

北部湾潮汐余流的初步研究*

李树华

(广西海洋研究所)

提 要

本文采用欧拉法, 计算了北部湾的欧拉余流, 同时还计算了拉格朗日余流和斯托克斯漂流。计算结果表明: 北部湾欧拉余流和拉格朗日余流比斯托克斯漂流大得多。 K_1 欧拉余流一般在15厘米/秒左右, M_2 余流约8厘米/秒, 而斯托克斯漂流最大不到2厘米/秒。 K_1 和 M_2 欧拉余流都在湾北部形成一个逆时针的环流, K_1 环流中心位于 $108^{\circ}30' E, 20^{\circ}20' N$; M_2 则位于 $108^{\circ}45' E, 20^{\circ}35' N$ 。

本文还讨论了动量方程中的非线性平流项和底摩擦以及水平湍流摩擦对湾内潮汐余流的影响。由分析结果可知, 北部湾潮汐余流产生的主要原因是非线性底摩擦以及动量方程中的非线性平流项, 但水平湍流摩擦对湾内潮汐余流也有一定的影响。

海湾中的潮汐余流, 是潮汐动力学中一个新的研究课题。近十几年来, 它越来越受到有关学者的重视, 人们从不同的方面, 探索了潮汐余流产生的物理机制, 并且, 取得了一定的成果。

北部湾近似于一个长方形海湾, 岸界曲折, 底形变化复杂, 湾内潮汐余流的分布以及变化规律, 人们还不甚了解。本文首次用欧拉法计算了该湾的欧拉余流, 并根据欧拉余流与拉格朗日余流和斯托克斯漂流之间的关系, 给出了拉格朗日余流场以及斯托克斯漂流场。

计 算 方 法

基本动力学方程取如下形式:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - C_D \frac{(u^2 + v^2)^{1/2} \cdot u}{h} + A_h \nabla^2 u \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + fu = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - C_D \frac{(u^2 + v^2)^{1/2} \cdot v}{h} + A_h \nabla^2 v \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(D + \zeta)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(D + \zeta)v] = 0 \quad (3)$$

式中 u 、 v 分别为 x 、 y 方向的潮流分量; h 为水深, $h = D + \zeta$, D 为平均海面到海底的距离, ζ 即从平均海面起算的水位高度; f 为柯氏参量, 取 $\varphi = 20^{\circ}$ 的量值, 即 $f = 4.99 \times 10^{-5}$; g 为重

* 本文蒙陈宗镛教授审阅, 并提出许多宝贵意见, 吴尚龙同志清绘底图; 彭云胜同志协助上机计算, 在此一并致谢。

力加速度, 取 9.78 米/秒²; A_h 为水平涡动粘滞系数, 取 10^2 米²/秒; C_D 为底摩擦系数, 取 0.0025 。

计算中采用一般的阶梯式网格, 先把海区分成一系列边长为 l 的正方形, 各正方形交点坐标为 $x = ml, y = nl (m, n = 0, 1, 2, \dots)$ 。潮位 ζ 和潮流 u, v 都是错开计算的, 并且两者相差半个时间步长 τ 。 ζ 的空间坐标和时间坐标分别为 $[2ml, 2nl], [2k\tau]$; u 为 $[(2n+1)l, 2nl], [(2k+1)\tau]$; v 则为 $[2ml, (2n+1)l]$ 和 $[2k+1)\tau]$ ($k = 0, 1, 2, \dots$)。

