第36集 海洋科学集刊 No. 36
1995年10月 STUDIA MASINA SINICA Oct., 1995

福建沿岸上升流数值研究

I. 台湾海峡潮汐、潮流的数值模拟*

颜廷壮 吴永成
(中国科学院海洋研究所)

台湾海峡内的潮运动是相当强烈和复杂的，一方面由于自海峡外传入的两支太平洋潮波在海峡内传播、相汇，形成强烈的潮运动；另一方面海峡内地形的复杂和岸线的曲折又使海峡内潮汐、潮流的分布变得特别复杂。自80年代以来，国内学者对海峡内的潮汐、潮流进行了不少研究(丁文兰，1983；方国洪等，1985；叶安乐等，1985，1986；李立等，1990；陈新忠，1983；郑文振等，1982)，并获得了有价值的成果。但是，他们对海峡内潮运动的过程、性质等尚有许多不同的看法。例如，关于 M_2 分潮最大流速同潮时线的分布状况，以上学者的结论各不相同，有的甚至差异很大。对海峡内 M_2 分潮最大流速同潮时线聚点(即圆流点)的问题也有两种观点。关于潮流分布状况，由于实测流资料缺乏，尽管已有的研究在潮流极值区的出现位置上基本达成共识，但在潮流流速量值的大小问题上仍有诸多分歧。

鉴于上述研究现状，为了对海峡内潮汐、潮流的分布状况有更准确、细致的认识，以便弄清海峡内潮过程在上升流形成过程中的作用，本文在已有研究的基础上，重新对台湾海峡内的潮汐、潮流作了数值计算。我们将讨论的重点放在以往研究中有争议的问题上，依据计算结果并结合实测资料提出我们的见解。

一、计算方法

采用 ADI 法结合破开算子法进行数值计算，基本方程为

$$\begin{cases} \dfrac{\partial H}{\partial t}+\dfrac{\partial U}{\partial x}+\dfrac{\partial V}{\partial y}=0 & (1) \\ \dfrac{\partial U}{\partial t}+\dfrac{\partial}{\partial x}\left(U\dfrac{U}{H}\right)+\dfrac{\partial}{\partial y}\left(V\dfrac{U}{H}\right)-fV=-gH\dfrac{\partial \xi}{\partial x}-\dfrac{gU(U^2+V^2)^{1/2}}{C^2H^2} & (2) \\ \dfrac{\partial V}{\partial t}+\dfrac{\partial}{\partial x}\left(U\dfrac{V}{H}\right)+\dfrac{\partial}{\partial y}\left(V\dfrac{V}{H}\right)+fU=-gH\dfrac{\partial \xi}{\partial y}-\dfrac{gV(U^2+V^2)^{1/2}}{C^2H^2} & (3) \end{cases}$$

在上式中，t 代表时间，x、y 轴的方向分别指向东偏南和北偏东，xy 平面与平均海

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第2331号。
本课题为国家重点基金资助项目，49136140号。
收稿日期：1994年4月5日。

平面重合。U,V 分别为 x、y 方向上的体积流量，$H=h+\xi$ 为海底到海面的实际深度，h 是自平均海面起算的深度，f 代表科氏参数(本计算中取为常数)，即 $f=0.0000592s^{-1}$。g 为重力加速度，C 为 chezy 系数(取值 0.0026)。用破开算子法将方程(1)—(3)破开为两组。

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\xi}{\partial t}+\dfrac{\partial(Hu)}{\partial x}=0 & (4)\\ \dfrac{\partial u}{\partial t}+u\left(\dfrac{\partial u}{\partial x}\right)+g\left[\dfrac{\partial\xi}{\partial x}+\dfrac{[u(u^2+v^2)^{1/2}]}{C^2H}\right]-fv=0 & (5)\\ \dfrac{\partial v}{\partial t}+u\left(\dfrac{\partial v}{\partial x}\right)=0 & (6)\end{cases}$$

$$\begin{cases}\dfrac{\partial\xi}{\partial t}+\dfrac{\partial(Hv)}{\partial y}=0 & (7)\\ \dfrac{\partial v}{\partial t}+v\left(\dfrac{\partial v}{\partial y}\right)+g\left[\dfrac{\partial\xi}{\partial y}+\dfrac{[v(u^2+v^2)^{1/2}]}{C^2H}\right]+fu=0 & (8)\\ \dfrac{\partial u}{\partial t}+v\left(\dfrac{\partial u}{\partial y}\right)=0 & (9)\end{cases}$$

