

石油在海洋中扩散漂移的研讨

万肇忠

(广东省环境保护研究所)

石油在海洋中的扩散漂移,一般可有三种类型:①固定点源的连续扩散漂移,如井喷等;②运动点源的连续扩散漂移,如航船的漏油等;③点源非连续扩散漂移,如船舶非法的“瞬时”倾倒含油废水等。

本文通过实验观测,重点讨论了点源非连续溢油的油膜面积和厚度、扩散漂移模式,进而推导了点源(固定与非固定)连续溢油情形下的油膜漂移模式。并根据这种扩散漂移模式,寻找污染的来龙去脉,确定油污的种类、数量及其影响范围,从而达到防污染的目的。

0号柴油和汽油,在 1.5×4.0 米²水池中作了试验(以自来水作载体)。从文献[1]和我们的结果都表明:当石油扩散达到最大面积之前,扩散速度随时间的增加而变慢(见表1和图1—4)。这种规律可用下式表示:

$$U_{0t} = at^{-\beta} (\beta > 0) \quad (1)$$

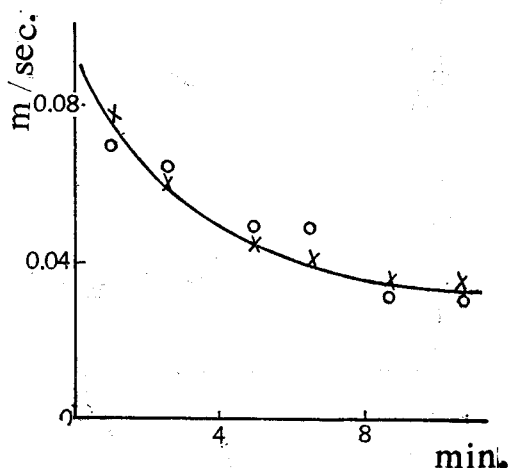


图1 30号机油

一、扩散速度随时间变化的规律

石油及其产品(以下称石油,前述亦同)在无风无流洁净水面上散逸开来的现象,称为扩散;此时的石油运动速度,称为扩散速度。

为了弄清油类扩散运动的规律,笔者除研究了文献[1]所提供的情况外,还特地选择了

表1 若干油类的扩散速度经验式

油种类	溢油量	扩散速度式	相关系数	单位		备注
				U_{0t}	t	
胜利原油 ¹⁾	0.5l	$U_{0t} = 0.093t^{-0.67}$	-1.01	m/sec.	min.	点源非连续溢油
30号机油 ²⁾		$U_{0t} = 0.048t^{-0.38}$	-0.92			
0号柴油	5 ml	$U_{0t} = 14.6t^{-0.44}$	-0.99	cm/sec.	sec.	
汽油		$U_{0t} = 29.2t^{-0.52}$	-0.98			
废油	900 l	$U_{0t} = 0.022t^{-0.51}$	-0.91	m/sec.	hr.	根据文献[1]的图转换而成
中东原油	100m ³	$U_{0t} = 0.58t^{-0.80}$	-1.00		min.	
中东原油	78m ³	$U_{0t} = 0.42t^{-0.66}$	-0.99			

