

黄河三角洲海域浅水波高和周期的分析*

范顺庭 王以谋

(中国科学院海洋研究所)

关于黄河三角洲海域的波浪状况,过去研究甚少。近岸浅水波浪颇具区域性特征,已提出的浅水波高和周期的一些分布模式,如 Глуховский (1966)、吴秀杰(1979)、黄培基(1980)等,在该海域也不适用。因而本文根据1984年以来我们测得的连续5年资料,从中选取大风过程的波浪资料,对该海域的浅水波高和周期进行具体分析。

1. 资料选取

本文使用了31个大风过程中测得的波浪资料——从波浪生成阶段到波浪消衰阶段的逐时观测记录,水深为6m左右,相对水深 $\left(\frac{H}{d}\right)$ 在0.08—0.18之间(多数为0.13),出现的最大波高为4.2m,风向多为北-东北向,是该海区的强浪向。渤海是一个内海,水域较小,外海的波浪不易传入,波浪尺度多由风来控制,很少有持续的涌浪存在。因此,所用的资料完全能反映该海域的风浪特征。

2. 波高的分布

深水波高的分布普遍使用 Rayleigh 分布:

$$F(x) = \exp\left(-\frac{\pi}{4} x^2\right) \quad (1)$$

其中 $x = H/\bar{H}$, 其密度函数为

$$f(x) = \frac{\pi}{2} x \exp\left(-\frac{\pi}{4} x^2\right) \quad (2)$$

波浪进入浅水区会发生各种变化,因此比较复杂。研究表明,浅水波高能较好地服从 Weibull 分布,即

$$F(x) = \exp(-Ax^B) \quad (3)$$

其中 $x = H/\bar{H}$, 密度函数为

$$f(x) = ABx^{B-1}\exp(-Ax^B) \quad (4)$$

式中的 A 和 B 由实测资料确定。

我们对31个大风过程中记录的18055对波高和周期的实测值进行了分析,按 Weibull 分布模式配置了分布曲线,确定了系数 A 和 B ,得到了十分满意的结果。其中

$$A = 0.743$$

$$B = 2.251$$

* 中国科学院海洋研究所调查报告第2042号。

收稿日期: 1991年9月14日。

由此,浅水波高的分布函数为

$$F(x) = \exp(-0.743x^{2.251}) \quad (5)$$

密度函数为

$$f(x) = 1.672x^{1.251}\exp(-0.741x^{2.251}) \quad (6)$$

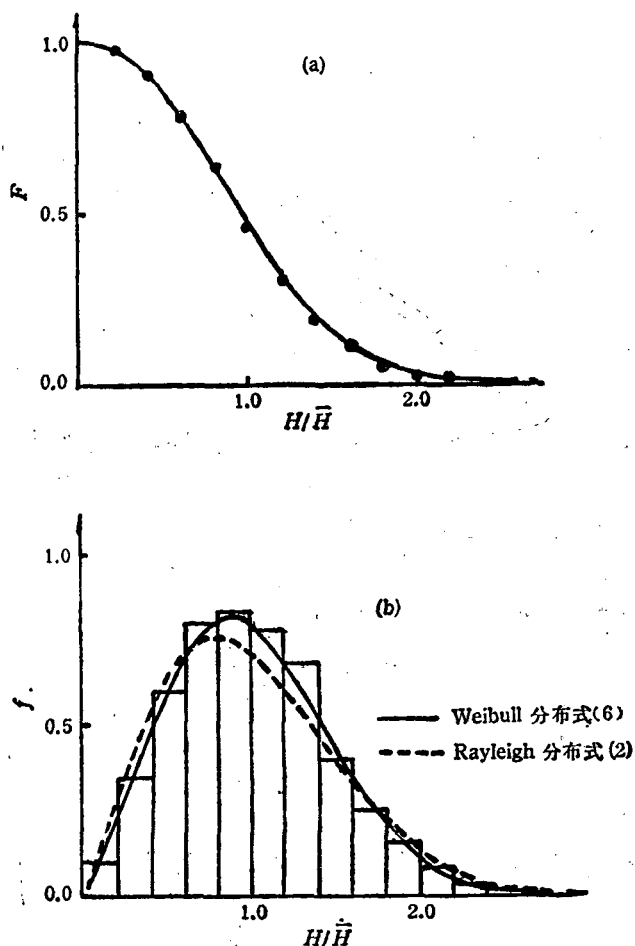


图 1 波高分布

与 Rayleigh 分布相比, Weibull 分布与实测结果有较好的贴合(见图 1)。这表明在黄河三角洲海域浅水波高也较好地服从 Weibull 分布。

依式(6)可以得到最可能出现的波高 $H_m = 0.88\bar{H}$, 依 Rayleigh 分布得到的最可能出现的波高是 $0.80\bar{H}$, 两者存在一定差别。

Weibull 分布的矩由下式表示

$$m_K = \int_0^{\infty} x^K f(x) dx = A^{\frac{K}{B}} \Gamma\left(1 + \frac{K}{B}\right) \quad (7)$$

由(7)式可知, K 阶矩 m_K 可由 Γ 函数求得。当 $K = 1$ 时, $m_1 = 1$ 。于是有

$$A = \Gamma^B \left(1 + \frac{1}{B} \right) \quad (8)$$

由实测资料配置 Weibull 分布,参数 A 和 B 一般不能严格地满足式(8),虽然可以通过调整 A 和 B 来满足式(8),但与实测结果的贴合程度就会发生变化。所以在本文求矩时没有用式(7)而是用了数值积分。求得至 3 阶矩的结果是

$$m_2 = 1.24$$

$$m_3 = 1.77$$

由概率论可知,各矩中心矩可用原点矩表示,即

$$\left. \begin{aligned} \mu_2 &= m_2 - m_1^2 \\ \mu_3 &= m_3 - 3m_1m_2 + 2m_1^3 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

其中 μ_i ($i = 2, 3$) 表示 i 阶中心矩。由此可以得到如下的数字特征:

$$\text{均方差 } \sigma = \sqrt{\mu_2} = 0.48$$

$$\text{离差系数 } C_v = \frac{\sigma}{m_1} = 0.47$$

$$\text{偏态系数 } C_s = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = 0.48$$

同样可以计算出 Rayleigh 分布的数字特征(见表 1)。

表 1 波高分布的数字特征

	Rayleigh 分布	Weibull 分布
σ	0.52	0.48
C_v	0.52	0.47
C_s	0.63	0.48

从表 1 可看出, Weibull 分布的均方差 σ 小于 Rayleigh 分布的均方差,前者的离差系数 C_v 也较小,这表明用 Weibull 分布来描述浅水波高的分布比用 Rayleigh 分布更好些,又一次说明浅水波高的分布较好地服从 Weibull 分布。

从表 1 还可看到, Weibull 分布的偏态系数 C_s 比较小。这表明虽然两种分布都属左偏,但 Weibull 分布比 Rayleigh 分布的左偏程度小一些(见图 1)。

3. 周期的分布

人们常把波浪的周期看成是一个随机变量,但至今对周期的分布还没有一个真正适用的定型的分布模式,多数学者采用由 Крылов (1956) 和 Bretshneider (1959) 提出的分布形式,即

$$F(y) = \exp \left[-\Gamma^4 \left(\frac{5}{4} y^4 \right) \right] \quad (10)$$

其中 $y = T/\bar{T}$, 密度函数为

$$f(y) = 4\Gamma^4 \left(\frac{5}{4} \right) y^3 \exp \left[-\Gamma^4 \left(\frac{5}{4} \right) y^4 \right] \quad (11)$$

其中 $\Gamma\left(\frac{5}{4}\right) = 0.916$, $\Gamma^*\left(\frac{5}{4}\right) = 0.675$ 。也有人主张将式(10)中的幂次减小为 3, 即

$$F(y) = \exp\left[-\Gamma^*\left(\frac{4}{3}\right)y^3\right] \quad (12)$$

其中 $\Gamma\left(\frac{4}{3}\right) = 0.712$ 。

从分布的形式看, 不管周期分布表达式中的幂次如何变化, 其形式是相同的, 即具有 Weibull 分布形式。我们根据实测资料以韦布尔分布形式来配置周期分布, 则得到

$$A = 0.555$$

$$B = 3.772$$

所以浅水周期分布为

$$F(y) = \exp[-0.555y^{3.772}] \quad (13)$$

密度函数为

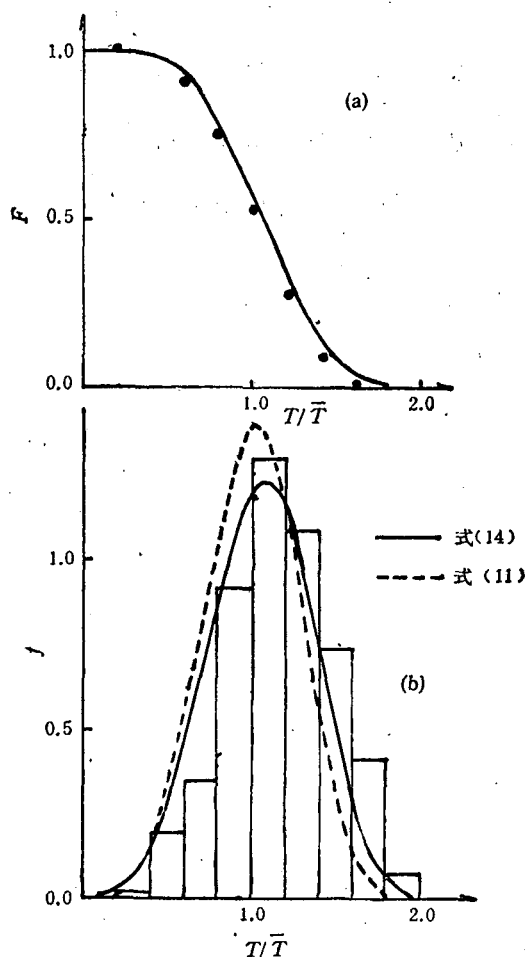


图 2 周期分布

$$f(y) = 2.093y^{2.772} \exp[-0.555y^{3.772}] \quad (14)$$

同样,可以由式(13)求出最可能出现的周期为

$$T_m = 1.08\bar{T}$$

周期分布的矩为

$$m_2 = 1.212$$

$$m_3 = 1.485$$

中心矩为

$$\mu_2 = 0.098$$

$$\mu_3 = -0.001$$

周期分布式(13)和(14)如图 2 所示,其数字特征列于表 2。

表 2 周期分布的数字特征

项目	式(11)	Weibull 分布
σ	0.28	0.31
C_v	0.28	0.30
C_s	-0.09	-0.04

从图 2(a)中可以看出,由式(13)描述的周期分布与实测资料(图中圆点)贴合得很好。从图 2(b)的密度分布曲线看,周期的分布有很好的对称性,表 2 中的偏度系数 C_s 也反映了这一点,因为偏度较小。这表明,用 Weibull 分布描述黄河三角洲海域波浪的周期是完全可行的。

4. 波高和周期的联合分布

近年来,人们对波高和周期的联合分布很感兴趣,Глуховский (1966) 在波高和周期互相独立的假定下提出了如下的分布公式:

$$f(x, y) = f(x) \cdot f(y) \quad (15)$$

然而这种假设既不令人信服,也不符合实际。另外,Longuet-Higgins (1975), 合田良实(1977)和 Давидан (1978) 都曾对联合分布作过研究,国内也有不少人研究过,但这些研究结果的适用性都比较差。葛明达(1984)利用二维 Weibull 分布来描述浅水波浪的分布,取得的效果较好。

这里仅给出由实测资料统计得到的波高 H 和周期 T 的联合分布图(图 3)。从图可看出: (1) 当 $H/\bar{H} > 1.0$ 时, $H/\bar{H}$ 的概率分布对 $T/\bar{T} = 1.0$ 有明显的对称性; (2) 众值比较明显地分布在 $H/\bar{H} < 1.0$ 的区域内。

