

渤、黄、东海三维潮波运动数值模拟^{*}

万振文 乔方利 袁业立

(国家海洋局地球流体力学和数值模拟重点实验室 青岛 266003)

提要 采用 POM 三维海流数值模式模拟渤、黄、东海潮波运动。所得潮汐调和常数与 77 个测站的观测值的平均绝对误差: m_1 振幅 1.92cm, 迟角 4.39° ; M_2 振幅 4.70cm, 迟角 5.08° 。模拟结果显示 M_2 分潮流共存在 8 个圆流点, m_1 分潮流共存在 9 个圆流点。其中, M_2 分潮流在舟山群岛附近与 m_1 分潮流在黄海北部和台湾海峡各存在一个圆流点, 这三个圆流点是本文数值模拟所首次显示的, 需进一步的观测验证它们实际存在与否。模式还得出湍流涡动系数分布。

关键词 渤、黄、东海 潮汐 数值模拟

学科分类号 P731

关于渤、黄、东海潮波运动数模研究的工作著文甚多(沈育疆, 1980; 方国洪等, 1985; 赵保仁等, 1994; 叶安乐等, 1995), 限于当时的计算条件, 其模型都有不同程度的近似。沈育疆(1980)的正压模型只考虑了地转项和摩擦力项, 忽略了对流和扩散项, 还忽略了天文引潮力的作用; 赵保仁等(1994)和叶安乐等(1995)考虑了水平对流项和天文引潮力, 但忽略了水平扩散, 且限于二维模式无法考虑垂直对流和扩散。总的说来, 该海域的潮波运动特征还是了解得相对较深入的。然而细致地比较各作者所得的结果, 差别还很大, 模型参数也很不一致。与潮波运动相关的许多问题, 如潮余流、潮汐余水位、各分潮合成流、潮流椭圆及其旋转率等的分布尚未取得一致的结论。作者认为三维全动力模型和高分辨率网格可能能够获得更好的结果。另一方面, 长期以来, 人们认识到潮波运动对其它流动的影响, 但是很难找到一个简单、直观且又能定量地反映这种影响的参量。潮混合强度反映潮波对温度、盐度和环流通量的输运和扩散效应, 它与湍流涡动粘性系数有关。POM 模式包含一个湍流二阶闭合子模式, 能给出随流动变化的湍流涡动系数。目前尚无关于该海区涡动系数大小分布的报道, 本文给出的结果将有助于认识潮波运动对其它流动的影响。

1 计算海区及数值模式

计算海区包括整个渤、黄、东海, $117^\circ 20' - 130^\circ 10' E$, $24^\circ 20' - 41^\circ 10' N$ 。水平网格间距为 $(1/12)^\circ \times (1/12)^\circ$ 。垂直分 5 个 σ 层。采用 97 版 POM (Princeton Ocean Model)。底摩擦系数在渤海海区取 0.001, 其它海区取 0.0016。计算初始, $u = v = w = \eta = 0$, 12h 以后, 水界处的水位达到调和常数所确定的水位。

^{*} 国家自然科学基金资助项目, 49406065 号。万振文, 男, 出生于 1970 年 10 月, 中国科学院海洋研究所博士生, Fax: 0086-0532-2879562

