

DOI:10.11737/j.issn.1003-0239.2024.01.003

## 福建省海浪灾害危险性评估

刘艳贵<sup>1</sup>, 徐瑞<sup>2,3\*</sup>, 侯放<sup>2,3</sup>, 邢闯<sup>2,3</sup>, 李本霞<sup>2,3</sup>, 张晓辉<sup>1</sup>, 傅望安<sup>1</sup>, 王海明<sup>1</sup>,  
刘鑫<sup>4</sup>, 尹铁男<sup>4</sup>

(1. 华能(浙江)能源开发有限公司, 浙江 杭州 310006; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 3. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081; 4. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209)

**摘要:** 选用美国国家环境预报中心的全球再分析风场为驱动风场, 以 WAVEWATCH III 海浪模式为基础, 采用全球-西北太平洋-中国近海海区三层嵌套方案构建了 1990—2020 年海浪再分析数据集; 利用该数据集, 分析了福建省近海海浪灾害强度和发生频率, 并计算了典型重现期的海浪波高。结果表明: 福建省海域海浪有效波高分布具有明显的季节变化; 因为地形的影响, 台湾海峡中部区域的巨浪出现频率高于其他区域。

**关键词:** 福建; 海浪危险性评估; 海浪再分析数据集; WAVEWATCH III

**中图分类号:** P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)01-0021-10

### 0 引言

福建省管辖海域位于东海南部和台湾海峡地区, 易受到台风和冷空气引起的灾害性海浪影响。根据福建省海洋与渔业局公布的《福建省海洋灾害公报》显示, 2011—2020 年福建省由海浪灾害造成的直接经济损失达 6 844 万元, 死亡(含失踪)105 人。因此科学、全面地开展福建省海域的海浪灾害危险性评估工作, 对提升福建省海洋灾害防治能力、保障福建省海洋经济可持续发展具有重要的现实意义。

我国海浪灾害危险性评估工作始于 21 世纪初。2003 年 9 月, 国务院批准设立“我国近海海洋综合调查与评价专项”, 该专项的实施积累了一大批海洋基础资料和海洋灾害专项资料, 但尚未系统地研究和建立海洋灾害风险评估体系。2011 年 7 月, 国务院要求原国家海洋局开展全国海洋灾害风险区划工作, 国家海洋环境预报中心编制完成了《海洋灾害风险评估和区划技术导则第 2 部分: 海浪》, 初步形成了比较全面、系统的海浪灾害危险性评估方法, 即利用成熟的海浪数值模型构建不少于 30 年的

海浪再分析数据集, 并以此数据集为基础开展典型重现期和频率的浪高分析, 并计算海浪危险性指数。

### 1 海浪再分析数据集构建

#### 1.1 海浪模式设置

本文以三代谱模式 WAVEWATCH III 为基础构建海浪再分析数据集。该模式由美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction)开发, 2003 年 3 月正式成为全球业务化预报模式<sup>[1]</sup>, 英国国家气象局(Met Office)也基于 WAVEWATCH III 搭建了业务化的全球-区域海浪预报系统以及业务化海浪集合预报系统<sup>[2-3]</sup>。WAVEWATCH III 也广泛应用于海浪后报和波候研究<sup>[4-6]</sup>, 国内的大量学者也利用它针对中国近海各个海区进行建模, 模拟结果得到广泛认可<sup>[7-10]</sup>。

本文采用了全球-西北太平洋-中国近海海区三层单向嵌套方案, 其中全球分辨率为 0.25°, 西北太平洋区域分辨率为 0.1°, 中国近海区域分辨率为

收稿日期: 2023-02-14。

基金项目: 中国华能集团有限公司科技项目(HNKJ20-H053)。

作者简介: 刘艳贵(1971-), 男, 高级工程师, 本科, 主要从事海上风电工程技术研究及应用工作。E-mail: yg\_liu@zhjfgs.chng.com.cn

\*通信作者: 徐瑞(1990-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海浪预报工作。E-mail: xur@nmefc.cn

1/30°。

本文中所使用的的风场为NCEP的气候预报系统再分析(Climat Forecast System Reanalysis, CFSR)资料,分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ,CFSR是一套高分辨率的海-陆-气-海冰耦合的全球再分析资料,时间为1979年1月—2020年12月。

本文所用的基础数据及模式配置见表1。

### 1.2 海浪再分析数据计算

计算时以自然月为单位进行逐月计算,月与月之间采用热启动,保证了数据在时间上的连续性。不同尺度模型之间利用嵌套边界的格点进行信息交换,保证了数据在空间上的连续性。具体计算流程见图1。

### 1.3 海浪再分析数据检验

本文利用海浪浮标观测资料,对福建省海域再分析海浪场开展一般海况和强海况下的检验。一般海况的检验时间跨度为2019年1—12月。检验结果见图2和表2。

本文选取影响福建省海域的8次大浪过程进行强海况下有效波高的检验,其中包括5次台风过程以及3次冷空气浪过程。检验结果见表3。从结果可以看出,本文建立的海浪再分析数据可以准确地模拟出福建海域海浪有效波高的时空演变规律,有效波高 $\geq 2$  m的预报平均相对误差为9%~15%,对于台风以及强冷空气造成的大浪过程也具备良好的模拟能力。

表1 模式配置表

Tab.1 Model configuration

强迫风场	地形数据	输入/耗散项	四波间相互作用计算方法	平流项	频率/方向(分隔数)	时间步长/s	输出要素	输出间隔
CFSR	ETOP01+ 高分辨率 海图数据	ST6(BYDRZ Source Term Package)	DIA(Discrete Interaction Approximation)	PR3(三 阶平流 项)	35/51	全球:900 300 300 15 西北太平洋:450 120 120 5 中国近海:450 120 120 5	有效波高、平均波周期、平均波向、平均波长、涌高、涌向、涌浪波长、涌浪周期、风浪成分占比、谱宽度	逐小时

