

海面溢油光学卫星遥感监测能力分析

苏伟光^{1,2,3}, 苏奋振², 周成虎², 杜云艳²

(1. 中国科学院海岸带环境过程重点实验室(烟台海岸带研究所), 山东省海岸带环境过程重点实验室, 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 海面溢油对海洋生态的影响具有频率高、范围广和危害大的特点。卫星遥感已成为海面溢油监测的重要手段。本文从海面油膜光谱特性出发,与常用的光学卫星传感器建立对应关系,根据对不同光学遥感卫星的空间分辨率、时间分辨率、幅宽和波段数等主要物理参数的对比分析认为,MODIS 传感器和 HJ-1 卫星有较强的海面溢油监测能力。故此,采用 MODIS、BJ-1、HJ-1 和 FY-3 光学卫星影像,对 2006 年 3 月和 2011 年 6 月渤海海面溢油污染事故进行了遥感监测。MODIS 遥感图像可以清晰反映出 2006 年和 2011 年这 2 次溢油污染事故中海面油膜信息, HJ-1 卫星遥感影像则能反映出 2011 年溢油污染事故中海面油膜信息,而 BJ-1 和 FY-3 卫星遥感影像不能反映出海面油膜信息。HJ-1、BJ-1 和 FY-3 卫星在波段设置上相似,但是,BJ-1 和 FY-3 卫星不能反映出油膜信息,所以,本文进一步对这 2 次溢油事件中的 MODIS 遥感影像的油水光谱反差和海水光谱方差进行计算,并对结果进行比较分析,实验结果表明,当 MODIS 某一波段的海水光谱方差小于油水光谱反差时,则该波段可以显示出油膜信息;而当油水光谱反差小于或接近海水方差时,则不能反映出海面油膜信息。从波谱响应、空间分辨率和时间分辨率,以及监测实例中说明 MODIS 传感器有较强的海面溢油监测能力。

关键词: 溢油; 光学遥感; 监测能力

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2012.00523

1 引言

由船舶泄漏、油轮碰撞、海面石油平台泄漏所引起的海面溢油已成为影响海洋生态环境的重要污染物之一。它有着发生频率高、分布范围广,以及危害程度大等特点。油污进入海水后,受到海浪和海风的影响,形成一层漂浮在海面上的油膜,阻碍了水体与大气之间的气体交换,致使鸟类、鱼类等海洋生物死亡,并且威胁沿岸民众的生活。遥感技术已成为当今监测海面溢油最重要、最有效的技术手段之一。目前,主要的海面溢油监测传感器包括微波传感器的合成孔径雷达(SAR)和侧视雷达(SLAR),以及光学传感器的可见光/近红外遥感器。国内外许多学者利用微波进行海面溢油监测,但是微波遥感的时间分辨率低,幅宽较小,而且微波遥感器监测能力还会受到海面风和海浪的影响,另外,一些天然因素等引起的在 SAR 图像上也表现为黑色斑块的现象,也增加了探测的难度。而光

学传感器具有监测范围广、资金投入少、时效性强、光谱信息丰富的优势^[1],已成为海面溢油监测的重要手段。1969 年,美国首次使用机载可见光扫描仪对井喷引起的油污染进行了监测,取得较好的效果^[2]。许多学者利用 AVHRR 数据对不同地区的溢油进行监测^[3-5]。Singh(2010)利用 MODIS 遥感数据对 Maracaibo 的溢油进行了监测^[6]。NASA 对 2010 年墨西哥湾的海洋溢油事件,应用 MODIS 数据进行了连续监测^[7]。我国的海面溢油卫星遥感监测研究起步于 70 年代末 80 年代初,李栖筠利用 TM 和 AVHRR 数据对老铁山水道海洋溢油事故进行了监测,提出了油膜监测的最佳波段组合^[8]。苏伟光利用 MODIS 数据对渤海海面溢油进行监测,并提出了 MODIS 数据的海面溢油检测模型^[9]。Hu 等根据纯净海水中油膜在 MODIS 数据上的独特值对溢油进行了监测^[10]。以上这些研究多是侧重于海面溢油监测方法的研究,针对不同光学卫星光谱段的监测机制和不同光学卫星的监测

收稿日期: 2011-12-26; **修回日期:** 2012-07-11.