把基本动力学方程写成一种显式差分的形式, 时间异数采用中心差商, 空间导数则采用向前差商进行逼近, 方程(1) - (3)的显式差分方程为:

$$\frac{u_{2m+1, 2n}^{2k+1} - u_{2m+1, 2n}^{2k-1}}{2\tau} + \frac{u_{2m+1, 2n}^{2k-1}}{2l} \left(u_{2m+3, 2n}^{2k-1} - u_{2m+1, 2n}^{2k-1} \right) + \frac{\bar{v}_{2m+1, 2n}^{2k-1}}{2l} \left(u_{2m+1, 2m+2}^{2k-1} - u_{2m+1, 2n}^{2k-1} \right) - f \bar{v}_{2m+1, 2n}^{2k-1} = -\frac{g}{2l} \left(\zeta_{2m+2, 2n}^{2k} - \zeta_{2m, 2n}^{2k} \right) + A_h \left(\nabla^2 u \right)_{2m+1, 2n}^{2k-1} - \frac{r_u^{2k-1}}{h}$$
(4)

$$\frac{v_{2m, 2n+1}^{2k+1} - v_{2m, 2n+1}^{2k-1}}{2\tau} + \frac{v_{2m, 2n+1}^{2k-1}}{2l} \left(u_{2m, 2n+3}^{2k-1} - v_{2m, 2n+1}^{2k-1} \right) + \frac{v_{2m, 2n+1}^{2k-1}}{2l} \left(v_{2m, 2m+2}^{2k-1} - v_{2m, 2n+1}^{2k-1} \right) + f \bar{u}_{2m, 2n+1}^{2k-1} = -\frac{g}{2l} \left(\zeta_{2m, 2n+2}^{2k} - \zeta_{2m, 2n}^{2k} \right) + A_h \left(\nabla^2 v \right)_{2m, 2n+1}^{2k-1} - \frac{r_v^{2k-1}}{h}$$
(5)

$$\frac{\zeta_{2m+2, 2n}^{2k+2} - \zeta_{2m+2, 2n}^{2k}}{2\tau} + \frac{1}{2l} \left[\left(hu \right)_{2m+1, 2n}^{2k+1} - \left(hu \right)_{2m-1, 2n}^{2k-1} \right] + \frac{1}{2l} \left[\left(hv \right)_{2m, 2n+1}^{2k-1} - \left(hv \right)_{2m, 2n-1}^{2k-1} \right] = 0$$
(6)

其中 $r_u^{2k-1} = C_D u_{2m+1, 2n}^{2k-1} \left[\left(u^2 \right)_{2m+1, 2n}^{2k-1} + \left(v^2 \right)_{2m+1, 2n}^{2k-1} \right]^{1/2}$

$r_v^{2k-1} = C_D v_{2m, 2n+1}^{2k-1} \left[\left(u^2 \right)_{2m, 2n+1}^{2k-1} + \left(v^2 \right)_{2m, 2n+1}^{2k-1} \right]^{1/2}$

$$\left(\nabla^2 u \right)_{2m+1, 2n}^{2k-1} = \frac{1}{l^2} \left(u_{2m+3, 2n}^{2k-1} + u_{2m+1, 2n+2}^{2k-1} + u_{2m-1, 2n}^{2k-1} + u_{2m+1, 2n-2}^{2k-1} - 4 u_{2m+1, 2n}^{2k-1} \right)$$

$$\left(\nabla^2 v \right)_{2m, 2n+1}^{2k-1} = \frac{1}{l^2} \left(u_{2m+2, 2n+1}^{2k-1} + v_{2m, 2n+3}^{2k-1} + v_{2m-2, 2n+1}^{2k-1} + v_{2m, 2n-1}^{2k-1} - 4 v_{2m, 2n+1}^{2k-1} \right)$$

u, v 上的一横表示对邻近四个点取均正值, 即:

$$\bar{u}_{2m, 2n+1} = \frac{1}{4} \left(u_{2m+1, 2n+2} + u_{2m-1, 2n+2} + u_{2m+1, 2n} + u_{2m-1, 2n} \right)$$

$$\bar{v}_{2m+1, 2n} = \frac{1}{4} \left(v_{2m+2, 2n+1} + v_{2m+2, 2n-1} + v_{2m+2, 2n+1} + v_{2m+2, 2n-1} \right)$$

