

# 台湾海峡两次典型冷空气过程的海浪研究

丁萍

(福建省海洋预报台, 福建 福州 350003)

**摘 要:** 基于浮标实测数据和欧洲中期天气预报中心再分析数值预报产品 ERA5, 采用时空分析的方法, 对影响台湾海峡的两次典型冷空气过程中的风浪差异成因进行分析。结果表明: 冬季, 中心强度在 1 028 hPa 以上且在长江口—山东半岛南岸一带入海的冷空气, 容易在台湾海峡形成浪高大于 6 m 的灾害性海浪; 台湾海峡北部受涌浪影响较大, 海峡内则风浪占主导, 涌浪占比较小。

**关键词:** 冷空气; 风; 浪; 台湾海峡

**中图分类号:** P731.22 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1003-0239(2023)05-0035-14

## 0 引言

台湾海峡位于福建和台湾岛之间, 是连通南海和东海之间的交通要道。因狭管效应, 台湾海峡是我国近海冬季风速最大的海区之一, 每年10月—翌年2月的月平均风速可达 10~12 m/s, 6级以上的大风频率可高达 50%, 其中 8级以上大风的出现频率在 10% 以上<sup>[1-4]</sup>。大风过程导致每年冬季台湾海峡出现波高大于 6 m 的灾害性寒潮浪超过 4 次<sup>[5]</sup>。恶劣的海况给附近海区带来严重的人员伤亡和财产损失<sup>[7-8]</sup>。据《福建省海洋灾害公报》统计, 2011—2020 年台湾海峡共发生海难事故 51 起, 死亡(含失踪)人数达 105 人, 直接经济损失 6 844 万元, 其中 83% 的人员死亡和 78% 的直接经济损失是由冷空气造成的恶劣海况导致的。因此, 针对台湾海峡恶劣天气的预报, 特别是对强冷空气期间海浪要素的预警预判, 可为及时制定防御措施和防灾减灾决策提供技术支撑, 具有十分重要的科学意义和应用价值。

## 1 冷空气过程

本文依据台湾海峡浮标数据, 统计出 2016 年 12 月—2021 年 12 月台湾海峡由冷空气影响而产生的

波高大于 6 m 的灾害性寒潮浪过程共有 5 次(见图 1, 图中时刻为北京时, 下同)。从图中可以看出, 造成这 5 次寒潮浪的冷空气中心强度为 1 028~1 040 hPa, 冷空气中心在长江口—山东半岛南岸一带入海。台湾地区山脉高度平均在 2 000 m 以上, 这种突出的地形对低层空气的流动起阻挡作用。当低层吹东北气流时, 空气在山脉东部堆积, 西部缺乏空气供应, 形成相对地形低气压槽<sup>[1]</sup>。由图 1 可知, 这种地形槽均在台湾西南侧形成, 槽顶位于台中—台北之间, 但因冷空气影响在台湾海峡造成浪高大于 6 m 的灾害性寒潮浪的具体因素尚未可知。为了研究造成这种灾害性寒潮浪的冷空气的具体特征, 本文以台湾海峡测得的平均风速达到 8~9 级为例, 选择上述 5 次冷空气过程中造成的寒潮浪最大的一次过程(发生于 2021 年 10 月 17—19 日, 记为 Case\_2021)和冷空气风速大小和方向相近的过程(发生于 2018 年 12 月 27 日—2019 年 1 月 4 日, 记为 Case\_2018)为例进行对比分析研究, 以期对海洋预警、预报和防灾减灾决策提供科学依据。

## 2 数据资料

浪高、风速等实测数据来自福建省海洋预报台

收稿日期: 2022-05-06。

基金项目: 福建省重大专项专题项目(2022NZ033023); 海洋经济发展专项(FJHJF-L-2022-17)。

作者简介: 丁萍(1987-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事海洋预报研究工作。E-mail: 756696314@qq.com

和福建省气象局布放在台湾海峡及周边海域业务化运行的浮标,包括 1 号标、2 号标、3 号标和海峡 1 号,分别位于台湾岛东北部、台湾海峡北部、中部和南部海域,具体位置如图 2 所示。浮标直径 10 m,

高 10 m,数据采样时间间隔 10 min。数值预报数据包括海面 10 m 风速、海面 2 m 温度、平均海平面压力、混合浪高、风浪高和涌浪高,来自欧洲中期天气预报中心 (European Center for Medium - Range Weather

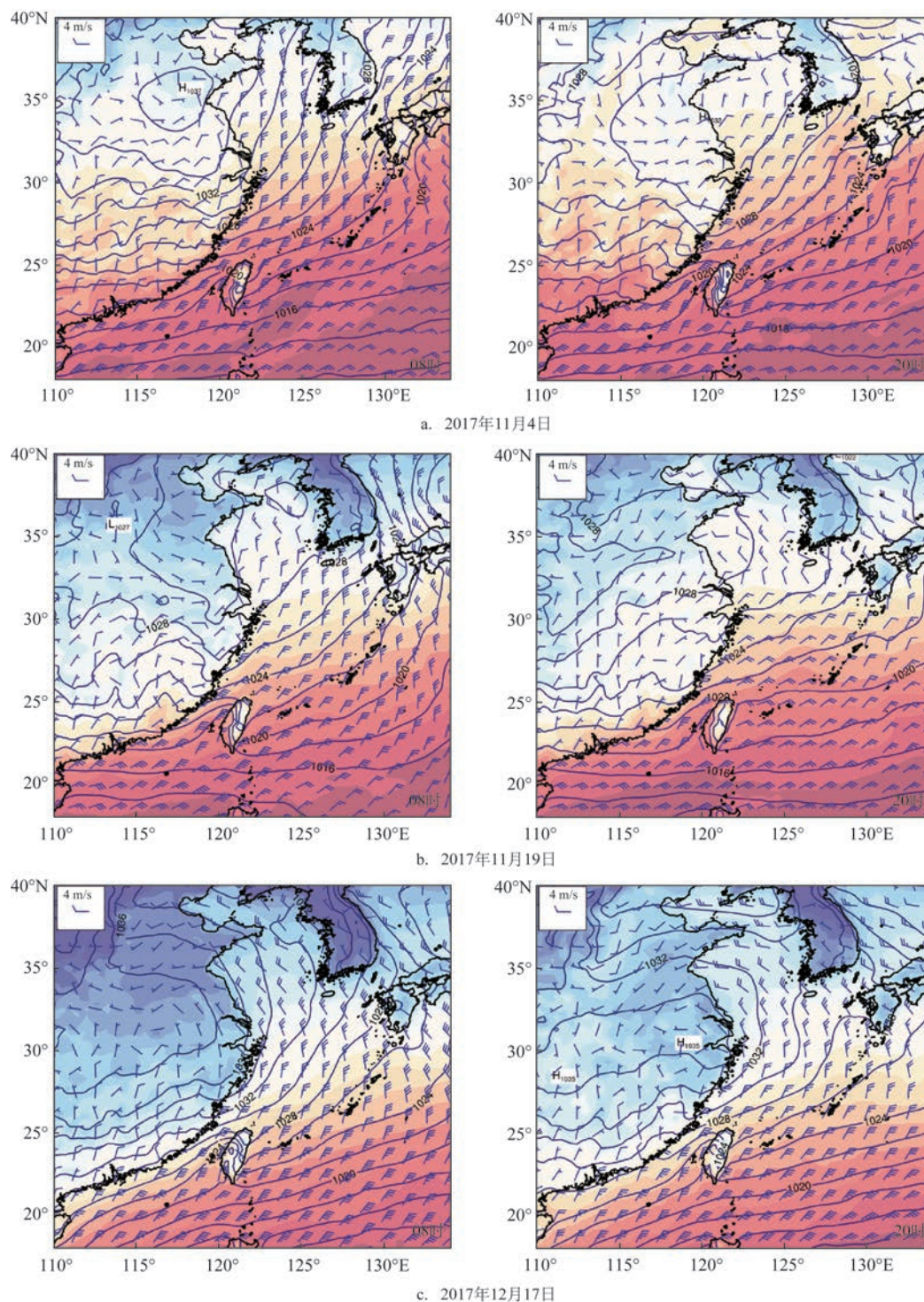


图1 地面风场(风向标,单位:m/s)、2 m温度(填色,单位:℃)和气压(等压线,单位:hPa)

