

# 黄茅海河口沿程异常潮差：I-理论模型研究<sup>\*</sup>

吴创收<sup>1,2</sup>, 刘欢<sup>1</sup>, 武亚菊<sup>1,3</sup>, 任杰<sup>1</sup>, 吴超羽<sup>1\*</sup>

(1. 中山大学 近岸海洋研究中心, 广东 广州 510275; 2. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062; 3. 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

**摘要:**依据水文年鉴资料, 研究分析发现, 黄茅海河口沿程潮差有先减小后增大的变化趋势, 这与珠江口其他喇叭型口门有很大差别。调和分析表明, 该区域主要受  $M_2$  分潮的影响,  $M_2$  分潮振幅的变化规律与潮差变化一致。因此, 分别利用 3 个解析模型, 讨论了河宽、摩擦和水深对沿程潮差的影响。结果表明, 黄茅海沿程异常潮差的变化主要是由其截面面积和摩擦的共同作用造成的。

**关键词:**黄茅海; 沿程潮差; 解析模型

**中图分类号:** P343.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-6647(2010)04-0436-09

河口是河流和海洋相交会的水域。水动力情况复杂多变。在潮汐河口, 影响河口动力的主要因素主要是潮汐、河流流量和河口的边界条件, 而表征潮汐强弱程度的一个非常重要的指标就是潮差。一般而言, 河口动力系统整体上主要是由正压驱动的, 沿程潮差的分布直接影响到河口整个动力场和消能过程。

河口中的潮汐现象历来为国内外学者所关注, 早在 19 世纪 30 年代, Green<sup>[1]</sup> 利用能量的观点来研究在一个河宽和水深缓慢变化的河口, 没有摩擦存在的情况下潮波的传播特点。结果表明潮波的振幅沿着上游方向, 随河宽和水深的减小而增大。但在真实河口, 河口辐聚的空间尺度变化比潮波波长的变化小的多, 而且摩擦在潮波传播中往往是一个不可忽略的、甚至是一个占支配地位的主要因素。1966 年, Ippen 在其杰出的专著《Estuary and Coastline Hydrodynamics》中, 依据波动方程和连续方程, 在一系列假定条件下, 导出了不同形状河口的理论解<sup>[2]</sup>。但由于从方程到假设条件都比较简化, 因此其解析模型离实际河口还有一定距离。其后, 国内外有不少更为深入和更接近实际的河口潮波动力研究。Godin 对加拿大圣劳伦斯河口的潮波进行了持续的研究, 他考虑了运动方程的平流非线性项和摩擦项, 分析了方程中各项的相对重要性, 较为深入的揭示了河口潮波传播的机理<sup>[3]</sup>。此外, Savenije 通过圣维南方程, 导出了河口潮波增大和衰减的方程<sup>[4]</sup>。我国学者对河口潮波也进行了较深入的研究, 较为突出的是杜勇等利用考虑摩擦的一维流体力学的基本方程, 分析了摩擦力对潮波传播的作用。他指出在线性摩擦系数量一定的情况下, 河口中浅水分潮波由两部分组成: 一部分来自河口以外, 是由湾外浅水非线性效应产生的; 另一部分则是由浅水非线性效应在湾内产生<sup>[5]</sup>; 以及叶安乐一系列关于潮汐进入强潮河口(杭州湾)的解析模式的研究<sup>[6-8]</sup>。以上分析基本都集中考虑了河口形状与摩擦对潮波传播的影响, 而没有考虑到潮波性质、地形和径流的影响。因此, 理论解在解决实际问题时, 仍具有一定的局限性。

本研究以黄茅海河口为例, 研究其沿程潮差的变化规律, 并利用解析模型, 分析影响该区域沿程潮差变化的因素。

## 1 研究区域概况

黄茅海河口位于珠江三角洲的西南部, 上游地区的潭江干流长 248 km, 平均坡降是 0.45‰, 水深变化

\* 收稿日期: 2009-09-01

资助项目: 国家自然科学基金项目——一个弱潮河口潮差沿程异常变化及其对河口动力场的影响(40676056)

作者简介: 吴创收(1981-), 男, 山西运城人, 博士, 主要从事河口动力学方面研究, E-mail: 52082601007@ecnu.cn

\* 通讯作者, E-mail: eeswcy@mail.sysu.edu.cn

(张 骞 编辑)

比较剧烈,支流众多。潭江和黄茅海地区通过崖门水道的银洲湖相连,银洲湖长大约 25 km,水深在 8~15 m,河宽在 1.5~2.1 m 之间,潭江的来水来沙通过崖门进入黄茅海。黄茅海作为崖门水道的出海口,是一个喇叭型的河口湾,河宽由湾口的荷包岛向湾顶逐渐束窄,湾顶的最窄处位于崖门炮台,宽约 0.6 km,进入河道以后河口宽度又逐渐加宽。其纳潮河段走向区别于珠江其他口门地区,在和江门水道汇合处发生了一个接近于 90°的大转弯(图 1)。崖门水道的径流主要来源于上游的潭江,资料显示崖门水道每年注入黄茅海的径流总量是 196 亿 m<sup>3</sup>,占到整个珠江径流总量的 6%。根据我国潮汐性质划分公式  $F=(H_{K1}+H_{O1})/H_{M2}$ ,崖门荷包岛站(1988)的  $F=1.35$ ,表明黄茅海河口潮汐是以  $M_2$  分潮占主要优势。