本计算取时间步长为 240 秒, 空间步长则为 2.15×10^4 米。计算范围包括 $16^\circ 00' \sim 21^\circ 24' N, 105^\circ 48' \sim 110^\circ 00' E$ 。

海岸边界以折线来逼近, 而且选取适当的坐标, 使潮流位于固体部份上, 潮位则位于液

体部份上。略去平行岸向的摩擦，置岸上法向速度为零。

在湾口以及琼州海峡的开边界处，取垂直于开边界的速度分量的偏导数为零。水位则取如下形式：

$$\zeta = H \cos(\delta t - \theta)$$

式中H为分潮振幅， θ 为分潮迟角， δ 为分潮角速率。

初始时刻，水位 ζ 和潮流 u 、 v 的值均取为零。

计算以波动趋于稳定状态为止。每完成一个周期后，将计算结果与前一周期对应时刻的值相比较，如果前后两个周期对应时刻的流速以及潮位的相对误差小于5%，则认为波动已达稳定状态，初始扰动消失。在此基础上，再进行一个周期，求该周期潮流 v 的积分的平均值，即得欧拉余流为：

$$v_E = \frac{1}{T} \int_0^T \vec{v} dt \quad (7)$$

其求和形式为：

$$v_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{v} \quad (8)$$

式中 $N = \frac{T}{\Delta t}$ ， Δt 为时间步长，T为该分潮的周期。

斯托克斯漂流的计算公式为：

$$v_s = \frac{1}{TD} \int_0^T \vec{v} \zeta dt \quad (9)$$

其求和形式为：

$$v_s = \frac{1}{ND} \sum_{i=1}^N \vec{v} \zeta \quad (10)$$

拉格朗日余流是欧拉余流和斯托克斯漂流的迭加，其表达式为：

$$v_L = v_E + v_s \quad (11)$$

根据式(8)、(10)、(11)即可求出北部湾的欧拉余流，拉格朗日余流和斯托克斯漂流。

计算结果

欧拉余流场：从图1和图4中可以看出， K_1 分潮以及 M_2 分潮的欧拉余流都在湾北部形成一个逆时针的环流。 K_1 分潮环流中心位于 $108^{\circ}30'E$ ， $20.20'N$ 附近； M_2 分潮偏北，位于 $108^{\circ}45'E$ ， $20^{\circ}35'N$ 。湾中部和湾口， K_1 分潮欧拉余流沿越南东岸流向西北，然后在洪麦岛一带绕转，沿海南岛西岸流出湾外； M_2 分潮的欧拉余流则都向东南流动，沿两岸流出湾外。欧拉余流的流速，在湾顶和海南岛西南沿岸， K_1 分潮可达20厘米/秒以上，量值几乎与实测流中的常流相当； M_2 分潮在湾北部沿岸和雷州半岛西岸，余流速度可达15厘米/秒。余流总的分布趋势是近岸浅水区域欧拉余流强， K_1 分潮一般在15厘米/秒左右， M_2 分潮约在8厘米/秒；在湾口和湾中部深水区域，流速较弱， K_1 分潮在10厘米/秒以下， M_2 分潮则在3~5厘米/秒。

拉格朗日余流场：北部湾拉格朗日余流的分布与欧拉余流的分布几乎一致，在湾的北部

同样形成一个逆时针的环流。余流的大小，仅在近岸浅海区域的 K_1 分潮比欧拉余流大 $0.5\sim 2.0$ 厘米/秒， M_2 分潮的变化幅度约 0.3 厘米/秒；在深水区域，余流速度基本不变。拉格朗日余流的方向，一般偏离欧拉余流方向 $2\sim 3^\circ$ ，在洪麦岛附近的一个小区域，其偏差稍大，可达 5° ，如图2和图5。