Fig.1 Surface wind field (barb, unit:m/s), air temperature at 2 meters (shaded area, unit: ℃) and surface pressure (isobar, unit: hPa)



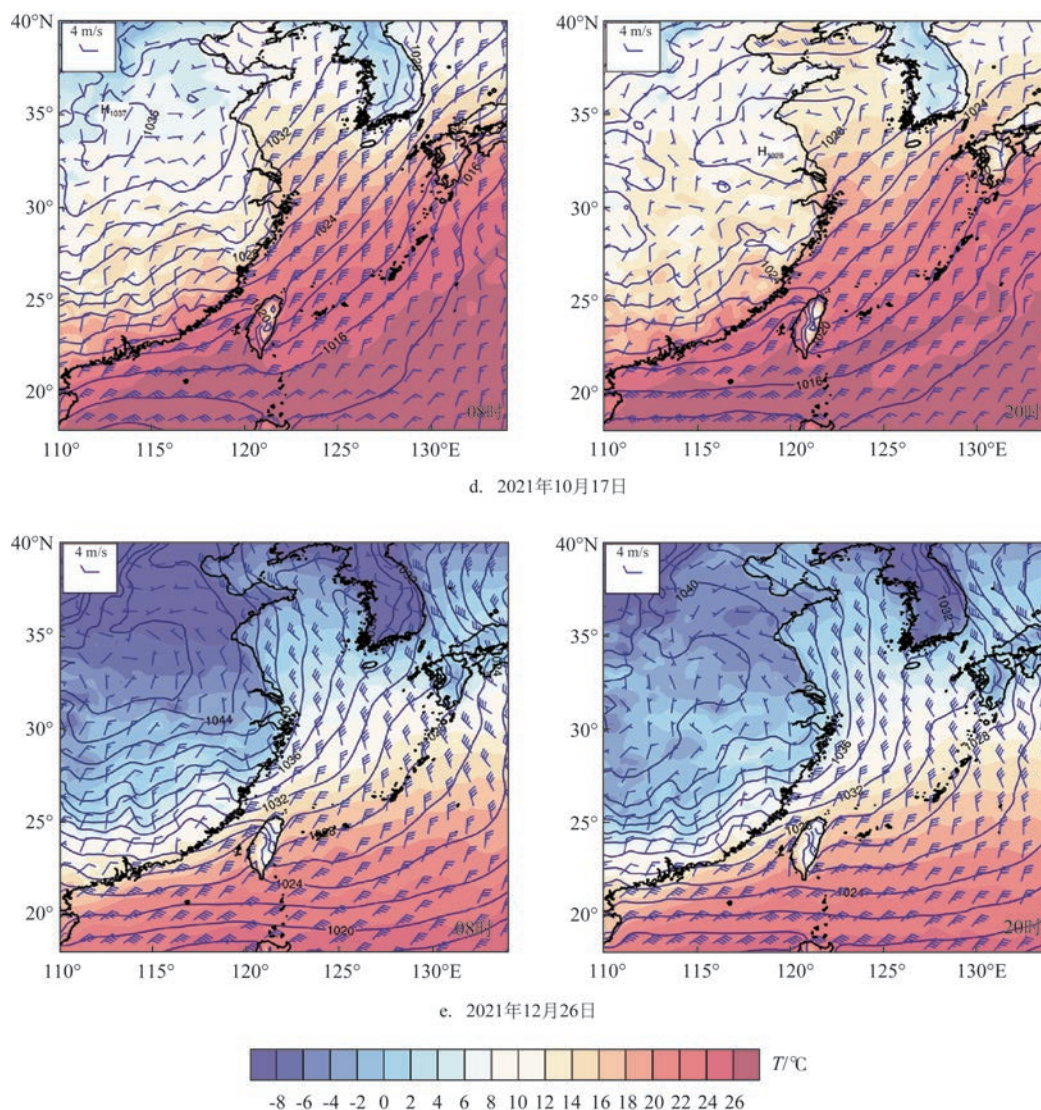


图1 (续)

Fig.1 (Continued)

Forecasts, ECMWF)的再分析产品 ERA5(来源: <https://cds.climate.copernicus.eu>)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 实测数据

表1为两次冷空气期间的浪高最值(即有效浪高最大值)和风速最值(即平均风速最大值)。由表1可知: Case\_2018中1号标、2号标和3号标测得的风速最值均达到9级,海峡1号风速最值略小,为8级,4个浮标均测到浪高最值为5.2~5.6 m的巨浪; Case\_2021中2号标和3号标测得的风速最值为9

级,1号标和海峡1号风速最值为8级,接近9级,4个浮标中除1号标测得5.6 m的巨浪外,其余3个浮标均测得6 m以上的狂浪。对比可知,两次冷空气过程中风速差值最大的为海峡1号,其后依次为3号标、1号标、2号标;浪高差值最大的为海峡1号,其后依次为3号标、2号标、1号标;海峡1号和3号标对应的风浪差值关系(风大浪高)符合风浪特征,但2号标对应的差值关系却是风大浪小(Case\_2018中实测风速最值22.3 m/s对应9级风,浪高最值5.6 m对应巨浪,而 Case\_2021中实测风速最值21.7 m/s对应9级风,浪高最值6.5 m对应狂浪,即 Case\_2018中风速最值较 Case\_2021大0.6 m/s,但浪