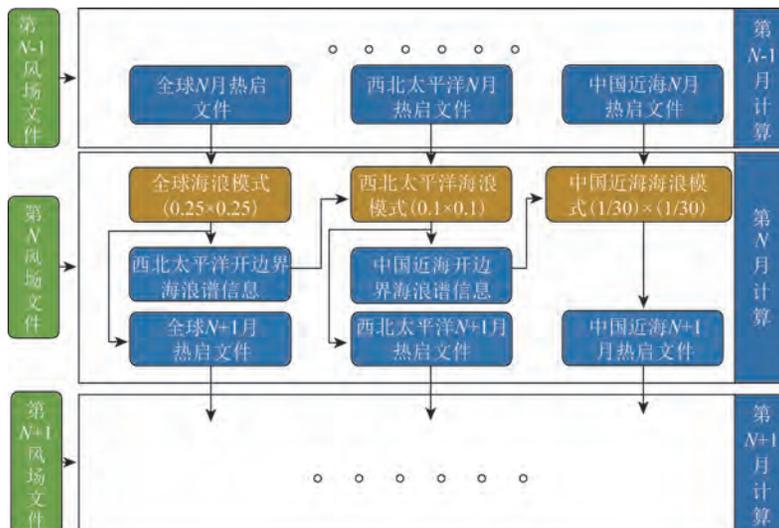


图1 海浪再分析数据计算流程  
Fig.1 Flowchart of wave reanalysis process

## 2 福建省近海海浪危险性评估

### 2.1 典型重现期浪高分布

基于福建省海域的海浪再分析数据集,统计确定每个格点上海浪有效波高的年极值序列,然后采用 Weibull 分布极值推算方法,计算确定每个格点上

