

## 常规海浪预报定量化检验评估方法研究

梁颖瑜, 徐丽丽, 徐婷婷, 姚圣康\*, 于芸, 郜海, 马卫军

(自然资源部东海预报减灾中心, 上海 201306)

**摘要:** 常规海浪预报内容是一段文字,无法直接应用实况数据进行预报质量的检验评估。在详细调研全国海洋预报机构发布的海浪预报产品的基础上,应用东海预报减灾中心预报结果和实况数据进行反复测试与验证,制定了常规预报产品的处理规则,设计了检验评估方法;通过对存在问题的研讨与论证,重点解决评估波高最小值设定、观测点与预报海域面之间的关系、同一海域多点实况资料选取等定量化检验评估中的关键技术难点,提升了检验评估规则的合理性和适用性。

**关键词:** 海洋环境预报;海浪预报质量;检验评估;定量

**中图分类号:** P731.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)01-0010-11

### 0 引言

海浪灾害是海洋灾害的主要灾种之一<sup>[1]</sup>,我国也是海浪灾害的多发地区。每年的海洋灾害都会给人民生命和财产造成重大损失<sup>[2-5]</sup>,根据《2021年中国海洋灾害公报》<sup>[6]</sup>的数据,近10年来,我国近海平均每年发生有效波高4.0 m(含)以上的灾害性海浪过程37.6次,年直接经济损失达1.60亿元。我国的海浪预报始于1966年,海浪警报始于2006年,海浪预警报为各级海洋行政管理部门提供防灾减灾决策依据,为海洋经济、国防安全、涉海企事业单位保障服务做出了积极的贡献。近几年来,随着我国海洋经济的高速发展,沿海政府各级海洋管理部门、涉海企事业单位在港口航运、涉海工程、渔业养殖、滨海旅游等方面的防灾减灾工作中,对海浪预警报质量的要求越来越高。预报产品质量检验评估是促进与提升预报技术水平的主要措施,也是评价海洋预报机构资质的重要标准。

由于海上实况资料匮乏,早期海浪预报质量检验评估主要基于每日08时(北京时,下同)、14时、20时绘制的海浪实况分析图,因获取的实况资料来源

不同,评估参考用的实况分析图差异较大,所以检验结果具有较大的主观性。《海洋预报和警报发布(GB/T 19721.2—2017)》标准主要规范了海浪预报发布的频次、时效、内容等<sup>[7]</sup>,但对波高、波向的发布方式没有明确规定,至今我国海洋预报机构还没有形成一套常规海浪预报质量检验评估标准。

国内外海浪预报质量检验多针对数值预报开展,常使用均方根误差、绝对误差、相对误差等检验指标,目前的海浪数值预报模式基本基于第三代数值预报模式建立<sup>[8]</sup>,尤其是WAVE WATCH III模式能真实地描述波高变化,稳定性好,预报准确性高,应用广泛,有效波高的预报值与观测值呈明显的线性相关,相关系数高达0.85<sup>[9]</sup>。东海区海浪模式预报的24 h的波高平均绝对误差在0.3 m左右,平均相对误差在20%以内<sup>[10]</sup>。

国内常规海浪预报主要是综合不同模式的预报结果,预报员根据经验将预报时效内逐时的波高、波向通过文字加字符的方式进行释用。在平稳的天气系统过程中,预报准确率与数值预报处于同一水平,在天气系统转换较快或有灾害性天气系统影响时,受预报单篇幅限制,预报只描述主要过程

收稿日期: 2022-11-03。

基金项目: 全国海洋标准化技术委员会推荐性制修订计划(20140698-T-418)。

作者简介: 梁颖瑜(1985-),女,工程师,硕士,主要从事海洋环境数值预报工作。E-mail: liangyingyu@ecs.mnr.gov.cn

\*通信作者: 姚圣康(1964-),男,教授级高级工程师,本科,主要从事东海海洋环境预警报工作。E-mail: yskyjn@126.com

或严重过程,此时的预报准确率与数值预报会出现偏差,但不会明显偏离,所以针对常规预报设计的评估规则与规定,其检验评估结果应该与数值预报准确率相当。海洋环境预报遵循的是可以适当空报、不允许漏报的原则,而评估检验又以实况为依据,所以在检验评估过程中,当结果存在争议时遵循有利于预报的原则。

本文基于对我国海洋预报机构的海浪预报产品的深入细致调研,系统分析了各家海浪预报产品的发布内容与形式,制定了一套将海浪常规预报内容转化为可检验评估的逐时波高、波向转换规则,对其中的关键性技术问题开展了专题论证,在遵循海洋预报客观规律的基础上,完善了评估规则,成功地实现了海浪预报质量的定量化检验评估。

## 1 数据及来源

本文研究及测试数据主要包括自然资源部东海预报减灾中心发布的海浪预报单与警报单、自然资源部东海局所属波浪观测站及海洋观测浮标数据、上海市海洋局所属海洋观测浮标数据。检验所用的波高与波向实况数据采用整点前的有效波高及相对应的波向、有效波周期。

## 2 海浪预报内容处理规则

常规海浪预报主要包含预报要素、预报时段、预报趋势等文字,例如某一海区的海浪预报内容为“NE 1.0~1.8 m,明晨 SE 2.0~3.0 m”,不同预报机构预报内容的形式差异较大。因此,对预报产品进行检验评估,须应用一定的规则将其转换为可定量化检验评估的要素。

### 2.1 预报要素处理

由于波高和波向为单值,因此可以直接应用实况数据进行检验评估。

波高为区间值,假定预报波高为“ $N_1 \sim N_2$ ”,其中 $N_1$ 为预报波高下限, $N_2$ 为预报波高上限,则检验评估波高的取值可分两种情况:①取 $N_1 \sim N_2$ 的任意值,如预报波高为2.0~3.0 m,则待检验评估值取

2.0~3.0的任一值;②取预报波高的平均值,如预报波高为2.0~3.0 m,则检验评估波高取为2.5 m。本文采用取预报波高平均值的方式。

波向为方位,可应用表1将预报波向转换为检验评估波向。

表1 预报波向与检验评估波向换算表

Tab.1 Wave direction conversion table for forecasts and evaluation

| 预报波向(方位) | 检验波向/(°) | 预报波向(方位) | 检验波向/(°) |
|----------|----------|----------|----------|
| N        | 0        | S        | 180      |
| NNE      | 22.5     | SSW      | 202.5    |
| N~NE     | 22.5     | S~SW     | 202.5    |
| NE       | 45       | SW       | 225      |
| ENE      | 67.5     | WSW      | 247.5    |
| E~NE     | 67.5     | W~SW     | 247.5    |
| E        | 90       | W        | 270      |
| ESE      | 112.5    | WNW      | 292.5    |
| E~SE     | 112.5    | W~NW     | 292.5    |
| SE       | 135      | NW       | 315      |
| SSE      | 157.5    | NNW      | 337.5    |
| S~SE     | 157.5    | N~NW     | 337.5    |

