

基于微波散射实验的油种识别研究*

马靖^{1,2,3} 过杰^{1,2}

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室 山东烟台 264003; 2. 山东省海岸带环境过程重点实验室 山东烟台 264003; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 海上溢油来源复杂, 溢油种类多样, 正确识别溢油类型对于溢油应急的快速反应具有重要意义。合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)具有全天时全天候的监测优势, 在海面溢油监测中发挥着主力军作用, 但在油种识别方面存在不足。利用 C 波段全极化散射计对柴油、原油、油水混合物和棕榈油进行外场实验观测, 探究微波识别油膜的敏感特征参数, 并将敏感特征参数应用于海上油膜实验获取的 SAR 图像进行油种识别。结果表明, 在垂直(vertical transmission vertical reception, VV)极化方式下的油水差($\Delta\sigma^0$)可以有效识别植物油和矿物油; 基于 dB 和 linear units 表达的后向散射系数(N_{RCS})计算的抑制比(D_R)在垂直(VV)和水平(horizontal transmission horizontal reception, HH)极化方式下可以有效识别植物油和矿物油, 并且在交叉(vertical transmission horizontal reception/horizontal transmission vertical reception, VH/HV)极化方式下 linear units 表达的 N_{RCS} 计算的抑制比可以识别原油和乳化油; 极化差(P_D)可用于识别原油、乳化油和植物油。

关键词 油种识别; 合成孔径雷达(SAR); C 波段全极化散射计; 敏感特征参数

中图分类号 P76 doi: 10.11693/hyhz20220500146

石油是全球重要能源之一, 在“一带一路”合作倡议的大背景下, 中国石油迎来了良好的发展契机, 与各国的能源合作渠道、合作模式呈多元化、多样化发展(余晓钟等, 2021), 而能源的进口主要通过海上运输与管道运输(于伟娜, 2012; 孙宁宁, 2019)。海上贸易的发展以及海上石油的开发、运输导致海上溢油污染风险增大, 及时准确地监测溢油对保护海洋环境和生态资源具有重要意义(刘朋, 2012)。卫星遥感技术以其大范围、高频次、同步、快速、长时序等观测优势, 为溢油的监测、识别及清理工作提供了极大的辅助(郑本昌, 2018; 蒋兴伟等, 2019; 沈亚峰等, 2020)。

海上油膜可分为天然来源和人为来源(吴传雯, 2014), 天然来源如浮游植物或鱼类产生的生物油膜等(Gade *et al.*, 1998)¹⁸⁸⁵¹, 人为来源主要有(Yang *et al.*, 2020)⁷¹⁶³: (1) 石油平台溢油, 如 2010 年 4 月美国墨西哥湾“深水地平线”钻井平台发生爆炸, 造成约 2 300 万加仑原油泄漏(张明亮, 2015); (2) 输油管道的损坏事故造成的溢油, 如 2010 年 7 月大连新港发生输油管线爆炸事故, 原油泄露量 1 500 t, 污染海域 430 km² (温艳萍等, 2013); (3) 大型油轮的碰撞事故等造成的溢油, 如 2018 年 1 月巴拿马籍油船“桑吉轮”与中国香港籍散货船在长江口以东发生碰撞, “桑吉轮”发生燃烧及爆炸, 造成 136 000 t 凝析油泄露(金戈等, 2019); (4) 游轮或货船非法排放燃油, 溢油类型主要为重柴油和轻柴油。溢油进入海洋环境, 会发生蒸发、光氧化、溶解、乳化、颗粒物质的吸附沉降以及微生物降解等风化过程(赵云英等, 1997)。乳化的重要风化过程, 石油产品中的沥青质、胶质和蜡对乳化物的形成起作用, 乳化使油膜形成不同浓度油包水乳化物, 显著改变油的物理化学性质(严志宇等, 2002²; Guo *et al.*, 2019)。

* 国家自然科学基金, 42076197 号; 山东联合重点基金, U1906217 号; NSFC-山东联合基金, U2106211 号。马靖, 硕士研究生, E-mail: jma@yic.ac.cn

通信作者: 过杰, 研究员, E-mail: jguo@yic.ac.cn, <https://orcid.org/0000-0001-8767-8874>

收稿日期: 2022-05-31, 收修改稿日期: 2022-07-15

为了最大程度降低溢油灾害带来的环境影响,需要采取快速应急响应处置溢油,正确识别溢油种类对于应急处理策略的制定具有重要意义(陆应诚等, 2019)。在光学遥感方面,油膜的光谱吸收特性是区分并识别不同油膜的重要依据(Lu *et al*, 2019),高光谱因具有丰富的光谱信息而在油种识别方面发挥着重要作用(Yang *et al*, 2020)⁷¹⁶⁴,许多学者基于油膜光谱特性提取进行了油膜类型的识别研究(Wettle *et al*, 2009; 谈爱玲等, 2011; Shi *et al*, 2018)。虽然光学传感器尤其是高光谱可以提供丰富的光谱信息,但溢油事故通常发生在天气恶劣的环境,限制了光学遥感在溢油事故中监测作用的发挥。

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)以其全天候全天候的优势在海面溢油遥感监测过程中发挥着主力军的作用(许晨琪等, 2021)¹³。SAR 依赖于海面粗糙度所形成的后向散射对海面进行成像,海面油膜抑制海面的毛细重力波,使海面粗糙度降低,从而减弱后向散射,在 SAR 图像上形成暗斑(李煜等, 2019; 陈韩, 2020)。油膜的抑制效应与油膜厚度、表面弹性及风速风向等因素相关(Zhang *et al*, 2015⁷¹; Zheng *et al*, 2021¹²)。基于此理论基础, Wismann 等(1998)在北海的受控溢油实验中,分别释放了重质燃料油和轻质燃料油,发现在 S、C、X 和 Ku 波段重质燃料油的抑制作用大于轻质燃料油, L 波段两者抑制比差异不大,且重质燃料油抑制比随油膜厚度增加而增加。Gade 等(1998)利用星载 SIR-C/X-SAR 图像对生物油膜和矿物油膜进行区分研究,结果发现同一油膜的抑制比强烈依赖于风速,相对于 C 波段和 X 波段, L 波段下生物油膜的抑制作用更大。Jones 等(2016)基于 2015 年挪威海岸溢油实验获取了 L 波段无人载合成孔径雷达 (uninhabited aerial vehicle synthetic aperture radar, UAVSAR)图像,分析可知在释放后的较短时间内,矿物油膜在不同极化方式下的抑制比均表现出明显的分带,而植物油在释放后分区并不明显。此外,基于极化分解和特征参数的油种区分也有研究, Tian 等(2010)基于中国海南海上溢油实验获取了 RADARSAT-2 图像,利用非相干目标分解结果对矿物油、生物油和似然物进行区分与识别研究。段冰等(2013)在分析生物油和矿物油极化比的基础上,提出基于交叉极化比的生物油和矿物油的区分方法。Skrunes 等(2014)获取了海上矿物油和生物油观测实验的全极化 C 波段合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)数据,发现几何强度和同极化向

量积的实部可以用于区别生物油膜和矿物油。

综上所述,随着微波技术的快速发展, SAR 在油种识别方面已存在极大的潜能。本文基于海面溢油来源的主要类型,选取柴油(石油衍生品代表)、原油、油水混合物(乳化油代表)和棕榈油(生物油代表)四种油品,开展 C 波段全极化散射计溢油观测实验,探究微波识别油膜的敏感特征参数,并将其应用于海上油膜实验获取的 SAR 图像进行油种识别。

1 实验与方法

1.1 外场实验

1.1.1 实验油品及实验仪器 基于海上溢油类型,选择了四种油品进行实验,分别为:(1)柴油;(2)原油,其沥青含量为 0.73%,密度为 0.92 g/mL;(3)油水混合物;(4)棕榈油,其密度为 0.85 g/mL。本次实验位于青岛市崂山区南姜码头陆基海水池(45 m×40 m×2 m)设置的围油栏内(为防止油膜溢出,实验设置双层围油栏),围油栏区域大小为 6.8 m×3.2 m,美国 ProSensing 公司生产的 C 波段全极化散射计设置在池边钢板平台上,极化方式为垂直(vertical transmission vertical reception, VV)极化、水平(horizontal transmission horizontal reception, HH)极化和交叉(vertical transmission horizontal reception/horizontal transmission vertical reception, VH/HV)极化,其在 25°~60°入射角范围内以 5°为间隔进行扫描,扫描足印直径 0.8 m, C 波段全极化散射计参数如表 1 所示,实验设置如图 1 所示,不同入射角下的扫描中心与池边距离如表 2 所示。

表 1 C 波段散射计参数
Tab.1 Parameters of the C-band scatterometer

参数	参数值
输出频率/GHz	5.25~5.75
发射功率/dBm	+7
发射波束带宽/MHz	500
距离向分辨率/m	0.3
极化方式	VV, VH, HV, HH
方位向扫描范围/(°)	±120
仰角扫描范围/(°)	15~120

注:极化方式 VV, VH, HV, HH 分别代表垂直(vertical transmission vertical reception, VV)极化、交叉(vertical transmission horizontal reception, VH)极化、交叉(horizontal transmission vertical reception, HV)极化、水平(horizontal transmission horizontal reception, HH)极化

