

渤海潮混合数值模拟

III. 渤海污染物潮扩散的数值计算*

徐洪达 王钟楮 刘赞沛

(国家海洋局第一海洋研究所)

长期以来,人们直接或间接地把海洋作为处理废物的垃圾箱,大量的污染物质直接或间接地注入海洋,使海洋受到污染,致使水产资源遭到破坏,影响人体健康。

渤海为我国内陆海湾。在渤海周围,每年都有大量的工业、农业和民用污染物被排放到海湾内。研究排放到渤海污染物的分布规律是制定排放措施的依据之一,也是开展环境质量评价和预报的重要手段。因此,研究渤海污染物扩散分布规律,对保护海洋环境非常必要。

渤海是以半日分潮性质为主的海域,潮流是引起渤海污染物扩散的重要因素。本文试图用数值计算方法,探讨渤海 COD 污染物质在主要半日分潮的作用下的扩散分布规律,以期估计渤海主要半日分潮对 COD 污染物的扩散能力,为渤海区域的污染防治提供依据。

一、数值计算模式

1. 物质扩散方程式

根据物质守恒定律可以推得:浓度为 P 的扩散物质,在分量为 U, V, W 的流场中,其基本扩散方程式为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \bar{P}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{U}\bar{P})}{\partial x} + \frac{\partial(\bar{V}\bar{P})}{\partial y} + \frac{\partial(\bar{W}\bar{P})}{\partial z} \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(D_x \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} \right) \\ & \quad + \frac{\partial}{\partial z} \left(D_z \frac{\partial \bar{P}}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

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。

对(1)式进行垂直积分,使公式二维化,得

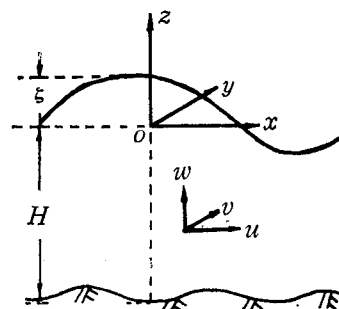


图1 坐标系的定义

Fig. 1 Coordinate system

* 参加本课题工作的还有董彬同志。

山东省环保局、山东省水文总站、天津市环保局、天津市水文总站、辽宁省环保局、辽宁省水文总站等单位积极为本文计算提供 COD 负荷量监测资料。何恩典教授、管秉贤研究员、方国洪副研究员、陈宗镛副教授、俞光耀、陈时俊和王化桐老师、郭择德和蔡广兴同志、陈则实副所长等审阅了本文初稿,给予热情的指导和帮助,谨致衷心感谢。

收稿日期: 1982年5月15日。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[(\zeta + H)\bar{P}]}{\partial t} + \frac{\partial[(\zeta + H)\bar{U}\bar{P}]}{\partial x} + \frac{\partial[(\zeta + H)\bar{V}\bar{P}]}{\partial y} \\ &= \frac{\partial \left[(\zeta + H)K_x \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[(\zeta + H)K_y \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} \right]}{\partial y} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $\bar{U}, \bar{V}, \bar{P}$ 分别为 $\bar{U}, \bar{V}, \bar{P}$ 在 $-H \leq z \leq \zeta$ 之间的平均量; ζ 为从平均海平面算起的海面高度; H 为自平均海平面算起的深度; K_x, K_y 为宏观扩散系数。

方程 (2) 是不考虑有“源”情况下的物质扩散方程式。如果从系外单位时间单位面积上有 S_m 个单位的物质向系内流入, 则 (2) 式应改写为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial[(\zeta + H)\bar{P}]}{\partial t} + \frac{\partial[(\zeta + H)\bar{U}\bar{P}]}{\partial x} + \frac{\partial[(\zeta + H)\bar{V}\bar{P}]}{\partial y} \\ &= \frac{\partial \left[(\zeta + H)K_x \frac{\partial \bar{P}}{\partial x} \right]}{\partial x} + \frac{\partial \left[(\zeta + H)K_y \frac{\partial \bar{P}}{\partial y} \right]}{\partial y} + S_m \end{aligned} \quad (3)$$

