

网络优先数字出版时间: 2016-05-12

网络优先数字出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/45.1075.N.20160512.1517.014.html>

海面溢油及浒苔遥感监测研究进展*

Status and Trends of Remote Sensing Study to Monitor Sea Surface Oil Spill and Enteromorpha

过杰^{1**}, 过爽²

GUO Jie¹, GUO Shuang²

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东省海岸带环境过程重点实验室, 山东烟台 264003;
2. 河南城建学院电气与信息工程学院, 河南平顶山 467000)

(1. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong, 264003, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan, Henan, 467000, China)

摘要:海面溢油和浒苔灾害已经成为当今主要的海洋生态环境问题,而基于卫星遥感影像提取海面溢油和浒苔信息是监测其动态变化的一种有效手段,因此本文对国内外海面溢油及浒苔遥感监测技术进行归纳整理。光学遥感数据多波段比值法是最常用的海面溢油监测方法。另外,合成孔径雷达(SAR)不受雨云影响,在灾害监测中发挥着越来越重要的作用,而利用灰度值或后向散射系数变化来判断溢油或浒苔是SAR常用的方法。从现有的研究可以看出:遥感监测海上溢油及浒苔范围发展最为成熟,已经业务化运行;然而,遥感监测溢油量、溢油类型及浒苔生物量仍然处于试验阶段。遥感海洋灾害的监测要由定性走向定量,真正实现实时、连续、快速、准确,仍需要多种平台和多源遥感数据相结合,调整传感器的空间分辨率,开发小型、新型传感器。

关键词: 遥感监测 海面溢油 浒苔 生态环境

中图分类号: P736.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-7378(2016)02-0073-06

Abstract: Marine oil spill and enteromorpha have now become a major form of marine pollution and harmful to our environment and society. Based on satellite remote sensing image to the dynamics of marine oil spill, which extension has become a timely and effective means. The monitoring capabilities and development directions of domestic, international of marine oil spill and enteromorpha are summarized in this paper. The optical remote sensing data is the most popular data used to combine the multi-band ratio method as the most commonly adopted monitoring method. On the other hand, synthetic aperture radar (SAR) is not affected by rain and cloud, which has played a more and more important role in disaster monitoring.

The grey value or backward scattering coefficient changes is the commonly used method in SAR to interpret images of enteromorpha or oil spill. From the point of research view in current, remote sensing to monitor marine oil spill and enteromorpha range are already developed and used. However, amount, types and biomass of oil spill and enteromorpha using remote sens-

收稿日期: 2015-11-10

作者简介: 过杰(1965—),女,博士,副研究员,主要从事海洋遥感及数值模拟研究。

* 国家自然科学基金委员会与俄罗斯基础研究基金会合作交流项目(4141101049),国家自然科学基金面上基金项目(41576032,41176160)和国家海洋局北海分局渤海中部公共海域沉积物现场微生物修复项目(QDZC20150420-002)资助。

** 通讯作者: E-mail: jguo@yic.ac.cn.

ing monitoring are still experimental. Disaster monitoring by remote sensing in the future needs the combination of different platforms and multi-source remote sensing data to adjust the sensor spatial resolution, and the development of small size, new sensors, realizing real-time, continuous, rapid accurate disaster monitoring, and improve remote sensing monitoring.

Key words: remote sensing monitoring, oil spill on sea surface, enteromorpha, ecological environment