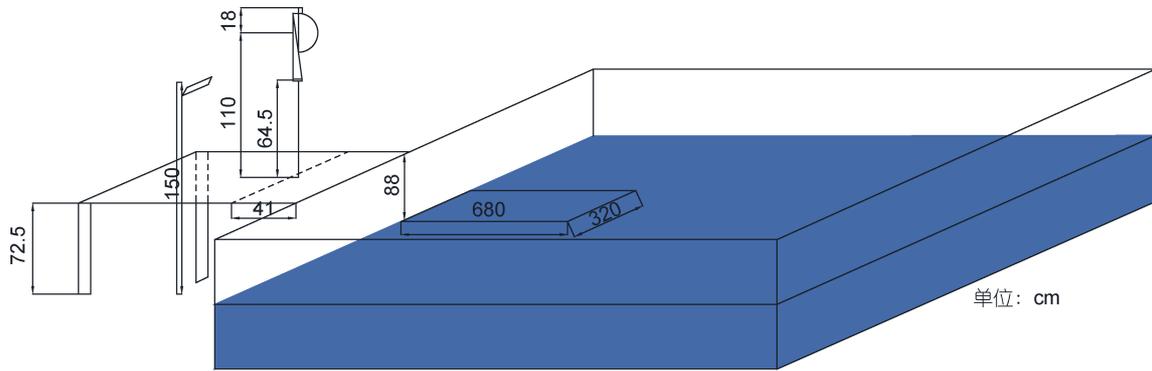


图1 外场实验设置

Fig.1 Field experimental settings

表2 C波段散射计不同入射角扫描中心距池边距离
Tab.2 Distances from the scanning center of C-band scatterometer to the pool edge at different incidence angles

入射角/(°)	距离/cm
25	161.09
30	187.48
35	217.48
40	252.25
45	293.45
50	343.57
55	406.50
60	488.70

1.1.2 实验条件及过程 本次外场实验时间为2020年9月26~29日,4天时间内分别进行柴油、原油、油水混合物、棕榈油的后向散射系数(normalized radar cross section, N_{RCS})观测,实验台附近设置小型风场、气温观测仪,每次实验伴随测量海水、油膜温度。9月26日测量海水温度后首先使用C波段全极化散射计扫描海水的 N_{RCS} ,分别得到四种极化方式下的 N_{RCS} ,即 σ_{VV}^0 、 σ_{HH}^0 、 σ_{VH}^0 和 σ_{HV}^0 ,其中 $\sigma_{VH}^0 = \sigma_{HV}^0$ 。为了减小测量误差,散射计每次测量时扫描3次,将3次扫描结果求均值得到最终的 N_{RCS} ,记录相关数据;然后分12次向围油栏内倒入柴油伴随油温测量,油膜的 N_{RCS} 处理与海水的相同;柴油实验完毕后清理油膜。其他油品的 N_{RCS} 测量与柴油相同,为了使油膜尽可能均匀分布,在倒入原油和油水混合物后进行了搅拌操作,而后进行温度测量和散射计观测,具体过程及实验油量如图2所示。

1.2 油种识别特征参数选择

1.2.1 极化差 海面 N_{RCS} 表示为镜面散射、布拉格散射以及非布拉格散射三者之和,中等入射角下,

镜面散射在总散射中占比小,可以忽略不计,因此,可以将中等入射角下海面 N_{RCS} 表示为布拉格散射与非布拉格散射之和(Zheng *et al.*, 2021)²。极化差(polarization difference, P_D)定义为VV极化的 N_{RCS} 与HH极化之差,计算公式如式(1)所示,其去除了非布拉格散射的影响,主要包含接近布拉格波数的短波分量的贡献。 P_D 在清洁海面时值最大,随着溢油影响增大而慢慢降低(Angelliaume *et al.*, 2017)。

$$P_D = \sigma_{VV}^0 - \sigma_{HH}^0. \quad (1)$$

1.2.2 抑制比 油膜在SAR图像上形成暗斑,原因之一为油膜抑制海面的毛细重力波,使海面粗糙度降低,从而减弱海面的后向散射。抑制比(damping ratio, D_R)可以定量描述油膜对海浪谱的抑制效应,定义为无油海水与油膜覆盖海面 N_{RCS} 的比值(Wismann *et al.*, 1998³⁶¹⁵;许晨琪, 2021³⁴),其计算公式如式(2)所示。

$$D_R = \sigma^{0,Water} / \sigma^{0,Oil}. \quad (2)$$

1.2.3 极化比 海水的介电常数大于油膜,油膜的存在使得有效介电常数变小,同样也会导致后向散射减小。极化比(polarization ratio, P_R)定义为HH极化与VV极化的 N_{RCS} 之比,计算公式如式(3)所示,在布拉格散射理论下,极化比与海面粗糙度无关,仅取决于入射角和海面的介电特性。当油膜厚度较小时(如生物油膜和薄矿物油膜),微波会穿透油膜而返回海水的特征,因此介电常数的变化可以忽略,其极化比与无油菜水的极化比基本相同;当海面覆盖厚油(对C波段而言油膜厚度大于1 mm)或乳化油膜,介电常数将影响极化比,在同一入射角下,随着含油率的增加(即含水率的减小),极化比呈现增加趋势(Angelliaume *et al.*, 2018);同时通过观测极化比值与理论值的对比,发现非布拉格散射对 N_{RCS} 产生重要

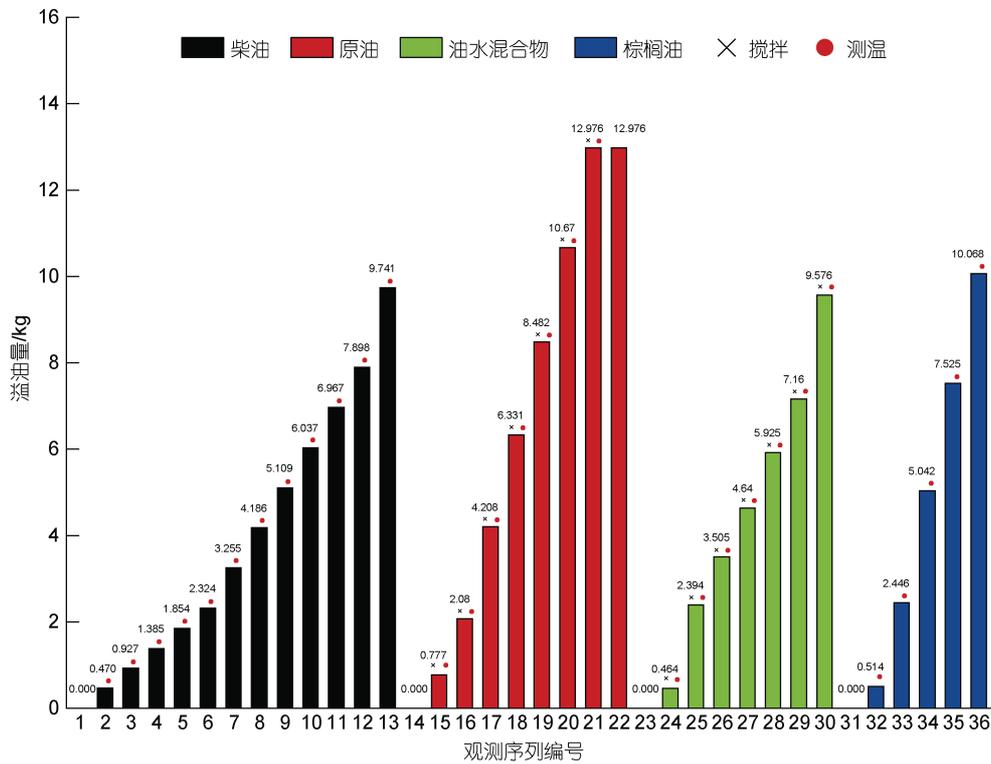


图 2 实验过程布油量

Fig.2 The amount of oil provided for the experiment

影响(Skrunes *et al.*, 2015)。

$$P_R = \frac{\sigma_{HH}^0}{\sigma_{VV}^0}, \quad (3)$$

σ_{VV}^0 为 VV 极化的 N_{RCS} , σ_{HH}^0 为 HH 极化的 N_{RCS} , $\sigma^{0,Oil}$ 为油膜的 N_{RCS} , $\sigma^{0,Water}$ 为海水的 N_{RCS} 。

2 结果与分析

2.1 南姜码头微波实验数据特征分析

2.1.1 海水和油膜 N_{RCS} 分析 在布拉格理论中, 随着入射角增大 N_{RCS} 呈现减小的趋势(Garcia-Pineda *et al.*, 2020)³, 且在 $20^\circ \sim 70^\circ$ 入射角下, $\sigma_{VV}^0 > \sigma_{HH}^0 > \sigma_{VH/HV}^0$ (Jones *et al.*, 2018)。本次实验海水和柴油 N_{RCS} 随入射角的变化如图 3 所示, σ_{VV}^0 、 σ_{HH}^0 和 $\sigma_{VH/HV}^0$ 随着入射角的增大呈现减小的趋势; 入射角在 25° 、 30° 、 55° 和 60° 下的 N_{RCS} 呈现 $\sigma_{VV}^0 > \sigma_{HH}^0 > \sigma_{VH/HV}^0$, $35^\circ \sim 50^\circ$ 入射角下由于仪器或环境影响出现 $\sigma_{HH}^0 > \sigma_{VV}^0$ 在本文研究中不考虑。由图 1 及表 2 可知, 25° 入射角与池壁距离较近, 60° 入射角与池壁最远, 且油膜分布少, N_{RCS} 易受环境因素影响, 因此本文选择 30° 和 55° 入射角下的数据进行研究。图 4a 和 4c