典型重现期的有效波高,获得福建省海域典型重现期的浪高分布。重现期分别考虑2年一遇、5年一遇、10年一遇、20年一遇、50年一遇、100年一遇的情况。

使用非线性最小二乘法拟合得到三参数 Weibull 分布,并得到对应重现期  $T$  的计算公式,据此计算每个格点上海浪要素的多年重现期值。对

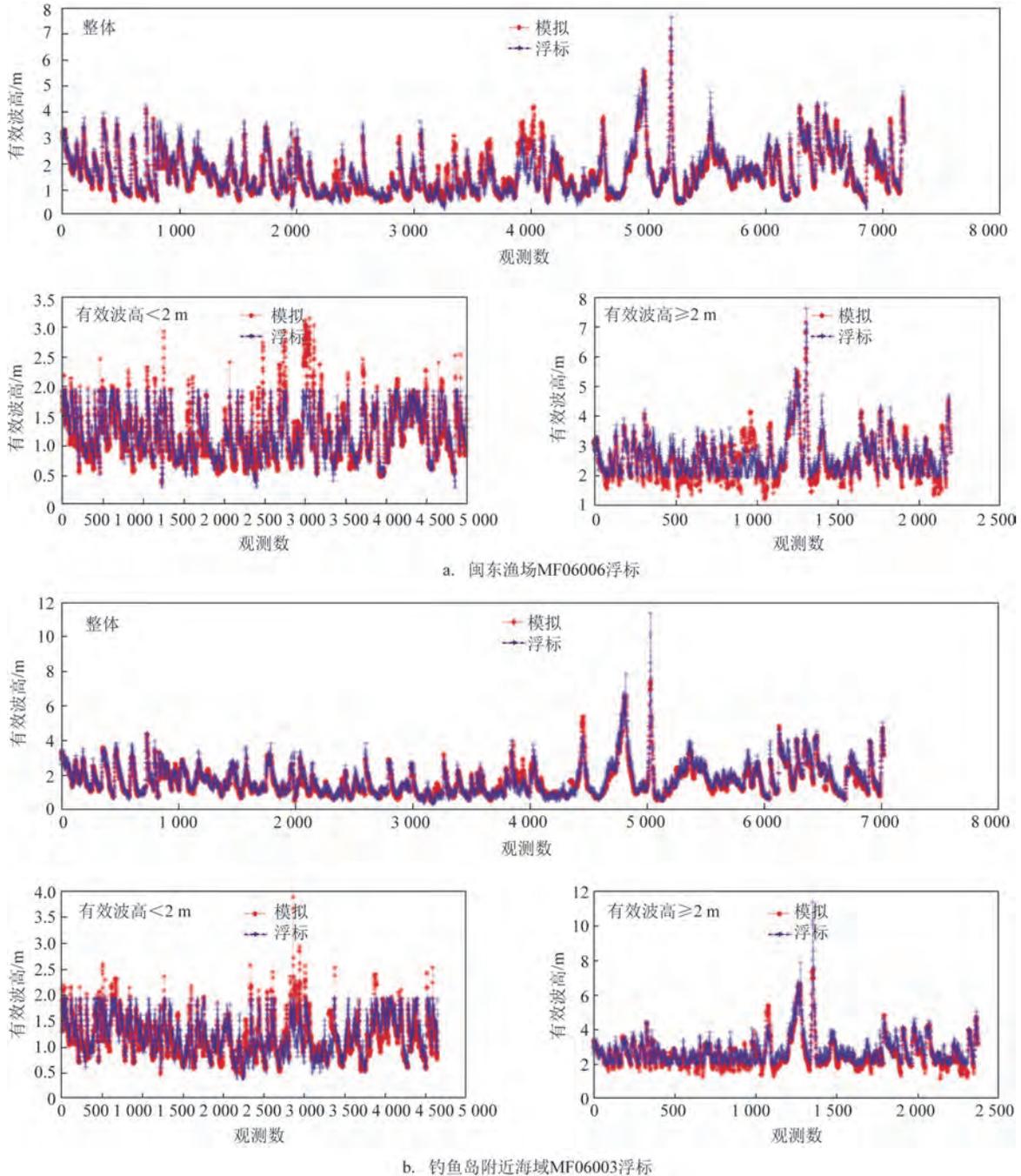
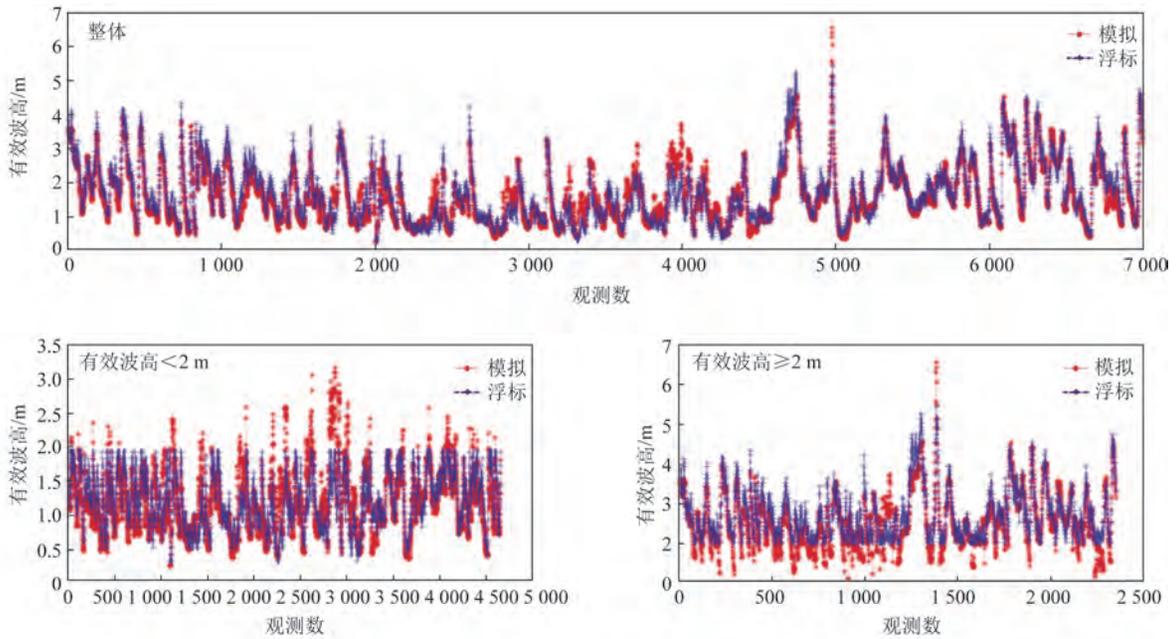
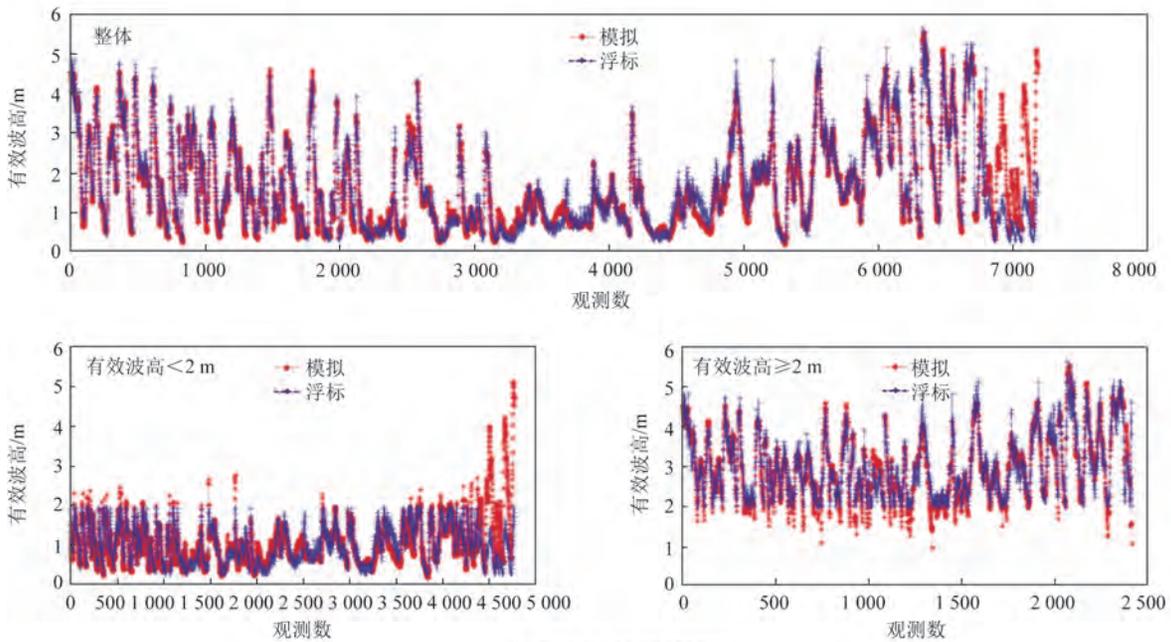


