



# 基于二维海浪谱的风涌浪分离方法研究<sup>\*</sup>

董华韦<sup>1</sup>, 郑振钧<sup>1</sup>, 马小舟<sup>1</sup>, 李鹏达<sup>2</sup>, 吴宇飞<sup>2</sup>, 董国海<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 深圳大学, 广东省滨海土木工程耐久性重点实验室, 广东 深圳 518060)

**摘要:** 海浪通常以风浪和涌浪混合的形式存在。二者的成长、消衰、传播和破坏机制各不相同, 实现风涌浪分离对海洋研究和工程应用具有重要意义。基于斯里兰卡汉班托塔海域的实测数据, 讨论了传统波龄法中波龄阈值的选取问题, 并对汉班托塔海域的海浪特征进行分析, 最后利用波龄法对新提出的不依赖风速风向信息的超射法进行了研究。结果表明, 波龄阈值取 1.7 时最为合理。汉班托塔海域为外海涌浪主导。超射法对外海涌浪的识别结果与波龄法一致, 而对高频位置的风浪和局地涌浪给出了不同的结果, 这主要是由海浪物理特性的改变慢于风速风向的变化引起。

**关键词:** 风涌浪分离; 二维海浪谱; 风浪; 涌浪; 波浪观测

中图分类号: U652; O353.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0008-08

## Separation methods of wind-wave and swell based on two-dimensional ocean wave spectrum

DONG Huawei<sup>1</sup>, ZHENG Zhenjun<sup>1</sup>, MA Xiaozhou<sup>1</sup>, LI Pengda<sup>2</sup>, WU Yufei<sup>2</sup>, DONG Guohai<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Durability for Marine Civil Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** Ocean waves are generally a mixture of wind-wave and swell. Due to the significant differences in their growth, decay, propagation, and destruction mechanisms, the separation of wind-wave and swell is of great significance for marine research and engineering application. Based on the measured data in the offshore of Hambantota, Sri Lanka, this paper discusses the selection of the wave age threshold in the traditional methods and analyzes the wave characteristics of the offshore of Hambantota. Finally, the method based on wave age is used to verify the newly proposed method based on the overshoot phenomenon that does not rely on meteorology information. The results show that the optimal threshold of wave age is 1.7. The offshore of Hambantota is dominated by the swell propagating from distant storms. The method based on the overshoot phenomenon is consistent with the method based on wave age in the identification of the swell propagating from distant storms but gives different results for the wind-wave and local swell at the high frequency, which can be explained by the fact that the change of physical wave characteristics is slower than that of wind.

**Keywords:** separation of wind-wave and swell; two-dimensional ocean wave spectrum; wind-wave; swell; wave observation

海浪通常是由不同成分的风浪和涌浪混合而成。风浪是指由局地风产生并持续受风作用的波

浪; 涌浪则对应局地风减小或转向后海面上遗留下来继续传播的波浪, 或是由外海传入的波浪。

收稿日期: 2022-12-01

\*基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52071060); 深圳市科技计划资助项目(KQTD20200820113004005); 中央高校基本科研业务费资助项目(DUT22LAB101, DUT22RC(6)006)

作者简介: 董华韦(1994—), 男, 硕士, 从事近岸波浪研究。

通讯作者: 马小舟(1977—), 男, 博士, 教授, 从事近岸波浪非线性变形的研究。E-mail: maxzh@dlut.edu.cn

当海面上风力巨大时, 风浪成长为高达数米的巨浪, 对航行船舶和海上构筑物的安全造成严重破坏。涌浪波长较长, 持续时间久, 对近岸结构物和港口运营等影响巨大<sup>[1]</sup>。风浪和涌浪的成长、消衰、传播和破坏机制各不相同, 在海洋研究和工程应用中有必要将二者区别对待。

目前普遍通过海浪谱实现风涌浪的分离。根据海浪谱维数, 将风涌浪分离方法分为一维谱方法(简称“1D法”)和二维谱方法(简称“2D法”)。1D法通常采用求解分割频率<sup>[2-4]</sup>或利用双峰模型谱拟合实测谱<sup>[5]</sup>的方式对海浪谱进行高低频划分, 将谱中低频部分的涌浪成分和高频部分的风浪成分分离。这类方法操作简单、应用广泛, 但不同方法的结果差异明显, 导致使用者难以选取准确的分离结果<sup>[6-8]</sup>。此外, 1D法仅将海浪划分为1个风浪系统和1个涌浪系统, 不适用于存在多涌浪系统的复杂海况。

