

台风影响下西沙海域与岛礁内外的波浪分布特征

梁海萍^{1,2}, 冯伟忠³, 梁海燕¹, 石军¹

(1. 国家海洋局海口海洋环境监测中心站, 海南 海口 570100; 2. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100; 3. 国家海洋局南海预报中心, 广东 广州 510000)

摘 要: 通过利用 1991—2018 年西沙海洋站波浪观测资料与 SWAN 模式反演计算结果, 初步探究不同路径热带气旋影响下西沙海域、西沙礁盘与岛屿波浪掩护区海域的波浪分布特征。结果表明: 西北型路径是影响西沙群岛的 TC 最大可能路径, 通常以台风强度居多, 波高以大到巨浪级别为主; 西行型路径是影响西沙群岛的 TC 第二可能路径, 通常以强台风居多, 巨浪为主, 海况极差; TC 影响下各岛屿波浪掩护区波高基本大于 2.0 m, 甚至接近 5.0 m, 礁盘内波高基本在 1.0 m 以下。本研究结果为西沙海域渔船避风与海洋防灾减灾工作提供基础性参考。

关键词: 西沙; 热带气旋; 波浪; 不同路径; 分布特征

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2019)04-0028-07

1 引言

西沙群岛是连接太平洋与印度洋的重要通道, 战略位置极为重要。西沙海域有著名的西沙渔场, 同时又是南下南海船只的避风、补给基地。西沙群岛易受热带气旋(Tropical Cyclone, TC)侵袭, 每年受影响个数约 3—4 个, 由于西沙群岛远离大陆, 避风、补给基础设施远未满足要求, 利用天然岛屿浅滩避风是目前的主要途径。

西沙海域特殊地理位置导致人们长期对西沙海域波浪分布特征缺乏全面认识。即便 2008 年以来, 海南省安全管理部门相继投入大量财力物力, 利用全球定位系统、AIS(船舶自动识别系统, Automatic Identification System)基站、短波通信基站、手机等实现船舶位置动态监控, 建成了全省的渔船安全应急指挥系统, 但在获知 TC 恶劣海洋环境预警信息条件下如何在广阔的西沙海域就近选择地点避险, 仍然是当前面临的难题。

海浪特征分析的实际应用比较广泛, 刘桂海等^[1]利用长期波浪观测资料, 寻求合适的海岸工程波浪要素长期统计分布概率模式; 杨宪章^[2]通过对波浪和系泊船舶运动的研究和分析, 对毛里塔尼亚友谊港修建港口码头提出看法与意见; 耿宝磊等^[3]收集了 2012 年 13 号 TC“启德”和 23 号 TC“山神”发生期间的波浪数据, 并结合波浪方向谱和频谱的变化, 分析出了琼州海峡海域在 TC 发生期间的波浪特征, 同时也对风浪和涌浪的特征进行了判别; 丁千龙等^[4]根据西沙海洋站实测波浪及风要素资料, 对西沙海区波浪分布特征进行了分析, 通过多元回归计算, 得出波要素的预报方程, 后报检验结果良好; 杨永增等^[5]运用 MASNUM(Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling)海浪数值预报系统里的全球 10 a 后报数据库资料, 对北印度洋区域波浪分布特征进行了统计分析, 发现了夏季的波浪高于冬季, 在空间分布上, 西部风、浪比东部大; 杨永增等^[6]建立了球坐标系下的全球海浪数值

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2018-12-26。

基金项目: 海南省自然科学基金(419QN380); 国家海洋局海洋预报员业务发展专项资助项目(HYYB2016B08); 海南省科技兴海专项资助项目(XH201425)。

作者简介: 梁海萍(1987-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事波浪、风暴潮统计、数值预报研究。E-mail: liangpinggai@163.com

