

基于实测数据的台湾海峡中部波浪特征分析*

徐啸^{1,2}, 陶爱峰^{1,2}, 李雪丁³, 郑祥靖³, 林伊楠^{1,2}

1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098;

3. 福建省海洋预报台, 福建 福州 350003

摘要: 利用台湾海峡中部2号大浮标2017年全年的实测波浪资料, 对海浪的基本波要素及其与风的相关性、波谱特性进行统计分析, 得出了重要特征波参数之间的回归关系和适合台湾海峡中部的海浪谱形式。研究结果显示: 1) 台湾海峡中部的常浪向是NE向, 强浪向是NNE向, 月均有效波高的变化范围为0.87~2.98m, 7月波高最小, 12月波高最大, 波周期与波高有着相似的月际变化趋势; 2) 主要波浪类型是以风浪为主的混合浪, 谱型上以单峰为主, 波高与风速整体上呈正相关关系, 大浪主要由台风和强劲的东北季风引起; 3) 波浪的平均周期与大部分特征波周期之间具有良好的线性相关性, NNE、NE方向的波浪有效波高和有效波周期线性相关性较强; 4) 相比于Jonswap谱, 规范谱一是更符合本区域的海浪谱模式, 给出了基于有效波高和谱峰周期拟合的规范谱一形式。这些研究成果可为海洋工程设计和波浪数值模拟提供参考。

关键词: 台湾海峡; 波浪特征; 海浪谱; 波参数; 拟合分析

中图分类号: P731.22

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2021)01-0012-9

Analysis of Wave Characteristics in the Central Taiwan Strait Based on Measured Data

XU Xiao^{1,2}, TAO Aifeng^{1,2}, LI Xueding³, ZHENG Xiangjing³, LIN Yinan^{1,2}

1. Key Laboratory of Ministry of Education for Coastal Disaster and Protection, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. Fujian Marine Forecasts, Fuzhou 350003, China

Abstract: Using the measured wave data in 2017 in the central Taiwan Strait, we analyze the basic features of wave, including spectral features, and their relationships with wind. The regression relationship among important characteristic wave parameters and the appropriate wave spectrum form are also investigated. The results are as follows. 1) The most frequently occurring wave direction is NE, and the strong wave direction is NNE. The monthly average significant wave height varies from 0.87 to 2.98 m. The wave height is the smallest in July and the highest in December. The wave period has similar inter-month change to wave height. 2) Mixed waves dominated by wind wave and single-peaked spectra make up the majority. The wave height is positively correlated with the wind speed as a whole. Strong wave is mainly generated by typhoons and strong northeast monsoon. 3) There are good linear correlations between mean wave period and most characteristic period parameters. The significant wave height and its corresponding wave period are strongly linearly related in the directions of

收稿日期: 2020-04-02; 修订日期: 2020-06-22。姚行桃编辑

基金项目: 福建省科技计划项目(2018Y0001); 国家自然科学基金项目(51579091)

作者简介: 徐啸(1995—), 男, 江苏扬州人, 硕士生, 从事水波动力学研究。email: 15150685669@hhu.edu.cn

通信作者: 李雪丁。email: lxd007@xmu.edu.cn

*感谢福建海洋预报台提供了2号大浮标的风、浪观测数据; 感谢审稿人提出宝贵的修改建议。

Received date: 2020-04-02; **Revised date:** 2020-06-22. Editor: YAO Yantao

(Foundation item: Science and Technology Planning Project of Fujian Province (2018Y0001); National Natural Science Foundation of China (51579091)

Corresponding author: LI Xueding. email: lxd007@xmu.edu.cn

NNE and NE. 4) Compared with the Jonswap spectrum, the Code spectrum 1 is more reasonable for the fitting of sea wave spectrum in this area. A spectrum in the form of Code spectrum 1 is given, which is fitted by significant wave height and spectral peak period. These results can provide references for ocean engineering design and numerical simulation of wave.

Key words: Taiwan Strait; wave characteristics; wave spectrum; wave parameter; fitting analysis

台湾海峡位于我国福建省和台湾岛之间, 是连接东海与南海的交通要道, 战略地位极为重要, 随着我国对海洋开发力度的增加, 台湾海峡内的人工作业、生产活动与航运日益频繁。另一方面, 台湾海峡大风天气频繁, 夏、秋季节又常常遭到台风侵袭, 平均每年有 2~3 次热带气旋经过(郭婷婷等, 2010)。大风掀起的巨浪可导致船只失速、转向、上浪, 甚至倾覆。据相关资料显示, 仅 2016—2017 年的两年间, 发生在台湾海峡的船只落水事件多达 12 次。由于台湾海峡气候多变、海况复杂、事故频发, 因此掌握台湾海峡的波浪特征具有重要的现实意义。

为了阐明台湾海峡的波浪特征, 学者们过去已经开展过一些研究。如陈剑桥(2018)以第三代海浪模式 Simulating Waves Nearshore (SWAN)模拟了 3 种典型台风路径下, 台湾海峡及周边海域的台风浪特征。袁凯瑞等(2014)以不同台风风场模型驱动的 SWAN 海浪模式分析了 3 个台风过程影响下的台湾海峡波浪场, 模拟结果与浮标实测值对比良好。对台湾海峡的台风浪进行后报模拟能够揭示短期台风浪场的演变规律, 但无法反映波浪的长期变化特征。鉴于波浪生成机制的不确定性以及海洋动力环境的复杂性, 数值模拟方法的准确性仍有待于进一步检验。相比之下, 基于实测数据的波浪要素统计分析则更适用于揭示局部海区的长期波浪特征。张国友等(2002)依据 1960—1990 年的国际气象船舶报资料, 统计了台湾岛周边海浪场的波高、波向随季节变化的特点。谢辛等(2013)使用 TOPEX 卫星高度计资料探讨了台湾岛周边海域有效波高的概率分布。郑崇伟等(2016)利用逐时浮标测站数据, 以典型月份代表整个季节, 分析了台湾岛附近海域的季节性波候特征。但由于该海区实测波浪资料的匮乏和观测技术的限制, 上述研究主要依据卫星高度计数据和船舶报资料, 这两种资料中的波浪数据分别存在时间分辨率较低和时间同步性不足的局限; 少量浮标测站又只提供基本的波浪统计参数, 缺乏实测波面记录, 导致前人的研究主要集中在波浪的外在统计特征上, 对于谱特性、海浪谱形式、重要特征波参数间的换算关系探讨不足, 特别是关于台湾海峡中部波浪特性的深入研究至今未见报道。

