

第五章 莱州湾潮流和污染物 扩散的数值模拟

为了定量地估计开发区周围海域的物理自净能力, 评价和预测环境质量, 除了现场海上观测和实验室水力模型实验之外, 通过建立数值模式, 用计算机对海水的流动和排放到海水中的污染物扩散分布规律进行数值模拟已成为有效方法。

用数值模拟的方法能够较好地重现研究区的流体运动和污染物在流体作用下的运输规律、污染物浓度的分布和变化。可以预测由于排污点位置的变化、污染排放量的改变对纳污水域水质的影响, 从而为合理利用海域的物理自净能力、估算海域的最大允许纳污量、实行污染排放控制、制定区域性排放量提供科学依据。

莱州湾是一半封闭的海湾, 是以半日分潮为主的海域。本章着重讨论莱州湾的主要半日分潮数值模拟及其沿岸所排放的 COD 污染物在主要半日分潮作用下的空间分布状况和扩散能力。

5.1 基本方程

一、浅水潮波方程

考虑到莱州湾的水平范围远远小于地球的半径, 因此在建立莱州湾潮波运动方程组时, 直角坐标系 xoy 平面与静止海平面重合, x 轴向东为正; y 轴向北为正; z 轴铅直向上为正 (如图 5.1 所示)。潮波的运动方程和连续方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = fv - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -fu - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} \quad (5.2)$$

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - g \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (5.4)$$

其中 t 为时间; u 、 v 和 w 分别为 x 、 y 和 z 向的流速分量; f 为柯氏参量 ($2\omega \sin\phi$), ω 为地球

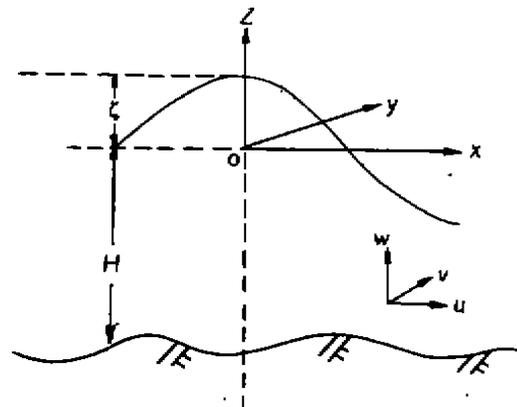


图 5.1 坐标系定义

自转速度, φ 为纬度; p 为流体压强; ρ 为海水密度; τ_x 和 τ_y 为在垂直于 z 轴面上作用于 x 和 y 方向的切应力。

利用式(5.4)可把式(5.1)和式(5.2)变为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(vu)}{\partial z} - fv + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} = 0 \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} + fu + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} = 0 \quad (5.6)$$

由式(5.3)得 $p = \rho g(\zeta - z) + p_0$, 在海面($z = \zeta$)上取 $p_0 = 0$ 得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial x} \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= \rho g \frac{\partial \zeta}{\partial y} \end{aligned} \right\} \quad (5.8)$$

把式(5.8)代入式(5.5)和式(5.6)得:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(vu)}{\partial z} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z} = 0 \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z} = 0 \quad (5.10)$$

考虑到莱州湾水浅(最大水深不超过 19m), 把该海域看成是充分混合的海域, 对式(5.4)、(5.9)和(5.10)进行二维化(即对水深方向平均化)处理, 定义平均流速为:

$$U = \frac{1}{H + \zeta} \int_{-H}^{\zeta} u dz$$

$$V = \frac{1}{H + \zeta} \int_{-H}^{\zeta} v dz$$

首先对连续方程式(5.4)进行垂直积分得:

$$\int_{-H}^{\zeta} \frac{\partial u}{\partial x} dz + \int_{-H}^{\zeta} \frac{\partial v}{\partial y} dz + \int_{-H}^{\zeta} \frac{\partial w}{\partial z} dz = 0 \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(H + \zeta)U] + \frac{\partial}{\partial y} [(H + \zeta)V] = 0 \quad (5.12)$$

同理, 对运动方程(5.9)和(5.10)垂直积分, 取 $\tau_x(\zeta) = 0, \tau_y(\zeta) = 0$, 可得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(H + \zeta)U] + \frac{\partial}{\partial x} [(H + \zeta)U^2] + \frac{\partial}{\partial y} [(H + \zeta)UV] \\ - f(H + \zeta)V + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} (H + \zeta) + \frac{1}{\rho} \tau_x(-H) = 0 \end{aligned} \quad (5.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} [(H + \zeta)V] + \frac{\partial}{\partial x} [(H + \zeta)UV] + \frac{\partial}{\partial y} [(H + \zeta)V^2] \\ + f(H + \zeta)U + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} (\zeta + H) + \frac{1}{\rho} \tau_y(-H) = 0 \end{aligned} \quad (5.14)$$

把式(5.12)代入式(5.13)和式(5.14), 取 $\tau_x(-H) = \rho \frac{g}{C^2} U \sqrt{U^2 + V^2}, \tau_y(-H) = \rho \frac{g}{C^2} V \sqrt{U^2 + V^2}$, 其中 C 为 Chezy 系数。由此得:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + gU \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{(H + \zeta)C^2} = 0 \quad (5.15)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + gV \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{(H + \zeta) C^2} = 0 \quad (5.16)$$

依据这些方程组即可模拟潮波。

由于莱州湾具有复杂的几何形状且存在摩擦和惯性效应，湾内潮流呈不均匀分布。另外，莱州湾的潮流分布既受从黄海进入的潮波系统的影响，又受渤海海湾潮波系统的影响。潮波的非线性耦合使水质点在一个潮周期产生一定的位移，成为潮致欧拉余流（以下简称潮余流）。因此，在数值模拟出莱州湾潮流的基础上，进而可以模拟出潮余流，其计算公式如下：

$$U_c = \frac{1}{T} \int_0^T U dt$$

其中 T 为半日分潮的周期。

二、污染物质扩散方程

根据物质守恒定律可以推导出：浓度为 P 的扩散物质，在分量为 U 、 V 和 W 的流场中，其扩散基本方程式为：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}\bar{p})}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v}\bar{p})}{\partial y} + \frac{\partial (\bar{w}\bar{p})}{\partial z} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (5.17)$$

式中 \bar{p} 、 \bar{u} 、 \bar{v} 、 \bar{w} 分别为 p 、 u 、 v 、 w 的时间平均量； D_x 、 D_y 、 D_z 分别为 x 、 y 、 z 方向的扩散系数。坐标系的定义与图 5.1 相同。

把式 (5.17) 在 z 轴方向上积分，并定义

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{H + \zeta} \int_{-H}^{\zeta} \bar{p} dz & U &= \frac{1}{H + \zeta} \int_{-H}^{\zeta} \bar{u} dz \\ K_x &= \frac{1}{H + \zeta} \int_{-H}^{\zeta} D_x dz & V &= \frac{1}{H + \zeta} \int_{-H}^{\zeta} \bar{v} dz \\ K_y &= \frac{1}{H + \zeta} \int_{-H}^{\zeta} D_y dz \end{aligned}$$

可得

$$\begin{aligned} \frac{\partial [(\zeta + H)P]}{\partial t} + \frac{\partial [(\zeta + H)UP]}{\partial x} + \frac{\partial [(\zeta + H)VP]}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[(H + \zeta) K_x \frac{\partial P}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(H + \zeta) K_y \frac{\partial P}{\partial y} \right] \end{aligned} \quad (5.18)$$

式(5.18)是不考虑有“源”情况下的污染物扩散方程。如果单位时间排放到单位体积海水中的污染物质质量为 S_s ，则污染物质扩散的方程式是：

$$\begin{aligned} \frac{\partial [(\zeta + H)P]}{\partial t} + \frac{\partial [(\zeta + H)UP]}{\partial x} + \frac{\partial [(\zeta + H)VP]}{\partial y} \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left[(\zeta + H) K_x \frac{\partial P}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\zeta + H) K_y \frac{\partial P}{\partial y} \right] + S_s \end{aligned} \quad (5.19)$$

5.2 数值方法

由于实际计算海域边界的复杂性和运动方程中包含有非线性项，因此要求出方程组(5.12)、(5.15)、(5.16)和(5.19)的解析解是不可能的，一般只能采取数值解法。这里选用ADI法求数值解。

一、网格和变量的位置

ADI法采用空间交错网格。水位、流速和污染物的浓度等诸变量在网格上的位置如图5.2所示，且网格距 $\Delta x = \Delta y = \Delta s$ 。

