



遥感学报

Yaogan Xuebao

第 24 卷 第 8 期 2020 年 8 月

目 次

研究进展

海洋一号 C 星光学载荷对海面溢油的识别能力分析 沈亚峰, 刘建强, 丁静, 焦俊男, 孙绍杰, 陆应诚 (933)

综述

日光诱导叶绿素荧光辐射传输模型研究进展 詹春晖, 章钊颖, 张永光 (945)

地表反射率地形校正物理模型与效果评价方法研究进展
..... 林兴稳, 闻建光, 吴胜标, 郝大磊, 肖青, 柳钦火 (958)

博士论坛

遥感估算地表蒸散发真实性检验研究进展 张圆,
贾贞贞, 刘绍民, 徐自为, 徐同仁, 姚云军, 马燕飞, 宋立生, 李相, 胡晓, 王泽宇, 郭枝虾, 周纪 (975)

联合局部二值模式的 CNN 高光谱图像分类 魏祥坡, 余旭初, 张鹏强, 职露, 杨帆 (1000)

技术方法

ASTER GDEM V2 的南极冰川高程误差校正及精度分析
..... 陈昊楠, 许诗枫, 黄艳, 王淑杰, 舒松, 余柏菡, 吴健平 (1010)

风云二号多通道卫星数据对流单体检测 刘佳, 罗向阳 (1023)

遥感应用

FY-3B/MWRI 与 GCOM-W1/AMSR-2 亮温数据在北极地区的交叉定标
..... 唐晓彤, 陈海花, 管磊, 李乐乐 (1032)

泛北极地区多年冻土活动层厚度演变 蔡红艳, 韩冬锐, 杨林生, 陈慕琳, 杨小唤 (1045)

本期责任编辑: 李薇

《遥感学报》网络版: www.jors.cn

《遥感学报》微信公众号及官网



订阅号



官网

JOURNAL OF REMOTE SENSING (Chinese)

(Vol. 24 No.8 August, 2020)

CONTENTS

Research Progress

HY-1C COCTS and CZI observation of marine oil spills in the South China Sea
..... *SHEN Yafeng, LIU Jianqiang, DING Jing, JIAO Junnan, SUN Shaojie, LU Yingcheng* (944)

Review

Recent advances in the radiative transfer models of sun-induced chlorophyll fluorescence
..... *ZHAN Chunhui, ZHANG Zhaoying, ZHANG Yongguang* (957)

Advances in topographic correction methods for optical remote sensing imageries
..... *LIN Xingwen, WEN Jianguang, WU Shengbiao, HAO Dalei, XIAO Qing, LIU Qinhuo* (974)

Doctor's Voice

Advances in validation of remotely sensed land surface evapotranspiration
..... *ZHANG Yuan, JIA Zhenzhen, LIU Shaomin, XU Ziwei, XU Tongren, YAO Yunjun, MA Yanfei, SONG Lisheng, LI Xiang, HU Xiao, WANG Zeyu, GUO Zhixia, ZHOU Ji* (998)

CNN with local binary patterns for hyperspectral images classification
..... *WEI Xiangpo, YU Xuchu, ZHANG Pengqiang, ZHI Lu, YANG Fan* (1008)

Technology and Methodology

Vertical accuracy correction and analysis of ASTER GDEM V2 over Antarctic Glacier
... *CHEN Haonan, XU Shifeng, HUANG Yan, WANG Shujie, SHU Song, YU Bailang, WU Jianping* (1022)

Detection of convective cells using multi-channel satellite data from FY-2 *LIU Jia, LUO Xiangyang* (1031)

Remote Sensing Applications

Intercalibration of FY-3B/MWRI and GCOM-W1/AMSR-2 brightness temperature over the Arctic
..... *TANG Xiaotong, CHEN Haihua, GUAN Lei, LI Lele* (1044)

Spatiotemporal change in permafrost active layer thickness in the Pan-Arctic region
..... *CAI Hongyan, HAN Dongrui, YANG Linsheng, CHEN Mulin, YANG Xiaohuan* (1057)

海洋一号C星光学载荷对海面溢油的识别能力分析

沈亚峰¹, 刘建强^{2,3}, 丁静^{2,3}, 焦俊男¹, 孙绍杰⁴, 陆应诚¹

1. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 南京 210046;

2. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081;

3. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 100081;

4. 中山大学 海洋科学学院, 珠海 510275

摘要: 中国首颗海洋水色业务卫星(HY-1C)搭载有水色水温扫描仪(COCTS)、海岸带成像仪(CZI)、紫外成像仪(UVI)等多套光学载荷,已于2019-06开展业务化运行。溢油是海洋环境监测的重要目标之一。近年来,光学遥感对海面溢油不同污染类型的识别、分类与估算原理得以阐明,其技术优势获得认可,能有效促进海面溢油的精细化定量探测。本研究以中国近海,主要以2019-02-20中国南海东沙岛附近海域一次溢油事件为例,收集了HY-1C星COCTS和CZI数据,并获取了同一天的VIIRS、MODIS Terra & Aqua遥感数据,开展了海面溢油的识别分类及其对比分析,重点评估COCTS与CZI光学载荷对海面溢油识别的效能。结果表明:在弱耀光对比条件下,COCTS、CZI、VIIRS均能有效识别此次东沙岛溢油,且COCTS对溢油的识别能力不弱于VIIRS数据;CZI不仅能识别此次溢油,还能区分此次溢油形成的海面油膜与溢油乳化物,从而提供更多的判定信息;CZI数据中,不同溢油污染类型的光谱信号离散度大于清洁海水平均噪声,展现了溢油量估算的潜力。HY-1C星光学载荷展现了优良的辐射分辨率、高信噪比等性能,随着HY-1D星的发射,双星组网观测还能提供更佳的时相分辨率数据,未来会在海洋溢油的实时、定量、精细化观测中提供丰富的数据支撑。

关键词: 遥感, HY-1C星, 水色水温扫描仪, 海岸带成像仪, 溢油, 光学遥感

引用格式: 沈亚峰,刘建强,丁静,焦俊男,孙绍杰,陆应诚.2020.海洋一号C星光学载荷对海面溢油的识别能力分析.遥感学报,24(8): 933-944

Shen Y F, Liu J Q, Ding J, Jiao J N, Sun S J and Lu Y C. 2020. HY-1C COCTS and CZI observation of marine oil spills in the South China Sea. Journal of Remote Sensing(Chinese), 24(8): 933-944[DOI:10.11834/jrs.20209475]

1 引言

溢油是海洋环境监测的重要目标之一(Kvenvolden 和 Cooper, 2003; Kessler 等, 2011; Leifer 等, 2012; Hu 等, 2018)。遥感因其大范围同步观测、获取信息速度快、周期短等技术优势,被广泛用于海洋溢油监测与评估(陆应诚 等, 2009, 2016, 2019)。微波雷达(Zheng 等, 2001; Brekke 和 Solberg, 2005; Zhang 等, 2011; Garcia-Pineda 等, 2013)、多/高光谱(Clark 等, 2010; Leifer 等, 2012; Shi 等, 2018; Hu 等, 2018; Lu 等, 2019; Sun 和 Hu, 2019)、热红外(Salisbury 等, 1993; Niclòs 等, 2014; Lu 等, 2016a)等多

种遥感技术在海洋溢油监测中,因遥感响应原理的差异,其监测效能也不一样(陆应诚 等, 2019)。

溢油对海面布拉格后向散射信号具有调制作用,因此微波雷达通过对海面暗像元的识别,实现溢油污染的监测(Zheng 等, 2001; Brekke 和 Solberg, 2005; Zhang 等, 2011; Garcia-Pineda 等, 2013)。微波雷达具有穿云透雾的技术优势,使其在海洋溢油监测的业务化应用中得到大力发展;但是环境因素带来的影响难以忽视,其监测也存在一定的不确定性。有研究正尝试通过利用高分辨率全极化合成孔径雷达识别较厚的乳化油(Minchew, 2012; Jones 和 Holt, 2018),其结果尚

收稿日期: 2019-12-24; 预印本: 2020-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(编号:41771376);国家重点研发计划(编号:2016YFC1400903)

