

粤东红海湾海区波侯特征分析^{*}

李志强, 陈子

(中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘要: 利用遮浪海洋站 3 a 的观测记录, 对红海湾海域的波侯进行了分析。结果表明该海区的观测资料前后有差异。海区的波高比较符合两参数的 Weibull 分布, 波浪周期符合对数—正态分布。该海区的波浪类型以风浪为主, 其中大浪主要是由风暴引起。平均波周期和平均波高的方根的比例系数为 3.87。波高 1 天滞后的自相关系数为 0.42。不平静海面的平均延时符合指数形式。最后用日极值波高数据和二项—对数正态复合极值分布分析了该海区的重现期波高。

关键词: 波侯; 统计分布; 联合分布; 波浪延时; 极值波高

中图分类号: P341; P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2003)06-00107-04

海岸和海洋工程设计中, 必须对其所在地的工程环境条件进行充分地调查和分析, 特别是当地的水动力条件。低估了海洋环境条件将致使海工建筑物受损, 进而造成重大的经济损失, 过高估计则造成资金浪费。波浪是海洋和海岸工程设计中最重要和影响最大的动力环境因素^[1], 因此对波浪状况进行恰当的统计分析有重要的意义。

根据时间尺度的不同, 波浪的统计分析有长期和短期之分。短期波浪统计是根据现场或实验连续测得的波面或压力数据, 分析波浪要素的分布和谱等特征, 长期的波浪统计需要数年至几十年的观测资料。长期波浪统计有时还进一步分为极值波浪统计和中期波浪统计。通常, 极值波浪统计仍称作长期波浪统计, 而中期波浪统计称为波侯统计^[1]。极值波浪统计需要几十年的观测数据, 主要目的是得到某一重现期的波高。波侯统计需要一年以上的资料, 主要得到波高、周期、波向等参数及关系, 反映海区一般的状况。本文利用粤东遮浪海洋站 1969—1971 年的逐日观测资料分析红海湾海区的波侯。由于该站邻近较长距离范围内没有站点, 对其进行分析具有海区代表性。

1 资料的总体分析

该资料从 1969 年 1 月 1 日到 1971 年 12 月 31 日, 一日观察 4 次 (08、11、14、17 时), 其中仅极少数次数没有观测数据。分析得平均波高为 1.1 m, 平均周期为 3.8 s, 其中各年的平均波高和周期依次分别为 1.0 m、1.2 m、1.1 m 和 3.9 s、3.8 s、

3.7 s。根据观测记录得出, 遮浪海区春季以偏东向浪为主, 夏秋季以偏东南向和西南向浪为主, 冬季以东北向浪为主。

2 波高、周期分布及其联合分布

2.1 波高、周期分布拟合方法

常用的长期波高、周期分布拟合方法有以下几种^[1]:

2.1.1 正态分布 正态分布的概率密度表达式为:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

其中, m 及 σ 分别为期望值和方差, x 为波高或周期(下同)。

2.1.2 对数—正态分布

$$f(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi x}} \exp\left[-\frac{(\ln x - m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

其中的各个参数与正态分布相同。

2.1.3 Weibull 分布^[5,9]

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha} \alpha (x - \nu)^{\alpha-1} \exp\left[-\left(\frac{x - \nu}{\beta}\right)^\alpha\right] \quad (3)$$

其中, $\nu > 0$, $\alpha > 0$, $\beta > 0$, 分别为位置参数、形状参数和尺度参数, 参数 ν 确定了 x 变量的可能最小值。当位置参数取为 0 时, 就是两参数 Weibull 分布, 曲线的起点在坐标原点。

2.2 波高、周期分布拟合分析

对波高和周期分别计算平均值, 然后计算各值与平均值的比值。采用上述各种分布进行拟合, 将

* 收稿日期: 2003—01—03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40276030)

作者简介: 李志强 (1974 年生), 男, 博士研究生; 通讯联系人: 陈子, E-mail: eesczs@zsu.edu.cn

结果与直方图进行比较（图 1）。

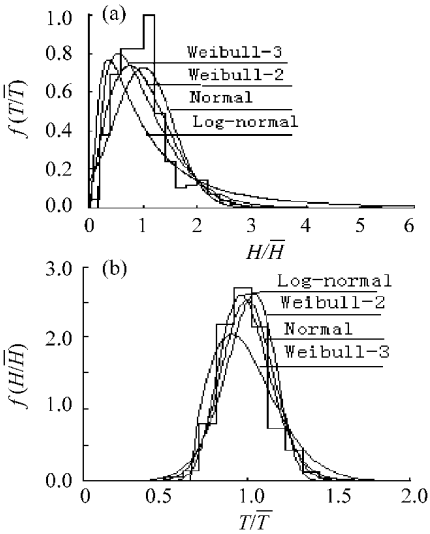


图 1 波高 (a)、周期 (b) 概率密度分布
Fig. 1 Probability density distribution of wave height (a) and period (b)