基金项目: 国家科技支撑项目(2011BAH23B04); 国家海洋公益性行业科研专项经费项目(201005011)。

作者简介: 苏伟光(1983-),男,博士研究生,研究方向为海洋及海岸带遥感与应用。E-mail: suwg@lreis.ac.cn

能力分析则是遥感监测海面溢油的基础性研究工作,而这些研究工作开展较少。本文主要以海面油膜在不同光谱范围内的光谱特性,建立与光学遥感卫星波段之间的对应关系,并结合各卫星的特点,对卫星的海面溢油监测能力进行分析,以 2006 年 3 月和 2011 年 6 月渤海海面溢油为例,应用光学遥感数据对溢油进行了监测。

2 海面溢油的光谱特征分析

海面溢油的光谱特征是遥感监测溢油的重要依据。Stewart 等在 1970 年提出的油膜光谱辐射模型,随波长的增加,在蓝光区油水对比出现由正至负的变化^[11]。Palmer 指出原油随浓度不同,在 700、740 和 800 nm 处反射率也不同,油膜反射率随着其厚度增加而降低,440~900 nm 可以用来进行油膜信息提取^[12]。Foudan 的研究表明,石油在 580 和 700 nm 具有强的反射峰,油量的增加会降低在可见光波段的反射率,厚油膜在近红外波段反射率要高^[13]。郑安全等用各种光学、红外和微波仪器对国产原油及制品的海面油膜波谱特性进行了实验室和现场测量,得到蓝波段可以作为监测重柴油的最佳波段^[14]。国家海洋局第一海洋研究所的测试结果说明^[11],在可见光范围内,油膜的反射率较小,不同油品的反射率随波长的变化而变化,波长在 500~600nm 处油膜的反射率小,在 650nm 出现一个反射率峰值。而在大于 700nm,反射率在逐渐的增加。大连海事大学^[15]在“八五”期间开展了航天遥感溢油探测的研究,获取了不同油种在多种厚度情况下的波谱特征数据;赵冬至等对不同油品与海水光谱反差进行了分析,得到柴油的反射率高于海水,在 399nm 和 426nm 处出现与海水反差的极大值,并在 930nm 处出现另一次峰值;润滑油反射率在可见光波段高于海水的反射率,在近红外波段略低于海水,在 407nm 和 429nm 处出现反差的极大值;原油反射率低于海水,而在近红外波段高于海水,反差极大值出现在 933 和 1073nm 处^[11,16]。

3 光学卫星海面溢油遥感监测能力分析

目前,可用于海面溢油监测的光学卫星遥感数据源主要包括低分辨率 NOAA 卫星的 AVHRR、中等分辨率的 Terra 和 Aqua 卫星的 MODIS、中高

分辨率的 LANDSAT 卫星的 TM 和 SPOT 的 HRV 等数据。此外,中国的 FY-3 号气象卫星、HY-1B 卫星、BJ-1,以及 HJ-1A/B 号卫星也相继投入到商业化服务和应用中。根据油膜反射率特点及各种光学卫星波段设置,得到卫星波段对油膜反射率的响应,如图 1 所示。

