

## 胶州湾溢油污染研究\*

吴永成 翁学传 杨玉玲

(中国科学院海洋研究所)

韩 忠 祥

(北海监测监视中心)

青岛港黄岛油区建成投产后,在扩大石油进出口量的同时,也使事故溢油污染概率增大,对胶州湾海水环境造成了威胁。从已经发生的油污染事件看,溢油多数是由于油船海损,其次是港口机具或储油设备损坏造成的。由于溢油多数是突然发生,在短时间内将大量石油泄漏海中,造成大面积海面或海滩油污染。溢油污染不但造成直接经济损失,而且油污染较长时间内难以清除干净,对海洋生态环境、沿岸旅游环境和社会环境都产生恶劣的影响,因此溢油污染危害早已引起青岛市有关部门的重视,先后开展了油污染监测和预报工作。本文根据胶州湾及邻近海域事故溢油污染预警、预报的需要,给出预报模型和典型天气下黄岛油区溢油行为和污染范围的预测,对有效地预防溢油污染和制定抢救、回收措施及方案提供了重要依据。

### 一、胶州湾溢油污染概况

自黄岛油区一期工程投产至今 20 余年来,在胶州湾及邻近海域共发生溢油污染 200 多次,其中油船事故占 4/6,油区事故占 1/6,其他占 1/6。溢油量一次超过 30t 的事故有 11 次,其中 9 次为油船事故,2 次为油区事故。溢油量最多的是 1983 年 11 月 25 日巴拿马籍油轮“东方大使”号在中沙礁触礁,至 12 月 2 日堵漏成功,7 天共溢油 3300 余吨入海。尽管当时大力围拦,先后回收溢油的 60% 左右,但由于溢油发生在初冬,气温和海水温度都较低,原油风化较慢,大量原油在潮流和偏北风的作用下扩展和输移较快,半天多时间油块就到达中沙礁东南方的团岛湾,并在沿岸堆积成 1.4km 长,30m 宽的油污带,成为这次溢油污染最重的区域。然而此次溢油的危害并未结束,26 日由于西风风速加大到 10m/s 左右,油块又在潮流和风的作用下南移到薛家岛湾和后又湾等海滩,形成了 3.3km 长,25m 宽的油污带,至 27 日北风风速减小,又出现短时南风,随潮流输移到湾外的部分原油受南风作用向青岛市东海岸移动,结果造成从湾内的团岛湾至湾外崂山头 230km 长海岸线被原油污染的严重后果。此次溢油直接经济损失达 1700 余万元,至于对沿岸旅游、

\* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 2659 号。

收稿日期: 1995 年 1 月 24 日。

养殖业等造成的影响和损失就很难统计了。其后,1984年9月巴西籍油轮“加翠”号触礁,溢油760余吨,污染海岸线长达130km;1988年8月黄岛油库爆炸溢油630余吨,污染海岸线长约100km。仅从以上三例即可见溢油污染对胶州湾及邻近海域危害之大,足以引起人们对溢油污染防治的重视。

## 二、溢油污染预测模型

溢油污染产生的危害是多方面的,其中危害最大的是物理影响,所以本文主要研究溢油物理影响模型。

**1. 扩展** 鉴于胶州湾以往发生的溢油几乎全部属于点源连续排放,因此采用 Fay (1969)给出的溢油在平静水面上分三阶段扩展式,并加以适当修改如下:

重力-惯性力阶段

$$R_1 = K_1(\Delta g Q t^3)^{1/4} \quad (1)$$

重力-粘性力阶段

$$R_2 = K_2(\Delta g Q^2 t^{7/2} / \nu^{1/2})^{1/6} \quad (2)$$

粘性力-表面张力阶段

$$R_3 = K_3[\sigma^2 t^3 / (\rho_0^2 \nu)]^{1/4} \quad (3)$$

式中,  $R_1, R_2, R_3$  为三个阶段油膜扩展半径;  $K_1, K_2, K_3$  为三个阶段扩展系数,根据实验求得。

$$\Delta = 1 - \rho_o / \rho_w$$

$\rho_o, \rho_w$  为油和水的密度,  $Q$  为溢油量,  $t$  为溢油历经时间,  $\nu$  为海水运动粘性系数,  $\sigma$  为表面张力。

