

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: B200334008

UDC _____

廈門大學

博 士 学 位 论 文

台湾海峡台风暴潮及其数值预报模式研究

The Study of Typhoon Surge and Its Numerical
Prediction Model in the Taiwan Strait

张 文 舟

指导教师姓名: 洪 华 生 教授

商 少 平 教授

专 业 名 称: 环 境 科 学

论文提交日期: 2006 年 11 月

论文答辩时间: 2006 年 12 月

学位授予日期: 2007 年 月

答辩委员会主席: 孙文心 教授

评 阅 人: 孙文心 教授

吴培木 李立 研究员

王东晓 研究员

2006 年 11 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹呈交的学位论文，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的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。

2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期： 年 月 日

导师签名：

日期： 年 月 日

台湾海峡台风暴潮及其数值预报模式研究

摘 要

本文以实测潮位资料为基础详细分析了福建沿海台风暴潮的主要特征;在分析台湾海峡风暴潮、潮汐及地形特点的基础上,研制出台湾海峡双向嵌套网格风暴潮-天文潮耦合数值预报模式,并以实测资料对该模式进行了全面检验;利用该模式研究了台湾海峡风暴潮时空分布变化特征及其形成机制、风暴潮与天文潮的非线性相互作用和风暴潮数值模式计算中的小网格尺度效应。主要研究内容及结论如下。

通过分析 1960-2001 年正面登陆我国东南沿海的台风在福建沿海所引起的风暴潮,揭示了福建沿海风暴潮特征及其可能形成机制。台湾海峡特殊地形对福建沿海风暴潮的时空分布有明显影响。台风大风区在台湾海峡的位置及范围对福建沿海台风增水幅度有重要作用。台风横穿台湾海峡时,易引起其中心区域附近福建沿海出现双增水峰现象,第一个增水峰出现在台风离开台湾岛进入台湾海峡后,第二个增水峰出现在台风登陆福建沿海前后。福建沿海风暴潮双增水峰现象的出现不仅与局部港湾地形有关,而且与整个台湾海峡地形有关。台风横穿台湾海峡有时会引起台湾海峡北部出现奇异增水现象,其重要特征为:增水峰值较大,峰值前后增水上升速率和下降速率都很大;水平空间影响范围较小;往往发生在低潮附近。奇异增水的发生与落潮时间缩短导致低潮时明显提前有关。

在分析福建沿海风暴潮特征和总结台湾海峡潮汐特点的基础上,针对台湾海峡地形研制出台湾海峡双向嵌套网格风暴潮-天文潮耦合数值预报模式。该模式水平方向具有较高的分辨率,并考虑了风暴潮与天文潮之间的相互作用,适合描述台湾海峡风暴潮复杂的物理过程。在辐射边界条件和局地解思想的基础上改进的开边界条件被成功应用于该模式中。计算表明:双向嵌套网格模式略优于单向嵌套网格模式;本文提出的开边界条件可以应用于天文潮和风暴潮模式。

模拟检验结果显示该模式对天文潮和风暴潮的计算都有很好的表现,对四个潮位站的检验结果表明,天文潮的模拟平均绝对误差小于 15 cm,标准误差小于

18 cm; 对 31 个台风过程风暴潮的模拟平均绝对误差为 19.5 cm, 标准误差为 25.2 cm。利用该模式成功模拟出台湾海峡实测风暴潮中的潮周期振动现象和双增水峰现象, 并通过对比实验证实这种潮周期振动现象是由风暴潮与天文潮的相互作用产生的。2005 年和 2006 年风暴潮数值预报实验表明该模式计算流程是可行的, 对风暴潮具有较好的预报能力。

用该模式对台湾海峡风暴潮时空分布变化特征及其形成机制进行了数值研究, 研究结果证实了利用实测资料分析得到的福建沿海风暴潮时空分布变化特征, 并阐述了台湾海峡西岸增水幅度一般大于其东岸增水幅度的分布趋势及其动力机制。除台风移动路径和台风风场结构及局部风场外, 台湾海峡海水体积变化和输运情况及柯氏力对台湾海峡风暴潮时空分布有重要影响作用。