0 引言

海洋是地球上最为稳定的生态系统,其面积辽阔,对全球生态环境起着重要的调节作用^[1]。伴随着全球经济的快速发展,沿海产业迅速崛起,所导致的海洋污染也日趋严重。据统计,在所有海洋污染灾害中,海面溢油的发生频率、污染范围以及影响程度均居于首位^[2]。从生态环境来看,溢油在水面容易形成薄膜,阻止海气交换,使海水中的溶解氧减少,研究发现 1 kg 石油完全氧化需要消耗 40 万 L 海水中的溶解氧,所以溢油污染可引起大面积的缺氧^[3]。溢油还使海水中产生致命的轻芳香烃物质及其衍生物(PAN)。计算显示,导致浮游小虾死亡的 PAN 浓度,相当于在满满的一盆水中滴进两滴石油的浓度。而且 PAN 在暴风雨、大风天气过后能够沉入深海,当海面布满油斑时其海底常常发现有致命的芳香烃有毒物质聚集,而且这些有毒物质还常常随海流扩散^[3]。其中多环芳香烃碳氢化合物能够在海洋生物,特别是底栖生物组织和器官中聚集起来,长期释放毒性。实验表明,石油污染物对海洋生态系统的损坏程度与石油污染浓度密切相关,浓度越大,毒性越大,危害也越重^[4]。溢油对海洋生物的危害,一方面是危害鱼类、近海网箱养殖,近岸扇贝、海带养殖等;溢油产生的油膜、油块能粘住大量鱼卵和幼鱼,使其窒息死亡;所产生的芳香烃类物质使卵化的幼鱼畸形,导致鱼、贝蓄积致癌物质,污染海域的鱼、虾等生物体内致癌物浓度明显增高。另一方面是危害海鸟,研究表明,长期的石油污染给海鸟带来的损害远远超过海洋石油污染事件的直接经济损失,仅北海和北大西洋因石油污染而丧生的鸟类,每年达 10 万只以上^[4]。溢油还容易导致大范围火灾,对来往船舶、海上设施也具有潜在威胁^[5]。因此,开展快速有效的海上溢油识别和监测,如光学、主动微波传感器监测以及船载、岸基、机载和航空等监测,对海洋污染事件处理以及生态环境恢复都具有重要的意义。

浒苔是生存在咸水与半咸水中的石莼科绿藻,具有较高的营养价值^[6-10]和药用价值^[11-16]。尽管浒苔本身无毒,但在一定的环境下会大量繁殖,不仅遮蔽光线,还消耗海水中的氧气,导致其它海洋生物不能正常生长,从而产生一系列的生态环境问题^[17]。随着我国海水养殖业的快速发展,海水富营养化正在加剧。2008 年至今,我国近海海域浒苔灾害频发,不仅破坏海洋生态系统平衡^[18-19],还对沿岸渔业、旅游业及海港工程^[20]等行业的发展造成严重影响。目前浒苔灾害监控已成为管理群体和学术群体关注的焦点问题之一。浒苔监测常用的地面调查方法虽然能够比较全面地了解浒苔灾害暴发的原因、过程以及浒苔在海水中的状态和生物量的变化,但需要投入较大的人力和物力,且持续时间长,尤其时空因素限制其应用。而遥感技术具有大范围、全天时、全天候、多频次、多角度的优点^[21-26],利用该技术监测浒苔的动态变化,可迅速确定浒苔的暴发区域、时间和聚集度,还能绘制浒苔分布示意图,从而能大范围对浒苔灾害进行跟踪监测分析并及时做出预警、预报,使海上打捞和后期处理工作更有针对性,并在最短时间内控制浒苔灾害的发展态势^[27]。

1 海面溢油的遥感监测

在海上溢油污染监测过程中,准确掌握污染物自身信息十分重要。根据不同阶段海面溢油的监测结果分析,油污监测指标体系可分为 3 大类:溢油范围、溢油量和溢油类型。溢油范围是海上溢油监测的主要指标,是指油膜受风、浪、流的影响后快速扩散的面积。溢油灾害发生后应及时准确地确定油膜已发生扩散的范围,进而通过溢油扩散方向和范围估算发生溢油事故的位置。溢油量以油膜厚度作为衡量标准,既是衡量灾害区域污染程度的重要指标,也是监测控制效果的重要指标。溢油类型是指通过遥感反演得知的油种。由于不同油种的波谱特征和扩散方式不同,故针对不同油种污染的控制方式也不同,所以溢油种类也是溢油监测的重要指标^[1]。

事实上溢油监测范围的划分,是遥感信息提取分类的过程。目前遥感分类的研究已经趋于成熟,监督分类、非监督分类以及面向对象的分类方法都已有报道。在溢油监测研究中,研究者关注的重点并不是如何选取分类器,而是探讨何种遥感数据可以快速、准确提取溢油信息^[1]。

