

北部湾潮汐和潮流的数值模拟*

曹德明 方国洪

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

摘要 本文用细网格的有限差分法模拟北部湾全日和半日分潮的潮汐和潮流。与实测值的比较表明符合程度良好。文章给出了北部湾潮汐、潮流、潮能通量、余水位和余流的分布。

北部湾为典型的全日潮海区。对于这样一个海区的研究具有特殊的意义。早期 *Dietrich* (见 *Defant*^[5]) 所给出的北部湾同潮图是非常简单的, 与实际情况相差甚远。60 年代初, 中国和越南曾经合作对北部湾潮汐和潮流进行了深入的观测和研究^[1], 方国洪又对观测结果作了进一步分析和选择^[6]。对北部湾潮波的数值研究已有 20 多年的历史, 但都是将其作为整个南海潮波的一个组成部分^[7-9]。专门对北部湾潮波进行研究始于周朦和方国洪^[3]。他们采用了分裂算子法。该文只是作为方法的具体应用而对北部湾进行研究的, 故网距较大, 对结果的分析亦不够详细。本文采用一个相当细密的网格进行模拟, 试图得出更准确和细致的结果。

一、计算方法

1. 基本方程组

连续方程

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Du) + \frac{\partial}{\partial y} (Dv) = 0 \quad (1)$$

运动方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + \frac{ku(u^2 + v^2)^{1/2}}{D} - A \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + \frac{kv(u^2 + v^2)^{1/2}}{D} - A \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

式中, x, y ——Cartesian 坐标轴, 分别指向东和北; t ——时间; ζ ——未扰动海面上的潮汐高度; D ——总水深 = $h + \zeta$, h 为未扰动水深; u, v ——垂直平均潮流在 x, y 方向上的分量; f ——Coriolis 参数 = $2 \Omega \sin \varphi$, φ 为地理纬度, 在本海区取平均值 $19^\circ 30'$, Ω 为地球自转角速度 = $7.29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; k ——底摩擦系数, 本计算海区取 0.0022 ; g ——重力加速度 = 9.8 m/s^2 ; A ——水平涡动粘性系数, 本海区取 $10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ 。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1557 号。

收稿日期: 1988 年 10 月 15 日。

1) 中越北部湾海洋综合调查报告。

与基本方程(1)–(3)相应的差分方程可参看文献[3]中的(4)–(8)式。

2. 计算海区、边界条件的选取和计算过程

本文的计算范围西面以 17°N 以北的越南东岸为界,东面到雷州半岛、海南岛的西岸及 $109^\circ30'\text{E}$ 子午线,南至 17°N (参看图 1)。计算网格空间步长 $\Delta s = \Delta x = \Delta y = 13837.5\text{m}$, 时间步长 $\Delta t = 298.094424\text{s}$ 。计算海域内共有 814 个内点和开边界点, 范围约 15.5 万 km^2 。