图2 浮标实测波高与再分析浪场对比

Fig.2 Comparison of significant wave height between the reanalysis data and the records of the buoy



c. 闽中渔场MF06004浮标



d. 闽南渔场MF09001浮标

图2 (续)

Fig.2 (Continued)

变量  $x$  来说,三参数 Weibull 分布的累计概率分布函数取值大于  $x$  的概率为:

$$y(x) = \begin{cases} \exp\left\{-\left(\frac{x-\gamma}{\alpha}\right)^\beta\right\} & x > \gamma \\ 1 & x \leq \gamma \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\alpha, \beta, \gamma$  分别称为形状参数、尺度参数和位置参数,  $\alpha > 0, \beta > 0$ 。  $y(x)$  的倒数  $T$  称为重现期。变换为  $x$  的函数,即可求解重现期为  $T$  的变量  $x$  的值。计算公式为:

$$x = \beta [\ln(T)]^{\frac{1}{\alpha}} + \gamma \quad (3)$$

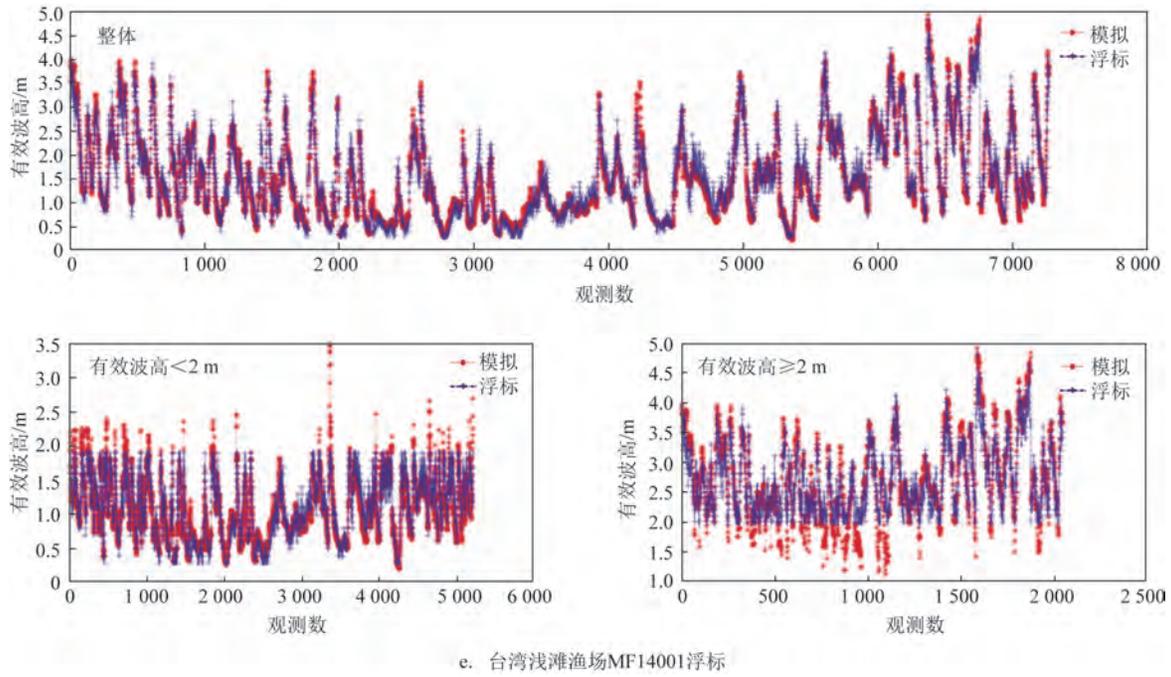


图2 (续)

Fig.2 (Continued)

表2 一般海况下浮标实测波高与再分析浪场对比结果

Tab.2 Significant wave height validation results under general sea state

浮标	整体		有效波高 $\geq 2$ m		有效波高 $< 2$ m	
	平均绝	平均相	平均绝	平均相	平均绝	平均相
	对误差/ m	对误差/ %	对误差/ m	对误差/ %	对误差/ m	对误差/ %
MF06006	0.18	13.28	0.26	9.49	0.15	14.88
MF06003	0.19	13.10	0.25	8.68	0.16	15.27
MF06004	0.21	14.99	0.30	11.01	0.17	16.92
MF09001	0.21	14.95	0.33	11.39	0.15	16.73
MF14001	0.23	15.79	0.39	14.64	0.16	16.24

在利用Weibull分布曲线推算多年一遇波高时,分布函数与浪高资料的拟合采用《海港水文规范》中推荐的定位概率公式。最终得到的福建省海域典型重现期浪高分布见图3。

福建省海域2年一遇有效波高极值(9~14 m)出现在闽东渔场(东海南部);闽中、闽南渔场(台湾海峡)2年一遇有效波高小于6 m,只有在100年一遇重现期下才会出现超过9 m的有效波高;闽外渔

表3 强海况下浮标实测波高与再分析浪场对比结果

Tab.3 Significant wave height validation results under severe sea state

过程(发生时间)	浮标	绝对 误差/m	相对 误差/%
1909号台风“利奇马”(2019年8月9—10日)	MF06003	0.41	8.43
1808号台风“玛莉亚”(2018年7月10—11日)	MF06004 MF06006	0.29 0.59	7.37 11.19
1513号台风“苏迪罗”(2015年8月8—9日)	FJ002	0.57	14.57
1323号台风“菲特”(2013年10月6—7日)	QF209	0.55	12.00
1209号台风“苏拉”(2012年8月2—3日)	QF208	0.22	6.16
201229冷空气(2020年12月29—31日)	MF14001	0.33	12.31
160122冷空气(2016年1月22—25日)	QF206	0.55	16.21
101214冷空气(2010年12月14—16日)	FJ002	0.38	8.51

