

渤海潮混合数值模拟*

I. 渤海主要半日分潮的数值模拟

山广林 刘赞沛 王钟楮 徐洪达

(国家海洋局第一海洋研究所)

雷光耀

(中国科学院应用数学研究所)

渤海为内陆海湾, 仅以一海峡与北黄海相通。天体引力作用下的周期性海水运动是渤海海水运动的主要形式之一。因此, 研究渤海潮流对污染物稀释扩散, 迁移输送的规律是环境保护研究工作中的重要课题。

渤海是以半日分潮性质为主的海域。因此本文着重讨论渤海半日分潮的数值模拟问题, 以便在此基础上求解扩散方程式, 进而得到污染物在主要半日分潮流作用下的空间分布状况。

一、渤海 M_2 分潮波的数学模式

1. 浅海潮波方程式

在笛卡尔直角坐标系中, xoy 平面取在平均海平面上, x 轴向东为正, y 轴向北为正, z 轴铅直向上为正(如图1所示)。

考虑到在地转偏向力、海底摩擦力、水平侧向摩擦力、大气压强等因素作用下的浅海潮波方程式, 取垂直积分后形式为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - g \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{(H+\zeta)C^2} + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - g \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{(H+\zeta)C^2} + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

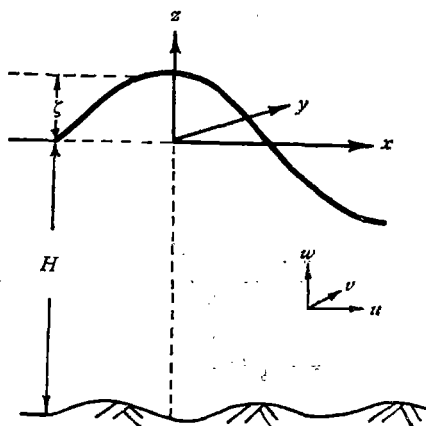


图1 坐标系的定义
Fig. 1 Coordinate system

* 何恩典教授, 陈宗镛、尤芳湖、管秉贤、方国洪副教授, 俞光耀、陈士俊和王化桐老师, 蔡广兴和郭择德同志, 陈则实副所长等审阅了本文初稿, 给予了热情指导, 参加本课题工作的还有董彬同志, 谨致感谢。
收稿日期: 1982年5月15日。 (2Δ)

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(H + \zeta)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(H + \zeta)v] = 0. \quad (3)$$

其中: t 为时间; u, v 分别为潮流东分量和北分量的垂直接分流速, 即

$$u = \frac{1}{H + \zeta} \int_{-H}^{\zeta} U \partial z; \quad v = \frac{1}{H + \zeta} \int_{-H}^{\zeta} V \partial z.$$

ζ 为从平均海平面算起的海平面起伏高度; f 为科氏参数; g 为重力加速度, 取 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$; ν 为水平涡动粘滞系数; C 为 Chezy 系数, 取 $C = \frac{1}{n} (\bar{H})^{1/6}$; n 为 Maning 系数; H 为自平均海平面算起的海水深度。

2. 求解方法

为了求方程(1)–(3)式的数值解, 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。

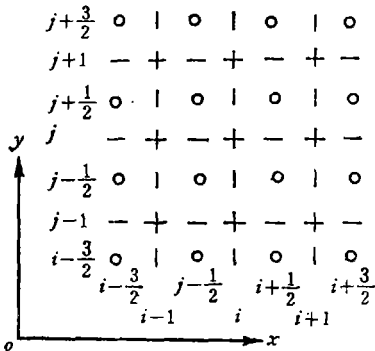


图 2 网格和变量的定义

- + : ζ (水位), C (Chezy 系数)
- 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. + : ζ (level), C (Chezy coefficient); O : H (depth); - : u (component of tidal current in X-direction); | : v (component of tidal current in Y-direction)

利用交替方向隐式差分法, 得到两组差分格式:

(i) 前半个时间步长

$$\begin{aligned} & \frac{\zeta_{i,j}^{K+\frac{1}{2}} - \zeta_{i,j}^K}{\Delta t} + \frac{1}{2\Delta S} [(H_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + H_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \\ & + \zeta_{i+1,j}^{K+\frac{1}{2}} + \zeta_{i,j}^{K+\frac{1}{2}}) u_{i+\frac{1}{2},j}^{K+\frac{1}{2}} - (H_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \\ & + H_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + \zeta_{i,j}^{K+\frac{1}{2}} + \zeta_{i-1,j}^{K+\frac{1}{2}}) u_{i-\frac{1}{2},j}^{K+\frac{1}{2}}] \\ & + \frac{1}{2\Delta S} [(H_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + H_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + \zeta_{i,j+1}^K \\ & + \zeta_{i,j}^K) v_{i,j+\frac{1}{2}}^K - (H_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + H_{i-\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} \\ & + \zeta_{i,j}^K + \zeta_{i,j-1}^K) v_{i,j-\frac{1}{2}}^K] = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \frac{u_{i+\frac{1}{2},j}^{K+\frac{1}{2}} - u_{i+\frac{1}{2},j}^K}{\Delta t} + u_{i+\frac{1}{2},j}^{K+\frac{1}{2}} \frac{u_{i+\frac{1}{2},j}^K - u_{i-\frac{1}{2},j}^K}{2\Delta S} \\ & + \frac{1}{4} (v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^K + v_{i,j+\frac{1}{2}}^K + v_{i,j-\frac{1}{2}}^K + v_{i+1,j-\frac{1}{2}}^K) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \frac{u_{i+\frac{1}{2},j+1}^K - u_{i+\frac{1}{2},j-1}^K}{2\Delta S} - \frac{f}{4} (v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^K + v_{i,j+\frac{1}{2}}^K + v_{i,j-\frac{1}{2}}^K + v_{i+1,j-\frac{1}{2}}^K) \\ & = -g \frac{\zeta_{i+1,j}^{K+\frac{1}{2}} - \zeta_{i,j}^{K+\frac{1}{2}}}{\Delta S} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - \frac{g u_{i+\frac{1}{2},j}^K \left\{ (u_{i+\frac{1}{2},j}^K)^2 + \left[\frac{1}{4} (v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^K + v_{i,j+\frac{1}{2}}^K + v_{i,j-\frac{1}{2}}^K + v_{i+1,j-\frac{1}{2}}^K) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}{\frac{1}{8} (H_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + H_{i+\frac{1}{2},j-\frac{1}{2}} + \zeta_{i+1,j}^K + \zeta_{i,j}^K) (C_{i+1,j} + C_{i,j})^2} \end{aligned}$$

