

新建石臼港海区油污染预测预报

苗 绿 田

(交通部青岛港务管理局)

一、污染源及其负荷预测

1. 污染源

石臼港系属年吞吐量1500万吨煤炭的专业化大型港口。油污染一般发生在港池、航道、锚地水域,其污染源就是分布在上述范围内的各种船舶;污染特点为连续点源形式。污染源位置见图1。

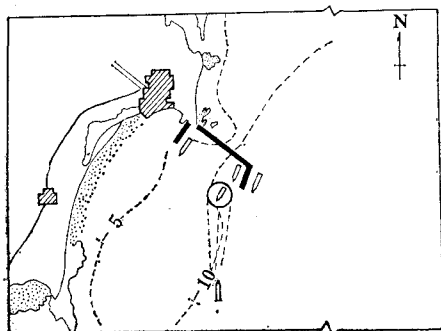


图1 油污染源位置

2. 污染负荷量预测

参考国外文献^[2]和交通部各大港口统计资料^[1],按石臼港设计船型及数量作年平均油

污染负荷量预测,见表1。

二、石臼港海区油污染扩散特征

污染源的位置大体处于海区主流轴上。石臼港海区潮型为正规半日潮,主流为NE-SW轴向的往复顺岸流。船舶所排放的油污水,主要是随表层海水平均流速作平流迁移的水平扩散。除潮汐流外,还受到波浪、风因子的影响,因此界面层因素也是扩散的基本条件。

三、浓度分布的预测模式

1. 基本扩散方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + U_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} + U_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} + U_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot \frac{\partial C}{\partial y} \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right) - \lambda C \end{aligned} \quad (1)$$

表 1

船 种	船 级 (t)	数 量 (艘)	每艘船活动天数			每艘船舱底油量 ($\times 10^{-2}$ t/day)		全年油量 (t)
			装 船	停 泊	航 行	停(装)泊	航 行	
货 轮	10—12.5万	150	2	2.5	0.5	12	6	85.5
	2.5—5万	220	1	2.5	0.5	12	6	99
	2.5—12.5万(压船)	230		2.5		12	6	69
拖 轮	500	6		100	200	1.5	0.4	13.8
油 轮	500	2		100	200	3	1.8	13.2
渔 轮	<500	150		150	150	0.15	0.10	56.3
合 计								336.75

注:码头设计作业天数按250天计^[2];拖轮、油轮、渔轮均按300天作业计;装船按停泊计。

1) 交通部环境保护工作经验交流会议纪要,1979。

2) 日本国际临海开发研究中心,1981。石臼港开敞式码头现场调查报告书。

式中, C 为油浓度 (ppm); t 为时间 (s); λ 为衰减系数 (1/日); X, Y, Z 为空间坐标; K_x, K_y, K_z 分别为 X, Y, Z 方向扩散系数 (cm^2/s); U_x, U_y, U_z 分别为 X, Y, Z 方向流速 (cm^2/s)。

方程式左边第2—4项是移流项; 右边第1—3项是扩散项, 第4项是衰减项。

2. 基本方程的推导

由于油比水重, 决定了油污染在垂直方向上的扩散尺度比较小; 因此, 设垂直分布到一定深度内近似均匀, 从 (1) 式可导出连续点源二维水平扩散方程式:

$$C = \frac{(M/H) \exp\{(X \cdot U/2K_x) - \lambda \cdot t\}}{2\pi \sqrt{K_x \cdot K_y}} \cdot K_0 \left\{ \frac{U}{2} \sqrt{\frac{1}{K_x} \left(\frac{x^2}{K_x} + \frac{y^2}{K_y} \right)} \right\} \quad (2)$$

式中, M 为单位时间流入的负荷量 (mg/s); U 为海流平均流速 (cm/s); H 为均匀分布的水深 (m); $K_0(x \cdot y)$ 为贝塞尔函数。