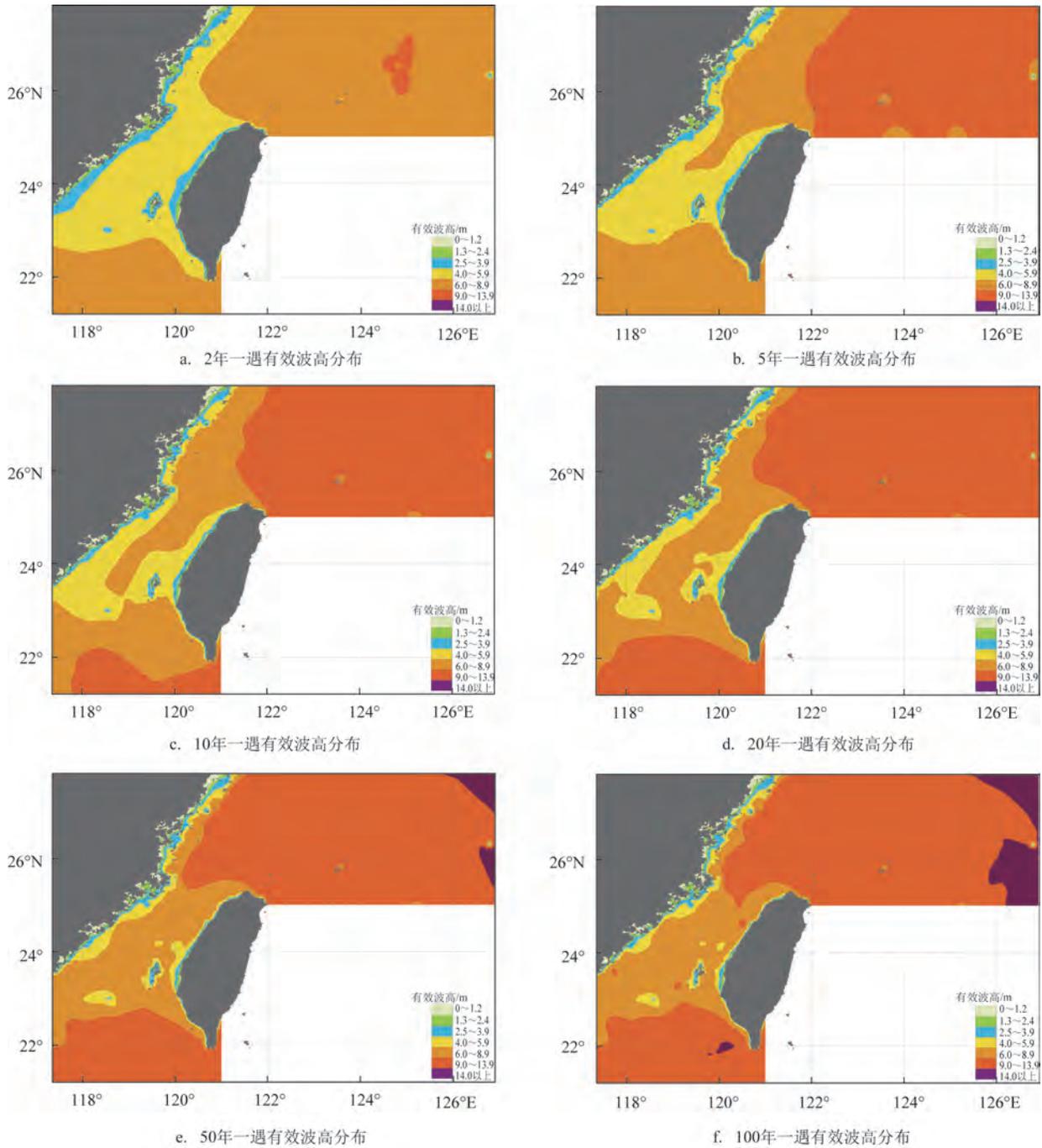


图3 福建省海域典型重现期浪高分布

Fig.3 Wave height in the typical return periods in the coastal waters of Fujian Province

场在50年一遇重现期下会出现大于14 m的有效波高;台湾浅滩渔场部分海域在100年一遇重现期下才会出现14 m以上的有效波高。

### 2.2 危险性指数计算

按照《海洋灾害风险评估和区划技术导则第2

部分:海浪》的划分,将每个格点上有效波高( $H_s$ )的大小分为特强、强、较强、一般4个等级,分别对应I、II、III、IV级。福建省海域海浪强度等级划分见表4。

基于福建省海域海浪再分析数据集,分别计算每个格点上I、II、III、IV级有效波高的年平均出现

表4 近海海域海浪强度等级划分

Tab.4 Classification of wave intensity in offshore waters

海浪强度等级	有效波高/m
I	$H_s \geq 14.0$
II	$9.0 \leq H_s < 14.0$
III	$6.0 \leq H_s < 9.0$
IV	$4.0 \leq H_s < 6.0$

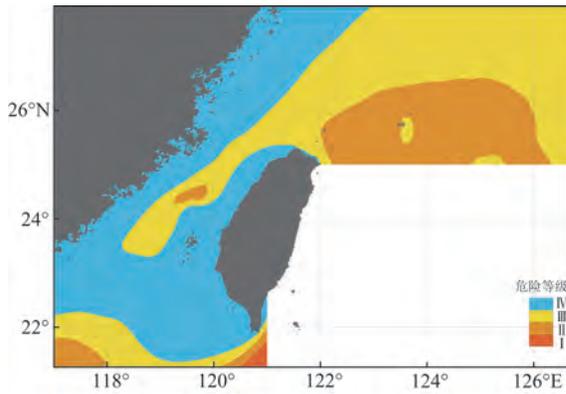


图4 福建省海域海浪灾害危险性分布

Fig.4 Distribution of hazard of wave disasters in the coastal waters of Fujian Province

