

# 珠江三角洲大系统风暴潮数学模型建立与验证

叶荣辉<sup>1,2</sup>, 钱 燕<sup>3</sup>, 孔 俊<sup>2</sup>, 赵红军<sup>2</sup>

(1. 珠江水利委员会 珠江水利科学研究所, 广东 广州 510611; 2. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098; 3. 珠江水利委员会 水文局, 广东 广州 510611)

**摘要:**为了较准确地模拟珠江三角洲河网区及口外海域风暴潮的过程,建立了珠江三角洲大系统全二维风暴潮数值模拟模型。以 2008 年 14 号强台风“黑格比”为例,对台风场的构造、风暴潮模型的建立与验证、研究区域的划分以及风暴潮的模拟计算过程等作了介绍。验证结果显示,数值模拟结果与实测值吻合良好,表明所建立的风暴潮模型能较好地模拟珠江三角洲河网区及口外海域风暴潮的过程。

**关键词:**风暴潮; 台风场; 外海开边界; 珠江三角洲

**中图分类号:** TV135 **文献标志码:** A

珠江三角洲网河区河汉纵横交错, 水网密布连通。珠江流入三角洲后经八大口门出海, 自东至西分别为虎门、蕉门、洪奇门、横门、磨刀门、鸡啼门、虎跳门和崖门, 形成“三江汇流, 八口出海”的河势特色。珠江三角洲地区每年都会遭受多次台风的袭击, 珠江口各口门均会发生程度不同的台风风暴潮灾害。珠江三角洲大系统风暴潮数学模型的建立, 对于该地区台风风暴潮的预警预报、河口的综合治理规划等具有重要现实意义。

台风风场是产生风暴潮的决定因素, 台风风暴潮的强度与海面气压场和风场有着密切的关系。现有的国内外风暴潮模式一般都采用台风经验模型风压场作为驱动场, 对台风外围风场的模拟不够精确。研究和开发能够模拟具有实际风压场结构的台风场模型, 能有效提高风暴潮数值模拟精度。由于三角洲河网纵横交错, 八大口门形态各异, 河网与口门相互影响, 因此对风暴潮的模拟研究应基于全水域系统考虑。然而在以往的模拟分析中, 限于资料、技术等因素, 多对珠江三角洲口门区及相邻海域的风暴潮过程单独进行模拟<sup>[1-3]</sup>, 而忽视了风暴潮发生期间珠江上游径流的影响。此外, 在进行河口海岸水动力数值模拟时, 外海开边界通常取在不受近岸影响的离岸海域, 该海域较少布置水文站点, 缺乏足够的实测资料, 因此有必要采用

合理准确的方法给定外海开边界。基于此, 本文着重从以下几个方面综合考虑。

(1) 台风场的构造。采用 QSCAT/NCEP 混合风资料和台风经验模型风场相叠加的方法构造台风风场, 有效保证台风中心附近及外围区域风场计算精度, 为风暴潮模型提供驱动风场。

(2) 外海开边界的给定。采用模型嵌套的方式, 建立大尺度的南中国海潮汐风暴潮耦合模型, 为珠江三角洲大系统风暴潮模型提供较为准确的外海开边界。

(3) 珠江三角洲大系统风暴潮数值模型的建立。将三角洲河网、八大入海口门、伶仃洋和黄茅海作为一个整体, 综合考虑上游径流、天文潮、风暴潮等复杂因素的相互作用, 建立珠江三角洲大系统风暴潮数值模拟模型, 并对模型加以全面验证。

## 1 台风场的构造

在台风中心附近, 台风经验模型可以较好地反映台风大风区的风场特征, 但一般仅限于几百公里范围内; 在台风外围, 风场一般同时受到台风和其他天气系统的影响, 这与经验模型风场差别较大。为给风暴潮模型提供更为准确的驱动风场, 本文通过一个权重系数, 将 QSCAT/NECP 混合风场和台风经验模型风场