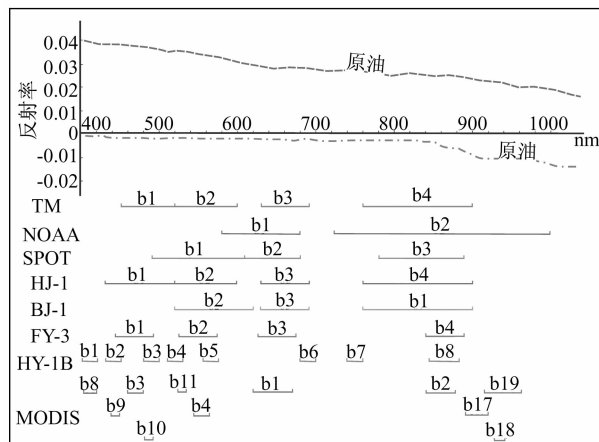


图 1 卫星波段对原油反射率的响应

Fig. 1 Satellites bands response to the reflectivity of crude oil

Terra/Aqua 的 MODIS 传感器空间分辨率为 250m、500m、1000m;时间分辨率为 0.5 天,可以对海面溢油实施动态监测;幅宽 2330km,但受其空间分辨率限制,不利于对小面积海面溢油进行监测;MODIS 有 36 个波段,带宽较窄,相比于其他卫星,光谱分辨率高,波段离散,获得的海洋表面信息更加丰富,而且可以消除一些干扰地物的反射特征。HJ-1A/B 卫星的空间分辨率为 30m,时间分辨率为 2 天,幅宽达到 720km,不仅可以监测大面积海面溢油,而且也能满足对小面积海面溢油的监测,并可以满足海面溢油连续监测的要求;HJ-1A/B 波谱范围在 430~900nm 之间,分为 4 个波段,带宽较宽,波段离散,可以满足海面溢油遥感监测的光谱需求。在波段设置,空间分辨率和时间分辨率上,MODIS 和 HJ-1A/B 卫星均表现出很好的海面溢油监测能力,而且可以免费获取卫星数据,因此,具有较强的海面溢油监测能力。Landsat 卫星的可见光/近红外的空间分辨率分别为 30m、时间分辨率为 16 天、幅宽为 185km,波谱范围在 450~900nm 之间,分为 4 个波段。SPOT 卫星的空间分辨率为 2.5m,时间分辨率为 26 天,幅宽为 60km,波谱范围在 500~890nm 之间,分为 3 个波段,没有蓝光波段。BJ-1 卫星的空间分辨率为 32m,时间分辨率为

2 天^[17],幅宽为 600km,波谱范围在 520~900nm 之间,分为 3 个波段,没有蓝光波段。Landsat、SPOT 和 BJ-1 卫星虽然有较高的空间分辨率,波段设置基本可以满足海面溢油监测的需要,但是它们很少在海洋成像,而且时间分辨率较低,所以,很难满足海面溢油监测的实时性和连续性,降低了海面溢油的监测能力。NOAA 卫星空间分辨率 1.1km,时间分辨率 0.5 天,幅宽 2800km,虽然其有很高的时间分辨率,但是其空间分辨率太低,而且可见光/近红外波谱范围在 580nm~1000nm,分为 2 个波段,带宽较宽。FY-3 号卫星携带的中分辨率光谱成像仪

(MERSI) 的空间分辨率为 250m,周期 101.496 分^[18],幅宽 2900km,波谱范围在 445~890nm 之间,分为 4 个波段。但是 NOAA 卫星和 FY-3 卫星是气象卫星,海洋信息较弱,很难对海面溢油进行监测。HY-1B 为中国第一颗海洋卫星,携带海洋水色扫描仪,空间分辨率 1.1km,时间分辨率 1 天,幅宽 1600km,波谱范围在 402~885nm 之间,分为 8 个波段,但是其空间分辨率太低,而且其主要用于探测叶绿素、悬浮泥沙、可溶有机物及海洋表面温度等要素。上述分析得到了各光学卫星的监测能力,如表 1 所示。

表 1 卫星监测能力
Tab. 1 Satellites monitor capacity

	MODIS	HJ-1	TM	SPOT	BJ-1	NOAA	FY-3	HY-1B
空间分辨率(m)	250	30	30	2.5	32	1100	250	1100
时间分辨率	0.5 天	2 天	16 天	26 天	2 天	0.5 天	101.496 分	1 天
幅宽(km)	2330	720	185	60	600	2800	2900	1600
波段数(个)	36	4	4	3	3	2	4	8
监测能力	强	较强	较弱	较弱	较弱	弱	弱	弱

4 海面溢油遥感监测实例分析

2006 年 3 月下旬,位于 118°30′~119°20′E、38°20′~39°20′N 渤海曹妃甸附近海域发生了因海底输油管线破裂引起的海面溢油事故;2011 年 6 月,在 119°~121°E、38°~39°N 距龙口 70km、长岛 60km 和秦皇岛 170km 处发生了海底溢油事故,6

月 13 日出现单日溢油最大分布面积达 158km²^[19]。

为了研究这两次溢油事件的海面油膜信息提取,本文分别选取了 MODIS、BJ-1、HJ-1,以及 FY-3 卫星的光学遥感数据(见表 2)。对获取的光学遥感数据进行彩色合成和图像增强处理,获得了海面油膜信息。

表 2 数据信息
Tab. 2 Data information

数据源	获取日期	时间	数据源	获取日期	时间	数据源	获取日期	时间
MODIS	3 月 23 日	11:00	BJ-1	3 月 23 日	10:10			
MODIS	6 月 14 日	13:00	HJ-1	6 月 14 日	11:06	FY-3	6 月 14 日	14:05

图 2 为 2006 年 3 月 23 日 MODIS 和 BJ-1 卫星遥感数据经过彩色合成以及图像增强处理后的结果,空间分辨率分别为 500m 和 32m。在 MODIS 卫星影像上,可以反映出 A、B、C 3 个溢油区的海面油膜信息,但在 BJ-1 卫星的影像上并没有反映出油膜信息。

图 3 为 2011 年 6 月 14 日 MODIS、HJ-1 以及 FY-3 卫星遥感数据经过彩色合成,以及图像增强处理后的结果,空间分辨率分别为 500m、30m 和 250m。在 MODIS 和 HJ-1 卫星的影像上可以清晰

地反映出 A 溢油区和 B 溢油区海面的油膜信息,但 FY-3 卫星的影像上并没有反映出油膜信息。

在两次溢油监测中,MODIS 和 HJ-1 卫星可以清晰地反映油膜信息,而与 HJ-1 波段设置相似的 BJ-1 和 FY-3 卫星却不能反映油膜信息。为进一步分析卫星波段的溢油探测能力,选择油水光谱反差和海水方差两个参数进行对比,油水光谱反差是同一波段的油膜反射率与海水反射率的差,是油膜和海水的的光谱差异。海水方差是同一波段海水光谱值和其中心值的偏离程度,代表海水本身的波动。

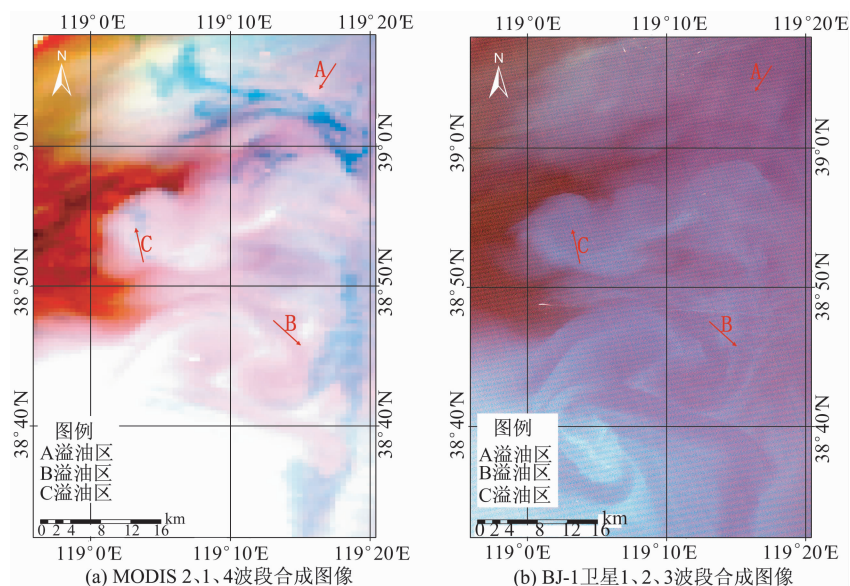


图2 不同卫星的假彩色合成影像

Fig. 2 Different satellite false color image

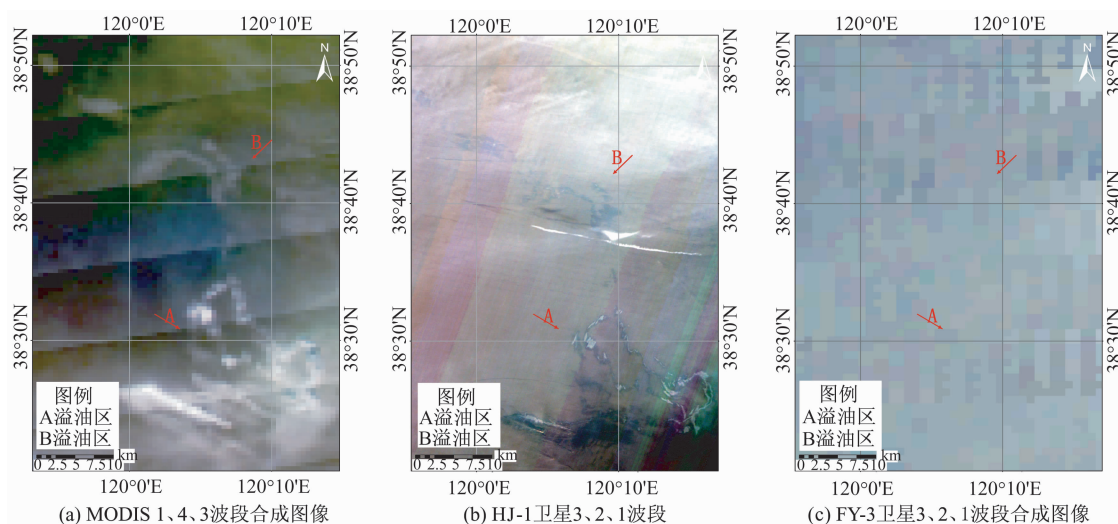


图3 不同卫星的真彩色合成影像

Fig. 3 Different satellite true color image

如果某一波段的油水光谱反差大于海水本身的波动,则该波段可以反映油膜信息;相反,如果某一波

段的油水光谱反差等于或小于海水本身的波动,则波段的油膜信息被海水信息所掩盖,则无法反映。

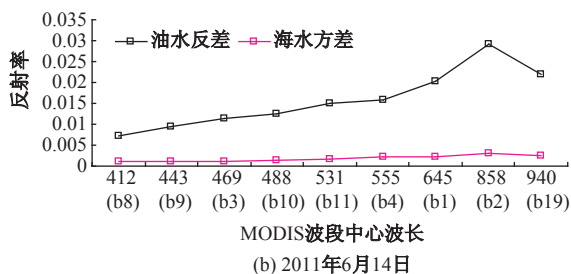
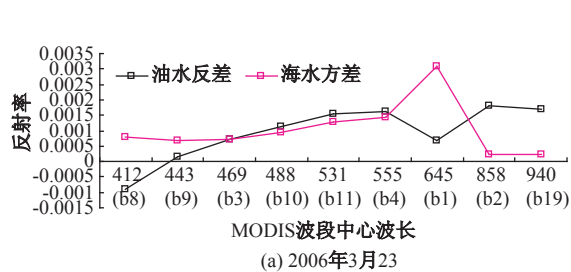


图4 油水反差及海水方差曲线

Fig. 4 The curve of the contrast of the oil-water and sea water variance

本文以 MODIS 数据为例,提取油膜及海水在可见光波段和近红外波段的特征光谱,绘制了油水光谱反差曲线和海水方差曲线,如图 4 所示,图 4(a)是 2006 年 3 月 23 日油水光谱反差曲线和海水的方差曲线,在第 2 波段,第 19 波段油水光谱反差大于海水方差,说明可以清晰地反映海面油膜信息,而在其余波段处,油水光谱反差小于或接近于海水方差,则不能明显地反映海面油膜信息,从图中可以

得到,此次海面油膜的反射率低于海水,呈暗色调,如图 5 所示。在海水方差小于油水反差的第 2 波段和第 19 波段可以清晰地显示油膜信息,第 2 波段图像,空间分辨率为 250m,油膜信息反映清晰,边缘明显;第 19 波段图像空间分辨率为 1000m,但因为其空间分辨率低,油膜信息较弱,油膜边缘模糊。

