



江苏近岸海域波浪的分布特征*

郭浩霖, 宋育霖, 张帆一, 翁添宇

(河海大学, 江苏南京 210098)

摘要: 利用2009年1—6月的实测波浪资料, 研究位于江苏北部辐射沙洲南部沿海测站的波浪特征。通过统计计算和研究分析, 获得其波高特征值, 并探讨各特征波高与平均波高(有效波高)之间的关系; 筛选出25组有效波高出现极值时刻的波面资料, 运用概率统计的方法计算了波高、周期及两者之间的联合概率密度分布, 并与其对应的理论公式结果进行对比。结果表明: Gluhovski分布较适用于本地区的波高分布规律; 当谱宽度较小时, Longuet-Higgins理论周期分布与实测分布比较符合; 实测波高与周期联合概率分布对于大波高小周期的情况与各理论分布均吻合较好。

关键词: 线性拟合; 波高分布; 周期分布; 波高与周期联合分布; 江苏

中图分类号: P 731

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)05-0041-07

Distribution characteristics of wave in Jiangsu offshore sea area

GUO Hao-lin, SONG Yu-lin, ZHANG Fan-yi, WENG Tian-yu

(Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Using the measured wave data from January to June, 2009 of the coastal station in the south of the northern Jiangsu radial sand ridges, we study the wave characteristics of the area. After taking all data for statistical analysis, we gain its wave height eigenvalues and explore the relationship between each characteristic wave height and mean wave height (significant wave height); after screening out 25 sets of wavefront data, whose significant wave height occurs extreme time, calculate the wave height, period and between joint probability density distribution with probabilistic method and compare them with corresponding theoretical formula results. Statistical results show that Gluhovski distribution is more applicable to the wave height distribution in this region; when the spectral width is small, Longuet-Higgins theoretical cycle distribution fit in with the measured distribution better; when the wave height is big and the period is small, the measured joint probability distribution of wave height and period and each theoretical distribution are in good agreement.

Key words: linear fit; wave height distribution; cycle distribution; joint distribution of wave height and period; Jiangsu

波浪荷载是海岸、海洋建筑物研究最为重要的环境荷载之一。为确保海上建筑物及船舶的正常运行和使用, 了解和掌握研究海区的波浪要素分布情况及风浪关系尤为重要。但是由于波浪现象影响因素众多、成因分析复杂, 特别是近岸海域, 至今尚未得到公认的、广泛适用的风浪关系

及海浪统计分布规律。因此, 利用实测资料统计分析, 探讨近岸海域风浪关系以及波浪分布统计特征十分必要。

自20世纪50年代初起, 海洋学家通过对随机波浪的深入观测和研究, 相继提出具有代表性的理论分布: Rayleigh分布^[1]、Gluhovski分布^[2]、Weibull

收稿日期: 2013-09-05

*基金项目: 河海大学实践创新训练计划(201205XCX034)

作者简介: 郭浩霖(1991—), 男, 在读本科, 主要从事港航工程研究。

分布、Longuet-Higgins 分布^[3]和 Bretschneider 分布^[4]等。我国海洋工作者洪广文、杨正己、孙孚^[5]等也对波浪的分布函数做了大量研究，提出了相关的经验分布。上述分布有些多侧重于理论和经验公式的研究，此外，还有学者将理论经验与地形特征、风浪涌浪状态相结合做出相对精确的计算。然而由于海浪出现的随机与复杂，海浪统计特征值的易变与极端气象条件影响使得实际应用中尚未找到一个统一的适用于任何地区的波高、周期分布及波高与周期联合分布公式。因此，从实测资料出发，分析目标海区的波高、周期分布及波高与周期联合概率密度分布的统计结果，对确定该地区波浪情况有及其重要的意义。

本文采用的实测资料所在地区属于江苏中南部海域，常风向和强风向均为 ESE，波浪是以风浪为主的混合浪，全年盛行偏北向浪，强浪向为 ENE^[6]。

本文根据实测资料与经典的波高、周期分布以及波高与周期的联合分布的理论分布公式的结果进行对比分析，讨论其中的差异性并确定海域波高、周期分布及两者的联合分布，为该海区的海浪研究和工程建设提供参考依据。