为方便起见, 以下将 (3) 式中的 $\bar{U}, \bar{V}, \bar{P}$ 分别用 U, V, P 表示。

2. 扩散方程的解法

为求方程 (3) 的数值解, 取正方形交错差分网格, 用交替方向隐式法进行计算。差分网格和变量的定义如图 2 所示。

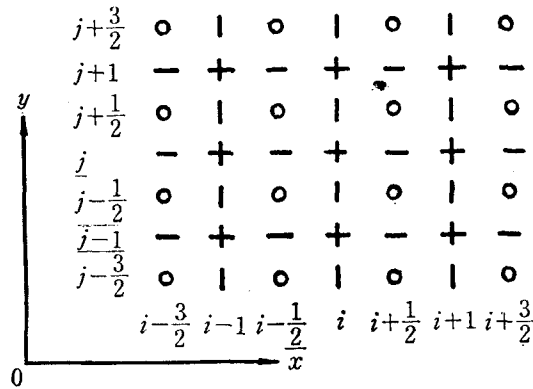


图 2 差分网格和变量的定义

+: ζ (水位), P (浓度); O : H (水深); $-$: U (x 轴方向流速分量); $+$: V (y 轴方向流速分量)

Fig. 2 Space-staggered scheme and variables

+: P (Concentration), $+$: ζ (Water level), O : H (Depth), $-$: U (Velocity component in x -direction), $+$: V (Velocity component in y -direction).

对 (3) 式利用交替方向隐式差分法, 可得到在 $K\Delta t \rightarrow (K + \frac{1}{2})\Delta t$ 时间里, 点 (i, j) 的浓度 $P_{i,j}^{K+\frac{1}{2}}$ 的计算公式为:

$$P_{i,j} = E_{i+1}P_{i+1,j} + Q_{i+1} \quad (4)$$

其中

$$E_{i+1} = \frac{c_i}{b_i + a_i E_i}, \quad Q_{i+1} = \frac{d_i - a_i Q_i}{b_i + a_i E_i}$$

$$a_i = \frac{\beta \Delta t}{4 \Delta S} (H_{i-1/2, j-1/2} + H_{i-1/2, j+1/2} + \zeta_{i-1, j}^{k+1/2} + \zeta_{i, j}^{k+1/2}) U_{i-1/2, j}^{k+1/2}$$

$$- \frac{\Delta t}{4(\Delta S)^2} (H_{i-1/2, j-1/2} + H_{i-1/2, j+1/2} + \zeta_{i-1, j}^{k+1/2} + \zeta_{i, j}^{k+1/2}) (K_x)_{i-1/2, j}^{k+1/2}$$

$$b_i = \frac{1}{4} (H_{i-1/2, j-1/2} + H_{i+1/2, j-1/2} + H_{i-1/2, j+1/2} + H_{i+1/2, j+1/2} + 4\zeta_{i, j}^{k+1/2})$$

$$+ \frac{\alpha \Delta t}{4 \Delta S} (H_{i+1/2, j-1/2} + H_{i+1/2, j+1/2} + \zeta_{i, j}^{k+1/2} + \zeta_{i+1, j}^{k+1/2}) U_{i+1/2, j}^{k+1/2}$$

$$- \frac{(1-\beta) \Delta t}{4 \Delta S} (H_{i-1/2, j-1/2} + H_{i-1/2, j+1/2} + \zeta_{i-1, j}^{k+1/2} + \zeta_{i, j}^{k+1/2}) U_{i-1/2, j}^{k+1/2}$$

$$+ \frac{\Delta t}{4(\Delta S)^2} (H_{i+1/2, j-1/2} + H_{i+1/2, j+1/2} + \zeta_{i, j}^{k+1/2} + \zeta_{i+1, j}^{k+1/2}) (K_x)_{i+1/2, j}^{k+1/2}$$

$$+ \frac{\Delta t}{4(\Delta S)^2} (H_{i-1/2, j-1/2} + H_{i-1/2, j+1/2} + \zeta_{i-1, j}^{k+1/2} + \zeta_{i, j}^{k+1/2}) (K_x)_{i-1/2, j}^{k+1/2}$$