近年来一些学者,如 Lehr (1988) 根据海面风对油膜扩展影响较大,提出考虑风因子的椭圆扩展 Fay 修正计算式。我们通过分析和试算,认为他所给出的修正式在量纲上不统一,概念上不明确,经验性过大,同时计算精度提高有限,故未采用。

**2. 输移** 溢油在海面上的输移是指其油膜中心的水平移动,输移速度为

$$\vec{U}_D = \alpha \vec{U}_w + \vec{U}_t + \vec{U}_r + \vec{U}_R \quad (4)$$

式中,  $\vec{U}_w, \vec{U}_t, \vec{U}_r, \vec{U}_R$  为风、潮流、余流和随机流的速度;  $\alpha$  为风因子系数,一般为 0.02—0.05,本文根据胶州湾风情和青岛海洋大学水槽实验数据取  $\alpha = 0.03$ 。式(4)中各项速度的计算方法如下:

(1) 风速 ( $U_w$ ): 风速指海面上 10m 高处实测值,当计算海域面积较大,不能用单站实测值时,若有多站实测值,则可用陆上观测风线性插值法求海面上的平均风速。若有三站资料时,可用下式求风速

$$u_w(x, y) = a_1 x + b_1 y + c_1 \quad (5)$$

$$v_w(x, y) = a_2 x + b_2 y + c_2 \quad (6)$$

式中  $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$  可用下式求得

$$\begin{bmatrix} u_w & x_1 & y_1 \\ u_w & x_2 & y_2 \\ u_w & x_3 & y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} v_w & x_1 & y_1 \\ v_w & x_2 & y_2 \\ v_w & x_3 & y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

若计算域周围没有实测值,也可通过风场数值计算来求风速。选择胶州湾风速时,我们曾选用青岛、胶南和小麦岛 3 个站实测值插值求取,结果和青岛单站风速差小于 20%,故实际计算时只以青岛站平均风速为准。

(2) 潮流流速 ( $U_t$ ): 由于胶州湾各处潮流流速和流向差别较大,本文使用的海面潮流场是通过海洋动力学方程式数值计算给出的[具体计算见(吴永成,1992)],但考虑到所利用的为二维模型,计算给出的流速为全水深垂直平均值,它比实际海面流速偏小,故根据经验将其乘上 1.2 倍,加以订正,取做  $U_t$ 。计算给出的胶州湾潮流场如图 1 所示。

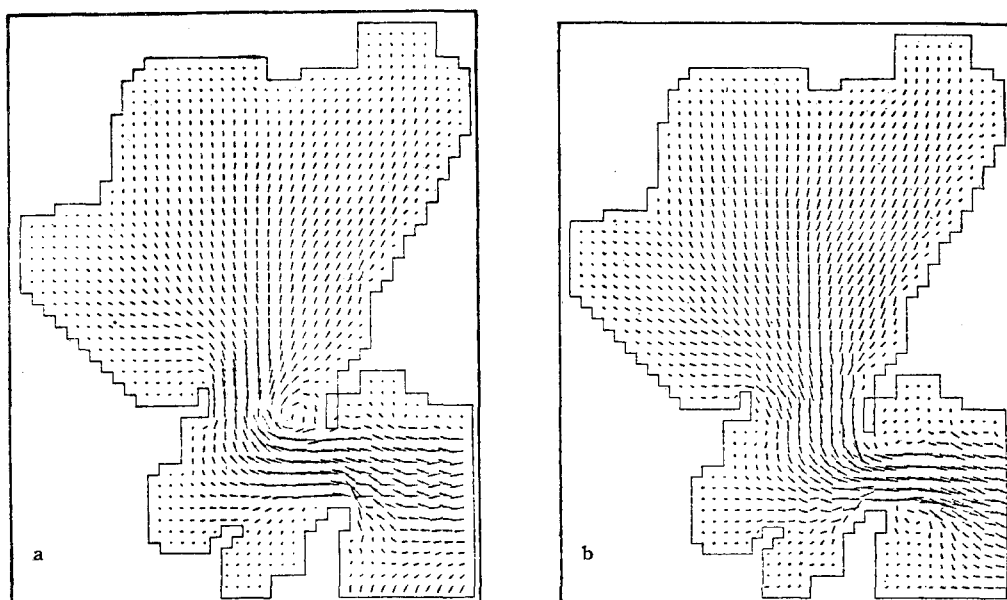


图 1 潮流流场图

a. 时间为  $(1/12)T$ ; b. 时间为  $(7/12)T$  ( $T$  为潮周期)

