

渤海台风风暴潮的数值模拟以及黄河口 附近台风风暴潮的数值估算*

丁文兰 刘凤树

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

提要 本文在分析渤海台风风暴潮特征的基础上, 将进入渤海的台风, 按其路径的不同分为三种类型, 采用动力数值计算方法, 模拟了具有代表性路径的三次台风风暴潮实例, 取得了计算值与实测值基本一致的结果。进而用模式风暴进行风暴潮的数值估算, 文中给出了10条台风移动路径, 计算了在不同风速和移行速度影响下黄河口近岸12个地点的风暴潮的高度值。

渤海沿岸曾多次遭受强风风暴潮的侵袭, 而莱州湾和渤海湾又是渤海风暴潮的多发区和严重区。因此, 对渤海风暴潮数值模拟以及黄河口区附近风暴潮预报的研究是十分重要的。近几年来, 国内许多学者^[1-3]对渤海风暴潮特性和潮灾进行了较深入的理论、数值研究和统计分析, 获得了一些有益的成果。但是, 到目前为止, 尚未见到渤海台风风暴潮的数值预报。本文采用动力数值计算方法, 模拟了具有代表性的几次台风风暴潮, 并试图对不同路径的台风所引起的黄河口附近的风暴增水进行预报。

一、控制方程

非线性的风暴潮平均流方程组为:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} + f \mathbf{k} \times \mathbf{V} = g \nabla \zeta + \frac{1}{\rho} \frac{\boldsymbol{\tau}_a - \boldsymbol{\tau}_b}{h + \zeta} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot [(h + \zeta) \mathbf{V}] = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{V} = U^i + V^j \quad (3)$$

这里, $\mathbf{V}$ 为平均流矢量; ζ 为风暴潮位; $\boldsymbol{\tau}_a$ 为风应力矢量; $\boldsymbol{\tau}_b$ 为底摩应力矢量; g 为重力加速度; ρ 为海水密度; f 为科氏参数; h 为水深; ∇ , $\nabla \cdot$ 分别为梯度和散度算子, t 为时间, i, j, k 分别为 x, y, z 轴上单位矢量。

1. 初始条件

$$t = 0, \zeta = 0, U = V = 0 \quad (4)$$

2. 边界条件

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第1314号。

收稿日期: 1986年4月20日。

岸界的法向流速为零;水界上,

$$\zeta = 0, V = 0, \frac{\partial U}{\partial X} = 0. \quad (5)$$

3. 风场模式

这里采用 Jelesnianski 所编制的风场模式:

$$\mathbf{W} = \begin{cases} \frac{r}{R+r} (V_{ox}\mathbf{i} + V_{oy}\mathbf{j}) + W_R(r/R)^{3/2} \cdot \frac{1}{r} (A\mathbf{i} + B\mathbf{j}) & 0 \leq r \leq R \\ \frac{R}{R+r} (V_{ox}\mathbf{i} + V_{oy}\mathbf{j}) + W_R(R/r)^{1/2} \cdot \frac{1}{r} (A\mathbf{i} + B\mathbf{j}) & r \geq R \end{cases} \quad (6)$$

上式右边第一项为随台风移动而产生的移行风场,分解成 x, y 方向上的分量形式:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} V_{ox} \\ V_{oy} \end{pmatrix} &= \frac{r}{R+r} V_0 \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} & 0 \leq r \leq R \\ \begin{pmatrix} V_{ox} \\ V_{oy} \end{pmatrix} &= \frac{R}{R+r} V_0 \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{pmatrix} & r \geq R \end{aligned} \quad (7)$$

第二项为台风的圆形风场,其分量形式为:

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} = W_R \left(\frac{r}{R} \right)^{3/2} \frac{1}{r} \begin{Bmatrix} -(y - y_0) \cos(\varphi - \lambda) - (x - x_0) \sin(\varphi - \lambda) \\ (x - x_0) \cos(\varphi - \lambda) - (y - y_0) \sin(\varphi - \lambda) \end{Bmatrix} \quad 0 \leq r \leq R \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix} = W_R \left(\frac{R}{r} \right)^{1/2} \frac{1}{r} \begin{Bmatrix} -(y - y_0) \cos(\varphi - \lambda) - (x - x_0) \sin(\varphi - \lambda) \\ (x - x_0) \cos(\varphi - \lambda) - (y - y_0) \sin(\varphi - \lambda) \end{Bmatrix} \quad r \geq R$$

$$\begin{aligned} \tau_a &= 3.2 \times 10^{-6} \mathbf{W} / \mathbf{W} / \\ \tau_b &= \rho g c^* \mathbf{V} / \mathbf{V} / \end{aligned} \quad (9)$$