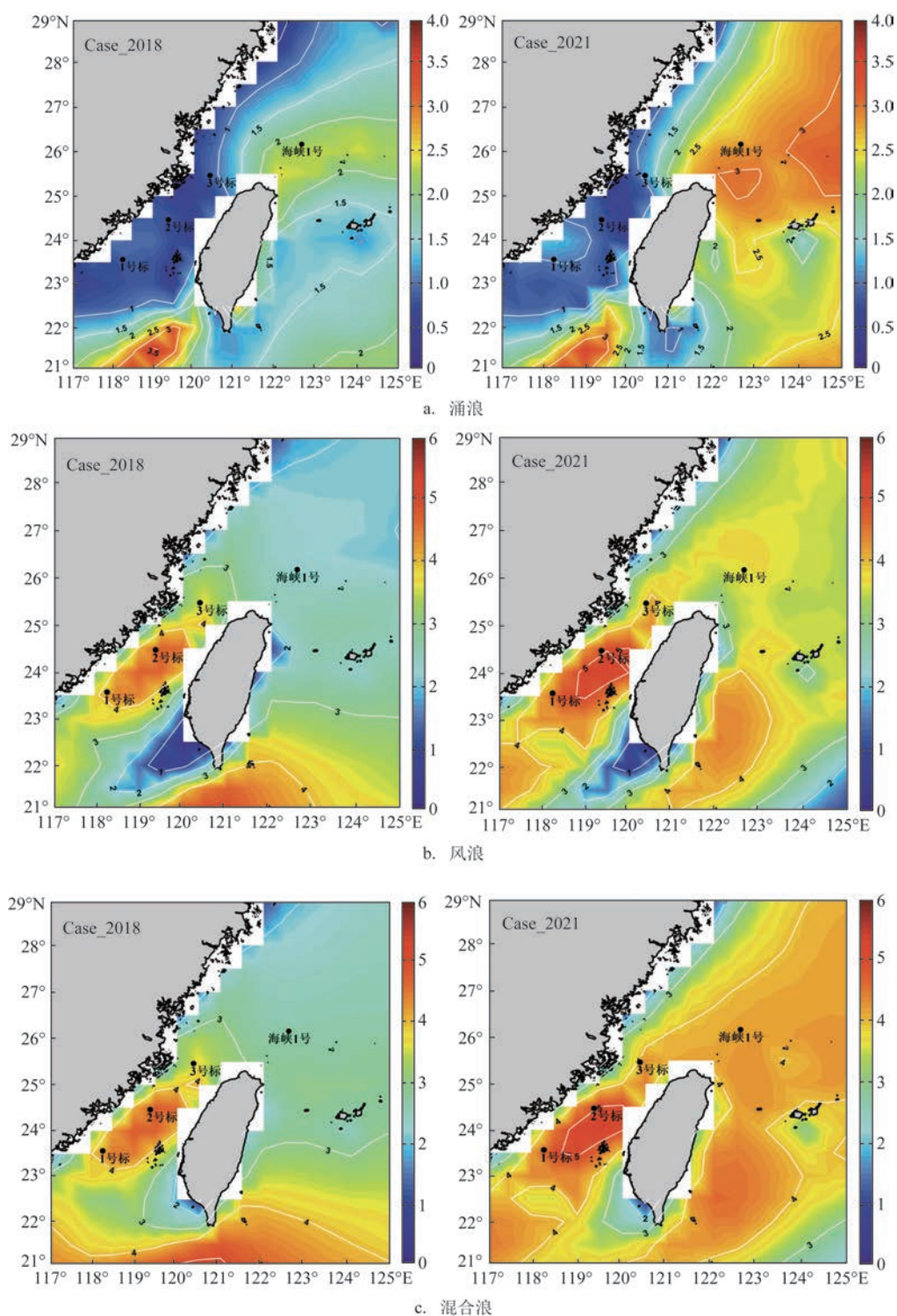


图2 两次冷空气过程对应的模型浪高(填色,单位:m)和浮标位置(•)

Fig.2 Wave height from model (shaded area, unit:m) and buoys (•) during two cold air processes

高最值却较 Case\_2021 小 0.9 m), 风速同级, 浪级却相差一个级别。

将 4 个浮标实测的逐时风速、风向和浪高进行

对比, 结果见图 3(因 Case\_2018 中浮标实测的风速和浪高最值均出现在 2018 年 12 月 31 日前, 所以浮标数据时间轴取 2018 年 12 月 27—31 日)。由图 3 可知, 在



表 1 两次冷空气期间浪高和风速

Tab.1 Wave height and wind speed during two cold air periods

站点	Case_2018		Case_2021		差值	
	风速最值/(m/s)	浪高最值/m	风速最值/(m/s)	浪高最值/m	风速差值/(m/s)	浪高差值/m
2号标	22.3(9级)	5.6(巨浪)	21.7(9级)	6.5(狂浪)	0.6	-0.9
3号标	21.1(9级)	5.4(巨浪)	22.1(9级)	6.4(狂浪)	-1.0	-1.0
海峡1号	17.9(8级)	5.2(巨浪)	20.6(8级)	6.4(狂浪)	-2.7	-1.2
1号标	21.1(9级)	5.6(巨浪)	20.1(8级)	5.6(巨浪)	1.0	0.0

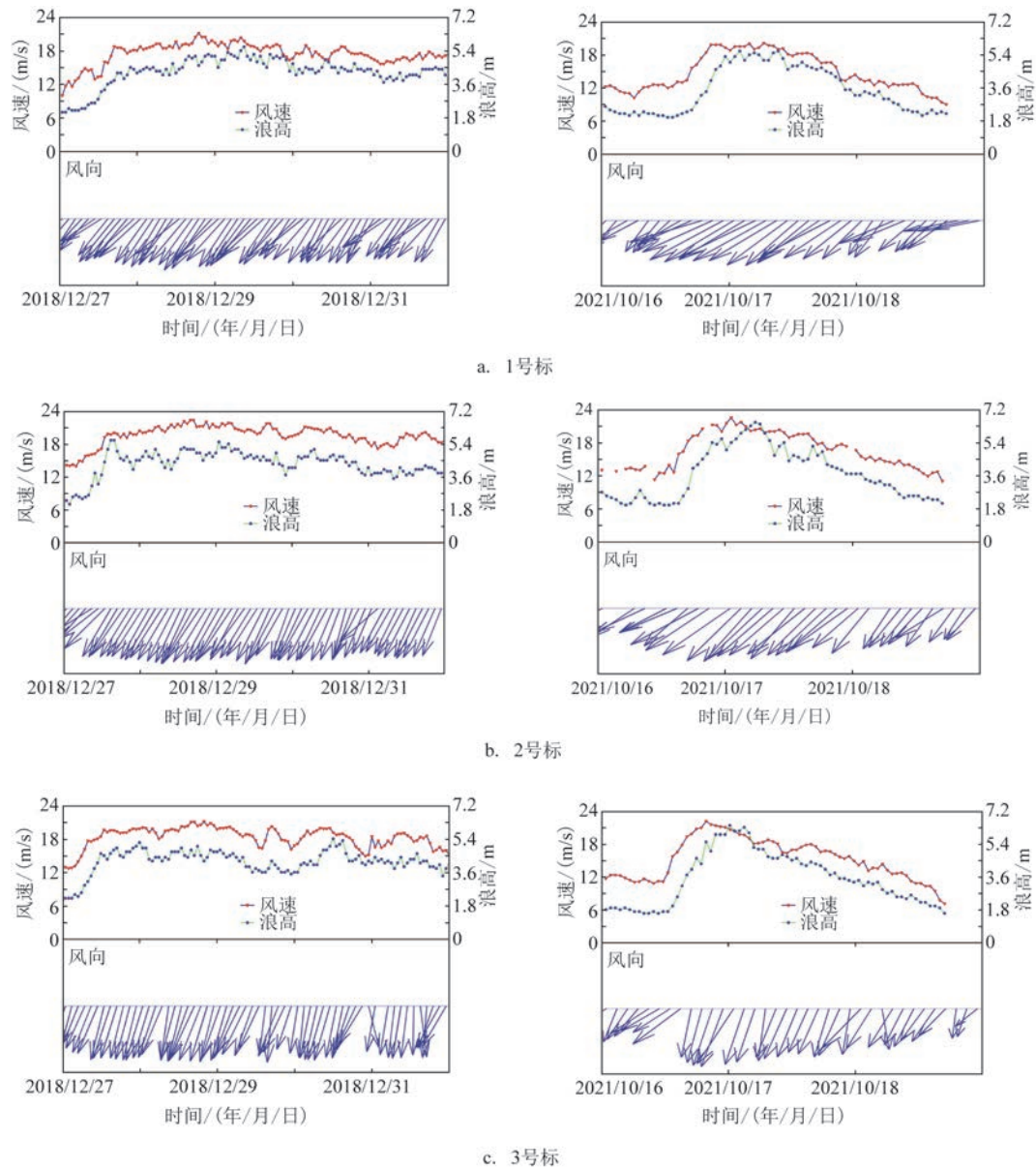
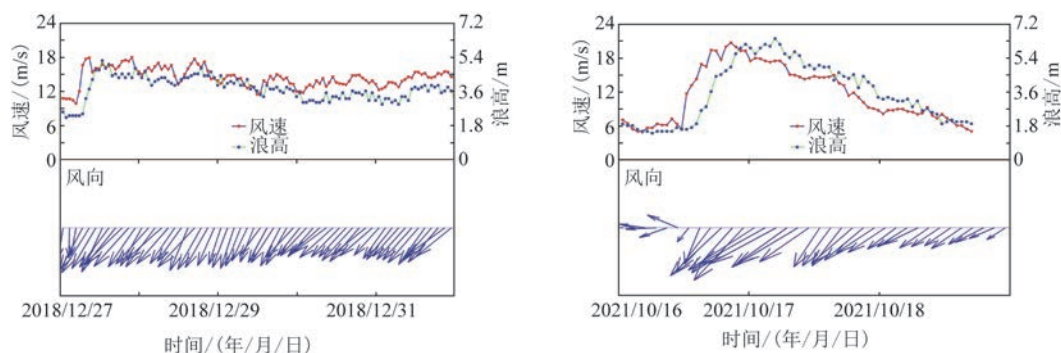


