

# 渤、黄、东海潮汐潮流的数值模拟

赵保仁 方国洪 曹德明

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

**摘要** 利用球坐标系中的二维非线性潮波方程组, 数值计算了渤、黄、东海全海区的全日及半日潮汐潮流。沿岸81个潮位站的计算与实测值的比较表明,  $M_2$ 分潮振幅差平均为7.2cm, 相角差为6.4°,  $m_1$ 分潮振幅差平均为2.6cm, 相角差为7.4°, 计算与实测符合良好。潮流的比较结果表明, 计算与实测的符合程度也是比较好的。文中给出的同潮图同Fang(1986)给出的实测与数值的综合结果基本一致。本计算还证实或首次给出了若干圆流点。如对 $M_2$ 分潮流, 证实了在北黄海山东北部近海及南黄海南部各存在一对圆流点, 并在浙江北部近海新发现一对圆流点; 对 $m_1$ 分潮流在苏北浅滩外侧发现一个圆流点, 另外在东海东北部(济州岛东南)新给出两个圆流点, 东海东南部的弱流区存在三个圆流点。此外, 文中还分别讨论了 $M_2$ 及 $m_1$ 分潮能通量的传播和消耗情况, 并指出从太平洋经吐噶喇海峡及冲绳至官古岛之间的水道传入东海的 $m_1$ 分潮, 在遇到陆坡的阻挡后, 其中有相当部分潮能被反射回太平洋。

**关键词** 数值模拟 潮汐潮流 渤、黄、东海

## 前言

自从Борис<sup>[1]</sup>首次发表黄海潮汐潮流的数值计算论文以来, 有关渤、黄、东海各海区的数值计算的文章不下20余篇。由于渤、黄、东海的海区跨度很大(达16个纬度), 地形和岸线条件比较复杂, 为了提高数值计算的精度, 绝大多数的数值计算工作是针对各个别海区进行的。只有少数作者, 如沈育疆<sup>[2]</sup>, Choi<sup>[3, 4]</sup>, 沈育疆和叶安乐<sup>[5]</sup>把渤、黄、东海作为一个整体进行数值计算, 然而他们的计算精度不够高, 提供的潮流分布信息也不够全面, 有的计算没有考虑侧向摩擦和非线性项, 为了计算的稳定性, Choi还不得不把计算海区的东南边界移到东海陆架边缘区域, 这就把东海陆坡及冲绳海槽等广大海域排除在外了。就数值计算结果的精确程度而言, 方国洪及其合作者提供的计算结果较为可靠, 但是他们的计算海区都

限制在较小的范围内。因此，尽管渤、黄、东海的潮汐潮流分布特征相对南海而言，是了解得比较多的，但目前仍然有许多不确定的东西<sup>[6, 7]</sup>。实际观测当然是解决这些问题的最有效的方法，但那将是十分昂贵和费时的。因此，把渤、黄、东海作为一个整体进行数值计算，提高计算结果的精度，仍不失为廉价而又又有意义的研究手段。另外，为了弄清潮汐潮流对物质输送和扩散，以及潮汐潮流对渤、黄、东海温、盐度分布的影响，也需要在较高的精度上，把渤、黄、东海作为一个整体来进行数值计算。正是基于上述两种考虑，我们在渤、黄、东海完成了一次全海区的潮汐、潮流数值计算工作，其准确度比以往全海区的数值计算均要高，现将其结果简述如下。

## 1 计算海区及数值模式

本计算海域包括整个渤、黄、东海，朝鲜海峡及台湾海峡北部水域，南北跨度达16个纬距以上，故取二维球面坐标系统，经向和纬向间距均为15'，计算海区如图1所示。计算所用的二维连续方程和运动方程为：

$$\frac{1}{R\cos\phi}\left[\frac{\partial}{\partial\lambda}(Hu)+\frac{\partial}{\partial\phi}(Hv\cos\phi)\right]+\frac{\partial\zeta}{\partial t}=0, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{R\cos\phi} \frac{\partial u}{\partial\lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial u}{\partial\phi} - \frac{uv\tan\phi}{R} - (2\omega\sin\phi)v + \frac{k_b u\sqrt{u^2+v^2}}{H} \\ & + \frac{g}{R\cos\phi} \frac{\partial(\zeta-\bar{\zeta})}{\partial\lambda} - \frac{A}{R^2\cos^2\phi} \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial\lambda^2} + \cos\phi \frac{\partial}{\partial\phi} \left( \frac{\partial u}{\partial\phi} \cos\phi \right) \right] = 0, \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{R\cos\phi} \frac{\partial v}{\partial\lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial v}{\partial\phi} + \frac{u^2\tan\phi}{R} + (2\omega\sin\phi)u + \frac{k_b v\sqrt{u^2+v^2}}{H} \\ & + \frac{g}{R} \frac{\partial(\zeta-\bar{\zeta})}{\partial\phi} - \frac{A}{R^2\cos^2\phi} \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial\lambda^2} + \cos\phi \frac{\partial}{\partial\phi} \left( \frac{\partial v}{\partial\phi} \cos\phi \right) \right] = 0, \quad (3) \end{aligned}$$

式中， $t$ 为时间， $\lambda$ 、 $\phi$ 分别为东经和北纬， $u$ 、 $v$ 分别为垂直平均的流速东分量和北分量， $H=h+\zeta$ 为总水深， $h$ 为未扰动水深， $\zeta$ 为未扰动海面上的潮高， $R$ 为地球半径，取6370km， $\omega$ 为地球自转角速度，取 $7.29\times 10^{-5}/s$ ， $g$ 为地球重力加速度， $A$ 为水平涡动粘性系数，取 $10^4 m^2/s$ ， $k_b$ 为海底摩擦系数，本计算中从点(40°00'N, 124°15'E)至点(25°15'N, 120°45'E)连线以西为0.001，朝鲜海峡为0.0035，其他区域取0.0016。 $\bar{\zeta}$ 为考虑了固体潮效应后的引潮势，取作引潮势的0.7倍。

计算的初始条件为：当 $t=0$ 时， $u=v=\zeta=0$ 。陆地边界取法向流速为零，水边界潮位给定。如同方国洪、杨景飞<sup>[8]</sup>所做的那样，取 $M_2$ 分潮为半日潮的代表分潮，取 $H_{m_1}=(H_{K_1}+H_{O_1})/2$ ， $\theta_{m_1}=(\theta_{K_1}+\theta_{O_1})/2$ ， $\sigma_{m_1}=(\sigma_{K_1}+\sigma_{O_1})/2$ 作为全日潮的代表分潮，这样在一个全日潮周期内可同时模拟全日和半日潮汐运动，以达到节省机时和计算方便的目的。于是水边界上的边界条件为：

$$\zeta = H_{r_1} \cos(\sigma_{m_1}t - g_{m_1}) + H_{v_2} \cos(\sigma_{M_2}t - g_{M_2}), \quad (4)$$

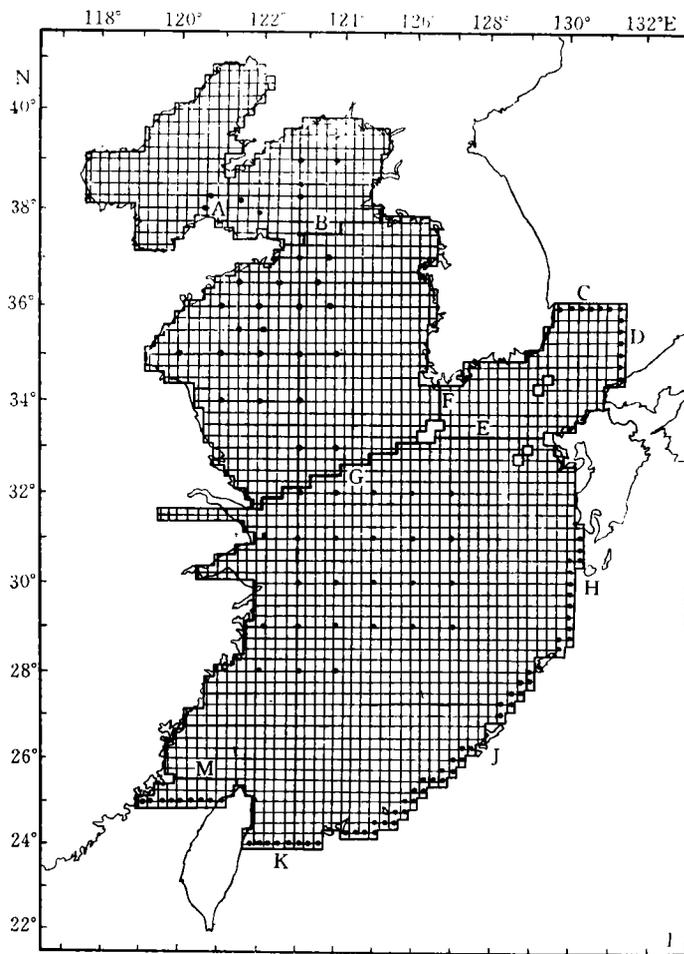


图1 计算海区及网络示意图

·为潮流比较点,粗线为能通量断面

开边界上的调和常数,主要参照岛链地区及海峡区域的实测值及已有的数值计算结果而定。

引潮势取为(单位: m):

$$\xi = 0.085 \sin 2\phi \cos[\sigma_1(t-s) + \lambda] + 0.170 \cos^2 \phi \cos 2[\sigma_1(t-s) + \lambda], \quad (5)$$

式中,  $s$  为标准时区, 取  $s=8\text{h}$ 。

计算中采用Flather和Heaps的差分格式(见文献[3]), 时间步长  $\Delta t=119.2377696$ 。预先给定的波动过程稳定性判据  $\varepsilon$  为: 对潮汐  $\varepsilon \leq 0.1\text{cm}$ , 对潮流  $\varepsilon \leq 0.1\text{cm/s}$ 。当计算达到稳定后, 即各内点相邻两周期  $u$ 、 $v$ 、 $\xi$  值之差均小于  $\varepsilon$  时, 再计算潮汐、潮流调和常数及潮流椭圆要素等值。

## 2 计算结果及实测的比较

为了同实测结果比较, 我们从历史资料中挑选出81个有代表性的沿岸水位站, 大体均匀

表1 潮汐调和常数计算值与实测值之差值

站号	站名	纬度 (N)	经度 (E)	$m_1$		$M_2$		站号	站名	纬度 (N)	经度 (E)	$m_1$		$M_2$	
				$\Delta H$	$\Delta G$	$\Delta H$	$\Delta G$					$\Delta H$	$\Delta G$	$\Delta H$	$\Delta G$
1	海洋岛	39°04'	123°09'	-1	-3	-16	0	42	渔隐洞	38°40'	125°11'	-2	2	-20	-9
2	长海	39°19'	122°40'	1	-8	0	2	43	梦金浦	38°11'	124°47'	-1	7	-11	-8
3	大连	38°58'	121°40'	-2	-13	-2	0	44	茂岛	37°44'	125°33'	-5	5	13	18
4	营口	40°38'	122°09'	-3	1	-12	8	45	汪文岛	37°39'	126°14'	-8	10	22	23
5	葫芦岛	40°43'	121°00'	-4	5	-17	20	46	永宗岛	37°30'	126°34'	-8	7	13	18
6	秦皇岛	39°55'	119°37'	-5	7	9	-5	47	牛舞岛	37°21'	126°27'	-6	3	13	4
7	塘沽	39°06'	117°43'	-7	13	-4	14	48	茅项里	36°47'	126°08'	-7	2	-3	-4
8	歧河口	38°37'	117°36'	2	21	1	6	49	蔬岛	36°23'	126°28'	-7	0	-4	-14
9	小清河	37°19'	118°59'	9	28	0	11	50	群山	35°39'	126°43'	-3	-3	0	-16
10	龙口	37°39'	120°19'	-5	16	-6	2	51	鞍马岛	35°21'	126°01'	-5	9	0	-5
11	砣矶岛	38°10'	120°45'	0	99*	-5	9	52	荏子岛	35°03'	126°05'	2	10	19	2
12	烟台	37°32'	121°24'	3	15	5	9	53	道治岛	34°34'	126°01'	-3	6	9	-8
13	威海	37°30'	122°10'	3	11	-5	19	54	莞岛	34°19'	126°45'	-2	3	8	0
14	成山头	37°23'	122°42'	0	7	8	-18	55	居金水道	34°30'	127°09'	-3	1	6	-4
15	石岛	36°53'	122°25'	-1	11	0	-5	56	丽水	34°44'	127°45'	1	10	13	2
16	乳山口	36°48'	121°29'	-3	2	0	-14	57	弥肋湾	34°43'	128°03'	-1	17	14	1
17	青岛	36°05'	120°19'	-4	11	-15	-6	58	知世浦	34°50'	128°43'	1	24	20	6
18	石臼所	35°23'	119°33'	-4	15	2	-2	59	釜山	35°06'	129°02'	2	41*	19	2
19	连云港	34°45'	119°27'	-4	16	2	4	60	蔚山湾	35°28'	129°25'	0	13	-3	-11
20	燕尾	34°29'	119°47'	-2	12	-6	0	61	小鹿	34°31'	129°27'	2	2	13	0
21	吕四	32°08'	121°37'	0	5	-3	-5	62	箕形	34°17'	129°16'	1	1	5	-2
22	余山	31°25'	122°14'	0	10	2	-15	63	濼户崎	34°24'	131°12'	-1	-6	0	0
23	中浚	31°07'	121°54'	1	2	0	-16	64	油谷湾	34°24'	130°57'	-1	-6	-3	1
24	绿华山	30°49'	122°36'	2	8	16	-13	65	岩屋	33°56'	130°41'	-1	-27	7	0
25	长涂	30°15'	122°18'	0	10	11	-11	66	神湊	33°51'	130°29'	-1	-14	1	-3
26	梅山	29°49'	122°01'	-1	12	16	4	67	乡野浦	33°45'	129°41'	2	-13	9	-9
27	石浦	29°15'	121°57'	2	1	16	3	68	呼子	33°33'	129°53'	4	-13	19	5
28	坎门	28°05'	121°17'	3	1	-1	1	69	黑子岛	33°23'	129°33'	2	-8	6	9
29	三沙	26°58'	120°10'	2	-1	-8	-3	70	户歧浦	32°45'	128°50'	2	-18	11	-10
30	梅花	26°01'	119°42'	3	-3	-6	-5	71	有川湾	32°59'	129°07'	7	-13	19	-2
31	平潭	25°27'	119°59'	-1	-2	-10	2	72	长崎	32°43'	129°51'	2	-7	7	-3
32	基隆	25°09'	121°45'	2	-5	2	-27	73	桦岛水道	32°34'	129°47'	3	-1	2	-6
33	苏澳湾	24°35'	121°52'	2	-9	1	-1	74	牛深	32°12'	130°01'	2	-11	1	-6
34	黄尾屿	25°56'	123°41'	2	-3	6	-5	75	甌岛	31°51'	129°51'	2	-5	3	-4
35	与那国	24°25'	123°00'	-1	-5	2	4	76	坊津	31°17'	130°13'	0	0	-3	3
36	石垣	24°20'	124°10'	3	-1	0	0	77	中之岛	29°50'	129°51'	3	1	-1	2
37	宫古	24°48'	125°18'	5	-19	0	-21	78	宝岛	29°09'	129°12'	2	-8	2	-4
38	仪间	26°20'	126°44'	4	1	-1	7	79	笠利湾	28°27'	129°39'	2	0	-6	0
39	水运岛	39°42'	124°24'	0	-4	-8	0	80	伊平屋岛	27°03'	127°58'	3	-4	2	2
40	鹿岛	39°45'	123°45'	1	5	-10	1	81	座间味	26°13'	127°18'	3	-3	-2	0
41	云雾岛	39°25'	125°07'	-6	-5	-7	2	绝对值总平均				2.6	7.4	7.2	6.4

带\*者非常接近无潮点, 该值未计入平均值内。

地散布于沿岸各处,且较接近计算网格点,此外在黄、东海找到54个潮流比较点,其位置如图1中“·”所示。

各站计算所得潮位调和常数与实测结果的差值列于表1。从该表可见,计算与实测符合得相当好, $M_2$ 分潮振幅差绝对值的平均值为7.2cm,相角为 $6.4^\circ$ ,其中最大差值分别为22cm和 $27^\circ$ , $m_1$ 分潮振幅差绝对值的平均为2.6cm,相角为 $7.4^\circ$ 。上述计算精度达到了通常在较小海区内作数值计算所达到的水平。就计算结果来看,朝鲜南部沿海,杭州湾以南的浙江北部沿海给出略偏高的计算值,辽东半岛及山东半岛南岸给出略偏低的计算值。

图2给出有关测流站潮流调和常数分量 $U\cos\xi$ 、 $U\sin\xi$ 、 $V\cos\eta$ 、 $V\sin\eta$ 的计算值(y轴)和实测值(x轴)的对比结果,测点大体均匀分布在有关计算海区。其中实测调和常数是用准调和分析方法得到的各层平均值,计算所得 $O_1$ 分潮流调和常数由Fang<sup>[6]</sup>给出的差比值从 $m_1$ 求出。由图可见计算值与观测值比较一致。误差统计分析表明,对 $O_1$ 分潮流来说,两者偏差绝对值小于等于3.0cm/s者占95%,最大偏差为4.5cm/s;对 $M_2$ 分潮流来说,两者偏差绝对值小于等于10.0cm/s者占89%,小于等于5.0cm/s者占70%,最大偏差为21.9cm/s,而且偏差大者均出现在近岸强流区,因此其相对误差仍然是不大的。

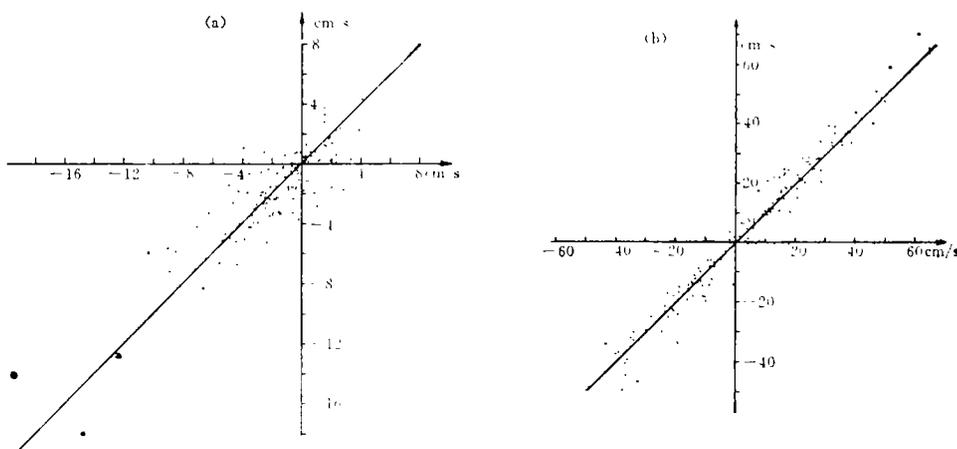


图2 计算分潮流分量 $U\cos\xi$ 、 $U\sin\xi$ 、 $V\cos\eta$ 、 $V\sin\eta$ 与实测之比较

(a)  $O_1$ 分潮流 (b)  $M_2$ 分潮流

### 3 计算结果的讨论

渤、黄、东海的潮汐、潮流的分布,最早是由Ogura在本世纪30年代根据实测资料制作的,50年代末至60年代初,我国对 $124^\circ\text{E}$ 以西的渤、黄、东海的潮汐潮流作了大量的观测和分析。根据这些资料在 $124^\circ\text{E}$ 以西,绘制了比Ogura准确得多的潮汐潮流分布图。70年代初,我国又对 $124^\circ\text{E}$ 以东的东海东部地区的潮汐潮流进行了大量的调查分析工作,并逐步有许多数值计算工作报道。Fang<sup>[6]</sup>根据大量的实测资料,以及他和合作者所做的一系列准确度比较高的数值实验结果,绘制了一份比较完整和比较准确的潮汐潮流图。在下面的讨论中,我们将以Fang的结果为主要参比对象。

### 3.1 半日分潮

图2给出 $M_2$ 分潮同潮图。与Fang的图1相比,同潮时线除南黄海南部的 $60^\circ$ 等潮时线的走向有较大差别外,其他均同Fang的结果一致。等振幅线也只有东海北部的 $80\text{cm}$ 线分布趋势与Fang有较大差别,此外浙江外海振幅大于 $120\text{cm}$ 的区域较大,其他均与Fang的结果一致。就计算所得五个无潮点的位置而言,与Fang给出的相比,除黄海南部的偏离最大,达 $20'$ 经度外,其他各点的经纬度偏差均不超过 $10'$ ,其中黄河口附近的那个位置已经确定的无潮点,几乎与实测完全重合。因此,从同潮图看,计算结果也是令人满意的。

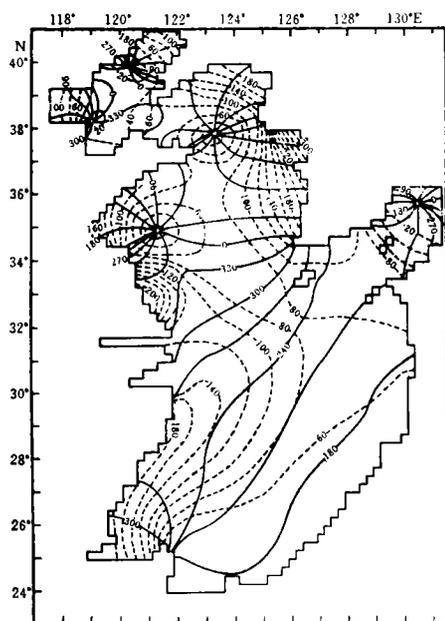


图3 计算所得 $M_2$ 分潮同潮图  
虚线为等振幅线,实线为同潮时线

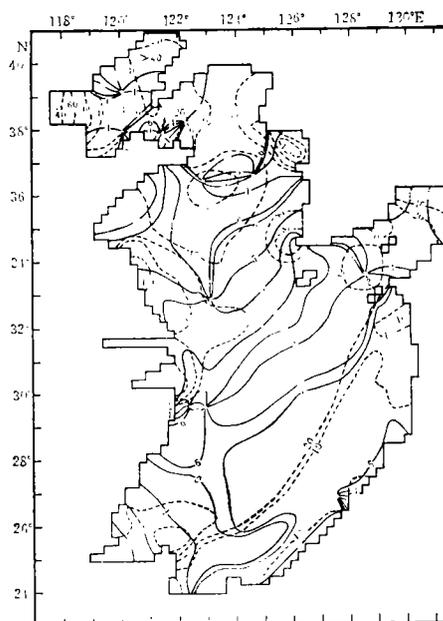


图4 计算所得 $M_2$ 分潮流同潮图  
虚线为等振幅线,实线为同潮时线

图4给出 $M_2$ 分潮流合成流等振幅线和同潮时线的分布。由图4看出, $M_2$ 分潮流的等振幅线的分布趋势与Fang给出的非常一致(见Fang文图3)。不同点仅在于本文在苏北浅滩附近,台湾北端和朝鲜沿岸的江华湾、珍岛西南等处, $M_2$ 分潮流最大值较Fang给出的要大一些。从方国洪<sup>[7]</sup>在黄海东部所做的数值计算结果来看,他的计算值略低于实测值,因此我们在这里给出较高的 $M_2$ 分潮流速分布看来可能是合理的,至少在黄海东部地区是这样。

从图4还可以看到,我们给出的 $M_2$ 分潮流的圆流点与Fang给出的基本一致,但要复杂一点。首先,Fang给出的圆流点在图4的相应位置上都可以找到,且位置偏离多数都在Fang给出的范围内。此外,这里再进一步指出几个问题:(1)莱州湾口东部的一个圆流点以前只有方国洪和杨景飞<sup>[8]</sup>的数值计算结果给出过,我们在这里证实了这一圆流点的存在,但位置比他们的偏东约 $20'$ 。(2)在山东半岛北部,图4给出两个距离很近的圆流点,这一结果

同郑文振等人(1964)<sup>1)</sup>从实测资料得到的结果一致,但圆流点的结构与郑文振等人的有较大差别.方国洪<sup>[6]</sup>虽然在该海域只给出一个圆流点,但他曾指出:“从椭圆率的分布看,似乎应当有两个圆流点,这样看来,这个区域存在几个圆流点,它们的位置在何处,都有待进一步研究”<sup>[7]</sup>.而我们的数值结果对这一疑问作了肯定的回答.(3)黄海中部的一对 $M_2$ 分潮流圆流点最早由Борис<sup>[1]</sup>用边值方法给出,方国洪<sup>[6]</sup>用数值方法给出了其中东部的那个圆流点,并在文献[6]中给出了一对圆流点;但两者的距离较Борис的小得多,结果也与Борис的有很大差别.我们在这里同样给出两个圆流点;位置介于他们两者之间,而圆流点的结构与Fang基本一致.看来本文给出的这两个圆流点的位置可能要更可靠一些.(4)我们的计算结果还在浙江外海,舟山群岛以南海区给出一对距离很近(经距不超过45') $M_2$ 分潮流圆流点,这在其他文献中从未提到过.这一区域实测同潮时线比较密集,并且潮流椭圆接近圆,因此,存在圆流点的可能性是有的,需进一步查明.

### 3.2 全日分潮

前面已经指出,这里讨论的全日分潮 $m_1$ 是 $K_1$ 和 $O_1$ 的平均值.根据各海区的差比值,很容易求得全日潮 $K_1$ 、 $O_1$ 的分布情况,这里我们仍按直接计算结果讨论 $m_1$ 分潮流的分布特征.

图5和图6分别给出 $m_1$ 分潮的潮汐和潮流同潮图.由图5可知,计算所得全日分潮 $m_1$ 的分布格局同Fang给出的 $k_1$ 分潮十分一致,振幅略偏小,相角约落后 $25^\circ$ 左右,同已知的差比值相适应.

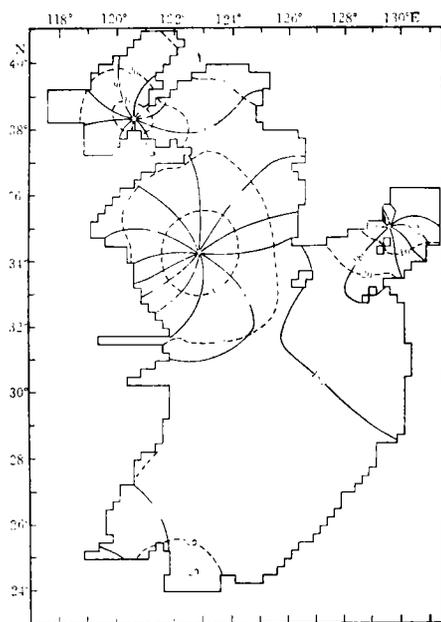


图5  $m_1$ 分潮等振幅线(虚线)和同潮时线(实线)分布图

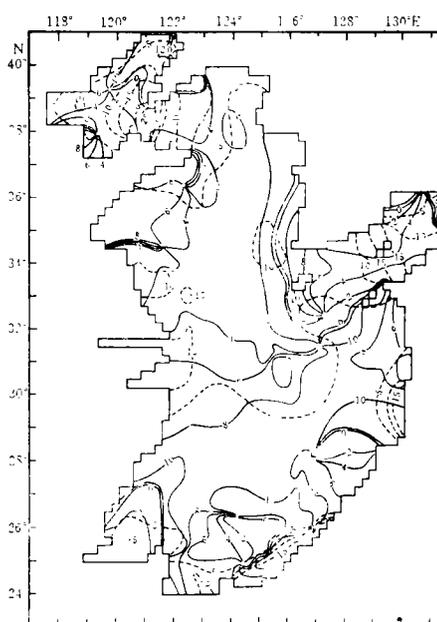


图6  $m_1$ 分潮流等振幅线(虚线)和同潮时线(实线)分布图

1) 全国海洋普查报告第五册.

由图6可知,  $m_1$ 分潮流的高流速区分布在渤海海峡, 其值可达25~30cm/s, 其次在朝鲜海峡的对马岛附近, 最大值约为15~20cm/s. 此外, 在吐噶喇海峡及石垣岛至那坝的边界区域也有较高的流速值, 其量值的可靠性值得进一步研究.