1 资料的选取与处理

本文采用江苏北部辐射沙洲南部沿海测站(32°15.604 3'N, 121°58.542 5'E, 水深为 10 m, 见图 1) 2009 年 1—6 月的波面观测资料。每天观测 8 次，每次记录约 17 min；采样时距为 0.5 s，每次采集 2 048 个数据。为了充分利用数据，得到更为准确的结果，运用所有数据进行波高统计分析。

对于波高分布、周期分布及波高与周期联合概率密度分布，在对采集数据进行初步整理后，选取了有效波高出现极值时刻的波面资料共 25 组（即将所有数据按有效波高由大到小排序，选取前 25 组数据）进行分析探讨。由于冬季通常出现大浪情况较多，所以选取有效波高出现极值时刻的数据具有代表性。

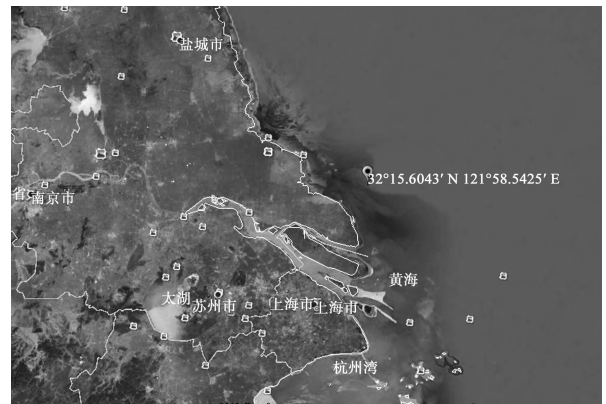


图 1 江苏北部沿海波浪资料观测点位置

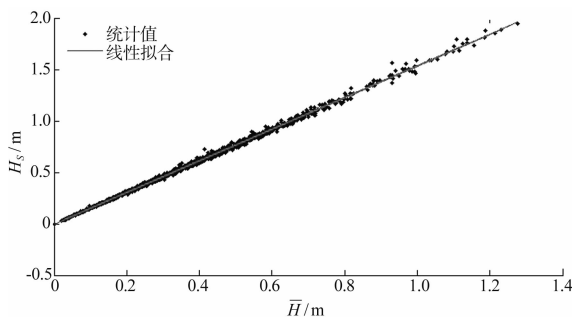
2 波浪要素统计分析

2.1 波高统计特征值

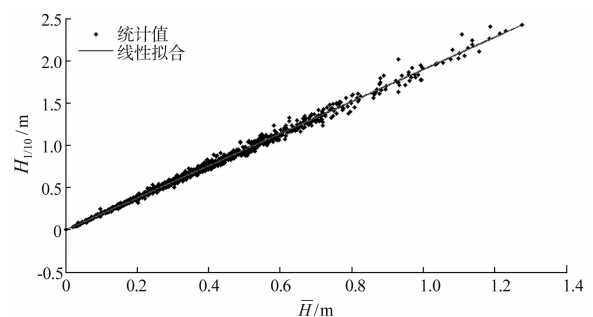
2.1.1 实测资料的波高统计

所采用的 25 组波面资料中，有效波高范围是 1.501 ~ 1.945 m，相应的有效周期范围是 5.140 ~ 17.043 s。

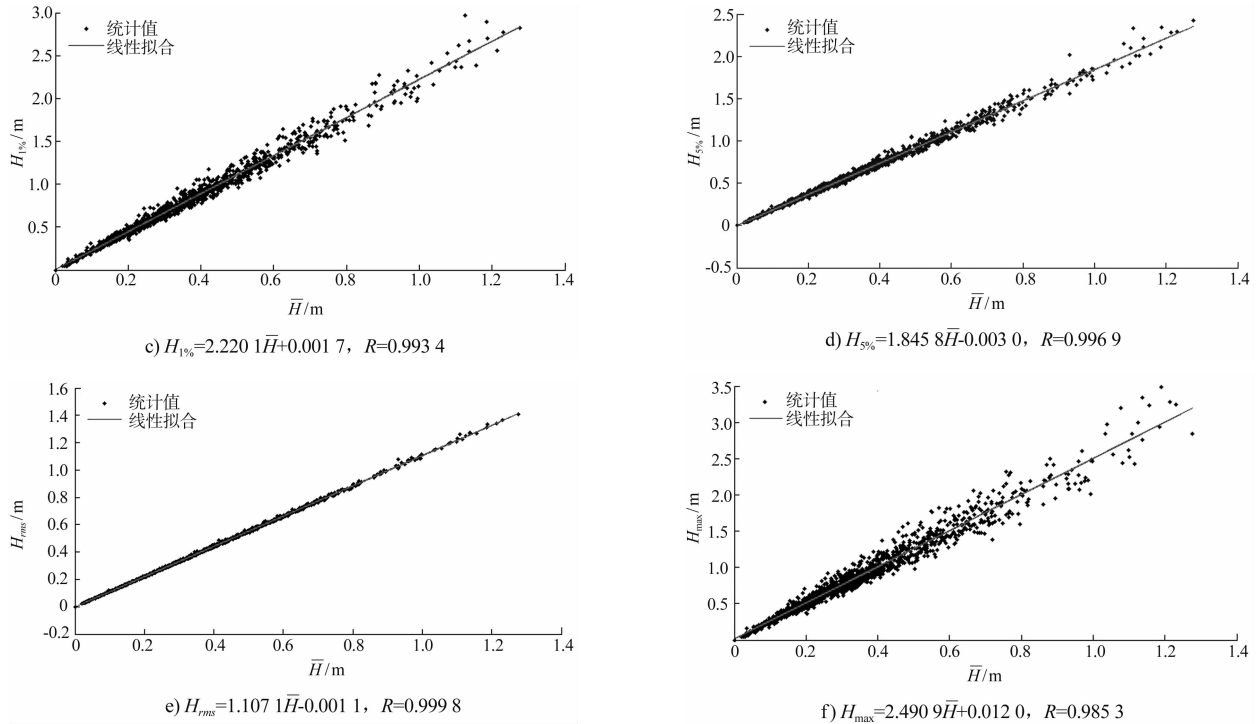
参照 Longuet-Higgins 在线性和窄谱条件下就 Rayleigh 波高分布推得的各特征波高相关关系式的理论形式，运用最小二乘法进行线性拟合，得到实测资料的 $H_s, H_{1/10}, H_{1\%}, H_{5\%}, H_{rms}$ 和 H_{max} 与平均波高 \bar{H} 的相关关系式，其线性拟合关系如图 2 所示。



a) $H_s=1.537 3\bar{H}-0.002 9, R=0.999 2$



b) $H_{1/10}=1.898 7\bar{H}-0.002 3, R=0.997 7$