相叠加<sup>[4]</sup>,这样既可保证台风外围风场的可靠性,又能提高台风中心附近的分辨率。

台风经验模型风场由梯度风和移行风模型合成,表达式如下:

$$V_M = c_1 V_g \begin{bmatrix} -\sin(\theta + \beta) \\ \cos(\theta + \beta) \end{bmatrix} + c_2 V_t \quad (1)$$

式中,  $V_g$  为梯度风;  $V_t$  为移行风;  $\beta$  为梯度风与海面风的夹角;  $\theta$  为计算点与台风中心的连线与  $x$  轴的夹角;  $c_1$  和  $c_2$  为订正系数。

梯度风可以通过其与气压场的关系式计算得到

$$V_g = -0.5fr + \sqrt{(0.5fr)^2 + \frac{r}{\rho_a} \frac{\partial p}{\partial r}} \quad (2)$$

式中,  $f$  为科氏力参数;  $r$  为计算点至台风中心的距离;  $\rho_a$  为空气密度;  $p$  为计算点处的气压,采用 Myers 圆对称模型<sup>[5]</sup> 计算得到。

移行风采用宫崎正卫公式<sup>[6]</sup> 进行描述,其表达式如下:

$$V_t = \exp(-\pi r/500\ 000) \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $V_x$  和  $V_y$  分别为台风中心移动速度的正东分量和正北分量。

QSCAT/NECP 混合风场和台风经验模型风场的合成方法为

$$V_c = (1 - e)V_M + eV_Q \quad (4)$$

式中,  $V_Q$  为 QSCAT/NECP 混合风;  $e$  为权重系数<sup>[7]</sup>。

## 2 风暴潮模型

由于珠江河口口门处及相邻近岸地带泥沙淤积,槽滩相间,使该区域的水动力条件十分复杂。因此,在对珠江三角洲进行整体风暴潮数值模拟时,外海开边界的位置应远离该区域,然而外海较远区域通常缺乏足够的实测资料。为此,本研究采用模型嵌套的方法,建立大尺度的南中国海潮汐风暴潮耦合模型,为珠江三角洲大系统风暴潮模型提供外海开边界。由于南中国海模型与珠江口模型网格空间尺度不一,在进行嵌套模拟时,珠江三角洲模型外海开边界处的水位通过线性插值获得(见图 1)。

### 2.1 南中国海潮汐风暴潮耦合模型

#### 2.1.1 模型构建

模型研究范围为  $105^\circ\text{E} \sim 125^\circ\text{E}$ ,  $10^\circ\text{N} \sim 25^\circ 20'\text{N}$ ,

