

南海北部夏季定点实测波浪统计分析

卢 燕^{1,2}, 王冠琳^{1,2*}, 王道龙^{1,2}, 王新怡^{1,2}

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘 要:由于波浪要素的变化对海洋工程设施选址、海上作业和安全生产等工作具有重要的参考价值,故对实测波浪数据进行科学的分析是极为重要的。根据南海北部观测站现场实测资料,分析了 1997 年 6 月至 8 月(夏季)该站附近的波浪特征,并着重分析了 9710 号(VICTOR)台风过境波浪特性及波浪谱拟合。为给海洋工程建设提供必要的参考,详细解析了观测期间有效波高按方向出现的频率、平均有效波高和最大有效波高的玫瑰图以及波高、周期联合分布表和波高、波向联合分布表等。统计结果表明,观测期间波浪最大平均有效波高 2.77 m,最大有效波高 10.66 m,其主波向 S,最大平均谱峰周期(T_p)7.9 s;由于台风的影响,这些特征值都发生在 1997 年 8 月;并特别指出,9710 号台风期间的波浪以风浪为主导,占比 64%,台风浪最大有效波高 10.66 m,主波向 S,谱峰周期 10.77 s。经波浪谱分析认为,本观测台风过境期间有效波高高于 8 m 的波浪谱,可使用波浪 JONSWAP 谱解析。

关键词:南海北部;波浪要素特征;9710 号台风;JONSWAP 谱

中图分类号:P731.22

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2020)03-0213-11

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2020.03.007

引用格式:LU Y, WANG G L, WANG D L, et al. Statistical analysis of the waves measured at fixed points in the northern South China Sea in summer[J]. Coastal Engineering, 2020, 39(3): 213-223. 卢燕, 王冠琳, 王道龙, 等. 南海北部夏季定点实测波浪统计分析[J]. 海岸工程, 2020, 39(3): 213-223.

中国南海是一个半封闭的深海盆,平均水深约 1 212 m,最大水深约 5 567 m。南海北部经台湾海峡和东海与太平洋相连。其夏季 5 月至 9 月盛行西南季风,同时是台风频发期,故海上实测资料尤为珍贵。南海北部是我国海上石油经济热门地区之一。由于波浪要素的变化对海洋工程设施选址、海上作业和安全生产等具有重要的参考价值,故对实测波浪数据进行科学的分析是极为重要的。本文使用 1997 年南海北部现场实测数据,分析了 1997 年 6 月至 8 月时间段内的包括有效波高、波向、谱峰周期及跨零周期、谱峰波向散布、波面方差等在内的主要波浪参数,并给出其变化规律。同时,对波级、大波最大历时长、波谱峰周期及最大历时长、有效波高和主波向、有效波高和谱峰周期(T_p)联合分布进行统计分析。本文基于现场实测资料得到一系列分析结果,旨在为该海区的海洋工程作业提供有效参考。

1 数 据

1.1 观测数据状况

1997-04-01—10-15 自然资源部第一海洋研究所于南海北部平均水深 100 m 左右的观测站点(114°58'33.24"E, 21°16'16.91"N)(图 1)进行了海洋水文气象定点连续观测,获得了夏季波浪数据。观测仪器为当时较为先进的 SeaPac 2100 方向波浪潮流仪,详细技术指标见表 1。

收稿日期:2020-03-31

资助项目:国家重点研发计划项目——大气海洋动力环境精细化预报海流子系统(2017YFC1404203)

作者简介:卢 燕(1962-),女,高级工程师,主要从事海洋数据分析方面研究. E-mail: luy@fio.org.cn

* 通讯作者:王冠琳(1981-),男,高级工程师,博士,主要从事海洋调查技术方面研究. E-mail: wanggl@fio.org.cn

(王佳实 编辑)

