

台湾海峡 M_2 分潮形态分布数值模拟研究

崔 培, 张福星, 江毓武*

(厦门大学 近海海洋环境科学国家重点实验室, 环境科学研究中心, 福建 厦门 361005)

摘要: 台湾海峡大部分区域属半日潮型, 半日潮的主要分量为太阳半日分潮 M_2 。前人研究表明, 台湾海峡 M_2 分潮是由来自太平洋的大洋潮波绕台湾岛南北两端汇合而成, 振幅最大区位于福建沿岸的平潭-兴化湾-湄洲湾一带。为解释这一强潮区形成的动力机制, 本文运用普林斯顿海洋模型(POM)进行台湾海峡 M_2 分潮的潮波运动数值模拟。所设计的数值实验包括改变科氏力、海底地形以及岸界 3 个方面。实验表明, 形成海峡西岸强潮区的机制主要是南北两股潮波在浅水区的汇合及岸界反射。

关键词: 台湾海峡; M_2 分潮; 数值模拟

中图分类号: P 731.23

文献标识码: A

文章编号: 0438-0479(2008)03-0426-05

台湾海峡是联系我国东海、南海以及海峡两岸的交通要道, 海底地形起伏变化剧烈(图 1)。大陆沿岸和海峡北部地形较平缓, 水深基本上低于 60 m; 澎湖列岛与台湾岛之间为较深的澎湖水道, 水深可达 100 m 以上; 台湾岛西南水深变化梯度剧烈, 不到半个经度距离内水深从几十米剧增到千米以上。与此形成鲜明对比的是该深水区附近的台湾浅滩, 平均水深仅 20 m 左右。此复杂的地形对该海区的潮波运动有重要影响。

自 80 年代起, 不断有学者对台湾海峡潮波系统进行研究。郑文振等^[1-3]通过对以往观测资料的总结分析以及海上实践, 对台湾海峡潮汐、潮流进行概括; 叶安乐等^[4]较早的将数值模拟应用于台湾海峡半日潮波形成机制研究中, 并参照以往在东海和南海计算结果, 认为台湾海峡及其附近海域的三维半日潮潮波运动是由北部的蜕化旋转潮波系统和南部的前进潮波系统汇合所形成; 方国洪等^[5]采用数值模拟方法指出台湾海峡 M_2 分潮是由东海西南向传播和南海北向入射的 Kelvin 波共同作用下产生; Jan 等^[6-7]通过二维南海潮汐模式结果, 得到台湾海峡两端开口边界上主要分潮振幅和相位相对台湾本岛南、北两端潮位观测站调和常数的转移函数, 再代入台湾海峡三维模式进行运算, 认为台湾海峡 M_2 潮波在西侧是沿大陆海岸向南传递的 Kelvin 波, 南下的潮波抵达海峡南端台湾浅滩和南海海盆连接处, 受水深突然增大影响被阻止并几乎完全反射回来, 进而在海峡东侧形成近似驻波的现象, 同时造成半日潮波振幅在海峡中段放大。

作者运用普林斯顿海洋模型模拟台湾海峡 M_2 分潮形态分布, 并设计几组数值实验, 对科氏力、底地形以及岸界反射等影响因素进行敏感性分析, 试图确定这些因素在台湾海峡 M_2 分潮形态分布中所起的作用, 并针对海峡西岸中部强潮区的形成机制做出解释。