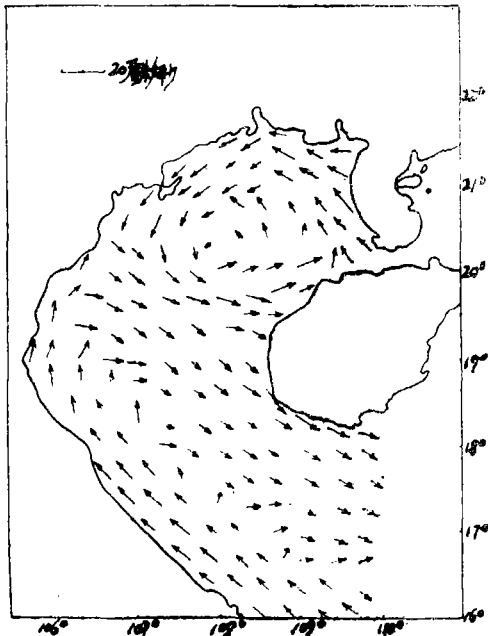


图1 欧拉余流场 (K_1 分潮)

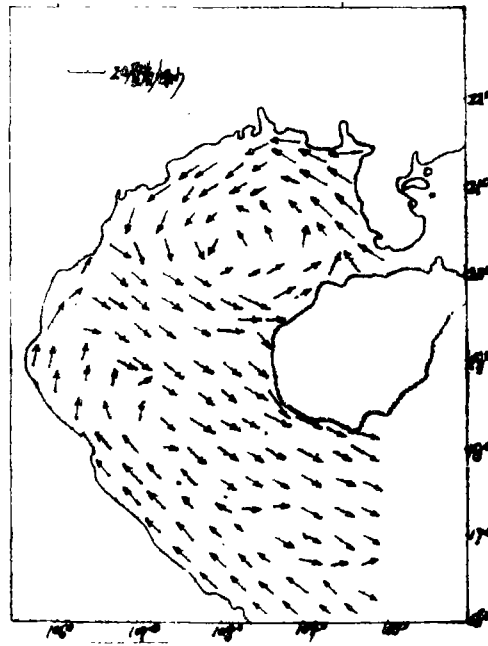


图2 拉格朗日余流场 (K_1 分潮)

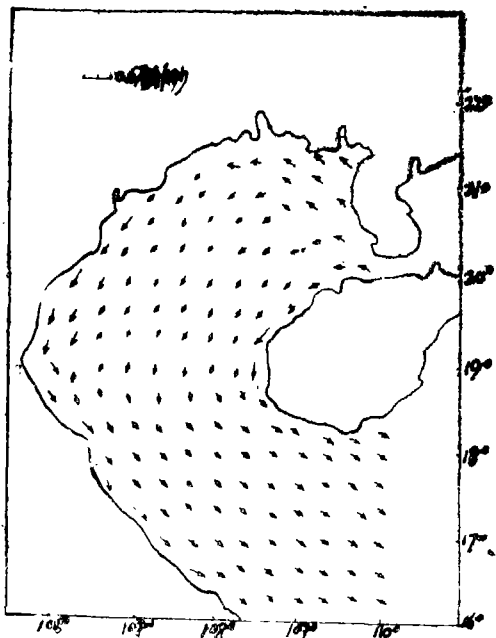


图3 斯托克斯漂流场 (K_1 分潮)