为了了解台湾海峡中部的波浪特性, 本文基于

台湾海峡 2 号大浮标 2017 年全年的实测波面序列以及风数据, 探讨波浪统计特性、重要特征波参数间的换算关系和谱特性, 相关研究成果可为海洋工程设计和航运提供参考, 并有助于波浪模型选择合理的波浪参数。

1 数据介绍与处理方法

1.1 数据介绍

2 号大浮标由福建海洋预报台布设, 位于台湾海峡中部, 其经度、纬度分别为 $119^{\circ}18'00''\text{E}$ 、 $24^{\circ}28'48''\text{N}$ (图 1)。测点水深为 67m, 测点周边 5km 范围内的水深均介于 60~70m 之间。浮标每 0.5h 采集一组波浪数据, 包括实测波面、平均波向, 其中实测波面数据每次采样时长为 1024s, 采样频率为 4Hz, 全年测得的波面记录总数共 17315 组。浮标每 10min 采集一组风数据, 包括 10m 高度最大风速、平均风速、平均风向等。数据时间跨度为 2017 年 1 月 1 日至 2017 年 12 月 31 日。这期间穿过台湾海峡的台风有“海棠”和“纳沙”, 其台风路径见图 1。郑崇伟等(2016)对马祖($120^{\circ}31'12''\text{E}$, $26^{\circ}21'00''\text{N}$)和东沙岛($118^{\circ}49'48''\text{E}$, $21^{\circ}02'24''\text{N}$)的波浪特征进行了分析, 本文将这两个测站的位置也绘在图 1 中, 由于它们分别位于台湾海峡以北和以南的附近海域, 所以适合作为 2 号标的对照测站。下文将简要分析 2 号标、马祖、东沙岛在波浪特征上的差异。

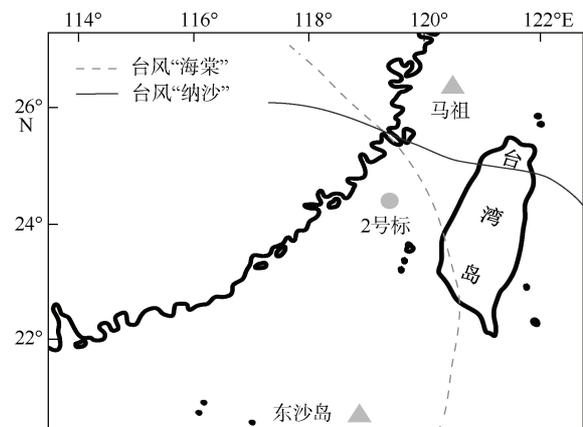


图 1 浮标测站位置及台风路径示意图

该图基于中华人民共和国自然资源部发布的审图号为 GS(2016)1595 的标准地图制作, 底图无修改

1.2 数据处理方法

按照波面连续、无异常突变的原则进行数据质量监控,发现仅有个别波面记录存在异常,对这部分数据予以剔除。基于上跨零点法计算典型特征波要素,包括平均波高 H_{mean} 、平均周期 T_{mean} 、有效波高 $H_{1/3}$ 及其对应周期 $T_{1/3}$ 、前 1/10 大波平均波高 $H_{1/10}$ 及其对应周期 $T_{1/10}$ 、最大单波波高 H_{max} 及其对应周期 T_{max} 等。根据浮标特性,以 0.04Hz 为截止频率对实测波面数据进行滤波,随后对波面离散值应用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)计算得到海浪谱的粗谱,使用移动平均法对海浪谱粗谱作平滑后得到最终的实测海浪谱。将下文要分析的重要谱参数定义如下:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n S(f) df \quad (1)$$

$$H_{m_0} = 4\sqrt{m_0} \quad (2)$$

$$T_{01} = m_0/m_1 \quad (3)$$

$$T_{02} = \sqrt{m_0/m_2} \quad (4)$$

$$\nu = \sqrt{m_0 m_2 / m_1^2 - 1} \quad (5)$$

式中: m_n 指海浪谱的第 n 阶矩(单位: m^2); f 是频率(单位: Hz); $S(f)$ 是海浪谱密度(单位: $\text{m}^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$);

H_{m_0} 是谱计算的有效波高(单位: m); T_{01} 和 T_{02} 分别是 1 阶谱矩和 2 阶谱矩计算的波浪平均周期(单位: s); ν 是谱宽(无量纲),用于表征海浪能量相对于频率的集中程度,谱宽越小,海浪能量则越集中。

2 数据分析与讨论

2.1 年月变化统计

在一年的观测期内,有效波高的变化范围及年均值分别是 0.13~6.8m 和 1.7m,最大波高的变化范围及年均值分别是 0.19~11.3m 和 2.7m,平均周期的变化范围及年均值分别是 3.4~11.8s 和 5.9s,谱峰周期的变化范围及年均值分别是 2.8~11.1s 和 6.7s。全年有效波高极值发生在 2017 年 10 月 14 日 4 时,全年最大波高极值发生在 2017 年 10 月 14 日 2 时,上述两次极端波浪记录均由平均风速达到 $22\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ (9 级)的 NE 向强风引发。

台湾海峡中部的波浪存在显著的月际变化(图 2a、2b)。月均有效波高的变化范围是 0.87~2.98m,7 月最小,12 月最大。4—9 月各月平均有效波高均低于 1.2m,1—2 月及 10—12 月期间各月平均有效波高均大于 2m。最大波高与有效波高有着相近的月际变

