

渤海东海潮波数值模拟*

叶安乐 梅丽明

(青岛海洋大学海洋环境学院, 青岛 266003)

提要 利用考虑引潮力的非线性球面潮波方程, 数值模拟渤海东海的潮波运动, 将计算结果与实测资料作比较。依据所得结果绘制 M_2, S_2, K_1, O_1 和 M_4 的同潮图和潮流椭圆, 并进行讨论。研究表明, K_1 和 O_1 的同位相线在台湾附近先作顺时针方向旋转然后作逆时针方向旋转, 该现象是由于大陆架和大陆坡水深分布和台湾存在的结果。同时也发现最大流速时刻比高潮时刻提前, 是摩擦和旋转潮波系统中的驻波成份所引起的。对该海区的非线性潮波部分的模拟作了首次尝试。可以看出: M_4 有 18 个旋转潮波系统, 其中 6 个作顺时针方向旋转, 12 个作逆时针方向旋转; 在江苏南部海岸和杭州湾口的外海区域以及渤海湾和大部分的莱州湾, 由 M_2 引起的潮汐余水位为正, 而在海区的其余部分这种余水位为负; 由 M_2 引起的潮汐余流总体上向南或向东南方向流动。

关键词 渤海东海 潮波 数值模拟 潮汐余水位和余流

自 80 年代以来, 已有不少作者将渤、黄、东海视为一整体, 探讨发生在该广阔水域中的潮波运动和变化规律。沈育疆(1980)、丁文兰(1984)、沈育疆和叶安乐(1985)利用边值法, 计算了其中的主要天文分潮波, Choi (1980) 运用初值法模拟了其中主要天文分潮, 方国洪(1986)基于初值法的模拟结果并结合实测资料研究了其中主要天文分潮。这些工作对人们了解和认识渤海东海潮波运动的特征很有意义, 然而也有一些值得探讨的问题: 边值法的效果依赖于边界值的可靠性, 在观测站分布稀疏的沿岸确定边界格点上潮位值的人为偏差, 会造成区域内部的可观误差; 初值法的计算结果用陆界观测资料加以检验, 是一种理想的方法, 但是在运用此方法模拟渤海东海潮波运动的过程中, 未将天体引潮力的影响和水深变化急剧的大陆坡区域考虑在内。此外, 由于渤、黄、东海具有不小的浅水地域, 非线性效应产生的浅水分潮波以及潮汐余水位和潮汐余流在潮波运动中占有一定的重要性。到目前为止, 尚未见有关该海域中浅水潮波的报道。

本文采用非线性球面潮波运动基本方程, 考虑了天体引潮力, 研究了包括琉球群岛一带大陆坡在内的渤海东海潮波运动。模拟结果有 M_2, S_2, K_1 和 O_1 主要天文分潮波, M_4 和 S_4 浅水分潮波, 以及由 M_2 和 S_2 产生的潮汐余水位和潮汐余流。

1 基本方程和计算说明

渤海东海的潮波运动可用如下方程描述:

* 国家自然科学基金资助项目, 249176248。叶安乐, 男, 出生于 1938 年 1 月, 教授。
收稿日期: 1993 年 5 月 25 日; 接受日期: 1993 年 6 月 22 日。

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial u}{\partial \varphi} - \frac{uv}{R} \tan \varphi - 2\omega v \sin \varphi \\ + \frac{k u \sqrt{u^2 + v^2}}{H} + \frac{g}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} (\zeta - \bar{\zeta}) = 0, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{R \cos \varphi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{R} \frac{\partial v}{\partial \varphi} + \frac{u^2}{R} \tan \varphi + 2\omega u \sin \varphi \\ + \frac{k v \sqrt{u^2 + v^2}}{H} + \frac{g}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} (\zeta - \bar{\zeta}) = 0, \\ \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left[\frac{\partial}{\partial \lambda} (Hu) + \frac{\partial}{\partial \varphi} (Hv \cos \varphi) \right] = 0. \end{aligned}$$