为 30° 和 55° 入射角在不同实验序列下油膜的 N_{RCS} 与风速的对应变化图, 分析可知, 风速的变化对部分实验序列的 N_{RCS} 产生了明显的影响, 风速的增大或减小改变了水面油膜厚度的分布, 进而使 N_{RCS} 增大或减小, 如序列 2~4 对应油膜 N_{RCS} 随风速增大而增大, 序列 16~18 和 25~27 对应油膜 N_{RCS} 随风速增大而增大, 序列 21~24 对应油膜 N_{RCS} 与风速的变化一致性较高, 其他序列下的油膜 N_{RCS} 与风速的变化一致性并不显著; 当风速大于 3 m/s 时, 油膜 N_{RCS} 并未随风速的增大而增大到最大值, 当风速小于 1 m/s 时油膜 N_{RCS} 同样未出现最低值, 且在风速小于 1 m/s 时, 油膜 N_{RCS} 在 VV 极化方式下的降低更为明显。根据油膜 N_{RCS} 随温度变化图 4b 和 4d 可知, 在序列 18~22 和序列 26~30 即原油和油水混合物实验中, 水温与对应 N_{RCS} 的变化趋势较为一致(风速整体呈下降趋势), 此时实验时间均处于每日温度较高的中午, 温度的升高加快乳化进程(严志宇等, 2002)³, 因此, N_{RCS} 呈现增加趋势(Guo *et al.*, 2020)⁴⁸。

油水差(N_{RCS} differences between oil-water, $\Delta\sigma^0$) 可以反映油膜相对于周围海水的变化(许晨琪, 2021)³³, 其计算公式为

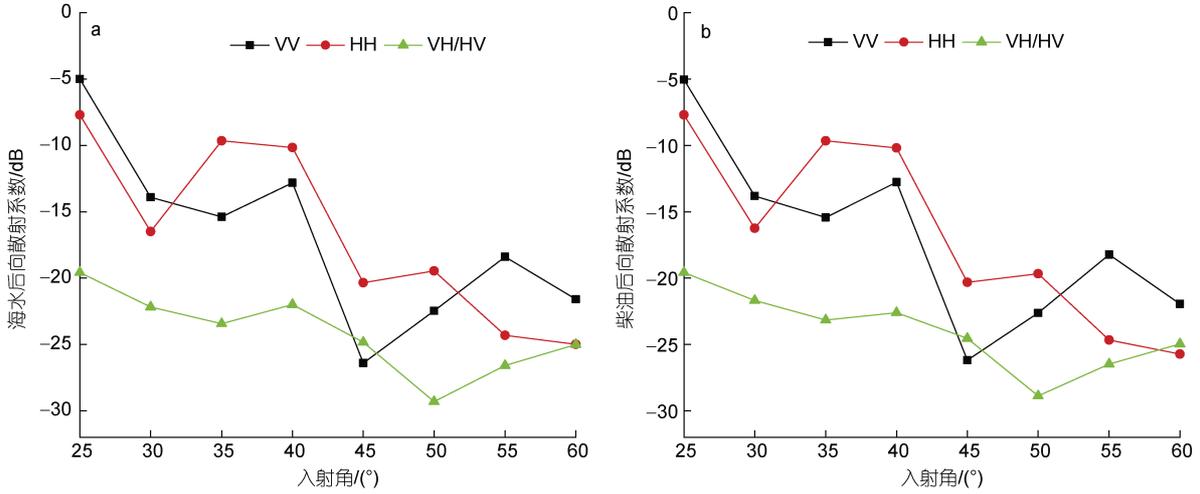


图3 海水 N_{RCS} (a)和柴油 N_{RCS} (b)随入射角的变化

Fig.3 Variation of seawater N_{RCS} (a) and diesel N_{RCS} (b) with incident angle

注: VV 表示垂直(vertical transmission vertical reception, VV)极化, HH 代表水平(horizontal transmission horizontal reception, HH)极化, VH/HV 表示交叉(vertical transmission horizontal reception/horizontal transmission vertical reception, VH/HV)极化

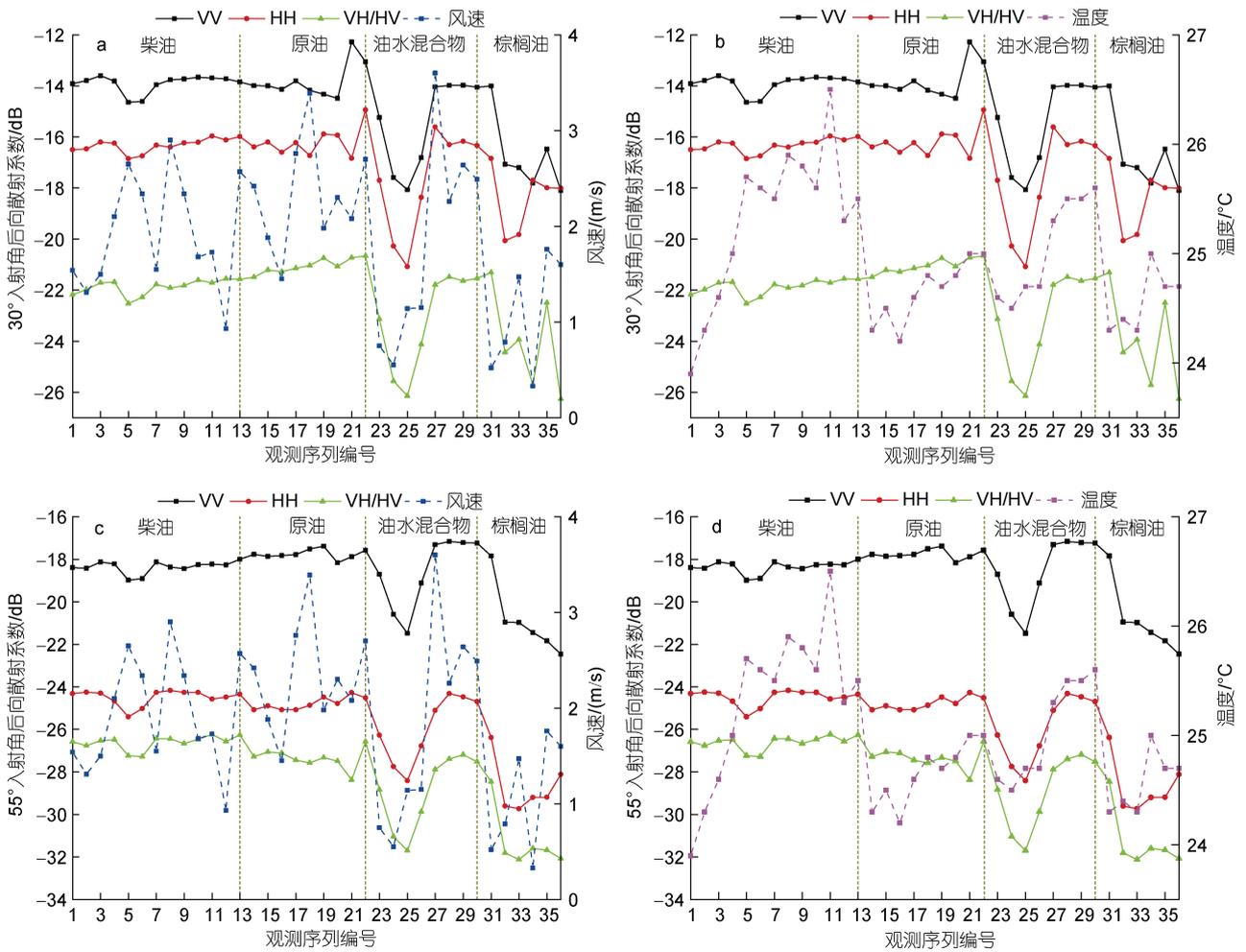


图4 油膜 N_{RCS} 在不同入射角随风速(a, c)和水温(b, d)变化

Fig.4 The N_{RCS} of oil film changes with wind speed(a, c) and water temperature(b, d) at different incident angles

注: 分割线为不同种油膜的实验序列

$$\Delta\sigma^0 = \sigma^{0,\text{Oil}} - \sigma^{0,\text{Water}} \quad (4)$$

柴油、原油、油水混合物和棕榈油 VV 极化方式下的油水差如图 5 所示, 在 30°和 55°入射角下对 VV 极化的数据进行分析发现: 油水混合物、原油和柴油均出现了油膜 N_{RCS} 大于海水即 $\Delta\sigma^0 > 0$ 的现象, 这与油膜抑制作用增强使得 $\Delta\sigma^0 < 0$ 的结论并不一致。在不同极化方式下对 30°和 55°入射角的 $\Delta\sigma^0 > 0$ 的数据进行统计如表 3 所示, 可以发现油水混合物作为油膜乳化物在不同极化方式下均出现了油膜 N_{RCS} 增大的现象, 且其比例均大于 50%, 说明一定程度乳化能够增大油膜的 N_{RCS} , 从而使得 $\Delta\sigma^0 > 0$, 印证了 Guo 等(2020)⁴² 的结论; 原油在三种极化方式下出现油膜 N_{RCS} 增大, 这是由于油膜出现部分乳化的现象(原油和油水混合物由于黏度大, 为保证扫描区域有油膜分布, 试验过程进行了人工搅拌); 柴油和棕榈油(实验过程没有进行人

工搅拌)不含沥青, 不易发生油包水的乳化(严志宇等, 2002)², 但柴油在不同极化方式下存在大于 50%的 $\Delta\sigma^0 > 0$ 且不同序列下 $\Delta\sigma^0$ 的值比较接近, 这是由于柴油进水后扩散较快, 黏度较小的柴油在风场的作用下向围油栏左长边聚集(面向水池), 散射计扫描轨迹中油膜分布不均匀且油量少, 致使 $\Delta\sigma^0 > 0$ 且差值大小比较接近。棕榈油在实验过程中风速在逐渐减小(图 4), 油膜在扫描轨迹上分布较均匀, 随着油量的增加 N_{RCS} 不断减小, 因此棕榈油 $\Delta\sigma^0 < 0$ 。由实验数据分析可知, 棕榈油 $\Delta\sigma^0$ 均小于 0, 柴油的 $\Delta\sigma^0$ 变化小, 因此, 基于 $\Delta\sigma^0$ 可以将二者与原油和油水混合物区分, 原油和油水混合物由于乳化使得 $\Delta\sigma^0$ 均呈现增大趋势, 在 VV 极化方式下比较容易识别(表 3)(许晨琪等, 2021)¹⁶, 而在 HH 和 VH/HV 极化方式下较难将两者区分。如果在相同条件下比较, 油水混合物 $\Delta\sigma^0 > 0$ 的比例应远远高于原油。

