

中国东部边缘海潮波系统形成机制 的模拟研究*

贾建军 闫国年[†] 宋志尧^{††} 林 琿^{†††} 钱亚东[†] 陈钟明[†]

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

[†](南京师范大学地理科学学院 南京 210024)

^{††}(河海大学港口航道及海岸工程学院 南京 210098)

^{†††}(香港中文大学地理系 香港)

摘要 以三维高精度潮波数值模拟为基础,运用系统分析方法和地理信息系统技术,对影响中国东部边缘海潮波系统的因素,包括入射潮波、科氏力、海区地形、岸线形状及底摩擦等,进行了模拟试验。结果表明,它们对潮波系统的模式有不同程度的作用,其中科氏力的有无、岸线形态的变化和 underwater 地形的巨变化对潮波系统有重要影响。研究认为,中国东部边缘海潮波系统是一个海-潮相互作用的整体;在一定的人射潮波条件下,该区的海区条件、特别是岸线形态对潮波系统的模式起主要作用。

关键词 边缘海 潮波系统机制 数值模拟 中国东部

学科分类号 P731

在中国东部边缘海海区(包括渤海、黄海和东海),潮波和潮流是海洋动力系统的主体(方国洪,1979;林琿等,1997),潮波系统的运动特征与形成机制一直是这一海区物理海洋学的研究焦点之一。有关中国东部边缘海潮波系统的研究可追溯至60多年前Ogura(1933)的工作,随着计算机技术的发展和计算方法的改进,取得了不少成果。但是,以往的研究大多是针对个别海区、个别影响因素进行的(Ogura,1933;陈宗镛,1965;方国洪等,1966;方国洪,1979、1980、1981;丁文兰,1984、1985;夏综万等,1984、1985、1987),少数的整体性研究(沈育疆,1980;沈育疆等,1985;Fang,1986;赵保仁等,1994)所采用的计算网格较为粗疏,设计的模拟试验较少,缺乏整个海区高分辨率的三维模拟。本文的目的在于充分运用地理信息系统(GIS)的数据采集与管理、空间分析与制图等功能,采用高分辨率三维潮波数值模型,对中国东部边缘海的潮波系统进行研究,探讨入射潮波的振幅与迟角、科氏力、海区地形、岸线形状及底摩擦等因素的影响,以期从整体上更精确地把握这一海区潮波系统的形成机制,理解边缘海中的海-潮相互作用,为深入地研究和探讨海洋资源与环境的基本特征、分布规律、形成演化过程,以及预测未来的变化

* 国家教委优秀青年教师基金资助项目;香港政府大学基金资助项目, CUHK318/95H号。贾建军,男,出生于1973年9月,博士生, E-mail: jiajj@163.net

收稿日期:1998-02-23,收修改稿日期:1998-08-30

趋势服务。

1 研究方法

1.1 潮波系统分析与潮波模拟

本研究所采用的中国东部边缘海潮波系统的数值模型具有相当的精度(林琚等, 1997), 可以认为该模型较真实地代表了实际情况; 对每一种可能的影响因素(如入射潮波、科氏力、海区条件等)改变其输入条件而保持其它条件不变, 观察潮波系统的变化, 可以认为这种变化即是输入条件改变的结果。在此基础上, 进行分析与综合。

1.2 GIS的运用

1.2.1 栅格数据获取与可变计算格网 运用 GIS 技术将矢量数据转换为数值计算的栅格数据非常便利。以水深数据的栅格化为例, 将海图进行跟踪数字化生成矢量图后, 根据计算精度的要求设定栅格格网的大小, 利用 GIS 自动将矢量图转换为栅格数据; 模拟试验时, 如果需要对比不同分辨率和格网格式的计算结果, 或对重点研究区进行格网加密, 或在岸线和水深规则化处理后重新对格网赋值, 都非常迅捷而方便。与以往手工方式进行数据的栅格化相比, 运用 GIS 技术节省了大量的人力和时间, 提高了效率, 也为在一定的时间内进行更多的模拟试验提供了可能。在本研究中, 采用了不同的分辨率(从 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 、 $1' \times 1'$ 、 $3' \times 3'$ 、 $6' \times 6'$, 直至 $15' \times 15'$)、多种格网格式(可以产生矩形格网, 也可以是有限元格网; 可获得球面坐标格网, 也可获得平面直角坐标格网)及多种输入条件的模拟试验, 主要得益于 GIS 技术。