注: H_S 为有效波高 (即前 1/3 大波的平均波高), $H_{1/10}$ 为前 1/10 大波的平均波高, $H_{1\%}$ 为波列累积频率 1% 的波高, $H_{5\%}$ 为波列累积频率 5% 的波高, H_{rms} 为均方根波高 (反映波的能量), H_{max} 为最大波高 (m), \bar{H} 为平均波高, 单位均为 m。

图 2 H_S , $H_{1/10}$, $H_{1\%}$, $H_{5\%}$, H_{rms} , H_{max} 和 \bar{H} 的线性拟合

由波面统计得到的各特征波高之间的相关关系结果见表 1。

从表 1 可知, 由研究区沿海测站的实测资料线性拟合的各特征值波高与平均波高的比值同瑞利分布理论值存在一定的差异, 普遍比理论分布值小, 且累计率越高的特征波高值, 实际拟合值与理论值

差异越大。与 2006 年统计分析资料^[7] 相比, 特征波高比值存在一定差异, 相关系数普遍提高, 均达到 0.98 以上, 由实测资料拟合的公式比理论推导公式更符合研究区海域的波高分布。由表中“标准差”一栏可以看出, 各特征波高与有效波高的关系比它们与平均波高的关系相对较稳定。

表 1 特征波高的比值系数

比值	变化范围	均值	标准差	瑞利分布
H_S/\bar{H}	1.241 ~ 1.782	1.525	0.039	1.558
$H_{1/10}/\bar{H}$	1.384 ~ 2.478	1.887	0.082	1.908
$H_{1\%}/\bar{H}$	1.501 ~ 3.662	2.225	0.164	2.130
$H_{5\%}/\bar{H}$	1.376 ~ 2.331	1.832	0.085	1.838
H_{rms}/\bar{H}	1.029 ~ 1.212	1.103	0.013	1.109
H_{max}/\bar{H}	1.501 ~ 4.416	2.530	0.271	
$H_{1/10}/H_S$	1.094 ~ 1.391	1.237	0.030	1.217
$H_{1\%}/H_S$	1.144 ~ 2.219	1.459	0.090	1.348
$H_{5\%}/H_S$	1.083 ~ 1.376	1.201	0.037	1.175
H_{rms}/H_S	0.673 ~ 0.829	0.723	0.011	0.719

