

赵崴, 王利锋, 牛生丽, 等. 基于多源遥感数据的“交响乐”轮溢油污染监测[J]. 海洋学报, 2024, 46(9): 109–119, doi:10.12284/hyxb2024106
Zhao Wei, Wang Lifeng, Niu Shengli, et al. Multi-remote sensing of spilled oils from *A Symphony* tanker collision in the Yellow Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2024, 46(9): 109–119, doi:10.12284/hyxb2024106

基于多源遥感数据的“交响乐”轮溢油污染监测

赵崴^{1,2}, 王利锋³, 牛生丽^{1,2}, 吕航³, 宋舒娴³, 焦俊男³, 宋庆君^{1,2}, 陆应诚^{3*}

(1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081; 2. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 100081; 3. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210023)

摘要: 溢油是海洋生态环境监测的重点对象。合成孔径雷达、光学遥感与热红外遥感等卫星技术开展海洋溢油监测的机理已得到阐明, 发挥多源遥感的技术特点和应用优势, 实现海洋溢油的精准监测与量化评估, 为海洋环境保护提供重要的技术支撑。2021 年 4 月 27 日巴拿马籍“义海”轮与利比亚籍“交响乐”轮在青岛外海发生碰撞, 导致约 9 400 t 船载货油泄漏入海。本文利用多源卫星遥感数据, 监测并分析了该事故海域的溢油污染覆盖状况及其乳化溢油分布特征。基于溢油多源遥感响应机理与响应特征, 优化了多源卫星遥感数据的处理流程, 实现了溢油覆盖区域的识别与多种溢油污染类型的分类。结果表明: 2021 年 5 月 1 日至 5 月 22 日, “交响乐”轮溢油污染事件累积溢油像元覆盖面积为 2 368.7 km², 其中乳化溢油像元覆盖面积为 1 019.3 km², 乳化油面积占比达 43.0%, 单日最大溢油像元面积达 734 km²; 多源遥感监测结果可以互为验证, 光学遥感更具备识别不同溢油污染的能力, 其中乳化溢油代表了污染危害的关键所在, 从而提高了海洋溢油污染的监测评估精度, 为溢油污染事件的危害评估与精细化监测提供可靠的技术与方法参考。

关键词: 海洋溢油; 乳化溢油; 多源遥感; “交响乐”轮; 光学遥感; 热红外遥感

中图分类号: X834 文献标志码: A 文章编号: 0253-4193(2024)09-0109-11

1 引言

在海洋原油开采、加工和运输的过程中, 溢油事件屡次发生。如 2010 年美国深水地平线钻井平台爆炸事故, 约 440 万桶原油泄漏至墨西哥湾海域, 造成了严重的环境污染^[1-2]; 2011 年渤海 19-3 油田溢油事故, 导致水产养殖损失超过 10 亿元, 生态损害的价值约 16.83 亿元^[3]。最近基于微波雷达数据的统计显示, 在 2014–2019 年期间, 人为来源的海洋油膜面积约占油膜总监测面积的 94%^[4], 远超 20 世纪 90 年代的统计数据(占比 53%)^[5]。这表明在过去的 20 年间, 人类活动导致的海洋溢油大幅上升。溢油进入海洋

后, 受风、浪与流等环境动力因素影响, 在风化作用下会形成多种溢油类型^[6], 包括不同厚度的非乳化油膜、不同类型(油包水相和水包油相乳化油)和浓度的乳化溢油等^[7]。这些溢油类型具有不同的数量、不同的危害和不同的应急处理方式, 会破坏底栖生物环境^[8], 还会影响海洋浮游植物的生长, 甚至可能引发赤潮^[9], 复杂溢油污染的精细监测与定量评估对海洋环境保护至关重要。

遥感技术是海面溢油监测的主要手段, 包括合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)^[10-13]、热红外遥感^[14-19]和光学遥感等^[20-24]。这些技术基于不同的作用机理和响应特征, 具有各自的优势和适用范围。

收稿日期: 2023-10-25; 修订日期: 2024-05-27。

基金项目: 国家自然科学基金(42371380; 42071387; 42176183), 中央高校基本科研业务费专项资金资助(0904-14380035)。

作者简介: 赵崴(1976—), 女, 辽宁省沈阳市人, 研究方向为海洋环境遥感监测与应用。E-mail: zhaowei@mail.nsoas.org.cn

* 通信作者: 陆应诚(1979—), 男, 安徽省六安市人, 教授, 主要研究方向为海洋环境遥感。E-mail: luyc@nju.edu.cn

SAR 不受云层影响,具有全天候监测的能力。不同类型的溢油污染都会调制海面毛细波和短重力波,降低海面粗糙度,减弱溢油海面的后向散射,在 SAR 影像中表现为“暗像元”特征,因此 SAR 难以有效开展溢油污染的精细识别分类与量化评估。此外,海面低风速区、降雨区、上升流区、生物油膜等同样表现为暗像元特征^[19],因此 SAR 检测出的油膜称为疑似油膜(look-alike oil slick, LAOS)。热红外遥感具有昼夜观测能力,是监测海洋溢油的另一种有效手段^[12],海洋溢油与背景海水在热红外遥感影像中会产生亮度温度(Brightness Temperature, BT)差异;一般情况下(即经历过海洋热平衡过程,不携带来自海底或溢油船舶背景温度信息的溢油),较厚的油膜在白天的亮度温度高于背景海水,表现为热红外图像上的正对比特征,在夜间亮度温度低于背景海水,表现为负对比特征^[17],油膜的热红外响应特征与其厚度密切相关^[17-18],因此可以用于量化油膜厚度,但在无先验知识的情况下难以区分溢油类型^[19]。卫星光学遥感由于高频次、大幅宽以及多波段成像的优势,长期用于溢油监测;随着溢油光学遥感理论研究的深入,乳化溢油的光学遥感机理得以阐明^[25-29],不同溢油污染的定量估算模型也初步建立^[28],光学遥感数据对海洋溢油识别分类与量化估算的技术优势凸显。不同的溢油污染类型对入射光具各异的反射率特征^[30-31]、干涉特征^[32]、吸收特征^[33]和特定的偏振特征^[34],通过对这些光学遥感特征的深入理解和利用,可以有效区分污染类型,并获取油膜厚度、覆盖面积等关键参数^[35-36]。

海洋溢油遥感监测应用,既要实现海洋溢油的快速应急响应,更要对溢油污染进行高精度、量化评估。基于单一遥感传感器的溢油监测技术具有局限性,如光学遥感数据受天气条件、云层遮挡等因素的影响,会导致数据获取的不连续和不稳定;SAR 和热红外遥感虽可在复杂天气条件下判断溢油存在与否,但其数据覆盖有限,且在污染物类型识别与溢油量估算方面受到明显制约。综合利用多源遥感数据的成像特征,发挥不同传感器的溢油监测优势,对提升海面溢油污染类型的定性定量监测至关重要。不同类型溢油污染在多源传感器中的成像特征存在分异,如何根据传感器特点发展具有适用性的处理方法与流程仍是一项挑战。目前尚缺乏使用多源遥感数据开展长期、大范围溢油污染监测的研究,如何有效利用多源遥感技术,在实际溢油事件中开展不同溢油污染类型的识别与分类,并进一步促进溢油量的定量评估,是目前海洋溢油遥感监测应用亟需解决的问题。

本研究以 2021 年 4 月 27 日在黄海发生的“交响乐”轮碰撞泄漏事件为例,收集了溢油事故发生期间的 SAR、热红外与光学卫星多源遥感数据,根据溢油在不同遥感数据上的成像特征,发展了相应的处理方法与流程,实现了对海面不同溢油污染类型的识别、提取、分类及初步估算。该研究有助于提升突发溢油事件应对能力,推进海洋溢油的卫星遥感监测应用水平,为典型海洋溢油事件的精细化监测与评估提供业务化应用参考。