模式,重点导出了球坐标系下的海浪能量谱平衡方程及其复杂特征线方程;韩淑宗等^[7]运用SWAN模式(Simulating Waves Nearshore,近岸海浪数值计算模式)计算出有效波高,采用实测资料验证,通过模式计算的结果分析出东中国海海域的台风浪有效波高分布特征;刘永玲等^[8-11]参考国外学者对风暴潮模式与波浪之间的相关关系及相关作用,建立了考虑海浪因素的三维风暴潮模式^[12]。船只避风方面的研究比较缺乏,丁慧彦等^[13]通过比较不同种类船只的不同避风方式,设计出可以给出船只回港优化方案的模型,可有效指导船只安全回港;王传聪等^[14]从避风锚地的底质、防波堤设计标准与锚泊方式等3个方面分别讨论了避风型渔港的避风因素,为建设避风型渔港与灾害决策提供了科学依据,目前关于西沙海域波浪分布特征的研究较少,大多数学者只停留在研究大范围波浪分布,未细化到礁盘与岛屿波浪掩护区,而关于西沙海域渔船避风方面尚未有相关研究,本研究探讨不同路径热带气旋影响下西沙海域、礁盘与岛屿波浪掩护区的波浪分布特征,旨在为西沙海域渔船避风与海洋防灾减灾工作提供基础性参考。

2 资料来源

本研究使用的资料来自于国家海洋局西沙海洋站(16°8'N, 112°3'E)的实测波高、风等,统计选取资料时间为1991—2018年。定义在TC活动期间监测到7级及7级以上风速过程称为受TC影响过程。

年鉴资料上将西北太平洋TC共分成13种路径,结合实际情况,本研究在此基础上,经过适当归并,将对影响西沙群岛的TC路径分为以下6种,各类路径定义^[15]如下:

西行型:TC移动的全过程中,平均移向大致在250°~289°之间。

西北型:TC移动的全过程中,平均移向大致在290°~339°之间。

右折型:TC移动路径中至少有一个折向点,并且前后12 h平均移向相比较,右折角度 $\geq 45^\circ$ 。

左折型:TC移动路径中至少有一个折向点,并且前后12 h平均移向相比较,左折角度 $\geq 30^\circ$ 。

偏北型:TC移动的全过程中,平均移向是在340°~20°之间。

回旋型:TC移动路径变幻多端,摆动、打转或停滞少动,无法判定。

1991—2018年期间影响西沙群岛的TC过程共计89次^[16],其中西北型路径占的比率最大,占比为43.8%,其次为西行型路径,占比为22.5%(见表1)。由于其他路径TC样本空间少,此处不做研究。

3 结果与讨论

3.1 不同路径TC波浪分布特征

3.1.1 西北型路径

1991—2018年期间影响西沙群岛的西北型TC数量为39个,占比约为43.8%(见表1),其中热带风暴占10.3%,强热带风暴占25.6%,台风占30.8%,强台风占25.6%,超强台风所占比率最小,为7.7%,其统计如表2所示。基于西沙海洋站实测波高条件,图1表明1991—2018年期间影响西沙群岛的西北型TC波高分布主要集中在2.5~3.9 m之间,占比为41%;其次是4.0~5.9 m之间,占比为28%;2.5 m以下波高占比为18%;波高在6.0~8.9 m之间占比为13%。

从表3可以看出:同一次TC过程中最大波高发生在最大风速之前的占比为12.8%,发生在最大风速之后的占比为61.5%,发生在最大风速发生时的占比为25.7%,由此可见,在西北型TC过程中,最大波高一般出现在最大风速之后,所以要注意提防大风过后的大浪灾害。

3.1.2 西行型路径

1991—2018年期间影响西沙群岛的西行型TC数量为20个,占总数的22.5%,其中强台风所占比率最高,为30%;其次为热带风暴与强热带风暴,占比均为20%,超强台风与台风占比均为15%(见表4)。基于西沙海洋站实测波高条件,从图1可以看出,1991—2018年期间影响西沙群岛的TC波高分布主要集中在4.0~5.9 m之间,占比为40%;其次是2.5~3.9 m之间,占比为35%;2.5 m以下波高占比为20%;波高分布在6.0~8.9 m之间占比较小,仅为5%。从表5可以看出,同一次TC过程中最大波高