影响风暴潮和天文潮相互作用的作用项主要有风应力项、二次底应力项、平流项和附加通量散度项, 水深、风应力、天文潮和风暴潮在这些项中起着重要作用。数值研究发现耦合作用产生的增水会以边缘波的形式沿海岸传播, 说明耦合增水具有传播特性。阐明 9914 号台风影响期间三沙和平潭站风暴潮的潮周期振动主要是由台风中心附近海域风暴潮与天文潮相互作用产生的耦合增水边缘波引起的。

风暴潮数值模式计算中小网格尺度效应能够产生边缘波, 它可能反映了局部小地形和岸形对风暴潮的影响。其幅度只有几厘米的量级, 周期约为 3-6 h。它的产生与台风移动路径并无直接关系, 而与风应力的强弱有关。

关键词: 台风; 风暴潮; 数值模式; 台湾海峡

The Study of Typhoon Surge and Its Numerical Prediction Model in the Taiwan Strait

Abstract

Main characteristics of typhoon surges along Fujian Province are obtained and analyzed from tide level observations. A two-way nested coupled tide-surge prediction model is developed for the Taiwan Strait in view of the particularity of storm surge, tide and bathymetry. Using this model, the spatio-temporal characteristic distributions of storm surges and their generative mechanisms, the interaction between storm surges and tides, and the small-grid-scale effect of storm surges are investigated. The main results and conclusions are as follows.

The characteristics and possible mechanisms of storm surges along Fujian coast are analyzed after investigating storm surges caused by the typhoons passing perpendicularly across the southeastern coastline of China during the period from 1960 to 2001. The specific topography of the Taiwan Strait obviously affects the distributions and variations of storm surges along Fujian coast. Typhoon moving in the Taiwan Strait, the strength of storm surges is affected by the location and the scope of strong wind. When typhoon moves across the Taiwan Strait, it tends to induce double peaks of storm surges along the coast near the center of strong wind. The first peak appears after it leaves the Taiwan island and the second appears before or after it lands on Fujian coast. It sometimes induces abnormal storm surges along the northern Fujian coast which has following significant characteristics: high peak; great setup speed; small horizontal scope; often happening at the time near the low tide of astronomical tide. Appearance of abnormal storm surges has relation to low tide advancing due to shorten ebb time.

A two-way nested coupled tide-surge prediction model (NCTSM) is established and applied in the Taiwan Strait and adjacent sea area in this study, based on the characteristics of storm surges, tides and topography. This two-dimensional model has a fine horizontal resolution and takes into account the interaction between storm surges and astronomical tides, which is suitable for depicting the complicated physical properties of storm surges in the Taiwan Strait. An open boundary condition

developed from Flather's radiation condition and Røed and Smedstad's local mode idea are successfully implemented in the model. Simulation experiments show that the performances of the two-way nested model are slightly superior to those of the one-way nested one in accuracy; the open boundary condition could be used in the tide and storm surge models.

Simulation verifications demonstrate that the model has good performances in the computations of tides and storm surges. The mean absolute error (MAE) of tide computations is under 15 cm and the standard deviation of errors (STDE) does not exceed 18 cm at four tide stations. The MAE from storm surge computations for 31 historical typhoons is 19.5 cm and the corresponding STDE is 25.2 cm. It succeeds in reproducing the phenomena of fluctuations with tidal period and double peaks of storm surges. The comparison experiment confirms that the fluctuations are generated mainly by the interaction between tides and storm surges. It is showed by forecast experiments in 2005 and in 2006 that the calculation scheme is feasible and the model has great capability in forecasting tides and storm surges.

Numerical study by NCTSM validates the characteristics of storm surges mentioned before along Fujian coast. It is showed that the magnitudes of storm surges along the western bank of the Taiwan Strait are often higher than those along the eastern bank as a trend and the generative mechanisms are given for this. Besides the track of typhoon, the wind structure of typhoon and local wind, the variation and the transport of water volume in the strait and the Coriolis force have a significant influence on the spatio-temporal distribution characteristics of storm surges in the Taiwan Strait.

The action terms of the interaction between storm surges and tides include wind-stress term, quadratic bottom-stress term, convective term and divergence term of additional mass flux, in which water depth, wind stress, tide and storm surge play an important role. Numerical study shows that the setup caused by coupling effect could propagate along the coast as edge waves, indicating that the setup has a propagation property. It is demonstrated that the fluctuations with tidal period at Sansha and Pingtan stations during Typhoon 9914 are mainly due to edge waves of the setup caused by coupling effect in the near central area of the typhoon.