第一作者简介: 沈亚峰,1995年生,男,硕士研究生,研究方向为海洋资源与环境遥感。E-mail: ShenYaFeng1995@foxmail.com

通信作者简介: 陆应诚,1979年生,男,副教授,研究方向为海洋资源与环境遥感。E-mail: Luyc@nju.edu.cn

需进一步验证,目前微波雷达主要应用于溢油范围的提取(Brekke和Solberg, 2005)。

近年来,海洋溢油污染光学遥感得到极大发展,溢油海面耀光反射差异(Hu等, 2009; Jackson和Alpers, 2010; Sun等, 2015, 2016; Sun和Hu, 2016; Lu等, 2016b)、不同溢油污染类型对入射光的吸收与散射光谱特征差异逐渐厘清(Wettle等, 2009; Clark等, 2010; 付玉慧等, 2008; Leifer等, 2012; Shi等, 2018; Lu等, 2008, 2011, 2012, 2019, 2020),光学遥感对不同溢油污染类型的识别、分类与定量估算原理得以阐明(Clark等, 2010; Leifer等, 2012; Hu等, 2018; Shi等, 2018; Lu等, 2013, 2019, 2020; Sun等, 2018a; Sun和Hu, 2019; 陆应诚等, 2016, 2019)。海洋溢油污染光学定量遥感能力得到认可,其业务化应用思路逐渐清晰(陆应诚等, 2016, 2019)。

进入海洋的石油,在其扩散、蒸发、乳化等风化迁移过程中,会形成复杂多样的溢油污染类型,对海洋生态环境的危害各不相同(Zhong和You, 2011; Clark等, 2010; Leifer等, 2012)。在溢油污染的应急处理中,不同的溢油污染类型需要针对性的处理策略,如喷洒分散剂、燃烧消除、撇油机回收等(Zhong和You, 2011);因此,准确识别不同溢油污染类型,不仅有助于应急处理策略的制定,还有助于精确估算溢油量,从而为灾损评估与索赔提供参考,具有积极的防灾减灾意义(陆应诚等, 2016, 2019)。目前,利用光学遥感技术开展海洋溢油污染不同类型识别、分类与定量估算的主要原理得以阐明,在国内外多次典型溢油污染事件监测应用中得到验证(Clark等, 2010; Sun等, 2018a, 2018b; Lu等, 2016, 2019, 2020; 陆应诚等, 2019)。

中国首颗海洋水色业务卫星(HY-1C)于2018-09发射成功,搭载有海岸带成像仪(CZI)、水色水温扫描仪(COCTS)、紫外成像仪(UVI)、星上定标光谱仪和船舶识别系统(AIS)一共5个载荷(前3个为成像载荷)。经过系统地轨测试与严格的定标处理,于2019-06投入业务化应用。卫星在轨测试期间,在中国近海发现了多次溢油污染事件,本文以中国东沙岛邻近海域的溢油污染事件为例,系统地分析评价了HY-1C星光学载荷对溢油污染监测的能力,可为中国HY-1C星的业务化应用提供参考。

2 数据与方法

2.1 HY-1C星光学遥感数据

海洋水色业务卫星(HY-1C)轨道高度782 km,为太阳同步轨道,降交点为地方时上午10:30。HY-1C星搭载了3个成像载荷,本研究主要探讨海洋水色水温扫描仪(COCTS)和海岸带成像仪(CZI)在海洋溢油监测中的效能。COCTS星下点地面分辨率优于1100 m,扫描幅宽大于2900 km; CZI星下点地面分辨率优于50 m,扫描幅宽大于950 km,其他具体参数见表1。HY-1C星的COCTS载荷能实现每天1次的全球覆盖, CZI能实现3天1次的成像观测,主要用于海洋水色水温、海岸带与近岸水体监测。HY-1C星在轨测试期间,观测到中国近海多次溢油污染事件。本研究以2019-02-20在中国南海东沙岛周边航运通道上的溢油为重点目标,对传感器的探测识别能力开展初步分析。COCTS与CZI均对此次溢油事件进行了观测,基于大气瑞利散射校正反射率(R_{rc})数据,此次溢油真彩色合成影像如图1所示,绿色、红色、蓝色十字符号分别代表油膜、乳化油、无油海水采样点。基于海洋溢油污染不同类型的光谱响应特征,分析了此数据中的海面耀光反射影响,进一步在CZI图像上识别出此次溢油形成的油膜与乳化油,在COCTS图像上由于像元混合,只能识别出油膜信息(图1)。

2.2 VIIRS与MODIS数据

基于HY-1C星监测到的中国东沙岛溢油污染,又收集美国VIIRS和MODIS Terra和Aqua在该海域同一天的观测数据,用于对比分析HY-1C星的溢油识别效能。对VIIRS和MODIS Terra和Aqua数据也进行相同的大气校正处理,生成瑞利散射校正反射率(R_{rc})数据,其真彩色合成图像如图2所示,绿色和蓝色十字符号分别代表溢油和无油海水采样点。MODIS中难以有效识别溢油,其范围和位置根据VIIRS图像标出。VIIRS真彩色合成图像也能观测到此次东沙岛溢油污染,但MODIS Terra和Aqua真彩色合成图像上无法有效辨识此次溢油污染。基于VIIRS上识别的溢油区域,可以圈出MODIS Terra和Aqua上溢油存在位置,并给出溢油与周边无油海水的相同采样点位置,用于后续分析。

表1 HY-1C星COCTS与CZI的主要技术指标
Table 1 Parameters of HY-1C COCTS and CZI

	波段	光谱范围	测量条件	信噪比(设计指标)	最大辐亮度		
COCTS	1	0.402—0.422	9.10	349	13.94		
	2	0.433—0.453	8.41	472	14.49		
	3	0.480—0.500	6.56	467	14.59		
	4	0.510—0.530	5.46	448	13.86		
	5	0.555—0.575	4.57	417	13.89		
	6	0.660—0.680	2.46	309	11.95		
	7	0.730—0.770	1.61	319	9.72/5.0		
	8	0.845—0.885	1.09	327	6.93/3.5		
	9	10.30—11.30	0.20 K(300 K时 NEΔT)		200—320 K		
	10	11.50—12.50	0.20 K(300 K时 NEΔT)		200—320 K		
CZI	1	0.42—0.50	8.41	410	14.0	21.0	48.3
	2	0.52—0.60	4.57	300	14.0	21.0	47.0
	3	0.61—0.69	2.46	248	12.0	18.0	39.0
	4	0.76—0.89	1.09	240	4	12	25

注：光谱单位为μm,测量条件与辐亮度单位为mW·cm⁻²·μm⁻¹·Sr⁻¹,COCTS的7、8波段与CZI波段的最大辐亮度范围可调。

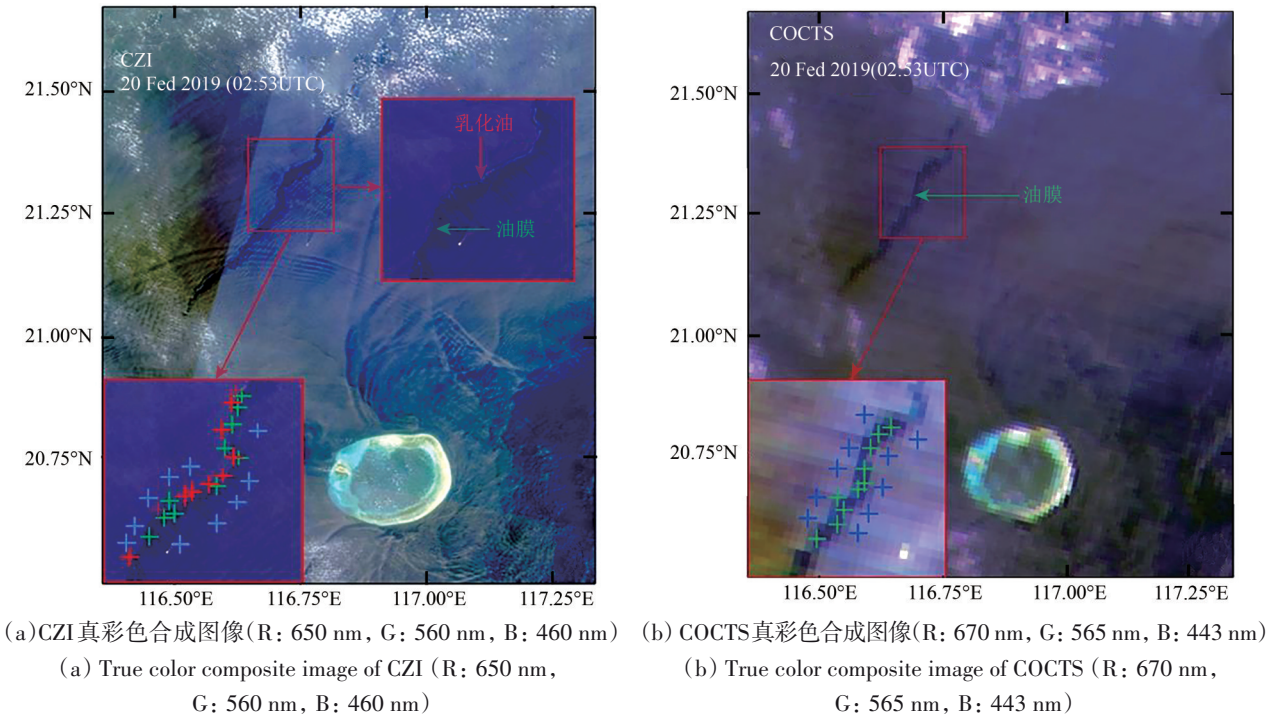


图1 2019-02-20中国南海东沙岛附近海域溢油事件的HY-1C星光学遥感合成影像
Fig. 1 HY-1C RGB images on February 20, 2019 covering oil spills close to Dongsha island in the South China Sea

