

渤海潮流污染扩散的数值模拟

窦振兴 罗远诠* 黄克辛 张存智 蔡广兴

(国家海洋局海洋环境保护研究所)

一、引 言

近十几年来,由于环境保护和管理的迫切需要和电子计算机的迅猛发展,污染扩散的数值研究获得重大的进展.国外不少学者曾做过自然水域的污染扩散数值研究,他们所建立的模型从一维定常解扩展到二维非定常解.目前鉴于三维流动模型仍很不完善,现行的模型大多数限于二维单层的或者分层的.模拟的污染指标,由保守性物质扩充到非保守性物质.在以往研究成果的基础上,环境数值模拟方法逐渐进入实用阶段.目前,一些工业发达国家在其环境政策中都明确规定了环境影响评价制度,并且把数值方法同实验模拟并列作为环境预测的主要方法之一.

本文是在以前工作^[1]的基础上,计算了潮流引起的污染扩散,以期逐步建立渤海水质控制模型.

二、数学模型

输运方程的一般形式是

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot p \vec{V} = \nabla \cdot (\kappa \nabla p) + s_m, \quad (1)$$

其中, p 为溶解物质的浓度, \vec{V} 是水质点的速度, s_m 表示源的强度,即单位体积内溶解物质在单位时间内的增加量, κ 是湍流扩散系数张量.

方程(1)是一个复杂的非线性偏微分方程,一般情况下得不到解析解.假定湍流场是均匀的和对称的, x_i 方向的湍流输运只与 $\partial p / \partial x_i$ 有关,则式(1)的三维形式可简化为

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(pu)}{\partial x} + \frac{\partial(pv)}{\partial y} + \frac{\partial(pw)}{\partial z} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial p}{\partial y} \right) \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial p}{\partial z} \right) + s_m. \end{aligned} \quad (2)$$

本文1981年7月9日收到.

*大连工学院.

在右手坐标系中对方程(2)从海面 ($z=\zeta$) 至海底 ($z=-h$) 求垂直积分, 运用 Leibnitz 公式变更积分微分符号的次序, 并利用海面和海底的湍流通量条件

$$\left[K_z \frac{\partial p}{\partial z} \right]_{z=\zeta} = \left[\frac{\partial z}{\partial x} K_z \frac{\partial p}{\partial x} \right]_{z=\zeta} + \left[\frac{\partial z}{\partial y} K_z \frac{\partial p}{\partial y} \right]_{z=\zeta}, \quad (3)$$

$$\left[K_z \frac{\partial p}{\partial z} \right]_{z=-h} = \left[\frac{\partial z}{\partial x} K_z \frac{\partial p}{\partial x} \right]_{z=-h} + \left[\frac{\partial z}{\partial y} K_z \frac{\partial p}{\partial y} \right]_{z=-h}. \quad (4)$$

得到以下深度平均的二维平流-扩散方程:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(H\bar{P})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(H\bar{P}\bar{U}) + \frac{\partial}{\partial y}(H\bar{P}\bar{V}) \\ & = \frac{\partial}{\partial x}\left(H\bar{K}_z \frac{\partial \bar{P}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(H\bar{K}_z \frac{\partial \bar{P}}{\partial y}\right) + s_m. \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $H=\zeta+h$, $\bar{P}, \bar{U}, \bar{V}, \bar{K}_z, \bar{K}_y$ 皆为深度平均值, \bar{P} 是化学耗氧量 COD 的深度平均

$$\text{浓度 } \bar{P} = \frac{1}{H} \int_{-h}^{\zeta} p dz, \text{ 为简单起见 } \bar{P} \text{ 记作 } P, \bar{U} = \frac{1}{h+\zeta} \int_{-h}^{\zeta} u dz, \bar{V} = \frac{1}{h+\zeta} \int_{-h}^{\zeta} v dz,$$

s_m 是 COD 的入海负荷量.

方程(5)左端后两项代表海水的整体运动所携带的物质平流; 右端前两项表示剪流和湍流脉动的联合扩散效应, 称为切向扩散或弥散^[2]. 鉴于目前对湍流机制尚不清楚, 弥散系数还没有确切的理论表达式. 在工程实践中, 多半采用半经验或纯经验的公式表示. 本文采用 Elder 的经验公式^[3].