1), 2) 在游泳池中做的试验。

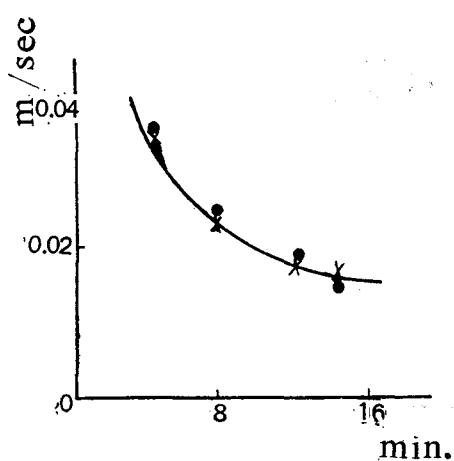


图2 胜利原油

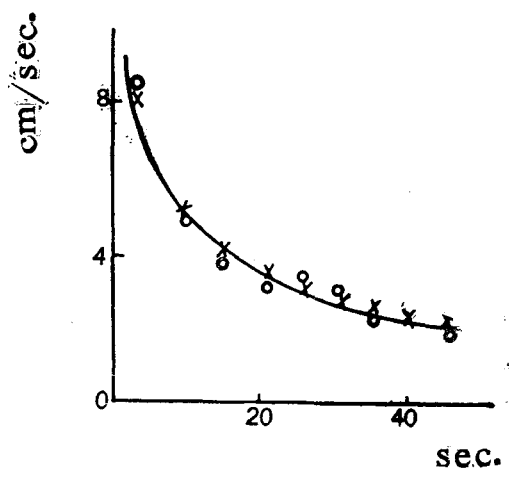


图3 0号柴油

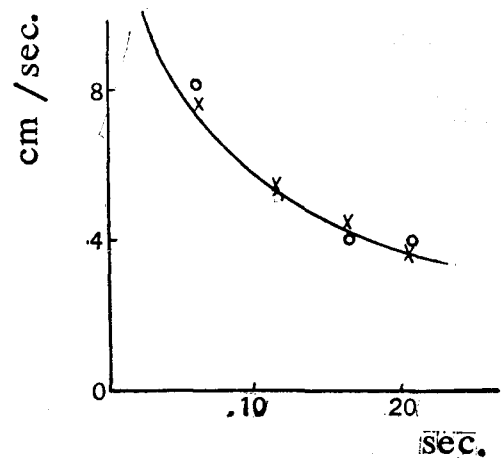


图4 汽油

上述四个图中：×为经验公式计算值；○为实测值。

式中， α 和 β 为待定系数，它们取决于油类、油量和溢油方式； U_0 为 t 时的扩散速度。

若干油类在不同油量、不同溢油方式下的扩散运动，见表2和图5。

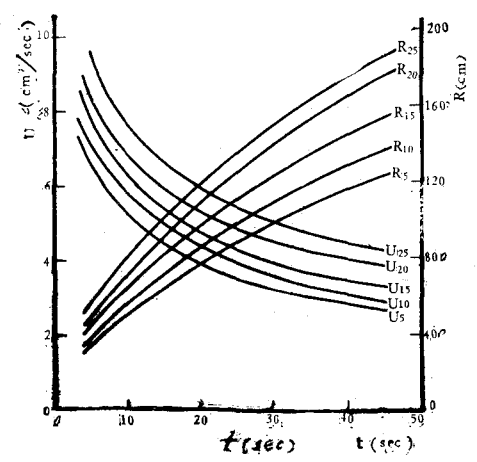


图5 不同油量(0号柴油)下的扩散(瞬时溢油)

R_{5-25} ， U_{5-25} 中的5—25表示油量(ml)； R 为扩散半径； U 为扩散速度。

从表2可以初步看到：①当溢油方式为固定点源的瞬时倾油时， α 和 β 均依赖于油类和油量，但是， α 随油量的增加而增加，而 β 则随油量的增加而减少。比重小的油，其 α 值大些(即，扩散快些)、 β 值也大些(即，扩散衰减快些)，这可能与它们的粘度和挥发性的不同有关。我们还发现，挥发特别快的汽油，其油膜损失特别快、扩散速度下降得也快。这可能是因为：挥发产生的对油膜的作用力随挥发速率的增大而增大，从而阻碍油的扩散；②当溢油方式为固定点源的连续溢油(固定溢油孔径)时， α 仅依赖于油类而不依赖于油量， β 则随油量的增加而减少。

图5表明：在相同溢油方式和同一扩散时间内，扩散速度和扩散半径都随油量的增加而增加。

二、扩散面积的估算

石油在水平面上以同心圆形式向四周扩散。为此，国外一些学者提出了如下几种计算

表2 若干油类在不同油量、不同溢油方式下的扩散速度 (单位: $U_{0t}=cm/sec.$, $t=sec.$)