图 4(b)是 2011 年 6 月 14 日油水光谱反差曲

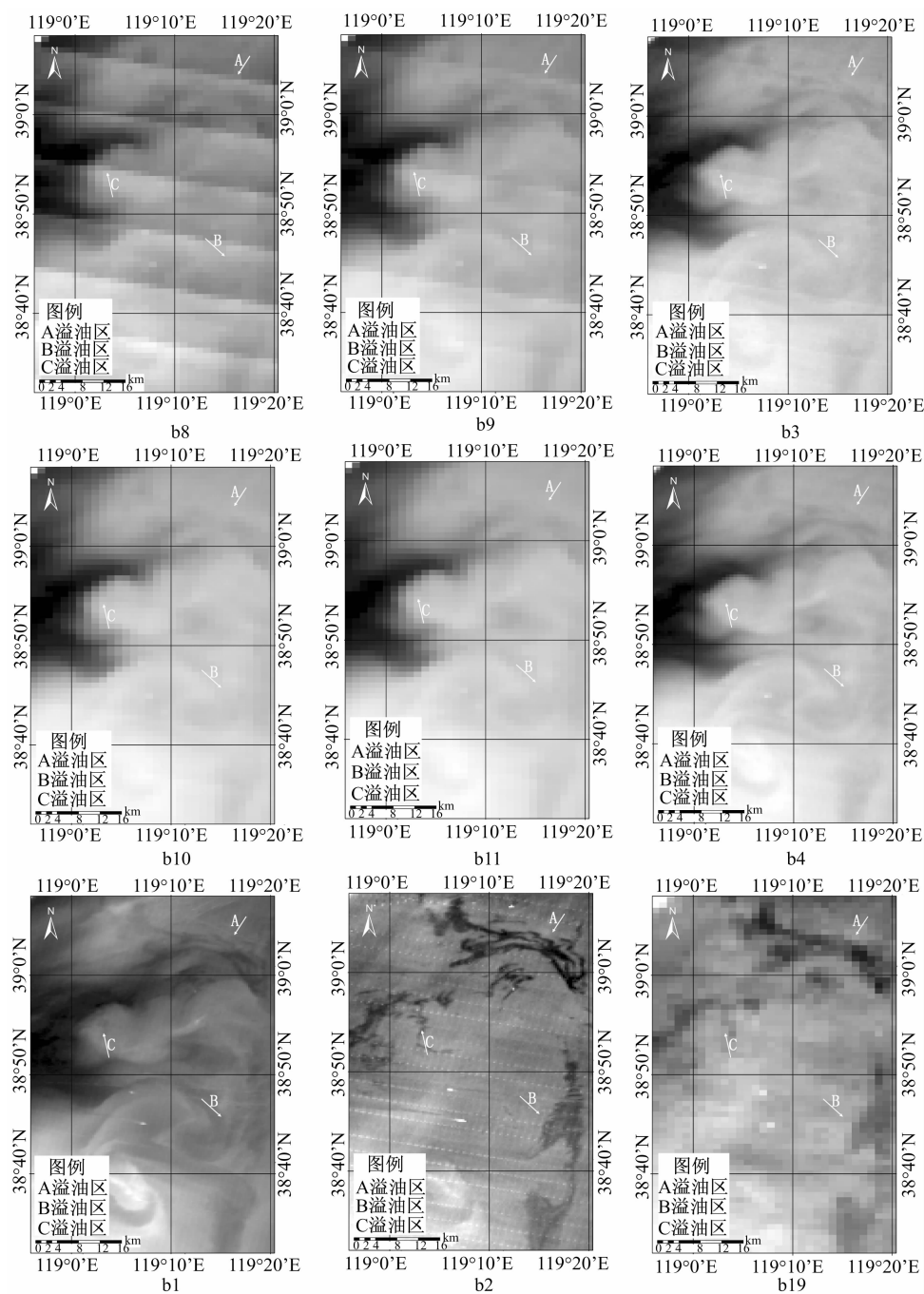


图 5 2006 年 MODIS 单波段影像

Fig. 5 Single-band images of MODIS in 2006

线和海水的方差曲线,从图中可以看出,所有波段的油水反差均大于海水方差,说明在所有波段处都可清晰地反映出海面油膜信息,并且油膜反射率大于海水反射率,因此,在图像中呈亮色调,如图 6 所示。图中第 1、2 波段图像,空间分辨率为 250m,油膜信息呈亮色调,两处溢油信息均反映清晰,边缘

明显;第 3、4 波段图像,空间分辨率为 500m,油膜信息呈亮色调,油膜边缘模糊;第 8、9、10、11、19 波段图像,空间分辨率为 1000m, B 溢油区域的油膜信息反映不明显,与背景海水很难区分, A 溢油区域虽能观察到油膜的信息,呈亮色调,但因为其空间分辨率太低,油膜信息较弱,油膜边缘模糊。

