

基于 ENVISat 的海洋污染性油膜雷达 散射特征与扩散趋势分析

刘 杨^{1,2}, 邵 芸¹, 于五一², 齐小平²

(1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:污染性海洋溢油一旦发生,快速获取油膜信息对有效控制溢油危害具有重要意义。以渤海湾一次溢油污染事件为例,利用 ENVISat 数据根据油膜雷达后向散射特征分析溢油的发生,并利用溢油期间的连续风场信息和连续 SAR 数据对比研究油膜的扩散趋势以及扩散过程中油膜尺度的变化。结果表明:污染性油膜在海上扩散的不同阶段具有不同的 SAR 图像特征,海上溢油雷达遥感检测分析方法与检测效果因 SAR 图像获取时油膜所处扩散阶段不同而有所不同,通过 SAR 连续观测结合辅助信息可以对污染油膜及其运动进行有效监控与预测。

关 键 词:污染油膜;雷达检测;后向散射特征;扩散

中图分类号:TP 79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2010)03-0311-07

1 引 言

随着海洋运输业和海上油田生产的不断发展,海洋环境面临石油污染的威胁日益严峻。污染性海洋溢油常具有突发性、规模大和扩散快的特点,一旦发生,快速获取油膜信息对有效控制溢油危害具有重要意义。目前,海洋表面油膜区域性检测主要通过遥感手段进行,合成孔径雷达(SAR)因其全天候、全天时的特点成为主要的遥感检测手段^[1-6]。利用卫星雷达数据可以快速获取瞬时油膜位置与面积信息,但对于污染溢油检测来说,检测只是第一步,分析溢油的发生与扩散漂移更为关键。

风、浪、流的调制作用使海洋表面处于非惯性、非线性运动中,油膜在海上的运动及变化是一个极其复杂的过程。其中的漂移、扩散等动力学过程的数值模拟方法是国内、外溢油研究的重点^[7-9]。而卫星 SAR 数据因能客观记录溢油油膜的瞬时状态,更能反映油膜变化真实过程。雷达信号不仅包含油膜轮廓信息,不同类型、厚度的油膜对海洋表面短波及重力毛细波的抑制作用存在差异,对雷达信号具有不同的衰减作用^[10-12]。油膜形态则反映油膜在海面受自身与环境影响演变的历史^[13-14]。本文利用 ENVISat 的 ASAR 数据分析 2006 年 3 月渤海湾发

生的一起溢油事故。通过研究污染油膜的雷达散射特征,结合溢油前后一段时间内的连续风场信息,分析溢油的发生、扩散及风场与油膜运动的关系。

2 海洋表面油膜扩散机制

2.1 海洋溢油随时间演变的过程

溢油在海面上的演变受物理、化学、生物等因素影响,经历扩展、漂移、蒸发、溶解、分散、乳化、沉降、生物降解和自氧化等一系列变化过程。不同演变过程彼此交互,相互影响。在溢油发生后 10 h 内,扩展过程起主要作用。漂移过程主要受风、浪和表面流控制,发生于溢油的整个过程,油膜团的移动与扩展过程及油膜体积无关。蒸发是油膜的初期降解过程,通常在溢油发生后的 24 h 内,油膜体积的 50% 被蒸发,煤油等精炼油可能全部蒸发。溢油的分散作用则在 10 h 后达到最大,分散作用导致油膜表面积增加,大的表面积又加快挥发、溶解和乳化过程。同时,海流和风进一步加速油膜扩散,使油膜发生破碎,参与乳化、沉降等物理化学过程。溢油在海面存在时间受油品及海况影响,可达 10^4 h 之久。

2.2 海洋表面油膜扩散特征

根据费伊理论,在静水中油膜扩展主要受重力、表面张力、惯性力和黏滞力作用,油膜的自身扩展过

程可分为重力—惯性力,重力—黏滞力和表面张力—黏滞力 3 个阶段。在溢油初期阶段,油膜的自身扩展过程持续时间很短。初始扩展之后,油膜在海上的运动受风场及海流控制。在定常均匀流场中,溢油的扩展分为重力扩展、剪切扩展和随流漂移 3 个阶段^[15]。

