

# 南黄海潮流和潮余流的数值计算

汤毓祥 姚兰芳

(国家海洋局第一海洋研究所)

## 一、引言

南黄海是一个平均深度不超过45米的陆架浅海。其独有的地理条件,使该海域潮运动独具特征。早从本世纪三十年代开始,日本学者就已对黄海的潮汐进行了研究<sup>[1]</sup>。近年来,我国、苏联、日本和南朝鲜等国学者又运用数值计算等方法进一步探讨了该海域的潮汐、潮流运动<sup>[2, 3, 4, 6]</sup>。然而,这些研究多偏重于揭示海域潮波运动的规律。对潮流的计算基本上未经实测资料校核。尤其是,对于由潮流的非线性效应所产生的潮汐余流研究甚少。为了更深刻地认识黄海潮运动的特征,本研究采用一种二维非线性潮汐模式,首先计算了集中反映该海域潮运动特征的优势分潮—— $M_2$ 分潮,然后,据此模拟了该海域的潮余流。

## 二、数值计算方法

在笛卡尔直角坐标系中,描述均匀水体中潮运动的二维基本方程为:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{Ku(u^2 + v^2)^{1/2}}{D} - A_h \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{Kv(u^2 + v^2)^{1/2}}{D} - A_h \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Du) + \frac{\partial}{\partial y} (Dv) = 0 \quad (3)$$

其中,  $t$ —时间;  $x, y$ —在未扰动海面的水平面上的笛卡尔坐标;  $u, v$ —潮流的 $x, y$ 方向分量;  $D$ —总水深 =  $h + \zeta$ ,  $h$ 为平均水深,  $\zeta$ 为从未扰动海面起算的水位高度;  $f$ —科氏参数 =  $2\Omega \sin \varphi$ , 随不同纬度取不同的值,  $\Omega$ 为地球自转角速度 =  $7.29 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ;  $K$ —底摩擦系数, 本计算中取0.0015;  $A_h$ —水平涡动粘性系数, 本计算中取  $1 \times 10^2 \text{ 米}^2/\text{秒}$ ;  $g$ —地球重力加速度 =  $980 \text{ 厘米}/\text{秒}^2$ 。

计算区域如图1所示。南、北边界分别取为北纬 $31^\circ$ 和 $37^\circ$ 线; 东边界从对马海峡基本上沿200米等深线南下; 西部为岸界。本计算中, 每个经度分为4格, 纬度分为5格, 即网格长、宽皆在20公里左右。

本研究所用数值计算方法主要取自Tee的研究<sup>[5]</sup>。时间步长 $\Delta t = 207$ 秒。初始条件皆取为零值。海岸边界线用折线代替, 这些折线通过 $(u, v)$ 点, 在这些点设 $u = v = 0$ 。沿开边界, 水位 $\zeta$ 值为给定的依赖于时间的函数。本计算以 $M_2$ 分潮周期的余弦函数形式输入, 即:

1988年4月29日收到初稿。1988年8月3日收到修改稿。

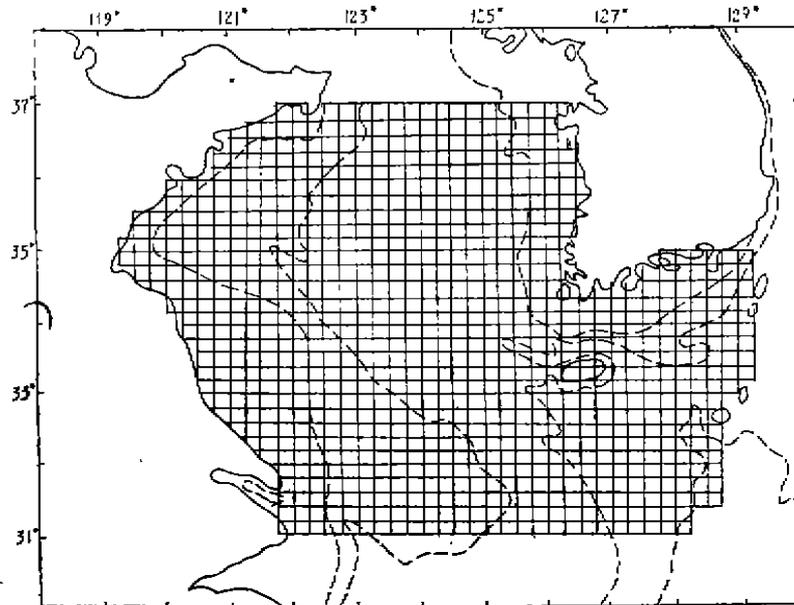


图1 计算区域和网格的分布

$$\xi^a = \xi_0 \cos(\sigma \Delta t - G) \quad (4)$$

式中  $\xi_0$  是  $M_2$  分潮的振幅,  $G$  是它的迟角,  $\sigma$  为  $M_2$  分潮的角速度。对于开边界上潮位值, 我们是根据所收集到的南黄海的经验同潮图, 并参考有关数值模拟所提供的信息, 采用尝试的方法, 经反复调整确定。