式中, t 为北京时; λ, φ 为东经和北纬; u, v 为深度平均流的东分量和北分量; R 为地球平均半径; ω 为地球自转角速度; g 为重力加速度; k 为底摩擦系数; $H = h + \zeta$ 为瞬时水深; h 为无扰动时的水深; ζ 为相对于无扰动海面的潮位高度; $\bar{\zeta}$ 为考虑地潮订正的平衡潮。 M_2, S_2, K_1 和 O_1 的平衡潮表达式为:

$$\begin{aligned} \bar{\zeta}_{M_2} &= 0.170 \cos^2 \varphi \cos [\sigma_{M_2}(t - S/15) + 2\lambda] \\ \bar{\zeta}_{S_2} &= 0.078 \cos^2 \varphi \cos [\sigma_{S_2}(t - S/15) + 2\lambda] \\ \bar{\zeta}_{K_1} &= 0.098 \sin 2\varphi \cos [\sigma_{K_1}(t - S/15) + \lambda] \\ \bar{\zeta}_{O_1} &= 0.070 \sin 2\varphi \cos [\sigma_{O_1}(t - S/15) + \lambda] \end{aligned}$$

式中, S 为标准经度; λ 为地点经度; $\bar{\zeta}$ 的单位为 m 。

计算中运用空间和时间平滑的差分格式。空间步长纬向取四分之一度对应的经圈弧长, 经向取四分之一度对应的纬圈弧长。时间步长取为 $T/400p$, T 为天文分潮波周期, 对全日分潮 $p = 2$, 对半日分潮 $p = 1$ 。 k 值对 M_2 分潮取为 0.0017, 对 S_2 取为 0.0051, 对 K_1 和 O_1 取为 0.0055。计算初值取 $\zeta = u = v = 0$ 。水界处的边界条件取强迫水位, 由实测资料经调试确定。

2 结果的检验

将渤海东海潮波的模拟结果与实测资料进行了比较, 两者令人满意地相近。表 1 列出了 M_2, K_1 和 M_4 分潮潮位在海域沿岸的计算和实测调和常数。实测最大流速和最大流速发生时刻已直接绘制在潮流椭圆图上。

3 结果与讨论

3.1 天文分潮波

根据计算结果绘制了渤海东海 M_2, S_2, K_1 和 O_1 分潮波的同潮图(图 1)以及潮流椭圆图(图 2)。

由图 1a 和图 1 b 可以看出, M_2 和 S_2 的潮波系统大致相似: 在渤海有两个旋转潮波系统, 在北黄海和南黄海各有一个旋转潮波系统, 在台湾北端外海有一个蜕化的旋转潮波系统; 在每个旋转潮波系统范围内, 最大振幅区域出现在离无潮点最远的沿岸附近; 由于水深分布的影响, 在长江口和杭州湾的外海有一舌状的等振幅线分布。图 2a 和图 2b 分别为 M_2 和 S_2 潮流椭圆图。所示的最大流速方向与同潮图中的同位相线有一定交角; 由于摩擦以及在旋转潮波系统中包含有驻波成份, 沿同位相线传播方向的最大流速发生时刻较

