

# 石油及其产品在海面上的稀释扩散规律\*

康兴伦 苗绿田<sup>1)</sup> 李培泉 刘玉珊 王品爱  
(中国科学院海洋研究所)

**关键词** 稀释, 扩散

随着石油工业的发展, 油已成为海洋上最主要的污染物之一。我们于1986年7月30日、31日, 8月2日、5日, 1987年5月24日两次在胶州湾进行了六次实验(分别称实验1, 2, 3, 4, 5, 6), 基本上掌握了油在海面上的稀释扩散规律, 为防止油对海洋的污染, 预报污染区域和范围, 提供了可靠的数据。

## 一、海上试验

实验采用以下设备

1. 薛机1号轮、薛机4号轮、海鹰轮、小舢舨数艘。

2. SLCG直读式海流计、风速计。

3. 油膜采集器, 油膜采集器的内径是10cm, 相应的圆面积是78.5cm<sup>2</sup>, 因此, 油膜采集器所采到的是78.5cm<sup>2</sup>油膜的重量。

4. 0号柴油, 20号柴油, 废油, 轻质原油(指漂浮在原油池内的上层原油)。

称取一定数量的油放入大桶内, 将大桶从船上吊到海面, 轻轻拉动大桶底部的拉绳, 使油缓缓流入海洋。油进入海洋后在海面上迅速扩散为油膜。小舢舨跟踪油膜核心的最厚处, 用直径为10cm的油膜采集器采油。将油膜采集器垂直吊入海水中, 使采集器内的聚丙烯纤维与水面保持一致, 停留1分钟, 提上油膜采集器, 取出聚丙烯纤维放入密封的广口瓶内保存。

薛机1号轮定点抛锚, 采样的同时在该船上定时测流、测风, 测量结果见表1, 2。

海鹰轮与小舢舨拉动绳子测量油膜的直径

表1 海流观测结果  
Tab. 1 The sea current

实验序号	时刻 (h:min)	水深 (m)	流向 (°)	流速 (cm/s)
1	12:10	4	15	18
	13:25	4	120	40
	13:45	4	130	46
	14:00	4	140	70
	14:10	4	140	80
2	8:20	1	0	21
	8:30	4	10	45
	8:40	4	30	65
	10:15	3	0	60
	11:05	3	0	42
	11:45	3	0	66
3	12:15	3	0	68
	10:40	2	76	20
	11:20	2	60	36
	11:50	2	72	20
4	12:35	2	0	40
	10:32	2	180	60
	11:00	2	230	100
5	12:00	2	230	35
	13:56	2	260	45
	14:30	2	320	72
	15:00	2	320	102
6	15:25	2	330	70
	13:30	2	290	79
	14:00	2	275	28
	14:30	2	260	12
	15:00	2	300	12

\* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第1566号。

1) 青岛港务局工程师。

表 2 风向风速观测结果  
Tab. 2 The velocity and direction of wind

实验序号	时 刻 (h:min)	风 向 (°)	风 速 (m/s)
1	12:00	158	5.0
	13:00	158	4.0
	14:00	135	3.3
2	9:05	225	2.0
	其余时间均无风		0
3	10:41	340	3.8
	11:15	20	3.8
	11:58	20	4.8
4	10:05	0	2.7
	10:30	0	3.8
	11:40	3	2.3
	12:00	280	1.7
5,6	14:00	135	8.0
	15:00	158	7.0
	16:00	135	10.0
	17:00	135	9.7

(R), 测量结果见表 3。

## 二、室内试验

将采样用的聚丙烯纤维剪成圆片, 直径为 9.5 cm 的圆片, 采样之前准确称重。在采样期聚丙烯纤维吸油且吸水, 因此, 必需设法将油、水分离。本研究采用 3A 型的分子筛进行油、水分离。因聚丙烯纤维在采样期间吸收的是海水, 故干燥后用 100ml 蒸馏水浸泡 3—4 天, 用电导盐度计测量含盐量, 作含盐量校正。六次试验的测量结果见表 2。