### 2.2 预报时段处理

在常规海浪预报中,会使用上午、下午、傍晚、半夜等时间段,按照2020年颁布并实施的《海洋预报术语(GB/T 39628—2020)》的规定可划定对应的时间范围(见表2),其中早晨一下半夜分8个时段,主要应用于24 h预报,白天和夜间主要应用于海浪警报或超过48 h的预报。由于相邻两个时段有一个重复时次,检验评估时,误差取两个时次中的较小值。

### 2.3 趋势变化处理

当预报时效内的天气系统发生较大变化时,预报波高、波向也会发生相应变化,预报内容会对趋势变化进行描述,但不同预报机构的描述差异较大。在24 h预报中,绝大多数机构会对趋势变化进行具体描述;而在48 h及以上时效的预报中,只有少数机构会描述趋势变化,主要分3种情况:无趋势

表2 预报时段及其对应的时间范围

Tab.2 Forecasting period and the corresponding time range

| 预报时段 | 北京时         |
|------|-------------|
| 白天   | 08:00—20:00 |
| 夜间   | 20:00—08:00 |
| 早晨   | 05:00—08:00 |
| 上午   | 08:00—11:00 |
| 中午   | 11:00—14:00 |
| 下午   | 14:00—17:00 |
| 傍晚   | 17:00—20:00 |
| 上半夜  | 20:00—23:00 |
| 半夜   | 23:00—02:00 |
| 下半夜  | 02:00—05:00 |

变化;有趋势变化且有发生时间;有趋势变化但无发生时间。

#### ① 无趋势变化

按照2.1节的规则检验评估波高、波向。

#### ② 有趋势变化且有发生时间

在趋势变化前的时段,波高、波向取变化前的检验评估值,在趋势变化及变化后的时段,波高、波向取变化后的检验评估值,其中趋势变化时段的4个时次,波高、波向与实况的误差取4个时次中的最小值。

以08:00发布的24 h海浪预报“NE 2.0~3.0 m上半夜转SW 4.0~5.0 m”为例。预报时效为09:00—次日08:00;趋势变化前,即上半夜前(09:00—19:00)的检验评估波高、波向分别为2.5 m与45°;趋势变化时段(上半夜)及趋势变化后,即20:00—次日08:00,检验评估波高、波向分别为4.5 m与227.5°,其中对变化时段(20:00—23:00)进行检验评估时,时段中4个时次的波高、波向的误差均取该时段中的最小值。

#### ③ 有趋势变化但无发生时间

自预报时效内的第二时段起,若某时次的实况波高、波向达到趋势变化后的预报值,则该时次所在时段定为趋势变化时段(若该时次为两个时段分界时,则将前一时段定为趋势变化时段);检验评估时,变化时段中4个时次的误差均取该时段中的最小值;若自预报时效内第二时段起—预报时效结束

都没有实况达到趋势变化后的波高、波向,则默认将预报时效内最后两个时段设定为趋势变化时段,该时段前所有时次的波高、波向取趋势变化前的值进行检验评估,最后两个时段的波高、波向取趋势变化后的值进行检验评估。

以08:00发布的24 h预报“NE 2.5~3.5 m转SW 3.0~5.0 m”为例。预报时效为09:00—次日08:00;趋势变化前,检验评估波高为3.0 m、波向为45°;趋势变化时段及趋势变化后,检验评估波高为4.0 m,波向为227.5°,趋势变化时段未知。自预报时效内第二时段的第一时次(11:00)起检索实况数据,如17:00实况波高 $\geq 4.0$  m,则17:00为变化时段,由于17:00均属于下午与傍晚时段,根据规则,取下午(14:00—17:00)为变化时段,则趋势变化前的时间段为09:00—13:00,变化后时间段为18:00—次日08:00,下午(14:00—17:00)时段中4个时次的波高、波向与实况的误差取该时段中的最小值;如11:00起实况波高均 $< 4.0$  m,则预报时效内最后两个时段,即下半夜(02:00—05:00)和次日早晨(05:00—08:00)默认为达到趋势变化,则趋势变化前时间段为09:00—次日01:00,趋势变化后时间段为02:00—08:00。

## 3 海浪预报检验评估规则

### 3.1 检验规则

根据相对误差进行波高检验,计算公式为:

$$R_{\text{波高}} = \frac{|H_M - H_F|}{H_M} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $R_{\text{波高}}$ 为波高的相对误差; $H_F$ 为评估波高; $H_M$ 为观测波高。

根据绝对误差进行波向检验,计算公式为:

$$X_{\text{波向}} = |(W_F - W_M + 180) \bmod 360 - 180| \quad (2)$$

式中: $X_{\text{波向}}$ 为波向的绝对误差; $W_F$ 为评估波向; $W_M$ 为观测波向。

### 3.2 评估规则

为了管理部门能直观明了地评估海洋预报机构与预报员的预报质量,在基于波高、波向误差检验结果的基础上,设计了波高、波向评估得分规则,本文采用波高占比80%、波向占比20%的权重分配。

波高评分规则为:根据《国际波级表》中有效波高范围,对每个观测波高赋值 $d$ ,赋予一个预报的满分 $d$ 值。 $d$ 值测试时,应满足海浪预报年平均分为75~95分。 $d$ 值计算公式为:

$$d = \max\{0.125 \times H_m, 0.3\} \quad (3)$$

式中: $d$ 为100分时的预报波高与实测波高的最大差值。根据评估波高与观测波高的绝对误差进行评估,方法为:

- (a)波高绝对误差  $\leq d$  时为100分;
- (b)波高绝对误差  $> d$  时,每相差0.1 m扣5分,直至0分;

波向评分规则为:根据评估波向与观测波向的绝对误差进行评估。

- (a) 误差  $\leq 1.5$  个方位为100分;
- (b) 误差  $> 1.5$  个方位且  $\leq 2$  个方位时,每偏差1°扣1分;
- (c) 误差  $> 2$  个方位时,每偏差1°扣5分,直至0分。

