

渤海潮波系统的数值模拟

周华民^{1,3}, 谷艺², 吕咸青¹

(1. 中国海洋大学 物理海洋实验室, 山东 青岛 266003; 2. 青岛大学 信息工程学院, 山东 青岛 266071; 3. 浙江海洋学院 海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316000)

摘要: 利用二维非线性潮波方程组, 讨论了渤黄海主要分潮(全日潮、半日潮及浅水分潮)数值模拟中的有关问题。数值模拟中同时考虑了 4 个主要分潮(M_2, S_2, K_1, O_1)和两个浅水分潮(M_4, MS_4)。分析表明, 在渤黄海潮波系统数值模拟中, 稳定后选取 14 d 的数值模拟结果进行调和分析能够取得最佳(最合理)的调和分析结果。计算出调和常数的模拟值与实测值之差的绝对平均值: M_2 分潮的振幅差为 4 cm, 迟角差为 3.3° , S_2 分潮的振幅差为 2 cm, 迟角差为 4.2° , K_1 分潮的振幅差为 1 cm, 迟角差为 3.7° , O_1 分潮的振幅差为 2 cm, 迟角差为 5.5° 。实验结果较好地体现了渤黄海潮波系统的特征。

关键词: 渤黄海; 潮汐; 数值模拟

中图分类号: P731.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2005)06-0048-05

最近 20 年中, 关于渤海、黄海、东海潮波数值模拟, 许多学者^[1-11]曾经做过这方面的工作。如果把半日潮和全日潮分开计算, 可以使数值模拟过程变得简单, 但忽略了它们之间的非线性效应, 这种效应在摩擦力项中特别重要。为了获得较合理的数值模拟结果, 国内外学者早就开始了同时模拟多个分潮的研究工作。如果同时模拟多个分潮, 必须在潮汐运动达到稳定后至少再模拟 15 天潮过程, 并进行较复杂的调和分析, 因此要花费较多的计算时间并要求大的存贮量。

由于计算机技术的飞速发展, 计算速度与存贮量大大地增加了, 使得同时进行多个分潮的数值模拟变得越来越容易实现, 这为研究不同分潮之间的相互作用提供了方便。

在同时多个分潮的潮波系统时, 稳定后采用多长时间的数值模拟结果进行调和分析, 才能得到最合理的结果, 目前仍未有人给出一个明确的答复。

作者就这个问题进行探讨。且利用得到的结论, 分析了渤黄海的潮波系统。由于在该海域具有不小的浅水区域, 非线性效应产生的浅水潮波具有一定的重要性, 但到目前为止, 浅水潮波的数值模拟的准确性尚需进一步提高。作者在数值模拟中除了考虑 4 个主要分潮(M_2, S_2, K_1, O_1)外, 还同时考虑了 2 个浅水分潮(M_4, MS_4)。所得到的结果与前人所得到的结果相比, 数值模拟结果与观测结果(高度计、验潮站)的误差总体上是最小的。

1 潮汐模型及数值模拟

所利用的模型、网格设置、有限差分方程、初始条件、岸界边界条件的设置均与文献^[12-14]相同, 在此不再赘述。

计算海域包括渤海和黄海北部($117.50^\circ \sim 126.67^\circ$ E, $34.00^\circ \sim 41.00^\circ$ N), 空间分辨率是 $10' \times 10'$, 计算海区如图 1 所示。

开边界设在北纬 34° 处(图 1), Coriolis 参数 f 取当地的值, 时间步长取 180 s。开边界的水位值 ζ 为给定的依赖于时间的函数。假设开边界点所处的位置为 (m_1, n_1) , 此处 $l = 1, 2, \dots, L$, 在第 j 时间步的开边界值可表示为:

$$\zeta_{m_1, n_1}^j = a_0 + \sum_{i=1}^6 [a_{i, l} \cos(\omega_i j \Delta t) + b_{i, l} \sin(\omega_i j \Delta t)], \quad (1)$$

这里是 $\{\omega_i: i = 1, \dots, 6\}$ 是 Fourier 模态的角频率, $\{a_{i, l}, b_{i, l}: i = 1, \dots, 6\}$ 是边界点 (m_1, n_1) 处的 Fourier 系数。

开边界条件通过伴随法^[14]反演得到; 底摩擦系数被设置成空间的函数, 也是通过伴随法^[14]反演得到。

收稿日期: 2003-06-25; 修回日期: 2004-10-12

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2001AA633030); 物理海洋教育部重点实验室资助项目(200307)