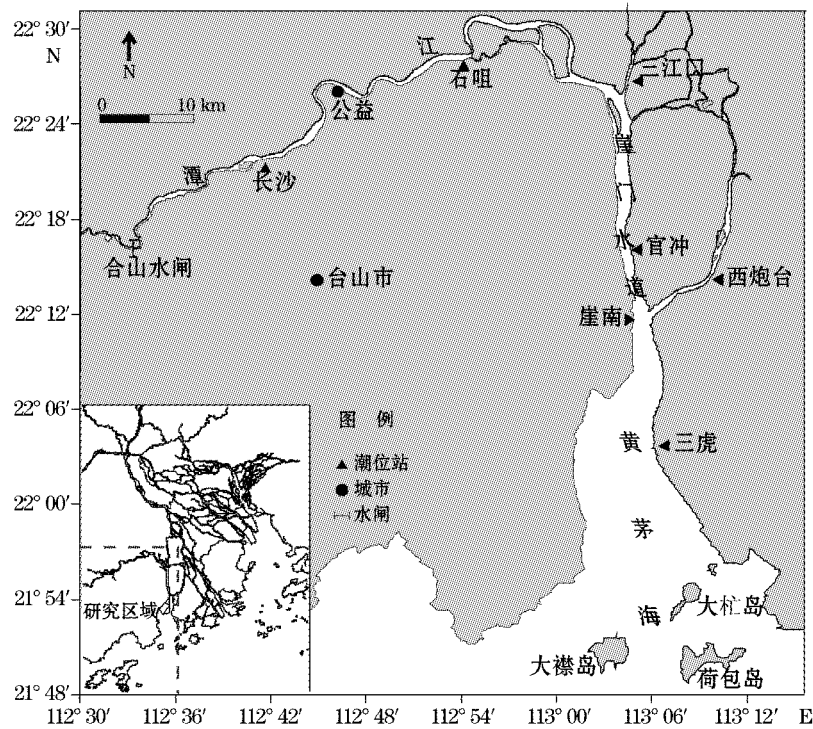


图 1 黄茅海河口地形

Fig. 1 Topography in the Huangmaohai River estuary

## 2 沿程潮差统计

根据 1979—1988 年 10 a 的水文年鉴资料统计可得,当潮波传入黄茅海河口湾以后,虽然口门地区的河口宽度逐渐束窄,但平均潮差却是由湾口荷包岛的 1.34 m 逐渐减少到湾顶崖南的 1.25 m;同时,由湾顶进入纳潮河道之后,虽然河床坡度较陡,但多年平均潮差却向上游不断递增,至距离湾口 100 余 km 的公益,潮差增加至 1.50 m(表 1)。

表 1 黄茅海河口多年平均潮差的沿程变化(1979—1988 年)

Table 1 The variability of annual mean tidal range along the Huangmaohai estuary (1979—1988)

项 目	站 点					
	荷包岛	崖南	黄冲	三江口	石咀	公益
潮差/m	1.34	1.25	1.23	1.25	1.36	1.50
距口门/km	0	38.5	48.7	63.5	87.5	104.0

注:荷包岛和崖南是 1988 年 4 月 17 日—5 月 15 日连续观测的平均值

河口沿程潮差变化受到三维地形、潮波性质、河流流量和底、侧边界介质等因素复杂作用。在珠江网河流域的其它口门地区,潮波进入口门的纳潮河道以后,潮差沿程向上基本上都是减小的。本研究对珠江的磨刀门水道和虎跳门水道的潮差进行了统计分析得出,崖门纳潮水道沿程的潮差变化和磨刀门水道以及虎门水道的潮差形成了鲜明的对比:在磨刀门水道,潮波进入河道以后,平均潮差是逐渐减小的;在虎门水道,潮差进入河道以后,平均潮差基本上是不变的,有一段距离也有可能是增大的;潮差在崖门纳潮水道中,沿河道向上游地区,表现为不断增大(表 2)。

表 2 崖门水道、虎门水道、磨刀门水道多年平均潮差沿程变化统计结果(1979—1988 年)

Table 2 The statistic results of annual mean tidal ranges respectively along the Yamen, Humen and Modaomen channels