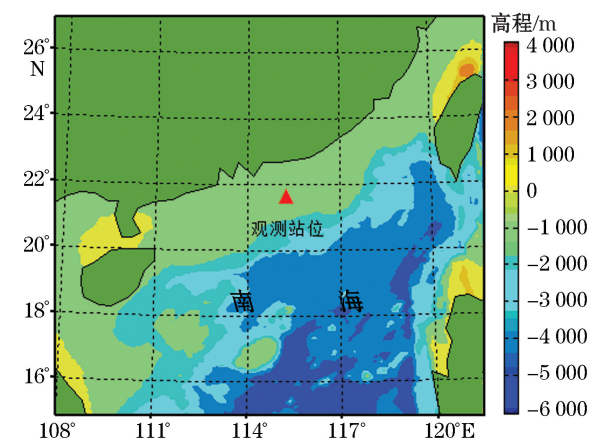


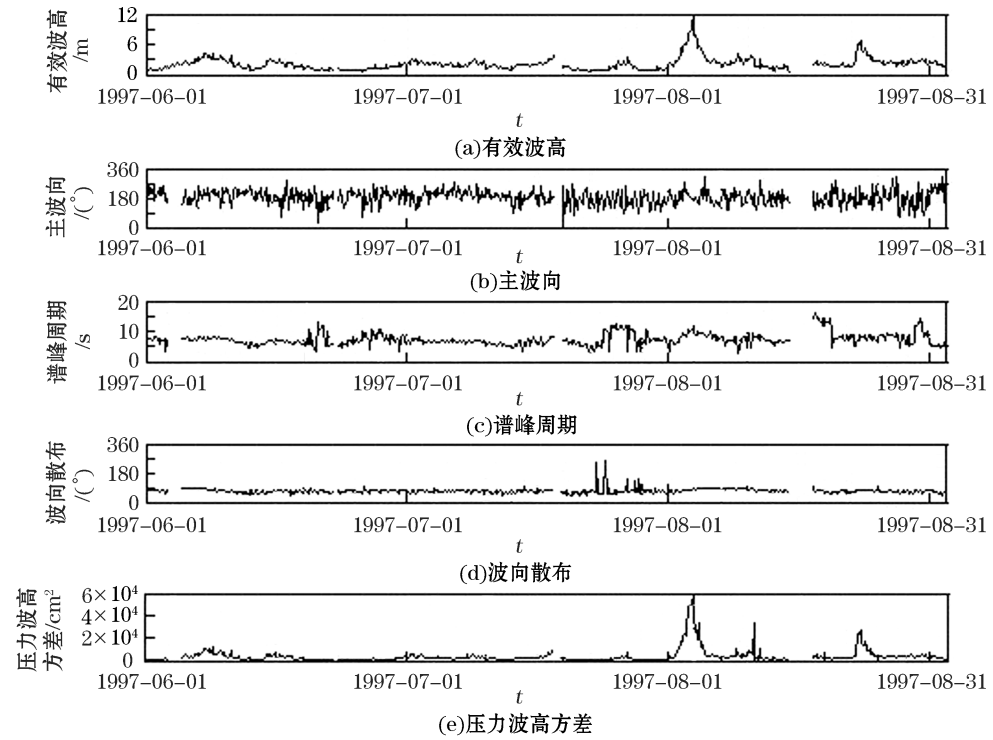
图 1 观测站位置(红色三角)
Fig.1 Location of observation station (red triangle)

表 1 SeaPac 2100 方向波浪潮流仪技术指标			
Table 1 Specifications of SeaPac 2100 wave and current gauge			
要素	范围	精度	准确度
流速/(cm·s ⁻¹)	0~300	<2(或 2%)	0.15
流向/(°)	0~360	±0.5	±0.1
压力/Psi	0~100	0.015%	0.001 5
温度/℃	0~35	±0.1	0.01

1.2 波浪实测数据

SeaPac 2100 仪器位于水下 7 m 处。每 3 h 观测一次,每次采样 0.3 h,采样间隔 0.5 s,观测要素包括:有效波高(H)、主波向、谱峰周期及跨零周期和波浪谱。对实测数据进行质量控制,将由于设备提出海面读取实测数据等工作缺测部分以 NAN 补充,不参加统计和绘图,确保统计数据真实可靠。

利用 Wave Pro 软件处理 SeaPac 2100 方向波浪仪的数据,用以提供动力波压力(P)、水平流速(V_e 、 V_n)以及方位(C)等要素。其运用自相关和交叉谱,基于 Grosskopf 等^[1]及 Longuet 等^[2]提出的方法根据上述要素计算出方向谱。经过估算,得到海浪的有效波高、波向、谱峰周期及跨零周期、谱峰波向散布和波面方差等 10 多个主要要素。图 2 给出了 1997-06-01—08-31 海浪的有效波高、波向、谱峰周期和方向散布及压力计算的波面方差的时间序列。



注:实测数据不连续,空白处为数据缺测

图 2 有效波高、主波向、谱峰周期、波向散布和波面方差的时间序列
Fig.2 Time series diagram of the effective wave height, the major wave direction, the peak spectral period, the wave-direction diffusion and the wave front variance

由图 2 可见,1997 年 6 月有 2 次弱浪过程:第 1 次发生于 1997-06-06—11,记录最大有效波高达 4.32 m,方向 SW,谱峰周期 7.5 s;第 2 次发生 1997-06-15—18,最大有效波高为 3.04 m,方向为 S,谱峰周期为 6.7 s。本月平均有效波高 1.77 m,平均谱峰周期 7.0 s,最大谱峰周期为 12.8 s,常浪向为 SSW,频率为 26.3%,次常浪向为 SW,频率为 18.8%;强浪向与此常浪向一致。

1997 年 7 月有 2 次弱浪过程:第 1 次发生于 1997-07-16—18,最大有效波高达 3.66 m,方向 S,谱峰周期 8 s;第 2 次发生于 1997-07-25—27,最大有效波高为 3.59 m,方向 S,谱峰周期 3.6 s。月平均有效波高 1.77 m,平均谱峰周期 6.8 s,最大谱峰周期为 11.6 s,常浪向为 SSW、S,频率皆为 21.7%,次常浪向为 SW,频率为 17.1%;强浪向为 S,2 次弱浪过程都发生在 S 向。

1997 年 8 月有 2 次台风过程经过测点,由图 2 可见,2 次台风所引起的波浪变化规律:第 1 次台风发生于 1997-07-31—08-04,最大有效波高达 10.66 m,方向 S,谱峰周期 10.77 s;2 次台风过程发生于 1997-08-21—23,最大有效波高为 6.57 m,方向 S,谱峰周期 8.5 s。月平均有效波高 2.77 m,平均谱峰周期 8.3 s,最大谱峰周期为 16 s,常浪向为 SSW,频率为 19.5%,次常浪向为 S,频率为 19.0%;强浪向为 S。

2 波浪统计分析

本次波浪资料统计采用 1997 年 6 月至 8 月共 3 个月的实测数据。期间因设备更换电池等导致的缺测以 NaN 填充。实际使用 736 组数据,资料覆盖率达 93.7%。本文依照《海洋调查规范:第 2 部分 海洋水文观测》(GB/T 12763.2—2007)进行波浪要素资料处理并统计分析。其中 1997 年 8 月有 2 次台风路径经过本观测点附近,其中 1997-07-31—08-04 的 9710 号台风特征较为明显。由图 3 可见,9710 号和 9713 号台风路径及观测站位,由于波级、大波最大历时长度、波谱峰周期及最大历时长度、有效波高和主波向、有效波高和谱峰周期波浪要素对海洋工程设施选址以及实际工程海上作业条件分析具有重要意义,所以对波级、大波最大历时长度等波浪要素进行了联合分布进行统计分析。