上两组方程中的 $u=U/H$，$v=V/H$。

本计算采用交错网格，实际海区的坐标系及矩形计算网格见图 1 和图 2。格距 $\Delta x=16\text{km}$，$\Delta y=18\text{km}$，计算时间步长 $\Delta t=30\text{s}$。

首先给出南、北开边界上的水位值，其形式如下：

$$\xi(i,j,t)=\sum_{k=1,2}H_k(i,j,t)\cos(\sigma_k t-\theta_k(i,j)) \qquad (10)$$

其中，$H_k(i,j,t)$ 为潮振幅，$\theta_k(i,j)$ 为位相，σ_k 代表分潮角频率，$k=1,2$ 分别代表全日潮和半日潮。

计算时，在 $\Delta t\to(n+1/2)\Delta t$ 时瞬，根据方程(4)和(5)，用隐式算出 $\xi^{n+\frac{1}{2}}$ 再代入

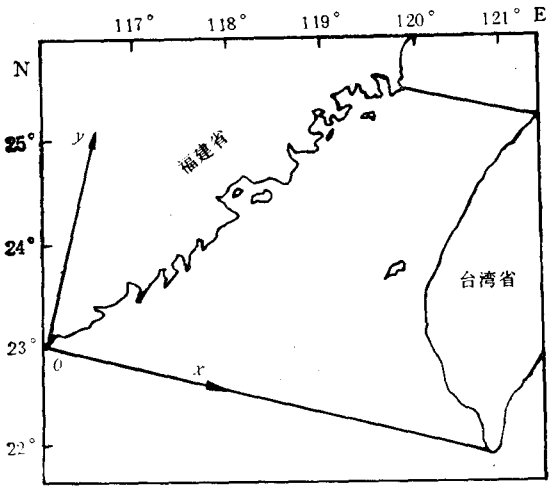

图 1 计算域与坐标系示意图

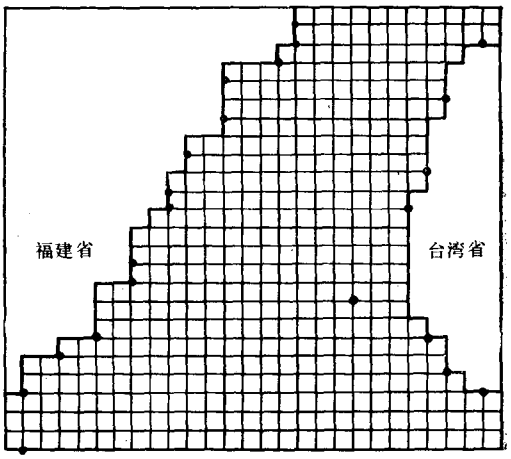

图 2 计算网格和验潮站位示意图

方程(6)，用显式求出 $V^{n+1/2}$。之后，将时间推后半步，在 $(n+1/2)\Delta t \to (n+1)\Delta t$ 时瞬，用方程(7)和(8)算出 ξ^{n+1} 和 V^{n+1}，再由方程(9)得到 U^{n+1}，用此方式反复交替运算，当计算至四个潮周期后，计算结果达到稳定。将算得的水位 ξ 值与沿岸测站依据调和常数推算得到的实测水位值进行比较。调整开边界水位，直到计算值与实测结果达到允许的误差范围内为止。