$$c_i = \frac{(1-\alpha) \Delta t}{4 \Delta S} (H_{i+1/2, j-1/2} + H_{i+1/2, j+1/2} + \zeta_{i, j}^k + \zeta_{i+1, j}^k) U_{i+1/2, j}^{k+1/2}$$

$$- \frac{\Delta t}{4(\Delta S)^2} (H_{i+1/2, j-1/2} + H_{i+1/2, j+1/2} + \zeta_{i, j}^{k+1/2} + \zeta_{i+1, j}^{k+1/2}) (K_x)_{i+1/2, j}^{k+1/2}$$

$$d_i = \frac{1}{4} (H_{i-1/2, j-1/2} + H_{i+1/2, j-1/2} + H_{i-1/2, j+1/2} + H_{i+1/2, j+1/2} + 4\zeta_{i, j}^k) P_{i, j}^k$$

$$- \frac{\Delta t}{4 \Delta S} (H_{i-1/2, j+1/2} + H_{i+1/2, j+1/2} + \zeta_{i, j}^k + \zeta_{i, j+1}^k) V_{i, j+1/2}^k$$

$$\times [r P_{i, j}^k + (1-r) P_{i, j+1}^k]$$

$$+ \frac{\Delta t}{4 \Delta S} (H_{i-1/2, j-1/2} + H_{i+1/2, j-1/2} + \zeta_{i, j-1}^k + \zeta_{i, j}^k) V_{i, j-1/2}^k$$

$$\times [\delta P_{i, j-1}^k + (1-\delta) P_{i, j}^k]$$

$$+ \frac{\Delta t}{4(\Delta S)^2} (H_{i-1/2, j+1/2} + H_{i+1/2, j+1/2} + \zeta_{i, j}^k + \zeta_{i, j+1}^k) (K_y)_{i, j+1/2}^k$$

$$\times (P_{i, j+1}^k - P_{i, j}^k) - \frac{\Delta t}{4(\Delta S)^2} (H_{i-1/2, j-1/2} + H_{i+1/2, j-1/2} + \zeta_{i, j-1}^k$$

$$+ \zeta_{i, j}^k) (K_y)_{i, j-1/2}^k (P_{i, j}^k - P_{i, j-1}^k) + \frac{\Delta t}{2} S_m,$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \text{当 } U_{i+1/2, j}^{k+1/2} \geq 0 \\ 0, & \text{当 } U_{i+1/2, j}^{k+1/2} < 0, \end{cases}$$

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

$$\gamma = \begin{cases} 1, & \text{当 } V_{i, j+1/2}^k \geq 0 \\ 0, & \text{当 } V_{i, j+1/2}^k < 0, \end{cases}$$

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

Δt , ΔS 分别为时间步长和空间步长。

在后半个时间步长 $(k + 1/2)\Delta t \rightarrow (k + 1)\Delta t$ 内, 点 (i, j) 的浓度 $P_{i,j}^{k+1}$ 的计算, 只需将前半个时间步长的计算公式作置换 $k + 1/2 \rightarrow k + 1$, $U \rightarrow V$, $V \rightarrow U$, $x \rightarrow y$, $y \rightarrow x$, $i \rightarrow j$, $j \rightarrow i$ 即可。