1.2.2 成果的可视化 利用 GIS 分析与地图绘制的优势, 将数值计算结果转绘为等值线图或矢量图, 叠合自然海岸线, 以二维平面图形和三维动画显示, 显示的比例尺、范围均可选择, 可视效果极佳。

2 研究结果

由于中国东部边缘海的潮波以半日型占绝对优势(丁文兰, 1984、1985; 赵保仁等, 1994), 因此, 本研究重点分析半日分潮潮波系统的形成机制, 并以 M_2 分潮和 K_1 分潮为例阐述研究结果。

2.1 入射潮波的影响

中国东部边缘海潮波系统基本是太平洋潮波传入后形成的自由潮波, 它的形成首先取决于入射潮波的性质。首先, M_2 半日分潮和 K_1 全日分潮两个潮波有系统上的区别, 表现在无潮点的位置和个数、潮差、潮能的大小和传播方向等方面(沈育疆, 1980; 丁文兰, 1984、1985; 夏综万等, 1984、1985; 赵保仁等, 1994; 林琚等, 1997), 这些再次为本研究所证实。研究还发现, 即使同为半日分潮(如 M_2 分潮与 S_2 分潮), 或同为全日分潮(如 K_1 分潮与 O_1 分潮), 它们的潮波系统也有一定的差异。

由于潮汐存在着各种周期的不等现象, 这可能对无潮点的位置有一定影响, 因此笔者进行了一些针对性试验: 在开边界处, 将 K_1 分潮和 M_2 分潮的入射振幅成比例地赋为正常值的 0.25 倍至 1.5 倍, 或将其入射迟角分别提前和延迟一小时, 重新进行计算, 所得结果与正常的潮波对比(见图 1), 两者的潮波系统型式基本一致, 尤其是无潮点的位置几乎未变。可见, 在入射潮波的性质中, 波长是影响潮波系统最主要因素, 而振幅和迟角则是相对很弱的影响量。夏综万等(1987)的模拟试验结果与此类似。

