

# 渤海湾流场以及污染物分布的数值模拟研究\*

王泽良 王日新 陶建华

(天津大学力学系 天津 300072)

**提要** 为了弄清渤海湾这一具有广阔潮间带典型海域的潮流以及污染物分布状况,采用考虑“窄缝”的二维动边界潮流和对流扩散模型对渤海湾流场以及污染物分布的浓度场进行了数值模拟研究,并应用潮流以及污染物分布的实测资料对研究模型进行了验证,数值模拟结果与实测值符合良好。

**关键词** 渤海湾 动边界 窄缝法

**学科分类号** P731

渤海湾污染负荷大,滩涂广阔,水深较浅,岸坡很缓,随潮水涨落,水面面积变化显著,对这一海域流场和污染物浓度场进行数值模拟研究,若水陆交接处采用固定边界处理,计算结果不可能真实反映海湾的流场以及污染分布的特性。在以往的研究中,对此海区的流场及污染物浓度场的数值模拟均采用固定边界进行计算<sup>1)</sup>。陶建华(1984)提出了用来

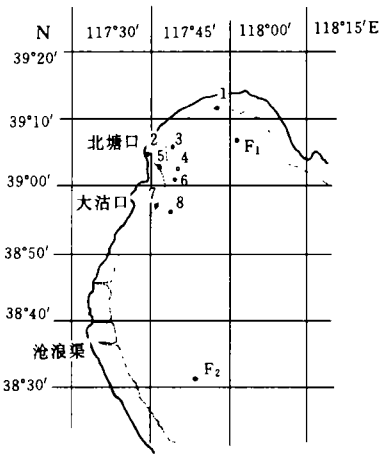


图1 站位位置图

Fig.1 Map showing location of the stations

● 为实测站位; ... 为零米等深线

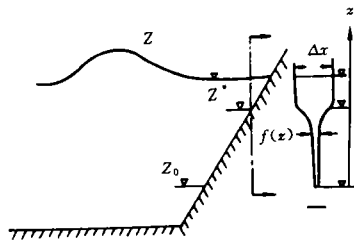


图2 窄缝示意图

Fig.2 Diagram showing the slot

$Z_0$  为窄缝底部高程;  $Z'$  为床底高程;  $f(z)$  为窄缝宽度;  $z$  为总的垂向坐标; A-A 为横截面

\* 国家八五攻关资助项目, 85-908-04-07-01。王泽良, 男, 出生于1968年6月, 博士, 现在中国水利水电科学研究院冷却水所, 北京, 100044, Fax: 0086-010-68412859

1) 天津市环保局, 1990年。天津近岸海域环境功能区划和有机物总量控制研究报告

收稿日期: 1996-03-11, 收修改稿日期: 1997-09-10

解决动边界问题的“窄缝法”,在求解水动力学模型中得到了很好的验证。本文采用考虑“窄缝”的二维水动力学模型,模拟了包括潮间带在内的渤海湾的流场,并应用考虑的“窄缝”二维对流扩散模型,模拟污染物在渤海湾及其潮间带上运动分布情况。研究海域的实测站位见图1。从数值模拟结果与实测结果比较可以看出,本文的动边界模型用于计算渤海湾潮流和污染物的分布情况是成功的。

## 1 基本方程

### 1.1 浅水潮波方程

渤海湾水平尺度远大于垂直尺度,且有广阔的潮间带,为此采用沿水深方向平均的并考虑动边界二维水深平均模型。图2是用于处理动边界的窄缝示意图。

考虑窄缝后的连续性方程为:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + F(Z) \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$F(Z) = \begin{cases} 1 & Z > Z^* \\ 2F_c - F_c^2 & Z \leq Z^* \end{cases}, \text{ 这里设 } \Delta x, \Delta y \text{ 为 } x, y \text{ 方向计算网格的空间步长, 并假定 } \Delta x$$