## 三、数据处理

1. 将油膜直径  $R$  与相应的时间  $t$  取对数, 1—4 次试验的回归方程分别为:

$$\lg R = 0.8955 + 0.6570 \lg t \quad (1)$$

$$\lg R = 1.2967 + 0.5306 \lg t \quad (2)$$

$$\lg R = 1.2496 + 0.5909 \lg t \quad (3)$$

$$\lg R = 0.7017 + 0.9031 \lg t \quad (4)$$

2. 将油膜重量  $C$  与相应的时间  $t$  取对数, 6 次试验的回归方程分别为:

$$\lg C = 1.053 - 0.4816 \lg t \quad (5)$$

$$\lg C = 0.9138 - 0.5160 \lg t \quad (6)$$

$$\lg C = 0.4232 - 0.4370 \lg t \quad (7)$$

$$\lg C = 1.5441 - 0.7324 \lg t \quad (8)$$

$$\lg C = 2.7413 - 1.2362 \lg t \quad (9)$$

$$\lg C = 3.3496 - 1.5235 \lg t \quad (10)$$

## 四、讨 论

1. 油膜的扩散速度 由表 3 看出, 油膜重量与扩散直径随时间的变化趋势基本相反。这是很容易理解的。随油膜扩散直径的增加, 油膜逐渐变薄, 其单位面积上的重量也必然相应地减少。因此, 油膜的重量和扩散直径这两个参数都能反映油膜的扩散速度。

本次实验属瞬间有限量的点源溢油扩散。这样的扩散随扩散动力的变化大体分为三个阶段: 惯性扩散阶段、粘性扩散阶段和表面张力扩散阶段。其相应的扩散模式是:

$$R_{\text{惯性}} = 1.14(\Delta g V t^2)^{1/4}$$

$$R_{\text{粘性}} = 1.45(\Delta g V^2 t^{3/2} / \nu_w^{1/2})^{1/6}$$

$$R_{\text{表面张力}} = 2.30(\sigma^2 t^3 / \rho^2 \nu_w)^{1/4}$$

式中:  $\Delta$  为油的密度与水的密度之差;  $\nu_w$  为水的运动粘度;  $V$  为溢油总体积;  $\sigma = \sigma_{wa} - \sigma_{oa} - \sigma_{ow}$ ,  $\sigma_{wa}$ ,  $\sigma_{oa}$ ,  $\sigma_{ow}$  分别为水和空气、油和空气、油和水之间的表面张力;  $\rho$  为油的密度;  $g$  为重力加速度常数;  $R$  为油膜扩散直径。

第一阶段持续的时间很短, 很快就转入第二阶段, 而且长期处于第二阶段, 因此可以按第二阶段的扩散规律来进行处理。在这一阶段, 油的重力和粘滞力为主要控制因素。在试验期间,  $\Delta$ ,  $g$ ,  $V$ ,  $\nu_w$  均为常数, 所以

$$R = a V^{1/3} t^{1/4} \quad (11)$$

(式中  $a$  为所有常数合并得到的总常数)。该式与本次试验所获得的(1)—(4)式相比, 差别都很大。这说明, 这一公式仅能描述不受任何环境因素影响的理想静止水面状态, 在实际上是不存在的。就是(1), (2), (3), (4)式相互之间差别也很大, 水文、地质、气象等因素对扩散均有很大影响, 而这些因素又是千差万别, 变化多端

表 3 油膜直径、重量随时间的变化  
Tab. 3 The changes of diameter and weight of the oil film with time

实验号	时 刻 (h:min)	扩散直径 (m)	采样时刻 (h:min)	油膜重量 (g)	实验号	时 刻 (h:min)	扩散直径 (m)	采样时刻 (h:min)	油膜重量 (g)
1 12:05 抛放原 油 45kg	12:07	10	12:06	5.04	4 10:30 抛放原 油 50kg	10:44	50	10:31	3.98
	12:10	30	12:11	4.16		10:46	80—100	10:35	5.08
	12:20	55	12:16	2.97		10:50	110	10:40	3.60
	12:22	63	12:20	2.10		10:55	110	10:45	5.41
	12:25	55	12:25	4.08		11:05	130	10:50	7.98
	12:31	63	12:30	2.11		11:07	130	10:55	4.56
	12:40	80	12:35	2.95		11:20	120	11:00	6.20
	12:42	70	12:4	1.43		11:25	200	11:10	2.70
	12:47	90	13:00	1.47		11:32	200	11:20	2.24
	12:51	70	13:10	1.77		11:40	200	11:30	2.24
13:05	70	13:50	1.98	11:45	220—150	11:40	1.20		
2 8:30 抛放原 油 50kg	8:35	50	8:31	6.64	11:55	310—250	11:50	0.86	
	8:40	60	8:35	3.58	12:00	300	12:00	0.73	
	8:45	85	8:40	2.68	5 13:37 抛放废 油 200kg	14:30	300	13:46	11.68
	8:46	75	8:55	0.83		14:42	450	13:51	13.38
	8:48	90	9:00	2.20		15:40	600	13:56	7.11
	8:52	140	9:15	1.94				14:01	12.88
	8:56	130	9:45	2.05				14:06	8.84
	9:00	140	10:00	0.41				14:11	5.01
	9:08	120	10:10	0.37				14:16	9.14
	9:18	140						14:42	2.71
9:33	160						14:52	4.37	
9:40	200						15:02	7.81	
3 8:30 抛放零 号柴油 50kg	10:52	60	10:46	11.56			15:17	4.85	
	10:55	70	10:50	1.31			15:37	0.85	
	11:00	100	10:55	0.88	6 13:40 抛放零 号柴油 200kg			13:53	29.90
	11:05	120	11:15	0.50				13:59	29.13
	11:10	120	11:20	0.70				14:06	14.00
	11:15	130	11:25	0.29				14:11	15.54
	11:24	130	11:30	0.83				14:17	9.23
	11:30	140	11:40	0.62				14:23	8.42
	11:42	140	11:50	0.72				14:29	6.09
	11:45	180	12:10	0.18				14:53	3.69
	12:00	180	12:20	0.13				15:03	4.04
	12:05	170						15:13	1.00
	12:10	200						15:23	0.26
12:20	300								

的。因此任何试验中得到的模式都有一定的局限性。然而  $\lg t$  与  $\lg R$ 、 $\lg C$  之间又普遍存在一定的线性关系，它们之间还是有共同遵守的规律可循。(1),(2),(3),(4)式可以相应地转化为：

$$R = 7.86t^{0.657};$$

$$R = 19.8t^{0.531};$$

$$R = 17.8t^{0.591};$$

$$R = 5.03t^{0.503}。$$

对照(11)式,并代入实验中的各参数,可以得到实验 1,2,3,4 中的  $\alpha$  值分别为 2.14,5.38,4.83,1.37。因此,胶州湾油扩散直径的经验公式为  $R = (1.37-5.38)V^{1/3}t^{0.331-0.903}$  (式中  $R, V, t$  的

单位是 m, L, min)。

试验 3 用的是零号柴油, 1, 2, 4 次均用轻质原油。由表 3 可看出, 试验 3 的油膜重量在试验开始以后的 10 分钟就降低到 1g 以下, 而其它三次试验达到这一重量所经历的时间都长得多。从油膜重量的变化来看, 试验 3 的扩散速度是最快的。原油中, 汽油、煤油和柴油等轻质液体燃料仅占 25%, 其余属重油。重油的分子量均大于轻油。一般液体的粘度与分子量成正比。因此柴油在原油中的粘度偏低, 其扩散速度相应地偏高。所以说, 溢油的扩散速度与油的本性有关。油的种类不同, 扩散速度是不同的。粘度越大, 扩散速度越小。

从扩散直径来看, 试验 4 的扩散速度最快, 依次是试验 3, 2, 1。在试验开始后的 1 小时左右, 试验 4, 3, 2, 1 的扩散半径分别是 200m, 180m, 160m, 70m。

由表 1 得知, 试验 1, 2, 4 期间的水文气象条件差别甚大。试验 1 选择在退潮期间进行, 当时的风向和流向基本相反。试验 2 正值涨潮期间, 整个试验基本无风, 仅在 9:05 左右出现过阵风 2 级, 风向西南。试验 4 期间的风向和流向基本一致。油样在抛放之后, 最初基本呈圆形, 以后在风和流的作用之下, 逐渐拉成椭圆形, 这时如果风和流的方向相同, 这种椭圆拉得越来越长, 相应的油膜得到迅速的扩散, 出现了试验 4 所示的现象。如果试验期间的风向和流向相反, 就会出现另一种局面, 椭圆得不到拉长, 油膜扩散受影响, 试验 1 就是这种环境下进行的, 所以它的扩散速度最慢。试验 2 只受流的作用, 风的影响很小, 所以扩散速度也介于两者之间。

试验 5, 6 进一步证明上述结论是正确的。试验 6 采用的是零号柴油, 但由于风向和现场流向基本相反, 所以在相当长的时间内扩散很慢, 而试验 5 由于风向和流向基本一致, 虽然用的是废油, 扩散速度仍很快。

2. 油的数量对扩散速度的影响 试验 1—4 在海上抛放 50kg 油, 试验 5, 6 抛放 200kg

油。由表 3 可以看出, 油膜重量并不与所抛油的数量成简单的正比关系。在试验 5, 4 中, 水文气象条件基本一致, 风和流同向。油的种类比较接近。在相同的时间内, 试验 5 的油膜重量一般是试验 4 的 2—3 倍。试验 3, 6 用的都是零号柴油, 实验期间的风向和现场流向相反。由表 3 可见, 在相同的时间内, 试验 6 的油膜重量一般是试验 3 的 10—30 倍。但到抛油后的第 100 分钟后, 实验 3, 6 的油膜厚度基本趋于一致。前面已指出, 溢油后油膜的扩散大体分三个阶段。对于不同的油种和不同的油量, 这三个阶段持续的时间不一样。

3. 胶州湾的扩散系数 前面已指出, 实验 2 基本上是在无风的气象条件下进行的, 因此具有一定的代表性, 可以利用本试验的参数计算扩散系数。已知:

$$K = \frac{r_i^2 - r_{i-1}^2}{4(t_i - t_{i-1})}$$

式中,  $K$  为油的扩散系数,  $r_i$  为  $t_i$  时刻的等效圆扩散半径。将实验 2 的有关测量参数代入该式, 得到  $K = 0.464 \text{ m}^2/\text{s}$ 。轻质原油在胶州湾的扩散系数为  $0.464 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

4. 原油是由多种化合物组成的混合物, 就其存在形态来说, 其中有固体, 液体, 气体。这些不同的物质溢撒到海洋上之后, 也表现出不同特性。气体和液体由于粘度较小, 扩散很快。原油中的固体粘度大, 扩散慢。由表 3 的数据可看出, 随着时间的增长, 油膜重量并不完全呈递减的趋势, 时有高低跳动。如试验 1 中, 抛放样品后的 85min, 采到的油膜重量约 5.42g, 而刚抛放的油膜也只有 5.04g。显然这是由于个别固体物质难以扩散而致。当然, 采样造成的误差也是一个重要的因素, 因为油在海面上没有很醒目的颜色, 采样者准确地寻找油膜的核心有一定的困难, 有些样品很可能不是核心处的油膜, 所以重量偏低。

5. 试验 3, 6 用零号柴油作样品, 它的分子中所含的碳原子数量是  $\text{C}_{15}$ — $\text{C}_{18}$ , 是一种比较纯净的化合物。因此, 柴油在海上的扩散应该

是均匀的。但表 2 中的数据也有高、低跳动的现象。正如前述,这主要由于采样误差造成的,但从另一方面也证实了确实存在一个油膜核心的问题。在油膜的核心处,油膜最厚,所采到的样品最重,在其它部分采到的样品重量都偏低。随离核心距离的增加,逐渐变薄,整个油膜的厚度分布呈高斯分布。

## THE LAW OF DILUTION AND DIFFUSION OF PETROLEUM AND ITS PRODUCTS ON THE SEA SURFACE\*

Kang Xinglun, Miao Lutian<sup>1)</sup>, Li Peiquan, Liu Yushan and Wang Pinai  
(*Institute of Oceanology, Academia Sinica*)

**Key words:** Dilution, Diffusion

### Abstract

Experiments show that the diameter of oil film increases with time, but its weight (thickness) decreases with time, presenting an opposite trend of change.  $\lg t$  correlates with  $\lg C$  and  $\lg R$  linearly. However, the speeds of changes differ from each other under hydrologic, meteorological, topographical conditions and amount of different oil. The oil film diffuses rapidly if direction of the wind is the same as direction of current. The oil film diffuses slowly if direction of the wind is opposite to current. The smaller the molecular weight of oil, the rapider the diffusion of oil film. The amount of oil and the thick of oil film do not present direct proportion simply. The meteorological condition of experiment 2 is the most conservative in the six experiment, The diffusion coefficient of the petroleum in Jiaozhou Bay is calculated as  $0.464\text{m}^2/\text{s}$  according to data of experiment 2. The core of oil film is thickest, it gets thinner with the increase of distance from core, the oil film presents normal distribution.

\* Contribution No. 1566 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.

1) Qingdao Port Office, Ministry of Communications.