2 数据与方法

2.1 研究区域

2021 年 4 月 27 日,巴拿马籍货船“义海 (*Sea Justice*)”轮与利比亚籍油船“交响乐 (*A Symphony*)”轮在青岛外海(35°43'N, 120°58'E)发生碰撞,事故导致“义海”轮与“交响乐”轮分别遭到不同程度的损坏,“交响乐”轮所携带的约 9 400 t 船载油品泄漏入海,对当地海域造成了严重污染。本文针对该事件进行溢油精细化监测,研究区域如图 1a 橘色方框所示,时间跨度从 2021 年 5 月 1-22 日。在 5 月 1 日 HY-1D 星海岸带成像仪(Coastal Zone Imager, CZI)的真彩色合成图像内首次发现油膜(图 1b 和 1e),可见“交响乐”轮以北至朝连岛东南有明显的溢油带;从 5 月 25 日 HY-1C 星海岸带成像仪的真彩色图像可见(图 1c),研究区域内,此时已无明显溢油信息。需要注意的是,碰撞点附近存在如图 1d 所示的低风速区(黑色区域),会对微波雷达监测溢油造成干扰。

2.2 多源遥感数据

2021 年 4 月 27 日至 5 月 22 日“交响乐”轮碰撞事件时间线及多源卫星遥感的可用数据如图 2 所示,所用的多源卫星数据包括光学数据, SAR 和热红外数据,有效数据共计 36 景,在该溢油事件中有 10 d 形成多星同日观测,可互为验证。光学数据来自海洋一号卫星星座(HY-1C 和 HY-1D),高分一号卫星(GF-1),环境二号卫星(HJ-2),哨兵二号卫星(Sentinel-2), Landsat-8 卫星和中巴资源卫星(CB04)。其中海洋一号卫星星座搭载的 CZI 光学载荷能够有效覆盖中国近海以及周边区域,通过上、下午双星组网可以实现对中国近海溢油的 3 d 两次监测。SAR 数据包括高分三号(GF-3 SAR)和哨兵一号(Sentinel-1 SAR),需要注意的是,微波雷达数据中的暗像元除了油膜外,还包括低风速区等干扰,监测到的海面溢油目标被称为“疑似溢油”,因此被用作辅助数据协助对光学影像中的溢油进行判别,热红外数据来自 Landsat-8 热红

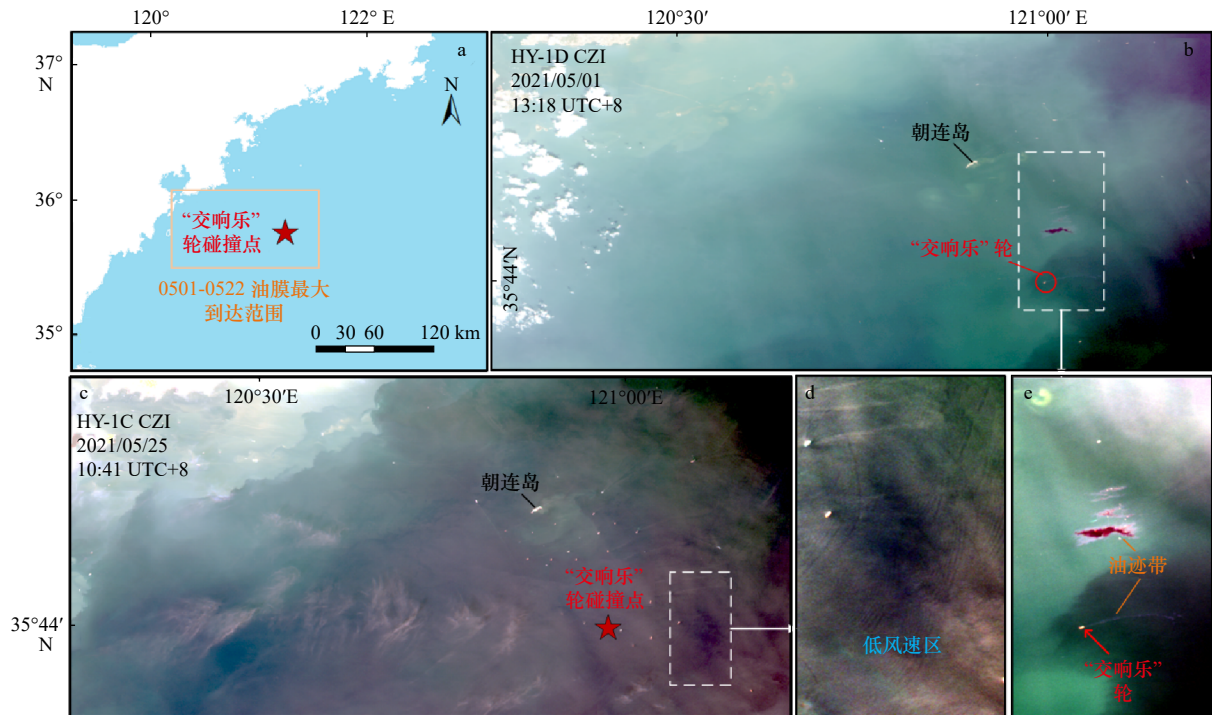


图1 “交响乐”轮溢油事件研究区域
Fig. 1 Study area for *A Symphony* tanker collision event

- a. “交响乐”轮碰撞点及溢油污染最大覆盖范围; b. 5月1日13时18分研究区域内HY-1D CZI传感器观测结果, 研究区域内首次发现溢油痕迹; c. 5月25日10时41分研究区域内HY-1C CZI传感器观测结果, 研究区域内已无明显溢油; d, e. 分别对应图c和b中白色虚线区域, d为海面低风速区, e可观察到“交响乐”轮及明显的海面溢油
- a. Collision point of *A Symphony* tanker and maximum coverage of oil spill pollution; b. the HY-1D CZI image at 13:18 on 1 May, and oil spill traces were first discovered in the study area; c. the HY-1C CZI image at 10:41 on 25 May, and no apparent oil spill was observed in the study area; d and e correspond to the white dashed areas in c and b, respectively; d is a low-wind zone on the sea surface; e shows *A Symphony* tanker and the obvious oil spill traces

外传感器 (TIRS, Thermal Infrared Sensor)。光学卫星图像显示为真彩色合成影像(仅CB04为假彩色合成), 对于HY-1 C/D图像RGB合成为R(650 nm), G(560 nm), B(460 nm); GF-1图像为R(660 nm), G(550 nm), B(480 nm); HJ-2图像为R(660 nm), G(560 nm), B(470 nm); Sentinel-2图像为R(665 nm), G(560 nm), B(490 nm); Landsat-8 OLI图像为R(660 nm), G(560 nm), B(485 nm); CB04为R(830 nm), G(660 nm), B(555 nm)。SAR图像展示使用VV波段, 热红外图像使用TIRS1波段。

2.3 多源遥感溢油定量监测模型

光学卫星图像预处理包括瑞利散射校正与溢油表面耀光反射率的计算, 其理论原理不再赘述, 可参考国内外相关文献[29–30]。所用的光学卫星数据均校正为瑞利校正反射率(R_c)产品, 应用于海面溢油分析, 其表达如公式(1)所示:

$$R_c = \pi(L_t - L_r) / F_0 \cos(\theta_0), \quad (1)$$

式中: L_t 为像元总辐亮度, 单位为 $\text{mW}/(\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{Sr})$,

L_r 为瑞利散射辐亮度, F_0 为太阳入射辐照度, θ_0 为太阳天顶角。由于耀光反射强度差异会改变海面溢油与背景水体的辐亮度对比(R_c 反射率)^[25], 需要对不同光学影像的耀光反射强度进行分析, 传感器探测方向与海面目标对太阳光镜面反射的夹角 θ_m 可以表示耀光反射强弱^[30], 计算方法如公式(2):

$$\cos(\theta_m) = \cos(\theta_0) \cos(\theta) - \sin(\theta_0) \sin(\theta) \cos(\varphi), \quad (2)$$