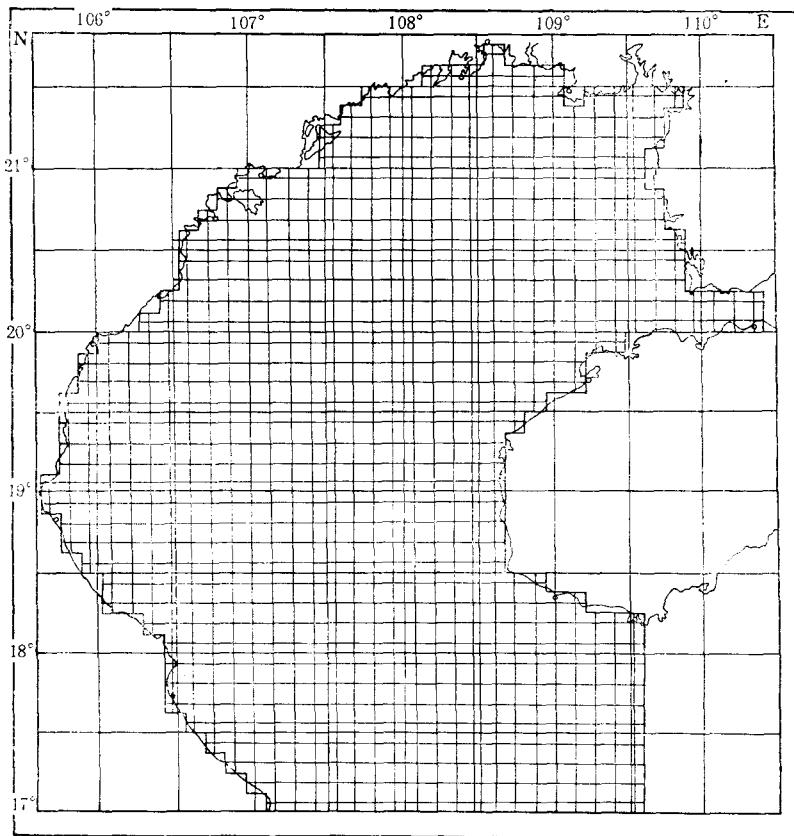


图 1 计算海区及网格

Fig. 1 Study area and computational grid

计算的初始条件为 $t = 0$ 时, $u = v = \zeta = 0$ 。陆地边界取法向流速分量为零。琼州海峡和海区南部和东部开边界上的水位 ζ 需给定。为了同时模拟全日潮和半日潮, 以 O_1 和 K_1 的平均值作为全日潮的代表分潮, 记为 m_1 , 即 $H_{m_1} = \frac{1}{2}(H_{K_1} + H_{O_1})$, $g_{m_1} = \frac{1}{2}(g_{K_1} + g_{O_1})$, $\sigma_{m_1} = \frac{1}{2}(\sigma_{K_1} + \sigma_{O_1})$, 用 M_2 代表半日分潮。故开边界上水位由下式计算:

$$\zeta = H_{m_1} \cos(\sigma_{m_1} t - g_{m_1}) + H_{M_2} \cos(\sigma_{M_2} t - g_{M_2}) \quad (4)$$

σ, H, g 分别为相应分潮的角频率、振幅和迟角, 开边界上的调和常数一般由实测资料确

定。注意,由于 $\sigma_{M_2} = 2\sigma_{m_1}$, 式(4)中 ζ 为以 $2\pi/\sigma_{m_1}$ 为周期的周期函数。式(4)中调和常数需事先给定。对琼州海峡这是容易给出的,但是东、南开边界相当长,在外海中缺乏水位实测资料,因此在实际工作中我们主要由依据历史资料描绘的同潮图上摘取^[6]。而在西南部开边界附近还有一个特殊的困难。根据方国洪^[2],这里是一个全日潮弱潮区,而且这里是否存在 K_1 无潮点还是不确定的。故边界条件作了多次调整,以使得在海区内部计算结果尽可能与实测一致。

计算趋于稳定后(各内点相邻两周期 u, v, ζ 值之差均小于 0.1cm/s 和 0.1cm), 对达到稳定后一个周期内的计算所得时间序列进行调和分析, 可得各计算点上的潮汐和潮流调和常数,进而计算各网格点上的潮流椭圆要素。为了进一步地了解潮波传播的动力学原因和效应,还计算了各网格点的能通量。

二、计算结果与实测值的比较

我们从可能搜集到的历史资料中得到沿岸 20 个验潮站的潮汐调和常数和海区内 25 个测流站的潮流调和常数,并与相应的计算结果进行了对比,其中潮汐的比较结果列于表 1。由表 1 可见, m_1 分潮振幅的平均偏差为 3.2cm , 迟角的平均误差为 3° , M_2 分潮振幅的平均偏差为 2.5cm , 迟角的平均偏差为 7° , 可以认为计算结果与实测值是符合

表 1 计算和实测潮汐调和常数之比较

Tab. 1 Comparison between computed and observed tidal harmonic constants

序号	地点	m_1				M_2			
		H		g		H		g	
		实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算
1	龙门	93	95	75	69	43	44	200	182
2	炮台角	91	92	68	67	36	38	181	179
3	三娘湾	92	93	62	66	43	42	179	177
4	白龙尾	96	90	63	68	36	33	178	180
5	北海	92	93	65	65	44	43	177	175
6	鸿基	87	80	76	75	6	4	144	166
7	涠州	87	90	62	63	36	41	171	171
8	吉婆州	73	77	66	72	5	3	152	137
9	昏涅岛	69	59	71	75	18	27	20	18
10	盐庭角	80	83	54	59	28	35	183	164
11	乌石	78	73	58	59	24	30	160	165
12	兵马角	82	81	54	59	24	26	150	153
13	洋浦	76	79	53	56	19	22	130	133
14	昌化港	69	67	47	49	16	15	98	83
15	八所	58	58	41	39	18	19	61	53
16	红牛	54	51	80	78	30	33	31	23
17	莺歌咀	32	36	0	354	24	24	6	357
18	芙蓉角	31	35	329	322	24	24	342	334
19	箐河口	24	29	82	79	26	25	16	15
20	榆林	30	30	303	301	21	21	315	311
平均误差		3.2		3.3		2.5		7.4	