欧拉形式的潮余流  $\bar{u}_R$  是潮流  $u$  在一个潮周期内的时间平均值, 即:

$$\bar{u}_R = \frac{1}{T} \int_0^T u dt \quad (5)$$

拉格朗日余流则是根据下式计算<sup>(5)</sup>:

$$\bar{u}_L = \bar{u}_R + \bar{u}_S \quad (6)$$

式中  $\bar{u}_L$  为拉格朗日余流,  $\bar{u}_S = \frac{1}{TD} \int_0^T u \xi dt$  为斯托克斯漂移, 其中  $D$  为水深。

### 三、潮汐和潮流的分布

#### (一) 潮汐特征

潮波系统是决定海域潮运动基本形态最主要的因素。因此, 先给出南黄海根据计算所得的  $M_2$  同潮图(图2)。该图与历史同潮图相比, 同潮时线和等振幅线的分布趋势基本吻合。表征潮波运动明显特征的南黄海无潮点位置也较一致。主要差别在于苏北沿海; 本计算结果表明, 在该海域的南部, 同潮时线与等振幅线不是正交, 而是趋于一致, 并以琼港附近为顶点向外作半圆形凸起。从而较为清晰地显示出, 来自北面的旋转潮波与来自南面的前进波在琼港外海辐合的情景。

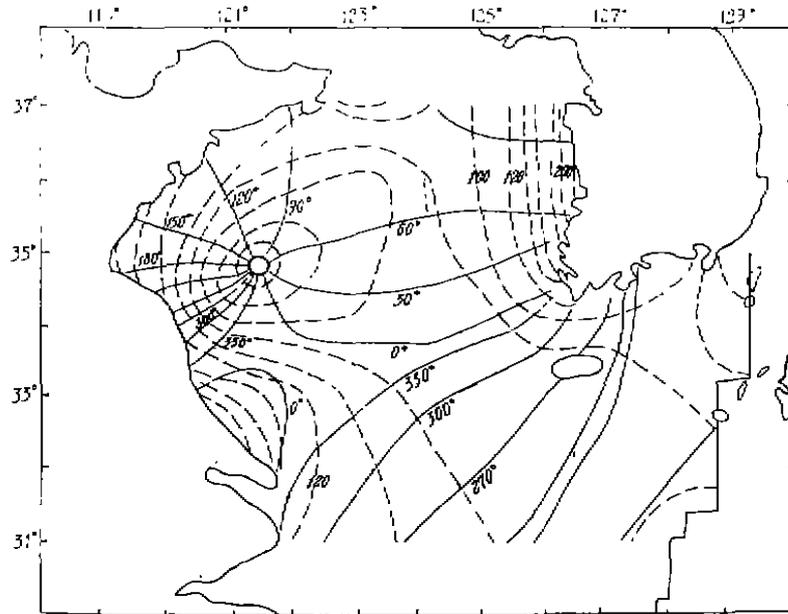


图2  $M_2$ 分潮的等振幅和等迟角线(振幅单位为厘米,迟角以 $120^\circ E$ 时间为准)

表1列出了同潮图上的计算值与验潮站调和常数的比较结果。由表可见,计算所得振幅误差在 $\pm 10$ 厘米以内的达90%,相位误差均小于 $14^\circ$ ,其中在 $10^\circ$ 以内的为70%。

表1

沿岸站 $M_2$ 分潮计算与实测调和常数比较

站名	余山	鸡骨礁	吕泗	小洋口	新洋港	射阳河口	废黄河口	张港	燕尾	青岛
振幅绝对差(厘米)	3	2	4	6	6	1	4	12	2	5
迟角绝对差(度)	5	3	3	14	2	4	12	14	5	4