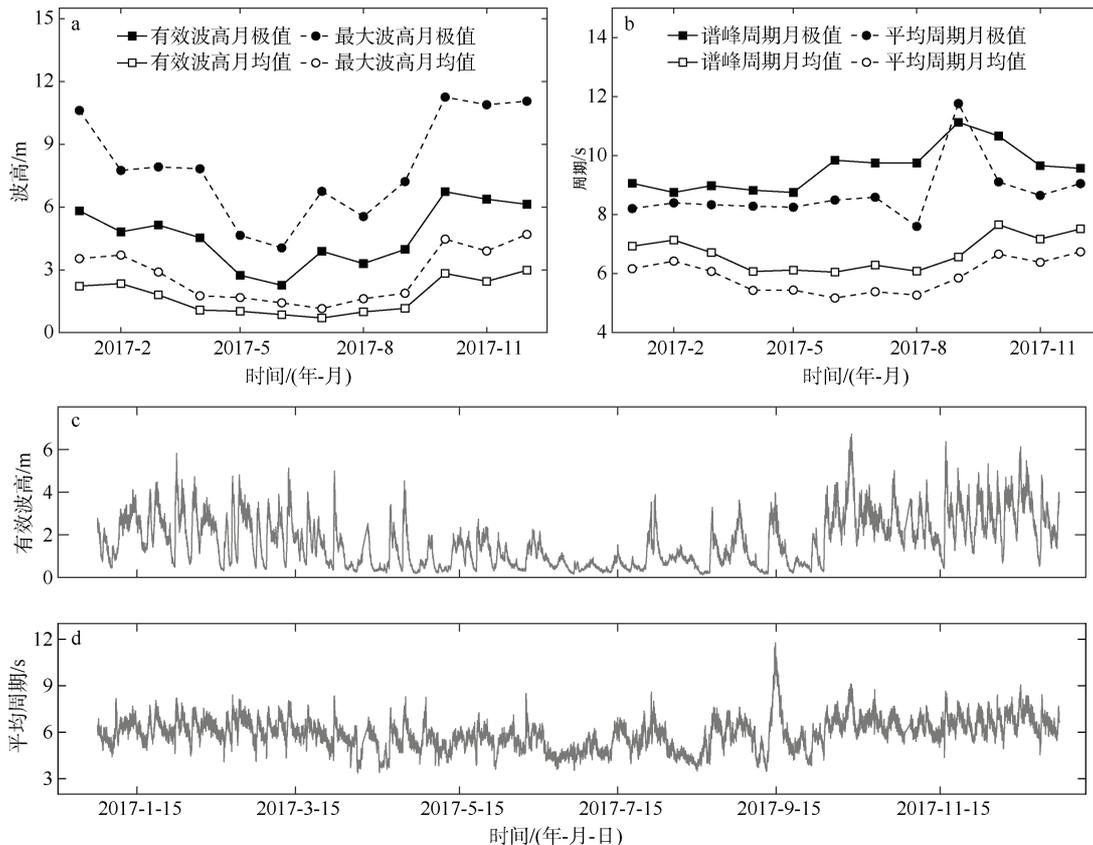


图 2 全年波高(a)、周期(b)的月际变化和有效波高(c)、平均周期(d)的半小时变化

Fig. 2 Monthly variations of wave height (a) and wave period (b), and 30-minute variations of significant wave height (c) and mean wave period (d) in the whole year of 2017

化趋势, 1月、10—12月都存在着最大波高大于10m的极端波浪。从波浪的平均特征来看, 波高大的月份, 其波周期也较大, 各月谱峰周期普遍大于平均周期。针对波浪这种小时间尺度现象, 进一步给出了半小时间隔的有效波高和平均周期过程线, 分别见图2c和图2d。值得注意的是, 2017年9月15日前后, 平均周期陡然增大, 达到了11.8s, 为全年峰值。该时段浮标测点的主导风向是NE向, 但主要波向是WS向, 风向、浪向一致性程度较低, 因此推测9月15日前后平均周期的激增是由南海长周期涌浪的传入所致。

表1统计了2017年各月有效波高的分级构成, 波高分级的标准参考祁祥礼等(2018)的研究: 将有效波高介于0~0.5m、0.5~1.25m、1.25~2.5m、2.5~4m和>4m分别划分为小浪、轻浪、中浪、大浪、巨浪。根据统计结果显示, 全年中浪出现的频率最高, 达到30.5%, 其次是轻浪, 达到27.6%。6—8月台湾海

峡受到西南季风的控制, 期间以中浪及以下的波况为主, 未捕捉到巨浪的出现。10月至次年3月是台湾海峡的东北季风期, 期间各月的主要波况是中浪和大浪。巨浪比例最高的月份是12月, 该月的波况中有16.3%是巨浪, 此外10月也有超过10%的波况是巨浪。

观测期内, 台风过境并未引发巨浪。2017年7月29日17时—7月30日13时, 台风“纳沙”(Nesat)自东向西经过台湾海峡北侧, 2017年7月30日10时—7月31日12时, 台风“海棠”(Haitang)自南向北横穿台湾海峡, 上述起始、终止时间分别对应图1中台风移动路径的起点和终点。两个台风的叠加使测点出现了最高3.6m的有效波高, 属于大浪范畴。根据全年所有巨浪过程发生期间的风特征统计, 巨浪期间的平均风速超过 $17\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 对应的风向集中在N—NE方向, 说明强劲的东北风是造成巨浪的重要因素。

表1 2017年全年及各月各级有效波高频率统计表

Tab. 1 Frequency of yearly and monthly significant wave height by graduation statistics method

	月份												全年
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
小浪频率/%	0.1	0.3	0.5	2.6	2.6	2.1	4.1	1.4	2.1	0.3	0.0	0	16.1
轻浪频率/%	1.6	1.2	2.3	2.5	2.3	4.5	3.5	5.2	3.1	0.4	0.5	0.5	27.6
中浪频率/%	3.4	2.4	3.9	2.0	3.6	1.8	0.6	1.8	2.0	2.5	3.9	2.6	30.5
大浪频率/%	3.2	3.6	1.8	0.6	0.0	0.0	0.3	0.2	1.1	4.3	2.8	4.1	22.0
巨浪频率/%	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.4	1.4	3.8

表2展示了2号标、马祖和东沙岛的波参数对比情况。马祖、东沙岛的波参数来源于郑崇伟等(2016)的研究, 2号标的波参数则由本文分析得到。此处参考郑崇伟等(2016)的方法, 以2月、5月、8月、11月作为典型月份, 分别代表冬、春、夏、秋四个季节。可以看出3个测站的波高具有春、夏小, 秋、冬大的共性, 这是因为3个测站都地处亚热带季风气候区, 受东北季风和西南季风的交替控制, 具有相似的气候特点。同时, 不同测站之间又存在着一定的季节性差异: 春、夏季节, 2号标的有效波高、大浪频率在3个测站中都是最小的; 秋、冬季节, 2号标的有效波高