单个海区波高、波向的误差或得分为该海区所有时次的累加平均,单份预报单波高、波向误差或得分为所有预报海区的累加平均。

### 4 检验测试与问题讨论

基于以上设计规则,本文应用2009年QF205、QF206浮标实况数据进行海浪预报质量测试,结果见表3。预报海区编号划分见图1。由于在原始观测数据审核过程中发现,浮标的波向存在系统性偏差,故预报波向不作检验。

从表3可以看出,检验评估结果误差较大,预报质量较差,预报准确性远低于数值预报。通过核查天气系统影响过程并对比检验结果,发现了偏差较大的主要原因,为完善检验评估方法,增强规则的合理性、兼容性及适用性,东海区及全国各级海洋预报机构之间进行了多次工作研讨,经意见征询、讨论与研究,从以下3点对检验规则进行补充完善。

#### 4.1 波高最小值的设定

通过分析检验结果发现,实况波高小于1.0 m是常规波高预报误差较大的主要来源。多数海洋预报机构在发布近海波高预报时,出于预警目的,

表3 2009年东海区5、9海区常规海浪预报检验评估结果表  
Tab.3 Evaluation and assessment results of conventional wave forecast in sea areas 5 and 9 of the East China Sea in 2009

| 检验海区 | 波高平均绝对误差/m | 波高平均相对误差/% |
|------|------------|------------|
| 5海区  | 1.26       | 1.36       |
| 9海区  | 1.58       | 1.52       |

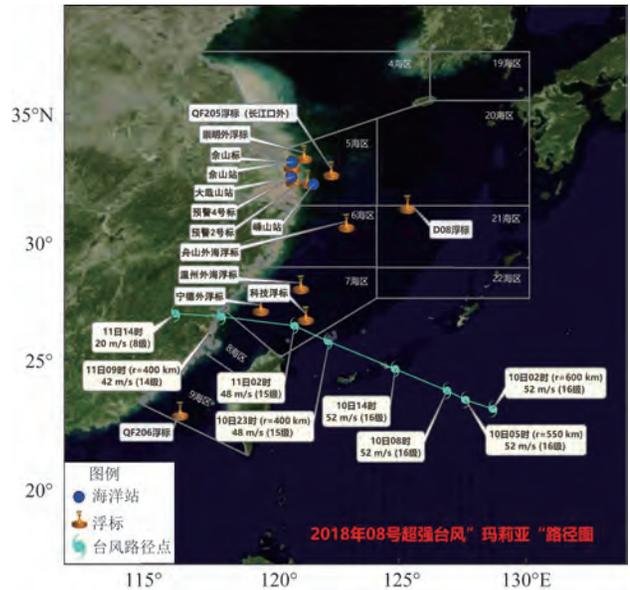


图1 预报海区和1808号台风“玛莉亚”路径

Fig.1 Forecast area and the path of 1808 Typhoon "Maria"

设定最小预报波高范围为1.0~1.8 m或0.8~1.6 m,按照2.2节的规则,检验评估波高分别为1.4 m和1.2 m,因此在实况小于1.0 m时,误差较大。例如,2022年6月4日,东海西南部海域受到华南弱倒槽影响,该海区海洋浮标的波高实况显示波高较小(见图2),按照预报波高1.0~1.8 m或0.8~1.6 m检验评

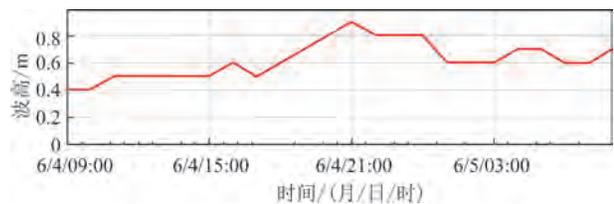


图2 2022年6月4日08:00—6月5日09:00波高实况图

Fig.2 Wave height observation during 2022-06-04 08:00 and 2022-06-05 09:00

估,导致结果的误差较大(见表4),预报准确性较差,与实际预报质量预期不符。

中国近海海区在处于高压中心或弱天气系统控制且没有涌浪的情况下,1.0 m以下的波浪过程较多,尤其是每年5—8月受西北太平洋副热带高压控制期间,若无热带气旋影响,1.0 m以下的海况比例较大。依据舟山外海浮标1999—2018年的波高实况资料,统计分析了1.0 m及0.7 m以下波高年均出

现频率分别约为16.6%和34.7%(见表5)。

针对上述情况,为遵循海洋预报客观规律,设定检验评估最小波高,当实况波高小于0.7 m时,取0.7 m作为检验评估波高。依据此规定计算后,预报1.0~1.8 m与0.8~1.6 m的平均绝对误差分别降为0.675 m和0.475 m(见表6);若预报波高为0.6~1.2 m时,平均绝对误差降为0.175 m,检验结果与模式预报结果较为接近。

表4 2022年6月4日09:00—6月5日08:00 7海区海浪预报质量检验测试表

Tab.4 Quality evaluation table of sea wave forecasts during 2022-06-04 09:00~2022-06-05 08:00