$= \Delta y$ 。  $P = UH, Q = VH$  为沿  $x, y$  方向的单宽流量;  $U, V$  为沿  $x, y$  方向的水深积分的平均流速;  $H$  为水深。

$$H = \begin{cases} \varepsilon(Z - Z_0) + \frac{1 - \varepsilon}{\alpha} e^{\alpha(Z_0 - Z^*)} [e^{\alpha(Z - Z_0)} - 1] & \text{当 } Z \leq Z^* \\ (Z - Z^*) + \varepsilon(Z^* - Z_0) + \frac{1 - \varepsilon}{\alpha} [1 - e^{\alpha(Z_0 - Z)}] & \text{当 } Z > Z^* \end{cases}; U, V \text{ 为沿 } x, y \text{ 方向沿}$$

水深方向平均的流速分量;  $Z$  为水位;  $F_c = \varepsilon + (1 - \varepsilon)e^{\alpha(Z - Z^*)}$  式中,  $\varepsilon$  为窄缝参数,  $\alpha$  为参数, 决定窄缝随深度缩减快慢, 一般取为 2.3。

考虑了窄缝后的动量方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{PQ}{H} \right) + gH \frac{\partial Z}{\partial x} &= -g \frac{P\sqrt{P^2 + Q^2}}{C_z^2 H^2} + fQ + E \left( \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{Q^2}{H} \right) + gH \frac{\partial Z}{\partial y} &= -g \frac{Q\sqrt{P^2 + Q^2}}{C_z^2 H^2} - fP + E \left( \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Q}{\partial y^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

式中,  $f$  是科氏力系数,  $f = 2\omega \sin \varphi$ ,  $\omega$  是地球自传角速度,  $\varphi$  是地球纬度;  $C_z$  是谢才系数,  $C_z = \frac{1}{n} H^{\frac{1}{6}}$ ,  $n$  为糙率系数;  $g$  是重力加速度;  $E$  为涡粘系数。

### 1.2 污染物的扩散方程

考虑动边界的二维水深平均的对流扩散模型如下:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(PC)}{\partial x} + \frac{\partial(QC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_y H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + HS_m \quad (3)$$

$$S = \begin{cases} 2HC - \int_{z_0}^z Cf(z)^2 dz & Z \leq Z^* \\ HC + H' C - \int_{z_0}^{z^*} Cf(z)^2 dz & Z > Z^* \end{cases}; f(z) = \begin{cases} \varepsilon + (1 - \varepsilon)e^{\alpha(z - Z^*)} & \text{当 } z \leq Z^* \\ 1.0 & \text{当 } z > Z^* \end{cases}$$

式中,  $H' = \varepsilon(Z - Z^*) + \frac{1 - \varepsilon}{\alpha} [1 - e^{\alpha(z_0 - Z^*)}]$ ;  $C$  为沿水深平均浓度;  $E_x, E_y$  分别为  $x, y$  方向的扩散系数;  $S_m$  为源项; 其它变量定义同公式(1)。

### 1.3 计算条件

#### 1.3.1 潮流计算

(1) 网格与水深 计算网格根据渤海湾海图绘制<sup>1)</sup>, 取  $\Delta x = \Delta y = 2000\text{m}$ 。网格点上的水深(潮间带上高程)由海图上水深(潮间带上高程)内差求得。

(2) 初始条件 计算从静止状态开始, 即  $t = 0$  时,  $Z = 0, P = 0, Q = 0$ 。

(3) 开边界 在进行  $M_2$  分潮潮流、水位计算时, 开边界(水边界)两端点强迫水位条件由式  $Z(t) = h \cos(\omega t - \psi)$  给出, 式中,  $h$  和  $\psi$  为开边界水位点  $M_2$  分潮的调和常数;  $\omega$  为  $M_2$  分潮的圆频率。开边界其它格点的调和常数由内差求得。在计算 1993 年 8 月 1—4 日的潮流时, 开边界条件由实测的开边界处的水位差值求得。

(4) 时间步长  $\Delta t = 372\text{s}$ 。

#### 1.3.2 扩散计算

扩散计算的水域、坐标系、网格间距以及水深条件与潮流计算相同。水位和流速由  $M_2$  分潮潮流数值模拟得到。

(1) 扩散系数 扩散系数取 Toshimitsu(1994) 的经验公式,  $E_x = \beta H |U|$ ,  $E_y = \beta H |V|$ ,  $\beta$  为扩散系数参量。