和大浪频率都大于马祖。究其原因, 2号标位于台湾海峡中部, 受到台湾岛的遮蔽作用, 而马祖和东沙岛位于台湾海峡两端开阔的海面上, 容易受到外海波浪的影响, 所以春、夏季2号标的波高和大浪频率都小于马祖和东沙岛。在秋、冬季, 冷空气频繁南下, “狭管效应”又进一步加强了台湾海峡内气流的强度, 因此2号标的波高和大浪频率都大于马祖。东沙岛的水深达3000m, 远远大于2号标(67m)和马祖(58m), 十分利于大浪的形成和发展, 这是东沙岛整体波高最大的重要原因。此外, 3个测站均服从波高大的月份, 其波周期也较大这一规律。

表2 台湾海峡中部、以北、以南3个测站的波参数对比

Tab. 2 Comparison of wave parameters at three stations located in central Taiwan Strait, north of Taiwan Strait and south of Taiwan Strait

位置	测站	月均有效波高/m				月均平均周期/s				大浪频率/%			
		2月	5月	8月	11月	2月	5月	8月	11月	2月	5月	8月	11月
海峡以北	马祖	2.1	1.3	1.3	2.0	5.6	5.2	5.1	5.3	26	6	14	25
海峡中部	2号标	2.3	1.0	1.0	2.5	6.4	5.4	5.3	6.4	50	0	2	48
海峡以南	东沙岛	2	1.2	1.6	2.6	5.9	5.1	5.6	6.1	26	6	18	58

2.2 风浪关系

图3为2号标2017年全年风浪玫瑰图。图3a表明观测点全年的浪向集中分布在NE和WS向,其中常浪向是NE向,对应频率为48.6%,次常浪向是SSW向,对应频率为18.5%。图3b反映出风向的分布与浪向较为一致。图3c揭示全年的强浪向是NNE向,强风向是NE向,NE向的极端波高和极大风速都显著大于WS向。图3d显示NE向的平均有效波高和平均风

速也明显大于WS向。需要注意的是,图3c和图3d中的波高线在N向上都出现断档,是因为观测期内未能观测到正北向的波浪。此外,受限于台湾海峡的特殊地形走向,WSW、W、WNW、NW、NNW这5个偏西或偏北的方向上观测到的来波次数均介于1~4之间。为反映真实情况,玫瑰图中也统计了这些偶然浪向的波浪特征,但由于组次过少,导致这些方向上最大波高、平均有效波高的计算存在较大的偶然误差。

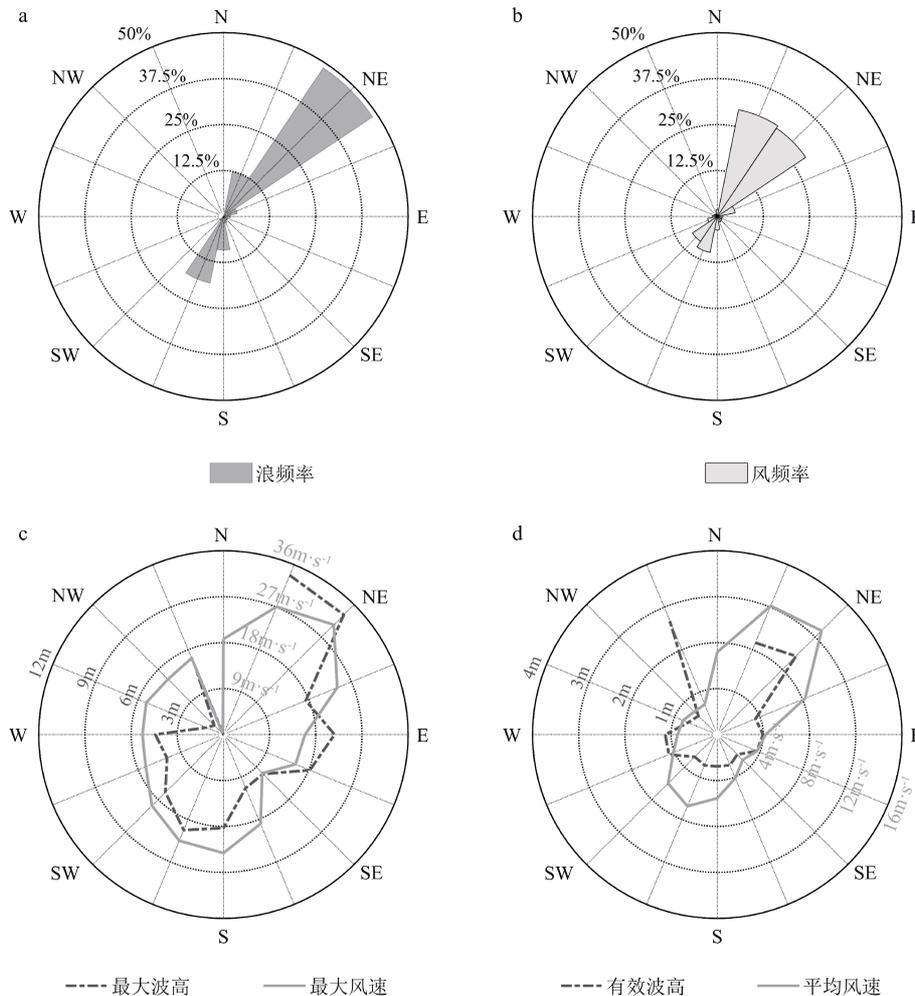


图3 2号标2017年全年风浪玫瑰图

a. 浪向频率玫瑰图; b. 风向频率玫瑰图; c. 最大波高、最大风速玫瑰图; d. 平均有效波高、平均十分钟风速玫瑰图

Fig. 3 The whole year rose chart of wave and wind. a) Frequency of wave direction; b) frequency of wind frequency; c) maximum wave height and maximum wind speed; d) mean significant wave height and mean 10-minute wind speed

为了进一步衡量风、浪之间的关系,图4a对比了各月的平均浪向和平均风向,发现两者吻合程度较高,而且东北季风期间风向、浪向的一致性明显高于西南季风期。风速和波高之间也存在相关关系,如图4b所示,全年的有效波高 $H_{1/3}$ 与10m高度风速 U_{10} 总体上呈正相关。利用最小二乘法对 $H_{1/3}$ 和 U_{10} 之间的关系进行拟合,相关系数 r 达到0.89,且通过了置信度99%的显著性检