3. 扩散计算条件

- (1) 水位和流场: 计算采用数值模拟得到的主要半日分潮的水位和流场。
- (2) 扩散系数: 根据数值试验结果取

$$K_x = kH|\bar{U}|, K_y = kH|\bar{V}| \quad (5)$$

其中 $k = 3.3$; H 为水深; $|\bar{U}|$, $|\bar{V}|$ 分别为流速 U , V 的绝对值的平均。在数值试验中,

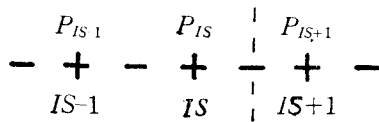


图3 开边界的处理

Fig. 3 Treatment of the open boundary

糙度系数 $C = \frac{1}{n}(H)^{1/6}$ 已考虑在内。数值试验

结果表明: 扩散系数公式 (5) 与国内外许多学者所用的 Elder 公式

$$K_x = 5.93\sqrt{gH|\bar{U}|}/C \quad (g = 9.81\text{m/s}^2; H, |\bar{U}|,$$

$$K_y = 5.93\sqrt{gH|\bar{V}|}/C \quad |\bar{V}| \text{ 和 } C \text{ 的意义同前})$$

相比, 两者在扩散数值计算的效果上是一致的, 在

使用计算机时间上, 前者较后者用机时少得多, 用 (5) 式进行扩散数值计算 60 个潮周期所需时间仅为用 (6) 式的一半。

- (3) 初始浓度: 取全域为 0.67 mg/l。

(4) 边界浓度: 在闭边界, 取计算水域外的浓度为零, 且通过边界的物质收支为零; 在开边界处(图3), 取水位强制点上的边界浓度随流向而改变: 从计算水域流向外海时取

$$P_{IS+1}^{k+1/2} = P_{IS+1}^k - \frac{\Delta t}{4\Delta S} (P_{IS}^k - P_{IS+1}^k) U_{IS-1/2}^{k+1/2},$$

潮流从外海流入计算水域时取

$$P_{IS+1}^{k+1/2} = P_c$$

其中 P_c 为常量, 其值可根据计算水域外水域中实测 COD 浓度值给出。

(5) 污染负荷量: 以 COD 作为污染指标, 在图 4 所示的 10 个主要排污河口地区, 按 1979 年监测所得单位时间平均入海量, 以 $\frac{1}{2} \Delta t$ 的时间步长连续地投入。

(6) 空间步长: 与数值模拟水位和流场所用的空间步长相同。本文取 $\Delta S = 20\text{km}$ 。

(7) 时间步长: 采用变步长的计算方法: 计算的 1—29 周期, 取 $\Delta t = 7200\text{s}$; 第 30 潮周期以后, 取 $\Delta t = 3600\text{s}$ 。