这里, $\mathbf{W}$ 为风速矢量; R 为台风最大风速半径, r 为任一点到台风中心的距离; W_R 为台风最大风速; V_0 为台风移行速度; θ 为台风移行方向与 x 轴之夹角; φ 为风向与地转风的偏角; λ 为等压线与同心圆夹角^[3]; x_0, y_0 为台风中心的初始位置; c^* 为粗糙系数, 其经验公式为: $c^* = \frac{1}{\eta} \bar{h}^{\frac{1}{4}}$, $\bar{h}$ 表示计算点之相邻 4 点 h 的平均值, η 值随海区的不同而异, 由试验确定。

二、差分方程

采用 C 型的交错网格, 以便于使用空间的中心差分, 其 xoy 坐标见图 1。

同时运用了“ADI”法, 将每个时间步长分为两个半步长。在 $k\Delta t - (k+1/2)\Delta t$ 半步长上, 沿 x 轴方向对 ζ, U 用隐式计算, 对 V 用显式计算; 在 $(k+1/2)\Delta t - (k+1)\Delta t$ 半步长上, 沿 y 轴方向对 ζ, V 用隐式计算, 对 U 用显式计算。每步求解的方程组系数矩阵为三角矩阵, 便于使用追赶法求解^[3]。

前半步 $k\Delta t - (k+1/2)\Delta t$ 时刻, x 方向差分格式如下:

在 (i, j) 点上离散连续方程

$$a_{i-1/2,j} U_{i-1/2,j}^{k+1/2} + b_{i,j} \zeta_{i,j}^{k+1/2} + c_{i+1/2,j} U_{i+1/2,j}^{k+1/2} = f_{i,j} \quad (10)$$

其中, $a_{i-1/2,j} = -\frac{\Delta t}{4\Delta s} (h_{i-1/2,j-1/2} + h_{i-1/2,j+1/2} + \zeta_{i-1,j}^k + \zeta_{i,j}^k); b_{i,j} = 1; c_{i+1/2,j} = \frac{\Delta t}{4\Delta s} \times$

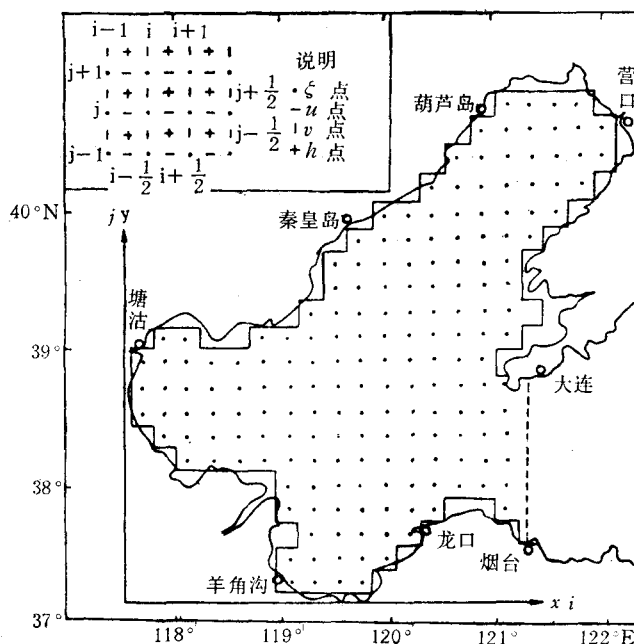


图 1 计算海区边界及网格图

Fig. 1 The computed area and grids

$$(h_{i+1/2,j-1/2} + h_{i+1/2,j+1/2} + \zeta_{i,j}^k + \zeta_{i+1,j}^k); f_{i,j} = \zeta_{i,j}^k - \frac{\Delta t}{4\Delta s} [(h_{i-1/2,j+1/2} + h_{i+1/2,j+1/2} + \zeta_{i,j}^k + \zeta_{i,j+1}^k)V_{i,j+1/2}^k - (h_{i-1/2,j-1/2} + h_{i+1/2,j-1/2} + \zeta_{i,j-1}^k + \zeta_{i,j}^k)V_{i,j-1/2}^k]$$

在 $(i + 1/2, j)$ 点上离散 x 方向的运动方程

$$a_{i,j}\zeta_{i,j}^{k+1/2} + b_{i+1/2,j}U_{i+1/2,j}^{k+1/2} + c_{i+1,j}\zeta_{i+1,j}^{k+1/2} = f_{i+1/2,j} \quad (11)$$