南黄海潮流的主要特征,可用计算的 $M_2$ 分潮流椭圆轴分布图(图3)加以表述。由图3可见,南黄海 $M_2$ 最大潮流方向,即椭圆长轴方向的分布有着三个明显特点:(1)在南黄海的东半部海域,长轴方向基本上为南—北向,与该海域潮波传播方向大体一致。(2)在南黄海的西北海域,长轴方向顺着同潮时线左旋而逐渐向左偏转。至海州湾,长轴方向几乎一致地指向湾顶。(3)在苏北近海,潮流椭圆以琼港为中心成辐射状分布。这与南、北两股潮波在此汇合形成鲜明的对应关系。从图3还可看到,南黄海有两个潮流高值区:一个在长江口东面;另一个位于朝鲜半岛西南端。在这两个区域, $M_2$ 最大流值皆在60厘米/秒以上。 $M_2$ 潮流最弱区出现在以北纬 $36^\circ$ 和东经 $123^\circ 15'$ 为中心的南黄海中央区, $M_2$ 最大流值只有10厘米/秒左右。

图4显示了 $M_2$ 潮流的旋转方向。由图可见,在南黄海的大部分区域, $M_2$ 潮流为顺时针方向旋转。特别是在黄、东海交界的海域中段,潮流有着强烈的右旋特征,潮流椭圆接近于圆形。随着纬度的增加,潮流椭圆的椭率减小,至北纬 $35^\circ 15'$ 和东经 $123^\circ 20'$ 附近的黄海中央区,椭率几乎为零(同时参看图3),出现了一片往复流性质的潮流区。在往复流区的西面

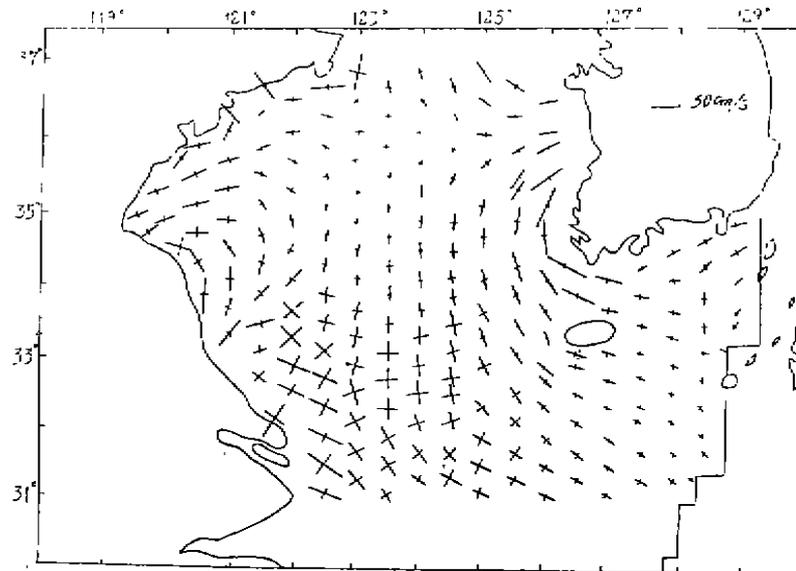


图3  $M_2$ 潮流椭圆长短轴分布

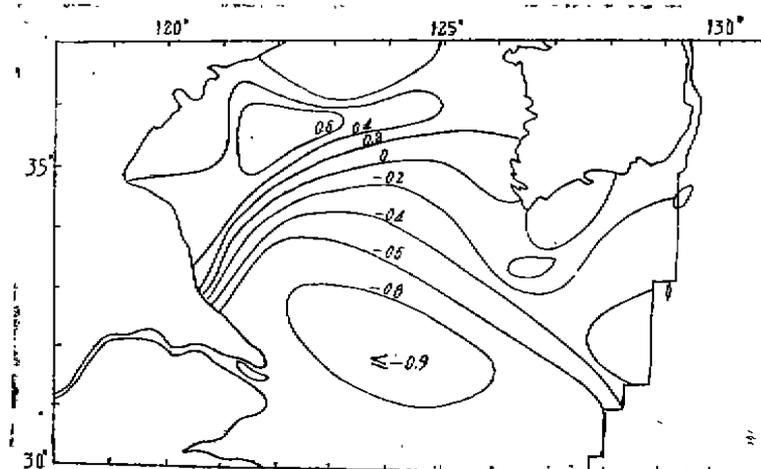


图4  $M_2$ 潮流旋转方向  
+ 逆时针向旋转  
- 顺时针向旋转  
数字为潮流椭圆椭率

是左旋潮波系统， $M_2$ 潮流也成为逆时针方向旋转。

为验证潮流计算结果，我们选用了近年来部分测流资料，将计算得到的 $M_2$ 潮流和据实测资料求得的值相比较，其结果列于表2。由表可看到： $M_2$ 分潮流最大流速的计算值与观测分析值的偏差在 $\pm 4$ 厘米以内的达79%，最大的为9厘米/秒，而流向计算误差一般小于 $15^\circ$ 。

