

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, doi:10.12284/hyxb2022161

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, doi:10.12284/hyxb2022161

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

葛化鑫^{1,2}, 刘荣杰^{2*}, 赵鑫^{1,2}, 马毅^{2,3}, 王新念⁴, 王义衍⁴

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

摘要: 中高空间分辨率宽波段光学卫星已成为赤潮监测的主要数据源, 但与水色卫星传感器不同, 中高空间分辨率卫星传感器主要面向陆地应用, 其波段数量少、宽度大, 由此对赤潮探测带来的影响尚待研究。为此, 本文基于不同优势种赤潮实测高光谱数据、时空同步的 GF-1 WFV2、GF-1 WFV3 传感器影像、Sentinel-2A MSI 传感器影像及 GF-6 WFV 传感器影像, 探究了波段设置、光谱响应函数、信噪比及空间分辨率对赤潮探测的影响, 并分析了红边波段赤潮探测优势。结果表明: 波段设置对赤潮探测影响大, 特别是红光波段和红边波段的中心波长和波段宽度; 波段设置相同的情况下, 赤潮探测精度受光谱响应函数的影响大, 受信噪比的影响较小; 空间分辨率对赤潮探测的影响较大, 空间分辨率的提升有助于提高赤潮探测的精度。红边波段赤潮探测实验表明, 较之红光波段, 基于红边波段的赤潮探测具有明显的优势, 平均 F1-Score 提高了 11%。本文的研究结果一方面可为赤潮中高空间分辨率卫星探测的数据选取提供理论依据, 另一方面可为中高空间分辨率卫星传感器的设计提供参考。

关键词: 中高空间分辨率; 宽波段; 卫星传感器; 赤潮探测

中图分类号: TP79

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2022)12-0136-12

1 引言

赤潮是指水体中浮游植物、原生动物或者细菌等在一定条件下爆发性增殖与聚集, 从而引起水体变色的现象^[1]。赤潮对海洋生态环境影响较大, 影响了海水养殖业发展, 有毒赤潮甚至会危害人类的生命安全。赤潮发生具有分布面积大、变化快等特点, 现场调查手段费时费力, 难以满足赤潮监测数据的时空覆盖需求, 而卫星遥感具有大面积、同步观测的优势, 成为了赤潮监测的主要技术手段。

一直以来, 水色卫星以其高光谱分辨率和高重访

周期的优势在赤潮监测中发挥了巨大作用, 但其空间分辨率较低, 无法有效监测近海频发的小规模赤潮^[2]。因此, 赤潮监测需要中高空间分辨率卫星的支持。目前, 国内外中高空间分辨率光学卫星发展迅速, 其数据时空覆盖率大幅提高, 满足了赤潮业务监测的数据需求, 中高空间分辨率光学卫星正越来越多地应用到赤潮探测中^[2-6]。不同于水色卫星传感器, 中高空间分辨率光学卫星传感器主要面向陆地应用, 其波段宽度大, 波段少并且信噪比低, 而这些传感器差异所带来的赤潮探测影响尚不明确。因此, 探究中高空间分辨率光学卫星传感器参数对赤潮探测的影响具有重

收稿日期: 2022-06-07; 修订日期: 2022-07-15。

基金项目: 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: 葛化鑫(1998—), 男, 河南省商丘市人, 主要从事赤潮遥感探测研究。E-mail: ghx98826@163.com

* 通信作者: 刘荣杰, 副研究员, 主要从事海洋光学遥感研究。E-mail: liurj@fio.org.cn

要意义。

目前已有诸多学者开展了卫星传感器参数地物探测影响研究。Trishchenko等^[7]探究了光谱响应函数对归一化植被指数(NDVI)的影响,发现光谱响应函数的差异会引起NDVI的差异。刘三超等^[8]分析了光谱响应函数和波段宽度对地表温度探测的影响,发现光谱响应函数对温度探测的影响与传感器波段宽度相关,误差随波段宽度变大而增加。Cao等^[9]评估了波段宽度对叶绿素浓度及悬浮物浓度反演的影响。邹寒月等^[10]研究了植被参数在蓝、绿、红、红边以及近红外波段的响应敏感性,探究了传感器中心波长以及波段宽度对植被遥感参数反演的影响。Chen等^[11]、Cao等^[12]以及张靖玮和丘仲锋^[13]评估了HY-1C COCTS、Tiangong-2 MWI以及FY-3D MERSI II传感器的信噪比,分析了信噪比对叶绿素浓度以及悬浮物浓度反演的影响。Li等^[14]从光谱响应函数、辐射分辨率以及信噪比3个方面评估了GF-1传感器的水质监测能力。Tang等^[15]对多源高分卫星信噪比以及空间分辨率的影响进行了对比分析,发现空间分辨率对悬浮物质浓度反演的影响要高于信噪比。Gray等^[16]评估了空间分辨率对雪藻探测的影响,发现高空间分辨率的WorldView影像检测出的雪藻面积是Sentinel-2A MSI传感器的17.5倍。而针对中高空间分辨率宽波段传感器参数对赤潮探测影响的研究有待开展。

基于此,本文利用赤潮高空间分辨率卫星影像数据以及不同优势种赤潮实测高光谱数据探究了波段设置、信噪比、光谱响应函数及空间分辨率对赤潮探测的影响,并对红边波段赤潮探测优势进行了分析,以期为中高空间分辨率光学卫星赤潮探测数据的选择及今后传感器的设计提供参考。

2 数据

2.1 卫星数据

本文选取了目前国内外主流的中高空间分辨率宽波段光学卫星传感器作为研究目标,包括:GF-1宽幅相机(Wide Field of View, WFV)、HY-1C海岸带成像仪(Coastal Zone Imager, CZI)、GF-6 WFV、Landsat8陆地成像仪(Operational Land Imager, OLI)以及Sentinel-2A多光谱成像仪(MultiSpectral Instrument, MSI)。各卫星传感器参数详见表1。

为评估信噪比及光谱响应函数对赤潮探测的影响,本文获取了2014年11月22日广东省阳江市海陵岛北部海域夜光藻赤潮GF-1 WFV2、WFV3影像各1景。为评估空间分辨率对赤潮探测的影响,本文获

取了2021年2月14日北部湾海域夜光藻赤潮Sentinel-2A MSI L2A级反射率数据1景(图1)。在数据获取的基础上,对GF-1 WFV数据进行了辐射校正、几何校正、裁切,对Sentinel-2A MSI数据进行了裁切。

2.2 实测高光谱数据

利用Field Spec4便携式地物光谱仪根据美国国家航空航天局海洋光学测量规范^[17]采用水面之上法获取了东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、抑食金球藻(*Aureococcus anophagefferens*)、夜光藻(*Noctiluca scintillans*)、赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)优势种赤潮及不同类型水体的实测高光谱数据(图2),并同步采集水样,进行了实验室分析。

3 方法

3.1 赤潮探测算法

为评估传感器参数对赤潮探测的影响,本文基于不同卫星传感器赤潮影像开展了赤潮探测实验。针对GF-1 WFV影像,利用面向GF-1 WFV的赤潮光谱指数法GF1_RI^[2]开展赤潮探测;针对Sentinel-2A MSI赤潮影像,利用面向MSI的ABDI光谱指数法^[6]开展赤潮探测,探测算法详细如下。

