

### 三、浮油污染物在水域之擴散

蕭 蓀 義

中央研究院物理研究所  
國立臺灣海洋大學河海工程系

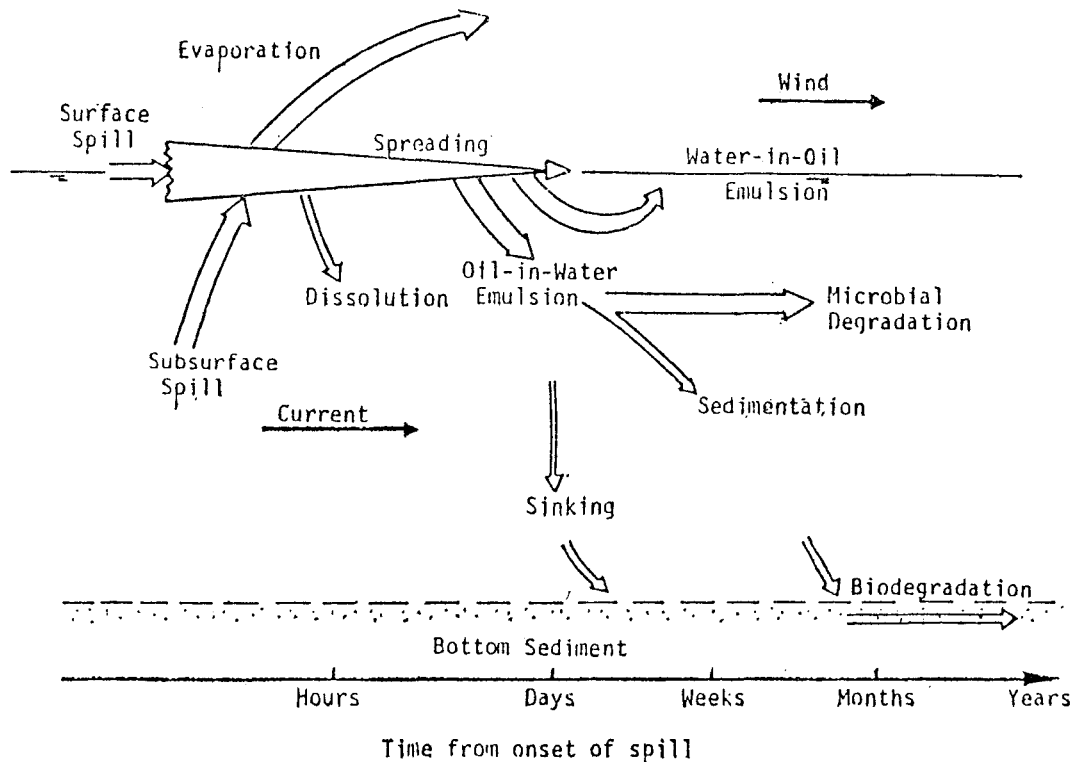
#### 摘 要

浮油污染對水域環境及生態衝擊很大。欲對該等油污染做有效控制，則需掌握瞭解其擴散特性。浮油在水面之擴散被水域之水平流速及油之延散特性所支配。利用浮油擴散特性發展數值模式，將可模擬計算水域浮油污染之擴散並提供環境影響評估之參考。

#### 1. 前 言

船舶廢油在港口及岸邊之排放或油輪在沿岸之溢油或油井在海上鑽探及輸油管線漏油等等均造成水面浮油污染，因而影響水域生態環境。近年來，由於環保意識抬頭，使得該浮油在水面之污染為人重視關切。

基本上，欲對浮油污染做有效控制處理，必需瞭解浮油在水面之擴散變化。浮油在水面之變化分為物理及化學過程。化學過程包括油乳化 (emulsion)，溶解 (dissolution)，生物分解 (biodegradation) 等，這些程序將油中之有毒之碳氫化合物溶入水中，為浮游生物或魚類吞食或吸附其身上



圖一 浮油在水域之物理、化學及生化變化

Fig. 1. Physical, chemical, and biological processes affecting the oil slick transformation (Shen, *et al.*<sup>(1)</sup>)

造成食物鍊之破壞，嚴重影響水域生態環境。物理過程則包括油蒸發 (evaporation)，風導流 (wind drift)，水平流 (advection)，及浮油延散 (spread) 等等。藉由此等物理過程，浮油在水面進行擴散。圖一為浮油在水域之各種變化過程示意圖<sup>(1)</sup>。

本文之探討著眼於物理過程，研究浮油在水面之擴散。應用浮油之擴散特性發展模式以模擬浮油運動，做為預測浮油在水域之擴散，以利提供浮油污染之處理及環境影響評估之參考。

## 2. 浮油之運動

浮油在水面之運動，主要由水平流 (advection) 及油之力學延散 (mechanical spreading) 來支配。以下分別探討水平流及力學延散，以利模擬浮油之擴散。

### (1) 水平流

浮油在水面之水平移動或漂移 (drift) 係由水流 (current)，風 (wind) 及風生波 (wind generated wave) 合併造成的<sup>(2)</sup>。據此，水平流表示為：

$$V_i = V + V' \quad (2.1)$$

式中  $V_i$  為浮油受到之水平流； $V$  為平均水平流； $V'$  則為紊流水平流 (turbulent fluctuation)。  $V$  包括了風及水流之作用，寫為：

$$V = \alpha_w V_w + \alpha_c V_c \quad (2.2)$$

式中  $V_w$  為離水面 10 公尺處之風速， $V_c$  為水流平均速度。 $\alpha_w$ ， $\alpha_c$  則分別為風速及水流之權重係數 (weighting factor)。 $\alpha_w$  一般介於風速之 0.01 至 0.06 之間，而 0.03 則為最常用的。 $\alpha_c$  一般介於 1.1 至 1.2 之間。

(2.1) 式之  $V$  為水平擴散 (Horizontal Diffusion) 之來源。在等向性紊流擴散 (isotropic turbulent diffusion) 時，擴散係數  $E_T$  與  $V'$  之關係，依據 Fischer, *et al.*<sup>(3)</sup> 之醉步分析 (random walk analysis) 結果為：

$$V' = \sqrt{\frac{4E_T}{\Delta t}} \quad (2.3)$$

式中  $\Delta t$  為時距，(time step)。

### (2) 力學延散

浮油在水面之延散係由重力 (gravitational force)，黏滯力 (viscous force) 及表面張力 (surface tension force) 之間平衡來決定。

Fay<sup>(4)</sup> 考慮浮油在水面之延散分為三相 (three phases)。在初始相 (beginning)，重力與慣性力 (inertia force) 平衡；在中間相 (intermediate phase)，重力與黏滯力平衡；在終止相 (final phase)，表面張力與黏滯力平衡。

應用連續方程式 (continuity equation) 及動量方程式 (momentum equation)，並配合浮油水面延散三相之特性，Fannelop and Waldman<sup>(5)</sup> 推導出一維 (one-dimensional) 及徑向式 (radial) 浮油之三相延散關係，結果示如表一。表中  $x_{LE}$  為浮油長度； $L$  為特性長度 (characteristic length)； $L^2$  代表沿浮油主軸方向單位長度之油體積； $g$  為重力加速度； $\Delta\rho$  為浮油與水之密度差 (density difference)； $\rho_w$  為水之密度； $t$  為時間； $\mu_w$  為水之動力黏滯係數 (dynamic viscosity)； $\sigma$  為表面張力。又延散率 (spreading rate)，則對表一之各關係式分別取時間微分 (time derivative) 即得之。

另外 Fay<sup>(6)</sup> 實場觀測浮油演變特性，浮油終究停止力學延散。依據現場調查資料，Fay 建議浮油最終擴散面積， $A_f$ ，(單位為  $m^2$ )：

$$A_f = 10^5 V^{3/4} \quad (2.4)$$

式中  $V$  為浮油總體積，單位為  $m^3$ 。該公式指出當浮油厚度擴散為  $10^{-5} V^{1/4} m$  時，力學延散將停止。

浮油擴散時，若其形狀較接近圓形，則使用表一之徑向式之三相延散公式；若形狀較近於條狀，則使用表一所示之一維之三相延散公式。

表一 浮油三相延散關係式

Table 1. Predicted spreading laws for oil slicks (Fannelop and Waldman<sup>(5)</sup>)

	Gravity-inertial regime	Gravity-viscous regime	Surface tension-viscous regime
One-dimensional	$x_{LE}/L = 1.39(g\Delta\rho/\rho_w L)^{1/3} t^{2/3}$	$x_{LE}/L = 1.39[g^2(\Delta\rho)^2/\rho_w \mu_w]^{1/8} t^{3/8}$	$x_{LE} = 1.43[\sigma^{1/2}/(\rho_w \mu_w)^{1/4}] t^{3/4}$
Radial	$x_{LE}/L = 1.14(g\Delta\rho/\rho_w L)^{1/4} t^{1/2}$	$x_{LE}/L = 0.98[g^2(\Delta\rho)^2/\rho_w \mu_w]^{1/12} t^{1/4}$	$x_{LE} = 1.6[\sigma^{1/2}/(\rho_w \mu_w)^{1/4}] t^{3/4}$

### 3. 岸邊條件及油蒸發

浮油若漂浮或外溢至岸邊 (shoreline) 時，部份浮油將會吸附在岸邊，亦即岸邊保留一部份浮油體積。浮油原來體積與保留體積之關係式為：

$$V_2 = V_1 e^{-K(t_2 - t_1)} \quad (3.1)$$

式中  $V_1, V_2$  分別為  $t_1$  與  $t_2$  時在岸邊之浮油體積。 $K$  為衰減常數，表示為：

$$K = \frac{-\ln(\frac{1}{2})}{\lambda} \quad (3.2)$$

$\lambda$  為半生命期 (half life)。表二所列為各種岸邊條件之半生命期。因此，在每一時段 (time step) 中，再捲入水域之浮油所佔之比例為：

$$\frac{V_1 - V_2}{V_1} = 1 - e^{-K\Delta t} = 1 - 0.5^{\Delta t/\lambda} \quad (3.3)$$

油蒸發係考慮油擴散初期之大量體積之蒸散。Mackay *et al.*<sup>(7)</sup> 之研究顯示蒸發之油體積之比例可依下式定之：

$$F = \left(\frac{1}{C}\right) \left[ \ln P_0 + \ln \left( CK_E t + \frac{1}{P_0} \right) \right] \quad (3.4)$$

式中  $t$  為時間； $K_E = K_M A v / RT V_0$ ， $K_M = 0.0025 U_{wind}^{0.78}$ ； $K_M$  為質量傳輸係數，單位  $m/s$ ； $U_{wind}$  為離水面 10 m 處之風速； $A$  為浮油面積，單位  $m^2$ ； $v$  為莫耳體積，單位為  $m^3/mole$ ； $R$  為氣體常數， $82.06 \times 10^{-6} atm m^3/mole \text{ } ^\circ K$ ； $T$  為油表面溫度，單位  $^\circ K$ ； $V_0$  浮油起始體積，單位  $m^3$ 。起始蒸氣壓 (vapor pressure)  $P_0$  在周遭溫度為  $T_E$ ，起始溫度  $T_0$  時為：

$$\ln P_0 = 10.6 \left( 1 - \frac{T_0}{T_E} \right) \quad (3.5)$$

Shen *et al.*<sup>(8)</sup> 推求原油 (crude oil) 之  $C$  值及  $T_0$  值為：

$$C = 1158.9 API^{-1.1435} \quad (3.6)$$

$$T_0 = 542.6 - 30.275 API + 1.565 API^2 - 0.03439 API^3 + 0.0002604 API^4 \quad (3.7)$$

式中  $API$  為指數，可由油之比重， $sg$ ，依照下式求得：

$$sg = \frac{141.5}{(API + 131.5)} \quad (3.8)$$

關於不同之岸邊條件，其半生命期亦異，依據 Torgrimson<sup>(9)</sup> 之報告結果示如表二，以供參照。而各種浮油之蒸發係數（摘自 Mackay *et al.*<sup>(7)</sup>）亦列於表三。

表二 各種岸邊條件及半生命期  
Table 2. Shoreline descriptor and half life (Torgrimson<sup>(9)</sup>)

Shoreline descriptor	Half life (hrs)
Exposed Headland	1
Wave-Cut Platform	1
Pocket Beach	24
Sand Beach	24
Sand and Gravel Beach	24
Sand and Cobble Beach	8,760
Exposed Tide Flats	1
Sheltered Rock Shore	8,760
Sheltered Tide Flat	8,760
Sheltered Marsh	8,760
Land	8,760

表三 各種浮油之蒸發係數  
Table 3. Suggested evaporation parameters for various crude oils  
( $T_E = 283^\circ\text{K}$ ) (Mackay, *et al.*,<sup>7)</sup>)

Gravity API	$g/\text{cm}^3$	$C$	$T_0$	$P_0$
10	1.0	89.2	366	0.044
12	0.986	69.4	348	0.088
15	0.966	52.1	339	0.13
20	0.934	34.7	329	0.18
25	0.904	27.2	330	0.17
30	0.876	22.33	325	0.21
35	0.850	19.5	314	0.31
40	0.825	17.9	304	0.45
45	0.802	16.4	283	1.004

#### 4. 模式之發展及應用

利用第三第四節探討分析浮油運動擴散特性及配合岸邊條件與油蒸發，可發展數值模式，以模擬浮油在水域之擴散變化。藉由數值計算，預測浮油在水面之擴散情形。不同區域之海岸水域，或港口湖泊，其邊界條件各有不同，再加上區域性之水流或潮汐均造成浮油擴散變化之複雜性。故發展數值模式預測各種狀況地點之浮油污染擴散，應是必要。而預測結果將可提供水域生態及環境影響評估之參考。

## 參 考 文 獻

1. Shen, H. T. and P. D. Yapa (1988). "Oil Slick Transport in Rivers," *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, V. 114, No. 5, pp. 529-543.
2. Tsahalidis, D. T. (1979). "Theoretical and Experimental Study of Wind and Wind-Induced Drift," *Journal of Physical Oceanography*, V. 9, pp. 1243-1257.
3. Fischer, H. B., *et al.* (1979). *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, N. Y.
4. Fay, J. A. (1969). "The Spread of Oil slicks on a Calm Sea," *Proceedings of a Symposium on the Scientific and Engineering Aspects of Oil Pollution of the Sea*, pp. 53-63, MIT.
5. Fannelop, T. K. and G. D. Waldman (1972). "Dynamics of Oil Slicks," *AIAA Journal*, V. 10, No. 4, pp. 506-510.
6. Fay, J. A. (1971). "Physical Processes in the Spread of Oil on a Water Surface," *Proceedings of the Joint Conference on Prevention and Control of Oil Spills*, pp. 463-467, American Petroleum Inst.
7. Mackay, D., S. Paterson and S. Nadeau (1980). "Calculation of the Evaporation Rate of Volatile Liquids," *Proceedings of National Conference on Control of Hazardous Material Spills*, pp. 361-368, Louisville, KY.
8. Shen, H. T., P. D. Yapa and M. E. Petroski (1986). "Simulation of Oil Slick Transport in Great Lakes Connecting Channels," Report Nos. 86-1~86-4, Department of Civil and Environmental Engineering, Clarkson University, N. Y.
9. Torgrimson, G. M. (1984). "The On-Scene-Spill Model: A User's Guide," NOAA Hazardous Materials Response Branch, Technical Report, Unpublished Manuscript.

## The Spread and Diffusion of Oil Pollutants on Water

Shiau Bao-Shi

*Institute of Physics, Academia Sinica, Taipei, Taiwan*  
*Dept. Harbor and River Engineering*  
*National Taiwan Ocean University Keelung, Taiwan*

### ABSTRACT

Oil spill on water due to accidents of oil tankers, discharge of waste oil from vessels, etc., pollutes the water and makes a great impact on the aquatic environment. In order to predict the coverage area by oil pollutants, it is necessary to understand their spread and diffusion processes on water. The spread and diffusion motion of oil is dominated by the advection of water and oil spreading. Based on this physical process of oil motion, a numerical model can be developed to simulate the spread and diffusion of oil pollutants on water. The predicted coverage area of oil pollutants will be used as references for aquatic ecosystem evaluation and for environmental impact assessment.