式中: θ 为卫星天顶角, φ 为太阳与卫星之间的相对方位角。需要注意的是, 对于HY-1C/D CZI, Sentinel-2 MSI(Multi Spectral Instrument)与Landsat-8 OLI(Operational Land Imager)数据, 根据卫星所提供的角度数据, 可计算图像中每个像素点对应的 θ_m ; 而对于HJ-2、GF-2、CB-03等光学数据, 只提供了星下点的角度数据, 因此对于该类卫星, 只计算所在区域的 θ_m 范围。溢油海面的亮度温度由Landsat-8的热红外数据计算得出^[18]。哨兵1的SAR数据(GRD级)使用欧空局的SNAP软件进行预处理, 流程依次为热噪声去除、轨道校正、辐射定标、多视处理、相干斑滤波、

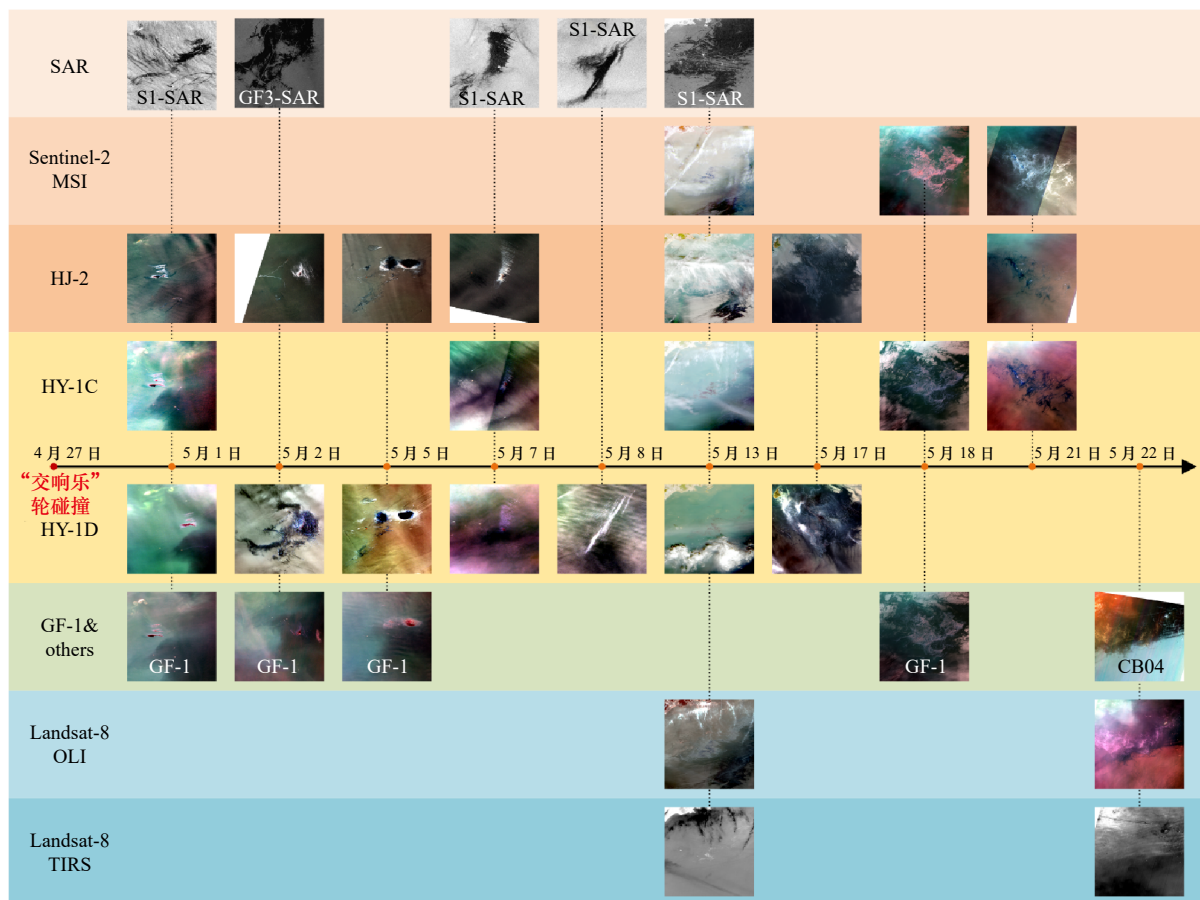


图2 2021年4月27日至5月22日“交响乐”轮碰撞事件时间线及多源卫星遥感数据

Fig. 2 Timeline of *A Symphony* tanker collision event from April 27 to May 22, 2021 with corresponding multi- remote sensing data

地形校正及分贝化处理, GF-3的 SAR 数据处理流程类似。

目前海洋溢油的识别与提取算法较多^[21-24], 虽存在原理与机制分异, 但都具有可行性; 在本研究中, 使用 Segment anything model (SAM) 模型作为识别提取算法^[37-38], 结合多源图像的波段特征与形态特征, 利用提取模型自动对溢油的分布与乳化油进行识别提取, 进而开展浓度的光学遥感评估。需要注意的是, 本研究并不侧重算法, 也不强调 SAM 的构架与原理; 重点是依托 SAM 及溢油识别分类模型, 提出了多源遥感溢油综合判别与评估溢油危害的新策略, 探索业务化应用的技术处理流程, 为后续溢油事件的应急监测提供技术方法参考(图3)。

3 溢油多源遥感响应特征

随着海洋溢油光学遥感理论不断发展, 不同溢油污染类型(不同厚度的非乳化油膜、不同类型和浓度的乳化油)的光学遥感响应特征得以阐明^[25-26], 特别是在不同的耀光反射条件下, 光学传感器检测到的溢油响应特征也各有不同^[21]。 θ_m 能够指征光学遥感

影像上的耀光反射强弱, 当 $\theta_m > 13^\circ$ 时, 代表该区域溢油处于弱耀光反射影响区域, 反之则处于强耀光反射区域。如图4所示, 图4a1中的MSI图像 θ_m 小于 13° , 属于强耀光反射区域, 其油膜与背景海水相比表现为亮对比特征; 这是由于光学卫星传感器主要接收到溢油表面的菲涅尔反射信号, 油膜对入射光的吸收特征会受到强耀光反射信号的影响^[30,31]。图4b1和图4c1的图像 θ_m 均大于 13° , 属于弱耀光反射区域, 由于溢油对入射光吸收作用和此角度下相对较弱的表面耀光反射率, 非乳化油膜与背景海水相比表现为暗对比特征, 乳化油膜仍然表现为亮特征(受乳化油内部光散射的影响)。图4a2和图4b2表明, 无论是在强耀光还是弱耀光反射区域, 不同传感器中的乳化油反射率均明显大于非乳化油膜, 且与背景水体具有明显差异。油膜与乳化油的反射特征差异符合溢油光学遥感的理论认知, 从而能被有效识别并区分。

除了强弱耀光下的溢油耀光反射特征, 光学检测还可有效区分并识别海面乳化油膜与非乳化油膜^[21], 如图5所示, 图5a1、b1、c1为5月2日准同步的光学卫星影像, 可见不同的传感器对于非乳化油及乳化油

