

Doi: 10.11840/j.issn.1001-6392.2021.03.006

台风涌浪进入东海形成浪区的空间分布特征

陆恒星^{1,3,4}, 高志一², 魏永亮^{1,3,4}, 孟凡昌², 唐泽艳⁵

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081;

3. 上海河口海洋测绘工程技术研究中心, 上海 201306; 4. 上海海洋大学国际海洋研究中心, 上海 201306;

5. 国家海洋局东海预报中心, 上海 200081)

摘 要: 西北太平洋台风外围的涌浪可穿过琉球群岛的海峡传入东海。本文采用 1978—2018 年的历史资料研究了有效波高 2 m 及以上的涌浪穿过琉球群岛在东海所形成浪区的空间分布特征。结果表明, 沿适当角度的台风外围涌浪主要通过与该国海峡、宫古海峡、边户岬-与路岛水道、奄美-吐噶喇海峡传入东海, 其余受到岛屿阻挡。筛选得到的 40 个台风案例中, 宫古海峡入射次数最多, 为 33 次, 其次是边户岬-与路岛水道和奄美-吐噶喇海峡, 均为 17 次, 与该国海峡为 11 次。奄美-吐噶喇海峡、宫古海峡、边户岬-与路岛水道和与该国海峡的涌浪入射深度达到最大时分别约为 570 km、480 km、380 km 和 234 km。多元线性回归分析结果表明, 登陆型台风和西进型台风 10 级风半径、台风平均移动速度、入射角度对涌浪入射深度的影响较大, 单独台风要素与涌浪入射深度无统计学上的相关性。

关键词: 涌浪; 琉球群岛; 传播特征; 入射深度

中图分类号: P731.22; P732.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2021)03-0292-09

Spatial distribution characteristics of typhoon swell in the East China Sea

LU Hengxing^{1,3,4}, GAO Zhiyi², WEI Yongliang^{1,3,4}, MENG Fanchang², TANG Zeyan⁵

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 3. Engineering Research Center on Estuarine and Oceanographic Mapping, Shanghai Municipal Ocean Bureau, Shanghai 201306, China; 4. International Center for Marine Studies, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

5. Forecasting Center of East China Sea, State Oceanic Administration, Shanghai 200081, China)

Abstract: Swells generated by typhoons in the Northwest Pacific Ocean can pass through the straits of Ryukyu Islands to the East China Sea. Based on the historical data from 1978 to 2018, the spatial distribution characteristics of swells with significant wave heights more than 2 m propagating into the East China Sea were studied. The results showed that the external swells along proper angles can propagate into the East China Sea through the Yonaguni Strait, Miyako Strait, Manzanaro-Yorojima Waterway, and Amami-Tokara Strait, and the rest were blocked by islands. Among the 40 typhoon cases screened, the incidence frequency of Miyako Strait was highest with 33 times, followed by Manzanaro-Yorojima Waterway and Amami-Tokara Strait with 17 times and Yonaguni Strait with 11 times. The maximum depths of the incident swell in the Amami-Tokara Strait, Miyako Strait, Manzanaro-Yorojima Waterway and the Yonaguni Strait are about 570 km, 480 km, 380 km and 234 km respectively. The results of multiple linear regression analysis show that the radius of whole gale, the average moving speed of typhoon and incident angle have great influences on the incident depth of swell, and there is no statistical correlation between

收稿日期: 2020-10-29; 修订日期: 2021-01-08

基金项目: 海洋动力灾害观测预警系统集成与应用示范 (2018YFC1407001); 国家自然科学基金 (41976174; 41606196)

作者简介: 陆恒星 (1995—), 硕士研究生, 研究方向为海浪遥感应用和海浪数值模拟。电子邮箱: lhxxyx@vip.qq.com

通讯作者: 魏永亮。电子邮箱: yl-wei@shou.edu.cn

<http://hytb.nmdis.org.cn>

single typhoon element and the depth of incident swell.

Key words: swell; Ryukyu Islands; propagation feature; incident depth

涌浪是海面极为重要的波浪形式,其定义是从生成源地向外传播,当风停止或削弱、转向,遗留在海上的或来自其他海域的波浪。全球海洋的背景场主要由涌浪主导 (Semedo et al, 2011)。涌浪传播速度较快,常在风暴系统到来之前先行抵达 (陈晓斌 等, 2013),且其衰减率较小,能够跨越大洋传播。涌浪因其作用时间长,往往具有惊人的破坏力,是造成沉船事故的重要因素 (魏永亮 等, 2017)。在大洋中,涌浪能使舰船发生中拱、中垂、螺旋桨空旋等现象,给舰船造成严重损坏 (郑崇伟 等, 2011)。传播到浅水或者近岸时,常形成猛烈拍岸浪,对岸边建筑破坏性很大 (黄世昌 等, 2012; 周延东 等, 2016)。

前人关于极端天气条件下涌浪的传播特征已有相关研究成果。Munk 等 (1963) 研究表明涌浪主要沿着地球大圆弧传播。周学群等 (1990) 基于船舶定点观测资料,分析了 8719 号台风涌浪在南海东北部海域的传播特征。韩晓伟等 (2011) 利用 WAVEWATCH III 对 0801 号台风过程进行了数值模拟,发现涌浪场基本分布在远离台风中心的外围海域,与风浪场的分布几乎相反。Ardhuin 等 (2003) 分析了大西洋沿岸东南部海域的波浪数据,发现涌浪跨陆架或岛屿传播时,能量最大降幅达到 93%。陈剑桥 (2018) 基于 SWAN 模式的模拟结果指出台湾岛对涌浪传播有阻挡作用。

