

# 海上溢油量评估方法研究综述

宋莎莎, 安伟, 李建伟, 赵宇鹏, 靳卫卫

(中海油能源发展股份有限公司安全环保分公司, 天津塘沽 300452)

**摘要:**近年来,国内外海上溢油污染事故的频发,使得全社会对海洋污染的关注不断升温。海上溢油量是评价海上溢油事故威胁程度和确定溢油事故等级的重要指标,也是污染赔偿追责的重要依据,同时对于现场溢油应急处置和科学决策也有重要作用。本文总结分析了目前主要的 4 种海上溢油量初步评估方法,包括质量平衡法、工艺流程法、现场观测法和数值模拟法。不同溢油量估算方法适用的溢油源和溢油方式各有不同,估算的溢油量也不尽相同。实际应用中,通常根据具体情况选择多种方法进行溢油量综合评估。本文从实际应用出发,探讨几种可用的溢油量评估方法,并结合案例进行说明。

**关键词:**海上溢油;溢油量;评估

**中图分类号:**X55

**文献标识码:**A

**文章编号:**1002-3682(2017)01-0083-06

**doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2017.01.009

在溢油事故中,溢油量的确定是事故处置的关键环节之一,为污损对象的确定以及损害评估提供基础数据支持<sup>[1-4]</sup>。同时,溢油量也是确定溢油事故等级的重要指标。国内溢油级别按照溢油量确定:溢油量 10 t 以下为小型溢油事故;10~100 t 为中型溢油事故;100 t 以上为大型溢油事故。

溢油量估算是一项复杂而具有挑战性的工作。一般而言,溢油事故由于原因复杂,无法直接通过体积计量等技术手段对溢油量进行精确计算。通常选用一定的技术方法来对溢油量进行估算。由于实际溢油事故应急处置中所保存和掌握的现场资料有限,并不能满足所有估算方法对于基础数据的需求,同时有些基础数据也因为时间、地点、海况等多方面原因不能够完全达到使用要求。实际应用中,通常根据事故的具体情况选择一种或多种估算方法进行综合评估。从墨西哥湾事故溢油量估算的结果来看,应用不同方法得出的结果有所差异,但基本上分歧不大<sup>[5]</sup>。如果溢油量估算过程中因方法选择不同出现最终结果差别较大,则需进一步探讨方法选择以及相应基础数据之间的匹配性、参数选择的合理性等。

海上溢油源主要包括船舶泄漏、管线泄漏、平台泄漏、储油设施泄漏等。不同的溢油源适用的油量估算方法也不同。船舶泄漏可通过事故调查、沉船点流量动态方法,利用监测结果评估总体溢油量,也有通过数值模拟方法精细计算船舶溢油过程中的泄漏量<sup>[6-7]</sup>。管线溢油评估方法包括:基于统计学方法、量纲分析法的溢油量总体评估,以及全过程泄漏量预测<sup>[8]</sup>。平台泄漏可通过油藏工程对溢油量进行初步评估<sup>[9]</sup>,也可基于现场观测设备获取数据进行评估分析。储罐设施泄漏可通过泄漏前后储量差进行估算。

## 1 溢油量评估方法

溢油量评估方法总结归纳为质量平衡法、工艺流程法、观测评估法、数值模拟法。各种估算方法的原理、需要的支持数据和应用的溢油类型各不相同。溢油量估算在事故总体评估和应急处置中都发挥着不可忽视

**收稿日期:**2016-11-03

**资助项目:**中国海洋石油总公司科技项目——海上溢油卫星自动识别和预警业务化系统研发(CNOOC-KJ 125 ZDXM 25JAB NFCY 2012-01)

**作者简介:**宋莎莎(1989-),女,工程师,硕士,主要从事海洋溢油污染防治方面研究.E-mail:songshsh2@cnooc.com.cn

(李燕 编辑)

的重要作用。

### 1.1 质量平衡法

质量平衡溢油量估算模型<sup>[5]</sup>,根据溢油在海洋环境中的行为与归宿,溢油总量包括海面残留量、风化过程中减少的量以及回收处理的量。

石油溢入海洋之后,经历漂移、扩散和风化等复杂的物理、化学和生物变化过程,同时在应急反应中会采取各种方法对溢油进行回收和处理,溢油在整个过程中遵循质量平衡原理,并最终从海洋环境中消失。

质量平衡溢油量估算是根据溢油在海洋环境中的行为与归宿,将各个过程中估算的溢油量相加,得到的油量和即为溢油总量,包括海面的溢油量、回收处理的溢油量以及风化(主要指蒸发、溶解和分散)过程中减少的溢油量,其关键在于对溢油在海洋环境中去向的分析与估算。

#### 1.1.1 海面现场溢油量估算

海面现场溢油量可根据海面油膜厚度和监测技术获取的海面油膜面积以及溢油品种的密度计算。将海面溢油区域根据油膜颜色划分为若干区域,基于各区域油膜面积和对应的油膜厚度计算溢油量,公式为

$$G = \sum_{i=1}^n S_i \times H_i \times \rho, \quad (1)$$

式中, $G$  为海面现场溢油量; $S_i$  为第  $i$  种颜色的油膜面积; $H_i$  为第  $i$  种颜色的油膜厚度; $\rho$  为油品密度; $n$  为油膜颜色的数量。

油膜面积通过现场观测、卫星遥感、航空遥感等多种监测技术获得;基于光学遥感和超声波原理的激光声学遥感器是最具发展潜力的油膜厚度测量技术<sup>[10]</sup>,但目前可操作性差。构建油膜扩展模型来估算油膜厚度需进一步试验应用验证<sup>[11]</sup>,目前常用的方法是通过监测技术获得的油膜颜色,并根据波恩协议油膜颜色与厚度的对应关系(表 1)获得厚度。综上利用监视监测信息,获取油膜面积,结合现场油膜颜色(图 1)对应的油膜厚度,计算海面现场溢油量。

表 1 溢油油膜颜色与厚度、体积实验关系<sup>[12]</sup>

Table 1 Experimental relationship between the oil slick color and the thickness and volume of the oil spill<sup>[12]</sup>

序 号	油膜颜色	大致厚度/ $\mu\text{m}$	大致体积/ $\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$
1	银灰色	0.02~0.05	0.02~0.05
2	灰色	0.1	0.1
3	彩虹色	0.3	0.3
4	蓝色	1.0	1.0
5	蓝褐色	5	5
6	褐色	15	15
7	黑色	20	20
8	黑褐色	100	100
9	桔色(巧克力色)	1 000~4 000	1 000~4 000

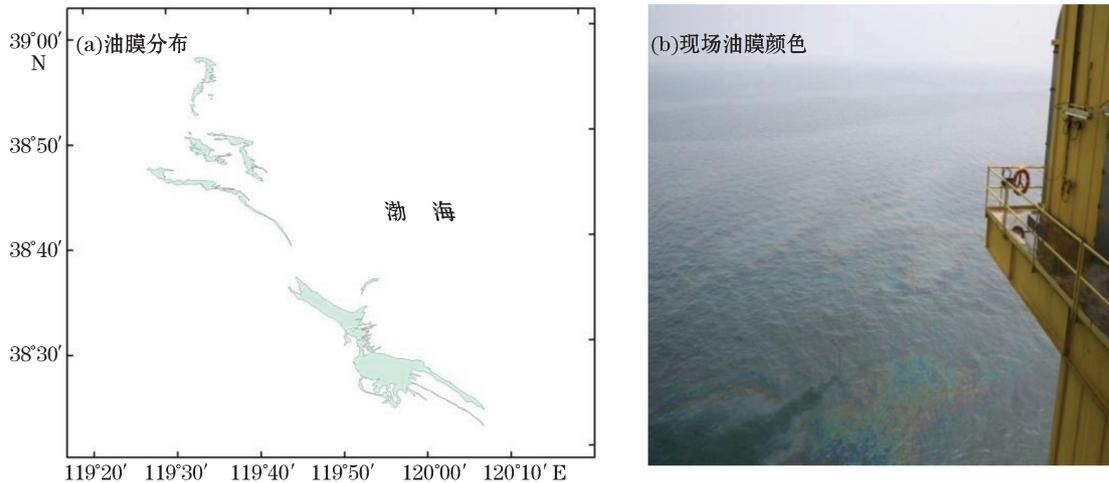


图 1 某次溢油过程利用遥感方法识别的油膜和现场油膜颜色

Fig.1 The oil slick identified by remote sensing and the in situ color of oil in an oil spill process

### 1.1.2 风化溢油量估算

风化溢油量主要考虑蒸发过程,通过实验模拟和数值模拟方法,建立风化溢油量估算方法。根据国内常见油品类型开展实验,对蒸发模型参数进行校正以弥补模型准确性的不足。溢油蒸发模型<sup>[13]</sup>:

$$F_v = \ln\left[1 + B' \frac{T_G}{T} \theta' \exp\left(A' - B' \frac{T_0}{T}\right)\right] \frac{T}{B' T_G}, \quad (2)$$

式中,  $F_v$  为蒸发油的体积分数;  $T$  为环境温度;  $A'$ ,  $B'$ ,  $T_0$ ,  $T_G$  为各种依赖于油品的常数;  $\theta'$  为挥发系数。  $T_G$  为蒸馏曲线的梯度,  $T_0$  为油 ( $F_v=0$ ) 的初始沸点温度, 这些参数都取决于油品属性, 通过蒸馏实验获得, 国内油品缺少这两个参数, 特别是  $T_G$ , 基本没有提到过。按照经验公式得到的计算结果与实验结果差距较大, 造成蒸发量计算结果误差较大。利用波浪槽模拟装置, 对中国近海油品进行实验, 修正蒸发模型。

通过试验, 发现水中溶解、分散的量较低, 通常可以忽略不计。如果一定需要估算, 一方面可以采取试验模拟, 另一方面可根据油品特征, 选取经验值进行估算。

### 1.1.3 溢油回收量估算

建立了不同回收技术(设备)溢油回收量理论计算公式, 溢油回收量根据理论收油效率、收油效率影响因素、设备数量和清污时间计算; 溢油处理量根据理论处理效率、处理效率影响因素、设备或材料数量和清污时间计算。溢油回收(处理)总量:  $M = M_{\text{实收}} + M_{\text{消油剂}} + M_{\text{吸油材料}}$ 。

## 1.2 工艺流程法

在工程数据如钻完井数据可获取的条件下, 工艺流程法是一种快捷、简单的方法。对于船舶溢油来说, 可根据船舶装卸载量差计算泄漏量。如溢油事故发生在输油期间, 可根据输油速率和输油时间估算泄露量<sup>[14]</sup>。当然, 突发事故中, 常常因资料有限, 无法应用该方法估计泄漏量。对于油井平台泄漏, 可采用油藏工程法。应用油气藏地质模型、开采日志、钻完井工程记录、压力、体积、温度数据、岩芯样品和模拟油藏数据开展油藏建模, 并进行溢油量估算。油藏工程方法选用的原则是, 根据实际资料情况, 选用资料丰富、落实程度较高的方法, 尽可能减少方法的假设前提条件, 使估算结果减少人为因素。经典的油藏工程方法参数包括采油强度、比采油指数、溢油时间等。

采油强度是指单位油层有效厚度的日产油量叫采油强度。计算方法: 采油强度 = 油井日产油量 / 油井油层有效厚度。比采油指数: 单位生产压差下每米有效厚度的日产油量, 是一个反映油层特性、流体性质、完井条件及泄油面积等与产量之间关系的综合指标。

