

珠江口台风暴潮的数值计算

甘雨鸣 唐永明 刘美南

(地理学系)

摘 要

本文介绍了一个应用于珠江口的河海联合台风暴潮数值计算模式,它基本建立于海洋的二维全流风暴潮模式及河道一维的圣维南方程之上.具体计算中,对河流的断面概化、网河区的平均流量选取及大风半径的优化等作了适当的处理,并在上述基础上,对三场台风引发的风暴潮作了计算.计算结果与沿岸的五个测站的实测结果作了对比,结果表明,本文所建立的模型能较好地反映珠江口台风暴潮的特点.

关键词 台风暴潮,数值模拟,珠江河口

1 一般情况

中国南海北部的广阔陆架水域及与其相连接的珠江口伶仃洋和自虎门至黄埔的广州水道,它不仅区域跨度大,而且,伶仃洋作为一个承接4个河道出海河口的河口湾更是地形复杂,水文条件异常,从而使该处的暴潮现象变得十分复杂,也加大了工作的难度.为了便于对比,本计算的主要目标测站确定为灯笼山、南沙、赤湾、泗盛与黄埔五站,它们分属于珠江的不同水系.灯笼山位于西江河道的出口,主要承受珠江最大水系西江的来水.南沙则位于蕉门水道,它除接受北江的来水外,还部份地接受西江的来水,相比之下,位于伶仃洋东侧的赤湾,则几乎只受海洋水体的影响,而泗盛站,却主要受东江水系的影响.珠江三角洲北端的黄埔站,应该说是最为复杂的一个,除主要承泄流溪河的来水外,还分别受到北江、西江、东江的部份来水影响.在这样的一种上游有不同迳流量,加上台风前期降雨影响范围的不确定性及潮波自外海进入河网区域削弱程度的差异,便构成了珠江口风暴潮增水的极为复杂的态势.表1列出了珠江流域西、北、东江各水系的洪水特征值^[1].

2 理论模型

对本域所实施的台风暴潮计算是在准直角坐标系中进行的. Ox 轴沿经圈指向南, Oy 轴向东取向,座标原点设在未受扰动的海平面处, Oz 轴垂直向上.南部水域边界为 $18^{\circ}N$,东西部边界各自取在 $116^{\circ}15'$ 及 $111^{\circ}00'E$ 上,并以河海联合模式进行计算.

本文1991年4月1日收到

表1 珠江流域各水系的洪水特征
Tab.1 The flood characteristics of Pearl River

水系	集水面积 (km ²)	洪峰流量 均值 (m ³ /s)	最大洪峰流量		最小洪峰流量		比值
			(m ³ /s)	发生日期	(m ³ /s)	发生日期	
西江	351353	30450	43200	1962.7.4	12800	1963.8.6	3.38
北江	38363	9400	14900	1968.6.27	2740	1963.4.24	5.44
东江	25325	5500	12800	1959.6.16	1080	1963.7.4	11.84

2.1 海洋模型

采用二维全流模式,即连续方程与运动方程为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{H} \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{V}{H} \frac{\partial U}{\partial y} - fV = \frac{H}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} - gH \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho} (\tau_{ax} - \tau_{bx}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{H} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{V}{H} \frac{\partial V}{\partial y} + fU = \frac{H}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial y} - gH \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho} (\tau_{ay} - \tau_{by})$$

其中: h 为水深, $\zeta = \zeta(x, y, t)$ 为 xy 平面算起的海面上升高度, $H = h + \zeta$, $U = \frac{1}{h + \zeta} \int_0^{\zeta} u dZ$, $V = \frac{1}{h + \zeta} \int_0^{\zeta} v dZ$, u, v 分别为 ox 与 oy 方向的流速, f 为科氏参量, g 为重力加速度, p_a 为海面气压, ρ 为海水密度, τ_a 为风应力。

$$\bar{\tau}_a = \rho_a \cdot r_a^2 |\bar{w}| \bar{w}$$

其中, ρ_a 为空气密度, 取 1.25 kg/m^3 , r_a 则以 Flather^[2]

$$r_a^2 \times 10^3 = \begin{cases} 0.565 & |W| \leq 5 \quad (\text{m/s}) \\ -0.12 + 0.137|W| & 5 < |W| \leq 19.22 \\ 2.513 & 19.22 < |W| \end{cases} \quad (4)$$

