

⑥ 46-54

溢油和含油污水对舟山海域 水质影响的数值分析

耿兆铨 倪勇强 程杭平
(浙江省河口海岸研究所)

x 55

摘 要

本文用迎流有限元方法模拟舟山内海域的潮流,在验证基础上计算了油泊位排放的含油污水对环境海域水质的影响。通过 Lagrange 无质量标记点跟踪计算,文章给出了在潮汐和风海流共同作用下,突发性溢油油膜中心点的运动轨迹,进而计算预测了溢油经历不同时刻后的弥散面积和影响范围。

关键词: 显式迎流有限元, 无质量标记点, 溢油,

水质, 数值分析

一、前 言

因入海的含油废水和事故溢油所致的海域油类污染问题,日渐令人关注。油类污染物消亡和运移十分复杂,但当不计蒸发、光合、生物降解、悬浮或沉降等作用时,数值模拟其输运过程是可能的。当油呈乳化状且可视为准保守物质时,可采用深度平均的二维数学模型,否则必须考虑含油污水层的实际厚度。

本文选用平面二维非恒定流的显式迎流有限元模式^[1]计算舟山内海域的潮流,进而计算了关头山、岙山和算山三个原油集散基地投产后所排含油废水造成的环境影响。为预测海域突发溢油在潮流和风海流共同作用下的运移路径和弥散范围,为制定应急措施提供依据,本文在算得潮汐和风共生流后,用 Lagrange 无质量标记点作油膜中心点的轨迹追踪计算,并用 P.C. Blokker 公式计算了不同历时后的溢油弥散面积,结果表明是合理的。

二、计算域概化及数学模型概述

2.1 计算域概化

舟山内海域北邻舟山本岛,南毗大陆峙头,西为金塘、册子岛,东至朱家尖~桃花岛一线,域内岛屿众多,水域面积约 720km²,潮汐属非正规半日潮,潮流速 1~4 节不等。该海域气候为亚热带季风型,冬季盛行西北风,夏季盛行东南风。海域温、盐度分布较均匀,水体垂向掺混良好,故宜选用平面二维有限元方法和三角形计算网格,易于勾划域内的 14 个主要岛屿(图 1)。除水边界外,尚有三个潮位站和两个流速站可供验证。流场计算中计有 486 个三角元和 325 个有效节点,计算污染场时,在三个油泊位附近进一步加密网格,共有 722 个单元和 373 个