表 1 1991—2018 西沙群岛的 TC 路径分布

路径	西行型	西北型		右折型	左折型	偏北型	回旋型
编号	9323	9103	0602	9318	9312	9506	9403
	9508	9106	0606	9516	9424	9610	9422
	9521	9111	0623	9810	9621	9710	9511
	9612	9204	0814	0601	9915	0801	9514
	9718	9205	0817	0621	0308	1508	9618
	0016	9207	1003		0312		9902
	0011	9303	1005		0715		0214
	0123	9419	1108		1118		0508
	0405	9515	1117		1329		0917
	0518	9520	1223		1724		1804
	0615	9606	1306				
	0616	9713	1309				
	0816	9803	1310				
	0916	9903	1311				
	1002	0103	1330				
	1119	0307	0516				
	1321	0320	0521				
	1325	1415	1409				
	1519	1621	1719				
	1723	1704					
占比/%	22.47	43.82		5.62	11.25	5.62	11.25

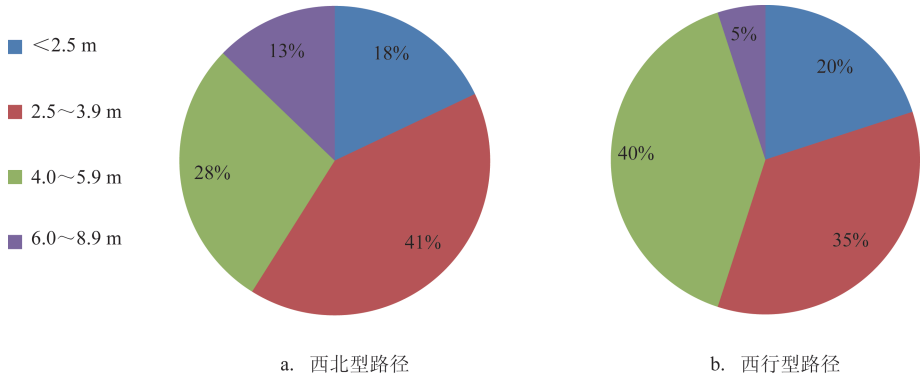


图 1 各类路径 TC $H_{1/10}$ 波高分布

表 2 1991—2018 年西北型 TC 各等级强度统计

TC 强度等级	热带风暴	强热带风暴	台风	强台风	超强台风
TC 数量/个	4	10	12	10	3
占比/%	10.26	25.64	30.80	25.64	7.69

表 3 1991—2018 年西北型路径最大波高与最大风速关系统计

出现时间	最大风速之前	最大风速之后	最大风、浪同时出现
TC 数量/个	5	24	10
占比/%	12.82	61.54	25.65

表4 1991—2018年西行型TC各等级强度统计

TC强度等级	热带 风暴	强热带 风暴	台风	强台风	超强 台风
TC数量/个	4	4	3	6	3
占比/%	20	20	15	30	15

表5 1991—2018年西行型路径最大波高与最大风速关系统计

出现时间	最大风速 之前	最大风速 之后	最大风、浪 同时出现
TC数量/个	5	12	3
占比/%	25	60	15

发生在最大风速之前的占比为25%,发生在最大风速之后的占比为60%,发生在最大风速发生时的占比为15%。由此可见,在西行型TC过程中,最大波高一般出现在最大风速之后,所以要注意提防大风过后的大浪灾害。