纵向弥散系数

$$K_l = 5.93 \sqrt{g h u c}^{-1}, \quad (6)$$

侧向弥散系数

$$K_s = 0.23 \sqrt{g h u c}^{-1}.$$

在自然水流中, 通常 $K_l \ll K_s$, 即沿流动方向剪流引起的弥散占支配地位, 多数情况下侧向弥散可以忽略. 但是, 纵向弥散的质量输运又比平流质量输运小得多, 这可以从单位宽度上二者的质量通量之比值 R 作出估计:

$$R = \frac{H \bar{K}_z \frac{\partial P}{\partial x}}{H \bar{U} P} = \frac{\bar{K}_z}{\bar{U}} \frac{\partial}{\partial x} (\ln P),$$

据渤海污染监测资料估算, R 介于 10^{-3} — 10^{-4} . 由此可见, 方程(5)的解对于弥散系数的变动是不敏感的, 因而弥散系数取值的偏差不至于给计算结果带来很大的影响.

方程(5)的边界条件是: 在闭边界上

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0, \quad (7)$$

在开边界上, 流出时

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{n} \frac{\partial P}{\partial n} = 0, \quad (8)$$

流入时

$$P(x, y, t) = P_0(x, y). \tag{9}$$

P_0 是在开边界上 COD 的浓度.

方程 (5) 的初始条件是

$$P(x, y, 0) = P_i(x, y)$$

P_i 是计算域内 COD 初始浓度, 需要预先给定.

三、差分格式

在建立方程 (5) 的 ADI 差分格式时, 使用同潮流计算^[1]一样的网格坐标(图 1). P 的差分点与 ζ 的相同, K_x 和 K_y 的差分点分别与潮流分量 U 和 V 的差分点相同. 方程

(5) 中的平流输运项, 由于是空间非对称的, 不可使用空间中心差分. 事实上, 只有“下游”的浓度受“上游”的控制; 反之, 不成立. 因此, 对平流项的差分采用“逆流”格式. 按照 ADI 法的步骤, 不难导出方程 (5) 的如下差分公式: 在前半时间步长 $k\Delta t \rightarrow (k + \frac{1}{2})\Delta t$ 上,

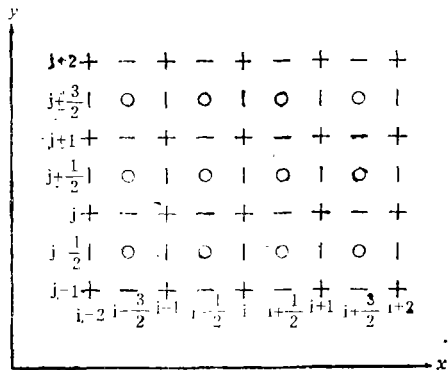


图 1 坐标和网格

$$A_{i-1, j} P_{i-1, j}^{k+\frac{1}{2}} + B_{i, j} P_{i, j}^{k+\frac{1}{2}} + C_{i+1, j} P_{i+1, j}^{k+\frac{1}{2}} = D_{i, j}, \tag{10}$$

其中系数

$$A_{i-1, j} = -\frac{\Delta t}{4\Delta s} \left(h_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + \zeta_{i-1, j}^{k+\frac{1}{2}} + \zeta_{i, j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \cdot \left[\beta U_{i-\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} + \frac{1}{\Delta s} (K_x)_{i-\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} \right],$$

$$B_{i, j} = \zeta_{i, j}^{k+\frac{1}{2}} + \frac{1}{4} \left(h_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} \right) + \frac{\Delta t}{4\Delta s} \left(h_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + \zeta_{i, j}^{k+\frac{1}{2}} + \zeta_{i+1, j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \cdot \left[\alpha U_{i+\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} + \frac{1}{\Delta s} (K_x)_{i+\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} \right] - \frac{\Delta t}{4\Delta s} \left(h_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + \zeta_{i-1, j}^{k+\frac{1}{2}} + \zeta_{i, j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \left[(1-\beta) U_{i-\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} - \frac{1}{\Delta s} (K_x)_{i-\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} \right],$$