### 1.3 观测评估法

观测评估法利用海洋观测设备,如多波束声呐、声学流速剖面仪等,对溢油面积和溢油速率进行测量估算,在此基础上进行溢油量的估算。观测评估法对观测设备要求较高,同时,在实际事故中,要考虑与应急处置的平衡,尽量不影响应急处置。

#### 1.3.1 光学估计法

粒子图像测速法是一种流体动力学技术,通过对 2 个连续的视频帧进行观察,并校正观察角度等因素,分析时间视频帧之间的移动距离可以得出流速,并通过在一段时间和空间内重复测量,获得平均流速,最后使用平均流速乘以羽流的断面面积等于体积流量,得到溢油量。

粒子图像测速技术使用微小固体颗粒进行测量,这些颗粒使用激光照射并在非常短时间的曝光条件下记录流速。由于流体中各处流速并不一致,必须对多个位置进行取样来评估平均流速。同样,截面面积受时间、空间和分散边界的影响,需要根据测速区的位置计算平均截面积。在每个测速区计算矢量流速,计算平均流速,结合平均截面积,便可估算出油气净流量<sup>[5]</sup>。

#### 1.3.2 声学估计法

声学估计法利用声呐测量溢油羽流横截面面积,用多普勒海流剖面仪测量流速。估计的流速和面积相乘得出总的体积(原油和天然气)流量。墨西哥湾溢油中美国海岸警卫队支持伍兹霍尔海洋研究所研究人员,在工作级水下机器人上安装 1.8 MHz 多波束成像声纳和 1.2 MHz 声学多普勒海流剖面仪,进行漏油量估计<sup>[6]</sup>。

### 1.4 数值模拟法

数值模拟是建立在水动力基础之上,包括三维水动力模型、对流散模型、水质模型等,该方法已经广泛应用于潮流、泥沙运输和沉积等过程的模拟和事故分析中<sup>[12,15]</sup>:一方面,在已知源强或假设源强的基础上,数值模拟方法可以对不同物理性质的污染物的浓度分布及扩散范围进行预测,并探讨污染物对事故海域造成的海洋环境影响;另一方面,在有实测数据的前提下,利用数值模拟方法可以反推污染物源强,解决污染物排放位置和强度等问题。由于海洋水动力环境和污染物扩散过程的复杂性,必须通过布点合理,多组、连续的监测数据,才可以利用数值模拟的方法较为准确地反推污染物排放源强。

以上溢油量估算方法中,质量平衡估算法可操作性高,但更适用于海面溢油量估算,对于水下溢油,特别是深水水下溢油事故,缺乏对于水下羽状流、沉底油的估算,容易导致估算溢油量偏低。工艺流程法基于工程数据,不需要开展现场试验采集数据,但缺乏数据则无法应用。观测评估法需在泄漏位置附近开展测量,特别是声纳方法应用要求高,需专业化海洋设备和水下工作机器人搭载,且设备调配布放均需时间,适于连续溢油情况。数值模拟方法,需配合布控监测数据,才能反推出溢油量,应用限制也较多。

此外,上述估算方法一方面可应用于溢油事故后评估,估算溢油总量;另一方面,质量平衡法中海面现场残余油量的估算、工艺流程法、观测评估法都可以为溢油应急处置和清污作业过程中清污资源调配与决策提供科学参考。针对各种溢油源,供参考的溢油量估算方法见表 2。

表 2 不同溢油源对应的溢油量估算方法

Table 2 Estimation method for oil spill volume corresponding to different oil spill sources

溢油源	溢出方式	
	一次性溢油	连续溢油
船舶泄漏	工艺流程、数值模拟、质量平衡	工艺流程、质量平衡、观测评估、数值模拟
管线泄漏	工艺流程、数值模拟、质量平衡	工艺流程、数值模拟、观测评估、质量平衡
平台泄漏	质量平衡、工艺流程、数值模拟	质量平衡、工艺流程、观测评估、数值模拟
储油设施泄漏	工艺流程	工艺流程

## 2 溢油量估算案例

为加深对上述溢油量估算方法的理解,下面对质量平衡法和工艺流程法给出简单的溢油量估算应用案例。由于观测评估法需专业监测设备,数值模拟法需布控监测数据的配合,这里就不再具体给出应用案例。

### 2.1 质量平衡法案例

假定一简单溢油场景进行应用,实际溢油事故中需根据具体情况进行综合评估。某一次性溢油事故中,事发约 48 h 后获取了海面溢油遥感影像。此时,现场通过收油机、吸油材料回收,并经油水分离<sup>[16]</sup>,实际回收溢油约 0.5 m<sup>3</sup>。

#### 1) 溢油实际回收量

考虑现场通过收油机、吸油材料回收,并经油水分离,现场实际回收溢油约 0.5 m<sup>3</sup>。

#### 2) 海面现场残余油量估算

根据遥感影像识别油膜面积约为 20.8 km<sup>2</sup>,现场照片显示除漏油点附近有一黑色细长油膜条带,油膜颜色以银白色和灰色为主,偶见彩虹色油膜。因此海面油量估算时选取油膜厚度:银白色油膜厚度 0.02~0.05 μm,取高值 0.05 μm,灰色油膜厚度 0.1 μm;银白色油膜占海面油膜约 80%,彩虹色约 20%。估算海面现场溢油量约为

$$20.8 \text{ km}^2 \times 0.05 \mu\text{m} \times 80\% + 20.8 \text{ km}^2 \times 0.1 \mu\text{m} \times 20\% = 1.3 \text{ m}^3. \quad (3)$$

#### 3) 风化溢油量估算

为估算风化溢油量,综合考虑各实验方法,采用在容器中进行基础静态实验和在波浪槽内模拟动态实验的方法。对溢油样品进行了 48 h 实验,综合静态和动态实验得到油挥发率约为 55%,即海面现场残余油量和实际回收量约为 45%。据此计算风化油量为

$$\frac{1.3+0.5}{45\%} \times 55\% = 2.2 \text{ m}^3. \quad (4)$$

综上,质量平衡法估算的总溢油量为 1.3+0.5+2.2=4.0 m<sup>3</sup>。由于未考虑沉底溢油或上岸溢油,估算的溢油量可能偏低。

### 2.2 工艺流程法案例

2005-01-02,利比亚籍油轮 Alyarmouk 与新加坡籍散货船 Sinar Kapuas 在新加坡海域相撞,导致 Alyarmouk 油轮一个油舱受损,管理 Alyarmouk 的 V. Ships UK Ltd 公司估计有 4 500 t(33 000 桶)的马都拉原油从油舱中泄漏出来([http://www.cnss.com.cn/html/2015/currentevents\\_0104/166012.html](http://www.cnss.com.cn/html/2015/currentevents_0104/166012.html))。其溢油量通过油舱仓容、载货量、卸货量估算,一般得到的是最少溢油量,误差视具体情况而定。

## 3 结 论

本文总结了质量平衡法、工艺流程法、观测评估法、数值模拟法四种溢油量估算方法。考虑到溢油事故的复杂性和极端环境溢油事故,实际应用中根据具体情况进行综合评估,为事故应急决策和事故评估提供重要支持。对于船舶、平台和管线的一次性泄漏,由于调用观测设备时间较长,需要一定的准备时间和设备调试时间,通常考虑工艺流程法、质量平衡法和数值模拟法;对于连续性溢油,各种方法都可考虑。船舶和管线泄漏时,首先考虑工艺流程法,其次考虑其他方法。平台泄漏,特别是溢油量较大时,采用多种方法进行估算,综合比较确定估算的溢油量。对于储油设施泄漏,通常基于泄漏前后储量差估算。

