

学校编码: 10384  
学号: 22320121151356

密级\_\_

廈門大學

硕士学位论文

# 厦门湾潮流不对称的数值研究

Tidal Asymmetry in the Xiamen Bay:

Numerical Model Approach

刘勇

指导教师姓名: 江毓武教授

专业名称: 物理海洋学

论文提交日期: 2015年05月

论文答辩时间: 2015年05月

2015年05月

## 厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下，独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果，均在文中以适当方式明确标明，并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范（试行）》。

另外，该学位论文为（ 海洋数值模型 ）课题组的研究成果，获得（ 海洋数值模型 ）课题组的资助，在（ 江毓武老师 ）实验室完成。（请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称，未有此项声明内容的，可以不作特别声明。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

## 目录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 选题背景及研究意义.....	1
1.2 潮不对称研究现状.....	2
1.3 研究目标及内容.....	7
第二章 厦门湾水动力特征.....	9
2.1 研究区域概况.....	9
2.1.1 潮汐.....	9
2.1.2 潮流.....	10
2.1.3 余流.....	10
2.2 观测数据.....	10
第三章 厦门湾潮流模型.....	13
3.1 数值模式介绍.....	13
3.1.1 控制方程.....	13
3.1.2 边界条件.....	14
3.1.3 随地形坐标系.....	15
3.1.4 时间步长设置.....	16
3.1.5 变边界处理.....	16
3.2 模式设置及验证.....	17
3.2.1 模式计算区域网格设计.....	17
3.2.2 模型参数及开边界条件.....	19
3.2.3 模型验证.....	20
3.3 厦门湾潮汐特征.....	25
3.4 厦门湾表层流场图.....	26
3.5 厦门湾余流特征分析.....	28

3.6 潮能通量和潮能耗散 .....	29
3.6.1 潮能通量 .....	29
3.6.2 潮能耗散 .....	31
3.7 本章小结 .....	32
<b>第四章 厦门湾潮流不对称分析 .....</b>	<b>34</b>
4.1 偏度 .....	34
4.2 敏感性实验 .....	36
4.3 分潮组合的影响 .....	45
4.4 理想模型 .....	52
4.5 本章小结 .....	55
<b>第五章 总结与展望 .....</b>	<b>57</b>
5.1 本文完成工作与结论 .....	57
5.2 不足与展望 .....	58
参考文献 .....	60
致谢 .....	65

## Contents

Abstract in Chinese .....	I
Abstract in English.....	III
Chapter 1 Introduction .....	1
1.1 Research background and significance .....	1
1.2 Overview of tidal asymmetry research .....	2
1.3 Goals and contents of this study .....	7
Chapter 2 Hydrodynamics of the Xiamen Bay .....	9
2.1 Characters of research domain.....	9
2.1.1 Tide range.....	9
2.1.2 Tidal current .....	10
2.1.3 Residual current .....	10
2.2 Observed data.....	10
Chapter 3 The tidal model in the Xiamen Bay .....	13
3.1 Model description .....	13
3.1.1 Equations.....	13
3.1.2 Boundary condition.....	14
3.1.3 Vertical coordinate system .....	15
3.1.4 Stability condition .....	16
3.1.5 Wetting-drying process .....	16
3.2 Model configuration and validation.....	17
3.2.1 Model domain .....	17
3.2.2 Model configuration and OBC.....	19
3.2.3 Model validation .....	20
3.3 Tidal characteristics in the Xiamen Bay. ....	25
3.4 Distributions of the surface tidal current .....	26
3.5 Residual current .....	28

3.6 Tidal energy and energy dissipation.....	29
3.6.1 Tidal energy .....	29
3.6.2 Tidal energy dissipation .....	31
3.7 Conclusions.....	32
<b>Chapter 4 Tidal asymmetry in the Xiamen Bay .....</b>	<b>34</b>
4.1 Introduction of Skewness.....	34
4.2 Sensitivity experiments.....	36
4.3 Contribution of different combine of tidal constituents.....	45
4.4 Idealized model.....	52
4.5 Conclusions.....	55
<b>Chapter 5 Summary and expectation.....</b>	<b>57</b>
5.1 Conclusions .....	57
5.2 Shortages and outlook.....	58
<b>References.....</b>	<b>60</b>
<b>Acknowledgements.....</b>	<b>65</b>