1 模型计算

1.1 计算区域与网格大小

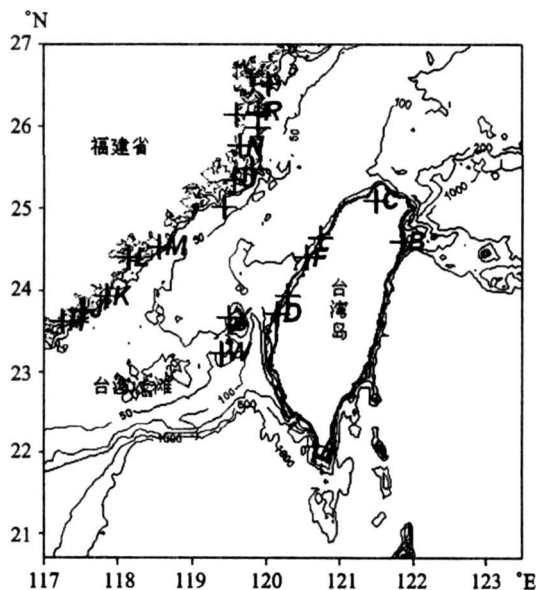


图 1 台湾海峡地形图

A. 车城; B. 苏澳; C. 台北; D. 口湖; E. 台西; F. 台中; G. 苗栗; H. 东山东南; I. 东山岛; J. Guleitou; K. 南澳; L. 厦门; M. 金門; N. 屿头岛; O. 福州; P. 台北; Q. 妈祖北; R. 妈祖南; S. 西洋岛; T. 大丘; U. 海坛岛; V. 乌丘岛; W. 望安; X. 澎湖

Fig. 1 Topography of the Taiwan Strait

收稿日期: 2007-11-12

* 通讯作者: ywjiang@xmu.edu.cn.

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

POM (Princeton Ocean Model)^[8] 是一个垂向采用 sigma 坐标的三维斜压海洋模式, 主要特点如下:

(1) 内嵌了 Mellor 和 Yamada 2 阶矩湍流封闭子模型以提供垂向湍流粘滞系数。

(2) 模式具有自由海表面, 时间步长相对于内、外两个模态分离, 外模态为二维模式, 时间步长受 CFL 条件和重力外波速限制, 时间步长较短; 内模式为三维模式, 时间步长较长。

(3) 时间积分在垂向(垂直涡动粘滞项、对流项)为隐式, 有利于消除计算不稳定, 从而加大时间步长。

本文运用 POM 模型外模态的水位计算结果, 进行 M_2 分潮振幅和迟角的计算。计算区域为 $117^\circ \sim 123.5^\circ \text{E}$, $20.7^\circ \sim 27^\circ \text{N}$ (见图 1)。采用的网格大小为水平方向 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$, 垂向 sigma 分 21 层。

1.2 模型的初始与边界条件

初始条件取 $\zeta = u = v = 0$ 。本模型的所有水边界均设定为水位强迫边界。为了准确模拟该过程, 有必要在开边界引入潮汐过程。潮汐数据来源于日本的全球模式 (NAOTIDE) 的天文潮调和常数值。开边界的潮位以 16 个基本分潮的周期性余弦函数形式输入, 即:

$$H = \sum_{i=1}^I \zeta_i = \sum_{i=1}^I H_i \cos(\alpha_i t + v_{0i} - g_i) \quad (1)$$

($i = 1, 2, 3, \dots, 16$)

式中, H_i , g_i , α_i , v_{0i} 分别为第 i 个分潮的振幅, 迟角, 角速率, 天文初相角, 均可由基本天文要素计算得到^[9]。

模型模拟时间为 1 个月。

2 结果与讨论

2.1 M_2 分潮潮汐的模拟结果分析

本文选取了散布于海峡两岸和澎湖列岛上的 24 个验潮站 (见图 1) 对 M_2 分潮振幅和迟角的计算值和观测值进行比较验证。结果见表 1。振幅的平均相对误差为 5%, 平均绝对误差为 0.06 m; 迟角误差平均值为 5.52° 。可见, 本次模拟结果与实际情况吻合得比较好。

图 3、4 分别是 M_2 分潮等迟角线和等振幅线分布图。分析得到台湾海峡 M_2 分潮形态分布特征如下:

(1) 从等迟角线分布 (见图 2) 可以看出, M_2 分潮主要来自太平洋潮波从东边界传入后, 分两路由台湾岛南北两端进入海峡。台湾海峡北部等迟角线呈现逆时针旋转状。这一形态被叶安乐等^[4]解释为北部退化的旋转潮波系统; 两股潮波汇合的位置如图中虚线所示, 位于东山海海至澎湖一线。

(2) 海峡中等振幅线分布 (见图 3) 的态势为西北部高, 东南和东北部低; 最大振幅发生在福建省湄洲湾

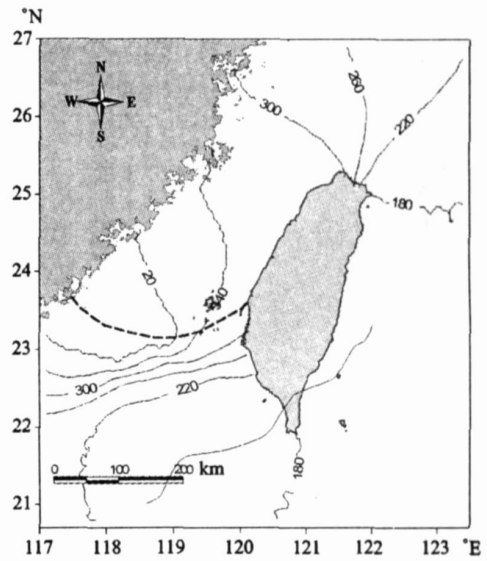


图 2 M_2 等迟角线分布图 ($^\circ$)

Fig. 2 Contour of phase lag

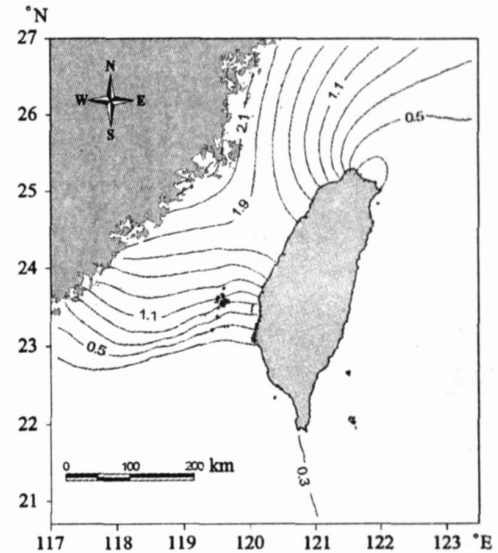


图 3 M_2 等振幅线分布图 (m)

Fig. 3 Contour of amplitude

— 兴化湾一带, 最大值为 2.4 m; 在海峡西岸中部形成强潮区, 并由此处向台湾岛南北两端逐渐减小; 最小振幅出现在台湾岛西南部高雄外海, 为 0.2 m。

(3) 海峡南部等迟角线形成东北—西南向倾斜, 等迟角线基本上沿着等水深线分布而形成密集区; 台湾浅滩至澎湖水道附近等振幅线密集。

通过对台湾海峡 M_2 分潮形态分布的数值模拟, 基于对以往研究的分析总结, 本文将科氏力、底地形、岸界反射设为影响台湾海峡 M_2 分潮形态分布的因素。对此, 本文将通过数值实验进行研究。

表 1 M_2 分潮调和常数计算值与实测值的比较

Tab.1 Comparison between computed and observed harmonic of M_2 tide

站号	验潮站位置		网格点位置		振幅误差		迟角误差
	°N	°E	I	J	$\Delta H/m$	相对误差	$\Delta g/(^{\circ})$
车城	120. 68	22. 07	74	98	0. 05	0. 5	- 10. 11
苏澳	121. 87	24. 58	98	48	0. 01	0. 33	1. 03
台北	121. 5	25. 08	90	38	- 0. 07	0. 33	- 20. 1
口湖	120. 17	23. 7	64	65	0. 06	0	- 1. 21
台西	120. 3	23. 92	66	61	0. 03	0. 21	- 0. 08
台中	120. 57	24. 38	72	52	0	0. 08	4. 98
苗栗	120. 75	24. 62	75	47	0. 03	0. 27	7. 01
东山东南	117. 28	23. 6	6	67	0	0. 05	5. 99
东山岛	117. 53	23. 73	11	65	0. 09	0. 29	0. 09
Guleitou	117. 57	23. 75	12	64	0	- 0. 36	1. 98
南澳	117. 87	23. 92	18	61	- 0. 1	0. 54	9. 01
厦门	118. 17	24. 38	24	52	0. 04	- 0. 17	4
金门	118. 57	24. 52	32	49	- 0. 03	- 0. 15	0
屿头岛	119. 68	25. 75	54	24	0. 1	0. 01	11. 87
福州	119. 92	25. 97	59	20	0	0. 01	2
台北	119. 63	26. 13	53	17	0. 26	- 0. 01	0
妈祖北	119. 92	26. 13	59	17	0. 2	- 0. 1	5. 23
妈祖南	119. 92	26. 17	59	16	- 0. 05	- 0. 01	11. 77
西洋岛	120. 05	26. 5	61	9	- 0. 03	0. 13	5. 12
大丘	119. 83	25. 47	57	30	0. 09	0. 1	12. 86
海坛岛	119. 58	25. 33	52	33	0. 13	0. 1	12. 04
乌丘屿	119. 45	25	49	39	0	0. 11	0
望安	119. 42	23. 22	49	55	0. 05	0. 09	5. 3
澎湖	119. 52	23. 65	51	63	0. 02	0. 11	0. 69
误差绝对值的平均值					0. 06	0. 05	5. 52

2.2 科氏力对潮波的作用

方国洪等^[5]指出台湾海峡的潮波是在由东海西南向传播和南海北向入射的 Kelvin 波共同作用下产生的,从而导致了西岸中部强潮区的形成. 本文设计实验研究与 Kelvin 波相关的科氏力对台湾海峡 M_2 分潮强潮区的影响.

实验分别计算了科氏力加倍和无科氏力作用下,计算区域内等振幅线的分布情况(文中分别用 f 、 F 表示改变前后的科氏力). 图 4 为台湾海峡中部等振幅线分布情况. a 为原始模拟结果; b、c 分别对应 $F=2f$ 、 $F=0$ 的情况. 通过对三幅图的比较可得,科氏力的改变,使台湾海峡西岸中部振幅发生了整体的增大和减小:增大科氏力,振幅减小;消除科氏力,振幅增大. 在此基础上,本文选取与岸线垂直的断面 AB、CD 进行分析. A、B、C、D 点的位置如图 4 所示. 其中 A 点为振幅最大值出现的位置. 分析结果见表 2.

表 2 表明, A、B 两点振幅差值随科氏力的增大和

减小而发生相应的变化;但是, C、D 两点差值的变化却没有呈现这样的变化规律:当科氏力加倍后,其差值反而减小. 所以,通过本组实验,本文认为与 Kelvin 波相关的科氏力并不是台湾海峡中部强潮区形成的原因. 这可能是由于科氏力的作用在像台湾海峡这样的计算尺度内并不显著. 值得注意的是,当科氏力加强时,台湾海峡的潮汐能量反而降低. 这可能是科氏力改变了整个潮汐传播路径所引起的.

2.3 底地形和岸界反射对潮波的作用

2.3.1 底地形调整实验

考虑台湾海峡特殊的地形,本文设计实验,将最小计算水深由 10 m 增加至 80 m,研究底地形对海峡西岸强潮区的影响. 图 5 为根据计算结果绘制的等振幅线

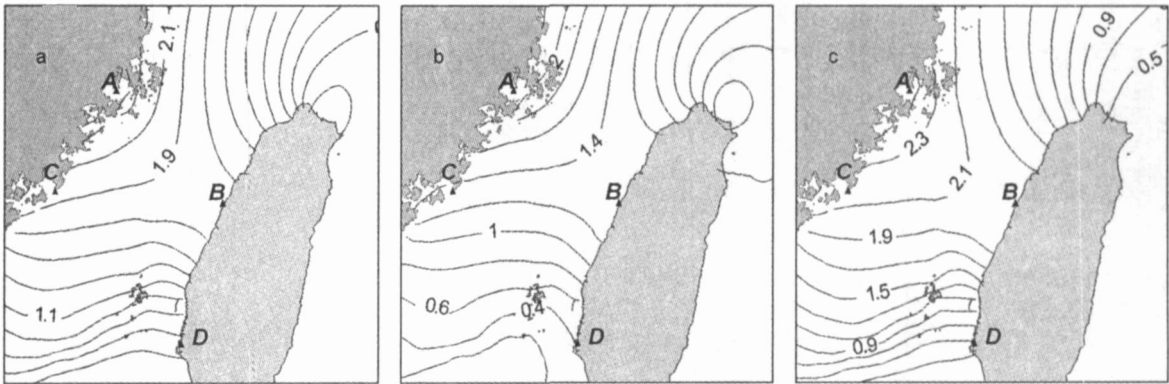


图 4 台湾海峡中部 M_2 等振幅线分布图(m)
a. $F=f$; b. $F=2f$; c. $F=0$
Fig.4 Contour of amplitude (m) in the middle of Taiwan Strait