站点	崖门水道		站点	虎门水道		站点	磨刀门水道	
	潮差/m	离崖门距离/km		潮差/m	离虎门距离/km		潮差/m	离磨刀门距离/km
官冲	1.21	10.2	泗盛	1.60	21.0	灯笼山	0.82	8.0
三江口	1.25	25.0	大盛	1.58	39.6	竹银	0.66	34.5
石咀	1.36	49.0	黄埔	1.60	44.9	叠石	0.54	46.5
长沙	1.38	79.5	中大	1.60	55.2	大鳌	0.54	51.0

### 3 潮汐调和分析

设河口潮汐是由  $i$  个分潮叠加而成,表达式为:

$$\zeta_i = H_0 + \sum_{i=1}^M f_i H_i \cos[\omega_i t + (V_0 + u)_i - g_i] \quad (1)$$

式中,  $M$  为分潮数;  $H_0$  为余水位;  $\omega_i = 2\pi/T_i$  为每个分潮的频率;  $T_i$  为每个分潮的周期;  $H_i$ 、 $g$  为相应分潮所产生的振幅和迟角。

根据已有的逐时资料(1988 年 4 月 16 日 00:00—5 月 15 日 00:00),对黄茅海河口的潮汐进行调和分析,得到 11 个分潮从湾口进入河口湾以及纳潮河段以后的振幅和迟角变化。结果表明:1)黄茅海河口的潮汐变化是半日分潮占主导作用的,  $M_2$  分潮的振幅占到了 4 个主要分潮振幅的 37.5%,全日分潮的  $O_1$  和  $K_1$  的振幅相对也比较大;2)  $M_2$  分潮的振幅从湾口的荷包岛站传到上游的长沙站的变化趋势是“增大—减小—增大”,其中三虎的振幅最大,是 0.52 m,但崖南和荷包岛相比,  $M_2$  分潮振幅仍然是减小的,其变化基本上和黄茅海河口的潮差沿程变化一致(表 3)。

表 3 黄茅海河口沿程各站分潮的振幅和迟角变化(1988 年 4 月 16 日—5 月 15 日)

Table 3 The amplitudes and delay angles of the tidal constituents at the stations along the coast of the Huangmaohai River estuary

分潮	站 点													
	荷包岛		三虎		崖南		官冲		三江口		石咀		长沙	
	H/m	g/°	H/m	g/°	H/m	g/°	H/m	g/°	H/m	g/°	H/m	g/°	H/m	g/°
$M_2$	0.49	278	0.52	299	0.46	316	0.47	334	0.45	354	0.47	23	0.51	71
$S_2$	0.17	308	0.17	325	0.17	339	0.16	356	0.17	13	0.17	43	0.17	90
$O_1$	0.31	254	0.28	264	0.28	274	0.26	280	0.26	293	0.26	300	0.25	322
$K_1$	0.35	304	0.35	321	0.34	333	0.33	342	0.34	353	0.35	6.0	0.35	30
$N_2$	0.04	252	0.07	276	0.06	288	0.06	308	0.06	308	0.05	344	0.03	41
$K_2$	0.04	329	0.04	348	0.04	1.7	0.04	18	0.04	18	0.04	66	0.04	113
$P_1$	0.11	311	0.11	328	0.11	340	0.11	349	0.11	349	0.11	13	0.11	36
$Q_1$	0.04	211	0.03	244	0.02	272	0.02	287	0.02	287	0.02	294	0.01	324
$M_4$	0.06	83	0.12	157	0.11	191	0.10	229	0.10	229	0.11	310	0.10	47
$MS_4$	0.03	140	0.06	213	0.05	237	0.04	281	0.04	281	0.06	357	0.03	83
$M_6$	0.00	304	0.01	8.5	0.01	58	0.01	93	0.01	93	0.01	232	0.01	352

### 4 解析模型

在河口潮汐运动中,由于方程的复杂性,通常要在一系列的假定条件下,通过简化运动方程来求得解析解,与数值模型相对而言,后者所求的是在一定精度范围内的近似解。虽然解析模型求得是理想条件下的结果,但在假设合理的前提下,仍能较为真实的反映物理过程,有助于加深对物理规律的认识。

#### 4.1 只考虑河宽变化

在研究变断面河道时,假定水深是常数,河宽随纵向距离指数变化(图 2),略去摩阻及地转偏向力影响,还略去断面渐变而产生的微小反射影响,根据潮波在传播过程中能量守恒,可推导出任意位置的振幅为:

$$H_x = H_0 e^{\frac{\delta}{2} \frac{(l-x)}{l}} \cos(\omega t - k(1-x)) \tag{2}$$

式中, $H$  为振幅; $l$  为湾口(荷包岛)距原点距离;频率  $\omega=2\pi/T$ ;波数  $k=2\pi/L$ ;波长  $L=CT$ ;波速  $C=\sqrt{gh}$ ;  $h$  为水深。对于  $M_2$  分潮,  $T=12.43$  h。脚标 0 是指湾口处的各项尺度,脚标  $x$  是指河道任意断面处的各项尺度,  $x=0$  为河道末端处(图 2)。