3.2 岛礁内外波浪特征

西沙海洋站波浪观测资料多为一天4次,且未能较好代表西沙礁盘与岛屿波浪掩护区状况,为更全面、具体了解西沙波浪分布特征,本研究采用SWAN波浪模式做进一步研究。

3.2.1 SWAN模式介绍

主要对特定波浪条件下西沙海域中环礁与岛屿附近海域波浪进行研究,主要考虑地形对波浪的影响。采用基于能量平衡方程,适用于近岸、河口、海湾、湖泊的SWAN模式对研究区域进行了模拟。SWAN41.01版模式考虑了波浪的浅变、折射、底摩擦、破碎、白帽、风能输入、三波相互作用和四波相互非线性效应,因而具有以下4个方面的功能^[17]: (1)适用于海岸、河口水域风浪、涌浪及混合浪的预报,在直角坐标和球坐标下以矩形网格进行嵌套计算、以曲线网格进行数值计算,适用于大、中、小水域;(2)模拟水底地形和流场的变化引起的波浪折射、浅化,逆流时波浪的反射和破碎,波浪遇到障碍物的透射及阻碍,波浪增水;(3)能预报计算域内波高、波周期、波长、波陡、波浪行进方向、近底水质点的运动速度、波能传播方向、能量耗散、单位水面所受波力等海岸工程所需的重要参数。

SWAN模式的基本控制方程为动谱能量平衡

方程:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S_{in} + S_{ds,w} + S_{ds,b} + S_{ds,br} + S_{nl4} + S_{nl3}}{\sigma} \quad (1)$$

3.2.1 模式推算范围

本研究利用SWAN模式两重嵌套方法研究西沙海域TC过程波浪,南海区域为:99°~129.5°E, 2.0°~30.75°N,空间分辨率为1/20°;西沙海域范围为:111.35°~112.85°E, 15.75°~17.25°N(见图2),空间分辨率为1/400°。南海区域SWAN模式推算结果为西沙海域模式提供嵌套的波谱边界条件,风场为WRF模式提供的逐时风场。波浪所需要地形数据分别取自ETOPO1与海图融合,西沙海域由航保部海图(17 100, 1:25 000)读取,限于西沙详细地形水深难以获得,环礁内与边缘水深概化处理,环礁中部水深取4.0~10.0 m,环礁边缘水深取0.5 m。在西沙群岛已经形成环礁的礁盘中、或岛屿波浪掩护区选取9个代表点,研究不同波向,不同波级条件下各岛礁的波浪条件。

SWAN模式采用SWAN41.01版,风能输入和白帽耗散项采用Komen参数化方案、底摩擦采用Hasselmann的JONSWAP实验常数理论,考虑Hasselmann四波相互和三波波相互作用,波浪破碎能量耗散采用Battjes和Janssen的bore-based模式。

利用1321号台风“蝴蝶”和0518号台风“达维”在西沙海洋站的波浪观测资料与模式结果进行对比,模式计算结果绝对平均误差小于30%,因此可

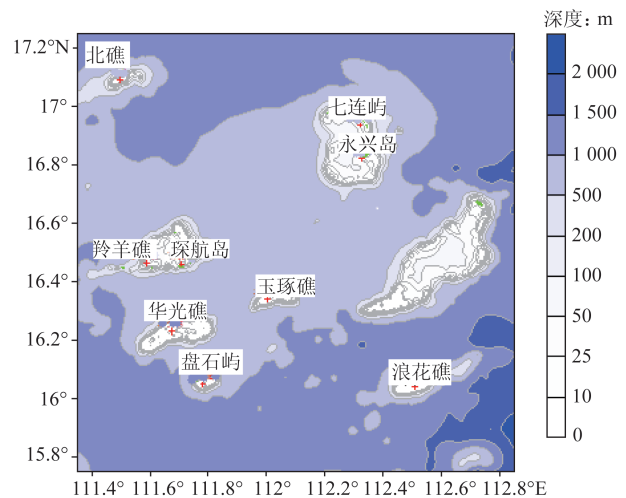


图2 小区推算范围和岛礁代表点

作为研究西沙海域的基础资料。

3.2.3 模式计算结果

TC影响下西沙海域波浪方向随TC风向改变,本研究按TC期西沙海域各代表点累年各向波浪分布频率将主要波浪方向确定为NE、S、E、N、W 5个方向,每个方向设定两种情景,其中 H_s 是按照3.1节中西北型及西行型路径均在2.5~3.9 m与4.0~5.9 m波高范围出现频率最高结论确定,每个波高范围取平均值,分别确定为3.0 m、5.0 m,以研究10种情景下礁盘与岛屿的波浪特征,其中 $H_{1/10}=1.18 H_s$ 转换。各情景小区边界条件设置见表6,计算结果见表7。