## 摘要

本文基于 ROMS(Regional Ocean Modeling System)建立厦门湾的三维水动力变边界模型,模拟厦门湾的水动力情况,并首次对厦门湾的潮流不对称现象进行了研究。厦门湾潮流的实测数据表明,湾内存在潮流不对称现象,猴屿站和鼓浪屿站最大涨落潮流速不一致。将模型结果与实测数据进行验证,结果表明模型能够很好的反映厦门湾内潮位和潮流的变化情况,并再现了猴屿站和鼓浪屿站的潮流不对称现象。

厦门湾为正规半日潮海区,  $M_2$  分潮为主要分潮,由模型结果得到了厦门湾内  $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$  四个分潮的同潮图和潮能通量分布图,分析可得:湾内潮波主要由台湾海峡传入,潮波进入厦门湾后,一部分由大金门岛东侧传入围头湾,而后向西传播,之后转向西北方向进入同安湾;另一部分在大金门岛南侧向西传播并分为两支,一支转向西北方向,进入九龙江河口及厦门西海域,另一支向北传播,与大金门岛西北侧潮波汇合,进入同安湾。厦门湾内潮波兼有前进波和驻波的特性。传入厦门湾的潮能主要通过底摩擦耗散,水平扩散引起的耗散所占比例较小,底摩擦对潮能的耗散受地形影响较大,耗散大的区域主要分布在厦门湾内的主要水道附近。

本文通过偏度来分析厦门湾内的潮流不对称现象,偏度能很好的反映出潮流不对称的类型和强度。结合厦门湾现状,设计敏感性实验来分析潮流不对称产生的原因及近年来的用海和清淤等项目对厦门湾水动力情况的影响,实验结果表明:西海域落潮为主型潮流不对称产生的主要原因是外海潮波在  $M_2$ 、 $M_4$  和  $M_6$  分潮共同作用下发生形变,在传入厦门湾西海域之前即为落潮为主型,且  $M_6$  分潮对传入潮波的不对称贡献较大,西海域北侧潮滩加强了猴屿站落潮为主型潮流不对称,鼓浪屿站涨潮为主型潮流不对称主要由底摩擦效应导致。

本文分析了近年来厦门湾内的用海和清淤等项目对湾内的水动力情况的影响,发现  $M_2$  分潮的振幅及潮能通量均有较大的改变。在 1938 年岸线情况下,厦门岛附近海域  $M_2$  分潮振幅较现状岸线增大约 10 cm,厦门西海域及同安湾湾口处潮能通量也比现状岸线下增加约  $0.4 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$ 。对所建立的理想模型结果进行分析,发现潮滩是潮能通量的汇,潮滩面积减小后,潮能通量及  $M_2$  分潮振幅均会减少。在涨落潮过程中,潮滩为潮能通量的临时储存池,且该区域潮能也将



在底摩擦作用下发生耗散。潮滩面积减少后，进入湾内的潮能通量将减少，海堤开口、清淤、围填海等工程将改变厦门湾的潮不对称情况及潮能通量的分布情况。

关键词：潮不对称；偏度；ROMS；数值模拟；厦门湾；围填海

厦门大学博硕士论文摘要库

## Abstract

In this article, a 3D model based on ROMS (Regional Ocean Modeling System) with wetting and drying processes is used to study the hydrodynamics in the Xiamen Bay, China. Measured data show a typical tidal asymmetry in the Xiamen Bay. The speed of ebbing and flooding in Gulangyu does not accord with that of Houyu. The hydrodynamic model was verified with the data collected in different sites of the Xiamen Bay. Model result indicates that this model provides a reasonable simulation of the temporal and spatial distributions of the tidal current in the Xiamen Bay. This thesis reports the tidal asymmetry of Xiamen Bay for the first time.

Xiamen Bay is a typical tide-controlled shallow estuary consisting of extensive tidal flats and  $M_2$  is the dominant tidal constituent in this estuary. We used the model to calculate the amplitude and phase of  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $O_1$ ,  $K_1$  tidal components, then analyzed the amount of the tidal energy flux entering the Xiamen Bay and estimate the amount of the energy dissipated inside it. The distribution of tidal energy flux show that tidal wave propagate into the Xiamen bay from Taiwan Strait (TWS), one goes into Weitou Bay from the east to Jinmen island and travels westward into the Tongan bay, other propagates flow along the south coast of Jinmen island into Jiulong estuary and the western of Xiamen island, The tidal wave in the Xiamen Bay is the combination of progressive wave and standing wave. Most of the tidal energy is dissipated via bottom friction in some channels of the Xiamen Bay, the energy dissipation in vertical and horizontal diffusion are less important.