东海与西北太平洋通过琉球群岛的海峡和水道相连。琉球群岛是太平洋东岸及大洋洲各国出入东海和黄海的重要水运航道,有众多的岛屿、海峡和水道,海底地形复杂 (毛科峰 等, 2010)。台风期间,东海的涌浪主要从西北太平洋通过琉球群岛的海峡和水道传入 (裴晔 等, 2016)。涌浪跨琉球群岛传播进东海时会发生折射和绕射,对入射涌浪的浪向及位置有一定的限定,无法忽略海底地形和岛屿的影响,相关研究较少。

因此,深入研究台风外围涌浪跨琉球群岛传入东海的传播和分布特征,对海上航行安全,台风提前预警以及海洋预报工作具有重要的指导意义。本文基于海浪再分析和台风历史资料,研究了台风涌

浪进入东海形成浪区的空间分布特征,以及涌浪入射深度与台风要素的关系。

1 研究区域及基础数据

1.1 研究区域

本文以 0° — 45° N, 105° E— 150° E 范围内的海域作为研究区域。琉球群岛西至中国台湾岛,东至日本九州岛,岛屿之间有众多海峡和水道。自西向东主要的海峡和水道依次有与那国海峡 (121.63° E— 123.61° E), 石垣水道 (124.36° E— 125.19° E), 宫古海峡 (125.34° E— 127.61° E), 边户岬—与路岛水道 (128.30° E— 129.20° E), 奄美—吐噶喇海峡 (129.70° E— 130.88° E) 和大隅海峡 (130.62° E— 130.67° E)。为体现琉球群岛的地形特点,断面设置及垂直剖面水深如图 1A,水深小于 100 m 的岛屿及陆架区域大于 30%。

Snodgrass 等 (1966) 研究表明涌浪沿大圆弧传播遵循恒定波周期的几何光学传播。根据前人的研究成果,若西北太平洋台风激发的涌浪沿地球大圆弧传播到琉球群岛,理论上会有一部分涌浪被岛屿及陆架阻挡,另一部分通过海峡和水道传入东海 (图 1B)。从 Topex/Poseidon 卫星在 2000 年 7 月 6 日 21:51:34 (UTC) 扫过琉球群岛后的轨道来看 (图 1C),在 0003 号台风过程中确实存在琉球群岛的岛屿后浪高小,海峡和水道口后浪高大的现象,与前人的研究相符。

1.2 基础数据

本研究使用的 1978—2018 年近 40 年的台风编号及路径信息来自中国中央气象台台风网,台风要素信息来自日本数字台风网。

天气形势场数据来源于美国国家海洋环境预报中心 (NCEP) 的气候预报再分析资料 (CFSR),该资料给出海表气压及 10 m 径向和纬向风速,风场和气压场的空间分辨率是 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$,时间步长是 1 h。

地形高程数据采用的是美国地球物理中心 (NGDC) 发布的 etopo2,空间分辨率为 $1/30^{\circ}$ 。海

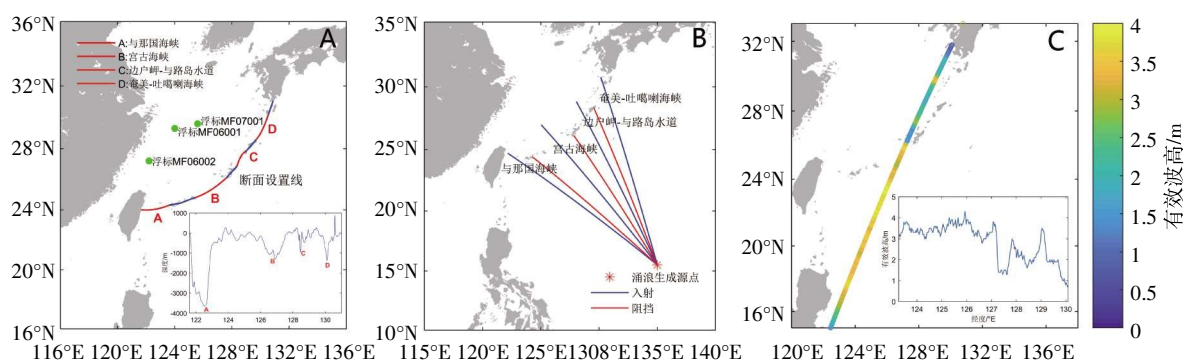


图1 (A) 琉球群岛断面设置及水深图; (B) 涌浪沿地球大圆弧传播示意图; (C) 台风0003号 KIROGI 过程中 Topex/Poseidon 卫星高度计在 20000706 215134 (UTC) 的有效波高数据及有效波高沿经度分布图

岸线数据采用 GSHHS 全球高分辨率海岸线数据。

2 海浪再分析资料

关于台风涌浪进入东海形成浪区的研究需要较高分辨率的浪场资料,以便较好地分析和刻画其空间分布特征。公开浪场资料空间分辨率不足,不适于本文研究。故本文基于第三代海浪模式 WAVEWATCH III 重新制备了海浪再分析资料。