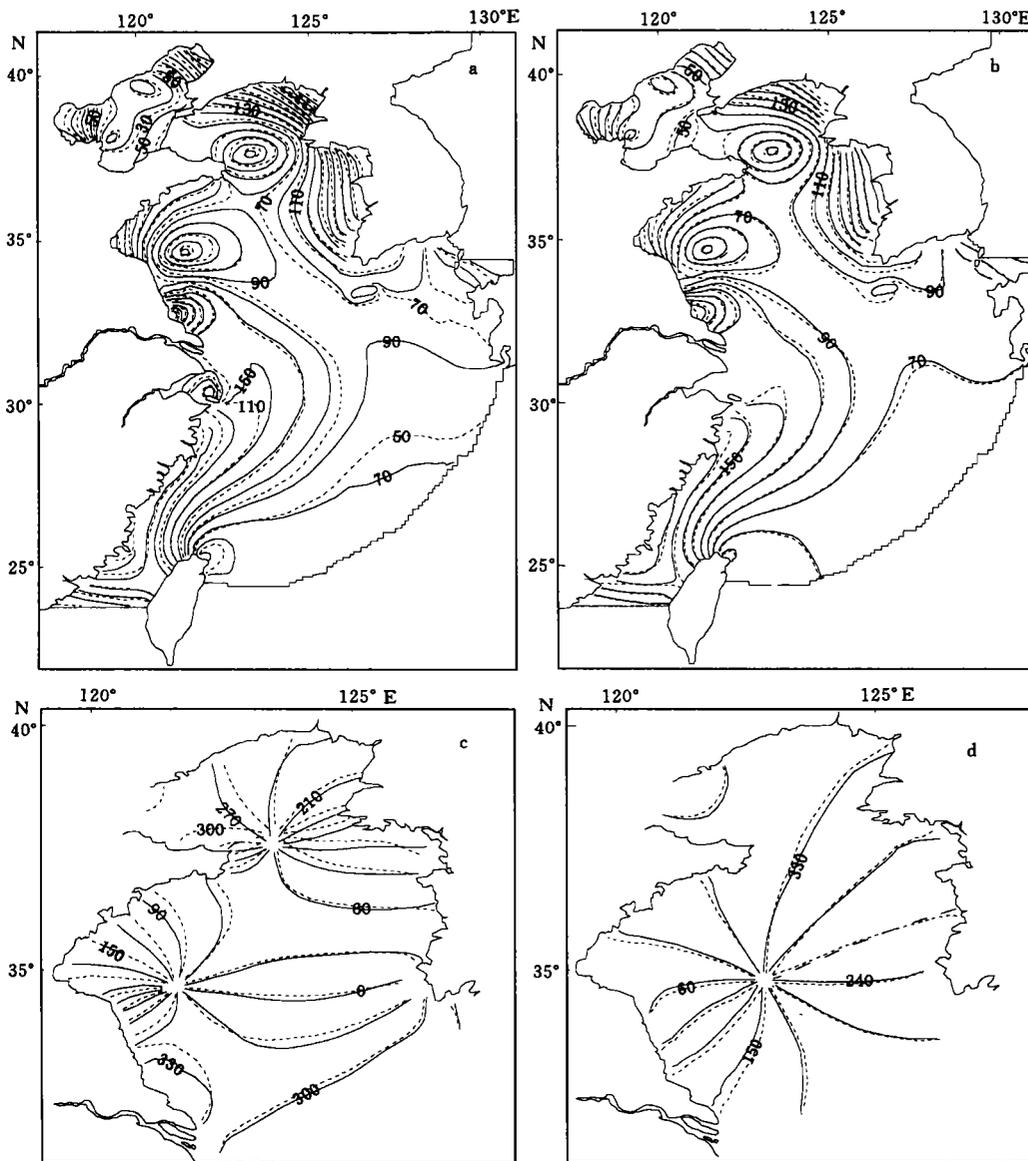


图1 入射潮波的振幅和迟角的变化对中国东部边缘海潮波系统的影响

Fig.1 Transformation of the tidal wave system in the marginal seas adjacent to eastern China in response to tide amplitude and phase changes on the outer boundary

- a. M_2 分潮等振幅线变化·····振幅 $\times 0.8$, ———振幅 $\times 1.2$;
 b. M_2 分潮振幅线变化·····正常潮波, ———迟角增加一小时;
 c. K_1 分潮等振幅线变化·····正常潮波, ———振幅 $\times 1.5$;
 d. K_1 分潮同潮时线变化·····正常潮波, ———振幅 $\times 1.5$;

2.2 科氏力的作用

将去除科氏力作用后的中国东部边缘海潮波系统与正常潮波进行对比(见图2),可以发现,没有科氏力作用的情况下,中国东部边缘海潮波系统面目全非,表现在:(1)除受

局部地形影响外,研究区潮波的同潮时线基本沿潮波入射方向平行向前传播,黄、渤海海区的旋转潮波系统完全不复存在,没有无潮点;(2)整个研究区潮波的同潮时线普遍滞后,滞后时间向北加大;(3)沿岸潮差变化不一,东海潮波等振幅线型式变化不大,沿岸潮差普遍增加 20cm 左右;黄渤海等振幅线型式有系统的差异,苏北及山东半岛南岸潮差变化不大,南黄海东岸、北黄海及渤海沿岸潮差减少了一半以上;(4)仅在原来南黄海无潮点的位置上出现了一个鞍形低振幅区,开口向东北,反映了山东半岛对潮波的反射作用和海底地形的影响。