验,说明本区的波高和风速具有较强的线性关系。一般而言,风大则浪大,风小则浪小。冯卫兵等(2009)在描述江苏如东的风浪关系时采用的指数关系形式为 $H_{1/3} = \alpha U_{10}^\beta + \gamma$,式中 α 、 β 、 γ 均是待拟合参数。本文也使用该指数关系形式来拟合2号标2017年的 $H_{1/3}$ 、 U_{10} 数据,得到的指数拟合曲线的 r 达到了0.92,因此比线性拟合效果更佳(图4b)。

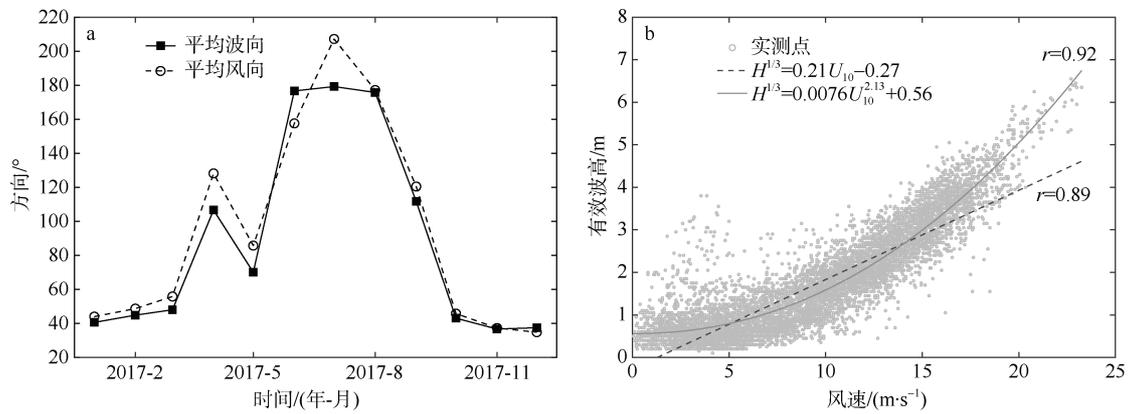


图4 月均波向与月均风向对比图(a)和有效波高与风速散点图(b)

Fig. 4 Comparison of monthly mean direction of wave and wind (a), and scatter diagram of $H_{1/3}$ and U_{10} (b)

综上可推测本区的波浪以风浪为主。为了验证这一判断,有必要从实测混合浪数据中分离出风浪和涌浪并进行对比。Gerling(1992)提出的“2D法”是目前被公认为最合理准确的风浪、涌浪分离方法(李水清等, 2012), 而林伊楠等(2019)利用“2D法”的分离结果作标定, 又提出了一种适用于台湾海峡的风浪、涌浪分离方法。本文采用林伊楠等(2019)提出的方法对本测站的波浪实施风浪、涌浪分离。分离结果显示: 超过 80% 的时间同时存在着有效波高均大于 0.2m 的风浪和涌浪; 风浪波高显著大于涌浪波高, 而周期则相反; 风浪和涌浪的平均有效波高分别为 1.6m、0.6m, 风浪和涌浪的平均周期分别为 5.4s、9.5s。这一结果表明台湾海峡风浪与涌浪并存, 且以风浪为主导。

2.3 波浪参数拟合

最大波高 H_{max} 、有效波高 $H_{1/3}$ 、 H_{m_0} 是重要的设计波浪参数。Longuet-Higgins(1952)指出在深水区 $H_{max}/H_{1/3}$ 的理论值为 1.53, 在本测站该比值的统计结果为 1.55, 较接近于理论值。基于瑞利分布和窄谱假定, 可推算出深水纯风浪的 $H_{m_0}/\sqrt{m_0}$ 为 4.0, 但实际波浪不满足窄谱的条件。Goda(1979)通过实测波浪资料分析, 提出对于以风浪为主的深水波浪, $H_{m_0}/\sqrt{m_0}$ 更接近于 3.8。本文统计得到的 $H_{1/3}/\sqrt{m_0}$ 为 3.82, 与 Goda(1979)给出的比值相近, 符合深水风浪的特征。

不同的海洋工程在设计时常参考不同的周期参数, 因此各特征波周期之间的转换关系具有重要价值(黄必桂等, 2016)。分析实测特征波周期之间的对应关系, 发现平均周期 T_{mean} 与基于波面统计的 $T_{1/3}$ 、 $T_{1/10}$ 和基于谱计算的平均周期 T_{01} 、 T_{02} 具有良好的线性相关性, 相关系数分别达到 0.97、0.95、

0.99 和 0.99, 对应的拟合公式分别为 $T_{1/3} = 1.128T_{mean}$ 、 $T_{1/10} = 1.127T_{mean}$ 、 $T_{01} = 1.305T_{mean}$ 、 $T_{02} = 0.986T_{mean}$ 。与上述特征波周期相比, 谱峰周期 T_p 和最大波高对应周期 T_{max} 与 T_{mean} 之间的相关性略低, 相关系数分别为 0.85 和 0.83, 相应的拟合公式为 $T_p = 1.136T_{mean}$ 、 $T_{max} = 1.114T_{mean}$ 。这是由于 T_{mean} 具有平均性质, 而 T_{max} 属于单个波周期, T_p 是与单点(谱峰值点)相对应的周期, 后两者都具有较强的不确定性。