作者简介: 周华民(1981-), 男, 浙江常山人, 学士, 研究方向: 物理海洋学, E-mail: huamin1999@yahoo.com.cn

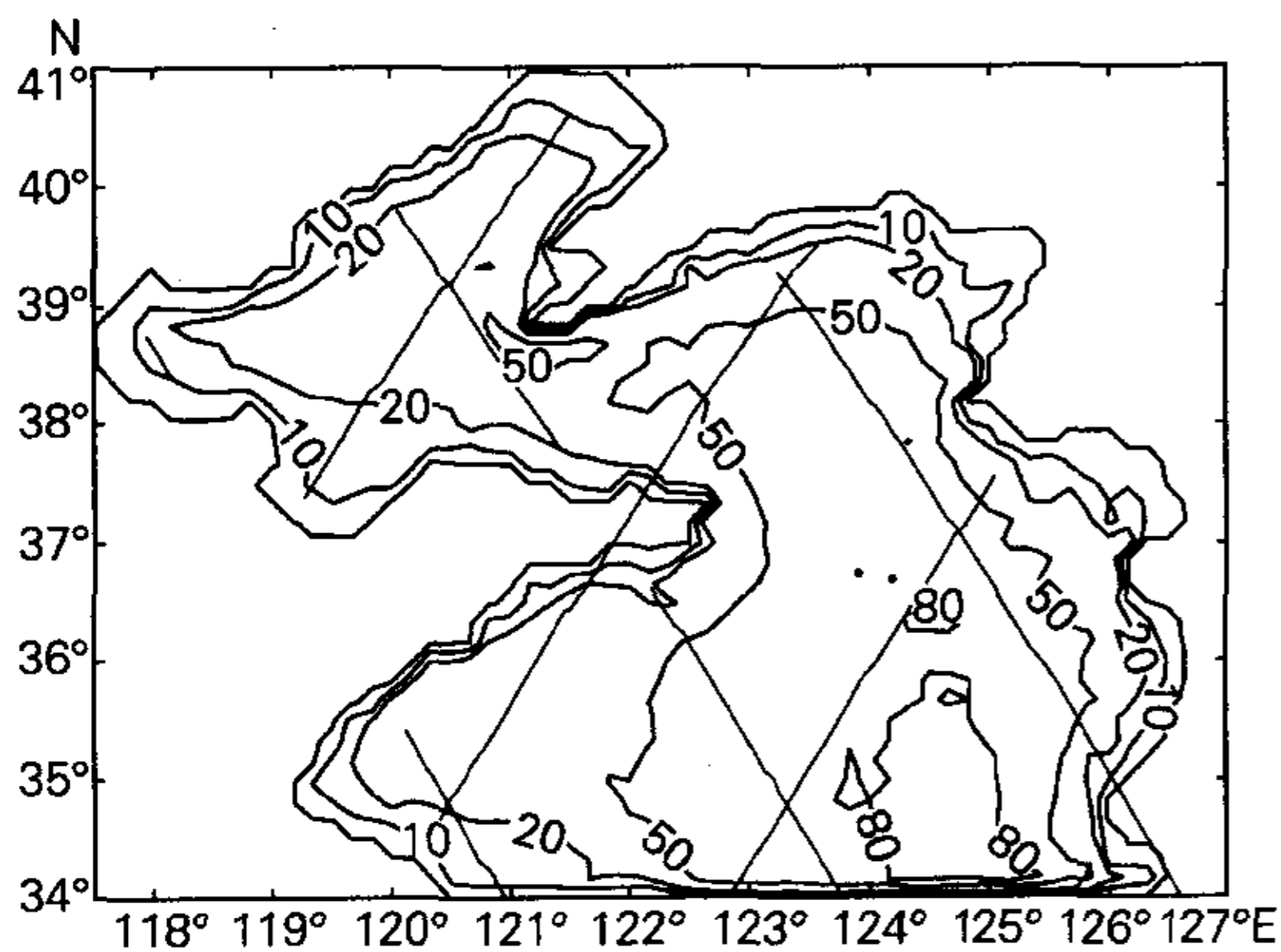


图1 渤黄海的水深、高度计轨迹(直线)、验潮站(圆点)示意
Fig.1 Bathymetric map of the Bohai Sea and the Yellow Sea (meters) showing the locations of the T/P tracks (straight lines), tidal stations (circle points).