2.3 数据预处理

所用的CZI和COCTS数据均包含两种产品，一是L1B级的辐亮度产品，将用于不确定性分析，二是L2A级的瑞利校正反射率产品(R_{rc})。 R_{rc} 反射率数据产品是国家卫星海洋应用中心为满足海洋资源与环境遥感监测需求所生产。遥感反射率产

品(R_{rc})需要进行精确的大气校正，包括瑞利散射校正和气溶胶校正，利用暗像元法(即假定近红外波段离水信号为零值)来外推其他波段的气溶胶信号，实现海洋光学数据的大气校正。海面溢油、浒苔、马尾藻等异常目标的存在，则会影响了该大气校正方法的使用，常常只计算相对简

单的瑞利散射信号,生成瑞利校正反射率 (R_{re}) 产品用于海洋溢油与藻类等的遥感应应用与分析。用于对比分析的同一天 MODIS 和 VIIRS 数据,则通过 Seadas 软件,进一步处理获得各个波段的瑞利散射校正反射率 (R_{re}) (式 (1))。特别需要注

意的是,耀光反射差异是改变溢油与背景水体辐射亮度(或 R_{re} 反射率)对比的重要因素,需要首先对耀光反射强度进行分析,因此所有图像都需要提供详细的太阳天顶角、太阳方位角、卫星天顶角与卫星方位角等角度信息。

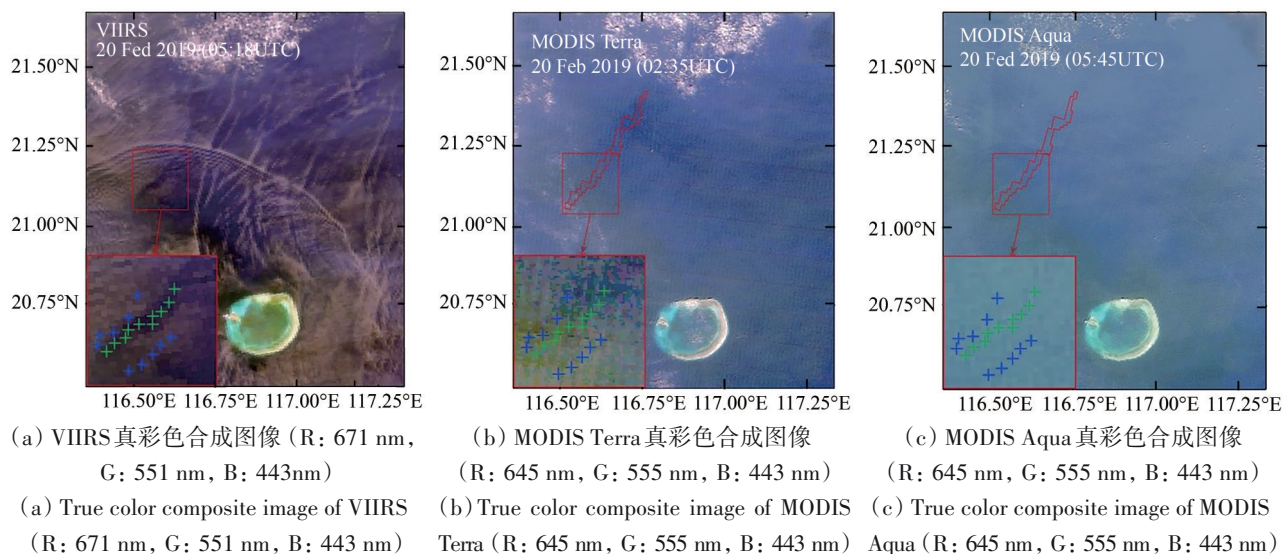


图2 2019-02-20中国南海东沙岛附近海域溢油事件的VIIRS与MODIS光学遥感合成影像

Fig. 2 VIIRS and MODIS RGB images on February 20, 2019 covering oil spills close to Dongsha island in the South China Sea

$$R_{re} = \pi(L_t - L_r)/F_0 \cos(\theta_0) \quad (1)$$

式中, R_{re} 为瑞利校正反射率(无量纲), L_t 为像元总辐射亮度 ($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1} \cdot \text{Sr}^{-1}$), L_r 为瑞利散射辐射亮度, F_0 为太阳入射辐照度, θ_0 为太阳天顶角。

2.4 不确定性分析

为准确评估HY-1C光学载荷对海洋溢油的识别与区分能力,不引入大气校正所带来的不确定性影响,本研究将在L1B级数据上开展。COCTS和CZI的L1B级辐射亮度数据,不仅包括了离水辐射亮度、溢油辐射亮度、表面菲涅尔反射辐射亮度、还包括瑞利散射与气溶胶散射辐射亮度信号。不确定性评估参数主要采用如下形式(式(2)~(4))(Hu等, 2013)

$$\delta_i = (L_i - L_{t_mean})/L_{t_mean} \quad (2)$$

$$\gamma = (1/N) \sum \delta_i \quad (3)$$

$$\Gamma = (1/N) \sum |L_i - L_{t_mean}| \quad (4)$$

式中, L_{t_mean} 为所选同一区域中所有像元的平均辐射亮度, δ_i 是某一个像元辐射亮度和辐射亮度平均值的差值比上辐射亮度平均值; N 是所选区域的像元数, γ 是同一区域所有像元 δ_i 值的平均值; Γ 是所有像元的

辐射亮度与平均辐射亮度差值的平均值。海水背景的 γ 值可以反映传感器所带来的不确定性影响,而油膜和乳化油辐射亮度值的差异则看成由两部分组成,一部分为传感器的影响,另外一部分为油膜厚度变化、乳化油浓度变化以及混合像元的影响。

2.5 耀光反射差异评估

海面溢油污染根据其光谱响应特征,可以分为不同厚度油膜、不同类型与浓度的溢油乳化物等若干种类型(Lu等, 2013, 2019; Shi等, 2018)。在光学卫星观测中,由于高异质性空间混合与表面耀光反射差异的影响,溢油体现出复杂的卫星光学响应特征(Sun等, 2016; Sun和Hu, 2019)。不同溢油污染类型的耀光反射差异得以厘清,即受到溢油海面折射率与粗糙度的共同作用(Hu等, 2009; Jackson和Alpers, 2010; Lu等, 2016b; Sun等, 2015; 陆应诚等, 2016, 2019)。海洋溢油污染的识别,首先要进行溢油海面耀光反射差异评估,最有效的指针为“镜面反射太阳光的方向与传感器探测方向的夹角(θ_m)”(Hu等, 2009; Lu等, 2016b; Wen等, 2018),其可

以通过太阳天顶角 (θ_0)、卫星天顶角 (θ)、太阳与卫星之间的相对方位角 (φ) 计算给出, 如下式

$$\cos(\theta_m) = \cos(\theta_0)\cos(\theta) - \sin(\theta_0)\sin(\theta)\cos(\varphi) \quad (5)$$