2.1 模式设置及介绍

海浪模式 WAVEWATCH III (简称 WW3) 是基于 WAM、WAVEWATCH I 和 WAVEWATCH II 模式基础上开发的第三代海浪模式,广泛应用于海浪研究和预报,现已被 NCEP 用作业务化的全球和区域海浪预报模式。本文使用的 WW3 (v5.16) 在以往版本的基础上,谱作用量平衡方程右侧的源函数 S 包括了更多的物理过程。除了风能量输入项 S_{in} 、白冠破碎耗散项 S_{dis} 、波波非线性相互作用项 S_{nl} 三个主要的平衡项外,还包含线性输入项 S_m 、波浪和地形相互作用项 S_{bot} 、深度引起的破碎项 S_{db} 、三波非线性相互作用项 S_{tr} 、地形引起的波扩散项 S_{sc} 、用户添加的源函数项 S_{xx} , S 可表示为:

$$S = S_{in} + S_{dis} + S_{nl} + S_{m} + S_{bot} + S_{db} + S_{tr} + S_{sc} + S_{xx} \quad (1)$$

本文波浪场计算海域范围为 -5°S — 50°N , 99°E — 155°E , 空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ 。利用时间步长为 1 h 的高分辨率 CFSR 再分析风场作为驱动,模拟计算时间为 1979/01/01/00:00:00—2019/01/01/00:00:00,采用 ST2 参数化方案,每 1 h 输出一次结果。

2.2 模式验证

为综合直观地比较模拟和实测有效波高的差异,将 WW3 模式的模拟结果与 2018 年浮标

MF06001、MF06002 和 MF07001 (图 1) 观测得到的有效波高进行对比,分析模拟有效波高的可信度。全年的浮标数据包含了所有的天气过程,模式设置是相同的,故 2018 年的对比验证结果不失一般性。本文计算了相关系数 (R)、平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE),并画出散点图 (图 2)。可以看出 WW3 模拟结果与浮标观测结果具有较好的一致性,相关系数分别为 0.95、0.96 和 0.96,平均绝对误差均为 0.21 m,均方根误差分别为 0.08 m、0.10 m 和 0.10 m,故 WW3 模式模拟的有效波高具有可靠性。

3 台风筛选方法

本文参照 Collard 等 (2009) 和 Young 等 (2013) 的标准,结合天气学的角度来筛选可作为涌浪分析的台风案例,标准如下。

第一,基于天气形势,在台风移动和涌浪入射持续期间,琉球群岛的断面线至中国近岸,整个东海风速均小于 10 m/s,确保在该研究区域内风的能量输入较小。第二,研究海域内没有其他显著的天气系统干扰,且是孤立台风过程。研究区域内涌浪传播距离不超过 1 000 km,使得西北太平洋台风激发生成的涌浪成分纯粹,保证受其他波浪系统的影响可忽略。第三,为确保入射的涌浪由孤立台风激发,消除背景有效波高,同时考虑到影响船舶航行安全的指标,本文以有效波高 2 m 及以上的涌浪 (下文简称“2 m 涌浪”),即再分析浪场中的 2 m 涌高线为研究对象。2 m 涌高线通过琉球群岛传播进东海后形成的舌状涌浪场称作入射涌浪区,其长度称为涌浪入射深度。以 2 m 涌高线抵达琉球群岛