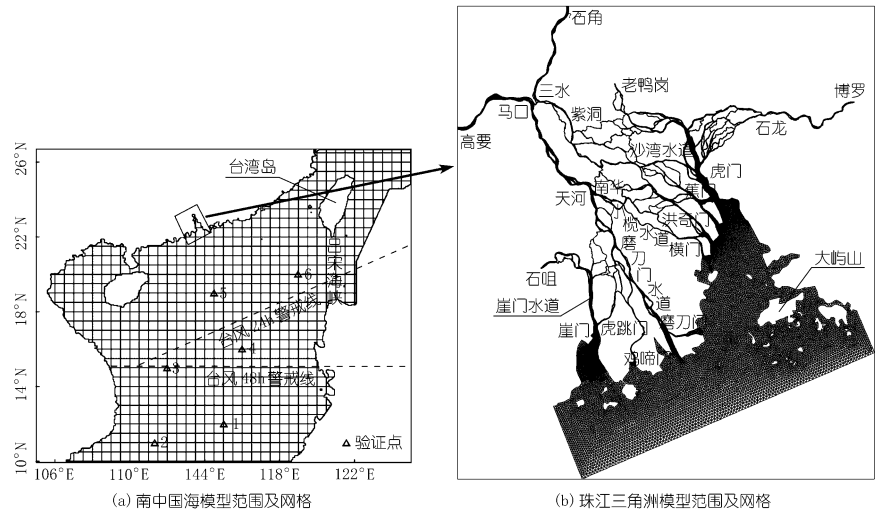


图 1 模型嵌套示意

模型南边界至台风 48 h 警戒线以南,北至台湾岛北部海域,东至吕宋海峡以东,开边界用 62 个天文分潮控制,由潮汐调和常数给定潮位过程线。模型区域剖分为  $2' \times 2'$  的网格(如图 1(a) 所示),由于计算范围大,跨多个经纬度,其数值模拟计算域的球面特征明显,需要考虑地球曲率和地图投影的影响,因此南中国海潮汐风暴潮耦合模型基于球面坐标系建立,模型采用 ADI 格式来求解<sup>[8]</sup>。计算所用水深采用美国国家地球物理资料中心(NGDC)数据,计算区域内糙率设定在 0.02 左右。

#### 2.1.2 模型验证

在模拟风暴潮与天文潮非线性耦合作用下的水位过程时,天文潮是一个重要的组成部分。若天文潮模拟正确,则可在在此基础上进行风暴潮模拟,因而不考虑气压及风切应力项,对天文潮位过程进行模拟。计算时间为 2003 年 8 月 25 日 0:00 至 9 月 6 日 0:00。

为全面验证南中国海模型的计算精度,在外海均匀布置了 6 个潮位验证站点(见图 1(a))。验证点坐标分别为:点 1( $115^\circ\text{E}$ ,  $12^\circ\text{N}$ )、点 2( $111^\circ 20'\text{E}$ ,  $11^\circ\text{N}$ )、点 3( $112^\circ\text{E}$ ,  $15^\circ\text{N}$ )、点 4( $116^\circ\text{E}$ ,  $16^\circ\text{N}$ )、点 5( $119^\circ\text{E}$ ,  $20^\circ\text{N}$ )、点 6( $114^\circ 30'\text{E}$ ,  $19^\circ\text{N}$ )。由于外海潮位验证资料较难获得,本文使用全球潮波模型 NAO99 间隔 1h 的计算值与本模型的计算结果进行比较<sup>[9]</sup>,比较结果见图 2。

从图 2 中可以看出,无论是高低潮位还是相位,6 个验证站点的计算值均与 NAO99 模型计算值基本一致。天文潮验证的良好性说明,南中国海模型开边界的天文潮调和常数使用基本正确,计算域糙率系数取值合理,可以在在此基础上进一步开发风暴潮模式,为珠江三角洲大系统风暴潮数值模拟提供外海开边界。

