

粤东沿海台风风暴潮特征及数值模拟

刘秋兴, 于福江, 吴少华, 付翔

(国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘 要: 粤东地区是我国沿海经济较为发达的地区之一,也是遭受风暴潮灾害较为严重的地区,本文重点分析了自1969年以来40年间影响粤东沿海的典型风暴潮过程,并建立起了一个适用于粤东沿海地区的高分辨率的风暴潮数值预报模式。此模式采用变网格技术,在保证使计算区域足够大的基础上,又能实现对重点区域的河口、海湾等地形加密处理,精细地刻画出其周围地形,从而保证了计算的准确性。通过对历史上影响该地区较为严重的台风风暴潮的模拟结果来看,此模式对该区域台风风暴潮的模拟效果良好。同时也可以将该模式较好地推广应用到其他地形较为复杂的区域进行台风风暴潮预报。

关键词: 台风风暴潮;数值模拟;变网格

中图分类号: P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2011)06-0001-06

1 引言

粤东地区地处我国广东省东北部地区,地理位置优越,北依福建省闽南地区,南望珠江三角洲,与宝岛台湾隔海相望。此地区经济发达,人口密集,著名侨乡潮汕地区的潮州、揭阳、汕头、汕尾沿海四市即在此区内,是广东省除珠江三角洲经济带外位居第二的经济区域,而汕头市更是作为全国的经济特区走在了改革开放的前沿。

正是这样一个在国家社会经济发展中占据重要地位的区域却饱受风暴潮的侵害,仅1922年8月的一次风暴潮过程就使潮汕地区死亡7万多人。建国以后,粤东地区也经常遭受强风暴潮过程的袭击,如6903号台风风暴潮、7908号台风风暴潮等,这些强风暴潮过程给粤东人民造成了大量的人员伤亡和财产损失。因此对该区域风暴潮发生发展特点及预报技术的研究有着十分重要的意义。本文分析了自1969年以来影响粤东地区的典型风暴潮过程并对该区域台风风暴潮的特征做出了分析,建立了一套适合于该区域的变网格风暴

潮数值预报模式。

2 粤东地区台风风暴潮特征分析

2.1 影响该区域台风的特征

由1950年到2000年台风统计资料表明,在粤西沿海登陆的热带气旋中,来自太平洋的占65%,来自南海的占35%,在珠江三角洲登陆的热带气旋中,来自太平洋的占72%,来自南海的占28%,在珠江口附近登陆的强台风通常也会对粤东沿岸风暴增水产生一定影响,而在粤东沿海登陆的热带气旋中,来自太平洋的占79%,来自南海的占21%,这种情况往往对粤东沿海风暴增水产生严重影响。登陆广东省的热带气旋中,以登陆粤西沿海的为最多,占44%;珠江口次之,占32%,粤东沿海最少,占24%^[1],然而虽然粤东沿海登陆热带气旋中数量较少,但强度相当强。

在粤东附近地区登陆的台风主要沿两个主要方向行进:

其一是生成于西北太平洋,之后沿西北偏西

收稿日期: 2011-05-06

基金项目: 国家“十一五”科技支撑项目(2006BAC03B01)

作者简介: 刘秋兴(1982-),男,助理研究员,主要从事风暴潮灾害的预报和研究工作。E-mail: lqx4216@sina.com

方向移动,经巴士海峡,吕宋岛,甚至穿过菲律宾后登陆粤东地区的。此类台风在海上时间较长,吸收海面能量较为充分,因此其台风强度较强,造成严重风暴潮灾害的往往是此类台风,如图1所示,影响粤东地区最严重的台风基本都是沿此路径行进。