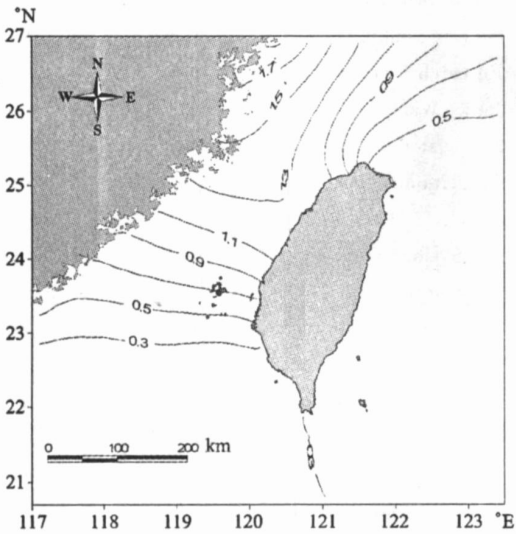


图 5 M_2 等振幅线分布图(m)(改变水深)
Fig.5 Contour of amplitude

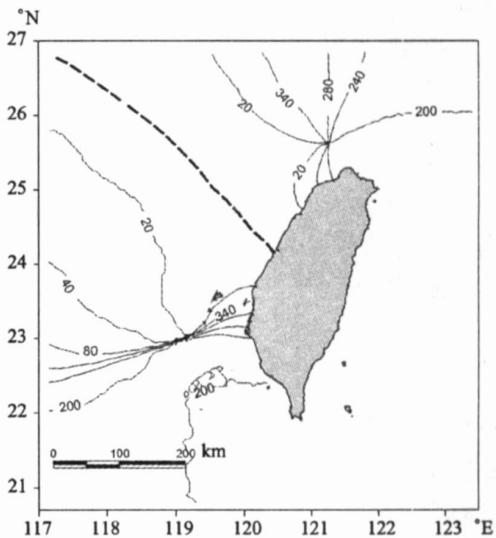


图 6 M_2 等迟角线分布图(°) (改变水深和岸界)
Fig.6 Contour of phase lag

深由千米以上急剧减小到百米、几十米,水深变化梯度增大,在台湾浅滩处发生“浅水放大”效应导致其附近等值线密集. 在本实验中该效应因水深加深而减小. (3) 西岸中部强潮区明显减弱, 振幅最大值由 2.4 m 减小到 1.5 m, 两岸振幅差值由 0.6 m 减小到 0.3 m.

2.3.2 底地形和岸界调整实验

在以上研究的基础上, 本文设计实验进一步研究底地形和岸界共同作用时, M_2 分潮形态分布的变化. 具体做法为: 水深 80 m 不变, 同时将西部和北部开边

界分别向北、向西方向延伸. 将台湾海峡西岸陆地区域内的所有网格点设为水点, 根据计算结果绘制等迟角线和等振幅线分布图(见图 6、7). 分析可得: (1) 两股潮波的交汇位置向西北方向偏移. 如图 2、6 中虚线所示. 这主要是由于增大水深, 减小底摩擦对潮能量的损耗, 加快了潮波的传播速度. 而北上的上行波波速大于南下的下行波. (2) 对比图 5 可见, 强潮区振幅减小更加显著. (3) 海峡西岸的强潮区移至计算区域左上角.

通过本组的两个数值实验, 并将两组数值实验的

表 2 西岸中部振幅变化比
Tab.2 Comparison of amplitude in the middle of western coast

图号	变化关系	A/ m	B/ m	C/ m	D/ m	AB 差值/ m	CD 差值/ m
a	$F=f$	2.4	1.8	2.0	0.4	0.6	1.6
b	$F=2f$	2.0	1.3	1.4	0.4	0.9	1.0
c	$F=0$	2.5	2.0	2.2	0.5	0.5	0.7

