

# MIKE21 在超强台风桑美风暴潮位预报中的应用

赵鑫 黄世昌

(浙江省水利河口研究院, 浙江, 杭州市, 310020)

**摘要:** 采用丹麦水力学研究所(DHI)研制的 MIKE21 软件模块建立中国东海二维水动力数学模型, 边界天文潮位使用全球天文潮位预报模型预报, 结合超强台风桑美(0608)的路径记录资料, 运用风场/气压场计算公式, 计算模型范围内风场、气压场的变化过程。并以此为输入条件, 运用 MIKE21 模块模拟了超强台风桑美在浙江省沿海的风暴潮位过程。

台风引起的风暴潮常给沿海各地的生产和生活设施带来极大灾害。浙江省是中国各省中遭受台风及风暴潮灾害最频繁和最严重的省份之一, 仅2000以来, 就是24个台风对其有影响, 其中11个在浙江登陆。因此, 建立一个准确并且适合浙东沿海海域特点的风暴潮预报模式是非常必要的。风暴潮模型的建立主要有四部分组成: 地形、边界条件、风场/气压场计算模型、水动力模型, 其中地形部分采用我国公开出版的海图, 边界天文潮位采用全球天文潮位预报模型TPXO.6给出, 风场/气压场采用Jelesnianski模型进行计算, 以上三项经过国际同行的努力和比较, 均可认为在精度和可靠性上达到计算或使用的要求, 而水动力模型, 特别是较大范围的水动力模型的计算, 目前较少比较和分析, 本文通过MIKE21水动力模块建立的中国东海大范围二维水动力数值模型, 并以此为基础对超强台风桑美(0608)在浙东沿海所造成的风暴潮位进行预报, 取得了较好的结果

## 1 理论模式

### 1.1 水动力学基本控制方程组

MIKE 21 水动力模块计算的控制方程包括一个连续性方程和二个动量方程, 基本方程为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \quad (1-1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{pq}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \Omega q - fVV_x + gp \frac{\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ & = E \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right) - \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (P_a) \end{aligned} \quad (1-2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{pq}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \Omega p - fV V_y + gq \frac{\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} \\ & = E \left( \frac{\partial^2 q}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) - \frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (P_a) \end{aligned} \quad (1-3)$$

式中： $\zeta$ 为潮位（包括天文潮和台风增水）； $p$ 、 $q$ 分别为 $x$ 、 $y$ 方向上的垂线平均单宽流量； $h$ 为水深； $\Omega$ 为柯氏力参数； $\rho_w$ 为水密度； $C$ 为谢才系数； $P_a$ 为大气压力； $f$ 为风摩擦系数； $V$ ， $V_x$ ， $V_y$ 分别为风速及其在 $x$ 、 $y$ 方向的分量； $E$ 为涡动粘性系数。

上述方程组中， $\frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial x} (P_a)$ ， $\frac{h}{\rho_w} \frac{\partial}{\partial y} (P_a)$ 项为大面的气压梯度项，是体现大范围风暴潮计算特征的比较重要的一项； $fV V_x$ ， $fV V_y$ 是台风场对水体的切应力项，也是风暴潮计算中重要的一项。 $\Omega p$ 、 $\Omega q$ 为地转效应。

初始条件：

$$\zeta(x, y)|_{t=0} = \zeta_0; \quad p(x, y)|_{t=0} = 0; \quad q(x, y)|_{t=0} = 0$$

边界条件：

陆边界：取法向流量为零，即 $Q_n = 0$

水边界：由全球天文潮预报模型给出

### 1.2 边界条件

大区边界取静压水位叠加由10个分潮推算的天文潮位。包含八个主要分潮 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $N_2$ 、 $P_1$ 、 $K_2$ 、 $Q_1$ 以及两个长周期分潮 $M_f$ 、 $M_m$ ，这10个分潮基本能够构造出外海深处真实的天文潮过程。各开边界处的水位由下式给出：

$$\zeta_0(x) = \zeta_p(x) + \sum_{i=1}^{10} A_i(x) \cdot \sin(\omega_i t + \alpha_i(x)) \quad (1-4)$$