溢油发生初期首先经历重力扩展阶段,油膜扩展受水流和风的影响较小,油膜在重力作用下迅速扩展,但历时很短。随着油膜厚度逐渐变薄,重力扩展减弱,油膜扩展进入剪切扩展阶段。这个阶段的油膜扩展受水流和风影响显著,是油膜充分扩展的主要时期。油膜上部和底部与风和水之间的黏滞力是油膜扩展的主要驱动力。当流向与风向相同时,油膜内的垂向速度梯度减小,使油膜扩展减缓,漂移速度增加;反之,油膜扩展加快,漂移速度减小。随着油膜厚度的进一步减小,油膜扩散进入随流漂移阶段,通常在溢油发生 1.5 至 2 个潮周期后出现。油膜在风、浪、流的紊动作用下开始破碎、分散,被分割成大小不等的块状或带状油膜,随风漂移扩散。油膜的扩展与漂移过程通常同时进行,只是在开始阶段,自身扩展是油膜扩散的主要运动形式,之后逐渐转化为以漂移为主的运动形式。因此,油膜一面向四周扩展,一面在风应力和潮流作用下向前漂移,在主风向上,油膜将被拉长。

3 海洋表面油膜雷达散射特征

海洋表面油膜因能有效抑制海洋表面风生短重力毛细波,减弱雷达接收后向散射回波信号强度,而在 SAR 图像上形成相对周边背景较暗的低散射区。对于入射角在 $20^\circ \sim 70^\circ$ 之间的雷达入射波,传感器接收的海面雷达后向散射以 Bragg 散射为主^[16]。Bragg 波指波长满足 Bragg 共振条件的海洋表面波:

$$\lambda_B = \lambda_0 / 2 \sin \theta \quad (1)$$

其中: λ_0 为雷达波长, θ 为入射角。此时,海面的归一化后向散射系数 σ° 为:

$$\sigma^\circ = C_{ij}(\epsilon, \theta) [E(+k_B) + E(-k_B)] \quad (2)$$

其中: $C_{ij}(\epsilon, \theta)$ 是 Bragg 系数,与雷达入射角 θ ,海面介电常数 ϵ ,后向散射电磁波极化方式($i, j = H$ 或 V)有关, $E(\pm k_B)$ 为海洋表面波在 Bragg 波矢量 $\pm k_B$ 处的海面波数谱密度。

由于表面油膜的厚度小于雷达在海水中的穿透深度, Bragg 系数不受表面油膜存在的影响。因此,表面油膜对海洋表面波的衰减作用可以通过无油膜覆盖海面的雷达后向散射系数 $\sigma_{\text{sea}}^\circ$ 与油膜覆盖海面

的雷达后向散射系数 $\sigma_{\text{oil}}^\circ$ 的比值来衡量^[12]:

$$\frac{\sigma_{\text{sea}}^\circ}{\sigma_{\text{oil}}^\circ} = \frac{E_{\text{sea}}(+k_B) + E_{\text{sea}}(-k_B)}{E_{\text{oil}}(+k_B) + E_{\text{oil}}(-k_B)} \quad (3)$$

表面油膜对雷达后向散射系数的衰减作用随 Bragg 波数、油粘性和油层厚度的增加而相对增加。在相同海况条件下,轻质油油膜在 C 波段对海面波产生约 4 dB 的衰减作用,而重质油油膜产生约 10 dB 的衰减作用。因此,在相同海况、相同油种情况下,同次成因形成表面油膜的雷达后向散射特征变化可以反映油膜厚度的相对变化趋势,油膜越厚,对海面波的衰减作用越强。研究中利用油膜区内后向散射系数的相对衰减量 $\Delta\sigma_{\text{sea-oil}}^\circ$ 来表示油膜对海洋表面波的衰减作用大小:

$$\Delta\sigma_{\text{sea-oil}}^\circ = |\sigma_{\text{sea}}^\circ - \sigma_{\text{oil}}^\circ| \quad (4)$$

$\Delta\sigma_{\text{sea-oil}}^\circ$ 值越大,衰减作用越大。

SAR 对表面油膜的检测能力与海面风速密切相关。海洋表面需要具有一定粗糙度,使表面油膜对海洋表面波的抑制作用得以体现。风速过低,海洋表面不能形成短重力毛细波,在雷达图像上呈暗区反映,无法检测到表面油膜。风速过大,一方面海洋表面短波获得足够能量克服表面油膜的抑制作用;另一方面,海洋上层湍流作用使油膜破碎或下沉,同样检测不到表面油膜。3~6 m/s 的风速是比较理想的检测条件,表面油膜 SAR 检测的风场上限在 10~14 m/s 之间^[17]。因此,研究中结合风场数据分析溢油的发生与扩散。