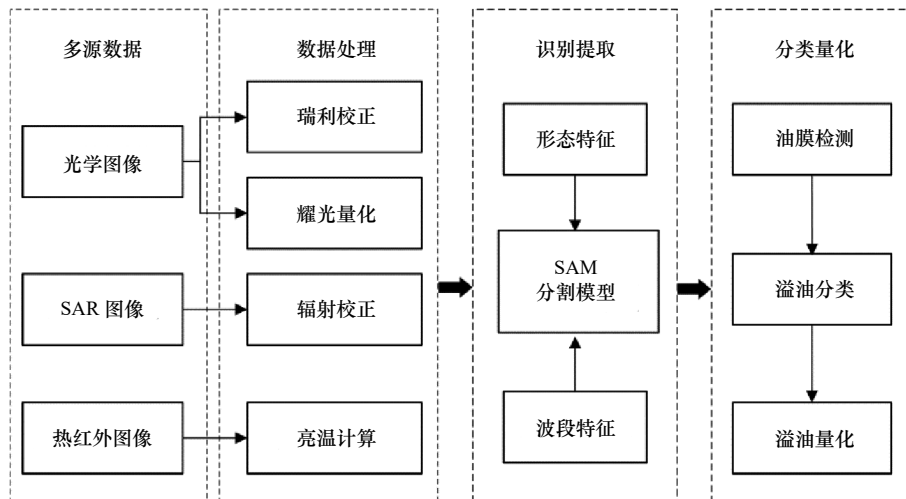


图3 多源遥感数据溢油定量监测处理流程

Fig. 3 Flow chart for quantitative oil spill monitoring of multi-source remote sensing data

的响应特征不同, HY-1D CZI 影像中有暗对比特征的非乳化油膜与亮对比特征的乳化油, HJ-2 和 GF-1 影像中可明显观测到亮对比特征的乳化油, 但对于非乳化油不敏感(主要是非乳化油膜与背景海水的反射耀光对比差异不大所导致)。图 5d1 为 GF-3 SAR 影像, 水面油膜可显著调制海面毛细波, 降低海面粗糙度, 从而改变海面的布拉格散射, 在 SAR 图像上油膜为暗对比特征^[9]; 但是海面低风速区、生物油膜, 上升流区等具有低表面粗糙度特征, 也表现为暗对比特征^[13], 因此, SAR 遥感监测结果为海面“疑似油膜”, 需要进一步结合光学图像提高 SAR 疑似油膜的检测精度。

溢油与背景海水的蒸发率不同, 两者与空气之间的热传输存在显著差异, 在热红外影像上会有明显的亮度温度差异, 显示出热对比特征(正或负对比), 可以用于海洋溢油的监测和量化^[17-19]。在白天, 海面溢油相较于背景海水会吸收更多的太阳辐射, 在影像上表现出亮温正对比的图像特征; 夜晚海面溢油散发热量快于背景海水, 呈现出亮温负对比特征, 热红外图像也可用于海面油膜的监测与验证。如图 6 所示, 图 6a1 和图 6b1 分别为 5 月 13 日与 5 月 22 日的 Landsat 8 光学真彩色图像。可明显观测到水面油膜与乳化油特征。图 6c1 与图 6d1 为对应的热红外亮度温度(BT)图像, 在热红外图像中, 使用 BT 来表征海面溢油的差异。具体来说当油膜 BT 高于水面时(图 6c1), 油膜可能已在阳光照射下达到热平衡且指示了这是较厚的乳化油^[9], 图 6c2 中检测到的油膜区域与图 6a2 中的乳化油区域相吻合进一步佐证了该猜测。对于 5 月 22 日的 Landsat 8 图像图 6b1 和图 6d1, 虽然在光学图像中可以观测到海面油膜, 但在热红外

图像中并未检测到海面油膜, 这是由于油膜厚度未达到油膜热红外遥感的最小监测厚度。

4 “交响乐”轮溢油的多源卫星精细化监测

4.1 基于多源卫星数据的溢油识别提取

溢油能够被微波雷达、光学、热红外等多源遥感技术监测, 不同的遥感图像上具有明显的响应特征差异。基于 SAR, 热红外, 及光学遥感的溢油图像特征, 发挥不同传感器的溢油监测优势, 进行溢油的识别与表征, 既可以克服单一传感器的局限性, 又可提升监测频率并实现溢油类型的分类。本文以 SAM 模型为主, 结合南京大学与国家卫星海洋应用中心共同开发的国产自主光学卫星溢油监测算法与软件, 通过图像波段与溢油形态特征分析, 并以目视解译结果为验证, 对“交响乐”轮溢油遥感图像进行溢油识别和提取, 结果如图 7 所示。对于光学图像, 提取结果可分为非乳化油与乳化油, 展示了光学遥感在溢油乳化物分类及溢油量化方面的特点与优势。SAR 图像中提取的“疑似油膜”结果, 不受云层覆盖及天气条件影响, 有效提升了该次事件的溢油观测频率。此外, 多源识别提取结果可互为验证, 同时又能克服不同传感器监测溢油的固有不足, 增强溢油污染类型的判别能力。综合多源遥感的不同技术优势, 能够有效促进对复杂海面溢油污染类型的定性与定量监测, 有助于突发溢油事件的精细化监测, 推进海洋环境遥感应用效能。