5. 波高和周期的相关性

(1) 平均波高 ($\bar{H}$) 与平均周期平方 ($\bar{T}^2$) 之间的相关: 这种相关特性在各海域不完全相同,已得到的这种特性有多种经验关系式,为了进行比较,将它们分别列出:

$$\bar{H} = 0.058\bar{T}^2 \text{ (葛明达, 1984)}$$

$$\bar{H} = 0.084\bar{T}^2 \text{ (Крылов, 1958)}$$

$$\bar{H} = 0.038\bar{T}^2 \text{ (葛明达, 1984)}$$

$$\bar{H} = 0.025\bar{T}^2 \text{ (葛明达, 1984)}$$

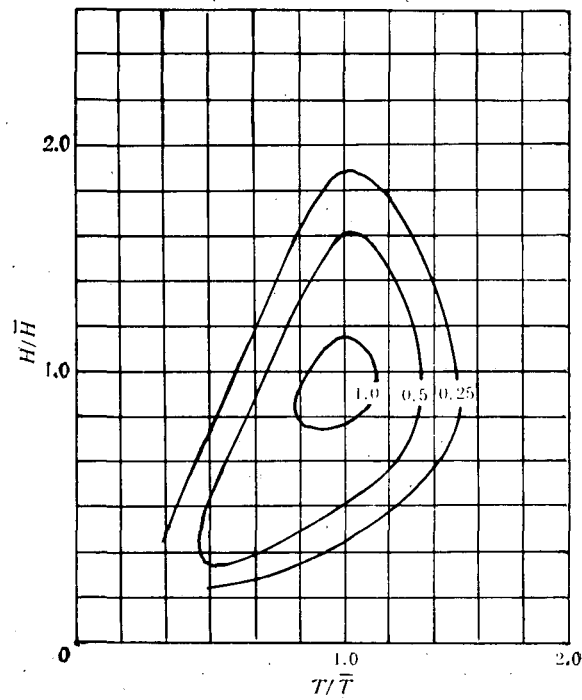


图 3 波高和周期的联合分布

$$\bar{H} = 0.041 \bar{T}^2 \text{ (葛明达, 1984)}$$

本文利用黄河三角洲海域大浪过程的观测资料得到关系式如下:

$$\bar{H} = 0.035 \bar{T}^2 \quad (16)$$

式(16)及其散布点如图 4 所示

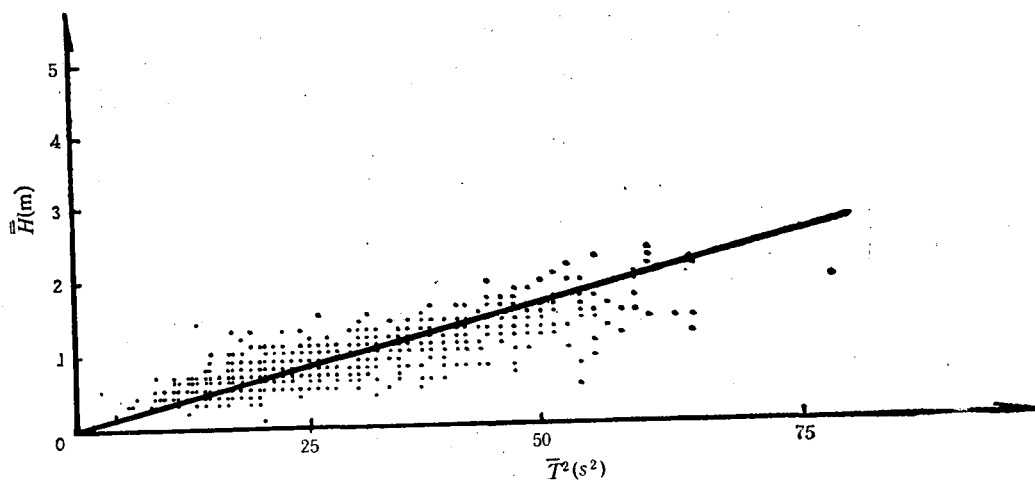


图 4 平均波高与平均周期平方的关系

从以上各式可看出,平均波高和平均周期平方之间的关系有一定的差异性。

(2) 单个波高与对应周期的相关性: 我们计算了实测波高和相应的周期之间的相关系数 r , 得到 $r = 0.42$ 。从相关系数看, 单个波高和对应周期并非相互独立。所以它们的联合分布不能简单地把各自的分布函数相乘而得到。

