

汕尾市引发灾害性海浪的热带气旋特征研究*

殷玉齐^{1, 2, 3} 侯一筠^{1, 2, 3, 4} 冯兴如^{1, 2, 3} 荣增瑞^{3, 5}

(1. 中国科学院海洋研究所 海洋环流与波动重点实验室 青岛 266071; 2. 中国科学院海洋大科学研究中心 青岛 266071;
3. 青岛海洋科学与技术国家实验室海洋动力过程与气候功能实验室 青岛 266237; 4. 中国科学院大学 北京 100049;
5. 中国海洋大学 青岛 266100)

摘要 近年来, 海浪灾害是威胁近海民众生命安全最为突出的海洋灾害, 对我国造成的经济损失有整体上升的趋势。基于 31 a (1986—2016 年) 汕尾市观测站的热带气旋影响期间白天的海浪数据, 本文定义并提取了 31 次灾害性海浪(1/10 大波波高 4 m)事件。在灾害性海浪发生时, 热带气旋主要位于观测站点的西侧(115.57°E 以西)。31 次灾害性海浪事件集中发生于 6—9 月; 其中, 虽然 6 月份影响研究海域的热带气旋数量相对较少, 但引发灾害性海浪的概率约是 7—9 月份的两倍。有 26 个热带气旋生成于 121°E 以东的西太平洋海域, 且移动路径相对较集中: 途经吕宋海峡(16°—22°N)的热带气旋总数为 25 个, 其中 22 个热带气旋途经 16°—20°N 之间, 是最为重要的通道。途经此处的热带气旋在汕尾海域引发灾害性海浪的估算概率约为 25%—50%。本研究可为汕尾市灾害性海浪的预警报和防灾减灾提供重要的参考。

关键词 灾害性海浪; 热带气旋; 1/10 大波波高; 汕尾市

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyhz20200600175

海浪灾害是海洋灾害的重要组成部分, 是各种海洋灾害中导致人员伤亡和经济损失的最主要致灾因素, 近年来对我国造成的经济损失也有整体上升的趋势(彭冀等, 2013; 李硕等, 2017)。2000—2015 年的《中国海洋灾害公报》数据显示, 由波浪灾害造成的死亡或失踪人数占比例为 73.7%(陶爱峰等, 2018), 已成为威胁中国近海民众生命安全最为突出的海洋灾害。同时, 灾害性海浪也是各种涉海工程规划设计、海上交通运输、石油开采、渔业捕捞和近海海水养殖等生产过程必须考虑的动力因素(邓文君等, 2007; 李硕等, 2017; 施斌等, 2020)。热带气旋是引发灾害性海浪的重要因素, 在西北太平洋沿岸国家中, 我国也是受热带气旋袭击最多的国家, 年平均登陆的台风个数约为 9 个, 登陆地主要集中在浙江、福建和广东省(王毅等, 2009; 贾晓等, 2010)。进行长时间序列的灾害性海浪和热带气旋资料分析, 对海岸带

规划和工程防护、海浪的长期预测以及防灾减灾等具有重要的指导意义。

通常意义上, 能够在海上或者岸边引起灾害损失的海浪就可以称为灾害性海浪。现有研究对灾害性海浪并没有明确统一的定义, 主要以波高、有效波高或者 1/10 大波波高作为指标, 将大于或等于 3 m(或者 4 m)的海浪定义为灾害性海浪(王华等, 2007; 张薇等, 2012; 王智峰等, 2013)。总体来说, 我国的黄渤海海域灾害性海浪次数相对较少, 且主要以寒潮浪和气旋浪为主导; 台湾海峡处灾害性海浪年平均发生 6.1 次, 台湾省以东和吕宋海峡区域灾害性海浪年平均发生 11 次; 南海灾害性海浪出现的频率最大, 为 14.1 次, 也是受台风浪影响最严重的海区(许富详, 1991; 1996; 王祥涛等, 2000)。多年的卫星高度计资料显示, 南海灾害性海浪中台风浪明显强于非台风浪, 监测到的最大台风浪波高为 12.47 m(王绿卿等, 2019)。

* 国家重点研发计划项目, 2016YFC1402000 号, 2018YFC1407003 号; 中国科学院先导 A 专项, XDA19060202 号, XDA19060502 号。殷玉齐, 副研究员, E-mail: yinyuqi@qdio.ac.cn

收稿日期: 2020-06-22, 收修改稿日期: 2020-09-17

我国灾害性海浪存在显著的季节变化, 11 月份最多, 4、5 月份最少。其中, 台风浪多发于 7—10 月的台风季节, 寒潮浪主要发生在冬半年, 气旋浪主要发生在 10 月份至次年 3 月份(许富祥, 1996; 张薇等, 2012; 彭冀等, 2013; 潘晓东等, 2016)。另外, 灾害性海浪(有效波高 4 m)的发生次数也具有显著的年际变化, 其中灾害性台风浪出现次数呈现较好的 5 a 左右的变化周期(邢闯等, 2013)。灾害性海浪发生天数与副热带高压面积指数年距平有较密切的关系, 基本呈反位相变化; 与副高西伸脊点位置有较密切的关系, 基本呈同位相变化(高志华等, 1995)。浙江和福建海域长达 20 a 的数值模式结果显示: 福建北部海岸带台风浪有效波高极值和持续时间有显著增长的趋势, 且 ENSO 信号与台风浪的持续时间有较好的相关性(冯兴如等, 2018)。

受益于卫星测量技术和精度的提高, 卫星遥测的海面波高数据被广泛应用于中大尺度海域波浪的研究(Alves *et al.*, 2003; Vinoth *et al.*, 2011; 周水华等, 2013; 王绿卿等, 2019)。然而, 对近岸海域来说, 卫星观测准确度不足, 现场观测数据(尤其是长期观测、高海况下观测)缺乏, 前人多是结合海洋数值模型和短期的观测资料开展海浪特征研究(管长龙, 2000; Moon *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2008; 王智峰等, 2013); 同时, 前人研究主要关注沿岸的灾害性海浪的特征和机理, 对于引发灾害性海浪的热带气旋统计特征研究不足。受热带气旋移动路径特征的影响, 其导致的海浪典型受灾区域集中在我国东南沿海; 对于特定的海滨城市而言, 不同特征的热带气旋(比如移动路径和强度)引起的海浪特征存在显著差异(Young, 2003; 邱桔斐, 2005; 陈剑桥, 2018)。因此, 统计分析引发灾害性海浪的热带气旋的特征, 对城市的海岸带规划和防灾减灾具有重要的参考价值。

汕尾市位于南海北部沿海, 常住人口 300 多万人; 全市海岸线长 455 km, 居全省第二位; 海岛数量 881 个, 居全省第一位, 是南海优良渔场; 在沿海开发了红海湾遮浪半岛旅游区, 属于国家 4A 级景区。然而, 汕尾市是广东省内台风登陆次数排名第三的地级市, 受海浪灾害影响非常频繁; 汕尾市属于高脆弱性的城市, 台风灾害风险指数为 4 级(张悦等, 2017)。针对灾害性海浪的观测原始记录十分有限, 而汕尾市遮浪观测站拥有 30 多年的海浪观测记录, 数据尤其珍贵。本文基于影响汕尾的热带气旋过程期间的白天的海浪观测数据, 聚焦于引发灾害性海浪的

热带气旋事件, 并对这些热带气旋的生成地、移动路径和强度进行细致分析, 研究引发汕尾市海域灾害性海浪的热带气旋的主要特征和移动路径, 旨在为灾害性海浪的预警报和防灾减灾提供参考。

1 数据说明

1.1 海浪波高数据

本文使用的是汕尾市遮浪观测站波浪观测数据, 站点位于 115°34'E, 22°39'N。海浪数据由人工观测获取: 在常规情况下, 使用岸用光学测波仪观测海浪; 在大浪或仪器故障等情况下, 目测海浪, 并直接估计出波高。详细的观测规范和计算方法见《海滨观测规范: 第 3 章 海浪》(国家海洋局, 科学出版社, 1987 年出版)。观测时间 1986—2016 年, 共搜集到 210 个热带气旋过程期间的海浪观测数据, 包括 1/10 大波波高、有效波高, 精度为 0.1 m; 观测时间为白天的 8:00、11:00、14:00 和 17:00; 2009 年以前, 仅对 1/10 大波波高进行观测; 2009 年以后, 增加了有效波高的观测。

1.2 热带气旋数据

本文使用的是中国气象局热带气旋资料中心(Ying *et al.*, 2014)发布的热带气旋最佳路径数据集, 包括热带气旋的中心位置、时间、强度等级、中心最低气压、2 min 平均近中心最大风速, 时间间隔为 6 h。在使用前, 去除了未被编号和命名的热带气旋过程。

热带气旋的强度等级划分遵循《热带气旋等级》国家标准(GB/T 19201—2006), 以其底层中心附近最大平均风速为标准(正点前 2 min 至正点内的平均风速)。数据采用的热带气旋等级强度具体定义为: 0 级-弱于热带低压, 1 级-热带低压(10.8—17.1 m/s), 2 级-热带风暴(17.2—24.4 m/s), 3 级-强热带风暴(24.5—32.6 m/s), 4 级-台风(32.7—41.4 m/s), 5 级-强台风(41.5—50.9 m/s), 6 级-超强台风(≥51.0 m/s)。

2 结果

2.1 引发灾害性海浪的热带气旋提取

首先, 由于观测数据中 1/10 大波波高的样本数量远多于有效过高, 因此, 本文中将 1/10 大波波高 4 m 的海浪定义为灾害性海浪。然后, 统计 210 个热带气旋过程期间海浪的 1/10 大波波高最大值, 提取出了引发灾害性海浪的 31 个热带气旋过程, 它们的移动路径如图 1 所示。利用热带气旋最佳路径数据集, 计算了 31 个热带气旋的移动路径距离观测站的最短

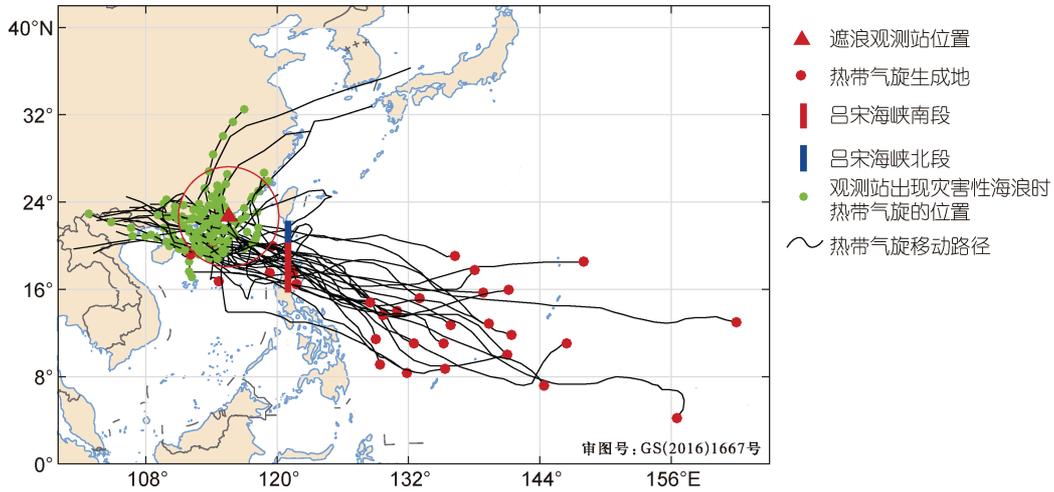


图 1 在汕尾市海域引发灾害性海浪的热带气旋路径图

Fig.1 Tracks of tropical cyclone that induced disastrous waves in Shanwei City, Guangdong, South China
注: 红色圆圈的半径为 510 km

距离: 平均值为 196.8 km, 标准差为 144.9 km, 最小值为 7.6 km, 最大值为 509.4 km。在图 1 中对 1/10 大波波高 4 m 时的热带气旋位置进行了标注(绿点, 热带气旋位置为 6 h 间隔), 可以看出, 出现灾害性海浪时, 热带气旋主要位于观测站点的西侧(115.57°E 以西)。

210 个热带气旋过程中, 有些热带气旋的路径距离观测站点较远, 对站点无影响, 不应参与本文后续的统计分析。由于上述 31 个热带气旋路径距离观测台站的最远距离为 509.4 km, 本研究假设能够引发灾害性海浪的热带气旋基本均会途经此距离内。因此, 本文以观测站点为中心, 以 510 km 为半径画圆(图 1 红色圆圈, 后文统称“红圈海域”), 统计 210 个过程中所有途经红圈海域的热带气旋过程, 共计 150 个, 如图 2a。同时, 利用热带气旋最佳路径数据集, 同样统计了途经此红圈海域的所有热带

气旋过程, 共计 180 个。因此, 在观测站点漏掉了 30 个热带气旋过程的海浪观测, 热带气旋路径见图 2b。首先, 这些热带气旋大多数是途经红圈海域的南部和东部边缘区域, 距离观测站点较远; 而引发灾害性海浪的热带气旋主要集中在圆圈范围的西半部分, 这是由于热带气旋主要在其行进方向的右侧沿岸海域引发较强的海浪。其次, 从热带气旋分布的年份和月份来看(图 3a, 3b), 缺测的 30 个热带气旋过程分布相对较为均匀。基于以上两点, 我们认为, 缺测的热带气旋过程对分析引发灾害性海浪的热带气旋长期统计特征影响较小。

途经红圈海域的热带气旋数量存在显著的年际变化(图 3a 中虚线): 年平均数量为 5.8 个, 1994 年和 2013 年影响观测台站的热带气旋数量均达到 9 个, 而 1997 年仅有 2 个热带气旋过程进入此区域。在季节

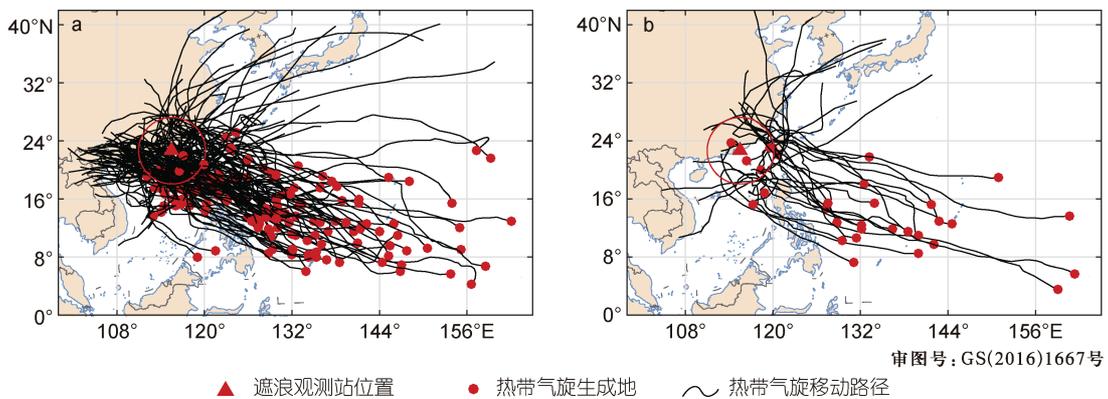


图 2 台站观测数据中热带气旋移动路径图

Fig.2 Tracks of tropical cyclone recorded in ocean station
注: a: 所有途经图中红色圆圈的 150 个热带气旋; b: 途经图中红色圆圈且缺乏海浪观测的 30 个热带气旋

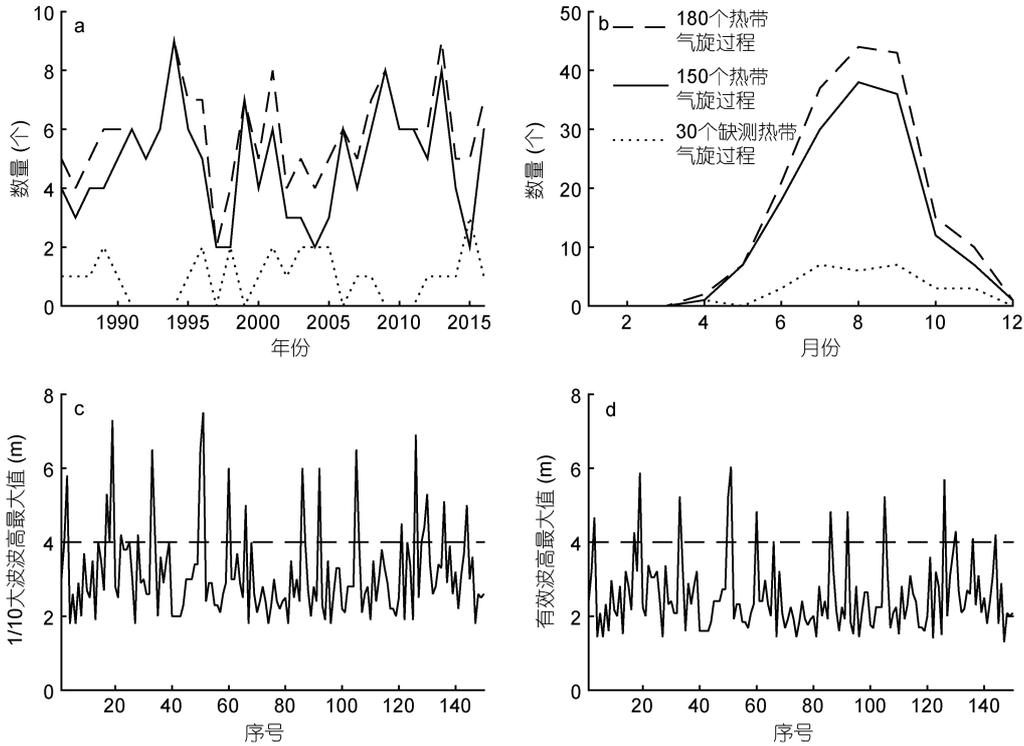


图 3 途经红圈海域的热带气旋数量的分布(a, b)以及 150 个热带气旋期间的 1/10 大波波高(c)和有效波高(d)最大值
 Fig.3 Yearly (a) and monthly (b) distribution of tropical cyclone arrived into the red circle, and maximums of 1/10 wave height (c) and significant wave height (d) of the 150 tropical cyclones.
 注: a: 年分布; b: 月分布; 虚线对应 180 个热带气旋过程; 实线对应 150 个热带气旋过程; 点对应 30 个缺测热带气旋过程

上, 热带气旋集中在 7、8 和 9 月份到来, 6 月份和 10 月份的台风数量显著减少。150 个热带气旋过程中, 台站观测的海浪 1/10 大波波高的最大值见图 3c。从 2009 年开始, 观测站点记录了 36 次热带气旋过程的海浪有效波高, 共 1014 个有效观测记录; 基于这些有效波高和对应时刻的 1/10 大波波高数据(图 4), 拟合了二者的线性换算公式:

$$H_{1/10} = 1.216H_{1/3} + 0.046, \quad (1)$$

其中, $H_{1/10}$ 表示 1/10 大波波高, $H_{1/3}$ 表示有效波高。对 150 个热带气旋过程的有效波高进行了换算, 统计了每个热带气旋过程的海浪有效波高的最大值(图 3d)。如前所述, 31 个热带气旋过程引起了 4 m 的 1/10 大波波高; 1/10 大波波高最大值的平均值为 5.05 m, 标准差为 1.14 m, 最大值为 7.5 m; 对应的有效波高最大值的平均值为 4.07 m, 标准差为 0.93 m, 最大值为 6.04 m。

2.2 引发灾害性海浪热带气旋的特征分析

2.2.1 移动路径

在研究站点引发灾害性海浪的 31 个热带气旋过程中, 有 26 个热带气旋(占比 83.9%)生成于 121°E 以东的西太平洋海域, 仅有 5 个热带气旋(占比 16.1%)生成于 121°E 以西的中国南海海域(表 1)。从图 1 可以看出, 来自西太平洋的热带气旋

的移动路径相对较集中, 主要途经吕宋海峡附近进入南海。途经吕宋海峡(16°—22°N)的热带气旋总数为 25 个, 其中 22 个热带气旋途经 16°—20°N 之间, 是最为重要的通道。

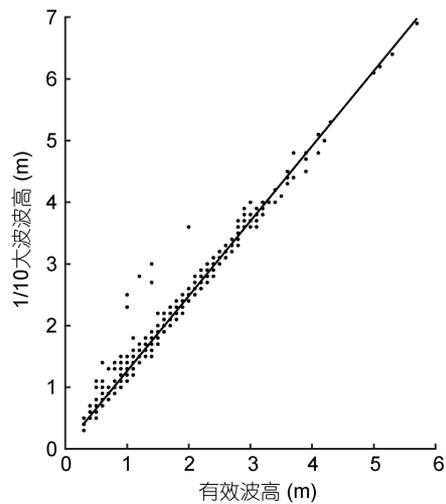


图 4 台站观测的 1/10 大波波高与有效波高的对应关系(散点)及其拟合曲线(黑线)
 Fig.4 The fitting curve between the 1/10 wave height and significant wave height

表 1 热带气旋数量分区统计
Tab.1 Numbers of tropical cyclone in different regions

	总数	生成地		途经吕宋海峡		
		121°E 以东	121°E 以西	16°—22°N	16°—20°N	20°—22°N
引发灾害性海浪的热带气旋数量(个)	31	26	5	25	22	3
途经红圈海域且有海浪观测的热带气旋数量(个)	150(20.7%)	112(23.2%)	38(13.2%)	73(34.3%)	58(37.9%)	15(20%)
所有热带气旋数量(个)	/	/	/	103(24.3%)	84(26.2%)	19(15.8%)

注: /: 未计算; 括号内百分比为引发灾害性海浪的热带气旋数量在其中占得比例

与红圈海域有海浪观测的热带气旋数量相比, 引发灾害性海浪的热带气旋数量占总数的 20.7%, 占生成于 121°E 以东的热带气旋数量的 23.2%, 占生成于西太平洋且途经吕宋海峡的热带气旋数量的 34.3%; 值得注意的是, 在台站观测中, 生成于西太平洋且途经吕宋海峡南段(16°—20°N)进入研究区域的热带气旋, 37.9%的热带气旋引发了灾害性海浪; 其概率是吕宋海峡北段(20°—22°N, 20%)的接近 2 倍。与现实中所有生成于西太平洋且途经吕宋海峡的热带气旋数量相比, 能够在观测站点引发灾害性海浪的热带气旋数量占总数的 24.3%; 其中途经海峡南段的热带气旋有 26.2%可以引发灾害性海浪, 途经海峡北段的则仅有 15.8%可以引发灾害性海浪。

2.2.2 强度 引发灾害性海浪的 31 个热带气旋的强度如图 5a 所示。当观测站点的海浪 1/10 大波波高达到最大值时, 热带气旋强度等级的平均值为 3.35, 最大等级为 5 级, 最小等级为 2 级。31 个热带气旋移动过程中的最强等级的平均值为 4.26, 最大等级为 6 级, 最小等级为 2 级。对于生成于南海海域的热带气旋, 总体来说, 强度等级要 3 级才可以在观测站引起灾害性海浪。此外, 有 3 个热带气旋过程的最强等级仅为 2 级, 它们生成于西太平洋海域, 途经吕宋海峡抵达研究海域(图 6a)。在它们引发灾害性海浪时, 热带气旋在观测站西侧偏南的位置, 距离分别为 120.1、352.6 和 133.3 km, 相对较近。

对于生成于西太平洋且途经吕宋海峡的热带气旋来说, 它们在整个移动过程中的最强等级的平均值为 4.44, 途经吕宋海峡处的强度等级平均值为 3.44(图 5b)。而且, 有 6 个热带气旋在途经吕宋海峡时强度等级仅为 1 级, 有 3 个热带气旋在途经吕宋海峡时强度等级为 2 级。由此可见, 由于热带气旋在移动过程中, 受到大气环流和海温的影响, 可能存在显著的增强和减弱, 因此, 在途经吕宋海峡处的强度等级并不能作为判断其是否能在观测站点引发灾害性海浪的标准。

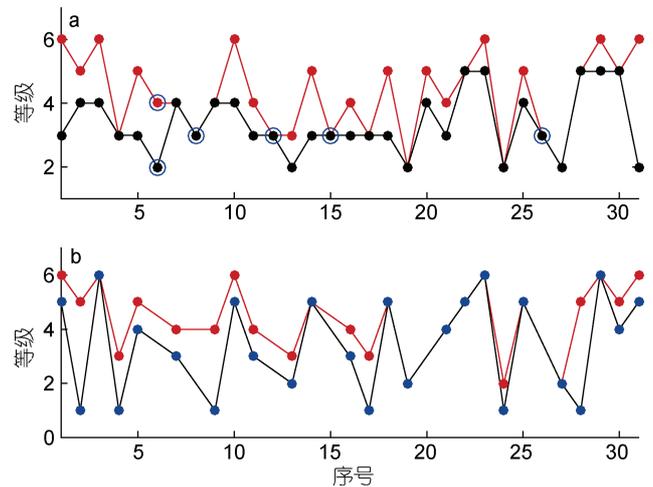


图 5 引发灾害性海浪的 31 个热带气旋(a)以及生成于西太平洋且途经吕宋海峡的 25 个热带气旋(b)的强度等级

Fig.5 Intensity of tropical cyclone that induced disastrous wave (a) and intensity of those generated in the western Pacific and passed through the Luzon Strait region (b)

注: 红线表示热带气旋移动过程中能达到的最强等级; 黑线表示热带气旋期间观测站海浪 1/10 大波波高达到最大值时刻的强度等级; 蓝色圆圈标注的为生成于南海海域的强度等级; 蓝线表示热带气旋跨越 121°E 时刻的强度等级

2.2.3 月份分布 31 次灾害性海浪事件发生的月份也呈现出显著的年变化: 主要发生在夏季(图 7), 与抵达红圈海域的热带气旋数量的年变化较为相似(图 3b)。值得注意的是, 6 月份抵达红圈海域的热带气旋数量约为 7—9 月份的 50%左右, 而对于灾害性海浪事件来说, 6 月份发生的次数与 7—9 月份基本一致。6 月份引发灾害性海浪的热带气旋共有 7 次, 有 5 个生成于太平洋海域, 有 2 个生成于南海的海南岛东部海域(图 6b)。由于月份较早, 太平洋海域的 5 个热带气旋均生成于 12°N 以南。

进一步对比分析 6—9 月份途经红色圆圈区域的热带气旋(图 8)后发现, 相对于 7—9 月份, 6 月份的热带气旋的生成纬度相对较低, 位置相对靠西。另外, 6 月份从西太平洋来的热带气旋均在台湾岛以南进入研究海域, 且绝大部分途经菲律宾北部; 而 7—9 月

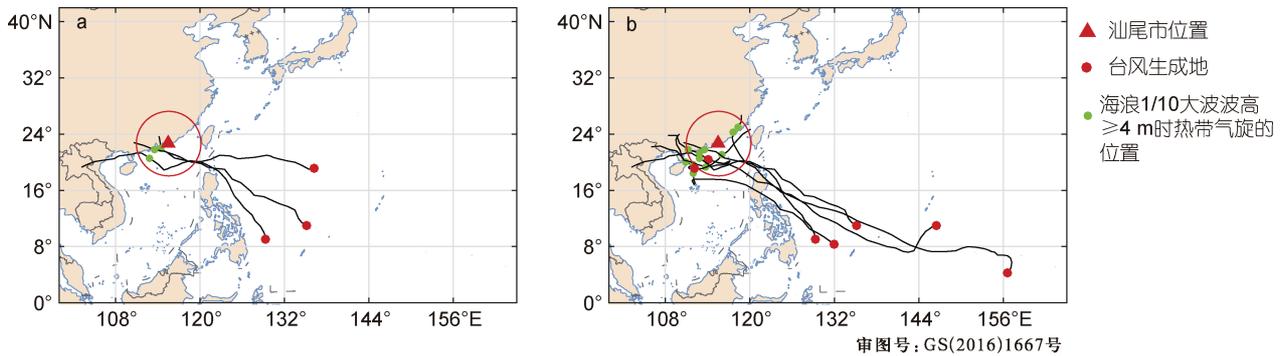


图 6 引发灾害性海浪的 31 个热带气旋中最强等级为 2 级的热带气旋移动路径(a)和发生于 6 月的热带气旋移动路径(b)
Fig.6 Tracks of tropical cyclone that induced disastrous wave whose largest intensity was two(a) and tracks of tropical cyclone that induced disastrous wave and arrived in June(b)

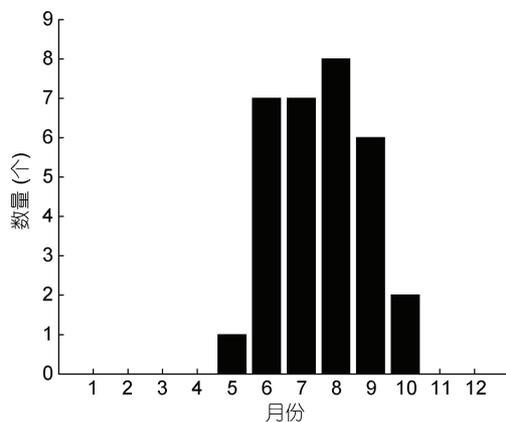


图 7 灾害性海浪事件发生次数的月份分布
Fig.7 Monthly distribution of disastrous wave events

份的热带气旋的移动路径有整体北移的趋势, 途经吕宋海峡北部或穿越台湾岛上空进入研究海域的热带气旋显著增多。虽然 7—9 月份热带气旋数量增加, 但移动路径的差异使得许多热带气旋途经汕尾市以东海域, 降低了引发灾害性海浪的概率。热带气旋一般是沿着西太平洋副热带高压的边缘移动, 造成移动路径北移的原因是副热带高压的季节性移动: 5—8 月, 副热带高压整体呈现出向北、向东移动; 从 9 月开始向南、向西移动。

3 讨论

需要注意的是, 观测站点仅在白天的 8:00、11:00、14:00 和 17:00 四个时刻有海浪观测数据, 这种观测方式会漏掉一些晚上发生的灾害性海浪事件。由于采样样本大, 时间覆盖范围广, 所以我们认为仅有白天的观测对热带气旋强度、空间分布和移动路径特征的分析影响较小, 但还是会影响移动路径的概率统计结果。

下面, 我们将在红圈海域内统计全天的热带气旋的累计存在情况。首先, 将热带气旋路径从原先的 6 h 间隔插值到对应台站海浪观测时刻的 3 h 间隔上, 统计 150 个热带气旋在途经红圈海域时的位置, 如图 9a 所示。在红圈海域, 每个时刻(2:00—23:00, 每 3 h) 累计存在热带气旋的位置数量和平均近中心最大风速显示(图 9b): 全天热带气旋的数量变化不大, 8:00—17:00(白天时段)的累计存在位置总数为 1245, 20:00—5:00(夜晚时段)的累计存在位置总数为 1274; 近中心最大风速均在 25—26.2 m/s 范围内, 差别很小。如仅统计观测站点西侧(115.57°E 以西)的热带气旋位置, 热带气旋在白天时段和夜晚时段出现的数量和强度差异也很小。因此, 热带气旋在白天和夜晚的出现概率基本相同, 据此估算, 现实中(包含夜晚)热带气旋引发灾害性海浪的概率最大将会加倍: 途经吕宋海峡(16°—22°N)且途经研究海域的热带气旋在观测站点引发灾害性海浪的概率约为 35%—70%; 途经吕宋海峡(16°—22°N)的热带气旋在观测站点引发灾害性海浪的概率约为 25%—50%。

4 结论

基于 31 a (1986—2016 年)汕尾市海域的 210 次热带气旋影响期间白天的海浪台站观测数据, 本文定义并提取了 31 次灾害性海浪事件(1/10 大波波高 4 m), 海浪 1/10 大波波高最大值的平均值为 5.05 m, 标准差为 1.14 m, 最大值为 7.5 m, 对应的有效波高最大值的平均值为 4.07 m。当海浪 1/10 大波波高达到最大值时, 热带气旋强度等级的平均值为 3.35, 最大等级为 5 级, 最小等级为 2 级。在引发灾害性海浪时, 热带气旋主要位于观测站点的西侧(115.57°E 以西)。

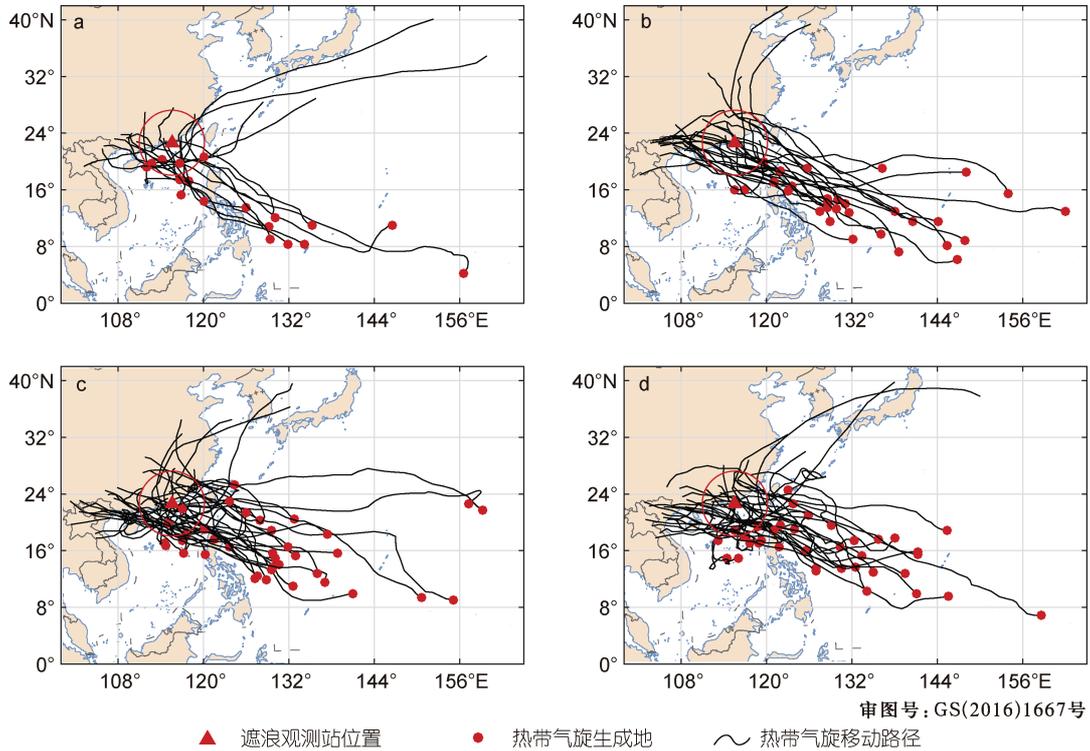


图 8 在研究区域内发生于 6 月份(a)、7 月份(b)、8 月份(c)、9 月份(d)的热带气旋移动路径
 Fig.8 Tracks of tropical cyclone arrived in June (a), July (b), August (c) and September (d)

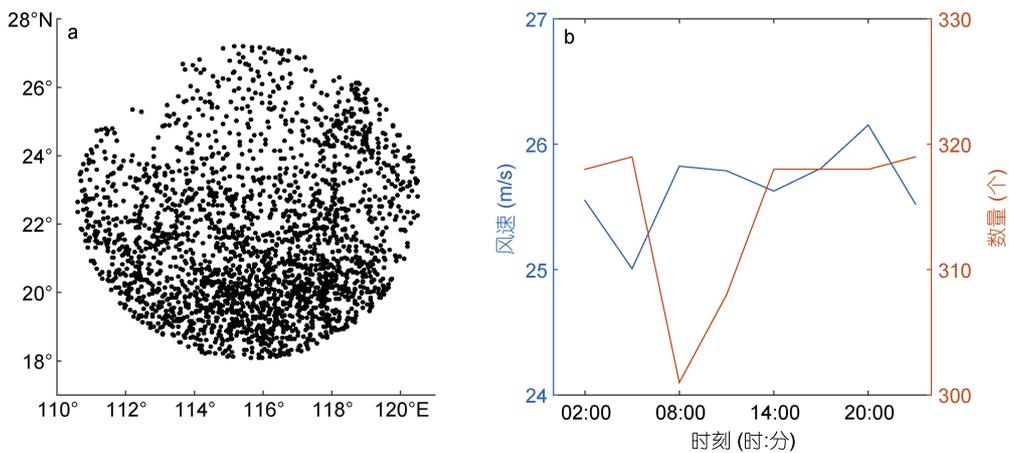


图 9 150 个热带气旋途经红圈海域时的位置散点图(a, 每 3 h)以及一天中每个时刻对应的累计散点的数量和热带气旋平均近中心最大风速(b)
 Fig.9 Locations of the 150 tropical cyclones in red circle (a, every 3 h) and number of points in Fig.9a and mean wind speed every 3 h (b)

引发灾害性海浪的 31 个热带气旋过程中, 有 26 个热带气旋(占比 83.9%)生成于 121°E 以东的西太平洋海域, 仅有 5 个热带气旋(占比 16.1%)生成于 121°E 以西的中国南海海域。对于生成于南海的热带气旋, 总体来说, 强度等级要 3 级才可以在观测站引起灾害性海浪。来自西太平洋的热带气旋的移动路径相对较集中, 途经吕宋海峡(16°—22°N)的热带气旋总数

为 25 个, 其中 22 个热带气旋途经 16°—20°N 之间, 是最为重要的通道。由于观测站仅记录了白天时段的海浪数据, 但研究海域内热带气旋在白天和夜晚的发生概率和强度基本相同, 本文据此进行定量估算: 途经吕宋海峡(16°—22°N)的热带气旋在观测站点引发灾害性海浪的概率约为 25%—50%。此外, 热带气旋在经过吕宋海峡后, 强度等级可能发生较大变化,

所以吕宋海峡处的强度等级并不能作为判断其是否能在观测站点引发灾害性海浪的标准。

以遮浪站为中心, 以 510 km 为半径的研究海域, 所有途经此范围的热带气旋集中在 7、8 和 9 月份到来, 6 月份和 10 月份到来的数量显著减少; 热带气旋数量也存在显著的年际变化, 尤其是在 1996 年之后, 数量有较为明显的增加趋势。引发灾害性海浪的 31 次事件对应的月份也呈现出较为相似的季节变化, 但值得注意的是, 虽然 6 月份到来的热带气旋数量相对较少, 但引发灾害性海浪的概率约为 7—9 月份的两倍, 其原因是西太平洋副热带高压的季节性移动对热带气旋移动路径的影响。

本文针对汕尾市海域, 提取了引发灾害性海浪的热带气旋事件, 归纳了热带气旋的生成地、强度和移动路径特征, 为汕尾市灾害性海浪的预警报和防灾减灾提供了重要参考。

致谢 本文使用的遮浪观测站波浪观测数据是由国家海洋信息中心提供; 使用的热带气旋最佳路径数据集由中国气象局热带气旋资料中心提供, 可通过 <https://tcdata.typhoon.org.cn> 下载。

参 考 文 献

- 王 华, 姚圣康, 龚茂珣等, 2007. 东海区域灾害性海浪长期预测方法研究. 海洋通报, 26(5): 35—42
- 王 毅, 石汉青, 黄思训, 2009. 西北太平洋热带气旋的时空分布特征分析. 自然灾害学报, 18(6): 166—174
- 王祥涛, 王文毅, 2000. 我国海洋 1966—1990 年 6 米灾害性海浪的统计分析. 见: 中国航海学会海洋船舶驾驶专业委员会天气海洋与航海安全论文集. 延吉: 中国航海学会, 61—68
- 王绿卿, 夏运强, 梁丙臣等, 2019. 南海灾害性波浪基本特征研究. 海洋学报, 41(3): 23—34
- 王智峰, 董 胜, 2013. 三沙近海海域灾害性海浪数值推算. 海洋开发与管理, 30(S1): 98—101
- 邓文君, 宋萍萍, 冯伟忠等, 2007. 强台风“珍珠”引发广东沿岸灾害性海浪调查分析. 海洋预报, 24(2): 52—59
- 冯兴如, 杨德周, 尹宝树等, 2018. 中国浙江和福建海域台风浪变化特征和趋势. 海洋与湖沼, 49(2): 233—241
- 邢 闯, 李本霞, 2013. 中国近海 2012 年灾害性海浪分析及 2013 年预测. 海洋预报, 30(3): 1—8
- 许富祥, 1991. 西北太平洋灾害性海浪的监测和预报. 海洋预报, 8(1): 36—42
- 许富祥, 1996. 中国近海及其邻近海域灾害性海浪的时空分布. 海洋学报, 18(2): 26—31
- 李 硕, 陶爱峰, 吴 迪等, 2017. 近 15 年中国海浪灾害特性分析. 见: 第十八届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 舟山: 中国海洋学会海洋工程分会, 202—204
- 邱桔斐, 2005. 江苏沿海风、浪特征研究. 南京: 河海大学
- 张 悦, 李珊珊, 陈 灏等, 2017. 广东省台风灾害风险综合评估. 热带气象学报, 33(2): 281—288
- 张 薇, 高 山, 闾忠辉等, 2012. 渤海灾害性海浪特征分析. 海洋预报, 29(5): 73—77
- 陈剑桥, 2018. 三种典型路径下的台湾海峡台风浪特征研究. 海洋预报, 35(6): 1—12
- 周水华, 俞胜宾, 冯伟忠等, 2013. 基于多卫星融合资料的南海浪高时空分布特征研究. 海洋科学, 37(10): 71—77
- 施 斌, 施腾源, 马庆滨, 2020. 广东沿海斜坡式防波堤台风破坏特征及其应对措施. 广东水利水电, (1): 1—4
- 贾 晓, 路川藤, 卢 坚等, 2010. 中国沿海台风的统计特征及台风浪的数值模拟. 水道港口, 31(5): 433—436
- 高志华, 许富祥, 1995. 1994 年中国海灾害性海浪特征分析. 海洋开发与管理, (4): 57—59
- 陶爱峰, 沈至淳, 李 硕等, 2018. 中国灾害性海浪研究进展. 科技导报, 36(14): 26—34
- 彭 冀, 陶爱峰, 齐可仁等, 2013. 近十年中国海浪灾害特性分析. 见: 第十六届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上册). 大连: 中国海洋学会海洋工程分会, 814—817
- 管长龙, 2000. 我国海浪理论及预报研究的回顾与展望. 青岛海洋大学学报, 30(4): 549—556
- 潘晓东, 林顺利, 姚玉娟等, 2016. 南麂海域灾害性海浪分布特征. 中国水运, 16(12): 160—162
- Alves J H G M, Young I R, 2003. On estimating extreme wave heights using combined Geosat, TOPEX/Poseidon and ERS-1 altimeter data. Applied Ocean Research, 25(4): 167—186
- Moon I J, Ginis I, Hara T *et al*, 2003. Numerical simulation of sea surface directional wave spectra under hurricane wind forcing. Journal of Physical Oceanography, 33(8): 1680—1706
- Vinoth J, Young I R, 2011. Global Estimates of extreme wind speed and wave height. Journal of Climate, 24(6): 1647—1665
- Wang D P, Oey L Y, 2008. Hindcast of waves and currents in hurricane Katrina. Bulletin of the American Meteorological Society, 89(4): 487—496
- Ying M, Zhang W, Yu H *et al*, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 31(2): 287—301
- Young I R, 2003. A review of the sea state generated by hurricanes. Marine Structures, 16(3): 201—218

CHARACTERISTICS OF TROPICAL CYCLONES THAT CAUSE DISASTROUS WAVES IN SHANWEI CITY

YIN Yu-Qi^{1, 2, 3}, HOU Yi-Jun^{1, 2, 3, 4}, FENG Xing-Ru^{1, 2, 3}, RONG Zeng-Rui^{3, 5}

(1. CAS Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, Institute of oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Center for Ocean Mega-Science, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Laboratory for Ocean and Climate Dynamics, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract In recent years, wave disaster from tropical cyclone caused increasing economic losses in China, and it is also the most prominent marine disaster that threatens people's safety. Based on 31-years (1986—2016) ocean wave data during tropical cyclone recorded in the Shanwei Station, Guangdong, China, 31 disastrous wave (1/10 wave height ≥ 4 m) events were extracted. The tropical cyclones were mainly centered in the west of the station (west of 115.57°E) when the disastrous wave happened. The 31 events occurred mainly from June to September. Although few tropical cyclones arrived in June, the incidence of disastrous wave events was twice as that from July to September. Among the 31 events, 26 were generated in the western Pacific (east of 121°E), and their propagation paths were relatively concentrated: 25 tropical cyclones passed through the Luzon Strait region (16°—22°N), and 22 were between 16°N and 20°N, the most important channel. About 25%—50% of the tropical cyclones via the Luzon Strait region caused disastrous waves in Shanwei City. This study provides an important reference for the early warning, prediction, and disaster prevention and mitigation of the disastrous wave in Shanwei City.

Key words disastrous waves; tropical cyclone; 1/10 wave height; Shanwei