油种类	溢油量 (ml)	扩散速度经验式	相关系数	比重	溢油方式	试验者
0号柴油	5	$U_{0t}=14.6t^{-0.44}$	-0.99	0.876	固定点源的瞬时倾油 (即: 固定点源非连续的溢油)	本文笔者
	10	$U_{0t}=15.7t^{-0.43}$	-0.98			
	15	$U_{0t}=16.4t^{-0.41}$	-0.98			
	20	$U_{0t}=17.2t^{-0.39}$	-0.99			
	25	$U_{0t}=20.9t^{-0.42}$	-0.97			
汽油	5	$U_{0t}=29.2t^{-0.52}$	-0.98	0.732		
	10	$U_{0t}=31.3t^{-0.50}$	-0.99			
	15	$U_{0t}=32.6t^{-0.51}$	-0.98			
	20	$U_{0t}=34.0t^{-0.45}$	-0.99			
50号机油	5	$U_{0t}=13t^{-0.38}$		0.912	固定点源的固定溢油孔径的放油 (具有短暂连续溢油性质)	1)
	10	$U_{0t}=13t^{-0.35}$				
	15	$U_{0t}=13t^{-0.30}$				
	20	$U_{0t}=13t^{-0.29}$				
	25	$U_{0t}=13t^{-0.29}$				
胜利原油	5	$U_{0t}=12t^{-0.35}$		0.9078		
	10	$U_{0t}=12t^{-0.31}$				
	15	$U_{0t}=12t^{-0.29}$				
	20	$U_{0t}=12t^{-0.30}$				

1) 黄礼贤、万肇忠, 1982. 环境科学丛刊 1:7-12。

油膜半径的经验公式:

元应辉重提出, 石油流出的初期扩散半径 R_{∞} ^[1]为:

$$R_{\infty} = V^{\frac{1}{3}} \left(\frac{5\sqrt{g}}{\eta c} \frac{\beta}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{1-\rho}}{R_0} \right)^{1/5} \quad (2)$$

式中, R_{∞} 为稳定后的圆形半径, V 为体积, η 为粘滞系数, ρ 为比重, R_0 为初始半径, β 和 c 为待定常数。

元良^[3]认为, 油流出后的扩散半径 R_t 为:

$$R_t = \sqrt{2 \sqrt{\frac{9V}{\pi}} t + R_0^2} \quad (3)$$

而经过相当时间后的扩散半径则为:

$$R_t = 8 \sqrt{\frac{16gV^3}{\pi^3 c^3 \nu} t + R_0^8} \quad (4)$$

在(3), (4)式中: R_t 为任意时间 t 时油的半

径; V 为 $V_0 \left(\frac{\rho_w}{\rho_0} \right)$, V_0 为油的总量, ρ_0 为油的比重, ρ_w 为海水的比重, c 为速度梯度系数 (1-0), ν 为油的动粘度 ($10^{-5}m^2/sec.$), g 为重力加速度 ($9.8m/sec.^2$)。

许多学者^[3,7]认为, 在风和流作用较小情况下, 扩散半径可按Blokker公式计算:

$$D^3 - D_0^3 = \frac{24}{\pi} K(d_w - d_0) \frac{d_0}{d_w} V_0 t \quad (5)$$

式中: D_0 为 $t=0$ 时的油膜直径, D 为 $t=t$ 时的油膜直径, d_w 和 d_0 分别为水和油的比重, V_0 为油的总量(体积), K 为常数 (中东原油为15000)。

从(2)到(5)式可以看到, 扩散半径是时间的函数。从这些式子可推求油膜面积。但由于其亦要从实验来确定式中的经验常数, 所以上述四式仍有其局限性。既然如此, 直接