$$+ \frac{\nu}{(\Delta S)^2} (u_{i+\frac{1}{2},j}^K + u_{i+\frac{1}{2},j}^K + u_{i+\frac{1}{2},j+1}^K + u_{i+\frac{1}{2},j-1}^K - 4u_{i+\frac{1}{2},j}^K) \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
& \frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}^{K+\frac{1}{2}} - v_{i,j+\frac{1}{2}}^K}{\frac{\Delta t}{2}} + \frac{1}{4} (u_{i+\frac{1}{2},j}^{K+\frac{1}{2}} + u_{i+\frac{1}{2},j+1}^{K+\frac{1}{2}} + u_{i-\frac{1}{2},j+1}^{K+\frac{1}{2}} + u_{i-\frac{1}{2},j}^{K+\frac{1}{2}}) \frac{v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{K+\frac{1}{2}} - v_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{K+\frac{1}{2}}}{2\Delta S} \\
& + \frac{v_{i,j+\frac{1}{2}}^K - v_{i,j-\frac{1}{2}}^K}{2\Delta S} v_{i,j+\frac{1}{2}}^{K+\frac{1}{2}} + \frac{f}{4} (u_{i+\frac{1}{2},j}^{K+\frac{1}{2}} + u_{i+\frac{1}{2},j-1}^{K+\frac{1}{2}} + u_{i-\frac{1}{2},j+1}^{K+\frac{1}{2}} + u_{i-\frac{1}{2},j}^{K+\frac{1}{2}}) \\
& = -g \frac{\zeta_{i,j+1}^K - \zeta_{i,j}^K}{\Delta S} \\
& - \frac{g v_{i,j+\frac{1}{2}}^{K+\frac{1}{2}} \left\{ (v_{i,j+\frac{1}{2}}^{K+\frac{1}{2}})^2 + \left[\frac{1}{4} (u_{i+\frac{1}{2},j}^K + u_{i+\frac{1}{2},j+1}^{K+\frac{1}{2}} + u_{i-\frac{1}{2},j+1}^{K+\frac{1}{2}} + u_{i-\frac{1}{2},j}^{K+\frac{1}{2}}) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}}{8} \\
& \quad \left(H_{i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + H_{i-\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}} + \zeta_{i,j+1}^{K+\frac{1}{2}} + \zeta_{i,j}^{K+\frac{1}{2}} \right) (C_{i,j+1} + C_{i,j})^2 \\
& + \frac{v}{(\Delta S)^2} (v_{i,j+\frac{1}{2}}^{K+\frac{1}{2}} + v_{i,j-\frac{1}{2}}^{K+\frac{1}{2}} + v_{i+1,j+\frac{1}{2}}^{K+\frac{1}{2}} + v_{i-1,j+\frac{1}{2}}^{K+\frac{1}{2}} - 4v_{i,j+\frac{1}{2}}^{K+\frac{1}{2}}) \quad (6)
\end{aligned}$$

3. 后半段时间步长

在上述差分格式中,使 $K \rightarrow K + 1/2$, $u \rightarrow v$, $i \rightarrow j$ 即得后半段时间步长的差分格式(此处从略)。

上述差分格式,均对非线性项作了适当的显式处理。

差分格式的精度、稳定性以及质量守恒与动量守恒的检验及差分计算公式拟另文论述。

4. 计算条件

(1) 计算网格的绘制和水深的选取

从海军海道测量部 1956 年出版的 5001 和 5002 (1/5 百万) 海图上绘制计算网格并读取水深。渤海地处 $37^\circ - 41^\circ\text{N}$ 之间,南北跨 4 个纬度,平均纬度为 39°N 。为了消除形变对计算结果的影响,以 39°N 处的长度比为基准绘制网格。

水深是海图深度基准面的深度在一个网格内的平均值,再加上 1.8m。

(2) 初始条件

当 $\tau = 0$ 时, $\zeta = u = v = 0$ (全域)。

(3) 边界条件

一般取垂直于陆界的流速为零,即

$$U_{\perp} = V_{\perp} = 0,$$

陆界以外的水位为零。但在渤海湾南岸和莱州湾南岸因有相当宽阔的滩涂(最宽处约有 30km,一般为数公里)。当空间网格取 $\Delta S \leq 20\text{km}$ 时,滩涂的存在是不可忽略的,不能简单地将滩涂作为陆界处理。因此我们采用法向导数外推法模拟滩涂边界,此法对差分格式的稳定性没有影响,其做法如下: 设网格边界为 Γ , 其法线方向为 N , 假定在 Γ 的两侧有 $\left. \frac{\partial F}{\partial N} \right|_{\Gamma^*} = \delta \left. \frac{\partial F}{\partial N} \right|_{\Gamma^{\text{内}}}$, 其中 δ 为常数(取值在 0.7 左右,一般取 $1/2 < \delta < 1$, 计算表明在此范围内结果无大差别。) F 为 ζ, u 或 v 。作差分近似即可得出在滩涂边界外侧网格上的数值,差分方程组的求解公式,在滩涂边界处需作相应的调整,这里不做详细叙