2 模拟结果的调和与分析

作者的目的是要确切地知道在潮汐运动达到稳定后,用多长时间的数值模拟结果进行调和与分析能够取得最佳(最合理)的模拟结果。假设稳定后选 nd 的模拟结果进行调和与分析能够取得最佳(最合理)的潮汐调和常数。那么,采用稳定后第一个 nd 的模拟值和第二个 nd 的模拟值得到的潮汐调和常数应该一致。作者进行以下数值试验:

实验 1:在潮汐运动达到稳定后,对计算结果每 3 min 记录一次水位值。依次对稳定以后前 nd 和接下来 nd 的模拟结果进行调和与分析 (n 依次取 2, ..., 30)。分析结果表明:振幅的分析结果很容易达到所要

求的精度,而迟角分析结果的差异与资料长度的关系见图 2。从图 2 中看出,用 14 d 的模拟资料分析得到的结果是最佳(最合理)的。在此需要说明的是,为了进行对比,作者分别将模式开始启动前 30 d 或前 60 d 作为潮汐运动的成长期。因此在进行调和与分析时分别利用了第 31 天至第 90 天或第 61 天至第 120 天的水位值。调和与分析方法用的是最小二乘法,3 min 记录一次水位值与每 1 h 时记录一次水位值的调和与分析方法相同。

实验 2:在潮汐运动达到稳定后,对计算结果每 1 h 时记录一次水位值。依次对稳定以后的前 nd 和接下来的 nd 的模拟结果进行调和与分析 (n 依次取 2, ..., 60)。分析结果表明:振幅的分析结果很容易达到所要求的精度,而迟角分析结果的差异与资料长度的关系见图 3。从图 3 中也可以看出,用 14 d 的模拟资料进行调和与分析,可以得到最佳(最合理)的结果。同实验 1 一样,为了进行对比,作者分别将模式开始启动前 30 d 或前 60 d 作为潮汐运动的成长期。因此在进行调和与分析时分别利用了第 31 天至第 150 天或第 61 天至第 180 天的水位值。

对比实验:对 36 个开边界点的水位值(每 3 min 记录一次水位值),进行调和与分析,将调和与分析得到的调和常数与赋值的调和常数进行比较。发现用 2 d 的资料进行调和与分析,就能得到与给定的调和常数极其接近的调和与分析结果。采用每 1 h 记录水位值,用 2 d 的资料也可达到同样的精度。在此需要说明的是对开边界处的水位值进行调和与分析时,利用了与实验 1 和实验 2 相同的调和与分析方法以及程序。