表 2

 $M_2$ 分潮最大流速的计算与实测值的比较

站 名	$M_1$	$M_2$	$M_3$	$R_2$	0801	1002	03	0203
振幅绝对差(厘米/秒)	3	3	2	4	3	4	9	4
流向差(度)	12	16	7	11	3	4	15	5

#### 四、潮余流的特征

##### (一)欧拉潮余流

现将南黄海欧拉潮余流的计算结果绘于图 5 上。从该图可知,南黄海潮余流分布最突出的一个特点是:在海域的东部,余流北上,而在广阔的中、西部海域,潮余流则一致地向东南和南向流动。从而,在海中央区形成一明显的逆时针向环流。在苏北沿海,潮余流的运动比较复杂。在弥港以南海域,余流运动方向基本指向东北;在弥港以北至海州湾一带,余流似乎形成一顺时针方向运动。在长江口,则是一股较强的离岸余流。

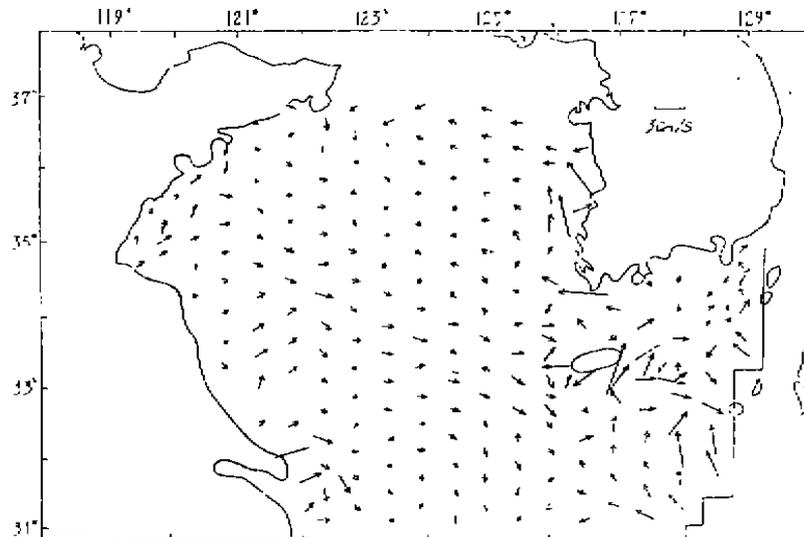


图 5 欧拉潮余流

在南黄海的大部分地区,潮余流的量值很小,一般皆在 2 厘米/秒以下。在水深较大的中央开阔区,潮余流值则只有 1 厘米/秒左右。在沿岸水域,尤其是朝鲜西岸近海,潮余流的量值有较明显的增加,一般可达 4 厘米/秒以上,最大值为 9.8 厘米/秒。

##### (二)拉格朗日余流

图 6 显示了拉格朗日余流的计算结果。与图 5 相比,绝大部分海域,计算所得拉格朗日余流的分布趋势与欧拉余流基本相似,两者未显现出任何重大的差别。然而,在苏北沿岸,尤其是在弥港至吕泗一带沿海,复杂的地形使潮波变形厉害。因此,在该海域,计算所得斯托克斯漂移几乎与欧拉余流同量级,从而使拉格朗日余流速度的分布显得比较复杂。

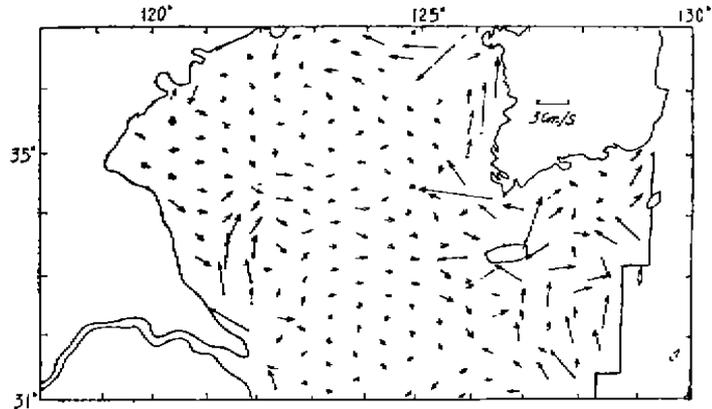


图6 拉格朗日潮余流

### (三) 潮余流对余流场的贡献

为探讨潮余流在构成南黄海陆架余流场中所作的贡献，我们在此引入了根据实测资料分析所得的余流场模式图(即图7)。如将图5显示的潮余流分布与该模式图相比，我们将发现，两者的分布趋势基本一致，皆是一逆钟向式的环流。由此可见，潮余流作为陆架余流场的一个组成部分，确起着一定作用。但是，由于在大部分海域，潮余流的值一般比总的余流值要小一个量级，所以在该海域，潮余流构不成余流场的主要成份。