述。

(4) 开边界水位控制

取旅顺至八角与烟台西口村之间 A 点 ($39^{\circ}39'N$, $121^{\circ}15'E$) 作为开边界, 两端点用正规的正弦波给出水位, 即 $\zeta = H_{M_2} \sin \left(2\pi \frac{\Delta t}{T} - q_{M_2} \right)$, 式中 H_{M_2} 和 q_{M_2} 分别为 M_2 分潮的振幅和迟角, T 为 M_2 分潮周期, 取 $T = 12.5$ 小时。

A 点的 H_{M_2} 和 q_{M_2} 是由八角和烟台西口村的 M_2 调和常数内插求得的。

(5) 底摩擦系数

底应力取为二次方律:

$$F_{bx} = -g \frac{u|U|}{C^2}; \quad F_{by} = -g \frac{v|V|}{C^2},$$

C 为 Chezy 系数, 取 $C = \frac{1}{n} (\bar{H})^{1/6}$ 。

(6) 科氏系数

考虑到渤海南北跨近 4 个纬度, φ 的值随不同纬度取不同的值。

(7) 水平涡动粘性系数

取 $\nu = 125 \text{m}^2/\text{s}$ 。

二、模拟结果

为了较好地模拟出渤海 M_2 分潮, 我们采用不同的空间步长 (5, 10, 20km)。不同时间步长 (100, 200, 450, 900, 1800s) 及不同的边界, 不同的 n 值和 ν 值, 作了许多个方案的数值试验, 取得了与实测比较一致的模拟结果。

1. 渤海 M_2 分潮波性质

图 3 是根据对水位 ζ 值进行福氏分析和频谱分析处理后求出的 M_2 分潮振幅和相位调和常数而绘制的 M_2 分潮等振幅和同相位图。图中清楚地表明: 渤海 M_2 分潮是由两个反时针旋转的潮波系统构成, 两个潮波的无潮点分别位于秦皇岛以东外海和黄河口

表 1 沿岸站 M_2 分潮 (ζ) 计算与实测调和常数比较

站名	振幅绝对误差 (cm)	迟角绝对误差 (度)	站名	振幅绝对误差 (cm)	迟角绝对误差 (度)
塘沽	7	1	鲅鱼圈	11	6
曹妃甸	6	13	营口	19	3
潍河口	9	10	葫芦岛	0	2
龙口	8	1	菊花岛	1	0
蓬莱	0	1	长山寺	2	3
长山岛	1	2	团长角	2	4
北隍城岛	1	5	石河东	1	10
砣矶岛	1	7	石河西	1	0
羊头洼	1	7	秦皇岛	1	15
葫芦套	2	11	滦河口	1	3
西中岛	1	11	太平角	13	0

外。这与前人通过调查研所得到的结果一致(见图 3)。

从数值模拟的结果中,选取了 22 个计算点,把各点计算得到的 M_2 分潮调和常数与其对应的岸边验潮站从实测水位资料中求得的 M_2 分潮调和常数相比较(如表 1 所示)可以看出:两者振幅的相对误差大部分在 10% 以内,相位误差均小于 15° 。

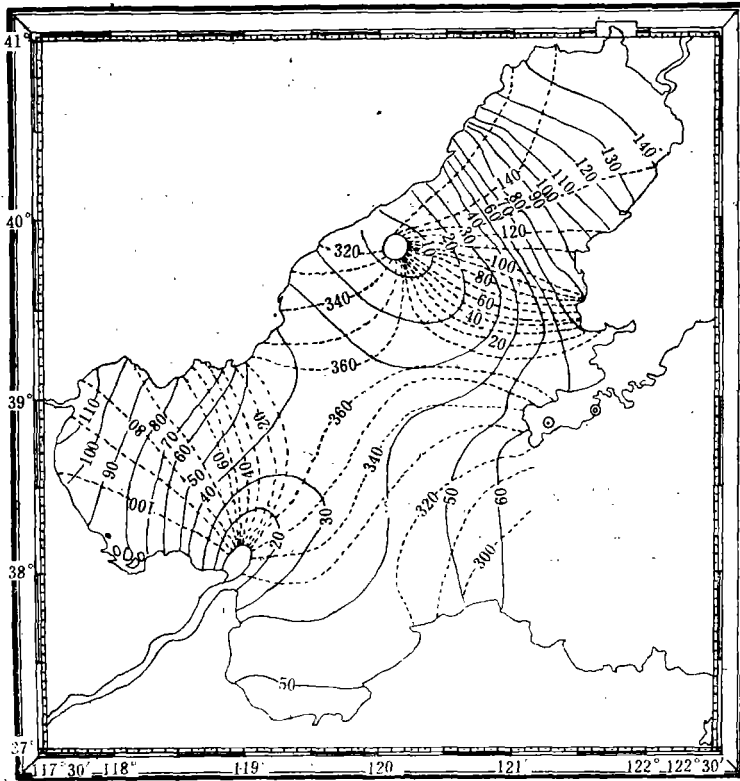


图 3 计算 M_2 等振幅同位相图

Fig.3 M_2 co-amplitude lines and M_2 co-phase lines (calculated)

表 2

站 号	1005	1007	1012	1021	1033	1041	1059	1075	6162	1085	6194
潮汐高潮时	8.2	7.8	8.2	7.0	3.6	2.9	2.3	2.2	2.0	2.0	2.0
最大潮流时	11.4	11.4	11.3	11.2	4.5	4.0	3.1	3.2	4.4	11.0	11.5
差	-3.2	-3.6	-3.1	-4.2	-0.9	-1.1	-0.8	-1.0	-2.4	3.5	3.0
站 号	1061	1043	1047	1056	1057	1058	1060	1092	1093	1094	1095
潮汐高潮时	6.5	6.0	6.1	6.0	5.5	3.8	1.6	1.4	1.4	1.3	1.2
最大潮流时	3.5	3.0	3.3	3.4	3.2	3.1	2.9	2.6	2.8	2.8	2.9
差	3.0	3.0	2.8	2.6	2.3	0.7	-1.3	-1.2	-1.4	-1.5	-1.7