3.1.1 GF1_RI指数

GF1_RI指数是由Liu等^[2]针对GF-1 WFV传感器数据提出,该指数建立在赤潮红光和近红外响应基础上,利用绿光、红光以及近红外波段辐亮度计算得到,具体计算公式为

$$GF1_RI = L3 - (L2 + L4)/2, \quad (1)$$

式中, $L2$ 、 $L3$ 以及 $L4$ 分别表示绿光波段、红光波段以及近红外波段的辐亮度。探测阈值采用Liu等^[2]论文中的阈值-2.5,即大于-2.5的像元为赤潮,小于-2.5的像元为海水。

3.1.2 ABDI指数

ABDI指数是由Cao等^[6]针对Sentinel-2A MSI数据提出,该指数由两部分组成,第一部分通过红边波段与红光、近红外波段的基线差来区分清水和赤潮,第二部分通过红光波段减去绿光波段的一半实现了浑水与赤潮的区分,具体计算公式为

$$ABDI = [R_{RE2} - R_{Red} - (R_{NIRn} - R_{Red}) \times (\lambda_{RE2} - \lambda_{Red}) / (\lambda_{NIRn} - \lambda_{Red})] - (R_{Red} - 0.5 \times R_{Green}), \quad (2)$$

式中, R_{Green} 、 R_{Red} 、 R_{RE2} 、 R_{NIRn} 分别表示在绿光、红光、红边2以及近红外波段的遥感反射率, λ_{Red} 、 λ_{RE2} 、 λ_{NIRn} 分别表示在红光、红边2以及近红外波段的中心波长。

表 1 中高空间分辨率卫星传感器参数

Table 1 Medium and high spatial resolution satellite sensor parameters

卫星传感器	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	卫星发射时间
GF-1 WFV	1	450~520	485	16	800	2	2013年
	2	520~600	555	16	800	2	2013年
	3	630~690	660	16	800	2	2013年
	4	770~890	830	16	800	2	2013年
HY-1C CZI	1	420~500	460	50	950	3	2018年
	2	520~600	560	50	950	3	2018年
	3	610~690	650	50	950	3	2018年
	4	760~890	825	50	950	3	2018年
GF-6 WFV	1	450~520	485	16	800	2	2018年
	2	520~590	555	16	800	2	2018年
	3	630~690	660	16	800	2	2018年
	4	770~890	830	16	800	2	2018年
	5	690~730	710	16	800	2	2018年
	6	730~770	750	16	800	2	2018年
	7	400~450	425	16	800	2	2018年
	8	590~630	610	16	800	2	2018年
Landsat8 OLI	1	433~453	443	30	170	16	2013年
	2	450~515	483	30	170	16	2013年
	3	525~600	563	30	170	16	2013年
	4	630~680	655	30	170	16	2013年
	5	845~885	865	30	170	16	2013年
Sentinel-2A MSI	1	433~453	443	60	290	10	2015年
	2	458~523	490	10	290	10	2015年
	3	543~578	560	10	290	10	2015年
	4	650~680	665	10	290	10	2015年
	5	698~713	705	20	290	10	2015年
	6	733~748	740	20	290	10	2015年
	7	773~793	783	20	290	10	2015年
	8	785~900	842	10	290	10	2015年

通过最大类间方差阈值分割法结合目视判读^[6]确定了赤潮探测阈值为 0.027, 大于 0.027 的像元为赤潮。

3.2 信噪比评估方法

3.2.1 信噪比评估流程

信噪比即信号与噪声的比例, 是反应传感器数据质量的重要指标^[18], 能够很好地反映传感器的辐射性能及衰退情况。传感器的噪声定义为随机噪声误差

的单变量高斯分布的标准偏差, 常用标准差来表示。针对卫星传感器信噪比评估, Hu 等^[19]提出了一种综合考虑水体叶绿素浓度等因素的信噪比评估算法, 该方法被广泛应用于卫星传感器的信噪比评估, 其流程如图 3 所示。

针对每一个波段, 其信噪比评估方法具体步骤如下:
(1) 选取叶绿素 *a* 浓度小于 0.07 mg/m³ 的大洋清

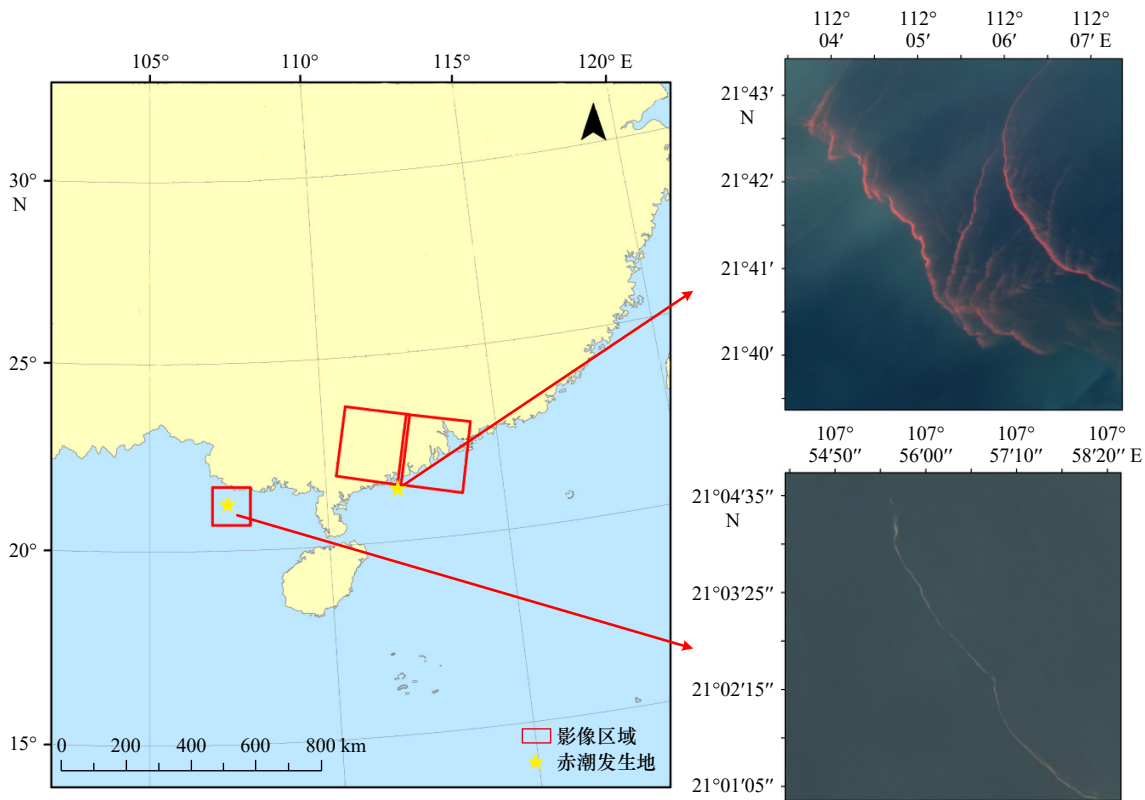


图1 研究区及赤潮卫星影像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area and satellite images of red tide

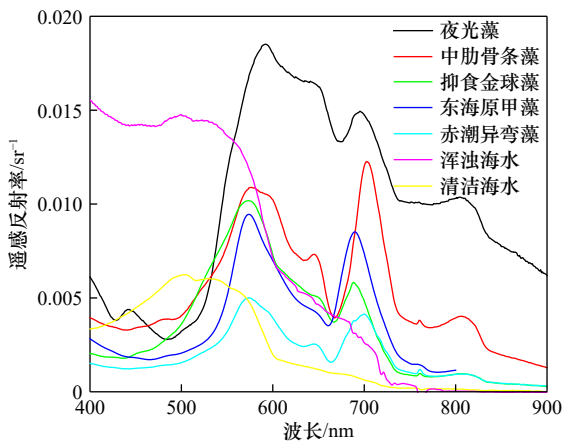


图2 不同优势种赤潮及不同类型海水实测高光谱数据

Fig. 2 Hyperspectral data of different dominant species of red tide and different types of seawater