从 $m_1$ 合成分潮流同潮图, 我们还可以看到它的圆流点的分布情况. 图6表明, 在计算海区 $m_1$ 分潮流一共存在9个圆流点, 渤海中的两个同方国洪和杨景飞<sup>[8]</sup>的计算所得十分一致, 其中北部的一个在普查报告中也有报道. 南黄海西部也有两个圆流点, 其中北部的一个在普查报告及Борис的数值计算中均有报道, 但后者的位置偏东, 我们的计算结果与普查结果比较吻合, 苏北浅滩外侧的那个圆流点尚未有人报道过. 从全国海洋普查给出的 $K_1$ 和 $O_1$ 分潮长短轴分布及最大流速出现的时间来看, 这一圆流点是存在的, 但实际位置可能要偏南一些. 另外在Борис的数值计算中, 南黄海东部还有一个圆点, 但在本计算中没有出现. 济州岛东南尚有两个圆流点, 东海东南部还有另外三个圆流点, 这些均在5cm/s左右的弱流区, 以前也未见过报道.

图7、8为 $m_1$ 分潮流及 $M_2$ 分潮流椭圆长短轴分布图, 虚线勾出了椭圆的旋转方向.

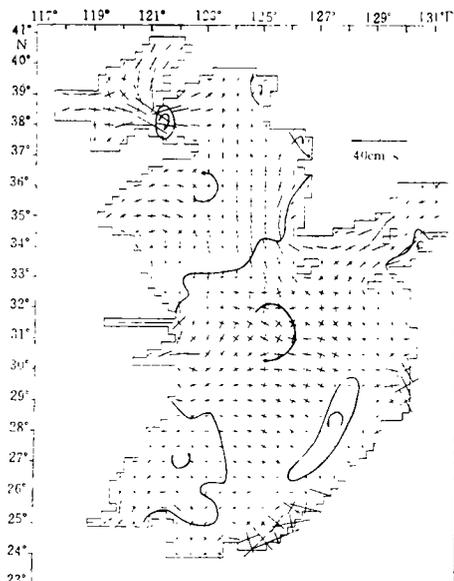


图7  $m_1$ 分潮流椭圆长短轴分布图

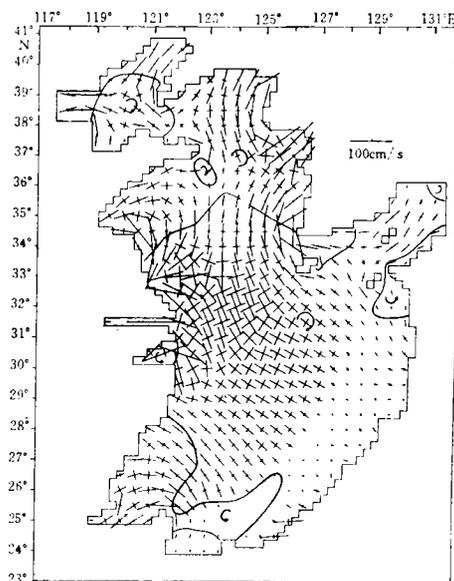
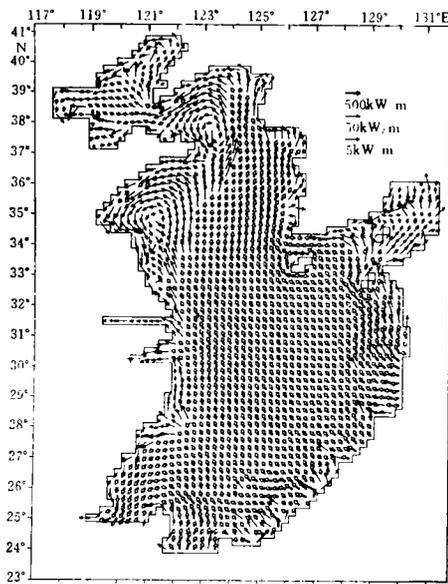
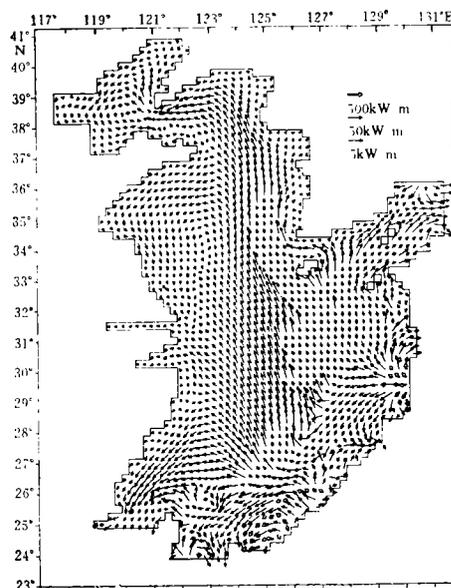


图8  $M_2$ 分潮流椭圆长短轴分布图

### 3.3 潮能通量及潮波运动

$M_2$ 和 $m_1$ 分潮的能通量分布如图9、10所示.