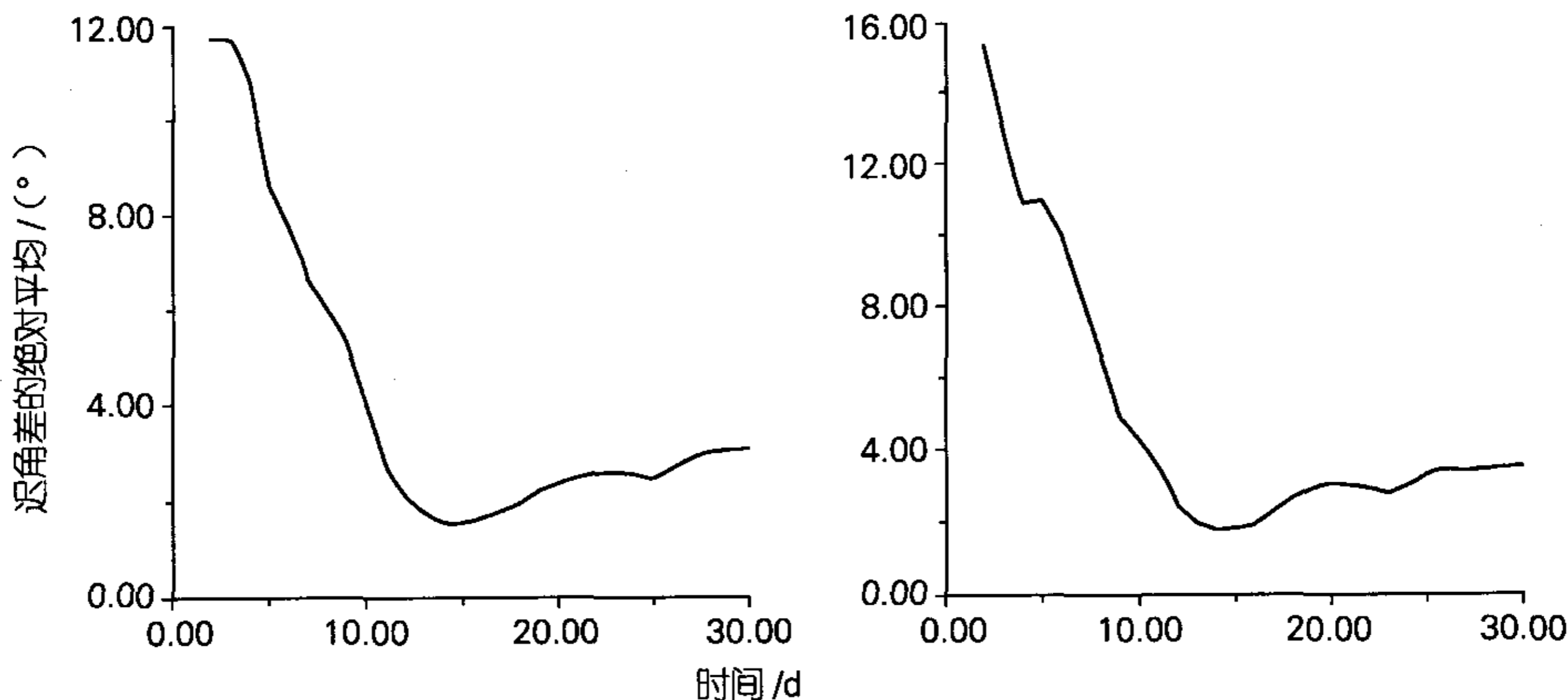


图2 每 3 min 记录一次水位值的对比分析

Fig.2 The contrast of sea level recorded every 3 minutes

横坐标表示调和与分析所用资料的长度(d),纵坐标代表迟角差的绝对平均(°),左图表示 30 d 作为稳定期的结果,右图表示 60 d 作为稳定期的结果

Abscissa axis stands for the length (d) of data which is used for harmonic analysis, ordinate axis stands for the averaged absolute differences of phase-lag(°). The left stands for the results of 30d act as stability time. The right stands for the results of 60d act as stability time