(3) 余流流速 ( $U_r$ ): 根据多次海上调查资料分析,我们认为胶州湾及邻近海域的余流主要是潮余流,其他成分都可忽略不计,故本文计算中只考虑潮余流。潮余流是在计算  $U_t$  时一起算出来的(图 2)。

(4) 随机流流速 ( $U_R$ ): 随机流流速采用下式计算

$$U_R = R_x(2K_x\Delta t) \quad (9)$$

$$V_R = R_y(2K_y\Delta t) \quad (10)$$

式中,  $U_R, V_R$  为  $x$  和  $y$  方向的随机流流速,  $R_x, R_y$  为随机数,平均值为零,方差为 1,  $K_x, K_y$  为  $x$  和  $y$  方向的扩散系数。本文采用实验值。

我们通过试算,发现  $U_R$  和  $V_R$  均较小,故正式计算中未考虑。

**3. 溢油风化** 溢油在海面和海水中的存在量是多种因素的函数, 主要与油的风化

(蒸发、溶解和分解等)有关。本文主要依据曹祖德<sup>1)</sup>建议的方法计算。

(1) 蒸发: 基于质量守恒, 并假设溢油在海面上服从一级衰减规律, 则蒸发计算式可写为:

$$dQ_1/dt = -K_o U_w A(t) \quad (11)$$

式中,  $Q_1$  为溢油蒸发量,  $U_w$  为风速,  $A(t)$  为油膜面积。  $K_o$  为蒸发系数, 与油的组分等有关, 可用下式求得

$$K_o = (7.4 \times 10^{-3} + 1.87 \times 10^{-3} U_w) \cdot P_i M_o / (RT \delta \rho_o) \quad (12)$$

式中,  $P_i$  为  $i$  组分的蒸气压,  $M_o$  为油分子量,  $R$  为气体常数,  $T$  为油的温度,  $\delta$  为油膜主要部分的厚度,  $\rho_o$  为油的密度。粗算时多取  $K_o$  为常数。

(2) 溶解: 溢油的溶解是其各组分由表面悬浮状态向水中转化的质量输送。溶解速度取决于油的成分和理化特性等, 一般应用下式计算

$$dQ_2/dt = -K \rho_o A(t) S \quad (13)$$

式中,  $Q_2$  为溶解量,  $K$  为溶解系数,  $S$  为油的溶解度。

$$S = S_o \exp(-\alpha t) \quad (14)$$

$S_o$  为原油溶解度,  $\alpha$  为衰减系数, 由实验中求得;  $t$  为衰减时间。我国北方各主要油田原油的溶解度如表 1 所示。

表 1 我国原油溶解度

| 产 地         | 大庆油田 | 胜利油田 | 渤海油田 | 辽河油田 | 大港油田 |
|-------------|------|------|------|------|------|
| 饱和溶解度(mg/L) | 1    | 5    | 2    | 4    | 2    |

(3) 分解: 当溢油油膜破碎变成油滴进入海水中便产生分解、乳化和沉降等过程, 因为这些变化过程极其复杂, 至今还无法给出其各自的计算式, 故本文将它们统一视为油滴入水量来加以考虑, 并用下式计算

$$dQ_3/dt = -NQ \quad (15)$$

式中,  $N$  为在单位时间内油膜破碎机率, 它与破碎波有关

$$N = 1/(4T) \times 10^{-4} \quad (16)$$

$T$  为波浪周期,  $Q_3$  为入水的油量,  $Q$  为溢油在海面上残存量。

上面三种风化计算式的右侧均为负值, 是代表溢油在海面的减小量。当  $Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$  时, 海面油量为—恒值, 在这种情况下, 油膜扩展半径达最大值, 计算式为