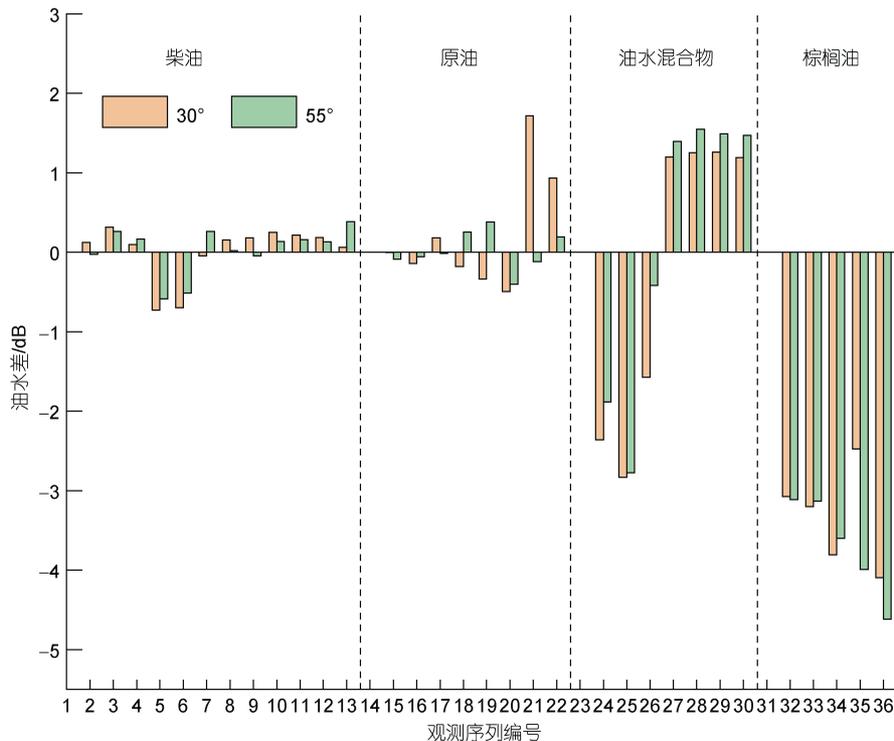


图 5 入射角在 30°和 55°条件下不同序列 VV 极化方式的 $\Delta\sigma^0$

Fig.5 $\Delta\sigma^0$ for different sequential in VV polarization modes at incidence angles of 30° and 55°

表 3 入射角 30°和 55°条件下不同极化方式 $\Delta\sigma^0 > 0$ 的统计比例

Tab.3 Statistical proportion of $\Delta\sigma^0 > 0$ in different polarization modes at incidence angles of 30° and 55°

极化方式	柴油	原油	油水混合物	棕榈油
VV	0.71	0.375	0.57	0
HH	0.67	0.75	0.57	0
VH/HV	0.75	0.69	0.57	0

2.1.2 油膜散射特征参数变化分析 由于棕榈油实验序列为 6 个, 因此, 基于特征参数的分析选取 4 种油品的前 6 个序列, 序列 1 为无油海水, 序列 2~6 为油膜特征参数变化, 该实验序列下的风速、水温如图 6 所示。

图 7a, 7b 为 30°和 55°入射角下柴油、原油、油水混合物和棕榈油的极化差 P_D , 图 7c~7e 和图 7f~7h

分别为 30°和 55°入射角下四类油膜不同极化方式下以 dB 表达的 N_{RCS} 计算的抑制比 D_R , 图 7i, 7j 分别为 30°和 55°入射角下四类油膜的极化比 P_R 。随着油膜影响增大(油膜厚度相对增大), N_{RCS} 减小, P_D 和 D_R 均应呈现减小趋势, 而 P_R 则应呈现增加趋势。柴油在序列 3~4 下风速的增加使得油膜分散, 油膜对 N_{RCS} 的影响降低, 因此 P_D 和 D_R 异常增加, P_R 减小; 而在序列 4~6 下随着油膜影响的增大, P_D 和 D_R 呈现减小趋势, P_R 呈现增加趋势。原油的 P_D 、 D_R 和 P_R 变化较小, 说明在此过程中原油的油膜厚度变化小且该入射角下为薄油分布, 序列 3~5 下的 P_D 和 D_R 逐渐增大, P_R 逐渐减小, 这是由于风速的增加导致扫描区域油膜较薄, 其对 N_{RCS} 的影响减小, 序列 6 不同入射角的油膜分布不同, 因此, P_D 和 D_R 出现不同的变化趋势。油水混合物的 P_D 和 D_R 呈现先减小后增大的趋势, P_R 的变化趋势在两个入射角下并不相同; 在 30°入射角

下序列 2~4 的 P_D 随着油膜影响增大而减小, P_R 随之增大, D_R 则在序列 3~4 出现了异常增大, 这与乳化增大 N_{RCS} 有关; 序列 4~6 下的风速呈现增大趋势, 油膜分散使得其影响减小, N_{RCS} 增加迅速使得 P_D 、 D_R 增加, P_R 减小, 55°入射角下序列 6 的 P_D 存在较小的增加趋势, 而 P_R 均呈现增加趋势, 这可能与风速影响油膜分布而导致的异常有关。棕榈油随着油膜影响的增加, P_D 和 D_R 呈现减小趋势, P_R 呈现增加趋势, 30°入射角下的序列 4 和 6 风速减小, 油膜聚集使得油膜影响增大, 因而 P_D 和 D_R 在 VV 极化和 VH/HV 极化方式下异常减小, P_R 异常增加; 序列 5 风速增加, 油膜分散使得 P_D 增加, VV 极化和 VH/HV 极化方式下的 D_R 增加, P_R 减小, 55°入射角下的变化正常; 实验过程中 D_R 在 HH 极化方式下出现了异常增加趋势, 且在 30°入射角下的增加趋势更大, 这可能与风速影响油膜分布导致的数据异常有关。

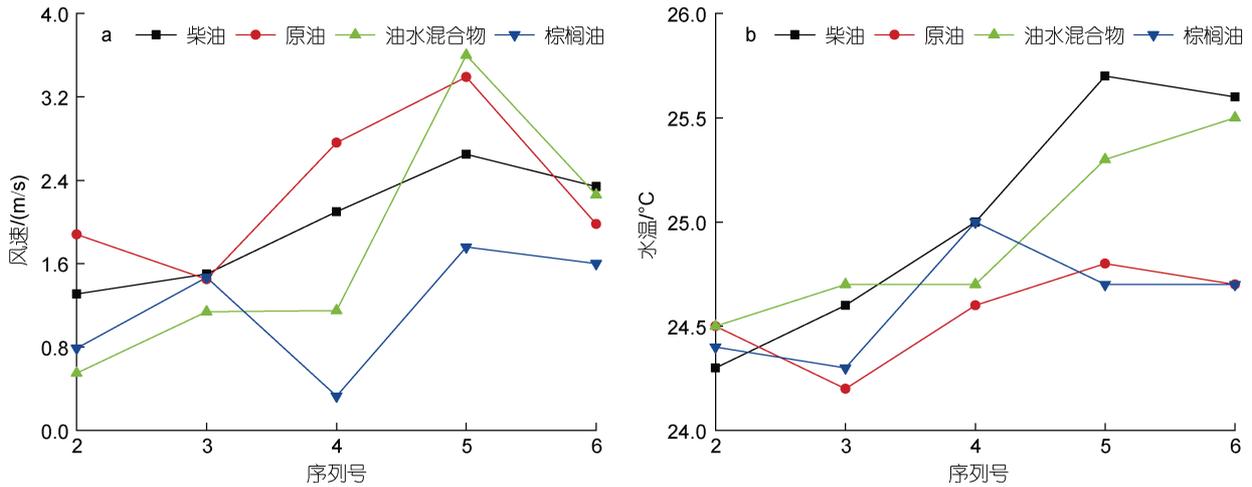
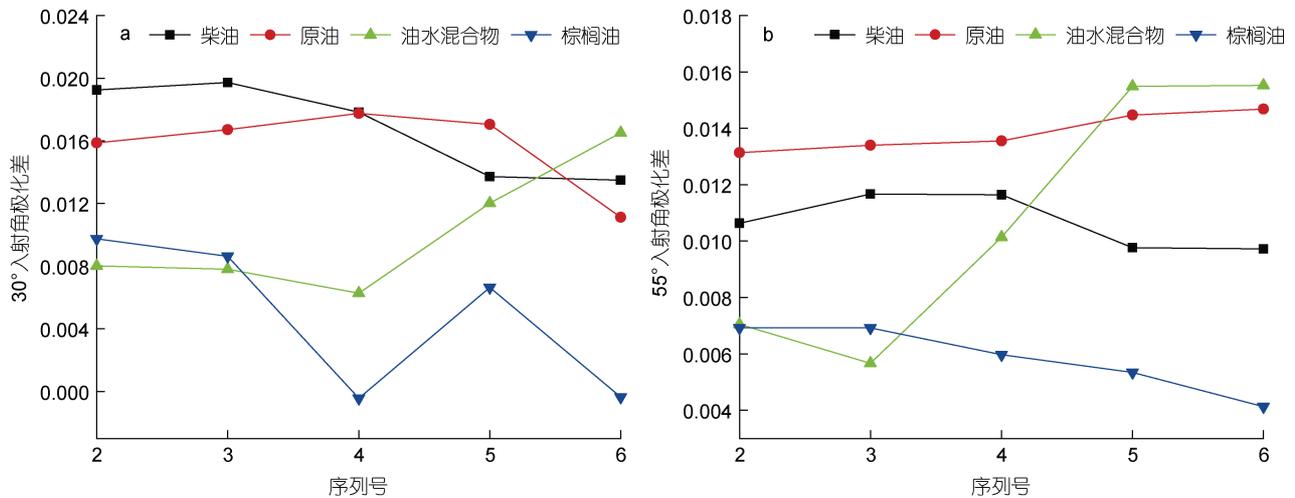