其二是生成于南中国海,直接北上登陆粤东沿海。此类台风强度较弱,造成的风暴潮灾害较轻。

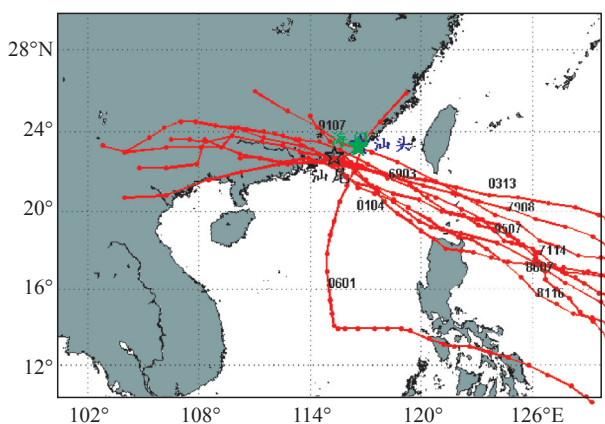


图1 影响粤东地区最严重的10条台风路径图

2.2 风暴增水分析

粤东沿海以不正规全日潮为主^[2],沿岸主要潮位站潮差一般在2 m左右,由于当地天文潮差较小,潮位变化率也很小,经常出现在10 h内天文潮潮位变化不超过50 cm的情况,如此小的潮差和潮位变化速率在中国其它海区是非常少见的。潮差小同时潮位变化慢,这就大大增加了风暴潮和较高的天文潮位叠加的概率,因此较强的热带气旋在此登陆时往往会造成比较严重的风暴潮灾害^[3-4]。历史上1969年6903号、1979年7908号、2001年0104号等台风风暴潮过程即使最大增水均未发生在当地日最高天文高潮上,但由于粤东沿岸天文潮潮位变化相对较小,强台风风暴潮过程仍然造成了严重的灾害。在进行总潮位预报时,其预报准确度更大程度上取决于对风暴潮的预报准确度的把握,因此对该区域研究风暴潮位的变化对于总潮位预报甚至当地的防潮减灾工作都有着更为重要的意义。

通过统计、分析粤东地区汕头、海门、汕尾三个重要潮位站自1969—2009年的潮位资料,40年来在粤东附近区域登陆的并且造成1 m以上增水的较大风暴潮过程共计21次,平均不到两年一次;而增水值超过2 m的过程总共3次,最大增水出现在6903号台风影响期间的汕头站,增水值达到了298 cm。所有增水超过2 m的过程均对粤东沿海造成了较大的风暴潮灾害,这也印证了风暴潮对该区域总水位变化影响更大的结论。

3 台风风暴潮数值预报模式的建立

风暴潮数值模式的建立既要考虑到模式的通用性、时效性,又要兼顾到特定区域对模式适用性的要求;同时还要考虑到粤东地区地形较为复杂,河口,岛屿较多,需要更加精细地刻画此类微地形影响对风暴潮的影响^[5-6],基于上述考虑,我们采用国家海洋环境预报中心研制的变网格风暴潮数值预报模式,实现了重点地区的加密处理。

模式各格点水深根据最新的水深数据插值得到,我们还结合得到的最新的地形数据,对水深插值结果做了进一步的修正,精确地刻画出了河道,岛屿等重要区域的水深和地形的最新变化。

3.1 模式的控制方程

模式在计算过程中对离散的控制方程进行体积分,保证了海水在计算域内的体积守恒,在物理上也更加符合水波的传播规律。这是本模式设计上的一大特点。

模式在计算的过程中利用完整的二维浅水方程来计算台风风暴潮,基本方程包括连续方程和运动方程。在运动方程中,除了考虑平流项、科氏力项、底摩擦力项外,还考虑了侧向粘性项。在笛卡儿直角坐标系中,连续方程和运动方程可表示为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(Hu) + \frac{\partial}{\partial y}(Hv) &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial x} + \\ &\quad \frac{1}{\rho_w H} (\tau_{sx} - \tau_{bx}) + A \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu &= -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p_a}{\partial y} + \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\rho_w H}(\tau_{sy} - \tau_{by}) + A(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2})$$