4 研究区与数据源

渤海是我国的一个半封闭型内陆海域,沿岸经济区密布,海域内航线发育,而且是我国一个主要的海上石油开采海域,属于溢油污染的高风险海域。2006 年 3 月 23 日,该海域检测到一起溢油污染事件,研究区位于 $118^\circ \sim 120^\circ \text{E}$, $38^\circ \sim 40^\circ \text{N}$ 之间。

研究获取 3 月 23 日、4 月 1 日、4 月 11 日 3 期 EN-VISat 的 ASAR 数据,数据分辨率 30 m、幅宽 100 km,接收 VV 和 HH 两种极化方式。为研究方便,研究中数据时间均为 UTC 时间。3 月 23 日、4 月 1 日、4 月 11 日数据接收时间分别为 2:17、13:49 和 2:20。

风场数据利用 Quick Scat 卫星的风速和风向矢量,研究获取 3 月 15 日至 4 月 12 日期间的连续风场数据。风场数据的空间分辨率为 25 km,时间间隔为 12 h,每天升轨过境(记为 A)的时间为晚上 21:00~22:00 前后,降轨过境(记为 D)的时间为早上 10:00~11:00 前后。虽然风场数据空间分

分辨率不是很高,但对于分析风场变化与油膜运动之间的关系是有益的。

5 数据处理

研究中数据处理包括 SAR 图像预处理、油膜信息提取以及风场数据处理,主要数据处理与分析技术流程如图 1。

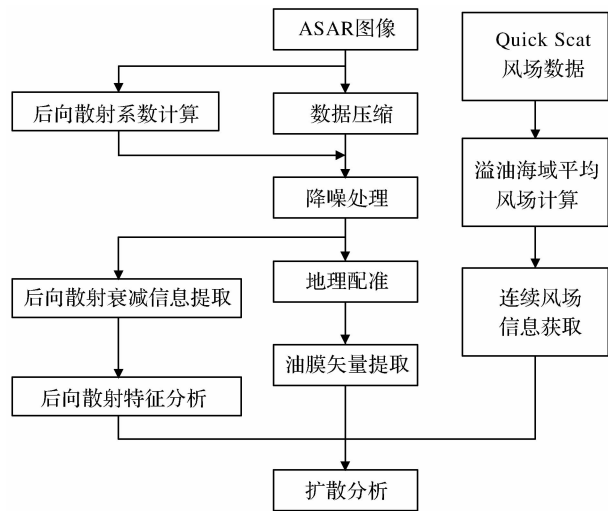


图 1 基于 ENVISat 数据处理与分析技术流程

Fig. 1 Flow chart of data processing and analysis based on ENVISat image

(1)SAR 图像预处理

SAR 图像预处理包括数据压缩、降噪滤波和地理配准。其中,由于海域内无有效控制点,地理配准根据数据自带控制点及轨道参数完成。同时,为了便于提取油膜矢量感提取,减少数据处理工作量,利用直方图统计图像灰度值的主要分布区间,将区间内的 16 位图像数据转换为 8 位图像数据。此外,为了减少 SAR 信号的相干作用引起的斑点噪声对油膜信息提取的影响,利用增强 Lee 滤波变换对数据进行平滑降噪处理。

(2)油膜信息提取

为了定量研究油膜后向散射特征,利用 ASAR 原始数据值计算后向散射系数。根据 ASAR 1B 数据的绝对定标公式,后向散射系数计算公式为:

$$\sigma_{i,j}^{\circ} = 10 * \log_{10} \left[\frac{DN_{i,j}^2}{K} * \sin(a_{i,j}) \right]$$
 (5)

其中: i 和 j 为像元行列数, $\sigma_{i,j}^{\circ}$ 为对应像元后向散射系数, $DN_{i,j}^2$ 为像元灰度值, K 为绝对定标系数, $a_{i,j}$ 为对应像元入射角。

油膜矢量信息提取主要基于预处理后的 8 位 SAR 数据。研究中在油膜海域选取 8 个样本区,统计油膜及周边海域在 V/V 和 H/H 极化方式下的平均后向散射系数,计算 $\Delta\sigma_{\text{sea-oil}}^{\circ}$,统计结果见表 1。