4.2 “交响乐”轮溢油污染时空变化

基于多源卫星的溢油识别提取与分类结果(图 7), 本文统计了 5 月 1-22 日“交响乐”轮溢油类型和量值

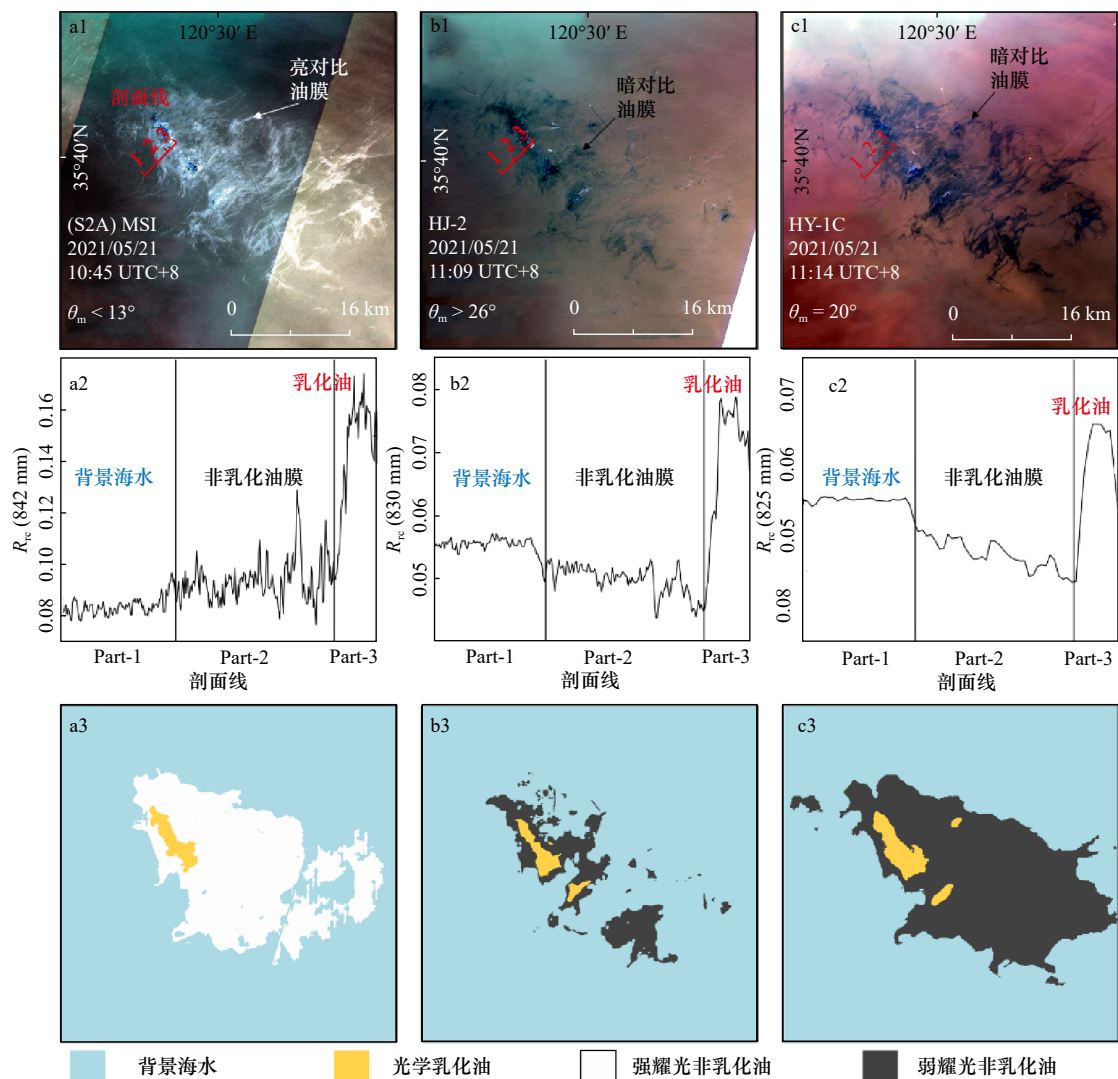


图 4 光学遥感数据在不同耀光条件下的溢油响应特征

Fig. 4 Oil spill response characteristics of optical remote sensing under different sunlight conditions

a1、b1、c1. 5月21日准同步 Sentinel-2(S2A) MSI(R: 655 nm, G: 560 nm, B: 492 nm), HJ-2(R: 660 nm, G: 560 nm, B: 470 nm), HY-1 C(R: 650 nm,

G: 560 nm, B: 460 nm) 光学真彩色合成数据; a2、b2、c2. 不同传感器油膜反射率特征差异; a3、b3、c3. 溢油光学识别分类结果

a1、b1、c1. Quasi-synchronous Sentinel-2(S2A) MSI(R: 655 nm, G: 560 nm, B: 492 nm), HJ-2(R: 660 nm, G: 560 nm, B: 470 nm) and HY-1C(R: 650 nm, G: 560 nm, B: 460 nm) optical true-color composite data from May 21; a2, b2, c2. differences in reflectance characteristics of oil films for different sensors;

a3, b3, c3. optical identification and classification of oil spill

变化。图 8 展示了多源遥感数据在“交响乐”轮碰撞 22 d 内的溢油像元面积变化趋势(需要注意的是, 溢油像元面积不能直接等同于实际溢油面积, 会受到混合像元等因素影响), 根据光学遥感信息还可将统计面积分为非乳化油面积与乳化油面积。5月1日在光学遥感影像中首次监测到非乳化油膜与乳化油, SAR 图像出现对应的油膜区域, 地点为“交响乐”轮碰撞事故附近。5月2-13日均陆续监测到海面溢油, 光学影像监测到的溢油像元面积均在 100 km^2 以内; 此后溢油持续扩散, 在5月17-18日监测到的溢油像元面积达到高值, 单日最大溢油像元面积达

734 km^2 。结果表明, 本次碰撞导致的溢油污染至少持续了 22 d, 光学影像检测到的累积溢油像元覆盖面积 2368.7 km^2 , 其中乳化溢油像元覆盖面积 1019.3 km^2 , 占比 43%。在本次溢油污染事故中, 乳化油的像元面积占比较高表明泄漏的原油中重质原油含量较高, 也反映了溢油风化过程及其对环境的危害。

4.3 溢油污染的量化估算

溢油量是溢油事故应急处理与灾损评估的一个重要参数。光学遥感可识别不同的溢油污染类型, 通过估算乳化溢油浓度, 从而提高溢油量化的精准度; 近红外与短波红外波段在乳化溢油的面积识别与量

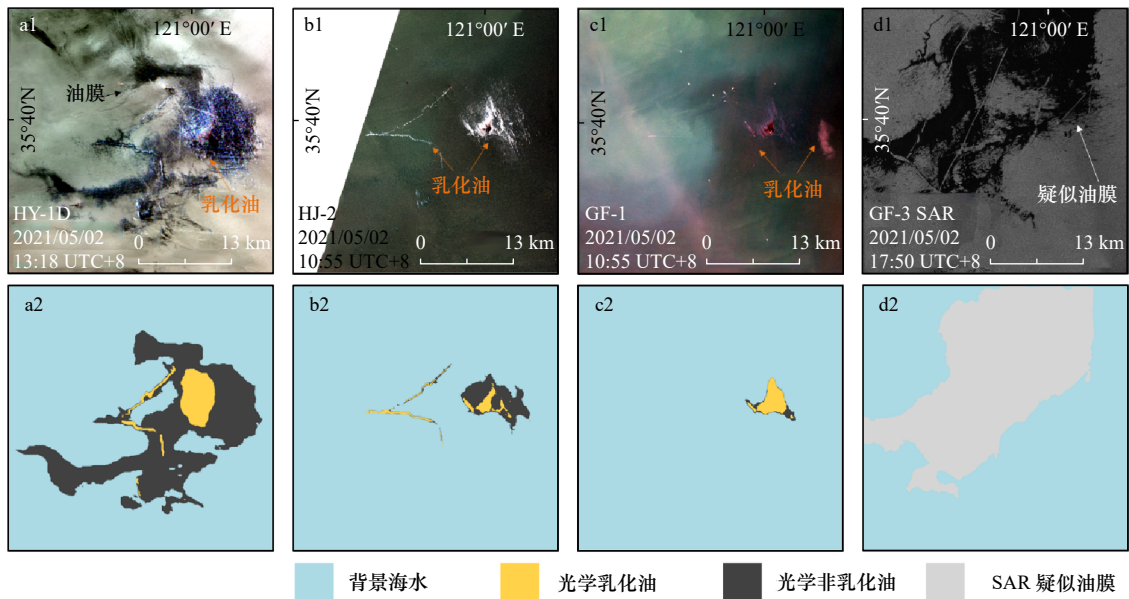


图5 多源遥感数据的光学与SAR溢油响应特征

Fig. 5 Oil spill response characteristics of optical remote sensing and SAR

a1、b1、c1、d1. 5月2日准同步HY-1D(R: 650 nm, G: 560 nm, B: 460 nm), HJ-2(R: 660 nm, G: 560 nm, B: 470nm), GF-1(R: 660 nm, G: 555 nm, B: 485 nm)光学真彩色合成数据及GF-3 SAR数据; a2、b2、c2、d2. 溢油识别分类结果
 a1, b1, c1, d1. Quasi-simultaneous HY-1D (R: 650 nm, G: 560 nm, B: 460 nm), HJ-2 (R: 660 nm, G: 560 nm, B: 470 nm) and GF-1 (R: 660 nm, G: 555 nm, B: 485 nm) optical true-color composites and GF-3 on May 2 SAR data; a2, b2, c2, d2. identification and classification of oil spill in a1, b1, c1, d1

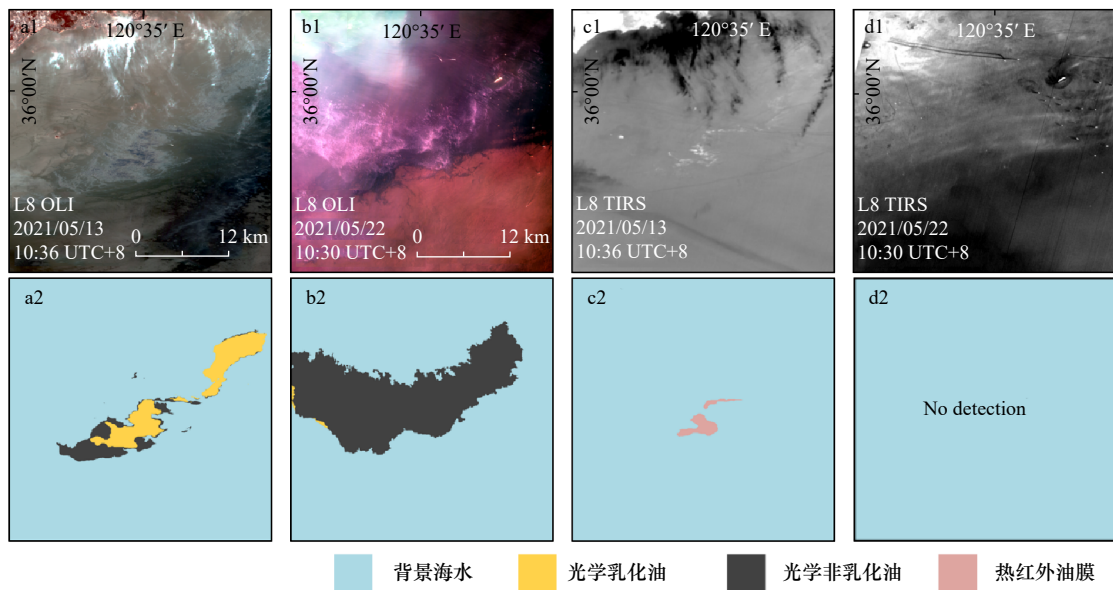


图6 Landsat 8 光学数据及热红外数据的溢油响应特征

Fig. 6 Oil spill response characteristics of Landsat 8 optical and thermal infrared data

a1. 5月13日Landsat 8 OLI(R: 655 nm, G: 563 nm, B: 483 nm)光学真彩色合成数据; b1. 5月22日Landsat 8 OLI光学真彩色合成数据; c1. 5月13日Landsat 8 TIRS热红外数据; d1. 5月22日Landsat 8 TIRS热红外数据; a2、b2、c2、d2. 溢油识别分类结果
 a1. Landsat 8 OLI (R: 655 nm, G: 563 nm, B: 483 nm) optical true-color composite data on 13 May; b1. Landsat 8 OLI optical true-color composite data on 22 May; c1. Landsat 8 TIRS thermal infrared data on 13 May; d1. Landsat 8 TIRS thermal infrared data on 22 May; a2, b2, c2, d2. identification and classification of oil spill in a1, b1, c1, d1

化估算上具有优势,可用于其浓度计算^[28]。如图9所示,5月18日的MSI光学遥感影像(图9a),从其光谱响应曲线(图9b)可见,无油海面,非乳化油膜及乳化

溢油具有各异的光谱响应特征。特别是在短波红外波段(MSI对应的1375 nm和1610 nm波段),乳化溢油的光谱反射率明显高于油膜与海面,这是乳化溢油

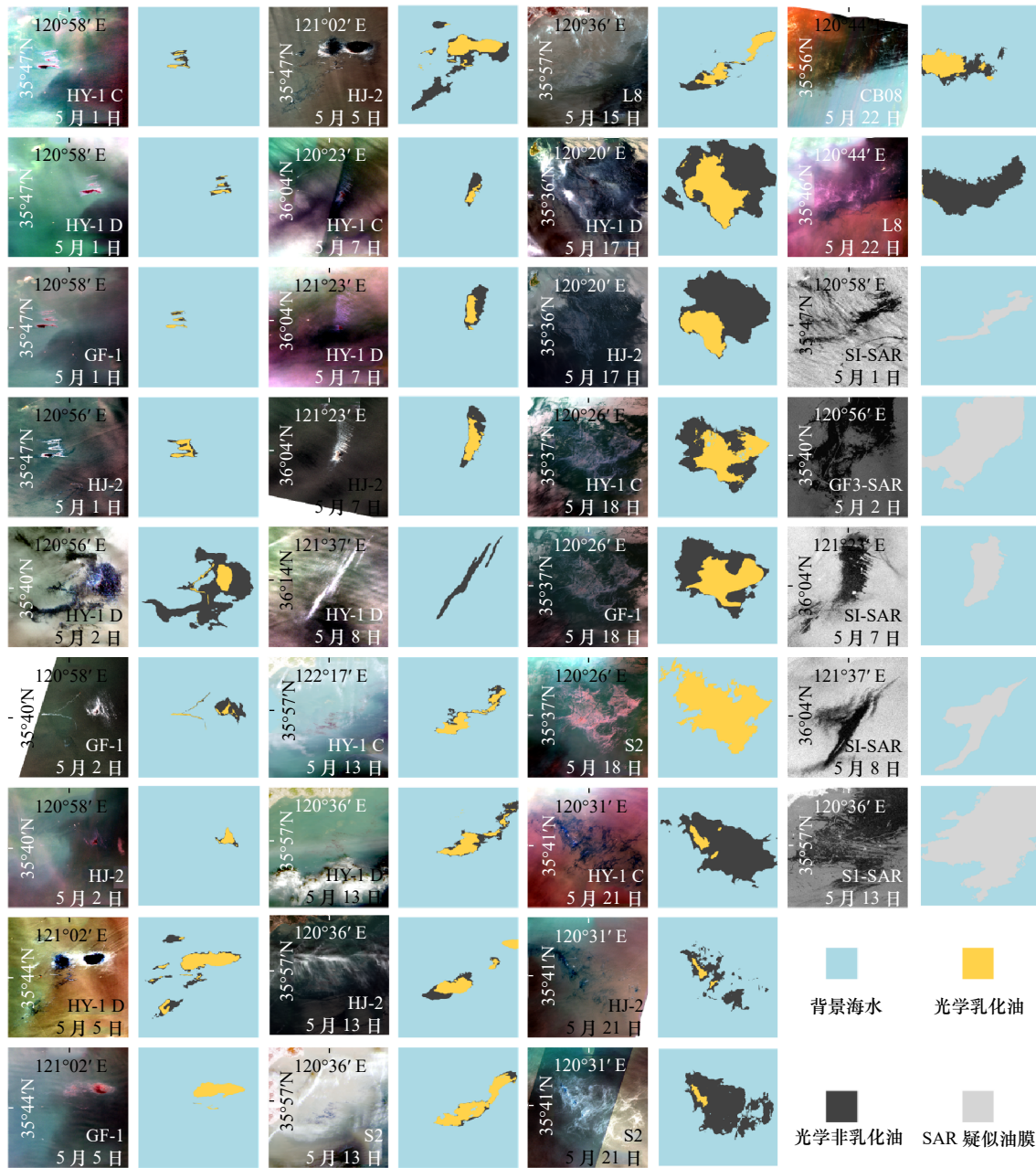


图 7 基于多源遥感数据的识别分类结果

Fig. 7 Identification and classification of oil spill based on multi-remote sensing data

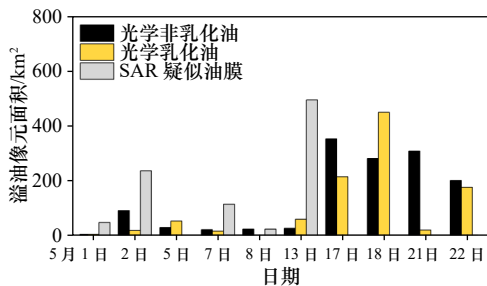


图 8 “交响乐”轮溢油像元面积统计结果

Fig. 8 Statistical results of pixel area of oil spill for A Symphony tanker

在近红外-短波红外波段后向散射信号所产生。根据

溢油提取结果 (图 9c) 使用查找表对乳化溢油浓度进行归一化估算^[28], 结果如图 9d 所示, 图中乳化溢油浓度较高的区域对应于图 9a 中的溢油量最为集中的区域。乳化溢油、非乳化油膜与背景海水区分明显, 归一化浓度是乳化溢油的重要特征参量, 如能进一步给出此次事件中乳化油浓度与厚度的光学统计关系, 则能实现溢油量的进一步估算。波恩协议^[39]的经验法则中 (该法则常用于溢油量的经验估算), 目视特征为彩虹色薄油膜-金属色溢油, 其厚度约 0.3~50 μm, 对应单位溢油量参考值约为 300~50 000 L/km²; 高浓度的乳化溢油, 等效厚度大于 50 μm, 单位面积溢油量

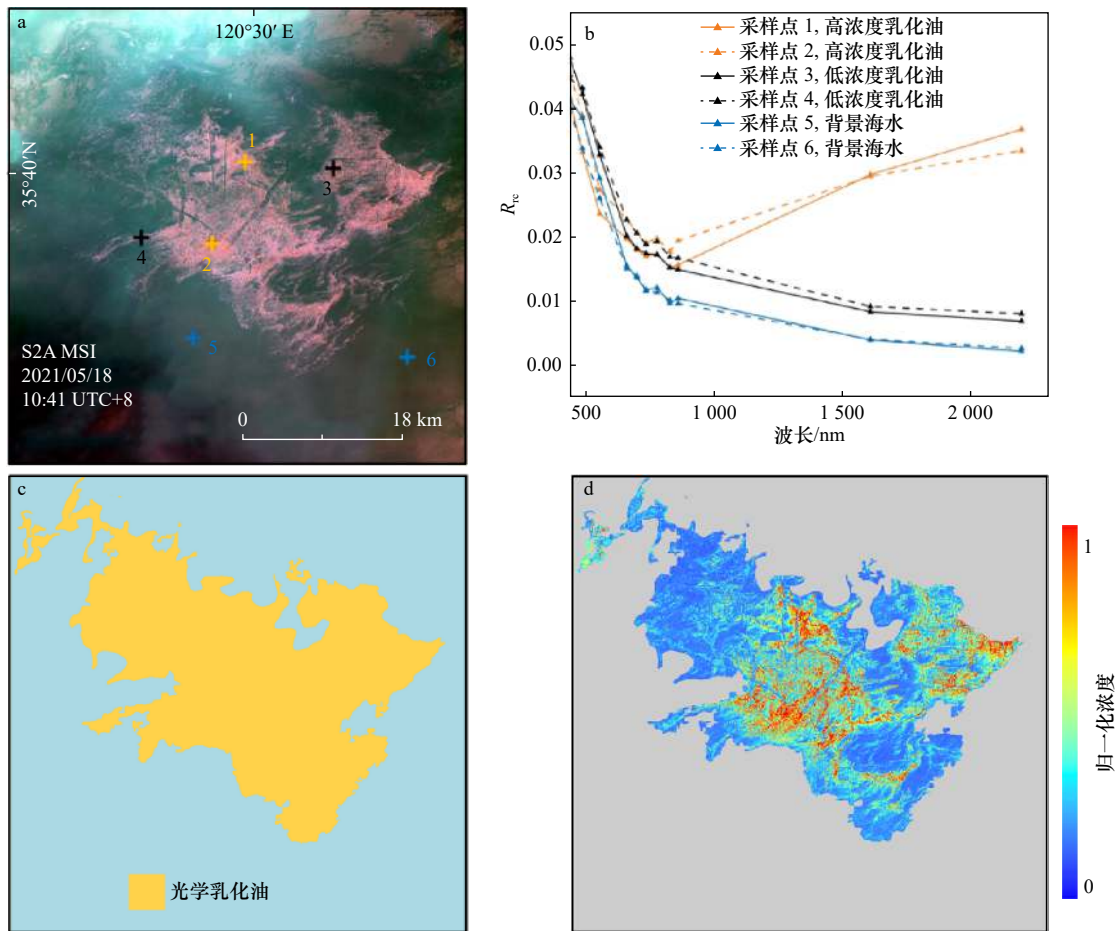


图9 a. Sentinel-2 MSI 光学真彩色合成数据及采样点分布; b. 光谱响应特征; c. 溢油识别提取结果; d. 乳化油归一化浓度估算结果

Fig. 9 a. Optical true-color composite of Sentinel-2 MSI and sampling sites distribution; b. spectral response characteristics; c. Identification and classification of oil spill; d. the estimation of emulsified normalized oil concentration

则大于 $50\,000\text{ L/km}^2$ 。鉴于缺少现场验证数据, 本研究仅给出乳化油归一化浓度, 但这已表明光学遥感数据对于不同溢油污染类型能够进行较为精确的量化监测。

5 结论

随着光学遥感在不同溢油污染类型识别分类, 乳化溢油浓度和油膜厚度估算等方面的理论逐步成熟, 将以微波雷达为主的溢油遥感监测, 推进到以多源卫星遥感(包括 SAR、热红外遥感和光学遥感)协同的综合监测, 有助于充分发挥各自的优势和特色。本文基于多源遥感数据, 对 2021 年 5 月的“交响乐”轮溢

油事件开展了精细化监测评估, 2021 年 5 月 1–22 日期间的 36 景图像, 展示了此次溢油事故的详细发展过程。自船只碰撞起, 卫星数据观测到的溢油污染至少持续了 22 d, 海洋溢油光学图像面积最大(5 月 18 日)达 734 km^2 , 累积溢油像元覆盖面积达 $2\,368.7\text{ km}^2$, 其中 43.0% 覆盖面积为乳化溢油; 5 月 13 日热红外遥感图像中, 明显的溢油热红外特征则表明此时海面仍有较厚的溢油存在。本研究通过不同类型溢油污染的识别分类与量化, 为后续定量估算提供依据, 并讨论了多源遥感数据对复杂溢油污染的响应差异, 为中国海洋水色业务卫星和其他国产自主卫星数据, 开展海洋溢油的业务化监测应用提供技术和方法参考。

参考文献:

- [1] Crone T J, Tolstoy M. Magnitude of the 2010 Gulf of Mexico oil leak[J]. *Science*, 2010, 330(6004): 634.
- [2] Leifer I, Lehr W J, Simecek-Beatty D, et al. State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: application to the BP *Deepwater Horizon* oil spill[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 124: 185–209.
- [3] 曹阳. 海上油污损害的救济途径研究——以墨西哥湾漏油事件为例 [D]. 大连: 大连海事大学, 2014.

- Cao Yang. On remedies of ocean oil damage—A case study of the Gulf of Mexico oil spill[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014.
- [4] Dong Yanzhu, Liu Yongxue, Hu Chuanmin, et al. Chronic oiling in global oceans[J]. *Science*, 2022, 376(6599): 1300–1304.
- [5] Kvenvolden K A, Cooper C K. Natural seepage of crude oil into the marine environment[J]. *Geo-Marine Letters*, 2003, 23(3): 140–146.
- [6] Zhong Zhixia, You Fengqi. Oil spill response planning with consideration of physicochemical evolution of the oil slick: a multiobjective optimization approach[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2011, 35(8): 1614–1630.
- [7] Lu Yingcheng, Tian Qingjiu, Wang Xinyuan, et al. Determining oil slick thickness using hyperspectral remote sensing in the Bohai Sea of China[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(1): 76–93.
- [8] 马媛, 高振会, 杨应斌, 等. 海上石油开采导致生态环境变化实例研究 [J]. *海洋学报*, 2005, 27(5): 54–59.
Ma Yuan, Gao Zhenhui, Yang Yingbin, et al. Eco-environment changes in the Chengbei Oil Field due to the marine petroleum exploration[J]. *Haiyang Xuebao*, 2005, 27(5): 54–59.
- [9] 沈南南, 李纯厚, 王晓伟. 石油污染对海洋浮游生物的影响 [J]. *生物技术通报*, 2006(S1): 95–99.
Shen Nannan, Li Chunhou, Wang Xiaowei. Effects of oil pollution on marine planktons[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2006(S1): 95–99.
- [10] Fingas M F, Brown C E. Review of oil spill remote sensing[J]. *Spill Science & Technology Bulletin*, 1997, 4(4): 199–208.
- [11] Brekke C, Solberg A H S. Oil spill detection by satellite remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(1): 1–13.
- [12] Zhang Biao, Perrie W, Li Xiaofeng, et al. Mapping sea surface oil slicks using RADARSAT-2 quad-polarization SAR image[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(10): L10602.
- [13] Li Chenglei, Kim D J, Park S, et al. A self-evolving deep learning algorithm for automatic oil spill detection in Sentinel-1 SAR images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 299: 113872.
- [14] Salisbury J W, D'Aria D M, Sabins Jr F F. Thermal infrared remote sensing of crude oil slicks[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 45(2): 225–231.
- [15] Tseng W Y, Chiu L S. AVHRR observations of Persian Gulf oil spills[C]//Proceedings of IGARSS'94-1994 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Pasadena: IEEE, 1994: 779–782.
- [16] Svejkovsky J, Lehr W, Muskat J, et al. Operational utilization of aerial multispectral remote sensing during oil spill response[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2012, 78(10): 1089–1102.
- [17] Shih W C, Andrews A B. Modeling of thickness dependent infrared radiance contrast of native and crude oil covered water surfaces[J]. *Optics Express*, 2008, 16(14): 10535–10542.
- [18] Lu Yingcheng, Zhan Wenfeng, Hu Chuanmin. Detecting and quantifying oil slick thickness by thermal remote sensing: a ground-based experiment[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 181: 207–217.
- [19] Jiao Junnan, Lu Yingcheng, Hu Chuanmin, et al. Quantifying ocean surface oil thickness using thermal remote sensing[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2021, 261: 112513.
- [20] 刘建强. 全球海面油膜遥感 [J]. *科学通报*, 2022, 67(33): 3897–3899.
Liu Jianqiang. Remote sensing of oil slicks in global oceans[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(33): 3897–3899.
- [21] 刘建强, 陆应诚, 丁静, 等. 中国海洋水色业务卫星揭示我国近海溢油污染状况 [J]. *科学通报*, 2022, 67(33): 3997–4008.
Liu Jianqiang, Lu Yingcheng, Ding Jing, et al. Oil spills in China Seas revealed by the national ocean color satellites[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(33): 3997–4008.
- [22] Sun Shaojie, Lu Yingcheng, Liu Yongxue, et al. Tracking an oil tanker collision and spilled oils in the East China Sea using multisensor day and night satellite imagery[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(7): 3212–3220.
- [23] 陆应诚, 刘建强, 丁静, 等. 中国东海“桑吉”轮溢油污染类型的光学遥感识别 [J]. *科学通报*, 2019, 64(31): 3213–3222.
Lu Yingcheng, Liu Jianqiang, Ding Jing, et al. Optical remote identification of spilled oils from the SANCHI oil tanker collision in the East China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(31): 3213–3222.
- [24] Zhu Xiaobo, Lu Yingcheng, Liu Jianqiang, et al. Optical extraction of oil spills from satellite images under different sunglint reflections[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 4210714.
- [25] Lu Yingcheng, Shi Jing, Wen Yansha, et al. Optical interpretation of oil emulsions in the ocean—Part I: laboratory measurements and proof-of-concept with AVIRIS observations[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 230: 111183.
- [26] Lu Yingcheng, Shi Jing, Hu Chuanmin, et al. Optical interpretation of oil emulsions in the ocean—Part II: applications to multi-band coarse-resolution imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 242: 111778.
- [27] Hu Chuanmin, Lu Yingcheng, Sun Shaojie, et al. Optical remote sensing of oil spills in the ocean: what is really possible?[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 9141902.
- [28] Jiao Junnan, Lu Yingcheng, Hu Chuanmin. Optical interpretation of oil emulsions in the ocean—Part III: a three-dimensional unmixing model to quantify oil concentration[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 296: 113719.
- [29] Lu Yingcheng, Zhou Yang, Liu Yongxue, et al. Using remote sensing to detect the polarized sunglint reflected from oil slicks beyond the critical angle[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(8): 6342–6354.
- [30] Hu Chuanmin, Li Xiaofeng, Pichel W G, et al. Detection of natural oil slicks in the NW Gulf of Mexico using MODIS imagery[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(1): L01604.
- [31] Jackson C R, Alpers W. The role of the critical angle in brightness reversals on sunglint images of the sea surface[J]. *Journal of Geophys-*

- ical Research: Oceans, 2010, 115(C9): C09019.
- [32] Wettle M, Daniel P J, Logan G A, et al. Assessing the effect of hydrocarbon oil type and thickness on a remote sensing signal: a sensitivity study based on the optical properties of two different oil types and the HYMAP and Quickbird sensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(9): 2000–2010.
- [33] Kukhtarev N, Kukhtareva T, Gallegos S C. Holographic interferometry of oil films and droplets in water with a single-beam mirror-type scheme[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(7): B53–B57.
- [34] Zhou Yang, Lu Yingcheng, Shen Yafeng, et al. Polarized remote inversion of the refractive index of marine spilled oil from PARASOL images under sunglint[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(4): 2710–2719.
- [35] Lu Yingcheng, Li Xiang, Tian Qingjiu, et al. Progress in marine oil spill optical remote sensing: detected targets, spectral response characteristics, and theories[J]. *Marine Geodesy*, 2013, 36(3): 334–346.
- [36] Clark R N, Swayze G A, Leifer I, et al. A Method for Quantitative Mapping of Thick Oil Spills using Imaging Spectroscopy[R]. Denver: U. S. Geological Survey, 2010.
- [37] Kirillov A, Mintun E, Ravi N, et al. Segment anything[C]//Proceedings of the 2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision. Paris: IEEE, 2023: 3992–4003.
- [38] Ma Jun, He Yuting, Li Feifei, et al. Segment anything in medical images[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 654.
- [39] Bonn A. Bonn agreement aerial operations handbook, 2016[R]. London: Bonn Agreement, 2016.

Multi-remote sensing of spilled oils from *A Symphony* tanker collision in the Yellow Sea

Zhao Wei^{1,2}, Wang Lifeng³, Niu Shengli^{1,2}, Lü Hang³, Song Shuxian³,
Jiao Junnan³, Song Qingjun^{1,2}, Lu Yingcheng³

(1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China; 2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 3. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Oil spill is one of the critical target of marine environmental monitoring. Synthetic Aperture Radar (SAR), thermal infrared remote sensing, and optical remote sensing for monitoring of marine oil spills have been elucidated, and it is crucial for marine environmental protection to utilize the features and advantages of multi-source remote sensing to achieve accurate monitoring and quantitative assessment of marine oil spills. On April 27, 2021, the collision between the Panamanian vessel *Sea Justice* and the Liberian oil tanker *A Symphony* resulted in an estimated 9400 t of cargo oil seeping into the yellow sea. Here, we used multi-source satellite remote sensing data to monitor and analyze the coverage of oil spill and the distribution of emulsified oil in this accident. Based on the response mechanism and characteristics of oil spill multi-source remote sensing, the processing of multi-source data is optimized to realize the identification of oil spills and the classification of multiple oil types. The findings indicate that from May 1 to May 22, 2021, the cumulative pixel area of oil spills from *A Symphony* tanker was 2 368.7 km², of which the emulsified oil pixel area was 1 019.3 km², accounting for 43.0%. The maximum daily oil spill pixel area reached 734 km². The results of multi-remote sensing monitoring validated each other, and optical remote sensing is more capable of identifying different oil types, in which the emulsified oil represents the key of pollution hazards. It improves the accuracy of monitoring and assessment of marine oil spills, and provides reliable technical and methodological references for the hazard assessment and refined monitoring of oil pollution events.

Key words: marine oil spill; oil emulsion; multi- remote sensing; *A Symphony* tanker; optical remote sensing; thermal infrared remote sensing