

河口水环境遥感监测研究进展 ——以赤潮和溢油为例

张彤辉^{1,2,3}, 唐世林¹, 詹海刚¹

(1. 热带海洋环境国家重点实验室, 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301; 2. 广东省海洋与渔业环境监测预报中心, 广东 广州 510222; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 从河口地区对赤潮和溢油的监测需求出发, 阐述了利用遥感技术监测赤潮和溢油等问题的有效性和优越性。回顾了河口地区赤潮和溢油遥感监测的发展历程、探测机理和影响因素, 并探讨了历史上不同卫星传感器对赤潮和溢油监测的优势和不足。通过对最新研究成果的总结, 讨论了水环境遥感监测存在的问题, 并对未来水环境遥感平台发展趋势和新的研究方向进行了展望。

关键词: 河口; 水环境监测; 遥感; 赤潮; 溢油

中图分类号: P76

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2017)09-0151-06

DOI: 10.11759/hyhx20161128001

近年来海洋日益成为社会关注的焦点, 发展海洋经济、拓展海洋空间、建设海洋强国的期望日益强烈。河口三角洲是传统的经济发达地区, 随着工业的发展, 人口迅速增长, 用海需求和规模不断扩大, 沿海地区海洋环境不断恶化。海水水质下降导致水环境事件频发, 包括赤潮、海上溢油和海水污染等海洋环境灾害对近海渔业资源、海洋经济和沿岸居民生活的影响越来越严重, 因此对河口水环境的监测具有重要意义。

目前国内外水环境监测仍以传统的布点采样方式为主^[1-4], 尽管在线监测技术已有较大进步, 但传统监测方法仍存在较多缺陷: 监测站点数量有限, 且站点空间分布对监测结果影响很大^[5]; 物理化学和生物分析手段耗时长^[6]; 监测仪器多为接触式, 维护成本高^[7]; 药品和试剂的使用会在环境监测的过程中产生新的污染等等。遥感技术在水体环境监测^[8-9]方面具有空间信息全面、高效和节约成本等优势, 且本身也是一种符合环保理念的“清洁”技术。研究人员利用遥感技术已多次成功探测到河口水环境事件的发生^[7], 为河口水环境事件预报提供了新的研究途径。

目前许多国家已经发射了可用于水质遥感监测的卫星。2008年9月我国的环境与灾害监测预报小卫星星座 HJ-1A/1B 发射升空。近几年发射的高分系列卫星, 在河口水环境监测方面也得到了应用^[10]。新一代的卫星如 CBERS-04 等原设计用于陆地观测的资源卫星、高分-3 号雷达卫星以及高分-4 号静止轨道卫星等在河口水环境监测方面将具有更广泛的应

用前景。利用遥感技术可实现对河口水环境的全天候、多层次立体监测, 能够为相关业务和管理部门的监测和预警工作提供基础观测资料, 对提高水环境监测能力, 减轻海洋灾害, 以及海岸带经济的可持续发展具有重要意义。

本文将回顾赤潮和溢油两种水环境污染事件的遥感监测发展历程和监测机理, 探讨不同传感器监测赤潮和溢油的优势和不足, 并对赤潮和溢油遥感监测平台未来的发展趋势进行展望。

1 赤潮遥感监测研究

赤潮是指某些海洋微型藻类、原生动物或细菌等在适当的海洋环境下大量繁殖, 造成海水变色或对海洋中其他生物产生危害的一种自然现象。赤潮藻类毒素能导致人类食用后中毒死亡, 也可使海洋生物窒息死亡^[11]。赤潮能够破坏海洋生物的生存环境和海洋生态平衡, 导致海洋生物死亡, 使渔业资源、水产养殖业和滨海旅游业蒙受损失, 甚至威胁人类生命安全。1998年春季珠江口爆发的大规模赤潮曾造成粤、港两地渔业经济损失达 3.5 亿元^[12]。随着

