

YW-SWP 海浪数值预报模式及其应用*

尹宝树 王 涛 范顺庭

(中国科学院海洋研究所, 青岛 266071)

提要 YW-SWP 海浪数值预报模式考虑了地形引起的折射效应和波波间非线性能量转移,采用了新的风输入源函数和文氏理论风浪谱,使模式不仅适合深浅水,且有更适合我国海区的特色;另外,计算中对风场采取了一种加权平均的处理技术。应用于渤海个例检验及对温坨子站的后报结果表明,本模式有相当好的可靠和准确性。折射效应在 20m 以上水深影响不明显,但在大约 10m 水深的浅水区影响达 30cm。

关键词 海浪预报模式 个例检验和后报计算 折射影响

自 60 年代以来,经过 30 多年的反复研究和实验,海浪数值预报得到迅速发展,现已达到实用阶段。目前,海浪数值模拟的可靠性已不容置疑,而且海浪数值计算已成为获取海洋工程设计参数的快速、有效、可靠的一条途径。

按照 SWAMP 小组(1988)对各种海浪数值模式的划分和对比,尽管数值模式已发展到了第三代——WAM 模式,但由于问题的复杂性,还不能说第三代模式完全可以取代第二代甚至第一代模式。实际上,现在许多国家的业务预报仍用第二代或第一代模式。YW-SWP 为第二代模式,本文研究不仅考虑了近岸工程中重要的浅水区的折射变浅效应,同时采用了新的风能量输入表达式和文氏理论风浪谱进行非线性能量转移项的计算,对风场还采取了一种加权平均的技术处理,使模式更具适合我国海区的特色。实测检验和后报的结果是令人满意的。

1 YW-SWP 区域海浪数值预报模式及方法

1.1 YW-SWP 区域海浪数值预报模式 对任意水深,组成波能量平衡方程为:

$$\left\{ \left\{ \left\{ \frac{\partial E}{\partial t} = -\nabla \cdot (c_g E) \right\} - \frac{\partial}{\partial \theta} [(c_g \cdot \nabla \theta) E] \right\} + S_{in} + S_{bo} + S_{br} \right\} + S_{nl} \quad (1)$$

式中, $E(f, \theta, x, y, t)$ 为二维的方向谱; c_g 为组成波群速; $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$; x, y 分别代表直角坐标的两个方向。

式(1)中第一重括号为传播项,第二重括号为折射项,第三重括号为能量输入和耗散项,第四重括号为组成波能量非线性转移项。 $(c_g \cdot \nabla \theta)$ 表示波动沿 θ 方向传播的速度,它建立于连续的 Snell 定律,可表示为:

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 2309 号。国家“七五”攻关课题, D04860121 号。
收稿日期: 1992 年 7 月 15 日。接受日期: 1993 年 8 月 29 日。

$$(\mathbf{c}_g \cdot \nabla \theta) = - \frac{|\mathbf{c}_g|}{k} \left(\frac{\partial d}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial d}{\partial y} \cos \theta \right) \left(\frac{-k^2 \sec^2 k d}{\operatorname{th} k d + k d \sec^2 k d} \right)$$

$$|\mathbf{c}_g| = \frac{1}{2} (g \operatorname{th} k d)^{0.5} \left\{ 1 + \frac{2 k d}{\operatorname{sh}(2 k d)} \right\}$$

$$(2 \pi f)^2 = g k \operatorname{th} k d$$

风能量输入项 $S_{in} = \alpha + \beta E$, 这里

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_1 U^2 \cos^2(\theta - \phi), & \text{当 } f = f_{\max}, |\theta - \phi| < 90^\circ \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$\alpha_1 = \alpha_0 / (2 \pi f_{\max})$$

$$\beta = \max \left\{ 0, \beta_0 0.25 \frac{\rho_a}{\rho_w} \omega \left(28 \frac{U_*}{c} \cos(\theta - \phi) - 1 \right) \right\}$$