波高和周期之间也存在着转化关系, 其中 $H_{1/3}$ 与 $T_{1/3}$ 间的相关关系常常是海岸工程较为关注的。在描述波高与周期之间的相关关系时, 学者们常使用线性关系(杨斌等, 2018)和指数关系(冯兴如等, 2018)。本文分别利用线性关系 $T_{1/3} = \alpha H_{1/3} + \beta$ 和指数关系 $T_{1/3} = \alpha H_{1/3}^\beta$ (α 和 β 均为待拟合参数)来拟合本测站的全部 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ 数据, 得到的两条拟合线见图 5a。图中的 r 代表相应拟合线给出的 $T_{1/3}$ 预测值与 $T_{1/3}$ 实际值之间的相关系数, 其中线性拟合的 r 为 0.73, 指数拟合的 r 为 0.7, 说明 $H_{1/3}$ 与 $T_{1/3}$ 之间更符合线性关系。但即使是效果更佳的线性拟合, 其拟合精度也不算高, 这是因为不同方向的波浪具有不同性质, 很难用同一条拟合曲线去概括不同方向上的 $H_{1/3}$ 与 $T_{1/3}$ 关系。因此, 图 5b 中将波浪分成 16 个方向, 分别计算不同方向上 $H_{1/3}$ 与 $T_{1/3}$ 的线性相关系数。其中, 偏西北方向(WSW—N)由于波浪组次较少, 计算的偶然误差大, 故忽略。其他方向中, NNE 方向上的相关系数最大, 达到 0.89; 其次 NE、E、ESE 方向上的相关性也较高, 相关系数都在 0.8 上下浮动; 仅有 WS 方向的 $H_{1/3}$ 与 $T_{1/3}$ 相关系数低于 0.4, 且未通过置信度 99% 的显著性检验。

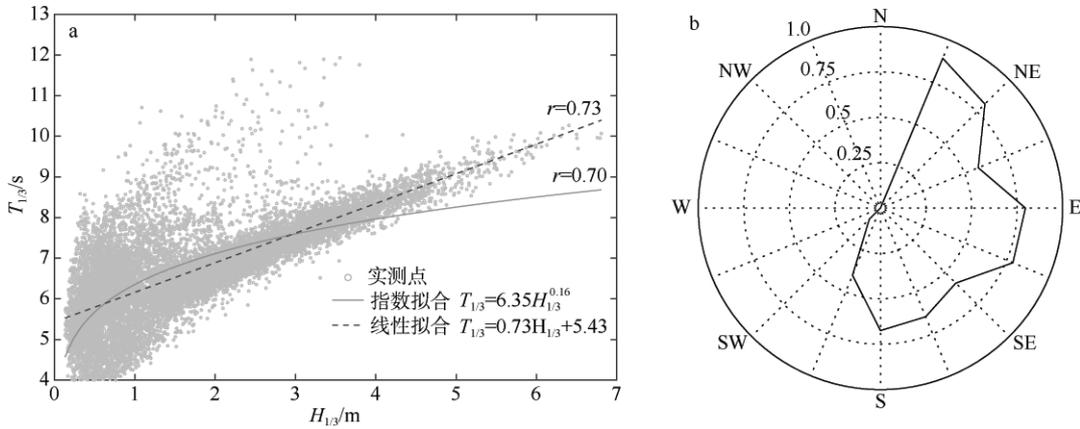


图 5 $H_{1/3}$ 与 $T_{1/3}$ 的回归关系(a)及 $H_{1/3}$ 与 $T_{1/3}$ 相关性玫瑰图(b)

Fig. 5 Regression relationship between $H_{1/3}$ and $T_{1/3}$ (a), and rose chart of their correlation coefficient (b)

2.4 谱特性

海浪谱能够反映海浪的内部结构, 可以推算各类波要素并且反映波浪荷载对海上结构物的动力作用, 在海浪模拟与预报、海岸泥沙运动及海洋工程设计中都得到了广泛的应用, 因此海浪谱特性的分析和谱形的拟合具有重要意义。

观测期内谱峰周期的众值出现在 7s 附近, 其频率分布由众值向两端递减, 介于 6~8s 的占 60.0%, 小于 3.5s 或大于 10s 的情形极少。海浪谱峰值的分布范围较广, 从 $0.0076\text{m}^2\cdot\text{Hz}^{-1}$ 到 $59.12\text{m}^2\cdot\text{Hz}^{-1}$, 平均值为 $4.24\text{m}^2\cdot\text{Hz}^{-1}$ 。谱宽 ν 分布在 0.20 到 0.54 之间, 均值为 0.31, 各月平均谱宽较为稳定, 在 0.29~0.33 之间波动。

海浪谱形以单峰为主, 占总数的 90.7%, 双峰和多峰分别占 8.4% 和 0.9%。总体上东北季风越为强盛, 单峰谱比例越高。双峰谱中, 高频峰一般出现在 0.18~0.24Hz 之间, 低频峰常出现在 0.11~0.16 Hz 之间, 高频峰峰值大于低频峰峰值的情形约占一半。6 月出现双峰或多峰的概率最高, 为 25.5%; 2 月出现频率最低, 为 0.06%。

由于海浪的随机性和复杂性, 所以实测得到的海浪观测谱一般是分散的, 大小、形状各异。为了总结海浪谱的共性, 需确定具有代表性的海浪谱形式, 通常的做法是选择经典的海浪谱模式对实测谱进行拟合分析。前文分析表明, 观测海区以深水风浪为主, 因此适合采用 Jonswap 谱(Hasselmann et al, 1973)(以下简称“J 谱”)和深水条件下的规范谱一(中华人民共和国交通运输部, 2015)对实测谱进行拟合。J 谱是海浪学界广泛使用的经典海浪谱模式, (适用于有限风区的风浪)规范谱一由文圣常院士提出, 经过中国海实测波浪资料的系统检验。本文将

分别按 J 谱和规范谱一的形式去拟合实测谱, 并比较两种谱形在台湾海峡的适用性。

J 谱的形式如下:

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

式中: α 是无量纲系数; g 是重力加速度; f 是频率; f_p 是谱峰频率; γ 是谱峰升高因子, 取值范围介于 1.0~7.0; λ 是峰形参数, 当 $f \leq f_p$ 时, $\lambda=0.07$, 当 $f > f_p$ 时, $\lambda=0.09$ 。

适用于深水的规范谱一形式如下:

当 $0 < f \leq 1.15f_p$ 时,

$$S(f) = \frac{m_0 P}{f_p} \exp\left\{-95 \left[\ln \frac{P}{1.522 - 0.245P + 0.00292P^2} \right] \left(\frac{f}{f_p} - 1 \right)^{12/5} \right\} \quad (7)$$