2.1.2 实测波高分布与理论分布的对比

鉴于瑞利分布对于大波的估计理论结果过大, Forristall^[8] 利用墨西哥湾 8 个测站, 共计 116 h 的

飓风风浪记录进行统计分析, 发现用双参数的 Weibull 分布比 Rayleigh 分布更符合实际。Weibull 分布的形式为:

$$F\left(\frac{H}{\bar{H}}\right) = \exp\left[-a\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^b\right] \quad (1)$$

式中： $a = \Gamma^b(1 + 1/b)$ ， $\Gamma(x)$ 为伽马函数，此处取 $a = 0.7486$ ， $b = 2.4$ 。

其概率密度函数形式为：

$$f(H) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{H}{\sqrt{m_0}}\right)^\alpha \frac{1}{H} \exp\left[-\frac{1}{\beta} \left(\frac{H}{\sqrt{m_0}}\right)^\alpha\right] \quad (2)$$

通过上式与实测资料的拟合，得到 25 组波面数据对应的参数 α 和 β ，对应的取值范围是 α ：1.898 ~ 2.559， β ：4.002 ~ 9.183。

根据研究区海域实测的波高资料得出的波高分布及与理论和经验分布的概率密度，部分组次如图 3 所示。每个图中除实测结果（用直方图表示）外，还有 3 条理论分布曲线，分别代表 Rayleigh 分布、Weibull 分布以及 Gluhovski 的浅水分布。

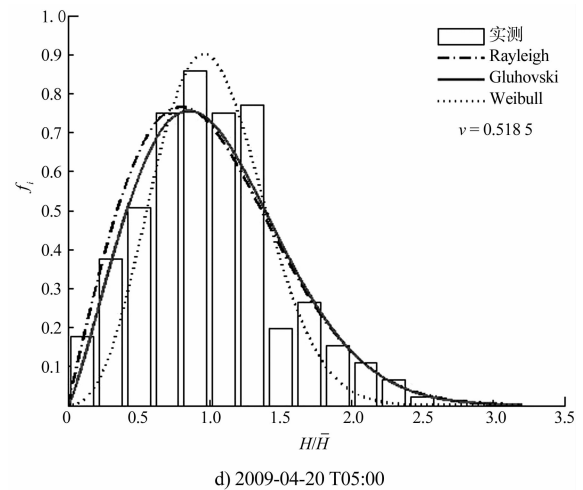
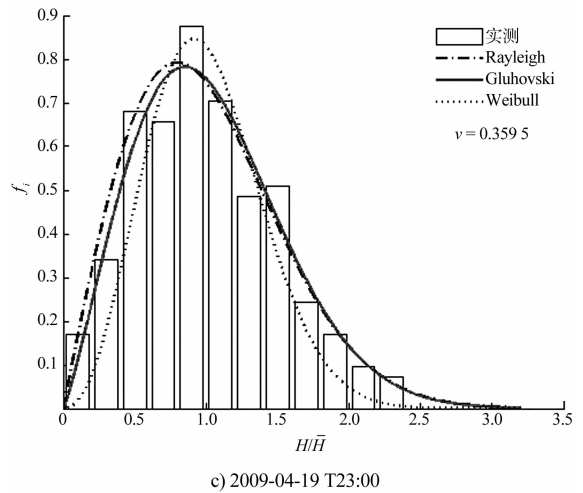
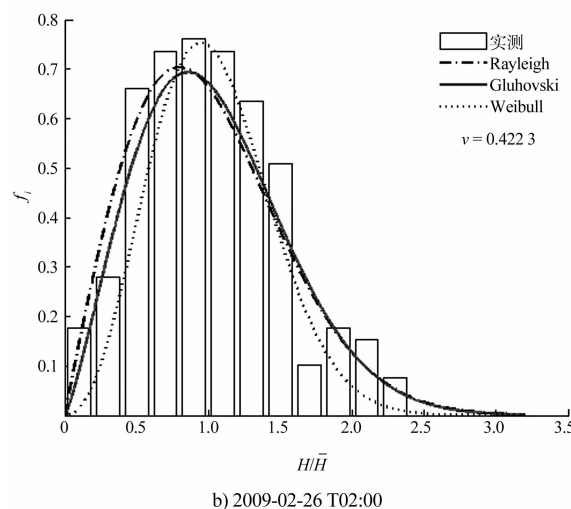
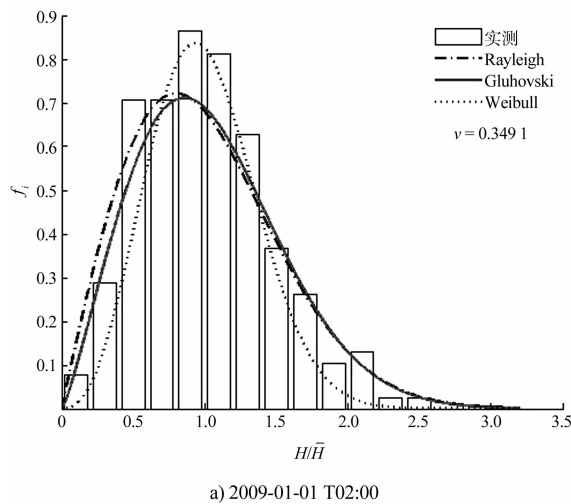