图 3 两次冷空气过程对应的浮标浪高、风速和风向

Fig.3 Buoy wave height ,wind speed and direction during two cold air processes



d. 海峡1号

图3 (续)

Fig.3 (Continued)

Case\_2018和Case\_2021中,浮标实测的风速最值均达到8~9级,浪高最值均滞后于风速最值。Case\_2018中4个浮标测得风速在12月27日达到最值后基本维持,浪高亦是同样的趋势,风向以东北向( $12.25^{\circ} \sim 33.75^{\circ}$ )为主,风向较稳定;Case\_2021中4个浮标测得风速在10月17日达到最值后明显减弱,浪高亦是同样的趋势,风向以东北向( $33.75^{\circ} \sim 56.25^{\circ}$ )为主,风向不稳定。为了探究这两次冷空气造成的浪高差异的成因,本文将采用再分析的模型数据进行研究。

### 3.2 天气过程

图4为两次冷空气过程对应的地面风、温度和气压场。因台湾地形作用,两次过程均在台湾西南侧形成地形低压槽,槽顶位于台中—台北之间,台湾海峡的风速均达到8~9级,但冷空气的中心强度和移动路径不同。图4a显示Case\_2018的冷空气中心位于陆地且由陆地南下,中心移动缓慢,东海北部为偏北风(6~7级),东海南部转向为东北风进入台湾海峡(风力8~9级);图4b显示Case\_2021的冷空气中心在苏北沿岸入海,当冷空气中心位于陆地时,东海为北风7~8级,台湾海峡风力8~9级,当冷空气中心入海时,东海风速减弱为北东北风5~6级。两次冷空气过程在东海存在风差异,导致从东海传入台湾海峡的涌浪不同,进而影响两次冷空气过程中台湾海峡的浪高,下文将用再分析数据与浮标实测数据进行对比分析。

### 3.3 浮标和模型数据对比

#### 3.3.1 风速

图5为两次冷空气过程中浮标实测风速与模型

风速对比。从图中可以看出,4个浮标的实测风速都与模型的模拟风速变化趋势一致,但实测风速最值均高于模型风速最值。图6的风速差值分析也表明,两次过程中4个浮标的实测风速较模型风速大,其中Case\_2018的两者差值均在6 m/s以下,Case\_2021中海峡1号的风速差值在7 m/s以下,其余浮标的风速差值均在5 m/s以下。

#### 3.3.2 浪高

Case\_2018和Case\_2021中4个浮标实测浪高与模型模拟的浪高(本节中指模型的混合浪)趋势一致(见图7),实测浪高最值均高于模型浪高最值,这与图5的风速趋势一致。两次过程中,4个浮标的实测浪高较模型浪高大(见图8),但浪高差值均在2 m以下,这也对应了Case\_2018中台湾海峡的浪高较Case\_2021小,前者浪高最大值低于5 m,后者浪高最大值为5~6 m。

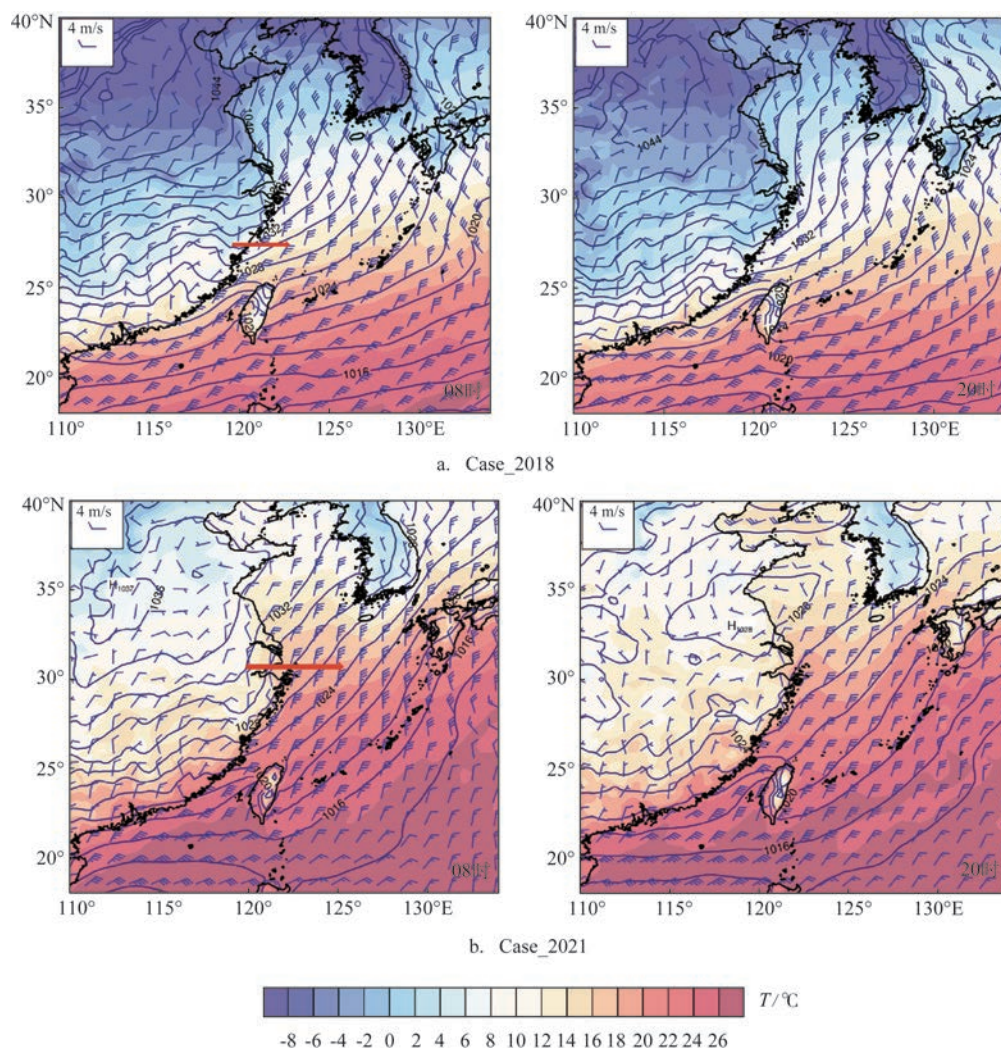
综上可知,模型可以模拟出两次冷空气过程中的风速和浪高趋势,且Case\_2018中台湾海峡浪高较Case\_2021小。这也说明中心强且移动速度快的冷空气过程更易在台湾海峡形成灾害性海浪。因此,再分析的模型数据可用于Case\_2018和Case\_2021的海浪分析研究。

### 3.4 模型浪高

#### 3.4.1 涌浪

从图9a可以看出,两次冷空气过程中海峡1号的涌浪(本节指浮标处对应的再分析涌浪)明显高于其余3个浮标,即海峡1号受涌浪影响较大且波动幅度较大。表2也显示Case\_2021和Case\_2018





注:红色箭头所指位置为冷空气过程中台湾海峡的风区起点

图4 两次冷空气过程对应的地面风(风向标,单位:m/s)、2 m温度(填色,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )和气压(等压线,单位:hPa)