得相当好的。

潮流的比较结果列于表 2。由表 2a 可见, m_1 分潮流振幅的平均偏差北分量和东分量均为 2.4cm/s, 迟角的平均偏差分别为 5° 和 12° 。由表 2b 可见, M_2 分潮流北分量振幅的平均偏差为 1.8cm/s, 东分量振幅的平均偏差为 1.4cm/s, 迟角的平均偏差分别为 9° 和 12° 。考虑到实测潮流调和常数大多是依据短期观测分析得到的, 本身也包括一定的误差, 故我们认为模拟结果与实测结果符合程度是良好的。

三、计算海区潮汐潮流的基本特征

1. 潮汐

由表 1 可以推得, 所列 20 个验潮站 m_1 分潮的平均振幅为 70cm, M_2 分潮的平均振幅为 26cm, 故本海区的大部分潮汐性质属于正规全日潮。但海南岛南部海区, m_1 分潮的平均振幅与 M_2 分潮的平均振幅量值相近, 为混合潮海区, 在这样的海区, 半个月中出

表 2a m_1 分潮流实测值与计算值之比较

Tab. 2a Comparison between computed and observed m_1 tidal current

序号	U		ξ		V		η	
	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算
1	7	6	129	129	54	53	120	114
2	18	18	317	318	30	27	104	102
3	15	15	335	336	5	7	347	354
4	19	17	338	336	7	6	21	34
5	17	16	336	340	8	10	2	21
6	16	15	349	346	15	13	22	3
7	15	15	342	342	5	5	353	341
8	15	16	345	344	7	6	337	353
9	31	29	341	338	24	20	358	349
10	41	37	302	292	21	31	124	125
11	14	24	13	351	16	29	165	146
12	16	15	343	340	6	5	333	308
13	21	24	345	339	12	12	0	355
14	38	45	346	337	10	12	32	355
15	27	27	340	342	18	22	165	161
16	21	14	342	328	10	10	337	317
17	25	26	340	339	6	5	0	3
18	30	31	340	344	15	15	169	163
19	22	19	355	347	17	17	161	170
20	15	12	336	333	8	7	311	318
21	18	12	341	334	8	5	348	325
22	19	19	344	341	12	13	169	164
23	12	14	341	338	5	7	168	163
24	12	9	343	319	24	27	121	88
25	24	23	341	344	4	6	159	163
平均误差	2.4		5		2.4		12	

表 2b M_2 分潮流实测值与计算值之比较Tab. 2b Comparison between computed and observed M_2 tidal current

序号	U		ξ		V		η	
	实测	计算	实测	计算	实测	计算	实测	计算
1	9	2	205	217	29	25	196	199
2	10	10	55	57	17	15	177	168
3	9	13	83	86	9	10	83	99
4	15	13	83	84	15	9	83	102
5	9	12	87	84	9	10	88	107
6	9	11	87	88	9	11	87	97
7	11	11	102	90	11	8	101	90
8	13	12	92	89	10	9	104	93
9	13	12	88	77	13	11	90	80
10	11	14	354	352	9	7	158	162
11	4	5	325	332	6	6	107	133
12	12	12	94	91	9	9	109	82
13	13	13	96	82	10	11	125	92
14	14	11	72	57	5	4	112	97
15	6	6	16	3	6	5	148	146
16	19	11	105	79	16	15	103	90
17	8	10	83	69	10	9	107	96
18	7	7	38	32	4	5	129	130
19	5	5	350	342	4	5	121	138
20	7	8	87	79	11	10	109	95
21	7	6	97	87	11	9	103	100
22	4	3	22	15	6	5	133	122
23	2	2	54	44	5	5	124	113
24	4	1	259	287	8	8	127	115
25	6	5	48	48	5	6	115	110
平均误差	1.8		8.8		1.4		12.5	