图 3 实测与理论波高分布对比

图 3 为海区实测波高资料所得波高分布及经验分布（Rayleigh 分布、Weibull 分布及 Gluhovski 浅水分布）的概率密度图。可以发现：Weibull 分布对平均波高的预报值与实测值在三者中最为接近，Rayleigh 分布和 Gluhovski 分布也与实测结果吻合较好，但两者有一定的差别，主要源于该资料的观测点位置虽在水深为 10 m 处，但近似接近于深水情况；总体而言，Weibull 分布对小于平均波高的小波高或者大于平均波高的大波的预报值则偏小。Rayleigh 分布和 Gluhovski 分布对平均波高的预报较为接近，但对小于平均波高的小波或者大于平均波高的大波的预报值则要大一些。综上，3 种理论波高分布中浅水 Gluhovski 分布与实测波高分布符合最好；此外，绝大部分波高出现在平均波高 2 倍范围之内，最大概率密度的波高值为平均波高的 1 倍左右，

平均波高附近的波占优势; 所以从波高概率分布密度图来看, Gluhovski 分布适用海区波高分布规律。

2.2 实测周期分布与理论分布的对比

经由实测资料绘制的周期分布直方图以及理论周期分布曲线 (Longuet-Higgins 分布、Bretschneider 分布和孙孚分布) 如图 4 所示。可以看出: 实测资料的周期分布范围较窄, 主要集中在平均周期附近, 这也说明了在波浪要素中, 周期确实是一个比较保守的量; 当谱宽度较小时, 也与实测资料分布比较符合, 而随着谱宽度的增大, Longuet-Higgins

理论分布与实测资料的差异也逐渐增大, 其特征是对于中等波的周期预测过低, 而对于大波的周期预测过高; 大部分情况下, Bretschneider 周期分布和孙孚周期分布对于中波的周期预测过高, 对于小波的周期预测过低, 都不适合当地的周期分布规律; 当谱宽度较大时, 上述 3 种周期分布与实测周期分布均有较大的差别。可见对于谱宽度较大时, 对于周期分布的预测是比较困难的。对于谱宽度适当时, Longuet-Higgins 理论周期分布较适用于本地区的周期分布规律。