$$\begin{aligned}
C_{i+1, j} &= \frac{\Delta t}{4\Delta s} \left(h_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + \xi_{i, j}^{k+\frac{1}{2}} + \xi_{i+\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \\
&\quad \cdot \left[(1-\alpha) U_{i+\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} - \frac{1}{\Delta s} (K_x)_{i+\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} \right], \\
D_{i, j} &= \frac{\Delta t}{4\Delta s} P_{i, j-1}^k \left(h_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + \xi_{i, j-1}^k + \xi_{i, j}^k \right) \left[\delta V_{i, j-\frac{1}{2}}^k \right. \\
&\quad \left. + \frac{1}{\Delta s} (K_y)_{i, j-\frac{1}{2}}^k \right] + P_{i, j}^k \left\{ \xi_{i, j}^k + \frac{1}{4} \left(h_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + h_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} \right) - \frac{\Delta t}{4\Delta s} \left(h_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + \xi_{i, j}^k \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \xi_{i, j+1}^k \right) \cdot \left[\gamma V_{i, j+\frac{1}{2}}^k + \frac{1}{\Delta s} (K_y)_{i, j+\frac{1}{2}}^k \right] + \frac{\Delta t}{4\Delta s} \left(h_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + h_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + \xi_{i, j-1}^k + \xi_{i, j}^k \right) \cdot \left[(1-\delta) V_{i, j-\frac{1}{2}}^k - \frac{1}{\Delta s} (K_y)_{i, j-\frac{1}{2}}^k \right] \right\} \\
&\quad - \frac{\Delta t}{4\Delta s} P_{i, j+1}^k \left(h_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + \xi_{i, j}^k + \xi_{i, j+1}^k \right) \left[(1-\gamma) V_{i, j+\frac{1}{2}}^k \right. \\
&\quad \left. - \frac{1}{\Delta s} (K_y)_{i, j+\frac{1}{2}}^k \right] + \frac{\Delta t}{2} (s_m)_{i, j}.
\end{aligned}$$

其中

$$\begin{cases} \alpha = 1, & \text{当 } U_{i+\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} \geq 0 \text{ 时,} \\ \alpha = 0, & \text{当 } U_{i+\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} < 0 \text{ 时;} \end{cases} \quad \begin{cases} \beta = 1, & \text{当 } U_{i-\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} \geq 0 \text{ 时,} \\ \beta = 0, & \text{当 } U_{i-\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} < 0 \text{ 时;} \end{cases} \\
\begin{cases} \gamma = 1, & \text{当 } V_{i, j+\frac{1}{2}}^k \geq 0 \text{ 时,} \\ \gamma = 0, & \text{当 } V_{i, j+\frac{1}{2}}^k < 0 \text{ 时;} \end{cases} \quad \begin{cases} \delta = 1, & \text{当 } V_{i, j-\frac{1}{2}}^k \geq 0 \text{ 时,} \\ \delta = 0, & \text{当 } V_{i, j-\frac{1}{2}}^k < 0 \text{ 时.} \end{cases}
\end{cases}$$

在后半时间步长 $(k + \frac{1}{2})\Delta t \rightarrow (k+1)\Delta t$ 上,

$$A_{i, j+1} P_{i, j+1}^{k+\frac{1}{2}} + B_{i, j} P_{i, j}^{k+\frac{1}{2}} + C_{i, j-1} P_{i, j-1}^{k+\frac{1}{2}} = D_{i, j}. \quad (11)$$

其中系数

$$\begin{aligned}
A_{i, j+1} &= \frac{\Delta t}{4\Delta s} \left(h_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + \xi_{i, j}^{k+\frac{1}{2}} + \xi_{i, j+1}^{k+\frac{1}{2}} \right) \\
&\quad \cdot \left[(1-\alpha) V_{i, j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - \frac{1}{\Delta s} (K_x)_{i, j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right],
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
B_{i,j} = & \xi_{i,j}^{k+1} + \frac{1}{4} \left(h_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} \right) \\
& + \frac{\Delta t}{4\Delta s} \left(h_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + \xi_{i,j}^{k+1} + \xi_{i,j+1}^{k+1} \right) \left[\alpha V_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \right. \\
& + \frac{1}{\Delta s} \left(K_y \right)_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1} \left. \right] - \frac{\Delta t}{4\Delta s} \left(h_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + \xi_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+1} \right. \\
& \left. + \xi_{i,j}^{k+1} \right) \left[(1-\beta) V_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} - \frac{1}{\Delta s} \left(K_y \right)_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+1} \right],
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_{i,j-1} = & -\frac{\Delta t}{4\Delta s} \left(h_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + \xi_{i,j-1}^{k+1} + \xi_{i,j}^{k+1} \right) \\
& \cdot \left[\beta V_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} + \frac{1}{\Delta s} \left(K_y \right)_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+1} \right],
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
D_{i,j} = & \frac{\Delta t}{4\Delta s} P_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} \left(h_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + \xi_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} + \xi_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \\
& \cdot \left[\delta U_{i-\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} + \frac{1}{\Delta s} \left(K_x \right)_{i-\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \right] + P_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \left\{ \xi_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + \frac{1}{4} \left(h_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} \right. \right. \\
& \left. \left. + h_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + h_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} \right) - \frac{\Delta t}{4\Delta s} \left(h_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} \right. \right. \\
& \left. \left. + h_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + \xi_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + \xi_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \left[\gamma U_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} + \frac{1}{\Delta s} \left(K_x \right)_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \right] \right. \\
& \left. + \frac{\Delta t}{4\Delta s} \left(h_{i-\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} + h_{i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + \xi_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}} + \xi_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \left[(1-\delta) \right. \right. \\
& \left. \left. \cdot U_{i-\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - \frac{1}{\Delta s} \left(K_x \right)_{i-\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \right] \right\} - \frac{\Delta t}{4\Delta s} P_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} \left(h_{i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}} \right. \\
& \left. + h_{i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}} + \xi_{i,j}^{k+\frac{1}{2}} + \xi_{i+1,j}^{k+\frac{1}{2}} \right) \left[(1-\gamma) U_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} - \frac{1}{\Delta s} \left(K_x \right)_{i+\frac{1}{2},j}^{k+\frac{1}{2}} \right] \\
& + \frac{\Delta t}{2} (s_m)_{i,j}.
\end{aligned}$$

其中

$$\begin{cases} \alpha = 1, & \text{当 } V_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \geq 0 \text{ 时,} \\ \alpha = 0, & \text{当 } V_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} < 0 \text{ 时;} \\ \beta = 1, & \text{当 } V_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} \geq 0 \text{ 时,} \\ \beta = 0, & \text{当 } V_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} < 0 \text{ 时;} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \gamma = 1, & \text{当 } U_{i+\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} \geq 0 \text{ 时,} \\ \gamma = 0, & \text{当 } U_{i+\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} < 0 \text{ 时;} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \delta = 1, & \text{当 } U_{i-\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} \geq 0 \text{ 时,} \\ \delta = 0, & \text{当 } U_{i-\frac{1}{2}, j}^{k+\frac{1}{2}} < 0 \text{ 时.} \end{cases}$$

方程 (10) 和 (11) 是三对角方程, 容易用追赶法求解, 交替使用 (10) 及 (11) 就可以求出所有结点上的 P 值.

四、计算输入条件

输入内容	取值
坐标及计算网格	见图 1
水深	从海图上读取, 订正到平均海平面深度, 边界水深不小于当地潮差.
步长	$\Delta S=10$ 公里, $\Delta t=30$ 分
流速和水位	第八个潮周期输出的潮流场和潮位场.
扩散系数	$\langle \frac{K_x}{K_y} \rangle = 5.93 \sqrt{g} hc^{-1} \cdot \langle \frac{ u }{ v } \rangle$
污染(COD)负荷量	沿岸 28 个主要排污河口的 COD 入海负荷量
边界值	闭边界: $\partial P / \partial n = 0$ 开边界: 流入 $P_{IE+1} = \text{const}$ (监测平均值). 流出 $P_{IE+1}^{k+\frac{1}{2}} = P_{IE+1}^k - \frac{\Delta t}{2\Delta S} U_{IE+\frac{1}{2}}^{k+\frac{1}{2}} (P_{IE+1}^k - P_{IE}^k)$.
初始值	参考污染监测资料确定
计算实时	通过数值试验确定

五、结果和讨论

全部计算是用自编程序 IMEP-TC 和 TD 在 SIEMENS 7·760 机上完成的, 所得主要结果如下:

(一) 潮流

在扩散模型中, 潮流是作为已知量提供的, 所以在扩散计算之前, 先算出流场, 并将其存入“数据库”, 备扩散计算时调用. 由于扩散计算对于潮流精度要求很高, 所以将潮流

计算延续到第八个潮周期, 此时输出的流场充分稳定, 而且较好地重现了实际潮流系统。从图 2—5 可大体看出渤海潮流的主要分布特征。

(二) 计算实时及初值的确定

扩散计算实时亦即浓度分布在全域达到平衡所需要的时间, 依赖于计算水域的范围和环流等自然条件。因此, 对于特定水域, 计算实时需要通过数值试验加以确定。

象渤海这样广大的海湾, 扩散计算实时往往很长。如果设全域的初始浓度为零, 污染负荷由污染源开始随时间逐渐向外扩散, 那么这一过程追踪到第 60 个潮周期 (一个月), 各计算点上 COD 浓度仍在急剧上升 (图 6), 表明此刻计算浓度与平衡浓度尚差很远, 甚至计算到三百个潮周期, 各点浓度仍有上升趋势。为缩短计算时间, 要求尽可能给定与实际分布相近的初始条件。本计算初始浓度参照多次渤海污染监测资料给定, 而且在湾口上, 也赋予监测平均浓度。这样一来, 计算收敛速度显著加快 (图 7)。从图上还可看出, 在三大海湾 (80, 692, 1130 号点), 浓度随时间的变化在前 30 个周期内比较明显, 到第 45 个潮周期时已趋平稳, 仅仅在渤海中部 (672 号点) 浓度仍继续上升。整体而言, 第 45 计算周期的浓度输出值与第 60 周期的结果几无多大差别。这表明在此初值条件下, 计算延续到 60 个潮周期已经足够了。

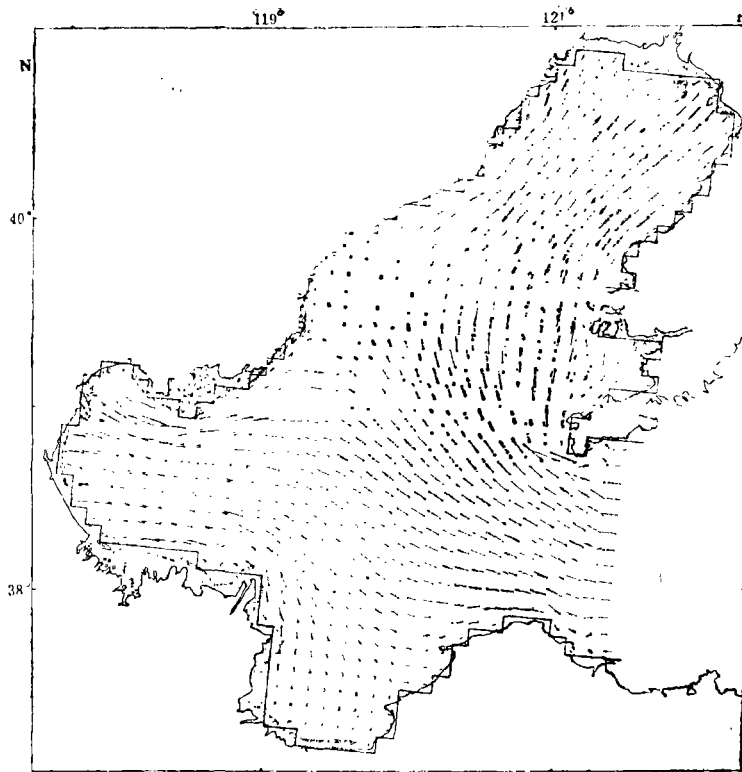


图 2 $t=0$ 时潮流场

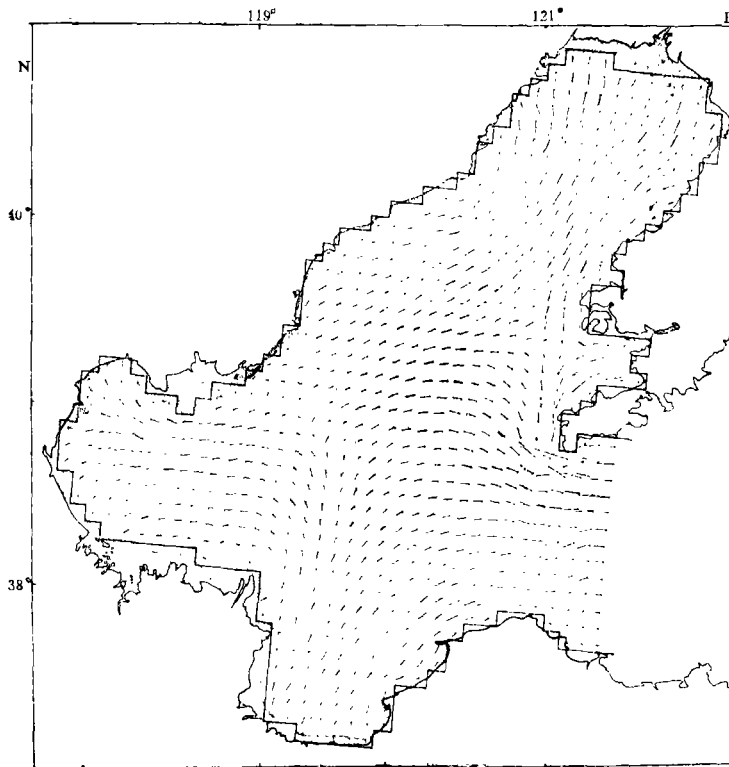


图 3 $t = \frac{1}{4}$ 时潮流场

(三) 渤海水质现状

图 8 表明, 用 1979 年入海污染 (COD) 负荷量资料计算出来的 COD 浓度平面分布。由图可见, 虽然大体上说目前渤海的水质尚属良好, 但是辽东湾的湾顶和渤海湾的西北部浓度较高, 其中又以大凌河口外广大滩面区为最高, 超过了水产一级水质标准, 这一带水域已经受到轻度污染。在渤海湾, 虽然流入负荷量很大, 但比大凌河口附近污染较轻, 因为这里水深流急, 且潮汐环流有利于污染物向外迁移, 污染物不易在此滞留。

除上述二个湾顶区域之外, 包括莱州湾在内的渤海广大水域, COD 浓度皆不超过 1ppm, 可以认为海水基本上是清洁的。

以上是渤海全年的平均水质状况。实际上, 由于废水的排海量有相当大的季节变化和月际变化, 即便是平均水质状况良好, 也不能排除在海湾、河口的某些局部区域出现水质污染的可能性, 1976—1978 年, 渤海湾夏季曾几度发生赤潮便是例证。因此, 对某些极端情况做出预测是很有实际意义的。

(四) 渤海水质预测

为了预测废水排放量对于水质的影响, 我们分别计算了①现有 (1979 年) 入海

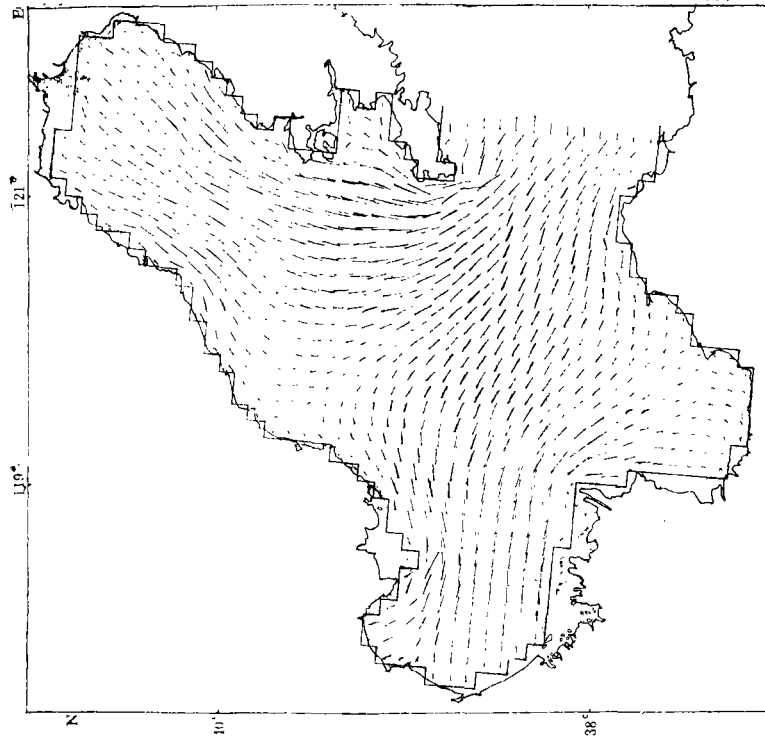


图 5 $t = \frac{3}{4}T$ 时潮流场

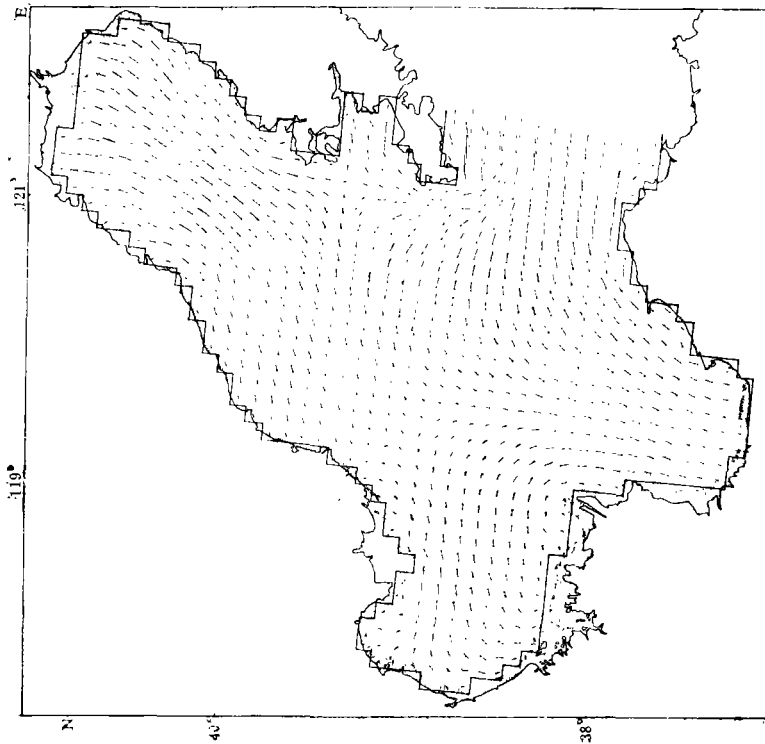


图 4 $t = \frac{2}{4}T$ 时潮流场

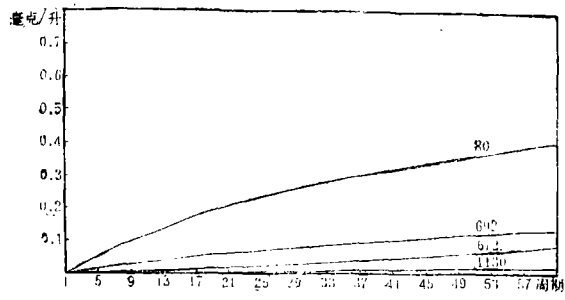


图 6 初值为零时 COD 浓度的增长过程

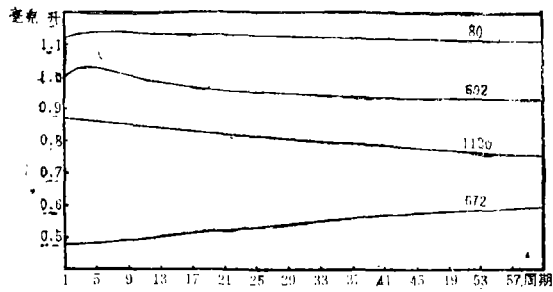


图 7 初值不为零时浓度的增长过程

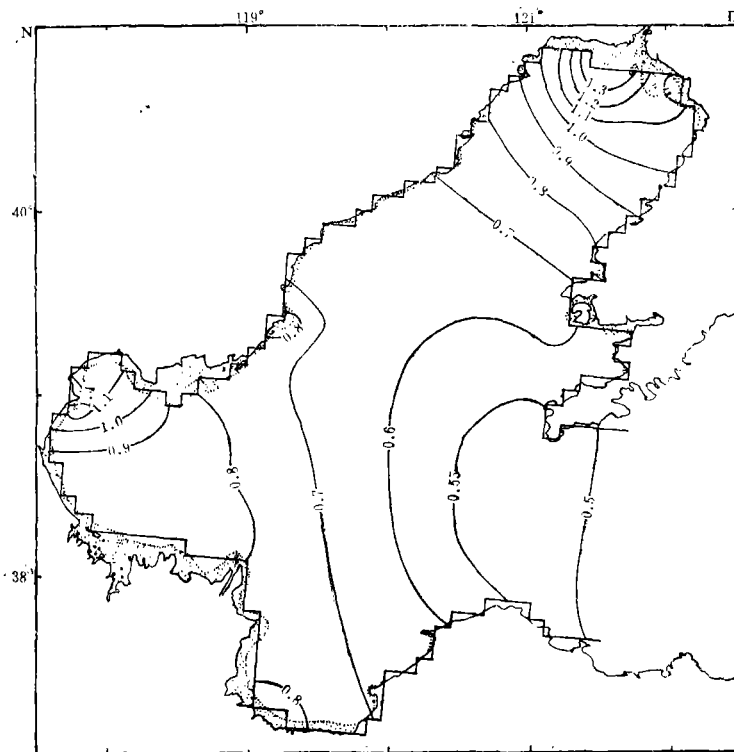


图 8 1979 年渤海 COD 浓度的平均分布

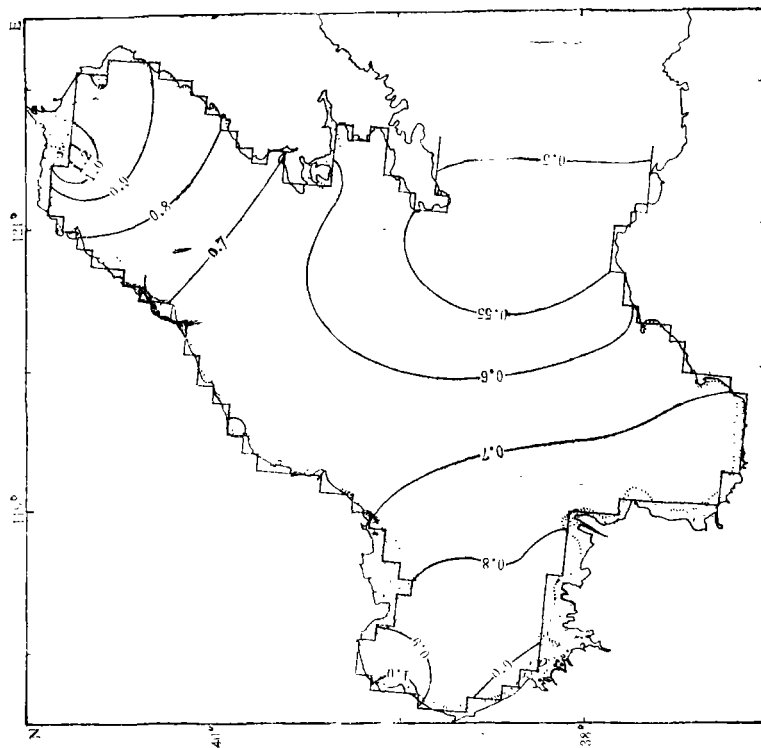


图 10 入海负荷量减半时浓度的分布

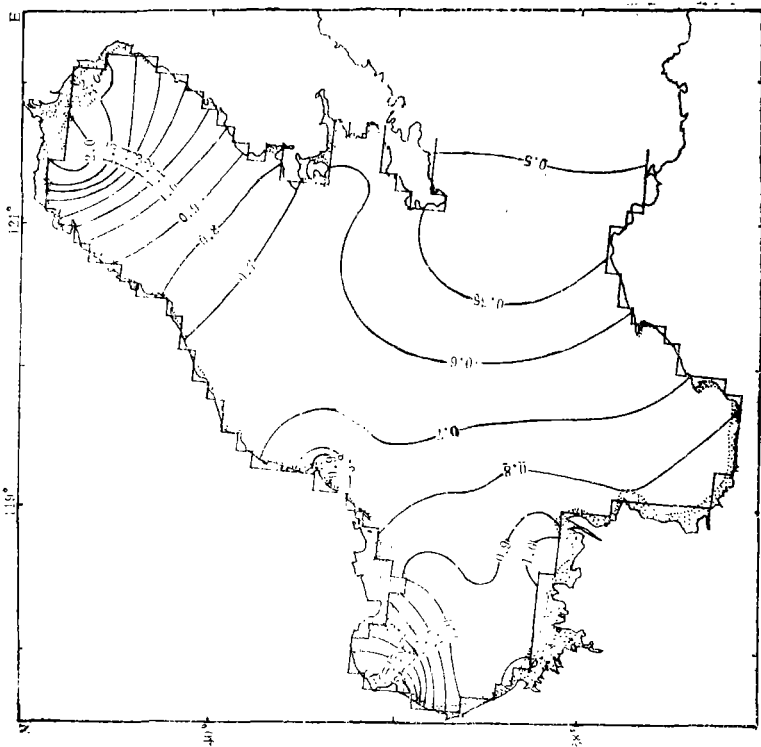


图 9 入海负荷总量增倍时浓度的分布

污染(COD)负荷增加一倍(图9)和②现有污染负荷减少一半(图10)这两种情况下渤海水质的变化。

由图9可以看出:在污染负荷增倍条件下,“外海”清洁水域(0.5—0.8ppm)的范围几乎没有变化,但海湾和河口附近的水质受到严重的影响,同图8相比,不论是辽东湾还是渤海湾,浓度梯度增大。大于1ppm的水域所占范围,随着入海污染负荷量的增加而成倍地扩大,尤其是2ppm以上的“污染区”扩展得更快——在辽东湾污染面积增加了3—4倍,而在渤海湾由于污染负荷量的增加也产生了这类“污染区”。图10表明入海污染负荷量减半给水质带来的显著变化:整个渤海,2ppm以上的“污染区”消失了,而且浓度大于1ppm的水域所占面积只有原来的四分之一左右。由此我们可以得出结论:就平均状况而言,渤海水质基本上是“良好”的,但是在辽东湾和渤海湾几个排污河口附近,水质已受到轻度污染。如果入海负荷量继续大量增加,将会招致沿岸鱼虾产卵繁殖场和浅滩养殖场地的破坏,从而危及整个渤海的生态系统。入海污染负荷量的增减,对于海湾和河口(排污口)附近水域的水质产生显著影响,但对“外海”水质影响甚微。无疑,渤海水域污染防治的重点区域,应该是主要排污河口和海湾。

参 考 文 献

- (1) 窦振兴等,海洋学报,3(1981),3,355—369.
- (2) James, A. (Ed.), *Mathematical model in water pollution control*, John Wiley & Sons Ltd., 1978, 193—225.
- (3) Leendertse, J. J., *A water-quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal seas*, Memo. RM-6230RC, The Rand Corp., 1970, 1—69.
- (4) 金子安雄·堀江毅·井上和男,港湾技术研究所报告,第十四卷,第一号,1975, 1—61.