根据实测的数据计算得出黄茅海河口的平均水深  $h=6.2$  m,  $H_0$  为荷包岛处  $M_2$  分潮振幅,由调和分析结果给出,崖南距离初始位置的距离  $x=3.945$  km,荷包岛距离初始位置的距离  $l=38.565$  km,  $\delta$  根据指数拟合给出,代入(2)式得出崖南站  $M_2$  分潮振幅 48 h 分布情况(图 3)。计算结果显示,计算值是实测值的 3 倍左右,表明如果单纯考虑河宽的变化,无法解释潮差的变化规律,应受到其它因素的影响。

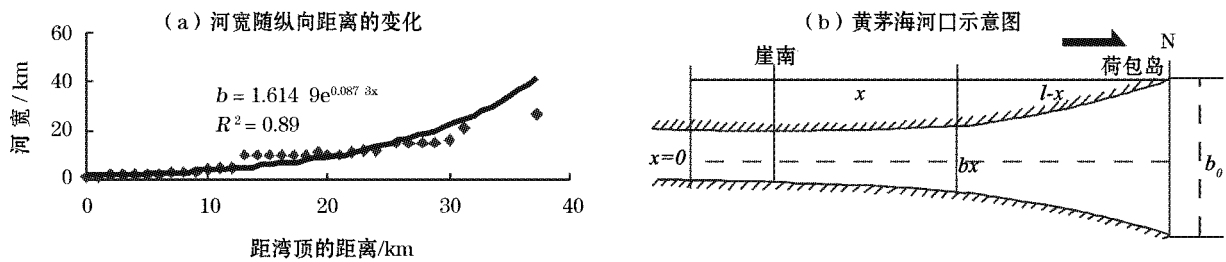


图 2 河宽沿纵向距离变化(崖南—荷包)

Fig. 2 The variation of river width along the river lengthways (Yanan-Hebao)

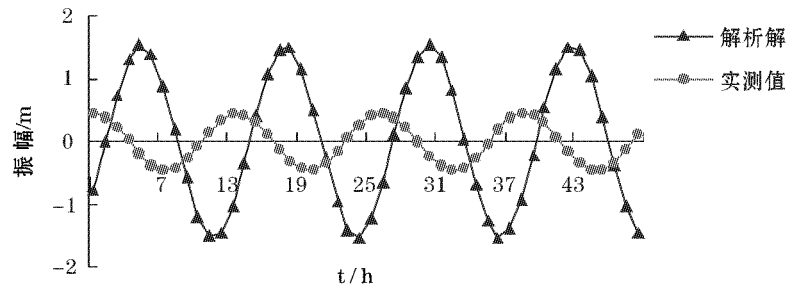


图 3 崖南站  $M_2$  分潮振幅对比

Fig. 3 Comparison between the measurement and the calculation of the  $M_2$  amplitude at Yanan

#### 4.2 考虑底摩擦及断面变化

在潮波传播过程中,由于底摩擦的作用,使潮波能量逐渐减小,因此,潮差也由外海向上游逐渐减小,直到潮能耗散殆尽,潮差为零。假设线性摩擦系数  $p=k'=\frac{8k'}{3\pi}H_0$ ,  $H_0$  为初始位置的特征流的振幅,深度  $h$  为常数,坐标原点位于湾口处, $x$  轴指向上游为正,断面宽度  $b=b_0e^{-cx}$ ,  $c$  表示的是河口宽度变化因子,则潮位和潮流复数形式的一般解为<sup>[5,6]</sup>:

$$\begin{aligned}\eta &= B_1 e^{[(\frac{c}{2} + \frac{R^{1/2}}{2} \cos \frac{\varphi}{2}) + i(\omega + \frac{R^{1/2}}{2} \sin \frac{\varphi}{2})x]} + B_2 e^{[(\frac{c}{2} - \frac{R^{1/2}}{2} \cos \frac{\varphi}{2}) + i(\omega - \frac{R^{1/2}}{2} \sin \frac{\varphi}{2})x]} \\ u &= A_1 e^{[(\frac{c}{2} + \frac{R^{1/2}}{2} \cos \frac{\varphi}{2}) + i(\omega + \frac{R^{1/2}}{2} \sin \frac{\varphi}{2})x]} + A_2 e^{[(\frac{c}{2} - \frac{R^{1/2}}{2} \cos \frac{\varphi}{2}) + i(\omega - \frac{R^{1/2}}{2} \sin \frac{\varphi}{2})x]}\end{aligned}\quad (3)$$

其中,

$$R = \sqrt{(c^2 - \frac{4\omega^2}{gh})^2 + 16(\frac{\omega p}{gh^2})^2}, \quad \varphi = \arctan[4 \frac{\omega p}{gh^2} / (c^2 - \frac{4\omega^2}{gh})] \quad (4)$$

考虑到黄茅海河口的断面宽度随  $x$  的变化是逐渐的,加上摩擦的影响,可以认为河口中的潮波主要呈现前进波的性质,因此可以近似取  $B_1=0, A_1=0$ , 则潮位和潮流的振幅可表示为:

$$\begin{aligned}\eta(x) &= |B_2| e^{sx} \\ H(x) &= |A_2| e^{sx}\end{aligned}\quad (5)$$

其中,

$$s = \frac{c}{2} - \frac{R^{1/2}}{2} \cos \frac{\varphi}{2} \quad (6)$$

设  $A_{21}$  和  $A_{22}$  是  $A_2$  的实部和虚部,可以得到以河口口门处潮位边界条件表示的  $A_{21}$  和  $A_{22}$ :

$$\begin{aligned}A_{21} &= H_{m_0} \frac{\frac{R^{1/2}}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \cos g_{m_0} + (\frac{c}{2} + \frac{R^{1/2}}{2} \cos \frac{\varphi}{2}) \sin g_{m_0}}{(\frac{R^{1/2}}{2} \sin \frac{\varphi}{2})^2 + (\frac{c}{2} + \frac{R^{1/2}}{2} \cos \frac{\varphi}{2})^2} \cdot \frac{\omega}{h} \\ A_{22} &= H_{m_0} \frac{\frac{R^{1/2}}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \sin g_{m_0} - (\frac{c}{2} + \frac{R^{1/2}}{2} \cos \frac{\varphi}{2}) \cos g_{m_0}}{(\frac{R^{1/2}}{2} \sin \frac{\varphi}{2})^2 + (\frac{c}{2} + \frac{R^{1/2}}{2} \cos \frac{\varphi}{2})^2} \cdot \frac{\omega}{h}\end{aligned}\quad (7)$$

式中,  $H_{m_0}$  为在初始位置某个分潮的潮位调和常数的振幅 ( $m$  是代表某个分潮的符号),  $g_{m_0}$  为初始位置某个分潮的调和常数的迟角,本研究中主要研究  $M_2$  分潮的变化。

在计算过程中,当  $c$  和  $h$  一定时,  $R$  和  $\varphi$  是线性摩擦系数  $p$  的函数,而  $p$  又由河口中的特征流振幅  $\tilde{H}$  所决定,因此,只有当  $\tilde{H}$  已知时,  $A_{21}$  和  $A_{22}$  才能由式(6)最后确定。一般而言,整个河口采用一个摩擦系数是不合适的,可将河口分成若干段,使得每一段的线性摩擦系数所对应的特征流振幅可选用该段中点的流振幅。

将黄茅海划分为 5 段,每段长度为  $L=10$  km,每一段的特征潮流振幅初步认为是一致的。已知黄茅海荷包岛处潮位调和常数  $H_{M_2}=0.49$  m,  $g_{M_2}=278^\circ$ 。同时引入一个假想的河口,其深度  $h=h_1=6.2$  m,  $c=c_0$ , 并且满足  $c_0^2 - \frac{4\omega^2}{gh_1}=0$ , 得出  $c_0=3.6 \times 10^{-5}$ 。

将黄茅海河口进行拟合,得到了河口宽度随纵向距离呈指数变化的河口湾(图 4),其指数变化关系式:  $b=268.54e^{-0.00009x}$ ,  $R^2=0.9316$ , 因此,  $c=0.00009$ 。由此可以确定比值  $r=c/c_0=0.00009/0.000036=2.5$ 。

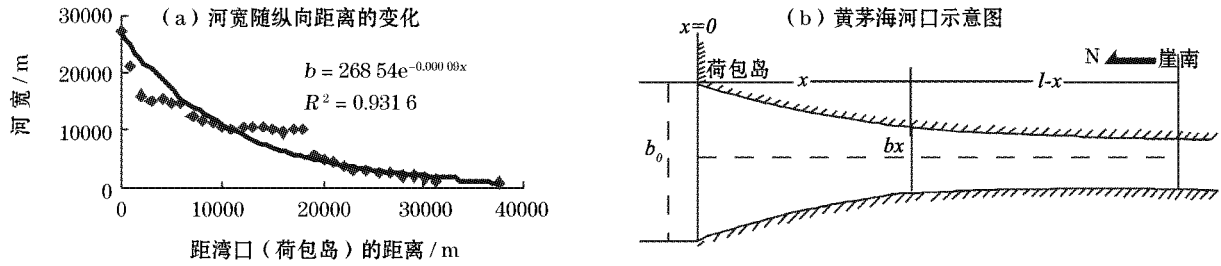


图 4 河宽沿纵向距离变化(荷包—崖南)

Fig. 4 Variations of river width along the river lengthways (Hebao - Yanan)