取值, W 为海面风速。海底摩擦则按二次律计算

$$\bar{\tau}_b = \rho r_b^2 |\bar{V}| \bar{V} \quad (5)$$

r_b^2 为一经验系数, 显然, 海洋与河流取值不一, 在海洋中, 假定为 0.0025 。

2.2 河流模型

河道取一维模式, 即取一维不恒定流的圣维南方程组并略去河道的傍侧入流与曲折效应。连续方程与运动方程形式为:

$$\frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial \zeta}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left(gF \frac{Q^2 B}{F^2} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{2Q}{F} \frac{\partial Q}{\partial x} = \left(\frac{Q}{F} \right)^2 \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{\zeta} - \frac{gQ|Q|}{FC^2R} \quad (7)$$

其中： Q 为过水断面流量， B 为河面宽度， F 为过水断面面积， R 为水力半径， ζ 为水位， C 为谢才系数， $\frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{\zeta}$ 表示水位 ζ 固定时，断面面积的沿程变率。

3 差分表达式

(1) 海域上的二维计算引用Fisher格式^[3]，在B型网格上离散上述(1)~(2)方程从而得到一种半隐半显的差分格式(图1)。图中的·点为水位计算点，×为流速计算点。网格的覆盖面为18°00′至22°45′N，110°00′至116°15′E，即自博贺港向东直至粤东的惠来。南北方向则由南海北部的18°N计算至伶仃洋的虎门。空间步长取12000m左右(图略)。

(2) 一维河道的计算中，采用四点隐格式中的四点带权平均格式，如图2所示。

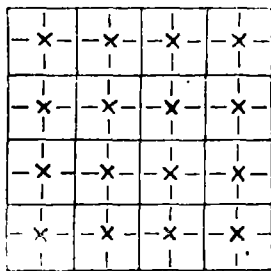


图1 二维计算格式

Fig.1 Finite-difference grid for sea model

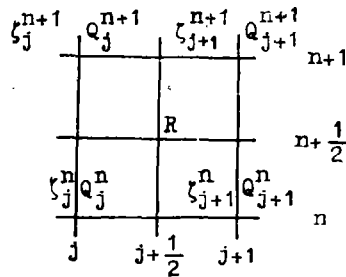


图2 一维计算格式

Fig.2 Finite-difference grid for river model

若以下式

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{Q_{j+1}^{n+1} + Q_j^{n+1}}{2} - \frac{Q_{j+1}^n + Q_j^n}{2} \right)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{Q_{j+1}^{n+1} \times Q_{j+1}^n - Q_j^{n+1} + Q_j^n}{2} \right)$$

进行离散，并以类同的形式写出 $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ ， $\frac{\partial \zeta}{\partial x}$ 的差商，再将这些差商代入圣·维南方程组(6)

~(7)中，经整理后，便可得

$$a_{1j} \zeta_j^{n+1} - c_{1j} Q_j^{n+1} + a_{1j} \zeta_{j+1}^{n+1} + c_{1j} Q_{j+1}^{n+1} = E_{1j} \tag{8}$$

$$a_{2j} \zeta_j^{n+1} - c_{2j} Q_j^{n+1} + a_{2j} \zeta_{j+1}^{n+1} + d_{2j} Q_{j+1}^{n+1} = E_{2j} \tag{9}$$

$$(j = 1, 2, \dots, N-1)$$

式中

$$C_{1j} = 2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x_j} \cdot \frac{1}{B_R}$$

$$e_{1j} = \zeta_j^n + \zeta_{j+1}^n + \left(\frac{1+\alpha}{\alpha} \right) C_{1j} (u_j^n - u_{j+1}^n) + 2Q_{1j}$$

$$\begin{aligned}
 E_{1j} &= e_{ij} - \frac{2\Delta t}{\Delta x} \cdot \Delta F \cdot \frac{U_R}{B_R} \\
 a_{2j} &= 2\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x_j} \left[(U_R)^2 \cdot \frac{B_R}{F} - 9.8 \right] \\
 C_{2j} &= 1 - 4\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x_j} U_R \\
 d_{2j} &= 1 + 4\alpha \frac{\Delta t}{\Delta x_j} U_R \\
 E_{2j} &= \frac{1+\alpha}{\alpha} a_{2i} \left(\zeta_{j+1}^n - \zeta_j^n \right) + \left[1 - 4(1-\alpha) \frac{\Delta t}{\Delta x_j} U_R \right] U_{j+1}^n \\
 &\quad + \left[1 + 4(1-\alpha) \frac{\Delta t}{\Delta x_j} U_R \right] U_j^n + 2\Delta t U_R^2 / (\Delta x_j \cdot F_R \cdot \Delta F) \\
 &\quad - 2\Delta t \cdot g \cdot \frac{U_R |U_R| B_R}{n^2 F_R (F_R/B_R)^{1/3}}
 \end{aligned} \tag{10}$$