## 参考文献:

- [1] 于春艳, 梁斌, 韩庚辰, 等. 海洋溢油生态损害评估程序及方法探讨[J]. 海洋开发与管理, 2015, 32(1): 92-96.
- [2] 刘伟峰, 臧家业, 刘玮, 等. 海洋溢油生态损害评估方法研究进展[J]. 水生态学, 2014, 35(1): 96-100.
- [3] 许文彬, 莫好容. 三都澳油品泊位溢油风险对大黄鱼保护区影响的预测分析[J]. 海岸工程, 2014, 33(4): 71-82.
- [4] 高振会, 杨建强, 王培刚. 海洋溢油生态损害评估的理论、方法及案例研究[M]. 北京: 海洋出版社, 2007.
- [5] MCNUTT M, CAMILLI R, GUTHRIE G, et al. Assessment of flow rate estimates for the deepwater horizon oil spill[R]. US: Department of the Interior, 2011: 8-20.
- [6] 赵谱. 我国船舶溢油污染事故溢油量评估方法及其应用[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(4): 469-472.
- [7] 许颖. 船舶溢油过程及溢油量的精细计算的方法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
- [8] 李长俊, 刘刚. 考虑阀门关断的海底管道溢油量预测方法[J]. 世界科技研究与发展, 2016, 38(3): 550-555.
- [9] 王世宗, 战昭君. 海上某复杂断块油藏最大可能溢油量估算[J]. 重庆科技学院学报, 2013, 15(1): 120-123.
- [10] 吴晓丹, 宋金明, 李学刚, 等. 海上溢油量获取的技术方法[J]. 海洋技术, 2011, 30(2): 50-54, 58.
- [11] 吴晓丹, 宋金明, 李学刚, 等. 海洋溢油油膜厚度影响因素理论模型的构建[J]. 海洋科学, 2011, 34(2): 68-74.
- [12] 中华人民共和国国家海洋局. 海洋溢油生态损害评估技术导则: HY/T 095—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [13] STRIVER W, MACKAY D. Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixture[J]. Environmental Science & Technology, 1984, 18(11): 834-840.
- [14] 马厚璘, 张士魁, 王振先, 等. 海上溢油分类和其运动规律以及溢油量、污染量的估算[J]. 环境与可持续发展, 1989, 14(7): 12-14.
- [15] 宋莎莎, 赵宇鹏, 安伟, 等. 海上溢油 SAR 遥感监测及溢油漂移快速数值预报技术研究[J]. 海洋科学进展, 2016, 34(1): 138-146.
- [16] 张春昌, 靳卫卫, 韩龙, 等. 水上溢油回收分离、临时存储及转运能力定量关系研究[J]. 海岸工程, 2015, 34(1): 41-46.

## Review on the Methods for Assessment of Marine Oil Spill Volume

SONG Sha-sha, AN Wei, LI Jian-wei, ZHAO Yu-peng, JIN Wei-wei  
(CNOOC EnerTech-Safety & Environmental Protection Co., Tanggu 300452, China)

**Abstract:** In recent years the pollution caused by marine oil spill occurs frequently at home and abroad, which has made the whole society pay much attention to the marine pollution. The marine oil spill volume is not only an important index for evaluating the threat degree of marine oil spill accident and determining the grade of oil spill accident, but also an important basis for pollution compensation and accountability. Also, it plays an important role for the in-situ oil spill response and scientific decision making. Several major methods for preliminary evaluation of marine oil spill volume are summarized and analyzed, which include mass balance method, technical process method, field observation method and numerical simulation method. Different methods are suitable for different sources and ways of oil spill so that the estimated oil spill volume is usually not the same. In the practical application, it is common to select multiple methods for the comprehensive assessment of oil spill volume according to the concrete conditions. For practical application, several methods available for the assessment of oil spill volume are discussed and illustrated by combination with practical cases.

**Key words:** marine oil spill; oil spill volume; assessment

**Received:** November 3, 2016