(2) 初始浓度 取初始浓度为  $0.0\text{mg/L}$ 。

(3) 边界条件 水陆交接处边界, 采用动边界进行处理。开边界处, 采用以下条件:

$$\left. \begin{aligned} C &= C_0 && \text{入流阶段} \\ \frac{\partial C}{\partial t} + V_n \frac{\partial C}{\partial n} &= 0 && \text{出流阶段} \end{aligned} \right\}$$

现场实测表明, 入流阶段流入湾内的海水并非纯净的海水, 计算中取  $C_0 = 1.4\text{mg/L}$ ;  $V_n$  为法向流速。

(4) 时间步长  $\Delta t = 1860\text{s}$ 。

(5) 污染源 渤海湾三个主要排污口为北塘口、大沽口和沧浪渠。1992 年的三个排污口各自 COD(化学需氧量)的排放量以及入海径流量由天津市环保局提供<sup>2)</sup>(各排污口排放量见表 1)。

1) 海军某部提供, 1985. 渤海湾海图

2) 天津市环保局, 1995. 天津污水海洋处置工程的可行性研究

表1 1992年北塘口、大沽口和沧浪渠COD入海量和径流量

Tab.1 The total fluxes of COD and fresh water discharges at Beitangkou, Dagukou and Canglangqu, 1992

排污口	入海径流量(m <sup>3</sup> )	COD入海量(t)
北塘口	31 956.0	18 066.1
大沽口	37 464.0	13 855.4
沧浪渠	4 430.0	1 792.0

## 2 计算结果

### 2.1 水动力学模型的验证与应用

**2.1.1 流速的验证** 1993年8月1—4日多家单位联合对渤海湾潮流进行了多点同步测量。为了验证二维窄缝法动边界数学模型对于渤海湾这样岸坡极缓的海湾是否具有良好的重现性,本文采用这次详细的流速实测资料对数学模型进行验证。图3给出了海湾中两个站位同步的实测流速过程与数值模拟的流速过程。可以看出,两个站位的实测流速值与计算流速值之间吻合得比较好。由于计算中的开边界条件是水位边界条件,而验证应用的是两个站位的速度过程,所以说计算的流场是可靠的。这也说明了本文采用的水动力学动边界模型对于渤海湾潮流场的模拟是成功的。

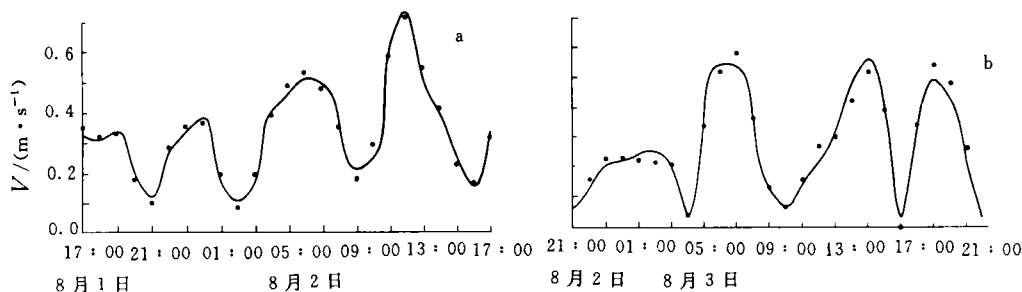


图3 实测流速过程与计算结果的比较

Fig.3 Comparison between observed and calculated velocity data

a. F1点; b. F2点

● 实测; — 计算

**2.1.2 M<sub>2</sub>分潮流场、水位计算** 在进行污染物COD的浓度场计算时,需要了解的是1992年年平均的分布状况,所以在计算渤海湾的流场时,选取了在该海湾中起主要作用的分潮。从图4可以看出,在海域内存在多个余环流,其中较大的余环流主要有两个,以大沽口为界以北的顺时针余环流和大沽口以南的逆时针余环流。大沽口以北海域余环流十分复杂,大沽口以南海域余环流相对较为简单,在大的逆时针环流中同时存在若小的余环流。这种存在多个余环流的渤海湾的欧拉余流场也正是本海域与外海交换能力差的表现之一,对污染物的输移扩散十分不利。