二维海浪谱给出了海浪能量在全频域、全方向的详细分布和组成。由于考虑的信息更加全面, 2D法理论上能够给出更为准确的分离结果。2D法的基本过程是先利用谱分割技术将海浪谱划分成由不同气象活动引起的波浪系统, 然后根据风涌浪识别标准对波浪系统进行成分判定, 进而实现风涌浪的分离。Gerling等<sup>[9]</sup>最早提出波浪系统的划分方法, 该方法利用最低能量阈值识别出谱中的波浪系统。Hasselmann等<sup>[10]</sup>提出分水岭法, 将谱中对应同一局部峰值的网格点作为1个分区进行分离, 并通过设定合并阈值的方式检测、合并谱中的无效分区。随后, Voorrips等<sup>[11]</sup>和Hanson等<sup>[12]</sup>指出分水岭法中的合并阈值需根据实际调整, 并给出不同的阈值参数。Portilla等<sup>[13]</sup>进一步分析了人为设定合并阈值的使用限制, 进而将图像处理中的二维离散卷积运算引入波浪系统的划分中。波浪系统划分完成后, 通常使用波龄标准对波浪系统进行风涌浪判断, 导致2D法的应用必须考虑风速、风向等先验信息, 而这些数据在实践中往往难以获取。另外对于波龄阈值的选取, 不同学者给出了不同的经验参数, 如何选取

最优值成为2D法应用时必须面对的另一问题。近年, Chen等<sup>[14]</sup>在风资料缺失的情况下, 提出根据风浪超射特性区分风涌浪(简称“超射法”), 有效简化了2D法的应用条件, 但目前对于该方法在其他海域的适用性还缺乏验证。

本文结合汉班托塔海域的实测资料, 对2D法的应用开展研究。首先, 基于Portilla等改进的传统2D法(简称“波龄法”)探讨了波龄阈值的设定问题, 并尝试给出快速评估阈值合理性的经验方法, 同时对汉班托塔海域的波浪特征进行分析, 最后以波龄法的分离结果为标准研究了超射法在当前海域的适用性。

## 1 实测数据及2D法

### 1.1 实测数据

汉班托塔港位于斯里兰卡最南端, 北纬6.13°, 东经81.16°, 是“一带一路”的关键节点。由于直接面对北印度洋, 没有宽广大陆架和岛礁的掩护, 易受外海涌浪影响<sup>[15]</sup>。在印度洋区域特殊气候条件下, 斯里兰卡呈现明显的季风特点, 夏季盛行西南季风(6—9月), 冬季盛行东北季风(12月—翌年3月), 特别在西南季风期间, 因风速增大, 海洋中存在明显的风浪、涌浪混合。选取2018年9月在汉班托塔海域实测的600组波浪数据进行分析。波浪采集设备为Nortek AWAC传感器, 采样频率为2 Hz, 每1 h进行一次数据采集, 每次记录20 min。风资料由沿岸风场测站提供。研究海域及测点位置信息见图1。



图1 研究海域及测点位置

### 1.2 2D法

#### 1.2.1 波龄法

为减少波浪系统划分过程中的无效分区数目,

Portilla 等引入图像处理中的二维离散卷积运算对海浪谱进行平滑:

$$\hat{S}(i,j) = \kappa(m,n) \otimes S(i,j) = \sum_{m=-1}^1 \sum_{n=-1}^1 \kappa(m,n) S(i-m, j-n) \quad (1)$$

式中:  $S(i,j)$  为原始谱密度矩阵中第  $i$  行、第  $j$  列的数值;  $\hat{S}(i,j)$  为卷积运算后的谱密度值; 符号  $\otimes$  表示卷积运算,  $\kappa$  为卷积核, 按式(2)所示设定:

$$\kappa(m,n) = 1/9 \quad (\forall m,n) \quad (2)$$

在将海浪谱划分为若干个波浪系统后, 根据风向海浪传输能量的基本特征, 利用式(3)在谱中划定 1 个风浪区域, 将峰值点位于区域内部的波浪系统定义为风浪, 否则为涌浪。

$$f_s = \frac{g}{2\pi} [TU_{10} \cos(\theta - \theta_{wind})]^{-1} \quad (|\theta - \theta_{wind}| < \frac{\pi}{2}) \quad (3)$$