6. 各种特征波高和各种特征周期之间的关系

各种特征波高之间的关系是指如下的比值: $H_{1/100}/\bar{H}$, $H_{1/10}/\bar{H}$, $H_{1/3}/\bar{H}$, 可通过波高的分布函数计算得到。当给定波高的分布函数后, 最大 $\frac{1}{p}$ 波高的平均值与平均波高的比值为

$$x_p = \frac{H_{1/p}}{\bar{H}} = \frac{1}{p} \int_{x_p}^{\infty} x f(x) dx \quad (17)$$

式(17)得到的结果与实测资料的统计结果列于表 3。

表 3 特征波高的比值

项 目	计算值	实测值
$H_{1/100}/\bar{H}$	2.38	2.35
$H_{1/10}/\bar{H}$	1.90	1.87
$H_{1/3}/\bar{H}$	1.50	1.52

同样可以得到各种特征周期之间的比值, 结果列于表 4; 但这种比值在实际应用中意义不大。一般人们关心的是与某种特征波高对应的周期, 如 $T_{H_{1/10}^1}$ 为 $\frac{1}{10}$ 大波波高对应的周期, 由实测资料统计得 $T_{H_{1/10}^1} = 1.096\bar{T}$ 。

表 4 特征周期的比值

$T_{1/100}/\bar{T}$	$T_{1/10}/\bar{T}$	$T_{1/3}/\bar{T}$
1.80	1.56	1.34

7. 结语

(1) 按实测资料得到的波高分布服从 Weibull 分布, 两者贴合很好, 而与 Rayleigh 分布则有一定差别。

(2) 周期分布也服从 Weibull 分布, 比其它分布形式更接近实测值。

(3) 由波高、周期的分布得到的各种特征值之间的比, 与实测统计结果很一致, 较深水的比值要小。

(4) 由实测海浪资料得到一个波高、周期的联合分布图。当 $\frac{H}{\bar{H}} > 1.0$ 时, $\frac{H}{\bar{H}}$ 的概率分布相对于 $\frac{T}{\bar{T}} = 1.0$ 有明显的对称性。

参 考 文 献

- 吴秀杰等, 1979, 浅水海浪要素分布函数初步探讨, 海洋湖沼通报, 1: 26—32。
 黄培基等, 1980, 以风浪成长阶段因子为参数的波高分布, 海洋研究, 4: 1—20。
 葛明达, 1984, 连云港波高周期统计分布, 海洋工程, 2(1): 40—49。
 合田良夷, 1977, 波浪観測記録にち万周期と波高結合分布の解析, 港湾技研资料, 272: 1—19。
 Longuet-Higgins, M. S. 1975, On the joint distribution of the period and amplitudes of sea wave, *J. Geophys. Res.*, 80(18): 2688—2694。
 Крылов, Ю. М., 1958, Статическая теория расчёт моуских ветровых волн, часть 2, тр. гоин. 42: 3—88。
 Дивадан, В. Х., Лопатухин, Л. И., Рожков, В. А., 1978, Ветровое волнение как вероятностный гидродинамический процесс, Изд. Гидромет., 285。
 Глуховский, Б. Х., 1966, Исследование морского волнения, Изд. Гидромет., 284。

ANALYSIS OF HUANGHE RIVER DELTA SHALLOW WATER WAVE HEIGHT AND PERIOD*

Fan Shunting and Wang Yimou

(Institute of Oceanology, Academia Sinica)

ABSTRACT

There were no wave investigations, and few data on the Huanghe River Delta offshore area were available before 1984. Since then about 5 years investigation in the sea area around the 5# pile was started to provide scientific basis for development of the area's petroleum and natural gas resources, expansion of communication transportation, port construction, etc. Eight or more times of 15 minutes running recording measurement were made daily at 6m water depth in strong winds, yielded wave data (on 31 typical strong winds directed mainly N to NE) analysis of which was important for clarifying wave characteristics (such as distribution of individual wave heights and periods and their correlations) and showed that: 1) Shallow water wave heights and periods follow Weibull distribution, 2) Wave height and period are not independent because the correlation coefficient is 0.42, and 3) Shallow water waves have clearly regional characteristics.

* Contribution No. 2042 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.