其中： α 为权因子，当 $\alpha = \frac{1}{2}$ 时，即为四点中心格式。本计算中， α 取值为0.64。脚标R表示所取值按R点位置获得。 Q_i 为傍侧入流量，此处不予考虑，即 $Q_i = 0$ 。 U_R 为流速之四点平均值。

由于计算河道从虎门至黄埔总长45km共划分为15个断面(图3) 而对某一计算时

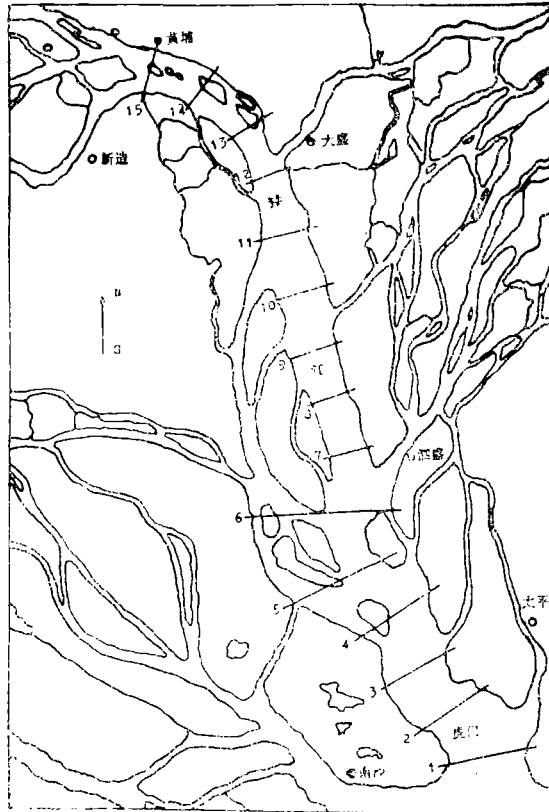


图3 珠江河段的15个断面

Fig.3 Elevation sections along the Pearl River

刻, 每一个计算河内段相当于四个点网格都可列出上述(8)、(9)方程, 因此, 整个一维计算域内可列出30个方程, 当确定了上、下游两处之边界值, 便可从该线性代数方程中解出全部的未知数。鉴于上述方程组系数矩阵呈带状, 所以用追赶法求解。河流计算的空间步长取3000m。

4 求解的几个条件

4.1 一维计算中的上游边界条件

广州水道北端以黄埔附近第15个断面的流速值作为上游边界值, 即

$$U = -Q/F$$

根据文[4]可知, 流溪河迳流的全部及北江来水量的40% (以北江三水站作为代表计算) 均可进入广州水道, 因此, 根据1956~1979年共23年的流量资料可获得一个适合第15号边界的上游来水量, 并算出具有年平均性质的边界条件流速值, 即0.0688(m/s) (表2)。

表2 15号断面年平均流速

Tab.2 The average annual flood of flood profile № 15

月 份	4	5	6	7	8	9	10	平 均
流量(m ³ /s)	383	950	1377	1358	1160	640	263	876
流速(m/s)	0.0301	0.0747	0.1083	0.1068	0.0913	0.0503	0.0207	0.0688

4.2 河道中水位与面积的关系

为了便于计算, 对15个断面分别按不同的水位确定了它们所包含的面积 F , 并概化为一个多项式进行

$$F = a_0 + a_1 h + a_2 h^2 + a_3 h^3 \quad (11)$$

其中, F 水下面积, h 水深, a_0 、 a_1 、 a_2 、 a_3 为待定系数, 均用最小二乘法确定。

4.3 一、二维连接条件

二维海模型与一维河模型的衔接条件为: $\zeta_1 = \zeta_2$, ζ_1 表示一维计算在连接点的水位, ζ_2 则表示二维在连接点的水位。

流量连接条件为: $Q_1 + Q_2 = 0$, Q_1 表示由一维河道流出连接点的流量, Q_2 表示由二维海洋流进连接点的流量。

4.4 二维海模型的边界条件。

对海岸来说, 取滑动边界条件, 即 $\nabla_n = 0$, n 为岸线法向。对计算域的东、西两侧水界, 分别用厦门大学提出的方法处理, 即:

$$\zeta = \zeta_p + \zeta_r + \zeta_\theta \quad (12)$$

$$\text{其中 } \zeta_p = \frac{1}{\rho g} (P_\infty - P_0)$$

$$\zeta_r = \begin{cases} A \cdot \frac{4}{3} \cdot \left[1 - \frac{1}{4} \left(\frac{r}{R} \right)^3 \right] & r \leq R \\ A \cdot \frac{R}{r} & r > R \end{cases}$$