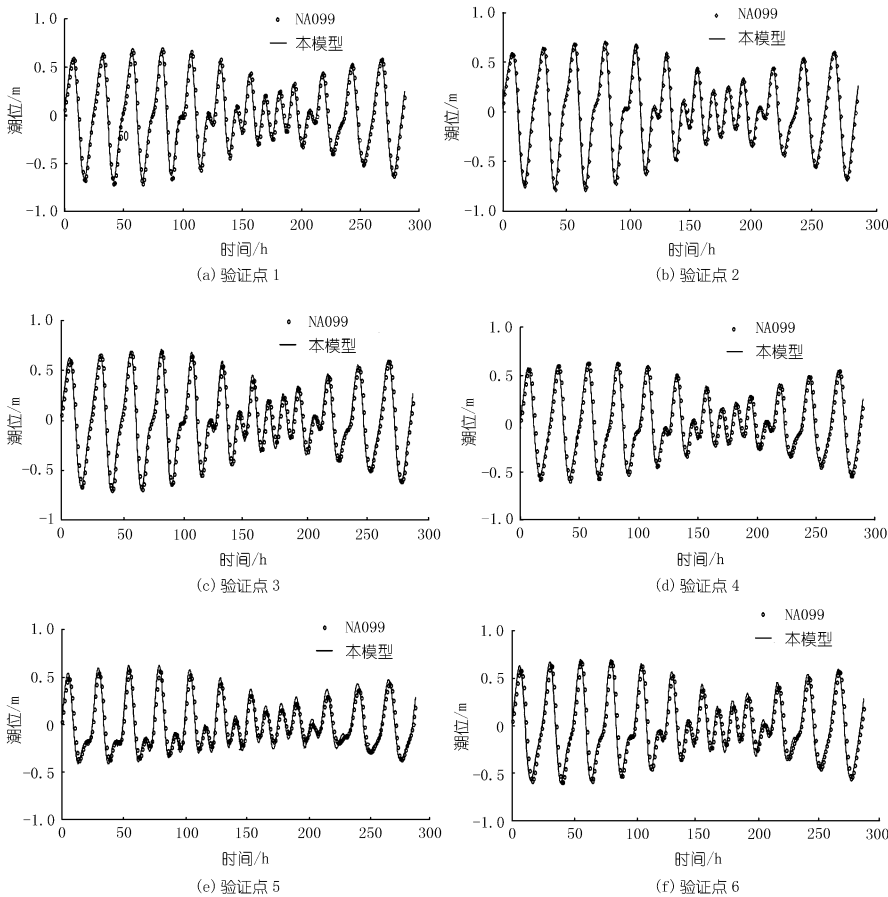


图2 南中国海模型天文潮验证

## 2.2 珠江三角洲大系统风暴潮模型

### 2.2.1 数值模式

二维风暴潮数学模型控制方程包括连续方程和动量方程,其中表面风应力及大气压力通过台风场模型计算获得。模型采用 Casulli 和 Zanolli<sup>[10]</sup> 提出的基于非结构型有限体积差分的欧拉-拉格朗日格式进行数值离散,保证了流量守恒。为避免 Courant 数的限制,模式引入了拉格朗日方法处理动量方程中的对流项,使模式不受时间步长的限制,有利于提高模式的计算效率。针对珠江三角洲河网及河口区域滩槽相间的复杂地形,该模式采用动边界的方式处理干湿边界,即预先设定一阈值,当网格单元水深小于该值时,此单元不参与计算,反之则参与计算。

### 2.2.2 研究区域及网格

由于珠江三角洲地区河网密布,水道纵横,分八大口门入海,台风期间,网河区水流除受上游径流、外海潮汐的影响之外,还受风暴潮增水影响,因此模式计算范围覆盖整个珠江三角洲河网区及相邻口外海域(见图1(b))。模型上游边界分别取在西江的高要、北江的石角、东江的博罗、流溪河的老鸦岗和潭江的石咀;模型的外海边界取在珠江口外南海30 m等深线附近。

研究区域采用非结构网格,河道内采用贴体四边形网格,在河道交汇处及口外复杂区域采用三角形网格。网格的设计及数量充分考虑到了模型的计算效率及精度,最小网格单位尺寸为20 m。计算所用的地形资料,主要为珠江水利委员会设计院及广东省水利厅于1999年在珠江三角洲河网联合测量的1:5 000河道地形资料,其中天河至百顷头地形更新为2006年最新实测资料,磨刀门水道地形更新为2008年最新实测资料。

### 2.2.3 参数率定

在将模型应用于风暴潮数值模拟前,采用1999年洪季、2001年枯季等典型水文过程对模型进行了率定<sup>[11]</sup>。整个研究区域的糙率系数为0.015~0.030;从上游向口门逐渐减小,在口外最小;伶仃洋内平均为0.016;网河区内西江上游马口段为0.028,而北江上游三水段为0.030;网河区中段平均为0.025。

## 3 模型验证

近年来,珠江口地区多次遭受台风风暴潮袭击,其中2008年14号强台风“黑格比”引发了珠江三角洲特大风暴潮。该台风于9月19日在菲律宾东部洋面生成,生成后向西北偏西方向移动,22日17:00加强为强台风,22日23:00经巴士海峡进入南海北部海面,并于24日6:45在广东电白市沿海地区登陆,登陆时中心风力15级,中心风速48 m/s,中心气压950 hPa;24日下午进入广西北海市境内,25日早晨移入越南境内后消失。