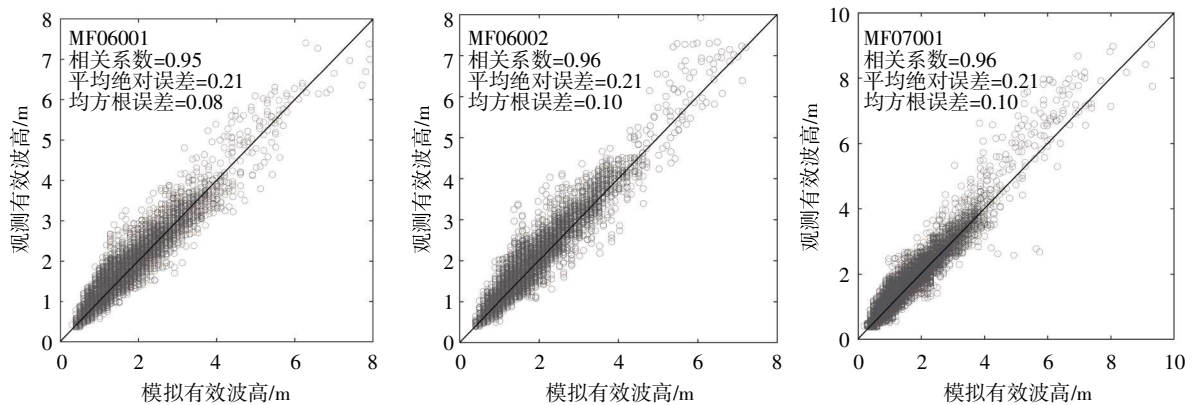


图2 浮标 MF06001 (左)、MF06002 (中) 和 MF07001 (右) 观测有效波高与模拟有效波高散点图

为起始时间, 以台风 10 m/s 风圈抵达琉球群岛为截止时间。过滤掉 10 m/s 风圈比 2 m 涌高线先行抵达琉球群岛的台风个例。

综合上述条件, 筛选出 1978—2018 年 6—8 月份符合条件的 40 个单独台风过程案例 (以 9710 号台风为例, 图 3) 进行研究。

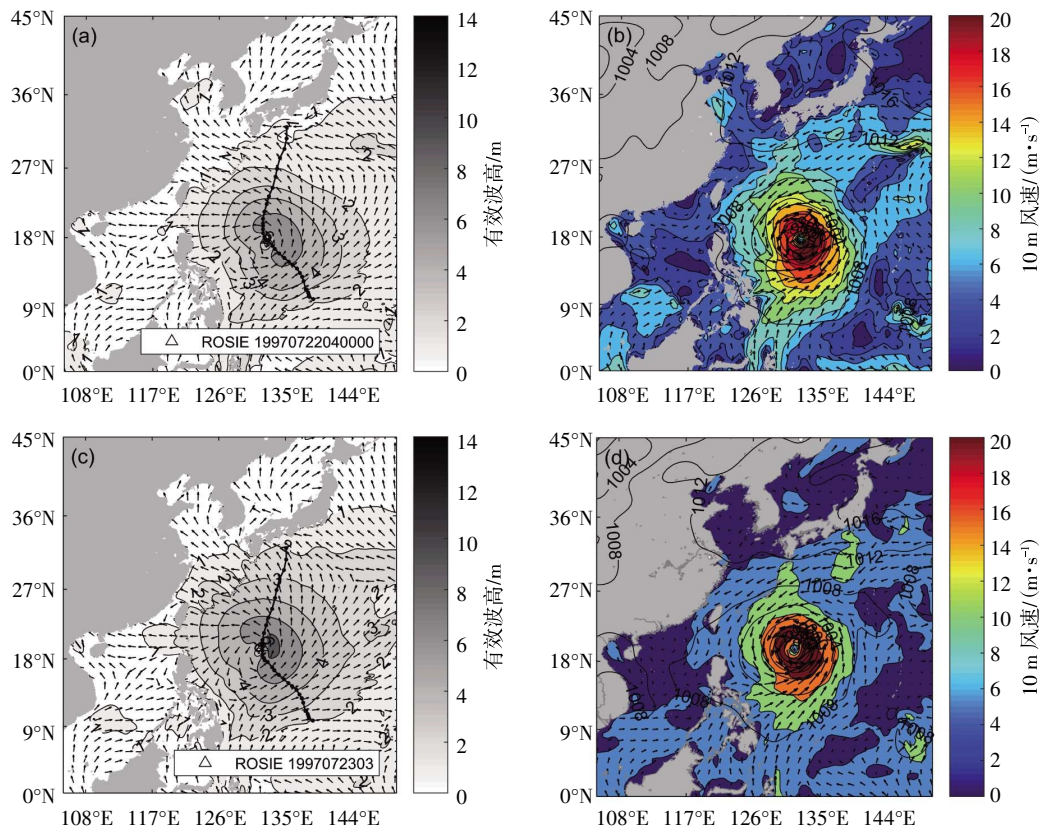


图3 转向型台风 9710 号 ROSIE 过程浪场和天气形势分布情况

注: (a) 19970722 040000 (UTC) 浪场分布图; (b) 19970722 040000 (UTC) 天气形势分布图; (c) 19970723 030000 (UTC) 浪场分布图; (d) 19970723 030000 (UTC) 天气形势分布图

4 结果分析

通过对 40 个台风案例进行分析, 发现西北太平洋台风激发的外围涌浪接触到琉球群岛后, 一部

分会被群岛上的岛屿或岸礁阻挡, 另一部分主要通过宫古海峡、宫古海峡、边户岬—与路岛水道和奄美—吐噶喇海峡入射进东海形成舌状涌浪场。本文研究的 2 m 涌浪传播距离基本在 1 000 km 范围, 可将涌浪近似视为几何光学传播。由于台风激发生

成的涌浪向外传播过程中能量不断耗散,会在台风中心外围形成有效波高达 2 m 及以上的不规则圆形涌浪场。涌浪先于台风向外传播,脱离生成源区一定距离后有效波高逐渐衰减到 2 m 以下,故涌浪入射深度是有限的。

按路径将台风案例分成登陆型、西进型和转向型三种类型(图 4)分别进行结果分析。三种路径台风,从 2 m 涌高线接触到琉球群岛到 10 m/s 风

圈接触到琉球群岛的过程中,涌浪场均匀稳定,入射涌浪的浪向在较小的范围内变化。涌浪易通过台风移动路径右侧大浪区覆盖到的海峡入射,若海峡位于台风移动路径左侧,则不利于涌浪入射。涌浪的浪向与海峡口的法线夹角较大,不利于涌浪从该海峡入射,若夹角较小则利于涌浪入射。台风右侧涌浪的浪向与海峡口法线的夹角往往较小。