式中:  $f_s$  为分割频率;  $\theta$  为波向;  $\theta_{wind}$  为风向;  $U_{10}$  为海表 10 m 处的风速;  $T$  为波龄阈值, 取 1.0~2.0。

### 1.2.2 超射法

Barnett 等<sup>[16]</sup>发现风浪高频组成波在成长过程中存在能量超射现象, 即高频组成波能量随风区迅速增长至最大值, 然后随时间推移能量逐渐下降至某一稳定值, 在达到稳定值时表明风浪已经充分成长。

Chen 等基于 1D 法中的波系识别法, 将风浪超射特性应用至对二维谱的风涌浪分离中, 避免了传统 2D 法对风资料的依赖, 该方法的实现过程如下: 1) 利用波龄法中的谱分割技术将海浪谱划分成不同的波浪系统; 2) 对各波浪系统进行波向积分, 得到相应的一维频谱; 3) 按照波系识别法对各波浪系统进行超射特性检测, 确定波浪系统的风涌浪属性。波系识别法以 PM 谱为充分成长的风浪谱, 通过将波浪系统对应频谱的谱峰值与同峰值频率 PM 谱的谱峰值比较, 判断当前波浪系统是否存在超射特性。二者峰值处的比值以参数  $\lambda$  表示:

$$\lambda = \frac{S(f_p)}{S_{PM}(f_p)} \quad (4)$$

式中:  $f_p$  为单个波浪系统的峰值频率;  $S(f_p)$  为波浪系统对应频谱的谱峰值;  $S_{PM}(f_p)$  表示以  $f_p$  为峰值频率的 PM 谱的谱峰值, PM 谱的基本形式为<sup>[17]</sup>:

$$S_{PM}(f) = 0.008 \cdot 1g^2 (2\pi)^{-4} f^{-5} e^{-1.25(f/f_p)^{-4}} \quad (5)$$

若  $\lambda > 1$ , 表明当前波浪系统存在超射特性, 将其定义为风浪, 否则为涌浪。

## 2 结果分析及讨论

### 2.1 波龄阈值的设定

波龄阈值的设定将直接影响二维海浪谱中风浪区域的大小, 目前尚无明确规定标准。Bidlot 等<sup>[18]</sup>和李水清等采用 1.3 为阈值, Tracy 等<sup>[19]</sup>编写的海浪谱分割算法中将阈值设为 1.7, Hessner 等<sup>[20]</sup>认为阈值取 1.5 可以确保识别出海浪谱中所有潜在的风浪系统, 如何选取众多参数的最优值成为波龄法应用的又一难题。为此, 本文分别以 1.3、1.5 和 1.7 为波龄阈值进行分析, 为快速评估所设阈值的合理性, 优先对风浪成长阶段的海浪谱进行检验, 即处于风向不变、风速增加或稳定时段的海浪谱。

图 2 所示为 2018-09-18T08:00—17:00 时段的风速及风向变化情况, 可知当日 08:00—14:00 时段风速、风向相对稳定, 随后风向大幅偏转, 由 220° 转向 270°。风浪受风的持续作用产生, 理论上应该与风联系密切, 为观察该时段内海浪的变化情况, 选取其中 3 个时刻的海浪谱进行分析, 见图 3。可以看出, 谱中存在 2 个波浪系统, 对应波向在 200° 和 160° 附近, 其中低频处的波浪系统(周期约 14 s)基本不受风的影响, 而且波向与风向差异悬殊, 表明为外海传入的涌浪; 而高频位置的波浪系统(周期约 5 s)受风的影响变化显著, 在风速风向相对稳定的时段(10:00—14:00), 能量出现明显增长, 之后因风向转变能量消散, 这表明 14:00 以前高频位置的波浪系统通过从风场中获取能量发生增长, 即对应为风浪, 之后的能量衰减则说明其由风浪变成局地涌浪。