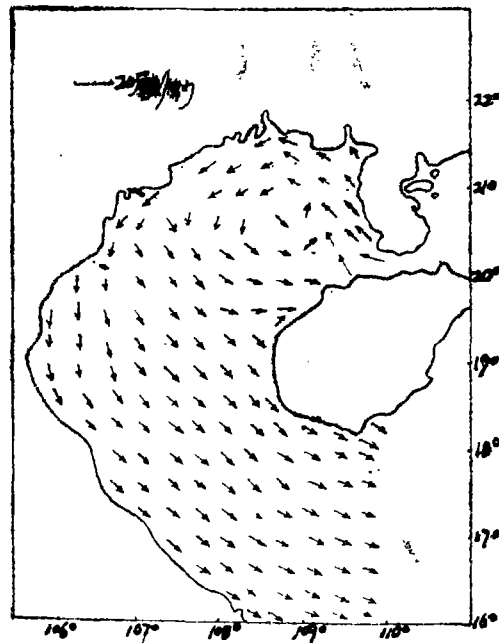
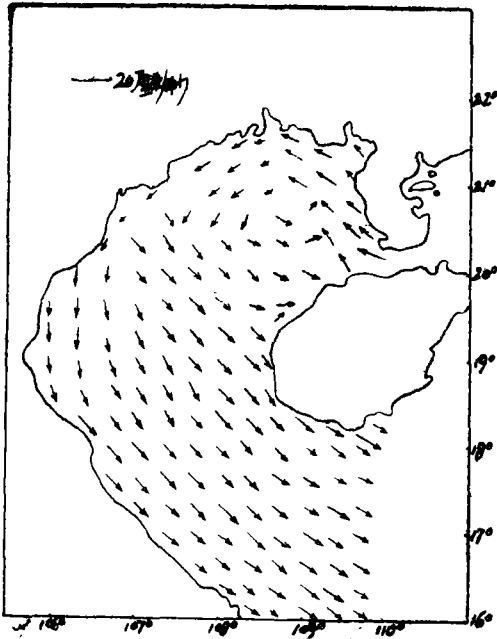
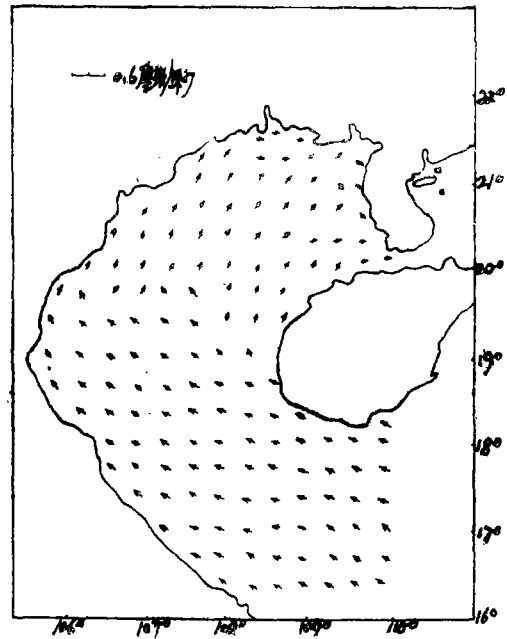


图4 欧拉余流场 (M_2 分潮)

图5 拉格朗日余流场 (M_2 分潮)图6 斯托克斯漂流场 (M_2 分潮)

斯托克斯漂流场：北部湾的斯托克斯漂流，不管是 K_1 分潮还是 M_2 分潮，都比欧拉余流和拉格朗日余流小得多。漂流最大流速不到2厘米/秒，在湾中部和湾口深水区域， K_1 分潮和 M_2 分潮的流速都在0.2厘米/秒以下，沿岸浅水区域的流速在0.3厘米/秒左右，大者达1厘米/秒以上。漂流的方向， K_1 分潮由湾顶流向湾口， M_2 分潮则由湾口流向湾顶，然后经琼州海峡流出湾外，如图3和图6。

笔者在对“北部湾潮波的数值模拟试验”研究中发现，凡是湾内出现强潮流的区域，几乎都伴随着较强的欧拉余流和拉格朗日余流，这可能与潮流的惯性效应有一定的关系，潮流惯性效应导致了潮波的变形，潮流强，其惯性效应就大，导致的潮波变形越严重，结果就出现了较强的欧拉余流和拉格朗日余流。在近岸浅水区域，底摩擦项在潮波基本方程组中已显示出重要的作用，它使潮波在传播过程中不断地减弱，从而使潮波发生变形，因此，近岸浅水区的剩余余流一般较大，尤其是斯托克斯漂流。