如果只考虑主流轴 (x) 向平均浓度 ($\bar{C}$), 当令 $K_x = K_y$, $\lambda = 0$, $Y = 0$ 时, (2) 式可近似为:

$$\bar{C}(x) = \frac{M}{2H \sqrt{\pi \cdot K_x \cdot U \cdot X}} \quad (3)$$

为得到 (3) 式解的结果与实际污染接近, 其它参数均可实测求得, 唯有扩散系数必须经过试验确定。

四、水平扩散系数的确定

水平扩散系数因各海区水文、气象要素等界面条件的差异而各不相同。扩散系数的准确性直接影响预测的准确度。为得到代表石臼海区的扩散系数, 采用现场模拟试验的方法。由于连续点源模拟的控制条件复杂, 故以斐克 (fick) 脉冲式一次投放 200kg 示踪油, 作瞬间点源扩散试验, 所得扩散系数即近似为 (3) 式参数 (K_x)。

1. 示踪油入海后的扩散过程

(1) 初始自扩散阶段: 初期受重力、惯性力、粘性力、表面张力的同时作用, 呈重力喷流式圆形扩展运动。各种作用力对应的扩展直径 (D) 由下面公式求得。

重力: 惯性力扩展 $D_1 = (\Delta \cdot g \cdot V_o \cdot t^2)^{1/4}$;

重力: 粘性力扩展 $D_2 = (\Delta \cdot g \cdot V_o^2 \cdot t^3 / \nu^{1/2})^{1/6}$;

表面张力: 粘性力扩展 $D_3 = (\sigma^2 \cdot t^3 / \rho^2 \cdot \nu)^{1/4}$ 。

式中, g 为重力加速度 $9.8 \text{ (m/s}^2\text{)}$; V_o 为示踪油体积 0.21 m^3 ; t 为扩展时间 300 (s) ; ρ 为海水密度 $1 \text{ (g/cm}^3\text{)}$; Δ 为水与油的比重差 0.05 ; σ 为单位长度油与水表面张力之差 30 (dyn/cm) ; ν 为油动粘系数 $10^{-2} \text{ (cm}^2/\text{s)}$ 。

经计算整个重力喷流扩展直径 $D = 29 \text{ (m)}$ 。一般常用综合计算式表示这种扩展半径 $R(t)$:

$$R(t) = \left\{ 2 \left(\frac{g \cdot V}{\pi} \right)^{1/2} \cdot t + R_o^2 \right\}^{1/2} \quad (4)$$

若考虑磨擦作用, 修正 (4) 式得:

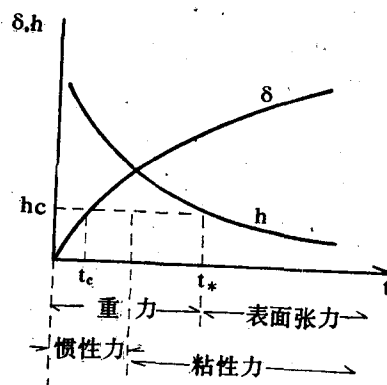


图2 油层受各种力作用的扩散范围
 δ 为油水临界层厚度; h 为油层厚度; t_c 为 $D=h$ 时的时间; h_c 为 t_c 时间的 δ 厚度; t_* 为重力与表面张力相等的时间。

表 2

主导作用力	重力	表面张力	惯性力	粘性力
条 件	$h > h_c$	$h < h_c$	$h > \delta$	$h < \delta$

$$R(t) = \left\{ \frac{16g \cdot V_o^3}{\pi^3 \cdot C^3 \cdot v} \cdot t + R_o^3 \right\}^{1/8} \quad (5)$$

式中 R_o 为油流入海面初始半径1.5(m)。按(5)式计算 R 为15.9(m)，与实测结果相近。

油层受各种力所支配的扩展范围，见图2；各种力在扩散过程中的主导作用、随时间变化的规律，见表2。

(2) 平流扩散阶段：由于油的轻质成分挥发及粘性阻抗作用，重力喷流扩展运动在较短时间内结束，转受表层海流与风因素的支配而水平扩散，其轴向浓度分布遵守瞬间点源扩散模式⁽³⁾：

$$C = \frac{M}{4\pi \cdot H \cdot K_x \cdot t} \exp \left\{ -\frac{(x - U \cdot t)^2}{4K_x \cdot t} \right\} \quad (6)$$