由图9和图2可知, 计算海区的 $M_2$ 分潮波是从太平洋经日本九州至中国台湾之间的岛链地区传入东海的. 潮波运动方式在东海为前进波, 在黄、渤海和朝鲜海峡为驻波. 从潮能矢量来看, 由大隅—吐噶喇海峡进入东海的潮能折向西北偏北方向, 在到达五岛列岛附近时分成东西两支, 西支折向西北, 经济州岛西南直入黄海. 东支一部分也折向西北并经济州海峡入黄海, 另一部分折向东北经朝鲜海峡东水道后传入日本海, 而朝鲜东岸有来自日本海的返回

图9  $M_2$ 分潮能通量分布图图10  $m_1$ 分潮能通量分布图

潮能。从台湾东海岸至西表岛之间的水道进入东海南部的潮能通量, 绕过台湾北端后作反时针方向回转, 传入台湾海峡。从西表岛至奄美大岛之间的各水道进入的潮能通量, 除少部分进入台湾海峡外, 约有一半在东海, 特别在杭州湾及邻近区域消耗, 另外大约一半进入黄海。到达黄海以后的潮能大部分沿朝鲜西岸北上, 另一部分在到达 $36^\circ\text{N}$ 一线时, 与北黄海反射潮能会合, 转向山东半岛南部沿海, 最后折向苏北浅滩后消失。沿朝鲜半岛西岸北上的潮能, 在北黄海形成一个反时针回转, 其中一小部分潮能经渤海海峡进入渤海后耗散。

表2给出图1所示各断面潮能通量值。由表可见, 从太平洋进入东海的 $M_2$ 分潮总能量为157.91GW。其中经G、F断面进入黄海的能量为65.67GW, 经M断面进入台湾海峡的能量为19.68GW。最后经A断面进入渤海的潮能通量仅3.01GW。表2中的数值同丁文兰<sup>[10, 11]</sup>的结果基本一致, 但进入北黄海及渤海的能量偏小较多。从表2还可算得 $M_2$ 分潮在东海、南黄海、北黄海、朝鲜海峡耗散的能量分别为65.86、54.08、8.58、6.38GW。其中东海消耗的能量居各海区之首位。

由图10可知合成全日潮 $m_1$ 能量主要从吐噶喇海峡及冲绳至宫古岛之间的水道进入东海。由于受到陆坡的阻挡一部分潮能又折回了太平洋, 这就不难理解为何在岛链地区 $m_1$ 与 $M_2$ 分潮振幅之比大约为2/5, 而到达大陆沿岸后便降至1/5~1/10左右, 这里陆坡的反射是重要原因之一。进入陆架区的 $m_1$ 分潮能通量的传播情况与 $M_2$ 基本相似, 这里不再赘述。通过各断面的 $m_1$ 分潮能通量也列于表2。可以看到通过各主要断面的 $m_1$ 分潮能通量不足 $M_2$ 分潮的1/10。

表2 各断面能通量 (GW)

断 面	$m_1$	$M_2$	备 注
A	0.25	3.01	进渤海为正
B	0.38	11.59	进北黄海为正
C	0.39	0.19	进朝鲜海峡为正
D	-1.71	-0.52	进朝鲜海峡为正
E	1.50	19.87	进朝鲜海峡为正
F	0.27	13.16	进黄海为正
G	1.22	52.51	进黄海为正
H	5.63	45.71	进东海为正
J	6.14	89.08	进东海为正
K	2.0	23.12	进东海为正
M	0.93	19.68	进台湾海峡为正
H+J+K	13.77	157.91	九州至台湾东岸
G+F	1.49	65.67	

本文得到国家自然科学基金部分资助, 涂登志同志参加部分工作, 文中用图由杜眉山同志清绘, 在此一并表示感谢。

### 参考文献

- 1 Борис Л И. Расчет приливов и приливных течений Желтого моря. Тр. ЛГМИ, 1958, Вып. 7
- 2 沈育疆. 东中国海潮汐潮流数值计算. 山东海洋学院学报, 1980, 10(3): 28~35
- 3 Choi B H. A tidal model of the Yellow Sea and the East China Sea. KORDI Report 80-2 (1980), Korea Ocean Research and Development Institute, 72
- 4 Choi B H. A three-dimensional model of the East China Sea. In: Ocean Hydrodynamics of the Japan and East China Sea, Elsevier Oceanography Series, 1984, 209~224
- 5 沈育疆, 叶安乐. 东中国海三维半日潮流的数值计算. 海洋湖沼通报, 1985, (1): 1~11
- 6 Fang Guohong. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China. C. J. of Oceanology and Limnology, 1986, 4(1): 1~16
- 7 方国洪. 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. 第一届潮汐与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, 1986, 12~20
- 8 方国洪, 杨景飞. 渤海潮运动的一个二维数值模型. 海洋与湖沼, 1985, 16(5): 337~346
- 9 方国洪. 黄海东部 $M_2$ 潮流的数值计算及其与观测结果的比较. 第一届潮汐与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, 1986, 45~56
- 10 丁文兰. 东海潮汐和潮流特征的研究. 海洋科学集刊, 第21集, 北京: 科学出版社, 1983, 135~148
- 11 丁文兰. 渤海和黄海潮汐潮流分布的基本特征. 海洋科学集刊, 第25集, 北京: 科学出版社, 1985, 27~40