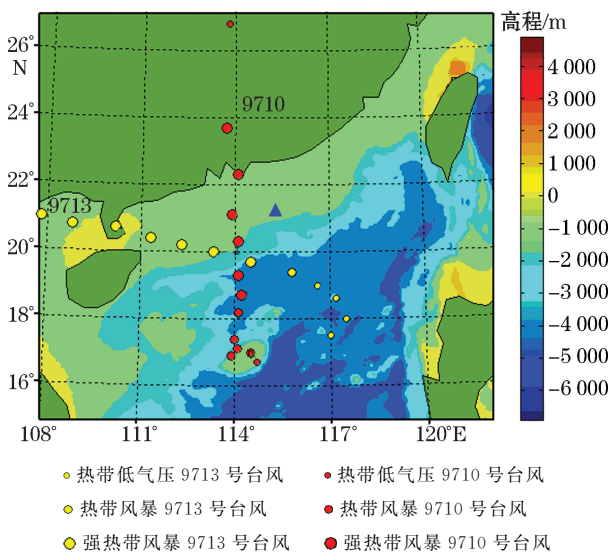


图 3 9713 号和 9710 号台风路径
Fig.3 Typhoon tracks of No. 9710 and No. 9713

2.1 波级统计

我国和国际上均根据有效波高范围进行波浪波级的划分,其划分要求如表 2^[3]所示。根据波级(表 2)划分标准,南海东北部观测点观测到的 1997 年 6 月至 8 月各月波级统计表见表 3。

表 2 波级表
Table 2 Wave level table

波 级	有效波高/m	波 级	有效波高/m	波 级	有效波高/m
0	0	4	$1.25 \leq H < 2.5$	7	$6.0 \leq H < 9.0$
1	$0 \leq H < 0.1$	5	$2.5 \leq H < 4.0$	8	$9.0 \leq H < 14.0$
2	$0.1 \leq H < 0.5$	6	$4.0 \leq H < 6.0$	9	$H \geq 14.0$
3	$0.5 \leq H \leq 1.25$				

注:空白处无数据

由表 3 可知,1997 年 6 月和 7 月波级 ≤ 6 级,大浪非常少,<4 级的浪各占 1997 年 6 月和 7 月观测数据的 78.6%和 87.1%;1997 年 8 月有大浪达到 8 级,<4 级的浪占本月观测数据的 56.6%,6 级及以上大浪占本月观测数据的 14.0%。

表 3 1997 年 6 月至 8 月各月波级出现频率
Table 3 Frequency of wave levels in each month from June to August 1997

时 间	组 数	覆盖率/%	各波级出现频率/%				
			0 级~4 级	5 级	6 级	7 级	8 级
1997 年 6 月	224	93.3	78.6	20.1	1.3		
1997 年 7 月	240	96.7	87.1	12.9			
1997 年 8 月	226	91.1	56.6	29.2	8.0	4.8	1.2

注:空白处无数据

2.2 5 级以上大波最大历时长度统计

6 级以上大波为有效波高 >4 m 的波浪,通常称为风暴浪。风暴浪最大历时长度描述了海面上恶劣海况所持续的最长时间,在海洋工程设计中是一个重要的考量指标。表 4 给出了南海北部观测点 1997 年 6 月至 8 月 5 级以上大波最大历时长度统计表。

表 4 1997 年 6 月至 8 月各月 5 级以上大波最大历时长度(h)
Table 4 Statistics of maximum diachronic lengths (h) of the waves larger than 5 grades monthly from June to July 1997

时 间	≥ 8 级	≥ 7 级	≥ 6 级	≥ 5 级
1997 年 6 月			6	93
1997 年 7 月				18
1997 年 8 月	9	27	66	102

注:空白处无数据

由表 4 可知,1997 年夏季各月中 ≥ 6 级的浪最大持续时间为 66 h; ≥ 7 级的浪最大持续时间为 27 h; ≥ 8 级大浪的最大持续时间为 9 h。这些大波级海浪最大历时均发生在 1997 年 8 月。

2.3 谱峰周期统计

波浪周期是海洋设施动力响应和疲劳度计算的重要参数。表 5 给出了南海北部观测点各月谱峰周期出现率(%)统计表。

表 5 1997 年 6 月至 8 月各月谱峰周期出现率(%)统计结果
Table 5 Probability of the occurrence frequency of spectral peak period monthly from June to July 1997 (%)

时 间	组 数	$0 \leq T_p < 6 \text{ s}$	$6 \leq T_p < 8 \text{ s}$	$8 \leq T_p < 11 \text{ s}$	$11 \leq T_p < 14 \text{ s}$	$14 \leq T_p < 18 \text{ s}$
1997 年 6 月	224	22.8	54.0	21.0	2.2	
1997 年 7 月	240	30.0	54.2	10.4	5.4	
1997 年 8 月	226	13.7	29.2	45.1	7.1	4.9

注:空白处无数据

由表 5 可知,1997 年 6 月和 7 月谱峰周期出现频率较多的为 6~8 s,各月占比皆为 54%,而 1997 年 8 月谱峰周期出现频率较多的为 8~11 s,占比 45%;1997 年 6 月和 7 月最少的谱峰周期出现在 11~14 s,而 1997 年 8 月最少的谱峰周期出现于 14~18 s。

2.4 大波谱峰周期最大历时长度统计

由表 6 可知,1997 年 6 月至 8 月 8 s 以上波浪谱峰周期最大历时长度统计结果为 90 h; ≥ 11 s 的谱峰周期最大历时长度为 54 h; ≥ 14 s 的谱峰周期最大历时长度为 21 h。这些最大历时长度均发生在 1997 年 8 月。

表 6 1997 年 6 月至 8 月各月 8 s 以上谱峰周期最大历时(h)长度统计结果

Table 6 Statistics of maximum diachronic lengths (h) of the spectral peak periods longer than 8 s monthly from June to July 1997

时 间	T_p/s		
	8	11	14
1997 年 6 月	21	9	
1997 年 7 月	48	12	
1997 年 8 月	90	54	21

注:空白处无数据

2.5 波参数统计

表 7 给出了 1997 年 6 月至 8 月各月平均有效波高、最大有效波高、主波向、平均谱峰周期和最大谱峰周期实测值。1997 年 6 月最大有效波高为 4.32 m,主波向 SW;1997 年 7 月最大有效波高 3.82 m,主波向 S;1997 年 8 月最大波高 10.66 m,主波向 S。平均有效波高皆小于 3 m,1997 年 6 月和 7 月平均有效波高 <2 m。

表 7 1997 年 6 月至 8 月各月平均有效波高,最大有效波高,主波向,平均谱峰周期和最大谱峰周期统计结果

Table 7 The mean and maximum effective wave heights, the main wave direction, the mean and maximum spectral peak periods monthly from June to July 1997

时 间	平均有效波高/m	最大有效波高/m	主波向	平均谱峰周期/s	最大谱峰周期/s
1997 年 6 月	1.77	4.32	SW	7.2	12.8
1997 年 7 月	1.77	3.82	S	6.7	11.6
1997 年 8 月	2.77	10.66	S	7.9	16.0

苏纪兰^[4]统计分析了盛行风浪向频率(%)分布(表 8)、孙湘平^[5]统计分析了盛行涌浪向频率分布(%)和南海波高逐月分布及周期分布(表 9)。由表 8 可知,风浪最多常浪向南向(S),频率 17;涌浪最多常浪向南向(S),频率 28。由表 9 得知,南海北部海域的月平均波高在 1.3~1.5 m,最大波高为 4.0~5.0 m;月平均周期为 5.9~6.1 s,最大周期为 15.0~17.0 s。

表 8 南海 1997 年 8 月的盛行风浪向、涌浪向频率分布(%)^[4]

Table 8 Frequency distributions of the directions of prevailing wind waves and swells (%) in the South China Sea in August 1997^[4]

海区名	风浪项目				涌浪项目			
	最多		次多		最多		次多	
南海北部 (110°~115°E,20°~25°N)	浪向	频率	浪向	频率	浪向	频率	浪向	频率
	S	17	SW	17	S	28	SW	17

表 9 南海北部波高(m)、周期(s)逐月分布^[5]

Table 9 Monthly distributions of wave heights (m) and periods (s) in the northern South China Sea^[5]

海区名	时 间	波 高/m		周 期/s	
		平均波高	最大波高	平均周期	最大周期
南海北部 (110°~115°E,20°~25°N)	1997 年 6 月	1.3	4.0	5.9	15.0
	1997 年 7 月	1.5	5.0	6.0	17.0
	1997 年 8 月	1.5	5.0	6.1	17.0

经比较,实测资料统计结果只有平均有效波高和最大有效波高高于统计资料,是因历年观测方法、观测地点不同,又加以 9710 号台风等原因所致,其他统计分析结果都是相符的。

由于各月波高、波向出现频率和平均有效波高、最大有效波高及波向按方位的出现频率均为海洋工程作业所需要的重要参数,故给出了有效波高按方向出现的频率、平均有效波高和最大有效波高的玫瑰分布(图 4)、波高、周期联合分布表(表 10)以及波高、波向联合分布表(表 11)。联合分布表格都以 1997 年 8 月资料为例,上述表 7 和图 4 中波的主波向皆指波的来向,以北向为 0° ,顺时针方向旋转。