以试验重力喷流扩展半径 R 修正(6)式 x 轴得：

$$C = \frac{M}{4\pi \cdot H \cdot K_x \cdot t} \exp \left\{ -\frac{(x - U \cdot t - R)^2}{4K_x \cdot t} \right\} \quad (7)$$

式中， x 为经 t 时采样点至投油原点的距离(m)； U 为表层海流平均流速(cm/s)； H 为表层水深(m)； R 为重力喷流扩展半径(m)； K_x 为 x 轴上扩散系数(cm^2/s)。

2. 试验条件与结果

(1) 1980年12月2日：天气晴，无风，

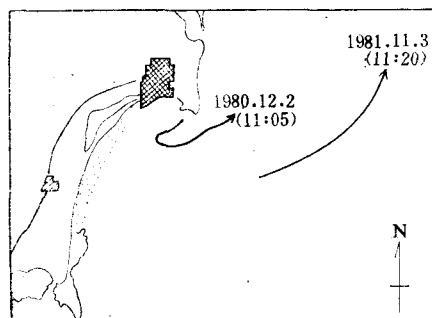


图3 油污水平扩散试验流迹

涨潮流况扩散结果见表3。由于实测风速 $< 0.7(\text{m/s})$ ，故风漂流影响不计。平流扩散主要受表层海流支配。在试验时间内扩散按涨潮流向进行，当9点35分以后，扩散转受石臼突嘴复杂地形的影响，随湾内潮余流（顺时针方向旋转）迴流扩散。这表明海流对扩散起到非常明显的作用。扩散流迹见图3。

(2) 1981年11月3日：天气晴，实测海面附近风速4—7(m/s)，落潮流况试验。当风作用于表面海水而产生风海流(亦称风漂流)时，其流速(U_o)根据厄克曼有限海深风漂流理论经验公式求得：

$$U_o = \frac{0.0127V}{\sqrt{\sin \phi}} \quad (8)$$

式中， V 为风速(m/s)； ϕ 为 36°N ；0.0127系经验常数。由于试验现场水深均在10(m)左右，属于浅海风漂流，参考实测统计资料对经验常数订正为0.019，则(8)式可变为下式：

表 3

采样时间 (h:min)	x (m)	H (m)	U (cm/s)	t ($\times 1800\text{s}$)	实测 C (ppm)	K_x ($\times 10^3 \text{cm}^2/\text{s}$)	$\bar{K}$ ($\times 10^3 \text{cm}^2/\text{s}$)	计算 C (ppm)
8:30—8:35	15.9	2		0.17				
8:35—9:05	641		33	1	9.70	2.826	2.643	10.06
9:05—9:35	1037		27	2	4.43	2.652	2.643	4.45
9:35—10:05	1105		19	3	2.85	2.550	2.643	2.82
10:05—10:35	1247		16	4	1.87	2.332	2.643	1.84
10:35—11:05	2083		22	5	1.54	2.001	2.643	1.51

注：表中平均值 $\bar{K}$ 为：

$$\bar{K} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} K_{\dots}}$$

$$U_0 = K \cdot V \quad (9)$$

式中, K为风因子, 取作0.025。

以上说明风漂流速度大小与表层风速大小成正比关系。当风漂流一经形成, 柯氏力与海水内部摩擦力同时作用, 使其流向偏右。右偏角 α 即为风漂流与风向的夹角, 右偏角模式^[1]:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{sh}[2\pi(h/D)] - \sin[2\pi(h/D)]}{\operatorname{sh}[2\pi(h/D)] + \sin[2\pi(h/D)]} \quad (10)$$

式中, D为摩擦阻力深度, 理论公式如下:

$$D = \sqrt{\frac{A_z}{\rho \cdot \omega \cdot \sin \phi}} \quad (11)$$

由于 A_z 参量难求, 故采用经验公式:

$$D = 7.6 \frac{V}{\sqrt{\sin \phi}} \quad (12)$$

$$h/D = 0.1003 \ h/V \quad (13)$$

由(13)式可知, D同V系正比关系, 即风速越大而摩擦深度也越大。厄克曼指出, 表层风

与流的右偏角决定于表层风速, 风速越大而右偏角越小。从试验的平均风速 $V = 4 \text{ m/s}$ (北向), $h = 10 \text{ m}$ 时, 按(13)式计算得 $h/D = 0.25$, 将结果代入(10)式计算, 右偏角 $\alpha = 22.5^\circ$ 。从(9)式可求得风漂流流速为 10 cm/s 。这相当于海流速度的 $1/4 - 1/2$ 。如果仅考虑海流和风的作用, 那么在风的影响下, 油由于受海流与风漂流同时作用而平流扩散, 致使扩散方向偏离主流轴向 15° 左右。风漂流与海流方向夹角(θ)大小直接影响扩散的快慢。经分析可知, 当 $270^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 时, 风力加速扩散; 当 $90^\circ < \theta < 270^\circ$ 时, 风力是扩散的阻力。试验条件及结果分别见表4, 5。

3. 主流轴(X)向扩散系数的确定

试验结果表明, 扩散系数均出现随时间的增大而依次减小的相同规律; 无论涨潮还是落潮基本属于同阶, 其几何均值亦很接近, 说明潮汐变化对主流轴向扩散影响不明显。就试验条件而论, 一般海况(风速 $< 7 \text{ m/s}$) 的扩散

表 4

采样时刻 (h:min)	风 向 (度)	风 速	平均风速	风 漂 流	海 流	合 成 流
		(m/s)				
8:45—8:50	0°	7				
8:50—9:20		7—4	5.3	13.2/202.5	24/45	12.8/68
9:20—9:50		4—5	4.5	11.2/202.5	26/45	16.2/60.3
9:50—10:20		5—4	4.5	11.2/202.5	28/45	18.5/62.4
10:20—10:50		4	4	10/202.5	31/45	22/55
10:50—11:20		4	4	10/202.5	46/45	36.9/51

注: 速/向系指流速/方向, 即为 (cm/s)/度。

表 5

采 样 时 刻 (h:min)	x	H	U	t	实测 C	K _x	$\bar{K}$	计算 C
	(m)		(cm/s)	($\times 1800s$)	(ppm)	($\times 10^3cm^2/s$)		(ppm)
8:45—8:50	15.9	2		0.17				
8:50—9:20	264.7		12.8	1	13.5	2.760	2.501	14.6
9:20—9:50	621		16.2	2	7.8	2.459	2.501	7.7
9:50—10:20	1060		18.5	3	4.4	2.124	2.501	4.0
10:20—10:50	1671		22	4	2.3	2.015	2.501	2.2
10:50—11:20	3421		36.9	5	1.7	1.973	2.501	1.6

表 6

试验日期 (年 月 日)	$t_{max}(s)$	k (cm^2/s)	$\bar{K}/k$	K_x/k
1980.12.2 (涨潮流)	5×1800	2112	1.25	1.22
1981.11.3 (落潮流)		1959	1.28	1.31

系数可以取作 $(2643 + 2501)/2$, 即 $K_x = 2572 cm^2/s$ 。

上述处理方法须要解析 (7) 式复杂方程, 但不易解决, 为此可以作下述经验系数处理。当扩散时间为 t_{max} 时, 最大扩散面积内的浓度 C_* 可以看作均匀分布, (7) 式中负指数 $-(x - U \cdot t - R)^2 / 4k_x \cdot t \approx -1$, 原式变为 $C_* = Me^{-1} / 4\pi \cdot H \cdot k \cdot t_{max}$, 扩散系数公式为 $k = Me^{-1} / 4\pi \cdot H \cdot C_* \cdot t_{max}$ 。经验系数与试验比较见表 6。对 k 订正后得 $K_x = \frac{4}{3}k$, 即为石臼海区参数。