次数或小时数。计算每个格点的海浪灾害危险性参数  $H_w$ , 计算公式为:

$$H_w = 0.6N_1 + 0.25N_2 + 0.1N_3 + 0.05N_4 \quad (4)$$

式中:  $N_1 - N_4$  分别为 I - IV 级有效波高的年平均出现次数。将每个格点上的危险性参数进行归一化处理, 得到归一化后的危险性指数  $H_{wn}$ , 并统计 4 级浪高出现的频率, 结果见图 4。福建省近海海域海浪危险性等级最高的区域为台湾浅滩渔场东部 (I 级); 闽中、闽南、闽外渔场大部分海域的海浪灾害危险性等级为 III 级或 IV 级; 台湾海峡中部区域海浪灾害危险性等级较高, 为 II 级; 闽东渔场西部的海浪灾害危险性自西向东逐渐增加, 最高级别为 II 级。

### 2.3 月平均各级浪高出现频次统计

福建省海域易受到台风和冷空气引起的灾害性海浪影响, 有效波高呈现较明显的季节特点。本文统计了福建省海域 IV 级 (巨浪)、III 级 (狂浪)、II 级 (狂涛)、I 级 (怒涛) 浪高的月平均出现频次, 结果见图 5。从图中可以看出, 福建省海域浪高分布具有非常明显的季节变化特征, 秋季和冬季的巨浪

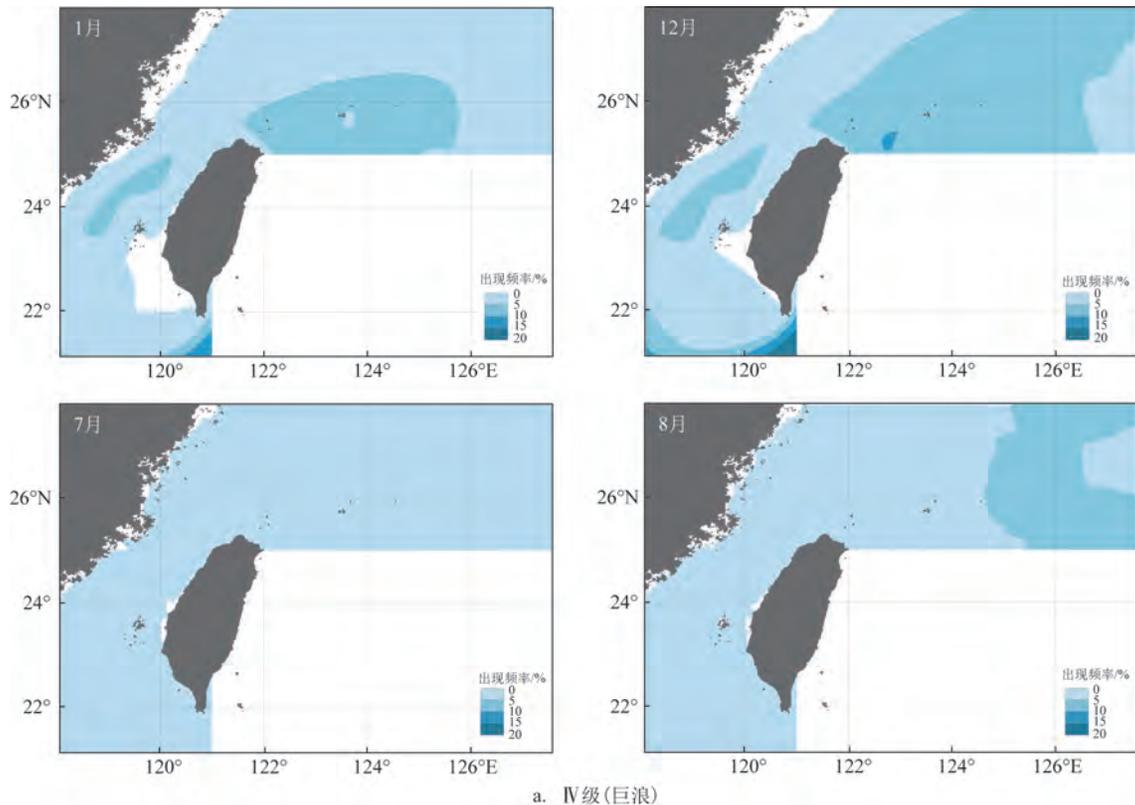
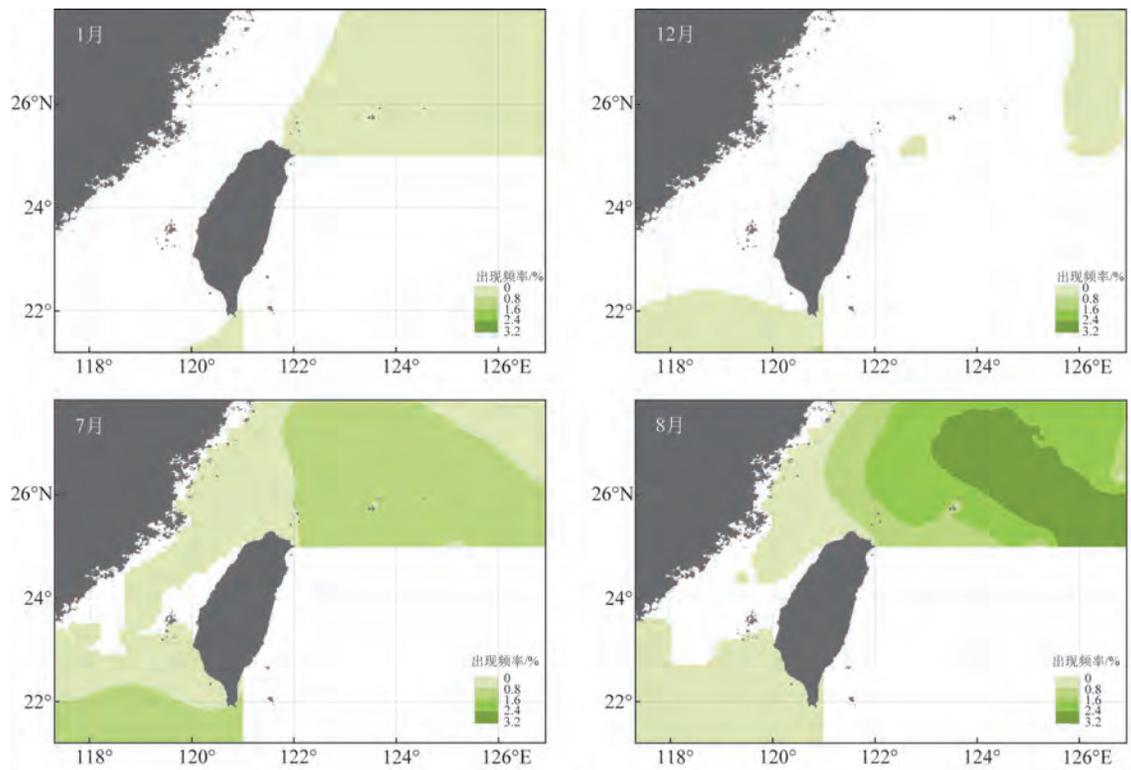
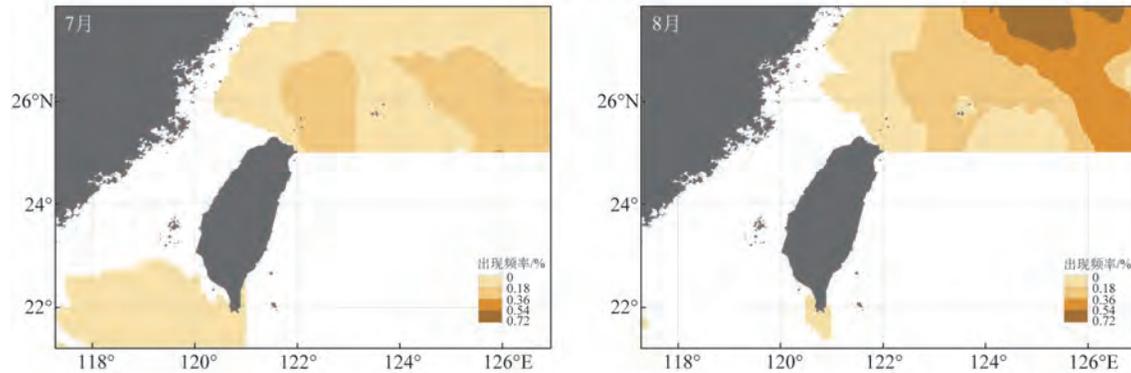