遥感技术最早用于溢油监测的是可见光和近红外遥感技术。1969年美国已使用机载可见光扫描仪对井喷产生的溢油进行监测,并取得较好的效果。随着光学遥感技术的发展,多光谱和高光谱遥感技术也逐渐应用于海面溢油监测,主要是根据不同波段,不同光谱识别油膜范围及种类。高光谱数据以其多波段性逐渐成为海面溢油监测的手段之一。利用高光谱遥感数据对海面溢油进行监测时,必须要进行数据降维,以降低各波长数据的冗余度,故使用高光谱数据反而提高了数据处理的难度,降低了分类算法的运算效率^[1]。由于溢油事故往往在天气异常时发生,而光学传感器监测海面溢油时易受雨云影响,不能实现连续观测,但是微波雷达遥感技术可以弥补这些不足。主动微波技术以其高分辨率、不受雨云及光线强弱的影响,在海面溢油监测中发挥着越来越重要的作用。合成孔径雷达(SAR,一种主动式微波传感器)单极化数据(ERS, ENVISAT 和 RADARSAT-1)可用于监测海面溢油,所常用的分析方法是神经网络自动和半自动算法、多尺度图像分割法和模糊逻辑法^[28-31]。随着全极化 SAR 的发展,其数据已可用于油膜与生物油膜的区别。全极化 SAR 数据能够提供像素的散射矩阵和完整的振幅及相位信息。Schuler 等^[32]基于 C-band AIR-SAR 数据,利用最大似然分类器并结合极化分解参数,用复合 Wishart 分布开发了生物油膜和油流产生的螺旋涡流特性映射。L-bandALOS PALSAR 和 C-band SIR-C/X-SAR 数据被用于 Muller 矩阵以区分海面油膜和油醇^[32-34]。Zhang 等^[35]利用 Radarsat-2 全极化数据并采用陆地遥感的一致性系数成功从海面提取了溢油油膜。总之,无论是光学遥感还是主动微波技术都能实现溢油范围的探测。

由于辐射计的散射信号随油膜厚度的变化而变化,研究者正致力于开发微波辐射计数据应用的新方法,通过对比两个正交极化方向上的强度来测量油层厚度,但该技术需要大幅度提高辐射计的分辨率。当薄油层小于 $0.05 \mu\text{m}$ 时,其在紫外波段会有很高的反射,因此可以用紫外遥感技术对薄油层进行探测,通过紫外与红外图像的叠加分析,即可得到

油层的相对厚度。热红外遥感技术是通过获取热红外波段包含的地物温度信息(油膜在一定厚度下能将一部分吸收的太阳辐射能量以热能的形式释放)进行油膜厚度探测。一般情况下,较厚油膜通常表现为“热”特征,而中等厚度油膜通常表现为“冷”特征。总之,微波辐射计、紫外遥感技术和热红外遥感技术在研究油膜厚度方面各有利弊^[1]。从理论上讲激光声学仪可以探测油膜厚度^[5],且吴頔等^[36]基于垂直入射式差分激光三角法原理,研制了可机载投放的浮标式油膜厚度测量传感器,他们选用 $1.4 \sim 9.4 \text{ mm}$ 量块对传感器进行精度测量,测量相对误差小于 1%。20 世纪 70 年代,美国 NASA 和 NO-AA 联合研制出机载海洋激光雷达(AOL)系统^[37],并用于薄油膜测量。目前此技术已成为探测油膜绝对厚度的遥感探测器之一,是一种可靠的并具有发展前景的油层厚度测量技术。在现有理论的支持下油膜厚度遥感探测器的研发已取得一定程度突破,新传感器的诞生指日可待。

红外偏振遥感技术相比传统的热红外遥感,除了能够获取目标的电磁波强度,还能获取目标表面状态、物质结构等与目标本身特性有关的偏振信息^[1,38],因此,该技术更利于油膜的识别。由于任何物质均能发射特有的荧光谱,故激光荧光遥感技术也可用于溢油类型识别。20 世纪 90 年代,德国 Oldenburg 成功研制了海洋激光雷达系统(OLS)^[39],并应用于溢油海域的实时监测。另外,加拿大、法国、意大利等国家也相继研制了用于溢油监测的机载激光雷达系统^[40]。2001 年,中国海洋大学海洋遥感研究所成功研制了多套海洋荧光激光雷达,并用于海洋环境参数的测量,其中赵朝方等通过对实验室激光诱发油样本的荧光数据分析,研究不同溢油种类的荧光光谱特征,并给出区分溢油程度的快速分析方法。2009 年以来,赵朝方等研制的海洋荧光激光雷达系统在青岛近海进行多次实验,结果表明,该雷达系统监测海面溢油性可靠,能够准确判别溢油种类,并可区分溢油污染程度^[41]。