该研究以14号强台风风暴潮为例,对珠江三角洲大系统风暴潮数学模型进行了全面验证。模型计算时间为2008年9月20日12:00至9月25日12:00,模型计算时间步长取为180 s,计算基面为珠江基面。模型上游高要、石角、博罗边界给定流量过程,其中高要最大径流量达11 000 m<sup>3</sup>/s,其他边界因缺乏实测流量数据而给定水位过程。外海开边界潮位数据通过南中国海模型计算给定。台风影响期处于天文潮小潮期间,但受强台风影响,珠江口及其西岸一带多数岸段增水达到2 m及2 m以上,且由于最大风暴潮增水发生时间与天文高潮水位出现时间同步,珠江口多个水位站

均出现了 100 a 一遇、甚至 200 a 一遇的高潮位,其中南沙、横门、灯笼山、官冲等多个站的高潮位超过了历史最高值。

图 3 为采用本文台风场构造方法计算获得的 2008 年 9 月 23 日 02:00 台风场图(其中实线为风速等值线,箭头为风场)。由图 3 可知,由于在经验模型中融合了 QSCAT/NCEP 再分析风资料,本文台风的构造方案避免了经验模型关于台风外围风场的计算明显偏小的缺陷,对风场结构的描述更为合理。

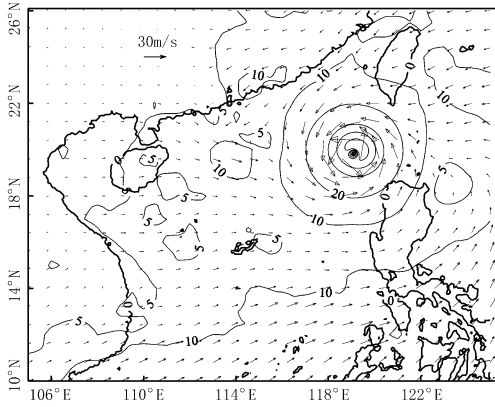


图 3 2008 年 9 月 23 日 02:00 台风场

比较,验证站点分布在珠江三角洲网河区(容奇、竹银、横山、白蕉等)、口门区(横门、南沙、万顷沙西、灯笼山、大横琴、黄金、官冲等)及近岸相邻海区(赤湾)。结果显示,无论是网河区、口门区还是近岸相邻海区的各站点,模型计算结果均与实测结果吻合较好。为更直观地展示模型的模拟效果,表 1 列出了模型计算最高潮位误差及相位误差值。

表 1 误差统计

站点	模拟最高潮位/m	实测最高潮位/m	潮位绝对误差/m	相位误差/h
容奇	2.61	2.61	0	1
横门	2.57	2.79	0.22	0
南沙	2.70	2.70	0	0
赤湾	2.11	2.20	0.09	0
万顷沙西	2.64	2.78	0.14	0
竹银	2.74	2.60	0.14	0
灯笼山	2.60	2.73	0.13	0
大横琴	2.40	2.75	0.35	1
黄金	2.30	2.69	0.39	1
横山	2.47	2.66	0.19	1
白蕉	2.47	2.63	0.16	1
官冲	2.78	2.73	0.05	0