现一天一次高低潮的现象约有 1/2 弱的天数。

根据计算结果我们绘制了本海区 m_1 分潮 $\left(\frac{O_1 + K_1}{2}\right)$ 和 M_2 分潮的同潮图 (图 2, 3)。

由图 2 可见,在计算海区西南部, m_1 分潮振幅小,其外存在一个无潮点或退化了的无潮点^[6],潮波由海区的东南部沿逆时针方向向海区西北或西部传播,越南沿岸越到南部出现的时间越晚,但时间上差别不大。在雷州半岛和海南岛的西岸出现高潮的时间则由南向北逐渐推迟,其中海南岛西南岸变化很快,约 25km 变化 1 小时。海南岛西北岸和雷州半岛西岸则变化较慢,从南部的榆林到最北部的龙门出现高潮的时间要相差 8 小时 40 分左右。越南沿岸全日潮的高潮时变化不大,箬河口高潮时比榆林晚 9 小时 20 分左右,即比北部的龙门要晚 40 分。这一点从 m_1 分潮能通量分布图上也可以看出来。

由图 4 可以看到,维持北部湾 m_1 潮波运动的潮能来自东南湾口,而主要又是从湾口

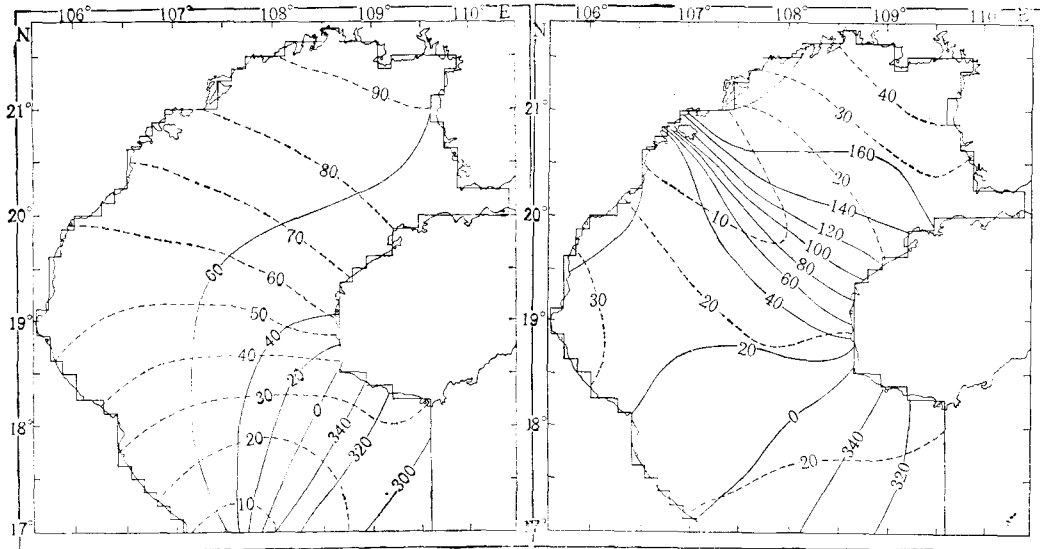


图2 m_1 分潮 $\left(\frac{O_1 + K_1}{2}\right)$ 同潮图

图3 M_2 分潮同潮图

Fig. 2 Cotidal chart of $m_1[(O_1 + K_1)/2]$ constituent

Fig. 3 Cotidal chart of M_2 constituent

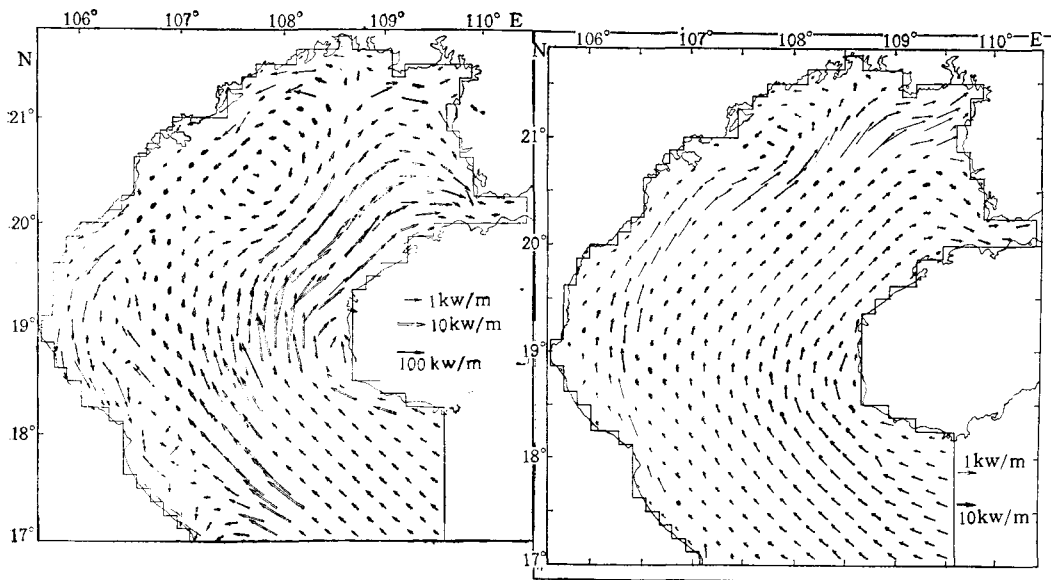
实线为迟角(°);虚线为振幅(cm)。图3同。

的右侧(面朝湾顶)进入的。整个海湾东面大部海区能量流基本上沿着湾轴方向由湾外流向湾内,同时有一部分能量流向琼州海峡。能流到达湾顶附近后,除大部流向琼州海峡外,还有一部分转而南下,沿着海湾的西侧流出湾外。与流入的能量相比,流出的量已经是相当微弱了。在计算海域南边界处,只在距海岸 20n mile 的范围内能通量具有向湾外的分量,且量值甚小。这种分布特征与前面提到的高潮时变化情况是相符的。