(8) 计算延续时间: 系指计算污染物浓度分布在全域达到稳定所需要的计算时间。本文通过数值试验确定计算延续时间为 60 个潮周期。

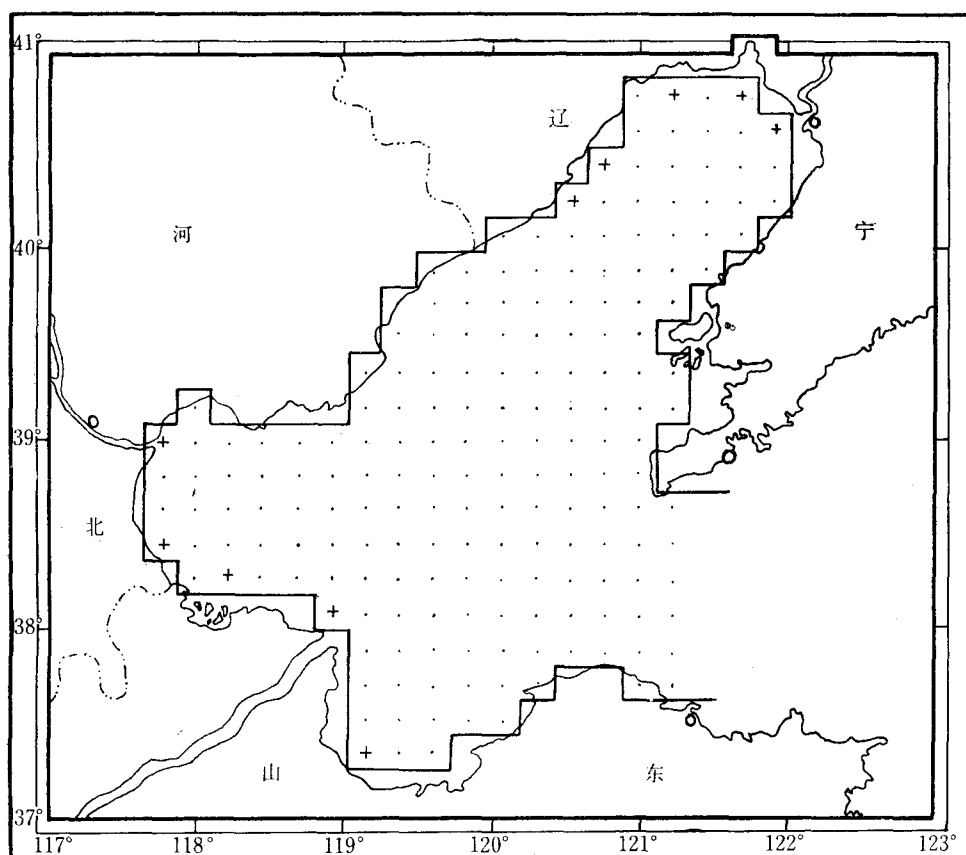


图4 计算网格和 COD 污染物投放处

Fig. 4 Computational grid and the locations of COD pollutant release points

二、数值计算结果

按照上述数值模式,用 10 个投放点上(图 4)的负荷量,计算了在主要半日分潮作用下的 COD 浓度分布(如图 5 所示)。计算结果表明:靠近大凌河口、辽河口及海河口一带 COD 浓度在 1.20 mg/l 以上,其余海区浓度均在 1.15 mg/l 以下。用水质评价标准(COD 按 2.5 mg/l 计)来衡量,渤海各海区污染程度为 I 级,即水质属于良好级。这与 1979 年监测渤海水质状况较一致。

为预测入海负荷量对渤海水质的影响,我们在图 4 所示 10 个污染物投放点,将 COD 污染物的投放量都各增加到 1979 年入海量的 (1) 2 倍; (2) 5 倍; (3) 10 倍; (4) 15 倍。数值计算结果如图 6—8 所示。

图 6 是大凌河口、海河口、小清河口及渤海中部 A 点 ($119^{\circ}48'E, 38^{\circ}36'N$) 四处计算 COD 浓度和负荷量倍增的关系图。图中坐标横轴“1”示 1979 年负荷量值,“2”示 1979 年数值的 2 倍,其余类同。由图可见: COD 浓度是随污染负荷量的增加而线性增大,其增大速度因海区不同而异。例如大凌河口附近增大的速度较快,小清河口增大速度缓慢,渤海中部变化不大。就 A 点来说,当岸边 10 个污染物投放处污染负荷量增加到 1979 年数

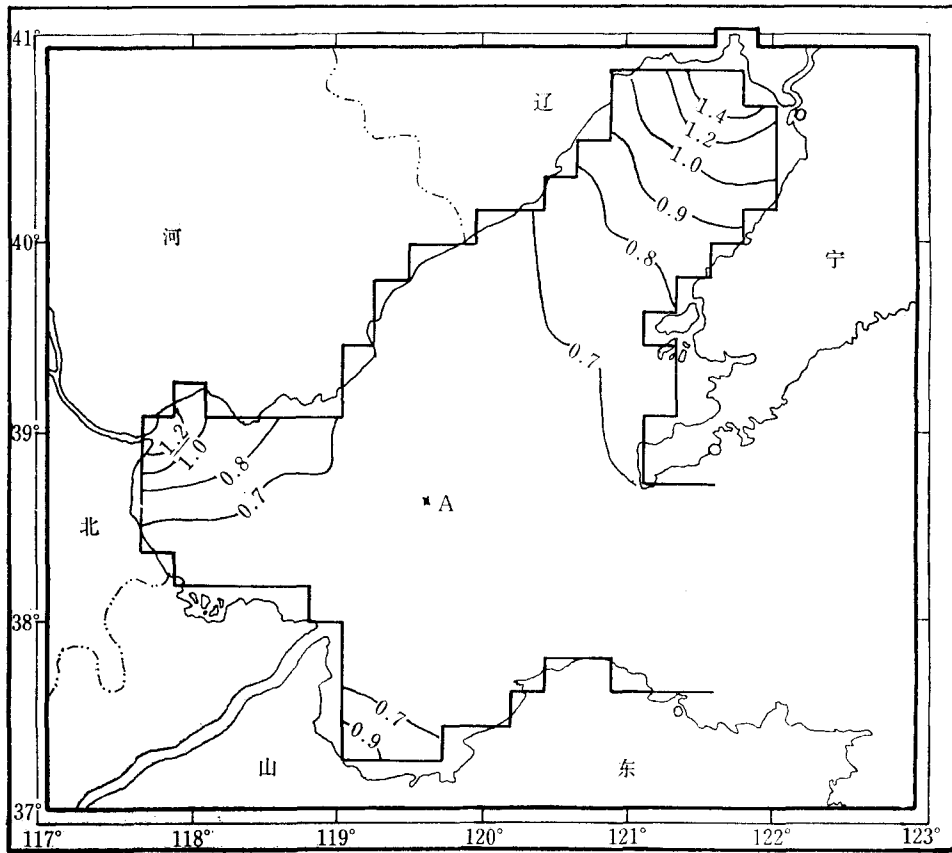


图 5 计算 COD 浓度分布图 (1979 年负荷量)

Fig. 5 Distribution of the computed concentration of COD pollutant (inputed quality of 1979)

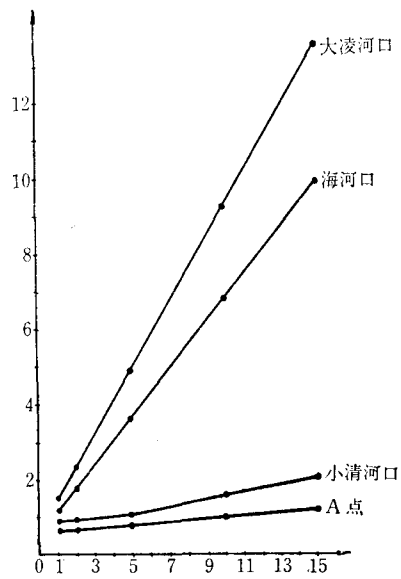


图 6 计算 COD 浓度和负荷倍增的关系

Fig. 6 Relation of the computed concentration with the inputed quality of COD pollutant

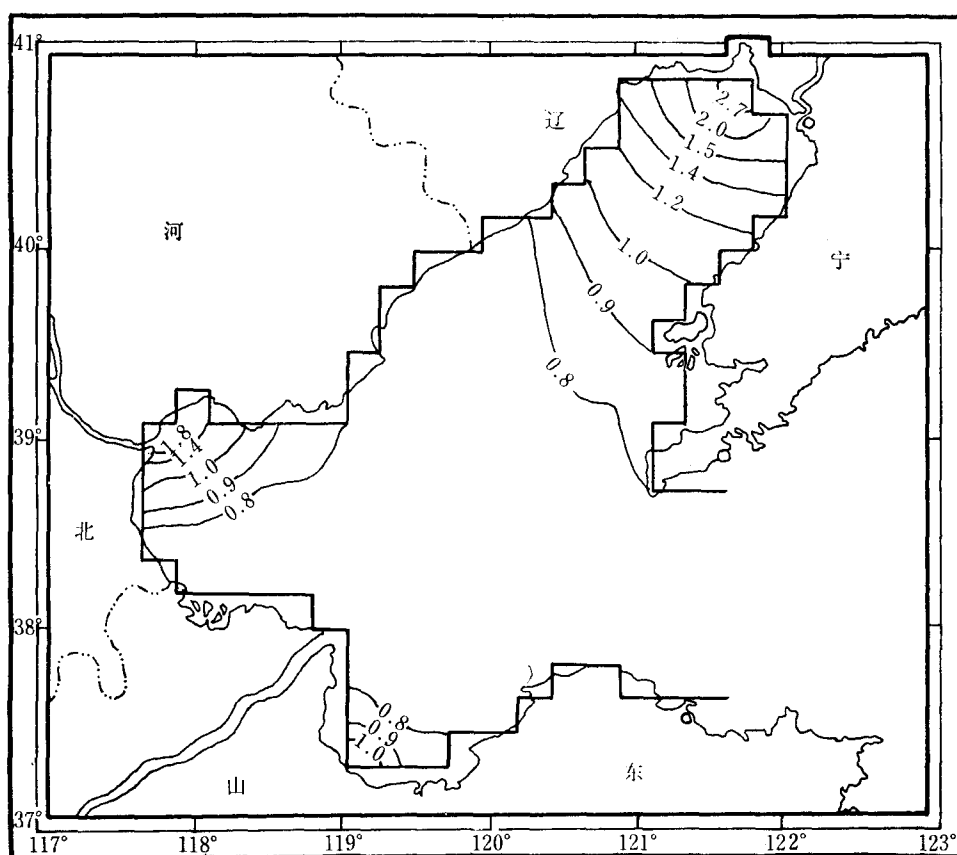


图 7 计算 COD 浓度分布图 [负荷量为 (1)]

Fig. 7 Distribution of the computed concentration of COD pollutant [inputed quality of (1)]

值的 15 倍时,该处的浓度仅增加了 0.65 mg/l。这说明污染负荷量的成倍增加,对大凌河口、海河口附近水质影响较大,而对渤海中部海区的影响较小。

图 7 和图 8 分别是负荷量为 (1) 和 (2) 情况下 COD 浓度分布图,其表明:当污染负荷量成倍增加时,COD 浓度倍增,污染区域迅速向渤海中部方向扩展。如浓度值为 1mg/l 的等值线,当负荷量增加 1 倍时,图 7 中该等值线的位置与图 5 相比:在辽东湾,则向渤海中部海区方向移动了 60 公里左右;在渤海湾,则移了 20 多公里。当污染负荷量增加 4 倍时,图 8 中 1 mg/l 的等值线的位置与图 5 相比:在辽东湾,则向渤海中部移了 130 多公里;在渤海湾,则向渤海中部移了 100 公里左右。上述两种情况,1 mg/l 的等值线的位置在莱州湾变化较小。

以上是渤海 10 个主要地区所投放的 COD 污染物在半月分潮的作用下,对污染物扩散分布状况进行数值计算的结果。当然,在渤海区域,使 COD 污染物稀释扩散的因素,不仅有半月潮,而且还有其它潮成分,同时还有藻类、细菌的分解同化作用等,也可使流入海洋的污染物稀释。因此,实际污染程度,在远离岸边的海区比上述计算出的浓度低。再者,由于计算出的各点的 COD 浓度是代表该点所在网格内的 COD 浓度平均值,因此湾头局部地区的实际污染程度要比计算值高。