由图 1 a 可看出，红海湾海区的波高比较符合 Weibull 分布。波高大于最可能出现波高时，以两参数 Weibull 分布拟合得最好，对数正态分布拟合效果最差。各种分布的最大概率密度值都明显小于最可能出现波高的概率。对于大波的出现概率，对数正态分布拟合概率过于偏大。

由图 1 b 可知，红海湾海区波周期比较符合正态分布，其中又以对数—正态分布拟合最佳。三参数 Weibull 分布拟合效果最差，在最可能出现波周期部分明显偏小，在长周期部分偏大。两参数 Weibull 分布对短周期的风浪和长周期的涌浪拟合概率都偏小，而且在平均周期附近右偏。

对各种分布的拟合程度用离差平方和 (d^2) 与相关系数 (R) 进行检验，结果如表 1。其中 $d^2 = \sum_{i=1}^N [f(x_i) - f_0(x_i)]^2$, $f(x_i)$, $f_0(x_i)$ 分别为拟合分布概率和直方图分布概率, N 为检验个数。

检验结果也表明，海区的波高比较符合两参数的 Weibull 分布，波浪周期符合对数—正态分布。

2.3 波高一周期的联合分布

长期波浪的波高一周期的联合分布对了解特定波高与周期的对应关系，以及海岸和海洋工程应用有参考意义。依照文献^[4]的方法，计算得到红海湾海域的波高一周期联合分布概率(图 2)。由图可以看出，红海湾海区的波高一周期联合分布图上在 $T/\bar{T}=1.0$ 附近出现两个概率密度脊(3.0 等值线)，对应的周期分别为和 $H/\bar{H}=0.85$ 和 $H/\bar{H}=1.1$ 。

表 1 检验结果¹⁾

Tab. 1 Results of examination

分布类型	拟合方法	d^2	R
$H/\bar{m}$	Weibul-2	0.2466	0.9543
	Weibull-3	0.3619	0.9265
	正态	0.3374	0.9352
	对数—正态	0.8349	0.8229
$T/\bar{s}$	Weibull-2	1.4842	0.9430
	Weibull-3	1.7358	0.9398
	正态	0.5651	0.9794
	对数—正态	0.2132	0.9927

1) Weibul-2, Weibull-3 分别代表两、三参数 Weibull 分布

从波高和波周期来分析，这两个脊反映的都是以风浪成分为主的海况，说明该海区以风浪为主，两个不同的波高值可能与波高季节变化有关。图中 $H/\bar{H}=0.3$ 的 0.1~0.05 等值线之间为以涌浪成分为主的海况，说明涌浪传到该海区时波能已经消散。 $H/\bar{H}=2.0$ 以上为大浪成分，并出现一个概率密度脊 ($H/\bar{H}=2.1, 1.2$)。该海区的大浪周期较小，说明大浪主要由风暴引起。

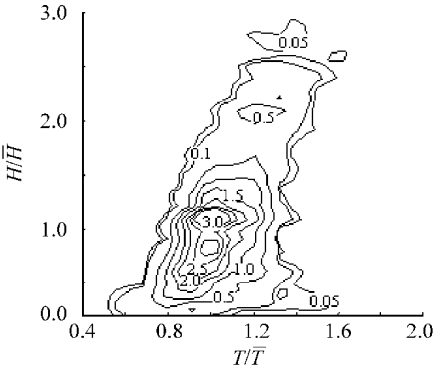


图 2 波高一周期联合分布
Fig. 2 Joint distribution of wave height and period

3 波高和周期的关系

波浪周期和波高的关系比较复杂，具有区域性的特点。一般认为，特征波高和特征波周期之间有如下的关系：

$$T = \mu \sqrt{H} \tag{4}$$

其中， T 、 H 可以是平均或有效波周期和波高。文献[3] 得出黄河口海域平均波高和平均周期上式比值 $\mu = 5.44^{2①}$ ，文献[2] 得出东海、黄海平均周期和有效波高的上式比值 $\mu = 3.66$ 。文献[2, 3] 分别还提供了另外几个比值：国际实验水槽会议根据各大

①. 原表达形式为 $H = \mu^2 T$ ，为了比较本文经过了换算。
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