其中, $a_{i,j} = -\frac{g\Delta t}{2\Delta s}$; $b_{i+1/2,j} = 1 + \frac{\Delta t}{4\Delta s}(U_{i+3/2,j}^k - U_{i-1/2,j}^k)$; $c_{i+1,j} = \frac{g\Delta t}{2\Delta s}$;

$$\begin{aligned} f_{i+1/2,j} = & U_{i+1/2,j}^k + \frac{\Delta t}{8} \bar{v}^k \left[f - \frac{1}{2\Delta s} (U_{i+1/2,j+1}^k - U_{i+1/2,j-1}^k) \right] \\ & + \frac{\Delta t \tau_{axi+1/2,j}^{k+1/2}}{\rho(h_{i+1/2,j-1/2} + h_{i+1/2,j+1/2} + \zeta_{i,j}^k + \zeta_{i+1,j}^k)} \\ & - \frac{4g\Delta t U_{i+1/2,j}^k}{(h_{i+1/2,j-1/2} + h_{i+1/2,j+1/2} + \zeta_{i,j}^k + \zeta_{i+1,j}^k)(c_{i,j}^* + c_{i+1,j}^*)} \\ & \times \sqrt{(U_{i+1/2,j}^k)^2 + \frac{1}{16}(\bar{v}^k)^2} \end{aligned}$$

在 $(i, j + 1/2)$ 点上离散 y 方向的运动方程

$$\begin{aligned} V_{i,j+1/2}^{k+1/2} = & \left\{ V_{i,j+1/2}^k - \frac{\Delta t}{8} \bar{u}^{k+1/2} \left[\frac{1}{2\Delta s} (V_{i+1,j+1/2}^k - V_{i-1,j+1/2}^k) + f \right] \right. \\ & \left. + \frac{\Delta t \tau_{ayij+1/2}^{k+1/2}}{h_{i-1/2,j+1/2} + h_{i+1/2,j+1/2} + \zeta_{i,j}^{k+1/2} + \zeta_{i,j+1}^{k+1/2}} - \frac{\Delta t g}{2\Delta s} (\zeta_{i,j+1}^k - \zeta_{i,j}^k) \right\} \end{aligned}$$

$$\div \left[1 + \frac{\Delta t}{4\Delta s} (V_{i,j+3/2}^k - V_{i,j-1/2}^k) \right. \\ \left. + \frac{4g\Delta t \sqrt{(V_{i,j+1/2}^k)^2 + \frac{1}{16} (\bar{U}^{k+1/2})^2}}{(h_{i-1/2,j+1/2} + h_{i+1/2,j+1/2} + \zeta_{i,j}^{k+1/2} + \zeta_{i,j+1}^{k+1/2})(c_{i,j}^* + c_{i,j+1}^*)^2} \right] \quad (12)$$

式中, $\bar{V}^k = (V_{i,j-1/2}^k + V_{i,j+1/2}^k + V_{i+1,j-1/2}^k + V_{i+1,j+1/2}^k)$;

$\bar{U}^{k+1/2} = (U_{i-1/2,j}^{k+1/2} + U_{i-1/2,j+1}^{k+1/2} + U_{i+1/2,j}^{k+1/2} + U_{i+1/2,j+1}^{k+1/2})$ 。

若把 $U, V; i, j$ 位置分别对调, $k, k+1/2$ 分别改为 $k+1/2, k+1$, 则可得到后半步沿 y 方向的差分公式。具体的计算是, 前半步的 U^k, V^k, ζ^k 值代入 (10), (11) 式, 求出 $U^{k+1/2}, \zeta^{k+1/2}$, 再代入 (12) 式, 求出 $V^{k+1/2}$ 。同样, 将后半步 $U^{k+1/2}, V^{k+1/2}, \zeta^{k+1/2}$ 值代入 (i, j) 点上离散连续方程和 $(i, j+1/2)$ 点上离散的运动方程, 求出 V^{k+1}, ζ^{k+1} , 代入 $(i+1/2, j)$ 点上 x 方向离散的运动方程, 即求出 U^{k+1} 值。

本文选取网格距离和时间步长与文献^[3]相同, Δs 为 20 km, ΔT 为 20 min, 稳定效果符合要求。这里数值模拟了三种路径 (见图 2) 的台风潮。计算工作是在 BCM-6800 机上完成的。

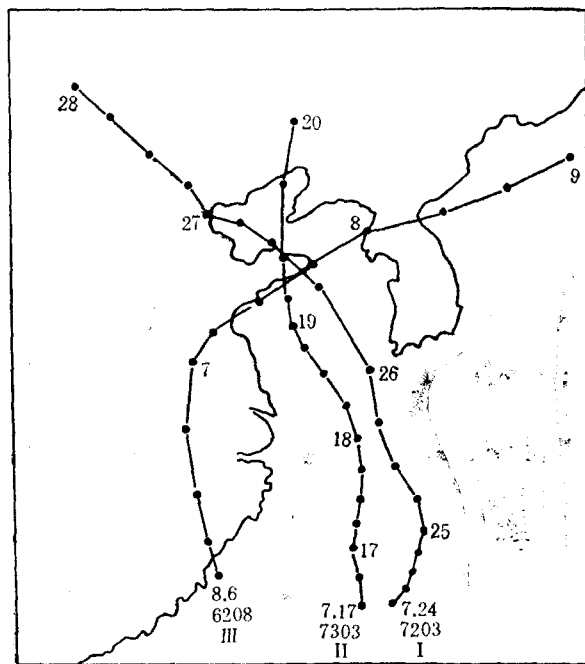


图 2 台风的三种路径

Fig. 2 The three typhoon tracks

三、计算结果与讨论

1. 模式风场参数的取值试验

对一次台风过程, 选取一组气象参数。其中, 台风最大风速 W_R , 移行速度 V_t , 移行

方向与 x 轴之夹角 θ 都取 6 小时的平均值。最大风速半径 R , 对 I 型、II 型台风 R 取为 120 km; 对 III 型台风 R 值随台风与渤海距离的增加而增大, 最大取为 180 km, 这是由于台风到达北黄海已变性为低气压之故。风向与地转风的偏角 φ 和等压线与同心圆的夹角 λ 的选取, 分为两种情况: (1) 当台风在东海和黄海或者穿越了渤海时, $\varphi = 15^\circ, \lambda = 0$, 这时渤海只受到台风移行风场的影响, 而圆形风场的影响不明显。(2) 当台风进入渤海或者沿渤海东部移行时, 台风圆形风场的影响就明显起来, 这时, 若 $r < R$, 则 $\varphi = 15^\circ, \lambda = 0$; 若 $r > R$ 时, 则 $\varphi = 10^\circ, \lambda$ 值随离台风中心距离的增大而加大。

2. 台风移行速度的效应

台风移行速度对风暴潮位的影响是一个重要的动力因子。但由于各海区地理环境的差异, 导致了它们之间的关系也有所不同, 甚至在同一海区由于处地有别也不尽相同。在本次计算过程中充分论证了这一事实。

图 3 清楚表明, 从塘沽至神仙沟 (第 8 计算点) 沿岸, 台风移行速度 V_0 为 3 m/s—9 m/s, 最大风暴潮位随台风移速的增加而增加; 当 V_0 在 9 m/s—15 m/s 范围内, 最大风暴潮位随台风移速的增加而减小。这一动力过程不仅在渤海湾南岸存在, 且在辽东湾葫芦岛站也具有这一特性。然而, 从神仙沟至羊角沟黄河口沿岸, 最大风暴潮位随台风移速的变化规律相同, 但最大风暴潮位发生在 $V_0 = 12$ m/s。

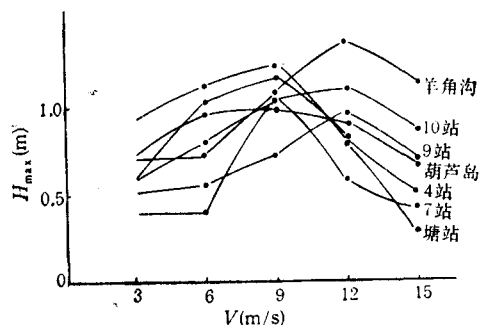


图 3 台风移速与最大风暴潮位的关系

Fig. 3 The relationship between the typhoon speed and max. surges

3. 台风路径的效应

台风路径与风暴潮位有着密切的关系。图 4 给出了三种台风路径所引起的风暴潮位的逐时变化的数值结果与实测值之比较。可以看出, 两者变化趋势基本一致, 特别是成功地模拟了黄河三角洲西部塘沽和东部羊角沟两站的风暴潮位。这为模型风暴潮预报奠定了基础。但应指出的是在 I 型台风过程中, 羊角沟的实测值为两个峰, 前一增水峰大于后一峰值, 而第二峰值与计算值位相反。但由于它对下面的风暴潮最大值的预报影响不大, 所以没有作深入的研究, 待今后进一步试验。

4. 台风潮的空间分布

我们以穿越渤海在其西岸登陆的 7203 号台风 (即 I 型) 为例, 绘制了历时等水位线和相应的风暴潮流的空间分布图 (图 5), 它给出了这次风暴潮的发生、发展和消衰的全过程。

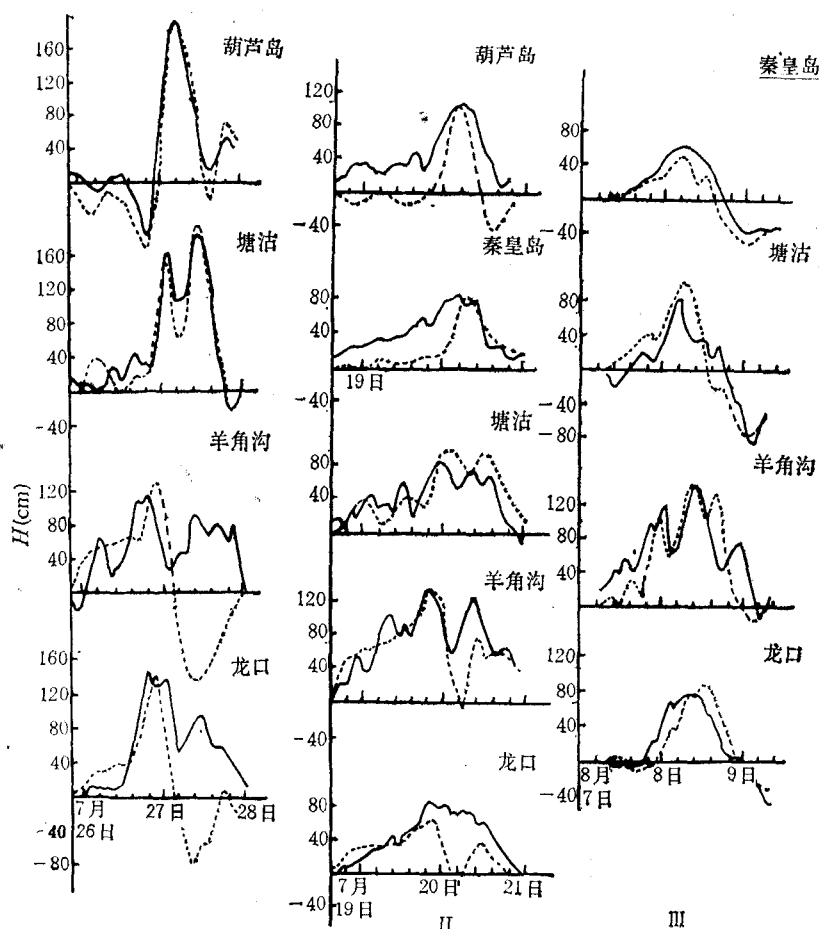


图4 各测站台风潮过程曲线

——实测值; ----计算值。

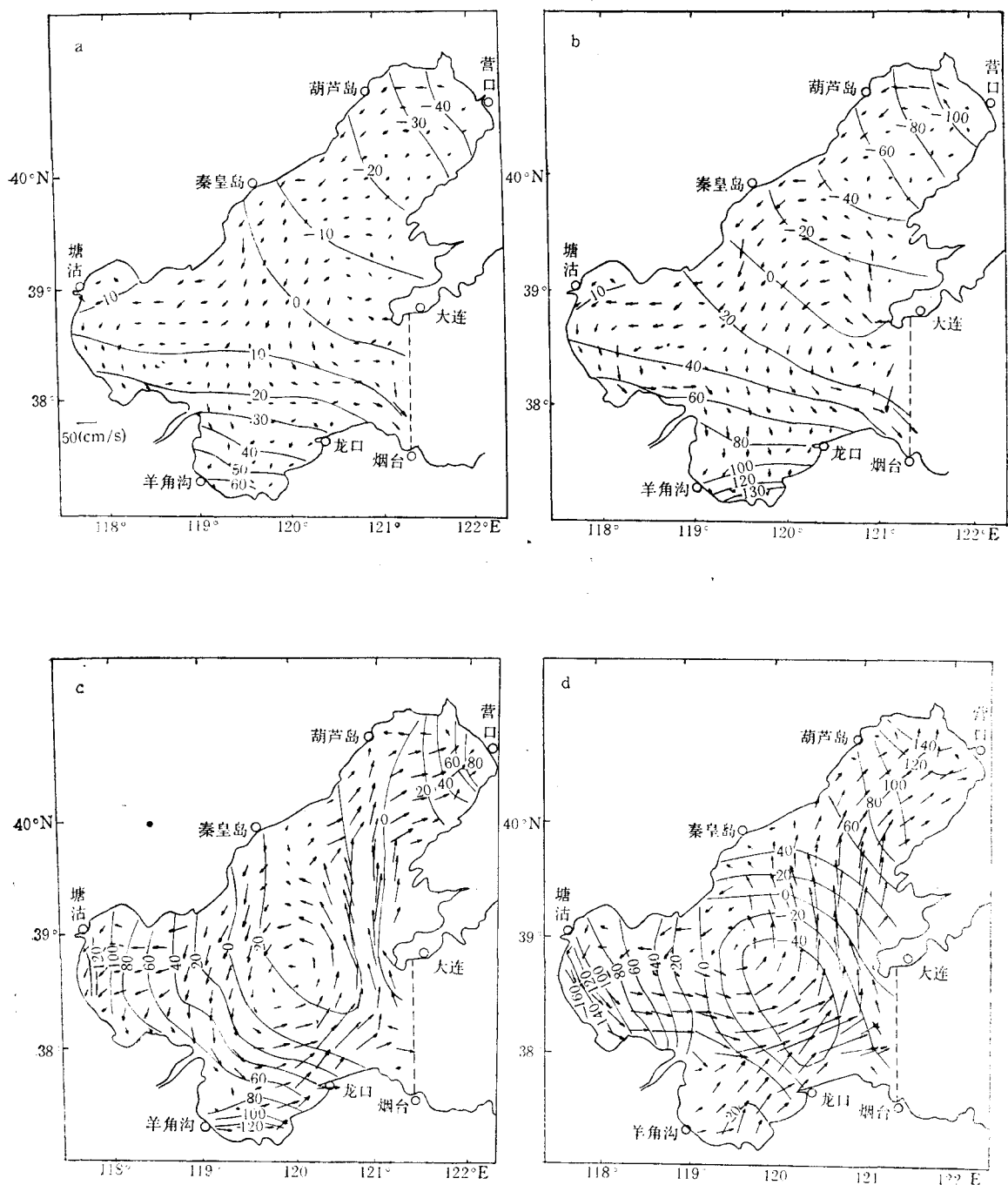
I. 7203; II. 7303; III. 6208.

Fig. 4 The surge curves at the stations along the coast

—— value of observation; ---- value of computation.

7203号台风潮数值模拟结果分析表明(见图5), 7月26日14时, 台风还在南黄海时, 渤海的海面已有轻微的反应, 并有小的波动。7月26日20时, 台风到达山东半岛北岸渤海海峡时, 整个渤海处在东北大风的控制之下, 台风中心附近海域形成一个逆时针的小环流, 海水由东北向西南方向流动, 这时莱州湾的增水几乎达到了极值, 辽东湾处于大减水时期, 呈现出南高北低的现象。7月26日23时, 当台风进入渤海中部时, 整个渤海形成一个非常明显的逆时针环流, 莱州湾风暴潮位达到了极值。与此同时, 辽东湾、渤海湾已有明显增水。7月27日02时, 台风于渤海西岸登陆时, 辽东湾顶的水位急剧上升达到极值。此时, 南部水位下降, 大致形成了南北水位变化趋势相反的情况。

6208号台风潮的数值结果表明, 8月7日20时左右, 台风位于山东半岛南部。这时, 渤海受东风的影响, 渤海湾水位升高, 湾口水位降低, 呈现出西高东低的现象。8月8日02时, 台风移动到山东高角。这时, 渤海处于东北大风控制之下, 辽东湾减水, 莱州湾、



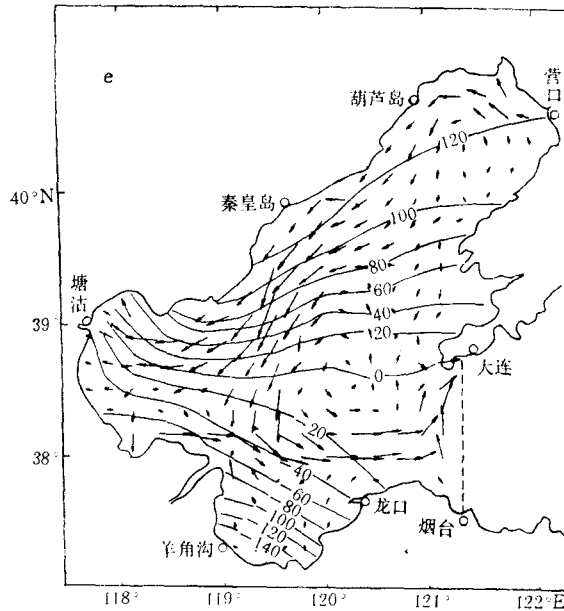


图 5 7203 号台风潮空间分布

a. 1972.7.26.14^h; b. 1972.7.26.20^h c. 1972.7.26.23^h;
d. 1972.7.27.02^h; e. 1972.7.27.08^h。

Fig. 5 The space distribution of surges for typhoon No. 7203

渤海湾增水。8 月 8 日 08 时, 台风于朝鲜北部登陆时, 莱州湾和渤海湾的风暴潮位达到了极值, 台风穿越朝鲜北部继续向东北移动时, 因风场强度逐渐减弱, 离渤海的距离越来越远, 从而对渤海潮位的影响也逐渐消失。

综观两种路径的台风所引起的风暴潮位场的变化, 最大增水发生时间是由北向南沿西岸逐时迟后, 呈逆时针方向传播, 这是由于科氏力效应的结果^[1]。

四、黄河口区台风风暴潮数值估算的预报方案

对海湾中风暴潮的预报, 由于预报路径的误差, 在风暴到达前作出风暴潮数值预报的动力程序是非常困难的。但是, 我们以模拟的三条台风路径的风暴潮为基础, 用模式风暴作风暴潮的数值计算还是可行的。

图 6 是典型的模拟路径, 假定台风沿 10 条路径中的每一条, 且分别以 9.82 m/s 和 12.27 m/s 速度移行, 而台风的最大风速每一过程分为 5 种情况, 分别为: 15, 20, 25, 30, 35 m/s, 最大风速半径为 120 km。I, II 型路径相邻两条的平均距离为 60 km, III 型路径相邻两条的平均距离为 80 km。据此用二维动力模式作出黄河口三角洲近岸地区 12 个地点的最大风暴潮的高度值, 现以 I₂ 线为例(见表 1)。

假如一次台风沿一条居间的路径移行, 则用上述结果内插可估算出预报地点最大风暴潮高度值。一般来说, I 型路径的台风最大风速可达 30—35 m/s; II 型路径为 20—25 m/s; III 型路径最小, 一般在 15—20 m/s。因此, 对黄河口风暴潮的极值水位影响最大

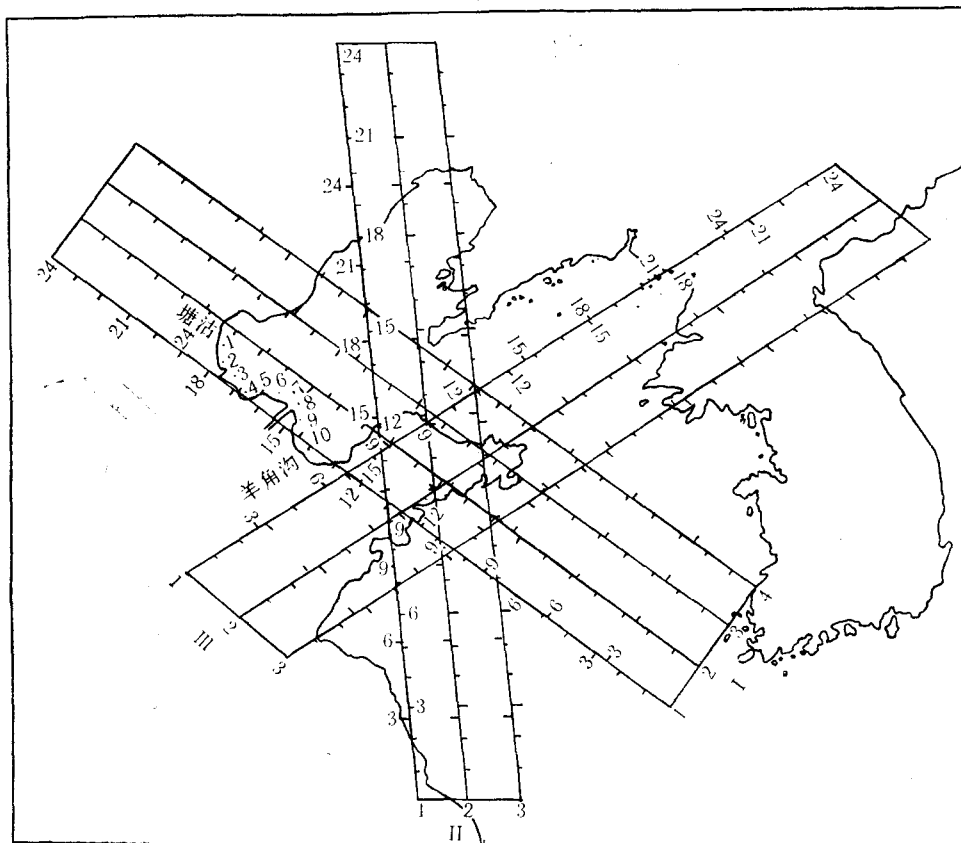


图 6 假想台风路径和预报站位

Fig. 6 The imaginary typhoon track and forecast stations

表 1 黄河口附近最大风暴潮高度估算 (I₂ 路线)

Table 1 The max. surge values estimated in near Huanghe River estuary (I₂ track)

站位		塘沽	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	羊角沟
最大增水	风速 (m/s)	塘沽	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	羊角沟
9.82	15	27.1	30.5	37.4	31.3	27.0	21.0	17.3	13.6	11.2	21.0	25.8	22.3
	20	49.9	58.3	70.9	60.3	53.6	44.2	36.9	30.9	26.4	42.0	50.0	60.6
	25	77.7	91.4	110.5	96.4	73.1	74.1	61.3	53.4	47.7	68.8	80.6	99.0
	30	108.6	128.3	154.7	137.2	124.9	108.8	89.5	80.3	73.6	100.7	116.8	144.4
	35	142.1	168.6	202.7	181.9	168.5	147.5	121.0	110.8	103.4	137.3	158.1	196.1
12.27	15	15.0	17.4	23.2	21.3	17.5	11.4	9.2	6.8	9.1	17.9	21.3	25.8
	20	33.7	38.5	50.8	44.6	40.7	29.8	26.6	21.3	19.7	37.4	43.4	52.9
	25	58.2	66.9	86.5	78.4	68.0	55.6	50.9	42.1	34.0	62.6	72.2	88.0
	30	87.6	100.9	128.8	118.9	108.9	89.1	80.8	68.3	56.6	92.8	107.0	130.1
	35	121.3	139.7	176.6	164.9	151.1	128.7	115.2	99.2	83.7	127.6	147.1	178.4

的应该是 I 型路径,在 I 型路径中,尤以 I_2 路径的台风对黄河口风暴潮的影响为最大。

参 考 文 献

- [1] 刘凤树、王喜年, 1984. 渤海风风暴潮的初步探讨。海洋科学集刊 23: 1—17。
- [2] 孙文心、冯士侗、秦曾灏, 1979. 超浅海风风暴潮的数值模拟(一)零阶模型对渤海风风暴潮的初步应用。海洋学报 1(2): 193—211。
- [3] 张延廷、王以娇, 1983. 渤海风场的模拟及风暴潮数值计算。海洋学报 5(3): 261—272。
- [4] Liu Fengshu, 1982. An analysis on some characteristics of storm surges by typhoon. *Collected Oceanic Works* 2: 5—17.

NUMERICAL SIMULATION ON TYPHOON SURGE AND SURGE ESTIMATION OF HUANGHE RIVER ESTUARY REGION IN BOHAI SEA*

Ding Wenlan and Liu Fengshu

(Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao)

ABSTRACT

The hydrodynamic numerical method is employed in this paper to simulate typhoon surges of three typical tracks in Bohai Sea. The results coincide with observations.

1. When the typhoon is in East China Sea and Yellow Sea or has crossed Bohai Sea, the angle between the wind direction of Jelesnianski wind field and the direction of geostrophic wind is $\varphi=15^\circ$, the angle of isobar and concentric circles is $\lambda=0$. When the typhoon has moved into or along the east of Bohai Sea, the circular wind field effect of typhoon becomes more obvious and the value of λ increases as the distance increases from the typhoon centre.

2. From Tanggu to Shenxiangou, when the travelling speed of typhoon is in the range of 3 m/s—9 m/s, the maximum surge increases as the travelling speed increases. But when V_0 is between 9 m/s and 15 m/s, the maximum surge decreases as the travelling speed increases.

3. The maximum surges occur for the first time in Laizhou Bay, then the crest of surge propagated from north to south along the west coast around the center of the Bohai Sea appears to move anticlockwise. This is due to the influence of Coriolis force.

On the basis of numerical simulation, we choose 10 tracks of typhoon and assume that each typhoon has a travelling speed 9.8 m/s and 12.3 m/s respectively. The maximum wind velocities are 15 m/s, 20 m/s, 25 m/s, 30 m/s and 35 m/s respectively. Thus, we find the maximum surges at 12 places in nearshore of Huanghe River Delta. The tests show that along the I_2 track the typhoon has the most effect on the storm surges of Huanghe River Estuary.

* Contribution No. 1314 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.