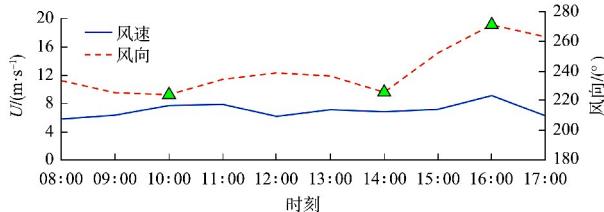
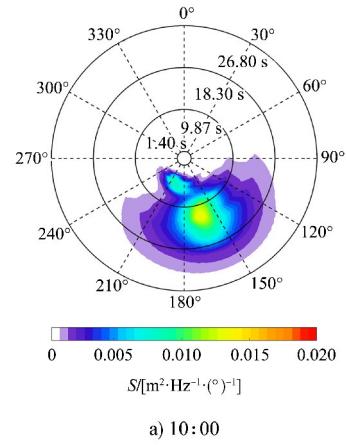
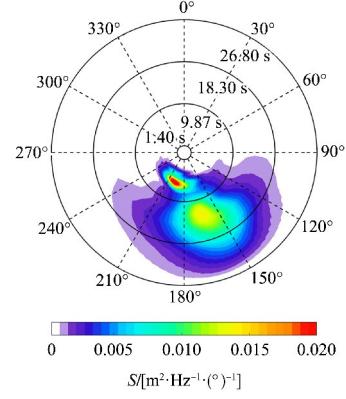


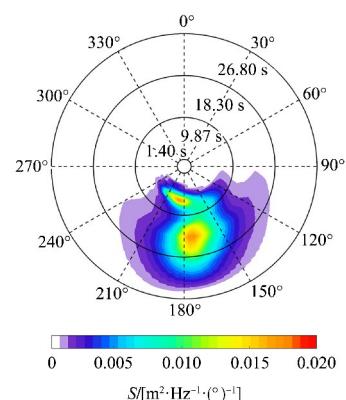
图 2 代表时刻风速及风向



a) 10:00



b) 14:00



c) 16:00

图 3 代表时刻二维海浪谱

由图 3 可知, 高频位置的风浪系统在 14:00 时成长至最大, 下面以该时刻的海浪谱对波龄阈值进行评估, 图 4 展示了由不同阈值确定的分割频率抛物线, 发现对于谱中高频位置的风浪系统, 波龄阈值取 1.3 和 1.5 时都未能成功识别, 因此对于当前海域, 波龄阈值取 1.7 更为合理。

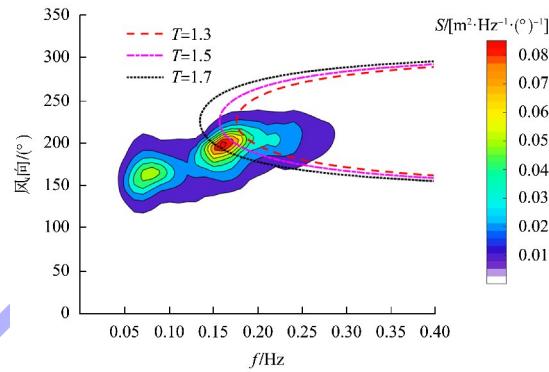


图 4 海浪谱中不同阈值确定的分割频率

## 2.2 基于波龄法的风涌浪分离结果

在确定波龄阈值后, 利用波龄法对全部的海浪谱进行风涌浪分离, 图 5 给出了风涌浪分离结果与风速、风向的对比情况。为使风浪的变化趋势更加明显, 图 5a) 中将风浪的有效波高进行了放大。可以看到, 风浪波高与风速呈现较强的的相关性, 风浪的波高随风速的增加而增长, 当风速减小时, 因原风浪系统逐渐脱离风的作用变为局地涌浪, 而此时谱中还未产生新的风浪系统, 造成风浪波高曲线发生间断。由图 5b) 可知, 风浪波向在风向稳定时与风向较为一致, 当风向转变时, 风浪波向曲线间断, 涌浪波向则稳定维持在 170°附近, 与风向相差较大, 这表明汉班托塔海域的涌浪以 170°方向传入的外海涌浪为主, 对于 16、18 日涌浪主波向发生大幅波动接近风浪波向的情况, 考虑是谱中由风减小或转向引起的局地涌浪能量超过外海涌浪, 造成涌浪的主波向发生变动。