θ_m 直接指征了卫星光学图像上的耀光反射强弱, 其中溢油海面与清洁海面耀光反射明暗对比与反转的临界角位于 12° — 13° (Hu 等, 2009; Wen 等, 2018); 考虑溢油海面耀光反射差异的溢油污染类型识别思路如图3所示。在强耀光反射的正对比区 ($\theta_m \leq 12^\circ$), 光学卫星观测到的信号包括强耀光反射信号 ($L_{\text{GN-oil}}$), 乳化油后向散射信号, 而不同厚度黑色油膜对入射光的吸收影响则湮没在强耀光反射信号中, 因此所有类型的溢油污染都表现出比背景水体亮的特征。在耀光反射的临界角区内 ($12^\circ < \theta_m < 13^\circ$), 溢油海面与清洁海面的耀光反射率差异不大 ($L_{\text{GN-oil}} \approx L_{\text{GN-seawater}}$), 油膜不易鉴别, 但是乳化油的散射信号明显。在弱耀光反射的负对比区 ($\theta_m \geq 13^\circ$), 溢油海面耀光反射率小于清洁海水耀光反射率 (Hu 等, 2009; Jackson 和 Alpers, 2010; Lu 等, 2016b; Wen 等, 2018)。因此不同溢油污染类型的光吸收特征与散射特征是卫星光学探测的主信号来源, 不同溢油污染类型可以明确鉴别。

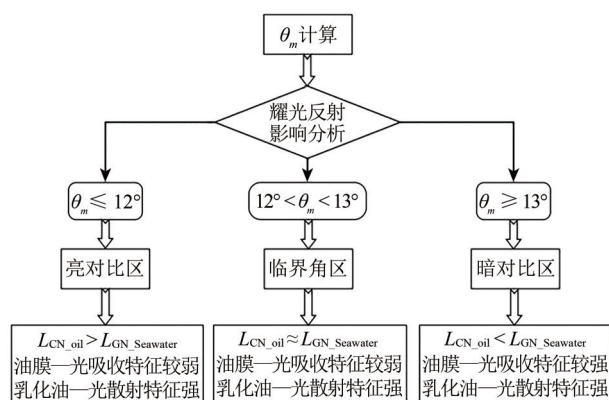


图3 不同太阳反射耀光条件下的信号构成差异

Fig.3 Signal composition of various spilled oils under different sunglint reflection

3 东沙岛溢油光谱特征与识别

3.1 耀光反射影响的评估

根据卫星提供的角度参数, 各传感器获取的2019-02-20中国南海东沙岛溢油图像所对应的 θ_m 角度值可以计算给出。如图4所示, 所有图像中的

弱耀光反射均可以忽略。COCTS、CZI、VIIRS、MODIS Terra 和 Aqua 遥感图像的 θ_m 值均远远大于 13° , 这表明溢油与海面太阳耀光反射率处于负对比区 ($L_{\text{GN-oil}} < L_{\text{GN-seawater}}$), 溢油表面耀光反射率的影响可以忽略 (这并不意味着清洁海水表面的耀光反射可以忽略)。光学卫星遥感探测到的溢油表面信号, 则主要来自溢油污染内部对入射光的吸收与散射特征差异。基于 Cox-Munk 模型推导的溢油海面或清洁海面太阳耀光反射率 ($L_{\text{GN-oil}}$ 或 $L_{\text{GN-seawater}}$) 空间分异特征, 适用于粗空间分辨率的卫星光学遥感数据 (COCTS、VIIRS、MODIS Terra 和 Aqua), 虽然未必完全适用于高空间分辨率的卫星光学数据; 但在本研究中, 这种海面耀光反射的尺度效应暂时不考虑, 也一并认为 CZI 光学遥感数据处于弱耀光对比区, 且可以忽略溢油海面耀光反射率对整体信号的贡献。

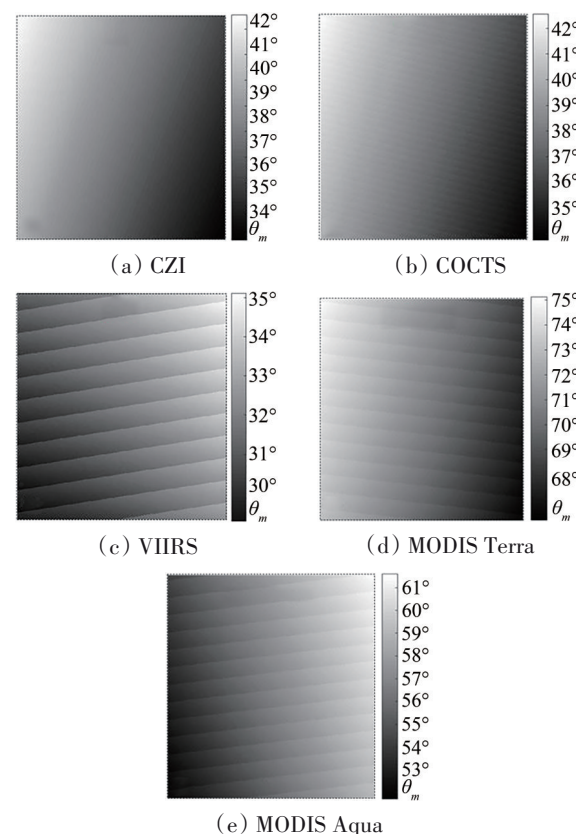


图4 不同卫星光学遥感图像对应的 θ_m 角度

Fig. 4 Variation of θ_m in different optical remote sensing images

3.2 东沙岛溢油的光谱响应特征

针对2019年中国南海东沙岛溢油污染所获取

的各光学遥感数据,均进行了同样的大气校正过程,生成 R_{e} 反射率数据。基于太阳耀光反射影响的评估可知,溢油海面耀光反射率贡献可以忽略,卫星光学数据中的信号贡献主要来自溢油与背景海水。针对COCTS、CZI、VIIRS、MODIS Terra和Aqua卫星光学图像,分别进行光谱采样分析,COCTS和CZI光谱采样位置如图1所示。CZI能清晰区分乳化油与油膜,对两种不同溢油污染类型和背景海水分别进行光谱采样,采样数各10条(图5(a))。由于像元混合作用,在COCTS图像上没有检测出乳化油像元,则只对油膜和背景海水进行光谱采样(图5(b))。VIIRS、MODIS Terra和Aqua卫星图像中,只有VIIRS图像能目视检测出溢油分布,在VIIRS图像中圈定溢油的主要范围,并将之用于MODIS图像中溢油区域的标注;在VIIRS图像上选择油膜和背景海水光谱各10条(图5(c)),对MODIS图像上也给出与VIIRS相同位置的采样点光谱(图5(d)和图5(e))。溢

油乳化物光谱特征主要受不同类型(油包水状、水包油状)乳化油的后向散射与光谱吸收构成(Shi等,2018;Lu等,2019,2020),主要光谱特征集中在近红外到短波红外波段,虽然CZI缺乏短波红外波段,但近红外波段可以满足乳化油鉴别的需求。CZI图像中的乳化油光谱反射率整体高于背景海水光谱反射率,而油膜光谱反射率整体低于背景海水光谱反射率,分别是因为乳化油的后向散射特性和油膜对入射光的吸收特征差异产生。在COCTS与VIIRS光谱中,油膜反射率也因为对入射光的吸收作用,而表现出反射率低于背景海水光谱反射率的光谱特征。在MODIS Terra和Aqua图像光谱中,油膜与背景海水光谱反射率则无法有效区分,造成的原因在于如下两点:(1)MODIS Terra和Aqua所观测区域整体反射光能量相对较弱(θ_m 相较于其他影像而言过大);(2)受其辐射分辨率的影响,在低辐亮度区难以展现油膜对入射光吸收的差异。