收稿日期: 1997-06-20, 收修改稿日期: 1998-02-20

2 计算结果和讨论

2.1 误差检验

本文用实测水位站附近 4 个网格点上计算所得潮汐调和常数插值到水位站点上,然后与实测值进行比较(表 1)。

表1 潮汐调和常数计算值与实测值比较

Tab.1 Comparison between the simulation and abserved constituent constants

站号	东经	北纬	m_1				M_2			
			$H(\text{cm})$		$g(^{\circ})$		$H(\text{cm})$		$g(^{\circ})$	
			计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值
1	123° 09′	39° 04′	29.8	28.2	308.0	313.7	120.3	126.0	249.4	249.7
2	122° 40′	39° 19′	31.8	27.4	318.0	322.2	128.8	124.9	259.2	261.3
3	121° 40′	38° 58′	25.4	23.0	336.4	343.3	95.6	98.0	288.0	292.2
4	122° 09′	40° 38′	36.8	32.5	70.8	77.3	127.4	123.9	138.1	144.3
5	121° 00′	40° 43′	34.6	32.1	72.2	80.6	94.2	95.5	147.0	150.5
6	119° 37′	39° 55′	27.6	26.1	82.8	87.8	10.6	10.7	310.9	313.4
7	117° 36′	38° 37′	18.2	17.9	160.5	168.2	33.6	39.0	286.0	325.2
8	121° 24′	37° 32′	12.5	11.8	265.5	268.7	82.0	74.0	284.8	290.5
9	122° 10′	37° 30′	17.0	16.7	281.0	283.5	65.4	61.8	297.0	299.8
10	120° 45′	38° 10′	2.0	2.2	177.7	180.7	53.0	54.3	293.3	296.7
11	122° 42′	37° 23′	20.5	20.4	285.0	290.0	36.7	34.9	359.0	0.9
12	122° 25′	36° 53′	21.0	21.0	290.4	291.2	79.6	76.8	48.8	51.0
13	121° 29′	36° 48′	20.4	22.0	290.0	308.1	110.9	112.7	72.1	88.6
14	120° 19′	36° 05′	24.1	24.0	319.8	326.6	125.5	125.7	130.1	133.6
15	119° 33′	35° 23′	25.0	25.7	330.4	337.1	158.0	140.9	157.8	161.9
16	119° 27′	34° 45′	26.3	26.6	340.1	343.7	162.0	158.4	170.0	177.9
17	119° 47′	34° 27′	26.0	24.5	340.2	352.0	159.4	143.7	179.0	195.2
18	121° 37′	32° 08′	10.1	15.9	113.5	117.5	158.6	168.9	354.6	354.9
19	122° 14′	31° 25′	17.0	19.6	159.4	151.4	120.0	113.2	311.8	312.1
20	121° 54′	31° 07′	18.0	21.2	174.3	130.2	124.0	121.2	330.6	325.9
21	122° 36′	30° 49′	20.0	22.3	179.5	170.4	121.0	118.2	287.1	284.7
22	122° 18′	30° 15′	22.3	23.8	190.1	182.1	102.4	102.5	285.6	286.1
23	122° 04′	30° 00′	23.8	25.6	198.4	191.6	92.1	89.4	280.2	287.0
24	122° 18′	29° 57′	24.0	25.0	196.8	196.4	132.8	113.1	267.6	267.0
25	122° 01′	29° 49′	24.3	25.0	195.0	188.4	140.6	120.8	271.1	264.1
26	121° 57′	29° 15′	25.0	25.8	199.6	192.0	174.2	165.8	259.3	253.3
27	121° 17′	28° 05′	25.0	26.9	214.2	200.2	182.6	187.6	260.0	255.7
28	120° 48′	27° 58′	25.0	24.9	212.0	212.4	201.4	207.7	272.2	276.9
29	120° 24′	27° 10′	24.0	27.1	215.0	211.0	188.6	195.0	280.2	278.3
30	119° 42′	26° 01′	25.3	25.0	225.5	226.8	206.3	207.7	305.0	308.7
31	119° 59′	25° 27′	24.4	27.9	231.6	231.5	205.2	201.4	314.4	312.1
32	121° 45′	25° 09′	17.4	17.0	210.2	213.5	20.8	19.0	285.2	283.0
33	121° 52′	24° 35′	17.4	18.0	205.2	207.5	42.0	44.0	173.0	169.0
34	123° 41′	25° 56′	18.0	20.0	200.0	198.5	47.2	45.0	196.4	197.0
35	123° 00′	24° 25′	16.9	17.0	200.6	200.0	45.0	42.0	175.0	174.0
36	125° 18′	24° 48′	15.4	16.0	217.8	214.0	48.1	50.0	182.4	197.0
37	124° 10′	24° 20′	21.0	19.0	202.1	202.0	45.4	46.0	179.0	177.0
38	126° 44′	26° 20′	18.0	18.0	193.0	186.0	54.0	56.0	183.0	172.0
39	124° 24′	39° 42′	37.2	33.0	310.6	312.0	200.8	206.0	237.8	239.0