北部湾 K_1 分潮在湾口存在着一个左旋的潮波系统，但从上面的计算结果可以看出，潮汐剩余环流并未发现与之相对应的系统。许多实际计算都表明，海湾中的潮波系统与潮汐环流一般是不相对应的，这似乎可以说，潮波系统的分布变化，对潮汐剩余环流只起影响作用，并非起决定作用。

讨 论

非摩擦非线性的影响：我们把动力方程中的 $u \frac{\partial u}{\partial x}$ 、 $v \frac{\partial u}{\partial y}$ ……等非摩擦非线性项略去不计，按上述同样方法计算了北部湾 K_1 分潮的欧拉余流。与前面的结果相比，余流速度一般减小1—2厘米/秒，仅在湾顶和海南岛西岸一小区域的余流有所加强，极个别点的余流速度

比原来的结果要大2厘米/秒。在湾口以及湾中部深水区域，两者计算结果基本一致。余流的方向最大偏离8°，但余流的环流模式不变。

图7是湾内不同地点考虑与不考虑非线性项时，潮流在一个周期内的变化分布图。从图中可看出，在浅水弱流区，不考虑非线性项时，潮流只在前半周期出现一个峰值，但考虑了非线性项后，潮流在后半周期也出现了一个不大的峰值，因此，潮流在一个周期内出现了两个峰值；在强流区，非线性项使潮流在前半周期出现了两个峰值，并且，两个峰值的高度相差很大；在湾口深水区，非线性项对潮流的变化影响不大，两者计算结果基本一致。非线性项使潮流变化图的峰值在浅水弱流区减低，在强流区却升高。它使潮波运动出现较为明显的非线性现象。

底摩擦影响：图8是考虑与不考虑底摩擦影响的欧拉余流分布图。从图中可看出，余流方向两者一般偏离5—8°，大者可达28°。考虑底摩擦影响后，大部份区域的余流速度增大1—2厘米/秒；在近岸浅水区