本文于 1990 年 8 月 23 日收到。

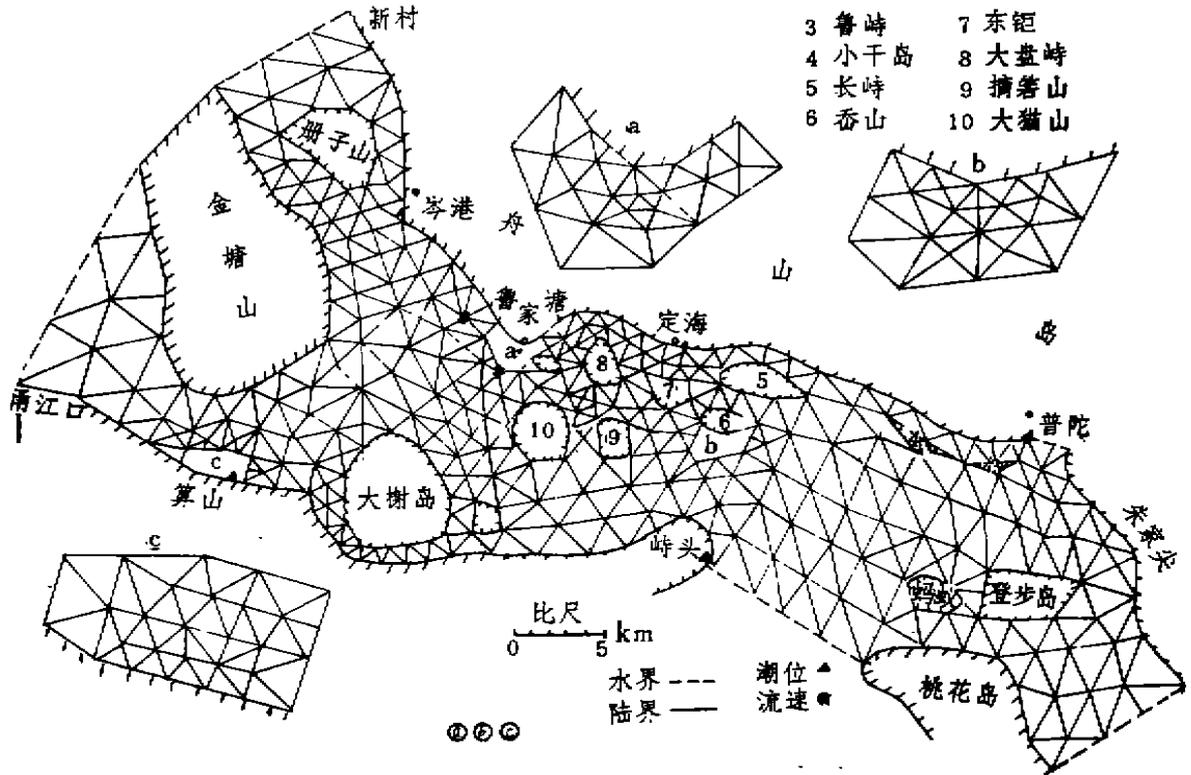


图 1

节点，最小三角元高度为 150m，计算的时间步长，30 秒用于水流，180 秒用于水质。

2.2 数学模型简介：

数学模型控制方程采用经垂线积分含二阶涡动粘滞项的浅水潮波方程和相应的二维对流扩散方程，利用内积简记号： $\langle u, v \rangle = \int uv d\Omega$ ，对方程应用加权余数法伽辽金逼近(其中二阶项运用分部积分)，令时导数 $\frac{\partial q}{\partial t} = \dot{q}$ ，取前差近似： $\dot{q} = (q^{n+1} - q^n) / \Delta t$ ， n 为时步数， Δt 为时步长(s)，可得：

$$\langle \dot{Z}, \Phi_i \rangle + \left(\frac{\partial(Hu)^n}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)^n}{\partial y}, \Phi_i \right) = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \langle \dot{u}, \Phi_i \rangle + \left(u_i^n \frac{\partial u_i^n}{\partial x} \Big|_{r_i^e} + v_i^n \frac{\partial u_i^n}{\partial y} \Big|_{r_i^e}, \Phi_i \right) + \left(g \frac{\partial \hat{Z}^{n+1}}{\partial x}, \Phi_i \right) \\ + \left(\frac{\overline{gU} u^n}{C^2 H^{n+1}}, \Phi_i \right) - (f v^n, \Phi_i) - \left(\frac{W_x}{H^{n+1}}, \Phi_i \right) \\ + \left(\varepsilon_x \frac{\partial u^n}{\partial x}, \frac{\partial \Phi_i}{\partial x} \right) + \left(\varepsilon_y \frac{\partial u^n}{\partial y}, \frac{\partial \Phi_i}{\partial y} \right) = 0 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \langle \dot{v}, \Phi_i \rangle + \left(u_i^n \frac{\partial v_i^n}{\partial x} \Big|_{r_i^e} + v_i^n \frac{\partial v_i^n}{\partial y} \Big|_{r_i^e}, \Phi_i \right) + \left(g \frac{\partial \hat{Z}^{n+1}}{\partial y}, \Phi_i \right) \\ + \left(\frac{\overline{gU} v^n}{C^2 H^{n+1}}, \Phi_i \right) + (f u^n, \Phi_i) - \left(\frac{\overline{W}_y}{H^{n+1}}, \Phi_i \right) \end{aligned}$$

$$+ \left(\varepsilon_x \frac{\partial \hat{v}^n}{\partial x}, \frac{\partial \hat{\Phi}_i}{\partial x} \right) + \left(\varepsilon_y \frac{\partial \hat{v}^n}{\partial y}, \frac{\partial \hat{\Phi}_i}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

式中, $\frac{\partial \hat{u}}{\partial x} \Big|_{r'_i}$ 表示 $\frac{\partial \hat{u}}{\partial x}$ 在迎流单元 T'_i 上取值, 余类推, 广义变量: $\hat{q} = q_i \delta_i, \hat{q} = q_i \Phi_i$.