### 2.2 渤海湾污染物(COD)分布状况数值模拟

在取得了渤海湾分潮流、水位数据基础之上,应用动边界的对流扩散模型,模拟了渤海湾1992年年平均的COD的分布情况。从表2可以看出,数值模拟结果与实测值符合较

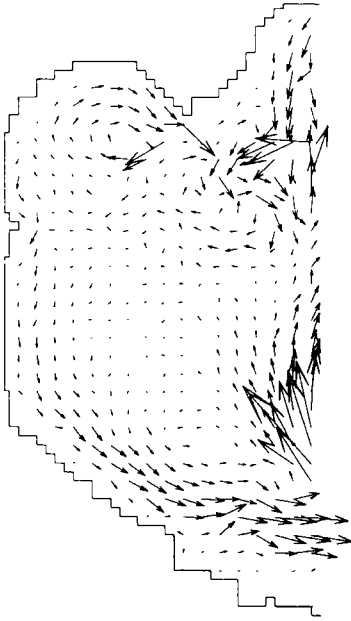


图4 渤海湾的欧拉余流场

Fig.4 Eulerian residual flows in the Bohai Bay

好。从图 5 可以看出高潮与低潮时的 COD 的分布状况是存在一定的差别的, 涨潮时 COD 浓度等值线梯度变大, 落潮时 COD 浓度等值线梯度变小。这是因为在涨潮时, 海水由外海流向海湾, 虽然由于 COD 浓度低的海水的进入, 使湾内高 COD 浓度的海水得以稀释, 但由于流速方向基本上是由湾外向湾内, 使污染物浓度等值线梯度增大, 这时不利于污染物向外迁移扩散。落潮时, 潮流速度方向是由湾内向湾外, 使得污染物浓度等值线梯度减小。

通过对水动力学模型以及对流扩散模型的验证, 可以看出, 本文的动边界二维水深平均的水动力学模型和对流扩散模型能够成功地模拟渤海湾这样缓坡海岸海湾的潮流场及 COD 浓度场。通过对海湾污染物分布的成功模拟, 可以使采用简单定点监测难以达到的定量地了解海湾中各个区域 COD 的浓度分布

表2 渤海湾8个监测站位COD浓度(mg/L)实测值与计算结果的比较

Tab.2 Comparison between observed and calculated concentrations of COD (mg/L) at eight monitoring stations in the Bohai Bay

站位	1	2	3	4	5	6	7	8
实测值	1.76	3.39	2.50	2.06	2.56	2.07	2.14	2.14
计算值	1.93	3.34	2.45	2.11	2.60	2.05	2.17	2.09

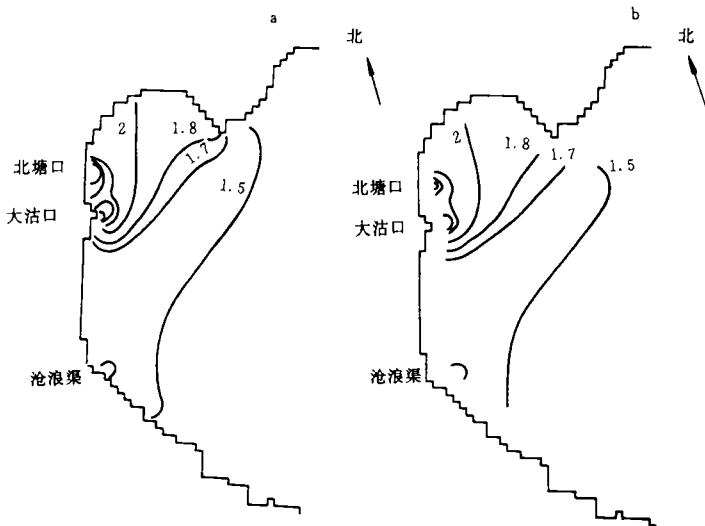


图5 COD在高潮时(a)和低潮时(b)的分布(mg/L)

Fig.5 The distribution patterns of COD at high water (a) and low water (b) during tidal cycle (mg/L)

的问题得以解决,同时也为成功地对渤海湾进行治理和功能区划提供了科学的决策依据。

### 3 结论

3.1 应用考虑“窄缝”水动力学模型计算渤海湾的潮流场,可以较好地反映近岸海域以及潮间带上潮流运动的情况,说明本文采用的数学模型对于模拟具有宽阔潮间带的渤海湾的流场是成功的。