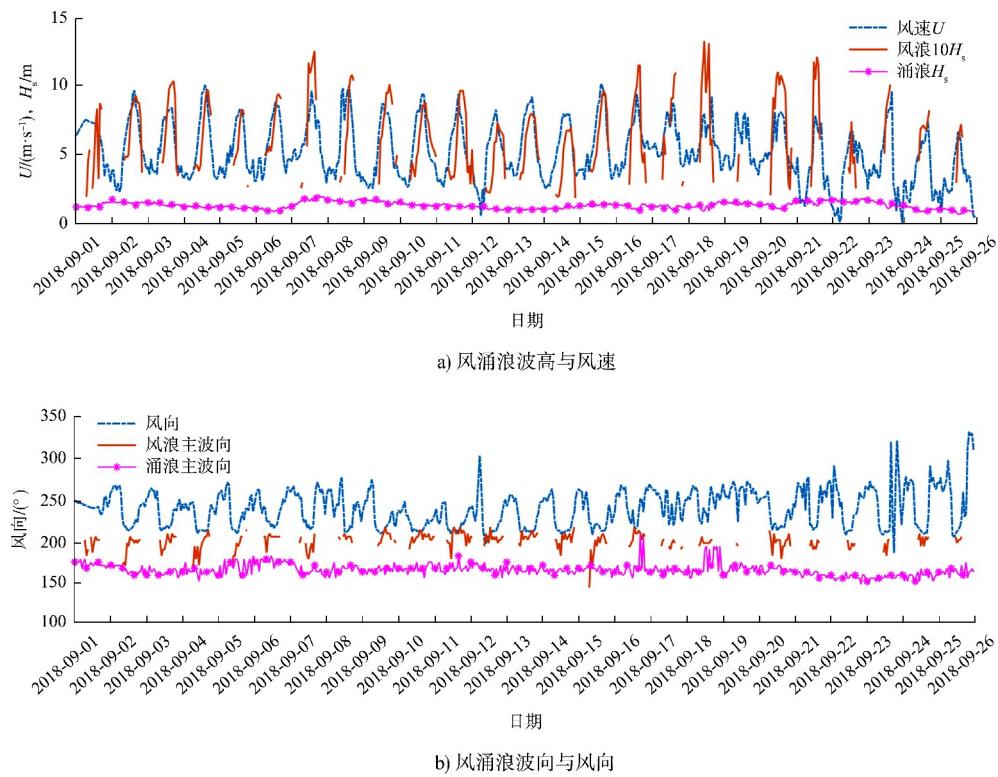


图 5 风涌浪分离结果与风速、风向对比

为进一步验证风涌浪分离结果的准确性, 利用 PM 风浪谱的风浪波高与风速关系对波龄法得到的风浪数据进行检验, 见图 6。可以看出, 大部分散点都位于 PM 充分成长曲线下方, 部分散点高出曲线可能是波浪系统划分过程中分区合并导致风浪成分高估, 但不影响整体结果。综合分析表明, 利用波龄法得到的风涌浪分离结果是真实可信的。汉班托塔海域在观测期内存在明显的风浪、涌浪混合, 涌浪由外海传入的涌浪和局地风减小或转向引起的涌浪共同组成, 并为外海涌浪主导。

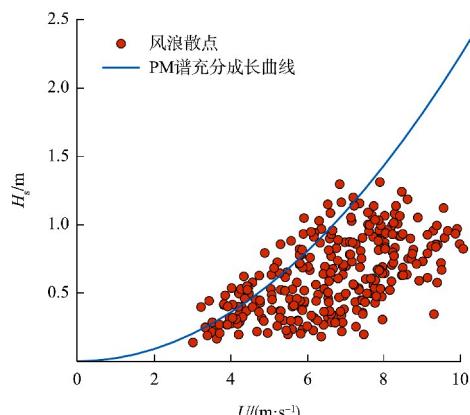


图 6 风浪波高与风速关系

### 2.3 超射法的适用性检验

由于波龄法给出的结果具有较高的可信度, 以其为标准, 对超射法在当前海域的适用性进行检验。以 9 月 12 日 17:00 和 23:00 海浪谱为例, 展示波龄法和超射法的风涌浪分离结果, 见图 7、8。由图 7a) 可知, 高频位置的波浪系统位于分割频率抛物线以内, 按照波龄法判别标准, 认定为风浪, 低频处的波浪系统因位于抛物线外则识别为涌浪。图 8 为谱中各波浪系统对波向积分后得到的频谱和具有相同峰值频率的 PM 谱, 可以发现, 图 8b) 中高频波浪系统的频谱峰值要高于同峰值频率的 PM 谱的峰值, 呈现出风浪的超射特性, 故将其判别为风浪, 而图 8a) 中的波浪系统因不存在超射特性为涌浪, 这与波龄法的结果吻合。另外, 由图 5 可知, 17:00—23:00 时段内风速由 7.16 m/s 减小至 3.92 m/s, 风向也由 216° 转向 255°, 即 23:00 时处于风速衰减末期和风向转变时段。受风的变化影响, 波龄法的分割频率抛物线发生明显变动(图 7), 导致原高频处的风浪系统变为局地涌浪, 而图 8d) 依然表现出风浪的超射特性, 因此超射法将其识别为风浪, 得到了与波龄法不同的判别结果。