2 浒苔灾害的遥感监测

漂浮或悬浮在海水中的浒苔,其不同遥感数据反演会存在差异,如光学遥感和微波遥感。目前的研究对象主要是漂浮浒苔,基于其在海水表面体现出的光谱特征差异,利用光学遥感进行监测。经典植被的归一化植被指数(NDVI)可以在卫星影像上快速有效地解译浒苔信息^[42],这也是光学遥感监测

漂浮浒苔信息的理论基础^[27]。微波遥感监测漂浮状态下的浒苔,是通过微波遥感影像,综合其纹理、形状、大小、位置等识别特征,分析剖面区域的影像灰度值,并统计浒苔灰度值主要动态范围和水体灰度值主要动态范围,再由不同灰度值判读出影像中浒苔分布的典型区域^[43]。此外,还可以根据浒苔对 SAR 后向散射系数的响应(体散射),在图像上呈现的亮斑或暗斑(波段不同,浒苔在图像上呈现不同)来判断影像中浒苔分布的典型区域^[22]。对于悬浮浒苔的研究目前涉及较少,赵文静等^[44]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。

遥感监测浒苔类型的主要方法有监督分类法、单波段阈值法、多波段比值法、双波段比值法、辐射传输模型法和全极化 SAR 数据的非监督分类检索因子等方法^[45-46]。监督分类法是遥感影像计算机分类法中最基本的方法之一,它在进行分类之前需选择代表性像元作为训练样本,对遥感图像进行分类。单波段阈值法是利用地物光谱反射特性的差异来提取地物的信息。覆盖浒苔的海水与未覆盖浒苔的海水在近红外波段其光谱反射特性的差异较大,该波段已成为单波段阈值法提取浒苔信息的最佳波段。相对于单波段阈值法,多波段比值法能扩大浒苔覆盖海水在可见光波段的吸收谷与近红外波段的反射峰之间的差异,提高正常海水与浒苔覆盖海水的区分度。此方法直观判读效果好、误分率较低,能够比较精确的解译藻类信息。双波段比值法是利用两个不同波段进行比值运算,再通过反演浒苔叶绿素浓度达到解译浒苔信息的目的。辐射传输模型法主要是通过分析目标地物与其光谱辐射特征之间的相关性来建立模型,提取地物信息。全极化 SAR 数据的非监督分类检索因子方法通过散射矩阵在没有先验类别作为样本的条件下,根据像元间相似度大小进行计算自动判别归类,无须人为干预。

3 展望

从目前的研究可以看出,水色遥感技术具有中等分辨率,可以根据不同地物光谱特性差异识别地物,而且其数据可以免费下载,故该技术最先应用于海面溢油和浒苔的监测;但由于海上天气多变,而水色光学传感器易受雨云影响,该技术不能实现灾害事件的连续观测。主动微波遥感技术具有高分辨率、不受雨云影响的特征,在海面溢油监测中发挥着越来越重要的作用,对浒苔爆发的监测作用也很突出。全极化 SAR 4 个通道弥补了单一极化色彩通

道信息的不足,尽管利用 SAR 研究浒苔爆发存在覆盖面积小的不足,但是,紧致极化 SAR 的研究将有助于解决这一问题,因为它可维持高分辨率,扩大覆盖面积。随着 SAR 部分研究数据可以免费获取,这极大促进了 SAR 数据在溢油和浒苔灾害监测研究方面的应用。另一方面,由于 SAR 数据是搭载在极轨卫星上,而该卫星对某一区域灾害监测不能完全实现连续、快速观测,这为小型机载、岸基、船载 SAR 的研究提供了契机。

目前遥感技术主要用于监测海面溢油和浒苔的分布区域、面积和漂移路径等,对海面溢油量和浒苔生物量的监测尚未深入展开,不能给海面溢油和浒苔灾害的等级划分和灾害预警提供足够的信息。但是激光、荧光雷达,声学等技术与遥感技术的结合,为海洋溢油量和浒苔生物量的研究提供了新的方法,今后还会有更精确的定量监测传感器及方法应用于海面溢油和浒苔灾害的研究。溢油和浒苔遥感技术的业务化实现不仅需要监测系统集成以及遥感、观测平台数据的实时融合,还要结合地理信息技术与相应的数学模型对数据进行综合处理,并评估溢油、浒苔对生态环境带来的影响。所以我国海面溢油和浒苔灾害遥感监测的发展应注重如下 3 个方面:

(1)实现多种平台和多源遥感数据相结合。现阶段已经利用卫星遥感手段和地面船只(载人、无人)、机载(载人机、无人机)光学传感器对溢油和浒苔爆发进行监测,未来应该广泛结合航空、航天遥感(船、飞艇,载人机和无人机搭载的光学小型传感器、小型 SAR 等)、海上平台及船只、岸基平台(近岸站点监测、浮标、岸基雷达),做到真正的全天时、全天候连续、快速、准确监测。此外,单一卫星数据具有一定局限性,要想全面、准确的获取海面溢油和浒苔灾害的信息需要多源卫星联合监测,需加强机载(船载)光学、激光荧光雷达,激光声学 SAR 等小型传感器的研发,使灾害监测做到机动灵活、快速,并形成陆海空一体化观测体系。

(2)提高及调整遥感数据的空间分辨率。对溢油量和浒苔生物量的监测需研发新的传感器。虽然光学卫星覆盖面积大,但分辨率低,目前研究者所使用的数据信息存在大量的混合像元,例如美国 MODIS 卫星影像空间分辨率从 250 m 到 1 000 m 不等,属于中低分辨率卫星遥感数据。低分辨率的遥感影像降低了浒苔监测结果的准确性^[27]。随着我国 HJ1A、1B 卫星和资源一号 04 卫星、中巴卫星以

及高分 1,2 号卫星数据的投入使用,海面溢油污染和浒苔爆发的监测准确率有了很大程度地提高。按照全球卫星发展态势,卫星将会以星座群的形式出现,它们时间衔接,交叉覆盖,会极大提高海上灾害监测的准确性。

(3)重点关注海面溢油量和浒苔生物量的监测。目前已经有学者结合激光扫描仪与主动微波技术,建立海面溢油粗糙长度与后向散射系数的关系,旨在实现 SAR 监测海面油膜厚度。也有学者正通过溢油实验和模式模拟结合油膜散射特性来实现油膜厚度推算。也有的学者通过水下声学监测系统与海面遥感结合研究油膜和浒苔的厚度。只要海面溢油或浒苔厚度取得突破,那么在监测范围内就易推算出溢油量和浒苔生物量。而目前借助单一一种传感器,很难实现海面溢油量和浒苔生物量监测技术的突破,需要融入其他传感器或技术手段,更需要引入新的传感器,如加入激光、声学等技术的传感器。

总之,已建立的遥感监测预警、预报系统,目前尚停留在监测层面。要将溢油和浒苔灾害带来的社会、经济、生态影响降至最低,在研究过程中则应充分考虑溢油和浒苔引起的生物学、生态学和环境学问题,以及海洋水色遥感、主动微波、岸基、无人机、海洋气象因素。

参考文献:

- [1] 张煜洲,陈志莉,胡潭高,等. 遥感技术监测海上溢油现状及趋势[J]. 杭州师范大学学报:自然科学版,2013,12(1):81-88.
ZHANG Y Z, CHEN Z L, HU T G, et al. Status and trends of remote sensing technology to monitor marine oil spill[J]. Journal of Hangzhou Normal University: Natural Science Edition,2013,12(1):81-88.
- [2] 李栖筠,陈维英,肖乾广,等. 老铁山水道漏油事故卫星监测[J]. 环境遥感,1994,9(4):256-262.
LI Q J, CHEN W Y, XIAO Q G, et al. The satellite monitoring of oil spill at Laotieshan Channel[J]. Remote Sensing of Environment China,1994,9(4):256-262.
- [3] 中海石油环保服务有限公司. 溢油常识[EB/OL]. [2015-08-29]. http://www.cleanupoil.org.cn/DataCenter/DataCenter_5.asp#_Toc81361836.
CNOOC Environmental Protection Service Co., LTD. Common sense of oil spill [EB/OL]. [2015-08-29]. http://www.cleanupoil.org.cn/DataCenter/DataCenter_5.asp#_Toc81361836.
- [4] BOHTOB M A,刘爱菊,李若钝. 石油污染对海洋生态系统的影响[J]. 海岸工程,1995,14(4):61-65.
BOHTOB M A,LIU A J,LI R D. The influence of oil pollution on the marine ecological system[J]. Coastal Engineering,1995,14(4):61-65.
- [5] 李四海. 海上溢油遥感探测技术及其应用进展[J]. 遥感信息,2004(2):53-56.
LI S H. Application of remote sensing for oil slicks detecting and its progress [J]. Remote Sensing Information,2004(2):53-56.
- [6] FLEURENCE J,GUTBIER G,MABEAU S,et al. Fatty acids from 11 marine macroalgae of the French Brittany coast[J]. Journal of Applied Phycology,1994,6(5/6):527-532.
- [7] AMBROSIO A L,SANZ L,SÁNCHEZ E I,et al. Isolation of two novel mannan-and L-fucose-binding lectins from the greenalga *Enteromorpha prolifera*: Biochemical characterization of EPL-2[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics,2003,415(2):245-250.
- [8] RAMAN B V,RAO D N,RADHAKRISHNAN T M. *Enteromorpha compressa* (L.)Greville an edible green alga as a source of antiallergic principle (S)[J]. Indian Journal of Clinical Biochemistry,2004,19(1):105-109.
- [9] BURTIN P. Nutritional value of seaweeds[J]. Electronic Journal of Environmental, Agricultural and Food Chemistry,2003,2(4):498-503.
- [10] 李红艳,刘天红,李晓,等. 浒苔虾丸配方的优化[J]. 广西科学院学报,2015,31(4):253-258.
LI H Y,LIU T H,LI X,et al. Formula optimization of *Ulva prolifera* shrimp balls[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences,2015,31(4):253-258.
- [11] SUKATAR A,KARABAY-YAVASOGLU N U, OZDEMIR G, et al. Antimicrobial activity of volatile component and various extracts of *Enteromorpha linza* (Linnaeus) J Agardh from the coast of Izmir, Turkey[J]. Annals of Microbiology,2006,56(3):275-279.
- [12] IBTISSAM C,HASSANE R,JOSÉ M L, et al. Screening of antibacterial activity in marine green and brown macroalgae from the coast of Morocco[J]. African Journal of Biotechnology,2009,8(7):1258-1262.
- [13] HUDSON J B,KIM J H,LEE M K,et al. Antiviral compounds in extracts of Korean seaweeds: Evidence for multiple activities[J]. Journal of Applied Phycology,1998,10(5):427-434.
- [14] JIAO L L,JIANG P,ZHANG L P,et al. Antitumor and immunomodulating activity of polysaccharides from *Enteromorpha intestinalis* [J]. Biotechnology and Bioprocess Engineering,2010,15(3):421-428.
- [15] CHO M,YANG C,KIM S M,et al. Molecular characterization and biological activities of water soluble sulfated polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* [J]. Food Science and Biotechnology,2010,19(2):525-533.
- [16] CASTRO R,ZARRA I,LAMAS J. Water-soluble seaweed extracts modulate the respiratory burst activity of turbot phagocytes[J]. Aquaculture,2004,229