表 1 3 期图像的油膜信息统计表

Table 1 Statistics of oil slicks in both images

参数	3 月 23 日数据	4 月 1 日数据	4 月 11 日数据
油膜数	35	58	139
总面积/km ²	337.10	127.78	223.88
平均面积/(km ² /块油膜)	9.63	2.20	1.61
面积标准方差/块油膜	23.67	3.41	4.58
平均周长/(km/块油膜)	22.15	11.91	10.87
周长标准方差/块油膜	40.46	10.78	21.65
油膜块数(占总数百分比)			
<1 km ²	16 (45.71%)	28 (48.28%)	88(63.31%)
1~5 km ²	9 (25.71%)	24 (41.38%)	47 (33.81%)
5~10 km ²	4 (11.43%)	4 (6.9%)	1(0.72%)
>10 km ²	6 (17.14%)	2 (3.45%)	3(2.16%)
油膜面积 km ² (占总面积百分比)			
<1 km ²	9.93(2.94%)	14.96 (11.71%)	33.63 (15.02%)
1~5 km ²	15.85 (4.7%)	49.40 (38.66%)	97.92(43.74%)
5~10 km ²	32.94 (9.77%)	29.38 (22.99%)	6.53 (2.92%)
>10 km ²	278.39 (82.58%)	34.04 (26.64%)	85.80 (38.33%)

结果显示,虽然 H/H 极化方式下油膜对后向散射衰减作用的反映能力稍弱,但与 V/V 极化方式下油膜对后向散射衰减作用的变化规律相同,将两个极

化方式数据相加,可以增强油膜与海水反差,更有利于油膜信息提取。因此,将预处理后的 8 位 SAR 数据进行如下数据变换:

$$DN_{i,j}=DN_{i,j}^{(H/H)}+DN_{i,j}^{(V/V)}-d \tag{6}$$

其中： i 和 j 为像元行列数， $DN_{i,j}$ 为变换后对应像元灰度值， $DN_{i,j}^{(H/H)}$ 和 $DN_{i,j}^{(V/V)}$ 分别为 H/H 和 V/V 极化预处理后数据灰度值， d 为图像灰度调整浮值。由于图像相加导致图像亮度增强，一些灰度值溢出 8 位灰度值范围，需要减去一个浮值调整图像亮度，具体取值以突出油膜信息为原则。在变换后的数据图像上进行油膜矢量提取，定量获取油膜面积、周长参数，并利用提取的多期油膜矢量对比分析油膜的相对运动。

油膜对后向散射系数的衰减信息提取基于后向散射系数数据。统计油膜周边海水平均后向散射系数，计算油膜与对应周边海水平均后向散射系数的相对变化量，提取油膜对后向散射系数衰减程度分布信息，分析油膜后向散射特征。

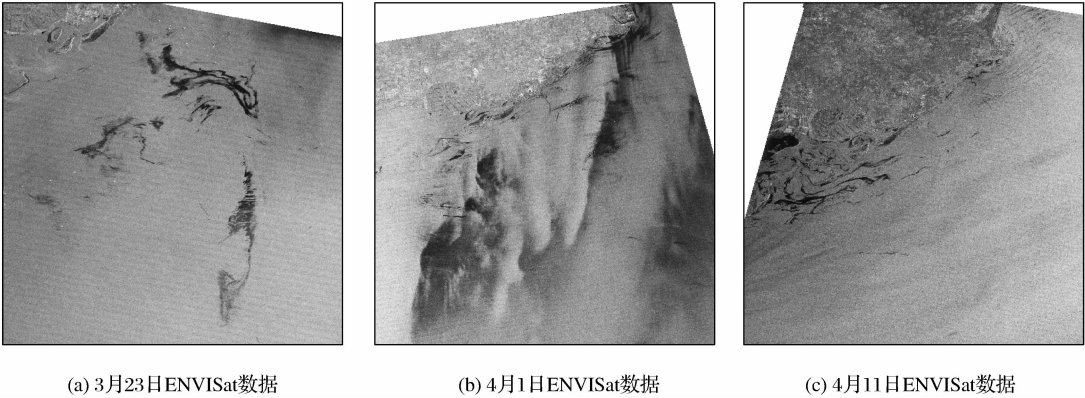


图 2 ENVISat 的 ASAR 数据
Fig. 2 Images of the ASAR

按照油膜展布可将油膜分为 a、b、c 三大块。a 块油膜对海面波的整体抑制作用明显大于 b 块和 c 块油膜，而 a、b、c 3 块油膜后向散射系数的衰减作用具有从 a、b、c 聚合处分别向另一侧减小的趋势。在海洋溢油初期，随着离溢油源点距离的增加，表面油膜的扩散速度降低，油膜厚度逐渐变薄。离溢油