计算中所用初值皆取零。岸边界取固定直壁式边界，潮流法向流速 $U_n = 0$。

二、计算值与观测值的比较

图 3 和图 4 给出了 M_2 分潮调和常数计算值与观测值的相关点聚。实测资料取自英

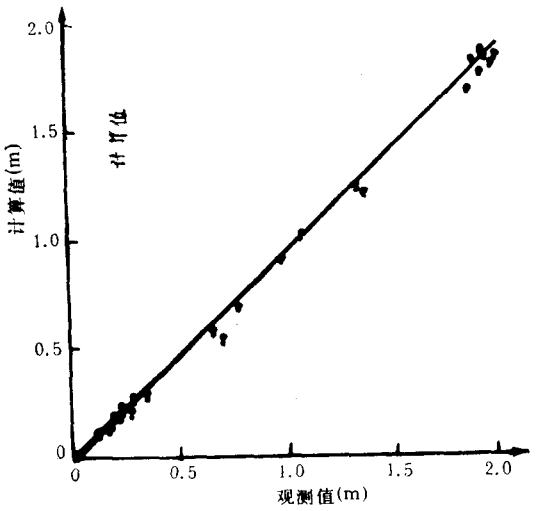

图 3　M_2 分潮振幅实测值与计算值的比较

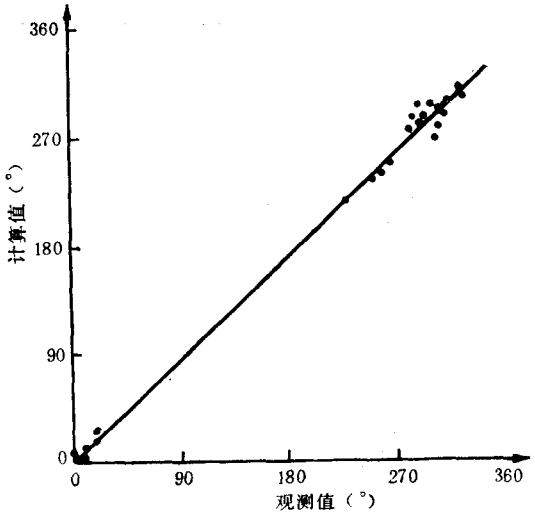

图 4　M_2 分潮位相实测值与计算值的比较

国的《China Sea Pilot》。我们共收集了台湾海峡东、西两岸及海峡内的 22 个验潮点(图 2)的实测资料，资料覆盖范围广，有较好的代表性。由图 3 和图 4 可看出，计算结果与实测值的符合情况是令人满意的。

三、计算结果和讨论

图 5 和图 6 给出了 M_2 分潮的同潮图。由图 5 可见，等振幅线的分布有如下几个特点：(1) 整体而言，海峡北部半日潮振幅大于南部，西部大于东部，例如，海峡西北部的大练岛近海潮差为 4.26m，远大于海峡东南部的高雄外海 0.41m 的潮差；(2) 台湾浅滩以及澎湖群岛西侧的潮振幅变化剧烈，形成等振幅密集区，在澎湖群岛西侧的等振幅密集区，东西向相距约两个计算网格 (32km) 的两点振幅差即达 1.0m 左右；(3) M_2 分潮最大振幅出现在海峡西北部的海坛岛近海，达 2.13m，最小值则位于台湾岛西南一侧的深水区，仅 0.12m。上述分布特点的形成，除了与海峡两端太平洋潮波的传入有关外，更重要的原

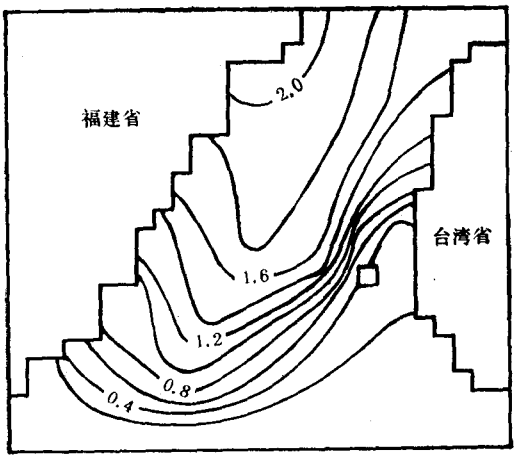

图 5 M_2 分潮等振幅线分布（m）

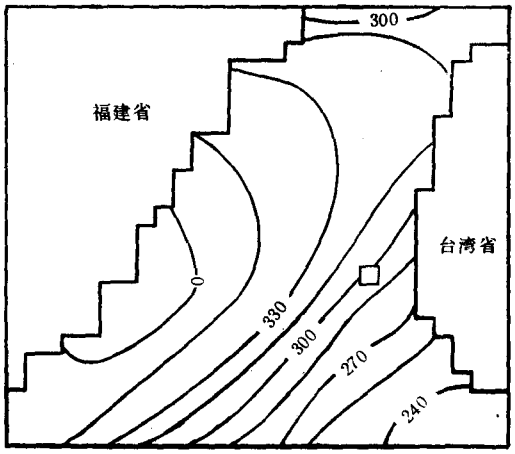

图 6 M_2 分潮同位相线分布(°)