收稿日期: 2016-11-28; 修回日期: 2017-03-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(41006111); 广州市科学(技术)研究专项重点项目(201607020042)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41006111; the Focus on Special Science and Technology in Guangzhou City Research Project, No. 201607020042]

作者简介: 张彤辉(1981-), 男, 山东海阳人, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事海洋遥感、物理海洋、海洋防灾减灾等研究工作, 电话: 18680285107, E-mail: studenty@126.com

沿海城市经济不断发展,大量污染物进入河口水体,造成海水中氮、磷含量持续增加,导致赤潮发生频率呈逐年上升趋势。

赤潮遥感的主要卫星传感器包括 CZCS(The Coastal Zone Color Scanner, 海岸带水色扫描仪)、Landsat(陆地卫星)、SeaWiFS(Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor, 海视宽视场扫描仪)、MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectrometer, 中分辨率成像光谱仪)、MERIS(Medium Resolution Imaging Spectrometer, 中分辨率成像光谱仪)以及 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer, 改进型甚高分辨率辐射仪)等。1978 年 CZCS 发射成功,同年利用 CZCS 探测到了 *Karenia brevis* 赤潮^[13]。在遥感图像上的赤潮水体显示出高浑浊度和高叶绿素浓度特征^[13],这证实了利用 CZCS 监测赤潮的可能性。之后 Haddad^[14]利用遥感方法提取了 Florida 西部近岸赤潮, Groom 等^[15]则成功提取了颗石藻的暴发。Stumpf 等^[16]专门研究了 CZCS 在河口区赤潮提取中的应用。1972 年 Landsat 成功发射,为利用卫星数据提取近岸及河口区较小面积的赤潮提供了可能^[17]。随着 Landsat 系列卫星的发射,利用 Landsat 监测海岸带赤潮的研究^[18]越来越多。由于赤潮水体与非赤潮水体间有明显的光谱差异,因此随着第二代的水色传感器的发射,从光谱上分辨赤潮成为可能。Ahn 等^[19]提出了基于 SeaWiFS 的赤潮指数(RI)算法,并成功应用于海岸带光学复杂水体赤潮的监测。Roy 等^[20]分析了拉普拉塔河口的叶绿素变化。陈楚群等^[21]利用 SeaWiFS 数据提取了珠江口叶绿素浓度。胡传民等^[22]提出 MODIS 荧光高度法监测赤潮,并成功用于监测佛罗里达西南沿岸河口区赤潮。张涛等^[23]将 MODIS 数据应用于珠江口赤潮。沈春燕等^[24]利用 MODIS 数据计算了烟台四十里湾叶绿素 a 浓度变化。随着 MERIS 的发射,利用 MERIS 监测赤潮显示出巨大潜力, MERIS 的波段设置与 MODIS 相似,但其具有更合理的荧光波段,且 MERIS 的分辨率较高,与 SeaWiFS 和 MODIS 相比,在赤潮监测方面更有优势。Tao 等^[25]利用 MERIS 数据监测了东海赤潮, Zhao 等^[26]则使用 MERIS 数据对阿拉伯湾赤潮进行了提取。遗憾的是,搭载 MERIS 的卫星 ENVISAT 在 2012 年 4 月 8 日后与地球失去了联系。

综上所述,目前河口及海岸带赤潮遥感监测已有大量的研究工作,不同的研究者针对不同的卫星传感器和海域,提出了赤潮遥感算法。但现有卫星系

统在水环境监测方面还存在一些不足。首先缺乏能够快速响应且可用于水色遥感的卫星(如可实时拍摄的中分辨率静止轨道卫星),同时由于光学卫星受到天气等因素的影响,赤潮遥感监测尚缺乏业务化运行系统。MODIS 等传统水色卫星虽然波段设置可以用于监测赤潮,但空间分辨率稍有不足。而 TM(Thematic Mapper, 专题制图仪)、ETM+(Enhanced Thematic Mapper, 增强型专题制图仪)、SPOT 以及 CBERS(China & Brazil Earth Resource Satellite, 中巴地球资源卫星)等中高分辨率卫星的时间分辨率稍差,如 Hyperion 虽有很高的空间分辨率(30 m)且波段设置合理,但其重访周期为 16 d,对于业务化常规监测来说时间较长。