图 6 实验序列对应的风速(a)和水温(b)

Fig.6 Wind speed (a) and water temperature (b) corresponding to the experimental sequence



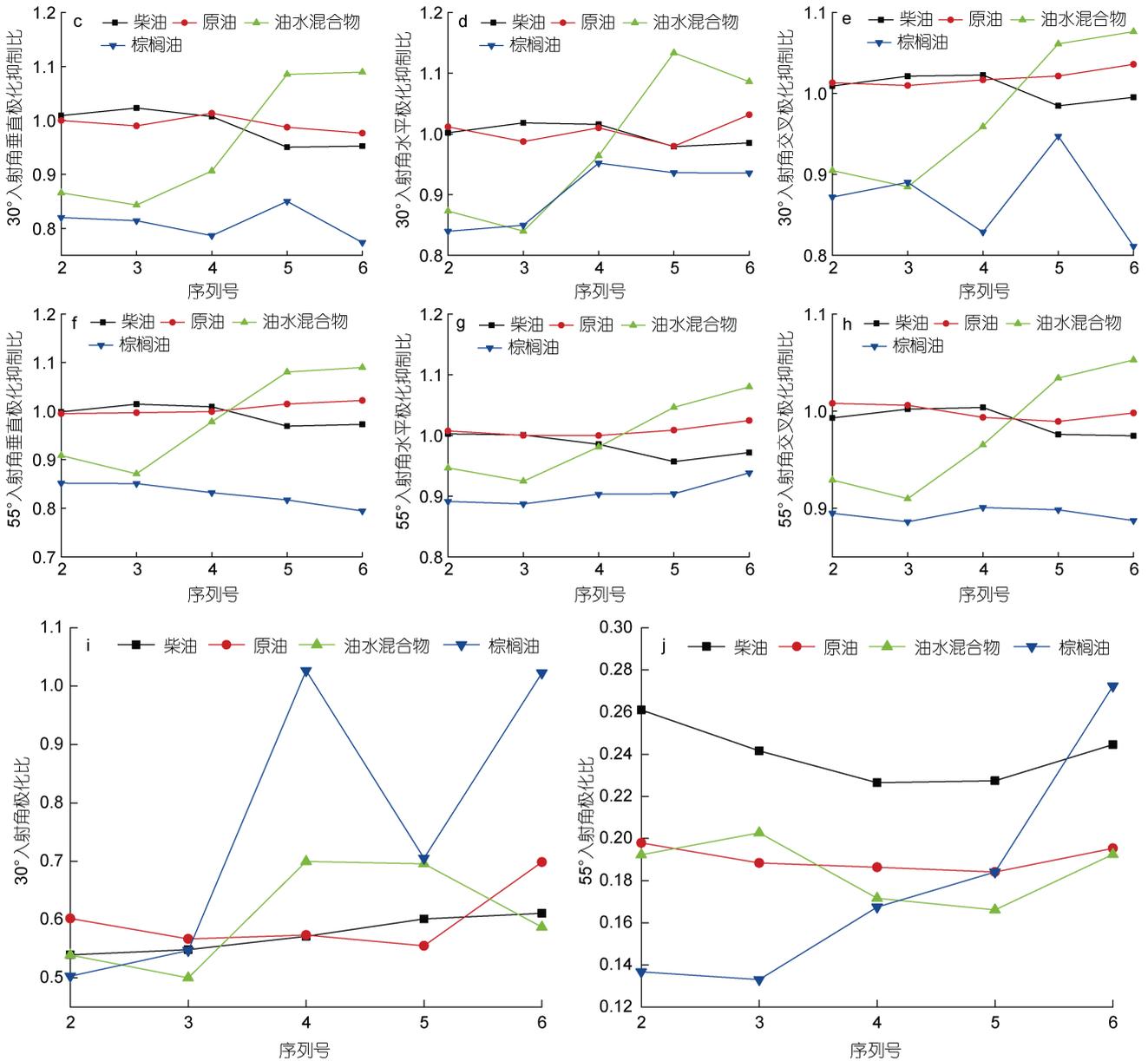


图 7 不同入射角下的特征参数变化

Fig.7 Variation of characteristic parameters at different incident angles

综上所述, 柴油作为原油的衍生品, 其 P_D 、 D_R 两类散射特征参数值与原油接近; 棕榈油在四类油膜中的 P_D 和 D_R 特征参数最小并与其他油种差距较大, 最易识别; 油水混合物在 P_D 和 D_R 特征参数下的变化趋势为增大, 且变化趋势大于原油和柴油; 棕榈油的 P_R 呈现增加趋势, 其他油种则在不同入射角下的变化趋势不一致。对散射特征参数的均值进行统计, 其均值大小比较如图 8 所示, 分析可知: (1) 不同极化方式的原油、油水混合物、柴油三类油膜的 D_R 均值均大于棕榈油, 可以有效识别棕榈油;

VV 极化和 HH 极化下柴油、原油和油水混合物的 D_R 均值接近, 而在 VH/HV 极化方式下三者 D_R 均值尤其是原油和油水混合物的差异较大, 因此 VH/HV 极化方式下对于原油和油水混合物的识别有效; (2) 柴油作为原油的衍生品, 其 P_D 与原油接近, 但原油、油水混合物和棕榈油的 P_D 均值依次减小, 因此 P_D 能识别原油、油水混合物和棕榈油; (3) 矿物油在不同入射角下的 P_R 变化趋势不相同, 且不同入射角下的均值大小关系相反, 因此在本实验中不适于四类油种的识别。

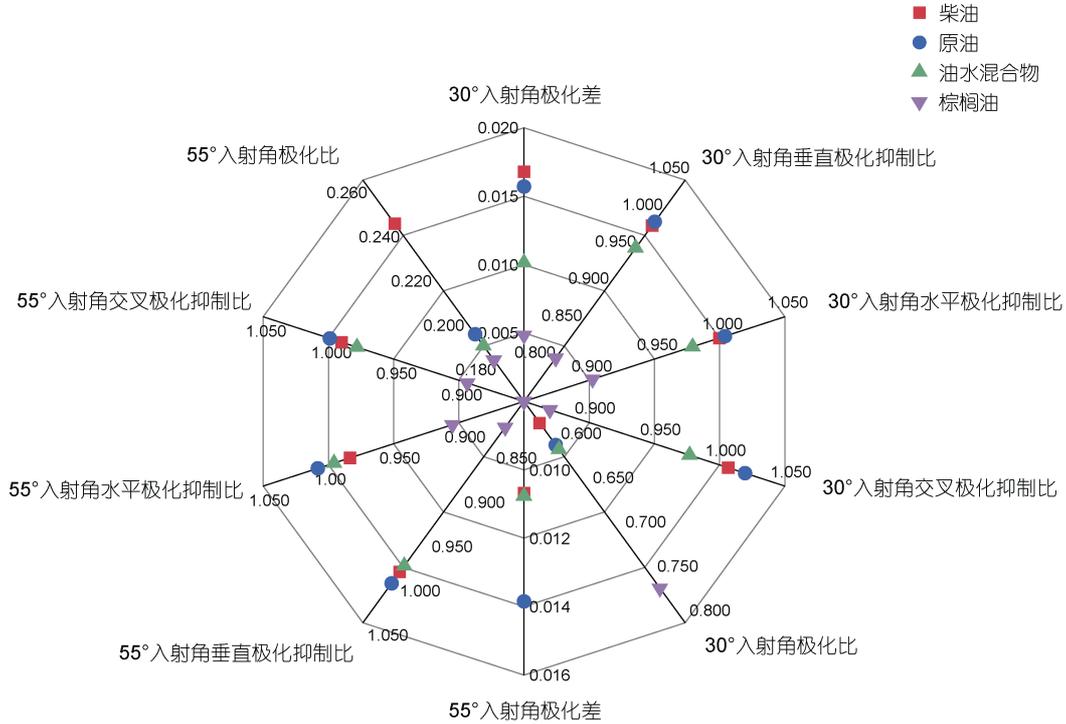


图 8 特征参数均值大小比较
Fig.8 Comparison in mean of feature parameters

2.2 SAR 图像油种识别应用

2.2.1 SAR 验证图像获取 2011 年 6 月 6~9 日, 挪威海洋清洁运营协会公司(Norwegian Clean Seas Association for Operating Companies, NOFO)在北海(59°59' N, 2°27' E)开展海上溢油实验, 实验区域如图 9 所示。实验选取原油、乳化油和植物油三种油品, 原油是 Balder 油, 密度为 0.914 g/mL; 乳化油由 Oseberg blend 原油混合 5% 的 IFO380 制成, 实验室测得含水率为 69%; 植物油为 Radiagreen ebo 油, 具有与天然油膜类似的双亲结构, 用于模拟天然单分子生物成因油膜; 其他油膜特性可参考 Skrunes 等(2014)⁵³⁰⁴ 和舒思京(2020)。三种油膜的释放过程如表 4 所示, 释放后对乳化油进行机械回收, 剩余 1 m³ 以成像, 对原油进行分散处理。

本文获取了一景 6 月 8 日的 RADARSAT-2 图像进行油种识别应用, 其具体参数如表 5 所示, 风速数据为参加实验的船只或附近的石油平台提供。经过定标、滤波处理后的 VV 极化 N_{RCS} 图像如图 10a 所示, 基于 VV 极化图像的 N_{RCS} 利用阈值法协同目视解译的方法提取出油膜范围如图 10b 所示。图中左上为植物油, 中间为乳化油, 右下为原油, 三类油膜清晰可见, 图像获取时间分别为植物油释放后 13 h, 乳化油

释放后 29 h, 原油释放后 9 h。

表 4 油膜释放过程数据记录
Tab.4 The data logging of oil film release process

油品	释放时间/年-月-日 T 时:分	释放量/m ³	回收方式
植物油	2011-06-08T04:10	0.4	自然分解
乳化油	2011-06-07T12:15	20	机械回收, 剩余 1 m ³
原油	2011-06-08T08:23	30	分散

表 5 RADARSAT-2 图像参数
Tab.5 Image parameters of RADARSAT-2

时间/年-月-日 T 时:分	模式	入射角/(°)	分辨率/m	风速/(m/s)
2011-06-08T17:27	Fine Quad	34.9~36.1	5.2×7.6	1.6~3.3

2.2.2 基于敏感特征参数的识别 南姜码头实验结果分析可知, 油水差 $\Delta\sigma^0$ 、抑制比 D_R 和极化差 P_D 可以应用于图 10 油种的识别。基于 ENVI 5.3 软件对经过定标、滤波后的图像选取溢油邻近海水, 利用 MATLAB R2018b 按列计算海水样本的 N_{RCS} 均值, 而后计算油膜与对应列海水均值的差值形成 $\Delta\sigma^0$ 图像, 如图 11 所示; VV 和 HH 极化方式的图像显示植物油的 $\Delta\sigma^0$ 比原油和乳化油小, 且原油、乳化油油膜边缘 $\Delta\sigma^0$ 值大于油膜中间, 植物油不显示此差异, 这是由

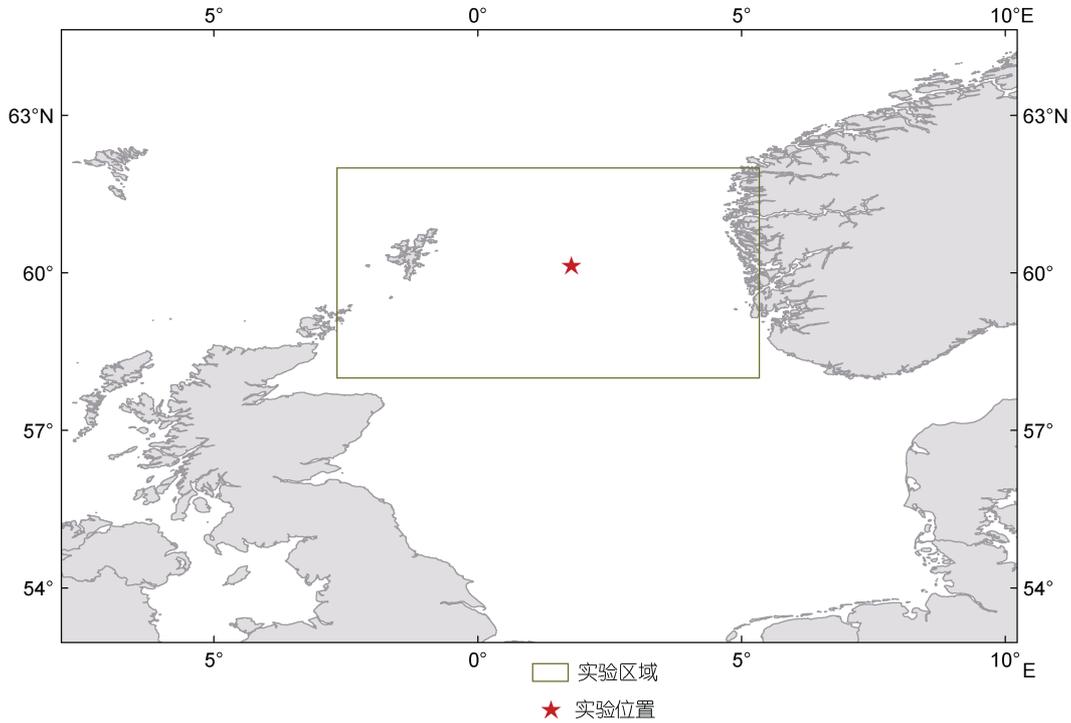
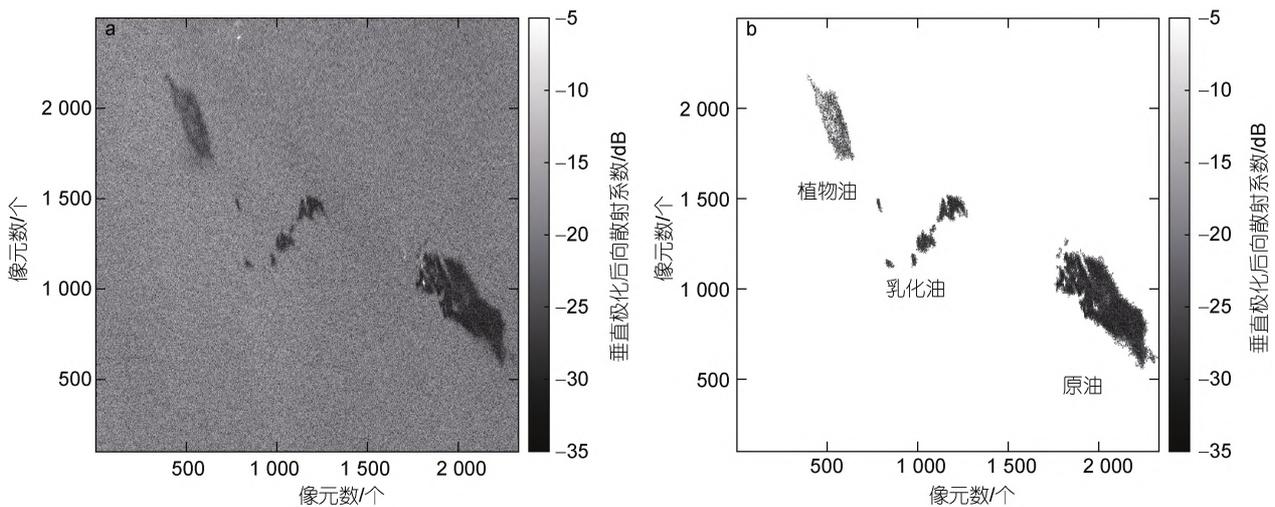


图 9 实验位置及区域

Fig.9 Experimental location and area

图 10 VV 极化下的 $N_{RCS[dB]}$ 图(a)和溢油提取图(b)Fig.10 $N_{RCS[dB]}$ image(a) and oil spill extraction image(b) in VV polarization modes

于原油、乳化油边缘油膜厚度小, 易于发生乳化, 使得边缘 $\Delta\sigma^0$ 值大, 这一结论与 Guo 等(2022)¹³ 一致, 植物油不发生乳化, 因此油膜边缘与中间 $\Delta\sigma^0$ 值无明显差异; VH/HV 极化方式下原油、乳化油和植物油的 $\Delta\sigma^0$ 值分布并无明显差异。

与 $\Delta\sigma^0$ 计算方法类似, 基于 dB 表达的 N_{RCS} 计算不同极化方式下的 $D_R(N_{RCS[dB]})$ 如图 12a~12c 所示,

基于 linear units 表达的 N_{RCS} 计算的 $D_R(N_{RCS[linear units]})$ 如图 12d~12f 所示; VV 极化和 HH 极化方式的 $D_R(N_{RCS[dB]})$ 显示原油、乳化油边缘值大于油膜中间, 植物油不显示此差异, 这是由于原油、乳化油边缘油膜厚度小, 易于发生乳化, 使得边缘 $D_R(N_{RCS[dB]})$ 值大, 这一结论与 Guo 等(2022)¹³ 一致, VH/HV 极化方式下原油、乳化油和植物油的 $D_R(N_{RCS[dB]})$ 值分布

并无明显差异。VV 极化和 HH 极化方式的 D_R ($N_{RCS[\text{linear units}]}$) 显示植物油小于原油、乳化油, 矿物油膜边缘值明显小于油膜内部, 植物油的图像较为均匀; VH/HV 极化方式下的图像可以看出乳化油的 D_R 均值大于原油, 两者存在差别。 D_R ($N_{RCS[\text{dB}]}$) 和 D_R ($N_{RCS[\text{linear units}]}$) 均可以在 VV 和 HH 极化方式下较好地识别植物油, 但 D_R ($N_{RCS[\text{linear units}]}$) 在 VV 和 HH 极化方式下植物油和矿物油的差异更明显, 且 VH/HV 极化方式下可以识别原油和乳化油, 因此, D_R ($N_{RCS[\text{linear units}]}$) 更有利于油种识别。

基于 ENVI 5.3 计算的 P_D 图像如图 13a 所示, 可以看出原油和乳化油的边缘 P_D 值大于油膜中间, 植物油的边缘和中间差异不如矿物油明显, 但在油

膜左侧也出现了边缘值大的情况, 这是由于边缘油膜厚度小, 油膜影响小, 进而导致边缘 P_D 大; 为了进一步增大油种之间的差异, 尝试计算油水差的极化差 (polarization difference of oil-water difference, P_{DOW}), 即 VV 极化与 HH 极化油水差的差值, 其计算公式如式(5)所示, 计算结果如图 13b 所示, 由图 13b 可知, 基于 P_{DOW} 的特征图像可以看出原油、乳化油和植物油三类油膜的差异。

$$P_{DOW} = (\sigma_{VV}^{0, \text{Oil}} - \sigma_{VV}^{0, \text{Water}}) - (\sigma_{HH}^{0, \text{Oil}} - \sigma_{HH}^{0, \text{Water}}). \quad (5)$$