式中, U 是 10m 高处风速; 波速 $c = \frac{g}{2 \pi f} \operatorname{th} k d$; d 为水深; $\omega = 2 \pi f$; α_0, β_0 为可调系数, 本研究中取 $\alpha_0 = 2.5 E - 7$, $\beta_0 = 1$ 。

底摩擦能量消耗源函数 $S_{b0} = - \frac{\Gamma \omega^2}{g^2 \operatorname{sh}^2 k d} E$, 式中底摩擦系数 Γ 取为 $0.0038 \text{m}^2/\text{s}^3$ 。

破碎能量消耗源函数取 $S_{br} = - \varepsilon f^2 \left[\int E d j d \theta \right]^{0.25} E$, 式中系数 ε 取为 4×10^{-4} 。

由于精确计算非线性能量转移项 S_{n1} 的复杂性, 本研究中采用参量化方法, 并且选择适合我国海区特点的文氏理论风浪谱 (Wen, 1988) 作为控制谱形, 方向函数取为 $\frac{2}{\pi} \cos^2(\theta - \phi)$, θ 为波向, ϕ 为风向。

1.2 模式的数值计算方法 设 $E_{i,j,l,m}^n$ 表示在网格点 (x_i, y_j) 上, 当时刻为 t_n 时, 频率为 f_i , 方向为 θ_m 的组成波能量, Δt 为从 t_n 到 t_{n+1} 时刻的时间间隔; $\Delta x, \Delta y$ 分别为 x, y 方向的空间步长。

对式(1)中传播项 $\frac{\partial}{\partial t} E_{i,j,l,m}^n = - \nabla \cdot (\mathbf{c}_g E_{i,j,l,m}^n)$, 采用修正的 Lax-Wendroff 差分格式如下:

第一步由 t_n 时刻计算 $t_{n+1/2}$ 时刻过渡值:

$$E_{i+1/2,j}^{n+1/2} = \frac{1}{2} (E_{i+1,j}^n + E_{i,j}^n) - \frac{\Delta t}{2} \left\{ \frac{c_{i+1,j} E_{i+1,j}^n - c_{i,j} E_{i,j}^n}{\Delta x} + \frac{c_{i+\frac{1}{2},j+1} E_{i+1/2,j}^n - c_{i+1/2,j-1} E_{i+1/2,j-1}^n}{2 \Delta y} \right\}$$

$$E_{i,j+1/2}^{n+1/2} = \frac{1}{2} (E_{i,j+1}^n + E_{i,j}^n) - \frac{\Delta t}{2} \left\{ \frac{c_{i+1,j+1/2} E_{i+1,j+1/2}^n - c_{i-1,j+1/2} E_{i-1,j+1/2}^n}{2 \Delta x} + \frac{c_{i,j+1} E_{i,j+1}^n - c_{i,j-1} E_{i,j-1}^n}{\Delta y} \right\}$$

第二步由上述的 $t_{n+1/2}$ 时刻的过渡值计算 t_{n+1} 时刻的值:

$$E_{i,j}^{n+1} = E_{i,j}^n - \Delta t \{ (1 + a_x) (c_{i+1/2,j} E_{i+1/2,j}^{n+1/2} - c_{i-1/2,j} E_{i-1/2,j}^{n+1/2})$$

$$\begin{aligned}
& + 1/3a_x(c_{i+3/2,j}E_{i+3/2,j}^{n+1/2} - c_{i-3/2,j}E_{i-3/2,j}^{n+1/2})]/\Delta x \\
& + [(1 + a_y)(c_{i,j+1/2}E_{i,j+1/2}^{n+1/2} - c_{i,j-1/2}E_{i,j-1/2}^{n+1/2}) \\
& + 1/3a_y(c_{i,j+3/2}E_{i,j+3/2}^{n+1/2} - c_{i,j-3/2}E_{i,j-3/2}^{n+1/2})]/\Delta y\}
\end{aligned}$$

式中, $a_x=3/8-1/8(c_x\Delta t/\Delta x)^2$; $a_y=3/8-1/8(c_y\Delta t/\Delta y)^2$; $c_x=c\cos\theta$; $c_y=c\sin\theta$, 这里 c 表示群速 c_g , 只要满足 G.F.L 条件, 计算便稳定。

式(1)中折射项采用迎风格式计算如下:

$$\begin{aligned}
E_{i,j,l,m}^{n+1} &= E_{i,j,l,m}^n - \Delta t \\
&\left\{ \begin{aligned} & \frac{(c_g \nabla \theta)_{i,j,l,m} E_{i,j,l,m}^n - (c_g \cdot \nabla \theta)_{i,j,l,m-1} E_{i,j,l,m-1}^n}{\Delta \theta}, (c_g \cdot \nabla \theta) > 0 \\ & \frac{(c_g \cdot \nabla \theta)_{i,j,l,m+1} E_{i,j,l,m+1}^n - (c_g \cdot \nabla \theta)_{i,j,l,m} E_{i,j,l,m}^n}{\Delta \theta}, (c_g \cdot \nabla \theta) < 0 \end{aligned} \right.
\end{aligned}$$

为了保证计算的稳定性, 须满足 $|c_g \cdot \nabla \theta| \leq \frac{\Delta \theta}{\Delta t}$. 另外, 为了避免折射计算中在焦点

及附近出现个别组成波能量不合理的累加现象, 有必要加如下限制

$$E_p(f) = 0.0005 f^{-5} m^2 H_x^{-1} \text{rad}^{-1},$$

超出部分认为通过破碎而消耗, 方向函数取 $\frac{2}{\pi} \cos^2(\theta - \phi)$ 。

式(1)中能量成长和损耗项计算如下:

$$E_{i,j,l,m}^{n+1} = E_{i,j,l,m}^n + (S_{ih} + S_{b0} + S_{br})_{i,j,l,m}^n$$

为了计算式(1)中非线性能量转移项, 考虑到高频部分时间响应不会超过模式的离散时间步长。为此, 对涌浪和风浪峰部分采用离散表示, 而超过峰的风浪谱尾端部分用参量化处理。实际应用中, 离散模式的参量化范围是从明显低于时间步长对应的切割频率开始的。

具体作法为: 将 $\begin{cases} f \geq 0.8f_p \\ |\theta - \phi| < 90^\circ \end{cases}$ 范围内的风浪能量 $\bar{E}_\omega = \int_{|\theta-\phi|<90^\circ} \int_{f>0.8f_p} E df d\theta$ 分离出

来, 并按公式 $f_p = (2.5 \times 10^{-4} / \bar{E}_\omega)^{0.25}$ 求峰频 f_p , 采用迭代求得 \bar{E}_ω, f_p 的初值取为 $f_{PM} = 0.8778 / 2\pi U_{19.5}$, 根据求得的 \bar{E}_ω , 可以求得文氏谱中的参量 H, T , 从而求得文氏谱, 这样便完成了风浪谱尾端部分的参量化处理过程。这种程序在每个时间步长上进行了传播、折射、输入和损耗后都要进行一次, 且要保持总能量不变。

为了限制风浪能量的充分成长, 取 $P-M$ 谱作为饱和谱, 即 $E_{PM} = (\alpha g^2 / \omega^5) \exp[-\beta(g/U\omega)^4]$, 无因次系数 $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}, \beta = 0.74$; 总能量为 $\bar{E}_{PM} = (1.4g/U)^4$, 我们认为超出部分的能量应转化为涌浪部分的能量。

1.3 风场加权处理技术 为了使从 t_n 到 t_{n+1} 时刻的计算值更加合理, 按下述方法计算风速: 当风速随时间变化不大时, 用平均风速为其代表值; 当风速持续地上升或下降时, 分别用下列两式计算其代表值:

$$\begin{aligned}
U &= 0.3U_{i_1} + 0.7U_{i_2} \\
U &= 0.2U_{i_1} + 0.8U_{i_2}
\end{aligned}$$

式中, U_{i_1}, U_{i_2} 分别为始末两时刻的风速。

1.4 边界处理及其它划分 本方法中对固体边界取 $E_{\text{固}} = 0$; 对开边界采取扩大实际

的计算边界,然后按固体边界处理;初始值取 $E|_{t=0} = 0$ 。选用渤海 37—41°N, 117°30′—122°30′E 作为检验和后报区域, x 轴向正东, y 轴向正北的直角坐标系。取 $(1/4)^\circ \times (1/4)^\circ$ 的网格,时间步长为 $\Delta t = 30\text{min}$, 频率为: 0.235, 0.37, 0.465, 0.58, 0.715, 0.87, 1.045, 1.24, 1.455, 1.69, 1.945, 2.275 s^{-1} 和 12 个等间隔为 30° 的方向。

2 模式检验

在将模式应用于实际计算之前,必须对模式的可靠和准确性进行检验。为此选取了位于渤海研究区域内的 5 个较有代表性的实测过程作为检验模式的基础(见图 1 和表 1)。

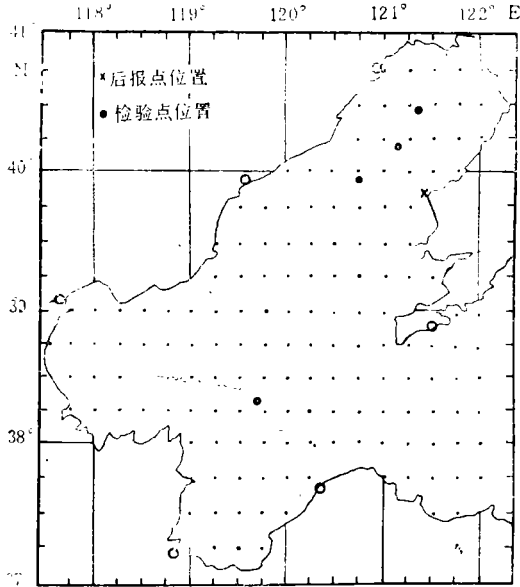


图 1 渤海检验点和后报点位置及网格点

Fig. 1 The position of examined and hindcast points as well as grid points in Bohai Sea

表 1 5 个过程的时间和地点

Tab. 1 Times and positions of five processes

检验过程	计算起止时间 (年·月·日·时)	观测点位置	水深 (m)
CF8710	1987.10.29.02—1987.11.01.02	39°54′10″N 120°45′34″E	31
SW8611	1986.11.10.14—1986.11.12.20	40°38′31″N 121°20′13″E	16
SW8805	1988.5.26.08—1988.05.29.08	40°12′29″N 121°07′12″E	25
SW8806	1988.06.29.08—1988.07.01.02	38°19′12″N 119°41′07″E	22
CF8510	1985.10.15.14—1985.10.17.14	38°15′00″N 118°43′00″E	9.5

从前 4 个风场特征来看, CF8710 是一个强寒潮过程, 其余 3 个为南风过程; 为了检验模式(1)中第二重括号折射项的作用, 选了一个有部分实测资料且水深较浅的一个寒潮过程 CF8510, 以检验模式对深度的适用性。在实测个例检验中, 将我们的计算结果分别与实测资料及“七五”期间青岛海洋大学¹⁾和国家海洋局第一海洋研究所²⁾的结果进行了比较和分析(见表 2 和图 2a,b,c,d)。

表 2 计算极值与观测极值比较

Tab.2 The comparison of the computed extreme values with those observed

个 例	特征值	有折射计算极值	无折射计算极值	观测极值	绝对误差	相对误差(%)
CF8710	$\{H_{1/3}(m)$	3.97	3.98	3.9	0.07, 0.08	1.8, 2.1
	$\{T_{1/3}(s)$	7.50	7.62	8.2	0.7, 0.58	8.5, 7.1
SW8611	$\{H_{1/3}(m)$	2.08	2.20	2.0	0.08, 0.20	4.0, 10
	$\{T_{1/3}(s)$	6.90	7.30	6.3	0.60, 1.00	9.5, 15.9
SW8805	$\{H_{1/3}(m)$	2.50	2.52	2.7	0.20, 0.18	7.4, 6.7
	$\{T_{1/3}(s)$	6.14	6.17	4.8	1.34, 1.37	27.9, 28.5
SW8806	$\{H_{1/3}(m)$	0.95	0.96	1.2	0.25, 0.24	20.8, 20.0
	$\{T_{1/3}(s)$	4.24	4.25	5.1	0.86, 0.85	16.9, 16.7
平均值	$\{H_{1/3}(m)$				0.15, 0.18	8.5, 9.7
	$\{T_{1/3}(s)$				0.88, 0.95	15.7, 17.1
CF8510	$\{H_{1/3}(m)$	2.30	2.60	2.50	0.20, 0.10	8.0, 4.0
	$\{T_{1/3}(s)$	5.80	6.11	6.20	0.40, 0.09	6.5, 1.5

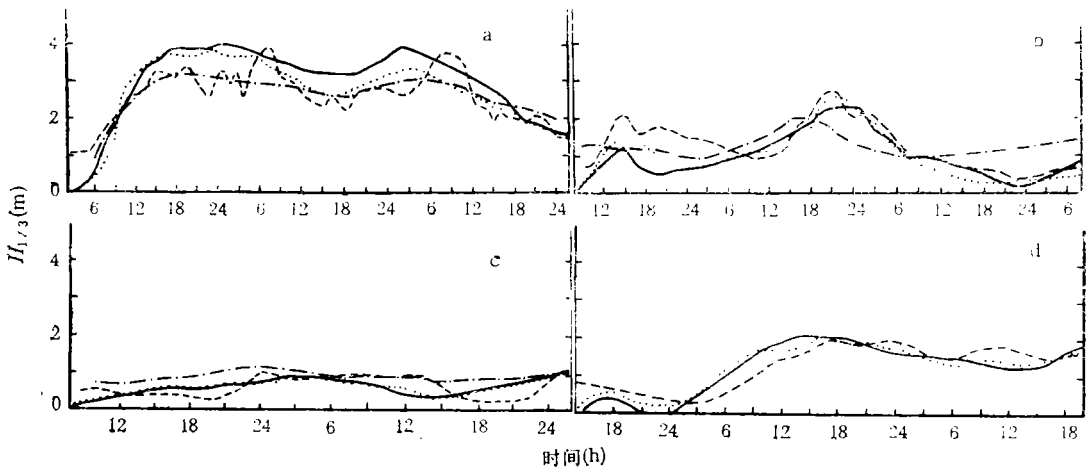


图 2 数值模拟与实测比较

Fig. 2 The comparison of numerical simulation with measured data

a. 1987. 10.29.02—1987. 11. 01.02; b. 1988.05.26.08—1988.05.29.08;

c. 1988.06.29.08—1988.07.01.02; d. 1986.11.10.14—1986.11.13.08。

——国家海洋局一所结果; -----实测结果;本模式结果; -·-·-·青岛海洋大学结果。

1) 青岛海洋大学“七五”攻关报告, 1990, 海浪数值研究报告。

2) 国家海洋局一所“七五”攻关报告, 1990, 渤海海浪数值模拟及长期统计分析研究。

从图表 2 和 2a,b,c,d 可以看到,无论大风过程 CF8710,还是小风过程 SW8806,整体模拟曲线与实测曲线吻合较好,且波高的最大绝对误差为 0.25m,最小的仅为 0.07m,前 4 个过程波高的平均相对误差仅为 8.5%。对 CF8510,波高的绝对误差为 0.20m,这在目前的模式中,在浅水处能达到如此的模拟误差是非常令人满意的。另外,还可以看到,对较深水(>20m)折射效应不是很明显,但对浅水处(约 9.5m),本模式给出的折射和无折射的结果相差 30cm,说明模式(1)中第二重括号折射项在 10m 左右水深影响明显,而对较深水无明显效应,即模式(1)对水深,特别是浅水域有较好的适应性。此外,还可看到模式对大风过程的模拟误差更小。因此,模式对灾害性天气过程会给出更好的结果。

3 实际应用及结果分析

经过对 5 个实例的检验,精确确定了各源函数的系数后,运用青岛海洋大学“七五”期间提供的近 30 年(1960—1990)的风场资料及其中的 27 个样本值,对温坨子站(39°48'N, 121°28'E)的波浪状况进行了后报及重现期推算;同时还利用温坨子站 4 年(1984—1987)实测波浪资料进行了重现期推算并与后报结果进行了对比(表 3—表 6)。

3.1 长期资料推算公式 本研究采用较适合海浪极值推算的 Weibull 分布,其分布函数为:

$$F(x) = P(x_{\max} \geq x_p) = \exp \left[-\left(\frac{x-a}{b} \right)^c \right]$$

a, b, c , 3 个参数可由后报的 27 个(每年选一个最大的)样本值确定并求出相应于各重现期的极值要素。

3.2 短期资料推算方法 由于只有温坨子站 4 年实测资料,为此按每月取一个最大值组成一个样本序列并依据《规范》确定的重现期推算方法和 Weibull 分布作极值推算。若观测 a 年中最大值的频率为 P_a , 则重现期为 b 年一遇的频率为 $P_b = \frac{a}{b} P_a$ 。

表 3 5 个实测资料的后报过程

Tab. 3 Five hindcast processes with measured data

过 程	计算起止时间 (年·月·日·时)	后报点位置	水 深 (m)
CF8710	1987.10.29.02—1987.11.01.02	39°48'N 121°28'E	15.8
SW8611	1986.11.10.14—1986.11.12.20	39°48'N 121°28'E	15.8
CF8510	1985.10.15.14—1985.10.17.14	39°48'N 121°28'E	15.8
CF8412	1984.12.02.20—1984.12.04.20	39°48'N 121°28'E	15.8
Ty8508	1985.08.19.02—1985.08.20.14	39°48'N 121°28'E	15.8

表 4 5 个后报结果与实测资料对比

Tab. 4 The comparisons of five hindcast results with measured data

过程	时间 (h)	特征值	计算结果	实测结果	绝对误差	相对误差(%)
CF8510	11	$H_{1/10}(\text{m})$	2.2	2.38	0.16	7.2
		$T_{1/10}(\text{s})$	4.4	6.0	1.6	36.3
CF8412	8	$H_{1/10}(\text{m})$	2.5	2.32	0.18	7.2
		$T_{1/10}(\text{s})$	4.4	6.0	1.6	36.3
Ty8508	17	$H_{1/10}(\text{m})$	2.0	1.7	0.3	15.0
		$T_{1/10}(\text{s})$	4.5	4.9	0.4	8.8
SW8611	17	$H_{1/10}(\text{m})$	1.8	1.78	0.02	1.1
		$T_{1/10}(\text{s})$	4.2	5.2	1.0	23.8
CF8710	17	$H_{1/10}(\text{m})$	2.7	2.98	0.28	10.3
		$T_{1/10}(\text{s})$	5.8	6.78	0.98	4.5
平均值		$H_{1/10}(\text{m})$			0.19	8.2
		$T_{1/10}(\text{s})$			1.12	23.9

表 5 极值推算样本数据

Tab. 5 The sample data of extreme calculations

过程	$H_{1/3}(\text{m})$	过程	$H_{1/3}(\text{m})$	过程	$H_{1/3}(\text{m})$
CF7901	3.86	CF8612	2.69	SW7804	1.91
CF6304	3.83	SW7204	2.65	CF8304	1.89
CF8004	3.77	SW7510	2.62	SW8805	1.48
CF8710	3.51	CF6204	2.59	SW8205	1.14
CF6812	3.28	SW7304	2.51		
CF7010	3.28	CF8101	2.48		
CF6501	2.95	CF8510	2.43		
CF6602	2.89				
CF8412	2.80	CF6105	2.39		
CF7101	2.79	Ty6707	2.26		
CF7411	2.77	CF6404	2.19		
CF7702	2.77	SW7605	2.05		

注: CF 表示寒潮; SW 表示南风; Ty 表示台风。

表 6 后报极值和实测资料推算的极值比较

Tab. 6 The comparisons of hindcast extreme values with those calculated by measured data

特征值	分布函数	重现期(年)	计算值	实测值	绝对误差	相对误差(%)
$H_{1/3}(\text{m})$	Weibull	100	4.32	4.48	0.16	3.6
$H_{1/3}(\text{m})$	Weibull	50	4.14	4.25	0.11	2.6

3.3 结果分析 从表 4 的 5 个后报过程与实测对比看, 5 个过程波高绝对误差为 0.19 m, 而相对误差的平均值仅为 8.2%, 模拟结果与实测吻合的相当好; 尽管周期的相对误差为 23.9% 偏大些, 但这个精度对周期而言, 模拟结果也是较好的。从表 6 看到百年遇

波高绝对误差为 0.16m, 而相对误差为 3.5%; 50 年一遇的绝对误差为 0.11m, 而相对误差仅为 2.5%。由此表明, 无论从实测检验还是从实际应用的后报结果看, 都证明了所开发的 YW-SWP 海浪数值预报模式的可靠和准确性, 完全可以满足那些无实测资料区域海洋工程设计参数的需要。

4 结论

YW-SWP 海浪数值预报模式是第二代的 CD 模式, 由于采用了新的风输入源函数和文氏理论风浪谱及折射变浅效应, 使模式更具适合我国海区特色。此外, 在计算中对涌浪和风浪峰部分采取离散化表示, 而对谱峰尾端部分采用参量化处理, 使组成波的成长过程中有明显的物理意义。实测检验和实际应用表明: 无论大风过程, 还是小风过程, 模式都能给出与实际较吻合的结果。在浅水区, 折射效应明显, 不能忽略。

参 考 文 献

- 陈上及、马继瑞, 1991, 海洋数据处理分析及其应用, 海洋出版社(北京), 349—433。
 Golding, B., 1983, A wave prediction system for real time sea state forecasting, *J. R. Met. Soc.*, **109**: 393—416。
 The SWAMP-Group, 1985, *Ocean Wave Modelling*, Plenum Press (New York).
 The WAMDI-Group, 1988, The WAM model—a third generation ocean wave prediction model, *J. P. O.*, **18**: 1 775—1 810。
 Wen Shengchang, 1988, Theoretical wind wave frequency spectra in shallow water, *Acta Oceanology Sinica*, **7** (3): 325—343。

YW-SWP SEA WAVE NUMERICAL PREDICTION MODEL AND ITS APPLICATION*

Yin Baoshu, Wang Tao, Fan shunting
(Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao 266071)

Abstract

The refraction caused by topography and nonlinear energy transfers are taken into account the wind input function and S. C. Wen's theoretical windsea spectrum in the YW-SWP sea wave numerical prediction model given by authors, so that the model is not only suitable for deep or shallow water but has a feature especially applicable to chinese sea areas as well. In addition, a weighted average method of treating the wind field has been adopted. The model results' maximum(8.5) and minimum (2.5), in Bohai Sea, relative error for the hindcast significant wave height show that the model is quite reliable and accurate. The influence of refraction is not obvious beyond 20m depths, but at about 10m it can reach 30cm.

Key words Sea wave prediction model Process examination and hindcast calculation Refraction influence

* Contribution No. 2309 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.