采用三节点三角形单元面积坐标, 利用阶梯函数特性和集中质量概念, 极易求得其形参数, 代入式(1)~(3)并移项化简, 可得局部有限元方程适于编制计算机程序的计算公式:

$$Z_j^{n+1} = Z_j^n - \Delta t [(\beta \bar{H} u^n + \gamma \bar{H} v^n) / 2\lambda] \quad (4)$$

$$u_j^{n+1} = u_j^n - \Delta t \left\{ u_j^n (\beta \bar{u} / 2\lambda)^n \Big|_{r'_i} + v_j^n (\gamma \bar{u} / 2\lambda) \Big|_{r'_i} + g \frac{\beta Z_j^{n+1}}{2\lambda} - f v_j^n + \frac{g}{C^2} \left(\frac{u^n U^n}{H^{n+1}} \right) - \left(\frac{W_x}{H^{n+1}} \right) + (\varepsilon_x \beta \bar{\beta} u + \varepsilon_y \gamma \bar{\gamma} u) / 4\lambda^2 \right\} \quad (5)$$

$$v_j^{n+1} = v_j^n - \Delta t \left\{ u_j^n \left(\frac{\beta v}{2\lambda} \right)^n \Big|_{r'_i} + v_j^n \left(\frac{\gamma v}{2\lambda} \right)^n \Big|_{r'_i} + g \frac{\gamma Z_j^{n+1}}{2\lambda} + f u_j^n + \frac{g}{C^2} \left(\frac{v^n U^n}{H^{n+1}} \right) - \left(\frac{W_y}{H^{n+1}} \right) + (\varepsilon_x \beta \bar{\beta} v + \varepsilon_y \gamma \bar{\gamma} v) / 4\lambda^2 \right\} \quad (6)$$