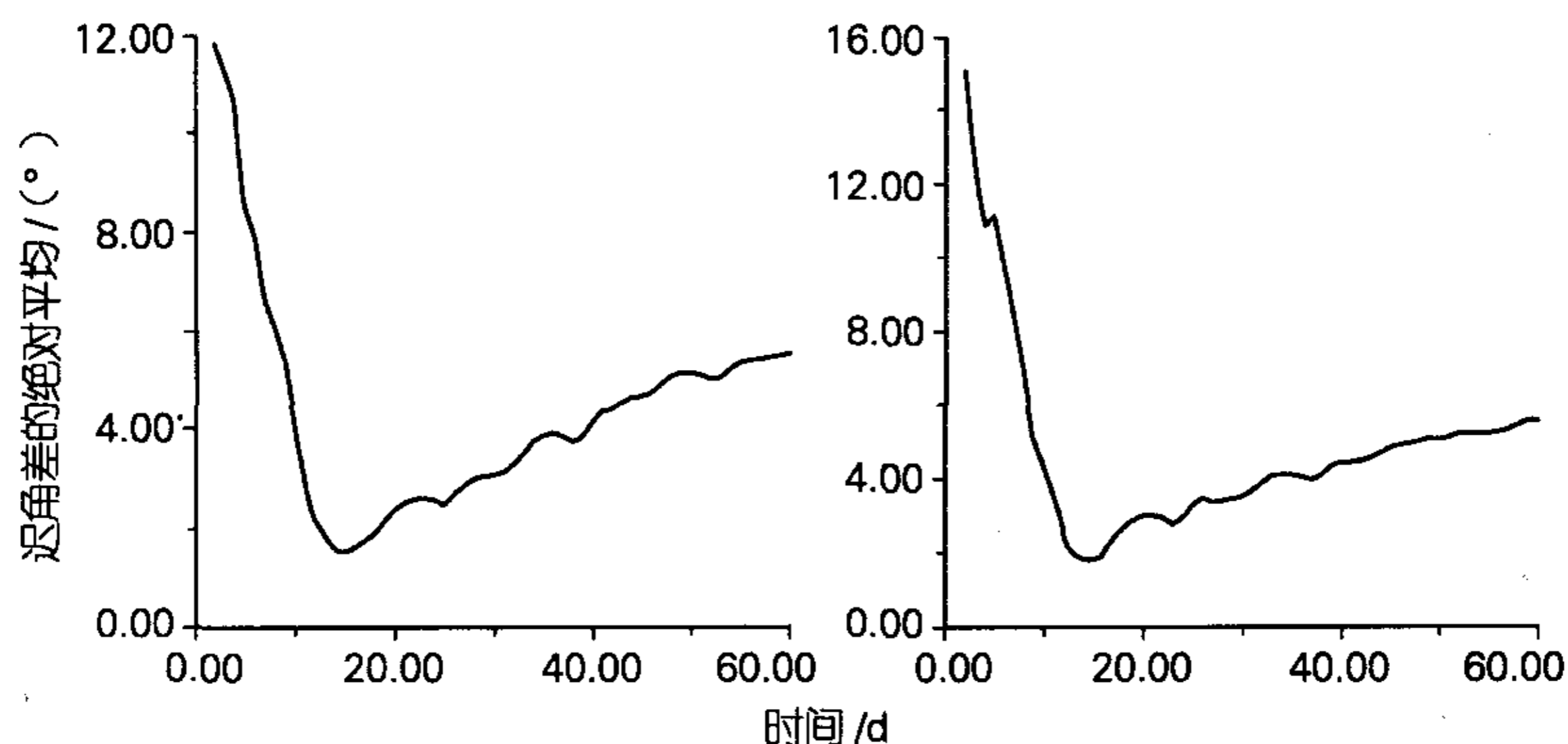


图3 每1h记录一次水位值的对比分析

Fig. 3 The contrast of sea level recorded every 1 hour

横坐标表示调和所用资料的长度(d), 纵坐标代表迟角差的绝对平均(°), 左图表示30d作为稳定期的结果, 右图表示60d作为稳定期的结果

Abscissa axis stands for the length (d) of data which is used for harmonic analysis, ordinate axis stands for the averaged absolute differences of phase-lag (°), The left stands for the results of 30d act as stability time. The right stands for the results of 60d act as stability time

利用14d的模拟结果, 将每3min记录一次模拟水位值进行调和与分析得到的调和常数与每1h记录模拟水位值进行调和与分析得到的调和常数进行比较, 得到的结果见表1。

表1 每3min记录一次模拟水位值与1h记录一次模拟水位值得到的调和常数之比较

Tab.1 Contrasts of the harmonic constants of sea level recorded every 3 minutes and 1 hour

分潮	振幅差的绝对平均(m)	迟角差的绝对平均(°)
M ₂	0.00	0.0
S ₂	0.00	0.0
K ₁	0.00	0.0
O ₁	0.00	0.0
M ₄	0.00	0.4
MS ₄	0.00	0.5

根据以上实验, 作者可以得到以下结论:

(1) 在渤海内, 采用稳定后14d的模拟水位资料进行调和与分析能够得到最好(合理)的调和与分析结果。

(2) 每1h记录一次水位值是每3min记录一次水位值数据量的5%, 但两者所得到的结果不论从定性方面(14d的模拟水位资料), 还是从定量方面(得到的潮汐调和常数)均为一致。

对开边界点, 用较短(2d)的资料就可以通过调和与分析得到准确的潮汐调和常数, 原因在于开边界处的水位是通过线性迭加得到的。开边界以内区域需要更长的时间序列(14d)来进行调和与分析, 才能得到合理的潮汐调和常数, 这是因为区域内部对应了一个

较为复杂的过程, 包括不同分潮之间的相互影响, 底摩擦的作用等。

作为对以上实验得到结论的补充, 作者在实验2中, 将30d作为稳定期, 做了以下探讨: 从第31天开始, 取出两段资料进行调和与分析, 并将得到的各分潮的潮汐调和常数进行的对比, 由于振幅的分析结果非常接近, 只列出迟角的调和与分析结果的差异(表2)。在表2中, E1代表第31天至第44天与第45天至第58天两段资料的调和与分析结果对比, E2代表第31天至第58天与第59天至第86天两段资料的调和与分析结果对比, E3代表第31天至第44天与第45天至第72天两段资料的调和与分析结果对比, E4代表第31天至第58天与第59天至第72天两段资料的调和与分析结果对比, E5代表第31天至第44天与第31天至第58天两段资料的调和与分析结果对比。