五、石臼港海区油污 染浓度预报

1. 参数的选用值

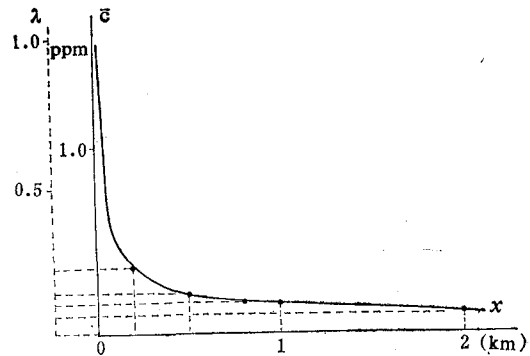
按模式 (7) 进行数值预报, 选用参数: 油负荷量为 $12.992 \times 10^3 mg/s$; 扩散系数为 $2.5 \times 10^3 cm^2/s$; 扩散水深为 2 m; 海流平均速度为 $54 cm/s$ 。海流平均流速 $\bar{U}$ 是指涨潮最大流速 U_{max} 与落潮最大流速 V_{max} 分别对水深积分的平均值。

$$\bar{U} = \frac{1}{2H} \left(\int_0^H U_{max} dH + \int_0^H V_{max} dH \right)$$

表 7

$X^{1)}(m)$	10	10^2	2×10^2	5×10^2	8×10^2	10^3	2×10^3	3×10^3	5×10^3	10^4
$\bar{C}^{2)}(ppm)$	1.58	0.49	0.35	0.22	0.18	0.16	0.11	0.09	0.07	0.05

1) 至污染源距离; 2) 平均浓度。

图 4 a $\bar{C}$ — x
b λ — x 相关图

2. 浓度预报

将“1”内参数代入 (7) 式计算结果见表 7。由表 7 得知, 当 $x > 100(m)$ 时, 浓度 $\bar{C} < 0.5(ppm)$ 符合国家海水水质暂行标准第三类; 当 $x > 2000(m)$ 时, $\bar{C} < 0.1(ppm)$ 符合第二类。预报结果表明, 油的平流扩散特性, 可从图 4(a) 中发现, 在 x 为 200(m) 处形成衰减拐点; 从图 4(b) 明显看出 $x < 200(m)$ 时衰减较快, $x > 200(m)$ 时衰减速度平缓。因而当发生油污事故时, 可根据预测扩散速度的快慢特性, 作相应防污染处理。

六、试验方法说明

1. 示踪物质

我们以石油为示踪物质, 其特点为: 石油是港口易发生污染的代表性物质, 同时也是评价港口环境质量的重要指标; 石油的化学变化及生物降解均较缓慢, 不溶于水并具有浮于水表面的性质, 受风的影响较大, 铅直方向扩散尺度较小; 石油动粘度系数较有机染料大, 其扩散速度相应减慢, 试验接近实际; 石油表现与水相似的流动行为, 容易投放和采样; 海区

天然含量较低,与试验油背景明显。

2. 示踪油的组成及数量

以30%废机油加70%轻柴油混匀,一次用量以200kg为宜,这样可在二小时左右完成试验。

3. 投放位置与跟踪方法

(1) 投放位置设计:用半浮式漂流瓶分别作涨、落潮漂流试验,参考勘港资料¹⁾,对6条涨潮和8条落潮流迹分析,表明表层海流流迹基本与主流轴向(N-E-S-W)一致。结合供油与输煤码头设计位置,分别于堤头设投油点。

(2) 跟踪方法:在20部机动小船头部设外伸3m长的平台,示踪油盛于塑料袋内置平

台上,在投油点,用刀一次割裂瞬时投放入海。以小舢板跟踪,按规范采集流迹中心水样。

七、小 结

本文就石臼港所发生的油污染事故,提出预测污染程度的模式和确定扩散系数的方法。

主要参考文献

- [1] 山东海洋学院, 1982. 海洋学. 第148页。
- [2] 平泉 泰, 1974. 公害研究3(4):28—43。
- [3] 花市颖悟, 1978. 海洋开发11(3):88。
- [4] 日本海洋学会, 1979. 海洋环境调查法。恒星社厚生阁, 493—494页。

1) 山东海洋学院石臼港勘察小组, 1980. 石臼港勘港调查小结。

ESTIMATION AND FORECAST OF OIL POLLUTION IN THE NEW SHIJU HARBOR

Miao Lutian

(Qingdao Port Office, Ministry of Communications)

Abstract

The oil pollution in Shijiu Harbor area was investigated with a theoretic model. Using the experimental data, the diffuse coefficient was determined and the oil pollutant concentration in the harbor area was estimated. The process and explanation of the experiment are also given here.