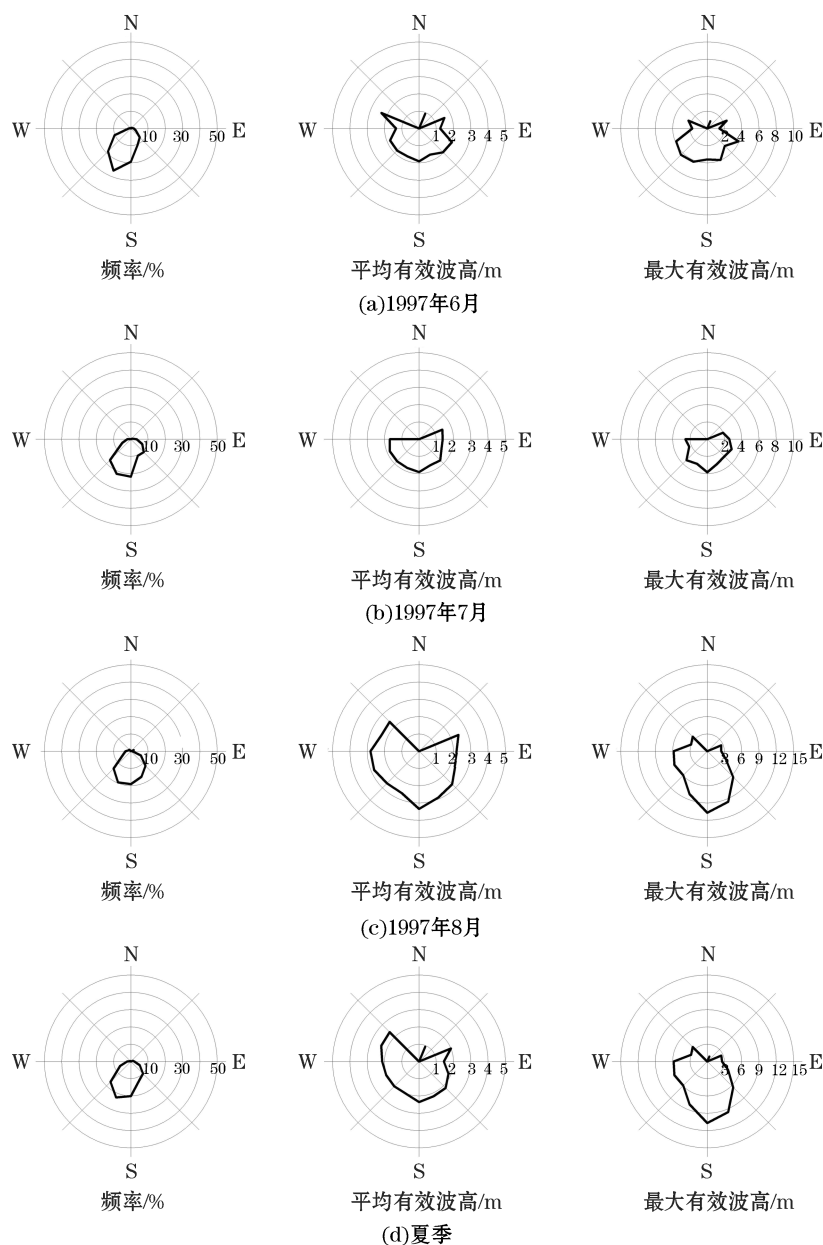


图 4 1997 年 6 月至 8 月逐月及整个夏季有效波高与波向的玫瑰分布

Fig.4 Rose diagrams of significant wave height and wave direction monthly and in the whole summer from June to August 1997

表 10 1997 年 8 月有效波高(H)和谱峰周期(T_p)联合分布
Table 10 Joint distribution of the effective wave height (H) and period (T_p) in August 1997

有效波高/m	谱峰周期/s														合 计
	$0\leqslant T_p<2$	$2\leqslant T_p<3$	$3\leqslant T_p<4$	$4\leqslant T_p<5$	$5\leqslant T_p<6$	$6\leqslant T_p<7$	$7\leqslant T_p<8$	$8\leqslant T_p<9$	$9\leqslant T_p<10$	$10\leqslant T_p<11$	$11\leqslant T_p<12$	$12\leqslant T_p<16$	$16\leqslant T_p$		
$0\leqslant H<0.5$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
$0.5\leqslant H<1.0$	0	0	0	0	0.44	0.44	0.44	0	0	0	0	0	0	1.33	
$1.0\leqslant H<1.5$	0	0	0	0	0.44	4.87	0.44	0	0	0	0	0	0	5.75	
$1.5\leqslant H<2.0$	0	0	0	1.33	1.77	3.10	7.96	7.96	0.44	0	1.33	2.65	0	26.55	
$2.0\leqslant H<2.5$	0	0	0	2.21	2.21	2.21	1.33	9.29	0.88	0	0.88	3.54	0.44	23.01	
$2.5\leqslant H<3.0$	0	0	0	0	3.10	0.88	3.10	7.52	1.77	0	0.44	1.77	0	18.58	
$3.0\leqslant H<3.5$	0	0	0	0.44	0.44	0.44	1.77	3.10	0.44	0	0	0.44	0	7.08	
$3.5\leqslant H<4.0$	0	0	0	0.88	0	0	0.44	1.33	0.88	0	0	0	0	3.54	
$4.0\leqslant H<4.5$	0	0.44	0	0	0	0	0.44	0.44	0.44	0	0	0	0	1.77	
$4.5\leqslant H<5.0$	0	0	0	0	0	0	0.44	1.33	0	0	0	0	0	1.77	
$5.0\leqslant H<5.5$	0	0	0	0	0	0	0	1.33	1.33	0	0	0	0	2.65	
$5.5\leqslant H<6.0$	0	0	0	0	0	0	0	0.88	0.88	0	0	0	0	1.77	
$6.0\leqslant H<6.5$	0	0	0	0	0	0.44	0.44	0.88	0	0	0	0	0	1.77	
$6.5\leqslant H<7.0$	0	0	0	0	0	0	0	0.88	0	0	0	0	0	0.88	
$H\geqslant 7.0$	0	0	0	0	0	0	0	0.44	1.33	1.33	0.44	0	0	3.54	
总合计	0.0	0.4	0.0	4.9	8.4	12.4	16.8	35.4	8.4	1.3	3.1	8.4	0.4	100.0	
最小值	0.0	4.2	0.0	1.6	0.7	0.5	1.0	1.5	1.7	7.3	1.8	1.5	2.3		
平均值	0.0	4.2	0.0	2.5	2.2	1.9	2.4	3.0	4.4	9.1	3.2	2.2	2.3		
最大值	0.0	4.2	0.0	3.8	3.1	6.1	6.4	7.7	8.4	10.7	9.5	3.1	2.3		
标准差	0.0	0.0	0.0	0.8	0.6	1.0	1.1	1.4	2.1	1.7	2.8	0.4	0.0		

注:空白处无数据

表 11 1997 年 8 月有效波高与主波向联合分布

Table 11 Joint distribution of the effective wave height and direction in August 1997