再假定线性摩擦系数量在此假想河口中正好等于  $2\omega h_1$ , 并以  $p_0$  表示, 则  $p_0 = 2\omega h_1 = 0.001\ 7$ , 同时特征流振幅可以由线性摩擦系数量求出:  $\tilde{H}_0 = \frac{3\pi}{8k} p_0 = 1.0$ , 其中,  $k = 0.002^{[6]}$ , 黄茅海地区口门处的潮流调和常数振幅可表为  $H_{m1} = a_1 \tilde{H}_0$ , 第一段的线性摩擦系数量可表为  $p_1 = a_1 p_0 e^{\lambda_1 L}$ , 由式(7)式可得:

$$a_1 = \frac{\omega_{H_{M_2}}}{\tilde{H}_0 h_1 \sqrt{\left(\frac{R^{1/2}}{2} \sin \frac{\varphi}{2}\right)^2 + \left(\frac{rc_0}{2} + \frac{R^{1/2}}{2} \cos \frac{\varphi}{2}\right)^2}} \quad (8)$$

可以用式(6)和式(8)以迭代的方法得出  $s_1 = 3.8 \times 10^{-6}$ ,  $a_1 = 0.125$ 。利用同样的计算原理, 可以得到其余各个河段的边界条件和特征流振幅。当各个河段的边界条件和特征流振幅确定以后, 可以计算出黄茅海地区的每一段的任意点处与时间因子无关部分的潮位:

$$Y(x) = (H_{mm} \cos g_{mm} - iH_{mm} \sin g_{mm}) e^{s_n x - i q_n x} \quad (9)$$

结果显示, 考虑摩擦和河宽变化以后,  $M_2$  分潮的振幅从湾口到湾顶也是逐渐增大的(图 5)。从而说明即使考虑了摩擦以后, 潮差依然沿程增加, 潮差变化必然还受到其他因素影响。

在本节的解析解中, 我们一方面认为黄茅海的水深是没有变化的, 在解析模型中取一个常数, 另外一方面就是线性摩擦系数  $p$  值都是给定的, 那么, 水深和线性摩擦系数量这 2 个参量会对潮波运动的结果造成什么样的影响? 通过灵敏度分析来考察: 1) 水深变大, 线性摩擦系数量不变; 2) 水深不变, 线性摩擦系数量变大。分析结果表明, 当水深加大时, 沿程的调和常数的振幅明显减小; 而线性摩擦系数量发生变化, 对潮波振幅造成的影响很小, 因此, 在黄茅海河口潮波传播过程中, 水深是一个不能忽略的因素(图 6)。

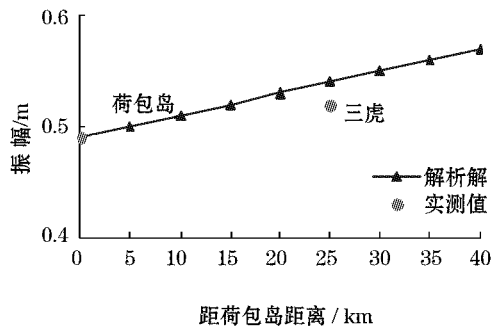


图 5 黄茅海河口  $M_2$  分潮振幅沿程变化

Fig. 5 Variation of the  $M_2$  amplitude along the coast of the Huangmaohai River estuary

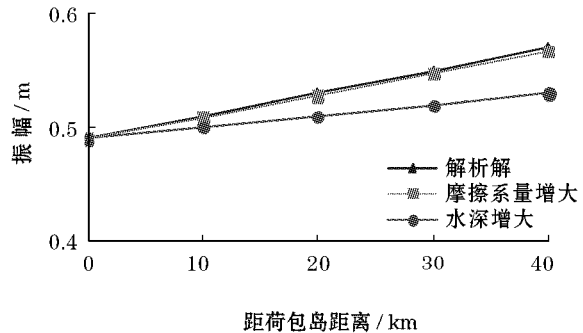


图 6  $M_2$  分潮灵敏度分析

Fig. 6 Sensitivity analysis of the  $M_2$  constituent

### 4.3 考虑底摩擦及截面面积变化(W. K. B 方法)

从以上分析可以看出,水下地形对黄茅海河口的潮波传播有重要影响,因此在解析模型中须考虑其变化。修日晨利用 W. K. B 方法,在计算过程中同时考虑了河宽、水深和摩擦三者间的相互作用,对潮波传播进行了研究<sup>[9]</sup>。假定海水的密度均匀,摩擦力以及运动方程均取线性形式变化,又假设海底起伏及水域宽度变化都比较缓慢,则由一维谐振潮波阻尼振动的运动方程以及连续方程,结合边界条件,推导出潮波振幅的表达式:

$$H = H_0 \sqrt{\frac{S_0}{S}} \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} e^{-\frac{\mu}{2} \int_0^x \sqrt{\rho + mdx}} \cos(\omega t - K_x) \quad (10)$$

$$m = \frac{\sigma^2 b}{gS} + \frac{1}{4S^2} \left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)^2 - \frac{1}{2S} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}, \rho^2 = \left[\frac{\sigma^2 b}{gS} + \frac{1}{4S^2} \left(\frac{\partial S}{\partial x}\right)^2 - \frac{1}{2S} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} - \frac{1}{2S} \frac{\partial^2 S}{\partial x^2}\right]^2 + \left(\frac{\mu \omega b}{gS}\right)^2$$

$$tg K_x = \frac{(a_0 a + b_0 b) \sin \frac{\sqrt{2}}{2} \int_0^x \sqrt{\rho + mdx} + (a_0 b - ab_0) \cos \frac{\sqrt{2}}{2} \int_0^x \sqrt{\rho + mdx}}{(a_0 a + b_0 b) \cos \frac{\sqrt{2}}{2} \int_0^x \sqrt{\rho + mdx} + (a_0 b - ab_0) \sin \frac{\sqrt{2}}{2} \int_0^x \sqrt{\rho + mdx}} \quad (11)$$