续表1

站号	东经	北纬	m_1				M_2			
			$H(\text{cm})$		$g(^{\circ})$		$H(\text{cm})$		$g(^{\circ})$	
			计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值
40	124° 16′	39° 48′	37.6	34.0	304.0	311.0	197.5	212.0	242.4	246.0
41	123° 45′	39° 45′	36.0	31.0	306.0	306.0	179.5	187.0	243.0	244.0
42	123° 05′	39° 29′	32.9	37.0	316.1	319.0	153.2	158.0	252.1	254.0
43	125° 07′	39° 25′	40.4	39.0	310.4	314.0	218.0	222.0	235.0	237.0
44	125° 11′	38° 40′	33.0	33.0	292.8	295.0	171.2	173.0	204.0	219.0
45	124° 47′	38° 11′	31.1	29.0	282.1	282.0	109.8	112.0	179.7	184.0
46	125° 20′	37° 45′	33.0	33.0	276.0	277.0	150.0	154.0	129.0	126.0
47	125° 33′	37° 44′	32.8	33.0	277.6	278.0	195.1	198.0	126.0	120.0
48	126° 14′	37° 39′	30.2	35.0	277.5	277.0	272.6	270.0	140.0	118.0
49	126° 34′	37° 30′	30.0	35.0	277.2	278.0	292.2	293.0	127.3	113.0
50	126° 09′	37° 15′	32.0	38.0	265.8	261.0	248.1	248.0	109.3	102.0
51	126° 08′	36° 47′	33.2	33.0	258.8	259.0	220.2	220.0	84.0	84.0
52	126° 27′	37° 02′	31.8	35.0	266.1	266.0	262.7	262.0	103.2	98.0
53	126° 26′	36° 23′	32.8	33.0	252.6	253.0	221.2	226.0	71.8	77.0
54	126° 43′	35° 39′	28.0	28.3	249.9	251.3	211.3	212.8	50.0	70.4
55	126° 01′	35° 21′	28.1	28.0	232.6	232.0	168.6	169.0	36.8	40.0
56	126° 05′	35° 03′	26.8	21.0	226.4	227.0	149.1	142.0	24.2	25.0
57	126° 01′	34° 34′	27.0	25.0	208.3	215.0	120.9	117.0	340.4	351.0
58	129° 16′	34° 23′	27.0	27.0	189.0	187.0	128.2	109.0	311.6	298.0
59	126° 45′	34° 19′	24.1	25.0	170.2	173.0	108.0	108.0	268.2	263.0
60	127° 09′	34° 30′	22.0	24.0	164.2	168.0	117.2	110.0	255.0	253.0
61	127° 45′	34° 44′	14.2	17.0	154.8	153.0	96.2	102.0	230.4	228.0
62	128° 03′	34° 43′	12.4	16.0	154.0	146.0	86.0	89.0	225.0	223.0
63	128° 43′	34° 50′	7.8	8.0	143.3	131.0	51.8	60.0	215.0	212.0
64	129° 41′	33° 45′	18.8	15.0	221.6	221.0	62.3	66.0	241.8	245.0
65	129° 53′	33° 33′	18.0	15.7	225.1	225.1	53.6	59.5	237.2	235.0
66	129° 33′	33° 23′	23.8	19.0	197.6	209.0	75.6	82.0	229.1	224.0
67	128° 50′	32° 45′	25.0	23.0	183.0	194.0	78.0	77.0	217.0	218.0
68	129° 51′	32° 43′	24.0	23.0	172.2	182.0	84.4	85.0	203.4	200.0
69	129° 07′	32° 59′	24.0	18.0	183.6	194.0	80.5	73.0	220.5	218.0
70	129° 47′	32° 34′	23.9	22.0	169.8	175.0	81.7	86.0	204.3	201.0
71	130° 01′	32° 12′	21.0	23.0	174.6	185.0	76.2	85.0	201.0	198.0
72	129° 51′	31° 51′	22.0	26.0	174.6	179.0	74.1	76.0	200.4	194.0
73	130° 13′	31° 17′	20.0	23.0	174.1	174.0	70.7	74.0	180.0	179.0
74	129° 51′	29° 50′	20.0	19.0	177.6	172.0	60.0	58.0	170.6	168.0
75	129° 12′	29° 09′	19.0	19.0	187.1	187.0	59.9	56.0	182.0	180.0
76	127° 58′	27° 03′	18.2	18.0	192.0	191.0	55.2	52.0	176.0	171.0
77	127° 28′	26° 13′	18.0	18.0	191.0	190.0	54.8	57.0	174.8	172.0
绝对平均误差			1.92		4.39		4.70		5.08	