图 4 所示为 14 号台风风暴潮计算值与实测值的

从表 1 中可以看出,最高潮位误差在 0.39 m 以

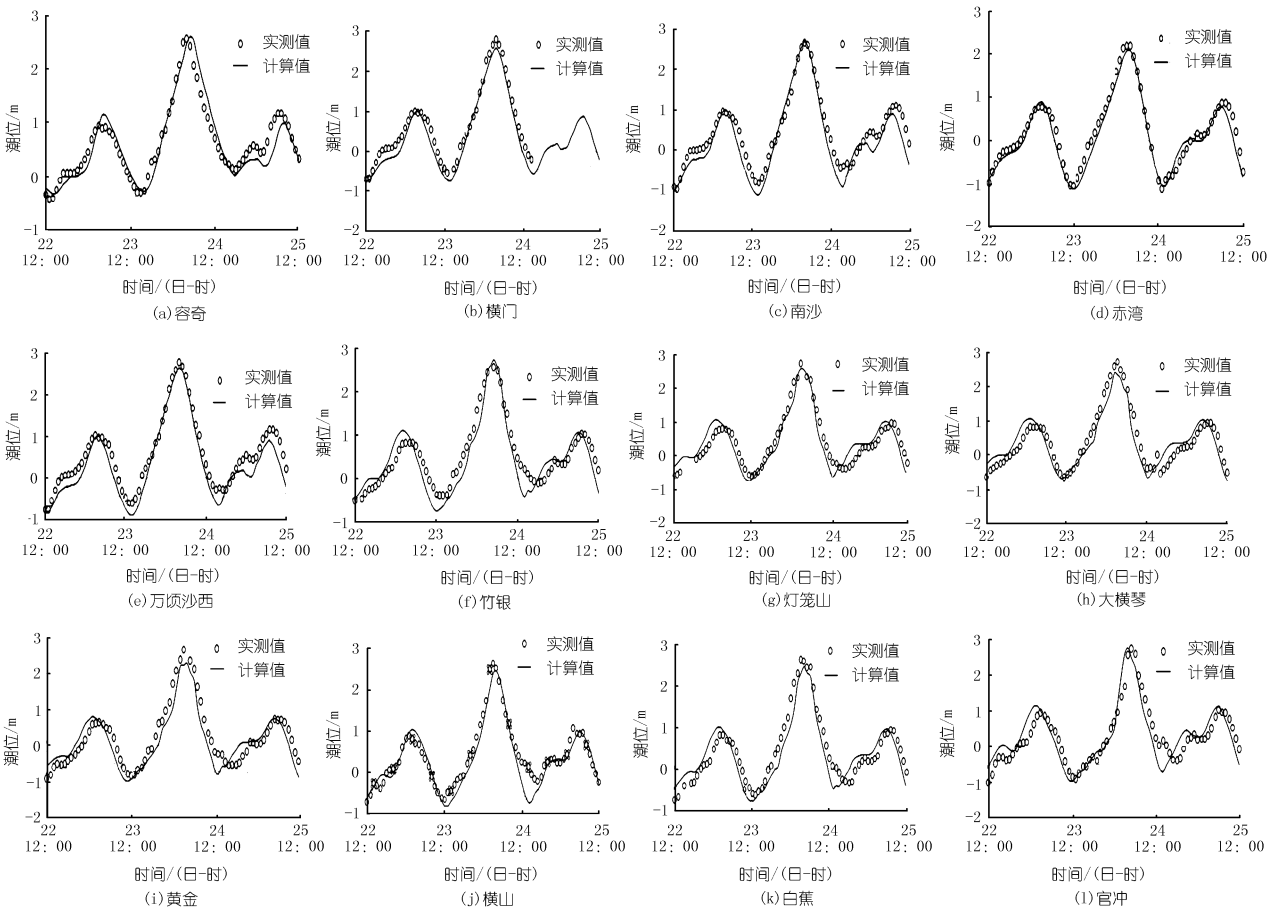


图 4 2008 年 9 月珠江三角洲模型验证

内,平均误差为 0.15 m,相位误差在 1h 之内。模拟结果的合理性表明,所建立的模型能较好地反映珠江河口上游径流、外海天文潮、风暴潮增水等因素间的相互作用,模型能较准确地模拟该区域的风暴潮过程。