式中,  $H$  为潮波的振幅;  $\omega$  为角频率;  $S$  为河道截面面积;  $b$  为河道断面的宽度;  $\mu$  为河道的摩擦系数;  $0$  表示初始位置。

将黄茅海河口划分成河口湾(荷包岛—崖南)和纳潮河道(官冲—长沙)2 部分,分别对截面面积随纵向距离的变化进行拟合,拟合结果表明,截面面积基本符合指数变化规律(图 7)。

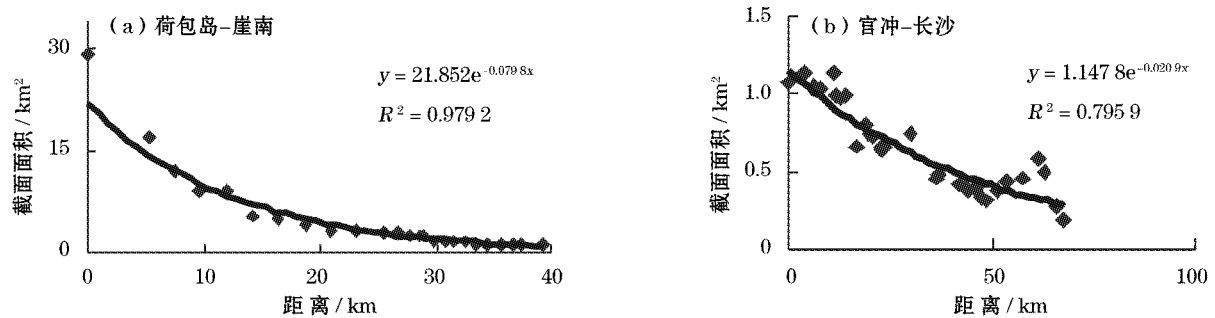


图 7 截面面积随纵向距离变化

Fig. 7 Variation of the cross section area along the river

将其代入式(11),可得  $m$  和  $\rho^2$  的表达式,从而得到潮波振幅的简化式:

$$H = H_0 \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho}} e^{-\frac{1}{2} \alpha x - \frac{\mu}{2} \int_0^x \sqrt{\rho + mdx}} \quad (12)$$

式中,  $\alpha$  为衰减系数;摩擦系数  $\mu$  取常数。

从式(8)可以得出,在潮波传播的过程中,如果河道的截面面积减小的话,潮波的振幅是增大的,同时摩擦力的作用使得潮波的振幅减小。而黄茅海的实际计算结果表明,截面面积沿程是指数性衰减,导致了潮波在传播过程中,单位面积上的潮波能量增大,同时摩擦消耗了一定的能量,黄茅海沿程潮差变化是由截面面积和摩擦两者共同作用产生的。从荷包岛到三虎这一段,潮波能量的辐聚大于摩擦耗散,因此三虎的  $M_2$  分

潮振幅大于荷包岛;而从三虎到崖南这一段,潮波能量辐聚小于摩擦耗散,从而导致崖南的  $M_2$  分潮振幅小于三虎(图 8a)。在纳潮河道内,解析模型与实际调和分析的结果也较为吻合,表明解析模型能较好反映该区域的实际情况(图 8b),截面面积和摩擦共同控制了潮波振幅的变化。

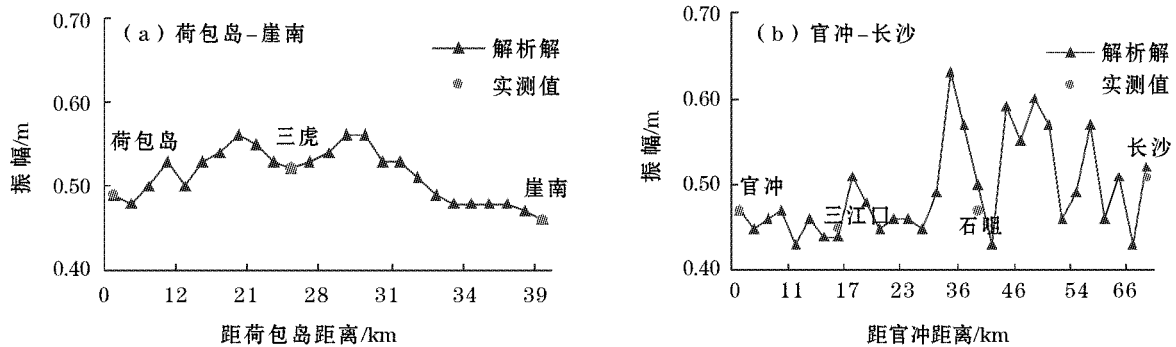


图 8  $M_2$  分潮振幅沿程变化  
Fig. 8 Variation of the  $M_2$  amplitude along the river

## 5 结 论

针对黄茅海河口沿程异常潮差变化的特殊规律,利用潮差变化的解析模型对其成因进行了分析,得出了以下几点结论:

1) 调和分析表明,黄茅海河口主要受分潮  $M_2$  的影响,  $M_2$  分潮的振幅由湾口向上游纳潮河道呈现先减小后增大的变化趋势,与沿程潮差的变化基本一致。

2) 在解析模型中,单独考虑河宽的变化,或者只考虑河宽和摩擦,其潮差都是沿程增大的,通过灵敏度分析可以发现,水深是影响潮差变化的一个重要因素。利用 W. K. B 解析模型,同时考虑河宽、水深以及摩擦 3 个因素,解析解与实测值吻合较好,因此认为黄茅海沿程异常潮差的变化主要是由其截面面积和摩擦的共同作用造成的。

3) 截面面积和摩擦在不同区域内的作用不尽相同。在荷包岛至三虎一段,潮波能量辐聚大于摩擦耗能作用,因此潮差沿程呈现增大趋势;而在三虎至崖南一段,潮能辐聚小于摩擦耗能,因此潮差沿程减小。

## 参考文献 (References):

- [1] GREEN G. On the motion of waves in a variable canal of small depth and width[J]. TRANS. Cambridge Philos. Soc., 1837, 6: 458-462.
- [2] IPPEN A T. Estuary and coastline hydrodynamics[M]. US: McGraw-Hill, 1966: 493-522.
- [3] GODIN G. The Propagation of tides up Rivers with Special Considerations on the Upper Sanit Lawrence river[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 48: 307-324.
- [4] SAVENIJE H H G. A simple analytical expression to describe tidal damping or amplification[J]. Journal of Hydrology, 2001, 243: 205-215.
- [5] DU Y, CHEN Z Y, YE A L. Research of nonlinear effect in a kind of estuaries with gradually varying cross-section[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1989, 11(6): 669-682. 杜勇,陈宗铺,叶安乐. 一种变截面河口中非线性潮波的研究[J]. 海洋学报, 1989, 11(6): 669-682.
- [6] YE A L. Tidal response in a kind of estuaries with gradually varying cross-section[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1984, 14(2): 1-11. 叶安乐. 一种变截面河口中的潮汐响应[J]. 山东海洋学院学报, 1984, 14(2): 1-11.
- [7] YE A L. Tidal partition and transport of tidal wave energies in varying cross-section estuaries and their application to the estimate of tidal energies in the Hangzhou bay[J]. Oceanologia Et Limnologia Sinica, 1989, 20(4): 322-329. 叶安乐. 一种变截面河口中潮能的劈分与

- 传输及其对杭州湾潮能估算的应用[J]. 海洋与湖沼, 1989, 20(4): 322-329.
- [8] YE A L, LI F Q. Physical Oceanography[M]. Qingdao: Ocean University of Qingdao Press, 1982. 叶安乐, 李凤歧. 物理海洋学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992.
- [9] XIU R C. Research of tide propagating in the variational cross-sectional area of the waters[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1983, 5(6): 687-693. 修日晨. 潮波在截面积变化水域中传播的探讨[J]. 海洋学报, 1983, 5(6): 687-693.

## Study on Abnormal Tidal Range Along Coast of Huangmaohai River Estuary: I - Theoretical Model

WU Chuang-shou<sup>1,2</sup>, LIU Huan<sup>1</sup>, WU Ya-ju<sup>1,3</sup>, REN Jie<sup>1</sup>, WU Chao-yu<sup>1</sup>

- (1. *Research Center of Coastal Ocean Science and Technology, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;*  
2. *State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China;*  
3. *Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China*)

**Abstract:** According to the statistic data of the hydrological almanac, the tidal range becomes diminished in the lower upstream of the Huangmaohai River estuary, and then enlarged in the further upstream. This phenomenon is very different from those of the other trumpet-like estuaries of the Pearl River. It is learnt from the harmonic analysis that this area is effected mainly by the M2 constituent. The tidal range variation in the estuary is consistent with the variation of the M2 constituent amplitude in the estuary. Three analytical models are employed to discuss the effects of river width, friction, and river depth on the tidal range. It is shown in the result that the abnormal tidal range along the upstream of the Huangmaohai estuary is mainly caused by the effects of the river cross section area and the friction.

**Key words:** the Huangmaohai estuary; tidal ranges along the coast; analytical model

**Received:** September 1, 2009