近年来高分辨率遥感卫星不断发射,在赤潮遥感方面可利用的高分辨率卫星数据越来越多。如欧洲航天局(The European Space Agency)近两年发射的 Sentinel-3 卫星,美国发射的 VIIRS(Visible Infrared Imaging Radiometer, 可见光红外成像辐射仪)卫星,其空间分辨率及光谱分辨率与传统水色卫星 SeaWiFS、MODIS 相比,均有显著的提高。部分用于陆地遥感监测的光学卫星,如 Landsat-7、8 卫星和 Sentinel-2 卫星,我国发射的 CBERS-4 星及 GF(高分)系列卫星,虽然其最初的设计并不针对海洋遥感应用,但其用于赤潮遥感的潜力不可忽视。我国自主发射的 HJ(环境减灾小卫星)系列卫星^[27-28]空间分辨率为 30 m, A、B 双星监测使得重复周期可以达到 2 d。GF-4 号卫星拥有更高的时间分辨率,有望在将来的水环境监测工作中发挥更大的作用^[29-30]。如 2016 年 3 月广东大亚湾附近发生的大规模赤潮在 Landsat-7 图像上有明显的显示(图 1 和图 2)。



图 1 2016 年 3 月广东大亚湾附近海域赤潮现场图
Fig.1 Red tide in the Daya Bay, Guangdong, in March 2016



图2 2016年3月27日 Landsat-7 影像真彩色合成图显示大亚湾发生较大面积赤潮

Fig. 2 An image acquired by Landsat-7 showing the red tide in the Daya Bay on 27th March 2016

2 溢油遥感监测研究

河口地区港口、航运业发达,河口区域内航道密布,航行船只密度大,自然和人为事故时有发生,与大洋相比,更容易发生溢油事件。随着经济快速发展,河口地区突发性溢油事件的发生频率越来越高。《中国近岸海域环境质量公报 2015》的数据显示,2015 年共发生船舶污染事故 16 起,总泄漏量约为 193.802 t。溢油发生后,油膜在潮汐、径流、风场等因素作用下漂移,对河口生态环境产生破坏,对水产养殖、旅游业甚至城市水源地产生影响,从而影响河口周围居民生产和生活。溢油污染对资源与环境的损害是持久和难以恢复的,准确掌握和了解溢油污染的位置、范围、数量,预告其漂移扩散方向,可以为溢油灾害的应急响应与经济损失评估提供参考依据,是溢油应急工作的重要内容。作为河口水环境监测的一种重要手段,遥感技术在溢油的位置、范围、数量监测等方面具有明显的优势,已经得到广泛应用,并推动了溢油监测体系的发展。

遥感溢油检测主要利用卫星的合成孔径雷达(SAR)传感器数据。油膜会降低海面的后向散射系数,从而相应区域的 SAR 图像通常呈现暗的区域。目前利用 SAR 探测溢油的方法可归结为两类:手动方法和自动方法。手动方法首先从 SAR 图像中探测可疑的浮油,然后人工给出置信度。手动方法通常需要人工遍历整幅图像,并将可能的溢油标识为高、中或低置信度。置信度主要基于溢油与周围环境的对比度、周围背景的同质性、附近的钻井平台或船只、附近的自然油斑以及溢油的边界与形状等特征来进行标

识。手动方法给出的置信度水平并不十分科学,探测结果存在较大的不确定性,时间消耗也比较多^[31]。

与人工方法不同,自动方法则是依靠计算机完成溢油探测与分类的整个流程。近十年国际上提出过多种自动方法,这些方法步骤基本相似,即首先对 SAR 图像进行预处理,包括图像校正、陆地掩膜等,然后进行相干斑抑制、黑点探测与分割、特征提取,在此基础上,结合类型特征数据库与天气情况,实现黑斑分类,进而给出溢油探测结果。很多现象会在 SAR 图像上产生黑斑,自动算法的最后一步就是将溢油从其他现象中区分出来。一般采用监督学习方法来进行分类,如 Fiscella 等^[32]采用 Mahalanobis 分类器来估计黑斑是溢油的概率;Solberg 等^[33]采用多元高斯密度函数来分配概率;Frate 等^[34]采用人工神经网络探测 ERS 图像的溢油。Keramitsoglou 等^[35]提出一种基于模糊逻辑推理的分类器。总体而言,分类结果并不单纯取决于分类方法,与所采用的数据集、分割方法、特征提取方法也有很大关系。例如,如果油斑在图像分割时没有被探测到,就不能被正确分类。如果所选的特征具有较强的差别,分类结果就可能更好。

SAR 探测溢油的效果受多种因素影响,风速是其中之一。Litovchenko 等^[36]认为所有星载 SAR 探测溢油的上限风速应介于 12~14 m/s。Gade 等^[37]在分析波罗的海、北海和地中海西北部溢油污染时发现高风速(>10 m/s)情况下很难在 SAR 图像上探测到溢油。因此风速的测定对溢油探测具有重要的意义。实际上有些溢油自动探测系统已包含了海面风场的信息,如风向估测和风速计算等^[33, 38]。在 Solberg 等^[33]提出的溢油探测算法中,人工设定风速等级作为模型阈值化的输入。获取风速信息的其他途径可能来自外部,如星载微波散射计。但散射计空间分辨率较低,无法测量近岸几十公里内的海面风场。SAR 可以弥补微波散射计的不足,在河口区域溢油探测具有明显优势,它可以提供大范围、高空间分辨率的水面风场信息,在溢油探测分类与油污扩散方向预测等方面发挥重要作用^[38]。

SAR 探测溢油的另一个挑战是如何区分溢油与溢油相似物,如自然薄膜、油脂状冰、低风速区(风速<3 m/s)、雨团、剪切带、内波等^[39]。这些物质与过程可以抑制海面粗糙度,导致后向散射的衰减,从而在 SAR 图像产生与溢油相似的特征。特别是自然薄膜,单纯依靠 SAR 图像很难将其与溢油分开。

由于自然薄膜主要来源于生物活动,因此海洋水色遥感资料可能是一种较好的辅助与补偿信息。另外,海洋水色遥感受海况(如风速)的影响较小,一定程度上可以弥补 SAR 图像探测溢油的不足。特别是新一代水色传感器,如搭载在 Terra 和 Aqua 上的 MODIS,某些波段的空间分辨率已提高至 250 m,在海面溢油探测方面可发挥独特的作用^[39]。我国的环境卫星由于其重访周期短,空间分辨率高,对溢油具有一定的监测能力(图 3,图 4)。随着 Sentinel-1 和 Sentinel-2 陆续发射,以及我国高分-3 号卫星的发射,卫星传感器逐渐增多且分辨率提高,可以有效集成光学遥感信息和 SAR 信息提取溢油,提高算法在复杂海况条件下的探测能力。



图 3 珠海万山群岛 2013 年“8.14”沉船事故溢油现场
Fig. 3 “8.14” wreck accident in 2013 near the Wanshan Islands, Zhuhai



图 4 2013 年 9 月 9 日 HJ-1 卫星探测到的沉船事故现场附近疑似油膜
Fig. 4 A suspected oil film in the of the wreckage accident area detected by HJ-1 on 9th September 2013

3 结论

1) 遥感技术的发展将为近岸水环境监测带来革

命性的变化。针对近岸及河口区赤潮及海面溢油的遥感监测目前已有大量研究工作,国内外研究者针对不同的卫星传感器和海域,提出了赤潮及溢油遥感监测方法。但总体来说河口水环境遥感监测目前仍处于尝试阶段,缺少业务化运行系统。

2) 随着越来越多的卫星发射升空,以及无人机遥感平台的迅速发展,利用遥感方法监测和预警河口区海洋环境灾害将越来越广泛。

3) 但利用遥感技术监测近岸水环境的变化,仍然需要做好以下方面的工作:(1)基于现场观测,完善赤潮、溢油等水环境遥感监测的指标体系;(2)研究针对河口水环境监测遥感卫星的波段配置、信噪比要求等,根据需要发射针对河口水环境监测的遥感卫星,使遥感技术在河口水环境监测中发挥更重要的作用;(3)利用多源数据监测河口海洋环境,建立数据综合分析和处理平台。

参考文献:

- [1] 叶璐. 河口区海洋环境监测与评价一体化研究——以珠江口为例[D]. 厦门: 厦门大学, 2013.
Ye Lu. Integrated system of environmental monitoring and assessment in estuaries: a case of Pearl River Estuary[D]. Xiamen: Xiamen University, 2013.
- [2] 叶璐, 张珞平, 郭娟, 等. 河口区海洋环境监测与评价一体化研究 I——珠江口水环境监视性监测方案设计、实施和改进[J]. 海洋环境科学, 2014, 33(1): 105-112.
Ye Lu, Zhang Luoping, Guo Juan, et al. Integrated system of marine environmental monitoring and assessment in estuary I: a case study of water surveillance monitoring in Pearl River Estuary[J]. Marine Environmental Science, 2014, 33(1): 105-112.
- [3] 刘丽雪, 王玉珏, 邸宝平, 等. 2012 年春季渤海中部及邻近海域叶绿素 a 与环境因子的分布特征[J]. 海洋科学, 2014, 38(12): 8-15.
Liu Lixue, Wang Yujue, Di Baoping, et al. Spatial distribution of chlorophyll a and environmental factors in the Bohai Sea in spring of 2012[J]. Marine Sciences, 2014, 38(12): 8-15.
- [4] 李照, 宋书群, 李才文. 长江口及其邻近海域叶绿素 a 分布特征及其与低氧区形成的关系[J]. 海洋科学, 2016, 40(2): 1-10.
Li Zhao, Song Shuqun, Li Caiwen. Distribution of chlorophyll a and its correlation with the formation of hypoxia in the Changjiang River Estuary and its adjacent waters[J]. Marine Sciences, 2016, 40(2): 1-10.
- [5] 兰冬东, 李冕, 许妍, 等. 渤海水质监测站位优化研究[J]. 海洋科学, 2016, 40(4): 88-93.
Lan Dongdong, Li Mian, Xu Yan, et al. Layout optimization of water quality monitoring stations in the Bohai

- Sea[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(4): 88-93.
- [6] 魏康林, 温志渝, 武新, 等. 基于紫外-可见光谱分析的水质监测技术研究进展[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(4): 1074-1077.
Wei Kanglin, Wen Zhiyu, Wu Xin, et al. Research advances in water quality monitoring technology based on UV-Vis spectrum analysis[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(4): 1074-1077.
- [7] 杨跃忠, 孙兆华, 曹文熙, 等. 海洋光学浮标的设计及应用试验[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(2): 565-569.
Yang Yuezhong, Sun Zhaohua, Cao Wenxi, et al. Design and experimentation of marine optical buoy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(2): 565-569.
- [8] 朱小鸽, 何执兼, 邓明. 最近 25 年珠江口水环境的遥感监测[J]. *遥感学报*, 2001, 5(5): 396-400.
Zhu Xiaoge, He Zhijian, Deng Ming. Monitoring of water color for Pearl River Estuary over twenty years[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(5): 396-400.
- [9] 应晨璐, 董庆, 薛存金, 等. 大区域海洋遥感数据处理方法研究[J]. *海洋科学*, 2014, 38(8): 116-125.
Ying Chenlu, Dong Qing, Xue Cunjin, et al. Researches of processing methods on large-scale marine remote sensing data[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(8): 116-125.
- [10] 程乾, 刘波, 李婷, 等. 基于高分 1 号杭州湾河口悬浮泥沙浓度遥感反演模型构建及应用[J]. *海洋环境科学*, 2015, 34(4): 558-563.
Cheng Qian, Liu Bo, Li Ting. Research on remote sensing retrieval of suspended sediment concentration in Hangzhou Bay by GF-1 satellite[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(4): 558-563.
- [11] 周名江, 朱明远, 张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展[J]. *生命科学*, 2001, 13(2): 54-59.
Zhou Mingjiang, Zhu Mingyuan, Zhang Jing. Status of harmful algal blooms and related research activities in China[J]. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2001, 13(2): 54-59.
- [12] 吴迪生, 黎广媚, 赵雪. 1997~1998 年广东赤潮发生与海洋水文气象的关系[J]. *广东气象*, 2005, 2: 14-15.
Wu Disheng, Li Guangmei, Zhao Xue. The relationship between red tide and marine hydro-meteorological status in Guangdong Province in 1997—1998[J]. *Guangdong Meteorology*, 2005, 2: 14-15.
- [13] Steidinger K A, Haddad K. Biologic and hydrographic aspects of red tides[J]. *Bioscience*, 1981, 31(11): 814-819.
- [14] Haddad K D. Hydrographic factors associated with west florida toxic red tide blooms: an assessment for satellite prediction and monitoring[D]. St.Petersburg: University of South Florida, 1982.
- [15] Groom S B, Holligan P M. Remote sensing of coccolithophore blooms[J]. *Advances in Space Research*, 1987, 7(2): 73-78.
- [16] Stumpf R P, Tyler M A. Satellite detection of bloom and pigment distributions in estuaries[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24(3): 385-404.
- [17] Ochiai H. The significant application of LANDSAT data to monitoring of marine environment[J]. *Acta Astronautica*, 1980, 7(4-5): 425-440.
- [18] Wei G F, Tang D L, Wang S. Distribution of chlorophyll and harmful algal blooms (HABs): A review on space based studies in the coastal environments of Chinese marginal seas[J]. *Advances in Space Research*, 2008, 41(1): 12-19.
- [19] 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.
- [20] Armstrong R A, Gilbes F, Guerrero R, et al. Validation of SeaWiFS-derived chlorophyll for the Rio de la Plata Estuary and adjacent waters[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(7-8): 1501-1505.
- [21] Chen Chuqun, Shi Ping, Larson M, et al. Estimation of chlorophyll-a concentration in the Zhujiang Estuary from SeaWiFS data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 21(1): 55-65.
- [22] Hu C, Muller-Karger F E, Taylor C, 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.
- [23] 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.
Zhang Tao, Su Fenzhen, Yang Xiaomei. A method for detecting red tide information from MODIS data and its application in Pearl River Estuary[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2009, 11(2): 244-249.
- [24] 沈春燕, 施平, 赵辉. 烟台四十里湾叶绿素 a 浓度的时空分布特征及其影响机制[J]. *海洋科学*, 2014, 38(9): 33-38.
Shen Chunyan, Shi Ping, Zhao Hui. Spatial-temporal distribution characteristics of chlorophyll a and the controlling factors in the Sishili Bay of Yantai[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(9): 33-38.
- [25] Tao B, Mao Z, Wang D, et al. The use of MERIS fluorescence bands for red tides monitoring in the East China Sea[J]. *Proc Spie*, 2011, 8175(1): 466-471.
- [26] 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.
- [27] 王林, 杨建洪, 李冠男, 等. 江苏近岸海域 HJ CCD 影像悬浮泥沙遥感反演[J]. *海洋科学*, 2016, 40(2): 77-83.
Wang Lin, Yang Jianhong, Li Guannan, et al. Retrieval of suspended sediment concentration from HJ-CCD imagery in Jiangsu coastal sea[J]. *Marine Sciences*, 2016, 40(2): 77-83.