当 $f > 1.15f_p$ 时,

$$S(f) = 1.749m_0 f_p^3 (1.522 - 0.245P + 0.00292P^2) / f^4 \quad (8)$$

$$P = f_p S(f_p) / m_0 \quad (9)$$

式中: m_0 是海浪谱零阶矩; P 是谱尖度因子, 满足 $1.54 \leq P \leq 6.77$ 。

由于 J 谱的无量纲系数 α 和谱峰升高因子 γ 、规范谱一的谱尖度因子 P 是谱形参数, 会随着谱的大小、形状不同而变化。如果仅仅根据拟合结果来给出 α 、 γ 、 P 的某个统计量并作为代表值, 就无法反映海浪谱的复杂动态变化, 这对准确地确定海浪谱是不利的。可行的办法是分析 α 、 γ 、 P 与常见特征波要素如有效波高 $H_{1/3}$ 、谱峰周期 T_p 等

之间的关系, 将海浪谱与常见的特征波要素建立联系后, 只需给定 $H_{1/3}$ 、 T_p 即可完全确定海浪谱, 从而提升谱的易用性, 且得到的海浪谱会随着波浪参数的变化而变化。回归分析给出 α 、 γ 、 P 的拟合式如下:

$$\alpha = 0.02H_{1/3}^{2.05}T_p^{-4} \quad (10)$$

$$\gamma = 7.05H_{1/3}^{0.12}T_p^{-0.86} \quad (11)$$

$$P = 3.86H_{1/3}^{0.06}T_p^{-0.38} \quad (12)$$

由前文的波浪参数统计结果可知:

$$m_0 = (H_{1/3}/3.82)^2 \quad (13)$$

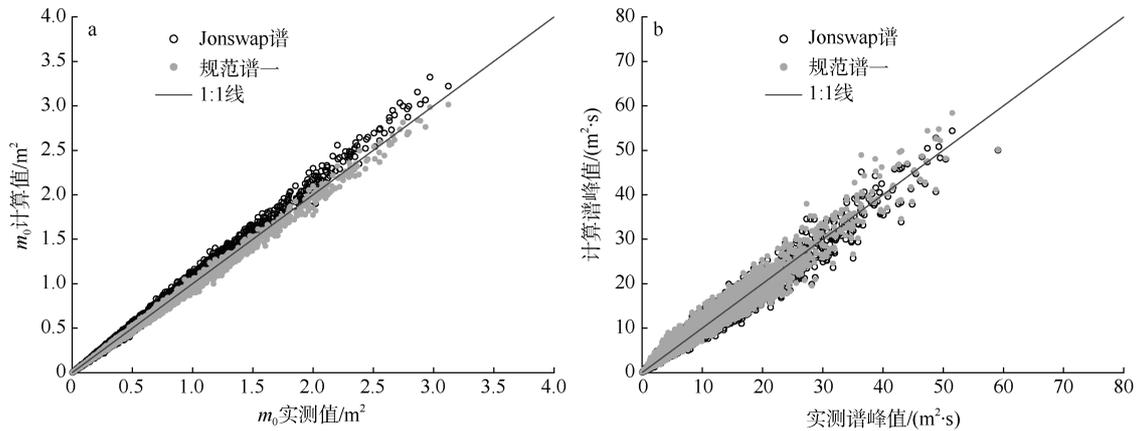


图 6 基于 Jonswap 谱、规范谱一计算的零阶矩 m_0 (a) 和谱峰值 (b) 与真实值对比

Fig. 6 Contrast between the zero moment m_0 (a) and spectral peak period (b) calculated from Jonswap spectrum and Code spectrum 1, and the corresponding measured values

经统计, 就零阶矩 m_0 而言, J 谱和规范谱一的平均偏差指数分别为 5.2%、3.5%, 就谱峰值而言, J 谱和规范谱一的平均偏差指数分别为 9.5%、9.8%, 说明规范谱一的综合拟合效果略优于 J 谱。

杨斌等(2017)采用了规范谱一拟合了杭州湾的实测海浪谱, 与其计算结果对比后发现, 本研究中 m_0 、谱峰值这两个谱参数的模拟误差更小, 说明规范谱一更适合于描述本海域的海浪谱。Feng 等(2012)在研究江苏近海的海浪谱模式时, 为了得到典型的风浪谱, 只选用了均方波高大于 0.5m 的波浪组次进行拟合分析。而本文在拟合海浪谱时考虑了波高较小的波浪, 是因为波高小的波浪也可能有较大的波周期, 从而容易与海上浮式结构物发生共振, 带来船舶定位困难、海洋平台被破坏的风险(Tao et al, 2017)。上文已指出观测点存在小波高、长周期的涌浪, 因此考虑小波高浪的影响是有实际意义的。

将式(10)、(11)代入式(6)中, 可得到 J 谱形式的拟合谱, 将式(12)、(13)代入式(7)、(8)中, 可得到规范谱一形式的拟合谱。图 6 对比了两种形式的拟合谱所给出的谱参数模拟值和基于实测谱计算的真实值, 总体上吻合度较高, 说明两种模式的拟合谱均能较好地代表实测海浪谱。

按式(14)定义偏差指数(deviation index, DI), 以量化拟合效果:

$$DI = \left| \frac{y - \hat{y}}{y} \right| \times 100\% \quad (14)$$

式中: y 是实测值; \hat{y} 是模拟值。

3 结论

1) 台湾海峡中部海域波高总体较大, 平均有效波高为 1.7m, 波浪的月际变化显著, 月均有效波高的变化范围是 0.87~2.98m, 波高大的月份波周期也较大。浪向集中在北东和西南方向, 北东方向的波高显著大于西南方向, 全年风向、浪向的一致性较高, 而且东北季风期内风向、浪向的一致性明显高于西南季风期。

2) 单峰型海浪谱占总数的 90.7%, 主要波浪类型是风浪主导的混合浪, 大浪主要由台风和强劲的东北季风引起, 波高与风速具有较强的线性相关性。

3) H_{\max} 与 $H_{1/3}$ 的比值为 1.55, $H_{1/3}$ 与 $\sqrt{m_0}$ 的比值为 3.82, 平均周期与大部分实测特征波周期之间具有良好的线性关系, NNE—NE 方向的波浪有效波高和有效波周期线性相关性较强。