This article analyzes the tidal asymmetry of the Xiamen Bay through statistical skewness, which can correctly reflects the mode and intension of it. Combining current situation in the Xiamen Bay, we configure some sensitivity experiments to investigate the effect of coastal project on the hydrodynamics. Results show that ebb-dominance in western side of the Xiamen Bay are due to the tide entering estuary is ebb-dominant, mainly caused by combination of  $M_2$ ,  $M_4$  and  $M_6$ , where  $M_6$  plays an important role, and the extensive wetland in the north of western Xiamen Bay augments the ebb-dominance tidal asymmetry.

The redistribution of tidal energy flux and amplitude of  $M_2$  due to coastal project are examined by our 3D model. In the case which use the coastline of 1938, amplitude of  $M_2$  increased 10 cm around Xiamen Island, and tidal energy flux increased  $0.4 \times 10^5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$  correspondingly. Results of our idealized model indicate that the tidal flat are

the sink of tidal energy flux since tidal energy flux can be transported to the tidal flat when it is flooding, and dissipate on it.

Above all, reclamation of the tidal flat will decrease the tidal energy flux entering the bay, coastal project will changed the tidal asymmetry of Xiamen bay and redistribute the tidal energy flux.

Key words: Tidal asymmetry; Skewness; Coastal project; ROMS; Numerical modeling; Xiamen Bay

厦门大学博硕士论文摘要库

## 第一章 绪论

### 1.1 选题背景及研究意义

河口海湾区位于海洋与陆地的交界处，是河流与海洋的过渡区域，受波浪、潮流、径流等动力因素的共同作用，丰富的海洋资源和便捷的航运交通为经济的发展提供了强力的支撑。近年来，随着经济的发展和城市化、工业化进程的不断加快，人类活动对河口海湾区的影响也越来越大。工业污水、生活污水的排放以及对河口区的改造活动，如围海造地、港口航道建设等将打破河口区原有的生态平衡，水动力条件也会相应改变，对河口区的海洋生物地球化学活动有较大的影响。

潮汐运动是河口区最主要的动力因素。外海潮波传至河口区域时，因为水深变浅，加上底摩擦、潮波的反射以及径流等因素的作用，非线性作用增强，产生浅水分潮，潮波形态将发生变化。天文潮和浅水分潮共同作用时，会造成潮位和潮流的不对称<sup>[1]</sup>。潮位不对称主要体现为拉格朗日不对称，在高平潮和低平潮期间影响泥沙的沉降时间和再悬浮；潮流的不对称主要表现在涨落潮历时及峰值不一致，当涨潮历时大于落潮历时，最大落潮流速将大于最大涨潮流速，表现为落潮为主型；反之，则为涨潮为主型。对泥沙运输的影响方面，最大涨落潮流速的不一致的影响主要体现为欧拉不对称，即影响局地的拖曳应力<sup>[2, 3]</sup>。落潮为主型时，底质不易发生淤积，但对岸线有一定侵蚀；涨潮为主型时，湾内易淤积。潮流不对称对港湾内物质的运输起着很重要的作用，落潮为主型时有利于港湾内物质向外海输送，有利于保持湾内水体的水质，但也会使得岸线容易被侵蚀；反之，涨潮为主型时，长期积累的情况下，不利于保持湾内水体的水质<sup>[4]</sup>。

对潮不对称的研究首先是基于定点观测的实测潮位和潮流数据，但由定点观测较难了解全港湾内的水文动力情况。随着计算机计算能力的不断进步，以及国内外海洋模式的发展，我们可以通过数值模拟的方式，来全面了解港湾内的水文动力情况及分析潮不对称产生的原因，也可以为河口水质和泥沙的研究打下基础。

河口海湾区是与人类生产生活密切相关的地区，要合理开发利用河口海湾区，我们首先需要对该区域的海洋环境问题有充分的认识。对河口海湾区的水文特征、动力过程的研究是研究河口的基础，河口区的水动力条件也是影响污水自净、泥

沙冲淤情况的重要因素,利用数值模式结合现场观测对河口区水动力条件的研究具有重要的实际意义和科学意义。近年来,对河口海湾区的改造活动产生的后续影响逐渐引起了人们的关注,结合观测数据与数值模式来研究之前的改造活动对该类区域的水动力情况的影响,能为将来合理开发和利用河口海湾区提供科学指导。

## 1.2 潮不对称研究现状

一般来说,河口区的主要动力因素为潮汐,不同河口区的地形、岸线、潮滩面积等属性均有较大差别,所以其对潮波传播的响应也不同。为充分了解河口区的水动力情况,近年来,许多学者对潮波在河口区的传播特征进行了充分的研究。关于潮不对称的研究主要包括以下三个方面:研究一维浅水连续性方程中非线性项对高频分潮产生的贡献及产生何种高频分潮;分潮相互作用后使潮波变形导致潮不对称;底摩擦和潮滩等地形因素对潮不对称的影响。

第一部分, Parker<sup>[5]</sup>使用简化的一维浅水连续性方程和动量方程来分析潮波在浅水狭长海湾中的非线性效应,简化方程所基于的前提假设为:

$$\text{潮波波长} \gg \text{海湾长度} \gg \text{海湾宽度} \gg \text{海湾水深}$$

可得:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{b} \frac{\partial (b(h+\eta)u)}{\partial x} = 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{h+\eta} C_f u |u| \quad (1.2)$$

式 1.1 为一维连续性方程,式 1.2 为一维动量方程。其中  $\eta$  为水位,  $h$  为沿海湾方向的平均流速,  $b$  为海湾宽度,是海湾的平均水深,  $C_f$  为摩擦系数(经验值,一般为  $2.5 \times 10^{-3}$ )。

式 1.1 和式 1.2 中的非线性项包括:连续性方程中的  $(\partial(b(h+\eta)u)/\partial x)$ 、动量方程中的对流非线性项  $(u\partial u/\partial x)$  和底摩擦项  $(C_f u|u|/(h+\eta))$ 。非线性项的主要作用是潮波能量从一个分潮传给另外的分潮。

连续性方程中的  $\partial(b(h+\eta)u)/\partial x$  可分解成:

$$\frac{\partial (b(h+\eta)u)}{\partial x} = \frac{\partial (bhu)}{\partial x} + \frac{\partial (b\eta u)}{\partial x} \quad (1.3)$$

该式中，式 1.3 右侧第一项为线性部分，第二项为非线性部分。

底摩擦项：

$$\frac{1}{h+\eta} C_f u |u| = \frac{1}{h} \left(1 + \frac{\eta}{h}\right)^{-1} C_f u |u| \quad (1.4)$$

其中  $\left(1 + \frac{\eta}{h}\right)^{-1} = 1 - \frac{\eta}{h} + \left(\frac{\eta}{h}\right)^2 - \left(\frac{\eta}{h}\right)^3 + \dots$

在浅水区中底摩擦项可写成

$$\frac{1}{h+\eta} C_f u |u| = \frac{1}{h} C_f u |u| - \frac{1}{h^2} C_f \eta u |u|, \text{ for } \frac{\eta}{h} \ll 1 \quad (1.5)$$

其中式 1.5 中底摩擦项包括两个部分，一部分为二次底摩擦项，即底摩擦正比于流速的平方；另一部分为底摩擦与水位共同作用项，该项体现了底摩擦在浅水区的影响比在深水区要大。

假设潮流流速  $u(x,t) = u_k(x) \cos(\omega_k t - \varphi_k(x))$ ，其中  $u_k(x)$  为分潮振幅， $\omega_k$  为分潮频率， $\varphi_k(x)$  为分潮迟角，两个不同的分潮一起作用时，可发生耦合作用，也可在对流非线性项的作用下产生其他分潮：

$$U(x,t) = u_1(x) \cos(\omega_1 t - \varphi_1(x)) + u_2(x) \cos(\omega_2 t - \varphi_2(x)) \quad (1.6)$$

将式 1.6 化简，让  $\omega_0 = \omega_1 - \omega_2$ ， $n\theta = n\omega_0 t - \varphi_1(x)$ ， $n$  为整数， $\beta = \pm 1$ ，则：

$$U(x,t) = u_1(x) \cos(n\theta) + u_2(x) \cos\left([n + \beta]\theta - \left[\varphi_2(x) - \frac{n + \beta}{n} \varphi_1(x)\right]\right) \quad (1.7)$$

在对流非线性项作用下，

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{2} u_1^2 + u_1 u_2 \cos(\beta\theta - [\varphi_2 - \frac{n + \beta}{n} \varphi_1]) + \frac{1}{2} u_1^2 \cos 2n\theta \right) + u_1 u_2 \cos\left([2n + \beta]\theta - \left[\varphi_2 - \frac{n + \beta}{n} \varphi_2\right]\right) \quad (1.8)$$

在正规半日潮海区， $M_2$  分潮为主要分潮。我们将  $u_1(x)$  视为  $M_2$  分潮的潮流振幅，式 1.8 中右边第一项为  $M_2$  分潮在对流项作用下产生的流，称为潮致余流；第三项中生成一个倍潮， $M_4$  分潮；第二项和第四项是由  $M_2$  分潮与其他分潮共同作用生成的复潮。

对底摩擦的处理采用傅里叶变换，该项处理较复杂，详情可见 Parker<sup>[5]</sup> 和方国洪<sup>[6]</sup>，徐鹏<sup>[7]</sup> 在其文章中指出，对于单个天文潮波， $u/|u|$  可以展开为：

$$u|u| = u_k^2 \sum_{i=0}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{8}{(2n-1)(2n+1)(2n+3)\pi} \cos[(2n+1)\omega t] \quad (1.9)$$

则二次底摩擦项只能产生奇次谐波，频率为天文潮的奇数倍，如  $M_6$  分潮。值得注意的是，在式 1.8 中， $M_2$  分潮和  $M_4$  分潮的共同作用可生成  $M_6$  分潮，但这是一个二阶效果， $M_6$  分潮主要由式 1.9 中的底摩擦项产生。

Parker<sup>[5]</sup>总结了  $M_2$  分潮与其自身或与其他分潮共同作用下，在多种非线性项作用下可以产生的倍潮和复潮。从表 1.1 中可得出， $M_4$  分潮主要由于  $M_2$  分潮在连续性方程和动量方程中的非线性项下作用下产生的。

表 1.1\* 一维浅水方程中非线性项产生的倍潮和复潮<sup>[5]</sup>

Table 1.1 Compound and overtide constituents generated by nonlinear terms in the one dimensional equations of motion<sup>[5]</sup>

M <sub>2</sub> interacting with constituent C ↓	Tidal Constituents Generated With Frequency:				
	$ \sigma_{M_2} - \sigma_C $	$(2\sigma_{M_2} - \sigma_C)$	$(\sigma_{M_2} + \sigma_C)$	$(2\sigma_{M_2} + \sigma_C)$	$(4\sigma_{M_2} - \sigma_C)$
M <sub>2</sub>	mean *	-----	M <sub>4</sub>	M <sub>6</sub>	M <sub>6</sub>
N <sub>2</sub>	MN (Mm)	2MN <sub>2</sub> (L <sub>2</sub> )	MN <sub>4</sub>	2MN <sub>6</sub>	4MN <sub>6</sub>
S <sub>2</sub>	MS (MSf)	2MS <sub>2</sub> (μ <sub>2</sub> )	MS <sub>4</sub>	2MS <sub>6</sub>	4MS <sub>6</sub>
K <sub>1</sub>	MK <sub>1</sub> (O <sub>1</sub> )	2MK <sub>3</sub> [MO <sub>3</sub> ]	MK <sub>3</sub> [2MO <sub>3</sub> ]	2MK <sub>5</sub> [3MO <sub>5</sub> ]	4MK <sub>7</sub> [3MO <sub>7</sub> ]
O <sub>1</sub>	MO <sub>1</sub> (K <sub>1</sub> )	2MO <sub>3</sub> [MK <sub>3</sub> ]	MO <sub>3</sub> [2MK <sub>3</sub> ]	2MO <sub>5</sub> [3MK <sub>5</sub> ]	4MO <sub>7</sub> [3MK <sub>7</sub> ]
Nonlinear terms responsible →	$\partial(\eta u)/\partial x$ $\eta u u $ $u\partial u/\partial x$ $u u $ with a mean flow	$u u $	$\partial(\eta u)/\partial x$ $\eta u u $ $u\partial u/\partial x$ $u u $ with a mean flow	$u u $	$u u $
symmetric or asymmetric NL mechanism	asymmetric	symmetric	asymmetric	symmetric	symmetric
in terms of $\sigma_r$ **	$\sigma_r$	$\sigma_{M_2} + \sigma_r$	$\sigma_{M_2} - \sigma_r$	$3\sigma_{M_2} - \sigma_r$	$3\sigma_{M_2} + \sigma_r$

\* the mean can be in the form of a residual mean circulation or a shift in mean sea level  
 \*\*  $\sigma_r = |\sigma_{M_2} - \sigma_C|$

\*此表出自 Parker<sup>[5]</sup>.

由此可得，潮波在浅水区传播的非线性来源包括：对流非线性项、二次底摩擦项、底摩擦与水位的共同作用项及连续性方程中的水深随时间变化产生的非线性项。这些非线性项将产生多种倍潮和复潮。

第二部分中，主要研究分潮之间共同作用后所引起的潮不对称，包括半日潮

为主的海区中  $M_2$  分潮与浅水分潮的共同作用、混合潮型海区中全日分潮与半日分潮之间的共同作用。在  $M_2$  分潮为主的半日潮海区中，主要关注  $M_2$  分潮和  $M_4$  分潮对潮不对称的贡献。Speer 和 Aubrey<sup>[8]</sup>，Friedrichs 和 Aubrey<sup>[3]</sup> 使用  $M_4$  分潮振幅与  $M_2$  分潮振幅之比来衡量潮波非线性变形程度，并利用其相对迟角 ( $2\varphi_{M_2}-\varphi_{M_4}$ ， $\varphi_{M_2}$  为  $M_2$  分潮的迟角， $\varphi_{M_4}$  为  $M_4$  分潮的迟角) 来衡量潮波变形后的潮不对称类型。此方法被应用于多个  $M_2$  分潮为主的半日潮海区，但存在一定的局限性。Blanton 等<sup>[9]</sup>通过对多组实测潮流和潮位数据进行调和和分析，研究了不同河口区  $M_2$  与  $M_4$ 、 $M_6$  分潮分别作用和共同作用下对潮不对称的影响，相较于之前的研究，分析了  $M_6$  分潮对潮波形变的影响。结果表明，在某些海区， $M_6$  分潮对潮不对称的贡献不可忽略。由此可知，在  $M_2$  分潮为主的半日潮海区，仅考虑  $M_2$  分潮和  $M_4$  分潮共同作用对潮不对称的贡献不够严谨。

Nidziko<sup>[10]</sup>研究了混合潮型海区的潮不对称现象，外海的潮不对称主要由天文潮自身的叠加产生，潮波传入近岸港湾及河口后，浅水分潮产生，外海形成的不对称的潮波传到近岸由于非线性变形，可能被增强、减弱或者反转。文中还提出用统计学中的“偏度”来表征潮不对称类型和强度，并将该方法应用于美国西海岸河口。Song 等<sup>[11]</sup>基于 Nidziko 的研究，研究了不同分潮组合对潮不对称的贡献，并利于全球多个站位的潮位资料研究了不同区域的潮不对称现象。文中指出对于某分潮  $i$ ， $\omega_i$  为该分潮的频率，推导出引起潮不对称的分潮频率需满足  $2\omega_1=\omega_2$  或  $\omega_1+\omega_2=\omega_3$  的条件，如部分半日潮为主的海区  $M_2$  分潮和  $M_4$  分潮，全日潮为主的海区， $M_2$ 、 $O_1$  和  $K_1$  分潮，某些半日潮为主的海区  $M_2$ 、 $M_4$  和  $M_6$  分潮<sup>[9]</sup>。潮不对称的类型和强度取决于各组合的相对贡献。

第三部分主要研究潮滩、底摩擦等对潮不对称的贡献。Friedrichs 和 Aubrey<sup>[3]</sup>根据多个潮位站的实测数据结合数值模式研究了混合均匀的浅水河口区潮波的非线性变形，发现底摩擦和潮滩为潮波传入河口区后非线性变形的主要原因。潮波和底摩擦的响应主要由潮波振幅与水深的比值决定。底摩擦对潮波的影响主要是减小潮波的传播速度并使潮波的振幅衰减，且在低水位时对潮波速度的减小大于高水位期间，导致落潮历时更长，最终潮不对称为涨潮为主型；潮滩对潮不对称的影响主要由其纳潮量与河道水体体积之比决定，潮波在潮滩上的传播速度比在河道中慢，使得涨潮期间潮波传播速度小于落潮期间潮波传播速度，从而涨潮



Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.