有效波高/m	各波向出现频率/%																总合计/%
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	
$0 \leq H < 0.5$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$0.5 \leq H < 1.0$	0	0	0	0	0	0	0	0.44	0.88	0	0	0	0	0	0	0	1.33
$1.0 \leq H < 1.5$	0	0	0	0	0	0.44	0.44	0.44	2.21	0.44	1.77	0	0	0	0	0	5.75
$1.5 \leq H < 2.0$	0	0	0	0	0.44	2.21	3.10	4.42	3.54	7.52	2.65	1.33	0.44	0.44	0.44	0	26.55
$2.0 \leq H < 2.5$	0	0	0	0.88	0.44	2.21	3.10	3.54	3.10	3.10	3.54	0.88	1.33	0.44	0.44	0	23.01
$2.5 \leq H < 3.0$	0	0	0	0.88	0	0.44	1.77	3.10	2.21	5.31	2.21	1.77	0.88	0	0	0	18.58
$3.0 \leq H < 3.5$	0	0	0	0	0	0.88	1.77	1.33	1.33	0	1.33	0	0	0.44	0	0	7.08
$3.5 \leq H < 4.0$	0	0	0	0	0	0	0.44	0	1.33	0.88	0.44	0	0	0	0.44	0	3.54
$4.0 \leq H < 4.5$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.44	0.88	0.44	0	0	0	0	1.77
$4.5 \leq H < 5.0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0.88	0.44	0.44	0	0	0	0	0	1.77
$5.0 \leq H < 6.0$	0	0	0	0	0	0	0.88	1.33	0.88	0	0.88	0	0.44	0	0	0	4.42
$6.0 \leq H < 7.0$	0	0	0	0	0	0	0.44	0.88	0.44	0.44	0	0.44	0	0	0	0	2.65
$H \geq 7.0$	0	0	0	0	0	0	0	0.44	2.21	0.88	0	0	0	0	0	0	3.54
总合计	0	0	0	1.77	0.88	6.19	11.95	15.93	19.03	19.47	14.16	4.87	3.10	1.33	1.33	0	100
最小值	0	0	0	2.22	1.89	1.36	1.32	0.54	0.68	1.02	1.11	1.58	1.55	1.65	1.70	0	0.50
平均值	0	0	0	2.46	2.16	2.26	2.71	2.89	3.33	2.63	2.63	2.82	2.81	2.37	2.40	0	2.80
最大值	0	0	0	2.65	2.43	3.46	6.37	9.51	10.66	8.06	5.87	6.16	5.83	3.04	3.60	0	10.70
标准差	0	0	0	0.19	0.38	0.62	1.23	1.82	2.40	1.46	1.17	1.31	1.39	0.70	1.00	0	

注:空白处无数据

在整个夏季,观测到的台风都实发于 8 月。第一次为 7 月 31 日开始至 8 月 3 日结束的 9710 号(VICTOR)台风;第二次为 8 月 20 日开始至 8 月 23 日结束的 9713 号(ZITA)台风。结果表明,8 月有效波高 $>2\text{ m}$ 的波浪持续时间超过了 15 d,达 18.75 d;大风期间有明显大浪过程,一般持续 3~5 d;其高波级大浪出现频率较大(≥ 8 级,出现频率 1.2),持续时间也较长(9 h);主波向以西南向(SW)居多;6 月至 8 月期间的波浪过程,主波向也都是西南向(SW)和南向(S)居多(图 4 的波向散度区间 98%以上 $<90^\circ$,也说明主波向的聚拢度稳定)。由上述频率统计结果(图 4)可知,西南(SW)范围内出现主波向的频率都集中在这个区域,这与文献[6]观点一致。

2.6 台风期间的波浪谱分析

SeaPac 2100 方向波浪仪自身数据处理软件 Wave Pro 提供了谱峰值的计算结果。1997-07-31—08-04 的 9710 号台风,其形成初期有一个小的西行过程,然后一直由南向北移动直至登陆。此台风路径经过本观测海域,其离观测点的最近距离为 110 km,台风中心风力为 11 级。

台风过境时,本观测点上方 111 m 高度处最大风力 >10 级,谱峰值达到 $8\,000\text{ FT}^2/\text{Hz}$ 。图 5 为 1997-07-30—08-05 台风期间的波浪要素连续图,记录了 9710 号台风过境的全部过程。根据现有的资料,在此采用 1D-PM 方法^[7],以实测谱峰频率与分割频率(f_s)(0.8PM 谱峰频率)的比较,高于分割频率则视为风浪。在 1997-07-31T07:00—08-05T11:00 期间,经实测谱峰频率与分割频率比较得出,风浪起主导作用,占整个波浪的 64%。

由 Earle^[8]给出的分割频率(f_s)分离经验关系式:

$$f_s = 0.8 f_{PM}, \quad (1)$$

式中:PM 谱峰频率 $f_{PM} = 0.13g/U_{10}$, 其中 g 为重力加速度, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, U_{10} 为 10 m 高处的风速^[9]。

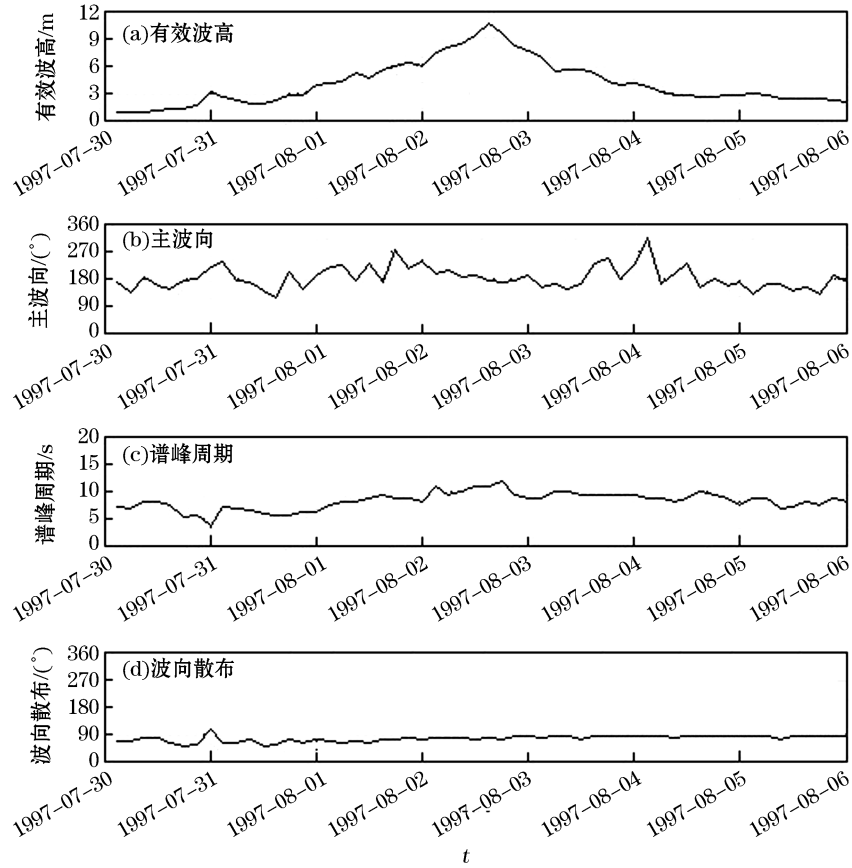


图 5 台风期间(1997-07-30—08-05)的波浪要素

Fig.5 Wave element map during the typhoon (July 30–August 5 in 1997)