全日分潮的振幅由南向北增加,最小值出现在湾口的西边(见图 2)。郑文振和方国洪¹⁾曾根据 Merian 公式对北部湾的自由振动周期作了估计。他们取湾长 500km,平均水深 37.8m,得出自由振动周期为 28.9 小时。它略大于 O_1 分潮的周期。据此他们认为,北部湾自由振动周期与全日潮相近,全日潮在这里接近共振,因而解释了南海基本上是一个混合潮的海区,而北部湾却是一个全日潮海区,且全日潮振幅达到世界上各附属海少有的强度。同时由自由振动周期更接近 O_1 分潮这一点,解释了北部湾 O_1 分潮大于 K_1 分潮这一特殊的现象。退化了的无潮点出现在湾口附近也证明了上述论断。不过由于越南海岸超过湾口一直向南延伸,北部湾自由振动的周期用简单的 Merian 公式估计还是不够准确的,更准确的估计需借助数值方法,我们这里不作进一步研究。

M_2 分潮由湾口向湾内传布时,同潮时线的走向基本与湾轴垂直,即逐渐由西南-东北向变成西北-东南向。在吉婆岛附近有一退化了的无潮点。南边的榆林港和北部的龙门港出现高潮的时间要相差 8 个小时(参看图 3)。

1) 中越北部湾海洋综合调查报告。

图 4 m_1 分潮能通量分布图Fig. 4 Energy flux density of m_1 tide图 5 M_2 分潮能通量分布图Fig. 5 Energy flux density of M_2 tide

M_2 分潮振幅增加的幅度比较小,海区内大部地区振幅约在 20cm 上下,但在海湾顶部振幅可超过 40cm。在海湾西端振幅亦超过 30cm。吉婆岛附近振幅很小,其原因是这里正处在半日潮波节带。在本海区 M_2 分潮波的能通量分布十分简单,几乎是一致地从湾口流向湾内,并有部分从琼州海峡流出(见图 5)。不过海湾东部的能通量密度比西部大,且在局部地区(吉婆岛以北的西北沿岸)有反向的能流。

2. 潮流

根据潮流的计算结果绘制了 m_1 分潮流椭圆长短轴分布图(图 6)和 M_2 分潮流椭圆长短轴分布图(图 7)。

从这两张图上可以看出下列特点:

(1) 潮流速度以琼州海峡为最强,海南岛西岸次之。 m_1 分潮流的流速要比 M_2 分潮流普遍大 1 倍以上。

(2) 北部的湾流大都为往复流,但在海区的东南部和东北部潮流的旋转性比较强;特别琼州海峡西口外旋转性很强,这与方国洪^[6]的同潮流图一致,他认为这里半日潮与全日潮都有一个圆流点。