根据扩散速度随时间而变化的经验式，也可简便地通过求扩散半径来推求扩散面积。于是，任一时刻的油扩散半径（或称油膜半径。上、下文均同）为：

$$R_t = U_0 t \quad (6)$$

由此式计算出来的半径，与我们实测的结果基本一致，见表3。

表3 扩散半径经验式（0号柴油）

溢油方式	溢油量 (ml)	按(6)式计算		
		实 测		相 关 系 数
		扩散半径经验式		
点的源瞬非时连续油	5	$R_t = 14.9t^{0.56}$	$R_t = 14.6t^{0.56}$	0.98
	10	$R_t = 15.7t^{0.57}$	$R_t = 15.7t^{0.57}$	0.99
	15	$R_t = 16.4t^{0.59}$	$R_t = 16.4t^{0.58}$	0.99
	20	$R_t = 17.2t^{0.61}$	$R_t = 17.1t^{0.60}$	0.99
	25	$R_t = 20.9t^{0.58}$	$R_t = 20.8t^{0.57}$	0.97

从表1到表3可见，扩散半径与扩散速度均具有与时间成指数变化的类似性质。不同的是：扩散半径随时间的增加而增大，而扩散速度则随时间的增加而减慢；当扩散半径达到最大时，扩散速度等于零。

据上述，我们可以近似地求出静态或近静态条件下的油膜面积。然而，由于现实的海洋是千变万化的，因之，石油在海洋中的扩散漂移运动，势必受到风、海流、潮流、波浪、水温、盐度、密度、海底地形等等因素的影响^[2-4]。例如，当波浪产生的力大于油分子间的拉力（内摩擦力）时，油膜就可能被波浪冲破而变成许多面积大小不一、形状不一的油膜，从而对估算油膜面积产生困难。但是，作为一种近似的描述和推算，我们可以将复杂的海况简化成仅是风和流对石油扩散漂移的影响（事实上，其它一些因素的影响，可认为已被归并到（1）式中的 α 和 β 以及（9）式中的 b 值中了）；而且根据质量守恒原理，也可以近似地将原来油膜的计算结果看成是碎裂油膜的集合。于是，根据石油的扩散漂移性质（见本文“四”），在海洋中漂移油膜的面积，可按下来估算：

$$A_t = \pi \theta R_t^2 = \pi \theta \alpha^2 t^{2(1-\beta)} \quad (7)$$

式中， θ 为压缩系数，即以半径 R_t 为圆油膜的压缩系数。无风无流时， $\theta=1.0$ 。在石油污染监测的实际工作中，相应于油膜达到最大面积时的压缩系数 θ_{min} ，具有最实用的意义。

三、油膜厚度的估算

在前述工作基础上，漂移油膜的厚度，可按下列式估算：

$$d_t = \frac{G}{\pi \theta \rho \alpha^2} t^{-2(1-\beta)} \quad (8)$$

式中， G 和 ρ 分别为溢出油的重量和密度。可见，油膜厚度也是时间的函数。油膜厚度与油膜颜色关系的推荐值见文献^[5,7]。

四、计算机模拟石油扩散漂移模式

D. P. Hoult提出，石油在海洋中的运动，可用下列式描述：

$$\vec{U}_t = \vec{U}_{水流} + b \vec{U}_{风} \quad (9)$$

式中， \vec{U}_t 为油的运动速度矢量； b 为经验系数，D. P. Hoult测得 $b=0.035$ 。这个式子对于寻找石油污染的来龙去脉，是有相当价值的。但是，它对于石油在海洋中的扩散漂移运动来说，还有不足的地方，而且对于判定和解析扩散漂移油膜的性质来说，也还不够理想。

根据笔者的观察研究，当石油流入海洋之后，其扩散漂移运动过程包括石油自身迅速向四周扩散，以及石油在扩散的同时，主要受流和风的作用。因之，流出油在海洋中的扩散漂移运动（注：（9）式描述的仅仅是漂移情况），一般可视为分阶段进行的。