表 1 计算和实测调和常数的比较

Tab. 1 Comparison between computed and observed harmonic constants

| 站名 | M_2 | | | | K_1 | | | | M_4 | | | |
|-----|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|---------------------|
| | 计算值 | | 实测值 | | 计算值 | | 实测值 | | 计算值 | | 实测值 | |
| | H (cm) | g ($^\circ$) | H (cm) | g ($^\circ$) | H (cm) | g ($^\circ$) | H (cm) | g ($^\circ$) | H (cm) | g ($^\circ$) | H (cm) | g ($^\circ$) |
| 大黑山 | 104 | 17 | 106 | 18 | 25 | 226 | 24 | 238 | 5.7 | 112 | 4.2 | 105 |
| 群山 | 207 | 59 | 209 | 62 | 32 | 265 | 33 | 256 | 24.1 | 68 | 17.5 | 76 |
| 仁川 | 252 | 118 | 290 | 115 | 43 | 291 | 40 | 289 | 16.7 | 58 | 10.4 | 22 |
| 南浦 | 176 | 231 | 173 | 227 | 40 | 325 | 38 | 320 | 3.8 | 201 | 4.0 | 163 |
| 大连 | 98 | 278 | 96 | 288 | 26 | 1 | 25 | 1 | 5.2 | 67 | 0.8 | 77 |
| 营口 | 127 | 149 | 126 | 143 | 41 | 98 | 38 | 101 | 8.5 | 211 | 12.9 | 209 |
| 葫芦岛 | 95 | 152 | 96 | 150 | 37 | 105 | 38 | 104 | 3.3 | 328 | 2.2 | 296 |
| 秦皇岛 | 7 | 306 | 11 | 310 | 28 | 115 | 29 | 111 | 3.6 | 90 | 4.1 | 70 |
| 塘沽 | 114 | 95 | 117 | 90 | 37 | 156 | 36 | 154 | 6.7 | 86 | 9.4 | 79 |
| 龙口 | 38 | 324 | 40 | 316 | 24 | 197 | 20 | 200 | 1.2 | 320 | 0.03 | 253 |
| 烟台 | 50 | 284 | 36 | 290 | 15 | 307 | 16 | 295 | 1.0 | 179 | 2.5 | 196 |
| 乳山口 | 99 | 96 | 112 | 89 | 26 | 341 | 25 | 336 | 7.8 | 111 | 4.4 | 149 |
| 青岛 | 125 | 138 | 126 | 134 | 29 | 0 | 28 | 357 | 12.2 | 163 | 10.2 | 169 |
| 石臼所 | 139 | 166 | 141 | 163 | 33 | 11 | 32 | 9 | 6.0 | 211 | 6.0 | 213 |
| 连云港 | 160 | 183 | 159 | 182 | 33 | 21 | 31 | 19 | 10.8 | 288 | 11.0 | 271 |
| 吕四 | 158 | 343 | 168 | 354 | 22 | 150 | 20 | 153 | 10.1 | 205 | 6.9 | 178 |
| 高桥 | 102 | 6 | 110 | 3 | 24 | 182 | 25 | 208 | 10.4 | 269 | 14.2 | 291 |
| 大陈岛 | 165 | 260 | 170 | 264 | 28 | 222 | 30 | 226 | | | | |

相应的高水位时刻提前, 例如在连接我国台湾和日本九洲的 M_2 分潮波的 210° 同位相线上的最大涨潮流发生时刻约为 6.5h, 即比发生高潮时刻提前约 0.6h。

图 1c 和图 1 d 所示的 K_1 和 O_1 潮波系统两者也大致相似: 在渤海和南黄海都各有一个旋转潮波系统; 在台湾以北海域, 有一同位相线先是右旋、而到达台湾北端后又左旋的现象。同位相线的右旋状是大陆架和大陆坡水深分布所致, 例如 K_1 分潮波的通过杭州湾口附近的 210° 同位相线几乎为一直线, 当波动继续传播时, 由于大陆架上的传播速度由近岸向外海逐渐增大, 在大陆坡处传播速度最快, 结果形成通过台湾北端的弯曲状的 220° 同位相线, 此后, 由于台湾的阻挡, 致使同位相线成绕岛的左旋状。图 2c 和图 2 d 所示全日潮流的最大流速与半日潮流的类似, 其方向与同位相线有一定交角, 其发生时刻较高潮时刻提前。

3.2 浅水潮波 渤黄东海的浅水分潮波中以 M_4 为最大, 而且 S_4 与 M_4 的波动系统具有相似的形式, 因此, 这里仅讨论 M_4 。图 3 为 M_4 同潮图, 共有 18 个旋转潮波系统, 其中 12 个沿逆时针方向旋转, 6 个沿顺时针方向旋转。按海区来分, 渤海有 4 个(两个为蜕化的), 均沿逆时针方向旋转。北黄海有两个, 一个沿逆时针方向旋转, 另一个沿顺时针方向旋转。南黄海有 7 个: 山东和江苏外海有 3 个, 一个沿顺时针方向旋转, 两个沿逆时针方向旋转; 朝鲜半岛两岸外海和中部均有两个, 一个沿顺时针方向旋转, 一个沿逆时针方向旋

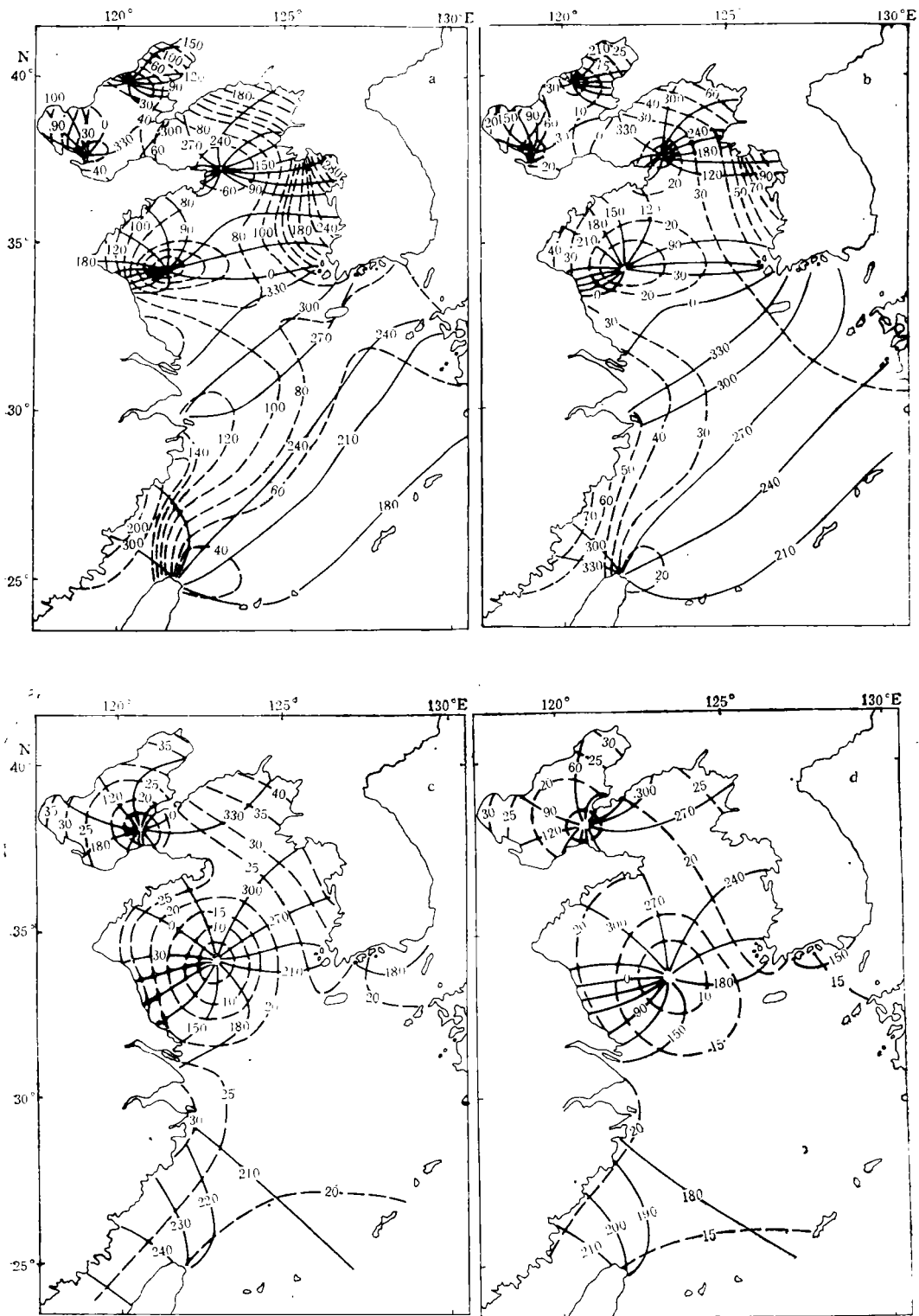


图 1 M_2 (a), S_2 (b), K_1 (c), O_1 (d) 同潮图

Fig. 1 M_2 (a), S_2 (b), K_1 (c), O_1 (d) cotidal charts

----- 振幅 (cm); — 位相(°)

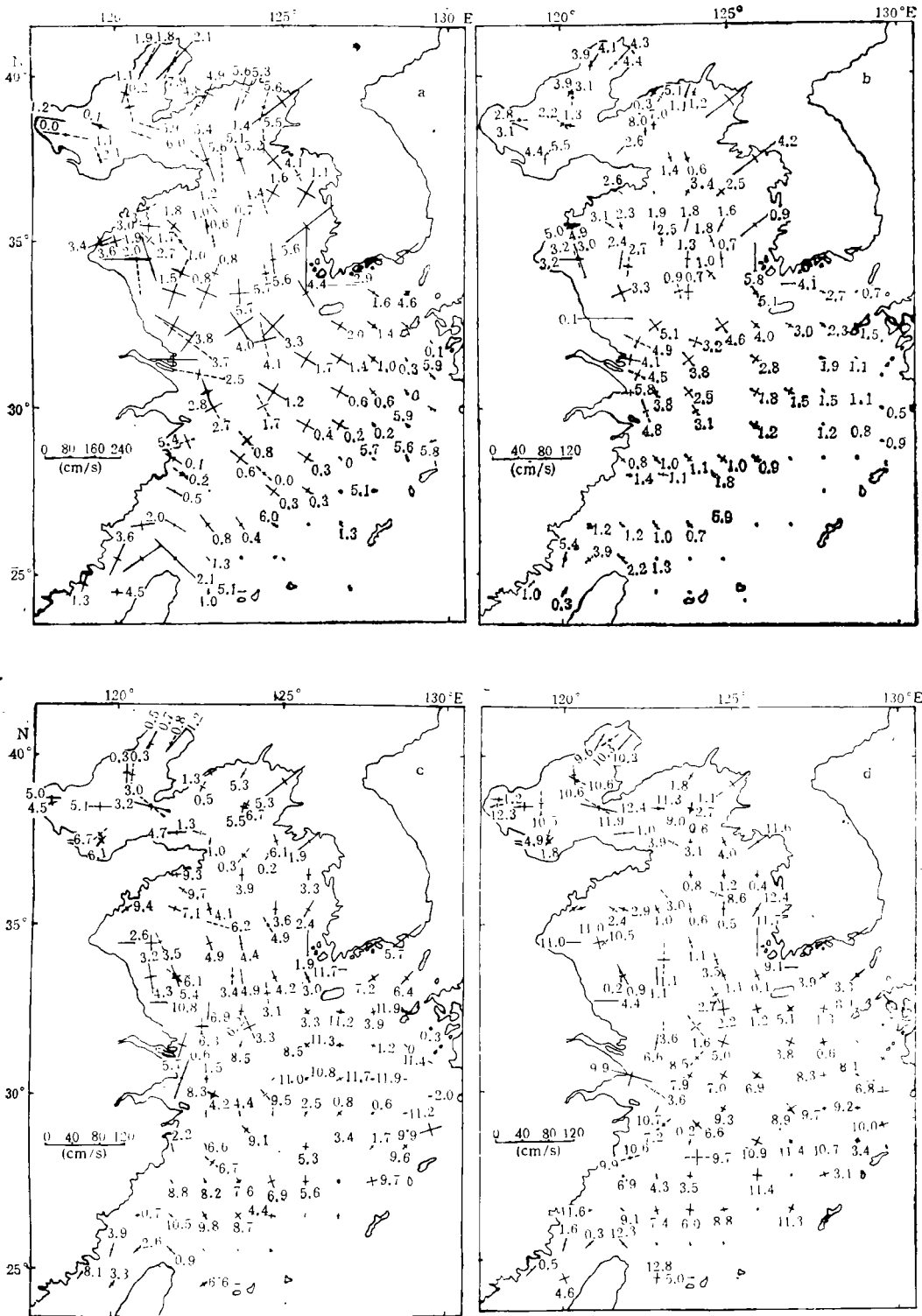


图 2 M_2 (a), S_2 (b), K_1 (c), O_1 (d) 潮流椭圆

Fig. 2 M_2 (a), S_2 (b), K_1 (c), O_1 (d) tidal current ellipses

---- 2.5 最大流速和最大流速时刻的观测结果; —— 2.4 最大流速和最大流速时刻的计算结果。

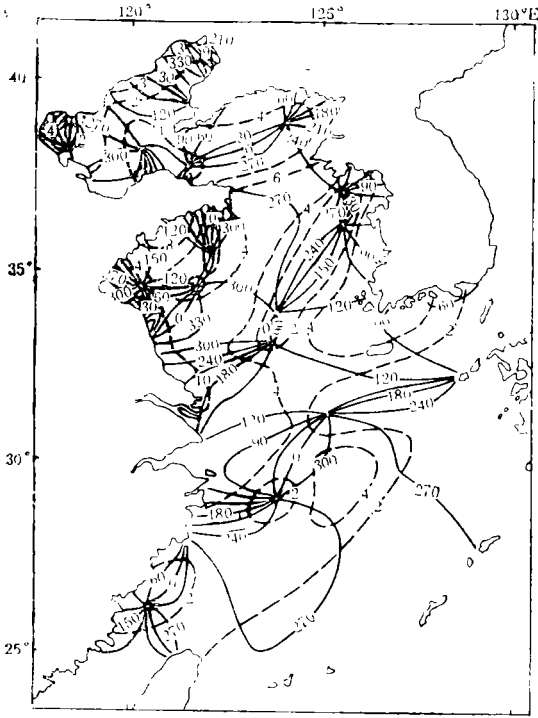


图3 M₄ 同潮图

Fig. 3 M₄ cotidal chart

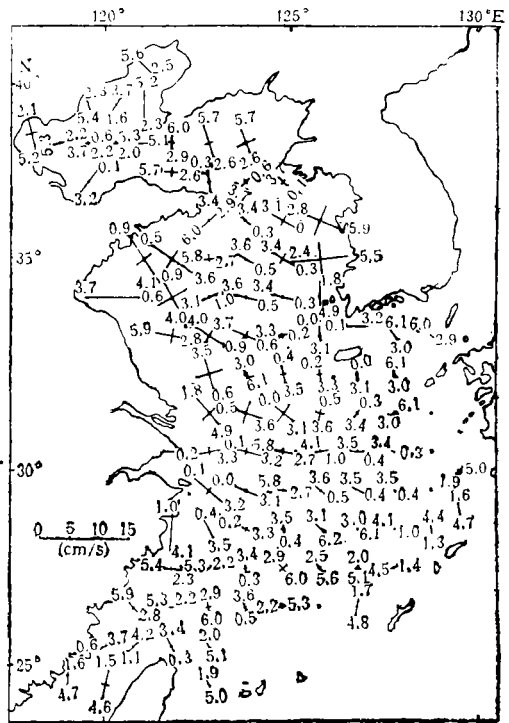


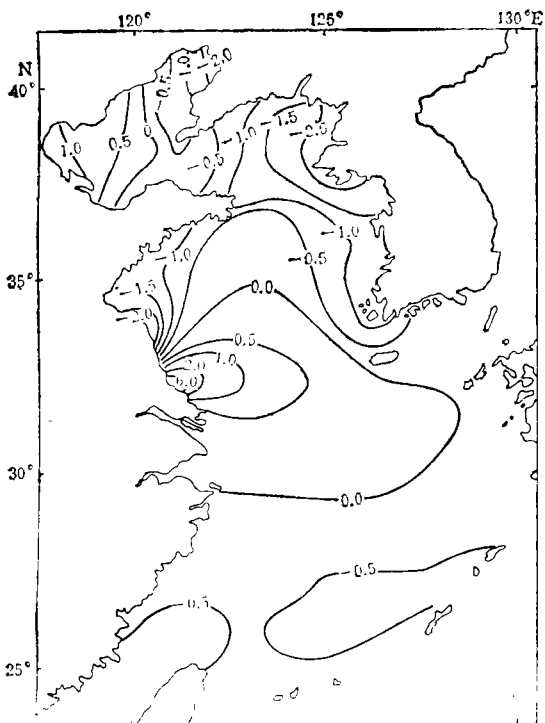
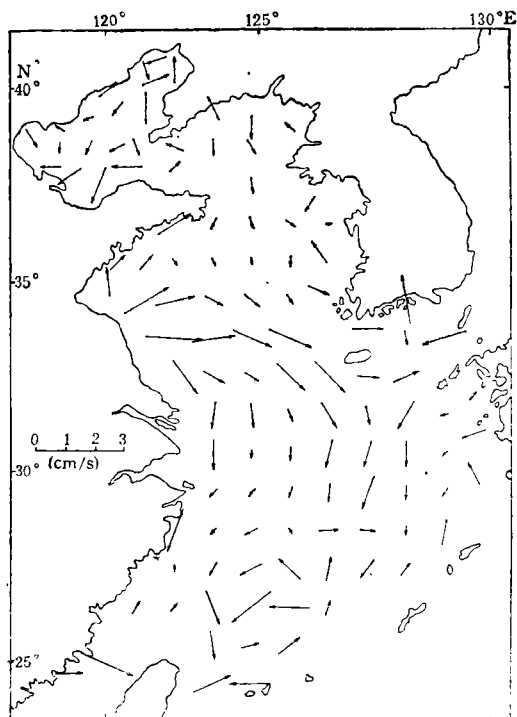
图4 M₄ 潮流椭圆