表2 迟角差的绝对平均(°)

Tab.2 The averaged absolute differences of phase-lag(°)

分潮	E1	E2	E3	E4	E5
M ₂	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0
S ₂	0.5	1.0	0.7	0.7	0.2
K ₂	0.6	1.2	0.9	0.9	0.3
O ₁	0.6	1.4	0.5	0.7	0.3
M ₄	1.6	3.2	2.4	2.5	0.8
MS ₄	5.9	10.9	8.5	8.5	3.0

从表2中可以看出, 相邻的两段资料(14d或者28d, 对应E1~E4)的结果对比, 14d与14d的一致性是最好的。这说明对多个分潮的数值模拟结果而言,

稳定后利用 14 d 的数值模拟结果进行调和得到的结果是最合理的。E5 则说明在两段资料有重叠的情况下, 利用 14 d 和 28 d 的数值模拟结果分别进行调和, 得到的结果基本一致。

本文中迟角差的绝对平均是将迟角差的绝对值进行了累加后再进行平均所得到的结果。实际上当某些点对应的振幅值非常小时, 这些点的迟角值是没有意义的, 统计平均值时可不考虑这些点。表 2 中 E5 迟角差的绝对平均是其中最小的, 说明不论是利用第 31 天至第 44 天(14 d)的模拟结果还是利用第 31 天至第 58 天(28 d)的模拟结果, 其调和结果基本上是一致的。

3 模拟结果的检验

根据以上结论, 在渤海潮波数值模拟稳定后(30 d) 每 1 h 记录一次模拟水位值, 用 14 d 的水位资料进行调和。将模拟结果(调和常数)与实测资料(高度计, 验潮站)的潮汐调和常数进行了比较, 符合得很好。表 3 列出了 4 个主要分潮(M_2, S_2, K_1, O_1)调和常数的模拟值和观测值(高度计、验潮站)的比较。作者所得到的结果与前人所得到的结果相比, 数值模拟结果与观测结果(高度计、验潮站)的误差总体上是最小的。

表 3 观测结果与模拟结果的比较

Tab. 3 Contrasts of the results of simulation and observation

分潮	振幅差的绝对平均(m)	迟角差的绝对平均(°)
M_2	0.04	3.2
S_2	0.02	4.2
K_1	0.01	3.7
O_1	0.02	5.5

4 结论

本研究取得的结果与以往的研究成果相比大致相同, 但本文作者所做的工作与之有很多不同之处, 主要表现在以下几个方面:

(1) 作者的数值模拟同时考虑了 4 个主要分潮(M_2, S_2, K_1, O_1)和 2 个浅水分潮(M_4, MS_4), 首次提出利用稳定后 14 d 的模拟水位资料进行调和才能得到各个分潮最合理的潮汐调和常数, 这一点对于数值模拟结果的准确分析是相当重要的。当已经得到水位的数值模拟结果时, 可以在数值模拟稳定后取 14 d 的模拟水位资料进行调和, 也可以取 28 d 的模拟水位资料进行调和, 但考虑到不同的 28 d 得到的潮汐调和常数差异较大, 而不同的 14 d 得到的潮汐调和

常数的一致性较好, 所以作者认为利用稳定后 14 d 的模拟水位资料进行调和能得到各个分潮最合理的潮汐调和常数。

(2) 将底摩擦系数设置成空间的函数, 并且通过伴随法^[4]反演得到。由于海底并不是一个平面或斜面, 因此作者的底摩擦系数的设置更为合理。

(3) 实验所得到的 4 个主要分潮(M_2, S_2, K_1, O_1)和 2 个浅水分潮(M_4, MS_4)的同潮图与前人结果相比大体一致。而作者所得到的结果与前人所得到的结果相比, 数值模拟得到的潮汐调和常数与观测数据(高度计、验潮站)得到的潮汐调和常数的误差总体上是最小的。因此作者的结果能够更准确地体现渤海全日潮、半日潮以及浅水分潮的基本特征。

参考文献:

- [1] Baoren Z, Guohong F, Deming C. Numerical modeling on the tides and tidal currents in the Eastern China Seas[J]. *Yellow Sea Research*, 1993, 5, 41-61.
- [2] Guohong F. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1986, 4(1), 1-16.
- [3] Kang SK. Fine grid tidal modeling of the Yellow and East Seas[J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18: 739-772.
- [4] Lefevre F, Le Provost C, Lyard F H. How can we improve a global ocean tide model at a regional scale? A test on the Yellow Sea and East China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(C4): 8 707-8 725.
- [5] Mazzega P, Bergé M. Ocean tides in the Asian semienclosed seas from TOPEX/POSEIDON[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99(C12), 24 867-24 881.
- [7] Teague W J. Current and tide observations in the southern Yellow Sea[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(C12), 27 783-27 793.
- [8] Teague W J. Evaluation of tides from TOPEX/Poseidon in the Bohai and Yellow Seas[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17, 679-687.
- [9] 方国洪, 杨景飞. 渤海潮运动的一个二维数值模型[J]. *海洋与湖沼*, 1985, 16(5): 337-346.
- [10] 赵保仁, 方国洪, 曹德明. 渤、黄、东海潮汐潮流的数值模拟[J]. *海洋学报*, 1994, 1(5): 1-10.
- [11] 叶安乐, 梅丽明. 渤海东海潮波数值模拟, *海洋与湖沼*, 1995, 26(1): 63-69.
- [12] 王凯, 方国洪, 冯士筵. 渤海、黄海、东海 M_2 潮汐潮流的三维数值模拟[J]. *海洋学报*, 1999, 21(4): 1-13.
- [13] 吕咸青, 方国洪. 渤海 M_2 分潮的伴随模式数值实验[J]. *海洋学报*, 2002, 24(1): 17-24.
- [14] 吕咸青, 方国洪. 渤海开边界潮汐的伴随法反演[J].

海洋与湖沼, 2002, 33(2): 113 - 120.

的 1 种反演方法[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 333
(2), 165 - 172.

[15] 吕咸青, 吴自库, 殷忠斌, 等. 渤、黄、东海潮汐开边界

Numerical modeling of tidal waves in Bohai Sea and Huanghai Sea

ZHOU Hua - min^{1,3}, GU Yi², LU Xian - qing

(1. Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. College of Information and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 3. College of Marine Science and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China)

Received: Jun., 25, 2003

Key words: Bohai sea the Huanghai sea, tides, numerical simulation.

Abstract: By applying two dimensional tidal equations, problems in tidal simulation of Bohai Sea and Huanghai Sea have been solved. The simulation process contains four major constituents (M_2 , S_2 , K_1 , O_1) and two shallow water constituents (M_4 , MS_4). The analysis shows that in the tidal simulation, the harmonic analysis of 14 day results upon stability yielded the best (the most reasonable) harmonic results. The averaged absolute differences between the simulated and observed are as follows. For M_2 tide, the averaged absolute difference of the amplitude is 4 cm and the averaged absolute difference of the phase-lag is 3.3° . For S_2 tide, they are 2 cm and 4.2° . K_1 tide gives 1 cm and 3.7° . And O_1 tide gives 2 cm and 5.5° . The results in the numerical simulation coincided with the tides observed in the areas.

(本文编辑:张培新)

(上接第 34 页)

Effects of Pb^{2+} on the growth of marine algae

ZHANG Ying - ying, WANG Xiu - lin, YANG Ru - jun, ZHAN Yu - jie SHI Xiao - yong
(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Received: Dec., 2003, 15

Key words: lead ion; algae; growth model

Abstract: In designed batch culture experiments, effects of Pb^{2+} on the growth of 8 species of marine algae were tested. The experimental results showed that higher doses of Pb^{2+} inhibited the growth of *Heterosigma akashiwo* Hada, *Chaetoceros curcisetus*, *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve, *Pheodactylum tricorruptum* Blhlin, *Platymonas subcordiformis*, *Platymonas helgolanidica* Kylin var *tsingtaoensis*, *Prorocentrum micans*, *Gymnodinium* sp. But, and lower doses promoted the growth of marine algae, excluding *Prorocentrummicans*, *Gymnodinium* sp. A growth mode. In consideration of Pb^{2+} effect on the growth of marine algae, we incorporated Logistic growth model with Lorentz equation and Gaussamp equation. Lorentz equation can describe the effect of Pb^{2+} on growth rate constant, while Gaussamp equation can describe the effect of Pb^{2+} on final biomass of algae. It was demonstrated an agreed results between from growth model and the experimental data.

(本文编辑:张培新)