第一阶段，当流入水体的石油扩散达到最大稳定面积之前或瞬间，石油（或油膜，下同）的扩散漂移运动受石油自身扩散和流与风的混合作用，即，此时的运动是扩散加漂移的运动。用下列式来描述：

$$\vec{U}_t = \vec{U}_{ot} + \vec{U}_{水流} + b\vec{U}_{风} \quad (10)$$

式中, \vec{U}_t 为石油的扩散漂移速度矢量; \vec{U}_{ot} , $\vec{U}_{水流}$ 和 $\vec{U}_{风}$ 分别为石油自身扩散、水流和风的矢量; b 为待定常数。 b 可实测得到, 称之为风对油膜运动的作用系数, 主要取决于风、油类和水体性质。一般认为, b 值在 0.02—0.05 之间^[1-3]; 而我们在江口海区测得的 b 平均值为 0.035^[1], 并经 t 检验法使我们可断言: 在 95% 置信度要求下, 真值 b 落在 0.006—0.062 的区间里。此结果与 D. P. Hoult 等所测一致。

这一阶段, 是估算油膜面积、厚度和估定油膜初期形状的重要阶段, 但, 其经历的时间往往较短。在此阶段中, 油膜就逐渐从圆转变成椭圆、再变成扁椭圆。

必须注意的是, (10) 式不仅仅是数学模式, 而且更重要的是物理模式。

第二阶段, 当油膜扩散达到最大稳定面积后, $U_{ot} = 0$, 此时, 油膜的扩散漂移运动就完全转变成漂移运动了。于是, (10) 式即变成 (9) 式。

这一阶段, 是决定油膜漂移运动的主要阶段; 又由于此阶段经历的时间长, 所以, 也是观察油膜形状的主要阶段。在此阶段中, 油膜在日光、波浪、细菌等等因素的作用下, 油膜的边缘逐渐破碎、缩小, 直至最后消失。

据文献(1)的航空摄影表述, 油膜是以椭圆状漂移的; 而我国海洋科学工作者, 曾观察到“十几海里长、一海里多宽, 并聚积于流线上”的长条形漂浮油。然而, 扩散漂移油膜的形状究竟如何? 是怎样漂移的? 为弄清这些, 笔者用电子计算机模拟了在恒风恒流情况下的固定点源瞬时溢油的油膜扩散漂移模型(图6), 并以此类推了固定点源连续溢油的油膜扩散漂移模型, 从而有可能解析上面提出的问题。

模拟计算结果表明: 对于固定点源非连续溢油来说, 随着扩散漂移时间的增加, 油膜逐渐由圆转变成椭圆, 油膜面积也逐渐增大, 椭

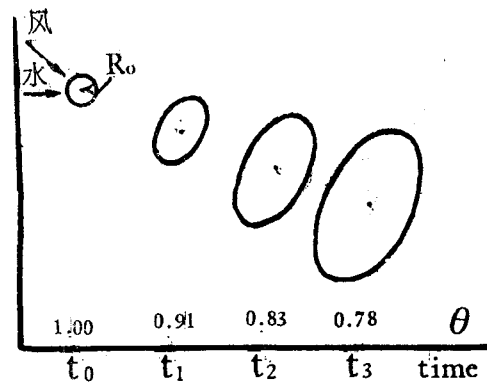


图6 油膜漂移模型

圆的长半轴与短半轴之比也有规律地增加, 并且长半轴按顺时针方向缓慢地向油膜漂移方向略有偏转。当油膜达到最大时, 压缩系数最小, 油自身扩散即告停止, 油膜成理想的长条形(即: 扁或极扁的椭圆形); 当油膜达到最大之后, 在各种自然条件, 特别是海流、潮流的作用下, 长条形的油膜就可能形成所谓的“蛇形”运动^[3,4], 油膜朝水流和风的合力方向漂去。