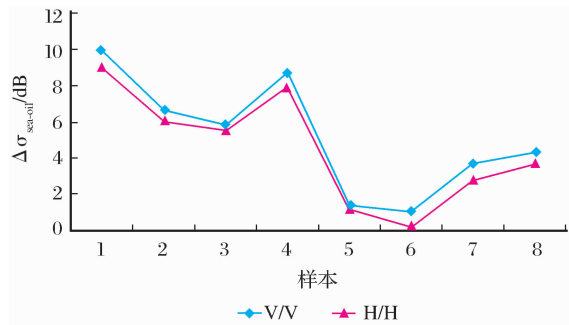


图 3 H/H 和 V/V 极化油膜后向散射系数衰减示意
Fig. 3 Backscatter coefficient attenuation of oil slick with polarization of H/H and V/V

(3)风场数据处理

将 Quick Scat 卫星的风场数据转换成矢量格式，获得风向及风速信息。由于溢油海域范围较大，计算溢油海域的平均风场信息，获得溢油期间连续风场变化信息。

6 结果分析

6.1 油膜雷达后向散射变化特征

3 期检测数据如图 2(a)、图 2(b)、图 2(c)，3 月 23 日数据距离溢油发生时间最近，海况稳定，油膜扩展充分，以 3 月 23 日 V/V 极化数据为基础分析油膜雷达散射特征。根据油膜对雷达后向散射系数衰减程度由高到低将油膜海域分为红、黄、绿 3 个等级，分割节点定位 7 和 12，其衰减信息分布如图 4。

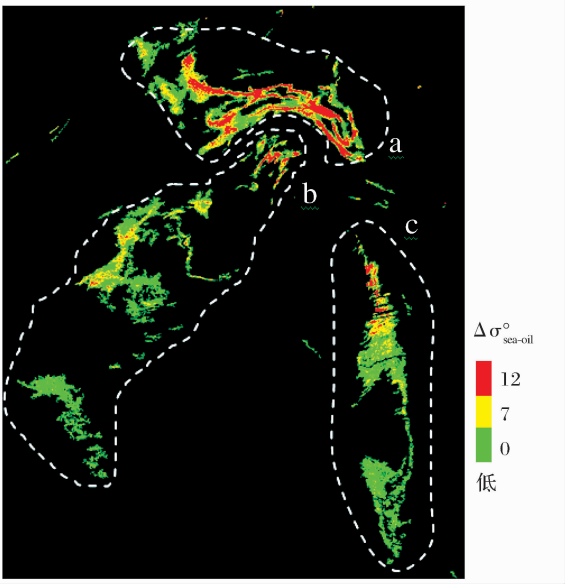


图 4 3 月 23 日油膜后向散射系数衰减分布图
Fig. 4 Backscatter coefficient attenuation distribution of oil slick on 23rd March 2006

源点越近,形成的油膜越厚,对海面波的抑制作用越强。3块油膜后向散射特征变化的方向性规律表明3块油膜由交汇处向另一侧扩散的趋势。分析溢油源大致分布在3块油膜交汇处海域,a块油膜形成时间晚于b、c块油膜。

6.2 油膜扩散趋势分析

图5、图6反映3月15日至4月12日期间溢油海域风场信息。横轴为时间轴,“3.21D”代表3月21日降轨数据,“A”代表升轨数据,纵轴分别代表溢油海域

的平均风向与平均风速。风向角度为从北顺时针旋转至风向的角度,正南风风向 0° ,正西风风向 90° 。

(1) 3月23日数据

3月15日至23日期间,溢油海域风速处于 $3\sim 8\text{ m/s}$ 之间,风向以南风(西南风或东南风)为主。只有3月17日晚和22日晚刮东北风,3月23日上午风向转为东南风。雷达数据显示b、c块油膜向南扩展漂移,a块油膜向北扩展漂移,这与风向由东北风转为西南风的变化规律相吻合。数据获取时刻,