It is revealed by the results of numerical study that the small-grid-scale effect of storm surges can produce edge waves, which might reflect the influence of local topography and coast on storm surges. The magnitude of the edge waves is only

several centimeters of order and the period is 3-6 hours long. Their generation has no direct relation to the track of typhoon, but is related to the strength of wind stress.

Key words: Typhoon; Storm Surges; Numerical Model; Taiwan Strait

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

摘 要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪 论	1
1.1 研究背景和研究意义.....	1
1.2 风暴潮业务化数值预报预警研究综述.....	2
1.2.1 英国的温带风暴潮业务化数值预报	3
1.2.2 美国的飓风风暴潮业务化数值预报与预警	6
1.2.3 中国的风暴潮业务化数值预报	8
1.3 研究目标、研究内容和技术路线.....	10
第二章 福建沿海风暴潮特征的分析	12
2.1 引言.....	12
2.2 福建沿海风暴潮的时空分布.....	13
2.3 台风大风区位置对台湾海峡西岸台风增水幅度的影响.....	15
2.4 双增水峰现象.....	17
2.5 台湾海峡北部奇异增水现象.....	18
2.6 小 结.....	21
第三章 台湾海峡双向嵌套网格风暴潮-天文潮耦合数值预报模式	22
3.1 引言.....	22
3.2 数学模型.....	24
3.2.1 基本方程	24
3.2.2 底应力和风应力的参数化	25
3.2.3 初始条件和边界条件	29
3.2.4 台风气压场和风场的计算	32
3.3 数值方案.....	34
3.3.1 差分方案	34
3.3.2 边界处理	38
3.3.3 网格双向嵌套方案	39
3.4 模式计算流程	41

3.5 模式守恒性和稳定性分析.....	42
3.5.1 质量守恒.....	42
3.5.2 能量守恒.....	45
3.5.3 稳定性分析.....	47
3.6 小结.....	48
第四章 风暴潮-天文潮耦合数值预报模式检验和分析.....	50
4.1 引言.....	50
4.2 统计量的计算.....	51
4.3 天文潮的模拟.....	51
4.3.1 潮汐的模拟检验.....	52
4.3.2 潮流的模拟验证.....	58
4.4 风暴潮的后报检验.....	61
4.4.1 风暴潮后报误差的统计特征.....	61
4.4.2 代表性台风个例.....	67
4.5 风暴潮后报模拟实验.....	80
4.6 福建沿海风暴潮数值预报实验.....	84
4.6.1 0513 号台风风暴潮的数值预报.....	85
4.6.2 0608 号台风风暴潮的数值预报.....	87
4.7 风暴潮数值预报误差来源分析.....	92
4.8 小结.....	95
第五章 台风风暴潮特性的研究.....	98
5.1 引言.....	98
5.2 台湾海峡风暴潮的时空分布变化特征.....	98
5.3 风暴潮与天文潮的相互作用.....	107
5.3.1 风暴潮与天文潮相互作用的动力学分析.....	108
5.3.2 风暴潮与天文潮相互作用的数值研究.....	114
5.4 小网格尺度（小尺度）效应产生的边缘波.....	126
5.5 小结.....	133
第六章 总结和展望.....	134

6.1 总结	134
6.1.1 研究结论.....	134
6.1.2 创新点.....	136
6.2 不足之处及未来展望	136
附：福建沿海风暴潮预警预报系统的设计	138
A.1 建设目标	138
A.2 接口分析与支持环境	138
A.3 总体结构及系统集成	139
A.4 系统界面设计	142
参考文献	146
攻读博士学位期间发表及完成的论文	158
致 谢	159

Contents

Abstract in Chinese	I
Abstract in English	III
Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background and Significance	1
1.2 Review of the Studies in Operational Storm Surge Prediction and Warning	2
1.2.1 Operational Extratropical Storm Surge Numerical Prediction in Britain	3
1.2.2 Operational Hurricane Surge Numerical Prediction and Warning in the United States	6
1.2.3 Operational Storm Surge Numerical Prediction in China.....	8
1.3 Goal, Content and Scheme of the Study	10
Chapter 2 The Characteristics of Storm Surges along Fujian Coast	12
2.1 Introduction	12
2.2 Spatio-temporal Distribution of Storm Surges along Fujian Coast	13
2.3 Influence of the Location and Scope of Typhoon Strong Wind on the Strength of Storm Surges	15
2.4 Double Peaks of Storm Surges	17
2.5 Abnormal Storm Surges	18
2.6 Conclusion	21
Chapter 3 A Two-way Nested Coupled Tide-Surge Model for the Taiwan Strait	22
3.1 Introduction	22
3.2 Mathematical Model	24
3.2.1 Basic Equations.....	24
3.2.2 Parameterizations of Bottom Stress and Wind Stress	25
3.2.3 Initial Conditions and Boundary Conditions	29
3.2.4 Cyclone Model.....	32
3.3 Numerical Scheme	34
3.3.1 Difference Scheme.....	34