计算结果还表明:在同一纬度上辽东湾东海岸的水位高于西海岸,潮波以逆时针方向旋转,显示出明显的凯尔波性质。

表 2 列出了计算域内三个断面共 22 个点上的 M_2 分潮发生高潮和最大潮流的时间。从表中可看出：在辽东湾、渤海湾及莱州湾三个海湾中高潮时和发生最大潮流的时间相差达 3 小时，即四分之一潮周期左右，而在渤海中部和海峡处两者仅差 1 小时左右。驻波除能形成无潮点(即波节)外，在波节处流速大、潮差为零，而在波腹处则潮差大，流速弱，两者潮时相差四分之一周期。前进波则不能构成波节、且两者潮时相同或相差二分之一周期。以上分析说明，模拟出的 M_2 分潮波在渤海构成两个反时针旋转的驻波系统，在三个海湾中表现出明显的驻波性质，而在渤海中部及海峡处以前进波性质为主，这与全国海洋普查所得到的结果一致。

2. 渤海 M_2 分潮流

为了验证模拟的 M_2 分潮流，我们采用了比较 M_2 分潮流分量调和常数和潮流椭圆要素的办法。表 3 列出的是计算得到的 M_2 分潮流东分量和北分量调和常数(振幅和相位)和实测求得的调和常数。实测是分层的，表中列出的是各层算术平均结果。两者比较表明：渤海湾内东分量振幅的相对误差均小于 10%，相位差小于 6° ，北分量除湾口中部 1057 站为 25.0% 外，其余均小于 20%，相位只有三个站误差大于 15° (1056, 1057 和 1061)。辽东湾则相反，北分量的误差均小于 20% (振幅)和 10° (相位)，东分量振幅在 9 个比较点中有 4 个大于 20%，相位除 1007 站外，也均小于 10° 。渤海中部和莱州湾，东、北分量振幅的平均相对误差除 1060 站外均小于 20%，相位差大部分在 15° 以内。

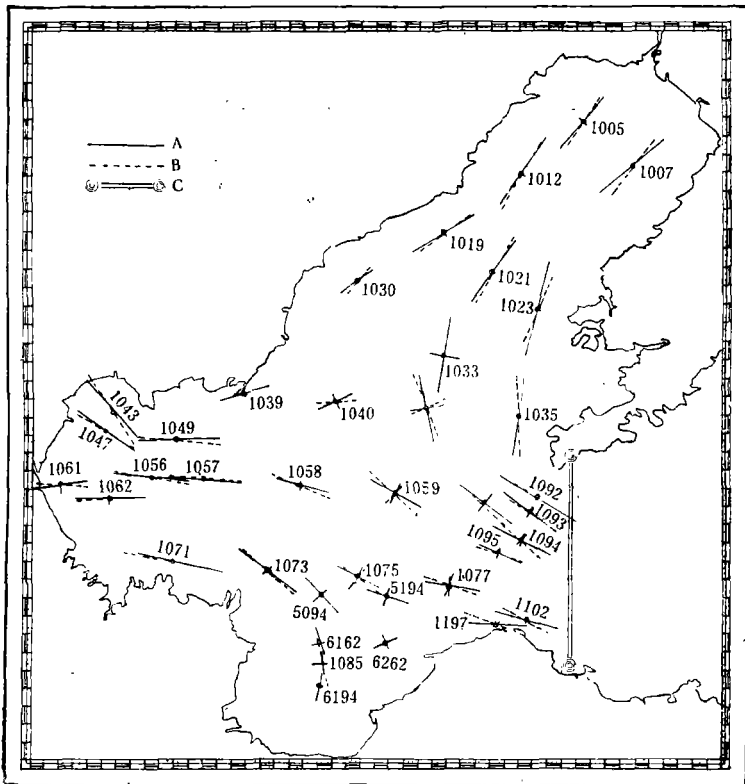


图 4 M_2 分潮流椭圆长短轴分布图

Fig. 4 The pattern of the major and minor axis of the M_2 tidal current ellipse

由图 4 可以看出: 计算与实测的潮流椭圆长短轴的分布趋势是一致的。此外还比较了计算与实测的发生最大潮流的同潮时图(见图 5, 6), 两者也完全相同。

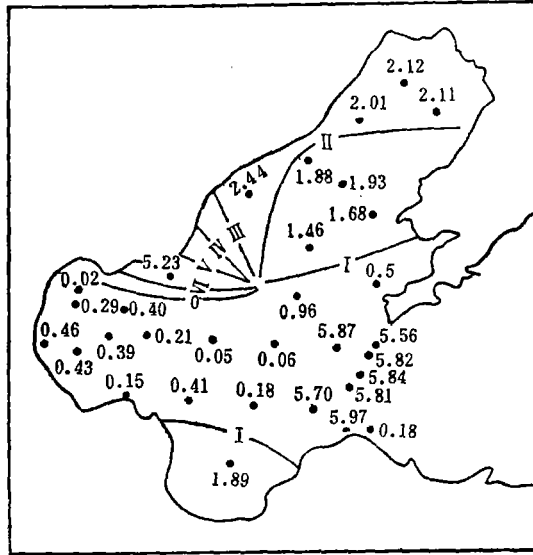


图 5 M_2 分潮流最大潮流同潮时线(计算)

Fig. 5 The pattern of the cotidal chart of the M_2 maximum current (calculated)

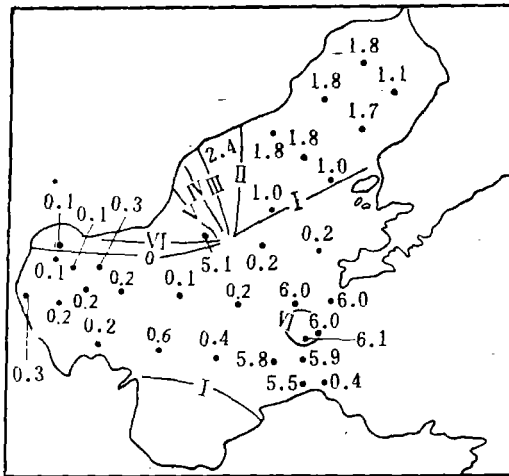


图 6 M_2 分潮流最大潮流同潮时线(0~底平均)(实测)

Fig. 6 The pattern of the cotidal chart of the M_2 maximum tidal current (observed)

3. 主要半日潮 ($M_2 + S_2$) 潮流计算结果

计算结果表明: 辽东湾最大涨潮流发生在旅顺高潮后 3 时 48 分至 4 时, 最大落潮流在旅顺高潮前 2 时 12 分至 2 时 25 分; 渤海湾最大涨潮流在旅顺高潮后 2 时 6 分至 2 时 12 分, 最大落潮流在旅顺高潮前 3 时 48 分至 3 时 56 分; 莱州湾最大涨潮流发生在旅顺

表 3 潮流调和常数计算与实测比较

站号	东分量 (u)		北分量 (v)	
	振幅误差 (cm/s)	相角误差(度)	振幅误差 (cm/s)	相角误差(度)
1043	2	-5	-6	3
1047	2	-2	2	9
1061	3	-2	-1	-33
1062	1	4	2	13
1056	2	1	-2	-18
1057	1	-2	-1	-63
1073	-1	-6	-6	-5
1040	1	-1	0	29
1058	-4	-3	-6	2
1085	1	-16	-9	19
1075	1	-6	-3	1
1060	10	-4	6	6
1059	-2	-1	-11	3
1041	-4	3	-2	14
1033	1	9	7	10
1021	3	0	-2	1
1019	7	-3	2	3
1030	6	-7	-1	-4
1005	9	7	5	6
1012	4	0	-3	4
1007	16	6	0	10
1023	-4	11	18	18
1035	-1	-97	-1	6
1092	16	-6	8	-17
1094	8	6	-5	3
1095	-2	-6	3	4
1102	13	-8	-4	-2
1077	5	7	-5	16

高潮前 2 时左右,最大落潮流均在高潮后 4 时 12 分左右,与实测结果相比较,最大涨落时间相差均不超过 30 分钟,流速相对误差均小于 20%,涨落潮的方向亦趋一致。开始转流的时间,一般计算的较实测的提前;转流过程中两者流向相差较大。计算结果还表明,辽

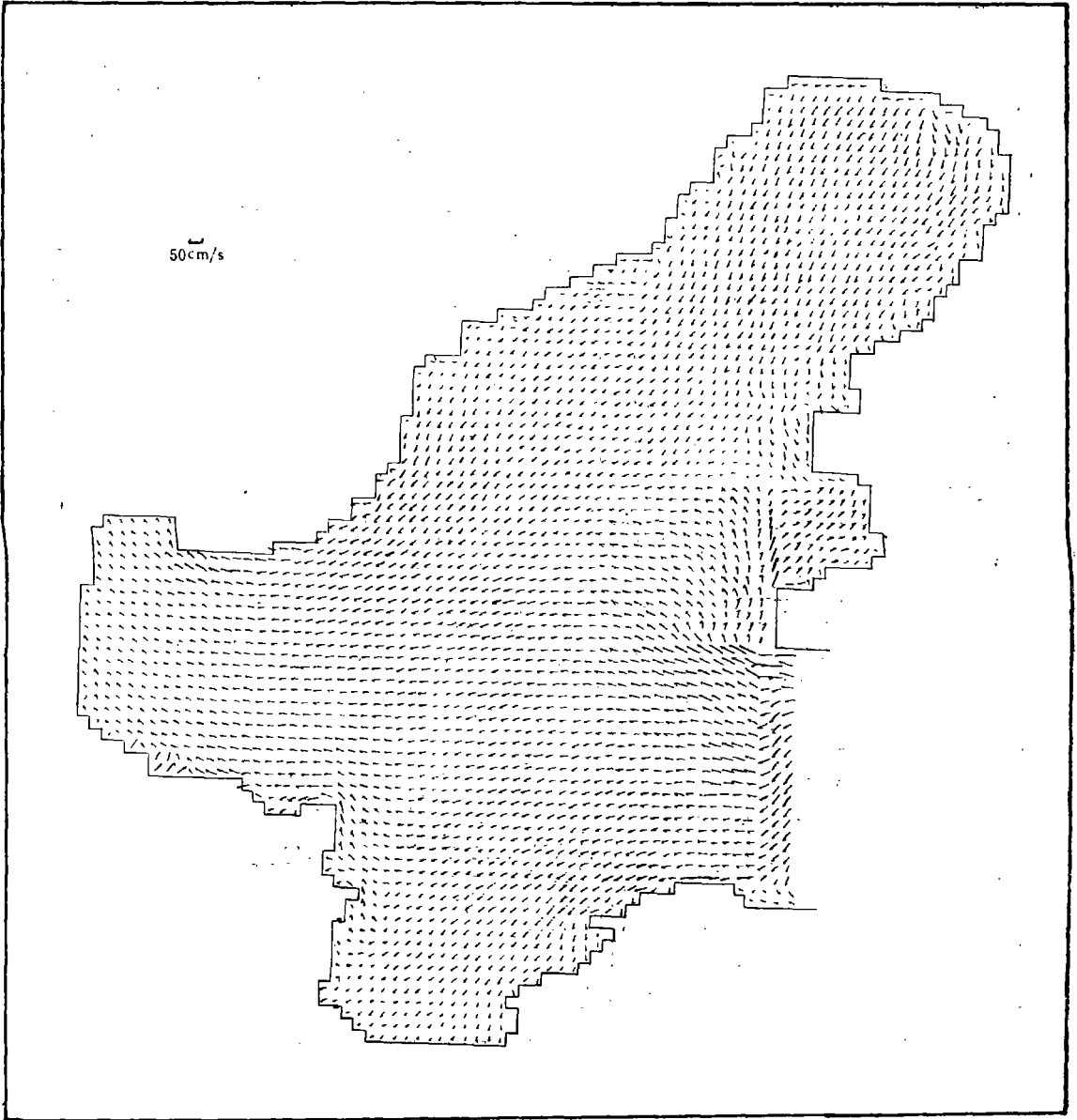


图7 渤海潮流场图 ($M_2 + S_2$, $t = 1$ 时)