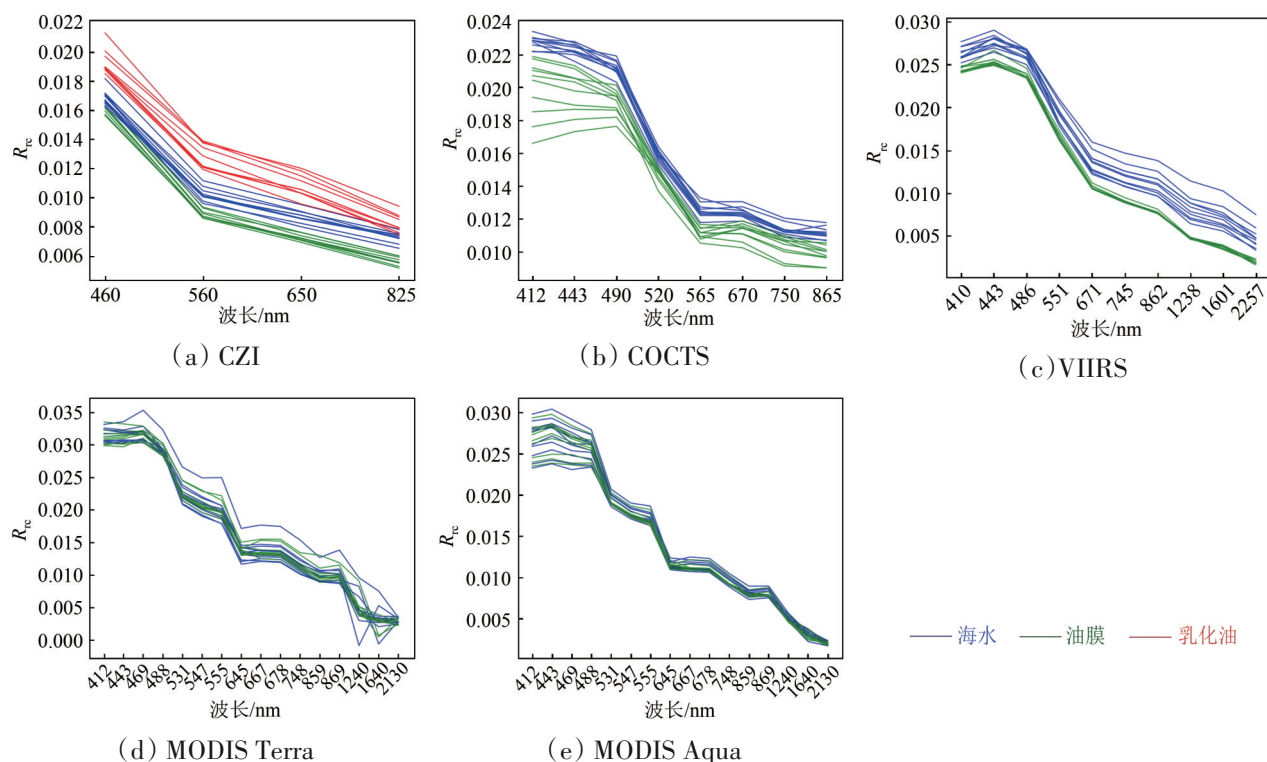


图5 不同遥感数据中海水与溢油污染的 R_{e} 光谱

Fig. 5 Various remotely sensed data derived R_{e} spectra of oil-free seawater and spilled oils

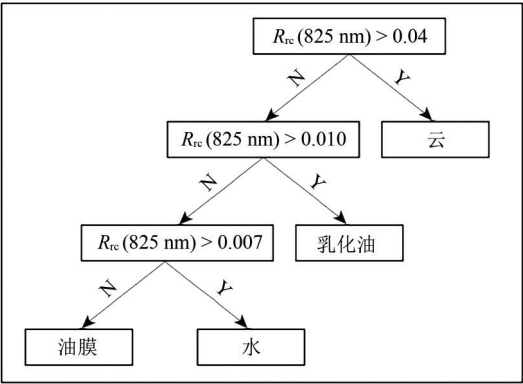
3.3 基于光谱特征差异的海面溢油识别

不同类型的溢油污染,在可见光—近红外—短波红外的光散射、反射、吸收差异显著;虽然在

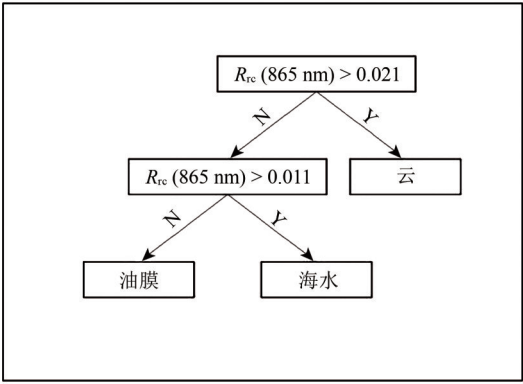
该光谱范围内,诊断性特征的分子光谱差异也较为显著,如油包水状与水包油状乳化油的“-C-H”和“-O-H”光谱团吸收特征(Clark等,2010;

Shi 等, 2018; Lu 等, 2019, 2020)。这些诊断性的分子光谱吸收特征, 只有利用覆盖近红外—短波红外范围的高光谱设备方能实现有效鉴别; 而搭载于 HY-1C 卫星的 COCTS 或 CZI 光学传感器, 只能提供覆盖可见光到近红外范围内的 8 个或 4 个多光谱 R_{rc} 反射率图像。在耀光反射影响已经阐明条件下, 则可以利用 COCTS 和 CZI 的近红外波段

(中心波长分别为 865 nm 和 825 nm), 通过对乳化油、油膜和背景海水之间光散射差异来进行决策树分类, 具体过程如图 6 所示。CZI 能有效区分油膜和乳化油, 而由于像元混合的影响, COCTS 只能探测到油膜。乳化油的出现, 也表明此次事件含重质油的几率较高。



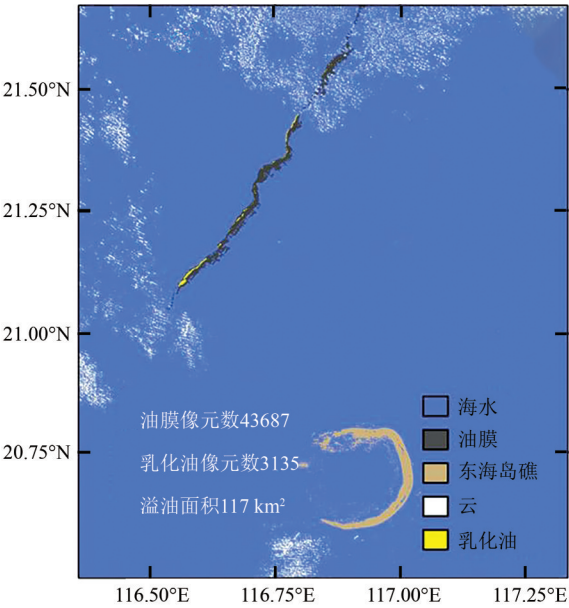
(a) CZI 图像中溢油识别流程



(b) COCTS 图像中溢油识别流程

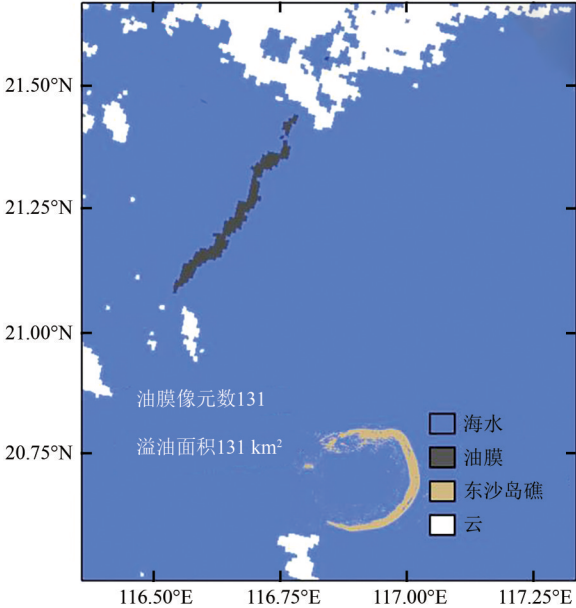
(a) Flowchart and thresholds of the decision-tree for CZI image

(b) Flowchart and thresholds of the decision-tree for COCTS image



(c) CZI 分类结果图

(c) Optical classification of oil emulsion and oil slicks in CZI image



(d) COCTS 分类结果图

(d) Optical classification of oil slicks in COCTS image

图 6 基于决策树的 CZI 和 COCTS 图像中溢油识别

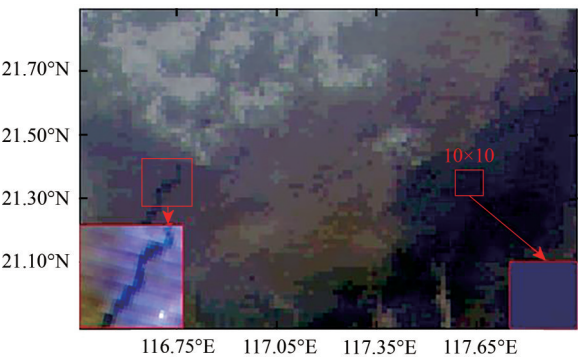
Fig. 6 Decision-tree to classify spilled oils in CZI and COCTS images