初始条件为: $\zeta = u = v = 0$, 当 $t = 0$ 时

海岸边界条件为: $V_n = 0$

式中, V_n 为岸边界的法向深度平均流流速。

水边界取为静压边界条件:

$$\zeta = \frac{100}{\rho_w g}(p_\infty - p_a)$$

式中, ζ 是以海平面起算的水位高度(m), ρ_w 是海水密度, $p_\infty = 1006 \text{ hPa}$ 是外围气压。

海底摩擦力 $\bar{\tau}_b$ 与深度平均流 V 的关系, 采用二次平方律; 海面风应力 $\bar{\tau}_s$ 与海面风 W 的关系, 也采用二次平方律。模式中求解所需要的物理变量的过程中, 计算采用有限体积法, 对控制方程中水体体积进行积分求解, 保证了计算结果的可靠性。

3.2 模式的计算区域及时间步长

模式为国家海洋环境预报中心自主研发的用于工程计算的变网格风暴潮数值模式, 本文中选取计算区域足够大, 包含了约 90000 个计算格点, 覆盖到了包括台湾岛及南海北部在内的整个中国东南沿海海域, 计算区域网格分辨率由外及内依次提高, 这样设计的一套网格既包含了台风的影响区域, 能保证模式准确地刻画出台风进入该区域后风暴潮的变化情况, 消除了边界条件对计算结果的影响(见图2); 也同时也照顾到了河口港湾等微小地形变化对风暴潮的影响, 减小了相应的计算量。

台风域中的风场由两个矢量场叠加而成, 其一是相对于台风中心对称的风场, 风矢量穿过等压线指向左方, 流入角为 20° , 风速大小与梯度风成比例, 其二是基本风场, 假定其速度取决于台风移速。本文选用 Veno Takeo(1981) 的风场公式来计算台风域中的基本风场, 风场模型中的气压场采用 Takahashi(1939) 和 Fujita(1952) 的关于台风中的气压场分布公式嵌套计算同一台风域中的气压场分布; 该风场模型是国家海洋环境预报中心是用来计算台风风暴潮的主要风场模型。经过检验该模型对台风风场有着较好的刻画^[7-8]。

模式的计算时间步长同时受限于水深和水平分辨率, 水平最高分辨率达到了 200 m 左右, 为了

使计算稳定, 取时间步长为 6 s, 完全能够满足 CFL(Courant-Friedrichs-Lewy) 条件要求。在此模式的验证过程中我们选取了建国以来对该地区影响明显的 3 次台风风暴潮个例进行模拟, 在此模式均为冷启动, 模拟整个风暴潮过程达 72 h。

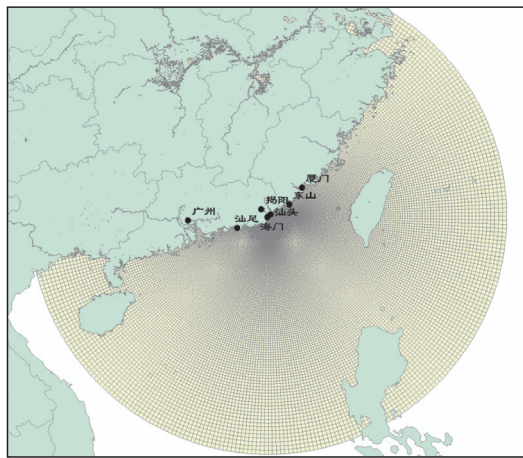


图2 计算区域网格分布

4 台风风暴潮数值预报模式的验证

4.1 6903 号台风风暴潮过程模拟

1969 年台风 6903 号(Viola), 生命史 7 月 20—31 日, 生成于菲律宾以东洋面, 进入南海东北部, 26 日 08 时台风强度达到最强(台风中心气压 898 hPa, 近中心最大风速 75 m/s)。7 月 28 日 11—12 时登陆广东惠来, 登陆时, 台风中心气压 936 hPa, 近中心最大风力 12 级, (汕头的妈屿出现历史最高潮位) 登陆后向偏西方向移动, 31 日消失于云南境内。台风路径见图 3, 图 4 为本次过程计算值和观测增水值的对比情况。

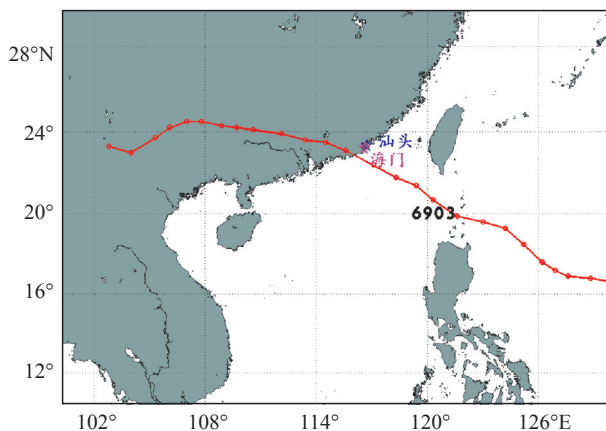


图3 6903 号台风路径图

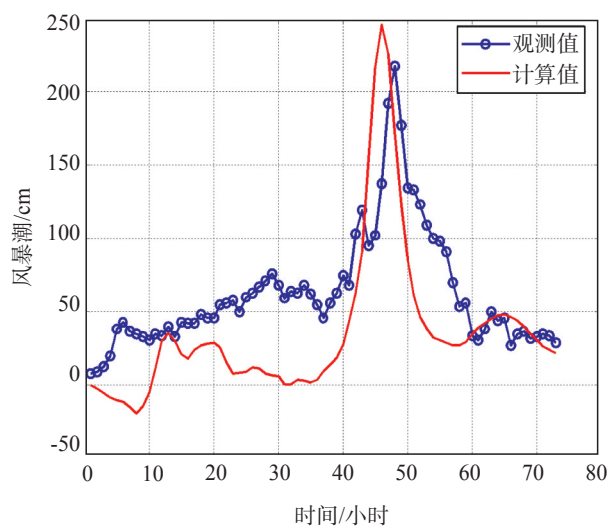
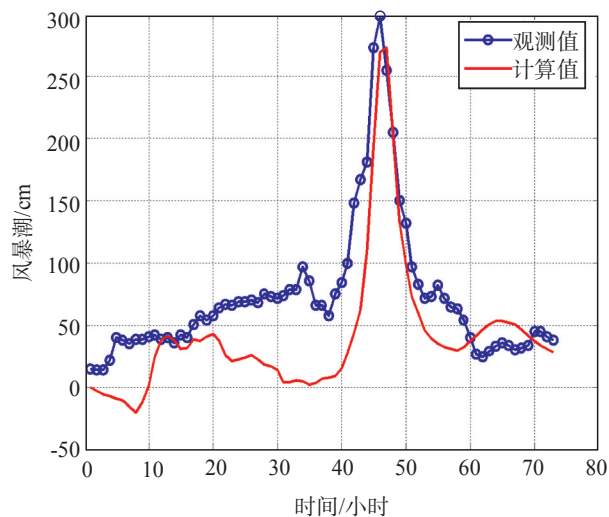


图4 6903号台风期间海门站、汕头站
风暴潮计算值与观测值比较

4.2 7908台风风暴潮过程模拟

7908号台风(Hope)于7月25日在菲律宾以东洋面生成, 西北行, 进入南海。7月29日02时达到热带风暴强度, 29日14时达到台风强度, 8月1日08时台风强度达到最强。8月2日13—14时登陆广东深圳。登陆时, 台风中心气压955 hPa, 近中心最大风速45 m/s。登陆后向偏西方向移动, 经广东、广西、越南, 最终西进至孟加拉湾。此次过程近台风中心最大风速达70 m/s, 最低气压为898 hPa。台风路径见图5, 图6为本次过程计算值和实测增水值的对比情况。

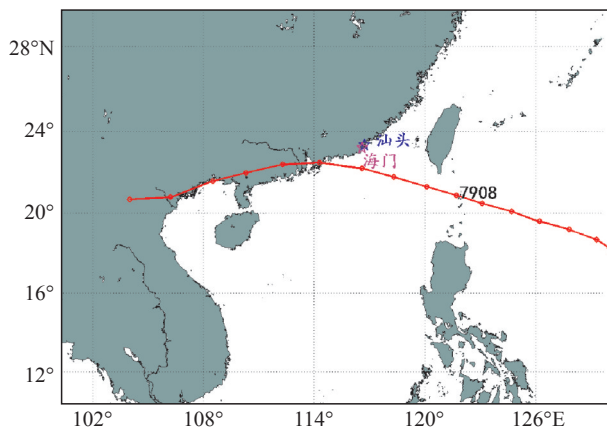


图5 7908号台风路径图

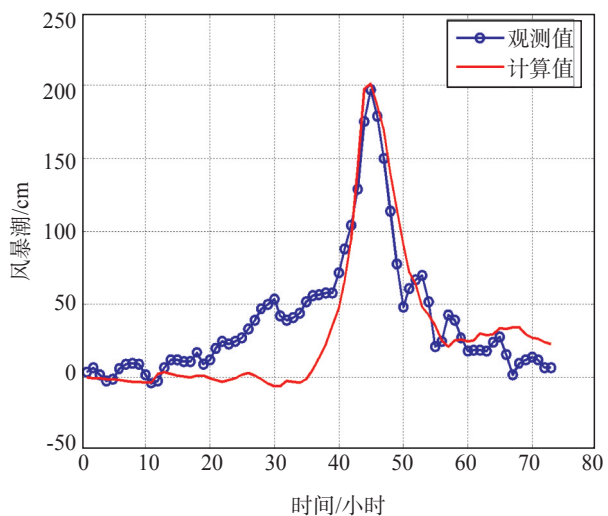
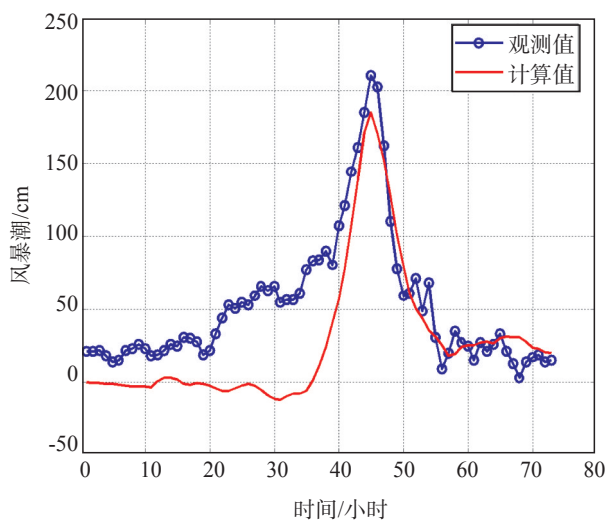


图6 7908号台风期间汕头站、海门站
风暴潮计算值与观测值比较

4.3 0104 台风风暴潮过程模拟

2001 年 0104 号(Utor), 生命史 7 月 1—8 日, 生成于菲律宾以东洋面, 西北行, 经巴士海峡进入南海东北部, 7 月 2 日 08 时达到热带风暴强度, 3 日 20 时达到台风强度, 4 日 02 时台风强度达到最强(台风中心气压 965 hPa)。据年鉴, 7 月 6 日 8 时登陆广东海丰-惠东登陆时, 台风中心气压 970 hPa, 近中心最大风速 30 m/s, 登陆后向西北方向移动, 7 日后消失于广西境内。台风路径见图 7, 图 8 为本次过程计算值和实测增水值的对比情况。

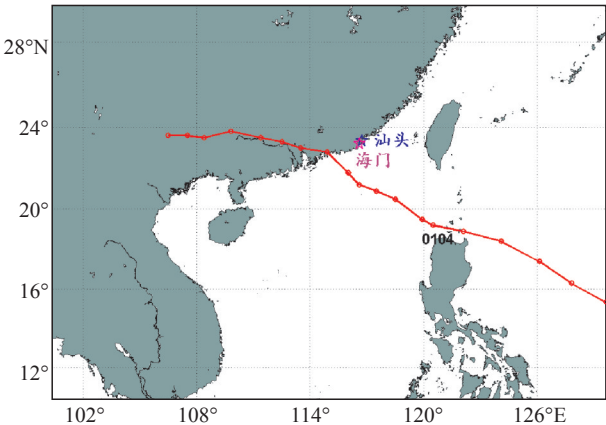
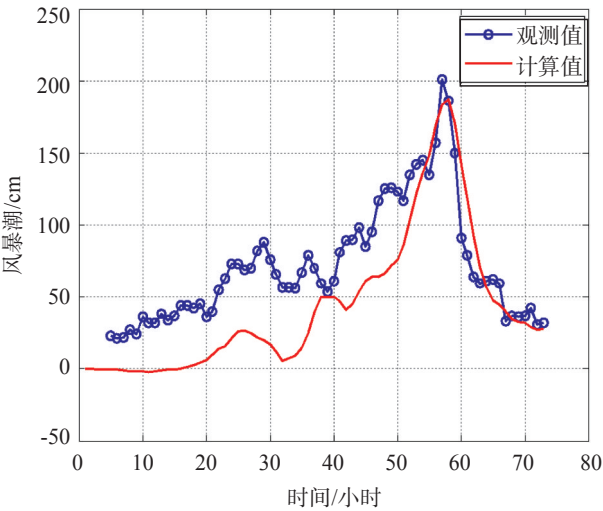
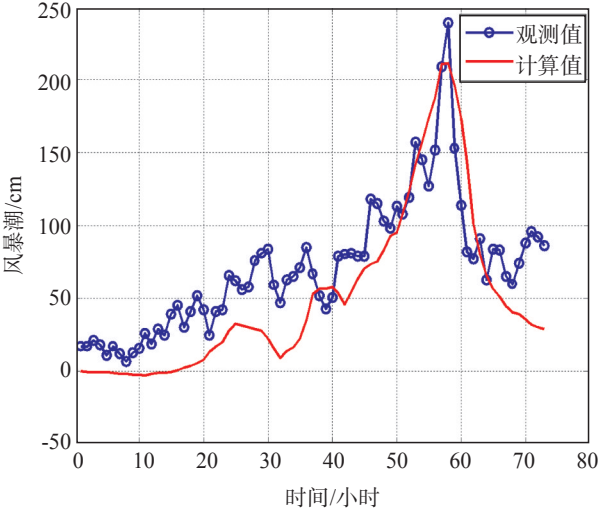


图 7 0104 号台风路径图



汕头站, 计算起始时间为 7 月 3 日 20 时



海门站, 计算起始时间为 7 月 3 日 20 时

图 8 0104 号台风期间汕头站、海门站风暴潮计算值与实测值比较

4.4 三次过程的统计检验

通过对三次强台风风暴潮过程的模拟情况来看, 我们可以清楚地看到由于粤东地区地形相对较为简单, 强台风条件下模型对风场刻画较好, 特别是对主增水峰刻画较好, 通过适当调整模式的大风半径, 可以实现模式对粤东地区的风暴潮较好的模拟能力。从模拟和实测峰值对比情况来看, 计算结果和实测情况峰值相对误差基本控制