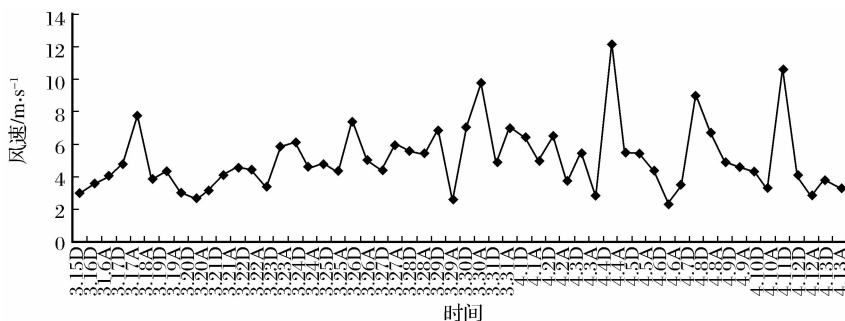


图5 3月15日至4月12日期间平均风速

Fig. 5 Average wind speed from 15th March to 12th April 2006

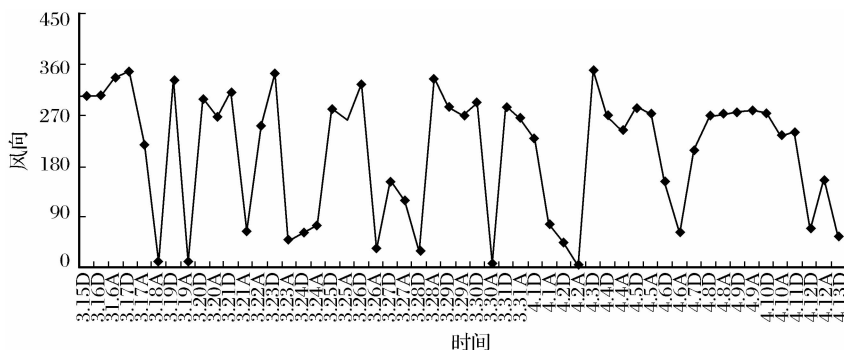


图6 3月15日至4月12日期间平均风向

Fig. 6 Average wind direction from 15th March to 12th April 2006

溢油油膜形态规整,扩展充分,虽然面积很大,但还未完全分散开,分析溢油油膜处于扩展阶段,溢油发生时间不是很长。据此推测溢油发生于3月22日。

(2) 4月1日数据

3月23日至4月1日期间,海域内风速主要在 $3\sim 8\text{ m/s}$ 之间,只有3月30日晚达 9.7 m/s 。海域内除3月27日刮西北风外,主要以东风和南风为主。这段时间风场条件支持油膜主要向北漂移的运动趋势。距离3月23日检测数据已有9d时间间隔,雷达数据显示在北部沿岸附近海域可见大量小型油膜,溢油油膜已经进入随流漂移阶段。当天海域风速并不大,在 $5\sim 6.4\text{ m/s}$ 之间,但图像显示当时海面风浪很大,分析与当天风向从东北风转为西

南风,发生较大变化有关。

(3) 4月11日数据

4月2日至4月11日期间,海域内仍以东风和南风为主,只有6、7日上午刮西北风和东北风,4月10日晚至4月11日,海域内盛行东北风,风速在11日达 10.7 m/s 。因此,4月11日图像显示当时海面粗糙度较大。风场条件分析这段时间油膜继续向西及北漂移为主。又经过10d,雷达图像中油膜已大量集中于北部沿岸海域。

3期检测数据提取油膜矢量信息见图7(a)、图7(b)、图7(c)。3张图清晰显示在溢油油膜近20d时间里由南向北、由东向西、由海洋向陆地扩散漂移的运动规律。油膜在运动过程中遇到陆地阻挡后,