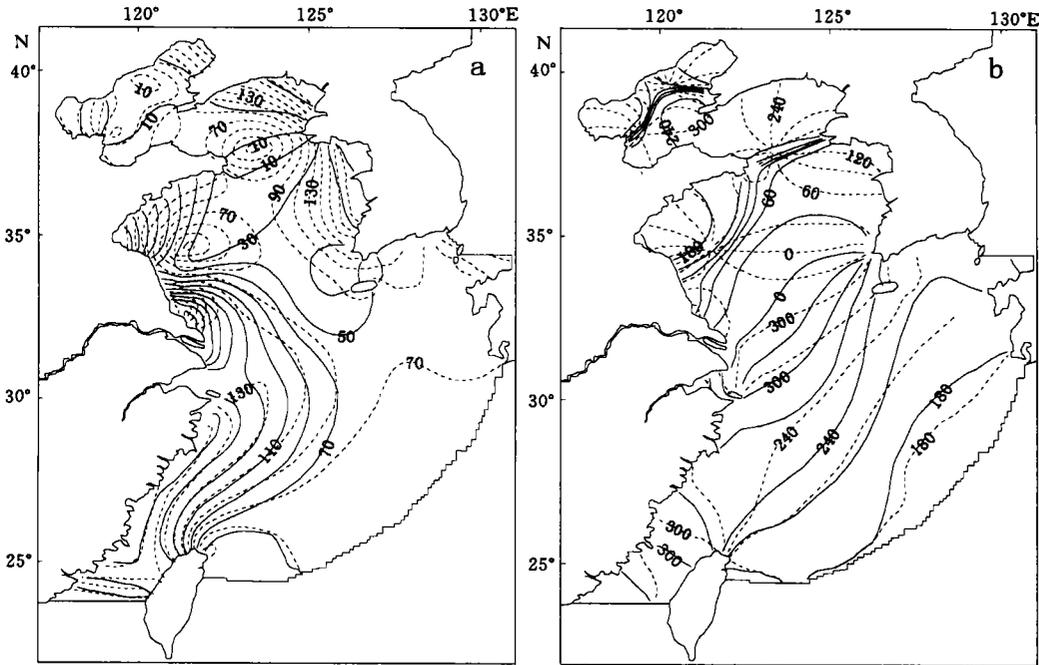


图 2 科氏力对中国东部边缘海潮波系统的影响(以 M_2 分潮同潮图为例)

Fig.2 Transformation of the tidal wave system in the marginal seas adjacent to eastern China in response to the Coriolis acceleration changes (illustrated with the co-amplitude chart of the M_2 constituent)

a. 同潮时线对比; b. 等振幅线对比

.....正常潮波; ——去除科氏力作用的潮波

Taylor(1921) 曾经指出,半封闭海湾出现旋转潮波的必要条件是 Kelvin 波发生全反射。根据计算,黄渤海海区符合半封闭海湾发生 Kelvin 波全反射的条件(陈宗镛, 1980; 夏综万等, 1987)。这一模拟结果说明,科氏力是形成黄渤海旋转潮波系统(或无潮点)的决定性因素,在黄渤海区,无潮点的形成有三个必要条件:(1) Taylor 判据;(2) 地形条件,为半封闭海湾地形(如渤海),或存在与潮波入射方向近于直交的海岸边界(如南黄海的山东半岛南岸和北黄海的辽东半岛南岸);(3) 动力条件,科氏力的作用形成与入射潮波垂直的附加波动,二者叠加形成旋转潮波系统(陈宗镛, 1980)。