| 时间    | 实况波高/<br>m | 评估波高<br>(1)/m | 波高误差    |         | 评估波高<br>(2)/m | 波高误差    |         | 评估波高<br>(3)/m | 波高误差    |         |
|-------|------------|---------------|---------|---------|---------------|---------|---------|---------------|---------|---------|
|       |            |               | 绝对/m    | 相对/%    |               | 绝对/m    | 相对/%    |               | 绝对/m    | 相对/%    |
| 4日09时 | 0.4        | 1.4           | 1.0     | 2.50    | 1.2           | 0.8     | 2.00    | 0.9           | 0.5     | 1.25    |
| 4日10时 | 0.4        | 1.4           | 1.0     | 2.50    | 1.2           | 0.8     | 2.00    | 0.9           | 0.5     | 1.25    |
| 4日11时 | 0.5        | 1.4           | 0.9     | 1.80    | 1.2           | 0.7     | 1.40    | 0.9           | 0.4     | 0.80    |
| 4日12时 | 0.5        | 1.4           | 0.9     | 1.80    | 1.2           | 0.7     | 1.40    | 0.9           | 0.4     | 0.80    |
| 4日13时 | 0.5        | 1.4           | 0.9     | 1.80    | 1.2           | 0.7     | 1.40    | 0.9           | 0.4     | 0.80    |
| 4日14时 | 0.5        | 1.4           | 0.9     | 1.80    | 1.2           | 0.7     | 1.40    | 0.9           | 0.4     | 0.80    |
| 4日15时 | 0.5        | 1.4           | 0.9     | 1.80    | 1.2           | 0.7     | 1.40    | 0.9           | 0.4     | 0.80    |
| 4日16时 | 0.6        | 1.4           | 0.8     | 1.33    | 1.2           | 0.6     | 1.00    | 0.9           | 0.3     | 0.50    |
| 4日17时 | 0.5        | 1.4           | 0.9     | 1.80    | 1.2           | 0.7     | 1.40    | 0.9           | 0.4     | 0.80    |
| 4日18时 | 0.6        | 1.4           | 0.8     | 1.33    | 1.2           | 0.6     | 1.00    | 0.9           | 0.3     | 0.50    |
| 4日19时 | 0.7        | 1.4           | 0.7     | 1.00    | 1.2           | 0.5     | 0.71    | 0.9           | 0.2     | 0.29    |
| 4日20时 | 0.8        | 1.4           | 0.6     | 0.75    | 1.2           | 0.4     | 0.50    | 0.9           | 0.1     | 0.13    |
| 4日21时 | 0.9        | 1.4           | 0.5     | 0.56    | 1.2           | 0.3     | 0.33    | 0.9           | 0.0     | 0.00    |
| 4日22时 | 0.8        | 1.4           | 0.6     | 0.75    | 1.2           | 0.4     | 0.50    | 0.9           | 0.1     | 0.13    |
| 4日23时 | 0.8        | 1.4           | 0.6     | 0.75    | 1.2           | 0.4     | 0.50    | 0.9           | 0.1     | 0.13    |
| 5日00时 | 0.8        | 1.4           | 0.6     | 0.75    | 1.2           | 0.4     | 0.50    | 0.9           | 0.1     | 0.13    |
| 5日01时 | 0.6        | 1.4           | 0.8     | 1.33    | 1.2           | 0.6     | 1.00    | 0.9           | 0.3     | 0.50    |
| 5日02时 | 0.6        | 1.4           | 0.8     | 1.33    | 1.2           | 0.6     | 1.00    | 0.9           | 0.3     | 0.50    |
| 5日03时 | 0.6        | 1.4           | 0.8     | 1.33    | 1.2           | 0.6     | 1.00    | 0.9           | 0.3     | 0.50    |
| 5日04时 | 0.7        | 1.4           | 0.7     | 1.00    | 1.2           | 0.5     | 0.71    | 0.9           | 0.2     | 0.29    |
| 5日05时 | 0.7        | 1.4           | 0.7     | 1.00    | 1.2           | 0.5     | 0.71    | 0.9           | 0.2     | 0.29    |
| 5日06时 | 0.6        | 1.4           | 0.8     | 1.33    | 1.2           | 0.6     | 1.00    | 0.9           | 0.3     | 0.50    |
| 5日07时 | 0.6        | 1.4           | 0.8     | 1.33    | 1.2           | 0.6     | 1.00    | 0.9           | 0.3     | 0.50    |
| 5日08时 | 0.7        | 1.4           | 0.7     | 1.00    | 1.2           | 0.5     | 0.71    | 0.9           | 0.2     | 0.29    |
| 平均    |            |               | 0.779 2 | 1.362 0 |               | 0.579 2 | 1.024 6 |               | 0.279 2 | 0.518 5 |

表5 1999—2018年舟山浮标0.7 m和1.0m以下波浪年出现频次统计表

Tab.5 Statistical analysis table of annual frequency of waves below 0.7 m and 1.0 m recorded by Zhoushan buoy from 1999 to 2018

| 年份   | 频次(0.7 m) | 频率(0.7 m) | 频次(1.0 m) | 频率(1.0 m) | 总观测次数   |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| 1999 | 254       | 0.196     | 503       | 0.389     | 1 293   |
| 2000 | 240       | 0.122     | 475       | 0.242     | 1 965   |
| 2001 | 167       | 0.169     | 278       | 0.281     | 990     |
| 2002 | 65        | 0.051     | 235       | 0.185     | 1 273   |
| 2003 | 170       | 0.077     | 394       | 0.179     | 2 207   |
| 2004 | 124       | 0.089     | 372       | 0.266     | 1 397   |
| 2005 | 278       | 0.092     | 801       | 0.265     | 3 021   |
| 2006 | 242       | 0.072     | 879       | 0.263     | 3 344   |
| 2007 | 392       | 0.139     | 916       | 0.324     | 2 827   |
| 2008 | 406       | 0.208     | 775       | 0.397     | 1 953   |
| 2009 | 605       | 0.223     | 1 140     | 0.421     | 2 707   |
| 2010 | 1 175     | 0.201     | 2 133     | 0.365     | 5 844   |
| 2011 | 1 205     | 0.135     | 2 977     | 0.334     | 8 920   |
| 2012 | 1 013     | 0.115     | 2 520     | 0.287     | 8 785   |
| 2013 | 1 523     | 0.169     | 3 088     | 0.343     | 8 990   |
| 2014 | 2 056     | 0.226     | 4 004     | 0.440     | 9 094   |
| 2015 | 1 515     | 0.171     | 3 295     | 0.371     | 8 871   |
| 2016 | 1 957     | 0.230     | 3 424     | 0.402     | 8 512   |
| 2017 | 1 859     | 0.205     | 3 597     | 0.396     | 9 082   |
| 2018 | 1 401     | 0.156     | 2 933     | 0.327     | 8 956   |
| 共计   | 16 647    | 0.166     | 34 739    | 0.347     | 100 031 |

注:1999—2010年浮标数据为每日8个时次(02时、05时、08时、11时、14时、17时、20时、23时)

表6 设定实况最小波高后检验结果表

Tab.6 Evaluation table after setting the minimum sea wave height

| 预报波高/m  | 评估波高/m | 平均绝对误差/m | 平均相对误差/% | 设定实况最小波高0.7 m |          |
|---------|--------|----------|----------|---------------|----------|
|         |        |          |          | 平均绝对误差/m      | 平均相对误差/% |
| 1.0~1.8 | 1.4    | 0.779 2  | 1.362 0  | 0.675         | 0.939 8  |
| 0.8~1.6 | 1.2    | 0.579 2  | 1.024 6  | 0.475         | 0.662 7  |
| 0.6~1.2 | 0.9    | 0.279 2  | 0.518 5  | 0.175         | 0.247 0  |

#### 4.2 检验结果有效性

海洋浮标、岛屿或岸基观测站是一个点,波浪观测数据代表的是观测点所在的小范围海域内的海浪状况,而常规预报范围是海区內所有观测点集

合而成的面,在进行预报质量检验时,观测点的数据能否代表整个海区面的海浪状况,应视影响海区的天气系统而定。在平稳或弱天气系统影响海域时,同一海区内的波高不会发生显著差异,此时观测点的波高能够代表所在海区的实况,检验评估结