Fig.4 Surface wind field (barb, unit:m/s), air temperature at 2 meters (shaded area, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) and surface pressure during two cold air processes (isobar, unit: hPa)

中涌浪最值最大的是海峡1号,分别为2.79 m和2.16 m;Case\_2018中其余3个浮标涌浪最值依次是2号标、1号标、3号标,对应的值分别为1.15 m、1.14 m、1.02 m;Case\_2021中其余3个浮标涌浪最值依次是3号标、1号标、2号标,对应的值分别为1.40 m、1.26 m、1.12 m。这个结果与浮标位置(见图2)有关,海峡1号位于台湾岛东北角较开阔的海域,受外海传来的涌浪影响较大;3号标位于海峡北口,涌浪大小取决于从海峡北口传入的涌浪;2号标位于海峡中部,涌浪较小,主要从海峡南口传入;1号标位于海峡南口,涌浪大小取决于从海峡南口传入的涌浪。1号标、2号标和3号标的涌浪特征与郑祥靖

等<sup>[9-10]</sup>的研究结论一致,即涌浪从台湾海峡南口或北口进入海峡内的影响有限,海峡内的浪以风浪为主。

图9b显示在Case\_2021与Case\_2018中,2号标的涌浪差值较稳定、变化小,差值范围为-0.5~0.5 m,这与2号标在海峡中部主要受风浪影响的结论一致;海峡1号的涌浪差值变化较大,说明Case\_2021中外海传入的涌浪较大(见图2);3号标和1号标的涌浪差值在0.5 m左右,说明Case\_2021中外海从海峡北口和南口传入的涌浪较Case\_2018大。图4的地面风场分布也可以解释此种现象,Case\_2021中从东海进入台湾海峡的最大风为8级东北风,台湾

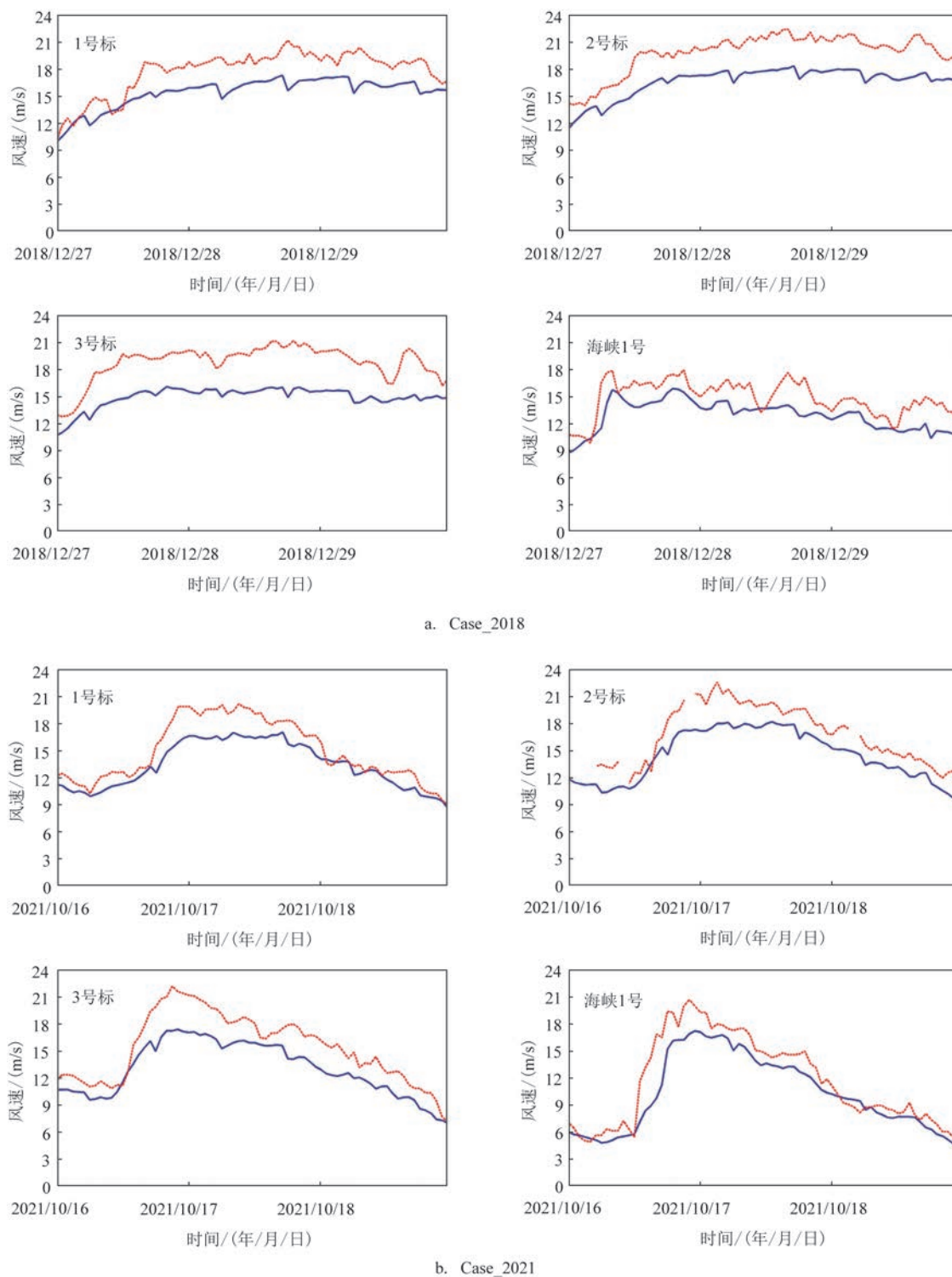


图5 Case\_2018和Case\_2021浮标实测(红线)与模型(蓝线)风速  
Fig.5 Measured (red line) and modeled (blue line) wind speed of Case\_2018 and Case\_2021