2.3 海区条件的作用

2.3.1 水下地形及深度分布的影响

本研究进行了三个实验来观察海底地形和水深分

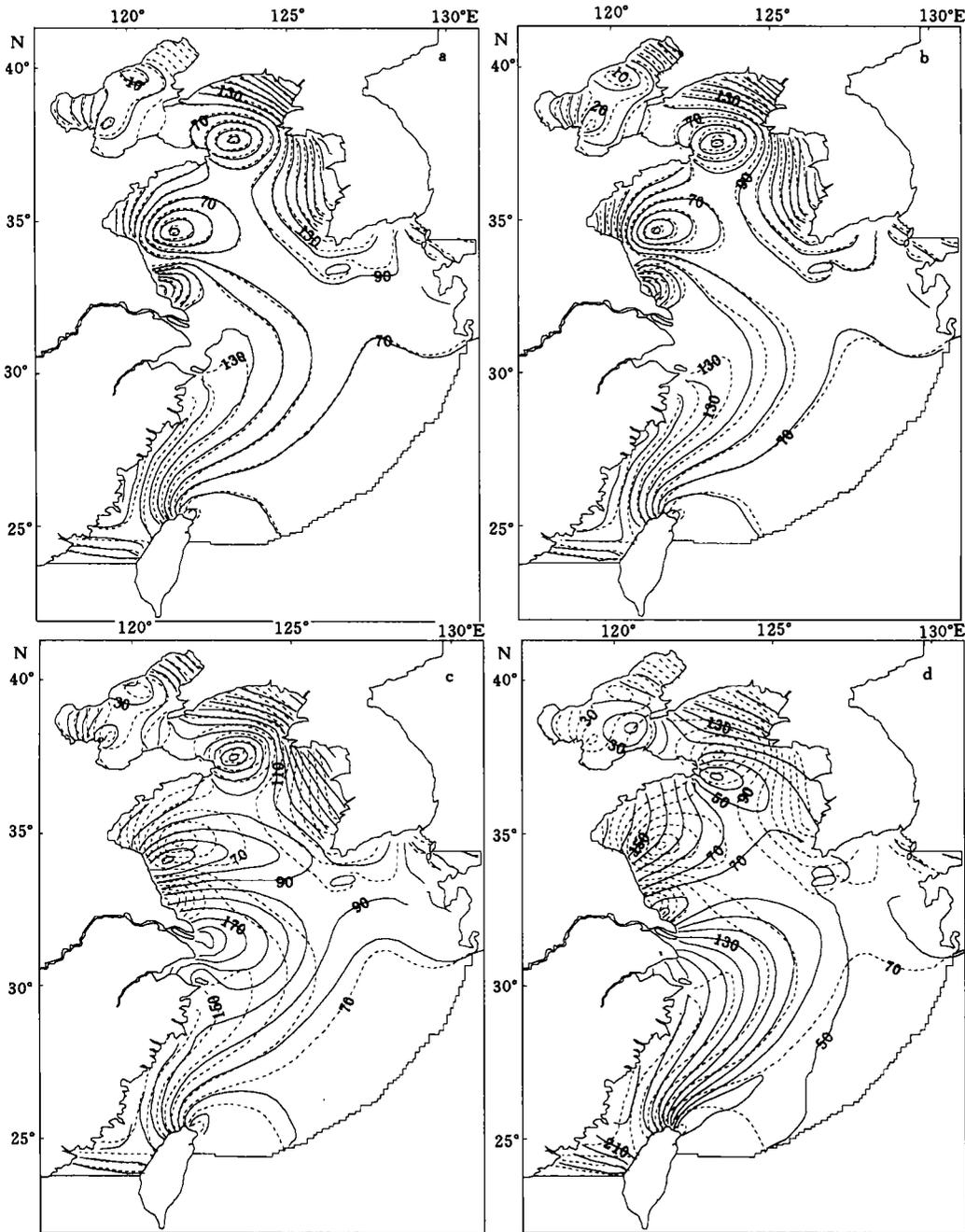


图 3 海底地形变化对中国东部边缘海潮波系统的影响(以 M_2 分潮等振幅线图为例)

Fig.3 Transformation of the tidal wave system in the marginal seas adjacent to eastern China in response to seabed topography changes (illustrated with the co-amplitude chart of the M_2 constituent)

a. 海底地形阶梯化; b. 夷平海底沙脊群; c. 黄海海区赋为 -44m 水深; d. 全海区赋为 -65m 水深
正常海底地形时; ——海底地形变化后

布对研究区内潮波系统的影响:

I. 将研究海区的水下地形图每隔 10m 等深取其平均深度,即将原海图的 0m—10m 水深区统一赋为 -4.487m, -10m—20m 水深区赋为 -15.677m,以此类推,使研究区海底地形阶梯化,结果见图 3a;

II. 将苏北辐射沙洲全部夷平,结果见图 3b;

III. 将黄海海区统一赋为黄海平均水深 -44m,结果见图 3c;

IV. 将整个研究区水深赋为其平均值 -65m,结果见图 3d。

从图 3 可以看出,试验 I 和试验 II 产生的模拟潮波基本保持原来的潮波型式,变化很小,而试验 III 和试验 IV 产生的模拟潮波则与原来的潮波大相径庭。图 3c 显示,将整个黄海区水深赋为 -44m 后,黄海潮波系统产生向岸(向西)、向南的偏移,原来位于成山角东部海区的无潮点、南黄海西部的无潮点和以苏北弥港为中心的潮波辐聚区偏移量分别达到了经纬度各 0.2° 、 0.5° 和 1.0° ;同时,渤海海区的两个无潮点移至岸边而趋向退化。图 3d 显示,将整个研究区水深赋为 -65m 后,潮波型式的变化较试验 III 更甚,原来位于成山角东部海区的无潮点向南偏移了一个纬度,更靠近岸线,这一旋转潮波系统的长轴轴向顺时针旋转了近 45° ;南黄海西部的旋转潮波系统基本萎缩,退化的无潮点移至小洋口附近;以舟山群岛为中心形成了一个巨大的潮波辐聚区;同时,原先渤海区的两个无潮点不复存在,在渤海海峡西口形成一个新的、较大规模的旋转潮波系统。