相应的定解条件为

初始条件: $z(x, y, 0) = z^*$ (带“*”号者为已知值, 下同),

$$u(x, y, 0) = v(x, y, 0) = 0.$$

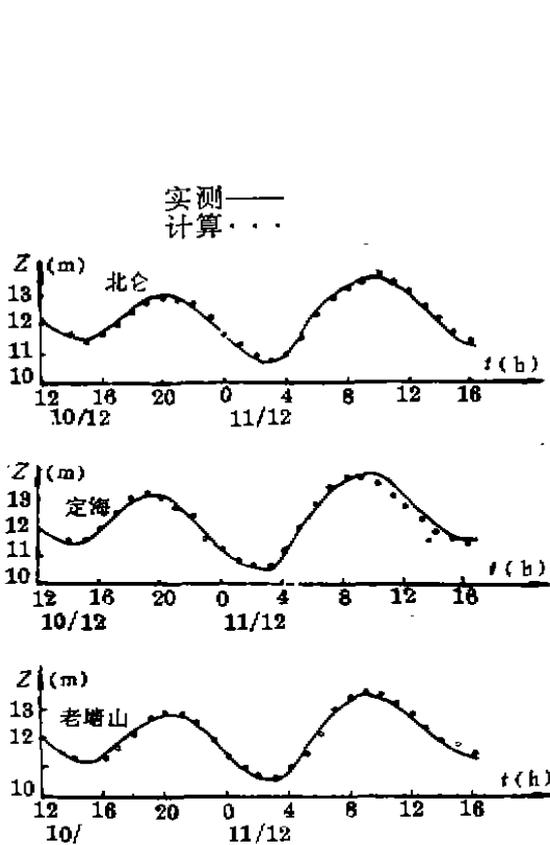


图 2 潮位验证

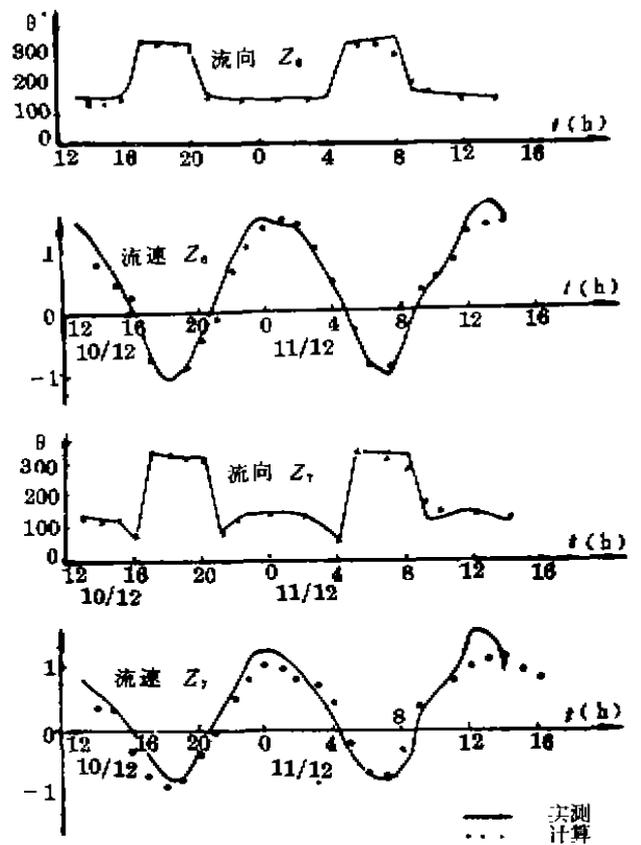


图 3 流速流向验证

边界条件：水边界： $z(x, y, t) = z^*(x, y, t)$,

陆边界： $v_n(x, y, t) = 0$ (法向流速)。

式中： H 为流动深度(m)， $H = Z - Z_0$ ，其中 Z 和 Z_0 分别为相对于某一理论基准面的自由水面和水底高程；

u, v 分别为 x, y 方向上的流速分量的垂线平均值(m/s)，流速模 $U = \sqrt{u^2 + v^2}$ ；

W_x, W_y 和 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ 分别为 x, y 方向上的风应力参数(m^2/s^2)和涡动粘滞系数(m^2/s)；

C 为Chezy阻力系数；

柯氏力参数 $f = 2\omega \sin \varphi$ ， φ 为地理纬度， ω 为地转角速度。

污染物的对流扩散水质模式与上述水流模式类似。水质模型属保守质模式，用以计算油污染时，假设非全乳化的石油类污染物在海水表层0.5~2.0m厚度内是掺混均匀的，同时不计其悬浮、蒸发、风化、微生物降解等因素，视为准保守物质(计算结果偏安全)。

本模式主要特点有三个，一是利用质心域集中质量法导得了显格式，省机时、省内存；二是在对流项中采用了迎风技巧；三是计及了二阶涡动粘滞项。从而使格式更稳定实用。

将此模式应用于舟山内海域的流场计算，潮位和流速的验证情况绘于图2和图3。图4和图5是计算域以定海为准的涨急和落急流矢。

由图可见，流场验证较好，金塘水道、螺头水道和册子水道，在涨急和落急潮时，均为强流区。

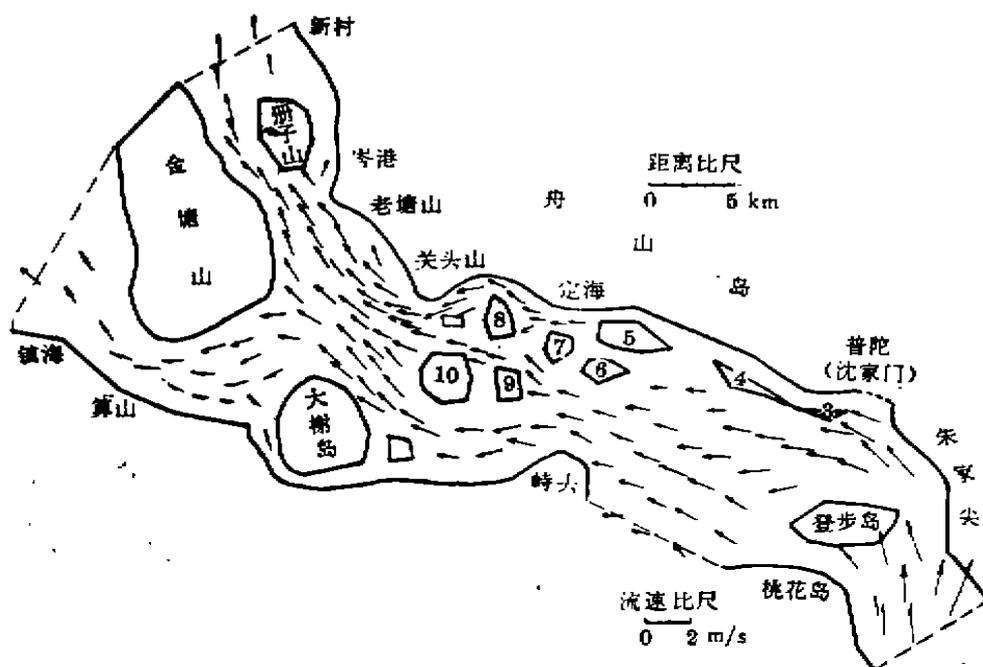


图4 涨急流矢

三、油膜中心运动轨迹计算与突发性溢油影响预测

在模拟验证潮流场的基础上，选用潮差为2.0m和3.0m的典型潮(保证率分别为55%和5%)，按无风和有风情形分别计算流场。按方程(5)、(6)计算风应力 τ_x (即 W_x, W_y)的公式