#### 4 结 论

将珠江三角洲河网、八大入海口门、伶仃洋和黄茅海作为一个整体,综合考虑上游径流、天文潮、风暴潮增水等复杂因素的相互作用,建立了珠江三角洲大系统风暴潮数值模拟模型,并以 2008 年 14 号强台风“黑格比”为例对模型进行了全面验证,得到以下主要结论。

(1) 采用 QSCAT/NCEP 混合风资料和台风经验模型风场相叠加的方法构造台风场,能有效保证台风中心附近及外围区域风场计算精度,该风场能为风暴潮数值模拟提供较为合理的驱动风场。

(2) 采用模型嵌套的方式,建立大尺度南中国海潮汐风暴潮耦合模型为珠江三角洲模型提供外海开边界。验证结果表明,该模型模拟精度较高,能保证珠江三角洲模型外海开边界的计算精度。

(3) 基于本文方法所建立的珠江三角洲大系统风暴潮模型,能较好地模拟径流、天文潮、风暴潮增水等因素相互作用下的总水位,并能较为准确地对珠江三角洲河网区及口外海域风暴潮过程进行模拟。

#### 参考文献:

- [1] 于斌,林少奕,王永信. 风暴潮沿珠江河道上朔运动的数值模拟[J]. 海洋学报,2001,23(4):17-24.
- [2] 丁文兰,方国洪. 珠江口外海风暴潮的数值模型[J]. 热带海洋,1990,9(3):39-46.
- [3] 李杰,于福江,李洋,等. 珠江口地区台风风暴潮的数值模拟试验[J]. 海洋预报,2009,26(2).
- [4] 赵红军,宋志尧,徐福敏,等. 南中国海台风浪数值模拟研究[J]. 海洋工程,2010,28(3):128-134.
- [5] Myers V A. Characteristics of United States hurricanes pertinent to levee design for Lake Okechobee[R]. FL Hydromet Report 32. Government Printing Office,1954.
- [6] 宫崎正卫. 海洋物理Ⅲ[M]. 台中:东海大学出版社,1977.
- [7] Carr III LE, Eiseberr Y L. Models of tropical cyclone wind distribution and beta-effect propagation for application to the tropical cyclone track forecasting[J]. Mon. Wea. Rev.,1997,(125):3190-3209.
- [8] 叶荣辉. 基于 GIS 的珠江口风暴潮数值模拟系统研究[D]. 南京:河海大学,2009.
- [9] Matsumoto, K, T Takanezawa, M Ooe. Ocean Tide Models Developed by Assimilating TOPEX/POSEIDON Altimeter Data into Hydrodynamical Model: A Global Model and a Regional Model around Japan[J]. Journal of Oceanography,2000,(56):567-581.
- [10] Casulli V, Zanolli P. A three-dimensional semi-implicit algorithm for environmental flows on unstructured grids. [C] // Institute for Computational Fluid Dynamics Conference on Numerical Methods for Fluid Dynamics VI. 1998.
- [11] 杨明远,严以新,孔俊,等. 珠江口水流泥沙运动模拟研究[M]. 北京:海洋出版社,2008.

(编辑:赵秋云)

### Mathematical model establishment and verification for large scale storm surge in Pearl River Delta

YE Ronghui<sup>1,2</sup>, QIAN Yan<sup>3</sup>, KONG Jun<sup>2</sup>, ZHAO Hongjun<sup>2</sup>

(1. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Hydrology Bureau, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China)

**Abstract:** In order to accurately simulate storm surge process in Pearl River Delta area and the nearby offshore area, two-dimensional mathematical model for large scale storm surge in Pearl River Delta is established. Taking No. 14 Typhoon Heigebe in 2008 as an example, the typhoon field structure, establishment and verification of storm surge model, division of research zone, calculation and simulation processes of storm surge are introduced. The results show that the simulation results are in good agreement with the measured results, which shows that the established model can well simulate storm surge process in Pearl River Delta area and the nearby offshore area.

**Key words:** storm surge; typhoon field; offshore boundary; Pearl River Delta

保护长江 开发长江 为子孙后代留下一条健康的长江