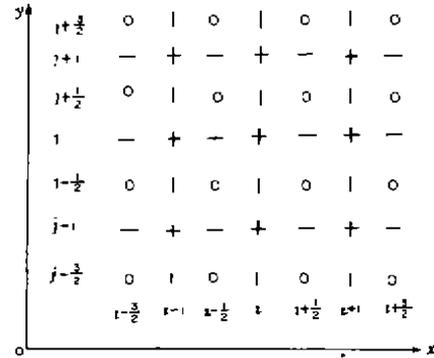


图 5.2 网格和变量的位置

+: ξ (水位), o (扩散系数), P (污染物浓度);
 0: H (水深); -: U (x 轴方向流速分量);
 |: V (y 轴方向流速分量)

二、潮流计算差分式

首先在时间步 $k\Delta t \sim (k + \frac{1}{2})\Delta t$ 内，分别在 (i, j) 、 $(i + \frac{1}{2}, j)$ 和 $(i, j + \frac{1}{2})$ 各点对方程(5.12)、(5.15)和(5.16)进行差分。

式(5.12)在点 (i, j) 差分得：

$$\begin{aligned} & \frac{\xi_{i,j}^{k+1/2} - \xi_{i,j}^k}{\Delta t} + \frac{1}{2\Delta S} [(H_{i+1/2,j+1/2} + H_{i+1/2,j-1/2} + \xi_{i+1,j}^k + \xi_{i,j}^k) U_{i+1/2,j}^{k+1/2} \\ & - (H_{i-1/2,j-1/2} + H_{i-1/2,j+1/2} + \xi_{i,j}^k + \xi_{i-1,j}^k) U_{i-1/2,j}^{k+1/2}] \\ & + \frac{1}{2\Delta S} [(H_{i+1/2,j+1/2} + H_{i-1/2,j+1/2} + \xi_{i,j+1}^k + \xi_{i+1,j}^k) V_{i,j+1/2}^{k+1/2} \\ & - (H_{i+1/2,j-1/2} + H_{i-1/2,j-1/2} + \xi_{i,j}^k + \xi_{i,j-1}^k) V_{i,j-1/2}^{k+1/2}] = 0 \quad (5.20) \end{aligned}$$

式(5.15)在点 $(i + \frac{1}{2}, j)$ 差分得：

$$\begin{aligned} & \frac{U_{i+1/2,j}^{k+1/2} - U_{i+1/2,j}^k + U_{i+1/2,j}^{k+1/2}}{\Delta t} + U_{i+1/2,j}^k \frac{U_{i+3/2,j}^k - U_{i-1/2,j}^k}{2\Delta S} + \bar{V}_{i+1/2}^k \frac{U_{i+1/2,j+1}^k - U_{i+1/2,j-1}^k}{2\Delta S} \\ & + f\bar{V}_{i+1/2}^k + g \frac{\xi_{i+1,j}^{k+1/2} - \xi_{i,j}^{k+1/2}}{\Delta S} \\ & + \frac{gU_{i+1/2,j}^k \sqrt{(U_{i+1/2,j}^k)^2 + (\bar{V}_{i+1/2}^k)^2}}{\frac{1}{8} (H_{i+1/2,j+1/2} + H_{i+1/2,j-1/2} + \xi_{i,j}^k + \xi_{i+1,j}^k) (C_{i+1,j} + C_{i,j})^2} = 0 \quad (5.21) \end{aligned}$$

式 (5.16) 在点 $(i, j + \frac{1}{2})$ 差分得:

$$\begin{aligned} & \frac{V_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} - V_{i,j+\frac{1}{2}}^k}{\frac{\Delta t}{2}} + \bar{U}_{j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} \frac{V_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} - V_{i-1,j+\frac{1}{2}}^k}{2\Delta S} + V_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} \frac{V_{i,j+\frac{3}{2}}^k - V_{i,j-\frac{1}{2}}^k}{2\Delta S} \\ & + f\bar{U}_{j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} + g \frac{\zeta_{i,j+1}^{k+1} - \zeta_{i,j}^k}{\Delta S} \\ & + \frac{gV_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} \sqrt{(\bar{U}_{j+\frac{1}{2}}^{k+1/2})^2 + (V_{i,j+\frac{1}{2}}^k)^2}}{\frac{1}{8} (H_{i+1/2,j+1/2} + H_{i-1/2,j+1/2} + \zeta_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} + \zeta_{i,j}^{k+1/2}) (C_{i,j} + C_{i,j+1})^2} = 0 \end{aligned} \quad (5.22)$$

以上式中

$$\begin{aligned} V_{i+1/2}^k &= \frac{1}{4} (V_{i,j+1/2}^k + V_{i,j-1/2}^k + V_{i+1,j-1/2}^k + V_{i-1,j+1/2}^k) \\ \bar{U}_{j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} &= \frac{1}{4} (U_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1/2} + U_{i+\frac{1}{2},j+1}^{k+1/2} + U_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1/2} + U_{i+\frac{1}{2},j+1}^{k+1/2}) \end{aligned}$$

在时间步 $(k + \frac{1}{2}) \Delta t \sim (k+1) \Delta t$ 内, 分别在点 (i, j) 、 $(i + \frac{1}{2}, j)$ 和 $(i, j + \frac{1}{2})$ 对方程式 (5.12)、(5.15) 和 (5.16) 差分:

式 (5.12) 在点 (i, j) 差分得:

$$\begin{aligned} & \frac{\zeta_{i,j}^{k+1} - \zeta_{i,j}^k}{\frac{\Delta t}{2}} + \frac{1}{2\Delta S} [(H_{i+1/2,j+1/2} + H_{i+1/2,j-1/2} + \zeta_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} + \zeta_{i,j}^{k+1/2}) U_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1/2} \\ & - (H_{i-1/2,j-1/2} + H_{i-1/2,j+1/2} + \zeta_{i,j}^{k+1/2} + \zeta_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1/2}) U_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1/2}] \\ & + \frac{1}{2\Delta S} [(H_{i+1/2,j+1/2} + H_{i-1/2,j+1/2} + \zeta_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} + \zeta_{i,j}^{k+1/2}) V_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} \\ & - (H_{i+1/2,j-1/2} + H_{i-1/2,j-1/2} + \zeta_{i,j}^{k+1/2} + \zeta_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+1/2}) V_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+1/2}] = 0 \end{aligned} \quad (5.23)$$

式 (5.15) 在点 $(i + \frac{1}{2}, j)$ 差分得:

$$\begin{aligned} & \frac{U_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1/2} - U_{i+\frac{1}{2},j}^k}{\frac{\Delta t}{2}} + U_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1/2} \frac{U_{i-\frac{3}{2},j}^{k+1/2} - U_{i-\frac{1}{2},j}^k}{2\Delta S} + V_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1/2} \frac{U_{i+\frac{1}{2},j+1}^{k+1/2} - U_{i+\frac{1}{2},j-1}^k}{2\Delta S} \\ & + fV_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1/2} + g \frac{\zeta_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1/2} - \zeta_{i+\frac{1}{2},j}^k}{\Delta S} \\ & + \frac{gU_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1/2} \sqrt{(U_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1/2})^2 + (V_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1/2})^2}}{\frac{1}{8} (H_{i+1/2,j+1/2} + H_{i+1/2,j-1/2} + \zeta_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1/2} + \zeta_{i+\frac{1}{2},j}^k) (C_{i+\frac{1}{2},j} + C_{i,j})^2} = 0 \end{aligned} \quad (5.24)$$

式 (5.16) 在点 $(i, j + \frac{1}{2})$ 差分得:

$$\frac{V_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} - V_{i,j+\frac{1}{2}}^k}{\frac{\Delta t}{2}} + \bar{U}_{j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} \frac{V_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} - V_{i-1,j+\frac{1}{2}}^k}{2\Delta S} + V_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1/2} \frac{V_{i,j+\frac{3}{2}}^k - V_{i,j-\frac{1}{2}}^k}{2\Delta S}$$

$$\begin{aligned}
 & + f\bar{U}_{i+1/2}^k + g \frac{\zeta_{i,j+1}^{k+1} - \zeta_{i,j}^{k+1}}{\Delta S} \\
 & + \frac{gV_{i,j+1/2}^{k+1/2} \sqrt{(U_{i+1/2}^{k+1/2})^2 + (V_{i,j+1/2}^{k+1/2})^2}}{\frac{1}{8} (H_{i+1/2,j+1/2} + H_{i-1/2,j+1/2} + \zeta_{i,j+1/2}^{k+1/2} + \zeta_{i,j}^{k+1/2}) (C_{i,j} + C_{i,j+1})^2} = 0
 \end{aligned} \quad (5.25)$$