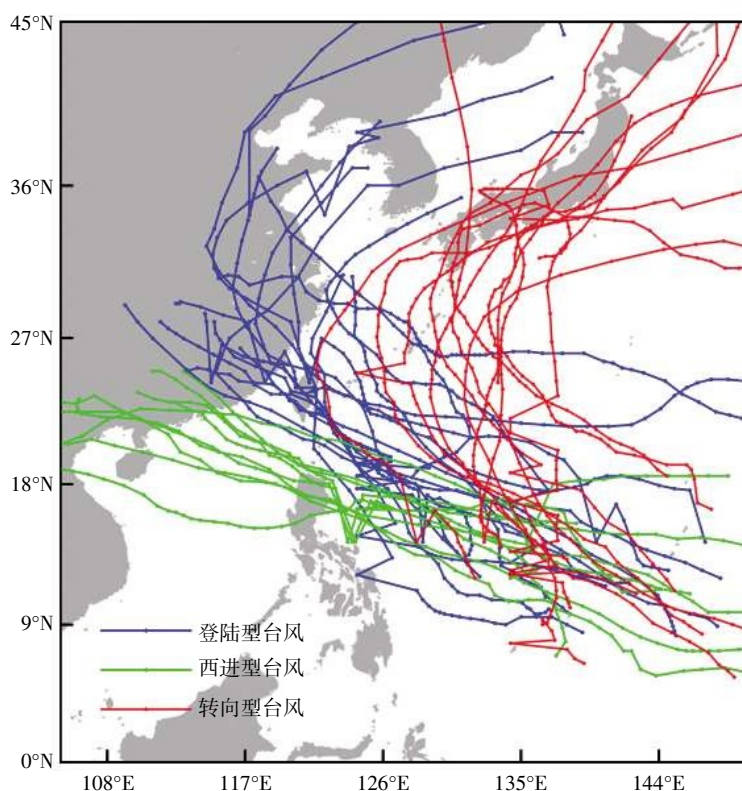


图 4 台风案例按三种路径分类图

4.1 登陆型台风案例分析

从筛选得到的 18 个登陆型台风案例来看(表 1),有 16 个台风案例通过宫古海峡入射,边户岬-与路岛水道和奄美-吐噶喇海峡均有 7 个案例入射,仅有 3 个案例通过与那国海峡入射。登陆型台风在移动过程中会穿过琉球群岛,台风移动路径与琉球群岛的交点简称“登陆点”。登陆点跨度较大,西至台湾岛以南,东至冲绳岛以东。有 16 个台风案例(7910、8007、8408、8706、9005、9107、9405、9412、9416、9417、9717、0205、0513、0605、1410 和 1601 号台风)的登陆点在台湾岛以南至宫古海峡范围内,该情况下涌浪均会通过宫古海峡入射。宫古海峡、边户岬-与路岛水道和奄

美-吐噶喇海峡均位于台风移动路径右侧大浪区,且浪向与海峡口法线夹角往往较小。该情况下与那国海峡位于登陆型台风移动路径的右上侧,涌浪浪向与海峡口法线夹角较大,鲜有涌浪入射,其入射深度较小,在 50 km 以内。若台风强度和半径足够大,激发的 2 m 涌浪能传播到边户岬-与路岛水道和奄美-吐噶喇海峡,则将同时入射两个或三个海峡。有 2 个台风案例(0008 和 1810 号台风)的登陆点在宫古海峡至奄美岛范围内,只有奄美-吐噶喇海峡有涌浪入射。若三个海峡能同时入射,则通常宫古海峡的涌浪入射深度最大,边户岬-与路岛水道与奄美-吐噶喇海峡次之,与那国海峡最浅。登陆型台风的涌浪入射深度大约在 20~280 km 之

表 1 登陆型台风案例统计信息表

台风编号	涌浪入射起止时间 (UTC)	10 级风圈 半径/nm	7 级风圈半 径/nm	平均中心 气压/hp	平均风速/ (m·s ⁻¹)	平均速度/ (km·h ⁻¹)	入射角度/°	入射海峡	涌浪入射 深度/km
7910	197908 2014–2100	74	177	938	52	17.7	31.1	BCD	145
8007	198007 0814–0822	45	200	982	29	24.	–43.2	BCD	105
8408	198408 0601–0606	N/A	225	992	22	17.8	–39.5	BC	41
8706	198707 1918–2010	66	233	983	30	26.5	–52.4	B	100
9005	199006 2105–2120	46	219	970	33	21.3	–44.3	AB	197
9107	199107 1717–1801	89	217	969	46	22.5	–35.4	B	112
9405	199407 0902–0907	70	270	971	48	18.4	–31.7	AB	93
9412	199408 0123–0207	N/A	90	998	19	21.7	–32.9	B	50
9416	199408 1800–1810	80	273	973	34	16.7	0.3	B	43
9417	199408 3006–3015	N/A	83	992	20	17.1	26.5	BCD	40
9717	199708 2520–2700	79	276	962	39	6.9	–26.4	AB	272
0008	200008 0508–0520	53	134	956	41	19.3	61.2	D	163
0205	200207 0122–0202	70	355	981	28	20.7	–6.0	BC	31
0513	200508 2916–2923	113	242	961	40	22.0	4.2	BCD	22
0605	200607 2317–2405	48	146	969	36	19.3	–53.0	B	121
1410	201407 2108–2116	62	174	973	33	19.9	–37.5	B	116
1601	201607 0605–0609	51	178	943	48	28.7	–16.5	BCD	55
1810	201807 1921–2003	N/A	208	993	21	15.4	17.7	D	27