- [28] 薛瑞, 吴孟泉, 刘杨, 等. 基于 HJ-1A/1B 的 2014 年黄海海域浒苔灾害时空分布[J]. 海洋科学, 2016, 40(7): 115-123.
Xue Rui, Wu Mengquan, Liu Yang, et al. Spatial and temporal variability of *Ulva prolifera* in the Yellow Sea, China in 2014[J]. Marine Sciences, 2016, 40(7): 115-123.
- [29] 丁一, 曹丛华, 黄娟, 等. 黄海绿潮多源卫星遥感业务化监测需求分析与系统设计[J]. 海洋科学, 2015, 39(2): 85-90.
Ding Yi, Cao Conghua, Huang Juan, et al. The green tide multi-source satellite remote sensing operational monitoring requirement analysis and system design in the Yellow Sea[J]. Marine Sciences, 2015, 39(2): 85-90.
- [30] 禹定峰, 邢前国, 施平. 内陆及近岸二类水体透明度的遥感研究进展[J]. 海洋科学, 2015, 39(7): 136-144.
Yu Dingfeng, Xing Qianguo, Shi Ping. A review on the estimation of Secchi disk depth by remote sensing in inland and nearshore case 2 waters[J]. Marine Sciences, 2015, 39(7): 136-144.
- [31] Indregard M, Solberg A, Clayton P. D2-report on benchmarking oil spill recognition approaches and best practice[R]. Ispra, Italy: European Commission, 2004.
- [32] Fiscella B, Giancaspro A, Nirchio F, et al. Oil spill detection using marine SAR images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(18): 3561-3566.
- [33] Solberg A H S, Storvik G, Solberg R, et al. Automatic detection of oil spills in ERS SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 1999, 37(4): 1916-1924.
- [34] Del Frate F, Petrocchi A, Lichtenegger J, et al. Neural networks for oil spill detection using ERS-SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2000, 38(5): 2282-2287.
- [35] Keramitsoglou I, Cartalis C, Kiranoudis C T. Automatic identification of oil spills on satellite images[J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(5): 640-652.
- [36] Litovchenko K, Ivanov A, Ermakov S. Detection of oil slicks parameters from ALMAZ-1 and ERS-1 SAR imagery[C]//IEEE. IGARSS'99 Proceedings. Hamburg, Germany: IEEE, 1999: 1484-1486.
- [37] Gade M, Scholz J, Viebahn C V. On the detectability of marine oil pollution in European marginal waters by means of ERS SAR imagery [C]//IEEE. IGARSS 2000 Proceedings. Honolulu, USA: IEEE, 2000: 2510-2512.
- [38] Shen H, Perrie W, He Y. Progress in determination of wind vectors from SAR images [C]// IEEE. IGARSS 2006 Proceedings. Denver, USA: IEEE, 2006: 2228-2231.
- [39] 杨红, 杭君. 基于 MODIS 与 HJ-1 多源卫星的上海海域溢油事故诊断[J]. 海洋科学, 2014, 38(10): 90-97.
Yang Hong, Hang Jun. Diagnosis of oil spills in Shanghai coastal area based on multi-source satellite MODIS and HJ-1[J]. Marine Sciences, 2014, 38(10): 90-97.

Progress in monitoring the estuarine water environment by remote sensing: the case of red tides and oil spill

ZHANG Tong-hui^{1, 2, 3}, TANG Shi-lin¹, ZHAN Hai-gang¹

(1. State Key Laboratory of Tropics Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China; 2. Guangdong Ocean and Fishery Environment Monitoring and Forecasting Center, Guangzhou 510222, China; 3. University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China)

Received: Nov. 28, 2016

Key words: estuary; water environment monitoring; remote sensing; red tide; oil spilling

Abstract: There was a need to monitor oil spills and red tides in the estuary area. It outlined the advantages and validity of recognizing oil spills and red tides by using satellite remote sensing. The history, mechanism, and methods of an oil spill and red tide monitoring using remote sensing were reviewed. The advantages and disadvantages associated with different satellites were discussed. According to the summary of the latest research findings, it was noted that there is a shortage of satellites for monitoring water environments and an increase in the number of satellites in future was proposed.

(本文编辑: 刘珊珊)