关于海底地形的模拟研究表明,在中国东部边缘海区,海底地形的微变对潮波系统基本上没有影响,这与夏综万等(1987)的结论一致,而海底地形的巨变将使整个潮波系统发生显著变化。可以推论,南黄海辐射沙洲等潮流沙脊的地貌形态是受辐聚辐散的潮流系统作用而成的,而不是相反。试验 III 和 IV 的效果可以从两方面来理解:如果把中国东部边缘海区近似地看作一个半封闭的矩形海湾,那么将黄海或整个中国东部边缘海的水深赋为其平均水深,其主要影响表现在加大了湾顶和近岸的海水深度,从纵向来看,等效于自湾口向湾底近于线性地加大水深,即减弱了摩擦的作用(陈宗镛,1965,1980;方国洪等,1966),从海湾横向来看,等效于将海湾的海底地形自东向西倾斜(叶安乐等,1987)。因此,试验 III 和 IV 所造成的无潮点向西向南的偏移及其偏移程度的差异就不难理解了。

2.3.2 海岸边界轮廓的影响 研究潮波在海湾(或浅海)中的运动都遵循了 Taylor(1921)所作的一个假设,即岸线取为规则矩形或其变形(如“L”形),这等于默认海湾的岸线形状对于潮波运动的影响是一个可忽略的相对小量,至少是忽视了海岸轮廓的作用。事实上,这种隐含的假定可能存在很大的问题。为了了解岸线对潮波系统的影响,对黄海岸线作了规则化处理,封闭了渤海湾(见图 4 中框线所围区域),进行岸线和其他海区条件的各种组合变化试验。从图 4 可以看出,黄海岸线的抽象并未使旋转潮波系统消失,但南黄海西部的无潮点向南偏移,而北黄海的无潮点则向西偏移。与原始岸线相比,抽象后的黄海岸线相当于将山东半岛南岸向南移,而朝鲜西海岸则向西,这与试验产生的无潮点偏移方向相当吻合。沈育疆等也做过类似的试验(沈育疆等,1993),但认为岸线的变化对黄海潮波系统影响不大,二者的差异在于对潮波系统的认识存在分歧,同时试验时的边界条件设置也不一致(沈育疆等,1993;林晖等,1997)。

2.3.3 摩擦的作用 摩擦作用对潮波运动的影响主要表现在潮能的消耗上(方国洪,

1979、1980、1981; 陈宗镛, 1980)。对于黄、渤海这样的旋转潮波系统来说, 摩擦作用将使人射潮波波长变短, 使反射潮波减弱, 从而使无潮点位置偏向左岸。本研究对摩擦的影响也进行了试验, 将中国东部边缘海区摩擦系数全部置为最大可能值(由 0.00011 增至 0.00044), 结果见图 5: (1) 整个研究区 M_2 潮波系统基本型式未变, 东海前进潮波和黄渤海旋转潮波系统依然存在, 但潮波振幅有明显减弱, 沿岸平均减弱 20—50cm; (2) 黄海 M_2 分潮两个无潮点向岸偏移较为明显, 但仍保留了旋转潮波图式; (3) 渤海 M_2 潮波的无潮点向陆偏移而近于退化。

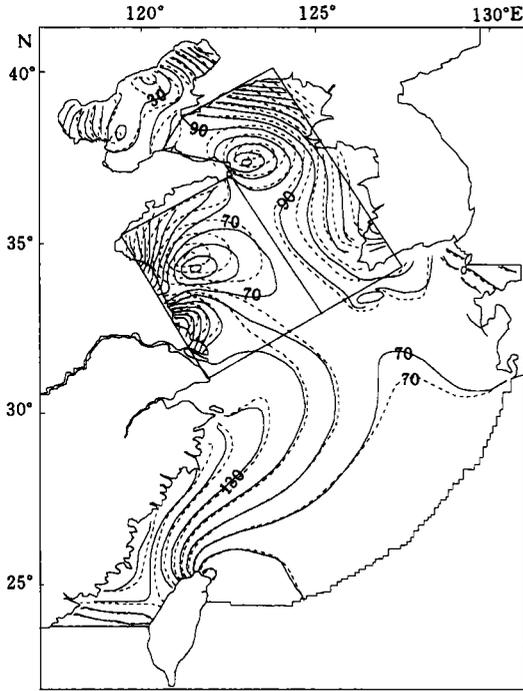


图 4 海岸轮廓的变化对中国东部边缘海潮波系统的影响(以 M_2 分潮为例)