注：A 为与那国海峡、B 为宫古海峡、C 为边户岬–与路岛水道、D 为奄美–吐噶喇海峡；入射角度为 2 m 涌浪入射进琉球群岛时，台风中心与宫古海峡口法线的夹角，向右为正

间。涌浪入射时，台风中心位置与宫古海峡法线的夹角在–53°~61°之间，登陆型台风 2 m 涌浪会通过 与那国海峡、宫古海峡、边户岬–与路岛水道和奄美–吐噶喇海峡入射进琉球群岛。

4.2 西进型台风案例分析

10 个西进型台风案例（表 2），有 10 个台风案例均通过宫古海峡入射，有 8 个案例通过与那国海峡入射，仅有 2 个案例通过边户岬–与路岛水道入

射，没有案例从奄美–吐噶喇水道入射。西进型台风的移动路径相对登陆型台风跨度较小，台风从西北太平洋向西移动，穿过巴士海峡或菲律宾岛北部进入南海。与那国海峡和宫古海峡位于台风移动路径右侧大浪区，且离台风中心较近，西进型台风激发的 2 m 涌浪一般只通过与那国和宫古海峡入射。相对来说，宫古海峡口法线与涌浪的浪向夹角较小，大部分涌浪从宫古海峡入射。但也有强度较大

表 2 西进型台风案例统计信息表

台风编号	涌浪入射起止时间 (UTC)	10 级风圈 半径/nm	7 级风圈半 径/nm	平均中心 气压/hp	平均风速/ (m·s ⁻¹)	平均速度/ (km·h ⁻¹)	入射角度/°	入射海峡	涌浪入射 深度/km
7907	197907 3015–3101	73	211	950	41	12.7	–13.7	BC	52
8008	198007 2008–2019	92	222	964	36	28.8	–60.1	AB	240
8607	198607 0710–0812	115	234	933	50	22.7	–51.3	ABC	468
8710	198708 1618–1804	48	146	973	34	10.3	–62.0	AB	222
8805	198807 1715–1802	95	192	964	41	25.9	–69.6	AB	217
8908	198907 1418–1511	75	177	959	40	24.2	–48.6	AB	116
9302	199306 2518–2604	96	262	933	55	23.9	–69.3	AB	203
0104	200107 0312–0314	103	492	975	30	39.5	–28.2	B	32
0308	200307 2114–2204	85	224	938	53	21.6	–59.8	AB	210
0812	200808 1915–2004	71	172	970	35	25.1	–68.1	AB	103

注：A 为与那国海峡、B 为宫古海峡、C 为边户岬–与路岛水道、D 为奄美–吐噶喇海峡；入射角度为 2 m 涌浪入射进琉球群岛时，台风中心与宫古海峡口法线的夹角，向右为正

的台风（如 7907 和 8607 号）激发的 2 m 涌浪能够传播到边户岬-与路岛水道，甚至到奄美-吐噶喇海峡。通常边户岬-与路岛水道与涌浪浪向夹角较大，故仅有少数西进型台风案例有 2 m 涌浪从边户岬-与路岛水道入射。奄美-吐噶喇海峡口法线与涌浪的浪向大致垂直，几乎没有西进型台风案例从该海峡入射。西进型台风的涌浪入射深度大约在 30~470 km 之间。涌浪入射时，台风中心位置与宫古海峡法线的夹角在 $-70^{\circ}\sim-14^{\circ}$ 之间，西进型台风 2 m 涌浪会通过那国海峡、宫古海峡和边户岬-与路岛水道入射进琉球群岛。

4.3 转向型台风案例分析

12 个转向型台风案例（表 3），有 10 个案例通过奄美-吐噶喇海峡入射，有 8 个案例通过边户岬-与路岛水道入射，有 7 个台风案例通过宫古海峡入射，没有案例从与那国海峡入射。转向型台风相对于登陆型和西进型台风来说，在移动过程中会

向东北转向，其移动路径的变化范围较大，可分为琉球群岛外转向和琉球群岛内转向两种情况。琉球群岛内转向的台风案例（8105、8214、9211、9605、0704 和 1408 号）向东北转向发生在 10 m/s 风圈传播到琉球群岛之后，故台风转向对 2 m 涌浪入射几乎没有影响。该情况类似于登陆型台风，2 m 涌浪会从宫古海峡、边户岬-与路岛水道或者奄美-吐噶喇海峡入射，涌浪入射深度较小，6 个案例中有 5 个小于 100 km。若在琉球群岛外转向，台风从西北向东北转向时会会有一个拐弯的过程，台风移动速度相对变慢，增加了 2 m 涌浪的传播时间。转向点在琉球群岛外转向的台风案例（8704、9708、9710、0111、0406 和 0507 号）涌浪入射深度较大，约在 200~580 km 之间。台风转向北上后贴近日本岛，涌浪浪向逐渐与奄美-吐噶喇海峡口法线垂直，该海峡入射的浪区最深。涌浪入射时，台风中心位置与宫古海峡法线的夹角在 $-57^{\circ}\sim-98^{\circ}$ 之间。