式中

$$\bar{V}_{i,j+1/2}^k = \frac{1}{4} (V_{i,j+1/2}^{k+1} + V_{i,j-1/2}^{k+1} + V_{i+1/2,j-1/2}^{k+1} + V_{i-1/2,j+1/2}^{k+1})$$

在上述各差分式中,有些项已做了显式处理,其目的是为了计算线性化和稳定化。为了便于用计算机进行计算,可将式(5.20)和式(5.21)做进一步处理,得一般式:

$$\zeta_{i,j}^{k+1/2} = -P_i U_{i+1/2,j}^{k+1/2} + Q_i \quad (5.26)$$

$$U_{i+1/2,j}^{k+1/2} = -R_{i-1} \zeta_{i,j}^{k+1/2} + S_{i-1} \quad (5.27)$$

其中,

$$P_i = \frac{r_{i+1/2}}{1 + r_{i-1/2} R_{i-1}}$$

$$Q_i = \frac{A_i + r_{i-1/2} S_{i-1}}{1 + r_{i-1/2} R_{i-1}}$$

$$R_i = \frac{r_{i+1}}{r'_{i+1/2} + r_i P_i}$$

$$S_i = \frac{B_{i+1/2} + r_i Q_i}{r'_{i+1/2} + r_i P_i}$$

$$\begin{aligned}
 A_i = \zeta_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{4\Delta S} [& (H_{i+1/2,j+1/2} + H_{i-1/2,j+1/2} + \zeta_{i,j}^k + \zeta_{i,j+1}^k) V_{i,j+1/2}^k \\
 & - (H_{i+1/2,j-1/2} + H_{i-1/2,j-1/2} + \zeta_{i,j-1}^k + \zeta_{i,j}^k) V_{i,j-1/2}^k]
 \end{aligned}$$

$$B_{i+1/2} = U_{i+1/2,j}^k + \frac{\Delta t}{2} \left\{ f\bar{V}_{i+1/2}^k - \frac{1}{2\Delta S} \bar{V}_{i+1/2}^k (U_{i+1/2,j+1}^k - U_{i+1/2,j-1}^k) \right\}$$

$$-gU_{i+1/2,j}^k \frac{\sqrt{(U_{i+1/2,j}^k)^2 + (\bar{V}_{i+1/2}^k)^2}}{\frac{1}{8} (H_{i+1/2,j+1/2} + H_{i+1/2,j-1/2} + \zeta_{i,j}^k + \zeta_{i+1,j}^k) (C_{i,j} + C_{i+1,j})^2}$$

$$r_i = \frac{\Delta t}{2\Delta S} g$$

$$r'_{i+1/2} = 1 + \frac{\Delta t}{4\Delta S} (U_{i+1/2,j}^k - U_{i-1/2,j}^k)$$

由式(5.26)和式(5.27)可以看出,为了解出 ζ 、 U 和 V ,首先在 x 轴上,沿着 i 增加的方向求出 P_i 、 Q_i 、 R_i 、 S_i 。然后交替地使用式(5.26)和式(5.27),沿着 i 减小的方向求出 ζ 和 U ,再把求出的 ζ 和 U 代入式(5.22),沿着 j 增加的方向求出 V 。

在后半时间步 $(k + \frac{1}{2}) \Delta t \sim (k + 1) \Delta t$ 内,可用同样的方法得到如下一般式:

$$\zeta_{i,j}^{k+1} = -P_j V_{i,j+1/2}^{k+1} + q_j \quad (5.28)$$

$$V_{i,j+1/2}^{k+1} = -r_{j-1} \zeta_{i,j}^{k+1} + S_{j-1} \quad (5.29)$$

其中

$$\begin{aligned}
 P_2 &= \frac{r'_{j+1/2}}{1+r'_{j-1/2}r_{j-1}} \\
 q_j &= \frac{a_j^{k+1/2}+r'_{j-1/2}S_{j-1}}{1+r'_{j-1/2}r_{j-1}} \\
 r_2 &= \frac{r'_{j+1}}{r'_{j+1/2}+r'_jP_2} \\
 S_2 &= \frac{b_{j+1/2}^{k+1/2}+r'_jq_j}{r''_{j+1/2}+r'_jP_2} \\
 a_2^{k+1/2} &= \zeta_{i,j}^{k+1/2} - \frac{\Delta t}{4\Delta S} \left[(H_{i+1/2,j+1/2}+H_{i+1/2,j-1/2}+\zeta_{i,j}^{k+1/2}+\zeta_{i,j}^{k+1/2}) U_{i+1/2,j}^{k+1/2} \right. \\
 &\quad \left. - (H_{i-1/2,j+1/2}+H_{i-1/2,j-1/2}+\zeta_{i,j}^{k+1/2}+\zeta_{i,j}^{k+1/2}) U_{i-1/2,j}^{k+1/2} \right] \\
 b_{j+1/2}^{k+1/2} &= V_{i,j+1/2}^{k+1/2} + \frac{\Delta t}{2} \left[f\bar{U}_{i,j+1/2}^{k+1/2} - \frac{1}{2\Delta S} \bar{U}_{i,j+1/2}^{k+1/2} (V_{i,j+1/2}^{k+1/2} - V_{i,j+1/2}^{k+1/2}) \right] \\
 &\quad - \frac{gV_{i,j+1/2}^{k+1/2} \sqrt{(V_{i,j+1/2}^{k+1/2})^2 + (\bar{U}_{i,j+1/2}^{k+1/2})^2}}{\frac{1}{8} (H_{i+1/2,j+1/2}+H_{i-1/2,j+1/2}+\zeta_{i,j}^{k+1/2}+\zeta_{i,j}^{k+1/2}) (C_{i,j}+C_{i,j+1})^2} \\
 r'_j &= \frac{\Delta t}{2\Delta S} g \\
 r''_{j+1/2} &= 1 + \frac{\Delta t}{2\Delta S} (V_{i,j+1/2}^{k+1/2} - V_{i,j-1/2}^{k+1/2})
 \end{aligned}$$

由此知，为了在后半时间 $(k+\frac{1}{2}) \Delta t \sim (k+1) \Delta t$ 内求出 ζ, U, V ，可在 y 轴上，沿 j 增加的方向求出 P, q, r ，和 S 。然后交替地使用式 (5.28) 和式 (5.29)，沿着 j 减小的方向求出 ζ, V ，再把求出的 ζ 和 V 代入式 (5.24)，沿着 i 增加的方向求出 U 。

三、扩散计算的差分式

与潮流计算的差分方法类似，在点 (i, j) 对 (5.19) 式进行差分。在 $k\Delta t \sim (k+\frac{1}{2}) \Delta t$ 时间内，在 x 轴方向差分，式 (5.19) 左边第 1 项、第 2 项和右边第 1 项的 ζ, U 和 P 。取 $(k+\frac{1}{2}) \Delta t$ 时刻值，其它各项用 $k\Delta t$ 时刻的值；在 $(k+\frac{1}{2}) \Delta t \sim (k+1) \Delta t$ 时间内，在 y 轴方向差分，式 (5.19) 左边的第 1 和第 3 项和右边的第 2 项的 ζ, U 和 P 取 $(k+1) \Delta t$ 时刻值，其他各项用 $(k+\frac{1}{2}) \Delta t$ 时刻时的值。对差分式进行整理，可得到在 $k\Delta t \sim (k+\frac{1}{2}) \Delta t$ 时间内，点 (i, j) 的浓度 $P_{i,j}^{k+1/2}$ 的差分计算式：