对于固定点源的连续溢油来说, 由于在漂移方向上, 溢油时间是连续的, 因之, 每一时刻扩散漂移油膜的“迭加”(相当于漂移速度对时间的积分)结果, 就形成所谓的“油带”(见图7)。其长度可按下式来估算:

$$L_t = R_0 + U_t t \quad (11)$$

或

$$L_t = R_0 + \int_0^t U_t dt \quad (12)$$

式中, t 为连续溢油时间, R_0 为初始扩散半径, U_t 为扩散漂移速度。

油带的宽度主要取决于第一阶段完成的瞬间。确切地说, 当扩散面积达到最大的瞬间(如图7中的 t_m) 时, 从 t_0 到 t_m 内, 油带宽度按“梯形”状从小 ($2R_0$) 变大 ($2R_m$); 在 t_m 之后, 油带宽度将因各种原因而从 $2R_m$ 逐

1) 黄礼贤、万肇忠, 1982. 环境科学丛刊 1:7

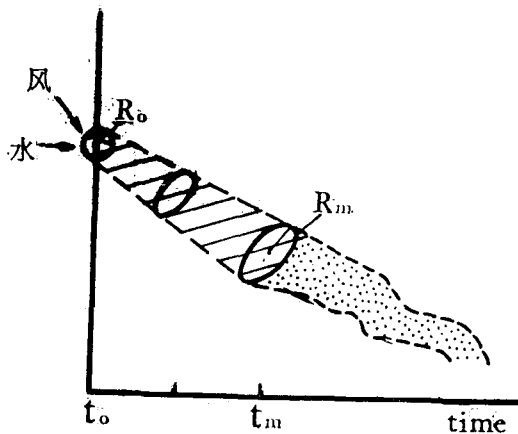


图7 漂移油带

渐变小。

运动点源的溢油情况，还有待探讨。

五、结 论

自然界的情况是复杂的，用一个数学式子把这些复杂的诸因子都包揽无遗，是很难的。因此，用一种近似的方法来研究问题，是有意义的。

对石油在海洋中扩散漂移的研究结果如下：

固定点源瞬时溢油的石油扩散漂移模型是椭圆状的；固定点源连续溢油的扩散漂移模型是条带状或蛇形的。并根据这些模式，可以粗略判断溢油的类型、油量和溢油的时间。

根据扩散漂移模式 ((9), (10)), 既用来寻找石油污染源 (甚至是沉没的油船), 也可用来追查和预测石油的去向、油量、影响范围等。

石油在海洋中的扩散漂移, 不但与油种类、油量有关, 而且与溢油方式有关, 也与自然条件有关 (其中, 以风、流为最主要)。

比重小的油比比重大的油, 扩散快些; 而挥发性大的油 (如汽油), 其扩散速度下降较快, 扩散面积往往较小, 在水体中停留的时间也较短。

主要参考文献

- [1] 日本水产学会编, 1976. 石油污染と水产生物. 恒星社厚生阁刊, 17—21页; 40—41页。
- [2] 佐佐木忠义等, 1977. 环境工学. 讲谈社サイエンティフィック, 271—281页。
- [3] 小川 胜, 1975. 海洋の油污染. 39—47页。
- [4] 寺本俊彦, 1974. 海洋物理 I (海洋学讲座第1卷). 东京大学出版会, 161—179页。
- [5] 村上彰男, 1977. 沿岸の污染. 筑地书馆, 76页。
- [6] J. Wardley-Smith, 1979. The Control of Oil Pollution on the Sea and Inland Waters. pp. 30—31.
- [7] Нунупаров, С.М., 1979. Предотвращение Загрязнения Моря Судами. стр. 286—288.

A STUDY ON THE DIFFUSION AND DRIFT OF OIL ON THE SEA

Wan Zhaozhong

(Institute of Environmental Protection, Guangdong)

Abstract

The thickness, the spreading area and the model of diffusion of an oil spill from a discontinuous point source were observed through the experiments. Then the model of diffusion and drift of a continuous oil spill from a point source (fixed and unfixed) was derived. By this model we could find the pathway of the pollutants and determine the species being polluted and the range of influence of the oil pollutants, thus attaining the purpose of protection.