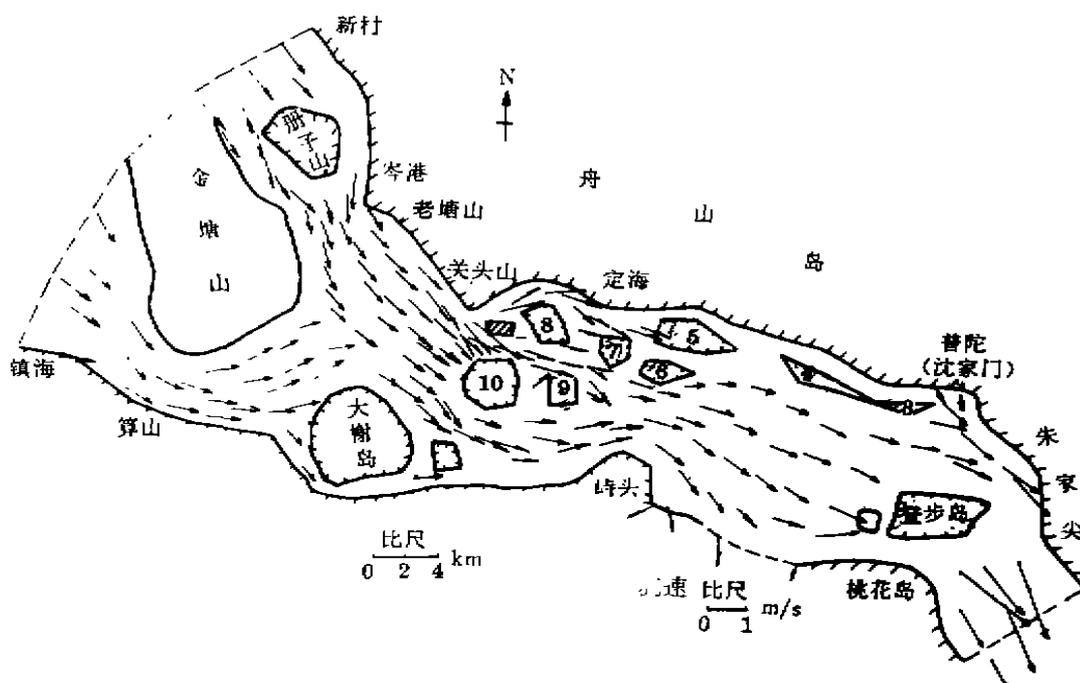


图5 落急流矢

为:

$$\tau^a = K \frac{\rho_a}{\rho_w} |W| W \quad (7)$$

式中, 风应力系数 $K = 2.6 \times 10^{-3}$, ρ_w 为水密度, 空气密度 $\rho_a = 1.25 \times 10^{-3}$, W 为海面上空 10~15 m 处的风速, 计算中均取 $W = 15 \text{ m/s}$. 按东、西、南、北、东南、西北六种不同风向的风所形成的风应力参数, 代入式(5)、(6), 即可求得潮汐力迭加风应力所共生的流场(垂线平均值)。为慎重计, 又用文献[3]所引的 Hoult 公式作校核:

$$\vec{V}_t = \vec{V}_{\text{水潮}} + b \vec{V}_w \quad (8)$$

公式适用于油膜扩散达最大稳定面积后的水面层共生流速 \vec{V}_t , b 为风对油膜运动的作用系数, 它主要取决于风、油种、海水性质、水温等, 通常 b 值在 0.02~0.05 之间。结果表明, 按方程(5)、(6)计算所得风潮共生垂线平均流速基本上是按公式(8)计算值的下限($b = 0.02$), 考虑到海面油膜在潮流和风切应力作用下的实际漂移速度, 应大于垂线积分模式计算所得垂线平均流速。因此, 在方案计算中选用 $b = 0.04$, 按公式(8)计算出风生流迭加潮流后的海面表层流场, 并以此作为 Lagrange 无质量标记点的轨迹计算依据。在每一种共生流场中, 又分别按高平、落急、低平、涨急四个潮流特征时刻投放标记点, 其点位代表油膜中心位置, 计算公式为:

$$x_i(t^n) = x_i(t^{n-1}) + \int_{t^{n-1}}^{t^n} \left\{ u_e[x_i(t^{n-1}), t] + \int_{t^{n-1}}^{t^n} u_e[x_i(t^{n-1}), t'] dt' \cdot \nabla_n u_e[x_i(t^{n-1}), t] \right\} dt \quad (9)$$