Fig.4 Transformation of the tidal wave system in the marginal seas adjacent to eastern China in response to coastline configuration changes (illustrated with the co-amplitude chart of the M_2 constituent)

.....正常岸线时等振幅线; ——规则岸线后等振幅线

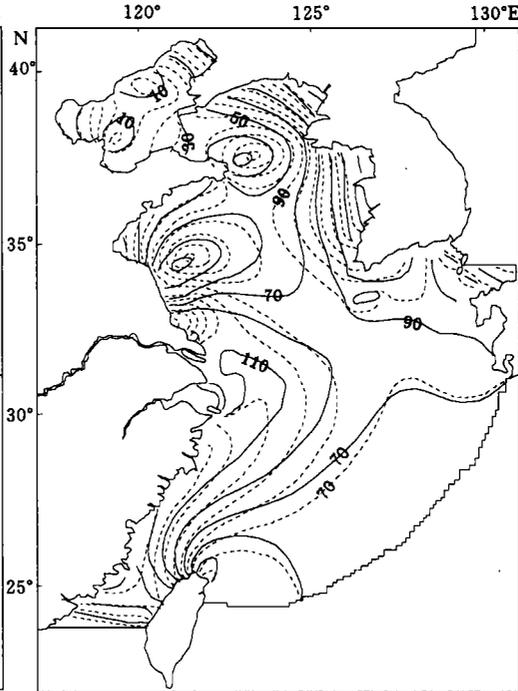


图 5 摩擦系数的变化对中国东部边缘海潮波系统的影响(以 M_2 分潮为例)

Fig.5 Transformation of the tidal wave system in the marginal seas adjacent to eastern China in response to frictional coefficient changes (illustrated with the co-amplitude chart of the M_2 constituent)

.....摩擦系数为正常值; ——摩擦系数为最大值

3 结论

3.1 中国东部边缘海潮波系统是一个统一的整体, 它是由太平洋潮波传入东中海区后, 在特定海区条件下形成的潮-海共同作用的产物。整个中国东部边缘海以半日型潮波占绝对优势, 潮波型式以东海前进潮波、黄渤海旋转潮波及二者交汇点的一个辐聚区为其主要特征。

3.2 模拟结果显示, 在入射潮波的作用中, 波长是影响中国东部边缘海潮波系统的主要因素, 而振幅和迟角的变化影响微弱。科氏力是形成旋转潮波系统的决定性因素之一。在

海区条件中,只有当海底地形和摩擦产生巨变时,潮波系统才会发生显著改变,地形、水深分布及摩擦系数的微变对中国东部边缘海潮波系统影响很小,但岸线的改变将产生显著影响。由于大洋入射潮波、海底地形、水深分布、摩擦系数及科氏力相对稳定,在现实中不可能发生试验中所设的巨大变化,因此,中国东部边缘海的海区条件,特别是海区的海岸轮廓,就成为潮波系统的主要形成因素。摩擦作用、海底地形及水深分布这三者之间是相互影响的,而岸线轮廓则是一个相对独立的因素,潮波的反射基本是由岸线形态决定的。

3.3 与前人的研究成果相比,本研究证实了已有的一些观点,也发现了与前人结论不一致之处,如入射分潮潮波振幅和迟角的变化对潮波系统影响并不大,而岸线形状的改变却会产生显著的作用。究其原因,可能是对潮波系统概念的认识及试验时边界条件的处理不一致造成的,但前人的研究提供了有益的思路和方法。

3.4 根据本研究的结果,如果恢复了末次盛冰期以来这一海区的海面升降与岸线变迁历史,就有可能重演这一时期内潮波系统的演化过程。这项工作对于理解陆海间相互作用及大型潮流沙体的形成演变是大有裨益的。