式中， $\zeta_0$ 为边界处的潮位， $\zeta_p$ 为边界处静压水位， $i$ 等于1至10，分别对应 $M_2$ 、 $S_2$ 、 $K_1$ 、 $O_1$ 、 $N_2$ 、 $P_1$ 、 $K_2$ 、 $Q_1$ 、 $M_f$ 、 $M_m$ 等分潮， $A_i$ 、 $\alpha_i$ 分别为分潮在三条边界处的振幅和迟角， $\omega_i$ 为分潮的角频率。

### 1.3 台风场和气压场计算

Mike21本身提供了台风风场、气压场模型，但用户也可导入自己的模型台风。目前国际通的模式主要还有高桥和藤田模式、Jelesnianski模式等，通

通过对浙江省历年来典型台风风场的计算及验证, 其间差别并不大, 基本上都能较好地拟合风场过程, 对于桑美台风风速, Jelesnianski (65 式) 模型较优, 因此选用 Jelesnianski (65 式) 模型风场和气压场, 其式如下:

$$W = \begin{cases} \frac{r}{r+R} (V_{0x} \bar{i} + V_{0y} \bar{j}) + W_R \left( \frac{r}{R} \right)^{\frac{3}{2}} (A\bar{i} + B\bar{j})/r, & (0 < r \leq R) \\ \frac{R}{r+R} (V_{0x} \bar{i} + V_{0y} \bar{j}) + W_R \left( \frac{R}{r} \right)^{\beta} (A\bar{i} + B\bar{j})/r, & (r > R) \end{cases} \quad (1-5)$$

$$P_a = \begin{cases} P_0 + \frac{1}{4} (P_{\infty} - P_0) \left( \frac{r}{R} \right)^3, & (0 < r \leq R) \\ P_{\infty} - \frac{3}{4} (P_{\infty} - P_0) \frac{R}{r}, & (r > R) \end{cases} \quad (1-6)$$

式中,  $R$  为最大风速半径;  $r$  为计算点到台风中心的距离;  $V_0$  为台风移动速度;  $W_R$  为台风最大风速;  $A = -[(x-x_c) \sin \theta + (y-y_c) \cos \theta]$ ;  $B = (x-x_c) \cos \theta - (y-y_c) \sin \theta$ ;  $(x, y)$ 、 $(x_c, y_c)$  分别为计算点坐标和台风中心坐标;  $\theta$  为流入角 (计算中当  $r \leq R$  时  $\theta$  取  $10^\circ$ , 当  $r > 1.2R$  时  $\theta$  取  $25^\circ$ , 其余的  $\theta$  在  $10^\circ$  和  $25^\circ$  之间线性内插);  $P_0$  为台风中心气压,  $P_{\infty}$  为无穷远处的大气压 (计算中取  $1010\text{hPa}$ )。  $\beta$  为台风风速距离衰减系数。

一般说来, 在实际观测中, 中心低压与最大风速相比, 后者观测更为困难, 误差也较大, 因此, 本模型使用 ATKINSON—HOLLIDY (1977) 提出的风—压关系式来计算最大风速。

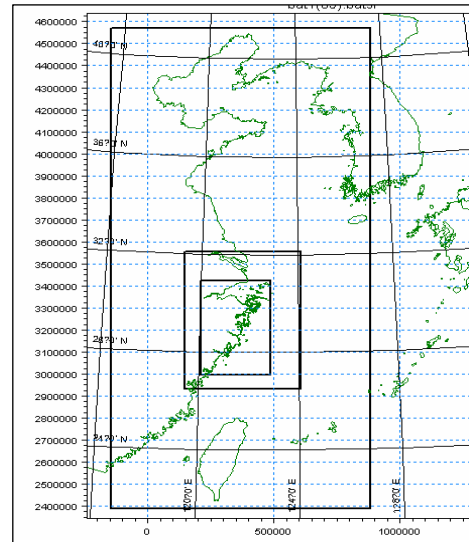
$$W_R = 3.029(P_{\infty} - P_0)^{0.644} \quad (1-7)$$