果有效;在热带气旋或强温带气旋影响海域时,由于气旋近中心海域一般是波高最大区域,从中心向外延伸,波高在水平方向上呈显著减小趋势,此时观测站点的数据一般不能代表整个预报海区,需要甄别检验评估结果是否合理有效。

#### 4.2.1 有效性测试1

应用中央气象台发布的2004号台风“黑格比”、1917号台风“塔巴”、2114号台风“灿都”、1808号台风“玛莉亚”、2106号台风“烟花”这5个影响预报海区的台风路径信息(见图3)以及东海区6个浮标的实况风浪数据来测试检验评估结果的有效性。

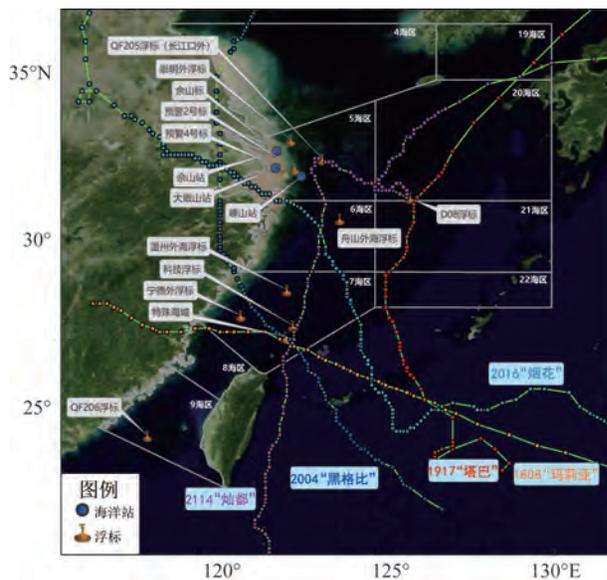


图3 测试台风路径与测波点概位示意图

Fig.3 Schematic diagram of typhoon path and wave measuring points

测试发现,台风的中心强度、7级风圈大小、移动速度会影响某一海域的波高大小,但与观测波高能否代表预报海区的关联度不高。如在2021年7月23日03时,舟山外海浮标与2106号台风“烟花”中心( $T_{中心}$ )距离700 km,受冷空气影响风力达9级,波高为4.5 m,观测波高能代表所在预报海区,检验评估结果有效。

观测波高能否代表所在预报海区,关键在于测点能否观测到台风影响该海区时的最大有效波高。在台风未进入预报海区前,主要影响因子是台风的7级风圈半径( $r_{7级}$ )何时影响预报海区;在台风进入

预报海区后,主要影响因子是测波点处于台风前进方向的位置。检验评估结果有效性测试结果见表7。测试得到如下结论:

①预报时效内,当台风7级风圈未影响预报海区时,波高大小变化相对平稳,由近海海区传播而来的涌浪基本覆盖全海区,观测波高能代表所在海区的海浪状况,检验评估结果有效。

②预报时效内,当台风7级风圈影响预报海区时,波高大小会随着风圈半径与观测点的远近出现剧烈变化,此时观测波高能否代表所在海区的海况主要取决于观测点能否观测到台风近中心的最大有效波高。

③预报时效内,若台风中心经过观测点且形成台风眼时,台风中心有强烈的下沉气流,海面波高在短小时内迅速减小,而常规海浪预报由于受预报单篇幅限制和出于预警目的,不会描述这一减小过程,所以此时观测波高不能代表该海域的海况,检验结果视为无效。

例如2019年9月21日07时,1917号台风“塔巴”位于25.8°N,125.7°E,近中心最大风力为11级(强热带风暴级),图4为21—22日该台风中心穿过位于东海东北部D08浮标时的实况波高图。东海预报减灾中心根据未来24 h台风加强的趋势,发布该海域24 h波高预报为偏东浪3.5~5.5 ↑ 6.0~9.0 m。根据实测有效波高看,如果不考虑台风中心经过的5个时次的记录,预报结果正确。

#### 4.2.2 有效性测试2

2020年,东海预报减灾中心联合上海市海洋监测预报中心,应用位于5海区的崇明外和长江口外浮标,上海预警2号与4号、余山3 m浮标和大戢山、余山、嵎山海洋观测站2007—2020年风浪实况资料,针对影响上海沿海的55次台风和7次温带气旋警报结果进行了有效性验证。综合有效性测试1的结论,考虑到发布的 $r_{7级}$ 和实况有偏差以及温带气旋无大风半径数据,最终确定在热带气旋或温带气旋影响预报海区时,检验结果有效性判定按以下具体规则执行:

①预报时效内,气旋7级风圈外缘距预报海域边缘 $> 200$  km,检验结果有效;