3 讨论

南姜码头散射计实验发现 VH/HV 极化在区分别矿物油膜方面有优势。星载 SAR 图像的 VH/HV 极

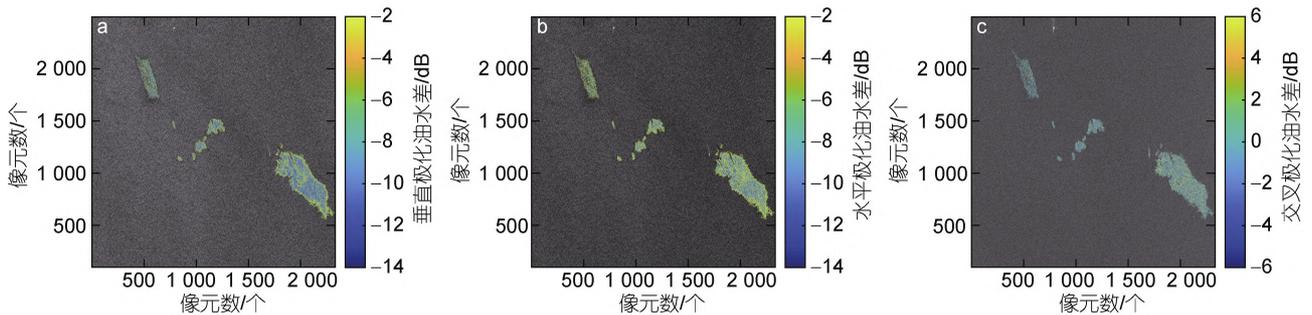


图 11 不同极化方式的油水差图

Fig.11 Image of oil-water difference in different polarization modes

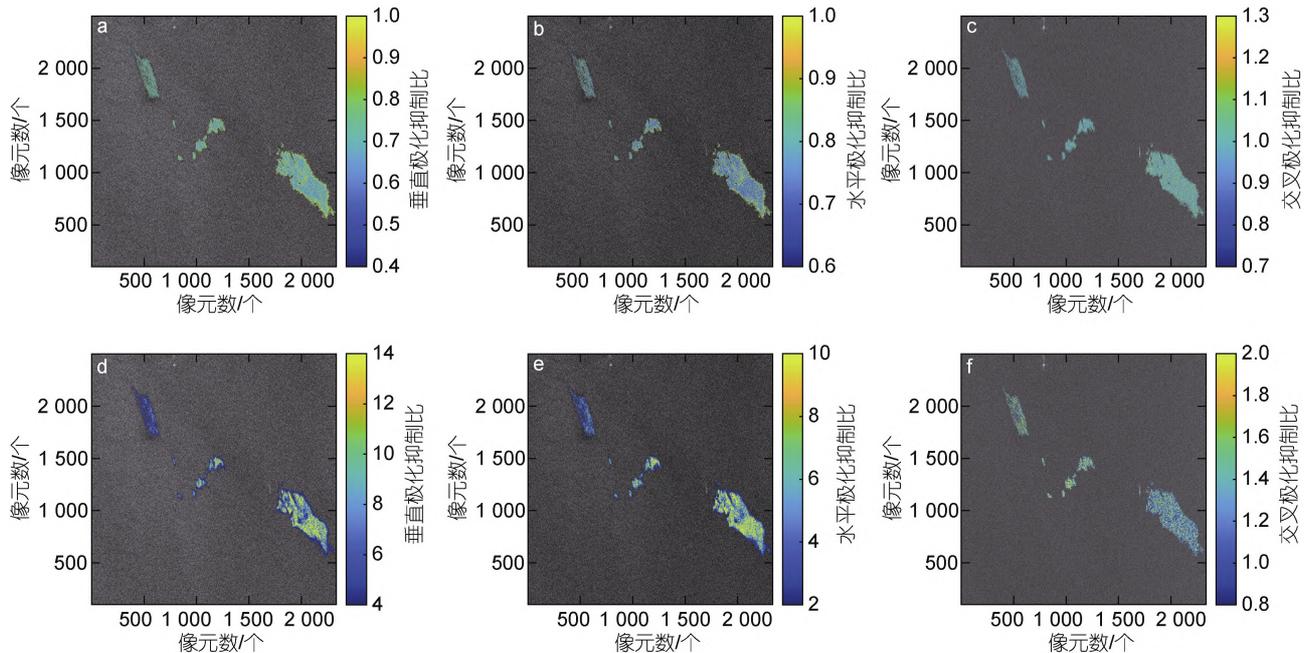


图 12 基于 dB(a~c)和 linear units(d~f)表达的后向散射系数计算的不同极化方式下的抑制比

Fig.12 Damping ratio calculated based on the backscatter coefficient expressed in dB (a~c) and linear units (d~f) in different polarization modes

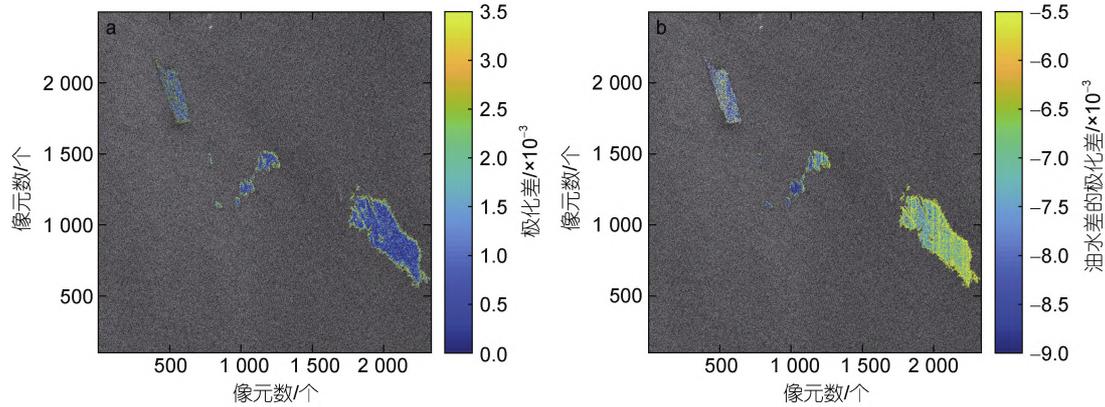


图 13 极化差(a)和油水差的极化差图(b)

Fig.13 Image of polarization difference (a) and image of polarization difference of oil-water difference (b)

化方式下受噪声影响较大(Garcia-Pineda *et al*, 2020)⁴, 油膜抑制毛细重力波使得 N_{RCS} 更小, 因此, VH/HV 极化在油种识别方面不敏感, 但在对 NOFO 溢油实验获取的图像计算特征参数时发现, VH/HV 极化方式下的 D_R ($N_{RCS[\text{linear units}]}$) 有利于原油和乳化油的识别。

油膜的抑制效应与油膜厚度、表面张力、黏度、风速风向等有关(Zhang *et al*, 2015)⁷¹, 此外, 一定程度乳化增大 N_{RCS} , 这对油膜的抑制效应也会产生影响。Guo 等(2022)¹³ 提出 D_R ($N_{RCS[\text{dB}]}$) 能够一定程度反映原油与乳化原油混合条件下的相对油膜厚度大小, 其值越小厚度越大; 同时 D_R ($N_{RCS[\text{dB}]}$) 能够反映 SAR 图像中同一油膜的相对乳化程度, 乳化程度越高值越大。Zhang 等(2015)提出油膜厚度小于 0.01 mm 时, D_R ($N_{RCS[\text{linear units}]}$) 变化不大, 厚度大于 0.01 mm 时, D_R ($N_{RCS[\text{linear units}]}$) 总体上随厚度增加而增加。随着油膜影响增大(油膜厚度的增大), P_D 呈现减小趋势, 而 P_R 呈现增加趋势, 因此, 结合各参数的变化特征可以有效判断南姜码头实验中的相对油膜厚度大小。由 NOFO 获取的 SAR 图像计算原油和乳化油的 D_R 图像可以看出油膜边缘油膜厚度小, 内部厚度大, 存在明显分区, 同时油膜边缘乳化作用较强, 对 D_R 的变化也会产生影响; 植物油厚度小, 且不发生乳化, 因此 D_R 的变化较小。乳化油释放距成像时间 29 h, 且进行了回收操作, 油膜厚度较小, 原油释放 9 h, 在海水的作用下发生乳化; 因此, 原油和乳化油的特征参数图显示相似(Skrunes *et al*, 2014)⁵³¹⁷。

4 结论

本文开展基于 C 波段全极化散射计的外场实验, 获取了柴油、原油、油水混合物和棕榈油的不同实验

序列下的 N_{RCS} , 探索可以有效识别不同油种的敏感特征参数, 并将外场实验获取的敏感特征参数运用于 SAR 图像中进行不同油种的识别。结果发现: (1) VV 和 HH 极化方式下的油水差 $\Delta\sigma^0$ 有利于识别植物油和矿物油; (2) VV 和 HH 极化方式下的抑制比 D_R ($N_{RCS[\text{dB}]}$) 和 D_R ($N_{RCS[\text{linear units}]}$) 均有利于识别植物油和矿物油, 但 D_R ($N_{RCS[\text{linear units}]}$) 可以更清晰地显示植物油和矿物油的差异, 且在 VH/HV 极化方式下的 D_R ($N_{RCS[\text{linear units}]}$) 对于原油和乳化油的识别更有效, 因此, 基于 linear units 的 D_R 更有利于识别油种; (3) 极化差 P_D 在南姜码头实验中有效识别了原油、油水混合物和棕榈油, 在 SAR 图像中发现油水差的极化差 P_{DOW} 可以有效识别三类油种。

未来还需要进一步控制实验条件, 获取其他油膜的数据, 增加其他特征参数, 探索具有普适性的油种区识别方法, 为星载 SAR 油种区分与识别提供数据参考和方法支撑。

致谢 感谢加拿大国家航天局 RADARSAT-2 数据支持。

参 考 文 献

- 于伟娜, 2012. 我国海上原油运输通道运量分配优化研究[D]. 大连: 大连海事大学: 1-2.
- 刘朋, 2012. SAR 海面溢油检测与识别方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学: 1-2.
- 许晨琪, 2021. 原油乳化微波散射特性实验及应用研究[D]. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所): 1-60.
- 许晨琪, 过杰, 杨启霞, 等, 2021. 微波散射实验识别原油及乳化原油[J]. 海洋科学, 45(4): 13-21.
- 孙宁宁, 2019. 我国海上石油开采溢油应急预案机制研究[D]. 上海: 上海海洋大学: 8.