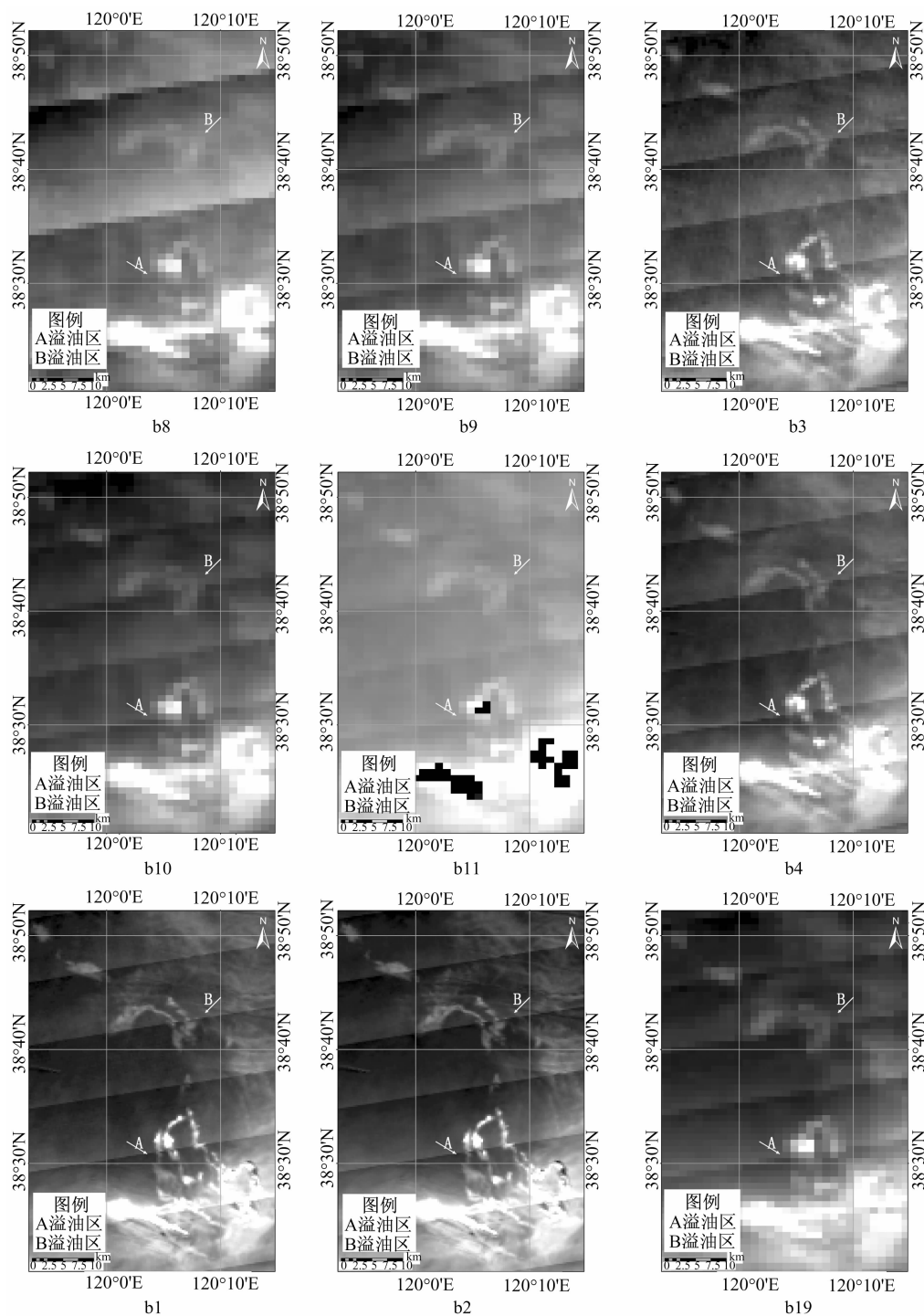


图 6 2011 年 MODIS 单波段影像

Fig. 6 Single-band images of MODIS in 2011

5 结语

本文对可用于海面溢油监测的光学卫星进行了分析,从各光学卫星的空间分辨率,时间分辨率,幅宽等物理参数,以及各光学卫星波段对海面油膜光谱特性的响应出发,得到了 MODIS 和 HJ-1 卫星有较强的海面溢油监测能力。利用得到的 MODIS、HJ-1、BJ-1 和 FY-3 卫星数据,分别对 2006 年和 2011 年的渤海溢油进行了监测。并以 MODIS 数据为例,选取油水光谱反差和海水方差 2 个参数对卫星波段的监测能力进行分析,结果表明,当卫星波段的油水光谱反差大于海水方差时,该卫星波段影像上可以显示出油膜信息。

影响海面溢油光学卫星遥感监测能力的因素还有很多,如卫星信噪比,成像特点和油膜类型等,这些因素在本文中没有反映,这将对光学卫星的监测能力产生一定影响。根据各光学卫星的物理参数与成像特点,以及不同油膜的光谱特性,选取更加有效和有用的数据对海洋溢油进行监测将是进一步研究的内容。

参考文献:

- [1] 陈辉,赵朝方. MODIS 多光谱信息在海上溢油检测中的应用[J]. 海洋湖沼通报,2009,3:46-52.
- [2] 安居白,张永宁. 发达国家海上溢油遥感监测现状分析[J]. 交通环保,2002,23(3):27-29.
- [3] O'Neil R A, Neville R A and Thompson V. The Arctic Marine Oil spill Program (AMOP) remote sensing study[R]. Environment Canada Report EPS 4-EC-83-3, Ottawa, Ontario, 1983,257.
- [4] Cross A. Monitoring marine oil pollution using AVHRR data: Observations off the coast of Kuwait and Saudi Arabia during January 1991 [J]. International Journal of Remote Sensing, 1992, 13:781-788.
- [5] Casciello D, Lacava T, Pergola N, *et al.* Robust satellite techniques for oil spill detection and monitoring using AVHRR thermal infrared bands[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32 (14): 4107-4129. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2010.484820>.
- [6] Srivastava H, Singh T P. Assessment and development of algorithms to detection of oil spills using MODIS data [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 2010, 38(1):161-167.
- [7] <http://www.nasa.gov/topics/earth/features/oilspill/index.html>
- [8] 李栖筠,陈维英. 老铁山水道漏油事故卫星监测[J]. 环境遥感, 1994,9(4):256-262.
- [9] 苏伟光. 海洋卫星遥感溢油监测技术与应用研究[D]. 长沙:中南大学论文,2008.
- [10] Hu C M, Li X F, William G P, *et al.* Detection of natural oil slicks in the NW Gulf of Mexico using MODIS imagery[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36, L01604.
- [11] 赵冬至,张存智,徐恒振. 海洋渔业灾害应急响应技术研究[M]. 北京:海洋出版社,2006,115-123.
- [12] Palmer D, Boasted G A, Boxall S R. Airborne multi-spectral remote sensing of the January 1993 Shetlands oil spill[R]. Proceedings of the Second Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments: Needs, Solutions and Applications, ER-IM Conferences, Ann Arbor, 1994, II-546-558.
- [13] Salem F M F. Hyperspectral remote sensing: A new approach for oil spill detection and analysis [D]. Washington, DC: George Mason University, 2003,49-85.
- [14] 郑安全,孙元福,师元勋,等. 海面溢油航空遥感监测方法研究一波谱特性及实验结果分析[J]. 海洋学报, 1984,6(4):531-554.
- [15] 张永宁,丁倩,高超,等. 油膜波谱特性分析与遥感监测溢油[J]. 海洋环境科学,2000,19(3):5-10.
- [16] 赵冬至,从丕福. 海面溢油的可见光波段地物光谱特征研究[J]. 遥感技术与应用,2000,15 (3):160-164.
- [17] 韩栋,纪凯. 遥感小卫星简介——以“北京一号”小卫星为例[J]. 航天返回与遥感,2007,28(1):22-24.
- [18] 范天锡. 风云三号气象卫星的特点和作用[J]. 气象科技,2002,30(6):321-327.
- [19] <http://www.soa.gov.cn/soa/news/importantnews/webinfo/2011/07/1309736508728166.htm>

Optical Satellite Remote Sensing Capabilities Analysis of the Marine Oil Spill

SU Weiguang^{1,2,3}, SU Fenzhen², ZHOU Chenghu² and DU Yunyan²

(1. *Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research (YIC), Chinese Academy of Sciences (CAS); Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, YICCAS, Yantai Shandong 264003, P. R. China;*

2. *State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

Abstract: The marine oil spill impacts on the marine environment with the features of high frequency, wide range and great hazards. Using remote sensing for marine oil spill detection has become an important means. In this paper, we started with the spectral character of the marine oil spill, and established the relationship with the common optical satellite sensors. Then we analyzed the main physical parameters of the different optical satellites, including the spatial resolution, the time resolution, width and band number. The MODIS sensor and HJ-1 satellite has a strong monitoring capabilities of marine oil spill. Based on this, we used MODIS, BJ-1, HJ-1 and FY3 optical satellites images to monitor the marine oil spill accident occurred in the Bohai Sea in March 2006 and June 2011. The MODIS image can reflect the information of marine oil spill clearly in 2006 and 2011. The HJ-1 image can reflect the information of marine oil spill clearly in 2011, but the BJ-1 and FY-3 images cannot reflect the information of marine oil spill clearly in the two oil spill accidents. HJ-1, BJ-1 and FY3 satellites in the band set are similar, but the BJ-1 and FY-3 satellites cannot reflect the information of marine oil spill. So in this article we compared the contrast of oil-water spectrum and the variance of the sea water spectrum using the MODIS remote sensing data. Experimental results show that, when the variance of the sea water spectrum is less than the contrast of oil-water spectrum in the MODIS band, the oil spill information can be shown on this band clearly. When the contrast of oil-water spectrum is less than or close to the variance of the sea water spectrum, the oil spill information cannot be shown on this band clearly. So through the above analysis, the MODIS sensor has a strong monitoring capacity on the spectral response of oil spill, spatial resolution, temporal resolution and the instance. This article has certain practical value of the optical satellite selected in marine oil spill remote sensing monitoring.

Key words: oil spill; optical remote sensing; monitor capacity