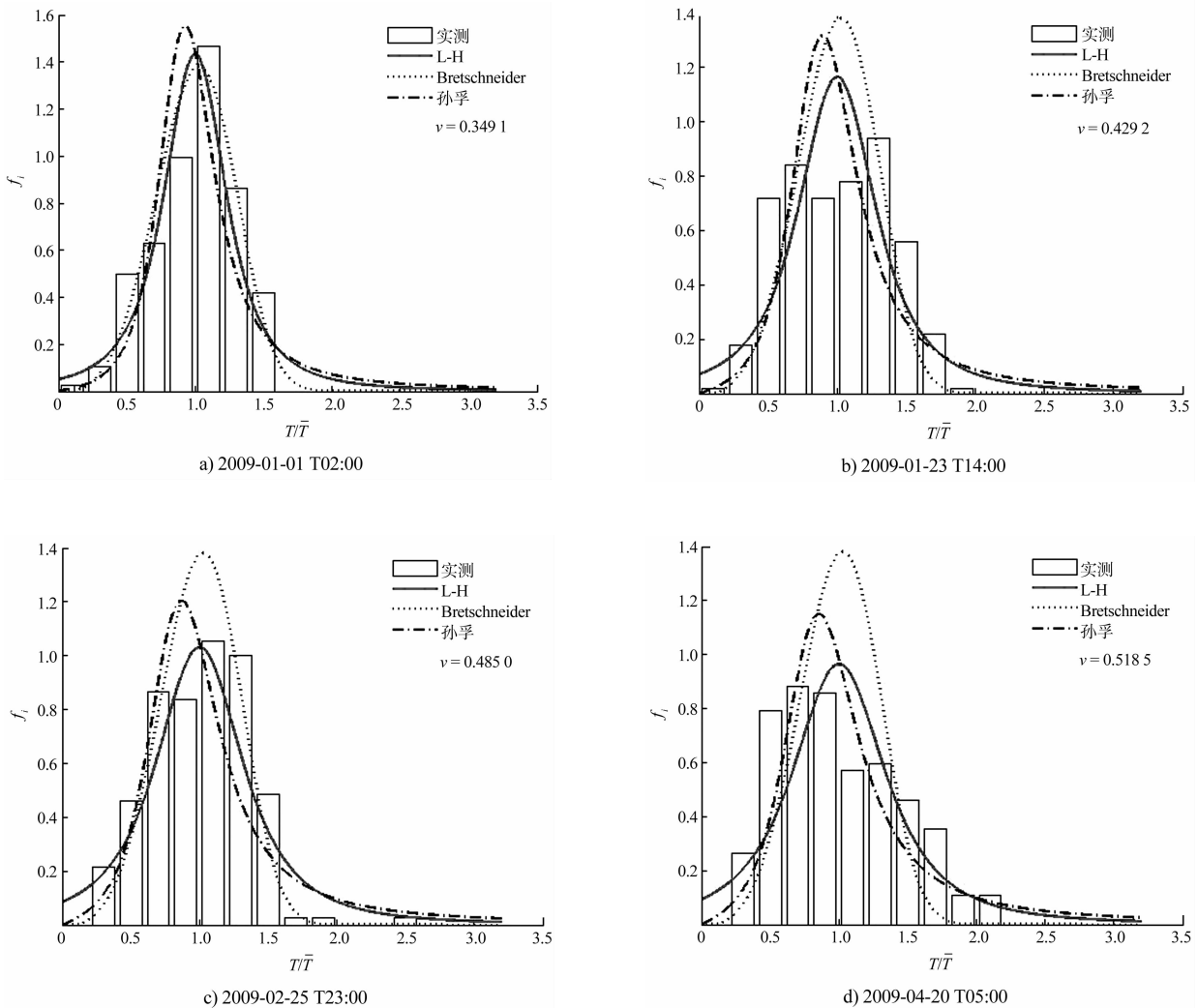


图 4 实测与理论周期分布对比

2.3 实测波高与周期联合分布同理论分布的对比

为了方便与波高周期联合分布的理论分布对比, 令 $x = H/\bar{H}$, $\tau = T/\bar{T}$, 将波高和周期无因次

化, 统计得出波浪在各个单位区间的概率密度, 绘制了现场实测资料的波高与周期联合概率密度分布以及理论分布, 部分组次如图 5 所示。

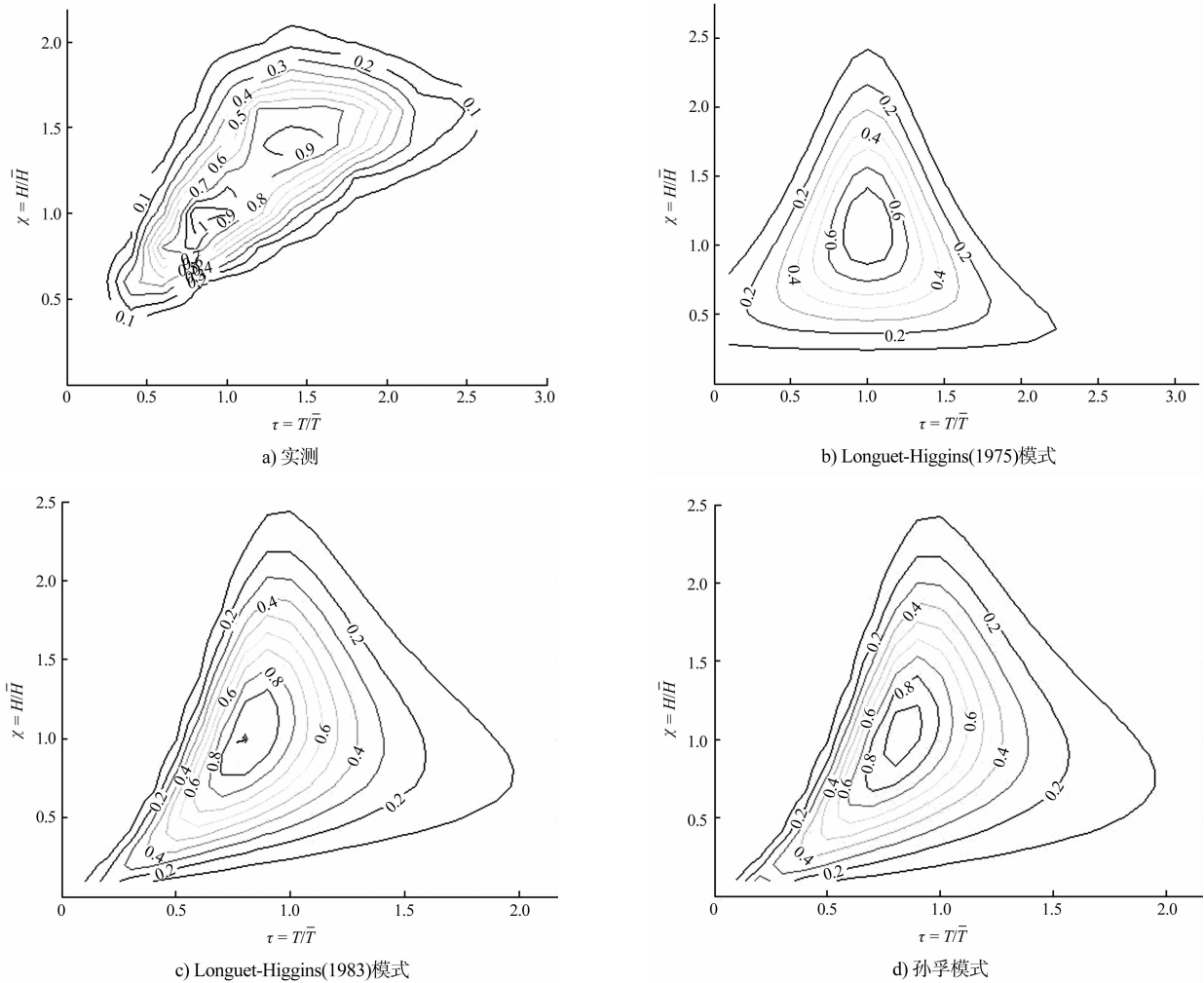


图5 波高与周期联合分布

由图5可知：理论分布结果与实测分布结果基本规律大概一致，最大概率值出现在平均波高与平均周期附近；大波高大周期的波与小波高小周期的波出现概率较小。Longuet-Higgins (1983) 模式或孙孚模式相对而言较适用于本地区的波高周期联合分布规律；实测资料分布的形状接近于一个斜三角形，而三种理论分布的形状则都为较明显的三角形。实测资料的无因次波高变化范围稍小于无因次周期变化范围，理论分布的无因次波高变化范围则稍大于无因次周期变化范围。实测资料分布中多数为双峰形式，少数为多峰形式，与理论分布的单峰形式存在较大差别，出现这种情况很大程度上是因为理论分布都是在单峰的假设基础上推导出来的。但在实际环境中，当地风浪与外海传入近岸海域的涌浪相互作用情况的出现促使了联合分布双峰甚至多峰状态的形成；将