Fig. 7 The pattern of the tidal current ($M_2 + S_2$) in the Bohai Sea (the 1 h)

东湾和渤海湾为往复流性质,莱州湾及渤海中部无明显转流时间,为旋转流性质,这与实测结果也是一致的。

在数值模拟收敛稳定后,绘制了一套整周期的潮流图(每半小时1张),图7—10分别表示旅顺高潮后1时、4时、7时30分和10时30分的 $M_2 + S_2$ 的潮流场图,它们可近似地代表旅顺高潮时及高潮后 $\frac{T}{4}$, $\frac{T}{2}$ 和 $\frac{3T}{4}$ 的半日分潮流场图。由所绘制的全部流场图可以看出:辽东湾是在旅顺高潮后约1小时至7小时涨潮,涨潮水在开始的3小时内主要来

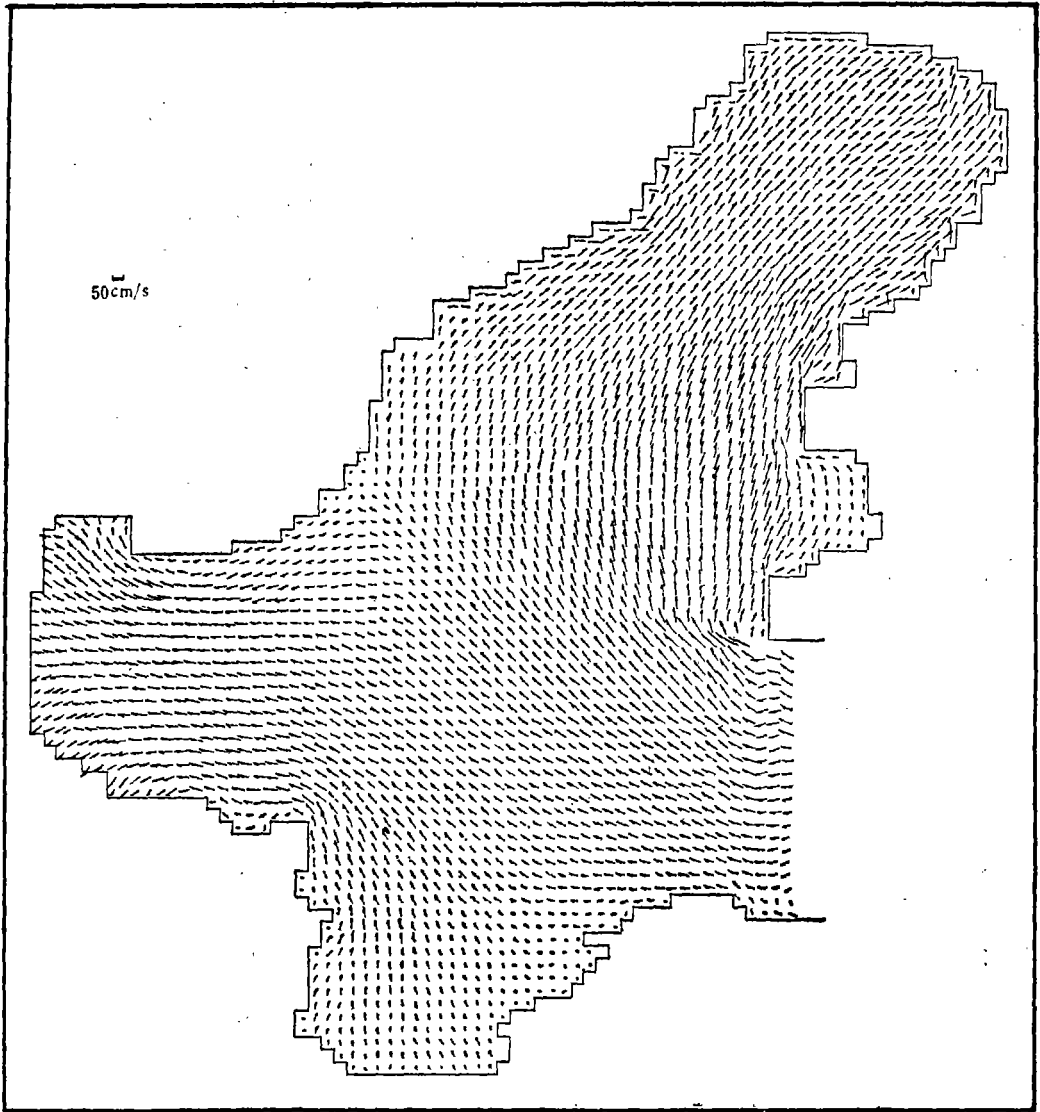


图 8 渤海潮流场图 ($M_2 + S_2$, $t = 4$ 时)

Fig. 8 The pattern of tidal current ($M_2 + S_2$) in the Bohai Sea (the 4 h)

自进入海峡的外海水。高潮后 4 小时以后, 由于海峡开始转流, 涨潮水主要来自渤海中部海域、约持续 1 小时, 在高潮后 5 至 7 时主要来自渤海湾的退潮水。旅顺高潮后约 7.5 小时, 辽东湾开始落潮, 在头 3.5 小时内, 落潮水主要向海峡流去, 而后流向渤海中部, 最后则流向渤海湾, 各持续约 1 小时。