4 HY-1C 星对溢油探测能力的评估

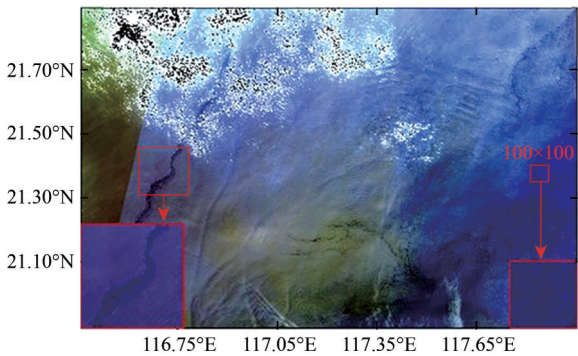
在 COCTS 和 CZI 影像识别与提取溢油污染的基础上, 需要系统地评估 HY-1C 星光学载荷各波

段对不同溢油污染的区分能力, 探讨其不确定性, 分析 HY-1C 星光学载荷是否具有开展溢油定量估算的潜力。COCTS 和 CZI 中溢油像元来自图 6 中识别与分类结果。此外要选择一片均匀、低反射率

的清洁海水，用于评估传感器自身的不确定性影响，因此在 COCTS 中选择 10×10 个、CZI 中选取了 100×100 个清洁海水暗背景像元作为不确定性评估对象（图 7）。上述分析均是基于 L1B 级辐亮度数据基础之上。



(a) COCTS 真彩色合成图像(左下图为 10×10 的清洁海水暗像元用于不确定性分析，右下图展现了溢油)
(a) True color composite image of COCTS (The bottom left image shows 10×10 pixels of clear seawater would be used for uncertainty analysis, the bottom right image has been stretched to show oil slicks)



(b) CZI 真彩色合成图像(左下图为 100×100 的清洁海水像元用于不确定性分析，右下图展现了油膜和乳化油)
(b) True color composite image of CZI (The bottom left image shows 100×100 pixels of clear seawater would be used for uncertainty analysis, the bottom right image has been stretched to show oil slicks and oil emulsions)

图 7 HY-1C 星溢油识别能力评估及其不确定性分析
Fig. 7 Detectability and uncertainty assessment of oil spills with HY-1C sensors

在表 2、表 3 中， L_{l_min} ， L_{l_max} ， L_{l_mean} 分别表示同一类目标（溢油或背景海水）辐亮度的最小值、最大值与平均值； Γ 代表了同一类统计像元的辐亮度标准差，清洁海水 Γ 则代表了背景噪声的能量值。对背景海水而言， γ 代表了辐亮度变化的不确定性（背景噪声所占比例）；而对溢油像元来说，

γ 则包含了不确定性与可区分度。对清洁背景海水而言， Γ 和 γ 值越小，则表明 HY-1C 星能量信号非常稳定、且不确定性也较小；而对于不同溢油，则分别表明了溢油与海水区分的能力，同一溢油污染类型内部的可区分度。如表 2 所示，背景海水与海面溢油在同一波段 Γ 值具有较大分异，如 COCTS 第 4 波段（520 nm），背景海水的辐亮度最小值大于溢油辐亮度最大值，且海水 Γ 值（0.0105）也明显小于溢油 Γ 值（0.0195），表明该波段能有效区分溢油海面与清洁海面。该波段海水 γ 值表明海水辐亮度不确定性约为 0.29%，而溢油海面 γ 值（0.54%）则表明溢油辐亮度变化将近一半的原因是不确定性因素产生（来自传感器与大气辐射），因此利用 COCTS 数据估算此次事件的溢油量将较为困难。

表 2 COCTS 统计参数						
Table 2 Statistical parameters of COCTS						
	波段	L_{l_min}	L_{l_max}	L_{l_mean}	Γ	γ
背景海水	412	8.23	8.31	8.27	0.0117	0.14%
	443	6.62	6.69	6.64	0.0090	0.14%
	490	4.98	5.06	5.01	0.0134	0.27%
	520	3.56	3.62	3.58	0.0105	0.29%
	565	2.29	2.36	2.31	0.0093	0.40%
	670	1.13	1.21	1.16	0.0077	0.66%
	750	0.71	0.78	0.73	0.0070	0.96%
	865	0.41	0.45	0.43	0.0047	1.11%
海面溢油	412	7.68	7.89	7.79	0.0459	0.59%
	443	6.23	6.38	6.32	0.0427	0.67%
	490	4.77	4.90	4.85	0.0252	0.53%
	520	3.46	3.59	3.55	0.0195	0.54%
	565	2.29	2.40	2.35	0.0192	0.82%
	670	1.13	1.69	1.25	0.0150	1.24%
	750	0.72	0.83	0.80	0.0132	1.65%
	865	0.44	0.52	0.49	0.0099	1.98%

对于 CZI 图像而言（表 3），各波段海水、油膜、乳化油的辐亮度值与 Γ 值都表明，不同类型溢油污染均能有效从背景海水中区分出来。 γ 值的对比分析也表明，各波段油膜与乳化油 γ 值约是背景海水 γ 值的 3 倍，这表明油膜厚度或乳化油浓度的差异均可以划分若干个级别，虽不能非常精确表明溢油量的变化，但已经可以指出高、中、低等量级差异。上述统计结果均是在弱耀光反射条件

下得出，如果入射光增强，将能提高溢油与海水背景之间的信号差异，有可能进一步促进HY-1C星光学载荷对溢油的定量反演。

HY-1C星CZI光学载荷对黄渤海、东海、南海、安达曼海等海域进行了大量的观测，发现了多次溢油事件。部分溢油事件的CZI彩色合成图像如图8所示，这些溢油事件基本位于主要航运通道附近，其中6次溢油事件有乳化油出现，这为溢油类型的进一步判断提供佐证。光学遥感技术虽然会受到天气的影响，但是能提供丰富的空间分辨率、光谱分辨率和时间分辨率数据，在海洋溢油监测的业务化应用中，可以通过丰富的数据支持，提高溢油事件监测的效率。

表3 CZI统计参数
Table 3 Statistical parameters of CZI

	波段	L_{L_min}	L_{L_max}	L_{L_mean}	Γ	γ
海水	460	4.62	4.70	4.65	0.0086	0.17%
	560	2.00	2.06	2.03	0.0066	0.32%
	650	1.02	1.06	1.03	0.0049	0.47%
	825	0.32	0.35	0.34	0.0031	0.92%
油膜	460	4.57	4.80	4.63	0.0231	0.49%
	560	1.96	2.18	2.02	0.0203	1.00%
	650	0.99	1.17	1.05	0.0182	1.73%
	825	0.33	0.43	0.36	0.0113	3.12%
乳化油	460	4.60	4.78	4.67	0.0247	0.53%
	560	1.98	2.24	2.15	0.0251	1.22%
	650	1.02	1.23	1.10	0.0232	2.14%
	825	0.35	0.46	0.39	0.0168	4.35%

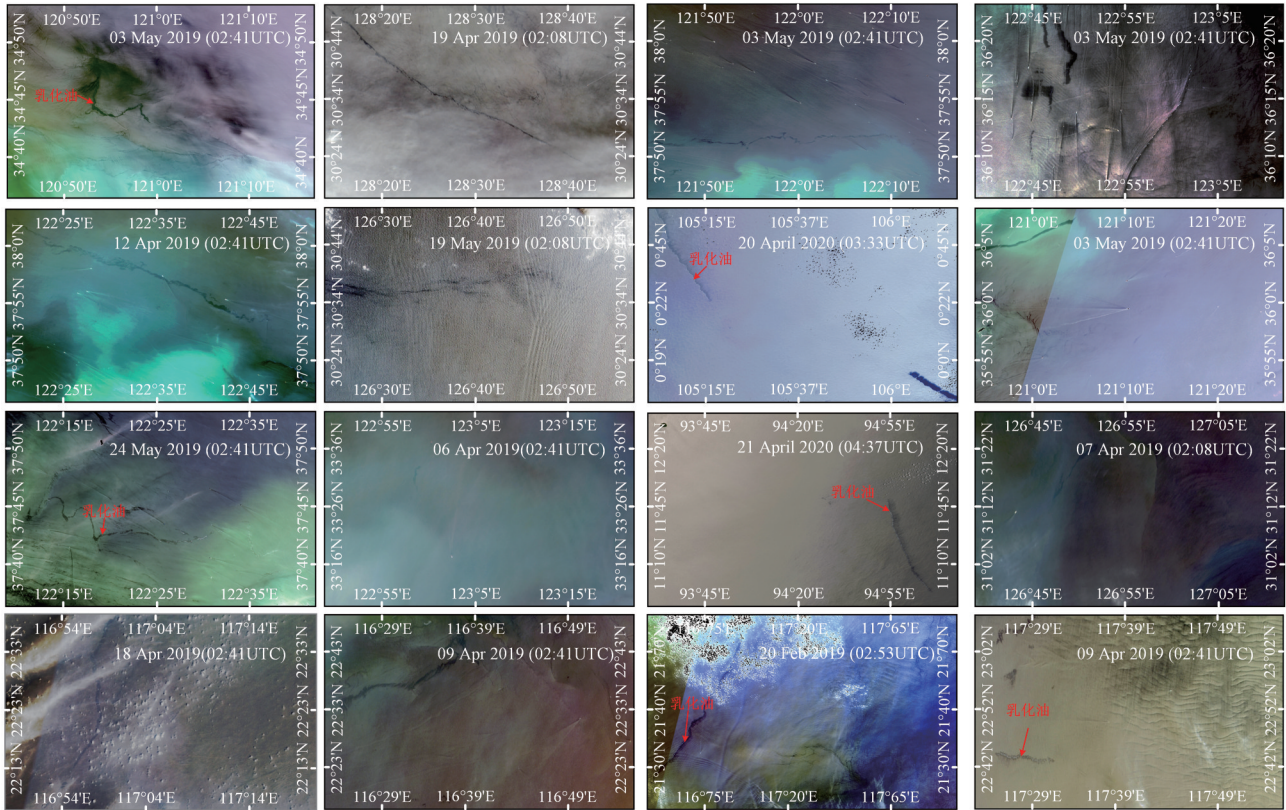


图8 HY-1C星CZI光学载荷监测到的海洋溢油事件(彩色合成图像)
Fig. 8 Various oil spills (oil slicks and oil emulsions) could be identified from HY-1C CZI RGB images (R: 650 nm, G: 560 nm, B: 460 nm) (Please note that the oil emulsions are annotated with red words)

5 结 论

本研究针对中国近海溢油事件，尤其是2019-02-20中国南海东沙岛附近海域一次小型溢油污染，收集了中国海洋水色业务卫星（HY-1C星）的COCTS和CZI图像，同时收集了美国

VIIRS、MODIS Terra & Aqua 同一天的观测数据。就此事件，开展了对比分析与研究，结果表明：（1）在弱耀光反射区域，CZI、COCTS、VIIRS都探测到此次溢油，而MODIS Terra 和 Aqua 没有探测出此次溢油，COCTS对海洋溢油的区分能力不弱于VIIRS。（2）CZI不仅能有效监测溢油，还能

进一步实现对溢油污染类型（油膜与乳化油）的识别与区分。（3）COCTS与CZI对溢油量的识别与分类，取决于传感器的信噪比与溢油自身辐亮度的离散特征；在此次南海小规模溢油事件中，溢油本身（油膜与乳化油）的辐亮度平均差异大于基于背景水平评估的背景噪声差异，这表明HY-1C星光学载荷有能力进一步实现对海洋溢油量的光学遥感估算。（4）光学遥感技术可以提供丰富且低成本的数据，具有空间分辨率、光谱分辨率、时间分辨率等技术特点，在海洋溢油的常规监测中也将会是一种非常有效的技术手段。HY-1C星COCTS与CZI光学传感器的信噪比高、辐射性能好，量化等级高、获取的图像细节特征清晰，还具有较高的时间分辨率，未来能在海洋溢油的实时监测、识别分类与定量估算中发挥更大的作用。

参考文献 (References)

- Brekke C and Solberg A H S. 2005. Oil spill detection by satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 95(1): 1-13 [DOI: 10.1016/j.rse.2004.11.015]
- Clark R N, Swayze G A, Leifer I, Livo K E, Kokaly R, Hoefen T, Lundeen S, Eastwood M, Green R O, Pearson N, Sarture C, McCubbin I, Roberts D, Bradley E, Steele D, Ryan T, Dominguez R and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) Team. 2010. A method for quantitative mapping of thick oil spills using imaging spectroscopy. Open-File Report 2010-1167. U. S. Geological Survey
- Fu Y H, Li Q J and Zhang B R. 2008. Spectroscopic analysis of oil spill at sea and satellite information distilling. *Journal of Remote Sensing*, 12(6): 1010-1016 (付玉慧, 李栖筠, 张宝茹. 2008. 海洋溢油光谱分析与卫星信息提取. *遥感学报*, 12(6): 1010-1016) [DOI: 10.3321/j.issn:1007-4619.2008.06.026]
- Garcia-Pineda O, MacDonald I, Hu C M, Svejksky J, Hess M, Dukhovskoy D and Morey S L. 2013. Detection of floating oil anomalies from the Deepwater Horizon oil spill with synthetic aperture radar. *Oceanography*, 26(2): 124-137 [DOI: 10.5670/oceanog.2013.38]
- Hu C M, Feng L, Holmes J, Swayze G A, Leifer I, Melton C, Garcia O, MacDonald I, Hess M, Muller-Karger F, Graettinger G and Green R. 2018. Remote sensing estimation of surface oil volume during the 2010 Deepwater Horizon oil blowout in the Gulf of Mexico: scaling up AVIRIS observations with MODIS measurements. *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(2): 026008 [DOI: 10.1117/1.JRS.12.026008]
- Hu C M, Feng L and Lee Z P. 2013. Uncertainties of seaWiFS and MODIS remote sensing reflectance: implications from clear water measurements. *Remote sensing of Environment*, 133: 168-182 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.02.012]
- Hu C M, Li X F, Pichel W G and Müller-Karger F E. 2009. Detection of natural oil slicks in the NW Gulf of Mexico using MODIS imagery. *Geophysical Research Letters*, 36: L01604 [DOI: 10.1029/2008gl036119]
- Jackson C R and Alpers W. 2010. The role of the critical angle in brightness reversals on sunglint images of the sea surface. *Journal of Geophysical Research*, 115(C9): C09019 [DOI: 10.1029/2009JC006037]
- Jones C E and Holt B. 2018. Experimental L-Band airborne SAR for oil spill response at sea and in coastal waters. *Sensors*, 18(2): 641 [DOI: 10.3390/s18020641]
- Kessler J D, Valentine D L, Redmond M C, Du M, Chan E W, Mendes S D, Quiroz E W, Villanueva C J, Shusta S S, Werra L M, Yvon-Lewis S A and Weber T C. 2011. A persistent oxygen anomaly reveals the fate of spilled methane in the Deep Gulf of Mexico. *Science*, 331(6015): 312-315 [DOI: 10.1126/science.1199697]
- Kvenvolden K A and Cooper C K. 2003. Natural seepage of crude oil into the marine environment. *Geo-Marine Letters*, 23(3/4): 140-146 [DOI: 10.1007/s00367-003-0135-0]
- Leifer I, Lehr W J, Simecek-Beatty D, Bradley E, Clark R, Dennison P, Hu Y X, Matheson S, Jones C E, Holt B, Reif M, Roberts D A, Svejksky J, Swayze G and Wozencraft J. 2012. State of the art satellite and airborne marine oil spill remote sensing: application to the BP *Deepwater Horizon* oil spill. *Remote Sensing of Environment*, 124: 185-209 [DOI: 10.1016/j.rse.2012.03.024]
- Lu Y C, Hu C M, Sun S J, Zhang M W, Zhou Y, Shi J and Wen Y S. 2016. Overview of optical remote sensing of marine oil spills and hydrocarbon seepage. *Journal of Remote Sensing*, 20(5): 1259-1269 (陆应诚, 胡传民, 孙绍杰, 张民伟, 周杨, 石静, 温颜沙. 2016. 海洋溢油与烃渗漏的光学遥感研究进展. *遥感学报*, 20(5): 1259-1269) [DOI: 10.11834/jrs.20166122]
- Lu Y C, Li X, Tian Q J and Han W C. 2012. An optical remote sensing model for estimating oil slick thickness based on two-beam interference theory. *Optics Express*, 20(22): 24496-24504 [DOI: 10.1364/OE.20.024496]
- Lu Y C, Li X, Tian Q J, Zheng G, Sun S J, Liu Y X and Yang Q. 2013. Progress in marine oil spill optical remote sensing: detected targets, spectral response characteristics, and theories. *Marine Geodesy*, 36(3): 334-346 [DOI: 10.1080/01490419.2013.793633]
- Lu Y C, Liu J Q, Ding J, Shi J, Chen J Y and Ye X M. 2019. Optical remote identification of spilled oils from the SANCHI oil tanker collision in the East China Sea. *Chinese Science Bulletin*, 64(31): 3213-3222 (陆应诚, 刘建强, 丁静, 石静, 陈君颖, 叶小敏. 2019. 中国东海“桑吉”轮溢油污染类型的光学遥感识别. *科学通报*, 64(31): 3213-3222)
- Lu Y C, Shi J, Hu C M, Zhang M W, Sun S J and Liu Y X. 2020. Optical interpretation of oil emulsions in the ocean - Part II: applications to multi-band coarse-resolution imagery. *Remote Sensing of*