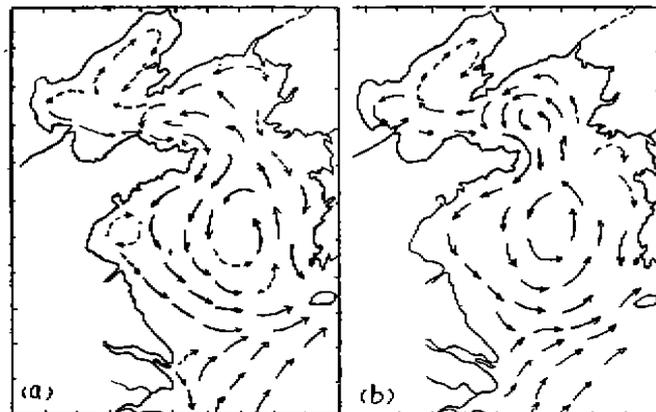


图7 黄海余流模式  
(a)冬季(b)夏季  
(取自陈则实等的研究〔7〕)

## 五、结 语

从以上的分析可看到：尽管计算区域开边界较长，从而给确定边界条件带来一定困难，但从与可能得到的实测值的比较来看，不论是潮位或潮流的计算与实测的符合程度还是较好。

分析表明，南黄海 $M_2$ 潮流的运动规律明显地受到该海域旋转潮波系统的制约。潮流的

长轴方向基本上与波峰线垂直。大部分海域潮流为右旋；而在山东半岛南岸近海和胶州湾一带，潮流却为左旋。

在研究区域内有两个潮流高值区：一个在长江口东面，另一个位于朝鲜半岛西南近海。它们的 $M_2$ 最大流一般皆在60厘米/秒以上。最弱流区位于北纬 $36^\circ$ 和东经 $123^\circ 15'$ 为中心的黄海中央区， $M_2$ 最大流只有10厘米/秒左右。

南黄海潮余流的量值较小，一般只有2厘米/秒左右。然而，该海域潮余流运动却有一明显特点，即形成一逆时针向大旋流。这与整个南黄海区余流的运动相一致。因此可初步认为，该海域的潮余流，尽管由于其量值比总的余流值几乎要小一量级，构不成余流场的主要成员，但两者在运动方向上的一致性，确表明潮余流在构成黄海陆架余流场中，也或多或少地起些作用。

### 参 考 文 献

- [1] Ogura, S.: The Tide in the Seas adjacent to Japan, Hudr. Bu-11, Dep. Jap. Navy 7, 1933.
- [2] An Hui Soo: A Numerical Experiment of the  $M_2$  Tide in the Yellow Sea, Journal of the Oceanographical Society of Japan, 33(2), 1977.
- [3] Choi, B. H.: A Tidal Model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea, KORDI Report 80-02, Korea Ocean Research and Development Institute, 1980, 72.
- [4] Борис Л. Н.: Расчет Приливов И Приливных Течения Желтого Моря, Тр. лгмн. Вып. 7, 1958.
- [5] Tee, K. T.: Tide-induced Residual Current, a 2-D Nonlinear Numerical Tidal Model, Journal of Marine Research, 1976, 6: 413-603.
- [6] 沈育疆: 东中国海潮汐数值计算, 山东海洋学院学报, 10(3), 1980: 26—35.
- [7] 陈则实等: 黄海海流状况, 海洋研究增刊, 3, 1979: 1—42.

## NUMERICAL MODELLING OF THE TIDAL AND TIDE-INDUCED RESIDUAL CURRENTS IN THE SOUTHERN HUANGHAI SEA

Tang Yuxiang      Yao Lanfang  
(First Institute of Oceanography, SOA)

### Abstract

In this article, a two-dimensional, non-linear numerical model is used to study the tidal and tide-induced residual currents in the southern Huanghai Sea. The results obtained with the model are strongly supported by observations available. The main features of the tidal and tide-induced residual currents in the southern Huanghai Sea are presented by analysing the results calculated.