另外一个待确定的台风参数为最大风速半径  $R$ 。美国用侦察机航空测量了台风的中心气压  $P_0$ 、最大风速半径  $R$  和台风中心移速  $V_d$ , 本文摘取了  $28 \sim 31^\circ\text{N}$  间西北太平洋上台风中心气压最低时的  $R$  和  $V_d$ , 资料共 15 年, 见表 3-1。可以看到  $R$  的最大值为  $57\text{km}$ , 最小值为  $11\text{km}$ , 一般台风  $P_0$  值小时,  $R$  也小。

由以上资料可构造求得:  $R = R_k - 0.4(P_0 - 900) + 0.01(P_0 - 900)^2$ ,  $P_0$  为中心气压 (hPa),  $R$  为最大风速半径 (km),  $R_k$  为经验常数, 推荐值为 40, 也可由气压或风速的拟合精度予以调节。本文中不涉及气压场的计算。

## 1.4 模型范围

所建立的中国东海大范围耦合模型的计算域见右图 1。计算域的水边界西至广东汕头，南至台湾岛南端，东至日本琉球群岛—韩国济州岛东侧一线，北至渤海辽东湾北岸。由于模型采用直角平面坐标，计算边界与经线、纬线并不重合，模型大致范围为  $21.5^{\circ}\text{N}\sim 41^{\circ}\text{N}$ 、 $116.5^{\circ}\text{E}\sim 127^{\circ}\text{E}$ ，整个计算域面积为  $1030\text{km}\times 2180\text{km}$ ，即  $224\text{万}\text{km}^2$ 。采用三层嵌套的方法逐步加密网格，其中大范围的网格尺寸为  $8100\text{m}$ ，其后每一层网格逐层缩小 3 倍， $900\text{m}$  尺寸的细网格覆盖了全部浙江沿海。



## 2. 风暴潮计算

今年第8号热带风暴“桑美”于8月5日20时在关岛附近洋面上生成，7日8时加强为强热带风暴，7日14时加强为台风，9日11时增强为强台风，同日18时继续增强为超强台风。“桑美”生成后一直向西北偏西方向移动，于10日17时25分在浙江省苍南县马站镇登陆。从不起眼的热带云团到超强台风，“桑美”只用了短短4天。其强度、风速、雨强均为我国罕见。在此过程中，利用MIKE21模块建立的中国东海风暴潮模型成功对“桑美”形成的风暴潮位进行了预报，并在台风过后对风场、风暴潮位进行了补充对比分析。