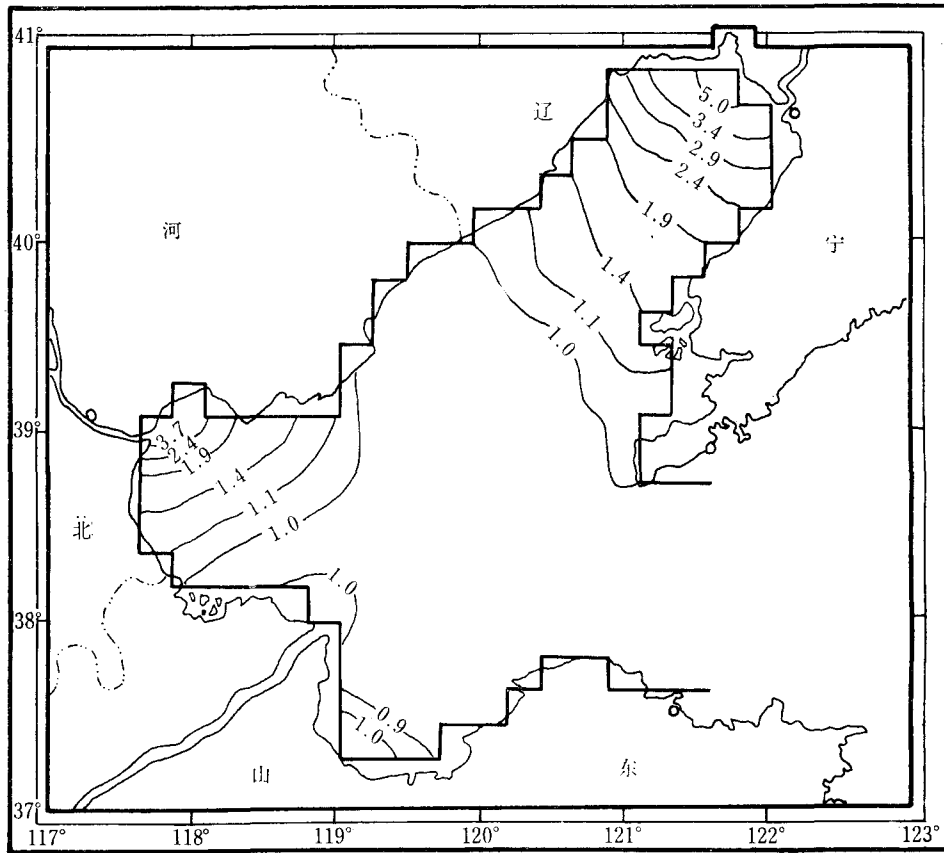


图 8 计算 COD 浓度分布图 [负荷量为 (2)]

Fig. 8 Distribution of the computed concentration of COD pollutant [inputed quality of (2)]

三、结 语

1. 渤海潮流运动具有相当强的物理自净能力,排入渤海的大量污染物,在主要半日大潮的作用下得到扩散、稀释,从而使海水不断得到净化。

2. 当沿岸 COD 污染物投放量增加时,辽东湾、渤海湾和莱州湾的三个湾头海区,污染浓度迅速增大。这说明由于地形和流场的影响以及污染物投放量的增加,上述三个地区的海水自净能力受到很大限制。计算结果表明:渤海区域受 COD 污染物威胁的主要污染源是大凌河地区和塘沽地区各排污河,其次是小清河口地区。因此,为了保护渤海环境,防止渤海海水大面积受到污染,要特别注意控制经大凌河和塘沽地区及小清河地区流入渤海 COD 污染物的投放量。

参 考 文 献

- [1] 金子安雄, 1975. ADI 法による潮流と污染拡散の数値計算——大阪湾に適用した場合について——港湾技术研究所報告 14(1): 3—61。
- [2] Bowden, K. F., 1965. Horizontal mixing in the sea due to a shearing current. *J. Fluid Mech.* 21 (1): 83.

- [3] George, E. F., 1960. Finite-difference Methods for Partial Differential Equations. John Wiley and Sons Inc. PP. 269—312.
- [4] Talbot, J. W., 1972. The Influence of Tidal, Waves and Other Factors on Diffusion Rates in Marine and Coastal Situations. Marine Pollution and Sea Life. PP. 122—130.

**ON NUMERICAL SIMULATION OF THE TIDAL MIXING
IN THE BOHAI SEA
III. NUMERICAL CALCULATION OF THE POLLUTANT DIFFUSION
UNDER THE ACTION OF THE SEMI-DIURNAL
CONSTITUENT IN THE BOHAI SEA**

Xu Hongda Wang Zhongjun and Liu Zhangpei

(First Institute of Oceanography, National Bureau of Oceanography)

ABSTRACT

In this paper, the Alternating Direction Implicit (ADI) method is employed to solve the pollutant diffusion equation and the distribution of the pollutant under the action of the semi-diurnal constituent in the Bohai Sea is given. The field of the tidal current and the values of water level used are got through simulating numerically. The diffusion coefficients are given by $K_x = 3.3H|\bar{u}|$ and $K_y = 3.3H|\bar{v}|$ through numerical experiment. The consistency is taken as zero outside the computing domain and changes with the direction of tidal current on the open boundary. The pollutant load: the COD used as index of the pollutant are put into the Bohai Sea by the time steps of 3600 second and 1800 second at ten locations draining the pollutant.

In order to estimate the diffuse ability of the semidiurnal constituent for COD, the pollutant diffusion have been calculated numerically by use of twice, 5 times, 10 times and 15 times the pollutant quantity drained at ten locations in 1979.