式中, u_e 为欧拉流速, 下标 i 为标记点号, 初始位置为 $x_i(t^0)$, n 为时步, t 为时刻, ∇_n 为算子。

利用三节点等参数三角元面积坐标, 易于求得新点位的插值欧拉流速, 进而求得更新点位。

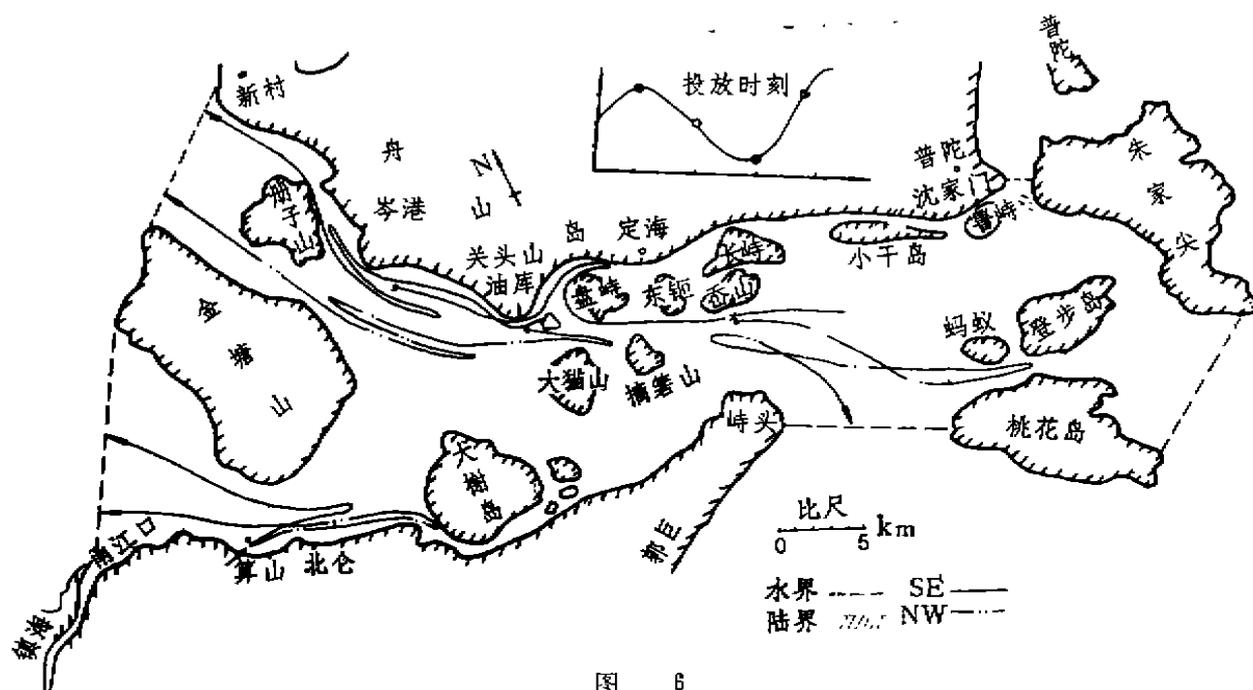


图 6

为便于比较和减省图幅，图 6 显示了在东南风和西北风两种相对主导风向的风和潮共生流作用下，落急时刻投放的无质量标记点的运动轨迹。

由图可见，岙山标记点在西北风、流作用下，经十几小时即可从桃花岛和峙头角之间跑出计算域，而在东南风作用下，经十几小时后到了册子山，说明岙山附近水体交换活跃。算山标记点无论是东南风还是西北风，均能在十二小时以内向西跑出金塘水道。关头山标记点在六种不同方向的风作用下，经历两个潮周后，均可跑出评价海域（以油泊位为中心，东西长 8km，向南 4km），而且有的可从金塘水道或册子水道跑出计算域，少数是从峙头角~桃花岛之间逸出，而未见有向沈家门或朱家尖南端运动的轨迹，因而可以推断，油膜污染区主要是在桃花岛至定海以西的海域，该区须重点防范。