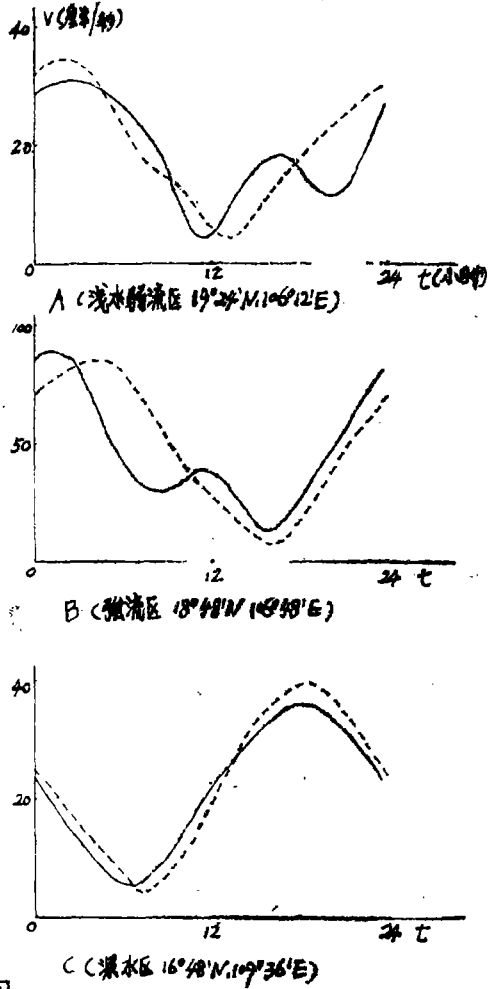


图7 考虑(虚线)非线性项的潮流变化

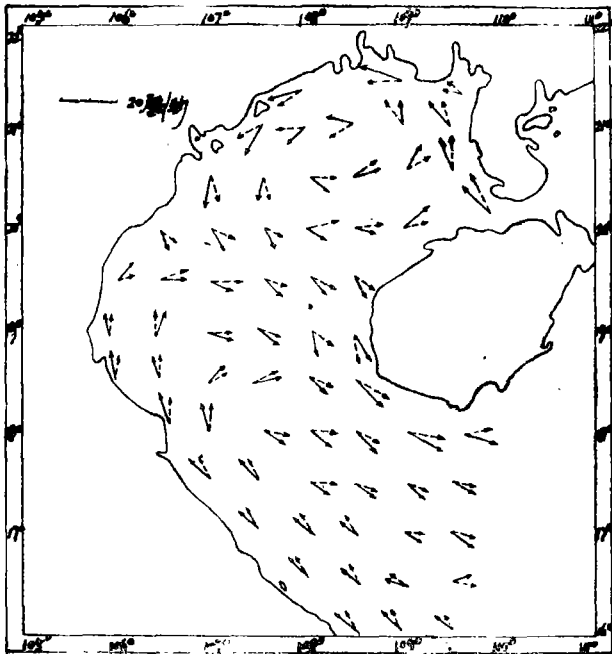


图8 底摩擦影响的欧拉余流场
考虑(实线)与不考虑(虚线)

域，余流速度的变化较为明显，增大幅度约在3—5厘米/秒；但在湾口深水区域，两者结果几乎不变。余流的环流中心有向北推移的趋势，但环流模型基本不变。

由图9看出，底摩擦对潮流变化的影响较为明显，尤其是浅水区域，它使潮流在前半周期的峰值出现时间推后，在后半周期却提前。而且，考虑了

底摩擦后，潮流的峰值减小了8厘米/秒。由此可知，底摩擦会使潮波在传播过程中，波长变短，传播速度不断减弱，从而导致了潮流的不规则变化。

水平湍流摩擦的影响：在动力学方程中令 $A_h = 0$ ，也就是说，不考虑水平湍流摩擦的影响。欧拉余流的计算结果变化甚微，环流的模式也不变。余流速度大部份区域减小，小数区域增大，但减小和增大的绝对值一般都不超过2厘米/秒。水平湍流摩擦使潮流在前半周期峰值的出现时间稍微延后，后半周期却提前。并且也使潮流峰值降低了2厘米/秒左右。由此可知，摩擦都会导致潮波在运动过程中，波长变短，速度变慢。但水平湍流摩擦对潮流的影响不如底摩擦的影响明显，是否考虑水平湍流摩擦，潮流的变化规律基本一致（如图10）。

上述各种情况都说明，非摩擦非线性项、底摩擦以及水平湍流摩擦对湾内潮汐余流的分布都有不同程度的影响。但潮汐剩余环流的形成，并非这些因素所引起，可能是湾内的底形分布和边界形状等原因所造成的。