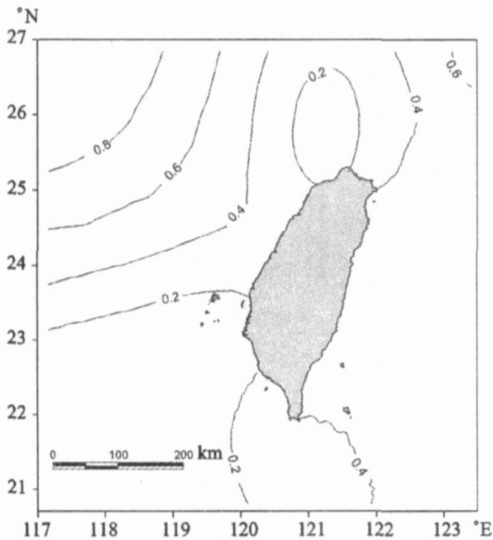


图7 M_2 等振幅线分布图(m)(改变水深和岸界)

Fig. 7 Contour of amplitude

敏感性分析结果进行比对, 本文认为底地形的潮汐放大作用及岸界反射是形成台湾海峡具有较大潮差的主要原因; 而潮波在浅水区汇合并形成岸界反射是西岸中部形成强潮区的主要原因。

3 结束语

运用 POM 模型对台湾海峡 M_2 分潮的潮波运动进行数值模拟研究, 得到如下结论: (1) 台湾海峡 M_2 分潮形态分布受科氏力、底地形以及岸界反射三方面共同作用的影响; (2) 科氏力作用的影响比较弱; (3) 底地形及岸界的共同作用是形成台湾海峡具有较大潮差

的主要原因; (4) 海峡西岸中部的强潮区是潮波在浅水区汇合及岸界反射共同作用的结果。

参考文献:

- [1] 郑文振, 陈福年, 陈新忠. 台湾海峡的潮汐和潮流[J]. 台湾海峡, 1982, 1(2): 1-4.
- [2] 王志豪. 台湾海峡的潮汐[J]. 台湾海峡, 1985, 4(2): 120-128.
- [3] 丁文兰. 台湾海峡潮汐和潮流的分布特征[J]. 台湾海峡, 1983, 2(1): 1-8.
- [4] 叶安乐, 陈宗镛, 于宜法. 台湾海峡及其附近海域三维半日潮波的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 1985, 16(6): 439-450.
- [5] Fang G H, Kwok Y K, Yu K J, et al. Numerical simulation of principal tidal constituents in the South China Sea, Gulf of Tonkin and Gulf of Thailand[J]. Continental Shelf Research, 1999, 19: 845-869.
- [6] Jan S, Wang Y H, Chao S Y, et al. Development of a now-cast system for the Taiwan Strait (TSNOW): numerical simulation of barotropic tides[J]. Ocean and Polar Research, 2001, 23(2): 195-203.
- [7] Jan S, Chen C S, Wang J. Transition of tidal waves from the east to South China seas over the Taiwan Strait: influence of the abrupt step in the topography[J]. Journal of Oceanography, 2002, 58: 837-850.
- [8] Blumberg A F, Mellor G L. A description of a three dimensional coastal ocean circulation model[C]// Heaps N S ed. Three Dimensional Coastal Models. Washington D. C.: American Geophysical Union, 1987, 4: 1-16.
- [9] 方国洪, 郑文振, 陈宗镛, 等. 潮汐和潮流的分析和预报[M]. 北京: 北京出版社, 1986.

Numerical Simulation of the M_2 Tidal Wave Distribution in the Taiwan Strait

CUI Pei, ZHANG Fur xing, JIANG Yur wu*

(State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Environmental Science Research Center,
Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The semidiurnal tides are the dominant tides in the Taiwan Strait. As the most important tide, the M_2 tidal wave significantly influences the tide distributions of this area. Lots of studies have shown that the M_2 tidal in the Taiwan Strait can be formed by the interaction between the two tides coming from the north and south entrances of the Taiwan Strait, respectively. The strongest tidal field occurs at the area from the Pingtan to Meizhou Bay and to Xinghua Bay along the Fujian coastline. In order to interpretate the phenomena mentioned above, the Princeton Ocean Model (POM) was used to do the numerical study in this paper. After a series of sensitive numerical experiments had been carried out, it is revealed that topography and reflective condition in the Taiwan Strait play important roles in the tide field, and the strong tide area at the middle of the west coast may be caused by cooperation between tide wave accumulation in shallow-water area and reflective condition.

Key words: Taiwan Strait; M_2 tidal; numerical simulation