洋波浪统计给出 $T = 5.0 \sqrt{H_{1/3}}$, 上海交通大学对中国各海区统计得到 $T = 4.7 \sqrt{H_{1/3}}$, 西首英之等^[2] 给出东中国海 $T = 3.29 \sqrt{H_{1/3}}$, 韩立祝等得出石臼所海域的两者关系为 $T = 6.32 H^{1/2}$, “海港水文规范”中规定的为 $T = 5.13 H^{1/2}$ ^[3]. 对遮浪站观测资料进行分析(图 3), 得到波高和周期的关系为:

$$T = 3.87 H^{1/2} \tag{5}$$

其相关系数为 0.653 8, 其中各年的相关系数分别为 0.476 5、0.764 4、0.719 6. 由此可知, 平均波高与平均周期的相关性较差. 采用指数形式, 用最小二乘法对两者的比值进行拟合得到 (图 3)

$$T = 3.74 H^{0.226} \tag{6}$$

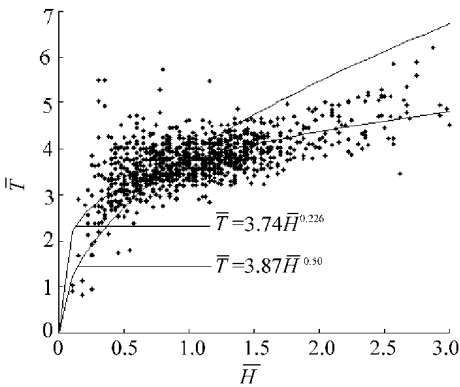


图 3 平均波高与平均周期的关系

Fig. 3 Relationship between the mean wave heights and periods

4 波浪延续特性

波浪延续特性涉及到暴风浪或平静海况延续时间平均状况, 对于沿岸地区的海洋工程建设和渔业、航运等生产活动有重要意义. 波浪的延续特性可以从两个方面来描述, 一是波高时间序列的自相关系数, 二是海况的平均延时^[1]. 合田对日本海岸用 1 d 的滞后时间求得自相关系数为 0.3. Lawson 和 Abernethy 用同样方法得到澳大利亚 Botany 湾的自相关系数为 0.5. Lawson 和 Abernethy 对不平静海面的平均延时采取如下的指数函数:

$$D = a(H_s)_c^b \tag{7}$$

其中, D 为以日表示的平均波高延时, $(H_s)_c$ 为以 m 表示的有效波高阈, a 、 b 为系数. Lawson 和 Abernethy 得到 $a=7$, $b=-2$.

由于遮浪站日观测次数仅为 4 次, 本文只能对红海湾海域的波浪延时做比较粗略的估计. 采取每天取一个最大有效波高方法, 按照上述做法, 求得红海湾海域波高序列的 1 d 滞后自相关系数为 0.42. 不平静海面 (本文取有效波高大于 1.1 m)

的平均延时符合指数形式 (图 4), 用指数函数拟合得:

$$D = 4.36(H_s)_c^{-0.88} \tag{8}$$

说明波高越大, 延时越短, 但波高达到一定值后, 波高总将持续一定的时间.

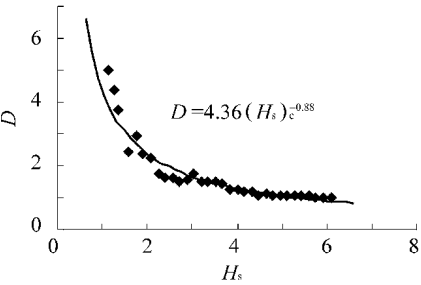


图 4 有效波高 (H_s) 与平均延时 (D) 关系

Fig. 4 Relationship between the D and H_s

5 极值波高推算

极值波高推算极值波浪统计的重要内容, 对于海岸和海洋工程的规划设计有重要意义. 重现波高的推算一般需要数十年的观测资料, 许多地区特别是一些刚开始进行建设的海区都不具备这种资料. 为此提出了许多利用短期观测资料推算重现期波高的方法^[4,7-9]. 本文利用文献 [4, 7] 的二项一对数正态复合极值分布以日极值来推算重现期波高, 同时用 Gumbell、Weibull 和对数一正态分布^[9] 以月极值推算重现期波高进行比较.