分为两部分,小部分油膜沿陆地岸边向北运动,由于沿途阻碍小,有继续向北漂移的趋势,大部分油膜沿

陆地岸边向西运动,遇到岛礁等地形阻碍,在局部海流系统作用下,围绕地形障碍物呈汇集趋势。

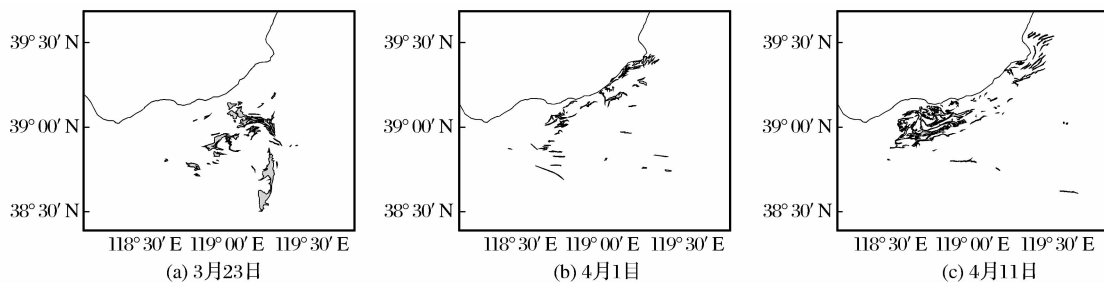


图 7 油膜分布图

Fig. 7 Oil slick distribution

6.3 油膜扩散过程中的尺度变化

对 3 期检测数据提取油膜矢量的面积和周长进行统计,结果见表 1。海面油膜数量在此期间由 35 块增加到 139 块,面积由 337.1 km^2 逐渐减少至 223.88 km^2 。其中,4 月 11 日油膜面积比 4 月 1 日有所增加,主要由于当时海面风浪较大,降低表面油膜对海面波阻尼作用,影响 SAR 检测能力所致。风浪区海域内已无法清晰显示油膜,在风浪区边缘海域却可以看到大量破碎油膜,实际当天海面油膜面积应大于雷达数据检测到油膜面积。

3 期数据单块油膜平均面积、平均周长及面积与周长的标准方差指示大多数油膜面积与周长的分布范围。与 3 月 23 日相比,4 月 1 日及 4 月 11 日油膜尺寸明显减小。3 月 23 日小于 1 km^2 的油膜有 16 块,占油膜总数的 45.71%,面积仅占总面积的 2.94%,而大于 10 km^2 的油膜只有 6 块,面积却占到油膜总面积的 82.58%。到 4 月 11 日小于 1 km^2 油膜数量增加 5 倍多,大于 10 km^2 的油膜数量与面积不断减小,从 278.3865 km^2 减少到 85.8006 km^2 。

统计数据表明,溢油期间油膜在风场、流场及自身扩散作用下经历不断被切割破碎过程,在海上停留时间越长,油膜破碎度越高,经历由完整大块被打散成大量小型条带状的变化过程。3 月 23 日数据中油膜仍处于扩展阶段,4 月 1 日及 4 月 11 日数据中油膜已被打碎进入随流漂移阶段。

7 结 语

研究中 3 期检测数据间隔近 20 d,仍能清晰检测到大量溢油油膜,表明溢油规模较大,油品粘稠度高,不易蒸发,检测数据记录了溢油油膜在海上扩散不同阶段的瞬间状态,因此,本文从油膜雷达散射特征、扩散过程中油膜尺度变化以及油膜运动规律 3

方面对污染油膜进行深入分析,总结以下认识:

(1) 溢油油膜在海上主要经历重力扩展、剪切扩展和随流漂移 3 个阶段,不同阶段油膜在海上的形态、分布特点不尽相同,具有不同的 SAR 图像特征。第一阶段油膜由于形成时间短,受风、流影响小,离溢油源最近,油膜形态比较完整,没有分散;第二阶段油膜与第一阶段油膜很难有明确的界限划分,相比较而言,油膜扩展更充分,受风、流影响大,形态比较完整,但在风、流作用下,可能会分散为相对完整的大块油膜,油膜分布与风、流变化具有相关性;第三阶段油膜最典型的特征就是油膜已被完全打散,破碎度高。溢油扩散在海上经历的具体阶段不完全统一,根据实际海况而定。根据雷达数据中溢油油膜的完整性及展布方式,借助风场信息有助于分析溢油所处扩散阶段,推算溢油发生的时间。

(2) 在相同海况、相同油种情况下,同次成因形成油膜的雷达后向散射特征变化与油膜厚度具有相关性。因此,对于具有一定面积的污染油膜,可以通过其雷达散射特征分析溢油源分布,但这种分析方法只适用于油膜扩散的第一、二阶段。第三阶段的油膜由于破碎、分散,其后向散射特征只能反映零散油膜自身的变化,且因随流漂移,已不能客观反映溢油发生时油膜的整体信息。

(3) 连续风场数据在油膜扩散分析中起到积极作用,但风场信息不能完全反映 SAR 图像中的海面状况(如 4 月 1 日图像),因为海面状况受风、浪、流的共同调制。研究中对流场、浪场对油膜运动的影响考虑不足。同时,风场数据的时间密度略粗,影响油膜扩散分析客观性与准确性。

利用 SAR 数据不仅可以检测是否发生溢油,还可以根据油膜后向散射特征变化规律,结合相关辅助信息,分析溢油源的大致分布,估测溢油发生的时

间,监测溢油的扩散。但检测效果受 SAR 图像获取时油膜所处扩散阶段限制,不同扩散阶段数据只能起到相应的检测作用。可以通过多颗卫星平台获取 SAR 数据的组合应用加密检测数据时间分辨率,提高 SAR 数据在溢油检测中的应用效果。