### 2.1 风场计算

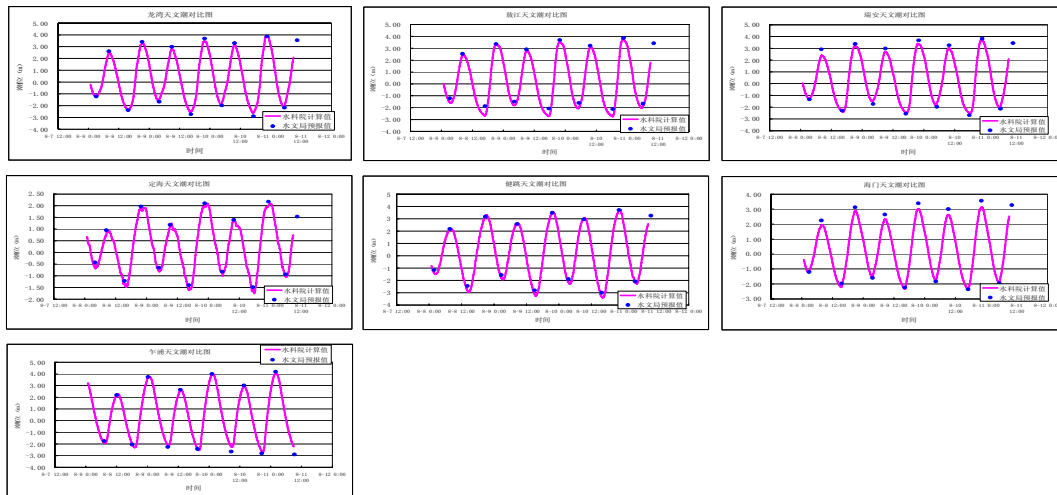
### 2.2 天文潮对比

在不考虑大气强迫力的条件下，仅在中国东海模型的开边界输入用全球天文潮预报程序计算的包含 10 个分潮的天文潮波，其中，对南边界（台湾岛以南）天文潮过程根据经验适度微调。在外海深水处，使用 10 个主要分潮基本能够构造出真实的天文潮过程，潮波由边界向近岸浅水区传播过程中，非线性数值模型将模拟出潮波的变形，浅水分潮、倍潮及其他因非线性效应派生的分潮均可由本模型自动算出。选取浙江沿海 7 个潮位站实测资料进行调和并计算天文潮作为“推算值”，与计算值的对比见表 2-1 和图 2-1，由图可见，无论是振幅还是相位二者均吻合良好，

表 2-1 天文潮位比较表

85 基面

站名	水文局提供值		数模计算值	
	时间	潮位 (m)	时间	潮位 (m)
龙湾	22:34	3.87	22:30	3.91
鳌江	22:34	3.87	22:30	3.79
瑞安	22:42	3.83	22:20	3.71
定海	23:18	2.17	22:30	1.94
健跳	22:13	3.72	22:20	3.73
海门	22:09	3.56	22:30	3.14
乍浦	1:55(8-11)	4.19	1:50	4.05



### 2.3 风暴潮计算

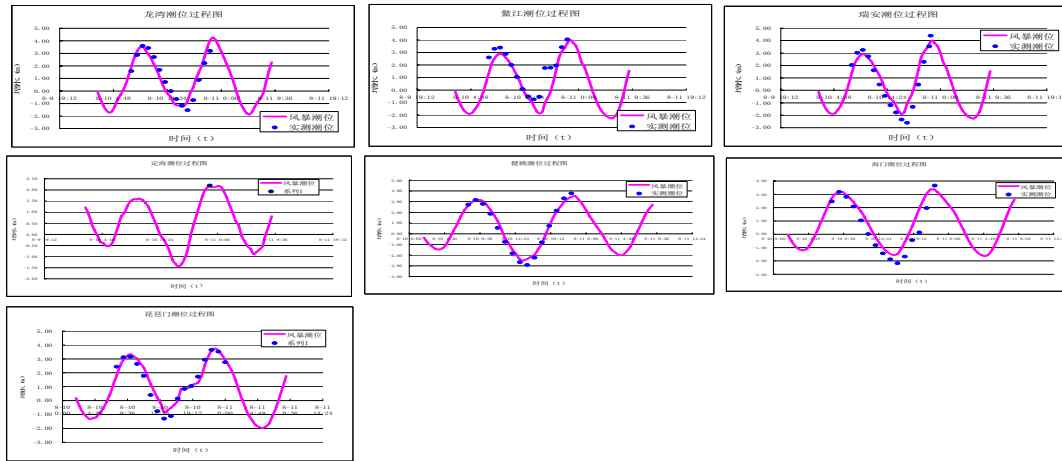
在以上工作的基础上，进行风暴潮计算，并以浙江沿海有代表性的 6 个站位例，将计算值与其后观测的潮位对比，列于表 2-2，

表 2-2 “桑美”台风风暴潮高潮位预报值与实测值对比表 (单位: m, 85 高程)

站名	实测		计算	
	潮位	时间	潮位	时间
定海	2.20	10 日 22:42	2.15	10 日 22:40
健跳	3.79	10 日 21:54	3.51	10 日 21:50
海门	3.65	10 日 22:06	3.43	10 日 21:30
瑞安	4.39	10 日 22:15	4.37	10 日 22:30

鳌江	4.04	10日 22:30	4.01	10日 22:30
琵琶门	3.65	10日 22:30	3.75	10日 22:30

由上表可见，计算值与实测值吻合较好。



### 3 讨论

采用 MIKE21 二维水动力模块，建立中国东海风暴潮模型，模拟了超强台风桑美在浙江沿海形成的风暴潮位，通过与实测值的比较，可以认为模型结果比较准确，可以在实际中进行预报、分析等工作。