- (1):67-78.
- [17] 王翔宇,吴海一.浒苔的营养盐吸收及生长特性研究[J].广西科学院学报,2015,31(4):243-246,252.
WANG X Y, WU H Y. Nutrient uptaking and growth performance of *Ulva prolifera* [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2015, 31(4): 243-246, 252.
- [18] RAMSEY III E, RANGOONWALA A, THOMSEN M S, et al. Spectral definition of the macro-algae *Ulva curvata* in the back-barrier bays of the eastern shore of Virginia, USA [J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(2): 586-603.
- [19] 齐衍萍,杨晓飞,宋文鹏,等.胶州湾海域生态问题及解决对策[J].广西科学院学报,2015,31(2):94-96.
QI Y P, YANG X F, SONG W P, et al. Ecological problems and countermeasures of Jiaozhou Bay [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2015, 31(2): 94-96.
- [20] 马士德,王在东,赵杰,等.海洋污损生物对海工混凝土工程腐蚀性分析[J].广西科学院学报,2015,31(3):209-213.
MA S D, WANG Z D, ZHAO J, et al. Effects of fouling organisms on the corrosion of marine concrete [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2015, 31(3): 209-213.
- [21] SON Y B, MIN J E, RYU J H. Detecting massive green algae (*Ulva prolifera*) blooms in the Yellow Sea and East China Sea using Geostationary Ocean Color Imager (GOCI) data [J]. Ocean Science Journal, 2012, 47(3): 359-375.
- [22] SHEN H, PERRIE W, LIU Q R, et al. Detection of macroalgae blooms by complex SAR imagery [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 78(1/2): 190-195.
- [23] ZHANG H Y, XU Q, CHENG Y C, et al. Monitoring of *Ulva prolifera* blooms in the Yellow Sea with MODIS [M] // The International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2013). Nanjing: Atlantis Press, 2013: 902-905.
- [24] CASAL G, SÁNCHEZ-CARNERO N, SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ E, et al. Remote sensing with SPOT-4 for mapping kelp forests in turbid waters on the south European Atlantic shelf [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011, 91(3): 371-378.
- [25] LYONS M, PHINN S, ROELFSEMA C. Integrating quickbird multi-spectral satellite and field data: Mapping bathymetry, seagrass cover, seagrass species and change in Moreton Bay, Australia in 2004 and 2007 [J]. Remote Sensing, 2011, 3(1): 42-64.
- [26] BLONDEAU-PATISSIER D, GOWER J F R, DEKKER A G, et al. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans [J]. Progress in Oceanography, 2014, 123: 123-144.
- [27] 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.
QIU Y H, LU J B. Advances in the monitoring of *Enteromorpha prolifera* using remote sensing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 4977-4985.
- [28] FRATE F D, PETROCCHI A, LICHTENEGGER J, et al. Neural networks for oil spill detection using ERS-SAR data [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2000, 38(5): 2282-2287.
- [29] SOLBERG A H S, BREKKE C, HUSØY P O. Oil spill detection in Radarsat and Envisat SAR images [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2007, 45: 746-755.
- [30] GARCIA-PINEDA O, ZIMMER B, HOWARD M, et al. Using SAR images to delineate ocean oil slicks with a texture-classifying neural network algorithm (TCNNA) [J]. Can J Remote Sens, 2009, 35: 411-421.
- [31] LIU P, ZHAO C, LI X, et al. Identification of ocean oil spills in SAR imagery based on fuzzy logic algorithm [J]. Int J Remote Sens, 2010, 31: 4819-4833.
- [32] SCHULERD L, LEE J S. Mapping ocean surface features using biogenic slick-fields and SAR polarimetric decomposition technique [J]. IEEE Proc Radar Sonar Navig, 2006, 153: 260-270.
- [33] NUNZIATA F, GAMBARDELLA A, MIGLIACCIO M. On the Mueller scattering matrix for SAR sea oil slick observation [J]. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 2008, 5: 691-695.
- [34] MIGLIACCIO M A, GAMBARDELLA F, NUNZIATA M, et al. The PALSAR polarimetric mode for sea slick observation [J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens Lett, 2009, 45: 506-511.
- [35] ZHANG B, PERRIE W, LI X F, et al. Mapping sea surface oil slicks using RADARSAT-2 quad-polarization SAR image [J]. Geophysical Research Letters, 2011, 38: L10602. DOI: 10.1029/2011GL047013.
- [36] 吴岫,吕且妮,葛宝臻.浮标式油膜厚度测量传感器的研制[J].中国激光,2014,41(1):1-5.
WU D, LV Q N, GE B Z. Development of oil film thickness sensor based on buoy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1): 1-5.
- [37] HOGE F E, BERRY R E, SWIFT R N. Active-passive airborne ocean color measurement. 1: Instrumentation [J]. Applied Optics, 1986, 25(1): 39-47.
- [38] 袁越明,熊伟,方勇华,等.差分偏振 FTIR 光谱法探测水面溢油污染的模型分析[J].红外与激光工程,2011,40(3):408-412.
YUAN Y M, XIONG W, FANG Y H, et al. Modeling analysis of detection of oil spills on water by differential polarization FTIR spectrometry [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(3): 408-412.