表7表明,在NE方向波浪作用下,无论情景1还是情景2,礁盘内 $H_{1/10}$ 都小于1.0 m,其中北礁、羚羊礁、盘石屿海况好,岛屿波浪掩护区内 $H_{1/10}$ 都大于1.0 m,情景2时深航岛口门 $H_{1/10}$ 有2.45 m,永兴岛西

南区域 $H_{1/10}$ 高达2.76 m; S波浪方向影响下,礁盘内与岛屿波浪掩护区的 $H_{1/10}$ 都比NE向波浪高,其中七连屿西南区域与永兴岛西南区域波浪较大,情景4时永兴岛西南区域波浪高达3.32 m;在E或N方向波浪作用下,除了情景6时华光礁 $H_{1/10}$ 略大于1.0 m外,其他的礁盘内 $H_{1/10}$ 都小于1.0 m,海况较好,E方向波浪作用时各岛屿掩护区 $H_{1/10}$ 相差小于0.5 m,而N方向波浪作用时七连屿西南区域 $H_{1/10}$ 明显小于其他两个岛屿波浪掩护区;在W方向的情景10中,除了羚羊礁、玉琢礁与琛航岛口门外,礁盘内与岛屿掩护区 $H_{1/10}$ 相对其他海况都明显偏高,其中永兴岛西南向高达4.7 m,位居第一。

3.3 西沙波浪分布特征成因分析

TC大多数发生在南、北纬度的 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}$,其中 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 居多^[18]。影响到西沙群岛的TC基本都是在菲律宾以东洋面生成后进入南海的,少部分TC是在南海内形成。西沙群岛位于南海的西北部海域,所以主要受西北行路径与西行型路径影响。

图3显示台风主要分布在7—10月份,强台风主要分布在9—11月份;图4显示西北型路径主要分布在7—8月份,西行型路径主要分布在8、9、11月份,所以影响西沙的西北型路径的TC多数以台风等级出现,而西行型路径的TC多数以强台风等级出现,另外在菲律宾以东洋面生成的TC强度一般较大,以台风与强台风为主。

风浪的成长取决于风速、风时、风区,在传播过程中风浪不断从风中获得能量和上游风浪传播能量而发展^[18],所以最大波高一般出现在最大风速之后。根据风浪原理,大风浪的产生需同时具备风

表6 各情景小区边界条件

情景	波浪方向	H_s/m	Tz/s	风速/(m/s)
1	NE	3	6.9	12
2	NE	5	8.9	16
3	S	3	6.9	12
4	S	5	8.9	16
5	E	3	6.9	12
6	E	5	8.9	16
7	N	3	6.9	12
8	N	5	8.9	16
9	W	3	6.9	12
10	W	5	8.9	16

表7 各礁盘和岛屿代表点 $H_{1/10}$ 计算结果(单位:m)

情景	北礁	华光礁	浪花礁	羚羊礁	盘石屿	七连屿西南	深航岛口门	永兴岛西南	玉琢礁
1	0.06	0.75	0.64	0.15	0.08	1.21	1.62	1.46	0.57
2	0.13	0.98	0.83	0.18	0.14	1.76	2.45	2.76	0.77
3	0.64	0.86	0.57	0.75	0.86	2.18	1.07	2.49	0.67
4	0.71	0.88	0.7	0.85	0.87	2.77	1.37	3.32	0.78
5	0.17	0.74	0.55	0.13	0.05	1.64	1.63	1.47	0.54
6	0.25	1.01	0.81	0.2	0.28	2.22	2.45	2.66	0.74
7	0.13	0.49	0.19	0.15	0.11	1.23	1.73	1.75	0.21
8	0.24	0.82	0.41	0.26	0.15	1.6	2.57	2.85	0.33
9	0.59	0.71	0.76	0.3	0.48	2.32	1.62	2.82	0.59
10	1.23	1.03	1.07	0.43	0.92	3.87	2.49	4.7	0.66

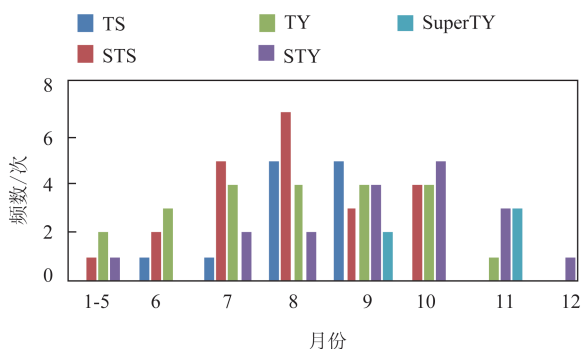


图3 影响西沙群岛的TC强度分布特征
(1991—2018年, TS热带风暴、STS强热带风暴、TY台风、STY强台风、SuperTY超强台风)

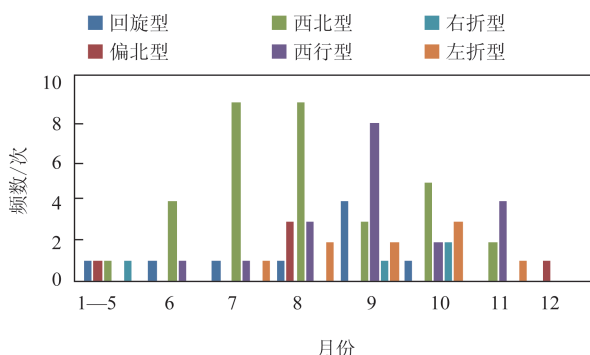


图4 影响西沙群岛的TC路径月分布特征
(1991—2018年)

速、风时、风区3个良好条件,而西沙礁盘基本四面都有礁石遮挡且区域较小,风区条件较差,所以无法形成大浪,礁盘内海况较好;而岛屿波浪掩护区内,一般具备风速、风时、风区3个良好条件,所以 $H_{1/10}$ 基本都在2 m以上,甚至高达4.7 m。

影响西沙海域波浪分布特征的因素还有很多,特别是西沙群岛不利于海水辐聚、辐散的海岸线,四面环海同时岛屿之间相互遮挡,与中沙群岛毗邻的特殊且复杂的地理位置产生的局部海水震荡^[15]。

4 结论

(1)西北型路径是影响西沙群岛的TC的最大可能路径,该路径TC最大可能等级是台风,引起的波高主要集中在2.5~5.9 m之间;西行型路径是影响西沙群岛的TC第二可能路径,该路径TC最可能

等级是强台风,引起的波高主要集中在4.0~5.9 m之间;

(2)西沙礁盘内风浪较小,基本小于1.0 m,而西沙岛屿波浪掩护区内风浪较大,基本大于2.0 m,甚至接近5 m,一般永兴岛西南向掩护区波浪高于其他岛屿波浪掩护区;

(3)无论西北型路径还是西行型TC路径,最大波高一般出现在最大风速之后,所以要注意提防大风过后的大浪灾害。

参考文献:

- [1] 刘桂海, 刘松. 我国近海波浪要素的长期分布[J]. 港口工程, 1989, (6): 25-37.
- [2] 杨宪章. 长周期波的特性及对系泊船舶动态特性的影响[J]. 港口工程, 1989, (6): 37-43.
- [3] 耿宝磊, 文先华. 台风作用下琼州海峡海域波浪特征分析[J]. 海洋工程, 2013, 31(6): 59-67.
- [4] 丁千龙, 曾永明, 王江伟. 西沙海区波浪特征分析与预报[J]. 海洋通报, 2000, 19(3): 19-23.
- [5] 杨永增, 孙玉娟, 王关锁, 等. 基于MASNUM海浪预报系统的北印度洋波浪特征模拟与预报分析[J]. 海洋科学进展, 2011, 29(1): 1-9.
- [6] 杨永增, 乔方利, 赵伟, 等. 球坐标系下MASNUM海浪数值模式的建立及其应用[J]. 海洋学报, 2005, 27(2): 1-7.
- [7] 韩淑宗, 史玉姣. 东中国海台风浪分布特征研究[J]. 中国海洋大学学报, 2013, 43(10): 1-7.
- [8] Booij N, Ris R C, Holthuijsen L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1999, 104(C4): 7649-7666.
- [9] Tolman H L. Effects of tides and storm surges on North Sea wind waves[J]. Journal of Physical Oceanography, 1991, 21(6): 766-781.
- [10] Mastenbroek C, Burgers G, Janssen P A E M. The dynamical coupling of a wave model and a storm surge model through the atmospheric boundary layer[J]. Journal of Physical Oceanography, 1993, 23(8): 1856-1866.
- [11] Zhang M Y, Li Y S. The synchronous coupling of a third-generation wave model and a two-dimensional storm surge model[J]. Ocean Engineering, 1996, 23(6): 533-543.
- [12] 刘永玲, 王秀芹, 王淑娟. 波浪对风暴潮影响的数值研究[J]. 海洋湖沼通报, 2007, (S1): 1-7.
- [13] 中国灾害防御协会风险分析专业委员会. 中国视角的风险分析和危机反应[C]. 巴黎: 亚特兰蒂斯出版社, 2010: 807-813.
- [14] 王传聪, 栾曙光, 郝晓燕, 等. 避风型渔港避风因素浅析[J]. 渔业现代化, 2009, 36(1): 65-66, 70.
- [15] 梁海萍, 梁海燕, 陈海南, 等. 1991~2013年发生在西沙永兴岛的台风风暴潮统计特征分析[J]. 应用海洋学报, 2017, 36(2): 243-248.

- [16] 梁海萍, 梁海燕, 车志伟, 等. 近五十年登陆海南省的热带气旋统计特征分析[J]. 海洋预报, 2015, 32(4): 68-74.
- [17] 徐福敏, 张长宽, 陶建峰. 浅水波浪数值模型SWAN的原理及应

用综述[J]. 水科学进展, 2004, 15(4): 538-542.

- [18] 冯士筌, 李凤岐, 李少筌. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 126-200.

Wave distribution characteristics of Xisha sea area and island reef under typhoon influence

LIANG Hai-ping^{1,2}, FENG Wei-zhong³, LIANG Hai-yan¹, Shi-Jun¹

(1. Haikou Marine Environment Monitoring Station of State Oceanic Administration, Haikou 570100 China; 2. ocean university of China, Qingdao 266100 China; 3. South Sea Forecast Center of State Oceanic Administration of State Oceanic Administration, Guangzhou 510000 China)

Abstract: Based on the wave observation data of Xisha Ocean Station from 1991 to 2018 and the SWAN model inversion calculation results, the wave distribution characteristics in Xisha, Xisha reef and island wave shelter areas under the influence of tropical cyclones with different paths are preliminarily studied. The results show that the northwest path is the most probable path of tropical cyclone that affects the Xisha Islands, which is characterized by intense tropical cyclone and rough-very rough sea. The westbound path is the second most likely path of tropical path, which is characterized by intense tropical cyclone and very rough sea. The wave height in the sheltered area is more than 2.0 meters and even close to 5.0 meters, while the wave height in the reef area is less than 1.0 meter. The results of this study provide a basic reference for fishing boats in Xisha waters and for marine disaster prevention and mitigation.

Key words: Xisha; tropical cyclones; waves; different paths; distribution characteristics.