2.2 分析和讨论

关于渤、黄、东海潮汐、潮流的数值模拟,赵保仁等(1994)和叶安乐等(1995)所得结果与观测资料较为接近,另外,“渤海、黄海、东海海洋图集(水文分册)”(陈国珍主编,1992)根据丰富翔实的观测资料,给出了系列潮汐、潮流分布图,本文将主要与这些文献资料作比较,进行分析和讨论。

2.2.1 M_2 分潮潮汐 关于 M_2 分潮在黄、渤海的首要特征可以说是存在 4 个无潮点(图 1a), 南黄海无潮点和秦皇岛无潮点位置较为稳定, 黄河口无潮点最不稳定。方国洪(1985)认为黄河口岸形的变迁影响无潮点位置, 本文支持这一观点。另外, 作者认为无潮点纬度的高低受琉球群岛开界处边值的影响, 如赵保仁等(1994)比叶安乐等(1995)在琉球群岛开界处边值的位相提前, 因而得出成山角附近无潮点纬度也较其高。南黄海北部 60° 等迟角线走向争议较大, 本文的结果与赵保仁等(1994)较一致。

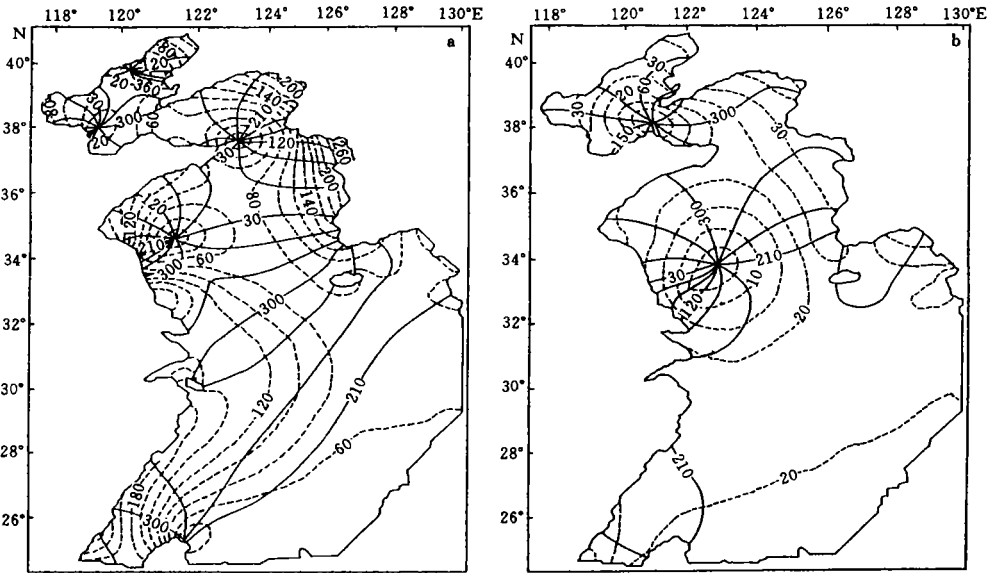


图 1 同潮图

Fig.1 The cotidal charts

a. M_2 ; b. m_1

--等振幅线(cm); ——等迟角线($^\circ$).(单位下同)