- Environment, 242: 111778 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111778]
- Lu Y C, Shi J, Wen Y S, Hu C M, Zhou Y, Sun S J, Zhang M W, Mao Z H and Liu Y X. 2019. Optical interpretation of oil emulsions in the ocean - Part I: laboratory measurements and proof-of-concept with AVIRIS observations. *Remote Sensing of Environment*, 230: 111183 [DOI: 10.1016/j.rse.2019.05.002]
- Lu Y C, Sun S J, Zhang M W, Murch B and Hu C M. 2016b. Refinement of the critical angle calculation for the contrast reversal of oil slicks under sunglint. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(1): 148-161 [DOI: 10.1002/2015JC011001]
- Lu Y C, Tian Q J and Li X. 2011. The remote sensing inversion theory of offshore oil slick thickness based on a two-beam interference model. *Science China Earth Sciences*, 54(5): 678-685 [DOI: 10.1007/s11430-010-4154-1]
- Lu Y C, Tian Q J, Song P F and Li S S. 2009. Study on extraction methods of offshore oil stick by hyperspectral remote sensing. *Journal of Remote Sensing*, 13(4): 686-695 (陆应诚, 田庆久, 宋鹏飞, 李姗姗. 2009. 海面油膜高光谱遥感信息提取. *遥感学报*, 13(4): 686-695) [DOI: 10.3321/j.issn:1007-4619.2009.04.011]
- Lu Y C, Tian Q J, Wang J J, Wang X C and Qi X P. 2008. Experimental study on spectral responses of offshore oil slick. *Chinese Science Bulletin*, 53(24): 3937-3741 [DOI: 10.1007/s11434-008-0515-y]
- Lu Y C, Zhan W F and Hu C M. 2016a. Detecting and quantifying oil slick thickness by thermal remote sensing: a ground-based experiment. *Remote Sensing of Environment*, 181: 207-217 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.04.007]
- Minchew B. 2012. Determining the mixing of oil and sea water using polarimetric synthetic aperture radar. *Geophysical Research Letters*, 39(16): L16607 [DOI: 10.1029/2012GL052304]
- Niclòs R, Doña C, Valor E and Bisquert M. 2014. Thermal-infrared spectral and angular characterization of crude oil and seawater emissivities for oil slick identification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(9): 5387-5395 [DOI: 10.1109/TGRS.2013.2288517]
- Salisbury J W, D'Aria D M and Sabins F F. 1993. Thermal infrared remote sensing of crude oil slicks. *Remote Sensing of Environment*, 45(2): 225-231 [DOI: 10.1016/0034-4257(93)90044-x]
- Shi J, Jiao J N, Lu Y C, Zhang M W, Mao Z H and Liu Y X. 2018. Determining spectral groups to distinguish oil emulsions from Sargassum over the Gulf of Mexico using an airborne imaging spectrometer. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 146: 251-259 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2018.09.017]
- Sun S J and Hu C M. 2016. Sun glint requirement for the remote detection of surface oil films. *Geophysical Research Letters*, 43(1): 309-316 [DOI: 10.1002/2015GL066884]
- Sun S J and Hu C M. 2019. The challenges of interpreting oil - water spatial and spectral contrasts for the estimation of oil thickness: examples from satellite and airborne measurements of the Deepwater Horizon oil spill. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(5): 2643-2658 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2876091]
- Sun S J, Hu C M, Feng L, Swayze G A, Holmes J, Graettinger G, MacDonald I, Garcia O and Leifer I. 2016. Oil slick morphology derived from AVIRIS measurements of the Deepwater Horizon oil spill: implications for spatial resolution requirements of remote sensors. *Marine Pollution Bulletin*, 103(1/2): 276-285 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.12.003]
- Sun S J, Hu C M, Garcia-Pineda O, Kourafalou V, Le Hénaff M and Androulidakis Y. 2018b. Remote sensing assessment of oil spills near a damaged platform in the Gulf of Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 136: 141-151 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.09.004]
- Sun S J, Hu C M and Thunnell J W. 2015. Surface oil footprint and trajectory of the Ixtoc-I oil spill determined from Landsat/MSS and CZCS observations. *Marine Pollution Bulletin*, 101(2): 632-641 [DOI: 10.1016/j.marpolbul.2015.10.036]
- Sun S J, Lu Y C, Liu Y X, Wang M Q and Hu C M. 2018a. Tracking an oil tanker collision and spilled oils in the East China Sea using multisensor day and night satellite imagery. *Geophysical Research Letters*, 45(7): 3212-3220 [DOI: 10.1002/2018GL077433]
- Wen Y S, Wang M Q, Lu Y C, Sun S J, Zhang M W, Mao Z H, Shi J and Liu Y X. 2018. An alternative approach to determine critical angle of contrast reversal and surface roughness of oil slicks under sunglint. *International Journal of Digital Earth*, 11(9): 972-979 [DOI: 10.1080/17538947.2018.1470687]
- Wettle M, Daniel P J, Logan G A and Thankappan M. 2009. 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. *Remote Sensing of Environment*, 113(9): 2000-2010 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.010]
- Zhang B, Perrie W, Li X F and Pichel W G. 2011. Mapping sea surface oil slicks using RADARSAT-2 quad-polarization SAR image. *Geophysical Research Letters*, 38(10): L10602 [DOI: 10.1029/2011GL047013]
- Zheng Q, Yan X H, Liu W T, Klemas V and Sun D C. 2001. Space shuttle observations of open ocean oil slicks. *Remote Sensing of Environment*, 76(1): 49-56 [DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00191-7]
- Zhong Z X and You F Q. 2011. Oil spill response planning with consideration of physicochemical evolution of the oil slick: a multiobjective optimization approach. *Computers and Chemical Engineering*, 35(8): 1614-1630 [DOI: 10.1016/j.compchemeng.2011.01.009]

HY-1C COCTS and CZI observation of marine oil spills in the South China Sea

SHEN Yafeng¹, LIU Jianqiang^{2,3}, DING Jing^{2,3}, JIAO Junnan¹, SUN Shaojie⁴, LU Yingcheng¹

1. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210046, China;

2. National Satellite Ocean Application Center, Beijing 100081, China;

3. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Applications, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China;

4. College of Marine Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai 510275, China

Abstract: An ocean color satellite of China (Haiyang-1C, HY-1C) was launched on September 7, 2018, equipped with several optical sensors, such as the Chinese Ocean Color and Temperature Scanner (COCTS), Coastal Zone Imager (CZI), and ultraviolet imager. These instruments were tested in orbit for 6 months and used in ocean and coastal zone environmental monitoring in June 2019. The optical remote sensing of oil spills is a key research direction in marine environmental monitoring. Significant progress has been made in recent years, demonstrating its ability to detect, classify, and estimate the volumes of various oil spills. In this paper, the marine oil spill incident near Dongsha Island in the South China Sea on February 20, 2019 was used as a case study. COCTS and CZI captured the oil spill, and the oil spill area was scanned using the Visible Infrared Imager Radiometer Suite (VIIRS) and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS Terra & Aqua) on the same day. The angles (between the viewing direction and the direction of mirror reflection, θ_m) of COCTS, CZI, VIIRS, and MODIS Terra and Aqua images were extremely small, indicating that sunglint reflectance in these images can be ignored. Therefore, the light absorption and backscattering characteristics of oil spills and surrounding oil-free seawater account for the differences among the images. In other words, these light signals can only weakly detect marine oil spills compared with strong sunglint reflection. However, if backscattering can be distinguished, it can be useful in the identification of various types of weathered oil. COCTS, CZI, and VIIRS capture marine oil spills with high radiometric resolutions and signal-to-noise ratios. Moreover, oil spills form oil emulsions and non-emulsified oil slicks, which can be distinguished by CZI due to its high spatial resolution (~50 m). Uncertainty analysis of COCTS and CZI shows that the difference between an oil spill and the oil-free seawater of COCTS or CZI is obvious, implying that CZI can be used in estimating the volumes of oil spills. In the near future, the same sensors in the HY-1D satellite will be available, and a network observation system of the HY-1C/D satellite will provide global images daily. This resource will likely play an important role in future ocean color remote sensing.

Key words: remote sensing, HY-1C, COCTS, CZI, oil spills, optical remote sensing

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 41771376); National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFC1400903)