为了进一步从谱型中研究该测点的风浪特点,我们分析了谱峰值 $S(f_p)$ 和有效波高之间的关系,如图 6 所示,在台风来临和台风过后,谱峰值随有效波高增加的线性关系较弱,这表明谱峰值难以控制波浪谱形式,单在台风经过测点时,即谱峰 > 1500 时,谱峰值随有效波高的增加线性关系较强,谱峰值基本可以控制海浪谱形式。其谱峰值和谱的平均频率宽度基本可表示为

$$M_0 = S(f_p) \bar{B}, \quad (2)$$

式中, M_0 为波浪谱的零阶距, $S(f_p)$ 为谱峰值, $\bar{B}$ 为谱的平均频率宽度, $\bar{B} = 0.01 \text{ Hz}$ 。这表明在本次观测台风浪期间,台风浪海浪谱具有相似特点,可以确定其谱的形式。

海浪谱是描述实际海浪内部机构的近似波动(正弦波),解析海浪的振幅(波高)与他们的波动频率之间所存在的关系。目前,海浪谱分析有多种谱模式,根据本次观测台风期间的波浪分析,发现观测点区域海浪谱为单峰谱,且平均频率宽度窄。从谱型上看,与 JONSWAP 谱型相似。因此,选 JONSWAP 为靶谱来拟合 9710 号台风浪的波浪谱。由 JONSWAP 的基本公式^[10]可知其无因形式为

$$S(\omega) = \omega^{-5} \exp(-1.25 \omega^{-4}) \gamma^{\exp[-(\omega^2 - 1)^2 / 2\sigma^2]}, \quad (3)$$

式中: ω 为无因次圆频率, $\omega = \frac{\omega}{\omega_0}$, 其中, ω_0 为谱峰频率的圆频率; γ 为谱峰升高因子, $\gamma = E_{\max} / E_{\max}^{\text{PM}}$, $E_{\max}$ 为波浪谱峰值, $E_{\max}^{\text{PM}}$ 为 PM 谱谱峰值,取平均值 $\gamma = 3.3$ 。当 $\omega \leq 1$ 时,峰形参数 $\sigma = 0.07$; 当 $\omega > 1$ 时, $\sigma = 0.09$ 。

利用 JONSWAP 谱对实测台风浪进行拟合时,需要波浪的谱峰值和谱峰圆频率,它们的实测资料已给出。海浪谱拟合仅对应本台风期间的最大有效波高 >8 m 海浪进行,拟合结果相似度较高,在此不逐一列举,仅选取有效波高 $=10.66$ m 为例(图 7)。由图 7 可知,此实测海浪谱与 JONSWAP 谱吻合度较高。认为 9710 号台风期间观测有效波高 >8 m 的可以用 JONSWAP 谱来解析其波浪的内部波动结构。

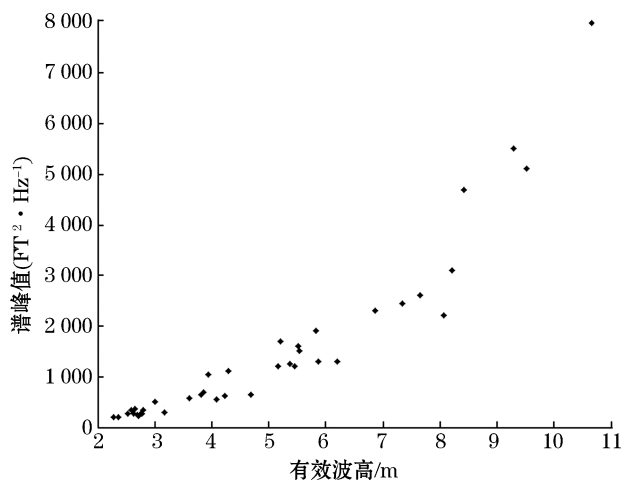


图 6 9710 号台风期间有效波高与谱峰值之间的关系

Fig.6 Relationship between the effective wave height and the spectral peak during Typhoon 9710

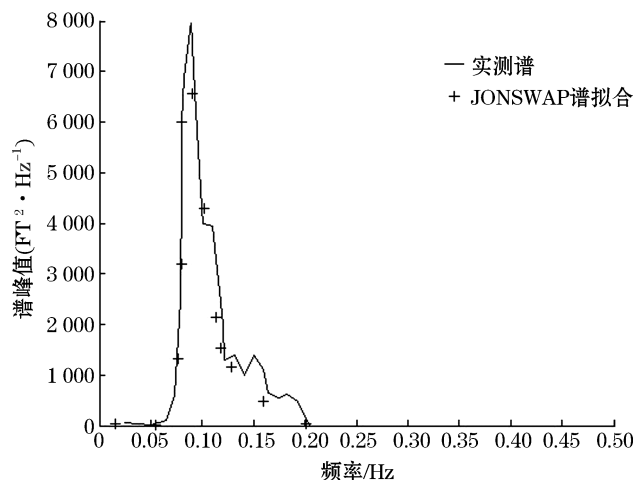


图 7 实测谱与 JONSWAP 谱拟合

Fig.7 Fitting chart of the measured and the JONSWAP spectra

3 结 论

根据位于南海北部观测站的现场实测资料,分析了 1997 年 6 月至 8 月(夏季)该站位附近的波浪特征,并着重分析了 1997-07-31—08-04 因 9710 号台风过境引起的波浪变化,给出了有效波高按方向出现的频率、平均有效波高和最大有效波高的玫瑰图以及波高、周期联合分布表和波高、波向联合分布表。据此得出的主要结论有:

1) 观测期间波级较大、历时和谱峰周期较长的海浪均出现在 1997 年 8 月,1997 年 6 月至 7 月的大浪非常少。

2) 1997 年 6 月最大有效波高为 4.32 m,主波向 SW;1997 年 7 月最大有效波高 3.82 m,主波向 S;1997 年 8 月最大波高 10.66 m,主波向 S。各月份平均有效波高皆 <3 m,1997 年 6 月和 1997 年 7 月有效波高均 <2 m。

3) 受台风影响,1997 年 8 月 >2 m 的波浪持续时间超过了 15 d,达 18.75 d。波向散度区间 98%以上 $<90^\circ$ 。主波向聚拢度稳定。大风期间的主波向以西南向居多。

4) 离观测点最近距离为 110 km、中心风力 11 级的 9710 号台风过境时,经实测谱谱峰与 PM 谱谱峰比较得出,风浪起主导作用,占整个波浪的 64%。

5) 上述台风过境期间,南海海浪谱为单峰谱,且平均频率宽度窄。从谱型上看,与 JONSWAP 谱型相似。因此,可使用 JONSWAP 为靶谱来拟合 9710 号台风期间有效波高 >8 m 的海浪的波浪谱。

参考文献(References):

- [1] GROSSKOPF W G, AUBREY D G, MATTIE M G, et al. Field intercomparison of nearshore directional wave sensors[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1983, 8(4): 254-271.
- [2] LONGUET-HIGGINS M S, CARTWRIGHT D E, SMITH N D. Observations of the directional spectrum of sea waves using the motions of a floating buoy[C]//Longuet-Higgins. Ocean wave spectra, Proc. Conference, Easton: Prentice-Hall, 1961: 111-132.
- [3] National Center of Ocean Standards and Metrology. Specifications for oceanographic survey: part 2 Marine hydrographic observation:

- GB/T 12763.2—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007: 26. 国家海洋标准计量中心. 海洋调查规范: 第 2 部分 海洋水文观测: GB/T 12763.2—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 26.
- [4] SU J L. China offshore hydrology[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005: 330-335. 苏纪兰. 中国近海水文[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 330-335.
- [5] SUN X P. Oceanography of China's offshore areas[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 186-190. 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 173-190.
- [6] XU L Z. Analysis and prediction of wave field in south China sea[J]. Marine Forecasts, 1987, 4(3): 48-52. 许林之. 南海波浪场的分析与预报[J]. 海洋预报, 1987, 4(3): 48-52.
- [7] LI S Q, ZHAO D L. Comparisons on partitioning techniques to identify wind-wave and swell[J]. Haiyang Xuebao, 2012, 34(2): 23-29. 李水清, 赵栋梁. 风浪和涌浪分离方法的比较[J]. 海洋学报, 2012, 34(2): 23-29.
- [8] EARLE M D. Development of algorithms for separation of sea and swell[R]. Marland: National Data Buoy Center, 1984: 53.
- [9] CHEN Y L, ZHAO Y P, ZHANG B S, et al. The study of the relations of wind velocity at different heights over the sea[J]. Marine Sciences, 1989(3): 27-31. 陈永利, 赵永平, 张必胜, 等. 海上不同高度风速换算关系的研究[J]. 海洋科学, 1989(3): 27-31.
- [10] YE A L, LI F Q. Physical oceanography[M]. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1992: 419. 叶安乐, 李凤岐. 物理海洋学[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992: 419.

Statistical Analysis of the Waves Measured at Fixed Points in the Northern South China Sea in Summer

LU Yan^{1,2}, WANG Guan-lin^{1,2}, WANG Dao-long^{1,2}, WANG Xin-yi^{1,2}

(1. First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;

2. Laboratory for Ocean Dynamics and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)

Abstract: It is essential to conduct scientific analyses on the measured wave data because the variations of wave elements have important reference values for the site selection of marine engineering facilities, the operations on the sea and the safety in production. In the present paper, the wave characteristics in the northern South China Sea during June to August in 1997 are analyzed based on the data measured at an observation station, and the wave characteristics and wave spectrum fitting induced by Typhoon 9710 (VICTOR) are also discussed. In order to provide necessary references for marine engineering, the detailed statistical characteristics are depicted, which include the frequency at which effective wave heights appear by direction, the rose charts of the average and maximal effective wave heights and the joint distribution tables of wave height-period and wave height-direction. The statistical results show that during the period of observation the maximum average effective wave height is 2.77 m, the maximum effective wave height is 10.66 m, the major wave direction is S and the maximum average spectral peak period (T_p) is 7.9 s. Due to the influence of typhoon, all these eigenvalues occurred in August 1997. It should be pointed out that during Typhoon 9710 wind wave was predominant, accounting for 64%; and the typhoon wave had the maximum effective wave height of 10.66 m, the major wave direction of S and the spectral peak period of 10.77 s. It is considered from the wave spectrum analysis that the effective wave height occurred during this typhoon transit could be higher than 8 m. To know the internal volatility structure of the wave, the JONSWAP spectrum can be used for the further analysis.

Key words: northern South China Sea; wave characteristics; Typhoon 9710; JONSWAP spectrum

Received: March 31, 2020