3.2 应用考虑“窄缝”的对流扩散模型模拟渤海湾的污染物浓度场,可以比较好地模拟污染物在滩涂上运动,并较准确地计算出近岸海域的污染物浓度分布状况,说明本模型的可行性。

3.3 通过对渤海湾的环境动力学特性研究,可以看出,本海域与外海水质交换能力很差,为保护海洋环境,应加强本海域的海洋环境治理。

3.4 为更好地模拟污染物在滩涂上运动和分布情况,在建立模型时还应该考虑到底泥释放问题,尤其在淤泥质的海滩,这个问题尤为显著,笔者对这一问题作过初步探索,因许多问题尚待完善,所以本文模型中未考虑底泥释放。

### 参 考 文 献

陶建华, 1984. 波浪在岸滩爬坡和波浪破碎的数学模型. 海洋学报, 6(5): 692—700

Toshimitsu Komatsu, 1994. Estimation of 1-D and 2-D Dispersion Coefficient in a Bay. Proceedings of China-Japan Bilateral Symposium on Fluid Mechanics and Management tools for Environment. Hefei: Science Press, 42—49

## NUMERICAL SIMULATION OF TIDAL CURRENT AND POLLUTANT DISTRIBUTION OF BOHAI BAY

WANG Ze-liang<sup>1)</sup>, WANG Ri-xin, TAO Jian-hua

(Mechanics Department of Tianjin University, Tianjin, 300072)

**Abstract** Bohai Bay is a typical semi-closed bay in the western part of Bohai Sea. The main characters of the bay are very shallow water depth, wide mild slope mud beach, and heavy pollution loads. In this paper, 2-D depth-averaged hydrodynamic model and advection-diffusion model with moving boundary are used to simulate the velocity field and pollutant distribution of Bohai Bay.

In order to treat the moving boundary following the tidal rise and fall, hydrodynamic equations and advection-diffusion equation using the slot method are used.

1) Hydrodynamic model

$$\text{Mass equation: } \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} + F(Z) \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

1) Present address: Dept. of Cooling Water, Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power Research, Beijing, 100044

$$F(Z) = \begin{cases} 1 & Z > Z^* \\ 2F_c - F_c^2 & Z \leq Z^* \end{cases}$$

where:  $P, Q$  are the unit discharge in  $x$  and  $y$  directions respectively;  $Z$  is water elevation;  $F_c = \varepsilon + (1 - \varepsilon)e^{\alpha(Z - Z^*)}$ ,  $\varepsilon$  and  $\alpha$  are parameters,  $Z^*$  is seabed elevation.

*Momentum equations are of the same form as that without slot.*

2) Advection-diffusion model

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial(PC)}{\partial x} + \frac{\partial(QC)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( E_x H \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( E_y H \frac{\partial C}{\partial y} \right) + HS_m \quad (2)$$

$$S = \begin{cases} 2HC - \int_{Z_0}^Z Cf(z)^2 dz & \text{when } Z \leq Z^* \\ HC + H' C - \int_{Z_0}^{Z'} Cf(z)^2 dz & \text{when } Z > Z^* \end{cases}; f(z) = \begin{cases} \varepsilon + (1 - \varepsilon)e^{\alpha(z - Z^*)} & \text{when } z \leq Z^* \\ 1.0 & \text{when } z > Z^* \end{cases}$$

Where:  $C$  is pollutant concentration parameter;  $H$  is water depth;  $H' = \varepsilon(Z - Z^*) + \frac{1 - \varepsilon}{\alpha} [1 - e^{\alpha(Z_0 - Z^*)}]$ ;  $Z_0$  is slope bottom elevation;  $S_m$  is source term;  $E_x, E_y$  are diffusion coefficient in  $x$  and  $y$  directions respectively.

The very small difference between the observed data and the numerical results for velocity and pollutant concentration distribution showed that the models presented in this paper are reliable, especially for the treatment of moving boundary conditions.

The above models were used to investigate the environmental capacity, division of function area and oceanic disposal of wastewater of Bohai Bay.

**Key words** Bohai Bay Moving boundary Slot method

**Subject classification number** P731