$$\zeta_{\theta} = \begin{cases} A \cdot B \cdot \left(\frac{4}{3} \cdot \frac{r}{R}\right) & r \leq \frac{3}{4}R \\ A \cdot B & \frac{3}{4}R < r \leq R \\ A \cdot B \cdot \frac{R}{r} & R < r \end{cases}$$

$$A = 2.2 \times 10^{-9} \cdot W_R^2 \cdot R/h$$

$$B = -\frac{3}{4} \frac{(x-x_c) \cdot |x-x_c|}{(x-x_c)^2 + (y_b-y_c)^2} \cdot e^{-(y-y_b)/3} \cdot \begin{cases} 2x \leq x_c \\ 1x > x_c \end{cases}$$

r 为台风中心至边界计算点的距离, R 为最大风半径, W_R 为最大风速, y_b 为边界靠岸处座标, x_c 、 y_c 为台风中心座标。外海的南侧边界, 取辐射加正压条件。

4.5 初始条件

流场为 $U = V = 0$, 即由零算起。

$$\text{水位场 则为 } \zeta = \frac{P_{\infty} - P_a}{\rho g (1 - U_c / \sqrt{gh})}$$

U_c 为台风中心移速

4.6 台风模型

风场采用 *Jelesnianski* 模型。气压场则取

$$P_a = \begin{cases} P_0 + \frac{1}{4} (P_{\infty} - P_0) \cdot \left(\frac{r}{R}\right)^3 & 0 \leq r \leq R \\ P_{\infty} - \frac{3}{4} (P_{\infty} - P_0) \cdot \left(\frac{R}{r}\right) & r \geq R \end{cases} \quad (13)$$

其中, P_0 为台风中心气压, P_{∞} 为珠江口外多年平均气压值, 自四月后, 各月气压平均值为 1009.5, 1005.3, 1005.8, 1005.3, 1008.3, 1014.4, 1017.1(hpa)。

4.7 最大风速半径的确定

目前国内外常用的气压场模式, 除上述的 *Jelesnianski* 模式外, 还有下列 3 个:

$$\text{高桥模式: } P_a = P_{\infty} - \Delta P / \left(1 + \frac{r}{R}\right)$$

$$\text{Myer 模式: } P_a = P_0 + \Delta P \exp\left(-\frac{R}{r}\right) \quad (14)$$

$$\text{藤田模式: } P_a = P_{\infty} - \Delta P / \left[1 + \left(\frac{r}{R}\right)^2\right]^{1/2}$$

它们均适用于对称的气压分布, 且都包含了具有重要影响的参数 R 。在 *Myer* 的模式中, R 被直接定义为大风半径, 在其它模式中, R 也具有类似的含义, 且随具体的台风而异, 它表征台风范围的大小, 并随台风的发展、移动、登陆有不同的值。

我们对全部模拟的台风用三种方法进行了 R 的推算, 且选择了 闸坡、广州、珠海、港口、汕尾等气象站每天 4 次的气压资料按直接法求解, 其中的 P_{∞} 取自汕头及湛江两地的月平均气压。

4.8 稳定性判断

根据Fourier法，对二维计算的格式进行稳定性计算试验，最大水深取300m，网格步长 $\Delta S = 0.125$ 纬距， $\Delta t = 300s$ ，效果良好。

根据[5]，一维计算的隐式差分方程的稳定条件是不受 $\Delta t/\Delta x$ 的限制的，一般可用较大的时间步长，但它与采用的权因子有关，而只有权因子 $\alpha < 0.5$ 时才是不稳定的。本计算权因子为 $\alpha = 0.64$ ，计算结果颇为合理、稳定。

5 计算结果及讨论

对于珠江三角洲的风暴潮计算，应以那一个测站作为控制站以作对比，向来是有不同的看法的。部份人认为，位于伶仃洋北端的南沙站应该是一个主要的暴潮灾害的监测对象，因为它不仅在警戒水位中有与其它平原区域相关联的作用，而且在近20年来的32场超过1m增水的台风暴潮中，南沙站的比率为 $15/32 = 47\%$ ，远高于其它各站。据此，进行了对台风暴潮计算值检验的安排。图4为利用本模型计算的三场台风7114、6411、8314的路径图；其所引起的珠江口几个潮位站的风暴潮过程计算结果与实况符合较好。