3.3.2 Boundary Condition Realization.....	38
3.3.3 Two-way Nesting Scheme	39
3.4 Flow of Model Working	41
3.5 Analyses of Conservation and Stability	42
3.5.1 Conservation of Mass	42
3.5.2 Energy Conservation.....	45
3.5.3 Stability Analysis	47
3.6 Conclusion.....	48
Chapter 4 Verification and Analysis of the Coupled Tide-Surge Model.....	50
4.1 Introduction	50
4.2 Calculations of Statistics	51
4.3 Tide Computation.....	51
4.3.1 Validation of Computed Tide Level.....	52
4.3.2 Validation of Computed Tide Current.....	58
4.4 Hindcast Simulaton of Storm Surges.....	61
4.4.1 Statistical Charateristics of Errors in Storm Surge Simulations	61
4.4.2 Cases of Representative Typhoons	67
4.5 Hindcast Experiments of Storm Surges.....	80
4.6 Numerical Forecast Experiments of Storm Surges	84
4.6.1 Numerical Forecasts of Storm Surges for Typhoon 0513	85
4.6.2 Numerical Forecasts of Storm Surges for Typhoon 0608	87
4.7 Analysis of Error Sources in Storm Surge Numerical Forecasts	92
4.8 Conclusion.....	95
Chapter 5 Some Features of Typhoon Surges	98
5.1 Introduction	98
5.2 Spatio-temporal Distribution Characteristics of Storm Surges in the Taiwan Strait.....	98
5.3 Interaction between Storm Surges and Tides	107
5.3.1 Dynamic Analysis	108
5.3.2 Numerical Study	114
5.4 Edge Waves Caused by the Small-grid-scale (Small-scale) Effect.....	126
5.5 Conclusion.....	133

Chapter 6 Summarization and Expectation.....	134
6.1 Summarization.....	134
6.1.1 Main Conclusions	134
6.1.2 Innovation Results	136
6.2 Limitations and Prospects	136
Appendix: Design of Storm Surge Prediction and Warning System for Fujian coast.....	138
A.1 The Goal	138
A.2 Interface Analysis and Sustaining Conditions	138
A.3 The Whole Frame and System Integration	139
A.4 Interface Design of the System	142
References.....	146
Published or Accomplished Papers	158
Acknowledgements.....	159

第一章 绪论

1.1 研究背景和研究意义

西北太平洋是全球热带气旋（不含热带低压，下同）形成最多的海域，其生成数占全球总数的 36%（Gray, 1968; 汪景庸, 1992）。不仅如此，西北太平洋还是生成的台风强度最强、大风范围最大的海区（王喜年, 2001a）。我国是受西北太平洋（包括南海）热带气旋影响最为频繁的国家，据统计，从 1949 年至 1988 年的 40 年里，在登陆热带气旋中有 34% 的热带气旋登陆我国；从 1949 年至 1996 年的 48 年里，登陆我国的热带气旋年均 7.04 个（王喜年, 2001a）。热带气旋登陆时，会引起沿海潮位的异常上升（风暴潮），时常造成严重的风暴潮灾害。每逢夏秋季节，热带气旋引起的风暴潮，伴随狂风、暴雨和巨浪，往往造成风、浪、潮、洪灾害交替出现的局面，不仅损坏海堤、涵闸、港口码头等沿海重要工程设施，给滨海城市供水、供电、防洪、排涝工作带来巨大影响，并给水产养殖、农业、交通运输等相关产业造成重大经济损失，而且还严重危及人民生命财产安全。