渤海湾, 在旅顺高潮前半小时开始涨潮, 涨潮水除了开始一小时内有一部分来自辽东湾外, 主要来自渤海中部海域和莱州湾; 在旅顺高潮后 6 小时开始退潮, 除开始一小时内有一部分落潮水流向辽东湾外, 主要向渤海中部和莱州湾流去。

莱州湾, 涨潮水主要来自渤海湾, 只有一部分来自渤海中部海域和进入海峡的外海

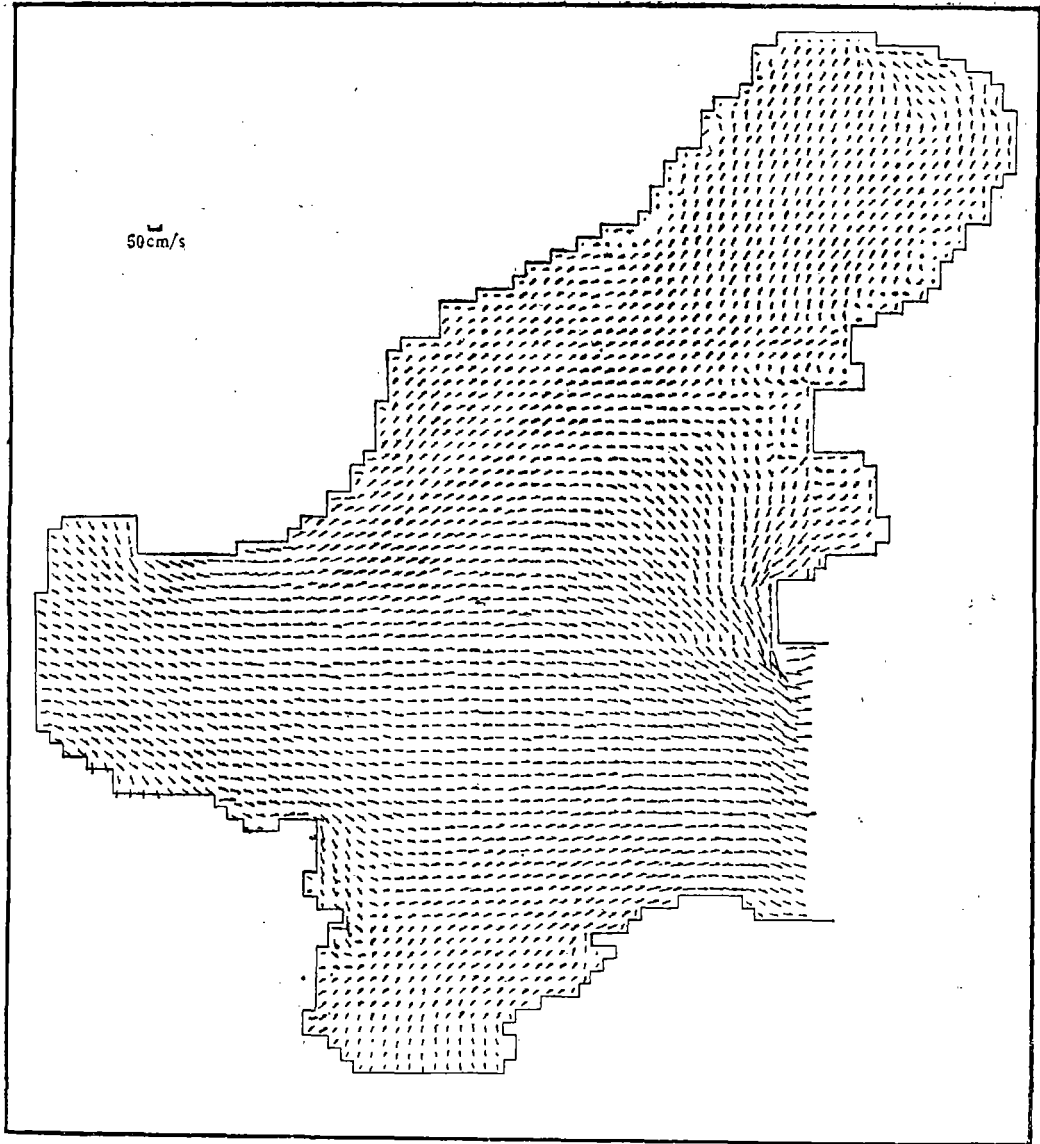


图9 渤海潮流场图 ($M_2 + S_2$, $t = 7$ 时 30 分)

Fig. 9 The pattern of the tidal current ($M_2 + S_2$) in the Bohai Sea (the 7.5 h)

水,且持续时间不到两小时。退潮水则相反。

就整个渤海而言,在涨落潮过程中,老铁山水道为强流区,其次是辽东湾,莱州湾则为弱流区,平均流速最小,尤其是湾头部分。

20km 网格的计算结果与实测的也较为一致。

综合上述分析可以看出:整个渤海在主要半日分潮流的作用下,只有中部海域和辽东湾的海水才有可能通过渤海海峡直接与外海水(指海峡为界的计算区域以外)进行混合交换,而莱州湾、渤海湾与渤海中部海域的海水主要是彼此进行混合交换。除此以外,只