2.2.2 M_2 分潮潮流 以 σ 坐标的 0.0, 0.4, 0.8 层分别作为表、中、底层, 结果显示中层和底层潮流分布形态与表层(图 2a)非常一致, 反映了潮流是正压流动的特点。对表、中、底三层潮流平均值作估算, $\overline{v}_表:\overline{v}_中:\overline{v}_底 = 1.00:0.95:0.70$, 反映了底摩擦对底层流动的影响。关于本海区潮流结构的基本特征主要反映在圆流点个数及其位置。 M_2 分潮潮流的圆流点, 在渤海中部、山东半岛北部、黄海南部、朝鲜海峡各存在一个, 黄海中部存在两个(方国洪等, 1985; 赵保仁等, 1994; 陈国珍主编, 1992), 本文再次验证了这些圆流点的存在。关于莱州湾圆流点, 前文(方国洪等, 1985; 赵保仁等, 1994; 陈国珍主编, 1992)所指的位置各异, 本文没有发现其存在。在浙江外海, 舟山群岛附近, 本文证实赵保仁等(1994)提及可能存在的圆流点, 这是其他文献所未提到过的。

2.2.3 m_1 分潮潮汐 m_1 分潮在本海区存在两个无潮点(图 1b), 全日分潮较半日分潮稳定, 上述文献所得结果与本文都比较一致。

2.2.4 m_1 分潮潮流 m_1 分潮流也与 M_2 一样, 中层和底层与表层的潮流分布形态非常相似(图 2b)。在渤海海区, m_1 分潮潮流分布较为稳定, 本文与上述文献均符合得较好, 尤其

是渤海中部和莱州湾这两个圆流点位置与他们所给出的非常吻合,但在东海的分布较为复杂。赵保仁等(1994)认为全海区共存在 9 个圆流点,本文认同这一点,但位置有所不同。本文新发现黄海北部、台湾海峡各存在一个圆流点。

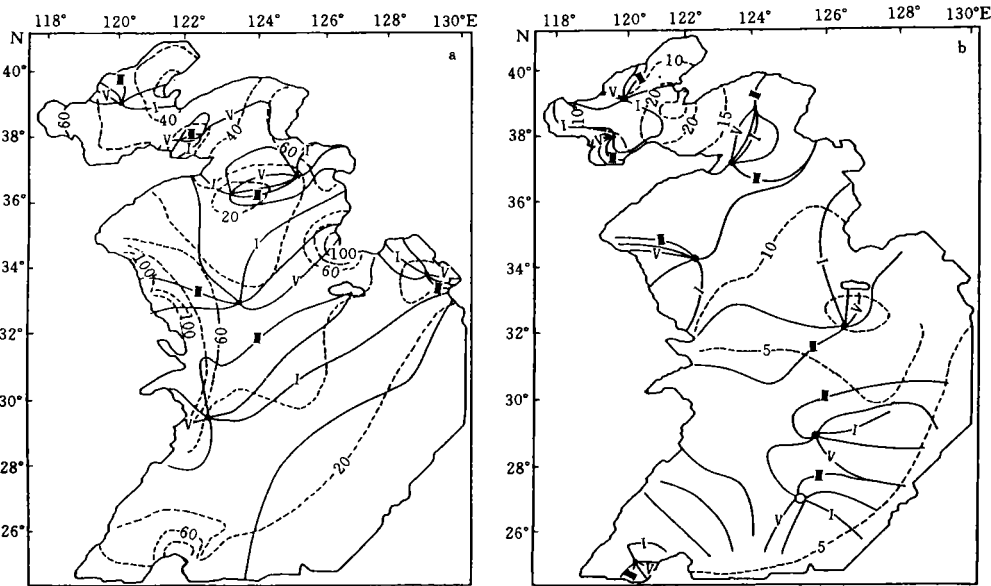


图 2 表层潮流等振幅和等迟角线的分布

Fig.2 Distribution of co-amplitude and co-phase lag lines of tidal current in surface