所有实测资料求得的谱宽度代入到3种理论分布中，显然 Longuet-Higgins (1975) 模式与实测结果不相符，孙孚模式与 Longuet-Higgins (1983) 模式十分相近，但同实测结果仍存在一定差距，特别是大波高、大周期情况下，实测结果明显大于理论分布。其主要原因在于江苏北部近岸海域受到一定强度的涌浪影响，谱宽度较大，而理论分布则是基于窄谱假定的，自然会出现误差；大致在 $0.5 \leq x \leq 1.7$, $0.5 \leq \tau \leq 1.5$ 区域内，各个理论分布概率密度较显著。而在 $0.5 \leq x \leq 0.7$, $0.5 \leq \tau \leq 2$ 区域内，实测分布的概率密度区域较显著。

3 结论

1) 通过对所有实测数据的统计分析，绘制出各特征波高与平均波高（有效波高）之间的线性拟合图，所得关系式的相关系数达到 0.98 以上，

可靠度高, 可应用于江苏北部海域的波高计算中。

2) 通过对筛选出的 25 组有效波高出现极值时刻的波面资料进行概率统计分析, 对比波高和周期的实测分布和理论分布可知: Gluhovski 分布较适用于江苏北部海域的波高分布规律; 当谱宽度较小时, Longuet-Higgins 分布较适用于本地区的周期分布规律。

3) 分别绘制出实测、理论的波高和周期联合分布图, 对比可知: 理论值和实测值存在一定差异, 各理论分布与实测分布仅在大波高小周期的情况下吻合较好。

参考文献:

- [1] 邱大洪. 工程水文学[M]. 4 版. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [2] Putz R R. Statistical distribution for ocean waves, Trans Amer Geophya, 1952, 3 (5): 685-692.
- [3] Longuet-Higgins M S. On the statistical distribution of the heights of sea waves[J]. J Mar Res, 1952, 11(3): 245-265.
- [4] Вялєиский Я Т. Глязовский Б Х Ю. Экспелпование пронесса морского весторовоя вопяньєпя[M]. ТР ГНН, Вып, 1957.
- [5] 孙孚. 海浪周期与波高的联合分布[J]. 海洋学报, 1988, 10(1): 10-15.
- [6] 邱桔斐. 江苏沿海风、浪特征研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [7] 冯卫兵, 彭向丽. 南黄海近岸海域风浪统计分析[C]// 中国海洋工程学会. 第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集: 上册. 北京: 海洋出版社, 2009.
- [8] Foristell G Z. On the statistical distribution of wave heights in a storm[J]. J Geophys Res, 1978 (S5): 2 353-2 358.

(本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

一航局中标天津港大沽口港区 9 号液体化工码头工程

近日, 一航局中标天津港大沽口港区 9 号液体化工码头工程。

该工程中标金额 1.2 亿元, 工期为 365 d。工程位于天津港临港经济区, 为 5 万吨级液体化工泊位, 水工结构按照 10 万吨级设计, 兼顾停靠 2 艘 5 000 吨级液体化工船, 码头岸线长度 298 m, 年设计吞吐量为 183 万 t。施工内容主要包括岸坡开挖、水工主体施工、接岸结构、陆域及道路等工程。

该项目的建成, 将进一步提高港区物流配套服务能力, 有效缓解 LG 渤海化工、天碱、大沽化等大型化工企业的生产供应。

摘编自《中国交通建设网》

中国港湾中标巴基斯坦 PIBT 煤、熟料及水泥码头项目

4 月 21 日, 中国港湾中标巴基斯坦 PIBT 煤、熟料及水泥散货码头 EPC 项目, 中标金额 1.28 亿美元, 资金由业主自筹。

该项目位于卡拉奇市卡西姆港, 工期为 27 个月。工程内容为 2 个散货泊位和 25 万 km² 后方堆场; 码头结构形式为高桩码头, 总长约 565 m; 堆场工程含 5 个 1 万 t 水泥筒仓和房建及其他配套附属设施。码头与堆场采用 PHC 桩栈桥连接, 栈桥线长 2 445 m。

该项目是中国港湾在卡西姆港实施的第 11 个项目, 有效维护了中国港湾在巴基斯坦港口工程市场的地位。

摘编自《中国交通建设网》