计算表明，经六个全潮后，大多数标记点可跑出计算域，仅有少部分受风、潮作用紧贴海岛边缘滞留，估计是浅水陆边界计算流速甚小之故。从总体上说，舟山海域水体交换是活跃的。

求得不同时刻油膜中心位置后，按 P.C. Blokker 提出的油膜扩散直径的经验公式，可进一步预测油膜扩散范围。

$$D_t^3 - D_0^3 = \frac{24}{\pi} K (d_w - d_o) \frac{d_o}{d_w} V_o t \quad (10)$$

式中：\$D_0\$、\$D_t\$ 分别为油膜在初始时刻和 \$t\$ 时刻的直径 (m)，\$K = \text{const.}\$，对于中东原油，\$K = 15000/\text{min}\$。

\$d_w\$、\$d_o\$ 分别为水和油的比重。\$V_o\$ 为计算油量 (\$\text{m}^3\$)，\$t\$ 为时间 (以 min 计)。据此可算得溢油油膜在不同历时后的扩散直径和面积 (\$A_t = \frac{\pi}{4} D_t^2\$)，表 1 为计算结果。

由表 1 可知，\$100\text{m}^3\$ 溢油，经历一个潮周期 (12.42h)，其油膜扩散面积接近 \$1\text{km}^2\$，而 \$3000\text{m}^3\$

溢油在一个潮周后, 扩散面积可达 9.19km^2 。这是在静水理想状况下, 如在风潮等因素共同作用下, 其油膜形状会拉长, 扩散面积将更大。

通过上述计算分析, 油泊位附近一旦突发溢油事故, 即可根据溢油发生时刻、风向、潮流、油量、时间等参数, 有效地预测溢油油膜飘移方向和影响范围。

表 1 溢油油膜扩散直径和面积: $D_t(\text{m})$, $A_t(\text{m}^2)$

油量 $v_0(\text{m}^3)$	时间 t (min)	10	20	30	60	120	180	240	480	720
		D_t	209	264	302	380	479	548	604	761
	A_t	34306	54739	71631	113411	180202	235858	286526	454841	595835
100	D_t	264	332	380	479	604	691	761	958	1097
	A_t	54739	86570	113411	180202	286526	375013	454841	720810	945155
500	D_t	451	568	650	819	1032	1182	1300	1639	1876
	A_t	159751	253388	331831	528100	836468	1097300	1327323	2109832	2764111
1000	D_t	568	716	820	1032	1300	1489	1639	2065	2363
	A_t	253388	402639	528102	836468	1327323	1741323	2109832	3349114	4385482
3000	D_t	820	1032	1182	1489	1876	2147	2363	2978	3409
	A_t	528102	836468	1097300	1741323	2764111	3620378	4385481	6965291	9127333

四、水质模拟计算

为便于了解关头山、岙山和算山三油泊位所排含油废水造成环境海域本底值改变的协同影响, 计算中采用零值作为计算域的初边值。结果表明, 当三个排放口的含油废水(排放流量分别为: $Q_{关}=0.01876\text{m}^3/\text{s}$, $Q_{岙}=0.02695\text{m}^3/\text{s}$, $Q_{算}=0.02080\text{m}^3/\text{s}$)均达标排放(浓度为 $10\text{mg}/\text{l}$)时, 对环境水域影响甚微; 但当含油污水不处理直接排海(浓度达 $3000\text{mg}/\text{l}$)时, 将造成舟山内海域的严重污染, 有 $0.05\text{mg}/\text{l}$ 以上浓度增值的污染海域面积达 500km^2 (约占全计算域面积的 70%), 见图 7。

五、主要结论

1. 用二维浅水潮波方程和物质对流扩散方程, 配以相应的定解条件, 选用显式迎流有限元方法, 能较好地模拟具有复杂平面边界和众多岛屿的海域流场和污染物的迁移扩散。

2. 舟山海域除油泊位附近局部测区油污染超过 II 类海水标准外, 其余大部分海区水质介于 I ~ II 类。油码头正常使用后, 含油污水经处理达标排放对海域环境水质影响甚微, 不致改变原水质类别; 若遇事故, 污水不经处理直接排放, 舟山内海域将近有 90km^2 海域水质劣于 III 类水体, 排放口附近更有严重污染, 因此必须全力避免事故排放。