岛正北部是8级偏北风;而Case\_2018中从东海进入台湾海峡的最大风为7级东北风,台湾岛正北部

是6级偏北风。由此可知,Case\_2021中东海风速较Case\_2018大,更利于在东海形成较大的涌浪。图2



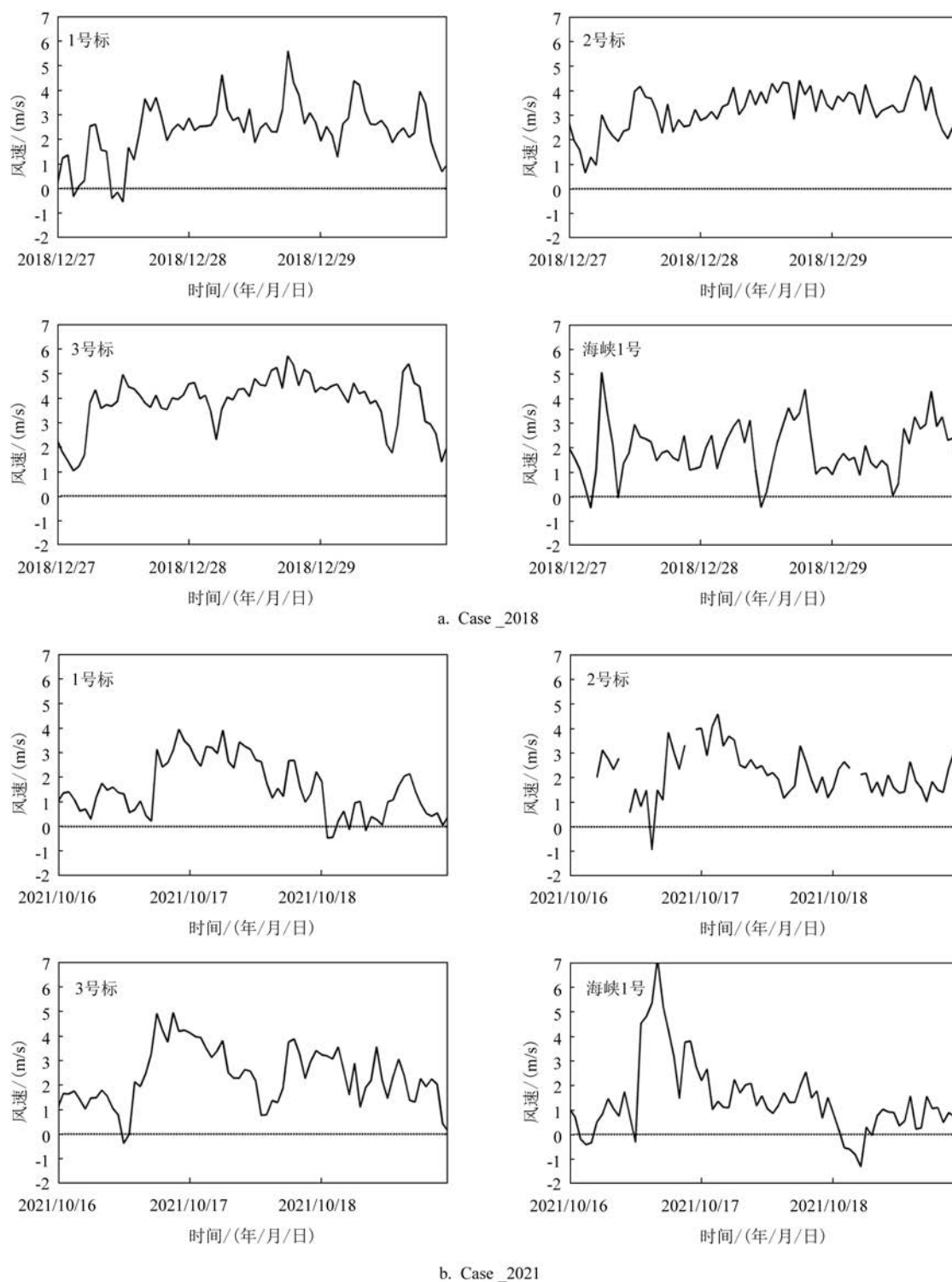


图6 Case\_2018和Case\_2021浮标实测与模型风速差值

Fig.6 Differences between measured and modeled wind speed of Case\_2018 and Case\_2021

中涌浪分布与图4中风场分布结论一致,显示Case\_2021中东海涌浪对台湾岛东北部影响较大,即从台

湾海峡北口传入台湾海峡的涌浪较大,可影响至3号标(见图9b和表2)。

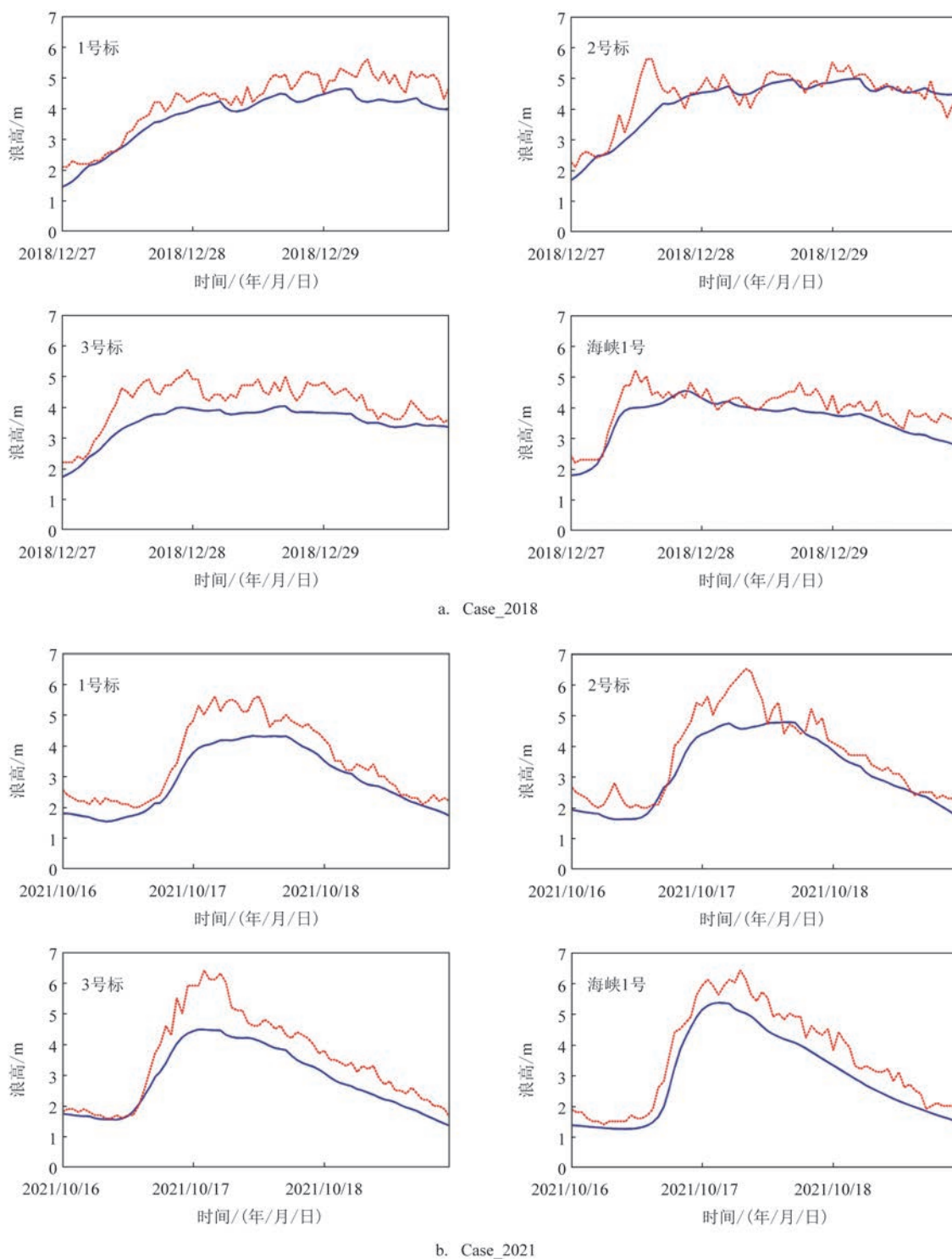


图7 Case\_2018和Case\_2021浮标实测(红线)与模型(蓝线)浪高

Fig.7 Buoy measured (red line) and modeled (blue line) wave height of Case\_2018 and Case\_2021