在 15 % 以内, 详见表 1。从后报的情况来看, 我们有理由相信在台风预报路径和强度基本准确的条件下, 该模式能较好的模拟出台风风暴潮特别是强台风风暴潮过程的变化过程。模拟中出现的前期增水与实测情况相差较大情况主要是由于模式的初始水位场为冷启动, 没有考虑背景增水场的原因。通过同化初始场信息可以有效的改变前期增水值偏小的情况, 这也是下一步需要做的工作之一。

表 1 模拟与观测结果统计

| 台风号 | 汕头站 | | | | 海门站 | | | |
|------|-----|-----|------|------|-----|-----|------|------|
| | 观测值 | 模拟值 | 误差 | 相对误差 | 观测值 | 模拟值 | 误差 | 相对误差 |
| | /cm | /cm | /cm | / % | /cm | /cm | /cm | / % |
| 6903 | 298 | 274 | 24 | 8.1 | 217 | 241 | 24 | 11.1 |
| 7908 | 210 | 179 | 31 | 14.7 | 197 | 198 | 1 | 0.5 |
| 0104 | 201 | 185 | 16 | 8.0 | 239 | 211 | 28 | 11.7 |
| 平均误差 | | | 23.7 | 10.3 | | | 17.7 | 7.8 |

5 结论

(1) 文中详细地分析了自 1969 年汕头大潮灾以来粤东地区风暴潮的总体情况, 总结出粤东地区风暴潮发生的特点及致灾原因;

(2) 在 ARCGIS 平台上, 结合最新的水深和地形信息对变网格差值得到的水深和地形进行了细致的修正, 为模式的准确应用奠定了基础;

(3) 计算中采用的变网格风暴潮数值模式对历史上出现在粤东地区的典型强台风风暴潮过程进行了模拟后报, 后报结果显示此模式对该区域有很好的模拟能力;

(4) 通过对模式各项参数的调整、验证, 也可基于此模式建立适合其他地形较为复杂的区域进行强台风风暴潮的预报。

参考文献:

[1] 宋丽莉. 中国气象灾害大典(广东卷)[M]. 北京: 气象出版社, 2006:

119-129.

- [2] 黄祖珂, 黄磊. 潮汐原理与计算[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2005: 7-20.
- [3] 张龙. 广东省风暴潮的历史调查和研究[J]. 水资源研究, 2003, 24(2): 35-36.
- [4] 郭娜, 李世光, 林健全等. 汕尾风暴潮频率与海堤改造初探[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(1): 1-5.
- [5] 宋立荣. 粤东海岸台风风暴潮数值预报[J]. 海洋预报, 2003, 20(4), 70-75.
- [6] 李未, 张长宽, 王如云. 基于无结构网格有限体积法的风暴潮数值预报模式[J]. 热带海洋学报, 2007, 26(2): 9-14.
- [7] 王喜年, 尹庆江, 张保明. 中国海台风风暴潮预报模式的研究与应用[J]. 水科学进展, 1991, 2(1): 1-10.
- [8] 王喜年. 风暴潮预报知识讲座[J]. 海洋预报, 2000, 19(2): 64-70.

Characteristics and numerical simulation of typhoon storm surge in the Eastern Guangdong sea area

LIU Qiu-xing, YU Fu-jiang, WU Shao-hua, FU Xiang

(National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China)

Abstract: The Eastern Guangdong coastal region is one of the most developed economies in China, and is also one of areas suffered the storm surge disaster. The characteristics of typical storm surge since 1969 is analyzed. In order to better relief the storm surge disaster of the Eastern Guangdong coastal region, a new storm surge model is established to simulate and forecast the storm surge. The model, with a variable grid, could not only cover a large enough area, but also distinguish the tiny topography of bays, estuaries and so on. The model is used to simulate an historical worst typhoon storm surge event, and shows its excellent applicability. The model can also be used in other areas to better serve the work of marine disaster prevention and mitigation.

Key words: typhoon storm surge; numerical simulation; variable grid