因是海峡内地形及岸线走势对潮波传播过程的直接影响。例如，台湾浅滩和澎湖岛西侧的等振幅密集是由于北上潮波在由深水向浅水传播时能量守恒引起的，也可以说是浅水放大效应引起的。海峡的狭管效应造成了南下潮能的集中，表现为振幅值的偏高。然而自海峡北端向南传播的太平洋半日潮波对海峡内潮过程的影响可能并未像人们以往认为的那样占据支配地位，李立等（1990）曾根据资料分析结果提出过这种观点，我们得到的 M_2 分潮同位相和同潮时分布也证实了上述观点。由图 6 可见，受南下和北上两支潮波的共同影响，M_2 分潮同位相线的分布由海峡北部的西北-东南走向蜕化为海峡南部附近的西南-东北走向。M_2 分潮高潮的出现时间在海峡北部自东北向西南推迟，中部自东向西推迟；而海峡南部则由东南向西北顺延，例如，海峡东南部的澎湖群岛邻近海域，位相值在 300—315° 之间，而位于澎湖群岛西北的金门外海的位相值在 0° 左右，也就是说，澎湖群岛附近海域高潮出现时间较金门外海提前约 2h，表明有一支自海峡东南端传入海峡并向西北向传播的入射潮波存在，其影响范围直达金门附近海域。同理，根据同位相线分布判断，海峡北部南日岛邻近海域的高潮出现时间较海峡北端的大练岛外海推迟一个小时左右，也表明有一支自海峡北端向南传播的潮波存在。由于上述两支潮波在海峡中部附近相汇，造成海峡中部的高潮时自东向西推迟，东、西两侧高潮出现时间相差 2h。由图 7 可见，M_2 分潮同潮时线在海峡中北部分布较密集，南部则相对稀疏。最大流发生时刻在海峡北部自东北向西南推迟，在中部自东南向西北推迟，而在海峡南部则大致由东向西推迟。就整体而言，海峡东、西向最大潮流发生时间相差 2—3h，澎湖群岛北部（24°30′N）附近的同潮时线分布最密，并在 119°45′E，24°30′N 附近形成一同潮时线聚点，时间作逆时针方向旋转，该聚点位置较叶安乐等(1985)给出的位置偏东约 23km。比较 M_2 分潮潮流椭圆分布(图 8)发现，M_2 分潮同潮时线聚点位置与 M_2 分潮弱流区位置重合，但弱流区似呈条带状分布，大致位于福建沿岸的围头（24°40′N，118°30′E）至台湾一侧的线西（24°11′N，120°25′E）断面周围，呈西北—东南走向。弱流区内 M_2 分潮流椭圆长轴长度在 0.1—0.38m/s 之间。从图 8 还可看出，M_2 分潮潮流椭圆的旋转方向也大致以围头—

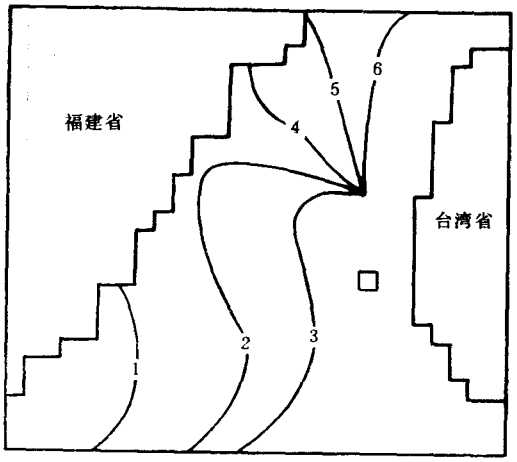

图 7　M_2 分潮最大流速同潮时线分布

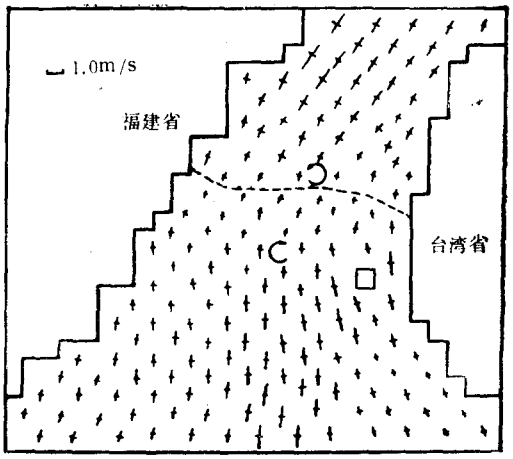

图 8　M_2 分潮流椭圆图（m/s）

线西断面为界划分，该断面以北按逆时针方向旋转，而断面以南，除局部小区域外，基本都按顺时针方向旋转。根据以上分析可以推断，海峡中部的围头一线西断面附近海域是南下和北进的两支太平洋半日潮波在海峡内的交汇处。如果以此断面作为海峡南、北部的分界线，则海峡南、北部海域的半日潮性质各主要受由海峡南北两端传入的两支太平洋半日潮波的控制。