表 3 转向型台风案例统计信息表

台风编号	涌浪入射起止时间 (UTC)	10 级风圈 半径/nm	7 级风圈半 径/nm	平均中心 气压/hp	平均风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	入射角度/ $^{\circ}$	入射海峡	涌浪入射 深度/km
8105	198106 1817-1902	72	200	979	31	25.8	-56.9	B	59
8214	198208 2309-2315	129	283	947	46	17.1	27.3	BCD	92
8704	198706 3014-0109	N/A	150	980	28	21.5	87.6	D	218
9211	199208 0611-0613	74	214	955	52	25.3	41.4	D	38
9605	199607 1623-1703	61	160	965	38	18.9	79.8	D	71
9708	199706 1804-1920	111	291	971	34	23.5	97.6	BCD	573
9710	199707 2204-2303	107	338	963	40	12.2	6.6	BCD	387
0111	200108 1509-1608	63	389	981	29	13.5	37.0	CD	197
0406	200406 1714-1813	126	268	940	51	14.5	1.0	BCD	314
0507	200507 2407-2502	80	275	981	29	19.4	68.0	CD	466
0704	200707 1120-1122	84	250	962	39	27.8	-4.0	BC	39
1408	201407 0609-0620	91	271	955	43	24.9	-12.4	BCD	386

注：A 为与那国海峡，B 为宫古海峡、C 为边户岬-与路岛水道，D 为奄美-吐噶喇海峡；入射角度为 2 m 涌浪入射进琉球群岛时，台风中心与宫古海峡口法线的夹角，向右为正

4.4 涌浪入射深度影响因素分析

由于本文研究的涌浪由西北太平洋台风激发生成，台风的强度、大小、速度和位置均可能影响涌浪入射深度（Young et al, 1996; Walsh et al, 2002; 洪新等, 2015）。此外，同一路径类型中各个台风案例的移动路径均不相同，导致其激发的涌浪浪向有所差异，从而对涌浪入射深度产生影响。缺乏台风与琉球群岛两者方位的量化指标，故本文引入入射角度（表 1 表注）作为台风要素之一。从三种路径类型的台风要素与涌浪入射深度的关系

（表 1—表 3）来看，单独台风要素与涌浪入射深度无统计学上的相关性。为进一步探讨涌浪入射深度与台风要素之间的关系，以 6 个台风要素作为自变量，涌浪入射深度为因变量，进行多元逐步线性回归分析。采用双检验原则，逐步引入和剔除自变量，建立满足检验条件的最优回归方程（表 4）。结果表明，登陆型台风和西进型台风分别有最优回归方程（2）和（3），分别通过 95% 置信区间的相关性检 $P = 0.033 < 0.05$ 和 $P = 0.028 < 0.05$ ，复相关系数分别为 $R^2 = 0.74$ 和 $R^2 = 0.76$ ，回归效果显著。

说明多元线性回归模型在一定程度上能够反映台风要素与 2 m 涌浪入射深度的相互关系，登陆型台风

和西进型台风涌浪入射深度受台风 10 级风半径、台风平均移动速度和入射角度的影响较大。

表 4 部分多元线性回归模型统计表

台风类型	线性拟合方程	F 检验	P 检验	复相关系数 R^2
登陆型台风	$Y_l = -1.64S_j - 9.50S_d + 415.48$	$6.93 > 3.98$	$0.011 < 0.05$	0.56
	$Y_l = -0.43S_j - 9.18S_d + 1.94 J_d + 266.39$	$9.66 > 3.71$	$0.003 < 0.05$	0.74
西进型台风	$Y_l = 5.56S_j - 1.01Q_j - 52.74$	$4.89 > 4.74$	$0.047 < 0.05$	0.58
	$Y_l = 6.31S_j - 12.58S_d + 3.27 J_d - 229.26$	$6.26 > 4.76$	$0.028 < 0.05$	0.76

表中： Y_l 为涌浪入射深度； S_j 为 10 级风圈半径； Q_j 为 7 级风圈半径； S_d 为台风平均速度； $|J_d|$ 为入射角度的绝对值。

$$Y_l = -0.43S_j - 9.18S_d + 1.94|J_d| + 266.39 \quad (2)$$

$$Y_l = 6.31S_j - 12.58S_d + 3.27|J_d| - 229.26 \quad (3)$$

式中： Y_l 为涌浪入射深度； S_j 为 10 级风圈半径； S_d 为台风平均速度； $|J_d|$ 为入射角度的绝对值。

转向型台风较前两种路径类型的台风在移动过程中多了由西北向东北转向的过程，且入射角度的范围最大，无符合检验条件的线性回归方程。台风转向期间，其中心位置在空间上的变化相对减小，其激发的涌浪浪向变化也相对较小，增加了涌浪的传播时间。台风转向是否发生在有利于涌浪传播进琉球群岛的适当的角度和区域，对涌浪入射深度有较大影响。转向型台风可大致分为琉球群岛内转向和琉球群岛外转向两种情况。一般来说，台风转向过程发生在琉球群岛外的台风更易具备有利于涌浪入射的条件。本文只讨论了台风要素与入射深度的关系，转向型台风需进一步考虑台风转向的变化过程。

5 结论

(1) 西北太平洋台风激发的外围涌浪跨琉球群岛传播，一部分会被群岛上的岛屿或岸礁阻挡，另一部分主要通过琉球群岛外转向型台风，通过宫古海峡、边户岬-与路岛水道和奄美-吐噶喇海峡入射进东海。入射次数最多的海峡是宫古海峡 33 次，其次是奄美-吐噶喇海峡和边户岬-与路岛水道，均为 17 次，最少的是与那国海峡，为 11 次。同一台风过程 2 m 涌浪可同时入射 1~3 个海峡，其涌浪入射深度通常是宫古海峡最大，其次分别是奄美-吐噶喇海峡、边户岬-与路岛水道和与那国海峡。