参 考 文 献

- 丁文兰, 1984. 东海潮汐和潮流特征的研究. 海洋科学集刊, 21: 135—148
- 丁文兰, 1985. 渤海和黄海潮汐潮流分布的基本特征. 海洋科学集刊, 25: 27—39
- 方国洪, 王仁树, 1966. 海湾的潮汐与潮流. 海洋与湖沼, 8(1): 60—77
- 方国洪, 1979. 黄海潮能的消耗. 海洋与湖沼, 10(3): 200—213
- 方国洪, 1980. 潮汐摩擦的非线性效应(I). 海洋与湖沼, 11(2): 98—108
- 方国洪, 1981. 潮汐摩擦的非线性效应(II). 海洋与湖沼, 12(3): 195—209
- 叶安乐, 陈宗镛, 1987. 半封闭矩形海域中海底地形对旋转潮波系统的影响. 山东海洋学院学报, 17(2): 1—7
- 沈育疆, 1980. 渤、黄、东海潮汐数值计算. 山东海洋学院学报, 10(3): 26—35
- 沈育疆, 叶安乐. 1985. 东中国海三维半日潮流的数值计算. 海洋湖沼通报, (1): 1—11
- 沈育疆, 黄岱岩, 钱成春, 1993. 试释黄海半日潮波系统形成机制. 海洋学报, 15(6): 16—24
- 陈宗镛, 1965. 长方形浅水海湾的一种潮波模式. 海洋与湖沼, 7(2): 85—92
- 陈宗镛, 1980. 潮汐学. 北京: 科学出版社, 1980: 63—90
- 林晖, 闫国年, 宋志尧等, 1997. 地理信息系统支持下中国东部边缘海潮波系统的模拟研究. 地理学报, 52(增刊): 161—169
- 赵保仁, 方国洪, 曹德明, 1994. 中国东部边缘海潮汐潮流的数值模拟. 海洋学报, 16(5): 1—10
- 夏综万, 王钟楮, 1984. 黄海 M_2 分潮的数值模拟. 黄渤海海洋, 2(1): 10—18
- 夏综万, 王钟楮, 1985. 黄海日潮的数值模拟. 黄渤海海洋, 3(3): 1—4
- 夏综万, 王钟楮, 1987. 关于半封闭海湾潮波的数值模拟. 海洋学报, 9(1): 16—22
- Fang Guohong, 1986. Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China, C J. Oceanol Limnol, 4(1): 1—6
- Ogura, S, 1933. The tide in the seas adjacent to Japan. Hydr Bull Dep Jap Navy, 7: 52—67
- Taylor, G I, 1921. Tidal oscillation in gulfs and rectangular basins. Proceeding of The London Mathematical Society, 20: 148—181

SIMULATION OF MECHANISMS FOR THE TIDAL WAVE SYSTEM IN MARGINAL SEAS, EASTERN CHINA

JIA Jian-jun, Lü Guo-nian[†], SONG Zhi-yao^{††},
LIN Hui^{†††}, QIAN Ya-dong[†], CHEN Zhong-ming[†]

(Institute of Oceanography, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

[†](Geography Science College, Nanjing Normal University, Nanjing, 210024)

^{††}(Harbor, Waterway & Coast Engineering College, Hohai University, Nanjing, 210098)

^{†††}(Geography Department, Hong Kong Chinese University, Hong Kong)

Abstract Based on a three dimensional and high resolution numerical model, some factors associated with the marginal seas adjacent to eastern China (including the Bohai, Yellow and Eastern China Seas), such as the Coriolis acceleration, tide amplitude and phase on the outer boundary, seabed topography, coastline configuration, and frictional coefficient, are studied with the aid of Geographic Information System (GIS) in order to understand the respective impact of these factors upon the tidal wave system. According to the present study, moderate changes in the tide amplitude and phase on the outer boundary, the seabed topography and the frictional coefficient has little effect on the tidal wave system. However, the transformation of coastline configuration has remarkable consequences within the tidal system, and so does the tremendous changes of the seabed topography. Since in reality the input data of tide amplitude and phase, the Coriolis acceleration, the seabed topography and frictional coefficient are comparatively stable, the tidal wave system in the marginal seas adjacent to eastern China is a combined result of tide and marine environment. The marine conditions, especially the coastline configuration, are the predominated factors affecting the tidal-wave system. In a sense, the tidal amphidroms and tidal amphidromic system are controlled mainly by the coastline configuration over this region.

Key words Marginal seas Tidal wave system Numerical simulation Eastern China

Subject classification number P731