(3) 潮流长轴的走向全日分潮流和半日分潮流十分近似,基本上都沿着湾轴方向。

3. 余水位与潮余流

我们还计算了本海区的余水位(图 8)和潮余流(图 9)。

由图 8 可见,本海区的余水位较小,在 $\pm 1.5\text{cm}$ 之间,大致的分布趋势是北高南低,西高东低,整个海区以海南岛西岸附近的余水位为最低。这里可能有两个原因。第一是这里岸线突出,潮流在这里产生大的方向偏转,引起了较大的离心力,从而引起了水位的降低(其物理解释可参看文献[1])。第二是这里潮流较强(见图 6, 7),根据 Bernoulli 原

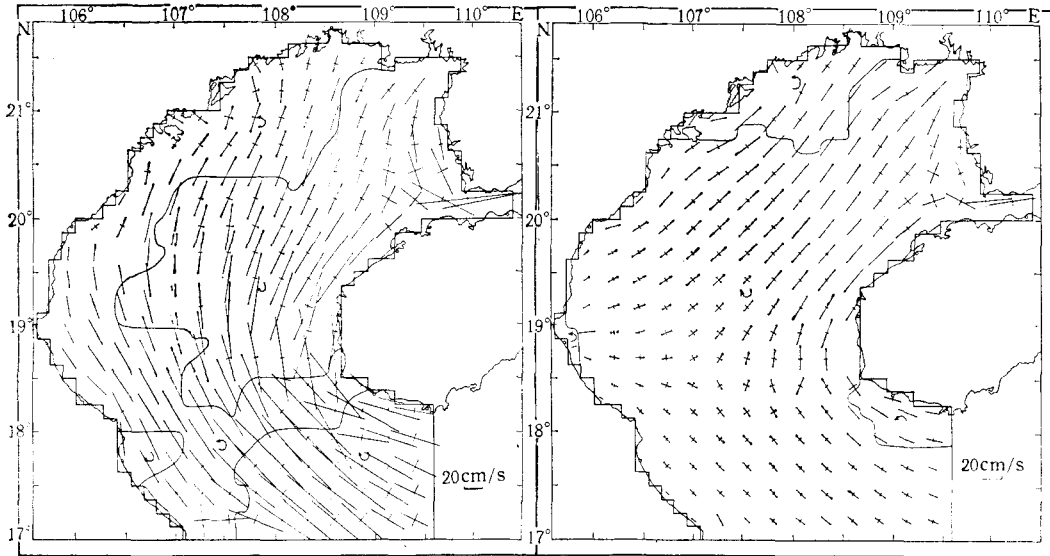


图6 m_1 分潮流椭圆长短轴分布图

Fig. 6 Major and minor axes of m_1 current ellipses

图7 M_2 分潮流椭圆长短轴分布图

Fig. 7 Major and minor axes of M_2 current ellipses

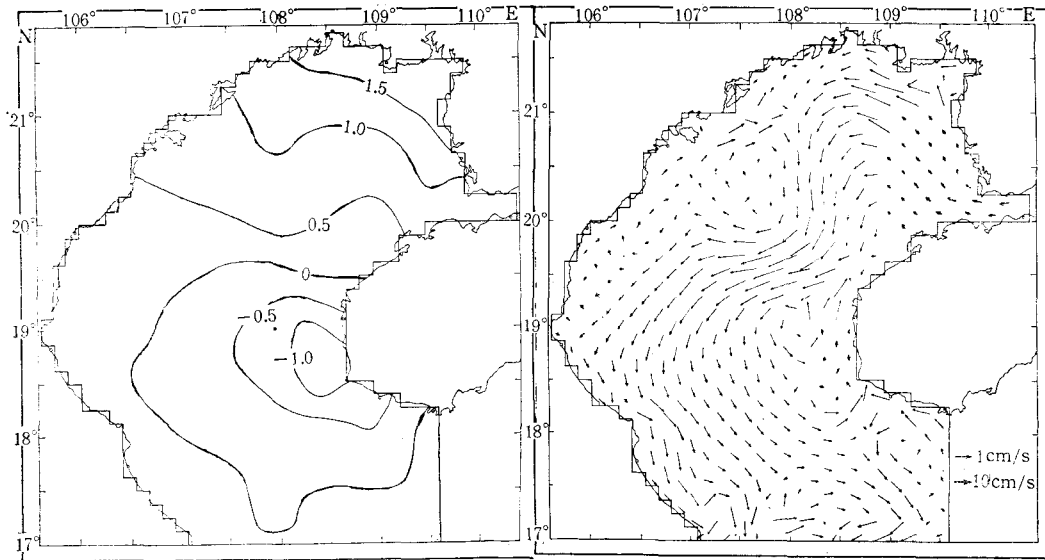


图8 余水位分布图

Fig. 8 Residual tidal elevation

图9 潮余流分布图

Fig. 9 Residual tidal current

理,强的流速可能伴随着低水位。由图9可见,本海区的潮余流以琼州海峡为最大,可达5—8cm/s,其次为海南岛西岸,达2—3cm/s,恰好与余水位的低值地区相应,可以认为,也是由于地形造成的。

琼州海峡的潮余流沿海峡向西流动,进入北部湾后沿雷州半岛向西北而后向南流去,

然后向西再向南绕过海南岛折向东南流出本海区。另有一小股沿海南岛北上在 $19^{\circ}30'N$ 附近与折向东南的潮余流汇合。 $19^{\circ}N$ 以北沿越南沿岸也有一小股向北的潮余流。

参 考 文 献

- [1] 方国洪、杨景飞, 1985. 渤海潮运动的一个二维数值模型. 海洋与湖沼 **16**(5): 337—346。
- [2] 方国洪, 1986. 关于中国近海潮汐潮流分布的若干有待进一步研究的问题. 第一届潮汐和海平面学术讨论会论文集. 国家海洋局海洋科技情报研究所出版, 12—20 页。
- [3] 周滕、方国洪, 1988. 二维长波方程的一个无条件稳定有限差分格式. 海洋与湖沼 **19**(2): 164—172。
- [4] 曹德明, 1984. 胶州湾潮汐潮流的数值计算. 海洋科学集刊 **21**: 157—164。
- [5] Defant, A., 1961. *Physical Oceanography*, Vol. II. Pergamon Press, New York. pp. 417—430。
- [6] Fang Guohong, 1986. Tide and Tidal Current Charts for the Marginal Seas Adjacent to China. *Chin. J. Oceanol. and Limnol.* **4** (1): 1—16。
- [7] Ye. A. L. and I. S. Robinson, 1983. Tidal Dynamics in the South China Sea. *Geophys. J. R. Astr. Soc.* **72**: 691—707。
- [8] Сергеев, Ю. Н., 1964. Применение метода крайних значений для расчёта карт гармонических постоянных приливов в Южно-китайском Море. *Океанология* **4**(4): 595—602。