综上, 超射法对外海传入的低频涌浪的识别结果与波龄法一致, 而对高频波浪系统会得出不同的结果, 尤其对处于风向转变、风速增长初期和风速衰减末期的海浪谱, 二者分离结果差异明显。原因主要是波龄法的判别标准基于风速、风向信息, 对风的变化响应迅速; 而超射法则是根据海浪的物理特性进行风涌浪的判别, 物理特性的改变通常慢于风的变化。

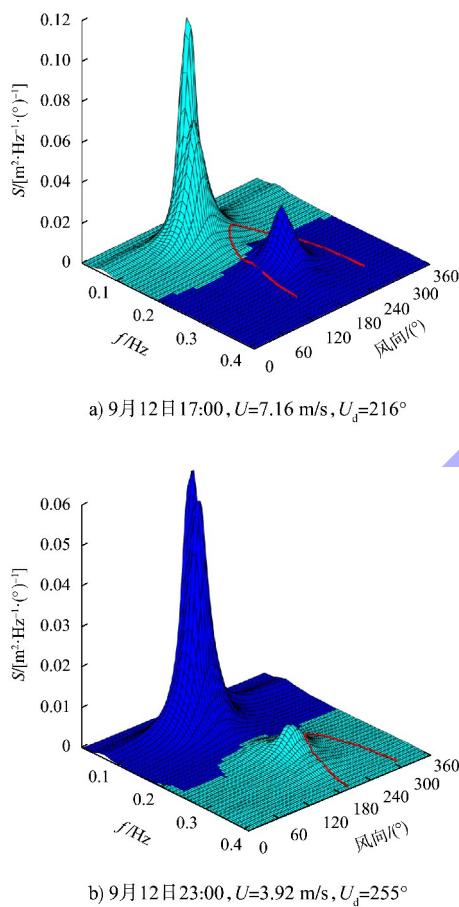
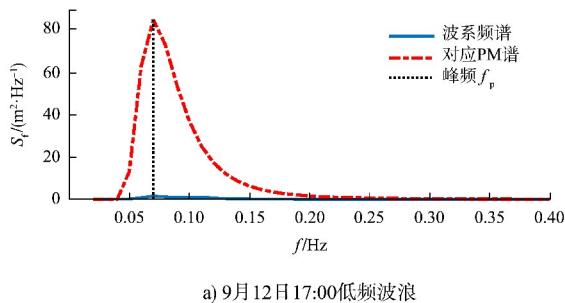
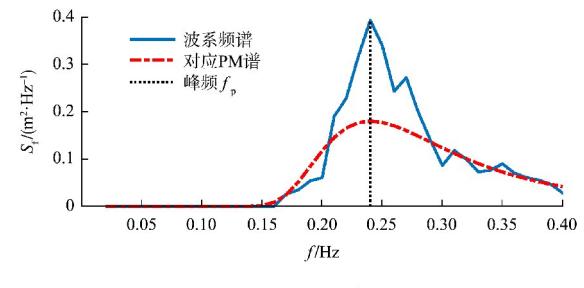


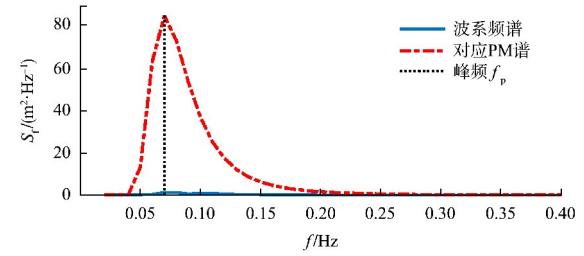
图7 风涌浪波龄法判别结果



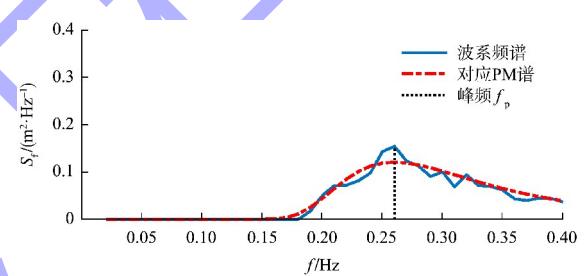
a) 9月12日 17:00 低频波浪



b) 9月12日 17:00 高频波浪



c) 9月12日 23:00 低频波浪



d) 9月12日 23:00 高频波浪

图8 风涌浪超射法判别结果

图9为利用超射法和波龄法得到的风浪、涌浪波高的对比结果。此外, 为定量地对2种方法的结果进行比较, 利用式(6)~(8)分别计算了二者的相关系数 $R$ 、平均误差 $M$ 和均方根误差 $S$ :