②预报时效内,气旋7级风圈外缘距预报海域边缘 $\leq 200$  km,且气旋中心距实况站点 $\leq 40$  km,检

表7 检验评估结果有效性测试表  
Tab.7 Validation table of test availability

| 台风过程           | 浮标名称/<br>所属海区 | $T_{中心}$ 穿越预报海区    |                  |                      |    | 时间/<br>h | 有效<br>性        | $T_{中心}$ 与预报海区距离/km |                |                |                | $r_{7级}$ 与预报海区距离/km |           |
|----------------|---------------|--------------------|------------------|----------------------|----|----------|----------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|-----------|
|                |               | 距离<br>$T_{中心}$ /km | 与 $T_{中心}$<br>位置 | $H_{1/3}$ 振幅<br>过程/m |    |          |                | (0,100]             | (100,200]      | (200,300]      | (300,400]      | (0,100]             | (100,200] |
| 2106号<br>“烟花”  | 长江口外/5        | 175                | 右前               | 7.2↑9.2↓3.8<br>5.4   | 24 | 良        | 6.4↑8.7<br>2.3 | 6.1↑6.9<br>0.8      | 4.8↑5.9<br>1.1 | 4.2↑4.7<br>0.5 | 4.4↑5.3<br>0.9 | 3.6↑4.9<br>1.3      |           |
|                | 舟山外/6         | 63                 | 右前               | 9.3↑9.9↓5.4<br>4.5   | 17 | 良        | 5.6↑9.5<br>3.9 | 4.6↑5.6<br>1.0      | 4.0↑4.9<br>0.9 | 3.8↑5.1<br>1.3 | 4.0↑5.3<br>1.3 | 3.8↑5.1<br>1.3      |           |
|                | 特殊海域/7        | 190                | 左前               | 6.1↑6.3↓4.8<br>1.5   | 12 | 差        | 7.5↓5.8<br>1.7 | 5.6↑7.6<br>2.0      | 4.7↑6.4<br>1.7 | 4.1↑5.9<br>1.8 | 4.7↑6.0<br>1.3 | 3.7↑5.9<br>2.2      |           |
| 2114号<br>“灿都”  | 长江口外/5        | 10                 | 穿越               | 6.4↑8.1↓3.2<br>4.9   | 38 | 良        | 4.8↑6.0<br>1.2 | 3.8↑5.1<br>1.3      | 3.4↑4.2<br>0.8 | 2.6↑3.4<br>0.8 | 3.0↑4.0<br>1.0 | 2.6↑3.4<br>0.8      |           |
|                | 舟山外/6         | 50                 | 正前               | 5.0↑8.7↓7.1<br>3.7   | 7  | 良        | 4.4↑5.4<br>1.0 | 3.6↑4.3<br>0.7      | 2.4↑3.9<br>1.5 | 2.2↑2.5<br>0.3 | 2.3↑3.9<br>1.6 | 2.1↑2.5<br>0.4      |           |
| 2004号<br>“黑格比” | 特殊海域/7        | 10                 | 穿越               | 4.6↑5.6↓3.8<br>1.8   | 16 | 优        | 3.2↑4.4<br>1.2 | 2.1↑3.3<br>1.2      | 0.9↑2.3<br>1.5 | 0.7↑0.9<br>0.2 | 1.7↑2.5<br>0.8 | 0.7↑2.0<br>1.3      |           |
| 1917号<br>“塔巴”  | D08/21        | 15                 | 穿越               | 7.7↓4.0↑5.7<br>3.7   | 20 | 优        | 8.9↓6.5<br>2.4 | 7.2↑8.4<br>1.2      | 4.8↑6.9<br>2.1 | 3.8↑4.8<br>1.0 | 4.2↑4.9<br>0.8 | 3.9↑4.5<br>0.6      |           |
|                | 长江口外/5        | 285                | 左侧               | —<br>—               | —  | 差        | 5.8↑6.6<br>0.8 | 5.4↑6.3<br>0.9      | 4.7↑5.7<br>1.0 | 4.4↑4.7<br>0.3 | 3.8↑4.5<br>0.7 | 3.5↑4.1<br>0.6      |           |
| 1808号<br>“玛莉亚” | 温州外/7         | 147                | 右前               | 7.6↑11.0↓6.1<br>4.9  | 10 | 优        | 7.2↓5.9<br>2.2 | 3.5↑6.6<br>3.1      | 2.0↑3.1<br>1.1 | 2.0↑2.3<br>0.3 | 1.7↑2.3<br>0.6 | 1.9↑2.2<br>0.3      |           |
|                | 科技/7          | 65                 | 右前               | 8.8↑14.6↓4.6<br>10.0 | 10 | 优        | 7.3↑9.0<br>1.7 | 4.6↑6.3<br>1.7      | 2.6↑4.7<br>2.1 | 2.4↑3.0<br>0.6 | 2.2↑2.6<br>0.4 | 2.3↑3.0<br>0.7      |           |

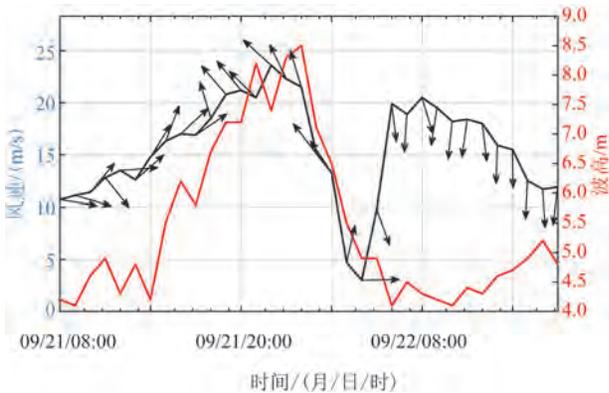


图4 2019年9月21—22日D08浮标风速(黑线)、风向与波高(红线)实况图

Fig.4 Wind speed (black line), wind direction and wave height (red line) of D08 buoy on September 21—22, 2019

验结果有效;

③预报时效内,气旋7级风圈外缘距预报海域边缘  $\leq 200$  km,但气旋中心距实况站点  $> 40$  km,检验结果无效;

④预报时效内,气旋中心经过观测站点时,检验结果无效。

若检验结果判断为无效,则将该结果从检验结果中剔除。在具体应用上述有效性规则时,还应根据海区情况加以调整参数,如D08浮标位于20海区与21海区交界处(见图1),当1917号台风“塔巴”从南向北移动时,浮标观测波高能代表20海区的最大波高,评估结果有效。

### 4.3 同一海域多个实况资料的选取

若预报海域内无实况资料,预报质量不作检验评估;若预报海域内有多个实况数据,取同一时段的最优值为检验结果。

以1808号超强台风“玛莉亚”经过7海区为例(见图1),该海区内共有科技、温州外海及宁德外海3个海洋浮标。由图5可见,11日01时,科技浮标在距离台风中心最近约65 km时,观测到的最大有效波高为14.6 m;11日04时,温州浮标在距离台风中

心约150 km时,观测到的最大有效波高为10.3 m;11日05时,宁德浮标在距离台风中心约60 km时,观测到的最大有效波高为12.2 m。3个浮标都位于台风移动的右侧前方,其中科技浮标距离台风中心最近,实测有效波高为14.6 m、最大波高为19.1 m,为我国近海波高有观测以来的最高记录。

7月10日07时,东海预报减灾中心针对该海域的波高预报结果为: E' 3.5~5.5 m 下午↑6.0~9.0 m,根据检验评估规则,在3个浮标观测记录中选取最优值,检验结果明显优于单个浮标检验结果(见表8)。

表8 2018年7月10日09:00—7月11日08:00 7海区海浪预报检验表

Tab.8 Sea wave forecast checklist during 2018-07-10 09:00 and 2018-07-11 08:00:00

| 时间     | 实况波高/m   |          |          | 评估<br>波高/m | 科技浮标       |            | 温州浮标       |            | 宁德浮标       |            | 最优值        |            |
|--------|----------|----------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|        | 科技<br>浮标 | 温州<br>浮标 | 宁德<br>浮标 |            | 绝对<br>误差/m | 相对<br>误差/% | 绝对<br>误差/m | 相对<br>误差/% | 绝对<br>误差/m | 相对<br>误差/% | 绝对<br>误差/m | 相对<br>误差/% |
| 10日09时 | 2.8      | 2.3      | 1.9      | 4.5        | 1.7        | 0.61       | 2.2        | 0.96       | 2.6        | 1.37       | 1.7        | 0.61       |
| 10日10时 | 2.6      | 2.0      | 1.8      | 4.5        | 1.9        | 0.73       | 2.5        | 1.25       | 2.7        | 1.50       | 1.9        | 0.73       |
| 10日11时 | 3.0      | 2.2      | 2.0      | 4.5        | 1.5        | 0.50       | 2.3        | 1.05       | 2.5        | 1.25       | 1.5        | 0.50       |
| 10日12时 | 4.1      | 2.2      | 2.0      | 4.5        | 0.4        | 0.10       | 2.3        | 1.05       | 2.5        | 1.25       | 0.4        | 0.10       |
| 10日13时 | 4.4      | 2.6      | 2.2      | 4.5        | 0.1        | 0.02       | 1.9        | 0.73       | 2.3        | 1.05       | 0.1        | 0.02       |
| 10日14时 | 4.5      | 3.1      | 3.0      | 7.5        | 1.9        | 0.34       | 2.3        | 0.44       | 3.7        | 0.97       | 1.9        | 0.34       |
| 10日15时 | 4.6      | 3.8      | 3.0      | 7.5        | 1.9        | 0.34       | 2.3        | 0.44       | 3.7        | 0.97       | 1.9        | 0.34       |
| 10日16时 | 5.4      | 4.3      | 3.4      | 7.5        | 1.9        | 0.34       | 2.3        | 0.44       | 3.7        | 0.97       | 1.9        | 0.34       |
| 10日17时 | 5.6      | 5.2      | 3.8      | 7.5        | 1.9        | 0.34       | 2.3        | 0.44       | 3.7        | 0.97       | 1.9        | 0.34       |
| 10日18时 | 6.3      | 6.6      | 4.6      | 7.5        | 1.2        | 0.19       | 0.9        | 0.14       | 2.9        | 0.63       | 0.9        | 0.14       |
| 10日19时 | 7.3      | 5.2      | 4.2      | 7.5        | 0.2        | 0.03       | 2.3        | 0.44       | 3.3        | 0.79       | 0.2        | 0.03       |
| 10日20时 | 7.4      | 7.2      | 4.7      | 7.5        | 0.1        | 0.01       | 0.3        | 0.04       | 2.8        | 0.60       | 0.1        | 0.01       |
| 10日21时 | 8.2      | 6.1      | 5.1      | 7.5        | 0.7        | 0.09       | 1.4        | 0.23       | 2.4        | 0.47       | 0.7        | 0.09       |
| 10日22时 | 8.4      | 6.6      | 5.1      | 7.5        | 0.9        | 0.11       | 0.9        | 0.14       | 2.4        | 0.47       | 0.9        | 0.11       |
| 10日23时 | 8.8      | 7.6      | 5.5      | 7.5        | 1.3        | 0.15       | 0.1        | 0.01       | 2.0        | 0.36       | 0.1        | 0.01       |
| 11日00时 | 10.0     | 7.7      | 6.5      | 7.5        | 2.5        | 0.25       | 0.2        | 0.03       | 1.0        | 0.15       | 0.2        | 0.03       |
| 11日01时 | 14.6     | 7.7      | 7.2      | 7.5        | 7.1        | 0.49       | 0.2        | 0.03       | 0.3        | 0.04       | 0.2        | 0.03       |
| 11日02时 | 12.7     | 9.2      | 7.7      | 7.5        | 5.2        | 0.41       | 1.7        | 0.18       | 0.2        | 0.03       | 0.2        | 0.03       |
| 11日03时 | 11.5     | 8.7      | 10.3     | 7.5        | 4.0        | 0.35       | 1.2        | 0.14       | 2.8        | 0.27       | 1.2        | 0.14       |
| 11日04时 | 9.1      | 10.3     | 11.9     | 7.5        | 1.6        | 0.18       | 2.8        | 0.27       | 4.4        | 0.37       | 1.6        | 0.18       |
| 11日05时 | 7.7      | 9.1      | 12.2     | 7.5        | 0.2        | 0.03       | 1.6        | 0.18       | 4.7        | 0.39       | 0.2        | 0.03       |
| 11日06时 | 7.2      | 8.3      | 9.9      | 7.5        | 0.3        | 0.04       | 0.8        | 0.10       | 2.4        | 0.24       | 0.3        | 0.04       |
| 11日07时 | 6.1      | 7.1      | 8.9      | 7.5        | 1.4        | 0.23       | 0.4        | 0.06       | 1.4        | 0.16       | 0.4        | 0.06       |
| 11日08时 | 5.3      | 7.3      | 9.0      | 7.5        | 2.2        | 0.42       | 0.2        | 0.03       | 1.5        | 0.17       | 0.2        | 0.03       |
| 平均误差   |          |          |          |            | 1.8        | 0.26       | 1.48       | 0.37       | 2.58       | 0.64       | 0.86       | 0.18       |

注:表中下午时段(14—17时)的4个时段取其中误差最小值

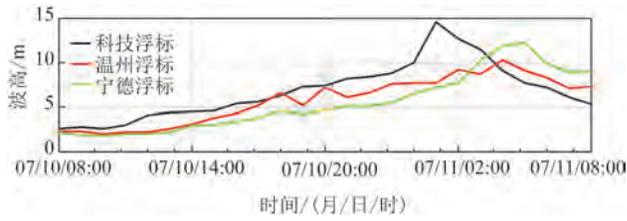


图5 2018年7月10—12日7海区浮标有效波高实况图

Fig.5 Buoy-recorded effective wave height in the 7th Sea Area in July 10—12, 2018

#### 4.4 检验评估结果

应用完善后的检验规则重新对2009年5海区、9海区进行预报质量检验测试。由表9的检验结果可以看出,两个海区的绝对误差与相对误差均有明显下降,检验效果较检验规则完善之前(见表3)大大提高。

表9 2009年东海区5、9海区常规海浪预报检验评估结果表  
(完善规则后)

Tab.9 Evaluation and assessment results of conventional wave forecast in sea areas 5 and 9 of the East China Sea in 2009 (after improving the rules)

| 检验海区 | 波高平均绝对误差/m | 波高平均相对误差/% |
|------|------------|------------|
| 5海区  | 0.84       | 0.21       |
| 9海区  | 0.91       | 0.25       |

应用3.2节的评估规则,对东海预报减灾中心2015—2018年5海区、7海区的常规海浪预报进行检验评估,波高得分情况见表10。从评估结果来看,两个海区的年波高平均得分为83~91分,评估