图5 福建省海域各级浪涛月平均出现频率分布

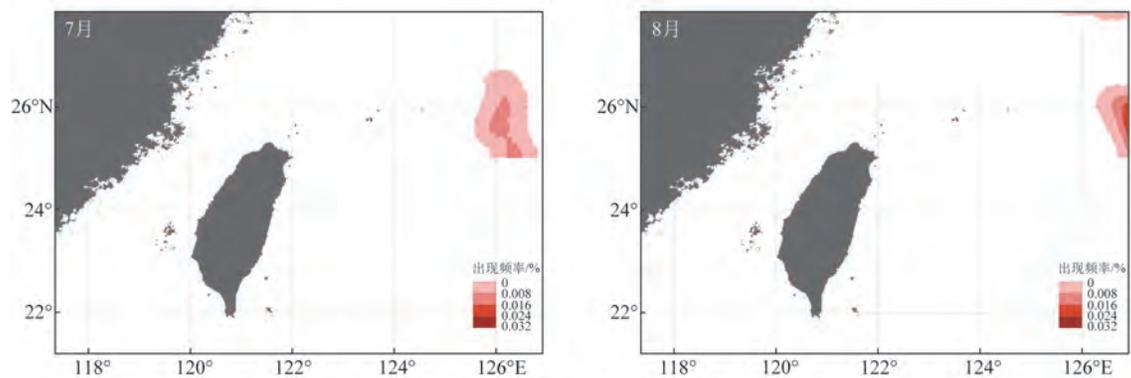
Fig.5 Monthly average frequency distribution of different levels of wave height in the coastal waters of Fujian Province



b. III级(狂浪)



c. II级(狂涛)



d. I级(怒涛)

图5 (续)  
Fig.5 (Continued)

出现频率明显高于夏季和春季,且分布范围更加广阔;冬半年巨浪在台湾浅滩渔场以南海域、闽外渔场、钓鱼岛附近海域、台湾海峡中部出现频率较高,夏半年巨浪仅在闽外渔场、钓鱼岛附近海域出现频率较高;狂浪过程主要由台风浪引起,所以夏半年的出现频率明显高于冬半年,外部海域高于近海海域;受台风影响,夏半年闽外渔场、钓鱼岛附近海域、台湾浅滩渔场以南海域狂浪过程的出现频率明显上升;狂涛过程均由台风浪引起,均出现在夏半年的外部海域,如在闽外渔场、钓鱼岛附近海域、台湾浅滩渔场以南海域均有出现,但在台湾海峡出现频率很低;怒涛过程均由台风浪引起,仅出现在7—8月闽外渔场的外部海域。