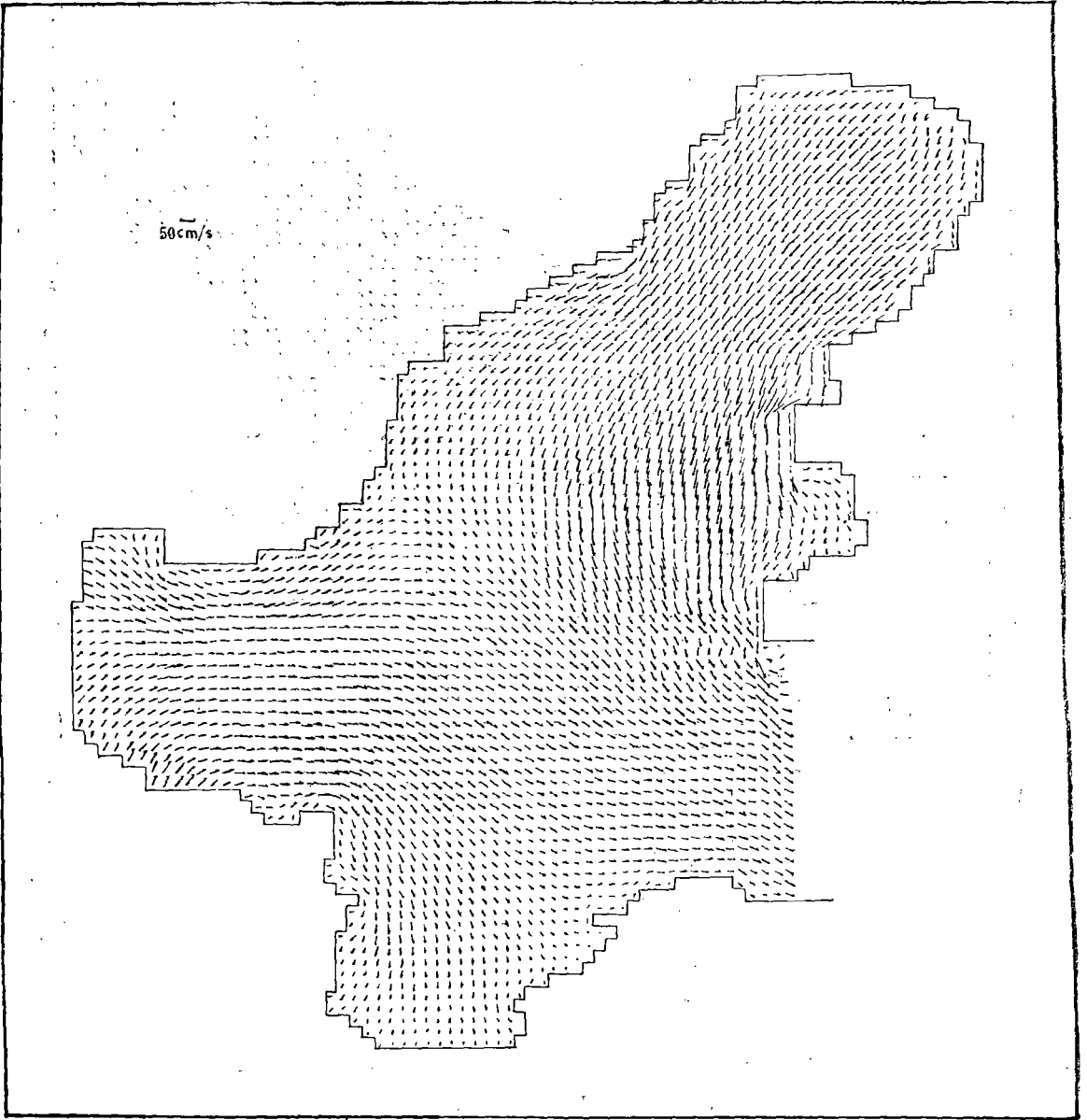


图10 渤海潮流场图 ($M_2 + S_2$, $t = 10$ 时 30 分)

Fig. 10 The pattern of the tidal current ($M_2 + S_2$) in the Bohai Sea (the 10.5 h)

在很短一段时间内，渤海湾和莱州湾的一小部分海水分别同辽东湾和外海水进行混合交换。

参 考 文 献

- [1] 普劳德曼, J., 1953. 海洋动力学(毛汉礼译). 科学出版社, 329—330页。
- [2] 金子安雄, 堀江毅, 村上和男, 1975. ADI法による潮流と汚染拡散の数値計算——大阪湾に適用した場合についで, 港湾技术研究所報告 14(1): 3—61。

- [3] 堀江毅,金子安雄,村上和男, 1976. 潮流計算にすける境界の取扱い—特して ADI 法による検討—. 港湾技術研究所報告 15(2): 251—287.
- [4] Heaps, N. S., 1978. Linearized vertically-integrated equations for residual circulation in coastal seas. *Dt. Hydrogr. Z.* 31: 147—169.
- [5] Leedertse, J. J., 1967. Aspects of a computational model for long period water wave propagation. Rand Corporation pp. 1—165.
- [6] Reimer, E. R., 1977. Residual circulation North sea due to the M_2 -tide and mean annual wind stress. *Dt. Hydrogr. Z.* 30: 69—80.
- [7] Tee, K. T., 1976. Tide-induced residual current, a 2-D nonlinear numerical tidal model. *J. Mar. Res.* 34: 603—628.

NUMERICAL SIMULATION OF THE TIDAL MIXING IN THE BOHAI SEA

I. THE NUMERICAL SIMULATION OF THE PRINCIPAL SEMI-DIURNAL CONSTITUENT IN THE BOHAI SEA

Shan Guanglin Liu Zanpei Wang Zhongjin Xu Hongda
(*First Institute of Oceanography, National Bureau of Oceanography*)

and

Lei Guangyao
(*Institute of Applied Mathematics, Academia Sinica*)

ABSTRACT

In this paper, a numerical model containing the vertically integrated equation of motion and continuous equation, in which the pressure gradient force, coriolis force, frictional force at bottom and lateral frictional force are considered, is applied to simulate numerically the principal semi-diurnal constituent in the Bohai Sea. The numerical calculation is conducted by the use of the ADI (Alternating Direction Implicit) method with the square net of 5 km and 20 km separately.

The treatment of closed boundary condition is different partly from the general numerical calculation of the tidal wave. The normal derivative extension method is used for modelling closed boundary at the shallow beach in the Bohai Bay and the Laizhou Bay. In order to compare the principal semi-diurnal constituent simulated numerically with the observed, the water level and tidal current values obtained from the numerical simulation are treated by means of the spectral analysis. The results show that values calculated numerically agree well with those observed.