4) Jonswap 谱和深水条件下的规范谱一均能较好地拟合台湾海峡中部海域的实测海浪谱, 其中规范谱一与实际海浪吻合程度更高。分析两种谱模

式中不易确定的谱形参数与有效波高、谱峰周期等重要特征波要素间的转换关系, 可提高海浪谱的实用性。

参考文献 References

- 陈剑桥, 2018. 三种典型路径下的台湾海峡台风浪特征研究[J]. 海洋预报, 35(6): 1–12. CHEN JIANQIAO, 2018. Study on the characteristics of typhoon waves under three typical paths in Taiwan Strait[J]. Marine Forecasts, 35(6): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- 冯卫兵, 彭向丽, 张少兰, 2009. 南黄海近岸海域风浪统计分析[C]//第十四届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 呼和浩特: 中国海洋工程学会 (in Chinese).
- 冯兴如, 李近元, 尹宝树, 等, 2018. 海南岛近岸海域海浪观测特征研究[J]. 热带海洋学报, 37(3): 1–8. FENG XINGRU, LI JINYUAN, YIN BAOSHU, et al, 2018. Characteristics of ocean waves in coastal area of Dongfang, Hainan Island based on observations[J]. Journal of Tropical Oceanography, 37(3): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- 郭婷婷, 高文洋, 高艺, 等, 2010. 台湾海峡气候特点分析[J]. 海洋预报, 27(1): 53–58. GUO TINGTING, GAO WENYANG, GAO YI, 2010. An analysis of the climate characteristics for Taiwan Strait[J]. Marine Forecasts, 27(1): 53–58 (in Chinese with English abstract).
- 黄必桂, 石新刚, 谢波涛, 等, 2016. 基于实测资料的南海海浪周期关系研究[J]. 海洋学研究, 34(3): 6–10. HUANG BIGUI, SHI XINGANG, XIE BOTAO, et al, 2016. Study on the relationships of ocean wave periods in the South China Sea based on the observed data[J]. Journal of Marine Sciences, 34(3): 6–10 (in Chinese with English abstract).
- 李水清, 赵栋梁, 2012. 风浪和涌浪分离方法的比较[J]. 海洋学报, 34(2): 23–29. LI SHUIQING, ZHAO DONGLIANG, 2012. Comparisons on partitioning techniques to identify wind-wave and swell[J]. Acta Oceanologica Sinica, 34(2): 23–29 (in Chinese with English abstract).
- 林伊楠, 陶爱峰, 李雪丁, 等, 2019. 台湾海峡风涌浪分离方法研究[J]. 海洋学报, 41(11): 25–34. LIN YI'NAN, TAO AIFENG, LI XUEDING, et al, 2019. Study on separation method of wind-wave and swell in the Taiwan Strait[J]. Acta Oceanologica Sinica, 41(11): 25–34 (in Chinese with English abstract).
- 祁祥礼, 郑向阳, 谌业良, 2018. 渤海湾中部波浪特征分析[J]. 水道港口, 39(3): 288–293. QI XIANGLI, ZHENG XIANGYANG, SHEN YELIANG, 2018. Analysis of wave characteristic in the middle part of the Bohai Bay[J]. Journal of Waterway and Harbor, 39(3): 288–293 (in Chinese with English abstract).
- 谢辛, 李燕初, 阮海林, 等, 2013. 基于 T/P 卫星高度计资料的台湾岛周边海域风浪的分布和时间变化特征[J]. 应用海洋学学报, 32(1): 102–107. XIE XIN, LI YANCHU, RUAN HAILIN, et al, 2013. Characteristic and temporal variations of the wind wave fields over the adjacent waters of Taiwan island based on T/P satellite altimeter data[J]. Journal of Applied Oceanography, 32(1): 102–107 (in Chinese with English abstract).
- 杨斌, 张俊彪, 叶钦, 等, 2017. 杭州湾中部实测波谱特性分析[C]//第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 舟山: 中国海洋工程学会 (in Chinese).
- 杨斌, 杨忠良, 叶钦, 等, 2018. 杭州湾中部实测波浪特性分析[J]. 海洋工程, 36(3): 96–103. YANG BIN, YANG ZHONGLIANG, YE QIN, et al, 2018. Analysis on wave characteristics of central Hangzhou Bay[J]. The Ocean Engineering, 36(3): 96–103 (in Chinese with English abstract).
- 袁凯瑞, 商少平, 谢燕双, 等, 2014. 台湾海峡台风浪的数值模拟[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 53(3): 413–417. YUAN KAIRUI, SHANG SHAOPING, XIE YANSHUANG, et al, 2014. The simulation of typhoon waves in Taiwan Strait[J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 53(3): 413–417 (in Chinese with English abstract).
- 张国友, 张绪东, 俞慕耕, 2002. 台湾海区的风浪特点及分布规律[J]. 海洋通报, 21(1): 23–30. ZHANG GUOYOU, ZHANG XUDONG, YU MUGENG, 2002. Characteristics and distribution pattern of wind and wave in sea area of Taiwan[J]. Marine Science Bulletin, 21(1): 23–30 (in Chinese with English abstract).
- 郑崇伟, 陈璇, 李崇银, 2016. 台湾岛周边海域的波候观测[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 17(5): 473–479. ZHENG CHONGWEI, CHEN XUAN, LI CHONGYIN, 2016. Observation of wave climate in surrounding waters of Taiwan Island[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 17(5): 473–479 (in Chinese with English abstract).
- 中华人民共和国交通运输部, 2015. JTS 145–2015 港口与航道水文规范[S]. 北京: 人民交通出版社: 30–31. Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2015. JTS 145–2015 Code of hydrology for harbour and waterway[S]. Beijing: People's Communications Press: 30–31 (in Chinese).
- FENG WEIBIN, YANG BIN, CAO HAIJING, et al, 2012. Study on wave spectra in south coastal waters of Jiangsu[J]. Applied Mechanics and Materials, 212–213: 193–200.
- GERLING T W, 1992. Partitioning sequences and arrays of directional ocean wave spectra into component wave systems[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 9(4): 444–458.
- GODA Y, 1979. A review on statistical interpretation of wave data[J]. Report of the Port and Harbour Research Institute, 18(1): 5–32.
- HASSELMANN K, OLBERS D, 1973. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)[J]. Ergänzung zur Deutsches Hydrographisches Institut, A(8): 1–95.
- LONGUET-HIGGINS M S, 1952. On the statistical distribution of the heights of sea waves[J]. Journal of Marine Research, 11(3): 245–266.
- TAO AIFENG, YAN JIN, PEI YE, et al, 2017. Swells of the East China Sea[J]. Journal of Ocean University of China, 16(4): 674–682.