### 3.4.2 风浪

由图2b可知,Case\_2018中台湾海峡的风浪较Case\_2021小,浪高以风浪占主导;Case\_2021中台

湾海峡中南部浪高存在5 m圈,4 m圈涵盖整个台湾海峡,而Case\_2018中浪高仅出现4 m圈且主要位于台湾海峡中南部。风浪的成长与大小除了取决



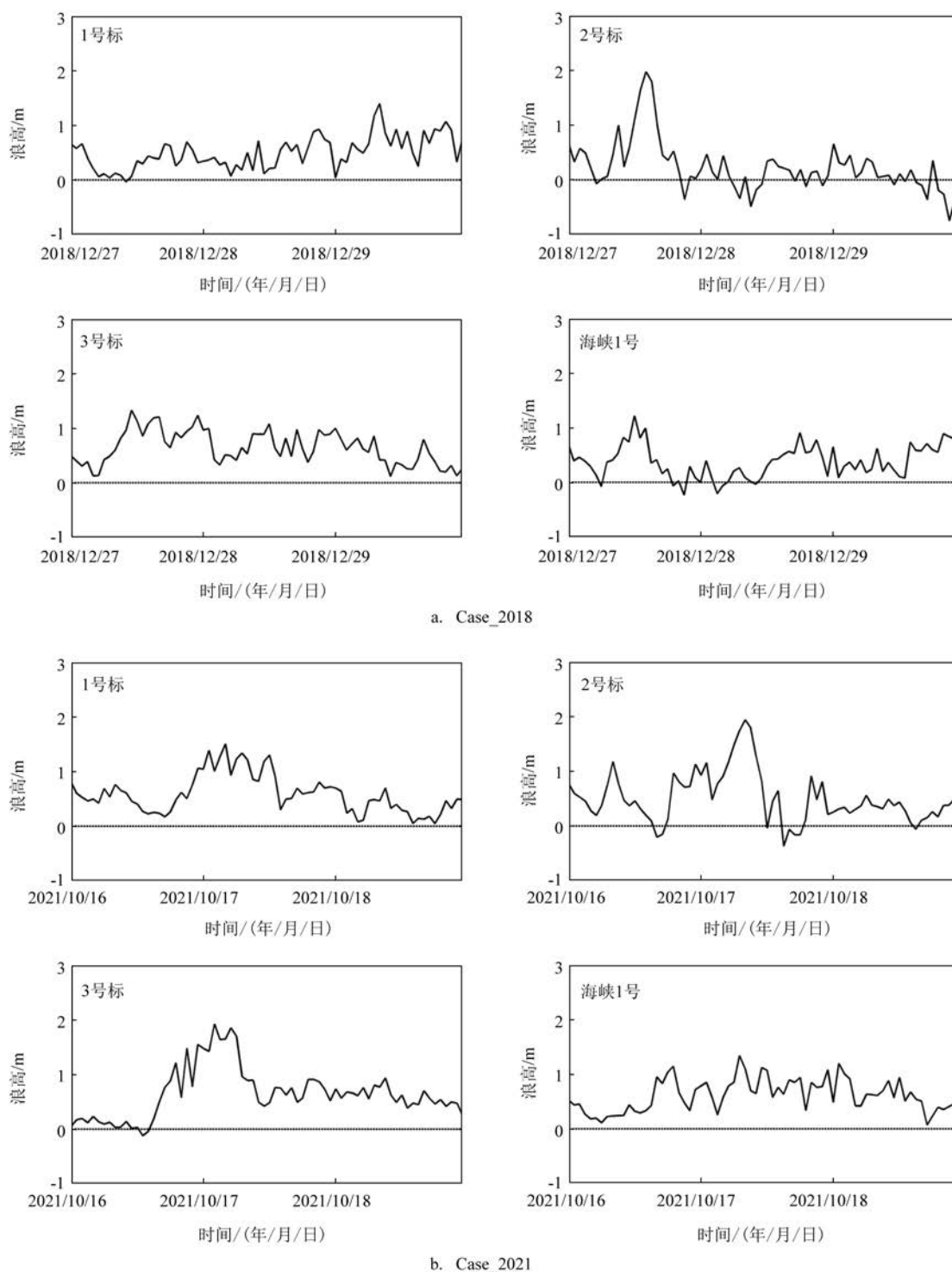
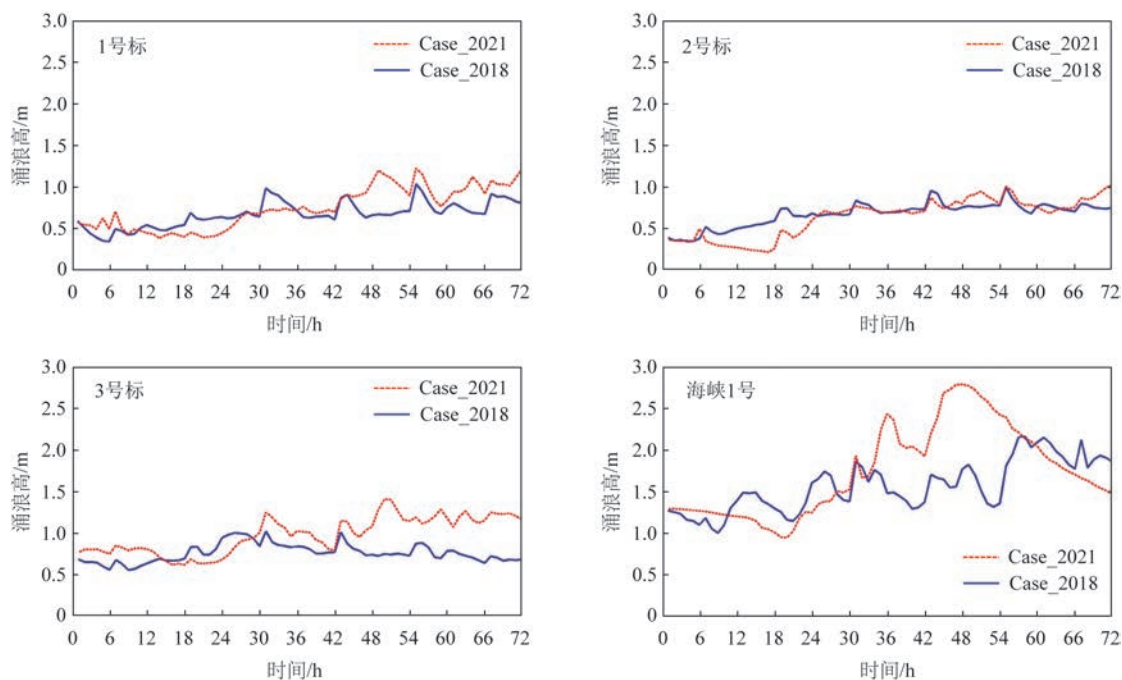


图8 Case\_2018和Case\_2021浮标实测与模型浪高差值

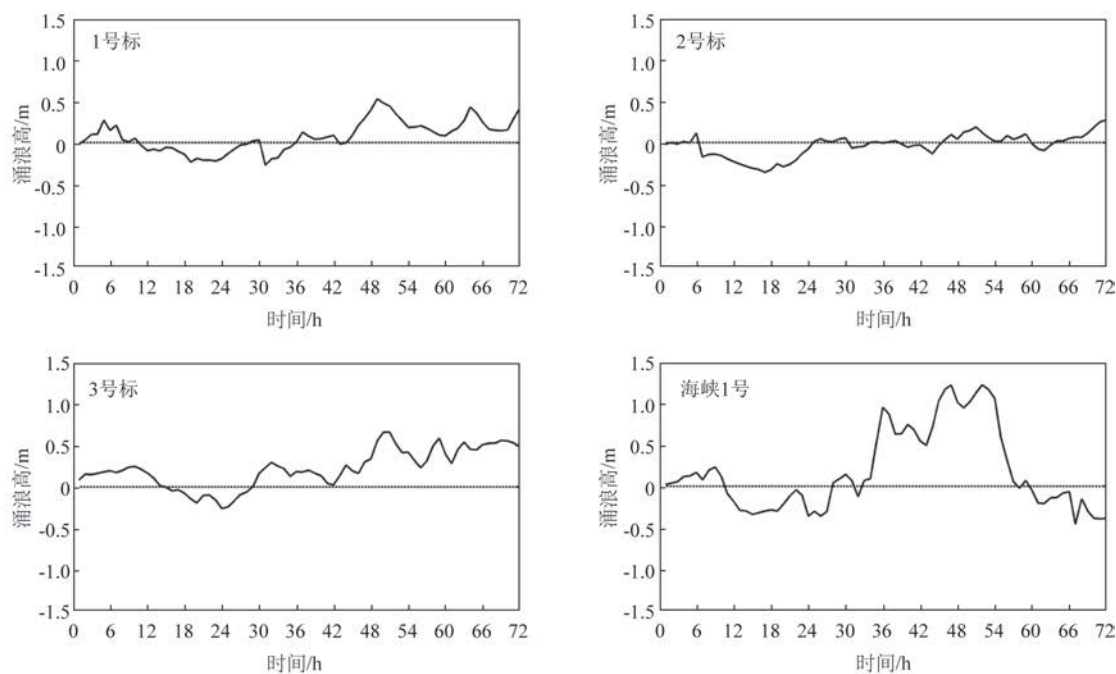
Fig.8 Differences of wave height between buoy and model of Case\_2018 and Case\_2021