台湾海峡位于我国东南沿海，处于西北太平洋台风（含热带风暴和强热带风暴，下同）主要移动路径上，台风影响频繁，加上海峡对风的狭管效应，风暴潮灾害严重。每年台风季节，台风和风暴潮常给位于海峡西岸的福建省造成严重的经济损失和人员伤亡。据统计（杨华庭等, 1993），从 1949 年至 1990 年，在我国沿海引起 1 m 以上增水的台风过程有 259 次，其中 205 个登陆我国沿海的台风中有 50 个登陆福建沿海，约占 24.4%。这期间需要特别提到的是 6911 号 (Elsie) 和 9018 号 (Dot) 台风，它们都在福建晋江登陆并造成特大台风和风暴潮灾害。6911 号台风和风暴潮造成人员死伤 7770 人，受淹农田 746.4 万亩，直接经济损失超过 1 亿元。9018 号台风及引发的风暴潮造成死亡 132 人，直接经济损失 15.8 亿元。1990 年以后福建沿海又陆续出现多次强台风和风暴潮，遭受了惨重的风暴潮灾害（资料主要来源于国家海洋局编制的《中国海洋灾害公报》）。1996 年 7 月 27 日至 8 月 1 日，福建省连续遭受 9607 号 (Gloria) 和 9608 号 (Herb) 台风袭击，引发严重的风暴潮灾害，造成 908 万人不同程度受灾，死亡 55 人，直接经济损失 46 亿元。1999 年 10 月的 9914 号 (Dan) 台风在福建龙海登陆，受台风引起的风暴潮影响，福建省从东山到沙垵的最高潮位普遍超过当地警戒水

位，厦门最大风暴增水达 122 cm，崇武最高潮位超过警戒水位 60 cm。受风暴潮和巨浪的共同影响，沿岸 10 余处海堤被冲毁，造成 72 人死亡和失踪，经济损失近 40 亿元。2001 年的 0102 号（飞燕，Chebi）台风于 6 月 23 日 22 时在福建福清市登陆，平潭以北多个验潮站最高潮位均超过当地警戒水位，最大增水达 80-120 cm，其中白岩潭站超过警戒水位 69 cm，为 50 年同期最高水位。这次风暴潮给福建省沿海造成重大灾害：死亡和失踪 122 人，受灾人口约 521 万；12.2 万公顷农田被淹，6430 艘船只沉没或损坏，海堤受损 321 处，堤防决口 80 处；直接经济损失 45.2 亿元。2004 年 8 月 0418 号（艾利，Aere）台风在福建福清登陆，福建沿海台风增水 100-170 cm，直接经济损失 24.85 亿元，死亡 2 人。2005 年 9 月 0513 号（泰利，Talim）台风登陆福建莆田，福建省直接经济损失 37.2 亿元，受灾人口 254.6 万，死亡 4 人。2006 年 8 月 0608 号（桑美，Saomai）超强台风尽管是在浙江苍南登陆，但仍给福建沿海带来惨重经济损失和人员伤亡，短短几天时间死亡和失踪人员达数百人。

近年来福建省政府提出了“建设海洋经济强省”和建设海峡西岸经济区的发展战略。随着福建省海洋经济开发事业的迅速发展和沿海经济的不断繁荣，海洋经济已成为福建国民经济建设和社会发展的主要支柱，然而风暴潮灾害的影响和威胁也在增加，因而急需建设风暴潮灾害的预报预警系统，提高预报、预警能力，尽可能把风暴潮灾害造成的损失减少到最低程度。

1.2 风暴潮业务化数值预报预警研究综述

风暴潮为世界主要海洋灾害之一，是由强烈的大气扰动（如强风和气压剧变）引起的潮位异常变化（一般指潮位异常上升，即风暴增水，风暴减水有人称之为负风暴潮）。由于引起风暴潮的天气系统不同，风暴潮一般分为由温带气旋引起的风暴潮和由热带气旋引起的风暴潮两类。由温带气旋引起的风暴潮一般发生于中、高纬度沿海地区，以欧洲的西北部沿海最为显著；由热带气旋引起的风暴潮一般发生于低、中纬度沿海地区，常遭受这种风暴潮影响的区域主要有西北太平洋沿岸及岛屿、北美沿海和孟加拉湾沿岸。西北太平洋发生的由热带气旋（台风）引起的风暴潮又称为台风风暴潮、台风暴潮或台风潮，北美沿海发生的由热带气旋（飓风）引起的风暴潮又称为飓风风暴潮或飓风潮（刘凤树，1990；冯士筭，1998；王喜年，2001a）。此外，我国北部沿海经常遭受由强冷空气（寒潮）或冷

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts 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 for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库