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2(Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (6)$$

$$M = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)}{N} \quad (7)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_i - Y_i)^2}{N}} \quad (8)$$

式中:  $X$  为波龄法的结果;  $Y$  为超射法的结果;  $N$  为海浪谱个数。

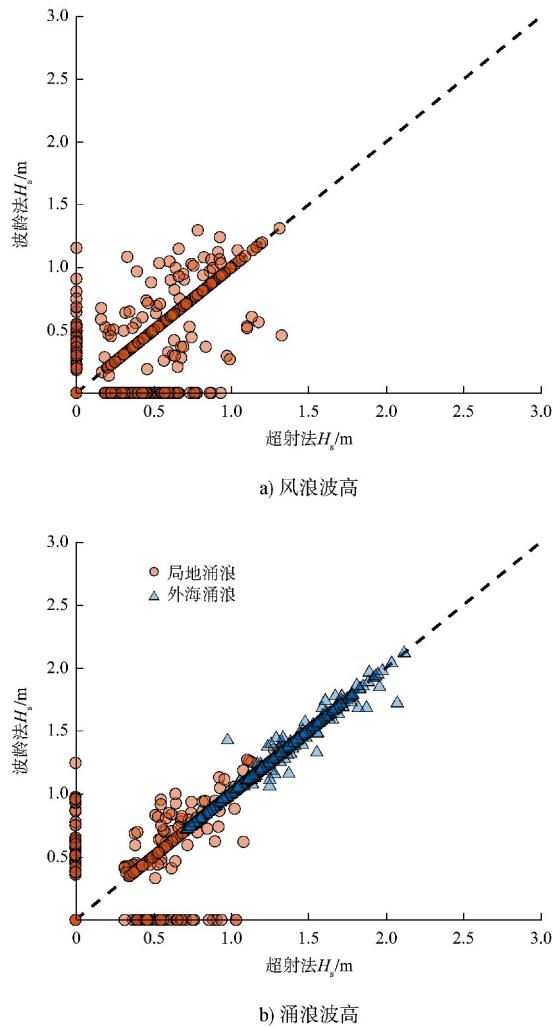


图 9 波龄法和超射法的分离结果对比

计算结果见表 1。可以看出,对于外海涌浪的识别,超射法与波龄法的结果呈现出较强的一致性,相关系数达到 0.99,而对于高频位置的波浪系统具体识别为风浪还是局地涌浪,因二者使用的风涌浪判别标准对风的响应速度不同,造成结果出现差异,相关系数也降低至 0.70 左右。

表 1 超射法和波龄法的风涌浪波高误差统计

浪型	相关系数	平均误差/m	均方根误差/m
风浪	0.73	-0.04	0.26
局地涌浪	0.77	0.01	0.24
外海涌浪	0.99	0	0.03

### 3 结论

1) 波龄阈值的设定是否恰当对风涌浪分离结果的准确性具有直接影响,对当前海域而言,波龄阈值取 1.3 和 1.5 时会遗漏风浪成分,取 1.7 最为合理。

2) 观测期内汉班托塔海域存在明显的风浪、涌浪混合,其中涌浪由外海传入的涌浪和局地风减小或转向引起的涌浪共同组成,整体上以外海涌浪为主。

3) 超射法对外海涌浪的识别结果与波龄法一致,而对处于风向转变、风速增长初期和风速衰减末期的海浪谱,因海浪的物理特性慢于风速风向的变化,使风浪和局地涌浪的分离结果差异明显。