参考文献:

- [1] Girard-Ardhuin F, Mercier G, Garello R. Oil Slick Detection by SAR Imagery: Potential and Limitation[C]//Oceans 2003 Proceedings, 2003, (1): 164-169.
- [2] Fingas M F, Brown C E. Review of Oil Spill Remote Sensing[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1997, 4(4): 199-208.
- [3] Brekke C, Solberg A H S. Oil Spill Detection by Satellite Remote Sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 2005, 95(1): 1-13.
- [4] Nirchio F. Automatic Detection of Oil Spills from SAR Images [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(6): 1157-1174.
- [5] Lu J. Marine Oil Spill Detection, Statistics and Mapping with ERS SAR Imagery in South-East Asia[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(9): 1619-1638.
- [6] Fiscella B, Giancaspro A, Nirchio F, *et al.* Oil Spill Detection Using Marine SAR Images[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(18): 3561-3566.
- [7] Liu Weifeng, Song Yinglan. Study and Improvement of Oil Spill Simulation Methods[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2009, 3: 90-97. [刘伟峰, 孙英兰. 海上溢油运动数值模拟方法的探讨与改进[J]. 华东师范大学学报, 2009, (3): 90-97.]
- [8] Reed M, Johansen O, Brandvik P J, *et al.* Oil Spill Modeling towards the Close of the 20th Century: Overview of the State of the Art[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1999, 5(1): 3-16.
- [9] Fay J A. Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface[C]//Proceedings of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills, 1971: 463-367.
- [10] Witte F. The Archimedes Ila Experiment: Remote Sensing of Oil Spills in the North Sea[J]. International Journal of Remote Sensing, 1991, 12(4): 809-821.
- [11] Huhnerfuss H, Alpers W, Witte F. Layers of Different Thickness in Mineral Oil Spills Detected by Grey Level Textures of Real Aperture Radar Images[J]. International Journal of Remote Sensing, 1989, 10(6): 1093-1099.
- [12] Wismann V. Radar Signatures of Marine Mineral Oil Spills Measured by an Airborne Multi-frequency Radar[J]. International Journal of Remote Sensing, 1998, 1(18): 3607-3623.
- [13] Espedal H A, Wahl T. Satellite SAR Oil Spill Detection Using Wind History Information[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(1): 49-65.
- [14] Jones B. A Comparison of Visual Observations of Surface Oil with Synthetic Aperture Radar Imagery of the Sea Empress Oil Spill [J]. International Journal of Remote Sensing, 1986, 7(8): 1001-1013.
- [15] Liu Dong. Characteristic Experiment of Spread and Transport of oil Spill in Tidal River [J]. Journal of Hydrodynamics, 2006, 21(6): 744-751. [刘栋. 感潮河道溢油扩展、漂移特性实验[J]. 水动力学研究与进展, 2006, 21(6): 744-751.]
- [16] Valenzuela G R. Theories for the Interaction of Electromagnetic and Oceanic Waves-A Review[J]. Boundary-Layer Meteorology, 1978, 13: 61-85.
- [17] Gade M, Ufermann S. Using ERS-2 SAR Images for Routine Observation of Marine Pollution in European Coastal Waters [C]//Proceedings of IGARSS98, 1998, 2: 757-759.

Analysis on Radar Backscatter Feature and Evolution of Ocean Pollution Oil Slick with ENVISat SAR

LIU Yang^{1,2}, SHAO Yun¹, YU Wu-yi², QI Xiao-ping¹

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100080, China)

Abstract: It has great significance for controlling the influence of oil spill to get pollution oil slick information promptly. Due to its all day-night and all-weather capability, space-borne synthetic aperture radar (SAR) has been proven to be a useful tool for ocean oil spill monitoring. Taking an oil pollution accident occurred in Bohai Sea as study case, this paper puts emphasis on studying radar backscatter feature and the evolution of pollution oil slicks. The potential oil spill source area was deduced by analyzing the change of backscatter values of slicks. The obtained oil spill information was integrated with continuous wind field data to study the evolution of the slicks and its size change during the period. The results show that the corresponding methods should be applied in the different evolution phases for the different SAR image feature of oil slicks. It is possible to monitor and predict the movement of the slicks with consecutive radar imagery combining with additional information.

Key words: Pollution oil slick; SAR detection; Backscatter feature; Evolution