表10 2015—2018年东海预报减灾中心常规海浪预报检验评估报表

Tab.10 Evaluation and assessment results of conventional wave forecast of the East China Sea forecast and disaster reduction center from 2015 to 2018

| 时间    | 5海区波高得分 | 7海区波高得分 |
|-------|---------|---------|
| 2015年 | 88.3    | —       |
| 2016年 | 84.5    | 89.5    |
| 2017年 | 86.4    | 90.2    |
| 2018年 | 83.2    | —       |
| 平均    | 87.2    | 89.9    |

结果与主流数值预报模式的精度量级相当,可见本文针对常规预报设计的检验评估规则与规定是合理有效的,满足预警报量化检验评估的业务需求。

## 5 结论

本文在详细调研全国海洋预报机构常规海浪预报产品基础上,设计了一套把常规海浪预报转换为预报时效内逐时量化值的处理规则,应用实况数据开展预报质量检验测试,在遵循海洋预报客观规律、保证安全预警的基础上,形成一套相对客观、合理、标准化的常规海浪检验评估方法,应用评估系统可对常规海浪预报质量进行检验评估。结果表明,在平稳的波高状态下,设定的评估规则能较好地体现预报质量状况;在预报时效内波高发生剧烈变化时,只能体现局部海域的检验评估状况。总体来说,本文的技术方法虽存在缺陷,需要不断改进和完善,但也填补了常规海浪预报量化检验评估的空白。该方法于2013年在自然资源部东海局下属9家海洋预报机构中试用运行,每月初发布上月度预报质量检验报告。预报质量检验评估增强了海洋预报员之间的技术交流,提升了海洋预报机构的整体预报保障能力,对健全海洋预报机构的预报质量管理制度具有促进作用。

致谢:海浪检验评估程序编制及测试工作由上海超恒软件技术有限公司完成,在此表示诚挚谢意。

#### 参考文献:

- [1] 王可, 钟少波, 杨永胜, 等. 海洋灾害链及应用[J]. 灾害学, 2018, 33(4): 229-234.  
WANG K, ZHONG S B, YANG Y S, et al. Construction and application of marine disaster chains[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(4): 229-234.
- [2] 张振克, 丁海燕. 近十年来中国大陆沿海地区重大海洋灾害分析[C]//中国海洋资源环境与工程学术研讨会论文集. 宁波: 中国地理学会, 2004: 75-77.  
ZHANG Z K, DING H Y. Analysis of major marine disasters in coastal areas of Chinese Mainland in the past decade[C]//Marine Geography Committee of Chinese Geographical Society and Coastline Committee of China Quaternary Scientific Research Association 2004 Joint Academic Annual Meeting. Ningbo: The Geographical Society of China, 2004: 75-77.
- [3] 龚茂珣, 堵盘军, 薛志刚. 上海沿海海洋灾害的危害及应对措施:

- 缅甸特大风暴潮灾害的启示[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2008(5): 126-133.
- GONG M X, DU P J, XUE Z G. Marine hazards in Shanghai coastal regions and corresponding countermeasures: Lessons from the storm surge disaster of Burma[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2008(5): 126-133.
- [4] 李本霞, 邢闯. 中国近海2011年灾害性海浪分析及2012年预测[J]. 海洋预报, 2012, 29(3): 20-25.
- LI B X, XING C. Analysis of disastrous wave of China seas in 2011 and prediction for 2012[J]. Marine Forecasts, 2012, 29(3): 20-25.
- [5] 邢闯, 李本霞. 中国近海2012年灾害性海浪分析及2013年预测[J]. 海洋预报, 2013, 30(3): 1-8.
- XING C, LI B X. Analysis of disastrous wave of China seas in 2012 and prediction for 2013[J]. Marine Forecasts, 2013, 30(3): 1-8.
- [6] 自然资源部海洋预警监测司. 2021中国海洋灾害公报[EB/OL]. (2022-04-08). <http://gi.mnr.gov.cn/202205/P0202205073-88929214813.pdf>.
- Marine Early Warning and Monitoring Department of the Ministry of Natural Resources. Bulletin of China Marine Disasters in 2021 [EB/OL]. (2022-04-08). <http://gi.mnr.gov.cn/202205/P020220507388929214813.pdf>.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 19721.2-2017 海洋预报和警报发布 第2部分: 海浪预报和警报发布[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-5.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 19721.2-2017 The issue of marine forecasts and warnings—Part 2: the issue of wave forecasts and warnings [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017: 1-5.
- [8] 刘凡, 陆小敏, 徐丹, 等. 海浪预报方法研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 387-393.
- LIU F, LU X M, XU D, et al. Research progress of ocean waves forecasting method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 387-393.
- [9] 周水华, 俞胜宾, 梁昌霞, 等. 南海海浪业务化数值预报系统检验[J]. 海洋预报, 2012, 29(6): 30-36.
- ZHOU S H, YU S B, LIANG C X, et al. The verification of operational surface wave forecast system in the South China Sea [J]. Marine Forecasts, 2012, 29(6): 30-36.
- [10] 徐丽丽, 肖文军, 石少华, 等. WaveWatch III和SWAN模型嵌套技术在业务化海浪预报系统中的应用及检验[J]. 海洋通报, 2015, 34(3): 283-294.
- XU L L, XIAO W J, SHI S H, et al. Application and validation of an operational wave forecast model system based on the nesting use of WaveWatch III and SWAN model[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(3): 283-294.

## Study on quantitative test and evaluation method of conventional sea wave forecasts

LIANG Yingyu, XU Lili, XU Tingting, YAO Shengkang\*, YU Yun, GAO Hai, MA Weijun  
(East China Sea Forecasting and Disaster Reduction Center, Ministry of Natural Resources, Shanghai 200136, China)

**Abstract:** The content of conventional sea wave forecasts is a paragraph of text, and it is impossible to validate the forecasts using observational values. On the basis of broadly investigation of sea wave forecasting products released by national ocean prediction centers, this paper introduces a processing rule for the conventional sea wave forecasts and its verification and evaluation methods after applying test and validation repeatedly to the forecasting results against the observational values provided by the East China Sea Forecasting and Disaster Reduction Center, Ministry of Natural Resources. Through the discussion and demonstration of the existing problems, the key technical difficulties in the quantitative verification and evaluation have been settled, such as setting of the minimum sea wave height value, relationship between the observational location and the forecasting area, and selection of multi-point observational values in an area. The rationality and applicability of the verification and evaluation rules have been improved.

**Key words:** marine environmental forecasts; wave forecasts quality; verification and evaluation; quantitative