$$P_{i,j} = E_{i+1}P_{i+1} + Q_{i+1} \tag{5.30}$$

其中

$$\begin{aligned}
 E_{i+1} &= \frac{c_i}{b_i + a_i E_i}, \quad Q_{i+1} = \frac{d_i - a_i Q_i}{b_i + a_i E_i} \\
 a_i &= \frac{\beta \Delta t}{4\Delta S} (H_{i-1/2,j-1/2} + H_{i-1/2,j+1/2} + \zeta_{i,j}^{k+1/2} + \zeta_{i,j}^{k+1/2}) U_{i,j}^{k+1/2},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{\Delta t}{4(\Delta S)^2}(H_{i-1/2,j-1/2}+H_{i-1/2,j+1/2}+\zeta_{i,j}^{k+1/2}+\zeta_{i,j}^{k+1/2})(K_x)_{i,j}^{k+1/2}, \\
b_i = & \frac{1}{4}(H_{i-1/2,j-1/2}+H_{i+1/2,j-1/2}+H_{i-1/2,j+1/2}+H_{i+1/2,j+1/2}+4\zeta_{i,j}^{k+1/2}) \\
& +\frac{\alpha\Delta t}{4\Delta S}(H_{i+1/2,j-1/2}+H_{i+1/2,j+1/2}+\zeta_{i,j}^{k+1/2}+\zeta_{i+1,j}^{k+1/2})U_{i+1/2,j}^{k+1/2}, \\
& -\frac{(1-\beta)\Delta t}{4\Delta S}(H_{i-1/2,j-1/2}+H_{i-1/2,j+1/2}+\zeta_{i-1,j}^{k+1/2}+\zeta_{i,j}^{k+1/2})U_{i-1/2,j}^{k+1/2}, \\
& +\frac{\Delta t}{4(\Delta S)^2}(H_{i+1/2,j-1/2}+H_{i+1/2,j+1/2}+\zeta_{i,j}^{k+1/2}+\zeta_{i+1,j}^{k+1/2})(K_x)_{i+1/2,j}^{k+1/2}, \\
& +\frac{\Delta t}{4(\Delta S)^2}(H_{i-1/2,j-1/2}+H_{i-1/2,j+1/2}+\zeta_{i-1,j}^{k+1/2}+\zeta_{i,j}^{k+1/2})(K_x)_{i-1/2,j}^{k+1/2}, \\
c_i = & \frac{(1-\alpha)\Delta t}{4\Delta S}(H_{i+1/2,j-1/2}+H_{i+1/2,j+1/2}+\zeta_{i,j}^k+\zeta_{i+1,j}^k)U_{i+1/2,j}^{k+1/2}, \\
& -\frac{\Delta t}{4(\Delta S)^2}(H_{i+1/2,j-1/2}+H_{i+1/2,j+1/2}+\zeta_{i,j}^{k+1/2}+\zeta_{i+1,j}^{k+1/2})(K_x)_{i+1/2,j}^{k+1/2}, \\
d_i = & \frac{1}{4}(H_{i-1/2,j-1/2}+H_{i+1/2,j-1/2}+H_{i-1/2,j+1/2}+H_{i+1/2,j+1/2}+4\zeta_{i,j}^k)P_{i,j}^k, \\
& -\frac{\Delta t}{4\Delta S}(H_{i-1/2,j+1/2}+H_{i+1/2,j+1/2}+\zeta_{i,j}^k+\zeta_{i,j+1}^k)V_{i,j+1/2}^k(\tau P_{i,j}^k+(1-\tau)P_{i,j+1}^k) \\
& +\frac{\Delta t}{4\Delta S}(H_{i-1/2,j-1/2}+H_{i+1/2,j-1/2}+\zeta_{i,j-1}^k+\zeta_{i,j}^k)V_{i,j-1/2}^k(\delta P_{i,j-1}^k+(1-\delta)P_{i,j}^k) \\
& +\frac{\Delta t}{4(\Delta S)^2}(H_{i-1/2,j+1/2}+H_{i+1/2,j+1/2}+\zeta_{i,j}^k+\zeta_{i,j+1}^k)(K_y)_{i,j+1/2}^k(P_{i,j+1}^k-P_{i,j}^k) \\
& -\frac{\Delta t}{4(\Delta S)^2}(H_{i-1/2,j-1/2}+H_{i+1/2,j-1/2}+\zeta_{i,j-1}^k+\zeta_{i,j}^k)(K_y)_{i,j-1/2}^k(P_{i,j}^k-P_{i,j-1}^k)+\frac{\Delta t}{2}S_m \\
\alpha = & \begin{cases} 1, & \text{当 } U_{i+1/2,j}^{k+1/2} \geq 0 \\ 0, & \text{当 } U_{i+1/2,j}^{k+1/2} < 0, \end{cases} & \beta = \begin{cases} 1, & \text{当 } U_{i-1/2,j}^{k+1/2} \geq 0 \\ 0, & \text{当 } U_{i-1/2,j}^{k+1/2} < 0, \end{cases} \\
\gamma = & \begin{cases} 1, & \text{当 } V_{i,j+1/2}^k \geq 0 \\ 0, & \text{当 } V_{i,j+1/2}^k < 0, \end{cases} & \delta = \begin{cases} 1, & \text{当 } V_{i,j-1/2}^k \geq 0 \\ 0, & \text{当 } V_{i,j-1/2}^k < 0. \end{cases}
\end{aligned}$$

Δt 、 ΔS 分别为时间步长和空间步长。

以上差分式中给出 α 、 β 、 γ 和 δ 的值随流向而定,其原因是在原差分式中出现的浓度平均若采用空间平均,就会出现负浓度,特别是在污染源附近。为了防止这种现象,而用上游的浓度代替空间平均。

在后半时间步 $(k+\frac{1}{2})\Delta t \sim (k+1)\Delta t$ 内,点 (i,j) 的浓度 $P_{i,j}^{k+1/2}$ 的差分计算公式,只需将上述前半时间步的差分式作置换 $k+\frac{1}{2} \rightarrow k+1$, $U \rightarrow V$, $V \rightarrow U$, $x \rightarrow y$, $y \rightarrow x$, $i \rightarrow j$, $j \rightarrow i$ 即可。

5.3 计算条件

莱州湾潮流和污染扩散的数值模拟分为两步,第一步数值模拟出莱州湾的水位和潮流;第

二步数值计算投放到莱州湾的污染物在主要半日潮流作用下的分布规律。数值模拟计算的一些必要条件如下。

一、潮流计算的必要条件

1. 网格和水深

计算用网格是依据海军航道测量部 1956 年出版的 5001 和 5002 海图绘制的, 取 $\Delta x = \Delta y = \Delta S = 5\text{km}$, 计算海域如图 5.3 所示。水深是海图深度基准数在一个网格内的平均值加上 1.8m 作为平均海平面的高度。

2. 初始条件

取全域从静止状态开始, 即全域当 $t=0$ 时, $\zeta = U = V = 0$

3. 闭边界条件

取垂直于陆海交界的流速为零。但在莱州湾西部和西南部, 由于潮滩宽广, 若取闭边界上流速的法向分量为零已与这里实际流况不符, 为此在莱州湾潮滩宽处采用法向导数外推法来模拟潮滩边界 (雷光跃、徐洪达等 1983), 做法是:

设边界为 Γ , 其法线方向为 n , 取

$$\frac{\partial F}{\partial n} \Big|_{\Gamma^{\text{外}}} = \delta \frac{\partial F}{\partial n} \Big|_{\Gamma^{\text{内}}} \quad (5.31)$$

其中 F 为 ζ , U 或 V ; δ 为外推系数, 取值为 $\frac{1}{2} > \delta > 1$ 。

依据式 (5.31), 做差分近似, 即可得出潮滩处计算边界外侧网格点上 ζ , U 和 V 的值: 在左边界外侧有:

$$\begin{aligned} \zeta_{i-1,j} &= \zeta_{i,j} + \delta (\zeta_{i,j} - \zeta_{i+1,j}) \\ U_{i-1/2,j} &= U_{i+1/2,j} + \delta (U_{i+1/2,j} - U_{i+3/2,j}) \\ V_{i-1,j+1/2} &= V_{i,j+1/2} + \delta (V_{i,j+1/2} - V_{i+1,j+1/2}) \end{aligned}$$

在下边界外侧有:

$$\begin{aligned} \zeta_{i,j-1} &= \zeta_{i,j} + \delta (\zeta_{i,j} - \zeta_{i,j+1}) \\ U_{i+1/2,j-1} &= U_{i+1/2,j} + \delta (U_{i+1/2,j} - U_{i+1/2,j+1}) \\ V_{i,j-1/2} &= V_{i,j+1/2} + \delta (V_{i,j+1/2} - V_{i,j+3/2}) \end{aligned}$$

4. 开边界

开边界 (水边界) 两端点用正规正弦波给出, 即

$$\zeta = H_{M_2} \sin \left(2\pi \frac{\Delta t}{T} - Q_{M_2} \right)$$

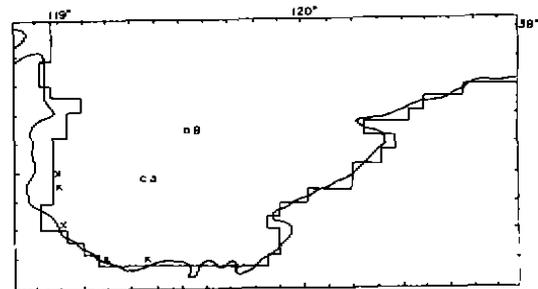


图 5.3 计算海域

$$\text{或} \quad \zeta = (H_{M_2} + H_{S_2}) \sin(2\pi \frac{\Delta t}{T} - Q_{M_2})$$

式中 H_{M_2} 和 H_{S_2} 分别为 M_2 和 S_2 分潮的振幅; Q_{M_2} 为 M_2 分潮位相; T 为 M_2 分潮周期, 取 $T=12.8\text{h}$ 。

开边界中间各点调和常数根据两端点调和常数用线性内插求得。

5. 糙度系数

糙度系数有多种选择, 本文取

$$C = \frac{1}{n} (H)^{\frac{1}{6}}$$

其中 n 为 Manning 系数, 取 $n=0.020\text{s/m}^{\frac{1}{3}}$; \bar{H} 为平均水深。

6. 时间步长

时间步长控制着计算的稳定性和收敛性, 一般用

$$\Delta t < \frac{\alpha \Delta S}{\sqrt{mgH_{\max}}} \quad (5.32)$$

其中 H_{\max} 为最大水深。但这个条件是以简单波动方程

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = gH \sum_{i=1}^n \frac{\partial^2 y}{\partial x_i^2}$$

的显式稳定性条件 (CFL) 为依据的。由于显式方法与交替方向隐式法有着本质的差别。因而在用 ADI 法时依据式 (5.32) 选取时间步长显然是不合适的。对差分式 (5.20)~(5.25) 直接进行稳定性讨论是困难的, 但可采用近似的方法对简化的情况做讨论。可以证明 (雷光跃、徐洪达等 1983), 在简化的情况下, ADI 法的差分式是无条件稳定的。据此可以推测, 差分格式 (5.20)~(5.25) 的稳定性条件要求不高。换句话说, 时间步长的选取可以不受式 (5.32) 的限制。我们为此做过一些数值试验, 在 $\Delta S=5000\text{m}$, $\Delta t=4500\text{s}$ 时, 差分格式 (5.20)~(5.25) 的计算依然是稳定的。为了便于分析计算结果和进行扩散计算, 取 $\Delta t=1800\text{s}$ 。

二、扩散计算的必要条件

扩散计算的水域、坐标系、网格点距和水深与潮流计算相同。水位和潮流由数值模拟得到。除这些条件外还有:

1. 扩散系数

扩散系数取徐洪达 (1984) 的经验公式, 即

$$K_x = KH|U|, \quad K_y = KH|V| \quad (5.33)$$

其中 H 为水深; U 和 V 分别为流速的东分量和北分量; $K=3.3$ 。

2. 初始浓度

当 $t=0$ 时, 取 $P_{i,j}=0$

3. 边界浓度

在闭边界, 取边界外的浓度为 0, 且通过边界的物质收支为 0。在开边界处, 取水位强制

点上的边界浓度随流向而改变：潮流从计算水域向界外海域流时，取

$$P_{js+1}^{t+\Delta t/2} = P_{js+1}^t - \frac{\Delta t}{4\Delta S} (P_{js}^t - P_{js+1}^t) V_{js+1/2}^{t+\Delta t/2}$$

潮流从计算界外水域流入计算水域时，取

$$P_{js+1}^{t+\Delta t/2} = 0$$

其中 JS 为上开边界所处位置。

4. 时间步长

取 $\Delta t = 3\ 600\text{s}$ 。

5. 污染负荷量

在莱州湾沿岸由河流流入海域的污染物主要有 COD、石油和酚。主要排污河有溢洪河、广利河、小清河、白浪河和虞河，监测所得诸河流入海湾中污染物的数量如表 5.1 所示。

表 5.1 莱州湾西南部五条河流污染物入海量 (t/a)

排污河	COD	石油	酚
溢洪河	3 100	30	5.5
广利河	4 700	466	3
小清河	3 300	438	4.9
白浪河	250	55	0.27
虞 河	4 300	0	110

依据式 (5.19) 计算污染扩散时，污染物质应是保守的。即污染物质无沉淀、吸附和分解等物理、化学和生物等作用。严格说来石油和酚并不是保守物质。为了方便起见，我们把溶合于水中的石油和酚当作保守物质来进行扩散计算。

在表 5.1 所列的 5 个污染源处以每 $\Delta t/2 = 1\ 800\text{s}$ 的时间步长连续投入。投入点在图 5.3 中用“X”表示。

6. 计算延续时间

计算延续时间取为 60 个潮周期。

5.4 数值计算结果

一、水位和潮流

数值试验结果表明：第三个潮周期的计算结果已趋稳定，说明用 ADI 法取 $\Delta t = 1\ 800\text{s}$ 不但稳定而且收敛较快。取第 5 个潮周期的结果进行分析。

1. M_2 分潮水位

为了检验数值模拟得到的 M_2 分潮的水位与实测 M_2 分潮水位拟合的程度，现取滩河口和龙口作检验点。数值模拟输出的滩河口和龙口的 M_2 分潮水位 (C) 曲线如图 5.4 所示，图中

实线为实测 M_2 分潮水位曲线。由图可见, 数值模拟输出的 M_2 分潮水位与实测 M_2 分潮的水位吻合得较好。

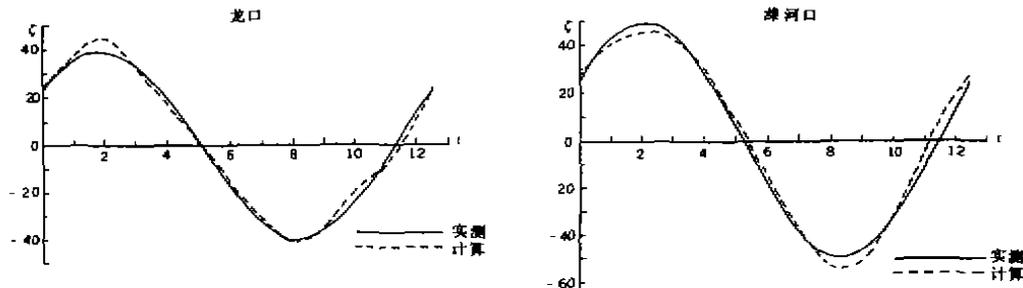


图 5.4 数值模拟 M_2 分潮与实测 M_2 分潮水位的比较

2. M_2 分潮流

M_2 分潮流是无法从现场观测直接得到的。为了验证 M_2 分潮流, 现选取莱州湾中一调查点 (图 5.3 中 B 处) 把数值模拟得到的 M_2 分潮流东分量和北分量的调和常数 (振幅和相角) 和实测得到的调和常数相比较 (见表 5.2)。由于实测是分层的, 比较时测值取各层的算术平均值。由表 5.2 可见数值模拟得到的 M_2 潮流与实测 M_2 潮流是接近的。

表 5.2 潮流调和常数的比较

	振 幅 (cm/s)			相 角 ($^{\circ}$)		
	计 算	实 测	差	计 算	实 测	差
东分量 (U)	11	10	1	148	164	-16
北分量 (V)	21	30	-9	51	32	19

3. M_2+S_2 潮流

图 5.5~5.12 是数值模拟输出的 M_2+S_2 潮流的部分流场。由图可以看到:

在 $t=2h30min$ 之前莱州湾全域潮流主要是西南向流, 此时是高潮前的涨潮流。 $t=2h30min$ 之后, 大部分海区开始由西南向流转为西向流, 莱州湾西部海岸附近海区潮流已转为西北偏北向流, 此时莱州湾处于涨、落潮的转流过程中, 由涨潮流转为落潮流。

在 $t=5\sim7h$ 这段时间内, 潮流由西北向流转为北向流, 而后转为东北向流。也就是说, 退潮水开始时向渤海湾方向流去, 而后向渤海中部, 最后向渤海海峡方向流去。

在 $t=8\sim12h$ 这段时间内, 潮流从莱州湾西部开始, 由南向流逐渐转为西南向流, 而后全域为南向流。这段时间的潮流为涨潮流。

由以上所述可知, 莱州湾的涨潮水主要来自渤海湾, 有一部分来自渤海中部海域和海峡方向。退潮水则流向渤海湾, 一部分流向渤海中部海区和海峡方向。莱州湾的潮流无明显的转流时间, 为旋转流性质。显然, 这与实测结果是一致的。

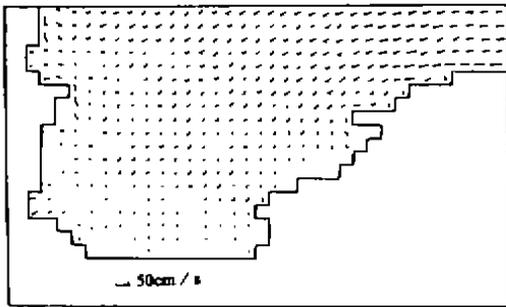


图 5.5 潮流场图 (数值模拟 M_2+S_2 , $t=0h30min$)

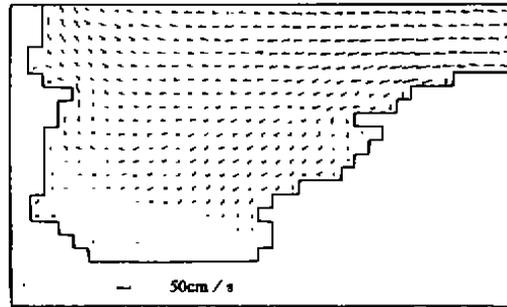


图 5.6 潮流场图 (数值模拟 M_2+S_2 , $t=1h30min$)

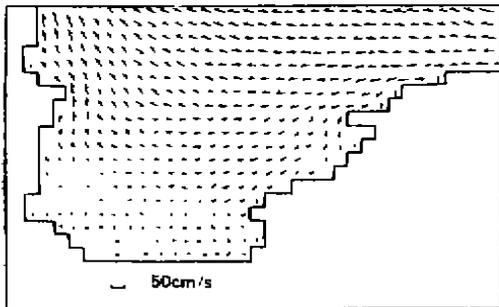


图 5.7 潮流场图 (数值模拟 M_2+S_2 , $t=2h30min$)

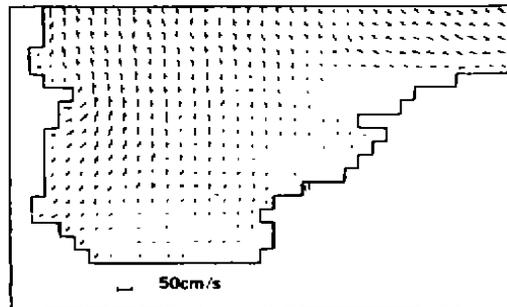


图 5.8 潮流场图 (数值模拟 M_2+S_2 , $t=5h$)

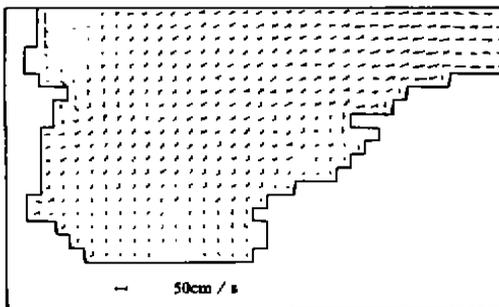


图 5.9 潮流场图 (数值模拟 M_2+S_2 , $t=7h$)

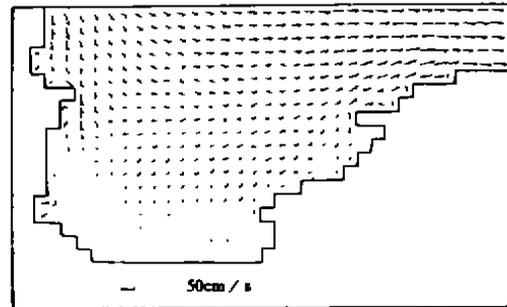


图 5.10 潮流场图 (数值模拟 M_2+S_2 , $t=8h$)

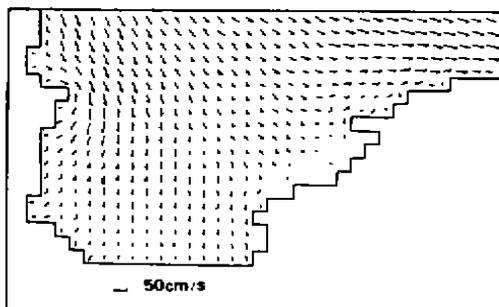


图 5.11 潮流场图 (数值模拟 M_2+S_2 , $t=10h$)

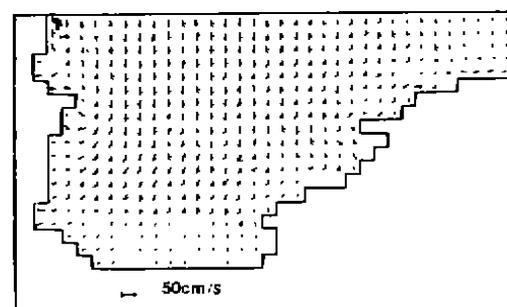


图 5.12 潮流场图 (数值模拟 M_2+S_2 , $t=12h$)

二、潮 余 流

数值模拟得到的潮余流(欧拉余流)场如图 5.13 所示。由图可见,莱州湾海区的潮流比较复杂,比较明显的潮余流涡旋系统有 5 个:

1. 5 号桩以东海区,潮余流涡旋呈顺时针方向,东西约 35km,南北约 25km,涡中余流速度一般在 8cm/s 以下。本涡旋外边沿,近岸区流速较大,最大流速达 26cm/s。

2. 黄河口以南至广利河口以北海区,此区潮余流涡旋呈顺时针方向,涡旋区域较大,东西和南北方向均约 45km,流速一般在 7cm/s 以下。在本涡旋外边沿黄河口附近余流速度较大,最大流速达 29cm/s。

3. 在黄河口北侧附近有一反时针潮余流涡旋。此涡旋范围较小,东西和南北约 15km。余流速度一般是 2~5cm/s。涡旋外缘处,潮余流速度较大,最大可达 16cm/s。

4. 在莱州湾湾顶有一反时针涡旋。此涡旋东西约 50km,南北约 25km。此区余流速度较小,一般小于 3cm/s,最大余流速仅有 6cm/s。

5. 在刁龙咀北面海区,有顺时针方向涡旋,东西和南北均约 20km,流速一般在 3~8cm/s 之间,涡旋外缘最大余流速达 15cm/s。

数值模拟所得到的 5 个潮余流涡旋系统,前 3 个涡旋系统与侍茂崇(1989)等所得余流涡旋系统基本相同,与本专辑第四章分析所得余流特征也基本一致。后两个涡旋系统,现无实测资料对照,有待今后通过实测资料来验证。

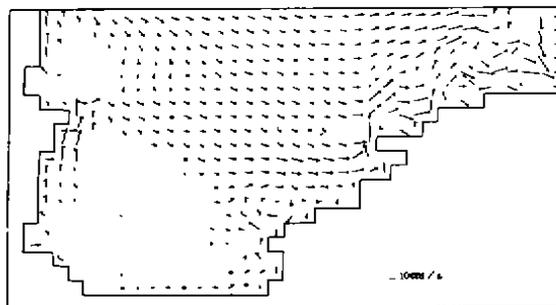


图 5.13 潮余流场(数值模拟)

三、COD 浓度的分布

1. 连续源对海域浓度分布的影响

用表 5.1 所列负荷量计算了在主要半日分潮作用下 COD 浓度的地理分布,计算结果如图 5.14。由图 5.14 可以看到:在 COD 的排放点(污染源)附近,COD 浓度的分布呈舌状,即 COD 污染物在潮流作用下呈舌状由排放点向湾的中部方向扩散。高浓度区在广利河口和小清河河口附近海域,平均浓度在 0.3mg/L 以上。从全域来看,以河口为源,COD 浓度的分布也基本上呈舌状,COD 浓度由西南向东北方向迅速降低,在距排污点大约 30km 处,COD 浓度仅是排污点附近浓度的 1/6。由图还可以看出,在一个潮周期中,不同潮时 COD 浓度的分布不是完全相同的,特别是莱州湾西部靠近排放点一带差别显著。把图 5.14(1)与图 5.14(3)相比较可以明显看出:在溢洪河、广利河、小清河和小清河口外,在图 5.14(3)($t=8$ 时)中 0.2mg/L 的等值线与边界所包围的区域比图 5.14(2)($t=5$ 时)中 0.2mg/L 的等值线所包围的区域大得多,这表明 $t=8$ 时 COD 扩散的速度比 $t=5$ 时慢得多。对照潮流图可知,这种差别是由于这两时刻潮流不同而造成的。由图 5.10 和 5.12 可以看到:在 $t=5$ 时,溢洪河、广

利河和小清河口一带正处于退潮时，潮流向东北方向流去，而 $t=8$ 时，这里基本上处于平潮，潮流速度明显小于 $t=5$ 时。物质扩散得快慢与流速有密切的关系，流速大扩散得快，流速小扩散得慢。

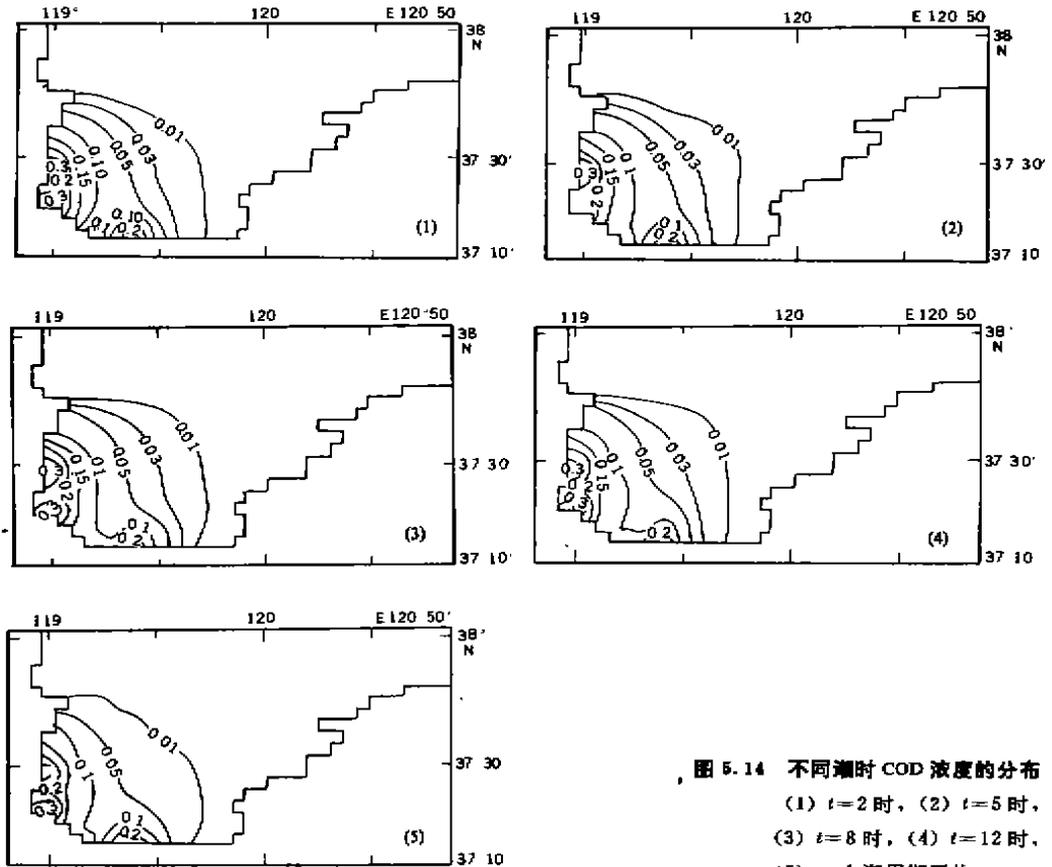


图 5.14 不同潮时 COD 浓度的分布
 (1) $t=2$ 时, (2) $t=5$ 时,
 (3) $t=8$ 时, (4) $t=12$ 时,
 (5) 一个潮周期平均

2. 浓度离差的变化

用 \bar{P} 表示某点一个潮周期的平均浓度，用 P_t 表示 t 时该点的浓度，我们定义 $P_t - \bar{P}$ 为 t 时刻该点的浓度离差。根据此定义可知，如果浓度离差值为正，则此时浓度高于平均浓度；浓度离差值为负，则此时浓度低于平均浓度。也就是说浓度离差值为正时污染物扩散的速度比离差值为负时扩散得慢。

现选择溢洪河口、广利河口、小清河口、白浪河口、虞河口五个排污点计算各点在一个潮期中不同潮时的 COD 浓度的离差，它们的变化如图 5.15 所示。由此图可见：各点浓度离差值为正或负的时间范围是各不相同的，各点离差最小值所对应的潮时也不相同。在溢洪河口， $t=1$ 时至 4.5 时和 10.5 时至 12 时离差值为负、最小值所对应的潮时约为 $t=2$ 时；在广利河口， $t=7.5$ 时前和 $t=11.5$ 时后离差值为负，最小值所对应的潮时为 $t=2$ 时；在小清河口， $t=6$ 时前离差值为负，最小值所对应的潮时为 $t=1$ 时；在白浪河口， $t=5$ 时前离差值为负，最小值所对应的潮时为 $t=1$ 时；在虞河口， $t=6$ 时至 9 时期间，浓度离差为负值，其最小值所对应的潮时为 $t=7$ 至 8 时。由数值模拟的水位看出，以上诸点发生高潮的时间大约在 $t=3$

时，由各河口的浓度离差变化和水位极值时刻可以推出，在溢洪河口、小清河口和广利河口于高潮前 1h 时 COD 浓度最低，而广利河口则于高潮前 2h COD 浓度最低。在虞河口低低潮时为 $t=9$ 时左右，其 COD 浓度最低的时刻是低低潮前 1~2h。

3. 污染源停止排放后海水浓度的衰减

为了考察莱州湾潮流扩散 COD 的能力，现做这样的计算：按表 5.1 所列负荷量连续排放 60 个潮周期后各排污点都停止排放，然后再进行 60 个潮周期的扩散计算。计算所得 COD 浓度的分布如图 5.16 所示。把此图与图 5.13 (5) 相比较可以明显看出：莱州湾全海域 COD 浓度降低很多，特别是近岸区域降低得更多，除了小清河口东南大约有 25km² 的海域 COD 浓度大于 0.06mg/L 之外，其余海区 COD 的浓度都低于 0.06mg/L。图 5.17

是溢洪河口、广利河口、小清河口、白浪河口和虞河口在停止排污后 60 个潮周期中 COD 浓度的变化曲线图。从此图可以看出：在停止向海中排污后，污染源附近海水中原有的 COD 污染物在潮流作用下扩散得很快，经过 60 个潮周期上述 5 个排污点 COD 的浓度分别减少了 83.3%，83.5%，81.4%，49.1% 和 77.7%。这表明广利河口附近 COD 的浓度降低得最多，降得较少的海区是白浪河口附近。换句话说，广利河口附近海域海水扩散 COD 污染物的速度较其他排污点附近海域快，即自净能力较其他排污点附近海域强。

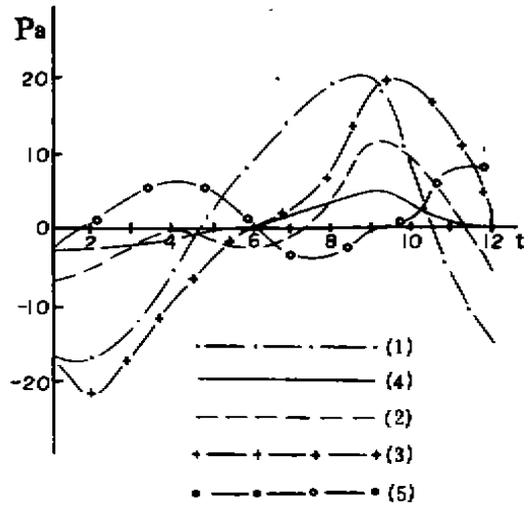


图 5.15 不同潮时浓度离差的变化
(1) 溢洪河 (2) 广利河 (3) 小清河
(4) 白浪河 (5) 虞河

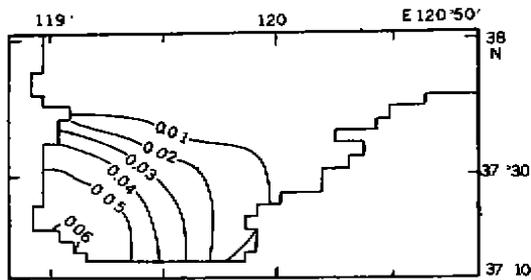


图 5.16 污染源停止排放 60 潮周期时的 COD 浓度分布

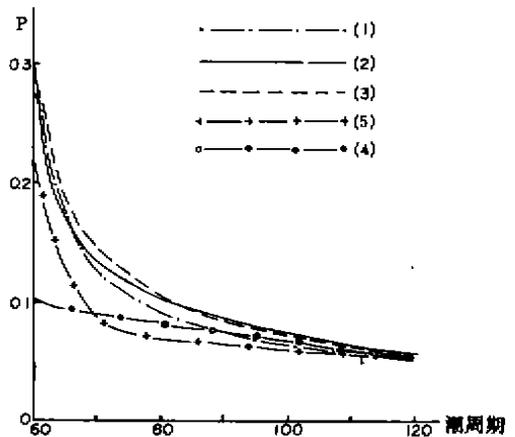


图 5.17 停止排污后河口 COD 浓度的变化
(1) 溢洪河口；(2) 广利河口；
(3) 小清河；(4) 白浪河；(5) 虞河口

4. 突发性事故的影响

莱州湾沿海各排污河向海中排污有这样一个特点：枯水期各河流向海中排污较少，大量的污染物淤积在河道中。而当洪水到来时，河道中平时淤积的大量污染物被冲入海中，这时由河流排入海中污染物的数量较平均量高出好多倍，使海水大面积受到污染，造成突发性污染事故。为了考察这种突发性排污时 COD 污染物的分布状况，分别计算莱州湾西部（溢洪河、广利河和小清河）、南部（白浪河和虞河）及上述 5 条河流 COD 排污量比平均量增加 5 倍时浓度的分布，计算结果如图 5.18 所示。由图可明显看出：当各河口排污量增加时，近海区域 COD 浓度迅速增加，尤其是当 5 条排污河都同时增加排污量时，近海 COD 浓度增加得更多。比较图 5.25 与 5.19 可知：当 5 条河流向海中排污量都增加 5 倍时，0.1mg/L 的等值线则向海湾中部方向延伸大约 40km。另外还可以看到，当西部排污量增加时不仅西部 COD 浓度升高而且还影响到莱州湾南部 COD 浓度的分布，而南部排污量增加时，对西部的影响较小。

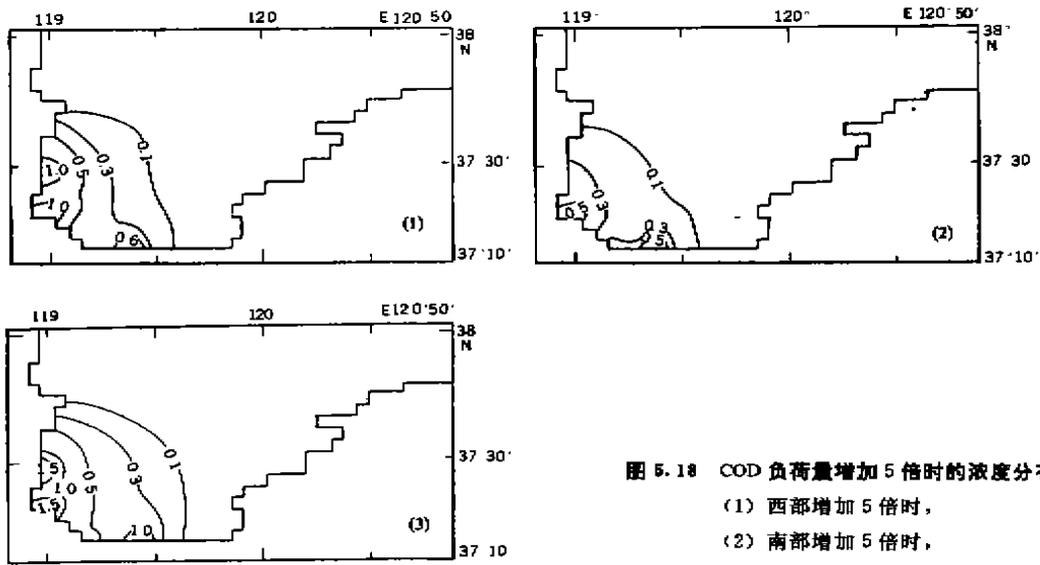


图 5.18 COD 负荷量增加 5 倍时的浓度分布
 (1) 西部增加 5 倍时，
 (2) 南部增加 5 倍时，
 (3) 5 个排污点都增加 5 倍时

四、石油和酚的分布

按表 5.1 所列负荷量计算石油和酚的分布如图 5.19 和 5.20 所示。由两图可见：由溢洪河、广利河、小清河和白浪河排入莱州湾的石油在潮流作用下其浓度分布呈舌形，浓度由西南向东北方向逐渐降低，高浓度区在广利河口至小清河口一带。酚的浓度分布也基本呈舌状，其浓度由南向北逐渐降低，高浓度区在虞河口附近近岸海域。

五、水质预测

由于计算网格距是 5km，则各网格点的计算浓度实际上是该点所在网格（25km²）中的

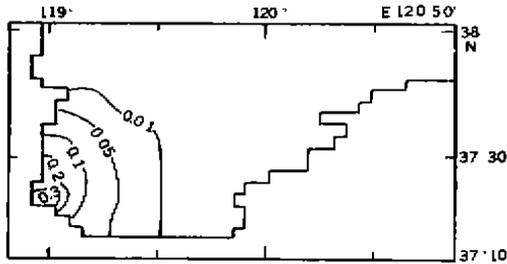


图 5. 19 石油的浓度分布

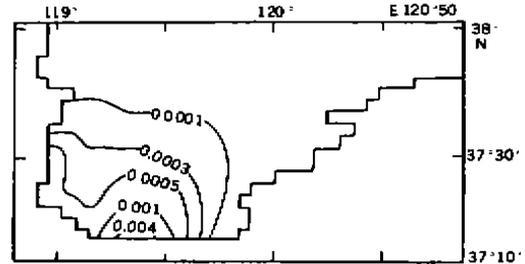


图 5. 20 酚的分布

平均浓度。

需要说明: 以上对 COD、石油和酚的浓度分布的计算都是假设全域为清洁水(污染物的浓度为零), 而没有考虑海水中的本底浓度, 也没考虑长时间排污的累积浓度。因此计算区域中的实际浓度要比以上各图上所表示的浓度高得多。

要想预测莱州湾全海域未来若干年的水质状况, 首先要知道各计算点的本底浓度。要得到这些资料显然是困难的。在此, 仅以表 5. 1 所列排污量计算连续向海中排污 1 年后莱州湾各处 COD 浓度的增加量。计算结果如图 5. 21 所示。由图可见, 在溢洪河口、广利河口、小清河口、白浪河口和虞河口各排污点附近海域 COD 浓度增加量都在 1mg/L 以上, 尤其是小清河口附近增加得较多。在莱州湾西南部, 距排污点大约 15~20km 范围内海水中 COD 浓度增加量在 1. 0~1. 2mg/L。由监测结果知, 在广利河口和小清河口附近海域, 枯水期时 COD 的浓度为 3mg/L, 洪水期时为 5mg/L。由此可以预计: 如果按表 1 所列排污量继续不间断地向莱州湾海域排污, 一年后在距排污点 15~20km 的海水水质将提高一级, 广利河口和小清河口附近海水将达到 2 级和 3 级, 即到了污染和严重污染的程度。这表明表 5. 1 所列负荷量已较大。

值得注意的是在小清河口东北方, 距小清河口约 20km 的地方出现一个高浓度区。对照图 5. 13 可知, 此区正位于两个潮余流涡旋交界的前沿, 这就使得一部分污染物滞留在这里而不能输运出去。显然这个高浓度区形成是与潮余流有关的。

需要指出, 这里的计算条件中: (1) 没考虑本底浓度; (2) 没考虑开边界污染源; (3) 没考虑间隔性排放。因此, 这里的结论是理想潮流情况下得到的。考虑到实际流场和浓度场边界条件, 年增加浓度并非线性叠加。

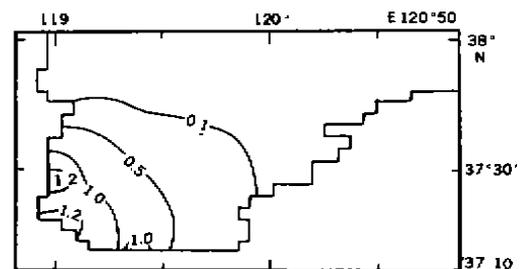


图 5. 21 COD 年累积浓度分布

六、结 论

综合上述计算结果, 可以得到以下几点结论:

(1) 莱州湾的海水具有较强的自净能力。由溢洪河、广利河、小清河、白浪河和虞河排放到莱州湾的大量 COD、石油和酚等污染物在潮流作用下迅速地扩散, 浓度分布基本以河口为中心呈舌状, 海水中污染物的浓度由排污点向莱州湾海域中部逐渐降低。如果诸河流同时停止一个月向海中排放污染物, 则各排污点附近海水中污染物的浓度将比原来降低 49.1%~83.5%, 其中广利河口附近降得最多。

(2) 莱州湾海水的自净能力是有限度的。如果按表 5.1 所列负荷量不间断地排放一年将会使距污染源 15~20km 的海水中 COD 的浓度增加 1mg/L 以上, 即水质提高一级。

(3) 急剧增加排污量会使近岸海域受到污染, 特别是溢洪河、广利河和小清河口, 当排污量急剧增加时不仅会使莱州湾西部海域海水污染物的浓度大大增加, 而且还会影响到莱州湾南部近海。因此要特别注意控制溢洪河、广利河和小清河的排污量, 防止突发性污染事故的发生。