Fig. 4 M₄ tidal current ellipse

转,中部有两个,也是一个沿顺时针方向旋转,一个沿逆时针方向旋转。东海有5个:日本九州外海有一个沿逆时针方向旋转的蜕化系统,长江口以东有一个沿顺时针方向旋转,杭州湾口东南有一个沿逆时针方向旋转,温州外海有一个沿顺时针方向旋转的蜕化系统,福建外海有一个沿逆时针方向旋转。图4为M₄潮流椭圆图,所示的大流速出现区域为山东、江苏、浙江的外海和朝鲜半岛西岸的外海。

3.3 M₂ 的潮汐余水位和潮汐余流 由图5可以看出,从江苏沿岸南段到杭州湾口的外海, M₂ 的潮汐余水位为正,形成舌状的海面升高,其中最大海面升高区域位于江苏沿岸南段的沿岸水域。在北黄海、南黄海北部和杭州湾以下的东海部分, M₂ 的潮汐余水位为负,最大海面下降区域位于朝鲜半岛西岸北段的沿岸水域和江苏沿岸北段的沿海水域。在渤海,渤海湾和大部分的莱州湾为正余水位区域,辽东湾为负余水位区域,其中辽东湾顶部为最大海面下降区域。

如图6所示,在黄海和东海, M₂ 的潮汐余流的总流动趋势是向南或东南,但局部区域有不同的流动特征:北黄海的西部沿岸区域存在一个逆时针方向的环流;台湾东北方向的外海也有一个逆时针方向的环流;江苏沿岸北段和山东沿岸外海的流动方向指向东北。在渤海的湾口, M₂ 的潮汐余流在上部流动趋势是向外,而在下部是向里。在辽东湾顶有一明显的逆时针方向的环流。

图 5 M_2 潮汐余水位 (cm)Fig. 5 Tidal residual water level induced by M_2 (cm)图 6 M_2 潮汐余流Fig. 6 Tidal residual current induced by M_2

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。
 沈育疆, 1980, 东中国海潮汐潮流数值计算, 山东海洋学院学报, 10(3): 28—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。
 Choi, B. H., 1980, A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea, KORDI Report 80-2, Korea Ocean Research and Development Institute, 72pp.
 Fang Guohong, 1986, Tide and tidal current charts for the marginal seas adjacent to China, C. J. Oceanol. Limnol., 4(1): 1—16。

NUMERICAL MODELLING OF TIDAL WAVES IN THE BOHAI SEA, THE HUANGHAI SEA AND THE EAST CHINA SEA

Ye Anle, Mei Liming

(*Institute of Environment, Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003*)

ABSTRACT

Tidal waves in the area were numerical modelled by the use of the non-linear spherical tidal equations with tide-generating force. The computed results were compared with the observed data. The cotidal charts and the tidal current ellipses of M_2 , S_2 , K_1 , O_1 and M_4 are drawn and discussed based on the obtained results. It is discovered for the first time near Taiwan the cophase lines of K_1 and O_1 rotate first clockwise and then anticlockwise. Such a phenomenon is due to both the water depth distribution of continental shelf and slope and the existence of Taiwan. It is also found that the maximum velocity moment is in advance of the high tide moment, which is caused by friction and standing wave part of amphidromic system. This is the first attempt at modelling the non-linear part here. It can be seen from the results that the M_4 has 18 amphidromic systems, among them, 6 rotating clockwise, 12 anticlockwise; the residual water level induced by M_2 is positive in the offshore area of the Jiangsu south coast and the Hangzhou Bay mouth, and in the Bohai Bay and the most part of the Laizhou Bay, whereas in the rest water area it is negative; and that the tidal residual current induced by M_2 flows southwards or southeastwards in general.

Key words Bohai, Huanghai East China Seas Tidal wave Numerical modelling Tidal residual water level and tidal residual current