洁水体区影像, 利用 Hu 等^[9] 的清水典型辐射值 L_{typical} 作为限制条件, 对其进行筛选。

(2) 为进一步地减小所选区域海洋或者大气本身变化所带来的影响, 保证所选区域的匀质性, 将经过步骤(1)筛选的影像分为多个 3×3 大小的块, 将各个块内最大辐射值与最小辐射值的比值作为阈值做进一步的筛选, 将超过该阈值的块丢弃。计算每个块的标准差作为噪声值, 对所有块计算出的噪声值进行高

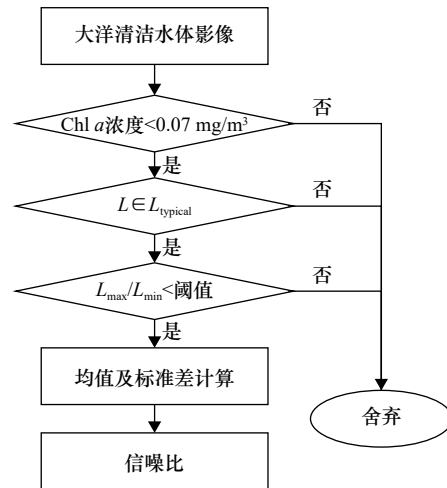


图3 信噪比评估流程图

Fig. 3 Flow chart of signal to noise ratio evaluation

斯拟合, 选取符合正态分布的噪声对应的阈值作为该波段的阈值。

(3) 计算经过上述两个步骤筛选得到的每个块的均值与标准差, 将其比值作为该块的信噪比, 将每个块计算得到的信噪比取平均即为该波段的信噪比。

3.2.2 信噪比评估阈值的确定

Hu 等^[9] 提出的信噪比评估方法主要面向水色卫星, 由于波段设置、光谱响应的差异, 该方法无法直

接应用于高分卫星的信噪比评估。为此,本文针对高分卫星特点,对该算法进行了适用性调整。在利用清水典型辐亮度值进行筛选时,由于 GF-1 WFV 与 MODIS Aqua 传感器的波段设置不同,缺乏 830 nm 波段的典型辐射值,本文通过 3 次样条插值得到了 830 nm 波段的典型辐射值 L_{typical} 。此外, Hu 等^[19]的信噪比评估算法中的阈值由于波段的差异无法应用于 GF-1 WFV 传感器,故本文基于太平洋中部清洁水体区(叶绿素 a 浓度 $<0.07 \text{ mg/m}^3$) GF-1 WFV2、WFV3 传感器影像,分析了阈值对信噪比评估的影响(图 4)。

由图 4 可以看出,当阈值小于 1.005 时无有效像元,无法进行信噪比评估;当阈值在 1.005~1.015 之间时,可获取大量有效像元,计算得到的信噪比值较为稳定。为进一步确定阈值,本文对此 6 景影像标准差(即噪声)分布进行了统计分析(图 5)。

当阈值为 1.005 时,其噪声分布明显不符合正态分布。当阈值为 1.01 时,虽较符合正态分布,但噪声值 0.02 至 0.035 处仍有分布,故均将其排除。当阈值为 1.015 时,其噪声分布最为符合正态分布,故蓝光波段的阈值确定为 1.015。同理,确定了绿光波段、红光波段以及近红外波段的阈值,分别为 1.005、1.01、1.015(图 6)。

3.3 中高空间分辨率宽波段卫星遥感反射率模拟

基于赤潮实测遥感反射率数据,结合各个中高空间

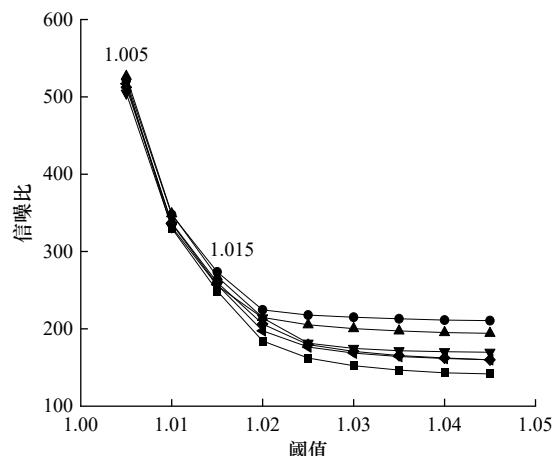


图 4 6 景宽幅相机影像蓝光波段不同阈值对应不同信噪比

Fig. 4 Different signal-to-noise ratios were obtained by calculating different thresholds at the blue band of six wide field of view images

分辨率卫星传感器光谱响应函数模拟其遥感反射率,计算公式为

$$R_{rs}(B_i) = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} R_{rs}(\lambda) \cdot RSR_i(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} RSR_i(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

式中, $R_{rs}(B_i)$ 表示第 i 波段的遥感反射率; $R_{rs}(\lambda)$ 表示实测遥感反射率; $RSR_i(\lambda)$ 为第 i 波段的光谱响应函数; λ_{\min} 和 λ_{\max} 分别为波段 i 的起始波长和终止波长。

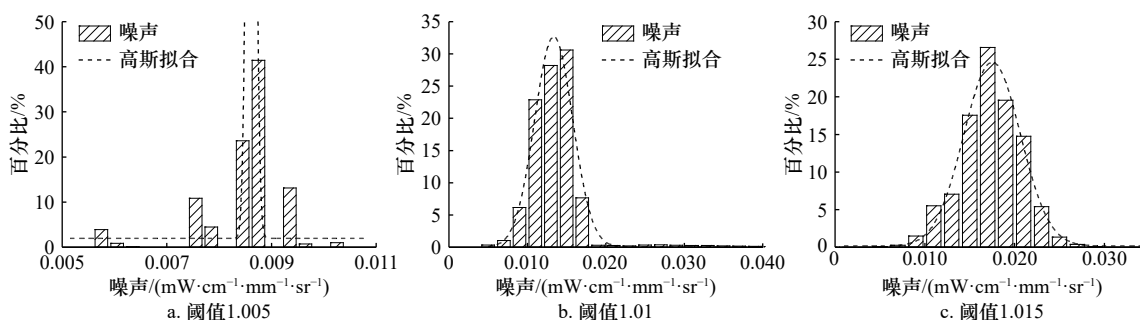


图 5 蓝光波段不同阈值对应噪声分布

Fig. 5 Noise distribution of different thresholds in blue band

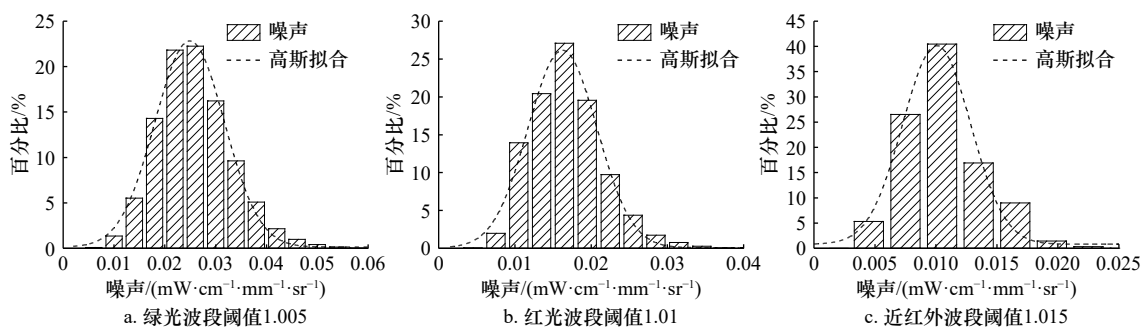


图 6 宽幅相机传感器绿光、红光、近红外波段噪声分布

Fig. 6 Distribution of noise in the green, red and near-infrared bands of the wide field of view sensor