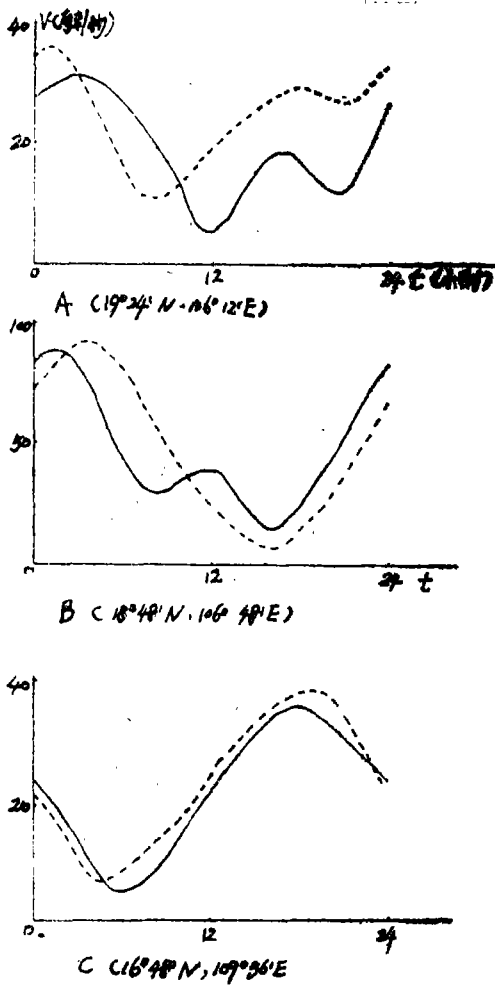


图9 考虑(实线)与不考虑(虚线)底摩擦时潮流变化图

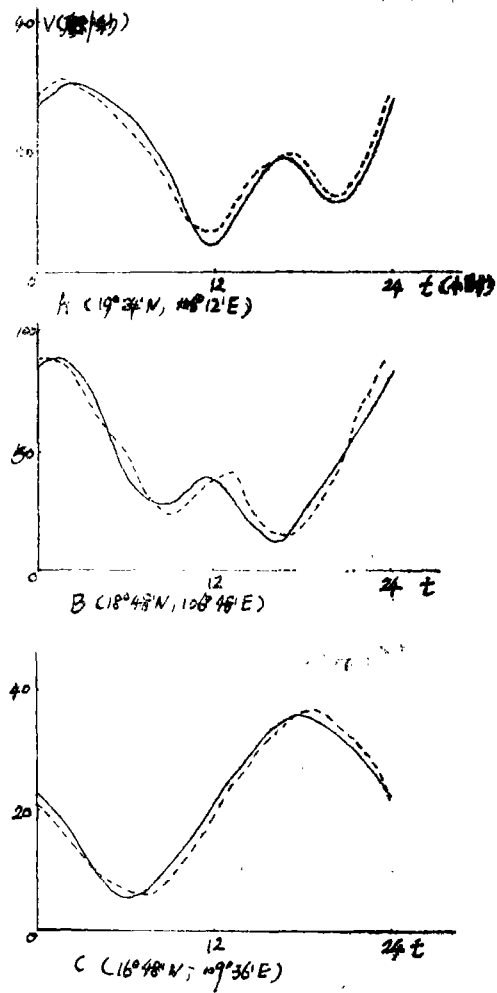


图10 考虑(实线)与不考虑(虚线)湍流摩擦时流变化图

结 语

K、T、Tee在研究芬地湾的潮汐余流时曾经指出，潮汐余流是由于非线性底摩擦效应、连续方程中的非线性项以及动量方程中的非线性平流项三种原因引起的。从上面计算结果可以看出，非线性底摩擦项以及动量方程中的非线性平流项这两种不同的非线性项所导致的非线性效应，使得潮波运动发生严重畸变，乃是北部湾潮汐余流产生的基本原因，但水平湍流摩擦对湾内潮汐余流的影响，也是不可忽略的。至于连续方程中非线性项的影响，本文没有进行研究。

正如前面指出的，北部湾潮汐剩余环流的形成可能主要取决于湾内边界形状及底形的分布，尤其是琼州海峡对该湾潮汐环流的形成，可能会起着举足轻重的作用。但湾内逆时针潮汐剩余环流的形成原因还不十分清楚，有待今后研究。

参 考 文 献

- [1] 陈宗镛：潮汐学，科学出版社1980，101—126，249—253
- [2] Tee, K.T., 1976, Tide-induced residual current, a 2-D Nonlinear Numerical Tidal Model, *J. Mar. Res.*, 34, NO. 4, 603—628
- [3] Oonishi, Yukio and Hideaki Kunishi, 1979, Water Exchange between Adjacent Vortices under an Additional Oscillatory Flow, *Journal of the Oceanographical Society of Japan*, Vol. 35, Nos. 3, 4, P136—140
- [4] G. I. Marchuk & B. A. Kagan, *Ocean Tides — Mathematical Model and Numerical Experiments*, (Translated by E. V. Blinova & L. Ya. Yusina), 1984, P76—95