1) 曹祖德等, 1986, 三维潮流数学模型及油膜输移扩散的数值计算, 天津水运工程研究所(内部资料)。

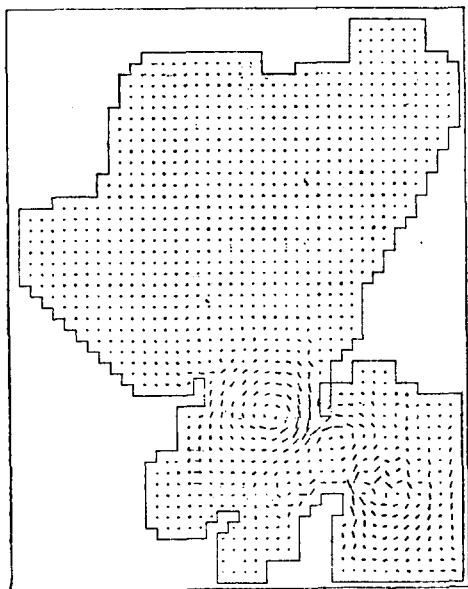


图 2 余流流场图

$$R_{\max} = \sqrt{10^5/\pi} V^{3/4} \quad (17)$$

当扩展半径  $R$  超过  $R_{\max}$  时,油膜已不是大片连续,而是破裂成许多小碎片,即进入到通称的第四阶段了。目前习惯上将前三阶段溢油污染区称重油污染区或主要油膜区,第四阶段以后称轻油污染区或油影响区。

**4. 油膜扩展阶段判别** 在计算油膜扩展时,首先应判断溢油处于那种扩展阶段,才能决定所应用的计算式,曹祖德等<sup>1)</sup>(1986)根据油膜各阶段扩展的极限导出判断时间式为第一阶段结束时间

$$T_1 = (K_2/K_1)^{1/6} Q^{1/2} (\Delta g \nu)^{-1/2} \quad (18)$$

第二阶段结束时间

$$T_2 = (K_2/K_3)^{1/6} Q^2 g \Delta \rho_0^3 \nu \sigma^{-3} \quad (19)$$

第三阶段结束时间利用  $R_{\max}$  判断即可,当扩展半径  $R_3 > R_{\max}$  时,即进入第四阶段了。

**5. 油滴扩散** 在波浪和湍流等的不断作用下,油膜破裂成碎片后逐渐变成油滴,并被卷入海水中,其中较大油滴还可能重新回到海面,而小油滴即永远留在水中,在潮流等作用下作扩散运动。如进入海水中的油量为前面计算中给出的  $Q_2$  与  $Q_3$  之和,扩散则可利用常用的物质扩散方程式计算给出。应该指出的是计算中应考虑源强项  $S$  在水中的衰减变化。具体计算见另文(吴永成等,1995)。

**6. 溢油污染范围和中心位置** 由于油膜污染比油滴污染影响大得多,因此目前许多资料所指的溢油污染多指油膜污染。油膜污染范围系指溢油油膜扩展和输移两种运动的覆盖的海面面积。该面积是油膜不同瞬时扩展圆片叠加的包络面积。油膜扩展和输移过程中,各瞬时的扩展半径和输移速度前面已给出,其中心位置可依据下式求出:

$$X_n^{n+1} = X_n^n + U_n^{n+1} \Delta t \quad (20)$$

$$Y_n^{n+1} = Y_n^n + V_n^{n+1} \Delta t \quad (21)$$

应当指出,这里给出的油膜中心位置( $X_n, Y_n$ )并不一定和潮流数值计算网格点重合,因此当不重合时,公式中的  $U_n^{n+1}$  和  $V_n^{n+1}$  的值应根据所在位置( $X_n, Y_n$ )处于潮流计算网格的位置及周围四角结点上流速进行线性插值求出。

### 三、胶州湾及邻近海域溢油污染分析

胶州湾岸线曲折、地形多变,加上海上风情和海况复杂,因此目前对溢油行为和变化规律还了解不多。笔者利用所建立的溢油数学模型,首先模拟了“东方大使”号溢油污染状况,验证了模型的正确性后,预测了几种天气下溢油对胶州湾及邻近海域污染状况。模拟的结果是:溢油初期,在风速为 5m/s 的西北风作用下,溢油在中沙礁入海后 4h 即输移、扩展到团岛湾,后又在落潮流挟带下移出胶州湾口(图 3);若风向不变则油膜向东输移;如转东南风或偏南风时,油膜则逐渐向汇泉湾和燕儿岛湾靠近(图略)。这些结果和当时现场调查结果吻合较好,说明所建立的模型是正确的。为了了解不同天气下溢油行为和规律,我们还进行了东北、西南、东南等风向溢油污染状况计算。计算中为便于对比,令