3.4 精度评价方法

针对赤潮探测精度定量评估,本文基于混淆矩阵计算了总体精度(OA)、召回率(Recall)、精度(Precision)、F1-Score以及Kappa系数,计算公式为

$$OA = (TP + TN) / N, \quad (4)$$

$$Precision = TP / (TP + FP), \quad (5)$$

$$Recall = TP / (TP + FN), \quad (6)$$

$$F1-Score = 2 \times (Precision \times Recall) / (Precision + Recall), \quad (7)$$

$$Kappa = \frac{TP + TN}{(TN + FP) \times (TN + FN) + (FN + TP) \times (FP + TP)}, \quad (8)$$

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。

4 结果分析

4.1 波段设置对赤潮探测的影响

由于卫星传感器设计目的不同,其波段宽度、中心波长会有所差异,导致传感器响应的差异,进而会对目标探测造成影响。本文基于不同优势种赤潮实测遥感数据,分析了主流中高空间分辨率卫星波段设置对赤潮探测的影响(图7,图8)。

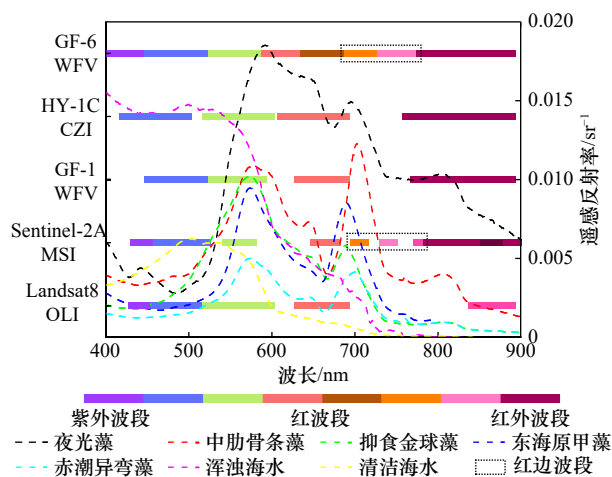


图7 不同卫星波段设置示意图

Fig. 7 Diagram of different satellite band settings

由图7和图8可知,赤潮水体在700 nm波长附近存在明显的荧光反射峰,这是卫星赤潮探测的理论基础^[20]。但各中高空间分辨率卫星传感器的红光波段,并未完全覆盖700 nm波长附近的荧光反射峰。相比于HY-1C CZI、GF-1 WFV及Landsat8 OLI传感器,Sentinel-2A MSI和GF-6 WFV传感器在700 nm波长附近

设置了红边波段,该波段的设置更好地捕捉到了赤潮荧光反射峰。

为探究红光波段荧光反射峰覆盖程度及红边波段对赤潮光谱响应的影响,本文基于夜光藻、中肋骨条藻、抑食金球藻及赤潮异弯藻优势种赤潮实测高光谱数据,结合Landsat8 OLI传感器、Sentinel-2A MSI传感器、GF-1 WFV3传感器、HY-1C CZI传感器以及GF-6 WFV传感器光谱响应函数(图8)模拟了不同优势种赤潮不同中高空间分辨率卫星传感器数据的宽波段遥感反射率(图9)。图8中灰色区域表示卫星传感器光谱响应函数,深灰色区域表示不同波段间光谱响应函数重叠部分。

由图8可知,Landsat8 OLI以及Sentinel-2A MSI传感器红光波段未覆盖赤潮700 nm左右的荧光反射峰,而HY-1C CZI、GF-1 WFV3以及GF-6 WFV传感器红光波段覆盖到了部分赤潮700 nm左右的荧光反射峰。宽波段模拟遥感反射率显示,HY-1C CZI、GF-1 WFV3以及GF-6 WFV传感器红光波段赤潮响应要高于Landsat8 OLI以及Sentinel-2A MSI传感器(图9)。因此,红光波段是否覆盖到赤潮荧光峰会对赤潮响应产生影响。此外,由图9可知,相对于红光波段,红边波段对赤潮水体响应更明显,尤其是东海原甲藻、中肋骨条藻及赤潮异弯藻赤潮,这主要是由于红边波段完全覆盖了以上几种赤潮的荧光反射峰。而夜光藻及抑食金球藻赤潮荧光反射峰位于690 nm左右(图7),导致Sentinel-2A MSI及GF-6 WFV传感器红边波段响应较弱。由此可见,红边波段对于赤潮探测来说具有重要意义。

4.2 信噪比及光谱响应函数对赤潮探测的影响

不同卫星传感器具有不同的波段设置,且获取其严格时空同步的赤潮影像较为困难,导致无法准确评估光谱响应函数、信噪比对赤潮探测的影响。因此,为避免卫星传感器间波段差异、影像时空差异的影响,本文选取了波段设置相同且时空严格同步的GF-1 WFV2、GF-1 WFV3赤潮影像,开展了赤潮探测实验,评估了信噪比和光谱响应函数对赤潮探测的影响,详细如下。

4.2.1 信噪比对赤潮探测的影响

本文基于3.2节信噪比评估算法对GF-1 WFV2和GF-1 WFV3传感器进行了信噪比评估(表2)。评估结果显示GF-1 WFV2、GF-1 WFV3传感器的信噪比存在较大差异,GF-1 WFV2信噪比整体上高于GF-1 WFV3,特别是在绿光波段,差异最为明显。

为探究信噪比差异对赤潮探测的影响,本文基于时空同步的GF-1 WFV2、GF-1 WFV3影像,利用GF1_RI

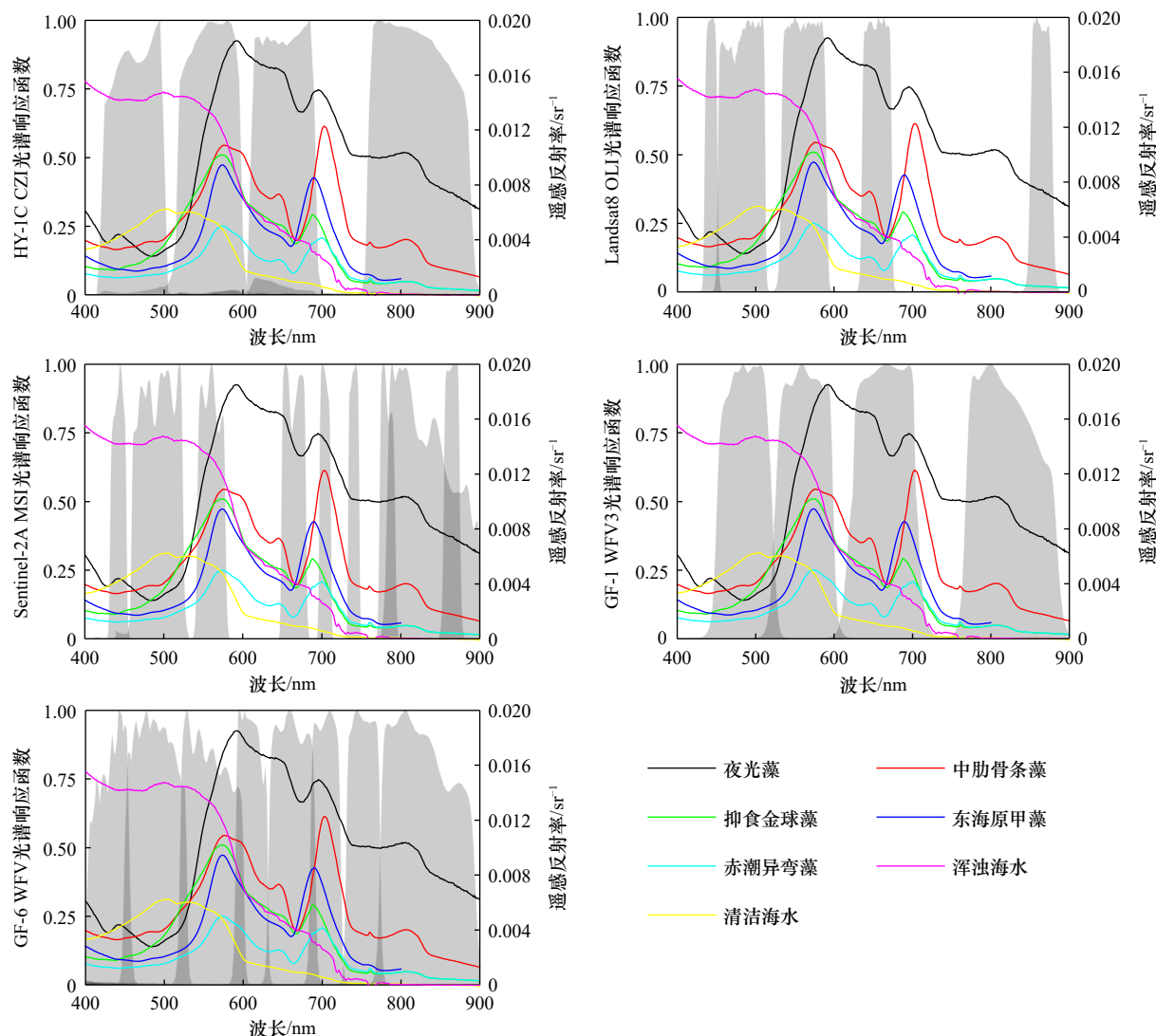


图 8 不同卫星光谱响应函数

Fig. 8 Spectral response functions of different satellites

指数算法开展了赤潮探测实验(图 10)。

由图 10 可知, GF-1 WfV2、GF-1 WfV3 传感器均具有良好的赤潮探测能力, GF-1 WfV3 传感器赤潮检测结果明显优于 GF-1 WfV2 传感器, 特别是在赤潮条带状分布区域。此外, 本文基于目视解译获取的真值对赤潮探测结果进行了定量评估(表 3)。

定量评估结果显示, GF-1 WfV3 赤潮检测精度优于 GF-1 WfV2, 其 Kappa 系数、OA、Recall 以及 F1-Score 均高于 GF-1 WfV2。实验结果表明, 虽然 GF-1 WfV3 传感器具有相同的波段设置, 但赤潮的探测精度具有明显的差异。

综合表 2 及表 3 可知, GF-1 WfV3 传感器赤潮探测精度优于 GF-1 WfV2 传感器, 但信噪比评估结果显示 GF-1 WfV2 传感器信噪比要优于 GF-1 WfV3。由此可见, 对于中高空间分辨率卫星传感器来说, 信噪比不是影响赤潮探测精度的主要因素。

4.2.2 光谱响应函数对赤潮探测的影响

由 4.2.1 节可知, 信噪比不是 GF-1 WfV2 和 GF-1 WfV3 赤潮探测精度差异的主要因素。除信噪比之外, GF-1 WfV2 和 GF-1 WfV3 传感器还具有不同的光谱响应函数(图 11)。

由图 11 可知, GF-1 WfV2、GF-1 WfV3 传感器光谱响应函数具有明显差异。为分析光谱响应函数对赤潮探测的影响, 本文选取了 GF-1 WfV3 检测为赤潮而 GF-1 WfV2 检测为非赤潮的像元进行统计分析(图 12)。结果显示, GF-1 WfV2、GF-1 WfV3 传感器在蓝光、红光和近红外波段接收到的辐亮度相差较小, 在绿光波段差异较大, GF-1 WfV2 在绿光波段的辐亮度值要高于 GF-1 WfV3, 这是导致计算出的 GF1_RI 指数有所差异的主要原因。

为进一步分析, 本文选取了 GF-1 WfV2 和 GF-1 WfV3 赤潮像元, 计算了 GF1_RI 指数(图 13)。发现

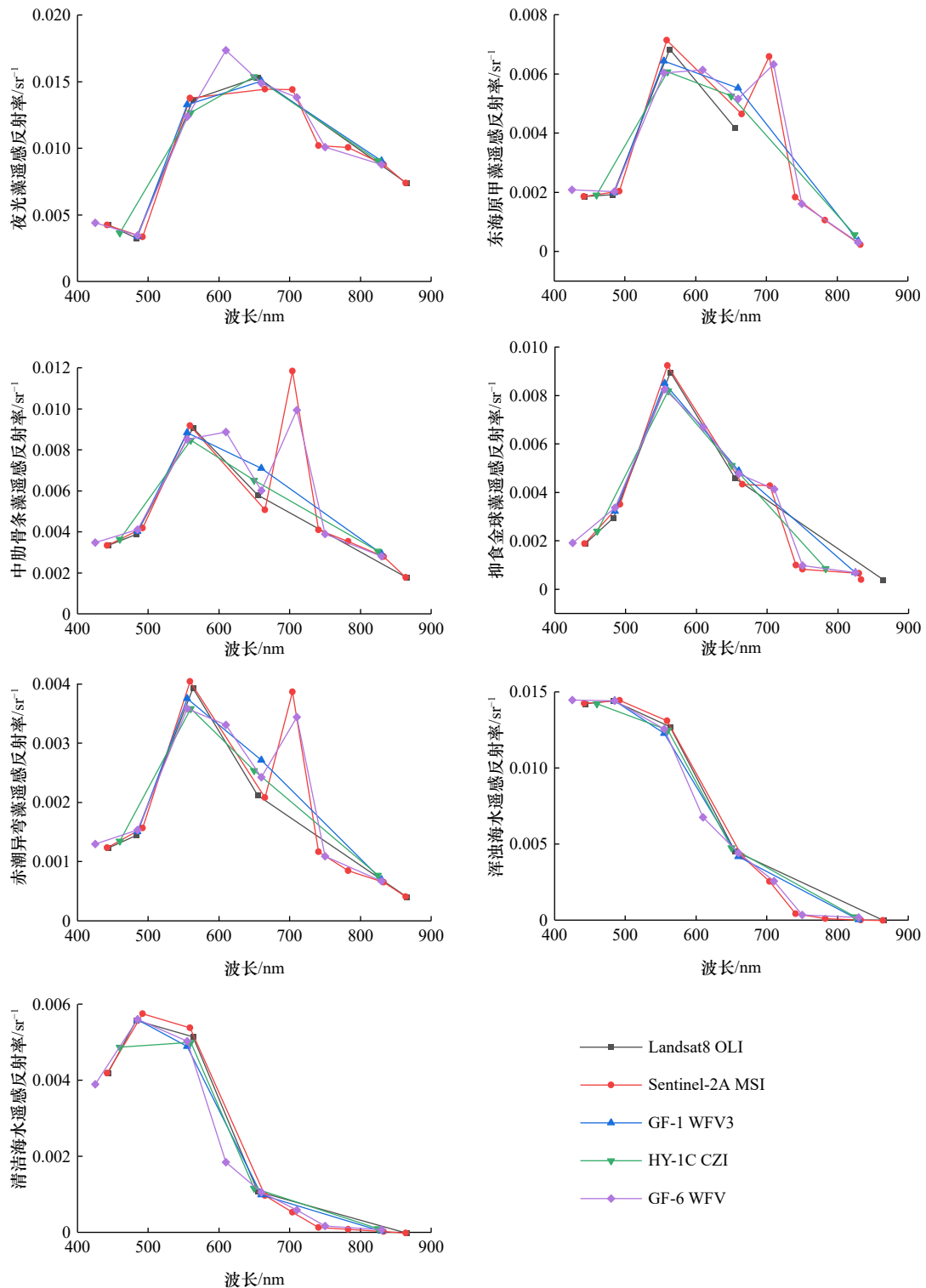


图 9 不同优势种赤潮及不同类型海水中高空间分辨率宽波段卫星模拟遥感反射率

Fig. 9 Medium and high resolution broad-band satellite remote sensing reflectance simulated from different dominant species of red tide and different types of seawater

两个传感器计算的 GF1_RI 指数并不完全一致, GF-1 WFV3 GF1_RI 指数要高于 GF-1 WFV2, 故 GF-1 WFV3 赤潮探测效果更好。

综上, GF-1 WFV2、GF-1 WFV3 传感器之间光谱

响应函数的差异是造成 GF-1 WFV3 传感器赤潮探测精度优于 GF-1 WFV2 传感器的主要原因之一。

4.3 空间分辨率对赤潮探测的影响

不同卫星重访周期不同, 导致缺乏时空同步的影

表 2 GF-1 WfV2、GF-1 WfV3 传感器信噪比评估结果

Table 2 Signal-to-noise ratio evaluation results of GF-1 WfV2 and GF-1 WfV3 sensors

波长/nm	WFV2 SNR	WFV3 SNR	差异	$L_{typical} / (mW \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1} \cdot sr^{-1})$	$L_{typical}$ 标准差
485	263	258	5	5.23	1.01
555	107	84	23	2.85	0.61
660	79	64	15	1.27	0.30
830	61	44	17	0.43	0.11

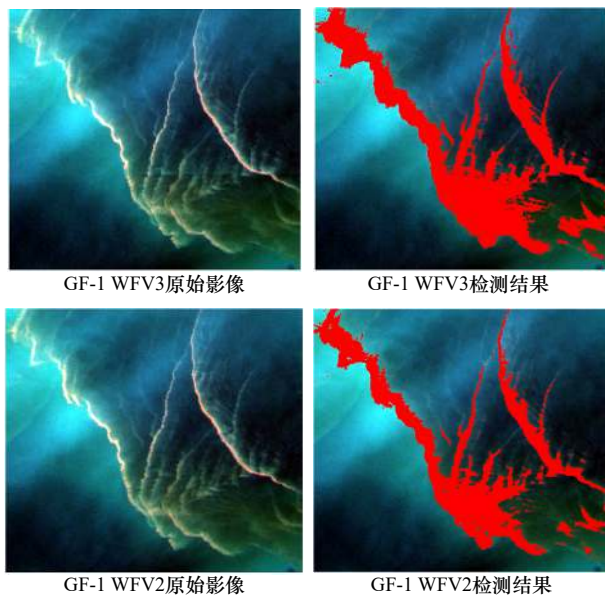


图 10 GF-1 WfV 传感器赤潮检测结果

Fig. 10 Results of GF-1 WfV sensor red tide detection

表 3 GF-1 WfV2、GF-1 WfV3 传感器赤潮探测精度

Table 3 Red tide detection accuracy of GF-1 WfV2 and GF-1 WfV3 sensors

影像	OA/%	Recall/%	Precision/%	F1-Score	Kappa系数
WFV2	94.47	73.15	98.51	0.84	0.807
WFV3	97.27	92.73	93.43	0.93	0.914

像数据,且赤潮的发生是一个快速变化的过程,卫星过境时间的差异会导致影像中赤潮位置和分布发生变化。因此,无法基于多源卫星开展不同分辨率的赤潮探测影响评估。为规避卫星影像成像时间差异的干扰,本文利用同一景 Sentinel-2A MSI 影像,通过重采样获取 10 m、20 m、60 m、100 m 及 200 m 空间分辨率卫星影像,利用 ABDI 指数对不同空间分辨率影像进行了赤潮探测,进而评估空间分辨率对赤潮探测的影响(图 14)。

结果显示,随着空间分辨率的不断降低, Sentinel-2A MSI 传感器赤潮探测能力明显下降。定量评估结果

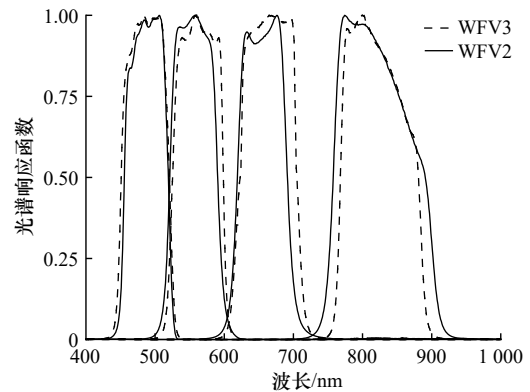


图 11 GF-1 WfV2、GF-1 WfV3 光谱响应函数

Fig. 11 Spectral response functions of GF-1 WfV2 and GF-1 WfV3

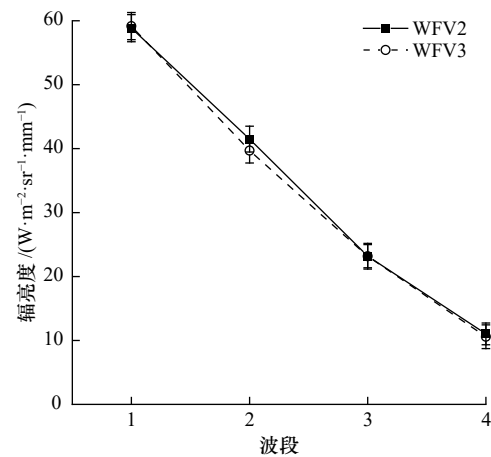


图 12 GF-1 WfV3 检测出赤潮 GF-1 WfV2 未检测出赤潮像元辐亮度

Fig. 12 Irradiance of image elements where red tide was detected by GF-1 WfV3 but not by GF-1 WfV2

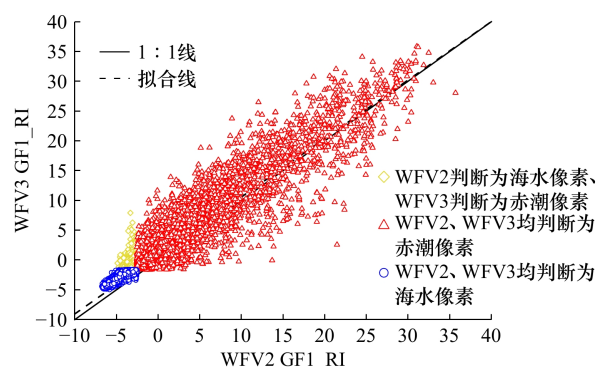


图 13 GF-1 WfV3 与 GF-1 WfV2 GF1_RI 指数散点图

Fig. 13 Scatter plot of GF1_RI index calculated by GF-1 WfV3 and GF-1 WfV2

显示,随着空间分辨率的不断降低,各评估指标不断下降,其中 Kappa 系数从 0.763 降至 0.260, OA 从 99.62% 降至 97.18%, Recall 从 62.75% 降至 15.38%, F1-Score 从 0.765 降至 0.267(表 4)。上述结果表明,卫星影像空间分辨率对赤潮探测精度的影响较大。

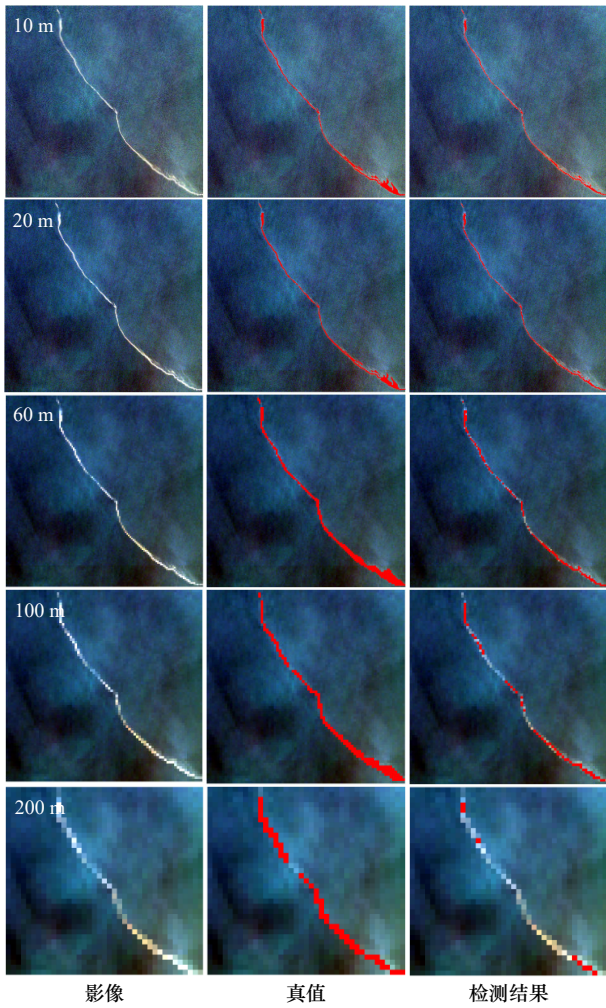


图 14 不同空间分辨率 Sentinel-2A MSI 影像赤潮检测结果

Fig. 14 Results of red tide detection with Sentinel-2A MSI images at different spatial resolutions

表 4 不同空间分辨率赤潮探测精度

Table 4 Accuracy of red tide detection at different spatial resolutions

分辨率/m	OA/%	Recall/%	F1-Score	Kappa系数
10	99.62	62.75	0.765	0.763
20	99.55	60.00	0.748	0.746
60	98.80	43.64	0.608	0.603
100	98.33	36.70	0.537	0.530
200	97.18	15.38	0.267	0.260

5 红边波段赤潮探测优势分析

由 4.1 节可知,大多数优势种赤潮在红边波段具有明显的响应特征,为探究红边波段赤潮探测优势,本文获取了夜光藻赤潮的 Sentinel-2A MSI 传感器影像,基于 GF1_RI 指数^[2]开展了赤潮探测实验(图 15)。

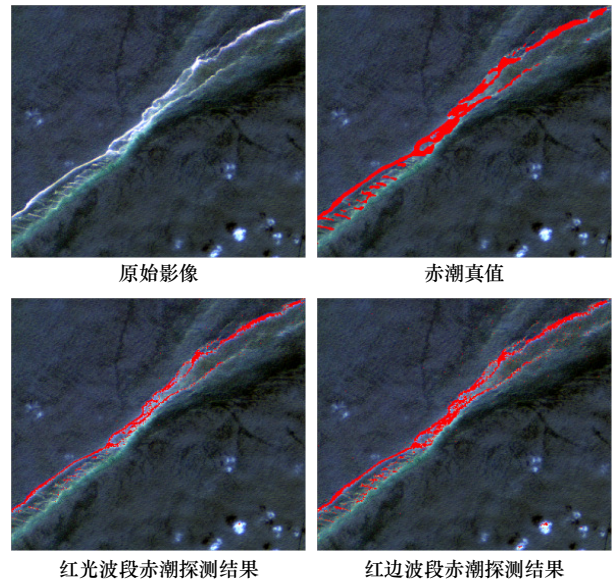


图 15 赤潮 Sentinel-2A MSI 影像探测结果

Fig. 15 Red tide detection results from Sentinel-2A MSI images

结果显示,红边波段赤潮探测效果明显优于红光波段(图 15)。从定量评估结果看,在相同的赤潮探测阈值下,红边波段赤潮探测精度较高,其召回率为 60.8%, F1-Score 为 0.70, Kappa 系数为 0.69,红光波段赤潮探测精度较低,其召回率为 44.1%, F1-Score 为 0.59, Kappa 系数为 0.58(表 5)。

表 5 Sentinel-2A MSI 不同波段 GF1_RI 指数赤潮探测精度
Table 5 Accuracy of GF1_RI index red tide detection at different wavelengths calculated by Sentinel-2A MSI

波段	Recall/%	F1-Score	Kappa系数
红光波段	44.1	0.59	0.58
红边波段	60.8	0.70	0.69

此外,本文获取了夜光藻赤潮 GF-6 WFV 传感器影像,基于 GF1_RI 指数^[2]开展了赤潮探测实验(图 16)。

结果同样显示红边波段赤潮探测效果明显优于红光波段(图 16)。从定量评估结果看,在相同的赤潮探测阈值下,红边波段赤潮探测精度较高,其召回率为 82.6%, F1-Score 为 0.90, Kappa 系数为 0.90,红光波段赤潮探测精度较低,其召回率为 79.8%, F1-Score 为 0.87, Kappa 系数为 0.86(表 6)。

由此可见,相比于红光波段,红边波段对赤潮更敏感,基于红边波段进行赤潮探测有助于探测精度的提高,在今后中高空间分辨率卫星传感器波段设计中,可以考虑增加红边波段,以为赤潮探测提供支撑。但需要说明的是,不同优势种赤潮红边波段响应具有差异,会影响赤潮红边波段探测精度。

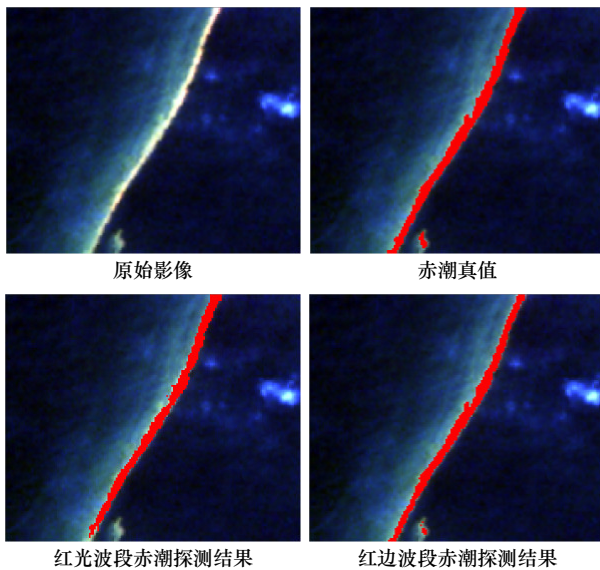


图 16 赤潮 GF-6 WFV 影像探测结果

Fig. 16 Red tide detection results from GF-6 WFV images

6 结论

为探究中高空间分辨率光学卫星传感器参数对赤潮探测的影响,本文基于不同优势种赤潮实测高光谱数据和中高空间分辨率卫星赤潮影像开展了波段设置、信噪比、光谱响应函数等传感器参数对赤潮探测影响实验,得到了以下结论:

参考文献:

- [1] 马毅. 赤潮航空高光谱遥感探测技术研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2003.
Ma Yi. Research on red tide detection technology by aerial hyperspectral remote sensing[D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [2] Liu Rongjie, Zhang Jie, Cui Bin'ge, 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.
- [3] 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.
- [4] 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*, 2021, 14(1): 88.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Trishchenko A P, Cihlar J, Li Zhanqing. Effects of spectral response function on surface reflectance and NDVI measured with moderate resolution satellite sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 81(1): 1–18.
- [8] 刘三超, 柳钦火, 高懋芳, 等. 波谱响应函数和波宽对地表温度反演的影响[J]. *遥感信息*, 2007(5): 3–6.
Liu Sanchao, Liu Qinhuo, Gao Maofang, et al. A study on effects of spectral response function and band width on land surface temperature inversion[J]. *Remote Sensing Information*, 2007(5): 3–6.
- [9] Cao Zhigang, Ma Ronghua, Duan Hongtao, et al. Effects of broad bandwidth on the remote sensing of inland waters: implications for high spatial resolution satellite data applications[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2019, 153: 110–122.
- [10] 邹寒月, 毛智慧, 邓磊. 传感器波段设置对植被遥感参数反演的影响研究[J]. *地理信息世界*, 2021, 28(3): 25–33.
Zou Hanyue, Mao Zhihui, Deng Lei. The influence of sensor band settings on vegetation parameter inversion[J]. *Geomatics World*, 2021, 28(3): 25–33.
- [11] Chen Shuguo, Du Keping, Lee Z, et al. Performance of COCTS in global ocean color remote sensing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(2): 1634–1644.
- [12] Cao Zhigang, Duan Hongtao, Song Qingjun, et al. Evaluation of the sensitivity of China's next-generation ocean satellite sensor MWI on-

表 6 GF-6 WFV 不同波段 GF1_RI 指数赤潮探测精度
Table 6 Accuracy of GF1_RI index red tide detection at different wavelengths calculated by GF-6 WFV

波段	Recall/%	F1-Score	Kappa系数
红光波段	79.8	0.87	0.86
红边波段	82.6	0.90	0.90

(1) 卫星波段设置对赤潮探测具有较大影响, 红边波段对赤潮响应明显; 卫星影像红边波段赤潮探测实验表明, 相比于红光波段, 红边波段赤潮探测的平均召回率提高了 10.2%, 平均 F1-Score 提高了 11%。

(2) 时空同步的赤潮 GF-1 WFV 影像探测结果表明: 信噪比对赤潮探测的影响较小, 光谱响应函数的差异会造成赤潮探测精度的不同, 是影响赤潮探测精度的主要原因之一。

(3) 空间分辨率对赤潮探测精度影响较大。随着空间分辨率从 10 m 降到 200 m, 赤潮探测的精度也在不断降低, Kappa 系数从 0.763 降至 0.260, Recall 从 62.75% 降至 15.38%, F1-Score 从 0.765 降至 0.267。

综上, 波段设置、光谱响应函数以及空间分辨率等传感器参数设置对赤潮探测来说十分重要, 设置有红边波段的中高空间分辨率卫星传感器如 Sentinel-2A MSI 是中高空间分辨率卫星赤潮探测较为理想的数据源。

- board the Tiangong-2 space lab over inland waters[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, 71: 109–120.
- [13] 张靖玮, 丘仲锋. 针对海洋水域的FY-3D MERSI II 数据质量评估[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 11–30.
Zhang Jingwei, Qiu Zhongfeng. Evaluation of data quality of FY-3D satellite sensor MERSI II over marine waters[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 11–30.
- [14] Li Jian, Chen Xiaoling, Tian Liqiao, et al. Improved capabilities of the Chinese high-resolution remote sensing satellite GF-1 for monitoring suspended particulate matter (SPM) in inland waters: radiometric and spatial considerations[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 106: 145–156.
- [15] Tang Rugang, Shen Fang, Pan Yanqun, et al. Multi-source high-resolution satellite products in Yangtze Estuary: cross-comparisons and impacts of signal-to-noise ratio and spatial resolution[J]. *Optics Express*, 2019, 27(5): 6426–6441.
- [16] Gray A, Krolkowski M, Fretwell P, et al. Remote sensing phenology of Antarctic green and red snow algae using World View satellites[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 671981.
- [17] Mueller J L, Fargion G S, Mc Clain C R, et al. Ocean Optics Protocols for Satellite Ocean Color Sensor Validation, Revision 4, Volume III: Radiometric Measurements and Data Analysis Protocols[M]. Maryland: National Aeronautical and Space Administration, 2003, 21–30.
- [18] Qi Lin, Lee Z, Hu Chuanmin, et al. Requirement of minimal signal-to-noise ratios of ocean color sensors and uncertainties of ocean color products[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(3): 2595–2611.
- [19] Hu Chuanmin, Feng Lin, Lee Z, et al. Dynamic range and sensitivity requirements of satellite ocean color sensors: learning from the past[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(25): 6045–6062.
- [20] 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.

Impact of medium and high spatial resolution wide band optical satellite sensor parameters on red tide detection

Ge Huaxin^{1,2}, Liu Rongjie², Zhao Xin^{1,2}, Ma Yi^{2,3}, Wang Xinnian⁴, Wang Yikan⁴

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

Abstract: Medium and high spatial resolution wide-band optical satellites have become the main data source for red tide monitoring, but unlike the ocean color satellite sensors, the medium and high spatial resolution satellite sensors are mainly oriented to terrestrial applications with a small number of bands and a large band width, and the resulting impact on red tide detection has yet to be studied. Therefore, this paper explores the effects of band settings, spectral response functions, signal-to-noise ratio and spatial resolution on red tide detection based on the actual hyperspectral data of different dominant species of red tide, spatio-temporally synchronized GF-1 WFV2 and GF-1 WFV3 sensor images, Sentinel-2A MSI sensor images and GF-6 WFV sensor images, and analyzes the advantages of red-edge band on red tide detection. Our results show that: the band settings have a great influence on the red tide detection, especially the central wavelength and band width of the red band and the red edge band; the red tide detection accuracy is greatly influenced by the spectral response function and less influenced by the signal-to-noise ratio under the same band settings; the spatial resolution has a greater influence on the red tide detection, and the improvement of spatial resolution helps to improve the accuracy of red tide detection. The experiments of red-edge band red tide detection show that red-edge band red tide detection has obvious advantages over red-light band red tide detection, and the F1-Score is improved by 11% on average. The results of this paper provide a theoretical basis for the data selection of red tide detection from medium and high spatial resolution satellites on the one hand, and a reference for the design of medium and high spatial resolution satellite sensors on the other hand.

Key words: medium and high spatial resolution; wide band; satellite sensor; red tide detection