a. M_2 ; b. m_1

--- 等振幅线; —— 等迟角线; I—V 为位相

2.3 湍流涡动系数

水平涡动系数(版图 I:1—3)垂向变化不大,水平分布差别很大。地形坡度是影响的关键因素,地形变化大,则水平涡动系数大。潮流大小是影响其大小的另一个重要因素,黄海海盆、东海西南部大陆架以及冲绳海槽等区域潮流较弱,而水平涡动系数也相应偏小。垂直涡动系数(版图 I:4—6)垂向变化由表层到底层逐渐增大,水平分布由浅到深逐渐增大。由于湍流涡动系数的模拟对网格分辨率要求更高,本文由于计算环境的限制,给出了初步分布特征,作者希望有更高效的方法或其它工作来进一步探索和证实其分布特征。

3 结论

采用三维全动力数值模式和高分辨率网格能得到高精度的潮汐调和常数分布。证实了前人工作所认同的圆流点的存在,并新发现 M_2 分潮流的浙江外海,舟山群岛附近存在一个圆流点, m_1 分潮流分别在黄海北部和台湾海峡各存在一个圆流点,这三个圆流点是本文数值模拟结果所显示的,需要进一步的工作验证它们实际存在与否。首次得出该海域潮流水平涡动系数和垂直涡动系数分布。

参 考 文 献

方国洪 杨景飞,1985. 渤海潮波运动的一个二维数值模型. 海洋与湖泊, 9(5):337—345

- 叶安乐 梅丽明, 1995. 渤黄东海潮波数值模拟. 海洋与湖沼, 26(1): 64—70
- 沈育疆, 1980. 东中国海潮汐潮流数值计算. 山东海洋学报, 10(3): 26—35
- 汤毓祥 姚兰芳, 1989. 南黄海潮流和潮流余流的数值计算. 海洋湖沼通报, 2: 1—7
- 陈国珍主编, 1992. 渤海、黄海、东海海洋图集(水文). 北京: 海洋出版社. 429—454
- 赵保仁 方国洪 曹德明, 1994. 渤黄东海潮汐潮流的数值模拟. 海洋学报, 16(5): 1—10

THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODELLING OF TIDAL WAVES IN THE BOHAI, YELLOW AND EAST CHINA SEAS

WAN Zhen-wen QIAO Fang-li YUAN Ye-li

(Key Lab of Geophysical Fluid Dynamics and Numerical Modelling,

State Oceanic Administration, Qingdao, 266003)

Abstract Several pieces of article were reported on the numerical simulation in the Bohai, Yellow and East China Seas. The models simplified to different extent produced results satisfying with the data to different extent. The author believed that a numerical simulation with a model included all dynamics items and in a fine net could bring a result better. Many problems concerned with tidal movement were not resolved for want of a sufficiently precise knowledge about tidal movement.

In application of the three-dimensional POM model, the tidal movement in the Bohai, Yellow and East China Seas were numerically simulated. The obtained tidal constituent constants were compared with the data observed from seventy-seven tidal stations, which gave the mean of absolute error: 1.92cm for the amplitude of constituent m_1 and 4.39° for its phase; 4.70cm for the amplitude of constituent M_2 and 5.08° for its phase. It was also shown that there were eight tidal current non-phase points for M_2 and nine for m_1 altogether. Among these tidal current non-phase points, one of M_2 , which located at the Zhejiang outer sea and near the Zhoushan island, and two of m_1 , which located north to Yellow Sea and in the Taiwan strait respectively, were firstly found by this numerical work, with the rest acknowledged by other researchers. The distribution of turbulent eddy coefficient was also given and its relationship with the topography and the water depth was discussed, as well as. The rough result firstly obtained here show: 1) the horizontal turbulent eddy coefficient doesn't vary notably in vertical direction but apparently in horizontal direction and the topography is another key factor influencing its distribution; 2) the vertical turbulent eddy coefficient is bigger and bigger from the surface toward the bottom or from the shallow place to the deep.

Key words The Bohai, Yellow, East China Seas Tides Numerical simulation

Subject classification number P731