于风力外,还与风时、风区有着密切关系。风浪的发展一般分为过渡状态、定常状态和充分成长3个状态。在定常状态下风浪尺度达到了理论的最大

值,不会再随着时间的增长而增大,因此风浪只受限於风区<sup>[5]</sup>。在Case\_2021和Case\_2018中,在台湾海峡风力均达到平均9级的前提下(见表1),风浪达到



a. 模型涌浪



b. 模型涌浪差值

图9 Case\_2021与Case\_2018模型涌浪及涌浪差值

Fig.9 Modeled swell of Case 2018 and Case 2021, and their difference

定常状态,风浪出现较大差异主要是风区长度不同。根据风区的定义<sup>[11]</sup>,图4中红色箭头所指位置

分别为两次冷空气过程中台湾海峡风区的起点,由图可知Case\_2021的风区长度是Case\_2018的数倍,



表2 两次冷空气期间模型涌浪

Tab.2 Modeled swell during two cold air periods

站位	Case_2021 涌浪最值/m	Case_2018 涌浪最值/m	涌浪差值/m
2号标	1.12	1.15	-0.03
3号标	1.40	1.02	0.38
海峡1号	2.79	2.16	0.63
1号标	1.26	1.14	0.12

注:涌浪最值指涌浪最大值。

因此可解释两次冷空气过程中台湾海峡风浪的差异。

## 4 结论

本文利用浮标实测数据和ECMWF再分析数值预报产品ERA5,从地面风场和风浪的时空变化角度对影响台湾海峡的典型冷空气过程Case\_2018和Case\_2021进行对比分析。主要结论如下:

①冬季中心强度在1 028 hPa以上且在长江口—山东半岛南岸一带入海的冷空气中心强且移动速度快,冷空气过程会使台湾海峡有较长风区,易在台湾海峡形成浪高大于6 m的灾害性海浪。

②冷空气期间,台湾海峡的浪高主要由风浪形成,2号标的浪高最具代表性。海峡北部受外海传入的涌浪影响较大,影响最显著的是海峡1号,其次是3号标,而海峡中南部受外海传入的涌浪影响较小。

③Case\_2021(冬季中心强度为1 028 hPa,在山东半岛南岸江苏北部入海的冷空气)与Case\_2018(中心强度为1 044 hPa,沿内陆南下的冷空气)相比,虽然均在台湾海峡形成相当等级的风,但因风区长度不同,风浪差异较大,前者因风区较长更易形成6 m以上的灾害性海浪。

致谢:福建省海洋预报台陈剑桥高级工程师、郭民权副研究员和厦门大学陈笔澄副教授在本研究中提供建议及帮助,谨致谢忱!感谢中国科学院大气物理研究所黄永杰博士提供的包含正确中国国界的地图数据(<https://github.com/huangynj/NCL-Chinamap.git>)!

## 参考文献:

- [1] 郭婷婷,高文洋,高艺,等.台湾海峡气候特点分析[J].海洋预报,2010,27(1):53-58.  
GUO T T, GAO W Y, GAO Y, et al. Analysis of climatic characteristics of Taiwan Strait[J]. Marine Forecasts, 2010, 27(1): 53-58.
- [2] 夏丽花,吴幸毓,陈敏艳.台湾海峡致灾大风气候特征分析[J].海峡科学,2017(6):3-8.  
XIA L H, WU X Y, CHEN M Y. Analysis of climatic characteristics of disaster-causing gale over Taiwan Strait[J]. Straits Science, 2017(6): 3-8.
- [3] 陈剑桥.2008年冬季台湾海峡及其邻近海域QuikSCAT卫星遥感风场的检验及应用分析[J].台湾海峡,2011,30(2):158-164.  
CHEN J Q. Validation of QuikSCAT data and their application in the analysis of wind characteristics of Taiwan Strait and its adjacent waters in winter 2008[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2011, 30(2): 158-164.
- [4] 任在常.2016年初强寒潮对台湾海峡及其邻近海域影响分析[J].海洋预报,2016,33(5):78-88.  
REN Z C. Analysis of the influence of early 2016 strong cold wave in Taiwan Strait and its adjacent waters[J]. Marine Forecasts, 2016, 33(5): 78-88.
- [5] 陈德文,李雪丁.台湾海峡及邻近海域冷空气过程风-浪关系的观测分析[J].海洋预报,2018,35(2):44-52.  
CHEN D W, LI X D. Analysis of relationship between wind and wave during the period of cold air in Taiwan Strait and its adjacent waters based on observed data[J]. Marine Forecasts, 2018, 35(2): 44-52.
- [6] 吴良奇,董斌.台湾海峡两岸客滚船直航风险分析及安全保障措施[J].中国水运,2011,11(4):3-6.  
WU L Q, DONG B. Risk analysis and safety safeguard measures of direct passenger rolling ships across Taiwan Strait[J]. China Water Transport, 2011, 11(4): 3-6.
- [7] 陈威,陈峰.减少两岸直航船舶通航风险的对策研究[J].中国水运,2010,10(6):22-23.  
CHEN W, CHEN F. Study on countermeasures to reduce the risk of direct cross-strait shipping[J]. China Water Transport, 2010, 10(6): 22-23.
- [8] 郭民权,曾银东,李雪丁,等.平潭近岸海域浮子漂移轨迹及其数值模拟[J].应用海洋学报,2014,33(4):449-454.  
GUO M Q, ZENG Y D, LI X D, et al. Buoy drift trajectory and numerical simulation in Pingtan coastal waters[J]. Journal of Applied Oceanography, 2014, 33(4): 449-454.
- [9] 郑祥靖,李雪丁,徐啸,等.台湾海峡海浪数值模拟和特征分析[J].海洋预报,2021,38(5):31-39.  
ZHENG X J, LI X D, XU X, et al. Numerical simulation and characteristic analysis of ocean waves in the Taiwan Strait[J].

- Marine Forecasts, 2021, 38(5): 31-39.
- [10] 林伊楠, 陶爱峰, 李雪丁, 等. 台湾海峡风涌浪分离方法研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(11): 25-34.
- LIN Y N, TAO A F, LI X D, et al. Study on separation method of wind-wave and swell in the Taiwan Strait[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(11): 25-34.
- [11] 冯士筭, 李凤岐, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 198-199.
- FENG S Z, LI F Q, LI S J. An introduction to marine science[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 198-199.

## Wave study of two typical cold air processes in the Taiwan Strait

DING Ping

(Fujian Marine Forecasts, Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** Based on buoys measurements and the ERA5 reanalysis data from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts, the causes and differences of wind waves in two typical cold air processes affecting the Taiwan Strait are analyzed by using the spatio-temporal analysis method. The results show that in wintertime, cold air with central intensity above 1 028 hPa, which encounters the ocean between the mouth of the Yangtze River and the south coast of the Shandong Peninsula, benefits for the formation of disastrous waves with wave height larger than 6 m in the Taiwan Strait. The northern part of Taiwan Strait is more affected by the swell, while in the strait wind wave dominates and the proportion of swell is small.

**Key words:** cold air; wind; wave; Taiwan strait