4 结束语

海面溢油在 SAR 影像上的成像除了受卫星成像过程的影响,还会受到海表面特征、溢油风化阶段等多种因素的影响,单纯依靠微波遥感手段往往难以获得较高的准确性。本研究在 SAR 影像溢油遥感识别的基础上,结合 AIS 等非遥感信息进行辅助解译,并利用边缘检测算法提取溢油信息,构建了海面溢油监测方法。案例分析结果表明,此方法能够有效提高溢油识别和检测的准确性。此方法对船舶溢油行为的有效监测和识别,为监管部门排查嫌疑船舶提供重要线索,为海洋环境保护提供有力的技术支持。

参考文献:

- [1] 李四海. 海上溢油遥感探测技术及其应用进展[J]. 遥感信息, 2004(2): 53-57.
- LI S H. Application of remote sensing for oil slicks detecting and its progress[J]. Remote Sensing Information, 2004(2): 53-57.
- [2] 王超, 张红, 吴樊, 等. 高分辨率 SAR 图像船舶目标检测与分类[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [39] HENGSTERMAN T, REUTER R. Lidar fluorosensing of mineral oil spill on the sea surface[J]. Applied Optics, 1990, 29(22): 3218-3227.
- [40] JHA M N, LEVY J, GAO Y. Advances in remote sensing for oil spill disaster management: State-of-the-art sensors technology for oil spill surveillance [J]. Sensors, 2008, 8(1): 236-255.
- [41] 赵朝方, 李晓龙, 马佑军. 多通道海洋荧光激光雷达溢油监测系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 7: 1263-1269.
- ZHAO C F, LI X L, MA Y J. Multi-channel ocean fluorescence lidar system for oil spill monitoring[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 7: 1263-1269.
- [42] 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.
- WU C Q, MA W D, WANG X L, et al. Remote sensing monitoring HAB in Yellow Sea by HJ1-CCD[J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(3): 161-165.
- [43] 李颖, 梁刚, 于水明, 等. 监测浒苔灾害的微波遥感数据选取[J]. 海洋环境科学, 2011, 30(5): 739-742.
- LI Y, LIANG G, YU S M, et al. Selection of microwave remote sensing data of monitoring of

WANG C, ZHANG H, WU F, et al. Ship Target Detection and Classification on High Resolution SAR Images [M]. Beijing: Science Press, 2013.

- [3] 朱金发, 孙文力, 汤华. 船载自动识别系统手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- ZHU J F, SUN W L, TANG H. Automatic Identification System Manual [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [4] 丁天冰. 基于 DGPS、AIS、GPRS 的船舶导航与监控系统[J]. 世界航运, 2006, 29(3): 48-49.
- DING T B. Ship navigation and monitoring system based on DGPS, AIS and GPRS[J]. World Shipping, 2006, 29(3): 48-49.
- [5] 王文成. AIS 与船舶交通安全管理[J]. 中国水运, 2007(3): 41-43.
- WANG W C. AIS and vessel traffic safety management [J]. China Water Transport, 2007(3): 41-43.
- [6] 夏良正, 李久贤. 数字图像处理[M]. 南京: 东南大学出版社, 1999.
- XIA L Z, LI J X. Digital Image Processing [M]. Nanjing: Southeast University Press, 1999.

(责任编辑: 尹 闯)

(上接第 78 页 Continue from page 78)

- [44] 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.
- ZHAO W J, ZHANG J, CUI T W, et al. *Enteromorpha prolifera* underwater spectral research based on simulation of radiation transmission [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29(6): 1656-1660.
- [45] 刘振宇, 江涛. 基于 MODIS 数据的浒苔信息提取方法研究[J]. 测绘科学, 2008, 33: 113-114.
- LIU Z Y, JIANG T. There search on the way of extracting Hu Moss on the basis of MODIS[J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33: 113-114.
- [46] 蔡晓晴, 崔廷伟, 郑荣儿, 等. 静止海洋水色卫星(GOCI)绿潮探测算法对比研究[J]. 遥感信息, 2014, 29(5): 44-50.
- CAI X Q, CUI T W, ZHENG R E, et al. Comparison of algorithms for green macro-algae bloom detection based on Geostationary Ocean Color Imager[J]. Remote Sensing Information, 2014, 29(5): 44-50.

(责任编辑: 尹 闯)