- [9] Нгуен Нгок Тви, 1969. Особенности формирования приливных явлений Южно-китайского Моря. *Океанология* **9**(2): 235—249。

A NUMERICAL MODEL OF THE TIDES AND TIDAL CURRENTS IN BEIBU BAY*

Cao Deming and Fang Guohong

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao*)

ABSTRACT

Diurnal and semidiurnal tides and tidal currents in the Beibu Bay are simulated by employing finite difference methods. The grid spacing is 7.5 n mile by 7.5 n mile. The computed harmonic constants are in good agreement with those for tides on the coast and island and those for tidal currents in the sea. The computed cotidal charts well reproduce the empirical ones. The results show that a diurnal amphidromic point exists near the coast of Vietnam at the entrance of the Gulf. The amplitude of diurnal tide increases towards the end of the Gulf and the sum of K_1 and O_1 reaches about 1.9m. A degenerated semidiurnal amphidromic region takes form near Haiphong with amplitude of M_2 being less than 0.1m. The greatest amplitude of M_2 with a value exceeding 0.4 m appears at the end of the Gulf. Thus the tidal currents in the Beibu Bay are dominated by the diurnal component. Correspondingly, the diurnal tidal current as a whole also prevails the semidiurnal one. The strongest diurnal current appears in the Qiongzhou Strait, then in the nearshore area to the west of the Hainan Island. In these areas the semidiurnal current is also relatively strong but appreciably less weaker than the diurnal current. The distributions of the tidal energy flux, the residual tidal elevation and the residual tidal current are also given in the present paper.

* Contribution No.1557 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.