### 3 结论

本文基于数值后报模拟分析结果,开展了福建省海域海浪灾害危险性评估工作,评估成果可为沿海海洋功能区划、海上大型工程选址及设计、海洋防灾减灾等提供重要参考。主要评估结论如下:

①台湾浅滩渔场以南海域、闽外渔场、钓鱼岛附近海域、闽东渔场东北和闽南渔场中北部的海浪危险等级较高。

②福建省海域有效波高分布具有明显的季节变化特征,冬季受冷空气的影响,巨浪出现频次最高,夏季受台风影响,较易出现狂浪以上的海浪过程。

③受地形影响,冬季台湾海峡中部区域的巨浪出现频率高于海峡其他区域。

#### 参考文献:

- [1] DYKES J D, ROGERS W E. WAVEWATCH III (registered trademark): transition to naval operations[J]. Wavewatch III Transition to Naval Operations, 2013.
- [2] LI J G, SAULTER A. Unified global and regional wave model on a multi-resolution grid[J]. *Ocean Dynamics*, 2014, 64(11): 1657-1670.
- [3] BUNNEY C, SAULTER A. An ensemble forecast system for prediction of Atlantic-UK wind waves[J]. *Ocean Modelling*, 2015, 96: 103-116.
- [4] 周良明, 吴伦宇, 郭佩芳, 等. 应用 WAVEWATCH-III 模式对南海的波浪场进行数值计算、统计分析和研究[J]. *热带海洋学报*, 2007, 26(5): 1-8.
- ZHOU L M, WU L Y, GUO P F, et al. Simulation and study of wave in South China Sea using WAVEWATCH-III [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26(5): 1-8.
- [5] MENTASCHI L, BESIO G, CASSOLA F, et al. Performance evaluation of Wavewatch III in the Mediterranean Sea[J]. *Ocean Modelling*, 2015, 90: 82-94.
- [6] GERASIMOS K, PAPADOPOULOS A, KATSAFADOS P, et al. A 2-year intercomparison of the WAM-Cycle4 and the WAVEWATCH-III wave models implemented within the Mediterranean Sea[J]. *Mediterranean Marine Science*, 2011, 12(1): 129-152.
- [7] 江丽芳, 张志旭, 齐义泉, 等. WAVEWATCH III 和 SWAN 模式在南海北部海域海浪模拟结果的对比分析[J]. *热带海洋学报*, 2011, 30(5): 27-37.
- JIANG L F, ZHANG Z X, QI Y Q, et al. Simulations of the northern South China Sea using WAVEWATCH III and SWAN[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2011, 30(5): 27-37.
- [8] 郭衍游, 侯一筠, 杨永增, 等. 利用 WaveWatch III 建立东中国海域海浪同化系统[J]. *高技术通讯*, 2006, 16(10): 1092-1096.
- GUO Y Y, HOU Y J, YANG Y Z, et al. To build a regional ocean wave data assimilation system of eastern China seas with WaveWatch III [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2006, 16(10): 1092-1096.
- [9] 王娟娟, 李本霞, 高志一, 等. 中国海的极端海浪强度变化及归因分析[J]. *科学通报*, 2021, 66(19): 2455-2467.
- WANG J J, LI B X, GAO Z Y, et al. Trend and attribution analysis of extreme wave intensity in the China Sea[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021, 66(19): 2455-2467.
- [10] WANG J J, LI B X, GAO Z Y, et al. Comparison of ECMWF significant wave height forecasts in the China Sea with Buoy data [J]. *Weather and Forecasting*, 2019, 34(6): 1693-1704.
- [11] SAHA S, MOORTHY S, WU X R, et al. The NCEP climate forecast system version 2[J]. *Journal of Climate*, 2014, 27(6): 2185-2208.
- [12] RASCLE N, ARDHUIN F. A global wave parameter database for geophysical applications. Part 2: Model validation with improved source term parameterization [J]. *Ocean Modelling*, 2013, 70: 174-188.

## Hazard assessment of wave disasters in Fujian Province

LIU Yangui<sup>1</sup>, XU Rui<sup>2,3\*</sup>, HOU Fang<sup>2,3</sup>, XING Chuang<sup>2,3</sup>, LI Benxia<sup>2,3</sup>, ZHANG Xiaohui<sup>1</sup>, FU Wang'an<sup>1</sup>, WANG Haiming<sup>1</sup>, LIU Xin<sup>4</sup>, YIN Tienan<sup>4</sup>

(1. Clean Energy Branch of Huaneng (Zhejiang) Energy Development Co., Ltd, Hangzhou 310014, China; 2. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China; 3. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China; 4. China Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing 102209, China )

**Abstract:** Using the wind fields from Climate Forecast System Reanalysis, this paper analyzes the intensity and frequency of offshore wave disasters in Fujian Province, as well as the wave height in the typical return period. The results show that effective wave height in the coastal waters of Fujian Province has significant seasonal variation. Owing to topographic effect, the central Taiwan Strait areas have a higher frequency of huge waves in comparison with other areas. The analysis results can provide important references for coastal marine function zoning, site selection and design of large offshore construction projects, and marine disaster prevention and reduction.

**Key words:** Fujian Province; hazard assessment of wave disaster; wave reanalysis data set; WAVEWATCH III