1) 同28页。

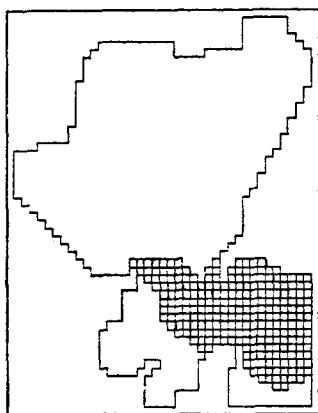


图3 NW向风时溢油污染状况  
（“东方大使”号溢油污染状况）

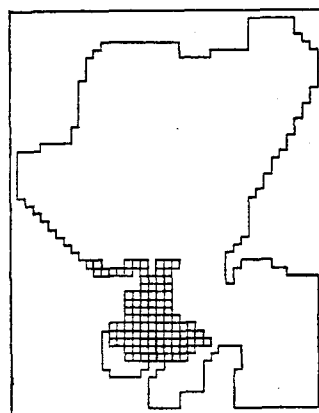


图4 NE向风时溢油污染状况

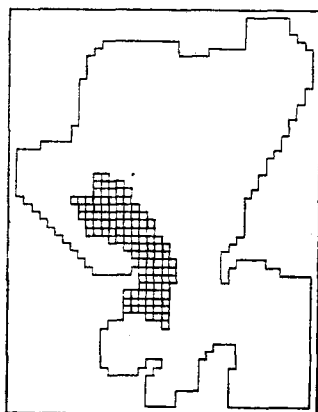


图5 SE向风时溢油污染状况

风速为 $5\text{m/s}$ ,溢油量为 $500\text{t}$ ,溢油点在中沙礁,其他参数均不变。从计算结果(图3—5)可以看出,风向对溢油行为有重要影响:如同为溢油后 $7\text{h}$ ,当刮东北风时溢油输移到胶州湾南部的前湾和薛家岛湾;而刮东南风时溢油输移到大沽河口至红岛沿岸;刮西南风时,溢油则可输移到沧口至黄岛湾沿岸。我们还计算了无风和风速小于 $5\text{m/s}$ 时的两种情况,结果指出,溢油输移速度和污染范围明显减小,溢油输移方向和潮流流向类似,不过当风速大于 $4\text{m/s}$ 时,风引起的输移明显大于潮流影响。

#### 四、结 论

(1) 本文给出的溢油数值模型可以较好地模拟和预测在胶州湾及邻近海域的溢油行为和污染范围。

(2) 在胶州湾及邻近海域的溢油行为和污染范围与当时风情,特别是与风向关系密切。当风速小于 $4\text{m/s}$ 时,则风影响小于潮流作用,溢油输移速度和污染范围明显变小。

(3) 当改变某些边界等条件时,本文给出的数学模型也可应用到其他海区。

#### 参 考 文 献

- 吴永成等,1992,胶州湾海水交换和混合扩散,胶州湾生态学和生物资源,科学出版社,57—72。  
 吴永成等,1995,事故溢油对胶州湾水环境污染浅析,胶州湾生态学研究,科学出版社,71—81。  
 Lehr, W. J. (张法高、王文素译),1988,用变形 Fay 扩散公式估算初始漏油量的一种新方法,海洋科学译报,90—95。  
 Fay, J. A., 1969, Oil spill intelligence report, Oil on the Sea, Plenum Press, 55—63。

## PREDICTION FOR OIL SLICK POLLUTION IN JIAOZHOU BAY\*

Wu Yongcheng, Weng Xuechuan and Yang Yuling

*(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences)*

Han Zhongxiang

*(North Sea Survey & Surveillance Center, SOA)*

### ABSTRACT

This paper presents numerical modelling (on the spread, transport and ageing of the oil slick from an accidental oil spill in the center of Jiaozhou Bay under NE, SW, SE and SW winds) showing that when wind speed is greater than 5m/s, winds exert greater effect than tides on the oil slick; and that if wind changes its direction from N to S during the time of the oil spill, the oil slick will spread to most parts of the east coast of Qingdao.

---

\* Contribution No. 2659 from Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences.