

渤海湾寒潮风浪谱的探讨*

吴永成 王以谋 李磊

(中国科学院海洋研究所, 青岛)

提 要

寒潮天气过程的风浪是渤海最危险的大浪之一。本文通过对1968年11月上旬一次寒潮天气过程风浪的连续资料分析,指出冬春季节,寒潮过境后偏北大风期间,渤海湾海域风浪频率谱的发展和消衰主要受制于风速。文章还讨论了风浪谱形状参数和尺度参数的变化规律,给出相应计算公式。

寒潮天气过程引起的风浪是渤海最危险的大浪之一。近年来已有许多科技工作者对渤海的大浪成因和分布等问题作了探讨^{1,2)},但至今还没见到有关寒潮天气过程的风和浪的研究报道。本文根据一次寒潮天气过程的风和浪资料,从几个方面探讨了渤海湾寒潮天气所引起的风浪特性,给出了风和浪的关系。

一、渤海湾寒潮天气过程的特点

寒潮天气过程是强冷空气由中亚或我国北方向南或东南侵袭的过程。在此过程中,较大地域出现大风并伴有剧烈的降温。由于冷空气强度及其中心移动的路径不同,大风强度和降温的幅度也因此而不同。从历史天气资料的分析可知,在寒潮的影响下,渤海湾可出现8—9级大风,风向通常为NW至NE。

本文选用的1968年11月上旬的寒潮天气过程是比较典型的冷锋配合低压型的天气过程,在渤海湾风向为ENE至N,最大风速达18 m/s。

二、波浪资料

本文共选用20组风和波浪资料(见表1),取自塘沽新港以东18 km处(38°53'N, 117°51'E)的观测资料,是用超声波回声测深仪改制成的波浪仪记录的。风要素是用手持风速仪于海上观测平台顶部测量的。选用资料的原则是:(a)波浪连续记录时间大于15分钟,记录前后半小时风向、风速没有明显变化;(b)具有同步的风要素观测资料;(c)计算得到的波谱具有显著的主峰,次峰相对较小。

波谱的计算大多数采用相关法,部分采用快速付氏变换(FFT)法。两种计算方法使

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第1134号。本所杜滔山同志清绘插图,谨此致谢。本文曾在中国海洋工程学会第二届海岸工程学会学术讨论会(1982)上宣读。

收稿日期: 1983年7月8日。

1) 国家海洋局, 1973。海浪计算手册。

2) 管秉贤, 渤海南部若干测点风浪最大波高的计算结果。

用的离散资料采样时间间隔均取 0.75 s, 其他参数如表 2 所示。

表 1 原始资料表

资料 编号	观测日期(日)	观测时间 (时,分)	风向	风速 (m/s)	风区 (km)	水深(m)
1	5	06:36	SW	9.0	35	9.3
2	6	20:46	S	8.5	70	7.5
3	7	10:53	NE	8.5	39	8.4
4	7	11:30	NE	11.0	39	8.7
5	7	12:54	NE	15.0	39	9.8
6	7	14:45	ENE	18.0	78	11.4
7	7	15:45	ENE	16.0	78	11.4
8	7	17:05	ENE	14.0	78	11.2
9	7	18:05	ENE	13.0	78	10.5
10	7	19:05	ENE	12.0	78	9.9
11	7	20:05	ENE	10.0	78	9.3
12	8	07:00	N	12.0	33	10.0
13	8	09:42	N	12.0	33	9.2
14	8	11:35	N	13.0	33	7.8
15	8	12:35	N	11.0	33	8.7
16	8	15:30	NNE	15.0	42	9.8
17	9	08:37	N	16.0	33	8.7
18	9	10:50	N	13.0	33	7.4
19	9	17:13		12.0		8.5
20	10	07:20	NW	8.0	14	8.6

表 2 波谱计算参数表

方法	项目	资料采样个数	计算的谱值个数	自由度	Nyquist 频率 (Hz)
相关法		1600	42	75.69	0.667
FFT 法		1024	64	16.00	0.667

三、风浪频率谱发展特性

图 1 是 1968 年 11 月 5 日至 10 日的风和风浪相关图。从图中风要素和风浪谱峰值 $S(\omega_M)$ 的历时变化可看出波浪的发展、消衰和风区、风向、风速的相关关系。因为渤海湾三面被陆地包围, 只有东面与渤海相通, 是一个半封闭海湾, 而寒潮天气过程的大风以偏东北或北向为主, 故形成的风浪是有限风区的风浪, 因此风向固定即相当于风区固定, 风浪受风区的影响可由风向的变化反映出来。从图 1 中看到, 在风向稳定的情况下, 风浪受风的影响不明显, 主要随风速变化。

从表 3 可以看到寒潮天气过程中, 风浪谱峰频率 (ω_M) 变化范围为 0.8—2.5 弧度/s,

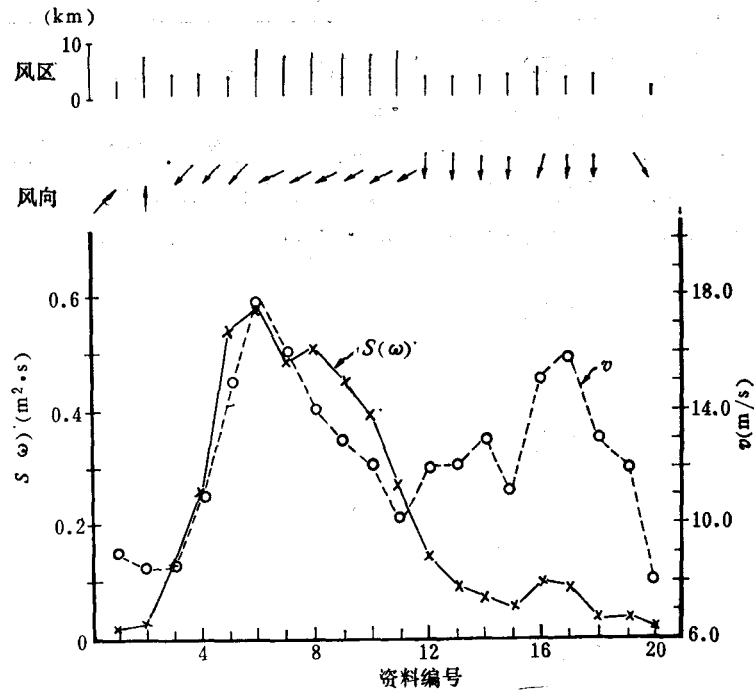


图1 风和风浪相关图
 ---风速变化曲线 —谱峰值历时曲线
 [图内 $S(\omega)$ 应为 $S(\omega_M)$]

表3 谱参数表

资料编号	零阶矩	谱宽度		谱峰值 ($m^2 \cdot s$)	谱峰频率 (弧度/s)	无因次谱 峰频率	无因次风区	无因次能量
	m_0	ϵ	ν	$S(\omega_M)$	ω_M	\bar{f}_m	\bar{F}	\bar{E}
1	0.0308	0.7805		0.0222	1.4	0.2044	4.24×10^3	9.03×10^{-4}
2	0.0252	0.7034		0.0288	1.4	0.1930	9.50×10^3	9.29×10^{-4}
3	0.0927	0.7224	0.1683	0.1257	1.4	0.1930	5.30×10^3	3.42×10^{-3}
4	0.1255	0.6623	0.3945	0.2572	1.4	0.2498	3.16×10^3	1.66×10^{-3}
5	0.2615	0.7319	0.1124	0.5422	1.2	0.2910	1.70×10^3	9.94×10^{-4}
6	0.4912	0.8191	0.7033	0.5869	0.9	0.2628	2.36×10^3	9.01×10^{-4}
7	0.3113	0.7618	0.5105	0.4877	0.9	0.2336	2.99×10^3	9.14×10^{-4}
8	0.4216	0.8523	0.6561	0.5163	0.9	0.2044	3.90×10^3	2.06×10^{-3}
9	0.2579	0.7808		0.4483	0.9	0.1823	4.53×10^3	1.74×10^{-3}
10	0.3038	0.8196	0.6575	0.3906	0.9	0.1752	5.31×10^3	2.82×10^{-3}
11	0.2250	0.7775	0.5228	0.2707	0.8	0.1298	7.65×10^3	4.34×10^{-3}
12	0.1088	0.6651		0.1463	1.4	0.2726	2.25×10^3	1.01×10^{-3}
13	0.0660	0.7486		0.0929	1.4	0.2718	2.25×10^3	6.13×10^{-4}
14	0.0587	0.7095		0.0758	1.6	0.3366	1.92×10^3	3.95×10^{-4}
15	0.1133	0.8240		0.0621	1.2	0.2141	2.68×10^3	1.49×10^{-3}
16	0.0701	0.7218		0.0985	1.5	0.3722	1.83×10^3	2.67×10^{-4}
17	0.0669	0.6959		0.0884	1.4	0.3634	1.23×10^3	1.96×10^{-4}
18	0.0404	0.6716		0.0360	1.5	0.3164	1.86×10^3	2.72×10^{-4}
19	0.0409	0.6577		0.0422	1.5	0.2920		3.80×10^{-4}
20	0.0180	0.6556		0.0113	2.5	0.3245	2.15×10^3	8.46×10^{-4}

相对应的风浪周期 $T = 2.5-7.8s$, 这说明渤海湾海域内风浪周期较短、频率较高。相应的谱峰值 $[S(\omega_M)]$ 最大可达 $0.5896 m^2 \cdot s$ 。

图 2 给出 11 月 7 日 10 时 53 分至 19 时 10 分的风浪发展和衰减的谱密度图。从图中可以看到随风速 (v) 的长消, 谱密度 $[S(\omega)]$ 也随之相应地长消, 7 日 10 时 53 分时风向为 ENE, $v = 8.5 m/s$, $S(\omega_M) = 0.1257 m^2 \cdot s$; 14 时 50 分时, v 增强到 $18 m/s$, $S(\omega_M)$

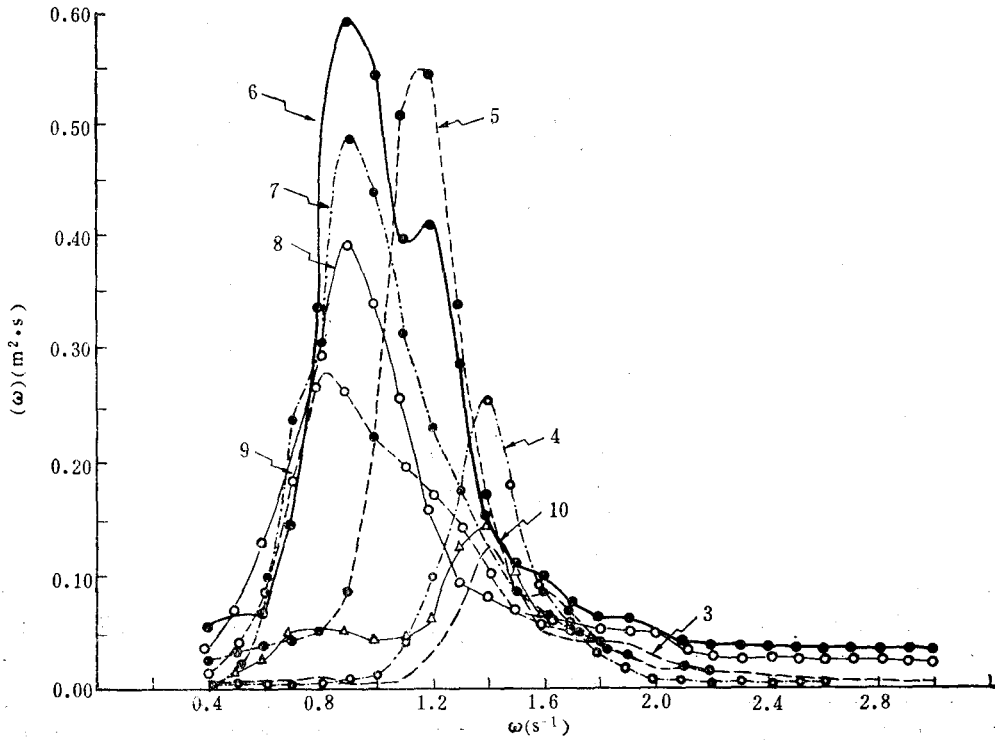


图 2 风浪谱密度图
[纵坐标 (ω) 应为 $S(\omega)$]

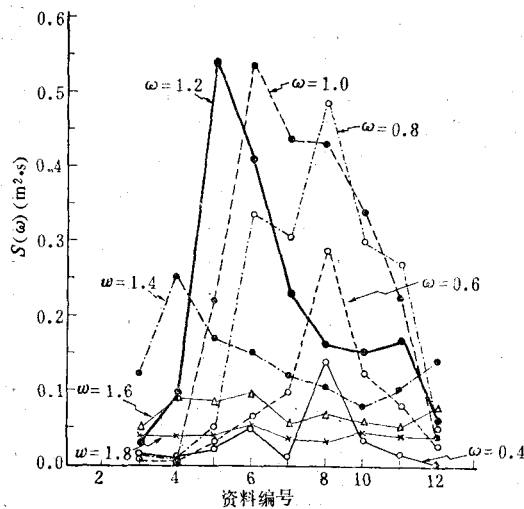


图 3 $S(\omega)$ 随时间变化图

随着增大到 $0.5869 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$; 20 时 7 分时, v 下降到 9.3 m/s , $S(\omega_M)$ 也相应地下降到 $0.2707 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$ 。另外, 图 2 中的 $S(\omega)$ 曲线 3—6 表明, 在风浪成长过程中存在“超射”现象, 曲线 4 上的 $S(\omega_M) = 0.2573 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$, $\omega_M = 0.14$ 弧度/s, 而曲线 5 比 4 晚 84 min, 在谱频率 $\omega = 0.14$ 弧度/s 处, $S(\omega)$ 却只有 $0.1720 \text{ m}^2 \cdot \text{s}$, 这说明风浪随风速增长时, $S(\omega_M)$ 显著地超过其后成长过程中相对应频率上的谱值。

为了更清楚地观察 $S(\omega)$ 随时间的变化, 以风浪频率为参数绘出 $S(\omega)$ 随时间变化图(见图 3)。从图中可看出当 $\omega > 1.5$ 弧度/s 时, $S(\omega)$ 随时间变化已经很小, 当 $\omega = 1.8$ 弧度/s 时, $S(\omega)$ 基本上不再变化, 这表明更高一侧的波谱中, 各组成波已处于谱的平衡范围内。

四、风浪谱形状参数和谱的关系

波谱的 n 阶矩可以写成:

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S(\omega) d\omega \quad (1)$$

而谱宽度通常有两种表示:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (2)$$

$$v = \sqrt{\frac{m_0 m_2}{m_1^2} - 1} \quad (3)$$

式中: m_0, m_1, m_2, m_4 分别表示 0, 1, 2, 4 阶谱矩。

根据实测资料, 应用上述各式计算得出的波谱形状参数和 $S(\omega_M)$ 关系(如表 3 和图 4

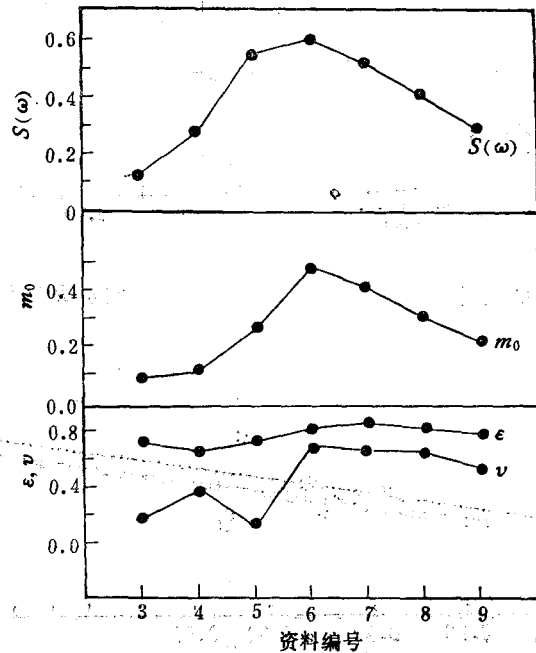


图 4 谱形状参数随时间变化图

[上图内 $S(\omega)$ 应为 $S(\omega_M)$]

所示)。图6中的曲线变化指明, m_n, ϵ, ν 的变化趋势和 $S(\omega_M)$ 变化是一致的。 ϵ 的变化范围 ($\epsilon = 0.6623-0.8523$) 较大, 说明寒潮天气过程中风浪的高频波成分较多。

五、谱尺度参数的讨论

Hasselmann 等^[1]人基于北海的大量观测资料提出 JONSWAP 谱, 用来预报北海海域波浪, 结果相当满意。可是光易恒^[2] 用其预报日本海域波浪时, 误差则较大, 这说明 JONSWAP 谱的尺度参数有地域性。光易恒依据日本海的实测资料提出修改式。本文利用类似光易恒的方法, 应用渤海湾的实测资料, 讨论了有限风区的寒潮天气过程风浪谱参数变化。讨论中为了便于量值的比较, 将各种量均化成无量纲形式, 得到如下结果。

1. $\tilde{F}-\tilde{f}_m, \tilde{E}-\tilde{f}_m$ 关系

根据实测资料计算得到的无量纲风区 (\tilde{F}) 和无量纲谱峰频率 (\tilde{f}_m), 无量纲能量 (\tilde{E}) 和 \tilde{f}_m 的关系如图5和6所示。应用最小二乘法求得如下关系式:

$$\tilde{f}_m = 3.51 \tilde{F}^{-1/3} \tag{4}$$

$$\tilde{f}_m \tilde{E} = 15.12 \times 10^{-6} \tag{5}$$

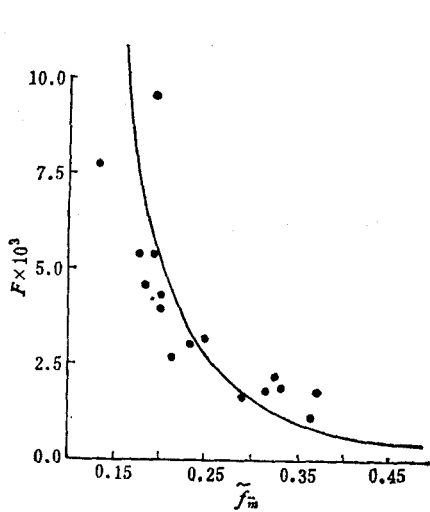


图5 \tilde{F} 与 \tilde{f}_m 关系图

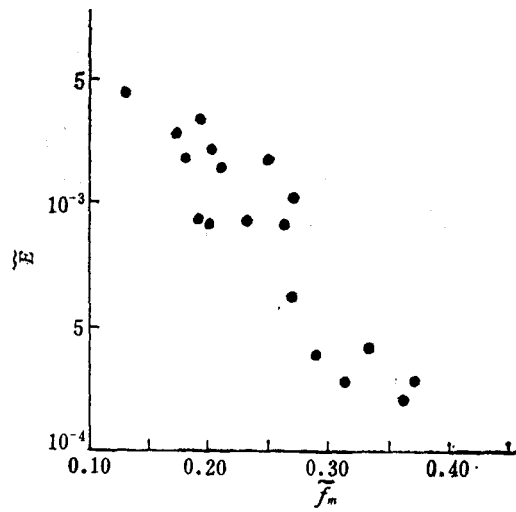


图6 \tilde{E} 与 \tilde{f}_m 关系图

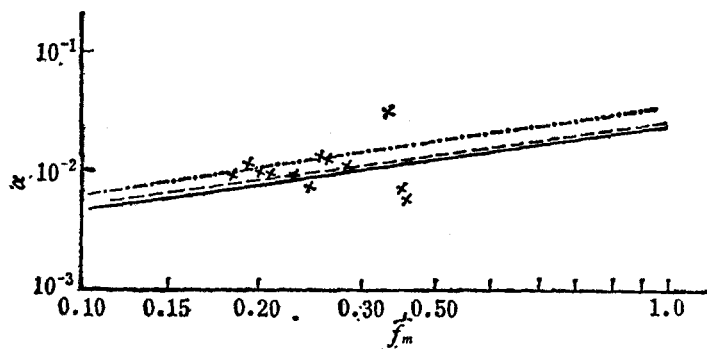


图7 α 与 \tilde{f}_m 关系图

--- Hasselmann - · - · - 光易恒 — 本文

式中：

$$\tilde{F} = \frac{gF}{U^2}; \quad \tilde{f}_m = \frac{Uf_m}{g}; \quad \tilde{E} = \frac{gE}{U^4}$$

F ——风区； U ——风速； E ——波能量； f_m ——谱峰频率（ $= \omega_M/2\pi$ ）； g ——重力加速度。

2. α - \tilde{f}_m , γ - \tilde{f}_m 关系

JONSWAP 谱表示为：

$$S(\omega) = \alpha g^2 (2\pi) \omega^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_M}{\omega} \right)^4 \right] \gamma \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_M)^2}{2\sigma^2 \omega_M^2} \right] \quad (6)$$

式中的尺度参数 α 和 γ 应用下面两式求得：

$$\alpha = \frac{2}{\omega_M} g^{-2} \int_{1.5\omega_M}^{2\omega_M} \omega^5 \exp \left[\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_M}{\omega} \right)^4 \right] S(\omega) d\omega \quad (7)$$

$$\gamma = \alpha^{-1} g^{-2} \exp \left[\frac{5}{4} \right] \omega_M S(\omega_M) \quad (8)$$

式(7)中的积分区间是依据实测风浪谱密度 $S(\omega)$ 达到平衡，即 $S(\omega)$ 基本上不再随风区或风时变化， $\gamma = 1$ 时选取的。式(8)是假定 α 值已由式(7)求出后，在 $\omega = \omega_M$ 情况下得到的。

根据实测的风浪资料和式(7)，(8)可以给出 α 与 \tilde{f}_m ， γ 与 \tilde{f}_m 关系图（见图7，8）和关系式：

$$\alpha = 3.3 \times 10^{-27} \tilde{f}_m^{4/6} \quad (9)$$

$$\gamma = 4.5 \tilde{f}_m^{3/7} \quad (10)$$

图7和8中还绘出 Hasselmann 和光易恒给出的关系曲线，其关系式分别为：

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 3.3 \times 10^{-27} \tilde{f}_m^{2/3} \\ \gamma &= 3.3 \end{aligned} \right\} \text{Hasselmann} \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 3.26 \times 10^{-27} \tilde{f}_m^{6/7} \\ \gamma &= 4.42 \tilde{f}_m^{3/7} \end{aligned} \right\} \text{光易恒} \quad (12)$$

从图7,8中可以看出,本文给出的关系曲线介于 Hasselmann 和光易恒的曲线之间。

3. α - \tilde{F} , γ - \tilde{F} 关系

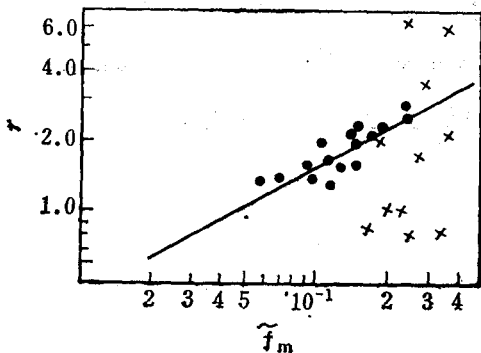


图8 γ 与 \tilde{f}_m 关系图

●光易恒 ×本文

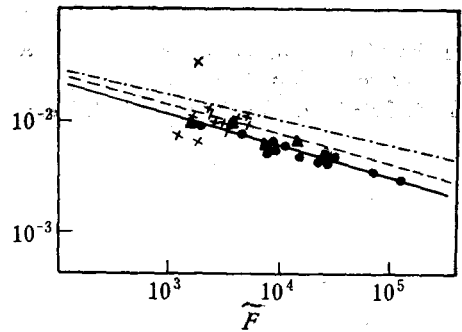
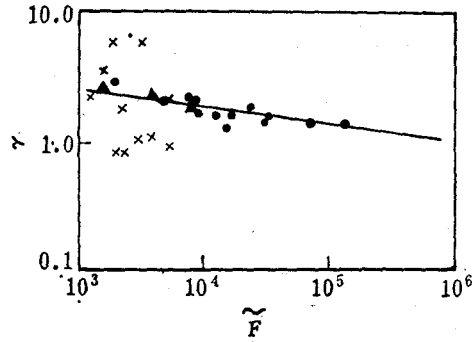


图9 α 与 \tilde{F} 关系图

-----和▲ Hasselmann ——和●光易恒 -·-·-和×本文
[纵坐标为 α]

图 10 γ 与 \bar{F} 关系图

▲ Hasselmann ● 光易恒 × 本文

根据实测资料绘出了 α 与 \bar{F} , γ 与 \bar{F} 关系图 (见图 9, 10), 图中还绘出 Hasselmann 和光易恒等人给出的实测数据。由于渤海湾地形影响, 实测资料风区较小 ($\bar{F} < 10^4$), 故图中给出的实测值集中于较小范围内。将式 (4) 分别代入式 (9) 和 (10) 中, 可得到

$$\alpha = 9.01 \times 10^{-2} \bar{F}^{-4/5} \quad (11)$$

$$\gamma = 7.71 \times 10 \bar{F}^{1/7} \quad (12)$$

从图 9 和 10 中可以看到观测值与式 (11) 和 (12) 符合较好。

六、结 语

1. 在寒潮天气下, 渤海湾内的波浪是有限风区的风浪。风时影响不明显。由于寒潮南下时, 风速增长和衰减均较快, 从而风浪的成长与消衰有随风速变化的趋势。
2. 寒潮风浪谱峰频率变化区间为 $\omega_M = 0.8-2.5$ 弧度/s, 最大谱值一般不大于 $0.6 \times 10^4 \text{m}^2 \cdot \text{s}_0$ 。
3. 谱宽度较大, 最大达 0.85, 这说明频带分布较宽, 寒潮天气过程下的风浪分布中不仅有低频波, 而且含有大量高频波。
4. 渤海湾内寒潮天气过程下的海浪谱尺度参数分布与光易恒的关系式较接近。

参 考 文 献

- [1] Hasselmann, K., D. B. Ross, P. Muller et al, 1976. A parametric wave prediction model. *J. Phys. Oceanogr.* 6(2): 200-228.
- [2] 光易恒, 1980. 风波のスペクトルの発達(3) 第 27 回海岸工学讲演会论文集。土木学会, 94-98 页。

THE CHARACTERISTICS OF WIND WAVE IN THE GULF OF BOHAI UNDER THE INFLUENCE OF COLD WAVE*

Wu Yongcheng Wang Yimou and Li Lei
(*Institute of Oceanology, Academia Sinica, Qingdao*)

ABSTRACT

The wind wave generated by cold wave is one of the most dangerous waves in Bohai Sea. This paper is a report of a detailed analysis of the wave records under the influence of cold wave observed from an oil platform in Gulf of Bohai in 1968 and of some characteristics of wind wave spectrum, including that of frequency, frequency range, bandwidth range, scale parameters and other parameters of wave spectrum.

In Gulf of Bohai the wind wave is fetch-limited wave. Its development depends on the wind speed but not on the wind duration.

The range of spectrum peak frequency is $\omega_M = 0.8-2.5\text{Hz}$. The maximum spectrum peak $S(\omega_M)$ is larger than $0.6 \times 10^4 \text{m}^2 \cdot \text{s}$.

The parameters α and γ are proportional to the spectrum peak frequency.

* Contribution No. 1134 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.