### 参考文献:

- [1] 周延东,雷震名,孙国民,等.涌浪基本理论研究综述[J].水道港口,2016,37(1): 1-6.
- [2] WANG D W, HWANG P A. An operational method for separating wind-wave and swell from ocean wave spectra[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2001, 18(12): 2052-2062.
- [3] HWANG P A, OCAMPO-TORRES F J, GARCIA-NAVA H. Wind-wave and swell separation of 1d wave spectrum by a spectrum integration method [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2012, 29 ( 1 ): 116-128.
- [4] EARLE M. Development of algorithms for separation of sea and swell [R]. Marland: National Data Buoy Center, 1984: 53.
- [5] 朱绍华,于文太,李广帅,等.基于双峰海浪谱的风浪和涌浪分离应用研究[J].中国造船,2017, 58 ( 4 ): 160-167.
- [6] LIU Y, HAO Z Z, GONG F, et al. Spectral separation of wind-wave and swell based on buoy observations [C]// Conference on remote sensing of the ocean, sea ice, coastal waters, and large water regions, Prague: [ s. n. ], 2011.
- [7] 李水清,赵栋梁.风浪和涌浪分离方法的比较[J].海洋学报(中文版),2012, 34(2): 23-29.

- [8] 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.
- [9] GERLING T W. Partitioning sequences and arrays of directional ocean wave spectra into component wave systems [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 1992, 9(4): 444-458.
- [10] HASSELMANN S, BRÜNING C, HASSELMANN K, et al. An improved algorithm for the retrieval of ocean wave spectra from synthetic aperture radar image spectra[J]. Journal of geophysical research (oceans), 1996, 101(C7): 16615-16629.
- [11] VOORRIIPS A C, MAKIN V K, HASSELMANN S. Assimilation of wave spectra from pitch-and-roll buoys in a north sea wave model [J]. Journal of geophysical research (oceans), 1997, 102(C3): 5829-5849.
- [12] HANSON J L, PHILLIPS O M. Automated analysis of ocean surface directional wave spectra[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2001, 18(2): 277-293.
- [13] PORTILLA J, OCAMPO-TORRES F J, MONBALIU J. Spectral partitioning and identification of wind-wave and swell[J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2009, 26(1): 107-122.
- [14] CHEN Z Z, ZHANG L G, ZHAO C, et al. A practical method of extracting wind-wave and swell from directional wave spectrum [J]. Journal of atmospheric and oceanic technology, 2015, 32(11): 2147-2159.
- [15] DONG G H, ZHENG Z J, MA X Z, et al. Characteristics of low-frequency oscillations in the hambantota port during the southwest monsoon [J]. Ocean engineering, 2020, 208: 107408.
- [16] BARNETT T P, SUTHERLAND A J. A note on an overshoot effect in wind-generated waves [J]. Journal of geophysical research, 1968, 73(22): 6879-6885.
- [17] PIERSON W J, MOSKOWITZ L. A proposed spectral form for fully developed wind-waves based on the similarity theory of sa kitaigorodskii [J]. Journal of geophysical research, 1964, 69(24): 5181-5190.
- [18] BIDLOT J. Ecmwf wave model products [J]. ECMWF wave-model products, 2001.
- [19] TRACY B, DEVALIERE E, HANSON J, et al. Wind-wave and swell delineation for numerical wave modeling [C]// Proceedings of 10th international workshop on wave hindcasting and forecasting and coastal hazard symposium, North Shore, Oahu, Hawaii: JCOMM Tech Rep, F, 2007.
- [20] HESSNER K, HANSON J L. Extraction of coastal wavefield properties from x-band radar[C]//Proceedings of the 2010 IEEE international geoscience and remote sensing symposium, Hawaii: IEEE, 2010.

(本文编辑 王传瑜)

· 消息 ·

## 广西钦州港大榄坪港区大榄坪作业区 1# ~3# 泊位工程(二期工程) 通过交工验收

近日, 中交水运规划设计院承建、中交四航局三公司参建的广西钦州港大榄坪港区大榄坪作业区 1# ~3# 泊位工程(二期工程)通过交工验收。该项目是西部陆海新通道建设的重点项目之一, 主要建设内容为 1#、2# 非金属矿石堆场, 4# 金属矿石堆场, 铁路装卸作业区 1#、2# 堆场, 铁路装卸作业区 3# 堆场(局部), 1#、2# 件杂货堆场共计 8 个堆场工程, 以及 8 个堆场管道及附属设备工程。项目的建成大幅提升大榄坪作业区吞吐能力, 有助于促进其与平陆运河的有效衔接, 加快西部陆海新通道建设。

[https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202309/t20230901\\_210212.html](https://www.ccccltd.cn/news/jcxw/jx/202309/t20230901_210212.html) (2023-09-01)