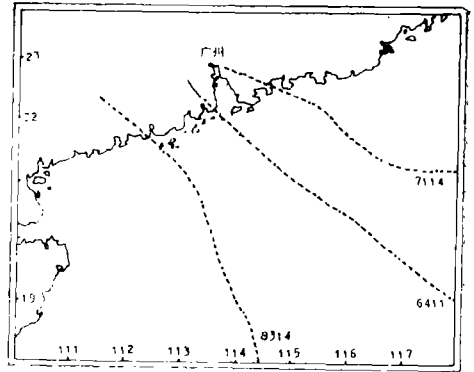


图4 7114、6411、8314台风路径图
Fig.4 Tracks of typhoon No. 7114、6411、8314

台风暴潮的大小及危害性，主要取决于台风的移动路径及登陆地点。我们刻意选择了分别登陆于珠江口的东部、中部及西部的上述3场台风以观测计算的结果。表3为三场台风计算的风暴潮值与实测值的比较。可以看出对南沙潮水水位站，风暴潮过程增水最大的误差都在10cm以下，其余的则在29cm以下，仅只是8314台风暴潮在灯笼山引起的误差在45cm，可能这与该台风引起西江干流洪水抬高底水所致。显然，这是值得进一步深入探讨的。

表3 各测站风暴潮计算与实测值比较

Tab.3 Observed and computed storm surge at various locations (cm)

测 站	7114			6411			8314		
	实测	计算	差值	实测	计算	差值	实测	计算	差值
DL	67	75	-8	117	98	19	125	80	45
NS	107	104	3	199	205	-6	98	105	-7
CW	64	89	-25	146	131	15	53	83	-29
SS	95	93	2	219	245	-26	96	105	-9
HP	85	100	-15	223	249	-26	93	109	-16

台风暴潮水位振动的形式常是人们关心的一个问题^[6]，从计算可以看出，结果较好地复制了由于台风走向不同所形成的增水类型差异的特点。比如，登陆于珠江口中部的台风所引发的风暴潮多呈孤立波的形式，而登陆于珠江口西侧的风暴潮，各站均表

现出标准型的增水振动,既有前兆增水,也有主振与余振阶段。至于在珠江口东侧平行于海岸或以较小角度登陆的台风,将使增水过程呈现出一种波动过程,这都与过去的工作结果相符。

风场结构,尤其台风大风半径 R 的大小,常是风暴潮影响范围及增水大小的一个重要因素。利用三个气压模式推算出的大风半径取平均值后,三场台风取值各为65, 150及60km,尽管60km与150km大风半径的台风分别属于两种不同的级别与规模,但本计算仍能较好地获得该风暴潮的发生、发展和消逝过程。

台风风暴潮波在台风的扰动挟持下于外海形成后,随台风的向岸移动而侵入沿岸海湾与河口。通过伶仃洋的虎门进入广州水道向北传播的暴潮波,以8314台风为例,不仅南沙站的过程最大增水误差为 -7cm ,泗盛站也仅为 -9cm ,黄埔为 -16cm 。可见,计算结果令人满意,同时说明,风暴潮孤立波在河道中演进的形式能够通过本计算很好地反映出来。计算结果表明,计算中所选取的模型及差分格式是合适的,建立的风场模式与河道描述也基本是成功的,处理得当,计算结果合理,值得作进一步的研究。

参 考 文 献

- 1 冯掌. 人民珠江, 1980, (1): 39~51
- 2 Flather R A, Recent results from a storm surge prediction scheme for the North Sea. In: Nihoul J (ed) MARINE FORECASTING, 1979
- 3 孙文心. 风暴潮, 1979; 1
- 4 丁树德. 人民珠江, 1981; 1
- 5 郭元裕、白宪台. 水利水电科技, 1980; 2
- 6 应仁方等. 风暴潮, 1981, (2): 1~5

Numerical Simulation of the Typhoon Surge in Pearl River Estuary

Gan Yuming* Tang Yongming Liu Meinan

Abstract

A mathematical of river-sea system model to reproduce typhoon surge in the Pearl River Estuary is introduced. The model is based on a two-dimensional models for the sea and one-dimensional models for the river representing motion of typhoon surge in the area. Computation have been concerned with generalized cross profile for the river, extracted the yearly volume of flow at the river system, and optimized the calculation radius of maximum wind for a concerning tropical cyclone. On the basis of above, the sea-level disturbances for several typhoons has been computed. In comparison with the actual record of some stations along the coast, were found that the model has good potential for simulating typhoon surge which occur in the Pearl River Estuary.

Keywords typhoon sarge, numerical simulation, estuary of Pearl River

* Department of Geography