3. 拉格朗日无质量标记点追踪计算表明, 舟山内海域水体交换甚为活跃, 突发性溢油油膜中心运动轨迹计算及油膜扩散面积计算可用以预测在潮汐和风共同作用下, 溢油的漂移途径和影响范围, 为制订应急措施提供依据。

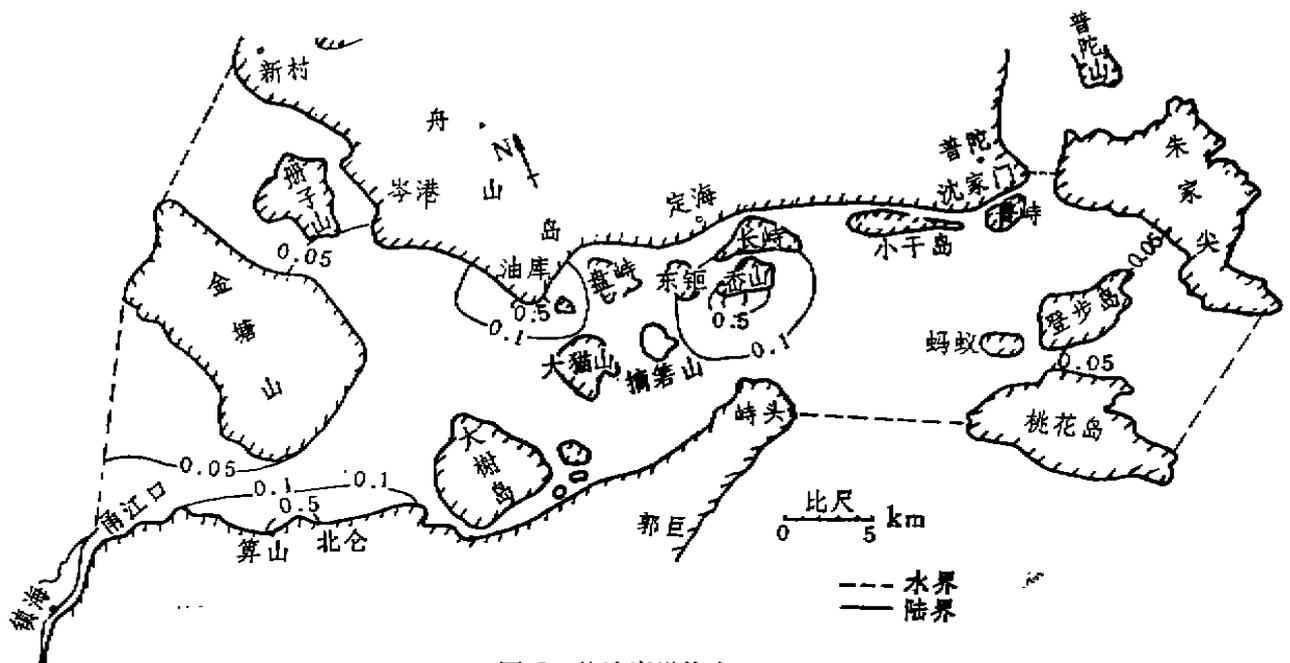


图 7 等浓度增值线

参 考 文 献

- [1] 耿兆铨, 二维非恒定流的显式迎流有限元模式, 全国第一届水动力学学术会议文集, 广州, 1984.
- [2] 耿兆铨, 倪勇强等, 北仑港二期工程排放废水对环境水质影响的数值分析, 东海海洋, 8卷1期, 1990.
- [3] Blokker, P. C., Spreading and Evaporation of Petroleum Products on Water, Proceedings of Ninth Harbor Conference, Antwerp, 1964.
- [4] Lehr, W. J., et al, Empirical Studies of the Spreading of Oil Spills, Oil and Petro-chemical Pollution, 1984.

Numerical Study of Oil Pollution on Sea Region

Geng Zhao-quan Ni Yong-qiang Chen Hang-pin

(Zhejiang Provincial Institute of Estuarine and Coastal Engineering Research)

Abstract

This paper adopts an upstream FEM of 2-D unsteady flow to calculate the tidal flow in Zhoushan sea area. Based on Verification of the tidal current and environmental situation, the effects of oily waste discharged from the oil berths on the water quality have been calculated. The moving locus of the slick centrepoint of oil spill and its spreading area have been calculated. The results indicate that the set of model can predict the transport of oil spill in the Zhoushan sea area over a relatively short period of time with reasonable accuracy.

Key words explicit upstream FEM model, unquality mark, oil spill, slick.