在日极值波高系列中, 选择某一 H_m 为起始波高和移动坐标原点距离 b_0 后, 可使不小于 H_m 的波浪资料 H_i ($i=1, 2, \dots$) 都符合对数正态分布. 而不小于 H_0 的资料个数 n , 对很多台站的资料进行检验, 基本都符合二项分布^[4]. 因此, 可以用 n 和 H 的复合极值分布 (即新构成的二项一对数正态复合极值分布) 来推求重现波高. 经过推导, 其分布函数可以化为:

$$\frac{1}{\sqrt{2\lambda}} \int_{-\infty}^x \exp(-\frac{t^2}{2}) dt = 1 - \frac{365}{\bar{n}} (1 - R^{1/665}) \tag{9}$$

根据不同的重现频率 R 和 $\bar{n}$ (每年取样的平均数) 造出了 $x \sim R \sim \bar{n}$ 的表, 即二项一对数正态复合极值分布表 (见文献[4]附表). 重现波高 H_R 可由以下各式计算:

$$H_R = b_0 + \exp(A + \sigma \Phi R n) \tag{10}$$

$$\Phi R n = \frac{\ln(H - b_0) - A}{\sigma} \tag{11}$$

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(H_i - b_0) \tag{12}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\ln(H_i - b_0) - A]^2} \quad (13)$$

式中， n 是从选定的起始波高 H_m 算起的日最大波高资料总数， b_0 为使经验点符合对数正态分布，经过试算，从波高系列中减去的常数。

对遮浪波浪观测记录进行试算，确定 $H_m = 0.5$ ， $b_0 = 0$ ，按上述方法计算得各重现波高(表 2)。

由表 2 可以看出，以月极值波高利用 Gumbell 分布推算的重现波高最大。以月极值波高利用对数—正态分布和 Weibull 分布推算的重现波高，与以日极值波高利用二项—对数正态分布推算的重现波高比较接近，平均相差不到 10%。

表 2 红海湾海区重现期波高推算结果
Tab 2 The estimation of recurrence wave heights of Honghai Bay waters

方 法	重现频率 (R)				
	0.04	0.02	0.01	0.005	0.002
二项—对数正态	6.01	6.72	7.28	7.84	8.42
Gumbell	6.41	7.26	8.11	8.96	10.08
Weibull	6.38	7.18	7.94	8.67	9.58
对数—正态	5.66	6.35	7.04	7.73	8.67

6 结 论

由以上分析可以得到以下主要结论：

(1) 红海湾海域平均波高为 1.1 m，平均波周期为 3.8 s，主要以偏东浪和西南浪为主，波浪类型以风浪为主，大浪多由风暴引起。

(2) 红海湾海域的波高符合两参数 Weibull 分布，波周期符合对数—正态分布。

(3) 红海湾海域平均波周期和平均波高的方根的比例系数为 3.87，波高与周期的相关性较差。

(4) 波高 1 d 滞后的相关系数为 0.42，不平静海面的平均延时符合指数形式。

(5) 以日极值波高用二项—对数正态分布对重现波高推算的结果和直接以月极值用 Weibull 分布及对数—正态分布推算的结果比较接近。

参考文献:

[1] 合田良实. 海况参数的分布和资料适线, 海岸及海洋工程手册[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1992: 271—298.

[2] 王云天, 伊辉延. 东、黄海波浪的统计特征及谱分析[J]. 大连水产学院学报, 1997, 12(3): 33—39.

[3] 范顺庭, 王以谋. 黄河口海域特征波浪要素比的分析[J]. 海洋预报, 1999, 16(1): 21—28.

[4] 丰鉴章, 李元智, 孙书敏, 等. 海岸工程中的海浪推算方法[M]. 北京: 海洋出版社, 1987: 82—83.

[5] HERBICH J B. 设计波特征值的选用, 海岸及海洋工程手册[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1992: 309—326.

[6] 马开玉, 丁裕国, 屠其璞, 等. 气候统计原理与方法[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 69—72; 408—419.

[7] 天津大学水文学教研室. 海洋石油工程环境—水文分析计算[M]. 北京: 石油工业出版社, 1983: 119—122.

[8] 王超. 海洋工程环境[M]. 天津: 天津大学出版社, 1993: 122—127.

[9] 刘德辅, 王超. 基于马尔可夫链的极值波高预测[J]. 中国造船, 1996(2): 7—15.

Wave Climate Characteristics of Honghai Bay Waters, Eastern Guangdong

LI Zhi qiang, CHEN Zi shen

(School of Geography and Planning, Sun Yat sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The wave climate (in terms of statistic concepts) is analyzed with three year wave data collected at Zhelang Ocean Observation Station. The results indicate that the two parameter Weibull distribution fits the wave heights well, while the lognormal distribution fits the wave periods well. Wind wave is the dominant wave pattern in this sea waters and the higher waves are mainly produced by storms. The ratio coefficient of mean wave period to square root of mean wave height is 3.87. The autocorrelation coefficient of wave height with one day lag is 0.42. The exponential curves fit the mean lasting time of calmless sea surface well. Finally, the extreme wave heights of this sea waters are analyzed based on the binomial logarithmic normal distribution.

Key words: wave climate; statistic distribution; joint distribution; wave lasting time; extreme wave heights