- 严志宇, 许海梁, 2002. 溢油乳化过程的研究进展[J]. 交通环保(2): 1-6, 26.
- 李煜, 陈杰, 张渊智, 2019. 合成孔径雷达海面溢油探测研究进展[J]. 电子与信息学报, 41(3): 751-762.
- 吴传雯, 2014. 大连新港溢油事故对海洋生态环境的影响研究[D]. 上海: 上海海洋大学: 1-2.
- 余晓钟, 罗霞, 2021. “一带一路”国际能源合作创新模式实施保障机制研究[J]. 科学管理研究, 39(5): 160-168.
- 沈亚峰, 刘建强, 丁静, 等, 2020. 海洋一号 C 星光学载荷对海面溢油的识别能力分析[J]. 遥感学报, 24(8): 933-944.
- 张明亮, 2015. 面向对象的 SAR 图像溢油信息提取研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-2.
- 陆应诚, 刘建强, 丁静, 等, 2019. 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, 64(31): 3213-3222.
- 陈韩, 2020. 海面溢油电磁遥感探测识别技术研究[D]. 南京: 南京信息工程大学: 13-14.
- 金戈, 董仁杰, 蔡睿, 等, 2019. “桑吉轮”碰撞事故溢油模拟研究[J]. 水利规划与设计(9): 64-67, 122.
- 郑本昌, 2018. 倚天观海, 助力海洋发展战略——中国海洋卫星应用面面观[J]. 太空探索(11): 13-15.
- 赵云英, 杨庆霄, 1997. 溢油在海洋环境中的风化过程[J]. 海洋环境科学, 16(1): 49-56.
- 段冰, 种劲松, 2013. 基于交叉极化比的 SAR 图像矿物油膜与生物油膜的区分方法[J]. 遥感技术与应用, 28(1): 103-107.
- 谈爱玲, 毕卫红, 赵勇, 2011. 基于稀疏非负矩阵分解和支持向量机的海洋溢油近红外光谱鉴别分析[J]. 光谱学与光谱分析, 31(5): 1250-1253.
- 蒋兴伟, 何贤强, 林明森, 等, 2019. 中国海洋卫星遥感应用进展[J]. 海洋学报, 41(10): 113-124.
- 舒思京, 2020. 极化雷达溢油探测实验研究[D]. 青岛: 自然资源部第一海洋研究所: 16.
- 温艳萍, 吴传雯, 2013. 大连新港“7.16 溢油事故”直接经济损失评估[J]. 中国渔业经济, 31(4): 91-96.
- ANGELLIAUME S, DUBOIS-FERNANDEZ P C, JONES C E, *et al*, 2018. SAR imagery for detecting sea surface slicks: performance assessment of polarization-dependent parameters [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 56(8): 4237-4257, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2803216>.
- ANGELLIAUME S, MINCHEW B, CHATAING S, *et al*, 2017. Multifrequency radar imagery and characterization of hazardous and noxious substances at sea [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 55(5): 3051-3066, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2661325>.
- GADE M, ALPERS W, HÜHNERFUSS H, *et al*, 1998. Imaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency/multipolarization SIR-C/X-SAR [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 103(C9): 18851-18866, <https://doi.org/10.1029/97JC01915>.
- GARCIA-PINEDA O, STAPLES G, JONES C E, *et al*, 2020. Classification of oil spill by thicknesses using multiple remote sensors [J]. Remote Sensing of Environment, 236: 111421, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111421>.
- GUO J, LUO Y M, GE F, *et al*, 2019. Study on crude oil and its emulsification characteristics [C] // IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama, Japan: IEEE: 8257-8259, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898844>.
- GUO J, XU C Q, LIU G W, *et al*, 2022. Experimental research on oil film thickness and its microwave scattering during emulsification [J]. Journal of Oceanology and Limnology, 40(4): 1361-1376, <https://doi.org/10.1007/s00343-021-1183-x>.
- GUO J, ZHANG T L, ZHANG X, *et al*, 2020. Impact of emulsification of crude oil on normalized radar cross section [J]. Journal of Oceanology and Limnology, 38(1): 42-54, <https://doi.org/10.1007/s00343-019-8298-3>.
- JONES C E, ESPESETH M M, HOLT B, *et al*, 2016. Characterization and discrimination of evolving mineral and plant oil slicks based on L-band synthetic aperture radar (SAR) [C] // Proc. SPIE 10003, SAR Image Analysis, Modeling, and Techniques XVI, 100030K. Edinburgh, Scotland: SPIE: 4-13, <https://doi.org/10.1117/12.2241266>.
- JONES C E, HOLT B, 2018. Experimental L-band airborne SAR for oil spill response at sea and in coastal waters [J]. Sensors, 18(2): 641, <https://doi.org/10.3390/s18020641>.
- LU Y C, SHI J, WEN Y S, *et al*, 2019. Optical interpretation of oil emulsions in the ocean - Part I: Laboratory measurements and proof-of-concept with AVIRIS observations [J]. Remote Sensing of Environment, 230: 111183, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.002>.
- SHI J, JIAO J N, LU Y C, *et al*, 2018. Determining spectral groups to distinguish oil emulsions from *Sargassum* over the Gulf of Mexico using an airborne imaging spectrometer [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 146: 251-259, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.09.017>.
- SKRUNES S, BREKKE C, ELTOFT T, 2014. Characterization of marine surface slicks by Radarsat-2 multipolarization features [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 52(9): 5302-5319, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2287916>.
- SKRUNES S, BREKKE C, ELTOFT T, *et al*, 2015. Comparing near-coincident C- and X-Band SAR acquisitions of marine oil spills [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(4): 1958-1975, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2351417>.
- TIAN W, SHAO Y, YUAN J N, *et al*, 2010. An experiment for oil spill recognition using RADARSAT-2 image [C] // 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Honolulu, HI, USA: IEEE: 2761-2764, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5652898>.
- WETTLE M, DANIEL P J, LOGAN G A, *et al*, 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 [J]. Remote Sensing of Environment, 113(9): 2000-2010, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.05.010>.
- WISMANN V, GADE M, ALPERS W, *et al*, 1998. Radar signatures of marine mineral oil spills measured by an airborne multi-frequency radar [J]. International Journal of

- Remote Sensing, 19(18): 3607-3623, <https://doi.org/10.1080/014311698213849>.
- YANG J F, WAN J H, MA Y, *et al*, 2020. Characterization analysis and identification of common marine oil spill types using hyperspectral remote sensing [J]. International Journal of Remote Sensing, 41(18): 7163-7185, <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1754496>.
- ZHANG Y M, ZHANG J, WANG Y H, *et al*, 2015. The damping model for sea waves covered by oil films of a finite thickness [J]. Acta Oceanologica Sinica, 34(9): 71-77, <https://doi.org/10.1007/s13131-015-0729-1>.
- ZHENG H L, ZHANG J, KHENCHAF A, *et al*, 2021. Study on non-Bragg microwave backscattering from sea surface covered with and without oil film at moderate incidence angles [J]. Remote Sensing, 13(13): 2443, <https://doi.org/10.3390/rs13132443>.

OIL TYPES IDENTIFICATION BASED ON MICROWAVE SCATTERING EXPERIMENT

MA Jing^{1, 2, 3}, GUO Jie^{1, 2}

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences (CAS), CAS Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai 264003, China; 2. Shandong Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, Yantai 264003, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract With complex sources and various types of oil spills at sea, correct identification of oil spill types is of great significance for the rapid response to oil spill incidents. Synthetic aperture radar (SAR) can perform all-day all-weather monitoring at sea surface for oil spill; however, there has been a deficiency in oil type identification. We applied the C-band full-polarization scatterometer in field experimental observations on diesel oil, crude oil, oil-water mixture, and palm oil to screen sensitive feature parameters for microwave identification of an oil film at sea, and the sensitive feature parameters were applied to the SAR images obtained from the offshore oil film experiments for oil-type identification. Results show that the oil-water difference ($\Delta\sigma^0$) in VV (vertical transmission vertical reception) polarization mode can effectively identify plant oil and mineral oil. The damping ratio (D_R) calculated based on the normalized radar cross section (N_{RCS}) expressed by dB and linear units, respectively, could effectively discriminate plant oil and mineral oil in VV and HH (horizontal transmission horizontal reception) polarization modes. In addition, in VH/HV (vertical transmission horizontal reception/ horizontal transmission vertical reception) polarization mode, the damping ratio calculated by N_{RCS} expressed by linear units could identify crude oil and emulsified oil, and using the polarization difference (P_D), crude oil, emulsified oil, and plant oil could also be discriminated.

Key words oil type identification; synthetic aperture radar (SAR); C-band full-polarization scatterometer; sensitive feature parameters