

南海北部台风及台风型海浪统计特征分析

张海燕^{1,2}, 罗军^{1,2}, 李希茜^{1,2}, 姚小娟^{1,2}, 张宇^{1,2}

(1. 自然资源部南海预报减灾中心, 广东 广州 510300; 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广东 广州 510310)

摘要: 利用 1949—2023 年中国气象局热带气旋最佳路径数据集, 从两类不同源地台风视角对南海北部台风活动特征进行统计分析。结果表明: 两类台风在生成消亡时空规律、移动路径、移动速度、影响强度、影响时长及其季节变化特征等方面存在明显差异。利用欧洲中期天气预报中心第五代全球气候再分析数据集(ERA5)逐时有效波高资料, 进一步分析了两类台风型海浪气候特征, 讨论了海浪变化与台风活动的关系。结果显示: 两类台风型海浪的有效波高均呈从东北向西南、从外海向近岸逐级递减的空间分布特征, 其中移入性台风型海浪波高普遍偏大; 台风型海浪波高与台风强度存在较好的线性拟合关系, 且移入性台风影响下的拟合关系更好。

关键词: 土台风; 移入性台风; 台风型海浪; 南海北部; 统计特征

中图分类号: P731.22; P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2026)03-0056-10

0 引言

南海是全球台风最主要的活动区域之一, 一方面受到西北太平洋生成后西行台风的影响, 另一方面南海本身也是台风生成的重要源地之一^[1]。频繁的台风活动使南海海域灾害性海浪过程频发, 对海上交通运输、海上军事活动、沿岸海水养殖以及海岸防护工程等造成极大的破坏, 给人民生命财产带来巨大损失。因此, 开展南海台风活动特征及台风型海浪特征分析具有重要科学意义, 可为南海台风和海浪科学预报以及海洋工程防护提供指导依据。

许多学者已针对南海海域台风活动开展了相关研究, 包括南海局地生成台风的源地、频率、强度、登陆特征及气候变异规律^[2-5], 西北太平洋生成、西行进入南海的台风的活动特征及相关机制^[6-7], 以及南海局地生成台风和西北太平洋移入台风的整体时空分布及气候变异特征^[8-12]。已有研究表明, 南海局地生成台风和移入性台风的活动规律存在显著差异。程撼等^[10]对比分析发现, 南海局地生成台风的源地位置与热带季风气候有关, 整体强度弱于

非局地台风; 局地生成台风在发展过程中的强度变化呈对称曲线形式, 移入性台风强度变化则呈递减曲线, 但两类台风的登陆位置都存在季风期变化规律。Wu 等^[11]研究指出, 南海局地生成台风的移动路径更短、生命史更短、强度更弱, 且两类台风在年际、年代际等较长时间尺度上呈反位相变化特征。上述研究从不同角度揭示了南海台风的活动特征。

台风活动常引发灾害性海浪过程。相较于南海台风受到的广泛关注, 针对南海台风驱动海浪的研究相对较少, 且现有研究多以台风浪个例特征分析或数值模拟为主^[13-16], 鲜有针对台风浪气候学特征的分析。本文聚焦台风最活跃且对近海、近岸影响最显著的南海北部海域, 基于两类不同源地台风的分类视角, 全面分析台风活动特征, 进一步剖析两类台风型海浪的气候统计特征, 探讨台风浪与台风活动特征的关系。

1 数据与方法

本文所用台风数据取自中国气象局上海台风

收稿日期: 2025-05-18。

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42206027)。

作者简介: 张海燕(1989-), 女, 工程师, 博士, 主要从事海洋气象气候预报及季风气象学研究。E-mail: zhaiyan202326@foxmail.com

研究所(Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration, CMA-STI)整编的热带气旋最佳路径数据集^[17-18]。该数据集收录了1949年以来西北太平洋海域(赤道以北、180°以西,包含南海)的热带气旋资料,数据包含每6 h一次的气旋中心位置(经纬度)和强度(2 min平均近中心最大风速和中心最低气压)。

台风强度等级统一采用2006年国家标准化管理委员会批准发布的《热带气旋等级》国家标准,依据台风中心最大风速将强度划分为6个等级:热带低压(Tropical Depression, TD, 中心最大风速10.8~17.1 m/s, 风力6~7级)、热带风暴(Tropical Storm, TS, 中心最大风速17.2~24.4 m/s, 风力8~9级)、强热带风暴(Severe Tropical Storm, STS, 中心最大风速24.5~32.6 m/s, 风力10~11级)、台风(Typhoon, TY, 中心最大风速32.7~41.4 m/s, 风力12~13级)、强台风(Severe Typhoon, STY, 中心最大风速41.5~50.9 m/s, 风力14~15级)和超强台风(Super Typhoon, Super TY, 中心最大风速 ≥ 51.0 m/s, 风力16级及以上)。

基于CMA-STI热带气旋最佳路径数据集,以进入南海北部范围($16^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)且强度达到热带风暴级及以上的台风作为统计分析样本。参考已有研究^[10,19],将台风强度首次达到热带低压级的位置定义为生成源地,把强度最后一次达到热带低压级的位置或路径数据集中最后一条记录所在位置定义为消亡位置;将台风在南海北部海域的活动时间记作影响时长,台风在南海北部范围内达到的最大强度记作影响强度。

为分析南海北部台风浪特征,本文还采用了欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium Range Weather Forecasts, ECMWF)发布的第五代全球气候再分析数据集(ECMWF fifth-generation global atmospheric reanalysis, ERA5)。该数据集由ECMWF综合预报系统模拟生成,并同化了大量历史常规观测和卫星观测资料,相较其前身ERA-interim资料,在时空分辨率、资料同化技术等方面有明显改进,目前已广泛应用于全球海域波浪相关研究^[20-22]。本文利用1981—2023年ERA5逐时有效波高资料(水平分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$),提取南海北部历次台风活动过程中各格点有效波高极大值,用以

表征台风浪波高。

2 南海北部台风活动特征分析

2.1 台风生成消亡及移动路径

据统计,1949—2023年共有632个台风在南海北部海域活动。这些台风生成源地可分成两个区域(见图1a、1c中红点):其一是 120°E 以西洋面,为南海局地生成(下文称“土台风”),共计195个,占台风总数的30.9%,它们多生成于南海中北部 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 、距海岸线有一定距离的深海海域,源地平均位置为(16.5°N , 115.5°E);其二是 120°E 以东的西北太平洋洋面,为移入性台风,共计437个,占台风总数的69.1%,它们多生成于菲律宾以东 $5^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 洋面,源地平均位置为(13.1°N , 135.2°E)。

不同源地台风的移动路径明显不同。为分析南海北部台风移动路径和活动范围,将每6 h一次的台风中心位置插值到 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 格点,统计近75年各格点台风途径总频次,得到台风移动路径密度图(见图1b、1d),同时在图中标记了各台风的消亡位置(见图1a、1c中蓝点)。

土台风活动范围大多局限在南海海盆内,生成后整体向西北或偏北方向移动,频繁经过海南岛东南部外海,随后靠近或登陆我国东南沿岸;另有小部分土台风在南海北部转向东北方向移动,穿过巴士海峡或台湾岛后进入西北太平洋(见图1b)。土台风平均消亡位置位于珠江口附近,多数在北部湾周边至珠江口以西的近岸海域消亡(见图1a)。可见土台风在南海北部的移动路径整体偏南、偏西,主要影响北部湾沿岸及广东西部近岸海域。

移入性台风活动范围更广,在菲律宾以东洋面生成后,整体往西北偏西方向移动,穿过菲律宾北部或巴士海峡进入南海东北部,频繁经过东沙群岛以南、吕宋海峡以西海域;之后继续向西北行进,靠近或登陆我国东南沿岸,或转向偏北或东北方向移动,逐渐移出南海海域(见图1d)。移入性台风平均消亡位置也在珠江口附近,消亡点位均匀分布在北部湾周边至福建沿海一带,消亡位置较土台风更深入内陆(见图1c)。表明移入性台风在南海北部的移动路径相对偏东,对我国东南沿海及内陆城市的影响范围更广。

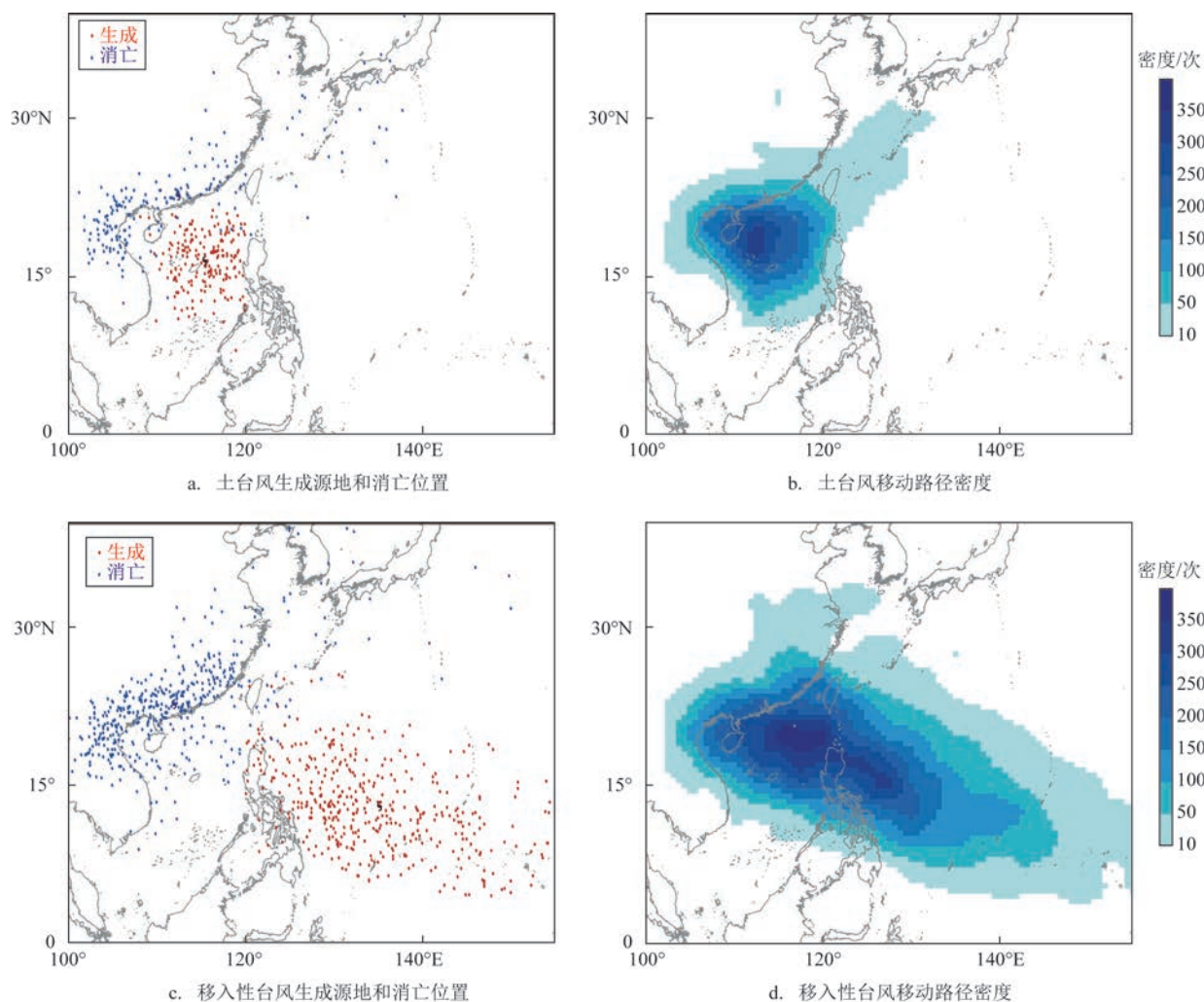


图1 南海北部台风的生成源地和消亡位置及其移动路径密度分布

Fig.1 The sources, dissipated points and distributions of the track densities of TCs in the northern SCS

2.2 台风移动速度和影响时长

南海北部台风平均移动速度为16.4 km/h,其中80%的台风移速介于10~25 km/h,移速超过25 km/h的台风占比仅为8.4%(见图2柱状图),但不同源地台风的移速存在明显差异。土台风和移入性台风在南海北部的平均移动速度分别为13.8 km/h和17.7 km/h。土台风移动速度相对较慢,10~15 km/h区间占比最高,达48.2%,移动速度超过25 km/h的土台风极少(见图2实线);移入性台风的移动速度多集中在10~25 km/h,移动速度超过25 km/h的占比为11.6%(见图2虚线)。

台风在南海北部的平均影响时长约为2.9天,80%台风的影响时长在1~4天(见图3柱状图),历

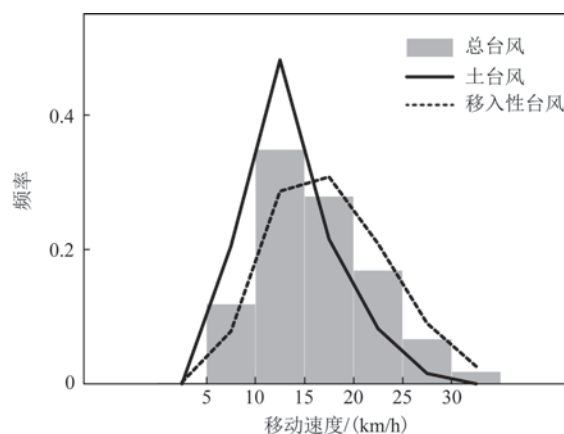


图2 南海北部台风移动速度频率分布

Fig.2 Frequency histograms of moving speeds for TCs in the northern SCS

史最长影响时间可达20天。土台风和移入性台风在南海北部海域的平均影响时长分别为3.7天和2.5天。图3中实线、虚线分别为两类台风影响时长的频率分布:土台风影响时长多为2~5天,累积占比72.8%,其中4天的频率最高;移入性台风影响时长多为1~4天,累积占比87.9%,以3天占比最大。整体而言,两类台风均存在影响时长超过10天的个例,且土台风影响时长更长。南海土台风的生命周期虽然短于西北太平洋生成台风^[11],但其移动速度慢,移动路径复杂多变,常出现曲折、打转、路径突然转折等情形^[23],因此在南海北部的影响时间普遍长于移入性台风。

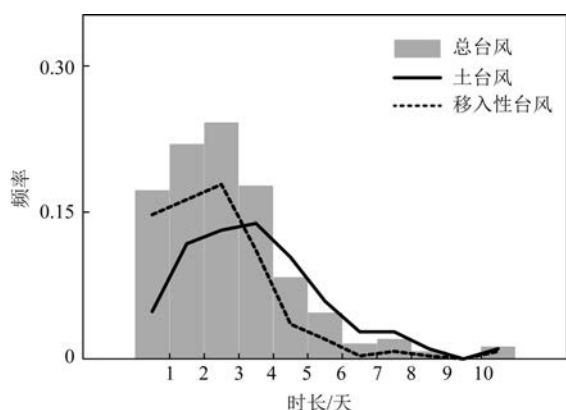


图3 南海北部台风影响时长的频率分布

Fig.3 Frequency histograms of lifetime for TCs in the northern SCS

2.3 台风影响强度

南海北部台风的平均中心最低气压为976 hPa,

平均最大风速为33 m/s;其中约70%的台风中心最低气压在980 hPa以上、最大风速低于35 m/s(见图4柱状图)。从强度等级分布来看,南海北部台风以台风级和强热带风暴级为主,两类占比均约30%;超强台风级占比最低;强台风级及以上的台风(下文称“高强度台风”)仅占总数的16.9%(见表1)。

对南海北部两类台风的影响强度进行分类统计,结果表明:土台风的平均中心最低气压为984 hPa,平均最大风速为27 m/s;移入性台风的平均中心最低气压为973 hPa,平均最大风速为35 m/s。从频率分布特征来看,移入性台风中心最低气压普遍更低,中心最大风速普遍更大(见图4)。强度等级统计显示,土台风以强热带风暴级和热带风暴级为主,高强度台风占比不足5%;移入性台风以台风级和强热带风暴级为主,高强度台风占比达22.7%(见表1)。对比可知,移入性台风的整体强度普遍更大。

2.4 台风活动季节变化

南海北部台风的活动时间为每年4月—翌年1月(见图5),全年活动时长达10个月。夏秋季(7—10月)台风活动最为频繁,全年约75%的台风活动发生在此期间;秋季(9—10月)台风整体强度更大,高强度台风占比更高,其中10月高强度台风占比高达28.6%,居全年之首。

不同源地台风的季节变化也存在明显差异。表2统计了两类台风各项活动特征的逐月变化规律。南海北部土台风活动季为4—11月,活跃高期为8—9月,该时段土台风生成频数最多、生成源

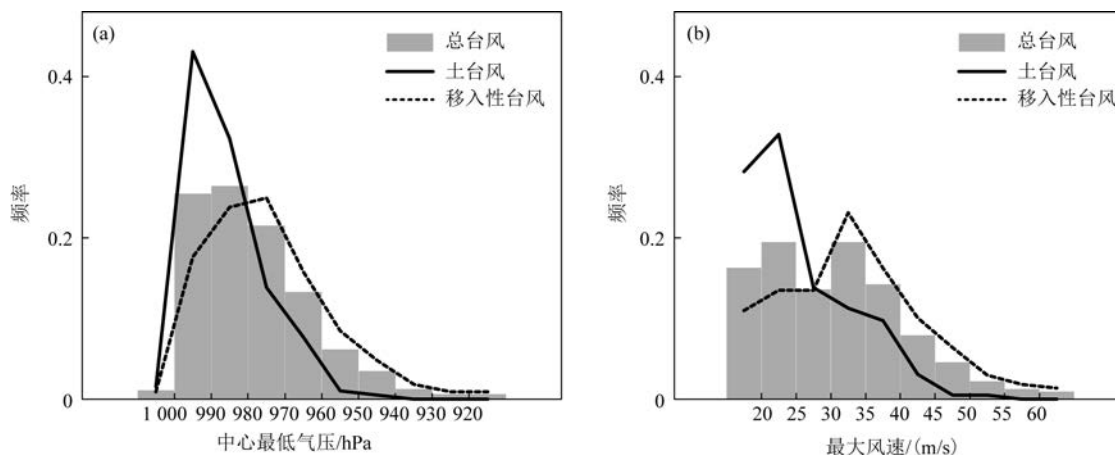


图4 南海北部台风中心最低气压(a)及最大风速(b)的频率分布

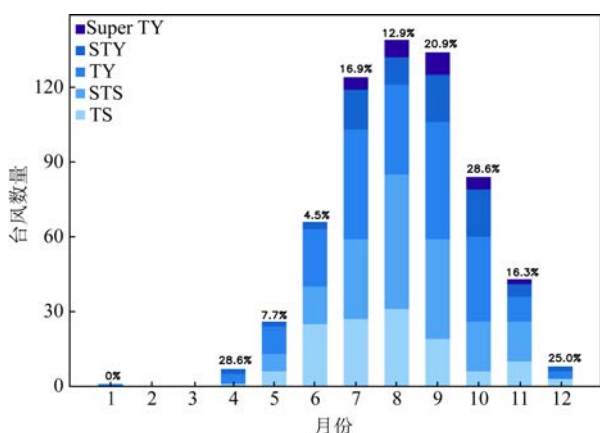
Fig.4 Frequency histograms of minimum central pressure (a) and maximum sustained wind speeds (b) for TCs in the northern SCS

表1 1949—2023年南海北部不同等级台风的数量与占比统计

Tab.1 Number and frequency of TCs in the northern SCS for different grades during 1949–2023

台风类型	热带风暴	强热带风暴	台风	强台风	超强台风	合计
总台风	128* (20.3%)**	184 (29.1%)	213 (33.7%)	79 (12.5%)	28 (4.4%)	632 (100%)
土台风	71 (36.4%)	75 (38.5%)	41 (21.0%)	7 (3.6%)	1 (0.5%)	195 (100%)
移入性台风	57 (13.0%)	109 (24.9%)	172 (39.4%)	72 (16.5%)	27 (6.2%)	437 (100%)

注：*台风数量；**台风占比。



注：各月上方标记数值为高强度台风占相应月份台风总频数的百分比

图5 南海北部台风数量的月际分布

Fig.5 Monthly distribution of TC number in the northern SCS

地最偏北、移动速度最快、影响时长最长；10月土台风的高强度台风占比为全年最高，整体强度更强。相比之下，移入性台风活动季更长，除2—3月外，其他各月均有移入性台风活动。移入性台风频数在8—9月达到峰值，生成源地也最偏北，在南海北部的影响时间更长。与土台风不同，移入性台风移动速度峰值出现在6—7月，与频数、影响时长的季节变化特征明显不同步。此外，除10月高强度台风占比较高外，4月移入性台风的强度也较强，高强度台风占比为全年最高。

3 南海北部台风型海浪特征

3.1 台风浪波高空间分布

台风中心附近的强风通过海面摩擦力和气压

梯度力向表层海水传递能量，进而形成巨浪。海洋工程防护等工作中通常需要考虑台风影响下海浪的极端不利工况，因此本文主要关注台风浪有效波高的过程极值。基于1981—2023年ERA5有效波高资料，筛选南海北部海域107场土台风和241场移入性台风过程，提取每场台风对应的有效波高过程极值，分别合成两类台风影响下有效波高极值的平均值和最大值空间分布，结果见图6。

1981—2023年，在土台风影响下，南海北部有效波高过程极值平均值呈东北—西南向带状分布，大部分格点波高可达3 m，海南岛东南部外海波高略偏低；近岸海域台风浪有效波高过程极值平均值明显减小，多在2 m以下（见图6a）。移入性台风影响下，南海北部有效波高过程极值平均值同样呈现自东北向西南、从外海向近岸逐渐减小的分布特征，大值中心出现在东沙群岛—巴士海峡一带，波高可达4 m，海南岛东南部外海则小于3 m（见图6b）。

从台风浪有效波高最大值的空间分布来看，土台风影响期间，南海北部大部分海域出现过6~8 m的灾害性海浪，巴士海峡局部海域曾出现9 m以上狂涛；近岸海域有效波高最大值普遍在6 m以下（见图6c）。移入性台风影响下，多数海域出现过9 m以上狂涛级灾害性海浪，广东东部近海—巴士海峡一带曾出现过12 m以上巨浪；近岸海域有效波高最大值多在6 m左右，其中广东东部近岸仍能达到9 m（见图6d）。

由以上分析可知，南海北部两类台风型海浪分布都存在空间非均匀性，无论波高平均值还是最大值，总体上均呈现从东北向西南、从外海向近岸逐渐减小的分布趋势，东沙群岛—巴士海峡的波高整体偏大，更容易发生极端海浪过程。但相比之下，

表2 1949—2023年南海北部台风活动特征的逐月变化

Tab.2 Monthly variations of TC activities in the northern SCS during 1949–2023

月份	频数/个	生成纬度/°N	移动速度/(m/s)	影响时长/天	高强度台风占比/%
1	(0,1*)	(/,6.6)	(/,11.3)	(/,0.8)	(/,0)
2	(0,0)	/	/	/	/
3	(0,0)	/	/	/	/
4	(1,6)	(13.7,7.9)	(9.5,15.5)	(3.8,1.4)	(0,33.3)
5	(17,9)	(14.8,8.2)	(12.9,14.5)	(3.6,1.8)	(5.9,11.1)
6	(34,32)	(16.5,10.6)	(13.4,19.4)	(3.4,2.4)	(2.9,6.3)
7	(37,87)	(17.1,12.8)	(13.4,19.7)	(3.6,2.3)	(2.7,23.0)
8	(47,92)	(17.4,15.5)	(13.6,17.6)	(4.5,3.0)	(0,19.6)
9	(46,88)	(16.2,15.0)	(14.5,18.6)	(3.7,2.8)	(8.7,27.3)
10	(10,74)	(13.9,12.2)	(13.7,15.6)	(2.8,3.0)	(10.0,31.1)
11	(3,40)	(12.7,9.5)	(13.0,14.3)	(2.3,1.9)	(0,17.5)
12	(0,8)	(/,7.4)	(/,14.3)	(/,1.6)	(/,25.0)

*括号内左列数据为土台风特征,右列数据为移入性台风特征

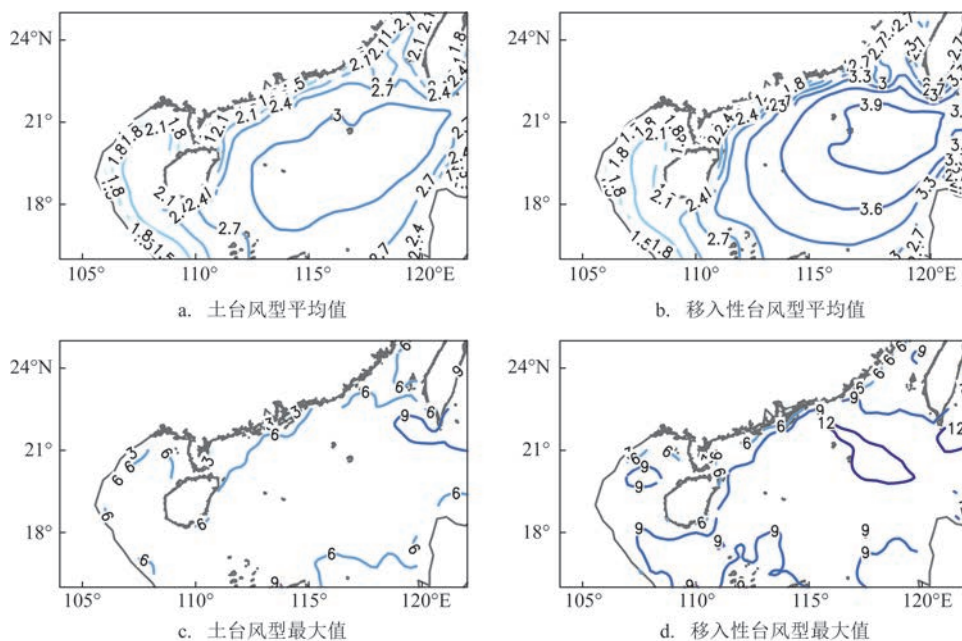


图6 1981—2023年南海北部台风型海浪波高平均值和最大值空间分布(单位:m)

Fig.6 Spatial distribution of mean and extreme values of TC wave magnitude in the northern SCS during 1981–2023 (unit: m)

移入性台风型海浪空间分布的非均匀性更为明显。

3.2 台风浪波高频率分布

从图6可以看出,移入性台风型海浪整体强于土台风型海浪。图7进一步给出两类台风浪波高的

频率分布情况。统计结果显示,南海北部土台风型海浪有效波高过程极值平均为4.9 m,其中50%台风浪过程的波高极值介于3~5 m,极值超过6 m的过程占比25.2%,极值能达到9 m的过程极少(见图7a)。移入性台风型海浪有效波高过程极值平均为6.4 m,

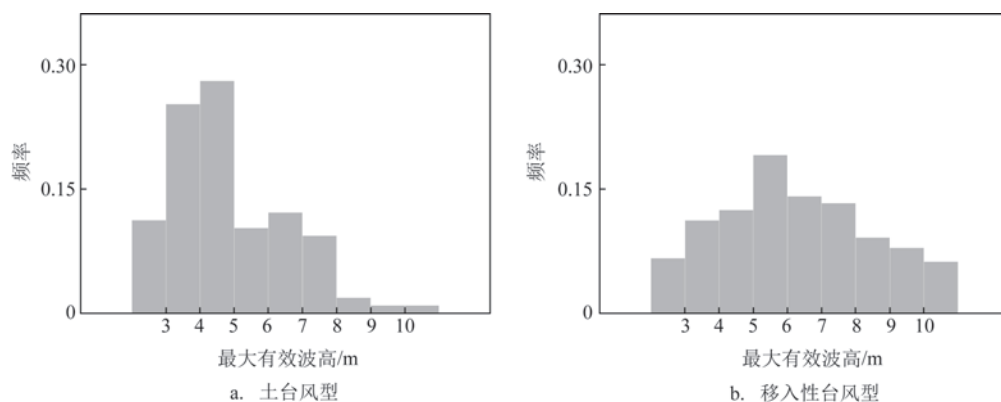


图7 南海北部台风浪最大有效波高频率分布

Fig.7 Frequency histograms of the maximum significant wave height for TCs in the northern SCS

频率分布较为均匀,台风浪过程的波高极值在5~6m区间占比最高,为19.1%,极值超过6m的过程累积占比50.6%,14.1%过程的极值可达9m以上(见图7b)。

3.3 台风浪波高与台风活动的关系

台风浪由台风风场驱动,其强度必然与台风活

动特征有关。图8为南海北部台风浪波高与台风影响强度的线性拟合结果。两类台风型海浪有效波高过程极值均与台风中心最大风速呈显著正相关关系,拟合系数 R^2 分别为0.17、0.40(见图8a、8b左图);与台风中心最低气压呈显著负相关关系, R^2 分别为0.26、0.38(见图8a、8b右图),统计结果均通过

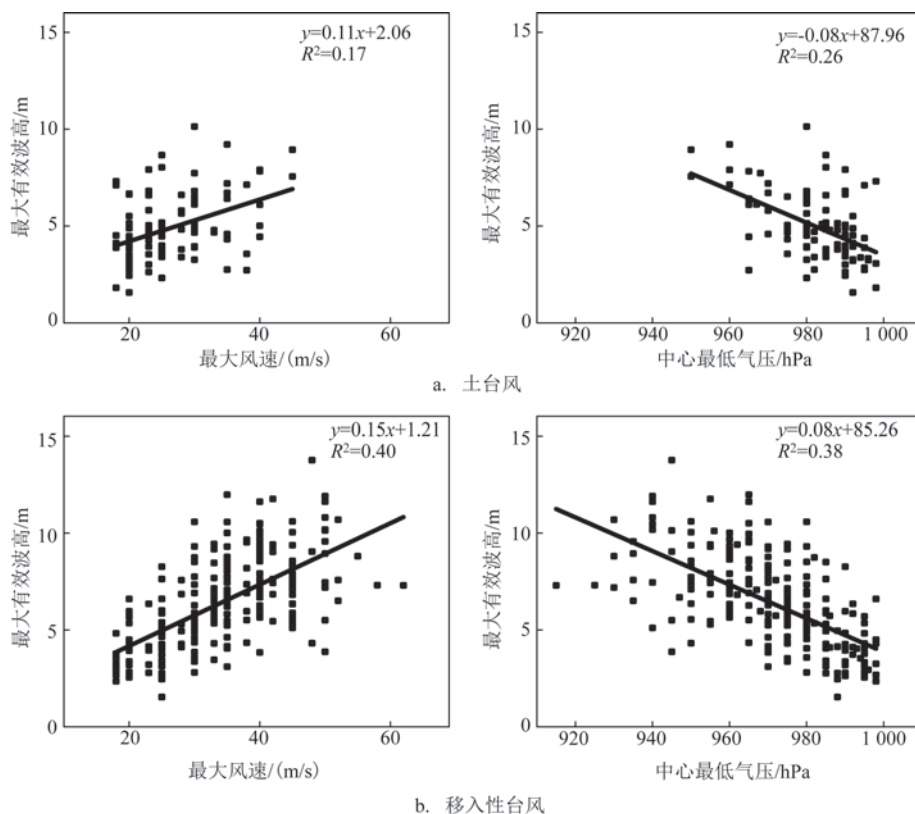


图8 南海北部台风浪最大有效波高与台风中心最大风速和最低气压的散点分布

Fig.8 Scatterplots of maximum sustained wind speeds and minimum central pressure against maximum significant wave height for TCs in the northern SCS

99.9%的信度检验。可见,台风强度越大,海浪成长越显著,越容易激发极端浪区;且台风中心最低气压与台风浪波高的线性拟合效果略优于台风中心最大风速。整体而言,在移入性台风影响下,台风浪与台风强度的拟合关系更好,台风强度对海浪波动变化的解释能力更强。

鉴于台风浪波高与台风强度的密切关系,台风浪空间分布特征(见图6)与台风强度空间分布趋势有较好的一致性。台风强度越高的外海海域,尤其是东沙群岛—巴士海峡一带,台风浪波高更大(图略);而水深较浅、下垫面摩擦较大的近岸海域,台风强度整体减弱,台风浪波高相应减小。

除台风强度外,台风移动速度也是影响台风浪的重要因素。分析发现,南海北部台风浪波高与台风移动速度无明显线性相关关系(图略)。台风移动速度与台风浪的关系复杂,更多通过改变台风风场结构的非对称性,进而调控台风浪场空间分布,使得台风移动路径右侧有效波高普遍大于左侧^[24-26]。

4 结论与讨论

本文利用近75年的CMA-STI热带气旋最佳路径数据集,从不同源地台风分类视角,系统分析南海北部台风活动特征;同时基于ERA5再分析数据集有效波高资料,进一步统计分析了两类台风型海浪的气候学特征,探讨台风浪与台风活动特征的关系。主要结论如下:

①南海北部台风的生成源地以西北太平洋为主,其次是南海局地,两者数量比例约为2:1。南海局地生成的土台风高频活动中心位于海南岛东南部外海,消亡位置多集中于珠江口以西沿海,移动路径整体偏南、偏西,主要影响北部湾周边及广东西部近岸海域;西北太平洋移入性台风的高频活动中心位于东沙群岛以南、吕宋海峡以西海面,消亡位置均匀分布于我国东南沿海且更深入内陆,移动路径更偏东,对我国东南沿海和内陆城市的影响更广泛。

②南海北部台风平均移动速度为16.4 km/h,平均影响时长约2.9天,以台风级和强热带风暴级为主;不同源地台风活动特征有显著差异。土台风移动速度慢,极少超过25 km/h,影响强度偏弱,高强度台风占比不足5%,但影响时长更长,多集中在2~5

天。移入性台风特征与之相反,移动速度较快,移速25 km/h以上的台风占比11.6%,整体强度更强,高强度台风占比22.7%,但影响时间偏短,多为1~4天。

③南海北部台风活动时间为每年4月—翌年1月,全年近75%的台风活动集中在7—10月,其中10月台风整体强度最高,高强度台风占比为全年最大。两类台风季节变化特征也存在差异:土台风活动季较短,8—9月是其高峰期,该时段台风生成频数最多、生成源地最北、移动速度最快、影响时长最长。移入性台风活动季更长,其频数、影响时长的峰值同样出现在8—9月,但移动速度峰值出现在6—7月,与其他活动特征的季节变化明显不同步。

④不同源地台风驱动的海浪波高均存在明显空间非均匀性,总体呈现自东北向西南、从外海向近岸逐渐减小的分布规律;东沙群岛—巴士海峡海域台风浪波高整体偏大,极端海浪过程更易频发。相比之下,移入性台风型海浪波高空间分布的非均匀性更为显著。

⑤土台风型海浪有效波高过程极值平均值为4.9 m,近半数集中在3~5 m,极值6 m以上过程占比约为25%;移入性台风型海浪有效波高过程极值平均值为6.4 m,半数过程极值可达6 m,约14%的过程极值能超过9 m。移入性台风所引发的海浪强度普遍更强。

⑥两类台风型海浪波高均与台风强度具有良好的线性拟合关系,台风中心最低气压越低、近中心最大风速越大,海浪成长越显著,越容易诱发极端浪区;且移入性台风影响下,台风浪与台风强度的拟合关系更好。

本文利用长时间序列资料,对南海北部台风和台风型海浪气候统计特征进行了较为全面的分析,所得结论具有一定参考价值,弥补了南海台风型海浪气候特征相关研究的不足,量化了台风浪波高与台风强度的关系,可形成适用于南海区的快速高效的台风浪经验预报方法,为海洋预报业务、海洋工程防护提供参考。需要指出的是,本文结论仅基于特定来源的数据,其普适性有待今后结合多源数据进行交叉验证。

参考文献:

[1] 陈世荣. 西北太平洋的热带风暴源地[J]. 气象, 1990, 16(2): 23-

27.
CHEN S Y. Source regions of tropical storms over Northwest Pacific Ocean[J]. *Meteorological Monthly*, 1990, 16(2): 23-27.
- [2] 吴迪生, 赵雪, 冯伟忠, 等. 南海灾害性土台风统计分析[J]. *热带气象学报*, 2005, 21(3): 309-314.
WU D S, ZHAO X, FENG W Z, et al. The statistical analyse to the local harmful typhoon of South China Sea[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2005, 21(3): 309-314.
- [3] 白莉娜, 王元. 南海源地热带气旋生成和登陆频数的气候变异[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2009, 45(6): 757-768.
BAI L N, WANG Y. Climatic variation of the occurring and landing frequencies of tropical cyclones initiated from South China Sea[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2009, 45(6): 757-768.
- [4] WANG G H, SU J L, DING Y H, et al. Tropical cyclone genesis over the South China Sea[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 68(3-4): 318-326.
- [5] 薛淑君. 南海土台风强度变化特征分析[J]. *海洋学研究*, 2018, 36(3): 1-16.
XUE S J. The analysis on characteristics of local typhoon intensity variation in the South China Sea[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2018, 36(3): 1-16.
- [6] 黄忠, 林良勋. 快速西行进入南海台风的统计特征[J]. *气象*, 2004, 30(9): 14-18.
HUANG Z, LIN L X. Statistical characteristics of tracking westward typhoons at high speed into the South China Sea[J]. *Meteorological Monthly*, 2004, 30(9): 14-18.
- [7] 于龙, 孙佳, 回贞立, 等. 西行穿越南海台风的特征及机制研究[J]. *海洋科学进展*, 2019, 37(4): 543-550.
YU L, SUN J, HUI Z L. Study on the typhoons with westward tracks crossing the South China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2019, 37(4): 543-550.
- [8] 李春晖, 刘春霞, 程正泉. 近 50 年南海热带气旋时空分布特征及其海洋影响因子[J]. *热带气象学报*, 2007, 23(4): 341-347.
LI C H, LIU C X, CHENG Z Q. The characteristics of temporal and spatial distribution of tropical cyclone frequencies over the South China Sea and its affecting oceanic factors in the past 50 yrs[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2007, 23(4): 341-347.
- [9] 叶婷婷. 南海热带气旋的若干气候特征分析[D]. 南京: 南京大学, 2013.
YE T T. A study to several climatological characteristic of tropical cyclones from South China Sea[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [10] 程撼, 梁楚进, 董昌明, 等. 南海土台风和非局地台风的对比研究[J]. *海洋学研究*, 2014, 32(1): 19-30.
CHENG H, LIANG C J, DONG C M, et al. Temporal and spatial distribution of local typhoon and non-local typhoon in the South China Sea[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2014, 32(1): 19-30.
- [11] WU L, ZHANG H J, CHEN J M, et al. Characteristics of tropical cyclone activity over the South China Sea: local and nonlocal tropical cyclones[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2020, 31(2): 261-271.
- [12] HA Y, ZHONG Z, SUN Y, et al. Decadal change of South China Sea tropical cyclone activity in mid-1990s and its possible linkage with intraseasonal variability[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(9): 5331-5344.
- [13] YANG S Q, HOU Y J, LIU Y H. Observed typhoon wave spectrum in northern South China Sea[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, 33(5): 1286-1294.
- [14] 齐义泉, 施平, 毛庆文, 等. 西太平洋 8708 号台风海面风、浪结构及其关系的遥感研究[J]. *海洋学报*, 1998, 20(3): 27-35.
QI Y Q, SHI P, MAO Q W, et al. Analysis of typhoon Betty 1987 on sea surface wind and wave over the western Pacific using Geosat altimetric data[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 20(3): 27-35.
- [15] 周水华, 李远芳, 冯伟忠, 等. “0601”号台风控制下的广东近岸浪特征[J]. *海洋通报*, 2010, 29(2): 130-134.
ZHOU S H, LI Y F, FENG W Z, et al. Wave characteristics dominated by typhoon named ‘Pearl’ [J]. *Marine Science Bulletin*, 2010, 29(2): 130-134.
- [16] 邓文君, 宋萍萍, 冯伟忠, 等. 强台风“珍珠”引发广东沿岸灾害性海浪调查分析[J]. *海洋预报*, 2007, 24(2): 52-59.
DENG W J, SONG P P, FENG W Z, et al. Surrey and analysis of rough high sea wave along Guangdong coast caused by severe typhoon “Chanchu”[J]. *Marine Forecasts*, 2007, 24(2): 52-59.
- [17] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287-301.
- [18] LU X Q, YU H, YING M, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(4): 690-699.
- [19] 姚小娟, 张海燕. 2017 年 7—10 月西北太平洋 TC 生成异常特征及成因分析[J]. *海洋预报*, 2019, 36(5): 53-62.
YAO X J, ZHANG H Y. Abnormal characteristics and causes analysis of tropical cyclogenesis over the western North Pacific from July to October 2017[J]. *Marine Forecasts*, 2019, 36(5): 53-62.
- [20] WANG J C, LIU J C, WANG Y, et al. Spatiotemporal variations and extreme value analysis of significant wave height in the South China Sea based on 71-year long ERA5 wave reanalysis[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 113: 102750.
- [21] 夏武松, 魏永亮, 陆恒星, 等. 基于 ERA5 的南大西洋风速和有效波高时空变化特征分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2024, 46(1): 1-11.
XIA W S, WEI Y L, LU H X, et al. Analysis of temporal and spatial changes of wind speed and significant wave height in the South Atlantic based on ERA5[J]. *Transactions of Oceanology*

- and Limnology, 2024, 46(1): 1-11.
- [22] DU W Y, ZHANG X R, SHI H Y, et al. Long-term extreme wave characteristics in the water adjacent to China based on ERA5 reanalysis data[J]. Journal of Ocean University of China, 2024, 23 (1): 1-10.
- [23] 韦有暹, 朱庆圻. 南海和西北太平洋台风复杂路径的气候分析[J]. 大气科学, 1985, 9(4): 358-365.
- WEI Y X, ZHU Q Q. A climato-statistical analysis of the complicated typhoon tracks over the South China Sea and northwestern Pacific[J]. Scientia Atmospherica Sinica, 1985, 9 (4): 358-365.
- [24] 孙瑞. 南海北部台风浪的时空变化规律和动力机制[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- SUN R. The variation and mechanism of typhoon waves in the northern part of the South China Sea[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [25] SHI Y P, DU Y, CHU X Q, et al. Asymmetric wave distributions of tropical cyclones based on CFOSAT observations[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2021, 126(4): e2020JC016829.
- [26] 洪新, 赵玮, 高志波, 等. 热带气旋风场对海浪分布特征的影响[J]. 海洋通报, 2015, 34(1): 32-44.
- HONG X, ZHAO W, GAO Z B, et al. Impacts of tropical cyclone wind field on ocean surface waves[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(1): 32-44.

Statistical characteristics of tropical cyclones and tropical cyclone waves in the northern South China Sea

ZHANG Haiyan^{1,2}, LUO Jun^{1,2}, LI Xixi^{1,2}, YAO Xiaojuan^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}

(1. South China Sea Marine Forecast and Hazzard Mitigation Center, Ministry of Natural Resources, Guangdong Guangzhou 510300, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangdong Guangzhou 510310, China)

Abstract: Using the best tropical cyclone (TC) track data of the China Meteorological Administration from 1949 to 2023, statistical characteristics of the TCs in the northern South China Sea (SCS) are analyzed for two types of TCs with different origin sources. Significant differences are studied in terms of genesis, disappearance, track, moving speed, intensity, duration and seasonal variations. Based on the hourly significant wave height (SWH) of the ERA5 datasets, the climatological characteristics of waves generated by the two types of TC are further analyzed, and the relationship between wave magnitudes and TC activities is discussed. The results show that waves of both types of TC exhibit similar spatial patterns with larger SWH in the northeast parts and open sea, smaller SWH in the southwest parts and nearshore waters. However, wave magnitudes of non-local TCs are generally larger. The wave magnitude and TC intensity exhibit a clear linear relationship for both types of TC, and the relationship is more significant for non-local TC.

Key words: local tropical cyclones; non-local tropical cyclones; TC waves; northern South China Sea; statistical characteristics