除了上述两支半日潮波的传播及相互作用的影响外，由于水深变化及岸线走势的影响，台湾海峡内的 M_2 分潮潮流形成三个强流区和两个弱流区。强流区位置分别在海峡北部的“狭管地带”、澎湖群岛东、西两侧以及台湾浅滩。而且强流的出现位置恰与海峡内上升流出现的位置相吻合，因而穿越等深线运动的潮流对上升流的形成究竟有何种程度的影响，值得进一步研究。比较而言，海峡北部“狭管地带”偏西的大练岛近海 M_2 分潮流流速达 2.0m/s，是海峡内流速最强的海区。两个弱流区分别位于台湾岛西南侧高雄外海的深水区和海峡中部围头-线西断面邻近海域，其中高雄外海 M_2 分潮椭圆长轴多在 0.1—0.3m/s 之间，这显然与该海域大的水深有关。在海峡中部的弱流区，最小 M_2 分潮椭圆长轴不超过 0.1m/s，该弱流区是由南下和北上的两支强度相近而位相相反的半日潮波在此相汇形成的。这一现象也进一步表明了海峡内北上潮波的影响范围远大于以往人们的估计。

关于全日潮，为使计算方便，我们采用与方国洪等（1985）相似的做法，即以 K_1，O_1 分潮振幅和相角的平均值作为代表分潮，这样可以将半日潮和全日潮迅速分离出来。由图 9 可见，全日潮等振幅线的走势基本与海峡海岸线平行，而同位相线则大致与岸线方向垂直。该结果与方国洪等（1985）的同潮图分布趋势基本一致，只是位相值的大小有一些差异。同位相线的分布在海峡北部附近较密，而南部则相对稀疏。振幅分布呈西北高、东南低的趋势。由于高潮时间由东北向西南推迟，因此全日潮在海峡内的传播方向是自东北向西南的，这也表明 $(K_1 + O_1)/2$ 潮波主要具有前进波属性，其传播特征与半日潮有明显不同。海峡内的半日潮是由海峡两端传入的两支太平洋半日潮波共同作用的结果，而

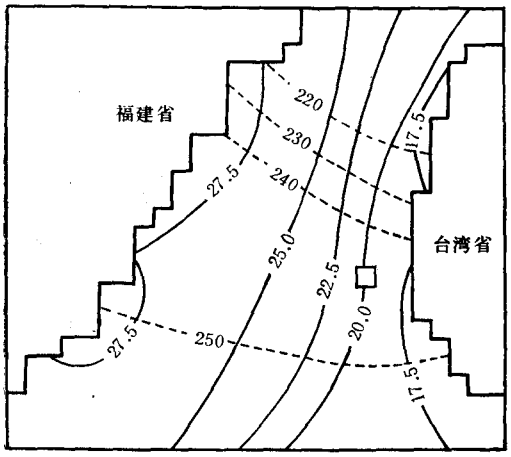

图 9 $(K_1 + O_1)/2$ 同潮图

—— 等振幅线(m); ---- 同位相线(°)

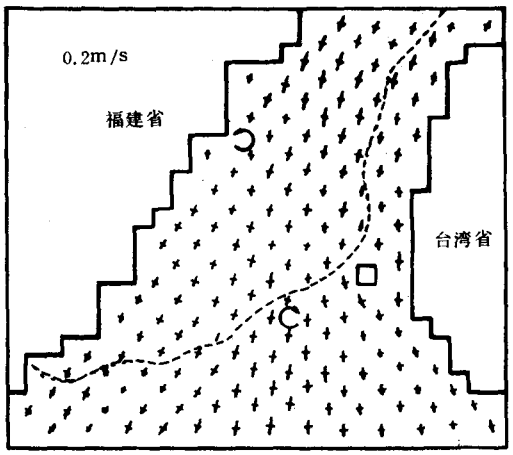

图 10 $(K_1 + O_1)/2$ 潮流椭圆分布 (m/s)

全日潮事实上是一支由东北向西南传播的凯尔文波。由于全日潮波在传播时的能量耗散较半日潮小得多(叶安乐等,1986),因此能够自东北向西南穿越台湾海峡,这也是全日潮和半日潮在传播动力学机制上的一个主要差别。由图 10 可见,全日潮流的分布主要受地形和岸线走势影响,椭圆长轴大致呈东北-西南走向,在海峡北部的"狭管区"以及海峡南部的台湾浅滩附近的流速值较大。一般而言,全日潮流流速远小于半日潮流速,最大流速值不超过 0.6m/s,除了海峡中部的 M_2 分潮弱流区外,海峡内的潮流基本上以半日潮流为主。

四、结 语

1. 台湾海峡中的潮运动是海峡内南下和北进两支太平洋半日潮系统共同作用的结果。其中北进潮波对海峡内潮运动的影响可达金门近海海域,大大超过了以往数值计算给出的范围。

2. 台湾一侧的线西 (24°11′N, 120°25′E) 至福建一侧的围头 (24°40′N, 118°30′E) 断面大致是南下和北进的两支半日潮波的相汇处。以此断面为界,海峡南、北两端的潮过程主要受各自一端传入的太平洋潮波系统控制。

3. 受潮波传播过程、地形和岸线等因素的影响,海峡内的 M_2 分潮潮流形成三个强流区和两个弱流区。最强流区出现在海峡西北部的大练岛外海,流速达 2m/s。台湾西南侧深水区 M_2 分潮流最小,一般在 0.1—0.3m/s。

4. 海峡内 M_2 分潮强流的出现位置与上升流的出现位置相当吻合,两者究竟存在何种关系,有必要作进一步探讨。

5. 由于全日潮与半日潮在传播机制上的差别,全日潮的同潮图分布与半日潮有较大差异。海峡内全日潮流流速最大不超过 0.6m/s,因此,海峡内的潮流主要以半日潮流为主。

6. 鉴于海峡内岸线走势的复杂，更细致的网格将有助于计算结果的改善。

参 考 文 献

丁文兰，1983，台湾海峡潮汐和潮流的分布特征，台湾海峡，2(1)：1—8。
方国洪，杨景飞，赵绪才，1985，台湾海峡潮汐和潮流的一个数值模型，海洋学报，7(1)：12—19。
叶安乐，陈宗镛，于宜法，1985，台湾海峡及其附近海域三维半日潮波的数值研究，海洋与湖沼，16(6)：439—449。
叶安乐，叶建华，1986，台湾海峡及其附近海域三维全日潮波的数值研究，海洋与湖沼，17(3)：260—265。
李立，王寿景，1990，对台湾海峡潮流的一点认识，海洋与湖沼，21(6)：578—580。
陈新忠，1983，台湾海峡及其两岸的潮流，海洋通报，2：16—24。
郑文振，陈福年，陈新忠，1982，台湾海峡的潮汐和潮流，台湾海峡，1(2)：1—4。

NUMERICAL STUDY ON UPWELLING ALONG FUJIAN COAST I. NUMERICAL MODELING ON TIDE AND TIDAL CURRENT IN THE TAIWAN STRAIT*

Yan Tingzhuang and Wu Yongcheng
(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences)

ABSTRACT

To study the effect of tidal mixture on the formation of upwelling along the Fujian coast, The tide and tidal current in the Taiwan Strait were calculated with the method of ADI and splitting operator. The present results show that the M_2 components of tidal wave entering the Strait from the south are stronger than those calculated previously and can influence the region adjoining Jinmen island. The section linked by two points, Weitou (24°40′N, 118°30′E) and Xianxi (24°11′N, 120°25′E), can be considered as the middle line of demarcation of the Strait. In the south and north sides of the Strait, The M_2 constituent features are determined mainly by the two M_2 tidal waves entering the Strait from the south and north, respectively. The section linked by Weitou and Xianxi is the intersect of the two branches of the M_2 tidal waves.

Affected by sea bottom topography、coastal line and tidal wave propagation, there are three regions with high tidal current velocity and two regions with low tidal current velocity in the Taiwan Strait. Tidal current velocity is high in the vicinity of the Haitan, Nanri, Penghu islands and Taiwan shoal, and low at the south-east side of Taiwan and the middle Strait. Results obtained from the model show that maximum velocity of M_2 tidal current is 2.0 m/s which appears in the offshore of Haitan island. Velocities in the low tidal current velocity region are generally about 0.1m/s—0.3m/s.

Average values of amplitude and phase of K_1 and O_1 constituents representing amplitude and phase of M_1 constituent were used to calculate M_1 tide and M_1 tidal current.

* Contribution No. 2331 from Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences