8 (a) True color image of Landsat7-ETM+ and (b) results of different algorithms for green tide extraction
 (the proposed algorithm and FAI algorithm)

4.2.2 环境卫星数据的算法验证

与高分一号卫星验证相似,利用 NDVI 算法和 EVI 算法对环境数据进行绿潮提取,提取结果如图 9 所示。综合图 4 和图 9 可以看出,这 3 种算法的提取结果与真彩色图像中绿潮范围和轮廓大致吻合,但 EVI 算法或 NDVI 算法将部分云误判成绿潮,如图 9 中右下角部分所示。EVI 算法和 NDVI 算法提取面积分别为 2303.85 km²和 2009.61 km²。以 NDVI 算法和 EVI 算法平均值作为真值(2256.73 km²),利用本文算法提取的绿潮面积为 2386.00 km²,相对误差 E 为 5.7%。上述结果表明 MGTI-多波段差值耦合算法针对 HJ-

CCD 数据的绿潮提取同样具有较高的精度,精度达到 94%。

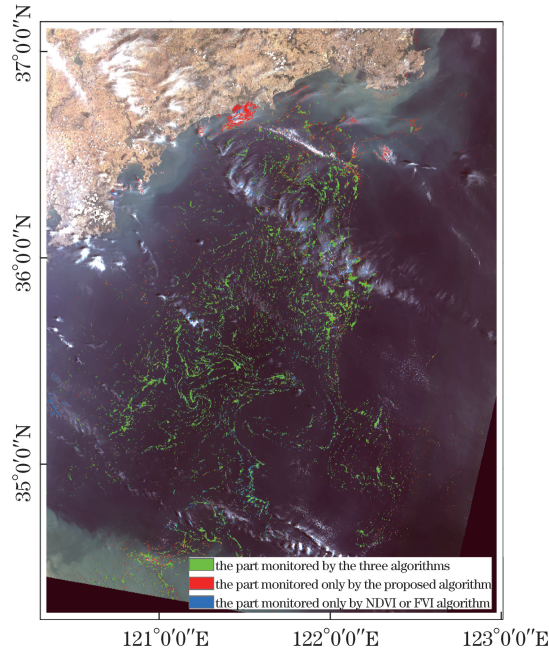


图 9 基于 HJ-CCD 数据的 3 种算法(本文算法、NDVI 算法和 EVI 算法)提取绿潮对比图

Fig. 9 Green tide extraction results of three algorithms (the proposed algorithm, NDVI algorithm and EVI algorithm) based on HJ-CCD data

5 结 论

在充分分析绿潮水体光谱特征的基础上,研发了一种针对我国环境卫星和高分一号卫星数据的绿潮遥感监测算法,即多光谱绿潮指数 MGTI-多波段差值耦合算法。将该算法应用于我国黄海沿岸绿潮发生区,并结合 Landsat7-ETM+ 数据、NDVI 算法和 EVI 算法对绿潮监测结果进行交叉对比和精度验证,结果表明该算法能准确确定绿潮位置和分布信息,监测精度达到 94%。该算法可有效地排除悬浮泥沙、薄云等外界干扰的影响,对环境敏感性低,这对我国沿海海域的绿潮遥感监测具有较大的应用潜力,对完善基于国产卫星数据的绿潮遥感监测技术体系具有重要的意义。但我国海岸线广阔,各地水域水体物质成分和光学性质呈现较大差异^[18-19],势必会影响绿潮水体的光谱特征,所以对该算法针对其他邻域的验证仍需进一步开展。

参 考 文 献

- Ye Na, Jia Jianjun, Tian Jing, *et al.*. Advances in the study of ulvapolifera monitoring with remote sensing[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(1): 7-12.
叶 娜, 贾建军, 田 静, 等. 浒苔遥感监测方法的研究进展[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 7-12.
- Xing Qianguo, Zheng Xiangyang, Shi Ping, *et al.*. Monitoring "green tide" in the Yellow Sea and the East China Sea using multi-temporal and multi-source remote sensing images[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(6): 1644-1647.
邢前国, 郑向阳, 施 平, 等. 基于多源、多时相遥感影像的黄、东海绿潮影响区检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(6): 1644-1647.
- 中华人民共和国国土资源部. 中国海洋灾害公报[R/OL]. [2015-12-25]. <http://www.mlr.gov.cn/zwgk/tjxx/>.
- Hu C M. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(10): 2118-2129.
- Zhao Wenjing, Zhang Jie, Cui Tingwei, *et al.*. Enteromorpha prolifera underwater spectral research based on simulation of radiation transmission[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(6): 1656-1660.
赵文静, 张 杰, 崔廷伟, 等. 水下悬浮浒苔海面光谱响应的辐射传输模拟[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(6): 1656-1660.

- 6 Shi W, Wang M. Green macroalgae blooms in the Yellow Sea during the spring and summer of 2008 [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2009, 114(C12): 207-211.
- 7 Shi Yingni, Shi Lijian, Xia Ming, *et al.*. The application of HJ-1A/1B's CCD data to enteromorpha prolifera monitoring over the Yellow Sea and East Sea [J]. *Remote Sensing Information*, 2012(2): 47-50.
施英妮, 石立坚, 夏明, 等. HJ-1A/1B星 CCD传感器数据在黄东海浒苔监测中的应用 [J]. *遥感信息*, 2012(2): 47-50.
- 8 Xin Lei, Huang Juan, Liu Rongjie, *et al.*. An improved model for MODIS green tide covered area extraction based on mixed pixel decomposition [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2014, 23(6): 585-589.
辛蕾, 黄娟, 刘荣杰, 等. 基于混合像素分解的 MODIS 绿潮覆盖面积精细化提取方法研究 [J]. *激光生物学报*, 2014, 23(6): 585-589.
- 9 He Shijun, Tang Yingli, Zhang Ting, *et al.*. Weight analysis of each influence factor of the green tide disaster based on SVM [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(11): 3431-3436.
何世钧, 唐莹莉, 张婷, 等. 基于支持向量机的绿潮灾害影响因素的权重分析 [J]. *中国环境科学*, 2015, 35(11): 3431-3436.
- 10 Yang Chaoyu. Effect of typhoon NALGAE on the distribution of phytoplankton [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 100101.
杨超宇. 浮游植物分布对强台风尼格的响应 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 100101.
- 11 Guo Yulong, Li Yunmei, Wang Qiao, *et al.*. A new water chlorophyll-a index and analysis of its application potential [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1101003.
郭宇龙, 李云梅, 王桥, 等. 一种新的水体叶绿素 a 指数及其应用潜力分析 [J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1101003.
- 12 Qiu Yahui, Lu Jianbo. Advances in the monitoring of enteromorpha prolifera using remote sensing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15): 4977-4985.
邱亚会, 卢剑波. 浒苔遥感监测研究进展 [J]. *生态学报*, 2015, 35(15): 4977-4985.
- 13 Hu C, He M X. Origin and offshore extent of floating algae in olympic sailing area [J]. *Eos Trans American Geophysical Union*, 2008, 89(33): 302-303.
- 14 Han Qijin, Pan Zhiqiang, Zhang Xuewen, *et al.*. Cross-calibration of GF-1 WFV and SJ-9A PMS sensors based on homogeneous land surface targets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0628003.
韩启金, 潘志强, 张学文, 等. 基于均匀目标的 GF-1WFV 与 SJ-9A PMS 相机交叉定标 [J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0628003.
- 15 Wu Chuanqing, Ma Wandong, Wang Xuelei, *et al.*. Remote sensing monitoring HAB in Yellow Sea by HJ1-CCD [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, 31(3): 161-165.
吴传庆, 马万栋, 王雪蕾, 等. 基于环境卫星 CCD 数据的黄海浒苔遥感监测 [J]. *中国环境监测*, 2015, 31(3): 161-165.
- 16 Huete A R, Justice C. MODIS vegetation index (MOD13) algorithm theoretical basis document [Z/OL]. 3rd ed. 1999: 35-39 [2016-12-25]. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf.
- 17 Ding Yi, Huang Juan, Cui Tingwei, *et al.*. The decomposition method of MODIS images enteromorpha mixed pixels based on the relationship of NDVI to abundance [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 37(7): 123-131.
丁一, 黄娟, 崔廷伟, 等. 基于 NDVI 与丰度关系的 MODIS 影像浒苔混合像素分解方法 [J]. *海洋学报*, 2015, 37(7): 123-131.
- 18 Gower J, King S, Wei Y, *et al.*. Use of the 709 nm band of MERIS to detect intense plankton blooms and other conditions in coastal waters [C]. *MERIS User Workshop*, 2003: 10-13.
- 19 Eko S, Joji I, Sarat C T, *et al.*. Detection of harmful algal blooms of *Karenia mikimotoi* using MODIS measurements: A case study of Seto-Inland Sea, Japan [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 129(2): 185-196.