(2) 台风外围 2 m 涌浪，登陆型台风可入射四个主要海峡，其中与那国海峡入射较少；西进型台风可入射宫古海峡和与那国海峡，边户岬-与路岛

水道入射较少，没有案例通过奄美-吐噶喇海峡入射；转向型台风可入射宫古海峡、边户岬-与路岛水道和奄美-吐噶喇海峡，没有案例通过与那国海峡入射。奄美-吐噶喇海峡、宫古海峡、边户岬-与路岛水道和与那国海峡的涌浪入射深度最大分别约为 570 km、480 km、380 km 和 234 km。

(3) 经相关性检验，得出单独台风要素与入射涌浪区深度无统计学上的相关性。通过多元线性回归分析发现登陆型和西进型台风 10 级风半径、台风平均移动速度、入射角度对入射涌浪区深度的影响较为显著。

从本研究的结果来看，在西北太平洋台风登陆到琉球群岛之前，台风外围 2 m 涌浪可通过琉球群岛的海峡先行入射进东海。先行入射的涌浪通过宫古海峡可在浙江南部和福建北部海域形成中浪到大浪区。西进型台风通过菲律宾北部或巴士海峡进入南海后，其激发的 2 m 涌浪场通过宫古海峡和与那国海峡继续向内陆延伸，甚至达到浙闽沿岸。浙闽台风浪的预警可借助台风要素适当考虑这部分先行入射的涌浪。琉球群岛外转向的转向型台风，通过奄美-吐噶喇海峡入射的涌浪区深度普遍较大，最远可达济州岛。

参 考 文 献

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.
陈晓斌, 周林, 史文丽, 等, 2013. 台风“梅花”风浪场和涌浪场特征分析[J]. 海洋科学进展, 31(1): 22-30.
黄世昌, 赵鑫, 姜海峰, 等, 2012. 浙江沿海超强台风作用下的台风浪波高[J]. 海洋通报, 31(4): 369-375.
洪新, 赵玮, 高志波, 等, 2015. 热带气旋风场对海浪分布特征的影响[J]. 海洋通报, 34(1): 32-44.
韩晓伟, 周林, 游大鸣, 等, 2011. 0801号台风风浪场和涌浪场的数值模拟[J]. 大气科学学报, 34(5): 597-605.
毛科峰, 陈希, 李妍, 等, 2010. 琉球群岛海域海浪数值计算地形处理

- 效应及试验分析[J]. 海洋科学, 34(11): 91–96.
- 裴晔, 陶爱峰, 张义丰, 等, 2016. 东海E3海域低频涌浪生成机制研究[J]. 海洋湖沼通报, 17–24.
- 魏永亮, 高志一, 唐泽艳, 等, 2017. 基于SAR波模式数据的沉船事故海浪要素分析[J]. 上海海洋大学学报, (6): 946–952.
- 郑崇伟, 周林, 周立佳, 2011. 西沙、南沙海域波浪及波浪能季节变化特征[J]. 海洋科学进展, 29(4): 419–426.
- 周学群, 杨洪玉, 1990. 8719号台风涌浪传播特征分析[J]. 海洋预报, 7(2): 62–64.
- 周延东, 雷震名, 孙国民, 等, 2016. 涌浪基本理论研究综述[J]. 水道港口, 37(1): 7–12.
- ARDHUIN F, HERBERS T H C, O' REILLY W C, et al, 2003. Swell Transformation across the Continental Shelf. Part I: Attenuation and Directional Broadening[J]. Journal of Physical Oceanography, 33(9): 1921.
- COLLARD F, ARDHUIN F, CHAPRON B, 2009. Monitoring and analysis of ocean swell fields from space: New methods for routine observations[J]. Journal of Geophysical Research, 114(7): C07023.
- MUNK W H, MILLER G R, SNODGRASS F E, et al, 1963. Directional recording of swell from distant storms[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of Series A: Mathematical and Physical Sciences, 255(1062): 505–584.
- SEMEDO A, SUŠELJ K, RUTGERSSON A, et al, 2011. A Global View on the Wind Sea and Swell Climate and Variability from ERA-40[J]. Journal of Climate, 24(5): 1461–1479.
- SNODGRASS F E, GROVES G W, HASSELMANN K F, et al, 1966. Propagation of ocean swell across the Pacific[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences, 259(1103): 431–497.
- WALSH E J, WRIGHT C W, VANDEMARK D, et al, 2002. Hurricane Directional Wave Spectrum Spatial Variation at Landfall[J]. Journal of Physical Oceanography, 32 (6): 1667–1684.
- YOUNG I R, BURCHELL G P, 1996. Hurricane generated waves as observed by satellite[J]. Ocean Engineering, 23(8):761–776.
- YOUNG I R, BABANIN A V, ZIEGER S, 2013. The Decay Rate of Ocean Swell Observed by Altimeter [J]. Journal of Physical Oceanography, 43(11): 2322–2333.

(本文编辑: 王少朋)